



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS**

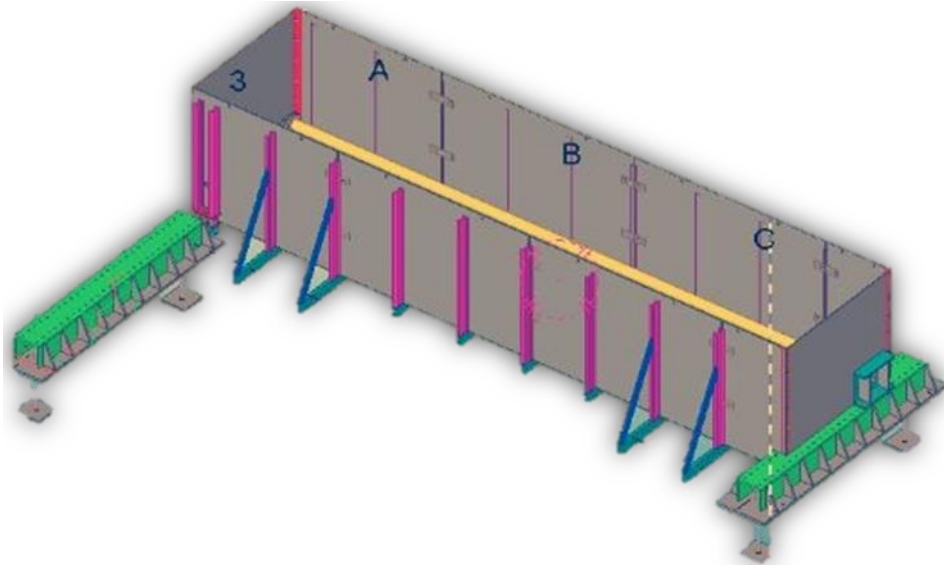
**SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF STRUCTURAL ENGINEERING**

**Institute of Steel Structures**

**Diploma Thesis**

**DESIGN OF EXPERIMENTAL SETUP OF  
UNDERGROUND PIPE IN INTERSECTION WITH  
SEISMIC FAULT**



**Moris Kalderon**

Supervisors:

Charis Gantes, Professor NTUA.

Vasilis Melissianos, PhD Candidate NTUA.

**ATHENS, FEBRUARY 2015**

**ΕΜΚ ΔΕ 2015/12**

Μωρίς Ι. Καλδερών (2015)

Σχεδιασμός πειραματικής διάταξης υπόγειου μεταλλικού αγωγού σε διασταύρωση με σεισμικό ρήγμα

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2015/12

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Moris I. Kalderon (2015)

Design of experimental setup of underground pipe in intersection with seismic fault

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2015/12

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

Copyright © Moris I. Kalderon, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, 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 τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

No part of these pages, either text or image may be used for any purpose other than personal use. Therefore, reproduction, modification, storage in a retrieval system or retransmission, in any forms or by any mean, electronic, mechanical or otherwise, for reasons other than personal use, is strictly prohibited without prion written permission.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Διπλωματική Εργασία  
ΕΜΚ ΔΕ 2015/12

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΓΩΓΟΥ  
ΣΕ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗ ΜΕ ΣΕΙΣΜΙΚΟ ΡΗΓΜΑ**

**Μωρίς Καλδερών**

Επιβλέποντες:

Χάρης Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Βασίλης Μελισσιανός, Υπ. Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

**Περίληψη**

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός πειραματικής διάταξης υπόγειου μεταλλικού αγωγού σε διασταύρωση με σεισμικό ρήγμα, καθώς και η διερεύνηση της συμπεριφοράς του αγωγού που διέρχεται από ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης. Εξετάζεται μια νέα μέθοδος αντιμετώπισης των υψηλών αναπτυσσόμενων τάσεων και παραμορφώσεων στον αγωγό κατά την ενεργοποίηση του ρήγματος μέσω της τοποθέτησης σε συγκριμένες θέσεις κατά μήκος του αγωγού εύκαμπτων κόμβων που στοχεύει στη συγκέντρωση των παραμορφώσεων, ώστε να μειωθεί η αναπτυσσόμενη ένταση στα χαλύβδινα τμήματα του αγωγού.

