

Αλληλεξάρτηση σεισμικών παραμέτρων και δεικτών βλάβης σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος

Α. Ελένας, Α. Λιώλιος & Λ. Βασιλειάδης

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Εφηρμοσμένης Στατικής και Δυναμικής των Κατασκευών, Ξάνθη (e-mail: liolios@civil.duth.gr)

Λέξεις κλειδιά: σεισμικές παράμετροι, δείκτες βλάβης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η παρούσα εργασία παρουσιάζει στο πρώτο της τμήμα μερικές παραμέτρους της σεισμικής επιτάχυνσης. Στο δεύτερο της τμήμα παρουσιάζεται μια μη γραμμική δυναμική ανάλυση μιας οκταώροφης πλαισιακής κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος και γίνεται ένας συσχετισμός μεταξύ των σεισμικών παραμέτρων και επιλεγμένων δεικτών βλάβης. Ως δείκτες βλάβης (δ.β.) της κατασκευής επιλέχθηκαν η ανηγμένη σχετική μετακίνηση των ορόφων (α.σ.μ.ο.) και ο δ.β. κατά Park/Ang. Η διαδικασία προβάλλει εκείνες τις σεισμικές παραμέτρους που έχουν ισχυρή επίδραση στους δείκτες βλάβης της κατασκευής. Τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη σεισμική ταχύτητα, η φασματική ψευδοεπιτάχυνση, η φασματική απόλυτη σεισμική ενέργεια, η ένταση Arias και η ισχύς $P_{0.90}$ παρουσιάζουν καλή συσχέτιση με τους δείκτες βλάβης της κατασκευής.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι τα σεισμικά επιταχυνσιογραφήματα παρουσιάζουν μόνο γενικά χαρακτηριστικά όπως τη μέγιστη επιτάχυνση ή την συνολική χρονική διάρκεια της σεισμικής δράσης. Για τον υπολογισμό πιο πολύπλοκων χαρακτηριστικών των επιταχυνσιογραφημάτων απαιτείται επεξεργασία αυτών με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Μερικές χαρακτηριστικές παράμετροι είναι η ένταση Arias, το διάγραμμα Husid, η χρονική διάρκεια της ισχυρής σεισμικής φάσης όπως ορίστηκε από τους Trifunac/Brady, τα φάσματα απόκρισης και η ισχύς $P_{0.90}$. Από παρατηρήσεις μετά από καταστροφικούς σεισμούς και από υπολογιστικές αναλύσεις, προκύπτει ότι οι βλάβες οι οποίες παρουσιάζονται μετά από σεισμική δραστηριότητα του εδάφους, συσχετίζονται σε μικρό ή μεγάλο βαθμό με παραμέτρους οι οποίες περιγράφουν το καταστροφικό δυναμικό ενός σεισμού.

Στην παρούσα εργασία υπολογίζονται διάφορες σεισμικές παράμετροι για μια σειρά επιταχυνσιογραφημάτων το οποία καταγράφηκαν σε περιοχές, γνωστές για την έντονη σεισμική τους δραστηριότητα. Ακολούθως, υπολογίζονται με την βοήθεια μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης, κατάλληλοι ολικοί δείκτες βλάβης (δ.β.) για την περιγραφή της συνολικής βλάβης του φέροντος οργανισμού. Η μέγιστη ανηγμένη σχετική μετακίνηση των ορόφων (α.σ.μ.ο.) και ο δ.β. κατά Park/Ang, επιλέχθηκαν ως ολικοί δείκτες βλάβης. Στη συνέχεια, αναζητείται ο βαθμός αλληλεξάρτησης μεταξύ των σεισμικών παραμέτρων και των δεικτών βλάβης της κατασκευής, με τη βοήθεια των συντελεστών συσχέτισης κατά Pearson και κατά Spearman. Τέλος, η μεθοδολογία προβάλλει τον βαθμό συσχέτισης των σεισμικών παραμέτρων που εξετάστηκαν, με τους ολικούς δείκτες βλάβης και εφαρμόστηκε σε μια οκταώροφη πλαισιακή κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος. Η

διαστασιολόγηση της κατασκευής πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τους κανόνες των Ευρωκωδίκων 2 και 8.

