

PROVE WEDGE SPLITTING PER LA DETERMINAZIONE DEL COMPORTAMENTO A FRATTURA DEL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO SOTTOPOSTO A CARICHI CICLICI.

A. Meda, G.A. Plizzari

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Brescia, via Branze 28, 25123 Brescia.
meda@ing.unibs.it, plizzari@ing.unibs.it*

Abstract

Experimental results from Wedge Splitting tests are performed to study fracture behavior of concrete under cyclic loading. Geometrically similar specimens with different sizes were adopted. Experiments concerned pre-cracked specimens in which a fracture process zone was present. Specimens of both normal strength and high strength concrete with sinusoidal steel fibers were adopted. Results show the strong influence of the fracture process zone size on damage accumulation, the better performance of high strength concrete and the size effect on fracture behavior of concrete under cyclic loading.

Introduzione

L'utilizzo di nuovi materiali per le costruzioni non può prescindere dallo studio dei diversi fenomeni che influenzano la sicurezza strutturale. Tra questi, la resistenza a fatica è sicuramente un aspetto che riveste particolare importanza a causa della natura ciclica dei carichi e della maggiore importanza dei carichi variabili nelle strutture di calcestruzzo ad alta resistenza, caratterizzate da un minor peso proprio della struttura.

Il recente utilizzo di calcestruzzi fibrorinforzati consente di colmare, almeno parzialmente, la ben nota limitata capacità del calcestruzzo di resistere a trazione. In particolare, le fibre intervengono dopo la fessurazione della matrice, presente già nella fase di maturazione del calcestruzzo a causa dei gradienti igrometrici e termici, ai quali si aggiungono successivamente gli effetti dei carichi. Diventa allora particolarmente interessante verificare la stabilità delle fessure in presenza di carichi ciclici.

Il problema del comportamento a frattura del calcestruzzo fessurato sottoposto a carichi ciclici è stato negli ultimi anni oggetto di alcune ricerche [1,2,3,4]. Slowik, Plizzari e Saouma [5] hanno osservato che, in presenza di carichi ciclici, il danneggiamento si verifica prevalentemente nella zona microfessurata presente all'apice della fessura (*Fracture Process Zone*); per questo motivo, i risultati delle prove di fatica disponibili in letteratura, ottenuti generalmente da provini non danneggiati (senza zona di processo), sono certamente preziosi ma non forniscono indicazioni precise sulla effettiva resistenza del materiale.

Il problema della fatica nel calcestruzzo fessurato è stato recentemente studiato anche all'Università di Brescia in collaborazione con il CTG Italcementi Group, effettuando prove di

trazione diretta su cilindri [6] e prove di flessione su travi [7], i cui risultati hanno anche consentito di formulare modelli di comportamento.

Scopo del presente lavoro è lo studio sperimentale sul comportamento a frattura di calcestruzzi ordinari e ad alta resistenza fibrorinforzati, sottoposti a carichi ciclici, con prove “Wedge Splitting” [8,9]. L'impiego di provini aventi diverse dimensioni ha consentito di verificare anche l'effetto scala che caratterizza il comportamento a frattura delle strutture. L'applicazione dei carichi ciclici è iniziata dopo aver prefessurato il provino, e quindi in presenza di zona di processo, in modo da simulare le condizioni di una fessura reale all'interno di una struttura. I risultati ottenuti consentono di effettuare alcuni confronti tra un calcestruzzo di normale resistenza ed un calcestruzzo ad alta resistenza, e di verificare l'influenza delle fibre e della resistenza sul comportamento a fatica del calcestruzzo.

Programma sperimentale

La prova “Wedge Splitting” consente di verificare il comportamento a frattura del calcestruzzo con provini più compatti delle travi (Fig. 1). Il carico viene applicato al provino per mezzo di un cuneo con superfici trattate per ridurre gli attriti, e di piastre di carico applicate all'estradosso dei provini (Fig. 2a). Le componenti orizzontali del carico costituiscono le forze di splitting che inducono nel provino uno stato di tensoflessione.

