



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Αστοχίες συγκολλητών κατασκευών από ψαθυρή  
θραύση και κόπωση (1980-2020)

Κερμελίδης Α. Θεόδωρος  
Επιβλέπων καθηγητής: Χαϊδεμενόπουλος Ν. Γρηγόριος



Εξεταστική Επιτροπή:

Χαϊδεμενόπουλος Γρηγόριος

Αράβας Νικόλαος

Κερμανίδης Αλέξιος

# Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο για τη καθοδήγησή του κατά τη σύνταξη αυτής της εργασίας, καθώς και όλους τους καθηγητές και τις καθηγήτριες του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για την υπομονή τους και τις προσπάθειές που καταβάλουν καθημερινά παρά τις υπάρχουσες δυσκολίες. Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνω στους γονείς μου και τα αδέρφια μου για την αμέριστη υποστήριξη που μου έδωσαν όλα τα χρόνια της μαθητικής και φοιτητικής μου ζωής, καθώς και σε όλους τους δασκάλους μου οι οποίοι στάθηκαν φωτεινοί οδοδείκτες στο δρόμο της επιστήμης και της γνώσης.

# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	iv
Περιεχόμενα .....	v
Ευρετήριο εικόνων .....	vi
Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 1: Θεωρία.....	2
1.1 Γενικά προβλήματα των συγκολλήσεων .....	2
1.2 Μηχανισμός Ψαθυρής Θραύσης.....	3
1.3 Μηχανισμός Κόπωσης.....	4
Κεφάλαιο 2: Ατυχήματα.....	5
2.1 Εκτροχιασμός Τρένου στη Μαλαισία (1987) .....	5
2.2 Σεισμός στο Northridge (1994).....	9
2.3 Γέφυρα I-64 Blue River (1994).....	11
2.4 Γέφυρα Seongsu (1994) .....	13
2.5 Ο Μεγάλος Σεισμός του Hanshin (1995).....	15
2.6 Γέφυρα Hoan (2000) .....	17
2.7 Έκρηξη Αγωγού στο San Bruno (2010) .....	19
2.8 Δυστύχημα σε εργοστάσιο της Ford (2014).....	23
2.9 Διαρροή αμμωνίας από δοχείο ψύξης (2019).....	25
Κεφάλαιο 3: Πίνακας .....	27
Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα.....	28
Βιβλιογραφία.....	29

# Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1.1.1 – α) Πιτσιλίσματα β) Μικρή λίμνη συγκόλλησης με κενά γ) Ατελής διείσδυση δ) Πόροι.....	2
Εικόνα 1.2.1 – Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για όλκιμο υλικό σε αντίθεση με ψαθυρό	3
Εικόνα 1.3.1 – Αριστερά: Πλαστική ζώνη. Δεξιά: Διάγραμμα Τάσης-Χρόνου.....	4
Εικόνα 2.1.1 – Το τρένο Ekspres Sinaran Petang.....	5
Εικόνα 2.1.2 - Αριστερά: Δείγματα από την αριστερή ράγα του τρένου. Δεξιά: Η επιφάνεια θραύσης στη συγκόλληση (σημείο Β).....	6
Εικόνα 2.1.3 – Η διατομή στο σημείο C (χαρακτηριστικά όλκιμης θραύσης) .....	6
Εικόνα 2.1.4 – Αριστερά: Οι περιοχές στη διατομή της συγκόλλησης. Δεξιά: Η διατομή της συγκόλλησης μετά τον καθαρισμό.....	7
Εικόνα 2.1.5 – Κρυσταλλικές δομές σε διάφορα σημεία της ράγας.....	8
Εικόνα 2.1.6 – Η ρωγμή κόπωσης.....	8
Εικόνα 2.2.1 – Αριστερά: Σχεδιάγραμμα της συνδεσμολογίας. Δεξιά: Σημείο έναρξης ρωγμής.....	9
Εικόνα 2.2.2 – Πάνω: Η διαδρομή της ρωγμής. Κάτω: Προσομοίωση της κατανομής τάσεων στη σύνδεση.....	10
Εικόνα 2.3.1 – Κέντρο: Σχέδιο της ρωγμής. Αριστερά και Δεξιά: Η ρωγμή που παρατηρήθηκε.....	11
Εικόνα 2.3.2 – Αριστερά: Τρισδιάστατη μορφή του σχεδίου. Δεξιά: Λεπτομέρεια της σύνδεσης και της ρωγμής.....	12
Εικόνα 2.4.1 – Το κατεστραμμένο κομμάτι της γέφυρας Seongsu.....	13
Εικόνα 2.4.2 – Η καταστροφή σε στάδια.....	14
Εικόνα 2.4.3 – Η διαφορά του σχεδίου με την υλοποίησή του.....	14
Εικόνα 2.5.1 – Εικόνες μετά το σεισμό του Χάνσιν.....	15
Εικόνα 2.5.2 – Η συχνότερη αστοχία στο σεισμό του Χάνσιν.....	16
Εικόνα 2.6.1 – Η ρωγμή που παρατηρήθηκε στη γέφυρα Χόαν.....	17
Εικόνα 2.6.2 – Δεξιά: Η φλάντζα στη σύνδεση της γέφυρας. Αριστερά: Η φλάντζα που ανακτήθηκε για μελέτη.....	18
Εικόνα 2.6.3 – Δεξιά: Η φλάντζα στη γέφυρα I-64. Αριστερά: Η φλάντζα στη γέφυρα Χόαν	18
Εικόνα 2.7.1 – Εικόνες από την έκρηξη.....	19
Εικόνα 2.7.2 – Τα τμήματα του αγωγού.....	20
Εικόνα 2.7.3 – Επιτυχής διπλή συγκόλληση βυθισμένου τόξου.....	20
Εικόνα 2.7.4 – Η ανεπιτυχής συγκόλληση C2.....	20
Εικόνα 2.7.5 – Συγκόλληση των ελασμάτων με υψηλό πορώδες.....	21
Εικόνα 2.7.6 – Η διαδρομή της θραύσης.....	22
Εικόνα 2.8.1 – Η περόνη ασφαλείας μετά την αστοχία.....	23
Εικόνα 2.8.2 – Η φλάντζα μετά την αστοχία.....	24
Εικόνα 2.8.3 – Η διάμετρος οπής σε σχέση με τη διάμετρο περόνης.....	24
Εικόνα 2.9.1 – Το δοχείο ψύξης.....	25
Εικόνα 2.9.2 – Το βόρειο άκρο του δοχείου ψύξης.....	26
Εικόνα 2.9.3 – Εσωτερική ρωγμή και η ζώνη κόπωσης.....	26

# Εισαγωγή

Η συγκόλληση αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους τρόπους σύνδεσης μεταλλικών στοιχείων. Θεωρείται τόσο παλιά όσο και η χρήση των μετάλλων (3000 π.Χ.). Όσο η χρήση των συγκολλήσεων διαδίδεται, τόσο βελτιστοποιείται. Έχουμε φτάσει λοιπόν σε ένα σημείο στη σύγχρονη εποχή, στο οποίο γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και ελαττώματα που μπορούν να εμφανίσουν τέτοιες κατασκευές. Παρόλα αυτά, ακόμα και σε αυτό το σημείο, έχουμε σφάλματα που πολλές φορές διαπιστώνονται εγκαίρως και διορθώνονται πριν τη χρήση της κατασκευής, κάποιες φορές κατά τη χρήση και συντήρηση των μηχανολογικών κατασκευών αλλά και πάλι διορθώνονται, και κάποιες, ευτυχώς όχι πολλές φορές, εντοπίζονται κατόπιν αστοχίας της κατασκευής ή μέρους του μηχανολογικού εξοπλισμού. Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι μια προσπάθεια παρουσίασης ορισμένων τέτοιων αστοχιών με σκοπό την ανάλυση των προβλημάτων που ταλαιπωρούν στη σημερινή εποχή τις συγκολλητές κατασκευές.

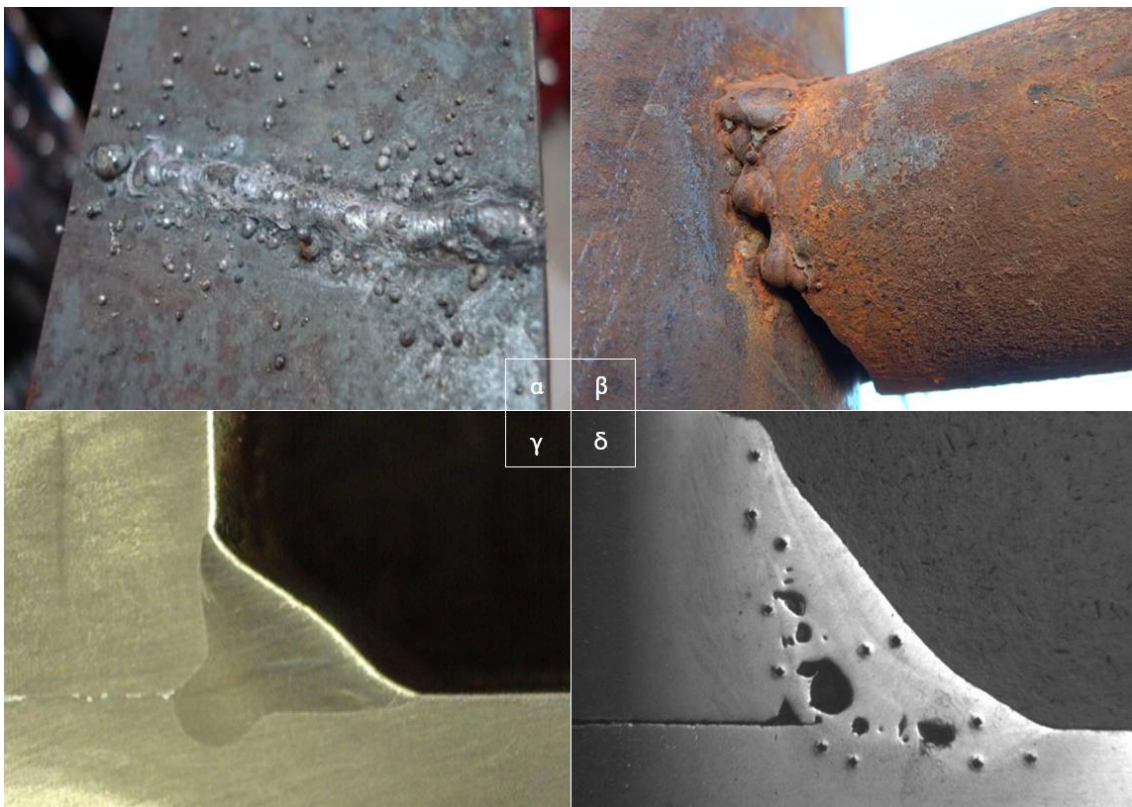
# Κεφάλαιο 1: Θεωρία

## 1.1 Γενικά προβλήματα των συγκολλήσεων

Η διαδικασία της συγκόλλησης, της ένωσης δηλαδή δύο ή περισσότερων μεταλλικών στοιχείων με σκοπό τη μεταξύ τους μεταλλουργική σύνδεση, συχνά εμφανίζει ατέλειες. Αυτές οφείλονται συνήθως στη κακή διενέργεια της διαδικασίας, δηλαδή την άγνοια ή τη περιφρόνηση των προδιαγραφών της κάθε συγκόλλησης.

Ορισμένα λάθη είναι τόσο φανερά που και ένας απλός παρατηρητής θα μπορούσε να τα αντιληφθεί. Τα πιτσιλίσματα και η πολύ μικρή λίμνη συγκόλλησης σε σημείο μάλιστα ορισμένες φορές να παρατηρούνται κενά στα ελάσματα (εικόνα 1.1.1α, 1.1.1β) είναι εξόφθαλμα λάθη στη συγκόλληση.

Οι ατέλειες όμως που δεν φαίνονται με γυμνό μάτι είναι ίσως οι πιο επικίνδυνες, διότι ή είναι κρυμμένες μέσα στη λίμνη της συγκόλλησης και μόνο με μια τομή θα μπορούσαμε να τις εμφανίσουμε, πράγμα αδύνατο σε μια κατασκευή, ή ακόμα χειρότερα, εμφωλεύουν μέσα στη κρυσταλλική δομή της θερμοεπηρεασμένης ζώνης της συγκόλλησης και ανιχνεύεται μόνο με κρυσταλλογραφική μελέτη. Τέτοια παραδείγματα είναι η ατελής διείσδυση και οι πόροι (εικόνα 1.1.1γ, 1.1.1δ). Τέλος, να σημειωθεί ότι υπάρχουν και άλλα πολλά ελαττώματα που παρατηρούνται σε ανεπιτυχείς συγκολλήσεις, απλά εδώ αναφέρονται αυτά που πρόκειται να συναντήσουμε στα ατυχήματά μας.

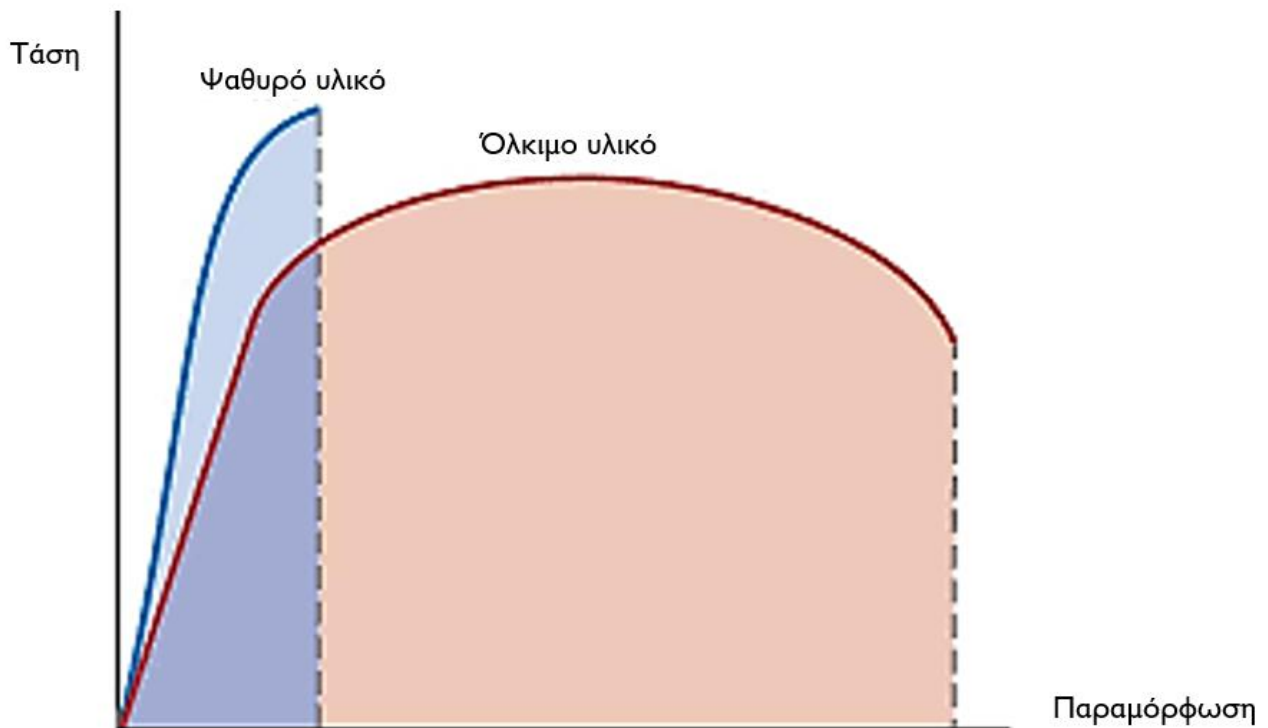


Εικόνα 1.1.1 – α) Πιτσιλίσματα β) Μικρή λίμνη συγκόλλησης με κενά γ) Ατελής διείσδυση δ) Πόροι



## 1.2 Μηχανισμός Ψαθυρής Θραύσης

Πρόκειται για την απότομη θραύση του μετάλλου, έχοντας εμφανίσει πολύ μικρές ή καθόλου παραμορφώσεις (εικόνα 1.2.1). Η κύρια αιτία είναι η ύπαρξη κάποιας ρωγμής, που αποτελεί ασυνέχεια στη δομή του υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η ρωγμή, τόσο μικρότερα είναι τα φορτία που απαιτούνται ώστε το υλικό να αστοχήσει. Αυτό σημαίνει ότι το φαινόμενο της ψαθυρής θραύσης μπορεί να εμφανιστεί ακόμα και σε φαινομενικά κανονικές συνθήκες λειτουργίας.



