



ΔΡΑΣΗ: «ΑΡΙΣΤΕΙΑ ΙΙ»

ΤΙΤΛΟΣ:

«Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών
για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών»

4916-ENSSTRAM

Επιστημονικός Υπεύθυνος: **Καθ. Χ. ΓΑΝΤΕΣ**

ΕΝΟΤΗΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ (Ε.Ε.) 9

*Πειραματικές δοκιμές υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους
κόμβους*

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 9.1:

*Τεχνική έκθεση πειραματικών δοκιμών υπόγειων αγωγών με
εύκαμπτους κόμβους*

2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

9 Iroon Polytechniou Str., GR-15780, Zografou, Greece

PROJECT: «ARISTEIA II»

TITLE:

«Novel design concepts for ENergy related Steel
STRuctures using Advanced Materials»

4916-ENSSTRAM

Research Coordinator: Prof. C. GANTES

WORK PACKAGE (W.P.) 9

Experimental tests of underground pipelines with flexible joints

DELIVERABLE 9.1:

Technical report of experimental tests of underground pipelines with flexible joints

2015



European Union
European Social Fund



MINISTRY OF EDUCATION & RELIGIOUS AFFAIRS, CULTURE & SPORTS
MANAGING AUTHORITY

Co-financed by Greece and the European Union



EUROPEAN SOCIAL FUND

Summary

Within the framework of deliverable EE9, the experimental tests that have been carried out in order to investigate the effectiveness of the use of flexible joints for the reduction of strains in pipes/tubes that are subjected to imposed transverse displacements are presented in this report.

First, a comprehensive literature review of pipeline experiments has been presented. Experimental investigation of pipelines is divided into two categories: (a) experiments of pipes/tubes without surrounding soil that aim at determining the pipe bending capacity, tensile capacity, cross-section ovalization and also estimating the critical compressive buckling strains and (b) experiments of scaled buried pipes using a shear box or a centrifuge to assess the pipe behavior due to faulting and evaluate the corresponding parameters. The literature review carried out revealed absence of experimental investigations of pipes with internal flexible joints, as those proposed for buried pipeline applications within this research program.

Next, the design of the experimental set-up that was used to assess the effectiveness of flexible joints in reducing the pipe developing strains has been presented. Preliminary numerical results in conjunction with the geometrical restrictions of the testing frame provided the optimum locations of the flexible joints in the pipe specimen with joints. Then, detailed drawings of the experimental project have been prepared for the fabrication of the specimens, their connections to the testing frame and the other components of the testing process. This design process is also summarized in the present report.

The experimental program consisted of testing continuous pipe specimens and pipe specimens with flexible joints. Also, tensile tests were carried out to determine the steel properties. The experimental results are presented here in terms of load - displacement curves as well as indicative photos of the undeformed and deformed specimens. The response of continuous specimens is stable, as the load - displacement equilibrium path is ascending, initially elastically and then with reduced stiffness, indicative of elasto-plastic behavior, as verified also by the strain measurements at critical locations. Moreover, the developing stress state of the

specimen with flexible joints is in general orders of magnitude lower than the corresponding one of the continuous specimen in terms of load as well as strains, providing strong support of the effectiveness of flexible joints.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	5
2	Βιβλιογραφική επισκόπηση	7
2.1	Γενικά.....	7
2.2	Πειράματα αγωγών χωρίς περιβάλλον έδαφος.....	8
2.3	Πειράματα αγωγών με περιβάλλον έδαφος.....	11
3	Σχεδιασμός πειραματικής διάταξης	14
3.1	Εισαγωγή.....	14
3.2	Πρόγραμμα πειραματικών δοκιμών	15
3.3	Μετρητικά όργανα.....	15
3.4	Περιγραφή δοκιμών	15
4	Πειραματικές δοκιμές αγωγών.....	20
4.1	Εισαγωγή.....	20
4.2	Ποιότητα χάλυβα	20
4.3	Πειραματική διάταξη	21
4.4	Αποτελέσματα δοκιμών	24

4.4.1	Δοκίμιο CP.....	24
4.4.2	Δοκίμιο PFJ.....	28
5	Εκτενής περίληψη - Συμπεράσματα	33
5.1	Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	33
5.2	Σχεδιασμός πειραματικής διάταξης	33
5.3	Πειραματικές δοκιμές αγωγών.....	34
	Βιβλιογραφικές αναφορές.....	35

1

Εισαγωγή

Η παρούσα Τεχνική Έκθεση αποτελεί παραδοτέο του Ερευνητικού Προγράμματος με τίτλο:

ΔΡΑΣΗ «ΑΡΙΣΤΕΙΑ ΙΙ»

Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών (ENSSTRAM)

που πραγματοποιείται κάτω από το γενικό συντονισμό του Καθηγητή Χαράλαμπου Γαντέ (Κύριος Ερευνητής).

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζει τις δράσεις που προδιαγράφονται στην **Ενότητα Εργασίας Ε.Ε 9**, με τίτλο:

«Στόχος, μεθοδολογία - αναμενόμενα αποτελέσματα - περιορισμοί και προϋποθέσεις - εμπλεκόμενα μέλη της ερευνητικής ομάδας»

Το αντικείμενο της **Ενότητας Εργασίας Ε.Ε. 9**, έχει περιγραφεί στην εγκεκριμένη Ερευνητική Πρόταση ως:

«Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μορφής αγωγών με εύκαμπτους κόμβους θα αξιολογηθεί μέσω πειραματικών δοκιμών με χρήση κατάλληλων δοκιμών υπό κλίμακα, όπως αυτά θα έχουν προεπιλεγεί στην ΕΕ8. Οι στόχοι αυτών των δοκιμών θα είναι:

Ο σχεδιασμός και η επαλήθευση εναλλακτικών επιλογών εύκαμπτων κόμβων για υπόγειους αγωγούς.

Η αποτίμηση της συμπεριφοράς συνδέσεων μεταξύ εύκαμπτων κόμβων και μεταλλικών τμημάτων αγωγών.

Η πιστοποίηση προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους κόμβους.

Η πειραματική διερεύνηση θα περιλαμβάνει δοκιμές με στόχο την επιβεβαίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των κόμβων, δοκιμές προσδιορισμού των καμπυλών φορτίου-παραμόρφωσης ή ροπής-στροφής των εξεταζόμενων κόμβων, καθώς και μία τρίτη ομάδα δοκιμών που θα αφορά σε συστήματα αγωγών αποτελούμενων από ευθύγραμμα μεταλλικά τμήματα, συνδεδεμένα με εύκαμπτους κόμβους.».

Το εν λόγω αντικείμενο έχει καλυφθεί πλήρως, όπως περιγράφεται στα κεφάλαια που ακολουθούν. Πιο συγκεκριμένα:

Αρχικά γίνεται βιβλιογραφική επισκόπηση των πειραμάτων που έχουν πραγματοποιηθεί για υπόγειους αγωγούς και αγωγούς/σωλήνες χωρίς περιβάλλον έδαφος. Ακολούθως, περιγράφεται αναλυτικά ο σχεδιασμός της πειραματικής διάταξης. Έπειτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών συνεχούς αγωγού και αγωγού με εύκαμπτους κόμβους.

Η πειραματική διαδικασία εκτελέστηκε στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Εθνικού Μετσόβιο Πολυτεχνείου.

Οι εργασίες που περιγράφονται έχουν πραγματοποιηθεί με τη συνεισφορά των παρακάτω μελών της **Ερευνητικής Ομάδας**:

Χαράλαμπος Γαντές, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Γεώργιος Μπουκοβάλας, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Αλέξανδρος Βαλαμής, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Αθανάσιος Τριανταφύλλου, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών

Κωνσταντίνος Καλοχαιρέτης, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Στυλιανός Βερνάρδος, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Παύλος Αστερίου, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Αριστομένης Τσαντίλης, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών

Στυλιανός Κατσαοσίδης, Μηχανολόγος Μηχανικός Τ.Ε.

Ξενοφών Λιγνός, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε., Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Γρηγορία-Πολυξένη Ζαράκη, Πολιτικός Μηχανικός Δομικών Έργων

Dimitrios Lignos, Assistant Professor, McGill University, Canada

Επίσης, ευχαριστίες εκφράζονται στον Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ Βασίλειο Μελισσιανό για τη συμβολή του.

2

Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1 Γενικά

Οι κοιλοδοκοί χρησιμοποιούνται ευρέως στις κατασκευές και για αυτό το λόγο η πειραματική τους διερεύνηση έχει ξεκινήσει από τη δεκαετία του 1950. Η εκτέλεση πειραμάτων μελών με κοίλες κυκλικές διατομές ξεκίνησε για διατομές με μικρό λόγο διαμέτρου προς πάχος (D/t), οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως σε κτηριακά έργα ή έργα γεφυροποιίας.

Πειράματα κυλινδρικών κελυφών υπό καθαρή κάμψη που παρουσίασαν ελαστικό ή ελαστοπλαστικό λυγισμό παρουσιάστηκαν σε πλήθος εργασιών [1-8]. Τα πειράματα αυτά αφορούσαν κυλίνδρους με σχετικά μεγάλο πάχος και λόγο $D/t < 100$. Στόχος αυτών των πειραμάτων ήταν η εξαγωγή συμπερασμάτων για τον ασφαλή σχεδιασμό χερσαίων και υπεράκτιων αγωγών. Ο Sherman [9] υποκινούμενος από την ανάγκη για ασφαλή σχεδιασμό υπεράκτιων δικτυωτών κατασκευών με κοιλοδοκούς, παρουσίασε μία σειρά πειραμάτων κοιλοδοκών ($D/t=35$ έως 102) υπό καμπτική καταπόνηση με συννοριακές συνθήκες προβόλου και αμφιέρειστης δοκού. Το πρόγραμμα πειραματικών δοκιμών έδωσε έμφαση στην ικανότητα των μελών να αναπτύξουν ανελαστικές παραμορφώσεις πριν την αστοχία.

Ακολούθως, στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος CBI - SwRI [10-11] υλοποιήθηκε ένα σημαντικό πειραματικό πρόγραμμα, όπου εξετάστηκε ο τοπικός λυγισμός 36 κοιλοδοκών υπό κάμψη και αξονική φόρτιση για το σχεδιασμό υπεράκτιων εξεδρών σε μεγάλο βάθος. Τα υπό δοκιμή μέλη είχαν λόγο D/t ίσο με 42 και 60. Ο βασικός στόχος της διερεύνησης ήταν η μελέτη της επιρροής της εξωτερικής πίεσης στην καμπτική αντοχή των κοιλοδοκών, ενώ παράλληλα εξετάστηκαν και πολλά δοκίμια χωρίς πίεση. Οι Von Foeken & Gresnigt [12] εκτέλεσαν πειράματα σε σχετικά λεπτότοιχους κυλίνδρους υπό κάμψη και εσωτερική πίεση, προκειμένου να διερευνήσουν την επιρροή της εσωτερικής πίεσης, ενώ παρουσίασαν και χρήσιμα αποτελέσματα από κυλίνδρους με λόγους D/t ίσους με 102 και 107. Τέλος, οι Elchalakani et al. [13] διεξήγαγαν πειράματα σε λεπτότοιχους κυλίνδρους ψυχρής έλασης από χάλυβα πολύ υψηλής αντοχής (very-high-strength-steel - VHS) με σκοπό να προσδιορίσουν την παραμορφωσιμότητα μελών VHS με λόγο D/t από 36 έως 110.

Οι αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες και η συνεπακόλουθη επέκταση των δικτύων αγωγών ανέδειξαν την ανάγκη του ασφαλούς σχεδιασμού υπόγειων αγωγών καυσίμων έναντι σεισμικών δράσεων και κυρίως μεγάλων μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων. Από τη δεκαετία του 1980 η ερευνητική κοινότητα άρχισε να εξετάζει και πειραματικά την αντοχή υπόγειων αγωγών. Η εισαγωγή, όμως, του περιβάλλοντος εδάφους στην πειραματική διερεύνηση δημιουργεί πολλές κατασκευαστικές δυσκολίες στην πειραματική διάταξη, ενώ παραμένει χρονοβόρα και δαπανηρή. Έτσι, η πειραματική διερεύνηση αγωγών/σωλήνων χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες:

(α) Αγωγός χωρίς περιβάλλον έδαφος (in-air conditions). Το στατικό προσομοίωμα του δοκιμίου μπορεί να είναι πρόβολος ή αμφίπακτη δοκός, ενώ συνήθως χρησιμοποιείται η προσέγγιση της κάμψης τεσσάρων σημείων (four-point bending test). Η φόρτιση του δοκιμίου μπορεί να περιλαμβάνει κάμψη, αξονική δύναμη και εσωτερική πίεση ή συνδυασμό αυτών. Σκοπός αυτών των πειραμάτων είναι συνήθως ο προσδιορισμός της καμπτικής αντοχής, της προλυγισμικής και μεταλυγισμικής συμπεριφοράς του σωλήνα και της κρίσιμης θλιπτικής παραμόρφωσης τοπικού λυγισμού.

