

ABSTRACT (VERSIONE ITALIANO)

Il comportamento meccanico di materiali a base cementizia è fortemente influenzato dalla propagazione di processi fessurativi sotto generici stati di sforzo triassiale. La presenza di una o più fratture predominanti in un elemento strutturale di fatto ne modifica la sua risposta e ne indebolisce le sue performance verso comportamenti fortemente fragili. L'utilizzo di fibre di acciaio in compositi cementizi rappresenta una nuova metodologia utilizzata per migliorare il comportamento post-fessurativo di tali compositi. La risposta di Compositi Cementizi FibroRinforzati (FRCC), in comparazione con calcestruzzi ordinari, è caratterizzata da una serie di vantaggi, tali come una più alta resistenza a sforzi di trazione e taglio, una maggiore duttilità in regimi post-fessurativi, una spiccata tenacità, ecc.

In questo quadro scientifico, la presente tesi si occupa tanto della ricerca sperimentale che della modellazione computazionale del comportamento meccanico di FRCC. Gran parte del lavoro è rivolto alla formulazione e validazione di un modello costitutivo discontinuo volto a simulare la risposta meccanica del FRCC considerando la possibilità di modellare processi di frattura più complessi come i modi misti di rottura.

In primo luogo, i risultati di una vasta campagna sperimentale, svolta presso il Laboratorio di prove su Materiali e Strutture (LMS) dell'Università degli Studi di Salerno, vengono presentati. La possibile influenza di combinare diversi tipi di fibre sulle proprietà meccaniche di Cementizi FibroRinforzati in Acciaio (SFRC) viene investigata. In particolare, lo studio concerne il comportamento in flessione di travette in calcestruzzo fibrorinforzato pre-incise. L'influenza di diverse quantità e tipi di fibre, sulla resistenza di prima fessurazione nonché sull'intero comportamento post-fessurativo, viene analizzata e discussa.

Un approccio innovativo per riprodurre gli effetti della singola fibra sui processi di frattura della matrice in calcestruzzo/malta cementizia è stato proposto. Si tratta di un approccio al discontinuo basato sull'utilizzo di elementi d'interfaccia a spessore nullo che vengono impiegati per modellare l'interazione tra fibre di acciaio e malta cementizia durante processi di frattura in modo I, II e/o sotto processi misti. L'indebolimento della matrice cementizia si modella mediante una legge di rammollimento basata sulla misura diretta dell'energia di frattura formulata nell'ambito della più generale teoria della plasticità.

Due aspetti fondamentali dell'interazione fibra-malta cementizia vengono considerati nella formulazione del modello d'interfaccia: da un lato si analizza il comportamento della singola fibra nella direzione di sviluppo della stessa, quindi nei confronti dello sfilamento della stessa, dall'altro lato si modella l'effetto della fibra sulla matrice cementizia derivante da possibili cinematismi relativi trasversali delle due facce della fessura, azione quest'ultima conosciuta come "effetto spinotto". Questi due effetti vengono combinati mediante la ben nota "Teoria delle Miscele". Particolare enfasi ed importanza è dedicata alla descrizione e modellazione del comportamento allo sfilamento di fibre immerse in matrici cementizie. Tale aspetto è di cruciale importanza nel controllo della risposta post-fessurativa degli FRCC.

In particolare, una formulazione unificata per simulare il comportamento globale allo sfilamento della singola fibra immersa in matrici cementizie viene presentata. Tale approccio può essere inteso come uno strumento che può essere verosimilmente impiegato in modelli numerici più complessi volti a simulare in maniera esplicita il comportamento meccanico degli FRCC tenendo conto della diretta natura discreta delle componenti che compongono tale composito e considerando esplicitamente i contributi delle varie componenti, nel quadro del cosiddetto approccio meso meccanico.

Le capacità predittive del modello discontinuo proposto per la simulazione meccanica degli FRCC vengono valutate sotto diversi livelli di osservazione. La formulazione discreta viene impiegata e convalidata per simulare il comportamento a rottura di FRCC tanto a livello di leggi costitutive che

attraverso analisi strutturali macroscopiche e mesoscopiche. Una vasta gamma di risultati numerici vengono eseguiti per dimostrare se la proposta, basata sulla formulazione non lineare di elementi di interfaccia, è in grado di condurre previsioni realistiche dei processi di rottura di FRCC sotto diverse condizioni di carico e considerando un ampio spettro di contenuti e tipi di fibre. Si analizza se la formulazione proposta sia in grado di catturare l'influenza del contenuto di fibre sulla massima resistenza e risposta post-picco in modo I, II e/o misto di frattura.

Inoltre, un modello semplificato basato su un approccio a cerniera-plastica concentrata, già disponibile in letteratura scientifica, viene proposto. I risultati sperimentali riportati in questa tesi vengono presi come riferimento per la sua calibrazione e validazione. Il modello rappresenta una riformulazione di un modello esistente in cui la legge sforzo-apertura della fessura viene considerata in maniera analoga al modello d'interfaccia per modi misti di frattura, considerandone in questa proposta i soli modi I per trazione. Una soluzione in forma chiusa per la legge sforzo apertura della fessura con l'esplicita considerazione delle azioni delle fibre viene formulata in questa proposta. Le predizioni del modello proposto, confrontate con le misure sperimentali, vengono eseguite per dimostrare la validità del modello nel riprodurre la risposta strutturale dei componenti in calcestruzzo fibrorinforzato.

