

Assegno di Ricerca in:

FIRMITAS: MULTI-HAZARD ASSESSMENT, CONTROL AND RETROFIT OF BRIDGES FOR ENHANCED ROBUSTNESS USING SMART INDUSTRIALIZED SOLUTIONS' (PRIN 2020 - SETTORE ERC PE8 - PROT. 2020P5572N - CUP F57G20000040001)

Nel corso dell'assegno di ricerca intitolato “Valutazione multirischio, controllo e adeguamento dei ponti per una maggiore robustezza tramite soluzioni industrializzate intelligenti,” sono state affrontate diverse tematiche e sono state svolte numerose attività presso il laboratorio PRiSMa dell’Università degli Studi di Roma Tre. L’obiettivo della ricerca era individuare nuove tecniche di retrofit per le pile da ponte presenti nel laboratorio, utilizzando il cemento armato fibrorinforzato (FRC), un materiale in grado di migliorare le prestazioni strutturali e ridurre il degrado causato dalla corrosione.

Per affrontare questa ricerca, il lavoro è stato suddiviso in diverse fasi:

STATO DELL’ARTE

- **Studio del cemento armato fibrorinforzato (FRC):** Nel periodo iniziale della ricerca è stato approfondito il comportamento dell’FRC a trazione e compressione attraverso uno studio della documentazione bibliografica presente in letteratura. In particolare, l’attenzione si è soffermata inizialmente sullo studio: delle *linee per la progettazione, messa in opera, controllo e collaudo di elementi strutturali in calcestruzzo fibrorinforzato con fibre di acciaio o polimeriche*, del CNR (*Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures*), e del *fib Model Code for concrete structures 2010*).
- **Studio della corrosione:** Successivamente è stato approfondito il fenomeno della corrosione nelle barre di armatura inserite all’interno del cemento armato ordinario e in FRC. Grazie allo studio della letteratura scientifica esistente, è stato possibile approfondire il fenomeno elettrochimico ponendo particolare attenzione ai metodi per riprodurlo in laboratorio mediante l’uso di generatori di corrente.
- **Studio del comportamento strutturale della pila:** È stato necessario approfondire il comportamento meccanico delle tre pile presenti nel laboratorio PRiSMa, analizzandone la capacità massima a flessione e a taglio secondo le formule normative. Sono stati inoltre studiati l’evoluzione dell’apertura delle fessure nelle pile all’aumentare di una forza orizzontale e la

duttilità. La ricerca si è focalizzata sulla comprensione del comportamento strutturale delle pile nello stato attuale e sull'efficacia di un intervento di rinforzo strutturale, realizzato mediante l'applicazione di un anello in FRC alla base della colonna centrale.

- **Studio della precompressione nelle travi in c.a. e in FRC:** È stata analizzata in dettaglio l'applicazione della precompressione sia in una trave in cemento armato che in una trave in FRC, concentrandosi sugli aspetti teorici e pratici del processo. L'approfondimento ha riguardato le tecniche di inserimento dei cavi di precompressione, il loro ancoraggio e il controllo delle tensioni indotte all'interno dei materiali. Sono stati inoltre valutati i vantaggi della precompressione, come la riduzione delle fessurazioni e l'aumento della capacità portante, confrontando le prestazioni delle due tipologie di travi.
- **Studio della fibra ottica (FBG) per il monitoraggio:** È stato approfondito il sistema di monitoraggio basato sull'utilizzo di fibre ottiche integrate all'interno delle travi in cemento armato e in FRC. Questo studio ha riguardato l'installazione delle fibre ottiche, la loro calibrazione e la raccolta dei dati relativi alla deformazione e alle sollecitazioni durante la precompressione della trave. In particolare, è stata valutata l'efficacia di questo sistema nel fornire misurazioni precise e in tempo reale, consentendo di rilevare variazioni nello stato di sollecitazione e possibili danni strutturali.
- **Studio della tecnica per la Digital Image Correlation (DIC):** È stata approfondita la tecnica DIC (*Digital Image Correlation*) per analizzare e studiare la propagazione delle fessure in elementi in calcestruzzo armato. Questo metodo avanzato si basa sull'osservazione e sull'elaborazione delle deformazioni superficiali attraverso immagini digitali ad alta risoluzione. In particolare, l'attenzione si è focalizzata sull'utilizzo del software Ncorr, uno strumento particolarmente efficace per interpretare gli spostamenti di punti marcati precedentemente sulla superficie degli elementi in prova.

