

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΒΛΑΒΕΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ

ΠΕΤΡΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να περιγράψει τα χαρακτηριστικά της κατακόρυφης σεισμικής κίνησης του εδάφους αλλά και τη συμπεριφορά των κατασκευών Πολιτικού Μηχανικού υπό την επίδρασή της σε συνδυασμό με την αντίστοιχη οριζόντια κίνηση. Επίσης παρουσιάζονται βλάβες σε κατασκευές οι οποίες οφείλονται στην ανάπτυξη σημαντικής κατακόρυφης κίνησης κατά τη διάρκεια σεισμών. Τέλος, γίνεται αναφορά σε πειραματικές αλλά και αναλυτικές έρευνες που έχουν γίνει, οι οποίες δείχνουν την κρισιμότητα της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού υπό κάποιες προϋποθέσεις.

1.ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑΣ

Η κατακόρυφη σεισμική συνιστώσα αποδίδεται κυρίως στην κατακόρυφη διάδοση των κυμάτων P σε αντίθεση με τις οριζόντιες που αποδίδονται στη διάδοση των κυμάτων S [12]. Κοντά στο επίκεντρο του σεισμού τα κύματα P έχουν μεγαλύτερη συχνότητα από τα κύματα S ενώ οι συχνότητες και των δύο μειώνονται καθώς αυτά διαδίδονται μακριά από το επίκεντρο. Η μείωση της συχνότητας των κυμάτων P, η οποία είναι και μεγαλύτερη, γίνεται με πιο γρήγορο ρυθμό από την αντίστοιχη μείωση των κυμάτων S. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί πιο γρήγορα η κατακόρυφη κίνηση όσο η διάδοση των κυμάτων προχωράει μακριά από το επίκεντρο. Αυτός είναι και ο λόγος που το πηλίκο της μέγιστης κατακόρυφης (V) επιτάχυνσης προς την αντίστοιχη οριζόντια (H) μειώνεται με την απόσταση από το επίκεντρο του σεισμού. Επιπλέον η κατακόρυφη κίνηση έχει μικρότερο ενεργειακό περιεχόμενο σε σχέση με την οριζόντια. Το γεγονός όμως ότι το αποδίδει σε ένα μικρό εύρος υψηλών συχνοτήτων μπορεί να αποδειχθεί επιζήμιο για κατασκευές με περίοδο κατακόρυφης κίνησης σε αυτό το εύρος [13].

Οι κανονισμοί των κρατών για τις κατασκευές είτε αγνοούν την κατακόρυφη σεισμική συνιστώσα είτε τη λαμβάνουν ίση με τα 2/3 ή το 70% της οριζόντιας [2]. Τα τελευταία είκοσι χρόνια όμως υπάρχουν καταγραφές από σεισμούς, κυρίως για περιοχές κοντά στο επίκεντρο του σεισμού ή το ρήγμα, που δείχνουν ότι ο λόγος V/H είναι μεγαλύτερος της μονάδας δύο ή και 3 φορές [22]. Αυτό βέβαια δε σημαίνει ότι όταν ο παραπάνω λόγος είναι μεγαλύτερος της μονάδας οι συνέπειες του σεισμού θα είναι καταστροφικές γιατί ενδέχεται και οι δύο συνιστώσες της επιτάχυνσης του σεισμού να είναι μικρές ή οι μέγιστες τιμές τους να μη συμπίπτουν χρονικά. Επομένως ο λόγος της μέγιστης κατακόρυφης προς τη μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση δεν μπορεί να είναι απόλυτο κριτήριο. Αντιθέτως, κριτήριο για την επίδραση της κατακόρυφης κίνησης του εδάφους στις κατασκευές μπορεί να είναι το μέγεθός της που κοντά στο επίκεντρο του σεισμού μπορεί να φτάσει ή και να ξεπεράσει το 1g [22]. Υπάρχουν καταγραφές που επιβεβαιώνουν αυτό το γεγονός ενώ στον πρόσφατο σεισμό στις 14 Ιουνίου 2008 στην Ιαπωνία φαίνεται ότι στιγμιαία η κατακόρυφη επιτάχυνση ξεπέρασε την τετραπλάσια τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας [6]. Πέραν των καταγραφών έχουν γίνει και επιτόπιες παρατηρήσεις κοντά σε ρήγματα που δείχνουν ότι η κατακόρυφη επιτάχυνση έφτασε σε τιμές ίσες ή και μεγαλύτερες της βαρύτητας. Μια τέτοια παρατήρηση αποτυπώνεται στο Σχήμα 1 [30] όπου φαίνεται ένας πάγκος να έχει μετακινηθεί οριζόντια χωρίς εμφανή σημάδια τριβής στο δάπεδο, γεγονός που σημαίνει ότι ο πάγκος ανασηκώθηκε κατά τη μετακίνησή του. Επίσης, στο Σχήμα 2 [9] φαίνονται πέτρες σπασμένες χωρίς να έχουν μετακινηθεί από τη θέση τους. Αυτό υποδηλώνει ότι οι πέτρες αυτές ανασηκώθηκαν και κατά την πτώση τους στο έδαφος έσπασαν. Παρόμοιες παρατηρήσεις έγιναν σε ορισμένες θέσεις του ρήγματος της Φυλής μετά το σεισμό του Σεπτεμβρίου του 1999 στην Αθήνα όπου ενδείξεις από αναπηδήσεις λίθων καταδεικνύουν πως η κατακόρυφη επιτάχυνση



