

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Σ. ΚΟΛΙΑΣ, ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ
ΑΡΧΩΝ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ
ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ
ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΥΛΙΚΩΝ**

ΚΑΦΙΡΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 1995

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

	ΣΕΛ.
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
- Συνέπειες της ύπαρξης ρωγμών στην επιφάνεια κύλι- σης - Στόχος της διπλωματικής εργασίας	3
- Μηχανισμός δημιουργίας των ρωγμών	10
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.	
1.1. Έννοια της κόπωσης	16
1.2. Εισαγωγή της ανάγκης για μελέτη των φαινομένων κόπωσης	17
1.3. Αίτια που προκαλούν την θραύση των υλικών λόγω φορτίων κόπωσης	19
1.4. Εισαγωγή της ανάγκης για έλεγχο των θραύσεων ..	21
1.5. Ανάλυση των στόχων του ελέγχου των θραύσεων ...	23
1.6. Διαχωρισμός των εννοιών: θραύσης και διάδοσης της ρωγμής	30
1.7. Προσδιορισμός της έννοιας της αντοχής	31
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.	
2. 1. Ανάλυση του τρόπου ανάπτυξης των τάσεων στην περιοχή των ασυνεχειών	32
2. 2. Συντελεστής συγκέντρωσης των τάσεων	37
2. 3. Τύποι παραμόρφωσης	42
2. 4. Συντελεστής έντασης των τάσεων	45
2. 5. Περιγραφή τασικού πεδίου γύρω απ' την ρωγμή ...	50
2. 6. Πλαστική ζώνη	52
2. 7. Αξιοπιστία του κριτηρίου θραύσης σε συνάρτηση με το μέγεθος της πλαστικής ζώνης	59

2.7.1. Επιρροή της εντατικής κατάστασης πάνω στην αντοχή του υλικού	61
2. 8. Κριτήριο ενέργειας	63
2. 9. Μείωση της αντοχής των υλικών με την πρόοδο των φορτίσεων	68
2.10. Ενεργειακό κριτήριο Griffith	78
2.11. Απλοί τρόποι φόρτισης. Έλεγχος της προόδου της θραύσης υπό σταθερό φορτίο, υπό συνθήκες απαραμόρφωτων συνόρων και υπό συνθήκες σταθερού φορτίου	83
2.12. Συσχέτιση του G με το K	89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

3.1. Ελαστοπλαστικά υλικά	94
3.2. Πλαστική κατάρρευση	96
3.3. Συσχέτιση του J και δυναμικής ενέργειας	99
3.4. Κριτήρια θραύσης για ελαστοπλαστικά υλικά	101
3.5. Εξάρτηση της αντοχής απ' το μήκος της ρωγμής ...	110

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

4.1. Ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής	115
4.2. Προσδιορισμός του αριθμού των επαναλήψεων της φόρτισης προκειμένου το μήκος της ρωγμής να γίνει κρίσιμο	121

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	124
5.1. Προσδιορισμός των παραμέτρων που επηρεάζουν την διάδοση των ρωγμών στο ασφαλτοσκυρόδεμα υπό δυ- ναμική εφελκυστική φόρτιση	124
5.2. Συσχέτιση παραμέτρων που επηρεάζουν την αντοχή θραύσης των ασφαλτοσκυροδεμάτων	137
5.3. Ανάλυση και σχεδιασμός της ελαστικότητας των ο- δοστρωμάτων	147
5.4. Two Parameter Model	155
5.5. Effective Crack Model	161
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ K_I , K_{II} ...	170
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	181
7.1. Φόρτιση κυλινδρικών δοκιμών σε αντιδιαμετρική θλίψη	182
7.1.1. Παρασκευή φαθυρών δοκιμών	182
7.1.1.1. Διευκρινιστικά σχόλια επί των συνθέ- σεων των φαθυρών δοκιμών	184
7.1.2. Πειραματική διαδικασία	186
7.1.3. Παρασκευή ασφαλτικών δοκιμών	190
7.1.4. Σχολιασμός αποτελεσμάτων που εξήχθησαν απ' την θραύση των φαθυρών δοκιμών	194
7.2. Φόρτιση ασφαλτικών δοκιμών σε μοναξονικό εφελ- κυσμό	198
7.2.1. Παρασκευή ασφαλτικών δοκιμών	198

	ΣΕΛ.
7.2.2. Πειραματική διαδικασία	203
7.2.3. Προσδιορισμός της ενέργειας θραύσης (J_R)	206
7.3. Σχόλια επί του πειράματος και των αποτελεσμάτων	219
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΠΡΑΓ-	
ΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	263
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ	268
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	270

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το οδόστρωμα είναι μία κατασκευή υψηλής αντοχής που σαν σκοπό έχει να εξυπηρετήσει με ασφάλεια και άνεση την κυκλοφορία των οχημάτων για μια μεγάλη χρονική περίοδο σχεδιασμού (συνήθως 10-15 έτη).

Υπάρχουν τρία είδη οδοστρωμάτων: τα εύκαμπτα, τα άκαμπτα και τα ημιάκαμπτα.

Τυπικές διατομές των παραπάνω τύπων φαίνονται στο σχήμα (Ε.1) [1].

Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται σε πολύ μεγάλο ποσοστό εύκαμπτα οδοστρώματα. Η παρούσα εργασία αναφέρεται πρωταρχικά στην μελέτη αυτού του τύπου των οδοστρωμάτων και δευτερευόντως στα υπόλοιπα.

Τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται σε μια διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος κατά την διέλευση ενός απλού τροχού δίδονται στο σχήμα (Ε.2) [1].

Τα μεγέθη αυτά είναι η κατακόρυφη ~~ανοιγμένη~~ παραμόρφωση της επιφάνειας της στρώσης έδρασης E_z και η οριζόντια ~~ανοιγμένη~~ εφελκυστική παραμόρφωση στην βάση της ασφαλτικής στρώσης E_x .

Με βάση τις κρίσιμες τιμές των παραπάνω μεγεθών καθορίζονται οι νόμοι αστοχίας τόσο της ασφαλτικής στρώσης όσο και της στρώσης έδρασης.

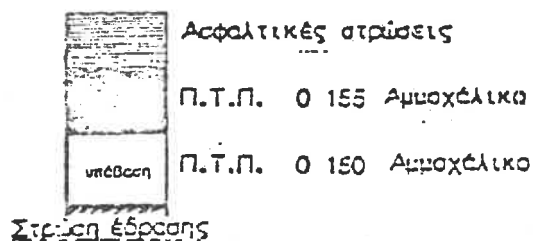
Τέτοιοι νόμοι δίνονται ενδεικτικά παρακάτω [1]

$$N_{E\pi} = 5,20 \cdot 10^{-7} E_x^{-3,291} \quad (\text{Για την ασφαλτική στρώση})$$

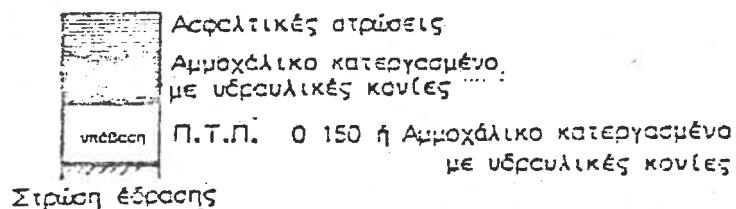
$$N_{E\pi} = 1,02 \cdot 10^{-7} E_z^{-4,167} \quad (\text{Για την στρώση έδρασης})$$



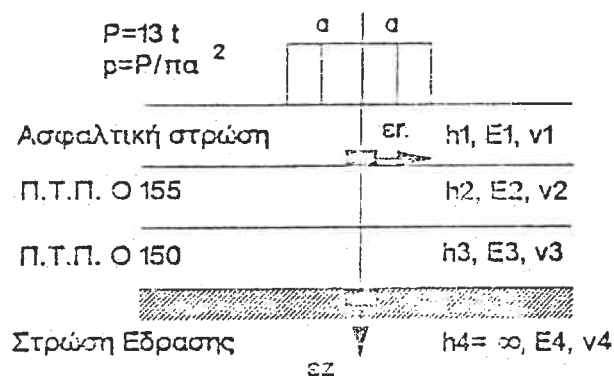
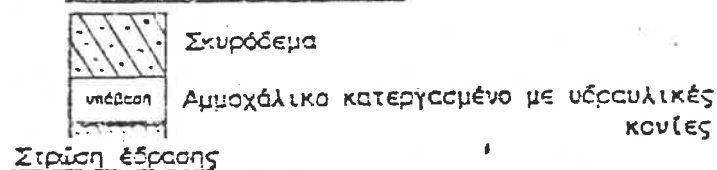
Εύκαμπτο οδόστρωμα



Ημιδύσκαμπτο οδόστρωμα



Δύσκαμπτο οδόστρωμα



(α)

Σχήμα. Ε.2. Στατικό προσομοίωμα οδοστρώματος - κρίσιμα σημεία και μεγέθη κατανομή τάσεων και ανηγμένων παραμορφώσεων (όχι υποκλίμακα):
(α) Εύκαμπτο οδόστρωμα

Δηλαδή για τα υπολογισθέντα E_x , E_z οι παραπάνω σχέσεις δίνουν τον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό επαναλήψεων της φόρτισης (Διελεύσεων αξονικού φορτίου) προκειμένου να μην αστοχήσει η αντίστοιχη στρώση.

Σαν αστοχία της στρώσης έδρασης θεωρείται η μεγάλη παραμόρφωση αυτής ενώ σαν αστοχία της ασφαλτικής στρώσης θεωρείται η ρηγμάτωσή της λόγω φαινομένων κόπωσης. (Η έννοια της κόπωσης αναλύεται σ'επόμενη παράγραφο).

Έτσι μετά την συμπλήρωση ορισμένου αριθμού επαναλήψεων της φόρτισης δημιουργούνται στην βάση της ασφαλτικής στρώσης οι πρώτες ρωγμές οι οποίες με τη πρόοδο των φορτίσεων αρχίζουν να διαδίδονται προς την επιφάνεια της στρώσης μέχρι που κάποια στιγμή εμφανίζονται σ'αυτήν οι πρώτες ρωγμές οπότε και θεωρείται ότι η ασφαλτική στρώση έχει αστοχήσει.

(Ο μηχανισμός δημιουργίας των αρχικών ρωγμών αναλύεται εκτενέστερα σ'επόμενη παράγραφο στο κεφάλαιο αυτό).

Συνέπειες της ύπαρξης ρωγμών στην επιφάνεια κύλισης

Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Μετά την εμφάνιση των πρώτων ρωγμών αυτές αρχίζουν να επεκτείνονται στην επιφάνεια του οδοστρώματος με αποτέλεσμα με την πάροδο του χρόνου η συνολική ρηγματωμένη επιφάνεια να καταλαμβάνει ολοένα και μεγαλύτερο ποσοστό

της συνολικής επιφάνειας του οδοστρώματος. Συνέπεια της εξάπλωσης του δικτύου των ρωγμών είναι η μείωση του μέτρου ελαστικότητας/δυσκαμψίας και επομένως τα φορτία που αυτή πλέον αδυνατεί να παραλάβει ή παραλαμβάνει σε πολύ μικρότερο ποσοστό, μεταβιβάζονται στις υποκείμενες στρώσεις βάση, υπόβαση και στρώση έδρασης. Όσον αφορά την βάση και την υπόβαση δεδομένου ότι αυτές αποτελούνται από θραυστό και συλλεκτό αμμοχάλικο αντίστοιχα, η μεταβίβαση σ' αυτές πολύ μεγάλων τώρα φορτίων έχει σαν αποτέλεσμα την επιφανειακή αλληλοσύνθλιψη των αδρανών και την στρογγυλοποίηση των επιφανειών τους. Παράλληλα, οι αναπτυσσόμενες εξωτερικές δυνάμεις στις επιφάνειες επαφής μεταξύ των αδρανών υπερβαίνουν κατά πολύ τις μέγιστες αναπτυσσόμενες δυνάμεις τριβής στις επιφάνειες αυτές μ' αποτέλεσμα την λείανσή τους και την απώλεια έτσι συνεργασίας μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί ως μείωση της διατμητικής αντοχής των στρώσεων. Έτσι, η υπερκείμενη επιφανειακή στρώση κάτω απ' την επένεργεια των εξωτερικών φορτίων και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι έχει ήδη μειωθεί η φέρουσα ικανότητά της εξαναγκάζεται - λόγω μείωσης της διατμητικής αντοχής της βάσης και υπόβασης - σε κατακόρυφες μετατοπίσεις με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ανωμαλίες στο οδόστρωμα.

Όσον αφορά την στρώση έδρασης καθώς αυτή δέχεται τώρα μεγαλύτερα φορτία απ' αυτά για τα οποία είχε σχεδιαστεί να παραλάβει και σε συνδυασμό με τις επαναλήψεις των εξωτερικά επιβαλλόμενων δυναμικών φορτίων αναπτύσσονται

σ'αυτήν μόνιμες υποχωρήσεις, με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας ανώμαλης επιφάνειας της στρώσης έδρασης η οποία συμπαρασύρει κατά τον τρόπο που αυτή παραμορφώνεται και τις υπερκείμενες στρώσεις. Έτσι πάλι δημιουργούνται διαφορικές υποχωρήσεις της επιφάνειας κύλισης που μειώνουν δραστηκά την προσφερόμενη ασφάλεια και καθιστούν έτσι την οδό επικίνδυνη για τους οδηγούς.

Προκειμένου όμως ν'αναπτυχθούν οι μηχανισμοί που αναφέρθησαν παραπάνω απαιτείται η μεσολάβηση κάποιου χρονικού διαστήματος. Απ'την στιγμή δηλαδή που θα εμφανιστούν οι πρώτες ρωγμές μέχρι την στιγμή που η επιφάνεια κύλισης θα έχει υποστεί μια ευρεία ρηγμάτωση, ταυτόχρονα με την ανάπτυξη των διαφορικών καθιζήσεων.

Αν λοιπόν είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε τον χρόνο κατά τον οποίο πρέπει να επέμβουμε κατά το διάστημα απ'την εμφάνιση των πρώτων ρωγμών μέχρι το τέλος της φυσικής ζωής του οδοστρώματος, με τρόπο τέτοιο (π.χ. επανεπίστρωση) ώστε να ~~κατατείνουμε~~ τη φυσική ζωή του έργου, τότε θα έχουμε ένα τεράστιο οικονομικό όφελος.

Για να γίνει όμως μια εκτίμηση του χρονικού διαστήματος μέσα στο οποίο πρέπει να επέμβουμε είναι αναγκαίο να ξέρουμε την ταχύτητα με την οποία διαδίδεται η ρωγμή αν και αυτό δεν αποτελεί το απόλυτο κριτήριο όσον αφορά τον χρόνο επέμβασης στο οδόστρωμα (δεδομένου ότι ο χρόνος αυτός επηρεάζεται κι από πλήθος άλλων παραμέτρων), αλλά ένα σημαντικό και βοηθητικό παράλληλα επιμέρους δομικό στοιχείο της συνολικής προσπάθειας εκτίμησης του χρόνου

5.



επέμβασης. Αν υποθετικά δηλαδή η ταχύτητα με την οποία θα διαδιδόταν μια ρωγμή στην ασφαλική στρώση ήταν πάρα πολύ μεγάλη, τότε θα μπορούσαμε ουσιαστικά να επέμβουμε και το οδόστρωμα μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα θα καταστρεφόταν. Όμως, στην πράξη δεν συμβαίνει αυτό, γιατί όπως προαναφέρθηκε υπάρχει ένα χρονικό διάστημα μέχρι να θεωρηθεί ότι το έργο έχει καταστραφεί. Στην πράξη δηλαδή οι ταχύτητες διάδοσης δεν είναι τέτοιας τάξης μεγέθους ώστε να καθίστανται απαγορευτικές για οποιαδήποτε επέμβαση στο οδόστρωμα. Έτσι σε συνδυασμό με κάποιο άλλο κριτήριο όπως π.χ. με τον προσδιορισμό του δείκτη παρούσας λειτουργικότητας όπως αυτός προσδιορίστηκε απ' το οδικό πείραμα AASHO μπορεί να προσδιοριστεί το εύρος του χρόνου μέσα στο οποίο πρέπει να πραγματοποιηθεί η συντήρηση του οδοστρώματος πριν η καμπύλη λειτουργικότητας αρχίσει να φθίνει ταχέως δηλ. η φθορά του οδοστρώματος αρχίσει ν' αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς.

Ο χρόνος μέσα στον οποίο πρέπει να επέμβουμε στο οδόστρωμα προκειμένου να παρατείνουμε την φυσική ζωή του δεν μπορεί να προσδιοριστεί όπως άλλωστε είναι εύλογο υιοθετώντας μια φαινομενολογική αντιμετώπιση του προβλήματος. Δεν μπορούμε δηλαδή μ' άλλα λόγια, να χρησιμοποιήσουμε ένα νόμο κόπωσης της ασφαλικής στρώσης. Η εξήγηση είναι η εξής: Ένας τέτοιος νόμος δίνει τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων της φόρτισης προκειμένου να μην αστοχήσει (ρηγματωθεί) η επιφάνεια κύλισης. Συμπεριλαμβάνει επομένως κι ένα εύρος αριθμού επαναλήψεων των φορτίσεων,

απ' την στιγμή δηλαδή που στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης έχει ήδη αναπτυχθεί μια μικρορωγμή μέχρι την στιγμή που με την πρόοδο των φορτίσεων καθώς αυξάνει το μήκος της αυτή φθάσει την επιφάνεια της στρώσης. Ο παραπάνω αριθμός επαναλήψεων αποτελεί ποσοστό του συνολικού μέγιστου επιτρεπόμενου αριθμού επαναλήψεων που καθορίζεται απ' το νόμο κόπωσης και η στιγμή έναρξης του τελευταίου αυτού κύκλου των φορτίσεων όπως είναι εύλογο δεν μπορεί να προσδιοριστεί απ' τον παραπάνω νόμο κόπωσης. Μ' άλλα λόγια δεν μπορούμε να ξέρουμε πότε περίπου αναμένεται να εμφανιστούν οι πρώτες ρωγμές στην βάση της ασφαλτικής στρώσης. Επομένως, δεν μπορούμε να ξέρουμε ούτε και τον χρόνο κατά τον οποίο πρέπει να συντηρήσουμε το οδόστρωμα. Πέρα απ' αυτό η φαινομενολογική αντιμετώπιση του προβλήματος όπως αυτή προσδιορίζεται απ' την εξαγωγή ενός νόμου κόπωσης είναι λανθασμένη όσον αφορά το κομμάτι εκείνο του αριθμού των επαναλήψεων απ' την δημιουργία των πρώτων ρωγμών μέχρι την τελική θραύση, δεδομένου ότι τώρα το τασικό πεδίο κατά την διεύθυνση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης, λόγω της παρουσίας των ρωγμών τώρα αλλάζει άρδην μορφή, κι επομένως οι παραδοχές με βάση τις οποίες προσδιορίστηκε ο νόμος κόπωσης τώρα παύουν να ισχύουν.

Ο μηχανικός έτσι στην προσπάθειά του να προσεγγίσει το πρόβλημα του προσδιορισμού του χρόνου επέμβασης στο οδόστρωμα θα πρέπει να "προσπεράσει" την ανάλυση μιας φαινομενολογικής αντιμετώπισης και να υιοθετήσει μια άλλη αντιμετώπιση που είναι γνωστή ως μηχανιστική και περιλαμ-

βάνει μεθόδους, παραμέτρους και έννοιες, που αποτελούν τις συνιστώσες ενός νέου κλάδου της μηχανικής γνωστού ως μηχανική των θραύσεων. Με την χρήση χαρακτηριστικών παραμέτρων που αποτελούν καθοριστικά στοιχεία στην ανάπτυξη του μηχανισμού των θραύσεων (π.χ. μήκος ρωγμής, γεωμετρία υλικού, είδος φόρτισης κ.λ.π.) εισάγονται στην μηχανική των θραύσεων δύο βασικά μεγέθη το K (συντελεστής έντασης των τάσεων) και το $G(J)$ (ρυθμός απελευθέρωσης παραμορφωσιακής ενέργειας) που αποτελούν ισχυρά όπλα στην προσπάθεια για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την συμπεριφορά του υλικού απ' την στιγμή που αυτό έχει ρωγματωθεί και μετά.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ν' αναπτύξει μεθόδους προσδιορισμού των χαρακτηριστικών παραμέτρων (K) και (J) για τα ψαθυρά και τα ελαστοπλαστικά αντίστοιχα υλικά. Είναι το πρώτο, και ίσως το πιο σημαντικό βήμα, στην προσπάθεια μελέτης της αντοχής των ρωγματωμένων υλικών που γίνεται στο εργαστήριο του Ε.Μ.Π.

Η όλη θεωρητική ανάλυση (Κεφ. 1-4) που προηγείται των πειραμάτων σκοπό έχει να βοηθήσει τον αναγνώστη - μελετητή να κατανοήσει τόσο τα προβλήματα που παρουσιάζονται στην μελέτη των ρωγματωμένων υλικών όσο και τους τρόπους με τους οποίους η μηχανική των θραύσεων τ'αντιμετωπίζει. Η θεωρητική ανάλυση των πειραμάτων όσο και η πειραματική ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών, μπορούν ν'αποτελέσουν την βάση και το εφαλτήριο για μελλοντικά ανάλογα πειράμα-

τα τα οποία θα δώσουν μια σφαιρικότερη εικόνα της συμπεριφοράς των ρωγματομένων υλικών οδοστρωσίας και θα εμπλουτίσουν την ήδη υπάρχουσα γνώση για τα υλικά αυτά.

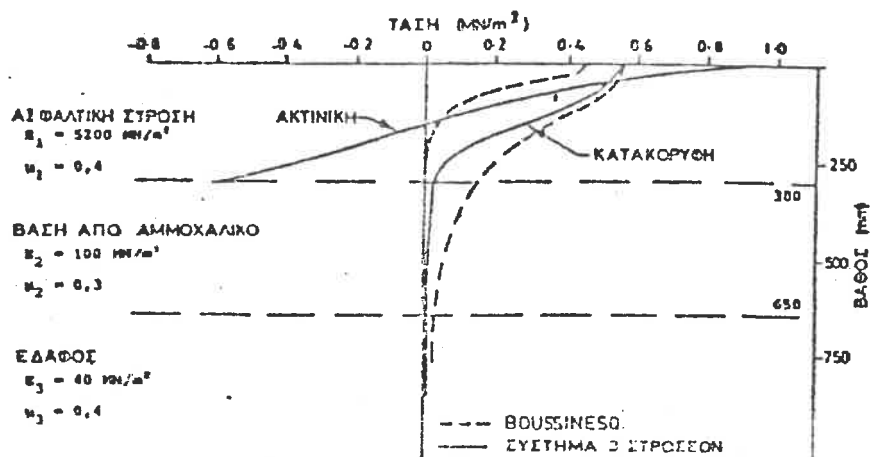
ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΡΩΓΜΩΝ

Τ'ασφαλτομίγματα, όπως και το σύνολο σχεδόν των δομικών υλικών, περιέχουν από την στιγμή της κατασκευής τους ένα σύνολο ασυνεχειών (οπές, εγκλείσματα, ρωγμές κ.λ.π.) οι οποίες βρίσκονται σε τυχαίες θέσεις μέσα στην μάζα τους.

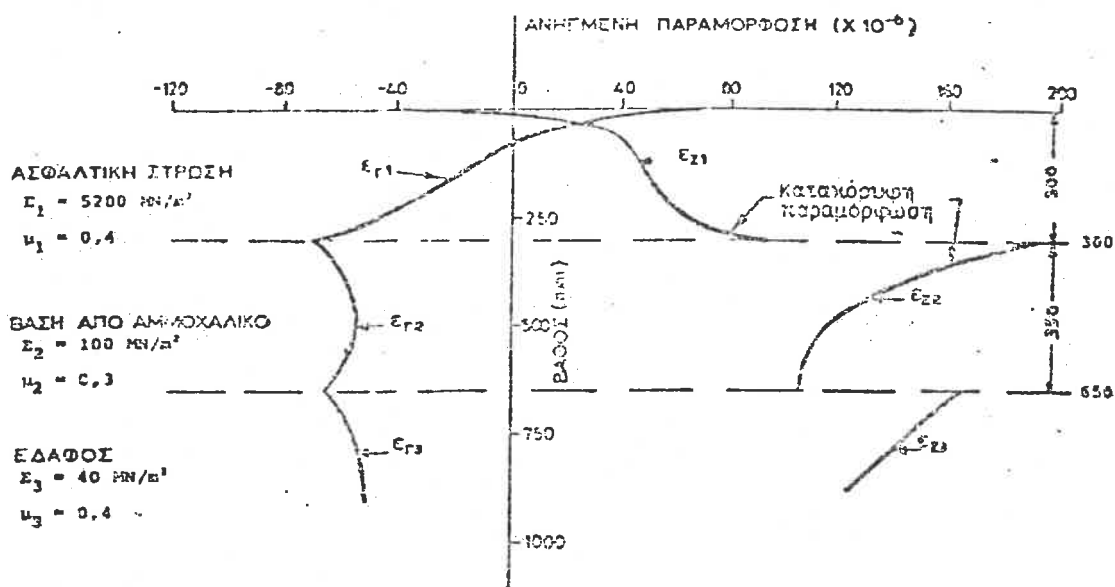
Όπως ήδη έχει αναφερθεί οι πρώτες ρωγμές στην ασφαλτική στρώση εμφανίζονται στην βάση της. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού στην περιοχή αυτή οι εφελκυστικές τάσεις και επομένως και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις είναι οι μέγιστες που αναπτύσσονται κατά την διεύθυνση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης.

Παρακάτω (σχήματα Ε.3, Ε.4) [1] παρατίθενται σχετικά διαγράμματα που δείχνουν την μεταβολή των τάσεων και των παραμορφώσεων καθ' ύψος μιας διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος.

Οι ρωγμές δεν δημιουργούνται ξαφνικά στην βάση της ασφαλτικής στρώσης μετά την πάροδο ορισμένου αριθμού διελεύσεων οχημάτων αλλά προϋπάρχουν σ' όλη την έκταση της μάζας της στρώσης από κατασκευής. Έχουν δηλαδή την μορφή γεωμετρικών ασυνεχειών που εκτείνονται στην μάζα της ασφαλτικής στρώσης και εντοπίζονται κυρίως στις διεπιφάνειες επαφής μεταξύ αδρανών και ασφάλτου. Οι επιφάνειες αυτές είναι οι πιο "αδύνατες" του ασφαλτομίγματος με την έννοια ότι υπάρχει ενδεχόμενο (ακόμα κι αν η



Σχ. Ε.3. Κατανομή οριζοντίων και κατακορύφων τάσεων. Το οδόστρώμα αποτελείται από ασφαλτική στρώση 30cm και βάση από αμμοχάλικο πάχους 35cm. Το φορτίο είναι 40 ΚΝ με $p = 0,5 \text{ MN/m}^2$ και ακτίνα $r = 160 \text{ mm}$.



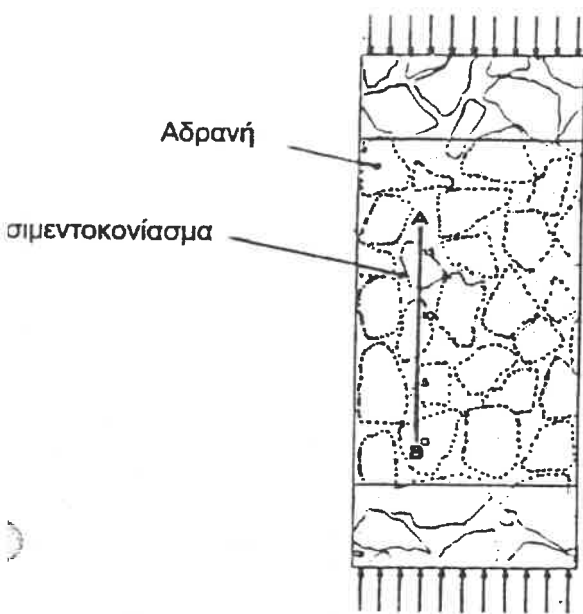
σχ.Ε.4. Κατανομή οριζοντίων και κατακορύφων ανηγμένων παραμορφώσεων. (Τα στοιχεία του οδόστρώματος είναι ίδια με του σχ. Ε.3.).

συμπύκνωση είναι καλή) ένα πολύ μικρό μέρος του αδρανούς να μην καλύπτεται από ασφαλτο κι επομένως να θεωρείται η περιοχή αυτή σαν προϋπάρχουσα ασυνέχεια (ρωγμή). Επίσης υπάρχει περίπτωση οι επιφάνειες κάποιων αδρανών να έχουν μικρορηγματώσεις οπότε όταν η ασφαλτος έρθει σ'επαφή μ'αυτές, υπάρχει κίνδυνος κατά την συμπύκνωση ή και κατά την περίοδο λειτουργίας της οδού κάτω απ'την επιβολή των εξωτερικών φορτίων η ασφαλτος να συμπαρασύρει την μικρορηγματωμένη περιοχή του αδρανούς κι έτσι στην θέση της να παραμείνει κενό. Τέλος, στις περιοχές αυτές μπορεί να παρατηρηθεί αποκόλληση των αδρανών απ'την ασφαλτο λόγω της διαφορικής μεταβολής του όγκου αυτών των υλικών που προκαλείται απ'την αυξομείωση της εξωτερικής θερμοκρασίας. Έτσι και πάλι δημιουργούνται επιφάνειες ασυνέχειας που αποτελούν περιοχές συγκέντρωσης των τάσεων - οι αναπτυσσόμενες τάσεις στις περιοχές αυτές υπερβαίνουν το όριο διαρροής του υλικού - κι επομένως συνιστούν αφετηρίες διάδοσης των προϋπάρχοντων μικρορωγμών.

Στα σχήματα (Ε.5, Ε.6) [1] φαίνεται καθαρά ότι κατά μήκος της γραμμής Α,Β τα σημεία όπου παρατηρείται υψηλή ανάπτυξη (συγκέντρωση) των τάσεων (κι αντιστοίχως και των παραμορφώσεων) είναι εκείνα των διεπιφανειών μεταξύ αδρανών κι ασφάλτου. [1]

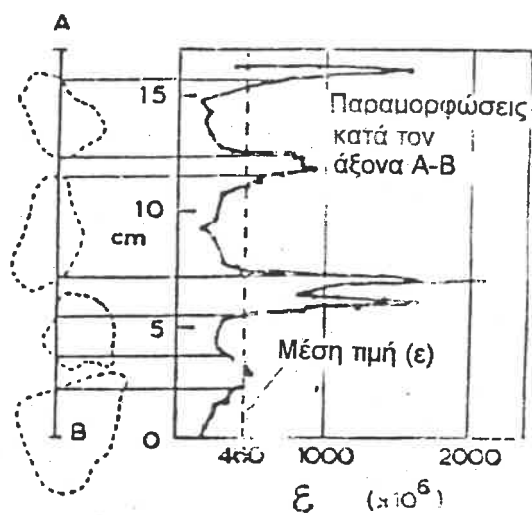
Οι διάφορες φάσεις της διαδικασίας της θραύσεως για ένα δοκίμιο που καταπονείται σε αντιδιαμετρική θλίψη φαίνονται ενδεικτικά στα σχήματα (Ε.7, Ε.8, Ε.9) [1]. Το

Σκυρόδεμα υπό φόρτιση



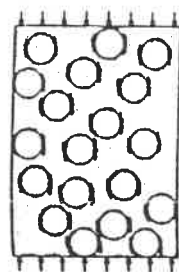
σχ. E.5

Dantu 1959, Swaney 1969, Keetom 1961

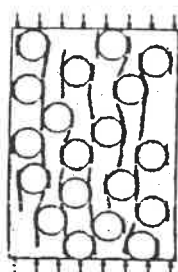


Ανηγγμένη παραμόρφωση

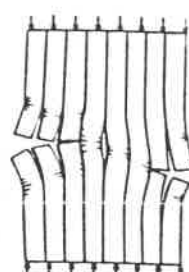
σχ. E.6



σχ. E-7

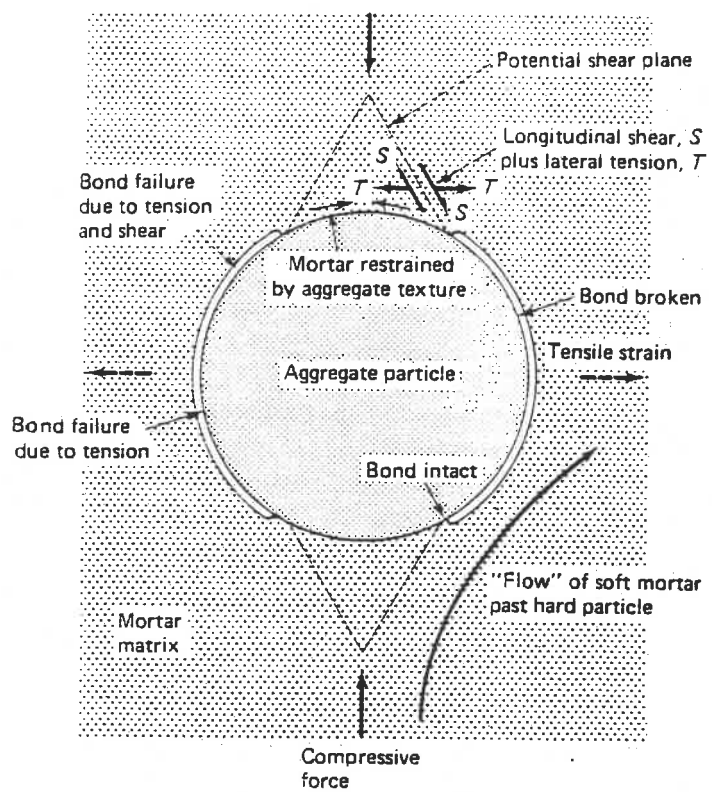


σχ. E-8



σχ. E-9

Φάσεις δημιουργίας και επέκτασης ρωγμών στο σκυρόδεμα.



σχ.Ε.10. Ενδεικτική απεικόνιση της ανάπτυξης των δυνάμεων στην περιφέρεια αδρανούς το οποίο καταπονείται θλιπτικά.

σχήμα (Ε.10) [2] αποτελεί λεπτομέρεια του σχ. (Ε.7). Κάτω απ' την επιβολή των εξωτερικών θλιπτικών τάσεων στην οριζόντια διεύθυνση που διέρχεται απ' το κέντρο του αδρανούς αναπτύσσονται καθαρά εφελκυστικές δυνάμεις οι οποίες προκαλούν αποκόλληση της ασφαλτικής μάζας απ' το αδρανές μ' αποτέλεσμα να εκκινεί ένας μηχανισμός ανάπτυξης των ρωγμών παράλληλα προς την διεύθυνση της φόρτισης και κάθετα ως προς την διεύθυνση ανάπτυξης των εφελκυστικών τάσεων σχ. (Ε.7). Με την πρόοδο των φορτίσεων μπροστά απ' την αιχμή της ρωγμής δημιουργείται μια μικρορηγματωμένη επιφάνεια η οποία είναι προϊόν μικροασυνεχειών της ασφαλτικής μάζας (π.χ. κενά αέρος, εγκλείσματα, μικρορωγμές κ.λ.π.) η οποία στη συνέχεια διευρύνεται και γίνεται οπτικά ορατή αποτελώντας το τελευταίο μέρος της επέκτασης της ρωγμής, σχ. (Ε.8). Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται κι έτσι οι διάφορες αναπτυσσόμενες ρωγμές συνενώνονται σε μεγαλύτερες σχ. (Ε.9) μέχρι την τελική θραύση του υλικού.

Στα εύκαμπτα οδοστρώματα σημειώνεται ότι η διάδοση της ρωγμής δεν πραγματοποιείται και κατά τις δύο διευθύνσεις αλλά μόνο κατά τη μία (απ' την βάση της ασφαλτικής στρώσης προς την επιφάνειά της) αλλά ο γενικότερος μηχανισμός διάδοσης είναι αυτός που προαναφέρθηκε.

Η διεύθυνση της διάδοσης είναι γενικά κατακόρυφη. Η ρωγμή στην περίπτωση σκυροδεμάτων πολύ υψηλής αντοχής όπου η αντοχή του τσιμεντοκονιάματος δεν διαφέρει σημαντικά από εκείνη των αδρανών ενδέχεται να περάσει και

μέσα ακόμα απ' την μάζα των αδρανών διαχωρίζοντάς τα στα δύο. [3]

Το ίδιο φαινόμενο όμως δεν μπορεί να παρατηρηθεί και στ' ασφαλτομίγματα δεδομένου ότι το μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου είναι πολύ μικρότερο από εκείνο των αδρανών κι επομένως το ασφαλτόμιγμα δεν μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα σώμα το οποίο συμπεριφέρεται ομοιότροπα σε κάθε σημείο της μάζας του. Στην περίπτωση αυτών των μιγμάτων όταν η ρωγμή συναντήσει ένα αδρανές το παρακάμπτει ακολουθώντας την περιφέρειά του και μετά συνεχίζει την ανοδική της πορεία προς την επιφάνεια της ασφαλτικής στρώσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

1.1. Έννοια της κόπωσης

Σαν κόπωση [4] ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο κατασκευές αστοχούν* κάτω απ' την επίδραση επαναλαμβανόμενων φορτίων μεταβαλλόμενων χρονικά με το χαρακτηριστικό ότι τα φορτία αυτά αντιστοιχούν σε τάσεις πολύ μικρότερες απ' το όριο διαρροής των υλικών, τα οποία αποτελούν τα δομικά στοιχεία των κατασκευών.

Η επιβολή των φορτίων κόπωσης μπορεί ν' αντιστοιχεί σε διαφορετικές εντατικές καταστάσεις. Έτσι οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μπορεί να οφείλονται σε δυνάμεις θλιπτικές, εφελκυστικές, καμπτικές ή στρεπτικές στις πιο απλές περιπτώσεις ή σε συνδυασμό των παραπάνω καταστάσεων στις πιο σύνθετες των περιπτώσεων.

* Υπενθυμίζεται ότι σαν αστοχία ενός υλικού θεωρείται η κατάσταση εκείνη κάτω απ' την οποία είτε μειώνεται σημαντικώς η αντοχή του υλικού ύστερα από υπέρβαση της τάσης διαρροής (όγκιμα υλικά) είτε το υλικό θραύεται, διακόπτεται δηλαδή η συνέχεια της μάζας του με τον κατακερματισμό του σε επιμέρους τμήματα. (ψαθυρά υλικά)

1.2. Εισαγωγή της ανάγκης για μελέτη των φαινομένων κόπωσης

Στην παράγραφο αυτή κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια σύντομη ιστορική αναφορά σχετικά με τ'ατυχήματα που συνέβησαν στην διάρκεια του αιώνα μας και ήταν αυτά που ουσιαστικά έδωσαν το έναυσμα για μελέτη των φαινομένων κόπωσης. [5]

Κατά την διάρκεια του πρώτου μισού της βιομηχανικής εποχής οι δομικές αστοχίες των κατασκευών ήταν πολυάριθμες. Εκρήξεις βραστήρων, εκτροχιάσεις τραίνων και ατυχήματα σε ανελκυστήρες ήταν συνηθισμένα φαινόμενα και αναφορές τέτοιων ατυχημάτων γίνονταν κάθε εβδομάδα, πολλές φορές και κάθε μέρα.

Στη συνέχεια η ανακάλυψη νέων υλικών μεγαλύτερης αντοχής, η βελτίωση των διαδικασιών παραγωγής, η εισαγωγή στον υπολογισμό συντελεστών ασφαλείας κι η εφαρμογή ποιοτικών ελέγχων μείωσε τις αστοχίες των κατασκευών κατά πολύ αλλά χωρίς αυτές να εξαλειφθούν τελείως.

Κατά την διάρκεια του αιώνα μας πάνω από 24 γέφυρες κατέρρευσαν, ενώ υπολογίζεται ότι απ'την εποχή του 2ου παγκοσμίου πολέμου πάνω από 200 πολιτικά αεροπλάνα κατέπεσαν μ'αποτέλεσμα να σκοτωθούν χιλιάδες άνθρωποι.

Τα αίτια των παραπάνω ατυχημάτων εντοπίστηκαν στην ύπαρξη ρωγμών λόγω φαινομένων κόπωσης. Ο αριθμός των ρωγμών που βρέθηκαν στα παραπάνω αεροσκάφη υπολογίζεται πάνω από 35.000. Επίσης έχουν εντοπιστεί πολλές ρωγμές σε

πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Σήμερα έχει αποδειχτεί στην πράξη ότι τουλάχιστον τα 3/4 των περιπτώσεων αστοχίας με θραύση οφείλονται σε καταπονήσεις κόπωσης. Το πρόβλημα λοιπόν της ανάλυσης της συμπεριφοράς των κατασκευών υπό φορτία κόπωσης τίθεται σήμερα περισσότερο επιτακτικό παρά ποτέ δεδομένου ότι η τεχνολογία έχει φτάσει πλέον σε τέτοιο υψηλό επίπεδο, ώστε η κοινωνική συνείδηση δικαιολογεί πολύ δύσκολα τα πολύνεκρα ατυχήματα για τα οποία κυρίως ευθύνονται τα μέσα μαζικής μεταφοράς. Κατά συνέπεια, οι διάφοροι κατασκευαστές σήμερα (και για λόγους ανταγωνισμού) διαθέτουν τεράστια ποσά στην έρευνα και μελέτη της συμπεριφοράς των κατασκευών υπό φορτία κόπωσης προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν την πιθανότητα αστοχίας της κατασκευής κατά το χρονικό διάστημα (μετρούμενο στην πλειοψηφία των περιπτώσεων σε χρόνια) λειτουργίας της που οριοθετεί και την φυσική ζωή της κατασκευής. Χαρακτηριστικά για να δωθεί ένα μέγεθος των δαπανούμενων κονδυλίων και της προσπάθειας που απαιτείται αναφέρεται ότι συνολικά μια πλήρης ανάλυση της συμπεριφοράς των διαφόρων υλικών που χρησιμοποιούνται σ' ένα αεροπλάνο απαιτεί 40.000 με 120.000 ανθρωποώρες εργασίας.

έκφρα-
ση.

1000
1000
1000

—

—

1.3. Αίτια που προκαλούν την θραύση των υλικών λόγω φορτίων κόπωσης

επιβεβαιώνεται

Ένας λόγος που μπορεί να προκαλέσει την θραύση ενός υλικού είναι η υπέρβαση της αντοχής του εξ' αιτίας της φόρτισής του με πολύ μεγάλες δράσεις που δεν είχαν προβλεφθεί κατά τον σχεδιασμό του. Όμως σήμερα η πιθανότητα του να συμβεί κάτι τέτοιο είναι πολύ σπάνια αν όχι μηδενική δεδομένου ότι για την συντριπτική πλειοψηφία των κατασκευών είναι πλέον γνωστή μια πλήρης ανάλυση των φορτίσεων με τις οποίες αυτές καταπονούνται κι επομένως λαμβάνονται υπ' όψη στον υπολογισμό με την εισαγωγή κατάλληλων συντελεστών ασφαλείας.

Ο κυριότερος λόγος που προκαλεί την θραύση των υλικών είναι η ύπαρξη μικροσκοπικών ατελειών και γεωμετρικών ασυνεχειών που προϋπάρχουν στο εσωτερικό της μάζας των υλικών εκ κατασκευής. Οι ασυνέχειες αυτές αποτελούν σε μικροσκοπικό επίπεδο περιοχές συγκέντρωσης των τάσεων οι οποίες είναι δυνατό να ξεπερνούν (τοπικά) το όριο διαρροής του υλικού την στιγμή που οι τάσεις που επιβάλλονται εξωτερικά στο σώμα είναι μικρότερες απ' αυτό. Με την επανάληψη των φορτίσεων λειτουργίας, ξεκινά στις περιοχές όπου οι τάσεις είναι αυξημένες ένας μηχανισμός επέκτασης των εξ' αρχής υπάρχοντων ρωγμών και δημιουργίας νέων. Τ' αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός δικτύου μακροσκοπικών ρωγμών, η επέκταση του οποίου έχει σαν αποτέλεσμα την

141333

μείωση της αντοχής του υλικού. Έτσι, τα φορτία λειτουργίας δεν μπορούν πλέον ν'αναληφθούν απ' το υλικό κι επέρχεται η θραύση του. [4]

1.4. Εισαγωγή της ανάγκης για έλεγχο των θραύσεων

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι η θραύση στοιχείων που αποτελούν κρίσιμα τμήματα μιας κατασκευής όσον αφορά την ασφάλεια που αυτή προσφέρει θα έχει ολέθριες συνέπειες δεδομένου ότι η κατασκευή μπορεί να αστοχήσει και να προκαλέσει τον θάνατο πολλών ανθρώπων.

Προκειμένου λοιπόν ν' αποφευχθεί ένα τέτοιο συμβάν είναι αναγκαίο να υιοθετηθεί ένα κατώτατο επιτρεπόμενο όριο αντοχής των στοιχείων κάτω απ' το οποίο η πραγματική αντοχή των υπ' όψη στοιχείων δεν θα πρέπει ποτέ να πέσει. Δεδομένου ότι η αντοχή ενός στοιχείου μειώνεται με την επέκταση των ρωγμών είναι προφανές ότι το κατώτατο αυτό όριο αντιστοιχεί σ' ένα μέγιστο μήκος ρωγμής. Κατά συνέπεια είναι αναγκαίο να ξέρουμε ποιά είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος ρωγμής ώστε η αντοχή του στοιχείου να μην πέσει κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή.

Η απαίτηση αυτή γέννησε και την ανάγκη ελέγχου της θραύσης δηλ. της μελέτης του τρόπου με τον οποίο οι διάφοροι παράμετροι τόσο των υλικών όσο κι οι εξωτερικοί επιδρούν στην επέκταση των ρωγμών καθώς και του προσδιορισμού του χρόνου που απαιτείται ώστε οι αρχικές προϋπάρχουσες μικρορωγμές να διαδοθούν μέσα στην μάζα των υλικών μέχρι ένα κρίσιμο μήκος (Μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος).

Η γνώση του τρόπου με τον οποίο οι διάφοροι παράμετροι επηρεάζουν την διάδοση των ρωγμών δίνει πολύτιμες

23

23

πληροφορίες ώστε στα ερευνητικά εργαστήρια να κατασκευαστούν νέα υλικά αυξημένης αντοχής όσον αφορά τον χρόνο που απαιτείται να καλυφθεί προκειμένου ν' αρχίσει η ρηγματώση των υλικών.

Η γνώση του χρόνου που απαιτείται για να επεκταθούν οι ήδη εμφανισθείσες ρωγμές μέχρι το μήκος τους να γίνει κρίσιμο είναι απαραίτητη γιατί έτσι ξέρουμε τα χρονικά περιθώρια μέσα στα οποία μπορούμε να επέμβουμε ώστε να επιδιορθώσουμε τα ρηγματωμένα στοιχεία ή να τ' αντικαταστήσουμε.

Ο τρόπος με τον οποίο θα επέμβουμε εξαρτάται απ' το πόσο κρίσιμο είναι το στοιχείο για την κατασκευή δηλαδή απ' τον βαθμό μείωσης της παρεχόμενης ασφάλειας και τις οικονομικές συνέπειες που θα έχει ο τρόπος που επελέγη για το δημόσιο ή για την εταιρεία που εκμεταλλεύεται το έργο.

Η επιστήμη η οποία αναπτύχθηκε προκειμένου να γίνει εφικτός ο έλεγχος των θραύσεων λέγεται ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΘΡΑΥΣΕΩΝ. (Βλ. και εισαγωγή).

1.5. Ανάλυση των στόχων του ελέγχου των θραύσεων

Υπενθυμίζεται ότι οι στόχοι του ελέγχου των θραύσεων είναι δύο που επιγραμματικά αναφέρονται παρακάτω.

- 1) Η επίδραση των ρωγμών στην αντοχή των υλικών (συναρτήσει του μεγέθους αυτών).
- 2) Η ανάπτυξη των ρωγμών σαν συνάρτηση του χρόνου.

[6]. Τα διάφορα μεγέθη κατά τον υπολογισμό μιας κατασκευής υπεισέρχονται σ'αυτόν με την λεγόμενη αντιπροσωπευτική τιμή τους. Η αντιπροσωπευτική τιμή μπορεί να προσδιορίζεται:

- α) Πιθανοτικά λαμβάνοντας υπ'όψη ένα πλήθος παραμέτρων και χαρακτηριστικών μεταβλητών που επηρεάζουν την τιμή του μεγέθους αυτού οπότε η αντιπροσωπευτική τιμή λέγεται χαρακτηριστική τιμή του υπ'όψη μεγέθους.
- β) Εμπειρικά ή αυθαίρετα, οπότε λέγεται ονομαστική τιμή του μεγέθους αυτού. Στην περίπτωση αυτή οι τιμές των μεγεθών δεν προσδιορίζονται πιθανοτικά είτε λόγω ελλείψεως επαρκών στατιστικών στοιχείων είτε σε περιπτώσεις που η διασπορά του μεγέθους είναι πολύ μικρή σε σχέση με την μέση τιμή (π.χ. το ίδιο βάρος σκυροδέματος, το μήκος ενός φορέα κ.λ.π.).

Σημειώνεται ότι η χαρακτηριστική τιμή ενός μεγέθους αντιστοιχεί σε προκαθορισμένη πιθανότητα υπερβάσεως ή υποσκελίσεως της μέσα σ'ένα επίσης προκαθορισμένο χρονικό

διάστημα όπως για παράδειγμα συμβαίνει στα συνήθη οικοδομικά έργα. Προκειμένου για δράσεις η πιθανότητα υπερβάσεώς του κυμαίνεται γύρω στο 5% ενώ για μεγέθη αντοχής η πιθανότητα υπερβάσεώς τους κυμαίνεται γύρω στο 95% (ή πιθανότητα 5% υποσκελίσεως της χαρακτηριστικής τιμής).

Γενικά, χαρακτηριστική τιμή S_k πιθανότητας p ενός μεγέθους S καλείται η τιμή εκείνη για την οποία ισχύει:

$$P(S > S_k) = p$$

Ισχύει ότι

$$S_k = S_m + K \cdot \sigma_s$$

όπου

S_m : Η μέση τιμή του S

σ_s : Η τυπική απόκλιση του S

K : Αριθμητικός συντελεστής που εξαρτάται απ' την συνάρτηση κατανομής της τυχαίας μεταβλητής S και απ' την πιθανότητα p .

Η τιμή υπολογισμού ενός μεγέθους προκύπτει απ' την χαρακτηριστική τιμή αυτού πολλαπλασιασμένη ή διαιρεμένη με τον κατάλληλο συντελεστή ασφαλείας, σύμφωνα με τους εκάστοτε κανονισμούς, ανάλογα με το αν πρόκειται για δράση ή αντοχή.

Έτσι η τιμή σχεδιασμού μιας δράσης S με χαρακτηριστική τιμή S_k είναι:

$$S_d = \gamma_f \cdot S_k$$

ενώ η τιμή σχεδιασμού ενός μεγέθους αντοχής R με χαρακτηριστική τιμή R_k είναι:

$$R_d = R_k / \gamma_m$$

όπου:

γ_f, γ_m : συντελεστές ασφαλείας

$$\gamma_f, \gamma_m > 1$$

θα πρέπει να ισχύει πάντα

$$S_d < R_d \quad (1)$$

Σημειώνεται ότι οι χαρακτηριστικές τιμές των διαφόρων μεγεθών καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας καθορίζονται από Κανονισμούς που είναι νομοθετημένοι.

Αν για οποιοδήποτε λόγο η αντοχή ενός υλικού μειωθεί έτσι ώστε ν'ανατραπεί η σχέση (1) και η ανισότητα αλλάξει φορά δεν σημαίνει υποχρεωτικά ότι όλη η κατασκευή καταρρέει. Αστοχεί μόνο το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο υπό το στενό πιθανοτικό πλαίσιο κάτω απ' το οποίο η σχέση (1) καθορίζει την ισχύ της εξεταζόμενης οριακής κατάστασης του υπόψη στοιχείου.

[7]. Ας θεωρήσουμε τώρα ένα υλικό το οποίο καταπονείται από μέγιστο φορτίο P_u . Τότε το υλικό σχεδιάζεται για ν'αντέξει φορτίο $jP_u = P_d$ όπου j ένας συντελεστής ασφαλείας. Τότε αν μετά από κάποιο χρονικό διάστημα λειτουργίας δεν έχουν παρατηρηθεί ρωγμές στο υλικό ($\alpha = 0$, α : μήκος ρωγμής) τότε σημαίνει ότι η απομένουσα αντοχή του είναι:

$$P_{res} = P_u$$

δηλαδή όση και η αρχική.

Εδώ σημειώνεται ότι τα φορτία λειτουργίας πολλών κατασκευών (γέφυρες, πλοία, αεροπλάνα) είναι συνήθως πολύ

μικρότερα των μέγιστων φορτίων λειτουργίας για τα οποία έχουν σχεδιαστεί οι κατασκευές και μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις τα πλησιάζουν. Αν κάποια στιγμή ανιχνευθούν ρωγμές στο υλικό, τότε η αρχική αντοχή του θα έχει μειωθεί και η νέα απομένουσα αντοχή του είναι τώρα $P_{res} < P_u$ κι επομένως κι ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται και γίνεται

$$j = P_{res} / P_s$$

που είναι μικρότερος απ' τον αρχικό

$$j = P_u / P_s$$

Έτσι, ενώ η πιθανότητα ν' αστοχήσει το υλικό αρχικά όταν ίσχυε ($P_u = P_{res}$) ήταν υπαρκτή αλλά πολύ μικρή τώρα η πιθανότητα να υπερβληθεί η νέα (απομειωμένη) αντοχή του είναι πολύ μεγαλύτερη.

Λόγω της επαναλαμβανόμενης φόρτισης η ρωγμή γίνεται μεγαλύτερη, η εναπομένουσα αντοχή μικρότερη και η πιθανότητα θραύσης μεγαλύτερη. Αν δεν ληφθεί κανένα μέτρο για επιδιόρθωση ή αντικατάσταση του ρηγματωμένου στοιχείου κάποια στιγμή η εναπομένουσα αντοχή θα γίνει:

$$P_{res} = P_s$$

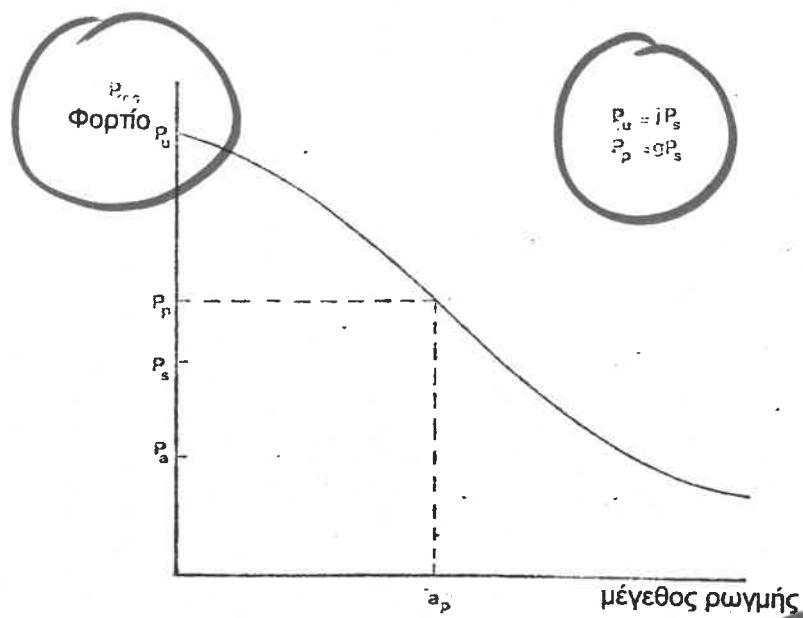
κι ο συντελεστής ασφαλείας ίσος με την μονάδα, οπότε η θραύση θα λάβει χώρα όταν εφαρμοσθεί φορτίο

$$P = P_s$$

ή στην χειρότερη περίπτωση όταν

$$P = P_a < P_s$$

Η επιρροή του μήκους της ρωγμής στην αντοχή του υλικού φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί, σχ. (141). [7]



σχ. 1.5.1. Εναπομένουσα αντοχή παρουσία ρωγμής. Για $a=0$ (νέα κατασκευή) είναι $P_u = j P_s$.

Υπόμνημα;
Παρά;



Αυτό είναι που θα πρέπει ν' αποφευχθεί. Δηλαδή δεν θα πρέπει να επιτρέψουμε στην ρωγμή να γίνει τόσο μεγάλη ώστε να επέλθει η θραύση κάτω από φορτία λειτουργίας. Η παραπάνω απαίτηση μας οδηγεί στην εισαγωγή ενός κατώτατου ορίου το οποίο μπορεί να φτάσει η απομένουσα αντοχή του στοιχείου χωρίς όμως να γίνει μικρότερη απ' αυτό. Έτσι δεχόμαστε το όριο αυτό ως:

$$P_p = \xi \cdot P_s$$

όπου:

ξ : ο εναπομένων συντελεστής ασφαλείας ($\xi > 1$).

Παρ' όλο που διεθνώς οι διάφοροι κανονισμοί προσδιορίζουν την τιμή του αρχικού συντελεστή ασφαλείας j , δεν προσδιορίζουν για τα περισσότερα υλικά τον ελάχιστο επιτρεπόμενο συντελεστή ασφαλείας ξ ώστε να προσδιοριστεί απ' το διάγραμμα το α_p που είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο (ή κρίσιμο) μήκος που μπορεί να φτάσει η ρωγμή.

Αν λοιπόν προταθούν κανονισμοί που να προσδιορίζουν το ξ τότε με δεδομένο το διάγραμμα $P_{res} = f(\alpha)$ ή $\sigma_{res} = f(\alpha)$ μπορούμε να προσδιορίσουμε την τιμή του $\alpha = \alpha_p$ για την οποία $P = P_{res}(\min)$ ή $\sigma = \sigma_{res}(\min)$

Αν στην συνέχεια με δεδομένο το κρίσιμο μήκος της ρωγμής προσδιοριστεί κι ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου το μήκος της ρωγμής ξεκινώντας απ' την αρχική τιμή του α_0 (που θεωρούμε ότι προϋπάρχει στο υλικό) να πάρει την κρίσιμη τιμή α_p μετά από κάποιο αριθμό επαναληπτικών φορτίσεων, τότε μπορούμε να ξέρουμε και το χρονικό

περιθώριο που έχουμε προκειμένου με κατάλληλη επέμβαση να επιδιορθώσουμε ή ν'αντικαταστήσουμε το συγκεκριμένο στοιχείο.

1.6. Διαχωρισμός των εννοιών: θραύσης και διάδοσης ρωγμής

Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι η θραύση του υλικού συμβαίνει μόνο την στιγμή που το εξωτερικό φορτίο γίνεται ίσο ή ξεπερνά την απομένουσα αντοχή του υλικού απ' το οποίο είναι κατασκευασμένο ένα στοιχείο μιας κατασκευής οπότε και το στοιχείο διαχωρίζεται σε δύο ή περισσότερα κομμάτια. Μέχρι να συμβεί αυτό και για το διάστημα εκείνο κατά το οποίο τα φορτία λειτουργίας είναι μικρότερα απ' την εκάστοτε εναπομένουσα αντοχή του υλικού, η ρωγμή θα διαδίδεται όχι λόγω θραύσης αλλά λόγω της ανάπτυξης των μηχανισμών διάδοσης των ρωγμών (π.χ. κόπωση, ερπυσμός).

Η παραπάνω παρατήρηση σκοπό έχει να καταστήσει σαφές ότι η διάδοση μιας ρωγμής δεν ταυτίζεται με την θραύση του υλικού. Άλλωστε αυτό γίνεται κατανοητό και απ' το γεγονός ότι η θραύση διαρκεί χρονικά πολύ λιγότερο απ' ότι η διάδοση της ρωγμής μέχρι την θραύση.

Παρ' όλα αυτά στην βιβλιογραφία πολλές φορές συναντάμε την φράση: "Η θραύση του υλικού βρέθηκε ότι αρχίζει σε τάση ίση με ..."

Σε τέτοιες περιπτώσεις ο όρος "θραύση" χρησιμοποιείται καταχρηστικά υποδηλώνοντας την έναρξη διάδοσης της ρωγμής κι όχι κυριολεκτικά.

1.7. Προσδιορισμός της έννοιας της αντοχής

Ο όρος εναπομένουσα αντοχή ενός υλικού δεν θα πρέπει να συγχυστεί με την παραμένουσα τάση του υλικού. Υπενθυμίζεται ότι ο όρος αυτός προσδιορίζει την τάση που παραμένει σ' ένα υλικό όταν πλέον το υλικό έχει αποφορτιστεί τελείως (δηλ. τα εφαρμοζόμενα εξωτερικά φορτία έχουν μηδενιστεί).

Η αντοχή περιγράφεται με τις μονάδες του εκάστοτε εντατικού μεγέθους (δύναμη, τάση, στρέψη, κάμψη), το οποίο καταπονεί το υλικό, και θεωρείται κρίσιμο χωρίς όμως να ταυτίζεται σαν έννοια με το κρίσιμο αυτό εντατικό μέγεθος. Μ' άλλα λόγια είναι μέγεθος "παθητικό" κι όχι "ενεργητικό" όπως θα ήταν αν επιβαλλόταν κάπου. Μπορεί καταχρηστικά να θεωρηθεί σαν ένα είδος ενέργειας η οποία είναι αποθηκευμένη στο υλικό και απομειώνεται με κάθε επανάληψη της φόρτισης, δηλ. με κάθε επανάληψη προσφοράς εξωτερικής ενέργειας.

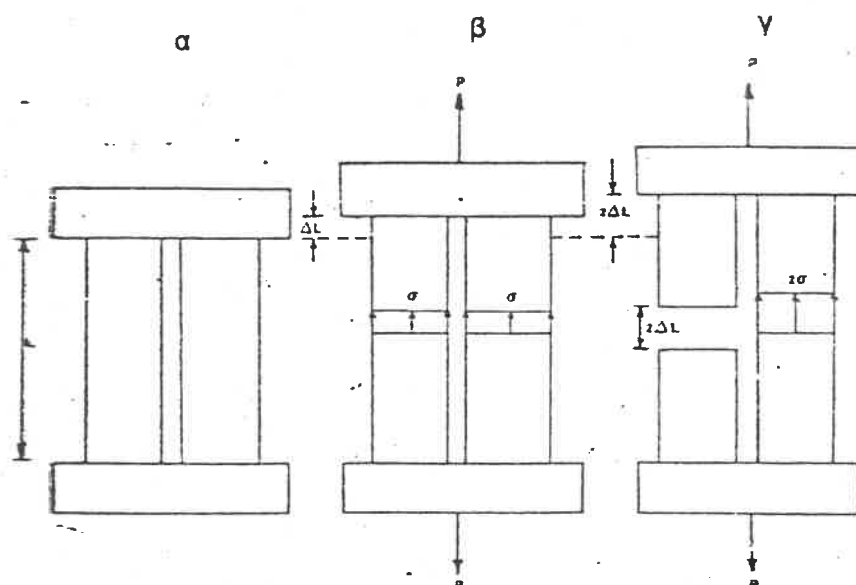
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

2.1. Ανάλυση του τρόπου ανάπτυξης των τάσεων στην περιοχή των ασυνεχειών.

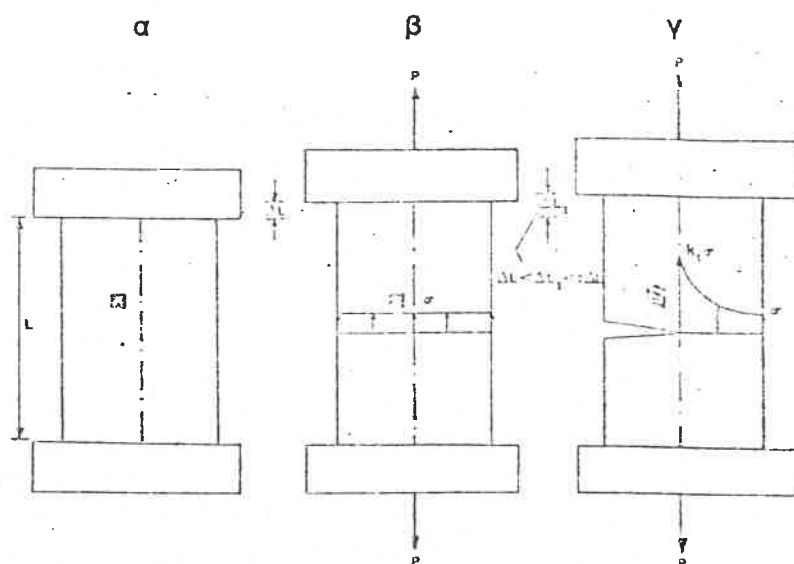
Όπως ήδη έχει αναφερθεί όλες οι μορφές ασυνέχειας (ρωγμές, μικροκενά κ.λ.π.) εντός της μάζας των υλικών αποτελούν περιοχές συγκέντρωσης των τάσεων. Η τάξη μεγέθους των τάσεων που αναπτύσσονται στ' άκρα αυτών των ασυνεχειών είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της αντίστοιχης τάξης μεγέθους της εξωτερικά επιβαλλόμενης τάσης, μ' αποτέλεσμα τοπικά, στις περιοχές αυτές οι τάσεις να φτάνουν ή και να ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού.

Για να γίνει αυτό καλύτερα κατανοητό [8] ας θεωρήσουμε δύο παράλληλες μεταξύ τους ράβδους του ίδιου υλικού και του ίδιου μεγέθους όπως φαίνεται στο σχ. (2.1.1.α).

Αν φορτίσουμε μ' ένα εφελκυστικό φορτίο P τις πλάκες στις οποίες οι ράβδοι συνδέονται τότε σε κάθε μία απ' τις ράβδους θ' αναπτυχθεί τάση ίση με το $1/2$ της εξωτερικά επιβαλλόμενης, ενώ και οι δύο ράβδοι θα επιμηκυνθούν κατά ΔL σχ. (2.1.1.β). Αν τώρα κόψουμε την αριστερή ράβδο στα δύο τότε η δεξιά ράβδος θα είναι αυτή που θα μεταφέρει εξ ολοκλήρου το επιβαλλόμενο φορτίο. Έτσι τόσο η αναπτυσσόμενη τάση όσο και η προκαλούμενη επιμήκυνση θα είναι διπλάσια άρα και η παραμόρφωση (Δηλ. $\epsilon = 2\Delta L/L$). Η αριστερή ράβδος τώρα δεν μεταφέρει καθόλου φορτίο σχ.



σχ. 2.1.1. Επίδραση που έχει το κόψιμο μιας ράβδου στην παραμόρφωση της άλλης όταν μεταξύ τους υπάρχει κενό.



σχ. 2.1.2. Επίδραση που έχει το κόψιμο της μιας ράβδου στην παραμόρφωση της άλλης όταν οι ράβδοι είναι μεταξύ τους ενωμένες.

(2.1.1.γ).

Αν θεωρήσουμε τώρα τις δύο ράβδους συνδεδεμένες σχ. (2.1.2.α,β) η κατάσταση ουσιαστικά είναι ίδια με την αρχική περίπτωση. Αν τώρα όμως κόψουμε την αριστερή ράβδο σχ. (2.1.2.γ) μια διαφορετική κατάσταση σε σχέση μ'εκείνη του σχ. (2.1.1.γ) παρουσιάζεται. Αν το πάνω μισό της δεξιάς ράβδου ενταθεί τότε αυτό αναπτύσσει μια παραμόρφωση. Τότε όμως την ίδια παραμόρφωση θ'αναπτύξει κατά προσέγγιση και το άνω τμήμα της αριστερής ράβδου. Δεδομένου ότι και οι δύο ράβδοι είναι κατασκευασμένες απ'το ίδιο υλικό θα έχουν το ίδιο μέτρο ελαστικότητας E . Έτσι, αν θεωρήσουμε τελείως ελαστική γραμμική συμπεριφορά ($\sigma = \epsilon \cdot E$) κάθε μία ράβδος θ'αναπτύσσει στην περιοχή σύνδεσης με τις πλάκες φόρτισης την ίδια τάση κι επομένως θα μεταφέρει το μισό απ'το επιβαλλόμενο εξωτερικό φορτίο. Η διαφορά είναι ότι τώρα στην περιοχή που η αριστερή ράβδος έχει κοπεί η εναπομείνουσα διατομή της δεξιάς ράβδου εξαναγκάζεται τώρα να μεταφέρει εκτός απ'το αρχικό της φορτίο και το φορτίο της αριστερής ράβδου το οποίο λόγω της ασυνέχειας της αριστερής ράβδου δεν είναι δυνατό να μεταφερθεί μέσω αυτής. Το φορτίο μεταφέρεται απ'την περιοχή της ασυνέχειας στην δεξιά διατομή μέσω της ανάπτυξης διατμητικών τάσεων.

