

**ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΔΟΚΟΥ-
ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ****Βασίλης Κάρολος**

Υποψήφιος Διδάκτωρ, Πολιτικός Μηχανικός
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
E-mail: carlosva@mail.ntua.gr

Ανδρέας Σπηλιόπουλος

Υποψήφιος Διδάκτωρ, Πολιτικός Μηχανικός
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
E-mail: spiliopa@central.ntua.gr

Ιωάννης Βάγιας

Καθηγητής Πολιτικών Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
E-mail: vastahl@central.ntua.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πρόβλεψη της δημιουργίας μιας ρωγμής καθώς και η θέση που αυτή θα εμφανιστεί σε μεταλλικές συγκολλητές κατασκευές υποκειμένες σε σεισμικές καταπονήσεις είναι μεγάλης σημασίας για τον σχεδιασμό. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η αναλυτική διερεύνηση της συμπεριφοράς συγκολλητών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος σε κατασκευές υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις με επίκεντρο την αντοχή τους έναντι ψαθυρής θραύσης. Ως μέσο για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του υλικού χρησιμοποιείται το κριτήριο δημιουργίας ρωγμής ως συνάρτηση της πλαστικής παραμόρφωσης και της τριαξονικότητας. Μέσω μιας διαδικασίας που περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση πειραματικών και αναλυτικών μετρήσεων με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων προσδιορίζονται οι λεγόμενες 'καμπύλες βλάβης' που στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του σημείου πρώτης εμφάνισης ρωγμής σε συγκολλητές συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά το σεισμό των Northridge, Καλιφόρνια, 1994 και Kobe, Ιαπωνία, 1995 παρατηρήθηκαν πρόωρες ρηγματώσεις στις συγκολλητές συνδέσεις δοκού

υποστυλώματος. Έρευνες έδειξαν ότι οι ψαθυρές αστοχίες οφείλονταν σε ένα συνδυασμό υψηλών απαιτήσεων σε στερότητα από την πλευρά των συνδέσεων και στη χρήση υλικών με χαμηλές τιμές στερότητας. Μέχρι τότε θεωρείτο ότι οι πλαισιωτές μεταλλικές κατασκευές μπορούσαν να συμπεριφέρονται πλαστικά σε μεγάλες στροφές και μετακινήσεις απορροφώντας μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Οι χαμηλές τιμές στερότητας τόσο στην συγκόλληση όσο και στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη μπορούν να οδηγήσουν σε ψαθυρή μορφή αστοχία σε πολλή μικρότερες τιμές ολκιμότητας.

Αρχικά η θραύση ξεκινά με τη δημιουργία ρωγμής με όλκιμο τρόπο αποκόλλησης του υλικού, μέχρι να φτάσει σε ένα κρίσιμο μήκος ρωγμής στο οποίο η θραύση μεταβάλλεται από όλκιμη σε ψαθυρή. Η συνήθης διαδικασία της όλκιμης αστοχίας περιλαμβάνει τη δημιουργία κενών γύρω από εγκλείσματα στο σώμα του υλικού τα οποία αυξάνονται και συνενώνονται μέχρι την τελική συγχώνευση.

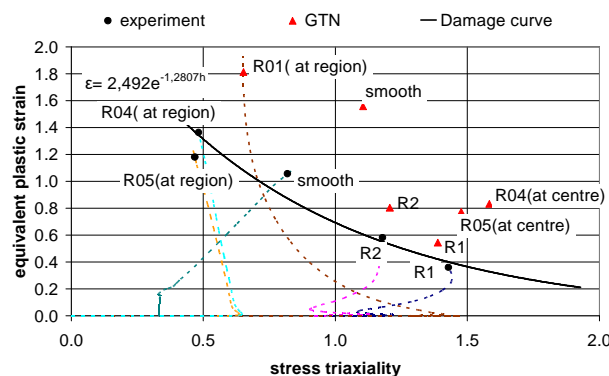
Η παρούσα εργασία εστιάζεται στην συμπεριφορά συγκολλητών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος σε μεταλλικά πλαίσια. Γίνεται σύνδεση μεταξύ της συμπεριφοράς των συνδέσεων σε ανακυκλιζόμενες φορτίσεις και ενός μοντέλου που περιγράφει τη διαδικασία δημιουργίας ρωγμής στον εκάστοτε χρησιμοποιούμενο χάλυβα. Με βάση το μοντέλο αυτό γίνεται πρόβλεψη του χρονικού σημείου όπου ξεκινά η δημιουργία ρωγμών καθώς και η θέση αυτών με σκοπό τον προσδιορισμό της στιγμής αστοχίας της σύνδεσης. Η ανάλυση γίνεται με τη χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων και η βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων γίνεται με σειρά πειραμάτων σε ανάλογες συγκολλητές συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος που πραγματοποιήθηκαν στο Πολυτεχνείο του Μιλάνου [1].