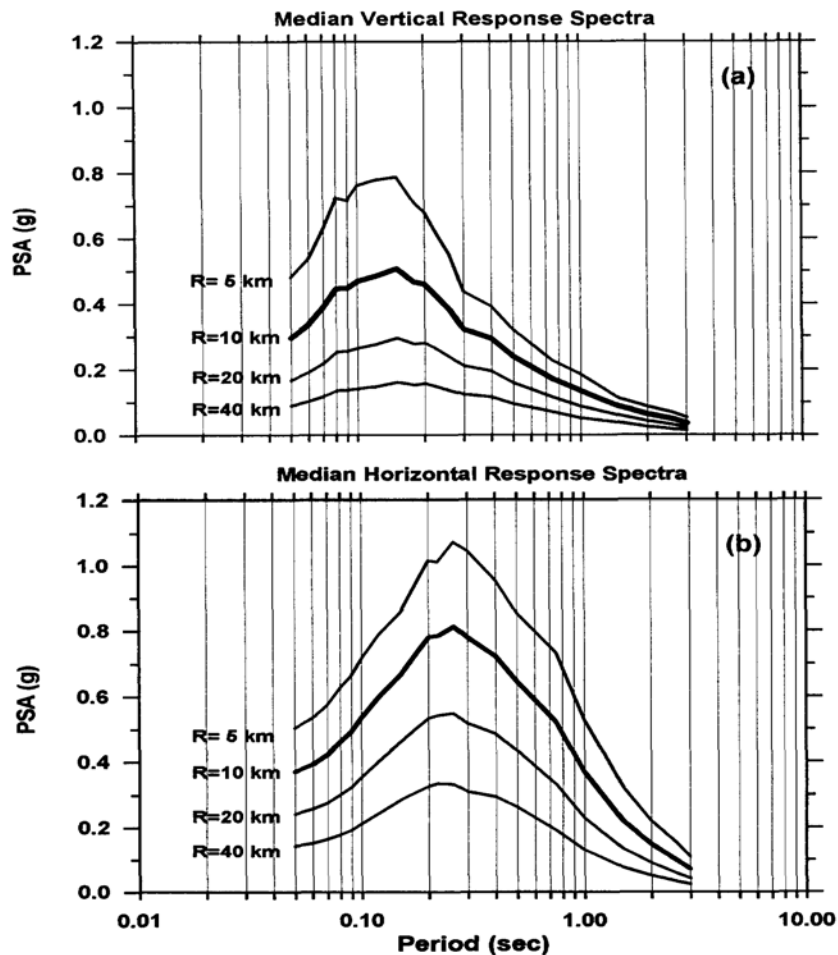
Σχήμα 1: Πάγκος που έχει μετακινηθεί χωρίς ίχνη τριβής στο δάπεδο [30]



Σχήμα 2: Πέτρες που έχουν σπάσει μετά από αναπήδηση [9]

προσέγγισε το $1g$ [3].

Το πόσο κοντά στο επίκεντρο ή στο ρήγμα είναι σημαντική η κατακόρυφη συνιστώσα δεν είναι απόλυτα σαφές κάθε φορά. Μια εικόνα του πως μεταβάλλεται η κατακόρυφη επιτάχυνση σε σχέση με την απόσταση από το επίκεντρο και την περίοδο φαίνεται στο Σχήμα 3 [11]. Το σχήμα αυτό δείχνει το φάσμα της μέσης απόκρισης για το σεισμό του Northridge του 1994, για την κατακόρυφη και οριζόντια επιτάχυνση σε σχέση με την απόσταση από το ρήγμα και την περίοδο. Τα φάσματα αυτά προέκυψαν από καταγραφές σε 41 περιοχές με αλλουβιακό έδαφος. Παρατηρούμε από αυτά τα φάσματα ότι όσο πιο μικρή

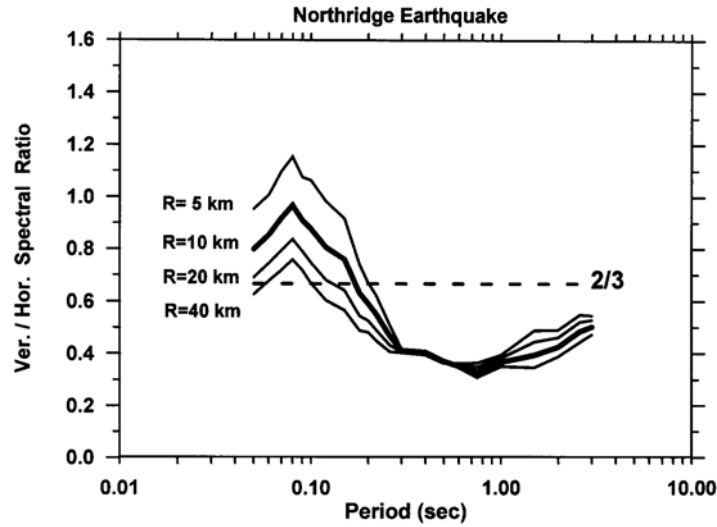


Σχήμα 3: Φάσματα μέσης απόκρισης με απόσβεση 5% [11]

είναι η απόσταση από το ρήγμα τόσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της κατακόρυφης επιτάχυνσης. Επιπλέον βλέπουμε ότι οι μέγιστες τιμές της κατακόρυφης επιτάχυνσης αντιστοιχούν σε μικρότερες περιόδους από αυτές της οριζόντιας και επομένως σε μεγαλύτερες συχνότητες. Στο Σχήμα 4 φαίνεται για τις ίδιες καταγραφές η εξάρτηση του λόγου V/H από την περίοδο και την απόσταση [11]. Παρατηρούμε στο σχήμα αυτό ότι κοντά στο επίκεντρο του σεισμού ή στο ρήγμα ο παραπάνω λόγος ξεπερνάει τη συνηθισμένη τιμή $2/3$ ενώ για συγκεκριμένες περιόδους ακόμα και 40 km μακριά από το ρήγμα η τιμή του είναι μεγαλύτερη του $2/3$.

