

ΣΧΕΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΔΕΙΚΤΗ R_d ΚΑΙ ΔΕΙΚΤΩΝ
ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ μ_f, μ_d

Είναι γνωστό ότι από την 1.7.1995 ισχύει στη χώρα μας ο νέος αντισεισμικός κανονισμός (ΝΕΑΚ) σε συνδυασμό με το νέο κανονισμό σκυροδέματος (ΝΚΩΣ). Ο Κανονισμός αυτός λαμβάνει υπόψη του την κατηγορία του κτιρίου Σ με το συντελεστή γ_1 , χωρίζει την Ελλάδα σε τέσσερις (4) ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας ανάλογα με την σεισμική επιτάχυνση του εδάφους $A = a_g$, λαμβάνει υπόψιν του την κατηγορία εδάφους και το σπουδαιότερο λαμβάνει υπόψιν του την μετελαστική συμπεριφορά του κτιρίου, δηλ. την μείωση των σεισμικών φορτίων σε σχέση με εκείνα που προκύπτουν από το ελαστικό σύστημα. Η μείωση αυτή των σεισμικών φορτίων λαμβάνεται υπόψιν με το συντελεστή σεισμικής συμπεριφοράς q . Ο συντελεστής αυτός ανάλογα με το δομικό σύστημα μπορεί να πάρει κάποιες τιμές, π.χ. για πλαίσια ή μικτά συστήματα μπορεί να πάρει την τιμή 3,50, για φορείς που αποτελούνται μόνο από τοιχώματα μπορεί να πάρει την τιμή 3,00 ενώ για φορείς που συμπεριφέρονται σαν πρόβολοι ή η μάζα τους είναι συγκεντρωμένη στα ανώτερα σημεία τους (υδατόπυργος) μπορεί να πάρει την τιμή 2,00.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι τα πλαίσια ή μικτά συστήματα μπορούν να προκαλέσουν τη μεγαλύτερη μείωση των σεισμικών φορτίων στην ανελαστική περιοχή, δηλ. μεγαλύτερη απόσβεση σεισμικής ενέργειας. Όσο πιο μεγάλο δείκτη σεισμικής συμπεριφοράς έχει η κατασκευή τότε η απόσβεση είναι μεγαλύτερη και κατ'επέκταση η μείωση των σεισμικών φορτίων με αποτέλεσμα ο συντελεστής σεισμού να μειώνεται. Επιπλέον όπως θα δούμε ο σεισμικός συντελεστής R_d εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως η ιδιοπερίοδος T , ο δείκτης β_0 , η σεισμική επιτάχυνση ανάλογα με τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας.

Ισχύει λοιπόν :

$$0 < T < T_1$$

$$R_d(T) = A \cdot \gamma_1 \left[1 + \frac{T}{T_1} \left(\frac{\Theta}{2} \beta_0 - 1 \right) \right]$$

$$T_1 \leq T \leq T_2$$

$$R_d(T) = A \cdot \gamma_1 \frac{\Theta \cdot \beta_0}{2}$$

$$T > T_2$$

$$R_d(T) = A \cdot \gamma_1 \frac{\Theta}{2} \beta_0 \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3}$$

όπου T_1 , T_2 σταθερές ανάλογα με την κατηγορία εδάφους και θ ο συντελεστής θεμελίωσης το οποίο λαμβάνω ίσον με τη μονάδα ($\theta = 1,00$).

Θα ασχοληθώ πιο κάτω μόνο με την περίπτωση

$$T_1 \leq T \leq T_2 \text{ και } \Theta = 1,00$$

Ο επόμενος πίνακας δείχνει τις τιμές του σεισμικού συντελεστή R_d σε σχέση με την σεισμική ζώνη, την κατηγορία του κτιρίου γ_1 και το δείκτη συμπεριφοράς q .

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

	$q = 3.50$		$q = 2.00$	$\frac{R_d \text{ } q = 2}{R_d \text{ } q = 3.50}$
$A = 0, g$	γ_1	R_d	R_d	
$A = 0.12 \text{ g}$	0.85	0.071	0.125	1.75
	1.00	0.084 “ $R_d = 0.084 \gamma_1$ ”	0.147 “ $R_d = 0.147 \gamma_1$ ”	
	1.15	0.097	0.169	
	1.30	0.110	0.191	
$A = 0.16 \text{ g}$	0.85	0.095	0.167	1.75
	1.00	0.112 “ $R_d = 0.112 \gamma_1$ ”	0.196 “ $R_d = 0.196 \gamma_1$ ”	
	1.15	0.128	0.225	
	1.30	0.145	0.255	
$A = 0.24 \text{ g}$	0.85	0.143	0.250	1.75
	1.00	0.168 “ $R_d = 0.168 \gamma_1$ ”	0.294 “ $R_d = 0.294 \gamma_1$ ”	
	1.15	0.193	0.338	
	1.30	0.218	0.383	

	$q = 3.50$		$q = 2.00$	$\frac{R_d \text{ } q = 2.00}{R_d \text{ } q = 3.50}$
$A = 0, g$	γ_1	R_d	R_d	
$A = 0.36 \text{ g}$	0.85	0.213	0.375	1.75
	1.00	0.252 “ $R_d = 0.252 \gamma_1$ ”	0.441 “ $R_d = 0.441 \gamma_1$ ”	
	1.15	0.291	0.507	
	1.30	0.328	0.574	

Στα σχήματα 1 και 2 παρουσιάζεται η μεταβολή του οριζόντιου σεισμικού συντελεστή για $q = 3,50$ και $2,00$ αντίστοιχα καθώς και οι απλουστευμένες σχέσεις του R_d συναρτήσει του γ_1 .

Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται η μεταβολή του οριζόντιου δείκτη R_d συναρτήσει του δείκτη σπουδαιότητας γ_1 για δείκτες συμπεριφοράς $q = 3.50$ και $q = 2.00$.

Από τα προηγούμενα σχήματα 1, 2 και 3 και τον πίνακα 1 παρατηρούμε ότι ο σεισμικός συντελεστής R_d για $q = 2,00$ είναι αυξημένος κατά 75% σε σχέση με αυτόν για $q = 3,50$, διπλάσια σχεδόν τιμή. Είναι φανερό λοιπόν η μεγάλη σημασία που έχει ο δείκτης συμπεριφοράς στον σεισμικό συντελεστή R_d . Μια λανθασμένη εκτίμηση του δείκτη q μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή αποτελέσματα και θα έχουμε σχεδιάσει το κτίριο με διαφορετικές δυνάμεις από εκείνες που πρόκειται να δεχθεί σε κάποιο σεισμό και ίσως να έχουμε δυσάρεστες συνέπειες. Το σχήμα 4 δείχνει την μεταβολή του σεισμικού συντελεστή R_d σε σχέση με την σεισμική επιτάχυνση A και το δείκτη συμπεριφοράς. Δείχνει επίσης και την γραφική παράσταση του R_d συναρτήσει της σεισμικής επιτάχυνσης A για $q = 1.00$ (ελαστική συμπεριφορά). Φαίνεται ξεκάθαρα η μείωση του R_d όταν μπαίνουμε στην ανελαστική περιοχή ($q > 1$) σε σχέση με την ελαστική περιοχή ($q = 1.00$).

Χάριν του δείκτη συμπεριφοράς q μπορούμε να υπολογίζουμε τα κτίρια με μικρότερες δυνάμεις απ'αυτές που δέχονται εξαιτίας της απόσβεσης της ενέργειας. Ο δείκτης συμπεριφοράς όμως έχει άμεση σχέση με τους δείκτες πλαστιμότητας μετατόπισης μ_d και καμπυλότητας μ_ϕ .

Λαμβάνοντας υπόψη την σχέση :

$$\mu_d = 0.50 (q^2 + 1) \Rightarrow q = \sqrt{2\mu_d - 1}$$

$$\text{και } R_d(T) = A \cdot \gamma_1 \frac{0.60}{2} = A \cdot \gamma_1 \frac{0.60}{\sqrt{2\mu_d - 1}} \Rightarrow R_d(T) = \frac{2.50 A}{\sqrt{2\mu_d - 1}}$$

$$\text{Επιπλέον από την σχέση } \mu_\phi = 0.8 q^2 \Rightarrow q = \sqrt{1.25 \mu_\phi}$$

$$\text{και } R_d(T) = A \cdot \gamma_1 \frac{0.60}{2} \Rightarrow R_d(T) = \frac{2.23 A}{\sqrt{1.25 \mu_\phi}}$$

όπου $\gamma_1 = 1.00$ (Σπουδαιότητα κτιρίου Σ2).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 Τιμές του δείκτη R_d σε σχέση με το δείκτη μ_d ανάλογα με την σεισμική επιτάχυνση $A = \alpha g$.

	$\mu_d = 3.00$	$\mu_d = 6.00$	$\mu_d = 15.00$	$\mu_d = 1.00$		
	R_d^3	R_d^6	R_d^{15}	R_d^1	$\frac{(R_d^3 - R_d^6)}{100}$	$\frac{(R_d^3 - R_d^{15})}{100}$
$A = 0.12 g$	0.13	0.098	0.055	0.294	32	38
$A = 0.16 g$	0.175	0.118	0.073	0.392	32	38
$A = 0.24 g$	0.263	0.178	0.110	0.588	32	38
$A = 0.36 g$	0.395	0.266	0.164	0.883	32	38

$$\begin{aligned} &\text{Μείωση 81\% } (Rd^1 \text{ σε } Rd^{15}) \\ &\text{Μείωση 69\% } (Rd^1 \text{ σε } Rd^6) \\ &\text{Μείωση 55\% } (Rd^1 \text{ σε } Rd^3) \end{aligned}$$

Από τον προηγούμενο πίνακα 2 καθώς και από το σχήμα 5 φαίνεται ξεκάθαρα η μείωση του σεισμικού συντελεστή και κατ'επέκταση των σεισμικών φορτίων που εντείνονται στην κατασκευή, όταν αυξάνεται ο δείκτης πλαστιμότητας μ_d . Παρατηρούμε ότι κατασκευή με δείκτη πλαστιμότητας $\mu_d = 6$ εντείνεται με σεισμικά φορτία κατά 32% μειωμένα σε σχέση με εκείνα όταν η κατασκευή έχει την μισή πλαστιμότητα, δηλ. $\mu_d = 3$, ανεξαρτήτου σεισμικής ζώνης. Η μείωση αυτή είναι κάπως μεγαλύτερη, περίπου 38% για δείκτη $\mu_d = 15$ σε σχέση με κατασκευή με δείκτη $\mu_d = 6$.

Σημαντική είναι η σύγκριση μεταξύ ελαστικής περιοχής ($\mu_d = 1$) και ανελαστικής περιοχής ($\mu_d > 1$).

