## ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΥΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ

## Βασίλης Κάρλος

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 σεισμική απόκριση μιας κατασκευής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ολκιμότητά της, δηλαδή την ικανότητα της να αντέχει μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις και να απορροφά ενέργεια χωρίς την εμφάνιση ψαθυρών μηχανισμών αστοχίας. Στην περίπτωση των μεταλλικών κατασκευών η ολκιμότητα εξαρτάται από την αντοχή σε κόπωση και τον λυγισμό ο οποίος μπορεί να οδηγήσει σε πρώιμη αστοχία της κατασκευής ή του μέλους.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην συμπεριφορά συγκολλητών συνδέσεων δοκούυποστυλώματος σε μεταλλικά πλαίσια ροπής. Η συμπεριφορά της σύνδεσης υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις συνδέεται με ένα μοντέλο υλικού το οποίο προβλέπει την απαρχή ρηγμάτωσης στον υπό μελέτη χάλυβα. Η ανάλυση πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων το οποίο βαθμονομείτε με χρήση πανομοιότυπων πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο πανεπιστήμιο του Άαχεν στη Γερμανία. Τέλος προτείνονται καμπύλες S-N, όμοιες με αυτές που προτείνονται στον EC3 για την αντοχή σε κόπωση, οι οποίες μας επιτρέπουν την πρόβλεψη απαρχής της ρηγμάτωσης στην υπό εξέταση σύνδεση.

# 2. ΑΡΧΗ ΕΝΕΡΓΟΥ ΒΛΑΒΗΣ

# 2.1 Μηχανική της βλάβης

Ο δομικός χάλυβας που χρησιμοποιείται στις κατασκευές παρουσιάζει όλκιμη συμπεριφορά θραύσης υπό σημαντική πλαστικοποίηση. Σε αντίθεση με την θραυστομηχανική η μηχανική της βλάβης επιτρέπει τον υπολογισμό απαρχής μιας ρωγμής χωρίς την παραδοχή εκ των προτέρων της ύπαρξης ατελειών στο σώμα του υλικού.

Ο τρόπος με τον οποίο η τριαξονικότητα και οι πλαστικές παραμορφώσεις επηρεάζουν τον όλκιμο μηχανισμό θραύσης ενός υλικού από μέταλλο έχει ερευνηθεί από πλήθος ερευνητών [1],[2]. Στην παρούσα μελέτη θα χρησιμοποιηθεί η αρχή της ενεργού βλάβης η οποία αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο της Οσάκα στην Ιαπωνία [3] προκειμένου να προβλεφθεί η αστοχία σε όρους ρηγμάτωσης σε μεταλλικές συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις.

# 2.2 Καμπύλες βλάβης

Η χρήση των καμπυλών βλάβης [4] είναι απαραίτητη προϋπόθεση προκειμένου να εφαρμοστεί η αρχή της ενεργού βλάβης. Οι καμπύλες βλάβης απεικονίζουν μια ποσοτική σχέση μεταξύ των τοπικών απαιτήσεων παραμόρφωσεων σε όρους τοπικών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων ε<sub>pl,eq</sub> και της τοπικής τάσης σε όρους τριαξονικότητας h. Οι καμπύλες βλάβης εξαρτώνται αποκλειστικά από την ποιότητα του χάλυβα, τη θερμοκρασία και την ταχύτητα φόρτισης.