Τέλος, πρέπει να σημειώσουμε, ότι υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστεί παρασιτική κατακόρυφη σεισμική κίνηση στην γειτονία πρανών έστω κι αν δεν υπάρχει αρχική κατακόρυφη διέγερση. Αυτή η παρασιτική κατακόρυφη κίνηση οφείλεται στις ανακλάσεις των προσπιπτόντων κυμάτων SV στην επιφάνεια του πρανούς και στη δημιουργία κυμάτων P και SV αλλά και κυμάτων Rayleigh τα οποία έχουν σημαντική κατακόρυφη συνιστώσα.

Υπό προϋποθέσεις η κίνηση αυτή μπορεί να είναι της τάξης μεγέθους της οριζόντιας κίνησης [1].



Σχήμα 4: Λόγος V/H [11]

2.ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΣΤΑ ΚΤΙΡΙΑ

Η κατακόρυφη επιτάχυνση του εδάφους έχει ως αποτέλεσμα τη διακύμανση των αξονικών φορτίων στα υποστυλώματα [29]. Η αξονική δύναμη όμως επηρεάζει την ικανότητα της διατομής να παραμορφώνεται πριν τη θραύση, δηλαδή την πλαστιμότητά της. Η τελευταία μειώνεται όσο αυξάνεται το θλιπτικό φορτίο [4]. Αντίθετα, η συμβολή του σκυροδέματος στην ανάληψη της τέμνουσας αυξάνεται με το θλιπτικό φορτίο. Επομένως η διακύμανση του αξονικού φορτίου λόγω της κατακόρυφης επιτάχυνσης μπορεί να επιδράσει αρνητικά στη δυσκαμψία και στην αντοχή των υποστυλωμάτων. Επίσης, ένα υποστύλωμα μπορεί να αστοχήσει σε θλίψη λόγω των μεγάλων αξονικών φορτίων που δημιουργούνται εξαιτίας της κατακόρυφης επιτάχυνσης. Στο Σχήμα 5α φαίνεται ένα υποστύλωμα το οποίο έχει αστοχήσει



(α)



(β)

Σχήμα 5: α) Αστοχία υποστυλώματος σε θλίψη, β) Κατάρρευση του CSUN parking [30]

σε θλίψη παρά το γεγονός ότι ήταν ευνοϊκή η αστοχία του σε διάτμηση λόγω της επίδρασης του κοντού υποστυλώματος που οφείλεται στη μη πλήρωση του τοίχου μέχρι τη δοκό [30]. Η αστοχία αυτή οφείλεται στην κατακόρυφη σεισμική συνιστώσα αλλά και στις ελλειείς κατασκευαστικές διατάξεις. Στο Σχήμα 5β φαίνεται η κατάρρευση του κτιρίου parking του Πανεπιστημίου του Northridge [30]. Σε αυτήν την περίπτωση τα εσωτερικά υποστυλώματα, που αναλαμβάνουν το κύριο μέρος των κατακόρυφων φορτίων, αστόχησαν σε θλίψη σε αντίθεση με τα υποστυλώματα των εξωτερικών πλαισίων που ο κύριος ρόλος τους ήταν να αναλάβουν τα οριζόντια σεισμικά φορτία. Ένας επιπλέον λόγος που τα υποστυλώματα των περιμετρικών πλαισίων δεν αστόχησαν λόγω αξονικών φορτίων είναι το γεγονός ότι είχαν διαστασιολογηθεί για αυξημένα αξονικά φορτία που θα προέκυπταν όμως από τη ροπή ανατροπής του κτιρίου.

Στο Σχήμα 6 φαίνεται ένα επταώροφο κτίριο, το ξενοδοχείο Holiday Inn στο Van Nuys, του οποίου τα υποστυλώματα στον τρίτο όροφο έχουν αστοχήσει σε διάτμηση [30]. Η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση ήταν 0,47g ενώ η μέγιστη κατακόρυφη ήταν 0,3g. Η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στην οροφή ήταν 0,59g. Αυτές οι τιμές προέκυψαν από τις καταγραφές στα όργανα με τα οποία ήταν εξοπλισμένο το κτίριο. Μια ανάλυση των χρονο-ιστοριών των επιταχύνσεων που καταγράφηκαν δείχνουν ότι ήταν σε φάση, γεγονός που υποδηλώνει ότι η οριζόντια απόκριση του κτιρίου ήταν στην πρώτη ιδιομορφή. Από τις ίδιες καταγραφές φαίνεται ότι δεν υπήρξε στρεπτική απόκριση του κτιρίου. Επομένως είναι



Σχήμα 6: Ξενοδοχείο Holiday Inn, Van Nuys [30]

πολύ πιθανό η διατμητική αστοχία να προήλθε από μείωση της ικανότητας ανάληψης τέμνουσας λόγω της κατακόρυφης κίνησης. Επιπλέον, όταν το κτίριο αποκρίνεται κατακόρυφα στην πρώτη ιδιομορφή η μείωση του θλιπτικού φορτίου είναι πιο έντονη για τους υψηλότερους ορόφους και σε συνδυασμό με την αυξημένη απαίτηση των χαμηλότερων ορόφων για ανάληψη της τέμνουσας μπορεί να εξηγήσει την αστοχία του τρίτου ορόφου και όχι του πρώτου ή του τελευταίου.