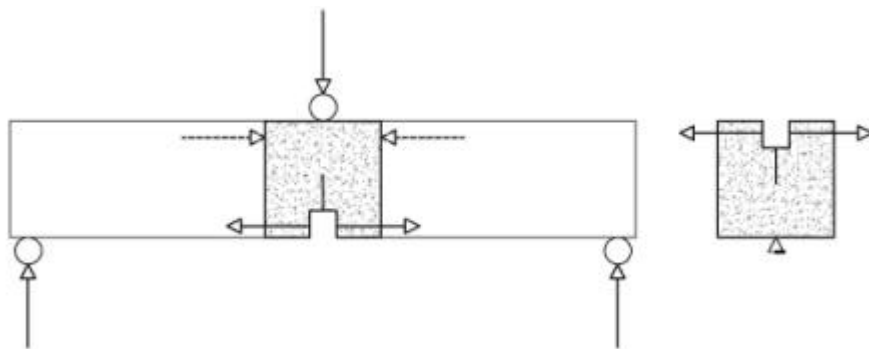


Figura 1
Analogia tra la prova di flessione e la prova Wedge Splitting.

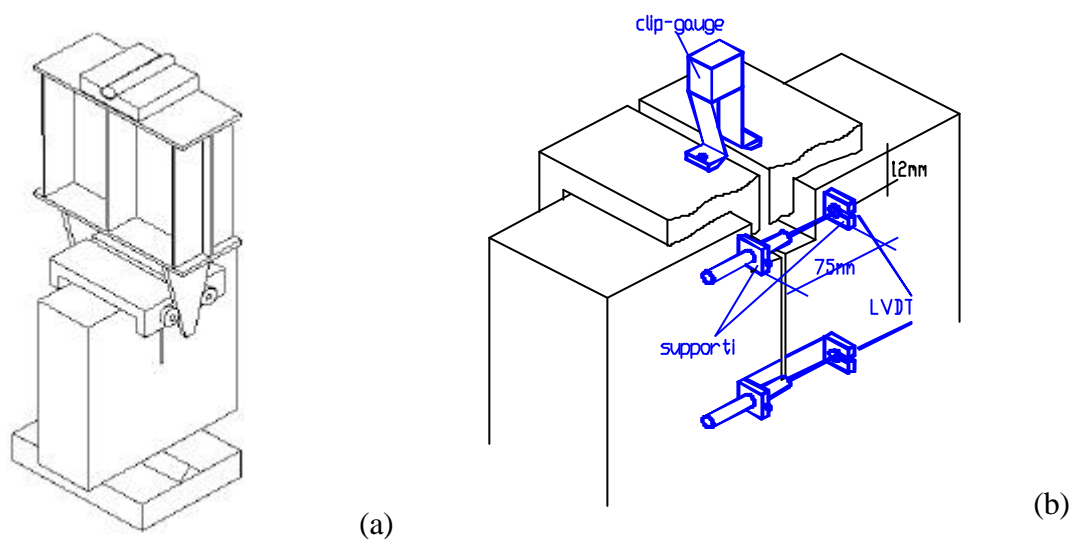


Figura 2
Schema del sistema di carico del provino Wedge Splitting (a); strumentazione (b).

Per la sperimentazione sono stati confezionati provini di tre diverse dimensioni (Fig. 3), sia con un calcestruzzo di normale resistenza (NSC, con $f_{ck} \approx 30$) che con uno di alta resistenza (HSC, con $f_{ck} \approx 75$). Nei provini era stato realizzato un intaglio inserendo nel getto un lamierino di acciaio dello spessore di 1 mm (Fig. 3); il rapporto tra l'altezza della sezione resistente (L) e l'altezza del provino è stato mantenuto costante e pari a 0.53.

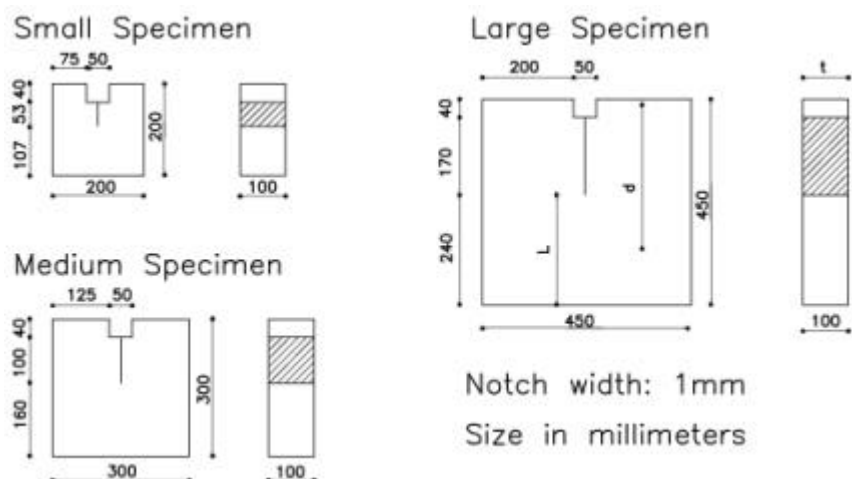


Figura 3
Caratteristiche geometriche dei provini.

