

ROBUSTEZZA DI SISTEMI INTELAIATI MISTI ACCIAIO-CALCESTRUZZO: IL CASO DI COLLASSO DI UNA COLONNA

Nadia Baldassino¹, Fabio Freddi¹, Riccardo Zandonini¹

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica, Università degli Studi di Trento

SOMMARIO

Negli ultimi anni, la ricerca di soluzioni costruttive finalizzate alla mitigazione dei danni causati da eventi eccezionali ha suscitato un grande interesse da parte della comunità scientifica internazionale. Tali azioni possono essere fronteggiate sia attraverso criteri di sovrarresistenza che di ridondanza strutturale e la combinazione di questi criteri può portare alla definizione di metodi di progetto efficaci ed economicamente efficienti. Uno dei principali obiettivi delle strategie di intervento è quello di realizzare sistemi strutturali in grado di attivare meccanismi di redistribuzione dei carichi in modo che questi possano essere trasferiti, dalla parte danneggiata alla parte non danneggiata della struttura. Il lavoro svolto fa parte di un Progetto di Ricerca Europeo che ha l'obiettivo di definire nuovi criteri di progetto per strutture miste acciaio-calcestruzzo nei confronti di azioni eccezionali. La prima parte della ricerca si concentra sul comportamento di due telai 3-D nei confronti del collasso di una colonna interna. Due prove a scala reale saranno eseguite su una parte di queste strutture. Simulando il collasso completo di una colonna sarà possibile studiare la ridondanza del sistema tridimensionale fornito dalla soletta attraverso l'attivazione delle forze membranali. Il presente articolo illustra lo studio preliminare condotto in fase di progetto delle prove.

ROBUSTNESS OF FRAMED STEEL-CONCRETE COMPOSITE SYSTEMS: THE CASE OF A COLUMN COLLAPSE

SUMMARY

The last years were characterized by a growing interest about the development of strategies for the mitigation of the damages caused by accidental events. Accidental actions can be resisted by residual strength and alternate load path methods and combination of these strategies can lead to an effective and cost efficient design procedure for progressive collapse mitigation by redistributing the loads within the structure. One of the main objective of these strategies is the development of structural systems able to activate mechanisms to transfer the loads from the damaged to the undamaged part of the structure. This paper illustrates the preliminary work carried on within a European Research Project, aimed at developing new design concepts for steel-concrete composite frames against accidental actions. The first part of the study investigates the behavior of two geometrically different steel-concrete 3-D composite frames subjected to the loss of an internal column. Two full-scale experimental tests will be performed on a part of these structure. By simulating the total loss of the impacted column, the experiments enable investigation of the redundancy of the 3-D slab system in terms of activation of membrane effects. The present paper presents the preliminary study for the design of the tests.

1. INTRODUZIONE

Il concetto di *affidabilità strutturale* è spesso sinonimo di *sicurezza* e ricopre un ruolo di primo piano nell'ottica progettuale odierna. In particolare, il conseguimento di un predefinito livello di affidabilità nei confronti di eventi rari è stato ed è tuttora uno degli argomenti di principale interesse all'interno della comunità scientifica. La sua importanza è legata al fatto che, nonostante tali azioni siano molto rare, le loro conseguenze sono spesso disastrose ed è necessario perseguire il giusto compromesso tra sicurezza ed economicità. Grandi progressi sono stati fatti negli ultimi anni nella valutazione della sicurezza nei confronti di alcune azioni

rare quali ad esempio il sisma, mentre lo studio dell'affidabilità strutturale a seguito di eventi eccezionali (impatti, esplosioni, conseguenze di errori umani) necessita ancora di importanti sviluppi.

Seguendo i principi di sicurezza ed economicità delle strutture, è ormai consolidato il concetto che, a seguito di eventi rari, i principali obiettivi del progettista sono quelli di salvaguardare la vita degli occupanti e di evitare danni sproporzionati rispetto all'entità delle cause. Nell'ambito dell'ingegneria sismica questi concetti sono largamente diffusi e recepiti dalle normative attraverso la definizione di differenti stati limite in relazione alla frequenza di accadimento

dell'evento. Nonostante la somiglianza delle problematiche, per quanto riguarda gli eventi eccezionali, la codificazione delle procedure non ha raggiunto gli stessi livelli di avanzamento e una delle cause è sicuramente la difficoltà nell'identificazione di tali eventi e nella descrizione della loro probabilità di accadimento.