3. ΑΡΧΗ ΕΝΕΡΓΟΥ ΒΛΑΒΗΣ

Ο προσδιορισμός του τρόπου επίδρασης της τριαξονικότητας και της πλαστικής παραμόρφωσης στο τρόπο όλκιμης αστοχίας ενός υλικού έχει απασχολήσει πλήθος ερευνητών όπως αναφέρθηκε και προηγουμένα. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας η αρχή της ενεργού βλάβης που αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο της Osaka [2] χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη αστοχίας σε κατασκευές υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η αρχή της ενεργού βλάβης βασίζεται στις καμπύλες βλάβης, οι οποίες αποτελούν εργαλείο για την πρόβλεψη τοπικής αστοχίας σε κατασκευές. Οι καμπύλες βλάβης προσδιορίζουν την ποσοτική σχέση μεταξύ της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης και της τριαξονικότητας για το υπό εξέταση κάθε φορά υλικό.

Οι καμπύλες βλάβης προσδιορίζονται από εφελκυστικές δοκιμές σε λεία και με εγκοπή κυλινδρικά δοκίμια υπό μονοτονική φόρτιση. Οι δοκιμές διακόπτονται τη στιγμή δημιουργίας της ρωγμής και στη συνέχεια με τη βοήθεια μεταλλογραφικής ανάλυσης με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο προσδιορίζεται η απόσταση μεταξύ του σημείου της ρωγμής και του κέντρου του δοκιμίου. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται έχουν διαφορετική κάθε φορά διάταξη (λεία ή με εγκοπή), ανάλογα με την οποία εμφανίζεται η ρωγμή είτε στο μέσο είτε στα άκρα του δοκιμίου αντίστοιχα. Συγκεκριμένα σε λεία και σε δοκίμια με μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας της εγκοπής (αμβλεία εγκοπή) η ρωγμή παρατηρείται στο κέντρο του δοκιμίου, ενώ σε περιπτώσεις με μικρή ακτίνα καμπυλότητας της εγκοπής (οξεία εγκοπή) η ρωγμή εμφανίζεται στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού κατά την οποία η πλαστική παραμόρφωση και η τριαξονικότητα λαμβάνονται ως οι συνιστώσες που καθορίζουν την δημιουργία όλκιμης ρωγμής. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε ανάλυση με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία το μέγεθος των οποίων στην κρίσιμη περιοχή του μέσου ήταν $0,2 \times 0,2 \times 0,2$ mm που αντιστοιχεί στο κρίσιμο μήκος του υλικού το οποίο βασίζεται στην κοκκομετρική του ανάλυση. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα ABAQUS Ver. 6.5. Ο νόμος του υλικού ακολουθεί το κριτήριο von Mises με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα τάσεων-παραμορφώσεων. Για όλα τα δοκίμια η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση $\bar{\epsilon}_p$ στο σημείο εκκίνησης της ρωγμής συσχετίστηκε με την τριαξονικότητα $\sigma_m/\bar{\sigma}$ (όπου σ_m είναι η μέση τάση και $\bar{\sigma}$ είναι η τάση Misses). Όπως φαίνεται στο Σχ. 1 η κρίσιμη τοπική ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση που απαιτείται για να προκαλέσει τη δημιουργία ρωγμής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τριαξονικότητα, γεγονός που επιτρέπει τη δημιουργία της καμπύλης βλάβης. Όταν η τριαξονικότητα αυξάνεται, η κρίσιμη πλαστική παραμόρφωση μειώνεται εκθετικά. Στο σχήμα με μαύρες κουκίδες συμβολίζονται τα σημεία όπου εμφανίστηκε η ρωγή στα πειράματα και επίσης φαίνεται και ο νόμος που διέπει τη συγκεκριμένη καμπύλη ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης-τριαξονικότητας.



