

## ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΓΕΦΥΡΩΝ

ΚΕΦΑΛΟΓΙΑΝΝΗΣ ΜΑΡΙΟΣ

### Περίληψη

*Οι γέφυρες είναι μοναδικές στη δομική τους απόκριση σε σύγκριση με τα κτήρια. Υπάρχουν πολλών ειδών υπερδομές, υποδομές και θεμέλια με περίπλοκες γεωμετρίες και χαρακτηριστικά δυναμικής απόκρισης. Στο παρόν κείμενο επιχειρείται μια αναφορά σε θέματα που αφορούν την αντισεισμική προστασία γεφυρών, τόσο κατά τη φάση σχεδιασμού τους όσο και κατά τη φάση της επισκευής ή ενίσχυσής τους. Με άλλα λόγια θα υπάρξει αναφορά τόσο στα σημαντικότερα στοιχεία του αντισεισμικού σχεδιασμού, όπως και των μεθόδων επισκευής των διάφορων μελών της γέφυρας, συγκρίνοντας τις διάφορες τεχνικές μεταξύ τους.*

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάλυση στοιχείων μετά από σεισμούς κατέδειξε ότι οι κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν με παλαιότερους κανονισμούς ήταν πιο επιρρεπείς σε ζημιές κάτω από σεισμική φόρτιση. Το επίπεδο της δόνησης, η κλίση, η καμπυλότητα, το είδος των ακροβάθρων, των μεσοβάθρων και η συνέχεια του ανοίγματος είχαν τη μεγαλύτερη συσχέτιση με την έκταση των ζημιών. Το συνολικό κόστος επισκευής των γεφυρών μετά από ένα σεισμικό γεγονός είναι μεγάλο και μάλιστα αυξάνεται σχεδόν εκθετικά σε σχέση με την έκταση και σοβαρότητα των ζημιών. Άρα επιθυμητή είναι η σχεδίαση της γέφυρας ώστε να αντιστέκεται επαρκώς στις σεισμικές κινήσεις. Για παράδειγμα στους δύο τελευταίους σεισμούς στις Η.Π.Α. από τις πάνω από 3500 γέφυρες που υπάρχουν στις κομητείες γύρω από το Los Angeles, μόνο περίπου 200 έπαθαν κάποια βλάβη (συνολικό κόστος αποκατάστασης περίπου \$150.000.000). Παρ' ότι από αυτές μόνο το 3% χρειάστηκε να αντικατασταθεί, το κόστος αντικατάστασής του αντιστοιχούσε στο 80% όλων των εξόδων που δαπανήθηκαν για τις γέφυρες[6].

Άρα η βέλτιστη λύση είναι η προληπτική ενίσχυση γεφυρών, καθώς με μικρά έξοδα προλαμβάνονται τεράστιες δαπάνες στο μέλλον. Για παράδειγμα, παρά τις εκτεταμένες αστοχίες γεφυρών κατά το σεισμό του Northridge, καμία δεν συνέβη σε μια πρόσφατα σχεδιασμένη ή πρόσφατα ενισχυμένη γέφυρα, έστω κι αν αυτές υπόκεινταν σε όμοιο σεισμικό φορτίο με γέφυρες που κατέρρευσαν[11].

### 2.1 ΑΡΧΕΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Ο βασικός στόχος του αντισεισμικού σχεδιασμού είναι να εξασφαλίσει ότι η αντοχή της κατασκευής είναι μεγαλύτερη από τα επιβαλλόμενα φορτία. Αυτό είναι περίπλοκο καθώς τα σεισμικά φορτία δεν είναι ντετερμινιστικά (δεν μπορούν να καθοριστούν με συγκεκριμένο τρόπο όπως το ίδιο βάρος, τα φορτία των οχημάτων κ.α.)

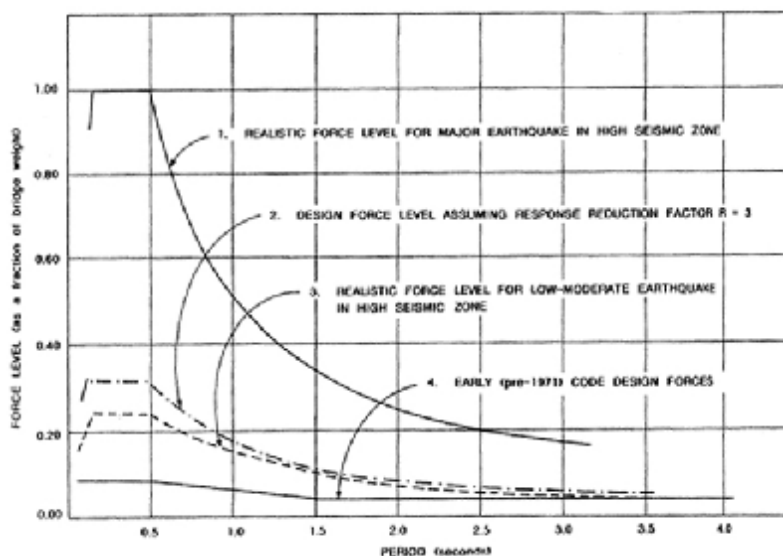
Η αντοχή μιας γέφυρας υπολογίζεται διαφορετικά για σεισμούς απ' ότι για τα πιο μόνιμα ή συχνά εμφανιζόμενα φορτία. Το μέγεθος του πιο σημαντικού σεισμικού συμβάντος σε μια περιοχή θα είναι πολλές φορές πιο επώδυνο απ' ότι οι υπόλοιπες φορτίσεις. Ο σχεδιασμός μιας γέφυρας που θα παραμείνει ελαστική και χωρίς ζημιές για ένα τόσο σπάνιο γεγονός είναι γενικά αντισυμβαλτικός και όχι πάντα εφικτός. Γι' αυτό η φιλοσοφία που αναπτύσσεται στο σχεδιασμό της αντισεισμικής αντοχής, διαφέρει από αυτή που υιοθετείται για άλλα είδη φορτίσεων.

