

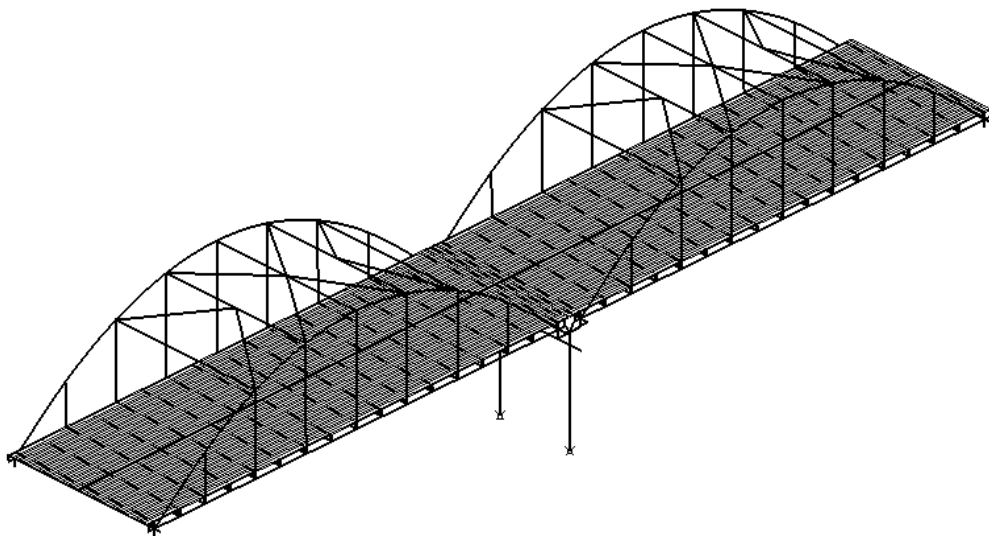


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΥΠΑΘΕΙΑΣ ΤΟΞΩΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ
ΓΕΦΥΡΑΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΙΚΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΛΟΓΩ
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ



Διπλωματική Εργασία
Βασιλικής Καϋμενάκη

ΕΜΚ ΔΕ 2014 15

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ
Συνεπιβλέπουσα: Ισαβέλλα Βασιλοπούλου, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

Copyright © Βασιλική Καϋμενάκη, 2014

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 της συγγραφέως. 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 τη συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από την Ανώτατη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Vasiliki Kaymenaki, 2014

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 organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Βασιλική Καϋμενάκη (2014).
Διερεύνηση ευπάθειας τοξωτής μεταλλικής γέφυρας σε διαφορικές μετακινήσεις
λόγω ρευστοποίησης εδάφους
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2014/15
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Vasiliki Kaymenaki (2014).
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2014/15
Assessment of Sensitivity of an Arched Steel Bridge to Imposed Differential Displacements
due to Soil Liquefaction
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Θα ήθελα να ευχαριστήσω,

Θερμά τον καθηγητή μου κ. Χάρη Γαντέ για την εμπιστοσύνη που έδειξε στη συνεργασία μας και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα θέμα ιδιαίτερου ερευνητικού και πρακτικού ενδιαφέροντος. Πάντα πρόθυμος να προσφέρει τη βοήθεια του, μεταφέροντας με τον πιο κατάλληλο τρόπο την εμπειρία, τη διορατικότητα και τις γνώσεις του πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο, αποτέλεσε κινητήρια δύναμη για την εκπόνηση και την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την παρότρυνσή του να συμμετάσχω στο 8^ο Συνέδριο Μεταλλικών Κατασκευών και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε προτείνοντάς μου να παρουσιάσω την εργασία μου σε ευρύτερο επιστημονικό κοινό, γεγονός που αποτέλεσε μια από τις πιο σημαντικές εμπειρίες της φοιτητικής μου ζωής. Παράλληλα τον ευχαριστώ για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ με σπουδαίους Μηχανικούς, όπως η Ισαβέλλα Βασιλοπούλου.

Μέσα από την καρδιά μου την Ισαβέλλα Βασιλοπούλου και να εκφράσω τη λύπη μου για το τέλος αυτής της όμορφης συνεργασίας. Δυστυχώς το «ευχαριστώ» δεν αρκεί για να καλύψει το χρόνο που αφιέρωσε για την επίλυση αποριών και την καθοδήγησή μου. Η όρεξη και η αγάπη της για το επάγγελμα του Πολιτικού Μηχανικού αποτέλεσαν και θα αποτελούν πηγή έμπνευσης και δύναμης για τη μετέπειτα πορεία μου ως επαγγελματίας Πολιτικός Μηχανικός. Την ευχαριστώ επίσης, καθώς επιμελήθηκε εξ ολοκλήρου τις αναλύσεις με το λογισμικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων SOFiSTiK, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας.

