

Διερεύνηση της Επιρροής των Χαρακτηριστικών της Σεισμικής Δόνησης στην Ανελαστική Συμπεριφορά Μονοβάθμιων Ταλαντωτών

Investigation of the Effect of Strong Ground Motion Characteristics on the Inelastic Response of SDOF Systems

Ιωάννης ΤΑΦΛΑΜΠΑΣ¹, Ιωάννης ΨΥΧΑΡΗΣ²

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην παρούσα εργασία διερευνάται η επιρροή του συχνοτικού περιεχομένου της σεισμικής διέγερσης, που είναι άμεσα συναρτημένο με το μέγεθος και το μηχανισμό γένεσης του σεισμού, στις σχέσεις μεταξύ συντελεστή συμπεριφοράς (ή παράγοντα πλαστιμότητας, R_y) και απαιτούμενης πλαστιμότητας, μ (σχέσεις $R_y-\mu$). Για το σκοπό αυτό επιλέγεται ένα πλήθος εδαφικών καταγραφών, συμπεριλαμβανομένων σεισμών κοντινού πεδίου με πρόσω ή όπισθεν κατευθυντικότητα, για το οποίο υπολογίζεται η σχέση $R_y-\mu$ μονοβάθμιων ταλαντωτών, ανάλογα με την ιδιοπερίοδό τους. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις περιοχές ισχύος των κοινά αποδεκτών θεωρήσεων: $R_y=\mu$ (θεώρηση ίσων μετακινήσεων) και $R_y=\sqrt{2\mu-1}$ (θεώρηση ίσων ενεργειών). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, για σεισμούς κοντινού πεδίου με φαινόμενα κατευθυντικότητας, η περιοχή ισχύος κάθε σχέσης είναι συναρτημένη με το λόγο της περιόδου της κατασκευής προς τη δεσπόζουσα περίοδο του παλμού. Προτείνονται νέα όρια ισχύος των σχέσεων $R_y-\mu$, τα οποία, για σεισμούς κοντινού πεδίου εξαρτώνται από το μέγεθος του σεισμού και το είδος της κατευθυντικότητας. Επίσης, προτείνεται ο προσδιορισμός της περιόδου του παλμού από τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος μετακινήσεων.

ABSTRACT : This study investigates the effect of the frequency content of the ground motion, which depends on the magnitude and the source mechanism, on the relationship between the reduction factor, R_y and the required ductility, μ . A large sample of strong motion records, including ones with near field characteristics (forward and backward directivity), is examined. For each record, the $R_y-\mu-T$ relation is calculated for SDOF systems. The results show that, for near field records containing directivity pulses, the validity of the widely used relations: $R_y=\mu$ (equal displacement rule) and $R_y=\sqrt{2\mu-1}$ (equal energy rule) depends on the ratio of the period of the structure to the period of the pulse. The range of application of each formula is reestablished, taking under consideration the magnitude of the seismic event and the type of directivity of the record. A new definition of the pulse period from the predominant period of the displacement response spectrum is also proposed.

¹ Πολιτικός Μηχανικός, Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: taflan@central.ntua.gr

² Αναπλ. Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: ipsych@central.ntua.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με τη θεώρηση των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών, ο υπολογισμός του σεισμικού φορτίου σχεδιασμού μιας κατασκευής προκύπτει από τη διαίρεση του ελαστικού φάσματος με κατάλληλο συντελεστή συμπεριφοράς q . Ο συντελεστής συμπεριφοράς μπορεί να γραφτεί ως $q=q_0 \cdot q_d$ (ΕΑΚ2000), όπου q_0 είναι ο παράγοντας υπεραντοχής της κατασκευής και q_d ο παράγοντας πλαστιμότητας, που στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται και ως “reduction factor” R_y . Επειδή ένα βασικό κριτήριο σχεδιασμού είναι η μη υπέρβαση της διαθέσιμης πλαστιμότητας μ , η εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας, γνωστής και ως *μεθόδου των δυνάμεων*, απαιτεί τη γνώση της σχέσης που συνδέει τον παράγοντα R_y με την πλαστιμότητα μ . Το θέμα αυτό έχει απασχολήσει αρκετά την επιστημονική κοινότητα και στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες προσεγγιστικές σχέσεις R_y - μ - T , δηλαδή σχέσεις μεταξύ R_y και μ βάσει της ιδιοπεριόδου, T , του εξεταζόμενου συστήματος.

Οι σύγχρονοι κανονισμοί, για τον υπολογισμό των ανελαστικών φασμάτων σχεδιασμού, στηρίζονται στη θεώρηση των Newmark and Hall (1982), η οποία βασίστηκε στις σχέσεις R_y - μ - T που είχαν προταθεί στην εργασία των Veletsos and Newmark (1960) και δίνονται από τις εξισώσεις:

$$R_y = \begin{cases} 1 & \text{για } T_n < T_a \\ \sqrt{2\mu-1} & \text{για } T_b < T_n < T_c \\ \mu & \text{για } T_n > T_c \end{cases} \quad (1)$$

όπου T_n είναι η ιδιοπερίοδος της κατασκευής, η περίοδος T_c δίνεται από τη σχέση

$$T_c = \frac{\sqrt{2\mu-1}}{\mu} \cdot T_b \quad (2)$$

και οι χαρακτηριστικές περίοδοι T_a , T_b και T_c λαμβάνουν τις τιμές: $T_a=0.03$ sec, $T_b=0.125$ sec και $T_c=0.50$ sec. Οι περίοδοι T_b και T_c ορίζουν την περιοχή της σταθερής φασματικής επιτάχυνσης στο ελαστικό φάσμα απόκρισης. Στην περιοχή T_b - T_c , όπου $R_y = \sqrt{2\mu-1}$ σύμφωνα με τις σχέσεις (1), γίνεται η θεώρηση ίσης απορροφούμενης ενέργειας μεταξύ ελαστικού και το ανελαστικού συστήματος, με αποτέλεσμα η ανελαστική μετακίνηση να παρουσιάζεται αυξημένη σε σχέση με την ελαστική. Αντίθετα, στην περιοχή $T_n > T_c$, οι Newmark and Hall θεωρούν ότι ισχύει η συνήθης παραδοχή των ίσων μετακινήσεων που οδηγεί στη σχέση $R_y = \mu$. Σημειώνεται ότι σε πολλούς αντισεισμικούς κανονισμούς, η σχέση αυτή επεκτείνεται σε όλο το εύρος του φάσματος σχεδιασμού.

Σε νεότερες μελέτες [Krawinkler and Nassar (1992), Vidic et al (1994), Miranda and Bertero (1994)], μετά από στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων για πολλές σεισμικές καταγραφές, προτείνονται εναλλακτικές σχέσεις R_y - μ - T . Χαρακτηριστική είναι η σχέση που προτείνεται από τους Krawinkler and Nassar:

$$R_y = [c(\mu-1)+1]^{1/c} \quad (3)$$

όπου η παράμετρος c είναι συνάρτηση της ιδιοπεριόδου T_n της κατασκευής και δίνεται από τη σχέση:

$$c(T_n) = \frac{T_n^\alpha}{1 + T_n^\alpha} + \frac{b}{T_n} \quad (4)$$

Οι συντελεστές α και b λαμβάνουν τις τιμές $\alpha=1$ και $b=0.42$ για ελαστικά-πλήρως πλαστικά συστήματα.