(β) Αγωγός με περιβάλλον έδαφος. Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει συνήθως διατμητικό κιβώτιο ή φυγοκεντριστή. Σκοπός αυτών των πειραμάτων είναι η μελέτη της απόκρισης υπόγειων αγωγών λόγω διάρρηξης σεισμικού ρήγματος, ρευστοποίησης εδάφους ή καθίζησης και παράλληλα η διερεύνηση της επιρροής διαφόρων παραμέτρων, όπως οι εδαφικές συνθήκες, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού και το βάθος ταφής.

Στις ακόλουθες παραγράφους παρουσιάζεται μία συνοπτική βιβλιογραφική ανασκόπηση των πειραμάτων που έχουν πραγματοποιηθεί βάσει της προαναφερθείσας κατηγοριοποίησης.

2.2 Πειράματα αγωγών χωρίς περιβάλλον έδαφος

Πειράματα αγωγών χωρίς περιβάλλον έδαφος πραγματοποιούνται από τους ερευνητές με σκοπό τον προσδιορισμό συγκεκριμένων παραμέτρων της απόκρισης ενός αγωγού σε απλές φορτίσεις (κάμψη, αξονική ένταση και εσωτερική πίεση). Τα πειράματα αυτά διεξάγονται συχνότερα, δεδομένου του αυξημένου κόστους και των κατασκευαστικών δυσκολιών που συνεπάγεται μία πειραματική διάταξη με το περιβάλλον έδαφος του αγωγού.

Ο Murray [14], για να μελετήσει τη συγκέντρωση παραμορφώσεων σε περιοχές τοπικού λυγισμού και τη μεταλυγισμική συμπεριφορά αγωγών, πραγματοποίησε μία σειρά πειραματικών δοκιμών αγωγών ποιότητας X52 και X65 και εξωτερικής διαμέτρου 508mm και 324mm. Μέσω της πειραματική διάταξης, έκκεντροι βραχίονες επέβαλαν στα δοκίμια καμπτική και θλιπτική καταπόνηση. Τα πειραματικά αποτελέσματα ανέδειξαν ότι ο τοπικός λυγισμός αγωγών άνευ εσωτερικής πίεσης έχει μορφή «διαμαντιού», ενώ ο τοπικός λυγισμός αγωγών υπό πίεση χαρακτηρίζεται από μία προεξοχή προς τα έξω. Παρατηρώντας την εξέλιξη του τοπικού λυγισμού σε

αγωγούς υπό πίεση, ο Murray διαπίστωσε ότι αρχικά σχηματίζεται μία περιοδική κυματομορφή στην επιφάνεια του κελύφους και στη γενέτειρα που αναπτύσσεται η μέγιστη θλιπτική καταπόνηση. Στη συνέχεια, όταν ο αγωγός περάσει στην περιοχή softening, μία από τις κυματομορφές που έχουν δημιουργηθεί εξελίσσεται σε τοπικό λυγισμό, ενώ οι υπόλοιπες εξαφανίζονται.

Οι Dama et al. [15] θέλοντας να μελετήσουν τη δομική συμπεριφορά αγωγών υπό κάμψη και εσωτερική πίεση, πραγματοποίησαν μία σειρά πειραματικών δοκιμών πλήρους κλίμακα σε API5L Grade B αγωγούς διαμέτρου 24in και μήκους 12m. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν ήταν κάμψης 4 σημείων (4-point bending test). Τα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν ότι αγωγοί που έχουν υποστεί τοπικό λυγισμό, λόγω συγκέντρωσης παραμορφώσεων, ενδέχεται να αστοχήσουν λόγω κόπωσης ή θραύσης στην περιοχή του τοπικού λυγισμού. Η μέγιστη εσωτερική πίεση που αντέχει ο αγωγός μπορεί να μην επηρεάζεται από την εκδήλωση τοπικών λυγισμών ή την ανακυκλιζόμενη φόρτιση, εφόσον το υλικό του αγωγού είναι επαρκώς όλκιμο, ώστε να «υποστηρίζει» τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στη θέση του τοπικού λυγισμού κατά τη φόρτιση και την αποφόρτιση.

Οι Thinhongprituk et al. [16] εκτέλεσαν πειράματα σε αγωγούς χαλυβδοσιδήρου με λόγο διαμέτρου προς πάχος (D/t) που κυμαίνονταν από 21.16 έως 42.57. Η φόρτιση των δοκιμών ήταν καθαρή κάμψη με σκοπό την τεκμηρίωση της αναλυτικής μεθοδολογίας που είχαν αναπτύξει για την εκτίμηση της οβαλοποίησης της διατομής του αγωγού.

Οι Gresnigt & Karamanos [17] παρουσίασαν σε δημοσίευση του 2009 μία επιπλέον μελέτη και διερεύνηση των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από ένα εκτεταμένο πρόγραμμα δοκιμών που πραγματοποιήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Delft (The Netherlands) στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος που χρηματοδοτήθηκε από το Pipeline Research Council International (PRCI). Σκοπός της πειραματικής διερεύνησης ήταν να δοθεί έμφαση στον ελαστοπλαστικό τοπικό λυγισμό αγωγών και να διερευνηθεί η επιρροή της κατασκευαστικής διαδικασίας των αγωγών στην οριακή τους αντοχή και στην εκδήλωση τοπικού λυγισμού. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα πλήρους κλίμακας αγωγών υπό καθαρή κάμψη (4-point bending test) με λόγο διαμέτρου προς πάχος από 20 έως 50. Η επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων ανέδειξε ότι η κρίσιμη θλιπτική παραμόρφωση τοπικού λυγισμού πρέπει να λαμβάνεται από τις παραμορφώσεις του αγωγού στη θέση της μέγιστης καμπτικής ροπής. Επίσης, τα πειραματικά αποτελέσματα «ταίριαζαν» καλύτερα με τις αναλυτικές σχέσεις των Murphey και Gresnigt παρά με τις κανονιστικές των κωδίκων BS 8010 και DNV. Επίσης, για αγωγούς χαμηλού λόγου D/t τα χαρακτηριστικά της κράτυνσης του υλικού έχουν μεγάλη επιρροή στην κλήση του διαγράμματος ροπής - καμπυλότητας στη μετελαστική περιοχή, παρά στην τιμή της παραμόρφωσης στη μέγιστη ροπή. Τέλος, τα αποτελέσματα για αγωγούς κατασκευασμένους με τη διαδικασία UOE ήταν προς την πλευρά της ασφαλείας συγκριτικά με τις αναλυτικές σχέσεις των Murphey και Gresnigt, σε αντίθεση με τους αγωγούς χωρίς ραφή συγκόλλησης (seamless pipes).

Οι Mason et al. [18] υλοποίησαν για πρώτη φορά ένα πρόγραμμα πειραματικών δοκιμών απευθείας εφελκυσμού αγωγών πλήρους κλίμακας με συγκολλητούς συνδέσμους ολίσθησης (welded slip joints – WSJs). Χρησιμοποιήθηκαν δύο δοκίμια αγωγών ποιότητας API5L Grade B και διαμέτρου 320mm και 6.4mm με WSJs στο μέσον, τα οποία υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη αξονική φόρτιση. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην ποιότητα των συγκολλήσεων. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι οι αγωγοί με WSJs έχουν μεταλυγισμική αντοχή, εάν έχουν κατασκευασθεί με πλήρη ικανοποίηση των αντίστοιχων κανονιστικών απαιτήσεων και προδιαγραφών. Έτσι, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η απόφαση για τη μέγιστη επιτρεπόμενη εφελκυστική παραμόρφωση επαφίεται στο μελετητή μηχανικό ή το χρήστη του αγωγού με βάση την ποιότητα κατασκευής στο εργοτάξιο. Εάν η ποιότητα κατασκευής είναι χαμηλότερη, τότε και τα όρια επιτρεπόμενων παραμορφώσεων μπορούν να μειωθούν.

Οι Chen et al. [19] πραγματοποίησαν πειραματικές δοκιμές πλήρους κλίμακας σε αγωγούς X70 και διαμέτρου 40in με σκοπό να διερευνήσουν την αντοχή τους, καθώς πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικό έργο. Μέσω κατάλληλης πειραματικής διάταξης οι αγωγοί υποβλήθηκαν σε κάμψη, θλίψη και εσωτερική πίεση 10MPa. Τα πειραματικά αποτελέσματα ανέδειξαν ότι οι εφελκυστικές παραμορφώσεις έχουν σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή στο εξωρράχιο του αγωγού, ενώ οι θλιπτικές παραμορφώσεις στο εσωρράχιο παρουσιάζουν μεγάλη συγκέντρωση, η οποία και οδηγεί σε τοπικό λυγισμό του κελύφους με την αύξηση της καμπτικής ροπής.

Με σκοπό τη διερεύνηση της κρίσιμης θλιπτικής παραμόρφωσης τοπικού λυγισμού αγωγών από χάλυβα υψηλής αντοχής, οι Ferino et al. [20] παρουσίασαν πειραματικά αποτελέσματα από πειράματα πλήρους κλίμακας αγωγών υπό καθαρή κάμψη. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα κάμψης αγωγών με και χωρίς εσωτερική πίεση με λόγο D/t ίσο από 50 έως 65, ενώ ο χάλυβας των αγωγών ήταν ποιότητας X80. Η πειραματική διάταξη περιελάμβανε κάμψη τεσσάρων σημείων. Οι συγγραφείς με χρήση των πειραματικών αποτελεσμάτων βαθμονόμησαν αριθμητικά προσομοιώματα, τα οποία χρησιμοποίησαν στη συνέχεια για την εξαγωγή αναλυτικής σχέσης πρόβλεψης της κρίσιμης παραμόρφωσης τοπικού λυγισμού. Η σχέση που εξήγαγαν λαμβάνει υπόψη το λόγο D/t , το συντελεστή εκμετάλλευσης (ανάλογα με την εσωτερική πίεση), το λόγο του ορίου διαρροής προς το μέτρο ελαστικότητας (Y/T), το εκθέτη κράτυνσης του υλικού, καθώς και συντελεστές ασφαλείας που σχετίζονται με τις γεωμετρικές ατέλειες του αγωγού και την ενδεχόμενη κακή ευθυγράμμιση των τμημάτων αγωγού στις συγκολλήσεις.

Οι Kristoffersen et al. [21] παρουσίασαν πρόσφατα μία σειρά πειραματικών δοκιμών υπεράκτιων αγωγών X65 υπό κλίμακα. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε ήταν κάμψη τριών σημείων (3-point bending test) με ταυτόχρονη επιβολή εγκάρσιου φορτίου στο μέσον του δοκιμίου και εσωτερικής πίεσης. Η μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα: (α) η αύξηση του αξονικού φορτίου αυξάνει την καμπτική αντίσταση του αγωγού, (β) η αύξηση της εσωτερικής πίεσης μειώνει την παραμόρφωση της διατομής και αυξάνει

την αντοχή του αγωγού, (γ) η τοπική παραμόρφωση της διατομής δεν επηρεάζεται σημαντικά από το αξονικό φορτίο και (δ) το δοκίμιο υπό εσωτερική πίεση, συγκριτικά με ένα δοκίμιο άνευ εσωτερικής πίεσης, παρουσίασε πιο ομαλή παραμόρφωση στο τέλος της δοκιμής.

2.3 Πειράματα αγωγών με περιβάλλον έδαφος

Η πραγματοποίηση πειραμάτων υπόγειων αγωγών με περιβάλλον έδαφος είναι ιδιαίτερα δαπανηρή και συνεπάγεται πλήθος κατασκευαστικών και τεχνικών δυσκολιών, δεδομένου ότι απαιτεί τη χρήση διατμητικού κιβωτίου ή φυγοκεντριστή. Γι αυτό το λόγο τα πειράματα αυτά πραγματοποιούνται υπό κλίμακα και συνεπακόλουθα η σχετική βιβλιογραφία είναι εξαιρετικά περιορισμένη. Ακολούθως παρουσιάζονται τα κυριότερα τέτοια πειράματα.

Στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος με τη συνεργασία του Cornell University (ΗΠΑ) και του Rensselaer Polytechnic Institute (ΗΠΑ) κατασκευάστηκε φυγοκεντριστή για τη μελέτη υπόγειων αγωγών υποκειμένων σε διάρρηξη σεισμικού ρήγματος. Οι Abdoun et al. [22] πραγματοποίησαν πειράματα φυγοκέντρωσης σε αγωγούς HDPE υπό κλίμακα και υποκειμένους σε διάρρηξη οριζόντιας ολίσθησης (strike-slip faulting). Οι παράμετροι υπό διερεύνηση ήταν ο ρυθμός επιβολής της μετακίνησης του ρήγματος, η περιεχόμενη υγρασία της επίχωσης, το βάθος ταφής και η διάμετρος του αγωγού. Τα πειραματικά αποτελέσματα ανέδειξαν ότι ο ρυθμός επιβολής της μετακίνησης του ρήγματος δεν επηρεάζει τη μέγιστη αξονική παραμόρφωση, ενώ ο χαμηλός ρυθμός επιβολής μετακίνησης αυξάνει τις μέγιστες καμπτικές παραμορφώσεις. Ακολούθως, ανεξάρτητα της περιεχόμενης υγρασίας της επίχωσης παρατηρήθηκε διαταραχή της εδαφικής επιφάνειας σε μία στενή ζώνη γύρω από τη θέση του ρήγματος, ενώ για αμμώδη επίχωση με υγρασία παρουσιάστηκαν επιπλέον ρωγμές στο έδαφος στα κατάντι του αγωγού (περιοχή ανάπτυξης παθητικών εδαφικών ωθήσεων). Στην περίπτωση μεγάλου λόγου βάρους ταφής προς διάμετρο του αγωγού (H/D) δεν παρατηρήθηκε εδαφική αστοχία στην επιφάνεια, ενώ για μέτρια τιμή του λόγου H/D διαπιστώθηκε η τυπική και αναμενόμενη εδαφική επιφανειακή αστοχία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση του βάρους ταφής οδηγεί σε ισχυρότερα εδαφικά ελατήρια με αποτέλεσμα η καμπτική παραμόρφωση του αγωγού να περιορίζεται πολύ κοντά στο ρήγμα. Τέλος, η διάμετρος του αγωγού φάνηκε ότι δεν επηρεάζει τη θέση εμφάνισης των μέγιστων καμπτικών παραμορφώσεων, ενώ η αύξηση της διαμέτρου οδήγησε σε σημαντική αύξηση των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται στον αγωγό. Ακολούθως, οι Ha et al. [23] χρησιμοποίησαν τη συσκευή φυγοκέντρωσης για την πειραματική διερεύνηση αγωγών HDPE με σκοπό τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις αστοχίες που παρατηρήθηκαν σε αγωγό μετά το σεισμό του 1999 στη Σμόρνη (Τουρκία). Τα βασικά συμπεράσματα της πειραματικής διερεύνησης ήταν ότι η όδευση του αγωγού θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν κάθετα στο επίπεδο του ρήγματος, δηλαδή η γωνία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος να πλησιάζει τις $\beta=90^\circ$. Θα πρέπει επίσης να αποφεύγεται η επιβολή καθαρής θλίψης στον αγωγό λόγω διάρρηξης ρήγματος μέσω της επιλογής

κατάλληλης γωνίας β . Επίσης, εάν η εσωτερική πίεση του αγωγού δεν είναι πολύ υψηλή, το HDPE είναι καταλληλότερο υλικό συγκριτικά με το χάλυβα για τον αγωγό σε περιοχές διασταύρωσης με σεισμικά ρήγματα. Επίσης, τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την αξιοπιστία των προτεινόμενων κανονιστικών σχέσεων της ASCE για τον υπολογισμό της πλευρικής εδαφικής αντίστασης και επιπροσθέτως διαπιστώθηκε ότι οι θέσεις ανάπτυξης τοπικού λυγισμού στον αγωγό λειτουργούν ως «εύκαμπτοι κόμβοι» στην περίπτωση επιπλέον αύξησης της μετατόπισης του ρήγματος.

Οι Sim et al. [24] πραγματοποίησαν πειράματα σε σεισμική τράπεζα (βαρυτικές συνθήκες 1g) σε ακρυλικούς αγωγούς υπό κλίμακα (διάμετρος 20mm, πάχος 4mm, μήκος 800mm) για τη διερεύνηση της διατμητικής αστοχίας αγωγών λόγω διάρρηξης σεισμικού ρήγματος ή επίπεδης κατολίθησης. Εξετάστηκαν γωνίες διασταύρωσης αγωγού - ρήγματος ίσες με $\beta=30^\circ$, 45° , 60° και 90° . Διαπιστώθηκε ότι η αναπτυσσόμενη καμπτική ροπή εξαρτάται σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα από το μέγεθος της επιβαλλόμενης μετακίνησης ρήγματος, ενώ η σεισμική δόνηση (shaking) δεν την επηρεάζει. Τέλος, επιβεβαιώθηκε η αποτελεσματικότητα σε όρους μείωσης των καμπτικών ροπών του αγωγού της χρήσης εδαφικής επίχωσης που περιέχει τμήματα ελαστικών (tire derived aggregate backfill).

Η χρήση διατμητικού κιβωτίου για την πλήρη και ακριβέστερη προσομοίωση της διάρρηξης σεισμικού ρήγματος και την αντίστοιχη διερεύνηση της απόκρισης του υπόγειου αγωγού παρουσιάστηκε από τους Rofoei et al. [25]. Πρόκειται για πείραμα υπό κλίμακα σε αγωγό API5L Grade B, διαμέτρου 4in, ο οποίος υποβάλλεται σε ανάστροφη διάρρηξη με γωνία κλίσης ρήγματος $\psi=61^\circ$. Η επιβολή ανάστροφης διάρρηξης οδήγησε σε εμφάνιση ανελαστικού τοπικού λυγισμού στον αγωγό, τόσο στο τμήμα του σταθερού τεμάχους (fault footwall), όσο και σε αυτό του ανερχόμενου τεμάχους (fault hanging wall). Τα πειραματικά ευρήματα επιβεβαιώθηκαν με χρήση τρισδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων.

Πρόσφατα, οι Moradi et al. [26] χρησιμοποίησαν μία συσκευή φυγοκέντρισης για τη μελέτη υπό κλίμακα της απόκρισης αγωγών από ανοξείδωτο χάλυβα σε ορθή διάρρηξη (normal faulting). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πειραματικής διερεύνησης ήταν: γωνία ρήγματος $\psi=60^\circ$, γωνία διασταύρωσης αγωγού - ρήγματος $\beta=90^\circ$, λόγος $D/t=20$ έως $D/t=50$, ενώ η στήριξη των δοκιμίων στα άκρα της διάταξης ήταν αρθρωτή. Οι αξονικές παραμορφώσεις προέκυψαν μεγαλύτερες από τις καμπτικές και παρέμειναν σταθερές κατά μήκος του δοκιμίου, ενώ προέκυψαν μεγαλύτερες στο κατερχόμενο τέμαχος. Η αύξηση του βάθους ταφής οδήγησε σε μείωση της μετακίνησης ρήγματος που οδηγεί σε αστοχία του αγωγού και συνεπακόλουθα σε μεγαλύτερες αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις. Η αύξηση της διαμέτρου προκάλεσε: (α) μεγαλύτερες παραμορφώσεις για μικρή μετακίνηση ρήγματος, (β) βελτίωση της καμπτικής και επιδείνωση της αξονικής λειτουργίας του αγωγού και (γ) αύξηση της δυσκαμψίας, με αποτέλεσμα η κατακόρυφη παραμόρφωση του αγωγού να ξεκινά για μικρότερη τιμή της μετακίνησης του ρήγματος.

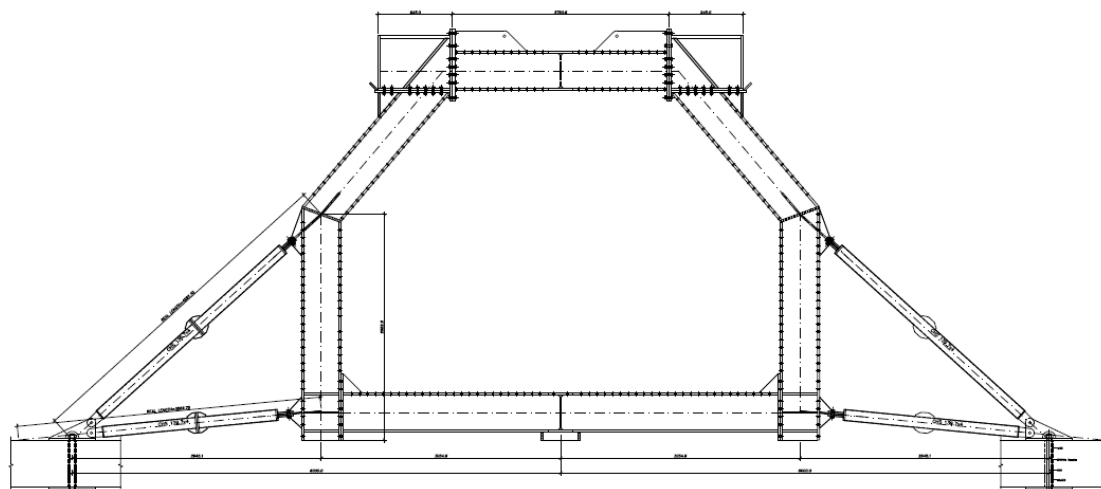
Από τη βιβλιογραφική διερεύνηση διαπιστώθηκε ότι δεν έχουν εκτελεσθεί πειράματα αγωγών ή σωλήνων με ενδιάμεσους αρθρωτούς εύκαμπτους κόμβους, όπως αυτοί που προτείνονται στο πλαίσιο του παρόντος ερευνητικού προγράμματος.

Σχεδιασμός Πειραματικής Διάταξης

3.1 Εισαγωγή

Η πειραματική διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της χρήσης εύκαμπτων κόμβων για την προστασία υπόγειων αγωγών έναντι αστοχίας λόγω της επιβολής μεγάλων εδαφικών παραμορφώσεων από διάρρηξη σεισμικού ρήγματος πραγματοποιείται μέσω μιας σειράς πειραμάτων σε δοκίμια/αγωγούς τόσο συνεχείς όσο και με εύκαμπτους κόμβους. Η χρήση εύκαμπτων κόμβων στους υπόγειους αγωγούς στοχεύει στη συγκέντρωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στους κόμβους και στη μείωση της αναπτυσσόμενης έντασης στα χαλύβδινα τμήματα του αγωγού, ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος αστοχίας από εφελκυστική θραύση ή τοπικό λυγισμό.

Για τα πειράματα χρησιμοποιούνται δοκίμια πρότυπης κοίλης κυκλικής διατομής CHS 114.3x3 και ονομαστικής ποιότητας χάλυβα S235JR, διαμορφωμένης υπό ψυχρή έλαση. Για λόγους διαθεσιμότητας στο εμπόριο στην επιθυμητή διάμετρο, επιλέχθηκε η χρήση απλών εύκαμπτων κόμβων. Τα πειράματα πραγματοποιούνται στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ. Το πλαίσιο της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Μεταλλικό πλαίσιο εκτέλεσης πειραματικών δοκιμών.

Figure 3.1: Steel test frame

3.2 Πρόγραμμα πειραματικών δοκιμών

Το πρόγραμμα των πειραματικών δοκιμών περιλαμβάνει τα ακόλουθα πειράματα:

- ο Δοκίμιο συνεχούς αγωγού, το οποίο θα καλείται εφεξής «CP» (Continuous Pipeline) χάριν συντομίας.
- ο Δοκίμιο αγωγού με κόμβους, το οποίο για λόγους συντομίας θα καλείται εφεξής «PFJ» (Pipeline with Flexible Joints).

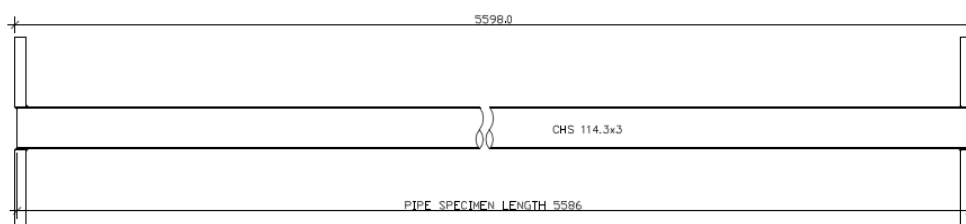
Για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων των υλικών θα γίνουν δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια χάλυβα των κοιλοδοκών σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-11.

