

L'USO DI MATERIALI INNOVATIVI PER LA COSTRUZIONE DI TUNNEL RESISTENTI ALLE AZIONI ECCEZIONALI

Marco di Prisco¹, Carlo Beltrami², Pamela Bonalumi¹, Ezio Cadoni³, Alessio Caverzan¹, Matteo Colombo¹, Liberato Ferrara¹, Paolo Martinelli¹

¹Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano

²Lombardi SA Consulting Engineers, Minusio-Locarno, Svizzera

³Dipartimento di Ambiente Costruzioni e Progettazione, Università delle Scienze Applicate della Svizzera meridionale, Lugano

Sommario

Il lavoro presenta il lavoro di ricerca, svolto in oltre tre anni, volto alla costruzione di conci di rivestimento prefabbricati per gallerie urbane in terreno soffice, in grado di garantire un'adeguata prestazione strutturale in presenza di carichi eccezionali, come incendi ed esplosioni interne alla struttura. Vengono brevemente riassunti i vantaggi derivanti dall'adozione di materiali fibrorinforzati come il calcestruzzo ad alte prestazioni, il calcestruzzo fibrorinforzato autocompattante ed il materiale cementizio rinforzato con reti di vetro alcali resistenti, sottolineando come tali vantaggi possano essere utilizzati in un progetto prototipale di concio prefabbricato al fine di contribuire a migliorare la risposta strutturale non solo con riferimento a condizioni eccezionali, ma anche nelle fasi di costruzione e di manutenzione, aumentando così la durata e la sostenibilità della struttura di rivestimento. La progettazione e la costruzione di conci di tunnel prefabbricati rappresentano l'esperienza finale del progetto denominato ACCIDENT - Advanced Cementitious Composites in DEsign and coNstruction of safe Tunnel - sviluppato al Politecnico di Milano in collaborazione con l'università della Svizzera Italiana SUPSI nell'ambito di un progetto Interegionale finanziato dalla Comunità Europea che ha visto la partecipazione della Provincia di Lecco. Il progetto si è articolato su tre livelli diversi: il materiale, il comportamento meso-strutturale ed il comportamento di macro-scala. Nell'articolo vengono brevemente riassunti i vantaggi ed i limiti di validità dell'approccio di progettazione proposta.

Parole chiave - Sicurezza nelle gallerie, calcestruzzo fibro-rinforzato, resistenza al fuoco, comportamento alle alte velocità di deformazione, materiali compositi ad alte prestazioni, Shock-tube tests, test esplosivi in scala al vero.

1 Introduzione

Le strutture sotterranee e le gallerie in particolare stanno assumendo un ruolo strategico nell'ambito delle costruzioni sia per i paesi in via di sviluppo, sia per i paesi contraddistinti da un'economia matura. La loro costruzione ai fini della gestione del traffico nel sottosuolo, ad esempio gallerie ferroviarie, strade e sottopassaggi, o della fornitura di altri servizi, quali tubi per l'approvvigionamento idrico, idroelettrico o igienico-sanitario, riveste un ruolo fondamentale per lo sviluppo economico, sia a livello nazionale, sia a livello globale. La sicurezza dei trasporti è allo stesso tempo una tematica di grande attenzione per la società moderna a causa del rischio di attentati terroristici come quelli avvenuti nelle metropolitane di Londra nel 2005 (56 morti, circa 700 feriti) e di Mosca nel 2010 (40 morti, circa 102 feriti), o di incendi accidentali, con la necessità di proteggere l'azione dei vigili del fuoco e delle squadre di soccorso e di garantire una riattivazione molto rapida del servizio infrastrutturale. In questo articolo viene presentata una breve sintesi dei risultati più significativi ottenuti in un progetto di 40 mesi sostenuto dalla Comunità Europea. I due enti capofila del progetto sono il Politecnico di Milano - Polo Regionale di Lecco (Lecco, Italia) e l'Università di Scienze