Οι προαναφερθείσες σχέσεις βασίζονται στην τιμή της ελαστικής ιδιοπεριόδου του εξεταζόμενου συστήματος και είναι ανεξάρτητες από το συχνοτικό περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης. Οι Chopra and Chintanapakdee (2001) επισημαίνουν τα διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ σεισμικών καταγραφών σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή και καταγραφών κοντινού πεδίου και προτείνουν διαφορετικές χαρακτηριστικές περιόδους T_a , T_b και T_c για κάθε περίπτωση. Με βάση τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων για τις καταγραφές που χρησιμοποίησαν, δίνουν τις τιμές: $T_a=0.025$ sec, $T_b=0.22$ sec και $T_c=0.42$ sec για συνήθεις καταγραφές μακρινών σεισμών και $T_a=0.04$ sec, $T_b=0.35$ sec και $T_c=0.79$ sec για την περίπτωση καταγραφών κοντινού πεδίου. Οι εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου που χρησιμοποίησαν είχαν καταγραφεί σε διεύθυνση περίπου κάθετη στο ίχνος του ρήγματος, με έντονο το φαινόμενο της πρόσω κατευθυντικότητας (forward directivity). Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα αντίστοιχα φάσματα εμφανίζουν ευρεία περιοχή σταθερής φασματικής επιτάχυνσης και περιορισμένη περιοχή σταθερής φασματικής ταχύτητας. Η περίοδος T_c ορίζεται ως το όριο μεταξύ των δύο αυτών περιοχών και, σύμφωνα με την εργασία, συνήθως είναι μικρότερη του 1 sec.

Παρότι οι σχέσεις των Chopra and Chintanapakdee διαφοροποιούν τις χαρακτηριστικές περιόδους που καθορίζουν τα όρια ισχύος των σχέσεων $R_y-\mu$ για κοντινούς σεισμούς από τις αντίστοιχες τιμές για μακρινούς, δεν λαμβάνουν υπόψη τους τη σχέση μεταξύ της περιόδου της κατασκευής και της δεσπόζουσας περιόδου του παλμού που συνήθως περιέχουν οι σεισμοί κοντινού πεδίου. Γι' αυτό μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική υποτίμηση της απαίτησης πλαστιμότητας στην περιοχή των μεγάλων περιόδων. Μία πιθανή αιτία του σφάλματος αποτελεί η χρήση μέσων τιμών για το δείγμα των σεισμών που εξετάζονται, οι οποίες εξαλείφουν τις ιδιαιτερότητες κάθε καταγραφής. Δεδομένου ότι η περίοδος του παλμού κατευθυντικότητας των καταγραφών κοντινού πεδίου είναι άμεσα συναρτημένη με το μέγεθος και το μηχανισμό γένεσης του σεισμικού γεγονότος, φαίνεται ότι και το συμπέρασμα, στο οποίο κατέληξαν οι Garcia and Miranda (2006) ακολουθώντας ανάλογη στατιστική επεξεργασία, ότι δηλαδή οι απαιτήσεις πλαστιμότητας δεν επηρεάζονται από το μέγεθος του σεισμού, μπορεί να μην ισχύει σε ορισμένες περιπτώσεις.

Αντίθετα, οι Mavroeidis et al (2004), οι οποίοι μελετούν σεισμούς κοντινού πεδίου, εισαγάγουν στις σχέσεις $R_y-\mu-T$ και τη διάρκεια T_p του παλμού κατευθυντικότητας, η οποία ταυτίζεται με την περίοδο του παλμού. Οι μελετητές επεκτείνουν τη χρήση των σχέσεων των Veletsos and Newmark στην περίπτωση καταγραφών κοντινού πεδίου τροποποιώντας τα όρια ισχύος κάθε περιοχής, ώστε να ληφθεί υπόψη και η διάρκεια T_p , σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$R_y = \begin{cases} 1 & \text{για } \frac{T_n}{T_P} < \left(\frac{T_n}{T_P}\right)_a \\ \sqrt{2\mu-1} & \text{για } \left(\frac{T_n}{T_P}\right)_b < \frac{T_n}{T_P} < \left(\frac{T_n}{T_P}\right)_c \\ \mu & \text{για } \frac{T_n}{T_P} > \left(\frac{T_n}{T_P}\right)_c \end{cases} \quad (5)$$

όπου

$$\left(\frac{T_n}{T_P}\right)_{c'} = \frac{\sqrt{2\mu-1}}{\mu} \cdot \left(\frac{T_n}{T_P}\right)_c \quad (6)$$

Οι κανονικοποιημένες περιόδους $(T_n/T_P)_a$, $(T_n/T_P)_b$, $(T_n/T_P)_c$ λαμβάνουν τιμές ανάλογα με το μέγεθος του σεισμού, συγκεκριμένα: $(T_n/T_P)_b=0.35$ για μεσαίου μεγέθους σεισμικά γεγονότα, $(T_n/T_P)_b=0.20$ για μεσαίους προς μεγάλους σεισμούς και $(T_n/T_P)_c=0.75$.

Για την εφαρμογή των παραπάνω σχέσεων απαιτείται η γνώση της περιόδου του παλμού T_P . Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες εμπειρικές σχέσεις που εκτιμούν την T_P από το μέγεθος σεισμικής ροπής, M_w . Ενδεικτικά αναφέρεται η σχέση του Rodriguez-Marek (2000):

$$\ln T_P = -8.33 + 1.33 \cdot M_w \quad (7)$$

που έχει προκύψει από στατιστική επεξεργασία και παρουσιάζει τυπική απόκλιση 0.54.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε ένα πλήθος από διεθνώς γνωστές καταγραφές, προκειμένου να αξιολογηθούν οι σχέσεις R_y - μ - T σε σχέση με το συχνοτικό περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης. Για κάθε καταγραφή έγιναν ανελαστικές αναλύσεις μονοβάθμιων ταλαντωτών για δεδομένο παράγοντα πλαστιμότητας, R_y , και υπολογίστηκε η μεταβολή της απαιτούμενης πλαστιμότητας, μ , με την ιδιοπερίοδο της κατασκευής. Με αυτό τον τρόπο διερευνήθηκε η σχέση R_y και μ στις διάφορες περιοχές του φάσματος απόκρισης, σε συνδυασμό με χαρακτηριστικές περιόδους της εδαφικής κίνησης.

ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε δείγμα 54 καταγραφών που επιλέχθηκαν από τις βάσεις δεδομένων COSMOS και PEER. Τα χαρακτηριστικά αυτών των καταγραφών (μέγεθος, σταθμός καταγραφής, προσανατολισμός του οργάνου, χαρακτηριστικά του εδάφους, απόσταση από το ρήγμα) δίνονται στον Πίνακα 1. Για την επιλογή τους λήφθηκαν υπόψη τα ακόλουθα κριτήρια:

- Να αντιστοιχούν σε σεισμικά γεγονότα διαφορετικών περιοχών, ώστε να αποφευχθεί η συσχέτισή τους με συγκεκριμένες σεισμικές πηγές.
- Να αντιστοιχούν σε σεισμικά γεγονότα μεσαίου και μεγάλου μεγέθους.
- Να αντιστοιχούν σε διαφορετικές εδαφικές συνθήκες και αποστάσεις από την πηγή.

