

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ : Πρόσφατες εξελίξεις της χρήσης κραμάτων μνήμης  
μορφής στην Γεφυροποιία

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ : ΖΑΦΕΙΡΗΣ ΓΙΩΡΓΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΣΟΦΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΒΟΛΟΣ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019

## Περίληψη - Ευχαριστίες

Στην διπλωματική εργασία που ακολουθεί παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον τομέα του Πολιτικού Μηχανικού ένα ιδιαίτερο υλικό που αποτελείται από κράματα μνήμης μορφής ( Shape Memory Alloys ). Αρχικά, παρουσιάζονται οι ιδιότητες των κραμάτων μνήμης μορφής καθώς και διάφορες προσπάθειες μοντέλων που αναπτύχθηκαν από επιστήμονες, για να εκφράσουν όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια την μηχανική συμπεριφορά αυτού του υλικού. Έπειτα ακολουθούν οι εφαρμογές των κραμάτων μνήμης μορφής στις κατασκευές του Πολιτικού Μηχανικού. Επίσης παρουσιάζεται από έρευνες που διεξήχθησαν, η χρήση των κραμάτων μνήμης μορφής στην γεφυροποιία, η οποία διαχωρίζεται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές είναι η 1) απομόνωση βάσης, 2) η αποκατάσταση και η αναβάθμιση, 3) ο εκτοπισμός και το rounding.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή που επέβλεψε και με συμβούλεψε για την εκπόνηση αυτής της εργασίας, κύριο Δημήτρη Σοφιανόπουλο.

## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	1
Περιεχόμενα .....	2
Κεφάλαιο 1 : Κράματα Μνήμης Μορφής – Ιδιότητες και Καταστατικοί Νόμοι	
1.1 Γενικά Στοιχεία .....	3
1.2 Μοντέλα και Καταστατικές Εξισώσεις .....	10
1.2.1 Μοντέλο του Özdemir .....	10
1.2.2 Μοντέλο των Graesser και Cozzarelli .....	12
1.2.3 Μοντέλο του Wilde .....	15
1.2.4 Μοντέλο του Auricchio .....	16
Κεφάλαιο 2 : Εφαρμογές των κραμάτων μνήμης μορφής	
2.1 Εφαρμογές των SMAs σε δομοστατικές κατασκευές .....	20
2.1.1 Έλεγχος δόνησης της κατασκευής χρησιμοποιώντας SMAs .....	20
2.1.2 Εφαρμογή των SMAs ως ενεργοποιητή .....	22
2.1.3 Τα SMAs ως τένοντες στις κατασκευές από σκυρόδεμα .....	23
2.1.4 Τα SMAs ως ένα εξωτερικό υλικό τάνυσης σε κατασκευή από σκυρόδεμα .....	23
2.1.5 Αναβάθμιση της κατασκευής χρησιμοποιώντας τις υπερελαστικές ιδιότητες των SMAs .....	24
2.1.6 Εφαρμογή των SMAs ως συνδετήρες μεταξύ κατασκευαστικών εξαρτημάτων .....	25
2.2 Τα κράματα μνήμης μορφής στην γεφυροποιία .....	26
2.2.1 Απομόνωση βάσης .....	26
2.2.2 Αποκατάσταση και αναβάθμιση .....	34
2.2.3 Εκτοπισμός και rouding .....	44
2.3 Βιβλιογραφία .....	64

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> : Κράματα Μνήμης Μορφής – Ιδιότητες και Καταστατικοί Νόμοι (Μοντέλα)

## 1.1 Γενικά Στοιχεία

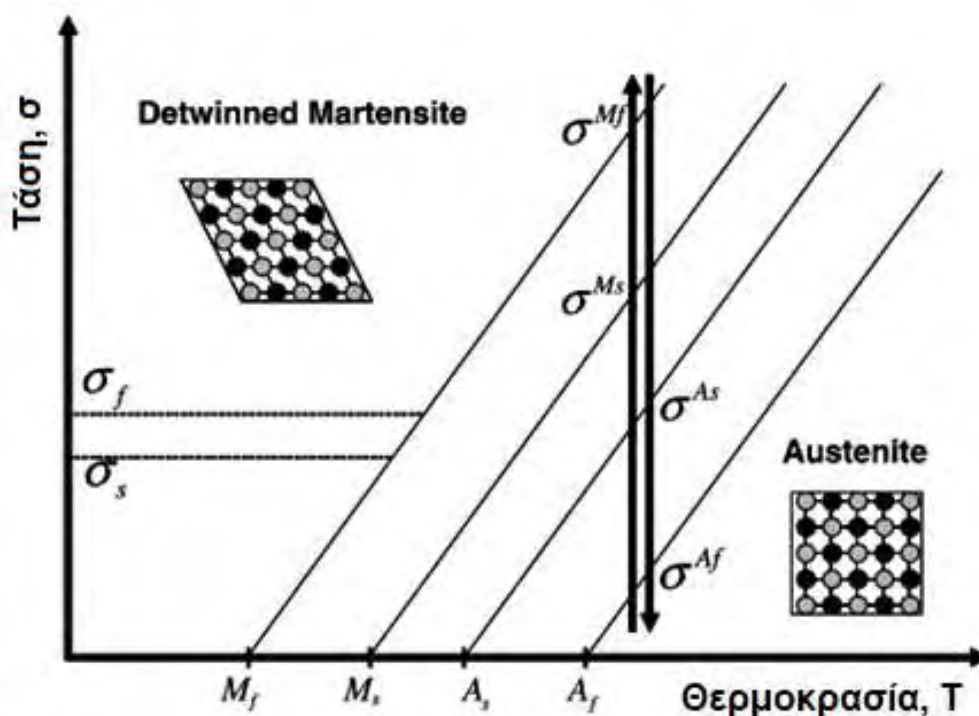
Είναι ευρέως αποδεκτό ότι δεν είναι οικονομικά εφικτό να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται δομήματα, τα οποία δέχονται δυνατούς σεισμούς, στην ελαστική περιοχή. Ως συνέπεια, η τωρινή φιλοσοφία σχεδιασμού αποδεχέται μεγάλες ζημιές υπο συνθήκες δυνατού σεισμού, υπό την προϋπόθεση ότι η κατασκευή είναι αρκετά πλάσטיμη, ώστε να εμφανίζει σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις χωρίς να καταρείει<sup>[1]</sup>. Τα κράματα μνήμης μορφής (SMA) είναι μία μοναδική κατηγορία υλικού, το οποίο έχει την ικανότητα να υφίστανται μεγάλες παραμορφώσεις, έως και 8-10%, μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από τα συνηθισμένα μέταλλα και κράματα, καθώς και να επανέρχονται πίσω στην αρχική τους απαραμόρφωτη κατάσταση ή διάσταση είτε μέσω εφαρμογών θέρμανσης, το οποίο είναι το φαινόμενο μνήμης μορφής, είτε με την αφαίρεση της τάσης, το οποίο είναι το υπερελαστικό φαινόμενο. Οι ιδιαίτερες ιδιότητες κραμάτων μνήμης μορφής είχαν αρχικά ανακαλυφθεί από τους Chang και Read το 1951, παρόλα ταύτα το 1962 ο Buechler και οι συνεργάτες του, ύστερα από έρευνες και πρακτικές εφαρμογές εις βάθος, παρατήρησαν το φαινόμενο μνήμης μορφής στο υλικό νικέλιο – τιτάνιο (NiTi)) στο εργαστήριο Naval Ordnance, όπου προέκυψαν έρευνες και πρακτικές εφαρμογές εις βάθος. Στο παρόν, τα κράματα μνήμης μορφής ευρέως εφαρμόζονται στην βιοιατρική, σε μηχανολογικές εφαρμογές, καθώς και σε εφαρμογές Πολιτικών Μηχανικών, καθιστώντας απαραίτητη την ακριβή κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς τους, έτσι ώστε να υπάρξει πλήρης ανάπτυξη και εκμετάλλευση των δυνατοτήτων τους<sup>[2-6]</sup>.

Η μοναδική μηχανική συμπεριφορά των κραμάτων μνήμης μορφής προέρχεται πιθανόν από την αναστρέψιμη μαρτενσιτική φάση μεταμόρφωσης (MPT), η οποία προκαλείται λόγω θερμοκρασίας ή μηχανικής ανάδρασης μεταξύ της οστενιτικής και της μαρτενσιτικής φάσης. Ο οστενίτης έχει κυβική κρυσταλλογραφική δομή μεγάλης συμμετρίας, με σταθερή δομή σε υψηλές θερμοκρασίες και σε μικρές τιμές τάσεων. Ο μαρτενσίτης έχει παραλληλόγραμμη δομή μικρής συμμετρίας, και είναι σταθερός σε χαμηλές θερμοκρασίες και σε μεγάλες τιμές τάσεων. Στην κατάσταση χωρίς τάση, το υλικό χαρακτηρίζεται από τέσσερις μεταβατικές θερμοκρασίες, οι οποίες ονομάζονται ως εξής: αρχή

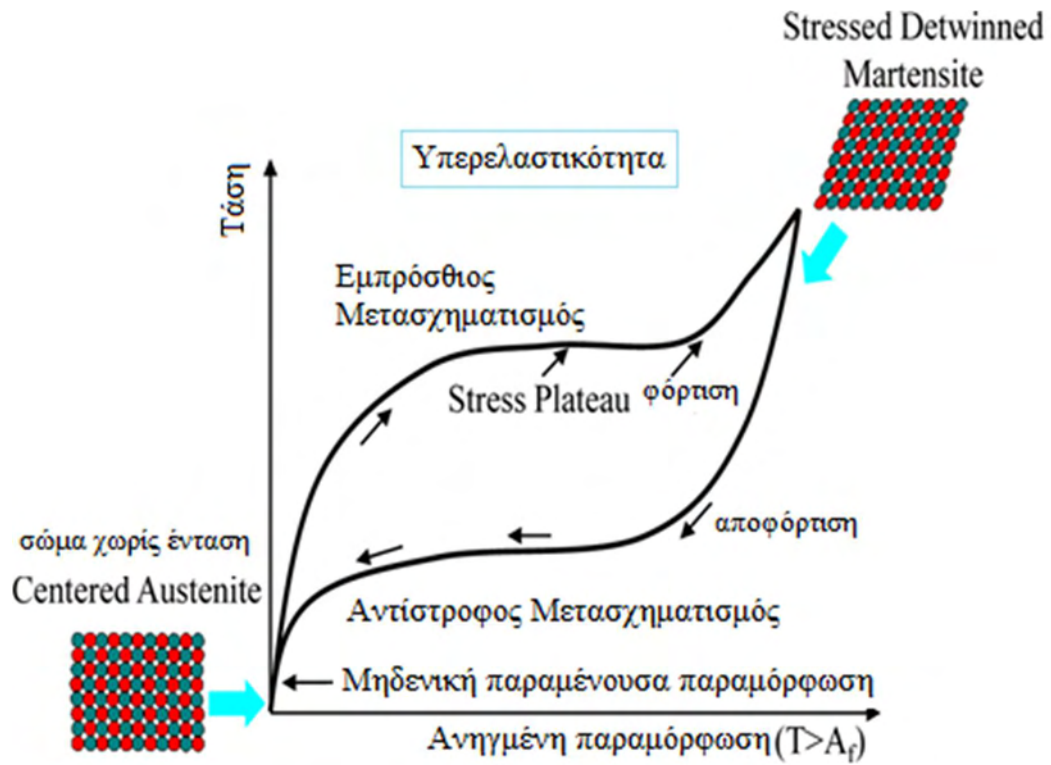
θερμοκρασίας του μαρτενσίτη  $M_s$ , τέλος θερμοκρασίας του μαρτενσίτη  $M_f$ , αρχή θερμοκρασίας του ωστενίτη  $A_s$ , τέλος θερμοκρασίας του ωστενίτη  $A_f$ .

Σε θερμοκρασίες μικρότερες από αυτές του τέλους θερμοκρασίας του μαρτενσίτη  $M_f$ , τυχόν παραμένουσες παραμορφώσεις που προκλήθηκαν από τον επαναπροσανατολισμό του μαρτενσίτη λόγω εφαρμογής τάσεων, μπορούν να ανακτηθούν ζεσταίνοντας το υλικό σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτές του τέλους θερμοκρασίας ωστενίτη  $A_f$ , το οποίο θα έχει ως αποτέλεσμα το φαινόμενο μνήμης μορφής. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτές του τέλους θερμοκρασίας του ωστενίτη  $A_f$ , η μορφή του μαρτενσίτη συσχετίζεται με εμπρόσθια μαρτενσιτική φάση μεταμόρφωσης το οποίο συμβαίνει λόγω τάσης όταν το φορτίο ξεπερνάει την εμπρόσθια τάση μεταμόρφωσης.

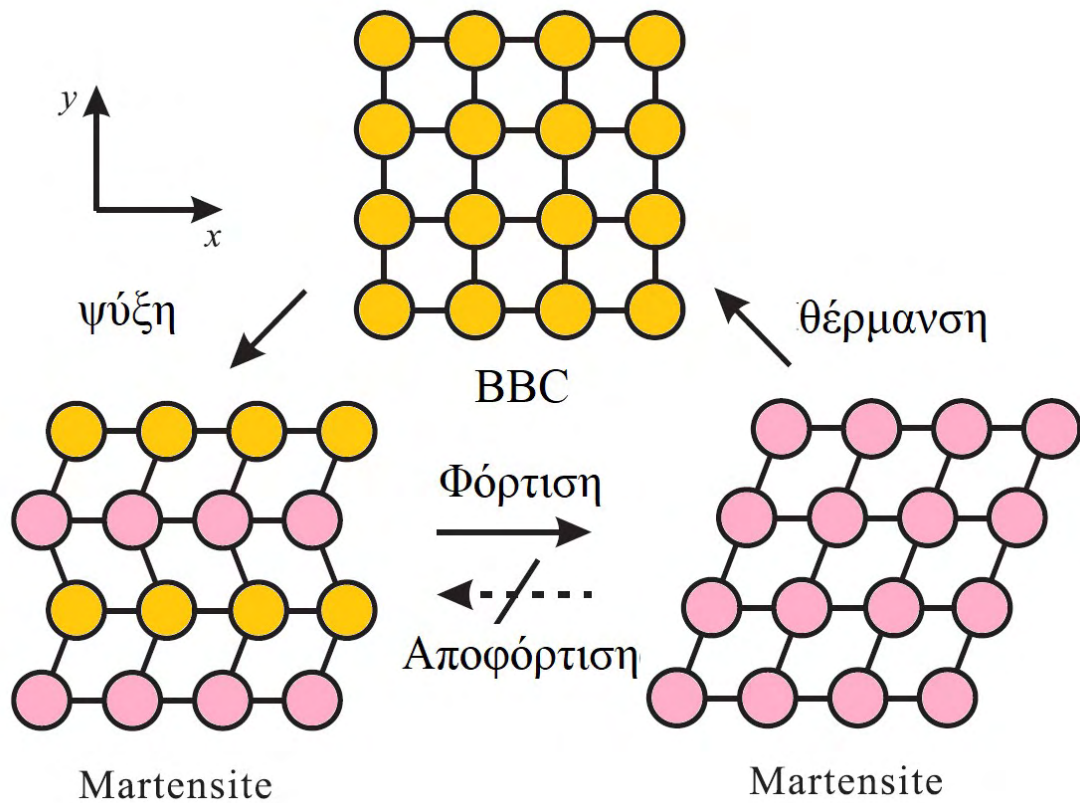
Παρόλα αυτά, το υλικό επανέρχεται σε ωστενίτη σε μικρότερες τιμές τάσεων, χωρίς παραμένουσες παραμορφώσεις, το οποίο σχετίζεται με αντίστροφη μαρτενσιτική φάση μεταμόρφωσης κατά την αποφόρτιση, φαινόμενο το οποίο οδηγεί στην *υπερελαστική* συμπεριφορά. Οι ως άνω ιδιότητες απεικονίζονται γραφικά στα Σχήματα 1.1 – 1.3. Σε αυτά ο όρος detwinned αναφέρεται σε δίδυμους κρυστάλλους που έχουν διαχωριστεί, BBC είναι η συντομογραφία του body-centered cubic (επίσης κρυσταλλογραφικός όρος) ενώ κρατήθηκε χωρίς μετάφραση η λέξη stress plateau.



Σχήμα 1.1 Υπερελαστικός δρόμος φορτίου



Σχήμα 1.2 Τοπική καμπύλη τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων της υπερελαστικής



Σχήμα 1.3 Αναπαράσταση της μετατόπισης και της ανάκτησης Σχήματος των SMAs

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες υπήρξε ένας σημαντικός αριθμός ερευνών ειδικευμένος στην μαρτενσιτική φάση μεταμόρφωσης<sup>[7,8]</sup> καθώς και τους παράγοντες που προκαλούν αυτό το φαινόμενο<sup>[9-11]</sup>. Το 1965 ο Wang<sup>[12]</sup> περιέγραψε πιο λεπτομερώς το φαινόμενο μνήμης μορφής και διεξάγοντας έρευνες περίθλασης ακτίνων X σε κρυστάλλους NiTi, απέδειξε ότι τα κράματα υποβάλλονται σε μια μαρτενσιτική μετάβαση, το οποίο αναγνωρίστηκε ότι είναι υπεύθυνο για της μοναδικές φυσικές ιδιότητες τους. Αργότερα το 1968 ο Buechler<sup>[13]</sup> και οι συνεργάτες του κατά την διάρκεια της έρευνας εκτίμησης της καταλληλότητας των κραμάτων NiTi για υδρο-διαστημικές εφαρμογές, διερεύνησαν την αλλαγή της θερμοκρασίας μετασχηματισμού λόγω της διακύμανσης της αναλογίας σύνθεσης των NiTi και της αντικατάστασης του νικελίου με κοβάλτιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη θερμοκρασία μετασχηματισμού συμβαίνει κοντά στο στοιχειομετρικό NiTi, καθώς η αντικατάσταση του με κοβάλτιο μειώνει της θερμοκρασίες μετασχηματισμού.

Στα επόμενα χρόνια το ενδιαφέρον των ερευνητών για τα κράματα μνήμης μορφής μεγάλωσε, καθώς επικεντρώθηκαν στην επίδραση της θερμοκρασίας, της τιμές φόρτισης, τον αριθμό των κύκλων, την σύνθεση του υλικού και στην απόκριση της μηχανικής συμπεριφοράς τους. Ο Miyazaki<sup>[14,15]</sup>(1981), διερεύνησε την επιρροή της θερμοκρασίας στα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων, διεξάγοντας πειράματα εφελκυσμού σε δείγματα υπό διαφορετικές θερμοκρασίες, καθώς και το φαινόμενο της κυκλικής παραμόρφωσης στα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων. Έδειξαν ότι η τάση μετασχηματισμού μειώνεται και η αντίστροφη τάση μετασχηματισμού αυξάνεται με αυξανόμενη θερμοκρασία καθώς και με αυξανόμενους αριθμούς κύκλων. Οι Shaw και Kyriakides<sup>[16]</sup>(1995), προσπάθησαν να αποκτήσουν μία πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της θερμομηχανικής αλληλεπίδρασης σε σύρματα NiTi. Διεξήγαγαν μία σειρά από πειράματα ερευνώντας τα αποτελέσματα της λανθάνουσας θερμότητας και των τιμών φόρτισης για την απόκριση των δειγμάτων σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Τα μονοαξονικά πειράματα εφελκυσμού, σε σύρματα NiTi, σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες υπό ισοθερμικές και μη ισοθερμικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα είναι το νερό και ο αέρας αντίστοιχα, απέδειξαν ότι η θέρμανση και ψύξη του δείγματος, οι οποίες προκαλούνται από μετασχηματισμούς, αυξάνουν την τάση που απαιτείται για τον μετασχηματισμό από ωστενίτη σε μαρτενσίτη και μειώνουν την τάση που απαιτείται για τον αντίστροφο μετασχηματισμό. Πειράματα σε ποικίλες τιμές μετατοπίσεων και υπό διαφορετικές θερμοκρασίες έδειξαν ότι η αύξηση των τιμών των μετατοπίσεων έχουν ως

αποτέλεσμα την μεταβολή θερμότητας, η οποία επηρεάζει την τοπική θερμοκρασία του υλικού και τροποποιεί την τάση μετασχηματισμού. Οι Dolce και Cardone<sup>[17,18]</sup>(2001), διεξήγαγαν πειράματα σε δείγματα από μαρτενσίτη και ωστενίτη με σκοπό να εκτιμήσουν την κυκλική συμπεριφορά ως μία συνάρτηση συχνότητας φόρτισης και εύρους παραμόρφωσης και την συμπεριφορά κόπωσης υπο κανονικά και ακραία εύρη παραμορφώσεων. Τα αποτελέσματα στα δείγματα από μαρτενσίτη έδειξαν ότι οι συχνότητες φόρτισης επηρέαζαν τα αποτελέσματα μόνο όταν οι συνθήκες από στατικές γινόταν δυναμικές, καθώς η αντίσταση της κόπωσης ήταν εξαιρετική σε σύγκριση με συνηθισμένα μέταλλα και τα δείγματα εμφάνισαν σταθερή και επαναλαμβανόμενη μηχανική συμπεριφορά. Από την άλλη πλευρά, τα δείγματα από ωστενίτη έδειξαν ότι έχουν μικρή επίδραση στις τιμές παραμορφώσεων και αξιολογη αντίσταση κόπωσης. Τα πειράματα σε δείγματα ωστενίτη υπο τάσεις εφελκυσμού εστιάζοντας στην θερμοκρασία, την συχνότητα φόρτισης και τον αριθμό των κύκλων απέδειξε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την μεταφορά των βρόγχων υστέρησης προς τα πάνω, η συχνότητα φόρτισης επηρεάζει την συμπεριφορά κυρίως περνώντας από χαμηλές συχνότητες προς τις ενδιαφερόμενες συχνότητες σεισμού και ο αυξανόμενος αριθμός των κύκλων επιδεινώνει την δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας και αυξάνει τον ρυθμό κρύνσης.

Ο Eggeler<sup>[19]</sup>(2004), μελέτησε την κόπωση των κραμάτων μνήμης μορφής διεξάγοντας πειράματα αμφίπλευρου εφελκυσμού και στρεπτοκαμπτικά πειράματα. Αργά ισοθερμικά αμφίπλευρου εφελκυσμού πειράματα σε σύρμα δύο διαφορετικών θερμοκρασιών για αυξανόμενους αριθμούς κύκλων, έδειξαν ότι οι τάσεις μειώνονται καθώς ο αριθμός των κύκλων αυξάνεται. Τα στρεπτοκαμπτικά πειράματα έδειξαν ότι η θερμοκρασία του σύρματος αυξάνεται γρηγορότερα για πιο χοντρά σύρματα και για μεγαλύτερες ταχύτητες στρέψης. Η αύξηση θερμοκρασίας του σύρματος οδηγεί σε αύξηση τάσης η οποία συμβάλλει στην πρόωμη ρήξη κόπωσης. Τα πειράματα αμφίπλευρου εφελκυσμού κόπωσης σε επίπεδα δείγματα για διαφορετικές μηχανικές μεταχειρήσεις έδειξαν ότι η μικροδομή επηρεάζει την απόκριση του κράμματος και επίσης επηρεάζουν τον βαθμό της τοπικοποίησης των παραμορφώσεων κατά την διάρκεια κυκλικής φόρτισης. Καλή αντίσταση κόπωσης μπορεί να επιτευχθεί βελτιστοποιώντας την μικροδομή.

Οι Dayananda και Rao<sup>[20]</sup>(2008), διεξήγαγαν εφελκυστικά και κυκλικά πειράματα σε σταθερό εύρος παραμορφώσεων σε σύρματα NiTi σε θερμοκρασία



δωματίου για διαφορετικές τιμές παραμορφώσεων. Τα εφελκυστικά πειράματα έδειξαν ότι σε υψηλότερες τιμές παραμορφώσεων, ακόμη και πριν την ολοκλήρωση του μαρτενσιτικού σχηματισμού, η ελαστική παραμόρφωση του ήδη σχηματισμένου μαρτενσίτη ξεκινάει, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα σε μια επικάλυψη αυτών των δύο διαδικασιών. Τα κυκλικά πειράματα έδειξαν ότι καθώς η τιμή παραμόρφωσης αυξάνεται, ο βρόγχος υστέρησης περιορίζεται και μεταφέρεται προς τα πάνω, ως αποτέλεσμα της αυτο-θέρμανσης του δείγματος. Μία άλλη παρατήρηση είναι ότι τα δύο ξεχωριστά τμήματα της αποφόρτισης συγχωνεύονται σε υψηλότερες τιμές παραμορφώσεων. Τα κυκλικά πειράματα με επαναλαμβανόμενους κύκλους σε σταθερή τιμή παραμόρφωσης έδειξαν ότι καθώς ο αριθμός των κύκλων αυξάνεται, οι τάσεις μειώνονται μετατοπίζοντας το μέσο σημείο σε χαμηλότερο καθεστώς τάσης.

Τα κράματα μνήμης μορφής έχουν πολλά πλεονεκτήματα κάποια από τα οποία είναι η ολκιμότητα, η μεγάλη δυσκαμψία σε μεγάλες τιμές παραμορφώσεων, η εξαιρετική αντίσταση διάβρωσης και κόπωσης, η αντίσταση σε επαναλαμβανόμενες κυκλικές φορτίσεις και η έκταση του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού και η υστεριτική συμπεριφορά μπορεί να ελεγχθεί από την επιλογή της σύνθεσης και των ποικίλων θερμοκρασιακών μεταγχειρίσεων του υλικού [Otsuka και Ren, (2008)<sup>[21]</sup>].

Υπάρχουν πολλά κράματα τα οποία εμφανίζουν της παραπάνω ιδιότητες, αλλά δεν έχουν όλα από αυτά εμπορική χρήση. Κράματα βασισμένα στον χαλκό της το Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni έχουν μικρό κόστος, τα οποία παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας κλασικές μεταλλουργικές μεθόδους και εμπορικά διαθέσιμες αλλά παρουσιάζουν αστάθεια, ανεφαρμοσιμότητα, ευθραυστότητα και φτωχή θερμομηχανική απόδοση [Jani, (2014)<sup>[22]</sup>]. Τα κράματα Cu-Zn-Al έχουν το μειονέκτημα ότι η μαρτενσιτική τους φάση σταθεροποιείται από μακροπρόθεσμη γήρανση σε θερμοκρασίες δωματίου. Αυτό το γεγονός προκαλεί μία αύξηση της θερμοκρασίας μετασχηματισμού με το πέρασμα του χρόνου και την αποσύνθεση της κατασκευής τους, όταν εκτίθενται σε μεγάλες θερμοκρασίες. Το μειονέκτημα των κραμάτων Cu-Al-Ni είναι ότι μπορούν μόνο να κατασκευαστούν σε υψηλές θερμοκρασίες και η τελική θερμοκρασιακή μεταγχείριση θα πρέπει να ελέγχεται στενά, ώστε να παραχθεί το επιθυμητό προϊόν.

Από την άλλη πλευρά τα κράματα NiTi διαθέτουν της καλύτερες ανακτήσιμες παραμορφώσεις από τα εμπορικά διαθέσιμα κράματα μνήμης μορφής. Παρουσιάζουν μεγάλη σταθερότητα σε κυκλικές εφαρμογές, αυξημένη ηλεκτρική αντίσταση, αντίσταση διάβρωσης και ένα μέτριο φάσμα διαλυτότητας, το οποίο επιτρέπει

αλλαγές στην σύνθεση και την ανάμειξη με άλλα στοιχεία ώστε να τροποποιήσουν τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά[Fuggaza,(2003)<sup>[23]</sup>]. Η θερμοκρασία στην οποία η αλλαγή φάσης συσχετίζεται με το φαινόμενο μνήμης μορφής μπορεί να προσαρμοστεί τροποποιώντας το ποσοστό του νικέλιου και του τιτανίου. Η βιομηχανοποίηση των κραμάτων NiTi είναι μία δύσκολη εργασία και οι τεχνικές των μηχανών μπορούν να χρησιμοποιηθούν με δυσκολία, γεγονός το οποίο μεγαλώνει το κόστος τους. Παρόλο που υπάρχει αυτό το μειονέκτημα, οι άριστες ιδιότητες των κραμάτων NiTi τα καθιστούν τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα κράματα μνήμης μορφής για εμπορική χρήση.

