ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΟΙΝΗΣ ΩΦΕΛΕΙΑΣ

ΡΟΥΜΠΑ ΔΗΜΗΤΡΑ

A.M. 2002.05.0042

<u>ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ</u>

ΤΣΟΜΠΑΝΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ Επίκουρος Καθηγητής Γενικού Τμήματος (Επιβλέπων)

ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΤΣΟΥΤΣΟΣ ΘΕΟΧΑΡΗΣ

Επίκουρος Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος

[XANIA 2009]

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα στο σημείο αυτό να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας κ. Ιωάννη Τσομπανάκη, Επίκουρο Καθηγητή του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης, τόσο για την επιλογή του θέματος όσο και για την καθοδήγηση του κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Επίσης, τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής: τον κ. Γεώργιο Καρατζά, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και τον κ. Θεοχάρη Τσούτσο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις τους. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Βαρβάρα Ζανιά, Υποψήφια Διδάκτωρ του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την πολύτιμη βοήθεια της.

Τους ευχαριστώ όλους θερμά

ΔΗΜΗΤΡΑ ΡΟΥΜΠΑ

<u>Περίληψη</u>

Η ανάγκη για να εξυπηρετηθεί καλύτερα μια κατοικημένη περιοχή οδήγησε στην κατασκευή των δικτύων κοινής ωφέλειας (Δ.Κ.Ω.). Τα Δ.Κ.Ω. αποτελούνται από τα δίκτυα ύδρευσης, αποχέτευσης, ηλεκτρικού, φυσικού αερίου, μεταφορών, τηλεπικοινωνιών κτλ. Σε σεισμογενείς χώρες, όπως η Ελλάδα, ένας από τους μεγαλύτερους κινδύνους που αντιμετωπίζουν τα Δ.Κ.Ω. είναι ο σεισμός, ο οποίος δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στα πάσης φύσεως τεχνικά έργα και υποδομές. Τα προβλήματα αυτά εμφανίζονται και στους υπόγειους αγωγούς, κυρίως εξαιτίας του γεγονότος ότι υπόκεινται σε σημαντική κινηματική καταπόνηση.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την ανάπτυξη καμπύλων τρωτότητας αγωγών ΔΚΩ, δηλαδή την εκτίμηση του βαθμού βλάβης που θα υποστούν αυτές για ένα δεδομένο επίπεδο σεισμικής έντασης. Η εργασία αυτή ασχολείται, αρχικά, με μια εισαγωγή στη σεισμολογία και τα Δ.Κ.Ω. Στη συνέχεια αναλύεται η σεισμική επικινδυνότητα και η σεισμική διακινδύνευση, καθώς και οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτώνται. Έπειτα γίνεται περιγραφή των διαφόρων παραγόντων που συσχετίζονται με την τρωτότητα των υπόγειων αγωγών, όπως είναι η εδαφική κίνηση, οι κατολισθήσεις, η ρευστοποίηση κ.α. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι συνηθέστεροι τύποι αστοχιών που έχουν σημειωθεί σε Δ.Κ.Ω, παγκοσμίως, έπειτα από μεγάλα σεισμικά γεγονότα. Τέλος αναλύονται οι κυριότερες μέθοδοι για την κατασκευή καμπύλων τρωτότητας αγωγών ΔΚΩ και παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αριθμητικά παραδείγματα.

<u>Περιεχόμενα</u>

Περίληψη	i
1. Εισαγωγή	1
1.1 Ορισμοί	1
1.1.2 Μηχανισμοί γένεσης σεισμών	3
1.1.3 Σεισμογενή Ρήγματα	5
1.1.4 Μεγέθη Έντασης Σεισμού	7
1.1.5 Μεγέθη χαρακτηρισμού της σεισμικής κίνησης	9
1.2 Σεισμικά Κύματα και Είδη Σεισμικών Κυμάτων	11
1.3 Σεισμικός Κίνδυνος και δίκτυα κοινής ωφέλειας	13
2. Σεισμική Επικινδυνότητα και Σεισμική Διακινδύνευση	16
2.1 Εισαγωγή	16
2.2 Σημαντικοί παράγοντες για τη σεισμική επικινδυνότητα	17
2.3 Ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας	18
2.3.1 Ντετερμινιστική ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας .	18
2.3.2 Πιθανοτική ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας	19
2.4 Σεισμική αξιοπιστία αστικών δικτύων αγωγών	23
2.4.1 Πιθανοτικό πρότυπο πρόβλεψης απόκρισης υπόγειω	JV
αγωγών	24
3. Βασικοί Παράμετροι Τρωτότητας Υπογείων Αγωγών	26
3.1. Εδαφική σεισμική κίνηση	26
3.2. Σεισμικές Κατολισθήσεις	26
3.3. Ρευστοποίηση	29
3.4. Χωροθέτηση	35
3.5. Ρήγματα	35
3.6. Καθιζήσεις	40
	ii

3.7. Ηλικία και Διάβρωση	42
4. Συμπεριφορά ΔΚΩ σε Πρόσφατους Σεισμούς .	45
4.1 Εισαγωγή	45
4.2 Σεισμοί από όλο τον κόσμο	46
4.2.1 Σεισμός Αρμενίας, 1988	46
4.2.2 Σεισμός California- Northridge, 1994	49
4.2.3 Σεισμός Chi-Chi	58
4.2.4 Σεισμός Kobe	62
4.2.5 Σεισμός Kocaeli	69
5. Σεισμική Τρωτότητα Δ.Κ.Ω	78
5.1 Εισαγωγή	78
5.1.1 Καταστάσεις ζημιάς	79
5.1.2 Δείκτης τρωτότητας	79
5.1.3 Μοντέλα βασισμένα στην κρίση ειδικών	80
5.1.4 Εμπειρικά πρότυπα	80
5.1.5 Αναλυτικά πρότυπα	83
5.2 Συστηματική προσέγγιση της αξιολόγησης της τρωτότητ	ας
δικτύων κοινής ωφέλειας	83
5.3 Σχέσεις τρωτότητας για τους θαμμένους σωλήνες	
υποκείμενους στην επίγεια κίνηση	90
5.3.1. Katayama et al. (1975)	91
5.3. 2 Eguchi (1991)	93
5.3.3 O'Rourke & Ayala (1993)	94
5.3.4 Hwang & Lin (1997)	96
5.3.5 O'Rourke et al. (1998)	98
5.3.6 Isoyama et al. (2000)	102
5.3.7 ALA (2001)	106

5.3.8 Συμπεράσματα1	09
5.4 Καμπύλες Τρωτότητας1	12
5.4.1 Γενική μορφή καμπύλων τρωτότητας για αγωγούς1	13
5.5. Οι αλγόριθμοι ζημίας PGD1	14
5.6. Συναρτήσεις της συνιστάμενης τρωτότητας αγωγών1	15
5.7. Παράγοντες τροποποίησης των καμπύλων τρωτότητας 1	16
5.8 Καμπύλες τρωτότητας για συγκεκριμένα υλικά1	18
5.8.1 Καμπύλη τρωτότητας σωλήνων χυτοσιδήρου1	18
5.8.2 Σωλήνας τσιμέντου αμιάντων1	19
5.8.3.Ενωμένος στενά σωλήνας χάλυβα1	19
5.9 Συμπεράσματα για τα παραπάνω υλικά	21
5.10 Άλλα υλικά σωλήνων1	22
6 Εφαρμονή Καμπυλών Τοωτότητας 1	24

	47
6.1 Εισαγωγή1	124
6.2 Εμπειρικές Καμπύλες Τρωτότητας1	125
6.3 Λογισμικό SSF1	127
6.4 Παραμετρική Διερεύνηση1	129
6.4.1 Επίδραση μετατόπισης ρήγματος- γωνία διάρρηξης 1	131
6.4.2 Επίδραση του υλικού του αγωγού1	132
6.4.3Επίδραση διαμέτρου αγωγού1	133
6.4.4Επίδραση εδαφικών ιδιοτήτων1	134
6.4.5 Επίδραση μετατόπισης ρήγματος1	135
6.5 Συμπεράσματα1	136
Βιβλιογραφία1	36

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</u>

Εισαγωγή

Ο σεισμός είναι ένα φυσικό φαινόμενο η εκδήλωση του οποίου συνδέεται με υλικές και μη καταστροφές. Τόσο η απότομη εκδήλωσή του όσο και οι ανεπιθύμητες συνέπειές του καθιστούν το σεισμό ένα φαινόμενο που έχει αποτελέσει αντικείμενο έντονης επιστημονικής έρευνας.

Παρακάτω αναφέρονται ορισμένοι χρήσιμοι ορισμοί που αφορούν τους σεισμούς, ώστε να γίνει πιο κατανοητό το φαινόμενο αυτό.

1.1 Ορισμοί

1.1.1 Σεισμοί (earthquakes): είναι οι εδαφικές δονήσεις οι οποίες γεννιούνται κατά τις διαταράξεις της μηχανικής ισορροπίας των γήινων πετρωμάτων, από φυσικά αίτια, που βρίσκονται στο εσωτερικό της γης. Στις θέσεις διατάραξης της μηχανικής ισορροπίας των πετρωμάτων απελευθερώνεται μηχανική ενέργεια, η οποία διαδίδεται μέσα στη γη με τη μορφή σεισμικών κυμάτων και εκδηλώνεται με τη μορφή δονήσεων του εδάφους.

Οι σεισμοί ανάλογα με τα αίτια γένεσής τους διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

 Τεκτονικοί σεισμοί: είναι εδαφικές δονήσεις οι οποίες προκαλούνται από την βίαιη διάρρηξη των πετρωμάτων της γης, ως αποτέλεσμα της δράσεως τεκτονικών δυνάμεων συμπίεσης και εφελκυσμού. Είναι οι πιο συνηθισμένοι, δεδομένου ότι το 90% των επιφανειακών σεισμών και το σύνολο των πλουτώνιων σεισμών είναι τεκτονικοί.

- Ηφαιστειογενείς σεισμοί: είναι εδαφικές δονήσεις που είτε προηγούνται είτε συνοδεύουν τις ηφαιστειακές εκρήξεις. Αποτελούν το 7% του συνόλου των επιφανειακών σεισμών.
- Εγκατακρημνισιγενείς σεισμοί: είναι εδαφικές δονήσεις που οφείλονται σε καταπτώσεις οροφών φυσικών εγκοίλων και σπηλαίων.
 Έχουν συνήθως μικρό μέγεθος και αποτελούν το 3% του συνόλου των επιφανειακών σεισμών.

Σεισμοί γεννιούνται μόνο μέσα στη λιθόσφαιρα και οι σεισμικές εστίες φθάνουν περίπου 700Km βάθος. Το μεγαλύτερο εστιακό βάθος σεισμού που έχει υπολογιστεί είναι 720Km. Ανάλογα με το εστιακό τους βάθος οι σεισμοί διακρίνονται σε:

- Επιφανειακούς σεισμούς με εστιακό βάθος μικρότερο από 60Km.
- Σεισμούς ενδιάμεσου βάθους με εστιακό βάθος μεταξύ 60 300 Km.
- Σεισμούς μεγάλου βάθους με εστιακό βάθος μεγαλύτερο από 300Km.

Οι σεισμοί ενδιάμεσου και μεγάλου βάθους καλούνται πλουτώνιοι σεισμοί.

Στις μεσο-ωκεάνιες ράχες παρατηρούνται μόνο επιφανειακοί σεισμοί, ενώ στις περιοχές σύγκλισης των πλακών γεννιούνται και σεισμοί ενδιάμεσου ή μεγάλου βάθους.

Επιπλέον, υπάρχουν εδαφικές δονήσεις που προέρχονται από φυσικά ή τεχνητά αίτια, αλλά δεν βρίσκονται στο εσωτερικό της γης. Οι δονήσεις αυτές παρόλο που δεν είναι σεισμοί μελετώνται από την σεισμολογία. Φυσικές δονήσεις θεωρούνται όσες οφείλονται σε πτώσεις μετεωριτών, μετεωρολογικά αίτια ή θαλάσσια κύματα, ενώ τεχνητές δονήσεις αυτές που προκαλούνται από πυρηνικές ή χημικές εκρήξεις καθώς και από τις μηχανές των εργοστασίων.

1.1.2 Μηχανισμοί γένεσης σεισμών

Η λιθόσφαιρα δεν είναι ενιαία αλλά απαρτίζεται από ένα σύνολο μεγάλων και μικρότερων πλακών που ολισθαίνουν πάνω στο υποκείμενο παχύρρευστο μανδυακό υλικό (ασθενόσφαιρα) πραγματοποιώντας σχετικές μεταξύ τους κινήσεις. Οι πλάκες αυτές λέγονται λιθοσφαιρικές πλάκες. Τα αίτια κίνησής τους πιθανόν να είναι οι οριζόντιες εφαπτομενικές κινήσεις που ασκούνται στον πυθμένα τους από τα θερμικά ρεύματα μεταφοράς τα οποία δημιουργούνται στον ασθενοσφαιρικό μανδύα.

Η θεωρία που ερμηνεύει ικανοποιητικά το σύνολο των γεωλογικών και γεωφυσικών παρατηρήσεων, που σχετίζονται με την ενεργό τεκτονική δράση και κατά συνέπεια και με τη σεισμική δράση, είναι αυτή που περιγράφει την κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών. Οι λιθοσφαιρικές πλάκες που υπάρχουν στον πλανήτη φαίνονται στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Απεικόνιση των λιθοσφαιρικών πλακών (πηγή: <u>www.oasp.gr</u>)

Οι λιθοσφαιρικές πλάκες αλλού αποκλίνουν, αλλού συγκλίνουν και αλλού η μία κινείται παράλληλα - εφαπτομενικά σε σχέση με τη διπλανή της. Στις περιοχές που αποκλίνουν οι λιθοσφαιρικές πλάκες -μεσοωκεάνιες ράχεςθερμό ασθενοσφαιρικό υλικό βγαίνει στην επιφάνεια, ψύχεται, στερεοποιείται και οδηγεί έτσι στη δημιουργία νέας λιθόσφαιρας κατά μήκος των δύο πλευρών των ραχών (π.χ. μεσοωκεάνια ράχη Ατλαντικού ωκεανού, απομάκρυνση Αμερικανικής - Αφρικανικής πλάκας).Στο σχήμα 1.2 που ακολουθεί απεικονίζεται η διαδικασία.



Σχήμα 1.2 Απεικόνιση της μεσοωκεάνιας ράχης (πηγή: <u>www.oasp.gr</u>)

Στις περιοχές που ολισθαίνουν οριζόντια η μία πλάκα σε σχέση με την άλλη, η κίνηση γίνεται κατά μήκος κατακόρυφων ρηγμάτων μετασχηματισμού.

Στην περίπτωση της σύγκλισης των πλακών η πυκνότερη από τις δύο βυθίζεται κάτω από την άλλη μέχρις ότου λιώσει η πρώτη μέσα στο θερμό μανδυακό υλικό και έτσι καταστρέφεται λιθοσφαιρικό υλικό (σχήμα 1.3). Η δημιουργία νέου ωκεάνιου φλοιού στις μεσο-ωκεάνιες ράχες αντισταθμίζεται λοιπόν με την καταστροφή αντίστοιχης ποσότητας στις περιοχές σύγκλισης πλακών, οπότε η συνολική επιφάνεια της Γης παραμένει σταθερή.



Σχήμα 1.3 Απεικόνιση σύγκλισης πλακών (πηγή: <u>www.oasp.gr</u>)

Αποτέλεσμα της σχετικής κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών είναι η αργή παραμόρφωση των πετρωμάτων στις παρυφές τους. Για το λόγο αυτό, στα πετρώματα που βρίσκονται κοντά στις περιοχές αυτές συσσωρεύονται τεράστια ποσά δυναμικής ενέργειας (ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης πετρωμάτων), και αναπτύσσονται μεγάλες τάσεις που συνεχώς αυξάνουν. Όταν οι τάσεις αυξηθούν τόσο πολύ, ώστε να υπερβούν το όριο αντοχής του λιθοσφαιρικού υλικού στο σημείο αυτό, επέρχεται θραύση (σχήμα 1.4). Ταυτόχρονα πραγματοποιείται απότομη σχετική κίνηση των δύο τμημάτων που έχουν προκύψει κατά μία επιφάνεια μέχρι να ισορροπήσουν σε νέες θέσεις. Η επιφάνεια αυτή είναι το σεισμικό ρήγμα. Τη χρονική αυτή στιγμή γεννιέται ένας σεισμός.







1.1.3 Σεισμογενή Ρήγματα



Ο χώρος που πρωτοεκδηλώνεται η διάρρηξη των πετρωμάτων (σεισμογόνος χώρος) μπορεί κατά προσέγγιση να θεωρηθεί ως σημείο και ονομάζεται εστία ή υπόκεντρο του σεισμού (σχήμα 1.5). Το ίχνος της κατακόρυφης προβολής της εστίας πάνω στην επιφάνεια της γης είναι το επίκεντρο, ενώ η απόστασή του από την εστία (βάθος της εστίας) λέγεται εστιακό βάθος. Σύμφωνα με όσα έχουν ήδη αναφερθεί αυτονόητο είναι ότι οι σεισμοί γεννιούνται μόνο μέσα στη λιθόσφαιρα και κατά κύριο λόγο εντοπίζονται στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών.

Τα ρήγματα διακρίνονται σε κανονικά, ανάστροφα και οριζόντιας ολίσθησης (σχήμα 1.6). Το είδος ενός ρήγματος καθορίζεται από τη σχετική κίνηση των δύο τμημάτων στα οποία χωρίζεται το πέτρωμα στη διάρκεια της διάρρηξης.

- Κανονικό ρήγμα: ονομάζεται το ρήγμα στο οποίο η πάνω πλευρά κινείται προς τα κάτω.
- Ανάστροφο ονομάζεται το ρήγμα στο οποίο η πάνω πλευρά κινείται
 προς τα κάτω. Ανάστροφα ρήγματα παρατηρούνται κύρια κατά μήκος
 του Ελληνικού τόξου.
- Οριζόντιας ολίσθησης είναι το ρήγμα που κινείται οριζόντια και μπορεί να είναι δεξιόστροφο ή αριστερόστροφο. Τα ρήγματα ολίσθησης είναι λίγα και παρατηρούνται στην περιοχή μεταξύ Κεφαλληνίας και Λευκάδας .Επίσης παρατηρούνται στην περιοχή του βόρειου Αιγαίου.



Σχήμα 1.6 Είδη Ρηγμάτων (Πηγή:Geotechnical Earthquake Engineering,Kramer)

Το ποσό της μετατόπισης της επιφάνειας του ρήγματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, υπολογίζεται, κυρίως, σε συνάρτηση με τον τύπο του ρήγματος, το μέγεθος του σεισμού, το εστιακό βάθος και τη γεωλογία της περιοχής. Οι μετακινήσεις των ρηγμάτων δεν χρειάζεται να περιορίζονται σε ένα μόνο επίπεδο ρήγματος ή ζώνη, αλλά μπορεί επίσης να εμφανιστούν σε σημαντική απόσταση από το κύριο ίχνος του ρήγματος.

1.1.4 Μεγέθη Έντασης Σεισμού

Για να υπάρχει κάποιο μέτρο σύγκρισης των σεισμών δημιουργήθηκε η ανάγκη υπολογισμού μίας ποσότητας που να τους χαρακτηρίζει. Έτσι ορίστηκε το μέγεθος (Μ) του σεισμού, που είναι το μέτρο της ενέργειας που εκλύεται από την εστία κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης. Το μέγεθος προσδιορίζεται με μετρήσεις διαφόρων παραμέτρων των σεισμικών κυμάτων όπως το πλάτος, η περίοδος και η διάρκεια. Για τον υπολογισμό του μεγέθους των σεισμών επινοήθηκαν διάφορες κλίμακες. Οι πιο γνωστές είναι: η κλίμακα τοπικού μεγέθους M_L (κλίμακα Richter - το όνομά της το πήρε από τον Ch. Richter to 1935) και η κλίμακα επιφανειακού μεγέθους M_S ενώ υπάρχουν και οι κλίμακες: χωρικού μεγέθους M_b, μεγέθους διάρκειας M_T, μεγέθους σεισμικής ροπής M_W σχέση (1.1). Το τελευταίο (M_w) δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$M_{W} = \frac{\log M_{0}}{1.5} - 10.7$$
 (1.1)

όπου

$$M_0 = \mu A \overline{D}$$
 (1.2)

Στην παραπάνω σχέση (1.2) υπολογισμού της σεισμικής ροπής μ είναι η αντοχή του υλικού του ρήγματος, Α η επιφάνεια διάρρηξης και *D* η μέση τιμή της ολίσθησης.

Στην Ελλάδα, συνήθως, οι αναφορές στο μέγεθος γίνονται σε M_s. Οι σεισμοί που προκαλούν βλάβες έχουν τις περισσότερες φορές μέγεθος μεγαλύτερο από 5 βαθμούς της κλίμακας Richter. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι οι επιπτώσεις ενός σεισμού στους ανθρώπους και στις κατασκευές (με βλάβες ή χωρίς βλάβες) εξαρτώνται εκτός από το μέγεθος και από άλλους παράγοντες όπως το βάθος της εστίας, τη θέση του επικέντρου, την κατασκευή, το έδαφος θεμελίωσης της κατασκευής, τη γειτνίαση με ενεργά ρήγματα.

Το μεγαλύτερο μέγεθος σεισμού που έχει μετρηθεί έως σήμερα σε παγκόσμια κλίμακα είναι 8,9 (κατά άλλους 9,2). Για να γίνει κατανοητή η αντιστοιχία των εννοιών μέγεθος - ενέργεια που εκλύεται από έναν σεισμό αρκεί να αναφερθεί ότι για μεγάλους σεισμούς (μέγεθος 8,7 - 8,9) η ενέργεια που εκλύεται είναι περίπου 900 φορές μεγαλύτερη από αυτήν της βόμβας στη Χιροσίμα. Ο μεγαλύτερος ίσως σεισμός (Μ=8,2) που έπληξε τον ελληνικό χώρο στις 21 Ιουλίου του 365μ.Χ. και προκάλεσε μεγάλες καταστροφές σε περιοχές της Μεσογείου (Πελοπόννησο, Κρήτη, Αίγυπτο, Σικελία, Δαλματία). Το συχνότερα παρατηρούμενο μέγιστο μέγεθος σεισμού -ετησίως- στη χώρα μας είναι το 6,3.

Για το μέγεθος Ms ισχύει η ακόλουθη εμπειρική σχέση (1.3):

$$Ms = \frac{2}{3} (\log E[erg] - 11.8) = \frac{2}{3} (\log E[Joule] - 4.8)$$

$$\log E[erg] = 11.8 + 1.5Ms$$
(1.3)

Όπου Ε είναι η εστιακή ενέργεια, η ενέργεια η οποία εκλύεται στον εστιακό χώρο από ένα σεισμό.

Η ένταση του σεισμού είναι μία άλλη ποσότητα που αποτελεί μέτρο των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα είναι μέτρο των βλαβών της σεισμικής δόνησης στους ανθρώπους και στις τεχνικές κατασκευές. Οι εμπειρικές κλίμακες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της έντασης είναι: η τροποποιημένη 12βάθμια κλίμακα Mercalli (**MM**, 1931), η επίσης 12βάθμια **MSK** (1964) που προτάθηκε από τους Medvedev, Sponheuer, Karnik και η 8βάθμια **JMA** (Japanese Meteorological Agency) που χρησιμοποιείται από τους Ιάπωνες. Το 1992 το Συμβούλιο της Ευρώπης υιοθέτησε μία νέα κλίμακα που αποτελεί εξέλιξη της MSK και έχει

8

προσαρμοστεί σε ευρωπαϊκά δεδομένα. Η κλίμακα αυτή είναι η EMS (European Macroseismic Scale).

Η ένταση ενός σεισμού είναι διαφορετική από περιοχή σε περιοχή και εξαρτάται κυρίως από την απόσταση της περιοχής αυτής από την εστία του σεισμού καθώς επίσης και από τους εδαφικούς παράγοντες της περιοχής. Ο προσδιορισμός της έντασης ενός σεισμού σε διάφορες περιοχές επιτρέπει τη χάραξη ισόσειστων καμπύλων, ώστε να εντοπιστούν οι περιοχές στις οποίες ο σεισμός προκάλεσε τις ίδιες βλάβες, είχε δηλαδή την ίδια ένταση.

1.1.5 Μεγέθη χαρακτηρισμού της σεισμικής κίνησης

Η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση, α₀, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό σεισμολογικό χαρακτηριστικό μέγεθος ενός σεισμού. Προσδιορίζεται συνήθως από μια εμπειρική σχέση προς την ένταση. Υπάρχει πληθώρα προτάσεων και έχουν γίνει πολλές προσπάθειες διατύπωσης τέτοιων σχέσεων. Οι σεισμολόγοι χρησιμοποιούν συνήθως, την εδαφική επιτάχυνση αιχμής που εμφανίζεται μόνο μια φορά κατά τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου. Μερικές σχέσεις μεταξύ έντασης και εδαφικής επιτάχυνσης αιχμής παρουσιάζονται στο σχήμα 1.7.



(Πηγή: Geotechnical Earthquake Engineering,Kramer)

Ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος της σεισμικής κίνησης αποτελεί το φάσμα απόκρισης ("response spectrum"). Χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των καταγεγραμμένων δονήσεων και τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών. Με τον όρο φάσμα απόκρισης νοείται η γραφική παράσταση των μέγιστων αποκρίσεων (ως προς την επιτάχυνση, ταχύτητα ή μετατόπιση) μονοβάθμιων ταλαντωτών με προκαθορισμένη ίση τιμή απόσβεσης και διαφορετική ιδιοσυχνότητα λόγω μιας καθορισμένης διέγερσης.

Η διαφορική εξίσωση του μονοβάθμιου ταλαντωτή είναι:

$$\ddot{x} + 2 \cdot \zeta \cdot \omega \cdot \dot{x} + \omega^2 \cdot x = -\ddot{x}_g(t)$$
 (1.4)

Η λύση της παραπάνω εξίσωσης είναι:

$$x(t) = \frac{1}{\omega'} \cdot \int_{0}^{t} \ddot{x}_{g}(\tau) \cdot e^{-\zeta \omega(t-\tau)} \cdot \sin \omega'(t-\tau) d\tau \quad (1.5)$$

Η δεσπόζουσα περίοδος, Τ_ρ, είναι ένα ακόμα χαρακτηριστικό μέγεθος. Είναι μια παράμετρος που παρέχει μια χρήσιμη αναπαράσταση της συχνότητας σε σχέση με την εδαφική κίνηση. Ορίζεται ως η περίοδος της ταλάντωσης σχετικά με τη μέγιστη τιμή του πλάτους του φάσματος Fourier.Η δεσπόζουσα περίοδος, ενώ δίνει μερικές πληροφορίες σχετικά με τη συχνότητα, σε πολλές περιπτώσεις κινήσεων που έχουν μεγάλες διαφορές στη συχνότητα, μπορεί να παρατηρηθεί να έχει την ίδια τιμή

Επιπρόσθετα, ένα επιπλέον χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η διάρκεια της σεισμικής δόνησης. Η διάρκεια μιας ισχυρής σεισμικής δόνησης, είναι σχετική με τον απαιτούμενο χρόνο για την απελευθέρωση της υπολογισμένης ενέργειας από τη θραύση κατά μήκος του ρήγματος. Καθώς το μήκος, ή η περιοχή της θραύσης ρήγματος μεγαλώνει, ο απαιτούμενος χρόνος για τη θραύση μεγαλώνει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η σεισμική διάρκεια να αυξάνεται με την αύξηση του σεισμικού μεγέθους. Η διάρκεια της σεισμικής δόνησης έχει ερευνηθεί με την ερμηνεία επιταχυνσιογραμμάτων για σεισμούς διαφορετικού μεγέθους.

1.2 Σεισμικά Κύματα και Είδη Σεισμικών Κυμάτων

Οι ιδιότητες των κυμάτων που ακτινοβολούνται (π.χ. χαρακτηριστικά ακτινοβολίας, σύνθεση φάσματος) καθορίζονται από τις διεργασίες κατά τη διαδικασία διάρρηξης στην εστία του σεισμού. Τα σεισμικά κύματα διαδίδονται από την πηγή μέσω της γης. Οι ιδιότητες του μέσου διάδοσης αυτού μεταβάλλουν σε σημαντικό βαθμό το πλάτος και το περιεχόμενο συχνοτήτων που ακτινοβολούνται.

Στον πίνακα 1.1 γίνεται διάκριση μεταξύ δύο κυρίων τύπων κυμάτων, των κυμάτων χώρου και των επιφανειακών κυμάτων.

Κύματα χώρου	Πρωτογενή κύματα (Ρ) Δευτερογενή κύματα (S)
Επιφανειακά κύματα	Κύματα Love(L) Κύματα Rayleight (R)

Πίνακας 1.1 Διάκριση δύο κύριων τύπων κυμάτων

Κύματα χώρου: τα συναντάμε στο φλοιό της γης και εν μέρει και στο εσωτερικό της γης (πρωτογενή κύματα).

Επιμήκη κύματα ή κύματα P (primary waves): τα κύματα που αναγράφονται πρώτα από τα σεισμόμετρα. Κατά την διάδοση τους, τα υλικά σημεία των πετρωμάτων ταλαντώνονται κατά διεύθυνση παράλληλη προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος δημιουργώντας διαδοχικά πυκνώματα και αραιώματα (βλ. σχήμα 1.8 α).

Εγκάρσια κύματα ή κύματα S (secondary waves): φθάνουν δεύτερα στους σεισμολογικούς σταθμούς γιατί η ταχύτητα διάδοσης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ταχύτητα των επιμηκών κυμάτων. Κατά την διάδοση τους τα υλικά σημεία του πετρώματος ταλαντώνονται κάθετα προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος προκαλώντας μεταβολή στο σχήμα του πετρώματος (βλ. σχήμα 1.8 b).





Επιφανειακά κύματα (surface waves): τα κύματα που δεν διαδίδονται προς όλες τις διευθύνσεις αλλά ακολουθούν ορισμένα στρώματα του επιφανειακού τμήματος της γης. Διακρίνονται σε κύματα Rayleigh και κύματα Love. Τα επιφανειακά κύματα έχουν μικρότερες ταχύτητες από τα κύματα χώρου για αυτό και καταγράφονται μετά από αυτά από τα σεισμόμετρα.

Κύματα Love: προκαλούνται από τον «εγκλωβισμό» και τις διαδοχικές ανακλάσεις κυμάτων S εντός μαλακού επιφανειακού στρώματος που υπέρκειται του βραχώδους υποβάθρου. Τα εδαφικά σωματίδια σε αυτήν την περίπτωση κινούνται οριζοντίως κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης, φθίνοντας όμως έντονα προς τα κάτω (βλ. σχήμα 1.9α)

Κύματα Rayleigh: τα νιώθουμε τελευταία και πιο έντονα από όλα τα σεισμικά κύματα και είναι αυτά που προκαλούν τις περισσότερες καταστροφές στα κτίσματα. Τα σωματίδια κινούνται με μια ελλειπτική τροχιά σε ένα κατακόρυφο επίπεδο, δηλαδή συνδυασμένα οριζοντίως προς τα μπρος και πίσω, καθώς και κατακορύφως πάνω και κάτω.(βλ. σχήμα 1.9b)



Σχήμα 1.9 Είδη σεισμικών κυμάτων a) Κύμα Love b) Κύμα Rayleigh [πηγή: Geotechnical Earthquake Engineering,Kramer]

1.3 Σεισμικός Κίνδυνος και δίκτυα κοινής ωφέλειας

1.3.1 Σεισμικός κίνδυνος (seismic risk). Ο αναμενόμενος βαθμός σεισμικών βλαβών που πρόκειται να υποστεί μια τεχνική κατασκευή ή και γενικότερα το σύνολο των επιπτώσεων στις ανθρώπινες δραστηριότητες εξαιτίας ενός σεισμού. Ο σεισμικός κίνδυνος είναι μια συνάρτηση των ιδιοτήτων της πηγής, του μέσου διάδοσης και των τοπικών συνθηκών που επικρατούν σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Οι επιπτώσεις των σεισμικών δονήσεων στις κατασκευές, στα ύδατα και στον πληθυσμό ονομάζονται και Μακροσεισμικά αποτελέσματα.

Στις μέρες μας η επιστήμη της σεισμολογίας έχει κάνει σημαντική πρόοδο προς την κατεύθυνση της ακριβούς πρόγνωσης του σεισμικού φαινόμενου, όμως ο σεισμικός κίνδυνος παραμένει ακόμα μη προβλέψιμος. Ο σεισμικός κίνδυνος δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί από την πηγή που προκλήθηκε, γιατί δεν είναι δυνατόν να επέμβουμε και να σταματήσουμε τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στο εσωτερικό της Γης και είναι υπεύθυνες για την πρόκληση των σεισμών.

1.3.2 Δίκτυα Κοινής Ωφέλειας (ΔΚΩ) ονομάζονται όλες εκείνες οι κατασκευές που είναι απαραίτητες για την καλύτερη λειτουργία μιας κατοικημένης περιοχής. Τέτοιες κατασκευές είναι τα δίκτυα ύδρευσης, αποχέτευσης, ηλεκτρικού, φυσικού αερίου, μεταφορών, τηλεπικοινωνιών κλπ. Τα τελευταία χρόνια έχουν διεξαχθεί ένας μεγάλος αριθμός μελετών για το

13

σεισμικό κίνδυνο που διατρέχουν τα δίκτυα κοινής ωφέλειας, καθώς πιθανές αστοχίες σε αυτά συνεπάγονται τεράστιες επιπτώσεις για τον πληθυσμό. Τα δίκτυα αυτά στη Σεισμική Μηχανική ονομάζονται ''γραμμές ζωής'' (lifelines). Με τον όρο αυτό εκφράζεται καλύτερα η σημασία τους για τη λειτουργία μιας αστικής περιοχής και ακολούθως την αναγκαιότητα για ιδιαίτερη επιστημονική προσέγγιση της διαχείρισης της επικινδυνότητας που αφορά αυτά τα δίκτυα.

Τα δίκτυα αποτελούνται από στοιχεία που είναι γραμμικά (όπως αγωγοί, οδοί) και σημειακά (όπως δεξαμενές, υποσταθμοί, τερματικοί σταθμοί) και καλύπτουν μεγάλες περιοχές. Έχουν τη δυνατότητα να διατρέχουν κάθε είδους εδάφους σε διάφορα βάθη, να έχουν δυσκαμψίες από σημείο σε σημείο και να συντίθενται από διάφορα υλικά. Πρόκειται δηλαδή για ποικιλόμορφες κατασκευές, που ανήκουν σε πολύπλοκα δίκτυα, εκτείνονται σε τρισδιάστατο χώρο και κατά συνέπεια φορτίζονται από σεισμικά κύματα με ένα εξαιρετικά σύνθετο τρόπο.

Ιδιαίτερη μέριμνα θα πρέπει να λαμβάνεται στη συμπεριφορά των δικτύων κοινής ωφέλειας μιας περιοχής σε περίπτωση σεισμικού κινδύνου. Κατά τη διάρκεια και μετά το τέλος ενός ισχυρού σεισμού, πρωταρχικό μέλημα είναι η διασφάλιση της ανθρώπινης ζωής, η οποία είναι αδύνατον να αποτιμηθεί. Εφόσον δεν θα υπάρξουν ανθρώπινα θύματα, επόμενο βήμα είναι η εξασφάλιση της καλύτερης και πιο ομαλής λειτουργίας των δικτύων. Αστοχίες στα δίκτυα αυτά συχνά προκαλούν τεράστια προβλήματα τις πρώτες ώρες μετά το σεισμό, οπότε και η απρόσκοπτη λειτουργία τους θεωρείται ζητούμενο για την σωστή αντιμετώπιση μιας κρίσης. Η αναγκαιότητα προστασίας των δικτύων κοινής ωφέλειας κρίνεται ακόμα πιο απαραίτητη, αν αναλογιστεί κανείς πως τα συνδυαστικά αποτελέσματα των επιπτώσεων ενός σεισμού στα δίκτυα μιας πόλης έχουν πολλαπλάσιες επιπτώσεις στην κοινωνία, τόσο τις πρώτες ώρες μετά το σεισμό, όσο και αργότερα. Ο ρόλος των δικτύων είναι πολύ σημαντικός για τις επιχειρήσεις έρευνας, διάσωσης και υποστήριξης των περιοχών που έχουν πληγεί από το σεισμό. Δεν είναι λίγες οι φορές για παράδειγμα που σε μεγάλους σεισμούς, οι μεγαλύτερες απώλειες προήλθαν από πυρκαγιές σε δίκτυα φυσικού αερίου, ή που οι άνθρωποι που κινδύνευαν δεν είχαν κανένα τρόπο επικοινωνίας με τις δυνάμεις πολιτικής προστασίας, ή που η αντιμετώπιση πυρκαγιών ήταν δύσκολη λόγω αστοχιών στο δίκτυο

ύδρευσης. Ο συνδυασμός αυτός δεν αποτελεί απίθανο σενάριο σε μεγάλες πόλεις κατά την διάρκεια εκδήλωσης σεισμικών δονήσεων μεγάλης έντασης, μπορεί να θέσει σε άμεσο κίνδυνο την ζωή του πληθυσμού. Ταυτόχρονα η επιδιόρθωση των καταστροφών στα δίκτυα κοινής ωφέλειας είναι συνήθως πολυδάπανη και καθόλου εύκολη υπόθεση.

Συμπερασματικά η σπουδαιότητα των δικτύων κοινής ωφέλειας για τον άνθρωπο και τις δραστηριότητες του είναι από όλους κατανοητή, όπως και οι απώλειες που δημιουργούνται με την τμηματική ή ολοκληρωτική καταστροφή τους σε περίπτωση σεισμού. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί οι καμπύλες τρωτότητας. Αυτές οι καμπύλες είναι ένα μοντέλο τρωτότητας που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των πιθανών βλαβών και του κόστους που θα προκύψει.

Το κόστος από την αστοχία του δικτύου μπορεί να είναι το οικονομικό κόστος, είτε για την επισκευή του έργου είτε από την αναβολή άλλων δραστηριοτήτων που έχουν άμεση εξάρτηση από το έργο. Ακόμα μπορεί το κόστος να αναφέρεται στην απώλεια των υπηρεσιών που παρείχε το έργο και στις πιθανές οικολογικές καταστροφές που προέκυψαν.

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</u>

Σεισμική Επικινδυνότητα και Σεισμική Διακινδύνευση

2.1 Εισαγωγή

Δυο βασικές έννοιες που χρησιμοποιούνται ευρέως στον κλάδο της Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής είναι η έννοια της σεισμικής επικινδυνότητας (Seismic Hazard) και η έννοια της σεισμικής διακινδύνευσης (Seismic Risk).

Σεισμική επικινδυνότητα (Seismic Hazard), σε έναν τόπο, ονομάζεται η πιθανότητα που έχει μια συγκεκριμένη παράμετρος της ισχυρής εδαφικής κίνησης (μετατόπιση Peak Ground Displacement ή PGD, ταχύτητα Peak Ground Velocity ή PGV, επιτάχυνση Peak Ground Acceleration ή PGA) να υπερβεί μια δεδομένη τιμή, σε ορισμένη χρονική περίοδο. Μπορεί επίσης, ως μέτρο της σεισμικής επικινδυνότητας να οριστεί η τιμή της παραμέτρου της εδαφικής κίνησης για την οποία υπάρχει προκαθορισμένη τιμή πιθανότητας υπέρβασης σε ορισμένη χρονική περίοδο.

Η σεισμική διακινδύνευση(Seismic Risk) εκφράζει τις πιθανές απώλειες που οφείλονται όχι μόνο στις άμεσες συνέπειες του σεισμού, όπως οι βλάβες των κατασκευών, οι θάνατοι ή τραυματισμοί, αλλά και στις έμμεσες συνέπειες, όπως η διακοπή της οικονομικής, κοινωνικής και πολιτιστικής δραστηριότητας στην πληγείσα περιοχή. Για τον υπολογισμό της σεισμικής διακινδύνευσης χρειάζεται να εκτιμηθεί η σεισμική επικινδυνότητα και η τρωτότητα των τεχνικών έργων.

