

Ο σεισμός του Βαρθολομιού (M=5.6) (2-12-2002): Ισχυρή εδαφική κίνηση, απόκριση εδαφικών σχηματισμών και συμπεριφορά των κατασκευών.

Μ. Δημοσθένους, Ι. Σους, Α. Σαββαΐδης, Α. Αναστασιάδης, Β. Μάργαρης
Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (Ι.Τ.Σ.Α.Κ.), Θεσσαλονίκη.

Ι. Καλογεράς, Ι. Μπασκούτας, Μ. Κουρουζίδης
Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών

Λέξεις κλειδιά: Σεισμός, Βαρθολομίο, Ισχυρή εδαφική κίνηση, Συμπεριφορά κατασκευών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην εργασία αυτή δίνονται αποτελέσματα από την εκτίμηση της μακροσεισμικής έντασης και τις καταγραφές της ισχυρής εδαφικής κίνησης κατά το σεισμό που έπληξε την πόλη και την ευρύτερη περιοχή του δήμου Βαρθολομιού στις 2-12-2002. Ειδικά για το δήμο Βαρθολομιού, που παρουσίασε τις περισσότερες βλάβες σε κατασκευές, γίνεται μια προκαταρκτική αποτίμηση της εδαφικής απόκρισης. Παρατίθενται επίσης πληροφορίες σχετικά με τη γεωγραφική κατανομή των βλαβών στην ευρύτερη περιοχή και καταβάλλεται προσπάθεια συσχετισμού αυτών των βλαβών με την εδαφική κίνηση και την τρωτότητα των κατασκευών με ιδιαίτερη αναφορά επίσης στο δήμο Βαρθολομιού.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η περιοχή του Βαρθολομιού έχει πληγεί κατ'επανάληψη στο παρελθόν από καταστροφικούς σεισμούς. Τα τελευταία πενήντα χρόνια η περιοχή έχει υποστεί σημαντικές ζημιές από τους σεισμούς του 1954, 1988 και πρόσφατα από το σεισμό του 2002. Σε κάθε περίπτωση είχε καταγραφεί η μακροσεισμική ένταση στην περιοχή και υπάρχουν αρκετές πληροφορίες σχετικά με τη γενική εικόνα των ζημιών. Κατά το σεισμό του 1988, μεγέθους $M=6.0$, και μέγιστης μακροσεισμικής έντασης $I_{max}=8$, είχαν προκύψει και οι πρώτες καταγραφές της ισχυρής εδαφικής κίνησης στην ευρύτερη περιοχή από επιταχυνσιογράφους των μόνιμων δικτύων του Ινστιτούτου Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ) και του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΓΙ-ΕΑΑ) (Αμαλιάδα: 0.13g, Ζάκυνθος: 0.12g, και Πύργος: 0.05g). Οι ζημιές που αναφέρονται στο δομημένο περιβάλλον της περιοχής, αποτελούμενο από λιθόκτιστα κτίρια και κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα των τελευταίων σαράντα χρόνων, που έχουν μελετηθεί με διάφορους κανονισμούς, προσφέρονται για συστηματική μελέτη της τρωτότητας των κατασκευών. Το πλήθος αυτών των δεδομένων καθώς και οι τεχνολογικές δυνατότητες που παρέχονται σήμερα, επιτρέπουν την καλύτερη κατανόηση της διάδοσης της ισχυρής εδαφικής κίνησης στην περιοχή, της απόκρισης των εδαφικών σχηματισμών και της συμπεριφοράς των κατασκευών.

2. ΜΑΚΡΟΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΚΑΙ ΙΣΧΥΡΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ

2.1. Σεισμολογικά στοιχεία και μακροσεισμική ένταση

Στις 2 Δεκεμβρίου 2002 στις 06:58 ώρα Ελλάδος έγινε στο Νοτιοανατολικό Ιόνιο, ισχυρός σεισμός μεγέθους $M_w=5.6$ στα νοτιοδυτικά παράλια του Νομού Ηλείας με γεωγραφικές συντεταγμένες επικέντρου $\varphi=37.82^\circ\text{B}$ και $\lambda=21.16^\circ\text{A}$. Τον κύριο σεισμό ακολούθησε σειρά μετασεισμών οι οποίοι καταγράφηκαν από το μετασεισμικό δίκτυο καταγραφής της ισχυρής κίνησης το οποίο εγκαταστάθηκε από το ΙΤΣΑΚ και το ΓΙ-ΕΑΑ στην πληγείσα περιοχή. Ο σεισμός προκλήθηκε από

μία διάρρηξη παράταξης (strike-slip) (Παπαζάχος κ.σ., 2001) ενώ ο μηχανισμός του σεισμού υπολογίστηκε από το Εργαστήριο Γεωφυσικής του ΑΠΘ (Roumelioti et al., 2003), το Εργαστήριο Σεισμολογίας του Πανεπιστημίου Πατρών και το πανεπιστήμιο του Harvard.

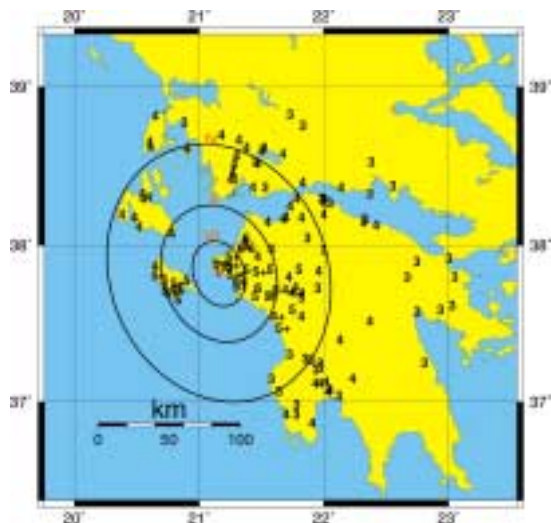
Ο σεισμός έγινε ιδιαίτερα αισθητός στη περιοχή των Δήμων Βαρθολομιού και Κυλλήνης (Σαββαΐδης κ.σ., 2003). Η ισχυρή κίνηση του σεισμού καταγράφηκε από τους σταθμούς της Ζακύνθου (ZAK10202: κωδικός καταγραφής) και του Πύργου (PYRA0201: κωδικός καταγραφής). Στο σχήμα (1) απεικονίζονται οι ισόσειστες καμπύλες του σεισμού ενώ οι αντίστοιχοι αριθμοί παρουσιάζουν τις μακροσεισμικές εντάσεις οι οποίες συλλέγησαν από το ΓΙ-ΕΑΑ.

Στο σχήμα (2) δίνονται οι μέγιστες διορθωμένες συνιστώσες των εδαφικών επιταχύνσεων των δύο καταγραφών ισχυρής κίνησης του κύριου σεισμού. Βασικά στοιχεία καθορισμού της ισχυρής κίνησης είναι επίσης η διάρκεια και τα ενεργειακά χαρακτηριστικά, τα οποία τα τελευταία χρόνια αποτελούν σημαντικές παραμέτρους της διαδικασίας σχεδιασμού κυρίως μεγάλων τεχνικών έργων. Ο ορισμός της περιβαλλόμενης διάρκειας, B-D (Bolt, 1974; bracketed duration) και της σημαντικής διάρκειας, S-D (Trifunac and Brady, 1975; significant duration) είναι δύο από τους πλέον διαδεδομένους ορισμούς στον Ελληνικό χώρο (Koliopoulos et al., 1998). Η καταστρεπτικότητα ενός σεισμού δεν εξαρτάται μόνο από τις μονοπαραμετρικές τιμές της εδαφικής κίνησης αλλά και από τα ενεργειακά χαρακτηριστικά της. Έχειδειχθεί ότι εδαφικές κινήσεις πλούσιες σε ενεργειακό περιεχόμενο επιβάλλουν ανάλογες απαιτήσεις μηχανισμών απορρόφησης της εισαγόμενης ενέργειας στην κατασκευή (Koliopoulos and Margaris, 2001). Υπολογίστηκαν διάφορα ενεργειακά χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης μεταξύ αυτών η ένταση κατά Housner (1959), I-H, ο δείκτης της συνολικής ενέργειας, (Total Energy Index TEI), και η ενεργή μέγιστη επιτάχυνση (Effective Peak Acceleration EPA) (Margaris et al., 2002). Στον Πίνακα (1) δίνονται οι τιμές από τους υπολογισμούς της διάρκειας και των ενεργειακών χαρακτηριστικών.

