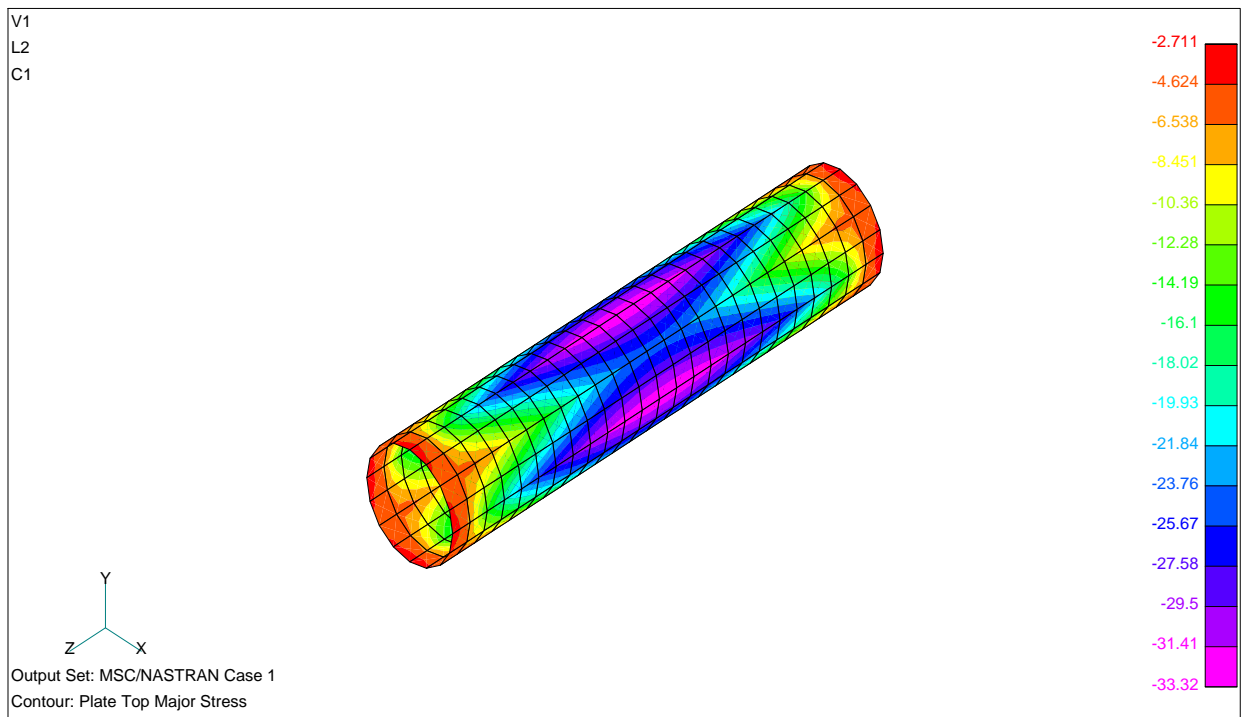


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ
ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ
ΜΕΘΟΔΟΥΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΗΣ
ΔΗΜΗΤΡΑΣ ΓΕΡΟΓΙΑΝΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΧΑΡΗΣ ΓΑΝΤΕΣ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 1997

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Δομοστατικής

“Μελέτη Μηχανικής Συμπεριφοράς Υπόγειων Αγωγών με Πεπερασμένα Στοιχεία και Αναλυτικές Μεθόδους”

Διπλωματική Εργασία της Δήμητρας Γερογιάννη

Επιβλέπων: Λέκτορας Χάρης Γαντές

Αθήνα, Οκτώβριος 1997

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς υπόγειων αγωγών υπό διάφορες φορτίσεις και συνθήκες στήριξης, για διαφορετικούς τύπους εδαφών. Η γνώση της συμπεριφοράς τέτοιων συστημάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μεταφορά και διανομή φυσικού αερίου και πετρελαίου, για δίκτυα ύδρευσης και αποχέτευσης, και γενικά έχουν πολλές εφαρμογές σε έργα πολιτικού μηχανικού. Επίσης, τα προβλήματα ανάλυσης και σχεδιασμού υπόγειων σωλήνων παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον από στατική και γεωτεχνική άποψη λόγω των διαφόρων αβεβαιοτήτων, οι οποίες αναφέρονται στα φορτία, στο είδος του εδάφους, στο μέγεθος του σεισμού, στη θέση του αγωγού σε σχέση με ρήγματα ή αστοχίες του εδάφους, στη μη γραμμική συμπεριφορά λόγω των λεπτότοιχων διατομών και στην ανάγκη εφαρμογής της μεμβρανικής και καμπτικής θεωρίας.

