



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΚΟΠΩΣΗ ΤΩΝ ΠΛΑΚΩΝ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

ΜΠΟΥΤΟΥΚΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



Υποβλήθηκε για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2023

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής: [Χρήστος Παπακωνσταντίνου](#) (Επιβλέπων)

[Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ.](#)

Δεύτερος Εξεταστής: [Λάμπρος Κούτας](#)

[Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ.](#)

Τρίτος Εξεταστής: [Παναγιώτης Γουργιώτης](#)

[Αναπληρωτής Καθηγητής, ΣΕΜΦΕ, Ε.Μ.Π.](#)

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, Δρ. κ. Παπακωνσταντίνου Χρήστο για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγηση του κατά την διάρκεια της συνεργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους(ες) μου για την ψυχολογική υποστήριξή τους. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου Χρύσανθο Μπουτούκο και Τριανταφυλλιά Κεσεμίδα για την αγάπη και για την υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Μπουτούκος Γεώργιος

ΚΟΠΩΣΗ ΤΩΝ ΠΛΑΚΩΝ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2023

Μπουτούκος Γεώργιος

Επιβλέπων: Χρήστος Παπακωνσταντίνου, Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΘ

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με το φαινόμενο της κόπωσης των καταστροφμάτων γεφυρών, κατασκευασμένων από οπλισμένο σκυρόδεμα (ΟΣ). Αρχικά γίνεται μια αναφορά στους τύπους των γεφυρών που περιγράφεται εν συντομία η διαδικασία κατασκευής τους. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται εν συντομία οι σχεδιαστικές αρχές των αμερικάνικων, ελληνικών και ευρωπαϊκών κανονισμών με έμφαση στο σχεδιασμό των καταστροφμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ακολούθως γίνεται μια περιγραφή του φαινομένου της κόπωσης, καθώς και οι επιπτώσεις του τόσο στα επιμέρους υλικά του καταστροφάτος, όσο και συνολικά στο δομικό στοιχείο. Αμέσως μετά παρουσιάζονται διάφορες πειραματικές έρευνες που έχουν εκπονηθεί σχετικά με την κόπωση των καταστροφμάτων ΟΣ. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του φαινομένου της κόπωσης. Τέλος, γίνεται σύγκριση και αξιολόγηση των ερευνητικών αποτελεσμάτων και αναλύονται πρακτικές ενίσχυσης των υφιστάμενων γεφυρών για την βελτιστοποίηση της ασφαλούς χρήσης της.

Λέξεις κλειδιά: κόπωση, καταστροφάματα, γέφυρες, αντοχή, οπλισμένο σκυρόδεμα

FATIGUE OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE DECK SLABS

BOUTOUKOS GEORGIOS

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2023

Supervisor: Christos G. Papakonstantinou, Associate Professor UTH

Abstract

This thesis deals with the effect of fatigue on the reinforced concrete bridge decks. Initially, the types and categories of bridges found around the world are described as well as their construction methodology. Continuously, a summary of the American, Greek and European design guidelines is presented with an emphasis on the design of bridge decks. Subsequently, the phenomenon of fatigue and its effects on both the constituent materials and the bridge deck itself are discussed in detail. The thesis focuses on the experimental setups used in studies that have been carried out on the fatigue of reinforced bridge decks and their effect on the performance of the experiments. Finally, the results of the studies are compared and evaluated, and strengthening methods of existing bridges to optimize their safe use are presented.

Key words: *fatigue, deck slabs, bridges, strength, reinforced concrete*

Πίνακας Περιεχομένων:

<u>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή</u>	<u>10</u>
<u>Κεφάλαιο 2 Κατασκευή γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα</u>	<u>13</u>
2.1 Ιστορική αναδρομή	13
2.2 Τύποι και κατηγορίες γεφυρών	14
2.3 Η ανατομία μιας γέφυρας	15
2.4 Υλικά κατασκευής	17
2.5 Βασικά στοιχεία κατασκευής γεφυρών	18
<u>Κεφάλαιο 3 Σχεδιαστικές οδηγίες καταστρωμάτων από ΟΣ</u>	<u>19</u>
3.1 Εισαγωγή	19
3.2 AASHTO LRFD	19
3.3 Ελληνικοί Κανονισμοί (ΟΜΟΕ)	25
3.4 Κόπωση πλακών καταστρωμάτων των γεφυρών από ΟΣ με βάση τον Ευρωκώδικα	27
<u>Κεφάλαιο 4 Κόπωση καταστρωμάτων γεφυρών από ΟΣ</u>	<u>34</u>
4.1 Εισαγωγή	34
4.2 Κόπωση	34
4.2.1 Κόπωση σκυροδέματος	34
4.2.2 Κόπωση Χάλυβα	35
4.2.3 Κόπωση οπλισμένου σκυροδέματος	35
4.2.4 Κόπωση υφιστάμενων γεφυρών	39
4.2.5 Κόπωση καταστρωμάτων γεφυρών από προεντεταμένο σκυρόδεμα	42
<u>Κεφάλαιο 5 Πειράματα κόπωσης καταστρωμάτων γεφυρών από ΟΣ</u>	<u>43</u>
5.1 Εισαγωγή	43
5.2 Πειραματικές έρευνες	43
5.2.1 Επίδραση του φορτίου της κυκλοφορίας στην κόπωση	43
5.2.2 Επίδραση των δονήσεων της κυκλοφορίας σε μία γέφυρα	53
5.2.3 Επίδραση των ακουστικών εκπομπών της κυκλοφορίας στην κόπωση	56

5.2.4 Επίδραση της “ηλικίας” μιας γέφυρας	57
5.2.5 Ο χρόνος ζωής των ρωγμών λόγω κόπωσης	59
5.2.6 Επίδραση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην κόπωση	61
5.2.7 Η επίδραση της ύπαρξης υδάτων στην κόπωση ενός καταστρώματος	68
5.2.8 Πειραματική έρευνα κόπωσης σε γέφυρες από προεντεταμένο σκυρόδεμα	72
5.3 Πειραματικές διατάξεις	79
5.3.1 Σύγκριση μεταξύ των φορτίσεων των πειραματικών δοκιμίων	79
5.3.2 Σύγκριση μεταξύ των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν	82
5.4 Αξιολόγηση και σύγκριση αποτελεσμάτων	83
 <u>Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα – προτάσεις</u>	 <u>88</u>
 Βιβλιογραφία – Πηγές	 93

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Αριθμός φορτηγών ανά λωρίδα και ανά έτος (Ευρωκώδικας 1-Μέρος 2, 2003)

Πίνακας 3.2: Τιμές συντελεστή λ2 (Αγρίμη & Ζάφειρα-Χατζή,2013)

Πίνακας 3.3: Τιμές συντελεστή λ3 (Αγρίμη & Ζάφειρα-Χατζή,2013)

Πίνακας 5.1: Λεπτομέρειες τεστ για κάθε δοκίμιο

Πίνακας 5.2: Καταστάσεις ελέγχου σε διαφορετικά επίπεδα υγρασίας

Πίνακας 5.3: Σύγκριση φορτίσεων δοκιμίων

Πίνακας 5.4: Σύγκριση διαστάσεων δοκιμίων

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Η πρώτη γέφυρα από χυτοσίδηρο στην Αγγλία (Αντωνίου,2018)

Σχήμα 2.2: Η καλωδιωτή γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου (www.elaktor.com)

Σχήμα 2.3: Κατά μήκος τομή γέφυρας (Κωνσταντινίδης, 2012)

Σχήμα 3.1: Τοποθέτηση πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος πάνω σε προκατασκευασμένες δοκούς

Σχήμα 3.2: Πλάκα καταστρώματος γέφυρας τοποθετημένη πάνω σε μεταλλικό πλαίσιο σε γέφυρα (LFRD,2015)

Σχήμα 3.3: Τοποθέτηση εγκάρσιου οπλισμού στο κάτω μέρος της πλάκας (LFRD,2015)

Σχήμα 3.4: Τοποθέτηση διαμήκης οπλισμού στο κάτω και πάνω μέρος της πλάκας έναντι της κόπωσης του σκυροδέματος (LFRD,2015)

Σχήμα 3.5: Τυπικό όχημα σχεδιασμού των αμερικανικών κανονισμών για τις φορτίσεις στις γέφυρες (LFRD,2015)

Σχήμα 3.6: Διαστάσεις του πρότυπου οδικού οχήματος που χρησιμοποιείται στις δοκιμές κόπωσης (Giordano,et.all, 2009)

Σχήμα 3.7: Διατομή γέφυρας σύμφωνα και με τον ΟΜΟΕ Γεφυρών (ΟΜΟΕ,2001)

Σχήμα 3.8: Αγκύρωση κυλινδρικών σωμάτων στον ξυλότυπο του φορέα (ΟΜΟΕ,2001)

Σχήμα 3.9: Μοντέλο φόρτισης γέφυρας (Ευρωκώδικας 1-Μέρος 2,2003)

Σχήμα 3.10: Καμπύλες αντοχής σε κόπωση για εύρη ορθών τάσεων(Αγρίμη & Ζάφειρα-Χατζή,2013)

Σχήμα 3.11: Διάρκεια ζωής και αριθμός κύκλων (Αγρίμη & Ζάφειρα-Χατζή,2013)

Σχήμα 3.12: Τιμές συντελεστή λ1 για ροπή στο άνοιγμα και στις στηρίξεις αντίστοιχα (Αγρίμη & Ζάφειρα-Χατζή,2013)

Σχήμα 3.13: Μέγιστες τιμές συντελεστή λ για ροπή στο άνοιγμα και στις στηρίξεις αντίστοιχα (Αγρίμη & Ζάφειρα-Χατζή,2013)

Σχήμα 4.1: Αντοχή σε κόπωση χαλύβδινου οπλισμού Schlafli & Bruhwiler (1998)

Σχήμα 4.2: Αντοχή σκυροδέματος σε κόπωση όπως αναπαρίσταται από ένα διάγραμμα Goodman για (α) θλιπτικές και (β) τάσεις διάτμησης Schlafli & Bruhwiler (1998)

Σχήμα 4.3: Διάγραμμα Goodman, Schlafli & Bruhwiler (1998)

Σχήμα 4.4: Καταστατικοί νόμοι οπλισμένου σκυροδέματος Ishida et al. (2021)

Σχήμα 5.1: Ακολουθία Φορτίου Κίνησης

Σχήμα 5.2: Πλάκες καταστρώματων από οπλισμένο σκυρόδεμα που μελέτησαν οι Schlafli & Bruhwiler (1998)

Σχήμα 5.3: Μοτίβο παραμορφώσεων στο σκυρόδεμα (Schlafli & Bruhwiler,2001)

Σχήμα 5.4:Δείγμα πλάκας σκυροδέματος καταστρώματος γέφυρας (Petrou & Perdikari,1998)

Σχήμα 5.5: Μοτίβο και τρόπος κόπωσης της πλάκας καταστρώματος της οδού από οπλισμένο σκυρόδεμα (Petrou & Perdikari,1998)

Σχήμα 5.6: Το μοντέλο ανάλυσης της πλάκας σκυροδέματος (Maekawa et.al,2006).

Σχήμα 5.7: : Ορθογωνικό μοντέλο δοκιμών κόπωσης σκυροδέματος ((Maekawa et.al,2006).

Σχήμα 5.8: Σημείο φόρτισης της πλάκας σκυροδέματος από κινητά φορτία (Maekawa et.al,2006)

Σχήμα 5.9: Εγκάρσια παραμόρφωση της πλάκας καταστρώματος γέφυρας από οπλισμένο σκυρόδεμα (Maekawa et.al,2006)

Σχήμα 5.10: Εγκάρσια παραμόρφωση της πλάκας καταστρώματος γέφυρας από οπλισμένο σκυρόδεμα εξαιτίας κινούμενων φορτίων (Maekawa et.al,2006)

Σχήμα 5.11: Ανάλυση κύκλου ζωής της κόπωσης σκυροδέματος σε συνάρτηση με το πλάτος φόρτισης(Maekawa et.al,2006)

Σχήμα 5.12: Δείγμα πλάκας σκυροδέματος για τις ανάγκες της έρευνας των Xu & Masuya (Xu & Masuya,2018)

Σχήμα 5.13: Σημεία τοποθέτησης αισθητήρων στην πλάκα σκυροδέματος (Xu & Masuya,2018)

Σχήμα 5.14: Παρουσίαση κόπωσης και διανομή σε όλο το μήκος της πλάκας (Xu & Masuya,2018)

Σχήμα 5.15: Εργαστηριακό δοκίμιο πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος (Yuyama et. al.2001)

Σχήμα 5.16: Δοκίμια και τρόπος εφαρμογής φορτίσεων στην μελέτη των Fehلمان & Vogel (Fehlman& Vogel,2009)

Σχήμα 5.17: Μοντέλο δοκιμών πλακών από οπλισμένο σκυρόδεμα στην μελέτη των Fathala et.al (Fathala et.al,2019)

Σχήμα 5.18: Γέφυρα Crêt de l'Anneau (Bayane et.al,2019)

Σχήμα 5.19: Τάσεις που αναπτύχθηκαν στην γέφυρα από το φορτηγό (Bayane et.al,2019)

Σχήμα 5.20: Κατανομή της θέσης των οχημάτων και στις 2 κατευθύνσεις (Bayane et.al,2019)

Σχήμα 5.21: Κατανομή του βάρους των οχημάτων που διέσχισαν την γέφυρα (Bayane et.al,2019)

Σχήμα 5.22: Θερμοκρασιακές μεταβολές στην γέφυρα ημερήσια και εποχιακά (Bayane et.al,2019)

Σχήμα 5.23: Αποτελέσματα ανάλυσης για τις θλιπτικές τάσεις που προκαλούνται στο κατάστρωμα της γέφυρας (Bayane et.al,2019)

Σχήμα 5.24: Μέγιστες τάσεις που προκαλούνται ανάλογα το βάρος και την θέση των οχημάτων στην γέφυρα (Bayane et.al,2019)

Σχήμα 5.25: Φθορές κόπωσης σκυροδέματος σε συνδυασμό με την θερμοκρασία και το βάρος του φορτίου(Bayane et.al,2019)

Σχήμα 5.26: Υπολογισμοί φάσεων μοντέλου Maekawa & Fujiyama (2013)

Σχήμα 5.27: Αποτελέσματα πειραματική έρευνας Maekawa & Fujiyama (2013)

Σχήμα 5.28: Γεωμετρία και διάταξη οπλισμού τελικού μοντέλου Hwang et al. (2010)

Σχήμα 5.29: Λεπτομέρειες τομής της πλάκας καταστρώματος Hwang et al. (2010)

Σχήμα 5.30: Χαρακτηριστικά δειγμάτων, Hwang et al. (2010)

Σχήμα 5.31: Στατική δοκιμή και δοκιμή υπό φορτίο τροχού, Hwang et al. (2010)

Σχήμα 5.32: Αποτελέσματα δοκιμών κυκλικής φόρτισης, Hwang et al. (2010)

Σχήμα 5.33: Δοκίμιο των μελετητών Hiratsuka et.al (2013)

Σχήμα 5.34: Εργαστηριακά αποτελέσματα κόπωσης μέσω της ακουστικής μεθόδου (Yuyama et.al,2001)

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

Οι γέφυρες είναι από το πιο σημαντικά έργα υποδομής καθώς διευκολύνουν την συγκοινωνία μεταξύ δυσπρόσιτων περιοχών και βελτιώνουν την ποιότητα ζωής των ανθρώπων. Τα ολοένα αυξανόμενα φορτία ενδέχεται να δημιουργήσουν προβλήματα με κυριότερο αυτό της κοπώσεως. Η σωστή λειτουργία μιας γέφυρας απαιτεί μεθοδικό έλεγχο και επιθεώρηση για την πρόληψη τυχόν βλαβών, καθώς και τη συντήρηση και την επισκευή αυτών. Οι συνηθέστερες βλάβες που εντοπίζονται κατά τους ελέγχους αφορούν φθορές του σκυροδέματος κυρίως στα βάθρα, στους πτερυγοτοίχους και κυρίως στο κατάστρωμα που έρχεται άμεσα σε επαφή με τα καιρικά φαινόμενα. Ασφαλώς βλάβες μπορεί να σημειωθούν και στα υπόλοιπα τμήματα μιας γέφυρας όπως είναι τα εφέδρανα και οι αρμοί διαστολής. Ο μεγάλος αριθμός ανθρώπων και αυτοκινήτων που εξυπηρετούνται καθημερινά καθιστά αδήριτη ανάγκη τον συστηματικό έλεγχο μιας γέφυρας προκειμένου να αποφευχθούν ανθρώπινα ατυχήματα και μόνιμες ζημιές στον φέροντα οργανισμό της που θα την καταστήσουν μη λειτουργική. Για τους παραπάνω λόγους κρίθηκε σκόπιμη η εκπόνηση της ακόλουθης διπλωματικής εργασίας.

Οι περισσότερες υφιστάμενες γέφυρες που έχουν κατασκευαστεί πριν το 1990 έχουν υποδιαστολογηθεί με βάσει τα σημερινά δεδομένα διότι σχεδιάστηκαν με παλαιότερους κανονισμούς, οι οποίοι βασίζονται σε χαμηλότερα φορτία. Αυτό οφείλεται αφενός στο ότι οι παλιότεροι κανονισμοί δεν λάμβαναν υπόψιν τις σεισμικές δράσεις, με αποτέλεσμα, τα κατακόρυφα μέλη να κρίνονται σήμερα ως μη οπλισμένα επαρκώς. Ακόμα τα αυξημένα φορτία που δέχονται τα καταστρώματα από τα βαριά οχήματα επιδρούν σημαντικά στην κόπωση των καταστρωμάτων των γεφυρών. Το φαινόμενο της κόπωσης του σκυροδέματος είναι ένα σύνθετο πρόβλημα με κυριότερους παράγοντες επιδείνωσης το περιβάλλον, τα υλικά κατασκευής και τις μηχανικές ιδιότητες αυτών, αλλά και την κυκλοφορία και τις φορτίσεις που υφίστανται. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των αιτιών που οδηγούν στην κόπωση του σκυροδέματος μέσα από την ελληνική και τη διεθνή βιβλιογραφία, η παρουσίαση των μηχανισμών με τους οποίους εμφανίζεται και η ανάδειξη των τρόπων πρόληψης της προκειμένου να αποκατασταθεί και να συντηρηθεί έγκαιρα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία απαρτίζεται από έξι ενότητες με το ακόλουθο περιεχόμενο:

Στο κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται αρχικά μια ιστορική αναδρομή και αναφέρονται οι τύποι, οι κατηγορίες και η ανατομία μιας γέφυρας προκειμένου ο αναγνώστης να εξοικειωθεί με την ορολογία που χρησιμοποιείται στη διπλωματική εργασία. Έπειτα, κατονομάζονται τα υλικά κατασκευής μιας γέφυρας, καθώς και τα βασικότερα στοιχεία και μέθοδοι που ακολουθούνται κατά την ανέγερση μιας γέφυρας.

Στο κεφάλαιο 3 παρατίθεται αναλυτική περιγραφή των κανονισμών που διέπουν τον κατασκευαστικό τομέα της γεφυροποιίας. Παρουσιάζονται λεπτομερώς οι αμερικάνικοι (AASHTO) και οι Ελληνικοί κανονισμοί (ΟΜΟΕ). Ακόμα, περιγράφονται οι οδηγίες για αποφυγή της κόπωσης των καταστρωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται το φαινόμενο της κόπωσης των καταστρωμάτων των γεφυρών. Γίνεται αναφορά στην κόπωση που δύναται να παρατηρηθεί στον χάλυβα οπλισμού, στο σκυρόδεμα και στο οπλισμένο σκυρόδεμα. Τέλος αναφέρονται βασικά βήματα που ακολουθούνται για την εξέταση της επίδρασης της κόπωσης σε υφιστάμενες γέφυρες.

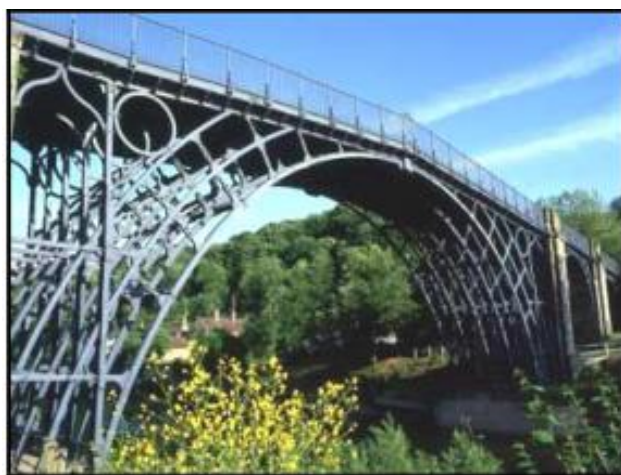
Στο κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται αναλυτικός έλεγχος της καταπόνησης των καταστρωμάτων σε κόπωση. Παρατίθενται διάφορες πειραματικές έρευνες που διερευνούν τους λόγους εμφάνισης του φαινομένου αυτού. Αναλύεται η επίδραση των κυκλοφοριακών συνθηκών, των ακουστικών εκπομπών, των περιβαλλοντικών φαινομένων, καθώς και της ηλικίας της γέφυρας σε σχέση με την αντοχή της σε κόπωση, όπως επίσης και τα επακόλουθα αυτής στην λειτουργικότητα μιας γέφυρας. Πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των φορτίσεων των πειραματικών δοκιμών και του τρόπου κατασκευής τους και αξιολογούνται τα αποτελέσματα όλων των ερευνών που μελετήθηκαν.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 παρατίθενται τα συμπεράσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και παρατίθενται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2^ο: Κατασκευή γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η ιστορία της κατασκευής των γεφυρών ξεκινάει χιλιάδες χρόνια πριν με τις πρώτες γέφυρες να κατασκευάζονται από πέτρα και ξύλο. Η επεξεργασία του χάλυβα και η βελτίωση στην κατεργασία του περί τα 200 χρόνια πριν, έδωσε τη δυνατότητα κατασκευής των πρώτων μεγάλων γεφυρών από σίδηρο. Το 1820, κατασκευάστηκε στην Μεγάλη Βρετανία η πρώτη μεταλλική γέφυρα με άνοιγμα τα 177 μέτρα. Το 1874, κατασκευάστηκαν οι πρώτες ατσάλινες τοξωτές γέφυρες οι οποίες άφηναν μικρότερη επιφάνεια εκτεθειμένη στους ισχυρούς ανέμους. Η εφεύρεση του οπλισμένου σκυροδέματος στα τέλη του 19^{ου} αιώνα σηματοδότησε μια νέα εποχή στην κατασκευή γεφυρών.



Σχήμα 2.3: Η πρώτη γέφυρα από χυτοσίδηρο στην Αγγλία (Αντωνίου,2018)

Από την δεκαετία του 1950 και μετά οι γέφυρες κατασκευάζονται από προεντεταμένο σκυρόδεμα, με υλικά κατασκευής τον χάλυβα και το οπλισμένο σκυρόδεμα. Η τεχνογνωσία και η τεχνολογία κυριάρχησαν στον σχεδιασμό και στην ανέγερση των γεφυρών έναντι της διαίσθησης, καθώς πρωταρχικό ρόλο ανέλαβε η ασφάλεια που είθισται να παρέχει στους χρήστες της, η αισθητική που αυτή έχει και το μήκος των ανοιγμάτων που πρέπει να καλυφθεί. Επέστρεψαν οι καλωδιωτές και οι κρεμαστές γέφυρες που δύναται να καλύψουν πολύ μεγάλα μήκη ανοιγμάτων με χαρακτηριστικό παράδειγμα την γέφυρα του Ρίου-Αντιρρίου στην Ελλάδα συνολικού μήκους 2880 μέτρων.



Σχήμα 2.4: Η καλωδιωτή γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου (www.elaktor.com)

2.2. Τύποι και κατηγορίες γεφυρών

Στην παρούσα παράγραφο γίνεται αναφορά των κυριότερων τύπων γεφυρών που συναντώνται ανά τον κόσμο. Η ταξινόμηση τους διαφέρει ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και τον σκοπό δημιουργίας τους.

- Βάσει του υλικού κατασκευής τους συναντώνται ξύλινες, λίθινες, μεταλλικές, σκυροδέματος και σύμμικτες
- Βάσει της χρήσης τους διακρίνονται σε οδικές, πεζογέφυρες και σιδηροδρομικές
- Βάσει του φορέα τους υπάρχουν οι γέφυρες με πλακοδοκό, οι κιβωτοειδούς διατομής, οι τοξωτές, οι κρεμαστές και οι καλωδιωτές
- Βάσει της δυνατότητας κίνησης χωρίζονται σε σταθερές και κινητές
- Βάσει της διάρκειας χρήσης τους σε προσωρινές, μόνιμες ή λυόμενες

Προκειμένου να επιλεγεί το κατάλληλο φέρον σύστημα για την ανέγερση μιας γέφυρας εξετάζονται διάφοροι παράγοντες, όπως είναι η μέθοδος κατασκευής που θα ακολουθηθεί, τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής, το άνοιγμα που πρέπει να εξυπηρετήσει και η συγκοινωνιακή ανάγκη.

2.3. Η ανατομία μιας γέφυρας

Βασικός πυλώνας για την δημιουργία και την ασφάλεια μια γέφυρας αποτελεί το σύστημα θεμελίωσης που επιλέγεται. Η θεμελίωση μπορεί να γίνει με επιφανειακή θεμελίωση, με πασσαλοκολώνες, με επιφανειακή με ανασήκωμα και με φρέατα.

Έπειτα τοποθετούνται τα ακρόβαθρα πάνω στα οποία τοποθετείται το κατάστρωμα της γέφυρας. Τα ακρόβαθρα συναντώνται στην αρχή και στο τέλος μιας γέφυρας και έχουν τον ρόλο της υποστήριξης του ανοίγματος από το επίχωμα. Η παρουσία τους είναι ύψιστης σημασίας, καθώς αναλαμβάνουν τις κατακόρυφες και τις οριζόντιες φορτίσεις, δημιουργούν ένα σύνδεσμο ανάμεσα στο επίχωμα και την ανωδομή και αναλαμβάνουν τις ωθήσεις των επιχωμάτων, μεταφέροντας τα στο έδαφος μέσω της θεμελίωσής τους. Στη θέση έδρασης της ανωδομής τοποθετείται μεγάλη ποσότητα σπλισμού, λόγω των μεγάλων φορτίων που λαμβάνουν. Ανάμεσα στη θέση έδρασης και του άνω τμήματος του ακροβάθρου βρίσκεται το θωράκιο, το οποίο προσφέρει στήριξη των πλακών πρόσβασης.

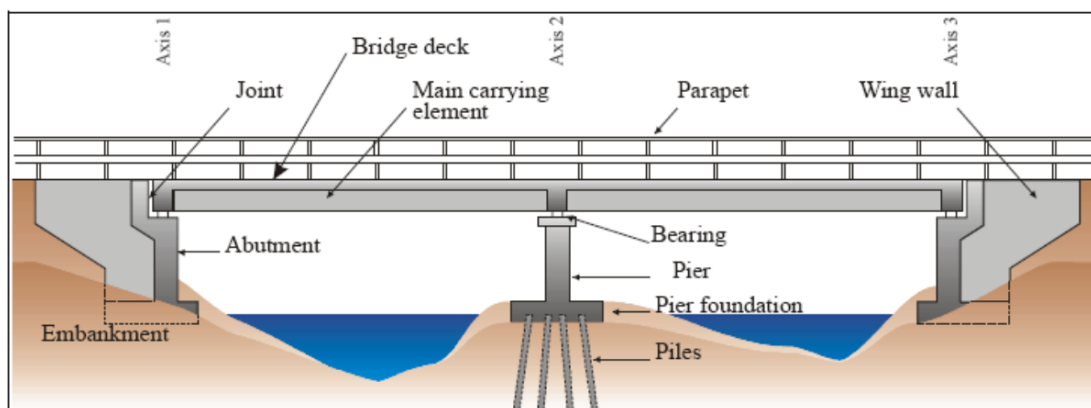
Το βασικότερο στοιχείο στήριξης της συνολικής δομής της γέφυρας, αλλά και της αισθητικής της αποτελούν τα μεσόβαθρα. Η επιλογή τους εξαρτάται από το είδος του ανοίγματος, αλλά και το ύψος που αυτά χρειάζεται να έχουν. Σε αυτοκινητόδρομους λαμβάνουν την μορφή στύλων, ενώ στην περίπτωση αδιάκοπης λήψης οριζόντιων φορτίσεων, όπως ένα ποτάμι, συνηθίζονται να έχουν μορφή τοιχώματος.

Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο μιας γέφυρας είναι τα εφέδρανα, το τμήμα δηλαδή ανάμεσα στην ανωδομή και την υποδομή. Παραλαμβάνουν τα φορτία της ανωδομής που προκαλούνται από τα ίδια βάρη, την κυκλοφορία και τον άνεμο και επιτρέπουν τις μετακινήσεις των υπόλοιπων τμημάτων. Οι μετακινήσεις που μπορεί να σημειωθούν συνήθως οφείλονται στον ερπυσμό του σκυροδέματος και των θερμοκρασιακών μεταβολών, ενώ οι στροφές λόγω του φόρτου κυκλοφορίας είτε πιθανόν κατασκευαστικών ατελειών. Ανάλογα με την κατά μήκος ή εγκάρσια μετακίνηση της ανωδομής κατηγοριοποιούνται σε σταθερά και κινητά, και με τα δύο όμως να προσφέρουν την δυνατότητα στροφής. Τα συνηθέστερα εφέδρανα που συναντώνται είναι τα ολισθαίνοντα (οι μετακινήσεις οφείλονται στην ολίσθηση της άνω και της κάτω πλάκας), τα αρθρωτά, τα κυλιόμενα και τα

σημειακού τύπου. Κριτήριο επιλογής του κατάλληλου είδους εφέδρανου αποτελεί η μέγιστη μετατόπιση και στροφή που δύναται να παραληφθεί.

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τη διάρκεια ζωής και την ποιότητα μιας γέφυρας είναι η επίδραση των θερμοκρασιακών μεταβολών στο μήκος της ανωδομής της. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι μεταβολές αυτές τοποθετούνται αρμοί διαστολής στα άκρα των γεφυρών και διακρίνονται είτε σε ανοικτούς (διέλευση σωματιδίων και υδάτων του καταστρώματος δια μέσω των αρμών), είτε σε κλειστούς (δεν επιτρέπεται η διέλευση). Βασική προϋπόθεση για την εύρυθμη και αποδοτική λειτουργία των αρμών διαστολής είναι η κατάλληλη τοποθέτησή τους, σύμφωνα με τα κατασκευαστικά πρότυπα.

Ακολουθεί απεικόνιση με τα βασικότερα τμήματα που απαρτίζουν μια γέφυρα.



Σχήμα 2.3: Κατά μήκος τομή γέφυρας (Κωνσταντινίδης, 2012)

2.4. Υλικά κατασκευής

Τα βασικότερα υλικά κατασκευής των γεφυρών είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα και ο χάλυβας. Είθισται να επιλέγεται το προεντεταμένο σκυρόδεμα, καθώς χαρακτηριστικό μειονέκτημα του απλά οπλισμένου είναι η αδυναμία εφαρμογής του σε κατασκευές με μεγάλα ανοίγματα λόγω του μεγάλου ιδίου βάρους του.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα στην γεφυροποιία σύμφωνα και με τους Αργυρούδη κ.α (2011) είναι:

- Το σκυρόδεμα συνήθως οπλισμένο και προεντεταμένο.

Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι από τα κύρια υλικά κατασκευής των γεφυρών και εξασφαλίζει μεγάλη αντοχή και υψηλή πλαστιμότητα που για την χώρα μας είναι πολύ σημαντικό λόγω της υψηλής σεισμικής δραστηριότητας. Επιπλέον το σκυρόδεμα προστατεύει και τον χάλυβα από διάβρωση. Σύμφωνα με τον DIN 1405/1988 η κατώτερη επιτρεπόμενη ποιότητα σκυροδέματος ορίζεται ως B25.

- Ο χάλυβας προέντασης

Ο χάλυβας με την μορφή καλωδίων βασικής προέντασης, καλωδίων ανάρτησης αλλά και κυρίως με την μορφή ράβδων οπλισμού του σκυροδέματος. Ο χάλυβας εκτός από την μεγάλη αντοχή που τον χαρακτηρίζει, είναι και από τα πλέον οικολογικά υλικά. Ακόμα και μετά την λήξη της διάρκειας ζωής του, το μεγαλύτερο μέρος του χάλυβα μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί χωρίς να χάσει τις βασικές του ιδιότητες. Επίσης οι διορθωτικές επεμβάσεις στον χάλυβα γίνονται ευκολότερα με αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου ζωής του.

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες βλάβης ενός καταστρώματος είναι η διάβρωση του οπλισμού, καθώς εκτίθενται καθημερινά σε διάφορες περιβαλλοντικές μεταβολές. Με τη διάβρωση ο χάλυβας οπλισμού ασκεί πίεση στο παρακείμενο σκυρόδεμα, που όταν ξεπεράσει τις τιμές αντοχής σε εφελκυσμό οδηγεί σε ρωγμές, θρυμμάτισμα του σκυροδέματος κάλυψης και αποκόλληση του ίδιου του οπλισμού. Για τον λόγο αυτό προτείνεται η επιλογή οπλισμού με ενισχυμένη αντοχή σε διάβρωση και υψηλότερη αντοχή διαρροής.