Πίνακας 1. Καταγραφές που λήφθηκαν υπόψη στη μελέτη.

a/a	Σεισμικό Γεγονός	Ημερομηνία	Μηχανισμός [§]	M _w	Σταθμός-Σύμβολο	Οριζόντιες Συνιστώσες	Έδαφος [‡]	Απόσταση [#]
1	Imperial Valley, CA, USA	19-05-1940	Strike-slip ^b	6.2-6.4	El Centro-ELC	180-270	SL	8.0 ^{ft}
2	Parkfield, CA, USA	27-06-1966	Strike-slip	6.4	Cholame Array 5-C05	355-085	SL	5.2 ^{ft}
3	San Fernando, CA, USA	09-02-1971	Reverse	6.5-6.7	Pacoima Dam-PCD	164-254	HR	3.0 ^{fr}
4	Gazli, USSR	17-05-1976	Reverse	6.7-6.9	Karakyr Point-KAR	000-090	SR	3.0 ^{hc}
5	Tabas, Iran	16-09-1978	Reverse	7.1	Tabas-TAB	344-074	SL	1.2 ^{ft}
6	Coyote Lake, CA, USA	08-06-1979	Strike-slip	5.6	Gilroy Array 1-GA1	230-320	HR	9.0 ^{ft}
7	Imperial Valley, CA, USA	15-10-1979	Strike-slip	6.4-6.6	El Centro Array 2-E02	140-230	SL	10.4 ^{fr}
8	»	»	»	»	El Centro Array 4-E04	140-230	SL	6.0 ^{ft}
9	Morgan Hill, CA, USA	24-04-1984	Strike-slip ^b	6.2	Halls Valley-HAL	150-240	SL	2.0 ^{ft}
10	Nahanni, Canada	23-12-1985	Reverse	6.7	Iverson -SITE1	010-280	HR	9.4 ^{fp}
11	San Salvador	10-10-1986	Strike-slip	5.6	Geol. Invest. Center, Channel 1-CIG	180-270	SR	4.0 ^{ec}
12	Whittier Narrows, CA, USA	10-10-1987	Reverse	6.0	Alhambra, Fremont Sc.-ALF	180-270	SL	13.1 ^{fp}
13	Superstition Hills, CA, USA	24-11-1987	Strike-slip	6.4-6.6	El Centro-ELC	000-090	SL	13.6 ^{ft}
14	Loma Prieta, USA	17-10-1989	Obverse	6.8-7.0	Gilroy Array 1-G01	000-090	SR	10.1 ^{fp}
15	Erzincan, Turkey	13-03-1992	Strike-slip	6.6	Erzincan-ERZ	000-090	SL	2.0 ^{ft}
16	Landers, CA, USA	28-06-1992	Strike-slip ^b	7.1-7.3	Joshua Tree-JSH	000-090	SL	11.6 ^{ft}
17	Northridge, CA, USA	17-01-1994	Reverse	6.7-6.8	Jensen Filtration Plant-JFA	292-022	SL	5.2 ^{fp}
18	»	»	»	»	Arleta Fire Station-SFY	000-090	SL	8.0 ^{fp}
19	»	»	»	»	Sylmar Converter Station-SCH	281-011	SL	5.0 ^{fp}
20	»	»	»	»	Canoga Park Church-CPC	196-106	SL	13.7 ^{fp}
21	»	»	»	»	Sun Valley Grace Church-SVG	000-090	SL	9.3 ^{fp}
22	Hanshin (Kobe), Japan	17-01-1995	Strike-slip	6.8-6.9	Takatori-TAK	000-090	SL	1.1 ^{ft}
23	»	»	»	»	Japanese Meteorological Agency-KJM	000-090	SL	0.6 ^{fr}
24	Chi-Chi, Taiwan	20-09-1999	Reverse	7.5-7.8	CHY024	000-090	SL	7.7 ^{fp}
25	»	»	»	»	CHY028	000-090	SL	2.3 ^{fp}
26	Duzce, Turkey	12-11-1999	Obverse	7.1	Duzce-DZC	180-270	SL	8.3 ^{ft}
27	Lefkada, Greece	19-08-2003	Strike-slip	6.2-6.4	City of Lefkas-LEF1	Long-Trans	SL	10.0 ^{ec}

[§] ο άνω δείκτης “b” υποδηλώνει επίδραση όπισθεν κατευθυντικότητας

[‡] τα σύμβολα των εδαφικών τύπων υποδηλώνουν: “SL” έδαφος και αλλουβιακές αποθέσεις, “SR” ιζηματογενής και κροκαλοπαγής βράχος, “HR” σκληρό βραχώδες έδαφος

[#] οι άνω δείκτες στην στήλη της απόστασης υποδηλώνουν: “ft” απόσταση από το ίχνος του ρήγματος, “fr” απόσταση από τη διάρρηξη, “fp” απόσταση από την επιφάνεια του ρήγματος, “ec” επικεντρική απόσταση, “hc” υποκεντρική απόσταση

- Να περιλαμβάνονται σεισμοί με διαφορετική σημαντική διάρκεια.

Το δείγμα των σεισμικών καταγραφών που επιλέχθηκε περιέχει καταγραφές κοντινού πεδίου σε αποστάσεις από τη σεισμική πηγή έως 15 km. Πολλές από αυτές σχετίζονται με φαινόμενα πρόσω (forward) και όπισθεν (backward) κατευθυντικότητας. Οι συνιστώσες των καταγραφών έχουν διευθύνσεις που σχηματίζουν διάφορες γωνίες με το ίχνος του ρήγματος. Σημειώνεται ότι η διεύθυνση της καταγραφής σε σχέση με το ρήγμα επηρεάζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά του παλμού κατευθυντικότητας. Σύμφωνα με τους νόμους διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, ο παλμός εξασθενεί όσο η γωνία διεύθυνσης της εδαφικής κίνησης αποκλίνει από την κάθετη στο ίχνος του ρήγματος. Στο δείγμα, συμπεριλήφθηκαν καταγραφές που εμφανίζουν τόσο ισχυρούς όσο και ασθενείς παλμούς. Επίσης, συμπεριλήφθηκαν και καταγραφές που χαρακτηρίζονται από φαινόμενα όπισθεν κατευθυντικότητας.

Πολλές από τις καταγραφές που επιλέχθηκαν προέρχονται από γνωστά σεισμικά γεγονότα, όπως ο σεισμός του Northridge (USA, 1994), του Kobe (Japan, 1995) και του Chi-Chi (Taiwan, 1999) που έδωσαν πολλές καταγραφές με πρόσω κατευθυντικότητα. Ως καταγραφές με φαινόμενα όπισθεν κατευθυντικότητας επιλέχθηκαν οι καταγραφές του σεισμού του Imperial Valley (USA, 1940), του σεισμού Morgan Hill (USA, 1984), του σεισμού Landers (USA, 1992) και του σεισμού της Λευκάδας (2003), που αποτελεί τυπική περίπτωση σεισμού κοντινού πεδίου με όπισθεν κατευθυντικότητα μεγάλης διάρκειας.