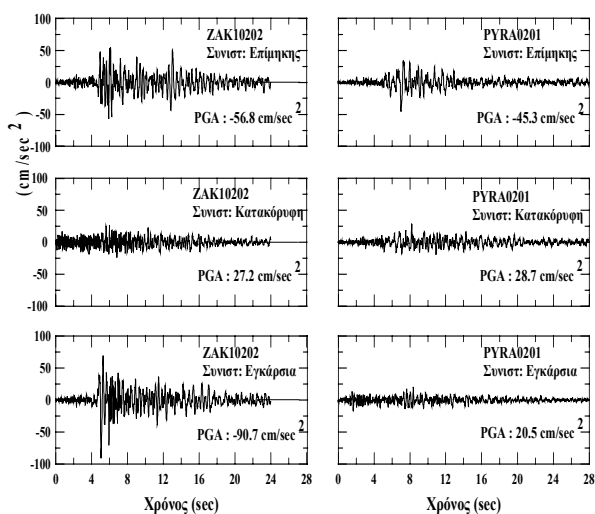
Το δίκτυο επιταχυνσιογράφων του Ελληνικού χώρου το οποίο κατέγραψε την ισχυρή κίνηση του σεισμού στις 2 Δεκεμβρίου 2002 δεν διέθετε μόνιμη εγκατάσταση καταγραφέα στην πόλη του Βαρθολομιού όπου και παρουσιάστηκαν οι μεγαλύτερες βλάβες. Είναι επομένως κρίσιμο να εκτιμηθεί η εδαφική κίνηση η οποία θα μπορούσε να καταγραφεί στη πόλη του Βαρθολομιού με κύριο στόχο να συσχετισθεί η εδαφική κίνηση αυτή με τις παρατηρημένες βλάβες στις τεχνικές κατασκευές. Ένα υβριδικό προσομοίωμα το οποίο υπολογίζει μία τυχαία εδαφική κίνηση με ιδιότητες οι οποίες υιοθετούνται από μοντέλα σεισμικών πηγών και απόσβεσης σεισμικών κυμάτων έχει αναπτυχθεί και εφαρμόζεται ευρέως. Το προσομοίωμα έχει χρησιμοποιηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια στον Ελληνικό χώρο (Margaris and Boore, 1998; Margaris and Hatzidimitriou, 2002) καθορίζοντας μέσες τιμές ισχυρής κίνησης.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συσχετίστηκαν με τις ήδη καταγραμμένες τιμές ισχυρής κίνησης στη θέση της Ζακύνθου (Σαββαΐδης κ.σ., 2003). Εφαρμόστηκε η απλή διαδικασία της αναγωγής της φασματικής κίνησης με την απόσταση και με την μακροσεισμική ένταση με βάση τις εμπειρικές σχέσεις (Θεοδουλίδης, 1991). Τα φάσματα αυτά σχετίστηκαν με το αντίστοιχο φάσμα απόκρισης της προσομοίωσης της ισχυρής κίνησης στη πόλη του Βαρθολομιού (Σχ. 3). Όλες οι φασματικές τιμές παρουσιάζουν ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των για όλο σχεδόν το εύρος των ιδιοπεριόδων από 0.05 – 2.0 sec. Μία υπέρβαση των ανοιγμένων φασματικών τιμών της καταγραφής ZAK10202, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί για ένα εύρος ιδιοπεριόδων από 0.35 – 0.6 sec. Στο σχήμα (4) παρουσιάζονται τα προσομοιώματα της ισχυρής εδαφικής κίνησης της εδαφικής επιτάχυνσης και της εδαφικής ταχύτητας στη θέση του Βαρθολομιού. Η υπολογισμένη εδαφική επιτάχυνση είναι $pg_a = 113 \text{ cm/sec}^2$ και εδαφική ταχύτητα $pg_v = 8.4 \text{ cm/sec}$. Οι τιμές αυτές βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με αυτές που υπολογίζονται από τις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της εδαφικής επιτάχυνσης και ταχύτητας για τον Ελληνικό χώρο (Μάργαρης κ.σ., 2001), $pg_a = 111 \text{ cm/sec}^2$ και $pg_v = 6.2 \text{ cm/sec}$. Το προσομοίωμα της ισχυρής κίνησης μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικό δεδομένου ότι βασίζεται σε μία μεθοδολογία η

οποία μπορεί να εκτιμήσει μέσες εδαφικές κινήσεις χωρίς να λάβει υπόψη τυχόν επιδράσεις της σεισμικής διάρρηξης, της κατευθυντικότητας, αναλυτικών γεωτεχνικών προσομοιωμάτων. Παρόλα αυτά μπορεί να αποτελέσει μία πρώτη εκτίμηση της αναμενόμενης ισχυρής κίνησης στην περιοχή η οποία πλήγηκε ιδιαίτερα από το σεισμό.



Σχ. 1. Μακροσεισμικές εντάσεις και ισόσειστες Καμπύλες του σεισμού στις 2/12/2002.

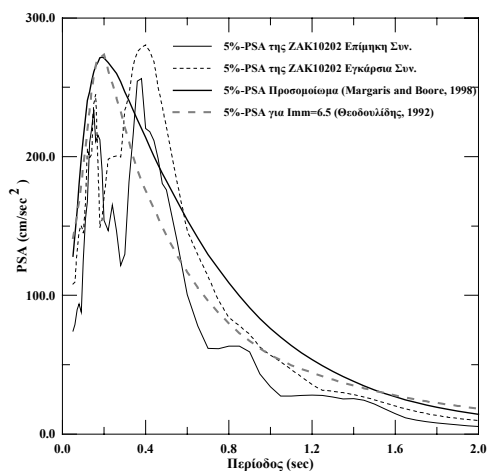


Σχ. 2. Μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις των δύο καταγραφών ισχυρής κίνησης.

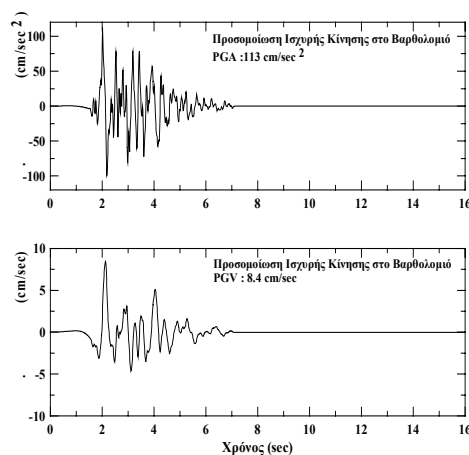
Πίνακας 1. Τιμές περιβαλλόμενης διάρκειας, B-D, σημαντικής διάρκειας, S-D, ενεργειακά χαρακτηριστικά, έντασης κατά Housner, I-H, δείκτη συνολικής ενέργειας, TEI, και ενεργής μέγιστης επιτάχυνσης, EPA, των καταγραφών του σεισμού στις 2 Δεκεμβρίου 2002.

Κωδικός	Συνιστ.	B - D (sec)		S - D (sec)	I - H (cm)	TEI (cm/sec)	EPA (g)
		0%	5%				
ZAK10202	L*	24.0	7.2	13.3	15.5	9.9	0.07
	V*	24.0	-	17.5	5.9	4.2	0.03
	T*	24.0	1.0	12.3	21.5	11.2	0.08
PYRA0201	L	29.0	-	14.2	15.6	8.6	0.04
	V	29.0	-	18.1	8.5	6.2	0.02
	T	29.0	-	20.1	4.2	3.3	0.02

L*: Επίμηκης Συνιστώσα V*: Κατακόρυφη Συνιστώσα T*: Εγκάρσια Συνιστώσα.