2.5. Βασικά στοιχεία κατασκευής γεφυρών

Ανά περιόδους, τόπους και ανάγκες έχουν εφαρμοστεί διάφορες μέθοδοι κατασκευής των φορέων των γεφυρών. Οι συνηθέστερες είναι η συμβατική, η κατασκευή του φορέα δηλαδή επί ικριωμάτων στο φυσικό έδαφος, η μέθοδος προωθούμενων δοκών κατά την οποία το άνοιγμα κατασκευάζεται ανά τμήματα ίσου μήκους και πλήρους πλάτους, η μέθοδος της προβολοδόμησης όπου ο φορέας δημιουργείται με συμμετρική τοποθέτηση των προβόλων και η συνηθέστερη στην Ευρώπη, η μέθοδος προκατασκευασμένων δοκών σύμφωνα με την οποία οι δοκοί προκατασκευάζονται και τοποθετούνται έτοιμες στις θέσεις τους.

Παρά τις διαφορετικές μεθόδους που δύναται να επιλεγθούν για την ανέγερση μιας γέφυρας, υπάρχουν αρκετά κοινά χαρακτηριστικά. Μερικά από αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Τα βάθρα κατασκευάζονται πάντοτε στην πρώτη φάση της κατασκευής της γέφυρας.
- Το κατάστρωμα κατασκευάζεται κατά τμήματα
- Πλην της προβολοδόμησης, η κατασκευή της γέφυρας προχωράει από το ένα βάθρο στο άλλο.

Υπάρχουν επίσης διάφορες παράμετροι και κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου κατασκευής μιας γέφυρας, όπως είναι το συνολικό μήκος της γεφύρωσης, το μήκος των επιμέρους ανοιγμάτων και την γεωμετρία της χάραξης οριζοντιογραφικά και κατά μήκος.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου κατασκευής εξαρτάται όμως και από τον διαθέσιμο εξοπλισμό, το κόστος κατασκευής αλλά και την εμπειρία του κατασκευαστή σε προηγούμενες κατασκευές.

Κεφάλαιο 3^ο: Σχεδιαστικές οδηγίες καταστρώματων γεφυρών από ΟΣ

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί μια αναφορά στους κανονισμούς που διέπουν τον σχεδιασμό και την κατασκευή των γεφυρών. Θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση των αμερικάνικων κανονισμών (AASHTO), των ελληνικών κανονισμών (ΟΜΟΕ), όπως επίσης και του Ευρωκώδικα. Με βάση αυτούς τους κανονισμούς πραγματοποιείται ο σχεδιασμός και η κατασκευή των γεφυρών, ενώ ορίζονται και τα πρότυπα οχήματα εκ των οποίων πραγματοποιούνται οι φορτίσεις στα καταστρώματα των γεφυρών.

3.2 AASHTO LRFD

Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι το πιο συνηθισμένο υλικό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των καταστρώματων των γεφυρών. Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε θλιπτικές τάσεις είναι ο λόγος που το οπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται στην κατασκευή γενικότερα των γεφυρών και των κατασκευών. Τα τελευταία χρόνια, η κατασκευή των καταστρώματων στον χώρο του έργου και οι προκατασκευασμένες πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος που απλά μεταφέρονται στο έργο και τοποθετούνται επί τόπου έχει βελτιώσει την ταχύτητα της κατασκευής και είναι και πιο οικονομικό από άποψη κόστους της κατασκευής (LRFD,2015).

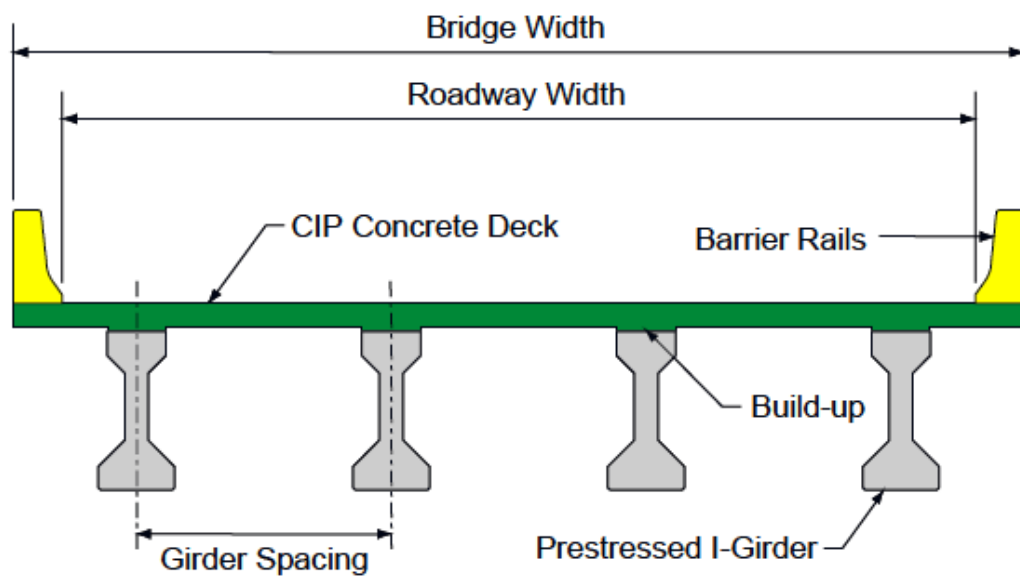
Η κατασκευή επί τόπου του καταστρώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα στην γέφυρα, έχει δείξει όμως πως η συρρίκνωση του σκυροδέματος σε συνδυασμό με τις χαλύβδινες ράβδους υποστήριξης της κατασκευής, έχει οδηγήσει στο συμπέρασμα πως χρειάζεται περισσότερος χρόνος μέχρι το σκυρόδεμα να σταθεροποιηθεί και να πήξει στο έργο και να αποκτήσει τις ιδιότητες που έχει και το καθιστούν τόσο δημοφιλές στην κατασκευή.

Για να αυξηθεί η αντοχή του σκυροδέματος στα καταστρώματα των γεφυρών έναντι των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν στον τόπο κατασκευής της γέφυρας όπως είναι το κρύο, το χιόνι και οι ακραίες χαμηλές θερμοκρασίες, διάφορα πρόσμικτα τοποθετούνται στο σκυρόδεμα τα οποία αυξάνουν την αντίσταση του σκυροδέματος στην διάβρωση, στην επαφή με το θαλασσινό νερό αλλά και με το αντιπαγετικό αλάτι.

Το ελάχιστο πάχος της πλάκας καταστρώματος των γεφυρών σύμφωνα και με τους Αμερικανικούς κανονισμούς (AASHTO LRFD, 2015) είναι 18 εκατοστά περίπου (7 ίντσες) και στις μελέτες που θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια για την κόπωση του σκυροδέματος στις πλάκες καταστρωμάτων των γεφυρών, οι μελετητές, στα δοκίμια τους χρησιμοποιούν περίπου αυτά τα πάχη πλακών. Υπάρχει μια διαφοροποίηση από κανονισμούς σε κανονισμούς για τα πάχη των πλακών καταστρωμάτων καθώς στην Ιαπωνία για παράδειγμα τα τελευταία χρόνια κατασκευάζονται πλάκες καταστρωμάτων γεφυρών με πάχος 24 εκατοστά. Έχει αποδειχτεί σε μελέτη των Fathala et.al (2019) πως μια αύξηση κατά 5% της πλάκας από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να αυξήσει κατά 45% τον χρόνο ζωής της ρωγμής που οφείλεται στην κόπωση του σκυροδέματος.

Για τον σχεδιασμό και τον υπολογισμό των φορτίων στις πλάκες των καταστρωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα ακολουθούνται 3 διαφορετικές μέθοδοι και αυτές είναι η εμπειρική μέθοδος, η λεπτομερής αναλυτική μέθοδος και η κατά προσέγγιση μέθοδος που χρησιμοποιεί ελαστικά όρια στις αναλύσεις.

Η εμπειρική μέθοδος και οι κύριοι υπολογισμοί έχουν να κάνουν με τις θλιπτικές τάσεις που δέχεται η γέφυρα και την αντοχή σε κάμψη αυτής. Ο οπλισμός του σκυροδέματος είναι ο βασικός τρόπος που χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της πλάκας που τοποθετείται πάνω σε προκατασκευασμένες δοκούς από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 ή σε μεταλλικό πλαίσιο που τοποθετείται πάνω στα βάθρα της γέφυρας και πάνω στο μεταλλικό πλαίσιο τοποθετείται η πλάκα σκυροδέματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.1: Τοποθέτηση πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος πάνω σε προκατασκευασμένες δοκούς

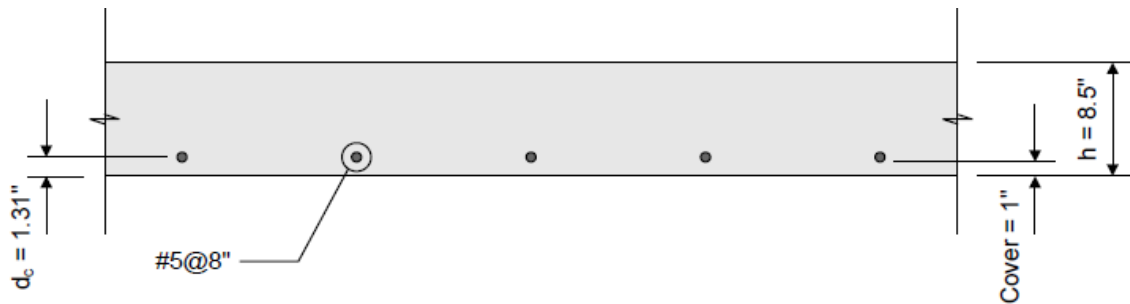


Σχήμα 3.2: Πλάκα καταστρώματος γέφυρας τοποθετημένη πάνω σε μεταλλικό πλαίσιο σε γέφυρα (LFRD,2015)

Η πλάκα του σκυροδέματος, ενισχύεται με ράβδους οπλισμού τόσο στη διαμήκη όσο και στην εγκάρσια διεύθυνση.

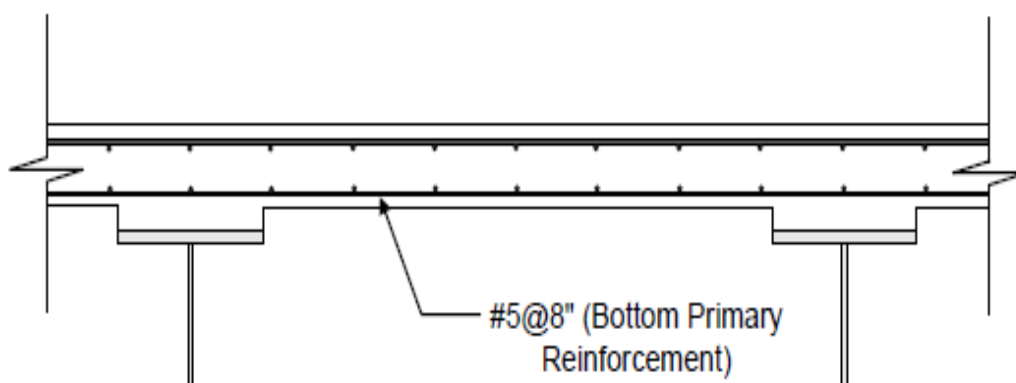
Στον σχεδιασμό της πλάκας υπολογίζονται:

1. η θλιπτική τάση στο πάνω μέρος της πλάκας στην εγκάρσια διεύθυνση και στο κάτω μέρος της πλάκας στην εγκάρσια διεύθυνση (Positive & negative)
2. Ο οπλισμός που θα τοποθετηθεί στην πάνω και στην κάτω πλευρά της πλάκας έναντι της κόπωσης και των ρωγμών που μπορεί να δημιουργηθούν σε αυτήν όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3



Σχήμα 3.3: Τοποθέτηση εγκάρσιου οπλισμού στο κάτω μέρος της πλάκας (LFRD,2015)

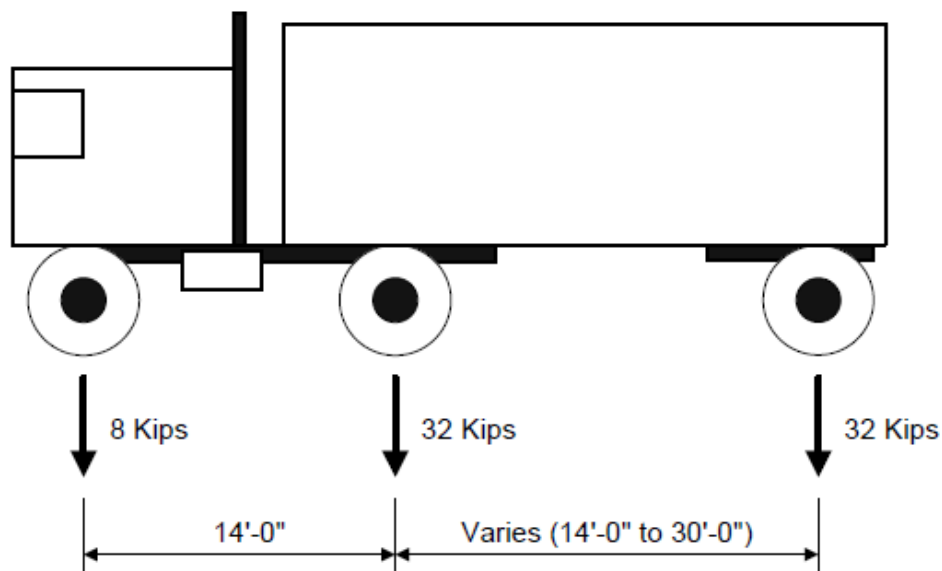
Η τοποθέτηση του οπλισμού στην διαμήκη διεύθυνση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Τοποθέτηση διαμήκης οπλισμού στο κάτω και πάνω μέρος της πλάκας έναντι της κόπωσης του σκυροδέματος (LFRD,2015)

Η διάταξη του οπλισμού στις πλάκες καταστρωμάτων των γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε σχεδόν σε όλα τα δοκίμια των μελετών που θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια. Εξαίρεση ίσως αποτέλεσαν οι Γάλλοι Toylemonde & Ranc, (2011) οι οποίοι στην μελέτη τους χρησιμοποίησαν οπλισμό μεγαλύτερης διαμέτρου ($\Phi 14$) σε σχέση με τους Αμερικάνικους κανονισμούς που χρησιμοποιείται οπλισμός διαμέτρου 8 χιλιοστών.

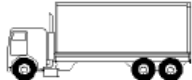
Η αξιολόγηση της κόπωσης του σκυροδέματος από τους Αμερικανικούς κανονισμούς παρουσιάζει περιορισμούς στο εύρος της θλιπτικής τάσης που υπολογίζεται. Αυτό έχει να κάνει με το βάρος των οχημάτων που διασχίζουν την γέφυρα καθώς και τον αριθμό των επαναλήψεων που λαμβάνονται υπόψη κατά τους υπολογισμούς. Οι υπολογισμοί έναντι της κόπωσης του σκυροδέματος πραγματοποιούνται λαμβάνοντας υπόψη ένα συνδυασμό δράσεων. Ο συνδυασμός αυτός προκαλεί ένα εύρος φορτίσεων στο κατασκευαστικό στοιχείο της πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος. Οι φορτίσεις όμως περιλαμβάνουν και την πιθανότητα κόπωσης και φθοράς των ράβδων οπλισμού του σκυροδέματος το οποίο εφάρμοσαν και οι Giordano et.al (2009) στην μελέτη τους για την αποκατάσταση της κόπωσης των πλακών σκυροδέματος με αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα.



Σχήμα 3.5: Τυπικό όχημα σχεδιασμού των αμερικανικών κανονισμών για τις φορτίσεις στις γέφυρες (LFRD,2015)

Αυτός ο συνδυασμός των δράσεων υπολογίζεται για ένα τυπικό όχημα που χρησιμοποιούν οι Αμερικάνικοι κανονισμοί για τον υπολογισμό των φορτίσεων στην γέφυρα όπως είναι το όχημα του παραπάνω Σχήματος 3.5. Όμως οι Giordano et.al (2009) και οι Maekawa (2006) χρησιμοποίησαν στις μελέτες τους τα τυπικά οχήματα που χρησιμοποιούνται από τους Ευρωπαϊκούς κανονισμούς (CEN 2003), όπως αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.6

Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτές τις μελέτες να είναι διαφορετικά από την άποψη του βαθμού της κόπωσης, αλλά την ίδια στιγμή ανεξάρτητα από το πρότυπο όχημα που χρησιμοποιήθηκε και τις επαναλήψεις που εφαρμόστηκαν στα δοκίμια. Όλες οι μελέτες συμφωνούσαν πως η κόπωση που δημιουργείται υπάρχει τρόπος να προβλεφθεί από τα αριθμητικά αποτελέσματα πριν η βλάβη λόγω κόπωσης καταλήξει σε αστοχία είτε του σκυροδέματος είτε των ράβδων οπλισμού.

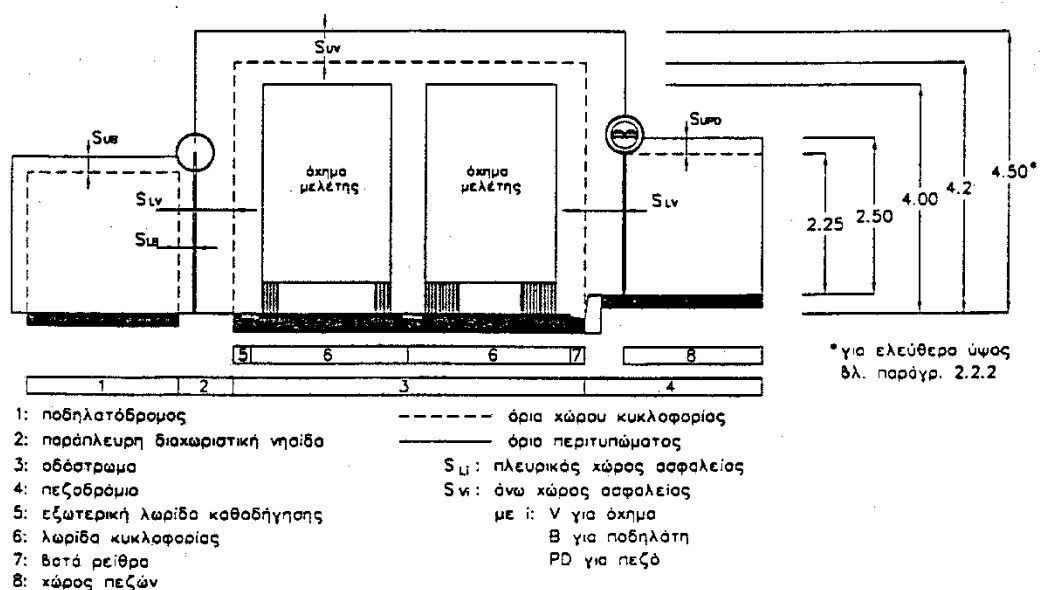
Vehicle type			Traffic type		
Lorry type	Axle spacing (m)	Equivalent axle loads (kN)	Lorry percentage		
			Long distance	Medium distance	Local traffic
	4.50	70.0 130.0	20.0	40.0	80.0
	4.20 1.30	70.0 120.0 120.0	5.0	10.0	5.0
	3.20 5.20 1.30 1.30	70.0 150.0 90.0 90.0 90.0	50.0	30.0	5.0
	3.40 6.00 1.80	70.0 140.0 90.0 90.0	15.0	15.0	5.0
	4.80 3.60 4.40 1.30	70.0 130.0 90.0 80.0 80.0	10.0	5.0	5.0

Σχήμα 3.6: Διαστάσεις του πρότυπου οδικού οχήματος που χρησιμοποιείται στις δοκιμές κόπωσης (Giordano,et.all, 2009)

Τα πρότυπα οχήματα του Σχήματος 3.6 βοήθησαν τους μελετητές να πραγματοποιούν μελέτες και πειράματα με πεπερασμένα στοιχεία, τόσο σε φορτίσεις όσο και σε επαναλήψεις προκειμένου να γίνει η προσομοίωση της κυκλοφορίας των οχημάτων στις γέφυρες και να διερευνηθεί η κόπωση που υφίσταται το οπλισμένο σκυρόδεμα.

3.3 Ελληνικοί Κανονισμοί (ΟΜΟΕ)

Οι Ελληνικοί κανονισμοί και οι Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (Ο.Μ.Ο.Ε) ορίζουν για τις γέφυρες πως το αντιπροσωπευτικό όχημα μελέτης έχει πλάτος 2,50 μέτρα και ύψος 4,00 μέτρα. Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται μια τυπική διατομή με το πλάτος και το ύψος των οχημάτων καθώς και το περιτύπωμα αυτών σε μια γέφυρα 2 λωρίδων κυκλοφορίας.



Σχήμα 3.7: Διατομή γέφυρας σύμφωνα και με τον ΟΜΟΕ Γεφυρών (ΟΜΟΕ,2001)

Οι πλάκες των καταστρωμάτων των γεφυρών μπορούν να είναι πλήρεις ή με κενά και το απαραίτητο πάχος της πλάκας ορίζεται από τους κανονισμούς ΟΜΟΕ.

Οι πλήρεις πλακογέφυρες είναι οι γέφυρες, των οποίων ο φορέας είναι πλάκα εδραζόμενη στρεπτός επί των ακροβάθρων και μεσοβάθρων. Σημειώνεται ότι, από άποψη στατικής λειτουργίας, οι φορείς αυτοί παρουσιάζουν λειτουργία πλάκας όταν το πλάτος τους είναι μεγαλύτερο από το μισό του ανοίγματος. Είναι κατάλληλες για μικρά ανοίγματα και

για περιορισμένα διαθέσιμα ύψη. Από αισθητική άποψη πλεονεκτούν λόγω της επίπεδης κάτω επιφάνειας του φορέα και από το γεγονός της εύκολης σχετικά προσαρμογής σε κάτοψη στις επιταγές της χάραξης της οδοποιίας (περιοχές κόμβων, κατοικημένες περιοχές κ.λ.π.).

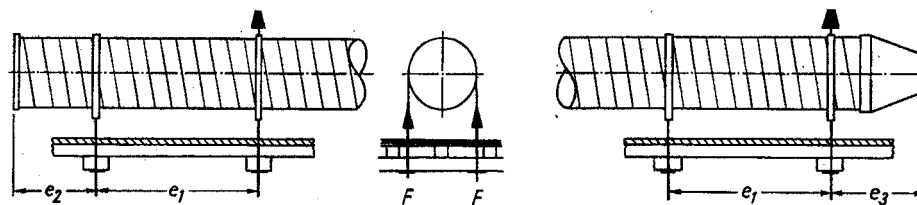
Συνήθως δεν απαιτείται εγκάρσια προένταση. Κατά τη διαμήκη έννοια, η φέρουσα λειτουργία πραγματοποιείται κυρίως με το μεσαίο τμήμα του φορέα (διπλή διαγράμμιση). Το ελάχιστο πάχος του φορέα l των γεφυρών αυτών h υπολογίζεται από τους ακόλουθους υπολογισμούς σύμφωνα και με τον ΟΜΟΕ (2001):

- | | |
|--|------------|
| • Προεντεταμένη αμφιέριστη πλακογέφυρα | $h = l/22$ |
| • Προεντεταμένη συνεχής πλακογέφυρα | $h = l/28$ |
| • Οπλισμένη αμφιέριστη πλακογέφυρα | $h = l/16$ |
| • Οπλισμένη συνεχής πλακογέφυρα | $h = l/21$ |

Με βάση τα παραπάνω, τα πλέον συνήθη μήκη ανοιγμάτων πλακογεφυρών εμφανίζονται όπως παρακάτω:

- | | |
|--|-------------------------|
| • Προεντεταμένη αμφιέριστη πλακογέφυρα | $l_{\max} = 22\text{m}$ |
| • Προεντεταμένη συνεχής πλακογέφυρα | $l_{\max} = 28\text{m}$ |
| • Οπλισμένη αμφιέριστη πλακογέφυρα | $l_{\max} = 16\text{m}$ |
| • Οπλισμένη συνεχής πλακογέφυρα | $l_{\max} = 21\text{m}$ |

Όταν το απαιτούμενο πάχος του φορέα πλακογέφυρας προκύπτει μεγαλύτερο των 70cm, τότε για τη μείωση του ιδίου βάρους συνιστάται η τοποθέτηση κυλινδρικών σωμάτων. Το μέγιστο συνιστώμενο ύψος είναι 1,40m. Στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην καλή αγκύρωση των σωμάτων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8 διότι ενδεχόμενη ανύψωσή τους κατά τη φάση σκυροδέτησης του φορέα θα έχει σαν άμεση συνέπεια τη μείωση του πάχους της θλιβόμενης ζώνης και επομένως τη διακινδύνευση της ασφάλειας της κατασκευής.



Αγκύρωση κυλινδρικών σωμάτων στον ξυλότυπο του φορέα

Σχήμα 3.8: Αγκύρωση κυλινδρικών σωμάτων στον ξυλότυπο του φορέα (ΟΜΟΕ,2001)

Το ελάχιστο πάχος της πάνω πλάκας της πλακογέφυρας καθορίζεται σε 20cm, της κάτω 15 έως 20cm και το πλάτος μεταξύ των σωμάτων δοκίδων σε 30cm.

Για την ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας των φορέων γεφυρών αυτού του είδους κατά την εγκάρσια διεύθυνση, καλό είναι να διατάσσονται εγκάρσιες διαδοκίδες στο μέσον του ανοίγματος, καθώς και στις στηρίξεις υπεράνω των ακροβάθρων και μεσοβάθρων.

Οι φορείς από πλακοδοκούς περιλαμβάνουν την πλάκα καταστρώματος και από δύο κύριες δοκούς και από εγκάρσιες διαδοκίδες στις θέσεις έδρασης στα ακρόβαθρα και μεσόβαθρα. Τέτοια συστήματα θεωρούνται από στατική άποψη ως ραβδόμορφοι φορείς. Σημειώνεται ότι η εγκάρσια διανομή των φορτίων γίνεται μέσω των διαδοκίδων και της πλάκας καταστρώματος (ΟΜΟΕ,2001).

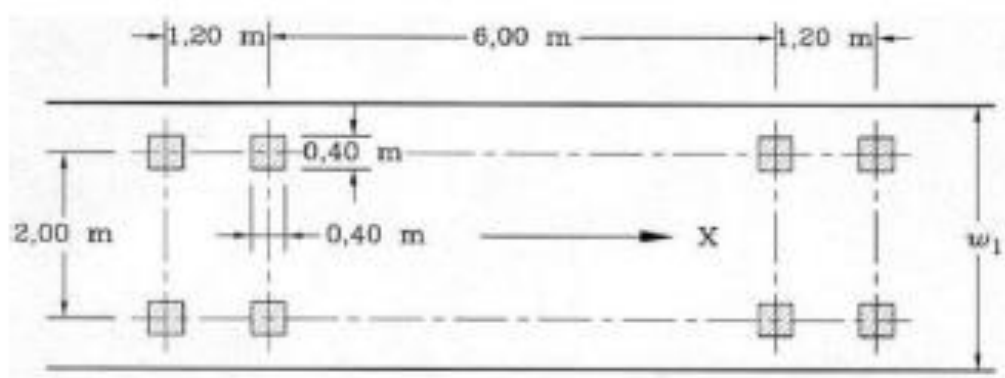
Τα πιο συνήθη μήκη ανοιγμάτων σύμφωνα με τον ΟΜΟΕ (2001) είναι τα ακόλουθα:

- Προεντεταμένη αμφιέριστη γέφυρα $l_{max} = 45m$
- Προεντεταμένη συνεχής γέφυρα $l_{max} = 45m$
- Οπλισμένη αμφιέριστη γέφυρα $l_{max} = 20m$
- Οπλισμένη συνεχής γέφυρα $l_{max} = 20m$

Σύμφωνα με τον ΟΜΟΕ οι πλάκες των καταστρωμάτων θα πρέπει να οπλίζονται με οπλισμό και στις δύο διευθύνσεις. Κάθε παρειά θα οπλίζεται ανά διεύθυνση με ελάχιστο ποσοστό οπλισμού 0,06% της διατομής του σκυροδέματος, όχι όμως λιγότερο από $\Phi 10/20$ ή πλέγμα οπλισμού της αντίστοιχης διατομής.

3.4 Κόπωση πλακών καταστρωμάτων γεφυρών από Ο.Σ με βάση τον Ευρωκώδικα

Στις οδικές γέφυρες ο έλεγχος στην κόπωση πραγματοποιείται μέσω του Ευρωκώδικα (Ευρωκώδικας 1-Μέρος 2, 2003) σε συνδυασμό με τα κυκλοφοριακά δεδομένα που ορίζονται από τους φορείς διαχείρισης των αυτοκινητοδρόμων. Το μοντέλο φόρτισης που χρησιμοποιείται στον Ευρωκώδικα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9 και το μοντέλο αυτό διαθέτει 4 άξονες με φορτίο ανά άξονα 120 kN και η επιφάνεια επαφής απεικονίζεται σε σχήμα τετραγώνου.



Σχήμα 3.9: Μοντέλο φόρτισης γέφυρας (Ευρωκώδικας 1-Μέρος 2,2003)

Για κίνηση του οχήματος αυτού κατά μήκος της γέφυρας, υπολογίζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τάσεις καθώς και το εύρος των τάσεων (δηλαδή η αλγεβρική διαφορά μεταξύ των δύο ακραίων τιμών ενός συγκεκριμένου κύκλου τάσεων).

Ο αριθμός βαρέων φορτηγών ανά έτος καθώς και ανά λωρίδα βραδείας κυκλοφορίας προκύπτει από τον Πίνακα 3.2 αλλά είναι πιο ακριβές να λαμβάνονται υπόψη οι μετρήσεις των κυκλοφοριακών φόρτων από τους αρμόδιους φορείς διαχείρισης των αυτοκινητοδρόμων .

Πίνακας 3.2: Αριθμός φορτηγών ανά λωρίδα και ανά έτος (Ευρωκώδικας 1-Μέρος 2, 2003)

Κατηγορίες Κυκλοφορίας	Βαρέα φορτηγά ανά έτος και ανά λωρίδα βραδείας κυκλοφορίας
Αυτοκινητόδρομοι με 2 ή περισσότερες λωρίδες κυκλοφορίας με υψηλό ποσοστό ροής φορτηγών	2.000.000
Αυτοκινητόδρομοι με μέσο ποσοστό ροής φορτηγών	500.000
Κύριες Αστικές Οδοί με χαμηλό ποσοστό ροής φορτηγών	125.000
Τοπικές οδοί με χαμηλό ποσοστό ροής φορτηγών	50.000

Λόγω της συνεχούς κυκλοφορίας οχημάτων και επομένως στους επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης που λαμβάνουν τα στοιχεία μιας γέφυρας, υπάρχει επιτακτική ανάγκη σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα για έλεγχο σε κόπωση στα στοιχεία που καταπονούνται περισσότερο, όπως το σκυρόδεμα. Για τον υπολογισμό της κόπωσης του σκυροδέματος γίνεται χρήση των παρακάτω σχέσεων (όπως περιγράφουν και οι οι Αγρίμη & Ζαφείρα - Χατζή (2013)):

$$\gamma_{mf} \cdot \Delta \sigma_{k2} \leq \Delta \sigma_c / \gamma_{Mf} \text{ και } \gamma_{mf} \cdot \Delta \tau_{k2} \leq \Delta \tau_c / \gamma_{Mf} \quad [3.1]$$

όπου: τα $\Delta \sigma_{k2}$ και $\Delta \tau_{k2}$ είναι τα όρια κόπωσης για την ορθή τάση και αντιστοιχούν σε 2.000.000 κύκλους επανάληψης.

Η αντοχή σε κόπωση για ονομαστικές τάσεις εκφράζονται με καμπύλες όπως αυτές που παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα 3.10 και 3.11 και αντιστοιχούν σε τυπικές κατηγορίες που χαρακτηρίζονται από έναν αριθμό που αντιπροσωπεύει μια τιμή αναφοράς για την αντοχή σε κόπωση για 2.000.000 επαναλήψεις.

