

Ενίσχυση τοιχοποιίας

1) Υπολογισμός θλιπτικής αντοχής τοιχοποιίας

Η θλιπτική αντοχή των εξωτερικών παρειών της τοιχοποιίας δίνεται από τον τύπο του Τάσσιου:

$$f_{ex,c} = \frac{\frac{2}{3}\sqrt{f_{bc}} - \alpha + \beta f_{mc}}{1 + 3.5 * (V_m / V_w - 0.30)} \quad (1)$$

όπου :

f_{bc} : η θλιπτική αντοχή του τοιχοσώματος

f_{mc} : η θλιπτική αντοχή του κονιάματος

α : μειωτικός συντελεστής για τοιχοποιία από φυσικούς λίθους που κυμαίνεται από 0.5 για λαξευμένες πέτρες μέχρι 2.5 για κροκάλες (για τεχνητούς λίθους $\alpha=0$)

β : συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την συνεισφορά του κονιάματος στην αντοχή και είναι $\beta=0.5$ για λιθοδομή και $\beta=0.1$ για σπτοπλινθοδομή

V_m/V_w : ο λόγος όγκου κονιάματος προς τοιχοποιίας

Υποθέτοντας ότι για τρίστρωτη τοιχοποιία η θλιπτική αντοχή του τοίχου εξαρτάται κυρίως από τις εξωτερικές στρώσεις, η συνεισφορά του εσωτερικού πυρήνα έχει αγνοηθεί. Έτσι:

$$f_{wc,0} = (V_{ex} / V) * f_{ex,c} \quad (2)$$

όπου V_{ex}/V ο λόγος όγκων εξωτερικής στρώσης τοιχοποιίας προς ολόκληρη τη τοιχοποιία.

Αντιθέτως, ο παρακάτω τύπος χρησιμοποιείται για να υπολογίσει τη θλιπτική αντοχή του ενισχυμένου τοίχου μετά τη χρήση ενέματος:

$$f_{mk} = f_{wc,0} * [1 + 1.25 * (V_{inf} / V) * \frac{\sqrt{f_{gr}}}{f_{wc,0}}] \quad (3)$$

όπου:

V_{inf}/V ο λόγος όγκων εσωτερικής στρώσης τοιχοποιίας προς ολόκληρη τη τοιχοποιία.

f_{gr} : η θλιπτική αντοχή του ενέματος

2) Υπολογισμός θλιβόμενου μήκους άοπλης τοιχοποιίας

Το μήκος της τοιχοποιίας που βρίσκεται στη θλιβόμενη ζώνη l_c εξαρτάται αποκλειστικά από την απόσταση άσκησης του αξονικού φορτίου από το σημείο άσκησης της ροπής.

Εάν η εκκεντρότητα $e=M_{sd}/N_{sd}$ είναι μικρότερη από $l_w/6$ (όπου l_w το μήκος του τοίχου), τότε όλη η τοιχοποιία θλίβεται, δηλαδή $l_c=l_w$

Εάν η εκκεντρότητα e είναι μεγαλύτερη από $l_w/6$, τότε το μήκος της τοιχοποιίας που θλίβεται δίνεται από τον τύπο:

$$l_c=3(l_w/2 - e) \quad (4)$$

3) Υπολογισμός μέγιστης παραμόρφωσης σχεδιασμού Σ.Υ.

Η μέγιστη παραμόρφωση σχεδιασμού του σύνθετου υλικού δίνεται ως η ελάχιστη από τις δύο παρακάτω τιμές:

$$\varepsilon_{fd} = \min\left(n_a \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd}\right) \quad (5)$$

όπου:

n_a : περιβαλλοντικός παράγοντας (ίσος με 0.95 για εσωτερικό περιβάλλον και για ενίσχυση με σύνθετο υλικό άνθρακα, πίνακας 3.4 του κανονισμού)

γ_f : συντελεστής ασφαλείας σύνθετου υλικού (πίνακας 3.2, ίσος με 1.10 και 1.20 για εφαρμογή τύπου Α, δηλαδή ελάσματα, σε περίπτωση θραύσης και αποκόλλησης αντίστοιχα και ίσο με 1.25 και 1.50 για εφαρμογή τύπου Β, δηλαδή υφάσματα, για θραύση και αποκόλληση αντίστοιχα)