Αρχικά, γίνεται εισαγωγή στους υπόγειους μεταλλικούς αγωγούς και ειδικότερα στο θέμα της διασταύρωσης με ενεργά σεισμικά ρήγματα καθώς και στις εξωτερικά επιβαλλόμενες δράσεις που προκαλούν ένταση στους αγωγούς. Στη συνέχεια αναλύονται συνοπτικά οι μέθοδοι που εφαρμόζονται σήμερα για την αντιμετώπιση της αναπτυσσόμενης έντασης στον αγωγό που προκαλείται από την ενεργοποίηση ρήγματος καθώς και η προτεινόμενη μέθοδος με την παρεμβολή στον αγωγό εύκαμπτων κόμβων. Στο πλαίσιο της παρουσίασης της μεθόδου αναλύονται τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά των κόμβων με βάση τις απαιτήσεις του πειράματος αλλά και της καταλληλότητας των ήδη διαθέσιμων εμπορικά κόμβων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται μία συνοπτική ανασκόπηση των πειραματικών διατάξεων που έχουν χρησιμοποιηθεί από διάφορους ερευνητές μέχρι σήμερα για την προσομοίωση της διασταύρωσης αγωγού – σεισμικού ρήγματος. Ακολουθώντας, αναλύεται η πειραματική διάταξη που πρόκειται να κατασκευαστεί στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Ε.Μ.Π. με σκοπό τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας ευκάμπτων κόμβων στην περίπτωση διάρρηξης οριζόντιας ολίσθησης.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στο σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης. Ειδικότερα, παρατίθενται τα σχέδια από τα τμήματα που αποτελούν τη διάταξη, δηλαδή τη δεξαμενή, τον αγωγό/δοκίμιο και το έμβολο που χρησιμοποιείται για την επιβολή μετακίνησης στον αγωγό/δοκίμιο. Παρουσιάζεται η προμελέτη της δεξαμενής μέσω αρχικών προκαταρκτικών δισδιάστατων αναλύσεων των