Εικόνα 1.2.1 – Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για όλκιμο υλικό σε αντίθεση με ψαθυρό

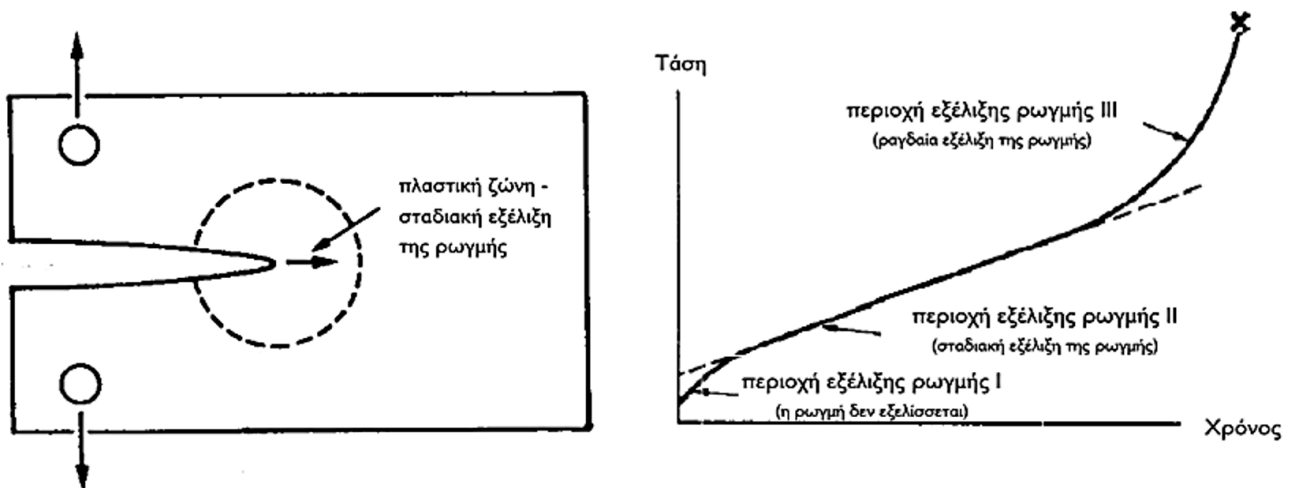
Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν το κατά πόσο μία συγκόλληση θα εμφανίσει ψαθυρή συμπεριφορά. Υψηλές παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις στη περιοχή της συγκόλλησης καθώς και χαμηλή δυσθραυστότητα του υλικού, αντίσταση δηλαδή στη διάδοση ρωγμών, προκαλούν ψαθυρή αστοχία. Σε γενικές γραμμές, οι χάλυβες υψηλής αντοχής έχουν χαμηλότερη δυσθραυστότητα και συνεπώς μικρότερο κρίσιμο μέγεθος ρωγμής από τους μαλακούς χάλυβες. Οι συγκολλήσεις από μόνες τους είναι επιρρεπείς στη δημιουργία μικρορωγμών. Όταν λοιπόν συνδυάζονται με υλικά που δεν αντιστέκονται στη διάδοση αυτών των ασυνεχειών, δημιουργούνται πολύ επικίνδυνες συνθήκες. Η επιτήρηση των συγκολλήσεων θα πρέπει να είναι ενδεδειγμένη σε τέτοιες περιπτώσεις.

### 1.3 Μηχανισμός Κόπωσης

Τα φορτία σχεδιασμού σε όλες τις κατασκευές είναι συνήθως τα όρια ως προς πλαστική αστοχία. Παρόλα αυτά, η φύση των φορτίων, δηλαδή το αν αυτά είναι στατικά ή εναλλασσόμενα, έχει μεγάλη σημασία στην αντοχή των υλικών. Όταν τα κατασκευαστικά στοιχεία υποβάλλονται σε κυκλική φόρτιση, μπορεί να έχουμε αστοχία σε υποκρίσιμα φορτία. Η αστοχία αυτή οφείλεται στη κόπωση των μετάλλων. Η κόπωση, η συνεχής δηλαδή επιβάρυνση του υλικού με εναλλασσόμενα φορτία, προκαλεί τη σταδιακή εξάπλωση των ρωγμών.

Στην εικόνα 1.3.1 βλέπουμε στην αριστερή μεριά τη ζώνη που δημιουργείται στη κορυφή της ρωγμής. Εκείνο το σημείο της κατασκευής αποτελεί κέντρο συσσώρευσης τάσεων και με επαναλαμβανόμενες φορτίσεις το μήκος ρωγμής σταδιακά μεγαλώνει (περιοχή II). Από ένα σημείο και μετά όμως το υλικό διαρρέει με μεγάλη ταχύτητα και η ρωγμή γίνεται ασυνέχεια που διαπερνάει το υλικό και το οδηγεί στη τελική θραύση(περιοχή III).

Οι συγκολλήσεις γενικά μειώνουν την αντοχή σε κόπωση και αυτό οφείλεται στις συγκεντρώσεις τάσεων λόγω της γεωμετρίας της σύνδεσης ή στη κακή τους ποιότητα. Ο τύπος σύνδεσης έχει σημαντική επίδραση στη κόπωση των συγκολλητών συνδέσεων. Οι μετωπικές συγκολλήσεις προτιμώνται από τις συγκολλήσεις επικάλυψης. Τέλος, για την αντιμετώπιση όλων αυτών των προβλημάτων είναι απαραίτητος ο έλεγχος σε κάθε στάδιο της κατασκευής, καθώς, συγκεκριμένα για τις συγκολλήσεις, προτείνεται να εφαρμόζονται μηχανικές (τρόχισμα, λείανση κ.α.) και θερμικές μέθοδοι (επανάτξη, ανόπτηση κ.α.) με στόχο τα τελικά προφίλ να είναι ομαλά, χωρίς ανισορροπίες.



Εικόνα 1.3.1 – Αριστερά: Πλαστική ζώνη. Δεξιά: Διάγραμμα Τάσης-Χρόνου

# Κεφάλαιο 2: Ατυχήματα

## 2.1 Εκτροχιασμός Τρένου στη Μαλαισία (1987)

Στα τέλη της δεκαετίας στου 90 ένα τρένο εκτροχιάστηκε στη πολιτεία του Τζοχόρ της Μαλαισίας, με τρεις νεκρούς και είκοσι τρεις τραυματίες. Το τρένο Ekspres Sinaran Petang (εικόνα 2.1.1) αποτελούνταν από οκτώ άμαξες και μετέφερε γύρω στους 200 επιβάτες από τη Σιγκαπούρη. Ορισμένοι διασωθέντες επιβάτες έδωσαν την μαρτυρία ότι άκουσαν «έναν τρομερό κρότο που ακολούθηθηκε από δυνατές δονήσεις». Το τρένο άρχισε να γέρνει δεξιά και αριστερά και έτσι τα τέσσερα τελευταία βαγόνια του κατέληξαν να πέσουν στον βάλτο. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με τους επιβάτες, η αμαξοστοιχία δεν κινούνταν με μεγάλη ταχύτητα τη στιγμή του εκτροχιασμού.

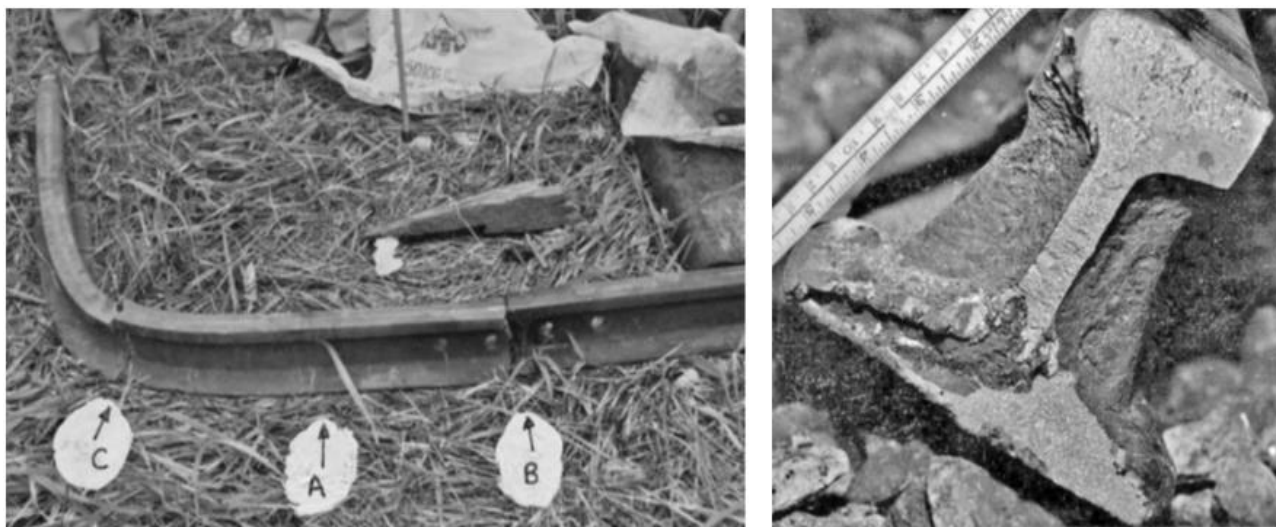


Εικόνα 2.1.1 - Το τρένο Ekspres Sinaran Petang

Δείγματα που βρέθηκαν στον χώρο του δυστυχήματος αποκαλύπτουν θραύσεις πολλών φύσεων. Έγινε μεταλλογραφική ανάλυση στα δοκίμια για να βρεθούν μεταβολές στα επίπεδα των κόκκων και στην αναλογία περλίτη-φερρίτη του βασικού μετάλλου και του μετάλλου συγκόλλησης. Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν μηχανικές δοκιμές με τη χρήση της μεθόδου χτύπου Charpy. Η συνισταμένη των αποτελεσμάτων καταδεικνυε ότι υπήρχαν σημαντικές μη ανιχνεύσιμες ατέλειες στη συγκόλληση.

Στο δείγμα από την αριστερή ράγα που έχουμε παρακάτω (εικόνα 2.1.2), φαίνεται θραύση στην αργιλιοθερμική συγκόλληση (ή συγκόλληση με θερμότητα) στο σημείο Β. Η δεύτερη θραύση που σημειώθηκε στο παρόν δοκίμιο ήταν στο βασικό μέταλλο και στο σημείο C. Να σημειωθεί

ότι η κατεύθυνση κίνησης είναι από το σημείο Β στο C, και ότι πριν το σημείο Β δεν υπήρξε παραμόρφωση στις ράγες για περίπου 3m.



Εικόνα 2.1.2 - Αριστερά: Δείγματα από την αριστερή ράγα του τρένου. Δεξιά: Η επιφάνεια θραύσης στη συγκόλληση (σημείο Β)

Στη παραπάνω διατομή (σημείο Β) βλέπουμε στην διατομή της ράγας τη προϋπάρχουσα ρωγμή (το σκούρο μέρος στη κάτω μεριά). Τέτοιες ατέλειες ήταν διάσπαρτες στις ράγες. Η επιφάνεια θραύσης στο σημείο C (εικόνα 2.1.3) ήταν όλκιμης φύσεως, και μάλλον αποτέλεσμα αναμενόμενης υπερφόρτισης.



Εικόνα 2.1.3 – Η διατομή στο σημείο C (χαρακτηριστικά όλκιμης θραύσης)

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η θραύση στη συγκόλληση συνέβη πρώτα, οδηγώντας στην όλκιμη θραύση της ράγας. Παρόλα αυτά, ερωτήματα σχετικά με το είδος φόρτισης που προκάλεσε τη ψαθυρή θραύση και το αν η θραύση ήταν αποτέλεσμα ή αιτία του εκτροχιασμού παραμένουν αναπάντητα.