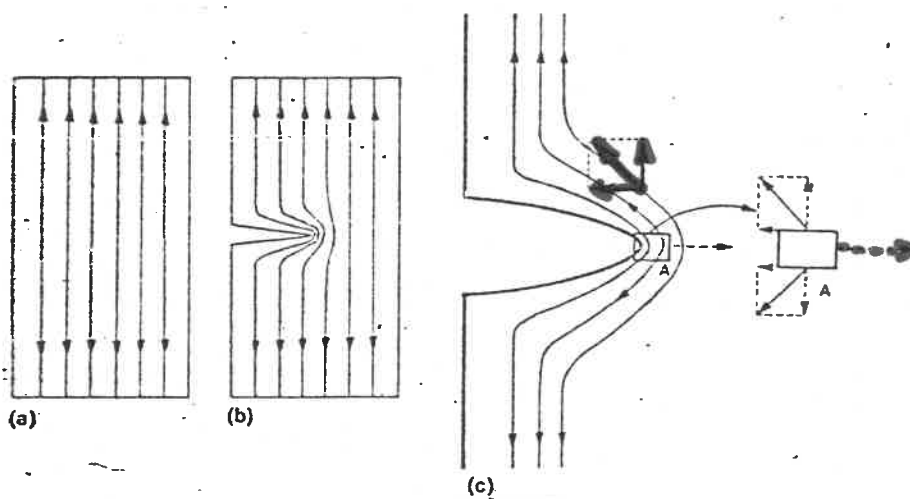
Συμβαίνει δηλαδή μια αλλαγή του τασικού πεδίου (ανακατανομή των τάσεων) στην περιοχή γύρω απ'την κορυφή της ασυνέχειας. Η ανωμαλία του τασικού πεδίου ξεκινά λίγο

πριν την ασυνέχεια όταν το φορτίο θεωρούμε καταχρηστικά ότι αλλάζει κατεύθυνση προκειμένου να περάσει απ'την δεξιά διατομή και ολοκληρώνεται λίγο μετά την ασυνέχεια (κάτω δηλ. απ'το επίπεδό της) όταν το επιπλέον φορτίο επαναδιανέμεται στην αριστερή ράβδο. Το επιπλέον φορτίο κατανέμεται ανομοιόμορφα κατά πλάτος της διατομής της δεξιάς ράβδου. Αυτό δηλ. που συμβαίνει είναι ότι όλο το επιπλέον φορτίο "περνά" από ένα πολύ μικρό τμήμα (dx) της δεξιάς διατομής που αποτελεί ένα πολύ μικρό ποσοστό του όλου μήκους της διατομής. Αυτό σημαίνει ότι από κάποιο σημείο της διατομής και μετά δεν θα υπάρχει καμία επιβάρυνση της τάσης λόγω του επιπλέον φορτίου γιατί απλά σ'αυτήν την περιοχή δεν υπάρχει (μεταφέρεται) επιπλέον φορτίο.

Έτσι, αυτός είναι ο λόγος που στην αιχμή της ρωγμής αναπτύσσονται τάσεις πολύ μεγαλύτερες της αρχικής επιβαλλόμενης.

Μια παραστατική απεικόνιση του φαινομένου της ανακατανομής των τάσεων δίδεται στα σχ. 2.1.3b,c [8] όπου σκιαγραφούνται θεωρητικές γραμμές ροής του φορτίου κατά την διεύθυνση του μήκους των ράβδων.

Απ'τα σχήματα αυτά φαίνεται καθαρά η αλλαγή του τασικού πεδίου στην περιοχή γύρω απ'την κορυφή της ασυνέχειας και ειδικότερα η ανάπτυξη διαξονικής, στην περιοχή αυτή, έντασης την στιγμή που μακριά απ'την ασυνέχεια οι ράβδοι φορτίζονται μοναξονικά (σε καθαρό εφελκυσμό).



σχ. 2.1.3. Θεωρητικές γραμμές ροής φορτίου καθ' ύψος μιας φορτιζόμενης επιφάνειας χωρίς εγκοπή (σχ.α) και με εγκοπή (σχ.β) και μεταβολή της ενταπκής κατάστασης από μοναξονική μακριά απ' την αιχμή της εγκοπής σε διαξονική στην περιοχή της αιχμής.

— 2

2.2. Συντελεστής συγκέντρωσης των τάσεων

Η ανάπτυξη στην περιοχή γύρω απ' τις ασυνέχειες τάσεων πολύ μεγαλύτερων απ' τις ονομαστικές τάσεις που εφαρμόζονται εξωτερικά γέννησε την ανάγκη για την εισαγωγή του συντελεστή συγκέντρωσης των τάσεων ο οποίος είναι ένας καθαρός αριθμός και προσδιορίζει το κατά πόσο οι τάσεις που αναπτύσσονται στα σύνορα της ασυνέχειας είναι μεγαλύτερες απ' τις εξωτερικά εφαρμοζόμενες. Δηλαδή είναι: [9]

$$K_s = \sigma / \sigma_m$$

όπου:

σ : Οι τάσεις στα σύνορα της ασυνέχειας.

σ_m : Η μέση εξωτερική εφαρμοζόμενη τάση.

Σημειώνεται ότι πολλές φορές προτιμάται ως σ_m να μην λαμβάνεται η μέση τάση μακριά απ' την ασυνέχεια αλλά η μέση τάση κατά την εγκάρσια ως προς αυτήν διεύθυνση. Δεδομένου όμως ότι η σ είναι πάντα σταθερή αυτό που κάθε φορά θ' αλλάζει είναι η τιμή του K_s . Οι παραπάνω δυνατές επιλογές δεν δημιουργούν πρόβλημα αξιοπιστίας αυτών όσο γίνονται κάθε φορά οι κατάλληλες επιλογές των στοιχείων εκείνων που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό των τοπικών τάσεων.

Γενικά οι τοπικές τάσεις στα σύνορα των διάφορων ασυνεχειών εντός των υλικών είναι δυνατό να υπολογιστούν είτε θεωρητικά είτε πειραματικά.

Η θεωρητική προσέγγιση είναι τόσο αξιόπιστη όσο πε-



ρισσότερο ελαστικά συμπεριφέρεται το υλικό κι όσο η μορφή (σχήμα) των ασυνεχειών πλησιάζει σχήματα για τα οποία έχει υπολογιστεί ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων. Σήμερα το K_s έχει υπολογιστεί για ένα μεγάλο αριθμό σχημάτων των ασυνεχειών ενώ έχει αναλυθεί πλήρως το τασικό πεδίο κοντά στα σύνορα των ασυνεχειών για τελείως ελαστικά υλικά.

Παρακάτω δείχνονται οι γραμμές ροής του φορτίου για διάφορες μορφές των ασυνεχειών σχ. (2.2.1.α, β, γ) [7]

Για μια ασυνέχεια ελλειπτικής μορφής σχ. (2.2.2 α,β) [7] και για τελείως ελαστικά υλικά έχει βρεθεί ότι ο συντελεστής συγκέντρωσης των τάσεων δίδεται απ'την σχέση:

$$K_s = 1+2 (b/a) \quad (1)$$

Η ακτίνα καμπυλότητας της έλλειψης στο τέλος (αρχή) του εγκάρσιου άξονα δίδεται απ'τη σχέση

$$\rho = a^2/b$$

Έτσι η (1) γίνεται

$$K_s = 1+2\sqrt{b/\rho} = 1+2 (a/\rho)$$

Για $b/a = 3$ ($\rho = a/3$), σχ. (2.2.2.α) η (1) δίνει

$$K_s = 7$$

Ενώ για $b/a = 1/3$ ($\rho = 3a$), σχ. (2.2.2.β) η (1) δίνει

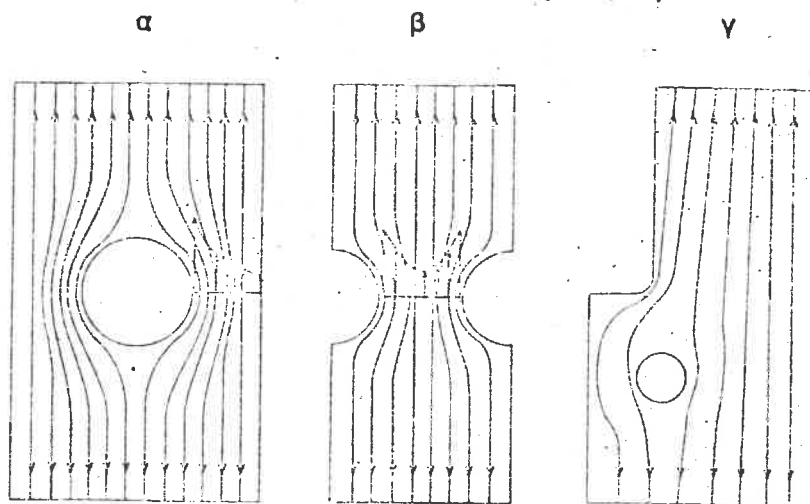
$$K_s = 1,667$$

Για συνέχεια κυκλικής μορφής $a = b = \rho = R$

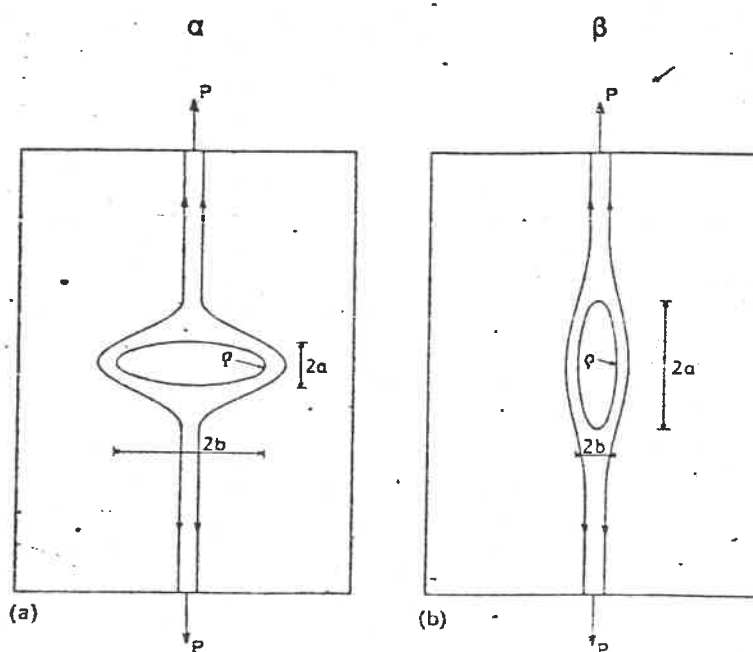
R : Η ακτίνα του κύκλου

η (1) δίνει

$$K_s = 3$$



σχ. 2.2.1. Θεωρητικές γραμμές ροής φορτίου σε υλικά που περιέχουν οπές (σχ. α, γ) ή έχουν επιφανειακές κοιλότητες (σχ. β).



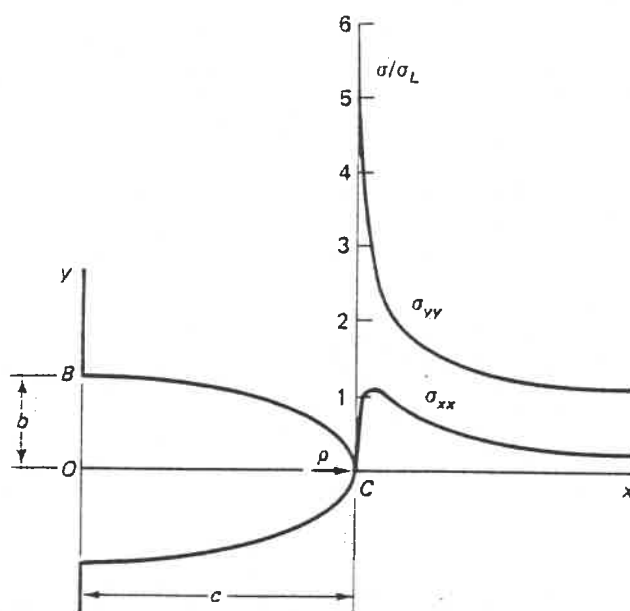
σχ. 2.2.2. Θεωρητικές γραμμές ροής φορτίου γύρω από μία ελλειπτική οπή όταν ο κύριος άξονας της έλλειψης είναι οριζόντιος (σχ. α) και κατακόρυφος (σχ. β).

Απ' τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι όσο περισσότερη αμβλεία είναι η ακτίνα της καμπυλότητας τόσο μικρότερες είναι οι τάσεις που αναπτύσσονται στα σύνορα της ασυνέχειας. Επομένως το συμπέρασμα που βγαίνει είναι ότι η μορφή του σχήματος της ασυνέχειας παίζει σημαντικό ρόλο όσον αφορά το μέτρο των τάσεων που αναπτύσσονται στα σύνορά της.

Οι πειραματικές μέθοδοι υπολογισμού των συνοριακών τάσεων των ασυνεχειών προτιμούνται στις περιπτώσεις που η μορφή των ασυνεχειών δεν έχει κάποια κλασσική μορφή, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός του K_{Σ} αλλά τυχαία. Ενδεικτικά αναφέρονται η μέθοδος της φωτοελαστικότητας, των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων, η μέθοδος Moire κ.ά.

Ακολουθώντας στο διάγραμμα που παρατίθεται σχ. (2.2.3) [10], φαίνεται ενδεικτικά η κατανομή των ακτινικών σ_{xx} και εφαπτομενικών τάσεων σ_{yy} υπό απλό εφελκυσμό στην άκρη μιας ελλειπτικής οπής κατά μήκος του κύριου άξονά της.

$$c = 3b.$$



σχ. 2.2.3. Μεταβολή των ακτινικών κι εφαπτομενικών τάσεων κατά μήκος του άξονα x σε μία ελλειπτική οπή με $c = 3b$.

2.3. Τύποι Παραμόρφωσης

Στην προσπάθεια να μελετηθεί η συμπεριφορά των ρωγμών κάτω από σύνθετες φορτίσεις κατέστη αναγκαίο ν'απλοποιηθεί κατά το δυνατόν η σύνθετη εντατική κατάσταση που επικρατεί στο άκρο της ρωγμής. Η ανάγκη αυτή οδήγησε στην εισαγωγή απλών τύπων φόρτισης της ρωγμής οι οποίοι προφανώς οδηγούν και σε αντίστοιχες απλές παραμορφώσεις των παρειών της ρωγμής.

Ο Irwin (1957) [11] πρώτος μελέτησε το τασικό πεδίο που αναπτύσσεται κοντά στις ρωγμές και παρατήρησε ότι υπάρχουν τρεις ανεξάρτητοι απλοί τρόποι παραμόρφωσης των χειλέων της ρωγμής υπό την επίδραση αντίστοιχων απλών εξωτερικών φορτίσεων.

Οι τύποι αυτοί παραμόρφωσης φαίνονται στο σχ. (2.3.1) [12]

α) Εφελκυστικός τύπος - I (Mode I)

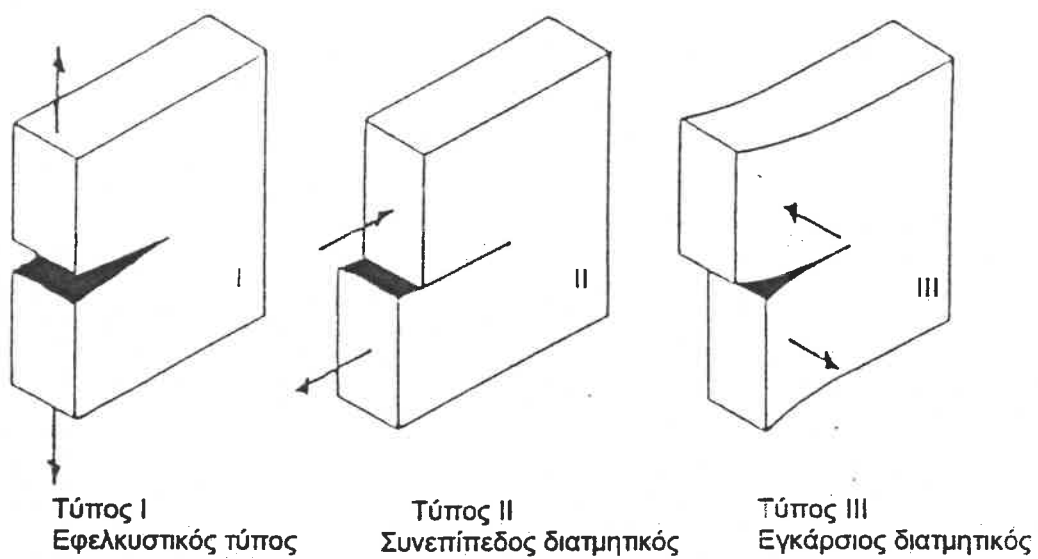
Όταν οι παρειές της ρωγμής τείνουν να διαχωρισθούν συμμετρικά ως προς το επίπεδο της παραμόρφωσης της ρωγμής.

β) Συνεπίπεδος διατμητικός τύπος - II (Mode II)

Όταν οι απέναντι παρειές της ρωγμής τείνουν να ολισθήσουν η μία σχετικά προς την άλλη προς αντίθετες κατευθύνσεις αλλά ως προς το ίδιο επίπεδο.

γ) Εγκάρσιος διατμητικός τύπος - III (Mode III)

Όταν οι απέναντι παρειές της ρωγμής τείνουν να διαχω-



σχ. 2.3.1. Χαρακτηριστικοί τύποι παραμόρφωσης των παρειών μιας ρωγμής.

ρισθούν προς αντίθετες εγκάρσιες διευθύνσεις κάτω απ' την επίδραση ίσων και αντίθετων δυνάμεων οι οποίες είναι κάθετες ως προς το επίπεδο του σώματος.

Έτσι οποιαδήποτε σύνθετη παραμόρφωση μπορεί ν' αναλυθεί σύμφωνα με τα παραπάνω σε απλούστερους τύπους παραμόρφωσης η επαλληλία των οποίων δίνει την αρχική περίπτωση.

Στην πράξη η πλειοψηφία των ρωγμών ακολουθεί την παραμόρφωση τύπου - I. Οι άλλοι δύο τύποι παραμόρφωσης δεν μπορούν να συναντηθούν από μόνοι τους αλλά πάντα σε συνδυασμό με τον εφελκυστικό τύπο - I. (Δηλ. I - II, I - III, I - II - III).

Παρ' όλα αυτά όμως ακόμα κι αν στην αρχή της εμφάνισης της ρωγμής επικρατεί ένας συνδυασμός απ' τους παραπάνω στην πράξη η ρωγμή τείνει ν' ακολουθήσει τέτοια διεύθυνση ώστε να υφίσταται μόνο εφελκυστική καταπόνηση κι επομένως η παραμόρφωση των παρειών της περιγράφεται μέσω της φυσικής αυτής διαδικασίας, απ' τον παραμορφωσιακό τύπο - I.

2.4. Συντελεστής έντασης των τάσεων K.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί ένα υλικό περιέχει εκ κατασκευής ένα πλήθος μικρορωγμών οι οποίες δεν είναι δυνατό ν'αποφευχθούν αλλά ούτε και να υπολογιστούν. Αυτό επομένως που η επιστήμη καλείται να εξετάσει είναι η επίδραση των ρωγμών αυτών σε μια κατασκευή. Για να γίνει όμως αυτό είναι αναγκαίο να μελετηθεί η συμπεριφορά των ρωγμών κάτω απ'τις διάφορες εντατικές καταστάσεις. Έτσι εισήχθη ο συντελεστής έντασης των τάσεων K ο οποίος δίνει ένα μέτρο της έντασης (μεγέθους) των τάσεων στην αιχμή μιας ρωγμής σ'ένα γραμμικό, ελαστικό, ισότροπο κι ομογενές υλικό. Ο συντελεστής αυτός έχει μονάδες ($\text{N.m}^{-3/2}$ ή $\text{lbs.inch}^{-3/2}$) και για τον υπολογισμό του λαμβάνονται υπ'όψη όλες εκείνες οι παράμετροι που επηρεάζουν το τασικό πεδίο στην έντονα καταπονούμενη περιοχή του άκρου μιας ρωγμής. Αυτές είναι το εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο, η γεωμετρία της ρωγμής (μέγεθος, σχήμα, καμπυλότητα της κεφαλής της) καθώς και την γενικότερη γεωμετρία του υλικού.

Έτσι θεωρείται ότι ο συντελεστής αυτός αποτελεί μια ισχυρή παράμετρο μέσω της οποίας μπορούμε να ελέγχουμε την διάδοση της ρωγμής.

Ανάλογα με τον τύπο παραμόρφωσης των παρειών της ρωγμής (I, II, III) ο συντελεστής έντασης των τάσεων συμβολίζεται αντίστοιχα ως K_I , K_{II} ή K_{III} .

Δεδομένου ότι ο συντελεστής αυτός παίρνει τόσο μεγαλύτερες τιμές όσο μεγαλύτερη είναι η εξωτερική επιβαλλό-

μενη τάση δηλ. όσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του υλικού μέχρι αυτό να θραυσθεί χαρακτηρίζεται κι ως αντοχή θραύσης του υλικού αυτού και συμβολίζεται με K_{σ} για επίπεδη εντατική κατάσταση και με $K_{I\sigma}$ για επίπεδη παραμορφωσιακή.

Σημειώνεται ότι δεν θα πρέπει να συγχέεται με τον συντελεστή έντασης των τάσεων K_{σ} ο οποίος όπως ήδη έχει ειπωθεί είναι καθαρός αριθμός κι απλώς είναι ο λόγος της τάσης στο άκρο μιας ρωγμής προς την μέση εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση. Η διαφορά του K_{σ} απ' τον K είναι ότι ο πρώτος εφαρμόζεται σε περιπτώσεις ασυνεχειών μεγάλου μεγέθους (π.χ. οπών, εγκοπών κλπ.) με αιχμές μεγάλης ακτίνας καμπυλότητας ενώ ο δεύτερος εφαρμόζεται σε περιπτώσεις ρωγμών με αιχμές μικρής ακτίνας καμπυλότητας. Επίσης ο K μπορεί να θεωρηθεί πληρέστερος απ' τον K_{σ} όσον αφορά τον προσδιορισμό του δεδομένου ότι ο δεύτερος δεν λαμβάνει υπόψη του, σ' αντίθεση με τον πρώτο, τις διαστάσεις του στοιχείου στο οποίο περιλαμβάνεται η ρωγή. Κατ' επέκταση κι οι θεωρητικές τάσεις που προκύπτουν μέσω αυτών των συντελεστών θα παρουσιάζουν διαφορά ως προς την σχετική ακρίβεια υπολογισμού τους.

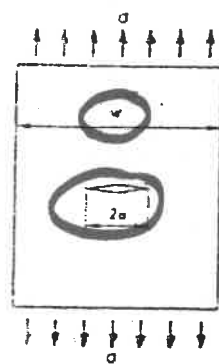
Στο σχ. (2.4.1) [13], φαίνεται μια πλάκα απείρου μήκους (W) η οποία περιέχει ρωγή μήκους $2a$ και υποβάλλεται σ' εφελκυστική τάση σ .

Η γραμμική θεωρία της ελαστικότητας της μηχανικής των θραύσεων αποδεικνύει ότι ο συντελεστής έντασης των τάσεων σε μια τέτοια περίπτωση είναι: [14]

$$\underline{K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot a}}$$

Handwritten text inside a circle, possibly "Handwritten" or "Handwritten".

—



σχ. 2.4.1. Εφελκυστική φόρτιση δοκιμίου που περιέχει κεντρική ρωγμή μήκους $(2a)$, υπό τάση (σ) .

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι το άπειρο μήκος δεν ταυτίζεται με την μαθηματική έννοια του απείρου αλλά έχει την έννοια ότι ο λόγος α/w είναι πάρα πολύ μικρός. Στην περίπτωση όμως που αυτός ο λόγος πλησιάζει την μονάδα τότε κρίνεται αναγκαία η εισαγωγή ενός συντελεστή C ο οποίος λαμβάνει υπόψη του τις γεωμετρικές διαστάσεις του στοιχείου.

Οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται πιο ολοκληρωμένα

$$K_I = C \cdot \sqrt{\pi \cdot \alpha}$$

$$(\text{Για } W \gg \alpha \Rightarrow C = 1)$$

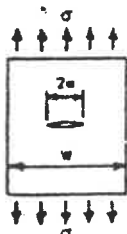
Οι τιμές του C έχουν προσδιοριστεί για γραμμικά ελαστικά ομογενή και ισότροπα υλικά για διάφορες περιπτώσεις τύπου ρωγμών και φόρτισης και ενδεικτικά αναφέρονται μερικές απ'αυτές στη συνέχεια $C = f(\alpha, W, B)$, σχ. (2.4.2-6) .[15]

Γενικότερα οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συντελεστών έντασης των τάσεων είναι τόσο θεωρητικές όσο και πειραματικές.

Ως μερικές απ'τις βασικότερες θεωρητικές αναφέρονται η μέθοδος της σύμμορφης απεικόνισης, των ολοκληρωτικών εξισώσεων τύπου Cauchy, Savruk και Datsyshin (1974), των πεπερασμένων στοιχείων.

Οι πιο γνωστές απ'τις πειραματικές είναι η μέθοδος των καυστικών, της φωτοελαστικότητας, Moire κ.λ.π.

Elementary Solutions



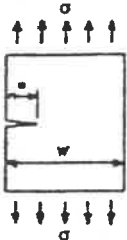
Centre cracked plate: $K_I = C \sigma \sqrt{\pi a}$

$$C = 1 + 0.256 \left(\frac{a}{W}\right) - 1.152 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 12.200 \left(\frac{a}{W}\right)^3$$

or $C = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)}$ (Feddersen)

or $C = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{W}\right)^2}}$ (Dixon)

σχ.2.4.2



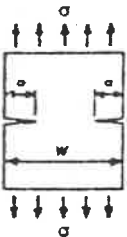
Single edge notched plate: $K_I = C \sigma \sqrt{\pi a}$

$$C = 1.12 \text{ for small cracks}$$

$$\text{or } C = 1.12 - 0.231 \left(\frac{a}{W}\right) + 10.55 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30.39 \left(\frac{a}{W}\right)^4$$

$$\text{up to } a/W = 0.6$$

σχ.2.4.3.



Double edge notched plate: $K_I = C \sigma \sqrt{\pi a}$

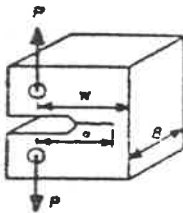
$$C = 1.12 \text{ for small cracks}$$

$$\text{or } C = \frac{1.122 - 0.561 \left(\frac{a}{W}\right) - 0.205 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0.471 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 0.190 \left(\frac{a}{W}\right)^4}{\sqrt{1 - \frac{a}{W}}}$$

σχ.2.4.4.

Χαρακτηριστικοί τύποι υπολογισμού του διορθωτικού συντελεστή (C) για διάφορες μορφές φόρτισης και τύπου δοκιμίων.

Solutions for Standard Test Specimens

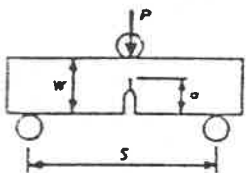


Compact tension specimen (CT):

$$K_I = \frac{P}{B W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

σχ.2.4.5.

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{(2 + \frac{a}{W})[0.886 + 4.64(\frac{a}{W}) - 13.32(\frac{a}{W})^2 + 14.72(\frac{a}{W})^3 - 5.6(\frac{a}{W})^4]}{(1 - \frac{a}{W})^{3/2}}$$



Single edge notched bend specimen (SENB):

$$K_I = \frac{P S}{B W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} [1.99 - \frac{a}{W}(1 - \frac{a}{W})(2.15 - 3.93(\frac{a}{W}) + 2.7(\frac{a}{W})^2)]}{2(1 + 2\frac{a}{W})(1 - \frac{a}{W})^{3/2}}$$

σχ.2.4.6.

2.5. Περιγραφή τασικού πεδίου γύρω απ' την ρωγμή

Οι Paris και Sih (1965) [16] απέδειξαν ότι στην επί-
πεδη παραμορφωσιακή κατάσταση οι τάσεις στο άκρο ρωγμής
υπό απλή εφελκυστική φόρτιση δίνονται απ' τις παρακάτω
σχέσεις:

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \dots \quad (\alpha)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \dots \quad (\beta)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \dots \quad (\gamma)$$

όπου

r, θ οι πολικές συντεταγμένες με αρχή των αξόνων την κο-
ρυφή της ρωγμής.

Η θεωρία της ελαστικότητας σύμφωνα με την οποία έχουν
εξαχθεί οι παραπάνω σχέσεις προϋποθέτει ότι οι τάσεις
στην κορυφή της ρωγμής ($r = 0$), απειρίζονται. Αυτό όπως
είναι προφανές δεν μπορεί ν' ανταποκρίνεται στην πραγματι-
κότητα δεδομένου ότι στη φύση όλα τα σώματα έχουν πεπερα-
σμένες διαστάσεις κι επομένως το r δεν είναι μηδέν όπως
θα ήταν αν οριζόταν σαν ένα μαθηματικό σημείο αλλά έχει

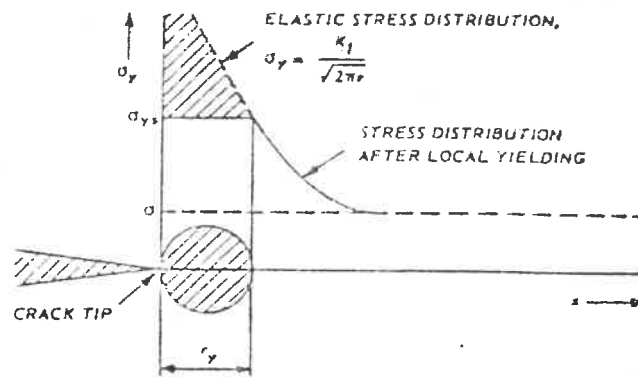
κάποια φυσική τιμή έστω και πολύ μικρή. Μ'αυτή τη λογική οι τάσεις δεν είναι άπειρες αλλά πάρα πολύ μεγάλες. Παρ'όλα αυτά όμως και πάλι τόσο μεγάλες τιμές των τάσεων δεν είναι δυνατό να υπάρξουν. Αυτό σημαίνει ότι απλά οι παραπάνω σχέσεις δεν περιγράφουν το τασικό πεδίο ακριβώς στην αιχμή της ρωγμής. Στην πραγματικότητα γύρω απ'την αιχμή της ρωγμής δημιουργείται μια πλαστική (κι όχι ελαστική) ζώνη (περισσότερα για την ζώνη αυτή αναφέρονται σ'επόμενη παράγραφο) εντός της περιοχής της οποίας οι προαναφερθείσες σχέσεις δεν περιγράφουν την εντατική κατάσταση και δεν θα ήταν δυνατό να συμβαίνει αυτό αφού όπως προαναφέρθηκε η εξαγωγή τους έχει βασιστεί στην παραδοχή τελείως γραμμικών, ελαστικών υλικών. Οι σχέσεις αυτές στην ουσία έχουν ισχύ έξω απ'την περιφέρεια της πλαστικοποιημένης ζώνης. Όμως αν το εύρος αυτής της ζώνης θεωρηθεί πολύ μικρό σε σχέση με την περιοχή που κυριαρχεί ο όρος $(r^{-1/2})$ [9] τότε με ικανοποιητική προσέγγιση μπορεί να δεχτούμε ότι οι προαναφερθείσες σχέσεις ισχύουν κι ότι η συμπεριφορά της ρωγμής καθορίζεται απ'τον ελαστικό συντελεστή έντασης των τάσεων (K). Έξω κι απ'την ελαστική αυτή περιοχή οι τάσεις είναι ίδιες μ'αυτές που θα υπήρχαν χωρίς την παρουσία της ρωγμής κι επηρεάζονται μόνο απ'τα γειτονικά σύνορα του στοιχείου. Σημειώνεται πάντως ότι τα όρια των παραπάνω περιοχών δεν είναι επακριβώς καθορισμένα και διαφέρουν σημαντικά από περίπτωση σε περίπτωση.

2.6. Πλαστική ζώνη

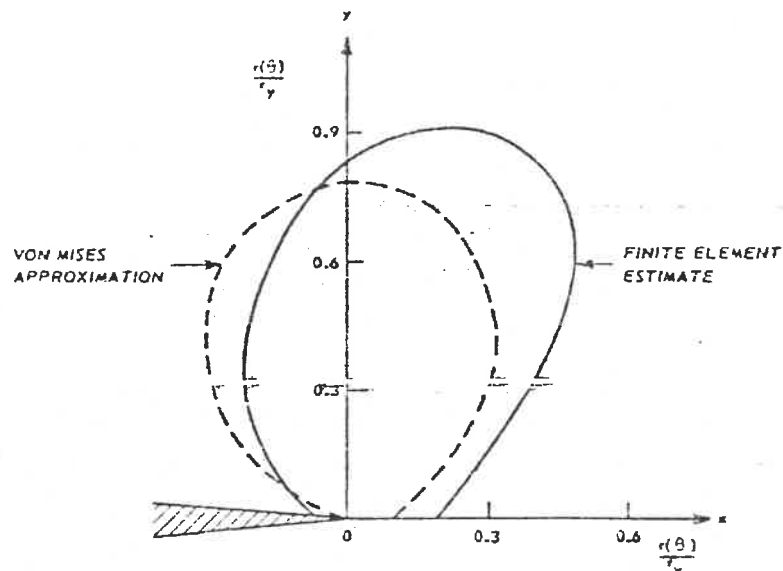
Οι τάσεις γενικά στις αιχμές των ασυνεχειών όπως ήδη έχει αναφερθεί υπερβαίνουν το όριο διαρροής του υλικού. Αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού είναι η πολύ κοντινή στην αιχμή περιοχή να πλαστικοποιείται και να δημιουργείται έτσι η πλαστικοποιημένη ζώνη. Η ένταση αυτής της ζώνης δεν έχει γίνει δυνατό να προσδιορισθεί επακριβώς μέσω κάποιων απλών μαθηματικών τύπων. Γενικά, επικρατεί η τάση να θεωρείται ως κυκλική αλλά πιο πολύπλοκες αριθμητικές μέθοδοι όπως αυτή των πεπερασμένων στοιχείων δείχνουν ότι αυτή έχει διαφορετική μορφή. Στα σχήματα (2.6.1, 2.6.2) [17], που ακολουθούν φαίνεται χαρακτηριστικά η μορφή της ζώνης αυτής κατά Irwin (σχ. 2.6.1), Von Mises, και μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (2.6.2).

Η ένταση αυτής της ζώνης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό απ' το είδος της εντατικής κατάστασης στην αιχμή της ρωγμής. Αν η κατάσταση που επικρατεί είναι επίπεδη εντατική το μέγεθος της πλαστικής ζώνης είναι μεγαλύτερο απ' το αντίστοιχο αν η κατάσταση ήταν επίπεδη παραμορφωσιακή.

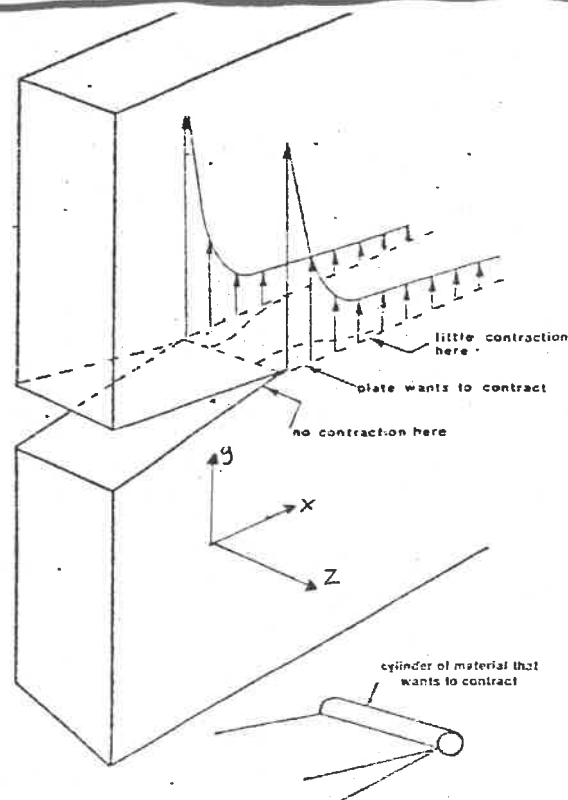
Για να γίνει αυτό καλύτερα κατανοητό ας θεωρήσουμε ένα δοκίμιο [18] της μορφής που φαίνεται στο σχ. (2.6.3) και το οποίο φορτίζεται εφελκυστικά με φορτίο P . Σημειώνεται ότι το δοκίμιο δεν θεωρείται ρηγματωμένο. Η εσοχή που φαίνεται είναι μια τεχνητή εγκοπή και παίζει τον ρόλο της ρωγμής χωρίς όμως να ταυτίζεται με την πραγματική έννοια αυτής δεδομένου ότι η ρωγμή που αναμένεται να



σχ. 2.6.1. Μορφή της πλαστικής ζώνης κατά Irwin



σχ. 2.6.2. Μορφή πλαστικής ζώνης κατά Von. Mises και μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.



σχ. 2.6.3. Θεωρητική παραμόρφωση της περιοχής μπροστά απ' την αιχμή της εγκοπής, δοκιμίου που υποβάλλεται σ'εφελκυστική καταπόνηση.

δημιουργηθεί στην συνέχεια με την αύξηση του εφελκυστικού φορτίου σε καμιά περίπτωση δεν έχει το μέγεθος και τις διαστάσεις της τεχνητής εγκοπής.

Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι σαν επίπεδη εντατική κατάσταση χαρακτηρίζεται εκείνη στην οποία μία απ' τις κύριες τάσεις είναι μηδενική. Αντίστοιχα ως επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση θεωρείται εκείνη όπου μια απ' τις κύριες παραμορφώσεις είναι μηδενική.

Σκοπός μας είναι χρησιμοποιώντας κάποιο κριτήριο διαρροής για αρωγμάτωτα υλικά να προσδιορισθεί η τάση σ_y που πρέπει ν' αναπτυχθεί στο άκρο της ρωγμής προκειμένου ν' αρχίσει η διαρροή δηλαδή η πλαστική παραμόρφωση της περιοχής γύρω απ' την αιχμή της εγκοπής.

Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό είναι αναγκαίο να καθορισθεί το είδος της εντατικής κατάστασης ακριβώς στην αιχμή της εγκοπής ώστε να υπολογίσουμε τις σχέσεις μεταξύ των αναπτυσσόμενων τάσεων, που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια στον προσδιορισμό της σ_y με χρήση του κριτηρίου διαρροής.

Επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί το κριτήριο διαρροής του Tresca ως πιο απλό ενώ στα ίδια περίπου αποτελέσματα θα καταλήξουμε αν χρησιμοποιήσουμε και το κριτήριο διαρροής του Von Mises.

Το κριτήριο του Tresca διατυπώνεται ως εξής:

"Η διαρροή σε όλκιμα υλικά κάτω από συνθήκες σύνθετης εντατικής κατάστασης συμβαίνει όταν η μέγιστη διατμητική

τάση $\tau_{\max}$ γίνει ίση με την μέγιστη διατμητική τάση που αναπτύσσεται την στιγμή της διαρροής όταν το υλικό καταπονείται σε καθαρό εφελκυσμό".

Προκειμένου να συμβαίνει αυτό αρκεί να ισχύει μία απ' τις παρακάτω σχέσεις:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = F\tau_y \quad \text{ή} \quad \sigma_1 - \sigma_2 = F\tau_y$$

εξαρτάται ποιά απ' τις σ_2, σ_3 είναι μικρότερη.

Όπου

$F\tau_y$: το όριο διαρροής του υλικού (Τάση διαρροής)

θεωρούμε ότι υπάρχει η αντιστοιχία:

$$\sigma_x \Rightarrow \sigma_2, \quad \sigma_y \Rightarrow \sigma_1, \quad \sigma_z \Rightarrow \sigma_3$$

Καθορισμός εντατικής κατάστασης

Κατ' αρχάς η ελεύθερη επιφάνεια της εγκοπής είναι ελεύθερη τάσεων συμπεριλαμβανομένης ακόμα και της επιφάνειας που συμπίπτει με την αιχμή της εγκοπής. Έτσι στην αιχμή θα ισχύει: $\sigma_x = 0$. Λίγο πιο μέσα όμως απ' την αιχμή είναι: $\sigma_x = 0$ και η εντατική κατάσταση (βλ. εισαγωγή: θεωρητικές γραμμές φορτίου) γίνεται διαξονική. Δηλαδή $\sigma_x, \sigma_y = 0$. Αν υποθέσουμε ότι το πάχος (B) του δοκιμίου είναι μικρό τότε η περιοχή κοντά στην αιχμή υπό την επίδραση της διαξονικής εντατικής κατάστασης συστέλλεται κατά την διεύθυνση του πάχους z. Έτσι θεωρούμε ότι η σ_z είναι πολύ μικρή ή ακόμα και μηδενική. Πράγματι, η σχέση που συνδέει τις $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ με την εγκάρσια παραμόρφωση ϵ_z είναι βάση της γραμμικής θεωρίας της ελαστικότητας.

$$\epsilon_z = 1/E [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (1)$$

Απ' αυτή για $\sigma_z = 0$ προκύπτει

$$\varepsilon_z = \nu/E (\sigma_x + \sigma_y)$$

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ακριβώς αυτή την συστολή του υλικού κατά την διεύθυνση του πλάτους του δοκιμίου κοντά στην περιοχή της αιχμής της εγκοπής.

Δεδομένου ότι $\sigma_z = 0$ η κατάσταση χαρακτηρίζεται ως επίπεδη εντατική. Απ' το κριτήριο του Tresca για $\sigma_z = 0$ έχουμε:

$$\sigma_1 - 0 = Fty \Rightarrow \sigma_y = Fty \quad (2)$$

Δηλαδή στην επίπεδη εντατική κατάσταση η διαρροή αρχίζει όταν η κατακόρυφη τάση σ_y γίνει ίση με την τάση διαρροής του υλικού.

Αν θεωρήσουμε τώρα ότι το πάχος B είναι πάρα πολύ μεγάλο αυτή η συστολή του υλικού κατά την διεύθυνση Z δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί. Αυτό εξηγείται ως εξής: Κατά την συστολή, συστέλλεται μόνο το τμήμα του υλικού που βρίσκεται κοντά στην αιχμή της εγκοπής, ενώ το υλικό που περιβάλλει αυτό το τμήμα δεν ακολουθεί αυτή την παραμόρφωση μ' αποτέλεσμα ν' ασκεί εφελκυστικές τάσεις στο συστελλόμενο υλικό κατά την διεύθυνση Z. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του δοκιμίου τόσο μεγαλύτερες είναι οι διαθέσιμες αυτές εφελκυστικές τάσεις. Στην ουσία είναι οι τάσεις σ_z . Έτσι για ένα μεγάλο B οι τάσεις αυτές δεν επιτρέπουν την συστολή του υλικού μ' αποτέλεσμα να ισχύει $\varepsilon_z = 0$. Πρόκειται δηλαδή, για περίπτωση επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης.

Με βάση την (1) θα έχουμε

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$$

Αν θεωρήσουμε $\sigma_x = \sigma_y$ και $\nu = 0,33$ τότε θα έχουμε:

$$\sigma_z = 0,66 \sigma_y$$

Οπότε απ' το κριτήριο του Tresca προκύπτει

$$\sigma_y - 0,66 \sigma_y = Fty \Rightarrow \sigma_y = 3 Fty \quad (3)$$

Δηλαδή στην επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση η κατακόρυφη τάση χρειάζεται να γίνει ίση με το τριπλάσιο του ορίου διαρροής προκειμένου ν' αρχίσει η διαρροή του υλικού. Στην περίπτωση αυτή επικρατεί περί το άκρο της εγκοπής τριαξονική εντατική κατάσταση.

Μετά τα παραπάνω κάνοντας χρήση της σχέσης

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{\lambda \pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4)$$

για $\theta = 0$ και $\sigma_y = Fty$, $\sigma_y = 3Fty$ μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε το εύρος της πλαστικοποιημένης ζώνης V_{Pl} .

Από (2), (4) και $\theta = 0$ έχουμε

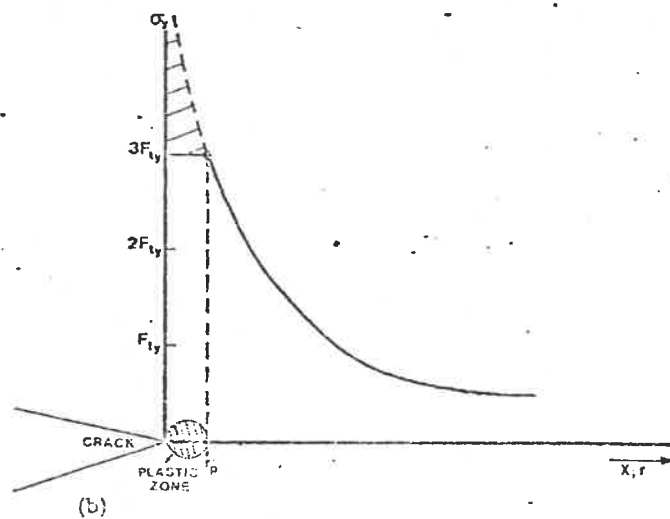
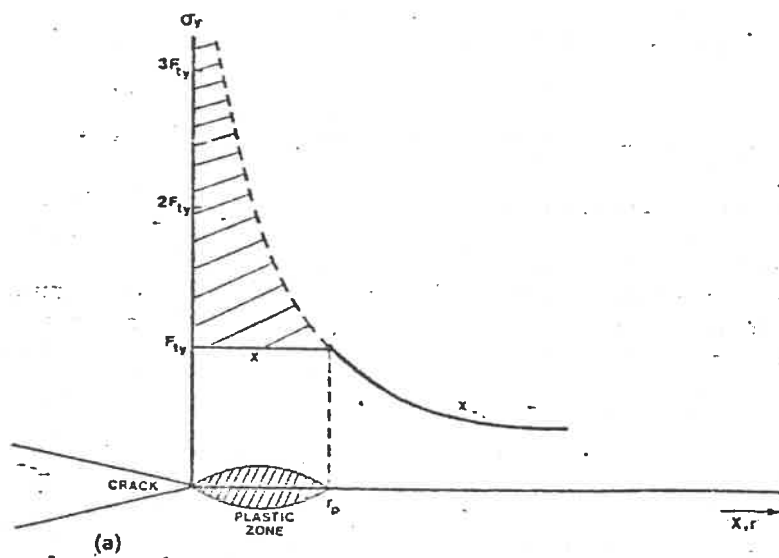
$$V_{Pl} = K_I^2 / 2\pi Fty^2 \quad (5) \quad (\text{Επίπεδη Εντατική})$$

Από (3), (4) και $\theta = 0$ έχουμε

$$V_{Pl} = K_I^2 / 18\pi Fty^2 \quad (6) \quad (\text{Επίπεδη Παραμορφωσιακή})$$

Είναι προφανές ότι το εύρος της πλαστικοποιημένης ζώνης είναι μεγαλύτερο στην επίπεδη εντατική απ' ό,τι στην επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η κατανομή των τάσεων για το παραπάνω παράδειγμα και το εύρος της πλαστικής ζώνης για επίπεδη εντατική κατάσταση σχ.(2.6.4) κι επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση [18]



σχ. 2.6.4. Κατανομή των εφαπτομένων τάσεων μετά το τέλος της πλαστικής ζώνης και εύρος αυτής για επίπεδη εντατική κατάσταση (σχ. α) και επίπεδη παραμορφωσιακή (σχ.β).

2.7. Αξιοπιστία του κριτηρίου θραύσης σε συνάρτηση με το μέγεθος της πλαστικής ζώνης.

Όπως έχει προαναφερθεί σαν χαρακτηριστική και ισχυρή παράμετρος που περιγράφει την διάδοση της ρωγμής και την τελική θραύση της στα γραμμικά, ελαστικά, ομογενή και ισότροπα υλικά έχει υιοθετηθεί ο συντελεστής έντασης των τάσεων K ο οποίος την στιγμή της θραύσης παίρνει μια κρίσιμη τιμή K_c . Είναι προφανές απ' τις σχέσεις (5), (6) ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής K τόσο μεγαλύτερο είναι και το εύρος της πλαστικής ζώνης. Υπενθυμίζεται ότι ο K είναι ελαστικός συντελεστής με την έννοια ότι έχει ισχύ απ' την περιφέρεια της πλαστικής ζώνης κι έξω. Επομένως, αν ο συντελεστής αυτός πάρει μεγάλες τιμές τότε η ισχύς του μεταφέρεται αναλόγως μακριά απ' την κορυφή της ρωγμής (αφού το εύρος της πλαστικής ζώνης διευρύνεται). Κάτι τέτοιο όμως καθιστά την ισχύ χρησιμοποίησής του μηδενική αφού πλέον περιγράφει την κατάσταση όχι πλησίον της αιχμής της ρωγμής που είναι αυτό που μας ενδιαφέρει αλλά πολύ μακριά απ' αυτήν.

Εδώ σημειώνεται ότι το εύρος της πλαστικής ζώνης εξαρτάται εκτός απ' τον συντελεστή K , και απ' την τάση διαρροής του υλικού, σχέσεις (5), (6). Δηλαδή μπορεί ακόμα και για μικρό K το V_{pl} να είναι μεγάλο αν το F_{ty} είναι πολύ μικρό.

Έτσι, το κριτήριο θραύσης με την εισαγωγή του συντε-

λεστή K_{σ} , δεν είναι κατάλληλο να περιγράψει τις συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιείται η θραύση του στοιχείου, στην περίπτωση που το εύρος της πλαστικής ζώνης είναι μεγάλο.

Παράλληλα, και οι τάσεις που αναπτύσσονται στην κορυφή της ρωγμής παύουν πλέον να περιγράφονται απ' τις σχέσεις (α) , (β) , (γ) . Αυτό είναι προφανές αφού για μεγάλο x οι τάσεις μηδενίζονται. Στην πραγματικότητα όμως η τάση μακριά απ' την περιοχή της αιχμής της ρωγμής δεν είναι μηδενική αλλά ίση με την τάση που εφαρμόζεται εξωτερικά. Αυτό σημαίνει ότι τώρα πλέον οι επιπλέον όροι των σχέσεων α , β , γ δεν μπορεί ν' αγνοηθούν. Με την εισαγωγή των επιπλέον αυτών όρων μια πλήρης ανάπτυξη της σχέσης (α) για παράδειγμα σε καρτεσιανές συντεταγμένες έχει ως εξής [18]:

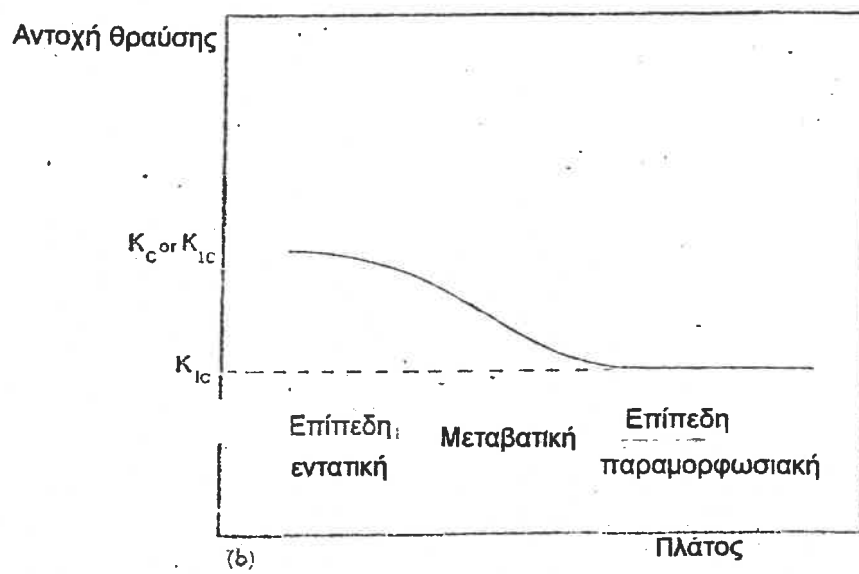
$$\sigma_y = (K_I / \sqrt{2\pi x}) + G \cdot X^0 + D \cdot X^{1/2} + E \cdot X^1 + F \cdot X^{3/2} + \dots$$

Μ' αυτήν πλέον την μορφή οι σχέσεις (α) , (β) , (γ) είναι αληθείς.

2.7.1. Επιρροή της εντατικής κατάστασης πάνω στην αντοχή του υλικού

Δύο δοκίμια απ' το ίδιο υλικό που και τα δύο έχουν ρωγμές θεωρούμε ότι φορτίζονται έτσι ώστε να έχουν τον ίδιο συντελεστή έντασης των τάσεων K . Το ένα έχει μικρό πάχος ώστε η εντατική κατάσταση στο άκρο της ρωγμής να είναι επίπεδη εντατική ενώ το άλλο έχει μεγάλο πάχος ώστε η κατάσταση στην περιοχή αυτή να είναι επίπεδη παραμορφωσιακή. Αν θεωρήσουμε ότι για μια δεδομένη τάση φόρτισης (σ) ο συντελεστής K για το δοκίμιο που βρίσκεται στην επίπεδη παραμορφωσιακή παίρνει την κρίσιμη τιμή του K_{IC} τότε για την ίδια τάση (σ) ο συντελεστής K για το δοκίμιο που βρίσκεται σ' επίπεδη εντατική βρίσκεται αρκετά πιο κάτω απ' την κρίσιμη τιμή του K_{IC} . Αυτό σημαίνει ότι προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η τιμή έχουμε την δυνατότητα ν' αυξήσουμε ακόμα παραπάνω την εξωτερική τάση. Έτσι το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η αντοχή του δοκιμίου σ' επίπεδη εντατική είναι σαφώς μεγαλύτερη απ' την αντοχή του σ' επίπεδη παραμορφωσιακή.

Το παραπάνω συμπέρασμα σχηματικά απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα, σχ. (2.7.1) [18].



σχ. 2.7.1 Επίρροή της εντατικής κατάστασης στην αντοχή θραύσης.

2.8. Κριτήριο Ενέργειας [19]

Δεδομένου ότι ο μηχανισμός διάδοσης των ρωγμών σχετίζεται μ' ενεργά φυσικά μεγέθη όπως δυνάμεις και τάσεις που προκαλούν αντίστοιχες παραμορφώσεις, είναι προφανές ότι η ύπαρξη αυτών των μεγεθών συνιστά τις προϋποθέσεις για παραγωγή έργου.

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας λέει ότι το έργο το οποίο παράγεται κατά μια φυσική διαδικασία δεν είναι δυνατό να χαθεί αλλά μετατρέπεται σ' άλλες μορφές ενέργειας.

Έτσι, αν σ' ένα σώμα εφαρμόσουμε μια εφελκυστική δύναμη P και το σημείο εφαρμογής της μετακινηθεί κατά $d\delta$ τότε έχει καταναλωθεί (ή προσφερθεί στο σώμα) έργο ίσο με

$$dF = P \cdot d\delta$$

Αν η μετακίνηση του σημείου εφαρμογής της P είναι δ τότε το έργο που προσφέρεται στο σώμα είναι:

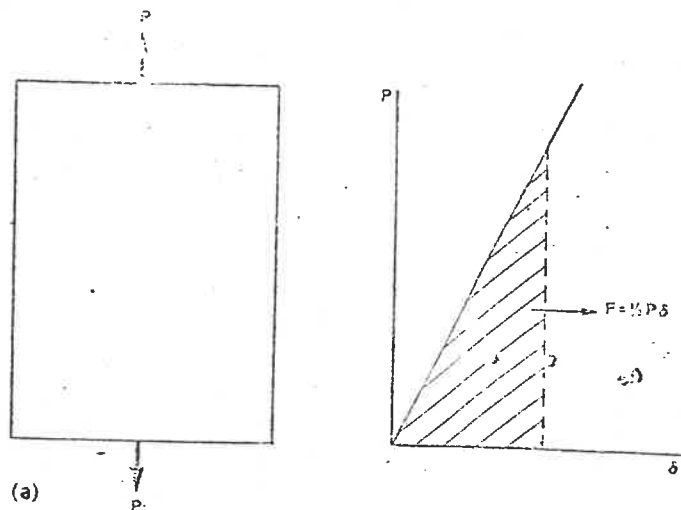
$$F = \int P \cdot d\delta$$

Η προσφορά του έργου αυτού στο σώμα έχει την έννοια ότι αποθηκεύεται σ' αυτό με την μορφή παραμορφωσιακής ενέργειας U που είναι μια μορφή δυναμικής ενέργειας.

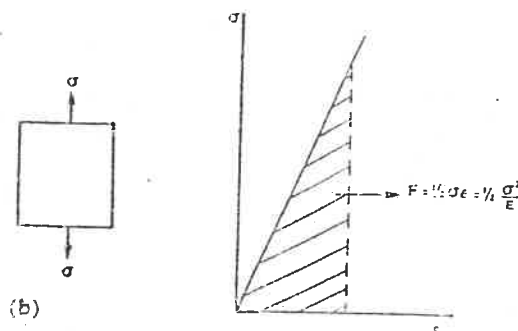
Επομένως θα πρέπει να ισχύει:

$$F - U = 0$$

Αν υποθέσουμε ότι το υλικό είναι τελείως ελαστικό και θεωρήσουμε την απλή περίπτωση όπου το σώμα υποβάλλεται σε μοναξονικό εφελκυσμό τότε το διάγραμμα δύναμης - μετατό-



σχ.2.8.1. Διάγραμμα φορτίου - παραμόρφωσης για δοκίμιο που υποβάλλεται σε μοναξονικό εφελκυσμό.



σχ. 2.8.2. Διάγραμμα τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης για δοκίμιο που υποβάλλεται σε μοναξονικό εφελκυσμό.

πισης σημείου εφαρμογής όσο και τ'αντίστοιχο τάσεων - παραμορφώσεων θα είναι αυτά που φαίνονται στα σχ. (2.8.1, 2.8.2).

Επομένως το έργο που καταναλώθηκε είναι

$$F = (1/2) P\delta = U \quad (1)$$

Αν θεωρήσω ότι η διατομή του δοκιμίου έχει εμβαδόν $A = W \cdot B$ και το μήκος του είναι L τότε αντικαθιστώντας στην (1)

$$P = \sigma \cdot L \cdot A \quad \text{και} \quad \delta = \epsilon \cdot L = (\sigma/E) L$$

έχουμε

$$F = U = (\sigma^2/2E) L \cdot A = (\sigma^2/2E) L \cdot W \cdot B \quad (2)$$

Η (2) αντιπροσωπεύει την ενέργεια που αποθηκεύτηκε σ'όλο το δοκίμιο υπό μορφή παραμορφωσιακής (δυναμικής) ενέργειας.

Στην περίπτωση που θεωρήσω μια στοιχειώδη κυβική επιφάνεια τότε γι'αυτήν θα ισχύει:

$$F = U = \sigma^2/2E$$

που είναι η ενέργεια που αποθηκεύτηκε μόνο σ'αυτήν.

Η ολική παραμορφωσιακή ενέργεια μπορεί να βρεθεί κι ως εξής.

Αν θεωρήσω μια μοναδιαία κυβική επιφάνεια (κύβο ακμής π.χ. 1 mm) το έργο που προσφέρεται απ'την τάση σ προκειμένου να πραγματοποιηθεί παραμόρφωση ϵ με βήμα $d\epsilon$ είναι όπως δείχτηκε παραπάνω:

$$F = U = (1/2) \sigma^2 \cdot E$$

Γενικά η τάση που αναπτύσσεται σε κάθε στοιχειώδες

κυβικό στοιχείο δεν είναι η ίδια. Έτσι για να πάρουμε την ολική παραμορφωσιακή ενέργεια ενός στοιχείου θα πρέπει να υπολογίσουμε το ολοκλήρωμα

$$U = \iiint (\sigma^2/2E) \, d_x \, d_y \, d_z$$

όπου η τάση σ εξαρτάται απ' τα x, y, z . Όταν όμως έχουμε ένα υλικό τελείως ελαστικό, ισότροπο κι ομογενές που καταπονείται σε μοναξονικό εφελκυσμό όπως στην περίπτωση μας τότε έπεται ότι η μοναδιαία ποσότητα $(\sigma^2/2E)$ θα είναι κοινή για όλα τα στοιχειώδη κυβικά στοιχεία που αποτελούν το σώμα κι επομένως η ολική παραμορφωσιακή ενεργειά του θα είναι ίση με:

$$\begin{aligned} U &= (\sigma^2/2E) \iiint d_x \, d_y \, d_z \Rightarrow \\ \Rightarrow U &= (\sigma^2/2E) \, L \cdot B \cdot W \end{aligned}$$

Τα παραπάνω ισχύουν όταν το σώμα είναι αρωγμάτωτο. Στην περίπτωση που έχει για παράδειγμα μια κεντρική ρωγμή μήκους $2a$ τότε είναι δυνατόν να συμβαίνουν τα εξής:

- α) Η αρχική ρωγμή να μην διαδίδεται με την αύξηση της φόρτισης οπότε ισχύουν τα παραπάνω.
- β) Η ρωγμή ν' αυξάνεται έστω κατά ένα στοιχειώδες μήκος da . Τότε είναι προφανές, δεδομένης της αρχής διατήρησης της ενέργειας, ότι στην εξίσωση ισορροπίας των ενεργειών πρέπει να υπεισέρχεται κι ένας τρίτος παράγων W ο οποίος εκφράζει την ενέργεια που απαιτείται προκειμένου να διαδοθεί η ρωγμή κατά da . Επιπλέον η ενέργεια αυτή εκφράζει και την αντίσταση (σε όρους ενέργειας) του υλικού προκειμένου η ρωγμή να επεκταθεί κατά da . Αυτό εξηγείται ως εξής: Από την προσφερόμενη

εξωτερική ενέργεια ένα μέρος διατίθεται για την αύξηση της ελαστικής παραμορφωσιακής ενέργειας και το υπόλοιπο διατίθεται για την διάδοση της ρωγμής. Αν όμως το διατιθέμενο ποσό ενέργειας είναι μικρότερο από εκείνο που πραγματικά απαιτείται για την στοιχειώδη αύξηση του μήκους της ρωγμής η διάδοση της ρωγμής όσο συμβαίνει αυτό δεν πρόκειται ποτέ να λάβει χώρα. Έτσι, αν θεωρήσουμε ως (W) την ενέργεια που είναι απαραίτητη για την διάδοση της ρωγμής τότε ως κριτήριο έναρξης της διάδοσης τίθεται η συνθήκη.

$$(d/da)(F-U) > (dW/da)$$

Όπως θα δούμε παρακάτω η αντίσταση (ακαμψία) του υλικού όσο αυξάνει το μήκος της ρωγμής δεν είναι σταθερή αλλά μειώνεται. Αυτό έχει ως συνέπεια την μείωση της εναπομένουσας αντοχής του και την τελική θραύση του υλικού κάτω από πολύ χαμηλά φορτία λειτουργίας. Το πως συμβαίνει αυτό αναλύεται παρακάτω.

2.9. Μείωση της αντοχής των υλικών με την πρόοδο των φορτίσεων

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο σχετικά με τον συντελεστή έντασης των τάσεων ο συντελεστής αυτός δίδεται συναρτήσει του μήκους της ρωγμής (a), της εφαρμοζόμενης τάσης ή φορτίου και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου. Στην περίπτωση του δοκιμίου με κεντρική ρωγμή ($2a$) που φορτίζεται σε καθαρό εφελκυσμό ο συντελεστής αυτός δίδεται απ' τη σχέση:

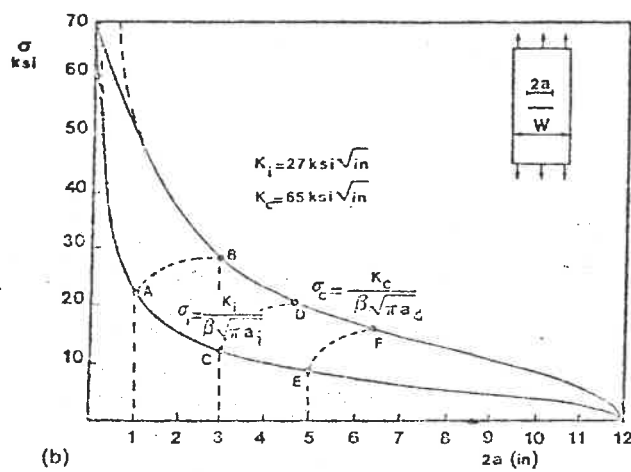
$$K_I = C^* \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \quad (1)$$

* Το C πολλές φορές στην βιβλιογραφία συναντιέται και ως β .

Οπότε η (1) μπορεί να γραφτεί

$$\sigma = (K_I / B \sqrt{\pi \cdot a}) \quad (2)$$

Για ένα δεδομένο (a) η έναρξη διάδοσης της ρωγμής πραγματοποιείται όταν το (σ) πάρει μια κατάλληλη τιμή, σχ. (2.9.1). Έστω ότι είναι $2a = 1 \text{ inch}$. Τότε όταν η τάση γίνει ίση μ' αυτήν που αντιστοιχεί στο σημείο Α ξεκινά να διαδίδεται η ρωγμή και το μήκος της αυξάνει κατά da . Αν συνεχίσουμε να διατηρούμε την τάση σ_A τότε περαιτέρω αύξηση πέρα του da δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί. Αυτό οφείλεται στο ότι το υλικό υπό την εφαρμογή συνεχούς αυξανόμενης τάσης παρουσιάζει αύξηση της αντοχής του μ' αποτέλεσμα ν' απαιτείται όλο και μεγαλύτερη ενέργεια προκειμένου να θραυσθεί, όταν πλέον το (K) θα έχει πάρει



σχ. 2.9.1. Μεταβολή της τάσης που απαιτείται να εφαρμοστεί προκειμένου να ξεκινήσει η διάδοση της ρωγμής καθώς και της τάσης θραύσης συναρτήσει του μήκους της ρωγμής ($2a$).

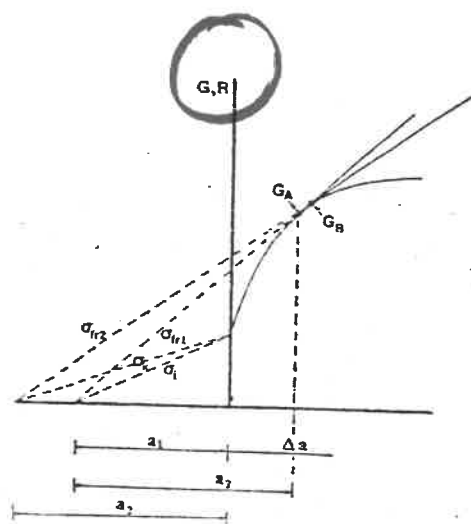
την κρίσιμη τιμή του (K_c) την στιγμή που το (σ) θα έχει πάρει αντίστοιχα την κρίσιμη τιμή του (σ_c).

Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η ενέργεια ακαμψίας του υλικού σε σχέση με την αύξηση της εξωτερικά παρεχόμενης ενέργειας για θραύση (δηλαδή με την αύξηση της τάσης σ) φαίνεται ενδεικτικά στο σχ. (2.9.2).

Με (G) συμβολίζεται η διατιθέμενη για θραύση ενέργεια.

Με (R) συμβολίζεται η ενέργεια αντίστασης του υλικού.
Όταν η τάση είναι μικρότερη απ' την (σ_1) (πρώτη διακεκομμένη γραμμή) η διατιθέμενη ενέργεια είναι μικρότερη απ' αυτήν που απαιτείται για έναρξη της θραύσης. (Βλ. κριτήριο ενέργειας στην προηγούμενη παράγραφο). Έτσι όσο διατηρείται η τάση κάτω απ' την (σ_1) δεν πρόκειται να ξεκινήσει η διάδοση της ρωγμής. Αν η τάση γίνει (σ_1) τότε για πρώτη φορά η διατιθέμενη ενέργεια (G_1) γίνεται ίση μ' αυτήν που απαιτείται (R_1). Η τελευταία εκφράζει την αντίσταση του υλικού την στιγμή που το μήκος της ρωγμής είναι a_1 .

Αν η ρωγή προχωρήσει κατά da τότε η διατιθέμενη ενέργεια αυξάνεται από (G_1) σε (G_2). Αυτό συμβαίνει γιατί στιγμιαία την στιγμή της εκκίνησης της ρωγμής η ακαμψία του υλικού πέφτει πάρα πολύ μ' αποτέλεσμα κάτω απ' την επενέργεια της ίδιας τάσης σ η ολική διαθέσιμη ενέργεια που προσφέρεται μέσω του εξωτερικού έργου να είναι μεγαλύτερη. Αυτό φαίνεται αναλυτικότερα σ' επόμενη παράγραφο



σχ. 2.9.2 Μεταβολή της ενέργειας αντίστασης του υλικού (R) σε σχέση με την εξωτερικά παρεχόμενη ενέργεια για θραύση (G).



όπου αναλύεται η φόρτιση υπό σταθερό φορτίο.

Έτσι θα περίμενε κανείς ότι τώρα η θραύση θα συνεχιστεί απρόσκοπτα αφού η αρχική αντίσταση του υλικού έχει ξεπεραστεί. Όμως η ενέργεια αντίστασης (R) του υλικού μετά την στιγμιαία αρχική πτώση στην αρχή της διάδοσης αρχίζει πάλι ν'αυξάνεται και μάλιστα με ταχύτερο ρυθμό απ'ότι το G μ'αποτέλεσμα κάποια στιγμή, όταν θα έχει ολοκληρωθεί η επέκταση κατά (da) η ενέργεια αντίστασης να έχει ξεπεράσει την αντίστοιχη προσφερόμενη. Έτσι ενώ η προσφερόμενη ενέργεια είναι (G_1) η ενέργεια αντίστασης του υλικού γίνεται $R_2 > G_1$ έτσι ώστε ν'απαιτείται μια εκ νέου αύξηση της τάσης σε σ_2 , δηλ. της προσφερόμενης ενέργειας σε G_2 ώστε να ισχύει πάλι $G_2 = R_2$ και η ρωγμή να προχωρήσει κατά ένα νέο (da). Έχουμε δηλαδή μια σταθερή, όπως λέμε, διάδοση της ρωγμής. Η αύξηση της ενέργειας (G) συνεχίζεται μέχρι το σημείο που το (R) δεν μπορεί πλέον ν'αυξηθεί οπότε και η διάδοση της ρωγμής με την διατιθέμενη ενέργεια να ξεπερνά την μέγιστη ενέργεια αντίστασης του υλικού, συνεχίζεται απρόσκοπτα και μάλιστα με ταχείς ρυθμούς. Απ'το σημείο στο οποίο ισχύει $G = \max R$ και μετά θεωρούμε ότι η διάδοση της ρωγμής είναι ασταθής. Στο σημείο αυτό στο οποίο επέρχεται η αστάθεια της διάδοσης ισχύει:

$$G = R \quad (3)$$

$$\text{και} \quad (dG/da) = (dR/da) \quad (4)$$

Γενικά ισχύουν τα παρακάτω:

Η (3) ισχύει για την περίοδο πριν την αστάθεια, η (4) εδώ προφανώς δεν ισχύει.

