

RINFORZO IN FRP PER IL RIADATTAMENTO DI LUNGHEZZE DI GIUNZIONE INSUFFICIENTI

*T.P. Tassios**

* Università Tecnica Nazionale, Atene
5 Iroon Polytexneiou
157 73 Zografou, Atene, GR

Sommario. Molto spesso, nei rinforzi con giunzioni sovrapposte di colonne in cemento armato esistenti la lunghezza delle giunzioni non è sufficiente. Un contenimento in FRP è in grado di ripristinare la capacità totale di legame e permette l'instaurarsi dello snervamento dell'acciaio. Questo articolo descrive un modello razionale per la progettazione di tali interventi di rinforzo: non appena compare la fessura da trazione tra le barre giuntate, e mentre la resistenza residua a trazione del calcestruzzo continua a contribuire alla resistenza di legame, lo scorrimento di taglio lungo la fessura produce una dilatanza trasversale che è in grado di attivare gli sforzi di tensione nel FRP che circonda gli spigoli ricurvi della colonna. A questo punto sull'interfaccia fratturata viene applicata una forza di compressione che favorisce l'attivazione di una resistenza ad attrito lungo la fessura. Si garantisce quindi una resistenza a distacco corrispondente. In questo articolo sono riportati anche i confronti tra i risultati ottenuti con diversi metodi di progettazione del FRP. L'articolo contiene inoltre la discussione e i suggerimenti sulla questione.

1. INTRODUZIONE

Nella maggior parte degli edifici in cemento armato esistenti, le lunghezze giuntate delle barre di acciaio longitudinali delle colonne sono più corte di quanto dovrebbero. Sotto gli effetti sismici, quindi, non si può garantire lo snervamento di tali barre e di conseguenza non si può assolutamente ottenere la duttilità necessaria.

Uno dei metodi di rinforzo disponibili è il contenimento della colonna per mezzo di polimeri rinforzati in fibra (FRP). Questo articolo descrive un modello razionale utilizzabile per il dimensionamento di un siffatto contenimento.

A tale scopo, durante il carico vengono considerati diversi stadi strutturali: innanzitutto, per basse tensioni nell'acciaio, il trasferimento della forza tra le barre giuntate si ottiene in modo normale. Quindi, per tensioni superiori nell'acciaio, viene generata una fessura trasversale di trazione tra le barre giuntate; dovrebbe conseguire il cedimento, a meno che venga attivata una compressione perpendicolare alla fessura, causata da un rinforzo trasversale esistente, oppure (come nel nostro caso) da un contenimento esterno: grazie a queste forze di compressione, durante lo scorrimento longitudinale lungo la suddetta fessura si genera una resistenza ad attrito. Infine, in presenza di una sollecitazione idonea normale e di uno scorrimento longitudinale di entità accettabile (di alcune decine di millimetri), si può raggiungere l'equilibrio. Il modello analitico che segue rappresenta un tentativo di quantificare questi meccanismi ed eventualmente di produrre un dimensionamento semplificato del contenimento esterno in FRP richiesto.

2. CONDIZIONI INIZIALI

a) In Fig. 1 è illustrata una rappresentazione semplificata delle forze che agiscono dalla barra "i" sulla barra "ii", che indica che la giunzione genera una forza di "strappo" "F" (uguale alla forza agente longitudinale). Quindi, le sollecitazioni a trazione " σ_{ct} " agiscono lungo la sezione obliqua CD, dove il loro valore medio in assenza di acciaio trasversale viene approssimato come

$$\sigma_{ct} = F : l_s(CD) \approx \frac{\pi d}{12 l_s} \sigma_s \quad (1)$$

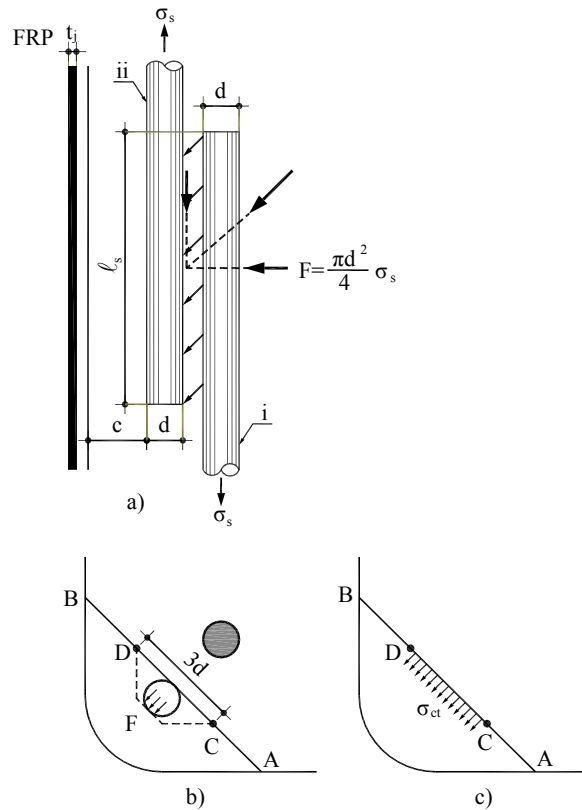


Fig 1. Forza di strappo "F" dovuta al trasferimento di legame tra barre giuntate, genera sollecitazioni a trazione trasversale σ_{ct} nel calcestruzzo.