Σχ. 3. Σύγκριση φασμάτων απόκρισης διαφόρων μεθοδολογιών του σεισμού Στις 2/12/2003 στο Βαρθολομίο



Σχ. 4. Προσομοίωμα της ισχυρής κίνησης της επιτάχυνσης και ταχύτητας στο Βαρθολομίο.

3. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΣΤΟ ΔΗΜΟ ΒΑΡΘΟΛΟΜΙΟΥ

3.1 Γεωλογικά – Γεωτεχνικά στοιχεία

Η ευρύτερη περιοχή του Βαρθολομιού, σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ (φύλλα Βαρθολομιό & Αμαλιάς, 1:50.000), δομείται από τεταρτογενείς σχηματισμούς οι οποίοι επικάθονται σε μεταλλικούς σχηματισμούς (μειοκαινικά ιζήματα, πλειο-πλειστοκαινικοί σχηματισμοί) μεγάλου πάχους. Οι μεταλλικοί σχηματισμοί επικάθονται ασύμφωνα στους Αλπικούς σχηματισμούς που αποτελούν το υπόβαθρο της περιοχής και ανήκουν στην Ιόνια γεωτεκτονική ζώνη. Οι πλειο-πλειστοκαινικοί σχηματισμοί συνίστανται από ασβεστιτικούς ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, μάργες, εναλλασσόμενες στρώσεις ιλυωδών άμμων και αργίλων πάχους μεγαλύτερου από 1500 μέτρα. Οι τεταρτογενείς, ολοκαινικές αποθέσεις αποτελούνται κυρίως από εναλλασσόμενες στρώσεις άμμων, ιλύων και αργίλων, συχνά σε χαλαρή δομή και πρόσφατες προσχώσεις από άμμους και κροκάλες, λόγω της δράσης των χειμάρρων στην ευρύτερη περιοχή. Κατά μήκος της νοτιοδυτικής και βορειοδυτικής παράκτιας ζώνης (Κυλλήνη, λουτρά Κυλλήνης, ακρ. Γλώσσα) εμφανίζονται θίνες πάχους 3-4 m, όπου και είχαν παρατηρηθεί εδαφικές διαρρήξεις λόγω ρευστοποίησης κατά τον σεισμό του 1988.

Τα διαθέσιμα γεωτεχνικά στοιχεία για την πόλη του Βαρθολομιού προέρχονται από τρεις δειγματοληπτικές - ερευνητικές γεωτρήσεις, σχετικά μεγάλου βάθους (52-76m) που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν από το ΚΕΔΕ κατά μήκος του άξονα με διεύθυνση Α-Δ στο κέντρο του Βαρθολομιού (Τσελέντης et al., 1997) καθώς και από τέσσερις γεωτρήσεις (βάθους έως 31.5 m) που διενεργήθηκαν (Αρχείο ΚΕΔΕ, Αποτελέσματα Γεωτρήσεων σε οικόπεδο Ο.Ε.Κ., 1996) σε απόσταση ~160m από το κτίριο του ΟΤΕ, όπου εγκαταστάθηκε επιταχυνσιογράφος του μετασεισμικού δικτύου του ΙΤΣΑΚ. Από τα διαθέσιμα στοιχεία το υπέδαφος στην υπόψη περιοχή συνίσταται από τις ακόλουθες εδαφικές στρώσεις:

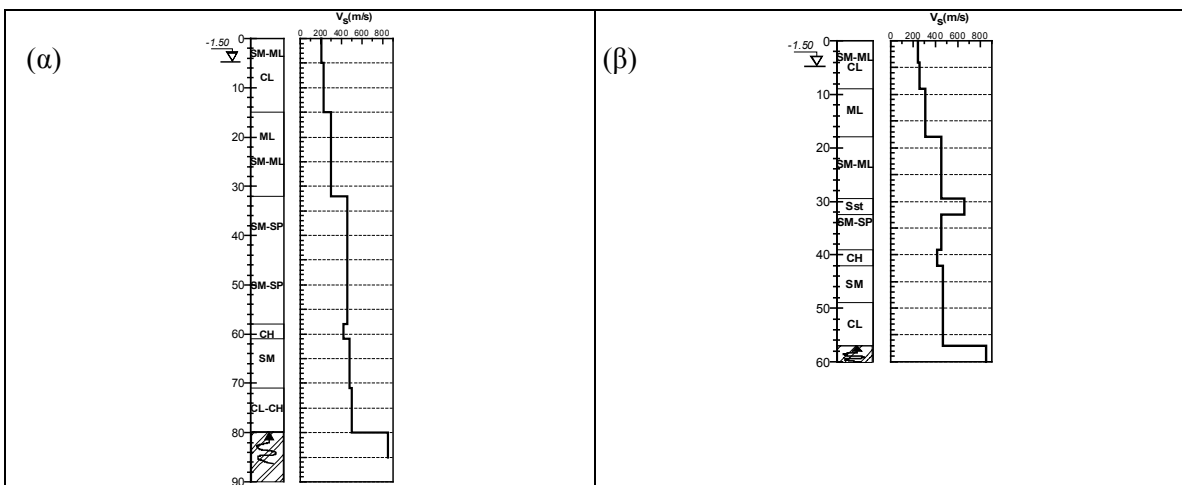
- Η επιφανειακή στρώση, πρόσφατων αποθέσεων εκτείνεται με πάχος που αυξάνεται από δυτικά (~6m) προς ανατολικά (~15m) και αποτελείται από χαλαρές έως μέσης πυκνότητας ιλυώδεις άμμους (SM), αμμώδεις ιλεις (ML), μέσης συνεκτικότητας αμμώδεις αργίλους μέσης πλαστικότητας (CL) κατά τόπους με χαλίγια, λεπτές ενστρώσεις ιλύος και μαλακές στρώσεις πλαστικής αργίλου (CH), πάχους 2 έως 5μ.
- Ακολουθεί εδαφική στρώση με πάχος αυξανόμενο από ~15m δυτικά, έως ~70m, περίπου, ανατολικά συνιστώμενη από στρώσεις πυκνής έως πολύ-πυκνής ιλυώδους άμμου (SM) και καθαρής άμμου (SP) με σποραδικά χαλίγια και πολύ στιφρής μαργαϊκής αργίλου (CL) με ενστρώσεις ψαμμιτών.
- Τέλος, η υποκείμενη στρώση αποτελείται από ιλυώδη-αργιλώδη πολύ στιφρή έως σκληρή μάργα με ενστρώσεις άμμων.

Η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία βρίσκεται σε βάθος 1m έως 2.5m από την επιφάνεια του εδάφους.

3.2 Προκαταρκτική μελέτη της εδαφικής απόκρισης

Η παρούσα προκαταρκτική μελέτη της σεισμικής απόκρισης του υπεδάφους του Βαρθολομιού έχει ως κύριο στόχο τη διερεύνηση, μέσω βασικών παραμέτρων απόκρισης και μονοδιάστατων θεωρητικών αναλύσεων, της πιθανής επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών στα χαρακτηριστικά του σεισμικού κραδασμού στην επιφάνεια του σεισμού της 2-12-2002. Η ανάλυση, σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία (Αθανασόπουλος, 1995, Τσελέντης κ.σ., 1997), επικεντρώθηκε σε δύο θέσεις της υπόψη περιοχής. Η πρώτη εξ' αυτών (θέση 1), αναφέρεται στην ανατολική περιοχή πλησίον της θέσης του επιταχυνσιογράφου του ΙΤΣΑΚ, όπου το πάχος των πρόσφατων χαλαρών εδαφικών αποθέσεων είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με την κεντρική περιοχή (περιοχή Αγ. Ιωάννη) όπου περιγράφεται από τη θέση 2. Στο σχήμα 5 δίδονται οι δύο εδαφικές τομές που χρησιμοποιήθηκαν στις θεωρητικές αναλύσεις, υποθέτοντας ότι τα σεισμικά