ε_{fk} : η παραμόρφωση αστοχίας του υλικού ενίσχυσης

ε_{fdd} : η παραμόρφωση αποκόλλησης του υλικού ενίσχυσης, η οποία υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd}}{E_f} \quad (6)$$

και f_{fdd} η αντοχή σχεδιασμού αποκόλλησης του σύνθετου υλικού, η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d} \sqrt{\gamma_M}} \sqrt{\frac{2E_f \Gamma_{ΓΚ}}{t_f}} \quad (7)$$

όπου

$$\Gamma_{ΓΚ} = c_1 \sqrt{f_{mk} f_{mtm}} \quad (8)$$

με:

γ_M : συντελεστής ασφαλείας τοιχοποιίας ίσος με 1.2

c_1 : συντελεστής ίσος με 0.015

E_f το μέτρο ελαστικότητας του Σ.Υ. και

f_{mtm} : εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας, η οποία λαμβάνεται ίση με $0.10f_{mk}$ που είναι η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας της οποίας ο τρόπος υπολογισμού ακολουθεί παρακάτω.

4) Ενίσχυση τοιχοποιίας σε κάμψη εντός επιπέδου

Η ροπή αντοχής τοιχοποιίας υπό κάμψη εντός του επιπέδου υπολογίζεται ως εξής:

$$M_{Rd} = \frac{\sigma_d * t * l^2}{2} \left(1 - \frac{\sigma_d * \gamma_M}{f_{wk}}\right) \quad (9)$$

Όπου:

t το πάχος του τοίχου

l το μήκος του τοίχου

σ_d η τάση που προκαλεί η αξονική δύναμη στο τοίχο ίση με $N_{sd}/(t*l)$

f_{wk} η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

και γ_M συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1.5

Σε περίπτωση που η ροπή που προκύπτει από το σχεδιασμό M_{sd} είναι μεγαλύτερη από τη ροπή αντοχής τότε η τοιχοποιία πρέπει να ενισχυθεί με κατακόρυφες λωρίδες οι οποίες θα είναι ικανές να παραλάβουν ροπή $\Delta M = M_{sd} - M_{Rd}$.

Έστω ότι τοποθετούνται n λωρίδες σε κάθε άκρο, η μία δίπλα στην άλλη. Σε περίπτωση που οι λωρίδες «μπαίνουν» και στη θλιβόμενη περιοχή της τοιχοποιίας τότε παύουν στο κομμάτι αυτό να συνεισφέρουν. Το συνολικό μήκος που καταλαμβάνει η ενίσχυση είναι $n * w_j$ όπου w_j το πλάτος της κάθε λωρίδας. Επομένως για τον μοχλοβραχίονα της ενίσχυσης από το θλιβόμενο άκρο διακρίνονται οι εξής δύο περιπτώσεις:

- Εάν $n * w_j > l_w - l_c$ τότε ο μοχλοβραχίονας της ενίσχυσης είναι $z = (l_w - l_c) / 2$ (10)

- Εάν $n * w_j < l_w - l_c$ τότε ο μοχλοβραχίονας της ενίσχυσης είναι $z = l_w - l_c - n * w_j / 2$

Αντίστοιχα, η δύναμη που παραλαμβάνει ο οπλισμός ενίσχυσης είναι:

- $F = n * w_j * t_j * E_{fd} * \epsilon_{fd}$ εάν $n * w_j < l_w - l_c$ και (11)

- $F = (l_w - l_c) * t_j * E_{fd} * \epsilon_{fd}$ εάν $n * w_j > l_w - l_c$

Η ροπή που παραλαμβάνει η ενίσχυση υπολογίζεται για κάθε μία περίπτωση που αναφέρθηκε ως το γινόμενο $\Delta M = F \cdot z$. Αντικαθιστώντας την τιμή ΔM ως την διαφορά της ροπής σχεδιασμού από της αντοχής, υπολογίζεται ο απαιτούμενος αριθμός λωρίδων n .

Επειδή η ενίσχυση τοποθετείται και στο δεξί και στο αριστερό άκρο του τοίχου, ώστε να καλύπτεται η περίπτωση να υπάρχει εφελκυσμός δεξιά και αριστερά, πρέπει να δοθεί προσοχή στο να μην επικαλύπτεται ο ένας σπλισμός από τον άλλον στο μήκος του τοίχου. Επομένως ο μέγιστος αριθμός λωρίδων που μπορεί να έχει το κάθε μισό του τοίχου είναι $(l_w/2)/w_j$.