Questa approssimazione si dimostra sufficientemente ragionevole: può essere applicata nello stesso modo al caso limite dove $l_s = l_b$, la lunghezza di ancoraggio totale.

$$l_b = \frac{df_{sy}}{4f_{bd}} \cong \frac{f_{sy}}{4 \cdot f_c / 8} = 2 \frac{f_{sy}}{f_c} / d \quad (2)$$

(dove $f_{bd} \sim f_c / 8$ indica la resistenza a legame media di calcestruzzi a bassa resistenza).

L'Equazione 1, infatti, è confermata in questo caso limite (se $\sigma_{ct} = f_{ctm}$):

$$f_{ctm} = \frac{\pi}{12} \cdot \frac{d}{2f_{sy}d/f_c} f_{sy} = 0,13f_c \quad (3)$$

(dove $f_{ctm} \approx 0,13f_c$ è di fatto il valore medio della resistenza a trazione di calcestruzzi a bassa resistenza).

Si fa notare che secondo questo approccio, la lunghezza delle giunzioni sovrapposte è considerata uguale alla lunghezza di ancoraggio di barre singole, senza alcun fattore di ingrandimento imposto dai codici per la progettazione di strutture nuove. In effetti, la ricerca più recente mostra che i requisiti di ancoraggio dei codici sono conservative al punto che nel caso di colonne in cemento armato esistenti, si può trascurare tale fattore di ingrandimento. In questo approccio si può naturalmente utilizzare qualunque altra ipotesi

conservativa, ammesso che venga utilizzato il valore caratteristico f_{ctk} al posto del valore medio f_{ctm} .

b) Se $l_s < l_b$, possiamo stimare (Equ.1) il valore limite σ_s delle barre giuntate prima del cedimento del legame.

$$\sigma_{s,lim} \cong \frac{12}{\pi} \cdot \frac{l_s}{d} \cdot f_{ctm} \quad (4)$$

Per sollecitazioni superiori dell'acciaio, tra le barre si apre una fessura per trazione e si ha cedimento – a meno che non sia disponibile un contenimento esterno. Tale contenimento verrebbe mobilitato immediatamente, dato l'instaurarsi della fessura da trazione “w”, e genererà forze di compressione trasversali rispetto all'interfaccia fessurata. Quindi le aperture fessurate possono essere mantenute il più piccolo possibile per consentire l'azione di una certa resistenza a trazione residua nel calcestruzzo (approccio Meccanica delle Fratture).

Contemporaneamente si avrà uno scorrimento di taglio (scorrimento uguale a “s”) lungo la direzione delle barre, compatibile con l'apertura “w”, in modo che i lati delle sporgenze dell'interfaccia arrivino a toccarsi di nuovo (Fig. 2) e sia attivata una resistenza ad **attrito**.

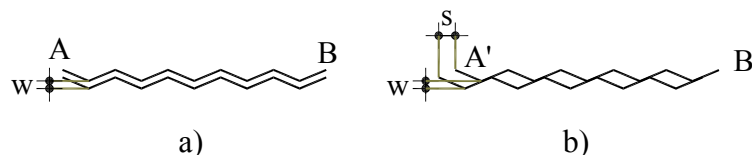


Fig. 2 a) Apertura iniziale “w” della fessura da trazione
b) scorrimento successivo “s” compatibile con l'apertura “w” data

Esiste una relazione tra “s” e “w” che dipende dalla geometria di queste sporgenze. Per interfacce grezze calcestruzzo-calcestruzzo spesso viene utilizzata una relazione empirica (Tassios et al., 1987).

$$\frac{w}{w_o} = \left(\frac{s}{s_o} \right)^{2/3} \quad (5)$$

con $w_o = 0,6^{mm}$ e $s_o = 1,0^{mm}$

oppure $w^{mm} = 0,6(s^{mm})^{2/3}$ (5a)

Se lo scorrimento continua, si hanno valori w maggiori (dilatanza di taglio), quindi una resistenza a trazione residua minore ed una resistenza ad attrito maggiore.

3. MECCANISMI DI RESISTENZA AL LEGAME POST-FESSURAZIONE

Di conseguenza, in tali condizioni immediatamente successive alla fessurazione (valori w molto bassi), esisteranno due meccanismi di resistenza al legame:

a) la resistenza a trazione residua “ $resf_{ct}$ ” del calcestruzzo, come illustrato in Fig. 3, prenderà parte alla resistenza al legame iniziale, per cui si può ottenere un valore di sollecitazione dell'acciaio σ_{sR1}

$$\sigma_{sR1} = \frac{resf_{ct}}{f_{ctm}} \cdot \sigma_{s,lim} \quad (6)$$

(dove $\sigma_{s,lim}$ come da Equ. 4)

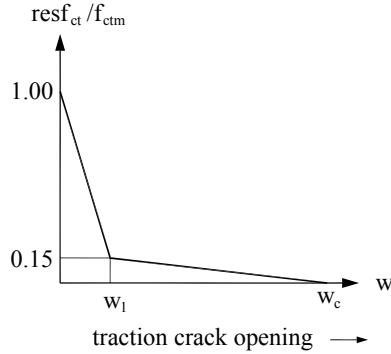


Fig. 3: Resistenza a trazione residua del calcestruzzo dopo la fessurazione per aperture fessurative molto piccole

Con riferimento al Codice 90 del modello CEB-FIP, la resistenza a trazione residua del calcestruzzo può essere stimata come segue:

$$resf_{ct} = f_{ctm} \left(1 - 0,85 \frac{w}{w_1} \right), \quad w < w_1 \quad (7)$$

$$resf_{ct} = \frac{0,15}{w_c - w_1} f_{ctm} (w_c - w), \quad w_c > w > w_1$$

dove:

$$w_1 = 2 \frac{G_F}{f_{ctm}} - 0,15 w_c \quad (8)$$

$$w_c = a_F \cdot G_F / f_{ctm} \quad (9)$$

Per calcestruzzi a bassa resistenza (<C20), ad esempio, sarà

$$G_F \cong 0,060 \text{ Nmm} / \text{mm}^2$$

$$\text{e } a_F \cong 6, \quad w_c = 0,16 \text{ mm}, \quad w_1 = 0,03 \text{ mm}$$