Για σταθερού πλάτους ονομαστικές τάσεις, οι αντοχές σε κόπωση μπορούν να προσδιορισθούν με τους ακόλουθους μαθηματικούς τύπους:

$$\Delta\sigma R_m \cdot N_R = D\sigma R_m \cdot 2.000.000 \text{ με } m=3 \text{ για } N \leq 5 \cdot 10^6 \text{ και}$$

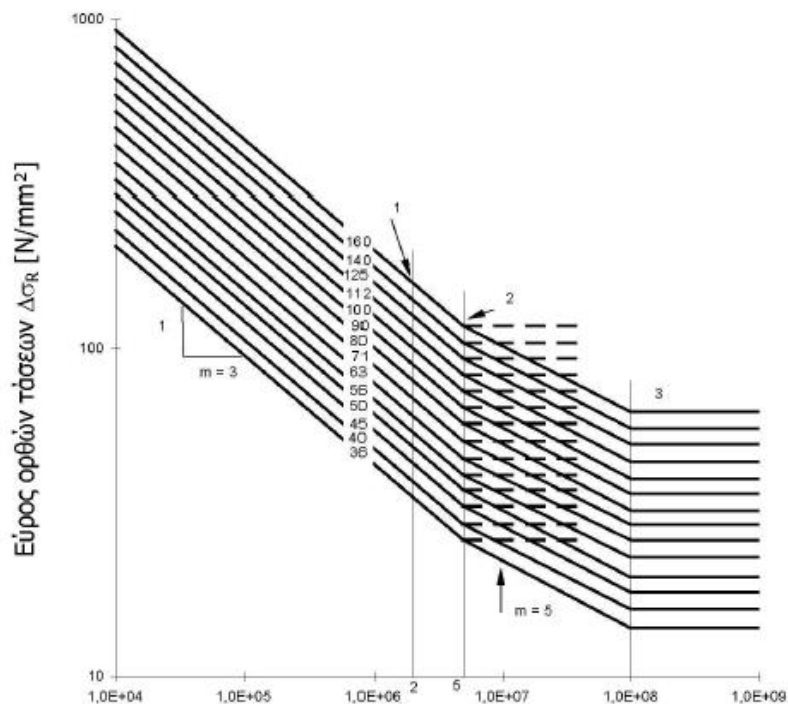
$$\Delta\sigma R_m \cdot N_R = D\sigma D_m \cdot 5.000.000 \text{ με } m=5 \text{ για } 5 \cdot 10^6 \leq N_R \leq 10^8$$

Όπου: $D\sigma R_m$ ή $\Delta\sigma_c^m$ τα όρια της κόπωσης για ορθή τάση σταθερού πλάτους

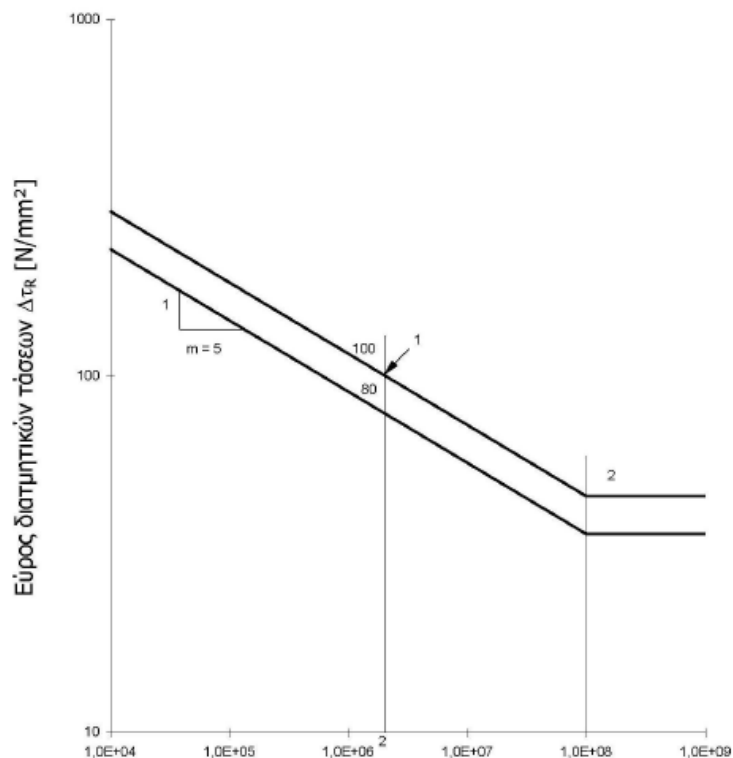
$D\sigma D_m$ ή $\Delta\sigma_D^m$ τα όρια της κόπωσης για διατμητική τάση σταθερού πλάτους

N η διάρκεια ζωής ή ο αριθμός των κύκλων φορτίσεων

Ο άνωθεν έλεγχος μπορεί να παραληφθεί σε περιπτώσεις όπως στις πεζογέφυρες υπό στατική φόρτιση ή σε δευτερεύοντα στοιχεία των γεφυρών που δεν καταπονούνται άμεσα από την κυκλοφορία.



Σχήμα 3.10: Καμπύλες αντοχής σε κόπωση για εύρη ορθών τάσεων (Αγρίμη & Ζάφειρα-Χατζή, 2013)



Σχήμα 3.11: Διάρκεια ζωής και αριθμός κύκλων (Αγρίμη & Ζάφειρα-Χατζή, 2013)

Για τα φορτία που αναφέρθηκαν προηγουμένως η διαδικασία με την οποία προσδιορίζεται το εύρος τάσης παρουσιάζεται στην συνέχεια και είναι η εξής σύμφωνα και με τον Ευρωκώδικα 4 - Μέρος 2 (2005):

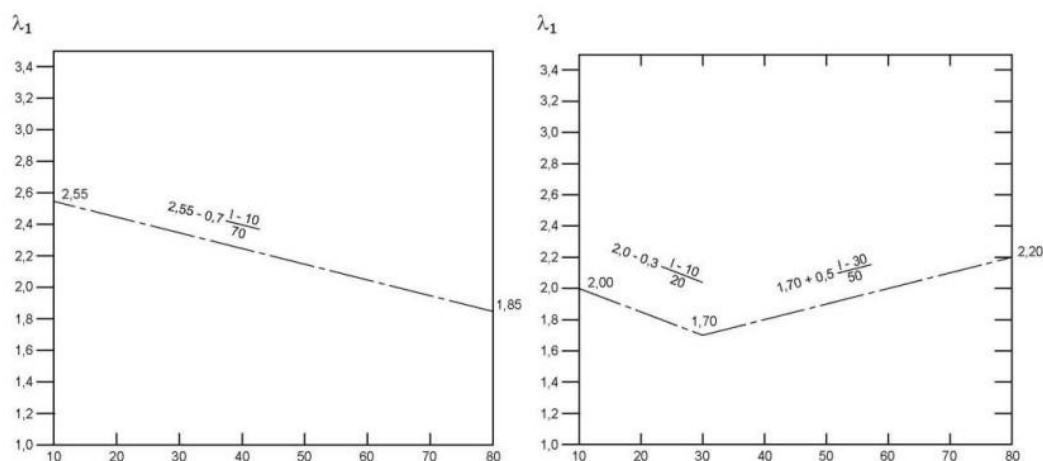
Για την συγκεκριμένη κατηγορία που έχει επιλεχθεί με την βοήθεια των γραμμών επιρροής που παρουσιάστηκαν παραπάνω προσδιορίζεται η ελάχιστη και η μέγιστη τάση και η σχέση που προσδιορίζει το εύρος των τάσεων είναι η εξής:

$$\Delta\sigma P = [\sigma_{rmax} - \sigma_{rmin}]$$

Το ισοδύναμο εύρος τάσης για επαναλήψεις ισούται με $\Delta\sigma K2 = \lambda * \phi2 * \Delta\sigma P$ όπου ο $\phi2$ είναι ο δυναμικός συντελεστής ο οποίος για οδικές γέφυρες λαμβάνεται ίσος με την μονάδα και λ είναι ο συντελεστής ισοδυναμίας βλάβης. Ο συντελεστής βλάβης ισούται με $\lambda = \lambda_1 * \lambda_2 * \lambda_3 * \lambda_4$ όπου για γέφυρες με μέγιστο άνοιγμα τα 80μ οι συντελεστές ισοδυναμίας υπολογίζονται ως εξής:

- λ_1

Η τιμή του πρώτου συντελεστή εξαρτάται από το μήκος της γραμμής επιρροής, την ένταση του μεγέθους της ροπής που λαμβάνουν τα στοιχεία της γέφυρας είτε στο άνοιγμα, είτε στις στηρίξεις σύμφωνα με το Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12: Τιμές συντελεστή λ_1 για ροπή στο άνοιγμα και στις στηρίξεις αντίστοιχα (Αγρίμη & Ζάφειρα-Χατζή, 2013)

- λ_2

Οι τιμές του δεύτερου συντελεστή λαμβάνονται από τον Πίνακα 3.2 όπου Q_{m1} το μέσο βάρος σε kN των φορτηγών που διασχίζουν τη λωρίδα βραδείας κυκλοφορίας και N_{obs} τον συνολικό αριθμό αυτών ανά έτος.

Πίνακας 3.2: Τιμές συντελεστή λ_2 (Αγρίμη & Ζάφειρα-Χατζή, 2013)

Q_{m1}	N_{obs}							
	0,25E6	0,50E6	0,75E6	1,00E6	1,25E6	1,50E6	1,75E6	2,00E6
200	0,362	0,417	0,452	0,479	0,500	0,519	0,535	0,550
300	0,544	0,625	0,678	0,712	0,751	0,779	0,803	0,825
400	0,725	0,833	0,904	0,957	1,001	1,038	1,071	1,100
500	0,907	1,042	1,130	1,197	1,251	1,298	1,338	1,374
600	1,088	1,250	1,356	1,436	1,501	1,557	1,606	1,649

- λ_3

Οι τιμές του τρίτου συντελεστή λαμβάνονται από τον Πίνακα 3.3 και καθορίζονται από την διάρκεια ζωής της γέφυρας σε έτη.

Πίνακας 3.3: Τιμές συντελεστή λ_3 (Αγρίμη & Ζάφειρα-Χατζή, 2013)

Διάρκεια ζωής, έτη	50	60	70	80	90	100	120
Συντελεστής λ_3	0,871	0,903	0,931	0,956	0,979	1,000	1,037

- λ_4

Ο τελευταίος συντελεστής περιγράφει την επίδραση της κυκλοφορίας σε όλες τις υπόλοιπες λωρίδες και υπολογίζεται από τον επόμενο τύπο:

$$\lambda_4 = [1 + N_2/N_1 * (n_2 * Q_{m2} / n_1 * Q_{m1})^5 + N_3/N_1 * (n_3 * Q_{m3} / n_1 * Q_{m1})^5 + \dots + N_k/N_1 * (n_k * Q_{mk} / n_1 * Q_{m1})^5]^{1/5}$$

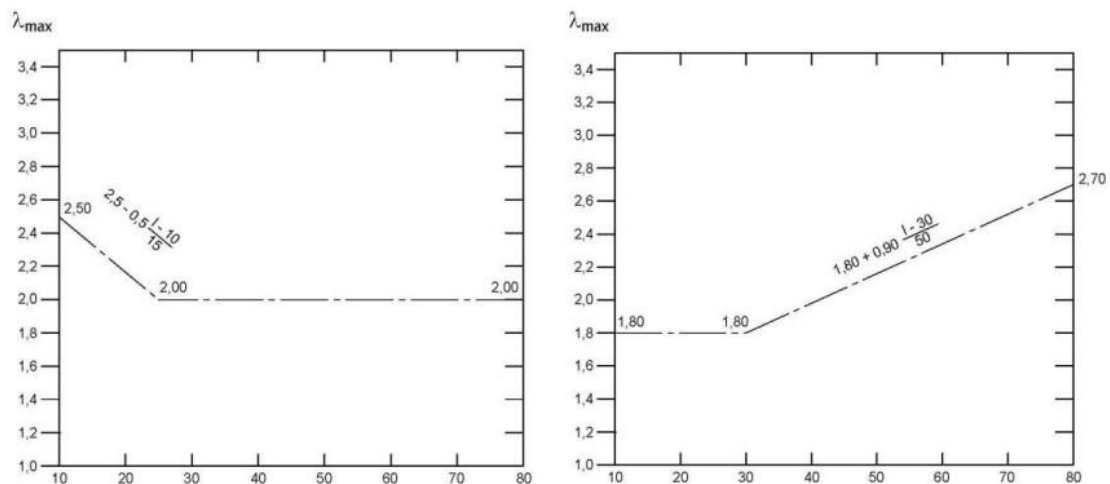
όπου: k ο αριθμός των λοιπών λωρίδων κυκλοφορίας

N_j ο αριθμός των φορτηγών ανά έτος σε κάθε λωρίδα

Q_{mj} το μέσο βάρος των φορτηγών ανά έτος σε κάθε λωρίδα

n_j η τιμή της έντασης των τάσεων που προκαλείται στο μέσον κάθε λωρίδας

Σε κάθε περίπτωση η τιμή του συντελεστή λ δεν μπορεί να ξεπερνάει μία μέγιστη, η οποία δίνεται από το Σχήμα 3.13 συναρτήσει των ροών στο άνοιγμα και στις στηρίξεις.



Σχήμα 3.13: Μέγιστες τιμές συντελεστή λ για ροπή στο άνοιγμα και στις στηρίξεις αντίστοιχα (Αγρίμη & Ζάφειρα-Χατζή, 2013)

Κεφάλαιο 4^ο: Κόπωση καταστρωμάτων γεφυρών από Ο.Σ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια παρουσίαση στις βασικές αρχές της κόπωσης του σκυροδέματος και του χάλυβα οπλισμού. Η διερεύνηση της κόπωσης των στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα απαιτεί την εξέταση και των δύο υλικών. Η φόρτιση κόπωσης των πλακών καταστρώματος γεφυρών μπορεί να οδηγήσει σε προοδευτική αστοχία του σκυροδέματος και του χάλυβα.

4.2 Κόπωση

4.2.1 Κόπωση σκυροδέματος

Το άοπλο σκυρόδεμα υπό φόρτιση καταπόνησης με ελεγχόμενη θλίψη ή εφελκυσμό παρουσιάζει έντονα αυξανόμενες παραμορφώσεις μέσα σε μια πρώτη σύντομη περίοδο ζωής, ακολουθούμενη από μια περίοδο σταθερών, αλλά ελαφρώς αυξανόμενων παραμορφώσεων. Κατά την τελευταία περίοδο, οι παραμορφώσεις αυξάνονται και πάλι σημαντικά πριν το δείγμα αστοχήσει. Η συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό φόρτιση κόπωσης κυριαρχείται επίσης από τη διάδοση ρωγμών. Μικρορωγμές πρώιμης ηλικίας στο τσιμεντοπολτό και στη διεπιφάνεια μεταξύ αδρανών και της μήτρας τσιμέντου διαδίδονται σταθερά και κάθετα προς την κατεύθυνση φόρτισης έως ότου το δείγμα αστοχήσει εμφανίζοντας μια διακριτή ρωγμή. Ο Reinhardt (1992) μελέτησε τη συμπεριφορά κόπωσης του απλού σκυροδέματος και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η διάδοση των ρωγμών οδηγεί σε αστοχία του σκυροδέματος.

Παράγοντες όπως: το εύρος της φόρτισης, ο ρυθμός φόρτισης, η εκκεντρότητα της φόρτισης, το ιστορικό φόρτισης, οι ιδιότητες του υλικού και οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν την αντοχή στην κόπωση του σκυροδέματος.

4.2.2 Κόπωση Χάλυβα

Η αστοχία κόπωσης του χάλυβα οπλισμού προκαλείται από μια μικρορωγμή που ξεκινά λόγω συγκέντρωσης τάσης στην επιφάνεια της ράβδου. Η ρωγμή διαδίδεται σταδιακά κι όταν η διάδοσή της γίνει ασταθής (όταν δηλαδή φτάσει στο κρίσιμο μήκος) τότε πραγματοποιείται θραύση. Έτσι, η διάρκεια ζωής του χάλυβα οπλισμού ισούται με τον χρόνο ή τον αριθμό των κύκλων για την έναρξη της ρωγμής συν τη διάρκεια ανάπτυξης της ρωγμής. Η έναρξη της ρωγμής συνήθως συμβαίνει στη θέση της μεγαλύτερης συγκέντρωσης τάσεων, δηλαδή στο σημείο που τέμνονται ο εγκάρσιος και ο διαμήκης οπλισμός του σκυροδέματος. Η αντοχή σε κόπωση των ράβδων οπλισμού εξαρτάται από τη χημική σύνθεση, τη διατομή, την ελάχιστη τάση, το μέγεθος της ράβδου, την γεωμετρία παραμορφώσεων, την απόδοση και την αντοχή σε εφελκυσμό. Στο σημείο επαφής του σκυροδέματος με τον οπλισμό δημιουργούνται οι μεγαλύτερες βλάβες λόγω κόπωσης καθώς σε εκείνα τα σημεία δημιουργούνται μεγαλύτερου μήκους ρωγμές. Επιπρόσθετα, παράγοντες που ευνοούν την έναρξη των ρωγμών και συνήθως οδηγούν σε μείωση της αντοχής σε κόπωση είναι οι συγκολλήσεις, η καμπυλότητα των λυγισμένων ράβδων και η διάβρωση.

Σημαντικός αριθμός πειραμάτων έχει δείξει ότι η αντοχή σε κόπωση του χάλυβα οπλισμού εξαρτάται και από την διάμετρό του. Χάλυβες μικρής διατομής παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε κόπωση από τους χάλυβες ίδιας ποιότητας αλλά μεγαλύτερης διατομής όταν υπόκεινται στο ίδιο εύρος ανακυκλιζόμενης τάσης.

4.2.3 Κόπωση Οπλισμένου Σκυροδέματος

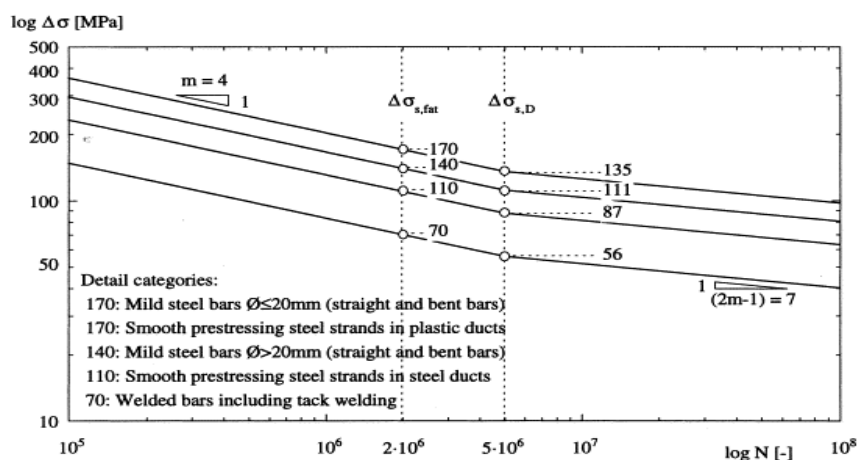
Όλη η έρευνα που αναφέρθηκε παραπάνω διερεύνησε τη συμπεριφορά κόπωσης του απλού σκυροδέματος και των ράβδων οπλισμού με αξονική φόρτιση. Ωστόσο, η απόδοση μιας πλάκας καταστρώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα εξαρτάται επίσης από τη σύνθετη δράση μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος. Στη διάρκεια ζωής μιας γέφυρας η συνεχής κυκλοφορία οχημάτων παράγει ένα μεγάλο αριθμό από επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης στα στοιχεία της γέφυρας. Το γεγονός αυτό δημιουργεί συνθήκες κόπωσης τόσο για το χάλυβα όσο και για το σκυρόδεμα. Για το λόγο αυτό απαιτείται να ελέγχεται η κόπωση σε τέτοιου είδους στοιχεία που υποβάλλονται τακτικά σε κύκλους φόρτισης. Ο σχεδιασμός

μιας γέφυρας έναντι της οριακής κατάστασης κόπωσης έχει σκοπό να εξασφαλίσει, με ένα αποδεκτό επίπεδο πιθανότητας, ότι η συμπεριφορά της θα είναι ικανοποιητική σε όλη τη διάρκεια της ζωής σχεδιασμού της, έτσι ώστε να είναι απίθανο να αστοχήσει λόγω κόπωσης ή να απαιτήσει επισκευές ζημιών που προκλήθηκαν από κόπωση. (Αγρίμη & Ζάφειρα-Χατζή, 2013).

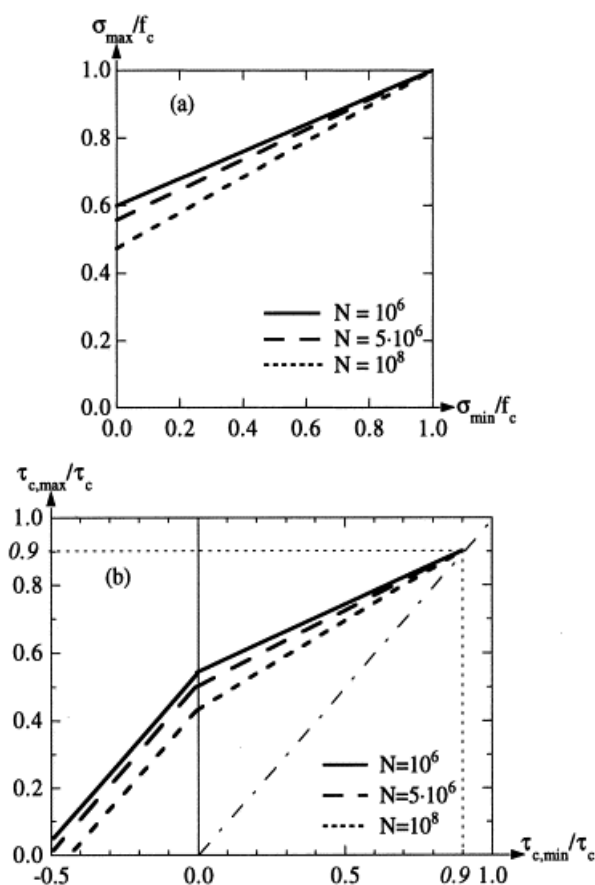
Το κατάστρωμα μιας γέφυρας από οπλισμένο σκυρόδεμα υπόκειται σε αστοχία λόγω κόπωσης, καθώς πρώτα φθείρετε εξαιτίας της κόπωσης ο χάλυβας που βρίσκεται μέσα στο σκυρόδεμα (ο οπλισμός) και κατόπιν το ίδιο το σκυρόδεμα. Η κόπωση του σκυροδέματος είναι η διαδικασία της συσσώρευσης βλάβης σε ένα στοιχείο κατασκευασμένο από σκυρόδεμα, λόγω της επαναληπτικής φόρτισης κατά την οποία διαδικασία σχηματίζονται και διευρύνονται οι ρωγμές πάνω στο σκυρόδεμα. Η αστοχία στο στοιχείο προκαλείται όταν η ρωγμή είναι τόσο μεγάλη που η παραμένουσα διατομή δεν μπορεί πλέον να παραλάβει τα επαναλαμβανόμενα φορτία.

Οι οδικές και σιδηροδρομικές γέφυρες που είναι κατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα υπόκεινται συχνά σε κόπωση λόγω των συνεχών και επαναλαμβανόμενων φορτίσεων. Στις μικρές και μεσαίες γέφυρες που ο λόγος μεταξύ κινητών και μόνιμων φορτίων είναι μεγαλύτερος, το φαινόμενο της κόπωσης του σκυροδέματος εμφανίζεται συχνότερα.

Η αντοχή σε κόπωση του υλικού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το βάρος των φορτίσεων και από τον αριθμό των επαναλήψεων σε αυτού του είδους τις φορτίσεις. Η αντοχή σε κόπωση δίνεται από τις καμπύλες κόπωσης (S-N curves) οι οποίες συνδέουν το εύρος των τάσεων $\Delta\sigma$ ή S με τον αριθμό των επαναλαμβανόμενων κύκλων φόρτισης N .



Σχήμα 4.1: Αντοχή σε κόπωση χαλύβδινου οπλισμού Schläfli & Bruhwiler (1998)



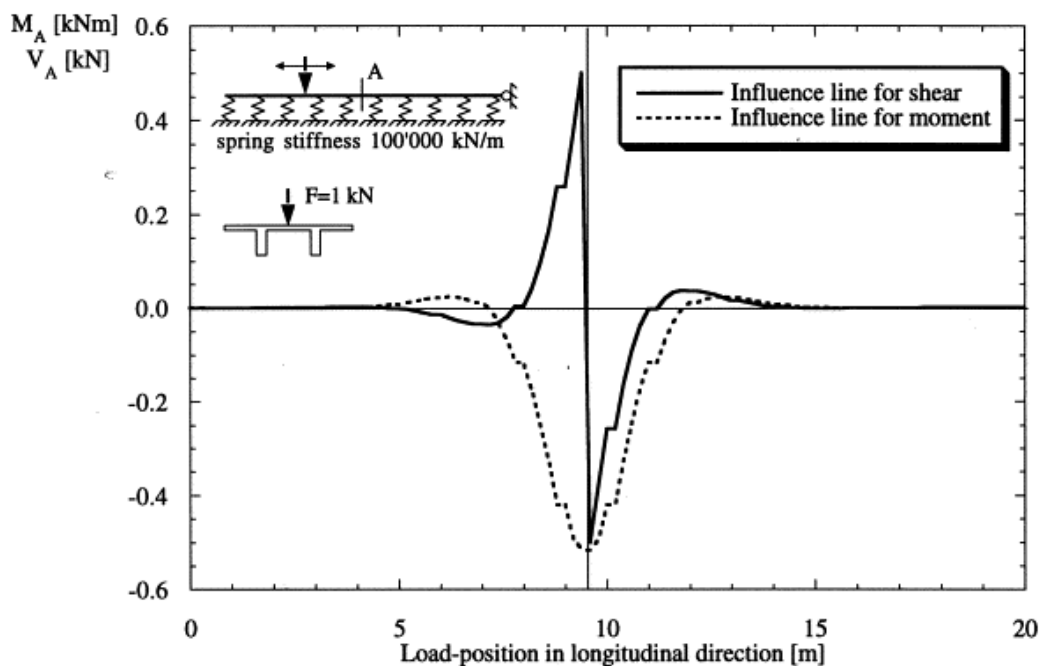
Σχήμα 4.2: Αντοχή σκυροδέματος σε κόπωση όπως αναπαρίσταται από ένα διάγραμμα Goodman για (α) θλιπτικές και (β) διατμητικές τάσεις Schlafli & Bruhwiler (1998)

Η αντοχή σε κόπωση είναι ένα τοπικό φαινόμενο στις κατασκευές του οπλισμένου σκυροδέματος και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατασκευαστική λεπτομέρεια του σημείου. Το σκυρόδεμα παρουσιάζει αυξανόμενες παραμορφώσεις κατά την διάρκεια καταπόνησης, με το μέτρο ελαστικότητας του συνεχώς να μειώνεται, λόγω της διαρκούς ανάπτυξης ρωγμών. Προκειμένου να καθοριστούν οι τιμές ασφάλειας έναντι κόπωσης, επισημαίνονται οι παράμετροι που επηρεάζουν τον χάλυβα οπλισμού και του σκυροδέματος χωριστά.

Οι παράμετροι που αφορούν τον χάλυβα οπλισμού είναι το εύρος των τάσεων, ο αριθμός των κύκλων φορτίου και η διάταξη του. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1 τα αποτελέσματα των δοκιμών εκφράζονται σε λογαριθμική κλίμακα και είθισται να χρησιμοποιείται ένα 5% εύθραυστο κριτήριο για τον υπολογισμό της κλίσης της καμπύλης S-N. Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζονται οι τιμές της αντοχής έναντι θλίψης και διάτμησης του σκυροδέματος σε

κόπωση. Ο συντελεστής διόρθωσης που εισάγεται λαμβάνει υπόψιν το σφάλμα λόγω της κόπωσης που έχει υποστεί ο οπλισμός σε διάρκεια 100 ετών.

Η τιμή ασφαλείας κόπωσης του σκυροδέματος καθορίζεται από το ζεύγος των ορθών και διατμητικών τάσεων και των μέγιστων και ελάχιστων τιμών που αυτές παράγουν κατά την κόπωση. Το Σχήμα 4.3 παριστάνει την επίδραση του ζεύγους τάσεων στην αντοχή έναντι κόπωσης συναρτήσει του αριθμού κύκλων φορτίου, γνωστό ως διάγραμμα Goodman. Η αντοχή σε κόπωση μειώνεται σημαντικά όταν αναστρέφονται οι τάσεις, το οποίο παρατηρείται κατά την διέλευση ενός κινητού φορτίου από την πλάκα καταστρώματος της γέφυρας. Ακόμη ιδιαίτερα σημαντικές για αντοχή του σκυροδέματος αποτελούν οι ονομαστικές τιμές σχεδιασμού της θλιπτικής και διατμητικής αντοχής. Σε αντίθεση με τον χάλυβα οπλισμού, στο σκυρόδεμα δεν εισάγεται διορθωτικός συντελεστής, καθώς δεν έχει αποδειχθεί εργαστηριακά η συσσώρευση βλαβών εξαιτίας κόπωσης.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα Goodman, Schlafli & Bruhwiler (1998)

4.2.4 Κόπωση Υφιστάμενων Γεφυρών

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το κατάστρωμα μιας γέφυρας είναι το περισσότερο καταπονούμενο μέλος, για αυτό και σήμερα το καθοριστικό κριτήριο σχεδιασμού είναι η κόπωση. Οι αστοχίες που παρατηρούνται ανά περιόδους εμφανίζονται κυρίως στις ράβδους οπλισμού, ενώ το σκυρόδεμα παρουσιάζει μικρές ρωγμές υπό κόπωση. Το μοντέλο S-N εξάγει τιμές που αντιπροσωπεύουν την ασφάλεια σε κόπωση, χωρίς όμως να περιγράφει το ίδιο το φαινόμενο και τις επιπτώσεις του, για αυτό και θεωρείται κατάλληλο για την εξέταση νέων γεφυρών, αλλά όχι υφιστάμενων.

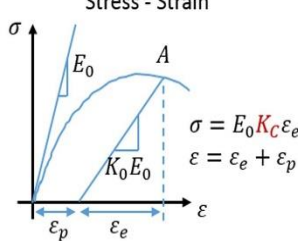
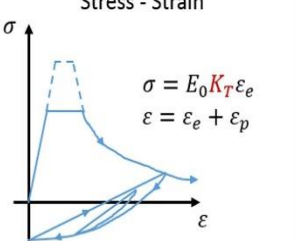
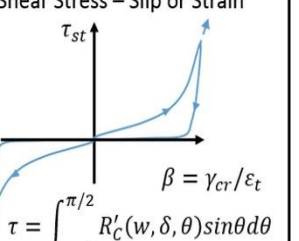
Προκειμένου διερευνηθεί η δομική ασφάλεια των υφιστάμενων γεφυρών και η δυνατότητα ή μη συντήρησης της ακολουθείται μια σταδιακή μελέτη των κρίσιμων δομικών στοιχείων της. Αρχικά μελετώνται οι κατασκευαστικές διατάξεις που ακολουθήθηκαν κατά την ανέγερση της και συγκρίνονται με τις σημερινές για να επαληθευτεί η ασφάλεια και η αντοχή του σκυροδέματος και του οπλισμού της σε κόπωση. Έπειτα γίνεται καταγραφή των φορτίων κυκλοφορίας που καταπονούν το κατάστρωμα, ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των υλικών, η εξαγωγή πυρήνων (καρότα) για να διαπιστωθεί η αντοχή του έργου και καταγράφονται λεπτομερώς οι βλάβες του σκυροδέματος και του οπλισμού εξαιτίας της κόπωσης μέσω των εμφανών ρωγμών.

Έχει αποδειχθεί ότι μείζον παράγοντας που επηρεάζει την αντοχή των πλακών από οπλισμένο σκυρόδεμα σε οδικές γέφυρες είναι οι συνθήκες υγρασίας ή ξηρασίας που επικρατούν. Σε διάφορες περιπτώσεις έχουν παρατηρηθεί εσωτερικές ρωγμές ή αποσάθρωση στην επιφάνεια του καταστρώματος το οποίο οφείλεται αρκετές φορές στα στάσιμα νερά. Οι ρωγμές αυτές συναντώνται κυρίως ανάμεσα στον αρμό διαστολής που προβάλλεται ανάμεσα σε δύο πλάκες, καθιστώντας αλληλένδετες την κόπωση και την διάβρωση και ως ένα σημαντικό παράγοντα φθοράς τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο.

Στο Σχήμα 4.3 που ακολουθεί περιγράφονται οι καταστατικοί νόμοι που διέπουν το οπλισμένο σκυρόδεμα όπου:

- K_c η παράμετρος θραύσης λόγω συμπίεσης
- ε η συνολική παραμόρφωση
- ε_p η πλαστική παραμόρφωση
- ε_e η ελαστική παραμόρφωση

- σ η συνολική τάση
- E_o η αρχική ακαμψία
- K_m η παράμετρος εξέλιξης ρωγμών
- λ το ποσοστό ζημίας λόγω κόπωση

	Compression	Tension	Shear
Core Concrete Models	Stress - Strain  $\sigma = E_0 K_C \varepsilon_e$ $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$	Stress - Strain  $\sigma = E_0 K_T \varepsilon_e$ $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$	Shear Stress - Slip or Strain  τ_{st} $\beta = \gamma_{cr} / \varepsilon_t$ $\tau = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} R'_C(w, \delta, \theta) \sin \theta d\theta$
Enhanced Model For High Cycle Fatigue	Fracture parameter K_C considers time dependent plasticity & fracturing and cyclic fatigue damage $dK_C = \frac{\partial K_C}{\partial t} dt + \frac{\partial K_C}{\partial \varepsilon_e} d\varepsilon_e$ Time Dependency Cyclic Fatigue $\frac{\partial K_C}{\partial \varepsilon_e} = \lambda \sim \text{when } F_k > 0$ $\frac{\partial K_C}{\partial \varepsilon_e} = -\frac{\partial F_k}{\partial \varepsilon_e} / \frac{\partial F_k}{\partial K_m} + \lambda \sim \text{when } F_k = 0$ $\lambda = K^3 \cdot (1 - K^4) \cdot g \cdot R$	Fracture parameter K_T considers time dependent fracturing and cyclic fatigue damage $dK_T = Fdt + Gd\varepsilon_e + Hd\varepsilon_e$ Fdt: time dependent fracturing $Gd\varepsilon_e$: cyclic fatigue damage	Accumulated path function X reduce shear associated with cyclic fatigue damage $\tau = X \cdot \tau_0(\delta, w)$ Function Original Model $X = 1 - \frac{1}{10} \log_{10} \left\{ 1 + \int \left d \left(\frac{\delta}{w} \right) \right \right\}$ ≥ 0.1
Physical Meaning	Decrease of Stiffness and Plasticity Accumulation by Continuous Fracturing Concrete	Decrease of Tension Stiffness by Bond Fatigue	Decrease of Shear Transfer Normal to Crack by Continuous Deterioration of Rough Crack Surface

Σχήμα 4.3: Καταστατικοί νόμοι σπλισμένου σκυροδέματος Ishida et al. (2021)

Στο Σχήμα 4.3 παρατηρείται η καταστροφή που δέχεται το σκυρόδεμα λόγω της διάτμησης και της τάσης. Η πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται κατά την επαναλαμβανόμενη φόρτιση με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μικρορωγμές στο εσωτερικό του σκυροδέματος με σταδιακή μείωση της ελαστικής ακαμψίας. Η μείωση της ακαμψίας λόγω της κόπωσης μεταξύ του οπλισμού και του σκυροδέματος προκαλεί “ζημιά” στην εφελκυστική αντοχή τους. Στο μοντέλο της διατμητικής τάσης, η τάση αυτή μειώνεται με την αύξηση των κύκλων επαναλήψεων, στο σκυρόδεμα εμφανίζεται ως τραχύτητα στην επιφάνειά του.