3.3 Μετρητικά όργανα

Η αναπτυσσόμενη ένταση στον αγωγό εκτιμάται σε όρους παραμορφώσεων με χρήση μονοαξονικών ηλεκτρομηκνσιομέτρων (strain gauges) τύπου KYOWA KFG-10-120-C1-11L1M3R. Η απαραμόρφωτη και η παραμορφωμένη κατάσταση των δοκιμών προσδιορίζεται με χρήση LVDTs.

3.4 Περιγραφή δοκιμών

Το δοκίμιο του αγωγού είναι πρότυπης κυκλικής διατομής CHS 114.3x3 με διάμετρο $D=114.3$ mm και πάχος $t=3$ mm και το σχέδιο του παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2. Το μήκος του συνεχούς δοκιμίου αγωγού είναι 5586mm, όπως προσδιορίστηκε από τη γεωμετρία της πειραματικής διάταξης (Σχήμα 3.1). Το δοκίμιο διαμορφώνεται ως αμφίπακτο, έτσι ώστε η παραμόρφωση κάθε μισού τμήματος του δοκιμίου να προσομοιάζει το σχήμα «τελικού σίγμα» (S) με το οποίο παραμορφώνεται ένας υπόγειος αγωγός που υπόκειται σε ενεργοποίηση ρήγματος.

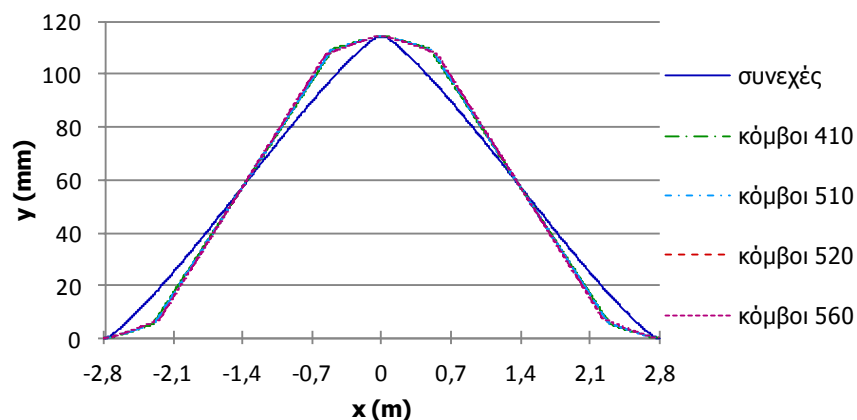


Σχήμα 3.2: Σχέδιο συνεχούς δοκιμίου (CP)

Figure 3.2: Drawing of continuous specimen (CP)

Η χωροθέτηση των εύκαμπτων κόμβων στο δοκίμιο έγινε κατόπιν προκαταρκτικών αριθμητικών αναλύσεων που προηγήθηκαν και σε συνάρτηση με τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τη χρήση των μετρητικών οργάνων. Έτσι, με χρήση απλών αριθμητικών προσομοιωμάτων εξετάστηκαν εναλλακτικές θέσεις τοποθέτησης των εύκαμπτων κόμβων συναρτήσει της απόστασης από τα άκρα του δοκιμίου και το μέσον. Σημειώνεται ότι οι εύκαμπτοι κόμβοι τοποθετούνται απολύτως συμμετρικά στο δοκίμιο του αγωγού. Οι περιπτώσεις αποστάσεων που εξετάστηκαν είναι 410mm, 510mm, 520mm και 560mm. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται οι μετακινήσεις του

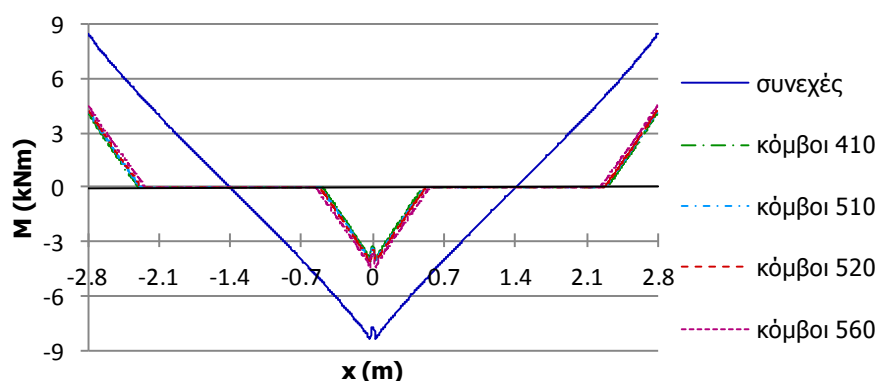
συνεχούς δοκιμίου (για σύγκριση) και του δοκιμίου με εύκαμπτους κόμβους τοποθετημένους σε διαφορετικές θέσεις. Διαπιστώθηκε ότι η διαφορετική χωροθέτηση των κόμβων δε μεταβάλλει σημαντικά την παραμορφωμένη εικόνα του δοκιμίου με τους κόμβους.



Σχήμα 3.3: Μετακινήσεις συνεχούς δοκιμίου και δοκιμίου με εύκαμπτους κόμβους

Figure 3.3: Displacements of continuous specimen and specimen with flexible joints

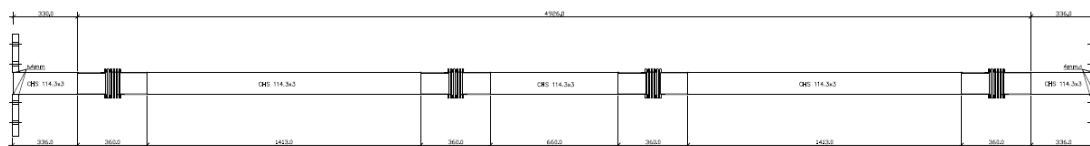
Η κατανομή των καμπτικών ροπών κατά μήκος του συνεχούς δοκιμίου και του δοκιμίου με εύκαμπτους κόμβους σε διαφορετικές θέσεις, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4, αναδεικνύει τις μικρές διαφορές που προκύπτουν σε όρους καμπτικών ροπών ανάμεσα στις εναλλακτικές θέσεις τοποθέτησης των κόμβων. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη ότι η επιθυμητή θέση των εύκαμπτων κόμβων είναι κοντά στα άκρα, όπου αναπτύσσεται η μέγιστη ένταση σύμφωνα και με τα αριθμητικά αποτελέσματα του παραδοτέου 8.1, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η βέλτιστη θέση των κόμβων είναι σε απόσταση 410mm από τα άκρα. Η θέση αυτή ικανοποιεί τους γεωμετρικούς περιορισμούς της πειραματικής διάταξης, τις κατασκευαστικές απαιτήσεις και τις απαιτήσεις σχετικά με τη λειτουργία των μετρητικών οργάνων.



Σχήμα 3.4: Κατανομή καμπτικών ροπών συνεχούς δοκιμίου και δοκιμίου με εύκαμπτους κόμβους

Figure 3.4: Bending moment distributions of continuous specimen and specimen with flexible joints

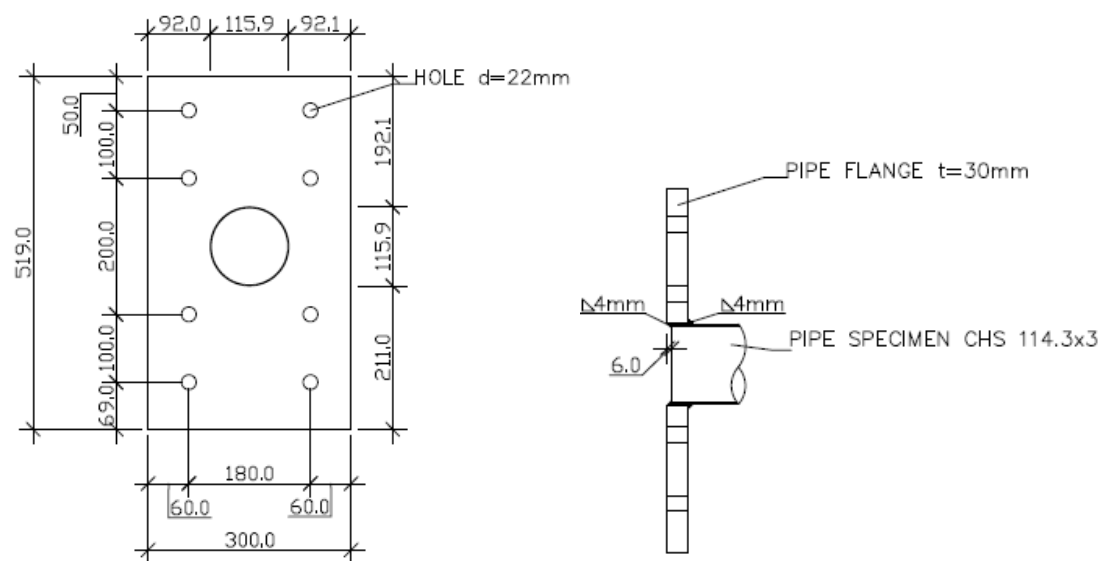
Βάσει της προηγούμενης συνοπτικής διερεύνησης, στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται το σχέδιο του δοκιμίου με τους τέσσερις (4) εύκαμπτους κόμβους, οι οποίοι τοποθετούνται συμμετρικά περί το μέσον του δοκιμίου.



Σχήμα 3.5: Σχέδιο δοκιμίου με εύκαμπτους κόμβους (PFJ)

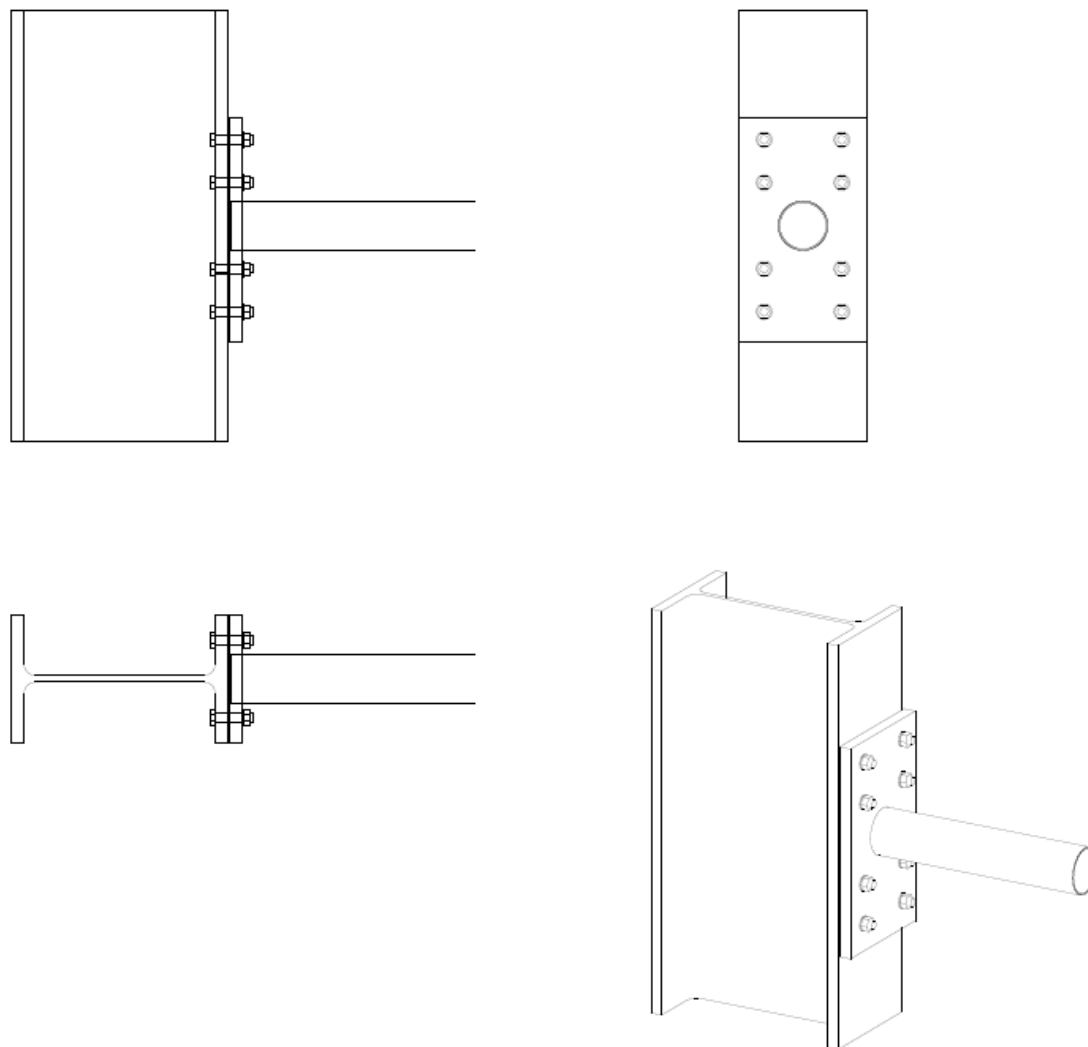
Figure 3.5: Drawing of specimen with flexible joints