Όσον αφορά για εφαρμογές της μηχανικής, οι έρευνες εφαρμογών του φαινομένου υπερελαστικότητας των κραμάτων μνήμης μορφής έχουν αυξηθεί τα τελευταία χρόνια. Ο Wilde K.<sup>[24]</sup> (2000), μελέτησε την συμπεριφορά, του κράματος μνήμης μορφής, ράβδου – αποσβεστήρα το οποίο προστέθηκε σε ένα σύστημα απομόνωσης από στρώματα ελαστομερούς. Αποδείχτηκε ότι οι μετατοπίσεις του καταστρώματος γέφυρας μπορούν να μειωθούν χρησιμοποιώντας αποσβεστήρες από κράματα μνήμης μορφής. Ο Dolce<sup>[25]</sup> (2000), ερεύνησε την σχεδιαστική διαδικασία και τον λειτουργικό μηχανισμό συσκευών βασισμένων σε κράματα μνήμης μορφής, ώστε να χρησιμοποιηθούν ως ειδικά υποστηρίγματα σε πλαισιωτές κατασκευές και μεμονωμένες συσκευές για κτήρια και γέφυρες. Οι DesRoches και Delemont<sup>[26]</sup> (2002), διεξήγαγαν πειράματα σε μια ράβδο δέσμευσης, από κράματα μνήμης μορφής, των 25.4 mm ώστε να χρησιμοποιηθεί σε γέφυρες. Τα αποτελέσματα της αναλυτικής μελέτης των πολλών ανοιγμάτων απλά στηριζόμενης γέφυρας έδειξαν ότι οι ράβδοι περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής μειώνουν της σχετικές μετατοπίσεις αρθρώσεων στο ακλόνητο στήριγμα. Ο Ocel<sup>[27]</sup> (2004), ερεύνησε την αποτελεσματικότητα των μερικώς δεσμευμένων συνδέσεων χρησιμοποιώντας συνδετικά στοιχεία από κράματα μνήμης μορφής, παρουσιάζοντας υποσχόμενα αποτελέσματα για την χρήση των κραμάτων μνήμης μορφής στην σχεδιαστική και ανακατασκευαστική αντίσταση έναντι σεισμών. Ο Lafortune<sup>[28]</sup> (2007), εξέτασε την αποτελεσματικότητα της χρήσης προ-τανυσμένων υποστηλωμάτων στην απόκριση ενός μονόροφου πλαισίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη μετατόπιση μπορεί να μειωθεί. Ο McCormick<sup>[29]</sup> (2007) και οι συνεργάτες του, διεξήγαγαν μία σειρά μη γραμμικών χρονοϊστορικών αναλύσεων σε ένα σύστημα ενισχυμένο με κλασικό σκυρόδεμα και σε ένα σύστημα ενισχυμένο με σκυρόδεμα από κράματα μνήμης μορφής, με το τελευταίο να επιδεικνύει μικρότερες τιμές στην στροφή του

υποστηλώματος και την παραμένουσα στροφή της στέγης. Οι Zhang και Zhu<sup>[30]</sup> (2007), πρότειναν ένα καινοτόμο αποσβεστήρα βασιζόμενο σε κράματα μνήμης μορφής ο οποίος αποτελούνταν από δύο κομμάτια ολισθαίνοντα το ένα πάνω στο άλλο, με υπερελαστικά σύρματα από κράματα μνήμης μορφής, προσκολλημένα σε αυτά. Μη γραμμική δυναμική χρονοϊστορική ανάλυση πραγματοποιήθηκε, ώστε να εξετασθεί η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αποσβεστήρα που είχε ενσωματωθεί σε μία χαλύβδινη πλαισιωτή κατασκευή σχεδιασμένη με αντίσταση σε ροπή, δείχνοντας μικρότερες σχετικές μετατοπίσεις ορόφων, όταν χρησιμοποιούταν ο προ-παραμορφωμένος αποσβεστήρας. Ο Saiidi<sup>[31]</sup> (2008) και οι συνεργάτες του ενδιαφέρθηκαν στην εφαρμογή των κραμάτων μνήμης μορφής της γέφυρες. Διεξήγαγαν πειράματα σε μια συσκευή από κράματα μνήμης μορφής ώστε να χρησιμοποιηθεί ως καλώδιο περιορισμού μεταξύ αρθρώσεων εντός ανοίγματος σε γέφυρες από σκυρόδεμα, καθώς και αναλυτικές έρευνες (Shrestha και Saiidi, (2015)<sup>[32]</sup>) σε πέντε διαφορετικούς τύπους γεφυρών, ο ένας από τους οποίους περιείχε υπερελαστικές οπλισμένες ράβδους από κράματα μνήμης μορφής NiTi και ύστερα από πειραματικές και αναλυτικές έρευνες (Varela και Saiidi, (2016)<sup>[33]</sup>) σε μία καινοτόμο ιδέα για υποστηλώματα γεφυρών από ράβδους κραμάτων μνήμης μορφής, τα οποία τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό ενός πλαστικού αρθρωτού στοιχείου από λάστιχο. Τα αποτελέσματα από όλες τις έρευνες απέδειξαν ότι η χρήση των κραμάτων μνήμης μορφής είναι αποτελεσματική στην εξάλειψη της ζημιάς, καθιστώντας τα ελκυστικά υλικά για της μηχανικούς και τους ερευνητές γεφυρών.

## 1.2 Μοντέλα και Καταστατικές Εξισώσεις των SMAs

### 1.2.1 Μοντέλο του Ozdemir

Η πρώτη αξιολογή προσπάθεια ώστε να αναπτυχθεί μια λογική σχέση μεταξύ δύναμης και μετατόπισης για ένα μεταλλικό αποσβεστήρα μπορεί να βρεθεί στην εργασία που διεξείγαγε ο Özdemir<sup>[34]</sup>(1976). Ένας από τους στόχους στην διπλωματική εργασία του Özdemir ήταν να αναπτύξει ένα μαθηματικό μοντέλο ικανό να περιγράφει την σχέση μεταξύ δύναμης και παραμόρφωσης των ενεργειακών αποσβεστήρων υπό πλαστική παραμόρφωση προκαλούμενη από κυκλική φόρτιση. Ξεκινώντας από το rate-dependent<sup>1</sup> μοντέλο των Johnston και Gilman, ο Özdemir

---

<sup>1</sup> εξαρτώμενο από τον ρυθμό μεταβολής των παραμορφώσεων

πρότεινε ένα rate-independent<sup>2</sup> μοντέλο, καθιστώντας το ανώτερο από τα rate-dependent μοντέλα, που αναπαρήγαγαν την συμπεριφορά των ενεργειακών αποσβεστήρων. Η μονοδιάστατη μορφή μοντέλου των Johnston και Gilman σχετίζεται με την δύναμη  $F$  και την παραμόρφωση  $\delta$  σύμφωνα με την σχέση:

$$\frac{\dot{F}}{F_0} = \frac{\dot{\delta}}{\delta_0} - \frac{1}{\tau} \left( \frac{F}{F_0} \right)^\eta \quad (1.1)$$

όπου  $F_0$ ,  $\delta_0$  είναι η δύναμη και παραμόρφωση διαρροής, αντίστοιχα, και  $\tau$  είναι μία χρονική σταθερά, η υπερκείμενη τελεία αναπαριστά παραγωγή ως προς τον χρόνο και ο εκθέτης  $\eta$  περιορίζεται σε περιττούς ακέραιους αριθμούς. Προκειμένου να συμπεριληφθεί η εργοσκληρυνση (work-hardening), εισάγεται η *backforce* ως μια εσωτερική μεταβλητή:

$$\frac{\dot{S}}{F_0} = \frac{a}{\tau} \left( \frac{F-S}{F_0} \right)^\eta \quad (1.2)$$

Επομένως η εξίσωση (1.1) τροποποιείται ως:

$$\frac{\dot{F}}{F_0} = \frac{\dot{\delta}}{\delta_0} - \frac{1}{\tau} \left( \frac{F-S}{F_0} \right)^\eta \quad (1.3)$$

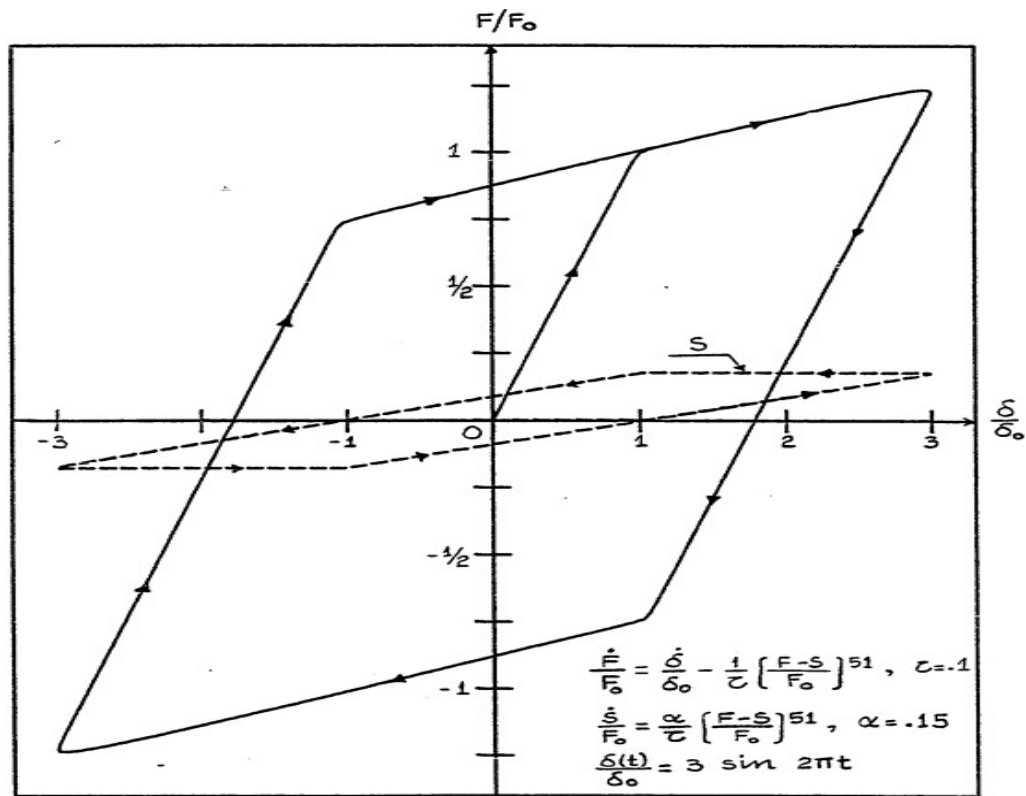
Ερευνώντας την συμπεριφορά αυτού του μοντέλου, παρατηρείται ότι για μεγάλες τιμές του εκθέτη  $\eta$  δημιουργούνται έντονες αλλαγές στο πλαστικό φάσμα. Για μικρές τιμές του  $\eta$ , η ανεξαρτησία των τιμών μπορεί να επιτευχθεί μεταβάλλοντας την σταθερά του χρόνου  $\tau$  σύμφωνα με την σχέση:

$$\frac{1}{\tau} = \left| \frac{\dot{\delta}}{\delta_0} \right| \quad (1.4)$$

Μια τυπική καμπύλη που αναπαράγεται από αυτό το μοντέλο φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

---

<sup>2</sup> ανεξάρτητο του ρυθμού μεταβολής των παραμορφώσεων



Σχήμα 1.4 Τυπικός βρόγχος υστέρησης παραγόμενος από το μοντέλο του Özdemir

Όσον αφορά την προσομοίωση της συμπεριφοράς που παρουσιάζουν τα κράματα μνήμης μορφής, σημαντικός περιορισμός στο μοντέλο του Özdemir είναι ότι δεν μπορεί να συλλάβει την υπερελαστική τους συμπεριφορά, διότι η ανελαστική παραμόρφωση δεν ξεκινάει να μειώνεται μέχρις ότου θλιπτικές τάσεις επιτευχθούν δημιουργώντας τον βρόγχο που αναπαριστάται στο Σχήμα 1.4.

### 1.2.2 Μοντέλο των Graesser και Cozzarelli

Οι Graesser και Cozzarelli<sup>[35]</sup> (1991) τροποποίησαν το μοντέλο του Özdemir, και πιο συγκεκριμένα την εξίσωση για την backstress, προσθέτοντας έναν άλλο όρο σε αυτήν, ώστε να συλλάβουν την συμπεριφορά των κραμάτων μνήμης μορφής καθώς και το φαινόμενο της υπερελαστικότητας. Η εξίσωση της τάσης, η οποία ήταν ίδια με αυτή του Özdemir, είχε αρχικά εκφρασθεί ως εξής:

$$\dot{\sigma} = E \left[ \dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon} \left( \frac{\sigma - \beta}{Y} \right)^\eta \right] \quad (1.5)$$

όπου  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας κατά Young,  $\varepsilon$  είναι η τιμή παραμόρφωσης,  $\beta$  είναι η backstress,  $Y$  είναι η τάση διαρροής και  $\eta$  είναι μία σταθερά, η οποία εκφράζει την δυσκολία αλλαγής από ελαστικές σε πλαστικές καταστάσεις. Η backstress δίνεται από τον τύπο :

$$\beta = E\alpha \left\{ \varepsilon^{in} + f_t |\varepsilon|^c \operatorname{erf}(a\varepsilon) [u(-\varepsilon)] \right\} \quad (1.6)$$

στον οποίο  $\alpha$  είναι μία σταθερά που αφορά την κλίση της καμπύλης τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων και ισούται με :

$$\alpha = \frac{E_y}{E - E_y} \quad (1.7)$$

όπου  $E_y$  είναι το μέτρο ελαστικότητας μετά την διαρροή.

Η ανελαστική παραμόρφωση  $\varepsilon^{in}$  εκφράζεται ως εξής:

$$\varepsilon^{in} = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (1.8)$$

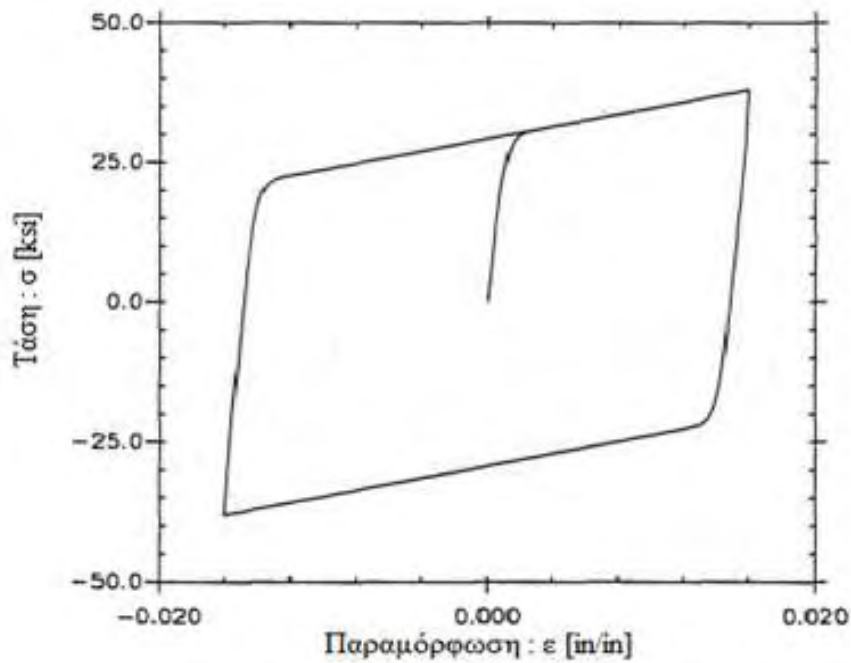
Οι παράμετροι  $f_i$ ,  $c$  και  $\alpha$  είναι σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό. Η σταθερά  $f_i$  συμπεριλαμβάνεται με σκοπό να ακολουθούνται οι τρόποι της υστερητικής συμπεριφοράς των SMAs, δηλαδή τόσο η μνήμη μορφής όσο και η υπερελαστικότητα. Οι συμβολισμοί  $\text{erf}(\cdot)$  και  $u(\cdot)$  χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν την συνάρτηση σφάλματος και την συνάρτηση μονάδας βήματος αντίστοιχα. Η συνάρτηση σφάλματος ορίζεται ως:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (1.9)$$

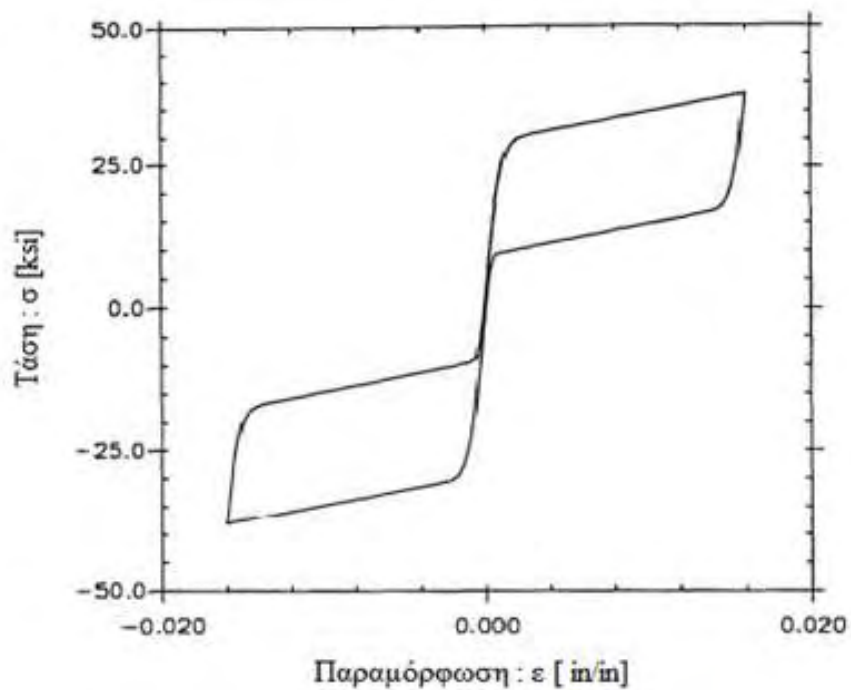
ενώ η συνάρτηση μονάδας βήματος ως:

$$u(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1.10)$$

Η συνάρτηση μονάδας βήματος θα ενεργοποιήσει τον πρόσθετο όρο της συνάρτησης backstress μόνο κατά την αποφόρτιση. Το τμήμα του υστερητικού βρόγχου κατά την διάρκεια της φόρτισης είναι ανεπηρέαστο από αυτόν. Το κίνητρο για την επιλογή της συγκεκριμένης μορφής της backstress προκύπτει από την ανάγκη μηδενικής παραμένουσας παραμόρφωσης, κάτι το οποίο είναι απαραίτητο για την περιγραφή της υπερελαστικής συμπεριφοράς της υλικού. Η επίδραση του πρόσθετου όρου από μαθηματική άποψη είναι ότι ξαφνικά αυξάνει η backstress κατά την έναρξη της αποφόρτισης. Για έναν υπερελαστικό τύπο απόκρισης οι παράμετροι  $f_i$ ,  $c$  και  $\alpha$  επιλέγονται έτσι ώστε η backstress να υπερβεί την τάση κατά την έναρξη της αποφόρτισης και αυτό προκαλεί την μείωση της ανελαστικής παραμόρφωσης. Αν η παράμετρος  $f_i$  πάρει την τιμή ίση με το μηδέν, τότε το σχήμα που παράγεται από το μοντέλο θυμίζει της καμπύλες που παράχθηκαν από το μοντέλο του Özdemir, το οποίο αντιστοιχεί στην απόκριση του φαινόμενου μνήμης μορφής. Η τυπική απόκριση του εν λόγω μοντέλου απεικονίζεται στα Σχήματα 1.5 και 1.6, για  $f_i = 0$  και  $f_i \neq 0$  αντίστοιχα.



Σχήμα 1.5 Τυπική κυκλική απόκριση μοντέλου των Graesser και Cozzarelli για  $f_i = 0$   
(φαινόμενο μνήμης μορφής) (1991)



Σχήμα 1.6 Τυπική κυκλική απόκριση μοντέλου των Graesser και Cozzarelli για  $f_i \neq 0$   
(υπερελαστικό φαινόμενο) (1991)

Ο περιορισμός στο μοντέλο των Graesser και Cozzarelli είναι ότι δεν μπορεί να συλλάβει την ελαστική φόρτιση του μαρτενσίτη ο οποίος ακολουθεί την πλήρη μεταμόρφωση από ωστενίτη σε μαρτενσίτη σε ένα υπερελαστικό τύπο απόκρισης.

Επιπλέον, όπως οι μελέτες έδειξαν [Shaw και Kyriakides<sup>[16]</sup> (1995), Dolce και Cardonne<sup>[17,18]</sup> (2001), Dayananda και Rao<sup>[20]</sup> (2008)] η απόκριση των κραμάτων μνήμης μορφής επηρεάζεται από τον ρυθμό μεταβολής της παραμόρφωσης, υποδηλώνοντας ότι διαφορετικοί βρόγχοι παράγονται για διαφορετικές τιμές παραμόρφωσης χρονικά. Το μοντέλο των Graesser και Cozzarelli είναι και αυτό rate-independent, όπως άλλωστε και αυτό του Özdemir, στο οποίο και βασίζεται.

### 1.2.3 Μοντέλο του Wilde

Ο Wilde<sup>[24]</sup> (2000), επέκτεινε το μοντέλο των Graesser και Cozzarelli ώστε να αναπαραστήσει την ελαστική φόρτιση του μαρτενσίτη, την οποία το μοντέλο αυτών δεν μπορούσε να περιγράψει. Αντίθετα με τους Graesser και Cozzarelli, οι οποίοι τροποποίησαν την έκφραση της backstress του Özdemir, ο εν λόγω ερευνητής την κράτησε ίδια, αλλά τροποποίησε την έκφραση για την τάση, προσθέτοντας δύο όρους ως ακολούθως:

$$\dot{\sigma} = E \left[ \dot{\varepsilon} - |\dot{\varepsilon}| \left( \frac{\sigma - \beta}{\gamma} \right) \right] u_I(\varepsilon) + E_m \dot{\varepsilon} u_{II}(\varepsilon) + (3a_1 \dot{\varepsilon} \varepsilon^2 + 2a_2 \text{sign}(\varepsilon) \dot{\varepsilon} \varepsilon^2 + a_3 \dot{\varepsilon}) u_{III}(\varepsilon) \quad (1.11)$$

όπου οι συναρτήσεις  $u_I(\varepsilon)$ ,  $u_{II}(\varepsilon)$ ,  $u_{III}(\varepsilon)$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$u_I(\varepsilon) = (1 - u_{II}(\varepsilon) - u_{III}(\varepsilon)) \quad (1.12)$$

$$u_{II}(\varepsilon) = \begin{cases} 1, & |\varepsilon| \geq \varepsilon_m \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (1.13)$$

$$u_{III}(\varepsilon) = \begin{cases} 1, & \varepsilon \dot{\varepsilon} > 0 \text{ και } \varepsilon_1 < |\varepsilon| < \varepsilon_m \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (1.14)$$

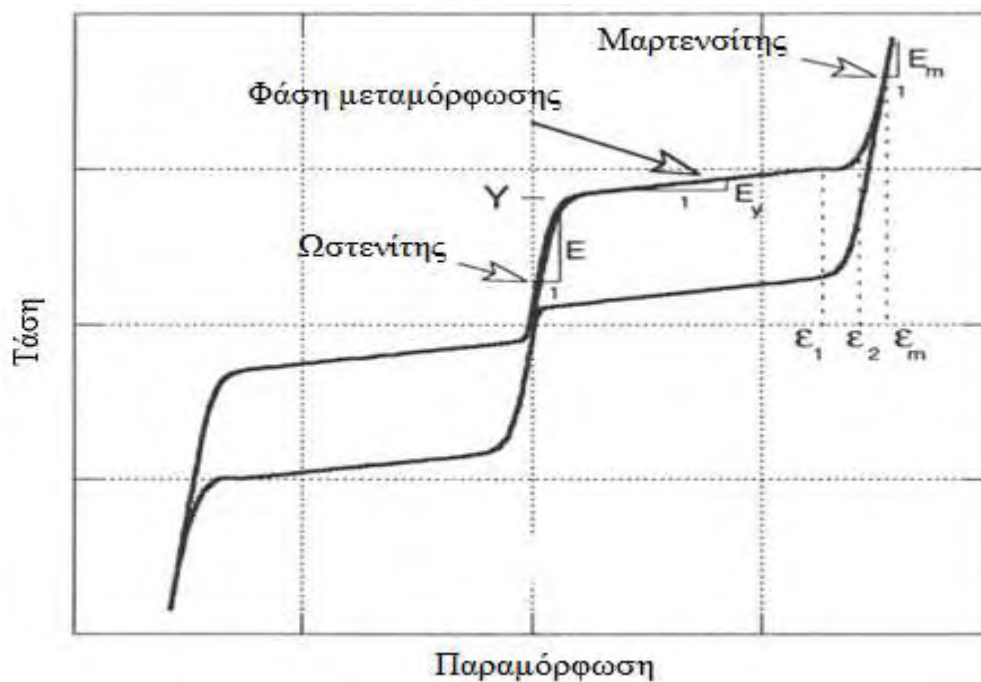
ενώ η παράμετρος  $\varepsilon_1$  ισούται με:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_m - 0.03 \quad (1.15)$$

Ο όρος  $E_m \dot{\varepsilon} u_{II}(\varepsilon)$  περιγράφει την ελαστική συμπεριφορά του μαρτενσίτη, η οποία ενεργοποιείται όταν η παραμόρφωση είναι υψηλότερη από  $\varepsilon_m$ , το οποίο ορίζει το σημείο που ο μετασχηματισμός από ωστενίτη σε μαρτενσίτη είναι ολοκληρωμένος. Η ομαλή μεταφορά από την καμπύλη τάσης κλίσης  $E_y$  στην καμπύλη ελαστικής φόρτισης κλίσης  $E_m$  επιτυγχάνεται προσθέτοντας τον τελευταίο όρο στην εξίσωση, ο οποίος είναι ενεργός μόνο κατά την φόρτιση για παραμορφώσεις μεγαλύτερες από το  $\varepsilon_1$  και μικρότερες από το  $\varepsilon_m$ . Οι σταθερές  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  ελέγχουν την καμπυλότητα της μετάβασης και επιλέγονται έτσι ώστε οι κλίσεις της συνάρτησης που ορίζεται από τον τελευταίο όρο στα σημεία  $\varepsilon_1$  και  $\varepsilon_2$  να είναι σύμφωνες με της κλίσεις των κραμάτων μνήμης μορφής πλαστικής συμπεριφοράς και της μαρτενσιτικής ελαστικής απόκρισης. Η ομαλότητα της μετάβασης διέπεται από την επιλογή της κλίσης στην



παραμόρφωση  $\varepsilon_2$ . Όλες οι παραπάνω παράμετροι παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.7. Το πιο σημαντικό μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι ότι απαιτεί μια εκ των προτέρων γνώση της παραμέτρου  $\varepsilon_m$ , έτσι ώστε να δώσει ακριβή συμπεράσματα, καθώς η παράμετρος  $\varepsilon_1$ , η οποία υποδηλώνει το σημείο όπου η καμπυλότητα ξεκινάει, ορίζεται αυθαίρετα. Επιπλέον, η εισαγωγή τριών επιπρόσθετων παραμέτρων, οι οποίες είναι οι  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  και  $\alpha_3$  απαιτεί την προσαρμογή τους χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα, ώστε να υπάρξουν ακριβή αποτελέσματα.



Σχήμα 1.7. Σχηματική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης μοντέλου Wilde

#### 1.2.4 Μοντέλο του Auricchio

Ο Auricchio<sup>[36]</sup> το 2007 διατύπωσε ένα μοντέλο για την συμπεριφορά των κραμάτων μνήμης μορφής βασιζόμενο σε δύο βαθμωτές εσωτερικές μεταβλητές, το στατικό τμήμα μαρτενσίτη,  $\xi_{st}$ , και το δυναμικό τμήμα μαρτενσίτη,  $\xi$ . Το πρώτο αναπαριστά το τμήμα του μαρτενσίτη που αποκτάται κάτω από στατικές συνθήκες φόρτισης και το δεύτερο αποκτάται υπό δυναμικές συνθήκες φόρτισης. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι νόμων της κινηματικής που διέπουν την εμπρόσθια και την αντίστροφη παραμόρφωση οι οποίοι είναι:

Για την εμπρόσθια παραμόρφωση:

$$\text{Γραμμική} \left\{ \begin{array}{l} \dot{\xi}_{ST} = -(1 - \xi_{ST}) \frac{|\dot{\sigma}_{ST}|}{|\sigma_{ST} - \sigma_{f,ST}^{AS}} H_{ST}^{AS} \\ \dot{\xi} = -(1 - \xi) \frac{|\dot{\sigma}|}{|\sigma - \sigma_f^{AS}} H^{AS} - \frac{\xi - \xi_{ST}}{\tau} H_u \end{array} \right\} \quad (1.16)$$

$$\text{Δυναμική} \left\{ \begin{array}{l} \dot{\xi}_{ST} = -\pi_{ST}^{AS} (1 - \xi_{ST}) \frac{|\dot{\sigma}_{ST}|}{|\sigma_{ST} - \sigma_{f,ST}^{AS}} H_{ST}^{AS} \\ \dot{\xi} = -\pi^{AS} (1 - \xi) \frac{|\dot{\sigma}|}{|\sigma - \sigma_f^{AS}} H^{AS} - \frac{\xi - \xi_{ST}}{\tau} H_u \end{array} \right\} \quad (1.17)$$

$$\text{Εκθετική} \left\{ \begin{array}{l} \dot{\xi}_{ST} = \beta_{ST}^{AS} (1 - \xi_{ST}) \frac{|\dot{\sigma}_{ST}|}{(|\sigma_{ST} - \sigma_{f,ST}^{AS}|)^2} H_{ST}^{AS} \\ \dot{\xi} = \beta^{AS} (1 - \xi) \frac{|\dot{\sigma}|}{(|\sigma - \sigma_f^{AS}|)^2} H^{AS} - \frac{\xi - \xi_{ST}}{\tau} H_u \end{array} \right\} \quad (1.18)$$

όπου  $H_{ST}^{AS}, H^{AS}$  και  $H_u$  είναι μηδέν εκτός εάν οι συνθήκες που περιγράφονται παρακάτω ικανοποιούνται:

$$H_{ST}^{AS} = 1 \text{ όταν } |\dot{\sigma}_{ST}| > 0 \text{ και } \sigma_{s,ST}^{AS} \leq |\sigma_{ST}| \leq \sigma_{f,ST}^{AS}$$

$$H^{AS} = 1 \text{ όταν } |\dot{\sigma}| > 0 \text{ και } \sigma_s^{AS} \leq |\sigma| \leq \sigma_f^{AS}$$

$$H_u = 1 \text{ όταν } |\sigma| > |\sigma_{ST}|$$

Οι παράμετροι  $\sigma_{s,ST}^{AS}, \sigma_s^{AS}, \sigma_{f,ST}^{AS}, \sigma_f^{AS}$  εκφράζουν την τάση κατά την οποία η στατική και δυναμική εμπρόσθια παραμόρφωση ξεκινάει και τελειώνει αντίστοιχα, καθώς οι παράμετροι  $\pi_{ST}^{AS}, \pi^{AS}, \beta_{ST}^{AS}, \beta^{AS}$  διέπουν την ταχύτητα της στατικής και της δυναμικής φάσης μεταβατικής εξέλιξης.