Η διαδικασία υπολογισμού των καμπυλών βλάβης περιλαμβάνει πειράματα σε λεία και με εγκοπή εφελκυστικά δοκίμια τα οποία φορτίζονται μονοτονικά μέχρι τη στιγμή δημιουργίας της πρώτης ρωγμής. Στα λεία δοκίμια η ρηγμάτωση εμφανίζεται αρχικά στην επιφάνειά τους, ενώ στα δοκίμια με εγκοπή ακτίνας R=1mm και 2mm η ρηγμάτωση λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό του δοκιμίου λόγω της αυξημένης τριαξονικότητας. Η φόρτιση σταματούσε πριν λάβει χώρα θραύση του δοκιμίου. Στη συνέχεια τα δοκίμια κόβονταν στο μέσο τους παράλληλα προς την κατεύθυνση της φόρτισης και με τη βοήθεια ηλεκτρονικού μικροσκοπίου γινόταν εξακρίβωση του ακριβούς σημείου δημιουργίας της ρωγμής. Στο  $\Sigma\chi$ . I φαίνεται η εικόνα της απαρχής ρηγμάτωσης στο κέντρο ενός από τα δοκίμια όπως απεικονίζεται στο μικροσκόπιο.

Οι εφελκυστικές δοκιμές προσδιόρισαν τα διαγράμματα πραγματικών τάσεωνπραγματικών παραμορφώσεων. Οι δοκιμές αναπαρήχθησαν με τη βοήθεια δισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων μεγέθους  $0.03 \times 0.03mm$  στην κρίσιμη διατομή με τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Σε όλα τα δοκίμια καταγράφηκε η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση  $\bar{\varepsilon}_p$  στο σημείο δημιουργίας της ρωγμής και συσχετίστηκε με την αντίστοιχη τριαξονικότητα  $\sigma_m/\sigma_{eq}$  ( $\sigma_m$  είναι η μέση τάση and  $\sigma_{eq}$  είναι η ισοδύναμη τάση von Mises). Στην παρούσα μελέτη το κρίσιμο μήκος στο οποίο έπρεπε να ικανοποιείται το κριτήριο όλκιμης δημιουργίας ρωγμής είναι 0.1mm το οποίο αποτελεί μια μέση τιμή της απόστασης των εγκλεισμάτων στο σώμα του χάλυβα. Στο Σχ. 2 φαίνεται η καμπύλη βλάβης για το χάλυβα (S355J2) της εργασίας, η οποία προέκυψε σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε. Όταν ο συνδυασμός των τιμών παραμόρφωσης και τριαξονικότητας είναι κάτω από την καμπύλη βλάβης, το υλικό θεωρείται χωρίς βλάβη, ενώ όταν ο συνδυασμός τους την ξεπεράσει, τότε το υλικό έχει υποστεί ρηγμάτωση.



Σχ. 1. Ρηγμάτωση στο κέντρο του δοκιμίου

Σχ. 2.Καμπύλη βλάβης

#### 2.2 Αρχή ενεργού βλάβης

Η αρχή της ενεργού βλάβης κάνει εφικτή τη χρήση των καμπυλών βλάβης για φορτία τα οποία μεταβάλλονται με το χρόνο, όπως είναι οι σεισμικές φορτίσεις. Οι ανακυκλιζόμενες συνθήκες φόρτισης επιβάλουν να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο Bauschinger με τη χρήση ενός μη γραμμικού ισοτροπικού/κινηματικού μοντέλου σκλήρυνσης κατά την ανάλυση. Ο ισοτροπικός όρος του μοντέλου σκλήρυνσης περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση.

$$\sigma_{\rho} = \sigma|_{\rho} + Q_{\infty} (l - e^{-be_{\rho}})$$
<sup>(1)</sup>

όπου  $\sigma|_0$  είναι η αρχική ελαστική τάση,

 $\overline{\varepsilon}_{p}$ είναι η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση

 $Q_{\infty}$ , b είναι παράμετροι του μοντέλου

Ο κινηματικός όρος του μοντέλου σκλήρυνσης περιγράφεται στην εξ. (2).

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma^0} (\sigma - \alpha) \dot{\overline{\varepsilon}}^{pl} - \gamma \alpha \dot{\overline{\varepsilon}}^{pl}$$

Όπου  $\alpha$  είναι η τάση backstress

C, γ είναι παράμετροι του υλικού.