Σε πολλές περιοχές του κόσμου, η 'απειλή' για τις ανθρώπινες δραστηριότητες και κατασκευές από τους σεισμούς καθιστά αναγκαία την προσεκτική θεώρηση του όλου προβλήματος του σχεδιασμού των τεχνικών έργων. Η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας μιας θέσης αποτελεί βασικό στοιχείο του αντισεισμικού σχεδιασμού καθώς και το πρώτο στάδιο για τον καθορισμό της εδαφικής κίνησης σχεδιασμού λόγω σεισμού, πάνω στην οποία στηρίζεται ο ασφαλής σχεδιασμός των τεχνικών έργων. Τα στοιχεία που προκύπτουν από αναλύσεις σεισμικής επικινδυνότητας χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της σεισμικής φόρτισης που επιβάλλεται στις κατασκευές.

2.2 Σημαντικοί παράγοντες για τη σεισμική επικινδυνότητα

Οι κυριότεροι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας είναι:

 η σεισμικότητα της περιοχής (το είδος και το μέγεθος των σεισμικών πηγών)

 η επίδραση του μέσου διάδοσης από τη θέση έκλυσης της σεισμικής ενέργειας στη θέση ενδιαφέροντος

3. η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών, οι οποίες τα τελευταία χρόνια διαπιστώνεται ότι παίζουν πρωταρχικό ρόλο τόσο στον καθορισμό των μέγιστων πλατών όσο και του περιεχομένου συχνότητας των εδαφικών κινήσεων

Το αποτέλεσμα μιας μελέτης σεισμικής επικινδυνότητας δεν αναφέρεται στις αναμενόμενες πιθανές κινήσεις από κάποιο συγκεκριμένο ρήγμα ή ρηξιγενή ζώνη, αλλά περιλαμβάνει όλες τις πιθανές περιπτώσεις που συντελούν στο να ξεπεράσει (ή όχι) η εδαφική κίνηση, στη θέση ενδιαφέροντος, κάποια τιμή με ορισμένη πιθανότητα. Έχει δηλαδή έναν έντονο στοχαστικό χαρακτήρα.

Μελέτες σεισμικής επικινδυνότητας σε εθνικό επίπεδο ή για εκτεταμένες περιοχές πραγματοποιούνται με τη συνεργασία των πολιτικών μηχανικών και σεισμολογικών εργαστηρίων και ενσωματώνονται στους αντισεισμικούς κανονισμούς. Για το σχεδιασμό σημαντικών τεχνικών έργων και για τις

17

ανάγκες των μικροζωνικών μελετών, εκπονούνται συγκεκριμένες μελέτες σεισμικής επικινδυνότητας.

2.3 Ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας

Η ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας περιλαμβάνει την ποσοτική εκτίμηση του κινδύνου της εδαφικής δόνησης επί ενός ιδιαίτερου τόπου. Ο κίνδυνος μπορεί να υπολογιστεί ντετερμινιστικά, με το να υποθέσει έναν σεισμό σεναρίου, ή πιθανολογικά, στον οποίο οι αβεβαιότητες στο μέγεθος και τη θέση σεισμού σε σχέση με το χρόνο και το διάστημα εξετάζονται ρητά.

2.3.1 Ντετερμινιστική ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας

Η ντετερμινιστική ανάλυση της σεισμικής επικινδυνότητας (Deterministic Seismic Hazard Analysis ή DSHA) περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός σεναρίου στο οποίο βασίζεται η εκτίμηση της επικινδυνότητας της σεισμικής κίνησης. Μία τυπική ντετερμινιστική ανάλυση σεισμική επικινδυνότητας αποτελείται από τέσσερα βήματα:

 Προσδιορισμός και χαρακτηρισμός όλων των πηγών σεισμού ικανών για τη σημαντική επίγεια κίνηση επί του τόπου ενδιαφέροντος, βασισμένου στα γεωλογικά στοιχεία και τη διανομή των προηγούμενων σεισμών. Ο χαρακτηρισμός πηγής περιλαμβάνει τον καθορισμό της γεωμετρίας της πηγής και της δυνατότητας του σεισμού.

2. Επιλογή μιας παραμέτρου χαρακτηρισμού της απόστασης των υπό εξέταση περιοχών από την σεισμική πηγή, για κάθε ζώνη πηγής. Η απόσταση μπορεί να είναι είτε από το επίκεντρο είτε από το υπόκεντρο, εξαρτάται από το μέτρο της απόστασης που χρησιμοποιείται στην σχέση πρόβλεψης που αναπτύσσεται στο ακόλουθο βήμα.

3. Επιλογή του κυρίως σεισμού της περιοχής (δηλ. ο σεισμός που αναμένεται για να παραγάγει το ισχυρότερο επίπεδο εδαφικής δόνησης), εκφράζεται συνήθως από κάποιες παραμέτρους χαρακτηρισμού της εδαφικής κίνησης. Η επιλογή γίνεται με τη σύγκριση των επιπέδων δόνησης που παράγονται από τους σεισμούς που καθορίζονται στο βήμα 1 που υποτίθεται ότι εμφανίστηκε στις αποστάσεις που προσδιορίζονται στο βήμα 2. Ο κύριος σεισμός έπειτα περιγράφεται από το μέγεθος και την απόσταση από την περιοχή.

4. Επίσημος καθορισμός του κινδύνου στην περιοχή από την εδαφική κίνηση που παράγεται επί του τόπου από τον κυρίως σεισμό. Τα χαρακτηριστικά εδαφικών κινήσεων περιγράφονται από μια ή περισσότερες παραμέτρους χαρακτηρισμού της εδαφικής κίνησης που λαμβάνονται από τις σχέσεις πρόβλεψης. Συνήθως ο χαρακτηρισμός της σεισμικής επικινδυνότητας ορίζεται από την μέγιστη ταχύτητα, την μέγιστη επιτάχυνση και τα φασματικά χαρακτηριστικά.

Η διαδικασία παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Κύριες όψεις μιας ντετερμινιστικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου (πηγή: Kramer, 1996)

2.3.2 Πιθανοτική ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας

Τα επίπεδα της εδαφικής κίνησης που χρησιμοποιούνται στο σεισμικό σχεδιασμό και τις αξιολογήσεις κινδύνου καθορίζονται γενικά με τη βοήθεια των σεισμικών αναλύσεων κινδύνου. Οι ντετερμινιστικές αναλύσεις σεισμικού

κινδύνου χρησιμοποιούνται συχνότερα για τις πρόσθετες δομές ή για την εκτίμηση των ανώτερων ορίων των επιπέδων της επίγειας κίνησης. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων της, τα επίπεδα εδαφικής δόνησης καθορίζονται από της πιθανολογικές αναλύσεις σεισμικού κινδύνου.

Οι πιθανολογικές αναλύσεις σεισμικού κινδύνου (Probabilistic Seismic Hazard Analysis ή PSHA) εξετάζουν τα πιθανά επίπεδα εδαφικής κίνησης από όλους τους συνδυασμούς μεγέθους και απόστασης για τις γνωστές πηγές που είναι ικανές να παράγουν σημαντική δόνηση στην εξεταζόμενη περιοχή.

Τα τελευταία 20 με 30 χρόνια η χρήση πιθανολογικών σεναρίων έχουν επιτρέψει οι αβεβαιότητες για το μέγεθος, την τοποθεσία και το ρυθμό επανεμφάνισης των σεισμών, καθώς και την απόκλιση των χαρακτηριστικών της εδαφικής κίνησης με το σεισμικό μέγεθος και την τοποθεσία να μπορούν σαφώς να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των σεισμικών κινδύνων. Η πιθανολογική ανάλυση σεισμικού κινδύνου παρέχει ένα πλαίσιο στο οποίο αυτές οι αβεβαιότητες μπορούν να προσδιοριστούν, να είναι κατάλληλες, και να συνδυαστούν κατά τρόπο ρεαλιστικό για να παρέχουν μια πληρέστερη εικόνα του σεισμικού κινδύνου.

Η προσέγγιση PSHA μπορεί να περιγραφεί ως διαδικασία τεσσάρων βημάτων, κάθε ένα από τα οποία περιέχει κάποιο βαθμό ομοιότητας με τα βήματα της διαδικασίας DSHA.

1. Το πρώτο βήμα, είναι ο προσδιορισμός και ο χαρακτηρισμός των πηγών σεισμού, είναι ίδιο με το πρώτο βήμα του DSHA, εκτός από το ότι η διανομή πιθανότητας των πιθανών θέσεων θραύσης μέσα στην πηγή πρέπει να έχει χαρακτηριστεί. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι ομοιόμορφες διανομές πιθανότητας ορίζονται σε κάθε ζώνη πηγής, που υπονοεί ότι οι σεισμοί είναι εξίσου πιθανό να εμφανιστούν σε οποιοδήποτε σημείο μέσα στη ζώνη πηγής. Αυτές οι διανομές συνδυάζονται έπειτα με τη γεωμετρία πηγής για να λάβουν την αντίστοιχη διανομή πιθανότητας της απόστασης πηγή--περιοχών. Το DSHA, αφ' ενός, υποθέτει ότι η πιθανότητα του περιστατικού είναι 1 στα σημεία μέσα σε κάθε ζώνη πηγής όσο πιο κοντά βρίσκεται στην περιοχή, και μηδέν οπουδήποτε αλλού.

2. Έπειτα, η σεισμικότητα ή η χρονική διανομή της επανάληψης σεισμού πρέπει να χαρακτηριστεί. Μια σχέση επανάληψης, που διευκρινίζει το μέσο ποσοστό στο οποίο ένας σεισμός κάποιου μεγέθους θα ξεπεραστεί, χρησιμοποιείται να χαρακτηρίσει τη σεισμικότητα σε κάθε ζώνης πηγής. Η σχέση επανάληψης μπορεί να προσαρμόσει το σεισμό με το μέγιστο μέγεθος, αλλά δεν περιορίζει την εκτίμηση σε εκείνο τον σεισμό, όπως συχνά κάνει η DSHAs.

3. Στο τρίτο βήμα, η επίγεια κίνηση που παράγεται στο χώρο από τους σεισμούς οποιουδήποτε πιθανού μεγέθους που εμφανίζεται σε οποιοδήποτε πιθανό σημείο σε κάθε ζώνη πηγής πρέπει να καθοριστεί με τη χρήση των σχέσεων πρόβλεψης. Η αβεβαιότητα που είναι έμφυτη στην σχέση πρόβλεψης εξετάζεται επίσης σε ένα PSHA.

4. Τέλος, οι αβεβαιότητες στη θέση σεισμού, το μέγεθος σεισμού, και την πρόβλεψη της παραμέτρου εδαφικής κίνησης συνδυάζονται για να λάβουν την πιθανότητα ότι η παράμετρος επίγειων κινήσεων θα ξεπεραστεί κατά τη διάρκεια ενός ιδιαίτερου χρονικού διαστήματος.



Η διαδικασία παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 2.2

Σχήμα 2.2Κύριες όψεις μιας πιθανολογικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου (πηγή: Kramer, 1996)

Η εκτίμηση του μέσου ετήσιου ποσοστού, στο οποίο ένα συγκεκριμένο επίπεδο σεισμικής δόνησης θα ξεπεραστεί, προκύπτει από το συνδυασμό της κατανομής μεγέθους, της απόστασης, καθώς και του επιπέδου εδαφικής κίνησης ανάλογα με το μέγεθος και την απόσταση. Το μέσο ετήσιο ποσοστό υπέρβασης μιας τιμής παραμέτρου επίγειας κίνησης, y, μπορεί να υπολογιστεί ως

$$\lambda_{y} = \sum_{i=1}^{N_{s}} v_{i} \sum_{j=1}^{N_{m}} \sum_{k=1}^{N_{R}} P[Y \succ y | M = m_{j}, R = r_{k}] P[M = m_{j}] P[R = r_{k}]$$
(2.1)

όπου *NS*, *N*M, and *N*R είναι οι αριθμοί των σεισμικών πηγών, διακριτά μεγέθη, και διακριτές αποστάσεις πηγή-περιοχών, αντίστοιχα, και *ν* i είναι το μέσο ετήσιο ποσοστό υπέρβασης κάποιου ελάχιστου μεγέθους για την πηγή ith. Ο αντίστροφος του μέσου ετήσιου ποσοστού υπέρβασης αναφέρεται συνήθως ως περίοδος επιστροφής. Τα αποτελέσματα της PSHA παρουσιάζονται χαρακτηριστικά υπό μορφή καμπύλης σεισμικού κινδύνου, η οποία επεξηγεί γραφικά τη σχέση μεταξύ λ_y και του y. Στην εξίσωση (2.1), η έκφραση πιθανότητας λαμβάνεται χαρακτηριστικά από μια σχέση μείωσης εδαφικών κινήσεων.

Για ένα σύστημα διανεμημένο στο χώρο, όπως ένα σύστημα διανομής ύδατος, η παραλλαγή του κινδύνου πέρα από μια εκτεταμένη περιοχή πρέπει να χαραχτεί για κάθε πιθανή σεισμική πηγή που καθορίζεται στο βήμα 1. Ο κυρίως σεισμός είναι αυτός που προκαλεί τις δυσμενέστερες εδαφικές κινήσεις πέρα από την περιοχή συστημάτων ή αυτός που προκαλεί την περισσότερη ζημία σε ορισμένα κρίσιμα συστατικά του συστήματος.

Μια ντετερμινιστική προσέγγιση στην ανάλυση κινδύνου σεισμού είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για οποιοδήποτε δίκτυο κοινής ωφέλειας δεδομένου ότι είναι σημαντικό να εξεταστεί η συγχωνευμένη επίδραση των ζημιών σε ολόκληρο το σύστημα. Για τη χωρική -συγκεκριμένη ανάλυση των μεμονωμένων κρίσιμων εγκαταστάσεων (π.χ. ένας κεντρικός αγωγός μετάδοσης ακατέργαστου ύδατος ή ένας σημαντικός σταθμός αντλιών), είτε οι πιθανολογικές, είτε οι ντετερμινιστικές αξιολογήσεις του κινδύνου μπορεί να χρησιμοποιηθούν.

Πιθανολογικά μοντέλα σεισμικού κινδύνου αναπτύσσονται για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των συστημάτων Δ.Κ.Ω. Εντούτοις, αν και αυτές οι μέθοδοι εξετάζουν ρητά όλες τις πιθανές σεισμογεννετικές πηγές, δεν επιτρέπουν τον καθορισμό μιας πραγματικής κατάστασης ζημίας συστημάτων.

Η ντετερμινιστική προσέγγιση, με τη χρησιμοποίηση ενός μικρού αριθμού σεναρίων-βασισμένων σε εκτιμήσεις απώλειας, δεν θα εξετάσει τις απώλειες από έναν μεγάλο αριθμό άλλων πιθανών σεναρίων σεισμού. Αναπτύσσεται για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των συστημάτων σανίδων σωτηρίας. Εντούτοις, αν και αυτές οι μέθοδοι εξετάζουν όλες τις πιθανές σεισμογενικές πηγές, ούτε αυτές επιτρέπουν τον καθορισμό μιας πραγματικής κατάστασης ζημίας συστημάτων. Παρόλα αυτά, ιδιαίτερα στις ιδιαίτερα σεισμικές περιοχές, με τις σαφώς καθορισμένες πηγές σεισμού, η ειδική γνώση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει τα κρίσιμα σενάρια.

Στην πράξη, οι υπεύθυνοι μηχανικοί τείνουν να χρησιμοποιήσουν τη βασισμένη σε σενάριο προσέγγιση. Αυτό επιτρέπει τον προσδιορισμό όχι μόνο της πιθανής έκτασης της φυσικής ζημίας για ένα δεδομένο σενάριο, αλλά και την απώλεια λειτουργίας του συστήματος.

2.4 Σεισμική αξιοπιστία αστικών δικτύων αγωγών.

Με βάση την προηγούμενη εμπειρία σεισμού και το πείραμα στις ενώσεις σωλήνων στην Κίνα, τρεις καταστάσεις ζημίας μιας υπόγειας σωλήνωσης σε σεισμό ορίζονται ως ακολούθως:

Άθικτη: Καμία ζημία στο σώμα σωλήνων. Η παραμόρφωση στις άκαμπτες
 ενώσεις είναι στο στάδιο της ελαστικότητα και η σχετική μετατόπισή της s
 είναι λιγότερο από το όριο σχισμής R1 για τις ενώσεις. Οι ενώσεις μπορούν

να έχουν μια πολύ μικρή σχισμή. Μπορεί να υπάρξει πολύ λίγη διαρροή στις ενώσεις.

Μικρή ζημία: Η παραμόρφωση στις άκαμπτες ενώσεις είναι από το στάδιο της ελαστικότητας στην πλαστικότητα, και η σχετική μετατόπιση s υπερβαίνει το όριο σχισμής R1. Υπάρχει ολίσθηση μεταξύ του δακτυλίου σύνδεσης και του σώματος σωλήνων στις εύκαμπτες ενώσεις. Η πίεση ύδατος στις σωληνώσεις μπορεί να μειωθεί.

 Σοβαρή ζημία: Η σχετική μετατόπιση s της ένωσης υπερβαίνει το όριο διαρροής R2, το υλικό πληρώσεως χαλαρώνει με σοβαρή διαρροή.

2.4.1 Πιθανοτικό πρότυπο πρόβλεψης απόκρισης υπόγειων αγωγών

Θεωρώντας τη σχετική μετατόπιση της ένωσης ως επίδραση σεισμού να είναι το S, και η επιτρεπόμενη μετατόπιση ως δομική αντίσταση της σωλήνωσης να είναι R, κατόπιν προκύπτει η αποτελεσματική λειτουργία Z των μεταβλητών S και R από τον τύπο:

$$Z = f(S, R) = R - S$$
 (2.2)

S και R είναι και οι δύο τυχαίες μεταβλητές,

έπειτα η πιθανότητα αστοχίας είναι

$$P_F = P(Z \prec 0)$$
 (2.3)

Υποθέστε ότι το R кαι το S ακολουθούν τις τυχαίες μεταβλητές των δύο κανονικών διανομών, $N(\mu_R, \sigma_R)$ και $N(\mu_S, \sigma_S)$ αντίστοιχα, κατόπιν το Z είναι μια κανονική τυχαία μεταβλητή, και ακολουθεί την κανονική διανομή $N(\mu_Z, \sigma_Z)$, στην οποία $\mu_Z = \mu_R - \mu_S$, $\sigma_Z = (\sigma_R^2 + \sigma_S^2)^{0.5}$, τα $\mu_R, \sigma_R, \mu_S, \sigma_S, \mu_Z, \sigma_Z$ είναι οι αναμενόμενες τιμές και οι σταθερές αποκλίσεις των τυχαίων μεταβλητών R, S,Z αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές καθορίστηκαν από τα πειράματα.

Έτσι, το πιθανολογικό πρότυπο πρόβλεψης της σεισμικής ζημίας της σωλήνωσης είναι :

1) Η κατάσταση χωρίς βλάβες

$$P_{F1} = P(Z_1 > 0) = \phi\left(\frac{\mu_1}{\sigma_1}\right)$$
 (2.4)

2) Η κατάσταση αστοχίας

$$P_{F3} = P(Z_2 \le 0) = \phi(\frac{-\mu_2}{\sigma_2})$$
 (2.5)

3) Η κατάσταση μετρίων βλαβών

$$P_{F2} = 1 - P_{F1} - P_{F3} \quad (2.6)$$

όπου
$$\mu_1 = \mu_{R1} - \mu_s$$
, $\sigma_1 = (\sigma_{R1}^2 + \sigma_s^2)^{0.5}$, $\mu_2 = \mu_{R2} - \mu_s$, $\sigma_2 = (\sigma_{R2}^2 + \sigma_s^2)^{0.5}$

Με τη βοήθεια αυτών των τύπων και στατιστικών στοιχείων δοκιμής, ανάλυσης σεισμικού κινδύνου και στοιχείων σωληνώσεων, η πιθανότητα ύπαρξης βλαβών μπορεί να υπολογιστεί, όπως αναλύεται στη συνέχεια, μέσω των καμπύλων τρωτότητας.

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</u>

3.0 Βασικοί Παράμετροι Τρωτότητας Υπογείων Αγωγών

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που προκαλούν τρωτότητα στους υπόγειους αγωγούς. Οι ακόλουθες υποενότητες περιγράφουν τους παράγοντες που οδηγούν στη ζημιά των υπόγειων σωληνώσεων από σεισμούς

3.1. Εδαφική σεισμική κίνηση

Η εδαφική κίνηση αναφέρεται στις παροδικές εδαφικές παραμορφώσεις που προκαλούνται από τη σεισμική διάδοση κυμάτων.

Η εδαφική κίνηση έχει επιπτώσεις σε μια ευρεία περιοχή και μπορεί να παραγάγει την κατανεμημένη παραμόρφωση. Το επίπεδο της εδαφικής κίνησης σε μια θέση αγωγών μπορεί να μετρηθεί με το μέγεθος της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας (PGV).

3.2. Σεισμικές Κατολισθήσεις

Οι καθιζήσεις εδάφους είναι μόνιμες παραμορφώσεις της εδαφικής μάζας, περιορισμένης έκτασης, που προκαλούν σοβαρή ζημιά στο υπόγειο αγωγό. Οι περισσότερες κατολισθήσεις εδάφους εμφανίζονται όταν ο σεισμός εμφανιστεί κατά τη διάρκεια του χειμώνα και ιδιαίτερα την περίοδο των βροχών.

Ενώ μερικές κατολισθήσεις εδάφους μπορούν να προκαλέσουν μικρές μετατοπίσεις του χώματος δηλαδή μόνο μερικά εκατοστά, άλλες μπορούν να

καταλάβουν μεγάλη έκταση σε αρκετή απόσταση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να πάθουν βλάβες ολόκληρες περιοχές αγωγών. Το ποσό μετακίνησης κατολισθήσεων εδάφους μετριέται από το μέγεθος της εδαφικής μετατόπισης (PGD).

Η σπουδαιότητα των κατολισθήσεων εδάφους οι οποίες προκαλούνται από τους σεισμούς είναι καλά αναγνωρισμένες. Σε πολλούς σεισμούς ο οικονομικός και κοινωνικός αντίκτυπος της ζημίας από κατολισθήσεις εδάφους έχει υπερβεί το συνδυασμένο αντίκτυπο όλων των άλλων σεισμικών κινδύνων (Kramer, 1996).

Ο όρος κατολίσθηση εδάφους καλύπτει μια ευρεία σειρά των φαινόμενων που περιλαμβάνουν τη βαρύτητα, τις καθοδηγούμενες κατηφορικές μετακινήσεις των εδαφικών υλικών. Διάφορα σχέδια ταξινόμησης της καθίζησης έχουν προταθεί βασισμένα στη μορφολογία, το υλικό, το μηχανισμό της έναρξης ή άλλα κριτήρια. Η ταξινόμηση που αναπτύσσεται από το Varnes είναι μια από της ευρύτατα χρησιμοποιημένη και έχει υιοθετηθεί για να ταξινομήσει τις προκληθείσες από το σεισμό κατολισθήσεις εδάφους σύμφωνα με τον τύπο υλικού (χώμα ή βράχος), το χαρακτήρα της μετακίνησης (διακεκομμένη ή είναι συνεχής) και άλλες δευτεροβάθμιες ιδιότητες (περιεκτικότητα σε ύδωρ, ταχύτητα της μετακίνησης και βάθος). Τρεις κύριες κατηγορίες προσδιορίζονται: οι διακεκομμένες κλίσεις και οι πτώσεις, οι συνεχόμενες κλίσεις, και η μετατόπιση πλευρικής εξάπλωσης και ροής.

Ένα πρανές που είναι σταθερό κάτω από τη στατική φόρτιση λόγω βαρύτητας μπορεί να αποτύχει κάτω από τη σεισμική φόρτιση λόγω των πρόσθετων δυναμικών δυνάμεων (dynamic forces). Οι αστάθειες που προκαλούν τη σεισμική αστοχία πρανών μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες: αδρανειακή αστοχία και αστοχία λόγω μείωσης της αντοχής (Kramer, 1996). Οι αδρανειακές αστοχίες προκαλούνται από την προσωρινή υπέρβαση της αντοχής του εδαφικού υλικού από την επιβαλλόμενη σεισμική φόρτιση. Η διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού παραμένει σχεδόν σταθερή. Οι αστοχίες λόγω απομείωσης της αντοχής συσχετίζονται με τις

27

αλλαγές στη διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού που προκαλείται από έναν συνδυασμό αύξησης της πίεσης των πόρων και δομικής διαταραχής. Οποιαδήποτε συγκεκριμένη περίπτωση κατολίσθησης εδάφους γενικά θα έχει προκληθεί από έναν συνδυασμό αυτών των δύο ασταθειών.



Σχήμα 3.1 Κύρια αποτελέσματα των κατολισθητικών κινήσεων εδάφους στους αγωγούς σύμφωνα με τον προσανατολισμό τους (πηγή: O'Rourke, 1998)

Οι μελέτες των προηγούμενων σεισμών έχουν δείξει τη σχετική αφθονία των διαφορετικών τύπων κατολισθήσεων εδάφους πέρα σε μια ευρεία σειρά σεισμών και γεωλογικών περιβαλλόντων. Η σχετική αφθονία του φαινόμενου κατολισθήσεων εδάφους μπορεί να ποικίλει σημαντικά μεταξύ των σεισμών.

Οι υπόγειοι αγωγοί είναι ιδιαίτερα τρωτοί στις διαφορικές μετακινήσεις στο περιβάλλον έδαφος. Η ζημία των αγωγών επομένως θα εξαρτηθεί από το μέγεθος, την έκταση και την ταχύτητα της μόνιμης επίγειας παραμόρφωσης που συνδέεται με μια καθίζηση εδάφους. Η αλληλεπίδραση εδάφουςαγωγών επηρεάζεται κυρίως από την ακαμψία του εδάφους.

Με τις υπόλοιπες μεταβλητές σταθερές, μια συνεχόμενη κλίση επομένως θα είναι πιο καταστρεπτική από μια κατολίσθηση εδάφους στο συνεκτικό ή

ρευστοποιημένο υλικό. Η σημασία του προσανατολισμού σωληνώσεων όσον αφορά τη μετακίνηση καθιζήσεων εδάφους φαίνεται στο σχήμα 3.1.

Στη χωροθέτηση των αγωγών μέσω των ευαίσθητων περιοχών οι κατολισθήσεις εδάφους είναι συχνά αναπόφευκτες. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα δίκτυα αγωγών μεταφοράς ύδατος που μεταφέρουν το νερό από τις πηγές στα βουνά έως τους πληθυσμούς. Η ταξινόμηση των κινδύνων κατολισθήσεων εδάφους είναι επομένως ένα σημαντικό βήμα στον προσδιορισμό των τρωτών τμημάτων του συστήματος παροχής νερού.

3.3. Ρευστοποίηση

Η ρευστοποίηση είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται σε χαλαρά, κορεσμένα, κοκκώδη χώματα όταν υποβάλλονται για μεγάλο χρονικό διάστημα, σε ισχυρή εδαφική κίνηση. Οι βούρκοι και οι άμμοι τείνουν να συμπυκνωθούν και σταθεροποιηθούν κάτω από αυτές τις συνθήκες. Καθώς συμπιέζονται και σταθεροποιούνται, τα κορεσμένα εδάφη μετατοπίζουν το νερό των πόρων, το οποίο αναγκάζεται να κατευθυνθεί προς τα πάνω. Η αυξανόμενη πίεση του νερού των πόρων προκαλεί δύο αποτελέσματα. Κατ'αρχάς, δημιουργεί γρήγορα μια συνθήκη στην οποία η φέρουσα πίεση των εδαφών μειώνεται προσωρινά. Δεύτερον, εάν οι παραγόμενες πιέσεις γίνουν αρκετά μεγάλες, το υλικό μπορεί να εκτιναχθεί από το έδαφος για να διαμορφώσει τη χαρακτηριστική άμμο που βράζει στην επιφάνεια. Αυτό το μετατοπισμένο υλικό, στη συνέχεια, προκαλεί την περαιτέρω τακτοποίηση της περιοχής.

Πολλοί σεισμοί έχουν παραγάγει θεαματικά παραδείγματα ρευστοποίησης που προκαλούν ζημίες σε όλους τους τύπους δομών, τόσο επάνω όσο και κάτω από το έδαφος. Ο όρος της ρευστοποίησης έχει χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει έναν αριθμό από διαφορετικά, εν τούτοις σχετικά φαινόμενα. Για λόγους εφαρμοσμένης μηχανικής, ο Kramer (1996) διαιρεί τα φαινόμενα ρευστοποίησης σε δύο κύριες ομάδες: ρευστοποίηση και κυκλική ενεργοποίηση.

29


Σχήμα 3.2. Πλευρική εξάπλωση που προκαλείται από τη ρευστοποίηση του κάτω από την επιφάνεια στρώματος (α) πριν από και (β) μετά από έναν σεισμό (πηγή: Kramer, 1996)

Οι αστοχίες από τη ροή ρευστοποίησης χαρακτηρίζονται από την ξαφνική, καταστροφική φύση τους και την ταχύτητα και την έκταση της μετακίνησης των ρευστοποιημένων υλικών. Το περιστατικό της ροής ρευστοποίησης θεωρεί ότι μια αστράγγιστη διαταραχή θα φέρει το χώμα σε μια ασταθή κατάσταση. Μόλις αρχίσει, οι στατικές διατμητικές τάσεις οδηγούν στην αστοχία και δίνουν δυνατότητα να παρατηρηθούν συχνά μεγάλες παραμορφώσεις.

Η κυκλική ενεργοποίηση σε αντίθεση από τη ροή ρευστοποίησης εμφανίζεται κάτω από την ευρύτερη εμβέλεια των χωρικών και εδαφικών συνθηκών. Κατά συνέπεια, παρατηρείται πολύ πιο συχνά, όμως τα αποτελέσματά του είναι γενικά λιγότερα σοβαρά. Η κυκλική ενεργοποίηση εμφανίζεται όταν η στατική διατμητική τάση είναι μικρότερη από την διατμητική αντοχή του ρευστοποιημένου εδάφους.

Οι παραμορφώσεις δεν είναι ξαφνικές όπως στην περίπτωση της ροής ρευστοποίησης, αλλά αναπτύσσονται αυξητικά πέρα από τη διάρκεια της

παραμορφώσεις, οι επίγειας κίνησης. Οι οποίες δημιουργούνται, καθορίζονται από τη μετατόπιση της πλευρικής εξάπλωσης και μπορούν να είναι μέχρι και αρκετά μέτρα εάν ο σεισμός είναι αρκετά μεγάλος ή ικανοποιητικής διάρκειας. Η πλευρική εξάπλωση μπορεί να εμφανιστεί σε πολύ ήπια κλίση εδάφους ή ακόμα και στο επίπεδο έδαφος παρακείμενη σε μια ελεύθερη αντιμετώπιση, όπως διευκρινίζεται στο Σχήμα 3.2. Σε αυτήν την περίπτωση, η πλευρική μετακίνηση του ρευστοποιημένου κάτω από την επιφάνεια χώματος έχει σπάσει το στρώμα επιφάνειας στους ευδιάκριτους φραγμούς που κινούνται διαφορικά, οριζόντια και κάθετα. Ένας αγωγός που ενσωματώνεται στο μη-ρευστοποιημένο στρώμα επιφάνειας μπορεί να σπρώχνει χωριστά ή με δυνάμεις συνάφειας. Ένας αγωγός που περνά μέσω του ρευστοποιημένου στρώματος θα υπόκειται στις οριζόντιες και κάθετες δυνάμεις λόγω της ροής του χώματος γύρω από αυτό, συν μια δύναμη ανόδου λόγω της πλευστότητας.



Σχήμα 3.3.Συμπεριφορά των αγωγών που ενσωματώνονται σε ένα ικανό στρώμα επιφάνειας που επικαλύπτει ένα ρευστοποιημένο υπέδαφος (πηγή:O'Rourke, 1996)

Μια πρόσθετη περίπτωση που έχουμε κυκλική ενεργοποίηση των επιπέδων του εδάφους είναι η επίγεια ταλάντωση. Σε αυτή την περίπτωση το έδαφος επιφάνειας ταλαντεύεται πάνω από ένα ρευστοποιημένο στρώμα. Αντίθετα από άλλα φαινόμενα ρευστοποίησης, η εδαφική ταλάντωση είναι ουσιαστικά παροδική. Ο O'Rourke επιβεβαίωσε τη σημασία του για τους υπόγειους αγωγούς σε μια έρευνα για τη ζημία που προκλήθηκε κατά τη διάρκεια του σεισμού Loma Prieta το 1989. Τα σχήματα 3.3 (c) and (d) επεξηγούν την αντίδραση των αγωγών στην επίγεια ταλάντωση. Η κατάσταση έχει απλοποιηθεί με το να εξετάζει τις εγκάρσιες και αξονικές συνιστώσες της μετακίνησης χωριστά. Η δυνατότητα για τη ζημία είναι μέγιστη όπου το ρευστοποιήσιμο στρώμα αραιώνει, διαμορφώνοντας ένα όριο για το ικανότερο υλικό. Το σχήμα 3 (β) επεξηγεί τη μόνιμη κάθετη παραμόρφωση σε ένα μη ρευστοποιημένο έδαφος που προκαλείται από τη σταθεροποίηση του ρευστοποιημένου υποστρώματος.

Η εδαφική ρευστοποίηση έχει προκαλέσει σημαντικές ζημιές στα υπόγεια Δ.Κ.Ω σε προηγούμενους σεισμούς. Η ταξινόμηση του κινδύνου ρευστοποίησης είναι επομένως ιδιαίτερα σημαντική. Δεν είναι όλα τα εδάφη ευαίσθητα στη ρευστοποίηση, έτσι το πρώτο στάδιο της αξιολόγησης κινδύνου ρευστοποίησης πρέπει να είναι ο προσδιορισμός της ευαισθησίας ρευστοποίησης. Για οποιοδήποτε δεδομένο έδαφος, η ευαισθησία ρευστοποίησης μπορεί να προσδιοριστεί σύμφωνα με τα διάφορα κριτήρια ιστορικού, γεωλογικής, συνθετικής ή εδαφολογικής κατάστασης. Μόλις καθοριστεί ότι το έδαφος έχει τη δυνατότητα να ρευστοποιηθεί, το επόμενο στάδιο είναι να καθοριστεί η πιθανότητα εάν ένας σεισμός θα προκαλέσει μια διαταραχή αρκετά ισχυρή ώστε να αρχίσει το φαινόμενο.

Δεδομένου ότι η ρευστοποίηση είναι πιθανή σε μια συγκεκριμένη θέση, είναι σημαντικό να προβλεφθεί το μέγεθος της μόνιμης επίγειας μετατόπισης που συνδέεται με τη ρευστοποίηση. Ο Hamada και οι συνεργάτες του παραδείγματος χάριν, πρότεινε έναν τύπο για να προβλέψει την οριζόντια εδαφική μετατόπιση που προκαλείται από την ρευστοποίηση τη μετατόπιση πλευρικής εξάπλωση, βασισμένο στις αστοχίες που παρατηρήθηκαν στους σεισμούς του Νιγκάτα το 1964 και Nihonkai-Chubu το 1983. Από μια

32

σύγκριση των αεροφωτογραφιών προ-σεισμού και μετά-σεισμού, προσδιορίστηκαν τα εδαφικά σχέδια παραμόρφωσης. Οι πλευρικές εξαπλώσεις διαιρέθηκαν με συγκεκριμένους περιορισμούς. Το ποσό οριζόντιας μετατόπισης, το πάχος του ρευστοποιημένου στρώματος και η δριμύτητα της επίγειας κλίσης υπολογίστηκαν κατά μέσο όρο, και έπειτα μέσα σε κάθε περιορισμό για να δώσουν την ακόλουθη έκφραση:

 $D_{H} = 0.75 \sqrt{H_{lig}} \sqrt[3]{\theta}$ (3.1)

όπου:

D_H :είναι η οριζόντια εδαφική μετατόπιση (m),

Η_{liq} :είναι το πάχος του ρευστοποιημένου στρώματος (m)

θ: είναι το μέγιστο της κλίσης της βάσης του ρευστοποιημένου στρώματος και της κλίσης της επίγειας επιφάνειας (%).Είναι μια παράμετρος που αποτελεί έμμεσα το ποσό επίγειου τινάγματος (μια λειτουργία του μεγέθους σεισμού και της απόστασης) καθώς επίσης και των εδαφικών συνθηκών επί τόπου.

Ο Youd & Perkins (1987) εισήγαγε την ιδέα ενός δείκτη σοβαρότητας ρευστοποίησης (LSI) για να προβλεφθεί η μέγιστη εδαφική μετατόπιση που αναμένεται επί ενός δεδομένου ρευστοποιημένου εδάφους. Από τις παρατηρήσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια έξι σεισμών στις δυτικές ΗΠΑ, πρότειναν ότι η εδαφική μετατόπιση είναι πρώτιστα μια λειτουργία του εύρους και της διάρκειας της ισχυρής εδαφικής κίνησης. Εντούτοις, λόγω έλλειψης των ισχυρών αρχείων κινήσεων για πολλές από τις περιοχές που μελετήθηκαν, καθόρισαν το LSI σε σχέση με το μέγεθος και την απόσταση σεισμού ως εξής:

$$\log LSI = -5.09 - 1.86 \log d_f + 0.98 M_w \qquad (3.2)$$

όπου:

LSI :είναι η μέγιστη αναμενόμενη μόνιμη οριζόντια μετατόπιση (m), αυθαίρετα σε 100 in (2.54 m),

d_f :είναι η πιο σύντομη οριζόντια απόσταση που μετριέται από την προβολή της επιφάνειας της σεισμικής πηγής ενέργειας ή η θραύση ρηγμάτων στην περιοχή ενδιαφέροντος (km).

Και οι δύο εμπειρικές σχέσεις δίνουν τις χρήσιμες εκτιμήσεις του ποσού εδαφικής παραμόρφωσης αλλά είναι περιορισμένες στη σειρά δυνατότητας εφαρμογής τους. Οι Bartlett & Youd έδειξαν ότι η εξίσωση παράγει τις λογικές εκτιμήσεις της μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης για τους σεισμούς με μέγεθος περίπου 7.5 και στις επικεντρικές αποστάσεις περίπου μεταξύ 20 και 30 km. Ο Youd & Perkins απέδειξαν ότι η σχέση ισχύει μόνο αυστηρά για τις δυτικές ΗΠΑ δεδομένου ότι περιγράφουν τα χαρακτηριστικά μείωσης της ισχυρής κίνησης με την απόσταση για εκείνη την συγκεκριμένη περιοχή.

Η αντίδραση των αγωγών στην ρευστοποίηση που προκαλείται από τη πλευρική εξάπλωση επηρεάζεται έντονα από τη μορφή και τη χωρική έκταση της ρευστοποιημένης περιοχής (O'Rourke, 1999). Εντούτοις, οι αναλυτικές ή εμπειρικές μέθοδοι για την πρόβλεψή τους δεν είναι ακόμα διαθέσιμες.

Η πλευρική εξάπλωση είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να συνοδεύσει τη ρευστοποίηση. Σε πολλές περιοχές, τα στρώματα των ρευστοποιήσιμων υλικών βρίσκονται κάποια απόσταση κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Εάν η περιοχή έχει μια σημαντική κλίση, ή είναι δίπλα σε μια ανοικτή περικοπή όπως ένα πιεσμένο ρέμα ή υπόστρωμα δρόμων, η ρευστοποίηση μπορεί να αναγκάσει τα επιφανειακά χώματα να ρεύσει κατηφορικά ή προς την περικοπή. Η πλευρική διάδοση μπορεί να είναι ιδιαίτερα καταστροφική για τους υπόγειους αγωγούς.