In conclusione, per $w < w_1$,

$$\sigma_{sR1}^I = \left(1 - 0,85 \frac{w}{w_1} \right) \cdot \sigma_{s,lim} \quad (10)$$

mentre per $w_1 < w < w_c$

$$\sigma_{sR1}^I = \frac{0,15}{w_c - w_1} \cdot (w_c - w) \cdot \sigma_{s,lim} \quad (10a)$$

Per $w_c < w$

$$\sigma_{sR1}^{II} = 0 \quad (10b)$$

b) Lo scorrimento di taglio “s” in condizioni di sollecitazione a compressione calcestruzzo-calcestruzzo “ σ_N ” (dovute all’allungamento del materiale limitrofo), attiva una resistenza ad attrito che può essere stimata come segue (Tassios et al.,)

- Allungamento del FRP limitrofo (Fig. 4a)

$$\delta_o = \sqrt{2} w \quad (11)$$

- Attivazione di una sollecitazione di distacco σ_j del FRP (Fig. 4b), supponendo una distribuzione quasi lineare della sollecitazione interna σ_{jx}

— Lunghezza ancoraggio

$$l_b \cdot f_b = t_j \cdot \sigma_j, \quad l_b = \frac{\sigma_j}{f_{ctm}} \cdot t_j \quad (12)$$

Supponendo che la resistenza di legame FRP-calcestruzzo “ f_b ” sia uguale a f_{ctm}

— Distacco

$$\delta_o = \int_0^{l_b} \frac{\sigma_j}{E_j} dx = \frac{1}{2} \frac{\sigma_j}{E_j} l_b \quad (13)$$

oppure
$$\delta_o = \frac{1}{2} \frac{\sigma_j^2}{E_j f_{ctm}} \cdot t_j$$

(14)

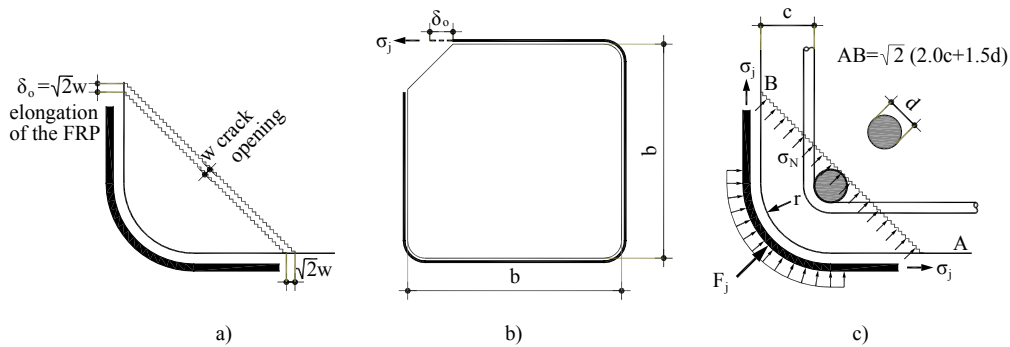


Fig.4: a) L'apertura iniziale dello stato fessurativo da trazione produce un allungamento locale del FRP,
 b) Questo allungamento è un distacco di una lunghezza del FRP uguale a “b”, legata lungo il lato “b” della colonna.
 c) Sollecitando il FRP, si produce una sollecitazione normale “ σ_N ” che agisce sulla fessura AB.

mentre

$$\sigma_j = \sqrt{2 E_j f_{ctm} \cdot \frac{\delta_o}{t_j}} \quad (15)$$

— Per la sollecitazione “praticabile” del FRP prevista dall'equazione 15, la lunghezza di ancoraggio necessaria uguale a

$$l_b = \sqrt{2 \frac{E_j}{f_{ctm}} \delta_o t_j} \quad (16)$$

non dovrebbe superare la lunghezza “b” del lato della colonna in cemento armato,

altrimenti potrebbe non essere possibile resistere ad una sollecitazione σ_j del FRP intorno all'angolo incurvato della colonna, come potrebbe risultare necessario sull'estremità opposta di questo lato, provocando un danneggiamento locale; infatti, su questo angolo opposto, si potrebbe aprire

un'altra fessura (pur più piccola) tra barre di compressione non sufficientemente giuntate.

Se così non fosse, vale a dire per $l_b = b$, si potrebbero derivare ammissibilmente i valori limite conservativi (vedi Equ. 15, 16 e 14):

$$\sigma_{j,\text{lim}} = (b : t_j) \cdot f_{ctm} \quad (15a) \quad \text{oppure} \quad w_{\text{lim}} = \frac{\delta_{o,\text{lim}}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left(\frac{b}{t_j} \right) \left(\frac{f_{ctm}}{E_j} \right) b$$

(14a)

