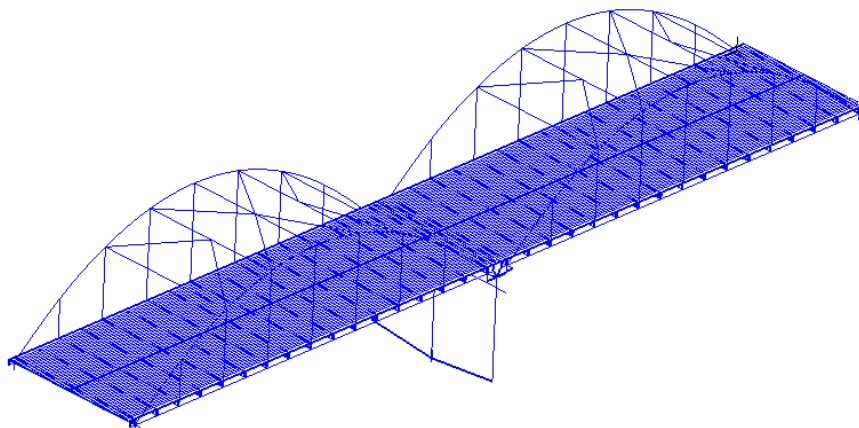




NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

PERFORMANCE CRITERIA AND DESIGN OF SHALLOW FOUNDATION OF AN ARCHED STEEL BRIDGE ON LIQUEFIABLE SOIL



DIPLOMA THESIS

MARIA GKIOKA

EMK ΔΕ 2015 23

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

Co-supervisor: Isabella Vassilopoulou, Dr. Civil Engineer

Athens, July 2015

Μαρία Γκιόκα (2015)
Κριτήρια επιτελεσματικότητας και σχεδιασμός επιφανειακής θεμελίωσης μεταλλικής τοξωτής
γέφυρας σε ρευστοποιήσιμο έδαφος
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2015 23
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Maria Gkioka (2015)
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2015 23
Performance Criteria and Design of Shallow Foundation of an Arched Steel Bridge on
Liquefiable Soil
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Copyright © Μαρία Γκιοκά, 2015
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 την συγγραφέα.

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

Copyright © Maria Gkioka, 2015
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).

Θα ήθελα να ευχαριστήσω,

Θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χάρη Γαντέ για την ανάθεση αυτού του τόσο ενδιαφέροντος θέματος, ερευνητικού και πρακτικού χαρακτήρα, τις πολύτιμες συμβουλές και παρατηρήσεις του, την ανεκτίμητη επιστημονική γνώση που μου μετέδωσε, όπως επίσης και για τον χρόνο που αφιέρωσε για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Την Ισαβέλλα Βασιλοπούλου, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό Ε.Μ.Π, για τη συνεχή καθοδήγηση και επίλυση αποριών καθ'όλη τη διάρκεια της εργασίας. Η άριστη συνεργασία μας και η αμέριστη συμπαράσταση της βοήθησαν καταλυτικά στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής, εξασφαλίζοντας ένα άρτιο αποτέλεσμα.

Τον καθηγητή του τομέα Γεωτεχνικής, κ. Γ. Μπουκοβάλα και τον καθηγητή του τομέα Δομοστατικής, κ. Ι. Ψυχάρη, για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Την Πολιτικό Μηχανικό Βασιλική Καϋμενάκη για τη βοήθειά της, ιδιαίτως στο ξεκίνημα της εργασίας, σε θέματα λογισμικού και κατανόησης του προβλήματος.

Τους γονείς μου για τη συνεχή συμπαράστασή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και τους φίλους και συμφοιτητές μου, για όλες τις όμορφες στιγμές που περάσαμε μαζί.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2015 23

Κριτήρια επιτελεστικότητας και σχεδιασμός επιφανειακής θεμελίωσης μεταλλικής τοξωτής γέφυρας σε ρευστοποιήσιμο έδαφος