CALCOLO E MODELLAZIONE STRUTTURALE

- **Calcolo del comportamento dei materiali:** È stato necessario sviluppare un legame costitutivo utilizzando i software Excel e Python, con l'obiettivo di rappresentare accuratamente il comportamento dell'FRC al variare dei parametri $fr1k$ e $fr3k$. Questo approccio ha permesso di simulare le proprietà meccaniche del materiale in diverse condizioni e di valutare la sua risposta strutturale sotto carico attraverso una modellazione numerica con differenti parametri, identificando il materiale più idoneo da utilizzare per le prove sperimentali in laboratorio. Grazie

a questo studio, è stato possibile definire in modo preciso le caratteristiche dei materiali necessari per il getto del calcestruzzo ordinario e dell'FRC.

- **Calcolo dell'apertura delle fessure nell'FRC e nel calcestruzzo ordinario:** Per comprendere il comportamento delle fessure durante le prove di laboratorio, è stato necessario approfondire i modelli di calcolo descritti in letteratura, sviluppati per analizzare la formazione e l'evoluzione delle fessure nel calcestruzzo ordinario e nell'FRC. L'obiettivo è stato quello di definire modelli di calcolo in grado di simulare numericamente l'andamento delle fessure nelle pile. Questo approccio ha consentito di ottenere una comprensione più precisa dell'evoluzione delle fessure nelle pile all'aumentare della forza orizzontale applicata.
- **Calcolo della corrosione:** È stato realizzato un modello di calcolo per realizzare la corrosione delle barre di armature delle pile. Il modello ha quindi permesso di stimare i materiali e le attrezzature necessarie per realizzare le prove di corrosione in laboratorio.
- **Modellazione con nuvola di punti delle pile:** È stata realizzata attraverso la tecnica di "Fotogrammetria" una nuvola di punti della pila 7, al fine di ottenere le informazioni geometriche in un modello tridimensionale.
- **Modellazione in HBIM delle pile:** È stato realizzato un modello HBIM della pila capace di descrivere la geometria attuale attraverso il software Revit 2024.
- **Modellazione in HBIM delle travi precomprese:** È stato realizzato un modello HBIM di due travi precomprese all'interno del software Revit 2024.
- **Modellazione FEM delle pile.** È stato realizzato un modello tridimensionale della pila con elementi tetraedrici solidi all'interno del software Midas Fea Nx. Il modello FEM è stato realizzato inserendo tutte le armature della pila nella loro posizione attuale. Questo ci ha permesso di capire l'evoluzione dello stato tensionale nella pila all'aumentare della forza orizzontale.
- **Modellazione FEM delle travi.** È stato realizzato un modello tridimensionale di due travi precomprese con elementi tetraedrici solidi all'interno del software Midas Fea Nx. Il modello FEM è stato realizzato inserendo tutte le armature delle travi nella loro posizione attuale. Questo ci ha permesso di capire l'evoluzione dello stato tensionale nelle travi all'aumentare della forza in mezzzeria.
- **Modellazione della pila in Python:** Per comprendere il comportamento strutturale all'aumentare della forza orizzontale è stato necessario modellare la pila all'interno del software Python. Questo modello ci ha permesso di individuare la massima capacità dell'elemento strutturale, la resistenza

a taglio e a flessione, e l'evoluzione dell'apertura w_k delle fessure. Attraverso queste informazioni è stato quindi possibile dimensionare gli elementi e le tipologie di materiale da acquistare necessarie per realizzare la prova di laboratorio.