Οι τελείες πάνω πάνω στους δείκτες καθορίζουν ότι αυτά είναι διαφορικές ποσότητες. 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. Οι κύριες ιδέες που επέτρεψαν τη χρήση αυτού του κριτηρίου είναι ότι μόνο η ενεργός πλαστική παραμόρφωση ( $\bar{\varepsilon}_{_{pl}}$ )\_{\_{eff}}σε κάθε κύκλο συνεισφέρει στην βλάβη του υλικού. Επίσης, η δημιουργία όλκιμης ρωγμής λαμβάνει χώρα όταν το άθροισμα των ( $\bar{\varepsilon}_{pl}$ )<sub>eff</sub> ως συνάρτηση της τριαξονικότητας κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης φτάσει μια κρίσιμη τιμή. Η τιμή αυτή είναι το σημείο τομής με την καμπύλη βλάβης.

#### 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΖΩΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

#### 3.1 Πειραματική διάταξη

Δύο διαφορετικοί τύποι διατάξεων χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα ανάλογα με τη διατομή της δοκού που χρησιμοποιήθηκε. Οι συνδέσεις που ελέγχθηκαν αποτελούνται διατομή δοκού ΗΕΜ 300 με ενισχύσεις στον κορμό της. Τέσσερα ζεύγη δοκών διατομής

(2)

ΗΕΑ300 συγκολλήθηκαν στο υποστύλωμα με τη βοήθεια εξωραφών και άλλα τέσσερα ζεύγη με τη βοήθεια εσωραφών. Στον δεύτερο τύπο, τρία ζεύγη δοκών διατομής IPE500 συγκολλήθηκαν στο υποστύλωμα με εξωραφές και άλλα τρία ζεύγη με εσωραφές. Στο Σχ. 3 και στο Σχ. 4 φαίνεται η πειραματική διάταξη, η οποία αποτελείται από τις δύο δοκούς οι οποίες τοποθετούνται οριζόντια και οι οποίες συγκολλούνται με τη διατομή του υποστυλώματος το οποίο τοποθετείται κατακόρυφα. Οι μετατοπίσεις επιβάλλονται με τη βοήθεια ενός υδραυλικού εμβόλου στο άνω μέρος του υποστυλώματος κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.



Σχ. 3. Γεωμετρική διάταξη



Σχ. 4. Διάταξη στο εργαστήριο

Η ίδια διάταξη χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των πειραμάτων με τη βοήθεια οκτακομβικών, εξαεδρικών πεπερασμένων στοιχείων. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκε η τεχνική των υπομοντέλων [5]. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε ένα επιπλέον αριθμητικό μοντέλο το οποίο μελετήθηκε ξεχωριστά. Το μοντέλο αυτό περιελάμβανε μόνο την κρίσιμη περιοχή της συγκόλλησης ή του σημείου του τοπικού λυγισμού. Κατά την ανάλυση του συνόλου της σύνδεσης καταγράφονταν οι μετατοπίσεις στην κρίσιμη αυτή περιοχή η οποία στη συνέχεια επιλυόταν ξεχωριστά έχοντας ως συνοριακές συνθήκες τις καταγραφές που έγιναν στο συνολικό μοντέλο. Οι μετακινήσεις δηλαδή των κόμβων στα άκρα του υπομοντέλου καθορίζονται από τις μετακινήσεις των αντίστοιχων κόμβων στο μοντέλο ολόκληρης της σύνδεσης. Το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων στην κρίσιμη περιοχή της συγκόλλησης έιναι 0,1mm, το οποίο αντιστοιχεί στο χαρακτηριστικό μήκος [6] του χάλυβα.

## 3.2 Ιστορικό φόρτισης

Το ιστορικό φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα αυτά εξήχθη μέσω αναλύσεων σε οκτώ διαφορετικά κτίρια με διαφορετικά ανοίγματα στις δύο διευθύνσεις και ύψους μέχρι οκτώ ορόφων. Συνολικά εφαρμόστηκαν δέκα ιστορικά σεισμικής διέγερσης στις κατασκευές που ερευνήθηκαν [7].