Applicate della Svizzera Italiana (Lugano Svizzera). Nel progetto di ricerca sono stati coinvolti anche nove partner italo/svizzeri, industriali ed istituzionali. Il progetto è rivolto allo sviluppo di nuove classi di materiali fibrorinforzati, che vengono utilizzati per la produzione di conci di tunnel prefabbricati prototipali in grado di ridurre il tasso di mortalità negli incidenti ove l'incendio e/o l'esplosione risultano l'azione di riferimento, provocando danni irreversibili o addirittura impedendo il soccorso dei vigili del fuoco a causa di crolli parziali. L'intero progetto è stato pianificato su tre livelli a scala crescente, ed i risultati sono brevemente riassunti nei capitoli successivi.

2 Il comportamento dei materiali

A livello del materiale, sono stati sviluppati e caratterizzati sia in campo statico sia in campo dinamico nuovi compositi cementizi rinforzati con micro-fibre in acciaio disperse in presenza anche di rete in fibra di vetro alcali-resistente considerando la condizione di incendio, l'esplosione e la loro eventuale interazione. Il comportamento del calcestruzzo alle alte temperature è un problema rilevante nella progettazione di rivestimenti di gallerie, soprattutto nell'idea di ridurre il più possibile lo spessore del rivestimento. E' stata effettuata un'indagine sperimentale su un HPFRCC (High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composite), con un mix-design selezionato dopo un'indagine preliminare volta ad ottimizzarne le prestazioni, indagandone il comportamento alle alte temperature (20, 200, 400, 600 °C) e per diverse velocità di deformazione (10-5, 0.1-1, 100-300 s⁻¹) in trazione ed in compressione uniassiale (Ferrara et al. 2010; Caverzan et al. 2012; Colombo et al. 2010). Inoltre, è stato attentamente studiato il comportamento in trazione di un calcestruzzo autocompattante più tradizionale rinforzato con macrofibre e di un malta rinforzata con una rete in fibra di vetro AR intessuta (TRC – Textile Reinforced Concrete). L'uso di questi materiali è stato finalizzato alla progettazione del rivestimento della galleria prefabbricata, pensato come struttura multistrato. Con riferimento alla caratterizzazione dinamica, l'indagine sperimentale è stata svolta utilizzando una barra di Hopkinson modificata, in grado di imporre una velocità di deformazione alquanto elevata (circa 100-300 s⁻¹), una attrezzatura oleo-pneumatico per imporre una velocità di deformazione media (0-10 s⁻¹), attrezzature queste entrambe disponibili presso il Laboratorio DynaMat della Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana di Lugano ed infine una presa elettromeccanica ad anello chiuso per prove statiche disponibile presso il Politecnico di Milano – Polo Regionale di Lecco. Avvalendosi di questa vasta campagna sperimentale è stato possibile identificare le caratteristiche meccaniche dei compositi tenendo conto del danno termico e degli effetti introdotti dalle alte velocità di deformazione. In Figura 1 sono mostrate sinteticamente a titolo di esempio, le prestazioni a trazione più significative per il