- Nelle condizioni di sollecitazione assiale del FRP (Equ. 15)

$$\sigma_j = \sqrt{2} E_j f_{ctm} \sqrt{2} w : t_j \sum f_{jd}$$

(15b)

una forza di compressione F_j agisce in diagonale sul bordo arrotondato della colonna RC in analisi (Fig. 4c):

$$F_j = \sqrt{2} \sigma_j t_j l_s \quad (17)$$

producendo una sollecitazione a compressione σ_N che agisce sulla fessura $(AB) = \sqrt{2}(2,0c + 1,5d)$:

$$\sigma_N = 1,7 \sqrt{E_j t_j f_{ctm} w} (2,0c + 1,5d) \quad (18)$$

- Nelle condizioni di tale sollecitazione a compressione “ σ_N ” e per un dato scorrimento di taglio “s” lungo la direzione delle barre giuntate uguale a

$$s^{mm} = (w^{mm} : 0,6)^{3/2} \quad (5b)$$

si può stimare la resistenza ad attrito (Tassions et al., 1987) utilizzando l'espressione (per $s \leq 1,0^{mm}$)

$$\tau_{fr} = k_{cycl} \cdot f_c \cdot \frac{1}{2} \sqrt[3]{\left(\frac{\sigma_N}{f_c} \right) \left(\frac{s}{s_u} \right)} \sum 0,3 f_{cd} \quad (19)$$

con $k_{cycl} \approx 0,7$ e $s_u = 2,0^{mm}$

- A questo stadio, sono praticabili alcune linearizzazioni pratiche entro specifici intervalli delle variabili principali:

(i) Aperture fessurative che controllano l'effetto della resistenza a trazione residua sono praticamente comprese nel range tra $0,01$ e $0,05^{mm}$; tramite la Equ. 5°; questi valori corrispondono ai valori s compresi tra $0,002^{mm}$ e $0,024^{mm}$; oppure $\frac{s}{s_u} \rightarrow 0,001$ e $0,012$. Per questo intervallo porremo

$$\sqrt[3]{\frac{s}{s_u}} \cong 12,5 \left(\frac{s}{s_u} \right) + 0,10 \quad (\pm 10\%) \quad (20)$$

Oltre questo intervallo le ampiezze accettabili “w” delle fessure che controllano la resistenza attrito-legame finale sono comprese nel range da $0,10^{mm}$ a $0,30^{mm}$; ed i valori s corrispondenti sono compresi tra $0,07$ e $0,35^{mm}$ ($\frac{s}{s_u} \rightarrow 0,03$ and $0,17$).

Per questo secondo intervallo, nelle formule di progetto finali useremo un'altra linearizzazione

$$\sqrt[3]{\frac{s}{s_u}} = 2,2 \left(\frac{s}{s_u} \right) + 0,25 \quad (\pm 5\%) \quad (21)$$

(ii) Inoltre, basandosi sulla Equ. 18, si può trovare un intervallo in cui i valori σ_N importanti rientrano tra $1,6^{MPa}$ e $16,0^{MPa}$. I valori $\left(\frac{\sigma_N}{f_c}\right)$ corrispondenti (per calcestruzzo a bassa resistenza) sono 0,05 e 0,70 (poiché secondo la Equ. 19, il valore di sicurezza massimo è comunque uguale a 0,75).

Quindi, per questo intervallo possiamo utilizzare la linearizzazione seguente

$$\sqrt[3]{\frac{\sigma_N}{f_c}} = 0,9 \left(\frac{\sigma_N}{f_c}\right) + 0,3 \quad (\pm 10\%) \quad (22)$$

- Di conseguenza, la Equ. 10 a questo punto può essere così modificata: Fase Uno (resistenza a trazione residua del calcestruzzo ancora sostanziale) per

$$0,01^{mm} < w < 0,05^{mm}$$

$$\tau_{fr} \cong 0,35 f_c \cdot \left(12,5 \frac{s}{s_u} + 0,1\right) \cdot \left(0,9 \frac{\sigma_N}{f_c} + 0,3\right) \quad (23)$$

Fase Due (resistenza ad attrito prevalente), approssimativamente per $0,10^{mm} < w < 0,30^{mm}$

$$\tau_{fr} \cong 0,35 f_c \cdot \left(2,2 \frac{s}{s_u} + 0,25\right) \cdot \left(0,9 \frac{\sigma_N}{f_c} + 0,3\right) \quad (24)$$

In entrambi i casi, σ_N è dato dalla Equ. 18

- Questa resistenza ad attrito offre una nuova forza di resistenza del legame “B” che permette di sviluppare una sollecitazione nell’acciaio:

$$B = \tau_{fr} \cdot \sqrt{2} \cdot (2,0c + 1,5d) \cdot l_s \quad (25)$$

e

$$\sigma_{sR2} = B \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (26)$$

Ne consegue:

Fase Uno ($0,01 < w < 0,05^{mm}$):

$$\sigma_{sR2}^I = \left(12,5 \frac{s}{s_u} + 0,1\right) \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{w}{d}\right) \left(\frac{t_i}{d}\right) \left(\frac{E_j}{f_c}\right) \left(\frac{f_{ctm}}{f_c}\right)} + 0,2 \left(2,0 \frac{c}{d} + 1,5\right) \right] \left(\frac{l_s}{d}\right) \cdot f_c \quad (27)$$

$$\text{oppure } \sigma_{sR2}^I = \frac{12,5 \frac{s}{s_u} + 0,1}{2,2 \frac{s_d}{s_u} + 0,25} \cdot \sqrt{\frac{w}{w_d}} \cdot f_{sy} \quad (\text{per } s_d, w_d \text{ vedi Equ. 30})$$

(27a)