Για την αντίστροφη παραμόρφωση ισχύουν οι σχέσεις:

$$\text{Γραμμική} \left\{ \begin{array}{l} \dot{\xi}_{ST} = \xi_{ST} \frac{|\dot{\sigma}_{ST}|}{|\sigma_{ST} - \sigma_{f,ST}^{SA}} H_{ST}^{SA} \\ \dot{\xi} = \xi \frac{|\dot{\sigma}|}{|\sigma - \sigma_f^{SA}} H^{SA} - \frac{\xi - \xi_{ST}}{\tau} H_u \end{array} \right\} \quad (1.19)$$

$$\text{Δυναμική} \left\{ \begin{array}{l} \dot{\xi}_{ST} = \pi_{ST}^{SA} \xi_{ST} \frac{|\dot{\sigma}_{ST}|}{|\sigma_{ST} - \sigma_{f,ST}^{SA}} H_{ST}^{SA} \\ \dot{\xi} = \pi^{SA} \xi \frac{|\dot{\sigma}|}{|\sigma - \sigma_f^{SA}} H^{SA} - \frac{\xi - \xi_{ST}}{\tau} H_u \end{array} \right\} \quad (1.20)$$

$$\text{Εκθετική} \left\{ \begin{array}{l} \dot{\xi}_{ST} = \beta_{ST}^{SA} \xi_{ST} \frac{|\dot{\sigma}_{ST}|}{(|\sigma_{ST} - \sigma_{f,ST}^{SA}|)^2} H_{ST}^{SA} \\ \dot{\xi} = \beta^{SA} \xi \frac{|\dot{\sigma}|}{(|\sigma - \sigma_f^{SA}|)^2} H^{SA} - \frac{\xi - \xi_{ST}}{\tau} H_u \end{array} \right\} \quad (1.21)$$

όπου  $H_{ST}^{SA}, H^{SA}$  είναι μηδέν εκτός εάν οι συνθήκες που περιγράφονται παρακάτω ικανοποιούνται:

$$H_{ST}^{SA} = 1 \text{ \acute{oταν } |\dot{\sigma}_{ST}| < 0 \text{ και } \sigma_{f,ST}^{SA} \leq |\sigma_{ST}| \leq \sigma_{s,ST}^{SA}}$$

$$H^{SA} = 1 \text{ \acute{oταν } |\dot{\sigma}| < 0 \text{ και } \sigma_f^{SA} \leq |\sigma| \leq \sigma_s^{SA}}$$

Για να μοντελοποιήσουμε της διαφορετικές ελαστικές ιδιότητες του ωστενίτη και του μαρτενσίτη, θα εισαχθούν ένα στατικό μέτρο ελαστικότητας,  $E_{ST}$ , και ένα δυναμικό μέτρο ελαστικότητας,  $E$ . Γνωρίζοντας το μέτρο ελαστικότητας αγνού ωστενίτη,  $E_A$ , και αγνού μαρτενσίτη,  $E_S$ , το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας εκφράζεται ως:

$$E_{ST} = \frac{E_A E_S}{E_S + (E_A - E_S) \xi_{ST}} \quad (1.22)$$

$$E = \frac{E_A E_S}{E_S + (E_A - E_S) \xi} \quad (1.23)$$

Επιπλέον, το θεμελιώδες μέρος του μοντέλου, η σχέση μεταξύ τάσης – παραμόρφωσης, πρέπει να εισαχθεί. Η στατική τάση,  $\sigma_{ST}$ , και η δυναμική τάση,  $\sigma$ , εκφράζονται ως:

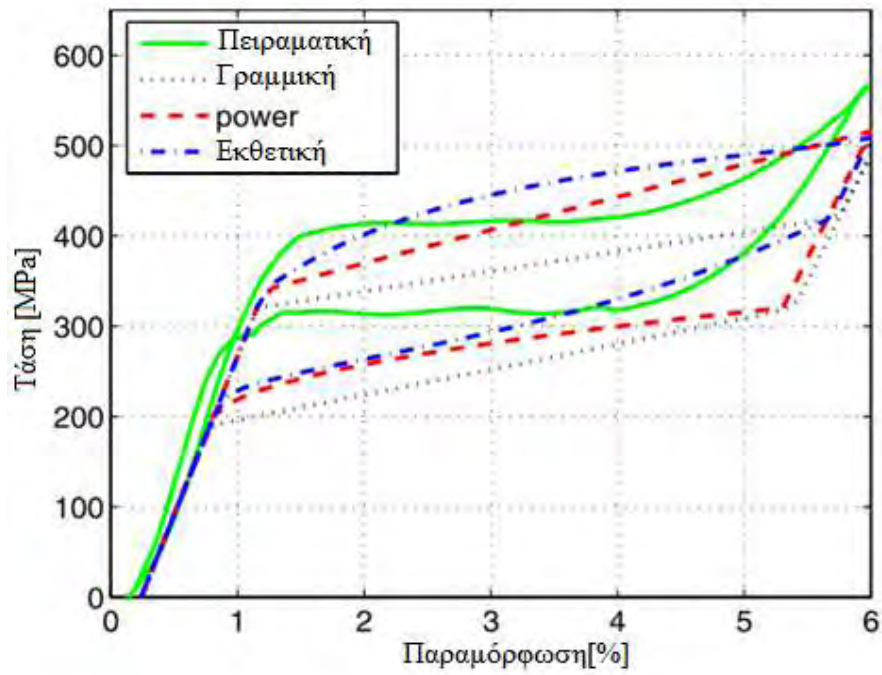
$$\sigma_{ST} = E_{ST} \varepsilon_{ST}^{el} = E_{ST} (\varepsilon - \varepsilon_{ST}^{in}) = E_{ST} (\varepsilon - \varepsilon_L \xi_{ST} \text{sign}(\sigma_{ST})) \quad (1.24)$$

$$\sigma = E \varepsilon^{el} = E (\varepsilon - \varepsilon^{in}) = E (\varepsilon - \varepsilon_L \xi \text{sign}(\sigma)) \quad (1.25)$$

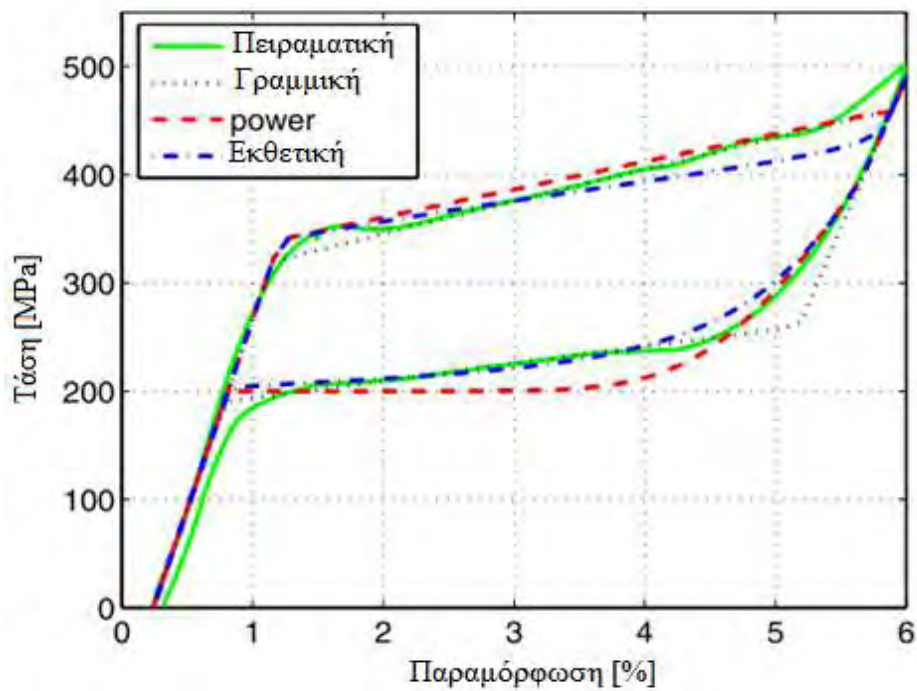
όπου  $\varepsilon_L$  είναι η μέγιστη παραμένουσα παραμόρφωση.

Αυτό το μοντέλο ενσωματώνει τα βασικά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς των κραμάτων μνήμης μορφής, τα οποία τα μοντέλα που συζητήθηκαν παραπάνω [μοντέλο Ozdemir (1976), μοντέλο Graesser – Cozzarelli (1991) και μοντέλο Wilde (2000)] δεν λαμβάνουν υπόψη, την rate-dependence.

Συγκρίνοντας την απόκριση του μοντέλου με πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από μονοαξονικά κυκλικά τεστ σε διαφορετικές τιμές παραμορφώσεων, σε εύρος δυναμικό και οιονεί στατικό, που διεξήγε ο DesRoches<sup>[37]</sup> (2004), είναι εμφανές ότι αναπαριστά επαρκώς την συμπεριφορά των κραμάτων μνήμης μορφής όπως απεικονίζεται στα σχήματα 1.8 και 1.9. Ένας περιορισμός του μοντέλου είναι ότι απαιτεί γνώση εκ των προτέρων της μέγιστης παραμένουσας παραμόρφωσης των κραμάτων μνήμης μορφής. Επιπλέον, αυξάνει τον αριθμό των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στις δέκα για τον γραμμικό νόμο της κινητικής και στις δεκατέσσερις για τον εκθετικό νόμο της κινητικής, γεγονός που το καθιστά λιγότερο απλό και εύκολο στην χρήση του.



Σχήμα 1.8 Σύγκριση απόκρισης του μοντέλου σε πειραματικά δεδομένα του DesRoches (2004) για συχνότητα των 0.025 Hz



Σχήμα 1.9 Σύγκριση απόκρισης του μοντέλου σε πειραματικά δεδομένα του DesRoches (2004) για συχνότητα των 1 Hz

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> : Εφαρμογές των κραμάτων μνήμης μορφής

### 2.1 Εφαρμογές των SMAs σε δομοστατικές κατασκευές

Οι ιδιότητες των κραμάτων μνήμης μορφής που μπορούν να ενσωματωθούν της δομοστατικές κατασκευές είναι:

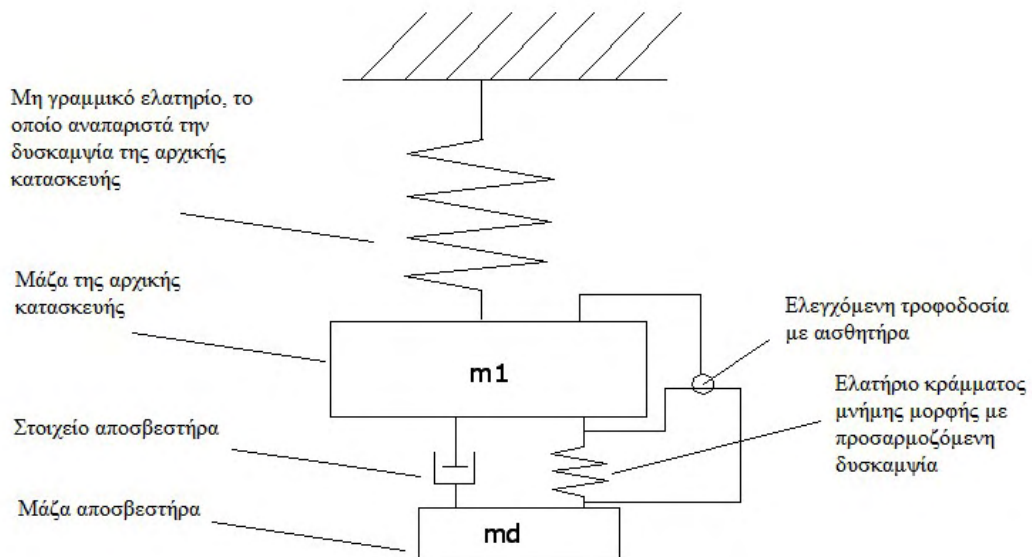
- 1) Η μεγάλη δύναμη που παράγεται κατά την επιστροφή στο αρχικό τους σχήμα είναι μία πολύ χρήσιμη ιδιότητα.
- 2) Επαναλαμβανόμενη απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας παραμόρφωσης υπο φόρτιση χωρίς μόνιμη παραμόρφωση.
- 3) Τα κράματα μνήμης μορφής έχουν άριστα χαρακτηριστικά απόσβεσης σε θερμοκρασία χαμηλότερη από το εύρος θερμοκρασίας μετάβασης.
- 4) Άριστη ιδιότητα σε αντίσταση διάβρωσης.
- 5) Τα κράματα μνήμης μορφής έχουν χαμηλή πυκνότητα και υψηλή αντίσταση κόπωσης υπο μεγάλους κύκλους παραμόρφωσης.
- 6) Έχουν την ικανότητα να θερμαίνονται ηλεκτρικά για την ανάκτηση του σχήματος.

#### 2.1.1 Έλεγχος δόνησης της κατασκευής χρησιμοποιώντας κράματα μνήμης μορφής.

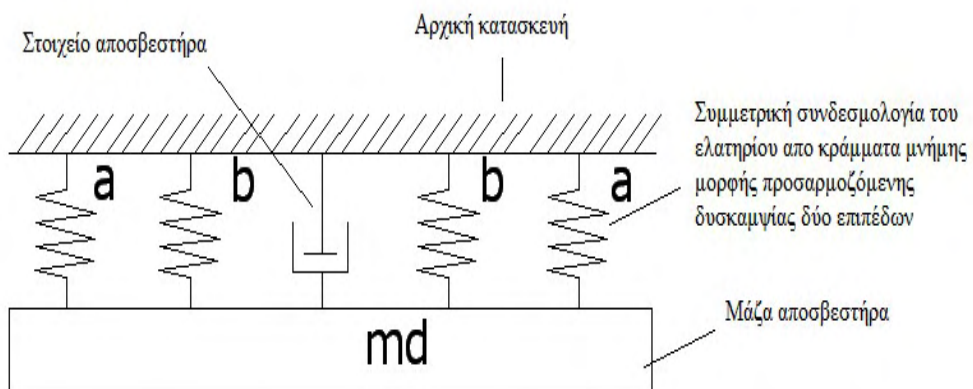
Ο έλεγχος δόνησης της κατασκευής είναι δυνατός μέσω της προσαρμοστικότητας αλλαγής της συχνότητας διέγερσης ή μέσω αλλαγής της ιδιοσυχνότητας. Γενικά συμβαίνει όταν υπάρχει αλλαγή στο στατικό φορτίο της κατασκευής ή όταν η κατάσταση του δομοστατικού συστήματος αλλάζει. Ο Nae<sup>[38]</sup> πρότεινε τον έλεγχο της υπερελαστικής καμπύλης τάσης παραμόρφωσης λεπτών καλωδίων από κράματα μνήμης μορφής για δονήσεις έως και 5 Hz. Για τον έλεγχο θερμότητας χρησιμοποιήθηκαν αντίσταση θέρμανσης και αναγκαστική ψύξη. Αυτή είναι μία μέθοδος ενεργούς απόσβεσης χρησιμοποιώντας την χωριτικότητα απόσβεσης και την δυνατότητα ρύθμισης λειτουργικότητας των κραμάτων μνήμης μορφής.

Ο Shanin<sup>[39]</sup> παρουσίασε ένα μοντέλο για ένα μονωμένο άνοιγμα ενός πολυόροφου κτηρίου με διασταυρομένους εφελκυστικούς συνδέσμους οι οποίοι αποτελούνται από ράβδους από κράματα μνήμης μορφής και επίσης χρησιμοποιούνται ως ενεργοποιητές. Ο Williams<sup>[40]</sup> παρουσίασε ένα μοντέλο με προσαρμοζόμενο ελατήριο κατά το οποίο η δυσκαμψία ενός ελατηρίου υποστηρίγματος από κράματα μνήμης μορφής ρυθμιζόταν από την αντίσταση

θέρμανσης. Το άκρο του υποστηρίγματος με μάζα λειτουργούσε ως ένα προσαρμοζόμενο σύστημα απόσβεσης με μεταβλητή ιδιοσυχνότητα. Αυτό το σχέδιο ελατηρίου με προσαρμοζόμενη δυσκαμψία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό προσαρμόσιμων αποσβεστήρων συντονιζόμενης μάζας για δομοστατικές κατασκευές. Μία γενική εικόνα της ιδέας της προσαρμόσιμου αποσβεστήρα ρυθμιζόμενης μάζας χρησιμοποιώντας ελατήρια από κράματα μνήμης μορφής όπως φαίνεται στα σχήματα 2.1 και 2.2.



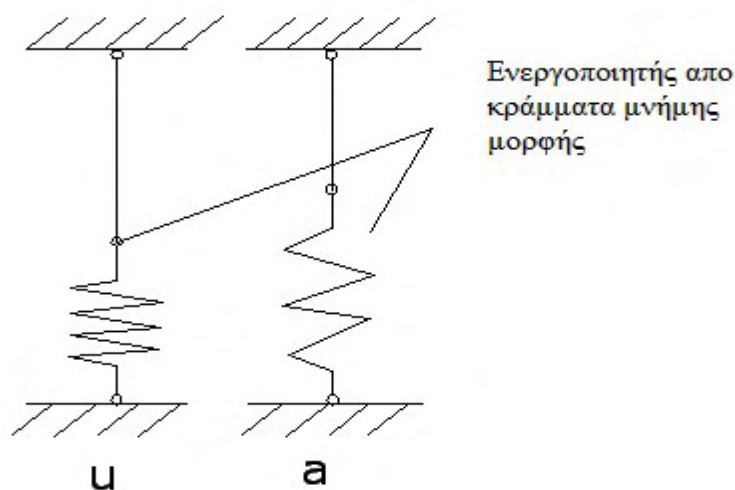
Σχήμα 2.1. Σχέδιο για τον ενεργό έλεγχο δόνησης μιας κατασκευής από ένα προσαρμοζόμενο αποσβεστήρα ρυθμιζόμενης μάζας χρησιμοποιώντας ελατήριο από κράματα μνήμης μορφής



Σχήμα 2.2. Σχέδιο για πιο αναίσθητη προσαρμογή ενός προσαρμοζόμενου αποσβεστήρα ρυθμιζόμενης μάζας χρησιμοποιώντας μία συνδεσμολογία ελατηρίων από κράματα μνήμης μορφής δυσκαμψίας δύο επιπέδων

### 2.1.2 Εφαρμογή των κραμάτων μνήμης μορφής ως ενεργοποιητών.

Τα κράματα μνήμης μορφής μπορούν να λειτουργήσουν ως ενεργοποιητές λόγω των φαινομένων μνήμης μορφής το οποίο μπορεί να αντιληφθεί είτε με την άσκηση δυνάμεων στην κατασκευή ή με την αλλαγή του σχήματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Κατά την θέρμανση, οι ενεργοποιητές κραμάτων μνήμης μορφής, οι οποίοι είναι ενσωματωμένοι ή τοποθετημένοι στις κατασκευές, θα αυξήσουν την δυσκαμψία της μητρικής κατασκευής έτσι ώστε η φυσική συχνότητα των κατασκευών να μπορεί ενεργά να ρυθμιστεί. Από ενεργή ρύθμιση συχνότητας, η συμπεριφορά της κατασκευής μπορεί να ελεγχθεί.



Σχήμα 2.3. Λειτουργία του ενεργοποιητή για την ανενεργή κατάσταση (*u*) και για την ενεργοποιημένη κατάσταση (*a*)

Ο Mc.Gavin G.<sup>[41]</sup>, ανέφερε μία απόδειξη της ιδέας σε ένα πείραμα πραγματικού χρόνου στο οποίο η συχνότητα της μεταλικής κατασκευής ρυθμίζεται χρησιμοποιώντας ένα καλώδιο ενεργοποιητή από κράματα μνήμης μορφής. Επιτεύχθηκε περίπου 32% αλλαγή της φυσικής συχνότητας. Ο Song G.<sup>[42]</sup>, πρότεινε το σχέδιο Ευφυούς Οπλισμένου Σκυροδέματος [Intelligent Reinforced Concrete (IRC)] χρησιμοποιώντας την ιδιότητα ενεργοποίησης των κραμάτων μνήμης μορφής. Η κατανομή παραμόρφωσης στο εσωτερικό του σκυροδέματος αποκτήθηκε αλλάζοντας την ηλεκτρική αντίσταση των καλωδίων από κράματα μνήμης μορφής. Το γεγονός ρηγματώσεων στο IRC λόγω εκρήξεων ή σεισμών μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την ηλεκτρική θέρμανση των καλωδίων από κράματα μνήμης μορφής, όπου οι ίνες του καλωδίου συστέλλονται και μειώνουν τις ρηγματώσεις.

### 2.1.3 Τα κράματα μνήμης μορφής ως τένοντες στις κατασκευές από σκυρόδεμα.

Σε μέλη από σκυρόδεμα, οι ράβδοι ή τα καλώδια από κράματα μνήμης μορφής μπορούν να ενεργούν ως τένοντες. Έρευνες από τους Deng Z.<sup>[43]</sup> και Krstulovic-Orpara N.<sup>[44]</sup> παρουσίασαν την χρήση των κραμάτων μνήμης μορφής ως τένοντες στα μέλη από σκυρόδεμα. Οι τένοντες από κράματα μνήμης μορφής έχουν αρκετά πλεονεκτήματα από τους συμβατικούς τένοντες από χάλυβα. Δεν υπάρχουν απώλειες τριβής λόγω ανάπτυξης κατανεμημένου εφελκυστικού φορτίου κατά μήκος του συνολικού μήκους του τένοντα κατά την διάρκεια της έναρξης των φαινομένων μνήμης μορφής. Είναι πολύ κατάλληλο για καμπύλα μέλη από σκυρόδεμα ή όπου η διατομή του τένοντα είναι πολύ καμπύλη. Χρησιμοποιώντας προεντεταμένο τένοντα από κράματα μνήμης μορφής, δεν υπάρχει ανάγκη από αγκυρώσεις. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τάνυση εξαιρετικά λεπτών μελών από σκυρόδεμα.

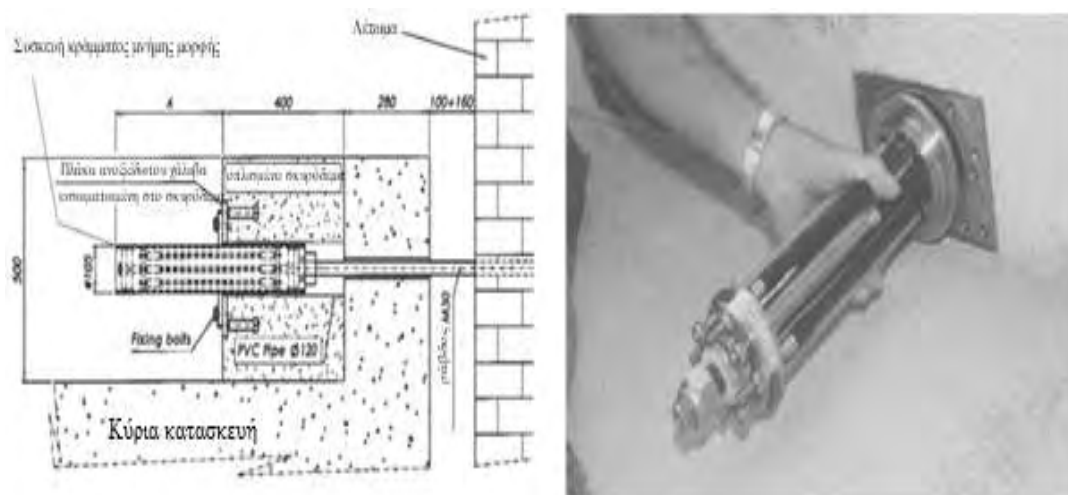
### 2.1.4 Τα κράματα μνήμης μορφής ως ένα εξωτερικό υλικό τάνυσης σε κατασκευή από σκυρόδεμα

Η ανεπάρκεια χωριτικότητα του φέροντος φορτίου και το ρίσκο μεγάλης παραμόρφωσης συμβαίνει σε κατασκευές από σκυρόδεμα λόγω αύξησης φαινομένων εξαρτόμενων από την φόρτιση και τον χρόνο. Με το πέρασμα του χρόνου στην κατασκευή από σκυρόδεμα, συχνά αναπτύσσονται ρηγματώσεις οι οποίες οδηγούν στην μείωση της διάρκειας ζωής του. Προσθέτοντας εξωτερικό στοιχείο τάνυσης είναι μια αποδεκτή στρατηγική της μέρες της για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων της κατασκευές από σκυρόδεμα. Υλικά όπως ο χάλυβας και ενισχυμένο με ίνες πλαστικό (EIP) χρησιμοποιούνται συνήθως για τέτοιους σκοπούς. Σε σύγκριση με αυτά τα υλικά, τα κράματα μνήμης μορφής έχουν την ικανότητα να υποβάλλονται σε τάσεις χωρίς να υπάρχουν συσκευές έντασης, όπως υδραυλικοί γρύλοι. Ύστερα από την τοποθέτηση και την αγκύρωση του μαρτενσίτη από κράματα μνήμης μορφής κατά μήκος της εξωτερικής επιφάνειας της κατασκευής, χρειάζεται να θερμανθεί ώστε να ξεκινήσει το φαινόμενο της μνήμης μορφής. Καθώς η ανάκτηση παραμόρφωσης περιορίζεται λόγω αγκύρωσης με την κατασκευή, δημιουργείται μία εφελκυστική τάση. Soroushian<sup>[45]</sup> παρουσίασε ένα παράδειγμα για την υλοποίηση μιας εξωτερικής μετά-τάνυσης. Ράβδοι αντίστασης σε διάβρωση χρησιμοποιήθηκαν για την βελτίωση της αντίστασης σε διάτμηση της ρηγματωμένης περιοχής σε μια δοκό γέφυρας από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η αντίσταση θέρμανσης εφαρμόστηκε σε ένα ρεύμα των 1000 Ampere.



### 2.1.5 Αναβάθμιση της κατασκευής χρησιμοποιώντας τις υπερελαστικές ιδιότητες των κραμάτων μνήμης μορφής.

Η υπερελαστική συμπεριφορά των κραμάτων μνήμης μορφής έχει τραβήξει το ενδιαφέρον των πολιτικών μηχανικών. Το κύριο πεδίο εφαρμογής τους είναι η αναβάθμιση των κατασκευών για αντισεισμικό σχεδιασμό. Ο Graesser E.J.<sup>[46]</sup> επιτυχώς χρησιμοποίησε κράματα μνήμης μορφής από Ni-Ti για απόσβεση των σεισμικών φορτίων. Μία εφαρμογή συσκευής υπερελαστικών κραμάτων μνήμης μορφής αληθινής κλίμακας είναι η αναβάθμιση της αντίστασης σε σεισμό της Βασιλικής Αγίου Φραγκίσκου στην Ασίζη της Ιταλίας (Castellano, M.G.<sup>[47]</sup>, and Brite E.<sup>[48]</sup>). Το ιστορικό αέτωμα ήταν συνδεδεμένο με την κύρια κατασκευή από συσκευή που χρησιμοποιούσε ράβδους από κράματα μνήμης μορφής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Οι ράβδοι Ni-Ti από κράματα μνήμης μορφής υποβλήθηκαν σε εφελκυσμό, παρόλο που σχεδιάστηκαν να λαμβάνουν εφελκυστικές αλλά και θλιπτικές τάσεις.



Σχήμα 2.4. Κατάλληλη σύνδεση συσκευής κράματος μνήμης μορφής για σεισμό του ιστορικού αετώματος και η κύρια κατασκευή της Βασιλικής Αγίου Φραγκίσκου στην Ασίζη της Ιταλίας

Ένα άλλο έργο που εκτελέστηκε για την αναβάθμιση της αντίστασης σε σεισμό ήταν αυτό του καμπαναριού της Εκκλησίας του Αγίου Γεώργιου στην Ιταλία. Χαλύβδινοι τένοντες προστέθηκαν ώστε να αυξηθεί η αντοχή κλίσης με ενδιάμεσες υπερελαστικές συσκευές από κράματα μνήμης μορφής ώστε να περιορίσουν τα φορτία για να αποτρέψουν την θλιπτική αστοχία της τοιχοποιίας (Indirli M.<sup>[49]</sup>, ISTECH<sup>[50]</sup>). Ο Sakai<sup>[51]</sup> διεξήγαγε μια έρευνα για την αποκατάσταση

της δοκού από σκυρόδεμα χρησιμοποιώντας υπερελαστικά καλώδια από κράματα μνήμης μορφής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι δοκοί με καλώδια από κράματα μνήμης μορφής ανακάμπτουν σχεδόν εξ ολοκλήρου ύστερα από την υποβολή σε εξαιρετικά μεγάλη ρηγμάτωση. Το Πανεπιστήμιο του Houston ανέπτυξε έναν πιο αποτελεσματικό τρόπο για την χρήση των υπερελαστικών καλωδίων από κράματα μνήμης μορφής ώστε να επιτευχθεί μία μεγαλύτερη αποκατάσταση δυνάμεων με την μορφή τυπικού καλωδίου (Otero K.<sup>[52]</sup>). Μία δοκός από σκυρόδεμα (24 ιντσες x 4 ιντσες x 6 ιντσες) οπλίστηκε με δεκατέσσερα υπερελαστικά καλώδια διαμέτρου 1/8 ιντσών, με 2% προένταση. Το κάθε καλώδιο είχε επτά ίνες και η κάθε ίνα είχε επτά υπερελαστικά σύρματα. Ειδικοί σφινγκτήρες χρησιμοποιήθηκαν για να κρατήσουν τα υπερελαστικά σύρματα από το να ολισθήσουν. Υπήρξαν μεγάλες ρηγματώσεις στο πείραμα της δοκού με φορτία μικρότερα των 11000 lbs. Κατά την αφαίρεση του φορτίου η ρηγμάτωση στην δοκό έκλεισε υπο την ελαστική αποκατάσταση δύναμης των υπερελαστικών κραμάτων μνήμης μορφής.