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη συμπεριφορά των κόμβων που αποτελούνται από δοκούς διατομής HEA. Ο λόγος ήταν ότι για τη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη έγιναν δύο επιπλέον πειράματα σε σχέση τις δοκούς IPE, καθώς επίσης και εξαιτίας του γεγονότος ότι κατά τη φόρτιση των κόμβων με τις διατομές IPE παρατηρήθηκαν εκτός επιπέδου μετατοπίσεις οι οποίες επηρέασαν σε κάποιο βαθμό τα αποτελέσματα. Συνολικά τέσσερα ιστορικά φόρτισης εφαρμόστηκαν σε κάθε κόμβο. Χρησιμοποιήθηκε η δυσμενέστερη χρονοϊστορία που προέκυψε από το σεισμό του Kobe, καθώς και ιστορικά που προέκυψαν από την προτεινόμενη διαδικασία ανακυκλιζόμενων φορτίσεων της ECCS [8] και από το ποσοστημόριο του 95% του συνόλου των σεισμών που εφαρμόστηκαν στην κάμβους με διατομές δοκών HEA. Εκτός από τις μεταβλητές φορτίσεις του Πίν. 1 εφαρμόστηκε και μια χρονοϊστορία σταθερού εύρους μετατόπισης (±70mm).

ECCS	Αριθμός κύκλων	N	1	1	1	1	3	3 + n
	Κατακόρυφη μετατόπιση [mm]	δ	±6.5	±13	±19.5	±26	±52	±104
ποσοστό 95%	Αριθμός κύκλων	N	6	5	4	3	2	1
	Κατακόρυφη μετατόπιση [mm]	δ	±2,3	±3,8	±5,9	±11,5	±22,6	±43,6
Vaha	Αριθμός κύκλων	N	6	5	4	3	2	1
NODE	Κατακόρυφη μετατόπιση [mm]	δ	±3,2	±7,7	±8,6	±22,0	±44,0	±60,0

Πίν. 1. Ιστορικά φόρτισης κόμβων με δοκούς ΗΕΑ300

## 3.3 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

Η αρχή της ενεργού βλάβης χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων με βάση τις χρονοϊστορίες που περιγράφηκαν προηγουμένως. Η απαρχή ρηγμάτωσης παρατηρήθηκε, στις περισσότερες περιπτώσεις, στην διεπιφάνεια του μητρικού υλικού της δοκού και του υλικού της συγκόλλησης είτε στο άνω είτε στο κάτω πέλμα της διατομής της δοκού. Κατά την ανάλυση του υπομοντέλου καταγράφονται οι τιμές της τριαξονικότητας και της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης σε όλα τα στοιχεία. Το στοιχείο στο οποίο ο συνδυασμός των τιμών ενεργού ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης και της καμπύλης βλάβης. Η απαρχή ρηγμάτωσης παραμή που συμβολίζει την αύξηση της ενεργού πλαστικής παραμόρφωσης τμηθεί με την καμπύλη βλάβης όπως φαίνεται και στο  $\Sigma_{\chi.5}$ .

Στον Πίν.2 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των πειραματικών και αναλυτικών διερευνήσεων των κόμβων. Τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο της συγκόλλησης που έχει χρησιμοποιηθεί κάθε φορά. Όπως φαίνεται υπάρχει καλή σχέση ανάμεσα στα πειραματικά και τα αποτελέσματα με την εφαρμογή της αρχής της ενεργού βλάβης.