Dal punto di vista normativo, il tema delle azioni eccezionali è trattato negli Eurocodici EN 1990 *Eurocode – Basis of Structural Design* [1] e EN 1991-1-7 *Eurocode 1 – Part 1-7 Accidental Actions* [2]. In particolare, l'Eurocodice EN 1990 [1] stabilisce i principi necessari al perseguimento di un'adeguata *robustezza strutturale* definita come "la capacità della struttura di evitare danni sproporzionati rispetto alle cause innescanti quali fuoco, esplosioni, impatti o conseguenze di errori umani" (EN 1991-1-7 1.5.14 [2]). L'Eurocodice EN 1991-1-7 [2] propone diverse strategie per il conseguimento della robustezza introducendo i concetti di *eventi eccezionali identificati* e *non identificati* e di *classe di conseguenza*. Nel caso di *eventi eccezionali identificati* (e.g. impatti, esplosioni, ecc.) le strategie di progetto includono: la realizzazione di elementi strutturali tali da sopportare le azioni eccezionali, progettati sulla base di forze statiche equivalenti e la prevenzione o riduzione dell'azione. Tali misure hanno l'obiettivo di prevenire il danno. Nel caso di *eventi eccezionali non identificati* (e.g. conseguenze di errori umani, attacchi terroristici, ecc.) le strategie di intervento dipendono dalla classe di conseguenza. In questi casi, l'impossibilità di prevedere le eventuali situazioni di innesco del fenomeno hanno portato a sviluppare strategie di progetto capaci di mitigare, piuttosto che di prevenire il danno. In particolare, l'elevata ridondanza strutturale (e.g. l'introduzione di percorsi di carico alternativi), il progetto di elementi chiave e l'adozione di regole prescrittive atte al mantenimento di un'adeguata integrità e duttilità strutturale sono alcune delle strategie proposte dall'Eurocodice [2]. L'obiettivo diventa quindi quello di realizzare un sistema strutturale dotato di difese intrinseche, tali da garantire il mantenimento di un livello di integrità adeguato a seguito di un qualunque possibile evento critico [3]. La *robustezza* è quindi una proprietà 'intrinseca' di una struttura nel senso che non dipende dalle possibili cause scatenanti. Infatti, nel momento in cui si consideri la dipendenza dalle azioni, risulta più appropriato parlare di resistenza al collasso.

L'Eurocodice propone una classificazione delle strutture sulla base di *classi di conseguenza* (CC). L'obiettivo è quello di differenziare l'affidabilità richiesta in base alle conseguenze derivanti dal fallimento del raggiungimento del requisito richiesto. La classe di conseguenza 3 (CC3) prevede elevate conseguenze in termini di perdite di vite umane e danni economici. In questi casi sono necessari criteri più stringenti al fine del raggiungimento del requisito di robustezza. Diversamente, la classe di conseguenza 1 (CC1) si riferisce ad esempio ad edifici agricoli dove l'uomo normalmente non entra ed un eventuale crisi strutturale non comporterebbe gravi danni sia dal punto di vista umano che economico.

Il crescente interesse per lo studio degli effetti delle azioni eccezionali ha portato negli ultimi decenni ad una consistente mole di ricerca. Gli studi si sono peraltro focalizzati sulla valutazione del comportamento di strutture in cemento armato. Solo pochi sono stati condotti su strutture in acciaio o su strutture miste acciaio-calcestruzzo investigando quasi esclusivamente la risposta di un singolo elemento all'impatto,

mentre le conseguenze sulla struttura non sono mai state sufficientemente approfondite. Le conoscenze in questo campo sono pertanto ancora piuttosto limitate.

Tali strutture rappresentano una importante tipologia con applicazioni sia nel campo degli edifici multi-piano a uso residenziale e commerciale, sia di edifici industriali. La ricerca in questo campo ha quindi un'elevata rilevanza pratica.

Alcuni contributi sono stati dati di recente allo sviluppo di strategie di progetto atte all'ottenimento di un'adeguata robustezza per questo tipo di strutture [4] e [5]. Permane tuttavia la necessità di ulteriori approfondimenti in particolare sul comportamento 3-D.

In molte tipologie di edifici le colonne risultano essere elementi vulnerabili nei confronti delle azioni eccezionali e quindi, l'identificazione degli effetti del collasso di una colonna ha una rilevanza fondamentale nella valutazione della robustezza. Tale interesse deriva sia dal ruolo fondamentale ricoperto dall'elemento strutturale sia dalla probabilità di accadimento di tale evento, che sebbene sia difficilmente quantificabile, ha sicuramente una rilevanza non trascurabile, in particolare nei casi di edifici situati in prossimità di strade molto trafficate o di edifici con zone carrabili al piano terra, dove la collisione di un veicolo è un evento con probabilità di accadimento non trascurabile.

Le strutture miste acciaio-calcestruzzo sono caratterizzate da un elevato rapporto resistenza/peso, un'elevata duttilità tale da garantire lo sfruttamento delle risorse residue del sistema e da un'elevata rigidità dei solai nel comportamento a piastra tale da consentire un'ottima ripartizione dei carichi nel caso di collasso di una colonna sfruttando il principio di ridondanza strutturale.

Il principio delle resistenze residue persegue l'obiettivo della stabilità globale attraverso un'elevata dissipazione di energia e mediante lo sfruttamento delle resistenze plastiche. Diversamente il principio della ridondanza strutturale si basa sull'idea di creare dei sistemi atti ad assorbire le azioni e quindi garantire un diverso percorso dei carichi qualora uno degli elementi strutturali dovesse collassare. Tale redistribuzione delle forze interne consente di limitare la crisi ad una parte della struttura senza compromettere la stabilità globale dell'edificio come mostrato in Figura 1. Nonostante questi siano due concetti differenti, la loro interazione è indispensabile al fine di ottenere un'adeguata robustezza strutturale.