Σχ. 1: Κριτήριο για όλκιμη δημιουργία ρωγμής

Σύμφωνα με την αρχή της ενεργού βλάβης, προκειμένου να εκτιμηθεί η βλάβη στο υλικό, θα πρέπει να εισαχθεί η ποσοτική εξέλιξη των εσωτερικών τάσεων σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Προκειμένου να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα Bauschinger, που συναντώνται σε ανακυκλιζόμενες φορτίσεις, ένας μη γραμμικός ιστροπικός/κινηματικός νόμος κράτνσης του υλικού εισήχθη στην ανάλυση. Ο ιστροπικός όρος του νόμου σκλήρυνσης δίνεται από την Εξ. (1).

$$\sigma_o = \sigma|_0 + Q_\infty (1 - e^{-b\epsilon_p}) \quad (1)$$

Όπου το εύρος της εκάστοτε ελαστικής ζώνης προκύπτει ως συνάρτηση του αρχικού ελαστικού εύρους $\sigma|_0$, της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης ϵ_p και δύο παραμέτρων Q_∞ και b . Ο κινηματικός όρος κράτνσης δίνεται από την Εξ. (2).

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma^0} (\sigma - \alpha) \dot{\epsilon}^{pl} - \gamma \alpha \dot{\epsilon}^{pl}, \quad (2)$$

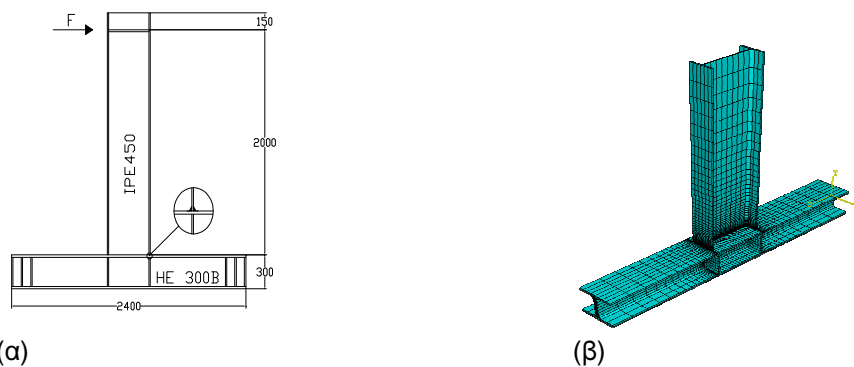
Όπου το α δηλώνει την τάση και τα C και γ είναι παράμετροι του υλικού. Οι τελείες πάνω στους δείκτες καθορίζουν ότι αυτά είναι διαφορικές ποσότητες. Ο παραπάνω είναι ο

νόμος σκλήρυνσης του Ziegler, στον οποίο έχει προστεθεί ο όρος $\gamma \alpha \bar{\epsilon}^{pl}$ για να εισαγάγει την μη γραμμικότητα. Οι παράμετροι για τα μοντέλα αυτά βαθμονομούνται με βάση τιμές από ανακυκλιζόμενες φορτίσεις σε λεία κυλινδρικά δοκίμια.