Την στιγμή της αστάθειας ισχύουν οι (3), (4) ταυτόχρονα. Για την περίοδο μετά την αστάθεια ισχύει $G > R$ και $(dG/da) > (dR/da)$

Απ' την στιγμή και μετά που η διάδοση καθίσταται ασταθής η θραύση επέρχεται πολύ γρήγορα. Έτσι στην πράξη θεωρούμε το σημείο αστάθειας σαν το κρίσιμο σημείο για το οποίο τα μεγέθη (G) ή (K) παίρνουν την κρίσιμη τιμή τους (G_c) ή (K_c) και θεωρούμε ότι πρακτικά η θραύση συμβαίνει στο σημείο αυτό.

Ο συντελεστής αυτός είναι μια παράμετρος σταθερή και χαρακτηριστική για κάθε υλικό. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο παράδειγμα που ακολουθεί.

Ας θεωρήσουμε δύο δοκίμια (1) και (2) τα οποία υποβάλλονται σε μοναξονικό εφελκυσμό, περιέχουν και τα δύο κεντρική ρωγμή μήκους ($2a = 2 \text{ cm}$) και έχουν πλάτος ($W_1 = 10 \text{ cm}$ και $W_2 = 15 \text{ cm} > W_1$).

Τότε ο συντελεστής β (ή C) θα είναι για τα δύο δοκίμια:

$$\beta_1 = 1,02628 \text{ (σχήμα 2.4.2)}$$

$$\text{και } \beta_2 = 1,01556$$

Αν υποθέσουμε ότι το δοκίμιο (1) θραύεται σε τάση $\sigma_{1c} = 4.000 \text{ KN/m}^2$, ο συντελεστής έντασης των τάσεων (K_{IC1}) θα είναι:

$$(K_{IC1}) = \beta_1 \cdot \sigma_1 \cdot \sqrt{\pi \cdot a} = 727,61 \text{ KNm}^{-3/2}$$

Το δεύτερο δοκίμιο αναμένεται λόγω του μεγαλύτερου

πλάτους του να έχει μεγαλύτερη ακαμψία κι επομένως να θραυστεί σε μεγαλύτερη τάση (σ_2).

Ανάλογα για το (2) θα έχουμε:

$$(K_{IC2}) = \beta_2 \cdot \sigma_2 \sqrt{\pi \cdot a}$$

Δεδομένου ότι τα (K_{IC}) πρέπει να είναι τα ίδια (αφού πρόκειται για το ίδιο υλικό) θα ισχύει:

$$\beta_1 \cdot \sigma_1 = \beta_2 \cdot \sigma_2 \Rightarrow$$

$$\sigma_2 = (\beta_1 / \beta_2) \sigma_1 = 4042,22 \text{ KN/m}^2$$

Δηλαδή πράγματι είναι

$$\sigma_2 > \sigma_1$$

Το παραπάνω απλό παράδειγμα περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο οι παράμετροι (β) και (σ) μεταβάλλονται έτσι ώστε το γινόμενο ($\beta \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a}$) να είναι πάντα σταθερό, ανεξαρτήτως του (W).

Το ίδιο συμβαίνει αν κρατήσουμε τις διαστάσεις σταθερές κι αλλάξουμε το μήκος της ρωγμής ή ακόμα, στην πιο σύνθετη περίπτωση, χρησιμοποιήσουμε δοκίμια με διαφορετικές διαστάσεις και μήκη ρωγμής.

Το γεγονός ότι το (K_{IC}) είναι μια χαρακτηριστική και σταθερή παράμετρος αντοχής για κάθε υλικό το καθιστά ένα σημαντικό όπλο στην προσπάθεια για μελέτη της αντοχής των ψαθυρών ρωγματωμένων υλικών δεδομένου ότι η τιμή του είναι ανεξάρτητη των γεωμετρικών διαστάσεων του φορτιζόμενου δοκιμίου και του μήκους της ρωγμής.

Είναι προφανές ότι κάτι τέτοιο δεν μπορεί να ισχύει υιοθετώντας την τάση (σ) ως παράμετρο αντοχής των υλικών δεδομένου ότι, για το ίδιο υλικό, η τιμή της εξαρτάται

απ' την ακαμψία του δοκιμίου που με την σειρά της εξαρτάται απ' το μήκος της ρωγμής και απ' τις διαστάσεις του. Επομένως, όσο η ακαμψία μεταβάλλεται θα μεταβάλλεται και η τάση θραύσης.

Έτσι η (σ_c) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο σύγκρισης της αντοχής διαφορετικών υλικών.

Όλα τα παραπάνω ισχύουν για την περίπτωση συνεχούς επιβαλλόμενης φόρτισης σ' ένα υλικό.

Επανερχόμενοι στο σχ. (2.9.1) το δοκίμιο θα θραυσθεί αν επιβληθεί τάση ίση με $\sigma_B = \sigma_c$. Τότε η αρχική ρωγμή θα διαδοθεί κατά $\Delta a = 2 \text{ inch}$ δηλαδή το μήκος ρωγμής θα γίνει $a = 3 \text{ inch}$ κι ο συντελεστής (K) θα γίνει ίσος με (K_c).

Στην περίπτωση της φόρτισης των οδοστρωμάτων μια τέτοια μονοτονική φόρτιση από (σ_A) σε (σ_B) θ'αντιστοιχούσε με την διέλευση ενός αξονικού φορτίου πάνω από μια συγκεκριμένη διατομή. Θα είχε επομένως ενδιαφέρον να εξεταστεί στην περίπτωση που το μέγιστο αναμενόμενο φορτίο ανέπτυξε τέτοιες τάσεις ώστε το όριο σ_c , για μια δεδομένη ρωγμή μικρού μήκους ($2a$), θα μπορούσε να επιτευχθεί και να προκαλέσει θραύση του τμήματος της διατομής που θα έφερε το φορτίο. Όμως στην πράξη στις πρώτες φάσεις διάδοσης της ρωγμής όσο και μεγάλα φορτία ν'ασκηθούν τέτοια περίπτωση θραύσης δεν μπορεί να υπάρξει κι άρα η αναπτυσσόμενη τάση κατά την διάρκεια μιας και μόνο μονοτονικής φόρτισης στην περιοχή που καταπονείται είναι ελάσσωνος σημασίας.

Αυτό που πραγματικά ενδιαφέρει είναι ο τρόπος που μεταβάλλεται η απομένουσα αντοχή της περιοχής της ρωγμής

με τις επαναλήψεις φορτίσεων κάτι που αναλύεται ακολούθως.

Αν θεωρήσουμε μια άλλη κεντρική ρωγμή μήκους $2a = 3 \text{ inch}$, όπως παρατηρούμε απ' το σχήμα το δοκίμιο θ' αστοχήσει υπό τάση $\sigma_a = \sigma_D < \sigma_B$. Δηλαδή για μεγαλύτερο αρχικό μήκος ρωγμής αστοχεί υπό την επενέργεια μικρότερης τάσης απ' αυτήν που αστόχησε στο αρχικό παράδειγμα όταν το αρχικό μήκος της ρωγμής ήταν $2a = 1 \text{ inch} < 3 \text{ inch}$. Επιπλέον η έναρξη της διάδοσης της ρωγμής πραγματοποιείται υπό μικρότερη τώρα τάση.

Το παραπάνω γεγονός μεταφράζεται σε μείωση της αντοχής του δοκιμίου με την αύξηση του μήκους της ρωγμής.

Κάτω απ' το πρίσμα των επαναληπτικών φορτίσεων η διαδικασία μείωσης της αντοχής έχει ως εξής:

Ας θεωρήσουμε πάλι την αρχική περίπτωση όπου $2a = 1 \text{ inch}$. Τότε η αντοχή είναι:

$$\sigma_{res,0} = \frac{K_{c,B}}{\beta_0 \sqrt{\pi \cdot a_0}}$$

Αν φορτίσουμε με μέγιστη τάση σ ($\sigma_A < \sigma < \sigma_B$) και αποφορτίσουμε τότε η ρωγμή θα διαδοθεί κατά da , έστω $da = 1 \text{ inch}$.

Αν επαναφορτίσουμε, η θραύση τότε θα λάβει χώρα σε τάση $\sigma_2 < \sigma_B$ ή ακόμα και σε τάση $\sigma_2 < \sigma_A$ ενώ η έναρξη της διάδοσης θα πραγματοποιηθεί σε τάση $\sigma_1 \ll \sigma_A$. Υπό το μήκος $a = 2 \text{ inch}$ πριν την 2η επανάληψη φόρτισης η αντοχή είναι

$$\sigma_{res,1} = K_{c,2} / \beta_1 \sqrt{\pi \cdot a_1} \quad (2a = 2 \text{ inch})$$

Προφανώς είναι $K_{\sigma,2} < K_{\sigma,B}$ αφού $\sigma_2 < \sigma_B$ επομένως και

$$\sigma_{res,1} = \sigma_{res,0}$$

Με την πρόοδο των επαναλήψεων φόρτισης δεδομένου της μείωσης του K_{σ} με κάθε επανάληψη, και της αύξησης του α έπεται ότι η απομένουσα αντοχή κάποια στιγμή θα πάρει τέτοια τιμή ώστε κάτω απ' την επιβολή μιας απλής τάσης λειτουργίας να ξεπεραστεί πολύ εύκολα και να προκληθεί έτσι η θραύση του στοιχείου.

2.10. Ενεργειακό Κριτήριο Griffith [20]

Αν θεωρήσουμε πλάκα απείρου μήκους (W) που έχει μια κεντρική ρωγμή μήκους ($2a$) και υποβάλλεται σε μοναξονική εφελκυστική τάση (σ), σχ. (2.10.1) τότε η ολική ενέργεια της ρηγματωμένης πλάκας μπορεί να γραφεί ως

$$U = U_0 + U_\alpha + U_\gamma - F$$

όπου

U_0 : Η ελαστική ενέργεια της φορτιζόμενης πλάκας όταν αυτή δεν περιέχει την κεντρική ρωγμή.

U_α : Η μεταβολή της ελαστικής ενέργειας η οποία προκαλείται απ' την εισαγωγή της ρωγμής στην πλάκα.

U_γ : Η μεταβολή της επιφανειακής ελαστικής ενέργειας η οποία προκαλείται απ' τον σχηματισμό των παρειών της ρωγμής.

F : Το έργο που παράγεται από εξωτερικές δυνάμεις. Αυτό αφαιρείται απ' την συνολική ενέργεια γιατί δεν αποτελεί μέρος της εσωτερικής (δυναμικής) ενέργειας της πλάκας.

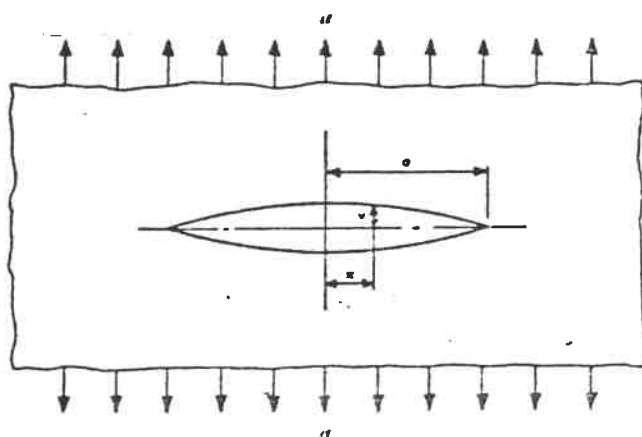
Η ελαστική ενέργεια που απαιτείται για ν' ανοίξει η ρωγμή είναι:

$$U_\alpha = (P \cdot 2V) / 2 = P \cdot V$$

όπου

P : Η δύναμη που απαιτείται για ολική επιμήκυνση ίση με $2V$.

Ο Inglis αναλύοντας το τασικό πεδίο στην κορυφή της



σχ. 2.10.1 Πλάκα με κεντρική ρωγμή μήκους $(2a)$ που υποβάλλεται σε μοναξονικό εφελκυσμό υπό τάση (σ) .

ρωγμής βρήκε ότι η μετατόπιση V δίδεται απ' τη σχέση:

$$V = (2\sigma/E)\sqrt{a^2 - x^2} \quad (\text{Επίπεδη εντατική})$$

Έτσι ολοκληρώνοντας την τελευταία ως προς το ολικό μήκος της ρωγμής έχουμε:

$$U_a = \int_0^a \frac{2G}{E} \sqrt{a^2 - x^2} dx \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U_a = \frac{\pi \cdot G^2 \cdot a^2}{E}$$

Στην επίπεδη παραμορφωσιακή είναι αντίστοιχα:

$$U_a = \frac{\pi \cdot G^2 \cdot a^2}{E} (1 - \nu^2)$$

ν : Ο λόγος Poisson

Η ασταθής διάδοση της ρωγμής συμβαίνει όταν η ολική ενέργεια (U) δεν μπορεί πλέον ν' αυξηθεί με την αύξηση του (a).

Δηλαδή έχουμε αστάθεια όταν ισχύει:

$$dU/da < 0 \quad (1)$$

Όπως δείχτηκε σε προηγούμενη παράγραφο η ελαστική παραμορφωσιακή ενέργεια μιας αρωγμάτωσης πλάκας που καταπονείται εφελκυστικά είναι:

$$U_o = (\sigma^2/2E) L \cdot B \cdot W$$

Αυτή δε μεταβάλλεται με την μεταβολή του a , οπότε από (1) έχουμε:

$$\begin{aligned} d/da (U_o + U_a + U_r - F) &< 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow d/da (F - U_a) &> dU_r/da \quad (2) \end{aligned}$$

Το dF/da αντιπροσωπεύει την ενέργεια που αναπτύσσεται

απ' τις εξωτερικές δυνάμεις για κάθε μονάδα στοιχειώδους αύξησης της ρωγμής κατά da .

Το dU_{α}/da παριστάνει την αύξηση της ελαστικής ενέργειας λόγω της εξωτερικής (μέσω του dF/da) προσφοράς ενέργειας. Επομένως το ποσό της ενέργειας που διατίθενται για θραύση είναι:

$$(d/da) (F - U_{\alpha})$$

Αυτό συμβολίζεται με G .

Το dU_{γ}/da παριστάνει την επιφανειακή ελαστική ενέργεια των παρειών της ρωγμής. Είναι η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για έναρξη της διάδοσης της ρωγμής και όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο αντιπροσωπεύει κατ' αυτή την έννοια την αντίσταση (ακαμψία) του υλικού. Αν λοιπόν θεωρήσουμε ως

$$R = dU_{\gamma}/da$$

τότε η (2) παίρνει την μορφή

$$G > R \quad (3)$$

Η ελαστική επιφανειακή ενέργεια U_{γ} είναι ίση με το γινόμενο της ειδικής ελαστικής επιφανειακής ενέργειας (γ_{σ}) και της επιφάνειας της ρωγμής. Επειδή όμως έχουμε δύο σχηματιζόμενες παρειές έπεται ότι θα είναι:

$$U_{\gamma} = 2 \cdot (2 \cdot \alpha \cdot \gamma_{\sigma}) = 4\alpha\gamma_{\sigma}$$

Έτσι το γενικό κριτήριο θραύσης όπως προκύπτει απ' την (2) γίνεται αναλυτικότερα:

$$\begin{aligned} d/da [F - (\pi\sigma^2 \cdot \alpha^2/E)] &> d/da (4\alpha\gamma_{\sigma}) \\ \text{ή } (dF/da) - (2\pi\sigma^2 \cdot \alpha/E) &> 4\gamma_{\sigma} \end{aligned} \quad (4)$$

Η συνθήκη έναρξης της θραύσης που δίδεται απ' την (4)

ισχύει για την περίπτωση της πλάκας του σχ. (2.10.1).

Για διάφορες μορφές φόρτισης το dF/da παίρνει ανάλογες τιμές κι επομένως ανάλογα διαμορφώνεται και η (4).

Χαρακτηριστικά παραδείγματα απλών μορφών φόρτισης δίδονται στην επόμενη παράγραφο οπότε και η (4) όπως θα δειχτεί παίρνει απλούστερη μορφή. Επίσης, η ελαστική παραμορφωσιακή ενέργεια U_{α} δεν είναι σταθερή και ίση με

$$U_{\alpha} = \pi \sigma^2 \cdot \alpha^2 / E$$

για κάθε περίπτωση φόρτισης και επομένως ανάλογα με την περίπτωση θα πρέπει να υπεισέρχεται, σαν ενεργειακός παράγων, στην συνθήκη (3) με την κατάλληλη μορφή.

Μετά τα παραπάνω προκύπτει ότι ο καθορισμός και ο υπολογισμός των ενεργειακών παραμέτρων που μπαίνουν σαν συστατικοί επιμέρους όροι στην συνθήκη (3) θα πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τα εκάστοτε ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου προβλήματος.

2.11. Απλοί τρόποι φόρτισης

Έλεγχος της προόδου της θραύσης υπό σταθερό φορτίο και υπό συνθήκες απαραμόρφωτων συνόρων [19]

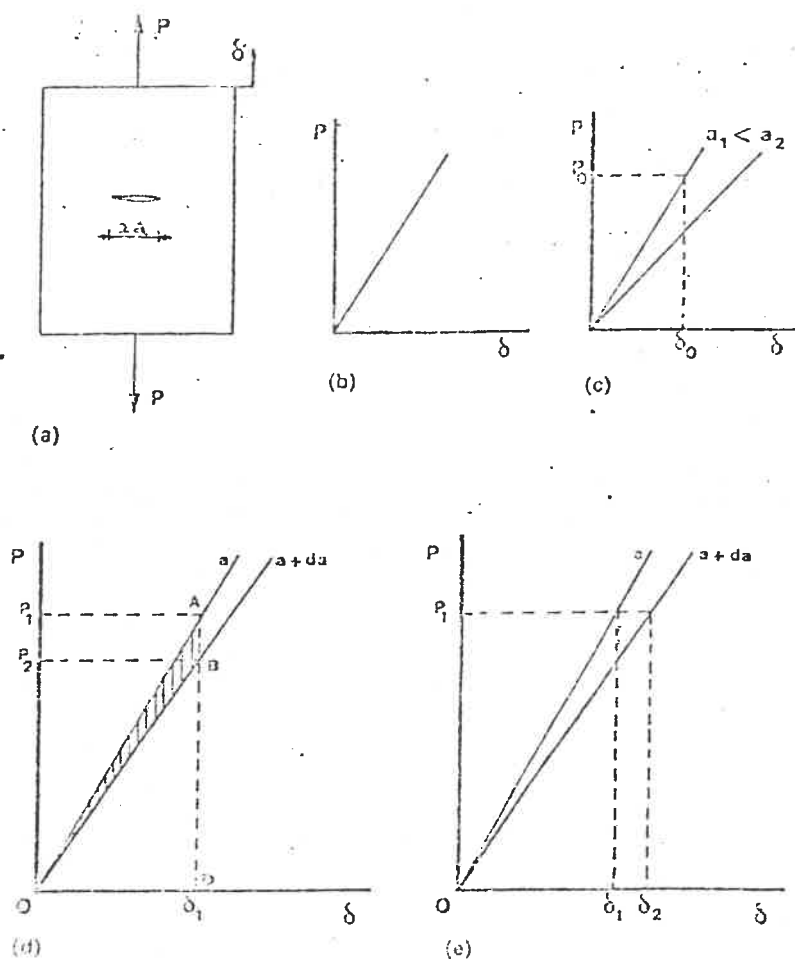
α) Συνθήκες απαραμόρφωτων συνόρων

Ας θεωρήσουμε πλάκα που περιέχει μια κεντρική ρωγμή μήκους $(2a)$ και υποβάλλεται σε μοναξονικό εφελκυσμό σχ. (2.11.1α).

Το φορτίο προοδευτικά αυξάνει μέχρι την στιγμή που η ρωγμή τείνει ν'αυξηθεί κατά da . Εκείνη την στιγμή η εξωτερικά προσφερόμενη ενέργεια έχει φτάσει οριακά την ενέργεια αντίστασης του υλικού. Με την κατάλληλη ρύθμιση της μηχανής της δίνουμε την εντολή, την στιγμή της διάδοσης, να ρίξει το φορτίο, έτσι ώστε τα σύνορα του δοκιμίου στα οποία εξασκείται το φορτίο, να διατηρήσουν την επιμήκυνση δ_1 που είχαν ακριβώς την στιγμή της διάδοσης υπό φορτίο P_1 και να μην ακολουθήσουν μεγαλύτερη παραμόρφωση σχ. (2.11.1d).

Το έργο που προσφέρθηκε στο δοκίμιο τότε είναι ίσο με $(1/2 P_1 \delta_1)$ που μετατρέπεται εξ'ολοκλήρου σε ελαστική παραμορφωσιακή ενέργεια η οποία αποθηκεύεται με την μορφή δυναμικής ενέργειας στο υλικό.

Αν επαναλάβουμε τώρα την ίδια διαδικασία με άλλο δοκίμιο αλλά θεωρώντας μεγαλύτερη αρχική ρωγμή κατά da , δηλαδή $(2a+da)$ τότε λόγω της μειωμένης ακαμψίας που παρουσιάζει το υλικό κάτω απ'την παρουσία της μεγαλύτερης



σχ.2.11.1

(α): Πλάκα με κεντρική ρωγμή μήκους $(2a)$ που υποβάλλεται σε μοναξονικό εφελκυσμό υπό φορτίο (P) .

(β): Γραμμική μεταβολή της παραμόρφωσης (δ) σε σχέση με το επιβαλλόμενο φορτίο (P) .

(γ) Διάγραμμα $P = f(\delta)$ για δύο πλάκες που διαθέτουν κεντρική ρωγμή μήκους a_1 και a_2 αντιστοίχως με $a_1 < a_2$.

(δ) Θραύση υπό σταθερή παραμόρφωση.

(ε) Θραύση υπό σταθερό φορτίο.

ρωγμής θ' απαιτείται μικρότερο φορτίο P_2 ώστε να επιτευχθεί παραμόρφωση ίση με δ_1 .

Το έργο που προσφέρθηκε στην δεύτερη αυτή περίπτωση στο δοκίμιο είναι $(1/2 P_2 \delta_1)$ και άρα τόση είναι και η ελαστική παραμορφωσιακή του ενέργεια.

Και στις δύο περιπτώσεις την στιγμή της θραύσης το σημείο εφαρμογής της εξωτερικής δύναμης P δεν μετακινείται αλλά παραμένει σταθερό. Λόγω λοιπόν του ότι τα σύνορα του δοκιμίου που είναι και σημεία εφαρμογής της P δεν μετακινούνται την στιγμή της θραύσης αυτός ο τρόπος φόρτισης συνιστά τις συνθήκες απαραμόρφωτων συνόρων. Είναι φανερό ότι την στιγμή της θραύσης το εξωτερικό έργο είναι μηδέν (αφού το σημείο εφαρμογής εκείνη την στιγμή δεν μετακινείται).

Δηλαδή:

$$dF/da = 0$$

Συνθέτουμε τώρα τα δύο ανεξάρτητα πειράματα σ' ένα ως εξής.

Φορτίζουμε μέχρι την στιγμή της θραύσης (P_1, δ_1) κι εκείνη την στιγμή ρίχνουμε το φορτίο σε P_2 προκειμένου να διατηρήσουμε το ίδιο δ_1 .

Άρα αν απ' την ελαστική ενέργεια του δοκιμίου του πρώτου πειράματος αφαιρέσουμε την αντίστοιχη του δευτέρου παρατηρούμε ότι μένει κάποιο υπόλοιπο ίσο με

$$U_{\text{υπ}} = (1/2) P_1 \delta_1 - (1/2) P_2 \delta_1 \quad (P_1 > P_2)$$

Δηλαδή αύξηση της ρωγμής κατά da οδηγεί σε μείωση της

δυνατότητας αποθήκευσης ενέργειας εντός του υλικού. Είναι λογικό επομένως να υποθέσει κανείς ότι στο τρίτο ενιαίο πείραμα προκειμένου η ρωγμή να επεκταθεί από (2α) σε $(2\alpha+d\alpha)$ πρέπει η αποθηκευμένη ενέργεια από $1/2 P_1 \delta_1$ που ήταν αρχικά να πέσει σε $1/2 P_2 \delta_1$. Αυτή η πτώση της ελαστικής ενέργειας εντός του υλικού υποδηλώνει ότι κατά την επέκταση της ρωγμής κατά $(d\alpha)$ απελευθερώθηκε ενέργεια η οποία είναι ίση με το παραπάνω υπόλοιπο.

$$U = 1/2 (P_1 - P_2) \delta_1$$

Αυτή είναι και η ενέργεια που διατίθεται για θραύση. Πράγματι στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε και μ'εφαρμογή της συνθήκης (2).

$$\begin{aligned} G &= d/d\alpha (F - U_\alpha) > dU_\gamma/d\alpha \Rightarrow \\ \Rightarrow G &= -dU_\alpha/d\alpha > dU_\gamma/d\alpha \end{aligned}$$

Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει απλά μείωση της ελαστικής ενέργειας.

Αν αντικαταστήσουμε στην τελευταία τις γνωστές σχέσεις:

$$U_\alpha = - (\pi \sigma^2 \alpha^2 / E) \quad \text{και} \quad U_\gamma = 4\alpha \gamma_e$$

θα έχουμε

$$\begin{aligned} 2\pi \sigma^2 \cdot \alpha / E &> 4\gamma_e \Rightarrow \\ \Rightarrow \pi \sigma^2 \cdot \alpha / E &> 2\gamma_e \end{aligned}$$

Δηλαδή έναρξη της θραύσης συμβαίνει όταν το γινόμενο $(\sigma^2 \cdot \alpha)$ για τον κατάλληλο συνδυασμό των (σ) , (α) , παίρνει μια κρίσιμη τιμή έτσι ώστε αυτό να είναι μεγαλύτερο μιας σταθερής τιμής που προσδιορίζεται απ' τις χαρακτηριστικές παραμέτρους του υλικού (E) , (γ_e) .

Δηλαδή θραύση όταν

$$\sigma^2 \cdot \alpha > 2\gamma_{\sigma} \cdot E/\pi$$

Συνθήκες σταθερού φορτίου

Θεωρούμε πλάκα με κεντρική ρωγμή (2α) που φορτίζεται εφελκυστικά με φορτίο P . Αυξάνουμε το φορτίο μέχρι το σημείο όπου η ρωγμή διαδίδεται κατά $d\alpha$ σχ. (2.11.1e).

Έστω P_1 , δ_1 το φορτίο και η επιμήκυνση των συνόρων αντίστοιχα εκείνη την στιγμή. Η ελαστική ενέργεια που αποθηκεύτηκε στο σώμα είναι: $1/2 P_1 \delta_1$.

Αν επαναλάβουμε το πείραμα μ'άλλο δοκίμιο που περιέχει ρωγμή ($2\alpha+d\alpha$) τότε λόγω της μειωμένης ανιαμψίας της πλάκας, υπό την επενέργεια του ίδιου φορτίου P_1 το σημείο εφαρμογής του φορτίου θα πραγματοποιήσει μεγαλύτερη μετακίνηση κατά την διεύθυνση της φόρτισης έστω (δ_2). Προφανώς είναι $\delta_2 > \delta_1$. Επομένως και το προσφερόμενο στο σώμα έργο θα είναι στην δεύτερη περίπτωση μεγαλύτερο απ'ότι στην πρώτη:

$$F_2 = 1/2 (P_1 \delta_2) > F_1 = 1/2 (P_1 \delta_1)$$

Άρα μεγαλύτερη θα είναι και η ελαστική παραμορφωσιακή ενέργεια που αποθηκεύεται στο υλικό και ίση με $1/2 P_1 \delta_2$.

Αν σε μια τρίτη περίπτωση θεωρήσουμε ότι φορτίζουμε την ίδια πλάκα μέχρι P_1 και στην συνέχεια διατηρήσουμε το φορτίο P_1 σταθερό, τότε θα έχουμε μια κατάσταση όμοια μ'αυτή που προκύπτει απ'την επαλληλία των δύο πρώτων καταστάσεων. Δηλαδή η επιμήκυνση από δ_1 πηγαίνει σε δ_2

ενώ παράλληλα αυξάνεται και η ελαστική παραμορφωσιακή ενέργεια του υλικού από $1/2 P_1 \delta_1$ σε $1/2 P_1 \delta_2$. Επομένως η μεταβολή της ενέργειας αυτής στο χρονικό διάστημα επέκτασης της ρωγμής κατά $(d\alpha)$ θα είναι:

$$1/2 (P_1 \delta_2) - 1/2 (P_1 \delta_1) > 0$$

Η προσφορά του εξωτερικού έργου στο ίδιο χρονικό διάστημα θα είναι:

$$P_1 (\delta_2 - \delta_1) > 0$$

Επομένως μ'εφαρμογή της (2) έχουμε:

$$\begin{aligned} G &= dF/d\alpha - dU_{\alpha}/d\alpha > dU_{\gamma}/d\alpha \Rightarrow \\ \Rightarrow G &= P_1 (\delta_2 - \delta_1) - 1/2 P_1 (\delta_2 - \delta_1) > dU_{\gamma}/d\alpha \Rightarrow \\ \Rightarrow G &= 1/2 P_1 (\delta_2 - \delta_1) > dU_{\gamma}/d\alpha = R \end{aligned}$$

Δηλαδή είναι πάλι

$$G = dU_{\alpha}/d\alpha = 2\pi\sigma^2 \cdot \alpha/E > dU_{\gamma}/d\alpha = 4\gamma_e$$

ή

$$\sigma^2 \cdot \alpha > 2\gamma_e E/\pi$$

2.12. Συσχέτιση του G με το K [19]

Είδαμε ότι σε κάθε μια απ' τις δύο παραπάνω περιπτώσεις φόρτισης ισχύει:

$$G = dU_{\alpha}/d\alpha = 2\pi\sigma^2 \cdot \alpha/E \quad (1)$$

Η παραπάνω ενέργεια απαιτείται να διατεθεί προκειμένου μία κεντρική ρωγμή (2α) που βρίσκεται στο μέσο μιας απείρου μήκους πλάκας ν' αυξηθεί κατά da.

Σημειώνεται εδώ ότι γενικά στην Βιβλιογραφία ρωγμές που έχουν δύο αιχμές, όπως για παράδειγμα στην εξεταζόμενη περίπτωση συμβαίνει με την κεντρική ρωγμή, θεωρείται ότι έχουν μήκος (2α) ενώ απλές ρωγμές που έχουν μόνο μια αιχμή θεωρείται ότι έχουν μήκος (α).

Δεδομένου ότι όλα τα προβλήματα ρωγμών περιορίζονται στην ανάλυση του τί συμβαίνει στην απλή αιχμή κάθε ρωγμής έπεται ότι η ενέργεια στην σχέση (1), δεδομένης της κεντρικής ρωγμής θα πρέπει να ισομοιράζεται λόγω συμμετρίας στα δύο άκρα της. Επομένως, η ενέργεια που απαιτείται για επέκταση της μιας αιχμής της ρωγμής κατά (da) είναι ίση με:

$$G = \pi\sigma^2 \cdot \alpha/E \quad (2)$$

Το K όμως για την συγκεκριμένη περίπτωση όπως ήδη έχει καταγραφεί είναι:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi \cdot \alpha} \quad (3)$$

Είναι προφανές ότι από (2), (3) για την επίπεδη εντατική προκύπτει

$$G = K_I^2/E$$

Ανάλογα για την επίπεδη παραμορφωσιακή ισχύει

$$G = (1-\nu^2) (K_T^2/E) \quad \nu : \text{Ο λόγος Poisson}$$

Σημειώνεται ότι το G μετριέται σε $N.m$ ($lb.inch$) ανά μονάδα μήκους σε m ($inch$) επέκτασης της ρωγμής και ανά μονάδα πλάτους B σε m ($inch$). Έτσι τελικά οι μονάδες του (G) είναι:

$$N.m/m^2 \quad \text{ή} \quad lb.inch/inch^2$$

Αναλυτικές μορφές του G . [21]

Όταν η φόρτιση είναι τέτοια ώστε τα σύνορα εφαρμογής του φορτίου να διατηρούνται σταθερά κατά την επέκταση της ρωγμής ή το φορτίο να διατηρείται σταθερό τότε το G μπορεί να πάρει αναλυτικότερες μορφές.

Είναι

$$G = (1/B) (dU_\alpha/d\alpha) \Rightarrow$$

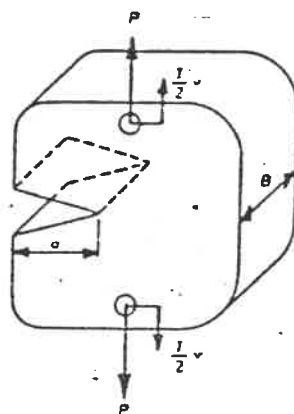
$$\Rightarrow G = \frac{1}{2B} \frac{dPV}{d\alpha} = \frac{1}{2B} \left(P \frac{dV}{d\alpha} + V \frac{dP}{d\alpha} \right)$$

Η ευκαμψία του υλικού ορίζεται ως ο λόγος

$$C = V/P$$

Στην γενική περίπτωση φόρτισης που κανένα απ' τα P, V δεν είναι σταθερό από α_1 έχουμε, σχ. (2.13.1).

$$G = \frac{1}{2B} \left(\frac{P dC P}{d\alpha} + \frac{C P dP}{d\alpha} \right) \Rightarrow$$



σχ.2.13.1. Εφελκυστική φόρτιση δοκιμίου υπό φορτίο (P), το οποίο διαθέτει πλαϊνή εγκοπή μήκους (a) και έχει πλάτος (B).

$$\Rightarrow G = \frac{1}{2B} \left(p^2 \frac{dC}{da} + \frac{C p dp}{da} + \frac{C p dp}{da} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow G = \frac{p^2}{2B} \frac{dC}{da} + \frac{V}{B} \frac{dP}{da}$$

Στην περίπτωση που τα σύνορα είναι σταθερά ($V =$ σταθερό) από (2) έχουμε:

$$\begin{aligned} G &= \frac{p^2}{2B} \frac{dC}{da} + \frac{V}{B} \frac{d(V/C)}{da} = \\ &= \frac{p^2}{2B} \frac{dC}{da} + \frac{V}{B} \left(\frac{V dC^{-1}}{da} + \frac{1}{C} \frac{dV}{da} \right) = \\ &= \frac{p^2}{2B} \frac{dC}{da} + \frac{V^2}{B} \frac{dC^{-1}}{dC} \frac{dC}{da} = \\ &= \frac{p^2}{2B} \frac{dC}{da} - \frac{p^2}{B} \frac{dC}{da} = \\ &= - \frac{p^2}{2B} \frac{dC}{da} \end{aligned}$$

Στην περίπτωση που το φορτίο είναι σταθερό έχουμε από (2)

$$G = \frac{p^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (4) \quad \left(\frac{dP}{da} = 0 \right)$$

Το αρνητικό πρόσημο στην (3) δεν σημαίνει αρνητική ενέργεια κάτι άλλωστε το οποίο δεν έχει φυσική σημασία αλλά ότι $dU_{\alpha}/da < 0$ δηλαδή η ελαστική παραμορφωσιακή ενέργεια μειώνεται κατά την αύξηση της ρωγμής από (2α) σε (2α+da) προκειμένου να απελευθερωθεί η απαραίτητη ενέργεια για θραύση.

Το θετικό πρόσημο στην (4) σημαίνει ότι $dU_{\alpha}/da > 0$,

δηλαδή το εξωτερικό έργο F προσφέρει την ενέργεια που χρειάζεται τόσο για την αύξηση της ελαστικής παραμορφωσιακής ενέργειας όσο και για την υπέρβαση της ενέργειας αντίστασης dU_{γ}/da του υλικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

3.1. Ελαστοπλαστικά υλικά

Σαν ελαστοπλαστικά χαρακτηρίζονται τα υλικά που παρουσιάζουν τόσο ελαστική όσο και πλαστική συμπεριφορά κατά την φόρτισή τους. Είναι γνωστό ότι στο ελαστικό τμήμα της φόρτισης αν αποφορτίσουμε, το υλικό επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση, δηλ. οι προκαλούμενες παραμορφώσεις μηδενίζονται. Όμως όταν το υλικό με την αύξηση της φόρτισης περάσει στη πλαστική περιοχή τότε αν αποφορτίσουμε, το υλικό δεν επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση αλλά παρατηρούνται παραμένουσες παραμορφώσεις. Το γεγονός αυτό είναι χαρακτηριστικό της πλαστικής συμπεριφοράς του υλικού.

Μέχρι τώρα η μεθοδολογία της μηχανικής των θραύσεων που αναπτύχθηκε αφορούσε την μελέτη της διάδοσης της ρωγμής και της θραύσης των υλικών που παρουσίαζαν ελαστική συμπεριφορά, δηλ. των υλικών που κάτω από συνθήκες επίπεδης εντατικής ή παραμορφωσιακής κατάστασης παρουσίαζαν πολύ υψηλή αντοχή. Τέτοια υλικά είναι τα μεταλλικά υλικά υψηλής αντοχής καθώς και ψαθυρά υλικά όπως το γυαλί, ο βράχος, ο πάγος, το Lexan, το fiberglass κλπ.

Στην περίπτωση όμως των υλικών που παρουσιάζουν περισσότερο όλκιμη συμπεριφορά και κατ'επέκταση πλαστική, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε με την εισαγωγή του συντελε-



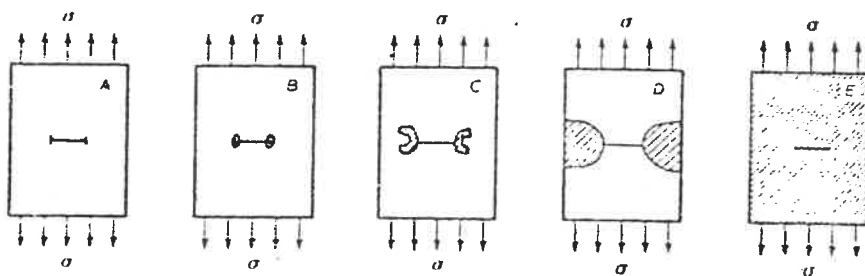
στή έντασης των τάσεων ως χαρακτηριστικής και ισχυρής παραμέτρου που ελέγχει την διάδοση της ρωγμής και την θραύση τώρα πλέον τίθεται υπό αμφισβήτηση. Κι αυτό γιατί όπως ήδη έχει αναφερθεί στην παράγραφο (2.6) περί πλαστικής ζώνης όταν το εύρος αυτής είναι πολύ μεγάλο, κάτι το οποίο συμβαίνει στα ελαστοπλαστικά υλικά η κατάσταση στην αιχμή της ρωγμής δεν μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά απ' το (K) . Έτσι συνιστάται η μελέτη της προόδου της θραύσης με χρήση μιας ενεργειακής παραμέτρου η οποία προσδιορίζει την ενέργεια που είναι απαραίτητη για την διάδοση της ρωγμής. Αυτή η παράμετρος συμβολίζεται με J και είναι ανάλογη της παραμέτρου G που ήδη έχει εισαχθεί στην μελέτη των ελαστικών υλικών. Περισσότερες λεπτομέρειες για το J δίδονται σ'επόμενη παράγραφο.

3.2. Πλαστική κατάρρευση

Η έκταση της πλαστικοποιημένης περιοχής στις αιχμές μιας κεντρικής ρωγμής που περιέχεται σε στοιχείο το οποίο εφελκύεται με τάση (σ), φαίνεται στο σχ. (3.2.1). Η συμπεριφορά του υλικού μεταβάλλεται από τελείως ελαστική (σχήμα στο αριστερό άκρο) ως τελείως πλαστική (σχήμα στο δεξιό άκρο). Είναι φανερό ότι η έκταση της πλαστικής ζώνης είναι τόσο μεγαλύτερη όσο περισσότερο πλαστική είναι η συμπεριφορά του υλικού.

Όταν η ευρύτερη περιοχή της κορυφής της ρωγμής έχει πλαστικοποιηθεί πριν επέλθει η θραύση του υλικού τότε θεωρούμε ότι το υλικό καταρρέει πλαστικά αφού πλέον η τάση την στιγμή της κατάρρευσης είναι η μέγιστη δυνατή που μπορεί να εφαρμοστεί, δεδομένου ότι αυτή θα είναι τότε ίση με την τάση διαρροής του υλικού. Επομένως, στην περίπτωση αυτή σαν αστοχία του υλικού θεωρείται η κατάσταση στην οποία αυτό πλαστικοποιείται κι όχι εκείνη όπου η εφαρμοζόμενη τάση όταν πάρει την κατάλληλη τιμή εξαντλείται η αντοχή του υλικού κι αυτό γιατί αυτή η τελευταία τάση είναι απλά μεγαλύτερη απ'την τάση διαρροής του υλικού κι επομένως δεν μπορεί να επιτευχθεί.

Επομένως στα ελαστοπλαστικά υλικά το φαινόμενο της πλαστικής κατάρρευσης θα πρέπει θεωρητικά να λαμβάνεται πάντα υπόψη και να εξετάζεται προκειμένου να ευρεθεί η πραγματική αντοχή του υλικού για δεδομένο μήκος ρωγμής.



σχ. 3.2.1. Μεταβολή του μεγέθους της πλαστικής ζώνης απ' τα τελείως ελαστικά υλικά (αριστερά) ως τα τελείως πλαστικά (δεξιά).

Στην πράξη το να προσδιορισθεί το αν ένα ελαστοπλαστικό υλικό αστοχεί λόγω υπέρβασης της πραγματικής αντοχής του για δεδομένο μήκος ρωγμής ή αστοχεί (καταρρέει) λόγω πλαστικοποίησής του δεν έχει γίνει ακόμα δυνατό κι αυτό γιατί ακόμα είναι άγνωστες οι ακριβείς συνθήκες κάτω απ' τις οποίες ένα τέτοιο υλικό πλαστικοποιείται καθώς άγνωστοι είναι και οι μηχανισμοί που επηρεάζουν την αντοχή του απ' την στιγμή της πλαστικοποίησής του και πέρα.

1

3.3. Συσχέτιση J και δυναμικής ενέργειας [22]

Αρχικά θα προσδιορίσουμε την γενική μορφή της δυναμικής ενέργειας U_p ενός δοκιμίου που υποβάλλεται σ'εφελκυστική καταπόνηση.

Στην περίπτωση που δεν έχουμε αύξηση του μήκους της ρωγμής προφανώς θα ισχύει:

$$U_{p_1} = U_{o_1} + \Delta F$$

Δηλαδή η δυναμική ενέργεια ισούται με την προϋπάρχουσα της φόρτισης ενέργεια U_{o_1} που είναι σταθερή κι ανεξάρτηση της φόρτισης και της ΔF που είναι η πρόσθετη ενέργεια που αποθηκεύεται στο υλικό λόγω της ανάπτυξης του εξωτερικού έργου ΔF .

Αν έχουμε αύξηση του μήκους της ρωγμής κατά Δa θα ισχύει:

$$\Delta F = \Delta U_\alpha + \Delta U_\gamma$$

Δηλαδή μέρος της εξωτερικής ενέργειας αποθηκεύεται στο υλικό με την μορφή παραμορφωσιακής ενέργειας ενώ το υπόλοιπο διατίθεται για την διάδοση της ρωγμής.

Η δυναμική ενέργεια σ'αυτή την περίπτωση θα είναι

$$U_{p_2} = U_{o_1} + \Delta U_\alpha$$

Το ΔU_γ είναι μη αναστρέψιμη μορφή ενέργειας κι επομένως δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί μέρος της δυναμικής ενέργειας του υλικού. Είναι δηλ. ενέργεια που χάνεται (καταναλώνεται) αφού ξοδεύεται για την διάδοση της ρωγμής.

Έτσι η μεταβολή της δυναμικής ενέργειας πριν και μετά την διάδοση της ρωγμής θα είναι:

$$\Delta U_p = U_{p_2} - U_{p_1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta U_p = \Delta U_\alpha - \Delta F$$

Για την οριακή περίπτωση όπου $\Delta \alpha \Rightarrow 0$ μπορούμε να γράψουμε

$$dU_p = dU_\alpha - dF$$

Απ' την τελευταία σχέση είναι φανερό ότι η μεταβολή της δυναμικής ενέργειας dU_p θα είναι πάντα αρνητική αφού το dF παρέχει τόσο το dU_α όσο και το dU_γ .

Ολοκληρώνοντας την τελευταία έχουμε

$$U_p = U_\alpha - F + C$$

όπου το C θα πρέπει να είναι ίσο με U_{o_1}

Οπότε τελικά

$$U_p = U_{o_1} + U_\alpha - F$$

Το U_{o_1} είναι μια σταθερή ποσότητα.

Έτσι αν παραγωγίσουμε ως προς α θα έχουμε

$$dU_p/d\alpha = d/d\alpha (U_\alpha - F)$$

Το J κατ' αναλογία με το G δίδεται απ' την σχέση

$$J = d/d\alpha (F - U_\alpha)$$

Από τις δύο τελευταίες σχέσεις είναι προφανές ότι:

$$J = - (dU_p/d\alpha)$$

3.4. Κριτήρια θραύσης για ελαστοπλαστικά υλικά

1^ο Κριτήριο [23]

Μέχρι τώρα έχει δειχθεί ότι για να επέλθει η θραύση ενός ελαστικού υλικού πρέπει να ισχύει:

$$\begin{aligned} & dU_{\alpha} / da > dU_{\gamma} / da \\ \text{ή} & \beta^2 \cdot \pi \cdot \sigma^2 \cdot a / E > 2\gamma_e \\ \text{ή} & G > R \end{aligned}$$

Δεδομένου ότι $\sigma = \varepsilon / E$ μπορούμε να γράψουμε

$$G = \beta^2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot a > R_{e1} \quad (1)$$

Στην περίπτωση που ένα υλικό παρουσιάζει και πλαστική συμπεριφορά τότε είναι αυτονόητο ότι η θραύση επέρχεται όταν

$$G + J > R_{e1} + R_{p1} \quad (2)$$

όπου:

G : Η ελαστική ενέργεια θραύσης

J : Η πλαστική ενέργεια θραύσης

R_{e1} : Η ελαστική ενέργεια αντίστασης του υλικού

R_{p1} : Η πλαστική ενέργεια αντίστασης του υλικού

Είναι προφανές ότι ο όρος ελαστική ή πλαστική ενέργεια θραύσης ενός υλικού στην περίπτωση που αυτό παρουσιάζει ελαστοπλαστική συμπεριφορά δεν είναι ακριβής αφού δεν είναι δυνατόν οι όροι αυτοί από μόνοι τους να προκαλέσουν την θραύση του υλικού παρά μόνο ο αθροιστικός συνδυασμός αυτών.

Στην Βιβλιογραφία έχει επικρατήσει η αντίσταση ενός



ελαστοπλαστικού υλικού να συμβολίζεται με J_R (Δηλαδή,
 $J_R = R_{p1} + R_{e1}$)

Με βάση την (1) είναι λογικό να υποθέσει κανείς την ύπαρξη μιας ανάλογης συνθήκης που να περιγράφει την πλαστική συμπεριφορά του υλικού.

Δηλαδή:

$$H \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot \alpha > R_{p1} \quad \text{ή} \\ J > R_{p1} \quad (3)$$

όπου H είναι ένας διορθωτικός συντελεστής ανάλογος του B που ισχύει για τα ελαστικά υλικά.

Το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων ενός ελαστοπλαστικού υλικού δίνεται ενδεικτικά στο σχ. (3.4.1).

Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες να βρεθεί μια κατάλληλη θεωρητική σχέση τάσεων - παραμορφώσεων η οποία να περιγράφει την μορφή της πειραματικής καμπύλης όπως φαίνεται στο σχ. (3.4.1).

Οι Ramberg - Osgood έχουν προτείνει την ακόλουθη σχέση:

$$\epsilon_{o\lambda} = \sigma/E + \sigma^n/F \quad \text{ή} \quad \epsilon_{o\lambda} = \epsilon_{e1} + \epsilon_{p1} \quad (4)$$

Στην σχέση (3) είναι προφανές ότι το ϵ αντιπροσωπεύει το πλαστικό μέρος της παραμόρφωσης ϵ_{p1} .

Δηλαδή είναι

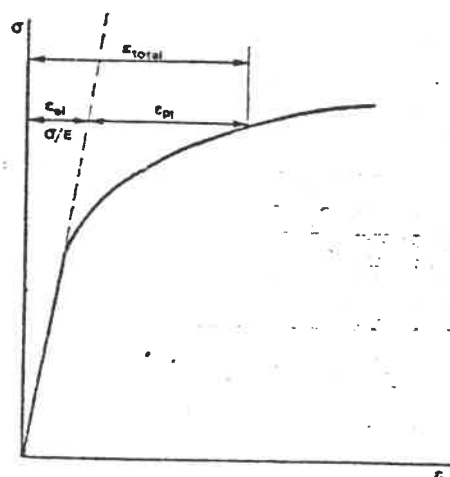
$$\epsilon_{p1} = J/H \cdot \sigma \cdot \alpha \quad (5)$$

Ομοίως για την ελαστική παραμόρφωση από (1) προκύπτει

$$\epsilon_{e1} = G/\pi \cdot \beta^2 \cdot \sigma \cdot \alpha$$

Από (4), (5) έχουμε:

$$J/H \cdot \sigma \cdot \alpha = \sigma^n/F \Rightarrow J = H \cdot \sigma^{n+1} \cdot \alpha/F \quad (7)$$



σχ. 3.4.1. Τυπικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων ενός ελαστοπλαστικού υλικού.

Από (4), (6) έχουμε

$$G/\pi.\beta^2.\sigma.\alpha = \sigma/E \Rightarrow G = \pi.\beta^2.\sigma^2.\alpha/E \quad (8)$$

Επομένως η (2) με βάση τις (7), (8) γίνεται

$$H.\sigma^{n+1}.\alpha/F + \pi.\beta^2.\sigma^2.\alpha/E > J_R \quad (9)$$

Ο συντελεστής (n) καλείται συντελεστής κράτυνσης και δίνει ένα μέτρο του πόσο πλαστικό είναι ένα υλικό.

Όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο συντελεστής τόσο περισσότερο πλαστικό είναι το υλικό.

Το F είναι μια σταθερά και είναι ανάλογο του E.

Για $n = 1$ είναι $F = E$ και $H = \pi.\beta^2$, δηλαδή πρόκειται για υλικό με καθαρά ελαστική συμπεριφορά.

Πράγματι απ' την (9) για $n = 1$ έχουμε

$$2\pi\beta^2.\sigma^2.\alpha/E > J_R = R_{0.1}$$

που είναι η συνθήκη η οποία ισχύει για τα ελαστικά υλικά.

Προσδιορισμός των F, n

Τα F, n προσδιορίζονται ως εξής:

Είναι

$$\varepsilon_{p1} = \sigma^n/F$$

Λογαριθμίζουμε την σχέση αυτή οπότε παίρνουμε

$$\begin{aligned} \log \varepsilon_{p1} &= \log(\sigma^n/F) \Rightarrow \\ \Rightarrow \log \varepsilon_{p1} &= \log \sigma^n - \log F \Rightarrow \\ \Rightarrow \log \varepsilon_{p1} &= n.\log \sigma - \log F \quad (10) \end{aligned}$$

Αν θεωρήσω

$$y = \log \varepsilon_{p1}$$

και

$$x = \log \sigma$$

τότε η παραπάνω σχέση γίνεται

$$y = n \cdot x - C \quad (C = \log F = \text{σταθερό})$$

Δηλαδή η (10) παριστάνει ευθεία με κλίση

$$dy/dx = n$$

Αν επομένως κατασκευάσουμε την πειραματική καμπύλη

$$\log \varepsilon_{p1} = f(\log \sigma)$$

και για διάφορα (σ) παίρνουμε τ'αντίστοιχα ε_{p1}^* θα πρέπει τα σημεία που προκύπτουν να κείνται επ'ευθείας**.

Με δεδομένη την πειραματική ευθεία προσδιορίζουμε την κλίση της οπότε έχουμε το (n) ενώ το (F) προκύπτει για οποιοδήποτε ζεύγος ($\log \varepsilon_{p1}$, $\log \sigma$) μ'αντικατάσταση σύμφωνα με την

$$\log F = n \cdot \log \sigma - \log \varepsilon_{p1}$$

* Το ε_{p1} προκύπτει για κάθε σ απ'την σχέση

$$\begin{aligned} \varepsilon_{p1} &= \varepsilon_{0\lambda} - \varepsilon_{p1} \Rightarrow \\ \Rightarrow \varepsilon_{p1} &= \varepsilon_{0\lambda} - \sigma/E \end{aligned}$$

** Στην περίπτωση που τα σημεία δεν βρίσκονται επ'ευθείας τότε σημαίνει ότι η σχέση Ramberg - Osgood δεν μπορεί να εφαρμοστεί.

Προσδιορισμός του H

Η Βιβλιογραφία δεν δίνει συγκεκριμένες μεθόδους για τον προσδιορισμό του (H). Η σχέση που βασικά προτείνεται είναι η ακόλουθη:

$$H = \pi \cdot \beta^{n+1}$$

Σημειώνεται ότι η παραπάνω σχέση ισχύει για μικρά (α) και (n). Για μεγαλύτερα (α), (n) η εφαρμογή της παραπάνω σχέσης δίνει αποκλίσεις απ' τις υπολογιζόμενες τιμές με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται ως πιο ακριβής, αλλά αυτό δεν καθιστά ανεφάρμοστη την σχέση αυτή καθ' ότι υπολογίζεται ότι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων δεν μπορεί να προσδιορίσει μ' ακρίβεια τις τιμές του H .

Προσδιορισμός J_R

Με δεδομένους τους συντελεστές n , F , H μπορούμε να προσδιορίσουμε τώρα την ενέργεια που απαιτείται προκειμένου να θραυσθεί το δοκίμιο ή αλλιώς την αντοχή σε όρους ενέργειας του υλικού (J_R) απ' την (9).

Η αντοχή σε όρους τάσης υπολογίζεται απ' την (9) για γνωστό J_R και αρχικό μήκος (a_0) με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή αφού η εξίσωση αυτή είναι γενικά μεγάλης τάξεως.

Στην περίπτωση ενός ιδανικά πλαστικού υλικού όπου η σχέση τάσεων - παραμορφώσεων μετά την τάση διαρροής θα παριστάνεται από μια οριζόντια ευθεία ο συντελεστής σκληρότητας (n) θα είναι $n = \infty$. Επομένως, το αριστερό μέλος της συνθήκης (9) γίνεται άπειρο δηλ. μ' άλλα λόγια το υλικό παρουσιάζει άπειρη αντοχή. Αυτό όμως όπως είναι προφανές δεν μπορεί να συμβαίνει δεδομένου ότι η τάση υπό την οποία θραύεται το υλικό είναι είτε ίση με την τάση διαρροής είτε μεγαλύτερη απ' αυτήν (κρατυνόμενα υλικά) κι

επομένως πεπερασμένη. Άρα η αντοχή του είναι κι αυτή πεπερασμένη κι επομένως κι η ενέργεια που απαιτείται για την θραύση του υλικού.

2^ο Κριτήριο [23]

Θεωρούμε ένα δοκίμιο το οποίο υποβάλλεται σε κάμψη τριών σημείων όπως φαίνεται στο σχ. (3.4.2). Το δοκίμιο φορτίζεται κάτω από συνθήκες σταθερής μετατόπισης, σχ. (3.4.3.α)

Γι' αυτό το είδος της φόρτισης όπως δείχτηκε σε προηγούμενη παράγραφο ισχύει:

$$G = - \frac{dU_a}{da} = - \frac{1}{2} P \cdot \delta$$

Στην περίπτωση που η σχέση τάσεων - παραμορφώσεων δεν είναι γραμμική, σχ. (3.4.3.b) ισχύει πάλι

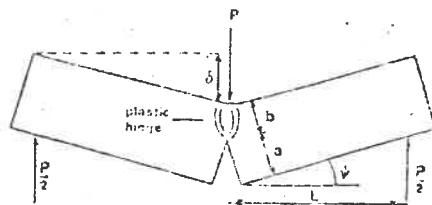
$$J = - \frac{1}{2} P \cdot \delta$$

Η σχέση αυτή μπορεί να γραφεί ως εξής:

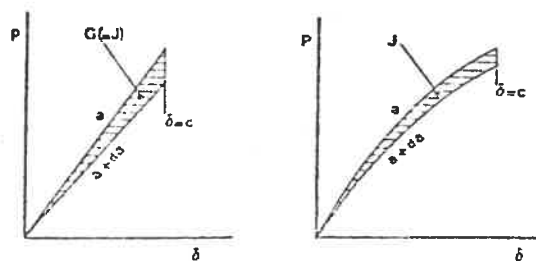
$$J = - \int_0^{\delta} \left(\frac{dP}{da} d\delta \right)$$

Αν θεωρήσουμε το εναπομείνων εγκάρσιο τμήμα κατά την διεύθυνση της διχοτόμου της εγκοπής ότι έχει διαρρεύσει τότε θα ισχύει:

$$\psi = C \frac{P \cdot L}{F_{ty} \cdot B \cdot b^2} = \frac{\delta}{L}$$



σχ.3.4.2. Δοκάρι υποβαλλόμενο σε κάμψη τριών σημείων.



σχ. 3.4.3. Προσδιορισμός της ενέργειας που απαιτείται για θραύση υπό σταθερή παραμόρφωση. (G) για γραμμικό διάγραμμα (P - δ) δεξιά, και (J) για μη γραμμικό διάγραμμα (P - δ).

απ' όπου παίρνουμε

$$P = \frac{F_{\tau y} \cdot B \cdot b^2}{C \cdot L^2} \cdot \delta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{dP}{db} = 2 \frac{F_{\tau y} \cdot B \cdot b}{C \cdot L^2} \delta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{dP}{db} = 2 \frac{P}{b}$$

Είναι προφανές ότι

$$db = - da$$

Οπότε η τελευταία σχέση γίνεται:

$$dP/da = -2(P/b)$$

κι άρα την στιγμή της θραύσης θα ισχύει

$$J = - \frac{1}{B} \int \frac{dP}{da} d\delta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow J = \frac{2}{B \cdot b} \int P d\delta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow J = \frac{2A}{B \cdot b} = J_R$$

Σημειώνεται εδώ ότι η παραπάνω σχέση υπολογισμού του J ισχύει μόνο για την στιγμή όπου $J = J_R$. Δεν μπορεί δηλαδή να εφαρμοστεί για τον ανεξάρτητο υπολογισμό του J .

Έτσι με βάση τα παραπάνω κριτήρια θεωρείται ότι επέρχεται η θραύση του υλικού την στιγμή που η διαθέσιμη για θραύση ενέργεια πάρει την τιμή που προσδιορίζεται απ' τις σχέσεις (9) και (11) για το 1^ο και 2^ο αντίστοιχα κριτήριο.

3.5. Εξάρτηση της αντοχής απ' το μήκος της ρωγμής

Η εισαγωγή των κριτηρίων της θραύσης για ελαστοπλαστικά υλικά και ο προσδιορισμός της αντοχής του υλικού σε όρους ενέργειας δεν σημαίνει πως η ενεργειακή αυτή παράμετρος διαχωρίζεται τελείως απ' την παράμετρο της τάσης η οποία στα ελαστικά υλικά θεωρήθηκε σαν εκείνη η οποία προσδιορίζει την αντοχή του υλικού. Κι αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στη σχέση (9) όπου η τάση (σ) είναι ανάλογη του (J) κι αυτό είναι κάτι το οποίο θα περίμενε κανείς δεδομένου ότι η προσφερόμενη σ' ένα υλικό ενέργεια είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η εξωτερική εφαρμοζόμενη τάση.

Έτσι και στην περίπτωση αυτή θα μπορούσε να προσδιορίσει κανείς (μέσω του J_R) την αντοχή του υλικού σε όρους τάσης και να καθορίσει έτσι ένα (α_{ex}) για το οποίο η τάση που θ' αναπτυχθεί από ένα κοινό φορτίο λειτουργίας να φτάσει ή και να ξεπεράσει την αντοχή του (σε όρους τάσης) και να προκαλέσει έτσι την θραύση του υλικού.

Ακολουθως αναλύεται ο προσδιορισμός αυτού του (α_{ex}) που αν και ακολουθεί λογική ανάλογη μ' αυτή που αναπτύχθηκε για τα ελαστικά υλικά (Παράγραφος 2.9) κρίνεται σκόπιμο να επαναδιατυπωθεί προς χάρην της καλύτερης κατανόησης του μηχανισμού αυτού σε σχέση τώρα και με την χρήση του (J).

Ας θεωρήσουμε πάλι δοκίμιο που περιέχει κεντρική ρωγή μήκους ($2a_0$) και υποβάλλεται σε μοναξονική εφελ-

κυστική φόρτιση. Τότε μπορούμε να ρυθμίσουμε την επιβαλλόμενη τάση κατά δύο τρόπους με την εξής έννοια.

α) Μπορούμε ν'αυξήσουμε την τάση μέχρι εκείνο το σημείο όπου η ρωγμή διαδίδεται κατά (da) και ν'αποφορτίσουμε.

β) Ν'αυξήσουμε (μονοτονικά) την τάση ακόμα περισσότερο έτσι ώστε το αρχικό μήκος $(2a_0)$ ν'αυξηθεί κατά $(2\Delta a)$, (Ένα Δa για κάθε αιχμή της κεντρικής ρωγμής), ώστε να επέλθει η θραύση του δοκιμίου.

Δεδομένου ότι και στις δύο περιπτώσεις έχουμε επέκταση της αρχικής ρωγμής έπεται ότι και στις δύο περιπτώσεις συμβαίνει μία υπέρβαση της αντοχής του δοκιμίου. Οι δύο αυτές αντοχές είναι προφανές ότι δεν είναι ίσες. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται υπέρβαση εκείνης της αντοχής για την οποία η ρωγμή διαδίδεται κατά (da) , (Έστω ότι αυτή είναι $J_{R,1}$), ενώ στην δεύτερη περίπτωση υπέρβαση εκείνης της αντοχής για την οποία η ρωγμή διαδίδεται κατά $(2\Delta a)$ και τελικά το δοκίμιο θραύεται, (έστω ότι αυτή είναι $J'_{R,1}$). Προφανώς $J'_{R,1} > J_{R,1}$. Σαν αντοχή θραύσης (σε όρους ενέργειας) ορίζεται η $J'_{R,1}$.

Τα παραπάνω φαίνονται πιο παραστατικά μέσω της σχ. (9). Δίδεται η (9)

$$J = (\pi \cdot \beta^2 \cdot \sigma^2 \cdot a / E) + (H \cdot \sigma^{n+1} \cdot a) / F = J_R$$

Για ένα δεδομένο αρχικό μήκος ρωγμής (a_0) είναι προφανές ότι όσο αυξάνουμε την τάση (σ) αυξάνεται τόσο το (a) όσο και η διατεθέμενη για την διάδοση της ρωγμής ενέργεια J . Όταν για το κατάλληλο (σ) , (έστω $\sigma_{c,1}$) γίνει

$J_1 = J_{R,1}$ τότε η ρωγμή διαδίδεται κατά (da) .

Όταν για ένα μεγαλύτερο (έστω $\sigma'_{c,1}$), για το ίδιο αρχικό μήκος $(2a_0)$ γίνει $J_c > J'_{R,1}$ επέρχεται η θραύση του δοκιμίου. Εκείνη τη στιγμή το συνολικό μήκος της ρωγμής θα έχει πάρει κι αυτό μια κρίσιμη τιμή (a_{cr}) που θα είναι:

$$a_{cr} = 2(a_0 + \Delta_a)$$

Επομένως για το δεδομένο (a_0) η αντοχή του δοκιμίου σε όρους τάσης βρίσκεται απ' την (9).

$$J = J_{el} + J_{pl} = \frac{n \cdot \beta^2 \cdot G_{res}^2 \cdot Q_0}{E} + \frac{H \cdot G_{res}^{n+1} \cdot a_0}{F} = J'_{R,1}$$

Στην περίπτωση που το J_{e1} είναι μικρό συγκρινόμενο με το J_{p1} η αντοχή θα είναι

$$G_{res,1} = \left(\frac{F \cdot J'_{R,1}}{H \cdot a_0} \right)^{1/(n+1)}$$

Η τελευταία σημαίνει μ' άλλα λόγια ότι για να θραυσθεί ένα δοκίμιο με δεδομένο αρχικό μήκος ρωγμής $(2a_0)$ θα πρέπει να εφαρμοστεί τέτοια εξωτερική τάση ώστε το αρχικό μήκος να πάρει μια κρίσιμη τιμή (a_{cr}) κι επομένως να εξαντληθεί η εναπομένουσα αντοχή του δοκιμίου δεδομένου ότι εκείνη την στιγμή θα ισχύει $\sigma_{res} = \sigma'_{c,1}$.

Για μικρά αρχικά μήκη (a_0) με την πρώτη ή τις πρώτες επαναλήψεις της φόρτισης η θραύση του δοκιμίου δεν μπορεί συνήθως να επέλθει αφού η αντοχή του (J'_R) είναι τόσο μεγάλη ώστε πολύ δύσκολα η εξωτερική τάση μπορεί να δώσει ενέργεια $J > J'_R$. Παρ' όλα αυτά με την πρόοδο των επαναληπτικών φορτίσεων η αντοχή του υλικού ελαττώνεται κι επο-

μένως φτάνει κάποια στιγμή όπου αυτή γίνεται πολύ μικρή κι αρκεί μια μικρή τάση για να θραυσθεί το υλικό.

Αιτία της μείωσης της αντοχής του υλικού είναι η αύξηση του μήκους της ρωγμής. Όσο μεγαλύτερο είναι το αρχικό μήκος* της ρωγμής τόσο μικρότερη τάση απαιτείται να εφαρμοσθεί προκειμένου η παρεχόμενη ενέργεια να ξεπεράσει την J_R (ενέργεια αντίστασης του υλικού).

* Σημείωση

Σε μία διαδικασία επαναληπτικής φόρτισης σαν αρχικό μήκος ρωγμής θεωρείται κάθε φορά εκείνο το μήκος το οποίο έχει η ρωγμή μετά από κάθε αποφόρτιση. Αν δηλαδή για παράδειγμα θεωρήσουμε ως (α_0) το μήκος μιας προϋπάρχουσας ρωγμής κι αυτό με την πρώτη επανάληψη της φόρτισης (για τα οδοστρώματα, διέλευσης τροχού) επεκταθεί κατά ($d\alpha$), τότε για την επόμενη φόρτιση σαν αρχικό μήκος θα θεωρείται το ($\alpha_1 = \alpha_0 + d\alpha$).

Έτσι στο παράδειγμά μας αν θεωρήσουμε ότι το αρχικό μήκος ρωγμής ($2\alpha_0$) είναι πολύ μικρό τότε η μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση δεν μπορεί να προκαλέσει θραύση του υλικού παρά μόνο επέκτασή της κατά ένα ($d\alpha$).

Αν τώρα για την δεύτερη φόρτιση ακολουθήσουμε την ίδια διαδικασία με την πρώτη θα παρατηρήσουμε ότι η θραύση του υλικού επέρχεται κάτω απ' την εφαρμογή τάσης (έστω σ'_2) που είναι μικρότερη της σ'_1 . Παράλληλα και η έναρξη διάδοσης της ρωγμής πραγματοποιείται σε τάση

$$\sigma_2 < \sigma_1.$$

Τα παραπάνω μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι τώρα λόγω του νέου αυξημένου αρχικού μήκους ($\alpha_1 = \alpha_0 + d\alpha$) η αντοχή του υλικού έχει πέσει κι επομένως οι ενέργειες (J) που χρειάζονται για την έναρξη καθώς και για την θραύση αυτού είναι μικρότερες των αντιστοίχων της πρώτης φόρτισης.

Επομένως θα ισχύει:

$$J_{R,1} > J_{R,2} \quad \text{και} \quad J'_{R,1} > J'_{R,2}$$

Η εναπομένουσα αντοχή ακριβώς στην έναρξη της δεύτερης φόρτισης θα είναι:

$$\sigma_{res,2} = \left(\frac{F \cdot J'_{R,2}}{H \cdot Q_1} \right)^{1/(n+1)}$$

που προφανώς είναι μικρότερη απ'την $\sigma_{res,1}$.

Έτσι με τις επαναλήψεις των φορτίσεων όσο αυξάνει το μήκος της ρωγμής τόσο μικραίνει το (J'_R) κι επομένως και η (σ_{res}). Για ένα μεγάλο πλέον αρχικό μήκος ρωγμής η (σ_{res}) θα έχει μειωθεί τόσο πολύ ώστε για ένα κοινό φορτίο λειτουργίας το οποίο θα προκαλέσει μία περαιτέρω αύξηση κατά ($d\alpha$) αυτή θα γίνει ίση ή θα πέσει κάτω απ'την τάση που αναπτύσσεται απ'το φορτίο αυτό έτσι ώστε στην επόμενη επανάληψη φόρτισης ίδιου ή μικρότερου φορτίου να ισχύει: $\sigma > \sigma_{res}$

γεγονός που θα σημαίνει θραύση του υλικού.

Σκοπός επομένως του μελετητή είναι να προσδιορίσει ένα μέγιστο μήκος ρωγμής το οποίο θεωρείται κρίσιμο και δεν θα πρέπει σε καμιά περίπτωση να ξεπεραστεί προκειμένου να μην προκληθεί θραύση του υλικού.