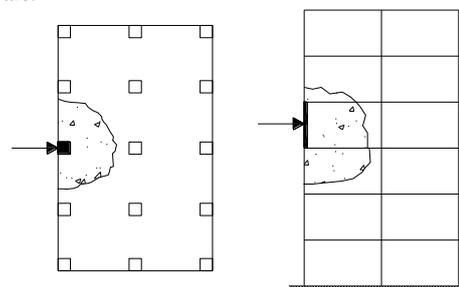


Figura 1 –Danneggiamento locale di un edificio (da EN 1991-1-7 [2])

Il collasso di una colonna genera un significativo cambiamento dello schema statico della parte di struttura interessata con conseguente incremento delle deformazioni, delle sollecitazioni e il trasferimento dei carichi negli elementi strutturali adiacenti. Tuttavia, il trasferimento delle azioni è un

meccanismo che si attiva a seguito di grandi spostamenti, è quindi necessario non solo un attento studio dei percorsi di carico alternativi e delle resistenze residue degli elementi interessati ma anche delle loro capacità deformative. La continuità degli elementi orizzontali è di fondamentale importanza e una delle problematiche principali riguarda l'evoluzione delle sollecitazioni nei collegamenti. Il corretto funzionamento di questi è indispensabile al fine di consentire il trasferimento dei carichi ed è quindi necessaria una progettazione mirata a ottenere consistenti resistenze residue e consentire grandi deformazioni tali da mobilitare le ulteriori riserve di resistenza della struttura, associate allo sviluppo di un comportamento 'a catenaria' del sistema di solaio.

Questo articolo illustra il lavoro preliminare svolto all'interno di un Progetto di Ricerca Europeo con l'obiettivo di sviluppare nuovi criteri di progetto per le strutture miste acciaio-calcestruzzo nei confronti di azioni eccezionali. Il principale obiettivo perseguito in questa prima parte di studio è quello di investigare i meccanismi 3-D di trasferimento delle azioni nel caso di collasso di una colonna attraverso prove sperimentali. In particolare, saranno eseguite due prove sperimentali a scala reale su di una sottostruttura ed il presente articolo illustra lo studio preliminare per la progettazione della prova. Simulando il collasso di una colonna, la sperimentazione consente lo studio della ridondanza strutturale attraverso l'attivazione di diversi meccanismi resistenti compreso l'effetto membranale della soletta.

2. PROGETTO DEI CASI STUDIO

Come casi studio sono stati scelti due edifici con travi composte in acciaio-calcestruzzo, soletta di c.a. e colonne di acciaio. Le dimensioni complessive degli edifici sono di 34,2

m (6 campate) in direzione X, 11,4 m (2 campate) in direzione Y e 18 m di altezza complessiva (5 piani). Sebbene le dimensioni siano uguali, due differenti geometrie in pianta sono state considerate in questo studio. Una configurazione è simmetrica rispetto ad entrambe le direzioni mentre l'altra è simmetrica solo rispetto alla direzione Y. Figura 2 e 3 riportano la rappresentazione in pianta dei due telai. Entrambe le strutture hanno un'altezza di interpiano di 3,60 m ed una campata di 5,70 m in direzione X. In direzione Y la struttura simmetrica ha campate di 5,70 m mentre la struttura asimmetrica ha campate rispettivamente di 7,125 m e 4,275 m. I materiali utilizzati sono calcestruzzo C30/37, barre di armatura B450C, acciaio strutturale S355 e bulloni di classe 10.9. Entrambe le strutture adottano le stesse sezioni per le travi (IPE 240), per le colonne (HEB 220), per i diagonal, lo stesso spessore della soletta (150 mm) e lo stesso collegamento trave-colonna con piastra bullonata. Tale scelta di uniformità ha come obiettivo quello di ridurre le variabili tra le due configurazioni in modo da semplificare il confronto dei risultati. Le dimensioni e la disposizione delle barre sono ovviamente differenti.

I casi studio sono stati progettati seguendo le indicazioni degli Eurocodici [1], [2], [6], [7], [8]. Le prescrizioni sismiche non sono state considerate con l'obiettivo di disaccoppiare il problema della sismica da quello della robustezza. La scelta della posizione dei controventi in direzione Y, asimmetrica in entrambi i telai, non permetterebbe di conseguire un buon comportamento sismico della struttura, tuttavia, questa scelta consente di individuare una sottostruttura da testare sperimentalmente priva di controventi metallici. In questo modo è possibile investigare una sottostruttura rappresentativa di un caso più generale.

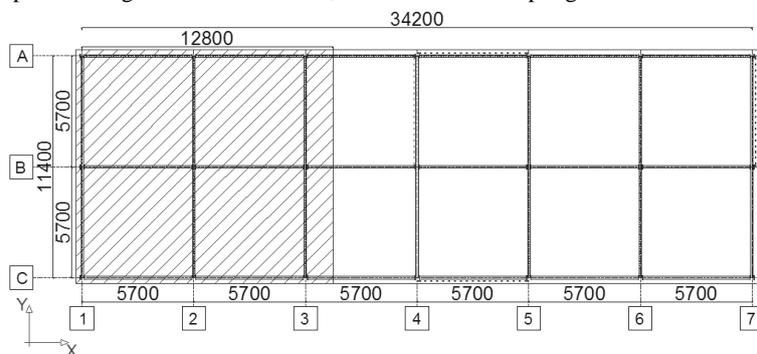


Figura 2 - Rappresentazione in pianta - Configurazione simmetrica (dimensioni in mm)