#### 2.1.6 Εφαρμογή των κραμάτων μνήμης μορφής ως συνδετήρες μεταξύ κατασκευαστικών εξαρτημάτων.

Οι συνδέσεις μεταξύ διάφορων κατασκευαστικών εξαρτημάτων είναι πιο πιθανό να ζημιωθούν σε περίπτωση σεισμού. Οι συνδετήρες από κράματα μνήμης μορφής έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν απόσβεση και για να αντιστέκονται σε σχετικά μεγάλες παραμορφώσεις. Ο Tamai H.<sup>[53]</sup>, πρότεινε έναν εκτεθειμένο τύπο βάσης υποστηλώματος με αγκυρώσεις από κράματα μνήμης μορφής για σεισμική αντίσταση. Οι αγκυρώσεις από κράματα μνήμης μορφής φτιάχτηκαν από NiTi ράβδους, σε διάμετρο των 20-30 mm, και από χαλύβδινες ράβδους. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από το πείραμα φόρτισης και την αριθμητική προσομοίωση έδειξαν ότι η χρήση ράβδων από κράματα μνήμης μορφής ήταν πολύ αποτελεσματική για την απορρόφηση ενέργειας και για την μείωση των δονήσεων του κτηρίου υπο έντονη σεισμική κίνηση του εδάφους. Παρατηρήθηκε ότι, σε σύγκριση με την συσσωρευμένη παραμένουσα παραμόρφωση σε συνήθεις αγκυρώσεις, οι αγκυρώσεις από κράματα μνήμης μορφής μπορούν να ανακτήσουν το αρχικό της σχήμα ύστερα από κυκλικές φορτίσεις. Η επίδοση αντίστασης των συνδετήρων από κράματα μνήμης μορφής ήταν η ίδια για την αποφυγή πλαστικών παραμορφώσεων και ζημιών των υποστηλωμάτων της κατασκευής.

Επιπλέον τα κράματα μνήμης μορφής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο βαθμό στις κατασκευές γεφυρών, καθώς μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην

απομόνωση βάσης, στην αποκατάσταση και την αναβάθμιση και στον εκτοπισμό και rounding.

## 2.2 Τα κράματα μνήμης μορφής στην γεφυροποιία.

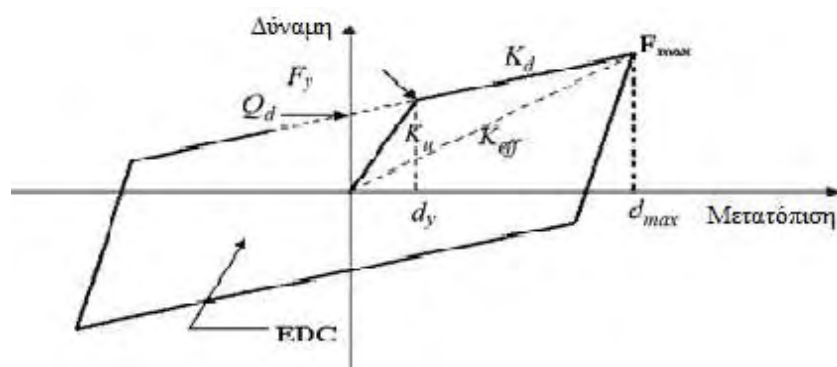
### 2.2.1 Απομόνωση βάσης

Ανάμεσα σε αρκετές μεθόδους σεισμικής απομόνωσης, η εφαρμογή των Ελαστομερών Εφεδράνων Μεγάλης Απόσβεσης (EEMA) θεωρείται ως μία από τις πιο υποσχόμενες συσκευές απομόνωσης. Τα ελαστομερή εφεδράνα για της συσκευές απομόνωσης βάσεων συνήθως κατασκευάζονται με εναλλασσόμενα λεπτά οριζόντια στρώματα από λάστιχο τα οποία είναι συνδεδεμένα με πλάκες από χάλυβα. Στην έννοια της απομόνωσης βάσης, οι χαλύβδινες πλάκες παρέχουν μεγάλη δυσκαμψία υπο κατακόρυφο φορτίο, καθώς τα στρώματα από λάστιχο παρέχουν μικρή οριζόντια δυσκαμψία, όταν η κατασκευή υποβάλλεται σε πλευρικά φορτία, όπως σε περιπτώσεις σεισμών και ανέμων. Οι συσκευές συνήθως υποβάλλονται είτε σε θλίψη, είτε σε συνδυασμό σύνθλιψης και τέμνουσας [Amin,(2006)<sup>[54]</sup>].

Διάφορα μοντέλα χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν την συμπεριφορά των EEMA στην οριζόντια διεύθυνση. Για λόγους απλότητας, ένα ιξωδοελαστικό γραμμικό μοντέλο συνήθως εφαρμόζεται για τις ανάγκες σχεδιασμού απομονωμένων κατασκευών [Kelly,(1990)<sup>[55]</sup>]. Παρόλα αυτά, όταν πραγματοποιείται η ανάλυση απόκρισης μιας απομονωμένης κατασκευής, απαιτείται μία ακριβής κατασκευαστική απόκριση καθόλη τη διάρκεια του σεισμού. Σε αυτή την περίπτωση, ένα ακριβές μη γραμμικό rate-independent μοντέλο των EEMA είναι απαραίτητο. Σε κάποιες προδιαγραφές (AR Bhuiyan<sup>[56]</sup>) τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά των EEMA εκφράζονται σε όρους ενός διγραμμικού μοντέλου για σεισμικό σχεδιασμό γεφυρών με EEMA. Παρόλα αυτά, η προηγούμενη έρευνα που διεξήχθη από κάποιους συγγραφείς [Hwang, (2002)<sup>[57]</sup>, Dall'Asta και Ragni, (2006)<sup>[58]</sup>, Bhuiyan (2009)<sup>[59]</sup>] έδειξε ότι η μηχανική συμπεριφορά των EEMA χαρακτηρίζεται από την υστερευτική rate-dependent ιδιότητα. Για αυτό τον σκοπό, θεωρείται ένα ακριβές μη γραμμικό μοντέλο των EEMA. Οι παράμετροι του φορέα οι οποίες περιγράφουν την πλευρική δύναμη – μετατόπιση διγραμμικού νόμου είναι η αρχική ελαστική δυσκαμψία  $K_u$ , η μετά την διαρροή δυσκαμψία  $K_d$ , η χαρακτηριστική δύναμη  $Q_d$ . Οι τιμές για αυτές της παραμέτρους λαμβάνονται από [Bhuiyan, (2009)<sup>[60]</sup>].

Τα ελαστομερή εφεδράνα χαλκού (EEX) αναπτύχθηκαν σε απάντηση των ανεπαρκών χαρακτηριστικών απόσβεσης των φυσικών ελαστομερών εφεδράνων [Park και Otsuka (1999)<sup>[61]</sup>]. Τα εφεδράνα είναι ουσιαστικά πανομοιότυπα με τα

φυσικά ελαστομερή εφεδράνα με την διαφορά προσθήκης ενός κυλινδρικού ‘εμβόλου’(plug) από χαλκό το οποίο βρίσκεται στο κέντρο του εφεδράνου. Το χάλκινο έμβολο προκαλεί μια διγραμμική απόκριση σε υψηλά επίπεδα πλευρικής διέγερσης, όπου η δυσκαμψία του συστήματος μειώνεται αφότου το έμβολο παραμορφωθεί ανελαστικά λόγω τέμνουσας. Τα EEX μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελούνται από δύο στοιχεία: (α) ένα γραμμικό ισοδωελαστικό στοιχείο που αντιπροσωπεύει την συνιστώσα του ελαστομερούς και (β) ένα γραμμικό ελαστικό – τέλεια πλαστικό στοιχείο το οποίο αντιπροσωπεύει το έμβολο από χαλκό. Αυτό το μοντέλο υποθέτει ότι η σχέση απόκρισης είναι διγραμμική, όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5. Διγραμμικός χαρακτηρισμός δύναμης-μετατόπισης του EEX

Οι παράμετροι του φορέα που περιγράφουν την πλευρική δύναμη – μετατόπιση διγραμμικού νόμου είναι η αρχική ελαστική δυσκαμψία  $K_u$ , η μετά την διαρροή δυσκαμψία  $K_d$ , η χαρακτηριστική δύναμη  $Q_d$ . Οι τιμές για αυτές τις παραμέτρους λαμβάνονται από [Bhuiyan, (2009)<sup>[60]</sup>]. Ακολουθώντας τον Οδηγό Προδιαγραφών AASHTO για Σεισμική Μόνωση Σχεδιασμού (AASHTO, (1999)], το EEX μοντελοποιείται διγραμμικά βασισμένο στις παραμέτρους που φαίνονται στο Σχήμα 2.5. Εδώ, το  $K_u$ , είναι η ελαστική δυσκαμψία, η οποία είναι αποτελεσματική στην αντίσταση φορτίων λειτουργικότητας όπως είναι ο άνεμος,  $K_d$  είναι η μετά την διαρροή δυσκαμψία η οποία είναι σημαντική στην αντίσταση και ενεργοποιείται όταν η πλευρική δύναμη υπερβαίνει την τιμή  $F_y$ ,  $Q_d$  είναι η χαρακτηριστική δύναμη,  $F_y$  είναι η δύναμη διαρροής όπου η αρχική δυσκαμψία αλλάζει στην δυσκαμψία μετά την διαρροή,  $K_{eff}$  είναι η ενεργή δυσκαμψία,  $d_y$  είναι η μετατόπιση διαρροής,  $d_{max}$  είναι η μέγιστη μετατόπιση,  $F_{max}$  είναι η μέγιστη δύναμη σχεδιασμού του μονωτή και EDC είναι η ενέργεια που χάθηκε σε ένα πλήρη αντιστρέψιμο κύκλο στην μέγιστη

μετατόπιση η οποία φαίνεται από το εμβαδόν που περικλείεται στον βρόγχο δύναμης – μετατόπισης. Η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση,  $\beta$ , μπορεί να προσεγγιστεί ως :

$$\beta = \frac{EDC}{2\pi K_{eff} d^2 \max} \quad (2.1)$$

όπου, EDC είναι το συνολικό εμβαδό κάτω από τους υστερητικούς βρόγχους,  $K_{eff}$  είναι η ενεργή δυσκαμψία και  $d_{max}$  είναι η μέγιστη μετατόπιση. Μία από της πιο σημαντικές παραμέτρους είναι η  $F_y/W$  ( ο λόγος της δύναμης διαρροής του μονωτή προς το συνολικό βάρος της κατασκευής), η οποία σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με κατασκευαστικές αποκρίσεις και την απορροφώμενη ενέργεια από τους μονωτές υπο φορτία σεισμού. Η δύναμη διαρροής του μονωτή σχετίζεται με την χαρακτηριστική δύναμη από την σχέση :

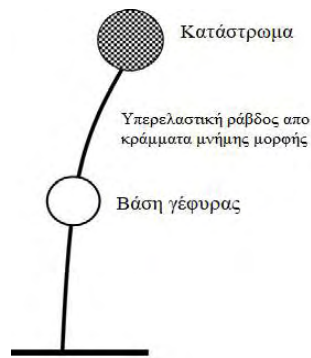
$$F_y = Q_d / (1 - K_d / K_u) \quad (2.2)$$

Η ελαστική δυσκαμψία  $K_u$  συνήθως λαμβάνεται ως δέκα φορές μεγαλύτερη της δυσκαμψίας μετά από την διαρροή [Naeim και Kelly (1999)<sup>[62]</sup>]. Σύμφωνα με αυτές τις υποθέσεις οι τιμές των διάφορων παραμέτρων φαίνονται στον Πίνακα 2.1 .

*Πίνακας 2.1. Ιδιότητες των συσκευών απομόνωσης που χρησιμοποιήθηκαν για το διγραμμικό μοντέλο (Bhuiyan, 2009<sup>[60]</sup>)*

Απομονωτής	Τύπος	Αρχική δυσκαμψία (kN/m)	Δυσκαμψία μετά την διαρροή (kN/m)	Δύναμη διαρροής (kN)	Χαρακτηριστική δύναμη (kN)	Ενεργή δυσκαμψία (kN/m)	Ενεργή απόσβεση
EEMA	Διγραμμικός	69665	11533	1153.7	962.7	16347	17%
EEX	Διγραμμικός	124900	11800	900	800	15900	15%

Η ράβδος από κράματα μνήμης μορφής ως απομονωτής βάσης που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την έρευνα είναι παρόμοια με αυτή του Wilde, (2000)<sup>[63]</sup>. Αυτό το μοντέλο αποκάλυψε ότι το σύστημα μόνωσης κραμάτων μνήμης μορφής παρέχει διάφορες αποκρίσεις στην διέγερση καθώς και μία αξιοσημείωτη απόσβεση. Το σύστημα απομόνωσης βάσης ράβδου από κράματα μνήμης μορφής εικονογραφείται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6. Σχηματική αναπαράσταση της συσκευής απομόνωσης από κράματα μνήμης μορφής για την γέφυρα (Wilde,2000<sup>[63]</sup>)

Το κράμα μνήμης μορφής μοντελοποιήθηκε ακολουθώντας το μοντέλο του Auricchio,(2001)<sup>[64]</sup>. Μια υπερελαστική ράβδος κραμάτων μνήμης μορφής έχοντας διάμετρο 34mm χρησιμοποιείται για να συνδέσει τη βάση της γέφυρας με το κατάστρωμα. Η ράβδος υποστηρίζεται από προστατευτικά υλικά τριγύρω, παρόλα αυτά, η συνεισφορά στην απόκριση έχει αγνοηθεί. Ο πίνακας 2.2 εικονογραφεί τις ιδιότητες των κραμάτων μνήμης μορφής που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το μοντέλο.

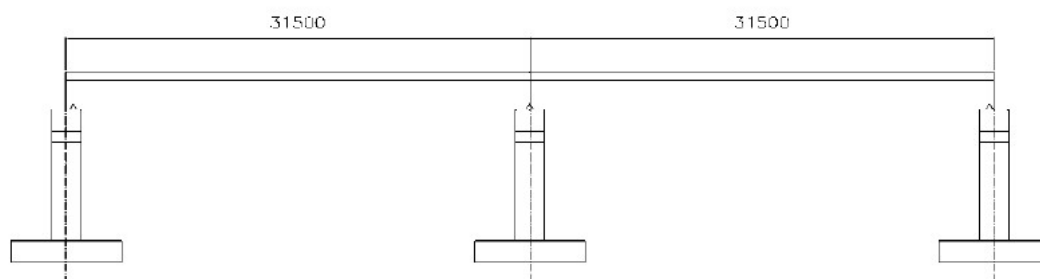
Πίνακας 2.2. Ιδιότητες της συσκευής από κράματα μνήμης μορφής που χρησιμοποιήθηκε για το μοντέλο (Alam,2008<sup>[78]</sup>).

Απομονωτής	Τύπος	Μέτρο ελαστικότητας (kPa)	Αρχική τάση από ωστενίτη σε μαρτενσίτη (kPa)	Τελική τάση από ωστενίτη σε μαρτενσίτη (kPa)	Αρχική τάση από μαρτενσίτη σε ωστενίτη (kPa)	Τελική τάση από μαρτενσίτη σε ωστενίτη (kPa)	Υπερελαστικό μήκος plateau strain (%)
ΕΕΜΑ	Υπερελαστικός	5.42E+07	414000	530000	380000	130000	6.2

Οι επιλεγμένες παράμετροι των κραμάτων μνήμης μορφής αντιστοιχούν σε ένα κράμα με τέλεια υπερελαστική συμπεριφορά. Το μήκος και το εμβαδόν διατομής των ράβδων από κράματα μνήμης μορφής βελτιστοποιούνται έτσι ώστε η τάση στην ράβδο από κράματα μνήμης μορφής να φτάνει την ελαστική απόκριση από αγνό μαρτενσίτη κατά την διάρκεια της πιο έντονης θεωρούμενης κίνησης του εδάφους.

Μία απλή δύο ανοιγμάτων γέφυρα που βρίσκεται στο δυτικό μέρος του Καναδά, χρησιμοποιήθηκε ως η βάση του μοντέλου που αναλύθηκε σε αυτή την έρευνα. Το Σχήμα 2.6 αναπαριστά το σχηματικό διάγραμμα της γέφυρας που θεωρήθηκε. Η υπερκατασκευή είναι ένα συνεχόμενο στοιχείο δοκών το οποίο στηρίζεται σε απομονωτές που βρίσκονται στην κορυφή των βάσεων γέφυρας. Ο τύπος της υπερκατασκευής είναι σύνθετος και αποτελείται από χάλυβα και σκυρόδεμα, έχοντας δύο ανοίγματα, το καθένα από τα οποία έχει μήκος 31500mm τα

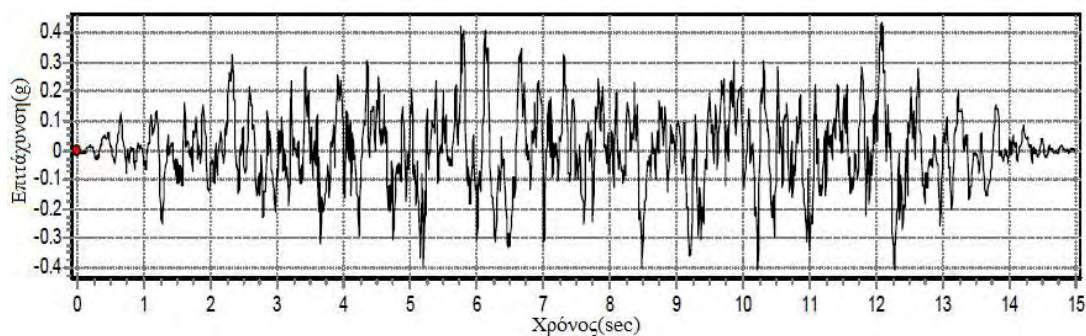
οποία στηρίζονται σε τρεις βάσεις γέφυρας. Η υποκατασκευή της γέφυρας αποτελείται από βάσεις σιδηροπαγούς σκυροδέματος οι οποίες έχουν μήκος 17000mm όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7. Γεωμετρία του μοντέλου ανάλυσης

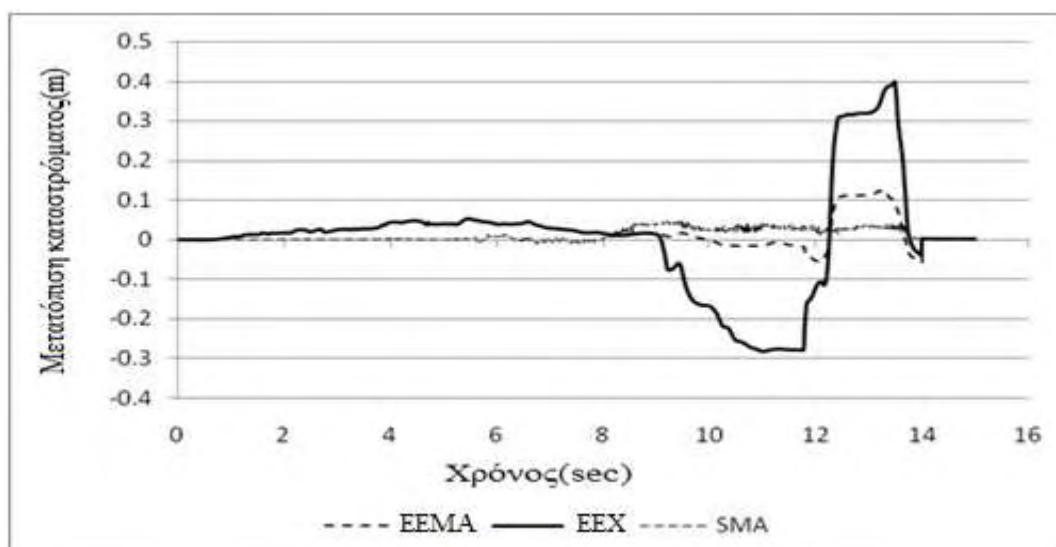
Η υπερκατασκευή και η υποκατασκευή μοντελοποιούνται ως ένα σύστημα συγκεντρωμένης μάζας το οποίο διαχωρίζεται σε έναν αριθμό μικρών διακεκριμένων τμημάτων: κάθε γειτονικό τμήμα συνδέεται από ένα κόμβο και σε κάθε κόμβο θεωρούνται δύο βαθμοί ελευθερίας. Οι μάζες του κάθε τμήματος υποτίθεται ότι είναι κατανομημένες μεταξύ των δύο γειτονικών κόμβων με την μορφή σημειακών μαζών. Οι βάσεις και τα καταστρώματα της γέφυρας αποτελούνται από 400 στοιχεία ίνας για δεσμευμένο και μη δεσμευμένο, σκυρόδεμα και οπλισμούς. Τα βήματα υποτέθηκαν ότι παρέχουν πλήρη σταθερότητα στην βάση του υποστυλώματος ώστε να μεγιστοποιηθεί η απαίτηση του στοιχείου γέφυρας.

Μία μη γραμμική ανάλυση χρονο-ιστορίας διεξάγεται σε αυτή την έρευνα σε μία γέφυρα απομόνωσης βάσης, απομονωμένη με τρεις διαφορετικούς απομονωτές (SMA, EEMA και EEX) εξιδανικευμένη ως ένα άκαμπτο κατάστρωμα, αγνοώντας την ευκαμψία του καταστρώματος της γέφυρας ώστε να βρεθεί η απόκριση της γέφυρας υπό σεισμική διέγερση. Αυτό το απλοποιημένο μαθηματικό μοντέλο απομονωμένης-βάσεως μονού-ανοίγματος γέφυρας θεωρείται ότι διεγείρεται υπο μονής κατεύθυνσης οριζόντιας συνιστώσας, του Vancouver BC, σεισμικής κίνησης του εδάφους. Η επιτάχυνση και η μετατόπιση της θεωρούμενης κίνησης του εδάφους παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8. Χρονο-ιστορία της θεωρούμενης κίνησης του εδάφους

Οι γραφικές παραστάσεις των χρονο-ιστοριών της μετατόπισης του καταστρώματος της γέφυρας με συστήματα SMA, EEMA και EEX φαίνονται στο Σχήμα 2.9.

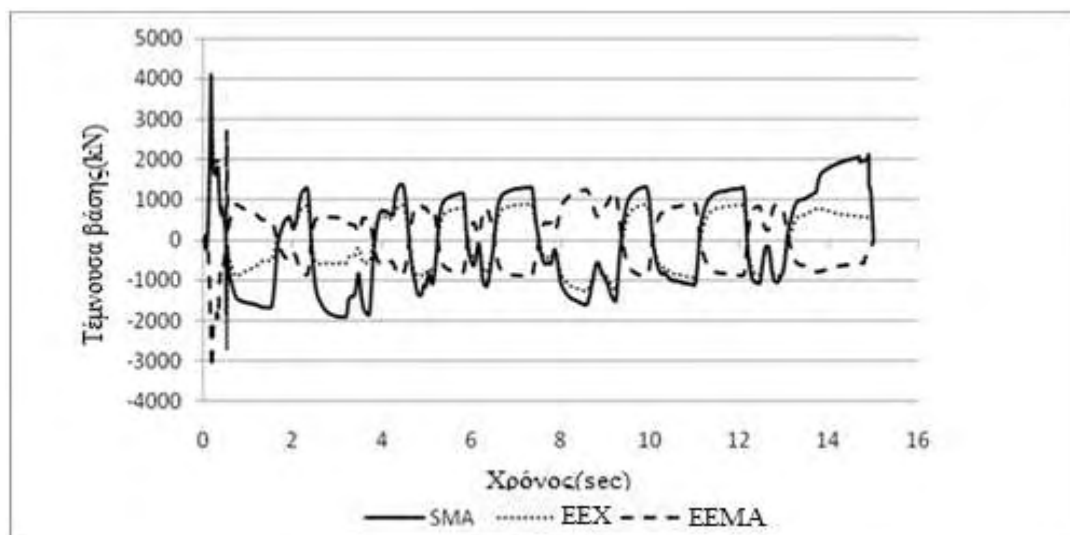


Σχήμα 2.9. Σύγκριση της χρονικής μεταβολής της μετατόπισης του καταστρώματος της γέφυρας από τις συσκευές απομόνωσης EEMA, EEX και κράματων μνήμης μορφής

Για αυτό το εύρος διέγερσης, η συσκευή κράματος μνήμης μορφής λειτουργεί ως μία παγιωμένη σύνδεση μεταξύ του καταστρώματος και της βάσης, καθώς με το σύστημα EEX, ακόμα και για αυτό το εύρος διέγερσης, η σχετική μετατόπιση φτάνει τα 0.4m και για το EEMA φτάνει τα 0.123m. Κοιτώντας τα αποτελέσματα για την μετατόπιση του καταστρώματος, τα κράματα μνήμης μορφής είναι πιο αποτελεσματικά στο να μειώνουν την μετατόπιση του καταστρώματος ενώ η αποτελεσματικότητα του EEX είναι ακόμα μικρότερη από αυτή του EEMA. Ο αποτελεσματικός περιορισμός της μετατόπισης του καταστρώματος είναι επιθυμητός



ώστε να αποφευχθεί η εκτόπιση του καταστρώματος και η αστάθεια των φορέων. Εφόσον το σύστημα των κραμάτων μνήμης μορφής έχει μεγαλύτερη δυσκαμψία από τα συστήματα των EEX και EEMA, η δύναμη που μεταδίδεται στην βάση από το κατάστρωμα είναι μεγαλύτερη, έχοντας ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη τέμνουσα δύναμη στην βάση. Η χρονο-ιστορία της τέμνουσας δύναμης με βάση την εφαρμοζόμενη κίνηση του εδάφους φαίνεται στο Σχήμα 2.10.

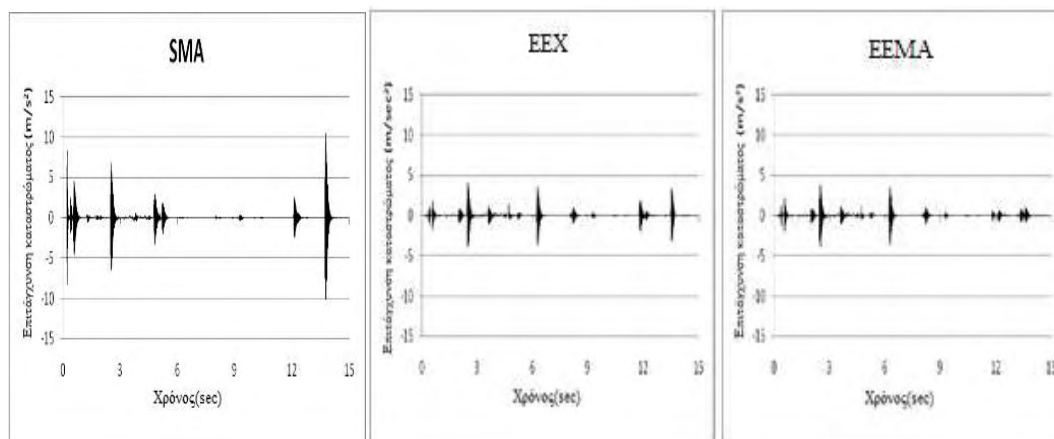


Σχήμα 2.10. Σύγκριση της χρονικής μεταβολής της τέμνουσας του καταστρώματος της γέφυρας από τις συσκευές απομόνωσης EEMA, EEX και κραμάτων μνήμης μορφής

Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη στην βάση για την γέφυρα με σύστημα κραμάτων μνήμης μορφής είναι 4091 kN. Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη στην βάση της γέφυρας που είναι εξοπλισμένη με σύστημα από EEX είναι 3187 kN και για το σύστημα από EEMA είναι 2717 kN. Όμως, η τέμνουσα δύναμη που ασκείται στην βάση που είναι απομονωμένη από συσκευή κραμάτων μνήμης μορφής είναι 1.3 φορές μεγαλύτερη από αυτή που είναι εξοπλισμένη με EEX και σχεδόν 1.5 φορές μεγαλύτερη από αυτή που είναι εξοπλισμένη με EEMA σύστημα.

Ένα μειονέκτημα της συσκευής απομόνωσης από κράματα μνήμης μορφής είναι η αύξηση στην απόκριση επιτάχυνσης. Τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά των SMA, ιδιαίτερα κατά την μετάβαση από ‘πλαστική’ απόκριση σε ελαστική, οδηγεί σε ένα ξαφνικό άλμα στην επιτάχυνση. Για όλα τα επίπεδα φόρτισης η μέγιστη επιτάχυνση του καταστρώματος με μια συσκευή από κράματα μνήμης μορφής είναι μεγαλύτερη από την απόκριση επιτάχυνσης των συστημάτων EEX και EEMA. Η μέγιστη επιτάχυνση που προκαλείται στην γέφυρα που είναι απομονωμένη από

συσκευή κραμάτων μνήμης μορφής είναι  $10 \text{ m/s}^2$  και της γέφυρες που είναι απομονωμένες με συσκευές EEX και EEMA είναι λιγότερη από  $5 \text{ m/s}^2$ . Η διαφορά στην απόκριση επιτάχυνσης υπο τη θεωρούμενη διέγερση του εδάφους φαίνονται στο Σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11. Σύγκριση της χρονικής μεταβολής της επιτάχυνσης του καταστρώματος της γέφυρας από τις συσκευές απομόνωσης EEMA, EEX και κραμάτων μνήμης μορφής

Ο Wilde (2000)<sup>[63]</sup> πρότεινε ένα σύστημα απομόνωσης κραμάτων μνήμης μορφής με ράβδους απόσβεσης να προστίθενται σε συσκευή ελαστομερούς εφεδράνου. Η απόδοση αυτού του συστήματος απομόνωσης συγκρίθηκε με την απόδοση ενός συμβατικού συστήματος μόνωσης χρησιμοποιώντας πολυστρωματικά εφέδρανα μολύβδου – καουτσούκ με μία επιπρόσθετη συσκευή σταματήματος. Μια μεγάλης διαμέτρου ράβδος κράματος μνήμης μορφής με προστασία τριγύρω, χρησιμοποιήθηκε ως ένας απομονωτής για να συνδέσει την βάση και το κατάστρωμα και η απόδοση του συγκρίθηκε με αυτή των συμβατικών απομονωτών από EEX και EEMA. Ο Wilde(2000)<sup>[63]</sup> ανέλυσε το μοντέλο γέφυρας υπο διάφορες διεγέρσεις του εδάφους και ανέφερε ότι το σύστημα απομόνωσης από κράματα μνήμης μορφής παρέχει δύσκαμπτη σύνδεση μεταξύ της βάσης και του καταστρώματος για μικρές εξωτερικές φορτίσεις. Η χρονο-ιστορία της μετατόπισης δείχνει ότι τα κράματα μνήμης μορφής περιορίζουν την σχετική μετατόπιση μεταξύ της βάσης και του καταστρώματος πιο αποτελεσματικά σε σύγκριση με τα άλλα δύο συστήματα. Ο Wilde(2000)<sup>[63]</sup> βρήκε ότι η ενσωμάτωση των κραμάτων μνήμης μορφής αυξάνει την επιτάχυνση του καταστρώματος κατά περίπου 3 φορές ενώ η συγκεκριμένη μελέτη δείχνει ότι την αυξάνει κατά 2.75 φορές, το οποίο είναι κοντά. Ο Wilde(2000)<sup>[63]</sup>

ανέφερε ότι η τέμνουσα στην βάση με συσκευή από κράματα μνήμης μορφής αυξάνεται κατά 1.3 φορές, ενώ η τρέχουσα ανάλυση έδειξε ότι αυξάνεται 1.28 φορές, που είναι παρόμοια αποτελέσματα.

