

Ο ρόλος της θεμελίωσης και του εδάφους στη δυναμική συμπεριφορά κτιρίου, που υπέστη βλάβες κατά το σεισμό της 14/08/2003 στη Λευκάδα

Soil and foundation role in the dynamic behavior of a building that was heavily damaged during the Lefkas earthquake on 14/08/2003

ΦΩΤΑΚΗ, Β. Πολιτικός Μηχανικός, MSc.
ΠΙΤΙΛΑΚΗΣ, Κ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Α.Π.Θ.
ΚΙΡΤΑΣ, Ε. Πολιτικός Μηχανικός, MSc., Υποψήφιος Διδάκτωρ, Α.Π.Θ.
ΣΕΞΤΟΣ, Α. Πολιτικός Μηχανικός, Λέκτορας, Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Κατά τον σεισμό της Λευκάδας (M=6.4,14/8/2003) μια 4όροφη κατασκευή Ο/Σ θεμελιωμένη σε πασσάλους παρουσίασε εκτεταμένες βλάβες στον φέροντα οργανισμό. Στην παρούσα εργασία γίνεται η μελέτη της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής μέσω δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης, δίνοντας έμφαση στη διαδικασία εκτίμησης της πραγματικής σεισμικής διέγερσης στη θέση του κτιρίου, όπως και στον καθορισμό της θέσης εφαρμογής αλλά και του προσανατολισμού των συνιστωσών της στο προσομοίωμα. Η παθολογία του κτιρίου συγκρίνεται με τα αποτελέσματα των αναλύσεων ενώ σχολιάζεται εκτεταμένα η επιρροή της ενδοσιμότητας του εδάφους και της ενδεχόμενης ρευστοποίησης στην σεισμική συμπεριφορά του φορέα.

ABSTRACT : During the Lefkas earthquake (M=6.4,14/8/2003) a 4-storey R/C building supported on pile foundation was heavily damaged. In this paper, the seismic response of the structure is investigated employing dynamic inelastic analysis, emphasizing on the procedure to evaluate the realistic input motion at the building location, as well as on the determination of the application point and orientation of the excitation components during the simulation. The observed damage pattern is compared with the analysis results while a comprehensive discussion takes place regarding the influence of the soil compliancy and potential liquefaction to the structural seismic behavior.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τον πρόσφατο σεισμό της Λευκάδας (M=6.4,14/8/2003) σημαντικό ρόλο στην χωρική κατανομή των βλαβών που παρουσιάστηκαν στα κτίρια έπαιξε η ποιότητα του εδάφους θεμελίωσης ιδιαίτερα στην περιοχή της παλιάς πόλης. Παράλληλα, ενώ πολλές κατασκευές με παραδοσιακό τρόπο δόμησης ανταπεξήλθαν επιτυχώς δίχως σημαντικές βλάβες, υπήρξαν νεότερα κτίρια τα οποία παρουσίασαν σημαντικές αστοχίες. Στο παρόν γίνεται η μελέτη της σεισμικής απόκρισης μιας πραγματικής κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος θεμελιωμένης σε πασσάλους, που παρουσίασε εκτεταμένες βλάβες κατά τη διάρκεια του σεισμού. Ιδιαίτερη

αναφορά γίνεται στην διαδικασία προσδιορισμού της σεισμικής κίνησης που χρησιμοποιείται κατά την δυναμική ανελαστική ανάλυση της κατασκευής και την μόρφωση προσομοιώματος που λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση εδάφους, θεμελίωσης και ανωδομής. Εκτεταμένες μελέτες από τη διεθνή βιβλιογραφία που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια επισημαίνουν την επιρροή του φαινομένου της αλληλεπίδρασης αλλά και την πολυπλοκότητά του που καθιστά δυσχερή τον προσδιορισμό της δράσης του ως ευνοϊκής ή δυσμενούς για τις κατασκευές (Mylonakis and Gazetas, 2000).

Η παρατηρηθείσα παθολογία συγκρίνεται με τα αποτελέσματα των αναλύσεων ενώ σχολιάζεται εκτεταμένα η επιρροή της

προσομοίωσης της ενδοσιμότητας του εδάφους, του ενδεχομένου ρευστοποίησης και της επιλογής της θέσης εφαρμογής της διέγερσης στην σεισμική συμπεριφορά του φορέα.

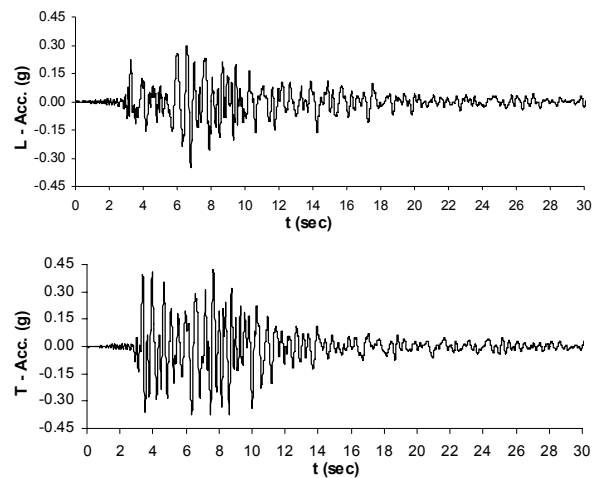
2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΛΕΥΚΑΔΑΣ

Ο σεισμός της Λευκάδας της 14^{ης} Αυγούστου 2003 συνέβη στις 8.15π.μ. τοπική ώρα και είχε μέγεθος 6.4 βαθμούς της κλίμακας Ρίχτερ. Σύμφωνα με Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Αθηνών το επίκεντρο του σεισμού, του ισχυρότερου που έχει πλήξει το νησί από το 1995, εντοπίζεται 8.5 μίλια κάτω από τη θάλασσα, περίπου 20 μίλια βορειοδυτικά του νησιού. Ο σεισμός προκάλεσε σοβαρές ζημιές σε κτίρια, δρόμους, τοίχους αντιστήριξης, καθώς και στο δίκτυο ύδρευσης και αποχέτευσης. Επιπλέον παρατηρήθηκαν πολυάριθμες κατολισθήσεις σε όλο το νησί, προκαλώντας σοβαρά κυκλοφοριακά προβλήματα.