Στο σημείο αυτό πρέπει να κάνουμε μια σημαντική παρατήρηση. Σύμφωνα με καταγραφές από το σεισμό του Northridge το 1994 από δώδεκα κτίρια που ήταν

εφοδιασμένα με όργανα καταγραφής, σε διάφορα σημεία και επίπεδά τους, παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μια αύξηση της κατακόρυφης επιτάχυνσης σε επίπεδα πάνω από τη βάση τους σε σχέση με την κατακόρυφη επιτάχυνση στη βάση. Αυτό συνέβη και στα δώδεκα κτίρια, μεταξύ των οποίων άλλα ήταν κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα, άλλα από δομικό χάλυβα και άλλα είχαν σεισμική μόνωση [10]. Επομένως είναι πολύ πιθανό η κατακόρυφη κίνηση να παίζει καταλυτικό ρόλο στην αντοχή και την ευστάθεια των υψηλότερων ορόφων. Σύμφωνα πάλι με τις ίδιες καταγραφές, στο κτίριο Seal Beach, η μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση στο μέσο της μηκυτοειδούς πλάκας του δεύτερου ορόφου ήταν 1,6-2,0 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μέγιστη επιτάχυνση στη βάση των υποστυλωμάτων του ίδιου ορόφου. Το αποτέλεσμα αυτής της μεγέθυνσης της κατακόρυφης επιτάχυνσης στις πλάκες φαίνεται στο Σχήμα 7 [30]. Το σχήμα αυτό δείχνει την κατάρρευση των δύο ανώτερων πατω-



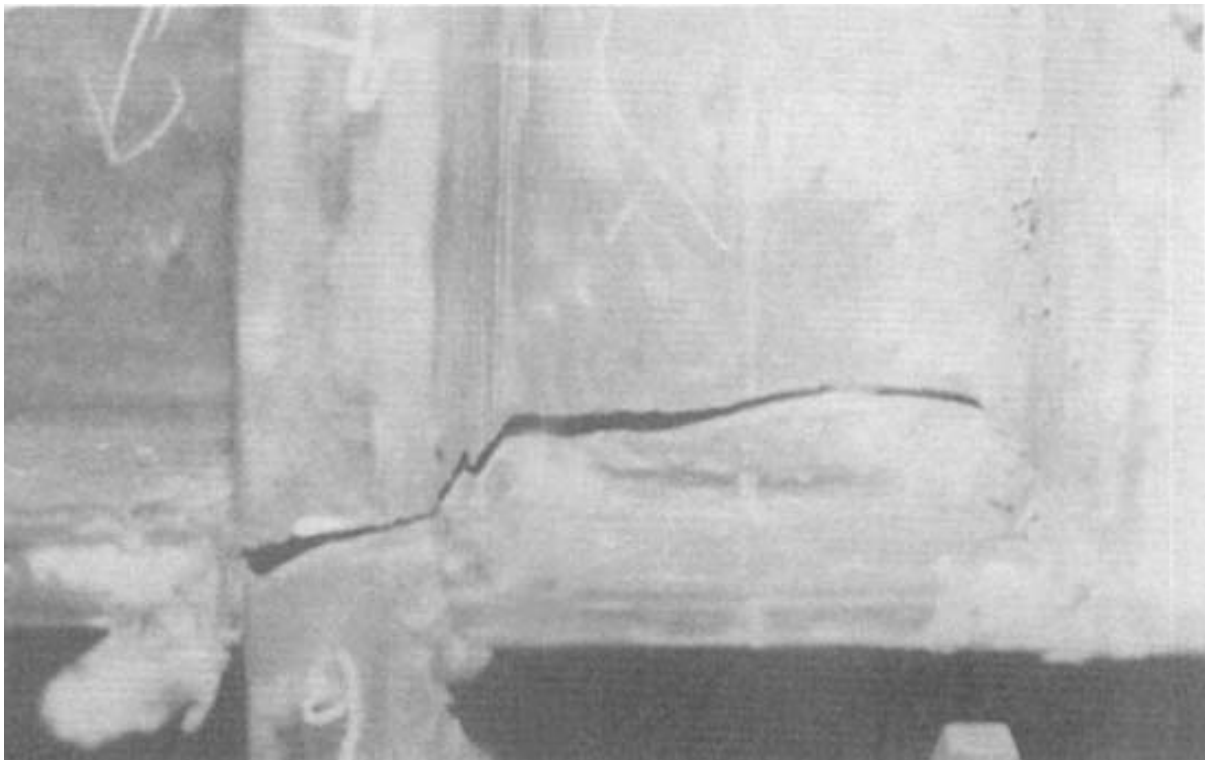
Σχήμα 7: Κατάρρευση των δύο ανώτερων μυκητοειδών πλακών, Bullocks store [30]

μάτων του καταστήματος Bullocks. Η αστοχία σε αυτό το κτίριο είναι σχεδόν βέβαιο ότι προκλήθηκε από τις ισχυρές κατακόρυφες ταλαντώσεις των πλακών δεδομένου ότι το κτίριο βρισκόταν σε μικρή απόσταση από το επίκεντρο του σεισμού. Σημαντική επίδραση έχει η κατακόρυφη επιτάχυνση και στα μπαλκόνια ιδιαίτερα όταν αυτά φέρουν μεγάλα φορτία. Στο Σχήμα 8 φαίνονται οι βλάβες που προκλήθηκαν στο σεισμό του 2003 στο Bingöl της Τουρκίας σε μπαλκόνια που ήταν «ανοιχτά» αλλά και σε μπαλκόνια που ήταν χτισμένα και είχαν γίνει δωμάτια, γεγονός που τα επιβάρυνε με πρόσθετο φορτίο [15].