Infine, tanto il comportamento meccanico del calcestruzzo non armato che gli FRCC vengono analizzati e modellati attraverso l'impiego di una nuova formulazione basata su un approccio al continuo con ingredienti della teoria della plasticità e l'utilizzo di micropiani. Questa formulazione al continuo (a fessurazione distribuita), basata sulla teoria dei micropiani combinata con la ben nota "Teoria delle Miscele", viene considerata per descrivere gli effetti delle fibre sul comportamento meccanico degli FRCC. La formulazione costitutiva, le superfici di resistenza e le interazioni tra matrice cementizia e fibre di acciaio vengono considerate in maniera analoga a quanto fatto per la proposta al discontinuo. Le capacità di tale modello nel catturare il comportamento post-fessurativo degli FRCC vengono valutati prendendo in considerazione alcuni dati sperimentali disponibili in letteratura scientifica.

ABSTRACT (ENGLISH VERSION)

The mechanical behavior of cement-based materials is greatly affected by crack propagation under general stress states. The presence of one or more dominant cracks in structural members modifies its response, possibly leading to brittle failure modes. The random dispersion of short steel fibers in cement materials is a new methodology used for enhancing the response in the post-cracking regime. The behavior of Fiber-Reinforced Cementitious Composite (FRCC), compared to conventional plain concrete, is characterized by several advantages, e.g., higher tensile and shear resistance, better post-cracking ductility, higher fracture energy, etc.

In this framework, this thesis deals with both the experimental investigation and computational modeling of the mechanical behavior of FRCC. A great part of the work is intended at reporting the formulation and validation of a novel constitutive model aimed at simulating the stress-cracking response of FRCC and considering most complex fracture occurrences in mixed-modes of failure.

Firstly, the results of an extensive experimental campaign, performed at the Laboratory of Materials testing and Structures (LMS) of the University of Salerno, is presented in which the possible influence of combining different fiber types on the resulting properties of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) is investigated. Particularly, the study concerns the four-point bending behavior of pre-notched SFRC beams where the influence of the amount of fibers and types on the first-crack strength and the whole post-cracking behavior is analyzed.

After this, an innovative approach for reproducing the fiber effects on the cracking phenomena of the concrete/mortar matrix is proposed. The well-known discrete crack approach based on zero-thickness interface elements is used to model the interaction between fibers and mortar as well as its degradation during fracture processes under mode I, II and/or mixed ones. The matrix degradation is modeled by means of a fracture energy-based softening law formulated in the framework of the flow theory of plasticity. Then, two fundamental aspects of the fiber-mortar interaction are considered in the model, i.e., the bond behavior of fibers bridging the crack opening and the dowel effect derived by possible relative transverse displacements of the two faces of the crack. The inclusion of fibers and the above two effects are taken into account by means of the well-known "Mixture Theory". Particular emphasis and importance is dedicated to the description and modeling of the overall debonding behavior of fibers embedded in cementitious matrices. Actually, the adhesive interaction between fibers in concrete matrix is of key importance in controlling the post-cracking response of FRCC. A unified formulation for simulating the overall bond behavior of fibers embedded in cementitious matrices is also presented. The proposed unified formulation is intended as a key element to be possibly employed in numerical models aimed at explicitly simulating the mechanical behavior of FRCC by taking into account the discrete nature of such materials and the contributions of the various constituents within the framework of the so-called meso-mechanical approach.

The predictive capabilities of the aforementioned discontinuous approach for failure analyses of fiber reinforced cementitious composite are evaluated at different levels of observation. Particularly, the discrete crack formulation is employed and validated to simulate the fracture behavior of FRCC at constitutive, mesoscopic and macroscopic levels of observations. Several numerical results are performed to demonstrate if such proposal, based on the non-linear interface formulation, is capable to lead realistic predictions of failure processes of FRCC under different load scenarios and considering a wide spectrum of fiber contents and types. It is also analyzed if the proposed formulation is able to capture the significant influence of the fiber content on the maximum strength and post-peak ductility in mode I, II and mixed ones showing the capability of the cracking formulation to capture the complex interaction mechanisms between fibers and matrix.

Furthermore, a simpler stress-crack opening model based on a hinge-crack approach, already available in the scientific literature, is proposed while the experimental results reported in this thesis

are taken as reference for its validation. The model represents a reformulation of a fictitious crack model and is based on fracture mechanics concepts where the stress-crack opening relationship is accounted in a similar way obtainable by considering the pure “mode I” case of the discontinuous proposal formulated in general sense for mixed-modes of fracture. A closed-form solution for the stress-crack opening law with the explicit consideration of the fiber actions is considered for such a formulation. The model predictions, compared with the experimental measures, are performed to demonstrate the soundness of the model to reproduce the mechanical response of SFRC members in terms of Force-Crack Tip Opening Displacement (CTOD) curves.

At last, both plain concrete and FRCC are analyzed and modeled by means of a novel microplane-based plasticity formulation. A continuum(smearred-crack) formulation, based on the non-linear microplane theory combined with the well-known “Mixture Theory”, is considered for describing the fiber effects on the failure behavior of FRCC. The constitutive formulation, failure analyses and the interactions between cementitious matrix and steel fibers are similarly approached as outlined for the discontinuous proposal. The capabilities of the microplane model to capture the significant enhancement in the post-cracking behavior of FRCC, with particular emphasis on the fracture and post-peak strengths, are finally evaluated by considering some experimental data available in scientific literature.