2 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Είναι γνωστό ότι το καταστροφικό δυναμικό ενός σεισμού περιγράφεται με διάφορες παραμέτρους της σεισμικής καταγραφής (Jennings 1982, Meskouris 1988, Elenas 2000). Τέτοιες παράμετροι μπορεί να είναι άκρες τιμές του επιταχυνσιογραφήματος (όπως η μέγιστη επιτάχυνση εδάφους PGA και η μέγιστη ταχύτητα εδάφους PGV), ενεργειακά μεγέθη (όπως η ένταση Arias, το διάγραμμα Husid, η χρονική διάρκεια της ισχυρής σεισμικής φάσης όπως ορίστηκε από τους Trifunac/Brady, η απόλυτη ή η σχετική σεισμική ενέργεια και ισχύς $P_{0.90}$) και φασματικά μεγέθη (όπως η φασματική ψευδοεπιτάχυνση και φασματική ψευδοταχύτητα).

Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκαν επιταχυνσιογραφήματα από διάφορες περιοχές του κόσμου, γνωστές για την έντονη σεισμική τους δράση. Κριτήριο επιλογής των καταγραφών ήταν ο αναμενόμενος βαθμός βλάβης επί της κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος που εξετάστηκε. Το πεδίο τιμών των δεικτών βλάβης θα πρέπει να είναι ευρύ (από ελάχιστο έως μεγάλο), για λόγους μεγαλύτερης στατιστικής αξιοπιστίας. Ο πίνακας 1 παρουσιάζει τα στοιχεία των σεισμικών καταγραφών που επιλέχθηκαν για την παρούσα έρευνα.

Από την επεξεργασία των επιταχυνσιογραφημάτων με την βοήθεια H/Y, προέκυψαν οι αριθμητικές τιμές των σεισμικών παραμέτρων που παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Αναλυτικά, υπολογίστηκαν η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση (PGA, a_{max}), η μέγιστη σεισμική ταχύτητα (PGV, v_{max}), η φασματική ψευδοεπιτάχυνση (SA), η κεντρική περίοδος της καταγραφής (CP) (Meskouris 2000), η φασματική απόλυτη σεισμική ενέργεια (E_{inp}) (Uang 1990), η ένταση Arias (Arias 1970), η χρονική διάρκεια της ισχυρής σεισμικής φάσης όπως ορίστηκε από τους Trifunac/Brady (SMD) (Trifunac 1975) με τη βοήθεια του διαγράμματος Husid (Husid 1969) και η ισχύς $P_{0.90}$ (Jennings 1982). Οι ορισμοί των παραπάνω παραμέτρων αναφέρονται στην βιβλιογραφία και δεν επαναλαμβάνονται στην παρούσα εργασία.

Τα φάσματα απόκρισης υπολογίστηκαν για ποσοστό 5% της κρίσιμης απόσβεσης, ενώ στον πίνακα 2 οι τιμές τους αναφέρονται για την ιδιοπερίοδο της κατασκευής που ερευνήθηκε και ισούται με 1.18 s.

Πίνακας 1. Σεισμικές διεγέρσεις

Σεισμική διεγερση	Χώρα	Ημερομηνία	Θέση καταγραφής	Συνιστώσα
Ancona	Italy	14.6.72	Rocca	EW
Friuli	Italy	6.5.76	Tolmezzo	EW
Rumania	Rumania	4.3.77	Bucharest	N0
Montenegro	Yugoslavia	15.4.79	Petrovac	NS
Argostoli	Greece	17.1.83	Argostoli	NS
Mexico	Mexico	19.9.85	Mexico City	N90W
Kalamata	Greece	13.9.86	Kalamata	EW
Spitak	U.S.S.R.	7.12.88	Gukasyan	EW
Loma Prieta	U.S.A.	17.10.89	Corralitos	0
Griva	Greece	21.12.90	Edessa	NS
Pyrgos	Greece	26.3.93	Pyrgos	T

