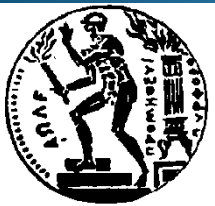


ΤΟΠΙΚΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ – ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΕΙΣΜΟΠΛΗΚΤΟΥ ΜΝΗΜΕΙΟΥ

Κωνσταντίνος Χ. ΣΠΥΡΑΚΟΣ
Ομ. Καθηγητής ΕΜΠ



*Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας,
Τομέας Δομοστατικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ
<http://lee.civil.ntua.gr/>*



ΠΑΤΡΑ – ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2024

Περιγραφή της Κατασκευής



- Βρίσκεται στο ΒΑ άκρο του νησιού της Κω
- Κατασκευάστηκε τον 14^ο αιώνα για την οχύρωση του λιμανιού και της πόλης
- Αποτελείται από δύο οχυρωματικούς περιβόλους οι οποίοι έχουν κοινή την ανατολική πλευρά και χωρίζονται στις άλλες τρεις με τάφρο, ενώ ενώνονται με γέφυρα και στη νότια πλευρά
- Εμβαδόν εξωτερικού περιβόλου: 28750m², διαστάσεις: 130X230m
- Εμβαδόν εσωτερικού περιβόλου: 8050m², διαστάσεις: 77X105m
- Έχει κηρυχθεί ιστορικό διατηρητέο μνημείο με την ΥΑ 23162/811/15-9-1948 – ΦΕΓΔΔ 15/26-11-1948

Διερευνητικές Εργασίες

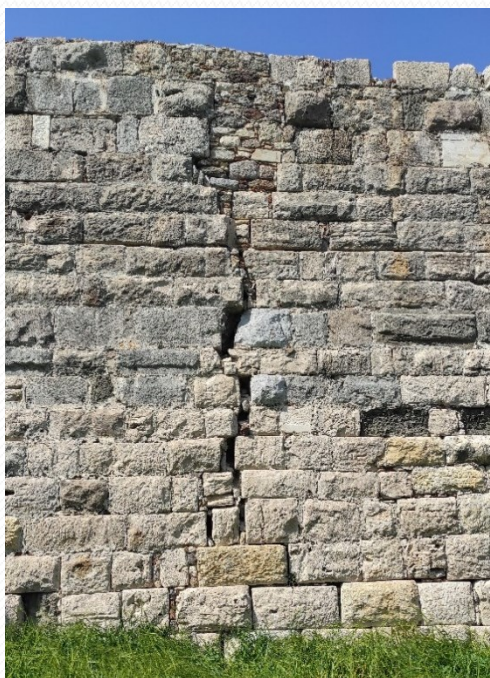
Υλικά Κατασκευής



- Φέρων οργανισμός από λιθοδομή
- Κατά την έννοια του πάχους της αποτελείται από πολλές στρώσεις (μικτή)
- Το πάχος των τοίχων είναι μεγάλο (οχυρωματική κατασκευή), 2.3m – 15m
- Εξωτερικές στρώσεις: ημιλαξευτή λιθοδομή από ογκόλιθους διαφόρων διαστάσεων και πάχους 25 – 60cm
- Εσωτερικές στρώσεις: αργολιθοδομή με χαμηλότερη ποιότητα δόμησης

Διερευνητικές Εργασίες

Αξιολόγηση Υφιστάμενων Βλαβών



- Πραγματοποιήθηκε οπτικός έλεγχος και διαπιστώθηκε η ύπαρξη εκτεταμένων βλαβών
- Παράγοντες στους οποίους οφείλονται:
 - Φθορά στο χρόνο κυρίως λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων
 - Καθιζήσεις εδάφους θεμελίωσης
 - Σεισμική δράση 21^{ης} Ιουλίου 2017

Διερευνητικές Εργασίες

Αντιπροσωπευτικές Υφιστάμενες Βλάβες



- Καμπύλη απόληξη ΒΑ γωνίας εσωτερικού περιβόλου – Εκτεταμένες βλάβες
- Εμφανίζονται κατακόρυφες ρωγμές και στις δύο παρειές της λιθοδομής
 - Εκτείνονται σχεδόν στο σύνολο του ύψους της λιθοδομής
 - Έχουν αποκατασταθεί με αρμολόγημα αλλά έχουν διευρυνθεί εκ νέου
 - Έχουν μεγάλο εύρος και έχουν προκαλέσει την αποσύνδεση μεταξύ των τριών τμημάτων της λιθοδομής
- Αποσύνδεση ενδιάμεσου τμήματος από το δυτικό και το ανατολικό
- Απόκλιση ενδιάμεσου τμήματος από την κατακόρυφο

Διερευνητικές Εργασίες

Αντιπροσωπευτικές Υφιστάμενες Βλάβες



- Απόσπαση και κατάρρευση εκτός επιπέδου τμημάτων γωνιακής σφήνας
 - Σχηματισμός τοπικού μηχανισμού αστοχίας “γωνιακής σφήνας” εκτός επιπέδου μεταξύ ενδιάμεσου και δυτικού τμήματος
 - Αντίστοιχος μηχανισμός αστοχίας μεταξύ ενδιάμεσου και ανατολικού τμήματος

Διερευνητικές Εργασίες

Εργαστηριακές και Επί Τόπου Δοκιμές

- Δοκιμή θλίψης λίθου:
 - Ορυκτολογική – πετρογραφική μελέτη
 - Χημική ανάλυση
 - Προσδιορισμός φυσικομηχανικών χαρακτηριστικών
 - Προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής σε συνδυασμό με κρουσιμέτρηση
- Κρουσιμέτρηση λίθου:
 - Προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής σε συνδυασμό με δοκιμή θλίψης
- Τέσσερις διαφορετικοί τύποι λίθων ασβεστολιθικής και ηφαιστειακής προέλευσης
- Μέση θλιπτική αντοχή $f_{cm} = 67.93 \text{ MPa}, 46.72 \text{ MPa}, 55.77 \text{ MPa}$ και 52.00 MPa , αντίστοιχα



Διερευνητικές Εργασίες

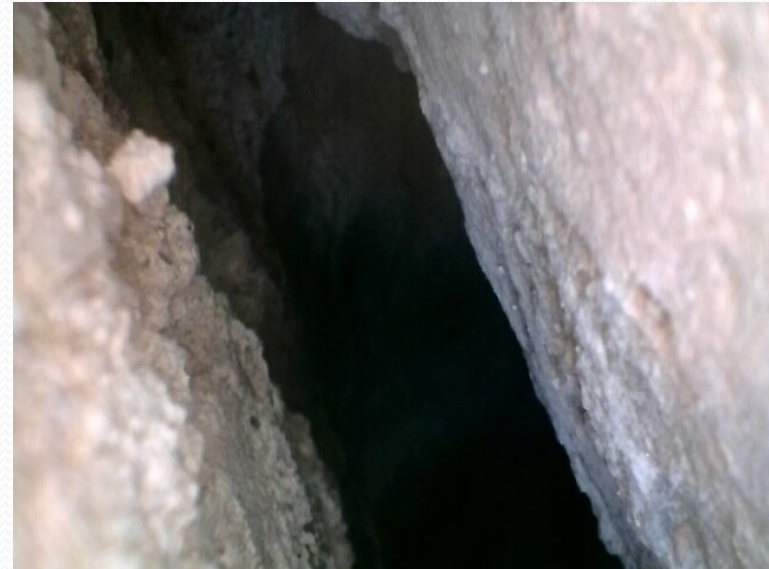
Εργαστηριακές και Επί Τόπου Δοκιμές

- Ανάλυση δειγμάτων κονιάματος:
 - Κοκκομετρική διαβάθμιση
 - Μικροσκοπική εξέταση
 - Χημική και ορυκτολογική εξέταση
 - Προσδιορισμός φυσικών ιδιοτήτων
- Κρουσιμέτρηση κονιάματος:
 - Προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής
- Δύο διαφορετικοί τύποι κονιαμάτων
- Μέση θλιπτική αντοχή $f_{cm} = 5.89 \text{ MPa}, 1.27 \text{ MPa},$ αντίστοιχα



