

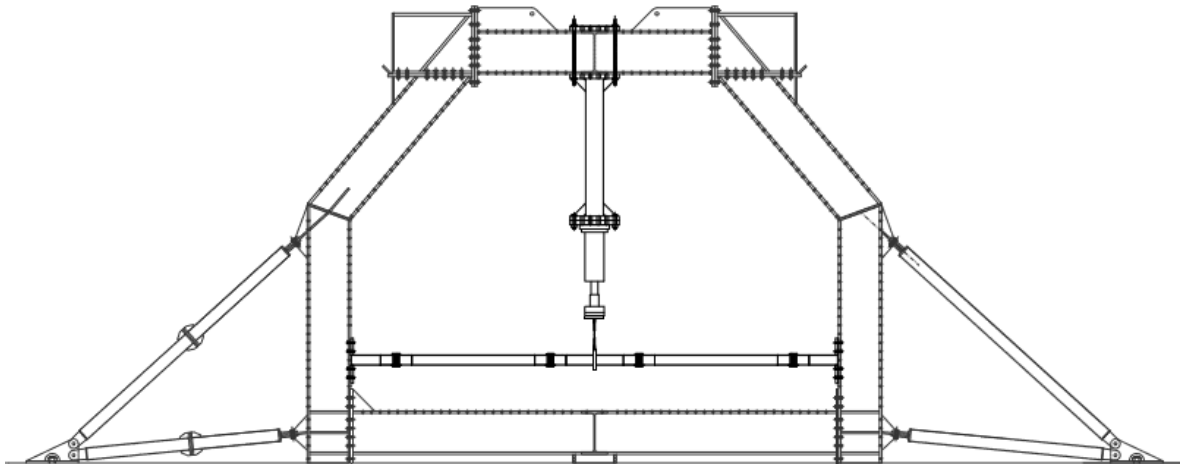


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**Πειραματική και αριθμητική αξιολόγηση  
της απόκρισης χαλύβδινων σωλήνων  
με και χωρίς εύκαμπτους κόμβους  
υπό εγκάρσια επιβαλλόμενη μετακίνηση**



Διπλωματική Εργασία  
Κωνσταντίνος Μπαχάς

ΕΜΚ ΔΕ 2016 6

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: Βασίλειος Μελισσιανός, Υποψήφιος Διδάκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2016

Copyright © Κωνσταντίνος Μπαχάς, 2016  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Konstantinos Bachas, 2016  
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organization (L. 5343/1932, art. 202).

Κωνσταντίνος Μπαχάς (2016)

Πειραματική και αριθμητική αξιολόγηση της απόκρισης χαλύβδινων σωλήνων με και χωρίς εύκαμπτους κόμβους υπό εγκάρσια επιβαλλόμενη μετακίνηση

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2016 6

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Konstantinos Bachas (2016)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2016 6

Experimental and numerical evaluation of the response of steel pipes with and without flexible joints under transverse imposed displacement

Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

## Ευχαριστίες

Με τη δημοσίευση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνονται οι προπτυχιακές μου σπουδές στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η επιτυχής εκπόνηση της εργασίας μου δεν θα είχε επιτευχθεί χωρίς την πολύτιμη συμβολή ορισμένων ανθρώπων, τους οποίους οφείλω να ευχαριστήσω.

Κυρίως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χάρη Γαντέ, καθηγητή του τομέα Δομοστατικής για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δίνοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Η αδιάκοπη καθοδήγησή του συνέβαλε καθοριστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας και οι ουσιαστικές του συμβουλές θα με καθοδηγούν σε όλη τη διάρκεια της ζωής μου.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω το Βασίλη Μελισσιανό, υποψήφιο διδάκτορα του Ε.Μ.Π., για την ουσιαστικότερη συνεργασία που είχαμε όλο το προηγούμενο διάστημα. Η παροχή του απαραίτητου βιβλιογραφικού υλικού, οι οδηγίες στη χρήση του λογισμικού καθώς και η επίβλεψη των εξαγομένων συμπερασμάτων διαδραμάτισαν ουσιαστικό ρόλο στην εκπόνηση της εργασίας. Οι πειραματικές δοκιμές που παρουσιάζονται στην εργασία μου αποτελούν σημαντικό μέρος της διδακτορικής του διατριβής και η βοήθεια του στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων καθώς και στην αριθμητική προσομοίωση τους ήταν καθοριστική. Επιπλέον, για τη βοήθεια στη χρήση του λογισμικού καθώς και για τις εξίσου πολύτιμες συμβουλές τους θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Ηλία Θανασούλα και Στέλιο Βερνάρδο, Υποψήφιους Διδάκτορες του Ε.Μ.Π.

Σε αυτό το σημείο οφείλω να ευχαριστήσω τον κ. Ξενοφώντα Λιγνό, μέλος Ε.Ε.Δ.Ι.Π. του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών, για την εκτέλεση των πειραμάτων καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές του κατά την ενασχόληση μου με τις πειραματικές δοκιμές. Ευχαριστώ επίσης το Στέλιο Κατσατσιδίδη για τη βοήθεια του κατά την προετοιμασία και εκτέλεση των πειραμάτων. Το διάστημα που πέρασα μαζί τους στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών με βοήθησε να αποκτήσω ορθότερη σκέψη μηχανικού.