Η σεισμική εδαφική ρευστοποίηση έχει τη δυνατότητα να εμφανιστεί στο κέντρο των εδαφών και μπορεί να οδηγήσει σε μόνιμες επίγειες παραμορφώσεις. Οι πιο σοβαρές αστοχίες θα εμφανιστούν στις περιοχές της προκληθείσας ρευστοποίησης λόγω πλευρικής εξάπλωσης Ο

34

προσανατολισμός του αγωγού σχετικά με την επίγεια μετακίνηση μπορεί να έχει επιπτώσεις στο ποσό ζημίας.

Το ποσό της μετακίνησης ρευστοποίησης μετριέται σε σχέση με τη μόνιμη επίγεια μετατόπιση (PGD).

3.4. Χωροθέτηση

Οι αστοχίες των αγωγών εμφανίζονται λόγω των σχετικών κατακόρυφων (διαφορικών) τοποθετήσεων σε ζώνες μετάβασης από το έδαφος μέτριας σε έδαφος καλής μηχανικής αντοχής, και σε περιοχές με νέα αλλούβια εδάφη με προδιάθεση σε εντοπισμένη ρευστοποίηση. Οι αστοχίες μπορούν επίσης να εμφανιστούν όπου οι αγωγοί ενώνονται στις δεξαμενές ή στα κτίρια. Το ποσό μετακίνησης λόγω εγκατάστασης μετριέται από την άποψη της εδαφικής μετατόπισης (PGD).

3.5. Ρήγματα

Οι περισσότεροι σεισμοί εμφανίζονται ως συνέπεια της συγκέντρωσης των πιέσεων στα όρια των τεκτονικών πλακών. Όταν αυτές οι πιέσεις υπερβαίνουν την αντοχή του βράχου, η θραύση εμφανίζεται κατά μήκος ενός ρήγματος, απελευθερώνοντας την αποθηκεμένη ενέργεια πίεσης υπό μορφή σεισμικών κυμάτων και θερμότητας. Η θραύση ρηγμάτων συμπίπτει συνήθως με μια προϋπάρχουσα ασυνέχεια στη γήινη επιφάνεια. Η έκταση του ρήγματος συνδέεται άμεσα με το μέγεθος σεισμού. Οι μεγάλοι σεισμοί μπορούν να παραγάγουν ρήγματα μήκους αρκετών χιλιομέτρων και πλάτη δεκάδων χιλιομέτρων, καθώς και μετατοπίσεις διάφορων μέτρων.

Στους περισσότερους σεισμούς, το επίπεδο θραύσης ρηγμάτων δεν έχει μια έκφραση επιφάνειας (τυφλό ρήγμα). Ένα ίχνος των ρηγμάτων επιφάνειας συνήθως μόνο παρατηρείται στους μεγάλους σεισμούς που εμφανίζονται σε ρηχό βάθος. Η έκταση του ρήγματος επιφάνειας εξαρτάται κυρίως από το μήκος και το ποσό μετατόπισης των υποεπιφανειών του ρήγματος, της τοποθέτησης της επιφάνειας ρηγμάτων, της κατεύθυνσης της μετακίνησης ρηγμάτων και του τύπου και πάχους της επιφανειακής γεωλογίας. Τα ρήγματα μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τη μετακίνηση των δύο πλευρών του ρήγματος το ένα σχετικά με το άλλο (σχήμα 3.3). Το ρήγμα καλείται την εισχώρηση-ολίσθηση όταν η μετακίνηση είναι κυρίως οριζόντια, ενώ όταν η μετακίνηση είναι στην κατεύθυνση της εμβύθισης της επιφάνειας των ρηγμάτων καλείται την εμβύθιση-ολίσθηση . Η μετακίνηση εμβύθισης-ολίσθησης όπου η οριζόντια συνιστώσα είναι συμπιεστική καλείται αντίστροφο ρήγμα. Στην περίπτωση που η οριζόντια συνιστώσα είναι συνιστώσα είναι εφελκυστική το ρήγμα καλείται κανονικό. Ένας συνδυασμός μιας μετακίνησης εμβύθιση-ολίσθησης και εισχώρησης-ολίσθησης αναφέρεται ως πλάγιο ρήγμα.

Όλα τα ρήγματα-όπως χαρακτηριστικά γνωρίσματα που παρατηρούνται στην επιφάνεια δεν συσχετίζονται με την τεκτονική θραύση. Τα σπασίματα μπορούν να διαμορφωθούν από την επίγεια δόνηση, τις καθιζήσεις εδάφους ή την προκαλούμενη ολίσθηση στα ρήγματα επιφάνειας σχετικά με την αρχική επιφάνεια ρηγμάτων (π.χ. ολίσθηση στα κλινοστρωμνή επίπεδα ρηγμάτων ή near-surface ολίσθηση στα παρακείμενα ρήγματα). Αυτά τα δευτεροβάθμια «ρήγματα» είναι μερικές φορές δύσκολο να διακριθούν από τα αρχικά κύματα μεγέθους, Ms < 6).

Όπως διευκρινίζεται στο σχήμα 3.4, η εδαφική πίεση που προκαλείται από το ρήγμα είναι σοβαρότερη στη διατομή μεταξύ της επιφάνειας του ρήγματος και της επίγειας επιφάνειας. Εντούτοις, η παραμόρφωση του γήινου φλοιού που συνοδεύει το ρήγμα σεισμού μπορεί να είναι σημαντική σε συγκεκριμένες αποστάσεις από την επιφάνεια θραύσης.





(πηγή:O'Rourke 1998)

Οι μεγάλες μόνιμες επίγειες παραμορφώσεις που συνδέονται με το ρήγμα μπορούν να παρουσιάσουν έναν πολύ σοβαρό κίνδυνο στις δομές που βρίσκονται επάνω ή είναι κοντά στα ενεργά ρήγματα. Όπου τα ενδεχομένως ενεργά ρήγματα μπορούν να προσδιοριστούν, οι ζώνες αποφυγής κατασκευαστικής δραστηριότητας μπορούν να υποδειχθούν, για να αποφύγουν την περιττή ζημία σε περίπτωση σεισμού. Στην περίπτωση των σωληνώσεων, που διασχίζουν τα ενεργά ρήγματα είναι συχνά αναπόφευκτα, δεδομένου ότι η θέση σωληνώσεων υπαγορεύεται από τις θέσεις των περιοχών προσφοράς και ζήτησης.

Πολυάριθμες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για να ερευνήσουν τη σύνδεση μεταξύ του μεγέθους σεισμού και των διάφορων χαρακτηριστικών της θραύσης ρηγμάτων. Οι Wells & Coppersmith συνέταξαν μια παγκόσμια βάση δεδομένων 244 σεισμών που καλύπτουν μια σειρά μεγεθών 5.6 ≤ *Mw* ≤ 8.1.

Οι παρατηρούμενες μετατοπίσεις ρηγμάτων κυμάνθηκαν από 0.05 - 8.0 μ για τα ρήγματα εισχώρησης-ολίσθησης, 0.08 - 2.1 μ για τα κανονικά ρήγματα και

0.06 - 1.5 μ για τα αντίστροφα. Από αυτήν την βάση δεδομένων, οι εμπειρικές σχέσεις παρήχθησαν μεταξύ του μεγέθους, του μήκους θραύσης, του πλάτους θραύσης, της περιοχής θραύσης και της μετατόπισης επιφάνειας.

Αυτές οι εκφράσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν τα πιθανά χαρακτηριστικά θραύσης ρηγμάτων δεδομένου ενός συγκεκριμένου μεγέθους του γεγονότος. Από το περισσότερο ενδιαφέρον για την πρόβλεψη της ζημιάς σωλήνωσης είναι εκφράσεις για την αναμενόμενη μετατόπιση ρηγμάτων επιφάνειας ως λειτουργία του μεγέθους:

$$\log D = C_1 + C_2 M_w$$
 (3.3)

όπου: D είναι η μέση μετατόπιση ρηγμάτων επιφάνειας (m),

Μω είναι το στιγμιαίο μέγεθος,

C1και C2 συντελεστές που προέρχονται από την παλινδρόμηση. Οι τιμές για τις διαφορετικές κατηγορίες τύπου ολίσθησης ρηγμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Συντελεστές για διάφορες κατηγορίες ρηγμάτων για χρήση στην εξίσωση των Wells & Coppersmith, 1994

Είδος	C ₁	C ₂	Κανονική	Συντελεστής	Ζώνη
Ολίσθησης			απόκλιση	Συσχέτισης	Μεγέθους
Ρήγματος					
Strike-slip	-6.32	0.90	0.28	0.89	5.6-8.1
Ανάστροφο	-0.74	0.08	0.38	0.10	5.8-7.4
Κανονικό	-4.45	0.63	0.33	0.64	6.0-7.3
Όλα	-4.80	0.69	0.36	0.75	5.6-8.1

Οι συντελεστές παρήχθησαν επίσης για τη μέγιστη μετατόπιση ρηγμάτων επιφάνειας, D_{max} με την παρατήρηση ότι κατά μέσον όρο, $D_{max} / \overline{D \approx 2}$. Με βάση τους συντελεστές συσχετισμού που λήφθηκαν από κάθε παλινδρόμηση, οι ερευνητές πρότειναν τη χρήση της σχέσης όλων των τύπων ολίσθησης για λόγους πρόβλεψης εκτός αν το σφάλμα εισχώρησης-ολίσθησης είναι αναμενόμενο.

Στις περιπτώσεις όπου τα δεδομένα ήταν διαθέσιμα (για 32 γεγονότα), οι Wells & Coppersmith (1994) συγκρίνανε τη μέση ολίσθηση στο επίπεδο του ρήγματος με τη μέση μετατόπιση που παρατήρησαν στην εδαφική επιφάνεια. Οι αναλογίες αυτών των τιμών είχαν ένα ευρύ φάσμα, που ποικίλλει από 0.25 έως 6.0. Εντούτοις, ο τρόπος της διανομής των αναλογιών ήταν αρκετά ευδιάκριτος, όντας 1.32. Η ένδειξη εδώ είναι ότι, για αυτό το υποσύνολο των σεισμών που παρουσιάζουν θραύση επιφάνειας, η περισσότερη ολίσθηση στο επίπεδο ρηγμάτων στα σεισμογενή βάθη φανερώθηκε στην επιφάνεια.

Ακόμη και για τους σεισμούς χωρίς καμία παρατήρηση της επιφάνειας ρηγμάτων, οι σεισμικές πιέσεις που προκαλούνται στη περιοχή του επικέντρου μπορούν ακόμα να είναι ικανές ώστε να προκαλέσουν τη ζημία στις θαμμένες σωληνώσεις. Ο O'Rourke (1999) έχει παρομοιάσει ένα σύστημα παροχής νερού με έναν γιγαντιαίο θαμμένο μετρητή πίεσης, οι αστοχίες σωλήνων δίνουν μια ένδειξη των περιοχών της υψηλής πίεσης.

Η αντίδραση ενός θαμμένου σωλήνα στο ρήγμα επιφάνειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον προσανατολισμό του όσον αφορά το ρήγμα. Η κάμψη, η αξονική συμπίεση, το τράβηγμα λόγω της αξονικής επέκτασης είναι όλες πιθανές περιπτώσεις. Για τις παρόμοιες εδαφικές μετατοπίσεις, ο μηχανισμός του ρήγματος εμβύθιση-ολίσθηση τείνει να είναι πιο καταστρεπτικός στις σωληνώσεις από τα ρήγματα διείσδυση-ολίσθησης. Αυτό συμβαίνει επειδή η φέρουσα πίεση σε ένα ενσωματωμένο αντικείμενο που κινείται προς τα κάτω στο χώμα είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση της μετακίνησης στην πλευρική κατεύθυνση.

Το βάθος στο οποίο βρίσκονται οι σωλήνες είναι επίσης ένας παράγοντας για τις διασταυρώσεις ρηγμάτων. Όσο πιο ρηχό είναι το σκάψιμο, λιγότερο επιβαρυμένες οι σωληνώσεις, εφόσον θα είναι λιγότερη η αντίσταση της τριβής από το χώμα στο σωλήνα. Όσο χαμηλότερη η αντίσταση της τριβής, τόσο ευκολότερα ο σωλήνας θα είναι σε θέση να παραμορφωθεί ή να καμφθεί προς τα πάνω στις διασταυρώσεις ρηγμάτων, χωρίς να προκληθεί σοβαρή ζημιά. Παραδείγματος χάριν, μια σωλήνωση σε βάθος περίπου ενός μέτρου υπερφορτίου μπορεί να υφίσταται περίπου τέσσερις φορές

39

περισσότερη μετατόπιση αστοχίας από μια σωλήνωση με 10 πόδια του υπερφορτίου

3.6. Καθιζήσεις

Η κίνηση του εδάφους που προκαλείται από το σεισμό μπορεί να προκαλέσει αύξηση της πυκνότητας και των συνεκτικών και των μη συνεκτικών χωμάτων (O'Rourke & Liu, 1999). Αυτή η διαδικασία φανερώνεται ως καθίζηση (settlement) στην επίγεια επιφάνεια και είναι ενδεχομένως καταστρεπτική στη υπόγεια υποδομή, όπως διευκρινίζεται μέσα στο σχήμα 3.5 που ακολουθεί. Η σεισμική αύξηση της πυκνότητας των αργίλων έχει παρατηρηθεί, αλλά μεγαλύτερη συνέπεια έχει η αύξηση της πυκνότητας των είτε κορεσμένων είτε ξηρών.

Η καθίζηση των ξηρών άμμων έχει ολοκληρωθεί μέχρι το τέλος της ισχυρής σεισμικής δόνησης. Εντούτοις, η εν λόγω διαδικασία για τις κορεσμένες άμμους εμφανίζεται μόνο όταν αρχίσουν να μειώνονται οι προκληθείσες από το σεισμό σημαντικές πιέσεις πόρων.



Σχήμα 3.5 Καθίζηση της επίγειας επιφάνειας (πηγή: O'Rourke,1998)

Αυτό εξαρτάται από τη διαπερατότητα και τη συμπιεστότητα του εδάφους και στην αποξήρανση στο μήκος των διαδρομών και επομένως μπορεί να μην έχει ολοκληρωθεί μέχρι μερικές ώρες μετά από το σεισμό. Μετά από το σεισμό του 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe), μετατοπίσεις μεταρευστοποίησης μέχρι 1μ παρατηρήθηκαν στα χαλαρά τεχνητά υλικά στο έδαφος στην περιοχή κόλπων της Οζάκα. Οι τύποι για την εκτίμηση της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάρκεια των σεισμών έχουν αναπτυχθεί από τους Takada & Tanabe (1988) με βάση την ανάστροφη ανάλυσης 404 περιπτώσεων εδαφικής μετατόπισης από πέντε σημαντικούς ιαπωνικούς σεισμούς (7.4 ≤ M_{JMA} ≤ 7.9). Οι σχέσεις παρήχθησαν συγκεκριμένα με σκοπό το σχέδιο σεισμού των εγκαταστάσεων Δ.Κ.Ω, που παρακινήθηκε από τα υψηλά επίπεδα της μετατόπισηςπροκληθείσας ζημίας σωληνώσεων που παρατηρήθηκε στους υπό έρευνα σεισμούς. Δύο σχέσεις δίνονται – η πρώτη για την μετατόπιση ενός αναχώματος (δ1) και η δεύτερη για την μετατόπιση μιας σαφούς περιοχής (επιπέδων) (δ2). δ1 και δ2 και τα δύο μέτριουνται σε εκατ.

$$\delta_1 = \frac{C_1 B H_{sand} a_p}{N_{SPT}} + C_2 \quad (3.4)$$
$$\delta_2 = \frac{C_3 H_{sand} a_p}{N_{SPT}} + C_4$$

όπου:

B: το ύψος του αναχώματος (m),

Hsand :το πάχος του αμμώδους στρώμματος (m),

N_{SPT:} ο αριθμός κρούσεων Ν της πρότυπης δοκιμής διείσδυσης (SPT) για τα αμμώδη εδάφη,

 $α_p:είναι το PGA (in cm/s2), and Ci είναι συντελεστές της παλινδρόμησης. Το C_{1:} έχει τις διαστάσεις s²/m²; C₂ and C₄ έχει διαστάσεις σε cm; C₃ σε s²/m.$

Και για τις δύο εκφράσεις, οι συντελεστές παρήχθησαν για δύο διαφορετικά σύνολα δεδομένων: μετατοπίσεις στο ρευστοποιημένο χώμα, και μετατοπίσεις και στο ρευστοποιημένο και στο μη-ρευστοποιημένο χώμα. Οι συντελεστές συνοψίζονται στον πίνακα 3.2.

Προβλεπόμενη	Είδος	Δεδομένα	C ₁	C ₂	Συντελεστής	Μέγεθος
ποσότητα	Χώρου				Συσχέτισης	Δεδομένων
δ ₁	Ανάχωμα	Με	0.123	19.3	0.88	35
		Ρευστοποίηση				
δ ₁	Ανάχωμα	Με-Χωρίς	0.118	19.9	0.88	42
		Ρευστοποίηση				

δ ₂	Επίπεδο	Ρευστοποίηση	0.339	3.79	0.81	41
δ ₂	Επίπεδο	Με-Χωρίς	0.332	4.88	0.82	43
		Ρευστοποίηση				

Πίνακας 3.2 Συντελεστές για υπολογισμό δ_{1 κ'} δ₂

Δύο σύνολα παλινδρομήσεων πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά σύνολα δεδομένων PGA (που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές, απροσδιόριστες σχέσεις μείωσης). Οι συντελεστές που αναφέρονται στον πίνακα 3.2 είναι, σε κάθε περίπτωση, οι τιμές που συνδέονται με το σύνολο δεδομένων PGA που έδωσε τον καλύτερο συντελεστή συσχετισμού.

Οι χωριστοί συντελεστές παρουσιάστηκαν για τις σχέσεις που χρησιμοποίησαν PGV και PGD αντί PGA, αν και οι ερευνητές συστήνουν τη χρήση των εκφράσεων PGA για λόγους πρόβλεψης.

Οι εκφράσεις δείχνουν ότι η επίγεια μετατόπιση αυξάνεται με το πάχος του αμμώδους εδαφολογικού στρώματος και με PGA αλλά μειώνεται με την αυξανόμενη του SPT N- τιμή του αμμώδους στρώματος. Οι μετατοπίσεις στο ρευστοποιημένο χώμα ήταν μεγαλύτερες από τις μετατοπίσεις στο μηρευστοποιημένο χώμα, όλοι οι άλλοι παράγοντες είναι ίσοι. Καμία επίγεια μετατόπιση δεν παρατηρήθηκε για PGA κάτω από 50 cm/s².

3.7. Ηλικία και Διάβρωση

Η ηλικία και η διάβρωση εντείνουν τη ζημία, ειδικά στους αγωγούς από τετμημένο χάλυβα, νηματοειδή (threaded) χάλυβα και χυτοσίδηρο.

Οι παλαιότεροι αγωγοί εμφανίζονται να έχουν μια υψηλότερη συχνότητα αστοχίας από τους νεότερους αγωγούς. Η ζημία στους αγωγούς από το σεισμό του 1987 στο Whittier Narrows στην περιοχή του Λος Άντζελες παρουσίασε αυξανόμενη τάση των σπασιμάτων σωλήνων σεισμού σε σχέση με την ηλικίας του αγωγού. Παρόμοιες τάσεις έχουν τεκμηριωθεί για το σεισμό στο Loma Prieta του 1989 για αγωγό χάλυβα.

Τα αποτελέσματα ηλικίας συσχετίζονται ενδεχομένως έντονα με τα αποτελέσματα της διάβρωση που προκαλούνται από τον αυξανόμενο αντίκτυπο της διάβρωσης κατά τη διάρκεια του χρόνου.

Η διάβρωση αποδυναμώνει τον αγωγό με τη μείωση της πυκνότητας του υλικού και με τη δημιουργία των συγκεντρώσεων πίεσης. Οι βιδωμένοι και σπειροειδείς (threaded) αγωγοί χάλυβα εμφανίζονται να αποτυγχάνουν σε ένα υψηλότερο ποσοστό από άλλους τύπους σωλήνων χάλυβα. Μερικοί σωλήνες χυτοσιδήρου έχουν δοκιμαστεί επίσης για τις υψηλότερες συχνότητες αστοχίας από διάβρωση.

Οι κύριοι τρόποι αστοχίας από διάβρωση για τους ελεύθερους συνεχείς αγωγούς (π.χ. ο αγωγός χάλυβα με τις συνδεδεμένες ενώσεις) είναι η θραύση λόγω της αξονικής έντασης, τοπική κάμψη λόγω της αξονικής συμπίεσης και αστοχία κάμψης. Η διάβρωση στους ελεύθερους τετμημένους αγωγούς με τις ενώσεις τύπων κουδουνιών και βυσμάτων, οι κύριοι τρόποι αστοχίας είναι αξονική εξόλκευση τις ενώσεις, που συντρίβουν στις ενώσεις και τις στρογγυλές ρωγμές κάμψης στα τμήματα σωλήνων μακριά από τις ενώσεις. Τα κριτήρια αστοχίας για κάθε έναν από αυτούς τους τρόπους δίνονται από Ο'Rourke (1999).

Η παρουσία διάβρωσης στους αγωγούς CI, Di ή χάλυβα αυξάνει την πιθανότητα της αστοχίας με τη μείωση του πάχους τοιχώματος των αγωγούς. Το περιστατικό της διάβρωσης συνδέεται με την ηλικία των αγωγών αλλά επηρεάζεται σημαντικά από τους επικρατούντες εδαφικούς όρους (όπως χαρακτηρίζεται από το pH, την εδαφολογική ειδική αντίσταση και τον εδαφολογικό αερισμό). Ο Isenberg ερεύνησε το ρόλο της διάβρωσης στην απόδοση αγωγών κατά τη διάρκεια τριών αμερικανικών σεισμών. Στο San Fernando Valley, Λος Άντζελες, μια επιθεώρηση των εκθέσεων επισκευής αγωγών έδειξε ότι πάνω από τις μισές διαρροές που αποδόθηκαν στον καταστρεπτικό σεισμό του 1971 οφείλονταν στη διάβρωση. Οι περισσότερες διαρροές στο χάλυβα και τους γαλβανισμένους κεντρικούς αγωγούς χάλυβα που προκλήθηκαν από το σεισμό Santa Rosa του 1969 εμφανίστηκαν στα σημεία που αποδυναμώθηκαν από τη διάβρωση. Το προκληθέν από σεισμό ποσοστό αστοχίας αγωγών έχει παρατηρηθεί να έχει αυξηθεί με την ηλικία τους, αυτό επηρεάζεται βεβαίως από την επιδείνωση αγωγών. Για τους αγωγούς CI, Di ή χάλυβα, η διάβρωση είναι ο μηχανισμός επιδείνωσης. Οι αγωγοί AC αποδυναμώνονται λόγω της χαλάρωσης που προκαλείται με τη διύλιση του ασβέστη. Οι αγωγοί PVC αποδυναμώνονται από την κούραση. Η επιρροή της ηλικίας αγωγών, εντούτοις συνδέεται επίσης με τις περιβαλλοντικές αλλαγές και τις αλλαγές με την πάροδο του χρόνου της εγκατάστασης αγωγών και των υλικών πρακτικών προδιαγραφών και επιλογής.

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</u>

Συμπεριφορά ΔΚΩ σε Πρόσφατους Σεισμούς

4.1 Εισαγωγή

Οι υπόγειοι αγωγοί αποτελούν ένα σημαντικό μέρος για τα δίκτυα κοινής ωφέλειας (Δ.Κ.Ω). Χρησιμοποιούνται στην κατασκευή δικτύων ύδρευσης, αποχέτευσης, στη μεταφορά και αποθήκευση υγρών και (αέριων) καυσίμων, στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας κ.α. Σε πολλά έργα, η επιλογή του υλικού, της διατομής αλλά και του τρόπου τοποθέτησης των υπόγειων αγωγών μεταβάλλεται από θέση σε θέση αναλόγως με τις εδαφικές συνθήκες και τις απαιτήσεις αντοχής.

Οι πληροφορίες για τη σεισμική συμπεριφορά και την αντοχή των υπόγειων αγωγών προέρχεται κυρίως από τα εμπειρικά στοιχεία επισκευής (ζημίας) που καταγράφονται από παλαιότερους σεισμούς. Μετά από έναν σεισμό, τα στοιχεία επισκευής όσον αφορά τους υπόγειους αγωγούς συγκεντρώνονται από τον αρμόδιο τομέα υπηρεσιών και ερευνών της κάθε χώρας, ο οποίος καθορίζει το ποσοστό επισκευής σωλήνων. Το τελευταίο ισούται με τον αριθμό επισκευών ανά μονάδα μήκους. Η σεισμική βλάβη στις σωληνώσεις επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως, για παράδειγμα, τις εδαφικές συνθήκες της περιοχής και την ένταση της σεισμικής κίνησης του εδάφους ή της παραμόρφωσης. Επιπροσθέτως, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν διάφοροι παράμετροι των αγωγών, όπως το υλικό, η διάμετρος, η ένωση των σωληνώσεων και ο βαθμός διάβρωσης των αγωγών. Σύμφωνα με τα παραπάνω, καθίσταται απαραίτητη η παράθεση στοιχείων σχετικά με τις αστοχίες που προκύπτουν στα δίκτυα κοινής ωφέλειας μετά από τη εμφάνιση ενός σεισμού. Τα στοιχεία αυτά βοηθούν στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τα κύρια αίτια που προκαλούν βλάβες στα δίκτυα και με ποιο τρόπο μπορούν αυτές να αποφευχθούν στο μέλλον δημιουργώντας μια σειρά από προδιαγραφές για την ασφαλέστερη κατασκευή των μελλοντικών δικτύων.

4.2 Σεισμοί από όλο τον κόσμο

4.2.1 Σεισμός Αρμενίας, 1988

<u>Γενικά Στοιχεία</u>

Ο σεισμός της Αρμενίας έγινε στην περιοχή του Leninanak, στις 7 Δεκεμβρίου του 1988 και το μέγεθος του ήταν Mw= 6,9. Ο σεισμός ήταν αποτέλεσμα της ρήξης του ρήγματος Sevan – Akera,το οποίο περνά ακριβώς κάτω από την πόλη του Spitak. Η μετατόπιση του ρήγματος ήταν 50 cm, ενώ η μέγιστη κάθετη εδαφική μετατόπιση ήταν 1.6m.Η δεσπόζουσα περίοδος ήταν 0,6s.

<u>Βλάβες σε ΔΚΩ</u>

Οι περισσότερες πληροφορίες είναι για τα συστήματα που εξυπηρετούν την περιοχή Leninakan, όμως καλύπτονται και οι ζημιές που έχουν δημιουργηθεί στη γύρω περιοχή.

Η συγκέντρωση των πληροφοριών μετά το σεισμό κατέστη δύσκολη γιατί η περιοχή βρισκόταν κάτω από τον έλεγχο του στρατού.

<u>Το σύστημα νερού</u>

Το Leninakan τροφοδοτείται με νερό από μια πηγή που βρίσκεται 32Km. βόρεια της πόλης. Το νερό μεταφέρεται στην πόλη με τρεις αγωγούς. Δύο γραμμές μεταφέρουν πόσιμο νερό από το βουνό το οποίο δε μοιράζεται πριν τη διανομή στην πόλη. Η διάμετρος των αγωγών είναι 500 – 600 mm, ο ένας αγωγός είναι κατασκευασμένος από χάλυβα και ο άλλος από ένα μίγμα χάλυβα και χυτοσιδήρου. Υπάρχει μία μικρή δεξαμενή ακριβώς βόρεια της πόλης, που έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης 6 ωρών, η οποία δεν καταστράφηκε. Ο τρίτος αγωγός με διάμετρο 500-600mm είναι κατασκευασμένος από χάλυβα και χυτοσίδηρο και μεταφέρει νερό για βιομηχανική χρήση, το οποίο διαμοιράζεται πριν την χρήση.

Αυτές οι τρεις γραμμές που εξυπηρετούν την Leninakan όσο και άλλες τρεις γραμμές που εξυπηρετούν άλλες κοινότητες διασχίζουν ένα φαράγγι 7 Km βόρεια της πόλης.



Σχήμα 4.1 Αναπαράσταση της πτώσεως βράχων-κατεστραμμένοι αγωγοί

Μέσα στο φαράγγι (σχήμα 4.1) οι αγωγοί τοποθετούνται περίπου ένα μέτρο κάτω από το έδαφος. Αναφέρεται πως η κατολίσθηση ενός βράχου για μια απόσταση περίπου 4,5 Km στο φαράγγι κατάφερε να καταστρέψει τους αγωγούς στη μια πλευρά του ποταμού. Μπάζα βρέθηκαν σε αγωγούς που βρίσκονταν σε βάθος 10 m. Κατά την επίσκεψη των εμπειρογνωμόνων δεν πάρθηκε καμία απόφαση για το αν θα ξεθάψουν ή αν θα παρατήσουν τους αγωγούς γιατί υπήρχε η πιθανότητα να προκληθεί κατολίσθηση βράχων και στην άλλη πλευρά του φαραγγιού, εκεί όπου οι αγωγοί λειτουργούσαν χωρίς κανένα πρόβλημα.

Αμέσως μετά το σεισμό, η παροχή νερού προς το Leninakan σταμάτησε. Υποτίθεται πως η διακοπή της παροχής έγινε για να εμποδίσουν την πλημμύρα σε ένα μεγάλο αριθμό ανοιχτών εξυπηρετούμενων συνδέσεων σε σπίτια που είχαν καταρρεύσει. Βάσει της αναφοράς από την πυροσβεστική το νερό αποκαταστάθηκε μετά από δυο ημέρες. Η εξυπηρέτηση νερού αποκαταστάθηκε τμηματικά, καθώς οι εξυπηρετούμενες συνδέσεις μπορούσαν να διακοπούν.

<u>Αποχετευτικό σύστημα</u>

Στη περιοχή Leninakan, οι εγκαταστάσεις λυμάτων που βρίσκονται νότια της πόλης, αναφέρθηκαν πως έχουν καταρρεύσει. Υπήρχαν, όμως, 10 θαμμένες κυκλικά ανοιχτές δεξαμενές από οπλισμένο σκυρόδεμα που δεν καταστράφηκαν.

Στην πόλη υπάρχουν 200km από αργιλικές σωλήνες που αποτελούνται από τμήματα 1,5 m ενωμένες με καμπανοειδή και βυσματικές συζεύξεις (bell and spigot couplings). Αναφέρθηκε πως συνολικά 170Km από τους αγωγούς καταστράφηκαν. Βέβαια αυτό αμφισβητείται γιατί δεν παρατηρήθηκε ανάπτυξη εδαφικών παραμορφώσεων στο Leninakan. Οι υπεύθυνοι ανέφεραν ότι οι μεγάλες κατακόρυφες επιταχύνσεις σχετίζονται με τις κατεστραμμένες από το σεισμό σωληνώσεις, παρόλο που δεν υπήρχε καμία απόδειξη για αυτό στην επιφάνεια. Οι ερευνητές που κατέφθασαν δεν παρατήρησαν καταστροφές και εν γένει οι αναφερόμενες βλάβες δεν μπορούν να αποδοθούν σε μεγάλες τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης χωρίς την ταυτόχρονη εμφάνιση μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων. Επιπρόσθετα αμφισβητείται η ικανότητα να εξετάσουν τα αποτελέσματα του σεισμού σε 170 Km αποχετευτικών σωλήνων.

Η μόνη ζημιά στις σωληνώσεις αποχέτευσης που παρατηρήθηκε ήταν διαρροή στο δρόμο, κοντά στο ποτάμι και στη δυτική πλευρά της πόλης.

Συστήματα φυσικού αερίου

Ένα σύστημα διανομής αερίου εφοδίαζε τις βιομηχανίες και τις κατοικημένες περιοχές με φυσικό αέριο στο Leninakan και Spitak.Το φυσικό αέριο ερχόταν από έναν μεταφορικό αγωγό από το Αζερμπαϊτζάν. Ο αγωγός βρίσκεται παράλληλα με το δρόμο Leninakan – Spitak δυτικά του Spitak. Ο αγωγός ήταν διαμέτρου 20 in από ατσάλι και ήταν καλά κατασκευασμένος. Καμία καταστροφή στο σύστημα μεταφοράς δεν παρουσιάστηκε. Η κύρια γραμμή μεταφοράς δε διασταυρώνεται με το ρήγμα της ζώνης διάρρηξης.

Στη περιοχή Leninakan, παρουσιάστηκε ξαφνική πτώση της πίεσης του αερίου εξαιτίας της διακοπής της εξυπηρέτησης προς τα κατεστραμμένα κτίρια. Σαρανταπέντε λεπτά μετά το σεισμό, η κύρια βαλβίδα τροφοδοσίας κόπηκε.

Δεν υπήρχαν αποθηκεμένα αποθέματα αερίου στην πόλη. Αρχικά δεδομένα αποκάλυψαν πως υπήρχαν 12 βλάβες στο σύστημα διανομής. Οι γραμμές υψηλής πίεσης ήταν από ατσάλι, δεν χρησιμοποιούσαν πλαστικούς αγωγούς. χωρισμένο σε 25 διαφορετικές περιοχές То Leninakan ήταν που χρησιμοποιούσαν και βαλβίδες απομόνωσης. Η αποκατάσταση TNC εξυπηρέτησης σε ορισμένες περιοχές άργησε να ολοκληρωθεί. Παρόλα αυτά αναφέρθηκαν μερικές φωτιές από διαρροές σχετικά με τους σπασμένους αγωγούς, χωρίς εκρήξεις ή αναφλέξεις αερίου. Η χρήση σκυροδέματος και πλίθινων κατασκευών θα μπορούσαν να εξηγήσουν την απουσία εξαπλωμένων πυρκαγιών.

Γενικές Παρατηρήσεις

Η συμπεριφορά των εξοπλισμών των Δ.Κ.Ω. στο σεισμό ήταν γενικά καλή. Οι κατασκευές που συσχετίζονται με τα Δ.Κ.Ω συμπεριφέρθηκαν ανεπαρκώς παρομοίως με άλλες βιομηχανικές και προκατασκευασμένες κατοικίες.

Ορισμένες αναφερμένες και παρατηρούμενες αστοχίες πρέπει να ερευνηθούν περισσότερο καθώς δεν ήταν τυπικές αστοχίες που αναφέρονται σε παρόμοια δίκτυα σε προηγούμενους σεισμούς. Συγκεκριμένα, πρέπει να ορίζονται οι αστοχίες κατά το σχεδιασμό και οι παράγοντες που συμβάλουν στην καταστροφή των αγωγών λυμάτων. Επιπρόσθετα, η επισκευή των δικτύων για το νερό και τα λύματα πρέπει να μελετώνται λεπτομερώς για να καθορίζονται εάν η καταστροφή στον εξοπλισμό ευθύνεται για την κατάρρευση των κατασκευών τους.

4.2.2 Σεισμός California- Northridge, 1994

<u>Γενικά στοιχεία</u>

Ο σεισμός του Northridge έγινε στις 17 Ιανουαρίου το 1994. Το μέγεθος του σεισμού ήταν Mw=6.7. Η δεσπόζουσα ταχύτητα ήταν 0,68 s, η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 56.90cm/s ενώ η μέγιστη εδαφική μετατόπιση 0.5963cm. Ο σεισμός ήταν αποτέλεσμα της ρήξης του ρήγματος Oak Ridge. Η μέγιστη μετατόπιση του ρήγματος ήταν 2.2m.

<u>Βλάβες σε ΔΚΩ</u>

Σύστημα νερού και λυμάτων

Το νερό που εφοδιάζει την νότια Καλιφόρνια υποστηρίζεται από τις τοπικές υπόγειες λεκάνες νερού, η αποκατάσταση του νερού, και εισαγωγές εφοδιασμού νερού γίνονται από τον ποταμό Coloranto και τη Βόρεια Καλιφόρνια. Ο σεισμός έσπασε 6 κύριους αγωγούς από τη βόρεια Καλιφόρνια (σχήμα 4.2) που εξυπηρετούν το San Francisco, Santa Clarita, και την κοιλάδα του Simi που εφοδιάζει με νερό 4 εργοστάσια. Τα τρία από αυτά τα εργοστάσια βρίσκονταν σε λειτουργία την ώρα του σεισμού και το τέταρτο υπό κατασκευή. Υπήρχαν βλάβες σε αγωγούς εφοδιασμού των 54,77,78,85 και 120 in από ατσάλι και τσιμέντο και σε αγωγούς σκυροδέματος μεταφοράς, οι οποίοι επισκευάστηκαν σε 2 μέχρι 67 μέρες. Μερικές επισκευές ήταν προσωρινές για την αποκατάσταση της εξυπηρέτησης και οι μόνιμες επισκευές σχεδιάστηκαν να αποκατασταθούν μερικούς μήνες από το γεγονός. Μέχρι την αποκατάσταση των αγωγών το νερό εφοδιαζόταν από τοπικές υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης.

Τα χρονοβόρα ταξίδια και το κυκλοφοριακό ήταν από τα προβλήματα πρόσβασης στις περιοχές των επισκευών βόρεια και νότια των κατεστραμμένων κόμβων I-5 και SR14 μετά το σεισμό.



Σχήμα 4.2 θέσεις της διανομής νερού και των υπηρεσιών λυμάτων.WTP=εργοστάσιο επεξεργασίας νερού (πόσιμου νερού), WRP=εργοστάσιο λυμάτων, WWTP=εργοστάσιο επεξεργασίας λυμάτων. Μόνο τα επηρεασμένα τμήματα των σωληνώσεων παρουσιάζονται.

Αγωγός	Διάμετρος	Υλικό	Χρόνος Επισκευής(μέρες)
	(in)		
Balboa Inlet	85	Χάλυβας	2
Aqueduct#1	120	Χάλυβας	58
Aqueduct#2	77	Χάλυβας	12
CastaicConduit	54/39/33	MPCCP	67
North Branch	78	Προεντεταμένο	46
Feeder		σκυρόδεμα	
Calleguas	51	Προεντεταμένο	-
Conduit		σκυρόδεμα	

Πίνακας 4.1 Λεπτομέρειες για την πλειοψηφία των κατεστραμμένων αγωγών από το σεισμό

Πρόγραμμα κρατικού ύδατος - δυτικός κλάδος San Fernando Valley

Ο δυτικός κλάδος προγράμματος κρατικού ύδατος παρέχει τις εγκαταστάσεις κατεργασίας ύδατος Jensen από τη δεξαμενή Castaic μέσω των σηράγγων Newhall και Balboa. Στη νότια πύλη της σήραγγας Balboa, η γραμμή 170 in διακλαδίζεται σε δύο των 85 in από 13/16 in οξυγονοκολλημένες ατσάλινες σωλήνες προς τις εγκαταστάσεις. Ο δυτικός σωλήνας είχε ικανοποιητική συμπεριφορά, όμως ο ανατολικός σωλήνας ράγισε περιφερειακά στο κυρτό τμήμα του μεγάλου μήκους κουδουνιού σε μια ένωση καμπανοειδή-βυσματοειδή. Το μέρος βόρεια της ρωγμής κινήθηκε οριζόντια περίπου τρεις ίντσες ανατολικά σε σχέση με το νότιο μέρος, και κάθετα περίπου 0.5 in.

Περίπου δέκα feet του χαλασμένου σωλήνα αφαιρέθηκαν και αντικαταστάθηκαν από δύο τμήματα μήκους 5 ft του σωλήνα(σχήμα 4.3α κ' 4.3b). Η περάτωση έγινε από τρεις ενωμένες στενά ενώσεις με λουριά άκρης.

Ο τροφοδότης MWD των ανατολικών κοιλάδων και οι εγκαταστάσεις αντλίας ενεργοποιήθηκαν για να παρέχουν τον ανεφοδιασμό από το πρόγραμμα κρατικού ύδατος υδραγωγείων ποταμών Coloranto - ανατολικός κλάδος στις

περιοχές της δυτική περιοχή του Λος Άντζελες και την ανατολική περιοχή της Ventura που επηρεάστηκαν από τη διακοπή της λειτουργίας.