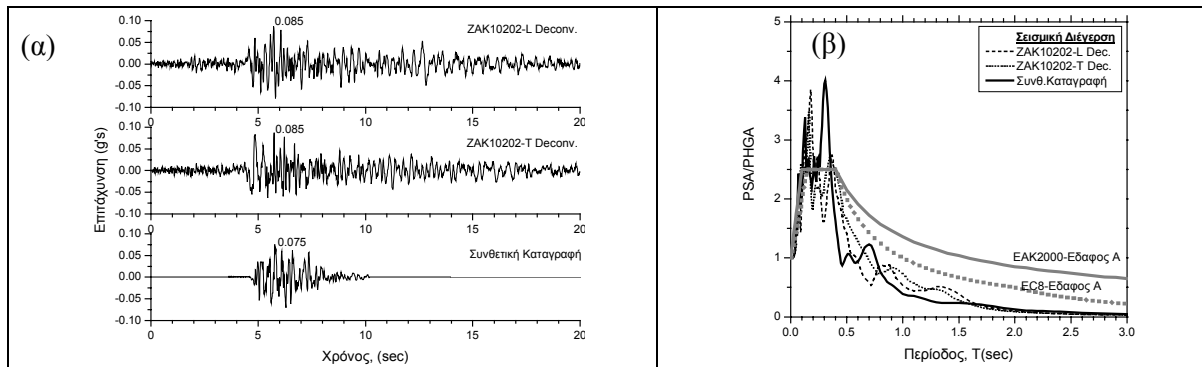
κύματα έχουν την μορφή οριζόντια πολωμένων κυμάτων τα οποία μεταδίδονται κατακόρυφα, από το σεισμικό υπόβαθρο προς την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Σύμφωνα με την προηγούμενη παραδοχή, το σύνθετο πρόβλημα της σεισμικής απόκρισης της εδαφικής ανάγεται στο απλούστερο πρόβλημα της μονοδιάστατης διάδοσης διατμητικών κυμάτων στο έδαφος. Το πρόβλημα επιλύεται αριθμητικά με τη βοήθεια ειδικού κώδικα H/Y (Schnabel et al., 1972). Οι διαφορικές εξισώσεις της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων επιλύονται στο πεδίο των συχνοτήτων με χρήση της ανάλυσης Fourier (frequency domain analysis). Ως σεισμικό υπόβαθρο θεωρήθηκε η πλειοκαινική εδαφική στρώση που αποτελείται από μάργες με τιμές της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων μεγαλύτερες από 750 m/s (Αθανασόπουλος, 1995; Τσελέντης κ.σ., 1997). Σύμφωνα με την ακολουθούμενη μέθοδο ανάλυσης, η ανελαστική συμπεριφορά της κάθε εδαφικής στρώσεως περιγράφεται από καμπύλες μεταβολής του αδιάστατου λόγου των μέτρων διάτμησης (G/G_{max}) και του λόγου κρίσιμης υστερητικής απόσβεσης (D_s) συναρτήσει του πλάτους της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης (γ). Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης οι καμπύλες μεταβολής G/G_{max} - γ - D_s επελέγησαν από τη διεθνή βιβλιογραφία σε παρόμοια εδάφη (Sun et al., 1988; Vucetic & Dobry, 1991; Kudo et al., 1991; Pitilakis & Anastasiadis, 1998; Wang & Kuwano, 1999). Οι σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη αναφέρονται σε συνθήκες επιφανειακής εμφάνισης βραχώδους υποβάθρου και δίδονται στο σχήμα 6. Από αυτές οι πρώτες δύο (ZAK10202-L και ZAK10202-T) προέκυψαν με αποσυνέλιξη της καταγραφής του κυρίως σεισμού στη Ζάκυνθο (ΙΤΣΑΚ-κτίριο ΟΤΕ), για τον προσδιορισμό του σεισμικού κραδασμού σε συνθήκες επιφανειακής εμφάνισης βραχώδους υποβάθρου (Yoshida & Iai, 1998) και στη συνέχεια κατάλληλη επικλιμάκια αναγωγή (Μάργαρης κ.σ., 2001) ώστε να αντιστοιχεί σε πιθανή καταγραφή στη θέση του Βαρθολομιού. Η τρίτη σεισμική διέγερση προέκυψε από τα αποτελέσματα της στοχαστικής προσομοίωσης της παρούσας μελέτης, σε συνθήκες εδάφους κατηγορίας Β κατά UBC97 ($V_s > 760$ m/s) στη θέση Βαρθολομιό.



Σχ. 5. Εδαφικές τομές που χρησιμοποιήθηκαν στις μονοδιάστατες θεωρητικές αναλύσεις: α) Θέση 1 – Ανατολική Περιοχή, β) Θέση 2 – Κεντρική περιοχή Αγ.Ιωάννη.

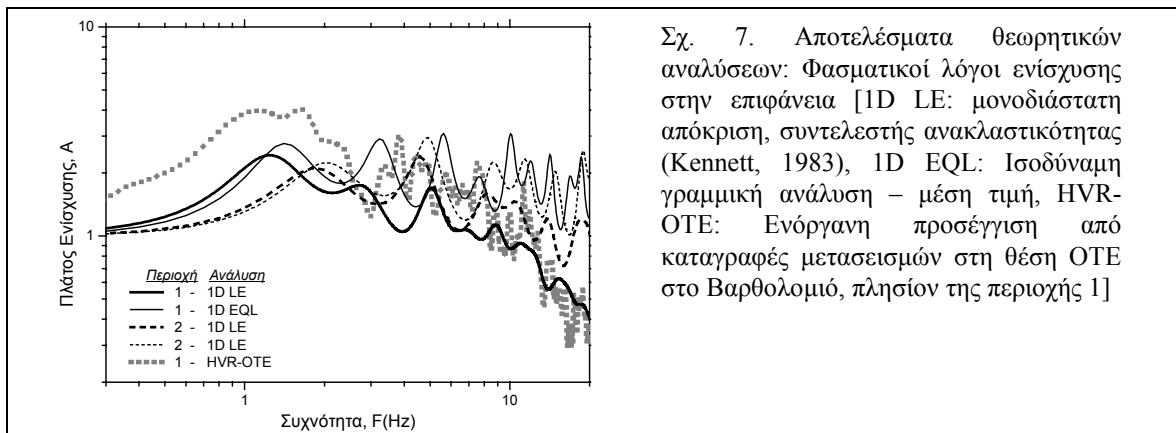
Οι τιμές της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου του εδάφους όπως υπολογίστηκαν από τα αποτελέσματα των αναλύσεων (σχήμα 7) κυμαίνονται από 0.8 sec (1.25Hz) για το προσομοίωμα 1 (Ανατολική περιοχή), έως 0.5sec (2Hz) για το πιο ‘δυστηγτο’ εδαφικό προσομοίωμα 2 (κεντρική περιοχή), ενώ το πλάτος ενίσχυσης για τις 3 σεισμικές διεγέρσεις κυμαίνεται από 2 έως 2.5 εξαιτίας της σχετικά μειωμένης δυστηγσίας του σεισμικού υποβάθρου, όπως εκτιμήθηκε από τα διαθέσιμα δεδομένα.

Οι μέσες τιμές της κορυφαίας επιτάχυνσης στην επιφάνεια (σχήμα 8) για τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις κυμαίνονται από 0.122g στη θέση 1 έως 0.134g στη θέση 2. Οι τιμές των φασματικών επιταχύνσεων στη θέση 1 παρουσιάζονται ενισχυμένες στην περιοχή περιόδων από 0.5-1.0 sec, ενώ αντίστοιχα στην θέση 2 στο διάστημα 0.1 έως 0.25 sec.



Σχ. 6. Σεισμικές διεγέρσεις: α) Αποσυνέλιξη της καταγραφής στο σταθμό ΖΑΚ για τη θέση του Βαρθολομιού και Συνθετική καταγραφή σε εδαφικές συνθήκες κατηγορίας Β κατά UBC97 ($V_s > 760\text{m/s}$), β) Κανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης των σεισμικών διεγέρσεων και φάσματα για παρόμοια εδάφη του ΕΑΚ2000 και του EC8.