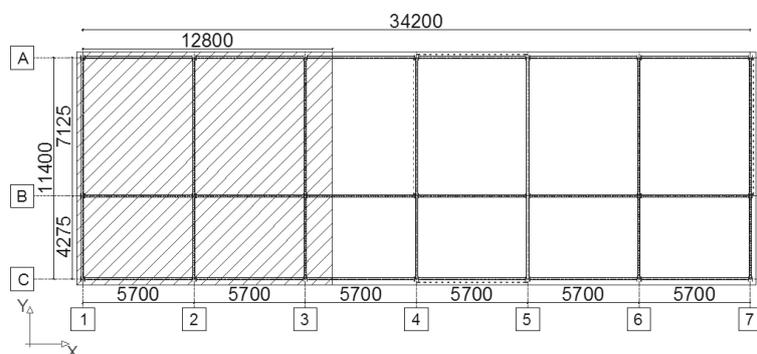


Figura 3 - Rappresentazione in pianta - Configurazione asimmetrica (dimensioni in mm)

Il modello agli elementi finiti del telaio 3-D utilizzato per il progetto è stato sviluppato attraverso il programma SAP 2000 [9]. I telai sono incastrati alla base in entrambe le direzioni. Elementi di tipo *'Frame'* sono stati utilizzati per modellare travi, colonne e diagonali. Elementi di tipo *'Shell'* sono stati impiegati per modellare la soletta in c.a. Il contributo dell'azione composta è stato considerato nell'analisi connettendo rigidamente le travi metalliche e la soletta in modo da simulare la completa interazione fornita dai connettori a taglio. Le imperfezioni geometriche globali (non verticalità) sono state introdotte direttamente nel modello mentre quelle locali sono state considerate nelle verifiche. L'effetto della viscosità del calcestruzzo è stato introdotto nel modello considerando un modulo di elasticità appropriato in funzione della condizione di progetto considerata. I nodi sono stati modellati introducendo un'appropriata rigidità rotazionale calcolata utilizzando il metodo delle componenti riportato negli Eurocodici [7].

3. PROGETTO DELLE PROVE SPERIMENTALI

Le prove sperimentali verranno eseguite su di una porzione del primo piano del corrispondente telaio. La porzione di telaio da riprodurre in laboratorio per la

sperimentazione è rappresentata dall'area tratteggiata in Figura 2 e 3 rispettivamente per il telaio simmetrico e asimmetrico.

Al fine di realizzare una sottostruttura rappresentativa del comportamento del caso studio, il progetto della prova sperimentale è stato effettuato attraverso un attento studio del comportamento del telaio completo e del sottotelaio. Modelli agli elementi finiti sviluppati attraverso il programma di calcolo Abaqus [10] hanno consentito una valutazione accurata della risposta. Travi e colonne sono state modellate come elementi *'Frame'* mentre la soletta è stata modellata come elemento *'Shell'*. Le barre della soletta sono state modellate in perfetta aderenza e la soletta è rigidamente connessa con le travi simulando la completa interazione della sezione composta. In questo studio preliminare, la connessione trave-colonna è stata assunta come rigida.

La prova verrà eseguita in tre fasi. Nella prima, il carico gravitazionale di progetto viene applicato sulla soletta andando a simulare la situazione iniziale prima del collasso della colonna; nella seconda la colonna centrale viene *'rimossa'*, mentre nella terza un carico addizionale viene applicato sulla soletta fino alla condizione di collasso con l'obiettivo di ottenere una stima del margine di sicurezza disponibile. La Figura 4 riporta la sequenza di prova del telaio simmetrico e della relativa sottostruttura.