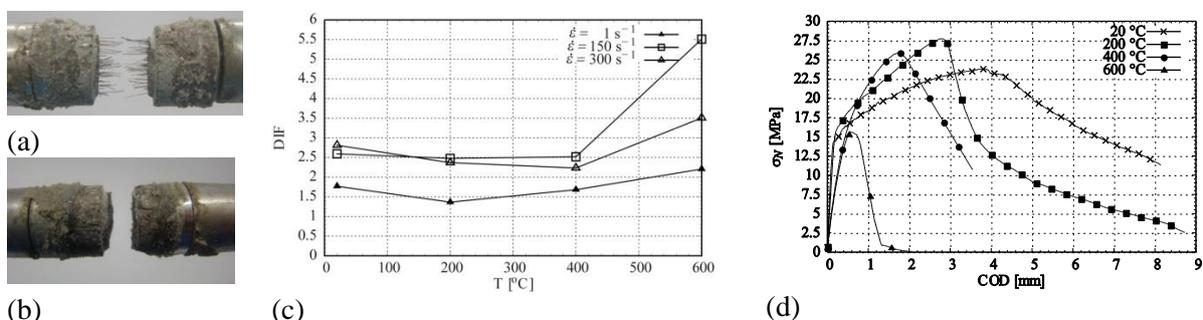


Fig. 1 Comportamento a trazione dell' HPFRCC. Prove di trazione uniassiale ad alta velocità di deformazione a rottura: campioni per T = 20 °C (a) e 600 °C (b); DIF (rapporto tensione resistente di picco dinamica/statica) al variare delle temperature a differenti velocità di deformazione (c). sforzo nominale a flessione al variare dell'apertura di fessura (COD – Crack Opening Displacement) con provini non intagliati dopo un ciclo termico a temperature diverse (d).

calcestruzzo ad alte prestazioni indagato, ed in particolare: le immagini di un campione fibrorinforzato ad alte prestazioni soggetto a trazione uniassiale mediante barra di Hopkinson a temperatura ambiente (Fig.1a) o dopo essere stato sottoposto ad un ciclo termico caratterizzato da una temperatura massima di 600°C (Fig.1b); l'andamento del rapporto resistenza di picco dinamica / resistenza di picco statica (DIF) al variare della temperatura T (Fig.1c); la resistenza nominale a flessione σ_N ottenuta con prova di flessione su provino non intagliato di 30 mm di altezza, al variare dell'apertura di fessura (COD – Crack Opening Displacement) dopo aver subito un ciclo termico a temperature massime di 20, 200, 400, 600 °C (Fig.1d).

3 Shock tube test

L'indagine dinamica impulsiva è stata estesa anche a livello meso-strutturale, indagando il comportamento di una lastra circolare interagente con il suolo, in grado di rappresentare una piccola porzione di concio di tunnel, sottoposta ad un'onda piana urto. L'onda è stata prodotta mediante una speciale attrezzatura denominata shock-tube costituita da un cilindro di circa 16 m di lunghezza (Fig.4a; Colombo et al, 2011) appositamente progettato e realizzato nell'ambito del contratto di ricerca. Le lastre circolari provate risultano stratificate e composte da uno strato interno in calcestruzzo fibrorinforzato con macrofibre in acciaio e uno o due strati esterni sottili in calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni (HPFRCC; Fig. 2). Le dimensioni dei campioni indagati sono espressi in Fig. 2. Le prove erano tese a verificare l'insorgere di eventuali fenomeni di delamina-

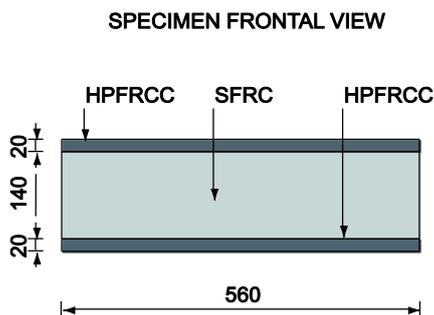


Fig. 2 Shock tube test: (units in mm).

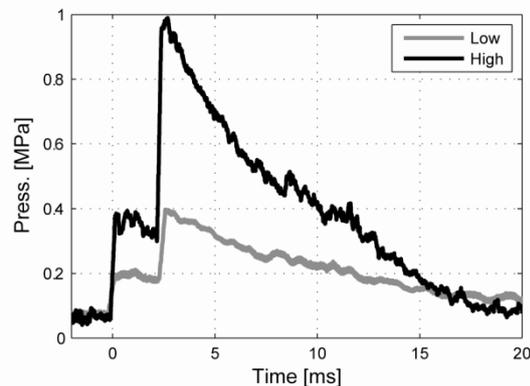


Fig. 3 Shock tube pressure close to the specimen face for low and high pressure test.