Όπως φαίνεται από τον προηγούμενο πίνακα 2 κατασκευή στην ανελαστική περιοχή με $\mu_d = 3$ εντείνεται με σεισμικά οριζόντια φορτία κατά 55% μειωμένα σε σχέση με κατασκευή όταν βρίσκεται στην ελαστική περιοχή ($\mu_d = 1$). Για $\mu_d = 6$ η μείωση των σεισμικών φορτίων είναι 69% ενώ για $\mu_d = 15$ η μείωση φτάνει στο 81%, πάντα σε σχέση με την ελαστική περιοχή. Για παράδειγμα ας υποθέσουμε ότι έχουμε κατασκευή που βρίσκεται σε περιοχή όπου κατά την διάρκεια του σεισμού μετρήθηκε επιτάχυνση βάσης $u_g = 0.50g$. Αν η κατασκευή σχεδιαστεί στην ελαστική περιοχή ($\mu_d = 1$) τότε ο σεισμικός συντελεστής R_d ισούται με 0.5 g δηλ. $R_d = 0.50$. Λόγω όμως της ανελαστικής απόκρισης της κατασκευής και όταν έχει δείκτη πλαστιμότητας $\mu_d = 3$ έχω μείωση σεισμικού συντελεστή κατά 55% περίπου, δηλ. $R_d = 0.50 \times 0.45 = 0.225$. Για $\mu_d = 6$ έχω μείωση 69% περίπου δηλ. $R_d = 0.50 \times 0.31 = 0.155$ και τέλος για $\mu_d = 15$ έχω μείωση 81% περίπου, δηλ. $R_d = 0.50 \times 0.19 = 0.095$.

Θεωρητικά όλα τα προηγούμενα είναι σημαντικά. Όμως πρακτικά δεν μπορούμε εκ των προτέρων να γνωρίζουμε το δείκτη πλαστιμότητας μ_d και άρα θα υπάρχει απόκλιση του σεισμικού συντελεστή και ίσως σχεδιάσουμε κτίρια με διαφορετικά σεισμικά φορτία από τα πραγματικά. Επίσης πολύ σημαντικό μειονέκτημα στην εκτίμηση της πλαστιμότητας είναι το εξής: Στο οπλισμένο σκυρόδεμα η έννοια της καμπυλότητας διατομής δεν έχει φυσικό νόημα, επειδή όλα τα μη γραμμικά φαινόμενα, όπως ρηγμάτωση, ολίσθηση ράβδων οπλισμού, λυγισμός θλιβόμενου χάλυβα κ.λ.π. λαμβάνουν χώρα σε ένα πεπερασμένο τμήμα του μήκους του μέλους και όχι σε στάθμη διατομής.

Επομένως, πρέπει να αναφέρεται κανείς στη μέση καμπυλότητα ενός τμήματος του μέλους ή στη σχετική γωνία των ακραίων διατομών του τμήματος αυτού. Αυτός μπορούμε να πούμε πως είναι και ο τρόπος του πειραματικού προσδιορισμού της τιμής φ_u (φ_u = καμπυλότητα στην αστοχία, $m_d = \varphi_u/\varphi_y$). Οι δείκτες της πλαστιμότητας και των παραγώγων της, είναι κατάλληλοι να εκφράσουν την βλάβη και την ανελαστική συμπεριφορά των μελών σε μονοτονική φόρτιση λόγω του ότι η ανακυκλιζόμενη ένταση μεγάλου εύρους μειώνει την δυσκαμψία και αντοχή και μπορούμε να οδηγηθούμε τελικά στην αστοχία για τιμές της μέγιστης απόκρισης μικρότερες απ' αυτές που προκαλούν αστοχία σε μονοτονική φόρτιση, καθώς και ακόμη ο τρόπος αστοχίας μπορεί να αλλάξει από καμπτικό για μονοτονική φόρτιση, σε διατμητικό ή απώλεια συνάφειας για ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Επιπλέον όταν η ένταση είναι ανακυκλιζόμενη, η αστοχία μπορεί να συμβεί προτού εξαντληθεί η διαθέσιμη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας. Για τον λόγο αυτό έχουν αντικατασταθεί οι μονοτονικοί δείκτες από αθροιστικούς και επιπλέον για να έχουμε πλήρη εικόνα για όλο τον φορέα και όχι μεμονωμένα για τα μέλη που τον αποτελούν. (Θα γίνει αναφορά στους αθροιστικούς δείκτες σε επόμενη εργασία). Σε προηγούμενη εργασία αναφέρθηκαν στους παράγοντες που επηρεάζουν την πλαστιμότητα (εγκάρσιος οπλισμός, $\min$ διαμήκη οπλισμό, μικρή αξονική δύναμη $vd < 0.50$ κ.λ.π.).

Θα εξετάσουμε πιο κάτω πως επηρεάζουν την πλαστιμότητα ο εγκάρσιος οπλισμός (συνδετήρες) και η αξονική δύναμη.

Θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση :

$$\mu \varphi \pm \frac{E_{cu}}{E_{sy}} \cdot \frac{0.9 - 0.5vd}{1.35vd}$$

όπου $E_{sy} = \frac{f_{sy}}{E_s}$

$$E_{cu} = 0.0035 + 0.10 a_u a_{sv} \alpha_n$$

όπου $a_u = 1 - \frac{4(b^2/6)}{bc^2}$ και $a_s = (1 - \frac{1}{2} \frac{s}{bc})^2$

όπου bc = διάσταση υποστηλώματος, $b_c = bc - 2c$

s = απόσταση συνδετήρων

α = αριθμός διαμήκων ράβδων που συγκρατούνται υπό γωνία συνδετήρα.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε υποστύλωμα 40 X 40 από υλικά C16, S400, διαμήκη οπλισμό 4Φ20 και επικάλυψη $C = 2$ cm. θα εξετάσουμε δύο περιπτώσεις : α) $vd = 0.20$, β) $vd = 0.40$ και συνδετήρες Φ8/10, Φ8/20 και Φ10/10, Φ10/20.