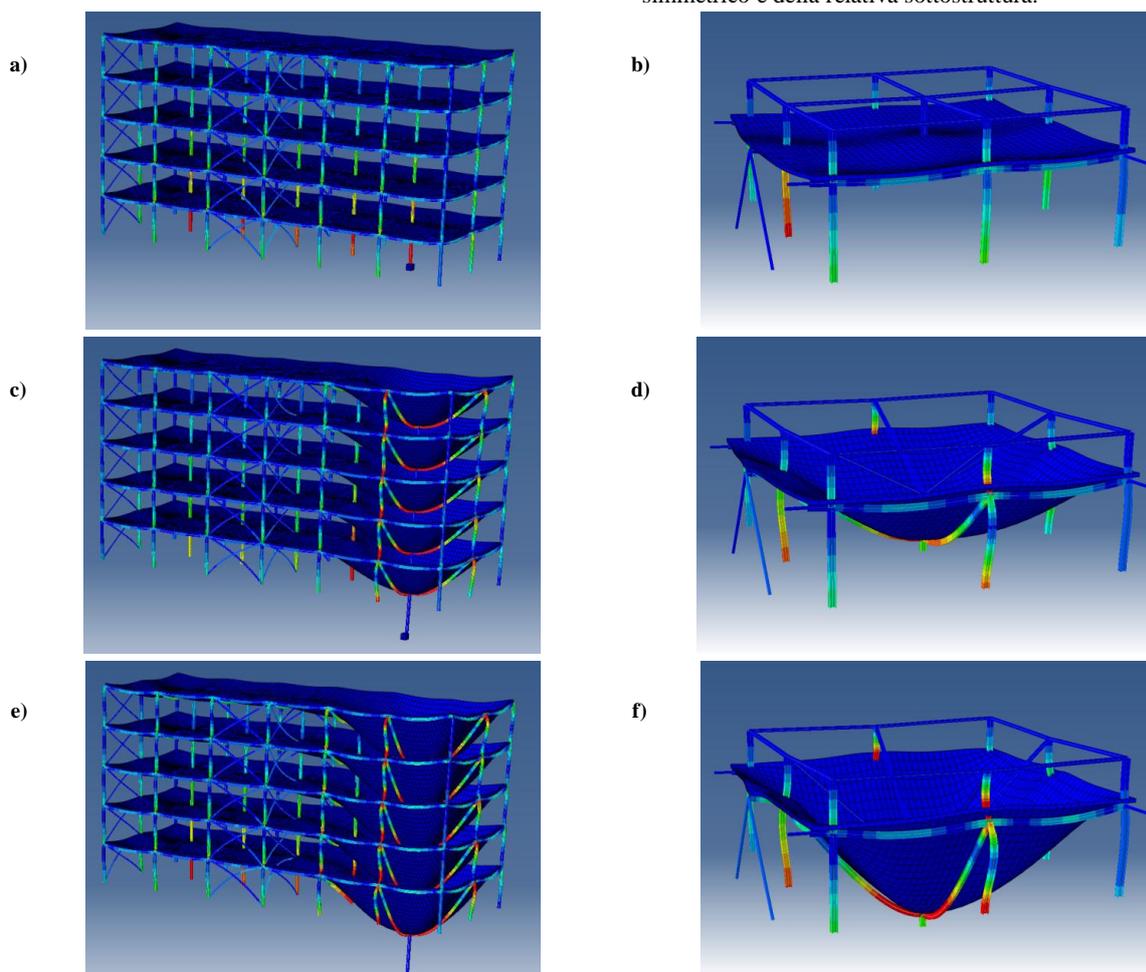


Figura 4 - Configurazione simmetrica - Risposta del telaio e del sottotelaio a conclusione delle seguenti fasi: a) e b) Applicazione del carico gravitazionale; c) e d) Rimozione della colonna; e) e f) Incremento di carico

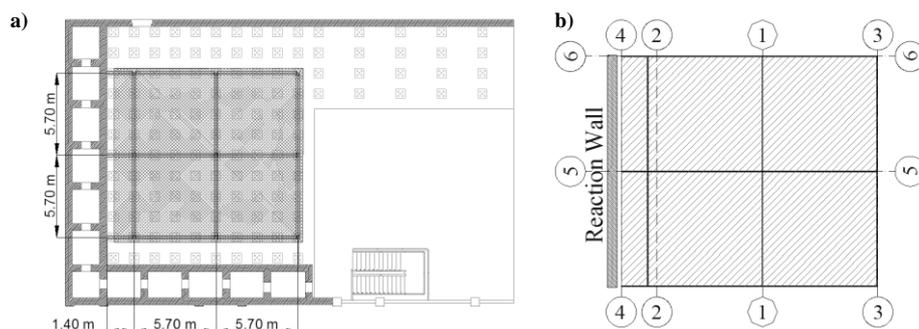


Figura 5 - a) Posizione del campione nel laboratorio; b) Sezioni 'significative'

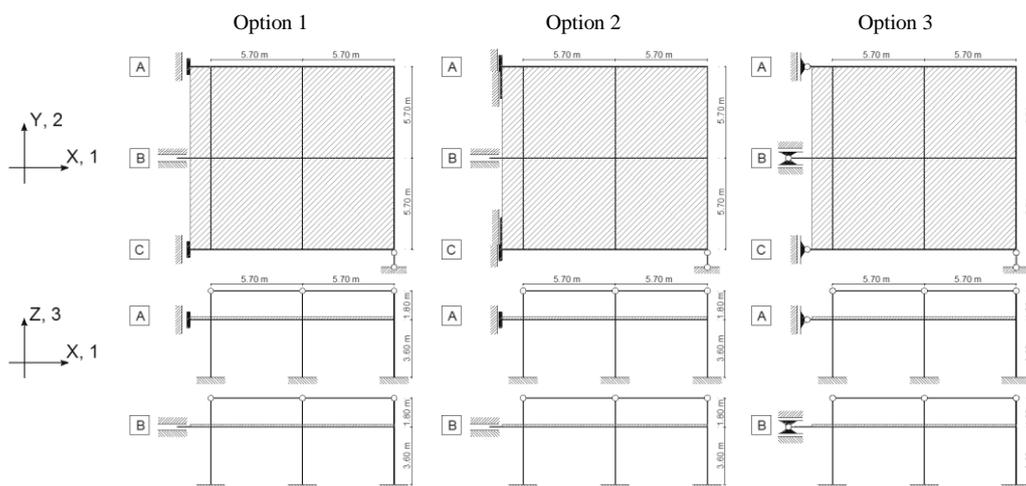


Figura 6 - Opzioni di vincolo del campione

Durante il progetto della prova, si sono affrontati alcuni problemi, due dei quali riguardano 'l'equivalenza' in termini di risposta tra il campione e il telaio di riferimento: 1) come vincolare la sottostruttura alle pareti di contrasto al fine di simulare la continuità presente nel telaio completo, 2) quali modalità di incremento di carico utilizzare per l'esecuzione della terza fase. Il confronto dei risultati delle analisi numeriche del telaio completo e della sottostruttura ha consentito di individuare le soluzioni più appropriate. Tali questioni sono trattate in modo dettagliato nei seguenti paragrafi. Per limitare le dimensioni dell'articolo vengono riportati esclusivamente i risultati relativi alla configurazione simmetrica. Risultati analoghi sono stati ottenuti per la configurazione asimmetrica.