Η στρατηγική που ακολουθείται για μια αποδεκτή σεισμική συμπεριφορά είναι:

1. Για μικρούς και μεσαίους σεισμούς, που προβλέπεται ότι θα συμβούν συχνά κατά τη διάρκεια της ζωής της γέφυρας, η κατασκευή σχεδιάζεται για να αντέχει σε αυτές τις φορτίσεις με δευτερεύουσες μόνο ζημιές.

2. Για μεγάλους σεισμούς που μπορεί να συμβούν μια φορά στη ζωή της γέφυρας, κάποιες δομικές βλάβες είναι αποδεκτές αλλά ελεγχόμενες ώστε να αποφευχθεί η κατάρρευση. Όπου είναι δυνατό, η ζημιά πρέπει να είναι εμφανής, επιθεωρήσιμη και αν είναι εφικτό, επιδιορθώσιμη.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι αντιοικονομικός ο σχεδιασμός μιας γέφυρας που παραμένει ελαστική σε τέτοιες εγκάρσιες φορτίσεις, για αυτό μια μειωμένη τιμή χρησιμοποιείται στη θέση της. Η επιτρεπόμενη μείωση εξαρτάται από την ικανότητα της υποδομής να αντέξει τις ζημιές χωρίς να καταρρεύσει. Για απλά μονά βάθρα μια μείωση κατά ένα συντελεστή της τάξεως του 3 κρίνεται ως επαρκής[12]. Έτσι η κατασκευή συνεχίζει να συμπεριφέρεται ελαστικά για μεσαίου μεγέθους σεισμούς.



Ένα ερώτημα που τίθεται είναι αν οι γέφυρες πρέπει να έχουν απαίτηση καλύτερης σεισμικής συμπεριφοράς σε σχέση με τις άλλες κατασκευές. Μετά από την εμπειρία των τελευταίων σεισμών είναι προφανές ότι οι γέφυρες σημαντικών οδικών αξόνων πρέπει να έχουν καλύτερη συμπεριφορά από τα κτήρια, γιατί δεν μπορεί να υπάρξει επισκευή των κτηρίων αν οι γέφυρες που έχουν σχεδιαστεί για την ίδια συμπεριφορά με τα κτήρια, υποστούν ζημιές[4].

## 2.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΜΕΛΩΝ ΜΙΑΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟ

**Υπερδομή:** Η απώλεια στήριξης στις δοκούς είναι από τις πιο σοβαρές βλάβες της υπερδομής και αυτό μπορεί να ωφείλεται στην έλλειψη συνέχειας στην υπερδομή, μη επαρκή μήκη στήριξης για τις δοκούς, καμπύλες στηρίξεις που ενθαρρύνουν την περιστροφή της υπερδομής γύρω από το κάθετο άξονα ή μετατοπίσεις στις στηρίξεις λόγω κάποιας μορφής αστοχίας του εδαφούς. Η μείωση αυτού του είδους αστοχίας αποτελεί το κύριο στόχο των περισσότερων κανονισμών ενίσχυσης τα τελευταία χρόνια.

**Υποδομή:** Οι βλάβες στην υποδομή γενικά έχουν τη μορφή αστοχιών στα βάθρα, ακρόβαθρα και θεμέλια. Βλάβη στα βάθρα μπορεί να συμβεί είτε λόγω καμπτικής αστοχίας, είτε λόγω διατμητικής αστοχίας, είτε λόγω απώλειας αγκυρώσεων στο διαμήκη οπλισμό. Αυτού του

είδους οι αστοχίες είναι δυνατόν να προκαλέσουν κατάρρευση της υπερδομής λόγω της μετακίνησης της στήριξής της.

Σεισμική βλάβη, ειδικά σε χαμηλές γέφυρες, είναι συχνά προκαλούμενη λόγω αστοχίας των θεμελίων που ωφείλεται στην εκτεταμένη παραμόρφωση του εδάφους και/ή στην απώλεια ευστάθειας και φέρουσας ικανότητας αυτού. Σαν αποτέλεσμα, η υποδομή συχνά παίρνει κλίση, κάζεται ή ακόμα και ανατρέπεται.

Λόγω της υψηλής εγκάρσιας δυσκαμψίας τους, τα ακρόβαθρα προσελκύουν το μεγαλύτερο μέρος των σεισμικών φορτίων που αναπτύσσονται στην υπερδομή. Αυτές οι δυνάμεις μπορεί να είναι πολύ μεγάλες και να προκαλέσουν εκτεταμένες αστοχίες, συχνά ψαθυρής μορφής. Καθίζηση των πρανών, που προκύπτει από τη συμπύκνωση, συχνά παρατηρείται μετά από σεισμικά γεγονότα.

### **3.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ – ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΓΕΦΥΡΩΝ**

Είναι προφανές τα τελευταία χρόνια ότι πολλές υπάρχουσες γέφυρες είναι ανεπαρκείς να δεχτούν τα σεισμικά φορτία. Πολλές αστοχίες γεφυρών έχουν συμβεί σαν αποτέλεσμα της σεισμικής δραστηριότητας και μάλιστα κάποιες απ αυτές έχουν συμβεί σε σχετικά μικρά επίπεδα σεισμικής κίνησης. Για να αποφύγουμε στο μέλλον αστοχίες σχετιζόμενες με σεισμούς είναι ξεκάθαρο ότι πρέπει να γίνει προσπάθεια για τον εντοπισμό των σεισμικά προβληματικών γεφυρών και να ξεκινήσει ένα πρόγραμμα μείωσης του κινδύνου από σεισμική αστοχία.

Ο κύριος στόχος της σεισμικής ενίσχυσης είναι ο περιορισμός της αποδεκτής ζημιάς κατά το σεισμό σχεδιασμού. Οι βλάβες είναι μη αποδεκτές αν καταλήγουν σε:

- Κατάρρευση, μερική ή ολική, της γέφυρας.
- Την απώλεια χρήσης μιας σημαντικής οδού που μπορεί να περνά από ή κάτω από τη γέφυρα.

Η διαδικασία σεισμικής επισκευής μπορεί να χωριστεί σε τρία βήματα

- Προκαταρκτικός έλεγχος για την κατάταξη των κατασκευών σε σειρά προτεραιότητας, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη δομική επικινδυνότητα, το κυκλοφοριακό φόρτο και άλλα σχετικά θέματα.
- Λεπτομερή εξέταση για το προσδιορισμό των τμημάτων της γέφυρας που θέλουν επισκευή.
- Επιλογή και σχεδιασμός των επισκευαστικών μέτρων.