Από τις καταγραφές του κύριου σεισμού της 14/08/2003 (Σχήμα 1), όπως προέκυψαν από το μόνιμο δίκτυο του Ινστιτούτου Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ), προκύπτει ότι η σεισμική δόνηση ήταν πολύ ισχυρή με την μέγιστη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση να αγγίζει τα 0.40g (Margaris et al, 2003). Παρόλα αυτά οι παρατηρηθείσες αστοχίες δεν ήταν τόσο σημαντικές ως αποτέλεσμα του παραδοσιακού τρόπου κατασκευής, όπως επίσης εξαιτίας της διαφορετικής τιμής της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου των περισσότερων κατασκευών (κυρίως μονώροφες ή διώροφες κατασκευές από ξύλο και πέτρα με περίοδο $T=0.1-0.25\text{sec}$) σε σχέση με την δεσπόζουσα συχνότητα της σεισμικής κίνησης. Στο Σχήμα 2 συγκρίνονται τα φάσματα απόκρισης των δύο οριζόντιων συνιστωσών, το ελαστικό φάσμα του ΕΑΚ και το αντίστοιχο ανελαστικό φάσμα (υπολογισμένο για δείκτες πλαστιμότητας $\mu=2$ και $\mu=4$).

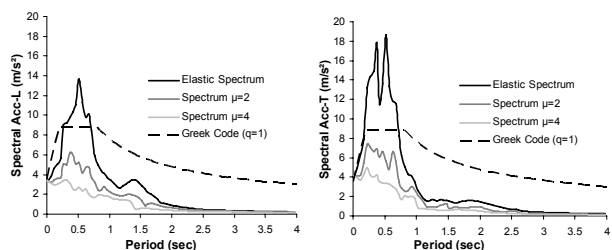
Ένας ακόμη λόγος για τη σχετικά μικρή ζημιά είναι το γεγονός ότι η πλειοψηφία των κτιρίων Ο/Σ της Λευκάδας ήταν ήδη σχεδιασμένα για ένα ελάχιστο επίπεδο σεισμικών δυνάμεων σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό τόσο του 2000 (τροποποίηση 2003) όσο και τον προγενέστερο του 1992. Συγκεκριμένα, η Λευκάδα όπως και τα περισσότερα νησιά του Ιονίου ανήκουν στη δυσμενέστερη σεισμική ζώνη III, με αποτέλεσμα τα κτίρια να

σχεδιάζονται για μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $A=0.36g$. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει όμως για τα κτίρια που είχαν κατασκευαστεί μεταξύ του 1959 και 1992 τα οποία και ήταν σχεδιασμένα σύμφωνα με τον Κανονισμό του 1959 (διαστασιολόγηση σύμφωνα με τις επιτρεπόμενες τάσεις) που προέβλεπε χρήση συντελεστή σεισμικής επιβάρυνσης ($\varepsilon=0.08, 0.12$ και 0.16) για εδάφη μικρής, μέτριας και μεγάλης σεισμικής επικινδυνότητας. Στην τελευταία κατηγορία ανήκει και το υπό μελέτη κτίριο που κατασκευάστηκε το 1980 και ήταν ένα από τα ελάχιστα κτίρια ΟΣ στην πόλη της Λευκάδας που παρουσίασαν σημαντικό βαθμό βλάβης.



Σχήμα 1. Επιταχυνσιογραφήματα του κύριου σεισμού όπως καταγράφηκαν από το μόνιμο δίκτυο του ΙΤΣΑΚ (www.itsak.gr).

Figure 1. Acceleration recordings of the main event (permanent network of the Institute of Engineering Seismology and Earthquake Resistant Structures of Thessaloniki).



Σχήμα 2. Ελαστικά και ανελαστικά φάσματα του κύριου σεισμού σε σύγκριση με το φάσμα σχεδιασμού του ΕΑΚ-2000 (για εδάφη κατηγορίας Γ).

Figure 2. Elastic and inelastic spectra of the main event compared with the design spectra of the Greek Seismic Code (i.e. Soil Category C).

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ

Το υπό μελέτη τετραώροφο κτίριο Ο/Σ με πυλωτή βρίσκεται στην οδό Π.Φίλιππα-Πανάγου, στην περιοχή της παλιάς πόλης της Λευκάδας κοντά στην προκουμαία (Σχήμα 3). Το ισόγειο του κτιρίου ύψους 5.65m λειτουργεί ως Super Market, ενώ στο πίσω τμήμα του έχει διαμορφωθεί πατάρι στο ύψος των 3m (Σχήμα 4β). Διαθέσιμα ήταν τα σχέδια της κάτοψης του ισογείου, του πρώτου (και τυπικού) ορόφου (Σχήμα 5) καθώς και της θεμελίωσης του κτιρίου.