La composizione del calcestruzzo NSC e HSC è riportata in Tab. 1. Il calcestruzzo è stato confezionato con aggregati naturali di natura silicea con diametro massimo di 15 mm e distribuzione granulometrica vicina a quella di Bolomey. Ad entrambi i tipi di calcestruzzo sono state aggiunte fibre sinusoidali con diametro di 0.5 mm e lunghezza di 30 mm (rapporto d'aspetto = 60), in quantità pari a 30 kg/m^3 (0.38% in volume).

Tabella 1
Composizione dei due tipi di calcestruzzo utilizzate per le prove

	NSC	HSC
Cement type	32.5 R CEM II/BL	52.5 R CEM I
Cement dosage	370 Kg/m^3	500 Kg/m^3
Water	170 Kg/m^3	128 Kg/m^3
w/c ratio	0.459	0.256
Superplasticizer type	Melamine-based	Acrylic-based
Superplasticizer dosage	3.92 Kg/m^3	16.2 Kg/m^3
Aggregate	1862 Kg/m^3	1829 Kg/m^3
Steel fibers	30 Kg/m^3	30 Kg/m^3

Al provino è stato applicato un trasduttore di spostamento resistivo (clip-gauge), posizionato tra le due piastre di carico (Fig. 2b), utilizzato durante la fasi di prova in controllo di apertura di fessura. Due coppie di trasduttori di spostamento LVDT hanno consentito la misura dell'apertura di fessura: la prima in corrispondenza della forza di splitting (Crack Mouth Opening Displacement - CMOD), con una distanza tra le basi di misura di 75 mm; la seconda in corrispondenza dell'apice dell'intaglio (Crack Opening Displacement- COD), con le basi di misura fissate per mezzo di un lamierino all'interno dell'intaglio (Fig. 2b). Per le prove si è utilizzata una pressa idraulica Instron 8500, con cella di carico da 500 kN.

Risultati sperimentali

Le prove cicliche sono state precedute da una serie di prove monotone effettuate al fine di caratterizzare il comportamento a frattura dei materiali. I risultati di tali prove sono pubblicati in [10].

Al fine di simulare il comportamento di una fessura reale, al cui apice è presente una zona di processo, la prova ciclica è stata preceduta da una fase statica nella quale il CMOD è stato incrementato monotonamente fino al raggiungimento del carico di picco [6]. Superato il carico massimo, i provini sono stati scaricati quando il carico era diventato pari al 95% del carico massimo (OAB in Fig. 4). Questa fase iniziale di carico (statico) ha provocato la formazione della FPZ prima dell'inizio dell'applicazione del carico ciclico. Dopo la fase di propagazione stabile della fessura, che si verifica prima del raggiungimento del picco di carico, la dimensione della zona di processo aumenta con l'incremento di CMOD; risulta quindi importante controllare con precisione il punto di scarico in modo da uniformare, nei diversi provini, la dimensione della zona di processo all'inizio della fase ciclica. A tal fine le prove sono state gestite da un apposito software, realizzato in ambiente LabWindows[®], sviluppato sulla base del programma presentato in [6,7].

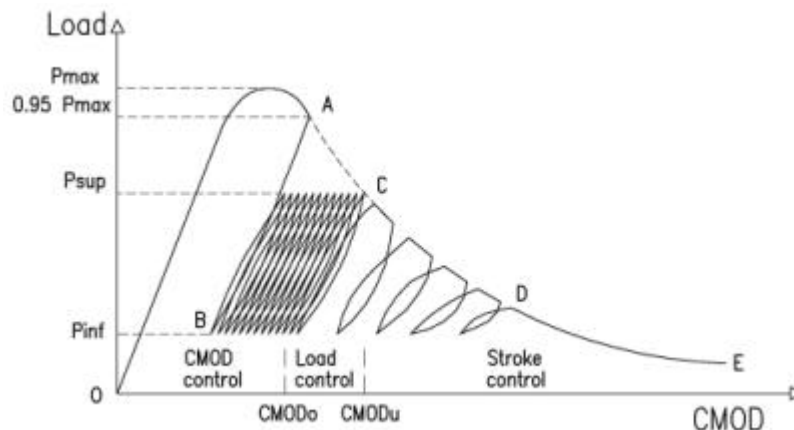


Figura 4
Schema delle diverse fasi della prova ciclica.