4.1. Ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής

Η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται η ρωγμή στην θραυστομηχανική δεν έχει την έννοια που συναντιέται στην κλασσική μηχανική, του χρόνου δηλαδή που χρειάζεται για να διανυθεί μια συγκεκριμένου μήκους απόσταση. Κι αυτό γιατί αιτία, αποτέλεσμα της οποίας είναι η διάδοση της ρωγμής, είναι οι επαναλήψεις των φορτίσεων κάτι που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Έτσι στην μηχανική των θραύσεων η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής ορίζεται ως ο λόγος του μήκους επέκτασης της ρωγμής (Δa) που έλαβε χώρα ύστερα από συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων της φόρτισης προς τον συνολικό αυτό αριθμό των επαναλήψεων. Για παράδειγμα, αν για την επέκταση μιας ήδη υπάρχουσας ρωγμής κατά 1 mm απαιτήθηκαν 100.000 επαναλήψεις τότε σημαίνει ότι κατά μέσο όρο η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής ήταν

$$\Delta a / \Delta N = 1 \text{ mm} / 100.000 \text{ cycles} = 10^{-5} \text{ mm/cycle} = da/dN$$

Δηλαδή κατά μέσο όρο σε κάθε επανάληψη (κύκλο) φόρτισης η ρωγμή επεκτεινόταν κατά $da = 10^{-5} \text{ mm}$.

Λόγω του ότι ο ρυθμός αύξησης του μήκους μιας ρωγμής είναι άμεση συνάρτηση της επιβαλλόμενης τάσης και του εκάστοτε αρχικού μήκους κατά την διαδικασία της επαναληπτικής φόρτισης, έπεται ότι αυτόματα θα είναι και συνάρτηση του συντελεστή έντασης των τάσεων K , παραμέτρου που όπως ήδη έχει αναφερθεί, ενοποιεί σε μια σχέση τόσο τις παραμέτρους (σ), (a), όσο και την σταθερά (β) που λαμβά-

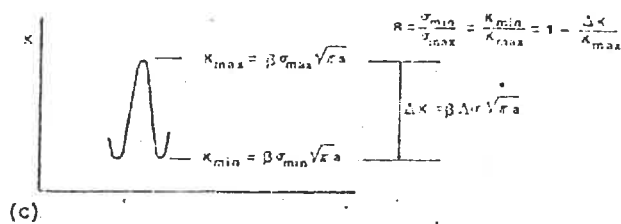
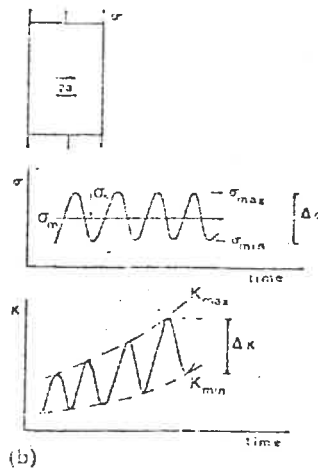
νει υπ' όψη της τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υλικού.

Επομένως είναι λογικό να κατασκευαστεί ένα διάγραμμα το οποίο θα απεικονίζει την συνάρτηση $da/dN = f(K)$.

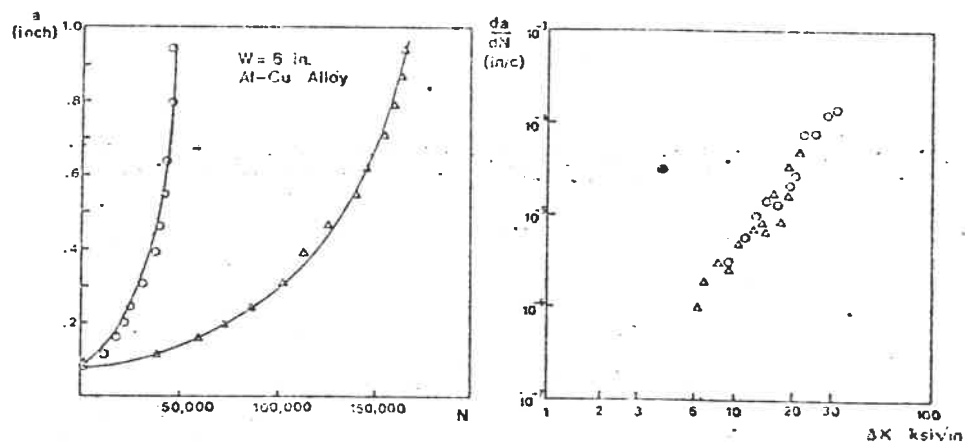
Στην περίπτωση που η φόρτιση ακολουθεί ημιτονοειδή μορφή, όπως συμβαίνει σε πολλά εργαστηριακά πειράματα, τότε αντί για το (K) εισάγεται το $(\Delta K = K_{max} - K_{min})$ το οποίο δεν αντιπροσωπεύει μια μικρή μεταβολή του (K) όπως θα συνέβαινε υπό αυστηρή μαθηματική ερμηνεία αλλά την μεταβολή του (K) σε μια ευρύτερη περιοχή της φόρτισης και συγκεκριμένα μεταξύ των σημείων όπου η τάση (σ) παίρνει την ελάχιστη και μέγιστη αντίστοιχα τιμή της, σχ. (4.1.1).

Παρατηρεί κανείς ότι το ΔK με την πρόοδο της φόρτισης μεγαλώνει, σχ. (4.1.1 b). Αυτό εξηγείται ως εξής. Λόγω της αύξησης του μήκους της ρωγμής με την πρόοδο των επαναλήψεων η αντοχή του υλικού όπως αναλυτικά εξηγήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο πέφτει. Έτσι δεδομένου ότι η φόρτιση ακολουθεί ημιτονοειδή μορφή με σταθερό εύρος $(\Delta \sigma)$ έπεται ότι σε κάθε $(\Delta \sigma)$ το (da) που θ' αναπτύσσεται θα είναι μεγαλύτερο απ' το (da) του προηγούμενου $(\Delta \sigma)$ αφού τώρα η αντοχή του υλικού είναι μικρότερη απ' ότι στον προηγούμενο κύκλο φόρτισης κι επομένως κάτω απ' την επιβολή του ίδιου φορτίου το προκαλούμενο (da) θα είναι μεγαλύτερο. Επομένως και η διαφορά δύο διαδοχικών (ΔK) θα είναι θετική, αφού το (a) είναι ανάλογο του (K) εξ' ορισμού.

Ο πρώτος ο οποίος έκανε τέτοια πειράματα ήταν ο Paris



σχ. 4.1.1. Φόρπιση δοκιμίου υπό εφελκυστική τάση ημιτονοειδούς μορφής και αντίστοιχη μεταβολή του συντελεστή έντασης των τάσεων (K).



σχ. 4.1.2. Τυπικό διάγραμμα $a = f(N)$ αριστερά και $da/dN = f(\Delta K)$ δεξιά.

ο οποίος και προσδιόρισε την συνάρτηση $da/dN = f(\Delta K)$ η οποία είναι

$$da/dN = n \cdot \Delta K^m$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει εύκολα ως εξής.

Από ένα πείραμα που γίνεται στο εργαστήριο παίρνουμε το διάγραμμα $a = f(N)$. Ενδεικτικά παραθέτεται ένα τέτοιο διάγραμμα στο σχ. (4.1.2).

Παραγωγίζουμε την καμπύλη που προκύπτει και στη συνέχεια κατασκευάζουμε το διάγραμμα.

$$\log(da/dN) = f(\log \Delta K)$$

Παίρνουμε λογαριθμικές κλίμακες των μεγεθών $da/dN, \Delta K$ προκειμένου ν'αμβλυνθεί η πολύ μεγάλη διαφορά στην τάξη μεγέθους των τιμών τους.

Το διάγραμμα αυτό έχει βρεθεί για διάφορα υλικά ότι είναι ευθεία της γενικής μορφής.

$$y = ax + b$$

Αν αντικαταστήσουμε

$$y = \log (da/dN)$$

$$x = \log (\Delta K)$$

$$b = \log (n)$$

$$a = m$$

τότε η παραπάνω σχέση γίνεται

$$\log(da/dN) = m \log (\Delta K) + \log (n)$$

απ'όπου ισοδύναμα έχουμε

$$\log(da/dN) = \log (\Delta K)^m + \log (n) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \log(da/dN) = \log (\Delta K)^m \cdot (n) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (da/dN) = n \cdot (\Delta K)^m$$

όπου (m) η κλίση του διαγράμματος $da/dN = f(\Delta K)$, δηλαδή: η κλίση της ευθείας.

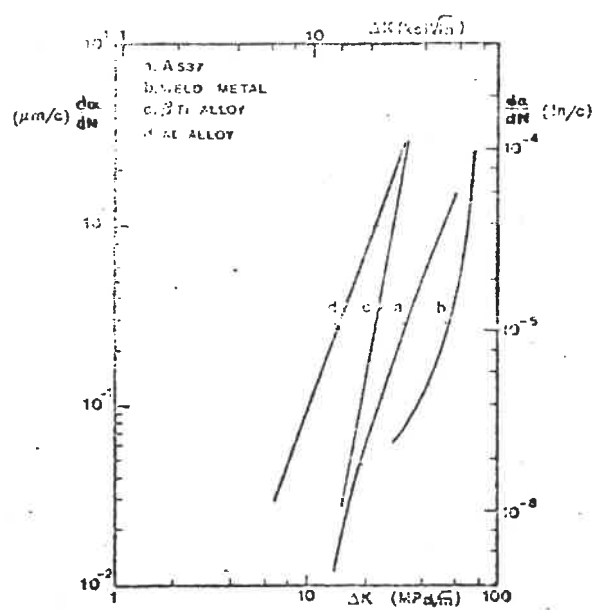
Μερικά τέτοια διαγράμματα για διάφορα υλικά φαίνονται στο σχ. (4.1.3).

Για τα ελαστοπλαστικά για τον ίδιο λόγο που το κριτήριο θραύσης γι'αυτά τα υλικά αφορά συσχετισμό ενεργειακών μεγεθών κι όχι της χαρακτηριστικής παραμέτρου (K) έτσι και στον παραπάνω νόμο αντί για το (ΔK) προτείνεται να χρησιμοποιείται το J.

Επομένως για ελαστοπλαστικά υλικά θα ισχύει

$$da/dN = n \cdot J^m$$

Η ισχύς της σχέσης αυτής έγκειται στο ότι τα m,n είναι χαρακτηριστικές σταθερές που εξαρτώνται απ'την φύση του υλικού κι όχι απ'το είδος της φόρτισης. Έτσι, παρ'όλο που η σχέση αυτή προκύπτει κάτω απ'τα αυστηρά καθορισμένα κι επομένως αυθαίρετα δεδομένα ενός εργαστηριακού πειράματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί, προκειμένου να προσομειωθεί με πολύ ικανοποιητική προσέγγιση μια πραγματική φόρτιση.



σχ. 4.1.3. Τυπικά διαγράμματα ταχύτητας διάδοσης ρωγμής συναρτήσει του (ΔK) για διάφορα υλικά.

4.2. Προσδιορισμός του αριθμού των επαναλήψεων της φόρτισης προκειμένου το μήκος της ρωγμής να γίνει κρίσιμο

Απ' την παραπάνω σχέση μπορεί να προσδιορισθεί ο απαιτούμενος αριθμός των επαναλήψεων φόρτισης προκειμένου το μήκος της ρωγμής να φτάσει το προκαθορισμένο κρίσιμο μήκος.

Στα ελαστικά υλικά στην περίπτωση που η εφαρμοζόμενη τάση είναι σταθερή τότε το μήκος της ρωγμής γίνεται κρίσιμο ύστερα από (N) αριθμό επαναλήψεων που προσδιορίζεται ως εξής:

Θεωρούμε ότι το υλικό έχει μια κεντρική ρωγμή μήκους (2a) και καταπονείται εφελκυστικά. Τότε είναι:

$$K_I = \beta \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a}, \quad \beta = f(a/w)$$

Οπότε θα έχουμε:

$$\frac{da}{dN} = n \cdot (\beta \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a})^m \Rightarrow$$

$$\Rightarrow N = \frac{1}{n \cdot \sigma^m} \int_{a_0}^{a_{cr}} \frac{1}{(\beta(a/w) \sqrt{\pi \cdot a})^m}$$

Το ολοκλήρωμα που προκύπτει δεν είναι γενικά κάποιας γνωστής μορφής (παρά μόνο αν $\beta = 1$) κι επομένως η λύση επιτυγχάνεται με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Στην περίπτωση που η επιβαλλόμενη φόρτιση ακολουθεί ημιτονοειδή μορφή τότε και μόνο αν το εύρος $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ είναι μικρό μπορούμε να θεωρήσουμε ως $\Delta\sigma$

την μέση τιμή, δηλαδή

$$\Delta\sigma = (\sigma_{\min} + \sigma_{\max} / 2)$$

και μ'αυτή σταθερή ν'αναχθούμε πάλι στην παραπάνω περίπτωση υπολογισμού.

Για τα ελαστοπλαστικά υλικά ισχύουν τ'ανάλογα, με την διαφορά ότι στην θέση του K θα χρησιμοποιείται το

$$J = K^2/E \quad \text{ή} \quad J = (1-\nu^2) (K^2/E)$$

οπότε πάλι είναι δυνατός ο υπολογισμός του N .

Ο υπολογισμός αυτός όμως καθίσταται εξαιρετικά δύσκολος στην περίπτωση όπου οι επιβαλλόμενες φορτίσεις δεν ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη μαθηματική μορφή αλλά είναι τελείως τυχαίες, όπως άλλωστε συμβαίνει και στην πραγματικότητα.

Αυτό το οποίο προτείνεται τότε να γίνει είναι να βρεθεί ένα μέσο σταθμισμένο K και ανάλογα J , το οποίο να προκαλεί φθορά ίση με την φθορά που προκαλεί το σύνολο των πραγματικών τυχαίων φορτίσεων μέσα σ'ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Θα πρέπει να δωθεί προσοχή ώστε το σύνολο των παρατηρηθέντων και μετρηθέντων φορτίσεων να αντιπροσωπεύει ένα επαρκές στατιστικό δείγμα. Έτσι, έχοντας πάλι ένα σταθερό (σταθμισμένο) (J) ή (K) μπορούμε μέσω των προαναφερθέντων ^{είναι} σχέσεων να υπολογιστεί το σύνολο των επαναλήψεων των φορτίσεων που μπορούν να λάβουν χώρα μέχρι την στιγμή που το μήκος της ρωγμής γίνεται κρίσιμο.



image

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά σε μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς από διάφορους ερευνητές πάνω στην μελέτη της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων μέσω της εξαγωγής εξισώσεων και του υπολογισμού παραμέτρων που εισάγει η μηχανική των θραύσεων. Σημειώνεται ότι το πεδίο έρευνας πάνω στην μελέτη των οδοστρωμάτων που έχουν υποστεί ρηγματώσεις είναι ακόμα σε αρχικό στάδιο και ιδιαίτερα όσον αφορά τα εύκαμπτα οδοστρώματα. Η Βιβλιογραφία ως εκ τούτου που προσφέρεται ως αντικείμενο μελέτης είναι περιορισμένη και γι' αυτό το λόγο κρίθηκε σκόπιμο στο κεφάλαιο αυτό ν' αναφερθούν μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί τόσο στα εύκαμπτα όσο και στα ~~άκαμπτα~~ οδοστρώματα προκειμένου ο αναγνώστης να σχηματίσει μια σφαιρική εικόνα της προόδου που έχει γίνει στην μελέτη των ρηγματωμένων οδοστρωμάτων.



5.1. Determination of Crack Growth Parameters of Asphalt concrete based on uniaxial dynamic tensile tests.

M. Jacobs

Delft University of Technology, Road and Railroad Research Laboratory, The Netherlands.

Προσδιορισμός των παραμέτρων που επηρεάζουν την διάδοση των ρωγμών στο ασφαλτοσκυρόδεμα υπό δυναμική εφελκυστική μοναξονική φόρτιση.

Το ερευνητικό αυτό πρόγραμμα βασίστηκε στη "θεωρία της απόλυτης αναλογίας" (Absolute Rate Theory) προκειμένου να προβλεφθεί η ρηγμάτωση και η θραύση του ασφαλτοσκυροδέματος.

Στην ART το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε ατομικό επίπεδο. Ο βασικός μηχανισμός της ART σύμφωνα με τον Krausz και Eyring είναι αυτός του σχηματισμού και του διαχωρισμού (σπασίματος) ατομικών δεσμών. Τα άτομα τείνουν να καταλάβουν μια θέση με το χαμηλότερο δυνατό ενεργειακό επίπεδο.

Αν προσφερθεί στο σύστημα εξωτερική ενέργεια με οποιαδήποτε μορφή (μηχανική, θερμική κλπ.) τότε το ενεργειακό επίπεδο των ατόμων αυξάνει. Αν τότε πραγματοποιηθεί αποφόρτιση και τα άτομα επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση πριν την φόρτιση τότε θεωρείται ότι το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά. Αν όμως η προσφερόμενη ενέργεια

είναι αρκετά μεγάλη τότε οι δεσμοί που συνδέουν τα άτομα ενδέχεται να σπάσουν οπότε τα άτομα μεταπίπτουν σε χαμηλότερα ενεργειακά επίπεδα ταυτόχρονα με την απελευθέρωση ενός ποσού ενέργειας. Η ενέργεια που απελευθερώνεται χρησιμοποιείται για τον σχηματισμό ενός νέου δεσμού. Στην περίπτωση που η προσφερόμενη ενέργεια είναι τέτοια ώστε όσοι δεσμοί καταστρέφονται τόσοι να δημιουργούνται η ενεργειακή κατάσταση του υλικού κι επομένως κι η φυσική του παραμένουν αμετάβλητες και καμιά αλλαγή δεν παρατηρείται στο υλικό.

Αν όμως η προσφερόμενη ενέργεια είναι τόσο μεγάλη ώστε οι δεσμοί που καταστρέφονται να είναι περισσότεροι απ'αυτούς που δημιουργούνται τότε παρατηρείται ρηγμάτωση του υλικού ή και πλαστική παραμόρφωσή του.

Η βασική εξίσωση της ART προσδιορίστηκε απ'τους Tobolsky και Eyring (1943) κι έχει ως εξής:

$$\dot{\Delta} = c_1 \exp\left(-\frac{Q_a}{kT}\right) \exp\left(\frac{W}{NkT}\right) \quad (1)$$

όπου

$\dot{\Delta}$: Το διαφορικό της μετατόπισης σε σχέση με τον χρόνο (mm/sec)

Q_a : Η ενέργεια που απαιτείται για να σπάσει ένας ατομικός δεσμός (J)

N : Ο αριθμός των δεσμών ανά μονάδα όγκου ($1/\text{mm}^3$)

K : Η σταθερά του Boltzmann, $K = 13,8066 \cdot 10^{-24}$ (J/Kelvin)

T : Η απόλυτη θερμοκρασία (Kelvin)

W : Η ενέργεια που προσφέρεται απ' την εξωτερική δύναμη ανά μονάδα όγκου (J/mm^3)

Απ' την (1) για διάφορα υλικά οι ερευνητές έχουν καταλήξει και σε διαφορετικές μορφές της παραπάνω εξίσωσης, που περιγράφουν ακριβέστερα τις συνθήκες στην εκάστοτε περίπτωση. Για ελαστοπλαστικά υλικά ο Krausz έχει προτείνει την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{d(A/A_0)}{dt} = \frac{k \cdot T}{h} \cdot \exp\left(\frac{Q_a}{k \cdot T}\right) \cdot \left(\frac{A}{A_0} \cosh \frac{f}{k \cdot T} - \sinh \frac{f}{k \cdot T}\right) \quad (2)$$

με

$$\frac{A}{A_0} = \exp\left(-\frac{k \cdot T}{h} \int_0^t \cosh \frac{f}{k \cdot T} dt\right) - \int_0^t \frac{k \cdot T}{h} \left(\sinh \frac{f}{k \cdot T}\right) \cosh \frac{f}{k \cdot T} dt$$

και

$$dt = \int_0^\infty \Phi(H) \exp\left(-\frac{h}{k \cdot T}\right) \quad (2b)$$

όπου

A : Η ρηγματωμένη περιοχή (mm^2)

A_0 : Η αρχική περιοχή για $t = 0$ (mm^2)

t : Ο χρόνος (sec)

h : Η σταθερά του Planck, $h = 0,663618 \cdot 10^{-33}$ (J-sec)

f : Η ελαστική ενέργεια ανά δεσμό (J)

$\Phi(H)$: Μια πιθανοτική συνάρτηση.

Ο Krausz υποστήριξε ότι μόνο η ελαστική ενέργεια μετέχει στην διαδικασία της θραύσης σ' ένα υλικό. Αυτό οδηγεί στην υπόθεση ότι:

$$f = \frac{W_{el}}{N}$$

Επίσης σε μια μονοδιάστατη κατάσταση μπορεί κανείς να υποθέσει ότι

$$\frac{A}{A_0} = \frac{N_0 - N}{N_0}$$

όπου

N_0 : Ο αριθμός των ατομικών δεσμών ανά μονάδα όγκου αρχικά ($t = 0$)

W_{el} : Η ελαστική ενέργεια ανά μονάδα όγκου.

N : Ο αριθμός των ατομικών δεσμών που παραμένουν αδιάσπαστοι.

Η σχέση (2) με βάση τις (2a), (2b), (3a) και (3b) γίνεται

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= (\lambda N_0 - N) \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{Q_a}{kT}\right) \exp\left(-\frac{W_{el}}{NkT}\right) = \\ &= -N \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{Q_a}{kT}\right) \exp\left(-\frac{W_{el}}{NkT}\right) \end{aligned}$$

Όσον αφορά την ελαστική ενέργεια ανά μονάδα όγκου αυτή μπορεί να προσδιορισθεί ως εξής. Κάτω από μια δυναμική φόρτιση όπου η τάση ή η παραμόρφωση ακολουθούν ημιτονοειδή μορφή η ενέργεια που χάνεται (κι επομένως δεν επαναποδίδεται) ανά κύκλο φόρτισης κι ανά μονάδα όγκου μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$$W_{diss} = \pi \cdot \sigma_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \sin \phi_0$$

όπου

σ_0 : Το εύρος της τάσης

ϵ_0 : Το εύρος της παραμόρφωσης

ϕ_0 : Η διαφορά φάσης μεταξύ σ και ϵ

Η ολική ενέργεια ανά κύκλο μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$$W_{tot} = \pi \cdot \sigma_o \cdot \varepsilon_o$$

Αν θεωρήσουμε τις παραπάνω ενέργειες ως διανύσματα τότε αφαιρώντας απ' το διάνυσμα W_{tot} το διάνυσμα W_{diss} προκύπτει η ελαστική ενέργεια ανά κύκλο κι ανά μονάδα όγκου. Οπότε

$$W_{el} = \pi \cdot \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot \cos \varphi_o \quad (5)$$

Η (1) με βάση την (5) γίνεται

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= (N_o - N) \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{Q_a}{kT}\right) \exp\left(-\frac{t \cdot \omega \cdot \varepsilon_o \cdot \cos \varphi_o}{N kT}\right) = \\ &= -N \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{Q_a}{kT}\right) \exp\left(-\frac{t \cdot \omega \cdot \varepsilon_o \cdot \cos \varphi_o}{N kT}\right) \end{aligned}$$

όπου

ω : Η γωνιακή ταχύτητα (rad/sec), $\omega = 2\pi f$

f : Η συχνότητα φόρτισης (Hz)

t : Ο χρόνος (sec)

Η (6) είναι μια διαφορική μη γραμμική εξίσωση πρώτου βαθμού. Περιγράφει μονοδιάστατα την διαδικασία της ρηγματώσεως σ' ένα βισκοελαστικό υλικό κάτω από μια ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενη τάση ή παραμόρφωση.

Δίνει δηλαδή μ' άλλα λόγια τον αριθμό των εναπομείναντων ατομικών δεσμών σε σχέση με τον χρόνο που μετράει απ' την έναρξη της φόρτισης.

Όμως δύο παράμετροι οι Q_a , N_o είναι άγνωστες.

Αυτές προσδιορίζονται πειραματικά.

Πειραματικό μέρος

Η συμπύκνωση των δοκιμίων έγινε στο εργαστήριο με μηχανικό τρόπο. Το μήκος τους ήταν 15 cm ενώ στο μέσο του δοκιμίου η διατομή απομειωνόταν περιμετρικά με τελικές διαστάσεις $0,05 \times 0,05$ m. Στην μέση περίπου της απομειωμένης διατομής έγινε μια εγκοπή και στις δύο απέναντι πλευρές στις οποίες και προσαρμόστηκε ένα μεταλλικό έλασμα. Το μήκος των τεχνητών εγκοπών ποίκιλε ανάλογα με την θερμοκρασία του πειράματος. Τα δοκίμια κολλήθηκαν στις πλάκες φόρτισης με μια εποξειδική ρητίνη. Για να εξασφαλισθεί η πλήρης επαφή των φορτιζόμενων επιφανειών του δοκιμίου στις πλάκες φόρτισης σκληρύνθηκε η κόλλα στην διεπιφάνεια επαφής μεταξύ επαναληπτικών δυναμικών φορτίσεων.

Χρησιμοποιήθηκε μια μηχανή MTS. Η μορφή του κύματος φόρτισης ήταν ημιτονοειδής χωρίς περιόδους ανάπαυλας. Η παραμόρφωση διατηρείτο σταθερή καθ'όλη την διάρκεια των πειραμάτων (φόρτιση με ελεγχόμενη παραμόρφωση). Η διαφορά φάσης μεταξύ τάσεων παραμορφώσεων καθώς και οι επιμέρους τιμές αυτών καταγράφονταν κατά την εξέλιξη των πειραμάτων μέσω χρήσης ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η συχνότητα φόρτισης ήταν 8 Hz.

Μέτρηση του μήκους της ρωγμής

Προκειμένου να καταγραφεί το ελάχιστο μήκος της ρωγ-

μής κατά την διάρκεια των επαναληπτικών φορτίσεων χρησιμοποιήθηκε ένα μεταλλικό έλασμα που αποτελείτο από συρματίδια τα οποία συνδέθηκαν μ'έναν H/Y δημιουργώντας έτσι ένα κλειστό κύκλωμα. Το μήκος κάθε συρματιδίου ήταν 4,1 mm και η μεταξύ τους απόσταση 1 mm. Στην περίπτωση που κατά την διάρκεια της φόρτισης κοβόταν ένα συρματίδιο τότε δημιουργείτο διαφορά τάσης της τάξεως των 8V μεταξύ της κορυφής και της βάσης του ελάσματος και γινόταν η ανάλογη καταγραφή στον υπολογιστή. Στην περίπτωση που κατά την σάρρωση των συρματιδίων δεν κοβόταν κάποιο συρματίδιο η διαφορά τάσης παρέμενε στα 0V και δεν γινόταν καμιά καταγραφή.

Στο σχ. (5.1.1) φαίνεται η διάδοση της ρωγμής σε σχέση με τις επαναλήψεις των φορτίσεων στο δοκίμιο DAB 26.

Τα πειράματα έγιναν σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες 0°, 10° και 20°C και σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια ώστε τ'αποτελέσματα να είναι πιο αξιόπιστα.

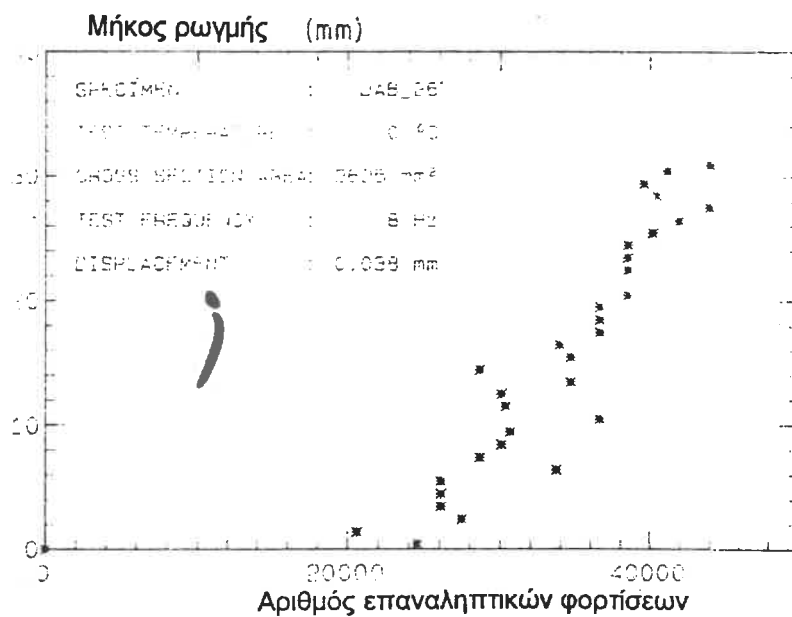
Στον (Πίν. 5.1.1) φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των πειραμάτων και των δοκιμών.

Στο (σχ. 5.1.2) φαίνονται 4 διαγράμματα στα οποία παρουσιάζεται η μεταβολή της παραμόρφωσης, της δύναμης, της γωνίας και της εναπομείνουσας περιοχής της απομειωμένης διατομής, μεγεθών δηλ. που μετρούνται κατά την διάρκεια του πειράματος κόπωσης.

Τα πιο βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν απ'τα δια-

5.1.1

Θερμοκρασία	(°C)	0	10	20
Συχνότητα Φόρτισης	(Hz)	8	8	8
Μήκος Δοκιμίων	(mm)	150.5	150.2	149.7
Υψος Της Απομειωμένης Περιοχής	(mm)	5	5	5
Συνολική Επιφάνεια Μεσαίας Διατομής	(mm ²)	2610	2620	2597
Απομειωμένη Επιφάνεια Μεσαίας Διατομής	(mm ²)	1571	1621	1998
Παραμόρφωση	(mm)	0.019	0.021	0.044
Ανηγμένη Παραμόρφωση Στην Απομειωμένη Διατομή	(mm/mm)	0.017	0.021	0.042
Εφαρμοζόμενη Δύναμη (t=0)	(N)	4745	2942	2186
Εφαρμοζόμενη Τάση Στην Απομειωμένη Διατομή (t=0)	(MPa)	3.008	1.816	1.094
Διαφορά Φάσης (t=0)	(deg)	11.9	24.9	53.7
Μέτρο Δυσκαμψίας (t=0)	(MPa)	14962	8707	3335
Διάρκεια Ζωής Των Δοκιμίων	(s)	4204	4333	4469



σχ.5.1.1. Μετρηθέντες τιμές του μήκους της ρωγμής σαν συνάρτηση των επαναλήψεων της φόρτισης.

—
2

i

i

γράμματα είναι τα εξής:

α) Η μείωση της δύναμης δεν μπορεί να συσχετισθεί άμεσα με την αύξηση του μήκους της ρωγμής ή την μείωση της εναπομένουσας περιοχής της απομειωμένης διατομής. Αυτό φαίνεται απ' το γεγονός ότι η δύναμη με την πρόοδο των επαναλήψεων μειώνεται ενώ την ίδια στιγμή (μέχρι δηλ. τις 24.000 περίπου επαναλήψεις) η ρωγμή δεν έχει ξεκινήσει να διαδίδεται. Αυτό πιθανολογείται ότι συμβαίνει εξ' αιτίας της παρουσίας ασυνεχειών (προϋπαρχουσών μικρορωγμών) στο υλικό. Έτσι, παρ' όλο που ουσιαστικά στην περίοδο αυτή δεν υπάρχει καμιά καταγραφή στον υπολογιστή (αφού δεν υπάρχει διάδοση ρωγμής κι άρα δεν κόβεται κανένα συρματάκι ώστε να διακοπεί το κύκλωμα και να γίνει καταγραφή) η ακαμψία του υλικού πέφτει, δεδομένου ότι οι μικρορωγμές αρχίζουν να μορφοποιούνται σε μια ζώνη, (μεταβάλλοντας το σχήμα και το μέγεθός τους) χωρίς όμως να συνιστούν μια εμφανή μακρορωγμή, ώστε αυτή να μπορεί μέσω του κυκλώματος να καταγραφεί. Αυτό επομένως που μπορεί να ειπωθεί είναι ότι η μείωση της δύναμης αποτελεί περισσότερο ένδειξη ότι αναμένεται να δημιουργηθεί μια μακρορωγμή και λιγότερο πειστήριο του γεγονότος αυτού.

β) Απ' το 4^ο διάγραμμα φαίνεται ότι η ρωγμή αρχίζει να διαδίδεται στις 24.000 περίπου επαναλήψεις της φόρτισης (σχ. 5.1.2).

Απ' το 3^ο διάγραμμα του ίδιου σχήματος φαίνεται ότι εκείνη την στιγμή η διαφορά φάσης μεταξύ τάσεων παραμορ-

φώσεων παίρνει την μέγιστη τιμή της. Οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι την στιγμή που η γωνία γίνεται μέγιστη ξεκινά η διάδοση της ρωγμής.

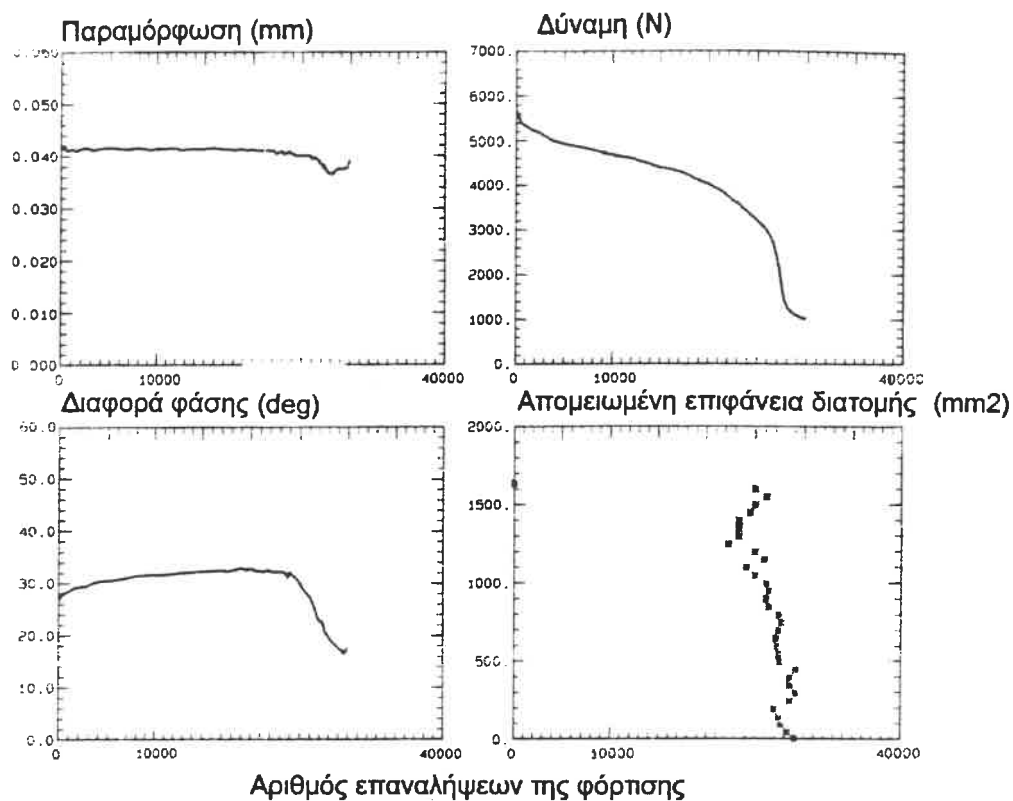
γ) Από (σχ. 5.1.1) φαίνεται ότι δεν υπάρχει μια ομαλή σχέση που να συσχετίζει την αύξηση του μήκους της ρωγμής με την πρόοδο των επαναλήψεων της φόρτισης. Κι αυτό γιατί και πάλι οι προϋπάρχουσες μικρορωγμές που υπάρχουν σε τελείως τυχαίες θέσεις μέσα στο υλικό καθιστούν την διάδοση μη ομαλή.

Προκειμένου τώρα να προσδιορίσουμε τις τιμές N_0 , Q_a ώστε η (6) να μπορεί πλέον να επιλυθεί με χρήση μιας μεθόδου της αριθμητικής ανάλυσης κατασκευάζουμε ένα διάγραμμα το οποίο συσχετίζει την σχετική εναπομείνουσα περιοχή της απομειωμένης διατομής (A/A_0) με το σχετικό διάστημα ζωής (t/t_0) του κάθε ενός απ'τα τρία δοκίμια για κάθε θερμοκρασία που εκτελούνται τα πειράματα.

Ως (t_0) καλείται ο συνολικός χρόνος ζωής του κάθε δοκιμίου ενώ ως t θεωρείται ο συνολικός χρόνος που έχει περάσει απ'την στιγμή της έναρξης ($t = 0$) του πειράματος.

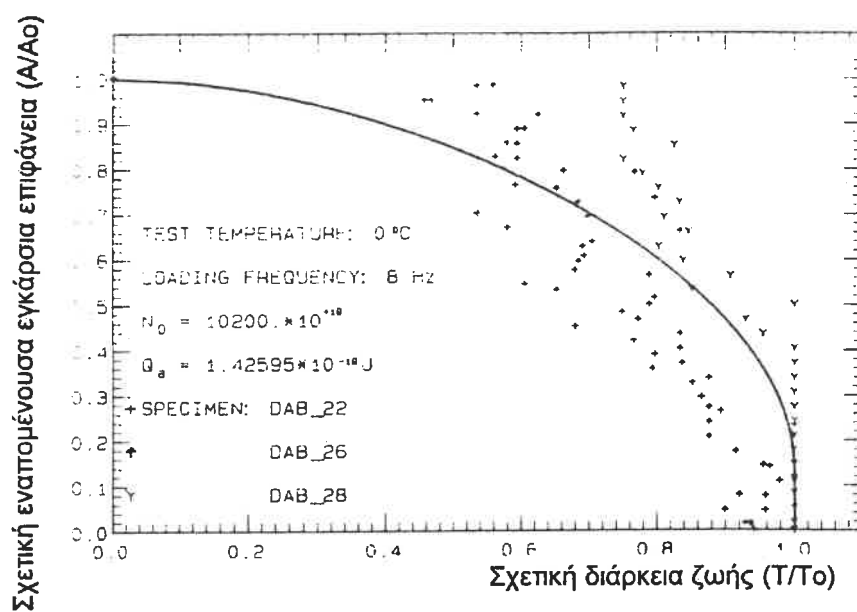
Έτσι όπως φαίνεται και στο (σχ. 5.1.3) παίρνουμε για κάθε ζεύγος (A/A_0 , t/t_0) κι ένα σημείο. Στη συνέχεια αφού πάρουμε όλα τα σημεία με χρήση ενός κατάλληλου μοντέλου παλινδρόμησης κατασκευάζουμε την καμπύλη με τον μεγαλύτερο δυνατό συντελεστή συσχέτισης R . Έχουμε δηλ. μια συνάρτηση της μορφής: $A/A_0 = f(t/t_0)$

Δεδομένου όμως της σχέσης (3b) έπεται ότι θα ισχύει και



σχ. 5.1.2. Υπολογισθείσες παράμετροι κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος κόπωσης.

σχ. 5.1.3.



$$N_0 - N / N_0 = f(t/t_0) \quad (7)$$

Απ' τις σχέσεις (6), (7) παίρνουμε δύο σχέσεις της μορφής

$$N = f(t, \dots)$$

μ' άγνωστα τα N_0 , Q_a .

Με χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίζουμε απ' αυτές τις σχέσεις τις τιμές των Q_a , N_0 . Για την θερμοκρασία των 0°C τα N_0 , Q_a φαίνονται στο σχ. 5. Η συνεχής καμπύλη που φαίνεται αντιπροσωπεύει την θεωρητική συνάρτηση $A/A_0 = f(t/t_0)$ η οποία προκύπτει απ' την (σ) για διάφορα (N,t) αφού πλέον είναι γνωστά τα Q_a , N_0 .

Σχόλια

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε συμπεριλαμβάνει στους υπολογισμούς της μεγέθη που έχουν σχέση με την συμπεριφορά του υλικού σε ατομικό πλέον επίπεδο κι ως προς αυτή την άποψη μπορεί να χαρακτηριστεί σαφώς πιο αξιόπιστη από άλλες που υιοθετούν macro παραμέτρους. Παρ' όλα αυτά απ' την άποψη του μηχανικού δεν φαίνεται να δίδει ιδιαίτερα χρήσιμα στοιχεία ως προς την συμπεριφορά του υλικού σε σχέση με μεγέθη και παραμέτρους που μπορούν με κάποιο τρόπο να μετρηθούν όπως το μήκος της ρωγμής, η εξωτερική τάση κ.λ.π. και που από πρακτική άποψη βρίσκονται πολύ κατώτερα στον τρόπο αντιμετώπισης του προβλήματος απ' την σκοπιά του μηχανικού. Επίσης δεν δίνει κάποιο κρίσιμο μέγεθος (N_0) του αριθμού του εναπομείναντων κατά την

εξέλιξη της φόρτισης ατομικών δεσμών πέρα απ' το οποίο η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής ακολουθεί αυξανόμενους ρυθμούς, κι αναμένεται επομένως σύντομα να επέλθει η θραύση του δοκιμίου. Έτσι δεν μπορούμε και δεν ξέρουμε ποιος είναι ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός ατομικών δεσμών που έχουν απομείνει, για τους οποίους ακόμα η διάδοση της ρωγμής πραγματοποιείται αργά κι επομένως μπορούμε να ξέρουμε τα χρονικά περιθώρια επέμβασης που έχουμε.

5.2. STRUCTURE - FRACTURE TOUGHNESS

RELATIONSHIPS OF ASPHALT

CONCRETE MIXTURES

H. Aglan, I. Shehata, L. Figneroa and A. Othman

Συσχέτιση παραμέτρων που επηρεάζουν την αντοχή θραύσης των ασφαλτοσκυροδεμάτων.

Οι παραπάνω ερευνητές προτείνουν μια σχέση που περιγράφει την διάδοση της ρωγμής σε σχέση με τις επαναλήψεις της εξωτερικής φόρτισης (da/dN) συναρτήσει κάποιων παραμέτρων που επηρεάζουν άμεσα τον όλο μηχανισμό της διάδοσης της ρωγμής. Η σχέση αυτή δίνεται παρακάτω.

$$da/dN = D / (\gamma^* K_1 - J) \quad (1)$$

όπου

D : Η ενέργεια η οποία καταναλώνεται στον σχηματισμό μικρορηγματωμένων περιοχών μπροστά απ' την αιχμή της κύριας ρωγμής. Οι περιοχές αυτές οριοθετούν και τις ζώνες μέσα απ' τις οποίες αναμένεται να περάσει η κύρια ρωγμή.

J : Η ενέργεια που προσφέρεται για την διάδοση της ρωγμής.

R_1 : Μέτρο της αντίστασης που προβάλλει το υλικό κατά την διάδοση της ρωγμής μέσω της ανάπτυξης μικρορηγματωμένων περιοχών παραπλεύρως της κύριας ρωγμής.

γ^* : Ειδική ενέργεια φθοράς.

Υπολογισμός R_1

Η δευτερεύουσα ρηγμάτωση που λαμβάνει χώρα παραπλευρώως της κύριας ρωγμής αναπτύσσεται σε ζώνη (ενεργή ζώνη) σχήματος τριγωνικού (σχ. 5.2.1) μέχρι το μήκος της κύριας ρωγμής γίνεται κρίσιμο. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η έκταση της ενεργής ζώνης τόσο μεγαλύτερη αντίσταση παρουσιάζει το υλικό. Έτσι ισχύει

$$R_1 = (\theta V / \theta \alpha) / B$$

όπου

V : Ο όγκος του ρηγματωμένου υλικού (ενεργής ζώνης) για μήκος ρωγμής (α).

B : Το πάχος του δοκιμίου.

Αν η βάση του ιδεατού τριγώνου που σχηματίζεται έχει μήκος h τότε ο όγκος της ενεργούς ζώνης είναι:

$$V = (\alpha \cdot h \cdot B) / 2$$

Αν φ η γωνία της κορυφής (στην περιοχή της τεχνητής εγκοπής) της ενεργής ζώνης τότε ισχύει:

$$\tan(\varphi/2) = \frac{h/2}{\alpha} \Rightarrow \frac{h}{\alpha} = 2 \tan(\varphi/2)$$

Η ποσότητα $2 \tan(\varphi/2)$ είναι σταθερή

Οπότε αν καλέσω $C = 2 \tan(\varphi/2)$

θα έχω $h = C \cdot \alpha$

Οπότε είναι $V = (C \cdot B \cdot \alpha^2) / 2$

Κι άρα $R_1 = C \cdot B \cdot \alpha / B = C \cdot \alpha$ C : σταθερά

Αν καλέσω $\gamma \cdot C = \gamma'$

τότε η ποσότητα $(\gamma \cdot R_1)$ στην (1) γίνεται

$$\gamma \cdot R_1 = \gamma \cdot c \cdot \alpha = \gamma' \cdot \alpha \quad (2)$$

Αναλυτική έκφραση του D

Σ' ένα πείραμα κόπωσης υπό ελεγχόμενη παραμόρφωση το B μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$D = dD/dN = \beta \cdot J^2$$

όπου (β) ένας συντελεστής κατανάλωσης ενέργειας ο οποίος εκφράζει το ποσοστό της συνολικής μεταβολής του έργου ανά κύκλο φόρτισης που ξοδεύεται για την διάδοση της ρωγμής.

Για πειράματα κόπωσης υπό ελεγχόμενη τάση το D μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\dot{D} = dD/dN = \beta' \cdot dW_i/dN = \beta' \cdot \dot{W}_i \quad (3)$$

όπου (β') είναι ένας συντελεστής κατανάλωσης ενέργειας ανάλογος του (β) για φόρτιση όμως υπό ελεγχόμενη τάση.

Η ποσότητα (W_i) προσδιορίζεται εύκολα απ' τις καμπύλες υστέρησης (Διαγράμματα Φορτίου - Παραμόρφωσης τα οποία παίρνουμε κατά την διάρκεια του πειράματος μέσω κατάλληλου μηχανολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού) αν απ' το συνολικό εμβαδό μιας καμπύλης υστέρησης αφαιρεθεί η περιοχή εκείνη που αντιστοιχεί στην προ της έναρξης της ρωγμής κατάσταση.

Πειραματικό Μέρος

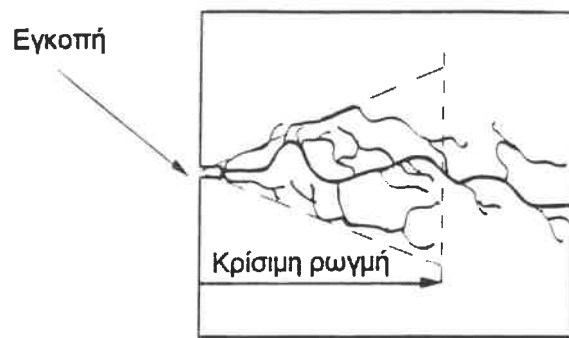
Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από ασφαλτοσκυρόδεμα. Οι διαστάσεις των δοκιμίων ήταν: Μήκος: 15 in, Πλάτος: 2 in, και Ύψος: 3,5 in σύμφωνα με τον κανονισμό ASTM D3202-83.

Χρησιμοποιήθηκαν 2 τύποι ασφάλτου AC-5 και AC-20.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση που χρησιμοποιήθηκε ήταν η εξής:

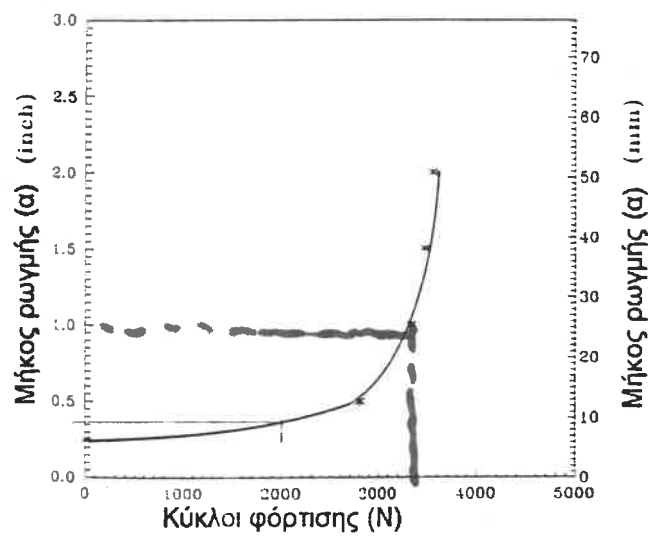
Κόσκινο	Διερχόμενο ποσοστό (%)
1/2 in	100
3/4 in	95
No 4	59
No 16	28
No 50	9
No 200	0

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κάμψη τριων σημείων σε μια πνευμονοδυναμική μηχανή. Τα σημεία στήριξης απείχαν 10,2 in και τα σημεία εφαρμογής των φορτίων 3,4 in. Έγινε μια αρχική ρωγμή μήκους 0,25 in. Τα πειράματα διεξήχθησαν υπό συνθήκες ελεγχόμενου φορτίου με συχνότητα φόρτισης 0,5 Hz και μέγιστο εφαρμοζόμενο φορτίο 65 lb. Κάθε φόρτιση είχε διάρκεια 0,2 sec. Μια κινητή κάμερα με ισχυρούς φακούς χρησιμοποιήθηκε για να μαγνητοσκοπήσει την διάδοση της ρωγμής ενώ ηλεκτρονικός εξοπλισμός με το κατάλληλο Software χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των καμπύλων φορτίου - παραμόρφωσης. Το μήκος της ρωγμής υπολογίστηκε κατά την διάρκεια των πειραμάτων με την βοήθεια μιας ελαστικής κλίμακας μεγάλης ακρίβειας που προσαρμόστηκε στα δοκίμια.

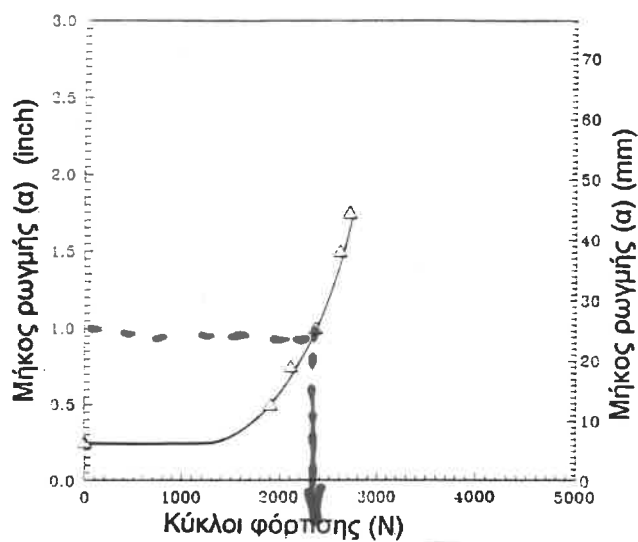


Διεύθυνση διάδοσης

σχ. 5.2.1. Η μορφή της ρηγματωμένης επιφάνειας του AC-20 μετά την κόπωση.



σχ. 5.2.2. Διάδοση της ρωγμής συναρτήσει των επαναλήψεων της φόρτισης στο AC-5.



σχ. 5.2.3. Διάδοση της ρωγμής συναρτήσει των επαναλήψεων της φόρτισης στο AC-20.



Αποτελέσματα

Στα (σχ. 5.2.2, 5.2.3) φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο διαδόθηκε η ρωγμή στους δύο τύπους δοκιμίων συναρτήσεων επαναλήψεων της φόρτισης. Είναι φανερό ότι η έναρξη και η διάδοση της ρωγμής μέχρι την θραύση στον τύπο AC-5 λαμβάνουν χώρα πολύ αργότερα σε σχέση με τους αντίστοιχους χρόνους στο AC-20. Για την ακρίβεια οι χρόνοι έναρξης και διάδοσης για το AC-5 και θραύσης είναι 1,4 και 1,2 φορές αντίστοιχα μεγαλύτεροι απ'ότι στο AC-20.

Στο (σχ. 5.2.4) φαίνεται η ενέργεια που απαιτείται για την διάδοση της ρωγμής (J) για διάφορες χαρακτηριστικές τιμές του μήκους της ρωγμής.

Λόγω της όλκιμης συμπεριφοράς που παρουσιάζει το AC-5 η αντίστασή του στην εξωτερική φόρτιση που σαν συνέπεια έχει την διάδοση της ρωγμής είναι μεγαλύτερη απ'ότι εκείνη του AC-20 που η συμπεριφορά του είναι λιγότερο όλκιμη κι επομένως περισσότερο ψαθυρή απ'ότι του AC-5.

Αποτέλεσμα του γεγονότος αυτού είναι ν'απαιτείται να διατεθεί μεγαλύτερη ενέργεια για να διατηρηθεί η διάδοση της ρωγμής στο AC-5 απ'ότι στο AC-20. Αυτό φαίνεται άλλωστε και στο (σχ. 5.2.4) όπου είναι ξεκάθαρο ότι για κάθε τιμή του μήκους της ρωγμής (a) το (J) που αντιστοιχεί σ'αυτό είναι μεγαλύτερο στο AC-5 απ'ότι στο AC-20.

Ομοίως στο (σχ. 5.2.5) η μεταβολή του έργου $\dot{W}_1$ που αντιστοιχεί σε κάθε χαρακτηριστική τιμή του μήκους της ρωγμής (a) είναι φανερό ότι είναι μεγαλύτερη στο AC-5

απ'ότι στο AC-20. Δηλαδή προκειμένου να διαδοθεί η ρωγμή μέχρι την θραύση το συνολικό έργο που δαπανήθηκε στο AC-5 είναι μεγαλύτερο απ'ότι στο AC-20.

Απ'τα παραπάνω είναι προφανές ότι η αντοχή του AC-5 είναι σαφώς μεγαλύτερη απ'ότι του AC-20.

Υπολογισμός των παραμέτρων γ' , β'

Η (1) με βάση τις (2), (3) γίνεται

$$\frac{da}{dN} = \frac{\beta' \cdot \dot{W}_i}{(\gamma' \cdot a - J)} \quad (4)$$

Τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν απ'τα πειράματα που διεξήχθησαν θα χρησιμοποιηθούν τώρα για να υπολογιστούν οι σταθερές γ' , β' και να ελεγχθεί ταυτόχρονα η ορθότητα της προτεινόμενης σχέσης.

Η (4) μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\frac{J}{a} = \gamma' - \beta' \frac{\dot{W}_i}{\left[\left(\frac{da}{dN}\right) - a\right]}$$

Η σχέση (5) είναι της μορφής

$$y = a + b \cdot x$$

Επομένως προκειμένου η (5) να είναι ορθή θα πρέπει αφού κατασκευαστούν σ'ένα διάγραμμα ζεύγη σημείων

$$\left(\frac{J}{a}, \frac{\dot{W}_i}{\frac{da}{dN} - a} \right)$$

αυτά να βρίσκονται επί ευθείας.

Πράγματι στα (σχ. 5.2.6, 5.2.7) φαίνεται ότι τα σημεία κείνται επί ευθείας οπότε η σχέση (5) έπεται ότι είναι σωστή άρα ισοδύναμα και η (4).

Οι συντελεστές γ' , β' προκύπτουν εύκολα με εφαρμογή του μοντέλου απλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Οι προσδιορισθείσες τιμές τους για τους τύπους AC-5 και AC-20 φαίνονται ακολούθως

	β'	γ'
AC-5	$4,81 \pm 0,37 \cdot 10^{-3}$	$1,79 \pm 0,09 \cdot 10^{-2} \text{ (in.lb/in}^3\text{)}$
AC-20	$2,71 \pm 0,70 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \pm 0,41 \cdot 10^{-2} \text{ (in.lb/in}^3\text{)}$

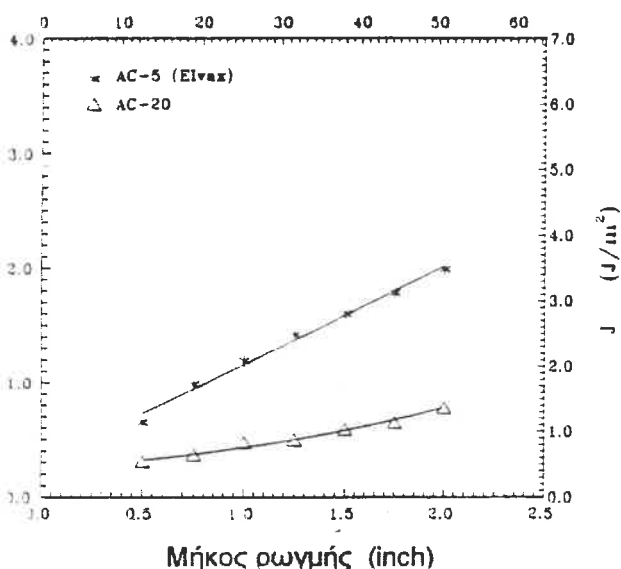
Τέλος στο διάγραμμα (σχ. 5.2.8) φαίνεται με γνωστές πλέον τις τιμές γ' , β' η μορφή που έχουν οι καμπύλες

$$da/dN = f(J)$$

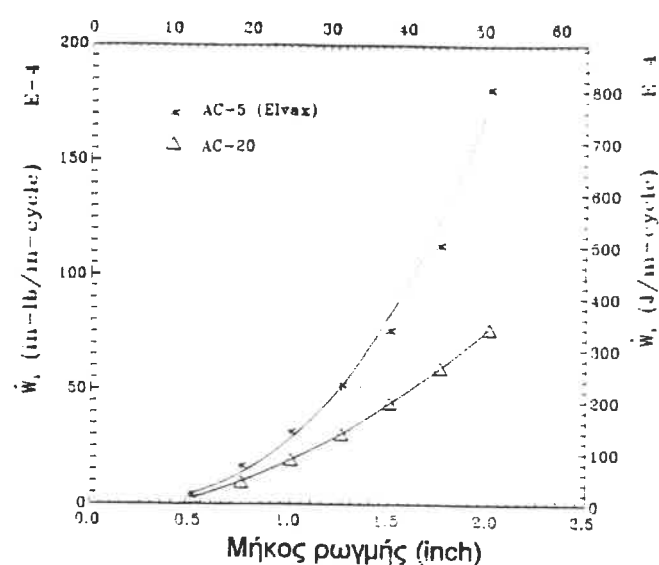
εφαρμόζοντας την (4) με χρήση των πειραματικών δεδομένων.

Σχόλια

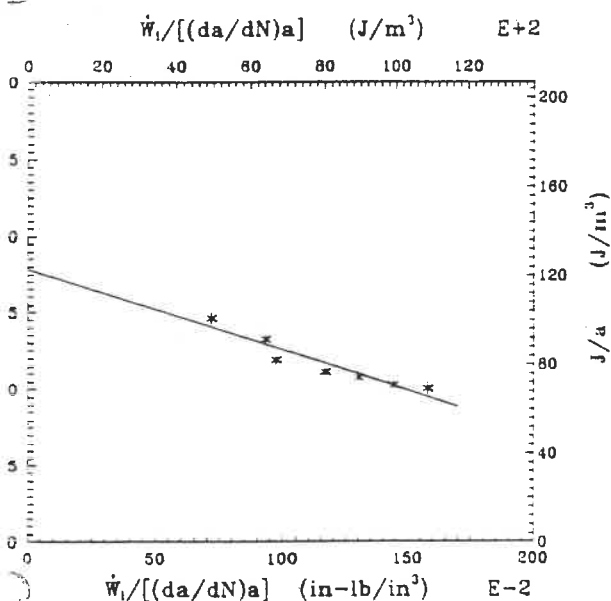
Η σχέση που προτείνεται αποτελεί μια καινοτομία στην μελέτη της συμπεριφοράς των ρηγματωμένων ασφαλτομιγμάτων υπό φορτία κόπωσης. Το πλεονέκτημά της έναντι της κλασσικής σχέσης του Paris [$(da/dN = A \cdot K^n$ (ή $A \Delta K^n)$] είναι ότι συναρτά την ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής με ενεργειακούς όρους οι οποίοι αποτελούν τις πλέον αξιόπιστες παραμέτρους στην μελέτη της γενικότερης συμπεριφοράς ενός υλικού και πολύ περισσότερο της συμπεριφοράς ενός ρηγματωμένου υλικού όπου οι μηχανισμοί που αναπτύσσονται είναι



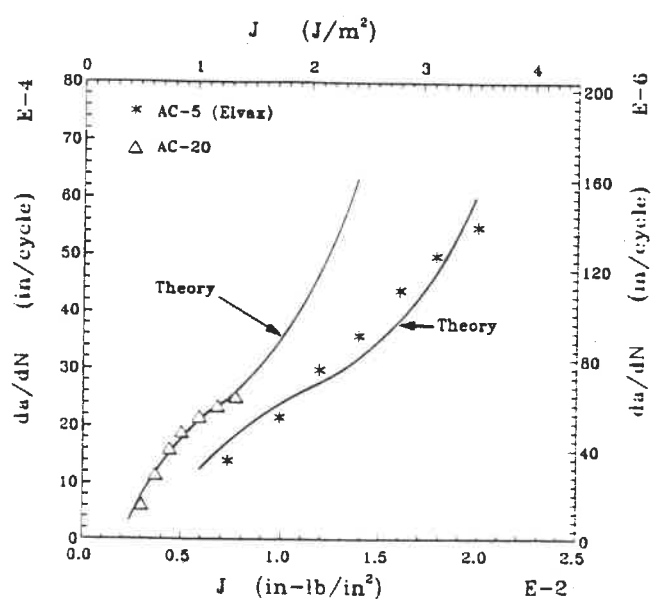
5.2.4. Μεταβολή του (J) συναρτήσει του μήκους ρωγμής για το AC-5 και το AC-20.



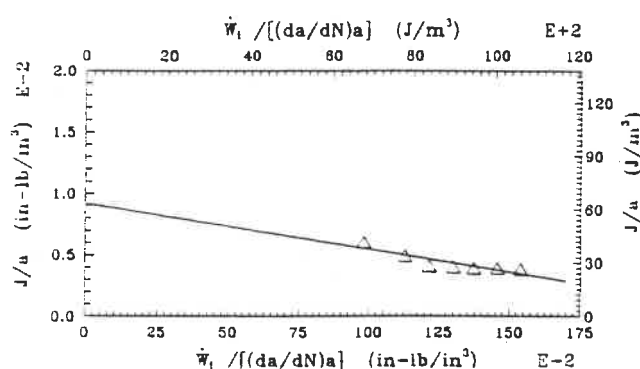
σχ. 5.2.5. Μεταβολή του W_i συναρτήσει του μήκους της ρωγμής για τα AC-5 και AC-20 ασφαλτικά μίγματα.



5.2.6. Γραμμική παρεμβολή των σημειούμενων με (*) σημείων, για τον προσδιορισμό των β' , γ' για το AC-5.



σχ. 5.2.8. Ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής συναρτήσει του (J) για τα AC-5, AC-20.



σχ. 5.2.7. Γραμμική παρεμβολή των σημειούμενων με (*) σημείων, για τον προσδιορισμό των β' , γ' για το AC-20.

πολυπλοκότεροι.

Επίσης δίνει την δυνατότητα για προσδιορισμό του (γ') μιας ενεργειακής παραμέτρου χαρακτηριστικής και σταθερής για κάθε υλικό (αφού είναι πολλαπλάσιο ή υποπολλαπλάσιο της ειδικής ενέργειας γ^*). Η παράμετρος αυτή είναι χαρακτηριστική της αντοχής που παρουσιάζει το ρηγματωμένο υλικό υπό εξωτερικά επιβαλλόμενα φορτία. Όσο μεγαλύτερο είναι το γ' τόσο μεγαλύτερη κι η αντοχή του υλικού κι άρα τόσο μεγαλύτερο το χρονικό διάστημα που απαιτείται να παρέλθει μέχρι την θραύση του. Έτσι με μια σειρά εργαστηριακών πειραμάτων μπορεί να γίνει μια κατάταξη των χρησιμοποιούμενων υλικών, απ'αυτό που παρουσιάζει την ελάχιστη αντοχή (ελάχιστο γ') μέχρι αυτό που παρουσιάζει την μέγιστη αντοχή (μέγιστο γ') κι έτσι οι μηχανικοί θα έχουν στα χέρια τους ένα σημαντικό επιπλέον στοιχείο κατά τη διαδικασία επιλογής του κατάλληλου τύπου ασφαλιστικής στρώσης σε κάθε περίπτωση.

5.3. THE ANALYSIS AND DESIGN OF THE FLEXIBILITY OF PAVEMENTS

D.V. Ramsamooj, K. Majidzadeh and E.M. Kauffmann

Ανάλυση και σχεδιασμός της ελαστικότητας των οδοστρωμάτων

Σ' αυτό το άρθρο οι παραπάνω ερευνητές παρουσιάζουν τρεις διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού της διάδοσης της ρωγμής σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης $N = f(a)$ και αξιολογώντας τ' αποτελέσματα των μετρήσεων προχωρούν στη συνέχεια στην εξαγωγή σχέσεων που δίδουν την ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής σαν συνάρτηση του (K) (βλ. Κεφ. 4) σύμφωνα με τον νόμο του Paris.

Πειραματικό Μέρος

Κατασκευάστηκε μια ασφαλτική πλάκα η οποία ζύγιζε 168 lbs, είχε διάμετρο 44 in και πάχος $1 \frac{1}{2}$ in. Η πλάκα τοποθετήθηκε επί ειδικής ελαστικής βάσης. Η βάση αυτή αποτελείτο από δύο στρώσεις εκ των οποίων η άνω στρώση ήταν φτιαγμένη από ειδικό ελαστικό υλικό με αρμούς πάχους 1 in και η κάτω στρώση από art-gum ελαστικό πάχους 12 in. Και οι δύο στρώσεις είχαν διάμετρο 48 in. Οι στρώσεις αυτές ήταν κολλημένες μεταξύ τους με ελαστικό τσιμέντο τύπου Bondmaster. Η ασφαλτική πλάκα είτε ήταν κολλημένη με μια λεπτή στρώση ασφάλτου 60/70 στην ελαστική βάση είτε ήταν ελεύθερη.

Σαν μέτρο του Young(E) μετρήθηκε το σύνθετο μέτρο ελαστικότητας E^* το οποίο βρέθηκε στα 5 Hz ίσο με 32.000 psi. Ο λόγος Poisson εκτιμήθηκε ότι είναι 0,4. Για την επιβολή του φορτίου στην πλάκα χρησιμοποιήθηκε μιας MTS ηλεκτροϋδραυλική μηχανή. Η μορφή της φόρτισης ήταν ημιτονοειδής με περίοδο 1 sec και διάρκεια φόρτισης 0,2 sec. Το φορτίο κυμαινόταν μεταξύ 200 και 400 lbs ενώ το στατικό φορτίο ήταν περίπου 5% του δυναμικού. Παραμορφώσεις μετρήθηκαν τόσο στο κέντρο της κυκλικής πλάκας από τα μηχανοσκόπια της MTS όσο και σ' ακτινικές αποστάσεις 3 1/2, 6, 9 και 12 in με μηχανοσκόπια τύπου Daytronic. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε θερμοκρασία δωματίου 77,5°F.

Πειραματικά αποτελέσματα

Η διάδοση της ρωγμής σε σχέση με τις επαναλήψεις της φόρτισης υπολογίστηκε με τρεις διαφορετικές μεθόδους. Η 1η μέθοδος βασίζεται στον προσδιορισμό μιας συνάρτησης $C = f(\alpha)$.

C : Το αντίστροφο της ακαμψίας, δηλ. ο λόγος $1/P$
όπου

P : Η εφαρμοζόμενη δύναμη

l : Η προκαλούμενη παραμόρφωση

α : Το μήκος της ρωγμής

Μια τέτοια σχέση προσδιορίζεται με χρήση μιας αριθμητικής μεθόδου (π.χ. μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων).

Για κάθε N_i (i : ο αύξων αριθμός της φόρτισης) υπολογίζεται με βάση το διάγραμμα $P_i = f(l_i)$ ένα C_i . Στη συνέ-

χεια απ' την σχέση $C = f(\alpha)$ υπολογίζεται για κάθε C_i το αντίστοιχο α_i . Τέλος καταγράφονται σ' ένα διάγραμμα ($N-\alpha$) ζεύγη σημείων (N_i, α_i) και μ' ένα μοντέλο παλινδρόμησης (αυτό που θα έχει τον μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης R) προσδιορίζεται η καμπύλη $N = f(\alpha)$.

Στο (σχ. 5.3.1) φαίνεται (κάτω καμπύλη) μια τέτοια καμπύλη όπως προσδιορίστηκε απ' την παραπάνω μέθοδο. Παράλληλα φαίνεται (πάνω καμπύλη) και η παραμόρφωση σε σχέση με τις επαναλήψεις της φόρτισης. Απ' την σύγκριση των δύο σχημάτων φαίνεται ότι στις πρώτες 20.000 με 30.000 επαναλήψεις η παραμόρφωση ακολουθεί αύξουσα πορεία χωρίς όμως αυτό να οφείλεται στην διάδοση ρωγμής. Το γεγονός αυτός βρίσκει μάλλον την εξήγησή του στην ανάπτυξη βισκοελαστικών φαινομένων καθώς και κράτυνσης του υλικού. Η 2η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε πάνω στην τεχνολογία των ακτίνων - X προκειμένου να καταγραφεί η διάδοση της ρωγμής στη βάση της ασφαλτικής πλάκας. Με την πρόοδο των φορτίσεων οι ρωγμές ακολούθησαν ανοδική πορεία μέχρι που κάποια στιγμή εμφανίστηκαν στην επιφάνεια. Τότε χρησιμοποιήθηκε μία οπτική μέθοδος (ink staining technique) για την παρατήρηση της διάδοσης της ρωγμής.

Στο (σχ. 5.3.2) φαίνονται οι καμπύλες $C = f(N)$, (C : το μήκος της ρωγμής) για τις τρεις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν.

Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι οι ερευνητές στο πείραμα αυτό μελετούν την διάδοση της ρωγμής στο επίπεδο που

εκτείνεται η πλάκα κι όχι όπως θ'ανέμενε κανείς σε επίπεδο κάθετο προς αυτήν.