Τον καθηγητή κ. Γ. Μπουκοβάλα και την ομάδα του για την πολύτιμη βοήθεια στην κατανόηση του φαινομένου της ρευστοποίησης των εδαφικών σχηματισμών, καθώς και για τη συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή. Παράλληλα ευχαριστώ και τον κ. Ι. Ψυχάρη για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Τους Υ.Δ. Βασίλη Μελισσιανό και Στέλιο Βερνάρδο για την πρόθυμη βοήθειά τους σε θέματα λογισμικού, καθώς και για το όμορφο κλίμα καθ' όλη τη διάρκεια που δουλέψαμε σε κοινό γραφείο.

Τους αγαπημένους φίλους και συμφοιτητές μου, Αλέξανδρο, Δημοσθένη, Θανάση, Ελένη, Κωνσταντίνο και Χριστίνα για την αμέριστη στήριξή τους, καθώς και για όλες τις όμορφες στιγμές που ζήσαμε σε αυτό το κοινό ταξίδι.

Τους γονείς και τα αδέρφια μου για τη στήριξη και την ενθάρρυνση, δίνοντας μου πάντα δύναμη να κυνηγώ τους στόχους και τα όνειρα μου.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΜΚ ΔΕ 2014/15

Διερεύνηση ευπάθειας τοξωτής μεταλλικής γέφυρας σε διαφορικές μετακινήσεις λόγω ρευστοποίησης εδάφους

Βασιλική Καϋμενάκη

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

Συνεπιβλέπουσα: Ισαβέλλα Βασιλοπούλου, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της απόκρισης μεταλλικής τοξωτής γέφυρας δύο ανοιγμάτων κατά την επιβολή μετακινήσεων και στροφών στη βάση του μεσοβάθρου λόγω ρευστοποίησης των υποκείμενων εδαφικών σχηματισμών. Εξετάζεται ένας νέος τρόπος θεμελίωσης γεφυρών που περιλαμβάνει τη χρήση επιφανειακής θεμελίωσης και την εκμετάλλευση του ρευστοποιήσιμου εδάφους ως συστήματος φυσικής σεισμικής μόνωσης, με αποτέλεσμα τη μείωση της έντασης που φτάνει στην ανωδομή και τη μείωση του κόστους θεμελίωσης συγκριτικά με τη μέθοδο βαθιάς θεμελίωσης με πασσάλους που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα. Ωστόσο, ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα της παραπάνω μεθόδου είναι οι αυξημένες μετακινήσεις και στροφές που αναπτύσσονται στη βάση των βάθρων. Με αφορμή το παραπάνω μειονέκτημα ορίζεται ο στόχος της εργασίας που είναι ο προσδιορισμός των ανεκτών μετακινήσεων και στροφών που μπορεί να παραλάβει η γέφυρα χωρίς να αστοχήσει.

Η γέφυρα που μελετάται αποτελείται από δύο αμφιέριστα ανοίγματα θεωρητικού μήκους 42.00m το καθένα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με πλάκα συνέχειας. Το θεωρητικό πλάτος του καταστρώματος ισούται με 14.70m. Το κατάστρωμα της γέφυρας είναι σύμμικτο και το κάθε άνοιγμα αποτελείται από δύο κύριες δοκούς και δεκαεφτά διαδοκίδες. Κάθε κύρια δοκός αναρτάται από ένα τόξο με τη χρήση αναρτήρων ενώ τα δύο τόξα του κάθε ανοίγματος συνδέονται μεταξύ τους με εγκάρσια και διαγώνια μέλη δυσκαμψίας. Το ύψος των τόξων είναι ίσο με 10.00m. Οι δοκοί, οι διαδοκίδες, τα τόξα και οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας έχουν κατασκευαστεί από δομικό χάλυβα. Το μεσόβαθρο αποτελείται από τη δοκό έδρασης και τρεις στύλους κυκλικής συμπαγούς διατομής από οπλισμένο σκυρόδεμα και έχει ύψος 10m συμπεριλαμβανομένης της δοκού έδρασης. Τα ακρόβαθρα θεωρούνται πολύ δύσκαμπτα σε σχέση με τη γέφυρα και γι' αυτό λαμβάνονται υπόψη ως ακλόνητα.