Κατά την διάρκεια των κύκλων φόρτισης της κόπωσης, η πίεση του νερού των πόρων αυξάνεται μέχρι να φτάσει το όριο εφελκυσμού κόπωσης μεταξύ του αρμού διαστολής και των αδρανών. Η επιφάνεια καταστρέφεται λόγω της αυξημένης πίεσης και οδηγεί στην αποσύνθεση των αδρανών και του τσιμέντου, οδηγώντας τελικά στη θραύση του σκυροδέματος.

Έχει παρατηρηθεί ότι η διάρκεια ζωής ενός καταστρώματος οπλισμένου σκυροδέματος έναντι κόπωσης σε ξηρές συνθήκες είναι 20 φορές μεγαλύτερη από ότι σε υγρές. Η ύπαρξη δηλαδή λιμναζόντων νερών απειλεί την ακεραιότητα και την ασφάλεια του καταστρώματος. Στις ξηρές συνθήκες, οι ρωγμές σχηματίζονται στην κάτω επιφάνεια της πλάκας. Σε αστικές περιοχές όπου οι βροχοπτώσεις είναι λιγότερες προτείνεται αρχικά η αύξηση του πάχους της πλάκας προκειμένου οι ρωγμές που σημειώνονται να μην επηρεάζουν άμεσα την επιφάνεια του καταστρώματος, και έπειτα ο συστηματικός έλεγχος τους προκειμένου να επιδιορθώνονται προτού προκληθούν μεγαλύτερες και μόνιμες καταστροφές.

Σε περιοχές με έντονη βροχόπτωση ή χιονόπτωση, ρωγμές και αποσάθρωση παρατηρούνται στην επάνω επιφάνεια κοντά στον οπλισμό της γέφυρας όπου δεν εντοπίζονται με απλούς οπτικούς ελέγχους προκειμένου να προληφθούν και πολλές φορές οδηγούν στην αστοχία του καταστρώματος. Κατά την διαδικασία απομάκρυνσης του χιονιού από την επιφάνεια της γέφυρας, χιόνι τείνει να συσσωρεύεται στα φράγματα του δρόμου και να σχηματίζει αναχώματα. Η τήξη των αναχωμάτων αυτών καθιστά μόνιμως υγρή την επιφάνεια και αυξάνει το κίνδυνο κατάρρευσης. Στις υγρές συνθήκες έχει αποδειχτεί ότι η αύξηση του πάχους της πλάκας δεν αποτελεί αποτελεσματικό μέτρο πρόληψης. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της αστοχίας λόγω υγρών συνθηκών προτείνεται η επίστρωση των καταστρωμάτων με στεγανωτικά υλικά και ο τακτικός και συστηματικός έλεγχος τους.

4.2.5 Κόπωση καταστρωμάτων γεφυρών από προεντεταμένο σκυρόδεμα

Στα απλουστευμένα συστήματα γεφυρών με μεγάλα ανοίγματα και μικρό αριθμό δοκών είναι πιο σύνηθες η κατασκευή της πλάκας καταστρώματος από προεντεταμένο σκυρόδεμα. Η σύνθετη μορφή γέφυρας από προεντεταμένο σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από απλοποιημένο δομικό σύστημα με αποτέλεσμα την βελτιωμένη κατασκευή, συντήρηση και αισθητική, καθώς μειώνει τον αριθμό των δοκών μέσω των χαλύβδινων πλακών υψηλής απόδοσης που χρησιμοποιεί. Η χρήση εγκάρσιων δοκών και υποστυλωμάτων αποφεύγεται, οδηγώντας σε δημιουργία εγκάρσιας πλάκας καταστρώματος με μεγάλο άνοιγμα, σε αντίθεση με τις κοινές πλάκες καταστρώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα, χαρακτηριστικό γνώρισμα των οποίων είναι το μεγάλο πάχος και βάρος και επομένως η μειωμένη δομική απόδοση της γέφυρας.

Κεφάλαιο 5°: Πειράματα κόπωσης πλακών καταστρωμάτων γεφυρών από Ο.Σ

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται πειράματα που έχουν εκπονηθεί για τη μελέτη της κόπωσης των πλακών καταστρωμάτων γεφυρών οπλισμένου σκυροδέματος. Γίνεται παρουσίαση και σύγκριση των πειραματικών διατάξεων προκειμένου να αξιολογηθούν οι μέθοδοι που ακολουθήθηκαν και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν.

5.2 Πειραματικές έρευνες

Αρκετοί ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει μελέτες και έρευνες πάνω στην κόπωση των πλακών των καταστρωμάτων των γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες πειραματικές διατάξεις προκειμένου να εκτελεστούν αυτές οι μελέτες και έρευνες.

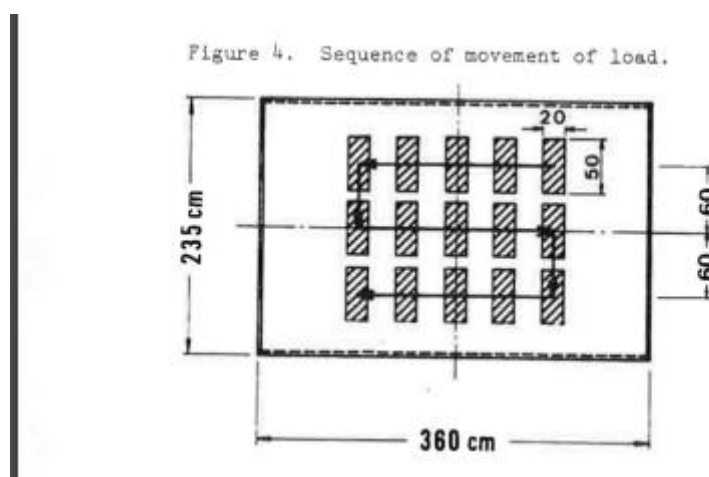
5.2.1 Επίδραση του φορτίου της κυκλοφορίας στην κόπωση

Η κόπωση των πλακών οπλισμένου σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται στα καταστρώματα των γεφυρών, προκαλείται από τους τροχούς των οχημάτων που κυκλοφορούν σε αυτές κι έπειτα από εκατομμύρια επαναλήψεις και κινήσεις αυτών στις οδικές γέφυρες. Οι Schlafli και Bruhwiler (1998) σημειώνουν πως αυτές οι επαναλήψεις μπορεί και να ξεπερνάνε τις 100.000.000 κατά την διάρκεια λειτουργίας της γέφυρας. Επιπροσθέτως τα καταστρώματα των γεφυρών δεν είναι σχεδιασμένα έναντι της κόπωσης του σκυροδέματος. Τα κατασκευαστικά στοιχεία των γεφυρών δεν εκπληρώνουν τις απαιτήσεις για αντοχή λόγω κόπωσης, σύμφωνα με τους καινούριους κανονισμούς και κώδικες σχεδιασμού των καταστρωμάτων των γεφυρών. Οι περισσότερες γέφυρες έχουν κατασκευαστεί πριν από 40 χρόνια κι είναι πιθανό η αντοχή στην κόπωση του οπλισμένου σκυροδέματος να είναι μικρότερη σε σχέση με την αντοχή της μελέτης σχεδιασμού ολόκληρης της γέφυρας. Τα καταστρώματα μπορεί να είναι τα κρισιμότερα κατασκευαστικά στοιχεία της γέφυρας όταν αυτά υπόκεινται σε διατμητικές τάσεις.

Στην μελέτη των Okada & Okamura (1978) επτά πλάκες με διαστάσεις πλήρους κλίμακας δοκιμάστηκαν υπό στατικό φορτίο, κεντρικά παλμικά φορτία και κινούμενα παλμικά φορτία. Για τη διερεύνηση της χαρακτηριστικής παραμόρφωσης και της αντοχής σε κόπωση, τέσσερις δοκιμαστικές πλάκες κόπηκαν από δύο καταστρώματα γεφυρών, που είχαν υποβληθεί σε φορτία κυκλοφορίας 20 - 50 χιλιάδων αυτοκινήτων την ημέρα για μια περίοδο 8 έως 10 ετών. (Ο οπλισμός των δοκιμών αποτελείται από στρογγυλές χαλύβδινες ράβδους με διάμετρο 16 mm στη διαμήκη κατεύθυνση και 13 mm στην εγκάρσια κατεύθυνση). Διαπιστώθηκε ότι η διαδικασία της αστοχίας αποτελούνταν από δύο στάδια: το πρώτο στάδιο ήταν η ανάπτυξη καμπτικών ρωγμών που εμφανίζονταν στην κάτω επιφάνεια της πλάκας και το δεύτερο στάδιο ήταν μια εξέλιξη περιστροφικών ρωγμών που εμφανίζονταν στην επάνω επιφάνεια, όταν το φορτίο του τροχού είχε απομακρυνθεί.

Πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση βασισμένη στην τρισδιάστατη ελαστικότητα μιας πλάκας μοντέλου με δικτυωτές ρωγμές για να διερευνηθεί η κατανομή των τάσεων κοντά στις ρωγμές λόγω κινούμενων φορτίων και να διευκρινιστεί η διαδικασία διάδοσης ρηγμάτωσης σε όλο το βάθος της πλάκας, κάτω από δράση εναλλασσόμενων εγκάρσιων και περιστροφικών διατμητικών τάσεων.

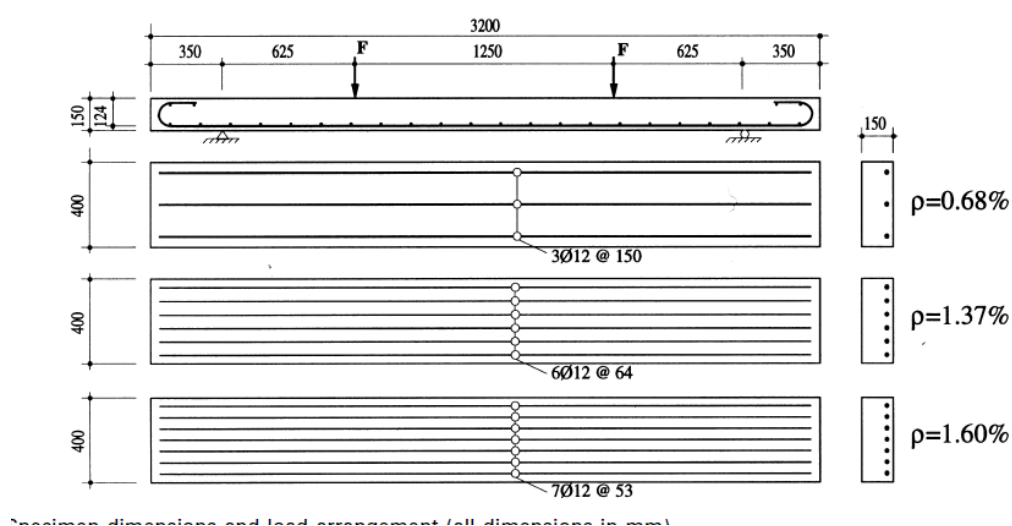
Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι διαδικασιών φόρτισης: στατικά ή παλμικά φορτία που εφαρμόζονται στο κέντρο της πλάκας και παλμικά φορτία που μεταφέρονται σταδιακά και κυκλικά σε πολλά διαφορετικά σημεία.



Σχήμα 5.1: Ακολουθία Φορτίου Κίνησης

Το παλμικό φορτίο ήταν μορφής ημιτονοειδούς κύματος και οι συχνότητες κυμαίνονταν από 4 Hz έως 5 Hz. Η ένταση του φορτίου ποίκιλε για διαφορετικές δοκιμές και κυμαινόταν μεταξύ 108 kN που αντιστοιχεί σε ένα φορτίο πίσω τροχού και 245 kN της μέγιστης χωρητικότητας της χρησιμοποιούμενης μηχανής δοκιμής. Ορισμένα δοκίμια στα τεστ κατέρρευσαν τελικά λόγω διάτμησης σκυροδέματος μετά από μερική καμπτική αστοχία.

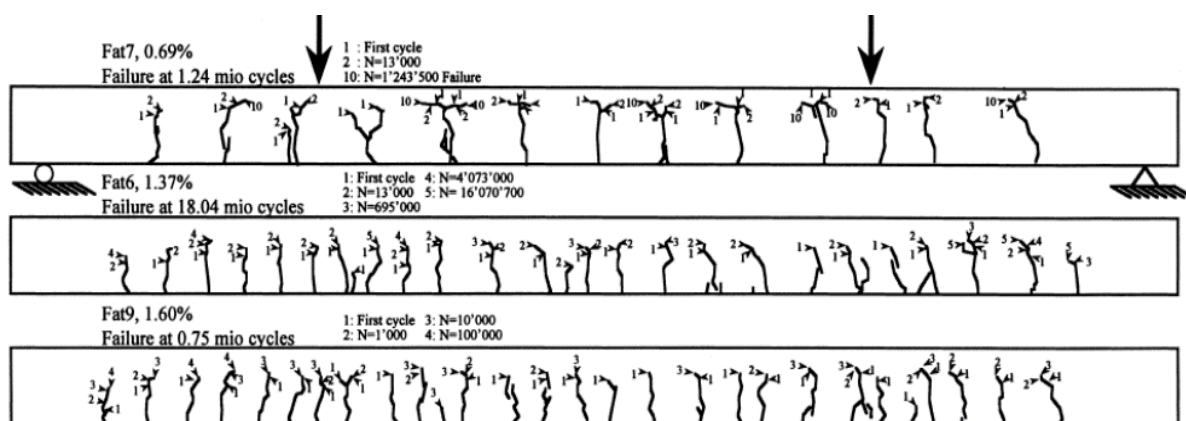
Οι Schläfli & Bruhwiler (1998) εξέτασαν 17 πλακοειδείς δοκούς (χωρίς οπλισμό διάτμησης) που υποβάλλονται σε κάμψη τεσσάρων σημείων και 10 δοκούς σαν πλάκες για έκκεντρη κάμψη τριών σημείων. Πριν από τη διεξαγωγή των πειραμάτων κόπωσης, δύο δείγματα έχουν δοκιμαστεί υπό στατική φόρτιση για να παρατηρηθεί το σχέδιο ρωγμών και να προσδιοριστεί η τελική στατική αντοχή όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Πλάκες καταστρωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα που μελέτησαν οι Schläfli & Bruhwiler (1998)

Στην έρευνα των Schläfli & Bruhwiler (1998) όλα τα δοκίμια είχαν «ηλικία» πάνω από 90 ημέρες και δημιουργήθηκαν με τσιμέντο τύπου Portland και αδρανή υλικά με διάμετρο μέχρι 32 χιλιοστά. Το σκυρόδεμα είχε μέση θλιπτική αντοχή κυλίνδρου f_{cc} 35 MPa. Η φόρτιση εφαρμόστηκε με υδραυλικές διατάξεις. Στα πρώτα 6 δοκίμια εφαρμόστηκε φόρτιση στο 10% της μέγιστης φόρτισης αλλά δεν διαπιστώθηκε καμία φθορά, οπότε η φόρτιση αυξήθηκε στο 30% της μέγιστης φόρτισης και οι πρώτες ρωγμές λόγω κόπωσης παρουσιάστηκαν όταν η φόρτιση εφαρμόστηκε στο 60% της μέγιστης φόρτισης. Οι πρώτες 2 μικρές ρωγμές μήκους

20 χιλιοστών διαπιστώθηκαν στο κάτω μέρος της μιας μπάρας του οπλισμού των δοκιμίων, ενώ στο πάνω μέρος του σκυροδέματος παρουσιάστηκε μια ρωγμή μήκους 100 χιλιοστών. Η παραμόρφωση μετρήθηκε σε όλο το βάθος του δοκιμίου με ένα μηχανικό μετρητή στη ζώνη σταθερής ροπής με αναλογία οπλισμού 1,6% και το μοτίβο των ρωγμών στην επιφάνεια του σκυροδέματος μετρήθηκε καθ' όλη την διάρκεια των δοκιμών με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.3 .



Σχήμα 5.3: Μοτίβο παραμορφώσεων στο σκυρόδεμα (Schlafli & Bruhwiler, 2001)

Παρατηρήθηκε ότι οι ρηγματώσεις και οι παραμορφώσεις αυξάνονταν ραγδαία ως τους πρώτους χίλιους κύκλους ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Στη συνέχεια, παρατηρήθηκε μια περίοδος μικρής αναλογικά αύξησής τους. Μετά από 10.000.000 επαναλήψεις των φορτίσεων σε ένα δοκίμιο οι παραμορφώσεις και οι ρωγμές ξεκίνησαν να επεκτείνονται και να μεγαλώνουν.

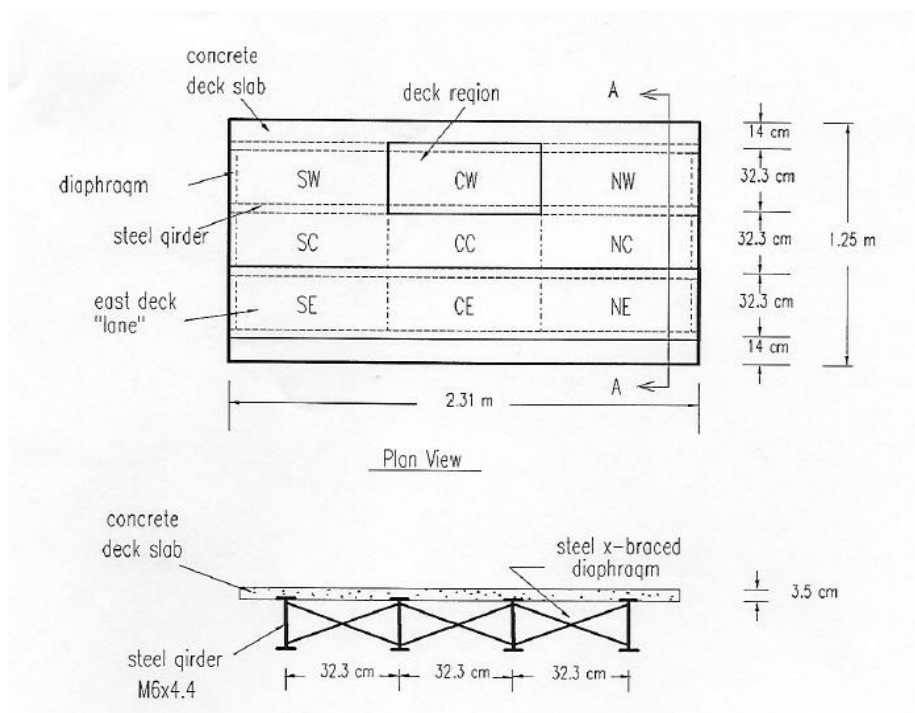
Τα αποτελέσματα της έρευνας των Schlafli & Bruhwiler (1998) έδειξαν πως η κατανομή των θλιπτικών τάσεων στα δοκίμια είναι γραμμική και υπάρχει μια αξιοσημείωτη αύξηση των παραμορφώσεων μετά τους πρώτους 1000 κύκλους επαναλήψεων και η αύξηση αυτή συνεχίζει μετά από εκατομμύρια κύκλους επαναλήψεων. Στο μεσοδιάστημα οι φθορές αυξάνονται αλλά με πολύ χαμηλότερο ρυθμό, την ίδια στιγμή που η ακαμψία του σκυροδέματος μειώνεται όσο συνεχίζονται οι κύκλοι των επαναλήψεων.

Η κόπωση του οπλισμένου σκυροδέματος συμβαίνει όταν οι θλιπτικές τάσεις στα δοκίμια φτάσουν το 60% του μέγιστου βάρους των φορτίσεων. Σε χαμηλότερες τάσεις το

οπλισμένο σκυρόδεμα αστοχεί μόνο όταν οι επαναλήψεις φτάσουν σε έναν τεράστιο αριθμό, ο οποίος ξεπερνάει τον χρόνο ζωής του οπλισμένου σκυροδέματος έτσι και αλλιώς. Η λειτουργικότητα της γέφυρας και των πλακών καταστρώματων από οπλισμένο σκυρόδεμα, μπορεί να επηρεαστεί από την κόπωση του οπλισμένου σκυροδέματος.

Τα δοκίμια που εξετάστηκαν στην έρευνα των Schlafli & Bruhwiler (1998) κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τις απαραίτητες πρακτικές σχεδιασμού των πλακών από οπλισμένο σκυρόδεμα έναντι της κόπωσης. Όμως όταν οι απαραίτητες πρακτικές αυτές δεν ακολουθούνται στην κατασκευή, πράγμα που έχει συμβεί στις υφιστάμενες γέφυρες που έχουν κατασκευαστεί πριν από 40 και 50 χρόνια, τότε η αντοχή στις καταπονήσεις λόγω κόπωσης του οπλισμένου σκυροδέματος μειώνεται σημαντικά.

Στην μελέτη τους οι Petrou & Perdikaris (1998) σημειώνουν πως η κόπωση των πλακών οπλισμένου σκυροδέματος είναι ένα σύνθετο πρόβλημα, που περιλαμβάνει την κόπωση τόσο του σκυροδέματος όσο και του οπλισμού και την αλληλεπίδραση των μηχανισμών κόπωσης, ιδιαίτερα στις οδικές γέφυρες που η κόπωση προέρχεται από τα κινητά φορτία. Στην πειραματική τους μελέτη, οι Petrou & Perdikaris (1998) χρησιμοποίησαν το δοκίμιο του Σχήματος 5.4 το οποίο είναι μια πλάκα σκυροδέματος στηριζόμενη με 4 ράβδους οπλισμού και πάχος τα 3,5 εκατοστά.



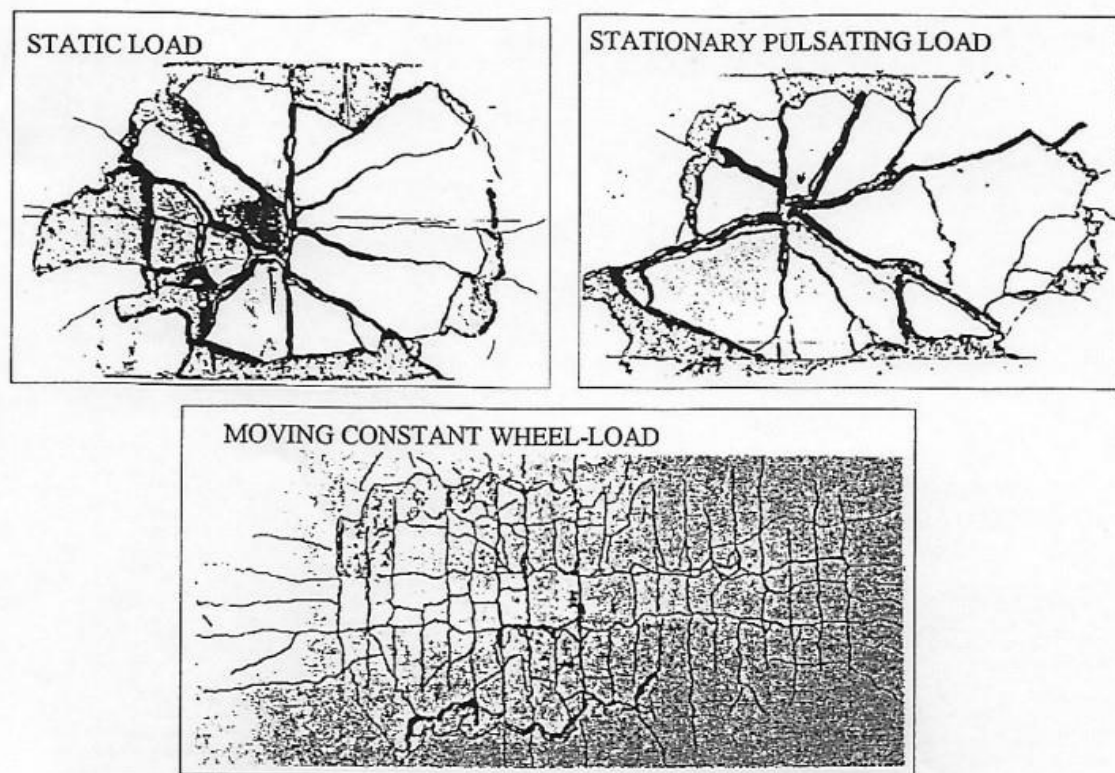
Σχήμα 5.4: Δείγμα πλάκας σκυροδέματος καταστρώματος γέφυρας (Petrou & Perdikari, 1998)

Εφαρμόστηκε στατικό, στατικό παλλόμενο και συνεχώς κινητό φορτίο τροχού στο κέντρο κάθε μίας εκ των τριών λωρίδων που σχηματίζει ο κάνναβος στο Σχήμα 5.4 με τις εξής παραδοχές 1) Αναλογίες χάλυβα οπλισμού εγκάρσια και διαμήκες 0,7% και 0,35% αντίστοιχα και 2) Αναλογίες χάλυβα εγκάρσια και διαμήκες 0,3% και στις δύο περιπτώσεις.

Στην περίπτωση του στατικού φορτίου παρατηρήθηκε ενίσχυση της τελικής στατικής αντοχής του καταστρώματος χάρη στην παρουσία πλευρικής και περιστροφικής συγκράτησης, έως και 3 φορές παραπάνω από την εκτιμώμενη. Η διάτρηση επετεύχθη και στις δύο παραδοχές στη μέγιστη παραμόρφωση της πλάκας σε λιγότερο από το μισό πάχος της. Παρόλο που η πλευρική συγκράτηση που προσφέρει ο οπλισμός αύξησε τη αντοχή της πλάκας, οδήγησε στη εμφάνιση του φαινομένου του λυγισμού. Για την αποφυγή της εμφάνισης του φαινομένου αυτού προτείνεται η μείωση του απαιτούμενου οπλισμού και την ανάλυση των πλακών ως διπλής κατεύθυνσης, και όχι σαν εγκάρσιες δοκούς.

Η “αντίδραση” του καταστρώματος υπό σταθερά παλλόμενο φορτίο παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με το στατικό φορτίο. Το σταθερό παλλόμενο φορτίο επιβάλλεται κατά μήκος του καταστρώματος και στις δύο κατευθύνσεις, έως ότου παρουσιαστούν τα πρώτα δείγματα αστοχίας μέσω ρωγμών, παρατείνοντας με αυτό τον τρόπο το φαινόμενο της κόπωσης. Σε αντίθεση με την πρώτη φόρτιση, η διατμητική αστοχία διάτρησης δεν αποτελεί την κύρια αιτία αστοχίας, αλλά η διαρροή του οπλισμού. Η συσσώρευση των βλαβών και η κάμψη που δέχεται η πλάκα συνεπάγονται την μείωση της τελικής αντοχής κατά 88% συγκριτικά με την στατική εφαρμογή.

Στις πλάκες καταστρωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα, η φόρτιση που προέρχεται από ένα κινητό φορτίο, ένα όχημα, επιταχύνει την κόπωση και την βλάβη της πλάκας και οι ρωγμές που παρουσιάζονται μεγαλώνουν με την πάροδο του χρόνου. Στο Σχήμα 5.5, παρουσιάζεται ο τρόπος που δημιουργείται η κόπωση στην πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος μετά από 2.000.000 εκατομμύρια επαναλήψεις των κινούμενων φορτίων (τρίτο σχήμα) και ο τρόπος αστοχίας στις περιπτώσεις στατικού και σταθερά παλλόμενου φορτίου (Petrou&Perdikaris,1998). Η ανάπτυξη των βλαβών εξελίσσεται σε τρία στάδια: ταχεία αύξηση ρυθμού ανάπτυξης βλαβών, σταθερός ρυθμός και τέλος μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής, οι υπόλοιπες ακολουθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 5.5: Μοτίβο και τρόπος κόπωσης της πλάκας καταστρώματος της οδού από οπλισμένο σκυρόδεμα (Petrrou & Perdikari,1998)

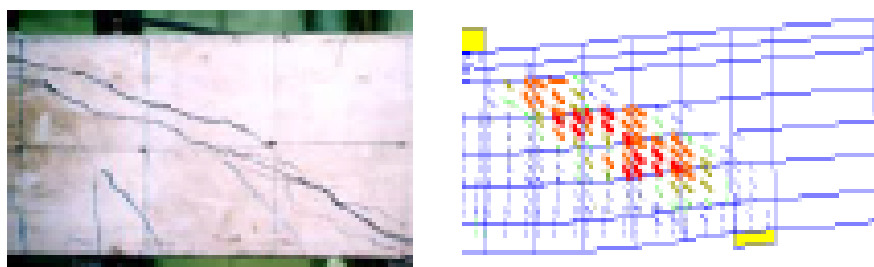
Η βασικότερη αιτία που θεωρείται ότι θα οδηγήσει στην κόπωση της πλάκας του καταστρώματος είναι η αστοχία συνάφειας ανάμεσα στο χάλυβα και το σκυρόδεμα, καθώς οι διαφορετικές παραμορφώσεις προξενούν την αποκόλληση του οπλισμού. Η χρήση πρόσμικτων στο σκυρόδεμα, αυξάνει την θλιπτική αντοχή της πλάκας καταστρώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα. Επίσης βελτιώνει τη συμπεριφορά του σκυροδέματος έναντι της κόπωσης αυτού, ενώ αυξάνει και την αντοχή του έναντι των περιβαλλοντικών συνθηκών. (Petrrou&Perdikaris,1998).

Ο χρόνος ζωής της κόπωσης του σκυροδέματος συνδέεται και με την πιθανή φθορά και οξείδωση του οπλισμού της πλάκας σκυροδέματος η οποία αυξάνει και μεγαλώνει όσο η βλάβη του οπλισμού αλληλεπιδρά με την πλάκα σκυροδέματος (Petrrou&Perdikaris,1998).

Στην μελέτη των Maekawa et.al (2006) η κόπωση σε πλάκες σκυροδέματος σε καταστρώματα οδικών γεφυρών μελετήθηκε μέσω μιας πειραματικής διάταξης που εφάρμοσε μικρές φορτίσεις αλλά πολλαπλών επαναλήψεων και κύκλων σε οδικές γέφυρες από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Οι βλάβες στις πλάκες σκυροδέματος των καταστρωμάτων των γεφυρών πολλές φορές διαπιστώνονται κατά την επιθεώρηση των γεφυρών και υπάρχει η ανάγκη για γρήγορη και έγκαιρη επιδιόρθωση αυτών των αστοχιών. Σε αυτήν την πειραματική διάταξη η κόπωση των πλακών έχει συνδεθεί και με την οξείδωση του χάλυβα του οπλισμού του σκυροδέματος (Maekawa et.al,2006).

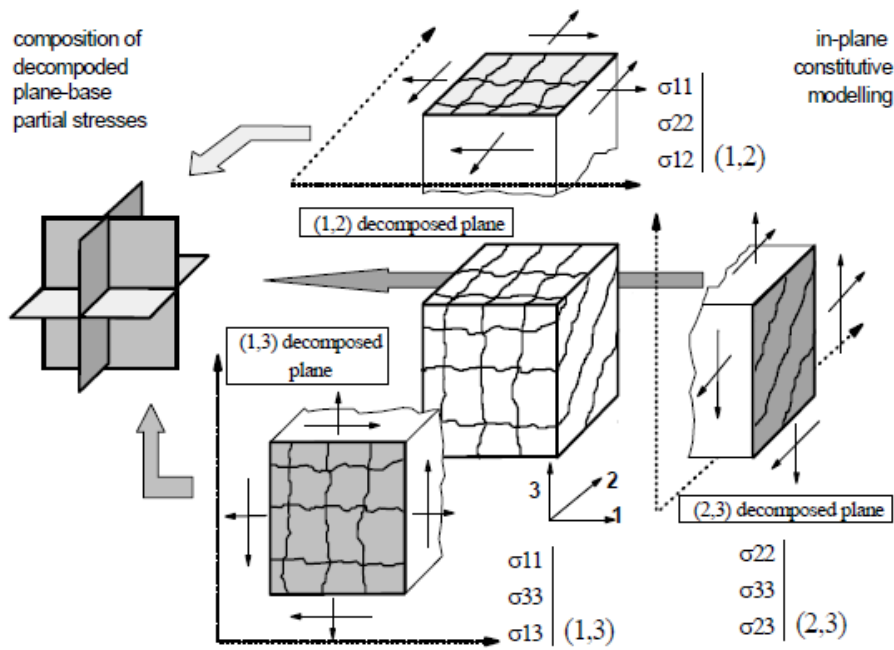
Ο στόχος των ερευνητών ήταν η ανάπτυξη ενός επαληθευμένου μοντέλου 3D ανάλυσης της κόπωσης των πλακών από οπλισμένο σκυρόδεμα που χρησιμοποιούνται στα καταστρώματα των γεφυρών.