Ο επόμενος πίνακας δείχνει τις τιμές της πλαστιμότητας $\mu\phi$ για τις πιο πάνω περιπτώσεις.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3

		$vd = 0.20$	$vd = 0.40$
Συνδετήρες	ECU %	$\mu\phi$	$\mu\phi$
$\Phi 8/10$	6.92	10.25	4.48
$\Phi 8/20$	4.70	6.96	3.05
$\Phi 10/10$	19.70	29.18	12.77
$\Phi 10/20$	5.39	7.98	3.50

Οι μεταβολές του δείκτη $\mu\phi$ συναρτήσει του εγκάρσιου οπλισμού και της αξονικής δύναμης φαίνονται επίσης στο σχήμα 6.

Παρατηρούμε ότι για διπλασιασμό της αξονικής δύναμης vd από 0.20 σε 0.40 έχω μείωση της $\mu\phi$ κατά 56% περίπου δηλ. έχω μισή πλαστιμότητα.

Επιπλέον για πύκνωση των συνδετήρων ίδιας διαμέτρου από $S = 20$ cm σε $S = 10$ cm έχω αύξηση της πλαστιμότητας κατά 32% περίπου. Ο σημαντικότερος όμως παράγοντας όπως φαίνεται από το σχήμα 6, που επηρεάζει την πλαστιμότητα $\mu\phi$ είναι η διάμετρος του συνδετήρα. Συγκεκριμένα για αύξηση της διαμέτρου από $\Phi 8$ σε $\Phi 10$ έχω αύξηση της πλαστιμότητας $\mu\phi$ κατά 284% !!.

Όπως αναφέραμε υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την πλαστιμότητα αλλά όπως βλέπουμε οι πιο σημαντικοί είναι η αξονική δύναμη και η διάμετρος του εγκάρσιου οπλισμού ακόμη πιο πολύ. Στοιχεία (υποστυλώματα επί το πλείστον) για τα οποία για κάποιο λόγο δεν μπορούμε να αποφύγουμε την σχετικά μεγάλη αξονική δύναμη $vd = 0.50$ πρέπει να αυξηθεί η διάμετρος του εγκάρσιου οπλισμού για να επαναφέρουμε την πλαστιμότητα στα επιθυμητά επίπεδα.

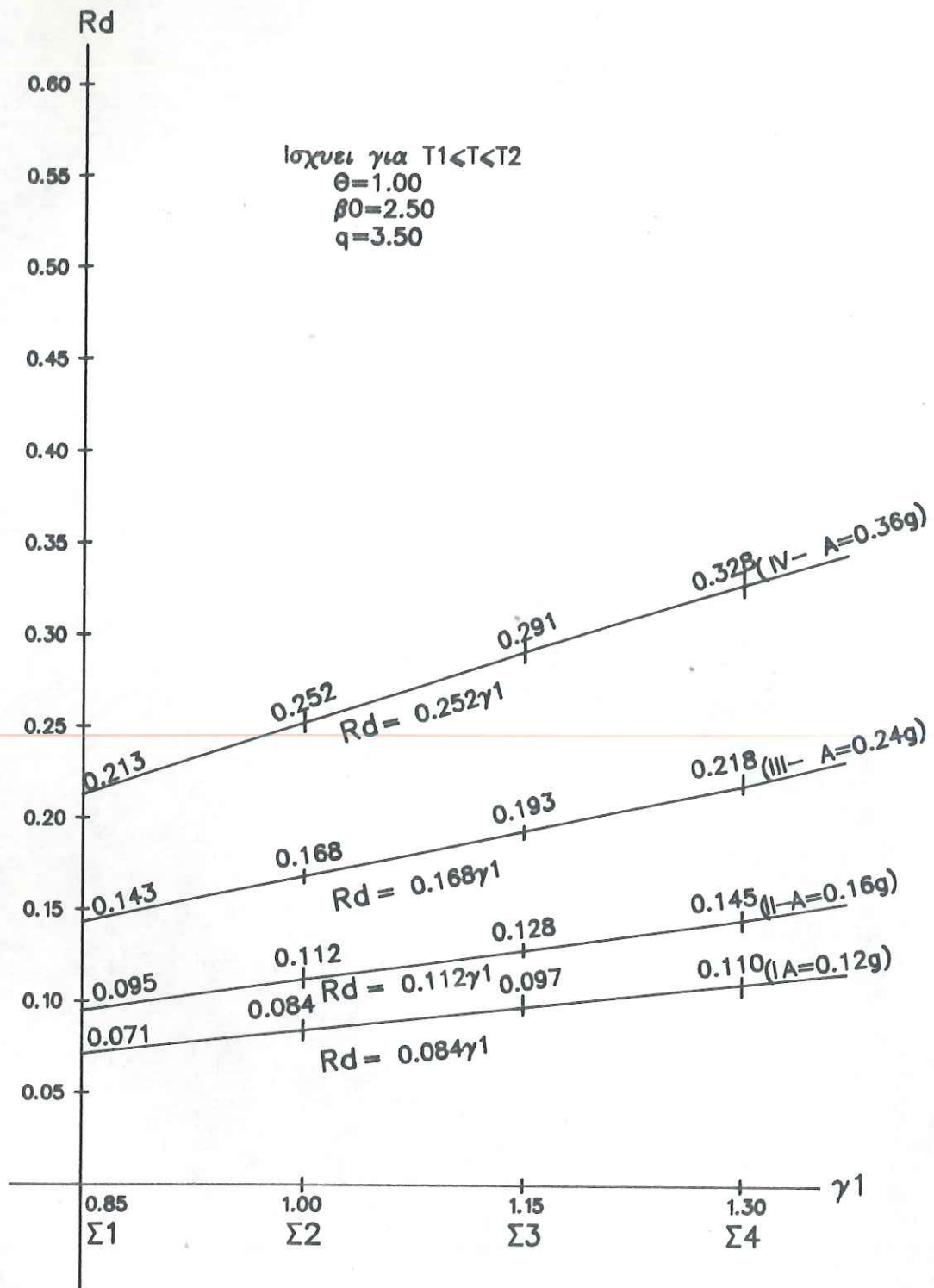
Ο τύπος της πλαστιμότητας που εκλέχτηκε για τους ελέγχους, δίνει μεγάλη σημασία όπως φαίνεται στην αξονική δύναμη vd και ιδιαίτερα στον εγκάρσιο οπλισμό και επιπλέον προϋποθέτει συμμετρικό διαμήκη οπλισμό ($w1 = w2$). Έχουν προταθεί και άλλοι πιο αναλυτικοί τύποι του δείκτη πλαστιμότητας οι οποίοι εξαρτώνται επιπλέον από το διαμήκη οπλισμό και την κατηγορία σκυροδέματος.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι έχοντας εκλέξει τον εγκάρσιο οπλισμό και γνωρίζοντας περίπου την αξονική δύναμη vd μπορούμε να εκτιμήσουμε το δείκτη πλαστιμότητας και επομένως να προσεγγίσουμε, όσο βέβαια είναι