Στο Σχήμα 9 φαίνεται μια από τις πολλές αστοχίες μεταλλικών κόμβων που παρατηρήθηκαν μετά το σεισμό του Northridge [30]. Η αστοχία αυτή αποδίδεται σε κόπωση και σε ελλειπείς κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Επίσης υπάρχει πιθανότητα να οφείλεται στην υπέρβαση της στρωφικής απαίτησης από τη σύνδεση για οριζόντια φορτία, η οποία προκλήθηκε από την κατακόρυφη κίνηση. Μια εναλλακτική θεωρία είναι ότι όταν υπάρχει και οριζόντια και κατακόρυφη επιτάχυνση η τάση διαρροής στο υλικό της βάσης αυξάνεται με αποτέλεσμα να αστοχεί πρώτα η συγκόλληση η οποία συμπεριφέρεται ψαθυρά [12].



Σχήμα 8: Βλάβες σε μπαλκόνια, Bingol, Τουρκία [15]



Σχήμα 9: Αστοχία σύνδεσης σε κόμβο μεταλλικής κατασκευής [30]

Επιπλέον, μεταλλικά στοιχεία μπορεί να αστοχήσουν σε εφελκυσμό λόγω της κατακόρυφης σεισμικής επιτάχυνσης. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 10 όπου ένα υποστύλωμα ενός μεταλλικού δικτύματος στην Ashiya-hama έχει αστοχήσει σε εφελκυσμό και μάλιστα κατά τρόπο ψαθυρό [30]. Η έλλειψη καμπτικών παραμορφώσεων των λεπίδων που αποτελούν το υποστύλωμα καταδεικνύουν ότι η κυρίαρχη απόκριση του υποστυλώματος ήταν αξονική και συμπεριλάμβανε εφελκυσμό. Τέτοιου είδους αστοχίες οδήγησαν και σε κατάρρευση κτιρίων αν και σημαντικό ρόλο έπαιξε η χρησιμοποίηση ψαθυρού χάλυβα και οι ελλειπείς κατασκευαστικές λεπτομέρειες.

Κλείνοντας αυτήν την ενότητα πρέπει να τονίσουμε ότι η κατακόρυφη επιτάχυνση παίζει σημαντικό ρόλο στα φαινόμενα P-Δ διότι επηρεάζει τη δυσκαμψία των κτιρίων [22].



Σχήμα 10: Εφελκυστική ψαθυρή αστοχία υποστυλώματος, Ahiya-hama [30]

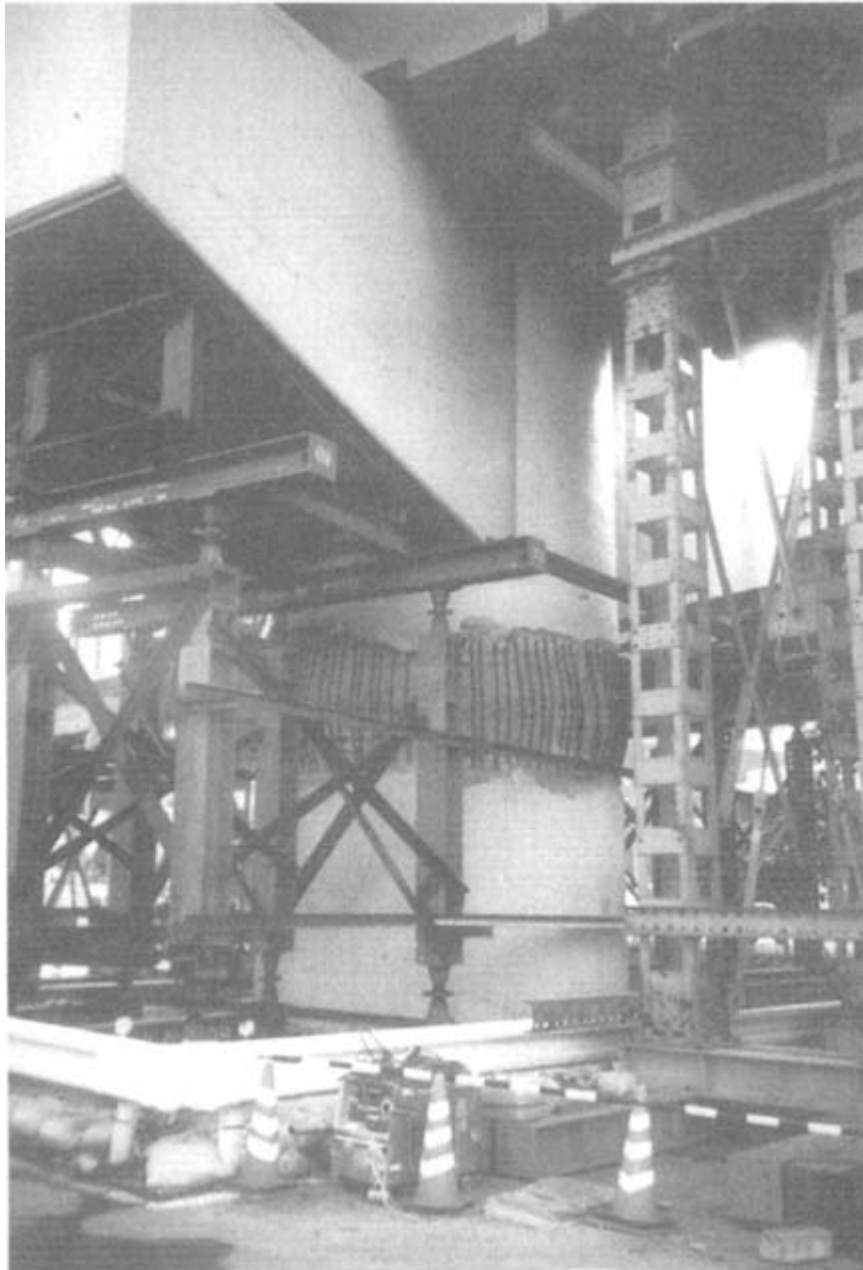
3.ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΣΤΙΣ ΓΕΦΥΡΕΣ