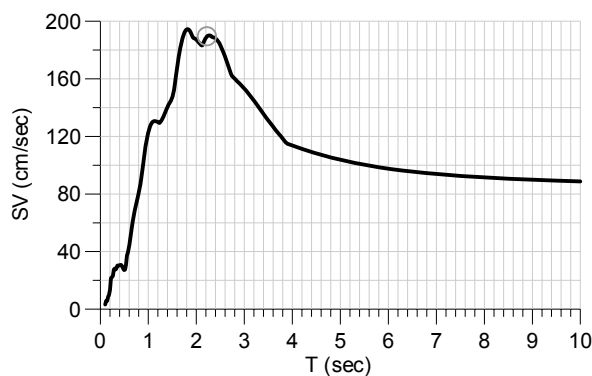
Για όλες τις καταγραφές του δείγματος υπολογίστηκαν τα φάσματα απόκρισης ταχυτήτων και μετακινήσεων για απόσβεση 5%, από τα οποία καθορίστηκαν χαρακτηριστικές περίοδοι που αντιστοιχούσαν σε κορυφές αυτών των φασμάτων. Επίσης, έγιναν ανελαστικές αναλύσεις για δεδομένους παράγοντες πλαστιμότητας, R_y , και υπολογίστηκε η μεταβολή της απαιτούμενης πλαστιμότητας με την ελαστική περίοδο της κατασκευής.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΣΥΧΝΟΤΙΚΟ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

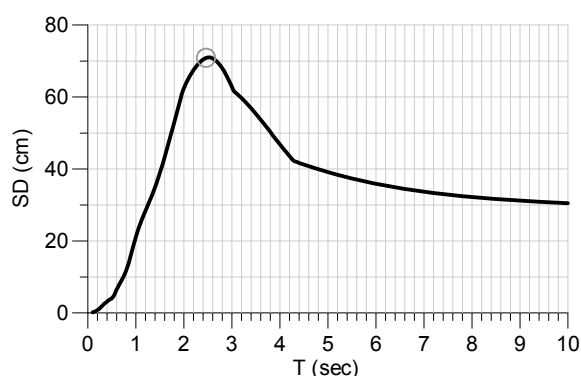
Σεισμοί κοντινού πεδίου με έντονη πρόσω κατευθυντικότητα

Χαρακτηριστική περίπτωση εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου με έντονη πρόσω κατευθυντικότητα αποτελεί η συνιστώσα ERZ-000 του σεισμού του Erzincan (Τουρκία, 1992, $M_w=6.6$), για την οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 1 τα φάσματα ταχυτήτων και μετακινήσεων για $\zeta=5\%$ και η μεταβολή της απαιτούμενης πλαστιμότητας $\mu=u_m/u_{el}$ για $R_y=3$. Σύμφωνα με τους Mavroeidis et al (2004), οι εδαφικές κινήσεις αυτού του τύπου εμφανίζουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

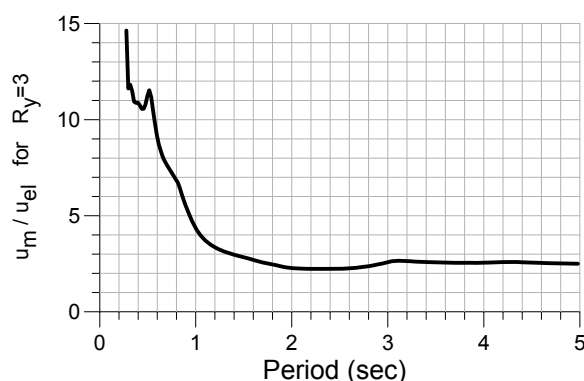
- Έχουν διεύθυνση σχεδόν κάθετη προς το ίχνος του ρήγματος, όπου το φαινόμενο της κατευθυντικότητας είναι ισχυρότερο.
- Τα φάσματα απόκρισης εμφανίζουν ευρεία περιοχή σταθερής επιτάχυνσης και περιορισμένη περιοχή σταθερής ταχύτητας.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 1. Συνιστώσα ERZ-000 σεισμού Erzincan (Τουρκία, 1992): (α) φάσμα ταχυτήτων για $\zeta=5\%$, (β) φάσμα μετακινήσεων για $\zeta=5\%$, (γ) απαιτούμενη πλαστικότητα για $R_y=3$.

- Τα φάσματα ταχυτήτων και μετακινήσεων έχουν παραπλήσια δεσπόζουσα περίοδο (η δεσπόζουσα περίοδος ορίζεται από την περίοδο που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του αντίστοιχου φάσματος). Αυτός είναι και ο λόγος, για τον οποίο η περιοχή σταθερών φασματικών ταχυτήτων, η οποία ορίζεται μεταξύ αυτών των περιόδων, εμφανίζεται με περιορισμένο εύρος. Για την περίπτωση της καταγραφής ERZ-000, η δεσπόζουσα περίοδος του φάσματος ταχυτήτων είναι 2.3 sec και του φάσματος μετακινήσεων 2.5 sec [βλ. σχήματα 1(α) και (β)].
- Η δεσπόζουσα περίοδος του φάσματος ταχυτήτων έχει παραπλήσια τιμή με την περίοδο του παλμού κατευθυντικότητας, T_P , και συνήθως χρησιμοποιείται αντ' αυτής (Alavi and Krawinkler, 2000). Για το παράδειγμα του Σχ. 1, η σχέση (7) δίνει $T_P=1.57$

sec και εάν ληφθεί υπόψη και η τυπική απόκλιση 0.54 προκύπτει τιμή $T_p=2.3$ sec, παραπλήσια της δεσπόζουσας περιόδου του φάσματος ταχυτήτων.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 1(γ), για κατασκευές μεγάλης περιόδου ισχύει η σχέση $R_y=\mu$, αλλά για μικρότερες περιόδους η απαιτούμενη πλαστιμότητα αυξάνεται εκθετικά με τη μείωση της περιόδου της κατασκευής. Τα αποτελέσματα και για άλλες σεισμικές διεγέρσεις αυτού του τύπου δείχνουν ότι η απαιτούμενη πλαστιμότητα είναι εμφανώς συσχετισμένη με το λόγο της περιόδου της κατασκευής προς την περίοδο του παλμού κατευθυντικότητας.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι Mavroudis et al (2004) προτείνουν την εφαρμογή των εξισώσεων (5), όπου η κατάλληλη σχέση $R_y-\mu$ που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το λόγο T_n/T_p . Έτσι, η θεώρηση των ίσων μετακινήσεων ($R_y=\mu$) ισχύει για $T_n/T_p > (T_n/T_p)_c$, όπου $(T_n/T_p)_c=0.75$. Για το παράδειγμα της καταγραφής ERZ-000, θεωρώντας $T_p=2.3$ sec (ίση με τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος ταχυτήτων) προκύπτει ότι η σχέση $R_y=\mu$ ισχύει για περιόδους $T_n > 1.7$ sec, που επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα του Σχ. 1(γ).