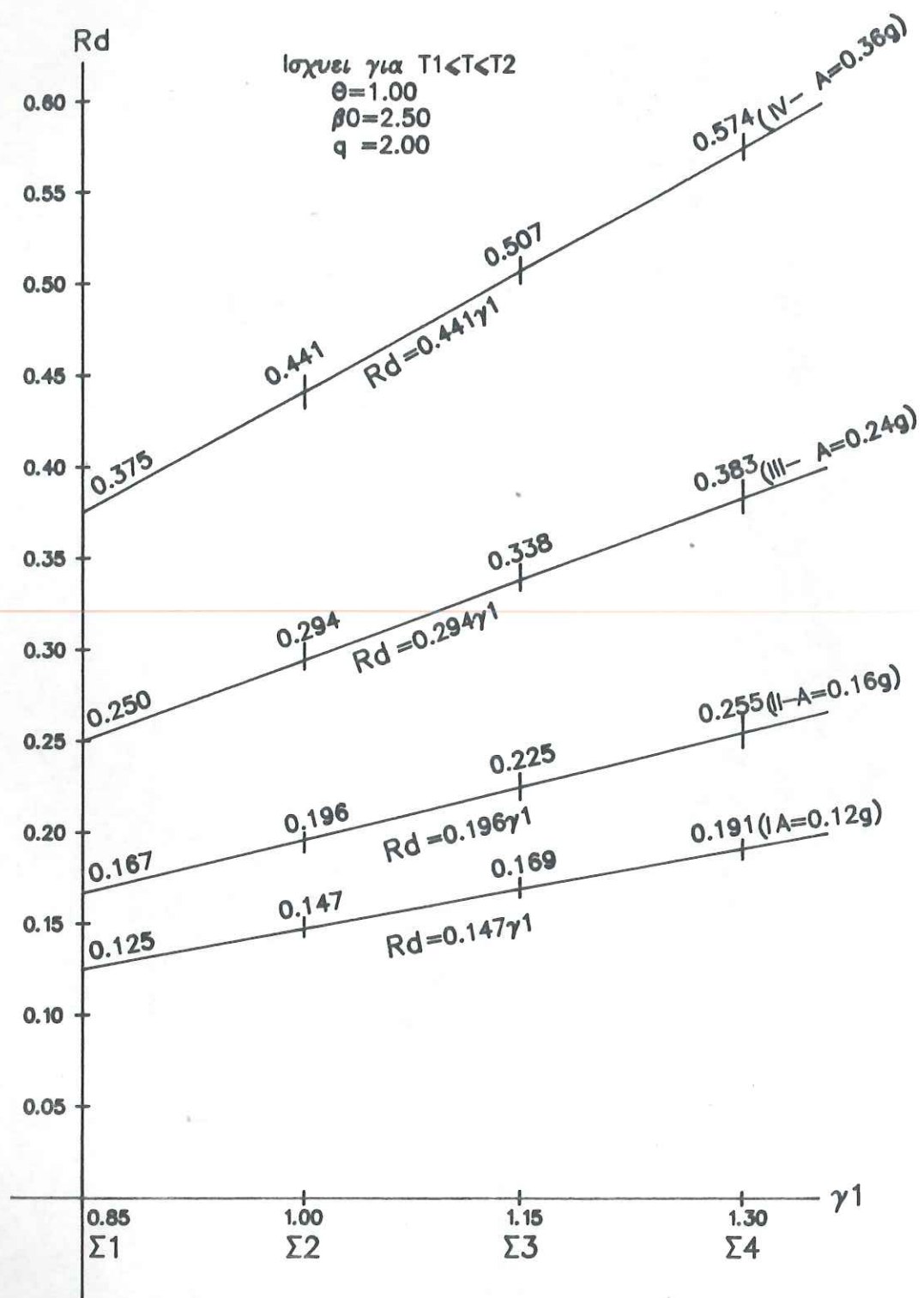
δυνατό, μία και είναι γνωστό ότι όσα αναφέρθηκαν προηγούμενα ισχύουν για μονοτονική φόρτιση και για μέλη ξεχωριστά και όχι για όλον το φορέα, το σεισμικό συντελεστή R_d .