5) Ενίσχυση τοιχοποιίας σε διάτμηση

Η αύξηση της διατμητικής αντοχής πέτρινου τοίχου, ο οποίος έχει ενισχυθεί με οριζόντιες λωρίδες ανθρακουφάσματος, υπολογίζεται με βάση το προσομοίωμα του Ιταλικού κανονισμού (CNR-DT 200/2004) από τη σχέση:

$$V_{Rd} = \{V_{Rd,m} + V_{Rd,f}, V_{Rd,max}\} \quad (12)$$

$V_{Rd,m}$: η διατμητική αντοχή μη ενισχυμένης τοιχοποιίας

$V_{Rd,f}$: η διατμητική ενίσχυση με σύνθετο υλικό

$V_{Rd,max}$: μέγιστη διατμητική δύναμη που προκαλεί κατάρρευση του θλιπτήρα

$$V_{Rd,m} = 1/\gamma_{Rd} f_{vd} t d \quad (13)$$

$$V_{Rd,f} = 1/\gamma_{Rd} 0.6 d A_{fw} f_{fd} / \rho_f \quad (14)$$

$$V_{Rd,max} = 0.3 f_{md}^h t d \quad (15)$$

d : είναι η απόσταση του θλιβόμενου άκρου της τοιχοποιίας από το ΚΒ του κατακόρυφου σπλισμού, t : το πάχος του τοίχου, f_{vd} : η διατμητική αντοχή του τοίχου, n : αριθμός στρώσεων Σ.Υ, γ_{Rd} : μερικός συντελεστής ίσος με 1.2, A_{fw} : ποσοστό σύνθετου υλικού παράλληλα στην διατμητική δύναμη, ρ_f : απόσταση από κέντρο σε κέντρο τις ενίσχυσης με σύνθετο υλικό, κάθετα στην διεύθυνση της διατμητικής δύναμης

Διατμητική αντοχή τοίχου $f_{vd} = f_{vko} + 0.4 \sigma_d$ όπου $\sigma_d = N_{sd} / (t \cdot l_c)$ όπου l_c το θλιβόμενο μήκος

Σε περίπτωση που η τέμνουσα σχεδιασμού προκύψει μεγαλύτερη από τη αντοχή της άοπλης τοιχοποιίας, τότε ο τοίχος πρέπει να ενισχυθεί με οριζόντιες λωρίδες σύνθετου υλικού οι οποίες θα παραλαμβάνουν τέμνουσα ίση με $\Delta V = V_{Rd,f} = V_{sd} - V_{rd,m}$. Αντικαθιστώντας υπολογίζεται ο λόγος A_{fw} / ρ_f . Ανάλογα με τη γεωμετρία του Σ.Υ. που χρησιμοποιείται, υπολογίζεται το A_{fw} και επομένως υπολογίζεται το ρ_f . Ο απαιτούμενος αριθμός λωρίδων, δεδομένου ότι τοποθετούνται ξεκινώντας από τα άκρα του τοίχου είναι ίσος με $(n-1) \cdot \rho_f + w_j = h \rightarrow n = (h - w_j) / \rho_f + 1$.

6) Ενίσχυση τοιχοποιίας σε κάμψη εκτός επιπέδου

Η ροπή αντοχής τοιχοποιίας υπό κάμψη εκτός του επιπέδου υπολογίζεται ως εξής:

$$M_{Rd} = \frac{\sigma_d * t^2 * l}{2} \left(1 - \frac{\sigma_d * \gamma_M}{f_{wk}}\right) \quad (16)$$

Σε περίπτωση που η ροπή σχεδιασμού εκτός επιπέδου προκύψει μεγαλύτερη από τη παραπάνω αντοχή, τότε απαιτείται ενίσχυση με οριζόντιες λωρίδες που θα παραλαμβάνουν την διαφορά των δύο ροπών.

Η λωρίδες ξεκινάνε να τοποθετούνται από το πάνω άκρο της τοιχοποιίας και η κάθε μία παραλαμβάνει ροπή ίση με $F * z$ όπου $F = w_j * t_j * E_{fd} * \epsilon_{fdd}$ και $z = t/2$. Επομένως για n λωρίδες, η συνολική ροπή που παραλαμβάνει η ενίσχυση είναι $n * F * z$ την οποία αν εξισώσουμε με την παραπάνω διαφορά των ροπών προκύπτει ο απαιτούμενος αριθμός οριζόντιων λωρίδων.