Η κατακόρυφη επιτάχυνση του εδάφους επηρεάζει τα βάθρα και την ανωδομή της γέφυρας όπως επηρεάζει τα υποστυλώματα και τις πλάκες ενός κτιρίου. Μεταβάλλει, δηλαδή, το



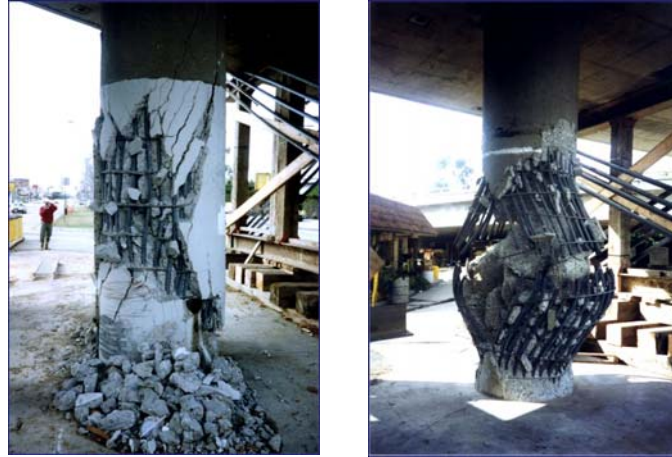
Σχήμα 11: Θλιπτική αστοχία βάθρων γέφυρας, Hanshin Expressway [30]

αξονικό φορτίο των βάθρων έως και 80% [17] ενώ προκαλεί πολλές φορές σημαντικές κατακόρυφες ταλαντώσεις στην ανωδομή με αποτέλεσμα να αστοχεί διατμητικά [20]. Επιπλέον, λόγω της μεταβολής του αξονικού φορτίου υπάρχει το ενδεχόμενο τα βάθρα να αστοχήσουν διατμητικά. Στο Σχήμα 11 φαίνεται μια σειρά από βάθρα στον αυτοκινητόδρομο του Hanshin τα οποία έχουν αστοχήσει σε θλίψη λόγω της κατακόρυφης σεισμικής επιτάχυνσης. Ο συμμετρικός λυγισμός του διαμήκους οπλισμού καθώς και οι μικρές ή ανύπαρκτες στροφές λόγω κάμψης καταδεικνύουν τον τρόπο αστοχίας. Στο Σχήμα 12 φαίνεται επίσης ένα βάθρο που έχει αστοχήσει θλιπτικά λόγω των αξονικών φορτίων.



Σχήμα 12: Θλιπτική αστοχία βάθρου γέφυρας, Port Island Crossing [30]

Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν κι άλλες αιτίες για τις αστοχίες που φαίνονται στα Σχήματα 11 και 12 πρέπει να τονίσουμε ότι το σημαντικότερο ρόλο τον έπαιξε η μεταβολή του αξονικού φορτίου λόγω της κατακόρυφης σεισμικής διέγερσης. Το Σχήμα 13 δείχνει τη διατμητική αστοχία δύο βάθρων γέφυρας λόγω της μεταβολής του αξονικού φορτίου [16].



Σχήμα 13: Διατμητική αστοχία βάθρων γέφυρας [16]

Κλείνοντας αυτή την ενότητα πρέπει να σημειώσουμε ότι αναλυτική εργασία με χρήση μαθηματικού μοντέλου [35] υποδεικνύει ότι η κατακόρυφη σεισμική επιτάχυνση είναι σημαντική για τη συμπεριφορά των ανηρημένων γεφυρών ενώ πειραματικές εργασίες επιβεβαιώνουν την κρισιμότητά της και στις γέφυρες από οπλισμένο σκυρόδεμα [16],[17].

4.ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑΣ ΣΕ ΑΛΛΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Πειραματικές αλλά και αναλυτικές εργασίες έχουν γίνει για να εκτιμηθεί η επίδραση της κατακόρυφης σεισμικής επιτάχυνσης στις φέρουσες τοιχοποιίες [8],[27], στις κατασκευές βαρύτητας [31],[33], στις δεξαμενές υγρών [19],[23] και όλες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η κατακόρυφη κίνηση του εδάφους είναι υπό κάποιες προϋποθέσεις σημαντική και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό. Στο Σχήμα 14 φαίνεται ο τρόπος αστοχίας δύο μεταλλικών δεξαμενών [24]. Πρόκειται για λυγισμό εξαιτίας της πίεσης του υγρού, η οποία αυξάνεται λόγω της κατακόρυφης κίνησης του εδάφους, σε συνδυασμό με τη ροπή ανατροπής λόγω των οριζόντιων σεισμικών φορτίσεων. Τέλος, μια εργασία με πεπερασμένα στοιχεία και ανάλυση στον υπολογιστή δείχνει ότι η κατακόρυφη επιτάχυνση σε περιοχές κοντά στο επίκεντρο του σεισμού είναι σημαντική για τη στήριξη μη φερόντων, προκατα-



Σχήμα 14: Αστοχία δεξαμενών λόγω της κατακόρυφης και της οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης [24]