Σχήμα 4.3a



Σχήμα 4.3b ση 85in ατσάλινες

85in οξυγονοκολλημένη καμπανοειδή- βυσματοειδή ένωση 85in ατσάλ αγωγοί

(πηγή:O'Rourke,1998)

4.2.2.1 Σύγκριση με την απόδοση σεισμού του 1971

Η αναγνώριση των διαφορών στη σεισμική ένταση και τη σύνθεση του συστήματος ανάμεσα στους δύο σεισμούς είναι χρήσιμη για τη καλύτερη προσέγγιση των μελλοντικών σχεδίων βελτίωσης του συστήματος απόδοσης αερίου το 1971 και το 1994 έτσι ώστε οι διαφορές μεταξύ του αναμενόμενου μηχανισμού αντίδρασης-αντίστασης του συστήματος να μπορούν να προσεγγιστούν. Μετά από το σεισμό του 1971 San Fernando, υπήρξαν πάνω από 100 αστοχίες στις γραμμές μετάδοσης αερίου, πρώτιστα στις περιοχές San Fernando και Sylmar. Οι σχετικά λίγες διαρροές και τις αστοχίες γραμμών μετάδοσης το 1994 συσχετίζονται εν μέρει με την αντικατάσταση των οξυακετυλινικών συγκολλημένων αγωγών προ-1932. Μετά από το σεισμό του 1971 San Fernando, παραδείγματος χάριν, περίπου 12 mile της γραμμής 1001 εγκαταλείφθηκαν στην περιοχή San Fernando. Το 1994, στα τμήματα που δεν είχαν αντικατασταθεί, μετά το 1971, εμφανίστηκαν οι αστοχίες στις οξυακετυλινικές συγκολλήσεις περιμέτρου μεταξύ Newhall και Fillmore.

Συστήματα αερίου

Το σύστημα φυσικού αερίου στη μητροπολιτική περιοχή του Λος Άντζελες ανήκει και χρησιμοποιείται από τη νότια επιχείρηση αερίου Καλιφόρνιας (SoCalGas). Είναι το μεγαλύτερο στις ΗΠΑ. σύστημα αερίου από άποψη

πελατών, με περίπου 4.6 εκατομμύρια καταγεγραμμένες υπηρεσίες. Σύμφωνα με τις στατιστικές για τις επιχειρήσεις που συντάσσονται για το 1993, υπάρχουν 3.803 mi αγωγών μεταφοράς από χάλυβα, ενώ οι κεντρικοί αγωγοί διανομής αποτελούνται από 26.809 mi αγωγούς από χάλυβα και 14.935 mi αγωγούς από πλαστικό. Οι αγωγοί μεταφοράς είναι κυρίως 8 έως 36in στη διάμετρο και λειτουργούν στις πιέσεις που υπερβαίνουν γενικά τις 150 PSI. Το σύστημα διανομής αποτελείται από αγωγούς με διάμετρο κυρίως 2 έως 12in και πιέσεων 60 PSI ή μικρότερες. Η πλαστική σωλήνωση κατασκευάζεται από μέση ή υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο.

Στα περισσότερα κτίρια είναι εγκατεστημένες σεισμικές βαλβίδες απότομης διακοπής αερίου (σχήμα 4.5 a κ'b). Η βαλβίδα αερίου έχει τη δυνατότητα να ενεργοποιείται με το σεισμό. Αποτελείται από δύο μηχανισμούς. Ένα μηχανισμό αίσθησης, ο οποίος

ανιχνεύει τη σεισμική κίνηση και ένα μηχανισμό βαλβίδων που διακόπτει την παροχή αερίου. Οι βαλβίδες αυτές δεν είναι ευαίσθητες στις διακυμάνσεις της ροής του αερίου ή της πίεσης.



Σχήμα 4.5 α

Σχήμα 4 .5b

Βαλβίδα απότομης διακοπής αερίου

Μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε, και αντιστοιχεί σε 407 σεισμικές βαλβίδες διακοπής αερίου, που αποτελούν περίπου το 2% των βαλβίδων της περιοχής, έγινε για να καθορίσει ποιες βαλβίδες δεν λειτούργησαν κατά τη διάρκεια του

σεισμού Northridge, ποιες βαλβίδες προστάτευσαν τα συστήματα που υπέστησαν τις διαρροές αερίου, ποιες βαλβίδες είχαν αστοχήσει παλαιότερα (και γιατί), τα μεγέθη, τους τύπους, τους κωδικούς των μοντέλων και τις ημερομηνίες εγκατάστασης τους. Η Καλιφόρνια, η μόνη πολιτεία με πρότυπα για αυτούς τους τύπους συσκευών θέτει ως όρια αστοχίας των βαλβίδων μεταξύ 0,08 και 0,30g οριζόντιας επιτάχυνσης στα 2,5 Hz.

Οι βαλβίδες διέκοψαν αποτελεσματικά τη παροχή αερίου στο Anaheim, στην Santa Ana και στη Ventura. Σχεδόν κάθε βαλβίδα που ερευνήθηκε μεταξύ των Beverly Hills, Burbank, Glendale, Pasadena, San Fernando Valley, Santa Monica και Δυτικό Los Angeles λειτούργησε. Η νότια επιχείρηση αερίου Καλιφόρνιας αποκατάστησε 841 εγκαταστάσεις των οποίων οι σεισμικές διακοπές βαλβίδων αερίου ήταν λανθασμένες, 162 (19%) του οποίου είχαν διαρροές, 38 (5%) είτε δεν έκλεισα εντελώς είτε δεν θα επαναρυθμίζονταν.

Παρατηρήσεις και Συστάσεις

Ο σεισμός του Northridge είχε παρόμοιες συνέπειες με τους προηγούμενους σεισμούς:

 Η σεισμική απόδοση των συστημάτων ύδατος και αποβλήτων στο σεισμό Northridge ήταν αισθητά καλύτερη από ότι ήταν στο σεισμό του 1971 στο San Fernando. Οι εγκαταστάσεις και ο εξοπλισμός χρησιμοποιούν τους σύγχρονους σεισμικούς κώδικες που εγκαταστάθηκαν από το 1971 και παρουσίασαν πολύ καλές σεισμικές συμπεριφορές. Επίσης συμπεριφέρθηκαν καλά οι σωλήνες που είναι συνδεδεμένοι με χάλυβα στις ενώσεις άκρης, οι όλκιμοι σωλήνες σιδήρου με τις ενώσεις ελαστικών μονωτικών, και οι σωλήνες πολυαιθυλενίου.

 Δομές και εξοπλισμός που ήταν σεισμικά αναβαθμισμένα από το σεισμό του 1971 San Fernando απόδωσαν καλά κατά τη διάρκεια του σεισμικού γεγονότος στο Northridge.

• Η εργασία μέσα στους αγωγούς μεγάλης διαμέτρου και τις σήραγγες πρέπει

να συμμορφωθεί με τις απαιτήσεις OSHA.

Η περισσότερη ζημία στο σύστημα διανομής ύδατος ήταν σε σωλήνες χυτοσιδήρου με τις άκαμπτες ενώσεις και σε παλιούς σωλήνες χάλυβα που είχαν υποστεί αποδυνάμωση από τη διάβρωση. Αν και μόνο σε ένα περιορισμένο εύρος εγκαθίσταται όλκιμος σωλήνας από σίδηρο με ενώσεις ελαστικού μονωτικού, η σεισμική συμπεριφορά της ήταν πολύ καλή. Προγράμματα απαιτούνται, συμπεριλαμβανομένης της χρηματοδότησης, για να αντικαταστήσουν τους παλιότερους αγωγούς στις σεισμικά ενεργές περιοχές.

 Οι βαλβίδες αέρα και κενού στις σωληνώσεις είναι εκκρεμή επάνω από την επίγεια επιφάνεια. Η ζημία μπορεί να είχε προκληθεί από τις προσωρινές πιέσεις στις σωληνώσεις. Μια προσπάθεια απαιτείται για να βελτιώσει τη σεισμική απόδοση αυτών των βαλβίδων.

Οι οξυακετυλινικές σωληνώσεις μετάδοσης που είναι συνδεδεμένες με χάλυβα,
που έχουν κατασκευαστεί πριν από το 1932, είναι τρωτές στα στα αποτελέσματα
διάδοσης των σεισμικών κυμάτων που μπορούν να προκαλέσουν τη θραύση και
την εμφάνιση ρωγμών στις συγκολλήσεις περιμέτρου.

Οι σωληνώσεις μετάδοσης χάλυβα, που κατασκευάζονται με είτε τις προστατευμένες είτε μη προστατευμένες συγκολλήσεις περιμέτρου ηλεκτρικού τόξου (electric- arc), έχουν αποδώσει γενικά καλά στον τομέα της σεισμικής δόνησης. Δεν υπάρχει καμία περίπτωση βλάβης εξαιτίας της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στις σωληνώσεις, οι οποίες μετά το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο κατασκευάζονται με τις σύγχρονες πρακτικές συγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου.

 Και οι συγκολλήσεις περιμέτρου ηλεκτρικού τόξου και οξυακετυλινικές συνδέσεις είναι τρωτές στη μόνιμη εδαφική παραμόρφωση όπως η μετατόπιση λόγω πλευρικής εξάπλωσης και οι καθιζήσεις εδάφους. Κατά τη διάρκεια του σεισμού Northridge, οι δύο γραμμές υπέστησαν βλάβη από την μόνιμη εδαφική παραμόρφωση. Και οι δύο γραμμές κατασκευάστηκαν με τις συγκολλήσεις περιμέτρου ηλεκτρικού τόξου.

 Η διοχέτευση με σωλήνες διανομής αερίου πολυαιθυλενίου είναι εντυπωσιακά ανθεκτική στα αποτελέσματα σεισμού. Σχετικά λίγη ζημία σε αυτόν τον τύπο σωληνώσεων έχει αναφερθεί ως συνέπεια το σεισμό Northridge.

 Η αλληλεπίδραση μεταξύ των χαλασμένων αγωγών ύδατος και αερίου ήταν ισχυρή σε εκείνη την ταυτόχρονη πλημμύρα και η πυρκαγιά που εμφανίστηκε σε διάφορες θέσεις.

Οι βαλβίδες διακοπής αερίου κατά τη διάρκεια του σεισμού λειτούργησαν καλά. Μια περιφερειακή έρευνα αποκάλυψε τρεις περιπτώσεις όπου το αέριο αποκλείστηκε ακίνδυνα από τις περιοχές με βλάβη στους αγωγούς. Η υπηρεσία αερίου ανέφερε ότι 19% των κτηρίων που ζήτησαν την επαναρύθμιση ενός κλεισίματος βαλβίδας αερίου είχε διαρροή αερίου.

Σύστημα υγρών καυσίμων

Υπάρχουν δίκτυα αγωγών ακατέργαστου πετρελαίου από την κοιλάδα San Joaquin προς το Los Angeles. Δύο από αυτούς επέζησαν του σεισμού χωρίς προφανή ζημία. Στο τρίτο, σε έναν αγωγό χάλυβα 10 in, αναφέρθηκαν βλάβες σε οκτώ θέσεις που επεκτείνονται πέρα από μια απόσταση 32 mi (σχήμα 4.6). Όλες οι αποτυχίες ήταν στις οξυακετυλινικές συγκολλήσεις, οι οποίες έγιναν κατά το μήκος της αρχικής κατασκευής όταν εγκαταστάθηκε η σωλήνωση το 1925. Η σωλήνωση περιείχε το πετρέλαιο, αλλά δεν αντλούσε κατά την διάρκεια του σεισμού.



Σχήμα 4.6 Ο Χάρτης απεικονίζει τα τερματικά υγρών καυσίμων και τα σπασίματα στη σωλήνωση ακατέργαστου πετρελαίου 10-inch.

Ως συνέπεια των αστοχιών στην συγκόλληση, υπήρξαν διαρροές που κυμαίνονται από 50 έως 150.000 gal. Η μεγαλύτερη διαρροή 150.000 gal ήταν κοντά στο Newhall και σταμάτησε τελικά έχοντας επιπτώσεις σε περίπου 16 mi του Santa Κλάρα River. Η άλλη σημαντική διαρροή, λιγότερη από 40.000 gal, ήταν στην πόλη του San Fernando. Αυτή η διαρροή έτρεξε στις υδρορροές και τελικά στον ποταμό του Λος Άντζελες. Κατά τη διάρκεια της μεταφοράς του, το ακατέργαστο πετρέλαιο έπιασε φωτιά, που τραυμάτισε έναν μοτοσικλετιστή και πήραν φωτιά 17 σταθμευμένα αυτοκίνητα. Αυτή η πυρκαγιά ανάφλεξε επίσης τέσσερα σπίτια, το ένα καταστράφηκε.

Από τις δύο σωληνώσεις ακατέργαστου πετρελαίου που δεν υπέστησαν ζημιές εξαιτίας του σεισμού, η μια ήταν σωλήνωση χάλυβα 16 in που κατασκευάστηκε το 1993 στα πιο πρόσφατα βιομηχανικά πρότυπα, μια σωλήνωση χάλυβα 12 in, κατασκευάστηκε στη δεκαετία του '50 χρησιμοποιώντας έπειτα τους τρέχοντες κώδικες που συνέδεαν τα κριτήρια και τις μεθόδους (συγκόλληση ηλεκτρικών τόξων). Η σωλήνωση 16 in επιθεωρήθηκε μετά από το σεισμό. Καμία ζημία δεν ανιχνεύθηκε και η γραμμή ήταν σύμφωνα με τα κριτήρια επιθεώρησης.

Υπάρχουν δύο προϊόντα σωληνώσεων από τις τοπικές εγκαταστάσεις καθαρισμού στα τερματικά διανομής στο San Fernando Valley. Δεν υπήρξε

καμία αναφερόμενη διαρροή ή πρόβλημα με αυτές τις σωληνώσεις, και έχουν επιστραφεί σε λειτουργία.

4.2.3 Σεισμός Chi-Chi

<u>Γενικά στοιχεία</u>

Ο σεισμός Chi-Chi προκάλεσε σοβαρή ζημιά και διάσπαση των Δ.Κ.Ω. Μερικές από τις ζημιές δεν έχουν παρατηρηθεί σε άλλους σεισμούς.

Στις 21 Σεπτεμβρίου 1999 στις 2μμ., ένας ισχυρός σεισμός στιγμιαίου μεγέθους M_W 7,6 εμφανίστηκε κοντά στην πόλη Chi-Chi στην κεντρική Ταϊβάν. Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ήταν 292cm/s ενώ η μέγιστη εδαφική μετατόπιση 867cm,όχι και τόσο μεγάλες για το μέγεθος του σεισμού. Η δεσπόζουσα περίοδος ήταν 30s. Ο σεισμός ήταν αποτέλεσμα ρήξης του ρήγματος Chelungpu, που είναι ένα σημαντικό ανάστροφο ρήγμα στην περιοχή της Ταϊβάν .Η μέγιστη εδαφική μετατόπιση ήταν 6m στην κάθετη και 9m στην οριζόντια διεύθυνση. Η μετατόπιση του ρήγματος ήταν 3.1μ. Ο σεισμός στην πόλη Chi-Chi ήταν ένας από τους καταστρεπτικότερους σεισμούς που εμφανίστηκε στο νησί της Ταϊβάν από το 1935. Ο σεισμός αυτός παρήγαγε περίπου 100 Km επιφανειακής διάρρηξης (surface faulting) και ισχυρή εδαφική παραμόρφωση, ιδιαίτερα στην περιοχή κοντά στο ρήγμα. Το σύστημα φυσικού αερίου στην πόλη Taichung, της τρίτης μεγαλύτερης πόλης στο νησί της Ταϊβάν, υπέστη τη μεγαλύτερη ζημία .

<u>Βλάβες σε ΔΚΩ</u>

Συστήματα νερού και λυμάτων

Η υπηρεσία ύδατος σε όλα τα μέρη της Ταϊβάν, εκτός από την πόλη του Ταιπέι, παρέχεται από μια κρατική επιχείρηση ύδατος, η εταιρία παροχής νερού της Ταϊβάν (TWSC). Ο σεισμός έβλαψε τα φράγματα (και ως εκ τούτου η ακατέργαστη παροχή νερού), τους αγωγούς και εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Η ζημία στο φράγμα Shihkang μείωσε την ακατέργαστη παροχή νερού για την πόλη Tai-Jung και το νομό κατά περίπου 40%. Υπήρξε ουσιαστική ζημία συγκεκριμένα

στους υδροσωλήνες κατά μήκος του ίχνους διάρρηξης του ρήγματος, η σοβαρότερη ζημία ήταν στους υδροσωλήνες που διέσχισαν το ρήγμα.

Οι μόνες εγκαταστάσεις κατεργασίας ύδατος στο σύστημα TWSC που υφίσταται σημαντική ζημία ήταν στο Feng-Yuan. Οι δεξαμενές εγκαταστάσεων, οι δεξαμενές, και η υπόγεια διοχέτευση με σωλήνες υπέστησαν τη σεισμική ζημία.

Στο νομό Tai-Jung, περίπου 80% των πελατών (όπως αντιπροσωπεύεται από τις συνδέσεις υπηρεσιών) ήταν χωρίς υπηρεσία ύδατος αμέσως μετά από το σεισμό. Στην πόλη Tai-Jung, η παροχή νερού επανέλαβε σε διανεμημένη βάση τη δεύτερη ημέρα μετά από το σεισμό, και ο πλήρης ανεφοδιασμός επανήλθε σε εννέα ημέρες, εκτός από μερικές απομονωμένες περιοχές σε υψηλότερο υψόμετρο, όπου το νερό το παρείχε φορτηγό. Η αποκατάσταση της υπηρεσίας ύδατος στις αγροτικές περιοχές ήταν πιο αργή απ' ότι στις αστικές περιοχές λόγω της ζημίας στους δρόμους πρόσβασης και τις γέφυρες. Στο νομό Nan- Tou, η παροχή νερού από το σεισμό.

Οι εγκαταστάσεις και το σύστημα αποβλήτων στη περιοχή του επικέντρου αποτέλεσαν τη δευτερεύουσα ζημία σεισμού. Οι τέσσερις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων στο νομό Nan-Tou συνέχισαν να λειτουργούν και να αποδίδουν πολύ καλά, εκτός από μερικούς αγωγούς που υπέστησαν ζημία. Μερικοί αγωγοί του συστήματος συλλογής στο νομό Tai-Jung έσπασαν. Σε μερικές θέσεις, οι συνδέσεις ήταν εξαρθρωμένες και μετατοπισμένες λόγω της αστοχίας κλίσεων. Η γενική ζημία στο σύστημα λυμάτων στη καταπονημένη περιοχή δεν ήταν σοβαρή. Εντούτοις, οι αγωγοί και ο εξοπλισμός υπέστησαν δευτερεύουσα ζημία και προσωρινά δεν επιδεχόντουσαν επέμβαση επισκευής λόγω των διακοπών λειτουργίας ρεύματος στα διάφορα βιομηχανικά πάρκα σε όλη την Ταϊβάν.

Αυτός ο σεισμός επιβεβαιώνει ότι η περισσότερη ζημία αγωγών οφείλεται στην εδαφική παραμόρφωση. Η αιτία πρέπει να δοθεί στην απαίτηση ότι οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας απόβλητου ύδατος έχουν αρκετή δύναμη έκτακτης ανάγκης ώστε να παρέχουν αρχική επεξεργασία στα απόβλητα αποχέτευσης. Δηλαδή σε επείγουσα περίπτωση, τα απόβλητα αποχέτευσης αφήνουν τις εγκαταστάσεις με την αρχική επεξεργασία, με αυτόν τον τρόπο αποτρέποντας το στήριγμα και την υπερχείλιση που μπορούν να καθαριστούν. Εν προκειμένω, είναι αξιοσημείωτο ότι οι απαιτήσεις ενέργειας για την αρχική επεξεργασία είναι σχετικά χαμηλές, σε σύγκριση με εκείνους για τη δευτεροβάθμια επεξεργασία.

Συστήματα αερίου και υγρών καυσίμων

Το σύστημα μεταφοράς αερίου συμπεριφέρθηκε καλά κατά τη διάρκεια του σεισμού. Δεν υπήρξε καμία ζημία στα φρεάτια αερίου, τις εγκαταστάσεις αποθήκευσης, τις εγκαταστάσεις LNG, τους σταθμούς συμπιεστών, τις εγκαταστάσεις συμπαραγωγής, ή τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις που εξυπηρετούνται από το σύστημα. Η μόνη γνωστή ζημία ήταν στα τμήματα δύο παράλληλων σωληνώσεων στη επιφάνεια της θραύσης ρήγματος κάτω από μια οδό.

Αμέσως μετά από το σεισμό, πέντε τοπικές επιχειρήσεις διανομής (LDC) μέσα σε περίπου 19 km από το επίκεντρο έκλεισαν ολόκληρα τα συστήματά τους επειδή οι καταγραφές οργάνων ισχυρών-κινήσεων επί των τόπων αποθήκευσης αερίου υπερέβη τα επιτρεπτά επίπεδα. Η υπηρεσία διακόπηκε σε περίπου 400.000 πελάτες (όπως αντιπροσωπεύεται από τις συνδέσεις υπηρεσιών).

Τα κατεστραμμένα τμήματα συστημάτων LDC περιέλαβαν τους αγωγούς (από χάλυβα, χυτοσίδηρο, PE), τις συνδέσεις, τις ενώσεις, τους μετρητές, και τις βαλβίδες. Ο αγωγός PE συμπεριφέρθηκε γενικά καλά. Από τους αγωγούς χάλυβα που αστόχησαν, 50% είχαν αποδυναμωθεί νωρίτερα λόγω της διάβρωσης. Οι περισσότεροι αγωγοί χυτοσιδήρου και PE απέτυχαν στις ενώσεις. Οι μετρητές και οι βαλβίδες βλάφθηκαν τυπικά στα καταστραμμένα κτήρια. Μερικοί μετρητές θεωρήθηκε ότι καταστράφηκαν με το ισχυρό τίναγμα. Υπήρξαν δεκάδες χιλιάδων διαρροές στις συνδέσεις υπηρεσιών – τέτοιες είναι, ο αγωγός

60

που οδηγεί από το μετρητή στον πελάτη. Εκτός από τη ζημία στις υπηρεσίες από τα κατεστραμμένα ή τα κτήρια που κατέρρευσαν, το σύστημα διανομής αερίου βλάφθηκε επίσης από τις διαφορικές καθιζήσεις του δρόμου ή τις διαφορικές καθιζήσεις μεταξύ του εδάφους και των κτηρίων. Αν και η συμπεριφορά του συστήματος μεταφοράς αερίου ήταν καλή, τα LDC έπαθαν ακόμα σοβαρότερη ζημία στα συστήματα αερίου τους και υπέστησαν τις οικονομικές απώλειες. Για παράδειγμα, το Shin Lin Gas Company έχασε το ένα τρίτο των πελατών του λόγω των κτιρίων που κατέρρευσαν.

Υπήρξε σχετικά λίγη ζημία στα συστήματα υγρών καυσίμων. Δεν υπήρξε καμία σημαντική ζημία στις σωληνώσεις ή τους σταθμούς αντλιών και κανένα σημαντικό κλείσιμο των συστημάτων.

Τα συστήματα αερίου λειτούργησαν πολύ καλά. Γρήγορο κλείσιμο των συστημάτων LDC έσωσε πιθανώς πολλές ζωές και ελαχιστοποίησε τη ζημία ιδιοκτησίας. Το μεγαλύτερο μέρος της ζημίας ήταν στους πελάτης-ιδιαίτερα στις κύριες συνδέσεις υπηρεσιών. Η εργασία αποκατάστασης ήταν επίσης συστηματική και έγκαιρη.

Παρατηρήσεις και Συστάσεις:

 Μεταξύ των τύπων ζημιών, οι αστοχίες των γραμμών μεταφοράς κατά τη διασταύρωση με το ρήγμα ήταν πιθανώς αναπόφευκτες. Εντούτοις, με τον κατάλληλο προγραμματισμό, ένα καλύτερο πέρασμα από τα ρήγματα που διασχίζουν την περιοχή, και το πρόσθετο σχέδιο εγκαταστάσεων σωλήνων (όπως η χρησιμοποίηση μιας β-τάφρου, ενός ελαφριού υλικού επίχωσης, και τα λοιπά), οι γραμμές μεταφοράς αντιδρούν καλύτερα στην εδαφική κίνηση.

 Ο σωλήνας μεταφοράς 20 cm που απέτυχε είναι η μόνη πηγή αερίου στο Shin Lin Gas Company. Ακόμα κι αν η αποτυχία δεν προκάλεσε σημαντικό πρόβλημα για το Shin Lin, θα ήταν καλύτερο να υπάρξει κάποιος πλεονασμός στον ανεφοδιασμό.

Το γεγονός ότι 50% ή περισσότερο των αστοχιών σωλήνων χάλυβα

διανομής αφορούσε τη διάβρωση προτείνει ότι τέτοιος σωλήνας πρέπει να αντικατασταθεί από αγωγό PE, ή το πρόγραμμα προστασίας διάβρωσης πρέπει να βελτιωθεί.

 Για να αποτρέψει τις αποτυχίες στη σύνδεση των υπηρεσιών που προκαλούνται από τη διαφορική εγκατάσταση μεταξύ των κτηρίων και του εδάφους, η εγκατάσταση των πιο εύκαμπτων συνδέσεων υπηρεσιών, παρόμοια με εκείνα που εγκαθίστανται στα κινητά εγχώρια πάρκα μετά από το σεισμό Northridge, πρέπει να θεωρηθεί.

 Εάν οι μετρητές έσπασαν με το ισχυρό τίναγμα, κατόπιν το σχέδιο των μετρητών και των υποστηρίξεών τους πρέπει να αναθεωρηθεί. Με την τρέχουσα γνώση του σεισμικού πιστοποιητικού εξοπλισμού, οι μετρητές και οι υποστηρίξεις τους θα μπορούν να σχεδιαστούν για να αντέξουν τη σεισμική καταπόνηση. Στο κλείσιμο έκτακτης ανάγκης, οι τοπικές βαλβίδες διαδραμάτισαν έναν σημαντικό ρόλο στην πρόληψη και την αποκατάσταση ζημίας.

Για πολλές θαμμένες σωληνώσεις, η ζημία είναι ακόμα άγνωστη. Λόγω των συνεχών εδαφικών μετακινήσεων και των μετασεισμικών δονήσεων, μερικοί αγωγοί θα μπορούσαν να αποτύχουν τους επόμενους μήνες μετά από το σεισμό. Οι επιχειρήσεις αερίου πρέπει να συνεχίσουν να επιθεωρούν και να ελέγχουν τους αγωγούς στις σεισμικές ζώνες κινδύνου, ώστε να επιτύχουν μια καλύτερη απόκριση έκτακτης ανάγκης και να μειώσουν τη δευτεροβάθμια ζημία.

4.2.4 Σεισμός Kobe

<u>Γενικά στοιχεία</u>

Ο σεισμός του Kobe έγινε στις 17 Ιανουαρίου του 1995, ήταν μέσου μεγέθους Mw=6.9. Η ζημία που προκλήθηκε ήταν τεράστια και η χειρότερη στην Ιαπωνία μετά το μεγάλο σεισμό του Kanto το 1923.Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ήταν 817gal, η μέγιστη εδαφική μετατόπιση 0.7 m/s. Η δεσπόζουσα περίοδος ήταν 1s. Το ρήγμα είχε μέγιστη μετατόπιση 1.5m.

<u>Βλάβες σε ΔΚΩ</u>



Σχήμα 4.7 Χάρτης Kobe (πηγή: R.E Bachman)

Το φυσικό αέριο για τις περιοχές που επηρεάστηκαν σοβαρά από το σεισμό, όπως Kobe, Ashiya, Amagasaki και Nishinomiya, παρέχεται από την εταιρία Osaka Gas Company, Ltd. Η εταιρία προμηθεύει αέριο σε περισσότερο από 5,6 εκατομμύρια καταναλωτές, αποτελώντας το 30% του συνολικού όγκου πωλήσεων αερίου στην Ιαπωνία. Το δίκτυο αποτελείται από κύριες γραμμές τροφοδοσίας, σωληνώσεις και κεντρικούς αγωγούς διανομής συνολικού μήκους 49.430km. Το υγροποιημένο αέριο (LNG) αποτελεί το 94% του αποθέματος αερίου της Osaka Gas system. Τρεις LNG σταθμοί (2 στο Senboku και 1 στο Himeji) αποτελούν τις κύριες πηγές για τη διανομή του αερίου. Το αέριο μεταβιβάζεται περιφερειακά μέσω ενός συστήματος κύριων γραμμών τροφοδοσίας που λειτουργούν σε πιέσεις των 4 MPa. Οι κύριοι αγωγοί τροφοδοσίας αποτελούνται από X-42 ή X-52 σωλήνες χάλυβα με περιμετρικές συγκολλήσεις πλήρους διάτρησης (penetration) και ηλεκτρικού τόξου.

Επιπροσθέτως, η μεταφορά του αερίου επιτυγχάνεται μέσα από ένα σύστημα αγωγών μεσαίας πίεσης που αποτελείται από τις A-lines, με εσωτερικές πιέσεις από 0,3 MPa ως 1,0 MPa και από τις B-lines με εσωτερικές πιέσεις από 0,1

MPa ως 0,3 MPa. Οι μεσαίας πίεσης A-lines αποτελούνται από σωλήνες χάλυβα περιμετρικής συγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου, ενώ οι μεσαίας πίεσης Blines αποτελούνται από σωλήνες χάλυβα με εύπλαστες μηχανικές ενώσεις σε διαστήματα 5 μέτρων. Οι μηχανικές ενώσεις είναι παρόμοιες με τις ενώσεις τύπου S που χρησιμοποιούνται σε συστήματα παροχής νερού και είναι εφοδιασμένες με ένα μηχανισμό κλειδώματος που επιτρέπει 6 εκατοστά διαστολή και 2 εκατοστά συμπίεση. Την περίοδο του σεισμού υπήρχαν 1245χμ A-lines και 3800χμ B-lines.

Επίσης, το σύστημα αποτελείται από ένα δίκτυο διανομής χαμηλής πίεσης 43895χλμ που λειτουργεί σε εσωτερικές περίπου με πίεση 1,8 kPa. Το σύστημα χαμηλής πίεσης στο Kobe αποτελείται κυρίως από σωλήνες χάλυβα με **threaded steel** συζεύξεις ή βιδωτές ενώσεις. Ένα μικρό ποσοστό του συστήματος χαμηλής πίεσης, περίπου το 5%, αποτελείται από αγωγούς πολυαιθυλενίου. Το σύστημα χαμηλής πίεσης υπέστη αρκετές ζημιές.

Το σύστημα φυσικού αερίου αποτελείται από έξυπνους μετρητές για να παρέχουν γρήγορη διακοπή της ροής αερίου σε πιθανή ζημία στις σωληνώσεις. Την περίοδο του σεισμού είχαν εγκατασταθεί 34 μετρητές σε όλο το δίκτυο λειτουργίας. Ο μετρητής αποτελείται από ένα σεισμικό αισθητήρα που ενεργοποιείται όταν η επιτάχυνση ξεπερνάει τα 0.2g, έναν αισθητήρα πίεσης και ένα μετατροπέα του ρυθμού ροής. Οι αισθητήρες πίεσης και ροής ανιχνεύουν ασυνήθιστες τιμές στην πίεση και στη ροή, οι οποίες αποτελούν ένδειξη αστοχίας και βλάβης στα δίκτυα φυσικού αερίου. Ένας υπολογιστής καταγράφει τα εισερχόμενα στοιχεία και διακόπτει τη ροή όταν απαιτείται.

Στους σταθμούς υγροποιημένου αερίου (LNG terminals) και στους σταθμούς διανομής δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική βλάβη αν και δέχτηκαν υψηλά επίπεδα επιτάχυνσης. Επίσης, δεν αναφέρθηκαν βλάβες στις γραμμές τροφοδοσίας του δικτύου (trunk lines). Στις γραμμές μεσαίας πίεσης υπήρξαν συνολικά 35 επισκευές στις A-lines και 61 στις B-lines. Οι κυρίαρχες αστοχίες εμφανίζονται με τη μορφή διαρροής εκεί όπου οι συμπιεστικοί μεταλλοπλαστικοί σύνδεσμοι έχουν χαλαρώσει (σύνδεσμοι Dresser).

64

Στις γραμμές χαμηλής πίεσης παρουσιάστηκαν βλάβες στις threaded ή στις βιδωτές ενώσεις των χαλύβδινων σωλήνων και ρωγμές στους σωλήνες από χυτοσίδηρο και όλκιμο σίδηρο. Χρειάστηκαν 5190 επισκευές στους αγωγούς διανομής φυσικού αερίου και στις διακλαδώσεις που περνούν κάτω από τους δρόμους της πόλης. Τέλος, είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι δεν παρουσιάστηκαν αστοχίες στους σωλήνες από πολυαιθυλένιο.

Παρατηρήσεις και συστάσεις

- Οι σωληνώσεις μεταφοράς χάλυβα με οξυακετυλινικές συγκολλήσεις, κατασκευασμένες πριν από το 1932, είναι τρωτές στις επιδράσεις που προκαλούν τα σεισμικά κύματα, προκαλώντας τη ρήξη και το μερικό ράγισμα στις συγκολλήσεις περιμέτρου.
- Σωληνώσεις μεταφοράς από χάλυβα που κατασκευάζονται • Jμ τόξου ηλεκτροσυγκολλήσεις (επενδεδυμένου (shielded) ή μη επενδεδυμένου ηλεκτροδίου) έχουν αποδώσει γενικά καλά στους τομείς της εδαφικής κίνησης.
- Οι αγωγοί με συγκολλήσεις ηλεκτρικού τόξου και οι αγωγοί με οξυακετυλινικές συγκολλήσεις είναι τρωτοί σε μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις όπως μετακίνηση ρήγματος και καθιζήσεις εδάφους.
- Οι αγωγοί διανομής αερίου από πολυαιθυλένιο παρουσιάστηκαν αρκετά ανθεκτικοί στις επιδράσεις που επέφερε ο σεισμός.
- Οι βαλβίδες απότομης διακοπής αερίου δούλεψαν αρκετά καλά.
- Μεταξύ των τύπων βλάβης, οι αστοχίες των γραμμών μεταφοράς στο πέρασμα ενός ρήγματος είναι πιθανώς αναπόφευκτες. Εντούτοις, με τον κατάλληλο προγραμματισμό και ειδικό σχεδιασμό εγκατάστασης σωλήνων, οι γραμμές μετάδοσης μπορεί να παρουσιάσουν καλύτερη συμπεριφορά στην εδαφική μετακίνηση.
- Οι βαλβίδες διακοπής αερίου έκτακτης ανάγκης διαδραμάτισαν έναν σημαντικό ρόλο στην πρόληψη και την αποκατάσταση ζημίας.

Συμπεραίνουμε πως η χρήση του κατάλληλου υλικού σε συνδυασμό με τη σωστή τοποθέτηση του δικτύου μακριά από ρήγματα και η χρήση βαλβίδων
ασφαλείας αποτελούν τη βάση για την κατασκευή των συστημάτων φυσικού αερίου.

Συμπεριφορά αγωγών σε σεισμό

Οι παρατηρήσεις της ζημίας σωληνώσεων στις πόλεις Kobe, Ashiya και του Nishinomiya, που προκλήθηκαν από το σεισμό Hyogoken-Nanbu το 1995 είναι σύμφωνες με το σχέδιο εκτίμησης που δίνεται στον πίνακα 4.2. Η χειρότερη πιο επηρεασθείσα κατηγορία σωλήνων ήταν από χάλυβα με τις περασμένες κλωστή ενώσεις (SG). Εντούτοις, αυτό το ποσοστό αποτυχίας είναι μη ρεαλιστικά υψηλό, αντιπροσωπεύοντας την εντοπισμένη ζημία που υπολογίζεται κατά μέσο όρο πέρα από ένα πολύ μικρό μήκος του σωλήνα. Το υψηλότερο αξιόπιστο ποσοστό ζημίας παρατηρήθηκε στους σωλήνες AC, ακολούθησαν το CI, το PVC και το Di, με τους σωλήνες χάλυβα να παρουσιάζουν την καλύτερη γενική απόδοση.

Material type/diameter	Joint type	Ruggedness	Bending	Joint flexibility	Restraint	Total					
	LOW VULNERABILITY										
ductile iron	B&S,RG,R	5	5	4	4	18					
polyethylene	Fused	4	5	5	5	19					
steel	arc welded	5	5	4	5	19					
steel	Riveted	5	5 5		4	18					
steel	B&S, RG, R	5	5	4	4	18					
LOW/MODERATE VULNERABILITY											
concrete cylinder	B&S, R	3	4	4	3	14					
ductile iron	B&S, RG, UR	5	5	4	1	15					
PVC	B&S, R	3	3	4	3	13					
steel	B&S, RG, UR	5	5	4	1	15					
	MO	DERATE VULNER	RABILITY								
AC>200mm Φ	Coupled	2	4	5	1	12					
cast iron > 200mm ϕ	B&S, RG	2	4	4	1	11					
PVC	B&S, UR	3	3	4	1	11					
concrete cylinder	B&S, UR	3	4	4	1	12					
MODERATE/HIGH VULNERABILITY											
AC < 200mm Φ	Coupled	2	1	5	1	9					
cast iron < 200mm ϕ	B&S, RG	2	1	4	1	8					
steel	gas welded	3	3	1	2	9					
HIGH VULNERABILITY											
cast iron	B&S, rigid	2	2	1	1	6					

Πίνακας 4.2 Σχέδιο Εκτίμησης για το σεισμό Hyogoken-Nanbu

Ο τύπος ένωσης και η απόδοση κατά το γεγονός του σεισμού είναι διευκρινισμένη σε σχέση με την απόδοση των σωλήνων που έχουν «Stype» ή ενώσεις «του τύπων S II». Οι DI σωληνώσεις που έχει αυτές τις ειδικάσχεδιασμένες αντισεισμικές ενώσεις, δεν υπέστη καμία ζημία ως συνέπεια του σεισμού στο Hyogoken-Nanbu. Αυτοί οι τύποι συστημάτων σωλήνας-ένωσης αποτέλεσαν περίπου 270 χλμ του συνολικού δικτύου διανομής ύδατος, 100 χλμ του οποίου συνέπεσαν με τις περιοχές που αντιμετώπισαν τη σημαντική ρευστοποίηση-προκληθείσα μόνιμη επίγεια παραμόρφωση. Στην περιοχή Ashiyama, παραδείγματος χάριν, ένας σωλήνας διαμέτρων 500mm με τις ενώσεις τύπων του S παρέμεινε άθικτος μετά από μια πλευρική επίγεια μετακίνηση περίπου 2m. Μια σωλήνωση διαμέτρου 300 χιλ. με τις ενώσεις τύπων SII στη δεξαμενή διανομής Egeyama δεν υπέστη επίσης καμία ζημία, παρά την καθίζηση περίπου 1.3m.

Στο σχήμα 4.8 απεικονίζονται οι αντισεισμικοί τύποι ενώσεων S και SII. Οι ενώσεις τύπου S II είναι για τους σωλήνες μικρών διαμέτρων (της τάξης 75 -450 mm.), ενώ οι ενώσεις τύπου S είναι για τους σωλήνες μεγαλύτερων διαμέτρων (500 - 2600 mm.). Το lock-ring παρέχει μια δύναμη σταματήματος 3*D0 kN, όπου D0 είναι η ονομαστική διάμετρος των σωληνώσεων σε χιλ. .Οι δύο τύποι ενώσεων επιτρέπουν επέκταση και συστολή στην ένωση ίση με 1% του μήκους σωλήνων. Οι επιτρεπόμενες γωνίες εκτροπής κυμαίνονται από 1.5° για τους σωλήνες μεγάλων διαμέτρων και ως 4° για τους σωλήνες μικρότερων διαμέτρων . Διάφορα μήκη αντισεισμικών σωλήνων μπορεί επομένως να ανεχτούν τις σημαντικές μόνιμες επίγειες παραμορφώσεις. Παραδείγματος χάριν, έντεκα σωλήνες με μήκος 6μ και διάμετρο 1000mm με τύπο ένωσης S μπορούν θεωρητικά να απορροφήσουν μια πλευρική μετατόπιση περίπου 7m . Λόγω των σχετικά υψηλών δαπανών, η εγκατάσταση των αντισεισμικών ενώσεων επιτρέπεται μόνο στις θέσεις που υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να υποστούν σοβαρή μόνιμη ρευστοποίηση. καθιζήσεις εδάφους ή αστοχία επίγειας παραμόρφωσης ως συνέπεια.