Διερευνητικές Εργασίες

Εργαστηριακές και Επί Τόπου Δοκιμές



- Ενδοσκόπηση:
 - Λιθοδομή μικτή κατά την έννοια του πάχους της
 - Πολλές συνεχόμενες στρώσεις λιθοδομής
 - Εξωτερικές στρώσεις: ημιλαξευτή λιθοδομή από ογκόλιθους διαφόρων διαστάσεων και πάχους 25 – 60cm
 - Εσωτερικές στρώσεις: αργολιθοδομή με χαμηλότερη ποιότητα δόμησης
 - Επάλξεις: Ποικιλομορφία στον τρόπο δόμησης (ημιλαξευτή-αργολιθοδομή) με πάχος από 60cm έως άνω του 1m

Διερευνητικές Εργασίες

Γεωτεχνική Έρευνα

- Στόχοι γεωτεχνικής έρευνας:
 - Προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους
 - Προσδιορισμός της πιθανότητας να συμβεί ρευστοποίηση του εδάφους στην περιοχή του μνημείου
- Πραγματοποιήθηκαν εννέα γεωτρήσεις βάθους 30m

Από 0,00 έως 5,00 μ. Άργιλος ιλυώδης, μέσης πλαστικότητας με φυτικά λείψανα και οργανικά 9,2%, χρώμα γκρι σκούρο, μαλακή έως μέσης στιφρότητας.

Από 5,00 έως 7,50 μ. Άργιλος αμώδης, μεγάλης πλαστικότητας με λίγα χαλίκια και χρώμα τεφροκύανο μαλακή έως μέσης στιφρότητας.

Από 7,50 έως 11,00 μ. Άργιλος μεγάλης πλαστικότητας συνεκτική με ασβεστούχα υλικά και λίγα χαλίκια. Χρώμα κοκκινωπό έως γκρι καφέ.

Από 11,00 έως 18,00 μ. Άργιλος μέσης πλαστικότητας, συνεκτική με λίγα χαλίκια και ασβεστούχα υλικά. Χρώμα γκρι ανοιχτό.

Από 18,00 έως 20,00 μ. Αργιλώδης άμμος, συνεκτική με χαλίκια και χρώμα καφέ ανοιχτό.

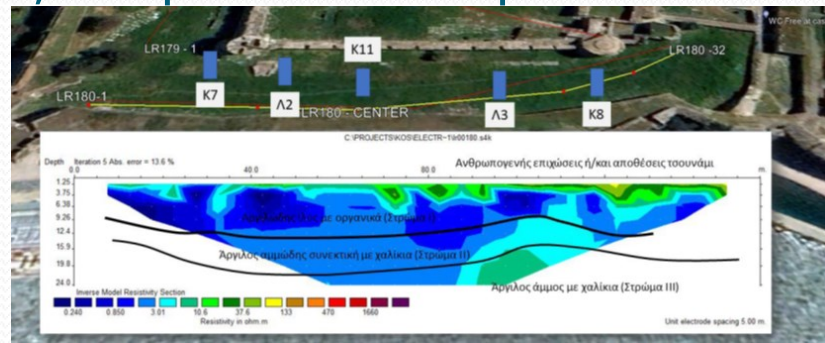
Ενδεικτικά αποτελέσματα γεώτρησης

- Κατηγορία εδάφους κατά EC8-1: D
- Αυξημένος κίνδυνος ρευστοποίησης για τη γεωτεχνική στρώση III: τεφρή ιλύς έως αμμο-ιλύς με οργανικά, πολύ μαλακής απόθεσης κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα

Διερευνητικές Εργασίες

Γεωφυσική Έρευνα

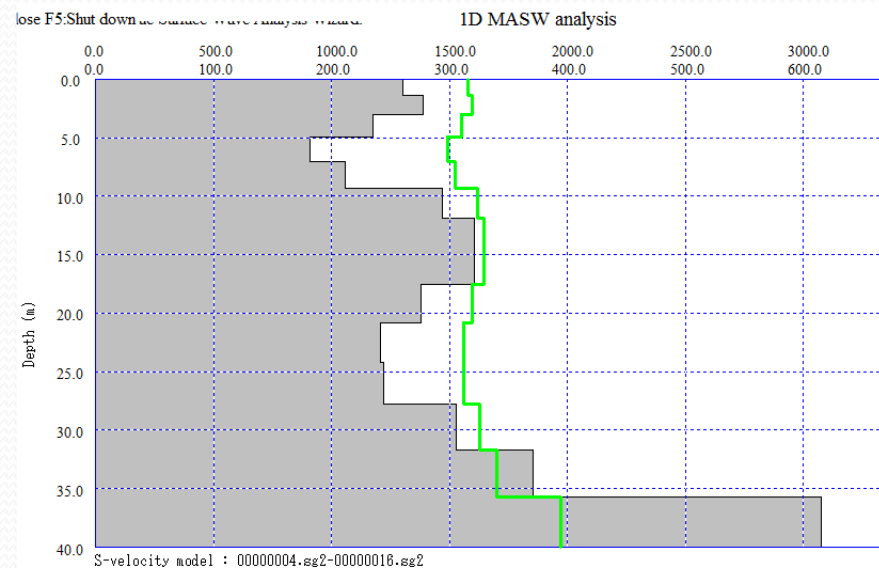
- Στόχοι γεωφυσικής έρευνας:
 - Προσδιορισμός των γεωμετρικών και γεωλογικών χαρακτηριστικών του εδάφους
 - Προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων στις θέσεις των τεσσάρων πύργων
- Ηλεκτρική τομογραφία (ERT):
 - Εφαρμόστηκε σε τρεις θέσεις του κάστρου
 - Εντοπίστηκε επιφανειακή στρώση από αργιλικό σύμμικτο υλικό
 - Εντοπίστηκε γεωλογικό καθαρά υπόβαθρο σε βάθος 24m – αδύνατο να πρόκειται για ανθρωπογενούς χαρακτήρα κατασκευή. Πιθανόν πρόκειται για γεωλογικό σχηματισμό μαρμάρου, ασβεστόλιθου ή θαλάσσιων ιζημάτων μικρή διαπερατότητα
 - Το βάθος θεμελίωσης των πύργων εκτιμάται σε 5m
 - Εντοπίστηκε ρήγμα σε βάθος 40m



Διερευνητικές Εργασίες

Γεωφυσική Έρευνα

- Σεισμική Μέθοδος (MASW):
 - Εφαρμόστηκε σε δύο πύργους του κάστρου
 - Για τον Πύργο 1 προέκυψε ότι η θεμελίωσή του έχει υποστεί βλάβες. Παρουσιάζεται το διάγραμμα μεταβολής της διατμητικής ταχύτητας με το βάθος
 - Για τον Πύργο 3 προέκυψε ότι τα η θεμελίωσή του έχει είναι σε καλή κατάσταση.