Σχήμα 5.6: Το μοντέλο ανάλυσης της πλάκας σκυροδέματος (Maekawa et.al,2006).

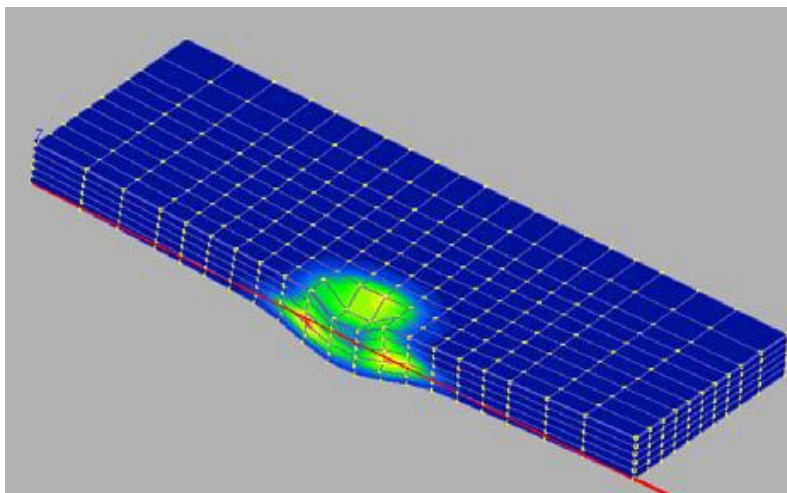
Ο μηχανισμός μεταφοράς των τάσεων στις πλάκες σκυροδέματος περιλαμβάνει ένα μοντέλο με 3 δυνάμεις πρόκλησης κόπωσης των πλακών καταστρωμάτων γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι δυνάμεις αυτές δημιουργούν εφελκυσμό, θλίψη και διάτμηση των ρωγμών σε συνάρτηση με τον χρόνο. Οι διαγώνιες ρωγμές στις πλάκες καταστρωμάτων σκυροδέματος εξαιτίας των επαναλαμβανομένων φορτίσεων από κινητά φορτία είναι ένας χαρακτηριστικός τύπος κόπωσης των πλακών σκυροδέματος (Maekawa et.al,2006)

Η κόπωση των πλακών καταστρωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα συμβαίνει σε 3 διαστάσεις από σταθερά και κινητά φορτία όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.7 του μοντέλου που εφαρμόστηκε.



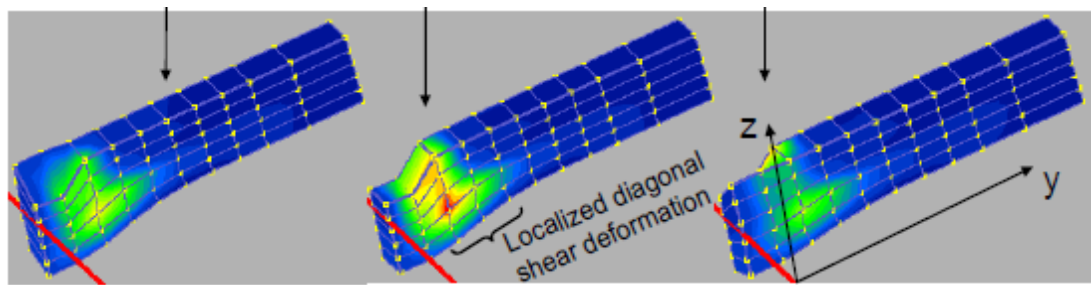
Σχήμα 5.7: Ορθογωνικό μοντέλο δοκιμών κόπωσης σκυροδέματος ((Maekawa et.al,2006).

Η κόπωση της πλάκας σκυροδέματος επηρεάζεται λιγότερο από τις εγκάρσιες δυνάμεις αλλά η ίδια η πλάκα επηρεάζεται αρκετά από αυτές. Η προσομοίωση του Σχήματος 5.8 αντιστοιχεί σε 1.000.000 επαναλήψεις δυναμικών κινητών φορτίων από το κατάστρωμα της γέφυρας.



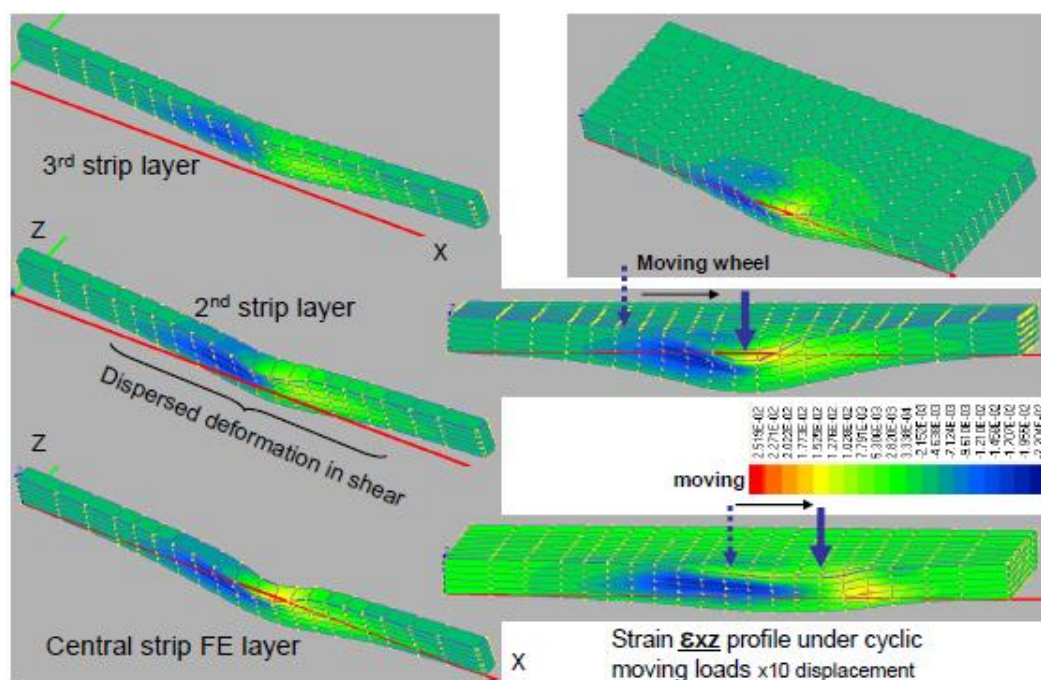
Σχήμα 5.8: Σημείο φόρτισης της πλάκας σκυροδέματος από κινητά φορτία (Maekawa et.al,2006)

Η εγκάρσια παραμόρφωση της πλάκας του καταστρώματος της γέφυρας από σπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.9: Εγκάρσια παραμόρφωση της πλάκας καταστρώματος γέφυρας από οπλισμένο σκυρόδεμα (Maekawa et.al,2006)

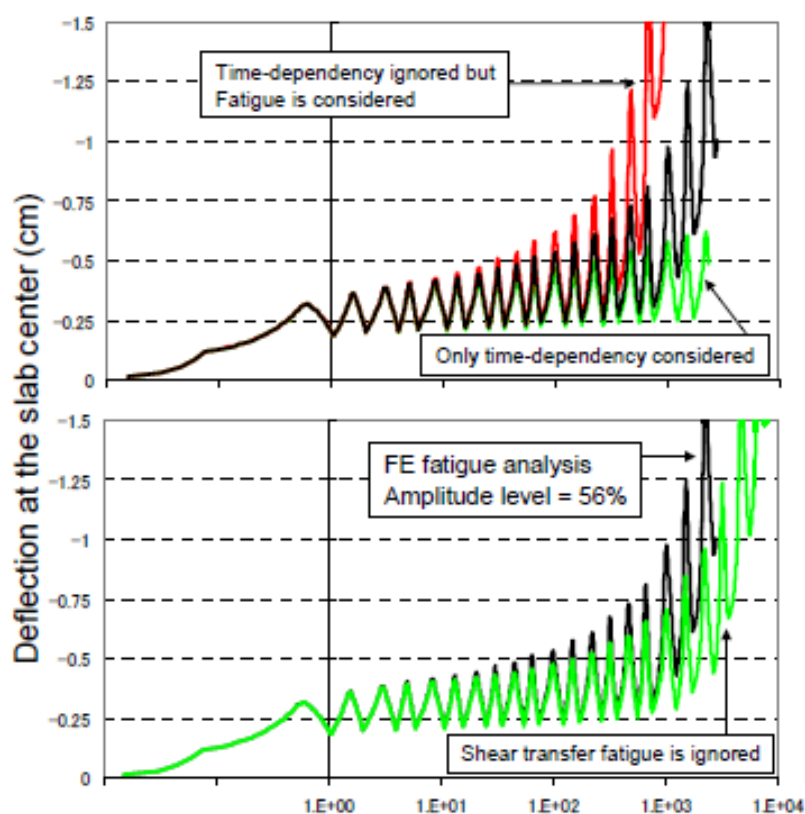
Η πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος στο πείραμα παρουσιάζει αστοχία εξαιτίας των διατμητικών δυνάμεων όταν η επανάληψη της φόρτισης είναι ομόκεντρη στο σημείο όπου πραγματοποιείται η φόρτιση. Στην περίπτωση που εφαρμόζονται κινούμενα φορτία με την επανάληψη των 1.000.000 κύκλων τότε η κόπωση στο σκυρόδεμα εμφανίζεται με την μορφή της διαγώνιας διάτμησης στην εγκάρσια κατεύθυνση όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.10: Εγκάρσια παραμόρφωση της πλάκας καταστρώματος γέφυρας από οπλισμένο σκυρόδεμα εξαιτίας κινούμενων φορτίων (Maekawa et.al,2006)

Η κόπωση στην πλάκα αυξάνεται σταδιακά όταν τα κινητά φορτία εφαρμόζονται με υψηλή επαναληψιμότητα όπως επίσης αυξάνεται και η βύθιση της πλάκας. Επιπρόσθετα όταν η πλάκα σκυροδέματος φορτίζεται σε ένα σταθερό σημείο και όχι από κινούμενα φορτία τότε το διάγραμμα κόπωσης είναι πιο ήπιο. Στην περίπτωση που η φόρτιση πραγματοποιείται από κινούμενα φορτία τότε και η κόπωση της πλάκας αυξάνεται και αυτό επηρεάζει τον χρόνο ζωής και της πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος και συνολικά της γέφυρας (Maekawa et.al,2006).

Η κόπωση της πλάκας σκυροδέματος όταν εφαρμόζονται φορτία με χαμηλή επανάληψη φόρτισης αλλά σε μεγαλύτερο πλάτος εφαρμογής και όχι σημειακά, επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος εξαιτίας των αυξημένων τάσεων φόρτισης της πλάκας. Αυτό φανερώνεται στο επόμενο Σχήμα 5.11.

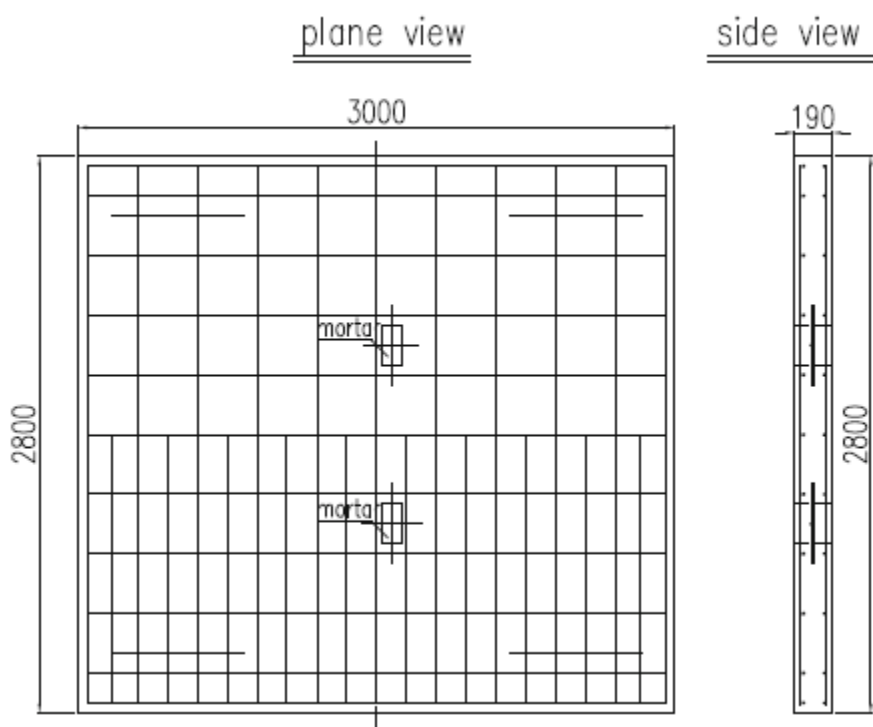


Σχήμα 5.11: Ανάλυση κύκλου ζωής της κόπωσης σκυροδέματος σε συνάρτηση με το πλάτος φόρτισης(Maekawa et.al,2006)

5.2.2 Επίδραση των δονήσεων της κυκλοφορίας σε μια γέφυρα

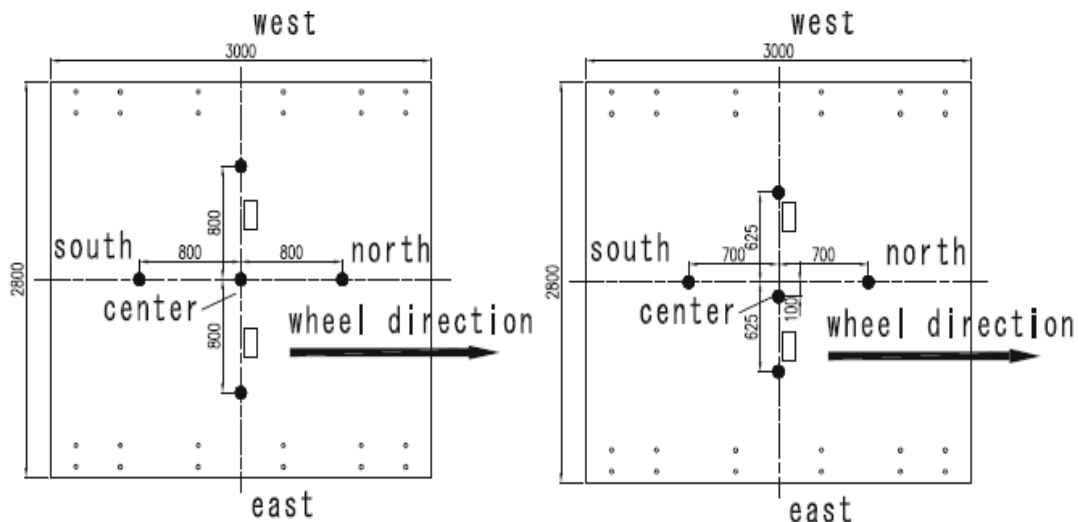
Οι Xu & Masuya (2018) μελετήσαν τις επιπτώσεις των δονήσεων στην κόπωση των πλακών καταστρωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα που προκαλείται από τα οχήματα που διασχίζουν την γέφυρα.

Κατασκευάστηκε μια πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος με διαστάσεις 3 επί 2,80 μέτρα και πάχος 19 εκατοστά ενώ στο σκυρόδεμα προστέθηκαν και ίνες άνθρακα. Το δοκίμιο αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.12 ενώ η φόρτιση της πλάκας από το κινητό φορτίο πραγματοποιήθηκε με ταχύτητα 2 km/hr και βάρος του κινητού φορτίου ήταν 160 kN και πραγματοποιήθηκαν 135.000 επαναλήψεις.



Σχήμα 5.12: Δείγμα πλάκας σκυροδέματος για τις ανάγκες της έρευνας των Xu & Masuya (Xu & Masuya, 2018)

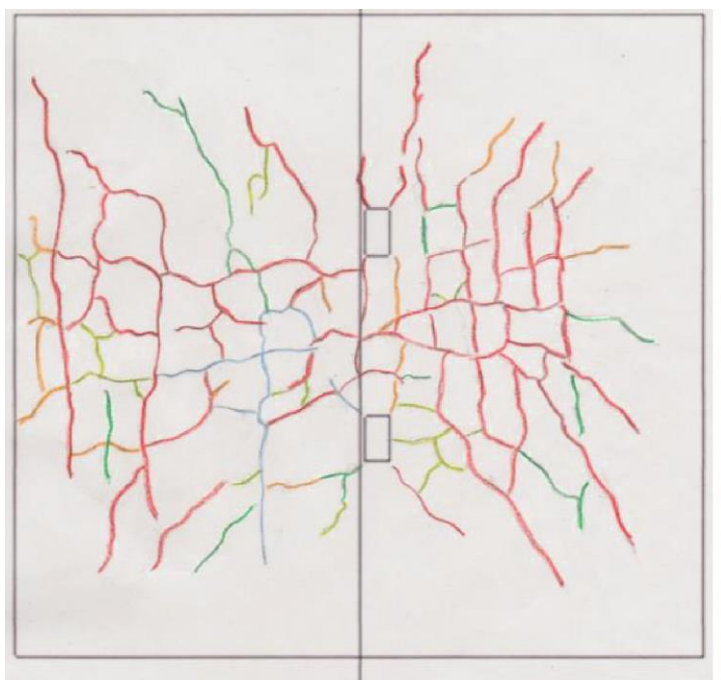
Για την ανίχνευση της κόπωσης από τις δονήσεις τοποθετήθηκαν αισθητήρες στην πλάκα σκυροδέματος όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.13.



Σχήμα 5.13: Σημεία τοποθέτησης αισθητήρων στην πλάκα σκυροδέματος (Χυ & Masuya, 2018)

Η κόπωση του σκυροδέματος από τις δονήσεις που προκαλούνται αρχίζουν και εμφανίζονται μετά τις 5000 επαναλήψεις. Στο Σχήμα 5.14 με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα σημεία στα οποία παρουσιάστηκαν ρωγμές στην πλάκα του δείγματος. Στην συνέχεια του πειράματος και μέχρι να φτάσουν στις 13.000 επαναλήψεις της φόρτισης της πλάκας με το κινητό φορτίο, οι ρωγμές αυτές μεγάλωναν και εξαπλώνονταν σε όλο το μήκος της πλάκας (Χυ & Masuya, 2018).

Οι ρωγμές έφτασαν σε μήκος τα 7 χιλιοστά μετά από 25.000 επαναλήψεις και στην συνέχεια η αύξηση του μήκος των ρωγμών και της κόπωσης του σκυροδέματος μειωνόταν όση ώρα συνεχιζόταν η φόρτιση της πλάκας σκυροδέματος με το κινητό φορτίο. Η συχνότητα της δόνησης προκάλεσε κόπωση στο σκυρόδεμα κυρίως στο κέντρο της πλάκας. Η μεγαλύτερη ρωγμή έφτασε σε πλάτος τα 25 χιλιοστά στην πλάκα του σκυροδέματος μετά τις 135.000 επαναλήψεις και είχε κάθετη διεύθυνση. Όπως προαναφέρθηκε παρουσιάστηκε εντονότερα στους πρώτους κύκλους επαναλήψεων της φόρτισης (5000 επαναλήψεις) και μετά μειώθηκε ο ρυθμός αύξησης της κόπωσης της πλάκας σκυροδέματος.

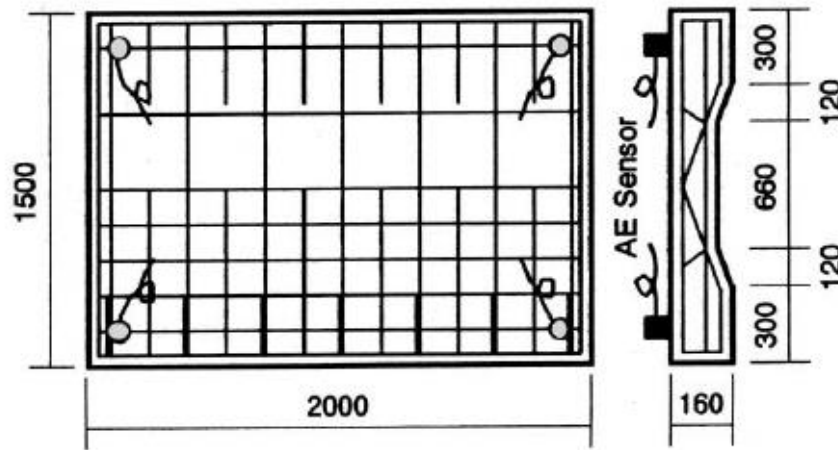


Σχήμα 5.14: Παρουσίαση κόπωσης και διανομή σε όλο το μήκος της πλάκας (Xu & Masuya, 2018)

5.2.3 Επίδραση των ακουστικών εκπομπών της κυκλοφορίας στην κόπωση

Οι Yuyama et.al (2001) αξιολόγησαν την κόπωση του σκυροδέματος στα καταστρώματα των γεφυρών μέσω μη καταστρεπτικών ελέγχων όπως είναι με τις ακουστικές μεθόδους. Εφαρμόστηκε η μέθοδος των ακουστικών εκπομπών παλμών τόσο σε ένα δοκίμιο οπλισμένου σκυροδέματος στο εργαστήριο όσο και σε μια γέφυρα κάτω από πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων.

Το εργαστηριακό δοκίμιο οπλισμένου σκυροδέματος είχε μήκος 20 εκατοστά και πλάτος 15 εκατοστά ενώ το πάχος του ήταν 1,6 εκατοστά. Στο δοκίμιο αυτό, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.15, εφαρμόστηκαν φορτίσεις επαναλαμβανόμενες με βάρος από 150 kN και έφτασαν μέχρι τα 270 kN. Όπως είναι όμως κατανοητό, το πάχος των 1,6 εκατοστών δεν εφαρμόζεται στην πραγματικότητα και για αυτό τον λόγο, έγιναν και μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας και σε μια γέφυρα με πραγματικό πάχος πλάκας τα 20 εκατοστά περίπου.



Σχήμα 5.15: Εργαστηριακό δοκίμιο πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος (Yuyama et.al,2001)

5.2.4 Επίδραση της “ηλικίας” μιας γέφυρας

Οι Felhman & Vogel (2009) σημείωσαν πως οι περισσότερες γέφυρες έχουν κατασκευαστεί στην δεκαετία του 1960 και 1970, τουλάχιστον για την Ευρώπη. Αυτό έχει σαν συνέπεια οι γέφυρες αυτές να κατασκευάστηκαν χωρίς να ακολουθούνται κάποιοι κανόνες σχεδιασμού και κατασκευής όπως είναι ο Ευρωκώδικας ή οι Αμερικάνικοι Κανονισμοί (AASHTO). Από εκείνες τις εποχές όμως, η κυκλοφοριακή κίνηση και φόρτιση των γεφυρών έχει αυξηθεί σημαντικά ενώ και τα φορτία των αυτοκινήτων και των φορτηγών που διασχίζουν τις γέφυρες έχουν αυξηθεί ως συνέπεια των τεχνολογικών εξελίξεων.

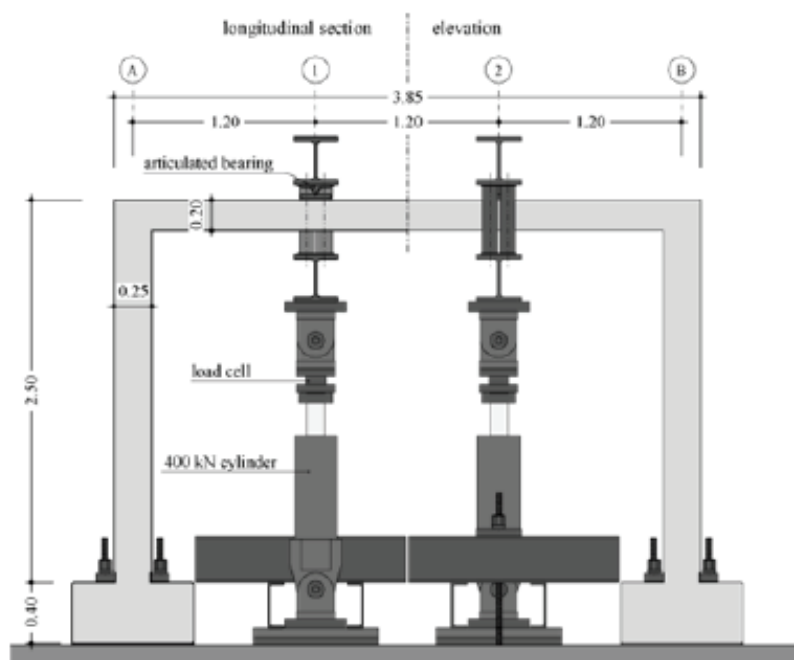
Η μελέτη των Fehلمان & Vogel (2009) πραγματοποιήθηκε σε μια γέφυρα ηλικίας 33 χρονών την εποχή που εκτελέστηκε η μελέτη τους και διαπιστώθηκε πως η κόπωση του οπλισμένου σκυροδέματος στις πλάκες καταστρωμάτων γεφυρών συνοδευόταν συνήθως και από διάβρωση του χάλυβα οπλισμού των γεφυρών.

Έχοντας δεδομένα από τα κατασκευαστικά σχέδια γεφυρών της Ελβετίας, οι συγγραφείς της μελέτης έφτιαξαν τα δοκίμια τους προκειμένου να προχωρήσουν στην μελέτη κόπωσης σε υφιστάμενες γέφυρες.

Το μέσο μήκος των γεφυρών που κατασκευάστηκαν στην Ελβετία τις δεκαετίες του 1960 και 1970 είναι 30 μέτρα και το πάχος της πλάκας του καταστρώματος είναι 40 εκατοστά. Η αντοχή σε εφελκυσμό του οπλισμένου σκυροδέματος είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην δημιουργία των φθορών λόγω κόπωσης στις πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος στις

γέφυρες και όπως είναι γνωστό το σκυρόδεμα έχει μειωμένη αντοχή στον εφελκυσμό. Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή αυτών των γεφυρών ήταν τσιμέντο Portland και ο όγκος που χρησιμοποιήθηκε ήταν 350 Kg/m^3 . Η αντοχή σε θλίψη μετά από 28 ημέρες του οπλισμένου σκυροδέματος ήταν 54 N/mm^2 .

Οι Fehman & Vogel (2009) δημιούργησαν δυο πανομοιότυπα δοκίμια τα οποία όμως είχαν διαφορετική ηλικία και ιστορία ως προς το πόσα χρόνια ήταν σε λειτουργία. Δηλαδή έγινε η παραδοχή πως τα δοκίμια αυτά βρίσκονταν σε λειτουργία διαφορετικά χρόνια και είχαν ήδη υποστεί τις συνέπειες των φορτίσεων από τα αυτοκίνητα και φορτηγά που διέσχιζαν την γέφυρα. Τα δοκίμια αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.16.



Σχήμα 5.16: Δοκίμια και τρόπος εφαρμογής φορτίσεων στην μελέτη των Fehman & Vogel (Fehman & Vogel, 2009)

Στην συνέχεια, στα δοκίμια αυτά εφαρμόστηκαν τάσεις των 400 kN, από κυλίνδρους σε μια περιοδικότητα επαναλήψεων, ενώ η τάση αυτή κατανεμήθηκε σε όλο το μήκος των δοκιμίων. Παράλληλα μέσω ακουστικών μεθόδων διερευνήθηκε και η κόπωση που υφίστανται οι χάλυβες οπλισμού των δοκιμίων. Οι δοκιμές των Fehman & Vogel (2009) έδειξαν πως οι φθορές κόπωσης παρουσίασαν 30% μικρότερο χρόνο ζωής στο δοκίμιο που είχε μεγαλύτερες φορτίσεις σε σχέση με το δοκίμιο που ήταν νεότερο από πλευράς φορτίσεων που είχε υποστεί.

5.2.5 Εμφάνιση ρωγμών λόγω κόπωσης

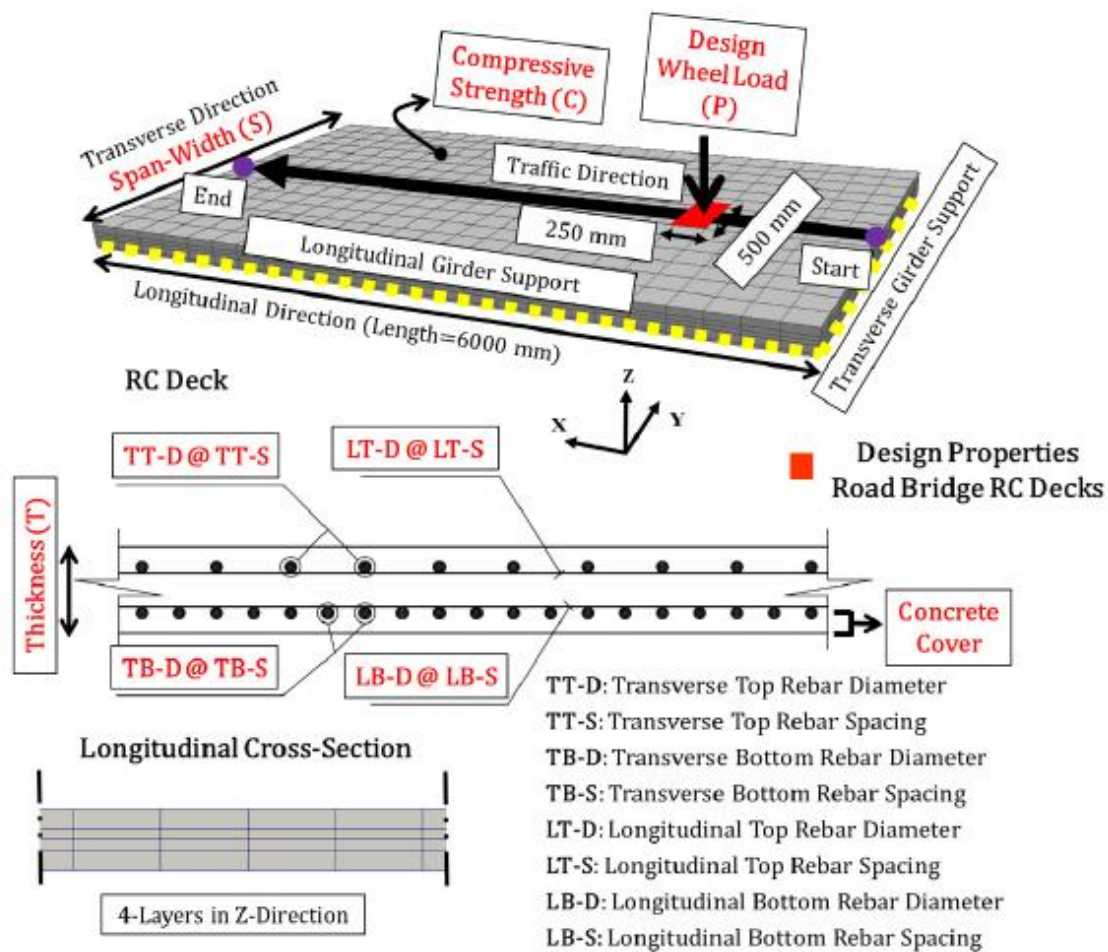
Στην μελέτη των Fathala et.al (2019) έγινε η προσπάθεια της δημιουργίας ενός μοντέλου πρόβλεψης του χρόνου δημιουργίας των ρωγμών που προκαλούνται από την κόπωση του σκυροδέματος. Η κόπωση στις πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται στα καταστρώματα των γεφυρών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι η μηχανική καταπόνηση της γέφυρας αλλά και από περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι οποίοι είναι όμως τοπικού ενδιαφέροντος και εξαρτώνται από την τοποθεσία που βρίσκεται το έργο. Η βλάβη του σκυροδέματος λόγω της κόπωσης αυτού παρουσιάζεται λόγω θλίψης και κάμψης εξαιτίας του φορτίου και η ελαστικότητα του σκυροδέματος μειώνεται μέσω της παρουσίας ρωγμών σε αυτό. Οι Fathala et.al (2019) στην μελέτη τους εξέτασαν την δυνατότητα της πρόβλεψης του βαθμού κόπωσης των πλακών από οπλισμένο σκυρόδεμα που χρησιμοποιούνται στα καταστρώματα των γεφυρών. Το μοντέλο που εξέτασαν παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.17.

Τα κριτήρια της πρόβλεψης βασίστηκαν σε προηγούμενες μελέτες και κριτήρια αστοχίας όπως είναι η παρουσία διατμητικής αστοχίας του σκυροδέματος πριν την εμφάνιση των ρωγμών λόγω κόπωσης (Tanaka et.al,2017).

Τα μηχανικά κριτήρια στην παρουσία ρωγμών κόπωσης στα καταστρώματα των γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι:

- το πάχος της πλάκας του καταστρώματος,
- το πλάτος της πλάκας καταστρώματος,
- η ενίσχυση από οπλισμό στο κάτω μέρος της πλάκας
- το μέγεθος των φορτίων τα οποία δέχεται η γέφυρα και συγκεκριμένα η πλάκα καταστρώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Στην μελέτη των Fathala et.al(2019) εφαρμόστηκε φορτίο της τάξης των 100 - 300 kN σύμφωνα και με τους Ιαπωνικούς κανονισμούς (Japanese Specifications for Highway Bridges Part-III (JRA 2012)).