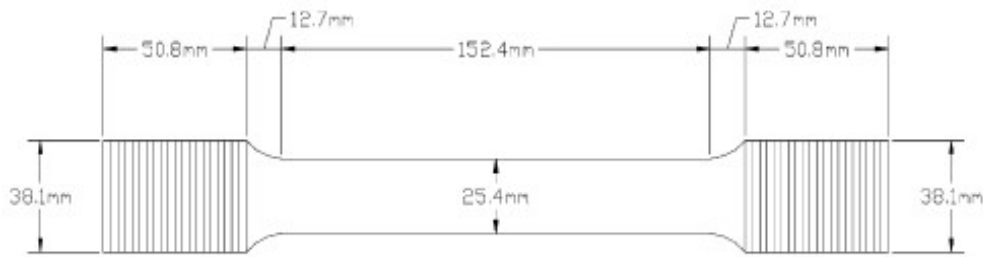
Συνοπτικά ένα έξυπνο σύστημα απομόνωσης για γέφυρες αυτοκινητοδρόμων ερευνήθηκε το οποίο αποτελούνταν από υπερελαστικά κράματα μνήμης μορφής και η απόδοση του συγκρίθηκε με την απόδοση άλλων δύο τύπων συσκευών μόνωσης, τα οποία είναι Ελαστομερή Εφέδρανα Μεγάλης Απόσβεσης (EEMA) και Ελαστομερή Εφέδρανα Χαλκού (EEX). Οι φορείς κραμάτων μνήμης μορφής ικανοποιητικά περιόρισαν τη μετατόπιση του καταστρώματος και τη σχετική μετατόπιση μεταξύ του καταστρώματος και της βάσης της γέφυρας για έντονη κίνηση του εδάφους. Παρόλο που η απαίτηση σε τέμνουσα στην βάση αυξήθηκε περισσότερο από τα εφέδρανα EEX και EEMA, μπορούν με ασφάλεια να συγκρατήσουν το κατάστρωμα από το να αποσπαστεί από τις βάσεις κατά την διάρκεια ισχυρών σεισμών.

Από την έρευνα τα ακόλουθα αποτελέσματα μπορούν να συλληφθούν:

- 1) Το σύστημα απομόνωσης από κράματα μνήμης μορφής παρέχει δύσκαμπτη σύνδεση μεταξύ των βάσεων και του καταστρώματος για μικρά εξωτερικά φορτία.
- 2) Ο μονωτής κραμάτων μνήμης μορφής ικανοποιητικά συγκράτησε την μετατόπιση του οδοστρώματος και την σχετική μετατόπιση των βάσεων και του καταστρώματος κατά την διάρκεια ισχυρών κινήσεων του εδάφους.
- 3) Το σύστημα μόνωσης από κράματα μνήμης μορφής έχει έμφυτη ικανότητα κεντραρίσματος λόγω της υπερελαστικής απόκρισης του κράματος.
- 4) Η μέγιστη επιτάχυνση του καταστρώματος σε μία συσκευή από κράματα μνήμης μορφής είναι μεγαλύτερη από την απόκριση επιτάχυνσης των συστημάτων EEX και EEMA.

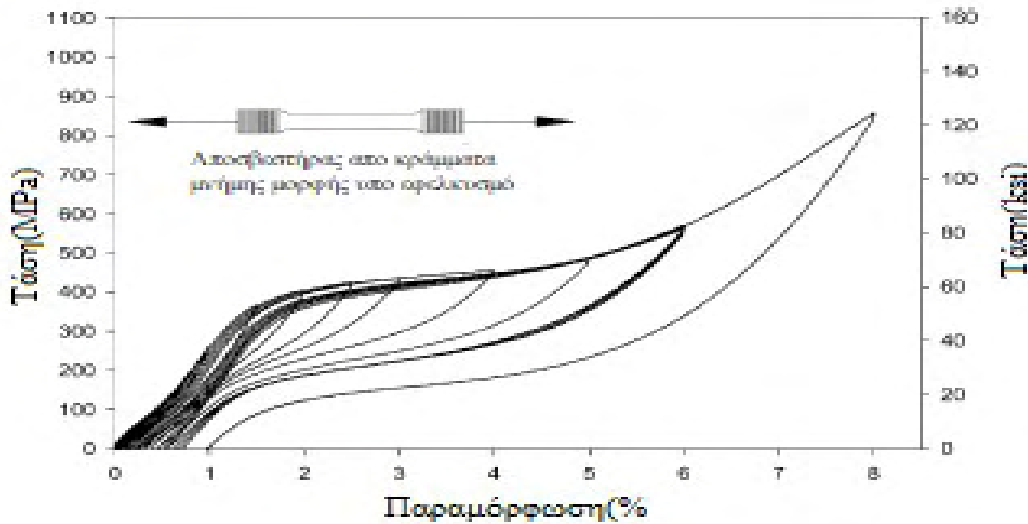
### 2.2.2 Αποκατάσταση και αναβάθμιση

Στην πρώτη φάση της έρευνας, μελετάται μία ράβδος περιορισμού πλήρης κλίμακας από κράματα μνήμης μορφής. Αυτή η ράβδος περιορισμού αποτελείται από NiTi κράματα μνήμης μορφής, η οποία έχει μήκος 280mm και διάμετρο 25.4mm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Οι ράβδοι από κράματα μνήμης μορφής είναι πλήρως ανοπτησμένες και 25% υπο ψυχρή – κατεργασία. Τα δείγματα είναι με σπειρώματα στα άκρα και ανοπτησμένα στο κενό στους 450 °C για 60 λεπτά καθώς ακολούθησε εμβάπτιση σε νερό. Το πείραμα εκτελέστηκε σε θερμοκρασία δωματίου (22°C), σε τιμή ανηγμένης παραμόρφωσης 0.10 mm/mm/s.



Σχήμα 2.12. Ράβδος περιορισμού NiTi από κράματα μνήμης μορφής που χρησιμοποιείται στο πείραμα

Η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης του NiTi αποσβεστήρα υπο εφελκυστική κυκλική φόρτιση φαίνεται στο Σχήμα 2.13.

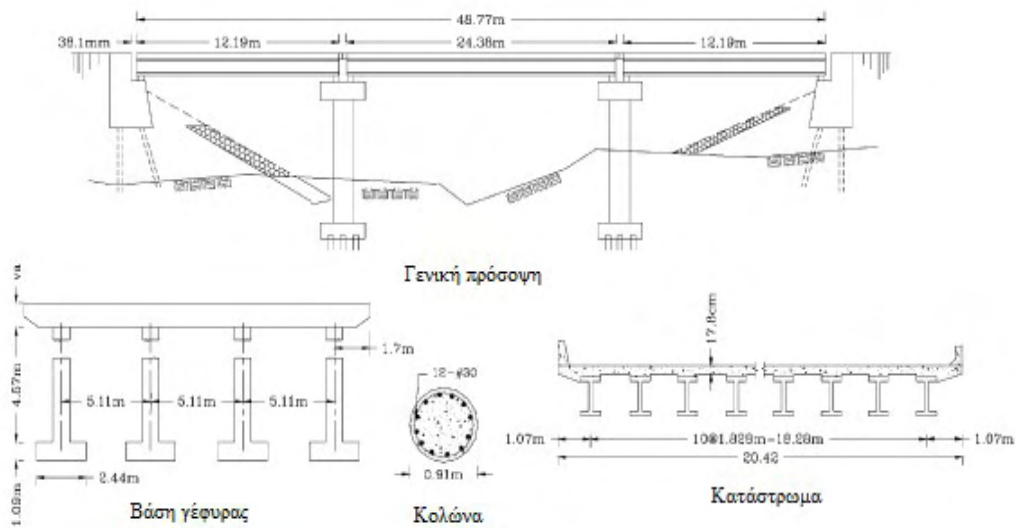


Σχήμα 2.13. Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης από πείραμα εφελκυσμού ράβδου περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής

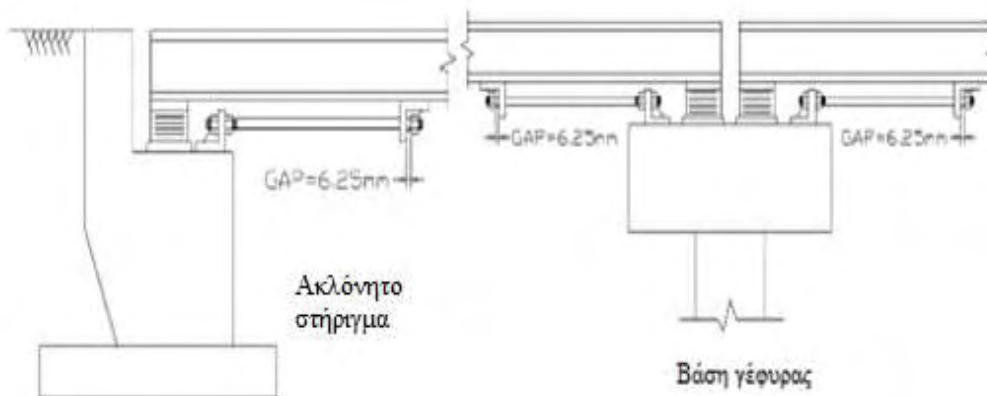
Τα δείγματα φορτίστηκαν σε αυξανόμενες παραμορφώσεις οι οποίες κυμαίνονται από 0.5% έως 8.0%. Πολλά χαρακτηριστικά των διαγραμμάτων τάσης – παραμόρφωσης μπορούν να ξεχωρίσουν. Ο αποσβεστήρας έχει άνω φράγμα φόρτισης τάσης που είναι κατά προσέγγιση 450 MPa με την κράτυνση να είναι περίπου στο 7%. Το Σχήμα 2.13 εικονογραφεί την εξάρτηση της παραμένουσας παραμόρφωσης και το άνω φράγμα (plateau) αποφόρτισης στις τελικές παραμορφώσεις. Η παραμένουσα παραμόρφωση αυξάνεται, με αύξηση της τελικής παραμόρφωσης. Για συνολική παραμόρφωση λιγότερη του 4%, η παραμένουσα παραμόρφωση είναι λιγότερη του 0.25%. Μετά από μία τελική παραμόρφωση 8%, η ράβδος έδειξε

περίπου 1% παραμένουσα παραμόρφωση. Η παραμένουσα παραμόρφωση που είναι 1% υποδεικνύει ότι η ολίσθηση άρχισε να συνεισφέρει στην συνολική παραμόρφωση. Προηγούμενες έρευνες καλωδίων από κράματα μνήμης μορφής έδειξαν ότι η ολίσθηση συμβαίνει για τιμές παραμορφώσεων περίπου στο 8-10%<sup>[65]</sup>. Το Σχήμα 2.13 επίσης, δείχνει ένα δεύτερο σημαντικό αποτέλεσμα για την παραμόρφωση. Παρόλο που το plateau φόρτισης παραμένει σταθερό, το plateau της αποφόρτισης μειώνεται καθώς η συνολική παραμόρφωση αυξάνεται. Αυτό το σημαντικό φαινόμενο οδηγεί σε εξαιρετική απορρόφηση ενέργειας για μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης. Για την ράβδο από κράματα μνήμης μορφής που μελετήθηκε σε αυτή την έρευνα, το plateau αποφόρτισης κυμάνθηκε από 140 – 200 MPa. Τελικά, το δείγμα άρχισε να έχει σημαντική κράτυνση μετά από περίπου 5-6% παραμόρφωσης, με την δυσκαμψία να είναι περίπου στο 45% της αρχικής δυσκαμψίας.

Η σχετική μετατόπιση των πολλών ανοιγμάτων απλά εδραζόμενων γεφυρών στις αρθρώσεις και στα ακλόνητα στηρίγματα μπορούν να οδηγήσουν σε κατάρρευση της γέφυρας αν υπερβεί της επιτρεπτές τιμές μετατόπισης<sup>[66]</sup>. Η χρήση ράβδων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής μπορούν να παρέχουν μία πιο αποτελεσματική εναλλακτική για τον περιορισμό των σχετικών μετατοπίσεων των αρθρώσεων από ότι τις συμβατικές ράβδους ή καλώδια περιορισμού. Οι ράβδοι περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να παρέχουν επαρκή δυσκαμψία και απόσβεση ώστε να περιορίσουν της σχετικές μετατοπίσεις των αρθρώσεων κάτω από μία προκαθορισμένη τιμή. Η πολλών ανοιγμάτων γέφυρα που θεωρήθηκε στην ανάλυση αποτελείται από τρία ανοίγματα τα οποία στηρίζονται σε καμπύλες με πολλά υποστυλώματα, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.14. Κάθε καμπύλη έχει 4 υποστυλώματα και κάθε άνοιγμα έχει 11 δοκούς. Τα μήκη των ανοιγμάτων είναι 12.2 m, 24.4 m και 12.2 m και το πλάτος είναι 20.4 m. Οι πλάκες από σκυρόδεμα υποστηρίζονται από χαλύβδινες δοκούς οι οποίες στηρίζονται σε ελαστομερή εφέδρανα. Το κενό μεταξύ του καταστρώματος και του ακλόνητου στηρίγματος είναι 38.1mm και το κενό μεταξύ των καταστρωμάτων είναι 25.4mm. Οι ράβδοι περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής θα συνδεόταν από την κεφαλή του πυλώνα στο κάτω πέλμα της δοκού με τρόπο παρόμοιο με τα τυπικά καλώδια περιορισμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.15. Η σύνδεση στο κάτω πέλμα θα αποτρέψει την πιθανότητα απόσχισης του κορμού και θα παρέχει μία σχετικά απλή αναβάθμιση.



Σχήμα 2.14. Τυπική απλά εδραζόμενη πολλών ανοιγμάτων γέφυρα



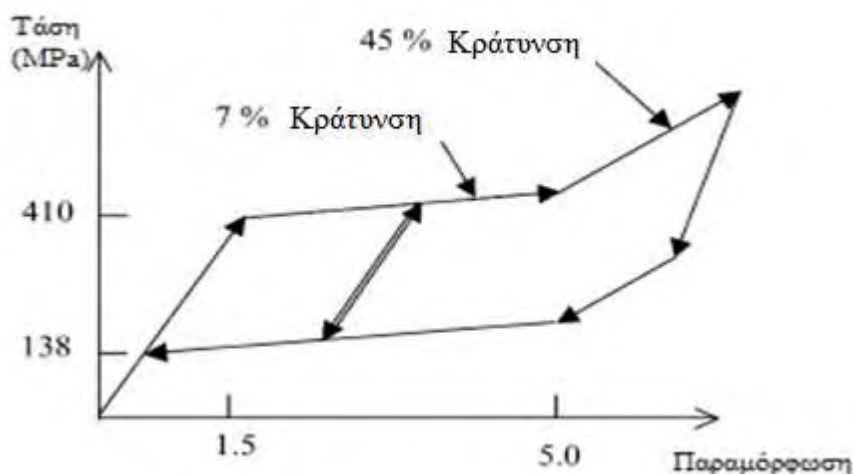
Σχήμα 2.15. Σύνθεση της ράβδου περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής που χρησιμοποιήθηκε στην απλά εδραζόμενη πολλών ανοιγμάτων γέφυρα στα ακλόνητα στηρίγματα και τις ενδιάμεσες βάσεις γέφυρας

Οι ράβδοι περιορισμού θα χρησιμοποιούνταν τυπικά ως μέλη που λαμβάνουν μόνο εφελκυσμό με ένα θερμικό κενό να παρέχεται ώστε να περιοριστεί η εμπλοκή των ράβδων περιορισμού κατά την διάρκεια θερμικών κύκλων. Αν μπορούσαν να παρέχονται επαρκής πλάγιοι σύνδεσμοι, οι ράβδοι περιορισμού θα μπορούσαν να φτιαχτούν ώστε να ενεργούν σε εφελκυσμό και σε θλίψη. Σε αυτή την έρευνα, θεωρείται μόνο συμπεριφορά εφελκυσμού. Παρακάτω, ένα μη γραμμικό αναλυτικό μοντέλο χρησιμοποιείται ώστε να ερευνηθεί η απόκριση πολλών ανοιγμάτων απλά εδραζόμενων γεφυρών οι οποίες αναβαθμίζονται με ράβδους περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής.

Ένα δισδιάστατο μη γραμμικό αριθμητικό μοντέλο των τριών ανοιγμάτων απλά εδραζόμενης γέφυρας που φαίνεται στο Σχήμα 2.14, αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα DRAIN-2DX μη γραμμικής ανάλυσης<sup>[67]</sup>. Η κατασκευή μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας γραμμικά ελαστικά στοιχεία, με ιδιότητες βασισμένες σε πλήρη σύνθετη δράση μεταξύ των πλακών του καταστρώματος και των χαλύβδινων δοκών. Τα υποστυλώματα μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας το DRAIN-2DX στοιχείο ίνας. Κάθε ίνα έχει μία σχέση τάσης παραμόρφωσης, η οποία μπορεί να καθοριστεί ώστε να εκπροσωπήσει μη περισφιγμένο σκυρόδεμα, περισφιγμένο σκυρόδεμα και τον επιμήκη χαλύβδινο οπλισμό. Η κατανομή των ανελαστικών παραμορφώσεων και δυνάμεων φαίνεται κάνοντας τομές κατά μήκος του στοιχείου. Οι μη γραμμικές ιδιότητες ακλόνητων στηριγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το μοντέλο βασίζονται σε ένα συνδυασμό σχεδιαστικών προτάσεων των Caltrans και πειραμάτων των ακλόνητων στηριγμάτων<sup>[68,69]</sup>. Ένα στοιχείο κρούσης χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει το **pounding** μεταξύ των καταστρωμάτων στην γέφυρα και μεταξύ του καταστρώματος και του ακλόνητου στηρίγματος. Το θλιπτικό-μόνο τριγραμμικό κενό στοιχείο έχει ελατήρια τα οποία δίδουν επιπρόσθετη ένταση στο κλείσιμο του κενού. Τα ελαστομερή εφέδρανα μοντελοποιούνται με ένα διγραμμικό στοιχείο με κράτυνση.

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων, ένα αναλυτικό μοντέλο των ράβδων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής αναπτύσσεται χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό στοιχείων σύνδεσης στο DRAIN-2DX όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16. Οι ράβδοι περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής μοντελοποιούνται ως εφελκυστικά-μόνο, πολύ-γραμμικά στοιχεία και εκπροσωπούν την σχέση δύναμης – μετατόπισης των κραμάτων μνήμης μορφής συμπεριλαμβάνοντας το plateau διαρροής και το plateau αποφόρτισης. Οι ράβδοι περιορισμού μοντελοποιούνται με μία δύναμη διαρροής περίπου ίση με 410 MPa και δύναμη διαρροής κατά την αποφόρτιση περίπου ίση με 140 MPa. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η τάση αποφόρτισης και η παραμένουσα παραμόρφωση εξαρτώνται από την συνολική παραμόρφωση. Στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την έρευνα, η παραμένουσα παραμόρφωση λαμβάνεται ως μηδενική και η τάση αποφόρτισης κρατείται σταθερή, βασισμένη στην μέση τιμή σε σχέση με το εύρος παραμορφώσεων που ερευνήθηκε. Οι παραμετρικές έρευνες που διεξήχθησαν έδειξαν ότι μικρές αλλαγές της παραμέτρου που χρησιμοποιήθηκαν στο αναλυτικό μοντέλο για την παραμένουσα παραμόρφωση και την τάση αποφόρτισης έχουν μία αμελητέα

επιρροή στην απόκριση. 7% κράτυνση θεωρείται για έως και 5% παραμόρφωση, και 45% κράτυνση θεωρείται για παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%, της καθορίστηκε από τα πειράματα.



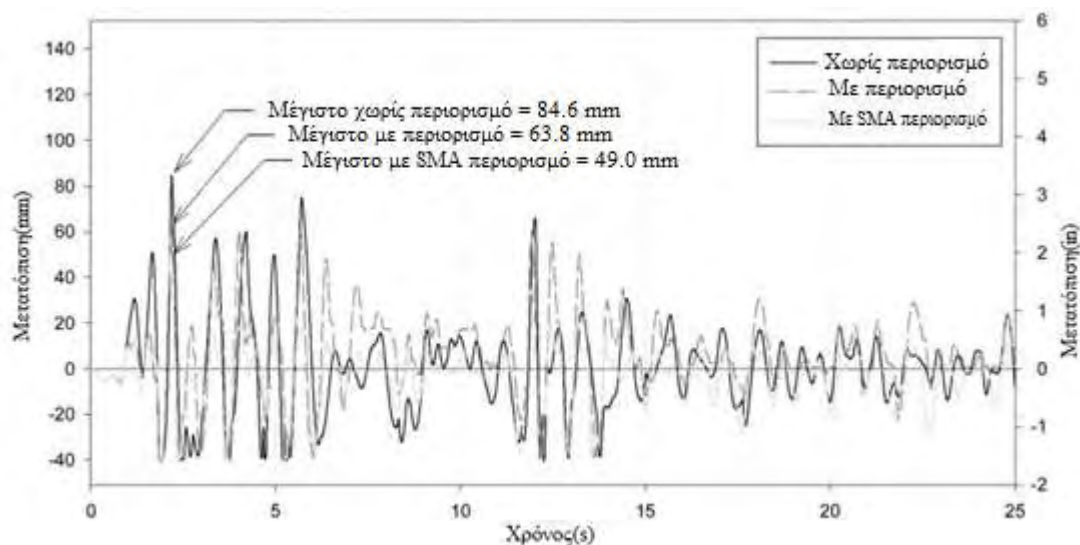
Σχήμα 2.16. Αναλυτικό μοντέλο της ράβδου περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής που χρησιμοποιήθηκε στο DRAIN-2DX

Σε αυτή την έρευνα θα γίνουν συγκρίσεις μεταξύ ράβδων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής και κοινώς χρησιμοποιούμενων χαλύβδινων καλωδίων περιορισμού. Τα χαλύβδινα καλώδια περιορισμού που αξιολογήθηκαν έχουν 1.52m μήκος και 19.1mm διάμετρο και τα οποία επιμηκύνονται περίπου 30.5 mm σε δύναμη διαρροής των 174 kN και 53.3 mm σε οριακή δύναμη αντοχής των 236 kN. Τα συμβατικά καλώδια περιορισμού μοντελοποιούνται ως διγραμμικά ελατήρια τα οποία αντιστέκονται μόνο σε εφελκυστικές δυνάμεις.

Για να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα των ράβδων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής ένα αναλυτικό μοντέλο της γέφυρας του παραδείγματος που φαίνεται στο Σχήμα 2.14 υποβάλλεται σε μια σειρά από κινήσεις του εδάφους που καταγράφονται, συμπεριλαμβάνοντας το 1940 El Centro (N-S), και το JMA Kobe Record (1995 Kobe Earthquake). Η απόκριση της γέφυρας αξιολογήθηκε για την περίπτωση με 1.52 m καλώδια περιορισμού και ράβδους περιορισμού κραμάτων μνήμης μορφής μήκους 0.61 m και 19.1 mm διαμέτρου, τα οποία είχαν τσάκισμα ίσο με 6.35 mm. Το Σχήμα 2.17 δείχνει την ιστορία απόκρισης της σχετικής μετατόπισης μεταξύ του καταστρώματος και του ακλόνητου στηρίγματος 2 για την γέφυρα που υποβλήθηκε στην 1940 El Centro καταγραφόμενη κίνηση του εδάφους, η οποία



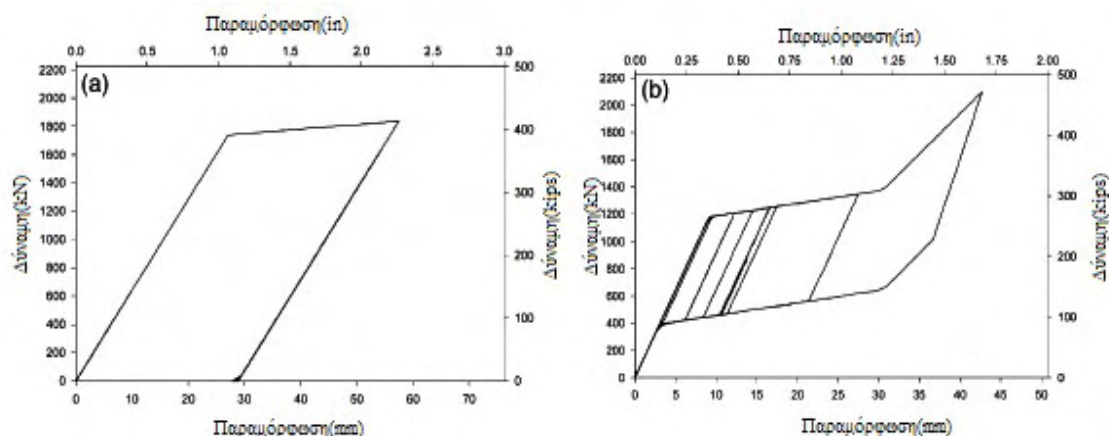
κλιμακώνεται στο 0.7 g PGA. Η μέγιστη σχετική μετατόπιση των περίπου 84.6mm συμβαίνει στην γέφυρα που κατασκευάστηκε. Η χρήση των ράβδων περιορισμού στα ακλόνητα στηρίγματα και τις βάσεις μειώνει την μέγιστη σχετική μετατόπιση στα 63.8mm, η οποία είναι μία μείωση της τάξεως του 24% της αρχικής μετατόπισης. Οι ράβδοι περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής, όμως, μειώνουν την μέγιστη σχετική μετατόπιση στα 49.0 mm, μία μείωση της τάξεως του 42% της αρχικής μετατόπισης.



Σχήμα 2.17. Σύγκριση της ιστορίας απόκρισης μετατόπισης του ακλόνητου στηρίγματος 2 για γέφυρα σε συνθήκες όπως κατασκευάστηκε, με καλώδια περιορισμού και με ράβδους περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής (1940 El Centro record, scaled to 0.70 g PGA)

Υπάρχουν αρκετοί λόγοι για την αποτελεσματικότητα των ράβδων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής σε σύγκριση με τα καλώδια περιορισμού. Αρχικά, εφόσον οι ράβδοι περιορισμού είναι υπερελαστικές, έχουν την ικανότητα να διατηρούν την ενεργή δυσκαμψία τους για επαναλαμβανόμενους κύκλους. Επανεξετάζοντας το διάγραμμα της ιστορίας απόκρισης παρατηρείται ότι τα καλώδια περιορισμού είναι αποτελεσματικά στον περιορισμό μετατόπισης κατά την διάρκεια των δύο πρώτων δευτερολέπτων φόρτισης. Όμως, κατά προσέγγιση στα δύο δευτερόλεπτα της απόκρισης τα καλώδια περιορισμού υποβάλλονται στην μέγιστη παραμόρφωση τους η οποία είναι περίπου 57mm, οδηγώντας έτσι στην διαρροή του καλωδίου. Στους μεταγενέστερους κύκλους φόρτισης, η αποτελεσματικότητα των καλωδίων περιορισμού μειώνεται σημαντικά λόγω της μεγάλης παραμένουσας παραμόρφωσης του καλωδίου. Μεγάλες παραμορφώσεις, περίπου των 55mm,

συμβαίνουν στα 6 s και ξανά στα 12 s στην ιστορία απόκρισης. Το διάγραμμα της ιστορίας απόκρισης δείχνει ότι, γενικά, η μετατόπιση του καταστρώματος με τα συμβατικά καλώδια περιορισμού είναι παρόμοια με την περίπτωση της γέφυρας όπως κατασκευάστηκε, χωρίς περιορισμό, για το υπόλοιπο της ιστορίας απόκρισης. Αυτό το φαινόμενο επίσης παρατηρείται στην γραφική παράσταση δύναμης – παραμόρφωσης του καλωδίου περιορισμού που φαίνεται στο Σχήμα 2.18.

