

IGF 11 - XI CONVEGNO NAZIONALE

Gruppo Italiano Frattura

Brescia, 4 - 6 Luglio 1995

APPLICAZIONE DELLA MECCANICA DELLA FRATTURA LINEARE ALLE STRUTTURE INFLESSE IN C.A.P. CON CAVI NON ADERENTI

Luigi Goffi

Ordinario di Tecnica delle Costruzioni al Politecnico di Torino

Sommario

Le strutture precomprese a cavi non aderenti, recentemente riproposte, prospettano l'applicazione della LEFM per il loro studio in fase fessurativa. Vengono rilevate le differenze di comportamento rispetto alle strutture in c.a.o., in conseguenza della costanza dello sforzo normale indotto mediante la precompressione che non consente un adeguato incremento del momento critico al crescere della profondità di fessurazione.

Come è noto, è stato recentemente riproposto l'impiego delle strutture precomprese a cavi non aderenti a seguito di incertezze circa l'efficacia delle iniezioni per riconosciuti fenomeni di corrosione nelle armature metalliche di strutture post-tese iniettate. Le strutture "unbonded" non pongono problemi di iniezioni non riuscite e consentono di fatto l'ispezione dell'armatura metallica (che in alcuni casi è esterna alla sezione di calcestruzzo e che comunque è più efficacemente protetta da un'adeguata guaina riempita di grasso) e l'eventuale sostituzione (nonché la ritaratura) dei cavi, ove necessario.

Le strutture "unbonded" sono caratterizzate dalla costanza dello sforzo di tesatura, cioè dalla sua indipendenza dai carichi agenti sulla struttura; infatti, a seguito dell'inesistente collegamento con il corpo della struttura cementizia per l'assenza di aderenza, viene meno per l'armatura l'ipotesi di conservazione delle sezioni piane ed il conseguente incremento di tensione nell'armatura.

Può essere interessante un'indagine sul comportamento alla fessurazione di questo tipo di strutture, applicando i concetti della MdF, pur nell'ipotesi semplificatrice di elasticità lineare.

Lo scrivente aveva pubblicato un articolo sull'applicazione della meccanica della frattura a strutture inflesse di c.a., in particolare nell'ipotesi di calcestruzzi ad alta resistenza (HSC) con R_{ck} non inferiore a 80 N/mm^2 , caratterizzati da maggiore fragilità e pertanto più suscettibili di essere trattati nell'ambito della LEFM.

Partendo dagli studi citati in bibliografia, si considerava una sezione inflessa armata ove il momento complessivamente agente, M , derivava dalla sovrapposizione di una coppia costituita dallo sforzo di trazione F nell'armatura metallica e dallo sforzo di compressione di pari entità nel calcestruzzo, applicato sulla semialtezza dell'intera sezione, più un ulteriore momento M_1 atto a realizzare l'equilibrio per rapporto al momento esterno (fig.1), e pertanto:

$$M = F(d/2 - h) + M_1 \quad (1)$$

Le sollecitazioni F e M_1 erano riferite ad una sezione resistente individuata dalla sezione integra del calcestruzzo (delimitata inferiormente dalla posizione dell'apice della fessura per le diverse progressioni di fessurazioni considerate) oltre che della sezione metallica, nell'ipotesi di conservazione delle sezioni piane e di elasticità lineare.

Conseguentemente il valore di K_I al lembo di intradosso risultava dalla sovrapposizione (somma in valore e segno) dei contributi delle due quote di carico sulla sezione di calcestruzzo e cioè la compressione F e la flessione M_1 ; i termini relativi, calcolati secondo bibliografia, fornivano complessivamente :

$$K_I = \frac{M_1 Y_m}{bd^{3/2}} - \frac{FY_p}{bd^{1/2}}$$

essendo Y_m e Y_p funzioni note del rapporto a/d , cioè profondità della fessura/altezza totale della sezione.

