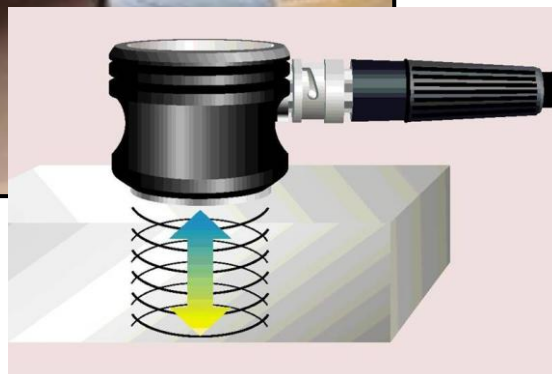


ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

ΑΝΤΟΧΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

Κων/νος Π. Προβιδάκης
Καθηγητής



ΧΑΝΙΑ ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2014

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 2

Δοκιμή Θλίψης

1. Σκοπός του πειράματος
2. Θεωρητικό υπόβαθρο
3. Μηχανές δοκιμών θλίψης, δοκίμια
4. Σκοπός και διαδικασία δοκιμής θλίψης
5. Αποτελέσματα πειράματος

1. Σκοπός Πειράματος

Ένα κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος διαστάσεων 15X15X15 (cmXcmXcm), θα υποβληθεί σε θλίψη μέχρι την θραύση του. Σκοπός της δοκιμής θλίψης είναι να κατασκευαστεί το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του σκυροδέματος σε θλίψη και από το διάγραμμα αυτό να προσδιοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες του όπως το μέτρο ελαστικότητας E , το όριο διαρροής και θραύσης.

2. Θεωρητικό υπόβαθρο

Θλιπτική καταπόνηση

Στην απλή θλίψη τα φορτία που επιβάλλονται στα σώματα είναι αντίθετης φοράς από αυτή του εφελκυσμού και προκαλούν σ' αυτά βράχυνση της διάστασή τους κατά την οποία ενεργούν και αντίστοιχα αύξηση της εγκάρσιας διάστασης τους. Στην καθημερινή τακτική πολλά είναι τα παραδείγματα όπου τμήματα κατασκευών ή μέλη μηχανών υπόκεινται σε θλιπτικά φορτία. Για την μελέτη της αντοχής των υλικών σε θλιπτικές καταπονήσεις, με την δοκιμή θλίψης, κατασκευάζουμε (όπως και στον εφελκυσμό) το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων χρησιμοποιώντας τυποποιημένα (σύμφωνα με τους κανονισμούς) κυλινδρικά ή κυβικά δοκίμια. Η δοκιμή αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για τα ψαθυρά υλικά (π.χ. τα οικοδομικά υλικά όπως σκυρόδεμα, πέτρες, μάρμαρα, ξύλο κλπ.) τα οποία καταπονούνται συνηθέστερα απ' ότι τα όλκιμα υλικά (π.χ. χάλυβας, αλουμίνιο), σε θλιπτικά φορτία, γιατί προσφέρεται για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων τους επειδή τα υλικά αυτά παρουσιάζουν μικρές παραμορφώσεις στον εφελκυσμό.

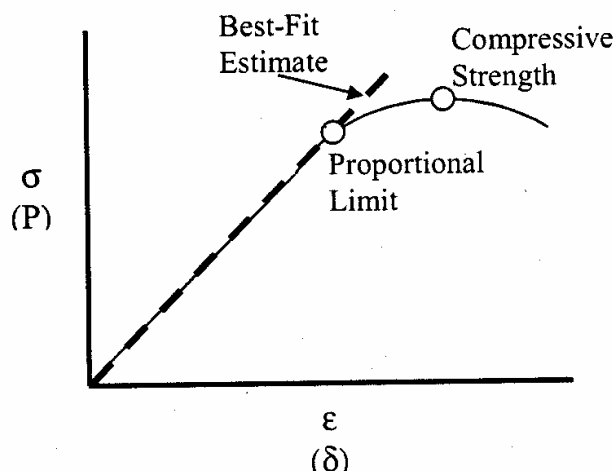
Οι θλιπτικές τάσεις σ_c προκαλούν μια βράχυνση των δοκιμίων στην οποία αντιστοιχεί μια θλιπτική παραμόρφωση ε_c , η οποία μετρά την ένταση της παραμόρφωσης (ανά μονάδα μήκους). Συνεπώς $\varepsilon_c = \Delta h/h_0 = (h-h_0)/h_0$, όπου h_0 το αρχικό ύψος του δοκιμίου και h το ύψος του δοκιμίου κατά την φόρτιση για την οποία θα υπολογιστούν οι αντίστοιχες θλιπτικές τάσεις. Η σχέση εντούτοις ανάμεσα στα δύο αυτά μεγέθη για την περιοχή των ελαστικών παραμορφώσεων, είναι ακριβώς η ίδια όπως και στην περίπτωση που θα εφαρμόζονταν στο υλικό εφελκυστικές τάσεις, δηλαδή ισχύει:

$$\sigma_c/\varepsilon_c = E$$

Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων διέρχεται έτσι από την αρχή των συντεταγμένων του διαγράμματος σ - ε ως ευθεία γραμμή (σχήμα 5.1). Το θλιπτικό όριο ελαστικότητας βρίσκεται, ως απόλυτη τιμή, πολύ κοντά στο αντίστοιχο εφελκυστικό όριο. Αντίθετα το θλιπτικό όριο διαρροής, ως απόλυτο μέγεθος, λαμβάνει (κυρίως στα υλικά που μας ενδιαφέρουν εδώ, δηλαδή τα ψαθυρά υλικά) μια σημαντικά ψηλότερη τιμή σε σχέση με το αντίστοιχο εφελκυστικό όριο διαρροής. Για παράδειγμα το όριο διαρροής σε θλίψη είναι δέκα φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο σε εφελκυσμό.

Η θραύση των ψαθυρών υλικών σε θλίψη λαμβάνει χώρα κατά τη διεύθυνση της μέγιστης διατμητικής τάσης, επειδή ακριβώς τα ψαθυρά υλικά παρουσιάζουν μειωμένη αντοχή σε διατμητικές τάσεις σε σύγκριση με τις ορθές θλιπτικές τάσεις (οι οποίες τείνουν περισσότερο να κλείσουν παρά να επεκτείνουν τις περιοχές

ανωμαλιών και τις μικρορωγμές στο εσωτερικό του υλικού, απ' όπου και ξεκινά η θραύση). Στα ψαθυρά υλικά επέρχεται αστοχία (δημιουργία ρωγμής και θραύση)



αμέσως μετά την είσοδο του υλικού στη διαρροή έτσι ώστε να καθίσταται αδύνατη η διάκριση ανάμεσα στο όριο διαρροής και στο όριο θραύσης, οποία και θεωρούμε ότι ταυτίζονται.