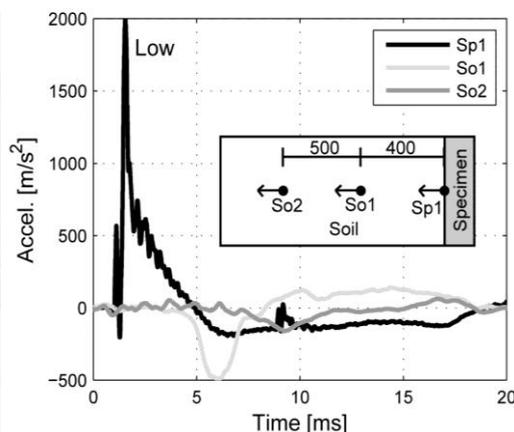


Fig. 4 (a) Shock tube facility; (b) specimen and soil acceleration for low pressure test (units in mm).

zione e a quantificare lo spostamento del concio verso il suolo sabbioso. Sono state prese in esame quattro prove: due a "bassa" pressione (0.34 MPa media pressione di picco e 3.51 MPa ms impulso specifico medio, Fig.3) e due ad "alta" pressione(1.04Mpa). Scegliendo il valore di 7.65 MPa ms come impulso specifico medio, si sono svolte opportune misure di pressione (Colombo et al., 2012). L'andamento nel tempo delle pressioni medie registrate dal trasduttore più vicino alla lastra campione per entrambe le pressioni indagate è indicata in Fig. 3. In Fig.4 si mostra l'andamento dell'accelerazione misurata solo nella prova svolta a bassa pressione. L'accelerometro centrale montato sul campione viene confrontato con gli accelerometri posti a due posizioni differenti all'interno del suolo: le misurazioni sono mostrate in Fig.4b. L'attenuazione della massima accelerazione osservabile in soli 0.5 m di suolo è alquanto significativa ed è uguale ad un fattore 4 e 2.5, rispettivamente per prove ad alta o a bassa pressione.

4 Test in scala reale

Per valutare l'affidabilità di appositi algoritmi di calcolo nella previsione delle azioni e del comportamento strutturale di strutture interratoe soggette a fenomeni esplosivi, si è provveduto a progettare prove in scala reale macro-strutturali, in grado di riprodurre fenomeni di scoppio e di incendio, in semplici tubi di calcestruzzo immersi in terreno soffice ad una profondità di 2.30 metri. I tubi di calcestruzzo indagati (diametro = 1 m; spessore = 8 cm, lunghezza = 25 m), svolgevano la funzione di condotti fognari presso il campus di formazione dei Vigili del Fuoco della Regione Lombardia a Bovisio Masciago (Milano). Le prove sono state effettuate con esplosivi detonanti ad alta energia preparati con varie quantità di esplosivo (da 10g ad 1 kg), poste all'interno del tubo. La ricerca risultava finalizzata a comprendere e riprodurre il comportamento di interazione terreno-struttura del sistema per varie intensità di carica e rappresenta un utile benchmark per calcoli numerici previsionali.

In Figura 5 sono mostrati rispettivamente il tubo scoperto opportunamente strumentato, il modello utilizzato per l'analisi tensionale con la tecnica degli Elementi Finiti ed infine un confronto teorico – sperimentale in termini di pressione e di accelerazione radiale: il confronto nel caso mostrato risulta alquanto promettente.