Βιβλιογραφία

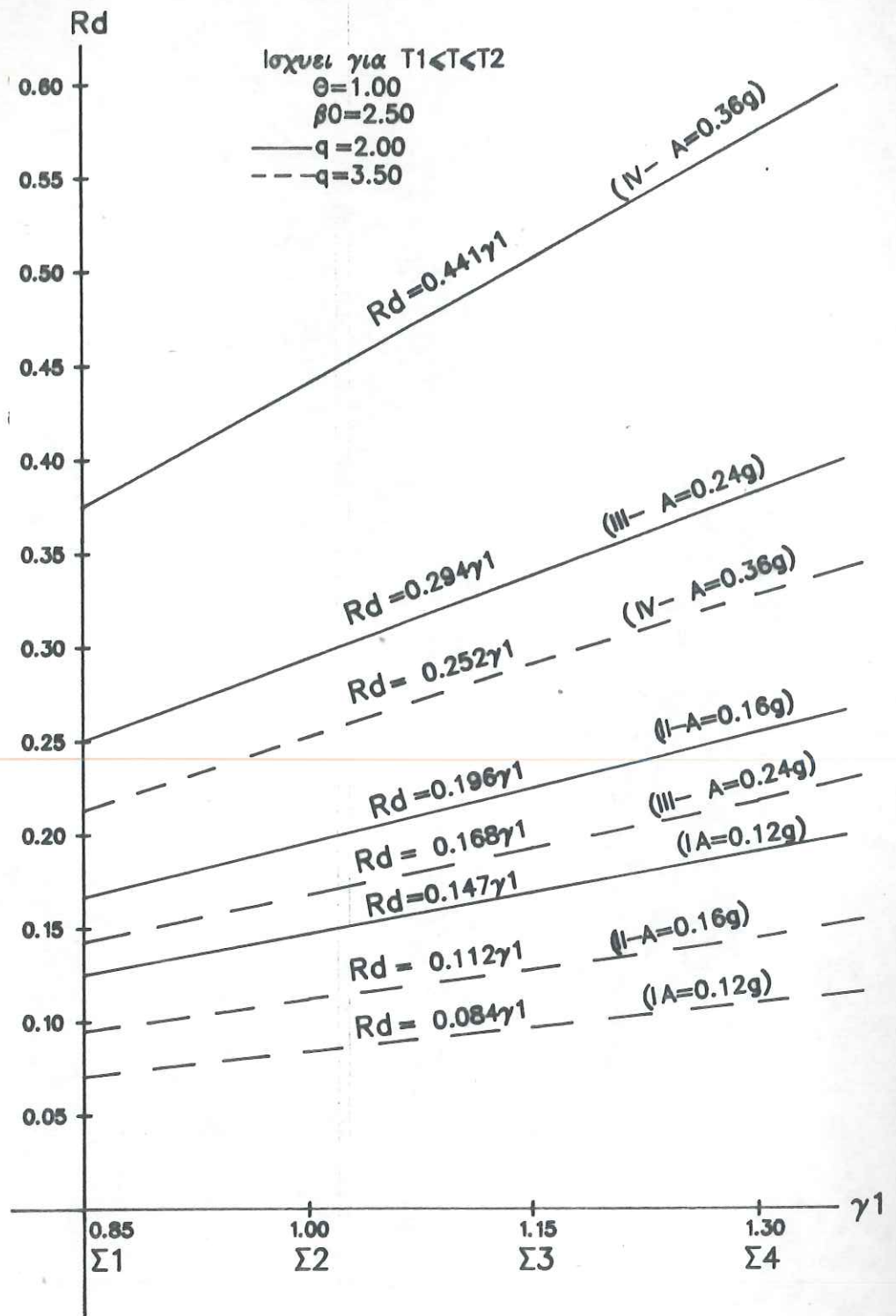
1. Μ.Ν. Φαρδής, Π.Α. Χριστόπουλος. Συγκριτική μελέτη δεικτών βλάβης μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.
10ο ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ - ΡΟΔΟΣ 1991.
2. Eurocode 8, Structures 14 Seismic regions, Part 1 : General and buildings - May 1988.
3. T.P. Tassios - M.P. Chronopoulos : R.C. Walls Cross - Section design for a given behaviour factor of the building.
4. Eurocode 8, Part 1. Justification Note : 6 - Required Confinement for columns.
5. Αφιέρωμα στο νέο αντισεισμικό κανονισμό - Τροποποιήσεις και συμπληρώσεις των διατάξεων του ΝΕΑΚ - Κεφάλαιο 2 : Σεισμικές δράσεις σχεδιασμού.