Σχήμα 4.8 Τύποι Ενώσεων

Οι συνεχείς σωληνώσεις είναι εκείνες που έχουν άκαμπτες ενώσεις, όπως οι συνεχείς σφιχτά ενωμένες σωληνώσεις χάλυβα.

Κατασκευασμένες σύμφωνα με τους σύγχρονους κώδικες πρακτικής, οι συνεχόμενες σωληνώσεις έχουν αποδώσει γενικά καλύτερα σε προηγούμενους σεισμούς από εκείνους που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας άλλες μεθόδους.

Η εμπειρία έχει δείξει ότι μερικές σωληνώσεις που κατασκευάστηκαν πριν από και κατά τη διάρκεια της αρχής της δεκαετίας του '30 δεν εξετάστηκαν από κατάλληλους ποιοτικούς ελέγχους όπως συμβαίνει σήμερα. Παραδείγματος χάριν, ο σεισμός του Long Beach 1933 προκάλεσε περισσότερα από 50 σπασίματα στη σωλήνωση της ψηλής πίεσης αερίου κυρίως στις στενά ενωμένες ενώσεις. Σε κάθε περίπτωση, τα σπασίματα στις γραμμές μεγάλων διαμέτρων ανακαλύφθηκαν στις συγκολλήσεις που στερήθηκαν την κατάλληλη εισχώρηση ή το δέσιμο με το σώμα του σωλήνα. Οι φτωχές συγκολλήσεις έχουν συμβάλει επίσης στις αποτυχίες των εκλεκτής ποιότητας σωληνώσεων χάλυβα της δεκαετίας του '60 που ήταν ενωμένες στενά χρησιμοποιώντας τις διαδικασίες της ηλεκτροσυγκόλλησης.

Επιπρόσθετα έχει παρατηρηθεί ότι οι στενά ενωμένες σωληνώσεις με κάμψεις, γωνίες ένωσης και τοπικές εκκεντρικότητες θα συγκεντρώσουν την παραμόρφωση σε αυτά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα, ειδικά εάν οι μόνιμες επίγειες παραμορφώσεις αναπτύξουν πιέσεις συμπίεσης. Οι καθιζήσεις εδάφους από ρευστοποίηση κατά τη διάρκεια του σεισμού του San Fernando προκάλεσε σοβαρή ζημιά σε μια σωλήνωση νερού διαμέτρου 49-ίντσας σε εννέα ενώσεις που είχαν καμφθεί ή ήταν ενωμένες στενά.

Μια ενωμένη σωλήνωση αποτελείται από τα τμήματα σωλήνων που συνδέονται από τις σχετικά εύκαμπτες (ή ταλαντευόμενες) συνδέσεις (π.χ., ένα σύστημα σωληνώσεων χυτοσιδήρου κουδούνι-και-βυσμάτων). Αυτές αποτυγχάνουν με τρεις τρόπους: εξαιτίας υπερβολικά ελαστικών και καμπτικών παραμορφώσεων στο κύλινδρο του σωλήνα, λόγω της

68

υπερβολικής περιστροφής σε μια ένωση, ή της υποχώρησης της ένωσης. Ο τετμημένος σωλήνας με την κάπως άκαμπτη στεγανοποίηση όπως το τσιμέντο του Πόρτλαντ δεν μπορεί να ανεχτεί πολλή μετακίνηση μέχρι να εμφανιστεί η διαρροή. Αντίθετα οι σωλήνες με τις εύκαμπτες λαστιχένιες στεγανοποιήσεις μπορούν γενικά να ανεχτούν περισσότερες σεισμικές παραμορφώσεις.

Επιπρόσθετα η ζημία σωληνώσεων τείνει να συγκεντρωθεί στις ασυνέχειες όπως οι γωνίες, τα γράμματα Τ, οι ευθύγραμμες βαλβίδες, οι φραγμοί OI συνδέσεις υπηρεσιών. Τέτοια αντίδρασης και χαρακτηριστικά δημιουργούνται στα σημεία αγκύρων ή στις άκαμπτες θέσεις που προωθούν τις συγκεντρώσεις δύναμης/πίεσης. Τοπικά οι υψηλές πιέσεις μπορούν επίσης να εμφανιστούν στις συνδέσεις σωληνώσεων στις παρακείμενες δομές (π.χ., δεξαμενές, κτήρια και γέφυρες), ειδικά εάν υπάρχει ανεπαρκής ευελιξία να προσαρμοστούν οι σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ του σωλήνα και της κατασκευής. Αυτός ήταν σύμφωνα με τις υπάρχουσες πληροφορίες η αιτία για το μεγαλύτερο μέρος της ζημίας στις συνδέσεις υπηρεσιών των συστημάτων σωληνώσεων διανομής ύδατος κατά τη διάρκεια του σεισμού του 1971 στο SAN Fernando.

4.2.5 Σεισμός Kocaeli

<u>Γενικά στοιχεία</u>

Στις 17 Αυγούστου 1999, σεισμός με μέγεθος Mw=7.4 συνέβη στην πόλη Kocaeli της Τουρκίας. Σεισμικό ρήγμα παρατηρήθηκε ανάμεσα στο Hersek delta και το Golkaya. Το ρήγμα είχε δύο τμήματα, το ένα εκτεινόταν ανάμεσα στο Hersek κ' Akyaz, ενώ το άλλο εκτεινόταν ανάμεσα στο Akyaz κ' Golkaya ολισθαίνοντας βορειοανατολικά-νοτιοδυτικά. Το μήκος του ρήγματος στην επιφάνεια ήταν 100 km. Η μετατόπιση του ρήγματος ήταν 2-4m. Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση είχε μέγεθος 399 gal.

<u>Βλάβες σε ΔΚΩ</u>

Ο σεισμός Kocaeli προκάλεσε σημαντική διάσπαση των Δ.Κ.Ω της περιοχής. Η πιο σοβαρή ζημία εμφανίστηκε στο δίκτυο ύδρευσης στο Adapazari.

Αυτό συνέβη πρώτα απ' όλα επειδή η εδαφική ρευστοποίηση και το μαλακό έδαφος οδήγησαν σε σημαντικές διαφορικές εδαφικές μετακινήσεις που αποσύνδεσαν και έσπασαν τους εύθραυστους αγωγούς τσιμέντου αμιάντων που βρίσκονταν τοποθετημένες σε όλη την πόλη.

<u>Παροχή νερού</u>

Η παροχή νερού στη περιοχή που επηρεάστηκε από το σεισμό προέρχεται είναι τρεις πηγές, που διανέμονται από τις περιφερειακές αντιπροσωπείες ύδατος. Οι τρεις αντιπροσωπείες εξυπηρετούν περίπου 2.5 εκατομμύριο ανθρώπους στις περιοχές yalova-Golciik, kullar-Izmit Gebze, και Adapazari. Υπάρχουν σύγχρονες εγκαταστάσεις κατεργασίας ύδατος, οι οποίες υπέστη τη δευτερεύουσα ζημία, αλλά αποκαταστάθηκαν γρήγορα και επαναλειτούργησαν.

Η παροχή νερού για Adapazari προέρχεται από τη λίμνη Sapanca. Το σχήμα 4.9 παρουσιάζει μια σχηματική αναπαράσταση της παροχής νερού. Από τις οκτώ αντλίες στη λίμνη Sapanca, δύο βλάφθηκαν από το σεισμό.

Από τις τρεις σωληνώσεις μεταφοράς ύδατος μόνο μία,συνέχισε να λειτουργεί κανονικά μετά το σεισμό. Ένα μήνα μετά η παροχή νερού στο Adapazari συνεχιζόταν να μεταφέρεται μόνο από τη γραμμή σωλήνωσης με διάμετρο 1.200 mm που είχε απομείνει μετά το σεισμικό γεγονός.

Οι σωληνώσεις, από τις οποίες εξυπηρετείται το Adapazari (σχήμα 4.9) αποτελούνται από σωληνώσεις διαμέτρου 1.200 mm, κατασκευασμένες από τσιμέντο συνδεδεμένες με χάλυβα και αμίαντο 700 mm. (AC) στις εγκαταστάσεις και τις δεξαμενές κατεργασίας ύδατος. Οι εγκαταστάσεις και οι δεξαμενές επεξεργασίας βρίσκονται σε έναν λόφο που ονομάζεται Maltepe, το οποίο αποτελείται είναι ένα στρώμα βράχου αμέσως νότια της πόλης. Το σχήμα 4.10 είναι ένας χάρτης της παροχής νερού Adapazari που παρουσιάζει

70

σωληνώσεις μεγάλων-διαμέτρων στο σύστημα και τις διάφορες περιοχές της πόλης. Το Maltepe βρίσκεται στη χαμηλή- αριστερή γωνία του χάρτη.



Σχήμα 4.9 Σχηματικά η υπηρεσία ύδρευσης του Adapazari (πηγή:Tang. E)



Figure 16.2. Map of Adapazari showing principal water trunk and distribution pipelines.

Σχήμα 4.10 Χάρτης σωληνώσεων του Adapazari (Tang. E)

Το νερό από το Maltepe μεταβιβάζεται από τη ροή βαρύτητας στην πόλη, αρχικά από τρεις σχετικά μεγάλες γραμμές. Δύο από αυτές είναι διαμέτρου 500 - και 600 mm.-από χάλυβα, και το τρίτο είναι μια σωλήνωση τσιμέντου αμιάντων διαμέτρου 600 mm. (AC). Με εξαίρεση τα σχετικά μικρά μήκη της σωλήνωσης χάλυβα από το Maltepe, το σύστημα διανομής ύδατος αποτελείται από τις σωληνώσεις AC.

Υπήρξαν πάνω από 500km των σωληνώσεων της κύριας τροφοδοσίας και διανομής στο σύστημα Adapazari. Αναφέρθηκε ότι το 70% των σωληνώσεων ήταν χαλασμένοι, με κάποια διαρροή να ανιχνεύεται στο υπόλοιπο 30%. Λόγω της εκτενούς ζημίας, αποφασίστηκε να αντικαταθεί ολόκληρο το δίκτυο σωληνώσεων. Η διαδεδομένη και κυρίαρχη φύση της ζημίας είναι αληθινά εξαιρετική και αντιπροσωπεύει μια από πολύ λίγες περιπτώσεις της συνολικής ή σχεδόν συνολικής διακοπής του συστήματος διανομής ύδατος που προκαλείται από έναν σεισμό (ένα άλλο παράδειγμα είναι η διακοπή του συστήματος σωληνώσεων ύδατος που προκλήθηκε από το σεισμό του Σαν Φρανσίσκο το 1906).

Το σχήμα 4.11 παρουσιάζει άποψη από το Maltepe βόρεια προς την κεντρική επιχειρησιακή περιοχή Adapazari. Η προεξέχουσα οδός στη φωτογραφία είναι η οδός Adnan Menderes, μπορεί επίσης να παρατηρηθεί στο σχήμα 12 ως διαδρομή της σωλήνωσης AC διαμέτρου 500 χιλ. που περνά από το Sirinelver μέσω του Giilluk προς το Akincilar. Το σχήμα 4.12 παρουσιάζει το νέο αγωγό που τοποθετήθηκε κατά μήκος της οδού Adnan Menderes και του χαλασμένου αγωγού που αντικαταστάθηκε. Ο κατεστραμμένος αγωγός αποτελείται από τμήματα αγωγού μήκους 4 m από AC, η εξωτερική διάμετρος και το πάχος τοίχων της ήταν 375 mm και 25 mm, αντίστοιχα. Η νέα σωλήνωση αποτελείται με πάχος τοιχώματος 12.5 mm.



Σχήμα 4.11 Maltepe (Πηγή :Tang A.)



Σχήμα 4.12a Χαλασμένος Αγωγός 4.12b. Νέος Αγωγός (Πηγή :Tang A.)

Οι διευθυντές συστημάτων ύδατος και το προσωπικό κατασκευής ανέφεραν ότι το μεγαλύτερο μέρος της ζημιάς στους αγωγούς AC ήταν στις ενώσεις. Το σχήμα 4.12 a είναι μια φωτογραφία μιας ένωσης σε έναν χαλασμένο αγωγό διαμέτρου 75mm. Μια χαρακτηριστική ένωση αγωγών αποτελείται από ένα κυλινδρικό τμήμα από AC, περίπου 150mm μήκους. Τα αντιτιθέμενα μήκη του αγωγού AC, που εγκαταστάθηκαν με τα ελαστομερικά μονωτικά, παρεμβλήθηκαν σε κάθε τέλος του κυλινδρικού τμήματος. Αναφέρθηκε ότι η ζημιά στην ένωση εμφανίστηκε από το ράγισμα, την εξόλκευση και την απώλεια της υδατοστεγούς στεγανοποίησης ως αποτέλεσμα της περιστροφής και της αξονικής ολίσθησης στην ένωση.

Το σχήμα 4.12b είναι μια φωτογραφία μιας χαρακτηριστικής ένωσης στη γραμμή αγωγών αντικατάστασης με διάμετρο 500mm. Το καμπανοειδές τέλος της ένωσης είναι 150mm βαθύ και είναι εξοπλισμένο με το περιγραμμένο πολυμερές υλικό που εμμένει στην εσωτερική επιφάνεια του περιβλήματος.

Περίπου ένα μήνα μετά το σεισμό, μόνο 10km της γραμμής τροφοδοσίας είχαν αναδημιουργηθεί. Η αναδημιουργία έναν μήνα μετά από το σεισμό άρχισε πρώτιστα στους αγωγούς AC. Η χρήση των εύθραυστων αγωγών AC έναντι της όλκιμης διοχέτευσης με αγωγούς χάλυβα ή της διοχέτευσης με πλαστικούς αγωγούς, οφείλεται στο ότι είναι πιο εύκολα διαθέσιμοι. Ακόμα και αν τα μικρά τμήματα αντικαταστάθηκαν με τους συνδεδεμένους αγωγούς χάλυβα, ο αγωγός χάλυβα δε θα μπορούσε να ληφθεί γρήγορα σε επαρκή ποσότητα. Η ακραία επείγουσα ανάγκη της αποκατάστασης του ύδατος απαίτησε τη γρήγορη απόκτηση αγωγού που θα μπορούσε να επεκταθεί χωρίς διακοπή του ανεφοδιασμού.

Τρεισήμισι μήνες μετά από το σεισμό του Αυγούστου, οι ανακατασκευές εκτελούταν είτε με αγωγούς χάλυβα είτε πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HPDE). Το προσωπικό παροχής νερού έδειξε ότι τα σχέδια αναδημιουργίας απαίτησαν περίπου 341 Km αγωγών HPDE και 21km των ενωμένων στενά αγωγών χάλυβα για να εγκατασταθούν.

Σε μια άλλη πόλη, το Golcuk, υπήρξε μια σοβαρή τοπική ζημία στο δίκτυο διανομής ύδατος. Η ζημία εμφανίστηκε στους κεντρικούς αγωγούς και τις υπηρεσίες διανομής. Υπήρξαν περίπου 120 km του πολυβινυλικού χλωριδίου (PVC), του χάλυβα, HDPE, και των σωληνώσεων διανομής AC στο Golcuk. Ο διευθυντής των υδάτινων έργων στο Golcuk ανέφερε ότι 45% του συστήματος καταστράφηκε, με άλλα 25% χαλασμένο.

Γενικές Παρατηρήσεις

Η απόδοση παροχής νερού κατά τη διάρκεια και μετά από το σεισμό Kocaeli περιέλαβε τις ουσιαστικές διαφορές στη σεισμική αντίδραση. Το εύθραυστο σύστημα σωληνώσεων AC στο Adapazari, που συνδυάστηκε με την επίγεια παραμόρφωση από τη ρευστοποίηση και τη χαλάρωση των αλλούβιων ιζημάτων, οδήγησε στη διαδεδομένη ζημία.

Οι δυσκολίες στην παροχή νερού ήταν κυρίως στα συστήματα μετάδοσης
και διανομής. Η ζημία στις σωληνώσεις μεταφοράς από χάλυβα αναφέρθηκε
στους τομείς του ρήγματος επιφάνειας και της μόνιμης εδαφικής

74

παραμόρφωσης που συνδέθηκαν με την εδαφική ρευστοποίηση.

Ένα από τα σημαντικότερα μαθήματα του σεισμού είναι η ανάγκη για σεισμικό προγραμματισμό, με, τις κατάλληλες προμήθειες και τα εφεδρικά συστήματα για την επισκευή και την αποκατάσταση έκτακτης ανάγκης. Η έλλειψη διαθέσιμης διοχέτευσης με σωλήνες χάλυβα και HDPE στο Adapazari σήμαινε ότι η αναδημιουργία των σημαντικών γραμμών τροφοδοσίας έπρεπε να αρχίσει με τον εύθραυστο σωλήνα AC. Η επαρκής συσσώρευση της όλκιμης σωλήνωσης θα εξασφάλιζε ότι τα συστατικά με τη σημαντική ικανότητα να στηριχτούν οι μεγάλες διαφορικές παροδικές και μόνιμες μετατοπίσεις θα μπορούσαν να επεκταθούν στις ζώνες όπου η επίγεια αποτυχία συνέβαλε στη ζημία συστημάτων.

Σύστημα παράδοσης αερίου

Το προπάνιο είναι η κύρια πηγή αερίου για λόγους θέρμανσης και μαγειρέματος στη επηρεασθείσα από το σεισμό περιοχή. Το μόνο φυσικό σύστημα διανομής αερίου στη περιοχή του επικέντρου είναι το σύστημα για lzmit, το οποίο χρησιμοποιείται από το IZGAS, τη μεγαλύτερη επιχείρηση αερίου στην Τουρκία. Τα σχήματα 2.15 και 2.16 είναι χάρτες των ανατολικών και δυτικών τμημάτων του δικτύου IZGAS. Το σύστημα περιέχει περίπου 405 χλμ των σωληνώσεων διανομής αερίου, των οποίων 38 km είναι από χάλυβα με ενωμένες στενά συνδέσεις και το υπόλοιπο είναι σωληνώσεις πολυαιθυλενίου μέσης πυκνότητας (MDPE).

Το σύστημα κατασκευάστηκε το 1995-1998. Οι σωληνώσεις χάλυβα έχουν διάμετρο κυρίως 100, 150, και 300 mm.. Οι σωληνώσεις MDPE είναι κυρίως διαμέτρου 63,110, και 125 mm.. Η ικανότητα πίεσης σχεδιασμού των σωληνώσεων χάλυβα είναι 2.5 MPa, αλλά η μέγιστη επιτρεπόμενη λειτουργική πίεση περιορίζεται στο 1.5MPa. Η λειτουργούσα πίεση στη διοχέτευση με σωλήνες MDPE είναι περίπου 400 kPa.

Το σύστημα συμπεριφέρθηκε εξαιρετικά καλά κατά τη διάρκεια του σεισμού αλλά και μετέπειτα. Δεν υπήρξε καμία πυρκαγιά που αποδόθηκε σε διαρροή αέριου. Δεν υπήρξε καμία στις σωληνώσεις και των κύριων ρυθμιστών έξω από

την επιρροή των κτηρίων που είχαν καταρρεύσει. Η ζημία που στηρίχτηκε στο σύστημα εμφανίστηκε όταν κατέρρευσαν τα κτήρια επάνω στα κιβώτια υπηρεσιών. Υπήρξαν 860 κιβώτια υπηρεσιών που καταστράφηκαν.

То Φυσικό σύστημα μεταφοράς αερίου στη επηρεασθείσα περιοχή χρησιμοποιείται από τη BOTAS. Ο σωλήνας κύριων γραμμών αποτελείται από τις σωληνώσεις χάλυβα με τις πλήρης-διείσδυσης περιμέτρου συγκολλήσεις. Ο ανεφοδιασμός μετάδοσης αερίου σε IZGAS δεν καταστράφηκαν ποτέ. Αμέσως μετά από το σεισμό, το προσωπικό της BOTAS επιθεώρησε το σύστημα και δεν βρήκε καμία σημαντική ζημία. Μια ενιαία πηγή διαρροής αερίου βρέθηκε κοντά σε Izmit σε μια σύνδεση φλαντζών, η οποία επισκευάστηκε με τη σκλήρυνση των μπουλονιών. Η διαρροή φλάντζας βρέθηκε κοντά στην ακτή όπου μια σωλήνωση μετάδοσης διασχίζει τον κόλπο Izmit.

Οι σωληνώσεις μετάδοσης φυσικού αερίου δεν διέσχισαν το σημείο θραύσης των ρηγμάτων. Μικρές μετατοπίσεις της τάξης των 10mm. παρατηρήθηκαν σε αυτήν την περιοχή. Τέτοιες μικρές μετατοπίσεις δεν θα είχαν επιπτώσεις στη σωλήνωση αλλά υπονοούν ότι θα είναι αιτία για μελλοντικές μεγαλύτερες μετατοπίσεις σε αυτήν την τοποθεσία.

Συμπεράσματα

Η καλή συμπεριφορά των σωληνώσεων αερίου πολυαιθυλενίου στο Izmit
είναι ένα πρόσθετο στοιχείο ότι αυτός ο τύπος συστήματος είναι αρκετά
όλκιμος και σκληρός ώστε να ανταπεξέλθει στα σημαντικά αποτελέσματα
σεισμού, υπό τον όρο ότι έχουν ακολουθηθεί οι πρακτικές σύγχρονου
σχεδιασμού και κατασκευής.

 Το ότι ήταν εκεί μόνο μια περίπτωση διαρροής φλαντζών στο φυσικό σύστημα μετάδοσης αερίου δείχνει ότι οι σωληνώσεις χάλυβα και οι σχετικές εγκαταστάσεις σε εκείνο το σύστημα λειτούργησαν καλά.

Αυτή η απόδοση είναι σύμφωνη με την παρατηρούμενη συμπεριφορά των σωληνώσεων χάλυβα αερίου και υγρών καυσίμων με τις συγκολλήσεις περιμέτρου πλήρης-διείσδυσης, κατά τη διάρκεια των προηγούμενων σεισμών, που

76

κατασκευάζονται σύμφωνα με τις σύγχρονες διαδικασίες συγκόλλησης και επιθεώρησης (O'Rourke 1996).

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</u>

Σεισμική Τρωτότητα Δ.Κ.Ω.

5.1 Εισαγωγή

Η τρωτότητα εκφράζει τη συμπεριφορά ενός στοιχείου που υποβάλλεται σε κίνδυνο σε ένα φαινόμενο με μεταβλητή ένταση. Η δυνατότητα να ποσοτικοποιηθεί η συστατική ζημία ως λειτουργία του επιπέδου σεισμικής έντασης κινδύνου είναι θεμελιώδης σημασίας για τη σεισμική απόδοση ενός συστήματος.

Η τρωτότητα περιγράφεται από μια σχέση, που αναφέρεται σε μια γενική αιτιοκρατική, στατιστική ή πιθανολογική σχέση που αφορά την κατάσταση της συστατικής ζημίας, τη λειτουργία, τις οικονομικές απώλειες κ.λπ., ένα κατάλληλο μέτρο της έντασης του κινδύνου σεισμού. Η σχέση μεταξύ της πιθανότητας της ζημίας των στοιχείων του Δ.Κ.Ω και του επιπέδου σεισμικού κινδύνου αναφέρεται κανονικά ως σχέση τρωτότητας ή καμπύλη τρωτότητας.

Υπάρχουν διαφορετικές μέθοδοι για να κατασκευαστούν οι καμπύλες τρωτότητας ή εύθραυστου και να ποσοτικοποιηθούν οι ζημίες σύμφωνα με την ένταση κίνησης. Στη συνέχεια προσπαθούμε μια σύντομη περιγραφή των διαφορετικών προσεγγίσεων και των μεθόδων που δίνουν τα αντιπροσωπευτικά παραδείγματα των καμπύλων εύθραυστο-τρωτότητας ή τις σχέσεις για τα διάφορα συστατικά των διαφορετικών δικτύων κοινής ωφέλειας.

5.1.1 Καταστάσεις ζημιάς

Ο πιο κοινός τρόπος να καθοριστούν οι συνέπειες σεισμού στα τμήματα δικτύων είναι μια ταξινόμηση από άποψη των ακόλουθων καταστάσεων ζημίας:

Χωρίς ζημιά - Ελαφριά / Ελάχιστη- Μέτρια - Εκτεταμένη -Ολοκληρωτική.

Αυτή η ποιοτική προσέγγιση απαιτεί μια συμφωνία για την έννοια και το περιεχόμενο κάθε κατάστασης ζημίας. Γενικά ο καθορισμός των καταστάσεων ζημίας είναι μάλλον υποκειμενικός.

Οι εναλλακτικοί τρόποι τις απώλειες προτείνονται ακόμα ως:

- Λειτουργία (δυαδική απόφαση: Ναι ή όχι)

- Δυνατότητα της ζημίας (συνήθως μεταξύ 0 και 1 ή 100%)
- Επισκευές /km (ειδικά για τους σωλήνες)

- Χρησιμότητα

- Ονομαστική χρήση, μειωμένη χρήση ή μη κατάλληλο για χρήση

- Χρήση χωρίς επισκευές, μετά από τις επισκευές ή μη επισκευάσιμο

Παράγοντας ζημίας ή κόστος αντικατάστασης (συνήθως μεταξύ 0 και 1 ή 100%).

5.1.2 Δείκτης τρωτότητας

Οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν το δείκτη τρωτότητας σκοπεύουν να αξιολογήσουν την τρωτότητα των τμημάτων των δικτύων χωρίς σύνθετους υπολογισμούς. Ο δείκτης καθορίζεται, στις περισσότερες περιπτώσεις, από μια αναλυτική έκφραση που συνδυάζει τους κύριους παράγοντες και τις επιπτώσεις τους κατά τη διάρκεια που το στοιχείο υπόκειται σε σεισμικό κίνδυνο. Ένα σύστημα εκτίμησης χρησιμοποιείται για να ορίσει το αποτέλεσμα σε κάθε ιδιότητα των επιλεγμένων παραγόντων. Οι τιμές κλιμάκωσης καθορίζονται με βάση την ειδική κρίση και την εμπειρία των προηγούμενων σεισμών, ενώ η έκφραση περιλαμβάνει συνήθως τους σταθμικούς παράγοντες προκειμένου να συμπεριλάβει τη σχετική συμβολή κάθε ιδιότητας στη συνολική ευπάθεια του συστατικού.

5.1.3 Μοντέλα βασισμένα στην κρίση ειδικών

Σε πολλές περιπτώσεις, και ιδιαίτερα στις αρχές του 1980, η έλλειψη στοιχείων ζημίας απαίτησε τη χρήση της άποψης ειδικών για την αξιολόγηση της σεισμικής συμπεριφοράς των τμημάτων Δ.Κ.Ω με διαφορετική τυπολογία. Το ATC-13 (1985) παρήγαγε τις μήτρες πιθανότητας ζημίας (DPM) οι καμπύλες τρωτότητας βασίστηκαν σε ερωτηματολόγια, από τα οποία οι εμπειρογνώμονες ρωτήθηκαν για την πιθανότητα ενός τμήματος Δ.Κ.Ω που είναι σε μια ορισμένη κατάσταση ζημίας για μια δεδομένη τιμή έντασης τροποποιημένη σε -Mercalli (MMI). Αυτές οι ειδικές αξιολογήσεις είναι πάντα χρήσιμες και με την αύξηση του αριθμού στοιχείων μετά από τους πρόσφατους ισχυρούς σεισμούς, είναι λιγότερο χρησιμοποιούμενες.

5.1.4 Εμπειρικά πρότυπα

Η ανάπτυξη των εμπειρικών καμπυλών τρωτότητας είναι βασισμένη στη στατιστική ανάλυση των στοιχείων ζημίας από τους προηγούμενους σεισμούς. Οι καμπύλες τρωτότητας παρέχονται συνήθως ως διάμεσοι και διασπορές της λογαριθμικής κανονικής διανομής. Διάφορες αβεβαιότητες περιλαμβάνονται σε μια τέτοια ανάλυση σχετικά με:

- Την ασυνέπεια ή ετερογένεια των στοιχείων ζημίας.

- Η έλλειψη επίγειας κίνησης καταγράφεται όπου παρατηρούνται οι ζημίες.

- Την αξιοπιστία και την ημιτέλεια του καταλόγου του χαλασμένου δικτύου.

 Η ασυνέπεια και η υποκειμενικότητα των περιγραφών ζημίας μεταξύ των διαφορετικών μηχανικών.

-Η στατιστική μέθοδος ανάλυσης που χρησιμοποιείται στη μελέτη συσχετισμού.

Εντούτοις, τα πραγματικά αναφερόμενα και επικυρωμένα στοιχεία ζημίας, καθώς και οι προερχόμενες μέθοδοι είναι εξαιρετικά πολύτιμα, έχουν τη δυνατότητα να ελέγξουν ακόμη και την αξιοπιστία άλλων ακριβέστερων μεθόδων.



Σχήμα 5.1 Σύγκριση ανάμεσα σε διαφορετικές εμπειρικές σχέσεις τρωτότητας για ελατές σωληνώσεις λόγω της PGV (αριστερά) και της PGD (δεξιά)

Ground shaking	Ground failure
O' Rourke and Ayala (1993): K*(10 ⁻⁴ *PGV ^{2.25}), K: type (fragile, ductile)	Honegger and Eguchi (1992): K*(7.821*PGD ^{0:56})
Eidinger (1998): 1,2*10 ⁻³ *PGV ^{0.7677} asbestos-cement	K: type (fragile, ductile)
$6*10^{-5} \text{ PGV}^{2.2949}$ ductile iron	
Eidinger and Avila (1999): K ₁ *1.512*(PGV ^{1.98})	$K_2^{*23.674*}(PGD)^{0.53}$
K1: material, connection type, soil, diameter	K ₂ : material, connection type
Isoyama et al. (1998): $C_{2}*C_{4}*2$ 11*10 2*(PGV 5) ^{1.3}	
Cp & Cd: material, diameter	ALA (2001a, b):
ALA (2001a, b):	K ₂ *11.223*PGD ^{0.319}
K_1^{*} 0.241 PGV K_1^{*} material, connection type, soil, diameter	K2. material, connection type

Πίνακας 5.1 : Σχέσεις τρωτότητας για σωληνώσεις

Για σωληνώσεις νερού και φυσικού αερίου οι O'Rourke and Ayala (1993), Eidinger (1998), Eidinger και Avila (1999), Isoyama et al. (1998) και ALA (2001a,b) ανέπτυξαν σχέσεις ζημιάς υπό την άποψη της αναλογίας επισκευής/km, η υπηρεσία υπολόγισε και κατέγραψε τις τιμές της μέγιστης επίγειας ταχύτητας (PGV) για δεδομένα από ΗΠΑ, Μεξικό και *Ιαπωνία* (σχήμα 5.1). Επιπλέον, οι Honegger και Eguchi (1992), Eidinger και Avila (1999) και ALA (2001a,b) παρήγαγαν σχέσεις που συσχετίζουν τη μόνιμη επίγεια μετατόπιση (PGD) με τις αστοχίες των σωληνώσεων (σχήμα5.1).

Η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών εμπειρικών σχέσεων δεν είναι πάντα καλές. Υπάρχουν πολλοί λόγοι, όπως οι υποθέσεις που γίνονται από τους διαφορετικούς ερευνητές, τον τύπο αναλύσεων συσχετισμού, τη μέθοδο του PGV και του PGD σε κάθε περιοχή, την ακρίβεια των στοιχείων ζημίας ή την αξιοπιστία του καταλόγου σωληνώσεων. Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προέρχεται από αυτήν την παρατήρηση είναι ότι οι σχέσεις τρωτότητας πρέπει να καθοριστούν συγκεκριμένα για κάθε χώρα και πόλη, ιδιαίτερα όσον αφορά την πρακτική σχέδιο-κατασκευής, το σεισμοτεκτονικό υπόβαθρο και τις τοπικές εδαφολογικές συνθήκες. Οι διάφορες παράμετροι τροποποιούν αρκετά την επίγεια ταχύτητα για τους μεγάλους σεισμούς και συνεπώς τις εκφρασμένες σχέσεις τρωτότητας από άποψη εδαφικών ταχυτήτων. Οι πρόσφατες επικυρώσεις με το σεισμό της Λευκάδας (2003) (Alexoudi, 2004) απέδειξαν ότι οι σχέσεις του Ο'Rourke και Ayala (1993) και (1992)του Honegger και Eguchi συσχετίζονται καλύτερα στις παρατηρούμενες ζημίες και για το επίγειο τίναγμα, όσο και για τις μόνιμες παραμορφώσεις.



Σχήμα 5.2 Αξιολόγηση της τρωτότητας στο σύστημα φυσικού αερίου στη Θεσσαλονίκη

Το σχήμα 5.2 και οι πίνακες 5.2 και 5.3 επεξηγούν τη διανομή των αναμενόμενων ζημιών στο σύστημα αερίου στο κεντρικό μέρος της πόλης Θεσσαλονίκης. Η εφαρμογή είναι βασισμένη στη σχέση τρωτότητας που παρέχεται από τον O'Rourke και Ayala (1993), ενώ το σεισμικό σενάριο κινδύνου εισαγωγής βασίζεται στη μελέτη Μικροζωνικής της πόλης (exceedance 10% σε 50 έτη) από άποψη την μέγιστη επίγεια ταχύτητα.

Πίνακας 5.2 Πίνακας 5.3 Ποσοστό ζημιάς για σύστημα αερίου Κίνδυνος τρωτότητας αγωγών Θεσσαλονίκης

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΖΗΝ	ΊΙΑΣ	ΤΑΞΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ	ΤΑΣΗ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣR.R				
ΧΩΡΙΣ ΖΗΜΙΑ 27%		ΥΨΗΛΗ	1.4 <r.r< td=""></r.r<>				
ΕΛΑΦΡΙΑ 70%		ΜΕΤΡΙΑ-ΥΨΗΛΗ	0.7 <rr≤1.4< td=""></rr≤1.4<>				
XAMHAH-METPIA 3%		METPIA	0.1 <rr≤0.7< td=""></rr≤0.7<>				
ΜΕΣΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΕΠΙ	ΣΚΕΥΗΣ	ΧΑΜΗΛΗ-ΜΕΤΡΙΑ	0.01 <rr≤0.1< td=""></rr≤0.1<>				
ΔΙΑΡΡΟΕΣ/Κm 0.04		ХАМНЛН	0.001 <rr≤0.01< td=""></rr≤0.01<>				
ΣΠΑΣΙΜΑΤΑ/Κm 0.01		ΧΩΡΙΣ ΖΗΜΙΑ	0.0≤RR≤0.001				

5.1.5 Αναλυτικά πρότυπα

Οι καμπύλες τρωτότητας μπορούν επίσης να κατασκευαστούν αναλυτικά. Τα πρότυπα θα μπορούσαν να είναι απλά ή περισσότερο περίπλοκα σύμφωνα με τον τύπο ανάλυσης, των χαρακτηριστικών και της μεθόδου προσομοίωσης του τμήματος.

5.2 Συστηματική προσέγγιση της αξιολόγησης της τρωτότητας δικτύων κοινής ωφέλειας

Συγκεκριμένες προσεγγίσεις απαιτούνται για να αξιολογηθεί η σεισμική τρωτότητα των Δ.Κ.Ω. Μερικά από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των δικτύων είναι ότι αποτελούνται από πολλά συστατικά —γραμμικούς σωλήνες, υποσταθμούς, κέντρα ελέγχου. Επιπρόσθετα στηρίζονται στις βασικές ιεραρχικές λειτουργίες και είναι επομένως αδύνατο να απομονωθούν

τα ενιαία μέρη και να αναλυθούν χωριστά το ένα από το άλλο. Εξαρτώνται το ένα από το άλλο με τέτοιο τρόπο που η αλληλεξάρτηση τους έχει αναγνωριστεί ως ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά τους.

Πολλές έρευνες έχουν διενεργηθεί, όπως για παράδειγμα από την κυβέρνηση Regione Lombardia στην Ιταλία για την ανάπτυξη ενός μοντέλου που αξιολογεί τη σεισμική τρωτότητα των Δ.Κ.Ω, και εξετάζει τους φυσικούς, λειτουργικούς και οργανωτικούς παράγοντες σαν να είναι σημαντικά εξαρτημένα το ένα με τα υπόλοιπα. Το μοντέλο της Ιταλικής πόλης αποτελεί ένα εργαλείο αξιολόγησης που αποτελείται από ένα σύνολο παραμέτρων μετρώντας την απόδοση των δικτύων που εκτίθενται στους σεισμούς σε μια δεδομένη περιοχή.

Η έννοια της συστηματικής τρωτότητας είναι το πλαίσιο της προτεινόμενης μεθόδου αξιολόγησης: αυτό που μπορεί να μετρηθεί είναι πόσο επιρρεπές είναι ένα σύστημα που βλάπτεται ή αστοχεί όχι μόνο ως συνεπεία της όποιας φυσικής ζημίας εμφανίζεται σε ένα από τα συστατικά του, αλλά και ως έμμεση επίδραση κάποιας φυσικής, λειτουργικής, ή οργανωτικής αστοχίας που οφείλεται σε άλλα συστήματα.

Εν προκειμένω, δεδομένου ότι τα Δ.Κ.Ω είναι ιδιαίτερα ιεραρχικά, η συνέπεια της αποτυχίας στα κρίσιμα συστατικά ή τα μέρη του συστήματος πρέπει να εξετάζεται με μεγάλη προσοχή στο πλαίσιο των εργασιών.

Το μοντέλο υπολογίζει επίσης την αλληλεξάρτηση μεταξύ των σανίδων σωτηρίας, η οποία μπορεί να είναι είτε φυσική (γραμμές που τοποθετούνται στον ίδιο διάδρομο που διέρχεται κάτω από τους δρόμους) είτε λειτουργική (παραδείγματος χάριν η ηλεκτρική ενέργεια είναι ζωτικής σημασίας για πολλές άλλες υπηρεσίες: δίκτυα επικοινωνίας, συσκευές ελέγχου, αντλιοστάσια ύδατος, κ.λπ.).

Τα αστικά και περιφερειακά συστήματα εξαρτώνται από τα Δ.Κ.Ω με διαφορετικούς βαθμούς, σύμφωνα με τις συγκεκριμένες ανάγκες τους ως χρήστες υπηρεσιών και επίσης ανάλογα με την εξεταζόμενη φάση καταστροφής. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι ευδιάκριτες μήτρες αξιολογήσεων έχουν αναπτυχθεί εξετάζοντας χωριστά την έκτακτη ανάγκη και τις περιόδους αναδημιουργίας. Σε κάθε μήτρα, τα κατώτατα όρια της καλής και κακής εκτέλεσης καθώς επίσης και τα βάρη, που εκφράζουν τη σημασία παραμέτρων, έχουν τεθεί σύμφωνα με τις διαφορετικές προτεραιότητες που προσδιορίζονται στις δύο φάσεις.

Το γενικό πλαίσιο αποτίμησης της ευπάθεια σανίδων σωτηρίας στην έκτακτη ανάγκη έχει αναφερθεί στον πίνακα 1: οι λειτουργικές, οργανωτικές και φυσικές τρωτότητες ομαδοποιούνται, αντίστοιχα, στην πρώτη, τη δεύτερη, και τρίτη στήλη.

Οι λειτουργικοί παράγοντες εξηγούν τις δυσλειτουργίες των Δ.Κ.Ω λόγω ποικίλων λόγων, πολλοί από τους οποίους δεν είναι φυσικοί. Κάθε σανίδα σωτηρίας είναι ένα ιεραρχικό σύστημα: εάν οι κρίσιμοι κόμβοι αποτύχουν, η υπηρεσία που παρέχουν στον κανονικό χρόνο θα διακόψει αναπόφευκτα την εξυπηρέτηση σε πολλούς πελάτες ακόμα και σε μεγάλη απόσταση. Εκείνοι οι κόμβοι είναι, παραδείγματος χάριν, μετασχηματισμός των σταθμών με υψηλές στο μέσο ή χαμηλές πιέσεις αερίου, υδραγωγεία, κ.λπ...