Στην παρούσα εργασία αντιμετωπίζονται προβλήματα ανάλυσης τάσεων και παραμορφώσεων για έλεγχο αντοχής και λειτουργικότητας, καθώς και ανάλυση λυγισμού για έλεγχο ευστάθειας. Ειδικότερα, ένας αγωγός μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ένα κυκλικό κυλινδρικό κέλυφος, το οποίο αποτελείται από διαδοχικούς κυκλικούς δακτυλίους. Επομένως, ένας κυκλικός δακτύλιος μπορεί να θεωρηθεί ως στοιχειώδες τμήμα ενός τέτοιου σωλήνα. Για το λόγο αυτό, στην εργασία παρουσιάζονται πρώτα γραμμικές ελαστικές αναλύσεις και γραμμικοποιημένες αναλύσεις λυγισμού κυκλικών δακτυλίων υπό διάφορες φορτίσεις και συνθήκες στήριξης. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά αντίστοιχα στη γραμμική ελαστική ανάλυση και στο λυγισμό κυκλικών κυλινδρικών κελυφών, οπότε σταδιακά καταλήγουμε στα τελευταία κεφάλαια που αφορούν τη μελέτη υπόγειων αγωγών. Για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έγινε χρήση της αριθμητικής μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, με το πρόγραμμα NASTRAN για Windows, ενώ επίσης χρησιμοποιήθηκαν διάφορες αναλυτικές λύσεις και προσεγγιστικές μέθοδοι για το ίδιο θέμα από τη βιβλιογραφία.

Επιπλέον, έγινε εξαγωγή προσεγγιστικών αναλυτικών σχέσεων για τα φορτία αστοχίας και λυγισμού υπόγειων αγωγών υπό καθαρή θλίψη και καθαρή κάμψη. Στα προσομοιώματα αυτά τα θλιβόμενα τμήματα του περιβάλλοντος εδάφους αντιπροσωπεύονται από γραμμικά ελατήρια μετακίνησης. Οι σχέσεις που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν για παραμετρικές μελέτες και χάραξη διαγραμμάτων για την επιρροή του τύπου εδάφους. Τέλος, εξετάστηκε η συμπεριφορά υπόγειων αγωγών υπό δυναμικά φορτία με προσεγγιστικές αναλυτικές μεθόδους, δίνοντας έμφαση στη διαφοροποίηση της επίδρασης σεισμών και εκρήξεων.

Department of Civil Engineering

Division of Structural Engineering

“Investigation of the Mechanical Behavior of Buried Pipelines with Finite Element Procedures and Analytical Methods”

Diploma Thesis of Dimitra Gerogianni

Supervisor: Charis Gantes, Assistant Professor

Athens, October 1997

Abstract

The purpose of this work is the investigation of the mechanical behavior of buried pipelines under various loading and boundary conditions, for different soil types. Knowledge of the behavior of such systems is of great importance because they are broadly used for transfer and distribution of oil and gas, as well as for water supply and drainage systems. In general, underground pipeline systems have many applications in civil engineering projects. Problems associated with the analysis and design of buried pipes are very interesting from a structural and geotechnical aspect, especially because of the various uncertainties involving loading conditions, soil type, earthquake magnitude, depth of burial, non linear behavior due to thin-walled cross-sections and need to combine membrane and bending theory.

This study is dealing with problems concerning stress and strain analysis in order to check possible strength and serviceability failure modes, as well as buckling analysis to check stability. More specifically, a long tube behaves as a circular cylindrical shell, which is formed by joining successive circular rings. Therefore, a circular ring can be considered as a fundamental part of the same tube. For these reasons, the study begins with linear elastic analyses and linear buckling analyses of circular rings under several loads and boundary conditions. Then, it continues with linear elastic and buckling analyses of circular cylindrical shells, gradually reaching the last chapters which are related to the investigation of buried pipelines. Analyses were carried out applying the numerical method of finite elements (using NASTRAN for Windows computer program), while also several analytical solutions and approximate methods from the bibliography were used for comparison.

Furthermore, approximate analytical relations were derived concerning critical failure modes and critical buckling loads for buried pipes under pure axial compression and pure bending. In these models the parts of the surrounding soil under compression are represented by linear translational springs. These relations were used for parametric analyses and creation of diagrams describing the effect of soil type. Finally, the behavior of underground pipeline systems under dynamic loads was examined, using approximate analytical methods and paying special attention to the different effect of earthquakes and explosions.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη.....	ii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ	
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Φορτίσεις υπόγειων αγωγών.....	1
1.3 Περιγραφή κινδύνων λόγω σεισμού.....	2
1.4 Προσδιορισμός των κινδύνων λόγω σεισμού.....	3
1.5 Κριτήρια σχεδιασμού υπόγειων αγωγών.....	4
1.6 Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ	
2.1 Εισαγωγή.....	12
2.2 Διαφορική εξίσωση ισορροπίας κάμψης λεπτής καμπύλης ράβδου...	23
2.3 Χρήση τριγωνομετρικών σειρών για την ανάλυση λεπτών κυκλικών δακτυλίων.....	24
2.4 Εφαρμογές.....	26
2.4.1 Κυκλικός δακτύλιος με δύο θλιπτικές δυνάμεις.....	26
2.4.2 Κυκλικός δακτύλιος υπό υδροστατική πίεση.....	28
2.5 Παρουσίαση ορισμένων επιλεγμένων αναλυτικών λύσεων.....	30
2.6 Παραδείγματα επίλυσης κυκλικών δακτυλίων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	32
2.7 Συγκρίσεις-Συμπεράσματα.....	41
2.8 Επιρροή ελαστικών στηρίξεων σε κυκλικό δακτύλιο.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ	
3.1 Εισαγωγή.....	56
3.2 Επίδραση ομοιόμορφης πίεσης σε κυκλικό δακτύλιο.....	56
3.3 Λυγισμός κυκλικών δακτυλίων υπό ομοιόμορφη εξωτερική πίεση.....	58