σκευασμένων στοιχείων από σκυρόδεμα που χρησιμοποιούνται ως επικάλυψη [26]. Αν και δεν χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στην Ελλάδα τέτοιου είδους προκατασκευασμένα στοιχεία, η εργασία αυτή μας δίνει την αφορμή να ελέγξουμε την επίδραση της κατακόρυφης σεισμικής συνιστώσας σε οποιοδήποτε βαρύ προσάρτημα θέλουμε να στηρίξουμε σε μια κατασκευή που βρίσκεται σε σειсмоγενείς περιοχές ή κοντά σε ρήγμα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ανακεφαλαιώνοντας μπορούμε να πούμε ότι η κατακόρυφη επιτάχυνση του σεισμού είναι συνάρτηση της απόστασης από το επίκεντρο, της περιόδου αλλά και των εδαφικών συνθηκών. Είναι προφανές από όσα αναφέρθηκαν ότι το να θεωρούμε την κατακόρυφη επιτάχυνση ίση με τα $2/3$ της οριζόντιας είναι επισφαλές, κυρίως για περιοχές κοντά στο επίκεντρο του σεισμού ή σε κάποιο ρήγμα. Το πόσο κοντά εξαρτάται από το μέγεθος του σεισμού, από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, αλλά και από τις ιδιότητες της ίδιας της κατασκευής.

Πέραν της ανέγερσης μιας νέας κατασκευής, η κατακόρυφη σεισμική συνιστώσα θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε περιπτώσεις εκτίμησης της απόκρισης μιας υπάρχουσας κατασκευής, έτσι ώστε να διακρίνεται αν είναι οικονομικότερη λύση η ενίσχυσή της για να μπορεί να παραλάβει τα φορτία που προκύπτουν από αυτήν την ανάλυση ή η κατεδάφισή της και η ανέγερση νέας. Επίσης, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η κατακόρυφη σεισμική συνιστώσα και όταν γίνεται ο σχεδιασμός της ενίσχυσης μιας υφιστάμενης κατασκευής, έτσι ώστε τα υλικά της ενίσχυσης και ο τρόπος εφαρμογής τους να είναι τέτοια που να μπορούν να παραλάβουν τα σεισμικά φορτία, όχι μόνο λόγω των οριζόντιων επιταχύνσεων αλλά και λόγω της κατακόρυφης επιτάχυνσης. Για παράδειγμα θα πρέπει να μπορούν να παραλάβουν ικανοποιητικά τις διατμητικές δυνάμεις ακόμα κι όταν το σκυρόδεμα λόγω της διακύμανσης του κατακόρυφου φορτίου δεν μπορεί να συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στην ανάλυσή τους. Κι όλα αυτά βέβαια ισχύουν για περιοχές κοντά σε ρήγματα όπου είναι πιθανή η δημιουργία σημαντικής κατακόρυφης κίνησης.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Μπουκοβάλας Γ. Δ., Παπαδημητρίου Α. Γ., Βασδέκης Σ., Βουρβαχάκης Θ., Δρανδάκης Ε., Σοφιανού Ι., “Προσεγγιστικές Σχέσεις Επίδρασης Τοπογραφίας στη Σεισμική Εδαφική Κίνηση”, Πρακτικά 5^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη, Μάιος 2006.
- [2] Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, “ΕΑΚ 2000”, Αθήνα, Απρίλιος 2001.
- [3] Παπαδόπουλος Γ. Α., Γκάνας Α., Παυλίδης Σ., “Ενόργανες και υπαίθριες παρατηρήσεις για τον καθορισμό της σεισμογόνου δομής του σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 στην Αθήνα”, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 34 (4), 1457-1464, Σεπτέμβριος 2001.
- [4] Φαρδής Ν. Μιχαήλ, “Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος, Μέρος 1”, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, 2006.
- [5] Alaghebandian Reza, Otani Shunsuke, Shiohara Hitoshi, “Effect of distributed mass on earthquake response of reinforced concrete frames”. Ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.rcs.arch.t.u-tokyo.ac.jp/shiohara/document/EQresponse/shiohara.fm.pdf>
- [6] Aoi Shin, Kunugi Takashi, Fujiwara Hiroyuki, “Trampoline effect in extreme ground motion”. Ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/322/5902/727>
- [7] Badalouka B. G., Papadopoulos G. A., “Experimental Study of a Structure Under Stress Pulse Simulating Vertical Ground Motion”, Journal of Earthquake 12, pp. 341-356, 2008.