Το εκάστοτε μήκος ρωγμής που χρησιμοποιήθηκε κατά την πορεία των υπολογισμών για κάθε μία απ' τις προαναφερθείσες μεθόδους βγήκε μέσω της εφαρμογής της αρχής της υπέρθεσης κάτω απ' το εξής πρίσμα. Έχει παρατηρηθεί ότι όταν οι αιχμές των ρωγμών βρίσκονται σ' αρκετά μεγάλη απόσταση η μία απ' την άλλη το τασικό πεδίο της μιας δεν επηρεάζει το αντίστοιχο πεδίο της άλλης. Η φυσική σημασία του γεγονότος αυτού είναι ότι κάθε ρωγμή μπορεί είτε να μελετηθεί ξεχωριστά είτε να υπολογιστεί ένα μέσο μήκος ρωγμής απ' το σύνολο των υπαρχόντων. Έτσι συνέπεια αυτού είναι και το ότι η προκαλούμενη παραμόρφωση μπορεί να μετρηθεί για κάθε ρωγμή χωριστά ή κάνοντας υπέρθεση να υπολογιστεί ένας μέσος όρος για την τιμή της παραμόρφωσης.

Έτσι, εφαρμόζοντας την παραπάνω αρχή για κάθε μέθοδο χωριστά και παίρνοντας στην συνέχεια τον μέσο όρο των υπολογισθέντων τιμών του μήκους της ρωγμής από κάθε μέθοδο προσδιορίστηκε ένας συντελεστής έντασης των τάσεων (K) για κάθε επανάληψη της φόρτισης σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση

$$K_I^2 = \frac{E}{2(1-\nu^2)} P^2 \frac{\theta C}{h \theta(2c)}$$

όπου

C : Η ευκαμψία

2c : Το μήκος της ρωγμής

h : Το πάχος της ασφαλτικής πλάκας

ν : Ο λόγος Poisson

Έτσι προέκυψαν στην συνέχεια οι ακόλουθες σχέσεις σύμφωνα με τον νόμο του Paris

$$dc/dN = 5.00 \cdot 10^{-12} K^4 \quad (\text{σχ. 5.3.3})$$

Ειδικότερα για κάθε μία απ' τις εμφανισθείσες στην επιφάνεια ρωγμές η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής συναρτήσει του (K) βρέθηκε ότι είναι

$$dc/dN = 4.12 \cdot 10^{-12} \cdot K^4 \quad (\text{σχ. 5.3.4})$$

Στο (σχ. 5.3.5) φαίνονται συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των μετρηθέντων στο συγκεκριμένο πείραμα τιμών και των αντίστοιχων για δοκάρια που φορτίστηκαν εδραζόμενα επί ελαστικών βάσεων όπως υπαγορεύεται απ' την αναφορά () της Βιβλιογραφίας.

Στο (σχ. 5.3.6) φαίνεται διαγραμματικά η μορφή της ρηγματωμένης επιφάνειας. Αρχικά εμφανίστηκαν 4 κύριες ρωγμές (Primary Mode). Στην συνέχεια και σε διευθύνσεις παράλληλες ως προς τις ανά δύο διχοτόμους αυτών εμφανίστηκαν δευτερεύουσες ρωγμές (Secondary Mode) ενώ τέλος και λίγο πριν την αποκόλληση της φορτιζόμενης επιφάνειας απ' την υπόλοιπη πλάκα εμφανίστηκαν μικρές ρωγμές στην περιφέρεια της επιφάνειας αυτής.

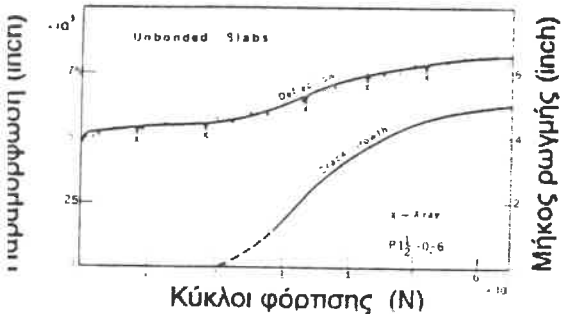
Τέλος στο (σχ. 5.3.7) φαίνεται η συσχέτιση της εφαρμοζόμενης τάσης σε ασφατική πλάκα και σε δοκάρια αντίστοιχα, εδραζόμενα επί ελαστικής βάσης, με τις επαναλήψεις της φόρτισης.

Σχόλια

Το όλο πείραμα βασίστηκε σε μετρήσεις του μήκους των ρωγμών που αναπτύσσονταν κάθετα στο επίπεδο της φόρτισης (παράλληλα δηλ. με την επιφάνεια της ασφαλιστικής πλάκας) κάτι το οποίο δεν συνηθίζεται σε ανάλογα πειράματα αφού αυτό που ενδιαφέρει είναι ο χρόνος (σαν συνάρτηση των επαναλήψεων της φόρτισης) που θα κάνει η ρωγμή για να διασχίσει το ύψος του φορτιζόμενου υλικού (Εδώ το πάχος της πλάκας) μέχρι να εμφανισθεί στην επιφάνειά του κι όχι το μήκος αυτής μετρούμενο στο επιφανειακό επίπεδο του δοκιμίου (εδώ πλάκας) αφού πλέον έχει εμφανιστεί στην επιφάνεια. Το σχόλιο δεν πρέπει να εκληφθεί ως μια αρνητική κριτική αλλά έχει το νόημα του προβληματισμού γύρω απ' το συγκεκριμένο θέμα.

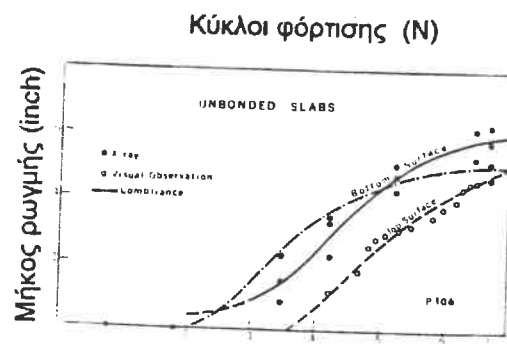
Το (σχ. 5.3.7) αποτελεί απόδειξη της σημαντικότητας που έχει η εισαγωγή του συντελεστή (K) στην θραυστομηχανική. Αυτό φαίνεται εύκολα απ' το γεγονός ότι δύο ίδια υλικά αλλά διαφορετικού σχήματος παρουσιάζουν διαφορά ως προς την διάρκεια ζωής τους σαν συνάρτηση της επιβαλλόμενης τάσης. Αυτό δεν μπορεί να είναι λογικό. Αίρεται όμως μέσω της εισαγωγής του συντελεστή (K) (σχ. 10) ο οποίος γενικά λαμβάνει υπόψη του τόσο την γεωμετρία του φορτιζόμενου δοκιμίου όσο και το εκάστοτε (κατά την διάρκεια της φόρτισης) μήκος της ρωγμής.

Η σχέση που εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό του (K) βασίζεται στην θεωρία της γραμμικής ελαστικής ανάλυσης που έχει ισχύ μόνο για τα ψαθυρά υλικά. Υπολογίζεται

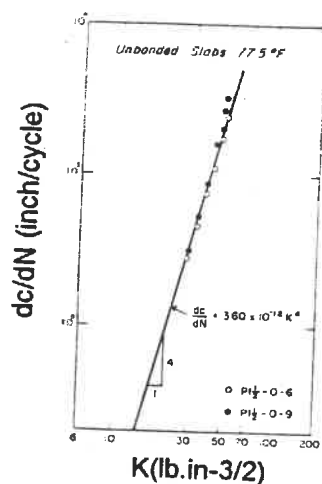


Κύκλοι φόρτισης (N)

σχ. 5.3.1. Διάδοση της ρωγμής συναρτήσει των κύκλων φόρτισης όπως προέκυψε από μετρήσεις της ευκαμψίας C.

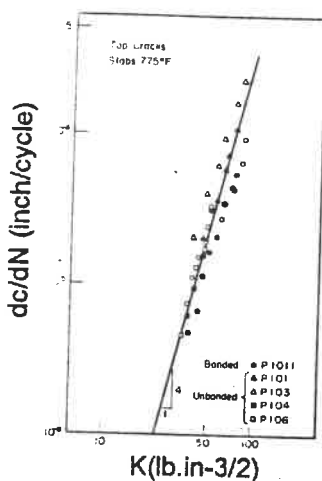


σχ. 5.3.2. Διάδοση της ρωγμής συναρτήσει των κύκλων φόρτισης όπως υπολογίστηκε σύμφωνα με τις τρεις μεθόδους.



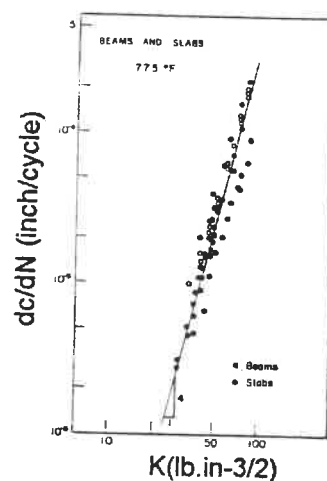
K(lb.in-3/2)

σχ. 5.3.3. Διάγραμμα $dc/dN = f(K)$ για την κυκλική πλάκα



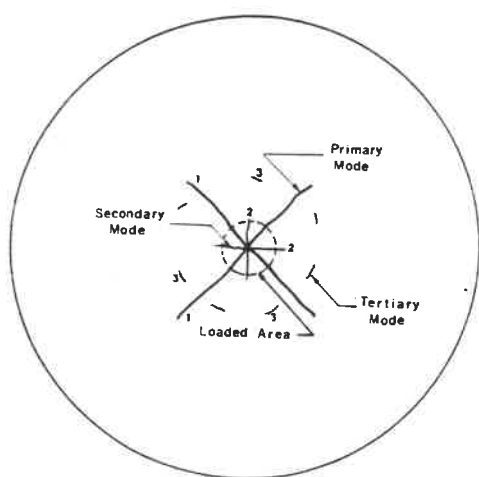
K(lb.in-3/2)

σχ. 5.3.4. Διάγραμμα $dc/dN = f(K)$ για τις επιφανειακές ρωγμές.

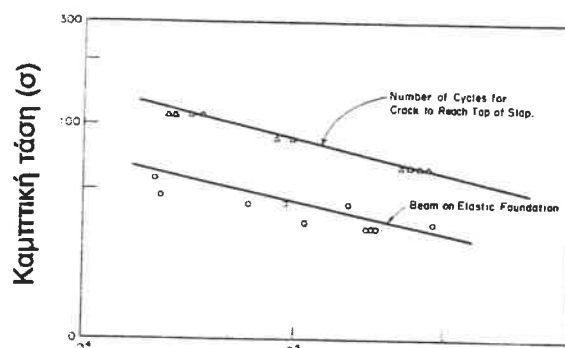


K(lb.in-3/2)

σχ. 5.3.5. Σύγκριση μεταξύ των διαγραμμάτων $dc/dN = f(K)$ για τις πλάκες και δοκάρια εδραζόμενα επί ελαστικής βάσης



σχ. 5.3.6. Μορφή ρηγματωμένης επιφάνειας της πλάκας στην περιοχή άσκησης του φορτίου.



Κύκλοι φόρτισης (N)

σχ. 5.3.7. Σύγκριση της διάρκειας ζωής μεταξύ δοκών και πλακών σαν συνάρτηση της καμπτικής τάσης.

δηλαδή το (G) σύμφωνα με την ανάλυση που αναπτύσσεται στην παράγραφο (2.12) και στην συνέχεια με βάση την σχέση, που ισχύει όμως μόνο για ψαθυρά υλικά,

$$G = K^2/E (1-\nu^2)$$

υπολογίστηκε το (K). Δεδομένου επομένως ότι το πείραμα διεξήχθη στους 77,5°F (25,2°C) η συμπεριφορά του ασφαλιστικού υλικού είναι σαφώς ιξοελαστική κι όχι ψαθυρή. Επομένως, η χρήση της (1) αναμένεται να μην δώσει τις πραγματικές τιμές του (K) για το συγκεκριμένο υλικό και τ'αποτελέσματα θα πρέπει ν'αντιμετωπιστούν με κάθε επιφύλαξη.



5.4. Μέθοδοι προσδιορισμού του K_u για το σκυρόδεμα

Στην παράγραφο αυτή αναπτύσσονται 2 μέθοδοι υπολογισμού του κρίσιμου συντελεστή έντασης των τάσεων όπως προτείνονται απ'τους Shah και Carpinteri.

1η Μέθοδος (Two Parameter Model: TPM)

Η πειραματική διάταξη φαίνεται σε σκαρίφημα στο σχ. 5.4.1 όπου και σημειώνονται όλες οι απαραίτητες διαστάσεις που θα χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς. Πρόκειται για κάμψη τριων σημείων. Το δοκίμιο δηλ. που είναι ένα δοκάρι διαστάσεων $L \times W \times B$ στηρίζεται αμφιαρθρωτά σε δύο στηρίγματα τα οποία μεταξύ τους απέχουν απόσταση S και στο κέντρο του δοκιμίου (σε απόσταση δηλ. $L/2$ απ'τα άκρα του) εφαρμόζεται φορτίο P .

Όπως φαίνεται και στην λεπτομέρεια μέσα σε κύκλο απ'την κάτω ίνα ξεκινά μια εγκοπή μήκους α_0 ενώ στα χείλη της προσαρμόζεται κατάλληλο μηχανοσκόπιο (clip gauge ή LVDT). Το ύψος του μηχανοσκόπιου συμβολίζεται ως H_0 . Η μέθοδος εφαρμόζεται για υλικά από σκυρόδεμα όπου το μέγιστο μέγεθος των αδρανών δεν πρέπει να ξεπερνά τα 25,4 mm (1 in).

Πρέπει να τηρούνται επίσης ορισμένες σχέσεις μεταξύ των διαστάσεων που είναι οι εξής:

$$\text{μήκος εγκοπής} / \text{ύψος}, \quad \alpha_0 / W = 1/3$$

$$\text{Απόσταση στηριγμάτων} / \text{ύψος}, \quad S/W = 4$$

Στην περίπτωση που τα αδρανή έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από 25,4 mm (1 in) οι διαστάσεις του δοκιμίου θα πρέπει ν' αυξάνονται αναλογικά.

Η μέθοδος βασίζεται στην μέτρηση του ανοίγματος των χειλέων της εγκοπής (CMOD) με την βοήθεια του μηκυνσιομέτρου σ' αντιστοιχία με το εφαρμοζόμενο φορτίο P , το οποίο το δίνει κάθε χρονική στιγμή η μηχανή που χρησιμοποιείται.

Αρχικά υπολογίζεται το μέτρο Young (E) σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση

όπου τα S , α_o , W , B έχουν ήδη προσδιοριστεί, το C_1 είναι η αρχική ευκαμψία (σχ. 5.4.2) ενώ το $V_1(a)$ προσδιορίζεται απ' την σχέση

$$V_1(a) = 0,76 - 2,28 \cdot \alpha + 3,87 \cdot \alpha^2 - 2,40 \cdot \alpha^3 + 0,66 / (C_1 - \alpha^2) \quad (2)$$

όπου

$$\alpha = \frac{\alpha_o + H_o}{W + H_o}$$

Ο συντελεστής έντασης K_{Ic} υπολογίζεται ως εξής.

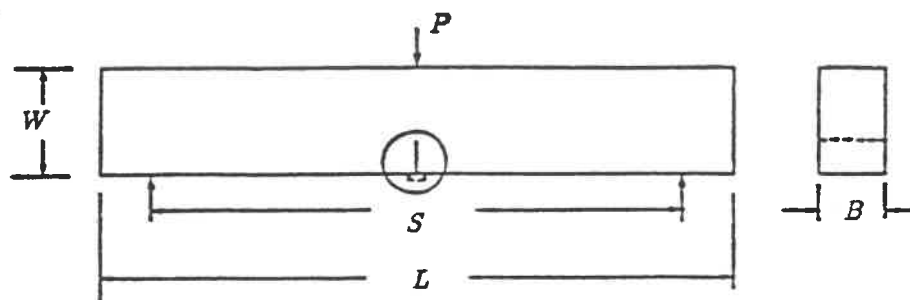
Προσδιορίζεται πρώτα το ενεργό κρίσιμο μήκος της ρωγμής $\underline{a}^*$ ($\underline{a} = \alpha_o +$ μήκος ρωγμής όταν το φορτίο γίνει μέγιστο) απ' την (3) λύνοντας ως προς $\underline{a}$

$$E = 6 \cdot \int \alpha V_1(a) / C_u^{**} \cdot W^2 \cdot B \quad (3)$$

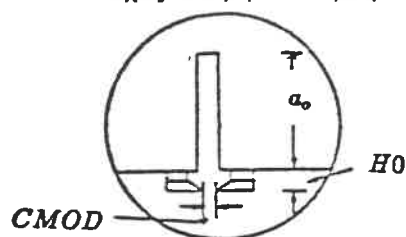
όπου το $V_1(a)$ δίδεται απ' την (2) με την διαφορά ότι τώρα είναι

$$\alpha = \frac{\underline{a} + H_o}{W + H_o}$$

ενώ το C_u είναι η ευκαμψία (σχ. 5.42) την στιγμή που έχει

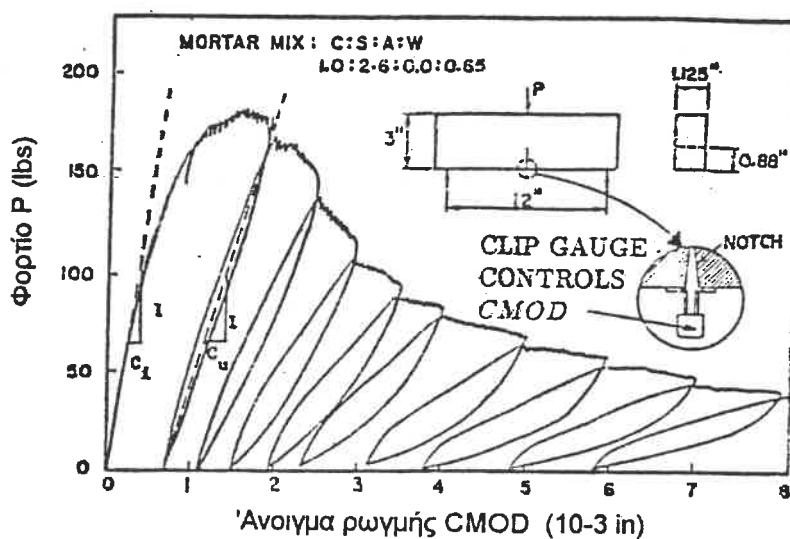


P = Φορτίο
 L = Μήκος δοκιμίου
 S = Απόσταση στηρίξεων
 W = Ύψος δοκιμίου
 B = Πλάτος δοκιμίου
 $H0$ = Πάχος του μηχανισιομέτρου



a_o = Αρχικό μήκος εγκοπής
 $CMOD$ = Crack mouth opening displacement
 Άνοιγμα ρωγμής

σχ. 5.4.1. Τυπική διάταξη κάμψης τριών σημείων και χαρακτηριστικά μεγέθη και διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν.



σχ.5.4.2. Τυπικό διάγραμμα φορτίου - άνοιγμα ρωγμής

ξεκινήσει η διαδικασία της αποφόρτισης και το εφαρμοζόμενο φορτίο είναι το 95% του μέγιστου που ήδη έχει εφαρμοσθεί.

* Η ρωγμή ξεκινά να διαδίδεται ακριβώς πάνω απ' την εγκοπή που έχει γίνει και σε επίπεδο παράλληλο ως προς το επίπεδο της εφαρμοζόμενης δύναμης P (είναι πιθανό μάλιστα τα δύο επίπεδα να συμπίπτουν).

** Λόγω του ότι είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί η αποφόρτιση ακριβώς την στιγμή που το φορτίο είναι το 95% του μέγιστου έχει γίνει γραμμική παρεμβολή και έχει προσδιοριστεί η C_u σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$C_u : C_i + (C_p - C_i) \cdot 0,05 P_{\max} / (P_{\max} - P)$$

όπου

C_i : Η αρχική ευκαμψία

P, C_p : Η δύναμη και η αντίστοιχη ευκαμψία την στιγμή που πραγματοποιείται η αποφόρτιση.

Αυτή η στιγμή μπορεί να προσδιορίζεται χρονικά πριν ή και μετά της στιγμής όπου το φορτίο είναι ακριβώς το 95% του μέγιστου.

Ο συντελεστής K_{IC} τότε υπολογίζεται απ' την σχέση:

$$K_{IC}^2 = \frac{3 \cdot P_{\max} \cdot S}{2 \cdot B \cdot W^2} \sqrt{n \cdot \underline{a}} F(\alpha) \quad (4)$$

όπου

$\underline{a}$: το κρίσιμο ενεργό μήκος της ρωγμής

Το $f(\alpha)$ προσδιορίζεται απ' την σχέση

$$F(a) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1,99 - a(1-a)(2,15 - 3,93a + 2,7a^2)}{(1+2a)(1-a)^{3/2}}$$

όπου

$$a = \underline{a}/W$$

και

P_{max} : το μέγιστο φορτίο που μετρήθηκε.

Η μέθοδος προσδιορίζει και το κρίσιμο άνοιγμα της αιχμής της ρωγμής (CTOD: Crack Tip Opening Displacement) σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση

$$CTOD = \frac{6 P_{max} \cdot S \cdot a}{W^2 \cdot B \cdot E} V_1(a) \left\{ (1-\beta^2) + (-1,149a + 1,081)(\beta - \beta^2) \right\}^{1/2}$$

όπου

$$a = \underline{a}/w \quad \text{και} \quad \beta = \underline{a}_0/\underline{a}$$

Προδιαγραφές και προετοιμασία των δοκιμίων

Οι διαστάσεις του δοκιμίου που προτείνουν οι Shah και Carpinteri για μέγιστο μέγεθος αδρανούς 25,4 mm είναι οι εξής:

$$L \times W \times B = 711,2 \text{ mm} \times 152,4 \text{ mm} \times 76,2 \text{ mm} \\ (28 \text{ in} \times 6 \text{ in} \times 3 \text{ in})$$

ενώ η απόσταση S μεταξύ των στηρίξεων καθορίζεται ως

$$S = 609,6 \text{ mm} (24 \text{ in}).$$

Το πάχος της εγκοπής δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 3,175 mm (1/8 in).

Τα δοκίμια μετά την παρασκευή τους θα πρέπει να καλυφθούν με λινάτσα ή να διατηρηθούν σε δωμάτιο με 100% σχετική υγρασία και σε θερμοκρασία 21°C - 25°C για τις πρώτες 24 ώρες. Τα δοκίμια θα πρέπει να διατηρηθούν στο

δωμάτιο συντήρησης υπό τις παραπάνω συνθήκες μέχρι και 4 περίπου ώρες πριν τα πειράματα.

Τέλος, το φορτίο πρέπει να ρυθμιστεί έτσι ώστε το μέγιστο φορτίο να επιτυγχάνεται εντός 5 min.

5.5. 2η Μέθοδος (Effective Crack Model [ECM])

Μ'αυτή τη μέθοδο προσδιορίζεται και πάλι ο κρίσιμος συντελεστής έντασης των τάσεων (K_{IC}) ο υπολογισμός του οποίου είναι ουσιαστικά ανεξάρτητος των διαστάσεων του δοκιμίου. Και σ'αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται δοκίμια σε μορφή δοκαριού τα οποία φορτίζονται στο μέσο του μήκους τους με δύναμη P (κάμψη τριων σημείων). Όπως και στο προηγούμενο μοντέλο στην μέση του μήκους των δοκιμίων δημιουργείται μια τεχνητή εγκοπή μήκους a_0 ενώ κατά την διάρκεια της φόρτισης μετريέται με την βοήθεια ενός μηχανοσυστήματος LVDT η παραμόρφωση της κάτω ίνας κατά το επίπεδο της φόρτισης. Το μηχανοσύστημα τοποθετείται ακριβώς δίπλα στην εγκοπή. Στο (σχ. 5.5.1) φαίνεται ένα σκαρίφημα της χρησιμοποιούμενης διάταξης.

Προδιαγραφές και προετοιμασία των δοκιμίων

Η μικρότερη απ'τις διαστάσεις των δοκιμίων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 5 φορές μεγαλύτερη απ'την διάσταση του μέγιστου κόκκου. Το μέγεθος των αδρανών (g) μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 5 - 25 mm. Το πλάτος πρέπει να είναι μεταξύ 40 και 100 mm, ο λόγος S/W μεταξύ 4 και 8 κι ο λόγος a_0/W μεταξύ 0,3 και 0,4. Το πλάτος της εγκοπής δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 3 mm.

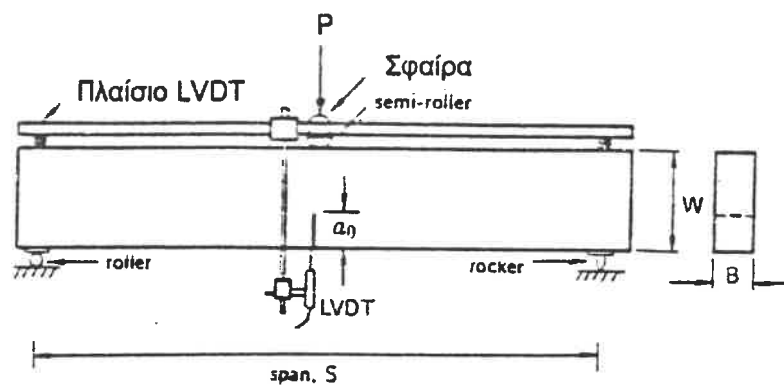
Τα δοκίμια μετά την παρασκευή τους θα πρέπει να διατηρούνται σε δωμάτιο με σχετική υγρασία 100% ή να σκεπα-

στούν με λινάτσα για τις πρώτες 24 ώρες. Η θερμοκρασία θα πρέπει να είναι μεταξύ 21°C και 25°C. Την δεύτερη μέρα τα δοκίμια πρέπει να βγουν απ'τα καλούπια τους ενώ οι σφήνες που έχουν χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία τεχνητών εγκοπών πρέπει ν'αφαιρεθούν προσεχτικά. Στη συνέχεια τα δοκίμια μεταφέρονται στο δωμάτιο συντήρησης όπου και παραμένουν μέχρι και 1 ώρα πριν την έναρξη των πειραμάτων.

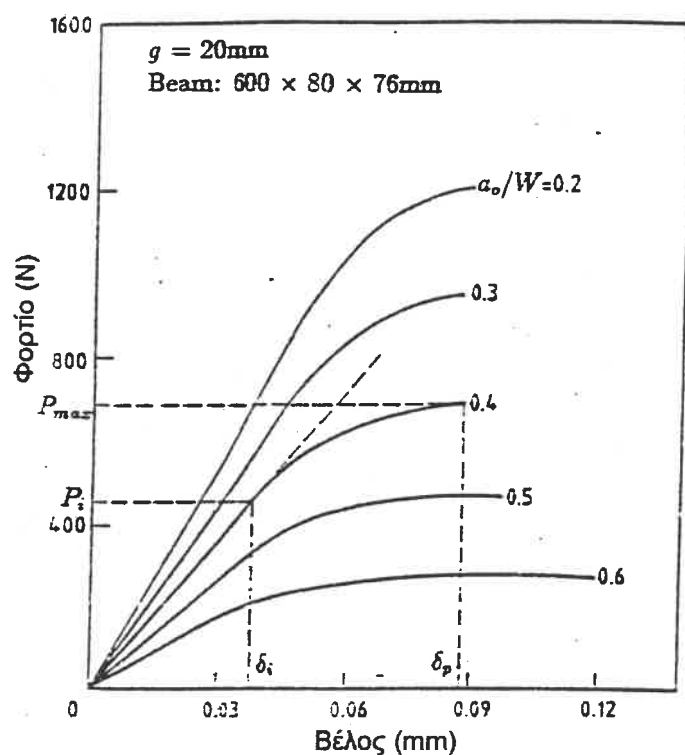
Υπολογισμός του (K_{Ic0})

Στην αρχή κατασκευάζεται ένα διάγραμμα (P-δ). Υπενθυμίζεται ότι το (δ) είναι η παραμόρφωση ακριβώς δίπλα στην τεχνητή εγκοπή κατά την διεύθυνση της φόρτισης και μετριέται απ'το LVDT. Απ'αυτό το διάγραμμα εντοπίζουμε δύο ζεύγη σημείων. Το (P_i, δ_i) και το (P_{max}, δ_p). Το πρώτο ζεύγος αντιστοιχεί στην στιγμή που η καμπύλη (P-δ) από ευθύγραμμη αρχίζει και καμπυλώνεται. Το δεύτερο ζεύγος αντιστοιχεί στην στιγμή όπου το φορτίο έχει πάρει την μέγιστη τιμή του P_{max} . Ενδεικτικές καμπύλες P-δ φαίνονται στο (σχ. 5.5.2) για διάφορους λόγους α_0/W . Τα δύο χαρακτηριστικά ζεύγη σημείων φαίνονται στο παραπάνω σχήμα για $\alpha_0/W = 0,4$. Αφού έχουν βρεθεί τα παραπάνω ζεύγη προσδιορίζεται το μέτρο E σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση.

$$E = \frac{P_i}{4B_i\delta_i} \left(\frac{S}{W} \right)^3 \left[1 + \frac{5\omega S}{8P_i} + \left(\frac{W}{S} \right)^2 \left\{ 9,70 + 1,35 \frac{\omega \cdot S}{P_i} \right\} - 0,84 \left(\frac{W}{S} \right)^3 \right] + \frac{9}{2} \frac{P_i}{B \cdot \delta_i} \left(1 + \frac{\omega \cdot S}{2P_i} \right) \left(\frac{S}{W} \right)^2 F_2(\alpha_0) \quad (1)$$



σχ. 5.5.1. Συσσκευή φόρτισης και διάταξη στην οποία προσαρμόζεται το LVDT.



σχ.5.5.2. Τυπικό διάγραμμα (P-δ) μέχρι το μέγιστο φορτίο για διάφορες πμές του λόγου (a_0/W).

όπου

W : το ήμισυ του ιδίου βάρους της δοκού

και

$$F_2(\alpha_0) = \int_0^{\alpha_0} \beta F_1^2(\beta) d\beta$$

όπου

$$\alpha_0 = \alpha_0 / W$$

και

$$F_1(\beta) = \frac{1,99 - \beta(1-\beta)(2,15 - 3,93\beta + 2,70\beta^2)}{(1+2\beta)(1-\beta)^{3/2}}$$

Για $S/W = 4$ ή 8 το $F_1(B)$ θα μπορούσε να προσδιοριστεί με περιθώριο λάθους μικρότερο του 1% σύμφωνα με το ακόλουθο μοντέλο.

$$F_1(B) = A_0 + A_1 \cdot B + A_2 \cdot B^2 + A_3 \cdot B^3 + A_4 \cdot B^4$$

όπου

$$0,1 < B < 0,6$$

με

$$A_0 = 0,0075 (S/W) + 1,90$$

$$A_1 = 0,0800 (S/W) - 3,39$$

$$A_2 = -0,2175 (S/W) + 15,40$$

$$A_3 = 0,2825 (S/W) - 26,24$$

$$A_4 = -0,1450 (S/W) + 26,38$$

Υπολογισμός α_0

Το κρίσιμο μήκος α_0 της ρωγμής μπορεί να υπολογιστεί αν θεωρήσουμε δοκό μ' ένα θεωρητικό μήκος εγκοπής ίσο με α_0 της οποίας η ακαμψία θα ήταν ίση με την μειωμένη ακαμ-

ψία μιας πραγματικής δοκού, ύστερα από την περάτωση μιας μονοτονικής φόρτισης, μέχρι το P_{max} η οποία θα είχε αρχικό μήκος εγκοπής α_0 .

Το E αρχικά για την εγκοπή μήκους θα υπολογίζεται σύμφωνα με την (1).

Αυτή τώρα μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\delta_p = \frac{P_{max}}{4BE} \left(\frac{S}{W} \right)^3 \left[1 + \frac{5WS}{8P_{max}} + \left(\frac{W}{S} \right)^2 \left\{ 2,70 + 1,35 \frac{WS}{P_{max}} \right\} - 0,84 \left(\frac{W}{S} \right)^3 \right] + \frac{9}{2} \frac{P_{max}}{B \cdot E} \left(1 + \frac{WS}{2P_{max}} \right) \left(\frac{S}{W} \right)^2 F_2(\alpha_e) \quad (4)$$

όπου

$$F_2(\alpha_e) = \int_0^{\alpha_e} \beta F_1^2(\beta) d\beta$$

με

$$\alpha_e = \frac{a_e}{W}$$

και

$F_1(B)$: όπως προσδιορίζεται απ' την (3).

Ο τρόπος υπολογισμού του α_0 έχει ως εξής:

Για $\alpha = \alpha_0$ υπολογίζεται απ' την (5) το $F_2(\alpha) = F_2(\alpha_0)$ και στην συνέχεια απ' την (4) το E . Προφανώς για $\alpha = \alpha_0$. Το E είναι αυτό που προσδιορίζεται κι απ' την (1), αφού πρόκειται για την ίδια σχέση. Στην συνέχεια θεωρώντας ότι η ρωγμή έχει επεκταθεί κατά $\Delta\alpha = 0,001 \text{ mm}$ (δηλαδή τώρα το (α) είναι: $\alpha = \alpha_0 + 0,001$) προσδιορίζουμε ένα νέο $F_2(\alpha)$ και απ' την (4) ένα νέο E (ας το ονομάσουμε E^*) το οποίο αναμένεται να είναι μικρότερο του αρχικού E που

προσδιορίστηκε για $\alpha = \alpha_0$. Συγκρίνουμε τώρα τα E, E^* . Αν ισχύει

$$E^* > E \pm 0,5\%$$

συνεχίζουμε τις επαναλήψεις. Θεωρούμε δηλ. ένα νέο $\alpha = \alpha_0 + 2 \cdot 0,001 = \alpha_0 + 0,002$ και μ'αυτό προσδιορίζουμε ένα νέο $F_2(\alpha)$ κι ένα νέο E^{**} . Συγκρίνουμε στην συνέχεια το E^{**} με το E^* σύμφωνα με την παραπάνω σχέση.

Αν ικανοποιείται η σχέση θεωρούμε ένα νέο α κι επαναλαμβάνουμε την διαδικασία. Οι επαναλήψεις σταματάνε όταν για δύο διαδοχικά υπολογισθέντα E (E^n και E^{n+1} , n : αύξων αριθμός της επανάληψης) ισχύει:

$$|E^{n+1} - E^n| \leq 0,5 \%$$

Η τιμή του (α) για την οποία η παραπάνω σχέση είναι αληθής καλείται ενεργό κρίσιμο μήκος της ρωγμής (α_0).

Βρέθηκε ότι η εξίσωση (προέκυψε μέσω της διαδικασίας της παλινδρόμησης) που εκφράζει καλύτερα το (α_0) συναρτήσει χαρακτηριστικών μεγεθών του δοκιμίου και της εφαρμοζόμενης δύναμης είναι η παρακάτω

$$\frac{Q_e}{W} = \gamma_1 \left(\frac{G_n}{E} \right)^{\delta_2} \left(\frac{Q_0}{W} \right)^{\delta_3} \left(1 + \frac{g}{W} \right)^{\delta_4}$$

όπου

$$G_n = \frac{GM}{B \cdot W^2}, \quad M = \left(P_{max} + \frac{W \delta}{2} \right) \frac{\delta}{4}$$

$$\gamma_1 : 0,088 \pm 0,004$$

$$\gamma_2 : -0,208 \pm 0,010$$

$$\gamma_3 : 0,451 \pm 0,013$$

$$\gamma_4 : 1,653 \pm 0,109$$

Μετά τα παραπάνω το (K_{IC}) υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση

$$K_{IC}^e = G_n \sqrt{a_e} F(a)$$

όπου

$$a = a_e / W$$

Το $F(a)$ υπολογίζεται απ' την (3) αν αντικαταστήσουμε το (B) με το (α).

Προκειμένου να διαπιστωθεί το κατά πόσο καλή είναι η συσχέτιση μεταξύ των K_{IC} όπως υπολογίζονται απ' τις δύο παραπάνω προτεινόμενες μεθόδους διεξήχθη σειρά πειραμάτων με διάφορα μίγματα με κωδικούς: C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 . Τα επιμέρους συστατικά των μιγμάτων και οι χαρακτηριστικοί λόγοι (A/C, W/C) φαίνονται στον (Πίν. 5.5.1).

Οι διαστάσεις των δοκιμών και οι λόγοι a_0/W για κάθε δοκίμιο φαίνονται στον (Πίν. 5.5.2).

Στον (Πίν. 5.5.3) φαίνονται τα μετρηθέντα μεγέθη όπως αυτά προσδιορίζονται απ' τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν και στον (Πίν. 5.5.4) ο τελικός υπολογισμός των συντελεστών έντασης των τάσεων K_{IC} και K_{ICe} για την 1η και 2η αντιστοίχως μέθοδο.

Εύκολα παρατηρεί κανείς από μια πρώτη ματιά ότι η συσχέτιση των τιμών των συντελεστών για κάθε δοκίμιο είναι πάρα πολύ καλή γεγονός που οδηγεί στην αμφότερη αξιοπιστία των προτεινόμενων μεθόδων.

Πίνακας 5.5.1.

Χαρακτηριστικά στοιχεία μίγματος*	Μ Ι Γ Μ Α				
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
Βασάλτης, 20 mm	1127,2	1108,5	1079,4	1027,9	952,5
Βασάλτης, 5 mm	393,2	386,6	376,5	358,5	332,2
Αμμος Σίδνεϋ	284,6	279,9	272,5	259,5	240,5
Ιπτάμενη τέφρα	86,7	85,2	83	79	73,5
Τσιμέντο τύπου Α	223,1	271,6	347,2	480,9	732,9
Νερό	204,7	201,3	196,0	186,7	155,2
Υπερπλαστικοποιητής	-	-	-	-	4.000
Λόγος: Αδρανών/τσιμέντο	6,9	5,8	4,6	3,2	2,0
Λόγος: Νερού/τσιμέντο	0,77	0,64	0,50	0,36	0,20
Κάθιση	100	100	100	100	100

* Τα συστατικά στοιχεία των μιγμάτων δίνονται σε (kg/m³)

5.5.2

Sl. No.	Specimen Designation	Specimen Size, mm $S \times B \times W$	a_0/W
1	C1-1	800×81×203	0.296
2	C1-2	800×81×204	0.294
3	C1-3	800×81×204	0.294
4	C2-1	800×81×203	0.296
5	C2-2	800×81×203	0.296
6	C2-3	800×81×203	0.296
7	C2-4	800×81×203	0.296
8	C3-1	800×80×203	0.296
9	C3-2	800×80×203	0.296
10	C3-3	800×81×204	0.294
11	C4-1	800×82×204	0.289
12	C4-2	800×80×203	0.296
13	C4-3	800×81×204	0.294
14	C4-4	800×81×204	0.294
15	C5-1	800×80×203	0.296
16	C5-2	800×80×203	0.296
17	C5-3	800×82×203	0.289
18	C5-4	800×82×204	0.289

5.5.3

No.	Specimen	a_0/W	P_{max} (N)	δ_i (mm)	δ_p (mm)	C_i $mm/N \times 10^{-5}$	C_u
1	C1-1	0.296	3840	0.052	0.086	0.600	1.210
2	C1-2	0.294	4120	0.056	0.084	0.584	1.240
3	C1-3	0.294	4000	0.055	0.082	0.601	1.480
4	C2-1	0.296	5200	0.060	0.091	0.467	1.020
5	C2-2	0.296	5150	0.060	0.090	0.471	1.060
6	C2-3	0.296	5100	0.060	0.090	0.475	1.020
7	C2-4	0.296	5120	0.060	0.090	0.493	1.020
8	C3-1	0.296	5450	0.058	0.087	0.464	0.981
9	C3-2	0.296	5660	0.060	0.089	0.464	0.964
10	C3-3	0.294	5900	0.060	0.088	0.446	0.946
11	C4-1	0.289	6720	0.060	0.088	0.378	0.792
12	C4-2	0.296	6000	0.057	0.082	0.406	0.828
13	C4-3	0.294	6500	0.060	0.088	0.375	0.755
14	C4-4	0.294	6380	0.058	0.085	0.382	0.793
15	C5-1	0.296	7500	0.065	0.093	0.392	0.743
16	C5-2	0.296	7780	0.065	0.094	0.378	0.728
17	C5-3	0.289	8600	0.070	0.100	0.354	0.649
18	C5-4	0.289	9170	0.073	0.103	0.343	0.647

5.5.4

Specimen	a_0/W	a_c/W	a_c/W (Eqn. 31)	a/W	K_{Ic}^c $MPa\sqrt{m}$	K_{Ic}^u	CTOD _c (mm)
C1-1	0.296	0.450	0.451	0.429	0.980	0.923	0.0471
C1-2	0.294	0.440	0.444	0.436	1.013	1.001	0.0242
C1-3	0.294	0.439	0.447	0.464	0.982	1.655	0.0284
C2-1	0.296	0.443	0.453	0.444	1.287	1.294	0.0275
C2-2	0.296	0.440	0.454	0.449	1.264	1.298	0.0266
C2-3	0.296	0.440	0.455	0.440	1.252	1.253	0.0258
C2-4	0.296	0.440	0.454	0.433	1.257	1.232	0.0253
C3-1	0.296	0.439	0.450	0.437	1.348	1.343	0.0254
C3-2	0.296	0.436	0.446	0.434	1.386	1.380	0.0263
C3-3	0.294	0.430	0.443	0.437	1.393	1.419	0.0266
C4-1	0.289	0.426	0.436	0.429	1.546	1.559	0.0257
C4-2	0.296	0.426	0.448	0.431	1.426	1.446	0.0240
C4-3	0.294	0.430	0.441	0.427	1.531	1.516	0.0232
C4-4	0.294	0.430	0.443	0.432	1.504	1.514	0.0237
C5-1	0.296	0.423	0.433	0.417	1.758	1.730	0.0267
C5-2	0.296	0.426	0.432	0.420	1.838	1.808	0.0256
C5-3	0.289	0.416	0.422	0.404	1.913	1.851	0.0257
C5-4	0.289	0.412	0.416	0.409	2.015	2.000	0.0266

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

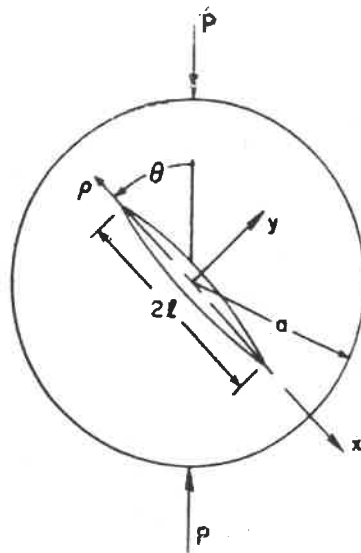
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ K_I , K_{II}

Στο Κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται η μαθηματική ανάλυση του προσδιορισμού του συντελεστή K για ψαθυρά υλικά όπως αναπτύχθηκε απ' τον Atkinson.

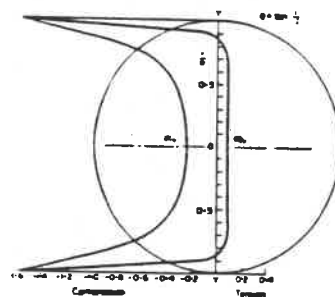
Η μέθοδος βασίζεται στην αντιδιαμετρική θλίψη ενός κυλινδρικού δοκιμίου και στον προσδιορισμό της δύναμης θραύσης του η οποία σε συνδυασμό με κάποιους άλλους συντελεστές N_I , N_{II} όπως προκύπτει απ' την ανάλυση που ακολουθεί δίδει τον συντελεστή έντασης των τάσεων του υλικού.

Θεωρούμε δοκίμιο ακτίνας (d) το οποίο φορτίζεται αντιδιαμετρικά με φορτίο (P) και περιέχει κεντρική ρωγμή μήκους ($2l$). Θεωρούμε επίσης σύστημα ορθογώνιων συντεταγμένων Oxy με αρχή των αξόνων το κέντρο της ρωγμής (δηλ. σε απόσταση $l/2$ απ' τις ακμές της ρωγμής) και τον άξονα X να ταυτίζεται με τον διαμήκη άξονα της ρωγμής (σχ. 6.1).

Αν θεωρήσουμε τον άξονα X κατακόρυφο τότε κατά το μεγαλύτερο μήκος της κατακόρυφης διαμέτρου όπως προκύπτει και απ' την ανάλυση του τασικού πεδίου (σχ. 6.2) αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις μ' αποτέλεσμα κάποια στιγμή με την αύξηση του φορτίου να προκληθεί διάδοση της ρωγμής κατά τον άξονα X (δηλαδή σε διεύθυνση κάθετη ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις) μέχρι την τελική θραύση του δοκιμίου. Αν η γωνία θ δεν είναι μηδενική τότε κατά το μήκος



σχ. 6.1. Γεωμετρία ενός βραζιλιανού δίσκου που περιέχει κεντρική ρωγμή.



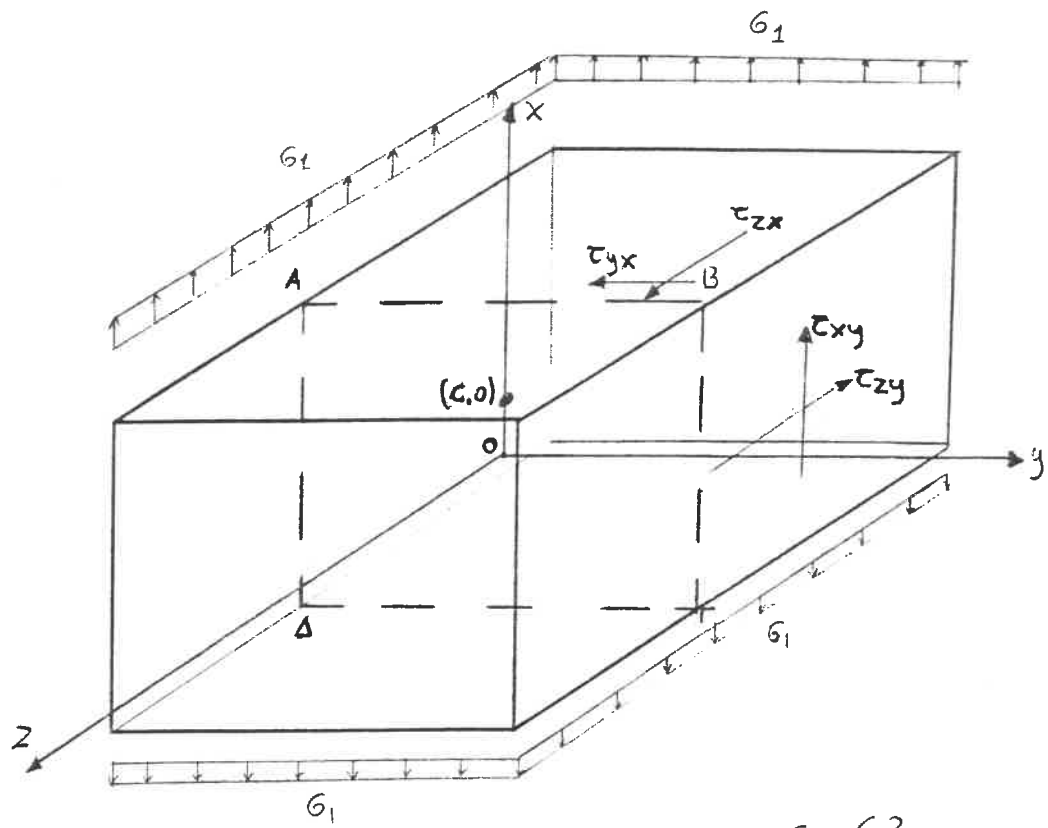
β) Ορθές τάσεις κατά μήκος της κατακόρυφου διαμέτρου . [20]

των παρειών της ρωγμής αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις οι οποίες τείνουν να προκαλέσουν ολίσθηση των παρειών ως προς τον άξονα X οπότε παράλληλα με την εμφάνιση εφελκυστικών τάσεων κάθετα στον X έχουμε και την ανάπτυξη διατμητικών παράλληλα προς αυτόν. Το φαινόμενο τότε είναι πιο σύνθετο και τότε εκτός απ' τον K_{xc} υπολογίζεται και ο K_{xzc} που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση των χειλών της ρωγμής σύμφωνα με τον συνεπίπεδο διατμητικό τύπο II. (βλ. παράγραφο 2.3).

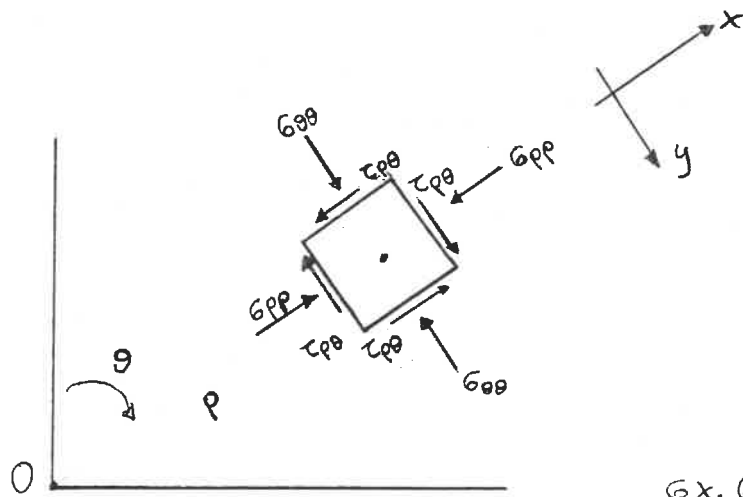
Κατά τον Atkinson η ρωγή μπορεί ν'αντικατασταθεί μ' ένα σύνολο ασυνεχειών (dislocations) οι οποίες αναπτύσσονται κατά την κύρια διεύθυνση της ρωγμής. Αν θεωρήσουμε μια και μοναδική ασυνέχεια τότε αυτή δημιουργεί γύρω της ένα ανομοιόμορφο τασικό πεδίο. Αν η ασυνέχεια βρίσκεται στην θέση (C, 0) ως προς ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων Oxy (σχ. 6.3) τότε κατά την διεύθυνση του οριζόντιου άξονα x οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις τ_{yx} δεδομένου ότι η ασυνέχεια βρίσκεται εντός της μάζας του υλικού (εννοείται ότι βρίσκεται και πάνω στο επίπεδο αναφοράς Oxy) δίνονται απ' τον Head σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\tau_{yx} = D \left(\frac{1}{x-c} - \frac{P}{x+c} - \frac{Qc}{(x+c)^2} + \frac{R \cdot c}{2(1+G_1)(x+c)^2} - \frac{S c (x-c)}{2(1+G_1)(x+c)^3} \right), \quad (1), \quad (\text{βλ. σχ. 6.3})$$

όπου οι παράγοντες P, Q, R, S δίδονται σαν συνάρτηση των



G x 6.3



G x 6.4.

ελαστικών σταθερών (E_1, σ_1) του υλικού

και

$$D = \frac{E_1}{4\pi(1-\sigma_1^2)} \quad \dot{\eta} \quad D = \frac{2G}{\pi(K+1)}$$

όπου

G : Το τέμνων μέτρο ελαστικότητας

K : $3-4\nu$ (για επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση)

K : $(3-\nu)/(1+\nu)$ (για επίπεδη εντατική κατάσταση)

ν : Ο λόγος Poisson

Δεδομένου όμως ότι η παραπάνω τ_{yx} οφείλεται στην ύπαρξη μιας και μόνο ασυνέχειας για να προσδιορίσουμε τις τάσεις τ_{yx} που οφείλονται στο σύνολο των ασυνεχειών θεωρούμε ένα συντελεστή πυκνότητας ασυνεχειών $N(c)$.

Ο συντελεστής αυτός δίνει ένα μέτρο της πυκνότητας των ασυνεχειών κατά μήκος του κυρίου άξονα της ρωγμής. Θεωρούμε ότι η ρωγμή μπορεί να αναπαρασταθεί μ' ένα σύνολο ασυνεχειών κατά μήκος του X με πυκνότητα $N(C)$, όπου το (C) παίρνει τιμές μεταξύ του σημείου $(c_{1,0})$ όπου θεωρούμε ότι βρίσκεται η πρώτη ασυνέχεια και του $(c_{2,0})$ όπου θεωρούμε ότι βρίσκεται η δεύτερη ασυνέχεια.

Έτσι η (1) γίνεται

$$\tau_{yx} = DN(c) \left(\frac{1}{x-c} - \frac{P}{x+c} - \frac{Q \cdot c}{(x+c)^2} + \frac{R \cdot c}{2(1+\sigma_1)(x+c)^2} - \frac{\beta \cdot c(x-c)}{2(1+\sigma_1)(x+c)^3} \right)$$

Η (2) ισχύει όχι μόνο για τις διατμητικές τάσεις τ_{yx} αλλά και για τις σ_y .

Προκειμένου να προσδιορίσουμε το $N(c)$ αντικαθιστούμε τις τ_{xy} (ή τις σ_y) με τις αντίστοιχες τάσεις οι οποίες αναπτύσσονται καθ'όλο το μήκος της ρωγμής όταν όμως θεωρήσουμε ότι δεν υπάρχει στο διάστημα $[(c_{1,0}) - (c_{2,0})]$ ρωγή. Οι τάσεις αυτές συναρτήσει της εξωτερικής εφαρμοζόμενης δύναμης P δίνονται σε πολικό σύστημα συντεταγμένων απ' τις παρακάτω σχέσεις

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{2P}{n \cdot d} \left[\frac{1}{2} - \frac{(1 - \frac{P}{d} \cos \theta) \sin^2 \theta}{(1 + \frac{P^2}{d^2} - 2 \frac{P}{d} \cos \theta)^2} - \frac{(1 + \frac{P}{d} \cos \theta) \sin^2 \theta}{(1 + \frac{P^2}{d^2} + 2 \frac{P}{d} \cos \theta)^2} \right]$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{2P}{n \cdot d} \left[\frac{(1 - \frac{P}{d} \cos \theta)(\cos \theta - \frac{P}{d}) \sin \theta}{(1 + \frac{P^2}{d^2} - 2 \frac{P}{d} \cos \theta)^2} + \frac{(1 + \frac{P}{d} \cos \theta)(\cos \theta + \frac{P}{d}) \sin \theta}{(1 + \frac{P^2}{d^2} + 2 \frac{P}{d} \cos \theta)^2} \right]$$

Οι διευθύνσεις κατά τις οποίες ασκούνται οι παραπάνω τάσεις φαίνονται στο (σχ. 6.4). Εκτός απ' τις εφαπτομενικές τάσεις ($\sigma_{\theta\theta}$) και τις διατμητικές ($\tau_{r\theta}$) διακρίνονται και οι ακτινικές (σ_{rr}) οι οποίες όμως δεν υπεισέρχονται στην ανάλυση του προβλήματος και γι' αυτό δεν δίνεται εδώ η αναλυτική μορφή τους. Σημειώνεται επίσης ότι οι φορές των τάσεων όπως παρουσιάζονται είναι απλά ενδεικτικές.

Οι παραπάνω σχέσεις υπό μορφή σειράς δίνονται παρακάτω

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{P}{n \cdot d} \sum_{i=1}^n A_i(\theta) \left(\frac{P}{d}\right)^{2i-2} \quad (3)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{2P \sin 2\theta}{n \cdot d} \sum_{i=1}^n B_i(\theta) \left(\frac{P}{d}\right)^{2i-2} \quad (4)$$

Τα $A_i(\theta)$ και $B_i(\theta)$ είναι αριθμητικοί συντελεστές που προκύπτουν απ' την ανάλυση των αρχικών σχέσεων σε μορφή σειράς, και η ανάπτυξή τους συναρτήσει της γωνίας θ δίνεται στον πίνακα που ακολουθεί για $i = 1$ μέχρι 5.

$$A_1 = 1 - 4 S^2$$

$$A_2 = 8 S^2 (1 - 4 C^2)$$

$$A_3 = -4 S^2 (3 - 36 C^2 + 48 C^4)$$

$$A_4 = -16 S^2 (-1 + 24 C^2 - 80 C^4 + 64 C^6)$$

$$A_5 = -20 S^2 (1 - 40 C^2 + 240 C^4 - 448 C^6 + 256 C^8)$$

$$B_1 = 1$$

$$B_2 = -5 + 8 C^2$$

$$B_3 = -3 + 8 (3 - 2 C^2) (2 - 3 C^2)$$

$$B_4 = 3 + 16 (1 - 2 C^2) - 12 (1 - 2 C^2)^2 - 32 (1 - 2 C^2)^3$$

$$B_5 = 5 - 16 (1 - 2 C^2) - 60 (1 - 2 C^2)^2 + 32 (1 - 2 C^2)^3 + 80 (1 - 2 C^2)^4$$

όπου

$$S = \sin\theta, C = \cos\theta, \cos 2\theta = 2C^2 - 1$$

Αν τις παραπάνω τάσεις τις καλέσουμε ως σ_o γενικά τότε αντικαθιστούμε στην (2) την (τ_{yx}) ή την (σ_{yy}) με την αντίστοιχη (σ_o) με αρνητικό όμως πρόσημο. Κι αυτό γιατί η σχέση (2) έχει προσδιοριστεί για μοναξονική εφελκυστική φόρτιση. Αν η φόρτιση αντιστραφεί και γίνει θλιπτική είναι προφανές ότι τα πρόσημα των αναπτυσσόμενων τ_{xy} , σ_{yy} θ'αλλάξουν φορά, επομένως και των αντίστοιχων σ_o

Έτσι η (2) μετά τα παραπάνω γράφεται ως εξής:

$$-\frac{G_o(x)}{D} = \frac{N(C)}{x-C} + N(C) Q_o(C, x) \quad (5)$$

όπου

$\sigma_0(x)$ η ανάπτυξη των (σ_0) σε καρτεσιανές συντεταγμένες και

$$Q_0(c, x) = -\frac{P}{x+c} - \frac{cQ}{(x+c)^2} + \frac{c \cdot D}{2(1+G_1)(x+c)^2} - \frac{c(x-c)}{2(1+G_1)(x+c)^3}$$

Για να προσδιορίσουμε το $N(c)$ καθ'όλο το μήκος της προκαθορισμένης ρωγμής δεν έχουμε παρά να ολοκληρώσουμε την σχέση (5) λαμβάνοντας ως αρχική τιμή το $(c_{1,0})$ και ως τελική το $(c_{2,0})$. Έτσι έχουμε

$$\frac{G_0(x)}{D} + \int_{c_1}^{c_2} \frac{N(c)}{x-c} dc + \int_{c_1}^{c_2} N(c) Q_0(c, x) dc = 0 \quad (6)$$

Για την περίπτωση κεντρικής ρωγμής μήκους $2l$ όπου η αρχή του συστήματος των αξόνων βρίσκεται στο μέσον του μήκους της ρωγμής η (σ) γράφεται

$$\frac{G_0(x)}{D} + \int_{-l}^l \frac{N(c)}{x-c} dc + \int_{-l}^l N(c) Q_0(c, x) dc = 0 \quad (7)$$

Κάνουμε τους μετασχηματισμούς

οπότε η (7) γίνεται

$$\frac{G_0(x, l)}{D} + \int_{-1}^1 \frac{N_1(c_1)}{x_1 - c_1} dc_1 + \int_{-1}^1 N_1(c_1) Q_0(c_1, x_1) dc_1 = 0 \quad (8)$$

όπου

$$Q_0(c_1, x_1) = \frac{1}{l} \left[-\frac{P}{x_1 + c_1} - \frac{c_1 \cdot Q}{(x_1 + c_1)^2} + \frac{c_1 \cdot D}{2(1+G_1)(x_1 + c_1)^2} - \frac{c_1(x_1 - c_1)}{2(1+G_1)(x_1 + c_1)^3} \right]$$

Η (8) γράφεται

$$\int_{-1}^1 \frac{N_1(c_1)}{c_1 - x_1} dc_1 = \frac{G_0(\ell x_1)}{D} + \int_{-1}^1 N_1(c_1) Q_0(c_1, x_1) dc_1 = 0$$

Θεωρώντας το δεξί μέρος της παραπάνω εξίσωσης γνωστό έχουμε ν'αντιστρέψουμε μια ολοκληρωτική εξίσωση της μορφής

$$\int_{-1}^1 \frac{N_1(c_1)}{c_1 - x_1} dc_1 = f(x_1)$$

έτσι ώστε να προκύψει μια εξίσωση Fredholm η οποία μπορεί να επιλυθεί με μια αριθμητική μέθοδο.

Η αντιστροφή δίνει (Mushkelishvili, Head and Louat)

$$N_1(n) = -\frac{1}{\pi^2 (1-n^2)^{1/2}} \left[\int_{-1}^1 \frac{G_0(\ell x_1) (1-x_1^2)^{1/2} dx_1}{x_1 - n} + \int_{-1}^1 N_1(c_1) F(c_1, n) dc_1 \right] \quad (10)$$

για

$$-1 < n < 1$$

όπου

$$F(c_1, n) = \int_{-1}^1 \frac{Q_0(c_1, x_1) (1-x_1^2)^{1/2} dx_1}{x_1 - n}$$

και

$$G_0(\ell x_1) = \frac{G_0(\ell x_1)}{D}$$

Κάνουμε τις αντικαταστάσεις

$$N_1(n) = N_0(n) / (1-n^2)^{1/2}$$

$$N_1(c_1) = N_0(c_1) / (1-n^2)^{1/2}$$

Οπότε η (10) γίνεται

$$N_0(n) = -\frac{1}{\pi^2} \left[\int_{-1}^1 \frac{G(\varrho x_1)(1-x_1^2)^{1/2}}{x_1-n} dx_1 + \int_{-1}^1 \frac{N_0(c_1)}{(c_1-c_1^2)^{1/2}} F(c_1, n) dc_1 \right] =$$

$$= -\frac{1}{\pi^2} \left[f(n) + \int_{-1}^1 \frac{N_0(c_1)}{(c_1-c_1^2)^{1/2}} F(c_1, n) dc_1 \right]$$

Κάνουμε τους μετασχηματισμούς

$$n = \cos \varphi, \quad c_1 = \cos \omega, \quad x_1 = \cos \omega,$$

Τότε η τελευταία γίνεται

$$N_0(\cos \varphi) = \frac{1}{\pi^2} \left[f(\cos \varphi) + \int_0^\pi N_0(\cos \omega) F(\cos \omega, \cos \varphi) d\omega \right]$$

Η λύση της παραπάνω σχέσης προκύπτει αν την αναπτύξουμε σε άθροισμα σειρών.

Το αποτέλεσμα της ανάπτυξης είναι το ακόλουθο

$$N_0(\cos \varphi_j) = -\frac{1}{\pi^2} \left[f(\cos \varphi_j) + \frac{\pi}{2N} N_0(-1) F(-1, \cos \varphi_j) + \right.$$

$$+ \frac{\pi}{N} \sum_{i=1}^{N-1} N_0(\cos \omega_i) F(\cos \omega_i, \cos \varphi_j) +$$

$$\left. + \frac{\pi}{2N} N_0(-1) F(-1, \cos \varphi_j) \right] \quad (11)$$

όπου

$$\varphi_j = \frac{j\pi}{N}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, N$$

$$\omega_i = \frac{i\pi}{N}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N$$

Η (11) για οποιοδήποτε N και να διαλέξουμε δίνει ένα σύστημα $(N+1)$ εξισώσεων το οποίο επιλύεται και προσδιορίζονται τα $No(-1)$, $No(0)$, $No(1)$.

Απ' τα προσδιορισθέντα $No(\cos\varphi)$ προκύπτουν οι αδιάστατοι συντελεστές έντασης των τάσεων που έχουν την ακόλουθη μορφή.

$$N_I = \sum_{i=1}^N T_i \left(\frac{\ell}{d} \right)^{2i-2} A_i(\theta)$$

$$N_{II} = 2 \sin \chi \theta \sum_{i=1}^N S_i \left(\frac{\ell}{d} \right)^{2i-2} B_i(\theta)$$

όπου

$$N_I = \frac{K_I}{60 \sqrt{\pi \cdot \ell}}, \quad N_{II} = \frac{K_{II}}{60 \sqrt{\pi \cdot \ell}}$$

Τα T_i , S_i είναι αριθμητικοί συντελεστές που προκύπτουν απ' την επίλυση της (11). Για διάφορες τιμές του λόγου (ℓ/d) οι τιμές των T_i , S_i για $(i = 1, 2, \dots, 5)$ δίδονται στον πίνακα 6.1.

Πίν. 6.1

ℓ/d	T_1 S_1	T_2 S_2	T_3 S_3	T_4 S_4	T_5 S_5
0.1	1.014998	0.503597	0.376991	0.376991	0.314159
	1.009987	0.502341	0.376363	0.376363	0.314159
0.2	1.060049	0.514907	0.382430	0.382392	0.318086
	1.039864	0.509959	0.379956	0.380584	0.316245
0.3	1.135551	0.533477	0.391640	0.393835	0.325033
	1.089702	0.522272	0.386086	0.387518	0.320834
0.4	1.243134	0.559734	0.404603	0.408597	0.334831
	1.160796	0.539824	0.394822	0.397403	0.327411
0.5	1.387239	0.594892	0.421949	0.428353	0.347941
	1.257488	0.563966	0.406869	0.410966	0.336447
0.6	1.578258	0.642124	0.445387	0.454861	0.365559
	1.390654	0.597985	0.424037	0.430072	0.349219

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται η πειραματική διαδικασία για καθένα από τα πειράματα που διεξήχθησαν ενώ στην συνέχεια αναλύονται και σχολιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα.

Διεξήχθησαν δύο διαφορετικά είδη πειραμάτων. Σκοπός και των δύο πειραμάτων ήταν να προσδιοριστεί η χαρακτηριστική παράμετρος αντοχής των χρησιμοποιηθέντων υλικών. Η παράμετρος αυτή όπως ήδη έχει αναλυθεί στα προηγούμενα κεφάλαια είναι ο συντελεστής έντασης των τάσεων (K) για τα ψαθυρά υλικά και η διατειθέμενη για θραύση ενέργεια (J) για τα ελαστοπλαστικά υλικά.

Δεδομένου ότι η έρευνα στον τομέα της θραυστομηχανικής σε υλικά όπως στα ασφαλτομίγματα και τα κατεργασμένα με τσιμέντο υλικά είναι ελάχιστα αναπτυγμένες, η βασική επιδίωξη της ερευνητικής αυτής εργασίας δεν ήταν η ακριβής μέτρηση των παραπάνω μεγεθών (K , J) αλλά μια εξέταση των δυνατοτήτων του εργαστηριακού εξοπλισμού σε συνδυασμό με την διερεύνηση των διαφόρων παραδοχών της θραυστομηχανικής και της δυνατότητας εφαρμογής τους στα υπό εξέταση υλικά.

Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από διαφορετικά υλικά, προκειμένου να διερευνηθούν οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν τα υλικά αυτά στις επιλεγμένες δοκίμες της θραυστομηχανικής.

7.1. Φόρτιση κυλινδρικών δοκιμίων σε αντιδιαμετρική θλίψη

Πείραμα 1ο

Σκοπός του πειράματος ήταν να υπολογιστεί η τάση θραύσης κυλινδρικών δοκιμίων τα οποία υποβάλλονταν σε αντιδιαμετρική θλίψη και στην συνέχεια να υπολογιστεί ο συντελεστής έντασης των τάσεων (K_I) για κάθε δοκίμιο, όπως αυτός προσδιορίζεται απ' την ανάλυση του Atkinson (Βλ. Κεφ. 6).

Υπενθυμίζεται εδώ η τελική σχέση που χρησιμοποιήθηκε.

$$K_I = N_I \cdot G_0 \sqrt{\pi \cdot \ell} / B \quad (1)$$

όπου

$$N_I = \sum_{i=1}^5 T_i \left(\ell/d \right)^{2i-2} A_i(\theta) \quad (2)$$

$$G_0 = \frac{P}{\pi \cdot d}$$

B: το ύψος των δοκιμίων.

Τα μεγέθη (P), (l), (d) φαίνονται στο (σχ. 7.2).

Το δεύτερο μέλος της (1) διαιρείται με (B) γιατί η θεωρία του Atkinson υποθέτει ομοιόμορφη φόρτιση ανά μέτρο μήκους γενέτειρας.

7.1.1. Παρασκευή φαθυρών δοκιμίων

Παρασκευάστηκε μια σειρά από σταθεροποιημένα δοκίμια και μια σειρά από ασφαλτικά. Όπως ήδη έχει αναφερθεί το

(K) δεν είναι η πλέον κατάλληλη παράμετρος μέσω της οποίας μπορεί να εκφραστεί ικανοποιητικά η αντοχή ενός ασφαλτικού υλικού αλλά παρ'όλα αυτά υπολογίζονται τα (K) δύο διαφορετικής σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων μόνο και μόνο για να διαπιστωθεί μια πρώτη διαφορά στην τάξη μεγέθους των υπολογισθέντων (K) απ'τα αντίστοιχα των σταθεροποιημένων υλικών.

Παρασκευάστηκαν συνολικά (8) σταθεροποιημένα με τσιμέντο δοκίμια και χρησιμοποιήθηκαν 4 διαφορετικές συνθέσεις υλικών, (2 δοκίμια ανά χρησιμοποιούμενη σύνθεση). Οι κυκλικές ονομασίες των δοκιμών είναι $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$ και D_1, D_2 . Οι συνθέσεις φαίνονται στον Πιν. 7.1.1

Πίνακας 7.1.1.