Σχ.1: Μεταβολή του οριζοντίου σεισμικού δείκτη R_d
 συναρτήσει του δείκτη σπουδαιότητας γ_1 για $q = 3.50$



Σχ.2 : Μεταβολή του οριζοντίου σεισμικού δείκτη R_d
 συναρτήσει του δείκτη σπουδαιότητας γ_1 για $q = 2.00$



Σχ.3 : Μεταβολή του οριζοντιου σεισμικου δεικτη R_d
 συναρτησει του δεικτη σπουδαιοτητας γ_1

Σεισμ. επιτάχυνση εδάφους

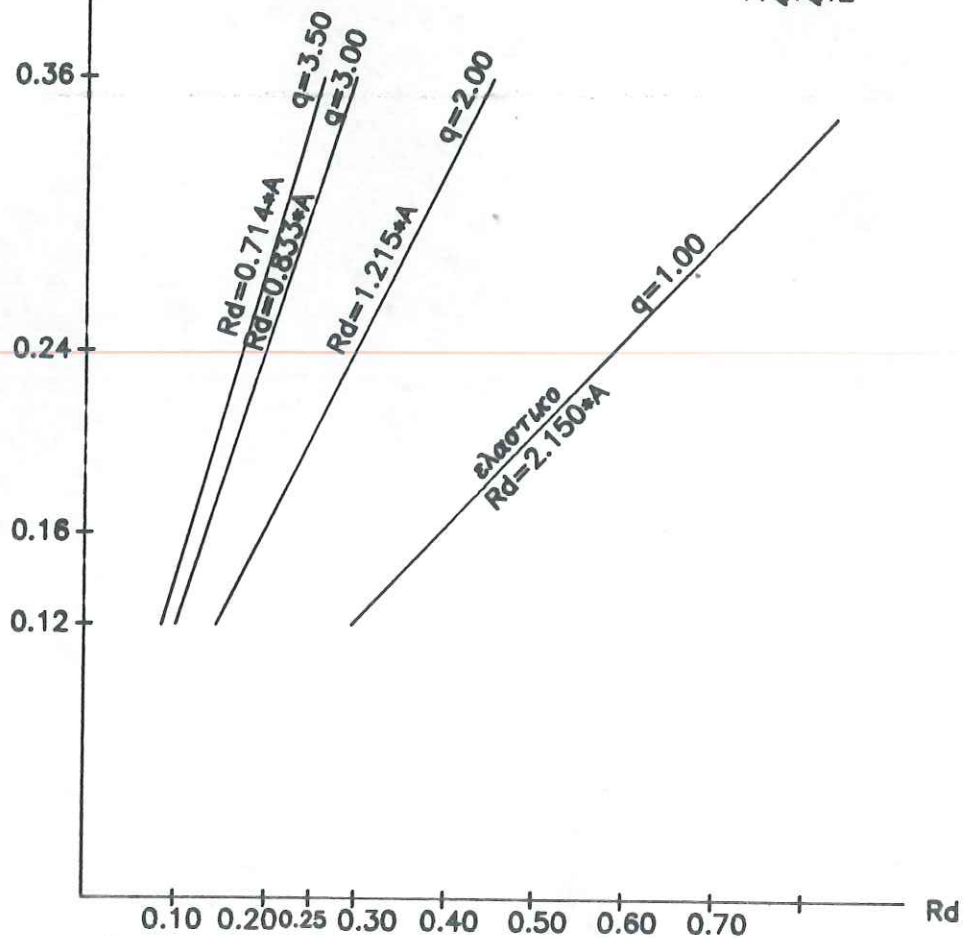
$\times g$

Ισχύει για $\gamma_1=1.00$

$\theta=1.00$

$\beta_0=2.50$

$T_1 \leq T \leq T_2$



Σχ.4 : Μεταβολή του οριζοντίου σεισμικού συντελεστή R_d συναρτήσει της σεισμικής επιτάχυνσης $A=\alpha g$, και σε σχέση με το δείκτη συμπεριφοράς q