- [8] Benedetti D., Carydis P., Limongelli M. P., “Evaluation of the seismic response of masonry buildings based on energy functions”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, pp. 1061-1081, 2001.
- [9] Bouchon M., Gaffet S., Cornou C., Dietrich M., Glot J. P., Courboux F., Caserta A., Cultera G., Marra, F. Guiget R., “Observations of vertical ground accelerations exceeding gravity during the 1997 Umbria-Marche (central Italy) earthquakes”, *Journal of Seismology* 4, pp. 517-523, 2000.
- [10] Bozorgnia Youself, Mahin Stephen A., Brady A. Gerald, “Vertical Response of Twelve Structures Recorded during the Northridge Earthquake”, *Earthquake Spectra*, Vol. 14, No 3, November 1998.
- [11] Bozorgnia Youself, Niazi Mansour, Campbell Kenneth W., “Characteristics of Free-Field Vertical Ground Motion during the Northridge Earthquake”, *Earthquake Spectra*, Vol. 11, No 4, November 1995.
- [12] Christopoulos Constantin, “A study on the characteristics of vertical accelerations and their effects on civil engineering structures”, *Universite de Monteval*, 1998. Ηλεκτρονική διεύθυνση: http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk2/tape17/PQDD_0003/MQ3866_6.pdf
- [13] Collier C. J., Elnashai A. S., “A procedure for combining vertical and horizontal seismic action effects”, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 5, No 4, pp. 521-539, 2001.
- [14] Diotallevi P. P., Landi L., “Influence of vertical ground motion component on the seismic behaviour of RC structures”. Ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.tdc.ing.unibo.it/tdc/STRUCTURAL%20ENGINEERING%20-%20research.pdf>
- [15] Dogangum Adem, “Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingol Earthquake in Turkey”, *Engineering Structures* 26, pp. 841-856, 2004.
- [16] Elnashai Amr S., Spencer Billie F., Kuchma Dan A., Yang Guangqiang, Carrion Juan, Gan Quan, Kim Sung Jig, “Large and small scale simulations on the multi-axial full-scale sub-structured testing and simulation (MUST-SIM) facility at the University of Illinois at Urbana-Champaign”, 2005. Ηλεκτρονική διεύθυνση: http://neesforge.nees.org/docman/view.php/21/33/C4%20-%20Elnashai_Spencer_Kuchma_Yang_Carrion_Gan_Kim_2005.pdf
- [17] Elnashai Amr, Spencer Bill, Kuchma Dan, Kim Sung Jig, Burdette Nicholas, Holub Curtis, Gonzales Johanna, Nakata Narutoshi, Yang Guangqiang, Gan Quan, “Analysis and Distributed Hybrid Simulation of Shear-Sensitive RC Bridges Subjected to Horizontal and Vertical Earthquake Ground Motion”. Ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://neesforge.nees.org/docman/view.php/21/34/C5%20-%20Elnashai%20et%20al.%20OUS-Japan.pdf>
- [18] Fujita K., Yoshitomi S., Tsuji M., Takewaki I., “Critical cross-correlation function of horizontal and vertical ground motions for uplift of rigid block”, *Engineering Structures* 30, pp. 1199-1213, 2008.
- [19] Haroun Medhat A., Tayel Magdy A., “Response of tanks to vertical seismic excitations”, *Earthquake engineering and Structural Dynamics*, Vol. 13, pp. 583-595, 1985.
- [20] Hsu Yao T., Fu Chung C., “Seismic Effect on Highway Bridges in Chi Chi Earthquake”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 18, No 1, February 2004.
- [21] Hsu Yao T., Fu Chung C., “Study of Damaged Wushi Bridge in Taiwan 921 Earthquake”. Ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://best.umd.edu/publications/paper01.pdf>
- [22] Kalkan Erol, Graizer Vladimir, “Multi-component ground motion response spectra for coupled horizontal, vertical, angular accelerations, and tilt”, *ISET Journal of Earthquake Technology – Special Issue on “Response Spectra”*, Vol. 44, No 22, March 2007.
- [23] Kianoush M. R., Chen J. Z., “Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks”, *Engineering Structures* 28, pp. 704-715, 2006.
- [24] Malhotra Praveen K., “Seismic Design of Liquid Storage Tanks”, *ASCE*. Ηλεκτρονική διεύθυνση: http://strongmotions.com/download_pages%5CSeismic%20Liquid%20Tanks.pdf

- [25] Mancilla Flor de Lis, Herrmann Robert B., Morales Jose, Stich Daniel, “Vertical Ground Motion in Southern Spain”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 98, No 2, pp. 733-745, April 2008.
- [26] Memari Ali M., Maneetes Hathairat, Bozorgnia Youself, “Study of the Effect of Near-Source Vertical Ground Motion on Seismic Design of Precast Concrete Cladding Panels”, *Journal of Architectural Engineering*, Vol. 10, No 4, December 2004.
- [27] Meyer Patrik, Ochsendorf John, Germaine John, Kausel Eduardo, “The Impact of High-Frequency/Low-Energy Seismic Waves on Unreinforced Masonry”, *Earthquake Spectra*, Vol. 23, No 1 pp. 77-94, February 2007.
- [28] Muhammad Llias, “Design optimization and inelastic behavior of reinforced concrete structures under seismic loads”. Ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://ir.library.tohoku.ac.jp/re/bitstream/10097/7001/1/T1H061728.pdf>
- [29] Mwafy Aman, Elnasha Amr i, “Vulnerability of code-compliant RC buildings under multi-axial earthquake loading”, 4th International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, October 2006.
- [30] Papazoglou A. J., Elnashai A. S., “Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25, pp. 1109-1137, 1996.
- [31] Sawicki Andrei, Chybicki Wlodzimierz, Kulczykowski Marek, “Influence of vertical ground motion on seismic-induced displacements of gravity structures”, *Computers and Geotechnics* 34, pp. 485-497, 2007.
- [32] Veldhuyzen Hendrik, “Contemporary subsidence and ground movement, southwestern Ontario: Possible bedrock controls”, *Geographie physique et Quaternaire*, 1993, Vol. 47, No 3, pp. 395-398.
- [33] Yan Liping, Matasovic Neven, Kavazanjian Edward, “Seismic response of a block on an inclined plane to vertical and horizontal excitation acting simultaneously”, *Engineering Mechanics, Proceedings of the 11th Conference*, May 1996.
- [34] Yang J., Lee C.M., “Characteristics of vertical and horizontal ground motions recorded during the Niigata-ken Chuetsu, Japan Earthquake of 23 October 2004”, *Engineering Geology* 94, pp. 50-64, 2007.
- [35] Yau J. D., Fryba L., “Response of suspended beams due to moving loads and vertical seismic ground excitations”, *Engineering Structures* 29, pp. 3255-3262, 2007.
- [36] Zifa Wang, “A preliminary report on the Great Wenchuan Earthquake”, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 7, pp. 225-234, 2008.