Συστατικά	Δοκίμια ($i = 1,2$)			
	A_i	B_i	C_i	D_i
Φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα (Kg)	3	-	-	-
Αμμος φρεζ. ασφαλτ/τος (Kg)	-	3	-	1,5
Καθαρή άμμος (Kg)	-	-	3	1,5
Τσιμέντο (gr)	150	150	150	150
Νερό (gr)	190	240	240	240
Μαρμαρόσκονη (gr)	-	100	-	100

7.1.1.1 Διευκρινιστικά σχόλια επί των συνθέσεων των ψα- θυρών δοκιμίων

Το φρεζαρισμένο ασφαλ/μίγμα είναι υλικό που παίρνουμε απ'το φρεζάρισμα ("ξύσιμο") της επιφάνειας των εύκαμπτων οδοστρωμάτων προκειμένου να γίνει επανεπίστρωση αυτών. Το φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα αποτελείται από μίγμα αδρανών περιβεβλημένων με άσφαλτο και από συσσωματώματα λεπτών κόκκων με άσφαλτο. Στην παρασκευή σταθεροποιημένων υλικών παίζει τον ρόλο των "αδρανών" και η χρήση του σαν τέτοιου υλικού μπορεί να αποφέρει μελλοντικά σημαντικά οικονομικά οφέλη δεδομένου ότι είναι ένα φτηνό υλικό. Ταυτόχρονα όμως είναι και νέο υλικό και σαν τέτοιο θα πρέπει να υποβληθεί σ'όλες τις απαραίτητες δοκιμές προκειμένου να διαπιστωθεί η καταλληλότητά του ως υλικού οδοστρώσεως. Γι'αυτό το λόγο όσον αφορά τα πλαίσια μέσα στα οποία κινείται η παρούσα εργασία κρίθηκε σκόπιμο να υπολογισθεί η χαρακτηριστική τιμή αντοχής (K) δοκιμίων τα οποία ως βασικό συστατικό τους δεν έχουν τα κλασσικά αδρανή αλλά φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα. Δύο τέτοια δοκίμια είναι τα A_1 και A_2 . Το φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα έχει κοσκινιστεί απ'το κόσκινο 3/4 in. (19 mm).

Στα δοκίμια B_1 , B_2 χρησιμοποιήθηκε άμμος φρεζαρισμέ-
νου ασφαλτομίγματος την οποία πήραμε απ'την αρχική κοσκι-
νίζοντάς την απ'το κόσκινο No. 4. (4,76 mm). Εδώ χρησιμο-
ποιήθηκε και περισσότερο νερό (8% επί του βάρους των
αδρανών αντί 6% όπως στα A_1 , A_2) για τον λόγο ότι η
συνολική επιφάνεια των αδρανών τώρα είναι μεγαλύτερη κι

επομένως απαιτείται περισσότερο νερό για συμπύκνωση.

Στα δοκίμια B_1 , B_2 και D_1 , D_2 χρησιμοποιήθηκε μαρμαρόσκονη προκειμένου να βελτιωθεί η κοκκομετρική διαβάθμιση, ν' αυξηθεί η συνεκτικότητα μεταξύ των κόκκων των χρησιμοποιηθέντων υλικών και να μειωθεί έτσι ο κίνδυνος ν' ανοίξει το δοκίμιο την στιγμή που αυτό εξωλιύεται απ' το καλούπι του. Η μαρμαρόσκονη δεν επηρεάζει άμεσα την αντοχή του δοκιμίου.

Οι συνθέσεις των μιγμάτων, με το ίδιο ποσοστό τσιμέντου, επελέγησαν έτσι ώστε να παρέχεται η δυνατότητα σύγκρισης των τιμών (K) για:

1. Βαθμιαία μεταβολή του περιεχομένου φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος από 0% [μίγμα C] σε 50% (μίγμα D) και σε 100% (μίγμα B).
2. Μεταβολή του μέγιστου κόκκου / συσσωματώματος από 19mm (μίγμα A) σε 4,76 mm - (μίγμα B).

Τα δοκίμια συμπυκνώθηκαν με την βοήθεια της διάταξης που φαίνεται στο (σχ. 7.1). Η διαδικασία έχει ως εξής. Το μεταλλικό στέλεχος A προσαρμόζεται στην βάση και σταθεροποιείται σ' αυτήν με την βοήθεια κατάλληλων σφικτηρών. Στη συνέχεια ο μεταλλικός δακτύλιος A τοποθετείται στην βάση και μια μεταλλική λάμα πλάτους 2 cm στερεώνεται στην ειδική εγκοπή που υπάρχει στο κέντρο του. Ακολούθως γεμίζουμε το καλούπι με το μίγμα που έχουμε ετοιμάσει από πριν φροντίζοντας ν' αφήσουμε ένα μικρό ελεύθερο μήκος στην κορυφή της λάμας έτσι ώστε στη συνέχεια να τοποθετηθεί πάνω στο υπό συμπύκνωση υλικό ο μεταλλικός δακτύλιος

Β. Προκειμένου να γίνει αυτό στον Β έχει κατασκευαστεί ειδική εγγοπή ανάλογης αυτής του δακτυλίου Α έτσι ώστε να μπορεί η λάμα να περάσει μέσα απ'αυτόν. Τέλος, με την ηλεκτρόσφυρα συμπυκνώνουμε το υλικό αφού προηγουμένως τοποθετηθεί ανάμεσα σ'αυτή και τον δακτύλιο Β το μεταλλικό στέλεχος Β. Η σκοπιμότητα ύπαρξης του στελέχους Β είναι ν'αφήσει κάποιο ελεύθερο ύψος κίνησης της λάμας η οποία κατά την συμπύκνωση, καθώς το υλικό συμπιέζεται αποκαλύπτεται όλο και περισσότερο με αποτέλεσμα να υπάρχει άμεσος κίνδυνος η ηλεκτρόσφυρα να στραβώσει την λάμα αφού πλέον απουσίας του Β έρχεται σε άμεση επαφή μαζί της, με φυσικό επακόλουθο να διαταραχτεί η συνέχεια της μάζας του συμπυκνούμενου υλικού.

Μετά την συμπύκνωση με την βοήθεια ειδικού εξωλκέα βγάζουμε το δοκίμιο απ'το καλούπι και το τοποθετούμε σε υγρό θάλαμο για διάστημα 1 εβδομάδας προκειμένου ν'αποκτήσει αντοχή.

7.1.2. Πειραματική διαδικασία

Μετά από 1 εβδομάδα παραμονής τους σε υγρό θάλαμο τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε αντιδιαμετρική θλιπτική φόρτιση. Για την φόρτιση χρησιμοποιήθηκε μια μηχανή MTS. Η φόρτιση ήταν μονοτονική και ο ρυθμός επιβολής του φορτίου ήταν (1 KN/sec). Το φορτίο κατά την διεξαγωγή του πειράματος καταμετρείτο συνεχώς (ανά εκατοστό του δευτερολέπτου) ηλεκτρονικά απ'την μηχανή. Τ'αποτελέσματα αποθηκεύτηκαν σε δισκέτα και διαβάστηκαν στην συνέχεια με την βοήθεια

του προγράμματος "Excel".

Τα φορτία θραύσης για κάθε ένα απ' τα δοκίμια φαίνονται στον (πίν. 7.1.2.1). Στον ίδιο πίνακα φαίνονται και τα ύψη (πάχη) των δοκιμίων που μετρήθηκαν πριν την επιβολή του θλιπτικού φορτίου. Η διάμετρος όλων των δοκιμίων ήταν (10 cm). Η διεύθυνση της κεντρικής ρωγμής όπως φαίνεται και στο (σχ. 7.1.2.1) είναι παράλληλη προς το επίπεδο φόρτισης. Η θέση αυτή της ρωγμής επιλέχτηκε για τον λόγο ότι όπως ήδη έχει αναφερθεί ο κύριος τύπος παραμόρφωσης των παρειών μιας ρωγμής της στρώσης κυκλοφορίας είναι ο εφελκυστικός τύπος I. (Παράγραφος 2.3). Έτσι όντας η διεύθυνση τον άξονα της ρωγμής παράλληλη ως προς το επίπεδο φόρτισης κατά το μεγαλύτερο ποσοστό του μήκους της κατακόρυφης διαμέτρου και κάθετα προς αυτή αναπτύσσονται μόνο εφελκυστικές τάσεις. Έτσι η γωνία (2) είναι μηδενική (βλ. σχ. 6.1) και επομένως μηδενικός είναι κι ο συντελεστής $N_{\pm\pm}$ (σχέση 13, Κεφ. 6) αφού ($\sin 2\beta = 0$) για ($\beta = 0^\circ$).

Αυτό είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι ο συντελεστής αυτός παίρνει τιμές μόνο στην περίπτωση που έχουμε αναπτύξει διατμητικών τάσεων κάτι που για ($\beta = 0^\circ$) δεν μπορεί να συμβαίνει.

Μετά τα παραπάνω έχοντας σαν δεδομένο τα ύψη και τα φορτία θραύσης και ξέροντας ότι:

$$d = 10/2 = 5 \text{ cm} \quad \text{και} \quad l = 2/2 = 1 \text{ cm}$$

υπολογίζουμε απ' την (2) το $N_{\pm}$ και στην συνέχεια απ' την (1) τα ($K_{\pm}$) για κάθε δοκίμιο.

Ο (N_x) για ($\beta = 0^\circ$) και ($1/d = 0,2$) βρίσκεται ίσος με

$$N_x = 1,0060049$$

Έτσι η (1) τελικά μετά τις αντικαταστάσεις των γνωστών μεγεθών (1) και (d) γίνεται

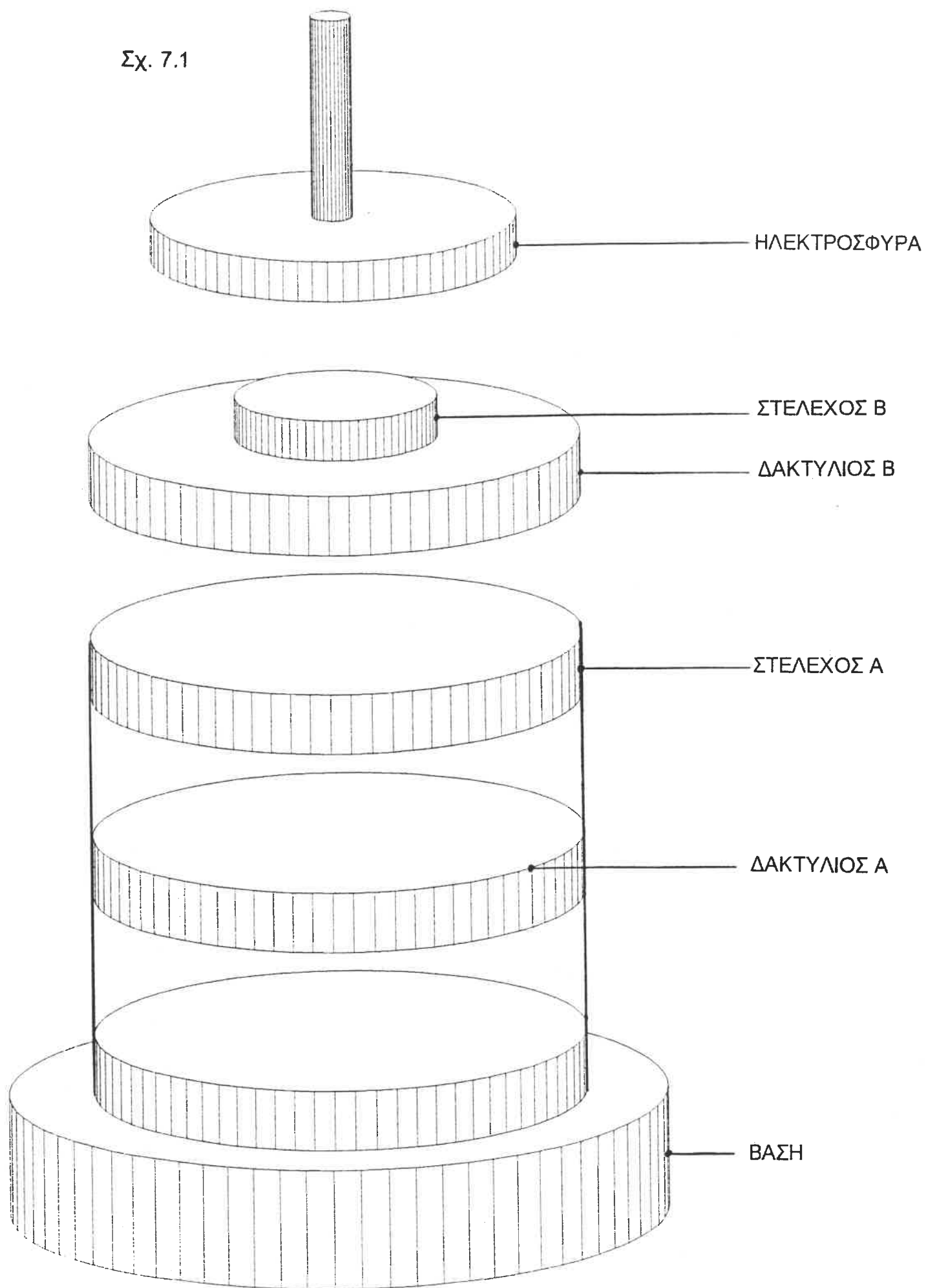
$$K_{IC} = 1,196137 \cdot (Pc/B)$$

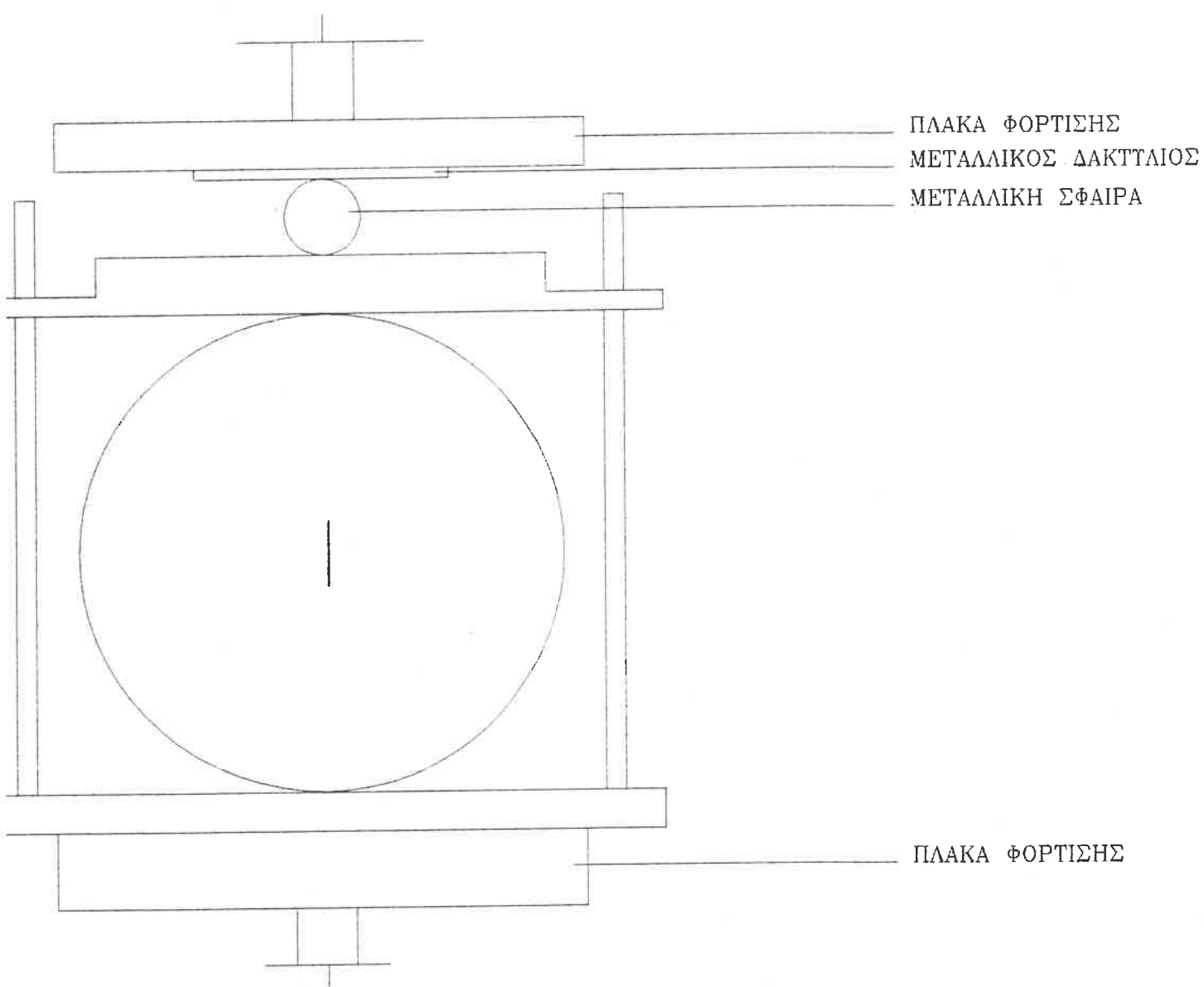
Οι υπολογισθέντες τιμές (K_{IC}) για κάθε δοκίμιο φαίνονται στην 4η στήλη του (Πίν. 7.1.2.1)

Πίνακας 7.1.2.1

ΔΟ- ΚΙ- ΜΙΟ	% φρεζ. Κόσκινο	Ύψος (cm)	Φορτίο θραύσης (Pc) (KN)	Συντ. Έντασης Τάσεων (K_{IC}) ($KNm^{-3/2}$)
A ₁	100	7,05	1,36719	23,196
A ₂	D=19mm	5,85	0,87891	17,971
B ₁	100	6,38	1,36719	25,632
B ₂	D=4,76mm	6,66	1,31836	23,677
C ₁		6,59	2,63672	47,858
C ₂		6,76	2,49023	44,063
D ₁	50	6,30	2,6855	50,987
D ₂		6,10	2,503	49,081

Σχ. 7.1





σχ. 7.1.2.1

7.1.3. Παρασκευή ασφαλτικών δοκιμίων

Για την παρασκευή των ασφαλτικών δοκιμίων δεν χρησιμοποιήθηκε κάποια συγκεκριμένη κοκκομετρική διαβάθμιση δεδομένου ότι όπως έχει ήδη αναφερθεί αυτό που ενδιαφέρει είναι η ανάπτυξη της μεθόδου σαν τρόπου προσδιορισμού του συντελεστή της έντασης των τάσεων κι όχι το πως επηρεάζουν άλλοι παράμετροι (όπως σαφώς συμβαίνει με την κοκκομετρική διαβάθμιση) την αντοχή των υλικών. Λαμβάνοντας σαν ενδεικτική τιμή το βάρος ενός τυπικού δοκιμίου Marshall που είναι (1200 gr) χρησιμοποιήθηκαν εμπειρικά εκείνα τα ποσοστά των αδρανών τα οποία στην περίπτωση που γινόταν κοκκομετρική διαβάθμιση θα τοποθετούσαν την κοκκομετρική καμπύλη εντός των επιτρεπομένων ορίων που προβλέπει ο Κανονισμός.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο συνθέσεις αδρανών απλά και μόνο για μια πρώτη σύγκριση μεταξύ των αντοχών των δοκιμίων (όπως εκφράζονται με την παράμετρο K_{IC}).

Τα αδρανή και τα βάρη τους επί της βάσης των (1300 gr) όσο και το ποσοστό και το βάρος της ασφάλτου σε κάθε σύνθεση επί της ίδιας βάσης φαίνονται στον (Πίν. 7.1.3.1)

Πίνακας 7.1.3.1.

ο: Το αδρανές περιέχεται στην σύνθεση
 -: Το αδρανές δεν περιέχεται στη σύνθεση

Είδος αδρανών	Δ ο κ ί μ ι α	
	E_1, E_2	F_1, F_2
Ψ.Γ.*	0	0
Χ.Γ.*	0	-
A*	0	0
Ποσοστό αδρανών (%)		
Ψ.Γ.*	30	50
Χ.Γ.*	30	-
A*	40	50
Βάρος αδρανών (gr)		
Ψ.Γ.*	390	650
Χ.Γ.*	390	-
A*	520	650
Ποσοστό ασφάλτου (%)		
	5,00	5,50
Βάρος ασφάλτου (gr)		
	65	71,5

Ψ.Γ.* : ψιλό γαρμπίλι,
 Χ.Γ.* : χοντρό γαρμπίλι
 Α.* : άμμος καθαρή

Τα αδρανή μαζί με την άσφαλτο θερμάνθηκαν στους 150 °C. Στην αρχή παρασκευάστηκαν τα E_1 , E_2 . Το E_1 συμπυκνώθηκε στη μηχανή συμπυκνώσεως Marshall η οποία άφηνε ένα βαρύ μεταλλικό στέλεχος να πέσει ελεύθερα στο δοκίμιο από ορισμένο ύψος. Συνολικά έγιναν 150 επαναλήψεις - πτώσεις του βάρους, 75 στην μια κυκλική επιφάνεια του δοκιμίου και 75 στην άλλη. Το δοκίμιο E_2 συμπυκνώθηκε με τον τρόπο που συμπυκνώθηκαν και τα δοκίμια από υλικά κατεργασμένα με τσιμέντο χρησιμοποιώντας την διάταξη του (Σχ. 7.1).

Για να διαπιστωθεί το κατά πόσο η συμπύκνωση του E_1 διαφέρει απ'την αντίστοιχη του E_2 μετρήθηκαν τα φαινόμενα Ειδικά Βάρη (Μέτρηση όγκου δοκιμίου ως διαφορά βάρους "εκτός" κι "εντός" νερού).

Πίνακας 7.1.3.2.

	E_1	E_2
Ξηρό βάρος : (gr)	1231	1211
Επιφανειακά ξηρό: (gr)	1234	1216
Βάρος υπό άνωση : (gr)	730	713
V : Όγκος : (cm ³)	504	503
Φ.Ε.Β. : (gr/cm ³)	2,443	2,408

Ο λόγος των Φ.Ε.Β. των E_1 και E_2 είναι ίσος με

$$\lambda = \Phi.E.B.(E_1) / \Phi.E.B.(E_2) = 1,0145$$

Δηλαδή διαφέρουν μόνο κατά 1,45% γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι δύο μέθοδοι συμπύκνωσης προκαλούν ουσιαστικά την ίδια ολική συμπύκνωση στο υλικό. Παρ'όλα αυτά δεν μπορούμε να ξέρουμε το κατά πόσο η τελική πυκνότητα των δοκιμών ανά στρώματα καθ'ύψος της γενέτειράς τους είναι η ίδια λόγω της συμπύκνωσης που προκαλείται απ'τις δύο παραπάνω μεθόδους. Αυτό είναι κάτι που προκειμένου να διαπιστωθεί θα πρέπει να καταφύγουμε σ'άλλες πολυπλοκότερες μεθόδους και σε τελική ανάλυση είναι κάτι που δεν ενδιαφέρει άμεσα στην παρούσα εργασία. Για λόγους ευκολίας και πρακτικής όλα τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο ανεξαρτήτως υλικού και μορφής πειράματος συμπυκνώθηκαν με την ηλεκτρόσφουρα. Προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι η συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων και ειδικότερα η αντοχή τους εξαρτάται απ'την θερμοκρασία τα δοκίμια E_1 και F_1 θραύστηκαν σε θερμοκρασία δωματίου (20 °C) ενώ τα E_2 και F_2 θραύστηκαν ενώ είχαν παραμείνει για μια ημέρα στο ψυγείο και σε θερμοκρασία 4,4 °C.

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν ακριβώς η ίδια με την αντίστοιχη διαδικασία που ακολουθήθηκε για τα δοκίμια από υλικά κατεργασμένα με τσιμέντο.

Τα ύψη των δοκιμών, που μετρήθηκαν πριν την φόρτιση, το φορτίο θραύσης, και οι υπολογισθείσες τιμές K_{IC} φαίνονται στον Πιν. 7.1.3.3.

Πίνακας 7.1.3.3.

ΔΟ- ΚΙ- ΜΙΟ	Ύψος (cm)	Θερμοκρασία δοκιμής (°C)	Φορτίο θραύσης (P) (KN)	Συντ. Έντασης Τάσεων (K_{IC}) ($KNm^{-3/2}$)
E ₁	6,35	20	9	169,531
E ₂	6,28	4,4	19,8	377,126
F ₁	5,88	20	6	122,05
F ₂	5,42	4,4	15	331,034

7.1.4. Σχολιασμός αποτελεσμάτων που εξήχθησαν απ' την θραύση των ψαθυρών δοκιμίων.

Όσον αφορά τα ψαθυρά δοκίμια παρατηρούμε ότι αυτά τα οποία ανήκουν στην ίδια σύνθεση (A_1 , A_2), (B_1 , B_2) κ.λ.π. έπαιρναν διαφορετικές τιμές (K_{IC}) την στιγμή που θα περίμενε κανείς να παίρνουν θεωρητικά την ίδια ακριβώς τιμή δεδομένου ότι αυτή είναι μοναδική και χαρακτηριστική για κάθε υλικό. Αυτό όμως όπως αποδεικνύεται και απ' τα αποτελέσματα δεν μπορεί να συμβαίνει στην πράξη καθ'ότι τόσο τα σταθεροποιημένα όσο και τ'ασφαλτικά υλικά παρουσιάζουν εγγενή ανομοιομορφία κι επομένως ποτέ δεν είναι δυνατό όσα πειράματα και να γίνουν οι υπολογισθείσες τιμές να συμπίπτουν. Το βασικό όμως εδώ είναι, κι αυτό είναι που θα πρέπει να κρατηθεί ως σημαντικό στοιχείο, ότι οι τιμές (K_{IC}) των δοκιμίων της ίδιας σύνθεσης πλη-

σιάζουν πολύ η μία στην άλλη. Επομένως μπορεί να καταλήξει κανείς στο συμπέρασμα ότι όσα δοκίμια και να σπάσει σε αντιδιαμετρική θλίψη σύμφωνα με την παραπάνω μέθοδο αναμένει οι τιμές (K_{IC}) που υπολογίζει να κινούνται μέσα σ' ένα στενό πεδίο τιμών. Σαν αντιπροσωπευτική τιμή (K_{IC}) τότε, για το συγκεκριμένο υλικό, μπορεί να ληφθεί ο μέσος όρος των υπολογισθέντων τιμών.

Συγκρίνοντας τώρα τα (K_{IC}) μεταξύ των κατεργασμένων με τσιμέντο δοκιμίων φαίνεται εύκολα ότι καθώς μεταβαίνουμε από την σύνθεση με φρεζαρισμένη μόνο ασφαλτο στην σύνθεση με καθαρή μόνο άμμο οι τιμές των (K_{IC}) ακολουθούν αύξουσα πορεία, με την μέγιστη τιμή (K_{IC}) ν'αντιστοιχεί στην ενδιάμεση σύνθεση όπου χρησιμοποιήθηκε καθαρή άμμος σε συνδυασμό με φρεζαρισμένη με ποσοστό συμμετοχής 50% για κάθε υλικό (δοκίμια D_1, D_2).

Επομένως το μίγμα άμμος φρεζαρισμένης ασφάλτου με καθαρή άμμο φαίνεται το πιο ενδιαφέρον από πλευράς αντοχής και θα πρέπει να μελετηθεί περαιτέρω η δυνατότητα ευρύτερης χρήσης του σαν υλικό οδοστρώσης.

Η διαφορά όμως της τιμής (K) μεταξύ των μιγμάτων (C) και (D) είναι μικρή και πιστεύεται ότι είναι εντός των ορίων του πειραματικού σφάλματος και γι' αυτό δεν θεωρείται ασφαλές ν' αξιολογηθεί περαιτέρω. Πιστεύεται ότι θα χρειασθεί μεγαλύτερος αριθμός δοκιμών για να καταστεί δυνατό να γίνει ακριβέστερη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Το πως επηρεάζουν την τιμή του (K_{IC}) η γεωμετρία του δοκιμίου και το μήκος της ρωγμής στα συγκεκριμένα πειρά-

ματα δεν φαίνεται καθαρά δεδομένου ότι όλα τα δοκίμια είχαν σταθερή ακτίνα (d) και μήκος ρωγμής (l). Σκοπός όμως όπως ήδη έχει ξανατονισθεί ήταν ν'αναπτυχθεί η μέθοδος προσδιορισμού του K_c κι όχι να μελετηθεί το πως επηρεάζεται η τιμή του από γεωμετρικές χαρακτηριστικές παραμέτρους συναρτήσεως των οποίων υπολογίζεται.

Συγκρίνοντας μεταξύ τους τις τιμές K_c των ασφαλτικών δοκιμών παρατηρούμε ότι η διαφορά μεταξύ των δοκιμών (E_1 , E_2) και (F_1 , F_2) από μίγμα με την ίδια σύνθεση αντίστοιχα είναι πολύ μεγάλη για τις διαφορετικές θερμοκρασίες (20°C και $4,4^\circ\text{C}$) στις οποίες έγινε η φόρτιση και θραύση τους. Το γεγονός αυτό έρχεται να επιβεβαιώσει (μέσω του υπολογισμού του K_c) την ήδη κατεκτημένη γνώση, ότι η συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων αλλάζει άρδην με την μεταβολή της θερμοκρασίας. Ειδικότερα σε χαμηλές θερμοκρασίες όπου το ασφαλτόμιγμα συμπεριφέρεται ελαστικά η αντοχή του είναι πολύ μεγαλύτερη απ'ότι στις υψηλότερες θερμοκρασίες, όπου η συμπεριφορά του είναι έντονα ιξοελαστική. Ειδικότερα τώρα όσον αφορά την σύγκριση μεταξύ των αντοχών των δοκιμών (E) και (F) είναι φανερό απ'τις τιμές (K_{Ic}) ότι το ασφαλτόμιγμα που περιέχει στη σύνθεσή του και χοντρό γαρμπίλι έχει τόσο σε υψηλή όσο και σε χαμηλή θερμοκρασία υψηλότερη αντοχή από εκείνο που περιέχει μόνο ψιλό γαρμπίλι.

Τέλος είναι φανερό ότι οι αντοχές των ασφαλτικών δοκιμών ξεπερνούν κατά πολύ τις αντίστοιχες των ψαθурών. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να προβληματίσει γενικότερα τον

μελετητή ο οποίος καλείται πλέον να βρει τρόπους με χρήση προσθέτων, ή διαφορετικών αναλογιών και συνθέσεων ν' αυξήσει την αντοχή των ψαθυρών υλικών που σαν βασικό τους συστατικό έχουν την φρεζαρισμένη ασφαλτο.

7.2. Φόρτιση ασφαλτικών δοκιμίων σε μοναξονικό εφελκυσμό

Πείραμα 2ο

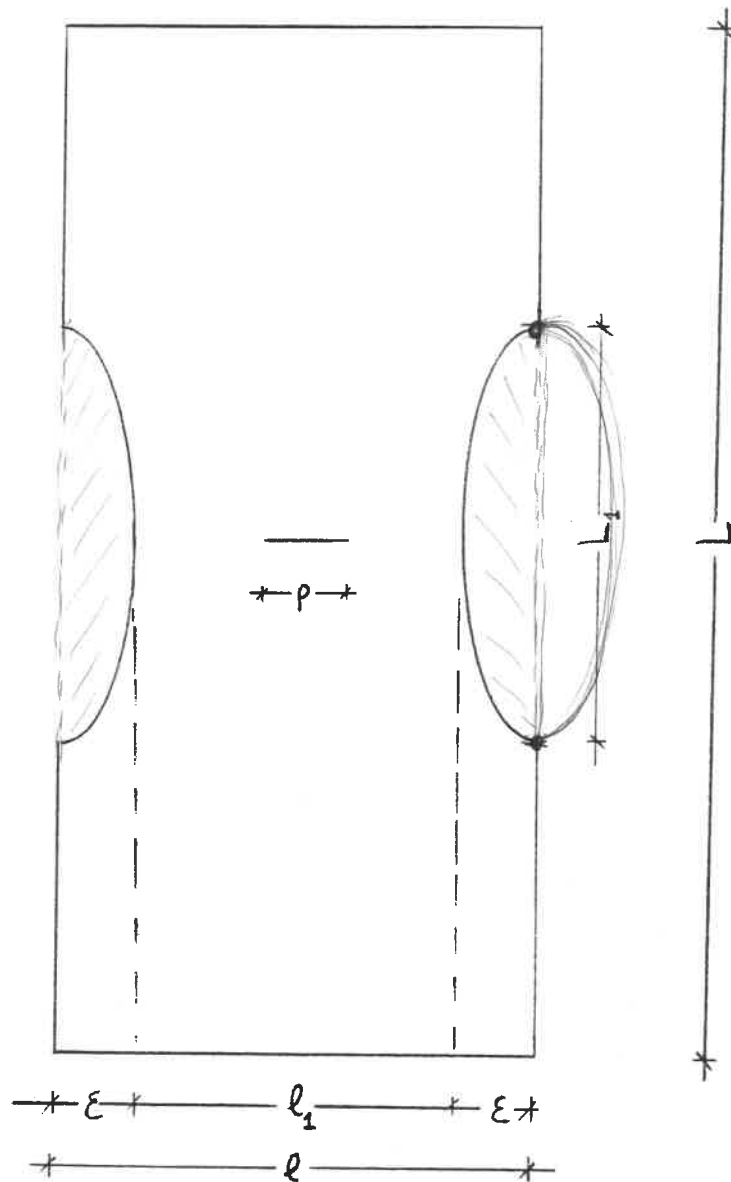
Σκοπός του πειράματος αυτού είναι να προσδιοριστεί η αντοχή των ασφαλτικών δοκιμίων σύμφωνα με την ανάλυση που αναπτύσσεται στην παράγραφο (3.4). Υπενθυμίζεται η τελική σχέση που χρησιμοποιήθηκε.

$$J_R = \frac{n \cdot \beta^2 \cdot G_c^2 \cdot a}{E} + \frac{H \cdot G_c^{n+1} \cdot a}{F}, \quad H = n \cdot \beta^{n+1}$$

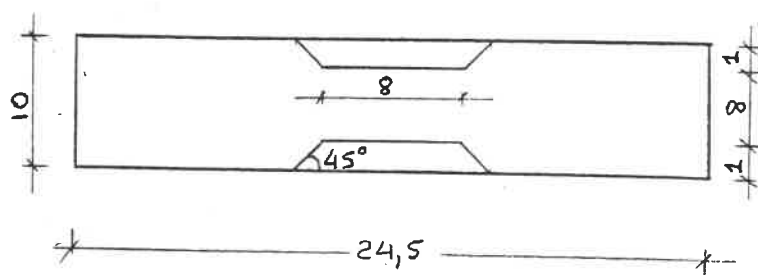
7.2.1. Παρασκευή ασφαλτικών δοκιμίων

Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές συνθέσεις μιγμάτων για την παρασκευή δύο αντίστοιχα δοκιμίων. Οι κωδικές ονομασίες των δοκιμίων είναι Δ_1 και Δ_2 και οι συνθέσεις τους φαίνονται τον (Πιν. 7.2.1.1). Τα δοκίμια είχαν την μορφή που φαίνεται στο (σχ. 7.2.1.1). Παίρνοντας υπέρ ασφαλείας σαν Φ.Ε.Β. την τιμή ($2,5 \text{ gr/cm}^3$) υπολογίστηκε ο όγκος που καταλαμβάνει κάθε δοκίμιο στο καλούπι. Αυτό έγινε ως εξής. Χρησιμοποιήθηκε καλούπι διαστάσεων ($L \times B \times H = 50 \times 10 \times 10 \text{ cm}$) το οποίο χωρίστηκε στην μέση με μια μεταλλική πλάκα πάχους 1 cm. Η απομείωση της διατομής των δοκιμίων όπως φαίνεται και στο (σχ. 7.2.1.1) επιτεύχθηκε με την τοποθέτηση ξύλινων παρεμβλημάτων στο μέσον του μήκους του τύπου. Χρησιμοποιήθηκαν παρεμβλήματα διαφορετικού πάχους (ε). Για το δοκίμιο (Δ_1) οι διαστάσεις των (2) παρεμβλημάτων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν

Gx. 7.2.1.1.



Gx. 7.2.1.2.



$$l_1 = 8 \text{ cm}, \quad L_1 = 10 \text{ cm}, \quad \epsilon = 1 \text{ cm}$$

$$L = 24,5 \text{ cm}, \quad \epsilon = 1 \text{ cm}$$

$$L_1 \times \varepsilon \times h = 10 \times 1,6 \times 10 \text{ (cm)}$$

ενώ αντίστοιχα για το δοκίμιο (Δ_2) οι διαστάσεις των παρεμβλημάτων ήταν

$$L_1 \times \varepsilon \times h = 10 \times 1 \times 10 \text{ (cm)}$$

όπου

L_1, ε : Το μήκος και το πάχος των παρεμβλημάτων (σχ. 7.2.1.1).

και

h : το ύψος τους.

Ο όγκος των δοκιμών υπολογίστηκε μετά τα παραπάνω ως εξής:

Το εμβαδό της αφαιρούμενης διατομής λόγω της ύπαρξης των παρεμβλημάτων θεωρήθηκε τραπέζιο με τις επί την βάση γωνίες ίσες με (45°), (σχ. 7.2.1.2). Έτσι η καθαρή επιφάνεια για το (Δ_2) είναι ίση με:

$$E_{\kappa} = 24,5 \cdot 10^{-2} [(10+8/2) \cdot 1] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{\kappa} = 227 \text{ cm}^2$$

Παίρνοντας σαν ύψος δοκιμίου

$$h_{\Delta} = 6,5 \text{ cm}$$

προκύπτει ότι ο καθαρός συνολικός όγκος του Δ_2 είναι

$$V_{\Delta} = 227 \cdot 6,5 = 1475,5 \text{ cm}^3$$

Λαμβάνουμε τελικά

$$V_{\Delta} = 1500 \text{ cm}^3$$

Παίρνοντας σαν ($\Phi.E.B.$) του (Δ_2) ίσο με ($2,5 \text{ gr/cm}^3$)

προκύπτει ότι τελικά το προς παρασκευή δοκίμιο θα ζυγίζει

$$B_{\Delta} = 2,5 \cdot 1500 = 3750 \text{ gr}$$

Πίνακας 7.2.1.1.

ο: Το αδρανές περιέχεται στην σύνθεση		
-: Το αδρανές δεν περιέχεται στη σύνθεση		
Είδος αδρανών	Δ ο κ ί μ ι α	
	Δ_1	Δ_2
Ψ.Γ.*	0	0
Χ.Γ.*	-	0
Α*	0	0
Ποσοστό αδρανών (%)		
Ψ.Γ.*	50	30
Χ.Γ.*	-	30
Α*	50	40
Βάρος αδρανών (gr)		
Ψ.Γ.*	1900	1140
Χ.Γ.*	-	1140
Α*	1900	1520
Ποσοστό ασφάλτου (%)		
	5,5	5
Βάρος ασφάλτου (gr)		
	209	190

Ψ.Γ.* : ψιλό γαρμπίλι,
Χ.Γ.* : χοντρό γαρμπίλι
Α.* : άμμος καθαρή

ή $B_{\Delta} = 3,75 \text{ Kgr}$

Λαμβάνουμε τελικά

$$B_{\Delta} = 3,8 \text{ Kgr}$$

και με βάση αυτή την τιμή και τα προκαθορισμένα ποσοστά αδρανών και της ασφάλτου (επί του συνολικού βάρους του δοκιμίου) υπολογίζεται πόσα (Kgr) απαιτούνται να χρησιμοποιηθούν από κάθε αδρανές και πόσα (gr) ασφάλτου για την παρασκευή του (Δ_2).

Τα τελικά βάρη φαίνονται στον (Πίν. 7.2.1.1).

Για το δοκίμιο (Δ_1) χρησιμοποιούμε και πάλι σαν τιμή βάσης του ποσοστού των αδρανών και της ασφάλτου την τιμή ($B_{\Delta 1} = 3,8 \text{ Kgr}$). Κι αυτό γιατί η συνολική καθαρή επιφάνεια του (Δ_1) είναι τώρα μικρότερη (αφού $\varepsilon = 1,6 \text{ cm}$ αντί $\varepsilon = 1 \text{ cm}$) κι επομένως αναμένεται να περισσέψει στο τέλος περισσότερο υλικό απ'ότι στο (Δ_2).

Γενικά αναλυτικοί υπολογισμοί δεν έχουν καμιά πρακτική σημασία. Αυτό που πρέπει να προσεχτεί στον υπολογισμό των βαρών των αδρανών είναι να λαμβάνεται μια τιμή ασφαλείας του (Φ.Ε.Β.) ώστε οι εκ των υστέρων υπολογισμοί να δίνουν επαρκή βάρη αδρανών για την παρασκευή του δοκιμίου.

Η ανάμιξη των υλικών μετά την ζύγισή τους έγινε σε ειδικό αναμικτήρα.

Στην συνέχεια το ασφαλτόμιγμα τοποθετήθηκε στον φούρνο μέχρι να πάρει την θερμοκρασία των 150°C . Ακολούθησε η συμπίκνωση του μίγματος στο καλούπι με την ηλεκ-

τρόσφυρα. Την στιγμή που τοποθετείτο το μίγμα μέσα στο καλούπι στην μέση του μήκους του είχε τοποθετηθεί μια λάμα πλάτους ($\rho = 2 \text{ cm}$) (σχ. 7.2.1.1).

Προκειμένου η ενδιάμεση πλάκα (πάχους 1 cm) να μην μετακινηθεί κατά την συμπίκνωση χρησιμοποιήθηκαν επιμήκη μεταλλικά ελάσματα μήκους ($24,5 \text{ cm}$) τα οποία καρφώθηκαν πάνω στα ξύλινα παρεμβλήματα και σφηνώθηκαν μεταξύ της ενδιάμεσης πλάκας και της παράλληλης προς αυτήν πλευράς του τύπου. Σε κάθε παρέμβλημα χρησιμοποιήθηκαν 2 τέτοια ελάσματα. Το ένα καρφώθηκε στην πάνω επιφάνεια και το άλλο στην κάτω.

Τα δοκίμια ξεκαλουπώθηκαν (1) ώρα μετά το τέλος της συμπίκνωσης.

7.2.2. Πειραματική διαδικασία

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε και πάλι η μηχανή MTS. Τα δοκίμια κολλήθηκαν σε ειδικές πλάκες φόρτισης που χρησιμοποιούνται για εφελκυστικές φορτίσεις με την βοήθεια ισχυρής εποξειδικής κόλλας. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι πριν κολληθούν στην πλάκα τα δοκίμια κόπηκαν οι βάσεις τους κατά ($0,5 \text{ cm}$), κατά την διεύθυνση του μήκους (L) του δοκιμίου, προκειμένου να δημιουργηθεί μια επίπεδη και ομαλή επιφάνεια και να αποκαλυφθούν τα αδρανή έτσι ώστε η συγκόλληση να γίνει σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό αδρανών έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή συνάφεια μεταξύ των βάσεων του δοκιμίου και της εποξειδικής κόλλας. Κατά την κόλληση

των δοκιμίων στις πλάκες δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε τα δοκίμια να είναι όσο το δυνατόν κατακόρυφα ενώ παράλληλα οι κατακόρυφες αιμές τους να είναι κάθετες ως προς το επίπεδο των πλακών φόρτισης. Η πρώτη πλάκα φόρτισης προσαρμόστηκε στην μια βάση των δοκιμίων την ημέρα της παρασκευής τους ενώ η άλλη πλάκα κολλήθηκε στην άλλη βάση την επόμενη μέρα. Τα δοκίμια με τις πλάκες τώρα κολλημένες στις βάσεις τους αφέθηκαν στο εργαστήριο για (2) ημέρες προκειμένου η κόλλα ν' αποκτήσει την μέγιστη αντοχή της. Στη συνέχεια οι πλάκες φόρτισης μαζί με το δοκίμιο προσαρμόστηκαν σε ειδικές βάσεις υποδοχής της M.T.S. Οι βάσεις αυτές έχουν σφαιρικές αρθρώσεις έτσι ώστε κατά την φόρτιση να μην δημιουργούνται (λόγω ατελούς κατακορύφωσης) καμπτικές ροπές στο φορτιζόμενο δοκίμιο αλλά ν' ασκείται μόνο το καθαρό εφελκυστικό φορτίο.

Σκοπός της φόρτισης ήταν να βρεθεί η τάση θραύσης των δοκιμίων αλλά και να προσδιοριστούν απ' τα δεδομένα το μέτρο δυσκαμψίας (E) καθώς και οι συντελεστές (η, F) της σχέσης (1). Το (Δ_2) φορτίστηκε εφελκυστικά υπό θερμοκρασία 18°C . Η φόρτιση ήταν μονοτονική και πραγματοποιήθηκε υπό ελεγχόμενο φορτίο με ταχύτητα φόρτισης (1 KN/sec), (Διάγραμμα Δ_2 αβ). Τ' αποτελέσματα αποθηκεύτηκαν σε δισκέτα κι επεξεργάστηκαν στην συνέχεια με χρήση του προγράμματος "Excel". Στο παράρτημα 2 φαίνονται όλες οι υπολογισθείσες τιμές απ' την μηχανή καθ' όλη την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος. Στην 1η στήλη φαίνεται ο χρόνος. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται ανά εκατοστό του

δευτερολέπτου. Στην δεύτερη φαίνεται η εκάστοτε κατακόρυφη θέση του εμβόλου "Stroke" όπως την καταγράφει η μηχανή M.T.S. με βάση το λογισμικό με το οποίο είναι εφοδιασμένη. Στην τρίτη στήλη δίδεται η εφαρμοζόμενη δύναμη και στην τέταρτη η παραμόρφωση στην διεύθυνση όπου έχουν τοποθετηθεί τα μηχανοσκόπια. Όμως στο συγκεκριμένο πείραμα δεν τοποθετήθηκαν μηχανοσκόπια αφού η παραμόρφωση του επιπέδου εφαρμογής της δύναμης, που είναι αυτή που μας ενδιέφερε εν προκειμένω, εξάγεται έμμεσα μέσω κατάλληλης επεξεργασίας της 2ης στήλης "Stroke". Έτσι τα δεδομένα της τελευταίας στήλης είναι πλασματικά κι άνευ σημασίας.

Η μετατροπή του "Stroke" σε παραμόρφωση κατά την διεύθυνση του σημείου εφαρμογής της δύναμης γίνεται ως εξής. Από τα δεδομένα της 2ης στήλης βλέπουμε τότε περίπου αρχίζει ουσιαστικά να αυξάνει το επιβαλλόμενο εφελκυστικό φορτίο. Η στιγμή αυτή για το (Δ_2) αντιστοιχεί σε χρόνο ($t = 0,4 \text{ sec}$) και το "Stroke" εκείνη την στιγμή είναι ίσο με $(-57,6172)$. Από την χρονική στιγμή αυτή και πέρα το φορτίο αρχίζει κι αυξάνει. Η παραμόρφωση (δ) κάθε χρονική στιγμή προκύπτει αν προσθέσουμε το $(57,6172)$ σε κάθε μια από τις τιμές του "Stroke" που ακολουθούν τις επόμενες χρονικές στιγμές μέχρι την στιγμή της θραύσης του δοκιμίου. Η μεταβολή της παραμόρφωσης συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου κάθε χρονική στιγμή φαίνεται στο διάγραμμα Δ_2 .

7.2.3. Υπολογισμός της ενέργειας θραύσης J_R

Προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας

Κατ'αρχάς για να δούμε εποπτικά μέχρι ποιο σημείο η σχέση τάσεων παραμορφώσεων είναι γραμμική πήραμε μια μεγέθυνση του διαγράμματος (Δ_2) για τις χρονικές στιγμές από ($t = 0$ ως $t = 0,5$ sec). Το σχετικό διάγραμμα είναι το ($\Delta_2 \alpha$).

Απ'αυτό φαίνεται ότι μέχρι και για ($\delta = 0,20$ mm) το διάγραμμα $P = f(\delta)$ εξακολουθεί και είναι περίπου γραμμικό. Ανάγουμε την παραμόρφωση (δ) και την δύναμη (P) σε ανοιγμένη παραμόρφωση (ϵ) και τάση (σ) αντιστοίχως. Αυτό γίνεται ως εξής. Τις τιμές (P) και (δ) από ($t = 0,4 - 3$ sec) με χρονικό βήμα ίσο με ($1/10$) του δευτερολέπτου τις διαιρούμε αντίστοιχα με το εμβαδόν της απομειωμένης διατομής (A) και το συνολικό μήκος του δοκιμίου (L). Τα (L) και (A) έχουν μετρηθεί μετά το ξεκαλούπωμα του δοκιμίου και μετά το κόψιμο κατά $0,5$ cm των βάσεων του. Οι τιμές αυτές είναι (σχ. 7.2.1.1)

$$L = 23,5 \text{ cm} \quad \text{και} \quad A^* = l_1 \cdot h_A$$

όπου

$$l_1 = 7 \text{ cm} \quad \text{και} \quad h_A = 5,25 \text{ cm}$$

Οπότε $A = 36,74 \text{ cm}^2$.

* Παρατήρηση

Στον υπολογισμό του (A) ως (l_1) λαμβάνεται εδώ ολόκληρη η εγκάρσια διατομή του δοκιμίου χωρίς ν'αφαιρεθεί το μήκος της ρωγμής ($\rho = 2 \text{ cm}$). Έτσι ο υπολογισμός του (J_R)

αναμένεται να δώσει μικρότερη τιμή απ'ότι αν το (l_1) ελαμβάνετο ίσο με ($l_1 = 7 - 2 = 5$ cm). Στη συνέχεια γίνονται ξεχωριστά υπολογισμοί λαμβάνοντας υπόψη ως (A) αυτό που προκύπτει για ($l_1 = 5$ cm) και υπολογίζεται ένα νέο (J_R).

Έτσι ανά (0,1 sec) από ($t = 0,4$ έως 3 sec) προκύπτουν ζεύγη τιμών (σ, ϵ). Η σχέση μεταξύ (σ) και (ϵ) αναμένεται να είναι γραμμική. Προκειμένου να το διαπιστώσουμε αυτό κάνουμε τον συντελεστή συσχέτισης (R).

Για ($t = 0,4 - 3$ sec) προκύπτει το ακόλουθο γραμμικό μοντέλο

$$\sigma = 127,246 + 746069 \epsilon$$

Συντελεστής συσχέτισης: $R = 0,90$

Επομένως, τα (σ, ϵ) συσχετίζονται γραμμικά. Δεδομένου ότι ο συντελεστής ($\alpha = 127,246$) που προκύπτει απ'την εφαρμογή του μοντέλου είναι πολύ μικρότερος απ'τον ($\beta = 746069$) μπορεί ν'αγνοηθεί. Επομένως, η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί.

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

με

$$E = 746069 \text{ KN/m}^2 \quad \text{ή} \quad E = 746 \text{ MPa.}$$

Λαμβάνουμε τελικά

$$\underline{E = 745 \text{ MPa}}$$

Προσδιορισμός n, F

Υπενθυμίζεται ότι το (n) είναι ο συντελεστής κράτυνσης του υλικού και το (F) το "πλαστικό" μέτρο δυσκαμψίας.

Προκειμένου να ισχύει η σχέση των Ramberg-Osgood

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{p1} + \varepsilon_{e1} = \sigma/E + \sigma^n/F$$

Θα πρέπει να βρεθεί κατά πόσο καλά συσχετίζονται τα μεγέθη ($\log \varepsilon_{p1}$, $\log \sigma$) σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\log \varepsilon_{p1} = n \log \sigma - \log F \quad (\text{παράγρ. 3.4})$$

όπου

$$\varepsilon_{p1} = \varepsilon_t - (\sigma_{e1}/E)$$

Η μέγιστη ελαστική τάση βρίσκεται για ($t = 3 \text{ sec}$) και είναι ίση με

$$\sigma_{e1} = 2,83203 / 0,003674 = 770,83 \text{ KN/m}^2$$

Οπότε είναι

$$\varepsilon_{p1} = \varepsilon_t - (770,83 / 745.000) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \varepsilon_{p1} = \varepsilon_t - 0,001634671$$

όπου

ε_t : Η ολική παραμόρφωση όπως προσδιορίστηκε απ' την ανάλυση της 2ης στήλης "Stroke".

Εφαρμόζοντας και πάλι το γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης για το διάστημα όπου το υλικό βρίσκεται στην πλαστική περιοχή προσδιορίζουμε τους συντελεστές (n, F) καθώς και τον συντελεστή συσχέτισης (R). Θεωρούμε ότι το υλικό μπαίνει στην πλαστική περιοχή λίγο μετά την πάροδο των 3 sec όπου οριακά ακόμα συμπεριφέρεται ελαστικά. Αν ($t = 3,3 \text{ sec}$) αυτή η στιγμή, τότε για το διάστημα ($t = 3,3 \text{ sec}$ ως $t = 8,33 \text{ sec}$) όπου απ' τα δεδομένα φαίνεται ότι επέρχεται η θραύση του εφαρμόζοντας το γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης προκύπτει

$$\log \varepsilon_{p1} = - 21,24 + 5,785 \log \sigma$$

Συντελεστής συσχέτισης: $R = 0,853$

Επομένως δεδομένου ότι ($R = 0,853$) έπεται ότι το σύνολο των ζευγών ($\log \varepsilon_{p1}$, $\log \sigma$) συσχετίζονται γραμμικά κατά ικανοποιητικό βαθμό.

Είναι επομένως

$$n = 5,785$$

$$\text{και} \quad F = 1,738 \cdot 10^{21}$$

Προσδιορισμός τάσης θραύσης

Για ($t = 8,33 \text{ sec}$) η τάση θραύσης υπολογίζεται

$$\sigma_c = P_c / A = 7,27539 / 0,003674 \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_c = 1980,237 \text{ KN/m}^2$$

Υπολογισμός β

Το (β) υπολογίζεται απ' την παρακάτω σχέση

$$\beta = 1 + 0,254 (\rho/l_1) - 1,152 (\rho/l_1)^2 + 12,2 (\rho/l_1)^3$$

Είναι $l_1 = 7 \text{ cm}$ και $\rho = 2 \text{ cm}$

Οπότε μ'αντικατάσταση προκύπτει

$$\beta = 1,0486$$

Εκτίμηση (ν)

Ο λόγος Poisson (ν), όσον αφορά τ'ασφαλτομίγματα εξαρτάται κυρίως απ' την θερμοκρασία. Από σχετικό διάγραμμα που δίνει την μεταβολή του λόγου (ν) συναρτήσει της θερμοκρασίας εκτιμήθηκε ότι για θερμοκρασία 18°C

είναι $\nu = 0,38$.

Υπολογισμός J_R

Μ'αντικατάσταση των $E, F, n, \beta, H = \pi \cdot \beta^{n+1}$ στην (1) βρίσκουμε

$$\begin{aligned} J_R &= J_{e1} + J_{p1} \Rightarrow \\ \Rightarrow J_R &= 0,1818 + 0,5823 \Rightarrow \\ \Rightarrow J_R &= 0,764 \text{ KN.m/m}^2 \end{aligned}$$

Αν συνυπολογίσουμε την επιρροή του λόγου Poisson και συμπεριλάβουμε τον όρο $(1-\nu^2)$ η (1) δίνει

$$J_{R2} = 0,738 \text{ KN.m/m}^2$$

Η επιρροή του λόγου Poisson ως ποσοστού επί της τελικής τιμής των υπολογισθέντων (J_R) είναι

$$\alpha = (0,764 - 0,738) / 0,764 = 0,0352 \text{ ή } 3,52\%$$

Δηλαδή το (ν) ελάχιστα επηρεάζει την τιμή του (J_R) κι επομένως δεν αποτελεί την παράμετρο εκείνη η οποία καθορίζει αποφασιστικά την τάξη μεγέθους της τελικής τιμής του.

Οι παραπάνω υπολογισμοί έγιναν και για δεύτερη φορά θεωρώντας τώρα ($l_1 = 5 \text{ cm}$) οπότε προσδιορίστηκε ένα νέο (A') ίσο με

$$A' = 5 \cdot 5,25 = 26,25 \text{ cm}^2$$

Οπότε υπολογίστηκαν νέα E', n', F' .

Υπολογισμός E'

Χρονικό διάστημα : $t = 0,4 - 3 \text{ sec}$

Γραμ. Μ. Παλινδρόμησης : $\sigma = 178,09 + 1044,213 \varepsilon$

Συντ. Συσχέτισης : $R = 0,90$

Οπότε $E' = 1044 \text{ MPa}$

Υπολογισμός n' , F'

Χρονικό διάστημα : $t = 3,3 - 8 \text{ sec}$

Γραμ. Μ. Παλινδρόμησης : $\log \varepsilon_{p1} = -22,086 + 5,785 \log \sigma$

Συντ. Συσχέτισης : $R = 0,853$

Οπότε

$$n' = 5,785$$

$$F' = 1,219 \cdot 10^{22}$$

Υπολογισμός τάσης θραύσης

$$\sigma'_{\sigma} = P_{\sigma} / A' = 7,27539 / 0,002625 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sigma'_{\sigma} = 2771,577 \text{ KN/m}^2$$

Υπολογισμός J'_R

Απ' την (1) μ'αντικατάσταση των παραπάνω μεγεθών και με ($\beta = 1,0486$) προκύπτει χωρίς και με συνυπολογισμό του (v)

$$\begin{aligned} J'_R &= J'_{e1} + J'_{p1} = \\ &= 0,254 + 0,813 \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\Rightarrow J_R = 1,067 \text{ KN.m/m}^2 \text{ και } J_R = 1,030 \text{ KN.m/m}^2$$

Η τιμή του (J_R) που υπολογίστηκε με την διατομή (A') εκτιμάται ότι είναι πιο σωστή απ'ότι η αντίστοιχη υπολογισθείσα με χρήση της διατομής (A) δεδομένου ότι η περιοχή της εγκάρσιας διατομής του υλικού όπου υπάρχει η κεντρική ρωγμή ($\rho = 2 \text{ cm}$) δεν συμμετέχει στην ανάληψη του εξωτερικά επιβαλλόμενου φορτίου.

Το δοκίμιο (Δ_1) φορτίστηκε εφελκυστικά σε θερμοκρασία 18°C υπό σταθερή ταχύτητα επιβολής παραμόρφωσης ($0,25 \text{ mm/sec}$). Διάγραμμα ($\Delta_1 \alpha\beta$). Η μεταβολή του φορτίου συναρτήσει της παραμόρφωσης φαίνεται στο διάγραμμα Δ_1 . Η φόρτιση αυτή διαφέρει απ'την προηγούμενη ως προς το ότι τώρα δόθηκε εντολή στην μηχανή να διατηρεί σταθερή την παραμόρφωση στην μονάδα του χρόνου κι όχι την δύναμη. Γι'αυτό το λόγο και στο διάγραμμα Δ_1 παρατηρούνται απότομες αυξομειώσεις του φορτίου, προκειμένου ανά (1 sec) η προκαλούμενη παραμόρφωση να διατηρείται σταθερή. Όταν το φορτίο γίνει μέγιστο η μηχανή ρίχνει την πίεση του λαδιού κι επομένως και το ασκούμενο στο δοκίμιο φορτίο πέφτει. Αυτό γίνεται διότι την στιγμή που το φορτίο γίνεται μέγιστο η αντοχή του υλικού έχει πλέον εξαντληθεί και το δοκίμιο δεν μπορεί ν'αναλάβει επιπλέον φορτίο. Έτσι η μηχανή ακολουθώντας την εντολή που της έχουμε δώσει ρίχνει το φορτίο προκειμένου να διατηρήσει σταθερή την παραμόρφωση αφού τώρα λόγω μειωμένης αντοχής του υλικού τα $0,25 \text{ mm}$ παραμόρφωση μπορούν να πραγματοποιηθούν υπό την άσκηση ολοένα και μικρότερων φορτίων.

Προκειμένου να προσδιορισθεί το (J_R) πάλι πρέπει απ'τα δεδομένα να υπολογίσουμε τα (E , n και F).

Το μήκος του δοκιμίου και το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής στην περιοχή της ρωγμής είναι:

$$L = 23,5 \text{ cm} \quad \text{και} \quad A = h_{\Delta} \cdot l_1$$

όπου

$$h_{\Delta} = 5,3 \text{ cm} \quad \text{και} \quad l_1 = 6,55 \text{ cm}$$

Οπότε

$$A = 34,63 \text{ cm}^2$$

Απ'τα δεδομένα του παραρτήματος 1 φαίνεται ότι η φόρτιση αρχίζει ν'αυξάνει απ'την χρονική στιγμή ($t = 3,9 \text{ sec}$). Θεωρώντας λοιπόν αυτή την στιγμή ως έναρξη μέτρησης του χρόνου προσθέτουμε την ένδειξη (55,8105) που αντιστοιχεί στα ($t = 3,9 \text{ sec}$) - και που είναι όπως έχει εξηγηθεί η κατακόρυφη θέση των εμβόλων όπως αυτή καταγράφεται απ'την μηχανή - στις υπόλοιπες τιμές με βήμα ($t = 0,1 \text{ sec}$) προκειμένου να πάρουμε την πραγματική παραμόρφωση ανά δέκατο του δευτερολέπτου. Στη συνέχεια μεγενθύνουμε το διάγραμμα Δ_1 για ($\delta = 0$ ως $\delta = 0,5 \text{ mm}$) προκειμένου να διαπιστώσουμε με μια πρώτη ματιά μέχρι ποιο σημείο η καμπύλη $P = f(\delta)$ εξακολουθεί να είναι γραμμική. Παρατηρούμε ότι μέχρι και ($\delta = 0,15 \text{ mm}$) μια μέση ιδεατή ευθεία που διέρχεται απ'την αρχή των αξόνων βρίσκεται εντός των τιμών του διαγράμματος. Η τιμή ($\delta = 0,15 \text{ mm}$) αντιστοιχεί όπως παρατηρούμε απ'τα δεδομένα του παραρτήματος 1 σε "Stroke" ίσο με (-55,665 mm) δεδομένου ότι ($55,8105 - 55,665 = 0,1455 \text{ mm}$).

Άρα προκειμένου να προσδιορίσουμε το μέτρο δυσκαμψίας του Δοκιμίου (Δ_1) εφαρμόζουμε το γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης για το χρονικό διάστημα ($t = 3,9$ ως $t = 4,5$ sec).

Υπολογισμός E

Χρονικό διάστημα : $t = 3,9 - 4,5$ sec

Γραμ. Μ. Παλινδρόμησης : $\sigma = -46,015 + 898632,3 \varepsilon$

Συντ. Συσχέτισης : $R = 0,79$

Οπότε

$$E = 898,632 \text{ MPa}$$

Λαμβάνουμε

$$E = 900 \text{ MPa}$$

Υπολογισμός n, F

Χρονικό διάστημα : $t = 4,7 - 7,3$ sec

Γραμ. Μ. Παλινδρόμησης : $\log \varepsilon_{p1}^* = -11,53 + 2,88 \log \sigma$

Συντ. Συσχέτισης : $R = 0,815$

$$\varepsilon_{p1}^* = \varepsilon_t = -0,15/235 = \varepsilon_t - 0,000638297$$

Οπότε

$$n = 2,88$$

$$F = 3,388 \cdot 10^{11}$$

Υπολογισμός τάσης θραύσης

Λόγω των απότομων αυξομειώσεων της δύναμης δεν είναι δυνατό να υπολογιστεί με μια πρώτη ματιά κατευθείαν απ' το

διάγραμμα Δ_1 κάτω υπό ποιο φορτίο θραύεται το δοκίμιο.

Έτσι οδηγούμαστε στο να προσδιορίσουμε μια συνάρτηση $\sigma = f(\varepsilon)$ μέσω χρήσης εκείνου του μοντέλου παλινδρόμησης που παρουσιάζει τον μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης.

Η παλινδρόμηση αυτή πραγματοποιήθηκε για το χρονικό διάστημα ($t = 0,4 = 7,3 \text{ sec}$) και βρέθηκε ότι το μοντέλο που συσχετίζει καλύτερα τα εισαχθέντα στον Η/Υ ζεύγη τιμών (σ, ε) με βήμα ($t = 0,1 \text{ sec}$) είναι το ακόλουθο λογαριθμικό μοντέλο.

Λογαριθμικό μοντέλο : $\sigma = 3538,78 + 410,017 \ln(\varepsilon)$

Συντελεστής συσχέτισης: $R = 0,9245$

Απ' το διάγραμμα Δ_1 φαίνεται ότι η θραύση συμβαίνει όταν η παραμόρφωση είναι περίπου ($0,68 \text{ mm}$).

Επομένως με βάση την παραπάνω σχέση βρίσκουμε ότι η τάση θραύσης για ($\varepsilon = 0,68/235 = 0,002893627$) είναι

$$\sigma_u = 1142,129 \text{ KN/m}^2$$

και το φορτίο θραύσης είναι

$$P_c = \sigma_u \cdot A \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_c = 3,955 \text{ KN}$$

που είναι τιμή εντός του πεδίου τιμών μέσα στο οποίο κινείται το φορτίο στην περιοχή γύρω απ' το ($\delta = 0,68 \text{ mm}$) όπως φαίνεται απ' το διάγραμμα Δ_1 .

Υπολογισμός β

Το (β) υπολογίζεται με βάση την σχέση

$$\beta = 1 + 0,254 (\rho/l_1) - 1,152 (\rho/l_1)^2 + 12,2 (\rho/l_1)^3$$

Αντικαθιστώντας $\rho = 2 \text{ cm}$ και $l_1 = 6,55 \text{ cm}$ βρίσκουμε

$$\beta = 1,0566$$

Υπολογισμός J'_R

Μ'αντικατάσταση των E , n , F , β , $H = \pi \cdot \beta^{n+1}$ στην (1) βρίσκουμε το (J_R) ίσο με

$$\begin{aligned} J_R &= J_{e1} + J_{p1} = \\ &= 0,05 + 0,0836 \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\Rightarrow J_R = 0,134 \text{ KN.m/m}^2$$

και με συνυπολογισμό του (v) ίσο με : $J_R = 0,126 \text{ KN.m/m}^2$

Στην περίπτωση που ληφθεί υπ'όψη η απομειωμένη διατομή (A') αφαιρούμενης της ρωγμής τα νέα υπολογισθέντα μεγέθη έχουν ως εξής.

Υπολογισμός μέτρου δυσκαμψίας E'

$$A' = 5,3 \cdot 4,55 = 24,115 \text{ cm}^2$$

Χρονικό διάστημα : $t = 3,9 - 4,5 \text{ sec}$

Γραμ. Μ. Παλινδρόμησης : $\sigma = -66,079 + 1290468 \varepsilon$

Συντ. Συσχέτισης : $R = 0,791$

Υπολογισμός n' , F'

Χρονικό διάστημα : $t = 4,7 - 7,3 \text{ sec}$

Γραμ. Μ. Παλινδρόμησης : $\log \varepsilon_{p1}^* = -12,63 + 3,084 \log \sigma$

Συντ. Συσχέτισης : $R = 0,77$

Οπότε

$$n' = 3,084$$

$$F' = 4,266 \cdot 10^{12}$$

Υπολογισμός τάσης θραύσης

Η συνάρτηση $\sigma = f(\varepsilon)$ που προσδιορίστηκε για το χρονικό διάστημα ($t = 4 - 7,3 \text{ sec}$) μέσω της χρήσης του λογαριθμικού μοντέλου παλινδρόμησης το οποίο δίνει τον μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης είναι η εξής

Λογαριθμικό μοντέλο : $\sigma = 5038,264 + 581,03 \ln(\varepsilon)$

Συντελεστής συσχέτισης: $R = 0,922$

Για ($\delta = 0,68 \text{ mm}$) είναι ($\varepsilon = 0,68/235 = 0,002893617$)

βρίσκουμε απ' την τελευταία

$$\sigma'_{\sigma} = 1642 \text{ KN/m}^2$$

Δηλαδή

$$P_c = \sigma'_{\sigma} \cdot A = 3,96 \text{ KN}$$

που ταυτίζεται με την (P_c) που προσδιορίστηκε και με το αρχικό μη απομειωμένο (A).

Υπολογισμός β

Το (β) είναι το ίδιο με προηγουμένως
Δηλαδή

$$\beta = 1,0566$$

Υπολογισμός J'_R

Με γνωστά τα E' , n' , F' , β , H' προσδιορίζουμε απ' την
(1) το (J'_R) χωρίς και με συνυπολογισμό του (v)
Βρίσκουμε

$$\begin{aligned} J'_R &= J'_{e1} + J'_{p1} = \\ &= 0,073 + 0,124 \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\Rightarrow J'_R = 0,197 \text{ KN.m/m}^2$$

$$\text{και } J'_R = 0,186 \text{ KN.m/m}^2$$

7.3. Σχόλια επί του πειράματος και των αποτελεσμάτων

Τ'αποτελέσματα που παρατίθενται εδώ είναι προϊόν της τρίτης κατά σειρά προσπάθειας που έγινε ώστε να πραγματοποιηθεί με επιτυχία το πείραμα του εφελκυσμού. Προηγήθηκαν δύο προσπάθειες οι οποίες όμως κατέληξαν σε αποτυχία κι οι λόγοι αναλύονται παρακάτω.

Στην πρώτη προσπάθεια, όπου σημειωτέον παρασκευάστηκαν δοκίμια μορφής ορθογωνίου παραλ/δου χωρίς καμιά τεχνητή απομείωση της διατομής με χρήση παρεμβλημάτων, χρησιμοποιήθηκε αντί για εποξειδική ρητίνη, σιδηρόστοκος (πολυεστερική κόλλα) ο οποίος όμως στα $(1,5 \text{ KN} = 150 \text{ Kgr})$ δεν άντεξε κι αποκολλήθηκε απ' τις πλάκες φόρτισης. Αυτό ίσως δικαιολογείται και απ' το γεγονός ότι οι πλάκες φόρτισης χρησιμοποιήθηκαν σ' αυτό το πρώτο πείραμα για πρώτη φορά και είχαν μια λεπτή επίστρωση από λάδι για λόγους προστασίας που αν και καθαρίσθηκε δεν αποκλείεται μια μικρή έστω ποσότητα να έμεινε πάνω σ' αυτές μ' αποτέλεσμα να μην αναπτυχθεί πλήρης συνάφεια μεταξύ του σιδηρόστοκου και της πλάκας φόρτισης.