Σεισμ.επιταχυνση εδαφους
 α_g

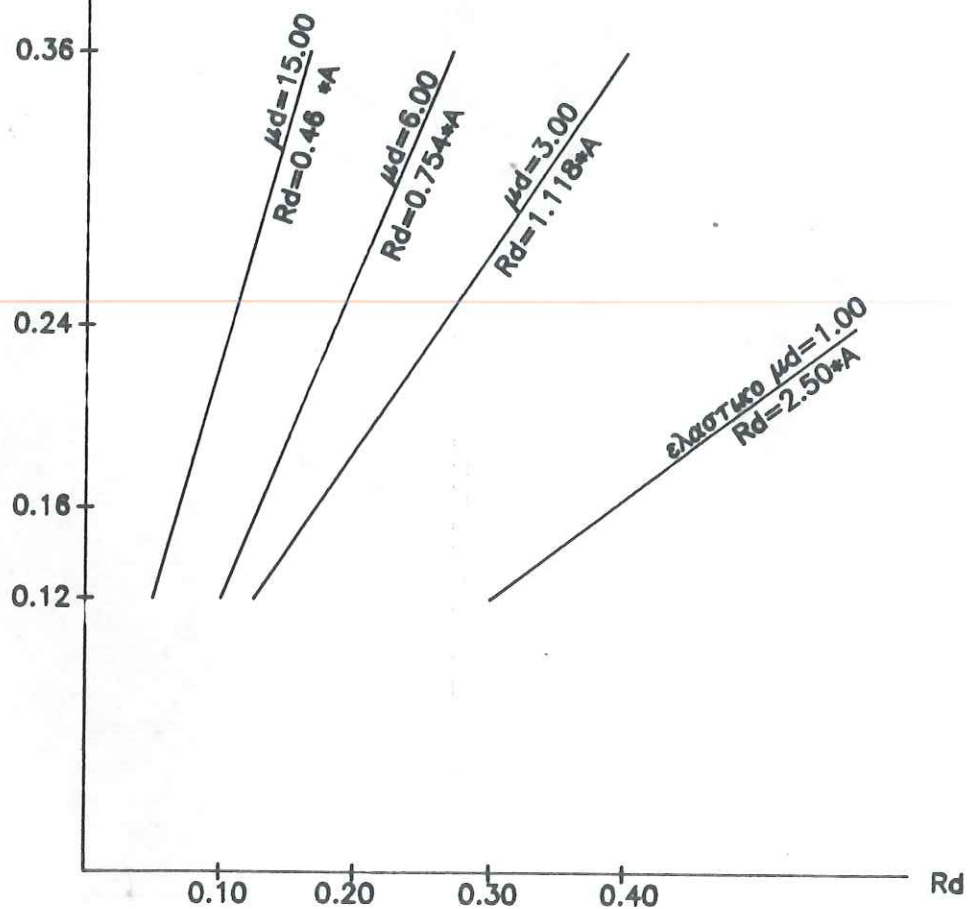
ισχυει για $T_1 \leq T \leq T_2$

$\theta=1.00$

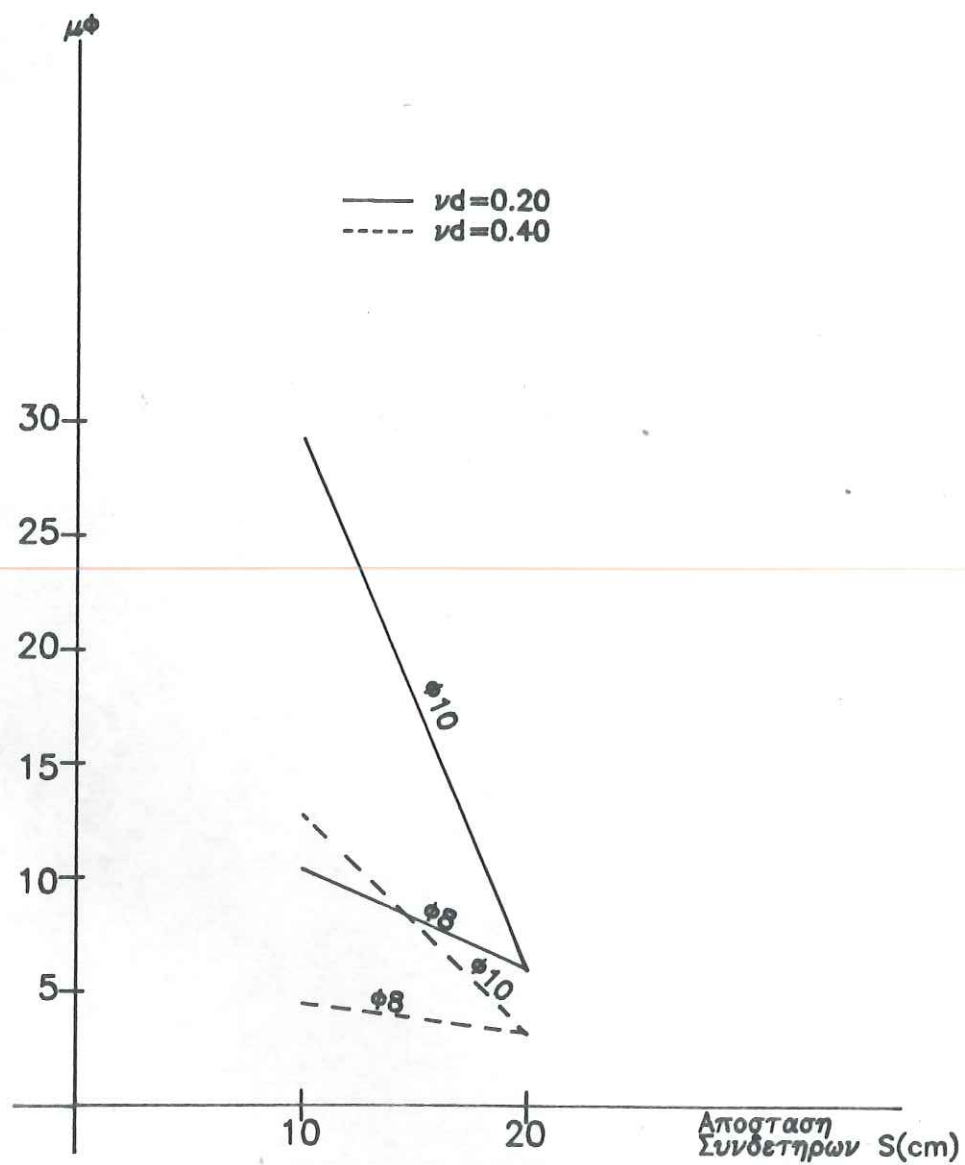
$\gamma_1=1.00$

$\beta_0=2.50$

$q = \sqrt{2\mu d - 1}$



Σχ.5 : Μεταβολη του οριζοντιου σεισμικου συντελεστη R_d συναρτησει της σεισμικης επιταχυνσης $A=\alpha_g$ σε σχεση με το δεικτη πλαστιμοτητας μ_d



Σχ.6 : Μεταβολή δείκτη πλαστιμότητας $\mu\phi$ συναρτήσει του δείκτη ν_d , Απόσταση συνδετηρά S και διαμετρο συνδετηρά