Από τα προκαταρκτικά αποτελέσματα των αναλύσεων σεισμικής απόκρισης προκύπτει ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες στην κεντρική περιοχή (θέση 2) ενισχύουν τον σεισμικό κραδασμό στο εύρος περιόδων 0.1 έως 0.25, σε σύγκριση με την ανατολική περιοχή όπου το πάχος των 'χαλαρών' εδαφικών αποθέσεων παρουσιάζεται μεγαλύτερο. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την επιρροή τυχόν πλευρικών ασυνεχειών, της γεωμετρίας και της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων του υποβάθρου, παράμετροι οι οποίοι συνεισφέρουν προσθετικά στον κλασσικό μονοδιάστατο συντονισμό των κατακόρυφα διαδιδόμενων διατμητικών κυμάτων (Ραπτάκης κ.σ. 2001), η μελέτη των οποίων δεν καλύπτεται από την παρούσα εργασία, ενδέχεται να οδηγεί σε πρόσθετη ενίσχυση και επιμήκυνση της διάρκειας διέγερσης στις περιοχές αυτές.



Σχ. 7. Αποτελέσματα θεωρητικών αναλύσεων: Φασματικοί λόγοι ενίσχυσης στην επιφάνεια [1D LE: μονοδιάστατη απόκριση, συντελεστής ανακλαστικότητα (Kennett, 1983), 1D EQL: Ισοδύναμη γραμμική ανάλυση – μέση τιμή, HVR-OTE: Ενόργανη προσέγγιση από καταγραφές μετασεισμών στη θέση OTE στο Βαρθολομίο, πλησίον της περιοχής 1]

4. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ

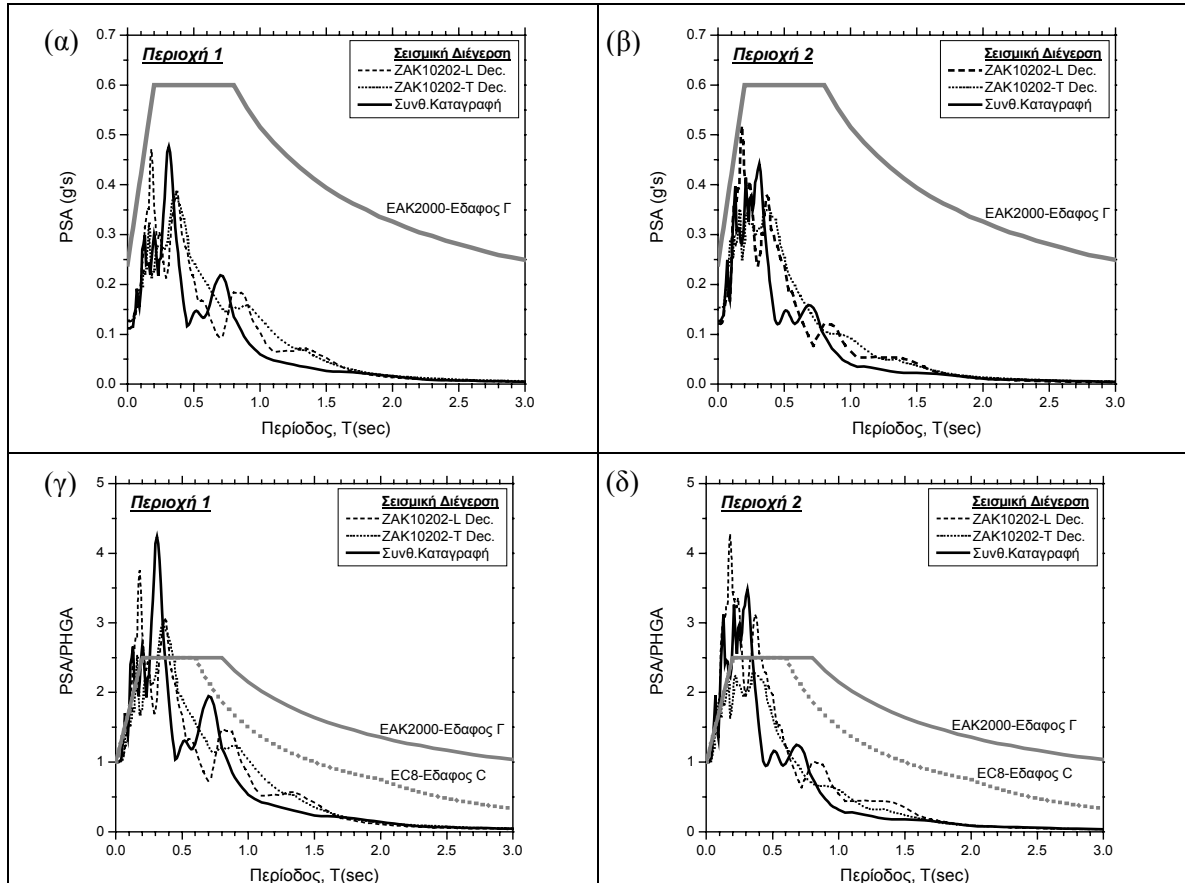
4.1. Στοιχεία απογραφής και γεωγραφικής κατανομής κτιρίων με ζημιές

Από το σεισμό που έπληξε την περιοχή του Βαρθολομιού στις 2/12/2002, ένας σημαντικός αριθμός κτιρίων είχαν υποστεί ζημιές. Τα αποτελέσματα από τον πρωτοβάθμιο και δευτεροβάθμιο έλεγχο στην περιοχή δίνονται στον Πίνακα 2. Τα κτίρια με σημαντικές ζημιές (κατηγορία «κίτρινα» και «κόκκινα») κατανέμονται σε 29 δήμους και κοινότητες της περιοχής. Οι οικισμοί αυτοί απέχουν από το επίκεντρο του σεισμού αποστάσεις που κυμαίνονται από 5.6Km έως 32.0Km και μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες σύμφωνα με τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής:

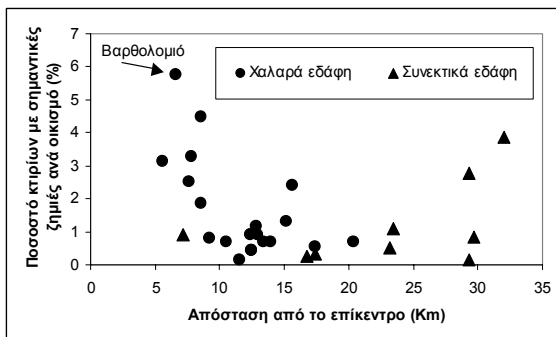
Πίνακας 2. Αποτελέσματα πρωτοβάθμιου και δευτεροβάθμιου ελέγχου*

Μετασεισμικός έλεγχος	Σύνολο κτιρίων που εξετάστηκαν	“Πράσινα”	“Κίτρινα”	“Κόκκινα”
Πρωτοβάθμιος	1128	707	354	67
Δευτεροβάθμιος	426	149	260	17

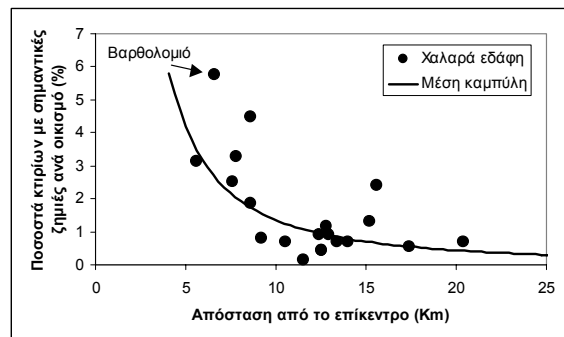
* Πηγή: ΤΑΣ Βαρθολομού



Σχ. 8. Σύγκριση αποτελεσμάτων θεωρητικών αναλύσεων και Κανονισμών: Ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους στις θέσεις α) 1 και β) 2, Κανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους στις θέσεις γ) 1 και δ) 2.