Στην περίπτωση της φυσικής τρωτότητας, τα Δ.Κ.Ω είναι ιδιαίτερα αλληλοεξαρτώμενα συστήματα: τα κανάλια και οι γραμμές μπορούν να βλαφθούν από τα καταρρέοντα σπίτια ή τις γέφυρες ή από τις καθιζήσεις εδάφους και των οχθών των ποταμών, η μετακίνηση των οποίων μπορεί να προκληθεί από τους σεισμούς.

Οι σειρές στον πίνακα 5.4 ομαδοποιούνται σε τρεις κύριους φραγμούς: στον πρώτο, εξετάζονται οι παράγοντες σχετικοί με την απόδοση Δ.Κ.Ω, στη δεύτερη εξετάζεται η τοποθέτηση των καταστάσεων.

Παραδείγματος χάριν οι υπόνομοι μπορούν να μολύνουν το ύδωρ όταν σπάζουν οι αγωγοί και οι διαρροές ή η διήθηση γίνονται πιθανότερες. Η τελευταία ομάδα σειρών δείχνει πώς τα τρωτά αστικά και περιφερειακά

85

συστήματα (εκτός από τα Δ.Κ.Ω) είναι στη διακοπή των υπηρεσιών όπως την ύδρευση, το αέριο, και την επικοινωνία.

Η μορφή για να αξιολογηθεί η τρωτότητα των Δ.Κ.Ω κατά τη διάρκεια της αναδημιουργίας περιλαμβάνει εκείνα τα στοιχεία που είναι πιο σχετικά με την αποκατάσταση. Η φυσική τρωτότητα δεν εξετάζεται άλλο, καθώς οι ρωγμές υποτίθεται πως έχουν εμφανιστεί ήδη μόλις τελειώνει η έκτακτη ανάγκη, ενώ οι λειτουργικές και οργανωτικές πτυχές παραμένουν ακόμα σημαντικές. Αυτή τη φορά, εντούτοις, η εστίαση της αξιολόγησης αφορά την έμμεση - και την άμεση--εξάρτηση που μπορούν να παρακωλύσουν тη γρήγορη αποκατάσταση. Στους οργανωτικούς όρους παραδείγματος χάριν, ο συντονισμός με τις δημόσιες υπηρεσίες και με τα υπεύθυνα ιδρύματα για την οικονομική ενίσχυση και την υποστήριξη για την αναδημιουργία γίνεται τόσο κρίσιμος όσο ο συντονισμός μεταξύ των σανίδων σωτηρίας διαχειριζόμενες τις επιχειρήσεις.

Η διαδικασία αξιολόγησης της τρωτότητας απαιτεί διάφορα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν προκειμένου να επιτευχθεί το τελικό αποτέλεσμα, που αποτελείται από ένα ομαλοποιημένο αποτέλεσμα που ορίζεται σε κάθε Δ.Κ.Ω και από μια αξιολόγηση της τρωτότητας των αστικών συστημάτων στη διάσπαση των δικτύων. Και οι δύο αξιολογήσεις πρέπει να πραγματοποιηθούν για την έκτακτη ανάγκη και τις φάσεις αναδημιουργίας.

Κάθε παράμετρος κατατάσσεται στις κατηγορίες τρωτότητας σύμφωνα με αυτό που έχει ερευνηθεί χρησιμοποιώντας την αναλυτική μορφή (Χ ι να είναι ίσο με 0 στις μη κρίσιμες καταστάσεις και ίσο με 1 για την κρισιμότερη κατηγορία). Εκτός από το βάρος W ι που μεταφράζει πόσο σημαντική είναι κάθε παράμετρος στην τελική αξιολόγηση (3 ορίζονται στις πολύ σημαντικές παραμέτρους), ένας άλλος συντελεστής έχει παρεμβληθεί στην εξίσωση (5,1) για να υπολογίσει το αποτέλεσμα τρωτότητας κάθε μέρους των σανίδων σωτηρίας. Αυτός ο συντελεστής αποτελεί την ιεραρχική θέση του μέρους του δικτύου που αξιολογείται:

$$v = \sum_{i=1}^{n} X_{i} W_{i} C_{i}$$
 (5.1)

Η εξίσωση (5.2) παρέχει το αποτέλεσμα τρωτότητας:

$$V_{t} = \sum_{t=1}^{n} X_{t_{i}} W_{t_{i}} C_{t_{t}}$$
 (5.2)

όπου ο συντελεστής Ct αντιπροσωπεύει τον αστικό και περιφερειακό βαθμό συστημάτων εξάρτησης στα συστήματα δικτύων.

Για τη φάση αναδημιουργίας η διαδικασία αξιολόγησης ακολουθεί την ίδια διαδικασία.

Η εφαρμογή αυτής της διαδικασίας παρέχει έναν δείκτη τρωτότητας σε κάθε Δ.Κ.Ω. . Προκειμένου να συγκριθούν τα δίκτυα, τα αποτελέσματα πρέπει να ομαλοποιηθούν. Η ομαλοποιημένη κλίμακα έχει υποδιαιρεθεί έπειτα στα διαστήματα, που κυμαίνονται από τα χαμηλά διαστήματα τρωτότητας, 0–0.2, ως το μέσο 0.2–0.4, 0.4–0.6 μέσο – υψηλό, 0.6–0.8 υψηλό, στα πολύ υψηλά επίπεδα 0.8–1.0. Σανίδες σωτηρίας με ένα τελικό αποτέλεσμα που βρίσκεται στο υψηλότερο μέρος της κλίμακας, είναι σε έναν μάλλον κρίσιμο σημείο, ενώ τα Δ.Κ.Ω που λαμβάνουν ένα χαμηλό αποτέλεσμα φαίνονται ικανές να ανταπεξέλθουν σε σεισμό.

Έπειτα είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν οι διασχισμένες συγκρίσεις μεταξύ των συστημάτων σανίδων σωτηρίας και μεταξύ των υποπεριοχών μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Συμπερασματικά, με αυτή την αξιολόγηση είναι δυνατό να συγκριθούν οι σανίδες σωτηρίας όσον αφορά τη σχετική τρωτότητα τους, να αναλυθεί ο βαθμός αυτονομίας/ η εξάρτηση με άλλα συστήματα στα Δ.Κ.Ω ώστε να συγκρίνει τις διαφορετικές περιοχές μέσα σε μια μεγαλύτερη περιοχή που προσδιορίζουν τις κρισιμότερες καταστάσεις.

Το μοντέλο έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο για να παρέχει το μεγαλύτερο αριθμό πιθανό αποτελεσμάτων, προκειμένου να ανοιχτεί ένα ευρύ φάσμα των

εναλλακτικών επιλογών για την προληπτική δράση, είτε για να μετριάσει τον αντίκτυπο καταστροφής στο στάδιο έκτακτης ανάγκης είτε για να επαναφέρει το σύστημα στην κανονική του κατάσταση όσο το δυνατόν γρηγορότερα στη φάση αποκατάστασης.

Ο πίνακας 5.4 ακολουθεί στην επόμενη σελίδα:

иу нэн нени сэ тоог	REGIONAL vulnerability to infractructures loss		STTING		PERFORMANCE		
• Other systems	Urban and regional systems for emergency operations	✓ Vulnerability due to the physical contact among lifelines	Accessibility	Within an individual line	→ Inter-systemic lifelines dependence	Induced by other systems	
FUN R 2	FUN R 1	FUN S 2	FUN S 1	FUN P 3	FUN P 2	FUN P 1	
Degree of functional dependence of other urban systems on lifelines	Degree of functional dependence of emergency systems on lifelines	Function depending on physical contact with other physical vulnerable lifelines	Direct access to broken points along lines	Specific lifeline features	Dependence on other lifelines	Dependence on other systems	FUNCTIONAL
ORG R 2 Coordination among lifelines suppliers and persons in charge for other systems	ORG R 1 ⇔Coordination among hospitals, civil protection, police and other agencies ⇔Communication skills to the public	ORG S 2 Coordination among lifelines service suppliers	ORG S 1 ⇒ Coordination between civil protection and companies in charge of roads management ⇒ Knowledge of alternative accesses ⇒ Available personnel, materials and means to be used for urgent operations	ORG P 3 ⇔ Organization within each company ⇒ Number of companies for each lifeline ⇒ Manual controls in case of automatic controls failure	ORG P 2 Cooperation among lifelines companies	ORG P 1 Inter agencies cooperation	ORGANIZATIONAL
PHY R 2	PHY R I	PHY S 2	PHY S 1	РНҮР 3	PHY P 2	PHY P 1	
Physical vulnerability of systems other than lifelines	Physical vulnerability of systems other than lifelines necessary during emergencies	Physical vulnerability of single component in contact points	Physical vulnerability of roads	Vulnerability of each lifeline component	Physical vulnerability of lifelines essential for the function of other lifelines	Physical vulnerability of systems which lifelines are physically connected	PHYSICAL

5. Menoni et al. / Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22 (2002) 1199–1208

5.3 Σχέσεις τρωτότητας για τους θαμμένους σωλήνες υποκείμενους στην επίγεια κίνηση

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές σχέσεις για την τρωτότητα σωληνώσεων σε σχέση με τη μόνιμη επίγεια παραμόρφωση και τα αποτελέσματα της επίγειας δόνησης. Μια συζήτηση των σχέσεων τρωτότητας για τη μόνιμη επίγεια παραμόρφωση μπορεί να βρεθεί μέσα από τους O'Rourke & Liu (1999) και στις πιο πρόσφατες εξελίξεις που δίνονται από την ΑΛΑ (2001).

Συνολικά δεκαεπτά μελέτες έχουν βρεθεί σχετικά με τη ζημία σωληνώσεων σε σχέση με τα επίγεια αποτελέσματα δόνησης, από τα στοιχεία που επιλέγονται από τους προηγούμενους σεισμούς. Η παράμετρος της ισχυρής κίνησης που χρησιμοποιείται για να καθορίσει το επίπεδο αποτελεσμάτων επίγειας σεισμικής δόνησης για κάθε μελέτη συνοψίζεται στον πίνακα .5. Ο πίνακας δείχνει επίσης τους σεισμούς από τους οποίους τα στοιχεία έχουν ληφθεί για κάθε μελέτη, και οπουδήποτε είναι γνωστός ο αριθμός σημείων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν. Οι καμπύλες τρωτότητας, συμπεριλαμβανομένων των συνόλων δεδομένων από τα οποία προέρχονται συμπεριλαμβάνονται οπουδήποτε είναι βαρτημένη μεταβλητή δίνεται ποικιλοτρόπως ως «ποσοστό επισκευής», «ποσοστό ζημίας» ή «αναλογία ζημίας». Άλλες μελέτες χρησιμοποιούν τον όρο «ποσοστό αποτυχίας». Αυτοί οι όροι χρησιμοποιούνται εναλλακτικά στη βιβλιογραφία.

Strong-motion parameter	Katayama <i>et al.</i> (1975)	Isoyama & Katayama (1982)	Eguchi (1983)	Barenberg (1988)	Ballantyne <i>et al.</i> (1990)	Eguchi (1991)	ASCE TCLEE (1991)	O'Rourke <i>et al.</i> (1991)	Hamada (1991)	Tiedemann (1992)	O'Rourke & Ayala (1993) [HAZUS]	Eidinger (1995, 1998)	Kitaura & Miyajima (1996)	Hwang & Lin (1997)	0'Rourke <i>et al.</i> (1998)	Isoyama <i>et al.</i> (2000)	ALA (2001)
la																	
I _{MM}																	
PGA																	
PGV																	
PGD																	
SA																	
SI																	

Πίνακας5.5 Παράμετροι ισχυρών κινήσεων για κάθε μελέτη

(πηγή : O'Rourke, 1998)

5.3.1. Katayama et al. (1975)

Μια από τις πρώτες προσπάθειες να συσχετιστεί η παρατηρούμενη σεισμική ζημία στις σωληνώσεις με οποιαδήποτε παράμετρο ισχυρής κίνησης ήταν όταν ο Katayama και λοιποί. (1975) εξέτασαν το ποσοστό ζημίας από άποψη PGA. Η μελέτη είναι βασισμένη στα ποσοστά αποτυχίας σωληνώσεων που λαμβάνονται για έξι σεισμούς. Το σχήμα 3 παρουσιάζει τα στοιχεία Katayama *et al.* (1975) όπως παρουσιάζεται από το Bresko (1980). Αυτός ο αριθμός έχει αναπαραχθεί σε διάφορες δημοσιεύσεις (e.g. O'Rourke & Liu, 1999) αν και η αρχική έκθεση (Bresko, 1980) δεν ήταν διαθέσιμη. Οι αριθμοί σημείων στοιχείων που χρησιμοποιούνται αναφέρονται στο αρχικό σύνολο δεδομένων Katayama και λοιποί. (1975). Οι αριθμοί σημείων στοιχείων που παρουσιάζονται από το Bresko (1980) διαφέρουν. Οι μικρές διαφορές οφείλονται στους διαφορετικούς τρόπους των στατιστικών ζημίας για τις σωληνώσεις.



Σχήμα 5.3 Δεδομένα τρωτότητας σωληνώσεων του Katayama et al. (1975) όπως παρουσιάζονται από τον O'Rourke & Liu (1999). Αυτό το σχήμα παρουσιάζει τα δεδομένα με πιο πολύπλοκο τρόπο απ'ότι το σχήμα στην πρωτότυπη μελέτη και περιλαμβάνει τάσεις που προτείνονται από το Bresko (1980). (πηγή : O'Rourke, 1998)

Κεφάλαιο 6

Οι τιμές PGA στην εγγύτητα κάθε χαλασμένου συστήματος σωληνώσεων υπολογίστηκε από τα λίγα αρχεία ισχυρών κινήσεων που ήταν διαθέσιμα για αυτούς τους σεισμούς. Οκτώ χωριστά σημεία στοιχείων παρουσιάζονται για τις διαφορετικές τοποθεσίες που επηρεάζονται από το σεισμό Tokachi-Oki του 1968. Οι τιμές PGA εμφανίζονται να υπολογίζονται από τις τιμές της έντασης JMA που δίνονται για κάθε τοποθεσία αν και η μέθοδος μετατροπής που χρησιμοποιήθηκε δεν είναι γνωστή. Δεκαεννέα χωριστά σημεία στοιχείων λήφθηκαν για το σεισμό SAN Fernando το 1971 με τη διαίρεση ενός χάρτη των αποτυχημένων σωληνώσεων στο βόρειο Λος Άντζελες σε 19 λωρίδες, κάθε μια με πλάτος 0.48 χλμ.

Μια τιμή PGA για κάθε λουρίδα βρέθηκε με τον υπολογισμό PGA στις βόρειες και νότιες άκρες της χαρτογραφημένης περιοχής και την παρεμβολή των τιμών χρησιμοποιώντας μια σχέση μείωσης των ισχυρών κινήσεων. Οι τιμές PGA που δίνονται στο σχήμα 5.3 για το σεισμό SAN Fernando καλύπτουν τη τάξη 0.18 - 0.34 g ενώ εκείνοι Katayama και λοιποί. (1975) για την ίδια κάλυψη σεισμού είναι της τάξης 0.27 - 0.50 g. Αυτό αντιπροσωπεύει μια απόκλιση στις μελέτες μεταξύ του Bresko (1980) και Katayama και λοιποί. (1975). Η διασπορά στο σύνολο δεδομένων που παρουσιάζεται από Bresko (1980) είναι ιδιαίτερη, αν και θα ήταν μεγαλύτερη εάν οι αρχικές τιμές PGA Katayama και λοιποί. (1975) χρησιμοποιούνταν.

Τέτοια μεγάλη διασπορά είναι χαρακτηριστική των σχέσεων τρωτότητας σωληνώσεων, αν και σε αυτήν την περίπτωση επηρεάζεται αναμφισβήτητα από τα μεγάλα ποσοστά ζημίας σε ορισμένες περιπτώσεις λόγω της μόνιμης επίγειας παραμόρφωσης (π.χ. ρευστοποίηση-προκληθείσα ζημία κατά τη διάρκεια του σεισμού του Νιγκάτα και ζημία λόγω ρηγμάτωσης στην περίπτωση του σεισμού της Μανάγουα). Τα περισσότερα από τα στοιχεία που παρουσιάζονται στο σχήμα 5.3 είναι για τους σωλήνες CI αν και το στοιχείο από το σεισμό tokachi-Oki του 1968 περιλαμβάνει και τη ζημία στους σωλήνες AC. Η σχέση τρωτότητας δεν κάνει καμία διάκριση μεταξύ των διαφορετικών διαμέτρων σωλήνων ή των τύπων ενώσεων, αν και τα δυο είναι γνωστό πως επηρεάζουν τα ποσοστά ζημίας. Εντούτοις, ο Katayama και λοιποί. (1975)

σχολιάζει την τάση αύξηση της ζημίας καθώς αυξάνεται η διάμετρος των σωλήνων. Οι σχέσεις τρωτότητας που υποδεικνύονται στο σχήμα 5.3 είναι εκείνες που προτείνονται από το Bresko (1980) και που εκφράζονται στην εξίσωση (3.28). Το b είναι μια παράμετρος που εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων συμπεριλαμβανομένων των εδαφολογικών όρων και της ηλικίας των σωλήνων. Έχει μια τιμή 4.75, 3.65 ή 2.20 για τις «κακές», «μέσες» ή τις «καλές» συνθήκες αντίστοιχα (Ayala & O'Rourke, 1989).

5.3. 2 Eguchi (1991)

Η εργασία του Eguchi (1991) ήταν μια τροποποίηση ενός προηγούμενου στοιχείου μελέτης (Eguchi, 1983) υπό το φως των δεδομένων από τους πιο πρόσφατους (απροσδιόριστους) σεισμούς. Και τα δύο σύνολα σχέσεων τρωτότητας δίνουν το ποσοστό επισκευής σωληνώσεων ως λειτουργία των ΙΜΜ. Στη πιο πρόσφατη μελέτη ήταν η πρώτη φορά που μια σχέση τρωτότητας ήταν παραγμένη χωριστά ρητά έξω από τη ζημία διάδοσης κυμάτων και από τη μόνιμη ζημία επίγειας παραμόρφωσης (O'Rourke & Liu, 1999).

Οι σχέσεις που παρήχθησαν από τον Equchi (1983) βασίστηκαν στα λεπτομερή στοιχεία ζημίας σωλήνων από τέσσερις σεισμούς συν τα λιγότερο πλήρη στοιχεία από πρόσθετους (απροσδιόριστους) 21 σεισμούς (Hwang & Lin, 1997). Οι τροποποιημένες σχέσεις παρουσιάζονται στο σχήμα .4. Το ποσό διασποράς που συνδέεται με αυτές τις σχέσεις δεν είναι δυνατό να καθοριστεί δεδομένου ότι тα μεμονωμένα σημεία στοιχείων δεν παρουσιάζονται . Η διάκριση γίνεται μεταξύ του διαφορετικού σωλήνα και των τύπων ενώσεων με τα μέγιστα ποσοστά ζημίας που παρατηρούνται με τους σωλήνες χάλυβα με τις αέριο-ενωμένες στενά ενώσεις. Οι ΑC και οι τσιμεντένιοι σωλήνες βρέθηκαν να είναι πιο τρωτοί από τους σωλήνες PVC, οι οποίοι ήταν στη συνέχεια πιο τρωτοί από τους σωλήνες CI και τους ενωμένους στενά σωλήνες χάλυβα με τις καλαφατισμένες ενώσεις. Οι DI σωλήνες δοκίμασαν κατά μέσον όρο περίπου δέκα φορές λιγότερες επισκευές ανά μήκος μονάδων από τους χειρότερους σωλήνες. Το ποσοστό επισκευής σωλήνων χάλυβα βαθμού Χ με τις τόξο-ενωμένες στενά ενώσεις ήταν περίπου δέκα φορές μικρότερο από αυτό των σωλήνων DI. Οι σχέσεις που παρουσιάζονται στο σχήμα 5.4 είναι διγραμμικές. Τα ποσοστά ζημίας αυξάνονται από έναν παράγοντα δέκα για την αύξηση μονάδων σε IMM για τα IMM < 8, και υπάρχει διπλασιασμός για την αύξηση μονάδων σε IMM επάνω από τα 8IMM.



Σχήμα 5.4 Διγραμμικές σχέσεις τρωτότητας σωληνώσεων από τον Eguchi (1991). (πηγή : O'Rourke, 1998)

5.3.3 O'Rourke & Ayala (1993)

Ο Barenberg (1988) σχεδίασε το ποσοστό ζημίας για το σωλήνα CI ενάντια σε PGV χρησιμοποιώντας τα στοιχεία από τρεις αμερικανικούς σεισμούς. Οι O'Rourke & Ayala (1993) στη συνέχεια προσθέσανε στοιχεία από το 1983 Coalinga και δύο μεξικάνικους σεισμούς (1985 Michoacan and 1989 Tlahuac). Οι σχέσεις τρωτότητας που καθορίζονται και από τις δύο έρευνες παρουσιάζονται στο σχήμα 5.5.

Η σχέση του Barenberg (του 1988) προήλθε από τέσσερα σημεία στοιχείων (Α έως Δ) ενώ η σχέση O'Rourke & Ayala (1993) προήλθε από ένδεκα σημεία στοιχείων (Α έως Κ).

Η ζημία σωληνώσεων στην Πόλη του Μεξικού κατανεμήθηκε σύμφωνα με τρεις ευδιάκριτες γεωλογικές περιοχές: η ζώνη λιμνών, που αποτελείται πρώτιστα από τους μαλακούς λιμναίους αργίλους η ζώνη λόφων, που αποτελείται από τους ηφαιστειακούς βράχους που περιβάλλουν το στρώμα λιμνών και μια ζώνη μετάβασης μεταξύ των δύο. Οι τιμές PGV λήφθηκαν με τον υπολογισμό μέσου όρου των τιμών κορυφής από όλους τους σταθμούς ισχυρών κινήσεων μέσα σε κάθε ζώνη. Τέσσερα αρχεία ήταν διαθέσιμα από τη ζώνη λόφων, μια από τη ζώνη μετάβασης και πέντε από τη ζώνη λιμνών.

Η σχέση τρωτότητας Barenberg (1988) προτείνει ότι ένας διπλασιασμός της PGV θα οδηγήσει σε μια αύξηση στο ποσοστό ζημίας σωληνώσεων από έναν παράγοντα περίπου 4.5. Η ίδια αύξηση σε PGV για την τροποποιημένη σχέση οδηγεί σε μια αύξηση 6 πτυχών στο ποσοστό ζημίας σωληνώσεων. Τα δύο απομακρυσμένα σημεία, Ε και G είναι κατά ένα μεγάλο μέρος αρμόδια για αυτήν την αλλαγή. Οι O'Rourke & Ayala (1993) εξήγησαν με κατ' ασυνήθιστο τρόπο το υψηλό ποσοστό ζημίας για το σημείο Ε, που αντιπροσωπεύει τη ζημία σωλήνων CI κατά τη διάρκεια του σεισμού Coalinga του 1983, από τα αποτελέσματα διάβρωσης. Το σημείο G αντιπροσωπεύει τη ζημία στους σωλήνες AC, τους CI και συγκεκριμένους σωλήνες στη ζώνη μετάβασης κατά τη διάρκεια του σεισμού Michoacan του 1985. Προτείνεται ότι το σχετικά υψηλό επίπεδο ζημίας οφείλεται σε αυτήν την περίπτωση κατά ένα μεγάλο μέρος στις απότομες αλλαγές στις συνθήκες κάτω από την επιφάνεια που χαρακτηρίζουν αυτήν την περιοχή (O'Rourke & Ayala, 1993). Η διασπορά στοιχείων στο σχήμα 5.5 είναι λιγότερο σημαντική από αυτό που παρατηρείται στο σχήμα 5.3. Η βάση δεδομένων του O'Rourke & Ayala είναι συνεπέστερη από αυτή του Katayama et al. (1975). Οι αποτυχίες σωληνώσεων δεν επηρεάζονται από τα μόνιμα αποτελέσματα επίγειας παραμόρφωσης και οι τιμές PGV είναι πιο αξιόπιστες στη μεγαλύτερη διαθεσιμότητα των αρχείων ισχυρών κινήσεων για αυτούς τους πιο πρόσφατους σεισμούς. Ο βελτιωμένος συσχετισμός που παρατηρείται στο σχήμα 5.5 επίσης οφείλεται σχεδόν βέβαια στη στενή σχέση μεταξύ της PGV και της επίγειας πίεσης. Οι Katayama et al. (1975) και Barenberg (1988) θεωρούν την PGA ανεπαρκή για τον καθορισμό της έντασης της επίγειας δόνησης.

Η σχέση τρωτότητας του O'Rourke & Ayala (1993) έχει ενσωματωθεί στην εθνική μεθοδολογία εκτίμησης απώλειας που χρησιμοποιείται στις ΗΠΑ, HAZUS (FEMA, 1999). Η σχέση, που δίνεται στην εξίσωση (3.32) (πίνακας 3.10) χρησιμοποιείται για τους εύθραυστους σωλήνες μόνο δεδομένου ότι είναι βασισμένη στα στοιχεία από τους σωλήνες AC, σκυροδέματος και CI. Για τους πιο όλκιμους τύπους σωλήνων (steel, DI or PVC), το HAZUS (FEMA, 1999) προτείνει αυτή η σχέση να πολλαπλασιάζεται με 0.3. Οι σωλήνες χάλυβα με τις τόξο-ενωμένες στενά ενώσεις είναι ταξινομημένοι όπως οι όλκιμοι, ενώ οι σωλήνες χάλυβα με τις αέριο-ενωμένες στενά ενώσεις είναι ταξινομημένοι όπως οι σωλήνες, οι σωλήνες χάλυβα προ του 1935 είναι ταξινομημένοι ως εύθραυστοι σωλήνες. Η μεθοδολογία HAZUS δεν θεωρεί τη διάμετρο σωλήνων ως παράγοντα.



Σχήμα 5.5 Σχέσεις τρωτότητας του Barenberg (1988) (πηγή : O'Rourke, 1998)

5.3.4 Hwang & Lin (1997)

Η σχέση τρωτότητας του Hwang & Lin (1997) δίνει το ποσοστό αστοχίας σωληνώσεων ως συνάρτηση της PGA. Είναι βασισμένη σε μια αναθεώρηση

των στοιχείων που προέρχονται από έξι προηγούμενες μελέτες (Katayama *et al.*, 1975; Eguchi, 1991; ASCE/TCLEE, 1991; O'Rourke *et al.*, 1991; Hamada, 1991; Kitaura & Miyajima, 1996). Η καμπύλη τρωτότητας του Hwang & Lin (1997) παρουσιάζεται στο σχήμα 5.6 μαζί με τις σχέσεις στις οποίες είναι βασισμένη.



Σχήμα5.6 Σύγκριση μεταξύ καμπύλης τρωτότητας του Hwang & Lin (1997) με καμπύλες τρωτότητας για PGA (1993) (πηγή : O'Rourke, 1998)

Οι σχέσεις του Eguchi (1991) and O'Rourke et al. (1991) καθορίστηκαν αρχικά για τα IMM και έτσι μετατράπηκαν σε PGA χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που προτείνονται τους από Trifunac & Brady (1975). Η μελέτη από ASCE/TCLEE (1991)ήταν ξανά επίλυση συνόλου μια TOU δεδομένωνKatayama et al. (1975) για να περιλάβει τα στοιχεία από το σεισμό Coalinga του 1983. Η σχέση του Hamada (1991) είναι βασισμένη στη ζημία σωληνώσεων που παρατηρείται κατά τη διάρκεια των σεισμών του SAN Fernando το 1971 και του Miyagiken-Oki του 1978. Τα δεδομένα από Kitaura & Miyajima (1996) επίσης περιλαμβάνονται στο σχήμα 5.6. Οι ερευνητές σχεδιάζουν τα ποσοστά αποτυχίας σωληνώσεων που παρατηρούνται στις διάφορες θέσεις μαζί με τη τάξη των τιμών PGA με εμπειρικό τρόπο. Οι Kitaura & Miyajima (1996) στη μελέτη περιλαμβάνουν τα στοιχεία από πέντε σεισμούς, συμπεριλαμβανομένου του σεισμού Hyogoken-Nanbu το 1995.

Το σχήμα 5.6 δίνει έμφαση στο πόσο μεγάλες είναι οι διαφορές μεταξύ των διαφορετικών σχέσεων τρωτότητας. Η βασική καμπύλη δημιουργήθηκε από Hwang & Liu (1997) αφορά τις σωλήνες CI με διάμετρο περίπου 300 mm. Ο παράγοντας διαμέτρων σωλήνων, RD, το οποίο καθορίζεται βασισμένος στα στοιχεία από το 1995 Hyogoken-nanbu σεισμό (Kitaura & Miyajima, 1996; Shirozu *et al.*, 1996). Απεικονίζονται στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7 Ρυθμός ζημιάς για διαφορετικές διαμέτρους (Hwang & Lin, 1997) (πηγή : O'Rourke, 1998)

5.3.5 O'Rourke et al. (1998)

Ο O'Rourke *et al.* (1998) χρησιμοποίησε μια βάση δεδομένων GIS για να ερευνήσει τους παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στη ζημία συστημάτων παροχής νερού που προκλήθηκε από το σεισμό Northridge του 1994. Όλο το τμήμα του Λος Άντζελες ύδατος και ενέργειας(LADWP) και οι μητροπολιτικές γραμμές τροφοδοσίας περιοχής ύδατος (MWD) μέσα στο σύστημα LADWP μεταλλάχθηκαν από τους χάρτες 1:12,000 παρεχόμενους από το LADWP. Η βάση δεδομένων επισκευής γραμμών τροφοδοσίας συγκεντρώθηκε από τις στατιστικές που παραχωρήθηκαν από LADWP και MWD και η βάση

δεδομένων επισκευής γραμμών διανομής προήλθε από τις στατιστικές που αναπτύχθηκαν για το κράτος του γραφείου Καλιφόρνιας των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης (OES).

Η βάση δεδομένων ισχυρών κινήσεων που ενσωματώθηκε στην ανάλυση GIS ήταν η ίδια με αυτήν που περιγράφεται από τον Chang και λοιποί. (1996), αποτελούμενη από τα αρχεία που λαμβάνονται από πάνω από 230 σταθμούς που καλύπτουν μια έκταση περίπου 6000 km² σε και γύρω από το Northridge. Οι περισσότεροι από αυτούς τους σταθμούς συγκεντρώθηκαν μέσα σε μια μικρότερη (περίπου 1200 km²) περιοχή που αντιστοιχεί με την έκταση της προκληθείσας ζημίας από το σεισμό στο δίκτυο διανομής ύδατος Northridge. Ένα τέτοιο εκτενές σύνολο δεδομένων ισχυρών κινήσεων επέτρεψε στους αξιόπιστους χάρτες περιγράμματος να σχεδιαστούν για τις διάφορες διαφορετικές παραμέτρους ισχυρών κινήσεων, συμπεριλαμβανομένου PGA, PGV, PGD, SA, la και του Si. Οι χάρτες IMM Dewey και λοιποί. (1995) ενσωματώθηκαν επίσης στο πρότυπο GIS.

Τα περιγράμματα του ποσοστού επισκευής σωληνώσεων υπολογίστηκαν για τους σωλήνες CI, οι οποίοι αποτέλεσαν περίπου 76% του δικτύου διανομής. Τα περιγράμματα βρέθηκαν με τη διαίρεση της περιοχής Northridge σε πλέγμα τετραγώνων των 2x 2 χλμ και τον καθορισμό του μήκους του σωλήνα CI και αριθμό επισκευών σωληνώσεων CI σε κάθε τετράγωνο. Καμία ζημία σωληνώσεων δεν παρατηρήθηκε στις περιοχές με PGV < 10 cm/s. Τα υψηλότερα ποσοστά επισκευής αποδείχθηκαν για να συμπέσουν εύλογα καλά με τις ζώνες υψηλότερου PGV. Οι παρόμοιοι συσχετισμοί βρέθηκαν για άλλες παραμέτρους ισχυρών κινήσεων. Οι συγκεντρωμένοι τομείς της ζημίας λόγω της ρευστοποίησης ή των καθιζήσεων εδάφους.

Οι διάφορες αναλύσεις παλινδρόμησης πραγματοποιήθηκαν μεταξύ των παραμέτρων ισχυρών κινήσεων και των ποσοστών επισκευής σωληνώσεων. Οι O'Rourke & Jeon (2000) διευκρίνισαν ότι από τα 2413 αρχεία ισχυρών κινήσεων των διαθέσιμων τμημάτων, 164 χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις παλινδρόμησης. Τα σημεία στοιχείων για την παλινδρόμηση λήφθηκαν με το άθροισμα των μηκών σωληνώσεων μέσα στις ζώνες της ίσης αξίας μιας δεδομένης παραμέτρου όπως σκιαγραφούνται από τον αντίστοιχο χάρτη περιγράμματος. Η αξία που ορίστηκε σε κάθε ζώνη ήταν η μεσαία τιμή. Μόνο εκείνες οι ζώνες που περιέχουν τα μήκη σωλήνων μεγαλύτερα από 150 χλμ (2% του συνολικού μήκους των σωλήνων CI) περιλήφθηκαν σε συνάρτηση προκειμένου να μειώσουν διαγωνίως λόγω των τοπικών ακανόνιστων αποτελεσμάτων. Διαπιστώθηκε ότι η ο πιο στατιστικά σημαντική παράμετρος ισχυρών κινήσεων ήταν η PGV (O'Rourke & Jeon, 1999). Η διαδικασία διαλογής έτεινε να παραλείψει από τη ζημία συνόλου δεδομένων που συνδέθηκε με PGV ≥ 70 cm/s. Για το σεισμό Northridge, αυτές οι περιοχές εμφανιστεί. Η τεχνική διαλογής ήταν επομένως χρήσιμη στην ελαχιστοποίηση της επιρροής της καθίζησης εδάφους ή της ρευστοποίηση-προκληθείσας ζημίας στις σχέσεις τρωτότητας.

Η μελέτη από τον Ο» Rourke και λοιποί. (1998) περιλαμβάνει τις σχέσεις τρωτότητας σωληνώσεων για τα IMM και το Si (που προέρχονται από το 20% μετριασμένο φάσμα ταχύτητας) βασισμένο μόνο στα στοιχεία Northridge και τις σχέσεις για PGA και PGV που χρησιμοποιούν επίσης τα στοιχεία από τρεις άλλους αμερικανικούς σεισμούς. Η σχέση που παρουσιάζεται στο σχήμα .8 (α) είναι για PGV για τους σωλήνες CI όλων των διαμέτρων. Η καλής εφαρμογής γραμμή σε αυτήν την περίπτωση λαμβάνεται από μια πιο πρόσφατη δημοσίευση (O» Rourke και λοιποί., 2001) και έχει τους ελαφρώς διαφορετικούς συντελεστές από αυτούς που δίνονται στο O» Rourke και λοιποί. (1998). Η τάση του O» Rourke και λοιποί. (2001) εκφράζεται στην εξίσωση (5.10) και έχει σχεδιαστεί στο σχήμα 5.9 για την επόμενη σύγκριση με τις σχέσεις τρωτότητας από άλλους ερευνητές. Η σχέση τρωτότητας για PGA του O» Rourke και λοιποί. (1998) εκφράζεται στην εξίσωση (5.5) και σχεδιάζεται στο σχήμα 5.8.

Το σχήμα 5.8 (β) παρουσιάζει συσχετισμούς ποσοστού επισκευής για τους σωλήνες χάλυβα, CI, Di και AC, όλοι που λαμβάνονται από την ανάλυση GIS

των στοιχείων Northridge. Οι σχετικές ευπάθειες του CI και DI σωλήνα υπονόησαν από αυτές τις τάσεις επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα των προηγούμενων μελετών. Τα ποσοστά χαμηλής ζημίας που παρατηρούνται για τους σωλήνες AC και τα υψηλά ποσοστά ζημίας που παρατηρούνται για τους σωλήνες χάλυβα, εντούτοις, εκπλήσσουν. Καμία εξήγηση δεν δίνεται για τη σχετικά εντυπωσιακή απόδοση των σωλήνων AC. Ο O'Rourke και λοιποί. (2001) προτείνει ότι η κακή απόδοση των σωληνώσεων διανομής χάλυβα μπορεί να είχε επηρεαστεί από τις υψηλές πιέσεις ύδατος που συνδέονται με τις σωληνώσεις διανομής χάλυβα στην περιοχή του Λος Άντζελες, και επίσης από την ευπάθειά τους στη διάβρωση.



Σχήμα 5,8(a)κ'(b) Ρυθμός επισκευής σωληνώσεων συσχέτιση με PGV για γραμμές διανομής από χάλυβα, CI, DI και AC: (a) CI σωλήνες διανομής; και (b)χάλυβα, CI, DI και AC σωλήνες διανομής (O'Rourke et al., 2001) (πηγή : O'Rourke, 1998)

Οι O'Rourke & Jeon (1999) επίσης ανέπτυξαν μια σχέση τρωτότητας για την κλιμακούμενη ταχύτητα, μια παράμετρος βασισμένη στη μέγιστη επίγεια ταχύτητα αλλά που ομαλοποιήθηκε για τα αποτελέσματα της διαμέτρου σωλήνων. Αυτό παρουσίασε καλύτερο συσχετισμό με το ποσοστό επισκευής σωληνώσεων από ότι η μη κλιμακούμενη παράμετρος έκανε με τα ποσοστά επισκευής για κάθε κατηγορία διαμέτρων σωλήνων που σχεδιάστηκε χωριστά. Η έκφραση για την κλιμακούμενη ταχύτητα, δίνεται από:

$$R_{R} = 0.050(v_{scaled})^{0.865}$$
(5.3)
$$v_{scaled} = \frac{PGV}{D_{0}^{1.138}}$$
(5.4)

όπου:
RR είναι το ποσοστό επισκευής σωληνώσεων (ανά χλμ μήκους του σωλήνα), PGV είναι η μέγιστη επίγεια ταχύτητα (cm/s²), *D0* είναι η διάμετρος σωληνώσεων (cm).

5.3.6 Isoyama et al. (2000)

Ο Isoyama et al. (2000) επέκτεινε τη βασισμένη σε GIS έρευνα στην Ένωση Εγκαταστάσεων Παροχής Ύδατος της Ιαπωνίας (JWWA) (Shirozu et ήδη., 1996) για να καθιερώσει τις σχέσεις τρωτότητας σωληνώσεων για PGA και PGV. Ο Shirozu *et al.* (1996) καθιέρωσε μια βάση δεδομένων GIS στους παράγοντες ανάλυσης που επηρεάζουν τη ζημία σωληνώσεων ύδατος που προκλήθηκε από το σεισμό hyogoken-Nanbu το 1995. Αυτή η βάση δεδομένων αποτελείται από σωλήνες διανομής που ψηφιοποιήθηκαν από τους χάρτες 1:5000 ή 1:6000 για το σύνολο ή την πόλη Kobe και τη γειτονική πόλη Ashiya (εκτός από την περιοχή Okuyama και Okuike) και την πόλη του Nishinomiya, όλες όσες υπέστησαν την εκτενή ζημία από το σεισμό. Η θέση ή κάθε επισκευή σωληνώσεων, συμπεριλαμβανομένων των ημερομηνιών, το υλικό σωλήνων, τη διάμετρο των σωλήνων, τη μορφή αστοχίας και το έτος της εγκατάστασης, εισήχθησαν στη βάση δεδομένων.

Τα τοπογραφικά και γεωλογικά στοιχεία ψηφιοποιήθηκαν από τους χάρτες 1:10000 που αναπτύχθηκαν από το γεωγραφικό ίδρυμα ερευνών (1996) και οι περιοχές που επηρεάστηκαν από τη ρευστοποίηση προσδιορίστηκαν από μια μελέτη των μόνιμων αποτελεσμάτων επίγειας παραμόρφωσης από τις εναέριες φωτογραφίες (Hamada *et al.,* 1995). Τα μακροσεισμικά στοιχεία έντασης περιλήφθηκε από μια μελέτη από το Chuo Kaihatsu Co Ltd (1995).