Στην παρούσα εργασία μορφώνεται το αριθμητικό προσομοίωμα με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ADINA 8.5.0 και εκτελούνται μη γραμμικές αναλύσεις έχοντας λάβει υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά γεωμετρίας και υλικού. Η μη γραμμική συμπεριφορά των στύλων του μεσοβάθρου από οπλισμένο σκυρόδεμα έχει προσομοιωθεί με τη χρήση διαγραμμάτων ροπών – καμπυλοτήτων. Στη γέφυρα ασκούνται τρεις βασικές φορτίσεις συμπεριλαμβανομένων του ίδιου βάρους της κατασκευής, των πρόσθετων μόνιμων φορτίων του καταστρώματος και των επιβαλλόμενων μετακινήσεων ή στροφών. Μελετάται η απόκριση της γέφυρας σε τρεις φάσεις, δηλαδή στο τέλος της επιβολής της κάθε φόρτισης, ενώ η κάθε φόρτιση προστίθεται στην προηγούμενη. Ταυτόχρονα, μετά την επιβολή του συνόλου των κατακόρυφων φορτίων συγκρίνεται η απόκριση της γέφυρας με διαφορετικό λογισμικό και επιβεβαιώνεται η σωστή προσομοίωσή της. Παρακολουθείται η συμπεριφορά των στύλων του μεσοβάθρου, των μεταλλικών στοιχείων της ανωδομής και των εφεδράνων κατά τη διάρκεια επιβολής των φορτίσεων. Ωστόσο, δεν διερευνάται η συμπεριφορά των στοιχείων της γέφυρας που θεωρούνται εύκολα επισκευάσιμα ή αντικαταστάσιμα, χωρίς να προσδίδουν ιδιαίτερη δυσκαμψία στο μεταλλικό φορέα της ανωδομής και στο μεσόβαθρο, όπως η πλάκα συνέχειας και οι αρμοί. Αυτά τα στοιχεία είναι πολύ πιθανό να εμφανίσουν αστοχία σε χαμηλές τιμές επιβαλλόμενων μετακινήσεων και στροφών, ωστόσο δεν επιφέρουν κατάρρευση της γέφυρας. Παράλληλα, δεν μελετάται η απόκριση της δοκού έδρασης καθώς είναι αρκετά δύσκαμπτη και δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις επιβαλλόμενες μετακινήσεις και στροφές.

Μετά το τέλος της επιβολής των μετακινήσεων και στροφών, προσδιορίζονται τα δομικά στοιχεία που οδηγούνται πρώτα στην αστοχία και καθορίζεται η μέγιστη τιμή των μετακινήσεων και στροφών που μπορεί να παραλάβει η γέφυρα. Ταυτόχρονα, καθορίζονται δείκτες βλάβης για κάθε στοιχείο που μελετάται. Κρισιμότερη θεωρείται η διαμήκης μετακίνηση καθώς λαμβάνει και τη μικρότερη τιμή, περίπου ίση με 0.5m. Οι τιμές της εγκάρσιας μετακίνησης και καθίζησης που μπορεί να παραλάβει η γέφυρα είναι αρκετά μεγάλες, περίπου ίσες με 2.5m, δηλαδή 5 φορές μεγαλύτερες από την τιμή της διαμήκου μετακίνησης. Οι στροφές κατά τη διαμήκη και την εγκάρσια έννοια που μπορεί να ανεχθεί η γέφυρα λαμβάνουν τις τιμές 0.025rad και 0.034rad, αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η γέφυρα μπορεί να παραλάβει μεγάλες μετακινήσεις και στροφές χωρίς να οδηγείται σε καταστροφική αστοχία. Τα όρια των μετακινήσεων και στροφών αξιολογούνται ως επαρκώς μεγάλα σε σύγκριση με τις πιθανές εδαφικές μετακινήσεις και στροφές για συνήθη τεχνικά έργα και εξίσου μεγάλα σε σχέση με τις αναμενόμενες τιμές μετακινήσεων και στροφών λόγω ρευστοποίησης με εξαίρεση τη διαμήκη μετακίνηση που είναι και η πιο κρίσιμη.