Fase Due ($0,10 < w < 0,30^{mm}$)

$$\sigma_{sR2}^{II} = \left(2,2 \frac{s}{s_u} + 0,25\right) \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{w}{d}\right) \left(\frac{E_j}{f_c}\right) \left(\frac{f_{ctm}}{f_c}\right) \left(\frac{t_j}{d}\right)} + 0,2 \left(2,0 \frac{c}{d} + 1,5\right) \right] \left(\frac{l_s}{d}\right) \cdot f_c \quad (28)$$

$$\text{oppure } \sigma_{SR2}^{II} = \frac{2,2 \frac{s}{s_u} + 0,25}{2,2 \frac{s_d}{s_u} + 0,25} \cdot \sqrt{\frac{w}{w_d}} \cdot f_{sy} \quad (\text{per } s_d, w_d \text{ vedi Equ. 30}) \quad (28a)$$

Per questa fase finale (“fase due”), ora risolviamo la Equ. 28 e troviamo lo spessore totale ricercato t_j del FRP per ottenere un recupero completo della resistenza di legame, vale a dire per i valori limite $\sigma_{SR2}^{II} = f_{sy}$, $s = s_d$, e il $w = w_d$ corrispondente.

Quindi

$$\frac{t_j}{d} = \left[\left(\frac{f_{sy}}{f_c} \right) \cdot \left(2,2 \frac{s_d}{s_u} + 0,25 \right) \cdot \left(\frac{l_s}{d} \right) - 0,2 \left(2,0 \frac{c}{d} + 1,5 \right) \right]^2 : \left(\frac{w_a}{d} \right) \left(\frac{E_j}{f_c} \right) \left(\frac{f_{ctm}}{f_c} \right) \quad (30)$$

I valori di progetto delle deformazioni s_d (e w_d) devono essere selezionati come caratteristiche di limitazione del danno dopo il carico sismico: un valore di sicurezza potrebbe essere uguale a $s = 0,3^{mm}$; l’“apertura fessurativa” corrispondente $w < 0,3^{mm}$ può essere considerata anche come un’ampiezza di fessura normalmente accettabile in elementi di edifici in cemento armato, se non rientra in ambienti pericolosi.

È inoltre interessante notare che il valore limite conservativo ammissibile di “w” suggerito dalla Equ. 14a, produrrebbe valori w vicini a quelli precedentemente citati ($w < 0,3^{mm}$, validi per calcestruzzi a bassa resistenza e colonne carenti di edifici normali).

Quindi, nella Equ. 30 saranno infine utilizzati i valori limite $s_d = 0,30_{mm}$ ($w_d \cong 0,27^{mm}$).

4. RESISTENZA DISPONIBILE DEL FRP

Quando si controlla il valore σ_j (Equ.15a), è necessario considerare tutte le riduzioni possibili della resistenza disponibile del FRP f_j , in modo da poter produrre un valore di progetto. Si riporta a questo punto un breve elenco di tali riduzioni.

a) Flessione del FRP intorno al bordo curvo dell’elemento edilizio:

$$\Delta \sigma_j = \frac{t_{j1}}{2r} E_j \quad (31)$$

Dove “ t_{j1} ” è lo spessore di ciascun strato di FRP, “r” è il raggio del bordo curvo ed “ E_j ” il modulo di elasticità del FRP.

b) Azione di contro-imbozzamento del contenimento in FRP rispetto alla “retrattilità” delle barre di acciaio angolari: a questo stadio si suggerisce di prendere genericamente in considerazione questa categoria di riduzione della resistenza del FRP, utilizzando un fattore di incertezza modello.

c) Inefficacia della cooperazione tra strati FRP multipli: di nuovo qui si può utilizzare solo un fattore di riduzione empirico generale uguale a $(k-2)^{-1/4}$, dove “k” indica il numero totale di strati.

$$\text{Infine } f_{jd} \cong \left(\frac{1}{1,2} f_{jk} - \frac{t_{jr} E_j}{2r} \right) : (k-2)^{1/4} \quad (32)$$

5. CAPACITÀ DI GIUNZIONE CONTROLLATA DALLO SPOSTAMENTO

È interessante seguire lo sviluppo dello spostamento longitudinale di una barra giuntata e la risposta corrispondente della barra alla forza o alla sollecitazione, dall'inizio del carico fino al cedimento finale della giunzione. A tale scopo, nella Fig. 5 (dove $\sigma_s = \sigma_{SR1} + \sigma_{SR2}$) è riportato un esempio per i dati specifici seguenti:

$$b \times b = 250.250 \text{ mm} \quad f_c = 20 \text{ MPa} \quad f_{ctm} = 2,3 \text{ MPa} \quad G_f = 0,060 \text{ Nmm/mm}^2$$

$$a_F = 6 \quad w_c = 0,16 \text{ mm} \quad w_i = 0,03 \text{ mm} \quad l_s = 20.d \quad d = 18 \text{ mm} \quad S400 \quad c = 20 \text{ mm}$$

$$E_j = 300 \text{ GPa} \quad f_{jk} = 2800 \text{ MPa} \quad t_j = 0,67 \text{ mm} \quad (k=5 \text{ strati})$$

I meccanismi della Meccanica delle Fessure incluso nel modello evidenzia il rapido recupero della resistenza di “legame” dopo la fessurazione.