Η ενίσχυση γεφυρών έχει ως κύριο σκοπό την πρόληψη της απώλειας ζωών λόγω κατάρρευσης γεφυρών σε μεγάλα σεισμικά γεγονότα. Σαν ένα παράπλευρο γεγονός της πρόληψης της κατάρρευσης, ένα μεγάλο οικονομικό όφελος πραγματοποιείται καθώς λόγω της ενίσχυσης η γέφυρα θα υποστεί περιορισμένες ζημιές. Είναι πολύ λιγότερο δαπανηρό να αντικαταστήσεις ένα υποστύλωμα ή να επισκευάσεις κάποιες αρθρώσεις, από το να αντικαταστήσεις ολόκληρη τη κατασκευή.

Η πιο καταστροφική μορφή αστοχίας για τις γέφυρες είναι η υπερβολική μετακίνηση των αρθρώσεων. Λόγω του σχεδιασμού τους, μια τέτοια μετατόπιση θα οδηγήσει στη κατάρρευση του καταστρώματος καθ' όλο το συγκεκριμένο μήκος, που σαν ντόμινο θα καταστρέψει μεγάλο μέρος της κατασκευής και θα θέσει σε κίνδυνο τις ζωές των ταξιδιωτών.

Η δεύτερη πιο ευάλωτη (σεισμικά) πλευρά της γέφυρας είναι τα βάθρα. Τα υποστυλώματα συγκρατούν την κατασκευή κι αν αστοχήσουν διατμητικά ή είναι αδύναμα καμπτικά, η κατασκευή μπορεί να καταστραφεί.

Ο βαθμός στατικής αοριστίας (υπερστατικότητα) είναι γενικά πολύ μικρότερος στις γέφυρες απ' ότι στα κτίρια. Επομένως, αστοχία ενός υποστυλώματος ή των θεμελίων είναι δυνατόν να προκαλέσουν κατάρρευση όλης της γέφυρας. Από τη στιγμή που οι γέφυρες αποτελούν σημαντικό κομμάτι του μεταφορικού συστήματος, πρέπει να έχουν επαρκή ασφάλεια έναντι του σεισμού.

Οι σεισμοί της Loma Prieta (1989), του Northridge (1994), του Kobe (1995), της Taiwan και της Τουρκίας (1999) προκάλεσαν σοβαρές ζημιές σε γέφυρες και αυτά τα γεγονότα σε συνδιασμό με την έρευνα που ξεκίνησε σαν συνέπεια των σεισμών, οδήγησαν σε σημαντικές προόδους στην αντισεισμική προστασία των γεφυρών.

### 3.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Οι μέθοδοι για την ακριβή εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου είναι ουσιαστικά οι ίδιοι με τις μεθόδους σχεδιασμού των νέων γεφυρών. Καθώς συχνά τα σχέδια των παλαιών γεφυρών δεν είναι διαθέσιμα, πρέπει να επανεκτιμηθούν βασιζόμενη στη παρούσα πρακτική και γνώση. Είναι πιθανό ότι η εγκάρσια δύναμη σχεδιασμού και οι απαιτήσεις αντοχής σημαντικών δομικών μελών στο αρχικό σχέδιο είναι ανεπαρκείς, βασιζόμενοι στους συγχρονους κώδικες. Γι' αυτό οι γέφυρες που σχεδιάστηκαν με προηγούμενους κανονισμούς εκτιμώνται ως επικίνδυνοι βασιζόμενοι στη σύγχρονη πρακτική. Είναι βασικό στην εκτίμηση του πόσο ευάλωτη είναι η κατασκευή, να χρησιμοποιούνται οι πραγματικές αντοχές της κατασκευής και του εδάφους και όχι οι ελάχιστες τιμές που ορίζονται από τους κανονισμούς.

Η προκαταρκτική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας γεφυρών εξαρτάται από μια ανάλυση που σκοπό έχει την ταυτοποίηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη σεισμική επικινδυνότητά τους. Για παράδειγμα σε μια ανάλυση των Kawasima και Unjoh (1990)[5], η ζημιά της  $i$  γέφυρας,  $D_i$ , κατηγοριοποιείται σε 5 βαθμίδες, 0 (καμία ζημιά), 1 (ασήμαντες ζημιές), 2 (μικρές ζημιές), 3 (αρκετές ζημιές), 4 (εκτεταμένες ζημιές), 5 (κατάρρευση). Επιλέγονται 15 παράγοντες που πιθανόν να οδηγούσαν σε ζημιές και ο βαθμός ζημιάς  $d_i$  εκτιμάται με βάση τον παρακάτω τύπο:

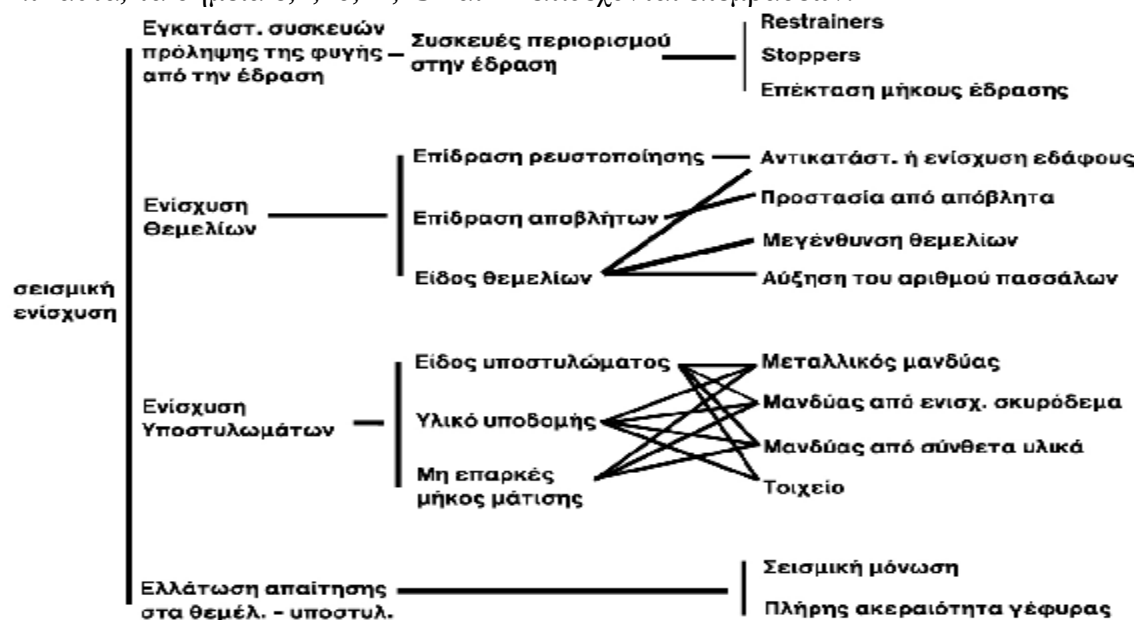
$$d_i = \sum \sum \delta_{ijk} w_{jk}$$

στον οποίο  $w_{jk}$  είναι ο συντελεστής βαρύτητας για την κατηγορία  $k$  του μέλους  $j$  και  $\delta_{ijk}$  είναι μια μεταβλητή για την κατηγορία  $k$  σε ένα μέλος  $j$  της  $i$  γέφυρας. Η  $\delta_{ijk}$  ορίζεται ότι παίρνει τη τιμή 1 αν μια ιδιότητα της γέφυρας ταιριάζει με την  $k$  κατηγορία του μέλους  $j$ , ή διαφορετικά 0. Ο συντελεστής βαρύτητας επιλέγεται ώστε να ελαχιστοποιείται το τετράγωνο της διαφοράς μεταξύ της εκτιμώμενης κατάστασης και της πραγματικότητας.

Οι 15 παράγοντες που επηρεάζουν τη σεισμική επικινδυνότητα της γέφυρας είναι[3]:

1. Κανονισμοί σχεδιασμού: Γέφυρες σχεδιασμένες με βάση παλαιότερους κανονισμούς είναι περισσότερο ευάλωτες.
2. Είδος υπερδομής: Γέφυρες με ενδιάμεσες αρθρώσεις και απλά εδραζόμενους δοκούς πολλαπλών ανοιγμάτων έχουν μεγαλύτερη επικινδυνότητα. Ενώ γέφυρες με αψίδες ή συνεχείς, πολλαπλών ανοιγμάτων γέφυρες έχουν μικρότερη επικινδυνότητα.
3. Καμπύλες και κεκλιμένες γέφυρες: Οι καμπύλες και κεκλιμένες γέφυρες δεν είναι κατ' ανάγκη πιο ευάλωτες από τις ευθείες γέφυρες.
4. Υλικό υπερδομής: Γέφυρες από οπλισμένο σκυρόδεμα ή με προένταση είναι ελαφρώς λιγότερο ευάλωτες από τις μεταλλικές, όμως η διαφορά είναι μικρή.
5. Λοξό κατάστρωμα: Γέφυρες με λοξό κατάστρωμα είναι πιο ευάλωτες.
6. Συσκευές συγκράτησης στην έδραση: Γέφυρες χωρίς πρόβλεψη τέτοιων συσκευών είναι πιο ευάλωτες.

7. Είδος υποδομής: Γέφυρες που εδράζονται σε απλά βάθρα ή πλαισιωτά βάθρα με ανεξάρτητα θεμέλια είναι πιο επικίνδυνα.
  8. Ύψος βάθρου: Γέφυρες με ψηλά βάθρα είναι πιο ευάλωτα.
  9. Συνθήκες περιοχής: Γέφυρες κατασκευασμένες σε μαλακά εδάφη έχουν μεγαλύτερη επικινδυνότητα.
  10. Ρευστοποίηση του εδάφους: Γέφυρες σε περιοχές ευάλωτες στη ρευστοποίηση είναι πιο ευάλωτες.
  11. Μεγάλες αλλαγές στις ιδιότητες του εδάφους: Γέφυρες που βρίσκονται σε περιοχές με ακανόνιστες εδαφικές στρώσεις είναι πιο επικίνδυνες.
  12. Επίδραση αποβλήτων: Γέφυρες όπου η εδαφική επιφάνεια είναι μολυσμένη είναι πιο ευάλωτες.
  13. Υλικά υποδομής: Γέφυρες που στηρίζονται από υποδομές απλού σκυροδέματος είναι πιο ευάλωτες.
  14. Είδη θεμελίων: Γέφυρες που στηρίζονται από ξύλο, τούβλα και άλλα άγνωστα υλικά είναι πιο ευάλωτες.
  15. Ένταση εδαφικής κίνησης: Γέφυρες που υπόκεινται σε σεισμικές κινήσεις μεγάλης έντασης είναι πιο ευάλωτες. Συγκεκριμένα ο κίνδυνος αυξάνει αν η μέγιστη επιτάχυνση εδάφους ξεπερνά τα 0,4g.
- Απ' αυτά, τα σημεία 6,7,10,12,13 και 14 επιδέχονται επεμβάσεων.



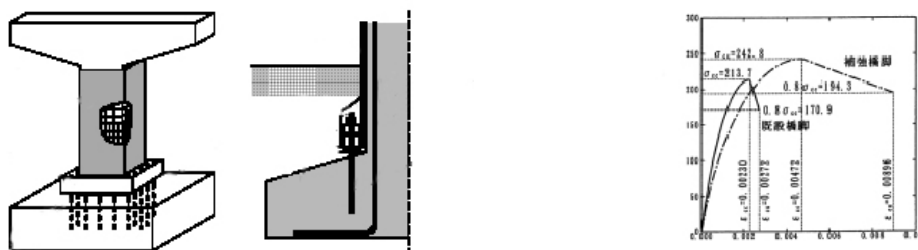
#### 4. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ

##### Υποστυλώματα:

Υποστυλώματα ενισχύονται χρησιμοποιώντας συγκολλημένα μεταλλικά πλαίσια διαφόρων παχών. Κατασκευάζονται κυκλικά ή κατα το δυνατό κυκλικά, πρακτικά όμως για ορθογωνικές διατομές παίρνουν ελλειπτικό σχήμα. Τα κελύφη προκατασκευάζονται σε 2 ή περισσότερα μέλη. Και μετά ηλεκτροσυγκολλούνται στο πεδίο για να περικυκλώσουν το υποστυλώμα. Ένα κενό 5 με 10 cm αφήνεται στο πάνω και κάτω μέρος του υποστυλώματος.