Η αρχή της ενεργού βλάβης χρησίμευσε ως η βάση για την δημιουργία ενός κριτηρίου για τον προσδιορισμό της έναρξης μιας ρωγμής σε χαλύβδινες κατασκευές υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις, με βάση τα αποτελέσματα από κυλινδρικά δοκίμια που περιγράφηκαν προηγουμένως. Το κριτήριο αυτό περιλαμβάνει τις ακόλουθες ιδέες: (1) η εφαρμοζόμενη πλαστική παραμόρφωση, όπου η μέγιστη τιμή της τάσης α υπερβαίνει την αντίστοιχη τιμή κατά τον προηγούμενο κύκλο φόρτισης, δεν επηρεάζει την βλάβη του υλικού. Μόνο η ενεργός πλαστική παραμόρφωση $(\bar{\epsilon}_{pl})_{eff}$ σε κάθε κύκλο συνεισφέρει στην βλάβη και (2) η δημιουργία όλκιμης ρωγμής λαμβάνει χώρα όταν το άθροισμα των $(\bar{\epsilon}_{pl})_{eff}$ ως συνάρτηση της τριαξονικότητας κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης φτάσει την κρίσιμη τιμή που έχει καθοριστεί από τις μονοτονικές φορτίσεις και τις αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία στον υπό εξέταση κάθε φορά χάλυβα.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Οι σύνδεσμοι αποτελούνται από ένα υποστύλωμα διατομής HE 300B ενωμένο με συγκόλληση με μια δοκό διατομής IPE450 όπως φαίνεται και στο Σχ. 2. Το υποστύλωμα βρίσκεται σε οριζόντια θέση, ενώ η δοκός συγκολλάτε στην κάθετη διεύθυνση και στο άκρο της δέχεται τις επιβαλλόμενες μετακινήσεις. Ο κορμός του υποστύλωματος είναι πιο παχύς στη θέση συγκόλλησης με τη διατομή της δοκού προκειμένου να αποφευχθεί η πιθανότητα πλαστικών παραμορφώσεων σε αυτόν. Τα πειράματα αυτά εκτελέστηκαν στο Πολυτεχνείο του Μιλάνου [3]. Ο υπολογισμός του ορίου και της μετακίνησης διαρροής (F_y και u_y αντίστοιχα) έγινε σύμφωνα με την ECCS (1986). Το όριο διαρροής για τις δοκούς που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ήταν 385 MPa για τα πειράματα με 30mm μετατόπιση και 365 MPa για αυτά με 125 mm μετατόπιση.



Σχ. 2: Διάταξη των συνδέσμων (α) κατά το πείραμα και (β) κατά την ανάλυση

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Για την ανάλυση των συνδέσεων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ABAQUS ver. 6.5. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία ενώ ελήφθησαν υπόψη φαινόμενα δευτέρας τάξεως προκειμένου να προσομοιωθούν φαινόμενα λυγισμού. Σε κάθε μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν 4738 στοιχεία, τα οποία είναι πυκνότερα

στην περιοχή της συγκόλλησης όπου αναμένεται η αστοχία. Οι μετακινήσεις επιβλήθηκαν στο άνω άκρο της δοκού ενώ οι μετακινήσεις στα δύο άκρα του υποστυλώματος δεσμεύτηκαν.

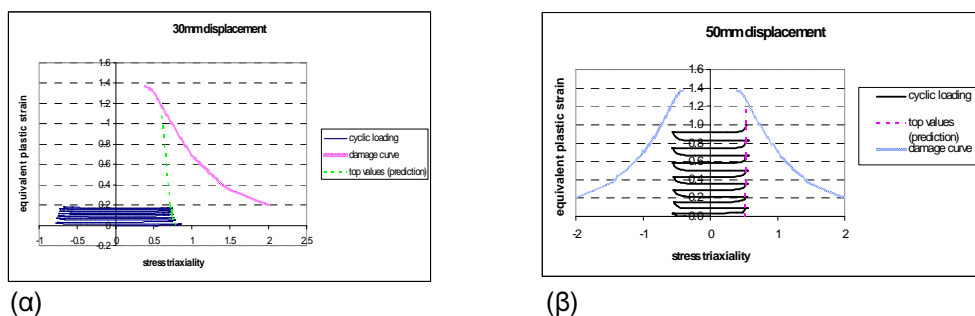
Για την βέλτιστη προσομοίωση της περιοχής της συγκόλλησης χρησιμοποιήθηκε η τεχνική των υπομοντέλων. Μετά την ανάλυση του καθολικού μοντέλου κατασκευαζόταν ένα νέο το οποίο περιλάμβανε μόνο την περιοχή της συγκόλλησης. Η λεπτομερής ανάλυση της περιοχής περιμετρικά της συγκόλλησης επέβαλλε την ανάλυση ενός μοντέλου ολόκληρης της σύνδεσης, στο οποίο καταγράφονταν οι μετατοπίσεις στην περιοχή της συγκόλλησης. Στη συνέχεια οι μετατοπίσεις αυτές χρησιμοποιούνταν ως συνοριακές συνθήκες για την απόκριση του υπομοντέλου. Οι μετακινήσεις δηλαδή των κόμβων στα άκρα του υπομοντέλου καθορίζονται από τις μετακινήσεις των αντίστοιχων κόμβων στο μοντέλο ολόκληρης της σύνδεσης. Η χρήση των υπομοντέλων επιτρέπει τη χρήση πιο εκτεταμένης διακριτοποίησης στην κρίσιμη περιοχή, το οποίο είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί στο σύνολο του μοντέλου καθώς θα οδηγούσε σε πολύ μεγάλους χρόνους ανάλυσης.