επαναλαμβανόμενων πλαισίων στη διαμήκη διεύθυνση αλλά και των μεταλλικών ελασμάτων που χρησιμοποιούνται περιμετρικά αλλά και στον πυθμένα της δεξαμενής. Τέλος, παρουσιάζεται η τελική μελέτη της δεξαμενής με τη βοήθεια ενός ακριβούς τρισδιάστατου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων, δίνοντας έμφαση στις κατασκευαστικές λεπτομέρειες όπου κρίνεται απαραίτητο στο στάδιο του σχεδιασμού.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση του αγωγού/δοκιμίου του πειράματος που υπόκειται σε μετακίνηση ίση με το διπλάσιο της διαμέτρου του αγωγού. Στην πειραματική διάταξη προσομοιώνεται η μισή διάρρηξη του ρήγματος και το στατικό προσομοίωμα του δοκιμίου είναι πρόβολος, αναγνωρίζοντας ότι αμελείται η επιβαλλόμενη αξονική κατά τη διάρρηξη. Σκοπός, όμως, του πειράματος είναι η ανάδειξη της αποτελεσματικότητας των εύκαμπτων κόμβων στη μείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων. Ακολούθως, η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης αγωγού – περιβάλλοντος εδάφους γίνεται με μη-γραμμικά ελατήρια σε τρεις διευθύνσεις. Αρχικά, εκτιμάται η απόκριση του συνεχούς δοκιμίου (χωρίς εύκαμπτους κόμβους), ενώ στη συνέχεια διερευνώνται οι βέλτιστες θέσεις για την τοποθέτηση ενός, δύο και τριών ευκάμπτων κόμβων με γνώμονα την αποδοτικότερη απομείωση των αναπτυσσόμενων καμπτικών ροπών και παραμορφώσεων του αγωγού. Τέλος, μελετάται μέσω παραμετρικών αναλύσεων η επίδραση της γωνίας τριβής του εδάφους στα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη του αγωγού/δοκιμίου, αναγνωρίζοντας την αβεβαιότητα που συνδέεται με τον προσδιορισμό των εδαφικών χαρακτηριστικών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο μελετάται η συμπεριφορά αγωγού που διέρχεται από ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης μετακίνησης διάρρηξης ίση με το διπλάσιο της διαμέτρου μέσω αριθμητικών αναλύσεων. Μελετάται τυπικός αγωγός μεγάλης διαμέτρου και υψηλής πίεσης από χάλυβα API5L-X65. Μέσω των αναλύσεων γίνεται αποτίμηση του κινδύνου εμφάνισης τοπικού λυγισμού και αστοχίας από εφελκυστική θραύση των συγκολλήσεων με τη χρήση κανονιστικών ορίων και διερευνάται η απόκριση του αγωγού για γωνία διασταύρωσης ρήγματος – αγωγού από  $\beta=15^\circ$  έως  $\beta=180^\circ$  λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη γεωμετρική μη-γραμμικότητα, όσο και τη μη-γραμμικότητα του χάλυβα και του εδάφους. Στη συνέχεια με βάση τα αποτελέσματα του συνεχούς αγωγού ερευνάται η απομείωση των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών μέσω της τοποθέτησης δύο και τεσσάρων εύκαμπτων κόμβων για κάθε περίπτωση, ενώ παράλληλα ελέγχεται η αποτελεσματικότητα και η καταλληλότητα της μεθόδου για κάθε περίπτωση γωνίας ρήγματος - αγωγού. Τέλος, στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της εργασίας.

Η διπλωματική αυτή διεξάγεται στα πλαίσια του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» (ΕΣΠΑ 2007-2013) –Δράση: «Αριστεία II». Η παρούσα έρευνα συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και την Ελλάδα μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» (ΕΣΠΑ 2007-2013)



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

Diploma Thesis  
EMK ΔΕ 2015/12

**DESIGN OF EXPERIMENTAL SETUP OF UNDERGROUND PIPE  
IN INTERSECTION WITH SEISMIC FAULT**

By  
**Moris Kalderon**

Supervisors:

Charis Gantes, Professor N.T.U.A.  
Vasileios Melissianos, Ph.D. Candidate N.T.U.A.

**Abstract**

The present diploma thesis deals with the design of an experimental setup for buried pipeline – seismic fault crossing, as well as the investigation of the behaviour of pipelines crossing strike-slip faults. A new method for reducing the developing strains and stresses is introduced by integrating flexible joints between adjacent steel parts of buried pipelines. This approach aims at concentrating strains at the joints and retain the steel pipe virtually undeformed.

In the first chapter, an introduction for pipelines and pipeline – fault crossing is presented. Furthermore, the methods that are currently used to mitigate the consequence of faulting on buried pipelines are briefly presented, while the proposed method of incorporating flexible joints in buried pipelines is discussed. In the context of this method, flexible joints' characteristics are described and defined based on experiment's requirements as well as the adequacy of the currently commercially available joints.

In the second chapter, a literature review on the experimental setups, which have been used by researchers during the last years in order to model the pipeline – cross faulting problem, is presented. Moreover, a description of the experimental setup that is going to be used in the Institute of Steel Structures at NTUA is outlined. The experimental setup aims at assessing the effectiveness of flexible joints in reducing the developing pipeline strains in case of a strike-slip fault offset.