La fase ciclica è iniziata controllando che il carico variasse tra due soglie, P_{sup} e P_{inf} (BC in Fig. 4), espresse come percentuale del carico di picco misurato durante la fase iniziale di precarico, e non stimato sulla base di prove statiche effettuate su altri provini, sia pur simili a quelli utilizzati per le prove cicliche. All'approssimarsi del ramo discendente della curva involuppo (C in Fig. 4), riconosciuto dal software che verifica l'incremento di apertura di fessura per ciclo, la prova è proseguita in controllo di spostamento del pistone per evitare il collasso del provino al raggiungimento del ramo instabile. Il passaggio da una fase di controllo all'altra è stato sempre gestito dal programma appositamente sviluppato per la prova. Dopo aver applicato alcuni cicli sulla curva involuppo (CD in Fig. 4), la prova è proseguita con spostamento monotonamente crescente fino al raggiungimento di valori di CMOD di circa 8 mm.

Risultati di precedenti sperimentazioni hanno evidenziato che il livello di carico gioca un ruolo ancora più significativo nel calcestruzzo fibrorinforzato in quanto le fibre diventano efficaci solo quando l'apertura di fessura supera certi limiti o, in altri termini, al di sotto di determinati livelli di sforzo post-picco [7]. A tale scopo, ai provini sono stati applicati diversi livelli di carico, pari al 25%-50%, 15%-65%, 20%-70% e 10%-70% di P_{max} .

In Tabella 2 sono riportati i principali risultati sperimentali, riguardanti il valore di picco della forza di splitting e del corrispondente valore di $CMOD_p$, ed il numero massimo di cicli applicati al provino (N_{max}).

La Figura 5a mostra l'andamento dell'apertura di fessura ($CMOD_{sup}$), misurata in corrispondenza di P_{sup} , in funzione del numero di cicli nei provini con carico variabile tra il 25% ed il 75% di P_{max} . Tali curve, note in letteratura come Cyclic Creep Curve, nei provini con FPZ sono caratterizzate da due fasi: fino a valori di numero di cicli pari a 80-90% del totale, l'aumento di fessura si mantiene limitato ed ha andamento lineare; successivamente si verifica un rapido incremento dell'apertura di fessura fino al collasso del provino [11]. Si può notare che, una volta superato il tratto lineare della Cyclic Creep Curve, al provino possono essere applicati un numero molto limitato di cicli. Di conseguenza, per la quasi totalità dei cicli si verifica un incremento di fessura costante ($dCMOD_{sup}/dn$). La pendenza del ramo lineare della Cyclic Creep Curve può essere un utile parametro per prevedere la resistenza a fatica del materiale; infatti un per un materiale poco resistente a fatica si hanno maggiori incrementi di apertura di fessura per ogni ciclo e, conseguentemente, una pendenza del ramo lineare della Cyclic Creep Curve più elevata. Tale comportamento è messo in evidenza dalla Fig. 5b che mostra il numero totale di cicli in funzione di $dCMOD_{sup}/dn$. Si può notare che la riduzione della resistenza a fatica è leggermente minore nel calcestruzzo ad alta resistenza, grazie alla maggior efficacia delle fibre [7].

Tabella 2

Principali risultati delle prove cicliche.