Αποτίμηση Υφιστάμενης Κατασκευής

Μηχανικά Χαρακτηριστικά Λιθοδομής

Πίνακας 1: Μηχανικά χαρακτηριστικά τοιχοποιίας τειχών πάχους από 2.30 m έως 15 m

Θλιπτική Αντοχή f (MPa)	2.00
Εφελκυστική Αντοχή f_t (MPa)	0.053
Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	1230
Ειδικό Βάρος w (kN/m ³)	20.0

Πίνακας 2: Μηχανικά χαρακτηριστικά τοιχοποιίας τμημάτων μεταξύ των επάλξεων πάχους από 20 έως 40 cm

Θλιπτική Αντοχή f (MPa)	1.07
Εφελκυστική Αντοχή f_t (MPa)	0.030
Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	870
Ειδικό Βάρος w (kN/m ³)	19.0

- Ενδεικτικά μηχανικά χαρακτηριστικά δύο τύπων λιθοδομών (Πίνακες 1 και 2)
- Συντελεστής εμπιστοσύνης για επίπεδο γνώσης ΕΓ2 – Κανονική Γνώση (EC8-3): $CF_{ΕΓ2} = 1.20$
- Συντελεστής ασφαλείας υλικού: $\gamma_M = 2.5$

Αποτίμηση Υφιστάμενης Κατασκευής

Σεισμολογικά Στοιχεία

- Ανάλυση σύμφωνα με EC8-1
- Εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού (Ζώνη 2): $a_{gR} = 0.24g$
- Συντελεστής σπουδαιότητας (Κατηγορία II): $\gamma_I = 1.0$
- Κατηγορία εδάφους D: $S = 1.35$

Αποτίμηση Υφιστάμενης Κατασκευής

Κινηματική Ανάλυση

- Οι βλάβες που παρατηρούνται υποδεικνύουν ότι λόγω της σεισμικής δράσης της 21^{ης} Ιουλίου 2017 αναπτύχθηκαν τοπικοί μηχανισμοί αστοχίας εκτός επιπέδου
- Υποδεικνύουν και το ενδεχόμενο ανάπτυξης άλλων τοπικών μηχανισμών στο μέλλον
- Με την κινηματική ανάλυση αξιολογείται η σεισμική συμπεριφορά μιας κατασκευής έναντι του ενδεχομένου ανάπτυξης τοπικών μηχανισμών αστοχίας εκτός επιπέδου
- Υπολογίζεται η εδαφική επιτάχυνση που προκαλεί την ενεργοποίηση του μηχανισμού, θεωρώντας τα μέλη που συμμετέχουν στο μηχανισμό ως άκαμπτα σώματα
- Εάν η επιτάχυνση αυτή είναι μικρότερη της εδαφικής επιτάχυνσης απαιτείται η λήψη μέτρων ενίσχυσης, αλλιώς ο φορέας επαρκεί.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ & ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ
ΓΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΠΥΡΑΚΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ
Δ/ΝΤΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Κεφάλαιο 8

ΤΟΠΙΚΟΙ

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ

8.1 Τοπικοί μηχανισμοί εκτός επιπέδου

Μετά από σεισμό, σε πολλές κατασκευές από τοιχοποιία παρατηρείται ότι οι αστοχίες και οι καταρρεύσεις οφείλονται στην ανεπαρκή σύνδεση μεταξύ των στοιχείων του φορέα, όπως για παράδειγμα μεταξύ των τοίχων ή μεταξύ των τοίχων και των πατωμάτων, γεγονός που οδηγεί στην ανάπτυξη τοπικών μηχανισμών αστοχίας εκτός επιπέδου (Σχήματα 8.1, 8.2 και 8.3γ). Συνεπώς, πληροφορίες για κατασκευαστικές λεπτομέρειες, όπως η μονολιθικότητα της σύνδεσης μεταξύ των τοίχων, η παρουσία ελκυστήρων ή διαζωμάτων, η σύνδεση τοίχων με οριζόντια διαφράγματα και οι συνδέσεις με παρακείμενα κτήρια, είναι ιδιαίτερα σημαντικές.



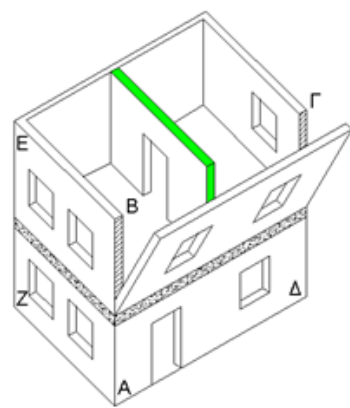
Σχήμα 8.1.: Αποκόλληση και πτώση τυμπάνου αετώματος λόγω σεισμού στην είσοδο δημοτικού σχολείου.



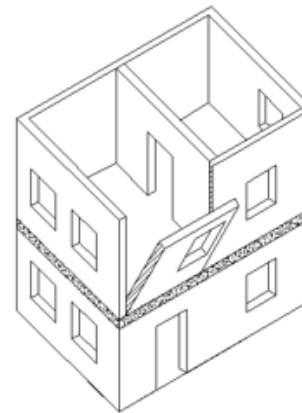
Σχήμα 8.2.: Αποκόλληση τοίχων και γωνιών.

Η ανάλυση μιας κατασκευής “ως συνόλου” βασίζεται στη θεώρηση ότι οι συνδέσεις μεταξύ των φερόντων στοιχείων δεν αστοχούν ώστε να αποφεύγεται η ανάπτυξη τοπικών μηχανισμών. Οι αστοχίες σε μια κατασκευή με ανεπαρκείς συνδέσεις ελέγχονται με αναλύσεις που εξετάζουν τοπικούς μηχανισμούς. Αυτό το αντικείμενο αναπτύσσεται διεξοδικά στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου. Συνεπώς, για να ελεγχθεί η συμπεριφορά μιας κατασκευής είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν αναλύσεις και έλεγχοι θεωρώντας την κατασκευή “ως σύνολο”, αλλά και ως ένα φορέα ο οποίος αποτελείται από επιμέρους άκαμπτα στοιχεία, τα οποία ονομάζονται ακολούθως *μακροστοιχεία* και τα οποία αστοχούν με την ανάπτυξη ενός ή περισσότερων μηχανισμών. Αυτή η προσέγγιση προϋποθέτει ότι η τοιχοποιία έχει επαρκή αντοχή για το σχηματισμό άκαμπτων μακροστοιχείων, δηλαδή δε θρυμματίζεται στα αρχικά συστατικά της (μεμονωμένοι λίθοι και τεμάχια κονιάματος).

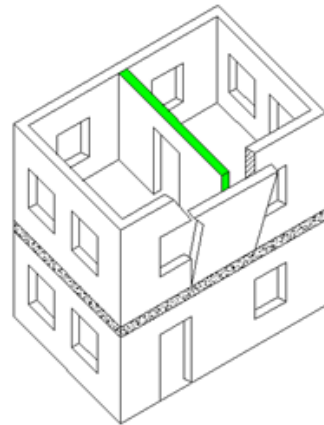
Στις δύο πρώτες περιπτώσεις των Σχημάτων 8.3(α) και (β), ο φορέας συμπεριφέρεται “ως σύνολο”, υπό την προϋπόθεση ότι η τοιχοποιία είναι καλοδομημένη και υπάρχει επαρκής σύνδεση μεταξύ των εγκάρσιων τοίχων. Αντίθετα, η απουσία απαραμόρφωτων διαφραγμάτων ή διαζωμάτων, καθώς και η ανεπαρκής σύνδεση μεταξύ των εγκάρσιων τοίχων οδηγεί στην ανεξάρτητη μετακίνηση των τοίχων (μακροστοιχείων) και στην ανάπτυξη τοπικού μηχανισμού ανατροπής υπό σεισμικό φορτίο (Σχήμα 8.3γ).