Occorreva un'ulteriore informazione per conoscere la ripartizione del momento totale M nelle due quote indicate nella (1). L'ipotesi adottata dallo scrivente conseguiva dalla conservazione delle sezioni piane e dalla distribuzione elastica delle tensioni nell'acciaio e nella parte integra (legamento) del calcestruzzo in corrispondenza della sezione fessurata. L'applicazione dei suaccennati criteri forniva come risultato i valori della quantità adimensionale $M_c / (K_{IC} bd^{3/2})$ in funzione del rapporto a/d , assumendo come parametro il prodotto $n\mu$, essendo come al solito $n = E_s / E_c$, $\mu = A_s / (bd)$ (fig.2).

In pratica nella fig. 2 sono individuati, per ogni apertura di fessura e per ogni valore del prodotto $n\mu$ i valori dei corrispondenti momenti (espressi adimensionalmente) atti ad indurre all'apice della fessura un valore critico di K_I tale da dar luogo all'apertura della fessura.

I diagrammi indicano, per $n\mu > 0.010$, che i valori di \bar{M} , dopo aver raggiunto un minimo per $a/d \approx 0.3$, risalgono al crescere della profondità della fessurazione; esiste cioè per le

sezioni in c.a. un ramo "includente" del suddetto diagramma, che assicura la stabilità della fessurazione, ove $n\mu = 0.010$ implica, per $n = 6$, $\mu = 0.15\%$, in accordo con la definizione di minima percentuale di armatura dell'EC2.

Orbene le formulazioni della Meccanica della frattura assumono aspetti particolarmente semplici, non richiedendo ipotesi supplementari necessariamente approssimate circa il valore delle tensioni nell'armatura metallica, nel caso di strutture precomprese con cavi non iniettati (unbonded), dacchè, come si è accennato, la tensione dell'armatura può considerarsi costante indipendentemente dall'entità dei carichi esterni. Assunta ancora una sezione rettangolare di altezza totale d e di larghezza b , sia F lo sforzo di precompressione realizzato a cavi scorrevoli non iniettati e applicato a distanza h dal lembo di intradosso; se M è il momento dei carichi esterni, l'azione di M e di F è equivalente ad uno sforzo F centrato sulla semialtezza della trave e ad un momento $M_1 = M - F(d/2 - h)$ per cui il K_I , per quanto ne consegue, assume la forma:

$$K_I = \frac{MY_m}{bd^{3/2}} - \frac{F\psi}{bd^{1/2}}$$

posto $\psi = Y_p + (1/2 - h/d) Y_m$, essendo questa volta F noto a priori e costante. Inversamente il momento nella solita formulazione adimensionale, assume l'espressione:

$$\bar{M} = \frac{M}{K_{IC}bd^{3/2}} = \frac{1}{Y_m} \left\{ 1 + \frac{F\psi}{K_{IC}bd^{1/2}} \right\}$$

Tale espressione definisce i valori dei momenti che, in relazione a diverse progressioni della fessurazione (a/d), danno luogo all'apice delle fessura al valore critico di $K_I = K_{IC}$. Il momento totale \bar{M} , nella sua forma adimensionale, può essere diagrammato in funzione di a/d assumendo come parametro la quantità $F/(K_{IC}bd^{1/2})$.

Il diagramma di fig. 3 fornisce l'andamento del momento adimensionale predetto ipotizzando le segg. circostanze (unità N, mm, salvo diversa indicazione):

- la sezione è assunta rettangolare con $d = 300$, $b = 100$, $h = 60$, $1/2 - h/d = 0.3$,
 $F = 225000$;

- è stato preso in considerazione un calcestruzzo con $K_{IC} = 70$, riferibile a calcestruzzo ordinario ($R_{ck} = 45$). Ciò significa l'assunzione del valore 1.8558. per il parametro adimensionale $F/(K_{IC}bd^{1/2})$.

Con le precedenti ipotesi, le tensioni indotte dalla sola precompressione risultano (si assumono positive le compressioni):

estradosso - 6
 intradosso + 21.

Se si assume il momento utile $M_u = 33000000$, si hanno complessivamente le segg. tensioni, ragionevolmente accettabili :

estradosso + 16
intradosso - 1.