Μαρία Γκιοκά

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνά την απόκριση μίας μεταλλικής τοξωτής γέφυρας επί ρευστοποιήσιμου εδάφους σε διαφορετικές καθιζήσεις και στροφές, καθώς και τον καινοτόμο σχεδιασμό της επιφανειακής της θεμελίωσης. Η συμβατική αντιμετώπιση του φαινομένου της ρευστοποίησης ορίζει τη χρήση πασσάλων ως είδος θεμελίωσης, ώστε τα φορτία της ανωδομής να μεταβιβάζονται σε βαθύτερες μη ρευστοποιήσιμες εδαφικές στρώσεις με ικανοποιητική αντοχή. Στα πλαίσια της προτεινόμενης λύσης, μελετάται η χρήση επιφανειακής θεμελίωσης και η θεώρηση του ρευστού εδάφους ως σεισμικού μονωτή. Θετική απόρροια αυτού του τύπου θεμελίωσης σε συνδυασμό με το ρευστοποιήσιμο έδαφος, είναι η μείωση του σεισμικού φορτίου που φτάνει στο μεσόβαθρο και στην ανωδομή. Ωστόσο, λόγω της ρευστοποίησης, ενδέχεται να προκύψουν σημαντικές μετακινήσεις και στροφές μετά από ένα σεισμό μεγάλου μεγέθους. Ως εκ τούτου, διερευνάται η απόκριση της γέφυρας, ώστε να καθοριστούν οι επιτρεπόμενες μετατοπίσεις του εδάφους, οι οποίες δεν προκαλούν κατάρρευση, αλλά ούτε και απώλεια της λειτουργικότητας. Αυτές οι επιτρεπόμενες μετατοπίσεις χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό της θεμελίωσης.

Η γέφυρα υπό μελέτη αποτελείται από δύο αμφιέριστα ανοίγματα θεωρητικού μήκους 42.00m το καθένα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με πλάκα συνέχειας μήκους 1m. 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 εγκάρσιους και διαγώνιους συνδέσμους 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, μορφώνοντας έτσι ένα πλαίσιο στην εγκάρσια έννοια της γέφυρας 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.

Το αριθμητικό προσομοίωμα της γέφυρας μορφώνεται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA v.8.5 και εκπονούνται μη γραμμικές αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψιν τη μη γραμμικότητα της γεωμετρίας, του υλικού και τις αρχικές ατέλειες στα μεταλλικά στοιχεία. Η μη γραμμική συμπεριφορά των στύλων του μεσοβάθρου από οπλισμένο σκυρόδεμα έχει προσομοιωθεί με τη χρήση διαγραμμάτων ροπών – καμπυλοτήτων. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε

στη διερεύνηση φαινομένων λυγισμού, εντός και εκτός επιπέδου, στα μεταλλικά στοιχεία της ανωδομής. Ως εκ τούτου, ορίστηκε πυκνό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στα μέλη της ανωδομής, στα οποία δόθηκαν και αρχικές ατέλειες. Για τον προσδιορισμό του σχήματος των αρχικών ατελειών, έγιναν γραμμικοποιημένες αναλύσεις λυγισμού (LBA) με σκοπό την εύρεση των ιδιομορφών λυγισμού. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός των ιδιομορφών αυτών, ώστε να ληφθούν υπόψη στις αναλύσεις όλα τα πιθανά ήδη λυγισμού των μεταλλικών στοιχείων. Έπειτα, έγιναν μη γραμμικές, στατικές, αναλύσεις, όπου επιβλήθηκαν καθιζήσεις και στροφές στις βάσεις των στύλων. Στο πέρας των αναλύσεων, καταγράφεται η συμπεριφορά όλων των κρίσιμων μελών της γέφυρας, συμπεριλαμβανομένων των μεταλλικών στοιχείων της ανωδομής, των εφεδράνων και του μεσοβάθρου, έως την πρώτη αστοχία. Ως πρώτη αστοχία ορίζεται η πρώτη διαρροή στη βάση των στύλων του μεσοβάθρου, ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στην κορυφή των στύλων αυτών, ή η αστοχία κύριων μεταλλικών στοιχείων. Αστοχία σε στοιχεία όπως εφέδρανα, πλάκα συνέχειας ή διαγώνιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας μεταξύ των τόξων δεν μπορούν να προκαλέσουν κατάρρευση της γέφυρας και μπορούν να επισκευαστούν ή και να αντικατασταθούν εύκολα. Επομένως δεν είναι κρίσιμα για τον καθορισμό των επιτρεπόμενων εδαφικών μετακινήσεων. Ωστόσο, στις αναλύσεις λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της δυσκαμψίας τους σε περίπτωση που ξεπερνούν το όριο διαρροής τους και υφίστανται βλάβες. Παράλληλα, δεν μελετάται η απόκριση της δοκού έδρασης καθώς είναι αρκετά δύσκαμπτη και δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις επιβαλλόμενες μετακινήσεις και στροφές.