Στο σημείο B, που αποτελεί το κεντρικό σημείο ενδιαφέροντος, έγινε περαιτέρω μελέτη η οποία οδήγησε σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Στο παρακάτω αντιπροσωπευτικό σχεδιάγραμμα (εικόνα 2.1.4) φαίνεται:

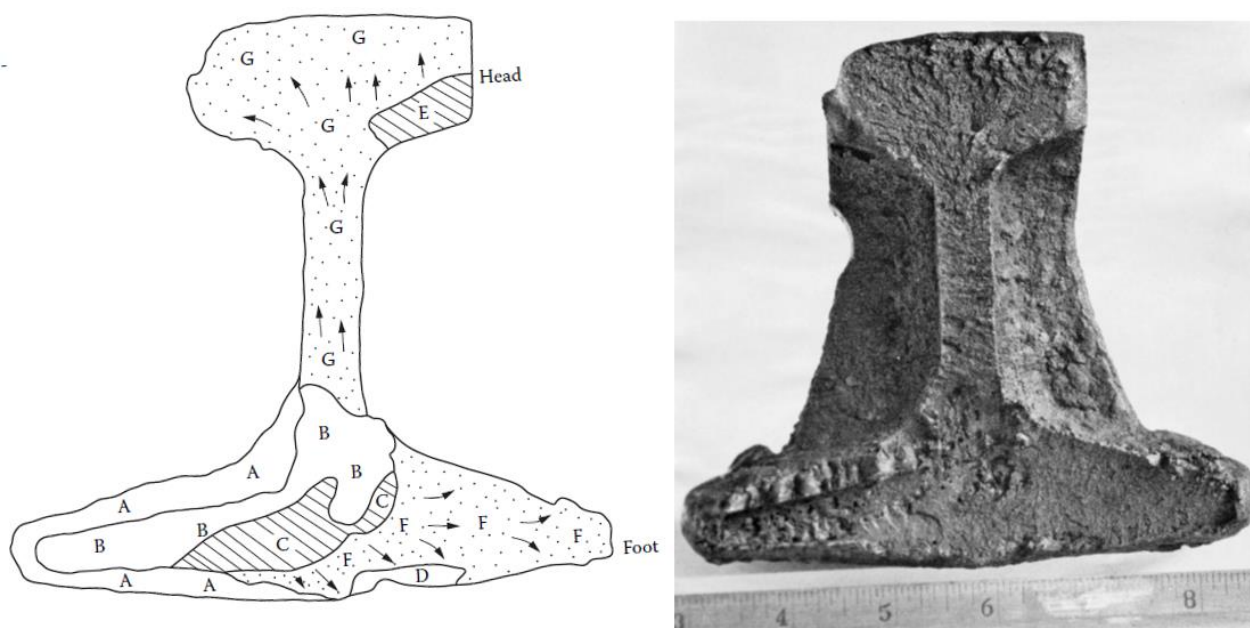
Περιοχή A: Ατελής διείσδυση του μετάλλου συγκόλλησης

Περιοχή B: Μεγάλο πορώδες

Περιοχή C: Μικρορωγμές λόγω των πολλών πόρων της περιοχής B

Περιοχές D και E: Μικροελαττώματα

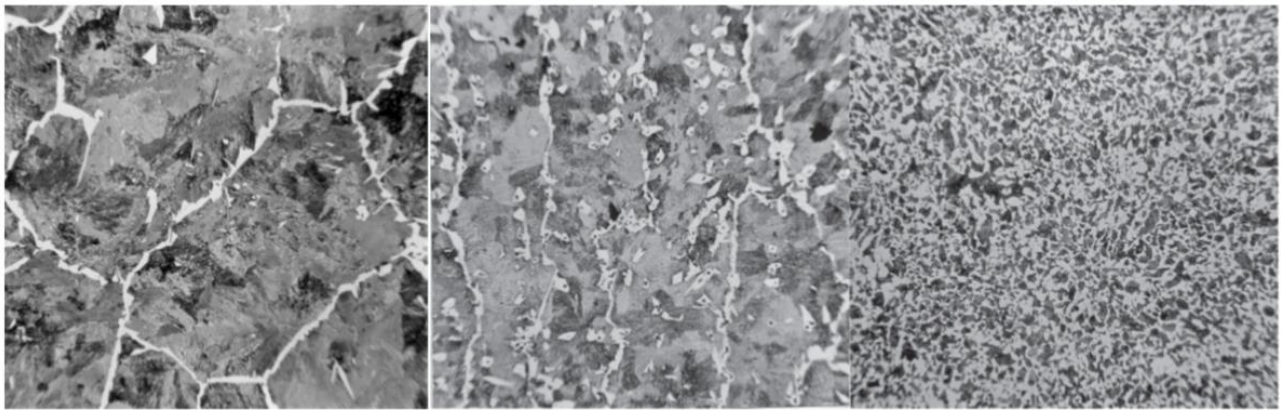
Περιοχές F και G: Επιφάνειες ψαθυρής θραύσης λόγω των ρωγμών και του πορώδους



Εικόνα 2.1.4 - Αριστερά: Οι περιοχές στη διατομή της συγκόλλησης. Δεξιά: Η διατομή της συγκόλλησης μετά τον καθαρισμό

Τόσο το βασικό μέταλλο όσο και το μέταλλο συγκόλλησης βρέθηκαν αρκετά λεπτόκοκκα με σκληρότητα 238HB κατά μέσο όρο για το πρώτο και 260HB για το δεύτερο. Τα νούμερα αυτά ήταν λογικά για τον χάλυβα BS11 ο οποίος έχει όριο πλαστικής διαρροής τα 462 MPa, και δεν αντιμετώπιζε προβλήματα με τις μικρότερες φορτίσεις από το τρένο.

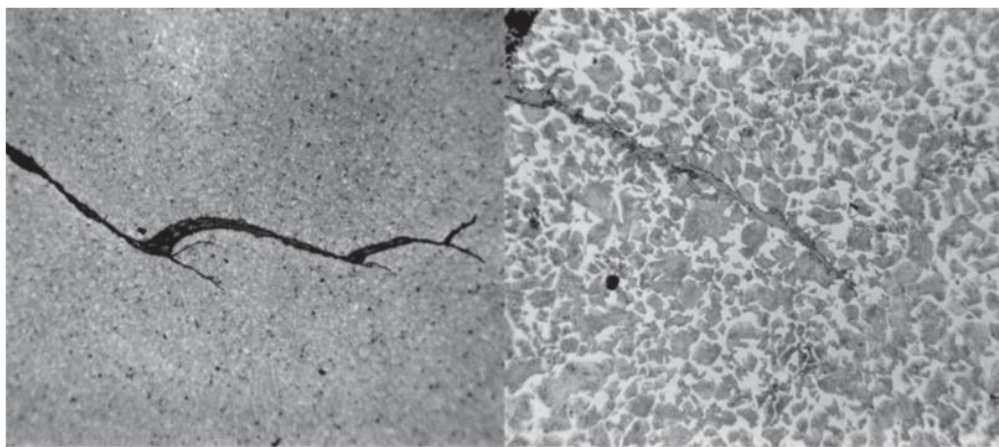
Ανησυχητικό είναι ότι κατά μήκος των ραγών η δομή του μετάλλου συγκόλλησης, αντίθετα με αυτή του βασικού μετάλλου, παρουσίαζε μεγάλες μεταβολές όπως φαίνεται και στις παρακάτω μικροδομές (εικόνα 2.1.5). Διάφορα μικροσφάλματα κατά μήκος των ραγών όπως στην περιοχή D και E ήταν αναμενόμενα μετά από την πολύχρονη καταπόνηση των ραγών και δεν είναι απίθανο ορισμένα να δημιουργήθηκαν τη στιγμή του εκτροχιασμού. Αυτό που δεν ήταν αναμενόμενο ήταν μία εσωτερική ρωγμή μήκους 10mm η οποία ήταν γεμάτη με οξείδια (εικόνα 2.1.6). Η ρωγμή αυτή βρέθηκε σε απόσταση 18mm από το σημείο της θραύσης, πράγμα που αποδείκνυε ότι είχε αρχίσει να μεταδίδεται εδώ και καιρό.



Βασικό μέταλλο

Μέταλλο συγκόλλησης σε δύο διαφορετικά σημεία

Εικόνα 2.1.5 – Κρυσταλλικές δομές σε διάφορα σημεία της ράγας



Ρωγμή ~10mm

Εικόνα 2.1.6 – Η ρωγμή κόπωσης

Οι δοκιμές που έγιναν, έδειξαν ότι τα κρίσιμα φορτία που ασκήθηκαν ήταν χαρακτηριστικά χαμηλότερα από το όριο διαρροής του υλικού (462MPa). Υπό αυτές τις συνθήκες, αποκλείεται η πλαστική παραμόρφωση των ραγών πριν την αστοχία τους.

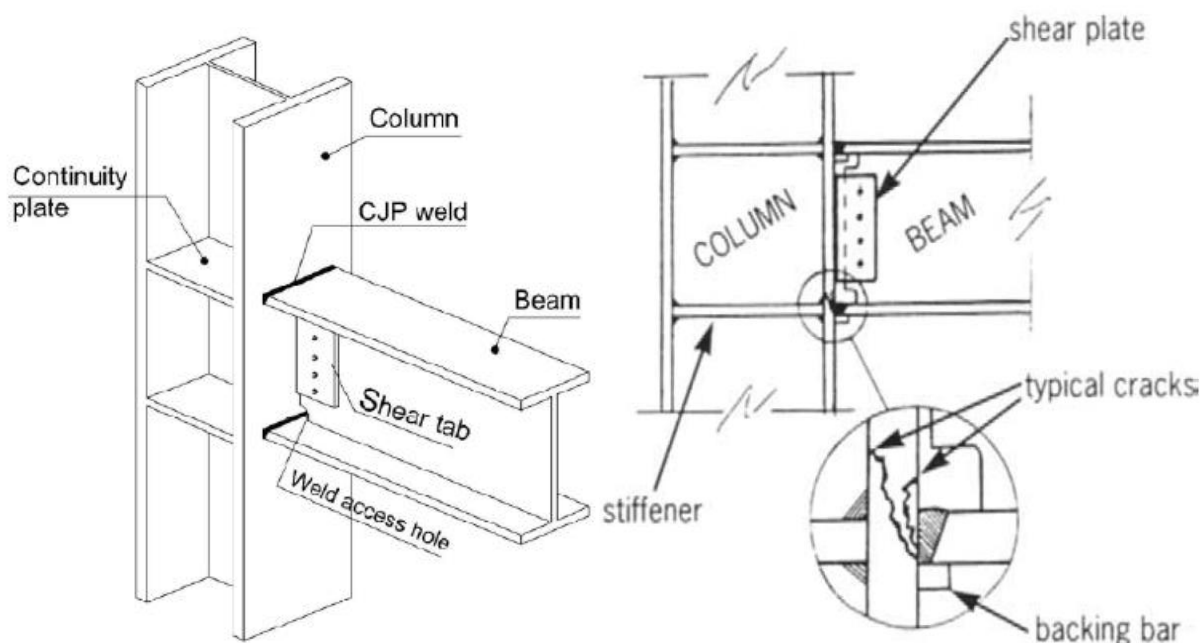
Ψαθυρή θραύση επίσης δεν αναμενόταν σύμφωνα με τον σχεδιασμό, όμως η κόπωση του υλικού έριξε το όριο αντοχής. Τις νυχτερινές ώρες, λόγω της πτώσης της θερμοκρασίας, οι ράγες επιβαρύνονταν με επιπλέον θλιπτικά φορτία, ξεπερνώντας τη κρίσιμη τάση για την εξέλιξη της ρωγμής.

Σε τελική ανάλυση, φαίνεται ότι η διαδικασία της συγκόλλησης δεν διενεργήθηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές και τα σφάλματα που προέκυψαν από το πορώδες δεν ανιχνεύτηκαν σε επόμενο έλεγχο. Είναι γνωστό ότι η συγκόλληση με θερμότητα γενικά παρουσιάζει ελαττώματα παρόμοια με αυτά της χύτευσης. Αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία και η εξέλιξη μικρορωγμών οι οποίες αποτέλεσαν «φωλιές» για διάβρωση και τελική αστοχία.

## 2.2 Σεισμός στο Northridge (1994)

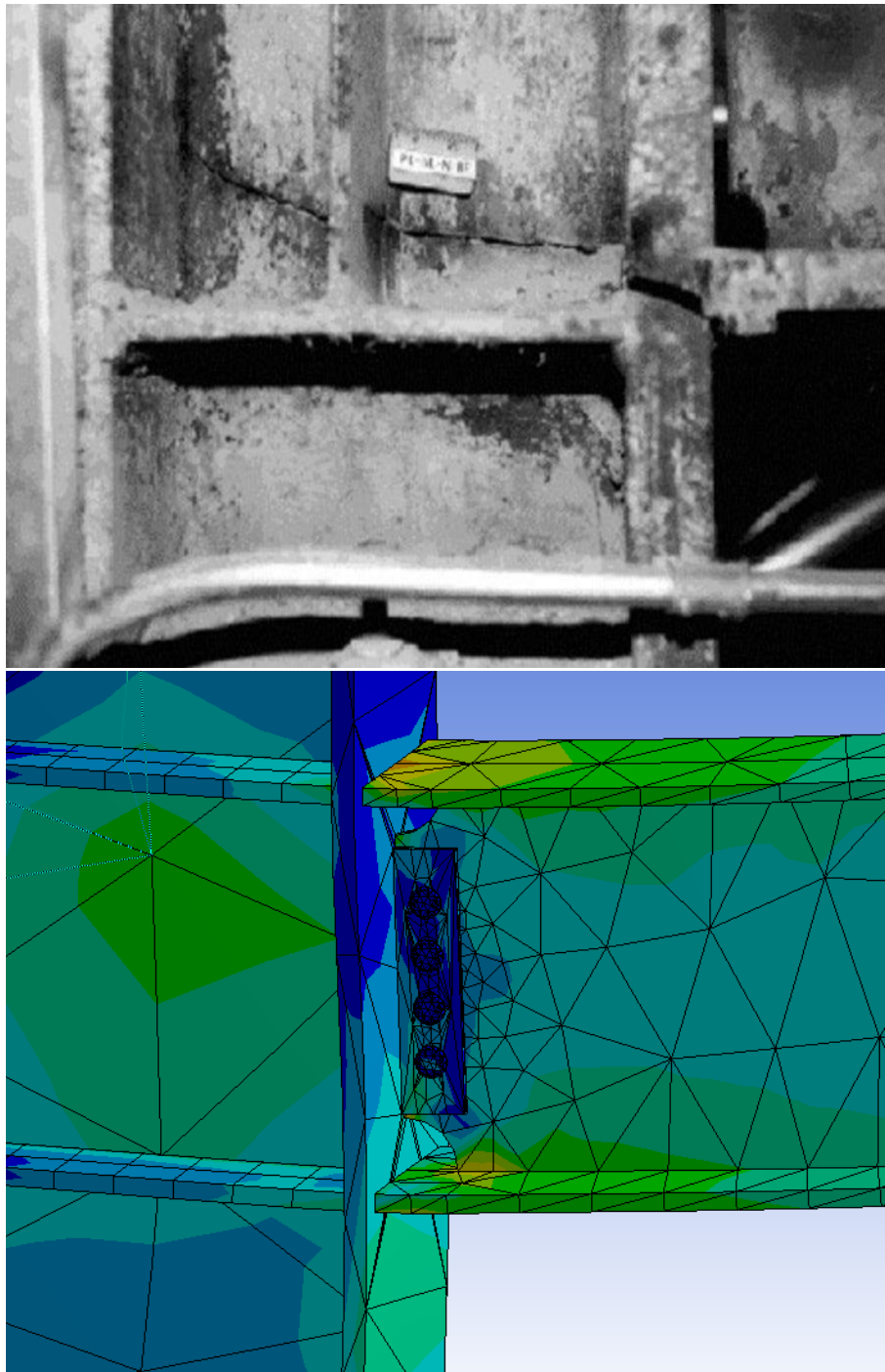
Στις 17 Ιανουαρίου του 1994, ο Σεισμός του Νόρθριτζ έπληξε την κοιλάδα Σαν Φερνάντο του Λος Άντζελες στις 4:30 το πρωί, σκοτώνοντας 72 και αφήνοντας άστεγους 26.026 ανθρώπους. Στα 6,7 ρίχτερ, διήρκησε μόλις 15 δευτερόλεπτα και η μέγιστη οριζόντια σεισμική επιτάχυνση του εδάφους που σημειώθηκε στα 1,82 g, αποτελεί μέχρι σήμερα παγκόσμιο ρεκόρ. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί σε μεγάλο βαθμό το ύψους 50 δισεκατομμυρίων εκτιμώμενο κόστος των καταστροφών. Παρόλα αυτά, αρκετά κτίρια έπεσαν πολύ έξω από στις προσδοκίες των κατασκευαστών τους, πράγμα που αποτέλεσε πεδίο μελέτης για πολλούς εμπειρογνώμονες.