Σχήμα 5.1 : Τυπικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων σκυροδέματος

Σκυρόδεμα

Το υλικό των δοκιμών που θα ελεγχθεί στο πείραμα αυτό σε θλίψη είναι από τα πιο κοινά δομικά υλικά στην Ελλάδα. Το σκυρόδεμα είναι ένα δομικό υλικό το οποίο αποτελείται από τέσσερα συστατικά: τσιμέντο, άμμο, αδρανή (πέτρες, χαλίκια κλπ.) και νερό. Μερικές φορές μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάποια πρόσθετα για να βελτιώσουν την ποιότητα του σκυροδέματος. Η αντοχή και γενικά οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος εξαρτώνται από την αναλογία των συστατικών του καθώς και τον τρόπο ανάμειξής τους.

Είναι ένα ανθεκτικό υλικό όταν υπόκειται σε θλιπτικά φορτία, ενώ αντίθετα είναι αρκετά αδύναμο σε εφελκυστικά φορτία. Για το σκοπό αυτό συνήθως προστίθεται μεταλλικά στοιχεία τα οποία λαμβάνουν τα εφελκυστικά φορτία οπότε το σκυρόδεμα ονομάζεται οπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο χρησιμοποιείται σε όλα τα οικοδομικά έργα.

Η αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τα φορτία που μπορούν να εφαρμοστούν σε μία κατασκευή από σκυρόδεμα. Διάφοροι παράγοντες μπορεί να επηρεάσουν την αντοχή του σκυροδέματος όπως η παρουσία υγρασίας, η ταχύτητα με την οποία γίνεται η δοκιμή καθώς και οι διαστάσεις του δοκιμίου.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για τον έλεγχο της αντοχής του σκυροδέματος. Οι δοκιμές χωρίζονται σε μη καταστροφικές (χρήση κρουσίμετρου, όπως περιγράφεται στην 3η εργαστηριακή άσκηση) και οι οποίες χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις όπου είναι αδύνατη η λήψη δοκιμών, και καταστροφικές (δοκιμή θλίψης, όπως περιγράφεται ακολούθως) οι οποίες χρησιμοποιούνται συνήθως στις υπό κατασκευή οικοδομές.

Για μία κατασκευή είναι σημαντικό να γίνεται έλεγχος της ποιότητας του σκυροδέματος από ένα αντιπροσωπευτικό αριθμό δοκιμών. Η λήψη των δοκιμών, καθώς και η συντήρησή τους για 28 μέρες ώστε το σκυρόδεμα να αποκτήσει τις μέγιστες αντοχές τους γίνονται βάσει προδιαγραφών. Σημαντικό είναι οι πλευρές του

δοκιμίου να είναι επίπεδες ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη επαφή με τις πλάκες της μηχανής θλίψης (όπως περιγράφεται αναλυτικότερα στην επόμενη παράγραφο). Μερικά πλεονεκτήματα της χρήσης του σκυροδέματος ως οικοδομικό υλικό είναι η υψηλή αντοχή στην φωτιά και το νερό, το σχετικά χαμηλό κόστος παραγωγής (λόγω της χρησιμοποίησης πρώτων υλών από την γειτονική περιοχή) καθώς και η δυνατότητα να διαστρωθούν ασυνήθιστες μορφές κατασκευών.

3. Μηχανές δοκιμών θλίψης, δοκίμια

Για τις δοκιμές θλίψης χρησιμοποιούμε διάφορους τύπους πρέσας, όπως η αυτόματη σερβο-υδραυλική μηχανή του οίκου PROETI, του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Μηχανικής (σχήμα 5.2). Η ικανότητα φορτίου της μηχανής αυτής είναι 2000 kN και αποτελείται από δύο κύριες μονάδες. Η μία μονάδα είναι η μονάδα ελέγχου του σερβομηχανισμού όπου γίνεται και ο πλήρης έλεγχος της μέσω H/Y και η εισαγωγή των δεδομένων των δοκιμών και στην συνέχεια γίνεται on-line απεικόνιση του πειράματος της θλίψης ενώ στο τέλος του πειράματος γίνεται επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Η δεύτερη μονάδα αποτελεί την μονάδα εφαρμογής του φορτίου όπου υπάρχει ο υδραυλικός μηχανισμός που μετακινεί δύο παράλληλες μεταξύ των πλάκες που είναι κατασκευασμένες από ειδικό χάλυβα μεγάλης αντοχής και στην επιφάνεια των οποίων τοποθετούνται τα δοκίμια και στη συνέχεια θλίβονται. Οι πλάκες ανάμεσα στις οποίες συνθλίβεται το δοκίμιο πρέπει να είναι επίπεδες, καλά λειασμένες και να έχουν κατασκευαστεί από σκληρότερο υλικό σε σχέση με το υλικό των δοκιμαζόμενων δοκιμών, ώστε να αποκλείεται η πλαστική παραμόρφωση τους. Επίσης πρέπει να εξασφαλίζεται η παραλληλότητα των πλακών αυτών φόρτισης.

Η τοποθέτηση των δοκιμών πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται απολύτως αξονική φόρτιση, όμως στην δοκιμή θλίψης είναι πρακτικά αδύνατο να διασφαλιστεί η απόλυτη μονοαξονική καταπόνηση του δοκιμίου εφόσον οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στις επιφάνειες του δοκιμίου που εφάπτονται με τις πλάκες φόρτισης δημιουργούν στην πραγματικότητα μια τριαξονική εντατική κατάσταση. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι να επηρεάζουν σημαντικά η μορφή και οι διαστάσεις του δοκιμίου (δηλαδή στην πραγματικότητα όχι μόνο ο λόγος ύψους/εγκάρσιας διατομή, αλλά και οι απόλυτες τιμές των διαστάσεων) τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης. Έχει λοιπόν παρατηρηθεί ότι η αντοχή σε θλίψη ενός κυλινδρικού δοκιμίου είναι ψηλότερη από την αντοχή σε θλίψη ενός κυβικού ή πρισματικού δοκιμίου. Παράλληλα, η αντοχή μειώνεται καθώς αυξάνει το ύψος του δοκιμίου. Είναι λοιπόν εξαιρετικά κρίσιμο να ακολουθούνται οι προδιαγραφές κατά την εκτέλεση των δοκιμών θλίψης ώστε να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα διαφορετικών δοκιμών.