Από τις αναλύσεις προέκυψε πως κρίσιμότερη είναι η στροφή περί το διαμήκη άξονα της γέφυρας, προκαλώντας πλαστικές αρθρώσεις στις κορυφές των στύλων του μεσοβάθρου. Αντίστοιχα, η στροφή περί τον εγκάρσιο άξονα της γέφυρας προκαλεί σημαντικές καμπτικές ροπές στη βάση των στύλων, καθιστώντας κρίσιμη τη διαρροή των διατομών στις θέσεις εκείνες. Ωστόσο, δεν παρατηρείται αστοχία στα μεταλλικά στοιχεία της γέφυρας, παρά μόνο κάποια φαινόμενα λυγισμού στους διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας. Επίσης δεν παρατηρείται καμία βλάβη στα εφέδρανα. Η μικρότερη ανεκτή καθίζηση ρ που μπορεί να υποστεί η γέφυρα χωρίς να προκληθούν ανεπανόρθωτες βλάβες που μπορεί να οδηγήσουν σε κατάρρευση είναι της τάξεως των $\rho_{\max}=24\text{cm}$, ενώ η συνδυασμένη στροφή ως προς τυχαίο άξονα ανέρχεται σε $\theta_{\max}=0.05\rho_{\max}=1.2^\circ$.

Θεωρώντας πως η γέφυρα έχει ήδη υποστεί καθίζηση και στροφή λόγω ρευστοποίησης εδάφους από ένα μεγάλο σεισμικό γεγονός, διερευνάται η συμπεριφορά της γέφυρας σε έναν επόμενο σεισμό. Ο σεισμός που προκαλεί ρευστοποίηση (Σεισμικό Σενάριο 2) έχει μεγάλη περίοδο επαναφοράς (1000 έτη) με μέγεθος $M=7.0$. Επειδή το ρευστοποιημένο έδαφος δρα ως φυσική σεισμική μόνωση ο σεισμός αυτός δεν προκαλεί μεγάλα εντατικά μεγέθη στην κατασκευή. Ωστόσο με το πέρας του σεισμικού γεγονότος, αναπτύσσονται παραμένουσες καθιζήσεις και στροφές στη βάση του μεσοβάθρου, οι οποίες εντείνουν το μεσόβαθρο. Μετά από έναν τέτοιο σεισμό, στη διάρκεια ζωής του έργου αναμένεται ένας σεισμός με μικρότερη περίοδο επαναφοράς ίση με 225 χρόνια και μέγεθος $M=6.2$ (Σεισμικό Σενάριο 1), ο οποίος όμως δεν προκαλεί ρευστοποίηση και επομένως δεν εκμεταλλεύεται στη φυσική σεισμική μόνωση. Έτσι, η γέφυρα που μελετάται, έχοντας υποστεί παραμένουσες παραμορφώσεις (καθίζηση και στροφή) στη βάση του μεσοβάθρου λόγω του Σεισμικού Σεναρίου 2, υπόκειται ξανά σε σεισμική δράση και καθορίζεται το μέγιστο ποσοστό του Σεισμού (Σεισμικό Σενάριο 1) το οποίο δεν προκαλεί ζημιές που θα μπορούσαν να καταστήσουν την κατασκευή μη λειτουργική. Από τις αναλύσεις προκύπτει πως αν ληφθεί υπόψη η αναμενόμενη καθίζηση του πεδίου λόγω ρευστοποίησης, βάσει της γεωτεχνικής μελέτης, ο σεισμός που μπορεί να υποστεί χωρίς σημαντικές βλάβες φτάνει το 70% του σεισμού σχεδιασμού του Σεισμικού Σεναρίου 1.

Η διπλωματική εργασία διεξάγεται στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος "ΘΑΛΗΣ" με τίτλο "Πρωτότυπος σχεδιασμός βάθρων γεφυρών σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με χρήση φυσικής σεισμικής μόνωσης", με επιστημονικό υπεύθυνο τον κ. Γ. Δ. Μπουκοβάλα.



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

DIPLOMA THESIS
EMKΔE2015 23

Performance Criteria and Design of Shallow Foundation of an Arched Steel Bridge on Liquefiable Soil

Maria Gkioka

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A
Co-supervisor: Isabella Vassilopoulou, Dr. Civil Engineer

ABSTRACT

In the current thesis the response of an arch steel bridge on liquefiable soil to imposed differential settlements and rotations, as well as the innovative design of a shallow foundation for the pier of the bridge are investigated. The conventional approach to the phenomenon of liquefaction is to use pile foundation, so that the loads of the superstructure can be transferred to deeper, non-liquefiable soil layers with adequate strength. In the proposed innovative solution, the concept of a shallow foundation is investigated, assuming that the liquefiable soil functions as a seismic isolator. A positive outcome that derives from the use of a shallow foundation on liquefiable soil is the decrease of the seismic actions that reach the pier and the superstructure. However, due to liquefaction, additional permanent ground movements, by means of settlements and rotations may evolve after a major earthquake event. The behavior of the bridge is investigated in order to determine the permissible ground movements, which would not result in the loss of its serviceability and strength. These permissible settlements and rotations are used for the design of the pier footing. To that end, the pier response to combined rotations and settlements, which simulate the differential displacements caused by liquefaction, is investigated.