Αντίθετα, για κατασκευές με μικρότερη περίοδο και συγκεκριμένα στο διάστημα $(T_n/T_p)_b < T_n/T_p < (T_n/T_p)_c$, οι σχέσεις των Mavroudis et al δεν επαληθεύονται εξίσου καλά. Σύμφωνα με τις σχέσεις (5), σε αυτό το διάστημα προτείνεται η σχέση: $R_y = \sqrt{2\mu - 1}$, η οποία αν επιλυθεί ως προς μ δίνει:

$$\mu = (1 + R_y^2) / 2 \quad (8)$$

Αντίστοιχα, η σχέση (6) μπορεί να γραφτεί ως

$$\left(\frac{T_n}{T_p} \right)_{c'} = \frac{2R_y}{1 + R_y^2} \cdot \left(\frac{T_n}{T_p} \right)_c \quad (9)$$

Για την περίπτωση του παραδείγματος του σεισμού ERZ-000 (Σχ. 1), ισχύει: $R_y=3.0$, $T_p=2.3$ sec, $(T_n/T_p)_b=0.20$ (μεσαίο προς μεγάλο σεισμικό γεγονός) και $(T_n/T_p)_c=0.75$. Επομένως, η εξίσωση (8) δίνει προβλεπόμενη πλαστιμότητα $\mu=5.0$ στο διάστημα περιόδων 0.5 sec $< T_n < 1.0$ sec. Όπως φαίνεται, όμως, από το Σχ. 1(γ), αυτή η τιμή επαληθεύεται μόνο για περιόδους κοντά στο 1.0 sec, ενώ για μικρότερες περιόδους η απαιτούμενη πλαστιμότητα αυξάνεται εκθετικά και παίρνει τιμές σημαντικά μεγαλύτερες από $\mu=5.0$.

Η συμπεριφορά αυτή δεν παρατηρήθηκε σε όλες τις καταγραφές που παρουσιάζουν έντονη πρόσω κατευθυντικότητα. Γενικά, από τις αναλύσεις αυτών των καταγραφών προέκυψε ότι για περιόδους στην περιοχή $(T_n/T_p)_b < T_n/T_p < (T_n/T_p)_c$, η απαιτούμενη πλαστιμότητα παρουσιάζει σημαντική διακύμανση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η σχέση (8) έδωσε τιμή πλαστιμότητας μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίστηκε, αλλά υπήρχαν και αρκετές περιπτώσεις που η αναλυτική τιμή ήταν μικρότερη από την πραγματική.

Σεισμοί κοντινού πεδίου με ασθενή πρόσω κατευθυντικότητα

Σε κοντινούς σεισμούς, το φαινόμενο της κατευθυντικότητας παρατηρείται όχι μόνο στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα, αλλά και σε συνιστώσες της κίνησης με μικρότερη γωνία

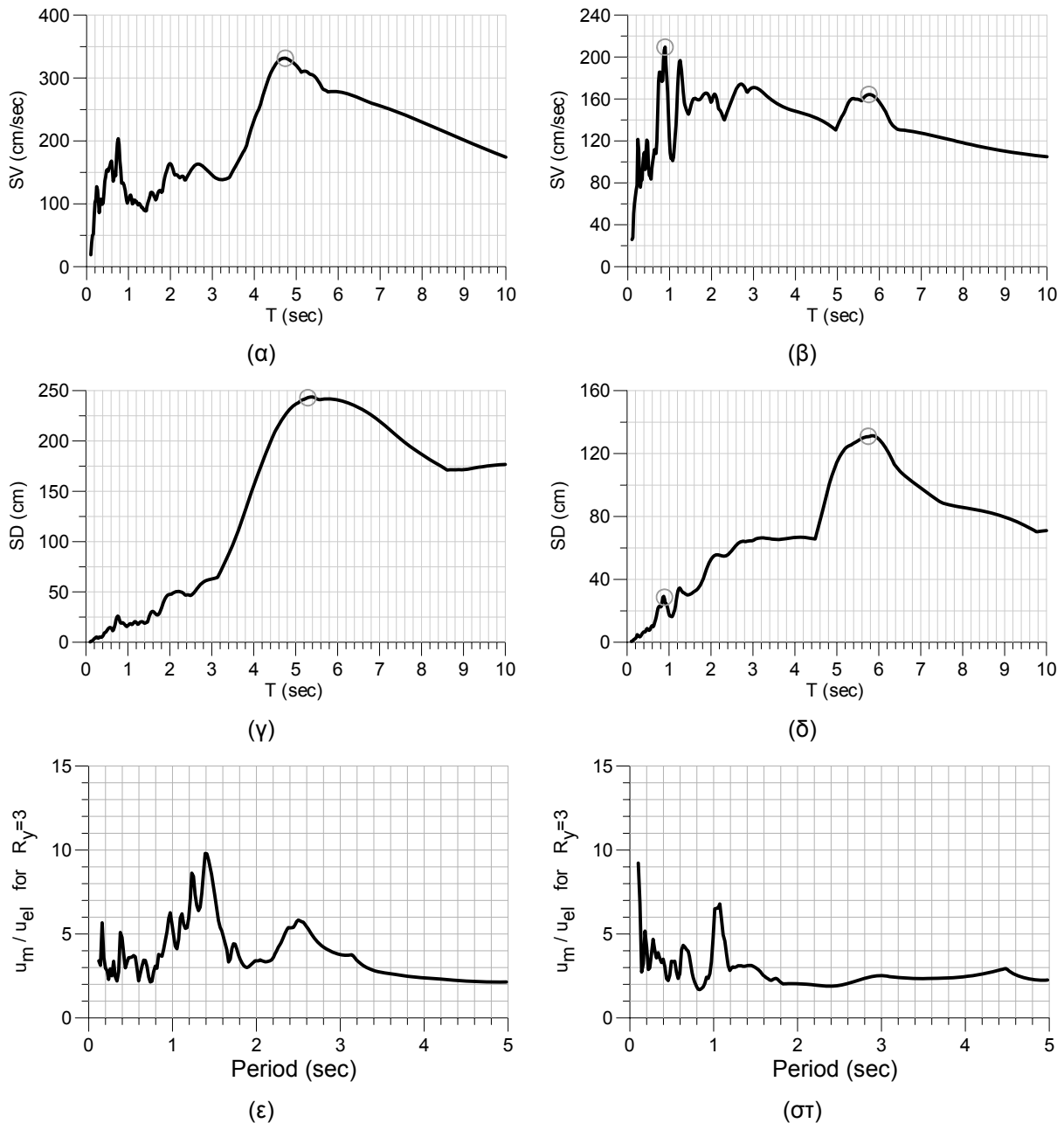
διεύθυνσης σε σχέση με το ίχνος του ρήγματος. Σύμφωνα με τον Baker (2007), στις περιπτώσεις αυτές διακρίνονται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Ο παλμός κατευθυντικότητας είναι λιγότερο ισχυρός σε σχέση με την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα.
- Τα φάσματα ταχυτήτων και μετακινήσεων εμφανίζουν αποκλίνουσες δεσπόζουσες περιόδους.
- Η δεσπόζουσα περίοδος του φάσματος ταχυτήτων είναι συσχετισμένη με τις υψίσυχνες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης και εμφανίζεται αρκετά μικρότερη από την περίοδο του παλμού κατευθυντικότητας, η οποία σχετίζεται με μακροπερίοδες συνιστώσες της δόνησης. Σε καταγραφές αυτής της μορφής, η περίοδος του παλμού κατευθυντικότητας ταυτίζεται με κάποια κορυφή του φάσματος ταχυτήτων με περίοδο μεγαλύτερη από την δεσπόζουσα.
- Ως συνέπεια της παραπάνω παρατήρησης, η χρήση της δεσπόζουσας περιόδου του φάσματος ταχυτήτων για την εκτίμηση της περιόδου του παλμού κατευθυντικότητας οδηγεί, σύμφωνα με τον Baker, σε μειωμένη εκτίμηση της T_P .