E' possibile ricavare i valori dei momenti critici secondo la $M_C = \bar{M}K_{IC}bd^{3/2}$ ove M_C assume un valore minimo pari a 42456000 in corrispondenza all'incirca di $a/d = 0,3$, mentre i valori massimi, registrabili per $a/d = 0,6$, limite di validità della trattazione, sono di poco superiori, a causa dell'andamento piatto delle curve di fig. 3. L'andamento piatto del diagramma implica che un incremento della profondità di fessurazione è in grado di mobilitare modesti incrementi di momento: ciò significa un processo di fessurazione con grandi deformazioni per la struttura nella sua fase ultima.

Il comportamento è quindi differente da quello registrato nei diagrammi di fig. 2 (c.a.o.), ove, per $n\mu > 0,010$, si registrava una fessurazione stabile con incremento del momento critico (dopo un minimo) al crescere della profondità della fessurazione.

Un confronto di massima può poi effettuarsi con il momento di rottura. Considerando il cedimento lato calcestruzzo (l'acciaio mantiene la tensione costante e pari alla tensione di esercizio sino all'ultimo), si può scrivere (per $R_{ck} = 45$):

$$0,83 \cdot R_{ck} \cdot b \cdot 0,8 \cdot x = F = 225000$$

donde $x = 75,30$ mm (altezza della zona compressa).

Il conseguente momento di rottura sarà:

$$M_R = 225000 (d - h - 0,4x) = 47222892$$

a fronte di un M_C massimo (per $a/d = 0,6$, limite di validità della trattazione) pari a 46266000, di poco inferiore al momento di rottura.

I risultati acquisiti sono stati posti a confronto con quelli relativi a due altri tipi di calcestruzzi, rispettivamente caratterizzati da $R_{ck} = 60$, $K_{IC} = 80$, e da $R_{ck} = 80$ e $K_{IC} = 90$. Gli sforzi di precompressione F sono stati incrementati nella stesso rapporto degli R_{ck} . Lo stesso rapporto consegue per i momenti di rottura.

A conti fatti, risulta la tabella riassuntiva allegata per quanto riguarda il confronto tra i diversi calcestruzzi esaminati (i risultati sono pure riportati in fig. 3).

In tutti i casi considerati, nell'ambito dei valori ipotizzati per R_{ck} e per K_{IC} , è stata accertata la sostanziale prossimità dei valori dei momenti di rottura ai momenti critici corrispondenti alla massima profondità di fessurazione, al limite di validità della trattazione ($a/d = 0,6$).

Ciò implica l'esistenza di un ridotto intervallo tra la fessurazione e la rottura per il c.a.p. "unbonded".

Un confronto è possibile tra il c.a.o. ed il c.a.p. "unbonded" a parità di sezione dell'armatura metallica, cioè per $\sigma_s = 900$, $A_s = 250$ (mm²), $\mu = 0,83\%$, $n\mu = 0,05$, (per $R_{ck} = 45$, $F = 225000$ ed in proporzione per gli altri valori di R_{ck} e F).

Per il c.a.p. "unbonded" si ha $M_C (a/d = 0,3) = 42456000$, $M_R = 47222000$; per il c.a.o., assunto $f_{yk} = 430$, si registra (fig.2) $M_C = 9056000$, a fronte di un $M_R \approx 22000000$.

La differenza tra i due momenti per il c.a.o. si riduce peraltro al crescere della profondità di fessurazione per il notevole incremento di M_C . Nel c.a.o. il passaggio tra la fase di fessurazione e la fase di rottura risulta pertanto avvenire con gradualità, e ciò grazie al notevole incremento dello sforzo nell'armatura metallica. al progredire della fessurazione.