Σχήμα 5.17: Μοντέλο δοκιμών πλακών από οπλισμένο σκυρόδεμα στην μελέτη των Fathala et.al (Fathala et.al,2019)

Το πλάτος της πλάκας του καταστρώματος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα της πρόβλεψης της κόπωσης, καθώς όσο μικρότερο είναι το πλάτος τόσο αυξάνεται η διατμητική τάση και η αστοχία που εμφανίζουν οι πλάκες από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η αυξημένη διατμητική τάση είναι ο «προπομπός» για την παρουσίαση της κόπωσης των πλακών οπλισμένου σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται στα καταστρώματα των γεφυρών. Μια διαφορετική παράμετρος που έχει σημαντικό ρόλο στην επιμήκυνση του χρόνου ζωής της κόπωσης που εμφανίζεται στις πλάκες από οπλισμένο σκυρόδεμα, είναι το πάχος της πλάκας του καταστρώματος. Μια αύξηση κατά 5% της πλάκας από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να αυξήσει κατά 45% τον χρόνο ζωής της ρωγμής που οφείλεται στην κόπωση του σκυροδέματος.

Στην Ιαπωνία, τα τελευταία χρόνια, το πάχος των καταστρωμάτων των γεφυρών κατασκευάζεται στα 24 εκατοστά δίνοντας μεγαλύτερο χρόνο ζωής στις ρωγμές κόπωσης του σκυροδέματος (Fathala,et.al,2019).

Το μοντέλο των Fathala et.al (2019) βασισμένο στην μέθοδο των υπολογισμών με πεπερασμένα στοιχεία και λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν (πλάτος πλάκας, πάχος πλάκας, βάρος φορτίου, αριθμός επαναλήψεων) μπορεί να προβλέψει τον χρόνο ζωής της κόπωσης που παρουσιάζουν οι πλάκες καταστρωμάτων γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα σε καινούριες και υπό κατασκευή γέφυρες. Αυτό βοηθάει στον σχεδιασμό των γεφυρών και των καταστρωμάτων κατά το στάδιο της μελέτης και του σχεδιασμού, προκειμένου να επιμηκύνεται ο χρόνος ζωής, είτε είναι καλωδιωτές γέφυρες, είτε είναι κρεμαστές γέφυρες, είτε είναι γέφυρες κατασκευασμένες με την μέθοδο της προβολοδόμησης.

Όπως έχει αναλυθεί η κόπωση του σκυροδέματος στις πλάκες των καταστρωμάτων των γεφυρών μπορεί να προέρθει είτε από τα κινητά φορτία της γέφυρας που την διασχίζουν είτε από περιβαλλοντικούς παράγοντες που έχουν να κάνουν με την τοποθεσία του έργου και την τοποθεσία στην οποία βρίσκεται η γέφυρα.

5.2.6 Επίδραση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην κόπωση

Οι Bayane et.al (2019) ανέλυσαν στην μελέτη τους, τις επιδράσεις που μπορεί να έχει το περιβάλλον σε συνδυασμό με τους κυκλοφοριακούς φόρτους που διασχίζουν την γέφυρα. Διότι, το φαινόμενο της κόπωσης του σκυροδέματος είναι ένα σύνθετο πρόβλημα που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι το περιβάλλον, τα υλικά κατασκευής, οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών αλλά και η κυκλοφορία και οι φορτίσεις που υφίσταται οι γέφυρες. Σύμφωνα με τους Bayane et.al (2019), το 75% των γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα έχει κατασκευαστεί στην Ευρώπη, πριν από το 1988. Δηλαδή έχουν ήδη διανύσει περίπου 35 χρόνια αδιάληπτης λειτουργίας και για αυτό τον λόγο διερευνάται η επίδραση της κόπωσης του σκυροδέματος στις πλάκες αυτών των γεφυρών.

Οι Bayane et.al (2019) ανέπτυξαν ένα μοντέλο πρόβλεψης των φθορών κόπωσης των καταστροφικών των γεφυρών βασιζόμενοι στην παρακολούθηση των πραγματικών στοιχείων της γέφυρας και όχι σε εργαστηριακές μελέτες. Αυτό που έκαναν οι μελετητές ήταν η ποσοτικοποίηση της επίδρασης των κινητών φορτίων που δέχεται η γέφυρα μέσω πραγματικών μετρήσεων κυκλοφοριακών φόρτων, καθώς επίσης και η ποσοτικοποίηση της επίδρασης της θέσης των οχημάτων στην γέφυρα σε συνδυασμό με τις θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούσαν σε αυτήν. Με άλλα λόγια θέλησαν να μελετήσουν την επίδραση και του περιβάλλοντος σε συνδυασμό με την κυκλοφοριακή φόρτιση της γέφυρας στην κόπωση του σκυροδέματος. Το μοντέλο αυτό μπορεί αξιοποιηθεί για την αξιολόγηση της κόπωσης σε υφιστάμενες γέφυρες βασιζόμενοι σε πραγματικά στοιχεία και μετρήσεις.

Η γέφυρα που εφαρμόστηκε η μέθοδος αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.18 και είναι η γέφυρα Crêt de l'Anneau η οποία κατασκευάστηκε το 1959 στην Ελβετία, έχει μήκος περίπου 200 μέτρα και βρίσκεται 20 χιλιόμετρα από τα σύνορα με την Γαλλία. Η γέφυρα κατασκευάστηκε από οπλισμένο σκυρόδεμα και στηρίζεται σε μεταλλικές δοκούς.



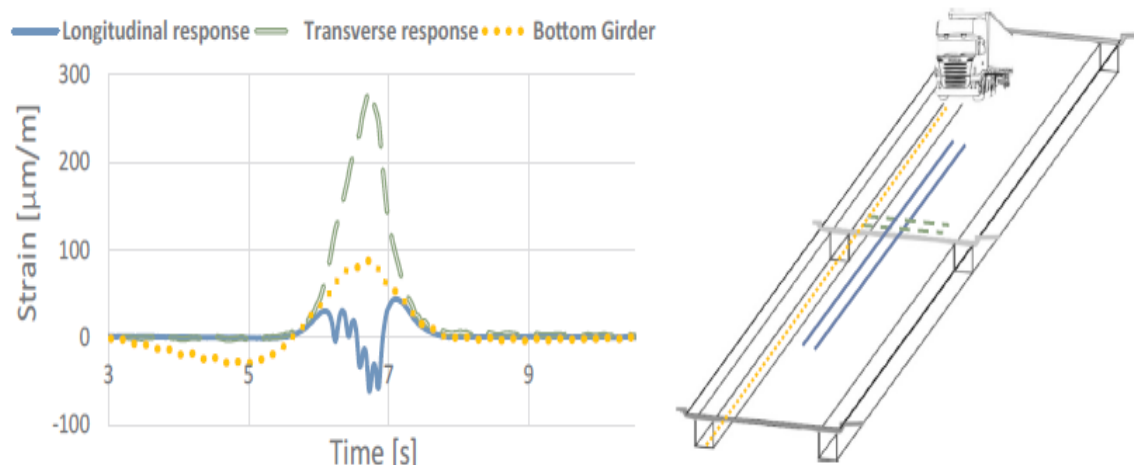
Σχήμα 5.18: Γέφυρα Crêt de l'Anneau (Bayane et.al,2019)

Το σύστημα παρακολούθησης της γέφυρας μετράει σε καθημερινή βάση και αποθηκεύει τα δεδομένα των μετρήσεων στις εγκάρσιες και διαμήκης καταπονήσεις που δέχεται αυτή από την κυκλοφορία των αυτοκινήτων. Επίσης μετράει και σε καθημερινή βάση τις θερμοκρασιακές μεταβολές κατά την διάρκεια της ημέρας.

Συγκεντρώθηκαν συνολικά 44 GB δεδομένων μετρήσεων τα οποία υπέστησαν επεξεργασία από τους μελετητές ενώ το σύστημα παρακολούθησης εγκαταστάθηκε στην γέφυρα το 2016.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν ξεχωριστές μετρήσεις για την επίδραση των κινητών φορτίων με την τοποθέτηση ενός φορτηγού με το νόμιμο μέγιστο βάρος των 400 kN και διέσχιζε καθημερινά την γέφυρα με διαφορετικές ταχύτητες (80 km/h, 40 Km/h, 30 Km/h και 10 Km/h).

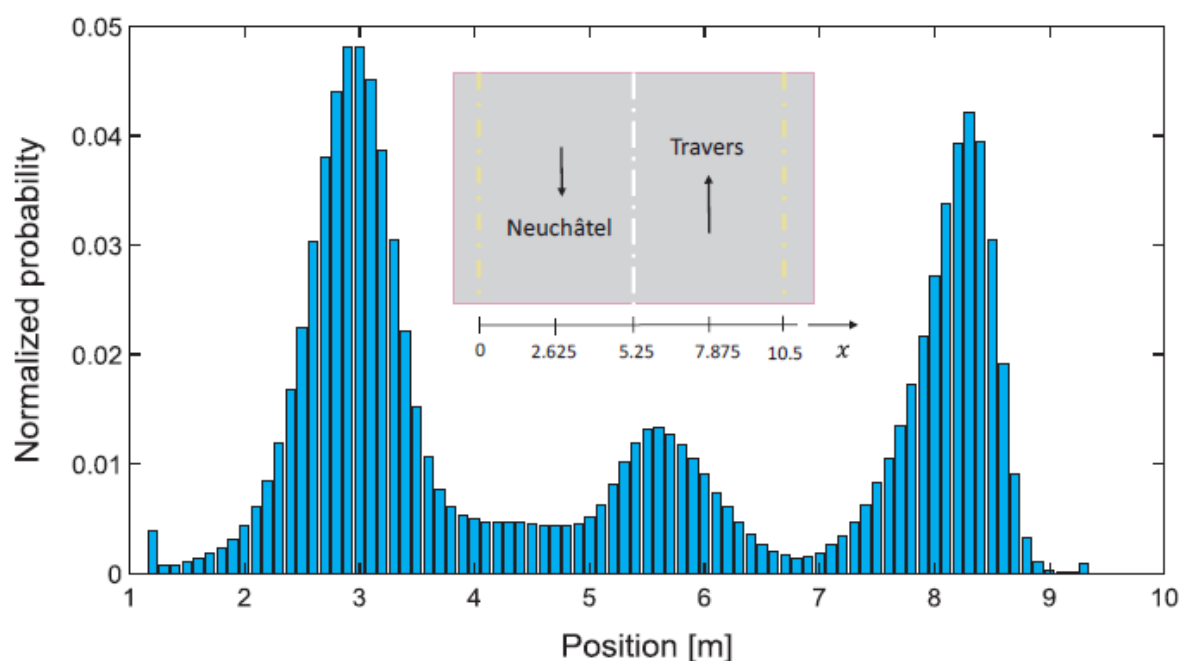
Κατά την διάρκεια που διέσχιζε την γέφυρα το φορτηγό, αναπτύσσονταν εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις στο κατάστρωμα της γέφυρας. Στο Σχήμα 5.19 παρουσιάζονται οι εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις όταν το φορτηγό κινήθηκε με ταχύτητα 30 Km/h. Η θέση του φορτηγού στην γέφυρα σε συνδυασμό με το πάχος της πλάκας καταστρώματος επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων.



Σχήμα 5.19: Τάσεις που αναπτύχθηκαν στην γέφυρα από το φορτηγό (Bayane et.al,2019)

Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν για να συσχετισθούν με τα αποτελέσματα των κυκλοφοριακών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με το βάρος των οχημάτων που διασχίζουν την γέφυρα και την θέση των οχημάτων πάνω σε αυτήν. Η στατιστική ανάλυση και κατανομή των αποτελεσμάτων των κυκλοφοριακών μετρήσεων πραγματοποιήθηκε για ένα διάστημα λειτουργίας της γέφυρας για 120 χρόνια, 60 χρόνια που ήδη λειτουργεί η γέφυρα και για τα επόμενα 60 χρόνια που θα λειτουργεί (Bayane et.al,2019).

Από τις κυκλοφοριακές μετρήσεις, τα οχήματα διαχωρίστηκαν σε ελαφριά οχήματα και βαριά οχήματα. Εξετάστηκε ο ρόλος τους στις τάσεις που αναπτύσσονται στην γέφυρα κατά την διάρκεια που αυτά την διασχίζουν. Υπολογίστηκε και η θέση που τα οχήματα βρίσκονται πάνω στην γέφυρα, δηλαδή σε ποια κατεύθυνση και σε ποιο σημείο της γέφυρας βρίσκονται όταν αναπτύσσονται οι τάσεις που προκαλούν την κόπωση του σκυροδέματος. Το συνολικό πλάτος της γέφυρας είναι 10,5 μέτρα και το πλάτος των οχημάτων υπολογίστηκε στα 2 μέτρα προκειμένου να υπολογιστεί η θέση του κέντρου βάρους των οχημάτων η οποία είναι 1,2 μέτρα και 9,3 μέτρα από την άκρη του οδοστρώματος στην καλύτερη περίπτωση. Οι θέσεις των οχημάτων αυτές υπολογίστηκαν και για τις 2 κατευθύνσεις της γέφυρας ενώ υπολογίστηκε και η φυγόκεντρος δύναμη που αναπτύσσουν τα οχήματα. Η κατανομή της θέσης των οχημάτων στην γέφυρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.20.

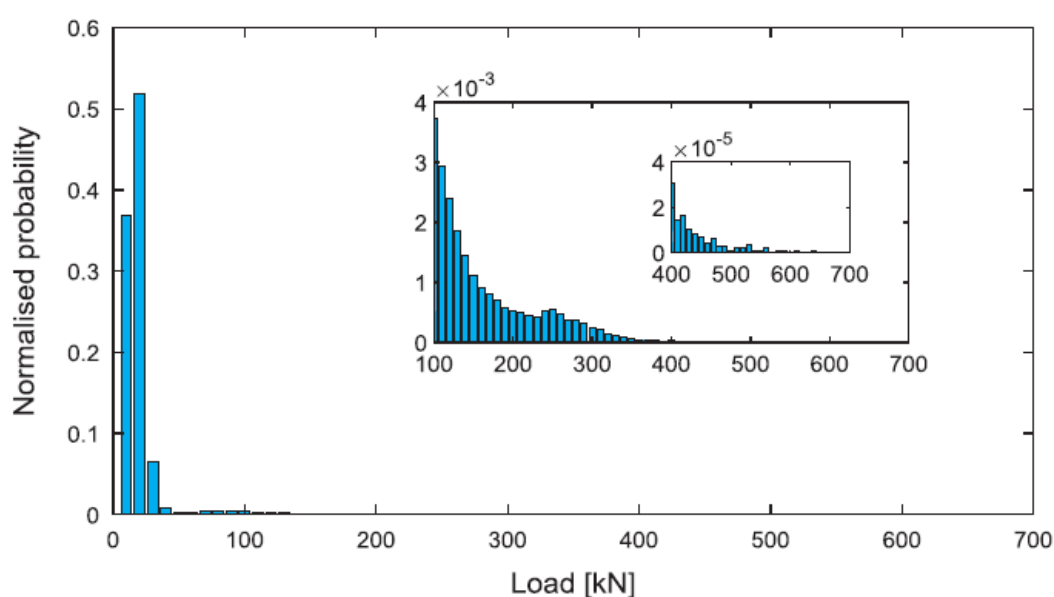


Σχήμα 5.20: Κατανομή της θέσης των οχημάτων και στις 2 κατευθύνσεις (Bayane et.al,2019)

Για τον υπολογισμό του βάρους των οχημάτων που διέσχισαν την γέφυρα αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος. Ο αλγόριθμος πήρε τα δεδομένα των κυκλοφοριακών μετρήσεων και τα ανέλυσε σε συνδυασμό με τα δεδομένα του φορτηγού των 400 kN που χρησιμοποιήθηκε στην αρχή της μελέτης. Το 96% των οχημάτων που διέσχισαν την γέφυρα ήταν αυτοκίνητα και ελαφρά φορτηγά με βάρος μόνο 35 kN. Μόνο 4% ήταν βαριά οχήματα εκ των οποίων τα

110 ξεπερνούσαν και το νόμιμο βάρος των 400 kN και έφταναν μέχρι και τα 640 kN. Επίσης, αυτό που διαπιστώθηκε ήταν πως τα βαριά φορτηγά διέσχισαν την γέφυρα από την μέση του πλάτους των λωρίδων κυκλοφορίας (Bayane et.al,2019).

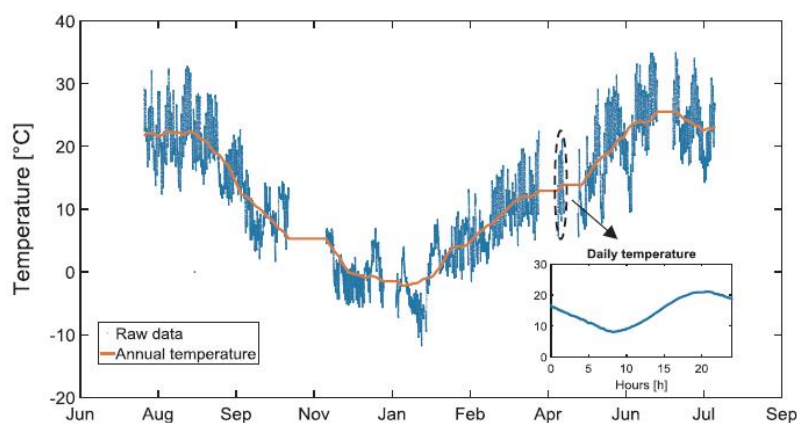
Η κατανομή του βάρους των οχημάτων που διέσχισαν την γέφυρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.21. Ο ρυθμός της αύξησης της κυκλοφορίας υπολογίστηκε από δεδομένα που συλλέχτηκαν από την αρμόδια αρχή διαχείρισης των αυτοκινητοδρόμων της Ελβετίας και περιλάμβαναν μετρήσεις από το 2002. Με βάση αυτές τις μετρήσεις υπολογίστηκε ο ρυθμός αύξησης των κυκλοφοριακών φόρτων στην γέφυρα ο οποίος ήταν 1,6% τον χρόνο.



Σχήμα 5.21: Κατανομή του βάρους των οχημάτων που διέσχισαν την γέφυρα (Bayane et.al,2019)

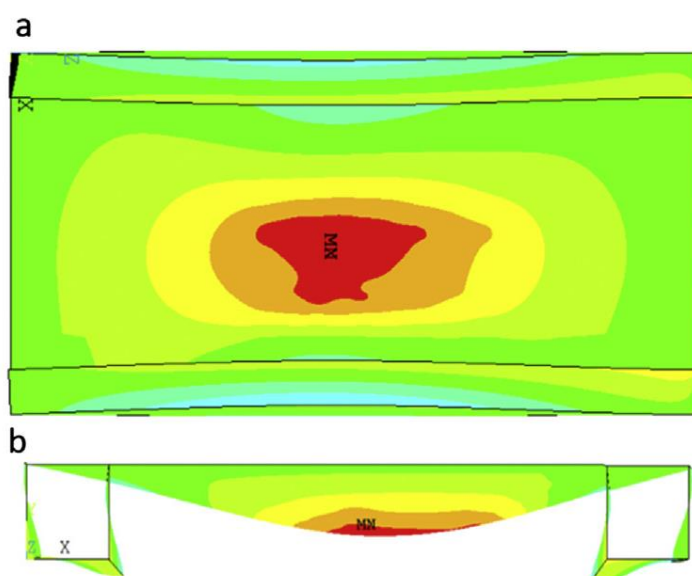
Οι θερμοκρασιακές μεταβολές μετρήθηκαν και διαχωρίστηκαν σε 2 κατηγορίες. Στις ημερήσιες μετρήσεις κατά τις οποίες είναι διαφορετική η θερμοκρασία στον αυτοκινητόδρομο νωρίς το πρωί και αργά το μεσημέρι και στις εποχιακές μετρήσεις όπου είναι διαφορετικές οι θερμοκρασιακές μεταβολές τον χειμώνα και το φθινόπωρο από το καλοκαίρι και την άνοιξη (Bayane et.al,2019).

Οι θερμοκρασιακές μεταβολές στο κατάστρωμα της γέφυρας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.22.

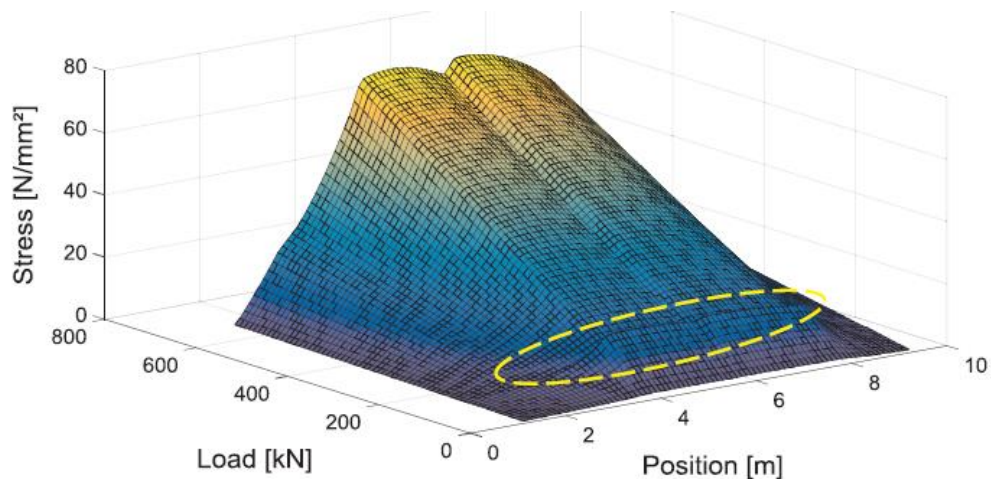


Σχήμα 5.22: Θερμοκρασιακές μεταβολές στην γέφυρα ημερήσια και εποχιακά (Bayane et.al,2019)

Τα στοιχεία των κυκλοφοριακών μετρήσεων μαζί με το βάρος και την θέση των οχημάτων στην γέφυρα σε συνδυασμό με τις θερμοκρασιακές μεταβολές επεξεργάστηκαν μαζί και συσχετίστηκαν μέσω του προγράμματος Matlab. Τα αποτελέσματα για την κόπωση του σκυροδέματος εξάχθηκαν για 82 πιθανές θέσεις των οχημάτων και 64 διαφορετικά βάρη αυτών. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τις θλιπτικές τάσεις που εμφανίζονται στο κατάστρωμα της γέφυρας παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.23 και 5.24 όπου φαίνονται οι θλιπτικές τάσεις στο κατάστρωμα της γέφυρας που προκαλούνται από τα οχήματα που την διασχίζουν.



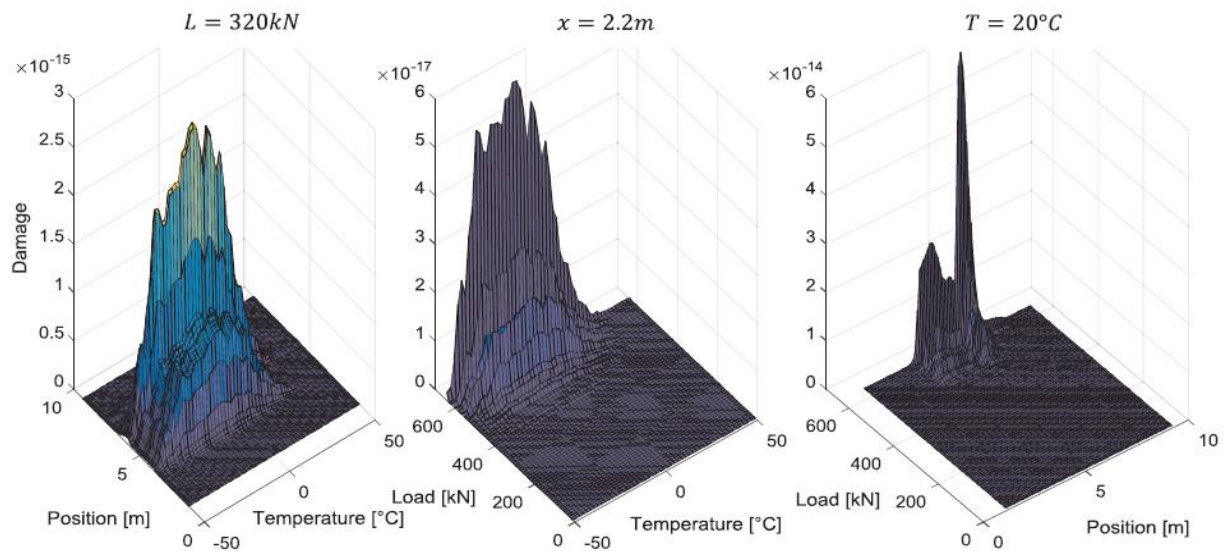
Σχήμα 5.23: Αποτελέσματα ανάλυσης για τις θλιπτικές τάσεις που προκαλούνται στο κατάστρωμα της γέφυρας (Bayane et.al,2019)



Σχήμα 5.24: Μέγιστες τάσεις που προκαλούνται ανάλογα το βάρος και την θέση των οχημάτων στην γέφυρα (Bayane et.al,2019)

Οι εγκάρσιες τάσεις ήταν μεγαλύτερες από τις διαμήκεις και στο οπλισμένο σκυρόδεμα του καταστρώματος αλλά και στις ράβδους του οπλισμού. Σημαντικές είναι και οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο κατάστρωμα της γέφυρας. Τα βαριά φορτηγά που έχουν βάρος μεταξύ 300-400 kN προκαλούν την μεγαλύτερη κόπωση στο σκυρόδεμα, ιδιαίτερα όταν κινούνται στο μέσο της λωρίδας κυκλοφορίας όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.24 και η συχνότητα της κόπωσης και της φθοράς εξαρτάται από την συχνότητα με την οποία διασχίζουν την γέφυρα. Στην συνέχεια, στους υπολογισμούς εισάχθηκαν και τα δεδομένα των θερμοκρασιακών μετρήσεων σε συνδυασμό με την θέση των οχημάτων στην γέφυρα. Στο Σχήμα 5.25 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης όπου διαπιστώνεται πως για θερμοκρασίες από 0-20 βαθμών κελσίου και για βάρος φορτίου 320 kN η βλάβη εξαιτίας της κόπωσης του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη, ιδιαίτερα όταν το φορτίο ξεπερνάει τα 400 kN και η θέση του οχήματος είναι στα 2,2 μέτρα από το άκρο της γέφυρας και επικρατεί θερμοκρασία 20 βαθμών κελσίου (Bayane et.al,2019).

Το συμπέρασμα της μελέτης των Bayane et.al (2019) είναι πως η κόπωση του σκυροδέματος αυξάνει ανάλογα της θέσης των οχημάτων στην γέφυρα και όσο η θερμοκρασία αυξάνεται, αυτή επηρεάζει της μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος και προκαλεί μεγαλύτερη κόπωση. Το ιδιαίτερο στοιχείο της μελέτης των Bayane et.al (2019) είναι πως στηρίχτηκαν σε πραγματικά στοιχεία και μετρήσεις και τα αποτελέσματα που παρουσίασαν ήταν ιδιαίτερα ακριβή ως προς την αξιοπιστία τους.



Σχήμα 5.25: Οι επιπτώσεις της κόπωσης του σκυροδέματος σε συνδυασμό με την θερμοκρασία και το βάρος του φορτίου (Bayane et.al, 2019)

5.2.7 Η επίδραση της ύπαρξης υδάτων στην κόπωση ενός καταστρώματος

Σύμφωνα με τους Fujiyama et al. (2011) η ανάλυση της κόπωσης και η αξιολόγηση της διάρκειας ζωής σε κόπωση, αποτελούν σημαντικές παράμετροι στον σχεδιασμό για την ασφάλεια και την αξιοπιστία της πλάκας καταστρώματος μιας γέφυρας οπλισμένου σκυροδέματος. Η συμπεριφορά της πλάκας γέφυρας οπλισμένου σκυροδέματος σε κόπωση που υποβάλλεται σε κεντρικά σταθερά παλμικά φορτία, διερευνάται πειραματικά και προσομοιώνεται αναλυτικά με πλήρη τρισδιάστατη μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Στην μελέτη τους οι Fujiyama et al. (2011) χρησιμοποίησαν 7 δοκίμια πλακών πλήρους μεγέθους, τα οποία σχεδιάστηκαν συστηματικά με αρχικά ελαττώματα με σκοπό την πρόκληση ξηρής συρρίκνωσης ή τεχνητής βλάβης πριν από τη φόρτιση. Στη συνέχεια, η άνω επιφάνεια ορισμένων δοκιμών εφαρμόζεται σε συνθήκες έκθεσης στο νερό. Οι πλάκες της γέφυρας είναι πάντα εκτεθειμένες στη βροχή, για αυτό τον λόγο στη συγκεκριμένη μελέτη λαμβάνεται υπόψη και ο παράγοντας του νερού.

Στο πείραμα τους, η πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος στηρίζεται σε δύο διαμήκεις άκρες με ελεύθερη περιστροφή και υπόκειται σε κεντρικό σταθερό παλμικό φορτίο μέσω ενεργού επιφάνειας επαφής (100mm x 200mm) από μια χαλύβδινη πλάκα. Οι διαστάσεις

της πλάκας είναι 1200mm x 2200mm x 140mm και το κύριο εγκάρσιο άνοιγμα είναι 1m. Ο οπλισμός εφελκυσμού και θλίψης και στις δύο κατευθύνσεις αποτελείται από D13@75mm και D13@150mm, αντίστοιχα. Εισήχθησαν τεχνητές ρωγμές σε μερικά δοκίμια ως αρχικά ελαττώματα. Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που επιβλήθηκαν σε κάθε δοκίμιο.

Specimen	Compressive strength F_c (Mpa)	Load level	Loading process*	Loading condition	Shrinkage(μ) Artificial crack	Age at testing (day/year)	Cement type
E1	17.7	1.00	S	Dry	800~1200	1 Y	OPC
E2	17.1	0.70	F, F→F	Dry			
E3	14.3	0.69	F, F→F	Water			
E4	21.4	0.71	F, F→F	Water	400	30 D	
E5	24.7	0.66	F, F→F	Water	450 Bending crack	39 D	
E6	25.0	0.66	F, S→F	Dry	500 External restraint	74 D	
E7	24.1	0.67	F, F→F	Water	700 External restraint	78 D	SHC

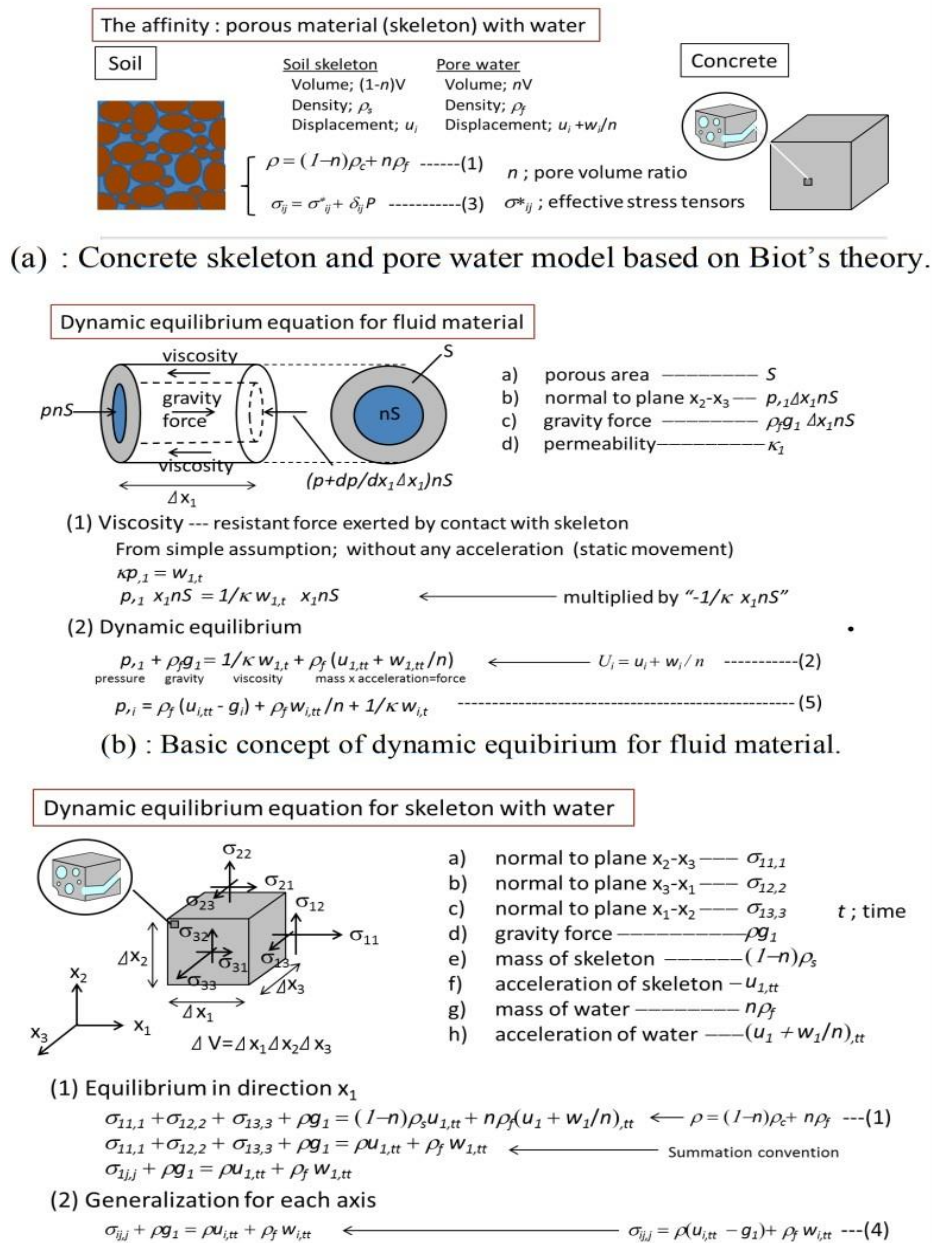
* S=static loading; F=fatigue cycle; F→F=fatigue loading to failure; S→F=static loading to failure.