Η διπλωματική αυτή διεξάγεται στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος "ΘΑΛΗΣ" με τίτλο «Πρωτότυπος σχεδιασμός βάρων γεφυρών σε ρευστοποίησιμο έδαφος με χρήση φυσικής σεισμικής μόνωσης» και με επιστημονικό υπεύθυνο τον καθηγητή Γ. Δ. Μπουκοβάλα. Μέρος της διπλωματικής εργασίας παρουσιάστηκε στο 8^ο Συνέδριο Μεταλλικών Κατασκευών που διεξήχθη στην Τρίπολη στις 2-4 Οκτωβρίου 2014, με τίτλο "Αποτίμηση της ευαισθησίας μεταλλικής τοξωτής γέφυρας σε επιβαλλόμενες οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις" και με συγγραφείς τους Β. Καϊμενάκη, Ι. Βασιλοπούλου, Χ. Ι. Γαντέ και Γ. Δ. Μπουκοβάλα.



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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2014/15

Assessment of Sensitivity of an Arched Steel Bridge to Imposed Differential Displacements due to Soil Liquefaction

Vasiliki Kaymenaki

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.

Co-supervisor: Isabella Vassilopoulou, Dr. Civil Engineer

ABSTRACT

The present diploma thesis deals with the assessment of the response of an arched steel bridge to imposed differential displacements and rotations due to soil liquefaction. A new design foundation method is investigated, including the use of shallow foundation and the exploitation of liquefied soil layer as natural seismic isolation. The advantages of the above method include the reduction of seismic forces acting on the superstructure and the significant decrease of the foundation cost, due to the elimination of the piles, which is of the most common solution in such cases. Nevertheless, the most important disadvantage of this innovative foundation method is the large displacements and rotations that are expected to develop at the bottom of the pier. The aim of the diploma thesis is to define the acceptable limits of displacements and rotations so that no collapse of the bridge occurs.

The bridge consists of two simply supported spans with theoretical length equal to 42.00m, each. The connection between the two spans is realized by a continuous reinforced concrete slab. The theoretical width of the deck is equal to 14.70m. The composite deck consists of two main and seventeen transverse beams for each span. Each main beam is suspended by one arch with the use of tie rods. The two arches of each span are interconnected with horizontal and diagonal bracing members. The height of the arches is equal to 10.00m. The main and transverse beams, the arches and the bracing members are made of structural steel. The pier consists of three circular reinforced concrete columns, which are connected at the top with a concrete beam. The abutments are considered as rigid due to their significant stiffness.

Nonlinear analyses are performed, taking into account the geometric and material nonlinearity. The nonlinear behavior of the concrete columns of the pier has been simulated by means of moment – curvature diagrams. Three load cases are considered including the self weight, the superimposed and the imposed displacements or rotations. The response of the bridge is estimated during three different

periods, more specifically at the end of each load case. The accuracy of the model is verified by comparing the response of the bridge due to vertical loads, with the one of linear analyses conducted with SOFiSTiK.

In the present diploma thesis, the response of the pier columns, the steel elements and the elastomeric bearings is investigated. Nevertheless, the response of structural elements, which are considered easily repairable or replaceable, such as the continuous slab and the expansion joints, is not considered, as they do not add significant stiffness to the steel superstructure of the bridge and the pier. It is possible for the aforementioned elements to reach failure at low values of the imposed displacements and rotations, but they cannot cause collapse of the bridge.

After imposing the displacements and rotations at the bottom of the pier, the first group of structural elements that reaches failure is defined and the tolerable limits of displacements and rotations are specified. Also, damage indices are defined for each group. The longitudinal displacement is the most hazardous as it takes the lower permissible value (almost 0.5m). The maximum transverse displacement and vertical settlement that the bridge can sustain are quite large, approximately equal to 2.5m, almost five times larger than the value of longitudinal displacement. The acceptable longitudinal and transverse rotations, at the bottom of the pier, are equal to 0.025rad and 0.034rad, respectively.

The analyses showed that the bridge can sustain large displacements and rotations, satisfying the acceptable safety levels. The limits of displacements and rotations are deemed as sufficiently large in comparison to anticipated soil displacements and rotations occurring in bridges, even in liquefied soil, except of the longitudinal displacement which is the most critical.

The present diploma thesis is part of the research program "THALIS" entitled "Innovative Design of Bridge Piers on Liquefiable Soils with the use of Natural Seismic Isolation" with principal investigator Professor G. D. Bouckovalas. A part of this diploma thesis has already been presented at the 8th Greek National Steel Structures Conference, in Tripoli, Greece, on 2-4 October 2014, with title "*Assessment of Sensitivity of an Arched Steel Bridge to Imposed Horizontal Soil Displacements*". The authors of the above paper are V. Kaymenaki, I. Vassilopoulou, C. J. Gantes and G. D. Bouckovalas.