Για τη συμμετοχής τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Τάσο Αβραάμ και Παύλο Θανόπουλο, Λέκτορες του τομέα Δομοστατικής.

Για τις σημαντικές οδηγίες της στη μορφοποίηση του κειμένου θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ισαβέλλα Βασιλοπούλου, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό Ε.Μ.Π.

Για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέφεραν κατά τη διάρκεια της πενταετούς φοίτησης μου είναι απαραίτητο να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου αφού χάρις σε εκείνους γνώρισα τον κόσμο του πολιτικού μηχανικού.

Κλείνοντας, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που στάθηκαν δίπλα μου σε όλα τα μαθητικά και φοιτητικά μου χρόνια καθώς και τους συμφοιτητές και φίλους που με στηρίζουν σε κάθε μου προσπάθεια.

*Κωνσταντίνος Μπαχάς  
Μάρτιος 2016*



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2016 6

## **Πειραματική και αριθμητική αξιολόγηση της απόκρισης χαλύβδινων σωλήνων με και χωρίς εύκαμπτους κόμβους υπό εγκάρσια επιβαλλόμενη μετακίνηση**

**Κωνσταντίνος Μπαχάς**

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ  
Συνεπιβλέπων: Βασίλειος Μελισσιανός, Υποψήφιος Διδάκτορας ΕΜΠ

Μάρτιος 2016

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η αποτελεσματικότητα της χρήσης εύκαμπτων κόμβων σε υπόγειους μεταλλικούς αγωγούς υπό εγκάρσια επιβαλλόμενη μετακίνηση μέσω πειραματικών δοκιμών και αριθμητικής προσομοίωσης. Η ενδεχόμενη ενεργοποίηση ενός σεισμικού ρήγματος από το οποίο διέρχεται ο υπόγειος αγωγός οδηγεί σε μεγάλες επιβαλλόμενες μετακινήσεις, τις οποίες ο αγωγός αναγκάζεται να ακολουθήσει αναπτύσσοντας μεγάλη ένταση που ενδέχεται να οδηγήσει σε αστοχία. Η τοποθέτηση εύκαμπτων κόμβων στον αγωγό μεταξύ των χαλύβδινων τμημάτων στοχεύει στη συγκέντρωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στους κόμβους, ώστε τα τμήματα του αγωγού να παραμένουν σχεδόν ευθύγραμμα, αναπτύσσοντας πολύ μικρή ένταση.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται εισαγωγικά στοιχεία για τους υπόγειους μεταλλικούς αγωγούς. Αρχικά γίνεται αναφορά στις δράσεις που αναπτύσσονται (σεισμικές και μη σεισμικές) και στα συνήθη μέτρα προστασίας που εφαρμόζονται έναντι διάρρηξης ρήγματος. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες για τους εύκαμπτους κόμβους και συγκεκριμένα για τους κόμβους τύπου bellow που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Τέλος, παρατίθενται τα κριτήρια εφελκυστικής και θλιπτικής αστοχίας αγωγών υπό μεγάλες παραμορφώσεις.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται ο σχεδιασμός των πειραματικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν. Οι πειραματικές δοκιμές αφορούν σωλήνες υπό εγκάρσια μετακίνηση χωρίς περιβάλλον έδαφος και στοχεύουν στην προσομοίωση της παραμόρφωσης αγωγού υπό διάρρηξη ρήγματος. Τα τέσσερα δοκίμια αγωγών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα (τρία συνεχή και ένα με κόμβους) περιγράφονται αναλυτικά ως προς τη γεωμετρία και τον τρόπο κατασκευής τους. Περιγράφεται επίσης το πλαίσιο δοκιμών στο οποίο πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα. Επιπλέον, παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τον ποσοτικό προσδιορισμό της απόκρισης των αγωγών κατά την επιβολή της εγκάρσιας μετακίνησης.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια μονοαξονικού εφελκυσμού για τον προσδιορισμό της ποιότητας του χάλυβα. Ακολούθως, οι εύκαμπτοι κόμβοι υποβλήθηκαν μεμονωμένα σε δοκιμές εφελκυσμού και κάμψης με σκοπό τον υπολογισμό της αντίστοιχης δυσκαμψίας τους. Έπειτα, παρουσιάζονται τα

πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών στους τέσσερις αγωγούς και ειδικότερα η απόκριση των δοκιμών μέσω του δρόμου ισορροπίας δύναμης - μετακίνησης. Επιπλέον, παρουσιάζεται η εξέλιξη των παραμορφώσεων που καταγράφηκαν από strain gauges συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετακίνησης. Συγκριτικά αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών και εξαγωγή συμπερασμάτων παρουσιάζεται στο τέλος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η βαθμονόμηση αριθμητικών προσομοιωμάτων με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα. Ειδικότερα, εξετάζονται εναλλακτικές αριθμητικές προσεγγίσεις, με χρήση τόσο στοιχείων δοκού, όσο και επιφανειακών στοιχείων. Διερευνήθηκε η επιρροή παραμέτρων, όπως η σύνδεση του δοκιμίου με το πλαίσιο δοκιμών, η προσομοίωση με γραμμικά ή επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, καθώς και η επιρροή των παραμενουσών τάσεων λόγω της διαμήκους συγκόλλησης των εν ψυχρώ διαμορφωμένων δοκιμών. Η βαθμονόμηση των προσομοιωμάτων ανέδειξε ότι η σύνδεση των δοκιμών στο πλαίσιο δοκιμών δύναται να θεωρηθεί πάκτωση. Για τα συνεχή δοκίμια απαραίτητη είναι η αριθμητική προσομοίωση με επιφανειακά στοιχεία προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι παραμένουσες τάσεις. Αντιθέτως, στην αριθμητική προσομοίωση του δοκιμίου με κόμβους επαρκεί η προσομοίωση με γραμμικά στοιχεία. Ειδικότερα, οι εύκαμπτοι κόμβοι προσομοιώνονται με μετακινησιακά και στροφικά ελατήρια. Τα αριθμητικά αποτελέσματα σε όρους δρόμους ισορροπίας δυνάμεων και παραμορφώσεων συγκρίνονται με τα πειραματικά και διαπιστώνεται ικανοποιητική σύγκλιση.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική και αριθμητική αξιολόγηση της χρήσης εύκαμπτων κόμβων σε υπόγειους αγωγούς. Διαπιστώθηκε ότι η εισαγωγή κόμβων συμβάλει δραστικά στη μείωση της αναπτυσσόμενης έντασης και στην αποτελεσματική προστασία του αγωγού. Επιπλέον διαπιστώθηκε ότι η συμπεριφορά του δοκιμίου με κόμβους ήταν γραμμική και ελαστική σε αντίθεση με τα συνεχή δοκίμια, των οποίων η συμπεριφορά ήταν μη-γραμμική με ανάπτυξη πλαστικών αρθρώσεων στις θέσεις μέγιστης έντασης.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2016 6

## **Experimental and numerical evaluation of the response of steel pipes with and without flexible joints under transverse imposed displacement**

**Konstantinos Bachas**

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.  
Co-supervisor: Vasileios Melissianos, PhD Candidate N.T.U.A.

March 2016

### **ABSTRACT**

In the present diploma thesis the effectiveness of integrating flexible joints in buried steel pipes under transverse imposed displacement to prevent failure due to transverse imposed displacement is experimentally and numerically investigated. The activation of a seismic fault that is transversed by a buried pipe causes large imposed displacements that the pipe is forced to follow by developing large strains, which may lead to failure. The introduction of flexible joints between the adjacent pipe steel parts aims at concentrating the developing strains at the joints and retain the pipes parts virtually undeformed and consequently unstressed.

In the first chapter a brief introduction to buried steel pipes is presented. The external seismic and non-seismic loads acting on the pipe and the commonly adopted mitigating measures against the consequences of faulting are presented. Then, technical data for commercial flexible joints and specifically for the bellow-type one's, which are used in this thesis, are presented. Finally, the tensile and compressive strain limits to prevent pipe failure are briefly discussed.

The second chapter is about the design of the experimental set-up. In the present thesis, pipes without surrounding soil subjected to transverse displacement are experimentally investigating. The experiments aim at simulating the pipe deformation due to fault offset. The geometry and the construction process of the four pipe specimens (three continuous pipes and one with flexible joints) are described in detail. Moreover, the testing frame and the measuring instruments used to evaluate the specimen's response are presented.

In the third chapter the results of the experiments are shown. The mechanical properties of the specimens' steel were identified at first through uniaxial tensile tests of appropriately designed coupons extracted from the specimens. Then, the two flexible joints were subjected to tensile and bending tests in order to obtain their stiffness. Afterwards, the results of the pipe specimens experiments are presented, and specifically the response of the pipes through force – displacement and strain - displacement equilibrium paths. Finally, the experimental results are compared and conclusions are extracted.

In the fourth chapter, numerical models are calibrated based on the experimental results. Alternative numerical approaches using either beam elements or shell elements are investigated. The effects of

parameters such as the connection of the pipe with the testing frame, the modeling with linear or shell finite elements and the effect of the residual stresses due to the longitudinal welding and the cold-forming of pipes were also researched. The calibration of the models revealed that the specimen – testing frame connection can be considered as rigid. As far as the continuous specimens are concerned, the numerical modeling using shell elements was shown to be necessary in order to take into account the residual stresses. On the contrary, the modeling of the specimen with flexible joints with beam-type elements was shown to be adequate. Moreover, the flexible joints are modeled with translational and rotational spring elements. The numerical equilibrium paths are compared against the experimental ones, indicating a good match.

Finally, in the fifth chapter, the conclusions extracted from the experimental and numerical evaluation of the integration of flexible joints in buried pipes are presented. It was found that the introduction of the joints has a significant contribution to the reduction of the developed strains and consequently on the prevention of pipe failure. Moreover, it was found that the response of the specimen with flexible joints was linear and elastic. On the other hand, the behavior of the continuous specimens was non-linear, as plastic hinges developed at locations of high stress.