Bibliografia

- Okamura H., Watanabe K.- Application of the compliance concept in fracture mechanics - Engineering Fracture Mechanics. Vol.7, 1975, pp. 531-539.
- Carpinteri A. - Stability of fracture process in rc beams - J. of Structural Engineering, Vol. 110, 1984, pp. 544-558.
- Caristo M., Goffi L. - Remarks on the interpretation of cracking of concrete structures according to elastic fracture mechanics. - Proceedings of ECF8, Turin, 1990.
- Goffi L. - I calcestruzzi armati ad alta resistenza - proposte di verifica mediante criteri di frattura - L'Industria Italiana del Cemento - Settembre 1992.
- Eurocodice 2. - Progettazione delle strutture in calcestruzzo. Parte 1-5: Regole generali Strutture con cavi non aderenti e cavi di precompressione esterna. UNI- ENV 1992-1

TABELLA

R_{ck}	K_{IC}	F	$\frac{F}{K_{IC} b d^{1/2}}$	M_c $a/d = 0,3$	M_c $a/d = 0,6$	M_R
N/mm^2	$N mm^{-3/2}$	KN	---	KN mm	KN mm	KN mm
45	70	225	1.855	42456	46266	47222
60	80	300	2.165	55548	61280	62962
80	90	400	2.566	72742	81157	83950