Πίνακας 1. Σεισμικές διεγέρσεις

Σεισμική διεγερση	Χώρα	Ημερομηνία	Θέση καταγραφής	Συνιστώσα
Northridge	U.S.A.	17.1.94	Jensen Filtration	292

Πίνακας 2. Σεισμικές παράμετροι

Σεισμική διεγερση	PGA a_{max} [m/s ²]	PGV v_{max} [m/s]	SA [m/s ²]	CP T_0 [s]	E_{inp} [m ² /s ²]	ARIAS [m ² /s ⁴]	SMD $T_{0.90}$ [s]	Ισχύς $P_{0.90}$ [m ² /s ⁴]
Ancona	4.447	0.097	0.238	0.086	0.006	2.700	3.035	0.802
Friuli	3.209	1.454	6.280	0.833	1.874	15.685	5.430	2.587
Rumania	2.017	0.736	6.102	0.593	0.821	4.907	7.460	0.594
Montenegro	4.503	0.433	2.658	0.267	0.973	27.864	10.600	2.375
Argostoli	1.621	0.068	0.272	0.175	0.010	1.948	10.900	0.161
Mexico	1.679	0.619	2.684	1.569	0.496	14.655	38.840	0.340
Kalamata	2.680	0.241	2.321	0.333	0.275	4.585	6.370	0.652
Spitak	1.875	0.166	1.755	0.239	0.107	2.001	8.960	0.201
Loma Prieta	6.177	0.555	2.436	0.315	0.544	19.547	6.860	2.612
Griva	0.997	0.111	0.626	0.325	0.023	1.304	7.800	0.151
Pyrgos	4.455	0.193	0.633	0.185	0.034	2.100	4.155	0.455
Northridge	6.210	0.967	13.154	0.459	11.94	31.575	6.280	4.542
Hyogo-Ken Nanbu	8.206	0.924	8.729	0.302	3.713	50.735	8.320	5.556

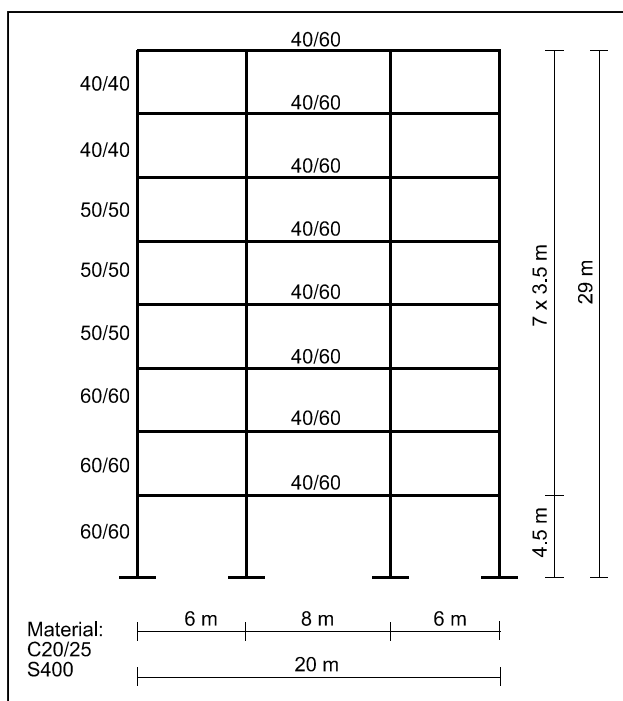
3 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Το σχήμα 1 παρουσιάζει ένα οκταώροφο πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος, το οποίο έχει διαστασιοποιηθεί σύμφωνα με τους κανόνες που ορίζουν οι Ευρωκώδικες 2 και 8. Η γεωμετρία των πλακοδοκών δίνεται από τις τιμές: 1.45 m συνεργαζόμενο πλάτος της πλάκας, 0.40 m πλάτος της δοκού, 0.60 m συνολικό ύψος της δοκού και 0.20 m πάχος της πλάκας. Η απόσταση μεταξύ των πλαισίων επιλέχθηκε να είναι 6 m. Η κατασκευή υπολογίστηκε με συντελεστή σπουδαιότητας III, μεσαία κατηγορία πλαστιμότητας, κατηγορία εδάφους B και σεισμική ζώνη 3 σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8. Πλην του ίδιου βάρους και της σεισμικής φόρτισης, λήφθηκαν υπόψη τα κινητά φορτία, το φορτίο χιόνος, το φορτίο ανέμου και η απόκλιση των υποστυλωμάτων από την κατακόρυφο. Οι αριθμητικές τιμές των φορτίων, των συντελεστών ασφαλείας και οι συνδυασμοί φορτίσεων επιλέχθηκαν σύμφωνα με τις διατάξεις των Ευρωκωδίκων 1, 2 και 8.