Σχήμα 5.2: Μηχανή θλίψης σκυροδέματος (πρέσα) Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Μηχανικής

Για τον υπολογισμό των πραγματικών τάσεων και των παραμορφώσεων σε δοκιμές θλίψης πρέπει να λάβουμε υπόψη και τη μεταβολή της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου A με την αύξηση των παραμορφώσεων, ιδιαίτερα στην περίπτωση των σημαντικά παραμορφούμενων (όλκιμων) υλικών. Για το σκοπό αυτό ξεκινάμε από την παραδοχή ότι ο όγκος του δοκιμίου διατηρείται σταθερός παρά τη διαδικασία παραμόρφωσης (αρχή ισόογκης μεταβολής). Ισχύει δηλαδή $A_0 \cdot h_0 = A \cdot h$, όπου A το εμβαδόν της διατομής και h το ύψος του δοκιμίου (ο δείκτης 0 υποδηλώνει τις αρχικές τιμές των μεγεθών). Έχουμε τότε για το φορτίο (το οποίο μετράμε κατά την διάρκεια του πειράματος):

$$P = \sigma_c \cdot A = \sigma_c \cdot A_0 h_0 / h.$$

Επειδή όμως $(h - h_0) = -e$ και συνεπώς $h_0/h = 1/(1 - e)$ έχουμε:

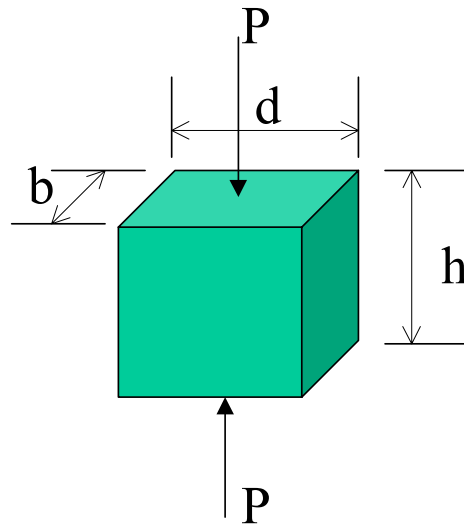
$$P = \sigma_c \cdot A_0 / (1 - e) \quad \sigma_c = P(1 - e) / A_0$$

Μετρώντας λοιπόν την τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου P και την αντίστοιχη βράχυνση $\Delta h = h - h_0$ του δοκιμίου υπολογίζουμε την πραγματική τάση $\sigma_c = P/A$ (σχήμα 5.3).

Στο συγκεκριμένο όμως πείραμα θλίψης δεν θα χρησιμοποιήσουμε τις πραγματικές τάσεις και παραμορφώσεις αλλά τις τάσεις υπολογισμού που προκύπτουν από την $\sigma_c = P/A_0$ δηλαδή στον παρανομαστή θα θεωρούμε το αρχικό εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου.

Από το βάρος του δοκιμίου του σκυροδέματος B και τα γεωμετρικά του στοιχεία προσδιορίζεται η φαινομενική πυκνότητα του ελεγχόμενου σκυροδέματος ως:

$$\rho = B(gr)/A \cdot h(cm^3).$$



Σχήμα 5.3: Δοκίμιο σκυροδέματος

4. Σκοπός και διαδικασία δοκιμής θλίψης

Το δοκίμιο από σκυρόδεμα κατασκευάζεται σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό και έχει διαστάσεις $b = d = h = 15 \text{ cm}$.

Το δοκίμιο θα ελεγχθεί σε:

Αντοχή με την θλίψη του δοκιμίου μέχρι αστοχίας.

ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ

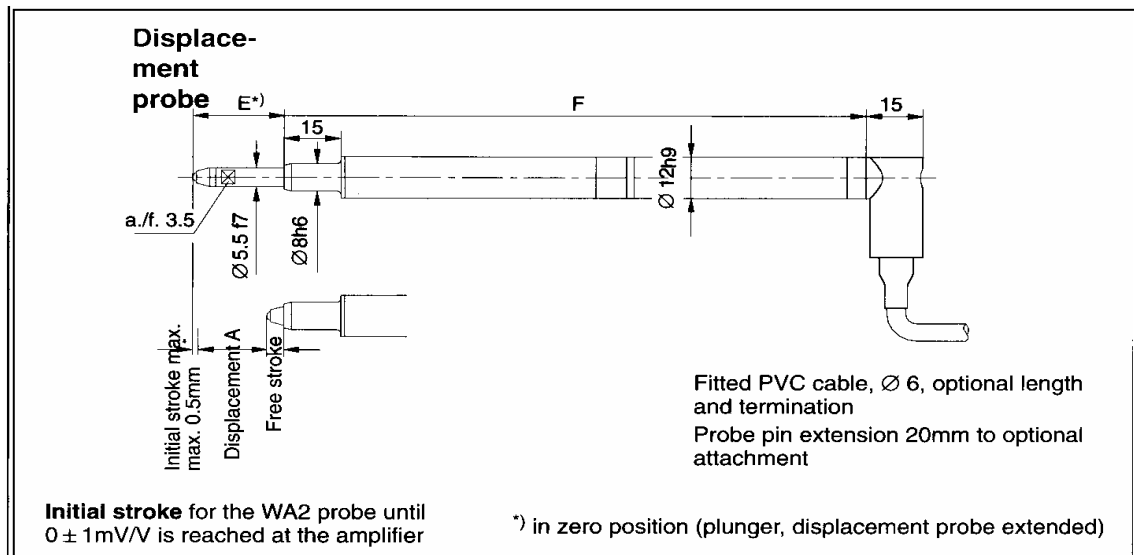
Μετά την δοκιμή της σκληρομέτρησης θα ακολουθήσει η διαδικασία ελέγχου αντοχής του δοκιμίου με την θλίψη του μέχρι την αστοχία και την καταστροφή του. Για το δοκίμιο αυτό με την δοκιμή θλίψης παράγεται το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων (σχήμα 5.1), οπότε και προσδιορίζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

2. Η αντοχή σε θλίψη σ_c (compressive strength) εκφράζεται σε μονάδες τάσης. Ως αντοχή σε θλίψη ορίζεται το πηλίκο του μέγιστου φορτίου P_m , το οποίο δέχεται το δοκίμιο μήκους h_0 , όταν θλίβεται, προς την αρχική εγκάρσια διατομή A_0 , ($\sigma = P_m/A_0$), (Σχ. 5.1).
3. Όριο αναλογίας σ_A (proportional limit) είναι η μέγιστη τάση για την οποία το υλικό μετά την αφαίρεση του φορτίου δεν παρουσιάζει παραμένουσα παραμόρφωση και για την οποία ισχύει ο νόμος της αναλογίας τάσεων - παραμορφώσεων του Hooke.
4. Μέτρο ελαστικότητας E (modulus of elasticity) είναι ο λόγος της τάσης προς την παραμόρφωση πριν από το όριο αναλογίας. Επίσης, ως μέτρο ελαστικότητας

ορίζεται ο συντελεστής αναλογίας, που συνδέει την τάση με την παραμόρφωση στο νόμο του Hooke, $\sigma = E\varepsilon$, και εκφράζεται σε μονάδες τάσης.