Το κτίριο είναι θεμελιωμένο σε πασσάλους αιχμής διαμέτρου 0.52m και βάθους 17-18m, όπου ανάλογα με τη γεωμετρία των φερόντων κατακόρυφων στοιχείων είναι είτε μεμονωμένοι είτε διαμορφωμένοι σε ομάδες από δύο έως τέσσερις που συνδέονται μεταξύ τους με κεφαλόδεσμο, ενώ υπάρχει και σύνδεση με συνδετήριες δοκούς.

Τα επικαιροποιημένα σε σχέση με προγενέστερους υπολογισμούς (Sextos et al, 2005) γεωτεχνικά δεδομένα που προκύπτουν από πρόσφατες γεωτρήσεις στην περιοχή της προκουμαίας κοντά στην θέση της κατασκευής, όπως και μια εκτίμηση των ταχυτήτων των διατμητικών κυμάτων στα αντίστοιχα βάθη (Κακδέρη και συνεργάτες, 2006) δίνονται στον Πίνακα 1. Επισημαίνεται η στρώση ιλυώδους άμμου στο βάθος μεταξύ των -6.5 και -12.0 μέτρων περίπου, η οποία και εμφανίζεται επιρρεπής σε ρευστοποίηση.

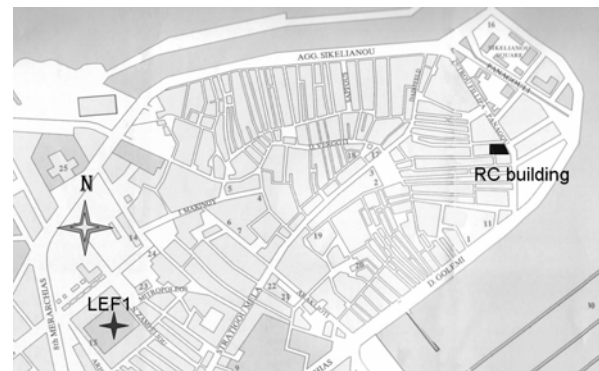
Οι παρατηρηθείσες αστοχίες από το σεισμό της 14/08/2003 εντοπίζονται κυρίως σε δύο πλευρές του κτιρίου στο ύψος του ισογείου. Συγκεκριμένα στην είσοδο του καταστήματος παρατηρήθηκε αστοχία τριών υποστυλωμάτων (K8-K15-K19 στο Σχήμα 5 ή C18-C19-C20 στο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων αντίστοιχα) με έντονη αποφλοίωση του σκυροδέματος σε θέση κοντά στον πόδα (Σχήμα 6). Ακόμη είναι εμφανής ο λυγισμός των διαμήκων ράβδων, ο θρυμματισμός του πυρήνα της διατομής του στύλου, καθώς και η αστοχία κάποιων συνδετήρων, που εμφανίζονται διαβρωμένοι.

Σημαντικές αστοχίες παρατηρούνται και στην πλαϊνή πλευρά της οικοδομής. Το ύψος της τοιχοποιίας πλήρωσης ισούται με 2m, υπολειπόμενο κατά 1m του ύψους των στύλων, σχηματίζοντας κοντό υποστύλωμα (Σχήμα 7) το οποίο και παρουσίασε την χαρακτηριστική έντονη διατμητική αστοχία. Ιδιαίτερα έντονη είναι επίσης η αποφλοίωση

του σκυροδέματος, καθώς και ο θρυμματισμός του πυρήνα της διατομής.

Πίνακας 1. Γεωτεχνικά στοιχεία
Table 1. Geotechnical data

Γεωτεχνικά Στοιχεία		
Στρώμα	Στάθμη z(m)	Vs(m/sec)
DB (debris)	-1.00	150
CL	-1.00	120
	-3.20	
MH-CH	-3.20	170
	-4.30	
CH	-4.30	160
	-5.40	
CL	-5.40	160
	-6.50	
SM	-6.50	215-245
	-12.00	
CL	-12.00	360
	-13.10	
ML	-13.10	280
	-15.40	
ΜΑΡΓΑ CL	-15.40	480-750
	-60.00	



Σχήμα 3. Θέση κτιρίου και θέση καταγραφής του σεισμού (LEF1)

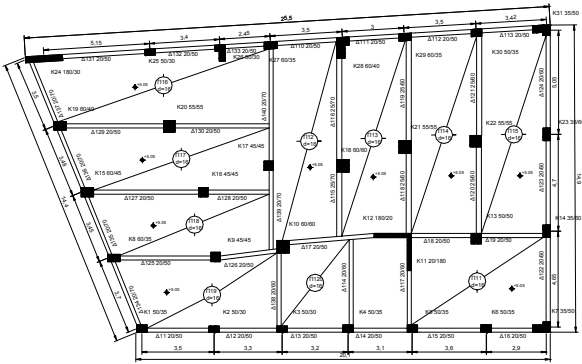
Figure 3. Building and recording station (LEF1) location



Σχήμα 4α. Η υπό μελέτη κατασκευή (αριστερά) Σχήμα 4β. Το πατάρι στο βάθος του καταστήματος (δεξιά)

Figure 4a. The building under study (left)

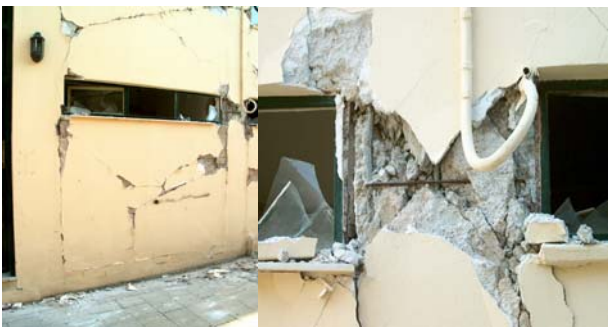
Figure 4b. The inner loft at the back of the ground store (right)



Σχήμα 5. Κάτοψη του τυπικού ορόφου
Figure 5. Plan view of the typical storey



Σχήμα 6. Καμπτική αστοχία των υποστυλωμάτων της εισόδου του καταστήματος.
Figure 6. Flexural failure of the columns at the store entrance.