Οι μελέτες που διεξήχθησαν, έδειξαν ότι το πρόβλημα εμφανίστηκε στην πιο διαδεδομένη «αντισεισμική» σύνδεση δοκών εκείνης της εποχής. Η συγκολλητή σύνδεση δοκού-υποστύλων με τη χρήση μιας μικρής λάμας στήριξης (backing bar) ήταν εγκεκριμένη και περιέχονταν στις αμερικανικές προδιαγραφές όπως φαίνεται παρακάτω (εικόνα 2.2.1).



Εικόνα 2.2.1 – Αριστερά: Σχεδιάγραμμα της συνδεσμολογίας. Δεξιά: Σημείο έναρξης ρωγμής

Φαίνεται ότι ο συγκεκριμένος σχεδιασμός είχε επιτυχία σε διάφορα μεμονωμένα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε αρκετά αμερικάνικα πανεπιστήμια, καθώς οδηγούσε πάντα σε όλικμη θραύση. Κατά τη διάρκεια του σεισμού, όπως ήταν αναμενόμενο, υπήρξε έντονη συγκέντρωση τάσεων στους συνδέσμους. Η κατάρρευση πολλών τέτοιων δικτυωμάτων, φαίνεται να οφείλεται στην δημιουργία ρωγμών στη θερμοεπηρεασμένη ζώνη και πιο συγκεκριμένα στη ρίζα της συγκόλλησης. Είχε παρατηρηθεί και παλαιότερα ότι η συσσώρευση τάσεων μαζί με «κενά» στη σύνδεση λόγω μη επαρκούς διείσδυσης του μετάλλου συγκόλλησης, μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία και τη διάδοση ρωγμών στη κατασκευή. Επιπλέον, οι βοηθητικές μπάρες στήριξης φάνηκε ότι είχαν καταλυτικό ρόλο στη δημιουργία των ρωγμών, αφού η μικρή τους επιφάνεια ασκούσε μεγάλες πιέσεις (εικόνα 2.2.2). Αυτό οδήγησε τους αναλυτές στο συμπέρασμα ότι όσο και να βελτιωνόταν η ποιότητα της συγκόλλησης, η συμπεριφορά του δικτυώματος δεν θα άλλαζε. Ο σωστός επανασχεδιασμός ήταν απαραίτητος.



Εικόνα 2.2.2 – Πάνω: Η διαδρομή της ρωγμής. Κάτω: Προσομοίωση της κατανομής τάσεων στη σύνδεση.

Η δυνατότητα προσομοίωσης της εντατικής κατάστασης των κατασκευών μας φέρνει σε θέση σήμερα να κατανοήσουμε τα λάθη του παρελθόντος. Φαίνεται ότι τα σημεία των συγκολλήσεων ήταν και σημεία συγκέντρωσης τάσεων, πράγμα που κανονικά αποφεύγεται. Οι συγκολλήσεις γενικά έχουν το μειονέκτημα ότι επηρεάζουν τη μικροδομή της θερμοεπηρεασμένης ζώνης. Αυτό συνεπάγεται ανομοιογένεια στη μηχανική συμπεριφορά. Ακραία γεγονότα, όπως είναι οι σεισμοί, καταπονούν με εναλλασσόμενα φορτία τα ευαίσθητα αυτά μέρη με αποτέλεσμα τη δημιουργία και την εξέλιξη ρωγμών.



## 2.3 Γέφυρα I-64 Blue River (1994)

Το Μάιο του 1994 η ομάδα συντήρησης του Τμήματος Μεταφορών της Ιντιάνα των Η.Π.Α., ανακάλυψε ότι η εξωτερική δοκός μιας μικρής παλιάς γέφυρας είχε μια διαμήκη θραύση. Ουσιαστικά το βάρος της γέφυρας το στήριζαν οι άλλες τρεις οριζόντιες δοκοί κατά το μήκος της. Η θραύση, που εικάζεται ότι έγινε τον πολύ κρύο χειμώνα εκείνου το έτους, ξεκινούσε από το σημείο σύνδεσης της κάτω φλάντζας στην εσωτερική κάθετη λάμα από την οποία στηρίζονταν οι εγκάρσιες δοκοί και με μια πρώτη ματιά φάνηκε ότι το πρόβλημα ήταν κοντά στη βάση της συγκόλλησης (εικόνα 2.3.1).



Εικόνα 2.3.1 – Η ρωγμή που παρατηρήθηκε

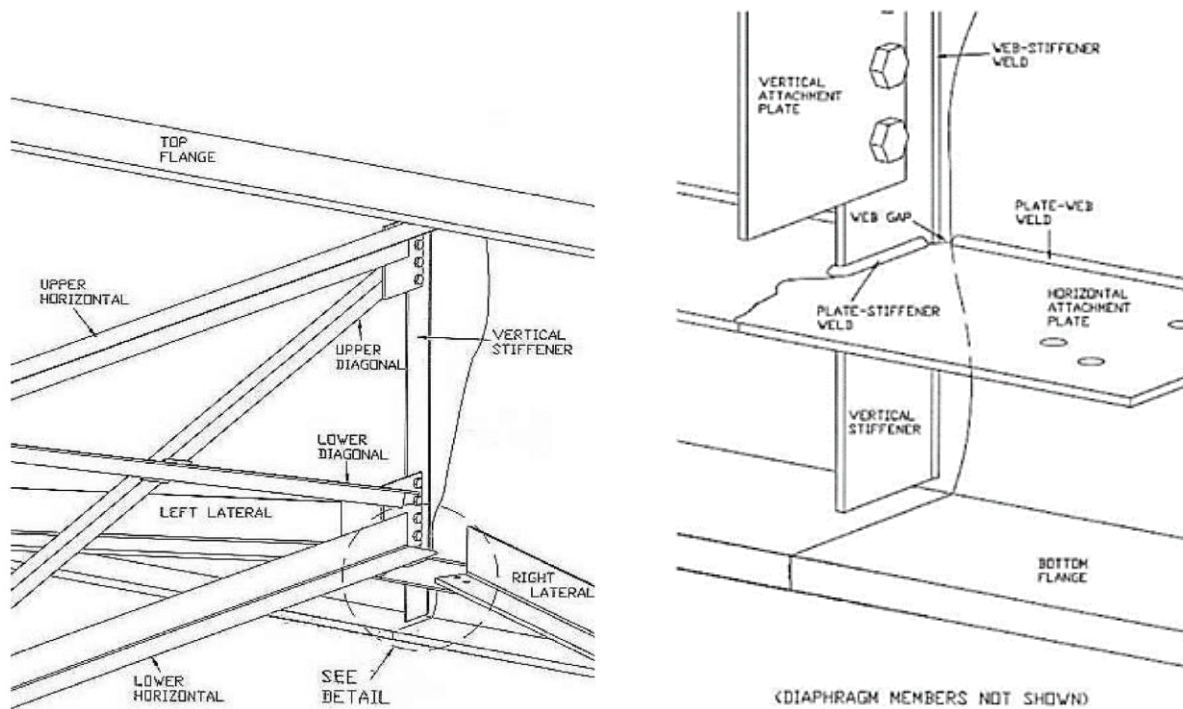
Πληροφορίες για τα υλικά δεν ανακτήθηκαν από το τμήμα μεταφορών. Έχοντας όμως την ημερομηνία κατασκευής και τα τότε ισχύοντα πρότυπα, πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε αρκετά υλικά που χρησιμοποιούνταν τότε και δε βρέθηκαν προβλήματα υπερφόρτισης. Το σίγουρο είναι ότι στη φλάντζα υπήρξε ανομοιομορφία της δομής του υλικού και σε άλλα σημεία ήταν ολκιμότερο, σε άλλα ψαθυρότερο.

Ο Bowman στην αναφορά του γράφει ότι τρεις ήταν οι λόγοι που αύξησαν τα φορτία στη κατασκευή, οδηγώντας στη τελική αστοχία:

- 1) Η ύπαρξη ενός μικρού κενού ανάμεσα στην αυχενική συγκόλληση της λάμας στη φλάντζα και σε αυτή της λάμας στο λαιμό της δοκού (web gap – εικόνα 2.3.1). Αυτό το κενό φαίνεται ότι αποτέλεσε σημείο συσσώρευσης τάσεων και αφού αποτελούσε «γειτονιά» δύο θερμοεπηρεασμένων ζωνών, είχε ήδη ευαισθητοποιηθεί.
- 2) Οι χαλαρές κοχλιοσυνδέσεις των εγκάρσιων δοκών στη λάμα σύνδεσης.

3) Τα επιπλέον φορτία που εισήχθησαν στο σύστημα μέσω των συγκολλητών εγκαρσίων δοκών.

Βλέπουμε ότι στη συγκεκριμένη κατασκευή υπάρχουν αρκετές σχεδιαστικές ελλείψεις και όλες οφείλονται στην άγνοια της ανομοιομορφίας του θερμοκρασιακού πεδίου που προκαλεί η συγκόλληση. Το σημείο έναρξης της ρωγμής ήταν «σταυροδρόμι» συγκολλήσεων και κοχλιοσυνδέσεων (εικόνα 2.3.2). Το γεγονός αυτό αυτόματα καθιστά τη κατανομή των φορτίων της κατασκευής ανομοιόμορφη. Επιπλέον, είναι πολύ εύκολο να γίνουν λάθη στη διάρκεια της κατασκευής και να μη τηρηθεί η κατάλληλη σειρά και προετοιμασία που προβλέπουν τα πρότυπα. Περισσότερη συζήτηση επί του θέματος γίνεται στη Γέφυρα Hoan (2000).



Εικόνα 2.3.2 – Αριστερά: Τρισδιάστατη μορφή του σχεδίου. Δεξιά: Λεπτομέρεια της σύνδεσης και της ρωγμής

## 2.4 Γέφυρα Seongsu (1994)

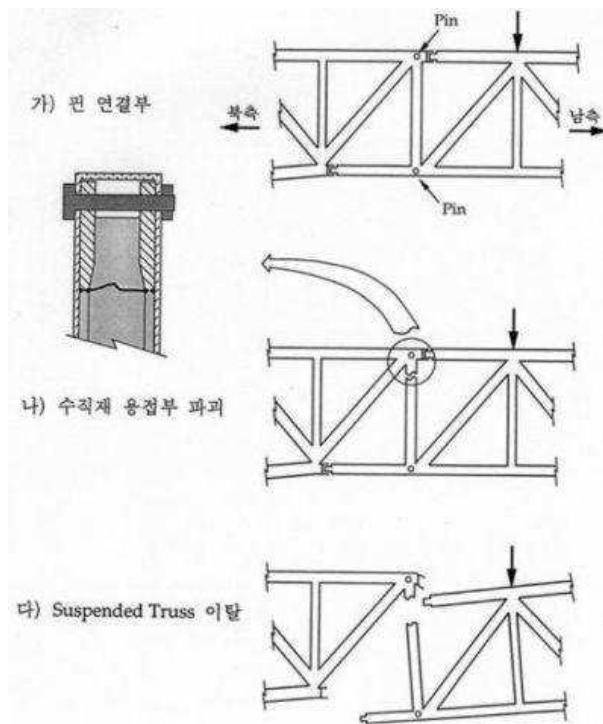
Μια από τις δεκαεφτά γέφυρες της νοτιοκορεάτικης πρωτεύουσας Σεούλ κατέρρευσε ξαφνικά νωρίς το πρωί της 21<sup>ης</sup> Οκτωβρίου του 1994. Οι εφημερίδα «New York Times» την επόμενη ημέρα έγραψε: “Αυτόπτες μάρτυρες ανέφεραν ότι δεν υπήρξε καμία προειδοποίηση. Από στιγμή σε στιγμή ένα κομμάτι της γέφυρας βρισκόταν πλεύσιμο στον ποταμό Χαν. Τα επιβεβαιωμένα θύματα είναι τριάντα δύο”.



Εικόνα 2.4.1 – Το κατεστραμμένο κομμάτι της γέφυρας Seongsu

Η γέφυρα κατασκευάστηκε το 1977. Στα δεκαπέντε χρόνια λειτουργίας της όμως, η δριμύτατη πληθυσμιακή αύξηση προκάλεσε υπερβολική επιβάρυνση του οδικού δικτύου της Σεούλ. Οι προδιαγραφές δεν επέτρεπαν μεγαλύτερη φόρτιση από 36,3 τόνους. Τις ημέρες του ατυχήματος φαίνεται ότι τα διερχόμενα οχήματα ξεπερνούσαν τους 47,3 τόνους.

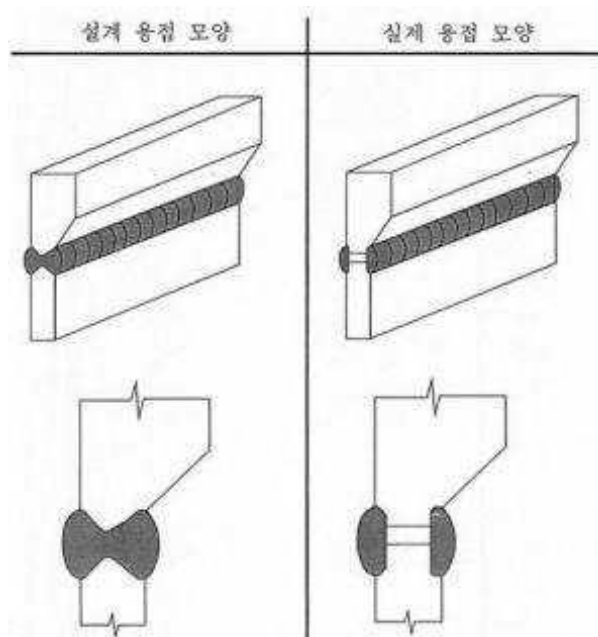
Τα προβλήματα όμως δεν σταματούσαν εκεί. Οι έρευνες έφεραν στο φως πολλά κατασκευαστικά ελαττώματα. Στους συνδέσμους των δοκών οι συγκολλήσεις ήταν ανεπαρκείς, το πάχος της συγκόλλησης πολύ μικρό (8mm πάχος αντί για 10mm) ενώ δεν υπήρξε αρκετή διείσδυση στο βασικό μέταλλο των δοκών. Τέλος, οι κοχλιοσυνδέσεις είχαν φθαρεί. Με άλλα λόγια η υπερφόρτιση δεν ήταν η μόνη αιτία κατάρρευσης της γέφυρας, παρόλο που μπορεί να θεωρηθεί η αφορμή.