Η σύνδεση του δοκιμίου με το πλαίσιο δοκιμών υλοποιείται μέσω μετωπικών πλακών, οι οποίες συγκολλούνται στο δοκίμιο και κοχλιώνονται στο πλαίσιο. Οι μετωπικές πλάκες έχουν διαστάσεις 300x519x30mm (Σχήμα 3.6). Στο μέσο της μετωπικής πλάκας διανοίγεται οπή διαμέτρου 115.9mm για την καλύτερη συγκόλληση του δοκιμίου με αμφίπλευρες εξωραφές πάχους 4mm. Η κοχλίωση της μετωπικής πλάκας στο υποστόλωμα του πλαισίου δοκιμών υλοποιείται μέσω οκτώ (8) κοχλιών M20 ποιότητας 10.9. Η σύνδεση του δοκιμίου στο πλαίσιο παρουσιάζεται και σε τρισδιάστατη απεικόνιση στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.6: Όψη και τομή μετωπικής πλάκας δοκιμίου

Figure 3.6: View and cross-section of specimen faceplate



Σχήμα 3.7: Σύνδεση δοκιμίου στο πλαίσιο δοκιμών

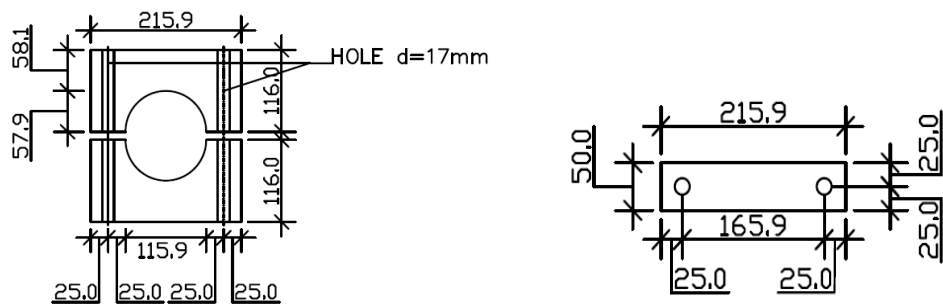
Figure 3.7: Specimen bolted connection to the testing frame

Η επιβολή της μετακίνησης γίνεται μέσω υδραυλικού εμβόλου (Εικόνα 3.1), το οποίο συνδέεται μέσω συρματοσχοίνου με έλασμα που τοποθετείται στο μέσον του δοκιμίου. Το έλασμα είναι διαστάσεων 116x215.9x50 mm και αποτελείται από δύο όμοια ημιτεμάχη για πρακτικούς λόγους, ώστε να είναι δυνατή η επαναχρησιμοποίησή του (Σχήμα 3.8). Τα ημιτεμάχη σφίγγονται μεταξύ τους μέσω ντιζών.



Εικόνα 3.1: Δοκίμιο και υδραυλικό έμβολο επιβολής μετακίνησης

Photo 3.1: Specimen and hydraulic actuator for displacement application.



Σχήμα 3.8: Όψη και τομή ελάσματος επιβολής μετακίνησης

Figure 3.8: View and cross-section of plate for load application

Το σύνολο των χαλύβδινων στοιχείων του πειράματος (δοκίμια, πλάκες σύνδεσης, ελάσματα) είναι ονομαστικής ποιότητας χάλυβα S235JR.

4

Πειραματικές δοκιμές αγωγών

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της χρήσης εύκαμπτων κόμβων στη μείωση των αναπτυσσόμενων ανηγμένων παραμορφώσεων.

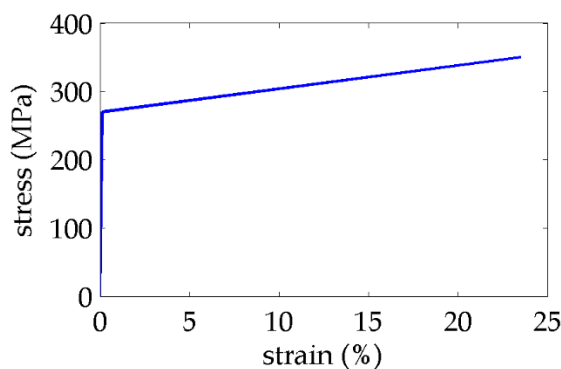
4.2 Ποιότητα χάλυβα

Για τον υπολογισμό της ποιότητας των υλικών έγιναν δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια χάλυβα των κοιλοδοκών (Εικόνα 4.1). Τα αποτελέσματα των δοκιμών συνοψίζονται στη γραμμικοποιημένη τυπική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης, η οποία δίδεται στο Σχήμα 4.1.



Εικόνα 4.1: Δοκίμιο χάλυβα για δοκιμή εφελκυσμού

Photo 4.1: Steel specimen for tensile test



Σχήμα 4.1: Τυπικό διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών χάλυβα

Figure 4.1: Typical stress - strain curve of specimens' steel

4.3 Πειραματική διάταξη

Ο σχεδιασμός και τα μέρη της πειραματικής διάταξης παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Το στατικό σύστημα κάθε δοκιμίου είναι αυτό της αμφίπακτης δοκού, στο μέσον της οποίας επιβάλλεται μονοτονικά μέσω υδραυλικού εμβόλου δυναμικότητας 300kN εγκάρσια μετακίνηση ίση με 115mm (Εικόνα 4.2 και Εικόνα 4.3). Η επιβολή της μετακίνησης στο μεσαίο έλασμα (παράγραφος 3.3, Σχήμα 3.8) πραγματοποιείται μέσω ντίζας διαμέτρου 8mm.



Εικόνα 4.2: Πειραματική διάταξη με συνεχές δοκίμιο

Photo 4.2: Experimental set-up with continuous specimen



Εικόνα 4.3: Πειραματική διάταξη με δοκίμιο με κόμβους

Photo 4.3: Experimental set-up with specimen with flexible joints

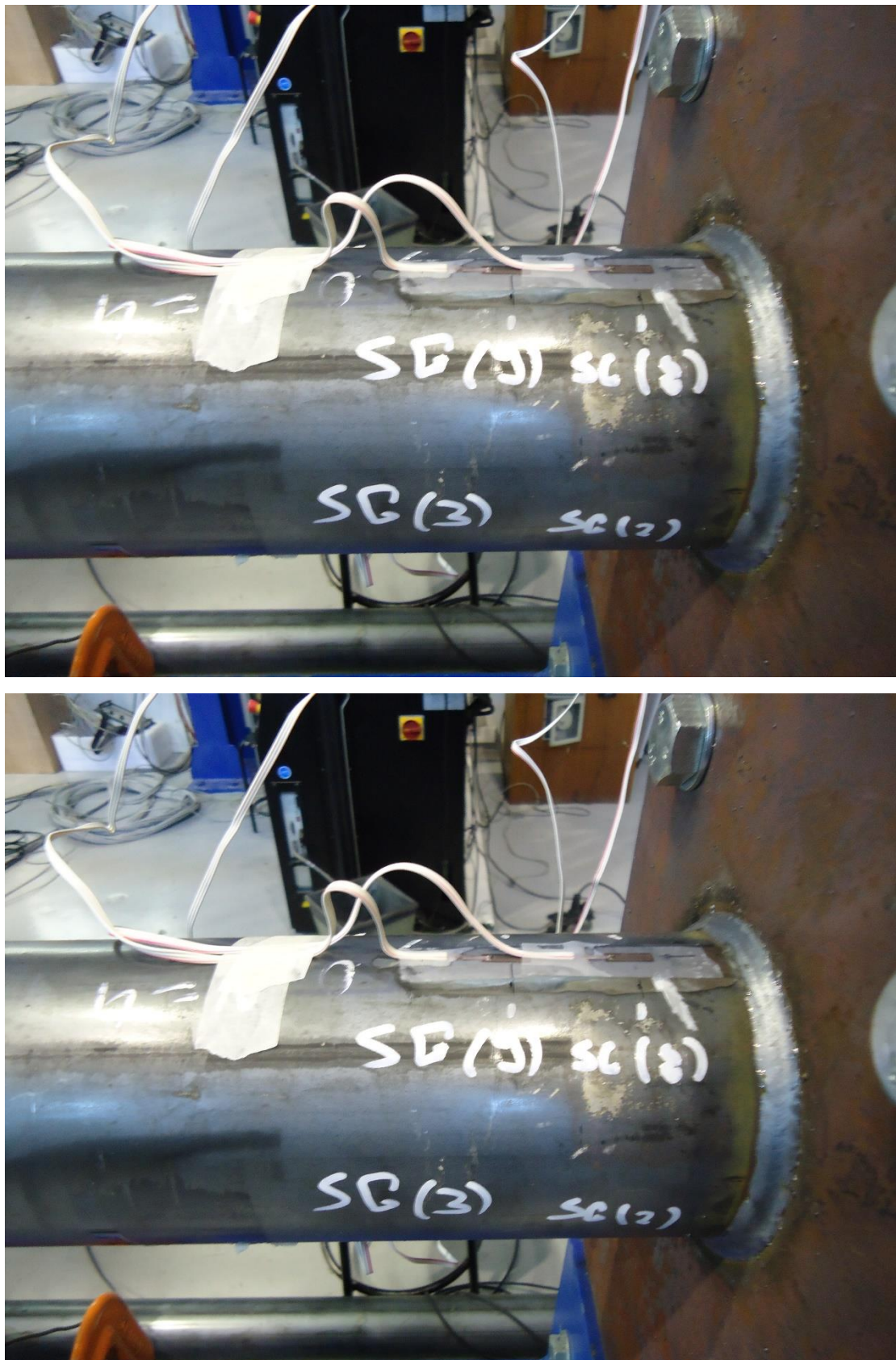
Οι κόμβοι που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα παρουσιάζονται στο Εικόνα 4.4 και έχουν τη δυνατότητα αξονικής, πλευρικής και στροφικής μετακίνησης και οι σταθερές ελατηρίων είναι αντίστοιχα 26.62N/mm , 91.94N/mm και 58262.97Nmm/rad



Εικόνα 4.4: Εύκαμπτος κόμβος πειραματικών δοκιμών

Photo 4.4 Flexible joint used in the experimental investigation

Για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων του χάλυβα, που αποτελούν το βασικό σημείο ενδιαφέροντος, ώστε να συγκριθούν οι παραμορφώσεις του συνεχούς δοκιμίου και του δοκιμίου με κόμβους, τοποθετήθηκαν κατά τη φάση προετοιμασίας των δοκιμών ηλεκτρομηκυσιόμετρα (Εικόνα 4.5) στις θέσεις της μέγιστης αναμενόμενης έντασης και ειδικότερα ένα στην εφελκόμενη ίνα και ένα στη θλιβόμενη. Ειδικότερα τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα τοποθετήθηκαν σε αποστάσεις 40mm και 80mm από τις μετωπικές πλάκες και σε απόσταση 40mm από το έλασμα επιβολής φορτίου. Συνολικά σε κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκαν δώδεκα (12) strain gauges, σύμφωνα με το σχέδιο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.