Πίνακας 5.1: Λεπτομέρειες τεστ για κάθε δοκίμιο

Την επίδραση του υδάτινου παράγοντα στην εμφάνιση του φαινομένου της κόπωσης στις πλάκες των καταστρωμάτων μελέτησαν και οι Maekawa & Fujiyama (2013), όπου υποστήριξαν ότι το νερό των πόρων εντός των ρωγμών, που συσσωρεύεται λόγω βροχοπτώσεων μειώνει τη διάρκεια ζωής των πλακών. Παρατηρήθηκε ότι το εναπομείναντα υγρό στοιχείο υποβαθμίζει την απόδοση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος, όπως παραδείγματος χάρη την αντοχή σε θλίψη, σε αντίθεση με το ίδιο όταν συναντάται σε ξηρές συνθήκες. Η εισχώρηση του νερού εντός του σκυροδέματος δεν μπορεί εύκολα να απορροφηθεί και η συνεχής επιβολή φορτίων στην επιφάνεια της πλάκας οδηγεί σε συνεχόμενη παραμόρφωση και αύξηση της πίεσης των πόρων του υλικού.

Στην έρευνα τους οι Maekawa & Fujiyama (2013) προσομοίωσαν την συμπεριφορά μετακίνησης του νερού στις ρωγμές του καταστρώματος εφαρμόζοντας ένα πολυφασικό πρότυπο σε συνθέσεις υγρών και στερεών υλικών. Η υγρασία αυξάνεται συνεχώς στις ρωγμές, αλλά και στο κενό ανάμεσα στους πόρους, έχοντας ως συνέπεια την ταχεία

εμφάνιση βλαβών. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα εδάφια της παρούσας διπλωματικής όταν το σκυρόδεμα υπόκειται σε θλίψη, πλην της πλαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται, σταδιακά η ελαστικότητα του που εδράζεται στις μικρορωγμές εξαλείφεται. Η διαδικασία κορεσμού του σκυροδέματος και οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.26 σε δύο φάσεις, στερεή και υγρή.



Σχήμα 5.26: Υπολογισμοί φάσεων μοντέλου Maekawa & Fujiyama (2013)

Όπου: ρ η συνολική πυκνότητα του κορεσμένου σκυροδέματος

ρ_c η πυκνότητα του σκυροδέματος

ρ_f η πυκνότητα του νερού στους πόρους

n ο λόγος του όγκου των πόρων

U_i η κίνηση του νερού των πόρων

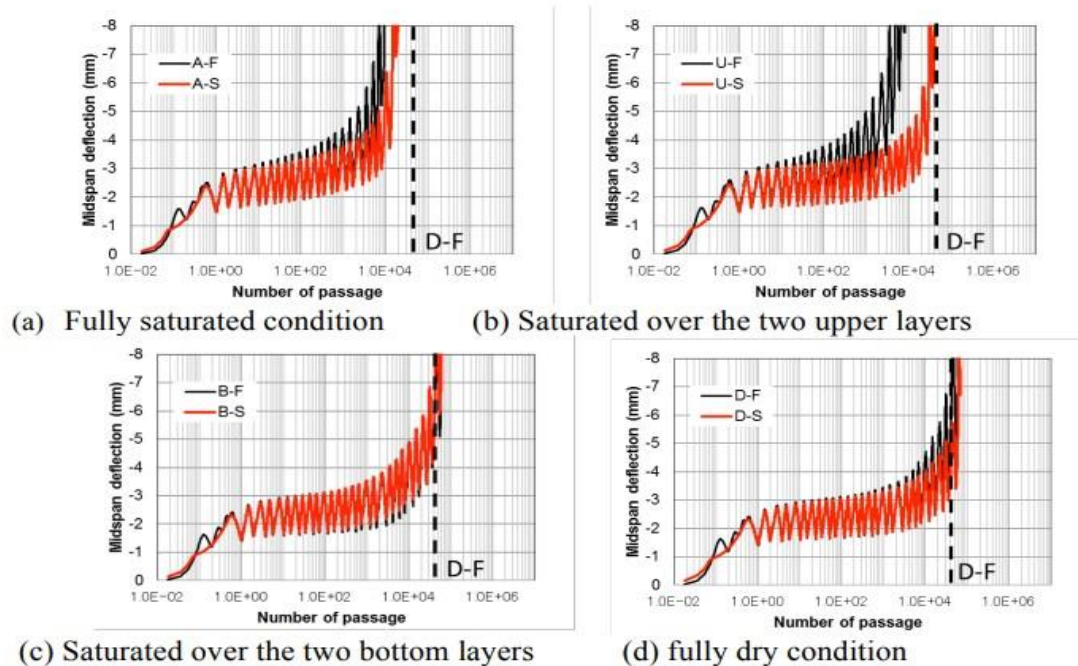
w_i η μετατόπιση του νερού των πόρων

Από το Σχήμα 5.26 δύναται να υπολογισθούν οι συνολικές τάσεις σ_{ij} που προέρχονται από την σωματιδιακή επαφή και την ιστροπική πίεση του νερού στους πόρους. Από την εμφάνιση ρηγματώσης και έπειτα, η πίεση του νερού στους πόρους δρα ανισοτροπικά στους πόρους του σκυροδέματος, ασκώντας επιπλέον πίεση κάθετα στο επίπεδο των ρωγμών.

Για την μελέτη της επίδρασης της υγρασίας επιλέχθηκε μία πλάκα σκυροδέματος διαστάσεων 2m x 3m και πάχους 0,19m, με μέση ταχύτητα τροχού στα 77 Km/h και 0,77 Km/h και τέσσερις καταστάσεις, πλήρως κορεσμένο σε όλο το πάχος, πλήρως κορεσμένο στα δύο ανώτερα στρώματα, πλήρως κορεσμένο στα δύο κατώτερα στρώματα και εντελώς ξηρό, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 5.2. Στο Σχήμα 5.27 απεικονίζονται διαγραμματικά τα αποτελέσματα της πειραματικής έρευνας.

Πίνακας 5.2: Καταστάσεις ελέγχου σε διαφορετικά επίπεδα υγρασίας

Loading speed (per 1 loading passage) (km/h)	Degree of water saturation			
	Fully saturated	Upper two layers saturated	Bottom two layers saturated	Dry
77	A-F	U-F	B-F	D-F
0.77	A-S	U-S	B-S	D-S



Σχήμα 5.27: Αποτελέσματα πειραματική έρευνας Maekawa & Fujiyama (2013)

Ερμηνεύοντας το Σχήμα 5.27 διαπιστώνεται πως η υψηλή ταχύτητα κίνησης σε περιπτώσεις όπου υπάρχει νερό στην επιφάνεια του καταστρώματος, μειώνει τη διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από το σχήμα (c) όπου δεν παρατηρείται καμία μεταβολή λόγω ταχύτητας όταν τα κατώτερα στρώματα είναι πλήρως κορεσμένα, καθώς και από το (d) όπου η απόκριση της πλάκας ανάμεσα στις δύο ταχύτητες είναι αμελητέα. Συνεπώς η παρουσία υγρασίας στην επιφάνεια των καταστρωμάτων των γεφυρών εν συναρτήσει με την ταχύτητα κίνησης των οχημάτων επηρεάζει άμεσα την εμφάνιση ρηγματώσεων και συνεπώς την αστοχία λόγω κόπωσης.

5.2.8 Πειραματική έρευνα κόπωσης σε γέφυρες από προεντεταμένο σκυρόδεμα

Αν και η προένταση αυξάνει την αντοχή σε κάμψη και κόπωση χωρίς να αυξάνει περαιτέρω το πάχος της πλάκας, υπάρχει απαίτηση για πρόσθετο πειραματικό έλεγχο σε καταστρώματα μεγάλων ανοιγμάτων. Το μοντέλο δοκιμής κυκλικής φόρτισης σταθερού σημείου, που είθισται να χρησιμοποιείται σε καταστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα, δεν αντικατοπτρίζει με ακρίβεια τις επιπτώσεις των κυκλοφοριακών συνθηκών, διότι λαμβάνει υπόψιν ότι κατά την διάρκεια ζωής της γέφυρας, το κατάστρωμα της είναι απαλλαγμένο από ρωγμές λόγω αστοχίας κόπωσης. Οι Hwang et al. (2010), μελέτησαν την αντοχή σε κόπωση δοκιμών με διαφορετικά επίπεδα προέντασης, υπό φορτίο κινούμενου τροχού και μέσω των αποτελεσμάτων των δοκιμών πρότειναν ένα μοντέλο σχεδιασμού για καταστρώματα από προεντεταμένο σκυρόδεμα μεγάλων ανοιγμάτων.

Ο τύπος της κόπωσης που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή του μοντέλου είναι ο:

$$\log\left(\frac{P}{P'_{sx}}\right) = -0.07835 \log(N) + \log 1.25 \quad (1)$$

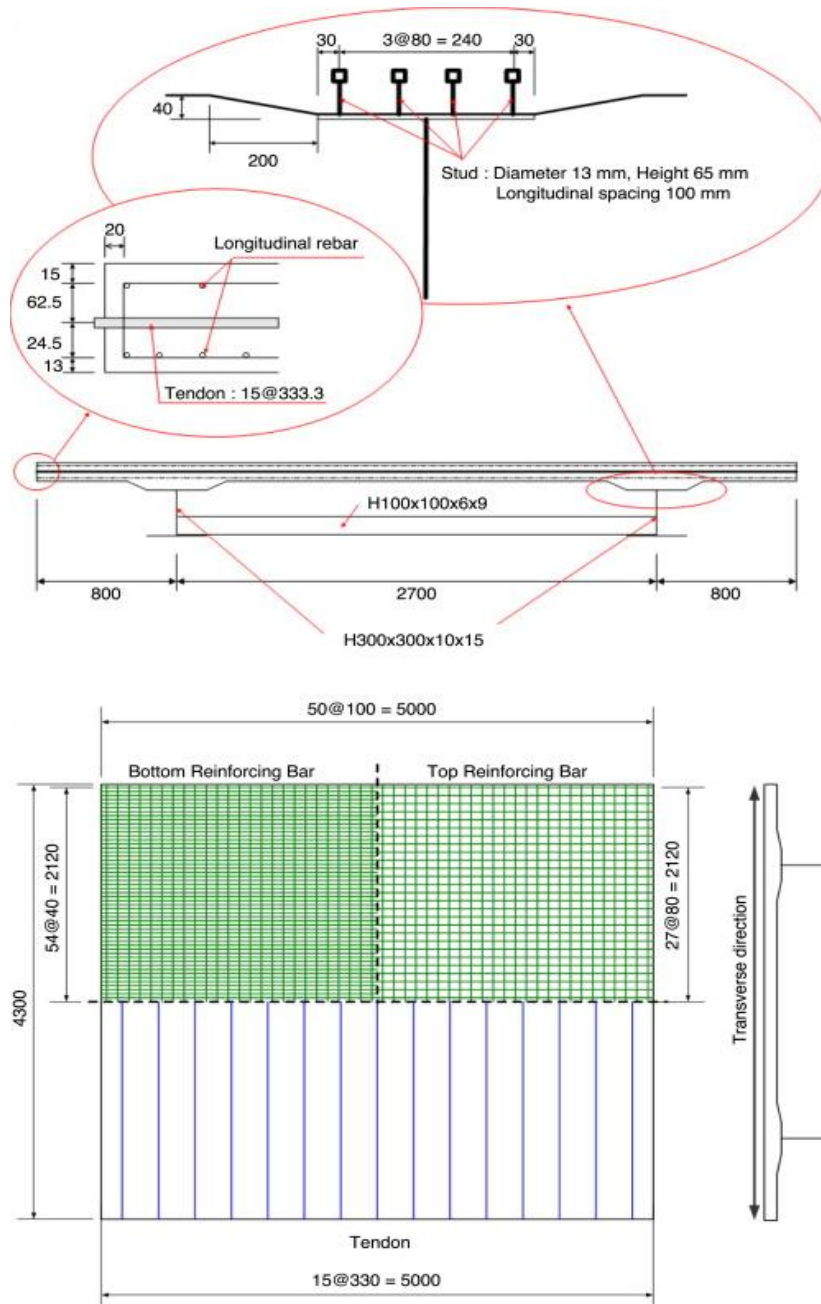
$$P'_{sx} = 2\tau_{\max} X_m B \alpha + 2\sigma_t C_m B \quad (2)$$

Όπου:

- **P** το φορτίο τροχού
- **N** ο αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία
- **X_m** η απόσταση μεταξύ άνω και ουδέτερου άξονα, μη λαμβάνοντας υπόψιν την αντοχή του σκυροδέματος σε εφελκυσμό
- **B= b+2d_d** το πλάτος της ραγισμένης πλάκας στη διαμήκη διεύθυνση
- **d** το μήκος της εφαρμογής ορθογώνιου φορτίου
- **d_d** αποτελεσματικό βάθος ράβδων διανομής
- **C_m** κάλυμμα σκυροδέματος κύριου οπλισμού

Η εξίσωση υπολογισμού της κόπωσης (1) & (2) αναπτύχθηκε από τους Higashiyama και Matsui , η οποία αποτελεί συνάρτηση της αντοχής σε διάτρηση προεντεταμένης πλάκας σκυροδέματος που ραγίζει παράλληλα με την εγκάρσια διεύθυνση ($P'sx$), υποθέτοντας ότι λόγω της επαναλαμβανόμενης φόρτισης του κινούμενου τροχού και των ρωγμών, η πλάκα συμπεριφέρεται όπως μια δοκός από οπλισμένο σκυρόδεμα στην εγκάρσια διεύθυνση.

Το αρχικό μοντέλο που χρησιμοποίησαν οι Hwang et al. (2010) πρόκειται για μια πλάκα καταστρώματος προεντεταμένου σκυροδέματος ανοίγματος 8,1 m μεταξύ των δοκών και πάχους 345 mm, με έκκεντρη διάταξη των τενόντων, η οποία λόγω χωρητικότητας απομειώθηκε στο 1/3 της αρχικής. Το τελικό μοντέλο απομειωμένο κατά 1/3 κατασκευάστηκε με μήκος ανοίγματος 2,7m και πάχος 115mm. Στο Σχήμα 5.28 παρουσιάζεται η γεωμετρία και η διάταξη του οπλισμού του τελικού μοντέλου.



Σχήμα 5.28: Γεωμετρία και διάταξη σπλισμού τελικού μοντέλου Hwang et al. (2010)

Στον Πίνακα 5.29 αναγράφονται οι λεπτομέρειες τομής της πλάκας του καταστρώματος, ενώ στον Πίνακα 5.30 τα κύρια χαρακτηριστικά των δειγμάτων που υποβλήθηκαν σε έλεγχο.

Πίνακας 5.29: Λεπτομέρειες τομής της πλάκας καταστρώματος Hwang et al. (2010)

Classification	Transverse direction		Longitudinal direction	Remarks
	Tensile rebar	Tendon	Distribution bar	
Rebar spacing (mm)	100	330	40	Span length: 2700mm
Effective height (mm)	102	77.5	96	Overhanging length: 800mm
Reinforcement ratio	0.0069 ^a		0.0078	Thickness: 115mm Tendon ($d = 15.2$ mm, bonded) Rebar ($d = 6$ mm)

^a

Value comprising both tensile bar and tendon.

Πίνακας 5.30: Χαρακτηριστικά δειγμάτων, Hwang et al. (2010)

Designation	Sectional dimensions (mm)			Jacking stress (MPa)	f_{pc} (MPa)	Quantity (EA)
	Girder gap	Cantilever	Thickness			
FF	2700	800	115	1440	4.07	3
PF	2700	800	115	670	1.32	1

Καθώς η αντοχή των δοκιμίων μειώνεται με την αύξηση των κύκλων φόρτισης του τροχού, η καταπόνηση λόγω της κόπωσης που συσσωρεύεται από την κυκλική φόρτιση πρέπει να αξιολογείται μέσω σύγκρισης με την στατική αντοχή. Η δοκιμή στατικής φόρτισης πραγματοποιείται στο κέντρο του καταστρώματος. Τα φορτία που εφαρμόστηκαν για την εκτίμηση της κόπωσης είναι 500 kN κατά την κυκλική φόρτιση και 1000 kN κατά την στατική φόρτιση. Στο Σχήμα 5.31 παρουσιάζονται τα δοκίμια τοποθετημένα για να λάβουν στατική και κυκλική φόρτιση αντίστοιχα.



Σχήμα 5.31: Στατική δοκιμή και δοκιμή υπό φορτίο τροχού, Hwang et al. (2010)

Όλες οι πλευρές των δοκιμίων πακτώνονται προκειμένου να προσομοιωθούν υπό σταθερές συνθήκες και οι επιδράσεις της καμπτικής ακαμψίας στη διαμήκη κατεύθυνση να εξαλειφθούν. Το Σχήμα 5.32 περιέχει τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης χρησιμοποιώντας τις αντοχές των στατικών δοκιμών για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος των μετρήσεων. Τα δοκίμια αστοχούν ξαφνικά με εμφάνιση καθίζησης στο κέντρο της πλάκας του καταστρώματος που υπόκεινται σε κυκλική φόρτιση τροχού και με διάδοση ρωγμών στο κάτω μέρος της πλάκας στα δοκίμια που υπόκεινται σε στατική φόρτιση.

$$P_{estimated} = P_{stest} \times \frac{\sqrt{f_{cf}}}{\sqrt{f_{cs}}} \quad (3)$$

Όπου:

- $P_{estimated}$ Η εκτιμώμενη τελική αντοχή για το δοκίμιο κόπωσης
- P_{stest} Η τελική αντοχή για το δοκίμιο στατικής φόρτισης
- f_{cf} Η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος για το δοκίμιο κόπωσης
- f_{cs} Η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος για το δοκίμιο στατικής φόρτισης

Specimen	f_c (MPa)	$P_{estimated}^a$ (MPa)	Wheel load and number of cycles at failure	Remarks ^b
FF-1	56.6	335.6	168 kN, $N_f = 35,000$	Loading level of about 50% of the predicted value for the static strength
FF-2	53.3	325.7	141 kN, $N_f = 31,704$	Loading level of about 43% of the predicted value for the static strength
FF-3	57.9	339.5	Stage 1: 29 kN, 500,000 cycles Stage 2: 141 kN, 22,140 cycles (at failure)	Stage 1: Equivalent concentrated wheel load producing maximum design moment
PF	53.6	324.9	Stage 1: 78 kN, 800,000 cycles Stage 2: 141 kN, 1000 cycles (at failure)	Stage 1: Loading level of about 24% of the predicted value for the static strength

Σχήμα 5.32: Αποτελέσματα δοκιμών κυκλικής φόρτισης, Hwang et al. (2010)

Τα δοκίμια FF-1 και FF-2 υποβλήθηκαν σε υψηλές τιμές φορτίσεων τροχού και παρουσιάζουν μικρή διάρκεια ζωής εξαιτίας του συνδυασμού της κυκλικής φόρτισης και των ρωγμών σε διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση. Η τιμή αστοχίας εμφανίζεται στη τιμή των 29 kN στατικής φόρτισης και 141 kN κυκλικής φόρτισης τροχού για τα πρώτα δύο δοκίμια με επανάληψη κύκλων φόρτισης 35.000 και 31.704 αντίστοιχα. Το τρίτο δοκίμιο χαρακτηρίστηκε από τις ίδιες τιμές αστοχίας σε 500.000 κύκλους στατικής φόρτισης και 22.140 κύκλους κυκλικής φόρτισης. Η διάδοση ρωγμών στο τρίτο δοκίμιο είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με τα δύο προηγούμενα, με την τάση του διαμήκη σπλισμού να είναι σε μικρές τιμές. Η ζημιά που προκλήθηκε στο FF-3 λόγω κόπωσης είναι σημαντικά ήσσονος σημασίας σε σχέση με τα FF-1 & FF-2. Το τελευταίο δοκίμιο PF υπεβλήθη σε 800.000 κύκλους

φόρτισης τροχού με φορτίο 78 kN και απέτυχε έπειτα από 1000 κύκλους με φορτίο 141 kN. Παρόλο που το δοκίμιο PF περιγράφει την πλάκα καταστρώματος με μερική προένταση παρουσίασε 30% της εκτιμώμενης τελικής αντοχής. Η διάδοση των ρωγμών τόσο στο πρώτο στάδιο φόρτισης, όσο και στο δεύτερο παρατηρείται σταδιακά, με το πλήθος τους να σχηματίζονται στο κάτω μέρος της πλάκας. Με την εφαρμογή της στατικής φόρτισης στο κέντρο της πλάκας η παραμόρφωση του αυξήθηκε κατά 57% προμηνύοντας ότι θα δεχθεί την σοβαρότερη βλάβη σε σχέση με τα προ ηγηθέντα δοκίμια.

Σύμφωνα με τους συγγραφείς η πλάκα καταστρώματος από προεντεταμένο σκυρόδεμα μεγάλου ανοίγματος είναι πρακτικά άφθαρτη, καθώς αστοχία λόγω κόπωσης εμφανίζεται μετά από πολλούς κύκλους φορτίσεων, όπου η εμφάνιση των πρώτων ρωγμών θα οδηγήσει στη συντήρηση τους προτού επέλθει η τελική αστοχία. Παρά την εμφάνιση ρωγμών στην κάτω πλευρά της πλάκας, η άνω πλευρά παραμένει σε καλή κατάσταση παρά τις πιθανές καθιζήσεις, με την αντοχή της να είναι ανάλογη με το επίπεδο προέντασης.

5.3 Πειραματικές διατάξεις

5.3.1 Σύγκριση μεταξύ των φορτίσεων των πειραματικών δοκιμών

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκαν τα πειράματα για την εύρεση της φθοράς σκυροδέματος από κόπωση στις πλάκες των καταστρωμάτων γεφυρών. Κοινή συνισταμένη των πειραμάτων ήταν η κατασκευή δοκιμών από οπλισμένο σκυρόδεμα και η φόρτιση των δοκιμών αυτών, προκειμένου να προσομοιωθεί η φόρτιση που πραγματοποιείται στις πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας στις οδικές γέφυρες.

Η φόρτιση στο πείραμα των Schlafli & Bruhwiler (1998) εφαρμόστηκε με υδραυλικές διατάξεις. Στα πρώτα 6 δοκίμια εφαρμόστηκε φόρτιση στο 10% της μέγιστης φόρτισης αλλά δεν διαπιστώθηκε καμία φθορά. Έπειτα η φόρτιση αυξήθηκε στο 30% της μέγιστης φόρτισης και οι πρώτες ρωγμές λόγω κόπωσης παρουσιάστηκαν όταν η φόρτιση εφαρμόστηκε στο 60% της μέγιστης φόρτισης.

Στην πειραματική τους μελέτη, οι Petrou & Perdikaris (1998) χρησιμοποίησαν το δοκίμιο που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 5.5 η οποία είναι μια πλάκα σκυροδέματος στηριζόμενη με 4 ράβδους οπλισμού και πάχος τα 3,5 εκατοστά.

Στις πλάκες καταστρωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα, η φόρτιση που προέρχεται από ένα κινητό φορτίο, ένα όχημα, επιταχύνει την κόπωση και την βλάβη της πλάκας και οι ρωγμές που παρουσιάζονται μεγαλώνουν με την πάροδο του χρόνου.

Στην μελέτη των Yuyama et.al (2001) το εργαστηριακό δοκίμιο οπλισμένου σκυροδέματος είχε μήκος 20 εκατοστά και πλάτος 15 εκατοστά ενώ το πάχος του ήταν 1,6 εκατοστά. Στο δοκίμιο αυτό, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.26, εφαρμόστηκαν φορτίσεις επαναλαμβανόμενες με βάρος από 150 kN και έφτασαν μέχρι τα 270 kN με πανομοιότυπο τρόπο με αυτόν το Felhman & Vogel (2009). Ο οπλισμός του δοκιμίου είχε πραγματοποιηθεί και αυτός και στις 2 διευθύνσεις στην εγκάρσια και διαμήκη διεύθυνση.

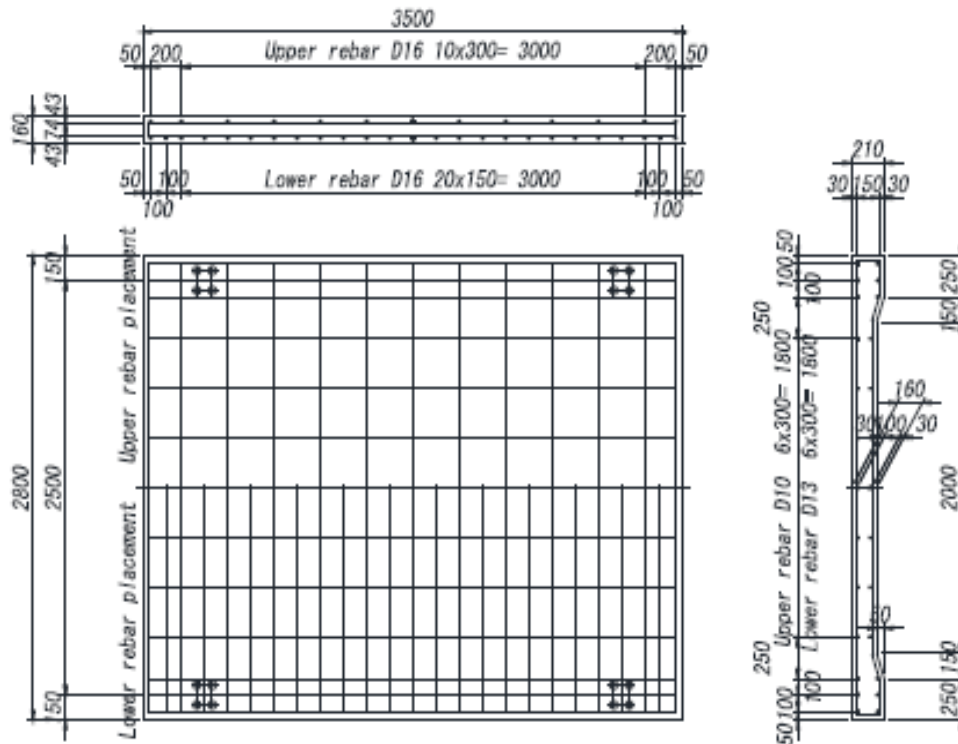
Οι Felhman & Vogel (2009) για παράδειγμα, την φόρτιση των πλακών την πραγματοποίησαν εφαρμόζοντας φόρτιση με κινητό φορτίο από κυλίνδρους σε μια περιοδικότητα επαναλήψεων, ενώ η τάση αυτή κατανεμήθηκε σε όλο το μήκος των δοκιμών προκειμένου να προσομοιωθεί η κίνηση των οχημάτων πάνω στην γέφυρα. Η φόρτιση της

πλάκας από το κινητό φορτίο πραγματοποιήθηκε με ταχύτητα 2 km/hr και βάρος του κινητού φορτίου ήταν 160 KN και πραγματοποιήθηκαν 135.000 επαναλήψεις.

Οι Toylemonde & Ranc, (2011) στην μελέτη τους έκαναν παρατηρήσεις πάνω σε υφιστάμενες γέφυρες, οι οποίες ήταν σε λειτουργία και κάτω από πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας των αυτοκινήτων. Στα σημεία που η πλάκα του καταστρώματος των γεφυρών βρισκόταν υπό θλιπτικές δυνάμεις οι ρωγμές κόπωσης δεν ήταν κρίσιμες και για τη στατικότητα της γέφυρας, καθώς στα σημεία αυτά ο οπλισμός του καταστρώματος είναι αρκετά πυκνός. Κοντά στα βάθρα της γέφυρας όπου υπάρχει αρνητική ροπή, το μήκος και το πλάτος των ρωγμών κόπωσης αυξανόταν και η ενίσχυση του καταστρώματος σε αυτά τα σημεία είναι απαραίτητη. Στα σημεία αυτά λόγω των διατμητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται εξαιτίας και της κυκλοφορίας των οχημάτων αλλά και εξαιτίας ότι ο διαμήκης οπλισμός είναι λιγότερος σε σχέση με τον εγκάρσιο οπλισμό, αναπτύσσονται σοβαρότερες ρωγμές κόπωσης οι οποίες έχουν μια πυκνότητα από 0,25 έως 0,50 μέτρα σε αυτά τα σημεία και το πλάτος των ρωγμών αυτών κυμαίνεται από 0,3 έως 0,6 χιλιοστά. Ο οπλισμός των δοκιμών στην μελέτη των Toylemonde & Ranc είναι εγκάρσιος και διαμήκης σε όλο το μήκος της πλάκας.

Στην μελέτη των Hiratsuka et.al (2013) εφαρμόστηκε φορτίο της τάξης των 100 - 300 KN σύμφωνα και με τους Ιαπωνικούς κανονισμούς το οποίο ήταν στατικό φορτίο σε όλο το μήκος της πλάκας και επαναλαμβανόταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Το δοκίμιο των Hiratsuka et.al (2013) παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.33 ενώ φαίνεται και ο οπλισμός της πλάκας ο οποίος είναι και εγκάρσιος και διαμήκης.



Σχήμα 5.33: Δοκίμιο των μελετητών Hiratsuka et.al (2013)

Οι Bayane et.al (2019) ανέπτυξαν ένα μοντέλο πρόβλεψης των φθορών κόπωσης των καταστρωμάτων των γεφυρών βασιζόμενοι στην παρακολούθηση των πραγματικών στοιχείων της γέφυρας και όχι σε εργαστηριακές μελέτες. Η φόρτιση των πλακών γινόταν σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας και σε πραγματική γέφυρα η οποία είχε ήδη υποστεί την φυσιολογική φθορά του χρόνου και των φορτίσεων.

Εάν πραγματοποιηθεί η σύγκριση του τρόπου των φορτίσεων των πλακών μεταξύ των μελετητών αυτές παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Σύγκριση φορτίσεων δοκιμών

Μελετητής	Τρόπος φόρτισης	Σημείο Φόρτισης
Felhman & Vogel (2009)	Κινητή φόρτιση από κυλινδρικό φορτίο	Σε όλο το μήκος της πλάκας
Hiratsuka et.al (2013)	Στατική φόρτιση με φορτίο σχεδιασμού	Σε όλο το μήκος της πλάκας
Yuyama (2001)	Στατική φόρτιση με φορτίο σχεδιασμού	Σε όλο το μήκος της πλάκας
Toylemonde & Ranc, (2011)	Πραγματικές συνθήκες φόρτισης σε υφιστάμενη γέφυρα	Σε όλο το μήκος της πλάκας
Petrou & Perdikaris (1998)	Κινητή φόρτιση από φορτίο, σταθερά παλλόμενο	Σε όλο το μήκος της πλάκας
Bayane et.al (2019)	Πραγματικές συνθήκες φόρτισης σε υφιστάμενη γέφυρα	Σε όλο το μήκος της πλάκας
Okada& Okamura (1978)	Διάφοροι τύπο φορτίσεων	Σε όλο το μήκος της πλάκας
Maekawa et. al. (2006)	Κινητά φορτία	Σε όλο το μήκος της πλάκας
Xu & Hasuya (2018)	Κινητή φόρτιση από φορτίο	Σε όλο το μήκος της πλάκας
Hwang et. al. (2010)	Κυκλική φόρτιση	Σταθερού σημείου
Schlaflfi & Bruhwiler (1998)	Διάφορες τιμές φορτίσεων	Σε όλο το μήκος της πλάκας

Από τις παραπάνω φορτίσεις, η δοκιμή φόρτισης με κινητό φορτίο σε όλο το μήκος της πλάκας είναι η καλύτερη καθώς προσομοιάζει, τις πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας πιο πιστά.

Θα πρέπει να σημειώσουμε βέβαια πως η μελέτη των Toylemonde & Ranc, (2011) που έγινε σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας και σε υφιστάμενη γέφυρα είναι ο καλύτερος τρόπος για να μελετηθούν οι αστοχίες λόγω κόπωσης στις πλάκες σκυροδέματος των καταστροφικών γεφυρών.