Σχήμα 7. Αστοχία κοντού υποστυλώματος στην πλαϊνή πλευρά του κτιρίου.
Figure 7. Short column failure at the side of the building

4. ΣΤΑΔΙΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ

Η διαδικασία προσομοίωσης που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία είχε ως στόχο την κατά το δυνατόν πληρέστερη απόδοση των σύνθετων φαινομένων της αλληλεπίδρασης εδάφους, θεμελίωσης και κατασκευής, του ενδεχομένου ρευστοποίησης όπως και της ανελαστικής συμπεριφοράς του φέροντος οργανισμού υπό το πρίσμα της ορθολογικής εφαρμογής της πραγματικής σεισμικής κίνησης στο υπό εξέταση προσομοίωμα. Ιδιαίτερα για την

αλληλεπίδραση εδάφους-πασσάλου είναι πλέον ευρύτατα αποδεκτό πως μεταβάλλει τη σεισμική κίνηση ανάλογα με την συχνότητα που την χαρακτηρίζει, ενώ παράλληλα η ταλάντωση της κατασκευής αυξάνει τις οριζόντιες μετακινήσεις των πασσάλων προκαλώντας σημαντικές παραμορφώσεις στο έδαφος που οδηγούν σε μείωση του μέτρου διάτμησης, αύξηση της απόσβεσης και περαιτέρω διαφοροποίηση της κίνησης (Gazetas and Mylonakis 2002, Mylonakis and Gazetas 2000). Το γεγονός αυτό αναγνωρίζεται και από τον Ευρωκώδικα 8 (Part 5) ιδιαίτερα για περιοχές όπου τα εδάφη είναι επιρρεπή σε ρευστοποίηση (2003). Για τους παραπάνω λόγους η διαδικασία σύμφωνα με την οποία έγινε η προσομοίωση, και η οποία περιγράφεται εποπτικά στο Σχήμα 8, συμπεριέλαβε τα ακόλουθα βήματα:

- Έγινε χρήση της πραγματικής καταγραφής του κύριου σεισμού μετά από κατάλληλη αποσυνέλιξη της κίνησης στη θέση καταγραφής, λαμβάνοντας υπόψη τη μη-γραμμική συμπεριφορά του εδάφους με χρήση καμπυλών G-γ-D (Σχήμα 9) στο πρόγραμμα Cyberquake (BRGM, 2000). Ακολούθησε μελέτη της εδαφικής απόκρισης στη θέση της κατασκευής συμπεριλαμβανομένου του ενδεχομένου ρευστοποίησης με χρήση του προγράμματος Cyclic-1D (University of California, 2001)
- Λήφθηκε υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους-πασσάλων με χρήση ελατηριακών στηρίξεων τύπου Winkler κατά μήκος των πασσάλων και σε δυο διευθύνσεις μεταβαλλόμενων με το βάθος και τη διαστρωμάτωση του εδάφους (Makris and Gazetas, 1992).

$$k_x = 1.2E_s \quad (1)$$

$$C_x = 1.6 \cdot \rho_s \cdot V_s \cdot d \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{\omega d}{V_s}\right)} + 2 \cdot \beta_s \cdot \frac{k_x}{\omega} \quad (2)$$

Κατά τον υπολογισμό των ελατηριακών σταθερών έγινε κατάλληλη απομείωση προκειμένου να ληφθεί υπόψη η συμπεριφορά στα βάθη όπου παρατηρήθηκε ρευστοποίηση (Tokimatsu, 1999). Πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της πολυπλοκότητας του μοντέλου δεν ήταν εφικτή η πλήρης προσομοίωση φαινομένων ομάδας πασσάλων όπως και αλληλεπίδρασης πασσάλου με πάσσαλο.

Αντίστοιχα η κατακόρυφη και οριζόντια ελατηριακή σταθερά για τον κεφαλόδεσμο υπολογίστηκε από την σχέση του Gorbunov-Passadon (1961) που έχει επιβεβαιωθεί και από πρόσφατες λύσεις (Russo, 1998):

$$K_v = \frac{G}{1-\nu} \cdot \beta_z \cdot \sqrt{4cd} \quad (3)$$

$$K_h = 4(1+\nu) \cdot G \cdot \beta_x \cdot \sqrt{cd} \quad (4)$$

όπου β_z , β_x συντελεστές απόσβεσης ενώ $2c$, $2d$ οι διαστάσεις του κεφαλόδεσμου, ν ο λόγος Poisson που λαμβάνεται ίσος με 0.2 και G το μέτρο διάτμησης της επιφανειακής στρώσης.