Specimen	P_{inf}/P_{max} P_{sup}/P_{max}	$F_{s,max}$ [kN]	$CMOD_p$ [mm]	$CMOD_o$ [mm]	$CMOD_u$ [mm]	N_{max} [-]	$CMOD_o/CMOD_u$ [-]
NSC2aS	0,25-0,75	5,005	0,12	0,1455	0,354	25408	0,411016949
NSC2bS	0,25-0,75	3,247	0,081	0,0895	0,242	432	0,369834711
NSC2dM	0,25-0,75	5,447	0,1025	0,107	0,2135	14273	0,50117096
NSC2hM	0,25-0,75	6,984	0,135	0,144	0,265	1861	0,543396226
NSC2eL	0,25-0,75	9,61	0,153	0,1515	0,212	2590	0,714622642
NSC2fL	0,25-0,75	7,335	0,1665	0,1945	0,4	9002	0,48625
NSC2gM	0,15-0,65	6,501	0,161	0,208	0,7295	588512	0,285126799
NSC2iM	0,15-0,65	6,858	0,1345	0,1165	0,407	93436	0,286240786
NSC2IM	0,15-0,65	5,393	0,119	0,1045	****	1021325	****
NSC2pM	0,15-0,65	6,356	0,1885	0,185	0,512	723465	0,361328125
NSC2mM	0,20-0,70	6,102	0,119	0,116	****	512498	****
NSC2nM	0,20-0,70	6,499	0,1375	0,1605	0,515	162923	0,311650485
NSC2oM	0,20-0,70	4,917	0,17	0,1635	0,4365	18028	0,374570447
HSC1iS	0,25-0,75	5,684	0,111	0,1435	0,4535	28333	0,316427784
HSC2aS	0,25-0,75	5,277	0,172	0,225	0,3265	54371	0,689127106
HSC1gM	0,25-0,75	7,477	0,1425	0,132	0,2405	1192	0,548856549
HSC1hM	0,25-0,75	11,067	0,170	0,180	0,425	4652	0,423529412
HSC2bL	0,25-0,75	13,262	0,181	0,2095	0,511	7752	0,409980431
HSC2cL	0,25-0,75	15,316	0,2765	0,2795	0,6395	1864	0,437060203
HSC2dM	0,15-0,65	10,526	0,179	0,2085	0,4005	76275	0,520599251
HSC2eM	0,15-0,65	9,931	0,1325	0,082	0,275	115924	0,298181818
HSC2fM	0,20-0,70	10,618	0,1165	0,122	0,39	45580	0,312820513
HSC2gM	0,20-0,70	6,979	0,141	0,165	0,3075	40600	0,536585366
HSC2hM	0,10-0,70	4,51	0,277	0,3845	0,8415	14959	0,456922163
HSC2iM	0,10-0,70	9,035	0,171	0,1805	0,3255	20121	0,55453149
HSC2IM	0,20-0,54	10,233	0,1505	0,154	****	502345	****

Risultati di prove sperimentali presentate in [5,7] hanno evidenziato che il danneggiamento provocato dai carichi ciclici si verifica prevalentemente nella zona di

processo. Come precedentemente affermato, nei provini utilizzati nel presente lavoro la dimensione della zona di processo è certamente legata al valore di deformazione raggiunto alla fine della fase iniziale di precarico, dal quale dipende il valore della $CMOD_{sup}$ all'inizio della fase ciclica ($CMOD_0$ in Fig. 4). Un secondo valore particolarmente significativo di $CMOD$ è quello in corrispondenza della curva inviluppo ($CMOD_u$, Fig. 4), in corrispondenza del quale si verifica il collasso per fatica del provino [7] (Fig. 6a). I valori di $CMOD_0$ e $CMOD_u$ rilevati da tutti i provini sono riportati in Tabella 2. La Figura 5c mostra il numero massimo di cicli in funzione del rapporto $CMOD_0/CMOD_u$, che rappresenta il rapporto tra la deformazione iniziale e la massima deformazione consentita al provino. Si può notare che, all'aumentare di questo rapporto, la resistenza a fatica del provino diminuisce in entrambi i tipi di calcestruzzo.