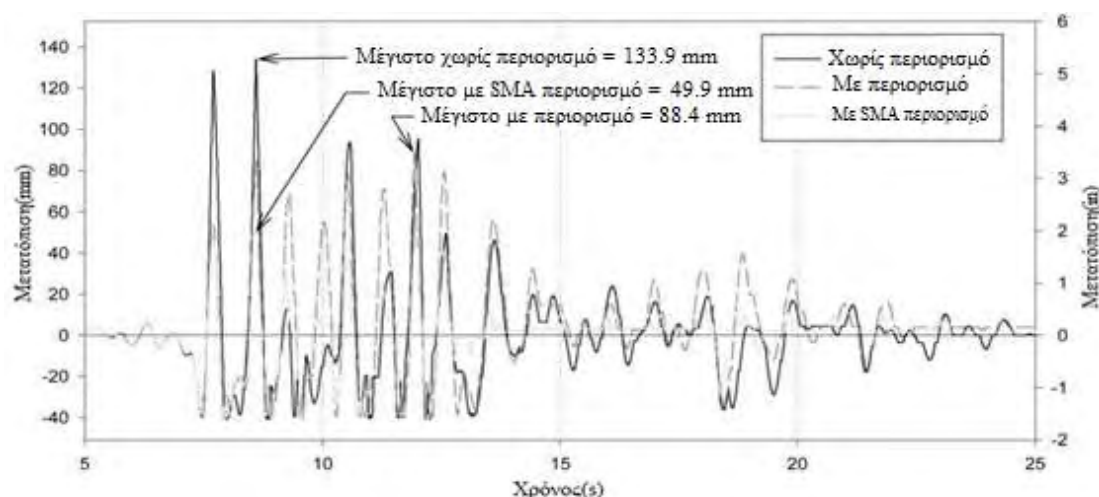


Σχήμα 2.18. Σχέση δύναμης παραμόρφωσης για καλώδιο περιορισμού (αριστερά) και για ράβδο περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής (δεξιά) για γέφυρα που υποβλήθηκε στην καταγραφή El Centro του 1940, scaled to 0.7 g PGA

Σε αντίθεση με το καλώδιο περιορισμού, τα καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής είναι αποτελεσματικά για επαναλαμβανόμενους κύκλους, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της ιστορίας απόκρισης του Σχήματος 2.17. Παρόλο που οι ράβδοι περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής υποβάλλονται σε μία μέγιστη παραμόρφωση των 40mm περίπου στα 2 s στην απόκριση, οι ράβδοι περιορισμού παραμένουν αποτελεσματικές για επαναλαμβανόμενους κύκλους. Ένας άλλος λόγος που οι ράβδοι περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής είναι αποτελεσματικές στον περιορισμό της σχετικής μετατόπισης του καταστρώματος της γέφυρας είναι λόγω της απορρόφησης ενέργειας από τις ράβδους περιορισμού. Μία σύγκριση από την ενέργεια που απορροφάται από της ράβδους περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής με την ενέργεια που απορροφάται από τα καλώδια περιορισμού αναπαρίσταται από την περιοχή που περιφράσσεται από την σχέση δύναμης – παραμόρφωσης, δείχνει ότι οι ράβδοι περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής απορρόφησαν μόνο λίγο περισσότερη ενέργεια από ότι τα χαλύβδινα καλώδια περιορισμού. Αυτό υποδεικνύει ότι η αποτελεσματικότητα των ράβδων

περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής προέρχεται κυρίως από την ικανότητα της να διατηρούνται ελαστικά μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης.

Για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των ράβδων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής σε κοντινό-πεδίο κίνησης εδάφους, αξιολογείται η απόκριση της γέφυρας στην καταγραφή του 1995 JMA Kobe. Το JMA Kobe καταγράφηκε εντός 5 km του επίκεντρου του σεισμού Kobe το 1995 και είχε μία μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους των 0.82 g. Κοντινά-πεδία κίνησης εδάφους περιλαμβάνουν μεγάλους παλμούς, οι οποίοι θα μπορούσαν να ενισχύσουν σημαντικά την δυναμική απόκριση κατασκευών μεγάλης περιόδου, ιδιαίτερα αν οι κατασκευές παραμορφώνονται στην ανελαστική περιοχή<sup>[70]</sup>. Η ιστορία απόκρισης της σχετικής μετατόπισης μεταξύ του καταστρώματος και του ακλόνητου στηρίγματος 2 για την γέφυρα που υποβλήθηκε στην καταγραφή του JMA Kobe φαίνεται στο Σχήμα 2.19.

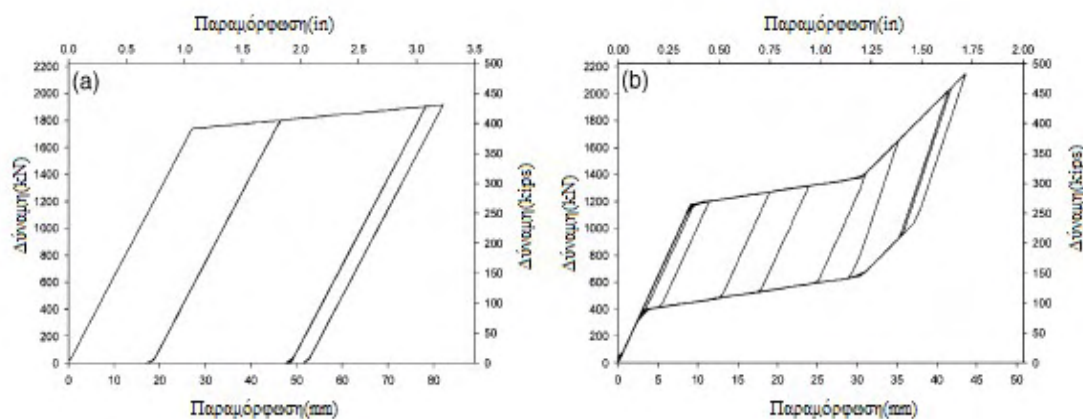


Σχήμα 2.19 Σύγκριση της ιστορίας απόκρισης μετατόπισης του ακλόνητου στηρίγματος 2 για γέφυρα σε συνθήκες όπως κατασκευάστηκε, με καλώδια περιορισμού και με ράβδους περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής (JMA Kobe καταγραφή, σεισμός Kobe 1995)

Όπως ήταν αναμενόμενο, το κοντινο-πεδίο κίνησης εδάφους παρήγαγε μεγάλες σχετικές μετατοπίσεις στην κατασκευή χωρίς περιορισμούς. Η μέγιστη σχετική μετατόπιση στο ακλόνητο στήριγμα 2 είναι 134 mm. Η ανάλυση με τα καλώδια περιορισμού δείχνει ότι τα καλώδια μειώνουν την μετατόπιση άρθρωσης στα 88.4mm, μείωση της τάξεως του 34%. Οι ράβδοι περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής, όμως, σημαντικά μείωσαν την σχετική μετατόπιση στο ακλόνητο στήριγμα. Η μετατόπιση με τις ράβδους περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής, 49,9 mm,

εκπροσωπεί μία μείωση της τάξεως του 63% στην σχετική μετατόπιση του ακλόνητου στηρίγματος.

Το Σχήμα 2.20 δείχνει τη σχέση δύναμης – μετατόπισης για το καλώδιο περιορισμού και για της ράβδους περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής στην περίπτωση της καταγραφής φόρτισης του JMA Kobe.



Σχήμα 2.20 Σχέση δύναμης παραμόρφωσης για καλώδιο περιορισμού (αριστερά) και για ράβδο περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής (δεξιά) για γέφυρα που υποβλήθηκε στην καταγραφή του JMA Kobe, σεισμό Kobe του 1995

Οι μεγάλοι παλμοί του κοντινού – πεδίου καταγραφής παρήγαγαν πρώιμη διαρροή στο καλώδιο περιορισμού, το οποίο ουσιαστικά μείωσε την αποτελεσματικότητα για το υπόλοιπο της καταγραφής κίνησης του εδάφους. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η μέγιστη σχετική μετατόπιση άρθρωσης να συμβεί αργότερα στην ιστορία της απόκρισης. Όμως, οι ράβδοι περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής ήταν ικανές να αντισταθούν σε επαναλαμβανόμενους μεγάλους κύκλους παραμορφώσεων ενώ παρέμεναν ελαστικές. Αυτό οδήγησε σε μία μεγάλη ενεργή δυσκαμψία και μέτρια απορρόφηση ενέργειας. Τη στιγμή που τα καλώδια περιορισμού είχαν μία μέγιστη μετατόπιση άρθρωσης των 88.4 mm, η αντίστοιχη μετατόπιση στην περίπτωση των ράβδων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής ήταν μόνο 45mm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.19. Επιπροσθέτως για τις μεγάλες τιμές παραμορφώσεων, η ράβδος περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής είχε μία σημαντική αύξηση στην δυσκαμψία της, λόγω κράτνσης, η οποία παρέχει επιπρόσθετη αντίσταση στο σχετικό άνοιγμα μεταξύ του καταστρώματος και του ακλόνητου στηρίγματος. Αυτή η ανάλυση διευκρινίζει ότι οι ράβδοι περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής

μπορούν να είναι εξαιρετικά αποτελεσματικές στον περιορισμό της απόκρισης των γεφυρών που υποβάλλονται σε κοντινά – πεδία κίνησης του εδάφους.

Παραπάνω παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της έρευνας αξιολογώντας την αποτελεσματικότητα χρήσης ράβδων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής για την μείωση της απόκρισης των καταστροφμάτων σε μία πολλών ανοιγμάτων απλά στηριζόμενη γέφυρα. Διεξήχθησαν πειράματα πλήρους κλίμακας σε ράβδους περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής διαμέτρου 25.4mm οι οποίες υποβλήθηκαν σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Οι ράβδοι υποβλήθηκαν σε κυκλικές παραμορφώσεις έως και 8% με ελάχιστη παραμένουσα παραμόρφωση. Η αποτελεσματικότητα των ράβδων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής σε γέφυρες εκτιμάται μέσω της αναλυτικής έρευνας της πολλών ανοιγμάτων απλά στηριζόμενης γέφυρας. Η σχετική μετατόπιση άρθρωσης σε μία γέφυρα συγκρίνεται για αναβαθμίσεις χρησιμοποιώντας συμβατικά χαλύβδινα καλώδια περιορισμού και ράβδους περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι ράβδοι περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής μειώνουν της σχετικές μετατοπίσεις άρθρωσης στο ακλόνητο στήριγμα πολύ πιο αποτελεσματικά από ότι τα συμβατικά χαλύβδινα καλώδια περιορισμού. Το μεγάλο ελαστικό εύρος παραμόρφωσης των ράβδων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής της επιτρέπει να υφίστανται μεγάλες παραμορφώσεις και να παραμένουν ελαστικά. Επιπροσθέτως η υπερελαστικές ιδιότητες των ράβδων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής, οδηγούν στην απορρόφηση ενέργειας στις αρθρώσεις. Τελικά, η αξιολόγηση της πολλών ανοιγμάτων απλά στηριζόμενης γέφυρας που υποβλήθηκε σε κοντινά – πεδία κίνησης του εδάφους, δείχνει ότι οι ράβδοι περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής είναι εξαιρετικά αποτελεσματικές για τον περιορισμό απόκρισης των καταστροφμάτων γεφυρών σε κοντινά – πεδία κίνησης του εδάφους. Η αυξημένη δυσκαμψία των ράβδων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής σε μεγάλες παραμορφώσεις παρέχουν επιπρόσθετο περιορισμό για την μείωση των σχετικών ανοιγμάτων της γέφυρας.

### 2.2.3 Εκτοπισμός και *pounding*.

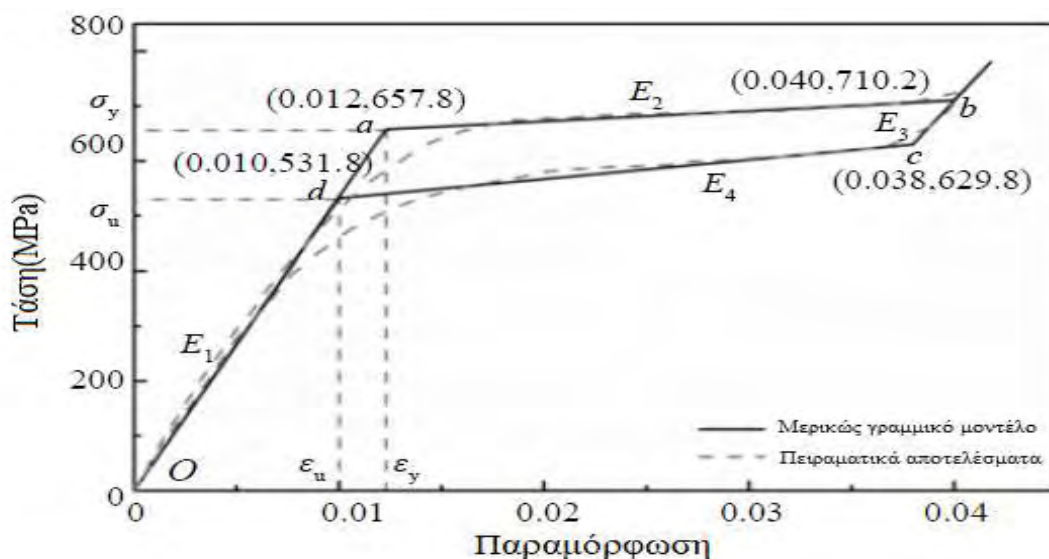
Το καλώδιο Nitinol από κράματα μνήμης μορφής που παρέχεται από το Shenzhen NTN Co. Ltd. της Κίνας χρησιμοποιείται σε αυτή την έρευνα. Η διάμετρος του καλωδίου από κράματα μνήμης μορφής είναι 1.2 mm. Οι θερμοκρασίες αρχής και τέλους του μαρτενσίτη του υλικού από κράματα μνήμης μορφής σε κατάσταση χωρίς τάσεις είναι  $-75^{\circ}\text{C}$  και  $-56^{\circ}\text{C}$ , αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες θερμοκρασίες αρχής και

τέλους του ωστενίτη είναι  $-38^{\circ}\text{C}$  και  $-16^{\circ}\text{C}$ , αντίστοιχα. Για την κατανόηση των δυναμικών ιδιοτήτων των καλωδίων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής, τα καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής δοκιμάζονται σε ένα INSTRON8801 Σύστημα Τεστ Κοπώσεως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.21. Τα πειραματικά δοκίμια έχουν μήκος 200 mm. Το ενεργό μήκος του δοκιμίου ορίζεται ως 120 mm όταν συσφίγγεται από υδραυλικές λαβές σφήνας. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων, οι εφαρμοζόμενες φορτίσεις και μετατοπίσεις μετρούνται από έμφυτους αισθητήρες των συστημάτων.



*Σχήμα 2.21 Πειράματα κυκλικής φόρτισης του καλώδιου από κράματα μνήμης μορφής*

Τα πειράματα εκτελούνται σε θερμοκρασία δωματίου περίπου στους  $20^{\circ}\text{C}$ . Κυκλικές φορτίσεις με συχνότητα κατά προσέγγιση 2.0 Hz, η οποία συμμορφώνεται με την δόνηση της συχνότητας των καλωδίων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής που εγκαθίστανται στο μοντέλο γέφυρας, εφαρμόζονται στα δοκίμια κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Σύμφωνα με της περιγραφές προϊόντος του υλικού που παρέχεται από τον κατασκευαστή, το εύρος παραμόρφωσης της ημιτονοειδούς φόρτισης επιλέγεται ως 4%. Μια τυπική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης των καλωδίων από κράματα μνήμης μορφής φαίνεται στο Σχήμα 2.22.



Σχήμα 2.22 Τυπική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης και το μερικώς γραμμικό μοντέλο των καλωδίων από κράματα μνήμης μορφή

Όπως παρατηρείται από το σχήμα, το υλικό από κράματα μνήμης μορφής έχει συμπεριφορά ελαστικής παραμόρφωσης κατά την ωστενιτική φάση στα πλαίσια μιας μικρής παραμόρφωσης. Με αύξηση της παραμόρφωσης, τα κράματα μνήμης μορφής διαρρέουν και μεταβιβάζονται στην μαρτενσιτική φάση που προκαλείται από τάσεις. Κατά την αποφόρτιση, η παραμόρφωση ανακτά την αρχική της κατάσταση εξαιτίας της μεταμόρφωσης από την μαρτενσιτική φάση στην ωστενιτική. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων, βρέθηκε επίσης ότι η χωρητικότητα της απορρόφησης ενέργειας του υλικού από κράματα μνήμης μορφής δεν είναι σημαντική λόγω περιορισμών του υλικού.

Τα υστερητικά χαρακτηριστικά του κράματος μνήμης μορφής μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας ένα μερικώς γραμμικό μοντέλο βασισμένο στα πειραματικά αποτελέσματα (Du, (2005)<sup>[71]</sup>). Οι παράμετροι του μερικώς γραμμικού μοντέλου προσδιορίζονται με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και με την ισότητα της απορρόφησης ενέργειας μεταξύ της πειραματικής καμπύλης και του μερικώς γραμμικού μοντέλου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.22, η μερική σχέση τάσης – παραμόρφωσης του υλικού από κράματα μνήμης μορφής διαιρείται σε πέντε τμήματα. Από το  $O$  στο  $a$  το κράμα μνήμης μορφής έχει συμπεριφορά ελαστικής παραμόρφωσης στην ωστενιτική φάση και μεταμορφώνεται σε μαρτενσίτη από το  $a$  στο  $b$ . Η παραμόρφωση διαρροής  $\epsilon_y$  και η τάση διαρροής  $\sigma_y$ , όπως δίνονται στο σημείο  $a$ , λαμβάνουν τις τιμές 0.012 και 657.8 MPa, αντίστοιχα. Το αρχικό μέτρο ελαστικότητας  $E_1$  και το μέτρο ελαστικότητας ύστερα από την διαρροή  $E_2$  είναι 54.8

και 1.87 GPa, αντίστοιχα. Κατά την αποφόρτιση το κράμα μνήμης μορφής ανακάμπτει από το σημείο  $b$  στο σημείο  $c$  με μέτρο ελαστικότητας  $E3$  το οποίο είναι 40.2 GPa. Ύστερα μεταμορφώνεται στην πλήρη ωστενιτική φάση στο σημείο  $d$ . Από το  $c$  στο  $d$  η κλίση υποδηλώθηκε ως  $E4$  ίσο με 3.50 GPa. Η ελαστική παραμόρφωση αποφόρτισης  $\epsilon_u$  και τάση  $\sigma_u$  είναι 0.010 και 531.78 MPa, αντίστοιχα. Με περαιτέρω αποφόρτιση το κράμα μνήμης μορφής ανακάμπτει στο αρχικό σημείο  $O$  χωρίς παραμένουσα παραμόρφωση.

Το μοντέλο του πειράματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.23, είναι μία δύο τμημάτων γέφυρα αυτοκινητόδρομου με ένα σύστημα απομόνωσης βάσης. Η πρωτότυπη γέφυρα του μοντέλου του πειράματος είναι μία κατασκευή πολλών ανοιγμάτων με μήκος των 36 m του κάθε τμήματος. Σε αυτή την έρευνα η γεωμετρική κλίμακα που επιλέγεται είναι 1:20 για τον σχεδιασμό του μοντέλου. Σύμφωνα με την δοθείσα γεωμετρική κλίμακα, το μοντέλο της γέφυρας κατασκευάστηκε να έχει 3.6 m μήκος και 1.2 m πλάτος. Οι υπερκατασκευές του μοντέλου γέφυρας αυτοκινητόδρομου στηρίζονται σε τρεις πασσάλους μέσω οχτώ ελαστομερών εφεδράνων. Το κάθε κατάστρωμα του μοντέλου της γέφυρας απαρτίζεται από χαλύβδινες πλάκες των 20 mm και block από οπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο είναι σφικτά προσκολλημένο στην χαλύβδινη πλάκα ως επιπρόσθετη μάζα. Η συνολική μάζα της κατασκευής είναι 2.5t για το κάθε τμήμα.



*Σχήμα 2.23 Φωτογραφία του μοντέλου γέφυρας αυτοκινητοδρόμου*

Γενικά το rounding σε μία γέφυρα αυτοκινητόδρομου προκαλείται από την διαφορά των δυναμικών χαρακτηριστικών των γειτονικών κατασκευών και της χωρικής μεταβολής των κινήσεων του εδάφους από σεισμό. Για τις γέφυρες



αυτοκινητοδρόμων με μικρά ανοίγματα, οι επιδράσεις της χωρικής μεταβολής των κινήσεων του εδάφους από σεισμό δεν θα είναι σημαντικές για το rounding της γέφυρας. Επιπλέον, εξαιτίας των περιορισμών της σεισμικής τράπεζας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την έρευνα, οι πολλών στηρίξεων κινήσεις του εδάφους δεν μπορούσαν να εφαρμοστούν. Έτσι, το rounding που προκαλείται από την διαφορά των δυναμικών χαρακτηριστικών των γειτονικών κατασκευών πρέπει να ληφθεί υπόψιν σε αυτή την έρευνα. Πράγματι, η πρωτότυπη κατασκευή, η οποία επιλέχθηκε από τα Standard Drawings of Highway Bridges of China (1999)<sup>[72]</sup>, σχεδιάζεται με την ίδια μάζα και με της ίδιες φυσικές συχνότητες των γειτονικών τμημάτων. Όμως, σε αυτή την περίπτωση η γέφυρα αυτοκινητόδρομου δεν θα έχει επαφή υπο την σεισμική κίνηση του εδάφους. Για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός, δύο τύποι ελαστομερών εφεδράνων διαφορετικών πλευρικών δυσκαμψιών χρησιμοποιούνται ως απομονωτές. Τα οχτώ ελαστομερή εφέδρανα έχουν το ίδιο μέγεθος με ύψος των 97.5mm και διάμετρο των 100mm. Τα μέτρα διάτμησης των εφεδράνων του αριστερού και του δεξιού τμήματος είναι 0.39 και 0.55 MPa, αντίστοιχα. Οι φυσικές συχνότητες των αριστερών και των δεξιών τμημάτων σχεδιάστηκαν να είναι 2.13 και 2.50 Hz, αντίστοιχα. Τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του μοντέλου της γέφυρας αυτοκινητοδρόμου φαίνονται στον Πίνακα 2.3.

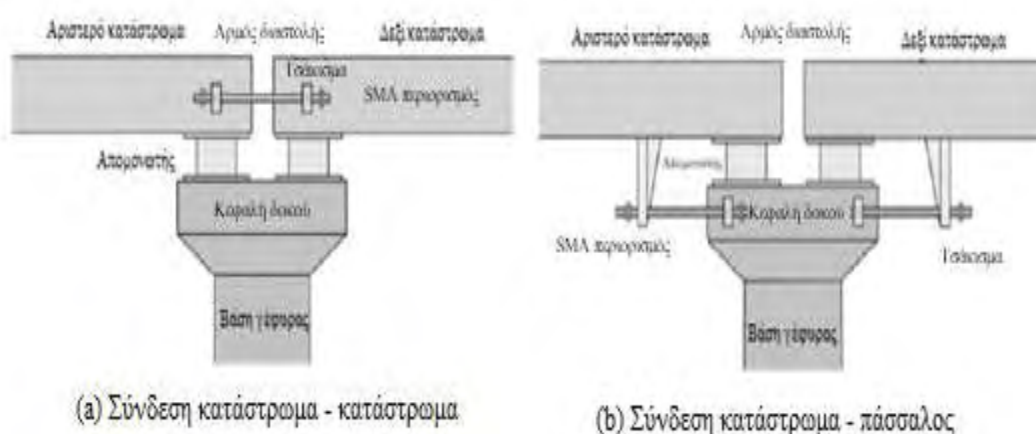
*Πίνακας 2.3 Δυναμικά χαρακτηριστικά της γέφυρας αυτοκινητοδρόμου*

Τμήμα	Μάζα (t)	Δυσκαμψία (10 <sup>5</sup> N/m)	Φυσική συχνότητα (Hz)	Αναλογία απόσβεσης (%)
Αριστερά	2.5	4.27 (5.22)	2.13 (2.30)	3
Δεξιά	2.5	6.16 (6.46)	2.50 (2.56)	2.5

Το αρχικό μέγεθος κενού του αρμού διαστολής της πρωτότυπης γέφυρας είναι 7cm. Σύμφωνα με τη γεωμετρική κλίμακα, ο διαχωρισμός μεταξύ των γειτονικών τμημάτων του μοντέλου της γέφυρας αυτοκινητοδρόμου είναι πολύ μικρός, μόνο 3.5mm. Για να επιβεβαιωθεί το αξονικό rounding κατά την διάρκεια των πειραμάτων, μία χαλύβδινη πλάκα των 100 mm κοντά στον αρμό διαστολής αφαιρέθηκε εκ των προτέρων και ένα σημείο επαφής τοποθετήθηκε στο κέντρο του αρμού διαστολής για να συμμορφώσει τον αρχικό διαχωρισμό των 3.5mm. Περισσότερες πληροφορίες για το μοντέλο γέφυρας δίνονται στο Gu, (2009)<sup>[73]</sup>.

Καλώδια περιορισμού εγκαθίστανται σε μία γέφυρα αυτοκινητοδρόμου χρησιμοποιώντας δύο τυπικά συστήματα εγκαταστάσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα

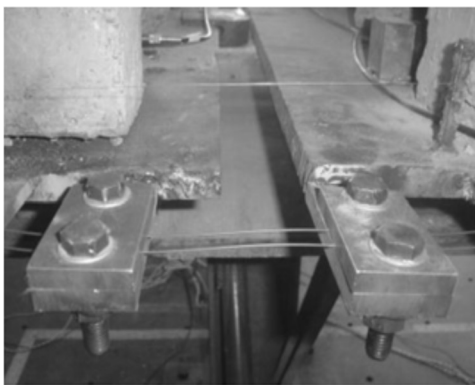
2.24, ώστε να αποφευχθεί εκτοπισμός των κατασκευών υπο σεισμικές διεγέρσεις. Στο πρώτο σύστημα εγκατάστασης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.24(a), τα καλώδια περιορισμού συνδέονται στα γειτονικά καταστρώματα κατα μήκος του αρμού διαστολής. Για την ελάφρυνση των θερμικών επιδράσεων των καταστρωμάτων της γέφυρας κατά την διάρκεια του στάδιου συντήρησης της γέφυρας, γενικά παρουσιάζεται τσάκισμα για τα καλώδια περιορισμού. Όταν τα γειτονικά τμήματα απομακρύνονται το ένα από το άλλο και η σχετική μετατόπιση μεταξύ των γειτονικών καταστρωμάτων υπερβαίνει το τσάκισμα, τα μόνο – εφελκυστικά καλώδια περιορισμού περιορίζουν της κινήσεις των καταστρωμάτων της γέφυρας για να αποφύγουν τον εκτοπισμό της γέφυρας όταν υποβάλλεται σε σεισμικές διεγέρσεις. Στην δεύτερη εγκατάσταση του συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.24(b), τα καλώδια περιορισμού εγκαθιστώνται μεταξύ των υπερκατασκευών και των κεφαλών των δοκών των υποκατασκευών. Παρόμοια, το τσάκισμα επίσης σχεδιάζεται για τα καλώδια περιορισμού. Κατά την διάρκεια του σεισμού τα γειτονικά τμήματα της γέφυρας αυτοκινητοδρόμου θα δονούνται ανεξάρτητα, και τα καλώδια περιορισμού θα περιόριζαν μόνο της μεγάλες σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των υπερκατασκευών και των υποκατασκευών. Η επίδοση των δύο τύπων των καλωδίων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής αξιολογείται με το ίδιο μοντέλο γέφυρας αυτοκινητοδρόμου αυτής της έρευνας.



Σχήμα 2.24. Σχηματικές εγκαταστάσεις των καλωδίων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής.

Το Σχήμα 2.25(a) δείχνει μία κοντινή φωτογραφία των καλωδίων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής, η οποία συνδέεται στην διεπαφή καταστρώματος – καταστρώματος, του μοντέλου της γέφυρας. Σε αυτή την

περίπτωση, δύο καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής εγκαθιστώνται συμμετρικά στις αντίθετες πλευρές των γειτονικών καταστρωμάτων κατά μήκος του αρμού διαστολής. Κάθε περιορισμός αποτελείται από δύο καλώδια από κράματα μνήμης μορφής με καθαρό μήκος των 100mm. Οι περιγραφές του προϊόντος του υλικού που παρέχεται από τον κατασκευαστή προτείνουν ότι είναι καλύτερο να περιοριστεί η μέγιστη παραμόρφωση κάτω από 4% για πρακτικές εφαρμογές. Από την μηχανική ιδιότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων των καλωδίων από κράματα μνήμης μορφής, επίσης βρέθηκε ότι το υλικό εξ ολοκλήρου μεταμορφώθηκε στην μαρτενσιτική φάση με παραμόρφωση περίπου στα 4% (σημείο b του Σχήματος 2.22). Για να επιβεβαιωθεί η ασφάλεια, η μέγιστη παραμόρφωση των καλωδίων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής σχεδιάστηκε να είναι 4% για την κατασκευή που υποβάλλεται σε σεισμικές κινήσεις του εδάφους σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομείωσης. Τα καλώδια από κράματα μνήμης μορφής παγιώνονται από τέσσερα κομμάτια χαλύβδινων πλακών με κοίλες ραβδώσεις μέσω κοχλιών.. Το καλώδιο περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής που εγκαταστάθηκε με μία σύνδεση κατάστρωματος – πασσάλου απεικονίζεται στο Σχήμα 2.25(b). Κατά την διάρκεια των πειραμάτων, κάθε τμήμα του μοντέλου της γέφυρας αυτοκινητοδρόμου είναι εξοπλισμένο με ένα περιορισμό, στο οποίο τέσσερα καλώδια από κράματα μνήμης μορφής με ένα καθαρό μήκος των 300mm χρησιμοποιούνται, μεταξύ του καταστρώματος και του εξωτερικού πασσάλου κατά την διαμήκη κατεύθυνση.



a) Σύνδεση κατάστρωμα-κατάστρωμα



b) Σύνδεση κατάστρωμα-πάσσαλος

*Σχήμα 2.25. Καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής που εγκαταστάθηκαν στην γέφυρα*

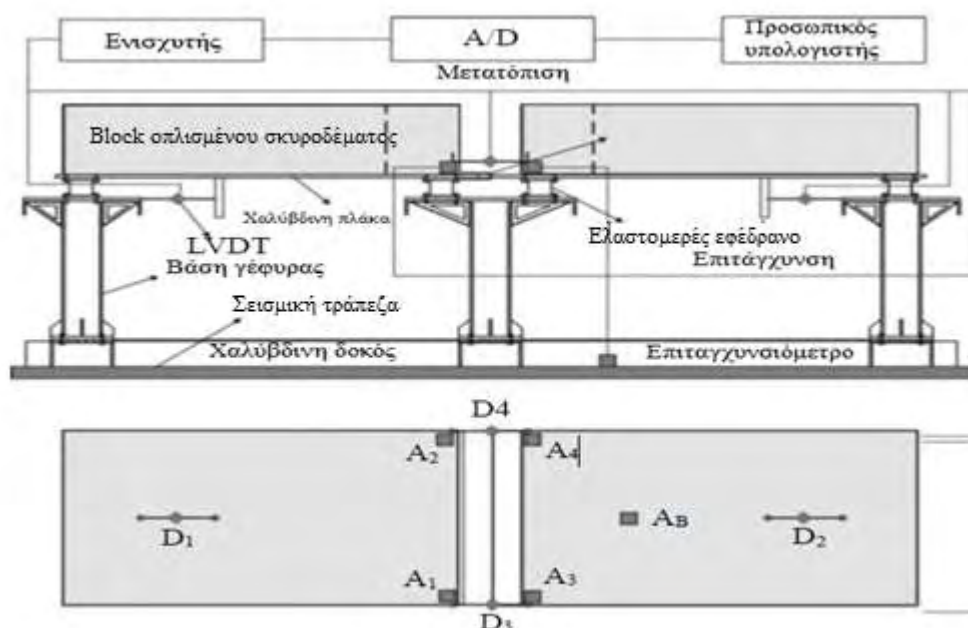
Για να εκτιμηθούν οι επιδράσεις των τσακισμάτων των καλωδίων περιορισμού, οι κατασκευαστικές αποκρίσεις του μοντέλου γέφυρας δοκιμάζονται χρησιμοποιώντας ένα καλώδιο περιορισμού χωρίς τσάκισμα και ένα με τσάκισμα των 3mm. Για να ληφθεί υπόψιν η ελεύθερη επέκταση των καταστρωμάτων της γέφυρας υπο θερμοκρασίες περιβάλλοντος, το τσάκισμα των καλωδίων περιορισμού επιλέγεται ως 3mm βασιζόμενο στον διαχωρισμό του αρμού διαστολής. Υποτίθεται ότι τα καλώδια περιορισμού δεν θα υποστηρίξουν δυνάμεις εφελκυσμού που προκαλούνται από θερμικά φαινόμενα κατά το στάδιο συντήρησης. Τα καλώδια περιορισμού χωρίς τσάκισμα επίσης εξοπλίζονται στην κατασκευή για σύγκριση. Οι περιπτώσεις πειραμάτων του μοντέλου της γέφυρας λαμβάνοντας υπόψιν τα συστήματα εγκατάστασης και το τσάκισμα των καλωδίων περιορισμού παρατίθενται στον Πίνακα 2.4.