Η δυναμική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με μια μικραυξητική διαδικασία κατά Newmark, συνοδευόμενη από μια επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης της λύσης ανά χρονικό βήμα κατά Newton/Raphson. Η διαδικασία επίλυσης έλαβε υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά του οπλισμένου σκυροδέματος με ένα τροποποιημένο μοντέλο των Takeda/Powell, με τριγραμμική περιβάλλουσα (Valles 1996). Επιπλέον, λαμβάνεται υπόψη η μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας των στοιχείων και η ολίσθηση του οπλισμού υπό ανακυκλιζόμενη καταπόνηση (Valles 1996). Η μη γραμμική δυναμική ανάλυση και ο υπολογισμός των ολικών δεικτών βλάβης πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα IDARC (Valles 1996), για όλα τα επιταχυνσιογραφήματα που παρουσιάστηκαν στον πίνακα 1. Ως

ολικοί δείκτες βλάβης της κατασκευής επιλέχθηκαν και υπολογίστηκαν ο τροποποιημένος δ.β. κατά Park/Ang (Park 1985, Valles 1996) και η ανηγμένη σχετική μετατόπιση των ορόφων. Η τελευταία ορίζεται ως το πηλίκο της σχετικής μετατόπισης για το ύψος του ορόφου.

Σχήμα 1. Πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος



4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ο πίνακας 3 παρουσιάζει τους ολικούς δείκτες βλάβης της κατασκευής για κάθε σεισμική διέγερση που εξετάστηκε (πίνακας 1). Ένας μηδενικός δείκτης βλάβης κατά Park/Ang δηλώνει ότι η κατασκευή παραμένει κατά την διέγερση στην ελαστική περιοχή. Για τον προσδιορισμό του βαθμού συσχέτισης μεταξύ των ολικών δεικτών βλάβης (πίνακας 3) και των σεισμικών παραμέτρων (πίνακας 2), υπολογίστηκαν οι συντελεστές συσχέτισης (σ.σ.) κατά Pearson και κατά Spearman (Spiegel 1992). Ο πρώτος συντελεστής δηλώνει τον βαθμό της γραμμικής συµμεταβολής δύο μεγεθών, ενώ ο δεύτερος δηλώνει τον βαθμό της ιεραρχικής συµμεταβολής. Συντελεστές συσχέτισης με τιμές έως 0.5, δηλώνουν μικρή αλληλεξάρτηση των εξεταζομένων μεγεθών. Όταν οι τιμές των συντελεστών είναι στην περιοχή από 0.5 έως 0.8, δηλώνουν μέτρια συσχέτιση των μεγεθών. Τέλος, αριθμητικές τιμές από 0.8 έως 1.0, δηλώνουν ισχυρή συσχέτιση.

Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των συντελεστών συσχέτισης κατά Pearson και κατά Spearman, μεταξύ όλων των δεικτών βλάβης και των σεισμικών παραμέτρων που εξετάστηκαν. Από τις τιμές των συντελεστών συσχέτισης προκύπτει ότι η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση του εδάφους (PGA) έχει μέτρια συσχέτιση με τους ολικούς δείκτες βλάβης της κατασκευής. Ενώ, χαμηλή συσχέτιση παρουσιάζει η χρονική διάρκεια της ισχυρής σεισμικής φάσης κατά Trifunac/Brady (SMD). Μέτρια συσχέτιση κατά Pearson και υψηλή κατά Spearman παρουσιάζει η μέγιστη σεισμική ταχύτητα του εδάφους (PGV). Χαμηλή συσχέτιση κατά Pearson και μέτρια κατά Spearman παρουσιάζει η κεντρική περίοδος των σεισμικών καταγραφών (CP). Η φασματική ψευδοεπιτάχυνση (SA), η φασματική απόλυτη σεισμική ενέργεια (E_{inp}), η ένταση Arias και

η ισχύς $P_{0.90}$ παρουσιάζουν υψηλή συσχέτιση με τους δείκτες βλάβης. Γενικά, οι ενεργειακές και οι φασματικές παράμετροι που εξετάστηκαν, παρουσιάζουν πολύ καλή συσχέτιση με τους δ.β. της κατασκευής.

Η μέγιστη συσχέτιση κατά Pearson υπολογίστηκε μεταξύ της ισχύος $P_{0.90}$ και μέγιστης ανηγμένης σχετικής μετατόπισης (0.961) και μεταξύ δ.β. κατά Park/Ang και φασματικής ψευδοεπιτάχυνσης (0.953). Επιπλέον, η μέγιστη συσχέτιση κατά Pearson υπολογίστηκε μεταξύ φασματικής απόλυτης σεισμικής ενέργειας και δ.β. κατά Park/Ang και μέγιστης ανηγμένης σχετικής μετατόπισης (0.993 και 0.984, αντίστοιχα).

Επιπλέον, υπολογίστηκε ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των ιδίων των δεικτών βλάβης. Έτσι, προέκυψε συντελεστής συσχέτισης μεταξύ του δείκτη βλάβης κατά Park/Ang και της μέγιστης ανηγμένης σχετικής μετατόπισης κατά Pearson ίσος με 0.970 και κατά Spearman ίσος με 0.977. Οι αριθμητικές τιμές τεκμηριώνουν, την ισχυρή αλληλεξάρτηση των δεικτών βλάβης μεταξύ τους.

Τέλος, οι συντελεστές συσχέτισης με τιμές μεγαλύτερες από 0.556 δηλώνουν σημαντική συμμεταβολή με δίπλευρο επίπεδο σημαντικότητας 5%. Ενώ, συντελεστές συσχέτισης με τιμές μεγαλύτερες από 0.697 δηλώνουν σημαντική συμμεταβολή με δίπλευρο επίπεδο σημαντικότητας 1%.

Πίνακας 3. Ολικοί δείκτες βλάβης

Σεισμική διέγερση	Δ.β. κατά Park/Ang	Max α.σ.μ.ο. [%]
Ancona	0.000	0.11
Friuli	0.312	2.42
Rumania	0.164	0.92
Montenegro	0.198	1.57
Argostoli	0.000	0.13
Mexico	0.123	0.43
Kalamata	0.092	0.52
Spitak	0.070	0.42
Loma Prieta	0.133	1.09
Griva	0.000	0.22
Pyrgos	0.070	0.41
Northridge	0.586	4.21
Hyogo-Ken	0.533	5.37

Πίνακας 4. Συντελεστές συσχέτισης

Σεισμικές παράμετροι	Σ.σ. κατά Pearson		Σ.σ. κατά Spearman	
	Δ.β. κατά Park/Ang	Max α.σ.μ.ο.	Δ.β. κατά Park/Ang	Max α.σ.μ.ο.
PGA	0.697	0.761	0.678	0.676
PGV	0.783	0.719	0.938	0.901
SA	0.953	0.877	0.965	0.934
CP	0.153	0.028	0.556	0.527
E_{imp}	0.849	0.755	0.993	0.984
Arias Intensity	0.867	0.913	0.921	0.901