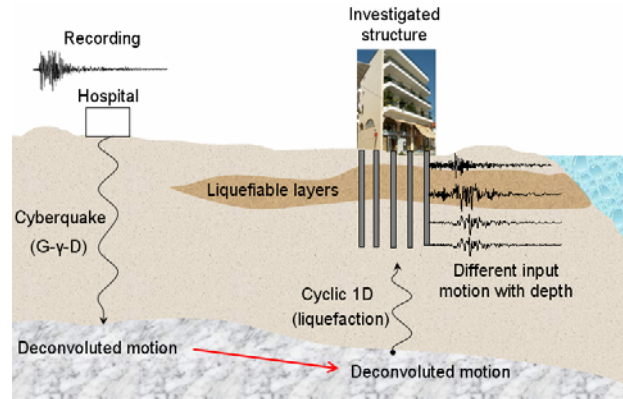
- Η σεισμική κίνηση που προέκυψε από την μελέτη εδαφικής απόκρισης στη θέση της κατασκευής εφαρμόστηκε με χρήση των αντίστοιχων, διαφορετικών με το βάθος χρονοϊστοριών μετακίνησης, στα αντίστοιχα σημεία των πασσάλων ταυτόχρονα και στις δυο διευθύνσεις. Η ταυτόχρονη διέγερση κατά τις δυο διευθύνσεις κρίνεται περισσότερο κατάλληλη στην περίπτωση χρήσης πραγματικών καταγραφών, από την συνήθη πρακτική επιβολής της κάθε συνιστώσας ξεχωριστά και εκ των υστέρων σύνθεσης των μέγιστων τιμών σύμφωνα με κάποιον κανόνα χωρικής επαλληλίας.

- Για την επίτευξη της πιστότερης προσομοίωσης της πραγματικής επιπόνησης του κτιρίου κατά τη διάρκεια του κύριου σεισμικού γεγονότος, ο προσανατολισμός της διέγερσης σε σχέση με τους κύριους άξονες της κατασκευής λήφθηκε στραμμένος κατά 30° ώστε να ανταποκρίνεται στην διεύθυνση των συνιστωσών της καταγεγραμμένης σεισμικής κίνησης.

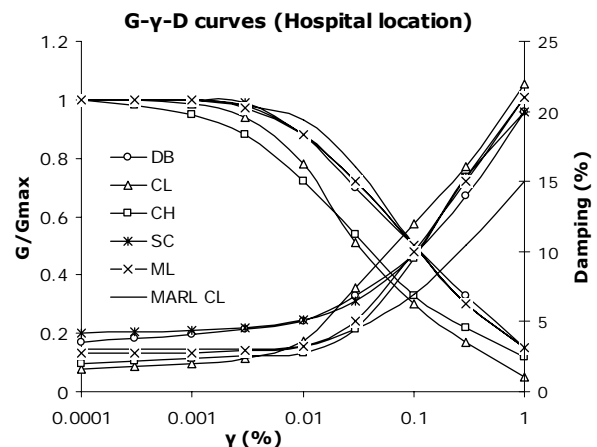
- Η γεωμετρία της ανωδομής υλοποιήθηκε με χρήση ενός τρισδιάστατου προσομοιώματος στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ETABS (Computers and Structures Inc, 2003) για τις ελαστικές αναλύσεις και στο SAP2000 (Computers and Structures Inc, 2002) για τις ανελαστικές. Προσομοιώθηκαν κατάλληλα τα κοντά υποστυλώματα που παρατηρήθηκαν στην μια πλευρά της κατασκευής, ενώ δυνατότητα ανελαστικής συμπεριφοράς δόθηκε μόνο στις πιθανές θέσεις σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα δοκών και στύλων με χρήση στοιχείων τύπου plastic link (Wen-type). Η σχέση ροπών-καμπυλοτήτων για τον καθορισμό των ιδιοτήτων των πλαστικών αρθρώσεων προήλθε με χρήση του προγράμματος RCCOLA (Karros, 1993).

Πέρα από την σύνθετη ανάλυση αλληλεπίδρασης εδάφους, πασσάλων και κατασκευής με ταυτόχρονο συνυπολογισμό της ανελαστικής συμπεριφοράς στην ανωδομή, διεξάγονται και άλλες απλούστερες ελαστικές και ιδιομορφικές αναλύσεις όπως και αναλύσεις με θεώρηση πακτωμένης στη βάση κατασκευής, ώστε να εντοπιστεί και να

ποσοτικοποιηθεί ο ρόλος των διαφόρων παραμέτρων που εμπλέκονται στην σεισμική συμπεριφορά και εν τέλει στην αστοχία που παρουσίασε ο φορέας κατά τη διάρκεια του σεισμού. Πλήρης αναφορά και σχολιασμός όλων των παραπάνω γίνεται αλλού (Φωτάκη, 2004)



Σχήμα 8. Περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης που ακολουθήθηκε.
Figure 8. Description of simulation procedure



Σχήμα 9. Καμπύλες G-γ-D του εδάφους στη θέση καταγραφής (ΟΑΣΠ, 1996).
Figure 9. G-γ-D curves of soil profile at recording location (OASP, 1996)

5. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

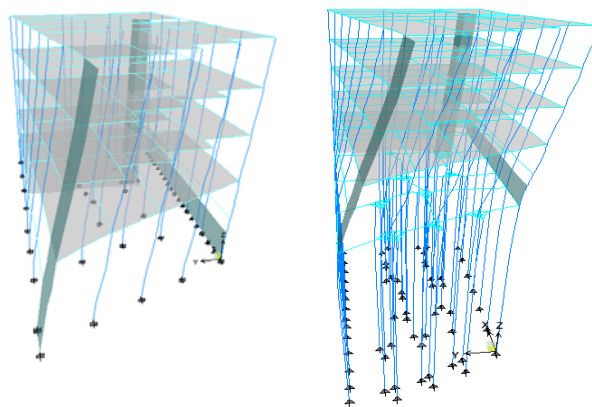
5.1 Ελαστική και ανελαστική δυναμική συμπεριφορά του συστήματος έδαφος-θεμελίωση-ανωδομή