Η διαφορά μεταξύ της έντονης και της ασθενούς πρόσω κατευθυντικότητας φαίνεται στο Σχ. 2, όπου παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες και τα φάσματα ταχυτήτων και μετακινήσεων για τις δύο συνιστώσες του σεισμού του Tabas (Iran, 1978, $M_w=7.1$). Η συνιστώσα TAB-074, με διεύθυνση σχεδόν κάθετη στο ίχνος του ρήγματος, εμφανίζει όλα τα χαρακτηριστικά της έντονης κατευθυντικότητας. Έτσι, η δεσπόζουσα περίοδος στα φάσματα ταχυτήτων και μετακινήσεων είναι περίπου ίδια [σχήματα 2(α) και (γ)], συγκεκριμένα 4.7 και 5.3 sec αντίστοιχα. Σύμφωνα με τους Alavi and Krawinkler (2000), η διάρκεια, T_P , του παλμού πρόσω κατευθυντικότητας θεωρείται παραπλήσια της δεσπόζουσας περιόδου του φάσματος ταχυτήτων και μπορεί να ληφθεί περίπου 5.0 sec. Η τιμή αυτή συμβαδίζει με τη σχέση (7), από την οποία, αν προστεθεί και η τυπική απόκλιση, προκύπτει $T_P=5.2$ sec. Αντίθετα, η συνιστώσα TAB-344 παρουσιάζει ασθενή κατευθυντικότητα με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν. Συγκεκριμένα, το φάσμα ταχυτήτων παρουσιάζει μικρή δεσπόζουσα περίοδο, μικρότερη του 1.0 sec [Σχ. 2(β)] και σημαντικά μικρότερη της περιόδου του παλμού, T_P .

Πρέπει να σημειωθεί ότι και στις δύο συνιστώσες του σεισμού, τα φάσματα μετακινήσεων εμφανίζουν δεσπόζουσα περίοδο λίγο μεγαλύτερη από 5.0 sec [σχήματα 2(γ) και (δ)], δηλαδή κοντά στην τιμή της T_P . Επίσης, για τη συνιστώσα TAB-344 της ασθενούς κατευθυντικότητας, το φάσμα ταχυτήτων εμφανίζει τοπικό μέγιστο για $T=5.8$ sec [Σχ. 2(β)], δηλαδή για τιμή ίση με τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος μετακινήσεων [Σχ. 2(δ)].

Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε και στις υπόλοιπες καταγραφές ασθενούς πρόσω κατευθυντικότητας που εξετάστηκαν. Προκύπτει, επομένως, ότι σε αυτού του τύπου τις εδαφικές κινήσεις, η διάρκεια, T_P , του παλμού σχετίζεται με τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος μετακινήσεων. Η τιμή αυτή εμφανίζεται και σε κάποιο τοπικό μέγιστο του φάσματος ταχυτήτων, αλλά δεν ταυτίζεται με τη δεσπόζουσα περίοδο αυτού του φάσματος.

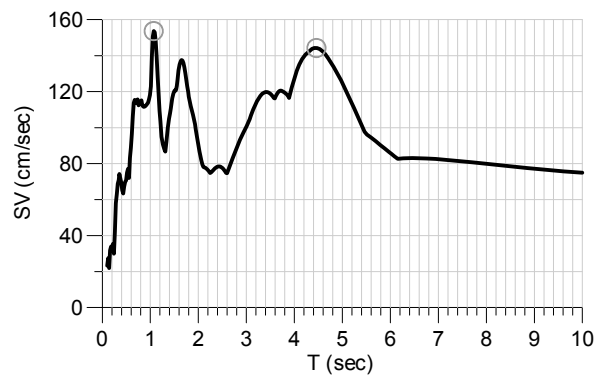


Σχήμα 2. Συνιστώσες TAB-074 (αριστερή στήλη) και TAB-344 (δεξιά στήλη) σεισμού Tabas (Iran, 1978): (α)&(β) φάσματα ταχυτήτων για $\zeta=5\%$, (γ)&(δ) φάσματα μετακινήσεων για $\zeta=5\%$, (ε)&(σ) απαιτούμενη πλαστιμότητα για $R_y=3$.

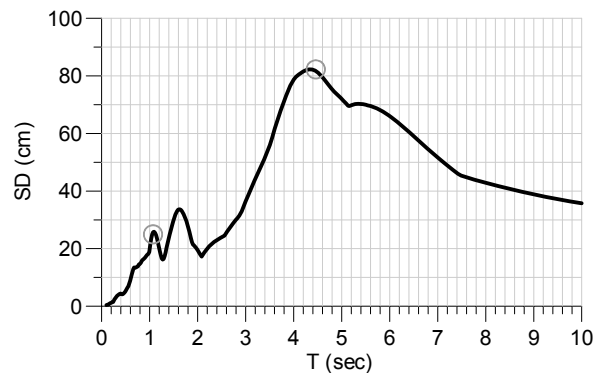
Πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάλυση των Manroeidis et al (2004) έγινε για καταγραφές με έντονη πρόσω κατευθυντικότητα. Από τις αναλύσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία, φαίνεται ότι οι σχέσεις (5) μπορούν να επεκταθούν και για καταγραφές με ασθενή πρόσω κατευθυντικότητα, με τροποποίηση όμως των ορίων ισχύος της μεσαίας περιοχής, όπως αναφέρεται παρακάτω. Για την εφαρμογή των σχέσεων, η T_p μπορεί να υπολογιστεί από τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος μετακινήσεων. Με αυτή τη θεώρηση και λαμβάνοντας υπόψη ότι $(T_n/T_p)_c=0.75$, οι αναλύσεις έδειξαν ότι:

- Επαληθεύτηκε ότι η σχέση $R_y=\mu$ μπορεί να εφαρμοστεί για περιόδους $T_n>0.75 \cdot T_p$, όπως και για παλμούς με έντονη κατευθυντικότητα.

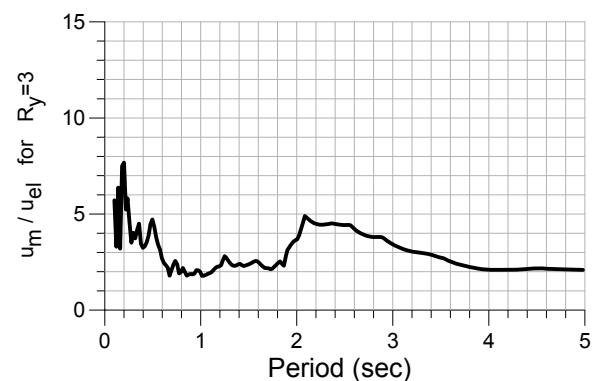
- Για μικρότερες περιόδους, υπάρχουν περιοχές στις οποίες εμφανίζεται αυξημένη απαίτηση πλαστιμότητας σε σύγκριση με την τιμή του R_y , αλλά και περιοχές με μειωμένες απαιτήσεις πλαστιμότητας, συγκεκριμένα για περιόδους κοντά στη δεσπύζουσα περίοδο του φάσματος ταχυτήτων. Γενικά, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η θεώρηση της ίσης ενέργειας μεταξύ του ελαστικού και του ανελαστικού συστήματος, που οδηγεί στη σχέση $R_y = \sqrt{2\mu - 1}$, μπορεί να εφαρμοστεί, συντηρητικά, στην περιοχή $(T_n/T_P)_b < T_n/T_P < (T_n/T_P)_c$, όπου το δεξιό όριο ισχύος μετατοπίστηκε στην τιμή $(T_n/T_P)_c$ αντί της $(T_n/T_P)_c'$, που προτείνουν οι Manroeidis et al (2004) και ισχύει για καταγραφές με έντονη κατευθυντικότητα.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 3. Συνιστώσα KAR-000 σεισμού Gazli (USSR, 1976): (α) φάσμα ταχυτήτων για $\zeta=5\%$, (β) φάσμα μετακινήσεων για $\zeta=5\%$, (γ) απαιτούμενη πλαστιμότητα για $R_y=3$.