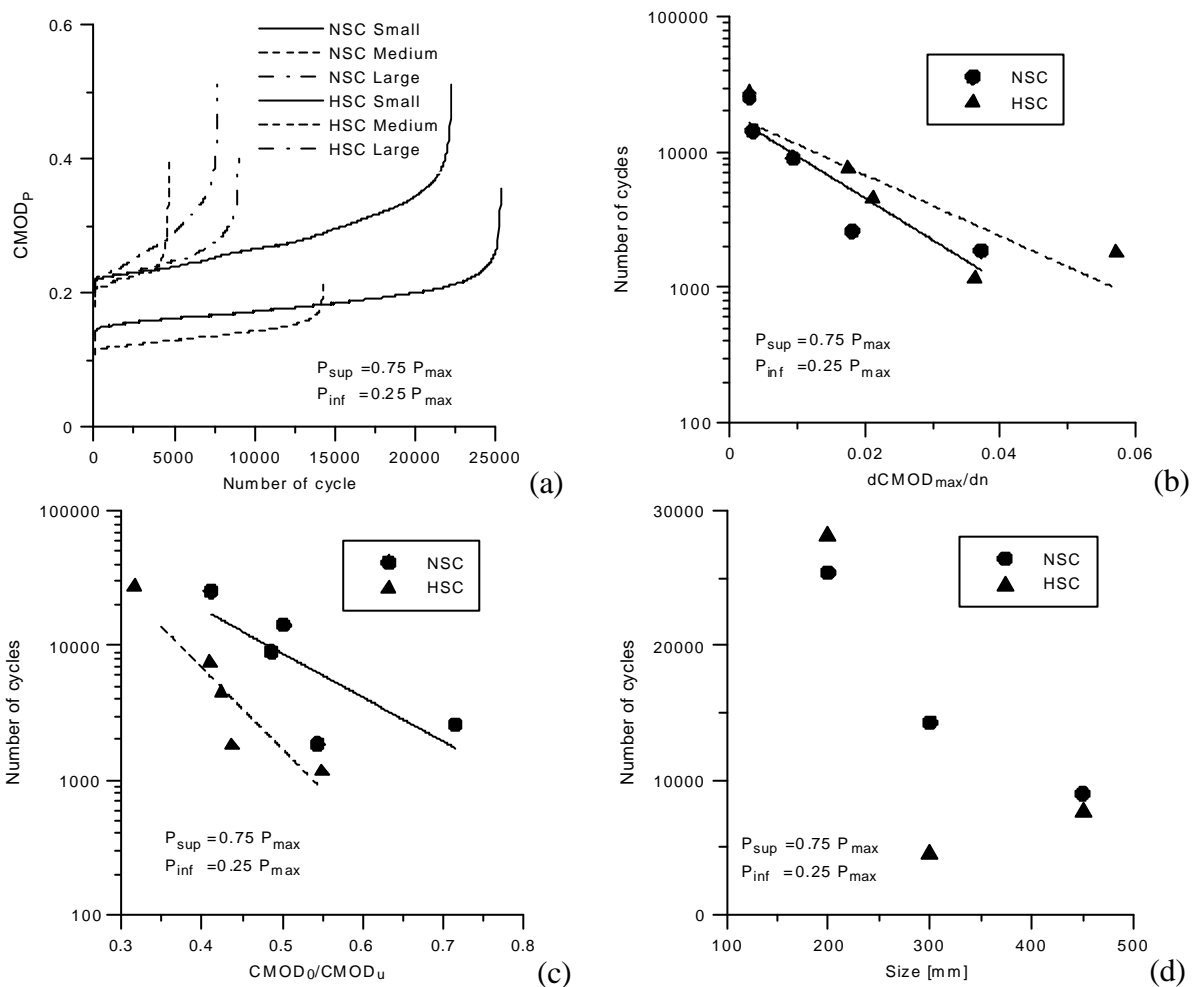


Figura 5

Risultati delle prove cicliche con carico variabile tra il 25% ed il 50% di P_{max} : $CMOD_{sup}$ in funzione del numero di cicli (a); numero massimo di cicli in funzione della pendenza del ramo lineare della Cyclic Creep Curve (b), del rapporto $CMOD_0/CMOD_u$ (c) e della dimensione caratteristica dei provini (d).

Il rapporto $CMOD_0/CMOD_u$ è sicuramente influenzato dalle dimensioni del provino, in quanto nei provini grandi la zona di processo tende a svilupparsi più velocemente ed il valore di $CMOD_u$ tende a diminuire a causa del comportamento post-picco più fragile. Tale conclusione è confermata dalle curve in Fig. 5d che mostrano la diminuzione della resistenza a fatica all'aumentare della dimensione caratteristica dei provini, assunta pari all'altezza dei

provini. Questo risultato conferma la presenza di un significativo effetto scala nei risultati delle prove di fatica su provini strutturali come travi o provini Wedge Splitting [12].