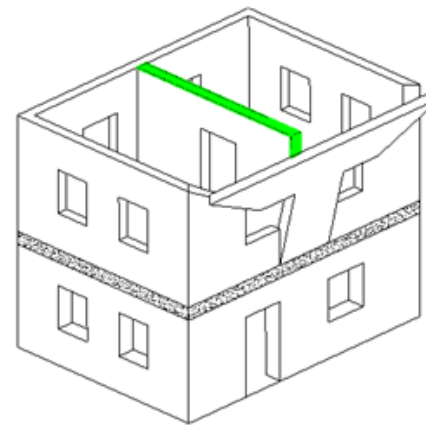
Μηχανισμός 1



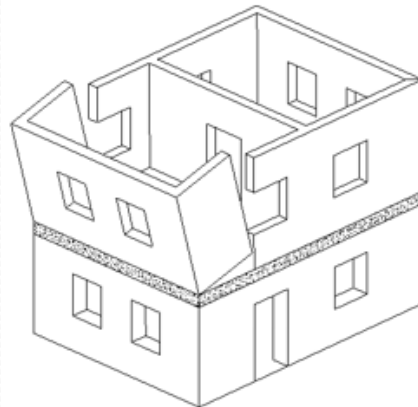
Μηχανισμός 2



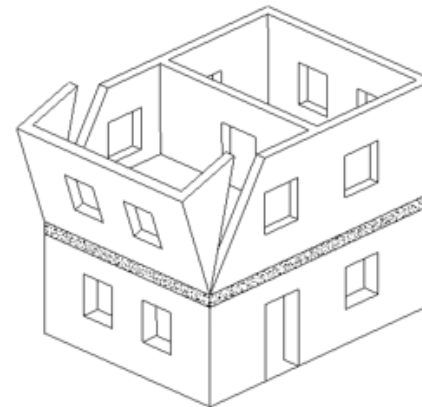
Μηχανισμός 3



Μηχανισμός 4



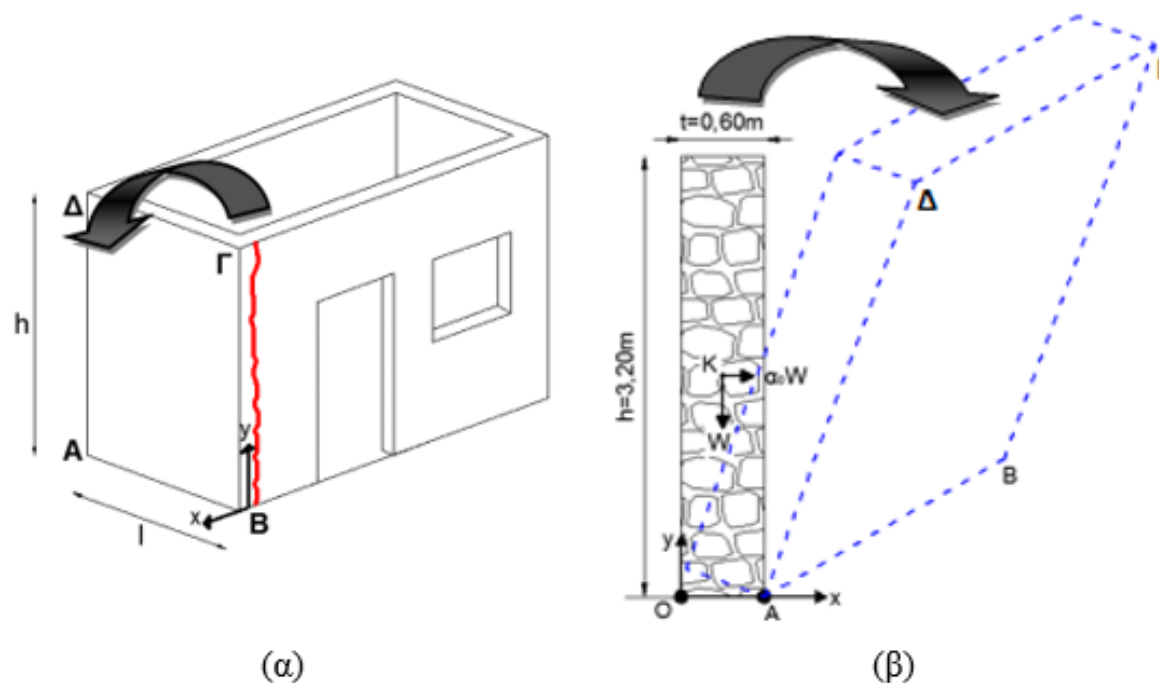
Μηχανισμός 5



Μηχανισμός 6

8.1.1 Παράδειγμα I Υπολογισμού του a_0 Μηχανισμού Ανατροπής

Να υπολογιστεί ο συντελεστής a_0 του μηχανισμού ανατροπής του άκαμπτου τοίχου ΑΒΓΔ που παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.6. Το ειδικό βάρος της τοιχοποιίας είναι $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$. Το πάχος της τοιχοποιίας είναι $t = 60 \text{ cm}$, το ύψος $h = 3.20 \text{ m}$ και το μήκος $l = 2.00 \text{ m}$.

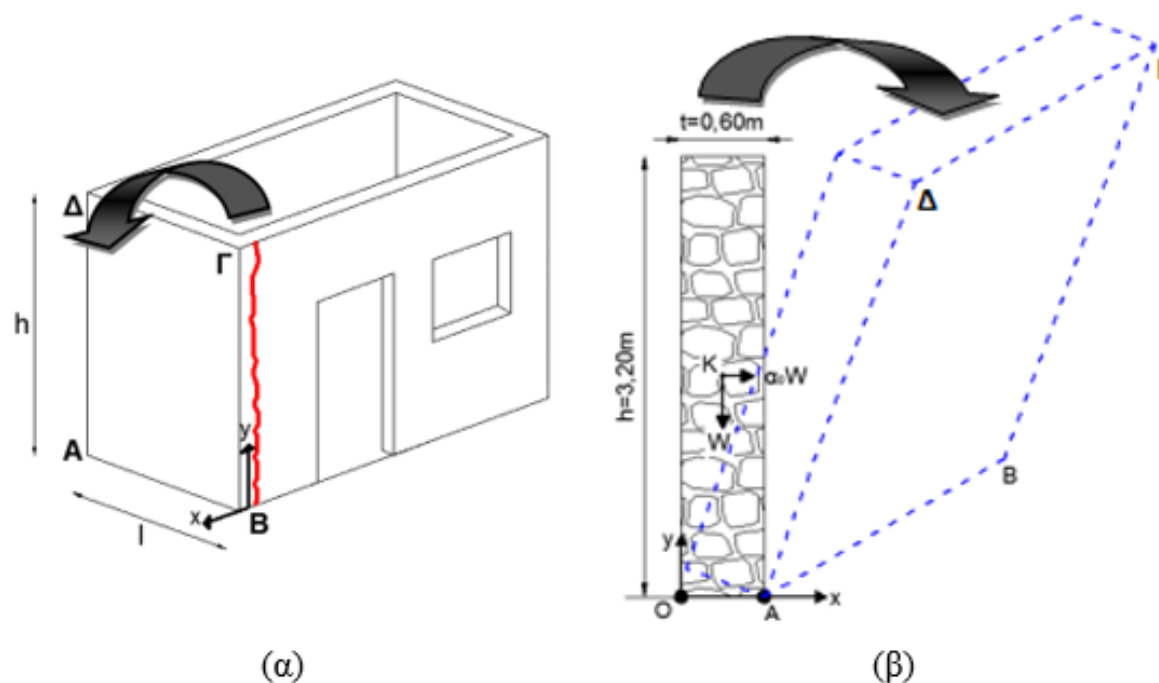


Σχήμα 8.6.: (α) Γεωμετρία φορέα και ανάπτυξη κατακόρυφης ρωγμής, (β) τομή του τοίχου ΑΒΓΔ καθ' ύψος.