Vagyaïgzagía	Αρ. κύκλων για ρηγμάτωση					
χρονοιο ιορία φόρτισης	Εξωρ	αφές	Εσωραφές			
φοριισης	Πειρ.	Αναλ.	Πειρ.	Αναλ.		
ECCS	9	8	9	10		
Ποσοστό 95%	25	24	20	19		
Σεισμός Kobe	3	5	6	7		
Σταθερού εύρους 70mm	8	7	6	7		

Σχ. 5. Αρχή ενεργού βλάβης

Πίν.2. Αποτελέσματα απαρχής ρηγμάτωσης ΗΕΑ300

## 4. ΚΑΜΠΥΛΕΣ S-Ν ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΕΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ

Θα ήταν πρακτικό ο υπολογισμός της ολιγοκυκλικής κόπωσης σε όρους απαρχής ρηγμάτωσης να συσχετιστεί με παραμέτρους οι οποίες περιγράφουν την ολική

συμπεριφορά της κατασκευής. Για το λόγο αυτό θα χρησιμοποιηθούν οι καμπύλες S-N, οι οποίες περιγράφονται από την εξ. (3):

 $NS^m = K$ 

(3)

(4)

Όπου S είναι η παράμετρος η οποία περιγράφει τις συνολικές απαιτήσεις παραμόρφωσης, παίρνοντας τιμές από στροφές κόμβων ή σχετικής στροφής των ορόφων,

Ν είναι ο αριθμός των κύκλων για την αστοχία υπό σταθερό εύρος S.

Έχουν προταθεί πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις για τον τρόπο ορισμού του S. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η πρόταση του Bernuzzi [9] όπου θέτει:

 $S = \varDelta \theta$ 

όπου  $\Delta \theta$ είναι η ολική στροφή του υπό μελέτη κόμβου.

Προκειμένου να ληφθούν υπόψη τόσο οι χρονοϊστορίες σταθερού όσο και μεταβλητού εύρους χρησιμοποιήθηκε ο νόμος γραμμικής συσσώρευσης βλάβης του Miner με μια παραλλαγή ώστε να λαμβάνει υπόψη του τις περιπτώσεις μεταβλητών φορτίσεων:

$$D = \sum_{i=1}^{n_{tot}} \frac{1}{N_i} \tag{5}$$

Όπου D είναι ο δείκτης βλάβης,

 $(1/N_i)$  αντιπροσωπεύει τη βλάβη σε κάθε κύκλο φόρτισης υπό  $S_i$ .

Συνδυάζοντας τις εξ. (3) και την εξ. (5) ο δείκτης βλάβης για μεταβλητά ιστορικά φόρτισης μετασχηματίζεται σε:

$$D = \sum_{i=1}^{i_{tot}} \frac{S_i^m}{K} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{tot}} S_i^m}{K}$$
(6)

Για την περίπτωση της μεταβλητής φόρτισης υπολογίζεται μια ισοδύναμη τιμή του S η οποία οδηγεί στη ρηγμάτωση μετά από  $N = N_{tot}$  αριθμό κύκλων:

$$S_{eq} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{L} n_i \cdot S_i^{\ m}}{n_{tot}}\right)^{\frac{1}{m}}$$
(7)

Η σχέση αυτή μπορεί να γραφεί και ως:

$$Log(n_{tot}) = Log(K) - mLog(S_{eq}) = Log(K) - mLog(\Delta\theta_{eq})$$
(8)

Στο Σχ.6 φαίνονται οι καμπύλες S-N για τις διατομές HEA της εργασίας για όλες τις διαφορετικές χρονοϊστορίες που εξετάστηκαν. Οι τελικές σχέσεις είναι διαφορετικές για τις εσωραφές και εξωραφές.

$$Log(Na) = 2.69 - 3.62 \cdot LOG(\Delta\phi) \tag{9}$$

$$Log(Na) = 2.07 - 2.15 \cdot LOG(\Delta\phi) \tag{10}$$

Όπου Ν<sub>a</sub> είναι ο αριθμός των κύκλων μέχρι να πραγματοποιηθεί ρηγμάτωση

 $\Delta \phi$  είναι το εύρος της στροφής του κόμβου [mrad/10] ή η σχετική στροφή του κόμβου εκφρασμένη σε ποσοστό %.

Στον Πίν.3 φαίνεται ο αριθμός των κύκλων μέχρι να πραγματοποιηθεί ρηγμάτωση σε κόμβους δοκού-υποστυλώματος με διατομή δοκού ΗΕΑ300 και την γεωμετρική διάταξη του Σχ.3 σε σχέση με την σχετική στροφή % που εφαρμόζεται κάθε φορά στη σύνδεση.