Είναι αρκετά πιθανό, η απαιτούμενη ενίσχυση σε κάμψη εκτός επιπέδου να υπερκαλύπτεται από τον σπλισμό που έχει τοποθετηθεί έναντι διάτμησης.

Seismic Retrofit of Masonry Structures (Stone Masonry)

1. Evaluation of compressive strength

The compressive strength of the external facades of a masonry wall is given by:

$$f_{ex,c} = \frac{\frac{2}{3}\sqrt{f_{bc}} - \alpha + \beta f_{mc}}{1 + 3.5 * (V_m / V_w - 0.30)} \quad (1)$$

where:

f_{bc} : compressive strength of stone/brick

f_{mc} : compressive strength of mortar

α : reduction factor. For masonry made of “natural” stones it varies from 0.5 for hand-carved stones to 2.5 for “natural stage” (for “artificial” stones $\alpha=0$)

β : Factor accounting for the contribution of mortar to the overall strength of the masonry wall. It is taken as $\beta=0.5$ for stone masonry and $\beta=0.1$ for brick masonry.

V_m/V_w : volume ratio (mortar over whole wall)

For a three-leaf masonry wall, one may ignore the contribution of the internal core, thus the total strength can be obtained from:

$$f_{wc,0} = (V_{ex} / V) * f_{ex,c} \quad (2)$$

where: V_{ex}/V is the ratio of the volume of the external facades over the total volume of the wall.

The following equation can be used to calculate the compressive strength of the wall after strengthening with injected resin

$$f_{mk} = f_{wc,0} * [1 + 1.25 * (V_{inf} / V) * \frac{\sqrt{f_{gr}}}{f_{wc,0}}] \quad (3)$$

where:

V_{inf}/V : volume ratio of the internal core volume over the volume of the whole wall

f_{gr} : the compressive strength of the injected resin

2. Calculation of the masonry section length under compression.

The length of the masonry l_c that is under compression exclusively depends on eccentricity ratio:

$$e = M_{sa} / N_{sd}$$

If $e < l_w/6$ (l_w is the wall length) then the whole section is in compression $l_c = l_w$.

If $e > l_w/6$, then the length of the wall under compression is given by:

$$l_c = 3(l_w/2 - e) \quad (4)$$

3. Calculation of the largest design strain for FRP.

The largest design strain is selected as the minimum of the following two values:

$$\varepsilon_{fd} = \min\left(n_a \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd}\right) \quad (5)$$

where:

n_a : environmental factor taken as 0.95 for interior placement of the CFRP, from Table 3.4 of the code

γ_f : safety factor of FRP (Table 3.2, taken as 1.10 and 1.20 for type A application, i.e., lamina, for fracture and debonding, respectively, or as 1.25 and 1.50 for type B application, i.e. fabrics for fracture and debonding respectively)

ε_{fk} : failure strain of FRP

ε_{fdd} : deponding strain of FRP, that is calculated from:

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd}}{E_f} \quad (6)$$

And f_{fdd} is the deponding design strength, that can be obtained from:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d} \sqrt{\gamma_M}} \sqrt{\frac{2E_f \Gamma_{\Gamma K}}{t_f}} \quad (7)$$

Where:

$$\Gamma_{\Gamma K} = c_1 \sqrt{f_{mk} f_{mtm}} \quad (8)$$

With:

γ_M : safety factor of the masonry wall taken as 1.2

c_1 : taken as 0.015

E_f : modulus of elasticity of FRP

f_{mtm} : tensiile strength of masonry wall, taken as 0.1 f_{mk} which is the characteristic compressive strength of the masonry wall as calculated in the following section.