Στον τοίχο ΑΒΓΔ, αν θεωρηθεί ότι η στέγη εδράζεται στους τοίχους της μεγάλης πλευράς του κτηρίου, ασκείται η κατακόρυφη δύναμη που είναι το ίδιο βάρος του W και η οριζόντια σεισμική δύναμη $a_0 \cdot W$ η οποία προκαλεί περιστροφή του περί τον άξονα ΑΒ, κάθετο στο επίπεδο xy . Και οι δύο δυνάμεις ασκούνται στο κέντρο βάρους K του τοίχου. Ως σύστημα αναφοράς θεωρούνται οι άξονες x, y με αρχή των αξόνων O στο κάτω αριστερά άκρο της βάσης του τοίχου (βλ. Σχήμα 8.6β).

8.1.1 Παράδειγμα Ι Υπολογισμού του a_0 Μηχανισμού Ανατροπής

Να υπολογιστεί ο συντελεστής a_0 του μηχανισμού ανατροπής του άκαμπτου τοίχου ΑΒΓΔ που παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.6. Το ειδικό βάρος της τοιχοποιίας είναι $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$. Το πάχος της τοιχοποιίας είναι $t = 60 \text{ cm}$, το ύψος $h = 3.20 \text{ m}$ και το μήκος $l = 2.00 \text{ m}$.



Σχήμα 8.6.: (α) Γεωμετρία φορέα και ανάπτυξη κατακόρυφης ρωγμής, (β) τομή του τοίχου ΑΒΓΔ καθ' ύψος.

Στον τοίχο ΑΒΓΔ, αν θεωρηθεί ότι η στέγη εδράζεται στους τοίχους της μεγάλης πλευράς του κτηρίου, ασκείται η κατακόρυφη δύναμη που είναι το ίδιο βάρος του W και η οριζόντια σεισμική δύναμη $a_0 \cdot W$ η οποία προκαλεί περιστροφή του περί τον άξονα ΑΒ, κάθετο στο επίπεδο xy . Και οι δύο δυνάμεις ασκούνται στο κέντρο βάρους Κ του τοίχου. Ως σύστημα αναφοράς θεωρούνται οι άξονες x, y με αρχή των αξόνων Ο στο κάτω αριστερά άκρο της βάσης του τοίχου (βλ. Σχήμα 8.6β).

$$\alpha_0 = \frac{\sum_{k=1}^N (G_k + Q_{1,k}) \cdot \delta_{GQ1y,k} - \sum_{k=1}^m Q_{3,k} \cdot \delta_{Q3,k} + L_i}{\sum_{k=1}^N (G_k + Q_{1,k} + Q_{2,k}) \cdot \delta_{GQ12x,k}}$$

Αποτίμηση Υφιστάμενης Κατασκευής

Κινηματική Ανάλυση

- Μηχανισμός ανατροπής:
 - Αναπτύσσεται με την περιστροφή ενός τοίχου περί οριζόντιου άξονα στη βάση του
 - Αποφεύγεται με την προσθήκη στοιχείων που αναλαμβάνουν εφελκυσμό, π.χ. ελκυστήρες, βλήτρα, διαζώματα, διαφράγματα
- Μηχανισμός σφήνας:
 - Αναπτύσσεται με την περιστροφή ενός τμήματος του τοίχου τριγωνικού σχήματος στην περιοχή της σύνδεσης μεταξύ δύο τοίχων περί οριζόντιου άξονα στη βάση του
 - Αποφεύγεται με παρόμοιες μεθόδους με τον μηχανισμό ανατροπής

Εφαρμογή της κινηματικής ανάλυσης στην κατασκευή:

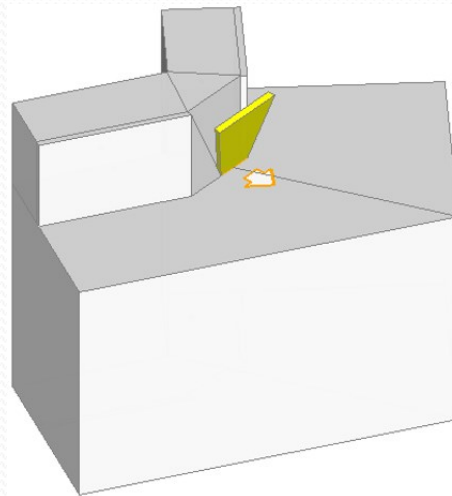
- Για κάθε τμήμα της κατασκευής όπου έχει αναπτυχθεί τοπικός μηχανισμός αστοχίας ή υπάρχει κίνδυνος να αναπτυχθεί στο μέλλον δημιουργήθηκε ξεχωριστό προσομοίωμα
- Πραγματοποιήθηκε έλεγχος επάρκειας για Οριακή Κατάσταση Σημαντικών Βλαβών (SD), συνεπώς εφαρμόστηκε συντελεστής συμπεριφοράς $q_{LM} = 2.00$

Αποτίμηση Υφιστάμενης Κατασκευής

Κινηματική Ανάλυση

Αποκόλληση και ανατροπή της εξωτερικής στρώσης της λιθοδομής:

- Η εξωτερική στρώση έχει αποκολληθεί και αποκλίνει από την κατακόρυφο, αλλά δεν έχει ακόμα καταρρεύσει
- Συντελεστής $\alpha_0 = 0.060$
- Εδαφική επιτάχυνση αστοχίας του μηχανισμού: $PSA_{SD} = 0.035g$
- Συντελεστής ανεπάρκειας: $\lambda = 0.144 < 1.0$. Συνεπώς, ο μηχανισμός αστοχεί
- Η μειωμένη διάρκεια ζωής της κατασκευής για εδαφική επιτάχυνση $\alpha_{gR} = 0.035g$ αντί για $0.24g$ προκύπτει $T < 10$ έτη αντί για 50 έτη