Για κυκλικά υποστυλώματα ένα κενό κατ' ελάχιστο 2,5 cm αφήνεται και γεμίζεται με τσιμεντοκονίαμα. Το τσιμεντοκονίαμα, εισπίζεται από κάτω ώστε να εξασφαλισθεί η πλήρης διαφυγή του αέρα. Η εισπίεση πρέπει να γίνεται αργά και συμμετρικά ώστε να

αποφεύγεται η μετατόπιση του κελύφους. Μικρές ράβδοι πρέπει να συγκολλούνται εσωτερικά του κελύφους ώστε να επιβληθεί το ελάχιστο κενό των 2,5 cm σε κάθε σημείο. Τα σημεία εισπίεσης πρέπει να τοποθετούνται κάθετα. Μόλις το τσιμεντοκονίαμα ξεχυλίσει από την κορυφή, το κέλυφος πρέπει να έχει γεμίσει με αυτό. Μετά από συντήρηση 2 ημερών περίπου, η κορυφή του κελύφους γεμίζει χειρονακτικά με κονίαμα προκειμένου να καλύψει τα κενά και να δημιουργήσει κλίση για την υδροροή.

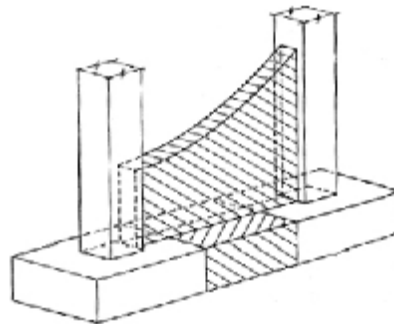
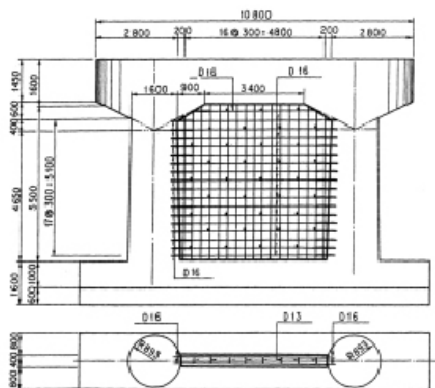


Μεταλλικά πλαίσια ελλειπτικής μορφής απαιτούν μεγαλύτερη προσπάθεια να σκυροδετηθούν. Εάν σε οποιοδήποτε σημείο η απόσταση υποστυλώματος-κελύφους ξεπερνά τα 10 cm, χαλίκι πρέπει να αναμιγνύεται στο τσιμεντοκονίαμα για να μειωθεί η συρρίκνωση. Τα ελλειπτικά κελύφη τείνουν να μετατραπούν σε κυκλικά κατά την εισπίεση καθώς το κονίαμα πιέζει το κέλυφος προς τα έξω. Περίσφυξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να συγκρατηθεί στην επιθυμητή μορφή, όμως συνήθως απλά περιορίζεται η εισπιεζόμενη ποσότητα για να μειωθεί η πίεση. Αν το τσιμεντοκονίαμα γεμίσει υψομετρικά 4 με 6 m, η πίεση του υγρού μπορεί να είναι αρκετά μικρή ώστε να μην δημιουργήσει οποιαδήποτε παραμόρφωση. Προτοποθετημένες υποδοχές εισπίεσης στα επιθυμητά ύψη εξασφαλίζουν την συνέχεια των εργασιών την επόμενη μέρα οπότε και το τσιμεντοκονίαμα θα έχει σκληρυνθεί. Μετά τη σκλήρυνση έχει εξασφαλιστεί ότι το κέλυφος δεν θα μετατοπιστεί.

Σε ένα τοιχείο με το πλάτος του στην εγκάρσια διεύθυνση αρκετά μεγαλύτερο από το ύψος στη διαμήκη διεύθυνση, ο περιορισμός του υπάρχοντος υποστυλώματος με μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα, δεν είναι αρκετός. Σε αυτή τη περίπτωση επιπλέον του μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα, ένας μεταλλικός μανδύας χρησιμοποιείται για να αυξήσει την σύνθλιψη στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης. Ο μανδύας αυτός είναι συνήθως 1-2 m ψηλός και προκατασκευασμένοι ράβδοι τοποθετούνται στο υπάρχον κομμάτι για να προλάβουν τη παραμόρφωση του μεταλλικού μανδύα. Τοποθετούνται ανα 30 cm στη κάθετη κατεύθυνση και γενικά δεν προεντείνονται γιατί συνήθως η παθητική περίσφυξη επαρκεί. Συνήθως παρέχεται και ένα κάλυμα από σκυρόδεμα γύρω από το μεταλλικό μανδύα για αντιδιαβρωτική προστασία και για προστασία από μικρές συγκρούσεις με διάφορα αντικείμενα ή οχήματα.

Σκυρόδεμα οπλισμένο με δικτυωτό οπλισμό χρησιμοποιείται επίσης πολύ συχνά. Τοποθετούνται γύρω στις νέες διαμήκεις ράβδους, ανάμεσα στο υπάρχον σκυρόδεμα προκειμένου να περισφύξουν το πυρήνα του σκυροδέματος γύρω από την περιοχή της πλαστικής άρθρωσης. Αυτό αγκυρώνεται στο νέο κομμάτι οπλισμένου σκυροδέματος, χρησιμοποιώντας αγκύρια σε γωνία 135°.

Σε μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος, η κατασκευή έγινε πιο γρήγορη χρησιμοποιώντας προκατασκευασμένα κομμάτια από σκυρόδεμα. Δύναμη προέντασης εισάγεται για να βελτιώσει τη διατμητική αντοχή και την πλαστιμότητα.