4. In-plane strengthening for Bending.

The in-plane bending moment resistance of a masonry wall is given by:

$$M_{Rd} = \frac{\sigma_d * t * l^2}{2} \left(1 - \frac{\sigma_d * \gamma_M}{f_{wk}}\right) \quad (9)$$

Where:

t = wall thickness

l = wall length

σ_d = the stress on the wall caused by $N_{sd}/(t * l)$

f_{wk} = compressive strength of wall

γ_M = factor of safety taken as 1.5

If the design moment M_{sd} is greater than the moment resistance M_{RD} , the wall can be strengthened with FRP strips placed vertically that could undertake a moment.

$$\Delta M = M_{sd} - M_{RD}$$

We consider that the strips are placed next to each other at the edges of the wall. The strips on the side that is under compression do not contribute. The total length covered by the strengthening strips is $n \cdot w_j$ is the width of a strip. We distinguish two cases regarding the lever arm.

a) $n \cdot w_j > l_w - l_c$ then $z = (l_w - l_c) / 2$ (10)

b) $n \cdot w_j < l_w - l_c$ then $z = l_w - l_c - n \cdot w_j / 2$

where: t is the distance of the mid-midth of the FRP strips to the central axis of the wall.

The tensile force developed in the FRP, respectively, is:

$$\begin{aligned} - F &= n \cdot w_j \cdot t_j \cdot E_{fd} \cdot \epsilon_{fdd} \quad \text{if } n \cdot w_j < l_w - l_c \\ - F &= (l_w - l_c) \cdot t_j \cdot E_{fd} \cdot \epsilon_{fd} \quad \text{if } n \cdot w_j > l_w - l_c \end{aligned} \quad (11)$$

The moment undertaken by the FRP reinforcement is calculated from $\Delta M = F \cdot z$. By substituting ΔM as the difference between the moment strength from the design strength, one can calculate the required number of FRP layers.

Because the wall is strengthened at both ends, to account for the possibility of tension to the left and right, care must be taken not to superimpose the strengthening of the two sides. Therefore the maximum number of FRP strips that can be placed on each half side of a wall is $(l_w / 2) / w_j$.

5. Strengthening for shear

For a wall strengthened with horizontal strips of CRFP cloth can be calculated according to the (CNR-DT 200/2004) from:

$$V_{Rd} = \{V_{Rd,m} + V_{Rd,f}, V_{Rd,max}\} \quad (12)$$

Where:

$V_{Rd,m}$: shear strength of the unstrengthened wall

$V_{Rd,f}$: shear strength from FRP strengthening

$V_{Rd,max}$: largest shear for compression failure

$$V_{Rd,m} = 1 / \gamma_{Rd} f_{vd} t d \quad (13)$$

$$V_{Rd,f} = 1 / \gamma_{Rd} 0.6 d A_{fw} f_{fd} / p_f \quad (14)$$

$$V_{Rd,max} = 0.3 f_{md}^h t d \quad (15)$$

d : the distance of the compressive edge of the wall to the center of gravity of the FRP strengthening strips,

t : the wall thickness,

f_{vd} : shear strength of the wall,
 n : number of FRP layers,
 γ_{Rd} : safety factor=1.2,
 A_{fw} : area of FRP reinforcement parallel to the shear force,
 p_f : distance between the centers of resultant forces of FRP layers perpendicular to the shear force direction.

The shear strength of the wall

$$f_{vd} = f_{vko} + 0.4\sigma_d$$

where:

$$\sigma_d = Nsd / (t * l_c)$$

and l_c is the wall part in compression.

When the design shear (demand) is greater than the design strength (capacity) of the unreinforced masonry, then the wall can be strengthened with horizontal strips of FRP that will undertake a shear equal to $\Delta V = V_{Rd,f} - V_{sd} - V_{rd,m}$. Through substitution one can calculate the ratio A_{fw} / p_f . Based on the geometry of FRP one can calculate the A_{fw} and consequently the P_f . The required number of strips, starting their placement from the edge of the wall is equal to : $(n-1) * p_f + w_j = h$ then $n = (h - w_j) / p_f + 1$.

6. Wall strengthening for out-of-plane bending

The wall strength for out-of-plane bending is calculated from:

$$M_{Rd} = \frac{\sigma_d * t^2 * l}{2} \left(1 - \frac{\sigma_d * \gamma_M}{f_{wk}} \right) \quad (16)$$

In case the out-of-plane moment is greater than the M_{Rd} from equation 16, horizontal FRP strips could be used to undertake the difference between the two moments.

The strips are placed from the extreme top side of the wall and each one undertakes moment equal to: $F * z$ where $F = w_j * t_j * E_{fd} * \epsilon_{fdd}$ and $z = t/2$. Therefore, for n strips, the total moment that can be carried by the FRP is $n * F * z$, which equated with the difference between the moments provides the required number of horizontal strips.

It is possible that the FRP strengthening for shear may satisfy the out-of-plane requirement for bending.