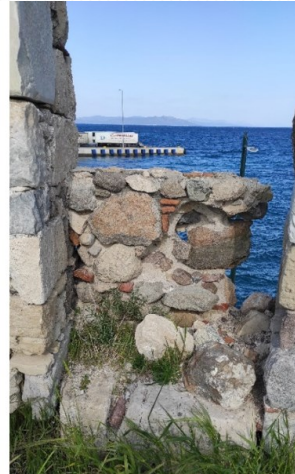
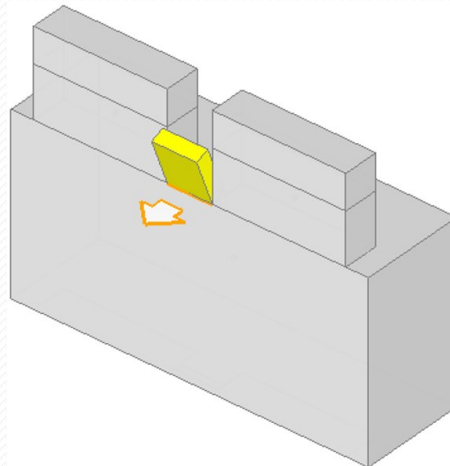


Αποτίμηση Υφιστάμενης Κατασκευής

Κινηματική Ανάλυση

Αποκόλληση και ανατροπή τμήματος τοιχοποιίας μεταξύ επάλξεων:

- Πρόκειται για τμήματα της λιθοδομής που έχουν κατασκευαστεί μεταγενέστερα και δεν είναι κατάλληλα συνδεδεμένα με τα προγενέστερα
- Συνήθως η αποκόλληση των κατακόρυφων πλευρών έχει ήδη συμβεί
- Συντελεστής $\alpha_0 = 0.139$
- Εδαφική επιτάχυνση αστοχίας του μηχανισμού: $PSA_{SD} = 0.074g$
- Συντελεστής ανεπάρκειας: $\lambda = 0.309 < 1.0$. Συνεπώς, ο μηχανισμός αστοχεί
- Η μειωμένη διάρκεια ζωής της κατασκευής για εδαφική επιτάχυνση $\alpha_{gR} = 0.074g$ αντί για $0.24g$ προκύπτει $T < 10$ έτη αντί για 50 έτη

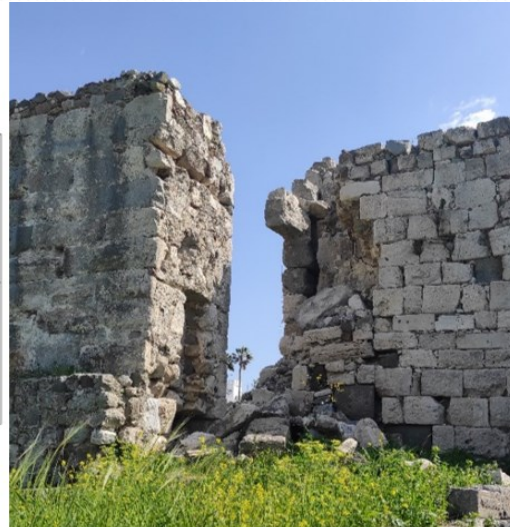
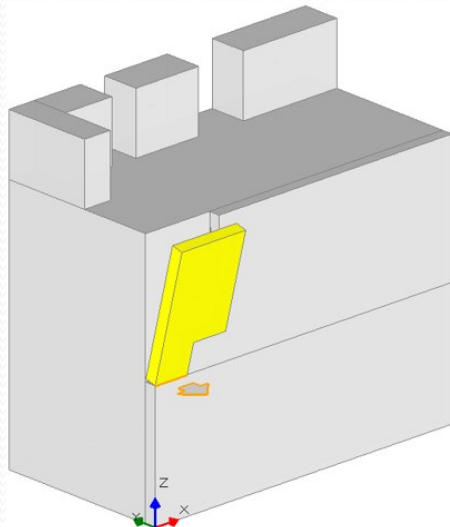


Αποτίμηση Υφιστάμενης Κατασκευής

Κινηματική Ανάλυση

Αποκόλληση και ανατροπή της εξωτερικής στρώσης της λιθοδομής:

- Η εξωτερική στρώση και κατέρρευσε κατά τη διάρκεια του σεισμού
- Συντελεστής $\alpha_0 = 0.080$
- Εδαφική επιτάχυνση αστοχίας του μηχανισμού: $PSA_{SD} = 0.084g$
- Συντελεστής ανεπάρκειας: $\lambda = 0.350 < 1.0$. Συνεπώς, επαληθεύεται η αστοχία του μηχανισμού
- Η μειωμένη διάρκεια ζωής της κατασκευής για εδαφική επιτάχυνση $\alpha_{gR} = 0.084g$ αντί για $0.24g$ προκύπτει $T < 10$ έτη αντί για 50 έτη

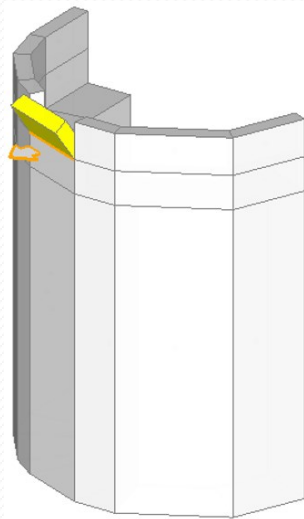


Αποτίμηση Υφιστάμενης Κατασκευής

Κινηματική Ανάλυση

Αποκόλληση και ανατροπή επάλξεων πύργου:

- Αποκόλληση έπαλξης στη βάση από τον πύργο και ανατροπή
- Ορισμένες επάλξεις κατέρρευσαν κατά τη διάρκεια του σεισμού
- Συντελεστής $\alpha_0 = 0.407$
- Εδαφική επιτάχυνση αστοχίας του μηχανισμού: $PSA_{SD} = 0.186g$
- Συντελεστής ανεπάρκειας: $\lambda = 0.774 < 1.0$. Συνεπώς, ο μηχανισμός αστοχεί
- Η μειωμένη διάρκεια ζωής της κατασκευής για εδαφική επιτάχυνση $\alpha_{gR} = 0.186g$ αντί για $0.24g$ προκύπτει $T = 23$ έτη αντί για 50 έτη

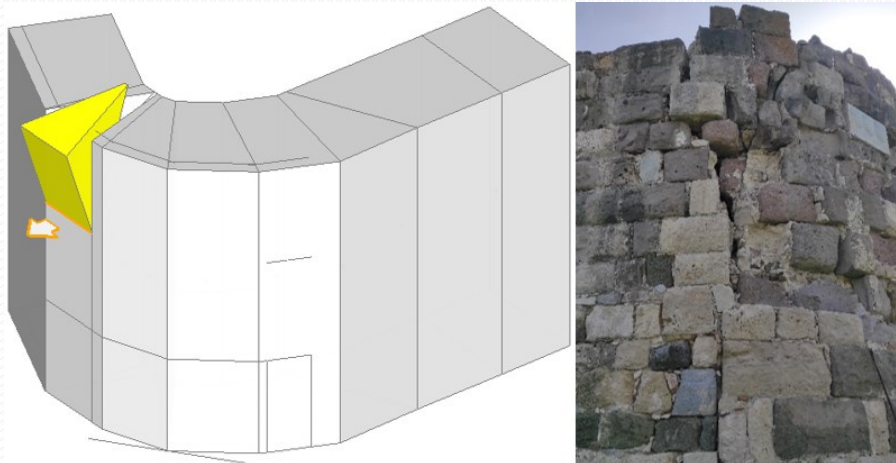


Αποτίμηση Υφιστάμενης Κατασκευής

Κινηματική Ανάλυση

Αποκόλληση και ανατροπή “σφήνας”:

- Στην καμπύλη απόληξη του βόρειου τείχους του εσωτερικού περιβόλου παρατηρούνται δύο σημεία διαμόρφωσης μηχανισμού “σφήνας”. Το ένα έχει καταρρεύσει, ενώ το δεύτερο έχει αποσπαστεί αλλά δεν έχει καταρρεύσει
- Συντελεστής $\alpha_0 = 0.388$
- Εδαφική επιτάχυνση αστοχίας του μηχανισμού: $PSA_{SD} = 0.285g$
- Συντελεστής ανεπάρκειας: $\lambda = 1.188 > 1.0$. Συνεπώς, ο μηχανισμός επαρκεί



Προτεινόμενες Επεμβάσεις

- Για την απόφαση των μεθόδων επέμβασης λαμβάνονται υπ' όψιν:
 - Οι υφιστάμενες καταρρεύσεις δομικών μελών
 - Οι υφιστάμενες βλάβες
 - Τα αποτελέσματα της αποτίμησης της υφιστάμενης κατασκευής
- Προτείνονται επεμβάσεις τοπικού χαρακτήρα προσαρμοσμένες στην ενισχυόμενη περιοχή της κατασκευής και το είδος του τοπικού μηχανισμού
- Εκ νέου έλεγχος επάρκειας όλων των ενισχυμένων τμημάτων της κατασκευής έναντι τοπικών μηχανισμών αστοχίας εκτός επιπέδου για επαλήθευση της επάρκειάς τους

Αποτίμηση Ενισχυμένης Κατασκευής

Προτεινόμενες Επεμβάσεις

Αποκόλληση και ανατροπή της εξωτερικής στρώσης της λιθοδομής:

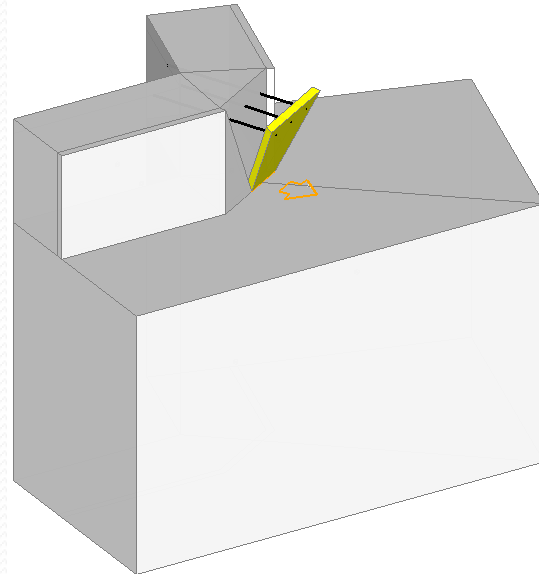
- Προτεινόμενες επεμβάσεις:
 - Καθαίρεση και ανακατασκευή της εξωτερικής στρώσης. Χρήση των λίθων που καθαιρέθηκαν και βρίσκονται σε καλή κατάσταση
 - Λιθοσυρραφή μεταξύ υφιστάμενων και ανακατασκευαζόμενων λίθων στα άκρα της ανακατασκευαζόμενης περιοχής όπου υπάρχουν ρωγμές
 - Εφαρμογή ελικοειδών μεταλλικών ράβδων κατά μήκος των οριζόντιων αρμών για σύνδεση με την υφιστάμενη λιθοδομή εκατέρωθεν
 - Εφαρμογή ελικοειδών μεταλλικών ράβδων κάθετα στην εξωτερική στρώση για σύνδεση με τις υφιστάμενες εσωτερικές στρώσεις

Αποτίμηση Ενισχυμένης Κατασκευής

Κινηματική Ανάλυση

Αποκόλληση και ανατροπή της εξωτερικής στρώσης της λιθοδομής:

- Κατά τον υπολογισμό έχουν ληφθεί υπόψη μόνο οι εγκάρσιοι σύνδεσμοι της πρώτης στρώσης στο άνω άκρο της λιθοδομής
- Συντελεστής $\alpha_0 = 1.333$
- Εδαφική επιτάχυνση αστοχίας του μηχανισμού: $PSA_{SD} = 0.768g$
- Συντελεστής ανεπάρκειας: $\lambda = 3.202 > 1.0$. Συνεπώς, επαρκεί



Αποτίμηση Υφιστάμενης Κατασκευής

Προτεινόμενες Επεμβάσεις

- Αποκόλληση και ανατροπή τμήματος τοιχοποιίας μεταξύ επάλξεων:
- Πρόκειται για τμήματα της λιθοδομής που έχουν κατασκευαστεί μεταγενέστερα και δεν αποτελούν τμήμα του μνημείου
 - Υπάρχει υψηλός κίνδυνος κατάρρευσης
 - Οριστική καθαίρεση η οποία θα βοηθήσει και στην αρχιτεκτονική αποκατάσταση του μνημείου

Αποτίμηση Υφιστάμενης Κατασκευής

Προτεινόμενες Επεμβάσεις

Αποκόλληση και ανατροπή της εξωτερικής στρώσης της λιθοδομής:

- Εκτός της κατάρρευσης της βόρειας εξωτερικής στρώσης εμφανίζονται επιπλέον προβλήματα:
 - Αποκόλληση ανατολικής εξωτερικής στρώσης λιθοδομής
 - Εκτεταμένη αποδιοργάνωση λιθοδομής της βόρειας όψης, το οποίο πιθανότατα συμβαίνει και στις εσωτερικές στρώσεις
 - Αστοχία δύο λίθινων δοκών – υπερθύρων της πύλης εισόδου από τον εσωτερικό προς τον εξωτερικό περίβολο
- Καθαίρεση και ανακατασκευή του συνόλου της περιοχής. Χρήση των λίθων που καθαιρέθηκαν και βρίσκονται σε καλή κατάσταση

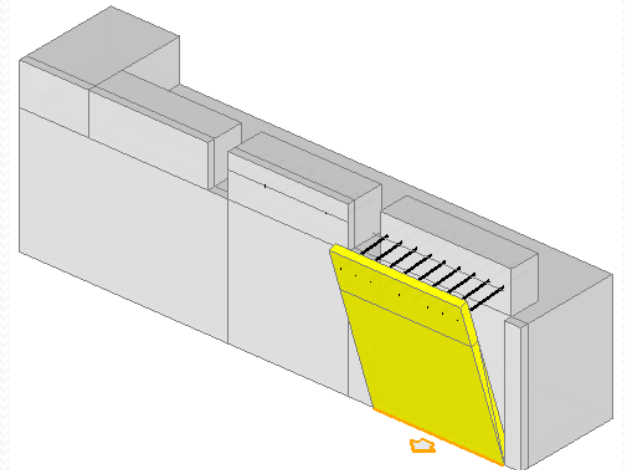


Αποτίμηση Ενισχυμένης Κατασκευής

Προτεινόμενες Επεμβάσεις – Κινηματική Ανάλυση

Αποκόλληση και ανατροπή της εξωτερικής στρώσης της λιθοδομής:

- Έχουν αναπτυχθεί ρωγμές και έχουν καταρρεύσει τμήματα. Ο μηχανισμός δεν έχει ενεργοποιηθεί. Προτεινόμενες επεμβάσεις:
 - Ανακατασκευή τμημάτων της λιθοδομής που έχουν καταρρεύσει. Χρήση των λίθων που έχουν καταρρεύσει και βρίσκονται σε καλή κατάσταση
 - Αρμολόγημα εξωτερικής στρώσης λιθοδομής
 - Εφαρμογή ελικοειδών μεταλλικών ράβδων κάθετα στην εξωτερική στρώση για σύνδεση με τις υφιστάμενες εσωτερικές στρώσεις
- Κατά τον υπολογισμό έχουν ληφθεί υπόψη μόνο οι εγκάρσιοι σύνδεσμοι της πρώτης στρώσης στο άνω άκρο της λιθοδομής
- Συντελεστής $\alpha_0 = 0.256$
- Εδαφική επιτάχυνση αστοχίας του μηχανισμού: $PSA_{SD} = 0.316g$
- Συντελεστής ανεπάρκειας: $\lambda = 1.351 > 1.0$.
Συνεπώς, επαρκεί