Σημειώνεται ότι το διάγραμμα φόρτισης –βράχυνσης (P- δ), (όπου η βράχυνση $\delta = \Delta h$) ή τάσεων-παραμορφώσεων (σ - ε) αντίστοιχα μπορεί να μη περιλαμβάνει ένα αρχικά ευθύγραμμο τμήμα. Στην περίπτωση αυτή για το προσδιορισμό του Μέτρου Ελαστικότητας E, χρειάζεται να προσεγγίσουμε την καμπύλη με μία ευθεία γραμμή εφαπτομενική στην καμπύλη (σχήμα 5.1, Best-Fit Estimate). Έτσι μπορεί να προκύψει ότι η γραμμή αυτή τέμνει τον οριζόντιο άξονα στα αριστερά της καμπύλης. Σ' αυτή την περίπτωση το σημείο αρχής μπορεί να επιλεγεί ως το σημείο όπου η εφαπτομενική γραμμή τέμνει τον οριζόντιο άξονα.

Για τον υπολογισμό της διαφοράς μήκους του δοκιμίου (βράχυνση) χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας μετατόπισης (displacement transducer), το οποίο είναι όργανο για την μέτρηση της γραμμικής παραμόρφωσης-βράχυνσης που υφίσταται το υλικό κατά την δοκιμή θλίψης. Το όργανο αυτό που αποτελείται από μία μεταλλική ράβδο προσαρμόζεται σταθερά κατά την διεύθυνση του μήκους του επάνω στην πρέσα ενώ ακουμπάει η άκρη του στην κινητή επιφάνεια βάσης της πλάκας που εδράζεται το δοκίμιο και συνδέεται μέσω καλωδίου με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο συγκεκριμένος μετατροπέας μετατόπισης εικονίζεται στην παρακάτω φωτογραφία είναι τύπου WA της εταιρίας HBM και μπορεί να μετρήσει μέχρι μέγιστη μετατόπιση 100 mm.



Η καταγραφή της βράχυνσης του δοκιμίου μέσω του αισθητήρα μετατόπισης γίνεται με ηλεκτρονικό τρόπο μέσω κατάλληλου συστήματος data logging και ενίσχυσης του σήματος τύπου SPIDER 8 της HBM. Μετά την ενίσχυση του σήματος γίνεται on-line καταγραφή της βράχυνσης του δοκιμίου σε συνάρτηση του χρόνου σε H/Y του Εργαστηρίου.

Αρχικά θα μετρηθούν τα γεωμετρικά στοιχεία του δοκιμίου καθώς και το βάρος του. Στην συνέχεια το δοκίμιο θα τοποθετηθεί στην πρέσα έτσι ώστε ο άξονας του να

συμπίπτει με τον άξονα φόρτισης της μηχανής η λειτουργία της οποίας ρυθμίζεται από αντίστοιχο πρόγραμμα H/Y και στο οποίο πρόγραμμα πλοήγησης της μηχανής δίνονται οι κατάλληλες ρυθμίσεις φόρτισης (ένταση και ταχύτητα φόρτισης κλπ.).

Τα βήματα που ακολουθούνται για την εκτέλεση της δοκιμής θλίψης είναι:

1. Εκκίνηση του προγράμματος από το βασικό “MENU”.
2. Επιλογή “Graphics”.
3. Επιλογή των επιθυμητών αρχείων ελέγχου της μηχανής (“Files Control Machine”).
4. Επιλογή του επιθυμητού αρχείου ελέγχου από υπάρχοντα αρχεία ή δημιουργία νέου και στην συνέχεια επιβεβαίωση εντολής με “OK”.
5. Εμφάνιση την οθόνης επιλογής δοκιμίου για την δοκιμή.
6. Εισαγωγή των αρχικών δεδομένων για το δοκίμιο ή επιλογή κάποιου υπάρχοντος δοκιμίου (με εντολή “Open”) και στην συνέχεια επιβεβαίωση εντολής με “OK”.
7. Με την ολοκλήρωση των προηγούμενων βημάτων έχουμε εκκίνηση της δοκιμής.
8. Με την εμφάνιση θραύσης του δοκιμίου, η μηχανή σταματά και η οθόνη του τεστ δοκιμίου (test specimen screen) θα εμφανιστεί ξανά με σκοπό την εισαγωγή των τελικών δεδομένων.
9. Εισαγωγή των τελικών δεδομένων στο τεστ του δοκιμίου και επιβεβαίωση εντολής με “OK”.
10. Επιλογή ονόματος αρχείου.
11. Εισαγωγή ονόματος αναγνώρισης αποτελεσμάτων-δεδομένων.
12. Αποθήκευση των δεδομένων-αποτελεσμάτων της δοκιμής.

Ταυτόχρονα γίνεται ενεργοποίηση του συστήματος Data logging SPIDER 8 και ενώ καταγράφονται on-line η μεταβολή της βράχυνσης σε συνάρτηση του χρόνου σε secs υπάρχει ταυτόχρονη δυνατότητα αποθήκευσης της χρονικής αυτής μεταβολής.

5. Αποτελέσματα πειράματος

Για το κυβικό δοκίμιο του σκυροδέματος θα γίνει και έλεγχος της αντοχής του μέχρι την αστοχία και την καταστροφή μέσω της δοκιμής θλίψης.

Από την δοκιμή θλίψης θα συλλεχθούν τα δεδομένα για την σχεδίαση του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων.

Ετσι:

1. Θα μετρηθούν οι διαστάσεις του δοκιμίου.
2. Θα ζυγισθεί το δοκίμιο ώστε να υπολογισθεί το φαινόμενο βάρος του.
3. Θα τοποθετηθεί ο αισθητήρας μετατόπισης σύμφωνα με τις προδιαγραφές.
4. Θα τοποθετηθεί το δοκίμιο στην κάτω πλάκα της μηχανής.
5. Θα ξεκινήσει κατάλληλα η μηχανή.
6. Διαδοχικά καταγράφεται σε H/Y η μεταβολή του φορτίου θλίψης σε συνάρτηση του χρόνου και σε άλλο H/Y η μεταβολή της βράχυνσης σε συνάρτηση πάλι του χρόνου.
7. Μετά το τέλος του πειράματος και αφού σταματήσει η μηχανή με κατάλληλο χειρισμό του H/Y που ελέγχει το πείραμα αποθηκεύονται στον σκληρό δίσκο σε αρχείο μορφής ASCII (με επίθεμα στο τέλος του

ονόματος του αρχείου .grf) τα αποτελέσματα του πειράματος υπό μορφή πίνακα με 6 στήλες. Στην πρώτη στήλη καταγράφεται η δύναμη θλίψης που εξασκείται σε kN, στην δεύτερη στήλη καταγράφεται η τάση σ σε MPa και στην πέμπτη ο χρόνος σε seconds.