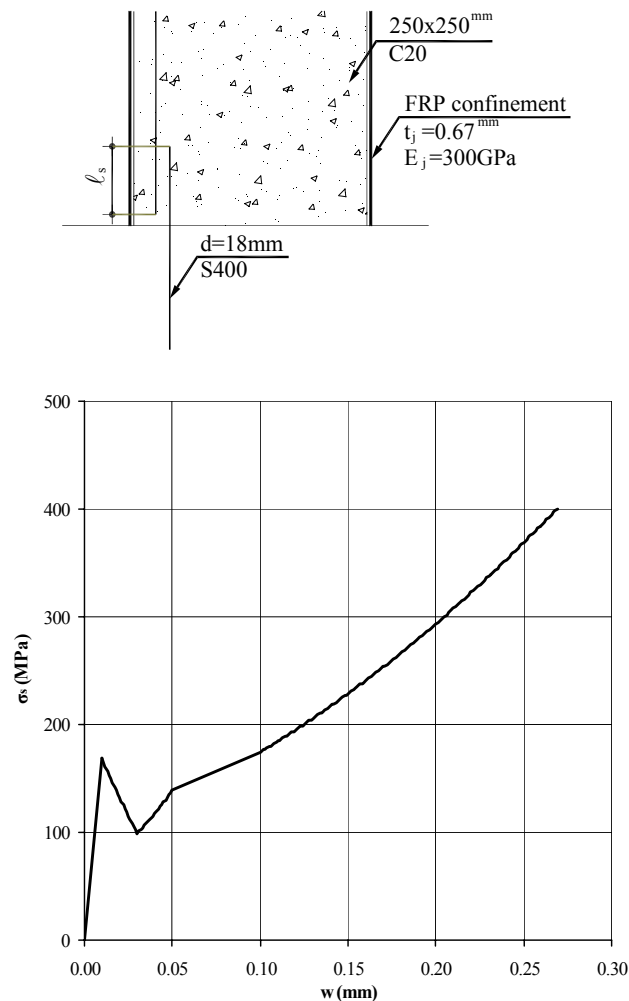


Fig. 5. Resistenza a distacco controllata dalla deformazione di barre giuntate in difetto, adeguatamente contenute.

Controllo della sollecitazione del FRP (Equ. 15a):

$$\max \sigma_j = \sqrt{2.300000 \cdot 2,3 \cdot 1,41 \cdot 0,27 \cdot 0,67} = 885^{MPa} (< 1488^{MPa})$$

$$\max \sigma_N = 885 \cdot 0,83 \cdot 67 = 11,0 \quad \sigma_N : f_c \cong 0,55$$

$$f_{jd} = \left(\frac{1}{1,2} \cdot 2800 - \frac{0,15}{2 \cdot 60} \cdot 300000 \right) : (5-2)^{1/4} \\ = 1488^{MPa}$$

6. FORMULE DI PROGETTO

Di seguito si descrive un confronto fatto tra i risultati di altri metodi di progettazione disponibili nella letteratura. Per iniziare si considera il caso descritto nel § 5, per il quale abbiamo trovato un valore $t_j = 0,67^{mm}$

a) Pristley et al, 1996

$$t_j = \frac{\frac{\pi d^2}{4} \cdot 1,0 \cdot f_{sy} \cdot b}{0,002 E_j \left[2\sqrt{2}(c+d) \right] \cdot l_s \cdot \mu} \quad (33)$$

In questi calcoli comparativi non sarà utilizzato l'aumento del 70% di f_{sy} per progetti di capacità (ragionevolmente consigliati). Inoltre, la superficie della fessura considerata sarà quasi uguale a quella utilizzata nel modello proposto in questo articolo.

Si ha $t_j = 0,78^{mm}$.

Secondo questa formula, la sollecitazione del FRP è mantenuta costante, indipendentemente da altre condizioni.

Quindi $\sigma_j = 0,002 E_j$ sarà uguale a 600^{MPa} , rispetto al nostro valore che è stato trovato uguale a 885^{MPa} . D'altro canto, potrebbe essere riconsiderato il valore efficace di attrito costante $\mu = 1,4$ utilizzato in questa formula. Infatti, per una sollecitazione calcestruzzo-calcestruzzo normale, come quella considerata in questa formula

$$\sigma_N = \sigma_j t_j : 2(c+d) = 600 \cdot 0,78 : 2(20+18) = 6,16^{MPa},$$

si troverebbe un valore μ uguale a

$$\mu = 0,44 \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-2/3} = 1,0$$

Ancora, per scorrimenti ad attrito inferiori a $s_u = 2,0^{mm}$, si prevede per questo "coefficiente" un valore attivato ulteriormente inferiore.

b) Elsanadedy et al, 2005

$$t_j = \left(\frac{4}{\pi} \right)^{1/2} \cdot \frac{b}{4} \cdot \frac{2}{1,4} \cdot \left[f_{sy} d : 4(l_s - 0,022 f_{sy} d) - 20\sqrt{f_c} : d \right] : 0,0015 E_j \quad [N, mm] \quad (34)$$

Si trova $t_j = 0,88^{mm}$

Qui, di nuovo, la sollecitazione del FRP è mantenuta costante ed uguale a

$\sigma_j = 0,0015 \cdot E_j = 450^{MPa}$, metà del valore trovato nella nostra analisi.

c) Harajli et al., 2004

$$\frac{t_j}{d} = \frac{3775}{E_j \sqrt[4]{f_c}} \cdot \left[0,6 \left(\frac{f_{sy}}{\sqrt[4]{f_c}} - 50,3 \right) \cdot \frac{d-c}{l_s} - \frac{c}{d} \right], \quad (\text{N, mm}) \quad (35)$$

ammesso che

$$\frac{c}{d} + 106 \cdot \frac{t_j}{2} \cdot \sqrt[4]{f_c} \quad \Sigma 4,0$$

Si trova

$$t_j = 0,33^{mm}$$

Questo primo semplice confronto di alcuni metodi di progettazione disponibili (che propongono spessori del FRP uguali a 0,33 o 0,67 o 0,78 o 0,88^{mm}), non sembra essere soddisfacente.