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε δοκίμια όπου εφαρμόστηκαν μετατοπίσεις με σταθερό εύρος μεγέθους 30mm, 50mm και 125mm. Στην πρώτη ομάδα πειραμάτων (30mm μετατόπιση) ο τοπικός λυγισμός απουσιάζει και μόνο το τμήμα περιμετρικά των συγκολλήσεων έχει διαρρέυσει ενώ η υπόλοιπη σύνδεση χαρακτηρίζεται από ελαστικές τάσεις. Σύμφωνα με το πείραμα η αστοχία επήλθε μετά από 52 εναλλασσόμενους κύκλους φόρτισης. Κατά την αναλυτική διαδικασία πραγματοποιήθηκαν 7 κύκλοι φόρτισης καθώς τα αποτελέσματα ήταν σε συμφωνία και οι βρόγχοι του διαγράμματος δύναμης-παραμόρφωσης σταθεροί, ενώ η περαιτέρω αύξηση του αριθμού των κύκλων φόρτισης είχε σαν αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση του υπολογιστικού κόστους.

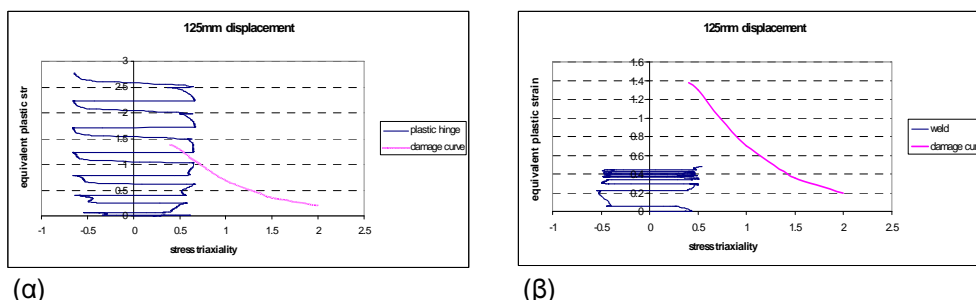
Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στην περίπτωση των συνδέσεων στις οποίες το ιστορικό φόρτισης αποτελείται από σταθερούς κύκλους μεγαλύτερου εύρους (50 mm μετατόπιση). Στην περίπτωση αυτή και πάλι δεν εμφανίζεται τοπικός λυγισμός, αλλά εξαιτίας των μεγαλύτερων μετακινήσεων η αστοχία επέρχεται σε μικρότερο αριθμό κύκλων. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα το πρώτο δοκίμιο της σύνδεσης αστόχησε ύστερα από 8 κύκλους φόρτισης ενώ το δεύτερο ύστερα από 10 κύκλους.

Στο Σχ. 3 φαίνονται τα διαγράμματα τριαξονικότητας-ενεργού ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για την περιοχή της συγκόλλησης για τις δύο περιπτώσεις. Για τα διαγράμματα αυτά επιλέχθηκε η θέση με το χειρότερο συνδυασμό αποτελεσμάτων, η οποία στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι στο άνω άκρο του πέλματος της δοκού. Στα σχήματα σχεδιάζεται και η καμπύλη βλάβης που έχει προκύψει από μονοτονικές φορτίσεις σε κυλινδρικά δοκίμια. Σύμφωνα με την ανάλυση μετά την πάροδο των πρώτων 5 κύκλων φόρτισης ο τρόπος μεταβολής της τριαξονικότητας σε σχέση με την ενεργό ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση εναλλάσσεται με βάση το ίδιο πρότυπο. Αυτή η παρατήρηση επιτρέπει την πρόβλεψη του σημείου εμφάνισης της πρώτης ρωγμής ενώνοντας τα μέγιστα του διαγράμματος τριαξονικότητας-παραμόρφωσης και βρίσκοντας την τομή με την καμπύλη βλάβης όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.