8. Σε άλλο αρχείο ASCII (με επίθεμα στο τέλος του ονόματος του αρχείου .asc) αποθηκεύονται τα αποτελέσματα της μεταβολής της βράχυνσης όπως λαμβάνονται από τον αισθητήρα μετατόπισης-βράχυνσης (displacement transducer) σε 2 στήλες. Η πρώτη στήλη είναι η βράχυνση σε mm και η δεύτερη στήλη είναι ο χρόνος σε sec.
9. Αν σε κάθε ζεύγος (t_i , ϵ_i) από την 7) αντιστοιχήσετε το ζεύγος (t_i , σ_i) από την 8) με κατάλληλο χειρισμό (inter/extrapolation) τότε μπορούμε να υπολογίσουμε και την τιμή της τάσης σ συναρτήσει της παραμόρφωσης ϵ για τον ίδιο χρόνο, λαμβάνοντας βεβαίως υπόψη ότι η τάση $\sigma = P/A$ και παραμόρφωση $\epsilon = \delta / L$.

Με βάση την παραπάνω διαδικασία να κατασκευασθεί το παρακάτω διάγραμμα :

1. Να παρουσιαστούν τα πειραματικά αποτελέσματα στο ακόλουθο πίνακα:

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Διαστάσεις δοκιμίου, $b=d= \dots$ cm, $h= \dots$ cm, Βάρος $B= \dots$ Kg, $L_0= \dots$ mm				
Μέτρηση	Φορτίο P (kN)	Ένδειξη μηκυνσιομέτρου (mm)	Παραμόρφωση ϵ	Θλιπτική τάση σ

2. Να σχεδιαστεί το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων.
3. Να υπολογιστούν:
 - a. Το Μέτρο Ελαστικότητας, E , προσεγγίζοντας αρχικά το καμπύλο πρώτο τμήμα του διαγράμματος με ευθεία γραμμή (όπως περιγράφηκε ανωτέρω).
 - b. Το όριο αναλογίας, σ_A
 - c. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, σ_c .
 - d. Η φαινομενική πυκνότητα, ρ του σκυροδέματος.
2. Να γίνει σύγκριση των τιμών που έχουν υπολογιστεί (1a,1b,1c και 1d), με τιμές που δίνονται σε βάσεις δεδομένων ή στο διαδίκτυο και να γίνει σχετικός σχολιασμός για την ποιότητα του σκυροδέματος που ελέγχθηκε.
3. Να περιγραφεί η μορφή θραύσης του δοκιμίου.

Η διαδικασία του πειράματος, τα αποτελέσματα καθώς και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις συγκρίσεις που ζητούνται ανωτέρω, να παρουσιαστούν σε μορφή τεχνικής έκθεσης.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 3.

Δοκιμή Κάμψης

1. Σκοπός της άσκησης.
2. Εξοπλισμός για το πείραμα.
3. Διαδικασία εκτέλεσης του πειράματος.
4. Αποτελέσματα άσκησης.

1. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ.

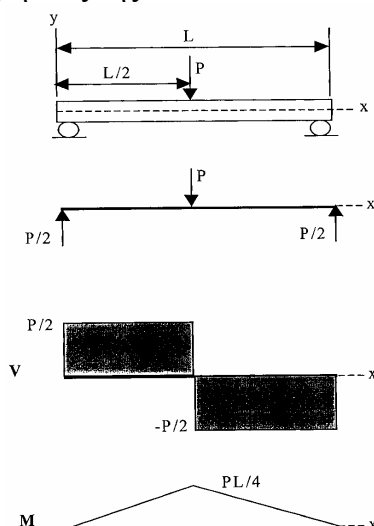
Ο σκοπός της άσκησης είναι να μελετηθεί η καμπτική φόρτιση πρισματικών δοκιμίων σε συνάρτηση με την δύναμη που προκαλεί την κάμψη, τις διαστάσεις της ράβδου και τέλος με την απόσταση των σημείων στήριξης της ράβδου. Από την μελέτη αυτή θα κατασκευασθεί το διάγραμμα που συνδέει το φορτίο με την μετατόπιση και θα εξαχθούν συμπεράσματα για την ποιότητα υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το δοκίμιο.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Στην δοκιμή αυτή μία δοκός από ξύλο ελέγχεται σε κάμψη μέχρι την θραύση της. Η μετατόπιση των σημείων, η καμπτική τάση και οι διαφορετικές μορφές θραύσης του δοκιμίου είναι οι βασικές παράμετροι που μελετώνται και εξετάζονται.

Οι δοκοί που φορτίζονται σε κάμψη είναι μία από τις πιο κοινές μορφές καταπόνησης στις κατασκευές αλλά και γενικότερα στην φύση. Η περίπτωση αυτή της καταπόνησης αν και είναι απλή και συνηθισμένη είναι περίπλοκη στην ανάλυση της ενώ εξ αιτίας αυτής της καταπόνησης αναπτύσσονται τάσεις με ποικίλες κατανομές που έχει σαν συνέπεια την αστοχία του υλικού με διαφορετικούς τρόπους.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται μία δοκός απλά εδραζόμενη στα δύο της άκρα και φορτιζόμενη στο μέσο του μήκους της L .



Σχήμα 1.

Στο ίδιο σχήμα φαίνεται το διάγραμμα ελεύθερου σώματος της δοκού και στην συνέχεια το διάγραμμα των εσωτερικών διατμητικών δυνάμεων V και των καμπτικών ροπών M .

Παραμόρφωση δοκού.

Η διαφορική εξίσωση της μετατόπισης στον άξονα y στην κάμψη με ελαστική φόρτιση της δοκού δίνεται από την εξίσωση:

$$EI(d^2 y / dx^2) = M(x) \quad (1)$$

όπου E το Μέτρο Ελαστικότητας της δοκού, I η ροπή αδράνειας της διατομής της δοκού και $M(x)$ η καμπτική ροπή στην θέση x της δοκού. Η ροπή αυτή δίνεται από την συνάρτηση:

$$M(x) = (P/2)x - P(x-L/2) \quad (2)$$

Οπότε η εξίσωση (1) γίνεται :

$$EI(d^2 y / dx^2) = (P/2)x - P(x - L/2) \quad (3)$$

Οι συνοριακές συνθήκες στήριξης για την δοκό του σχήματος είναι οι παρακάτω:

$$y=0, \text{ at } x=0 \text{ and } x=L$$

Ολοκληρώνοντας την διαφορική εξίσωση (1) δύο φορές καταλήγουμε στην:

$$EIy(x) = (P/2)x^3 - P/6(x - L/2)^3 + C_1x + C_2$$

Εφαρμόζοντας στην συνέχεια τις συνοριακές συνθήκες καταλήγουμε στην εξίσωση που μας δίνει την μετατόπιση y σε όλα τα σημεία που απέχουν απόσταση x από το άκρο της δοκού:

$$y(x) = (P/EI)[(x^3/12) - (1/6)(x - L/2)^3 - (1/16)L^2x]$$

Αρα και η μέγιστη μετατόπιση του μέσου της δοκού ($x=L/2$) δ_c θα δίνεται από την

$$\delta_c = y_{(x=L/2)} = -PL^3/48EI \quad (4)$$

Καμπτική (ορθή) τάση

Οι ορθές τάσεις λόγω κάμψης δίνονται από την εξίσωση:

$$\sigma = My/I \quad (5)$$

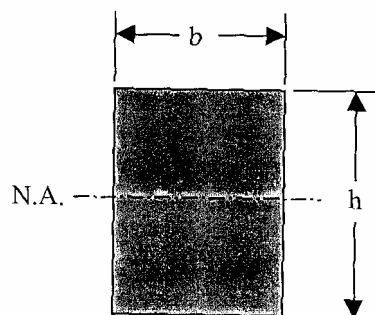
Όπου

M είναι η ροπή κάμψης,

Y είναι η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα (N.A. – Σχήμα 2) του σημείου που υπολογίζουμε την τάση σ

I είναι η ροπή αδράνειας της διατομής που στην περίπτωση της ορθογωνικής διατομής (Σχήμα 2) του δοκιμίου που θα χρησιμοποιηθεί στο πείραμα της κάμψης δίνεται από την εξίσωση:

$$I = bh^3/12$$



Σχήμα 2.

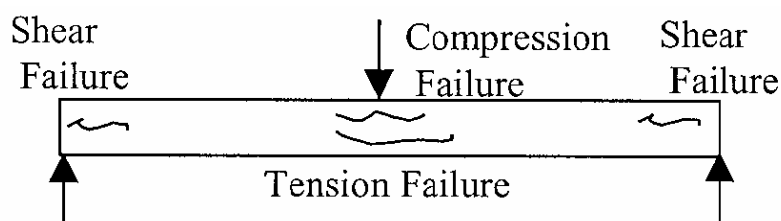
Η μέγιστη ορθή τάση λόγω κάμψης αναπτύσσεται στο πάνω ($y=h/2$) και στο κάτω άκρο της διατομής ($y=-h/2$) και σε απόσταση $x=L/2$ από το άκρο στήριξης της δοκού. Αντικαθιστώντας αυτές τις τιμές στην εξίσωση (5) καταλήγουμε στην μέγιστη τιμή της τάσης $\sigma_{\max}$ που δίνεται από την εξίσωση:

$$\sigma_{\max} = \pm[(PL/4)(h/2)] / (bh^3/12) \quad (6)$$

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Η μέγιστη τάση είναι εφελκυστική στο κάτω άκρο της δοκού και θλιπτική στο πάνω άκρο.

Μορφές θράυσης:

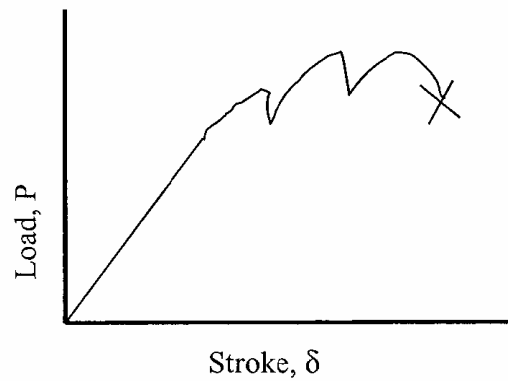
Τρεις τύποι θράυσης μπορούν να παρουσιασθούν σε μία δοκό από ξύλο όπως είναι η δοκός της συγκεκριμένης δοκιμής, όπως φαίνονται και στο Σχήμα 3. Κατ' αρχάς, μία εφελκυστική μορφή θράυσης ((Tension Failure) μπορεί να εμφανισθεί στο κάτω άκρο της δοκού όπου η καμπτική τάση έχει την μέγιστη θετική τιμή της. Μία δεύτερη μορφή θράυσης μπορεί να εμφανισθεί στο πάνω άκρο της δοκού που προέρχεται από θλιπτική τάση (Compression Failure) αφού στο άκρο αυτό εμφανίζεται και η μέγιστη αρνητική τιμή της καμπτικής τάσης. Η τρίτη μορφή θράυσης που μπορεί να εμφανισθεί είναι μία διατμητική θράυση (Shear Failure) που εμφανίζεται στον ουδέτερο άξονα της δοκού κοντά στα σημεία στήριξης όπου και η διατμητική τάση $\tau_{\max}$ παίρνει την μέγιστη τιμή της.



Σχήμα 3.

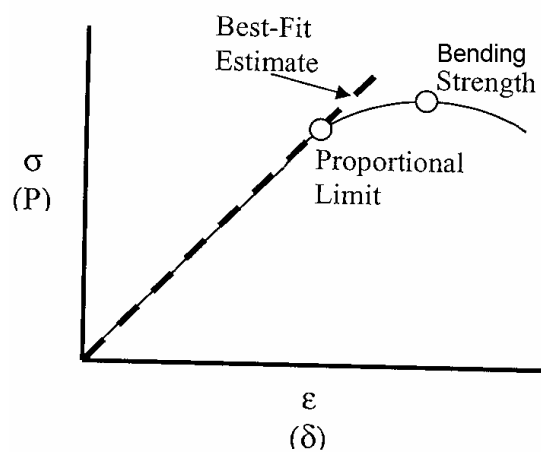
Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης

Μία τυπική καμπύλη μεταβολής του φορτίου (Load) P σε σχέση με την μετατόπιση (Stroke) δ του μεσαίου σημείου της δοκού δίνεται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4.

Από αυτό το διάγραμμα μπορεί να εξαχθεί το διάγραμμα σ - ϵ που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5 και στην συνέχεια το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων (σ - ϵ) που προέκυψε να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού του δοκιμίου.



Σχήμα 5.