Η παραπάνω συμπεριφορά φαίνεται στο Σχ. 3, όπου παρουσιάζονται τα φάσματα ταχυτήτων και μετακινήσεων και η απαιτούμενη πλαστιμότητα για $R_y=3.0$ για τη συνιστώσα KAR-000 του σεισμού του Gazli (USSR, 1976, $M_w=6.8$). Σε αυτή την περίπτωση, η δεσπόζουσα περίοδος του φάσματος ταχυτήτων προκύπτει 1.0 sec και του φάσματος μετακινήσεων 4.4 sec [σχήματα 3(α) και (β)]. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τη σχέση (7), θα προέκυπτε $T_p=3.5$ sec προσθέτοντας και την τυπική απόκλιση. Για $R_y=3.0$, οι χαρακτηριστικές περίοδοι για τις σχέσεις των Mavroeidis et al προκύπτουν (μεσαίο προς μεγάλο σεισμικό γεγονός): $(T_n/T_p)_b=0.2$, $(T_n/T_p)_c=0.75$ και $(T_n/T_p)_c=0.45$. Επομένως, οι σχέσεις (5) για $T_p=4.4$ sec θα έδιναν $\mu=3.0$ για $T_n>3.3$ sec και $\mu=5.0$ για $0.9\text{sec}<T_n<2.0\text{sec}$. Όπως φαίνεται από το σχήμα 3(γ), η πρόβλεψη είναι αρκετά καλή για $T_n>3.3$ sec (περιοχή ισχύος της σχέσης $R_y=\mu$), αλλά η περιοχή που ισχύει η σχέση $R_y=\sqrt{2\mu-1}$ εμφανίζεται μετατοπισμένη προς τα δεξιά, στην περιοχή 2.0 έως 3.3 sec. Με την τροποποίηση του δεξιά ορίου ισχύος αυτής της σχέσης, που προτείνεται παραπάνω, δηλαδή στην τιμή $T_n=0.75T_p=3.3$ sec, καλύπτονται οι απαιτήσεις πλαστιμότητας.

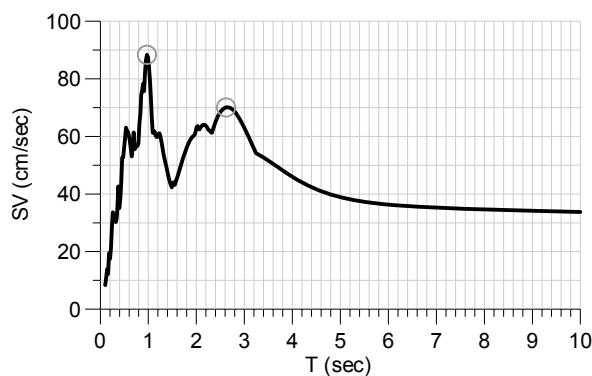
Σεισμοί κοντινού πεδίου με όπισθεν κατευθυντικότητα

Παρόμοια συμπεριφορά με αυτή της ασθενούς πρόσω κατευθυντικότητας παρατηρήθηκε και στις καταγραφές που σχετίζονται με το φαινόμενο της όπισθεν (backward) κατευθυντικότητας. Οι καταγραφές αυτές διακρίνονται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

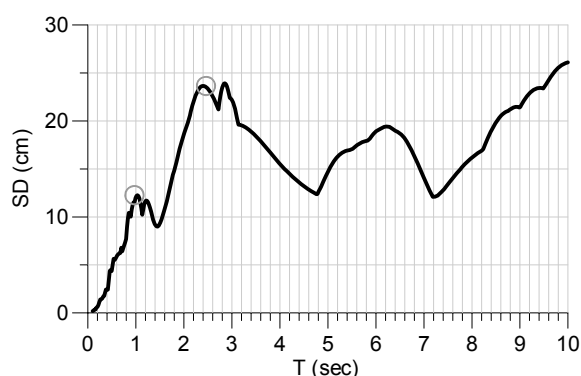
- Οι παλμοί της εδαφικής ταχύτητας που προκαλούνται από τις επιμέρους θραύσεις της επιφάνειας του ρήγματος δεν επιπροστίθενται, όπως στην περίπτωση της πρόσω κατευθυντικότητας, αλλά παρατίθενται χρονικά.
- Οι τιμές της εδαφικής ταχύτητας είναι σαφώς μικρότερες από,τι την περίπτωση της πρόσω κατευθυντικότητας, αλλά η διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης είναι σημαντικά μεγαλύτερη.
- Τα φάσματα ταχυτήτων και μετακινήσεων παρουσιάζουν μεγάλη φασματική μεγέθυνση, που οφείλεται στη μεγάλη διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης.
- Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα φάσματα ταχυτήτων και μετακινήσεων εμφανίζουν αποκλίνουσες δεσπόζουσες περιόδους, ανάλογα με την περίπτωση της ασθενούς πρόσω κατευθυντικότητας.

Από τις αναλύσεις καταγραφών όπισθεν κατευθυντικότητας προκύπτει, όπως και στην περίπτωση της ασθενούς πρόσω κατευθυντικότητας, συσχέτιση μεταξύ της δεσπόζουσας περιόδου T_p της εδαφικής ταχύτητας και της δεσπόζουσας περιόδου του φάσματος μετακινήσεων.

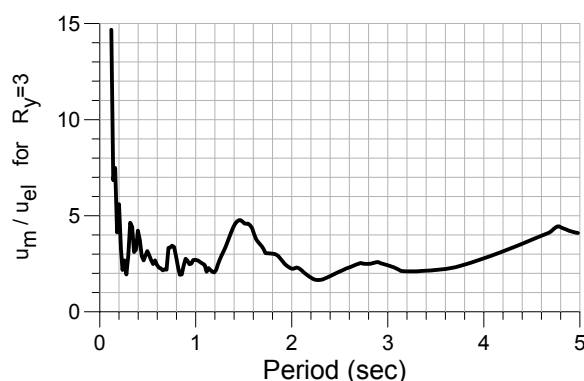
Ενδεικτική περίπτωση αποτελεί η συνιστώσα ELC-180 της καταγραφής του σεισμού Imperial Valley (USA, 1940, $M_w=6.2-6.4$) (Σχ. 4). Η καταγραφή χαρακτηρίζεται από μεγάλο αριθμό κύκλων εδαφικής κίνησης με σχετικά μικρά εύρη και αναφέρεται από τους Mavroeidis and Parageorgiou (2003) ως περίπτωση όπισθεν κατευθυντικότητας. Η δεσπόζουσα περίοδος του φάσματος ταχυτήτων προκύπτει 1.0 sec και του φάσματος μετακινήσεων 2.4 sec [σχήματα 4(α) και (β)]. Η αναλυτική σχέση (7) δίνει $T_p=2.05$ sec, με την πρόσθεση της τυπικής απόκλισης. Μπορούμε, επομένως, να θεωρήσουμε ότι η δεσπόζουσα περίοδος του παλμού είναι $T_p=2.4$ sec, όπως προκύπτει από το φάσμα μετακινήσεων.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 4. Συνιστώσα ELC-180 σεισμού Imperial Valley (USA, 1940): (α) φάσμα ταχυτήτων για $\zeta=5\%$, (β) φάσμα μετακινήσεων για $\zeta=5\%$, (γ) απαιτούμενη πλαστιμότητα για $R_y=3$.