Σχ. 3: Διαδικασία πρόβλεψης της αστοχίας σε (α) 30mm μετατόπιση και (β) 50mm μετατόπιση

Τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται στην περίπτωση των δοκιμών με μεγαλύτερο εύρος μετακινήσεων (125mm). Η συμπεριφορά και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των συνδέσεων αυτών επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον τοπικό λυγισμό της δοκού και τα φαινόμενα σκλήρυνσης του υλικού. Στα 120-150mm από το πέλμα του υποστυλώματος σχηματίστηκε πλαστικός σύνδεσμος ο οποίος συνοδεύτηκε από τοπικό λυγισμό. Ο τρόπος αστοχίας των συνδέσεων που υποβάλλονται σε μεγάλες μετατοπίσεις δεν χαρακτηρίζεται πλέον ως ψαθυρός αλλά ως όλκιμος. Η ρωγή εμφανίζεται στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης και συγκεκριμένα μεταξύ του κορμού και του πέλματος της δοκού και είναι υπεύθυνη για την τελική αστοχία της σύνδεσης. Στο Σχ. 4 απεικονίζονται τα διαγράμματα της ενεργού ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης σε σχέση με την τριαξονικότητα στην θέση του τοπικού λυγισμού και στη θέση της συγκόλλησης. Οι ανηγμένες παραμορφώσεις στο σημείο της συγκόλλησης σταθεροποιούνται μετά τον σχηματισμό της πλαστικής άρθρωσης, ενώ αντίθετα στην περιοχή του λυγισμού παρατηρείται μεγάλη αύξηση.



Σχ. 4: Διάγραμμα ενεργού ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στην περιοχή (α) της πλαστικής άρθρωσης και (β) στην περιοχή της συγκόλλησης

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο Πιν. 1 παρουσιάζει συνοπτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν με βάση τα πειράματα και την αναλυτική διαδικασία. Ο πίνακας δείχνει τον αριθμό των κύκλων μέχρι την αστοχία της σύνδεσης σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων και των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και τη στροφή που εφαρμόστηκε σε κάθε περίπτωση φόρτισης στη σύνδεση. Είναι εμφανές ότι στις περιπτώσεις που απουσιάζει ο τοπικός λυγισμός και η αστοχία παρουσιάζεται στη συγκόλληση υπάρχει πολύ καλή σύγκλιση των αποτελεσμάτων μεταξύ πειραμάτων και αναλυτικού προσδιορισμού καθώς η εμφάνιση της ρωγής και η αστοχία επέρχονται σχεδόν ταυτόχρονα. Στην περίπτωση όμως που σχηματίζεται πλαστική άρθρωση τα αναλυτικά αποτελέσματα υποεκτιμούν την αντοχή της σύνδεσης εξαιτίας της ικανότητας αυτής να αναλαμβάνει επιπλέον φορτίο παρά τη δημιουργία ρωγής στο σημείο του λυγισμού.

Δοκίμιο	Εύρος μετακίνησης		Αριθμός κύκλων αστοχίας (Πειρ)	Αριθμός κύκλων αστοχίας (Αναλ)	Στροφή (%)	Τύπος αστοχίας
	Δυ(mm)	Δθ(mrad)	N(tot)	N(tot)		
C-30	30	15	52	53	1.5%	Ψαθυρός
C-50	50	25	8-10	9	2.5%	Ψαθυρός
C-125	125	62.5	7-12	5	6.25%	Όλκιμος

Πιν.1: Πειραματικά-αναλυτικά αποτελέσματα αστοχίας της σύνδεσης

Η ανάλυση έδειξε ότι η απόκριση των συνδέσεων εξαρτάται από την επιβαλλόμενη παραμόρφωση. Ο τοπικός λυγισμός απουσίαζε όταν οι επιβαλλόμενες μετακινήσεις ήταν μικρές και γινόταν εμφανής καθώς το μέγεθός τους αυξανόταν. Ο τοπικός λυγισμός προστατεύει τις συγκολλήσεις από ψαθυρή αστοχία και μειώνει τις απώλειες ενέργειας. Η αστοχία χαρακτηρίζεται ως όλκιμη και η πλαστική άρθρωση συμπεριφέρεται ως 'αποσβεστήρας' μειώνοντας τις παραμορφώσεις στην συγκόλληση. Αντίθετα, στις μικρές μετατοπίσεις, όπου δεν παρουσιάζεται λυγισμός της δοκού, η συγκόλληση υφίσταται μεγάλες παραμορφώσεις οι οποίες τελικά οδηγούν στην ψαθυρή αστοχία.