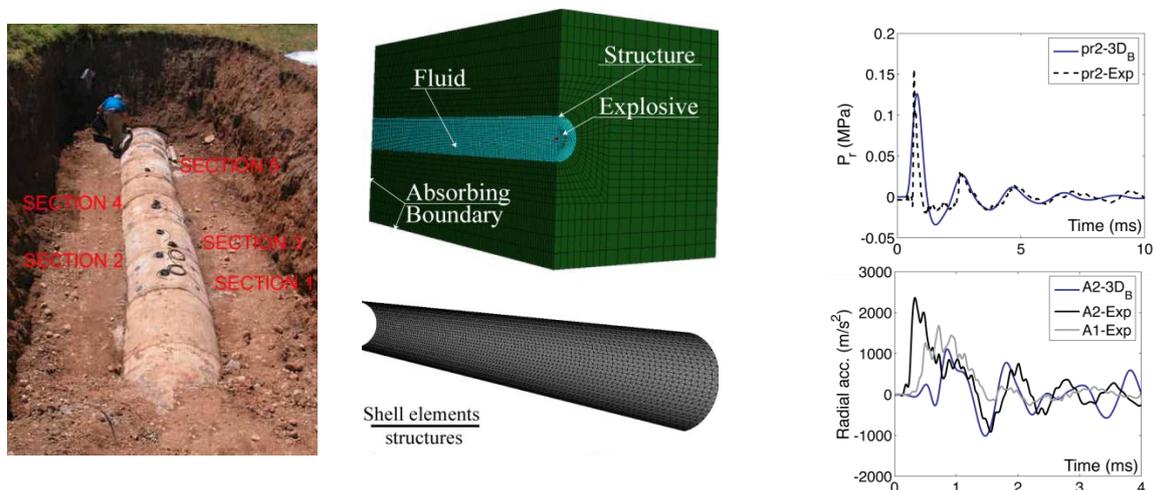


Fig. 5 Blast tests on the embedded concrete pipe: experimental set up and numerical model.

5 La progettazione e la costruzione del prototipo

Approfondendo dei molti risultati raccolti durante le diverse fasi del progetto di ricerca, si è passati alla realizzazione di un vero e proprio concio di tunnel prefabbricato, opportunamente progettato

secondo il nuovo Codice Modello 2010 ed effettivamente realizzato in collaborazione con i partner industriali italo-svizzeri. Questa attività finale ha permesso di verificare gli aspetti tecnologici relativi alla costruzione del prototipo di concio, consentendo una stima più realistica dei costi di produzione. E' stato inoltre possibile delineare con maggiore precisione i vantaggi di questo concio di tunnel prototipale quando confrontato con un rivestimento tradizionale, in termini di messa in opera, manutenzione e di resistenza alle azioni eccezionali.