Risultati di prove precedenti hanno anche evidenziato che la curva involuppo della prova ciclica è molto vicina alla curva statica [7]; tali risultati sono stati confermati nella presente sperimentazione, come mostrato in Figura 6a relativa ad un provino medio di calcestruzzo di normale resistenza. Questo evidenzia anche l'importante contributo delle fibre di acciaio alla resistenza a fatica del calcestruzzo; la presenza delle fibre nella matrice di calcestruzzo ha il ben noto effetto di aumentare la duttilità del materiale, cioè di spostare verso destra il ramo discendente della curva. Questo effetto è evidenziato in Figura 7 dove vengono confrontate le curve sperimentali ottenute da prove statiche su provini HSC con e senza fibre. Per un certo livello di carico, l'incremento di CMOD necessario per raggiungere la curva involuppo è più elevato nel calcestruzzo fibrorinforzato che è quindi caratterizzato da una maggiore resistenza a fatica [7].

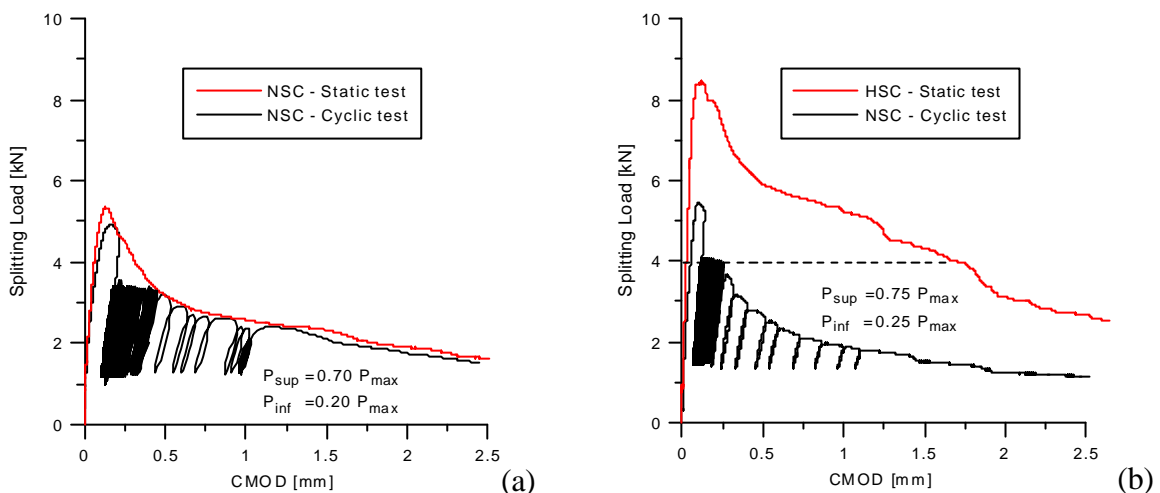


Figura 6

Confronti tra le curve sperimentali ottenute da una prova ciclica e una prova statica (a), e tra le curve ottenute da un calcestruzzo NSC e un calcestruzzo HSC (b).

I risultati mostrati finora non evidenziano differenze tra i provini di calcestruzzo NSC e HSC. Si deve però ricordare che i livelli di carico ciclico applicato ai provini erano proporzionali al carico massimo e che, di conseguenza, i provini di calcestruzzo ad alta resistenza erano, in termini assoluti, più caricati dei provini di normale resistenza. Nell'applicare ad un provino di calcestruzzo ad alta resistenza lo stesso livello di carico, in valore assoluto, applicato ad un provino a normale resistenza, non si è rilevato alcun danneggiamento significativo dopo l'applicazione di 500.000 cicli di carico. Il provino di NSC sottoposto alle stesso livello di carico era invece collassato dopo 14273 cicli. Il numero massimo di cicli applicabile al calcestruzzo ad alta resistenza per raggiungere il collasso per fatica non è stato determinato ma le risorse del provino HSC possono essere stimate confrontando la curva della prova ciclica del calcestruzzo NSC con la curva della prova statica del calcestruzzo HSC (Fig. 6b). La notevole distanza tra la curva involuppo del provino NSC con la curva statica del provino HSC (vicina alla curva involuppo), evidenzia la maggior resistenza a fatica del calcestruzzo ad alta resistenza con lo stesso tipo e dosaggio di fibre.

L'effetto dei livelli di carico è mostrato in Figura 8 che evidenzia il massimo numero di cicli applicato ai provini di NSC e di HSC. Si può notare come, diminuendo il carico superiore e l'ampiezza di carico, aumenti sensibilmente il numero di cicli sopportati dal provino.