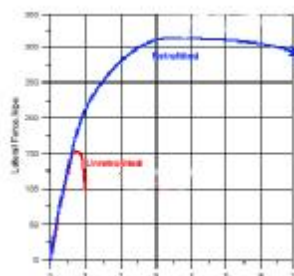
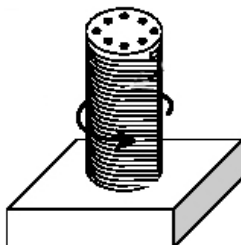


Ένα αποδοτικό και σχετικά φθηνό ( φθηνότερο του κελύφους) μέσο ενίσχυσης σε γέφυρες με βάθρα πολλαπλών υποστυλωμάτων είναι η δημιουργία τοιχείων. Τοιχεία με πάχος 30 με 40 cm τοποθετούνται ανάμεσα στα υποστυλώματα, δημιουργώντας βασικά ένα επιμήκες και εξαιρετικά δύσκαμπτο μέλος. Βλήτρα τοποθετούνται κατα μήκος του πλαισίου που δημιουργούν τα υποστυλώματα, το θεμέλιο και το κάτω μέρος του καταστρώματος για να εξασφαλίσουν τη σύνθεση του νέου με το παλιό μέλος. Τοποθετώντας εμποτισμένες με ρητινικές κόλλες ράβδους στο «καπάκι» του πλαισίου πετυχαίνουμε σημαντικές αντοχές. Το τοιχείο θα αποτρέψει τη διατμητική αστοχία του νέου μέλους και θα δημιουργήσει μια ισχυρή βάση που αντέχει στις ταλαντώσεις. Και πάλι υποδοχές εισπίεσης στο καλούπι επιτρέπουν την εισπίεση τσιμεντοκονιάματος μέχρι την κορυφή του μέλους. Τυπικά ράβδοι Φ18 τοποθετούνται ανα 30 cm τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια.

Ένα πρόγραμμα σεισμικής ενίσχυσης πρέπει να στοχεύει στην αύξηση της πλαστιμότητας στα μέλη της υποδομής. Παρότι οι μεταλλικοί μανδύες έχουν εκτεταμένως χρησιμοποιηθεί, για λόγους κατασκευαστικούς εναλλακτικοί μέθοδοι λαμβάνονται υπ' όψιν όπως η χρήση σύγχρονων σύνθετων υλικών. Στα χαρακτηριστικά τους συμπεριλαμβάνεται το ελαφρύ τους βάρος και η υψηλή δυσκαμψία. Η περίσφυξη με φύλλα ΙΟΠ επιτρέπει στα βάθρα να αναπτύξουν πλαστικές αρθρώσεις κατά τη διάρκεια των σεισμών, περιορίζοντας τη ποσότητα δύναμης που κατανέμεται στα γειτονικά μέλη. Είναι αποδοτικά σε περιοχές όπου δεν υπάρχει αρκετός χώρος για μεταλλικούς μανδύες[9].

Η επισκευή και ενίσχυση γεφυρών χρησιμοποιώντας σύγχρονα σύνθετα υλικά έχουν σαφή πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους λόγω της ευκολίας εφαρμογής και της δυνατότητας να προσαρμοστεί στην παρούσα εμφάνιση της κατασκευής[7].

Η ενίσχυση υποστυλωμάτων από ενισχυμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιώντας ΙΟΠ για να αντισταθεί στα σεισμικά φορτία είναι αρκετά συχνή. Οι ενισχύσεις χρησιμοποιώντας τετραγωνικούς μανδύες είναι αποτελεσματικοί σχεδόν κατα το ήμισυ σε σύγκριση με κυκλικούς μανδύες ΙΟΠ[10].

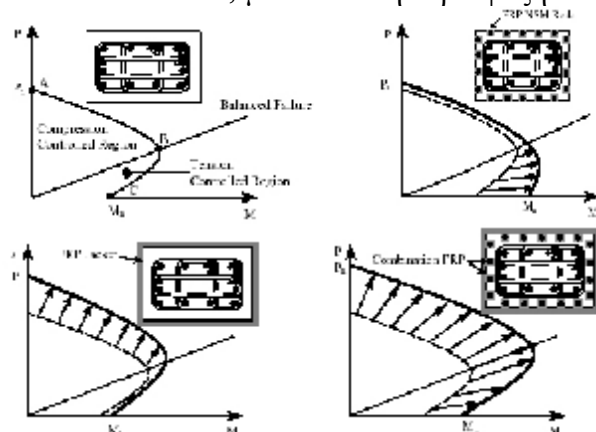


Η εφαρμογή των ΙΟΠ επιτυγχάνεται με μια διαδικασία που προσομοιάζει με την επικόλληση ταπετσαρίας και δεν απαιτείται καποιος προστατευτικός εξοπλισμός[8]. Επιπλέον επειδή η στρώση είναι της τάξεως του χιλιοστού, εφαρμόζει εύκολα στην παρούσα αρχιτεκτονική. Ο

συνδυασμός της ικανοποιητικής απόκρισης στα φορτία, ευκολίας στην εφαρμογή, το σχετικά μικρό κόστος και η μηδαμινή αισθητική ενόχληση κανεί τα FRP μια ελκυστική μέθοδο ενίσχυσης.

Με μανδύες από σύνθετα υλικά, τόσο τα κυκλικά όσο και τα ορθογωνικά υποστυλώματα μπορούν να επωφεληθούν από τα προφανή κατασκευαστικά πλεονεκτήματα. Μανδύες ΙΟΠ μπορούν να κατασκευασθούν πολύ γρήγορα οδηγώντας σε εξοικονόμηση χρόνου (κόστος) και προσπάθειας. Περιτυλίγοντας ένα τσιμεντένιο υποστήλωμα με ΙΟΠ, η διατμητική, καμπτική και αξονική αντοχή βελτιώνεται. Επιπλέον η πλαστιμότητα του στοιχείου μπορεί επίσης να αυξηθεί, χωρίς να επηρεάζεται η αντοχή αν αυτό είναι απαραίτητο. Οι μανδύες ΙΟΠ σχηματίζονται τυλίγοντας το υποστυλόμετρο με τις ίνες προσανατολισμένες στην εγκάρσια διεύθυνση. Στη συνέχεια αυτό ξηράνεται χρησιμοποιώντας θερμαντικό σώμα. Η εφαρμογή του ΙΟΠ γίνεται είτε χειρονακτικά είτε με ειδικό μηχάνημα περιτύλιξης (όπως τις παλέτες). Ο μανδύας προσφέρει σημαντική περίσφυξη στο σκυρόδεμα που οδηγεί σε βελτιώσεις των μηχανικών του ιδιοτήτων. Για χαμηλά επίπεδα διαμήκους φόρτισης, οι εγκάρσιες τάσεις είναι τόσο μικρές που ο δακτύλιος προσφέρει μικρή περίσφυξη. Όμως όταν οι αξονικές δυνάμεις ξεπεράσουν κάποιο κρίσιμο επίπεδο, η εγκάρσια τάση δεσμεύει τον μανδύα και η περίσφυξη γίνεται σημαντική. Η επίδραση της περίσφυξης είναι η δημιουργία τριαξονικής κατάστασης στο σκυρόδεμα. Είναι ήδη γνωστό ότι το σκυρόδεμα υπό τριαξονική φόρτιση παρουσιάζει ανώτερη συμπεριφορά, τόσο από πλευράς αντοχής όσο και πλαστιμότητας.