3.1 Definizione delle condizioni di vincolo del sottotelaio

La sottostruttura deve essere vincolata in modo tale da simulare correttamente il comportamento del telaio completo. Questo è stato uno dei principali aspetti investigati in questa fase di studio preliminare. La sottostruttura viene 'estratta' dal primo piano del telaio e le colonne risultano quindi incastrate alla base. Le colonne sono più lunghe dell'altezza del piano e si estendono fino a metà dell'altezza del piano superiore dove sono connesse tra loro attraverso profili metallici. Tale configurazione consente di simulare correttamente la distribuzione dei momenti nelle colonne e la rigidità rotazionale dei nodi trave-colonna. L'adeguatezza di questa scelta è stata confermata dal confronto dei risultati delle

analisi numeriche tra telaio completo e sottostruttura.

Mentre la definizione del vincolo sulle colonne è stata quasi immediata, lo studio della connessione delle travi con la parete di contrasto ha richiesto maggiore attenzione. La Figura 5a riporta la posizione del campione nel laboratorio e la relativa posizione rispetto alle pareti di contrasto. Sono state considerate tre differenti opzioni per le condizioni di vincolo (Fig. 6) e i principali risultati in termini di deformazioni e sollecitazioni sono stati confrontati con quelli ottenuti dal telaio completo. L'adeguatezza delle condizioni al contorno è stata controllata confrontando i risultati in alcune sezioni 'significative' riportate in Figura 5b. Per brevità, in questo articolo sono riportati esclusivamente i risultati relativi alla sezione 1.

Nelle opzioni 1 e 3, le sole travi metalliche vengono vincolate mentre la soletta non è connessa alla parete di contrasto. I controventi metallici del telaio impediscono ogni spostamento longitudinale dei telai laterali, quindi, lo spostamento longitudinale (U1) delle travi laterali è impedito (A e C in Fig. 6). Questo spostamento è libero nella trave centrale (B in Fig. 6) dove vengono invece vincolati lo spostamento trasversale e verticale (U2 e U3). Nell'opzione 1 sono vincolate anche le rotazioni R2 e R3 mentre nell'opzione 3 tutte le rotazioni sono libere. Nell'opzione 2, in aggiunta ai vincoli dell'opzione 1, anche la parte di soletta adiacente alle travi laterali viene vincolata alla traslazione longitudinale per una larghezza di 0,5 m su entrambi i lati.

Le elevate forze assiali nelle colonne del telaio generano

elevate deformazioni. Tali deformazioni non sono di interesse in questa sede in quanto l'attenzione è rivolta al comportamento del sistema di piano e la scelta della condizione di vincolo ha l'obiettivo di simulare correttamente il comportamento di quest'ultimo. Quindi, per consentire il confronto dei risultati, le forze assiali presenti nelle colonne del modello globale sono state riprodotte nel modello della sottostruttura.

La Figura 7 mostra il confronto tra gli spostamenti verticali e momenti flettenti della soletta (Sez. 1) della sottostruttura con una delle tre opzioni di vincolo ed il telaio completo per i tre step della sequenza di prova. Nella terza fase il carico sulla soletta viene incrementato con un coefficiente di 1,3. Le linee tratteggiate indicano la risposta del sottotelaio mentre quelle continue si riferiscono alla struttura completa. Dalla Figura 7 è possibile osservare che non c'è una significativa differenza tra i risultati ottenuti attraverso le tre opzioni di vincolo e che in tutti i casi il comportamento del telaio completo viene simulato in modo più che soddisfacente in termini di spostamenti e momento flettente. Risultati analoghi sono stati ottenuti anche per le altre sezioni riportate in Figura 5b e confrontando altre quantità (es. taglio, forza assiale, ecc.).

In Figura 8 vengono confrontate le tensioni di Von Mises nel lato inferiore e superiore della soletta ottenute dal modello del telaio completo e del sottotelaio vincolato secondo l'opzione 3. E' possibile osservare che la distribuzione delle tensioni ottenute dal modello del telaio completo sono ben

approssimate da quelle della sottostruttura. Risultati analoghi sono stati ottenuti anche con le altre opzioni di vincolo.

Il confronto dei risultati delle tre opzioni di vincolo indica chiaramente che il comportamento della soletta soggetta al collasso della colonna centrale è poco sensibile al tipo di condizione al contorno utilizzata per simulare la continuità del telaio completo. Questo risultato ha consentito di utilizzare la più semplice soluzione di vincolo nella preparazione del campione. Informazioni aggiuntive sono riportate in Baldassino et al. 2013 [11].

3.2 Incremento di carico dopo la rimozione della colonna

Durante la terza fase della prova, il carico agente sulla soletta viene incrementato fino a collasso al fine di ottenere una stima del margine di sicurezza. Tuttavia, l'applicazione di un ulteriore carico distribuito sulla soletta non è una soluzione sperimentalmente perseguibile e pertanto altre soluzioni sono state investigate.

Nella prova, durante la prima e la seconda fase, la presenza della colonna viene simulata attraverso l'utilizzo di un martinetto idraulico nel quale la forza di compressione viene gradualmente ridotta fino a zero. Dal punto di vista operativo, la soluzione più immediata per l'applicazione di un carico verticale aggiuntivo è quindi quella di utilizzare il martinetto in trazione. Tuttavia, in questo caso, l'incremento di carico avviene attraverso l'applicazione di un carico concentrato e si è ritenuto necessario valutare l'influenza di questa modalità di carico.