Η αρχή της ενεργού βλάβης μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία ώστε να προβλέψει τη συμπεριφορά των συγκολλητών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος. Υπήρχε ικανοποιητική σύγκλιση των πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων στις περιπτώσεις που δεν καταγράφηκε τοπικός λυγισμός και στις οποίες ο τύπος της αστοχίας χαρακτηρίζεται ως ψαθυρός. Όταν κύκλοι φόρτισης μεγαλύτερων μετατοπίσεων, οι οποίοι προκαλούν λυγισμό της δοκού, εφαρμόζονται στη σύνδεση, η αναλυτική διαδικασία προβλέπει πρόωμη αστοχία της σύνδεσης, γεγονός που οφείλεται στο ότι η σύνδεση μπορεί να υποστεί σειρά κύκλων φόρτισης ακόμα και με την ύπαρξη ρωγμών στο υλικό της.

Η συμπεριφορά της σύνδεσης μπορεί να μεταβληθεί από ψαθυρή σε όλκιμη αν ένας κύκλος αρκετά 'μεγάλος' είναι παρόν στο ιστορικό φόρτισης. Ένας κύκλος φόρτισης μεγάλου εύρους ο οποίος προκαλεί τοπικό λυγισμό στη δοκό, ανακουφίζει τη συγκόλληση από μεγάλες παραμορφώσεις.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] CASTIGLIONI C. A. (2005). "Effects of the loading history on the local buckling behaviour and failure mode of welded beam-to-column joints in moment-resisting steel frames" *Journal of Eng. Mech. Vol.131*
- [2] OHATA M., TOYODA M., (2003). "Damage concept for evaluating ductile cracking of steel structure subjected to large-scale cyclic straining" *Science and techn. Of adv. Materials, 5(241-249)*
- [3] CASTIGLIONI C. A., BRESCIANINI J. C., and PANZERI N. (2003). "Variable amplitude, low-cycle fatigue testing of welded steel beam-to-column joints." *Costruzioni Metalliche, 55(2), 35-51*
- [4] CHI W-M, KANVINDE A.M., ASCE A.M., DEIERLEIN G.G., F. ASCE (2006), "Prediction of Ductile Fracture in Steel Connections Using SMCS Criterion", *Journal of Structural Engineering, Vol.132, No.2, pp.171-181*

**PREDICTION OF FAILURE OF STEEL WELDED
BEAM-TO-COLUMN JOINTS UNDER CYCLIC LOADING****Vasilis Karlos**

Phd Student, Civil Engineer
National Technical University of Athens
Athens, Greece
E-mail: carlosva@mail.ntua.gr

Andreas Spiliopoulos

Phd Student, Civil Engineer
National Technical University of Athens
Athens, Greece
E-mail: spiliopa@central.ntua.gr

Ioannis Vayas

Professor, Civil Engineering Dpt.
National Technical University of Athens
Athens, Greece
E-mail: vastahl@central.ntua.gr

1. SUMMARY

Predicting the moment and the location of a crack's formation at steel structures undergoing cyclic loading, is of high importance for the design. Stress triaxiality and equivalent plastic strain are used as means to define material's behavior and crack formation. Tension tests, with the use of electronic microscope, at round bar specimens of different geometries (smooth, notched, etc.) lead to the exact location where a crack first appears in each specimen. Re-analysis of the experiments by the use of finite elements enables the determination of the stress triaxiality and the equivalent plastic strain at the point where the crack first appeared. This procedure leads to the evaluation of design damage curves that are used to define the time and the place where a crack forms at the beam-to-column connection. In the present study steel welded beam-to-column joints under cyclic loading are studied. With the use of damage curves the numbers of cycles until formation of the first crack were determined. The analytical results were compared to corresponding experimental ones for welded beam-to-column joints performed at the University of Milan.