- **Modellazione del sistema di connessione tra le barre in acciaio:** Per realizzare la sostituzione della barra corrosa, è stato necessario progettare un sistema di connessione adeguato tra la vecchia barra e una nuova barra in acciaio all'interno dell'intervento di retrofit. Il modello è stato sviluppato in Python, simulando diverse tipologie di connessioni. Grazie alla modellazione numerica, è stato possibile dimensionare la connessione più adatta per l'intervento previsto, garantendo così la migliore performance strutturale.
- **Modellazione del sistema di precompressione delle travi:** Sono stati realizzati differenti modelli agli elementi finiti per realizzare il sistema di precompressione delle travi al fine di valutare come applicare in sicurezza la forza nel cavo precompresso.

ATTIVITA' DI LABORATORIO

- **Setup di prova per la corrosione:** È stato opportunamente dimensionato il sistema di prova per realizzare la corrosione delle barre di armatura della pila. In particolare, sono stati definiti le tipologie di generatori di corrente da acquistare, il sistema di contenimento dell'acqua realizzato su misura intorno alla pila, il quantitativo di sale da acquistare per innescare il processo elettrochimico, e le differenti tipologie di connettori per applicare la corrente.
- **Setup di prova per le pile:** Sono stati identificati nel laboratorio PRiSMa gli elementi in acciaio utilizzati in precedenti test di laboratorio, valutandone l'idoneità per le nuove prove sperimentali. Parallelamente, sono stati progettati e dimensionati nuovi elementi in acciaio per completare il setup di prova necessario a testare le pile in calcestruzzo armato, rinforzate con un anello in FRC alla base. È stato realizzato uno scasso intorno alla pila, finalizzato alla preparazione del nuovo sistema di connessione precedentemente progettato.
- **Progetto e dimensionamento dei campioni di prova:** Sono stati opportunamente dimensionati il quantitativo minimo di provini per caratterizzare i materiali e le prove di corrosione. In particolare, sono stati dimensionati dei provini per caratterizzare i parametri fr_{1k} e fr_{3k} dell'FRC, differenti cubi per caratterizzare il materiale e dei prismi con delle barre di armatura per indagare i parametri

di corrosione. Successivamente sono state realizzate le casseforme per i provini in c.a. ed è stato preparato il mix design con l'aiuto della Buzzi Unicem s.r.l per realizzare il getto in calcestruzzo.

- **Prove NDT sulle pile:** Sono state realizzate differenti prove NDT per caratterizzare le pile presenti in laboratorio, in particolare sono state realizzate:

Delle prove pacometriche attraverso il Ferroskan della Hilti necessario per effettuare la valutazione dei ferri di armatura. In particolare, sono state applicate le tecniche di rilievo dei ferri attraverso la modalità *QuickScan e ImageScan*.

Delle prove tomografiche ultrasoniche (per il calcestruzzo) con la centralina CMS HLF-P serie SG02_0128 associata ad una trasmittente e ad una ricevente, al fine di individuare le caratteristiche interne del calcestruzzo ordinario.

- **Setup di prova per le travi:** Sono state realizzate le casseformi e le gabbie di armatura necessarie per la costruzione delle travi, insieme a due appoggi cubici in FRC progettati per garantire la corretta distribuzione dei carichi durante le prove. Inoltre, è stato progettato e inserito un sistema di monitoraggio basato su fibra ottica (FBG), applicato sia alle travi in calcestruzzo armato tradizionale sia a quelle in FRC. Il posizionamento e l'inserimento della fibra ottica all'interno delle gabbie di armatura ha richiesto particolare attenzione e precisione, per garantire una corretta rilevazione dei dati durante le prove. Questo processo è stato realizzato con il supporto tecnico e operativo dell'ENEA, che ha contribuito a ottimizzare l'inserimento delle fibre nel sistema strutturale. Questo approccio ha permesso di monitorare in modo dettagliato il comportamento delle travi durante le fasi di carico, fornendo informazioni sulle deformazioni e sull'evoluzione delle fessure nei diversi materiali testati.

Firma dell'assegnista:

Firma del tutor:

.....

.....