Εικόνα 2.4.2 – Η καταστροφή σε στάδια

Η αλληλουχία των γεγονότων φαίνεται παραπάνω (εικόνα 2.4.2). Αρχικά, παρατηρούμε την υπερβολική υπερφόρτωση, που προκάλεσε τη ψαθυρή θραύση της συγκόλλησης, η οποία επιβάρυνε τις περόνες ένωσης με δυσανάλογα θλιπτικά φορτία καθιστώντας τη γέφυρα ασταθή.

Η ανεπάρκεια της συγκόλλησης σε ορισμένα σημεία είναι φανερή στο σχέδιο 2.4.3. Στην αριστερή μεριά έχουμε το σχέδιο και στη δεξιά την εφαρμογή. Κύριοι υπαίτιοι για τη καταστροφή ήταν τόσο οι εργολάβοι για τη κακή διεργασία των συγκολλήσεων όσο οι πολιτικοί ηγέτες, αφού ήταν φανερό ότι δε δόθηκε το απαραίτητο ενδιαφέρον για τον έλεγχο και την αναβάθμιση της κατασκευής.



Εικόνα 2.4.3 – Η διαφορά του σχεδίου με την υλοποίησή του

## 2.5 Ο Μεγάλος Σεισμός του Hanshin (1995)

Ο μεγάλος σεισμός του Χάνσιν τον Ιανουάριο του 1995 παρέλυσε ένα κομμάτι της ιαπωνικής πόλης Κόμπε, αφήνοντας πίσω του 5502 νεκρούς και 43127 τραυματίες (εικόνα 2.5.1). Τα περισσότερα θύματα ήταν αποτέλεσμα της κατάρρευσης μικρών παλαιών κτηρίων με ξύλινους σκελετούς και ξεπερασμένες αντισεισμικές προδιαγραφές. Ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι η πλειονότητα των σιδηροκατασκευών που αστόχησαν είχαν μεταξύ δύο και πέντε ορόφους, ενώ κανένα κτήριο πάνω από επτά ορόφους δεν κατέρρευσε, δείγμα των υψηλών σεισμικών προδιαγραφών που εφαρμόζονταν από τότε.



Εικόνα 2.5.1 – Εικόνες μετά τον σεισμό του Χάνσιν

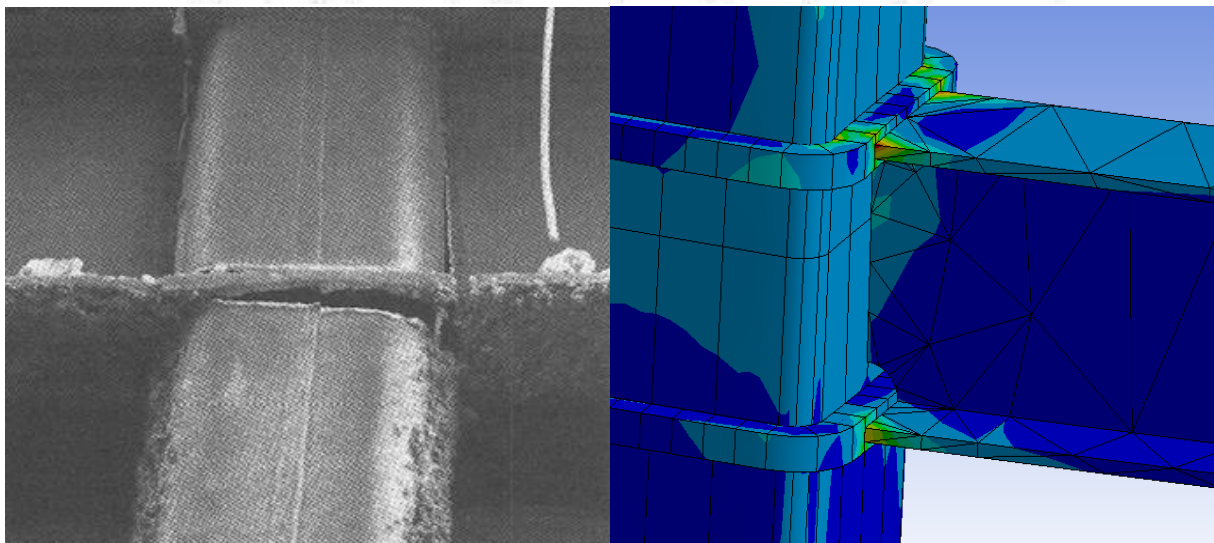
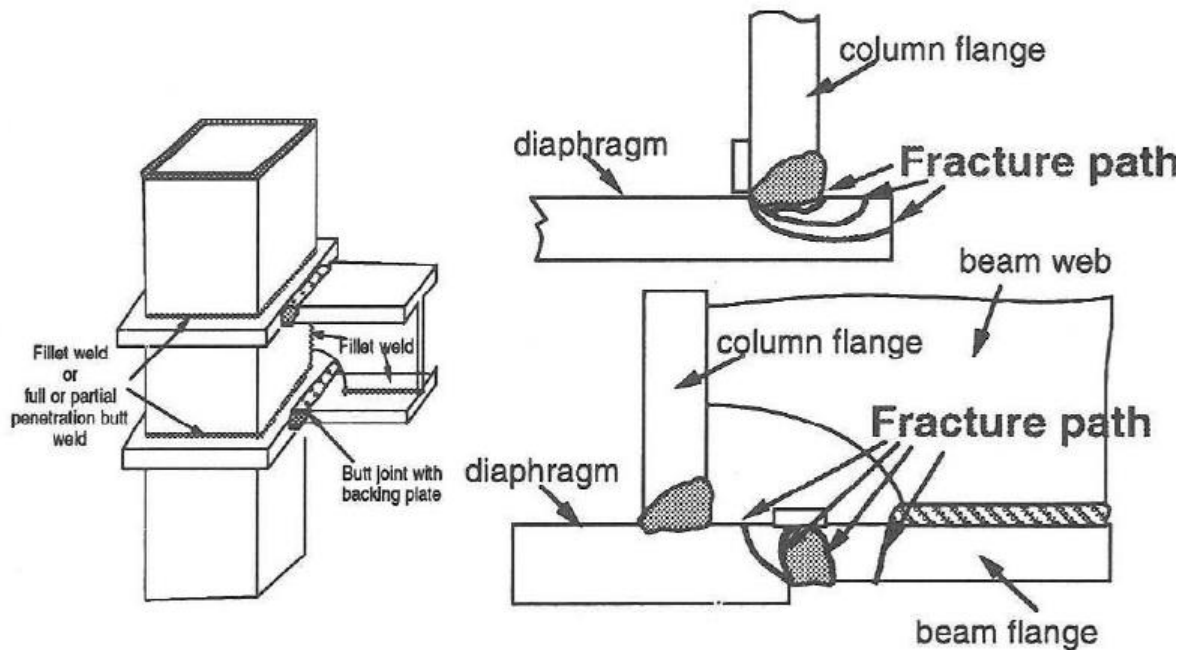
Οι ζημιές που προκλήθηκαν στον σεισμό του Χάνσιν είχαν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, διαφορετικά από αυτά που συναντούμε σε μεγάλους σεισμούς. Οι ρωγμές στους χαλύβδινους σκελετούς ήταν αναρίθμητες και σε διαφορετικά σημεία: στις συνδέσεις δοκών – στύλων, στις μεταλλικές βάσεις, σε όλα σχεδόν τα μέρη που υπήρξε συγκόλληση και σε κάθε σημείο που θα μπορούσαν να υπάρχουν συγκεντρώσεις φορτίων.

Οι θραύσεις αυτές μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, στις καθαρά ψαθυρές θραύσεις και αυτές που εμφάνισαν σημάδια πλαστικής παραμόρφωσης και λυγισμού στις περιοχές των ρωγμών. Οι τελευταίες παρατηρήθηκαν κυρίως σε μετωπικές συγκολλήσεις όπου ο λυγισμός πριν τη θραύση είναι συνήθως αναμενόμενος.

Οι ψαθυρές θραύσεις εμφανίστηκαν σε διάφορου είδους κατασκευές. Πιο συγκεκριμένα:

- 1) Σε κτήρια με κακές αυχενικές συγκολλήσεις. Τόσο τα μικρά τα πάχη συγκόλλησης όσο και οι ανεπαρκείς διεισδύσεις κατέστησαν τις κατασκευές ανίκανες να αντισταθούν στις παραμικρές φορτίσεις προτού αστοχήσουν. Να σημειωθεί βέβαια ότι οι περισσότερες συγκολλήσεις σύμφωνα με παλαιότερα πρότυπα.
- 2) Σε κτήρια με σωστές συγκολλήσεις, με σωστή διείσδυση δηλαδή και καλές τελικές επιφάνειες, πάλι υπήρξαν αστοχίες – λιγότερες βέβαια – αλλά εκεί ο λόγος ήταν η ανεπάρκεια ελέγχου και συντήρησης.
- 3) Η συχνότερη και πιο επικίνδυνη από τις θραύσεις εμφανίστηκε στη σύνδεση δοκού-στύλου (εικόνα 2.5.2). Η θραύση ξεκίνησε από τη ρίζα της συγκόλλησης και εξαπλώθηκε

στη γύρω περιοχή. Παρατηρούμε ότι πρόκειται για παρόμοιο τύπο θραύσης με αυτό στον σεισμό του Νόρθριτζ.



Εικόνα 2.5.2 – Η συχνότερη αστοχία στο σεισμό του Χάνσιν

Στη παραπάνω προσομοίωση καταλαβαίνουμε ότι τα σημεία συγκέντρωσης τάσεων στις ραφές των συγκολλήσεων οδήγησαν στη δημιουργία και την εξέλιξη ρωγμών από αυτές τις ευαίσθητες περιοχές. Παρατηρείται μεγάλη ομοιότητα με το πρόβλημα του σεισμού στο Northridge ο οποίος είχε γίνει το προηγούμενο χρόνο. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ANSYS.

## 2.6 Γέφυρα Hoan (2000)

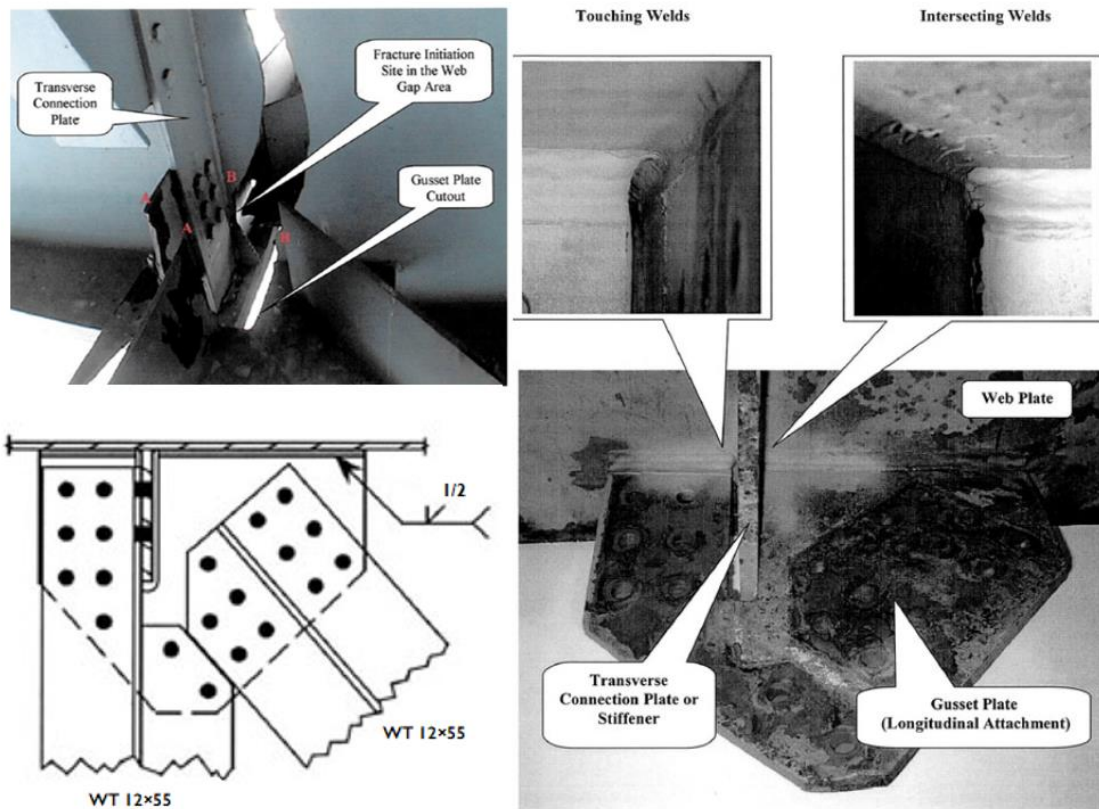
Η τοξωτή γέφυρα Χόαν στο Μιλγουόκι των Ηνωμένων Πολιτειών βρέθηκε τον Δεκέμβριο του 2000 με σοβαρές θραύσεις στις δοκούς (εικόνα 2.6.1). Άμεσα βγήκε απόφαση για διακοπή της κυκλοφορίας, το ελαττωματικό κομμάτι της γέφυρας αποσυνδέθηκε με εκρηκτικά, και δόθηκαν τμήματά του για έλεγχο και εργαστηριακή μελέτη.