Η κύρια ιδιοπερίοδος του πακτωμένου φορέα υπολογίστηκε σε $T=0.527\text{sec}$, καθιστώντας τον περισσότερο εύκαμπτο από μια τυπική τετράωροφη κατασκευή. Στο Σχήμα 10α φαίνεται η κύρια ιδιομορφή της ταλάντωσης που είναι σχεδόν αποκλειστικά στρεπτική

λόγω της μη κανονικότητας σε κάτοψη και καθ' ύψος (πατάρι στο πίσω μέρος του κτιρίου), του μηχανισμού μαλακού ορόφου που δημιουργείται στο ύψος των μπροστινών υποστυλωμάτων που σχηματίζουν *pilotis*, αλλά και της απουσίας επαρκών τοιχωμάτων και στις δυο διευθύνσεις. Στην περίπτωση ανάλυσης του συνολικού συστήματος πασσαλοθεμελίωσης-ανωδομής, η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος αυξάνεται κατά 10% σε $T=0.584\text{sec}$, γεγονός που έγκειται στην συμμετοχή ανώτερων ιδιομορφών (Σχήμα 10β). Συγκεκριμένα, 25 ιδιομορφές συμμετέχουν προκειμένου να ενεργοποιηθεί το 75% της συνολικής μάζας, ενώ μόνο 6 ιδιομορφές ήταν αρκετές για να ενεργοποιηθεί άνω του 90% στην περίπτωση της πακτωμένης κατασκευής. Η επιπλέον επιπόνηση εξαιτίας της αύξησης της συμμετοχής των ανώτερων ιδιομορφών στην ταλάντωση αγγίζει κατά περίπτωση το 30%, οδηγώντας κατά συνέπεια στο συμπέρασμα πως οι παρατηρηθείσες αστοχίες μπορούν εν μέρει να αποδοθούν στην επιρροή της θεμελίωσης.

Κατά την μελέτη της ανελαστικής συμπεριφοράς του συστήματος, λήφθηκε υπόψη η μη-γραμμική συμπεριφορά των κρίσιμων στοιχείων του σκελετού του κτιρίου. Έτσι εξετάστηκε η απαίτηση πλαστιμότητας όλων των υποστυλωμάτων του ισογείου και συγκρίθηκε με την αντίστοιχη διαθέσιμη σε μια προσπάθεια να δικαιολογηθεί η κατανομή των αστοχιών. Η κίνηση εισαγωγής (διαφορετική καθ' ύψος των πασσάλων και λαμβάνοντας υπόψη τη μη-γραμμικότητα του εδάφους όπως και φαινόμενα ρευστοποίησης) επιβλήθηκε στη θεμελίωση ταυτόχρονα σε δύο (κάθετες μεταξύ τους) οριζόντιες διευθύνσεις που σχηματίζουν γωνία 30° με τους κύριους άξονες του κτιρίου σύμφωνα με τον πραγματικό προσανατολισμό της καταγραφής. Από τη σύγκριση της απαιτούμενης και της διαθέσιμης πλαστιμότητας, καθώς και των αντίστοιχων διαγραμμάτων ροπών-στροφών ($M-\theta$) των υποστυλωμάτων της εισόδου C18 και C19 προέκυψε ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης επιβεβαιώνουν τις παρατηρηθείσες καμπτικές τους αστοχίες. Παράλληλα η συμπεριφορά των υπόλοιπων υποστυλωμάτων του ισογείου παραμένει ελαστική, όπως επιβεβαιώθηκε και από την κατάστασή τους μετά το σεισμό. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την ανελαστική συμπεριφορά του κτιρίου μπορούν να αναζητηθούν στους Sextos et al (2005).

Πρέπει εδώ να σημειωθεί πως κατά την αριθμητική μελέτη του προβλήματος διερευνήθηκε και η επιρροή της γωνίας πρόσπτωσης των δυο συνιστωσών της σεισμικής κίνησης. Πρόσφατες έρευνες έχουν μάλιστα δείξει ότι η μέγιστη τιμή μιας μεταβλητής απόκρισης μπορεί να είναι έως και 176% μεγαλύτερη σε σχέση με την τιμή που εμφανίζεται όταν οι συνιστώσες της σεισμικής κίνησης ταυτίζονται με τους κύριους άξονες του κτιρίου (Athanatoroulou et al 2005, Anastassiadis et al 2002). Στην κατασκευή που εξετάζεται εδώ διαπιστώθηκε διακύμανση της απαίτησης πλαστιμότητας για τα κρίσιμα υποστυλώματα έως και 50%, με δυσμενέστερη περίπτωση αυτήν της γωνίας 30° με τους κύριους άξονες του κτιρίου, που συμπίπτει με την πραγματική γωνία πρόσπτωσης του σεισμού στο συγκεκριμένο κτίριο.