The bridge under investigation consists of two simply supported spans, 42.00m each, which are connected through a continuity slab, 1m long. The theoretical width of the deck is 14.70. A composite deck is employed and each span consists of two main beams and seventeen transverse beams. Each main beam is suspended by a corresponding arch with seven hangers, while the two arches of each span are interconnected with transverse and diagonal bracing members. The height of the arches reaches 10m. The main beams, the transverse beams, the arches and the bracing members are made of structural steel. The pier consists of a concrete beam and three reinforced concrete columns, thus forming an indeterminate frame with a height of 10m, including the concrete beam. The abutments are considered rigid.

The numerical model of the bridge is developed with the use of the finite element analysis software ADINA v8.5. Nonlinear static analyses are conducted, taking into account the nonlinearities of the geometry, the material and the initial imperfections of the steel members. Bending moment – curvature diagrams have been used to simulate the non linear behavior of the RC columns of the pier. Special attention was given to the investigation of the in- and out-of-plane buckling of the steel members of the superstructure. To achieve the latter, a dense finite element mesh was used for these members, and initial imperfections were considered. In order to define the shape of the initial imperfections, a Linearized Buckling Analysis (LBA)

was conducted, so as to establish the buckling modes. Subsequently, a combination of these buckling modes is used, to take into account the possible buckling types of the steel members. Then, nonlinear static analyses are conducted, where combined settlements and rotations are imposed at the base of the pier. At the end of these analyses, the behavior of all crucial members, including the steel members of the superstructure, the bearings and the pier, is recorded up to first failure. The first failure is defined as the first yield at the base of the pier columns, the formation of plastic hinges at the top of the pier columns, or the failure of main steel members. The failure of the bearings, the continuity slab, or the diagonal bracing members is not considered important, since these members cannot provoke the collapse of the bridge and can be easily repaired or replaced. Therefore, they are not crucial for the determination of the permissible displacements of the soil. However, the alteration of their stiffness is taken into account, in case they exceed yield or bearing damage. Simultaneously, the response of the concrete beam of the pier is not investigated, since it is considered almost rigid and does not affect the permissible settlements and rotations.

The analyses indicated that the rotation about the longitudinal axis of the bridge is the most crucial one, as it results in plastic hinges at the top of the pier columns. Correspondingly, the rotation about the transverse axis of the bridge provokes significant bending moments at the base of the pier columns, thus rendering the yield at these positions crucial. However, no failure is observed at the steel members, although the diagonal bracing moments are subject to buckling in some analyses. Moreover, no damages are observed at the bearings. The smallest permissible settlement value that the bridge can withstand without significant, irreparable damages leading to collapse, is equal to $\rho_{\max}=24\text{cm}$, while the combined rotation about a random axis equals $\theta_{\max}=0.05\rho_{\max}=1.2^\circ$.

Considering that the bridge has already been subjected to settlements and rotations due to liquefaction caused by a major seismic event, the response of the bridge to a second earthquake is investigated. The earthquake that provokes liquefaction (Seismic Scenario 2) has a significant return period ($T=1000$), with a magnitude of $M=7.0$. Due to the natural seismic isolation offered by the liquefied soil, this earthquake does not cause large internal forces on the structure. However, liquefaction results in permanent settlements and rotations that are developed at the base of the pier, at the end of the major seismic event, which increase the bending moments on the columns of the pier. Such a large earthquake is unlikely to happen again within the life span of the bridge, therefore an earthquake with a smaller return period equal to $T=225$ years and a magnitude of $M=6.2$ (Seismic Scenario 1) is expected, which does not cause liquefaction and therefore the natural seismic isolation is not employed. Thus, the bridge under investigation having been subjected to permanent displacements (settlements and rotations) at the base of the pier due to Seismic Scenario 2, is subjected to a second earthquake and the permissible percentage of the design earthquake (Seismic Scenario 1) is established, with respect to maintaining the performance levels of the bridge. The analyses indicate that, if the displacements of the footing, expected by the geotechnical report, are taken into account, the percentage of the design earthquake, the bridge can withstand without significant damages, reaches 70% of Seismic Scenario 1.

The diploma thesis has been conducted within the research project "THALIS", entitled "Innovative Design of Bridge Piers on Liquefiable Soils with the use of Natural Seismic Isolation", performed under the general coordination of Professor George Bouckovalas.