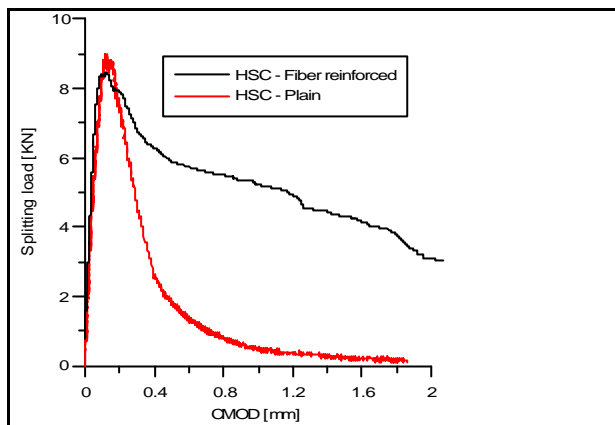


Figura 7
Confronto calcestruzzo con e senza fibre.

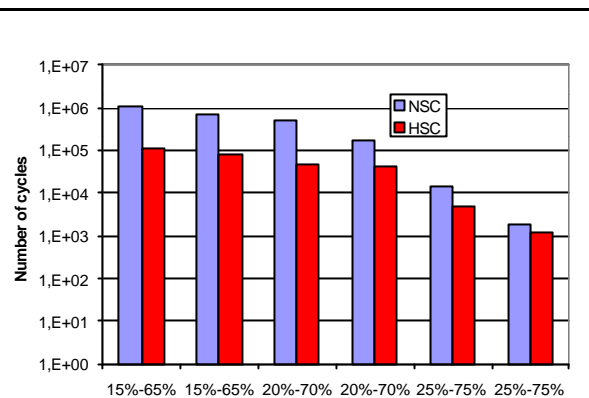


Figura 8
Effetto dei livelli di carico sul numero di cicli.

Ringraziamenti

Si ringrazia l'Ing. Paola Bignamini per l'aiuto fornito nella conduzione delle prove di laboratorio e le elaborazioni numeriche. Si ringraziano anche i tecnici del Laboratorio Pietro Pisa dell'Università di Brescia, ed in particolare il Sig. Andrea Del Barba, per l'assistenza fornita nella preparazione dei provini e nella conduzione delle prove sperimentali.

Bibliografia

- [1] Reinhardt H.W., Cornelissen H.A.W. "Post-Peak Cyclic behaviour of Concrete in Uniaxial Tensile and Alternating Tensile and Compressive loading", Cement and Concrete Research, **14**, 263-270, **1984**
- [2] Hordijk D.A. "Local approach to Fatigue of Concrete", Doctoral Thesis, Delft University of Technology, **1991**
- [3] Hilsdorf H.K., Kesler C.E. "Fatigue strength of concrete under varying flexural stresses", ACI Journal, Proceedings, **63**, 1059-1076, **1966**
- [4] Oh B.H. "Cumulative damage theory of concrete under variable-amplitude fatigue loading", ACI Materials Journal, **88** (1), 41-48, **1991**
- [5] Slowik V., Plizzari G.A., Saouma V. "Fracture of concrete under variable amplitude loading", ACI Materials Journal, **93** (3), 272-283, **1996**
- [6] Plizzari G. A., Cangiano S., Alloruzzo S. "The fatigue behavior of cracked concrete", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, **20** (8), 1195-1206, **1997**
- [7] Plizzari G. A., Cangiano S., Cere N. Postpeak behaviour of fiber-reinforced concrete under cyclic tensile loads, ACI Materials Journal, **97** (2), 182-192, **2000**
- [8] Linsbauer, H.N., Tcheegg, E.K. Fracture energy determination of concrete with cube-shaped specimens, Zement und Beton, **31**, pp.38-40, **1986**
- [9] Brühwiler, E., Wittmann, F.H. The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests, Eng. Fracture Mechanics, **35** (1/2/3), 117-125, **1990**
- [10] Bignamini P. F. Studio della fatica nel calcestruzzo fessurato, Graduate Thesis, Università degli Studi di Brescia, **1999**
- [11] Cornelissen H.A.W., Reinhardt H.W. "Uniaxial Tensile Fatigue Failure of Concrete under Constant Amplitude and Programme Loading", Magazine of Concrete Research, **36** (129), 216-226, **1984**
- [12] Bazant Z.P., Schell W.F. "Fatigue Fracture of High-Strength Concrete and Size Effect", ACI Materials Journal, **90** (5), 472-478, **1993**