Στην δεύτερη προσπάθεια χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια δοκίμια αλλά αυτή την φορά ως μέσο συγκόλλησης χρησιμοποιήθηκε όπως και στο τρίτο επιτυχές πείραμα, εποξειδική κόλλα. Αυτή τη φορά με την αύξηση του φορτίου η κόλλα παρέσυρε την ασφαλτο απ' την επιφάνεια της βάσης του δοκιμίου, στην οποία είχε απλωθεί, μ' αποτέλεσμα κάποια στιγμή ν' αποκολληθεί η πλάκα φόρτισης απ' το δοκίμιο, στην

επιφάνεια του οποίου υπήρχαν μόνο προεξέχοντα αδρανή αφού η ασφαλτος που υπήρχε ανάμεσά τους είχε παρασυρθεί απ' την κόλλα.

Επομένως προκειμένου ν' αποφευχθούν παρόμοιες αποτυχίες μελλοντικά θα πρέπει:

- α) Να κόβονται τα δοκίμια 0,5 - 1 cm στην βάση τους μετά την εξώλυσή τους απ' τα καλούπια.
- β) Θα πρέπει να καθαρίζονται οι πλάκες φόρτισης πολύ καλά πριν κολληθούν σ' αυτές τα δοκίμια.
- γ) Θα πρέπει να χρησιμοποιείται μια ισχυρή εποξειδική κόλλα για την κόλληση των δοκιμίων στις πλάκες φόρτισης.

Όσον αφορά τ' αποτελέσματα εύκολα διαπιστώνει κανείς ότι η αντοχή του δοκιμίου στην σύνθεση του οποίου περιλαμβάνεται τόσο ψιλό όσο και χοντρό γαρμπίλι είναι πολύ μεγαλύτερη απ' ότι η αντίστοιχη αντοχή των δοκιμίων όπου η σύνθεσή του περιλαμβάνει μόνο ψιλό γαρμπίλι. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού παίζει σημαντικό ρόλο στην αντοχή του κι απαιτείται να γίνει περαιτέρω έρευνα προκειμένου να εξακριβωθεί ποιές είναι εκείνες οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις των ασφαλικών υλικών που δίδουν τις βέλτιστες αντοχές.

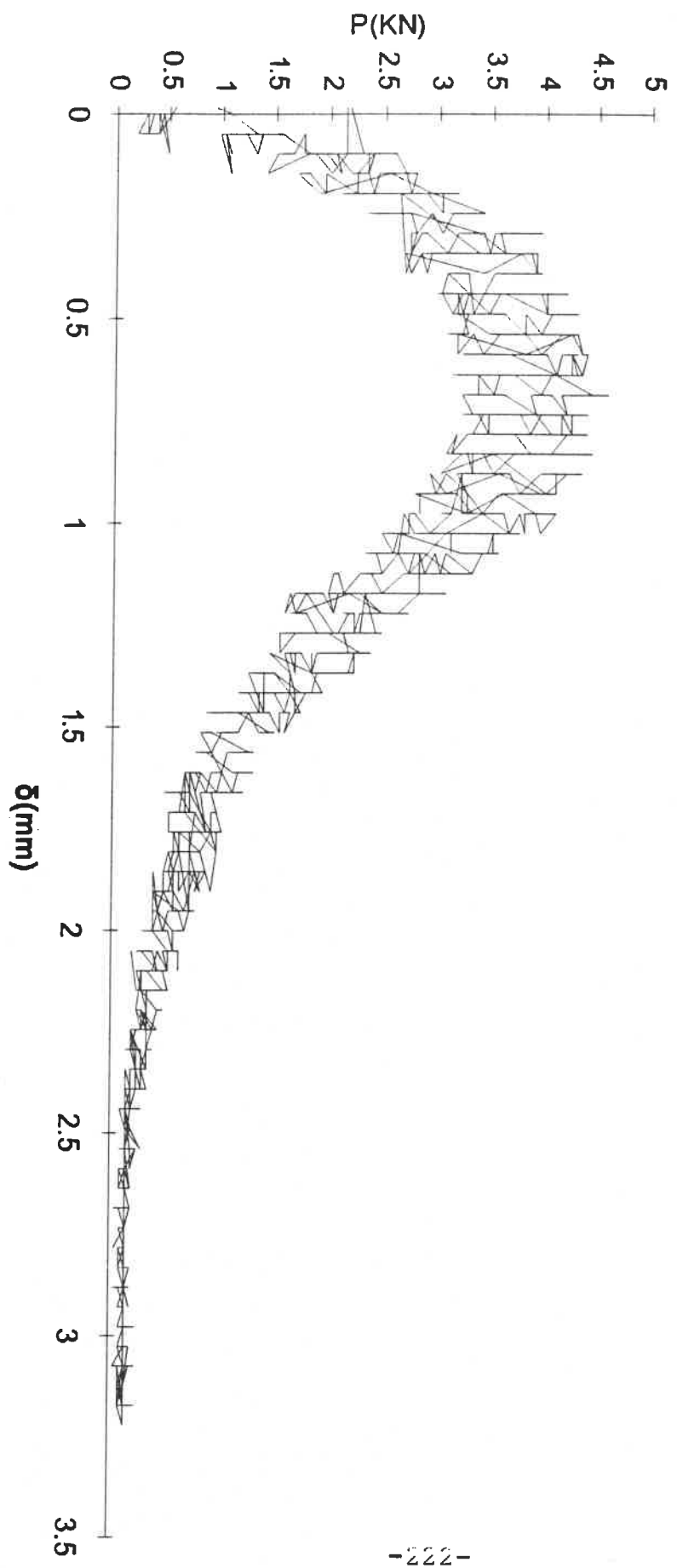
Το γεγονός ότι το δοκίμιο (Δ_2) παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή απ' ότι το (Δ_1) συμβιβάζεται και με το συμπέρασμα που προέκυψε απ' τα κυλινδρικά δοκίμια (E) και (F) όπου συγκρίνοντας το (K_{ic}) βρέθηκε (έστω και χωρίς

ικανοποιητική προσέγγιση της πραγματικότητας) ότι τα (K_c) των δοκιμών (E) (ανάλογων όσον αφορά την σύνθεση με το (Δ_2)) είναι μεγαλύτερα των αντίστοιχων (K_c) των δοκιμών (F) .

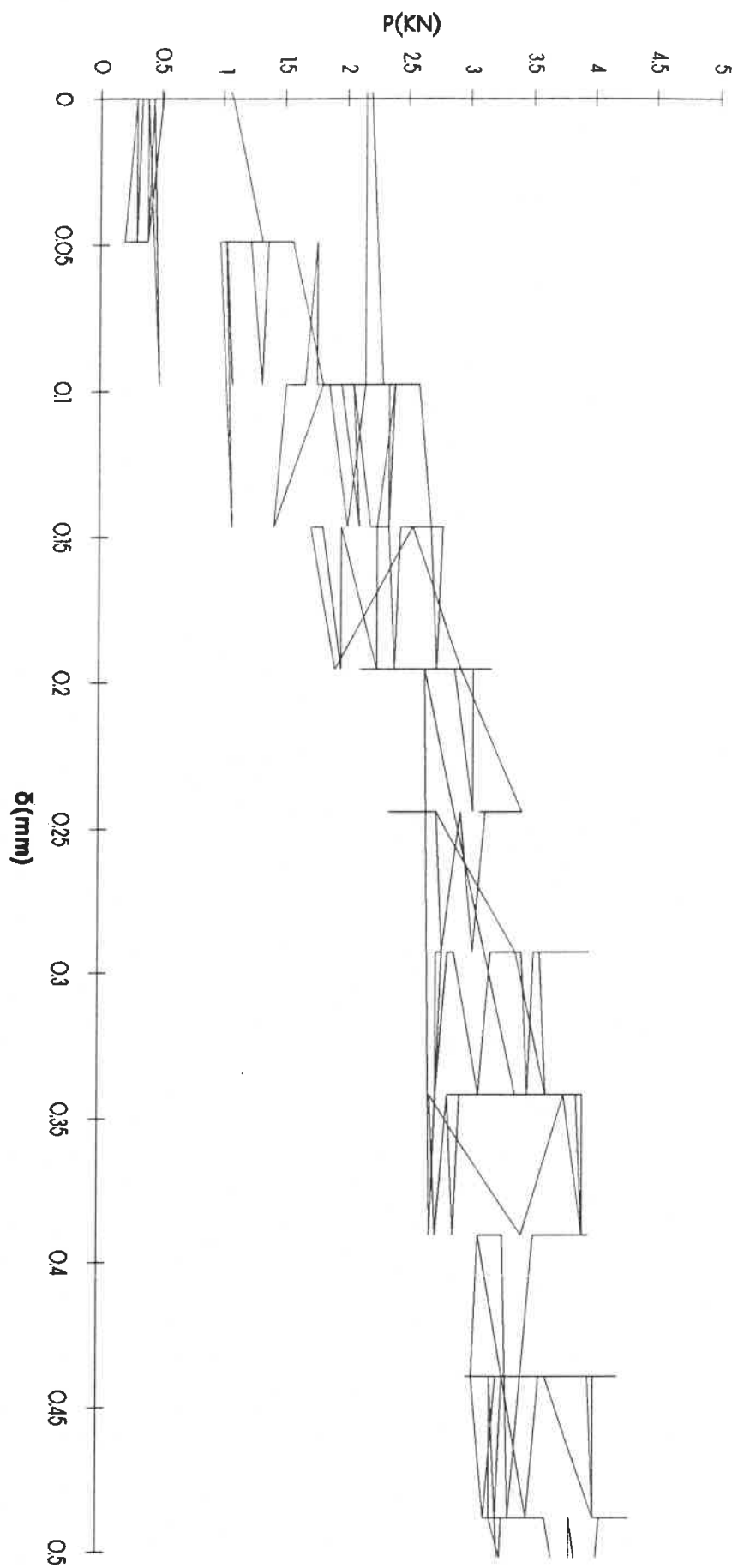
Η παραπάνω πειραματική διαδικασία και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε προκειμένου να προσδιοριστεί η χαρακτηριστική παράμετρος αντοχής (J_R) των ασφατικών υλικών συνιστούν έναν ασφαλή, απλό, αποτελεσματικό κι όχι ιδιαίτερα επίπονο τρόπο προσδιορισμού της αντοχής των ρηγματωμένων ασφαλτομιγμάτων.

Θα πρέπει να τονισθεί ιδιαίτερα όμως εδώ ότι η παραπάνω μεθοδολογία αποτελεί ένα όπλο στα χέρια του μηχανικού μόνο όσον αφορά το κλειστό "κυκλωμα" μέσα στο οποίο περιορίζεται ένα εργαστηριακό πείραμα. Δηλαδή μ'άλλα λόγια στην πράξη το (J_R) που υπολογίζεται για κάθε ελαστοπλαστικό υλικό είναι χαρακτηριστικό της αντοχής του υλικού υπό τις αυστηρά καθορισμένες και συγκεκριμένες συνθήκες του εργαστηρίου και δεν έχει σχέση με τ'αντίστοιχο (J_R) που θα μπορούσε θεωρητικά να υπολογιστεί κανείς στην περίπτωση που κατάφερνε να εξομειώσει στο εργαστήριο τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης. Κι αυτό γιατί στην πραγματικότητα ο τρόπος φόρτισης των ασφατικών στρώσεων είναι τελείως διαφορετικός απ'αυτόν του εργαστηρίου, όπως άλλωστε διαφορετικές είναι και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Αναλυτικότερα οι διαφορές μεταξύ πραγματικών συνθηκών και συνθηκών εργαστηρίου αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

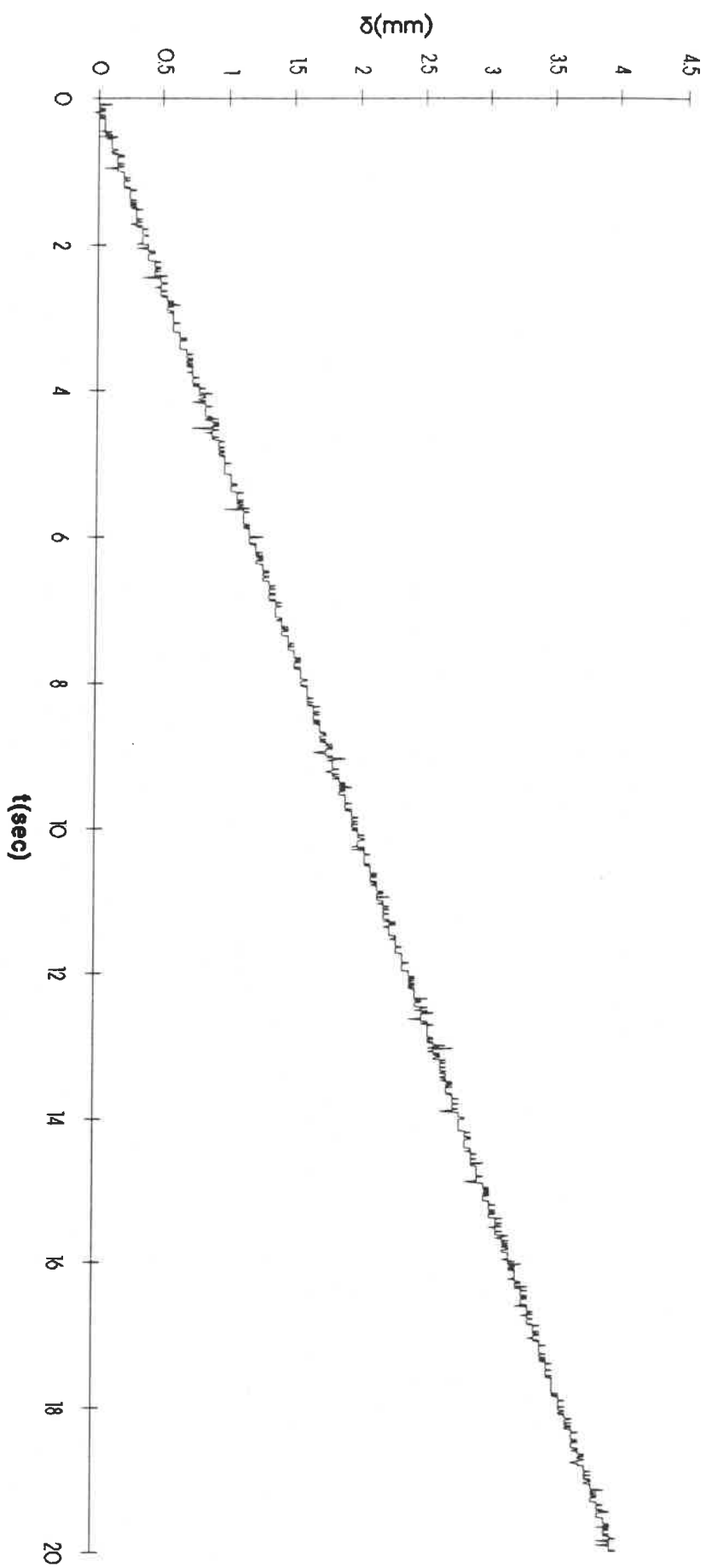
Δ1
Διάγραμμα Δύναμης - Παραμόρφωσης
Φόρτιση Υπό Ελεγχόμενη Παραμόρφωση



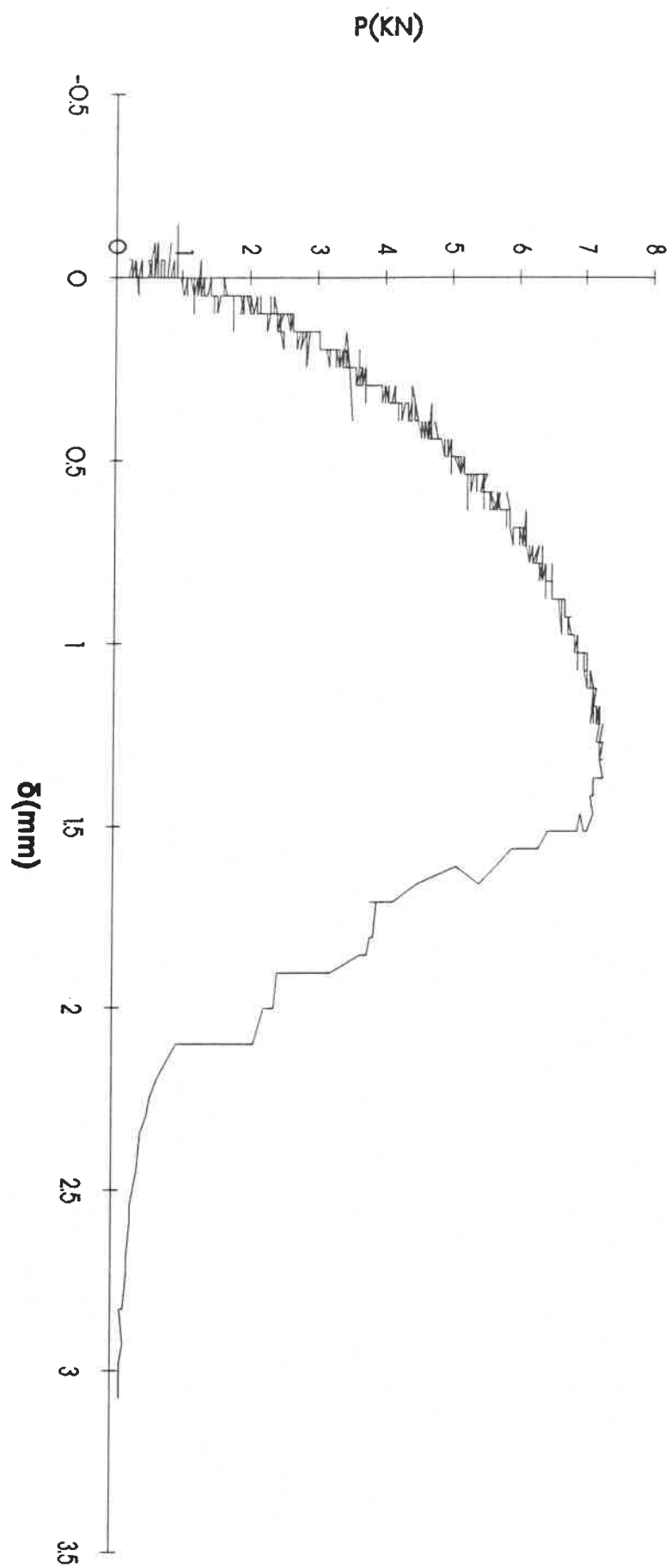
ΔI_a



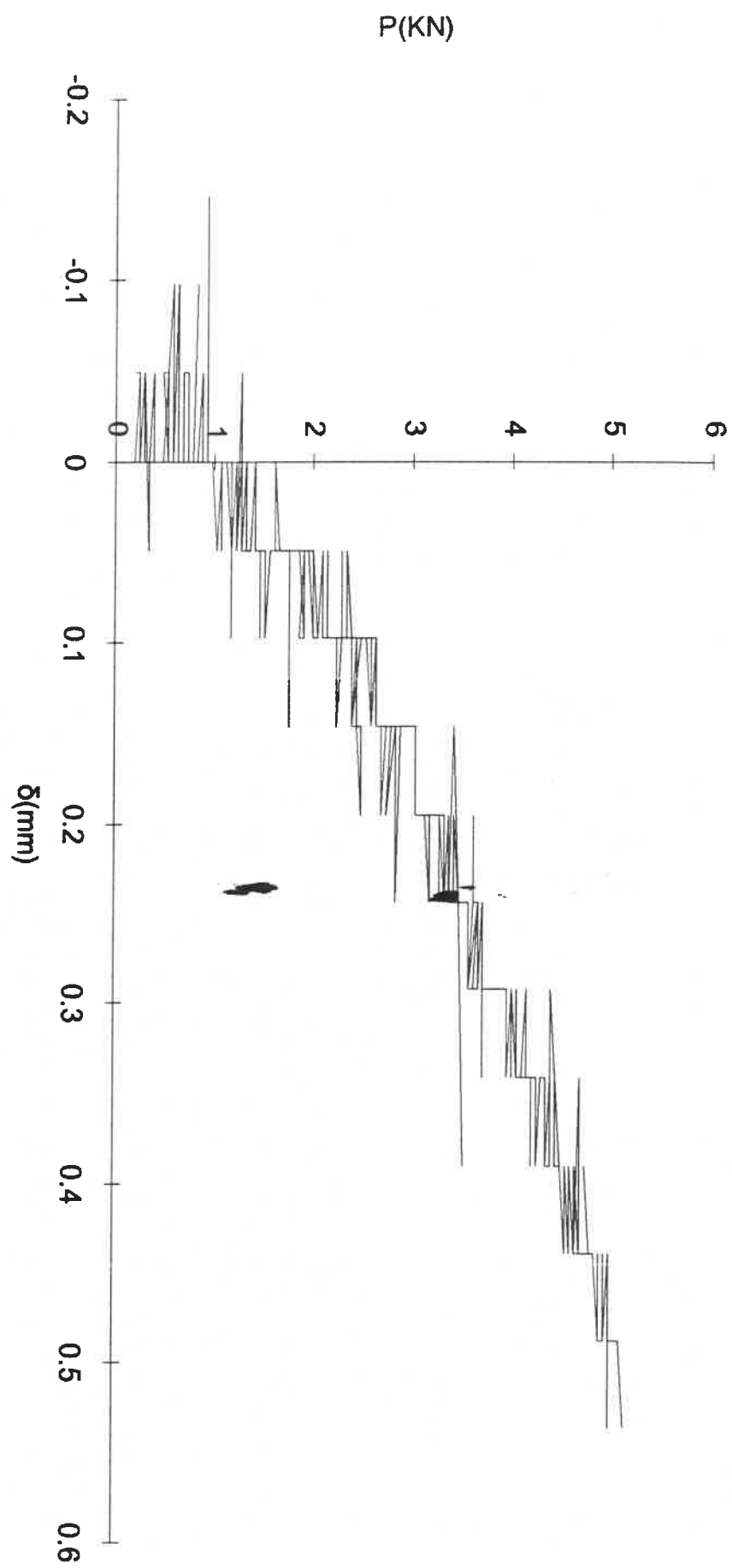
Δ10 Β
Διάγραμμα Παραμόρφωσης - Χρόνου
Φόρτιση Υπό Σταθερή Παραμόρφωση (0.25mm/sec)



Δ2
Διάγραμμα Δύναμης - Παραμόρφωσης
Φόρτιση υπό Ελεγχόμενη Δύναμη



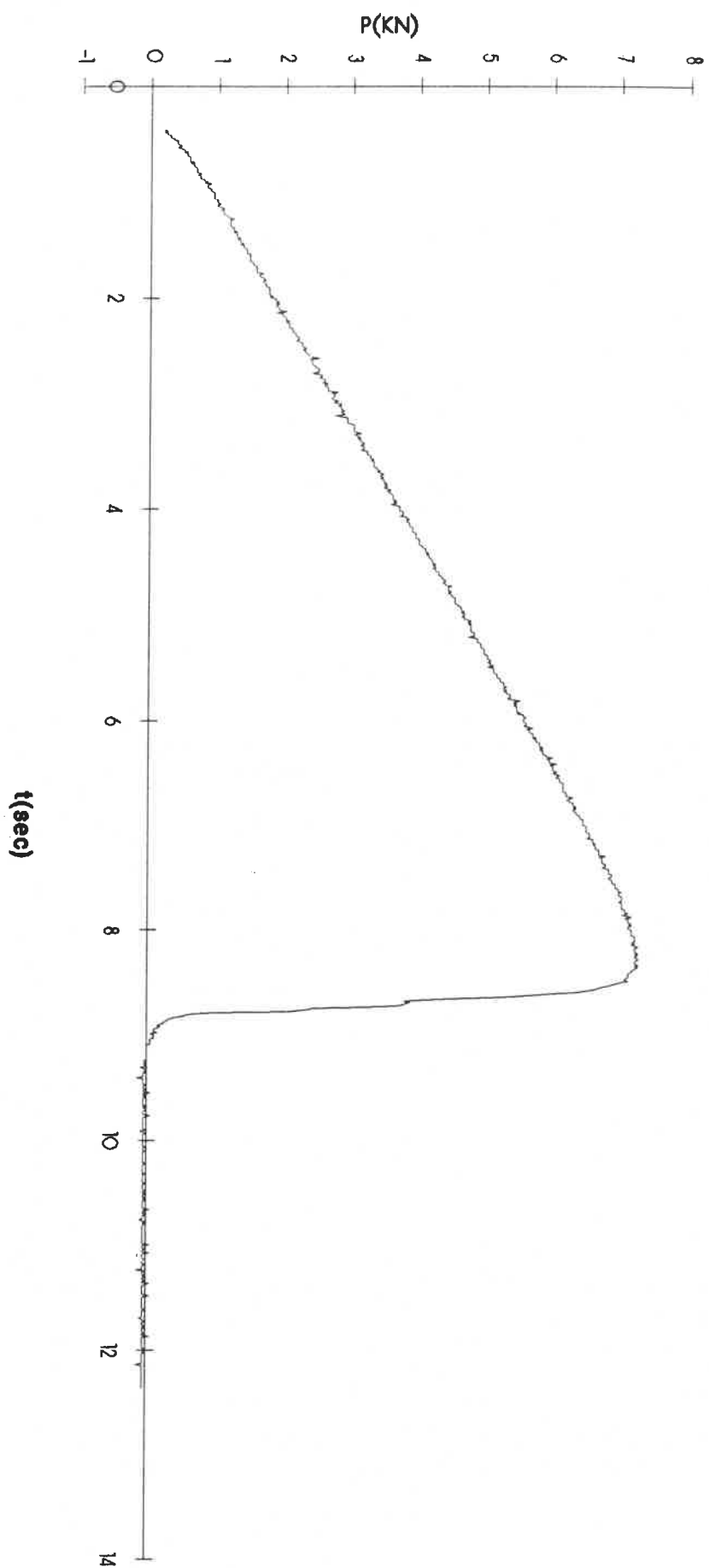
$\Delta 2a$



$P(KN)$

$\delta(mm)$

Δ208
Διάγραμμα Δύναμης - Χρόνου
Φόρτιση Υπό Ελεγχόμενη Δύναμη (1KN/sec)



Παράρτημα1

SHRP_Equipment_Corporation			
Automatic_Testing_System_v.3.11			
RAMP_RESULT			
INFORMATION			
Μετρηθέντες Τιμές Δύναμης - Κατακόρυφης Θέσης Εμβόλου			
Δοκίμιο Από Λεπτόκοκο Υλικό			
Φόρτιση: Μοναξονικός Εφελκυσμός			
Θερμοκρασία: 18°C			
CYL_SPECIMEN			
mm			
LOAD=3			
PRESS=-1			
AXIAL1=5			
AXIAL2=5			
LAT1=-1			
LAT2=-1			
RADTYPE=1			
LENGTH=235.000000			
RADIUS=33.200000			
no info			
RAW_ATS_DATA			
CHANNELS=3			
channel	0		3 5
name	ActrDisp.	Force	Disp.
sensit	0.048828	0.048828	0.000195
zero	0	0	0
sec	mm	kN	mm
0	-56.5429	0	0.03418
0.01	-56.5429	0	0.033789
0.02	-56.5429	-0.14648	0.033789
0.03	-56.5429	0	0.033985
0.04	-56.5429	0.048828	0.033594
0.05	-56.5429	0	0.033594
0.06	-56.5429	0.048828	0.033594
0.07	-56.5429	0	0.033789
0.08	-56.5429	0	0.033789
0.09	-56.4453	0	0.033789
0.1	-56.5429	0	0.033985
0.11	-56.5429	0.048828	0.033594
0.12	-56.5429	0	0.033399
0.13	-56.5429	0	0.033789
0.14	-56.4941	-0.04883	0.033789
0.15	-56.5429	0	0.033789
0.16	-56.4941	0	0.033985
0.17	-56.5429	0	0.03418
0.18	-56.4941	0	0.033594
0.19	-56.5918	0	0.033594
0.2	-56.5429	0	0.033789
0.21	-56.5429	0.048828	0.033789
0.22	-56.5429	0.048828	0.033789
0.23	-56.4941	0	0.033985
0.24	-56.5429	0	0.033985
0.25	-56.5429	0	0.033594

0.26	-56.4941	0.048828	0.033789
0.27	-56.5429	0	0.033789
0.28	-56.4941	0	0.033789
0.29	-56.4941	0.048828	0.033789
0.3	-56.4941	0.048828	0.033985
0.31	-56.4941	0	0.033594
0.32	-56.4941	0.048828	0.033594
0.33	-56.4941	0	0.033789
0.34	-56.4941	-0.04883	0.033789
0.35	-56.4941	0.048828	0.033789
0.36	-56.4941	0	0.033789
0.37	-56.4941	0	0.033985
0.38	-56.4941	0	0.033399
0.39	-56.4941	0.048828	0.033594
0.4	-56.4941	0	0.033789
0.41	-56.4941	0.048828	0.033789
0.42	-56.4941	0	0.033789
0.43	-56.4941	-0.09766	0.033789
0.44	-56.4941	0	0.033985
0.45	-56.5429	0	0.033399
0.46	-56.4453	0	0.033789
0.47	-56.4941	0	0.033594
0.48	-56.4941	0	0.033789
0.49	-56.4941	0	0.033789
0.5	-56.4453	0.048828	0.033789
0.51	-56.4453	0.048828	0.03418
0.52	-56.5429	0	0.033594
0.53	-56.3965	0	0.033594
0.54	-56.4453	0	0.033594
0.55	-56.4941	0	0.033789
0.56	-56.4453	0.048828	0.033789
0.57	-56.4453	0	0.033985
0.58	-56.4453	0	0.033985
0.59	-56.4453	0	0.033594
0.6	-56.4453	0.048828	0.033789
0.61	-56.4453	0.048828	0.033594
0.62	-56.4453	0	0.033789
0.63	-56.4453	0.048828	0.033789
0.64	-56.4453	0	0.033985
0.65	-56.4453	0	0.03418
0.66	-56.4453	0	0.033594
0.67	-56.4453	0	0.033789
0.68	-56.4453	0.048828	0.033789
0.69	-56.4453	0	0.033789
0.7	-56.3965	0	0.033985
0.71	-56.3965	0	0.033789
0.72	-56.4453	0	0.03418
0.73	-56.4453	0	0.033594
0.74	-56.4453	0	0.033594
0.75	-56.3965	0	0.033789
0.76	-56.4453	0.048828	0.033789
0.77	-56.3965	0.048828	0.033985
0.78	-56.3476	0.048828	0.033789
0.79	-56.3965	0	0.033985
0.8	-56.3476	0	0.033594
0.81	-56.3965	0	0.033789
0.82	-56.3965	0.048828	0.033789
0.83	-56.3965	0.048828	0.033789
0.84	-56.3965	0	0.033789
0.85	-56.3965	0	0.033985

Q.86	-56.3965	Q.O48828	Q.O33789
Q.87	-56.3965	O	Q.O33594
Q.88	-56.3965	O	Q.O33789
Q.89	-56.3476	Q.O48828	Q.O33594
Q.9	-56.3965	O	Q.O33789
Q.91	-56.3965	O	Q.O33789
Q.92	-56.3965	O	Q.O33985
Q.93	-56.3476	Q.O48828	Q.O33399
Q.94	-56.3965	O	Q.O33594
Q.95	-56.4941	O	Q.O33594
Q.96	-56.3965	-O.O4883	Q.O33789
Q.97	-56.3965	Q.O97656	Q.O33789
Q.98	-56.3965	O	Q.O3418
Q.99	-56.3965	O	Q.O33985
1	-56.3476	Q.O48828	Q.O33399
101	-56.3476	Q.O48828	Q.O33789
102	-56.3476	Q.O48828	Q.O33789
103	-56.3476	O	Q.O33789
104	-56.3476	O	Q.O33789
105	-56.3476	Q.O48828	Q.O33594
106	-56.3476	O	Q.O33985
107	-56.3476	Q.O48828	Q.O33399
108	-56.2988	O	Q.O33594
109	-56.3476	Q.O48828	Q.O33789
11	-56.3476	O	Q.O33789
111	-56.3476	Q.O97656	Q.O33789
112	-56.2988	O	Q.O33985
113	-56.3476	O	Q.O33985
114	-56.3476	O	Q.O33594
115	-56.3476	O	Q.O33789
116	-56.3476	O	Q.O33789
117	-56.3476	O	Q.O33789
118	-56.3476	O	Q.O33789
119	-56.3476	Q.O48828	Q.O33594
12	-56.3476	O	Q.O33985
121	-56.2988	Q.O48828	Q.O33594
122	-56.3476	Q.O48828	Q.O33789
123	-56.2988	Q.O48828	Q.O33594
124	-56.2988	Q.O97656	Q.O33789
125	-56.25	Q.O48828	Q.O33789
126	-56.2988	Q.O48828	Q.O34375
127	-56.2988	Q.O48828	Q.O33985
128	-56.2988	Q.O48828	Q.O33594
129	-56.2988	Q.O48828	Q.O33594
13	-56.2988	Q.O48828	Q.O33789
131	-56.2988	Q.O48828	Q.O33985
132	-56.2988	O	Q.O33594
133	-56.2988	Q.O97656	Q.O33789
134	-56.2988	Q.O48828	Q.O3418
135	-56.2988	Q.O97656	Q.O33594
136	-56.2988	Q.O48828	Q.O33789
137	-56.2988	Q.O48828	Q.O33789
138	-56.25	Q.O48828	Q.O33789
139	-56.2988	Q.O48828	Q.O33985
14	-56.2988	Q.O48828	Q.O33985
141	-56.2988	Q.O48828	Q.O3418
142	-56.25	Q.O48828	Q.O33594
143	-56.2988	Q.O48828	Q.O33594
144	-56.2988	Q.O48828	Q.O33594
145	-56.25	-O.O4883	Q.O33789

146	-56.2988	O.O48828	O.O33789
147	-56.2988	O	O.O33985
148	-56.25	-O.O4883	O.O3418
149	-56.25	O.O48828	O.O33594
15	-56.2988	O	O.O33594
151	-56.2011	O.O48828	O.O33789
152	-56.25	O.O48828	O.O33789
153	-56.25	O.O48828	O.O33985
154	-56.25	O	O.O3418
155	-56.25	O.O97656	O.O33985
156	-56.25	O.O48828	O.O33594
157	-56.25	O.O97656	O.O33594
158	-56.25	O.O48828	O.O33594
159	-56.25	O.O48828	O.O33789
16	-56.25	O.O48828	O.O33594
161	-56.25	O.O48828	O.O33985
162	-56.25	O	O.O33203
163	-56.25	O.O48828	O.O33789
164	-56.2011	O.O48828	O.O33789
165	-56.25	O.O48828	O.O33789
166	-56.25	O.O48828	O.O33789
167	-56.25	O.O48828	O.O33985
168	-56.2011	O.O48828	O.O33985
169	-56.25	O.O48828	O.O33203
17	-56.25	O.O48828	O.O33594
171	-56.2988	O.O48828	O.O33789
172	-56.25	O.O48828	O.O33789
173	-56.2011	O.O48828	O.O33789
174	-56.25	O.O48828	O.O33789
175	-56.25	O.O48828	O.O33985
176	-56.2011	O.O97656	O.O33399
177	-56.2011	O.O48828	O.O33789
178	-56.1523	O.O48828	O.O33594
179	-56.2011	O.O48828	O.O33789
18	-56.2011	O.O48828	O.O33789
181	-56.2011	O.O48828	O.O33985
182	-56.2011	O.O48828	O.O33985
183	-56.2011	O.O48828	O.O33789
184	-56.2011	O.O48828	O.O33789
185	-56.2011	O.O97656	O.O33789
186	-56.1523	O.O48828	O.O33789
187	-56.1523	O.O48828	O.O33789
188	-56.2011	O.O48828	O.O33985
189	-56.2011	O.O48828	O.O33985
19	-56.2011	O.O48828	O.O33594
191	-56.2011	O.O48828	O.O33594
192	-56.2011	O.O48828	O.O33594
193	-56.2011	O.O48828	O.O33789
194	-56.2011	O.O48828	O.O33985
195	-56.2011	O.O48828	O.O33985
196	-56.2011	O.O48828	O.O3418
197	-56.2011	O.O97656	O.O33594
198	-56.25	O.146484	O.O33594
199	-56.1523	O.146484	O.O33789
2	-56.1523	O.146484	O.O33789
201	-56.1523	O.146484	O.O33594
202	-56.1523	O.146484	O.O33985
203	-56.1523	O.146484	O.O33985
204	-56.25	O.146484	O.O33594
205	-56.1523	O.O97656	O.O33789

206	-56.1523	O.097656	O.033789
207	-56.1523	O.146484	O.033789
208	-56.1035	O.097656	O.033985
209	-56.1523	O.146484	O.033985
21	-56.1035	O.146484	O.033985
211	-56.1035	O.146484	O.033594
212	-56.1523	O.195312	O.033594
213	-56.1523	O.146484	O.033594
214	-56.1523	O.097656	O.033789
215	-56.1523	O.146484	O.033789
216	-56.1523	O.097656	O.033789
217	-56.1523	O.146484	O.033399
218	-56.1523	O.146484	O.033594
219	-56.1523	O.146484	O.033594
22	-56.1523	O.146484	O.033789
221	-56.1523	O.146484	O.033789
222	-56.1035	O.097656	O.033789
223	-56.0547	O.146484	O.033985
224	-56.1035	O.146484	O.033399
225	-56.1035	O.097656	O.033594
226	-56.1035	O.097656	O.033594
227	-56.1035	O.146484	O.033789
228	-56.1035	O.146484	O.033789
229	-56.1035	O.146484	O.033789
23	-56.0547	O.146484	O.033985
231	-56.1035	O.146484	O.033399
232	-56.0547	O.146484	O.033594
233	-56.1035	O.146484	O.033594
234	-56.1035	O.146484	O.033594
235	-56.1035	O.146484	O.033789
236	-56.0547	O.195312	O.033985
237	-56.1035	O.146484	O.03418
238	-56.1035	O.097656	O.033594
239	-56.1035	O.146484	O.033789
24	-56.1035	O.097656	O.033594
241	-56.1035	O.146484	O.033789
242	-56.0058	O.146484	O.033789
243	-56.0547	O.097656	O.033789
244	-56.2011	O.146484	O.033985
245	-56.1035	O.146484	O.033594
246	-56.0547	O.146484	O.033594
247	-56.0547	O.146484	O.033594
248	-56.0547	O.146484	O.033594
249	-56.0547	O.146484	O.033789
25	-56.0547	O.146484	O.033985
251	-56.0547	O.146484	O.033985
252	-56.0058	O.146484	O.033594
253	-56.0058	O.146484	O.033594
254	-56.0547	O.195312	O.033594
255	-56.0547	O.146484	O.033594
256	-56.0547	O.146484	O.033789
257	-56.0547	O.146484	O.033985
258	-56.1035	O.146484	O.033985
259	-56.0547	O.195312	O.033594
26	-56.0547	O.146484	O.033594
261	-56.0547	O.146484	O.033594
262	-56.0547	O.146484	O.033789
263	-56.0058	O.146484	O.033789
264	-56.0547	O.146484	O.033985
265	-56.0547	O.146484	O.033985

266	-56.0547	O.146484	O.O33594
267	-56.0547	O.O97656	O.O33399
268	-56.0547	O.146484	O.O33789
269	-56.0547	O.146484	O.O33789
27	-56.0058	O.146484	O.O33789
271	-56.0547	O.146484	O.O33985
272	-56.0058	O.146484	O.O33399
273	-56.0058	O.146484	O.O33789
274	-56.0058	O.146484	O.O33594
275	-56.0058	O.146484	O.O33789
276	-56.0058	O.146484	O.O33789
277	-55.957	O.146484	O.O33789
278	-56.0058	O.146484	O.O33985
279	-55.957	O.146484	O.O33203
28	-56.0058	O.146484	O.O33594
281	-56.0058	O.146484	O.O33594
282	-55.9082	O.146484	O.O33789
283	-56.0058	O.195312	O.O33789
284	-56.0058	O.146484	O.O3418
285	-55.957	O.146484	O.O3418
286	-56.0058	O.146484	O.O33594
287	-56.0058	O.146484	O.O33594
288	-56.0058	O.146484	O.O33594
289	-56.0058	O.146484	O.O33789
29	-56.0058	O.146484	O.O33985
291	-55.957	O.146484	O.O33789
292	-55.957	O.146484	O.O33985
293	-56.0058	O.146484	O.O33594
294	-55.957	O.146484	O.O33789
295	-55.957	O.146484	O.O33789
296	-55.957	O.146484	O.O33789
297	-55.957	O.146484	O.O33789
298	-55.957	O.146484	O.O33985
299	-55.957	O.O48828	O.O3418
3	-55.957	O.146484	O.O33594
301	-55.957	O.146484	O.O33789
302	-55.957	O.146484	O.O33594
303	-55.957	O.146484	O.O33789
304	-55.957	O.146484	O.O33789
305	-55.957	O.146484	O.O33789
306	-55.957	O.146484	O.O3418
307	-55.9082	O.146484	O.O33594
308	-55.957	O.146484	O.O33594
309	-55.957	O.146484	O.O33789
31	-55.957	O.146484	O.O33789
311	-55.957	O.195312	O.O33789
312	-55.957	O.146484	O.O33985
313	-55.957	O.146484	O.O33985
314	-55.957	O.146484	O.O33594
315	-55.957	O.146484	O.O33789
316	-55.957	O.146484	O.O33594
317	-55.957	O.146484	O.O33789
318	-55.957	O.146484	O.O33594
319	-55.957	O.146484	O.O33985
32	-55.9082	O.146484	O.O33399
321	-55.9082	O.146484	O.O33594
322	-55.9082	O.146484	O.O33594
323	-55.9082	O.O48828	O.O33789
324	-55.9082	O.146484	O.O33985
325	-55.9082	O.146484	O.O33985

3.26	-55.9082	Q.195312	Q.O33985
3.27	-55.9082	Q.146484	Q.O33203
3.28	-55.8593	Q.195312	Q.O33789
3.29	-55.9082	Q.146484	Q.O33594
3.3	-55.9082	Q.146484	Q.O33789
3.31	-55.8593	Q.146484	Q.O33789
3.32	-55.9082	Q.146484	Q.O33985
3.33	-55.9082	Q.146484	Q.O33985
3.34	-55.9082	Q.146484	Q.O33399
3.35	-55.9082	Q.195312	Q.O33594
3.36	-55.9082	Q.195312	Q.O33594
3.37	-55.9082	Q.146484	Q.O33594
3.38	-55.9082	Q.146484	Q.O33789
3.39	-55.9082	Q.195312	Q.O33985
3.4	-55.9082	Q.146484	Q.O3418
3.41	-55.9082	Q.146484	Q.O33594
3.42	-55.9082	Q.146484	Q.O33399
3.43	-55.9082	Q.O97656	Q.O33594
3.44	-55.8593	Q.146484	Q.O33789
3.45	-55.8593	Q.195312	Q.O33789
3.46	-55.8593	Q.146484	Q.O33789
3.47	-55.8593	Q.146484	Q.O33985
3.48	-55.8593	Q.O97656	Q.O33594
3.49	-55.8593	Q.146484	Q.O3418
3.5	-55.8105	Q.146484	Q.O33399
3.51	-55.8593	Q.146484	Q.O33789
3.52	-55.8593	Q.146484	Q.O33789
3.53	-55.8593	Q.146484	Q.O33789
3.54	-55.8593	Q.146484	Q.O33985
3.55	-55.8593	Q.146484	Q.O33594
3.56	-55.8105	Q.146484	Q.O33789
3.57	-55.8105	Q.146484	Q.O33789
3.58	-55.8593	Q.146484	Q.O33789
3.59	-55.8105	Q.146484	Q.O33985
3.6	-55.8593	Q.146484	Q.O33985
3.61	-55.8593	Q.146484	Q.O33985
3.62	-55.8593	Q.146484	Q.O33789
3.63	-55.8105	Q.146484	Q.O33789
3.64	-55.8593	Q.146484	Q.O33594
3.65	-55.8593	Q.195312	Q.O33789
3.66	-55.8105	Q.146484	Q.O33789
3.67	-55.8593	Q.195312	Q.O33985
3.68	-55.8105	Q.146484	Q.O33399
3.69	-55.8105	Q.146484	Q.O33594
3.7	-55.8105	Q.195312	Q.O33594
3.71	-55.8105	Q.195312	Q.O33594
3.72	-55.8105	Q.195312	Q.O33789
3.73	-55.8105	Q.146484	Q.O33789
3.74	-55.8105	Q.195312	Q.O33985
3.75	-55.8593	Q.146484	Q.O33203
3.76	-55.8105	Q.195312	Q.O33594
3.77	-55.8105	Q.195312	Q.O33789
3.78	-55.8105	Q.146484	Q.O33594
3.79	-55.8105	Q.195312	Q.O33789
3.8	-55.8105	Q.146484	Q.O33789
3.81	-55.8105	Q.195312	Q.O33985
3.82	-55.7617	Q.195312	Q.O33594
3.83	-55.8105	Q.146484	Q.O33594
3.84	-55.8105	Q.195312	Q.O33594
3.85	-55.8105	Q.195312	Q.O33789

3.86	-55.8105	0.146484	0.033789
3.87	-55.8105	0.146484	0.033789
3.88	-55.8105	0.146484	0.033985
3.89	-55.8105	0.244141	0.033594
3.9	-55.8105	0.146484	0.033594
3.91	-55.7617	0.195312	0.033789
3.92	-55.8105	0.146484	0.033789
3.93	-55.7617	0.195312	0.033789
3.94	-55.8105	0.146484	0.033985
3.95	-55.7617	0.195312	0.033985
3.96	-55.7617	0.341797	0.033594
3.97	-55.7129	0.292969	0.033594
3.98	-55.7617	0.292969	0.033594
3.99	-55.7617	0.390625	0.033789
4	-55.7617	0.439453	0.033789
4.01	-55.7617	0.488281	0.03418
4.02	-55.7617	0.390625	0.033985
4.03	-55.7617	0.439453	0.033594
4.04	-55.664	0.488281	0.033594
4.05	-55.7617	0.390625	0.033789
4.06	-55.7617	0.488281	0.033789
4.07	-55.7617	0.439453	0.033789
4.08	-55.7129	0.390625	0.033985
4.09	-55.7129	0.244141	0.033789
4.1	-55.7129	0.195312	0.033594
4.11	-55.7617	0.292969	0.033594
4.12	-55.7617	0.292969	0.033789
4.13	-55.7617	0.390625	0.033789
4.14	-55.7129	0.390625	0.033789
4.15	-55.7129	0.390625	0.033985
4.16	-55.8105	0.634765	0.033399
4.17	-55.7617	1.07422	0.033594
4.18	-55.7129	1.31836	0.033594
4.19	-55.7129	1.36719	0.033789
4.2	-55.7129	1.31836	0.033789
4.21	-55.7129	1.36719	0.033985
4.22	-55.664	1.31836	0.033985
4.23	-55.7129	1.2207	0.033203
4.24	-55.7129	1.36719	0.033594
4.25	-55.7129	1.41601	0.033594
4.26	-55.7129	1.31836	0.033789
4.27	-55.7129	1.17187	0.033789
4.28	-55.7129	1.12305	0.033789
4.29	-55.7129	1.02539	0.033985
4.3	-55.7129	1.2207	0.033399
4.31	-55.7129	1.26953	0.033594
4.32	-55.7129	1.26953	0.033399
4.33	-55.7129	1.17187	0.033789
4.34	-55.7129	1.12305	0.033789
4.35	-55.7129	1.02539	0.033985
4.36	-55.664	1.07422	0.033985
4.37	-55.664	1.07422	0.033594
4.38	-55.7129	1.02539	0.033594
4.39	-55.6152	1.07422	0.033594
4.4	-55.7129	0.976562	0.033789
4.41	-55.7129	1.5625	0.033789
4.42	-55.664	1.80664	0.033789
4.43	-55.664	1.95312	0.033985
4.44	-55.6152	2.09961	0.033594
4.45	-55.664	2.05078	0.033789

4.46	-55.6152	219726	O.O33789
4.47	-55.6152	224609	O.O33789
4.48	-55.664	239258	O.O33789
4.49	-55.6152	234375	O.O33789
4.5	-55.664	234375	O.O33985
4.51	-55.664	229492	O.O33594
4.52	-55.8105	214844	O.O33594
4.53	-55.664	214844	O.O33789
4.54	-55.6152	200195	O.O33985
4.55	-55.664	185547	O.O33985
4.56	-55.664	185547	O.O33985
4.57	-55.664	175781	O.O33203
4.58	-55.7129	175781	O.O33594
4.59	-55.664	166016	O.O33594
4.6	-55.664	161133	O.O33789
4.61	-55.664	151367	O.O33789
4.62	-55.664	161133	O.O33789
4.63	-55.664	151367	O.O33985
4.64	-55.6152	141601	O.O33399
4.65	-55.664	180664	O.O33594
4.66	-55.664	239258	O.O33594
4.67	-55.664	258789	O.O33789
4.68	-55.6152	268555	O.O33789
4.69	-55.6152	268555	O.O33789
4.7	-55.5664	273437	O.O33985
4.71	-55.6152	27832	O.O33594
4.72	-55.6152	273437	O.O33594
4.73	-55.6152	273437	O.O33789
4.74	-55.6152	273437	O.O33789
4.75	-55.6152	249023	O.O33789
4.76	-55.6152	253906	O.O33985
4.77	-55.6152	244141	O.O33985
4.78	-55.5664	239258	O.O33594
4.79	-55.6152	234375	O.O33789
4.8	-55.6152	229492	O.O33594
4.81	-55.6152	219726	O.O33789
4.82	-55.6152	224609	O.O33789
4.83	-55.5664	224609	O.O33789
4.84	-55.6152	195312	O.O33985
4.85	-55.5664	195312	O.O33594
4.86	-55.6152	180664	O.O33789
4.87	-55.6152	170898	O.O33594
4.88	-55.6152	170898	O.O33789
4.89	-55.5664	19043	O.O33789
4.9	-55.6152	253906	O.O33985
4.91	-55.5664	292969	O.O3418
4.92	-55.5664	3125	O.O33594
4.93	-55.5664	3125	O.O33594
4.94	-55.5664	317383	O.O33789
4.95	-55.5664	3125	O.O33789
4.96	-55.5664	3125	O.O33789
4.97	-55.5664	3125	O.O33789
4.98	-55.5664	307617	O.O33985
4.99	-55.5664	302734	O.O33399
5	-55.5175	302734	O.O33594
5.01	-55.5664	288086	O.O33789
5.02	-55.5664	273437	O.O33789
5.03	-55.5664	268555	O.O33789
5.04	-55.5664	263672	O.O33985
5.05	-55.5664	263672	O.O33203

5.06	-55.5664	263672	O.O33594
5.07	-55.5664	253906	O.O33789
5.08	-55.5664	239258	O.O33789
5.09	-55.5664	234375	O.O33789
5.1	-55.5664	234375	O.O33789
5.11	-55.5664	224609	O.O33985
5.12	-55.5664	209961	O.O33203
5.13	-55.5664	224609	O.O33789
5.14	-55.5664	292969	O.O33594
5.15	-55.5175	341797	O.O33789
5.16	-55.5175	341797	O.O33985
5.17	-55.5175	336914	O.O33985
5.18	-55.5175	336914	O.O33985
5.19	-55.5175	341797	O.O33594
5.2	-55.5175	336914	O.O33594
5.21	-55.5175	322265	O.O33789
5.22	-55.5175	327148	O.O33789
5.23	-55.5175	317383	O.O33789
5.24	-55.5175	307617	O.O33985
5.25	-55.5175	3125	O.O3418
5.26	-55.5175	307617	O.O33594
5.27	-55.5175	3125	O.O33985
5.28	-55.4687	302734	O.O33594
5.29	-55.5175	292969	O.O33789
5.3	-55.4687	27832	O.O33789
5.31	-55.5175	273437	O.O33985
5.32	-55.5175	253906	O.O33985
5.33	-55.5175	244141	O.O33594
5.34	-55.5175	239258	O.O33594
5.35	-55.5175	239258	O.O33594
5.36	-55.5175	234375	O.O33789
5.37	-55.5175	234375	O.O33985
5.38	-55.5175	273437	O.O33985
5.39	-55.4687	336914	O.O3418
5.4	-55.4199	361328	O.O33789
5.41	-55.4687	356445	O.O33789
5.42	-55.4687	356445	O.O33203
5.43	-55.4687	361328	O.O34375
5.44	-55.4687	375976	O.O33789
5.45	-55.4687	375976	O.O33985
5.46	-55.4687	395508	O.O33789
5.47	-55.4687	385742	O.O33789
5.48	-55.4687	361328	O.O33594
5.49	-55.4687	351562	O.O33594
5.5	-55.4199	34668	O.O33789
5.51	-55.4687	341797	O.O33789
5.52	-55.4687	317383	O.O33789
5.53	-55.4199	307617	O.O33203
5.54	-55.4687	288086	O.O33594
5.55	-55.4687	283203	O.O33789
5.56	-55.4199	273437	O.O33594
5.57	-55.4199	273437	O.O33789
5.58	-55.4687	273437	O.O33789
5.59	-55.4687	27832	O.O33985
5.6	-55.4199	273437	O.O33399
5.61	-55.3711	268555	O.O33789
5.62	-55.5664	263672	O.O33789
5.63	-55.4199	336914	O.O33789
5.64	-55.4199	375976	O.O33789
5.65	-55.4199	390625	O.O33985

5.66	-55.3711	3.90625	0.033985
5.67	-55.4199	3.85742	0.033789
5.68	-55.4199	3.80859	0.033594
5.69	-55.4199	3.75976	0.033789
5.7	-55.4199	3.80859	0.033789
5.71	-55.4199	3.75976	0.033789
5.72	-55.4199	3.56445	0.033789
5.73	-55.4199	3.4668	0.03418
5.74	-55.4199	3.41797	0.033594
5.75	-55.4199	3.27148	0.033789
5.76	-55.4199	3.125	0.033594
5.77	-55.4199	3.02734	0.033789
5.78	-55.4199	3.07617	0.033789
5.79	-55.4199	2.92969	0.033985
5.8	-55.4199	2.83203	0.03418
5.81	-55.4199	2.92969	0.033789
5.82	-55.4199	2.92969	0.033594
5.83	-55.3711	2.88086	0.033594
5.84	-55.4199	2.83203	0.033789
5.85	-55.3711	2.73437	0.033789
5.86	-55.4199	2.68555	0.033789
5.87	-55.3711	3.41797	0.033985
5.88	-55.4199	3.75976	0.033594
5.89	-55.3711	3.90625	0.033594
5.9	-55.3711	3.80859	0.033789
5.91	-55.3711	3.95508	0.033789
5.92	-55.3711	3.75976	0.033789
5.93	-55.3711	3.75976	0.033985
5.94	-55.3711	3.80859	0.033594
5.95	-55.3711	3.80859	0.033594
5.96	-55.3711	3.80859	0.033594
5.97	-55.3711	3.75976	0.033594
5.98	-55.3711	3.66211	0.033789
5.99	-55.3711	3.51562	0.033789
6	-55.2734	3.32031	0.033985
6.01	-55.3711	3.27148	0.033399
6.02	-55.3711	3.22265	0.033789
6.03	-55.3711	3.22265	0.033789
6.04	-55.3711	3.17383	0.033594
6.05	-55.3711	3.07617	0.033985
6.06	-55.3711	3.07617	0.033985
6.07	-55.3711	3.07617	0.033985
6.08	-55.3711	3.07617	0.033789
6.09	-55.3222	3.02734	0.033594
6.1	-55.3711	3.07617	0.033789
6.11	-55.3222	3.27148	0.033789
6.12	-55.3222	3.56445	0.033789
6.13	-55.3222	3.90625	0.033789
6.14	-55.3222	4.05273	0.033985
6.15	-55.3222	4.15039	0.033594
6.16	-55.3222	4.19922	0.033594
6.17	-55.3222	4.15039	0.033594
6.18	-55.3222	4.15039	0.033789
6.19	-55.3222	4.10156	0.033985
6.2	-55.3222	4.0039	0.033985
6.21	-55.2734	4.0039	0.033985
6.22	-55.3222	3.95508	0.033594
6.23	-55.3222	3.71094	0.033789
6.24	-55.3222	3.56445	0.033789
6.25	-55.2734	3.4668	0.033789

6.26	-55.3222	3.27148	O.O33985
6.27	-55.2734	3.22265	O.O33985
6.28	-55.3222	3.17383	O.O33985
6.29	-55.2734	3.17383	O.O33594
6.3	-55.2734	3.125	O.O33789
6.31	-55.3222	3.22265	O.O33789
6.32	-55.2734	3.125	O.O33789
6.33	-55.3222	3.O2734	O.O33789
6.34	-55.3222	2.97851	O.O33985
6.35	-55.3222	3.O7617	O.O3418
6.36	-55.3222	3.61328	O.O33594
6.37	-55.2734	4.OO39	O.O33789
6.38	-55.2734	4.15O39	O.O33789
6.39	-55.2734	4.19922	O.O33789
6.4	-55.2734	4.248O4	O.O33789
6.41	-55.2734	4.29687	O.O33789
6.42	-55.2734	4.248O4	O.O33985
6.43	-55.2734	4.19922	O.O33594
6.44	-55.2734	4.15O39	O.O33789
6.45	-55.2734	4.O5273	O.O33789
6.46	-55.2246	3.955O8	O.O33789
6.47	-55.2734	3.8O859	O.O33985
6.48	-55.2246	3.8O859	O.O33789
6.49	-55.2734	3.61328	O.O33594
6.5	-55.2734	3.41797	O.O33594
6.51	-55.2734	3.32O31	O.O33789
6.52	-55.2734	3.22265	O.O33985
6.53	-55.2246	3.27148	O.O33789
6.54	-55.2246	3.22265	O.O33985
6.55	-55.2734	3.27148	O.O33985
6.56	-55.2734	3.32O31	O.O332O3
6.57	-55.2734	3.27148	O.O33594
6.58	-55.2734	3.125	O.O33789
6.59	-55.2734	3.17383	O.O33789
6.6	-55.2246	3.4668	O.O33789
6.61	-55.2246	4.OO39	O.O33789
6.62	-55.2246	4.O5273	O.O33985
6.63	-55.2246	4.29687	O.O33399
6.64	-55.2246	4.29687	O.O33789
6.65	-55.2246	4.29687	O.O33789
6.66	-55.1758	4.3457	O.O33789
6.67	-55.2246	4.29687	O.O33789
6.68	-55.2246	4.19922	O.O3418
6.69	-55.2246	4.15O39	O.O33985
6.7	-55.1758	3.955O8	O.O33594
6.71	-55.2246	3.8O859	O.O33594
6.72	-55.2246	3.51562	O.O33789
6.73	-55.2246	3.66211	O.O33789
6.74	-55.2246	3.66211	O.O33985
6.75	-55.2246	3.56445	O.O33985
6.76	-55.1758	3.41797	O.O33985
6.77	-55.2246	3.32O31	O.O33594
6.78	-55.1758	3.17383	O.O33985
6.79	-55.2246	3.17383	O.O33789
6.8	-55.2246	3.22265	O.O33789
6.81	-55.2246	3.17383	O.O33985
6.82	-55.2246	3.O7617	O.O33985
6.83	-55.2246	3.O7617	O.O33985
6.84	-55.2246	3.17383	O.O33594
6.85	-55.1758	3.8O859	O.O33789

6.86	-55.2246	4.24804	Q.O33789
6.87	-55.1758	4.3457	Q.O33789
6.88	-55.1758	4.39453	Q.O33789
6.89	-55.1269	4.3457	Q.O33985
6.9	-55.1758	4.24804	Q.O33985
6.91	-55.1758	4.29687	Q.O33789
6.92	-55.1758	4.19922	Q.O33594
6.93	-55.1758	4.15039	Q.O33789
6.94	-55.1269	4.10156	Q.O33789
6.95	-55.1758	4.0039	Q.O33789
6.96	-55.1758	3.95508	Q.O34375
6.97	-55.1758	3.85742	Q.O33985
6.98	-55.1758	3.71094	Q.O33789
6.99	-55.1758	3.71094	Q.O33594
7	-55.1758	3.61328	Q.O33789
7.01	-55.1758	3.71094	Q.O33789
7.02	-55.1758	3.66211	Q.O33789
7.03	-55.1758	3.66211	Q.O33985
7.04	-55.1758	3.51562	Q.O33985
7.05	-55.1758	3.36914	Q.O33789
7.06	-55.1758	3.27148	Q.O33789
7.07	-55.1758	3.22265	Q.O33789
7.08	-55.1758	3.22265	Q.O33594
7.09	-55.1758	3.66211	Q.O33789
7.1	-55.1269	4.10156	Q.O33985
7.11	-55.1269	4.29687	Q.O33203
7.12	-55.1269	4.29687	Q.O33594
7.13	-55.1758	4.24804	Q.O33594
7.14	-55.1269	4.24804	Q.O33594
7.15	-55.1269	4.3457	Q.O33789
7.16	-55.1269	4.24804	Q.O33789
7.17	-55.1269	4.19922	Q.O33985
7.18	-55.1269	4.15039	Q.O33203
7.19	-55.1269	4.19922	Q.O33789
7.2	-55.1269	4.05273	Q.O33985
7.21	-55.1269	4.05273	Q.O33594
7.22	-55.0781	3.95508	Q.O33789
7.23	-55.1269	3.71094	Q.O33985
7.24	-55.1269	3.56445	Q.O33985
7.25	-55.0781	3.51562	Q.O33399
7.26	-55.1269	3.36914	Q.O33594
7.27	-55.0781	3.36914	Q.O33594
7.28	-55.0781	3.36914	Q.O33789
7.29	-55.1269	3.36914	Q.O33789
7.3	-55.1269	3.17383	Q.O33789
7.31	-55.1269	3.17383	Q.O33985
7.32	-55.1269	3.125	Q.O33594
7.33	-55.1269	3.41797	Q.O33789
7.34	-55.1269	4.10156	Q.O33594
7.35	-55.0781	4.44336	Q.O33985
7.36	-55.0781	4.44336	Q.O33789
7.37	-55.0781	4.49219	Q.O33985
7.38	-55.0781	4.58984	Q.O33985
7.39	-55.0781	4.44336	Q.O33594
7.4	-55.0781	4.39453	Q.O33594
7.41	-55.0781	4.29687	Q.O33789
7.42	-55.0781	4.24804	Q.O33789
7.43	-55.0781	4.19922	Q.O33985
7.44	-55.0781	4.15039	Q.O33985
7.45	-55.0293	4.19922	Q.O3418

Παράρτημα2

SHRP_Equipment_Corporation			
Automatic_Testing_System_v.3.11			
RAMP_RESULT			
INFORMATION			
Μετρηθέντες Τιμές Δύναμης - Κατακόρυφης Θέσης Εμβόλων			
Δοκίμιο Από Χονδρόκοκο Υλικό			
Φόρτιση: Μοναξονικός Εφελκυσμός			
Θερμοκρασία: 18°C			
CYL_SPECIMEN			
mm			
LOAD=3			
PRESS=-1			
AXIAL1=5			
AXIAL2=5			
LAT1=-1			
LAT2=-1			
RADTYPE=1			
LENGTH=235.000000			
RADIUS=34.200000			
no info			
RAW_ATS_DATA			
CHANNELS=3			
channel	0		3 5
name	ActrDisp.	Force	Disp.
sensit	0.0488281	0.0488281	0.000195313
zero	0	0	0
sec	mm	kN	mm
0	-57.5683	0.195312	0.034961
0.01	-57.6172	0.195312	0.034961
0.02	-57.6172	0.146484	0.034961
0.03	-57.6172	0.146484	0.034961
0.04	-57.6172	0.195312	0.0351563
0.05	-57.6172	0.146484	0.0351563
0.06	-57.6172	0.146484	0.0353517
0.07	-57.6172	0.146484	0.0353517
0.08	-57.6172	0.195312	0.034961
0.09	-57.6172	0.146484	0.034961
0.1	-57.6172	0.146484	0.0351563
0.11	-57.6172	0.146484	0.0351563
0.12	-57.6172	0.146484	0.0351563
0.13	-57.6172	0.0976562	0.0353517
0.14	-57.6172	0.146484	0.0353517
0.15	-57.666	0.146484	0.034961
0.16	-57.6172	0.146484	0.0351563
0.17	-57.6172	0.0976562	0.0347657
0.18	-57.6172	0.146484	0.0351563
0.19	-57.666	0.195312	0.0353517
0.2	-57.666	0.146484	0.0353517
0.21	-57.6172	0.146484	0.035547
0.22	-57.6172	0.195312	0.0351563
0.23	-57.6172	0.146484	0.034961
0.24	-57.5683	0.146484	0.034961
0.25	-57.6172	0.195312	0.0351563

0.26	-57.6172	0.146484	0.0351563
0.27	-57.6172	0.146484	0.0351563
0.28	-57.6172	0.146484	0.035547
0.29	-57.6172	0.195312	0.034961
0.3	-57.6172	0.195312	0.034961
0.31	-57.6172	0.146484	0.034961
0.32	-57.6172	0.146484	0.0351563
0.33	-57.6172	0.146484	0.0353517
0.34	-57.6172	0.0976562	0.0353517
0.35	-57.6172	0.146484	0.0353517
0.36	-57.6172	0.146484	0.034961
0.37	-57.6172	0.146484	0.0351563
0.38	-57.6172	0.146484	0.0351563
0.39	-57.666	0.195312	0.0351563
0.4	-57.6172	0.0488281	0.0351563
0.41	-57.6172	0.146484	0.0353517
0.42	-57.6172	0.195312	0.035547
0.43	-57.5683	0.195312	0.0351563
0.44	-57.6172	0.244141	0.034961
0.45	-57.6172	0.195312	0.0351563
0.46	-57.6172	0.244141	0.0351563
0.47	-57.5683	0.244141	0.0353517
0.48	-57.6172	0.292969	0.0353517
0.49	-57.5683	0.292969	0.0353517
0.5	-57.6172	0.292969	0.034961
0.51	-57.5195	0.341797	0.034961
0.52	-57.5683	0.341797	0.034961
0.53	-57.6172	0.390625	0.0351563
0.54	-57.6172	0.390625	0.0353517
0.55	-57.6172	0.390625	0.0353517
0.56	-57.5683	0.390625	0.0351563
0.57	-57.5683	0.439453	0.034961
0.58	-57.5683	0.439453	0.034961
0.59	-57.5683	0.390625	0.0351563
0.6	-57.5683	0.439453	0.0351563
0.61	-57.5683	0.488281	0.0353517
0.62	-57.5683	0.488281	0.0353517
0.63	-57.6172	0.537109	0.0353517
0.64	-57.6172	0.488281	0.0345704
0.65	-57.5683	0.537109	0.0351563
0.66	-57.5683	0.537109	0.0351563
0.67	-57.6172	0.537109	0.0351563
0.68	-57.666	0.585937	0.0351563
0.69	-57.6172	0.585937	0.034961
0.7	-57.6172	0.585937	0.035547
0.71	-57.5683	0.585937	0.0351563
0.72	-57.5683	0.585937	0.0351563
0.73	-57.5683	0.634765	0.0351563
0.74	-57.5683	0.585937	0.0351563
0.75	-57.666	0.634765	0.0353517
0.76	-57.6172	0.634765	0.0353517
0.77	-57.5683	0.634765	0.035547
0.78	-57.5683	0.683593	0.034961
0.79	-57.5683	0.683593	0.034961
0.8	-57.5683	0.683593	0.0351563
0.81	-57.5683	0.683593	0.0351563
0.82	-57.6172	0.683593	0.0351563
0.83	-57.6172	0.732421	0.0353517
0.84	-57.5683	0.732421	0.035547
0.85	-57.5683	0.683593	0.0347657

0.86	-57.5683	0.732421	0.0351563
0.87	-57.5683	0.732421	0.0351563
0.88	-57.5683	0.732421	0.0351563
0.89	-57.5683	0.78125	0.0351563
0.9	-57.5683	0.78125	0.0353517
0.91	-57.666	0.830078	0.035547
0.92	-57.5683	0.78125	0.0351563
0.93	-57.5683	0.878906	0.0351563
0.94	-57.5683	0.830078	0.0351563
0.95	-57.5683	0.830078	0.0351563
0.96	-57.5683	0.830078	0.0351563
0.97	-57.5683	0.830078	0.0353517
0.98	-57.6172	0.878906	0.0353517
0.99	-57.5683	0.878906	0.034961
1	-57.5683	0.878906	0.0351563
101	-57.5683	0.927734	0.0351563
102	-57.5683	0.927734	0.0351563
103	-57.5683	0.927734	0.0351563
104	-57.7148	0.927734	0.0353517
105	-57.5683	0.927734	0.035547
106	-57.6172	0.927734	0.0351563
107	-57.5683	0.927734	0.0351563
108	-57.5683	0.976562	0.0351563
109	-57.5683	0.976562	0.0351563
11	-57.5683	0.976562	0.0353517
111	-57.5683	0.976562	0.0353517
112	-57.5683	102539	0.0353517
113	-57.5683	0.976562	0.034961
114	-57.5683	0.976562	0.0351563
115	-57.5195	102539	0.0351563
116	-57.5683	107422	0.0351563
117	-57.5683	107422	0.0353517
118	-57.5683	102539	0.0353517
119	-57.5683	107422	0.0357423
12	-57.5195	107422	0.034961
121	-57.5683	107422	0.034961
122	-57.5683	107422	0.0351563
123	-57.5683	112305	0.0351563
124	-57.5683	112305	0.0351563
125	-57.5195	117187	0.0353517
126	-57.5683	12207	0.0353517
127	-57.5683	117187	0.0351563
128	-57.5683	117187	0.034961
129	-57.5683	117187	0.0351563
13	-57.5683	117187	0.0353517
131	-57.5195	117187	0.0351563
132	-57.4707	117187	0.0353517
133	-57.5195	117187	0.0353517
134	-57.5683	12207	0.0351563
135	-57.5195	12207	0.034961
136	-57.5683	12207	0.0351563
137	-57.5195	12207	0.0351563
138	-57.5683	126953	0.0353517
139	-57.5195	12207	0.0353517
14	-57.6172	126953	0.0351563
141	-57.5195	126953	0.0347657
142	-57.5195	126953	0.0351563
143	-57.5195	126953	0.0351563
144	-57.5195	131836	0.0351563
145	-57.5195	126953	0.0353517

