

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**



**Εφαρμογή μεθόδων δυναμικής ανάλυσης
σε κατασκευές με γραμμική
και μη γραμμική συμπεριφορά**

**Μεταπτυχιακή Εργασία
Ευανθίας Ξένου**

**Αθήνα
Μάρτιος 2006**

**Επιβλέπων: Χάρης Γαντές
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ**

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών

Εφαρμογή μεθόδων δυναμικής ανάλυσης σε κατασκευές με γραμμική και μη γραμμική συμπεριφορά

Μεταπτυχιακή Εργασία: Ευανθίας Ξένου
Επιβλέπων: Χάρης Γαντές
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ
Αθήνα, Μάρτιος 2006

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάζεται η συμπεριφορά των κατασκευών σε δυναμικά φορτία. Τα δυναμικά φορτία, σε αντίθεση με τα στατικά, εισάγουν την πολύ σημαντική παράμετρο του χρόνου στην ανάλυση μιας κατασκευής. Η φόρτιση και κατά συνέπεια η ένταση και η παραμόρφωση της κατασκευής δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του χρόνου. Επόμενο είναι λοιπόν ότι τα δυναμικά φορτία προκαλούν μια πρόσθετη φόρτιση σε σχέση με τα στατικά, τις αδρανειακές δυνάμεις που αντιτίθενται στην κίνηση της κατασκευής.

Σκοπός μας στην εργασία αυτή είναι να ελεγχθούν και να συγκριθούν δύο βασικές μέθοδοι δυναμικής ανάλυσης: η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου και η ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων. Η **ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (time domain)** χρησιμοποιεί ως κύρια παράμετρο τον χρόνο και ολοκληρώνει σε κάθε χρονική στιγμή την εξίσωση κίνησης του φορέα, προκειμένου να βρει τις προκύπτουσες μετατοπίσεις. Το αποτέλεσμα της επίλυσης είναι η απόκριση του φορέα συναρτήσει του χρόνου. Η **ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων (frequency domain)** χρησιμοποιεί ως κύρια παράμετρο τη συχνότητα φόρτισης της κατασκευής. Μετατρέπει λοιπόν οποιαδήποτε συνάρτηση φόρτισης $p(t)$ σε συνάρτηση $P(\Omega)$. Αντί λοιπόν να έχουμε το εύρος της φόρτισης για κάθε χρονική στιγμή, έχουμε το εύρος της φόρτισης για κάθε μια από τις φορτίζουσες συχνότητες, Ω . Το αποτέλεσμα της φόρτισης είναι η μέγιστη μόνιμη απόκριση της κατασκευής για κάθε συχνότητα φόρτισης.

Εκτός από τη σύγκριση των δύο μεθόδων μεταξύ τους πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ αριθμητικής και αναλυτικής λύσης, αφού όλες οι αναλύσεις έγιναν τόσο αριθμητικά με χρήση των προγραμμάτων Adina και Sap, όσο και αναλυτικά, με χρήση κατάλληλων σχέσεων και τη βοήθεια του Excel και του Maple.

Η εργασία περιέχει πολλά θεωρητικά στοιχεία για τη δυναμική ανάλυση των κατασκευών. Μετά από βιβλιογραφική έρευνα συγκεντρώθηκαν τα σημαντικότερα στοιχεία τόσο για μονοβάθμια, όσο και για πολυβάθμια συστήματα. Ακολουθούν οι αντίστοιχες εφαρμογές και ο έλεγχος-σύγκριση των μεθόδων δυναμικής ανάλυσης σε ένα μονοβάθμιο και σε ένα διβάθμιο σύστημα.

Στη συνέχεια αναφέρεται μια πολύ σημαντική παράμετρος της δυναμικής ανάλυσης, η **γεωμετρική μη γραμμικότητα**, η οποία καθορίζει συχνά τη μέθοδο ανάλυσης που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε. Παρουσιάζονται κάποια θεωρητικά στοιχεία και ελέγχεται η επιρροή διαφόρων παραμέτρων στο όριο ισχύος της γραμμικότητας, στο όριο δηλαδή πέρα από το οποίο η γραμμική και η μη γραμμική ανάλυση δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα. Γίνονται παραμετρικές αναλύσεις για ένα πρόβολο και για ένα καλώδιο, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Τέλος, γίνεται έλεγχος του ορίου ισχύος της γραμμικότητας για ένα πραγματικό πρόβολο – μια δοκό του στεγάστρου εισόδου του Ολυμπιακού Σταδίου – και για ένα πραγματικό καλώδιο – ένα τυπικό φέρον καλώδιο του Σταδίου Ειρήνης και Φιλίας.

National Technical University of Athens
School of Civil Engineer
Interdisciplinary Graduate Program of Studies
Structural Design and Analysis of Structures

**Application of methods of dynamic analysis
in structures with linear and non-linear behavior**

Thesis of: Evanthia Xenou
Assistant Professor NTUA: Ch. Gantes
Athens, March 2006

ABSTRACT

The present thesis investigates the behavior of structures under dynamic loading. Dynamic, as opposed to static loading, incorporates the important parameter of time in structural analysis. The force, and consequently the tension and the structural deformation, vary during time. Consequently, dynamic compared to static loading, produces an additional load, inertia, which resists the movement of the structure.

The aim of this project is to examine and compare two basic methods of dynamic analysis: the time domain and the frequency domain analysis. **Time domain analysis** integrates the equation of motion in every instant of time, in order to find the resulting displacements. The result of the solution is the response of the system for every time t_i . **Analysis in the frequency domain** converts any arbitrary loading function $p(t)$ into a function $P(\Omega)$. Instead of having the loading amplitude for every time t_i , we have the amplitude for each one of the loading frequencies Ω . The result of the analysis is the maximum steady-state response of the structure for every loading frequency.

Apart from the comparison between the two methods, a comparison between numerical and analytical solution is performed, as all the analyses have been performed not only numerically, using the programs Adina and Sap, but also analytically using suitable relationships and with the help of Excel and Maple.

The project contains many theoretical data about the dynamic analysis of structures. Following the literature research the most important information not only about one-degree but also about multi-degree of freedom systems are presented. Moreover the corresponding applications and the comparison of methods of dynamic analysis of one and two degree of freedom systems follow.

Additionally, a very important parameter of dynamic analysis is referenced, the **geometrical non-linearity**, often determining the analysis which needs to be used. Several theoretical data are presented, and the influence of a number of factors in the limit of linearity is examined. Limit

of linearity is defined as the point beyond which the results of linear and non-linear analysis begin to diverge. Parametric analysis of a cantilever beam and a cable is performed and the results are presented. In conclusion, the valid limit of linearity of an actual cantilever beam – an I-beam of the entrance canopies of the Olympic Stadium – and of an actual cable of the Stadium SEF is evaluated.