*Πίνακας 2.4 Σχέδιο εγκατάστασης και οι παράμετροι των καλωδίων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής για τα πειράματα σεισμικής τράπεζας*

Περίπτωση	Σχέδιο εγκατάστασης	Παράμετροι των καλωδίων από κράματα μνήμης μορφής		
		Αριθμός	Μήκος (mm)	Τσάκισμα (mm)
1	Σύνδεση καταστρώματος - καταστρώματος	2	100	0
2	Σύνδεση καταστρώματος - καταστρώματος	2	100	3
3	Σύνδεση καταστρώματος - καταστρώματος	4	300	0
4	Σύνδεση καταστρώματος - καταστρώματος	4	300	3

Το Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος απόκτησης δεδομένων φαίνεται στο Σχήμα 2.26. Όπως φαίνεται στο Σχήμα, πέντε επιταχυνσιόμετρα και τέσσερις μετατροπείς μετατόπισεων εγκαθίστανται στο μοντέλο γέφυρας αυτοκινητοδρόμου ώστε να μετρηθούν τα σημεία επιτάχυνσης και μετατόπισης. Μεταξύ αυτών, τέσσερα επιταχυνσιόμετρα, ονομαζόμενα ως A1-A4, τοποθετούνται στο κατάστρωμα κοντά στον αρμό διαστολής ώστε να μετρηθούν οι απόλυτες αποκρίσεις επιτάχυνσης και αυτό που απομένει το A<sub>B</sub> τοποθετείται στην σεισμική τράπεζα για να αποκτήσει της πραγματικές τιμές της σεισμικής τράπεζας. Δύο μετατροπείς μετατόπισης, D3 και D4, εγκαθίστανται κοντά στα καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής για να μετρήσουν την μετατόπιση των καλωδίων περιορισμού και την σχετική μετατόπιση μεταξύ των γειτονικών καταστρωμάτων. Άλλοι δύο μετατροπείς μετατόπισης, D1 και D2, χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των σχετικών μετατοπίσεων των καταστρωμάτων σχετικά με τους πασσάλους. Τα σήματα της επιτάχυνσης και της μετατόπισης διαμορφώνονται από συντελεστές και

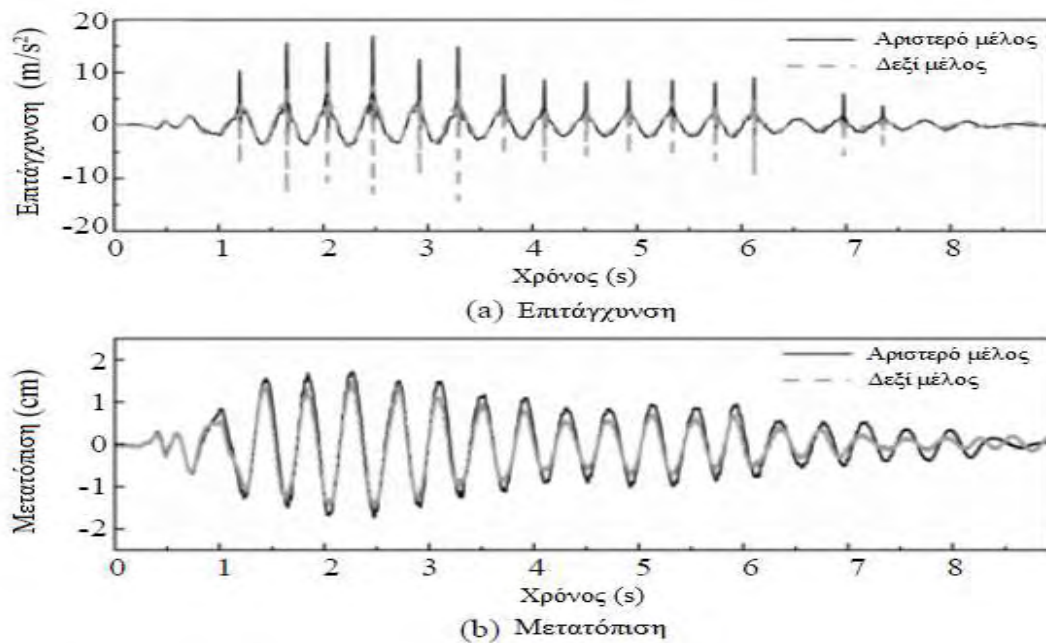
ύστερα μεταφέρονται σε ένα σύστημα dSPACE με 20 A/D κανάλια και 8 D/A κανάλια.



Σχήμα 2.26 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος απόκτησης δεδομένων

Για να εκτιμηθεί η επίδοση των καλωδίων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής, τρεις καταγραφές σεισμών, οι οποίες περιελάμβαναν της σεισμούς 1940 El Centro (N-S, Array 9 station), τον 1995 Kobe (Takarazu station) και 2008 Wenchuan (051MZQ station), χρησιμοποιούνται ως δεδομένα στην σεισμική τράπεζα. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων, η χρονική αύξηση της αρχικής καταγραφής συμπίεζεται σύμφωνα με την χρονική κλίμακα και η μέγιστη επιτάχυνση της κίνησης του εδάφους προσαρμόζεται στα 520 Gal [https://en.wikipedia.org/wiki/Gal\\_\(unit\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Gal_(unit)). Οι αποκρίσεις της επιτάχυνσης του καταστρώματος γέφυρας παρουσιάζονται χρησιμοποιώντας της μέσες τιμές, των A1 και A2, για το αριστερό τμήμα και A3 και A4 για το δεξιό τμήμα, αντίστοιχα, για να περιορίσουν της μικρές επιδράσεις περιστροφών των καταστρωμάτων γέφυρας λόγω σφαλμάτων εγκατάστασης. Το Σχήμα 2.27(a) δείχνει της χρονο-ιστορίες των απόλυτων αποκρίσεων επιτάχυνσης των καταστρωμάτων της γέφυρας της μη ελεγχόμενης κατασκευής όταν υποβάλλεται σε σεισμική κίνηση του εδάφους του El Centro. Όπως φαίνεται στο Σχήμα, πολλές αιχμηρές κορυφές εμφανίζονται στις χρονο-ιστορίες των αποκρίσεων της επιτάχυνσης. Αυτό το φαινόμενο προκαλείται από την ξαφνική ανταλλαγή ταχύτητας μεταξύ των γειτονικών τμημάτων κατά την σύγκρουση. Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι συνέβησαν 15

συγκρούσεις σε όλο το χρονικό πλαίσιο. Οι μέγιστες μετατοπίσεις στα αριστερά και δεξιά τμήματα βρέθηκαν να είναι 16.85 και 14.21 m/s<sup>2</sup>, αντίστοιχα. Οι αποκρίσεις μετατόπισης των ελαστομερών εφεδράνων που μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας μετατροπείς μετατοπίσεων, D1 και D2, παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.27(b). Όπως φαίνεται από το Σχήμα, οι μέγιστες μετατοπίσεις των φορέων μετρήθηκαν να είναι 1.73 και 1.47 cm, αντίστοιχα, για τα αριστερά και τα δεξιά τμήματα. Για σύγκριση, οι μέγιστες αποκρίσεις της επιτάχυνσης και της μετατόπισης της κατασκευής που υποβάλλεται σε άλλους σεισμούς αναφέρονται στον Πίνακα 2.5.



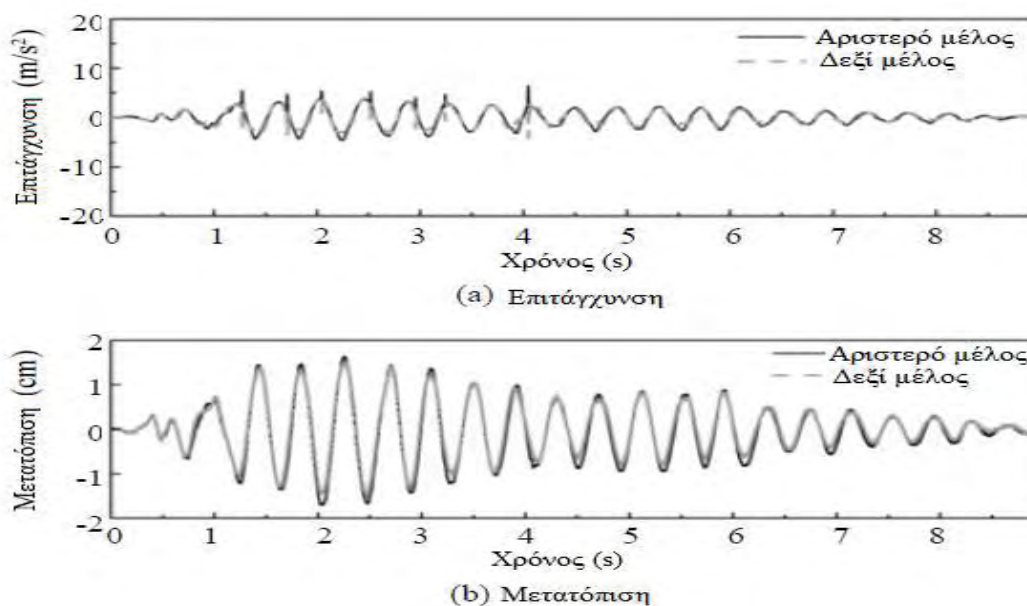
Σχήμα 2.27 Δομικές αποκρίσεις της μη ελεγχόμενης κατασκευής

Πίνακας 2.5 Σχέδιο εγκατάστασης και οι παράμετροι των καλωδίων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής για τα πειράματα σεισμικής τράπεζας (Παρατήρηση: το σύμβολο της διαγωνίου (/) χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει το πείραμα για τα καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής χωρίς τσάκισμα και με τσάκισμα, αντίστοιχα)

Περίπτωση	Καταγραφή σεισμού	Αποτελέσματα πειράματος				
		$x_1^{max}$ (cm)	$\dot{x}_1^{max}$ (m/s <sup>2</sup> )	$x_2^{max}$ (cm)	$\dot{x}_2^{max}$ (m/s <sup>2</sup> )	Impact number
Χωρίς rounding	El Centro	1.73	16.85	1.47	14.21	15
	Kobe	2.23	22.62	1.92	17.27	14
	Wenchuan	0.85	13.12	1.23	10.30	10
Σύνδεση κατάστρωμα κατάστρωμα	El Centro	1.71/1.72	6.42/13.29	1.53/1.50	4.19/8.67	7/10
	Kobe	2.18/2.20	8.28/16.16	1.95/1.99	5.86/12.46	6/9
	Wenchuan	1.04/1.12	3.10/8.04	0.99/0.88	2.63/7.39	0/3
Σύνδεση κατάστρωμα πάσσαλος	El Centro	1.38/1.62	19.40/17.06	0.89/1.12	17.47/15.55	4/8
	Kobe	1.56/1.73	25.05/27.05	1.31/1.46	18.53/19.31	8/9
	Wenchuan	0.53/0.63	11.04/17.53	0.70/0.75	12.33/16.35	8/5

Τα πειράματα σεισμικής τράπεζας του μοντέλου γέφυρας αυτοκινητοδρόμου με καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής διεξάγονται με τις ίδιες σεισμικές κινήσεις του εδάφους. Στην ακόλουθη συζήτηση, οι κατασκευαστικές αποκρίσεις μοντέλου γέφυρας αυτοκινητοδρόμου, στις τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις που σχετίζονται με το σύστημα εγκατάστασης και το τσάκισμα των καλωδίων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής, παρουσιάζονται και συγκρίνονται με την μη ελεγχόμενη κατασκευή. Για την πρώτη περίπτωση, τα καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής εγκαθιστώνται στο μοντέλο γέφυρας αυτοκινητοδρόμου με την μορφή σύνδεσης καταστρώματος – καταστρώματος χωρίς τσάκισμα. Υπο την κίνηση του εδάφους από την καταγραφή του σεισμού El Centro οι απόλυτες αποκρίσεις επιτάχυνσης των καταστρωμάτων της γέφυρας φαίνονται στο Σχήμα 2.28(a). Με την εγκατάσταση των καλωδίων περιορισμού, ο αριθμός συγκρούσεων του μοντέλου γέφυρας μειώνεται από 15 σε 7 φορές. Οι μέγιστες αποκρίσεις επιτάχυνσης σημαντικά μειώνονται σε 6.42 και 4.19 m/s<sup>2</sup> για τα αριστερά και δεξιά τμήματα αντίστοιχα δείχνοντας μείωση της τάξεως του 61.9% και 70.5%. Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι τα καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής μπορούν αποτελεσματικά να καταστείλουν τις rounding αποκρίσεις, παρόλο που το κίνητρο των παραδοσιακών καλωδίων περιορισμού προωθήθηκε για να αποτρέψει τον εκτοπισμό των γεφυρών αυτοκινητόδρομων. Ο εκτοπισμός της γέφυρας αυτοκινητόδρομου προκαλείται από

μεγάλες παραμορφώσεις μεταξύ των καταστρωμάτων και των πασσάλων υπερβαίνοντας το πλάτος επικάθισης υπο σεισμικές κινήσεις του εδάφους. Για να αποφευχθεί ο εκτοπισμός της υπερκατασκευής τα καλώδια περιορισμού πρέπει να επιτύχουν την λειτουργία μείωσης των αποκρίσεων της μετατόπισης μεταξύ των καταστρωμάτων και των πασσάλων. Το Σχήμα 2.28(b) παρουσιάζει τις χρονο-ιστορίες της μετατόπισης μεταξύ των καταστρωμάτων και των πασσάλων για την κατασκευή που υποβλήθηκε στην ίδια κίνηση του εδάφους.

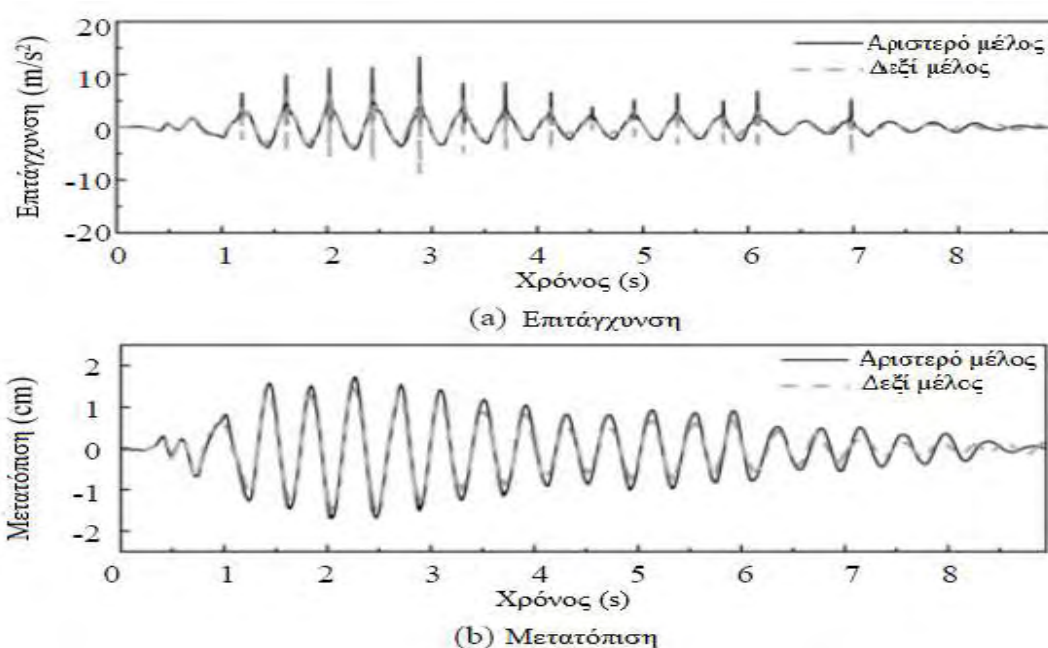


Σχήμα 2.28 Δομικές αποκρίσεις της γέφυρας αυτοκινητοδρόμου με καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής για την περίπτωση 1

Σε σύγκριση με τις αποκρίσεις της μη ελεγχόμενης κατασκευής, η μείωση των σχετικών αποκρίσεων μετατόπισης δεν είναι σημαντική. Αποκαλύπτει ότι τα καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής τα οποία είναι συνδεδεμένα με την διεπαφή καταστρώματος – καταστρώματος δεν μπορούν αποτρέψουν τον εκτοπισμό αποτελεσματικά. Ο λόγος είναι εξαιτίας των δυναμικών χαρακτηριστικών της γειτονικής κατασκευής του μοντέλου γέφυρας. Θεωρητικά, αν η διαφορά των φυσικών συχνοτήτων μεταξύ των γειτονικών κατασκευών είναι μικρή, η σχετική μετατόπιση της δεν είναι πολύ μεγάλη. Έτσι, τα καλώδια περιορισμού που συνδέονται στην διεπαφή καταστρώματος – καταστρώματος δεν μπορούν να περιορίσουν την κίνηση των γειτονικών τμημάτων λόγω της μικρής εκτός χώρου μετατόπισης. Σε αυτό το πείραμα, επειδή η φυσική συχνότητα του αριστερού τμήματος είναι κοντά με αυτήν του δεξιού τμήματος, οι αποκρίσεις μετατόπισης των



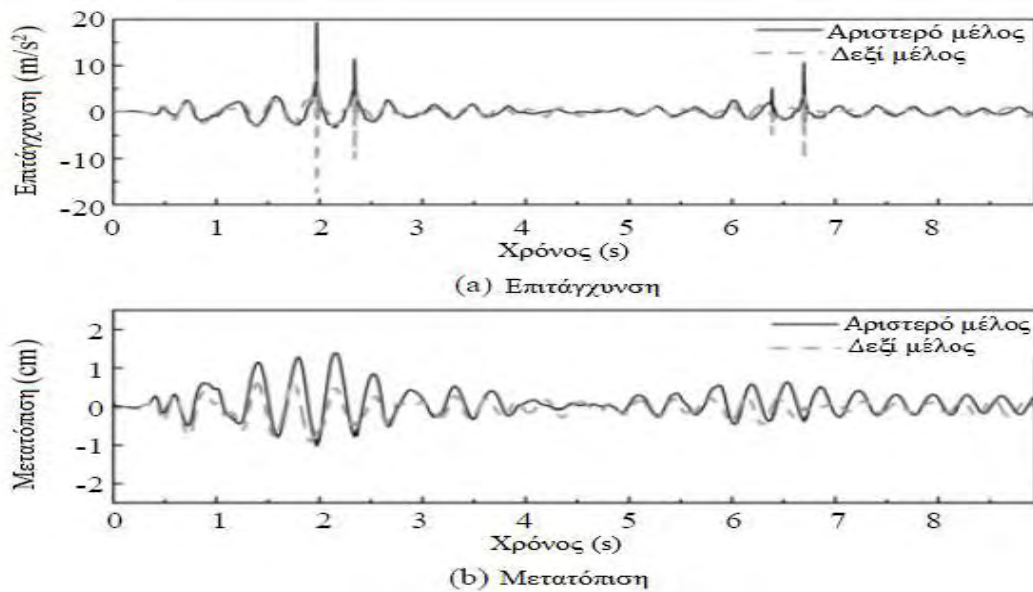
καταστρωμάτων που σχετίζονται με τους πασσάλους δεν καταστέλλονται αποτελεσματικά όταν τα καλώδια περιορισμού εγκαθίστανται στο μοντέλο γέφυρας χρησιμοποιώντας μία σύνδεση καταστρώματος – καταστρώματος. Για να ερευνηθούν οι επιδράσεις των τσακισμάτων στα καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής, διεξήχθησαν πειράματα τσακισμάτων των 3mm . Παρομοίως, οι απόλυτες επιταχύνσεις των καταστρωμάτων της γέφυρας φαίνονται στο Σχήμα 2.29. Βρέθηκε ότι οι αποκρίσεις της επιτάχυνσης αυξήθηκαν σε 13.29 και 8.67 m/s<sup>2</sup> και οι παραμορφώσεις του φορέα μεταβλήθηκαν ελαφρώς σε 1.72 και 1.5 cm, αντίστοιχα, για τα αριστερά και τα δεξιά τμήματα.



Σχήμα 2.29 Δομικές αποκρίσεις της γέφυρας αυτοκινητοδρόμου με καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής για την περίπτωση 2

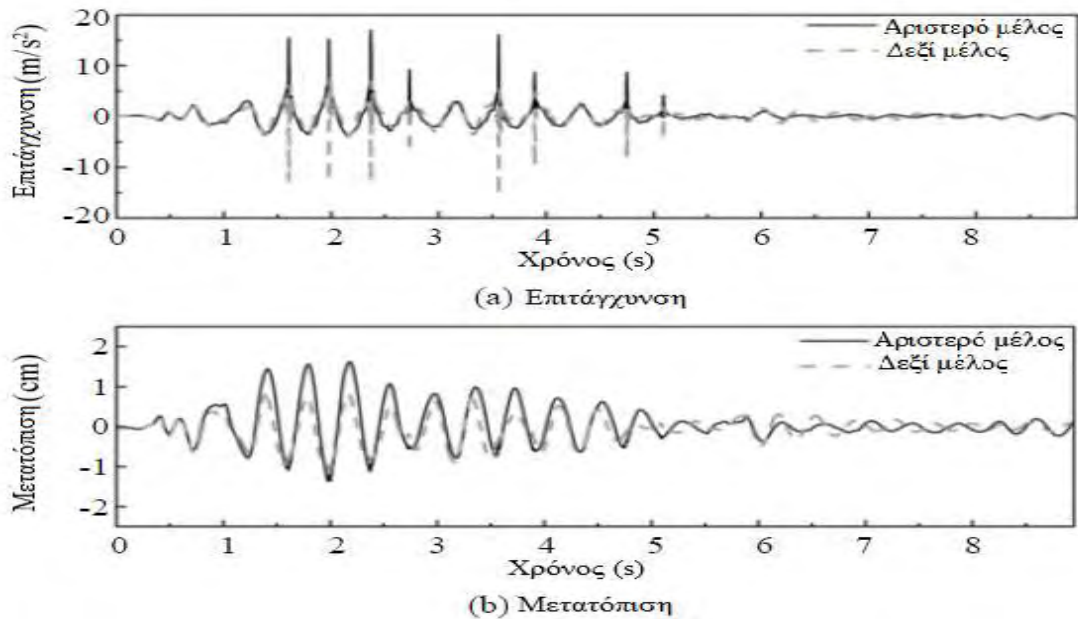
Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι τα καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής που εγκαταστήθηκαν ως μία σύνδεση καταστρώματος – καταστρώματος μπορούν αποτελεσματικά να μετριάσουν της αποκρίσεις rounding του μοντέλου γέφυρας αυτοκινητόδρομου. Όμως, επειδή η διαφορά στα δυναμικά χαρακτηριστικά μεταξύ των γειτονικών τμημάτων δεν είναι σημαντική, οι σχετικές μετατοπίσεις των καταστρωμάτων που σχετίζονται με τους πασσάλους δεν καταστέλλονται σημαντικά χρησιμοποιώντας καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής. Για να διευθύνουμε αυτό το πρόβλημα, πειράματα σεισμικής τράπεζας του μοντέλου γέφυρας αυτοκινητοδρόμου με καλώδια περιορισμού από

κράματα μνήμης μορφής τα οποία ήταν συνδεδεμένα στην διεπαφή καταστρώματος – καταστρώματος εφαρμόζονται υπο τις ίδιες δεδομένες κινήσεις του εδάφους. Στην περίπτωση των καλωδίων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής χωρίς τσάκισμα, οι αποκρίσεις επιτάχυνσης των καταστρωμάτων της γέφυρας που μετρήθηκαν φαίνονται στο Σχήμα 2.30(a) για την σεισμική κίνηση του εδάφους El Centro. Όπως φαίνεται από το Σχήμα, οι μέγιστες επιταχύνσεις αυξάνονται ελαφρώς σε 19.40 και 17.47 για τα αριστερά και δεξιά τμήματα, αντίστοιχα. Όμως η διάβρωση μειώνεται από 15 φορές στις 4 φορές συγκριτικά με την μη ελεγχόμενη κατασκευή. Το Σχήμα 2.29(b) δείχνει της χρονο-ιστορίες των αποκρίσεων μετατόπισης μεταξύ των καταστρωμάτων και των πασσάλων. Οι μέγιστες μετατοπίσεις μειώνονται από 1.73 και 1.47 cm σε 1.38 και 0.89 cm, με μία μείωση της τάξης του 20.2% και 39.5%, για τα αριστερά και τα δεξιά τμήματα, αντίστοιχα. Σημειώνεται από τις αποκρίσεις μετατόπισης ότι η μείωση παραμόρφωσης από τις μονωμένες κατά μήκος της κατεύθυνσης στο μέσο του πασσάλου είναι ανώτερη από την αντίθετη κατεύθυνση. Αυτό συμβαίνει λόγω των μόνο-εφελκυστικών χαρακτηριστικών των καλωδίων από κράματα μνήμης μορφής. Όπως περιγράφηκε παραπάνω, μόνο δύο περιορισμοί εγκαθίστανται μεταξύ των καταστρωμάτων και των εξωτερικών πασσάλων μακριά από τον αρμό διαστολής κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Για αυτό τον λόγο, το καλώδιο περιορισμού μπορεί να περιορίσει μόνο την κίνηση των καταστρωμάτων της γέφυρας κατά μήκος μόνο του αρμού διαστολής.



Σχήμα 2.30 Δομικές αποκρίσεις της γέφυρας αυτοκινητοδρόμου με καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής για την περίπτωση 3

Το Σχήμα 2.31(α) παρουσιάζει τις αποκρίσεις επιτάχυνσης του μοντέλου γέφυρας όταν το τσάκισμα των καλωδίων περιορισμού μεγενθύνεται στα 3mm. Παρόμοια με την περίπτωση 2, η σύγκρουση μεταξύ των γειτονικών καταστρωμάτων γίνεται πιο έντονη με την αύξηση του τσακίσματος. Υπάρχουν έξι συγκρούσεις μεταξύ των γειτονικών καταστρωμάτων καθώς οι μέγιστες επιταγύνσεις αυξάνονται 17.06 και 15.55  $m/s^2$ , αντίστοιχα. Επιπλέον, οι μέγιστες μετατοπίσεις των μονωτών επίσης αυξάνονται στα 1.62 και 1.12 cm, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.31(b). Αυτό αποδεικνύει ότι η επίδοση των καλωδίων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής επιδεινώνεται καθώς το τσάκισμα αυξάνεται. Οι μέγιστες κατασκευαστικές αποκρίσεις της γέφυρας αυτοκινητόδρομου που υποβλήθηκε στους σεισμούς Kobe και Wenchuan αναφέρονται στον Πίνακα 2.5. Τα πειραματικά αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι μπορούν να ληφθούν παρόμοια φαινόμενα από τα δεδομένα των άλλων σεισμικών κινήσεων του εδάφους.