Εικόνα 4.5: Λεπτομέρειες τοποθέτησης ηλεκτρομηκονσιομέτρων

Photo 4.5: Details of placement of strain gauges

Σχήμα 4.2: Σχέδιο θέσεων

Figure 4.2: Drawing of

Επίσης, σε δοκίμια αποστασιόμετρα το σχέδιο του Σχήματος

Σχήμα 4.3: Σχέδιο

Figure 4.3: Drawing

Οι θέσεις των LVDTs (α) να αποτυπώσουν ενδιαφέροντος επί των 38, 39, 40 και 41)

(β) να καταγραφεί της σύνδεσης του δοκιμών (LVDTs 30 και

(γ) να αποτυπωθεί η κατάσταση του φορέα με κινούμενο LVDT

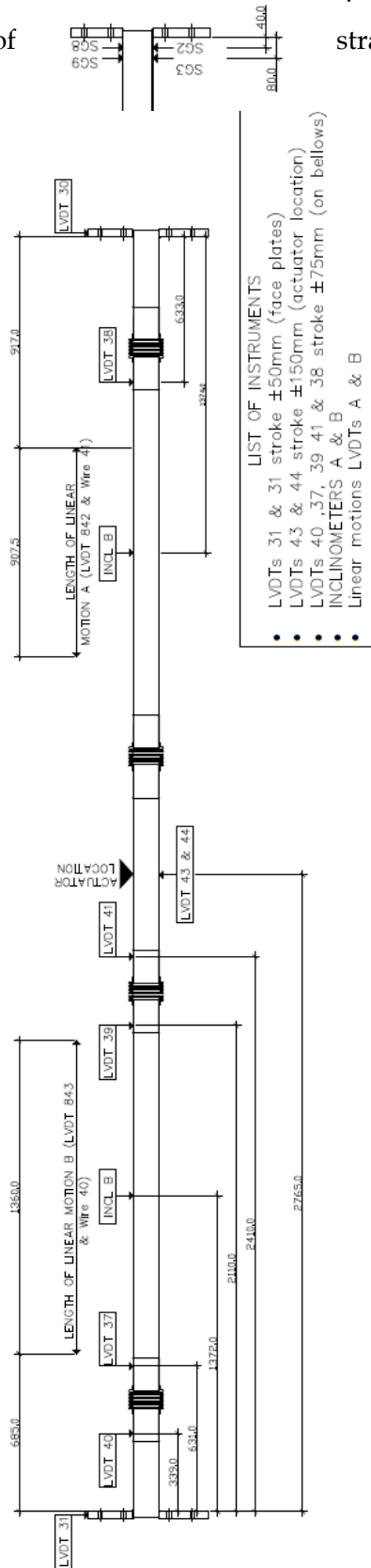
Τέλος, στο πρόγραμμα δοκιμών ο ρυθμός επιβλήθηκε ήταν 0.031667mm/sec.

4.4 Αποτελέσματα

4.4.1 Δοκίμιο CP

Η παραμόρφωση του παρουσιάζεται

4.6 για στάθμες μετακίνησης 50mm,



ηλεκτρομηκονοιομέτρων

strain gauges locations

συγκεκριμένες θέσεις τοποθετήθηκαν (LVDTs), σύμφωνα με 4.8.

θέσεων αποστασιόμετρων of LVDTs locations

επιλέχθηκαν έτσι ώστε: συγκεκριμένες θέσεις δοκιμών (LVDTs 37,

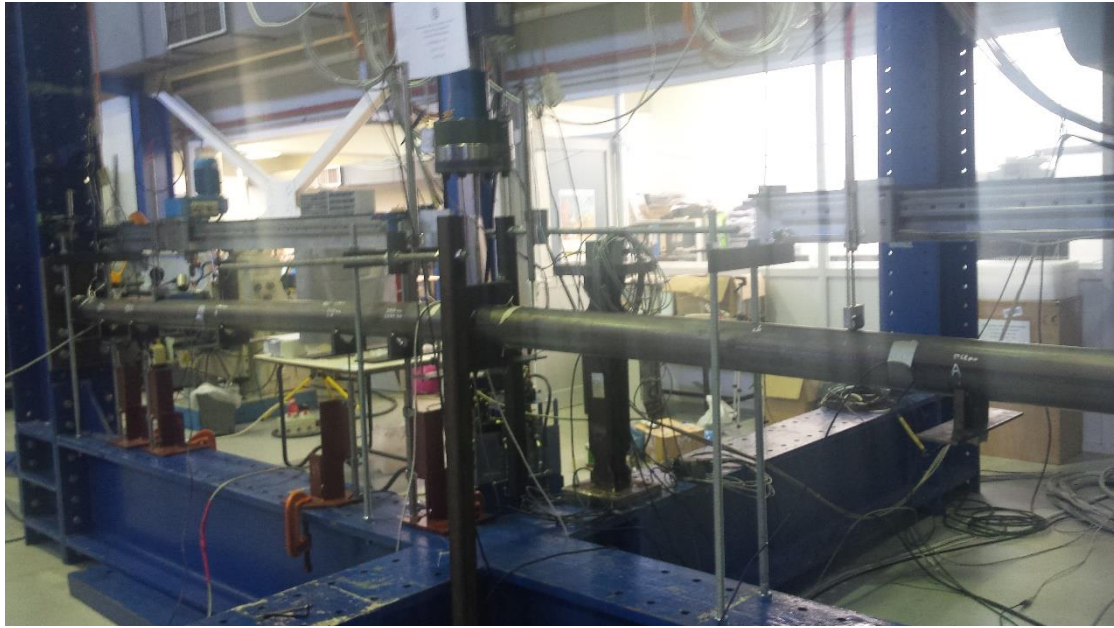
ενδεχόμενη ολίσθηση δοκιμίου στο πλαίσιο 31)

παραμορφωμένη με κατασκευή φορείου (Linear Motion A και B)

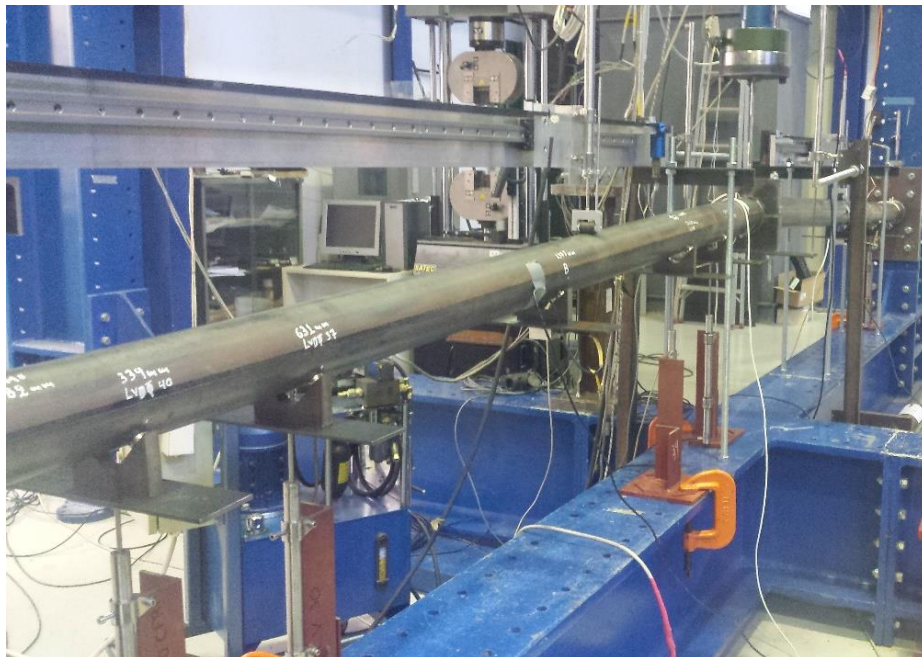
των πειραματικών φόρτισης που σταθερός και ίσο με

δοκιμών

συνεχούς δοκιμίου CP διαδοχικά στην Εικόνα επιβαλλόμενης 100mm και 115mm.



(α)



(β)

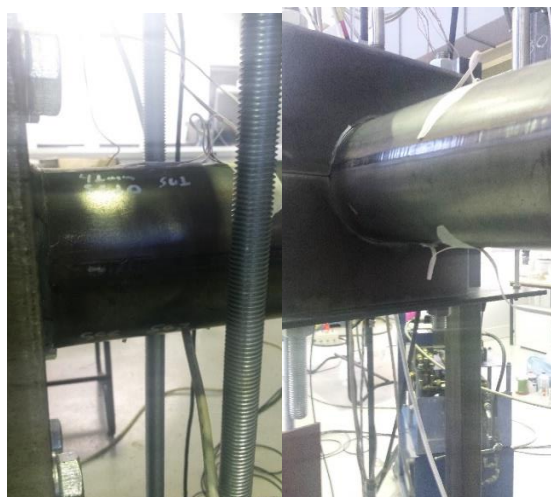


(γ)

Εικόνα 4.6: Παραμορφωμένος φορέας CP σε στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης (α) 50mm, (β) 100mm και (γ) 115mm

Photo 4.6: Specimen deformed shape CP for imposed displacement (α) 50mm, (β) 100mm και (γ) 115mm

Επίσης, στην Εικόνα 4.7 παρουσιάζονται λεπτομέρειες της παραμόρφωσης του δοκιμίου για στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης 115mm στις θέσεις μέγιστης έντασης, δηλαδή στη σύνδεση με τη μετωπική πλάκα και στο μέσον.

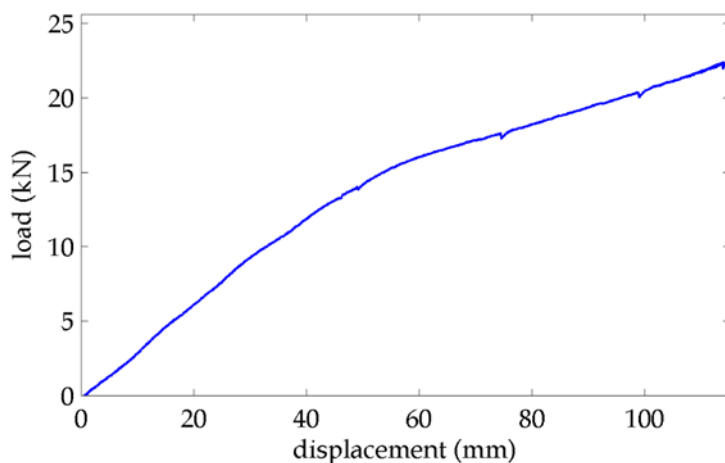


Εικόνα 4.7: Παραμορφωμένος φορέας CP - λεπτομέρειες παραμόρφωσης για επιβαλλόμενη μετακίνηση 115mm.

Photo 4.7: Specimen deformed shape CP - details of specimen deformation for imposed displacement 115mm

Η καμπύλη δύναμης - μετακίνησης (δρόμος ισορροπίας) που προέκυψε από την κυψέλη φορτίου του υδραυλικού εμβόλου για το συνεχές δοκίμιο CP παρουσιάζεται

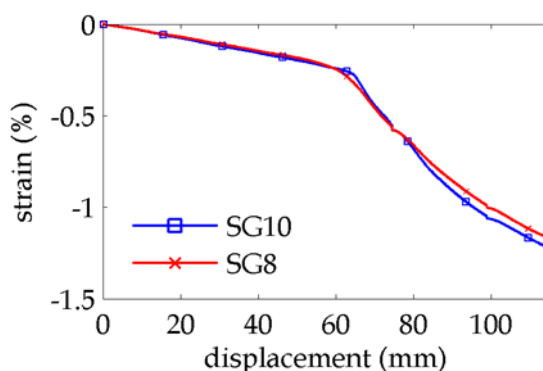
στο Σχήμα 4.4, όπου διαπιστώνεται καταρχήν η ευσταθής συμπεριφορά του φορέα και η απουσία οριακού σημείου. Αρχικά, η συμπεριφορά του φορέα είναι γραμμική και ακολούθως για μετακίνηση περίπου ίση με 60mm παρουσιάζεται καμπύλωση του διαγράμματος που συναρτάται με την πλαστικοποίηση των ακραίων διατομών και την έναρξη σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης. Ακολούθως ο δρόμος ισορροπίας παραμένει ανοδικός μέχρι τη μέγιστη επιβαλλόμενη μετακίνηση.



Σχήμα 4.4: Καμπύλη δύναμης - μετακίνησης δοκιμίου CP.

Figure 4.4: Force - displacement curves for CP specimen.

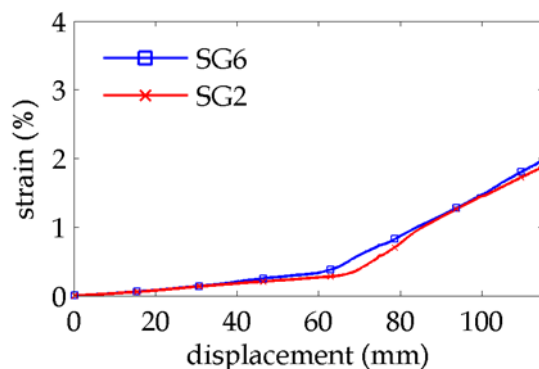
Τα συμπεράσματα από τον πειραματικό δρόμο ισορροπίας που περιγράφει τη συνολική συμπεριφορά του φορέα επιβεβαιώνονται και από το δρόμο ισορροπίας των strain gauges (Σχήμα 4.5) στη θλιβόμενη πλευρά του δοκιμίου και ειδικότερα αυτών που βρίσκονται πλησιέστερα στις δύο μετωπικές πλάκες σύνδεσης με το πλαίσιο δοκιμών. Έτσι, για μετακίνηση του φορέα περίπου ίση με 60mm διαπιστώνεται έντονη αλλαγή της κλίσης του διαγράμματος και ακολούθως ταχύτερη αύξηση των παραμορφώσεων.