SMD	-0.077	-0.150	-0.033	0.005
P _{0.90}	0.923	0.961	0.802	0.802

5 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία παρουσίασε μια διαδικασία αριθμητικού προσδιορισμού της αλληλεξάρτησης μεταξύ των σεισμικών παραμέτρων και των ολικών δεικτών βλάβης των κατασκευών. Υπολογίστηκαν άκρες τιμές επιταχυνσιογραφήματων, ενεργειακές και φασματικές παράμετροι. Τα επιταχυνσιογραφήματα καταγράφηκαν σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα. Χρησιμοποιήθηκαν ο ολικός δείκτης βλάβης κατά Park/Ang και η ανηγμένη σχετική μετακίνηση των ορόφων. Οι τιμές τους υπολογίστηκαν από την εφαρμογή μιας μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης. Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε μια οκταόροφη πλαισιακή κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος, η οποία διαστασιολογήθηκε σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες 2 και 8.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρονική διάρκεια της ισχυρής σεισμικής φάσης όπως ορίστηκε από τους Trifunac/Brady, η κεντρική περίοδος και η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση, δεν περιγράφουν ικανοποιητικά το καταστροφικό δυναμικό ενός σεισμού. Αντίθετα, η μέγιστη σεισμική ταχύτητα, η φασματική ψευδοεπιτάχυνση, η φασματική απόλυτη σεισμική ενέργεια, η ένταση Agias και η ισχύς P_{0.90} περιγράφουν ικανοποιητικά το καταστροφικό δυναμικό ενός σεισμού. Γενικά, οι ενεργειακές και οι φασματικές παράμετροι που εξετάστηκαν, παρουσίασαν πολύ καλή συσχέτιση με τους δείκτες βλάβης της κατασκευής. Επιπλέον, οι αριθμητικές τιμές των συντελεστών συσχέτισης κατά Pearson και κατά Spearman τεκμηριώνουν, την ισχυρή αλληλεξάρτηση μεταξύ του ολικού δείκτη βλάβης κατά Park/Ang και της ανηγμένης σχετικής μετακίνησης των ορόφων. Τέλος, το αριθμητικό παράδειγμα δείχνει την ικανοποιητική συμπεριφορά της κατασκευής, αν και για τα Ελληνικά επιταχυνσιογραφήματα δεν αποφεύγονται πλήρως οι βλάβες.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Arias, A. 1970. A Measure of Earthquake Intensity. In: Seismic Design for Nuclear Power Plants, ed. R. Hansen, Cambridge Massachusetts: MIT Press.
- Elenas, A. 2000. Correlation between seismic acceleration parameters and the overall damage indices of buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 20, Issue 1: 93-100.
- Husid, R.L. 1969. Analisis de terremoros: Analisis General, *Revista del IDIEM*. Vol. 8, Issue 5: 21-42.
- Jennings, P.C. 1982. Engineering Seismology, In: Earthquakes: observation, theory and interpretation, ed. H. Kanamori & E. Boschi, Varenna: Italian Physical Society, 138-173.
- Meskouris K., Krätzig, W.B., Elenas, A., Heiny, L., and Meyer, I.F. 1988. Mikrocomputer unterstützte Erdbebenuntersuchung von Tragwerken. *Wiss. Mit. SFB-Bericht Nr.8*. Bochum: Ruhr-Universität.
- Meskouris, K. 2000. *Structural dynamics*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Park, Y.J. and Ang, A.H.-S. 1985. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 111, Issue 4: 722-739.
- Spiegel, M.R. 1992. *Theory and problems of statistics*. London: McGraw-Hill.
- Trifunac, M.D. and Brady, A.G. 1975. A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 65, Issue 3: 581-626.
- Uang, C.-M. and Bertero, V.V. 1990. Evaluation of seismic energy in structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 19, Issue 1: 77-90.

Valles, R., Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., Li, C. and Madan, A. 1989. IDARC 2D Version 4.0: A program for the inelastic damage analysis of buildings. *Technical Report NCEER-96-0010*. Buffalo: State University of New York.