Σχήμα 2.31 Δομικές αποκρίσεις της γέφυρας αυτοκινητοδρόμου με καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής για την περίπτωση 4

Διάφοροι τύποι μηχανικών μοντέλων έχουν αναπτυχθεί για να προβλέψουν της αποκρίσεις rounding γέφυρας αυτοκινητόδρομου, όπως το γραμμικό μοντέλο ελατηρίου (Maison και Kasai, 1990<sup>[74]</sup>), το μοντέλο Kelvin [Anagnostopoulos και Spiliopoulos, (1992)<sup>[75]</sup>], το μοντέλο Hertz [Chau and Wei, 2001<sup>[76]</sup>] και το μοντέλο Hertz-damp [Jankowski, 2005<sup>[77]</sup>]. Μεταξύ αυτών το μοντέλο Kelvin χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της απλότητας του. Η δύναμη σύγκρουσης,  $f_p$ , του μοντέλου Kelvin δίνεται από

$$f_p = k_p \delta(t) + c_p \dot{\delta}(t), \quad \delta(t) \geq 0 \quad (2.3(a))$$

$$f_p = 0, \quad \delta(t) < 0 \quad (2.3(b))$$

όπου  $k_p$  και  $c_p$  είναι η δυσκαμψία και απόσβεση κρούσης αντίστοιχα,  $\delta(t)$  είναι η σχετική μετατόπιση μεταξύ των γειτονικών κατασκευών η οποία προσδιορίζεται από:

$$\delta(t) = x_1(t) - x_2(t) - u_{\text{gap}} \quad (2.4)$$

όπου  $x_1(t)$  και  $x_2(t)$  είναι οι μετατοπίσεις των αριστερών και δεξιών καταστρωμάτων αντίστοιχα και  $u_{\text{gap}}$  είναι το μέγεθος κενού τού αρμού διαστολής. Γενικά, δύο τύποι μηχανικών μοντέλων χρησιμοποιούνται για τις κατασκευαστικές αναλύσεις της γέφυρας αυτοκινητόδρομου. Για μία γέφυρα αυτοκινητόδρομου με δύσκαμπτους πασσάλους και εύκαμπτες στηρίξεις, όπως τα ελαστομερή εφεδράνα, το μοντέλο συγκεντρωμένης μάζας είναι πιο κατάλληλο για την ανάλυση της δυναμικής απόκρισης λόγω της απλότητας του. Αν οι πάσσαλοι είναι εύκαμπτοι, ένα μοντέλο

πεπερασμένου στοιχείου θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει της δυναμικές αποκρίσεις της κατασκευής όταν υποβάλλεται σε σεισμική διέγερση. Σε αυτή την έρευνα, ένα μοντέλο συγκεντρωμένης μάζας επιλέγεται για την ανάλυση της κατασκευής βασισμένο της ιδιότητες των πασσάλων και των εφεδράνων. Το αναλυτικό μοντέλο της γέφυρας αυτοκινητοδρόμου, συμπεριλαμβανομένων των επιδράσεων του rounding και των καλωδίων περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής φαίνονται της εξισώσεις 2.5. Κατά την διάρκεια της ανάλυσης κάθε τμήμα της γέφυρας απλοποιείται ως σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας (SDOF). Η δύναμη ελέγχου,  $f_{sma}(t)$ , η οποία προέρχεται από τα καλώδια περιορισμού, μπορεί να ληφθεί χρησιμοποιώντας την σχέση που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.22.

$$m_1 \ddot{x}_1(t) + (c_1 + c_p) \dot{x}_1(t) + (k_1 + k_p)x_1(t) - c_p \dot{x}_2(t) - k_p(x_2(t) + u_{gap}) - f_{sma}(t) = -m_1 \ddot{x}_g(t) \quad , \delta(t) \geq 0 \quad (2.5(a))$$

$$m_2 \ddot{x}_2(t) + (c_2 + c_p) \dot{x}_2(t) + (k_2 + k_p)x_2(t) - c_p \dot{x}_1(t) - k_p(x_1(t) - u_{gap}) + f_{sma}(t) = -m_2 \ddot{x}_g(t) \quad , \delta(t) \geq 0 \quad (2.5(b))$$

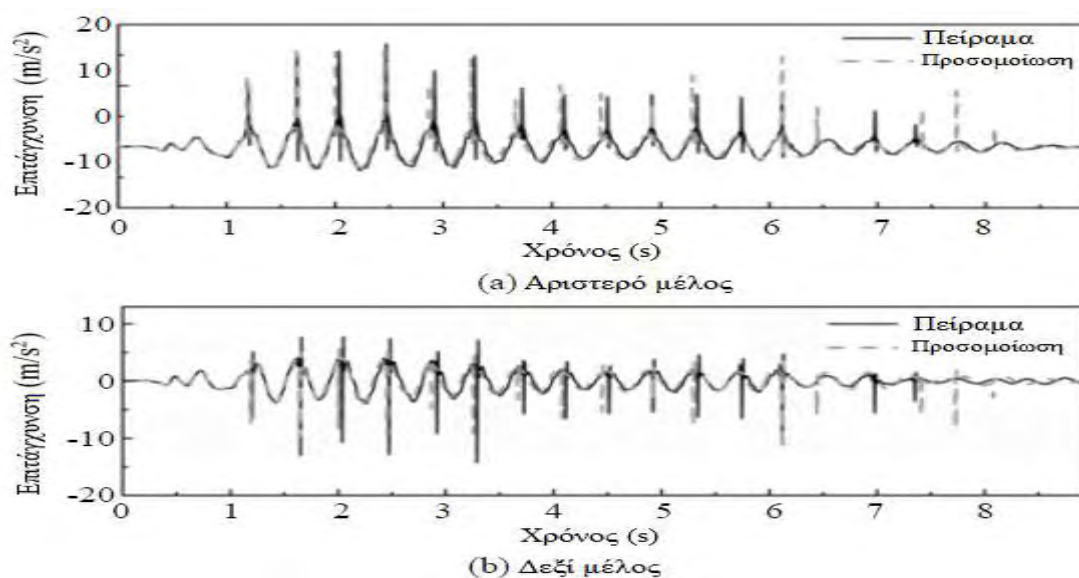
$$m_1 \ddot{x}_1(t) + c_1 \dot{x}_1(t) + k_1 x_1(t) - f_{sma}(t) = -m_1 \ddot{x}_g(t) \quad , \delta(t) < 0 \quad (2.5(c))$$

$$m_2 \ddot{x}_2(t) + c_2 \dot{x}_2(t) + k_2 x_2(t) + f_{sma}(t) = -m_2 \ddot{x}_g(t) \quad , \delta(t) < 0 \quad (2.5(d))$$

όπου  $m_i$ ,  $c_i$  και  $k_i$  είναι η μάζα, η απόσβεση και η δυσκαμψία της κατασκευής αντίστοιχα και  $\ddot{x}_g(t)$  δηλώνει την επιτάχυνση της κίνησης του εδάφους. Να σημειωθεί ότι τα καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής ενεργοποιούνται μόνο όταν οι σχετικές μετατοπίσεις υπερβαίνουν τα τσακίσματα των καλωδίων περιορισμού.

Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα του μοντέλου, οι πραγματικές συχνότητες και αναλογίες απόσβεσης της γέφυρας αυτοκινητοδρόμου προσδιορίζονται να είναι 2.3Hz και 3.0% για το αριστερό τμήμα και 2.56Hz και 2.5% για το δεξιό τμήμα, αντίστοιχα. Οι δυναμικοί παράμετροι καθώς και οι παράμετροι σχεδιασμού, απεικονίζονται στον Πίνακα 2.3. Οι αναγνωρισμένες παράμετροι ασχολούνται με την αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιώντας της εξισώσεις 2.5(a)-2.5(d). Η δυσκαμψία κρούσης και η απόσβεση κρούσης της εξίσωσης 2.3 λαμβάνονται να είναι  $6.67 \times 10^7$  N/m και  $6.05 \times 10^4$  N\*s/m, αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας την μέθοδο αναγνωρισμένων παραμέτρων που δίνεται από Gu, (2009)<sup>[73]</sup>. Κατά την διάρκεια της αριθμητικής προσομοίωσης οι μετρούμενες

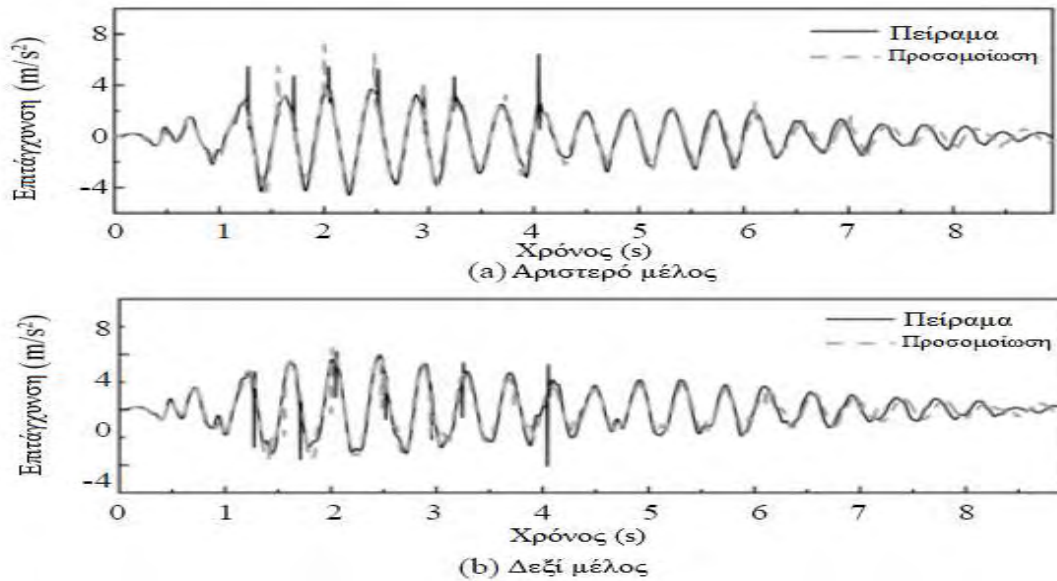
επιταχύνσεις της σεισμικής τράπεζας λαμβάνονται ως τα δεδομένα και οι κατασκευαστικές αποκρίσεις της γέφυρας αυτοκινητοδρόμου προσομοιώνονται μέσω ενσωμάτωσης της εξίσωσης 2.5. Το Σχήμα 2.32 δείχνει τις χρονο-ιστορίες των θεωρητικών επιταχύνσεων μαζί με τα πειραματικά αποτελέσματα της μη ελεγχόμενης κατασκευής υπο τον σεισμό El Centro. Οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων υποδεικνύουν ότι οι κατασκευαστικές αποκρίσεις της γέφυρας αυτοκινητοδρόμου με φαινόμενα rounding μπορούν αποτελεσματικά να προβλεφθούν χρησιμοποιώντας αναλυτικά μοντέλα.



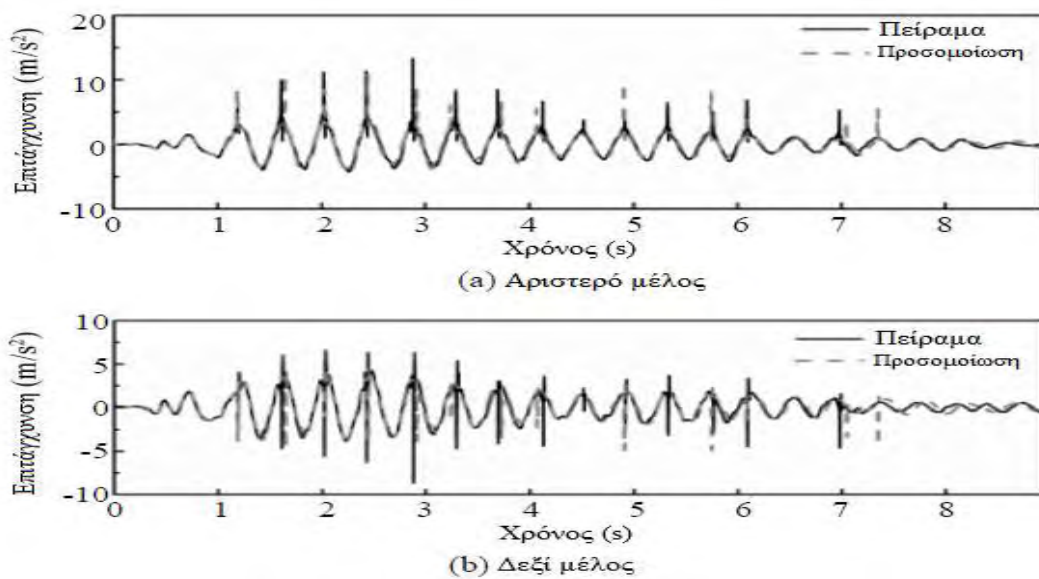
Σχήμα 2.32. Σύγκριση των αποκρίσεων επιτάχυνσης για την μη ελεγχόμενη κατασκευή.

Το Σχήμα 2.33 παρουσιάζει της κατασκευαστικές αποκρίσεις για την περίπτωση 1 του μοντέλου γέφυρας αυτοκινητοδρόμου με καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής. Σε αυτή την περίπτωση η πρώτη και η πέμπτη σύγκρουση κατά την διάρκεια των πειραμάτων εξαφανίζονται στα αποτελέσματα προσομοίωσης. Αυτό συμβαίνει επειδή οι αποκρίσεις επιτάχυνσης είναι ευαίσθητες στην σύγκρουση μεταξύ των γειτονικών καταστρώματων. Το μικρό σφάλμα του διαχωρισμού του αρμού διαστολής θα επίφερε ξανά τα γειτονικά καταστρώματα να μην έχουν επαφή. Όμως μια σύγκριση των αποτελεσμάτων επεξηγεί ότι το αναλυτικό μοντέλο της γέφυρας αυτοκινητοδρόμου με τα καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής μπορεί να συλλάβει της κατασκευαστικές αποκρίσεις ως σύνολο. Παρόμοια φαινόμενα μπορούν να αποκτηθούν από την σύγκριση των αποτελεσμάτων των άλλων περιπτώσεων. Ως περαιτέρω παράδειγμα οι χρονο-ιστορίες των αναλυτικών

και πειραματικών επιταχύνσεων για την περίπτωση 2 της απεικονίζονται στο Σχήμα 2.34.



Σχήμα 2.33 Σύγκριση των αποκρίσεων επιτάχυνσης της κατασκευής με καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής για την περίπτωση 1



Σχήμα 2.34 Σύγκριση των αποκρίσεων επιτάχυνσης της κατασκευής με καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής για την περίπτωση 2

Συνοπτικά παρουσιάστηκε η πειραματική έρευνα που επικεντρώθηκε στην μείωση του rounding και του εκτοπισμού του μοντέλου γέφυρας αυτοκινητοδρόμου μέσω της χρήσης των καλωδίων περιορισμού από κράματα

μνήμης μορφής. Μία σειρά από πειράματα σεισμικής τράπεζας διεξήχθησαν σε ένα μοντέλο απομόνωσης βάσης γέφυρας αυτοκινητοδρόμου. Τα κύρια συμπεράσματα αυτής της έρευνας συνοψίζονται ως εξής:

- 1) Παρόλο που τα παραδοσιακά καλώδια περιορισμού επικεντρώνονται κυρίως στην αποφυγή του εκτοπισμού, τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της έρευνας επιδεικνύουν ότι οι περιορισμοί από κράματα μνήμης μορφής είναι επίσης αποτελεσματικοί στην καταστολή του rounding μεταξύ των γειτονικών τμημάτων του μοντέλου γέφυρας αυτοκινητοδρόμου.
- 2) Αν η διαφορά των δυναμικών χαρακτηριστικών μεταξύ των γειτονικών τμημάτων δεν είναι σημαντική, τα καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής, τα οποία εγκαταστάθηκαν σε μορφή σύνδεσης καταστρώματος – καταστρώματος, δεν μπορούν να επιτύχουν καλύτερη επίδοση στην αποφυγή εκτοπισμού εξαιτίας της μικρής μείωσης μετατόπισης των καταστρωμάτων που σχετίζονται με τους πασσάλους.
- 3) Τα πειραματικά αποτελέσματα επιδεικνύουν ότι τα καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής, τα οποία εγκαταστάθηκαν σε μορφή σύνδεσης καταστρώματος – καταστρώματος, μπορούν σημαντικά να μειώσουν τις αποκρίσεις μετατόπισης των απομονωτών στο μοντέλο γέφυρας αυτοκινητοδρόμου. Παρόλο που οι μέγιστες επιταχύνσεις της κατασκευής έχουν μια μικρή μείωση όταν τα καλώδια περιορισμού συνδέονται στην διεπαφή δοκού πασσάλου, ο αριθμός σύγκρουσης μειώνεται. Τα καλώδια περιορισμού χρησιμοποιούνται για την μείωση των αποκρίσεων rounding της κατασκευής σε έναν ορισμένο βαθμό.
- 4) Το τσάκισμα στα καλώδια περιορισμού από κράματα μνήμης μορφής μειώνει την χωρητικότητα των συσκευών για την μείωση του rounding και την αποφυγή εκτοπισμού του μοντέλου γέφυρας αυτοκινητοδρόμου.



### 2.3. Βιβλιογραφία

- [1] CEN, European Committee for Standardisation Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures. Part 1.1 ENV1998.1.1
- [2] S. Saadat, J. Salichs, M. Noori et al., “An overview of vibration and seismic applications of NiTi shape memory alloy,” *Smart Materials and Structures*, vol. 11, no. 2, pp. 218–229, 2002.
- [3] G. Song, N. Ma, and H.-N. Li, “Review of applications of shape memory alloys in civil structures,” in *Proceedings of the Earth and Space Conference (ASCE '04)*, pp. 559–566, March 2004.
- [4] L. Janke, C. Czaderski, M. Motavalli, and J. Ruth, “Applications of shape memory alloys in civil engineering structures— overview, limits and new ideas,” *Materials and Structures*, vol. 38, no. 279, pp. 578–592, 2005.
- [5] H.N.Li and L. S. Huo, “Advances in structural control in civil engineering in China,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2010, Article ID936081, 23 pages, 2010.
- [6] R. Johnson, J. E. Padgett, M. E. Maragakis, R. Desroches, and M. S. Saiidi, “Large scale testing of nitinol shape memory alloy devices for retrofitting of bridges,” *Smart Materials and Structures*, vol. 17, no. 3, Article ID035018, 13 pages, 2008.
- [7] M. S. Alam, M. A. Youssef, and M. Nehdi, “Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: A review,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 34, no. 9, pp. 1075–1086, 2007.
- [8] K.L.Ng and Q. P. Sun, “Stress-induced phase transformation and detwinning in NiTi polycrystalline shape memory alloy tubes,” *Mechanics of Materials*, vol. 38, no. 1-2, pp. 41–56, 2006.
- [9] M. Dolce and D. Cardone, “Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 2. Austenite NiTi wires subjected to tension,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 43, no. 11, pp. 2657–2677, 2001.
- [10] R. Desroches, J. McCormick, and M. Delemont, “Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, no. 1, pp. 38–46, 2004.

- [11] D. Wolons, F. Gandhi, and B. Malovrh, "Experimental investigation of the pseudoelastic hysteresis damping characteristics of shape memory alloy wires," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 9, no. 2, pp. 116–126, 1998.
- [12] Wang, F.E., Buehler, W.J., Pickart, S. J., (1965), "Crystal Structure and a unique "Martensitic" Transition of TiNi", *Journal of Applied Physics*, Vol.36, No10, pp.3232-3239.
- [13] Buehler, W.J., Wang, F.E., (1968), "A Summary of Recent Research on the Nitinol Alloys and their Potential Application in Ocean Engineering", *Ocean Engineering*, Vol. 1, pp. 105-120.
- [14] Miyazaki, S., Otsuka, K., Suzuki, Y., (1981), " Transformation Pseudoelasticity and Deformation Behavior in a Ti-50.6at%Ni Alloy", *Scripta Metallurgica*, Vol. 15, pp. 287-292.
- [15] Miyazaki, S., Imai, T., Otsuka, K., Suzuki, Y., (1981), " Luders-Like Deformation Observed in the Transformation Pseudoelasticity of a Ti-Ni Alloy", *Scripta Metallurgica*, Vol. 15, pp. 853-856.
- [16] Shaw, J.A., Kyriakides, S., (1995), "Thermomechanical Aspects of Ni-Ti", *Journal of Mech. Phys. Solids*, Vol. 43, No. 8, pp. 1243-1281.
- [17] Dolce, M., Cardone, D., (2001), "Mechanical Behavior of Shape Memory Alloys for Seismic Applications. 1. Martensite and Austenite NiTi Bars Subjected to Torsion", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, pp. 2631-2656.
- [18] Dolce, M., Cardone, D., (2001), "Mechanical Behavior of Shape Memory Alloys for Seismic Applications. 2. Austenite NiTi Wires Subjected to Tension", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, pp. 2657-2677.
- [19] Eggeler, G., Hornbogen, E., Yawny, A., Heckmann, A., Wagner, M., (2004), "Structural and Functional Fatigue of NiTi Shape Memory Alloys", *Material Science and Engineering*, Vol. 378, pp. 24-33.
- [20] Dayananda, G.N., Subba Rao, M., (2008), "Effect of Strain Rate on Properties of Superelastin NiTi ThinWires" *Materials Science and Engineering*, Vol. 486, pp. 96-103.
- [21] Otsuka, K., Ren, X., (2005), "Physical Metallurgy of Ti-Ni-based Shape Memory Alloys", *Progress in Materials Science*, Vol. 50, pp. 511-678.

- [22] Jani, J.M., Leary, M., Subic, A., Gibson, M.A., (2014), “A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities”, *Materials and Design*, Vol. 56, pp. 1078-1113.
- [23] Fugazza, D., (2003), “Shape Memory Alloy Devices in Earthquake Engineering: Mechanical Properties, Constitutive Modeling and Numerical Simulations”, Master Degree Dissertation, University of Pavia.
- [24] Wilde, K., Gardoni, P., Fujino, Y., (2000), “Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges”, *Engineering Structures*, Vol. 22, pp. 222-229.
- [25] Dolce, M., Cardonne, D. Marnetto, R., (2000), ”Implementation and Testing of Passive Control Devices Based on Shape Memory Alloys”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.29, pp. 945-968.
- [26] DesRoches, R., Delemont, M., (2002), ”Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys”, *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 325-332.
- [27] Ocel, J., DesRoches, R., Leon, T., Hess, W.G., Krumme, R., Hayes, J.R., Sweeney S. (2004),”Steel Beam-Column Connections Using Shape Memory Alloys”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, No. 5, pp. 732-740.
- [28] Lafortune, P., McCormick, J., DesRoches, R., Terriault, P., (2007), “Testing of Superelastic Recentering Pre-Strained Braces for Seismic Resistant Design”, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 11, pp. 383-399.
- [29] McCormick, J., DesRoches, R., Fugazza, D., Auricchio, F., (2007), “Seismic Assessment of Concentrically Braced Steel Frames with Shape Memory Alloy Braces”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 133, No.6, pp. 862-870.
- [30] Zhang, Y., Zhu, S., (2007), “A Shape Memory Alloy-Based Reusable Hysteretic Damper for Seismic Hazard Mitigation”, *Smart Materials and Structures*, Vol 16, pp. 1603-1613.
- [31] Johnson, R., Padgett, E.J., Maragakis, M.E., DesRoches, R., Saiidi, M.S., (2008), “Large Scale Testing of Nitinol Shape Memory Alloy Devices for Retrofitting of Bridges”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, pp.1-10.

- [32] Shrestha, K.C., Saiidi, M.S., Cruz, C.A., (2015), “Advanced Materials for Control of Post-Earthquake Damage in Bridges”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, pp. 1-16.
- [33] Varela, S. Saiidi, M.S., (2016), “A Bridge Column with Superelastic NiTi SMA and Replaceable Rubber Hinge for Earthquake Damage Mitigation”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, pp.1-18.
- [34] Özdemir, H., (1976), “Nonlinear Transient Dynamic Analysis of Yielding Structures”, PhD Dissertation, University of California, Berkeley.
- [35] Graesser, E.J., Cozzarelli, F.A., (1991), “Shape-memory alloys as new materials for a seismic isolation”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, No. 11, pp. 2590-2608.
- [36] Auricchio, F., Fugazza, D., DesRoches, R., (2007), “A 1D Rate-Dependent Viscous Constitutive Model for Superelastic Shape-Memory Alloys: Formulation and Comparison with Experimental Data”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, pp. 39-50.
- [37] DesRoches, R., McCormick, J., Delemont, M., (2004), “Cyclic properties of Superelastic Shape Memory Alloys Wires and Bars”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, No. 1, pp. 38-46.
- [38] Nae,F.A., Ikeda,T. and Matsuzaki,Y (2004), The active turning of a shape memory alloy pseudoelastic property, *Smart Material Structure*, 13(3) pp 503-511.
- [39] Shahin,A.R., Meckl,P.H. and Jones,J.D (1997), Modeling of SMA tendons for active control of structures, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 8(1) pp 51-7.
- [40] Williams, K., Chiu,G. and Bernhard,R (2002), Adaptive-pass absorbers using shape memory alloys, *J. of Sound and Vibration*, 249(5) pp 835-848.
- [41] McGavin G, Guerin G (2002), Real time seismic damping and frequency control of steel structures using Nitinol wire. *Proceedings of SPIE*, 4696, pp 176-84.
- [42] Song G, Mo YI (2003), Increasing concrete structural survivability using smart materials University of Houston, Jan.
- [43] Deng,Z., Li,Q., Jiu,A., and Li,L (2003), Behavior of concrete driven by uniaxially embedded shape memory alloy actuators’, *J. Eng. Mech., ASCE* 129 (6) pp 697-703.

- [44] Krstulovic-Opara,N., Nau,J., Wriggers,P. and Krstulovic-Opara,L (2003), Self-actuating SMA-HPFRC fuses for auto-adaptive composite structures, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18(1) pp 78-94.
- [45] Soroushian,P., Ostowari,K., Nossoni,A. and Chowdhury,H (2001), Repair and strengthening of concrete structures through application of corrective post tensioning forces with shape memory alloys, *Transport Research Record No.1770*, pp 20-26.
- [46] Graesser,E.J. and Cozzarelli, F.A (1991), Shape memory alloys as new materials for seismic isolation, *J. Eng. Mech., ASCE* 117 (11) pp 2590-2608.
- [47] Castellano,M.G (2002), Seismic protection of the basilica in San Francesco di Assisi.
- [48] Brite Euram (1999), MANSIDE Project, Memory alloys for new Seismic Isolation and Energy Dissipation Devices Final Project Workshop, Rome, Italy.
- [49] Indirli, M (2000), Application of novel anti-seismic devices in the bell tower of the Church in San Giorgio a Trignano.
- [50] ISTECH, (2000), Shape Memory Alloy Devices for Seismic protection of Cultural Heritage Structures, *Proceedings of the Final Workshop*, Ispra, Italy,
- [51] Sakai.Y., Kitagawa Y, Fukuta T, Liba M., Experimental study for enhancement of self-restoration of concrete beams using SMA wire.
- [52] Otero K. (2004), Intelligent reinforced concrete structures using shape memory alloys. M.S thesis. Advisor: Dr.G.Song, University of Houston;
- [53] Tamai H, Kitagawa Y (2002), Pseudoelastic behavior of shape memory alloy wires and its application to seismic resistance member for building, *Computational Materials Science*; 25, pp 218-27
- [54] Amin, A.F.M.S., Wiraguna, S.I., Bhuiyan, A.R. and Okui, Y., 2006. Hyperelasticity model for finite element analysis of natural and high damping rubbers in compression and shear. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* .
- [55] James M. Kelly (1990) Base Isolation: Linear Theory and Design. *Earthquake Spectra*: May 1990, Vol. 6, No. 2, pp. 223-244.

- [56] AR Bhuiyan, Y Okui, H Mitamura, T Imai - International Journal of Solids and Structures
- [57] Hwang, J.S., Wu, J.D., Pan, T.C. and Yang, G., 2002. A mathematical hysteretic model for elastomeric isolation bearings. *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 31:771–789.
- [58] Dall'Asta, A., and Ragni, L. 2006. Experimental tests and analytical model of high damping rubber dissipating devices. *Engineering Structures*, 28: 1874–1884.
- [59] Bhuiyan, A.R., Okui, Y., Mitamura, H., and Imai, T., 2009. A Rheology model of high damping rubber bearings for seismic analysis: Identification of nonlinear viscosity. *International Journal of Solids and Structures*, 46:1778–1792.
- [60] Bhuiyan, A.R. 2009. Rheology modeling of laminated rubber bearings for seismic analysis, PhD Dissertation. Department of Environmental Science and Civil Engineering, Saitama University.
- [61] Park, J. and Otsuka, H. 1999. Optimal yield level of bilinear seismic isolation devices. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28: 941-955
- [62] Naeim, F. and Kelly, J. M. 1999. *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*, Wiley, Chichester, England.
- [63] Wilde, K., Gardoni, P. and Fuzino, Y. 2000, Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges, *Engineering Structures*, 22 (2000) 222–229.
- [64] Auricchio F, Faravelli L, Magonette G and Torra V ,2001, *Shape Memory Alloys: Advances in Modelling and Applications*, Barcelona: CIMNE.
- [65] Duerig TW, Melton KN, Stockel D, Wayman CM. *Engineering aspects of shape memory alloys*. London: Butterworth-Heinemann, 1990.
- [66] FHWA. *Seismic retrofit manual for highway structures*. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1995.
- [67] Prakash V, Powell GH, Filippou FC. *drain-2dx: base program user guide*. Report No. UCB/SEMM-92/29. University of California at Berkeley, 1992.
- [68] Caltrans. *Bridge design specifications manual*. California Department of Transportation, 1990.

- [69] Maroney BA, Romstad KM, Kutter B. Experimental testing of laterally loaded large scale bridge abutments. In: New York: American Society of Civil Engineers, 1993:1065–70.
- [70] Watanabe E, Sugiura K, Nagata K. Seismic behavior of highway bridge system against near-field earthquake. *Confronting urban earthquake: report of fundamental research on the mitigation of urban disasters caused by near-field earthquake*, March 2000. p. 138–41.
- [71] Du XW, Sun G and Sun SS (2005), “Piecewise Linear Constitutive Relation for Pseudo-elasticity of Shape Memory Alloy (SMA),” *Materials Science and Engineering A*, 393(1-2): 332–337.
- [72] JT/GQB 008-96. *Standard Drawings of Highway Bridge*. China Communications Press: Beijing, 1999 (in Chinese).
- [73] Guo AX, Li ZJ and Li H (2009), “Experimental and Analytical Study on Pounding Reduction of Base- Isolated Highway Bridges Using MR Dampers,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38(11): 1307–1333.
- [74] Maison BF and Kasai K (1990), “Analysis for Type of Structural Pounding,” *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 116: 957–977.
- [75] Anagnostopoulos SA and Spiliopoulos KV (1992), “An Investigation of Earthquake Induced Pounding between Neighboring Buildings,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21: 289–302.
- [76] Chau KT and Wei XX (2001), “Pounding of Structures Modelled as Non-linear Impacts of Two Oscillators,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30: 633–651.
- [77] Jankowski R (2005), “Non-linear Viscoelastic Modelling of Earthquake-induced Structural Pounding,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34 595–611.
- [78] Alam, M.S., Youssef, M.A., and Nehdi, M. Analytical prediction of the seismic behaviour of superelastic shape memory alloy reinforced concrete elements. *Engineering Structures* 2008, 30: 3399-3411.