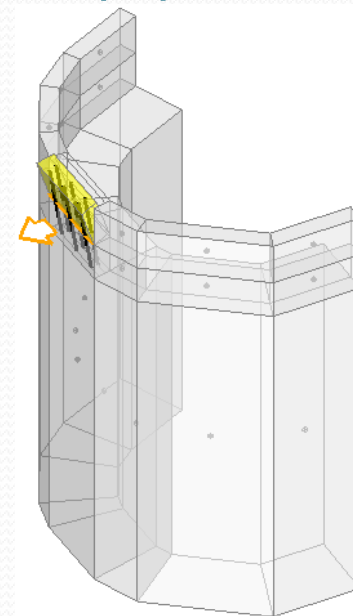


Αποτίμηση Ενισχυμένης Κατασκευής

Προτεινόμενες Επεμβάσεις – Κινηματική Ανάλυση

Αποκόλληση και ανατροπή επάλξεων πύργου:

- Προτεινόμενες επεμβάσεις:
 - Καθαίρεση όλων των επάλξεων του πύργου και διατήρηση των λίθων που είναι σε καλή κατάσταση
 - Ανακατασκευή των επάλξεων του πύργου
 - Εφαρμογή κατακόρυφων ελικοειδών μεταλλικών ράβδων στη βάση των επάλξεων για σύνδεση με τον πύργο
- Συντελεστής $\alpha_0 = 0.925$
- Εδαφική επιτάχυνση αστοχίας του μηχανισμού: $PSA_{SD} = 0.422g$
- Συντελεστής ανεπάρκειας: $\lambda = 1.760 > 1.0$.
Συνεπώς, επαρκεί



Αποτίμηση Υφιστάμενης Κατασκευής

Προτεινόμενες Επεμβάσεις

Αποκόλληση και ανατροπή “σφήνας”:

- Η καμπύλη απόληξη του βόρειου τείχους εμφανίζει εκτεταμένες βλάβες:
 - Ρωγμές μεγάλου εύρους
 - Αποκόλληση μεγάλων τμημάτων της λιθοδομής
 - Κατάρρευση μικρών τμημάτων της λιθοδομής
 - Απόκλιση τμημάτων της λιθοδομής από την κατακόρυφο
- Δεν είναι δυνατή η αποκατάσταση και ενίσχυσή του
- Καθαίρεση και ανακατασκευή του συνόλου της καμπύλης απόληξης. Χρήση των λίθων που καθαιρέθηκαν και βρίσκονται σε καλή κατάσταση

Φιλοσοφία των προτεινόμενων επεμβάσεων στο μνημείο:

- Συμβατότητα με τα υφιστάμενα υλικά
- Εφαρμογή επεμβάσεων αποκλειστικά σε περιοχές που εμφάνισαν βλάβες
- Εφαρμογή της ελάχιστης αποδεκτής στάθμης επιτελεστικότητας
- Εφαρμογή αναστρέψιμων επεμβάσεων

Γεωτεχνικές Επεμβάσεις

Υφιστάμενη κατάσταση:

- Ο κίνδυνος εμφάνισης ρευστοποίησης εδάφους είναι υψηλός
- Η περιοχή που εμφάνισε τα σημαντικότερα προβλήματα λόγω ρευστοποίησης είναι ο βόρειος τοίχος του εσωτερικού περιβόλου
- Οι σοβαρότερες βλάβες παρατηρήθηκαν στην καμπύλη απόληξη στο ανατολικό άκρο του τοίχου

Προτεινόμενες επεμβάσεις:

- Εφαρμογή χαλικοπασσάλων σε επιλεγμένη περιοχή του κάστρου
- Συνολικά 215 χαλικοπάσσαλοι διαμέτρου 800mm και μήκους 12 – 15m, με αξονική απόσταση μεταξύ τους 2.4m.
- Ποσοστό αντικατάστασης εδάφους $\alpha = 10.1\%$
- Αντικατάσταση φυσικού εδάφους με χαλίκι σε βάθος 1m στο σύνολο της επιλεγμένης περιοχής στην κορυφή των χαλικοπασσάλων



Συμπεράσματα

- Οι οχυρωματικές κατασκευές από λιθοδομή μπορεί να είναι ευάλωτες σε καθιζήσεις και σεισμικά φορτία που προκαλούν τοπικούς μηχανισμούς αστοχίας εκτός επιπέδου. Η θεμελίωση τέτοιων κατασκευών σε έδαφος ευάλωτο σε ρευστοποίηση αυξάνει αυτόν τον κίνδυνο
- Η πιθανότητα αστοχιών λόγω τοπικών μηχανισμών σε τέτοιες κατασκευές είναι υψηλή. Η σεισμική διακινδύνευση μπορεί να υπολογιστεί μέσω της κινηματικής ανάλυσης
- Απαιτείται εφαρμογή της κινηματικής ανάλυσης σε κάθε μέλος της κατασκευής ξεχωριστά με τη θεώρηση όλων των πιθανών μηχανισμών αστοχίας
- Λαμβάνοντας τα κατάλληλα μέτρα ενίσχυσης είναι δυνατή η αποφυγή των αστοχιών:
 - Αρμολόγημα εξωτερικών στρώσεων
 - Αντικατάσταση λίθων που έχουν αστοχήσει
 - Καθαίρεση και ανακατασκευή δομικών μελών με εκτεταμένες βλάβες με χρήση υλικών ανώτερης ποιότητας

Συμπεράσματα

- Λιθοσυρραφή

- Ελικοειδείς μεταλλικές ράβδοι από ανοξείδωτο χάλυβα τοποθετημένες παράλληλα στους οριζόντιους αρμούς ή/και κάθετα στην εξωτερική στρώση

- Σε ορισμένες περιπτώσεις η λύση μπορεί να είναι η οριστική καθαίρεση τμημάτων της κατασκευής που εμφανίζουν υψηλό κίνδυνο αστοχίας με τρόπο που να επηρεάζεται η αρχιτεκτονική του μνημείου το ελάχιστο δυνατό

- Λαμβάνοντας τα κατάλληλα μέτρα ενίσχυση είναι δυνατή η αποφυγή της ρευστοποίησης του εδάφους, η οποία οδηγεί την κατασκευή σε δομικές αστοχίες. Βελτίωση ποιότητας εδάφους της περιοχής με:

- Εφαρμογή χαλικοπασσάλων

- Εφαρμογή επιφανειακής στρώσης από χαλίκι στην περιοχή εφαρμογής των χαλικοπασσάλων

ΤΟΠΙΚΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ – ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΕΙΣΜΟΠΛΗΚΤΟΥ ΜΝΗΜΕΙΟΥ

ΠΑΤΡΑ – ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2024

Σας ευχαριστώ

Κωνσταντίνος Χ. Σπυράκος

*Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας,
Τομέας Δομοστατικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ
<http://lee.civil.ntua.gr/>*