Σχ. 9. Σύνολο οικισμών



Σχ. 10. Οικισμοί δομημένοι σε χαλαρά εδάφη

- A. Οικισμοί σε χαλαρούς γεωλογικούς σχηματισμούς (αλούβιες αποθέσεις): Δήμοι Βαρθολομιού, Γαστούνης, Ανδραβίδας, Τραγανού και Λεχαιών και κοινότητες Λυγιάς, Καλυβίων, Μάχου, Δήμητρας, Καρδιοκαυτίου, Σαβαλίων, Καβάσιλα, Αμπελόκαμπου, Μυρσίνης, Στρουσίου, Κυλλίνης, Αγίας Μαύρας, Σταφιδόκαμπου, Δουναιίκων και Αρετής.
- B. Οικισμοί σε συνεκτικούς γεωλογικούς σχηματισμούς: Δήμοι Αμαλιάδας και Βάρδας, και κοινότητες Κάστρου, Καρδαμά, Μέλισσας, Κουρτεσίου, Νησιού, Μανολάδας, και Νέας Μανολάδας.

Για κάθε οικισμό εκτιμήθηκε η απόσταση από το επίκεντρο του σεισμού, το σύνολο των υφιστάμενων κτιρίων και το σύνολο των κτιρίων με σημαντικές ζημιές (κατηγορία «κίτρινα» και «κόκκινα»). Το σύνολο των υφιστάμενων κτιρίων προέκυψε με βάση τα στοιχεία της απογραφής του 1991 και το σύνολο των οικοδομικών αδειών της περιόδου 1996 – 2001, επεκτεινόμενο στο διάστημα 1991-2001 με απλή αναγωγή. Με βάση αυτά τα στοιχεία υπολογίστηκε το ποσοστό των κτιρίων με σημαντικές ζημιές ανά οικισμό. Στο σχήμα 9 φαίνεται πως κατανέμονται αυτά τα ποσοστά για το σύνολο των οικισμών συναρτήσει της απόστασης από το επίκεντρο. Παρατηρούμε ότι για τους οικισμούς που είναι δομημένοι σε χαλαρούς γεωλογικούς σχηματισμούς προκύπτει μια γενική μείωση του ποσοστού των κτιρίων με την απόσταση από το επίκεντρο του σεισμού (σχήμα 10) η οποία μπορεί να περιγραφεί από μια μέση καμπύλη, ως αποτέλεσμα βεβαίως της απόσβεσης της ισχυρής εδαφικής κίνησης. Οι διακυμάνσεις γύρω από αυτή την καμπύλη αποδίδονται κυρίως στις τοπικές εδαφικές συνθήκες, με συνεπακόλουθο τη διαφοροποίηση της ισχυρής εδαφικής κίνησης, και προφανώς στη διαφοροποίηση της τρωτότητας των κατασκευών. Αντίθετα, δεν παρατηρείται κάτι παρόμοιο για το ποσοστό των κτιρίων με ζημιές στους οικισμούς που είναι δομημένοι σε συνεκτικά εδάφη, γεγονός που επιβάλλει πιο μικροσκοπική θεώρηση του προβλήματος. Ο δήμος Βαρθολομιού παρουσιάζει το μεγαλύτερο ποσοστό κτιρίων με σημαντικές ζημιές (5.76%), γι' αυτό στη συνέχεια γίνεται ιδιαίτερη αναφορά.

4.2. Βλάβες και παράμετροι τρωτότητας κτιρίων του δήμου Βαρθολομιού

Είναι ιδιαίτερα χαρακτηριστικό το γεγονός ότι τα κτίρια που εμφάνισαν σημαντικές ζημιές στο δήμο Βαρθολομιού κατά το σεισμό του 2002 εντοπίζονται κυρίως στην περιοχή του Αγίου Ιωάννη εκατέρωθεν της οδού Ανδρέα Παπανδρέου, που αποτελεί κεντρική οδό στην περιοχή (περιοχή 2 – σχ. 8). Αντίθετα, κατά το σεισμό του 1988 τα κτίρια με τις σημαντικότερες βλάβες είχαν εντοπιστεί στην ανατολική περιοχή του οικισμού (περιοχή 1 – σχ. 8). Με την παραδοχή ότι η τρωτότητα των κατασκευών δεν διαφοροποιείται σημαντικά εντός του οικισμού, η γεωγραφική κατανομή των βλαβών αποδίδεται στη διαφοροποίηση της εδαφικής κίνησης λόγω των τοπικών εδαφικών συνθηκών, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Κεντρικό σημείο της πληγείσας περιοχής του δήμου Βαρθολομιού αποτελεί η εκκλησία του Αγίου Ιωάννη η οποία κτίστηκε το 1938. Στο στάδιο της κατασκευής της υπήρξε απόκλιση από το αρχικό σχέδιο όσον αφορά τη μορφολογία της οροφής. Κατά το σεισμό του 1954 το ανώτερο τμήμα του λιθόκτιστου καμπαναριού της εκκλησίας, πάνω από τους περιμετρικούς τους τοίχους, είχε υποστεί εκτεταμένες βλάβες και στη θέση του κατασκευάστηκε ελαφριά μεταλλική κατασκευή που εδράζεται σε υπερυψωμένο τμήμα του ανώτερου τμήματος της περιμετρικής τοιχοποιίας. Στο κατώτερο τμήμα της βάσης έδρασης του καμπαναριού, που συμπίπτει με το ανώτερο τμήμα της περιμετρικής τοιχοποιίας, εντοπίστηκε οριζόντια ρωγή κατά το σεισμό του 2002 (εικ. 1). Επίσης, στο προαύλιο της εκκλησίας, μια μαρμάρινη στήλη κωνικής μορφής (εικ. 2) και μια προτομή (εικ. 3), ελεύθερα εδραζόμενες σε μαρμάρινες στήλες, παρουσίασαν σημαντική παραμένουσα στροφική και μεταφορική μετατόπιση από την αρχική τους θέση.

Τα παραδοσιακά κτίρια στην περιοχή είναι συνήθως ορθογωνικής κάτοψης, ενός ή δύο ορόφων και με συμμετρική διάταξη των ανοιγμάτων. Πρόκειται για λιθοκατασκευές με ημιλαξευτούς φυσικούς λίθους και ορθογωνικούς λαξευτούς γωνιόλιθους. Στις παλαιότερες κατασκευές παρατηρείται συστηματική χρήση ξύλινων διαζωμάτων και υπερθύρων και σε ορισμένες περιπτώσεις κατασκευή «ανακουφιστικού τόξου» στα υπέρθυρα (εικ. 4). Σε νεώτερες κατασκευές,

τα ξύλινα διαζώματα και υπέρθυρα έχουν αντικατασταθεί από Ο/Σ (εικ. 5). Όπου δεν έχει γίνει χρήση κονιαμάτων, μαρτυριέται πολύ καλή δόμηση των λίθων, με αρμούς κονιάματος μικρού πάχους. Όλα τα πιο πάνω στοιχεία προδιαγράφουν γενικώς καλή συμπεριφορά τέτοιων κατασκευών έναντι στατικών και κυρίως σεισμικών φορτίσεων και αποτελούν προφανώς το αποτέλεσμα διαχρονικών παρατηρήσεων λόγω της υψηλής σεισμικότητας της περιοχής. Ωστόσο, επισημάνθηκε σε μία περίπτωση ότι κατά την κατασκευή περιμετρικού διαζώματος από Ο/Σ στην οροφή του κτιρίου, μεταλλικές ράβδοι που είχαν χρησιμοποιηθεί για την αγκύρωση του διαζώματος εντός της τοιχοποιίας, τοποθετήθηκαν στο εξωτερικό τμήμα αυτής με συνεπακόλουθο την πρόκληση τοπικών αστοχιών (εικ. 6). Η πολύχρονη εμπειρία στην κατασκευή καλής ποιότητας λιθόκτιστων τοιχοποιιών μαρτυριέται στη συνέχεια και στην κατασκευή νεώτερων κτιρίων από άοπλη φέρουσα τοιχοποιία με διάτρητα τούβλα, κτίρια που επέδειξαν καλή συμπεριφορά κατά το σεισμό του 2002 (εικ. 7).