Χαρακτηριστικές τιμές - ιδιότητες του υλικού του δοκιμίου που μπορούμε να εξάγουμε και μόνο με την χρήση του διαγράμματος όπως π.χ. είναι το όριο αναλογίας σ_a (Proportional Limit – Σχήμα 5) σε κάμψη που αντιστοιχεί στο σημείο εκείνο μέχρι το οποίο η καμπύλη του διαγράμματος παρουσιάζεται σαν ευθεία γραμμή και υπολογίζεται με την $\sigma_a = M_a y / I$ (όπου M_a είναι η ροπή κάμψης στο σημείο αναλογίας). Χρησιμοποιώντας την εξίσωση της μέγιστης καμπτικής τάσης (6) στο μέσο του μήκους του δοκιμίου είναι δυνατόν να υπολογισθεί στο όριο αναλογίας το Μέτρο Ελαστικότητας του υλικού του χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

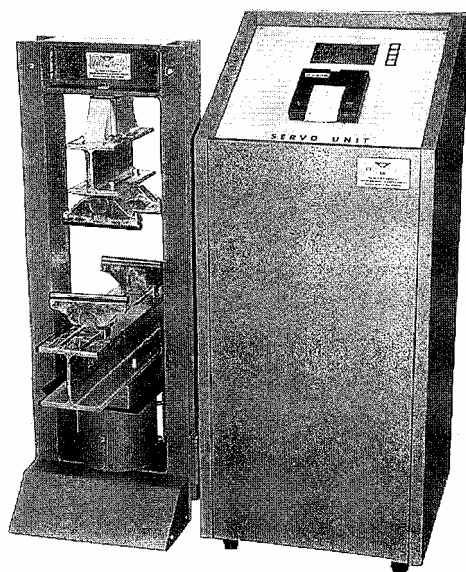
$$E = (P / \delta_c) L^3 / 48I$$

όπου δ_c είναι η μετατόπιση του σημείου στο μέσο της δοκού και σε απόσταση $y=L/2$. Το όριο αντοχής σ_u (Bending Strength) σε κάμψη αντιστοιχεί στο σημείο της μέγιστης τάσης που εμφανίζεται στο δοκίμιο μέχρι να θραυσθεί και υπολογίζεται από την $\sigma_u = M_u y / I$ (όπου M_u είναι η ροπή κάμψης στο σημείο με το μέγιστο φορτίο).

3. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΟΚΙΜΗ.

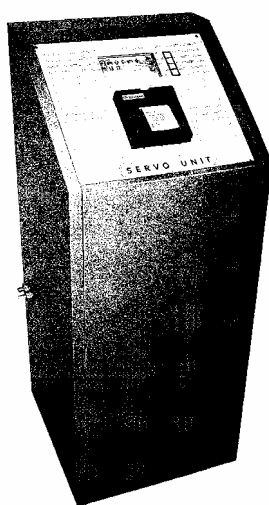
Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την δοκιμή κάμψης είναι:

1) Η Μηχανή κάμψης τριών ή τεσσάρων σημείων με δυνατότητα εφαρμογής μέγιστης καμπτικής ροπής 150 kNm της εταιρείας MATEST Srl, Italy (Φωτ. 1) που αποτελείται από δύο μέρη: α) το έμβολο όπου γίνεται η εφαρμογή της ροπής και η θραύση του δοκιμίου και β) από την κονσόλα ελέγχου της μηχανής.



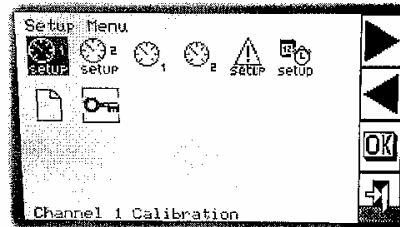
Φωτ. 1

Η κίνηση του εμβόλου της μηχανής γίνεται μέσω ηλεκτροκινητήρα που ελέγχεται από κατάλληλο σερβο-μηχανισμό. Ο χειρισμός της μηχανής γίνεται από παρακείμενη κονσόλα (Φωτ. 2).



Φωτ. 2

Όλες οι ενδείξεις της κονσόλας και ο χειρισμός της μηχανής γίνονται στην ειδική οθόνη επαφής (touch screen) της κονσόλας με το πάτημα κατάλληλων κουμπιών στα δεξιά της οθόνης (Φωτ. 3)



Φωτ. 3

Τα κουμπιά της οθόνης επαφής που χρησιμοποιούμε για τον έλεγχο της μηχανής κάμψης είναι:

- α) τα κουμπιά μετακίνησης στην οθόνη:  και 
- β) τα κουμπιά αλλαγής των δεδομένων της δοκιμής  και 
- γ) τα κουμπιά αποδοχής των δεδομένων 

2) Δοκίμια: Σαν δοκίμια για τον έλεγχο σε κάμψη χρησιμοποιούμε πρισματική δοκό από ξύλο πεύκου διαστάσεων 4 x 5 x 30 cm

3) Για την μέτρηση των διαστάσεων χρησιμοποιούμε μετροταινία.

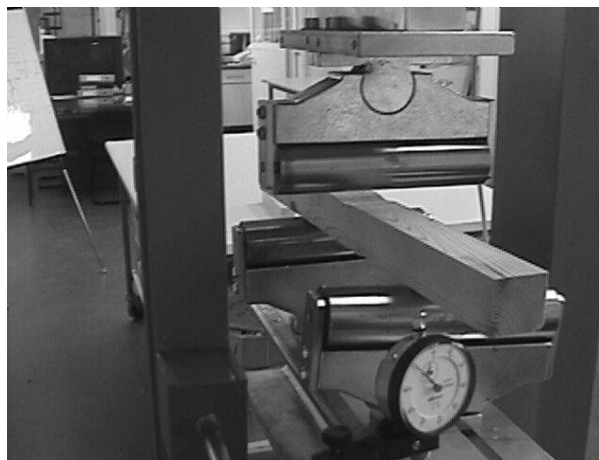
4) Για την μέτρηση των μετατόπισης των διάφορων σημείων του δοκιμίου χρησιμοποιούμε αναλογικό μικρόμετρο (dial gauge).

3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.

Μετρούμε κατ' αρχάς τις διαστάσεις του δοκιμίου ($a \times b$).

Μετρούμε τις αποστάσεις μεταξύ των υποστηριγμάτων για το δοκίμιο της μηχανής κάμψης (Μήκος L).

Τοποθετούμε το δοκίμιο στην διάταξη του πειράματος που φαίνεται στην Φωτ. 4 μεταξύ των δύο ακραίων υποστηριγμάτων της μηχανής κάμψης.



Φωτ. 4

ΠΡΟΣΟΧΗ: Καλύπτουμε το δοκίμιο με το κατάλληλο κάλυμμα που θα μας δοθεί στο Εργαστήριο ώστε να αποφύγουμε τυχόν εκτινάξεις τμημάτων του ξύλου όταν θραυσθεί.

Η αρχική οθόνη της κονσόλας πριν την έναρξη της δοκιμής πρέπει να είναι αυτή που φαίνεται στη Φωτ. 5.