Εικόνα 2.6.1 – Η ρωγμή που παρατηρήθηκε στη γέφυρα Χόαν

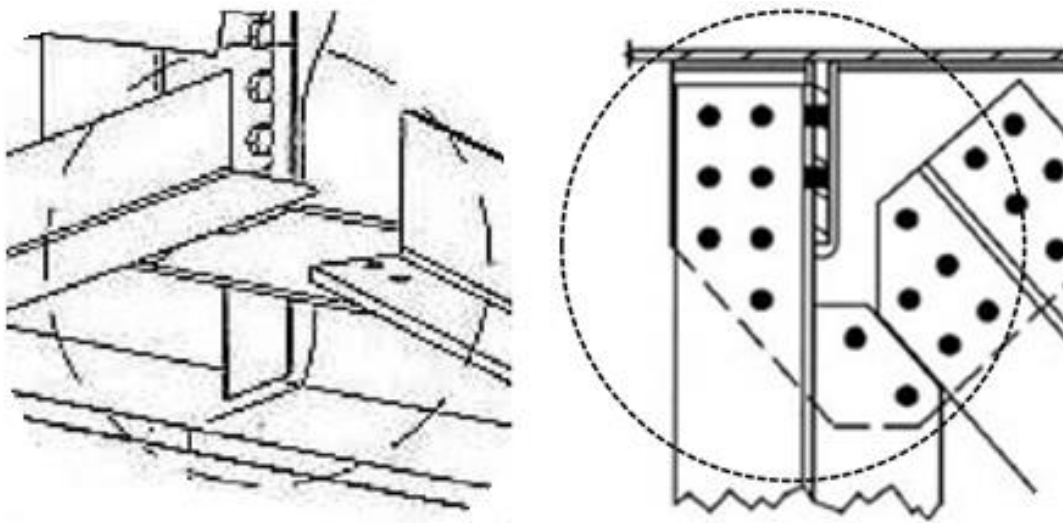
Τα κύρια πορίσματα των μελετών συνοψίζονται παρακάτω:

- 1- Τα υλικά που χρησιμοποιούνταν ικανοποιούσαν όλα τα πρότυπα.
- 2- Τοποθετήθηκε αισθητήρας στη προτεινόμενη παράκαμψη για να μετρηθεί το βάρος των διερχόμενων οχημάτων. Φαίνεται ότι δεν υπήρξε καμία υπερφόρτιση της γέφυρας.
- 3- Η φύση των θραύσεων ήταν ψαθυρή.
- 4- Δεν υπήρξε καμία απολύτως ένδειξη κόπωσης, οπότε οποιοσδήποτε προηγούμενος έλεγχος δε θα μπορούσε να αποτρέψει αυτή τη θραύση. Ο ρυθμός εξέλιξης της ρωγμής ήταν πολύ μεγάλος.
- 5- Η χαμηλή θερμοκρασία, ενώ δεν έπαιξε ρόλο στην έναρξη των ρωγμών, βοήθησε στη μετάδοσή τους.
- 6- Η περιοχή έναρξης των ρωγμών ήταν στη θερμοεπηρεασμένη ζώνη των συγκολλήσεων της φλάντζας. Στη λεπτομέρεια που βλέπουμε παρακάτω (εικόνα 2.6.2), υπάρχει ένα μικρό κενό το οποίο αποτέλεσε γόνιμο έδαφος για τη καλλιέργεια ρωγμών. Επειδή αυτό το κενό ήταν αρκετά μικρό, οι ανοχές επέτρεπαν να υπάρξουν κοινές θερμοεπηρεαζόμενες ζώνες μεταξύ των συγκολλήσεων. Αυτό με τη σειρά του δημιούργησε ανομοιομορφίες στο υλικό. Η επαφή δύο συγκολλήσεων ή η γειτνίαση τους, προκαλεί μεγάλη ψαθυροποίηση του υλικού, ειδικά αν δε συνοδεύεται με περεταίρω επεξεργασία μετά τη συγκόλληση (αποτακική ανόπτηση κλπ.). Η αστοχία λοιπόν, ήταν ζήτημα χρόνου.



Εικόνα 2.6.2 – Δεξιά: Η φλάντζα στη σύνδεση της γέφυρας. Αριστερά: Η φλάντζα που ανακτήθηκε για μελέτη.

Παρά τις ομοιότητες αυτής της αστοχίας με τη θραύση στη I-64 Blue River Bridge (1994) υπάρχει μια ουσιώδης διαφορά (εικόνα 2.6.3). Οι εγκάρσιες δοκοί του δικτυώματος της Ιντιάνα ήταν συγκολλητές στις φλάντζες, ενώ σε αυτή τη περίπτωση είναι βιδωτές. Είναι πράγματι μια κίνηση στη σωστή κατεύθυνση, αφού προτιμάται μια ομοιομορφία στο τρόπο σύνδεσης των μερών της κατασκευής (πχ. συγκολλείται η φλάντζα, και όλες οι υπόλοιπες ράβδοι βιδώνονται πάνω της), καθώς αυτό μας προσδίδει ομοιομορφία στο μερισμό των φορτίων, και φυσικά στη μικροδομή άρα και τις ιδιότητες της φλάντζας.

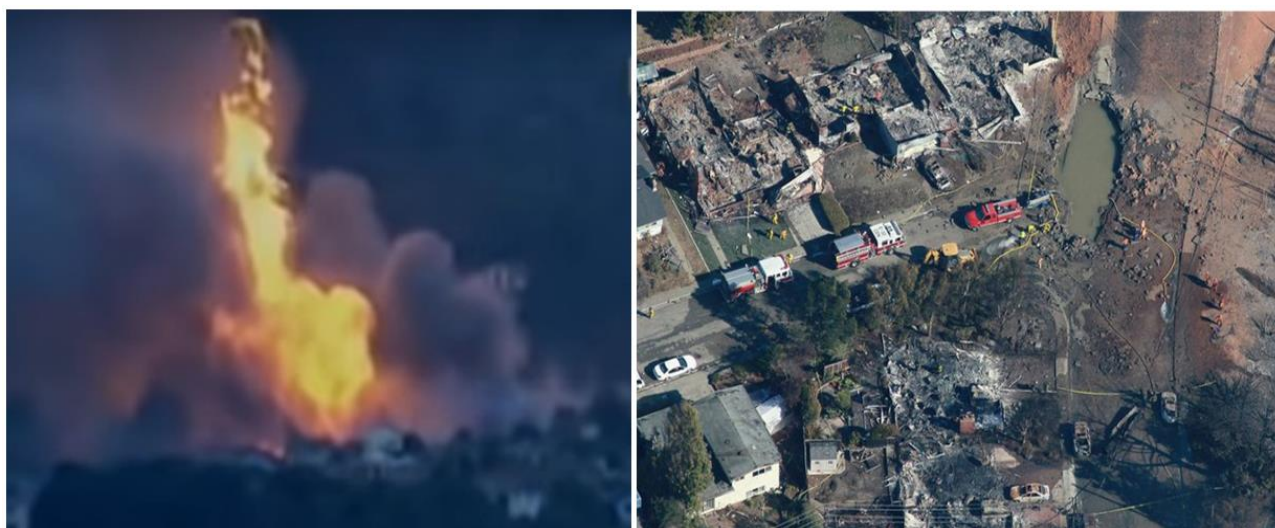


Εικόνα 2.6.3 – Δεξιά: Η φλάντζα στη γέφυρα I-64. Αριστερά: Η φλάντζα στη γέφυρα Χόαν



## 2.7 Έκρηξη Αγωγού στο San Bruno (2010)

Ένας εκκωφαντικός κρότος συντάραξε τη προασιακή συνοικία Σαν Μπρούνο του Σαν Φρανσίσκο, το απόγευμα της 9<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου του 2010. Ένας κρατήρας φωτιάς ύψους εκατό μέτρων είχε δημιουργηθεί σε έναν από τους κεντρικότερους δρόμους της περιοχής με πολλές καταστροφές σε σπίτια και αυτοκίνητα. Σε ένα σημείο της γραμμής φυσικού αερίου φαίνεται ότι υπήρξε ξαφνική άνοδος της πίεσης, αναγκάζοντας το κομμάτι εκείνο του αγωγού να σκάσει, μεγάλη ποσότητα αερίου να απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα και συγχρόνως να αναφλεχθεί, προκαλώντας το φοβερό θέαμα (εικόνα 2.7.1). Το δυστύχημα προκάλεσε οκτώ θανάτους, πενήντα οκτώ τραυματισμούς καθώς και μεγάλες ζημιές στις περιουσίες των κατοίκων γύρω από την έκρηξη.

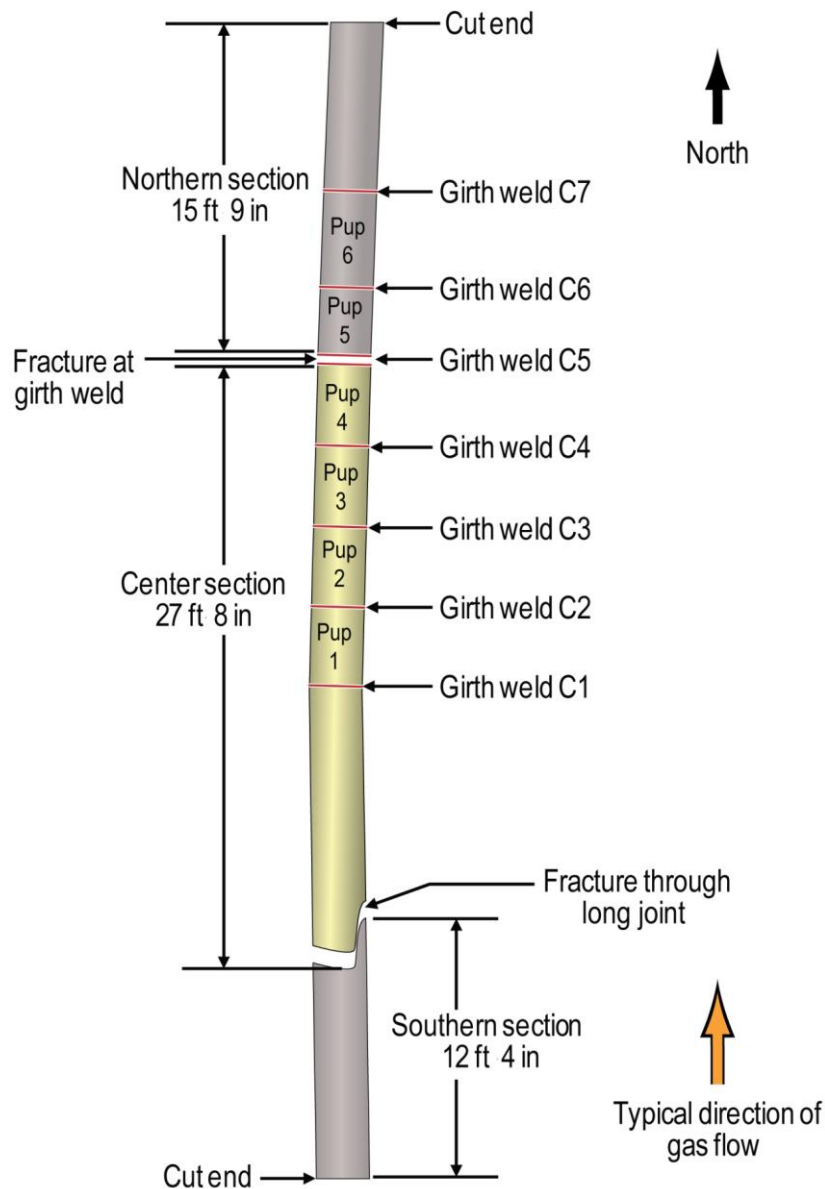


Εικόνα 2.7.1 – Εικόνες από την έκρηξη

Το υλικό κατασκευής όλης εκείνης της γραμμής του φυσικού αερίου (γραμμή 132) ήταν κλάσης X42, ικανό να αντέχει σε εσωτερικές πιέσεις έως και 400psi (27.2 atm). Κατά την έκρηξη, ο αισθητήρας σε εκείνο το τμήμα είχε μέγιστες μετρήσεις στα 386psi, πράγμα που σημαίνει ότι βρισκόταν σε κανονική λειτουργία. Η έκρηξη του αγωγού φαινομενικά ήταν αδικαιολόγητη.

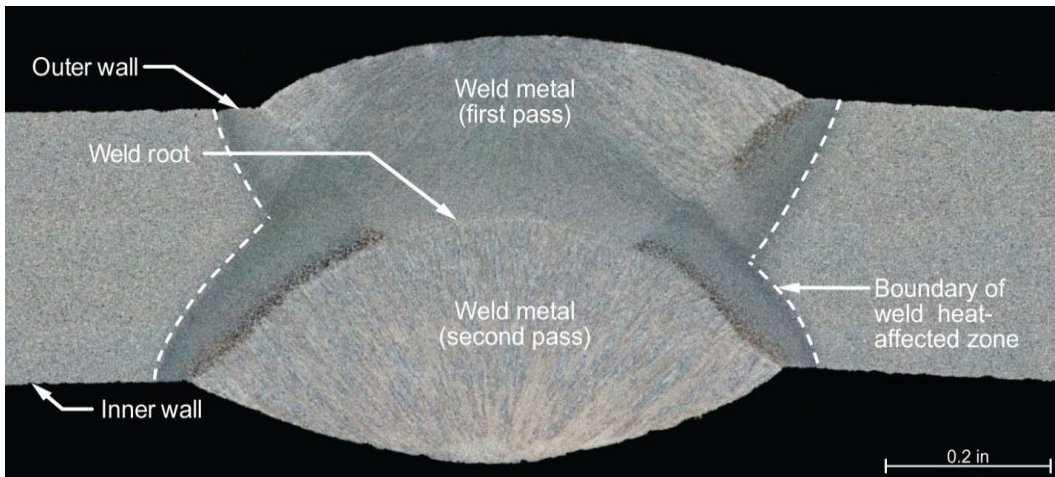
Τα εναπομείναντα κομμάτια του αγωγού μελετήθηκαν με μεγάλη λεπτομέρεια. Με μία πρώτη ματιά δε φάνηκε κανένα ίχνος διάβρωσης στο σώμα του υλικού και αυτό επιβεβαιώθηκε στη μετέπειτα μεταλλογραφική ανάλυση. Μπορεί ο αγωγός να τοποθετήθηκε το 1948, αλλά το υλικό ήταν κατάλληλα επιλεγμένο να αντέχει στη πολύχρονη λειτουργία κάτω από το έδαφος και σε συνθήκες υψηλής υγρασίας.

Η κατασκευή του σωλήνα έγινε σε τμήματα (rips) όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα. Τα κυλινδρικά αυτά τμήματα δημιουργήθηκαν με συγκολλήσεις ελασμάτων με τη μέθοδο των επενδεδυμένων ηλεκτροδίων, και η μεταξύ τους συγκόλληση έγινε με τη μέθοδο του διπλού βυθισμένου τόξου. «Διπλό» γιατί έγινε και από την εσωτερική και από την εξωτερική μεριά της κυκλικής διατομής.

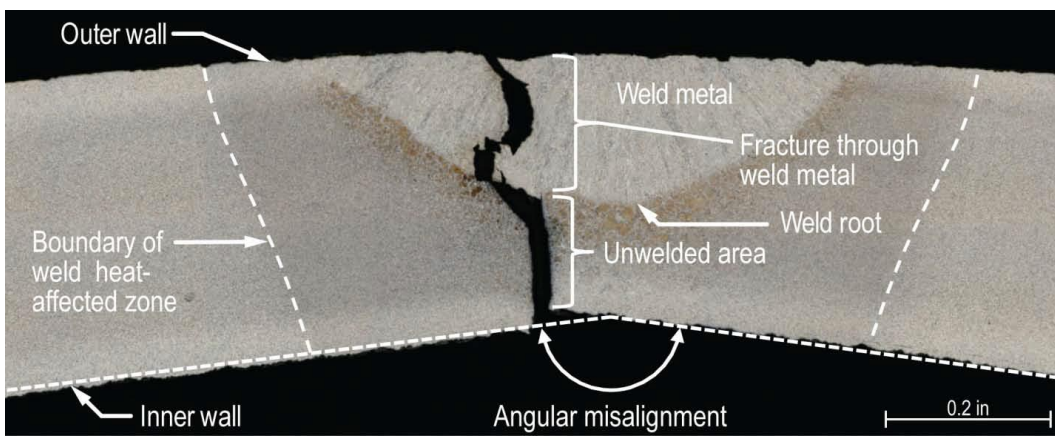


Εικόνα 2.7.2 – Τα τμήματα του αγωγού

Οι συγκολλήσεις φαίνεται όμως ότι είχαν αρκετές αδυναμίες. Στην εικόνα 2.7.3 βλέπουμε την επιτυχή συγκόλληση διπλού βυθισμένου τόξου μεταξύ δύο τμημάτων. Κάτι τέτοιο δε παρατηρήθηκε στη C2 (εικόνα 2.7.4). Το εξωτερικό τμήμα της της λίμνης συγκόλλησης που έχει ενισχυτικό ρόλο στην ένωση, έχει αφαιρεθεί με κατεργασία. Επιπρόσθετα, δεν υπάρχει συγκόλληση από την εσωτερική μεριά. Το σημαντικότερο λάθος όμως είναι η γωνιακή μεταβολή των ελασμάτων, ένα υπαρκτό πρόβλημα στη διαδικασία της συγκόλλησης, εξαιτίας της εγκάρσιας συστολής στη διάρκεια της ψύξης του τηγμένου μετάλλου. Ωστόσο, αυτή η γωνιακή συστολή θα ήταν αναμενόμενη από την αντίθετη μεριά. Κατά τη ψύξη του μετάλλου συγκόλλησης, συνήθως τα ελάσματα κινούνται προς τη ραφή. Απ' ότι φαίνεται κατά την ένωση των κυλινδρικών τμημάτων, δημιουργήθηκε εξ αρχής αυτή η διαφορά στη γωνία μεταξύ του pup 1 και του pup 2, και γι αυτό τον λόγο, φοβούμενοι οι συγκολλητές την επιπλέον γωνιακή συστολή που θα είχαν τα ελάσματα, αποφάσισαν να μην την πραγματοποιήσουν εσωτερική συγκόλληση.