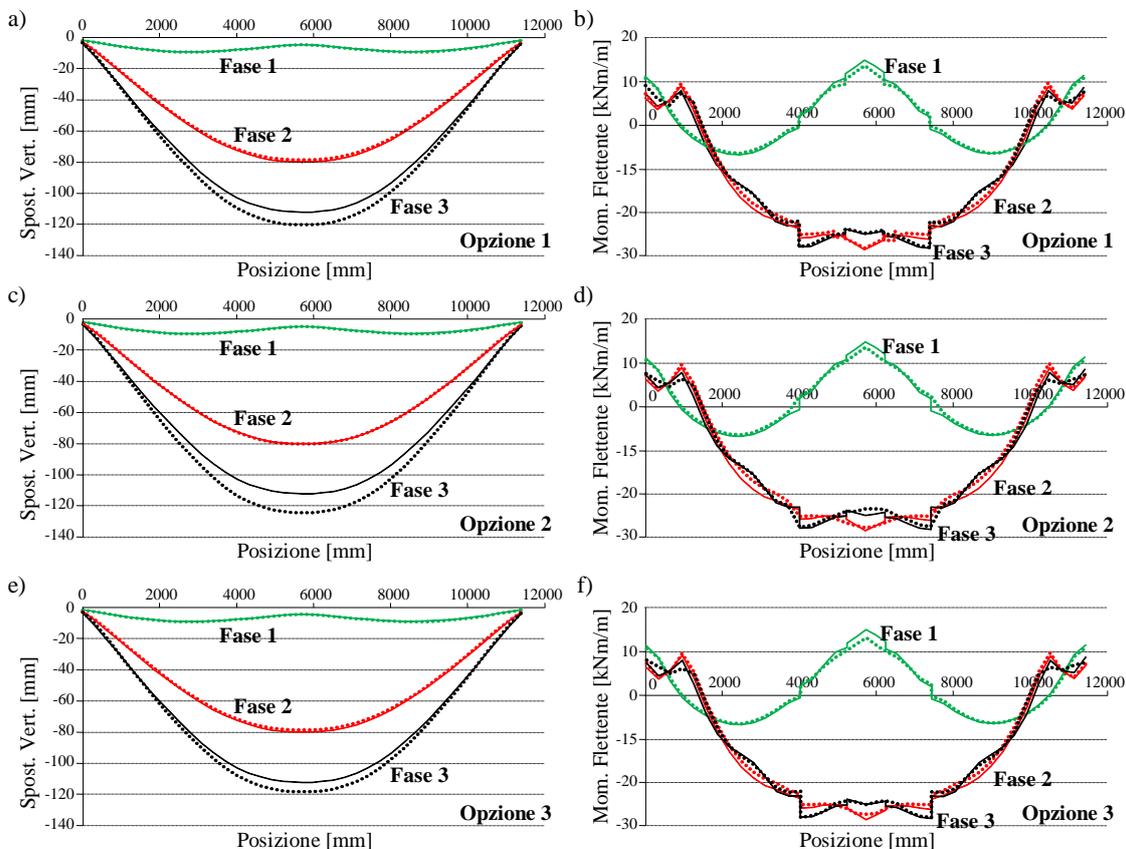


Figura 7 - Confronto dello spostamento verticale e del momento flettente corrispondenti alla sezione 1 - Studio sulle modalità di vincolo