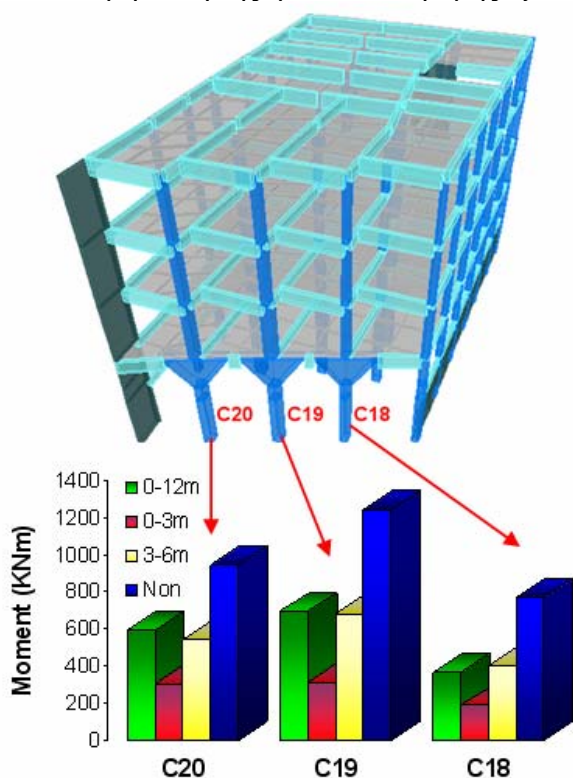
Σχήμα 10α-10β. Θεμελιώδης ιδιομορφή του πακτωμένου φορέα ($T=0.527\text{sec}$) και του συστήματος πασσάλων και κατασκευής ($T=0.584\text{sec}$) αντίστοιχα.

Figure 10a-10b. Fundamental mode of the fixed-based model ($T=0.527\text{sec}$) and the pile-structure system ($T=0.584\text{sec}$) respectively.

5.4 Επίδραση του βάθους ρευστοποίησης στις ροπές κάμψης των πασσάλων

Πέρα από τη διαμόρφωση του σκελετού του κτιρίου, την επιρροή της θεμελίωσης και τη διεύθυνση πρόσπτωσης των σεισμικών κυμάτων κρίθηκε αναγκαίο να αποτιμηθεί με ακρίβεια ο ρόλος της ρευστοποίησης, καθώς το φαινόμενο εμφανίστηκε σε πολλές θέσεις στην περιοχή του λιμανιού της Λευκάδας. Για το σκοπό αυτό πέρα από την θεώρηση της ρευστοποιήσιμης εδαφικής στρώσης στο πιθανότερο βάθος, διενεργήθηκε και μια παραμετρική μελέτη όπου υπολογίστηκε η απόκριση του φορέα για διάφορα βάθη ρευστοποιήσιμης στρώσης. Πρέπει να

σημειωθεί ότι στις αναλύσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το επικαιροποιημένο εδαφικό προφίλ που προέκυψε από μεταγενέστερες του σεισμού γεωτρήσεις. Στο Σχήμα 11 φαίνεται η έντονη επιρροή της θέσης της ρευστοποιήσιμης στρώσης στην σεισμική απόκριση της θεμελιωμένης σε πασσάλους κατασκευής. Όπως είναι γνωστό η ρευστοποίηση μπορεί να φιλτράρει μέρος της σεισμικής κίνησης. Συνεπώς απουσία της έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες τιμές σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, κάτι που μεταφράζεται σε αντίστοιχη απόκριση της ανωδομής (τελευταία στήλη Σχήμα 11). Το βάθος όμως της ρευστοποιήσιμης ζώνης παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο (Finn, 2005) καθώς λόγω της μεταβολής της κίνησης και της αλληλεπίδρασης εδάφους, πασσάλων και ανωδομής μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη επιπόνηση στην κατασκευή. Έτσι ενδεχόμενη ρευστοποίηση σε βάθος 3-6m έχει ως αποτέλεσμα διπλασιασμό των ροπών κάμψης των στύλων σε σχέση με την περίπτωση όπου η ρευστοποιήσιμη στρώση εντοπίζεται στην επιφάνεια (0-3m). Επειδή ακριβώς η πιθανότερη θέση της ρευστοποιήσιμης ζώνης



Σχήμα 11. Ροπές κάμψης των κρίσιμων υποστυλωμάτων της πρόσοψης για διάφορα βάθη της ρευστοποιήσιμης στρώσης.
Figure 11. Bending moments of critical front columns for various liquefiable layer depths.

βρίσκεται σε κάποιο βάθος από την επιφάνεια, η παθολογία του κτιρίου μπορεί ως ένα βαθμό να αποδοθεί στη ρευστοποίηση του εδάφους.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία εστίασε στο ρόλο της θεμελίωσης και του εδάφους στη δυναμική συμπεριφορά και κατά συνέπεια στις παρατηρηθείσες αστοχίες τετραώροφου κτιρίου στη Λευκάδα. Για το σκοπό αυτό ακολουθήθηκε μια διαδικασία προσομοίωσης του προβλήματος: α) προσδιορίστηκε μια "ρεαλιστική" εξαρτώμενη από το βάθος κίνηση εισαγωγής, βασισμένη σε πραγματικές καταγραφές και λαμβάνοντας υπόψη τις τοπικές εδαφικές συνθήκες, τη ρευστοποίηση και την ταυτόχρονη διέγερση σε δύο οριζόντιες διευθύνσεις, β) προσομοιώθηκε η πασσαλοθεμελίωση με χρήση ελατηριακών στηρίξεων τύπου Winkler κατά μήκος των πασσάλων, λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική διαστρωμάτωση του εδάφους, γ) μελετήθηκε η ανελαστική δυναμική απόκριση του συστήματος έδαφος-θεμελίωση-ανωδομή λαμβάνοντας υπόψη τη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων και την μόρφωση κοντών υποστυλωμάτων. Τα κύρια συμπεράσματα που εξαχθηκαν από την εργασία αυτή είναι:

- Η μη κανονικότητα και ο αρχικός σχεδιασμός του κτιρίου επηρεάζουν σημαντικά τη σεισμική του συμπεριφορά. Ασφαλώς θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι στον Κανονισμό βάσει του οποίου σχεδιάστηκε το κτίριο δεν γίνονταν αναφορά σε κριτήρια κανονικότητας.
- Στην περίπτωση που συνυπολογίζεται η αλληλεπίδραση της ανωδομής με τη θεμελίωση και το έδαφος, προκύπτει ότι η δυναμική απόκριση του κτιρίου γίνεται περισσότερο πολύπλοκη με την ενεργοποίηση ανώτερων ιδιομορφών.
- Με χρήση της ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης επιβεβαιώνεται η παθολογία που έχει καταγραφεί, τόσο στην καμπτική αστοχία των μπροστινών υποστυλωμάτων όσο και στην συγκέντρωση σημαντικών διατμητικών δυνάμεων στις θέσεις των κοντών υποστυλωμάτων.
- Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η πραγματική διεύθυνση της διέγερσης στην περίπτωση ανάλυσης κατασκευών υπό συγκεκριμένους σεισμούς προκειμένου να επιβεβαιωθεί η καταγραφείσα συμπεριφορά.
- Τόσο το φαινόμενο της ρευστοποίησης όσο και το βάθος της ρευστοποιήσιμης στρώσης σε συνδυασμό με τη δυναμική συμπεριφορά του

συστήματος έδαφος-θεμελίωση-ανωδομή επηρέασαν σημαντικά την απόκριση του υπό μελέτη κτιρίου στο συγκεκριμένο σεισμό.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Anastassiadis, K., Avramidis, I.E. and Panetsos, P. (2002), "Concurrent Design Forces in Structures under Three-Component Orthotropic Seismic Excitation", *Earthquake Spectra*, Vol.18, Iss.1, pp.1-17.

Athanatopoulou, A.M., Tsourekas, A. & Papamanolis, G. (2005), "Variation of response with incident angle under two horizontal correlated seismic components" *Earthquake Resistant Engineering Structures V*, Press WIT Transactions on The Built Environment, Vol.81, pp. 183-191.

BRGM (2000), "CyberQuake, Version 2, User's Manual", Orléans, France

CEN (2003), "prEN 1998-5:2003, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 5: Foundations, Retaining Structures and Geotechnical Aspects", European Commission for Standardisation.

Computers and Structures Inc. (2002) 'SAP2000. Linear and nonlinear static and dynamic analysis of three-dimensional structures', Berkeley, California, U.S.

Computers and Structures Inc. (2003) 'ETABS. Integrated Building design software v.8, User's Manual', Berkeley, California, U.S.

Finn, L. (2005), "A Study of Piles during Earthquakes: Issues of Design and Analysis" *Bulletin of Earthquake Engineering* Vol. 3, pp. 141-234.

Gazetas, G. and Mylonakis, G. (2002), "Kinematic Pile Response to Vertical P wave Seismic Excitation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, pp. 860-867.

Gorbunov-Possadov, M.I. and Serebrjanyi, R.V. (1961), "Design of structures on elastic foundations", *Proc. of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, Paris, France, pp. 643-655

Kappos, A. (1993), "RCCOLA-90: A Microcomputer Program for the Analysis of the inelastic Response of Reinforced Concrete Sections", Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Greece.

Margaris B., et al. (2003): 'Preliminary Observations on the August 14, 2003, Lefkada Island (Western Greece)

Earthquake', *EERI Special Earthquake Report – November 2003*, Joint report by Institute of Eng.Seismology and Earthquake Eng., National Technical University of Athens and University of Athens, 1-12.

Mylonakis, G. and Gazetas, G. (2000), "Seismic soil-structure interaction: Beneficial or detrimental?", *J. of Earthquake Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 277-301.

Russo, G. (1998), "Numerical analysis of piled rafts", *International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics*, Vol. 22, pp. 477-493.

Sextos, A., Pitilakis, K., Kirtas, E., Fotaki, V. (2005), "A refined computational framework for the assessment of the inelastic response of an irregular building that was damaged during the Lefkada earthquake", 4th European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures, 26-27 August, Thessaloniki, Greece

Tokimatsu, K. (1999), "Performance of pile foundations in laterally spreading soils," ed. P. S. Pinto, *Proc. of the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Vol. 3, Lisbon, Portugal, pp. 957-64.

University of California (2001), "Cyclic 1D Pre-release Beta version, User's Manual" San Diego, U.S.

Κακδέρη, Κ., Ραπτάκης, Δ., Αργυρούδης, Σ., Αλεξούδη, Μ., Πιτιλάκης, Κ., (2006) "Σεισμική απόκριση και τρωτότητα κρηπιδοτόιχων. Το παράδειγμα της Λευκάδας", υποβληθέν στο 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη

Τεχνική έκθεση ερευνητικού προγράμματος ΟΑΣΠ (1996) "Μελέτη της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών, της γεωμορφολογίας και της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής στις ενόργανες καταγραφές του εθνικού δικτύου επιταχυνσιογράφων", Επιστ. υπεύθυνος Κ. Πιτιλάκης, Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων ΑΠΘ & ΙΤΣΑΚ (1992-1996)

Υπουργείο Δημοσίων Έργων (2000), "Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, ΕΑΚ2000", Αθήνα

Φωτάκη, Β. (2004), "Ο ρόλος της θεμελίωσης και του εδάφους στη δυναμική συμπεριφορά κτιρίου, που υπέστη βλάβες κατά το σεισμό της 14/08/2003 στη Λευκάδα", Μεταπτυχ. Διπλ. Εργασία, ΑΠΘ