Τα κτίρια από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (Ο/Σ) είναι μέχρι τριών ορόφων. Τα περισσότερα από αυτά που παρουσίασαν βλάβες έχουν κατασκευαστεί σύμφωνα με τις διατάξεις των παλιών κανονισμών, με κυρίαρχο χαρακτηριστικό τη σχεδόν παντελή έλλειψη τοιχείων Ο/Σ. Νεότερα κτίρια, κατασκευασμένα σύμφωνα με τους νέους κανονισμούς, παρουσίασαν γενικώς καλή συμπεριφορά. Το γεγονός αυτό, πέρα από τις κατασκευαστικές διατάξεις που διαφοροποιούνται μεταξύ των κανονισμών, ως ένα βαθμό αποδίδεται και στην ανάπτυξη μικρότερων φασματικών επιταχύνσεων από το επίπεδο που ορίζεται από τον ΕΑΚ-2000 (σχ. 9α και 9β). Τα παλαιότερα κτίρια, λόγω έλλειψης τοιχείων (πλαισιακές κατασκευές), παρουσιάζουν μεγάλη ευκαμψία με συνεπακόλουθο η παρουσία των τοιχοπληρώσεων να έχει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά τους έναντι σεισμικών φορτίσεων. Από τη συνολική εικόνα των βλαβών, οι τοιχοπληρώσεις είχαν παρουσιάσει γενικώς καλή συμπεριφορά, χωρίς διαγώνιες ρωγμές, γεγονός που μαρτυρεί την καλή ποιότητα δόμησής τους και την υψηλή αντοχή τους. Ο πλέον συνήθης τύπος αστοχίας των τοιχοπληρώσεων που παρατηρήθηκε είναι η αποκόλληση από το περιβάλλον πλαίσιο (εικ. 8 και 9). Αυτός ο τρόπος συμπεριφοράς προδιαγράφει τον εμβολισμό των ανώτερων γωνιών της τοιχοπλήρωσης στις γωνίες δοκού και υποστυλωμάτων του περιβάλλοντα πλαισίου με συνεπακόλουθο την πρόκληση διατμητικών αστοχιών στους κόμβους (Πενέλης και Κάππος, 1990). Τέτοιες μορφές βλάβης σε κόμβους έχουν επισημανθεί σε αρκετά κτίρια από Ο/Σ, που είχαν μελετηθεί με βάση τους παλαιότερους κανονισμούς, οι οποίοι δεν προέβλεπαν ιδιαίτερες πρόνοιες όπλισης τόσο των ακραίων τμημάτων των δομικών στοιχείων (δοκών και υποστυλωμάτων) όσο και των κόμβων (εικ. 10 και 11). Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι στην περιοχή παρατηρείται η κατασκευή διπλών τοιχοποιιών μικρού πάχους με ενδιάμεσο κενό για τη λειτουργία συρόμενου παραθύρου. Λόγω λειτουργίας του παραθύρου οι τοιχοποιίες αυτές δεν συνδέονται μεταξύ τους και λόγω του μικρού πάχους διαθέτουν χαμηλή αντοχή. Συνεπακόλουθο αυτών των παραμέτρων ήταν η ανάπτυξη έντονων διαγώνιων ρωγμών σε αρκετές τέτοιες περιπτώσεις (εικ. 12 και 13). Πρόκειται ωστόσο για αστοχίες τοπικού χαρακτήρα, που επηρεάζουν κυρίως τη λειτουργικότητα του κτιρίου και πολύ λιγότερο τη φέρουσα ικανότητά του έναντι σεισμικών φορτίσεων. Έχει επίσης παρατηρηθεί σε αρκετά κτίρια η διακοπή της τοιχοπλήρωσης του ισογείου περίπου 0.5m χαμηλότερα από το κάτω μέρος της δοκού και η διαμόρφωση αυτού του τμήματος σε φεγγίτη, με συνεπακόλουθο τη λειτουργία του ανώτερου τμήματος των υποστυλωμάτων στα οποία καταλήγει η τοιχοπλήρωση ως «κοντά υποστυλώματα», όπου σε αρκετές περιπτώσεις αναπτύχθηκαν βλάβες διατμητικού χαρακτήρα (εικ. 14 και 15). Παρόμοιες μορφές αστοχίας είχαν αναπτυχθεί και κατά το σεισμό του 1988, αρκετές από τις οποίες, όπως εντοπίστηκαν από επιτόπου εξέταση, είχαν αποκατασταθεί με τοπική ενίσχυση του υποστυλώματος μόνο στην περιοχή διαμόρφωσης του «κοντού υποστυλώματος» και διακοπής αυτής της ενίσχυσης καθ' ύψος (περίπου στο ανώτερο μισό τμήμα του υποστυλώματος) (εικ. 16). Επίσης έχει εντοπιστεί παρόμοιος τρόπος αποκατάστασης βλαβών σε υποστυλώματα πλήρως ανεπτυγμένα καθ' ύψος, δηλ. τοπική ενίσχυση μόνο στη θέση εκδήλωσης της βλάβης (εικ. 17). Σε μία περίπτωση κτιρίου με πυλωτή αναπτύχθηκαν διατμητικές αστοχίες στο μέσο περίπου του ύψους δύο υποστυλωμάτων, που χαρακτηρίζονται από αποφλοίωση της επικάλυψης μικρού πάχους και διαγώνιων ρωγμών στον πυρήνα του σκυροδέματος (εικ. 18 έως 20). Όπως

αποκαλύφθηκε, οι εγκάρσιοι οπλισμοί είναι οξειδωμένοι, με μικρό πάχος επικάλυψης και δεν αγκυρώνονται κατά πώς προβλέπεται από τους κανονισμούς. Οξείδωση διαμήκων οπλισμών επισημάνθηκε και σε άλλα κτίρια με αποτέλεσμα την αποφλοιώση μέρους του σκυροδέματος της επικάλυψης στα γωνιακά τμήματα των υποστυλωμάτων. Τέλος, επισημάνθηκαν αρκετές περιπτώσεις αλληλεπίδρασης γειτονικών κτιρίων χωρίς ωστόσο να καταγράφονται σημαντικές ζημιές, πλην ορισμένων αποφλοιώσεων του επιχρίσματος στον αρμό επαφής των κτιρίων (εικ. 21).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας καταλήγουμε κατ' αρχή στο συμπέρασμα ότι τα ενεργειακά χαρακτηριστικά της ισχυρής εδαφικής κίνησης του σεισμού του 2002 ήταν γενικώς μικρότερα από τα αντίστοιχα μεγέθη του σεισμού του 1988, με συνεπακόλουθο την εκδήλωση λιγότερων ζημιών και μεγέθους μακροσεισμικής έντασης στην περιοχή. Η ισχυρή εδαφική κίνηση, τόσο ως προς τις μέγιστες τιμές όσο και ως προς το συχνοτικό περιεχόμενο, διαφοροποιείται εντός του οικισμού του Δήμου Βαρθολομιού και σ' αυτό το γεγονός αποδίδεται και η εκδήλωση ζημιών σε μια περιορισμένη περιοχή του οικισμού, με την παραδοχή βεβαίως ομοιόμορφης κατανομής της τρωτότητας των κτιρίων. Το ποσοστό των κτιρίων με σημαντικές ζημιές ανά οικισμό κυμαίνεται γενικώς σε χαμηλά επίπεδα και παρατηρείται μια σχετική μείωση αυτού του ποσοστού συναρτήσει της απόστασης από το επίκεντρο, ιδιαίτερα για οικισμούς δομημένους σε σχετικά χαλαρούς εδαφικούς σχηματισμούς. Οι συστηματικοί τύποι βλαβών που εμφανίστηκαν σε κτίρια από Ο/Σ είναι αστοχίες κόμβων, αποκόλληση τοιχοπληρώσεων από το περιβάλλον πλαίσιο και αστοχίες σε κοντά υποστυλώματα. Οι βλάβες αυτές αναπτύχθηκαν σε κτίρια που κατασκευάστηκαν με βάση τους παλαιότερους κανονισμούς ενώ νεότερα κτίρια ανέπτυξαν γενικώς καλή συμπεριφορά.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες οφείλονται προς το ΤΑΣ Βαρθολομιού για την παραχώρηση κάθε πληροφορίας σχετικά με την απογραφή των ζημιών καθώς και στο Τμήμα Γεωτεχνικής Μηχανικής του Κ.Ε.Δ.Ε. για τη διάθεση γεωτεχνικών στοιχείων και πληροφοριών.