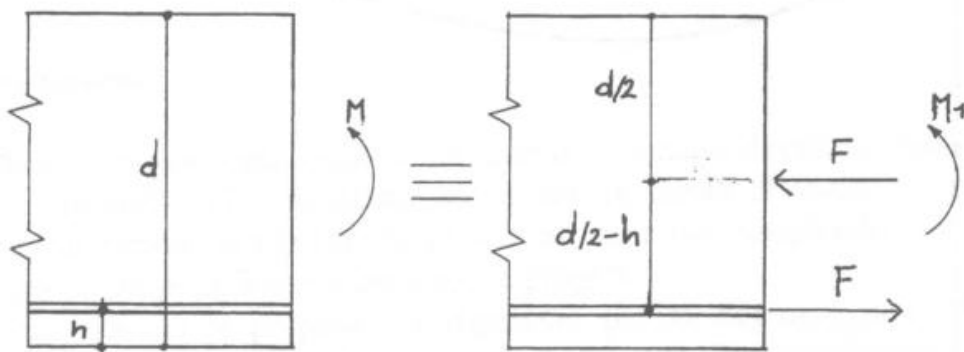


FIG. 1

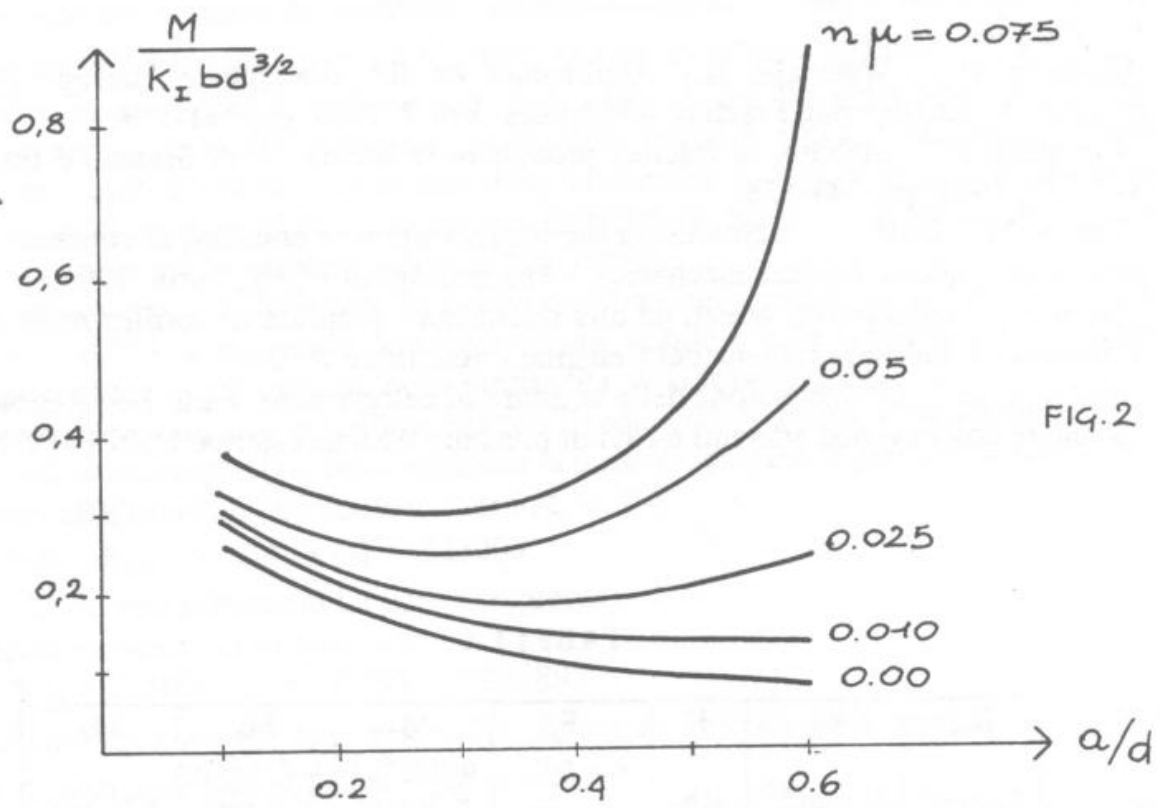


FIG. 2

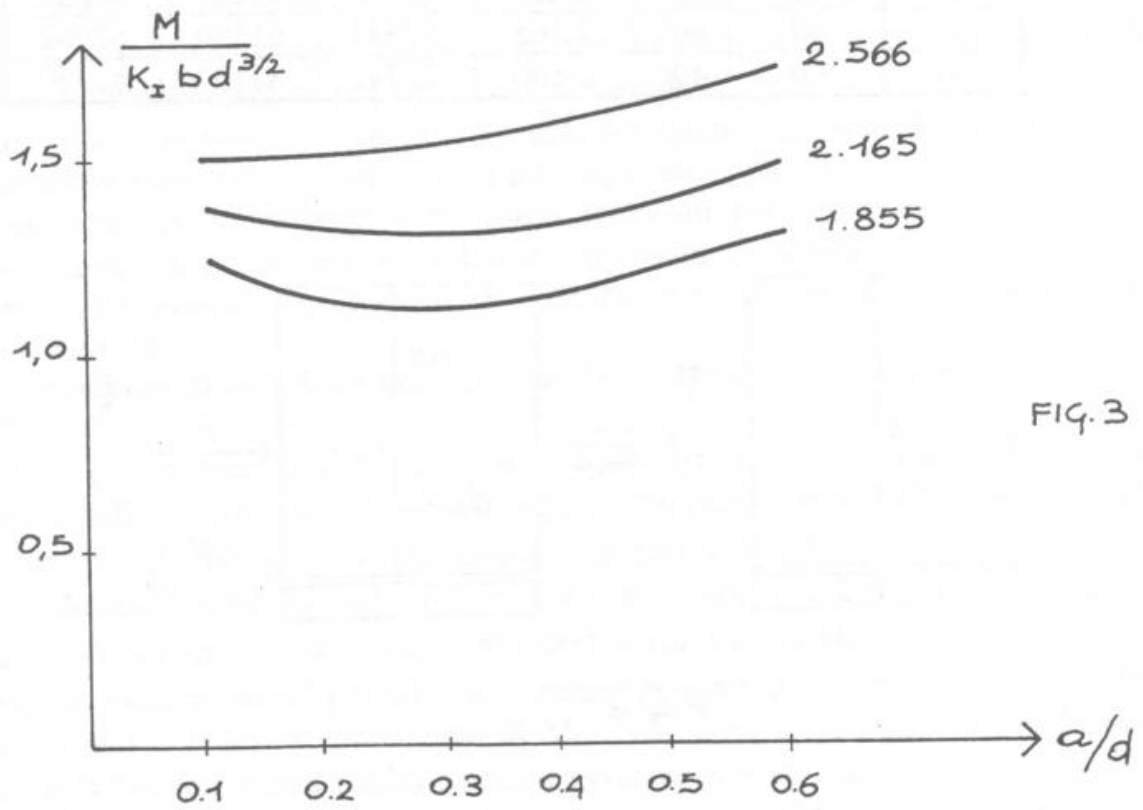


FIG. 3