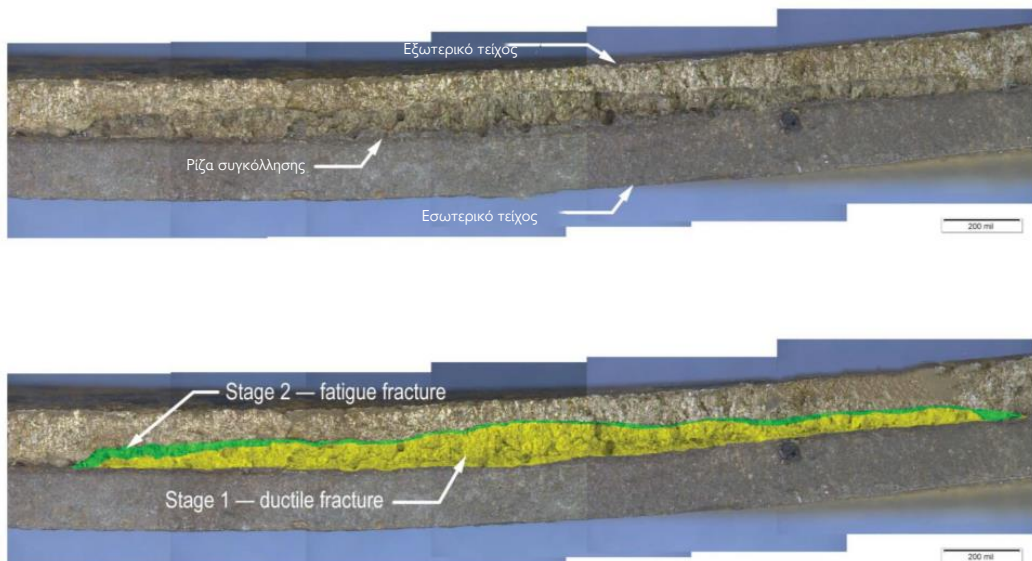


Εικόνα 2.7.3 – Επιτυχής διπλή συγκόλληση βυθισμένου τόξου



Εικόνα 2.7.4 – Η ανεπιτυχής συγκόλληση C2

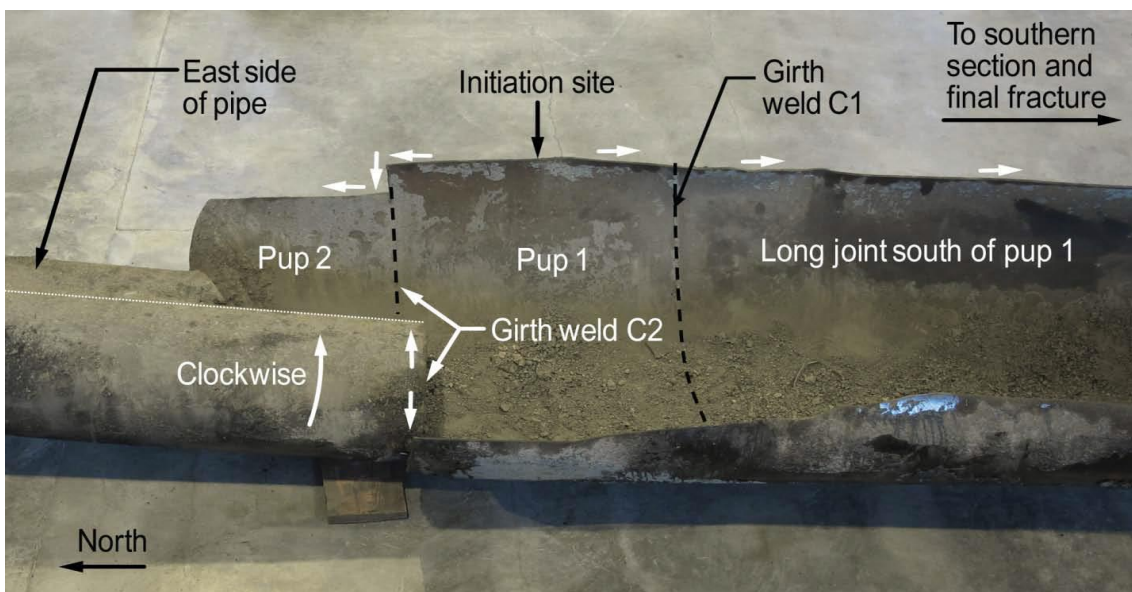
Ακόμα, οι συγκολλήσεις των ελασμάτων εμφάνισαν προβλήματα υψηλού πορώδους και ατελούς διείσδυσης (εικόνα 2.7.5). Το σημείο έναρξης της θραύσης ήταν στη μέση του τμήματος 1 σε μια προϋπάρχουσα ρωγμή μήκους 2,4 ίντσες. Η διάδοση της ρωγμής έγινε σταδιακά, αυξάνοντας τη ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης με επαναλαμβανόμενες φορτίσεις (πολυκυκλική κόπωση).



Εικόνα 2.7.5 – Συγκόλληση των ελασμάτων με υψηλό πορώδες και η κόπωση

Τα παραπάνω προβλήματα των συγκολλήσεων, όπως είδαμε στα περισσότερα από τα προηγούμενα ατυχήματα, θα μπορούσαν από μόνα τους να προκαλέσουν τη τελική αστοχία. Ο ρόλος τους όμως αυτή τη φορά ήταν περιορισμένος. Κατά διάρκεια της έκρηξης, το σκίσιμο του σωλήνα εξέθεσε όλα τα λάθη και τις παραβλέψεις των συγκολλήσεων, αφού ακολούθησε τον γρηγορότερο δρόμο (εικόνα 2.7.6). Τα λάθη στις συγκολλήσεις αποτελούν μεγάλο κίνδυνο για τη κατασκευή ακόμα κι αν δεν βρίσκονται σε επισφαλή σημεία.

Από τη στιγμή που παρατηρήθηκε γωνιακή μεταβολή ανάμεσα στα ελάσματα ήταν απαραίτητη η επέμβαση με κατεργασία για τη διόρθωση του προβλήματος και η μετέπειτα συγκόλληση των διορθωμένων τμημάτων. Ειδικά σε μια κατασκευή όπως είναι οι αγωγοί αερίου που οι εσωτερικές πιέσεις παίζουν εξέχοντα ρόλο στη φόρτιση της κατασκευής, η παραμικρή μεταβολή στη γωνία δημιουργεί τοπικά φορτία και αυξήσεις πιέσεων.

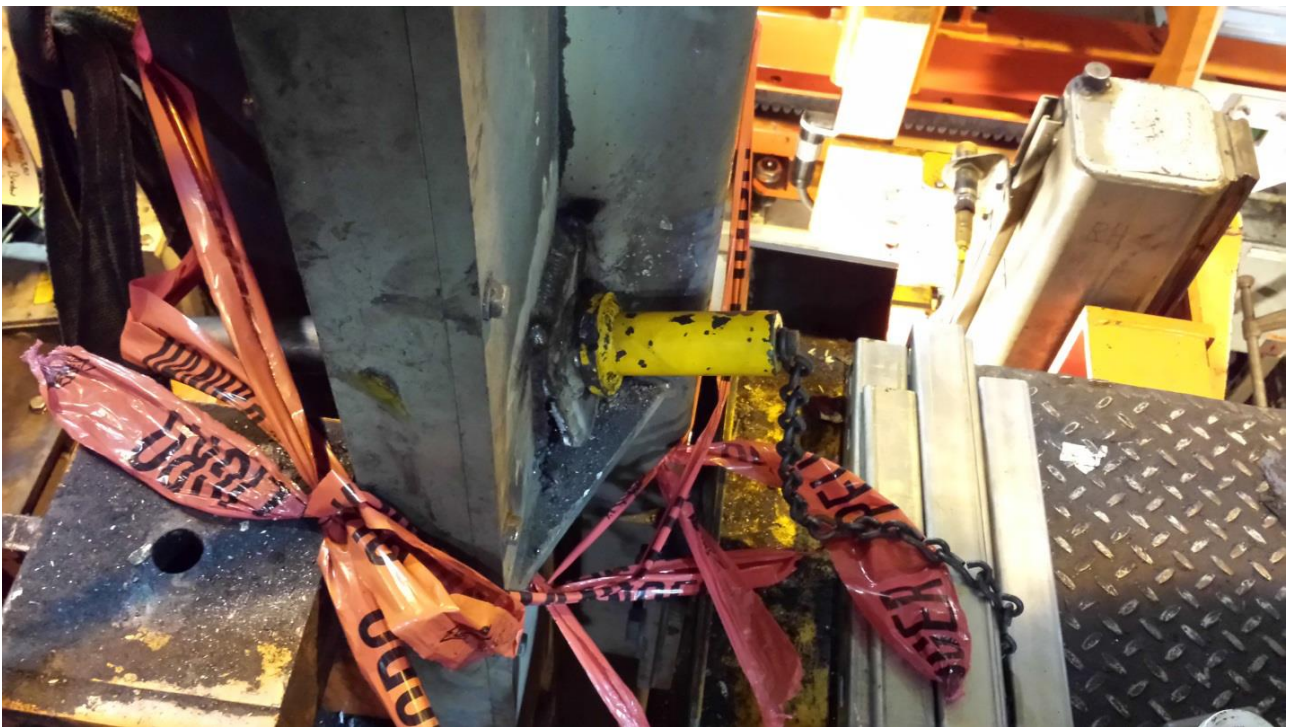


Εικόνα 2.7.6 – Η διαδρομή της θραύσης

## 2.8 Δυστύχημα σε εργοστάσιο της Ford (2014)

Το πρωί της 30<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου το 2014 ένα μοιραίο δυστύχημα συνέβη στο εργοστάσιο συναρμολόγησης της Ford στο Κάνσας Σίτι. Οι συγκολλήσεις στη περόνη ασφαλείας σε μια γερανογέφυρα ξαφνικά αστόχησαν προκαλώντας τη κατάρρευσή της πάνω σε ένα εργάτη που βρισκόταν ακριβώς από κάτω.

Η συγκεκριμένη γραμμή παραγωγής συναρμολογούσε διάφορα οχήματα της μεγάλης αυτοκινητοβιομηχανίας. Για να μπορέσει όμως να φιλοξενήσει τα νέα φαρδύτερα μοντέλα F-150 χρειάστηκε τροποποίηση της γερανογέφυρας. Αυτό προϋπέθετε την αλλαγή της θέσης των τεσσάρων περονών που κρατούσαν συνδεδεμένη τη πλατφόρμα στους στύλους. Η αλλαγή αυτή έπρεπε να γίνει πολύ σύντομα, οπότε αποφασίστηκε στις ήδη υπάρχουσες πλατφόρμες να δημιουργηθούν τρύπες σε διαφορετικά σημεία και να γίνει συγκόλληση φλάντζας σε καθένα από τους τέσσερις στύλους (εικόνα 2.8.1)



Εικόνα 2.8.1 – Η περόνη ασφαλείας μετά την αστοχία

Η Διεύθυνση Κατασκευών (Directorate of Construction) της Ουάσιγκτον έστειλε έναν εμπειρογνώμονα να μελετήσει τη καταστροφή και τις αιτίες της. Η έρευνα έδειξε ότι υπήρξαν πολλαπλά σφάλματα στην συγκόλληση της φλάντζας. Το πιο εξόφθαλμο λάθος, πέρα από τη μικρή διεύθυνση του μετάλλου συγκόλλησης, ήταν η έλλειψη συγκόλλησης στη κάτω μεριά της φλάντζας (εικόνα 2.8.2). Μετά από περεταίρω έρευνα, ανακαλύφθηκε ότι οι συγκολλήσεις έγιναν από μη πιστοποιημένους εργάτες οι οποίοι αγνόησαν τις προδιαγραφές του AWS (American Welding Society), χωρίς κάποια επίβλεψη κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, με αποτέλεσμα ολόκληρη η κατασκευή να βασιστεί στη περιορισμένη εμπειρία τους. Χαρακτηριστικό σφάλμα αποτελεί το ότι οι συγκολλήσεις έγιναν πάνω από το χρώμα των στύλων, χωρίς προηγούμενο τρίψιμο των επιφανειών με αποτέλεσμα την αποτυχία της όλης διαδικασίας.