Προκειμένου να αυξηθεί η καμπτική αντοχή του βάθρου προτείνεται μια τεχνική που αναφέρεται ως εγγύως τοποθετούμενοι ράβδοι ΙΟΠ[2]. Επαρκή συνεργασία αποκτάται δημιουργώντας εγκοπές στο σημείο τοποθέτησης των ράβδων. Η συνέχεια με το θεμέλιο αποκτάται δημιουργώντας τρύπες στο μέλος. Οι εγκοπές γεμίζονται κατα το ήμισυ με ρητίνες. Η ράβδος ΙΟΠ τοποθετείται αργότερα στην εγκοπή και πιέζεται ελαφρά, αναγκάζοντας τη ρητίνη να καλύψει πλήρως τη ράβδο. Η εγκοπή μετά γεμίζει και άλλο με ρητίνη και η επιφάνεια ισιώνεται. Μετά την τοποθέτηση των ράβδων ΙΟΠ, ένας μανδύας ΙΟΠ τοποθετείται, με σκοπό τη περίσφυξη τόσο του σκυροδέματος όσο και των ράβδων.



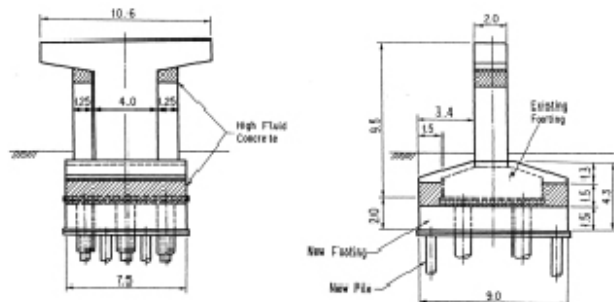
### **Θεμέλια:**

Οι εργασίες στα θεμέλια τείνουν να είναι οι πιο δύσκολες και ακριβές απ' όλες τις εργασίες ενίσχυσης. Πρέπει να αποφεύγονται με κάθε τρόπο.

Το ακραίο κόστος στις εργασίες θεμελίων προέρχεται από τις εκτεταμένες εκσκαφές που απαιτούνται και στην αύξηση των πασσάλων. Πολλές φορές ακόμα και οδοί πρόσβασης κατασκευάζονται ώστε ο βαρής εξοπλισμός να μπορεί να δουλέψει στα σημεία εκείνα.

Η πρώτη ομάδα εργασιών είναι η εκσκαφή στην κορυφή των θεμελίων και γύρω από τις πλευρές αν πάσσαλοι πρόκειται να προστεθούν. Αν θα μεγενθυθεί το θεμέλιο ο πάτος του πρέπει να είναι εμφανής αφήνοντας 15 cm ή περισσότερο του οπλισμού να προεξέχει. Αυτό πετυχαίνεται αφαιρώντας με γωνία 45° από το πάτο μέχρι να εμφανιστούν οι ράβδοι. Μια καλύτερη μέθοδος είναι η πλήρης αφαίρεση της άκρης, κατακόρυφα.

Στη συνέχεια γίνονται εργασίες πασσάλων. Η εκσκαφή των πασσάλων είναι πολύ ακριβή αλλά μπορεί να επιτευχθεί και για βάθη μέχρι 6 m. Αυτό απαιτεί την συγκόλληση πολλών σωλήνων που οδηγούνται τμηματικά.



Όλοι οι πάσσαλοι πρέπει να είναι καλά αγκυρωμένοι στο νέο θεμέλιο. Βλήτρα προστίθενται σε όλες τις προσόψεις που θα δεχτούν νέο σκυρόδεμα. Οι τρύπες για τα οριζόντια βλήτρα τρυπούνται κατακόρυφα με γωνία 20° ώστε το συγκολλητικό κονίαμα να μην ξεχειλίζει.

#### **Μόνωση και Αποσβεστήρες:**

Μονώσεις και αποσβεστήρες έχουν περιορισμένη χρήση στην ενίσχυση γεφυρών αλλά χρησιμοποιούνται περισσότερο για πολύ ευπαθείς ή εξαιρετικά σημαντικές κατασκευές. Λόγω του κόστους για να σηκωθεί η γέφυρα επάνω και να αντικατασταθεί το ελαστομερές, συνήθως χρησιμοποιούνται απλές επεκτάσεις της έδρασης ή blocks για να παραλάβουν τα φορτία αν η μόνωση αποτύχει.

Η μόνωση της κατασκευής από την καταστρεπτική επίδραση των σεισμών δεν είναι μια νέα ιδέα. Οι πρώτες πατέντες για μόνωση προέκυψαν στις αρχές του προηγούμενου αιώνα, αλλά μέχρι πολύ πρόσφατα, λίγες κατασκευές είχαν κτιστεί χρησιμοποιώντας αυτές τις ιδέες. Οι αρχικές ανησυχίες συγκεντρώθηκαν στο φόβο μιας μη ελεγχόμενης μετατόπισης στην διεπιφάνεια της μόνωσης, αλλά αυτός έχει σε μεγάλο βαθμό ξεπεραστεί με την επιτυχή ανάπτυξη αποσβεστήρων. Όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ένα εύκαμπτο μηχανισμό όπως π.χ. μονώσεις με ελαστομερή, ο αποσβεστήρας μπορεί να ελέγξει την απόκριση της μονωμένης κατασκευής, μειώνοντας τόσο τη μετατόπιση όσο και τις δυνάμεις. Γι' αυτό το λόγο έχει παρατηρηθεί εκτεταμένο ενδιαφέρον στην έννοια της μόνωσης σαν ένα αποδοτικό μέσο προστασίας γεφυρών στα τελευταία χρόνια.