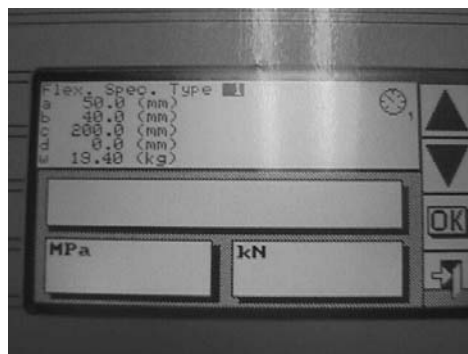
Φωτ. 5

Πιέζοντας το κουμπί  της οθόνης μπορούμε να μετακινηθούμε στα διάφορα υπομενού της οθόνης της κονσόλας στην μηχανής κάμψης.

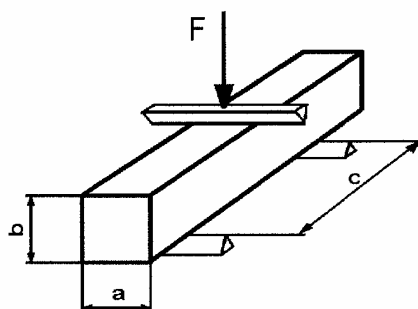
Πιέζουμε το κουμπί  μέχρι να φθάσει στο κουμπί  που είναι το κουμπί για την αυτόματη διαδικασία εφαρμογής της δοκιμής κάμψης και στη συνέχεια πιέζουμε το κουμπί OK.

ΠΡΟΣΟΧΗ: Αν σε οποιοδήποτε σημείο υπάρξει ανάγκη διακοπής της δοκιμής πρέπει να πατήσουμε το κουμπί  **OFF**

Θα εμφανισθεί πλέον η οθόνη της Φωτ. 6 και τότε πατώντας το κουμπί  ή το κουμπί  μπορούμε να μετακινηθούμε σε διάφορους τύπους δοκιμών (Types) που υπάρχουν στην μνήμη της μηχανής κάμψης και να επιλέξουμε το δοκίμιο που θέλουμε με τις διαστάσεις a, b, c, d (d = διάμετρος του δοκιμίου στην περίπτωση που πρόκειται για κυλινδρικό δοκίμιο) (σε mm μήκους) και το βάρος w (σε Kg) που έχουμε ήδη μετρήσει. Οι διαστάσεις a, b και c περιγράφονται στο Σχήμα 6. Στην συνέχεια θα πατήσουμε το κουμπί [OK] για επιβεβαίωση του δοκιμίου που επιλέξαμε, των διαστάσεων και του βάρους του.



Φωτ. 6



Σχήμα 6.

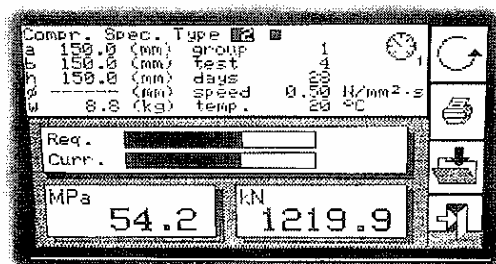
Η οθόνη που θα εμφανισθεί στην συνέχεια θα είναι όπως στην Φωτ. 7 όπου παρουσιάζονται επίσης οι διαστάσεις του δοκιμίου, το βάρος και άλλα δεδομένα όπως η ταχύτητα επιβολής φορτίου που θέλουμε να κινηθεί το έμβολο, η ηλικία του δοκιμίου και η θερμοκρασία του (αν το υλικό του δοκιμίου είναι από σκυρόδεμα). Πατάμε [OK] για επιβεβαίωση.



Φωτ. 7

Η μηχανή είναι τώρα έτοιμη για να ξεκινήσει την δοκιμή της κάμψης.

Πατάμε το κουμπί [OK] για να ξεκινήσει η δοκιμή. Η οθόνη θα παραμένει όπως στην Φωτ. 8. Η ένδειξη του εφαρμοζόμενου φορτίου στο μέσο του δοκιμίου φαίνεται στο κάτω δεξιά παράθυρο της οθόνης (όπου έχει την ένδειξη των μονάδων δύναμης kN). Μέχρι το έμβολο να ακουμπήσει το δοκίμιο στην ένδειξη του φορτίου πρέπει να φαίνεται φορτίο πολύ μικρό σε μέγεθος ή μηδέν.



Φωτ. 8

Το έμβολο της μηχανής θα κινηθεί προς τα πάνω μέχρι να φθάσει να ακουμπήσει το δοκίμιο

Μόλις ακουμπήσει το δοκίμιο θα αρχίσει να αυξάνεται η τιμή του φορτίου και να καταγράφεται η μεταβολή αυτή στην οθόνη. ΘΑ ΠΡΕΠΕΙ ΑΠΟ ΕΚΕΙΝΗ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΚΑΙ ΚΑΘΕ 10 secs ΝΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΦΟΙΤΗΤΕΣ ΟΙ ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ (P) ΣΤΗΝ ΟΘΟΝΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

Ταυτοχρόνως γίνεται και ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΝΔΕΙΞΕΩΝ ΤΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (δ_c) ΚΑΘΕ 10 secs ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΥ ΜΙΚΡΟΜΕΤΡΟΥ όπως φαίνεται στην Φωτ.9.



Φωτ. 9

ΓΙΝΕΤΑΙ ΣΥΜΠΛΗΡΩΣΗ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ Π.1

A/A	Χρόνος	P(kN)	$\delta_c(\text{mm})$
1.	0 secs		
2.	10 secs		
3.	20 secs		
4.	30 secs		
5.	40 secs		
6.	50 secs		

Μόλις φθάσει το μέγιστο φορτίο θραύσης του δοκιμίου τότε η μηχανή θα σταματήσει να εξασκεί το φορτίο και το έμβολο θα επιστρέψει στην αρχική του θέση, ενώ στην οθόνη θα καταγραφεί το μέγιστο φορτίο καθώς και το όριο αντοχής σ_u .

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΣΚΗΣΗΣ.

A) Να σχεδιάσετε, με την χρήση του EXCEL και των αποτελεσμάτων του πίνακα Π.1, το διάγραμμα μεταβολής του φορτίου P και την μετατόπισης του κέντρου δ_c .

B) Από το παραπάνω διάγραμμα να προσδιορίσετε για το συγκεκριμένο δοκίμιο:

Το όριο αναλογίας σε κάμψη και

Την όριο αντοχής σε κάμψη

Γ) Στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος να υπολογίσετε το Μέτρο Ελαστικότητας του υλικού του δοκιμίου.

Δ) Να σχεδιάσετε σε σκίτσο απλό τον τύπο θραύσης του δοκιμίου που παρατηρήσατε στην δοκιμή κάμψης.

Ε) Να συγκρίνεται τις τιμές που εξήχθησαν από την δοκιμή εργαστηριακά στα B) και Γ) ερωτήματα με τις τιμές που δίνονται για το συγκεκριμένο υλικό του δοκιμίου. Γιατί υπάρχουν οι όποιες διαφορές?