5.3.2 Σύγκριση μεταξύ των δοκιμών που κατασκευάστηκαν

Σε όλες τις προαναφερόμενες μελέτες και έρευνες κατασκευάστηκαν δοκίμια τα οποία οπλίστηκαν με εγκάρσιο και διαμήκη οπλισμό. Οι διαστάσεις και τα πάχη των πλακών που κατασκευάστηκαν για τις μελέτες και τις έρευνες διαφέρουν από μελετητή σε μελετητή. Συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά των δοκιμών που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία περιγράφονται στον Πίνακα 5.4:

Πίνακας 5.4: Σύγκριση διαστάσεων δοκιμών

Μελετητές	Μήκος (m)	Πλάτος (m)	Πάχος (cm)
Xu & Masuya (2018)	3,00	2,80	19
Hiratsuka et.al (2013)	3,50	2,80	16
Yuyama (2001)	4,8	3,4	18
Toylemonde & Ranc, (2011)	0,50	0,30	1,8
Petrou & Perdikaris (1998)	2,31	1,35	3,5
Bayane et.al (2019)	200	-	-

Από αυτά τα δοκίμια που παρουσιάστηκαν, τα δοκίμια με μεγαλύτερο πάχος παρουσιάζουν πιο αξιόπιστα και αληθή αποτελέσματα. Ο οπλισμός που έχουν οι πλάκες είναι περισσότερος και στις δυο διευθύνσεις (εγκάρσιος και διαμήκης) σε σύγκριση με τα δοκίμια που έχουν πάχος λιγότερο από 2 εκατοστά.

Όπως αναφέρθηκε άλλωστε και στην παρούσα εργασία μια αύξηση κατά 5% της πλάκας από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να αυξήσει κατά 45% τον χρόνο ζωής της ρωγμής που οφείλεται στην κόπωση του σκυροδέματος.

5.4 Αξιολόγηση και σύγκριση αποτελεσμάτων

Πολλές ερευνητικές ομάδες έχουν πραγματοποιήσει πειράματα για να διερευνήσουν τις συμπεριφορές κόπωσης των πλακών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Παλιότερες μελέτες (Matsui 1978, Perdikaris and Beim 1988) διαπίστωσαν ότι η διάρκεια κόπωσης των πλακών υπό κινούμενο φορτίο είναι μικρότερη σε σχέση με την φόρτιση υπό σταθερό παλμικό φορτίο. Σε αυτές τις πειραματικές μελέτες, ο πιο συνηθισμένος τρόπος αστοχίας λόγω κόπωσης ήταν από τη λειτουργία διάτμησης διάτρησης (punching shear mode). Οι Maekawa et al. (2006) παρουσίασαν μια αριθμητική προσομοίωση της κόπωσης πλακών από κινούμενο φορτίο. Αυτή η αριθμητική μέθοδος χρησιμοποίησε ένα σχήμα άμεσου ολοκληρώματος (direct pathintegral scheme) με δομικά μοντέλα κόπωσης, για τη διάτμηση της επιφάνειας του σκυροδέματος, τη πίεση και τις ρωγμές του σκυροδέματος. Οι προαναφερθείσες εργασίες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μοντελοποίηση της τάσης λόγω κόπωσης για το σκυρόδεμα παίζει σημαντικό ρόλο στην πρόβλεψη των συμπεριφορών κόπωσης των πλακών.

Τα αποτελέσματα της μελέτης των Fehlgan & Vogel (2009) έδειξαν πως φορτίσεις με μεγαλύτερα κινητά φορτία προκαλούν μεγαλύτερη ζημιά λόγω κόπωσης στις πλάκες των καταστροφών από οπλισμένο σκυρόδεμα σε σχέση με τις φορτίσεις που πραγματοποιούνται με μικρότερα κινητά φορτία.

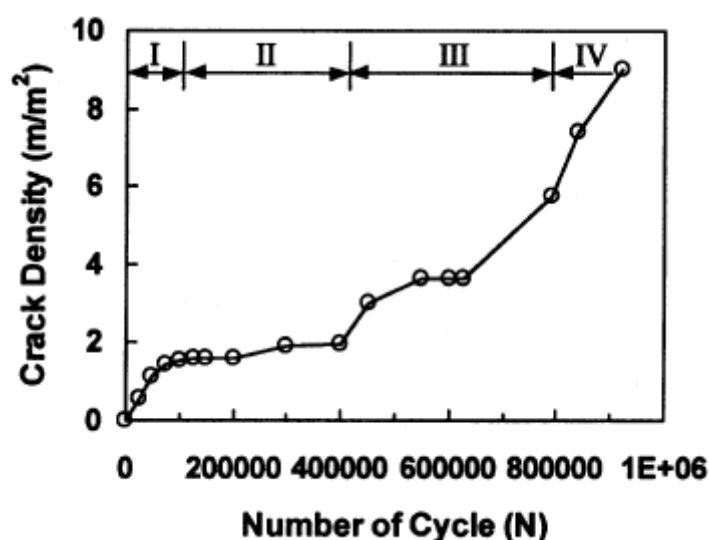
Στις πλάκες καταστροφών από οπλισμένο σκυρόδεμα, η φόρτιση που προέρχεται από ένα κινητό φορτίο, ένα βαρύ όχημα, δημιουργεί την κόπωση στην πλάκα και οι ρωγμές που παρουσιάζονται μεγαλώνουν με την πάροδο του χρόνου.

Επίσης οι Petrou&Perdikaris (1998) ανέφεραν μετά τα πειράματα που έκαναν, ότι η κόπωση του σκυροδέματος στα καταστώματα των γεφυρών πραγματοποιείται σε 3 διαστάσεις, όταν οι πλάκες φορτίζονται από κινητά φορτία όπως είναι τα οχήματα που ταξιδεύουν σε μια γέφυρα. Οι ρωγμές που οφείλονται στην διάτμηση αυξάνονται μη γραμμικά στις πλάκες σκυροδέματος, ενώ επιβεβαιώνεται η διάχυση της κόπωσης σε γειτονικά σημεία των ρωγμών που εμφανίζονται στο σκυρόδεμα. Αυτός είναι ένας από τους σημαντικότερους λόγους που επηρεάζουν την ζωή των πλακών οπλισμένου σκυροδέματος, που χρησιμοποιούνται για τα καταστώματα των γεφυρών.

Η κόπωση του σκυροδέματος από τις δονήσεις που προκαλούνται σύμφωνα με την μελέτη των Xu & Masuya (2018) αρχίζουν και εμφανίζονται μετά τις 5000 επαναλήψεις. Στο Σχήμα 5.16 με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα σημεία στα οποία εμφανίστηκαν ρωγμές στην πλάκα του δείγματος. Στην συνέχεια του πειράματος και μέχρι να φτάσουν στις 13.000 επαναλήψεις της φόρτισης της πλάκας με το κινητό φορτίο, οι ρωγμές αυτές μεγάλωναν και εξαπλώνονταν σε όλο το μήκος της πλάκας (Xu & Masuya, 2018).

Οι βλάβες από την κόπωση του σκυροδέματος αυξάνονται όσο μικρότερο είναι το πάχος της πλάκας στο κατάστρωμα της γέφυρας, αλλά όπως ανέφεραν οι Fathalla et.al, 2019, μια αύξηση στο πάχος της πλάκας καταστρώματος των γεφυρών μπορεί να αυξήσει σημαντικά τον χρόνο ζωής της ρωγμής που οφείλεται στην κόπωση.

Οι Yuyama et.al (2001) σημείωσαν πως παρουσιάζονται 4 στάδια δημιουργίας ρωγμών κόπωσης. Στο πρώτο στάδιο οι ρωγμές κόπωσης δημιουργούνται πάρα πολύ γρήγορα και αντιστοιχούν σε περίπου 100.000 επαναλήψεις φορτίσεων της πλάκας. Στο δεύτερο στάδιο και ενώ οι επαναλήψεις των φορτίσεων αυξάνονται στην πλάκα σκυροδέματος (περίπου 400.000 επαναλήψεις) παρατηρείται μια σταθερότητα στην δημιουργία ρωγμών κόπωσης και πρακτικά η κόπωση του σκυροδέματος δεν αυξάνεται καθόλου. Στο τρίτο στάδιο παρατηρείται αύξηση της κόπωσης του σκυροδέματος καθώς οι επαναλήψεις των φορτίσεων φτάνουν τις 800.000. Στο τελικό στάδιο παρατηρείται ραγδαία αύξηση των ρωγμών μέχρι να οδηγηθεί η πλάκα στην τελική αστοχία λόγω κόπωσης (Yuyama et.al, 2001).



Σχήμα 5.34: Εργαστηριακά αποτελέσματα κόπωσης μέσω της ακουστικής μεθόδου (Yuyama et.al, 2001)

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από τις μελέτες που παρουσιάστηκαν είναι πολύ σημαντικά και σε μεγάλο βαθμό αξιόπιστα, αλλά σε πολλές περιπτώσεις βασίζονται σε παραδοχές, καθώς η προσομοίωση μιας γέφυρας η οποία είναι σε χρήση ήδη για 40-50 χρόνια δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο. Επίσης, ένα άλλο ζήτημα είναι η δημιουργία των δοκιμών καθώς στο εργαστήριο δημιουργείται συνήθως ένα δοκίμιο μικρού σχετικά μεγέθους. Επίσης η ταχύτητα εφαρμογής των φορτίσεων στο εργαστήριο δεν μπορεί να προσομοιωθεί με την πραγματικότητα, καθώς ναί μεν το βάρος των φορτίσεων μπορεί να προσομοιωθεί στο εργαστήριο με ακρίβεια, αλλά η ταχύτητα κίνησης των οχημάτων δεν μπορεί να προσομοιωθεί στο εργαστηριακό περιβάλλον.

Σε σχέση με τις δονήσεις που προκαλούνται στις πλάκες καταστρωμάτων των γεφυρών, οι ρωγμές έφτασαν σε μήκος τα 7 χιλιοστά μετά από 25.000 επαναλήψεις. Στην συνέχεια η αύξηση του μήκος των ρωγμών και της κόπωσης του σκυροδέματος μειωνόταν όση ώρα συνεχιζόταν η φόρτιση της πλάκας με το κινητό φορτίο σύμφωνα και με τους Xu & Masuya (2018). Η συχνότητα της δόνησης προκάλεσε κόπωση στο σκυρόδεμα κυρίως στο κέντρο της πλάκας. Η μεγαλύτερη ρωγμή έφτασε σε πλάτος τα 25 χιλιοστά στην πλάκα του σκυροδέματος μετά τις 135.000 επαναλήψεις και είχαν κάθετη διεύθυνση. Σε αυτή την περίπτωση ενώ τα συμπεράσματα των μελετητών είναι πολύ σημαντικά σε σχέση με τις φθορές σκυροδέματος εξαιτίας της κόπωσης των πλακών καταστρωμάτων, οι δονήσεις που προκαλούνται σε μια γέφυρά σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της είναι δύσκολο να προσομοιωθούν στο εργαστηριακό περιβάλλον. Επίσης δεν λαμβάνονται υπόψη οι δονήσεις που προκαλούνται σε μια γέφυρα ως συνέπεια των σεισμικών δονήσεων, οι οποίες μπορεί να επιβαρύνουν περαιτέρω τις φθορές κόπωσης στις πλάκες καταστρωμάτων των γεφυρών σε συνδυασμό με τις δονήσεις των οχημάτων. Σε άλλες περιπτώσεις όπως των Yuyama et.al (2001) προκειμένου να επαληθευτούν τα εργαστηριακά αποτελέσματα, έπρεπε το πείραμα τους να διεξαχθεί και σε πραγματικές συνθήκες και σε μια πραγματική γέφυρα. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της κόπωσης των πλακών σκυροδέματος στην πραγματική γέφυρα κάτω από ομαλές συνθήκες κυκλοφορίας δεν έδειξαν αξιοσημείωτες αλλαγές και η αύξηση της κόπωσης ήταν γραμμική. Αυτό που γίνεται κατανοητό είναι πως με τις ακουστικές μεθόδους, οι αστοχίες λόγω κόπωσης του σκυροδέματος, μπορούν να προβλεφθούν εργαστηριακά αλλά είναι δύσκολο να προβλεφθούν σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας στην γέφυρα, επειδή θα πρέπει ο εξοπλισμός να είναι εγκατεστημένος μόνιμα στην γέφυρα (Yuyama et.al,2001).

Το ίδιο πρόβλημα της προσομοίωσης των αποτελεσμάτων της πραγματικότητας, στο εργαστήριο είχαν και οι Γάλλοι Toylemonde & Ranc, 2011. Στο πρώτο στάδιο του πειράματος τους, οι ρωγμές λόγω κόπωσης του οπλισμένου σκυροδέματος που βρέθηκαν μετά από επιτόπιους ελέγχους σε πραγματικές γέφυρες έπρεπε να δημιουργηθούν και στα δοκίμια, προκειμένου να υπάρχει η προσομοίωση με την πραγματικότητα. Για αυτό τον λόγο εφαρμόστηκε θλιπτική τάση στα δοκίμια μια εβδομάδα μετά την δημιουργία τους και με την βοήθεια αισθητήρων, δημιουργήθηκαν ρωγμές με πλάτος από 0,3 έως 0,5 χιλιοστά. Αφού δημιουργήθηκαν οι ρωγμές στα δοκίμια, μεταξύ των ρωγμών εφαρμόστηκε φορτίο που προσομοιάζοταν με το κινητό φορτίο που δέχονται οι πλάκες καταστρωμάτων γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι επαναλήψεις που εφαρμόστηκαν ήταν 10.000.000, οι οποίες είναι παρόμοιες με το να δέχεται φορτία η γέφυρα για 100 χρόνια λειτουργίας και το βάρος του φορτίου έφτανε τα 90 kN. Η δημιουργία ρωγμών στα δοκίμια που να προσομοιάζουν την πραγματικότητα και τις υφιστάμενες ρωγμές στην γέφυρα δεν είναι πάντα εύκολη διαδικασία και αξιόπιστη, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη και άλλες παραμέτρους όπως είναι η διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος. Παρόλαυτα εξάγεται το συμπέρασμα πως εάν υπάρχει ρωγμή λόγω κόπωσης του σκυροδέματος μικρότερη από 0,3 χιλιοστά, τότε η γέφυρα δεν έχει πρόβλημα στατικότητας ή να δημιουργηθεί πρόβλημα στο κατάστρωμα της για τα επόμενα 100 χρόνια.

Τα αποτελέσματα της έρευνας των Schlafli & Bruhwiler (1998) έδειξαν πως η κατανομή των θλιπτικών τάσεων στα δοκίμια είναι γραμμική και υπάρχει μια αξιοσημείωτη αύξηση των φθορών μετά τους πρώτους 1000 κύκλους επαναλήψεων και συνεχίζει μετά από εκατομμύρια κύκλους.

Τα σημεία τα οποία επηρεάζουν την αντοχή του οπλισμένου σκυροδέματος λόγω κόπωσης είναι:

1. να είναι καλά συγκολλημένοι οι χάλυβες του οπλισμού
2. η παρουσία διάβρωσης στον χάλυβα και στον οπλισμό του σκυροδέματος
3. η βλάβη του ίδιου του σκυροδέματος με την παρουσία μικρορωγμών σε αυτό, οι οποίες προκαλούνται από διάφορους λόγους, όπως είναι οι περιβαλλοντικοί
4. τα υψηλότερα φορτία φόρτισης των γεφυρών που μπορεί αυτές να υφίστανται σε σχέση με τα οχήματα σχεδιασμού (Schlafli & Bruhwiler, 1998).

Τέλος ιδιαίτερης σημασίας αποτελούν τα ευρήματα της έρευνας των Maekawa & Fujiyama (2013) οι οποίοι διαπίστωσαν την επίδραση που έχει στο φαινόμενο της κόπωσης η παρουσία υγρασίας στην επιφάνεια του καταστρώματος. Το βρόχινο νερό εισχωρεί στους πόρους του σκυροδέματος οδηγώντας στην ταχεία εμφάνιση ρωγμών. Η υψηλή ταχύτητα των οχημάτων που διασχίζουν καθημερινά την γέφυρα, σε συνδυασμό με την υψηλή πίεση του νερού στους πόρους έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων του σκυροδέματος, επιταχύνοντας έτσι την πρόκληση βλαβών και ρωγμών μειώνοντας την διάρκεια ζωής της πλάκας του καταστρώματος.

Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα – προτάσεις

Αρκετοί ερευνητές, έχουν πραγματοποιήσει πειραματικές μελέτες που σχετίζονται με την κόπωση των καταστρωμάτων των γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα και την αποκατάσταση της. Τα αποτελέσματα τους έχουν συνεισφέρει σε γνώση πολλά σχετικά με τους μηχανισμούς αστοχίας και τους τρόπους δημιουργίας τους, παρόλο που η συντριπτική πλειοψηφία των μελετών και των ερευνών πραγματοποιείται σε εργαστηριακό περιβάλλον και όχι σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας.

Η κόπωση στις πλάκες καταστρωμάτων των οδικών γεφυρών που είναι κατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα, εξετάστηκε στην παρούσα εργασία μέσω της μελέτης της ελληνικής και διεθνής βιβλιογραφίας.

Συμπερασματικά μέσω της εκτεταμένης ανάλυσης της βιβλιογραφίας, καθώς και της πληθώρας των πειραματικών ερευνών εξάγονται τα κάτωθι συμπεράσματα:

- Η καταπόνηση που δέχεται σε όλη τη διάρκεια ζωής της μια γέφυρα από την κυκλοφοριακή ροή, και συνεπώς από κινητά φορτία, αυξάνει συνεχώς την κόπωση της με αποτέλεσμα να μειώνεται τόσο ο χρόνος ζωής του καταστρώματος, όσο και συνολικά της ίδιας της γέφυρας.
- Βασικότερο αίτιο για την αστοχία λόγω κόπωσης κατά την εφαρμογή κινητών φορτίων αποτελεί η ρηγμάτωση του σκυροδέματος και συνεπώς η αποκόλληση του χάλυβα οπλισμού.
- Η κόπωση του σκυροδέματος στα καταστρώματα των γεφυρών είναι ένα τρισδιάστατο φαινόμενο, λόγω της γεωμετρίας και του τύπου φόρτισης των καταστρωμάτων. Οι ρωγμές που οφείλονται στην διάτμηση αυξάνονται μη γραμμικά στις πλάκες σκυροδέματος, ενώ επιβεβαιώνεται η διάχυση της κόπωσης σε γειτονικά σημεία των ρωγμών που εμφανίζονται στο σκυρόδεμα. Η κόπωση στην πλάκα αυξάνεται σταδιακά όταν τα κινητά φορτία εφαρμόζονται με υψηλή επαναληψιμότητα, ενώ αυξάνονται σταδιακά και οι ρωγμές σε όλο το μήκος της πλάκας.

- Οι περισσότεροι κατασκευαστές καταστρωμάτων γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα ακολουθούν τις προδιαγραφές AASHTO, κατά τις οποίες τα καταστρώματα προσομοιάζονται ως εγκάρσιες δοκοί προς την κυκλοφοριακή κατεύθυνση. Αποτέλεσμα αυτού αποτελεί το γεγονός ότι δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η κόπωση και η ενίσχυση που χρειάζεται ως προς την διάτμηση και την κάμψη κατά τη διεύθυνση της κυκλοφορίας των οχημάτων, μειώνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής του καταστρώματος των γεφυρών.
- Υπό ξηρές περιβαλλοντικές συνθήκες, οι περισσότερες ζημιές σε πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος σημειώνονται στην κάτω πλευρά της πλάκας όπου εντοπίζονται εύκολα κατά την διάρκεια οπτικών επιθεωρήσεων.
- Υπό υγρές περιβαλλοντικές συνθήκες, οριζόντιες ρωγμές σημειώνονται εσωτερικά κοντά στο ανώτερο στρώμα οπλισμού. Για την αντιμετώπιση τους θα πρέπει να πραγματοποιούνται δειγματοληπτικές δοκιμές πυρήνων προκειμένου να εντοπίζονται και να επιδιορθώνονται.
- Η αστοχία κόπωσης του σκυροδέματος υπό θλίψη και τάσεις διάτμησης αναμένεται μόνο εάν οι τάσεις είναι ιδιαίτερα υψηλές, δηλαδή πάνω από το 60% της αντοχής του κυλίνδρου f_{ck} . Το σκυρόδεμα που υπόκειται σε χαμηλότερες τάσεις μπορεί να αστοχήσει μόνο μετά από έναν εξαιρετικά μεγάλο αριθμό κύκλων, που υπερβαίνει τον αριθμό φορτίσεων που αναμένεται να υποβληθεί ένα κατάστρωμα γέφυρας κατά τη διάρκεια όλης της ζωής του.
- Η κόπωση της πλάκας του σκυροδέματος μπορεί να προβλεφθεί μέσω μαθηματικών σχέσεων που προβλέπουν το σημείο στο οποίο αυτή πλησιάζει στην αστοχία. Οι διάφοροι μαθηματικοί τύποι που έχουν αναπτυχθεί προσφέρουν τη δυνατότητα συστηματικών προληπτικών ελέγχων έναντι κόπωσης προκειμένου να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα ενίσχυσης της γέφυρας όταν πλησιάζει τα όρια θλίψης και λειτουργίας της.
- Όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο στην πλάκα σκυροδέματος τόσο μεγαλύτερη είναι και η κόπωση του σκυροδέματος και οι ρωγμές που δημιουργούνται.
- Η συμπεριφορά των πλακών καταστρωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί επίσης να βελτιωθεί έναντι της κόπωσης με την ενίσχυση με επιπλέον εγκάρσιες ράβδους οπλισμού.

- Η αυξημένη διατμητική τάση είναι ο «προπομπός» για την παρουσία της κόπωσης των πλακών οπλισμένου σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται στα καταστρώματα των γεφυρών.
- Μια σχεδιαστική παράμετρος που έχει σημαντικό ρόλο στην επιμήκυνση του χρόνου ζωής της κόπωσης των καταστρωμάτων γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα, είναι το πάχος της πλάκας του καταστρώματος. Μια αύξηση κατά 5% της πλάκας από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να αυξήσει κατά 45% τον χρόνο ζωής της ρωγμής που οφείλεται στην κόπωση του σκυροδέματος.
- Η αστοχία του σκυροδέματος λόγω κόπωσης μπορεί επίσης να προβλεφθεί μέσω και μη καταστρεπτικών ελέγχων του σκυροδέματος όπως γίνεται με τις ακουστικές μεθόδους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μπορεί να επιδιορθωθεί και να συντηρηθεί η πλάκα του καταστρώματος της γέφυρας πριν μεγαλώσει η ρηγμάτωση και αστοχήσει η πλάκα. Η μέθοδος αυτή πρόβλεψης της κόπωσης για τα καταστρώματα των γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα, χρησιμοποιείται στη Γαλλία σήμερα για τον υπολογισμό της ισοδύναμης φόρτισης των γεφυρών σε συνδυασμό με τις κυκλοφοριακές μετρήσεις που πραγματοποιούνται για την βαριά κυκλοφορία των γεφυρών. Επίσης δίνει την πρόβλεψη των ορίων της κόπωσης των πλακών των καταστρωμάτων των γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Η κόπωση του σκυροδέματος αυξάνει ανάλογα της θέσης των οχημάτων στην γέφυρα και όσο η θερμοκρασία αυξάνεται, αυτή επηρεάζει της μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος και προκαλεί μεγαλύτερη βλάβη λόγω κόπωσης. Για τον λόγο αυτό προτείνεται η ενίσχυση των βαρέων λωρίδων κυκλοφορίας και η υποχρεωτική κατεύθυνση των βαρέων οχημάτων σε αυτές, ιδίως σε περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες.
- Το πλάτος της πλάκας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα της πρόβλεψης της κόπωσης των καταστρωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα, καθώς όσο μικρότερο είναι το πλάτος τόσο αυξάνεται η διατμητική τάση και η αστοχία που εμφανίζουν οι πλάκες από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Η κόπωση του σκυροδέματος εκτός από τις φορτίσεις που οφείλονται στα κινητά φορτία που διασχίζουν την γέφυρα, μπορεί να προκληθεί και από τις δονήσεις που προκαλούνται στην γέφυρα από την κυκλοφορία των αυτοκινήτων. Από τις μελέτες

που διεξήχθησαν για την πρόκληση κόπωσης στην πλάκα καταστρωμάτων γεφυρών από σκυρόδεμα φανερώθηκε πως η αυξημένη συχνότητα της δόνησης προκάλεσε κόπωση στο σκυρόδεμα κυρίως στο κέντρο της πλάκας. Η μεγαλύτερη ρωγμή έφτασε σε πλάτος τα 25 χιλιοστά στην πλάκα του σκυροδέματος μετά τις 135.000 επαναλήψεις και είχε κάθετη διεύθυνση. Όπως προαναφέρθηκε παρουσιάστηκε εντονότερα στους πρώτους κύκλους επαναλήψεων της φόρτισης (5000 επαναλήψεις) και μετά μειώθηκε ο ρυθμός αύξησης της κόπωσης της πλάκας σκυροδέματος. Συνίσταται σε οδικές κυρίως γέφυρες, η στεγανοποίηση τους με μονωτικά ασφαλτικά υλικά υψηλής αντοχής ώστε να απορροφούν τόσο τις δονήσεις, όσο και την αυξημένη θερμοκρασία που επιφέρουν φαινόμενα κόπωσης

- Η κατηγορία λεπτομέρειας των 170 MPa για ελεύθερο σπλισμό χάλυβα υψηλής απόδοσης φαίνεται να είναι αισιόδοξη σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των δοκιμών.
- Οι πλάκες των καταστρωμάτων των γεφυρών εκτίθενται στη βροχή και στο νερό. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα, ότι το νερό αποτελεί έναν παράγοντα που προκαλεί δραματική μείωση της διάρκειας ζωής σε κόπωση της πλάκας της γέφυρας.
- Με βάση τις πειραματικές μελέτες συμπεραίνεται ότι η αστοχία του σκυροδέματος που υπόκειται είτε σε κυκλική φόρτιση είτε σε παρατεταμένο φορτίο, προκύπτει από την ανάπτυξη μικρορωγμών με την πάροδο του χρόνου.

Η κόπωση του σκυροδέματος στις πλάκες καταστρωμάτων των γεφυρών είναι ένα φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί τόσο στο πεδίο όσο και σε εργαστηριακές έρευνες. Η αποκατάσταση των αστοχιών αυτών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τους συμβατικούς τρόπους αποκατάστασης βλαβών σκυροδέματος είτε με τις νέες τεχνολογίες όπως είναι το σκυρόδεμα με τα ινοπλισμένα πολυμερή και το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα.

Οι Matsumoto & Suthiwarapirak (2006) για παράδειγμα σημείωσαν στην μελέτη τους πως η επισκευή των πλακών καταστρωμάτων των γεφυρών από ινοπλισμένο σκυρόδεμα προσφέρει πολύ καλά αποτελέσματα είτε η επισκευή γίνει στο κάτω μέρος είτε στο πάνω μέρος της πλάκας. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να αυξήσει την αντοχή της πλάκας σε εφελκυσμό αλλά και να κλείσει ρηγματώσεις που δημιουργούνται λόγω κόπωσης.

Μελλοντικά θα μπορούσε να διεξαχθεί και στην Ελλάδα μια μελέτη με στόχευση τη μελέτη της κόπωσης στις υφιστάμενες γέφυρες. Ειδικά για τις γέφυρες αυτές που έχουν κατασκευαστεί πριν από το 1990 και έχουν ξεπεράσει 40 χρόνια συνεχόμενης λειτουργίας. Η μελέτη αυτή θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με μετρήσεις από πραγματικά στοιχεία της κυκλοφορίας, προκειμένου να διαπιστωθεί ο βαθμός κόπωσης που έχουν υποστεί οι υφιστάμενες γέφυρες.

Βιβλιογραφία – Πηγές

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αγρίμη,Ε.,Ζάφειρα-Χατζή,Λ.,(2013) Σχεδιασμός Σύμμικτης Λοξής Οδικής Γέφυρας Δυο Ανοιγμάτων, Διπλωματική Εργασία στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών στο εργοστάσιο Μεταλλικών Κατασκευών, ΕΜΠ, Αθήνα

Αντωνίου,Δ.,(2018) Μέταλλα και μεταλλικά υλικά, Σημειώσεις μαθήματος, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα

Αργυρούδης Σ,Πιτιλάκης Κ,Κάππος Α,Σέξτος Α.,(2011) Μελέτη σεισμικής τρωτότητας γεφυρών από σκυρόδεμα. Εφαρμογή στο πολεοδομικό συγκρότημα Θεσσαλονίκης, Πτυχιακή Εργασία στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη

Ευρωκώδικας 1: Δράσεις, Μέρος 2: Φορτία Κυκλοφορίας σε γέφυρες, 2003.

Ευρωκώδικας 4: Σχεδιασμός σύμμικτων κατασκευών από χάλυβα και σκυρόδεμα, Μέρος 2: Γενικοί κανόνες και κανόνες για γέφυρες, 2005.

Κωνσταντινίδης, Δ.,(2008) Σημειώσεις Μαθήματος Γεφυροποιίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη

Μαρκογιαννάκη,Ο., (2015) Αναλυτική Έρευνα επί της Δυνατότητας Αξιοποίησης Ελκυστήρων προς Βελτίωση της Αντισεισμικής Ασφάλειας Υφισταμένων και Νέων Κατασκευών, Διδακτορική Διατριβή στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη

Παπαευθυμίου,Ι.,(2011) Διαχείριση της κατασκευής προκατασκευασμένων γεφυρών, Μεταπτυχιακή Εργασία στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, Αθήνα

Πανουτσόπουλος,Θ.,Μαλακάτας,Ν.,Τσιμώνος,Θ.,Αποστολάκης,Ζ.,Παπαευθυμίου,Κ.,Λεβογιάννης,Κ.,Μουζάκης Ν.,(2001) Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων-Τεύχος Τεχνικών Έργων, ΥΠΕΚΑ, Αθήνα

Σιγάλας, Ν.,(2010) Εισαγωγή στην Γεφυροποιία - Γέφυρες κατασκευαζόμενες με την μέθοδο της Προβολοδόμησης, Σημειώσεις μαθήματος στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, Αθήνα

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Bayane,I,.Mankar,A,.Bruhwiler,E,.Sorensen,J,. (2019) Quantification of traffic and temperature effects on the fatigue safety of a reinforced-concrete bridge deck based on monitoring data, Engineering Structures 196, 109357
- Fathalla,E,.Tanaka,Y,. Maekawa,Y,. (2019) Fatigue Lifetime Prediction of Newly Constructed RC Road Bridge Decks, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 17, 715-727
- Gaedicke,C,. Roesler,J,.Shah,S,. (2009) Fatigue crack growth prediction in concrete slabs, International Journal of Fatigue 31 (2009) 1309–1317
- Giordano,L,.Mancini,G,. (2009) Fatigue Behaviour Simulation of Bridge Deck Repaired with Self Compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 7, No. 3, 415-424, October 2009
- Fehlman,P,.Vogel,T,. (2009) Experimental investigations on the fatigue behavior of concrete bridges, IABSE Symposium, Thailand
- Hiratsyka,Y,.Senda,M,.Fujiyama,C,.Maekawa,K,. (2013) Fatigue-based Structural Behavior of RC Bridge Slabs with different loading histories, The thirteen East Asian Pacific Conference on structural Engineering and Construction, Sapporo, Japan
- Hoonhee H., Hyeajin Y., Changbim J., Byung-Suk K., (2010) Punching and fatigue behavior of long-span prestressed concrete deck slabs, Engineering Structures. Republic of Korea
- JRA, (2012). “Specification for highway bridges-part III Concrete bridges.” Tokyo, Japan: Japan Road Association
- Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Highway Bridge Superstructures,. (2015) Reference Manual, U.S Department of Transportation, Arlington, USA
- Maekawa,K,. Gebreyouhannes,G,. Mishima,T,.X, An,. (2006) Three-Dimensional Fatigue Simulation of RC Slabs under Traveling Wheel-Type Loads, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 4, No. 3, 445-457
- Matsumoto,T,. Suthiwarapirak,P,. (2006) Fatigue Analysis of RC Slabs and Repaired RC Slabs Based on Crack Bridging Degradation Concept, JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING, Vol.132, pp:939-948
- Papakonstantinou,C,.Petrou,M,.Harries,K,. (2001) Fatigue behavior of RC Beams Strengthened with GFRP sheets, Journal of Composites for Construction, November 2001

Petrou,M,. Perdikaris,P,. (1998) Fatigue failure mechanism of a concrete bridge under traffic loads, ASCE Journal of Bridge Engineering, Vol.1,No.4, November 1998

Schlaflli,M,.Bruhwiler,E,. (1998) Fatigue of existing reinforced concrete bridge deck slabs, Engineering Structures, Vol. 20, No. 11, pp. 991–998, 1998

Tanaka, Y., Maekawa, K., Maeshima, T., Iwaki, I., Nishida, T. and Shiotani, T., (2017). “Data assimilation for fatigue life assessment of RC bridge decks coupled with hygro-mechanistic model and nondestructive inspection.” Journal of Disaster Research, 12(3), 422- 431.

Toutlemonde,F,.Ranc,G,. (2011) Fatigue Tests Of Cracked Reinforced Concrete Slabs For Estimating The Service Life Of Composite Bridge Decks, Revue Française de Génie Civil, 5:4, 483-494,

Yuyama,S,.Li,Z,.Yoshizawa,M,.Tomokiyo,T,.Uomoto,T,. (2001) Evaluation of fatigue damage in reinforced concrete slab by acoustic emission, NDT International, 381-387

Xu,C,.Masuya,H,. (2018) Study on the Vibration Feature of Concrete Deck Slabs Under Fatigue Wheel Loading, Experimental Vibration Analysis for Civil Structures, Lecture Notes in Civil Engineering, Springer International Publishing