Ο βασικός σκοπός της μόνωσης είναι να αυξήσει τη θεμελιώδη περίοδο ταλάντωσης, έτσι ώστε η κατασκευή να υπόκειται σε μειωμένες δυνάμεις. Όμως η μείωση στη δύναμη συνοδεύεται από αύξηση στις μετατοπίσεις. Από την άλλη πλευρά, μελέτες έδειξαν ότι το κόστος της μόνωσης αποσβένεται από το μειωμένο κόστος της υποδομής και των θεμελίων, τόσο λόγω των μικρότερων διαστάσεων που προκύπτουν όσο και λόγω των μειωμένων εξόδων επισκευής των ζημιών.

Εν προκειμένω, υπάρχουν 3 βασικά στοιχεία σε ένα σύστημα μόνωσης μιας γέφυρας:

- Μια εύκαμπτη σύνδεση ώστε η περίοδος ταλάντωσης της γέφυρας να επιμηκύνεται επαρκώς για να μειωθεί η φόρτιση.

- Ένας αποσβεστήρας, έτσι ώστε οι σχετικές μετατοπίσεις στη σύνδεση να περιορίζονται σε ένα πρακτικά αποδεκτό επίπεδο.
- Ένας τρόπος πρόσδωσης δυσκαμψίας κάτω από χαμηλές φορτίσεις όπως ο άνεμος κλπ. Περιληπτικά τα ωφέλη της σεισμικής μόνωσης περιγράφονται ως[12]:
- Μείωση στα πραγματικά φορτία που υπόκειται η γέφυρα κατά ένα συντελεστή ανάμεσα στο 5 και 10 λόγω μιας μόνωσης που προκαλεί μετατόπιση της περιόδου ως πούμε από 0,4 sec σε 2sec.
- Εξάλειψη των απαιτήσεων πλαστιμότητας και άρα ζημιών στα υποστυλώματα.
- Έλεγχος της διασποράς των σεισμικών δυνάμεων στα μέλη της υποδομής, διαστασιολογώντας ανάλογα τα ελαστομερή της μόνωσης.
- Μείωση των δυνάμεων στις οποίες υπόκεινται τα υποστυλώματα κατά ένα συντελεστή της τάξεως τουλάχιστον του 2 σε σύγκριση με ένα συμβατικό σχέδιο.
- Μείωση των δυνάμεων σχεδιασμού των θεμελίων κατα ένα συντελεστή μεγαλύτερο του 2,5 σε σύγκριση με ένα συμβατικό σχέδιο.

#### **Ακρόβαθρα**

Μια άλλη περίπτωση είναι η προστασία των ακρόβαθρων όταν η ευστάθειά του έναντι της δυναμικής πίεσης του εδάφους ήταν ανεπαρκής. Αντί της άμεσης ενίσχυσης του ακρόβαθρου, αντικαταστάθηκε εδαφικό υλικό πίσω από το ακρόβαθρο αρκετών κυβικών μέτρων από διογκωμένο πολυστυρένιο. Έτσι μειώνεται η πίεση του εδάφους.

Η σεισμική επισκευή γεφυρών, είναι μια σχετικά νέα ιδέα. Μόνο μερικά επισκευαστικά σχήματα έχουν χρησιμοποιηθεί στη πράξη. Στο παρόν επίπεδο ανάπτυξης, η σεισμική επισκευή είναι μια τέχνη που απαιτεί αρκετή κρίση μηχανικού.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. California Department of Transportation, (2001)  
“The Caltrans Post Earthquake Inspection Team”, U.S.A.
2. De Lorenzis L., (2000)  
“Strengthening of RC Structure with Near Surface Mounted FRP Rods”, MS Thesis, University of Missouri-Rolla, U.S.A.
3. Kawashima K., (2002)  
“Seismic Design, Response Modification and Retrofit of Bridges”, Tokyo, Japan
4. Kawashima K., (2000)  
“Seismic Design and Retrofit of Bridges”, 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, paper No 1818, Auckland, New Zealand
5. Kawashima K., Unjoh. S., (1990)  
“An inspection Method of Seismically Vulnerable Existing Highway Bridges”, Structural Engineering and Earthquake Engineering, Proc. JSCE, 416/I-13, pp143-150, Tokyo, Japan
6. Kiremidjian A.A., Basoz N., (1997)  
“Evaluation of Bridge Damage Data from Recent Earthquakes”, NCEER Bulletin, Vol. 11, No 2, U.S.A.
7. Malvar J.L., Morill K.B., Crawford J.E., (2001)  
“Reinforced Concrete Column Retrofit Methods for Seismic and Blast Protection” ,U.S.A.
8. Malvar J.L., Morill K.B., Ferritto J.M., Crawford J.E., (2001)  
“Composite Retrofits to Increase the Blast Resistance of Reinforced Concrete Buildings”, 10<sup>th</sup> Inter. Symp. Of Interaction of the Effects of Munitions with Structures, U.S.A.
9. Nanni A., Hsu Y., Huang P.C., (2000)  
“Assessment and Proposed Structural Repair Strategies for Bridge Piers in Taiwan Damaged by the Ji-Ji Earthquake”, Proc. 3<sup>rd</sup> Inter. Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Ottawa, Canada
10. Priestley M.J.N., Seible F., Calvi H.M., (1996)  
“Seismic Design and Retrofit of Bridges”, John Wiley & Sons, New York, U.S.A.
11. Tong S.T., Ewert T., Goings C. (1995)  
“Seismic Retrofit of California Bridges”, EQE Review, U.S.A.
12. U.S. Department of Transportation (1987)  
“Seismic Design and Retrofit Manual for Highway Bridges”, Virginia, U.S.A.