Ο Shirozu *et al.* (1996) ανέλυσε το σύνολο στοιχείων για το Kobe, το Ashiya και το Nishinomiya, χρησιμοποιώντας ένα πλέγμα με τις διαστάσεις κυττάρων περίπου 290 X 230 μ, που επιλέχτηκαν για να προσαρμοστούν στο ιαπωνικό εθνικό τυποποιημένο πλέγμα εδάφους. Ο Isoyama *et al.* (2000) διεξήγαγε μια πιο λεπτομερή έρευνα που εστιάζει στις πόλεις Ashiya και του Nishinomiya. Για αυτήν την περιοχή, 50μ κύτταρα πλέγματος καθορίστηκαν προκειμένου να

αντιπροσωπευθούν καλύτερα οι «στενές κοιλάδες» και άλλοι τύποι τοπογραφίας.

Μια ανάλυση πολλών μεταβλητών πραγματοποιήθηκε για να ποσολογήσει την επιρροή των διάφορων παραγόντων στο ποσοστό ζημίας σωληνώσεων, που καθιερώνει τους εμπειρικούς παράγοντες διορθώσεων όπως το υλικό σωλήνων, τη διάμετρο σωλήνων, την εδαφολογική τοπογραφία και τη ρευστοποίηση (Πίνακας 5.6). Η μέθοδος ανάλυσης περιέλαβε ένα σχέδιο στάθμισης σύμφωνα με το μήκος του σωλήνα μέσα σε κάθε κατηγορία. Οι παράγοντες διορθώσεων νια μερικές από τiς κατηγορίες που παρουσιάστηκαν στον πίνακα .6 θεωρήθηκαν λιγότερο αξιόπιστες λόγω των σχετικά μικρών τιμών του μήκους σωλήνων στις οποίες ήταν βασισμένες.

Πίνακας 5.6Παράγοντες συσχέτισης για σχέσεις τρωτότητας του Isoyama et al. (2000). Οι τιμές στις παρενθέσεις είναι λιγότερο αξιόπιστες εξαιτίας του μικρού μεγέθους δείγματος.

Pipe material correction factor, B _p		Pipe diameter correction factor, B _d		Ground topography correction factor, B _g		Ground liquefaction correction factor, B _L	
DI	0.3	75 mm	1.6	Disturbed hill	1.1	No liquefaction	1.0
CI	1.0	100-150 mm	1.0	Terrace	1.5	Partial liquefaction	2.0
PVC	1.0	200-400 mm	0.8	Narrow valley	3.2	Total liquefaction	2.4
Steel	(0.3)	> 500 mm	(0.5)	Alluvial	1.0		
AC	(1.2)			Stiff alluvial	0.4		

(πηγή : O'Rourke, 1998)

Μια χωριστή ανάλυση εκτελέσθηκε χρησιμοποιώντας τα στοιχεία ισχυρώνκινήσεων πέρα από ολόκληρη την περιοχή της kobe-Οζάκα για να καθιερώσει τις τυποποιημένες καμπύλες ποσοστού ζημίας, στις οποίες οι παράγοντες διορθώσεων θα μπορούσαν να εφαρμοστούν.

Για τις λεπτομέρειες σχετικά με το σύνολο δεδομένων ισχυρών-κινήσεων, Isoyama και λοιποί. (2000) αναφέρετε σε μια χωριστή ιαπωνική μελέτη (Isoyama και λοιποί., 1998), που δεν φαίνονται για την τρέχουσα μελέτη. Τα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση ήταν πιθανώς ένα υποσύνολο της βάσης δεδομένων που παρουσιάστηκε από τον Ohno *et al.* (1996). Από συνολικά 53 αρχεία, 17 είναι πιθανό να είναι μέσα στη βαριά χαλασμένη περιοχή που βρίσκεται περίπου μέσα σε 20 χλμ της θραύσης ρηγμάτων επιφάνειας. Μερικά από τα πολλά πρόσθετα αρχεία μη διαθέσιμα στο δημόσιο τομέα μπορεί επίσης να είχαν χρησιμοποιηθεί στη μελέτη GIS. Οι σχέσεις τρωτότητας σωληνώσεων παρήχθησαν σύμφωνα με τη μορφή που δόθηκε στις εξισώσεις (5.5) και (5.6).

$$R_{R}(X) = B_{p}B_{d}B_{z}B_{L}R_{o}(X)$$
 (5.5)

$$R_o(X) = a(X - X_{\min})^b$$
 (5.6)

όπου: *RR* (X) είναι το ποσοστό επισκευής σωληνώσεων ανά χλμ του σωλήνα ως συνάρτηση της παραμέτρου ισχυρών-κινήσεων, Χ. Οι σχέσεις τρωτότητας έχουν παραχθεί για PGA και PGV.

Βί παράγοντες τροποποίησης που καθορίζονται στον πίνακα5.6,

*R*₀ είναι το τυποποιημένο ποσοστό ζημίας σωληνώσεων, που καθορίζεται για το σωλήνα CI τηςτάξης 100 διαμέτρων -150 χιλ. που βρίσκονται στο αλλούβιο χώμα χωρίς τη ρευστοποίηση (συντελεστές βισμούθιο = 1.0 στον πίνακα 5.6) *a* and *b* είναι συντελεστές παλινδρόμησης,

Xmin είναι η ελάχιστη αξία της ισχυρής εδαφικής-κίνησης για την οποία η ζημία θεωρείται πως θα εμφανιστεί (100cm/s² στην περίπτωση PGA και 15cm/s στην περίπτωση PGV).

Οι βασικοί αλγόριθμοι ποσοστού επισκευής για PGA και PGV παρουσιάζονται στα σχήματα 5.9a και 5.9b αντίστοιχα, μαζί με τα σημεία στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην παλινδρόμηση.



Σχήμα 5.9δεδομένα και σχέσεις τρωτότητας του Isoyama et al. (2000). Η κλίμακα επιτάχυνσης είναι PGA (1 gal = 1cm/s2); Η κλίμακα ταχύτητας είναι PGV (1 kine = 1 cm/s). (πηγή : O'Rourke, 1998)

Οι σχέσεις τρωτότητας βασίστηκαν σε 19 σημεία στοιχείων και 16 σημεία στοιχείων, αντίστοιχα (υπολογισμένος από το σχήμα 5.9). Σε κάθε περίπτωση, διάφορα πρόσθετα απομακρυσμένα σημεία αποκλείστηκαν λόγω των ακραίων περιπτώσεων ρευστοποίησης ή τοπογραφικών αποτελεσμάτων. Ως συνέπεια το μέγεθος και η ποιότητα του συνόλου στοιχείων, η εργασία του Isoyama *et al.* (2000) αντιπροσωπεύει μια σημαντική βελτίωση σε μια προηγούμενη σχέση τρωτότητας σωληνώσεων για PGA που αναπτύσσεται από Isoyama & Katayama (1982); και οι δύο σχέσεις σχεδιάζονται στο σχήμα 5.10 για τη σύγκριση. Οι αλγόριθμοι εκφράζονται στις εξισώσεις (5.4) και (5.6) αντίστοιχα. Ο βασικός αλγόριθμος ποσοστού επισκευής Isoyama και λοιποί. (2000) για PGV δίνεται από την εξίσωση (5.9) και σχεδιάζεται στο σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.10 Σύγκριση των σχέσεων τρωτότητας για PGA που εκφράζονται στον πίνακα 5.6. (πηγή : O'Rourke, 1998)

|--|

Ερευνητές	R _R =f(PGV)	Σημειώσεις
Eidinger et al.(1995,1998)	K ₁ 0.0001658PGV ^{1.98} (5.7)	'best-fit'σχέσεις τρωτότητας
		(Κ₁=1), μετατροπή από
		Imperial μονάδες σε SI
O'Rourke & Ayala (1993)	0.0001PGV ^{2.25} (5.8)	Σχέση τρωτότητας
HAZUS (FEMA,1999)		'εύθραυστες σωληνώσεις'
Isoyama et al. (2000)	3.31*10 ⁻³ (PGV-15) ^{1.30} (5.9)	CI σωληνώσεις 'κανονικές
		καμπύλες'
O'Rourke et al. (2001)	e ^{1.55InPGV-8.15} (5.10)	Cl σωληνώσεις
ALA (2001)	K _{1ALA} 0.002416PGV (5.11)	Βασική σχέση τρωτότητας
		(Κ _{1ΑLΑ} =1)μετατροπή από
		Imperial μονάδες σε SI

(πηγή : O'Rourke, 1998)



Σχήμα5 .11 Σύγκριση των σχέσεων τρωτότητας για PGV που εκφράζονται στον πίνακα 5.7.



5.3.7 ALA (2001)

Το 2001 η αμερικανική συμμαχία σανίδων σωτηρίας (ΑΛΑ), μια δημόσια ιδιωτική συνεργασία μεταξύ FEMA και ASCE, δημόσιευσαν ένα σύνολο λεπτομερών διαδικασιών για να αξιολογήσουν την πιθανότητα της ζημίας από τα αποτελέσματα σεισμού στα διάφορα συστατικά των συστημάτων παροχής νερού (ALA, 2001). Η εργασία κάλυψε τα συστήματα μεταβίβασης ύδατος (σωληνώσεις, σήραγγες και κανάλια). Για κάθε συστατικό, οι πιθανές καταστάσεις ζημίας και 01 αντίστοιχες συναρτήσεις τρωτότητας παρουσιάστηκαν. Για τις θαμμένες σωληνώσεις, οι σχέσεις τρωτότητας αναπτύχθηκαν χωριστά για τα μόνιμα αποτελέσματα επίγειας παραμόρφωσης και τα αποτελέσματα επίγεια δόνησης.

Η βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε για τα αποτελέσματα επίγειας δόνησης περιέλαβε τα ποσοστά ζημίας σωληνώσεων από 18 σεισμούς που εκτείνονται την περίοδο 1923-1995. Τα στοιχεία λήφθηκαν από διάφορες πηγές.

Τα δεδομένα από τους Katayama *et al.* (1975), O'Rourke & Ayala (1993), Eidinger *et al.* (1995) και Shirozu *et al.* (1996) είχαν ήδη χρησιμοποιηθεί χωριστά στην ανάπτυξη των προηγούμενων σχέσεων τρωτότητας, όπως περιγράφεται ανωτέρω. Το σύνολο δεδομένων που περιλήφθηκε από Toprak (1998) ήταν μέρος από αυτό που χρησιμοποίηση ο O'Rourke *et al.* (1998). Όπως υποδεικνύεται στον πίνακα, μια πρόσθετη έκθεση της ΑΛΑ αναφέρθηκε για μερικά από τα στοιχεία από το 1989 Loma Prieta και τους σεισμούς Northridge του 1994.

Η πλήρης βάση δεδομένων της ΑΛΑ (2001) ήταν ομογενοποιημένη όσο το δυνατόν περισσότερο. Όπου τα στοιχεία βασίστηκαν στα IMM ή PGA, οι μετατροπές σε PGV έγιναν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του Wald *et al.* (1999). Η βάση δεδομένων καλύφθηκε έπειτα για τα διπλά σημεία. Τα στοιχεία από τρεις σεισμούς αποκλείστηκαν λόγω της υπερβολικής και απροσδιόριστης ποσοτικά επιρροής των μόνιμων αποτελεσμάτων επίγειας παραμόρφωσης στα ποσοστά αποτυχίας σωληνώσεων. Τα στοιχεία από περαιτέρω τρεις σεισμούς αποκλείστηκαν δεδομένου ότι αυτά τα γεγονότα έκριναν τις μετασεισμικές δονήσεις αρκετά σημαντικές για να έχουν προκαλέσει την πρόσθετη ζημία σωληνώσεων. Δύο σημεία στοιχείων αποκλείστηκαν λόγω των υπερβολικών αποτελεσμάτων διάβρωσης (ένα σημείο κάθε ένα από τους σεισμούς Coalinga του 1983 και του Imperial Valley 1979).

Οι ερευνητές της ΑΛΑ (2001) επέλεξαν να χρησιμοποιήσουν το γεωμετρικό μέσο όρο των δύο οριζόντιων τμημάτων ταχύτητας (PGVG) στον καθορισμό PGV τους, όπως χρησιμοποιείται στις σχέσεις μείωσης των Sadigh & Egan (1998).

Οι μέγιστες ταχύτητες από τους σεισμούς Northridge και hyogoken-Nanbu εμφανίστηκαν στη βάση δεδομένων ως PGVL, το μέγιστο των δύο οριζόντιων συστατικών, έτσι μετατράπηκαν σε PGVG χρησιμοποιώντας τους παράγοντες πολλαπλασιασμού 0.90 και 0.83 αντίστοιχα, που καθορίστηκαν με τον υπολογισμό μέσου όρου των πολυάριθμων τιμών από τα όργανα που λήφθηκαν από αυτούς τους δύο σεισμούς. Για μερικούς από τους άλλους σεισμούς, οι πηγές στοιχείων δεν διευκρίνισαν τον καθορισμό PGV που

χρησιμοποιήθηκε, που οδηγεί στις πιθανές ασυνέπειες στη βάση δεδομένων της ΑΛΑ (2001).

Συνολικά 81 σημεία στοιχείων παρέμειναν μετά από τη διαδικασία διαλογής που περιγράφηκε ανωτέρω.

Αυτό περιλαμβάνει την τυποποιημένη σχέση τρωτότητας «των κύριων σωλήνων» βασισμένη σε ένα μιας παραμέτρου γραμμικό μοντέλο και τις γραμμές που αντιπροσωπεύουν τα 16α και 84α εκατοστημόρια του συνόλου στοιχείων. Η «κύρια» γραμμή καθορίζει τη μεσαία κλίση και των 81 σημείων στοιχείων και έχει την ιδιοκτησία της κατοχής των ίσων αριθμών σημείων επάνω από και κάτω από αυτή. Αυτή η προσέγγιση επιλέχτηκε παρά μια least-squares καλής εφαρμογής γραμμή λόγω του ποσού διασποράς στο σύνολο στοιχείων. Η γραμμή μεσαίας κλίσης είναι μια περιγραφή της κεντρικής τάσης λιγότερο ευαίσθητη προς τα απομακρυσμένα στοιχεία. Η σχέση εύθραυστου «της κύριας γραμμής» εκφράζεται στην εξίσωση (3.36) και σχεδιάζεται στο σχήμα 5.10.

Οι πρόσθετες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για να αξιολογήσουν την επιρροή του μεγέθους σεισμού, του υλικού σωλήνων και της διαμέτρου σωλήνων στο ποσοστό αποτυχίας σωλήνων. Σε κάθε περίπτωση, το σχετικό ποσοστό επισκευής για μια δεδομένη κατηγορία ποσολογήθηκε με τη λήψη των αναλογιών των συντελεστών κλίσεων για τα διαφορετικά υποσύνολα της βάσης δεδομένων.

Το μέγεθος σεισμού λήφθηκε ως αναπληρωματικό μέτρο κατά τη διάρκεια του επίγειου τινάγματος, με την επίπτωση ότι για μια δεδομένη η τιμή PGV, το ποσοστό ζημίας σωλήνων θα ήταν υψηλότερο στις περιοχές δοκιμάζοντας την πιό μακροχρόνια διάρκεια του επίγειου τινάγματος. Εντούτοις, καμία σημαντική σχέση δεν προσδιορίστηκε από τα διαθέσιμα στοιχεία. Ο προσδιορισμός μιας επίδρασης διάρκειας θα απαιτούσε διάφορα σύνολα δεδομένων παρόμοια με αυτό του Ο» Rourke και λοιποί. (1998), αποτελούμενος από έναν αξιόπιστο κατάλογο σωληνώσεων και μια υψηλή πυκνότητα των αρχείων ισχυρών-κινήσεων, αυτό παραμένει να γίνει.

Οι σχετικές ευπάθειες των διαφορετικών σειρών διαμέτρων σωλήνων και των υλικών τύπων ποσολογήθηκαν από τους παράγοντες τροποποίησης καμπυλών εύθραυστου, *K1ALA*. Αυτοί παρουσιάζονται στον πίνακα 1, παράλληλα με τους παράγοντες τροποποίησης παραγόμενους από Eidinger *et al.* (1995, 1998). Οι ξεχωριστές διαφορές μεταξύ των δύο συνόλων παραγόντων τονίζονται στον πίνακα. Η επιρροή της εδαφολογικής διαβρωτικής ικανότητας για τους σωλήνες μετάλλων ποσολογήθηκε βασισμένος στην ειδική άποψη δεδομένου ότι το σχετικό στοιχείο δεν ήταν διαθέσιμο για το μεγαλύτερο μέρος του συνόλου δεδομένων. Η σχέση εύθραυστου «των κύριων γραμμών» της ΑΛΑ (2001) καθορίστηκε για τους σωλήνες CI μικρών διαμέτρων με τις ενώσεις τσιμέντου που εγκαταστάθηκαν στα χώματα με την άγνωστη διαβρωτική ικανότητα.

Η έρευνα της ΑΛΑ (2001) περιέλαβε τις λεπτομέρειες στην εφαρμογή των σχέσεων εύθραυστου για τους διαφορετικούς σωλήνας-ένωσης-διάμετροςεδαφολογικούς τύπους και μια συζήτηση της διασποράς στο σύνολο δεδομένων, το οποίο είναι ιδιαίτερο.

5.3.8 Συμπεράσματα

Η πλειοψηφία των σχέσεων τρωτότητας των σωληνώσεων χρησιμοποιεί είτε PGA είτε PGV ως παράμετρο πρόγνωσης.

Για τη τάξη των τιμών ισχυρών-κινήσεων που συνδέονται χαρακτηριστικά με τους καταστρεπτικούς σεισμούς, η παραλλαγή στις αποκτημένες ποσοστού επισκευές χρησιμοποιώντας διαφορετικές σχέσεις τρωτότητας είναι γενικά λιγότερα για τη PGV από τη PGA (σχήματα5 .3 και 5.4). Αυτό προτείνει ότι η PGV μπορεί να είναι καλύτερος προάγγελος της προκληθείσας ζημίας των σωληνώσεων από σεισμό από ότι με τη PGA. Εντούτοις, πολλοί παράγοντες έχουν συμβάλει στη διασπορά που παρατηρείται μεταξύ των διάφορων σχέσεων τρωτότητας και μια πιο ποσοτική έρευνα απαιτείται για να συναγάγει περισσότερα σταθερά συμπεράσματα.

	Investigation	EQ1	Pipe Material	Parameter	Data points	r²	Regression equation
1	Katayama <i>et al.</i> (1975)	~	M×	PGA	37	0.12	Linear (non-zero intercept)
2	ALA1	V	M×	PGV	81	0.18	Linear (non-zero intercept)
3	ALA2	~	M×	PGV	88	0.26	Linear (non-zero intercept)
4	ALA3	V	м×	PGV	69	0.29	Linear (non-zero intercept)
5	O'Rourke & Ayala (1993)	~	M×	PGV	11	0.68	Linear (non-zero intercept)
6	O'Rourke <i>et al.</i> (1998)	N	СІ	sı	9	0.68	Logarithmic
7	O'Rourke & Jeon (1999)	N	сі	PGV	7	0.85	Logarithmic – Eqn (3.39)
8	O'Rourke <i>et al.</i> (1998)	N S,W,L	сі	PGA	12	0.81	Logarithmic – Eqn (3.30)
9	O'Rourke <i>et al.</i> (2001)	N S,W,L	сі	PGV	11	0.85	Logarithmic – Eqn (3.35)
10	Isoyama <i>et al.</i> (2000)	н	СІ	PGA	17	0.62	Power – Eqn (3.31)
11	Isoyama <i>et al.</i> (2000)	н	СІ	PGV	15	0.77	Power – Eqn (3.32)
12	Isoyama <i>et al.</i> (2000)	н	DI	PGA	16	0.64	Power
13	Isoyama <i>et al.</i> (2000)	н	DI	PGV	12	0.96	Power

Πίνακας5 .8 Σύγκριση των τιμών r² values για βάσεις δεδομένων για διάφορες σχέσεις τρωτότητας

Στον πίνακα 5.8, μια περίληψη δίνεται για τις τιμές των r² για μια επιλογή των σχέσεων εύθραυστου για την οποία είτε r² αναφέρθηκε είτε θα μπορούσε να υπολογιστεί από το αρχικό σύνολο δεδομένων. Το r² είναι ο συντελεστής του προσδιορισμού και μετρά το ποσοστό της συνολικής παραλλαγής στην εξαρτώμενη μεταβλητή Y (σε αυτήν την περίπτωση, ποσοστό επισκευής σωληνώσεων) που μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση παλινδρόμησης:

$$r^{2} = \frac{\sum_{i=0}^{n} (y_{i} - \overline{y})^{2}}{\sum_{i=0}^{n} (y_{i} - \overline{y})^{2}}$$
(5.7)

Όπου : y είναι ο μέσος όρος των μετρημένων τιμών,

y : είναι η προβλεφθείσα τιμή που χρησιμοποιεί την εξίσωση παλινδρόμησης και

n είναι ο αριθμός των σημείων στοιχείων.

Η σύγκριση r² για τις διαφορετικές σχέσεις τρωτότητας μπορεί να δώσει μια ένδειξη της οποίας η παράμετρος είναι η αποτελεσματικότερη στην πρόβλεψη

της ζημίας σωληνώσεων. Μια γραμμική παλινδρόμηση στο σύνολο δεδομένων PGA Katayama και λοιποί. (1975) δίνει τη λιγότερη πειστική τακτοποίηση όλων. Εντούτοις, η r² τιμή δεν είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή που υπολογίζεται για το αρχικό σύνολο δεδομένων PGV της AΛA (2001). Και οι δύο έρευνες περιέλαβαν τη συλλογή των ποσοστών επισκευής σωληνώσεων για όσο το δυνατόν περισσότερους σεισμούς, σχεδιασμένων από ένα ευρύ φάσμα των πηγών.

Οι σχέσεις τρωτότητας σωληνώσεων έχουν βελτιωθεί αρκετά κατά τη διάρκεια των πρόσφατων ετών και είναι χρήσιμες για την πρόβλεψη ζημίας. Για τη γενική εφαρμογή, η σχέση PGV της ΑΛΑ (2001) συστήνεται αφού προέρχεται από μια σφαιρική βάση δεδομένων. Αν και η διασπορά στα στοιχεία είναι μεγάλη, η σχέση επιτρέπει σε πολλούς από τους συνεισφέροντες σε αυτήν την διασπορά για να υπολογιστεί η χρησιμοποίηση των παραγόντων τροποποίησης.

Για την Ιαπωνία, προτείνονται οι σχέσεις Isoyama *et al.* (2000). Η αίτηση σε άλλες θέσεις υποβάλλεται δύσκολη από το τοπογραφικό σχέδιο ταξινόμησης που δεν χρησιμοποιείται κανονικά έξω από την Ιαπωνία. Οι σχέσεις τρωτότητας του O'Rourke *et al.* (1998, 2001) έχει ιδιαίτερη σχέση με τις ΗΠΑ δεδομένου ότι τα στοιχεία από άλλες θέσεις δεν έχουν περιληφθεί. Η σχέση O'Rourke *et al.* (1998) ισχύει μόνο αυστηρά στους σωλήνες CI και πρέπει να χρησιμοποιηθεί αναλόγως.

Αν και έχει αποδειχθεί ότι PGV είναι μια καλύτερη παράμετρος πρόγνωσης για τη ζημία σωληνώσεων από PGA, είναι εντούτοις χρήσιμο να υπάρξουν οι σχέσεις εύθραυστου PGA λόγω της διαδεδομένης χρήσης αυτής της παραμέτρου στην αξιολόγηση του κινδύνου σεισμού. Πρέπει να τονιστεί, εντούτοις, ότι οπουδήποτε είναι δυνατόν, οι προβλέψεις της ζημίας σωληνώσεων πρέπει να γίνουν από τις εκτιμήσεις PGV.

5.4 Καμπύλες Τρωτότητας

Οι καμπύλες τρωτότητας (fragility curves) περιγράφουν την πιθανότητα για δεδομένη σεισμική ένταση, η βλάβη μιας κατασκευής να είναι ίση ή μεγαλύτερη από ένα συγκεκριμένο επίπεδο και αναπαρίστανται από συναρτήσεις αθροιστικής κατανομής (π.χ. κανονικής, λογαριθμικής ή άλλης).

Η επιλογή ή η κατάρτιση κατάλληλων καμπυλών τρωτότητας που να ανταποκρίνονται στα κατασκευαστικά και τυπολογικά χαρακτηριστικά των στοιχείων των δικτύων κοινής ωφέλειας και των υποδομών αποτελεί βασική προϋπόθεση για μια «ευφυή μεθοδολογία σεισμικής διακινδύνευσης». Οι αγωγοί, ως ένα από τα κύρια στοιχεία των Δ.Κ.Ω (ύδρευσης, αποχέτευσης, φυσικό αέριο), αξιοποιούνται για την μεταφορά και διανομή νερού και φυσικού αερίου ανάμεσα σε περιοχές εντός και εκτός αστικών συγκροτημάτων, για την μεταφορά αποβλήτων ή ομβρίων.

Η εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης των αγωγών, παρουσιάζει σημαντική πολυπλοκότητα καθότι τα διαθέσιμα μοντέλα απόκρισης των αγωγών, βάσει της διεθνούς βιβλιογραφίας, προϋποθέτουν σημαντικές απλοποιήσεις και παραδοχές στην προσομοίωσή τους ενώ αρκετές και σημαντικές αβεβαιότητες συνδέονται με τον τρόπο προσδιορισμού του σεισμικού φορτίου και την χωρική μεταβλητότητα της σεισμικής κίνησης. της σεισμικής διακινδύνευσης Λεπτομερείς αναλύσεις αγωγών, προϋποθέτουν αξιόπιστες σχέσεις τρωτότητας. Οι σχέσεις τρωτότητας, στην περίπτωση των αγωγών, εκτιμούν τον αναμενόμενο αριθμό αστοχιών ανά χιλιόμετρο μήκους αγωγού και συνδέονται άμεσα με το επίπεδο και τις παραμέτρους της ισχυρής εδαφικής κίνησης (εδαφική ταλάντωση, μόνιμες μετακινήσεις).

Η εμπειρική εκτίμηση του αριθμού των αστοχιών και συνεπώς των καμπύλων τρωτότητας, η οποία αναφέρεται σε ένα υπάρχον και εν λειτουργία δίκτυο, εμπερικλείει τα αθροιστικά αποτελέσματα της καταπόνησης των αγωγών από διάφορα αίτια. Κατά την εξέλιξη του σεισμικού γεγονότος, είναι πιθανή η εμφάνιση συνδυασμού κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων.

5.4.1 Γενική μορφή καμπύλων τρωτότητας για αγωγούς

Ο αλγόριθμος ζημίας για το θαμμένο σωλήνα εκφράζεται ως το ποσοστό επισκευής ανά μονάδων μήκους του σωλήνα, ως συνάρτηση της εδαφικής κίνησης (μέγιστη επίγεια ταχύτητα, PGV) ή της εδαφικής αστοχίας (μόνιμη επίγεια παραμόρφωση, PGD).

Η ανάπτυξη των αλγορίθμων ζημίας για το θαμμένο σωλήνα το 2001 είναι πρώτιστα βασισμένη στα εμπειρικά στοιχεία, που μετριάζονται με την κρίση της εφαρμοσμένης μηχανικής και μερικές φορές από τις αναλυτικές διατυπώσεις.

Τα εμπειρικά στοιχεία σημαίνουν τα εξής: μετά από έναν σεισμό, τα δεδομένα συλλέγονται βάσει πόσα μίλια του θαμμένου σωλήνα δοκιμάστηκαν σε κάποια επίπεδα κινήσεως, και πόσοι σωλήνες ήταν σπασμένοι ή είχαν διαρροή λόγω εκείνου του επιπέδου κίνησης.

Το μεγαλύτερο μέρος των εμπειρικών στοιχείων πριν από το 1989 είναι για την συμπεριφορά του σωλήνα χυτοσιδήρου με μικρή διάμετρο (κάτω από 12 ίντσες). Αυτό είναι επειδή ο σωλήνας χυτοσιδήρου ήταν το πιο δημοφιλές υλικό που χρησιμοποιήθηκε στα συστήματα ύδατος για τους σεισμούς που εμφανίστηκαν πριν από καιρό, όπως στο San Francisco το 1906. Οι πιο πρόσφατοι σεισμοί όπως της Loma Prieta το 1989 και Northridge το 1994 έχουν παραγάγει τα νέα εμπειρικά στοιχεία για τα πιο σύγχρονα υλικά σωλήνων, συμπεριλαμβανομένου του τσιμέντου αμιάντων, του όλκιμου σίδηρου και τον ενωμένο με οξυγονοκόλληση σωλήνα χάλυβα. Εντούτοις, μια πλήρης εμπειρική βάση δεδομένων για όλα τα υλικά σωλήνων σε σχέση με όλα τα επίπεδα κίνησης ακόμα δεν υπάρχει. Η τρωτότητα περιγράφεται ως ποσοστό επισκευής ανά 1.000 πόδια του σωλήνα. Μια επισκευή σωλήνων μπορεί να οφείλεται είτε σε πλήρη σπάσιμο του σωλήνα, μια διαρροή στο σωλήνα είτε στη ζημία σε ένα εξάρτημα του σωλήνα.

Για τις επισκευές των σωλήνων προβλέπεται ότι χρησιμοποιούνται οι καμπύλες τρωτότητας για τους θαμμένους σωλήνες που είναι στην ιδιοκτησία της υπηρεσίας ύδατος. Αυτό περιλαμβάνει τους κεντρικούς αγωγούς στο δρόμο, πλευρικές σωλήνες που διακλαδίζονται από τον κεντρικό αγωγό στα στόμια υδροληψίας της πυροσβεστικής και τις συνδέσεις υπηρεσιών μέχρι το μετρητή που διαχειρίζεται η υπηρεσία ύδατος. Ο θαμμένος σωλήνας από το μετρητή της αντιπροσωπείας ύδατος μέχρι την οικοδομή του πελάτη μπορεί επίσης να σπάσει. Αυτός ο σωλήνας είναι πολύ μικρός στη διάμετρο (κάτω από 1"ίντσα) και η επισκευή της είναι συνήθως ευθύνη του πελάτη. Εάν αυτός ο σωλήνας σπάσει, κατόπιν το νερό θα διαρρεύσει από τον κεντρικό αγωγό ύδατος έως ότου κάποιος κλείσει τη βαλβίδα στη σύνδεση υπηρεσιών.

5.5. Οι αλγόριθμοι ζημίας PGD

Η ζημία που εξετάζεται για τις λειτουργίες είναι αυτή που προκαλείται από τις μόνιμες επίγειες παραμορφώσεις. Τα αποτελέσματα διάδοσης κυμάτων εμπεριέχονται στα πιο καταστρεπτικά αποτελέσματα PGDs. Η βάση δεδομένων περιέχει 42 σημεία από τέσσερις σεισμούς, και η επίγεια αστοχία ρευστοποίησης υπερισχύει του μηχανισμού που επικρατεί (πίνακας5.9).

Earthquake	Number of Data Points	Percentage	Ground Failure Type			
1989 Loma Prieta	12	28%	Liquefaction vertical settlement			
1983 Nihonkai-Chubu	20 ¹	48%	Liquefaction lateral spread			
1971 San Fernando	5	12%	Local tectonic uplift			
1906 San Francisco	5	12%	Liquefaction lateral spread			
Total	42	100%				

Πίνακας 5.9 Σεισμοί και Αριθμοί των σημείων της βάσης δεδομένων για PGV (πηγή : O'Rourke, 1998)

Note 1. Excludes 14 data points for gas pipes listed in database but not used in statistical analysis.

Table 4-3. Earthquakes and Number of Points in PGD Database

Οι τύποι των υλικών περιλαμβάνουν το τσιμέντο αμιάντων (20 σημεία στοιχείων), χυτοσίδηρο (17), και η μίξη χυτοσιδήρου και χάλυβα (5). Οι

διάμετροι είναι συνήθως εκείνα τα μεγέθη που συνδέονται με τα κύρια συστήματα διανομής. Μόνο 5 σημεία προσδιορίζονται συγκεκριμένα από το σωλήνα μεγάλων διαμέτρων μεγαλύτερο από 12 ίντσες. Οι σωλήνες αερίου από χυτοσίδηρο αναφέρθηκαν [Hamada, και λοιποί, 1986] να έχουν τα υψηλότερα ποσοστά επισκευής από τους πιο αδύνατους υδροσωλήνες τσιμέντου αμιάντων στο σεισμό Nihonkai-Chubu, επειδή οι διαρροές αερίου ανιχνεύθηκαν ακριβέστερα. Αυτό υπονοεί ότι πολλές διαρροές υδροσωλήνων είναι μη ανιχνευθείσες. Ο Hamada και λοιποί. [1986] δεν εξέθεσε τους τύπους ενώσεων που χρησιμοποιήθηκαν στο σωλήνα τσιμέντου ή χάλυβα αμιάντων.

Τα ποσοστά επισκευής είναι περίπου δύο μεγέθη μεγαλύτερα από εκείνα για ζημιά εξαιτίας της διάδοση κυμάτων, δείχνοντας κατά συνέπεια τον ακραίο κίνδυνο που το PGD θέτει για το θαμμένο σωλήνα. Ακόμη και για PGDs μέχρι 5 ίντσες, το ποσοστό επισκευής είναι περίπου 2 επισκευές ανά 1.000 πόδια. Στα πλαίσια της απόδοσης συστημάτων ύδατος μετα-σεισμού, σε ένα μέσο όρο μόνο 0.03 «σπασιμάτων» ανά 1.000 πόδια του σωλήνα σε όλο το σύστημα ορίζεται μια χρησιμότητα 50% χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία HAZUS, όπου η χρησιμότητα 100% αντιστοιχεί στον όρο προ-σεισμού. Το HAZUS ορίζει 20% των επισκευών διάδοσης κυμάτων ως «διαρροές», και 80% των επισκευών επίγειας αστοχίας ως «σπασίματα.». Ως εκ τούτου, εκείνα τα μέρη των συστημάτων ύδατος που αντιμετωπίζουν την επίγεια αστοχία είναι πιθανό να μη επιδέχονται επεμβάσεις αμέσως μετά από το σεισμό.

Επίσης, τα ποσοστά επισκευής είναι κάπως ανεπηρέαστα στην τιμή της PGD, δεδομένου ότι μια αύξηση μεγέθους σε PGD παράγει μόνο έναν παράγοντα της. Κατά προσέγγιση αυτό είναι μια αύξηση 2 έως 3 στους αριθμούς επισκευών.

5.6. Συναρτήσεις της συνιστάμενης τρωτότητας αγωγών

Ο πίνακας 5.10 παρέχει τις βασικές συναρτήσεις της συνιστάμενης τρωτότητας σωλήνων (π.χ., αλγόριθμοι ζημίας ή καμπύλες τρωτότητας) για τους μηχανισμούς PGV και PGD. Αυτές οι συναρτήσεις μπορούν να

χρησιμοποιηθούν όταν δεν υπάρχει καμία γνώση των υλικών σωλήνων, της συνδεσμολογίας, της διαμέτρου, της θέσης διάβρωσης, κ.λπ. από τον κατάλογο σωλήνων και όταν είναι η αξιολόγηση για έναν εύλογα μεγάλο κατάλογο των σωληνώσεων που περιλαμβάνει ένα σύστημα διανομής ύδατος.

Πίνακας 5.10 Συναρτήσεις τρωτότητας θαμμένων σωληνών
(πηγή : O'Rourke, 1998)

Hazard		Vulnerability Function	Lognormal Standard Deviation, β	Comment		
Wave Propagation		RR=0.00187 * PGV	1.15	Based on 81 data points of which largest percentage (38%) was for CI pipe.		
Permanent Ground Deformation		RR=1.06 * PGD ^{0.319}	0.74	Based on 42 data points of which largest percentage (48%) was for AC pipe.		
Notes						
 PGV = peak ground velocity, inches/second. PGD = permanent ground deformation_inches 						
 Ground failure mechanisms used in PGD formulation: Liquefaction (88%); local tectonic uplift (12%). 						

Table 4-4. Buried Pipe Vulnerability Functions

Οι αλγόριθμοι ζημίας στον πίνακα 5.10 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν τη ζημία στους θαμμένους σωλήνες λόγω της επίγειας κίνησης, της ρευστοποίησης και της καθίζησης εδάφους. Ο πίνακας 5.10 πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει καμία γνώση των υλικών σωλήνων, της συνδεσμολογία των σωλήνων, της διαμέτρου σωλήνων ή της εδαφολογικής διαβρωτικής ικανότητας.

5.7. Παράγοντες τροποποίησης των καμπύλων τρωτότητας

Οι καμπύλες εύθραυστου στον πίνακα 5.10 είναι οι βασικές καμπύλες τρωτότητας που αντιπροσωπεύουν τη μέση απόδοση όλων των ειδών σωλήνων στους σεισμούς. Οι πίνακες 5.11 και 5.12 παρουσιάζουν τις συνοπτικές συστάσεις σχετικά με το πώς να εφαρμοστούν οι καμπύλες τρωτότητας στον πίνακα 5.10 στους ιδιαίτερους τύπους σωλήνων. Όσον αφορά τη διάμετρο, ο όρος μικρή διάμετρος αναφέρεται από 4 έως 12 ίντσες, μεγάλη από 16 ιντσών και μεγαλύτερες. Οι πίνακες 5.11 και 5.12 είναι για τις

σωληνώσεις που εγκαθίστανται χωρίς σεισμικό σχέδιο, για τις συγκεκριμένες τοπικές γεωλογικές συνθήκες.

Pipe Material	Joint Type	Soils	Diam.	K1	Reference Sections
Cast iron	Cement	All	Small	1.0	4.4.2
Cast iron	Cement	Corrosive	Small	1.4	4.4.2
Cast iron	Cement	Non-corrosive	Small	0.7	4.4.2
Cast iron	Rubber gasket	All	Small	0.8	4.4.2
Welded steel	Lap - Arc welded	All	Small	0.6	4.4.4
Welded steel	Lap - Arc welded	Corrosive	Small	0.9	4.4.4
Welded steel	Lap - Arc welded	Non-corrosive	Small	0.3	4.4.4
Welded steel	Lap - Arc welded	All	Large	0.15	4.4.4
Welded steel	Rubber gasket	All	Small	0.7	4.4.6
Welded steel	Screwed	All	Small	1.3	4.4.6
					A.3.11
Welded steel	Riveted	All	Small	1.3	4.4.6
Asbestos cement	Rubber gasket	All	Small	0.5	4.4.3
					4.4.5
Asbestos cement	Cement	All	Small	1.0	4.4.3
Concrete w/Stl Cyl.	Lap - Arc Welded	All	Large	0.7	4.4.6
Concrete w/Stl Cyl.	Cement	All	Large	1.0	4.4.6
Concrete w/Stl Cyl.	Rubber Gasket	All	Large	0.8	4.4.6
PVC	Rubber gasket	All	Small	0.5	4.4.6
Ductile iron	Rubber gasket	All	Small	0.5	4.4.5
					4.4.6

Πίνακας 5.11 Εδαφική κίνηση –Σταθερές για καμπύλη τρωτότητας (πηγή : O'Rourke, 1998)

Table 4-5. Ground Shaking - Constants for Fragility Curve

Πίνακας 5.12 Μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις- Σταθερές για καμπύλες τρωτότητας (πηγή : O'Rourke, 1998)

Pipe Material	aterial Joint Type		Reference Sections
Cast iron	Cement	1.0	4.4.2
Cast iron	Rubber gasket	0.8	4.4.2
Cast iron	Mechanical restrained	0.7	4.4.2
Welded steel	Arc welded, lap welds (large diameter, non corrosive)	0.15	4.4.4
Welded steel Rubber gasket		0.7	4.4.3
Asbestos cement Rubber gasket		0.8	4.4.3
Asbestos cement	Cement	1.0	4.4.6
Concrete w/Stl Cyl.	Welded	0.6	4.4.6
Concrete w/Stl Cyl.	Cement	1.0	4.4.6
Concrete w/Stl Cyl. Rubber Gasket		0.7	4.4.6
PVC	Rubber gasket	0.8	4.4.6
Ductile iron	Rubber gasket	0.5	4.4.6

Table 4-6. Permanent Ground Deformations - Constants for Fragility Curve

Για να εφαρμόσουν τους πίνακες 5.11 και 5.12, οι συναρτήσεις τρωτότητας σωλήνων στον πίνακα 5.10 ρυθμίζονται ως εξής για τη διάδοση κυμάτων και για μόνιμη εδαφική παραμόρφωση αντίστοιχα :

 $RR = K_1(0.00187)PGV$ $RR = K_2(1.06)PGV^{0.319}$ (5.8)

5.8 Καμπύλες τρωτότητας για συγκεκριμένα υλικά

5.8.1 Καμπύλη τρωτότητας σωλήνων χυτοσιδήρου

Η καμπύλη τρωτότητας σωλήνων χυτοσιδήρου πρέπει να περιλάβει τις ακόλουθες εκτιμήσεις:

• Εάν ο σωλήνας χυτοσιδήρου είναι σε διαβρωμένα χώματα, το ποσοστό ζημίας πρέπει να είναι υψηλότερο από το εάν ο σωλήνας είναι σε μη διαβρωμένα. Δυστυχώς, ο όγκος της εμπειρικής βάσης δεδομένων δεν παρέχει τις πληροφορίες για εδαφολογική διάβρωση. Η εμπειρία της εφαρμοσμένης μηχανικής λέει ότι ένας σωλήνας χυτοσιδήρου μικρών διαμέτρων σε διαβρωμένο χώμα είναι περίπου 40% πιο ευαίσθητος στη ζημία από την καλής εφαρμογής καμπύλη από την εμπειρική βάση δεδομένων, και ότι ο σωλήνας χυτοσιδήρου στα μη διαβρωμένα χώματα είναι περίπου 30% λιγότερο ευαίσθητος στη ζημία από την καλή εφαρμογή καμπύλης από την εμπειρική βάση δεδομένων, και ότι ο σωλήνας χυτοσιδήρου στα μη διαβρωμένα χώματα είναι περίπου 30% λιγότερο ευαίσθητος στη ζημία από την καλή εφαρμογή καμπύλης από την εμπειρική βάση δεδομένων. Αυτό μεταφράζεται σε έναν παράγοντα της διαφοράς 2 μεταξύ του σωλήνα χυτοσιδήρου εναντίον των μη διαβρωμένων χωμάτων (1.4/0.7 = 2.0).