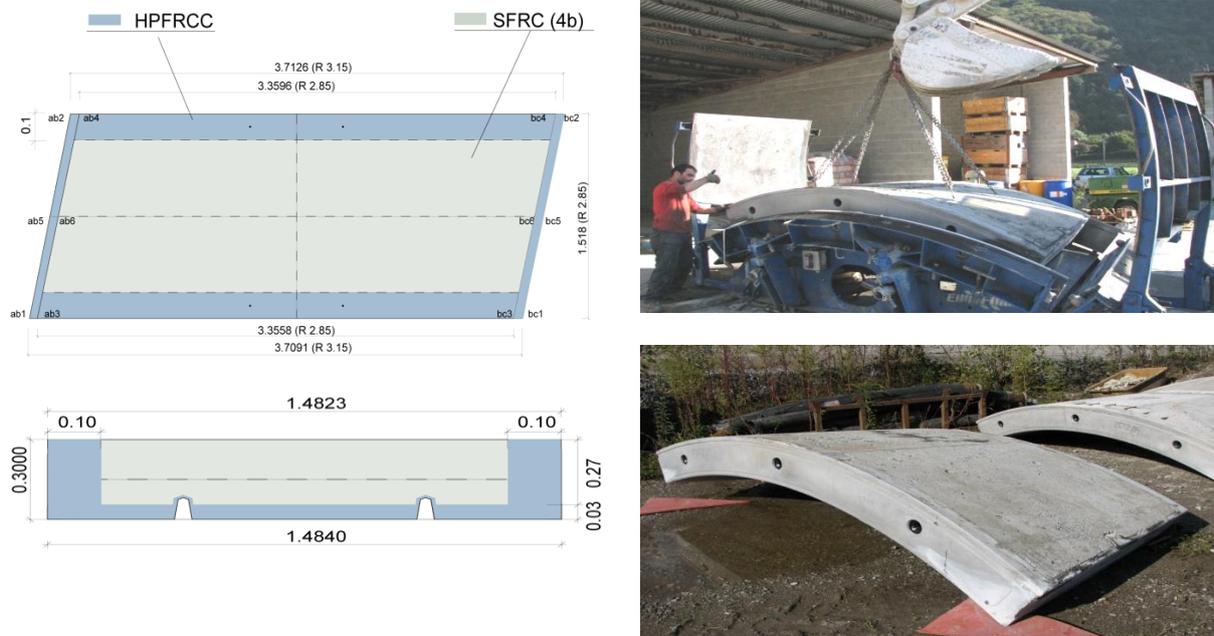


Fig. 6 – Geometria del prototipo e immagini del concio esposto al Made expo

6 Conclusioni

Nell'articolo vengono brevemente accennati alcuni risultati di una ricerca finanziata dalla comunità Europea che hanno portato alla progettazione di un nuovo prototipo di concio prefabbricato per rivestimenti strutturali di galleria. Il prototipo è concepito per migliorare la sicurezza nelle gallerie sottoposte a carichi eccezionali, come l'incendio e l'esplosione. L'idea chiave è quella di creare un concio pluristrato con materiali fibrorinforzati ad alte prestazioni all'intradosso e autocompattante a normale resistenza all'estradosso. All'interfaccia dei due materiali è interposta una rete di vetro alcali-resistente volta ad evitare qualsiasi formazione di microfessure dovute al ritiro differenziale dei compositi cementizi interagenti. La progettazione del prototipo è basata sul Codice Modello 2010 per l'approccio strutturale e sui risultati ottenuti da prove svolte su tre livelli di indagine, materiale, meso-struttura, e macro-struttura, per la caratterizzazione meccanica ed il calcolo degli effetti delle azioni eccezionali.

Ringraziamenti

La ricerca è stata finanziata dal Progetto Interregionale Europeo IT INTERREG / CH 2006_2013 progetto ACCIDENT ID 7629770, Misura 2.2. La ricerca è stata possibile grazie alla preziosa collaborazione delle Società italiane Mako Shark e Gavazzi Tessuti Tecnici, e svizzere GenioBeton e TGM Prefabbricati. Gli autori desiderano rivolgere un ringraziamento particolare all'ammiraglio Vassale per la preziosa collaborazione nell'ambito delle prove di esplosione in scala al vero e all'Ing. Federico Bonomelli per i preziosi suggerimenti forniti durante l'intero svolgimento della ricerca.

Bibliografia

- Bonalumi, P.; Colombo, M.; di Prisco M. (2011), Internal explosions in embedded concrete pipes. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 82, pp. 452-457.
- Bonalumi, P.; Colombo, M.; Comina, C.; di Prisco, M.; Foti, S.; Galli, A. (2011), Characterization of blast effects on surrounding soil: Internal detonations in underground pipes. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 82, pp. 302-307.
- Caverzan, A.; Cadoni, E.; di Prisco, M. (2012), Tensile behaviour of high performance fibre-reinforced cementitious composites at high strain rates. *International journal of impact engineering*, Vol. 45, pp. 28 -38.
- Caverzan, A.; Cadoni, E., di Prisco, M., On the influence of high temperature on the dynamic behaviour of high performance fibre reinforced cementitious composites, submitted to *Mechanics of Materials in 2012*
- Colombo, M.; di Prisco, M.; Felicetti, R. (2010), Mechanical properties of Steel Fibre Reinforced Concrete exposed at high temperatures. *Materials and Structures*, Vol. 43, No. 4, pp. 475-491.
- Colombo M.; di Prisco, M.; Martinelli, P. (2011), A New Shock Tube Facility for Tunnel Safety. *Experimental Mechanics*, Vol. 51, No. 7, pp. 1143–1154.
- Colombo M.; Martinelli, P.; di Prisco, M. (2012), Experimental investigation of layered concrete specimens interacting with soil under blast loads. Submitted to “*International journal of impact engineering*”
- Ferrara, L.; Ozyurt, N.; di Prisco, M. (2010), High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of “casting-flow induced” fibre orientation. *Materials and Structures*, Vol. 44, No. 1, pp. 109–128.