Una spiegazione possibile di tali discrepanze può essere il fatto che la risposta strutturale del sistema multiplo “calcestruzzo-barre giuntate-contenimenti esterni” sembra essere piuttosto sensibile agli spostamenti di distacco imposti alla barra giuntata: la resistenza ad attrito del sistema calcestruzzo-calcestruzzo (in condizioni di sollecitazione normale) può essere aumentata di un ulteriore 80% rispetto al valore $s_d = 0,3^{mm}$ consigliato in questo articolo (vedi Equ. 19), se si impongono spostamenti di taglio diciamo pari a $s = 1,0^{mm}$. Aumentando ulteriormente la dilatanza almeno della stessa percentuale, si può anche offrire la possibilità di un aumento rapido dell’efficacia del FRP (in vista del fatto che la sua resistenza non controlla l’intero meccanismo).

Questa super-sensibilità è illustrata nella Fig. 6, dove i valori degli spessori del FRP trovati in precedenza possono essere tutti “giustificati” se gli spostamenti critici variano solo tra 0,25 e 0,40^{mm}. In tal caso, diventa evidente che occorre cercare un ulteriore criterio di progettazione che permetta di armonizzare tali dati apparentemente contraddittori.

Si consiglia nel frattempo un atteggiamento conservativo; ecco perché in questo articolo abbiamo suggerito il valore limite di $s = 0,3^{mm}$.

A dimostrazione della validità di tale suggerimento, prendiamo anche i risultati illustrati nella Fig. 7, dove per una lunghezza di giunzione uguale alla lunghezza di ancoraggio richiesta per il calcestruzzo non contenuto (~ 40d), i valori limite suggeriti in questo articolo producono uno spessore del FRP insignificante.

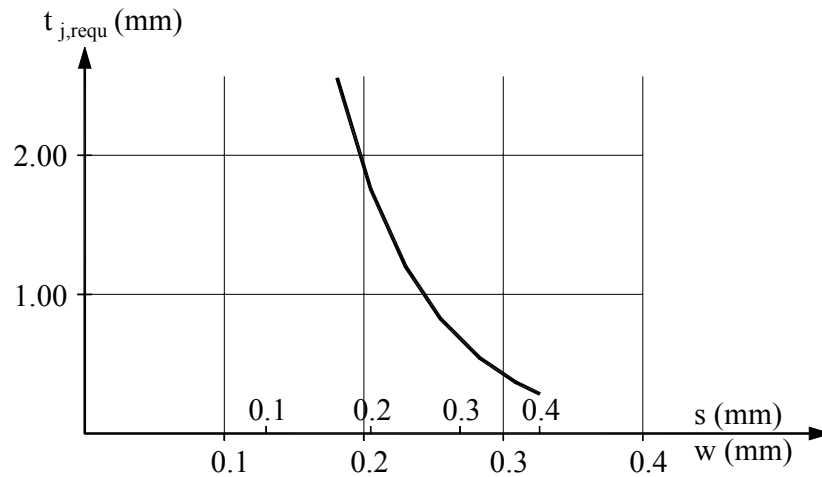


Fig. 6. Sensibilità del sistema alle aperture fessurative di taglio prodotte da spostamenti di distacco imposti sulla barra giuntata ($l_s:d=20$)

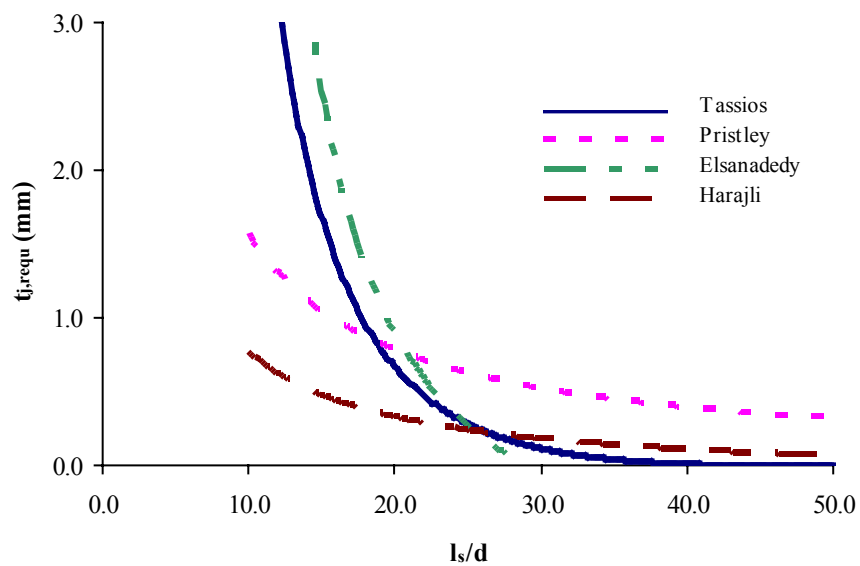


Fig. 7. Spessore del FRP richiesto per diverse lunghezze di giunzione " l_s ", secondo diverse formule di progetto. Per una lunghezza di ancoraggio di calcestruzzo non contenuto $l_b=40d$, deve essere disponibile FRP in spessore zero

7. CONCLUSIONI

- Grazie alla sua razionalità, il modello proposto in questo articolo sembra sia in grado di:

- prevedere il recupero quasi immediato della resistenza di legame iniziale dopo la fessurazione, grazie all'approccio di Meccanica delle Fessure utilizzato nel modello;
 - tenere conto di tutti i parametri del problema, osservando il loro ruolo specifico, senza preconcetti.
- b) È risaputo che lo spessore del contenimento del FRP richiesto per una giunzione sovrapposta è controllato soprattutto dal suo modulo di elasticità. Ci si attende, tuttavia, che il comportamento post plastico del sistema sarebbe dettato più chiaramente dalla resistenza disponibile del FRP.
- c) Il modello può inoltre spiegare parte della discordanza riscontrata tra i metodi di progettazione disponibili. La risposta strutturale del sistema multiplo “calcestruzzo – barre di acciaio – FRP” è molto sensibile agli spostamenti di distacco imposti alla barra giuntata: spostamenti molto ampi (che producono ampie dilatanze delle fessure, probabilmente al di fuori della riparazione) possono attivare ulteriori reazioni nel FRP.