3.3.1 Χρήση τριγωνομετρικών σειρών για το λυγισμό δακτυλίων...	58 61
3.3.2 Δεύτερος τρόπος ανάλυσης δακτυλίου σε λυγισμό.....	
3.4 Παραδείγματα επίλυσης κυκλικών δακτυλίων σε λυγισμό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	65 73
3.5 Συγκρίσεις-Συμπεράσματα.....	74
3.6 Επιρροή ελαστικών στηρίξεων στο λυγισμό κυκλικών δακτυλίων.....	
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ	79
4.1 Εισαγωγή.....	80
4.2 Μεμβρανική θεωρία κυκλικών κυλινδρικών κελυφών: Αξονοσυμμετρική φόρτιση.....	83
4.2.1 Κυλινδρικό κέλυφος υπό το ίδιο βάρος του.....	85
4.2.2 Δεξαμενή νερού.....	86
4.3 Καμπτική θεωρία κυκλικών κυλινδρικών κελυφών.....	97
4.3.1 Κυκλικό κυλινδρικό κέλυφος με δύο τέμνουσες δυνάμεις.....	99
4.3.2 Κυκλικό κυλινδρικό κέλυφος με δύο ακραίες ροπές.....	100
4.3.3 Δεξαμενή νερού πακτωμένη στη βάση της.....	103
4.4 Παραδείγματα επίλυσης κυκλικών κυλινδρικών κελυφών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	137
4.5 Συγκρίσεις-Συμπεράσματα.....	139
4.6 Επιρροή ελαστικών στηρίξεων σε κυκλικό κυλινδρικό κέλυφος.....	
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ	148
5.1 Εισαγωγή.....	148
5.2 Λυγισμός σωλήνων υπό ομοιόμορφη εξωτερική πίεση.....	150
5.3 Σχεδιασμός σωλήνων με ατέλειες υπό ομοιόμορφη εξωτερική πίεση.....	154
5.4 Παραδείγματα επίλυσης κυκλικών κυλινδρικών κελυφών σε λυγισμό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	164
5.5 Συγκρίσεις-Συμπεράσματα.....	165
5.6 Λυγισμός κυλινδρικών κελυφών υπό καθαρή αξονική θλίψη.....	174

5.7 Λυγισμός κυλινδρικών κελυφών υπό καθαρή κάμψη.....	181
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	181
ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΩΝ	181
ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ	186
6.1 Εισαγωγή.....	194
6.2 Υπόγειοι αγωγοί υπό καθαρή θλίψη-Αξονοσυμμετρικός λυγισμός.....	
6.3 Υπόγειοι αγωγοί υπό καθαρή κάμψη-Φαινόμενο Brazier.....	
6.4 Υπόγειοι αγωγοί υπό καθαρή κάμψη-Τοπικός λυγισμός.....	199
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	199
ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΥΠΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ	202
7.1 Εισαγωγή.....	
7.2 Περιγραφή του είδους κυμάτων που διαδίδονται στο έδαφος.....	205
7.3 Περιγραφή της συμπεριφοράς υπόγειων αγωγών κατά τη διάδοση κυμάτων στο περιβάλλον έδαφος.....	205
7.4 Υπολογισμός παραμορφώσεων υπόγειων αγωγών για επίπεδα κύματα.....	210
7.4.1 Πρώτος τρόπος υπολογισμού παραμορφώσεων.....	215
7.4.2 Δεύτερος τρόπος υπολογισμού παραμορφώσεων.....	219
7.5 Υπολογισμός παραμορφώσεων υπόγειων αγωγών για σφαιρικά κύματα.....	225
7.5.1 Πρώτος τρόπος υπολογισμού παραμορφώσεων.....	
7.5.2 Δεύτερος τρόπος υπολογισμού παραμορφώσεων.....	
	231
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	232
ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	234
8.1 Ανασκόπηση.....	
8.2 Γενικά συμπεράσματα.....	
8.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	235
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΜΑΤΗΜΑΤΙΚΑ.....	257

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

260

ΕΜΠΕΙΡΙΕΣ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
(NASTRAN).....

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....