HEAS	300	Εξωραφές	Εσωραφές
ή	2.0	34	27
مە 6)	2.4	18	17
στρ υ (9	2.8	11	11
кή Фол	3.2	7	9
ορό	3.6	5	6
$\Sigma_{\chi}$	4.0	3	5

Σχ. 6. Καμπύλη S-N για εξωραφές (ΗΕΑ)

Πίν.2. Αριθμός κύκλων για απαρχή ρηγμάτωσης

# 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μια μέθοδος με σκοπό την πρόβλεψη απαρχής ρηγμάτωσης σε μεταλλικούς συνδέσμους. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η αρχή ενεργού βλάβης μπορεί δώσει ακριβή αποτελέσματα ως προς τη δημιουργία ρωγμών. Η γνώση των χαρακτηριστικών του υλικού είναι απαραίτητη ωστόσο για τη συνέπεια των αποτελεσμάτων. Η χρήση καμπυλών S-N για ολιγοκυκλική κόπωση γίνεται εφικτή μέσω της χρήσης των πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων.

Η εργασία αυτή βασίζεται στην έρευνα στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος "PLASTOTOUGH – Modern Plastic Design for Steel Structures" το οποίο χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] McCLINTOCK F.A., "A criterion of ductile fracture by growth of holes", Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, 1968, pp. 363-371.
- [2] RICE J.R., TRACEY D.M., "On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fiels", Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 17, 1969, pp. 201-217.
- [3] OHATA M., TOYODA M., "Damage concept for evaluating ductile cracking of steel structure subjected to large-scale cyclic straining", Science Of Advanced Materials, Vol. 5, 2003, pp. 241-249
- [4] ACHENBACH U.J., "Einfluß des Gefüges auf die Schädigung von Stählen", Berichte aus dem Institut für Eisenhüttenkunde; Shaker Verlag, Band 7, 1999, pp. 99.
- [5] HIBBITT, KARLSSON, SORENSEN, "HKS. ABAQUS User's manual; Version 5.7.", 1997.
- [6] PANONTIN T. L., SHEPPARD S.D., "The relationship between constraint and ductile fracture initiation as defined by micromechanical analyses" Fracture Mechanics, Vol. 26, 1995, pp.1256.
- [7] Spiliopolous A., Karlos V., Vayas I., "Inelastic Deformation Requirements for Steel Buildings subjected to Seismic Loading", Eurosteel Graz, Austria, 2008, pp. 1395-1400.
- [8] European Convention for Constructional Steelwork (ECCS). "Recommended testing procedure for assessing the behaviour of structural steel elements under cyclic loads", *ECCS Publ. No 45, Rotterdam, The Netherlands*, 1986.
- [9] BERNUZZI C., CALADO L., CASTIGLIONI A., "Low cycle fatigue of structural steel components: a method for re-Analysis of test data and a design approach based on ductility", Journal of Earthquake Technology, Vol. 37, 2000, pp. 47-63.

## CRACK INITIATION PREDICTION OF WELDED JOINTS UNDER SEISMIC 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**

The seismic response of a structure depends considerably on its ductility, meaning its attitude to sustain large plastic deformations and to dissipate energy without occurrence of brittle fracture mechanisms. Structural ductility is closely related to the ductility of individual members, their connections and the ductility of the material itself. In the case of metal structures ductility is influenced by fatigue and buckling that may lead to premature failure on the structure or the individual member.

The current study focuses on the response of welded beam-to-column joints at steel moment resisting frames. The connection's behavior under cyclic loading is linked to a material model that predicts the formation of cracks at the used steel. Analysis is carried out with the aid of a finite element program which is calibrated with the use of similar experiments that took place at the University of Aachen. S-N lines similar to those proposed by EC3 for high cycle fatigue are proposed, that allow predicting the time of crack initiation at the joint under investigation.