Nonostante ciò, è necessario ricercare un valore limite di “deformazione accettabile”; temporaneamente in questo articolo per tale valore si è suggerito $s = 0,3$ mm, che sembra soddisfare anche il criterio di contenimento trascurabile richiesto quando la lunghezza della giunzione si avvicina alla lunghezza di ancoraggio richiesta per le barre nel calcestruzzo non contenuto.

Ringraziamenti

L'autore ringrazia Ms. K. Vassilopoulou per la revisione di questo articolo.

Bibliografia

- Tassios P.T., Vintzeleou E.: “Concrete-to-concrete friction”, J. of Struct. Eng., ASCE, April 1987
- CEB-FIP Model Code 90, Telford, London, 1991
- Priestley M.J.N., Seible E., Calvi E.M.: “Seismic design and retrofit of bridges”, J. Wiley, New York, 1996
- Harajli M.H., Hamad B.S., Rteil A.A.: “Effect of Confinement of bond strength between steel bars and concrete”, ACI Struct. J., October 2004
- Elsandedy H.M., Haroun M.A.: “Seismic design criteria for circular lap-spliced RC bridge columns with fiber reinforced polymer jackets”, ACI Struct. J., May June 2005.

NOTE

- a_F , Una costante per la previsione della risposta a sollecitazione a trazione residua del calcestruzzo dopo una fessurazione per trazione.
- δ_o , Scorrimento finale (allungamento) di materiale di contenimento del FRP vicino al bordo di una colonna in cemento armato, dovuto all'apertura "w" di una fessura tra le barre giuntate.
- μ , Coefficiente di attrito.
- σ , Sollecitazione normale.
- σ_c , Sollecitazione normale del calcestruzzo.
- σ_{ct} , Sollecitazione a trazione del calcestruzzo.
- σ_j , Sollecitazione a trazione in laminati FRP.
- σ_N , Sollecitazione a compressione che agisce sull'interfaccia della fessura, dovuta a σ_j .
- σ_s , Sollecitazione acciaio.
- $\sigma_{s,lim}$, Sollecitazione massima dell'acciaio prima del cedimento di barre giuntate non contenute.
- σ_S^I , Sollecitazione dell'acciaio se $w < \sim 0,05^{mm}$ (circa).
- σ_S^{II} , Sollecitazione dell'acciaio se $w > \sim 0,10^{mm}$ (circa).
- τ , Sollecitazione di taglio.
- τ_{fr} , Sollecitazione resistente ad attrito.
- b , Ampiezza di una colonna in cemento armato.
- c , Rivestimento in cemento per barre longitudinali.
- d , Diametro del rinforzo longitudinale.
- f_{bd} , Resistenza di legame (valore di progetto).
- f_c , Resistenza a compressione del calcestruzzo.
- f_{ctk} , Resistenza a trazione caratteristica del calcestruzzo ($\sim \frac{2}{3} f_{ctm}$)
- f_{ctm} , Resistenza a trazione media del calcestruzzo.
- $resf_{ct}$, Resistenza a trazione residua del calcestruzzo dopo la fessurazione.
- f_j , Resistenza del FRP.
- f_{jd} , Valore di progetto della resistenza del FRP.
- f_{sy} , Resistenza a snervamento dell'acciaio.

- k , Numero di strati FRP.
- k_{cycl} , Fattore di riduzione d'attrito in condizioni di azioni cicliche.
- l , lunghezza.
- l_b , Lunghezza d'ancoraggio richiesta.
- l_s , Lunghezza giunzione disponibile.
- r , Raggio di bordi curvi di una colonna in cemento armato.
- s , Scorrimento lungo una fessura chiusa.
- s_o , Costante per la previsione della dilatanza di taglio.
- s_u , Costante, il valore di scorrimento ($\sim 2,00^{mm}$) per resistenza ad attrito massima.
- t_j , Spessore totale del FRP.
- t_{j1} , Spessore di un singolo laminato di FRP.
- w , Ampiezza fessura da trazione.
- w , Dilatanza di una fessura da taglio.
- w_o , Costante per la previsione della dilatanza di taglio.
- w_1, w_c , Costanti della legge di costituzione della resistenza a trazione residua di calcestruzzo, dopo la fessurazione da trazione.
- A , Sezione.
- B , Forza di resistenza del legame.
- C , Classe calcestruzzo (in MPa).
- E , Modulo di elasticità.
- E_j , Modulo di elasticità del FRP.
- F_1 , Forza di strappo tra barre giuntate.
- F_j , Forza di compressione che agisce diagonalmente lungo il bordo curvo di una colonna in cemento armato (prodotta grazie all'allungamento del contenimento in FRP).
- G_F , Energia di frattura del calcestruzzo.
- $R1$, Indice del meccanismo di legame dovuto alla resistenza a trazione del calcestruzzo.
- $R2$, Indice del meccanismo di legame dovuto alla resistenza a taglio lungo la fessura inter-barra.
- S , Classe acciaio (in MPa).