Εικόνα 2.8.2 – Η φλάντζα μετά την αστοχία

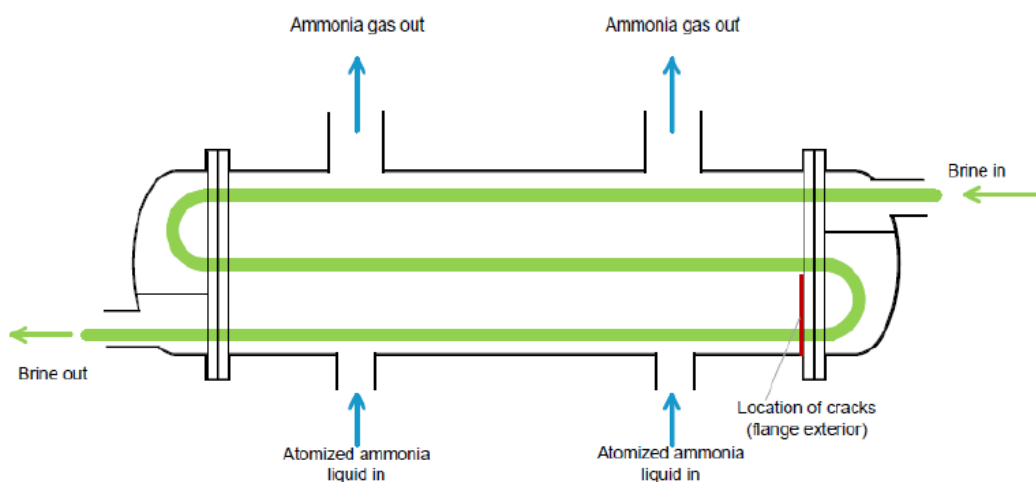
Ένα ακόμα ελάττωμα στην όλη σύνδεση ήταν ότι η διάμετρος της οπής που έγινε στους στύλους ήταν αρκετά μεγαλύτερη της διαμέτρου της περόνης (εικόνα 2.8.3). Αποτέλεσμα ήταν να επιβαρυνθούν περισσότερο οι φλάντζες, τόσο που σχεδόν όλο το βάρος της πλατφόρμας και του φορτίου της να στηρίζεται πάνω τους. Οι υπολογισμοί και οι προσομοιώσεις όμως που έκανε η Διεύθυνση Κατασκευών, έδειξαν ότι στη περίπτωση που οι συγκολλήσεις ικανοποιούσαν τα πρότυπα, οι φλάντζες θα μπορούσαν να αντέξουν ακόμα και αυτή τη παραπάνω φόρτιση.



Εικόνα 2.8.3 – Η διάμετρος οπής σε σχέση με τη διάμετρο περόνης

## 2.9 Διαρροή αμμωνίας από δοχείο ψύξης (2019)

Μόλις είκοσι εβδομάδες μετά την εγκατάσταση ενός καινούριου ψύκτη σε ένα παγοδρόμιο στο Πορτ Άλμπερνι του Καναδά, σήμανε συναγερμός, καθώς ο αισθητήρας έδειξε μεγάλη περιεκτικότητα αμμωνίας ( $\text{NH}_3$ ) στο μηχανοστάσιο. Αμέσως ενεργοποιήθηκε ο εξαερισμός και διατάχθηκε εκκένωση ώστε να μελετηθεί το συμβάν. Η πηγή αυτής της διαρροής φάνηκε ότι ήταν μια ρωγμή στο δοχείο.



Εικόνα 2.9.1 – Το δοχείο ψύξης

Το σύστημα ψύξης χρησιμοποιούσε την αμμωνία σαν ψυκτικό θαλασσινού νερού, το οποίο τροφοδοτούνταν κάτω από την επιφάνεια του πάγου για να διατηρεί τη θερμοκρασία σε όλη την έκταση του παγοδρομίου. Το σύστημα περιέχει ένα δοχείο άμεσης διαστολής (εικόνα 2.9.1). Πρόκειται για ένα καινοτόμο σύστημα που χρησιμοποιεί χαμηλότερα ποσά αμμωνίας σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα. Παρόλα αυτά, η ποσότητα  $\text{NH}_3$  που διοχετευόταν ήταν αρκετή να δημιουργήσει προβλήματα σε περίπτωση διαρροής.



Εικόνα 2.9.2 – Το βόρειο άκρο του δοχείου ψύξης

Το βασικό σχέδιο περιλαμβάνει ένα κυλινδρικό κέλυφος, σφραγισμένο στα άκρα του με δύο ημισφαιρικές κεφαλές που είναι βιδωμένες κέλυφος. Για να φιλοξενηθούν αυτές οι κοχλιοσυνδέσεις, συγκολλήθηκαν φλάντζες στα άκρα των κυλίνδρων με τη μέθοδο τηκόμενου ηλεκτροδίου με προστασία αερίου (GMAW). Στις συγκολλήσεις στο βόρειο άκρο (εικόνα 2.9.2) βρέθηκαν γύρω στις έντεκα ρωγμές, μία εκ των οποίων ήταν η πηγή της διαρροής.

Οι ρωγμές ήταν όλες εσωτερικές, που σημαίνει ότι ο απλός οπτικός έλεγχος δε θα μπορούσε να τις εντοπίσει και ο ψύκτης θα μπορούσε να λειτουργεί απρόσκοπτα με αυτές εξελίσσονται (εικόνα 2.9.3). Οι υπάρχουσες ενδείξεις οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η διαρροή όντως προέκυψε από διάφορα ελαττώματα στη συγκόλληση, που οδήγησαν σε ολιγοκυκλική κόπωση με φορτία κανονικής λειτουργίας. Υπάρχει μια περίπτωση επίσης το περιβάλλον λειτουργίας να έπαιξε κάποιο ρόλο στη επιδείνωση της κατάστασης.



Εικόνα 2.9.3 – Εσωτερική ρωγμή και η ζώνη κόπωσης

Συνήθως μετά τη διαδικασία της συγκόλλησης προτείνεται ο έλεγχος για την ανίχνευση ελαττωμάτων. Ειδικά σε ιδιαίτερες κατασκευές όπως το συγκεκριμένο δοχείο, ο έλεγχος με υπερήχους ήταν απαραίτητος για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας. Κάτι τέτοιο δυστυχώς δεν έγινε. Αποτέλεσμα ήταν με τη συνεχή χρήση, οι ρωγμές να αναπτύσσονται και έτσι να οδηγηθούμε στη τελική διαρροή.



## Κεφάλαιο 3: Πίνακας

Όνομα	Τοποθεσία	Πρόβλημα	Αιτία	Είδος συγκόλλησης	Χρόνος λειτουργίας	Νεκροί	Τραυματίες
Εκτροχιασμός Τρένου στη Μαλαισία (11/2/1987)	Κουάλα Λουμπούρ, Μαλαισία	1-Μεγάλο πορώδες 2- Εγκλείσματα οξειδίων	Έμφυτες ατέλειες είδους συγκόλλησης	TW	~40 έτη	3	200
Σεισμός στο Northridge (17/1/1994)	Λος Άντζελες, ΗΠΑ	Ρωγμή στη ρίζα της συγκόλλησης	Ανεπιτυχής σχεδιασμός	GMAW/MIG	~3-40 έτη	72	9000
Γέφυρα I-64 Blue River (1/5/1994)	Ιντιάνα, ΗΠΑ	Ρωγμή στη ΘΕΖ	Ανεπιτυχής σχεδιασμός	SMAW	20 έτη	0	0
Γέφυρα Seongsu (21/10/1994)	Σεούλ, Νότια Κορέα	1-Ατελής διείδυση 2-Μικρή λίμνη συγκόλλησης 3-Υπερφόρτιση	1-Αδιαφορία 2-Έλλειψη κατάρτισης συγκολλητών	SMAW	17 έτη	32	17
Ο Μεγάλος Σεισμός του Hanshin (17/1/1995)	Κόμπε, Ιαπωνία	Ρωγμή από τη ρίζα της συγκόλλησης	Ανεπιτυχής σχεδιασμός	GMAW/MIG	~10-80 έτη	5502	43127
Γέφυρα Hoan (13/12/2000)	Μιλγουόκι, ΗΠΑ	Ρωγμή στη ΘΕΖ	Ανεπιτυχής σχεδιασμός	SMAW	26 έτη	0	0
Έκρηξη Αγωγού στο San Bruno (9/9/2010)	Σαν Φρανσίσκο, ΗΠΑ	1-Γωνιακή μεταβολή ελασμάτων 2-Κακή διείδυση 3-Μεγάλο πορώδες	Ανεπαρκής έλεγχος κατά τη κατασκευή και λειτουργία	DSAW + SMAW	62 έτη	8	58
Δυστύχημα σε εργοστάσιο της Ford (30/12/2014)	Κάνσας Σίτι, ΗΠΑ	1-Ατελής διείδυση 2-Έλλειψη συγκόλλησης	1-Βιαστικός σχεδιασμός 2-Έλλειψη κατάρτισης συγκολλητών	SMAW	1 ημέρα	1	0
Διαρροή αμμωνίας από δοχείο ψύξης (3/11/2019)	Πόρτ Άλμπερνι, Καναδάς	Πολλές εσωτερικές ρωγμές	Έλλειψη ελέγχου ανίχνευσης ρωγμών και Αποτατικής Ανόπτησης	GMAW/MIG	20 εβδομάδες	0	0

TW: Συγκόλληση με θερμότητα

GMAW/MIG: Συγκόλληση Τόξου με Τηκόμενο Ηλεκτρόδιο και προστασία Αδρανούς Αερίου

SMAW: Συγκόλληση Τόξου με Επενδεδυμένα Ηλεκτρόδια

DSAW: Διπλή Συγκόλληση Βυθισμένου Τόξου

## Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα

Τα βασικότερα κοινά χαρακτηριστικά που μπορούμε να εντοπίσουμε έχουν ως εξής:

- ✓ Όλες οι αστοχίες εκτός της ρωγμής στη γέφυρα I-64 Blue River έλαβαν χώρα χειμωνιάτικους μήνες. Ακόμα και η ρωγμή στη γέφυρα όμως, όπως ειπώθηκε, πιθανολογείται ότι είχε γίνει τον προηγούμενο χειμώνα. Συμπεραίνουμε ότι η χαμηλή θερμοκρασία του περιβάλλοντος έχει καταλυτικό ρόλο στις ψαθυρές αστοχίες των υλικών λόγω της συστολής που παρατηρείται (ελαχιστοποίηση των αποστάσεων μεταξύ των ατόμων).
- ✓ Τα υλικά ήταν εντός προτύπων και ικανά να αντέξουν τις φορτίσεις εάν οι συγκολλήσεις ήταν ικανοποιητικές. Αυτό ήταν το πρώτο πράγμα που ελέγχονταν σε κάθε καταστροφή.

Τρία ήταν τα κύρια αίτια που οδήγησαν στις παραπάνω εννέα καταστροφές: Ο λανθασμένος σχεδιασμός, η ανεπάρκεια στη κατάρτιση των συγκολλητών και η έλλειψη ελέγχου των κατασκευών.

Αίτιο	Λάθος σχεδιασμός	Ανεπάρκεια συγκολλητών	Έλλειψη ελέγχου
Ατυχήματα	2.2 - Σεισμός στο Northridge 2.3 - Γέφυρα I-64 Blue River 2.5 - Ο Μεγάλος Σεισμός του Hanshin 2.6 - Γέφυρα Hoan	2.4 - Γέφυρα Seongsu 2.8 - Δυστύχημα σε εργοστάσιο της Ford	2.1 – Εκτροχιασμός τρένου στη Μαλαισία 2.7 – Έκρηξη αγωγού στο San Bruno 2.9 – Διαρροή αμμωνίας από δοχείο ψύξης
Προβλήματα που εμφανίστηκαν	Ρωγμή στη ρίζα της συγκόλλησης Ρωγμή στη ΘΕΖ	Έλλειψη συγκόλλησης Ατελής διείδυση Μικρή λίμνη συγκόλλησης	Εγκλείσματα οξειδίων Γωνιακή μεταβολή ελασμάτων Ατελής διείδυση Μεγάλο πορώδες Εσωτερικές ρωγμές

Η δεύτερη κατηγορία μπορεί να συνδυαστεί με τη τρίτη, αφού παρατηρούνται παρόμοια προβλήματα και συνήθως η ανεπάρκεια του συγκολλητή μπορεί να διορθωθεί από ένα πλήρη έλεγχο, όπως και η έλλειψη ελέγχου να μην οδηγήσει σε καταστροφή αν οι συγκολλητές εκτελούν αποτελεσματικά τις ραφές.

Στον 21<sup>ο</sup> αιώνα, οι μέθοδοι υπολογισμού, προσομοίωσης, καθώς και τα παραδείγματα που έχουμε προς μίμηση και προς αποφυγή, καθιστούν αδικαιολόγητες τις πρόωρες καταστροφές μηχανολογικού εξοπλισμού. Το σχέδιο γίνεται πάντα με προσοχή, με σεβασμό στις απαιτήσεις των υλικών, στις συνθήκες λειτουργίας και στη κατασκευαστική ομάδα. Τέλος, πρέπει να είναι συνεχής και ξεκάθαρη η επικοινωνία και ο έλεγχος σε κάθε στάδιο της παραγωγής.

Κλείνοντας τη βιβλιογραφική αυτή μελέτη, σημειώνεται ότι πολλές μελέτες έχουν γίνει πλέον και σε εργαστηριακό επίπεδο. Στην αναζήτηση των αστοχιών, βρέθηκαν διάφορα είδη και περιπτώσεις χωρίς το χρονικό προσδιορισμό ατυχήματος καθώς μια δεύτερη έρευνα έδειχνε ότι πρόκειται για εργαστηριακή μελέτη. Συνεπώς, υπάρχει σχεδόν σε κάθε περίπτωση, για τη πλειονότητα των κατασκευαστικών υλικών, μια προεργασία η οποία μπορεί να βοηθήσει στο στάδιο του σχεδιασμού με σκοπό τη πρόληψη ενδεχόμενων σφαλμάτων, και, σε κάθε περίπτωση, την αποφυγή αυτών που έχουν ήδη στιγματίσει τον κόσμο.

# Βιβλιογραφία

- Παντελής Ι. Δημήτρης, Χαϊδεμενόπουλος Ν. Γρηγόρης, Παπάζογλου Ι. Βασίλης – Επιστήμη και Τεχνολογία των Συγκολλήσεων
- Ashby, Michael F.\_ Jones, David R.H - Engineering Materials 2
- Hock-Chye Qua, Ching-Seong Tan, Kok-Cheong Wong, Jee-Hou Ho, Xin Wang, Eng-Hwa Yap, Jong-Boon Ooi, Yee-Shiuan Wong - Applied Engineering Failure Analysis: Theory and Practice - 1<sup>st</sup> Edition - 2017 by CRC Press
- F.Y. Cheng and M.-S. Sheu - Urban Disaster Mitigation - The Role of Engineering and Technology
- Ji Hyuck Moon - Cracks Everywhere: How the Seongsu Bridge Collapse Changed Seoul's Urban Personality
- John F. Lancaster - Engineering Catastrophes - Causes and Effects of Major Accidents (2005)
- Masao Toyoda - Failure Experience in Hanshin Earthquake on Brittle fracture of Steel Framed Structures
- Federal Highway Administration - Hoan Bridge Investigation - Steel - Structures - Bridges & Structures
- Evaluation of Steel Details for Susceptibility to Constraint-Induced Fracture, Final Report
- National Transportation Safety Board - Accident Report Natural Gas Transmission Pipeline Rupture and Fire - San Bruno, California
- Bowman, M. D. 2002 Fatigue Behavior of Beam Diaphragm Connections with Intermittent Fillet Welds, Part II: Brittle Fracture Examination of the I-64 Blue River Bridge
- U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration, Directorate of Construction - Investigation of the December 30, 2014 incident at Ford Kansas City Assembly Plant, Claycomo, MO
- Technical Safety BC - Incident Report #II-935221-2019 (#15840) (FINAL)
- X. Peng, A.R.S. Ponter - An experimental and theoretical investigation of the response of BS11 steel to cycling loading – Elsevier 1994