Η πρόταση που έγινε παραπάνω για τους σεισμούς με ασθενή πρόσω κατευθυντικότητα, δηλαδή για την επέκταση του δεξιού ορίου εφαρμογής της θεωρήσης ίσης ενέργειας ($R_y = \sqrt{2\mu - 1}$) έως την τιμή $T_n/T_P < (T_n/T_P)_c$, φαίνεται ότι ισχύει και στην περίπτωση της όπισθεν κατευθυντικότητας. Για το παράδειγμα του σεισμού ELC-180, οι χαρακτηριστικές περιόδους στις σχέσεις των Manroeidis et al προκύπτουν: $(T_n/T_P)_b=0.2$, $(T_n/T_P)_c=0.75$ και $(T_n/T_P)_c=0.45$. Επομένως, οι σχέσεις (5) για $T_P=2.4$ sec θα έδιναν: $\mu=3.0$ για $T_n > 1.8$ sec και $\mu=5.0$ για $0.5 \text{ sec} < T_n < 1.1$ sec (χωρίς την επέκταση του δεξιού ορίου). Όπως φαίνεται στο σχήμα 4(γ), η πρόβλεψη είναι αρκετά καλή για $T_n > 1.8$ sec, αλλά η θεώρηση των ίσων ενεργειών (που οδηγεί στην τιμή $\mu=5.0$) φαίνεται να ισχύει για περιόδους μεγαλύτερες από 1.1 sec. Με την προαναφερθείσα επέκταση του δεξιού ορίου έως την τιμή $T_n=0.75T_P=1.8$ sec, καλύπτονται, υπέρ της ασφαλείας, οι απαιτήσεις πλαστιμότητας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η περιοχή ισχύος των κλασικών σχέσεων μεταξύ του παράγοντα πλαστιμότητας, R_y και της πλαστιμότητας, μ , λαμβάνοντας υπόψη και τα συχνοτικά χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης. Για το σκοπό αυτό, υπολογίστηκαν οι απαιτήσεις πλαστιμότητας μονοβάθμιων ταλαντωτών για ένα πλήθος σεισμικών διεγέρσεων, πολλές από τις οποίες είχαν έντονα χαρακτηριστικά κοντινού πεδίου (πρόσω και όπισθεν κατευθυντικότητα).

Οι αναλύσεις έδειξαν ότι, σε πολλές περιπτώσεις, εμφανίστηκαν απαιτήσεις πλαστιμότητας σημαντικά μεγαλύτερες από τον παράγοντα πλαστιμότητας, R_y , για συστήματα με ιδιοπεριόδους μεγαλύτερες του 1.0 sec, γεγονός που αμφισβητεί την ευρέως διαδεδομένη θεώρηση ότι απαιτήσεις αυξημένης πλαστιμότητας προκύπτουν μόνο σε περιοχές μικρών περιόδων, ενώ σε μεγάλες περιόδους ισχύει $R_y = \mu$ σύμφωνα με την παραδοχή των ίσων μετακινήσεων. Οι απαιτούμενες πλαστιμότητες που προέκυψαν για τους σεισμούς που εξετάστηκαν ήταν συναρτημένες με τη σχέση της περιόδου του ταλαντωτή προς τη δεσπόζουσα περίοδο του παλμού κατευθυντικότητας και κατ' επέκταση με το μέγεθος και το μηχανισμό γένεσης του σεισμού.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Για σεισμούς κοντινού πεδίου με έντονη πρόσω κατευθυντικότητα μπορούν να εφαρμοστούν οι σχέσεις που δίνονται από τους Manroeidis et al (2004) [σχέσεις (5)].
- Για σεισμούς κοντινού πεδίου με ασθενή πρόσω κατευθυντικότητα και για σεισμούς με όπισθεν κατευθυντικότητα μπορούν να εφαρμοστούν οι ίδιες σχέσεις, αλλά με επέκταση της περιοχής ισχύος της ενδιάμεσης περιοχής, στην οποία ισχύει $R_y = \sqrt{2\mu - 1}$, έως την τιμή $T_n/T_P = (T_n/T_P)_c = 0.75$.
- Σε όλες τις περιπτώσεις, η περίοδος, T_P , του παλμού κατευθυντικότητας μπορεί να υπολογιστεί από τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος μετακινήσεων. Για σεισμούς με έντονη πρόσω κατευθυντικότητα, η περίοδος αυτή είναι παραπλήσια της δεσπόζουσας περιόδου του φάσματος ταχυτήτων, η οποία χρησιμοποιείται συνήθως για τον προσδιορισμό της T_P . Αντίθετα, σε περιπτώσεις σεισμών με ασθενή πρόσω ή όπισθεν κατευθυντικότητα, η δεσπόζουσα περίοδος του φάσματος ταχυτήτων δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της περιόδου του παλμού, αφού σχετίζεται με το υψίσυχο τμήμα της καταγραφής, ενώ ο παλμός κατευθυντικότητας χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερες περιόδους. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η δεσπόζουσα περίοδος του φάσματος μετακινήσεων δίνει περισσότερο αξιόπιστες τιμές, κοντά στις προβλέψεις εμπειρικών σχέσεων από τη βιβλιογραφία που σχετίζουν την T_P με το μέγεθος του σεισμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alavi B, Krawinkler H, (2000), "Consideration of near-fault ground motions effects in seismic design", *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Upper Hutt, New Zealand, Paper No. 2665.

- Baker J.W., (2007), "Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, pp. 1486-1501.
- Chopra A.K., Chintanapakdee C., (2001), "Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 30, pp. 1769-1789.
- COSMOS Virtual Data Center, <http://db.cosmos-eq.org/scripts/default.plx>
- Garcia J.R., Miranda E., (2006), "Inelastic displacement ratios for evaluation of structures built on soft soil sites", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 35, pp. 679-694.
- Krawinkler H., Nassar A.A., (1992), "Seismic design based on ductility and cumulative damage demands and capacities", *Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings*, Elsevier Applied Science.
- Mavroeidis G.P., and Papageorgiou A.S. (2003), "A mathematical representation of near-fault ground motions". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, pp. 1099-1131.
- Mavroeidis G.P., Dong G., and Papageorgiou A.S. (2004), "Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33, pp. 1023-1049.
- Miranda E., Bertero V.V. (1994), "Evaluation of strength reduction factors for earthquake resistant design" , *Earthquake Spectra*, 10, pp. 357-379.
- Newmark N.M., Hall W.J., (1982), "Earthquake Spectra and Design", Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley CA.
- PEER Strong Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html>
- Rodriguez-Marek, A. (2000), "Near-Fault Seismic Site Response", Ph.D. dissertation, Civil Engineering Department, University of California at Berkeley.
- Veletsos A.M., Newmark N.M., (1960), "Effect of inelastic behavior on the response of simple systems to earthquake motions", *Proceedings of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering*, Japan, vol. II, pp. 895-912.
- Vidic T., Fajfar P., Fischinger M., (1994), "Consistent inelastic design spectra: strength and displacement", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 23, pp. 507-521.