Σχήμα 4.5: Δρόμος ισορροπίας θλιπτικών παραμορφώσεων στην άνω θλιβόμενη ίνα πλησίον των μετωπικών πλακών.

Figure 4.5: Equilibrium path of compressive strains on the upper compressive side close to the face plates.

Για τις ίδιες θέσεις παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6 ο δρόμος ισορροπίας των εφελκυστικών παραμορφώσεων, από όπου εξάγονται τα ίδια συμπεράσματα.

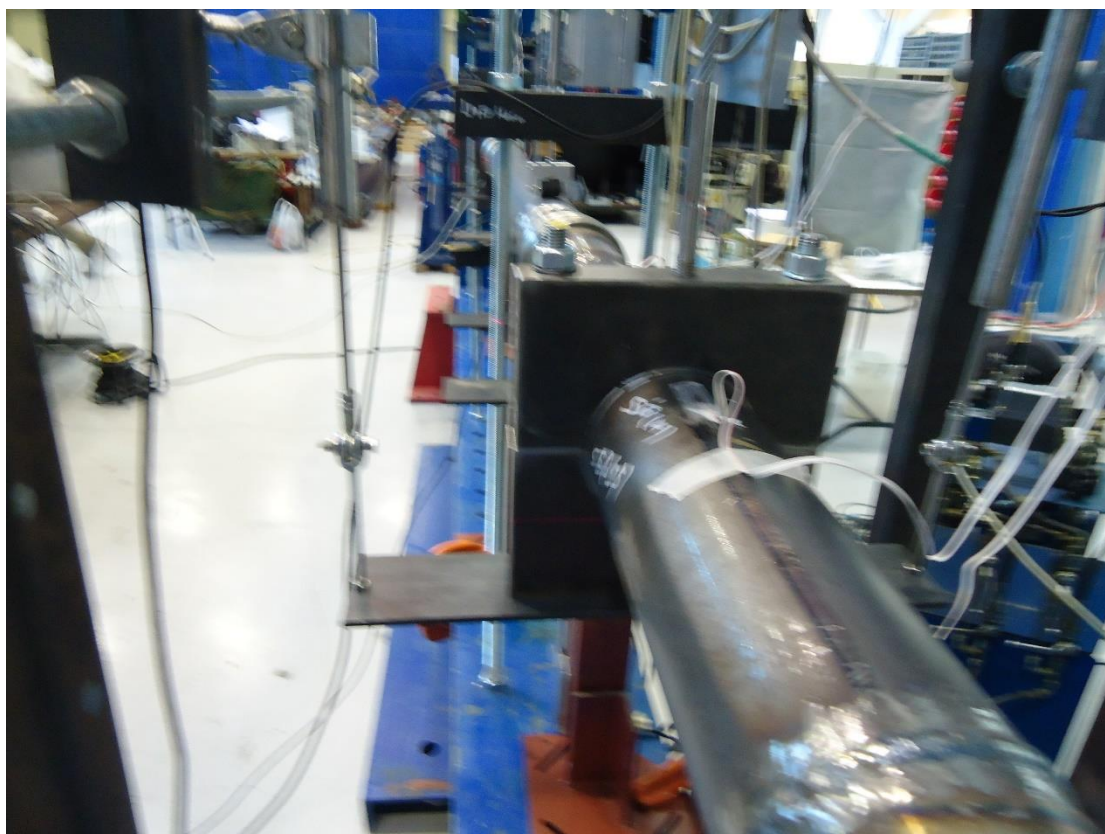


Σχήμα 4.6: Δρόμος ισορροπίας εφελκυστικών παραμορφώσεων στην κάτω εφελκυόμενη ίνα πλησίον των μετωπικών πλακών.

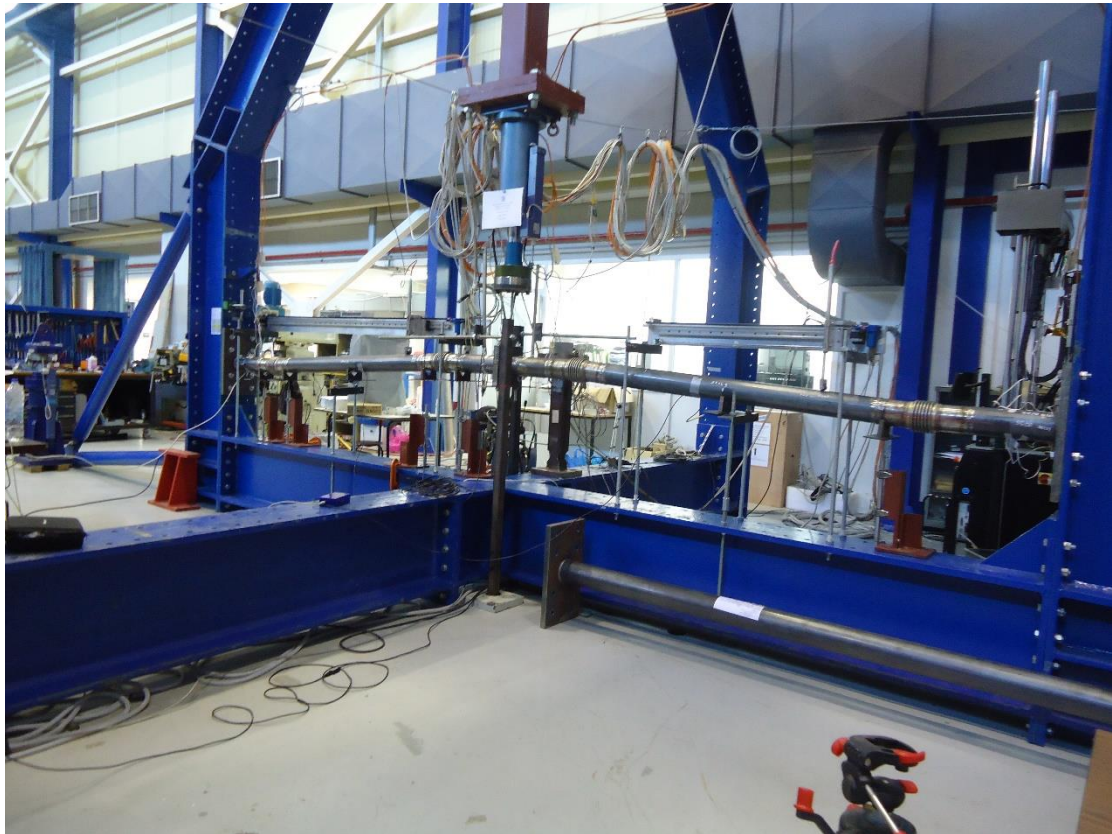
Figure 4.6: Equilibrium path of tensile strains on the bottom tensile side of the pipe close to the face plates.

4.4.2 Δοκίμιο PFJ

Η παραμόρφωση του δοκιμίου με εύκαμπτους κόμβους PFJ παρουσιάζεται διαδοχικά στην Εικόνα 4.8 για στάθμες επιβαλλόμενης μετακίνησης 50mm, 100mm και 115mm. Είναι εμφανές ότι οι παραμόρφωση επικεντρώνεται στους εύκαμπτους κόμβους, όπου σχηματίζεται γωνία μεταξύ των δύο εκατέρωθεν τμημάτων του δοκιμίου, του οποίου πλέον ο παραμορφωμένος άξονας σχηματίζει τεθλασμένη γραμμή με κορυφές τις θέσεις εύκαμπτων κόμβων.



(α)



(β)

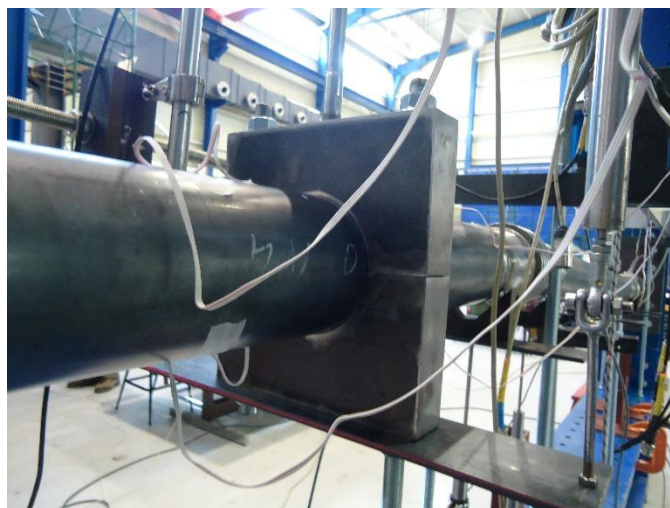


(γ)

Εικόνα 4.8: Παραμορφωμένος φορέας PFJ σε στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης (α) 50mm, (β) 100mm και (γ) 115mm

Photo 4.8: Specimen deformed shape PFJ for imposed displacement (α) 50mm, (β) 100mm και (γ) 115mm

Επίσης, στο Εικόνα 4.9 παρουσιάζονται λεπτομέρειες της παραμόρφωσης του δοκιμίου για στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης 115mm στις θέσεις μέγιστης έντασης, ήτοι στη σύνδεση με τη μετωπική πλάκα και στο μέσον.

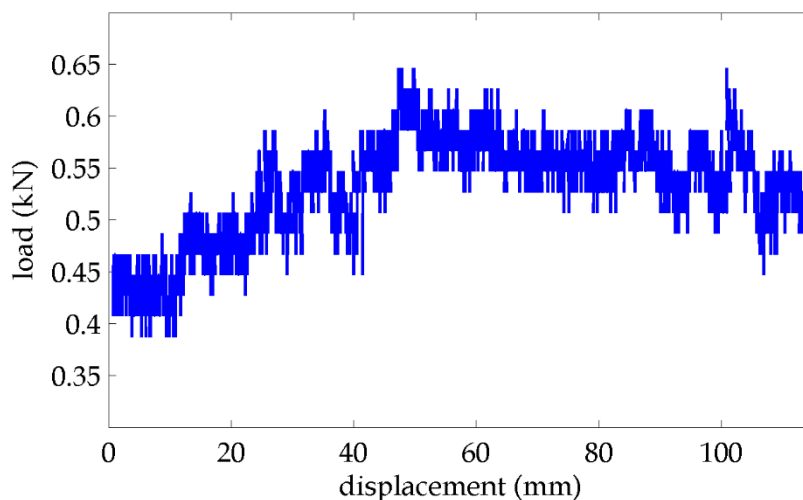


Εικόνα 4.9: Παραμορφωμένος φορέας PFJ – λεπτομέρειες παραμόρφωσης για επιβαλλόμενη μετακίνηση 115mm

Photo 4.9: Specimen deformed shape PFJ – details of specimen deformation for imposed displacement 115mm

Η καμπύλη δύναμης – μετακίνησης (δρόμος ισορροπίας) που προέκυψε από την κυψέλη φορτίου του υδραυλικού εμβόλου για το συνεχές δοκίμιο PFJ παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7, όπου διαπιστώνεται καταρχήν ότι το μέγεθος του φορτίου που αναπτύχθηκε κατά την πειραματική δοκιμή ήταν πολύ μικρό και λόγω ευαισθησίας των μετρήσεων της δυναμοκυψέλης του υδραυλικού εμβόλου δεν προκύπτει

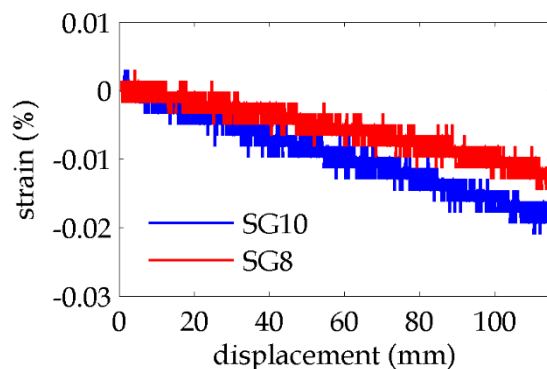
εμφανής καμπύλη. Σημαντικό, όμως, είναι το γεγονός ότι το αναπτυσσόμενο φορτίο είναι περίπου 3000% μικρότερο από το αντίστοιχο του συνεχούς δοκιμίου.