The design and the static analysis of the experimental setup is discussed in the third chapter. In particular, setup drawings, including the tank, the pipe specimen and the actuator that imposes displacement on the specimen are described. Also, a preliminary design of the tank is presented through preliminary two-dimensional analyses of adjacent typical frames and the metal panels used to cover the perimeter and the bottom of the tank. The final design of the tank is numerically evaluated through a rigorous 3D model that incorporates all significant constructional details.

In the fourth chapter, the numerical simulation of the pipe specimen subjected to permanent displacement, equal to twice the specimen's diameter, is studied. The experiment simulates the half

fault rupture and the specimen's static model is a cantilever, acknowledging the fact that the applied tension from strike-slip offset is neglected. However, given that the purpose of the experiment is to assess the effectiveness of flexible joints as a measure to reduce the developing strains, the absence of applied tension is acceptable. Subsequently, the pipeline – soil interaction is simulated using nonlinear springs in three directions. Firstly, the response of continuous pipe specimen is numerically assessed and then the optimal positions for integrating one, two and three flexible joints are investigated, in order to achieve an efficient reduction of pipeline developing bending moments and longitudinal strains. Finally, the effect of soil's friction angle is parametrically investigated regarding the pipe's response, acknowledging the uncertainty related to soil's properties.

In the fifth chapter, the numerical simulation of a typical high pressure large diameter API5L-X65 pipeline crossing a strike-slip seismic fault is discussed. The risk of local buckling and tensile fracture of girth welds is evaluated using the code-based limits, while the pipeline's response is investigated for various pipeline – fault angles ranging from  $\beta=15^\circ$  to  $180^\circ$  by also taking into account geometrical, material and soil non-linearity. Then, based on the continuous pipeline's results an investigation on the efficiency of flexible joints is conducted by integrating two and four flexible joints in each case study. Moreover, the effectiveness of joints is evaluated regarding the pipeline – fault angle case. In the sixth and last chapter, conclusions of the diploma thesis are presented.

The present diploma thesis is part of the research program "Aristeia II". This research has been co-financed by the European Union (European Social Fund – ESF) and Hellenic National Funds through the Operational Program "Education and Lifelong Learning" (NSRF 2007-2013).

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Φτάνοντας στο τέλος της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας ολοκληρώνεται ο κύκλος φοίτησής μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με την αφορμή αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην προσπάθειά μου αυτή με άμεσο ή έμμεσο τρόπο.

Πρώτα και σημαντικότερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Χάρη Γαντέ που με τίμησε με την εμπιστοσύνη του και μου έδωσε την ευκαιρία να εκπονήσω αυτή τη διπλωματική υπό την επίβλεψη του. Η διαρκής και υποδειγματική καθοδήγησή μαζί με την άριστη επιστημονική του κατάρτιση συνέβαλαν καταλυτικά στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω για την αμέριστη υποστήριξη του, τον υποψήφιο Διδάκτορα του Ε.Μ.Π. Βασίλη Μελισσιανό. Η συνεχής και άμεση βοήθεια που μου παρείχε καθόλη τη διάρκεια της εργασίας (ακόμη και την περίοδο των διακοπών!) αποτελούν ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της προσπάθειας αυτής.

Για την πρόθυμη βοήθειά τους σε θέματα λογισμικού, καθώς και για το όμορφο κλίμα τη διάρκεια που δουλέψαμε σε κοινό γραφείο ευχαριστώ τον Στέλιο Βερνάρδο και τον Ηλία Θανάσουλα, ενώ για τη βοήθεια στο σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης στον υπολογιστή την κα. Ξένια Ζαράκη.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Γιώργο Μπουκοβάλα, Καθηγητή του τομέα Γεωτεχνικής του Ε.Μ.Π και τον κ. Παύλο Θανόπουλο, Λέκτορα του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π. για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη διαρκή στήριξη που μου προσέφεραν καθόλη τη διάρκεια των σχολικών και φοιτητικών μου χρόνων, τους συμφοιτητές και φίλους μου, για τη συμπαράσταση τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

*Μωρίς Καλδερών*

*Φεβρουάριος 2015*