Εάν ο σωλήνας χυτοσιδήρου χρησιμοποιεί στις ενώσεις ελαστικά μονωτικά όπως εκείνα που χρησιμοποιούνται περιστασιακά από μερικές υπηρεσίες ύδατος, υποθέστε περίπου 80% του ποσοστού ζημίας για το επίγειο τίναγμα και περίπου 80% του ποσοστού ζημίας για την επίγεια παραμόρφωση. Αυτό απεικονίζει που ο σωλήνας όλων των τύπων, συμπεριλαμβανομένου του AC και DI, έχει τα ποσοστά χαμηλότερης ζημίας από το τσιμέντο ή τον μόλυβδοςενωμένο σωλήνα χυτοσιδήρου.

5.8.2 Σωλήνας τσιμέντου αμιάντων

Οι σωλήνες τσιμέντου αμιάντων περιλαμβάνουν τις ακόλουθες εκτιμήσεις:

 Ο Loma Prieta σεισμός έδειξε ότι ο σωλήνας AC στην περιοχή του επίκεντρου του σεισμού με ενώσεις ελαστικού μονωτικού και στα τμήματα 8 πόδια έως 13 ποδιών σωλήνων είχε την καλύτερη σεισμική απόδοση από ότι θα είχε υπολογιστεί με τη χρησιμοποίηση των παλαιότερων εμπειρικών μοντέλων, τουλάχιστον στις περιοχές υποκείμενες μόνο στο επίγειο τίναγμα.

• Τα εμπειρικά στοιχεία για το ελαστικό μονωμένο σωλήνα τσιμέντου αμιάντων του 1989 Loma Prieta και οι σεισμοί Northridge του 1994 διαφέρουν αρκετά από τα προηγουμένως αναφερόμενα εμπειρικά στοιχεία για το σωλήνα τσιμέντου αμιάντων στους σεισμούς Haicheng ή της Πόλης του Μεξικού [O'Rourke και Ayala]. Μια εξήγηση της ζημίας σωλήνων AC σε εκείνους τους σεισμούς είναι ÓΤΙ OI τσιμενταρισμένες ενώσεις χρησιμοποιήθηκαν κυρίως αντί των ενώσεις με ελαστικό μονωτικό. Οι τσιμενταρισμένες ενώσεις περιορίζουν την ευελιξία του σωλήνα. Αυτός ο παράγοντας εξετάζεται στη διαφοροποίηση του αλγορίθμου ζημίας για το σωλήνα AC σε δύο: ένας για το σωλήνα ελαστικού μονωτικού, ο οποίος είναι καλύτερος από το σωλήνα χυτοσιδήρου και ένας για τον τσιμενταρισμένο κοινό σωλήνα, ο οποίος παρουσιάζει παρόμοια απόδοση με το σωλήνα χυτοσιδήρου.

5.8.3.Ενωμένος στενά σωλήνας χάλυβα

Η ενωμένη στενά καμπύλη τρωτότητας σωλήνων χάλυβα πρέπει να περιλάβει τις ακόλουθες εκτιμήσεις:

 Εάν ο σωλήνας χάλυβα είναι σε διαβρωμένα χώματα, το ποσοστό ζημίας πρέπει να είναι υψηλότερο από εάν ο σωλήνας είναι στα μη διαβρωμένα χώματα. Η κρίση εφαρμοσμένης μηχανικής δείχνει ότι ένας σωλήνας χάλυβα μικρής-διαμέτρου στο διαβρωμένο χώμα είναι περίπου 50% πιο ευαίσθητος στη ζημία από την καλή εφαρμογή καμπύλης από την εμπειρική βάση δεδομένων, και ότι ο σωλήνας χάλυβα μικρής-διαμέτρου στα μη διαβρωμένα χώματα είναι περίπου 50% λιγότερο ευαίσθητο στη ζημία από την καλή εφαρμογή καμπύλης από την εμπειρική βάση δεδομένων. Αυτό μεταφράζεται σε έναν παράγοντα της διαφοράς 3 μεταξύ του ενωμένου στενά σωλήνα χάλυβα εναντίον των μη διαβρωμένων χωμάτων (1.5/0.50 = 3.0). Η ρύθμιση για τη διάβρωση πρέπει να εφαρμοστεί μόνο όταν δεν ληφθεί κανένα μέτρο προστασίας διάβρωσης και ο σωλήνας είναι στο διαβρωμένο ή υγρό χώμα. Η δύναμη μέτρων διάβρωσης περιλαμβάνει ένα κατάλληλο σύστημα επιστρώματος με τις ανόδους sacrificial anodes.

 Σημειώστε ότι για το χάλυβα ο σωλήνας με τη διάβρωση προστασίασυμπεριλαμβανομένου του κατάλληλου επιστρώματος και sacrificial anodes κατάλληλου επιστρώματος ανόδων ή με κατάλληλο υπόστρωμα με εφαρμοσμένη ροπή εξωτερικής τάσης –η χρήση των παραγόντων διορθώσεων για τη διάβρωση μπορεί να μην είναι κατάλληλος.

 Η διάβρωση είναι ένα ηλικιακό φαινόμενο. Ο σχετικά νέος σωλήνας χάλυβα (κάτω των 25 ετών) στα διαβρωμένα εδαφολογικά περιβάλλοντα δεν θα συμπεριφερθεί όπως ένας παλαιότερος σωλήνας χάλυβα (περισσότερο από 50 ετών) στο ίδιο περιβάλλον. Ομοίως, η διάβρωση δεν θα διαδραματίσει έναν μεγάλο ρόλο εάν η πρόσθετη προστασία διάβρωσης συμπεριληφθεί στο σχέδιο.

• Τα ποσοστά επισκευής μειώνονται για το σωλήνα χάλυβα που έχει τις ονομαστικές διαμέτρους μεγαλύτερο ή ίσο των 12 ιντσών. Τα εμπειρικά στοιχεία Loma Prieta του 1989 δείχνουν μια εξάρτηση διαμέτρων ποσοστού επισκευής [Eidinger, 1998]. Άλλες μελέτες [Sato και Myurata, O» Rourke και Jeon] επίσης εκθέτουν τα ποσοστά χαμηλότερης ζημίας για τους μεγάλης διαμέτρου σωλήνες. Οι σημαντικοί παράγοντες μπορούν να περιλάβουν την ποιότητα της κατασκευής, των λιγότερων πλευρικών συνδέσεων και ευθυγραμμίσεων ενδεχομένως στα καλύτερα χώματα. Εξετάζοντας αυτούς τους παράγοντες, μια εξάρτηση διαμέτρων για τους μεγάλης διαμέτρου σωλήνες ότι τα ποσοστά επισκευής μειώνονται κατά 75%. Η μείωση

των ποσοστών επισκευής για το σωλήνα μεγάλων διαμέτρων απεικονίζει πιθανώς διάφορους παράγοντες:

 Λίγες συνδέσεις υπηρεσιών είναι συνδεμένες με σωλήνα μεγάλων διαμέτρων.

 Υπάρχουν λιγότερες κάμψεις και γράμματα Τ στους μεγάλης διαμέτρου σωλήνες (π.χ., μετώπες πίεσης

 Οι μεγάλης διαμέτρου σωλήνες έχουν τους παχύτερους τοίχους για να περιέχουν ένα ίσο ποσό πίεσης και είναι επομένως ισχυρότεροι.

 Οι μεγάλης διαμέτρου σωλήνες μπορούν να εγκατασταθούν με την καλύτερη προσοχή.

 Είναι ευκολότερο να ενωθούν στενά οι μεγάλης διαμέτρου σωλήνες από τους σωλήνες μικρός-διαμέτρων.

Τα εδαφικά φορτία, ως συνάρτηση της δύναμης σωλήνων, είναι χαμηλότερα
 για το μεγάλης διαμέτρου σωλήνα δεδομένου του ίδιου βάθους της
 εδαφολογικής κάλυψης.



5.9 Συμπεράσματα για τα παραπάνω υλικά

Σχήμα 5.11 Βλάβες σωλήνων-σε σχέση με το υλικό-για PGV=35inch/sec

Figure 4-10. Pipe Damage – by Material – Regression using Data up to PGV=35 Inch/Sec

(πηγή : www.americanlifelinesalliance.org)

Οι καμπύλες στο παραπάνω σχήμα αντιπροσωπεύουν τις καλής εφαρμογής γραμμές μέσω της εμπειρικής βάσης δεδομένων μόνο για το χυτοσίδηρο μικρών-διαμέτρων, τον όλκιμο σίδηρο και το σωλήνα τσιμέντου αμιάντων για τη ζημία διάδοσης κυμάτων από το σεισμό Northridge του 1994. Οι ακόλουθες παρατηρήσεις γίνονται:

 Ο σωλήνας όλκιμου σιδήρου έχει ποσοστά χαμηλότερης ζημίας για χαμηλότερο PGVs.

 Ο σωλήνας AC έχει παρόμοια ποσοστά ζημίας όπως ο σωλήνα DI και έχει ποσοστό χαμηλότερης ζημίας σε PGVs πάνω από 14 ίντσες/δευτερόλεπτο.

• Ο σωλήνας χυτοσιδήρου έχει τα υψηλότερα ποσοστά ζημίας.

Με βάση το πλήρες σύνολο στοιχείων, οι συναρτήσεις τρωτότητας εγκαθίστανται μέσω των στοιχείων για τους συγκεκριμένους τύπους σωλήνων. Τα ακόλουθα μοντέλα βρίσκονται για τη ζημία σωλήνων λόγω του επίγειου τινάγματος:

Σωλήνας χυτοσιδήρου. RR=0.00195 * PGV. Τα ποσοστά ζημίας είναι 104% (=195/187) του μέσου όρου. (RR = 0.00195 * PGV για το σωλήνα χυτοσιδήρου είναι βασισμένο μόνο στα σημεία στοιχείων CI).

Όλκιμος σωλήνας σιδήρου. RR=0.00103 * PGV. Τα ποσοστά ζημίας είναι
 55% (=103/187) του μέσου όρου. (RR = 0.00103 * PGV για DI σωλήνες είναι
 βασισμένο μόνο στα σημεία στοιχείων DI).

Σωλήνας τσιμέντου αμιάντων. RR=0.00075 * PGV. Τα ποσοστά ζημίας είναι
 40% (=75/187) του μέσου όρου.

(RR = 0.00075 * PGV για το σωλήνα AC είναι βασισμένο μόνο στα σημεία στοιχείων AC).

5.10 Άλλα υλικά σωλήνων

Τα εμπειρικά στοιχεία που υπάρχουν αυτήν την περίοδο είναι ανεπαρκή για να περιγράψουν την απόδοση για πολλές κατηγορίες θαμμένου σωλήνα. Για αυτό το λόγο ένας τετμημένος σωλήνας που έχει παρόμοιες κοινές ιδιότητες με έναν άλλο σωλήνα διαφορετικού υλικού θεωρείται πως θα έχει παρόμοια σεισμική απόδοση. Στην πραγματικότητα η εφαρμοσμένη μηχανική δείχνει ότι ο πλαστικός σωλήνας PVC με το ελαστικό μονωτικό στις ενώσεις είναι κάπως καλύτερος από τον παρόμοιο σωλήνα AC, λόγω της καλύτερης ικανότητας της ελαστικής δύναμης του πλαστικού, αλλά είναι κάπως χειρότερος από το σωλήνα AC λόγω του πιο μακρινού ευθύγραμμου τμήματος των τμημάτων. Έλλειψη των εμπειρικών στοιχείων, υποθέτουμε τις ισοδύναμες ιδιότητες σωλήνων.

<u>Κεφάλαιο 6</u>

Εφαρμογή Καμπύλων Τρωτότητας

6.1 Εισαγωγή

Οι καμπύλες τρωτότητας, όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 5, είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την αποτίμησης της σεισμικής τρωτότητας των αγωγών των δικτύων κοινής ωφέλειας. Όπως αναφέρθηκε, εν γένει, μία καμπύλη τρωτότητας αναπαριστά την πιθανότητα υπέρβασης ενός επιπέδου βλάβης ή συγκεκριμένων περιθωρίων ασφάλειας ενός αγωγού (π.χ. την υπέρβαση της αντοχής του υλικού) συναρτήσει ενός συγκεκριμένου μέτρου σοβαρότητας της σεισμικής διέγερσης (π.χ. τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση). Στη παρούσα εργασία μελετήθηκε η εφαρμογή των καμπύλων τρωτότητας λόγω της επίδρασης επιβαλλόμενων μετακινήσεων σε αγωγούς Δ.Κ.Ω. εξαιτίας της διάρρηξης σεισμικού ρήγματος. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SSF το οποίο είναι αξιόπιστο και ιδιαίτερα εύχρηστο, ακόμα και στο χρήστη που δεν εξοικειωμένος με πολύπλοκα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, για την περίπτωση που ένα ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης διασταυρώνεται με μια υπόγεια σωλήνωση αγωγών φυσικού αερίου. Τα αποτελέσματα που έδωσε το λογισμικό είναι σε επίπεδα παραμόρφωσης (%) και δίνουν μια πρώτη εικόνα για την τρωτότητα που προκαλεί μια μετατόπιση ενός ρήγματος σε ένα αγωγό κατασκευασμένο από χάλυβα.

6.2 Εμπειρικές Καμπύλες Τρωτότητας

Όπως προαναφέρθηκε στην εκτενή ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας που προηγήθηκε, υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για την παραγωγή καμπυλών τρωτότητας: εμπειρικές και αριθμητικές. Η εμπειρική μεθοδολογία βασίζεται στην παραδοχή ότι η μορφή των καμπυλών τρωτότητας ακολουθεί εκείνη της αθροιστικής (συσσωρευτικής) συνάρτησης της λογαριθμοκανονικής (lognormal) κατανομής πιθανότητας. Η αριθμητική προσέγγιση, συνήθως πραγματοποιείται με στατιστική προσομοίωση με τη μέθοδο Monte Carlo.

Για τη δημιουργία καμπύλων τρωτότητας είναι απαραίτητο να ορίσουμε ένα εύρος των επιπέδων βλάβης ώστε να γίνει αποτίμηση της τρωτότητας των εξεταζόμενων αγωγών υπό ψευδοστατικές συνθήκες. Τα επίπεδα βλάβης περιγράφονται με βάση την διακύμανση των τιμών του δείκτη βλάβης, ενώ η κεντρική τιμή του δείκτη, αντιστοιχεί στο κατώφλι του κάθε επιπέδου βλάβης. Τα προτεινόμενα επίπεδα διακρίνονται σε ελάχιστη, μικρή, μέτρια, μεγάλη, σοβαρή βλάβη έως ολική αστοχία, με βάση την εμπειρία από προηγούμενους σεισμούς (Πίνακας 6.1). Τα προτεινόμενα όρια του δείκτη βλάβης στηρίζονται στα πρότυπα από την Αμερικανική Ένωση Πολιτικών Μηχανικών (ASCE,1984). Σύμφωνα με αυτές τις προδιαγραφές, η μέγιστη αξονική παραμόρφωση είναι η βασικότερη αιτία που προκαλεί ζημιά σε έναν υπόγειο αγωγό. Η τιμή της μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης έχει εύρος τιμών από 0% έως 5%.

Επίπεδο Βλάβης	Διακύμανση αξονικής παραμόρφωσης (%)
Ελάχιστη	Σ.A. ≤1
Μικρή	1<Σ.A. ≤2
Μέτρια	2<Σ.A. ≤3
Μεγάλη	3<Σ.A. ≤4
Σοβαρή	4<Σ.A. ≤5
Ολική Αστοχία	Σ.A. >5

Πίνακας 6.1 Ορισμός Επιπέδων Βλάβης

Στην παρούσα εργασία η καμπύλη τρωτότητας εκφράζεται από την παρακάτω αθροιστική (σωρευτική) συνάρτηση πιθανότητας

$$F(D \ge DI_i \mid S) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{tot}} \cdot In \left(\frac{S}{S_{mi}} \right) \right] (6.1)$$

όπου:

F(·) = η πιθανότητα ο δείκτης βλάβης D να ισούται ή να ξεπεράσει την τιμή του δείκτη βλάβης DI_i για την i-οστή στάθμη βλάβης (βλ. και Πίν. 1)

Φ = η τυπική κανονική αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας

S = κατάλληλο μέτρο της σεισμικής έντασης, π.χ. επιτάχυνση (PGA), μετακίνηση ρήγματος, κλπ

S_{mi} = η μέση (median) τιμή της σεισμικής έντασης που απαιτείται για να προκληθεί η i-οστή στάθμη βλάβης και

β_{tot} = η συνολική λογαριθμοκανονική τυπική απόκλιση

Η κάθε καμπύλη τρωτότητας που εκφράζεται από τη σχέση (6.1) ορίζεται με τη βοήθεια δύο παραμέτρων, της μέσης τιμής της σεισμικής έντασης για την οποία ο αγωγός θα εισέρχεται στο επίπεδο βλάβης DSi, και της αντίστοιχης λογαριθμικής τυπικής απόκλισης. Οι μέσες τιμές κατωφλίου της σεισμικής έντασης για το κάθε επίπεδο βλάβης DSi προσδιορίζονται από τα διαγράμματα εξέλιξης της βλάβης, σύμφωνα με τις κεντρικές τιμές του δείκτη βλάβης που ορίστηκαν για κάθε επίπεδο (πίνακας 6.1).

Η δεύτερη παράμετρος της λογαριθμοκανονικής κατανομής, δηλαδή η συνολική λογαριθμοκανονική τυπική απόκλιση β_{tot}, αντιπροσωπεύει το σύνολο των αβεβαιοτήτων στην κάθε καμπύλη τρωτότητας. Συνδέεται με τρεις βασικούς παράγοντες: (α) την αβεβαιότητα στον προσδιορισμό των επιπέδων βλάβης, β_{DS}, (β) την αβεβαιότητα στην διαθέσιμη αντοχή, β_C, και (γ) την αβεβαιότητα στη σεισμική δράση, β_D. Οι τρεις αυτοί παράγοντες αβεβαιοτήτων, ενώ είναι στατιστικώς ανεξάρτητοι, θεωρείται ότι ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή, οπότε η συνολική λογαριθμοκανονική τυπική απόκλιση β_{tot}, δίνεται από την σχέση (6.2):

$$\beta_{tot} = \sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2 + \beta_{DS}^2} \qquad (6.2)$$

6.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SSF

Για την αριθμητική επίλυση των αγωγών που αναλύθηκαν χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SSF (Μπουκοβάλας, 2008). Για περισσότερες πληροφορίες για το πρόγραμμα βλ. Μπουκοβάλας (2008) και Παπαδοπούλου (2008). Το παράθυρο εκκίνησης του προγράμματος ζητάει από το χρήστη να δώσει τιμές σε παραμέτρους που αφορούν τον αγωγό :

Εξωτερική διάμετρος (m) Πάχος τοίχωματος (m)

Στη συνέχεια ζητούνται τιμές για τα χαρακτηριστικά του υλικού που είναι κατασκευασμένος ο αγωγός: Μέτρο Ελαστικότητας= (GPa) Τάση διαρροής (Yield Stress) (MPa) Τάση αστοχίας (Failure Stress) (MPa) Παραμόρφωση αστοχίας (%)

Τέλος, ζητούνται οι τιμές των εδαφικών ελατηρίων που προσομοιώνουν την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής καθώς και οι συνιστώσες δχ και δy της μετατόπισης του ρήγματος, η οποία συνδέεται με το μέγεθος του σεισμού με σχέσεις της μορφής Παπαδοπούλου (2008):

 $\log \delta f = -6.32 + 0.90M$ (6.3)

όπου Μ: το μέγεθος του σεισμού και

δf: η μετατόπιση του ρήγματος

Η κίνηση παράλληλα στον άξονα του αγωγού οδηγεί σε διαμήκεις δυνάμεις τριβής στη διεπιφάνεια εδάφους-αγωγού. Οι αξονικές δυνάμεις που ασκούν τα ελατήρια αντιπροσωπεύουν την τριβή που ασκεί το έδαφος στην εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια κατά μήκος του αγωγού. Η ASCE δίνει τις παρακάτω εξισώσεις για άμμο και για άλλα μη συνεκτικά εδάφη:

Διαμήκης κίνηση εδάφους για μη ρευστοποιήσιμα εδάφη- αξονικά ελατήρια

$$t_u = \frac{\pi}{2} * D * \gamma * H(1 + K_o) \tan \delta$$
(6.4)

$$x_{\mu} = \left(2.54 - 5.08 * 10^{-3} m\right) \tag{6.5}$$

Όπου:

tu: μέγιστη αξονική αντίσταση ανά μονάδα μήκους

xu: μέγιστη σχετική μετατόπιση ανά μονάδα μήκους

Κο :συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών

Η : απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους ως τον άξονα του αγωγού

D : εξωτερική διάμετρος αγωγού

γ : υπό άνωση ειδικό βάρος εδάφους

δ : γωνία τριβής μεταξύ αγωγού και εδάφους

Η κίνηση κάθετα στον άξονα του αγωγού στο οριζόντιο επίπεδο προκαλεί εγκάρσιες δυνάμεις στην διεπιφάνεια εδάφους-αγωγού. Τα εγκάρσια οριζόντια ελατήρια προσομοιώνουν την αντίσταση που ασκείται από το περιβάλλον έδαφος σε οποιαδήποτε οριζόντια μετατόπιση του αγωγού. Σύμφωνα με την ASCE προκύπτει:

$$p_u = \gamma * H * N_{qh} * D$$
 (6.6)

$$\Delta P = 0.07 - 0.10(H + D/2)$$

= 0.02 - 00.3(H + D/2) (6.7)

Όπου:

pu: μέγιστη εγκάρσια οριζόντια αντίσταση ανά μονάδα μήκους Nqh: συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας

Δύναμη τριβής ανά μήκος σωληνώσεων, t_u (kN/m) (από σχέση 6.4) Εγκάρσια οριζόντια δύναμη ανά μήκος σωληνώσεων, p_u (kN/m) (από σχέση 6.6)

Οριακή εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση ρήγματος, ΔP (mm) (από σχέση 6.7)

DX (m) - Παράλληλο στον άξονα σωλήνωσης και ισούται με δx=δf*cosβ

DY (m) - Κάθετο στον άξονα σωλήνωσης και ισούται με δy=δf*sinβ

Τα αποτελέσματα που δίνει το πρόγραμμα περιλαμβάνουν:

<u>Παραμορφώσεις</u>

- •Αξονική Παραμόρφωση στο πέρασμα του ρήγματος (%)
- Μέγιστη Αξονική Παραμόρφωση (%)
- Μέγιστη Παραμόρφωση Κάμψης-Maximum Bending Strain (%)
- Ελάχιστη Παραμόρφωση(%)
- Μέγιστη Παραμόρφωση (%)
- Μη αγκυρωμένο μήκος Unanchored length (%)



Σχήμα 6.1: Παράθυρο εκκίνησης προγράμματος SSF

6.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Με το πρόγραμμα SSF θα εξετάσουμε πως επιδρούν οι παρακάτω μεταβλητές στον αγωγό:

- Η γωνίας διάρρηξης, β.
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού, πάχος και διάμετρος(D-t).

- Ο τύπος χάλυβα του αγωγού (τάση διαρροής, τάση θραύσης).
- Η μετατόπιση του ρήγματος, δf.



Σχήμα 6.2 :Κινηματική καταπόνηση αγωγού λόγω μετατόπισης ρήγματος.

Ο αγωγός που χρησιμοποιείται είναι ένας αγωγός κατασκευασμένος από χάλυβα X-52, με εξωτερική διάμετρο D=0.6m και πάχος τοιχώματος t=0.0064m. Το έδαφος είναι αμμώδες με ενεργό ειδικό βάρος γ=18kN/m, γωνία τριβής φ=36° (δ=24°) και βάθος τοποθέτησης H=1.3m. Η μετατόπιση που επιβάλλει το ρήγμα ισούται με 2.5m και με γωνία διάρρηξης 60°.

Για να εξεταστεί η επίδραση κάθε μίας από τις παραπάνω παραμέτρους στην συμπεριφορά του αγωγού, όλες οι παράμετροι κρατούνται σταθερές και γίνονται αλλαγές κάθε φορά στην παράμετρο επίδρασης.

Στο σχήμα 6.3 απεικονίζονται οι μετατοπίσεις ρήγματος και οι γωνίες διάρρηξης που χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα στο πρόγραμμα SSF. Τα ζεύγη τιμών των μετατοπίσεων ρήγματος df με τις γωνίες διάρρηξης β έχουν επιλεγεί με τυχαίο τρόπο έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνονται περισσότερες εκδοχές για τα σεισμικά αποτελέσματα διαφόρων ενδεχόμενων περιπτώσεων.



Σχήμα 6.3 Δεδομένα Προγράμματος

Για την δημιουργία των καμπυλών τρωτότητας με τη χρήση του Excel υπολογίζουμε τις μέσες τιμές των καμπύλων τρωτότητας, όπου εδώ είναι το PHA_{DS} και στη συνέχεια εφαρμόζουμε τη σχέση 6.1. Με αυτή τη διαδικασία το b_{tot} είναι η τυπική απόκλιση του PHA για την κάθε στάθμη βλάβης.

Για να υπολογίσουμε την μέση τιμή για την κάθε στάθμη του συντελεστή ασφαλείας κάναμε αρκετούς τυχαίους συνδυασμούς των τυχηματικών μεταβλητών. Έπειτα υπολογίσαμε με ψευδοστατιστικές αναλύσεις το PHA_{DS} ώστε να βρούμε το συντελεστή ασφαλείας.

6.4.1 Επίδραση μετατόπισης ρήγματος- γωνία διάρρηξης

Η γωνία διάρρηξης β είναι η γωνία με την οποία το ρήγμα διασχίζει την σωλήνωση. Οι γωνίες που θα εξεταστούν κυμαίνονται από τις 45 ως τις 90 μοίρες. Οι τιμές της μετατόπισης ρήγματος κυμαίνονται από 1 έως 8m. Στο σχήμα 6.4 φαίνονται οι καμπύλες τρωτότητας που προκύπτουν από την αριθμητική επεξεργασία των αποτελεσμάτων του προγράμματος SSF.



Σχήμα 6.4 Καμπύλες Τρωτότητας (επίδραση df-β)

Παρατηρούμε πώς η καμπύλη με τις ελάχιστες ζημίες αυξάνεται πιο απότομα. Αυτό συμβαίνει γιατί η πιθανότητα να εμφανιστούν ελάχιστες ζημιές είναι δυνατόν να συμβούν για πολύ μικρές τιμές της μετατόπισης του ρήγματος. Επιπρόσθετα από το σχήμα 6.4 παρατηρούμε ότι η πιθανότητα υπέρβασης για τη σοβαρή ζημιά είναι περίπου ίδια με την πιθανότητα μιας πλήρους αστοχίας του αγωγού, περίπου 85%.

6.4.2 Επίδραση του υλικού του αγωγού

Στην συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται αλλαγή στο υλικό του αγωγού με τα εδαφικά χαρακτηριστικά της άμμου. Χρησιμοποιείται χάλυβας χαμηλότερης αντοχής Χ-42 με χαρακτηριστικά τάση διαρροής 290 MPa, τάση αντοχής 413 και παραμόρφωση θραύσης λόγω εφελκυσμού 4%.



Σχήμα 6.5 Καμπύλες Τρωτότητας (επίδραση υλικού αγωγού)

Στην περίπτωση που τοποθετούμε αγωγό από χάλυβα X-42, παρατηρούμε πως ο αγωγός αυτός είναι εύθραυστος και στην περίπτωση κάπου σεισμικού γεγονότος θα εμφανίσει σίγουρα κάποια ελάχιστη ζημιά. Ο συγκεκριμένος αγωγός έχει πολύ μεγάλη πιθανότητα να εμφανίσει ακόμα και μεγάλες ζημιές με πιθανότητα υπέρβασης πάνω από 90%.

6.4.3 Επίδραση διαμέτρου αγωγού

Σε αυτή την περίπτωση θα εξετάσουμε πως αντιδρά ένας αγωγός από χάλυβα X-52, ο οποίος έχει μεγαλύτερη διάμετρο. Η διάμετρος είναι ίση με D=0,95m και έχει πάχος τοιχώματος t=0.0317m και βάθος εκσκαφής H=2,09m.



Σχήμα 6.6 Καμπύλες Τρωτότητας (επίδραση διαμέτρου αγωγού)

Αυξάνοντας την τιμή της διαμέτρου, παρατηρούμε πως ο αγωγός δεν έρχεται σε πλήρη αστοχία, ούτε εμφανίζει σοβαρές ζημιές. Αντίθετα με τον αγωγό με διάμετρο D=0,6m όπου μπορεί να φτάσει ακόμα και σε πλήρη αστοχία με μεγάλη πιθανότητα υπέρβασης.

6.4.4ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η μετατόπιση του ρήγματος μεταβάλλεται και εξετάζεται η επίδραση του εδάφους που περιβάλει τον αγωγό κατά τις διαφορετικές αυτές μετατοπίσεις. Έτσι, αντί για άμμο χρησιμοποιείται ελαφρόπετρα με ενεργό ειδικό βάρος γ=7.5 kN/m, γωνία τριβής φ=30° (δ=20°) και βάθος τοποθέτησης H=1.3m.

Τοποθετώντας ελαφρόπετρα παρατηρούμε πως ο αγωγός συμπεριφέρεται καλύτερα. Με την ελαφρόπετρα ο αγωγός μπορεί να υποστεί έως μέτριες ζημιές σε αντίθεση με την περίπτωση που είναι τοποθετημένος σε άμμο και έχουμε μέχρι και πλήρη αστοχία.



Σχήμα 6.7Καμπύλες Τρωτότητας (επίδραση εδαφικών ιδιοτήτων)

6.4.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ

Η μετατόπιση που θα εξεταστεί κυμαίνεται από 1 εώς 8 μέτρα για μια σταθερή γωνία 60° (αλλαγή στις συνιστώσες δχ και δy) και τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων που προκύπτουν από το πρόγραμμα SSF δίνονται στον σχήμα 6.12.



Σχήμα 6.8 Καμπύλες Τρωτότητας(επίδραση μετατόπισης ρήγματος)

Διατηρώντας τη γωνία διάρρηξης του ρήγματος σταθερή στις 60° παρατηρούμε πως η πιθανότητα να έχουμε μικρές ζημιές είναι πολύ μεγάλη και για df>4m θα έχουμε σίγουρα την εμφάνιση κάποιας μικρής ζημιάς. Ούτε σε αυτή την περίπτωση ο αγωγός φτάνει σε πλήρη αστοχία.

6.5 Συμπεράσματα

Στην παραμετρική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας εξετάσθηκε η επίδραση των βασικότερων παραμέτρων του επηρεάζουν την καταπόνηση ενός υπόγειου αγωγού Δ.Κ.Ω. κατά τη μετατόπιση ενός ρήγματος. Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα αποτελέσματα διαπιστώθηκαν τα εξής:

- Μόνο στην περίπτωση που έχουμε τον αγωγό από χάλυβα Χ-52 και • διάμετρο D=0.6m, τοποθετημένο σε άμμο έχουμε εμφάνιση πλήρους αστοχίας.
- Ο αγωγός από χάλυβα Χ-42 είναι πιο ευάλωτος από αυτόν που είναι κατασκευασμένος από χάλυβα Χ-52. Ο Χ-42 θα εμφανίσει σίγουρα ελάχιστη ζημιά κατά τη διάρκεια κάποιου σεισμικού γεγονότος. Βέβαια δεν θα έρθει σε πλήρη αστοχία όπως ο Χ-52.
- Αυξάνοντας τη διάμετρο ενός αγωγού, παρατηρούμε πως ο αγωγός συμπεριφέρεται πολύ καλύτερα. Και όχι μόνο δεν έρχεται σε πλήρη αστοχία αλλά δεν εμφανίζει ούτε σοβαρές ζημιές.
- Η αλλαγή του εδαφικού υλικού μας έδειξε πως ο αγωγός συμπεριφέρεται καλύτερα όταν είναι τοποθετημένος σε ελαφρόπετρα από την περίπτωση που τοποθετείται σε άμμο. Στην ελαφρόπετρα ο αγωγός μπορεί να υποστεί έως μέτριες ζημιές.

Τα προαναφερθέντα συμπεράσματα που προέκυψαν στο πλαίσιο της αριθμητικής διερεύνησης που διεξήχθη με τη χρήση του λογισμικού SSF και της εμπειρικής διαδικασίας παραγωγής καμπύλων τρωτότητας, προφανώς δεν μπορούν να αποτελέσουν κάποιο γενικό κανόνα για τη τρωτότητα κάθε τύπου υπόγειας σωλήνωσης και για κάθε είδος μόνιμων μετατοπίσεων. Παρόλα αυτά, δίνουν τη δυνατότητα για μια αξιόπιστη εκτίμηση της επίδρασης των κυριότερων γεωμετρικών και μηχανικών ιδιοτήτων του αγωγού, καθώς και των παραμέτρων που αφορούν το ρήγμα και το περιβάλλον εδαφικό υλικό, στη σεισμική τρωτότητα υπόγειων αγωγών Δ.Κ.Ω. σε μια ενδεχόμενη κινηματική καταπόνηση εξαιτίας της μετατόπισης ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης. Ειδικά, εάν ληφθεί υπόψη ότι ένα τέτοιο ενδεχόμενο αποτελεί μία από τις δυσμενέστερες περιπτώσεις σεισμικής καταπόνησης και αστοχίας των αγωγών Δ.Κ.Ω. και άλλων μεγάλων τεχνικών έργων υποδομής γενικότερα.
<u>Βιβλιογραφία</u>

- 1. **ALA**, Seismic Fragility formulation for water Systems American Lifelines Alliance,Part1–Guideline,April 2001 (<u>www.americanlifelinesalliance.org</u>)
- ASCE, E-spectra California-Northridge, Earthquake investigation Committee, Technical Council on Lifelines Earthquake Engineering of American Society of Civil Engineers. Chapter 8, 9
- 3. Bachman R.E., Case Studies of Kobe Earthquake Damage.
- 4. Bachmann Hugo, Εγχειρίδιο: Αντισεισμική Προστασία Κατασκευών, Εκδ.:
 Μ. Γκιούρδας
- Dharma Wijewickreme, M.EERI, Douglas Honegger, M.EERI, Allen Mitchell, and Trevor Fitzell, M.EERI. Seismic Vulnerability Assessment and Retrofit of a Major Natural Gas Pipeline System: A Case History,
- E-spectra Armenia: Association Francaise du Parasismique 1989, Le Seisme de Spitak (R.S.S d'Armenie) du 7 Decembre 1988, Saint-Remy-Les-Chavreuse, France, Chapter 9
- 7. Falcao Silva M.J., Bento Rita, Seismic Assessment to gas and oil lifelines
- 8. **Ivanov Radan, Takada Shiro, Norikazu Morita,** Analytical Assessment of the Vulnerability of Underground jointed PVC Pipelines to Fault Displacements
- JAEE, Recent Development of Research and Practice on Earthquake Engineering in Japan (Journal of JAEE) <u>www.JAEE.jp</u> JAEE: Japan Association for Earthquake Engineering.
- 10. **K. Pitilakis, M. Alexoudi ,S. Argyroudis ,O. Monge and C. Martin** Vulnerability And Risk Assessment Of Lifelines, Chapter 9
- Kramer L. Steven, Franke W. Kevin, Huang Yi-Min, Baska A. David, Performance-based Evaluation of Lateral Spreading Displacement (4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering June 25-28, 2007 Paper No. 1208)
- Kramer L. Steven, Εγχειρίδιο: Geotechnical Earthquake Engineering. (Chapter 4 : Seismic Hazard Analysis)
- 13. **Menoni S., Pergalani F., Boni M.P, Lifelin V.** Lifelines Earthquake Vulnerability Assessment: a systemic approach

- O'Rourke D. Thomas, Wang Yu and Shi Peixin, Advances In Lifeline Earthquake Engineering (13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 5003)
- O'Rourke J. Michael, Εγχειρίδιο: Lifeline Earthquake Engineering, Proceeding of the Fourth U.S. Conference Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering. Monograph No6. August, 1998
- 16. **Sezen Halil and Whittaker S. Andrew** Performance Of Industrial Facilities during the 1999, Kocaeli, Turkey Earthquake
- Takada Shiro, Kuwada Yasuko, Mahadavian Abbas, Rasti Resa and Tsutomu Imai , Dislocation And Strong Ground Motion Zoning Under Scenario Faults For Lifelines, (13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver ,B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 125)
- Takuzo lwatsubo: Damage to industrial equipment in the 1995 Hyogoken– Nanbu Earthquake
- Tang A.J. ank A.K.. E-spectra Chi-Chi: Schiff, , eds.2000. Chi-Chi Taiwan earthquake of September 21, 1999-lifeline performance. Earthquake investigation Committee, Technical Council on Lifelines Earthquake Engineering of American Society of Civil Engineers
- 20. **Tang. A.,** Izmir (Kocaeli) Earthquake of August 17, 1999- Lifeline performance. TCLLE Monograph No. 15 Reston, Va : ASCE
- 21. Tromans lain, Behaviour of Buried Water Supply Pipelines in Earthquake Zones (A thesis submitted to the University of London. For the degree of Doctor of Philosophy and for the Diploma of the Imperial College of Science, Technology and Medicine Department of Civil and Environmental Engineering Imperial College of Science, Technology and Medicine) London, SW7 2AZ January 2004.
- Μπουκοβάλας Γεώργιος, PROGRAM: "PipeSSF" v1.0 (Stress Analysis of Buried Steel Pipelines Crossing Active Strike-Slip Faults), <u>http://users.civil.ntua.gr/gbouck/software.shtml</u>, 2008.
- 23. **ΟΑΣΠ**, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού κ' Προστασίας (<u>www.oasp.gr</u>)
- 24. Παπαδοπούλου Δήμητρα Αντισεισμικός σχεδιασμός υπόγειων δικτύων φυσικού αερίου, Διπλωματική Εργασία, , Τμήμα ΜηΠερ, Πολ Κρήτης, 2008.