146	-57.5683	131836	O.O353517
147	-57.5195	131836	O.O347657
148	-57.5195	131836	O.O351563
149	-57.5195	136719	O.O34961
15	-57.5195	131836	O.O351563
151	-57.5195	136719	O.O351563
152	-57.5195	136719	O.O353517
153	-57.5195	136719	O.O353517
154	-57.5683	141601	O.O347657
155	-57.5195	141601	O.O351563
156	-57.5195	141601	O.O351563
157	-57.5195	141601	O.O351563
158	-57.5195	141601	O.O351563
159	-57.5195	146484	O.O351563
16	-57.5195	146484	O.O353517
161	-57.5195	146484	O.O347657
162	-57.4707	146484	O.O351563
163	-57.5195	146484	O.O34961
164	-57.5195	146484	O.O351563
165	-57.5195	146484	O.O353517
166	-57.5195	146484	O.O351563
167	-57.5195	151367	O.O35547
168	-57.5195	151367	O.O347657
169	-57.4707	151367	O.O351563
17	-57.5195	15625	O.O351563
171	-57.5195	15625	O.O351563
172	-57.5195	15625	O.O351563
173	-57.5195	15625	O.O353517
174	-57.5195	15625	O.O35547
175	-57.5195	15625	O.O345704
176	-57.5195	15625	O.O34961
177	-57.5195	166016	O.O34961
178	-57.5195	161133	O.O351563
179	-57.5195	161133	O.O351563
18	-57.5683	161133	O.O353517
181	-57.5195	166016	O.O353517
182	-57.5195	166016	O.O347657
183	-57.5195	170898	O.O34961
184	-57.5195	166016	O.O351563
185	-57.5195	166016	O.O351563
186	-57.5195	170898	O.O351563
187	-57.5195	170898	O.O351563
188	-57.5195	170898	O.O353517
189	-57.5195	170898	O.O347657
19	-57.5195	175781	O.O34961
191	-57.5195	175781	O.O351563
192	-57.5195	175781	O.O351563
193	-57.5195	175781	O.O351563
194	-57.4218	175781	O.O353517
195	-57.5195	175781	O.O353517
196	-57.4707	175781	O.O347657
197	-57.5195	175781	O.O34961
198	-57.5195	180664	O.O34961
199	-57.5195	175781	O.O351563
2	-57.5195	180664	O.O351563
201	-57.5195	185547	O.O353517
202	-57.5195	185547	O.O353517
203	-57.5195	185547	O.O34961
204	-57.4707	19043	O.O351563
205	-57.4707	185547	O.O351563

206	-57.5195	19043	Q.O351563
207	-57.4707	185547	Q.O351563
208	-57.4707	185547	Q.O353517
209	-57.5195	19043	Q.O353517
21	-57.4707	19043	Q.O34961
211	-57.5195	19043	Q.O34961
212	-57.5195	195312	Q.O351563
213	-57.5195	200195	Q.O351563
214	-57.5195	185547	Q.O353517
215	-57.5195	195312	Q.O353517
216	-57.5195	195312	Q.O353517
217	-57.5195	195312	Q.O351563
218	-57.4707	200195	Q.O347657
219	-57.4707	200195	Q.O351563
22	-57.5195	200195	Q.O351563
221	-57.5195	200195	Q.O351563
222	-57.4707	205078	Q.O353517
223	-57.4707	200195	Q.O353517
224	-57.4707	205078	Q.O34961
225	-57.4707	205078	Q.O351563
226	-57.4707	205078	Q.O34961
227	-57.4707	205078	Q.O351563
228	-57.4707	205078	Q.O351563
229	-57.5195	209961	Q.O35547
23	-57.5195	209961	Q.O353517
231	-57.4707	209961	Q.O34961
232	-57.4707	209961	Q.O34961
233	-57.4707	214844	Q.O351563
234	-57.4707	214844	Q.O351563
235	-57.5195	214844	Q.O351563
236	-57.4707	214844	Q.O353517
237	-57.4707	219726	Q.O353517
238	-57.4707	219726	Q.O351563
239	-57.4707	219726	Q.O34961
24	-57.4707	214844	Q.O351563
241	-57.4707	219726	Q.O351563
242	-57.4707	224609	Q.O351563
243	-57.4707	224609	Q.O353517
244	-57.4707	224609	Q.O353517
245	-57.4707	224609	Q.O351563
246	-57.4218	224609	Q.O34961
247	-57.4707	229492	Q.O351563
248	-57.4707	229492	Q.O351563
249	-57.4707	224609	Q.O351563
25	-57.4707	229492	Q.O353517
251	-57.5195	229492	Q.O353517
252	-57.4707	229492	Q.O34961
253	-57.4707	234375	Q.O34961
254	-57.4707	234375	Q.O351563
255	-57.5195	234375	Q.O351563
256	-57.4707	239258	Q.O351563
257	-57.4707	249023	Q.O353517
258	-57.4707	234375	Q.O353517
259	-57.4707	239258	Q.O34961
26	-57.4707	239258	Q.O351563
261	-57.4218	239258	Q.O351563
262	-57.4707	239258	Q.O351563
263	-57.4218	239258	Q.O351563
264	-57.4707	244141	Q.O353517
265	-57.4707	244141	Q.O35547

266	-57.4218	2.44141	O.O34961
267	-57.373	2.49023	O.O351563
268	-57.4218	2.49023	O.O351563
269	-57.4218	2.49023	O.O351563
27	-57.4218	2.49023	O.O351563
271	-57.4218	2.39258	O.O353517
272	-57.4707	2.49023	O.O353517
273	-57.4707	2.53906	O.O351563
274	-57.4707	2.53906	O.O34961
275	-57.4707	2.49023	O.O351563
276	-57.4707	2.53906	O.O351563
277	-57.4707	2.58789	O.O353517
278	-57.4218	2.58789	O.O351563
279	-57.4218	2.58789	O.O353517
28	-57.4707	2.53906	O.O34961
281	-57.4707	2.63672	O.O351563
282	-57.4707	2.58789	O.O351563
283	-57.4218	2.58789	O.O351563
284	-57.4707	2.63672	O.O351563
285	-57.4218	2.63672	O.O353517
286	-57.4707	2.63672	O.O353517
287	-57.4218	2.63672	O.O347657
288	-57.4218	2.63672	O.O351563
289	-57.4218	2.7832	O.O34961
29	-57.4218	2.68555	O.O351563
291	-57.4218	2.73437	O.O351563
292	-57.4218	2.73437	O.O353517
293	-57.4218	2.73437	O.O353517
294	-57.4218	2.68555	O.O347657
295	-57.373	2.68555	O.O34961
296	-57.4218	2.73437	O.O353517
297	-57.4218	2.7832	O.O351563
298	-57.373	2.73437	O.O34961
299	-57.373	2.73437	O.O353517
3	-57.4218	2.83203	O.O353517
3.01	-57.4218	2.83203	O.O34961
3.02	-57.4218	2.7832	O.O351563
3.03	-57.4218	2.83203	O.O351563
3.04	-57.4218	2.83203	O.O351563
3.05	-57.4218	2.83203	O.O353517
3.06	-57.4218	2.88086	O.O353517
3.07	-57.4218	2.83203	O.O357423
3.08	-57.3242	2.83203	O.O34961
3.09	-57.4218	2.88086	O.O351563
3.1	-57.4218	2.88086	O.O34961
3.11	-57.4218	2.73437	O.O351563
3.12	-57.4218	2.83203	O.O351563
3.13	-57.4218	2.92969	O.O353517
3.14	-57.4218	2.92969	O.O353517
3.15	-57.4218	2.92969	O.O34961
3.16	-57.4218	2.92969	O.O34961
3.17	-57.4218	2.92969	O.O351563
3.18	-57.4218	2.92969	O.O351563
3.19	-57.4218	2.97851	O.O357423
3.2	-57.4218	3.02734	O.O351563
3.21	-57.373	3.02734	O.O353517
3.22	-57.4218	3.02734	O.O34961
3.23	-57.373	3.02734	O.O351563
3.24	-57.373	3.02734	O.O351563
3.25	-57.373	3.02734	O.O351563

3.26	-57.373	3.02734	O.O353517
3.27	-57.373	3.07617	O.O351563
3.28	-57.373	3.125	O.O35547
3.29	-57.373	3.02734	O.O351563
3.3	-57.373	3.07617	O.O351563
3.31	-57.373	3.07617	O.O351563
3.32	-57.373	3.125	O.O351563
3.33	-57.373	3.07617	O.O353517
3.34	-57.373	3.125	O.O353517
3.35	-57.373	3.125	O.O353517
3.36	-57.373	3.125	O.O34961
3.37	-57.373	3.17383	O.O34961
3.38	-57.373	3.17383	O.O351563
3.39	-57.373	3.125	O.O351563
3.4	-57.373	3.125	O.O351563
3.41	-57.373	3.17383	O.O353517
3.42	-57.373	3.17383	O.O353517
3.43	-57.3242	3.17383	O.O34961
3.44	-57.373	3.125	O.O34961
3.45	-57.373	3.22265	O.O351563
3.46	-57.373	3.22265	O.O351563
3.47	-57.373	3.22265	O.O353517
3.48	-57.373	3.22265	O.O353517
3.49	-57.373	3.27148	O.O353517
3.5	-57.373	3.27148	O.O351563
3.51	-57.3242	3.27148	O.O351563
3.52	-57.373	3.27148	O.O351563
3.53	-57.3242	3.32031	O.O351563
3.54	-57.373	3.27148	O.O351563
3.55	-57.373	3.32031	O.O353517
3.56	-57.3242	3.32031	O.O353517
3.57	-57.3242	3.32031	O.O351563
3.58	-57.3242	3.32031	O.O351563
3.59	-57.3242	3.32031	O.O34961
3.6	-57.3242	3.32031	O.O351563
3.61	-57.373	3.36914	O.O351563
3.62	-57.3242	3.36914	O.O353517
3.63	-57.3242	3.36914	O.O353517
3.64	-57.3242	3.41797	O.O351563
3.65	-57.3242	3.36914	O.O351563
3.66	-57.4218	3.41797	O.O351563
3.67	-57.3242	3.4668	O.O351563
3.68	-57.3242	3.41797	O.O351563
3.69	-57.373	3.41797	O.O353517
3.7	-57.3242	3.4668	O.O353517
3.71	-57.3242	3.41797	O.O34961
3.72	-57.3242	3.4668	O.O34961
3.73	-57.3242	3.4668	O.O34961
3.74	-57.3242	3.4668	O.O351563
3.75	-57.3242	3.4668	O.O351563
3.76	-57.1777	3.51562	O.O353517
3.77	-57.3242	3.4668	O.O353517
3.78	-57.3242	3.51562	O.O351563
3.79	-57.3242	3.51562	O.O34961
3.8	-57.3242	3.4668	O.O351563
3.81	-57.3242	3.51562	O.O351563
3.82	-57.3242	3.56445	O.O351563
3.83	-57.3242	3.56445	O.O353517
3.84	-57.3242	3.51562	O.O351563
3.85	-57.3242	3.56445	O.O34961

3.86	-57.2754	3.56445	O.O351563
3.87	-57.3242	3.61328	O.O351563
3.88	-57.3242	3.61328	O.O351563
3.89	-57.3242	3.61328	O.O351563
3.9	-57.373	3.61328	O.O353517
3.91	-57.3242	3.61328	O.O351563
3.92	-57.3242	3.66211	O.O34961
3.93	-57.2754	3.61328	O.O351563
3.94	-57.2754	3.66211	O.O34961
3.95	-57.3242	3.66211	O.O351563
3.96	-57.2754	3.56445	O.O353517
3.97	-57.2754	3.66211	O.O353517
3.98	-57.3242	3.71094	O.O34961
3.99	-57.3242	3.71094	O.O351563
4	-57.2265	3.71094	O.O351563
4.01	-57.3242	3.71094	O.O34961
4.02	-57.2754	3.71094	O.O351563
4.03	-57.2754	3.75976	O.O351563
4.04	-57.2754	3.75976	O.O353517
4.05	-57.2754	3.75976	O.O347657
4.06	-57.2754	3.75976	O.O34961
4.07	-57.2754	3.71094	O.O34961
4.08	-57.2754	3.80859	O.O351563
4.09	-57.2754	3.80859	O.O351563
4.1	-57.2754	3.85742	O.O351563
4.11	-57.2754	3.80859	O.O353517
4.12	-57.2754	3.80859	O.O347657
4.13	-57.2754	3.85742	O.O34961
4.14	-57.2754	3.85742	O.O34961
4.15	-57.2754	3.85742	O.O351563
4.16	-57.2754	3.85742	O.O351563
4.17	-57.2754	3.85742	O.O353517
4.18	-57.2754	3.90625	O.O353517
4.19	-57.2754	3.90625	O.O34961
4.2	-57.2754	3.90625	O.O34961
4.21	-57.2754	3.90625	O.O351563
4.22	-57.2754	3.90625	O.O351563
4.23	-57.2754	3.95508	O.O351563
4.24	-57.2754	3.95508	O.O351563
4.25	-57.2754	3.95508	O.O35547
4.26	-57.2754	3.95508	O.O345704
4.27	-57.2754	3.95508	O.O345704
4.28	-57.2265	3.95508	O.O34961
4.29	-57.2754	4.0039	O.O351563
4.3	-57.2754	4.0039	O.O351563
4.31	-57.2754	4.0039	O.O353517
4.32	-57.2265	4.0039	O.O353517
4.33	-57.2265	4.0039	O.O347657
4.34	-57.2754	4.0039	O.O34961
4.35	-57.2265	4.05273	O.O351563
4.36	-57.2754	4.05273	O.O351563
4.37	-57.2265	4.05273	O.O351563
4.38	-57.2265	4.10156	O.O351563
4.39	-57.2265	4.10156	O.O353517
4.4	-57.2265	4.10156	O.O345704
4.41	-57.2265	4.10156	O.O351563
4.42	-57.2754	4.15039	O.O351563
4.43	-57.2265	4.10156	O.O351563
4.44	-57.2265	4.15039	O.O351563
4.45	-57.2265	4.15039	O.O353517

4.46	-57.2754	4.15039	O.O351563
4.47	-57.2265	4.15039	O.O345704
4.48	-57.2265	4.19922	O.O34961
4.49	-57.1777	4.19922	O.O34961
4.5	-57.2265	4.19922	O.O351563
4.51	-57.2265	4.19922	O.O34961
4.52	-57.2265	4.24804	O.O351563
4.53	-57.2265	4.19922	O.O353517
4.54	-57.2265	4.24804	O.O347657
4.55	-57.2265	4.24804	O.O351563
4.56	-57.2265	4.19922	O.O351563
4.57	-57.2265	4.24804	O.O351563
4.58	-57.1777	4.24804	O.O351563
4.59	-57.1777	4.24804	O.O353517
4.6	-57.2265	4.29687	O.O353517
4.61	-57.2265	4.29687	O.O347657
4.62	-57.2265	4.29687	O.O34961
4.63	-57.2265	4.29687	O.O351563
4.64	-57.2265	4.3457	O.O351563
4.65	-57.1777	4.3457	O.O351563
4.66	-57.1777	4.3457	O.O353517
4.67	-57.2265	4.39453	O.O35547
4.68	-57.2265	4.39453	O.O347657
4.69	-57.2265	4.39453	O.O34961
4.7	-57.1777	4.3457	O.O34961
4.71	-57.1777	4.39453	O.O351563
4.72	-57.2754	4.39453	O.O351563
4.73	-57.1777	4.49219	O.O351563
4.74	-57.1777	4.44336	O.O353517
4.75	-57.1777	4.44336	O.O347657
4.76	-57.2265	4.44336	O.O34961
4.77	-57.1777	4.44336	O.O351563
4.78	-57.1777	4.49219	O.O351563
4.79	-57.1777	4.44336	O.O351563
4.8	-57.1777	4.44336	O.O353517
4.81	-57.1777	4.49219	O.O353517
4.82	-57.1777	4.49219	O.O34961
4.83	-57.1777	4.49219	O.O34961
4.84	-57.1289	4.54101	O.O351563
4.85	-57.1777	4.54101	O.O351563
4.86	-57.1777	4.54101	O.O351563
4.87	-57.1777	4.54101	O.O353517
4.88	-57.1777	4.54101	O.O353517
4.89	-57.1777	4.54101	O.O34961
4.9	-57.1777	4.54101	O.O34961
4.91	-57.1289	4.58984	O.O351563
4.92	-57.1777	4.58984	O.O351563
4.93	-57.1289	4.63867	O.O351563
4.94	-57.1777	4.63867	O.O353517
4.95	-57.1289	4.63867	O.O353517
4.96	-57.1289	4.63867	O.O34961
4.97	-57.1289	4.6875	O.O34961
4.98	-57.1777	4.63867	O.O34961
4.99	-57.1289	4.6875	O.O351563
5	-57.1289	4.6875	O.O351563
5.01	-57.2265	4.6875	O.O353517
5.02	-57.1289	4.63867	O.O351563
5.03	-57.1289	4.6875	O.O34961
5.04	-57.1289	4.6875	O.O353517
5.05	-57.1289	4.73633	O.O351563

5.06	-57.1289	4.78515	O.O351563
5.07	-57.1289	4.73633	O.O353517
5.08	-57.1289	4.78515	O.O353517
5.09	-57.1777	4.73633	O.O35547
5.1	-57.1289	4.78515	O.O351563
5.11	-57.1289	4.78515	O.O34961
5.12	-57.1289	4.78515	O.O34961
5.13	-57.1289	4.78515	O.O351563
5.14	-57.1289	4.78515	O.O351563
5.15	-57.1289	4.78515	O.O353517
5.16	-57.1289	4.78515	O.O353517
5.17	-57.1289	4.83398	O.O353517
5.18	-57.1289	4.83398	O.O351563
5.19	-57.1289	4.83398	O.O351563
5.2	-57.1289	4.83398	O.O351563
5.21	-57.1289	4.73633	O.O353517
5.22	-57.1289	4.83398	O.O351563
5.23	-57.08	4.88281	O.O35547
5.24	-57.08	4.88281	O.O34961
5.25	-57.1289	4.88281	O.O34961
5.26	-57.08	4.88281	O.O34961
5.27	-57.08	4.93164	O.O351563
5.28	-57.1289	4.93164	O.O351563
5.29	-57.1289	4.93164	O.O353517
5.3	-57.08	4.93164	O.O351563
5.31	-57.08	4.93164	O.O34961
5.32	-57.1289	4.98047	O.O34961
5.33	-57.1289	4.98047	O.O34961
5.34	-57.08	4.98047	O.O351563
5.35	-57.08	4.98047	O.O353517
5.36	-57.0312	4.98047	O.O353517
5.37	-57.08	4.98047	O.O353517
5.38	-57.08	5.02929	O.O34961
5.39	-57.08	5.02929	O.O347657
5.4	-57.08	5.02929	O.O351563
5.41	-57.08	5.02929	O.O351563
5.42	-57.08	5.02929	O.O353517
5.43	-57.08	5.07812	O.O353517
5.44	-57.08	5.07812	O.O35547
5.45	-57.08	5.02929	O.O351563
5.46	-57.08	5.07812	O.O34961
5.47	-57.08	5.07812	O.O34961
5.48	-57.0312	5.12695	O.O351563
5.49	-57.08	5.02929	O.O351563
5.5	-57.08	5.12695	O.O353517
5.51	-57.0312	5.12695	O.O35547
5.52	-57.08	5.12695	O.O351563
5.53	-57.08	5.12695	O.O351563
5.54	-57.08	5.12695	O.O34961
5.55	-57.0312	5.12695	O.O351563
5.56	-57.08	5.17578	O.O353517
5.57	-57.08	5.17578	O.O353517
5.58	-57.0312	5.17578	O.O353517
5.59	-57.0312	5.17578	O.O34961
5.6	-57.0312	5.22461	O.O351563
5.61	-56.9336	5.22461	O.O351563
5.62	-57.0312	5.22461	O.O351563
5.63	-57.0312	5.22461	O.O351563
5.64	-57.0312	5.27343	O.O353517
5.65	-57.0312	5.27343	O.O353517

5.66	-57.0312	5.27343	0.0351563
5.67	-57.0312	5.27343	0.0351563
5.68	-57.0312	5.32226	0.0351563
5.69	-57.0312	5.27343	0.0351563
5.7	-56.9824	5.27343	0.0353517
5.71	-57.0312	5.32226	0.0353517
5.72	-57.0312	5.27343	0.035547
5.73	-57.0312	5.32226	0.0351563
5.74	-57.0312	5.32226	0.034961
5.75	-57.0312	5.37109	0.0351563
5.76	-56.9824	5.37109	0.0351563
5.77	-57.0312	5.37109	0.0353517
5.78	-57.0312	5.37109	0.0353517
5.79	-57.0312	5.32226	0.035547
5.8	-57.0312	5.41992	0.034961
5.81	-57.0312	5.51758	0.034961
5.82	-56.9824	5.41992	0.0351563
5.83	-56.9824	5.46875	0.0351563
5.84	-56.9824	5.41992	0.0353517
5.85	-56.9824	5.46875	0.0353517
5.86	-56.9824	5.41992	0.0353517
5.87	-57.0312	5.46875	0.0351563
5.88	-56.9824	5.46875	0.0351563
5.89	-56.9824	5.46875	0.0351563
5.9	-56.9336	5.46875	0.0351563
5.91	-56.9824	5.46875	0.0353517
5.92	-56.9824	5.51758	0.0353517
5.93	-56.9824	5.46875	0.035547
5.94	-56.9824	5.5664	0.0351563
5.95	-56.9824	5.5664	0.0351563
5.96	-56.9824	5.5664	0.0351563
5.97	-56.9824	5.61523	0.0351563
5.98	-56.9824	5.5664	0.0353517
5.99	-56.9824	5.5664	0.0353517
6	-56.9336	5.5664	0.0353517
6.01	-56.9336	5.5664	0.0351563
6.02	-56.9336	5.61523	0.0351563
6.03	-56.9336	5.61523	0.0351563
6.04	-56.9336	5.61523	0.0353517
6.05	-56.9824	5.5664	0.0353517
6.06	-56.9336	5.66406	0.0353517
6.07	-56.9824	5.71289	0.035547
6.08	-56.9336	5.61523	0.034961
6.09	-56.9336	5.66406	0.034961
6.1	-56.9336	5.66406	0.0351563
6.11	-56.9824	5.66406	0.0351563
6.12	-56.9336	5.71289	0.0351563
6.13	-56.9336	5.71289	0.0351563
6.14	-56.9336	5.71289	0.0353517
6.15	-56.9336	5.71289	0.0351563
6.16	-56.9336	5.76172	0.0351563
6.17	-56.9336	5.71289	0.0353517
6.18	-56.9336	5.76172	0.0351563
6.19	-56.9336	5.76172	0.0351563
6.2	-56.9336	5.76172	0.0353517
6.21	-56.9336	5.81054	0.0351563
6.22	-56.8847	5.81054	0.0351563
6.23	-56.9336	5.81054	0.034961
6.24	-56.9336	5.81054	0.034961
6.25	-56.9336	5.85937	0.0351563

6.26	-56.9824	5.81054	O.O353517
6.27	-56.9336	5.85937	O.O353517
6.28	-56.9824	5.81054	O.O351563
6.29	-56.9336	5.85937	O.O351563
6.3	-56.8847	5.85937	O.O351563
6.31	-56.8847	5.85937	O.O351563
6.32	-56.8847	5.85937	O.O351563
6.33	-56.8359	5.9082	O.O353517
6.34	-56.8847	5.9082	O.O353517
6.35	-56.8847	6.OO586	O.O34961
6.36	-56.8847	5.9082	O.O34961
6.37	-56.8847	5.95703	O.O351563
6.38	-56.8847	5.95703	O.O351563
6.39	-56.8847	5.95703	O.O351563
6.4	-56.8847	5.95703	O.O353517
6.41	-56.8847	6.O5468	O.O353517
6.42	-56.8847	5.95703	O.O347657
6.43	-56.8847	6.OO586	O.O351563
6.44	-56.8847	6.OO586	O.O34961
6.45	-56.8359	6.OO586	O.O351563
6.46	-56.8847	6.OO586	O.O351563
6.47	-56.8847	6.OO586	O.O353517
6.48	-56.8359	6.O5468	O.O353517
6.49	-56.8847	6.O5468	O.O347657
6.5	-56.8847	6.OO586	O.O34961
6.51	-56.8847	6.O5468	O.O351563
6.52	-56.8359	6.10351	O.O35547
6.53	-56.8359	6.O5468	O.O353517
6.54	-56.8359	6.O5468	O.O351563
6.55	-56.9336	6.10351	O.O35547
6.56	-56.8847	6.10351	O.O347657
6.57	-56.8359	6.10351	O.O351563
6.58	-56.8359	6.10351	O.O351563
6.59	-56.7871	6.15234	O.O34961
6.6	-56.8359	6.15234	O.O353517
6.61	-56.8359	6.15234	O.O353517
6.62	-56.7871	6.15234	O.O353517
6.63	-56.7871	6.15234	O.O347657
6.64	-56.8359	6.15234	O.O353517
6.65	-56.8359	6.15234	O.O351563
6.66	-56.8359	6.15234	O.O351563
6.67	-56.7871	6.15234	O.O351563
6.68	-56.8359	6.20117	O.O353517
6.69	-56.8359	6.20117	O.O353517
6.7	-56.7871	6.20117	O.O347657
6.71	-56.7871	6.20117	O.O351563
6.72	-56.7871	6.20117	O.O351563
6.73	-56.8359	6.29882	O.O351563
6.74	-56.7871	6.25	O.O351563
6.75	-56.7871	6.20117	O.O353517
6.76	-56.7871	6.25	O.O353517
6.77	-56.7871	6.25	O.O345704
6.78	-56.7871	6.29882	O.O351563
6.79	-56.7871	6.29882	O.O34961
6.8	-56.7383	6.29882	O.O351563
6.81	-56.7871	6.29882	O.O34961
6.82	-56.7871	6.34765	O.O351563
6.83	-56.7871	6.29882	O.O35547
6.84	-56.7871	6.34765	O.O345704
6.85	-56.7383	6.29882	O.O353517

6.86	-56.7871	6.29882	O.O351563
6.87	-56.7383	6.34765	O.O351563
6.88	-56.8359	6.34765	O.O351563
6.89	-56.7383	6.34765	O.O353517
6.9	-56.7871	6.39648	O.O353517
6.91	-56.7383	6.39648	O.O347657
6.92	-56.6894	6.39648	O.O34961
6.93	-56.7383	6.39648	O.O351563
6.94	-56.7383	6.44531	O.O351563
6.95	-56.7383	6.44531	O.O351563
6.96	-56.7383	6.44531	O.O353517
6.97	-56.7383	6.44531	O.O353517
6.98	-56.7383	6.44531	O.O345704
6.99	-56.7383	6.44531	O.O34961
7	-56.7383	6.49414	O.O351563
7.01	-56.6894	6.49414	O.O351563
7.02	-56.7871	6.49414	O.O351563
7.03	-56.6894	6.49414	O.O353517
7.04	-56.6894	6.49414	O.O353517
7.05	-56.6894	6.49414	O.O347657
7.06	-56.6894	6.49414	O.O34961
7.07	-56.6894	6.54297	O.O351563
7.08	-56.6894	6.54297	O.O351563
7.09	-56.6894	6.54297	O.O351563
7.1	-56.6894	6.54297	O.O351563
7.11	-56.6894	6.54297	O.O353517
7.12	-56.6894	6.49414	O.O345704
7.13	-56.6894	6.59179	O.O351563
7.14	-56.6894	6.59179	O.O351563
7.15	-56.6894	6.59179	O.O351563
7.16	-56.6894	6.59179	O.O347657
7.17	-56.6894	6.64062	O.O351563
7.18	-56.6894	6.59179	O.O35547
7.19	-56.5918	6.64062	O.O347657
7.2	-56.6406	6.64062	O.O353517
7.21	-56.6406	6.64062	O.O351563
7.22	-56.6894	6.64062	O.O351563
7.23	-56.6894	6.68945	O.O351563
7.24	-56.6406	6.68945	O.O351563
7.25	-56.6406	6.68945	O.O353517
7.26	-56.6406	6.68945	O.O347657
7.27	-56.6406	6.68945	O.O351563
7.28	-56.6406	6.68945	O.O351563
7.29	-56.6406	6.78711	O.O351563
7.3	-56.6406	6.68945	O.O351563
7.31	-56.6406	6.73828	O.O353517
7.32	-56.6406	6.73828	O.O353517
7.33	-56.6406	6.73828	O.O34961
7.34	-56.5918	6.73828	O.O34961
7.35	-56.6406	6.73828	O.O34961
7.36	-56.6406	6.73828	O.O351563
7.37	-56.5918	6.78711	O.O353517
7.38	-56.5918	6.78711	O.O353517
7.39	-56.5918	6.78711	O.O353517
7.4	-56.5918	6.73828	O.O347657
7.41	-56.5918	6.78711	O.O351563
7.42	-56.5918	6.83593	O.O351563
7.43	-56.5918	6.83593	O.O351563
7.44	-56.5918	6.83593	O.O351563
7.45	-56.5918	6.83593	O.O351563

7.46	-56.5429	6.83593	Q.O353517
7.47	-56.5918	6.88476	Q.O347657
7.48	-56.5918	6.88476	Q.O347657
7.49	-56.5429	6.88476	Q.O351563
7.5	-56.5429	6.83593	Q.O351563
7.51	-56.5429	6.83593	Q.O351563
7.52	-56.5918	6.88476	Q.O353517
7.53	-56.5429	6.88476	Q.O353517
7.54	-56.4941	6.88476	Q.O347657
7.55	-56.5429	6.88476	Q.O34961
7.56	-56.5429	6.93359	Q.O351563
7.57	-56.5429	6.93359	Q.O351563
7.58	-56.5429	6.93359	Q.O351563
7.59	-56.5429	6.93359	Q.O353517
7.6	-56.5429	6.93359	Q.O353517
7.61	-56.5429	6.98242	Q.O347657
7.62	-56.5429	6.98242	Q.O351563
7.63	-56.5429	6.98242	Q.O351563
7.64	-56.5429	7.03125	Q.O351563
7.65	-56.5429	6.98242	Q.O351563
7.66	-56.5429	6.98242	Q.O351563
7.67	-56.4941	6.98242	Q.O353517
7.68	-56.4941	7.03125	Q.O347657
7.69	-56.5429	7.03125	Q.O34961
7.7	-56.4941	7.03125	Q.O351563
7.71	-56.4941	7.03125	Q.O351563
7.72	-56.4941	7.03125	Q.O351563
7.73	-56.4941	6.98242	Q.O353517
7.74	-56.4453	7.03125	Q.O353517
7.75	-56.4941	7.03125	Q.O347657
7.76	-56.4941	7.03125	Q.O34961
7.77	-56.4941	7.03125	Q.O34961
7.78	-56.4453	7.03125	Q.O351563
7.79	-56.4941	7.03125	Q.O351563
7.8	-56.4453	7.03125	Q.O353517
7.81	-56.4453	7.08007	Q.O35547
7.82	-56.4941	7.08007	Q.O347657
7.83	-56.4941	7.08007	Q.O351563
7.84	-56.4453	7.1289	Q.O351563
7.85	-56.4453	7.08007	Q.O351563
7.86	-56.4453	7.03125	Q.O353517
7.87	-56.4453	7.1289	Q.O353517
7.88	-56.4453	7.17773	Q.O35547
7.89	-56.3476	7.08007	Q.O34961
7.9	-56.4453	7.1289	Q.O351563
7.91	-56.3476	7.1289	Q.O351563
7.92	-56.3965	7.1289	Q.O351563
7.93	-56.4453	7.1289	Q.O351563
7.94	-56.4453	7.17773	Q.O353517
7.95	-56.3965	7.1289	Q.O353517
7.96	-56.3965	7.17773	Q.O34961
7.97	-56.3965	7.1289	Q.O34961
7.98	-56.3965	7.1289	Q.O34961
7.99	-56.3965	7.1289	Q.O34961
8	-56.3965	7.17773	Q.O351563
8.01	-56.3476	7.17773	Q.O353517
8.02	-56.3476	7.17773	Q.O353517
8.03	-56.3965	7.17773	Q.O34961
8.04	-56.3476	7.17773	Q.O351563
8.05	-56.3965	7.17773	Q.O351563

8.06	-56.3476	7.22656	O.O353517
8.07	-56.3476	7.22656	O.O34961
8.08	-56.3476	7.22656	O.O353517
8.09	-56.3476	7.22656	O.O353517
8.1	-56.3476	7.22656	O.O351563
8.11	-56.3965	7.22656	O.O351563
8.12	-56.3476	7.17773	O.O351563
8.13	-56.3476	7.22656	O.O351563
8.14	-56.2988	7.17773	O.O351563
8.15	-56.2988	7.22656	O.O353517
8.16	-56.3476	7.27539	O.O353517
8.17	-56.2988	7.22656	O.O347657
8.18	-56.2988	7.22656	O.O351563
8.19	-56.2988	7.22656	O.O351563
8.2	-56.2988	7.22656	O.O351563
8.21	-56.2988	7.22656	O.O357423
8.22	-56.2988	7.27539	O.O353517
8.23	-56.2988	7.22656	O.O35547
8.24	-56.2988	7.27539	O.O34961
8.25	-56.25	7.22656	O.O351563
8.26	-56.25	7.22656	O.O353517
8.27	-56.25	7.27539	O.O351563
8.28	-56.25	7.27539	O.O353517
8.29	-56.25	7.22656	O.O353517
8.3	-56.2988	7.22656	O.O353517
8.31	-56.25	7.22656	O.O34961
8.32	-56.25	7.22656	O.O351563
8.33	-56.2011	7.27539	O.O351563
8.34	-56.2011	7.22656	O.O351563
8.35	-56.2011	7.27539	O.O351563
8.36	-56.2011	7.22656	O.O353517
8.37	-56.2011	7.22656	O.O35547
8.38	-56.2011	7.17773	O.O351563
8.39	-56.2011	7.17773	O.O34961
8.4	-56.2011	7.17773	O.O351563
8.41	-56.2011	7.1289	O.O351563
8.42	-56.2011	7.1289	O.O353517
8.43	-56.1523	7.1289	O.O351563
8.44	-56.1523	7.1289	O.O353517
8.45	-56.1523	7.1289	O.O34961
8.46	-56.1523	7.08007	O.O34961
8.47	-56.1523	7.08007	O.O351563
8.48	-56.1035	7.1289	O.O351563
8.49	-56.0547	7.03125	O.O353517
8.5	-56.0547	6.98242	O.O353517
8.51	-56.1035	6.93359	O.O353517
8.52	-56.0547	6.88476	O.O34961
8.53	-56.0547	6.83593	O.O351563
8.54	-56.0547	6.73828	O.O351563
8.55	-56.0547	6.68945	O.O353517
8.56	-56.0547	6.64062	O.O351563
8.57	-56.0547	6.54297	O.O353517
8.58	-56.0547	6.44531	O.O353517
8.59	-56.0058	6.29882	O.O345704
8.6	-56.0058	6.00586	O.O34961
8.61	-56.0058	5.9082	O.O34961
8.62	-55.957	5.66406	O.O351563
8.63	-55.9082	5.41992	O.O351563
8.64	-55.957	5.07812	O.O351563
8.65	-55.9082	4.49219	O.O353517

8.66	-55.8593	4.15039	0.034961
8.67	-55.8593	3.80859	0.034961
8.68	-55.8593	3.90625	0.0351563
8.69	-55.7617	3.85742	0.0351563
8.7	-55.7617	3.80859	0.0351563
8.71	-55.7129	3.75976	0.0353517
8.72	-55.7129	3.66211	0.035547
8.73	-55.664	3.22265	0.034961
8.74	-55.664	2.44141	0.0351563
8.75	-55.5664	2.39258	0.0351563
8.76	-55.5664	2.24609	0.0351563
8.77	-55.4687	2.09961	0.0351563
8.78	-55.4687	0.976562	0.0351563
8.79	-55.3711	0.683593	0.0353517
8.8	-55.3222	0.585937	0.034961
8.81	-55.2734	0.537109	0.034961
8.82	-55.2246	0.439453	0.0351563
8.83	-55.1269	0.390625	0.0351563
8.84	-55.0781	0.341797	0.0351563
8.85	-55.0293	0.292969	0.0353517
8.86	-54.9804	0.292969	0.0353517
8.87	-54.8828	0.244141	0.034961
8.88	-54.834	0.244141	0.0351563
8.89	-54.7363	0.195312	0.0351563
8.9	-54.7363	0.146484	0.0351563
8.91	-54.6386	0.195312	0.0351563
8.92	-54.5898	0.146484	0.0353517
8.93	-54.4922	0.146484	0.0353517
8.94	-54.4922	0.0976562	0.034961
8.95	-54.4433	0.0976562	0.0351563
8.96	-54.3457	0.0976562	0.034961
8.97	-54.2968	0.146484	0.0351563
8.98	-54.248	0.0488281	0.0351563
8.99	-54.1504	0.0976562	0.0351563
9	-54.1015	0.0976562	0.0353517
9.01	-54.0039	0.0976562	0.034961
9.02	-53.9551	0.0976562	0.034961
9.03	-53.9062	0.0488281	0.0351563
9.04	-53.8574	0.0488281	0.0351563
9.05	-53.8086	0.0488281	0.0351563
9.06	-53.7109	0.0488281	0.0351563
9.07	-53.6621	0.0488281	0.0353517
9.08	-53.5644	0.0488281	0.034961
9.09	-53.5156	0	0.034961
9.1	-53.4668	0	0.0351563
9.11	-53.4179	0	0.0351563
9.12	-53.3203	0	0.0351563
9.13	-53.2226	0	0.0353517
9.14	-53.2715	0	0.0353517
9.15	-53.125	0	0.0347657
9.16	-53.0761	0	0.0351563
9.17	-52.9785	0	0.0351563
9.18	-52.9785	0	0.0351563
9.19	-52.8808	0	0.0353517
9.2	-52.7832	0	0.0351563
9.21	-52.7343	0	0.035547
9.22	-52.6855	0	0.0345704
9.23	-52.6367	0	0.0351563
9.24	-52.539	-0.0488281	0.0351563
9.25	-52.4902	0	0.0351563

9.26	-52.3926	O	O.0351563
9.27	-52.3437	-O.O488281	O.0353517
9.28	-52.2949	O	O.0353517
9.29	-52.1972	O	O.0343751
9.3	-52.1484	-O.O976562	O.0351563
9.31	-52.0996	-O.O488281	O.034961
9.32	-52.0508	O	O.0351563
9.33	-51.9531	O	O.0351563
9.34	-51.9043	-O.O488281	O.0351563
9.35	-51.8554	O	O.035547
9.36	-51.7578	-O.O488281	O.0347657
9.37	-51.6601	-O.O488281	O.0351563
9.38	-51.6113	-O.O488281	O.034961
9.39	-51.5625	-O.O488281	O.0351563
9.4	-51.5136	-O.146484	O.0353517
9.41	-51.4648	-O.O488281	O.0353517
9.42	-51.3672	-O.O488281	O.0353517
9.43	-51.2695	-O.O488281	O.0347657
9.44	-51.2207	-O.O488281	O.0351563
9.45	-51.1718	-O.O488281	O.0351563
9.46	-51.0742	-O.O488281	O.0351563
9.47	-51.0254	O	O.0351563
9.48	-50.9765	-O.O488281	O.0353517
9.49	-50.8789	-O.O488281	O.0353517
9.5	-50.8301	-O.O488281	O.0347657
9.51	-50.7324	O	O.0353517
9.52	-50.6836	-O.O488281	O.0351563
9.53	-50.6347	-O.O488281	O.0351563
9.54	-50.5371	O.O488281	O.0351563
9.55	-50.4883	-O.O488281	O.0351563
9.56	-50.3906	-O.O488281	O.0353517
9.57	-50.3418	O	O.0345704
9.58	-50.2929	-O.O488281	O.0351563
9.59	-50.1953	O	O.034961
9.6	-50.1465	-O.O488281	O.0351563
9.61	-50.0976	-O.O488281	O.0351563
9.62	-50	-O.O488281	O.0353517
9.63	-49.9511	-O.O488281	O.0353517
9.64	-49.9023	-O.O488281	O.0347657
9.65	-49.8047	-O.O488281	O.034961
9.66	-49.707	-O.O488281	O.034961
9.67	-49.7558	O	O.0351563
9.68	-49.6093	-O.O488281	O.0351563
9.69	-49.5117	-O.O488281	O.0353517
9.7	-49.4629	O	O.0353517
9.71	-49.3652	O	O.034961
9.72	-49.3164	-O.O488281	O.0353517
9.73	-49.2187	-O.O488281	O.0351563
9.74	-49.1699	-O.O488281	O.0351563
9.75	-49.1211	-O.O488281	O.0351563
9.76	-49.0234	O.O488281	O.0351563
9.77	-48.9258	O	O.0353517
9.78	-48.8769	-O.O488281	O.0351563
9.79	-48.8281	-O.O488281	O.034961
9.8	-48.7304	-O.O488281	O.0351563
9.81	-48.6816	-O.O488281	O.0347657
9.82	-48.584	-O.O488281	O.0353517
9.83	-48.5351	-O.O488281	O.0353517
9.84	-48.4375	-O.O488281	O.0353517
9.85	-48.3886	-O.O488281	O.0351563

9.86	-48.3398	-O.O488281	O.O351563
9.87	-48.2422	-O.O488281	O.O351563
9.88	-48.1933	-O.O488281	O.O351563
9.89	-48.0957	-O.O488281	O.O351563
9.9	-48.0469	O	O.O353517
9.91	-47.998	-O.O976562	O.O353517
9.92	-47.9004	-O.O488281	O.O34961
9.93	-47.8027	O	O.O34961
9.94	-47.7539	-O.O488281	O.O351563
9.95	-47.6562	-O.O488281	O.O351563
9.96	-47.5586	-O.O488281	O.O351563
9.97	-47.5097	-O.O488281	O.O353517
9.98	-47.4121	-O.O488281	O.O353517
9.99	-47.4121	-O.O488281	O.O351563
10	-47.3144	-O.O488281	O.O351563
10.01	-47.2168	-O.O488281	O.O351563
10.02	-47.1191	-O.O488281	O.O351563
10.03	-47.1191	-O.O488281	O.O351563
10.04	-47.0215	-O.O488281	O.O353517
10.05	-46.9238	-O.O488281	O.O353517
10.06	-46.875	O	O.O353517
10.07	-46.8261	-O.O488281	O.O351563
10.08	-46.7285	-O.O488281	O.O351563
10.09	-46.7773	-O.O488281	O.O351563
10.1	-46.582	O	O.O353517
10.11	-46.5332	-O.O488281	O.O353517
10.12	-46.4844	-O.O488281	O.O353517
10.13	-46.3867	-O.O488281	O.O353517
10.14	-46.289	-O.O488281	O.O351563
10.15	-46.2402	-O.O488281	O.O35547
10.16	-46.1914	-O.O488281	O.O351563
10.17	-46.0937	-O.O488281	O.O351563
10.18	-45.9961	-O.O488281	O.O353517
10.19	-45.9472	-O.O488281	O.O353517
10.2	-45.8984	-O.O488281	O.O353517
10.21	-45.8008	-O.O488281	O.O351563
10.22	-45.7519	O	O.O34961
10.23	-45.6543	-O.O488281	O.O351563
10.24	-45.6054	-O.O488281	O.O351563
10.25	-45.5078	-O.O488281	O.O35547
10.26	-45.5078	-O.O488281	O.O353517
10.27	-45.3613	-O.O488281	O.O35547
10.28	-45.3125	-O.O488281	O.O351563
10.29	-45.2148	-O.O488281	O.O351563
10.3	-45.166	-O.O488281	O.O351563
10.31	-45.0683	-O.O488281	O.O351563
10.32	-45.0195	O	O.O353517
10.33	-44.9219	-O.O488281	O.O353517
10.34	-44.873	-O.O488281	O.O35547
10.35	-44.7754	-O.O488281	O.O351563
10.36	-44.7265	-O.O488281	O.O34961
10.37	-44.5801	-O.O488281	O.O351563
10.38	-44.5801	-O.O488281	O.O351563
10.39	-44.5312	-O.O488281	O.O351563
10.4	-44.4336	-O.O488281	O.O353517
10.41	-44.3359	O	O.O35547
10.42	-44.2871	-O.O488281	O.O34961
10.43	-44.2383	-O.O488281	O.O351563
10.44	-44.1894	-O.O488281	O.O351563
10.45	-44.0918	-O.O488281	O.O351563

10.46	-43.9941	-O.O488281	O.O351563
10.47	-43.9941	-O.O488281	O.O353517
10.48	-43.8965	O	O.O355547
10.49	-43.7988	-O.O488281	O.O34961
10.5	-43.75	-O.O488281	O.O34961
10.51	-43.6523	O	O.O351563
10.52	-43.6035	-O.O488281	O.O351563
10.53	-43.5058	-O.O488281	O.O351563
10.54	-43.457	-O.O488281	O.O353517
10.55	-43.3594	O	O.O353517
10.56	-43.2617	-O.O488281	O.O34961
10.57	-43.2129	O	O.O351563
10.58	-43.164	-O.O488281	O.O347657
10.59	-43.0664	-O.O488281	O.O351563
10.6	-42.9687	-O.O488281	O.O353517
10.61	-42.9199	-O.O488281	O.O353517
10.62	-42.8711	-O.O488281	O.O355547
10.63	-42.7734	-O.O488281	O.O34961
10.64	-42.7246	-O.O488281	O.O351563
10.65	-42.6269	-O.O488281	O.O351563
10.66	-42.5293	O.O488281	O.O353517
10.67	-42.4804	-O.O488281	O.O353517
10.68	-42.3828	O	O.O353517
10.69	-42.334	-O.O488281	O.O355547
10.7	-42.2851	-O.O488281	O.O351563
10.71	-42.1875	O	O.O351563
10.72	-42.0898	-O.O488281	O.O34961
10.73	-42.041	-O.O488281	O.O351563
10.74	-41.9433	-O.O488281	O.O351563
10.75	-41.8457	-O.O488281	O.O353517
10.76	-41.7969	-O.O976562	O.O355547
10.77	-41.6992	-O.O488281	O.O34961
10.78	-41.6504	O	O.O351563
10.79	-41.5527	-O.O488281	O.O351563
10.8	-41.4551	O	O.O351563
10.81	-41.4062	-O.O488281	O.O351563
10.82	-41.3086	-O.O488281	O.O353517
10.83	-41.2597	-O.O488281	O.O355547
10.84	-41.1621	-O.O488281	O.O34961
10.85	-41.1133	-O.O488281	O.O351563
10.86	-41.0156	-O.O488281	O.O351563
10.87	-40.9179	-O.O488281	O.O351563
10.88	-40.9179	-O.O488281	O.O353517
10.89	-40.7715	-O.O488281	O.O353517
10.9	-40.7226	-O.O488281	O.O355547
10.91	-40.625	-O.O488281	O.O351563
10.92	-40.5762	-O.O488281	O.O353517
10.93	-40.4785	-O.O488281	O.O351563
10.94	-40.4297	-O.O488281	O.O351563
10.95	-40.332	-O.O488281	O.O353517
10.96	-40.2344	-O.O488281	O.O353517
10.97	-40.1855	-O.O488281	O.O353517
10.98	-40.0879	-O.O488281	O.O351563
10.99	-39.9902	-O.O488281	O.O351563
11	-39.9414	O.O488281	O.O351563
11.01	-39.8926	-O.O488281	O.O351563
11.02	-39.7949	-O.O488281	O.O353517
11.03	-39.6972	-O.O488281	O.O353517
11.04	-39.5996	O	O.O353517
11.05	-39.5019	-O.O488281	O.O34961

П06	-39.4531	-О.О488281	О.О34961
П07	-39.3554	-О.О488281	О.О351563
П08	-39.2578	О.О488281	О.О351563
П09	-39.209	-О.О488281	О.О353517
П11	-39.1113	-О.О488281	О.О351563
П11	-39.0137	-О.О488281	О.О353517
П12	-38.916	-О.О488281	О.О34961
П13	-38.8672	-О.О488281	О.О347657
П14	-38.7695	О	О.О351563
П15	-38.7207	-О.О488281	О.О351563
П16	-38.623	-О.О488281	О.О353517
П17	-38.5254	-О.О488281	О.О353517
П18	-38.4277	-О.О488281	О.О359376
П19	-38.3789	О	О.О351563
П2	-38.2812	-О.О488281	О.О34961
П21	-38.1836	-О.О488281	О.О353517
П22	-38.0859	-О.О488281	О.О351563
П23	-38.0371	-О.О488281	О.О353517
П24	-37.9394	-О.146484	О.О353517
П25	-37.8418	О	О.О35547
П26	-37.7441	-О.О488281	О.О34961
П27	-37.6465	-О.О488281	О.О351563
П28	-37.5976	-О.О488281	О.О34961
П29	-37.5488	О	О.О353517
П3	-37.4023	-О.О488281	О.О353517
П31	-37.3535	О	О.О353517
П32	-37.2558	-О.О488281	О.О35547
П33	-37.1582	-О.О488281	О.О34961
П34	-37.1094	О	О.О34961
П35	-37.0117	-О.О488281	О.О351563
П36	-36.914	-О.О488281	О.О351563
П37	-36.8652	О.О488281	О.О351563
П38	-36.7676	О	О.О353517
П39	-36.6211	-О.О488281	О.О353517
П4	-36.5722	-О.О488281	О.О34961
П41	-36.4746	-О.О488281	О.О34961
П42	-36.4258	-О.О488281	О.О351563
П43	-36.3281	-О.О488281	О.О351563
П44	-36.2305	-О.О488281	О.О351563
П45	-36.1816	-О.О488281	О.О353517
П46	-36.0351	-О.О488281	О.О353517
П47	-35.9375	-О.О488281	О.О34961
П48	-35.8887	О	О.О351563
П49	-35.791	О.О488281	О.О351563
П5	-35.6933	-О.О488281	О.О351563
П51	-35.5957	-О.О488281	О.О351563
П52	-35.5469	-О.О488281	О.О35547
П53	-35.4492	-О.О488281	О.О35547
П54	-35.3515	-О.О488281	О.О34961
П55	-35.2539	-О.О488281	О.О34961
П56	-35.2051	-О.О488281	О.О351563
П57	-35.1074	-О.О488281	О.О351563
П58	-35.0097	-О.О488281	О.О353517
П59	-34.9121	-О.О488281	О.О353517
П6	-34.7656	-О.О488281	О.О353517
П61	-34.7656	-О.О488281	О.О351563
П62	-34.668	О	О.О351563
П63	-34.5703	-О.О488281	О.О351563
П64	-34.4726	-О.О488281	О.О351563
П65	-34.375	-О.О488281	О.О351563

1166	-34.2773	-O.O488281	O.O353517
1167	-34.2285	-O.O488281	O.O353517
1168	-34.1797	-O.O488281	O.O351563
1169	-34.0332	-O.O488281	O.O351563
117	-33.9355	-O.O976562	O.O351563
1171	-33.8379	-O.O488281	O.O351563
1172	-33.789	-O.O488281	O.O353517
1173	-33.6914	O	O.O353517
1174	-33.5937	-O.O488281	O.O353517
1175	-33.4961	-O.O488281	O.O34961
1176	-33.3984	-O.O488281	O.O351563
1177	-33.3008	O	O.O351563
1178	-33.2031	-O.O488281	O.O351563
1179	-33.1543	O	O.O351563
118	-33.0078	-O.O488281	O.O353517
1181	-32.959	-O.O488281	O.O351563
1182	-32.8613	-O.O488281	O.O34961
1183	-32.7637	-O.O488281	O.O351563
1184	-32.666	O	O.O351563
1185	-32.6172	-O.O488281	O.O351563
1186	-32.5195	-O.O488281	O.O351563
1187	-32.4219	O.O488281	O.O353517
1188	-32.3242	-O.O488281	O.O351563
1189	-32.2265	-O.O488281	O.O351563
119	-32.1777	-O.O488281	O.O351563
1191	-32.0801	-O.O488281	O.O351563
1192	-31.9336	-O.O488281	O.O351563
1193	-31.8359	-O.O488281	O.O353517
1194	-31.7871	-O.O488281	O.O351563
1195	-31.6894	-O.O488281	O.O353517
1196	-31.5918	-O.O488281	O.O34961
1197	-31.4941	-O.O488281	O.O351563
1198	-31.3965	-O.O488281	O.O351563
1199	-31.3476	O	O.O351563
12	-31.25	O	O.O351563
1201	-31.1523	O	O.O353517
1202	-31.0547	-O.O488281	O.O351563
1203	-30.9082	O	O.O34961
1204	-30.9082	-O.O488281	O.O351563
1205	-30.7617	-O.O488281	O.O351563
1206	-30.7129	-O.O488281	O.O351563
1207	-30.6152	-O.O488281	O.O353517
1208	-30.5176	-O.O488281	O.O353517
1209	-30.3711	-O.O488281	O.O34961
121	-30.3223	-O.O488281	O.O34961
1211	-30.2246	-O.O488281	O.O351563
1212	-30.1269	-O.O488281	O.O351563
1213	-30.0293	-O.O488281	O.O35547
1214	-29.9316	-O.146484	O.O353517
1215	-29.8828	-O.O488281	O.O35547
1216	-29.7363	-O.O488281	O.O34961
1217	-29.6875	-O.O488281	O.O34961
1218	-29.5898	-O.O488281	O.O351563
1219	-29.4433	-O.O488281	O.O351563
122	-29.3945	-O.O488281	O.O353517
1221	-29.2969	-O.O488281	O.O353517
1222	-29.1992	-O.O488281	O.O353517
1223	-29.1015	-O.O488281	O.O347657
1224	-29.0039	-O.O488281	O.O351563
1225	-28.9062	-O.O488281	O.O34961

1226	-28.8086	-0.0488281	0.0351563
1227	-28.7109	-0.0488281	0.0351563
1228	-28.6621	-0.0488281	0.0351563
1229	-28.5644	-0.0488281	0.0351563
123	-28.418	-0.0488281	0.0347657
1231	-28.3691	-0.0488281	0.034961
1232	-28.2715	-0.0488281	0.0353517
1233	-28.1738	-0.0488281	0.0351563
1234	-28.125	-0.0488281	0.0353517
1235	-27.9785	-0.0488281	0.0353517
1236	-27.8808	-0.0488281	0.0353517
1237	-27.7344	-0.0488281	0.0347657

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8.

ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό επισημαίνονται οι διαφορές μεταξύ των συνθηκών φόρτισης ενός δοκιμίου στο εργαστήριο και των αντίστοιχων συνθηκών φόρτισης μιας ασφαλικής στρώσης στην πραγματικότητα.

Διαφορές

α) Στο πείραμα που γίνεται στο εργαστήριο η φόρτιση, όσον αφορά τ'ασφατικά υλικά, είναι Μονοαξονικός Εφελκυσμός (Μ.Ε.). Στην πράξη όμως τέτοιου είδους φόρτιση δεν μπορεί να υπάρξει για μια ασφατική στρώση. Εκεί η εντατική κατάσταση είναι τριαξονική. Ο εφελκυσμός στην πράξη είναι έμμεσος και προέρχεται μέσω κάμψης της στρώσης εξ'αιτίας της φόρτισης που αυτή δέχεται απ'τους τροχούς των οχημάτων. Θα μπορούσε να πει κανείς ότι το εργαστηριακό πείραμα το οποίο θα προσέγγιζε περισσότερο την πραγματική φόρτιση είναι η κάμψη τριων σημείων (βλ. παράγραφο 5.4). Όσο όμως αυτή η διαφορά δεν είναι η μόνη που χωρίζει την εργαστηριακή πραγματικότητα από εκείνη των δρόμων δεν έχει προς το παρόν κανένα νόημα να τεθεί περιορισμός ως προς το είδος των πειραμάτων που διεξάγονται στο εργαστήριο.

β) Στον (Μ.Ε.) η φόρτιση είναι μονοτονική (συνεχής) ενώ στην πράξη δεν συμβαίνει αυτό αφού η φόρτιση μιας διατομής είναι φαινόμενο δυναμικό ή στην καλύτερη ακραία

περίπτωση περιοδικό. Η διάρκεια ζωής ενός υλικού που καταπονείται δυναμικά είναι πολύ μεγαλύτερη απ' την αντίστοιχη διάρκεια του ίδιου υλικού που καταπονείται μοναξονικά. Έχει βρεθεί επίσης ότι μεγάλη σημασία στην διάρκεια ζωής του οδοστρώματος παίζουν και οι περίοδοι ανάπαυλας μεταξύ των επαναληπτικών φορτίσεων. Ειδικά όσον αφορά πειράματα κόπωσης με υλικά από σκυρόδεμα έχει βρεθεί ότι συχνές περίοδοι ανάπαυλας χρονικής διάρκειας μέχρι και (5 min) αυξάνουν σημαντικά την ζωή του υλικού.

γ) Στον (Μ.Ε.) η φόρτιση είναι κεντρική ενώ στην πράξη δεν συμβαίνει αυτό αφού όπως είναι γνωστό οι διελεύσεις των τροχών από μια διατομή ακολουθούν κάποια κατανομή γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι με κάθε διέλευση μόνο ένα συγκεκριμένο σημείο της διατομής φορτίζεται, ενώ τα υπόλοιπα, δέχονται μειωμένη καταπόνηση λόγω της διέλευσης του τροχού. Σχετική μελέτη υπολογισμού των ευκάμπτων οδοστρωμάτων της Εταιρείας "SHELL", εξέλαβε σαν συνολικό αριθμό αξονικών διελεύσεων επί μιας διατομής το 40% του συνολικού αριθμού διελεύσεων που καταμετρήθηκε. Επομένως κι εδώ είναι φανερό ότι η καταπόνηση του δοκιμίου στο εργαστήριο είναι σαφώς δυσμενέστερη απ' την αντίστοιχη του ίδιου υλικού στην πράξη.

δ) Οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι συγκεκριμένες και δεδομένες όσον αφορά τα εργαστηριακά δεδομένα. Ανάλογες διαστάσεις κάποιου ιδεατού αντίστοιχου τμήματος της ασφαλικής στρώσης δεν είναι δυνατό να υποθέσουμε. Προκειμένου να παραλειφθεί η εξωτερική φόρτιση απ' την

ασφαλτική στρώση πρέπει να υποθέσουμε γύρω απ' την επιφάνεια φόρτισης μια συνεργαζόμενη περιοχή η οποία παραμορφώνεται κι αναλαμβάνει μέρος του φορτίου. Όμως μέχρι σήμερα κάτι τέτοιο δεν έχει ακόμα επιτευχθεί κι επομένως δεν μπορούμε να βρούμε κάποια μορφή αναλογίας που θα συσχετίζει τις διαστάσεις της περιοχής αυτής με τις αντίστοιχες ενός δοκιμίου στο εργαστήριο.

ε) Το είδος της ρωγμής (κεντρική ρωγμή) που γίνεται τεχνητά στο δοκίμιο για τους σκοπούς του πειράματος στο εργαστήριο δεν μπορεί ποτέ να υπάρξει στην πράξη. Εκεί η ρωγμή ξεκινά απ' την βάση της ασφαλικής στρώσης, δεδομένου ότι αυτή εφελκύεται έμμεσα λόγω κάμψης που προκαλείται απ' το επιβαλλόμενο φορτίο του τροχού, κι επεκτείνεται προς την επιφάνεια με την επανάληψη των φορτίσεων.

στ) Στο εργαστήριο μπορεί να μελετηθεί η αντοχή ενός τεχνητά ρηγματωμένου ασφαλικού δοκιμίου το οποίο όμως δεν μπορεί να περιέχει πάνω από δύο τέτοιες τεχνητές εγκοπές (ρωγμές). Στην πράξη πρώτον τέτοιες τεχνητές εγκοπές όπως είναι φυσικό δεν μπορεί να υπάρξουν και δεύτερον με την πρόοδο των επαναλήψεων της φόρτισης δίπλα από μια ρωγμή που δημιουργήθηκε αρχικά να εμφανιστούν κι άλλες οι οποίες είτε μπορούν να κινούνται παράλληλα προς την αρχική είτε να την διασταυρώνουν οπότε το φαινόμενο γίνεται εξαιρετικά πολύπλοκο.

ζ) θερμοκρασιακές επιρροές. Η ανάπτυξη πολύ χαμηλών θερμοκρασιών έχει σαν συνέπεια την συστολή της επιφάνειας της ασφαλικής στρώσης μ' αποτέλεσμα να δημιουργούνται

ρωγμές οι οποίες μάλιστα υπάρχει κίνδυνος να διευρυνθούν στην περίπτωση παγετού.

Η ανάπτυξη διαφορετικών θερμοκρασιών όπως είναι γνωστό επηρεάζει άμεσα και το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτικών μιγμάτων. Σε χαμηλές θερμοκρασίες τ'ασφαλτικά υλικά εμφανίζουν μεγάλο μέτρο δυσκαμψίας ενώ σε υψηλές το μέτρο δυσκαμψίας ελαττώνεται αισθητά. Το γεγονός αυτό όπως είναι φυσικό επηρεάζει άμεσα και την διάδοση των ρωγμών. Ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες, όπου η συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων γίνεται έντονα ιξοελαστική και το μέτρο δυσκαμψίας πέφτει, το υλικό μπορεί ν'αστοχήσει είτε λόγω υπέρβασης της αντοχής θραύσης του είτε λόγω πλαστικής κατάρρευσης. Κι αυτό γιατί παράλληλα με την ελάττωση του μέτρου δυσκαμψίας πέφτει και το όριο διαρροής του υλικού. Έτσι τώρα μπορεί απ'τη μια πιο εύκολα να ξεπεραστεί η αντοχή θραύσης του (αφού το (E) μειώνεται) αλλά και απ'την άλλη να μπει πιο εύκολα το υλικό κάτω από την ανάπτυξη μικρότερης τάσης στην πλαστική περιοχή, μ'αποτέλεσμα το υλικό, όταν θα έχει πλαστικοποιηθεί ένα μεγάλο μέρος της διατομής του, να καταρρεύσει (αστοχήσει) πλαστικά. Μέχρι σήμερα δεν έχουν βρεθεί οι συνθήκες εκείνες κάτω απ'τις οποίες επέρχεται η πλαστική κατάρρευση των ασφαλτικών υλικών. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα σύνθετο και πολύπλοκο. Η επιστήμη καλείται να δώσει απάντηση σχετικά με τους μηχανισμούς που διέπουν την πλαστική κατάρρευση των ασφαλτικών υλικών και να εξακριβώσει υπό ποίες συνθήκες ένα τέτοιο υλικό αστοχεί λόγω

υπέρβασης της αντοχής του ή λόγω πλαστικοποίησης της διατομής του. Είναι προφανές το πόσο το ίδιο πρόβλημα δυσκολεύει στη πράξη όπου οι θερμοκρασιακές αλλαγές είναι έντονες και οι γενικότερες συνθήκες φόρτισης απέχουν, σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν σ' αυτό το κεφάλαιο κατά πολύ απ' τις αντίστοιχες του εργαστηρίου.

Σαν συμπέρασμα βγαίνει ότι μέχρι να γίνει δυνατό για την επιστήμη να εξομοιώσει τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης, σ' ένα εργαστηριακό πείραμα, ή να βρει όλους εκείνους τους πολλαπλασιαστικούς συντελεστές οι οποίοι συσχετίζουν τα εργαστηριακά μετρούμενα μεγέθη με τα αντίστοιχα πραγματικά, οι υπολογισμοί που γίνονται στο εργαστήριο σχετικά με τις αντοχές των ρωγματομένων υλικών θα είναι σχετικοί. Παρ' όλα αυτά ακόμα και μ' αυτά τα δεδομένα οι δυνατότητες που έχει ο μελετητής σήμερα στο εργαστήριο είναι πολύτιμες δεδομένου ότι η σχετική έστω σύγκριση μεταξύ των αντοχών διαφόρων μιγμάτων με βάση την ανάλυση που υπαγορεύει κατά περίπτωση η θραυστομηχανική, αποτελεί ένα ισχυρό όπλο στη προσπάθεια του μηχανικού για τη βέλτιστη επιλογή του τύπου του ασφαλτομίγματος που θα χρησιμοποιήσει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9.

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκαν (2) μέθοδοι υπολογισμού των χαρακτηριστικών παραμέτρων (K) και (J_R) για τα ψαθυρά και τα ελαστοπλαστικά αντίστοιχα υλικά. Προκειμένου να αναπτυχθεί στη συνέχεια μια σφαιρική εικόνα της συμπεριφοράς των ρωγματομένων υλικών έναντι των παραμέτρων που επηρεάζουν την αντοχή τους, προτείνονται τα ακόλουθα πειράματα.

α) Επιβεβαίωση του γεγονότος ότι το (J_R) για κάθε ελαστοπλαστικό υλικό όσο και το (K_c) για κάθε ψαθυρό είναι παράμετροι σταθερές, ανεξάρτητες του μήκους της ρωγμής και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δοκιμίων. Προτείνεται δηλαδή να επαναληφθούν τα πειράματα που ήδη έγιναν, για διαφορετική γεωμετρία δοκιμίων και μήκος ρωγμής, να υπολογισθούν οι ίδιες τιμές (K_c και J_R), και να συγκριθούν με τις αντίστοιχες που ήδη παρατέθηκαν στην παρούσα διπλωματική.

β) Να επαναληφθεί το πείραμα του (Μ.Ε.) για διαφόρους τύπους ασφατικών μιγμάτων που θα ακολουθήσουν αντίστοιχες προδιαγραφές και να βρεθεί πάλι η σχετική αντοχή τους (J_R).

γ) Μέσω πάλι του πειράματος του (Μ.Ε.) να διαπιστωθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν διάφοροι συγκεκριμένοι παράμετροι την αντοχή των ασφατομιγμάτων όπως η κοκκομε-

τρικη διαβάθμιση, το ποσοστό ασφάλτου, το πορώδες κ.ά. Κάτι τέτοιο προϋποθέτει εκτέλεση σειράς πειραμάτων.

δ) Να βρεθεί η επιρροή της θερμοκρασίας στην αντοχή των ασφαλτομιγμάτων. Δηλαδή ουσιαστικά προτείνονται πάλι τα πειράματα (β) και (γ) αλλά αυτή τη φορά μ'ελεγχόμενη θερμοκρασία.

ε) Να γίνουν πειράματα κόπωσης, πάλι για διαφορετικούς τύπους ασφαλτομιγμάτων και σε διαφορετικές ελεγχόμενες θερμοκρασίες προκειμένου να βρεθούν σχέσεις του τύπου $\alpha = f(N)$, $d\alpha/dN = f(J)$ και να γίνουν τ'αντίστοιχα διαγράμματα. Το πείραμα της κόπωσης είναι αυτό που πλησιάζει περισσότερο την πραγματικότητα και επομένως τα υπολογισθέντα απ'αυτό μεγέθη α , N , J ή K αναμένεται να είναι πιο κοντά στα πραγματικά σε σχέση με τ'αντίστοιχα που υπολογίζονται από μία μονοτονική φόρτιση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Σ. Κόλλιας - Λ. Λοΐζος, Σημειώσεις οδοστρωμάτων Αθήνα (1992).
- [2]. Sidney Mindess, J. Francis Young, "Concrete", Prentice - Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- [3]. E.K. TSCHEGG, S.E. STANZL - TSCHEGG, J. LITZKA, "New testing method to characterize mode I fracturing of asphalt aggregate mixtures".
- [4]. Ι. Πρασιανάκης, Β. Κωνσταντέλλος, Ι. Μηλιός, "Πειραματική αντοχή υλικών", Αθήνα, Δεκέμβριος (1988), p.p. 169.
- [5]. DAVID BROEK, "The practical use of fracture mechanics" Inc., Galena, OH, USA, p.p. 17-18.
- [6]. Θ. Π. Τάσιος, Π.Ι. Γιαννόπουλος, Κ.Γ. Τρέζος, Σ.Γ. Τσουκαντάς, "Ωπλισμένο σκυρόδεμα με βάση το σχέδιο του νέου ελληνικού κανονισμού" p.p. 11-13.
- [7]. DAVID BROEK, "The practical use of fracture mechanics" Inc., Galena, OHIO, USA, p.p. 3-5.
- [8]. DAVID BROEK, "The practical use of fracture mechanics" Inc., Galena, OHIO, USA, p.p. 22-27.
- [9]. Ι. Πρασιανάκης, Β. Κωνσταντέλλος, Ι. Μηλιός, "Πειραματική αντοχή υλικών", Αθήνα, Δεκέμβριος (1988), p.p. 26-35.
- [10]. Sidney Mindess, J. Francis Young, "Concrete", Prentice - Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

tice - Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

- [11]. Irwin, G.R., "Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Transversing a Plate", Journal of applied mechanics, Vol. 24, p.p. 361-364, 1957.
- [12]. Asphalt Research Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkley
Fatigue Response of Asphalt - Aggregate Mixes Strategic Highway Research Program
National Research Council, Washington, DC 1994, p.p. 230.
- [13]. H. L. Ewalds, R. J. Wanhill, "Fracture Mechanics", October 1989, p. 16.
- [14]. Γ.Α. Παπαδόπουλος, "Ειδικά κεφάλαια μηχανικής, πειραματικές μέθοδοι ανάλυσης των τάσεων", Αθήνα 1952, σ. 53-54.
- [15]. H. L. Ewalds, R. J. Wanhill, "Fracture Mechanics", October 1989, p.p. 49-51.
- [16]. Paris, D. C and Sih, G.C., "Stress Analysis of Cracks, Fracture Toughness Testing and its Applications", ASTM Special Technical Publication, 381, p.p. 30-81, 1965.
- [17]. H. L. Ewalds, R. J. Wanhill, "Fracture Mechanics", October 1989, p.p. 56, 74.
- [18]. DAVID BROEK, "The practical use of fracture mechanics" Inc., Galena, OHIO, USA, p.p. 28-35, 57-63.
- [19]. DAVID BROEK, "The practical use of fracture mecha-