Εικ. 1



Εικ. 2



Εικ. 3



Εικ. 4



Εικ. 5



Εικ. 6



Εικ. 7



Εικ. 8



Εικ. 9



Εικ. 10



Εικ. 11



Εικ. 12



Εικ. 13



Εικ. 14



Εικ. 15



Εικ. 16



Εικ. 17



Εικ. 18



Εικ. 19



Εικ. 20



Εικ. 21

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αθανασόπουλος Γ. (1995). Σεισμική Απόκριση εδαφών σε Πάτρα, Αίγιο, Βαρθολομιό. Ενημερωτικό Δελτίο ΤΕΕ.
Bolt B.A. (1974). Duration of strong ground motion, *Proc. 5th W.C.E.E., Rome Italy*, 1304-1313.

- Θεοδουλίδης, Ν.Π. (1991). Συμβολή στη μελέτη της ισχυρής σεισμικής κίνησης στον Ελληνικό χώρο, Διδ. Διατριβ. Α.Π.Θ., σελ. 500.
- Housner, G.W. (1959). Behavior of structures during earthquakes, *Journal Eng. Mech. Div. ASCEI*, 85, 109-129.
- Kennett B.L.N. (1983). *Seismic Wave Propagation in Stratified Media*, Cambridge Univ.Press.
- Koliopoulos, P.K., B. N. Margaris and N.S. Klimis (1998). Duration and energy characteristics of Greek strong motion records, *Journal of Earthquake Eng.*, 2, 391-417.
- Koliopoulos, P.K. and B. N. Margaris (2001). The 1999 Athens (Greece) earthquake: Energy and Duration – related response spectral characteristics of different site conditions, *Proc. Fourth Inter. Conf. on Recent Advan. In Geoth. Earthq. Eng. Soil. Dyn., San Diego 26-31 Mar. 2001, paper10.31*.
- Kudo K., Nishi K. & Ogata N., (1991). Application of rock shear test on the soft rock ground, *Proc.of the 25th Japan Nat.Conf.on SMFE, Vol.1, pp.1139-1140, Nagano (in Japanese)*.
- Margaris, B.N. and D.M. Boore (1998). Determination of $\Delta\sigma$ and κ_0 from response spectra of large earthquakes in Greece, *Atkinson, Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 170-182.
- Margaris, B.N. and P.M. Hatzidimitriou (2002). Source spectra scaling and stress release estimates using strong-motion records in Greece, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 1040-1059.
- Μάργαρης, Β., Κ. Παπαζάχος, Χ. Παπαϊωάννου, Ν. Θεοδουλίδης, Ι. Καλογεράς και Α. Σκαρλατούδης (2001). Εμπειρικές σχέσεις απόσβεσης της οριζόντιας ισχυρής κίνησης των επιφανειακών σεισμών του Ελληνικού χώρου, *Πρακτ. 2^{οο} Παν. Συν. Αντισεισμ. Μηχ. Τεχν. Σεισμ., Νοεμ. 28-30, 2001, Θεσσαλονίκη, Α, 27-36*.
- Margaris, B.N., P.K. Koliopoulos and E.C. Ioannidou (2002). RMS- acceleration hazard assessment in Greece, *Proc. 12th E.C. E.E., Paper Ref. 364*.
- Παπαζάχος, Β.Κ., Δ.Μ. Μουντράκης, Κ.Β. Παπαζάχος, Μ.Δ. Τρανός, Γ.Φ. Καρακαίσης και Α.Σ. Σαββαϊδής (2001). Τα ρήγματα που προκάλεσαν τους γνωστούς ισχυρούς σεισμούς στην Ελλάδα και τη γύρω περιοχή από το 5^ο αιώνα π.Χ. μέχρι σήμερα, *Πρακτ. 2^{οο} Παν. Συν. Αντισεισμ. Μηχ. Τεχν. Σεισμ., Νοεμ. 28-30, 2001, Θεσσαλονίκη, Α, 17-26*.
- Penelis G.G. and A.J. Kappos (1997), “*Earthquake-resistant Concrete Structures*”, E & FN SPON (Chapman & Hall), London (592 pp).
- Pitilakis K., & Anastasiadis A., Soil and site characterization for seismic response analysis, *Proc.of XI European Conf. on Earthquake Engineering, Paris, 1998, Invited Lectures, pp.65-90*.
- Ραπτάκης Δ., Μάκρας Ν., Αναστασιάδης Α., Πιτλάκης Κ. (2001). Επίδραση της Εδαφικής Δομής στην Ισχυρή Σεισμική Κίνηση στη Θεσσαλονίκη: Σύγκριση Καταγραφών, 1D και 2D Προσομοίωσης., *Πρακτικά 2ου Παν.Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, 28-30 Νοεμβρίου 2001, Τόμος Α, σελ.175-184*
- Roumelioti, Z., Benetatos, Ch., Kiratzi, A., Stavrakakis, G., and Melis, N., The 2 December 2002, M5.5 Vartholomio (Western Peloponnese-Greece) earthquake sequence, 2003 (submitted in *Earth and Planetary Science Letters*).
- Σαββαϊδής, Α., Β. Μάργαρης, Ι. Καλογεράς, Ι. Μπασκούτας, Μ. Κοροζίδης, Α. Αναστασιάδης, Μ. Δημοσθένους, Ι. Σους, και Β. Λεκίδης (2003). Ο Σεισμός του Βαρθολομιού, 2 Δεκεμβρίου 2002: Αποτελέσματα από τη μελέτη της ισχυρής κίνησης, την προκαταρκτική μελέτη της εδαφικής απόκρισης, το συσχετισμό με τον αντισεισμικό κανονισμό και την επισκόπηση των βλαβών, *Εργασία ΙΤΣΑΚ 03-01, (Υπό δημοσίευση)*.
- Schnabel P.B., Lysmer J., Seed H.B., (1972) ‘SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites’, Report No.EERC-72/12, University of California, Berkeley, 1972.
- Sun J., Golesorkhi R. & Seed H., (1988). Dynamic moduli and damping ratio for cohesive soils, Report No.UCB/EERC-88/15.
- Trifunac M.D. and A.G. Brady (1975). A study on the duration of strong earthquake ground motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65, 581-626.
- Τσελέντης Γ.Α., Βασιλείου Ι., Λέκκας Ε., Ρουμπας Δ. Σωκος Ε., (1997). Σύγκριση αναλυτικών μεθόδων εδαφικής απόκρισης με μακροσεισμικές παρατηρήσεις στην περιοχή του Βαρθολομιού., *Πρακτικά 3^{οο} Παν.Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής, Πάτρα, 20-22 Μαρτίου 1997, Τόμος Ι, σελ. 567-574*.
- Vucetic M. & Dobry R., (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response, *ASCE J.og Geotech.Eng.*, Vol.117, No.1, pp.89-107.
- Wang G.X. & Kuwano J., (1999). Shear modulus & damping of clayey sands, *J. of Earth.Eng.*, Vol.3, No.2, pp.271-285.
- Yoshida N. & Iai S. (1998) Nonlinear Site Response and its Evaluation and Prediction. *Prc. 2nd Int. Symp.on the effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokosuka, Japan, pp.71-90*.