Σχήμα 4.7: Καμπύλη δύναμης - μετακίνησης δοκιμίου PFJ.

Figure 4.7: Force - displacement curves for PFJ specimen

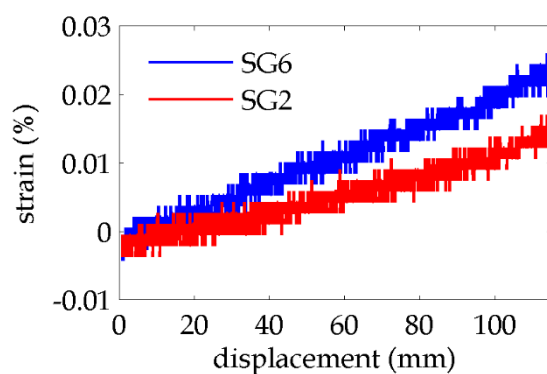
Ο πειραματικός δρόμος ισορροπίας περιγράφει τη συνολική συμπεριφορά του φορέα. Σε αυτόν, όμως, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η καθοριστικής σημασίας παρουσία των εύκαμπτων κόμβων με αξονική, πλευρική και στρωφική δυνατότητα μετακίνησης. Έτσι, κατά την εκτέλεση του πειράματος διαπιστώθηκε ότι για μικρές τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης οι εύκαμπτοι κόμβοι υπόκεινται κυρίως σε στρωφή. Ακολούθως, όμως, διαπιστώθηκε ότι εκτείνονται και αξονικά. Σε κάθε όμως περίπτωση η μετατροπή του συνεχούς στατικού συστήματος σε σπονδυλωτό επηρεάζει καθοριστικά την αναπτυσσόμενη ένταση των χαλύβδινων τμημάτων του αγωγού σε όρους παραμορφώσεων. Έτσι, στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες θλιπτικές παραμορφώσεις στην άνω θλιβόμενη ίνα πλησίον των μετωπικών πλακών. Ο δρόμος ισορροπίας των παραμορφώσεων είναι περίπου γραμμικός, στοιχείο το οποίο υποδεικνύει περίπου γραμμική αύξηση των παραμορφώσεων, οι οποίες είναι κατ' απόλυτη τιμή περίπου 1000 φορές μικρότερες από τις αντίστοιχες του συνεχούς δοκιμίου (CP). Η γραμμική αύξηση των παραμορφώσεων πλησίον των μετωπικών πλακών αιτιολογείται από την «απορρόφηση» της έντασης από τους ενδιάμεσους εύκαμπτους κόμβους. Σημειώνεται πως όπως και στην περίπτωση του δρόμου ισορροπίας του φορτίου, έτσι και στην περίπτωση των παραμορφώσεων οι μετρούμενες τιμές είναι πολύ μικρές και επηρεάζονται από την ευαισθησία των strain gauges.



Σχήμα 4.8: Δρόμος ισορροπίας θλιπτικών παραμορφώσεων στην άνω θλιβόμενη ίνα πλησίον των μετωπικών πλακών.

Figure 4.8: Equilibrium path of compressive strains on the upper compressive side close to the face plates.

Για τις ίδιες θέσεις παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9 ο δρόμος ισορροπίας των εφελκυστικών παραμορφώσεων, από όπου εξάγονται τα ίδια συμπεράσματα



Σχήμα 4.9: Δρόμος ισορροπίας εφελκυστικών παραμορφώσεων στην κάτω εφελκυστική ίνα πλησίον των μετωπικών πλακών.

Figure 4.9: Equilibrium path of tensile strains on the bottom tensile side of the pipe close to the face plates.

5

Εκτενής Περίληψη - Συμπεράσματα

Στα πλαίσια του εν λόγω παραδοτέου παρουσιάστηκε ο σχεδιασμός της πειραματικής διάταξης και η εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης χρήσης εύκαμπτων κόμβων σε αγωγούς με στόχο τη μείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων λόγω επιβαλλόμενων εγκάρσιων μετακινήσεων.

5.1 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Παρουσιάστηκε μία συνεκτική και συνοπτική βιβλιογραφική ανασκόπηση των πειραμάτων αγωγών που έχουν εκτελεσθεί. Τα πειράματα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία περιλαμβάνουν: (α) δοκιμές αγωγών/σωλήνων χωρίς περιβάλλον έδαφος με σκοπό τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής, εφελκυστικής αντοχής, τη διερεύνηση της οβαλοποίησης της διατομής και της κρίσιμης θλιπτικής παραμόρφωσης τοπικού λυγισμού και (β) δοκιμές αγωγών υπό κλίμακα με περιβάλλον έδαφος και με χρήση διατμητικού κιβωτίου ή φυγοκεντριστή για τον προσδιορισμό της απόκρισης αγωγού υποκειμένου σε ενεργοποίηση ρήγματος και παράλληλα τη διερεύνηση των παραμέτρων που επηρεάζουν αυτήν την απόκριση. Από τη βιβλιογραφική διερεύνηση διαπιστώθηκε ότι δεν έχουν εκτελεσθεί πειράματα αγωγών ή σωλήνων με ενδιάμεσους αρθρωτούς εύκαμπτους κόμβους, όπως αυτοί που προτείνονται στο πλαίσιο του παρόντος ερευνητικού προγράμματος.

5.2 Σχεδιασμός πειραματικής διάταξης

Παρουσιάστηκε ο σχεδιασμός της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς αγωγών με εύκαμπτους κόμβους συγκριτικά με συνεχείς αγωγούς. Προκαταρκτικές αριθμητικές αναλύσεις σε συνδυασμό με τους γεωμετρικούς περιορισμούς του πλαισίου δοκιμών παρέχουν τις βέλτιστες θέσεις εισαγωγής των εύκαμπτων κόμβων στο δοκίμιο/σωλήνα. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα λεπτομερή σχέδια του πλαισίου δοκιμών, των δοκιμίων και των λοιπών τμημάτων της διάταξης, παρέχοντας μία πλήρη εικόνα για την πειραματική διαδικασία.

5.3 Πειραματικές δοκιμές αγωγών

Το πρόγραμμα πειραματικών δοκιμών αγωγών με εύκαμπτους κόμβους περιελάμβανε δοκιμές τόσο συνεχών αμφίπακτων δοκιμίων όσο και δοκιμίων με εύκαμπτους κόμβους. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού για να προσδιοριστούν οι ιδιότητες του χάλυβα των δοκιμίων. Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται σε όρους δρόμους ισορροπίας (διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης), ενώ παρέχονται εικόνες από τα απαραμόρφωτα και τα παραμορφωμένα δοκίμια στο τέλος της πειραματικής δοκιμής. Η συμπεριφορά των δοκιμίων χαρακτηρίζεται από ευστάθεια, καθώς οι δρόμοι ισορροπίας είναι ανοδικοί. Παράλληλα, οι αναπτυσσόμενες εντάσεις του δοκιμίου με εύκαμπτους κόμβους είναι υποπολλαπλάσιες συγκριτικά με το συνεχές δοκίμιο, τόσο σε όρους φορτίου, όσο και σε όρους αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, οι οποίες μετρήθηκαν με ηλεκτρομηκυνσιόμετρα.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Moore R.L. & Clark J.W. (1952), "Torsion, compression and bending tests of tubular sections machined from 75S-T6 tolled round rod", NACA RM 52125.
- [2] Reddy D.B. (1979), "An experimental study of the plastic buckling of circular cylinders in pure bending", *International Journal of Solids and Structures* 15, pp. 669-685.
- [3] Tugcu P. & Schroeder J. (1979), "Plastic deformation and stability of pipes exposed to external couples", *International Journal of Solid and Structures* 15, pp. 643-658.
- [4] Gresnigt A.M. (1986), "Plastic design of buried steel pipelines in settlement areas", *HERON* 31(4).
- [5] Kyriakides S. & Ju G.T. (1992), "Bifurcation and localization instabilities in cylindrical shells under bending - II. Predictions", *International Journal of Solids and Structures* 29(9), pp. 1143-1171.
- [6] Fowler J.R. (1990), "Recommended design procedures for offshore pipeline", *Seminar Proceedings of Offshore Pipelines*, AGA Catalogue No. L51646.
- [7] Ju G.T. & Kyriakides S. (1992), "Bifurcation and localization instabilities in cylindrical shells under bending - II. Experiments", *International Journal of Solids and Structures* 29(9), pp. 1117-1142.
- [8] Foeken R.J. & Gresnigt A.M. (2001), "Local buckling of UOE and seamless steel pipes", *Proceeding of the Eleventh (2001) International Offshore and Polar Engineering Conference*, Stavanger, Norway.
- [9] Sherman D.R. (1976), "Tests of circular steel tubes in bending", *Journal of Structural Division*, ASCE 102, pp. 2181-2195.
- [10] Steinman S.L. & Vojta J.F. (1989), "Hydrostatic beam-column test phase II", *Final report*, CBI contract number C92731I, Plainfield, Illinois.
- [11] Marlow R.S. (1988), "Effects of external hydrostatic pressure on tubular beam-columns", *Final report*, SwRI project number 06-1184, San Antonio, Texas.
- [12] Gresnigt A.M., Dijkstra O.D. & van Rongern H.J.M. (1994), "Design of pipelines in high strength steel", *Proceeding of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol. 2, pp. 186-194, Osaka, Japan.
- [13] Elchalakani M., Zhao X.-L. & Grzebieta R. (2002), "Bending tests to determine slenderness limits for cold-formed circular hollow sections", *Journal of Constructional Steel Research* 58, pp. 1407-1430.

- [14] Murray D.W. (1997), "Local buckling, strain localization, wrinkling and postbuckling response of line pipe", *Engineering Structures* 19(5), pp. 360-371.
- [15] Dama E., Karamanos S.A. & Gresnigt A.M. (2007), "Failure of locally buckled pipelines", *Journal of Pressure Vessel Technology* 129, pp. 272-279.
- [16] Thinwongpituk C., Poonaya S., Choksawadee S. & Lee M. (2008), "The ovalization of thin-walled circular tubes subjected to bending", *Proceedings of the World congress on Engineering 2008 Vol II, London, UK*.
- [17] Gresnigt A.M. & Karamanos S.A. (2009), "Local buckling strength and deformation capacity of pipes", *Proceeding of the Nineteenth (2009) International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan*.
- [18] Mason J.A., O'Rourke T.D. & Kung J.K. (2010), "Direct tension performance of steel pipelines with welded slip joints", *ASCE Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 1, pp. 133-140.
- [19] Chen H., Ji L., Huang C., Wang H. & Yanhua L. (2012), "Analysis of bending test of 40-in X70 line pipe", *Proceeding of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece*.
- [20] Ferino J., Fonzo A., porta R. & Spinelli C.-M. (2014), "Analytical formulation for line pipe bending strain capacity evaluation developed through experimental-numerical approach", *International Journal of Offshore and Polar Engineering* 24(4), pp. 292-300.
- [21] Kristoffersen M., Børvik T., Langseth M. & Hopperstad O.S. (2015), "X65 steel pipes subjected to combined stretching and bending - Marine 2015", *Proceeding of the VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, Rome, Italy*.
- [22] Abdoun T.H., Ha D., O'Rourke M.J., Symans M.D., O'Rourke T.D., Palmer M.C. & Stewart H.E. (2009), "Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake faulting", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 29, pp. 415-427.
- [23] Ha D., Abdoun T.H., O'Rourke M.J., Symans M.D., O'Rourke T.D., Palmer M.C. & Stewart H.E. (2010), "Earthquake faulting effects on buried pipelines - case history and centrifuge study", *Journal of Earthquake Engineering* 14, pp. 646-669.
- [24] Sim W.W., Towhata I., Yamada S. & Moinet G.J.-M. (2012), "Shaking table tests modelling small diameter pipes crossing vertical fault", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 35, pp. 59-71.
- [25] Rofooei F.R., Jalali H.H., Attari N.K.A. & Alavi Mojtaba (2012), "Full-scale laboratory testing of buried pipelines subjected to permanent ground displacement caused by reverse faulting", *Proceeding of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal*.

- [26] Moradi M., Rojhani M., Galandarzadeh A. & Takada S. (2013), "Centrifuge modeling of buried continuous pipelines subjected to normal faulting", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 12(1), pp. 155-164.