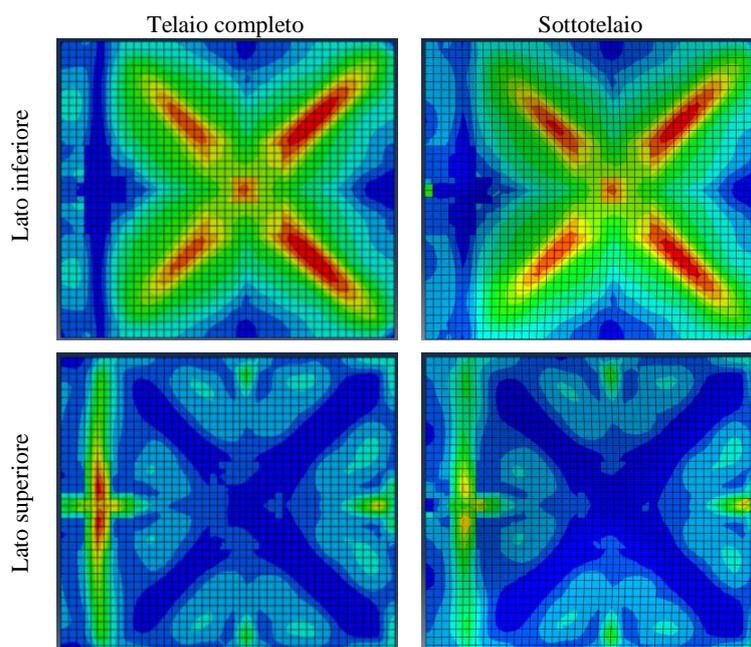


Figura 8 - Confronto delle tensioni di Von Mises nella soletta

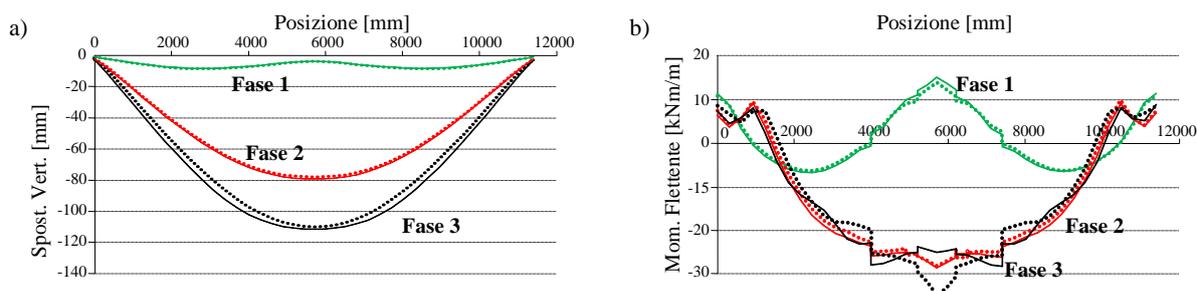


Figura 9 - Confronto dello spostamento verticale e del momento flettente sulla soletta corrispondente alla sezione 1 - Studio sulla modalità di carico

La sensibilità della risposta del telaio rispetto alla procedura di carico è stata quindi oggetto di analisi al fine di stabilire se la soluzione proposta fornisce risultati significativi ai fini della ricerca. Lo studio è stato effettuato confrontando i risultati dell'analisi numerica del telaio dove il carico distribuito viene incrementato e del sottotelaio (con l'opzione di vincolo 3) dove viene applicato un carico concentrato in corrispondenza della colonna centrale. Questo carico è ottenuto come forza equivalente determinata sulla base del principio dell'area di influenza. La risposta è stata confrontata in termini di spostamenti e sollecitazioni sulle diverse sezioni significative identificate in Figura 5b. Per brevità, solo i risultati relativi alla sezione 1 sono riportati in questo articolo.

La Figura 9 mostra il confronto dello spostamento verticale e del momento flettente della soletta (Sez. 1). La linea tratteggiata indica la risposta del sottotelaio mentre la linea continua si riferisce al telaio completo. La terza fase della sequenza di carico è riferita ad un incremento di carico con coefficiente pari a 1,3. Dalla Figura 9 si osserva che la procedura di carico proposta approssima in modo più che soddisfacente il comportamento del telaio completo in termini di spostamenti (con un errore dell'ordine di 1,5%) e di momento flettente. Risultati simili sono stati ottenuti per le

altre sezioni significative. L'analisi ha confermato la possibilità di incrementare il carico verticale applicando una forza concentrata di trazione in corrispondenza della colonna centrale. Informazioni aggiuntive sono riportate in Zandonini et al. 2014 [12].

4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il lavoro svolto fa parte di un Progetto di Ricerca Europeo che ha l'obiettivo di definire criteri di progetto adeguati per strutture miste acciaio-calcestruzzo nei confronti di azioni eccezionali. In particolare, viene investigata la capacità di attivare i meccanismi di redistribuzione 3-D dei carichi in modo che questi possano essere trasferiti, dalla parte danneggiata alla parte non danneggiata della struttura. L'attenzione si rivolge agli effetti della sovraresistenza, della ridondanza strutturale e della risposta dei giunti che sono tra i principali fattori che contribuiscono al raggiungimento del necessario livello di robustezza di queste.

La prima parte della ricerca si concentra sullo studio sperimentale di due telai 3-D a scala reale nei confronti del collasso di una colonna interna e il presente articolo illustra lo studio preliminare necessario per il progetto delle prove. Simulando il collasso completo di una colonna sarà possibile

studiare la ridondanza tridimensionale fornita dal sistema di solaio anche attraverso l'attivazione delle forze membranali.

Le prove riguardano due telai 3-D di un piano con due campate in entrambe le direzioni. I campioni sono delle sottostrutture realizzate in scala reale e vogliono essere rappresentativi dei telai completi accuratamente scelti come casi studio e dai quali sono stati estratti. La scelta delle condizioni di vincolo delle sottostrutture ha quindi richiesto particolare attenzione.

La prova verrà eseguita in tre fasi: il campione verrà inizialmente caricato con il carico di progetto uniformemente distribuito sulla soletta, successivamente il martinetto che simula la colonna centrale verrà fatto 'cedere' fino ad annullare la forza di compressione (collasso della colonna) e infine il carico verticale verrà incrementato mettendo in trazione il martinetto fino al 'collasso' con l'obiettivo di stimare il margine di sicurezza della struttura. Attraverso analisi numeriche è stato affrontato il problema della scelta

delle condizioni al contorno da applicare al campione atte a simulare correttamente il comportamento del telaio completo. Inoltre, è stata investigata l'adeguatezza della procedura scelta per l'applicazione del carico nella terza fase della prova.

Le analisi hanno mostrato una limitata sensibilità del comportamento della soletta soggetta al 'collasso' della colonna centrale rispetto alle opzioni di vincolo considerate. Questo risultato ha indicato la possibilità di utilizzare condizioni di vincolo semplici e tali da consentire la misurazione delle reazioni. Inoltre le analisi hanno dimostrato che, con riferimento ad un incremento del 30% del carico di progetto, l'applicazione di un carico concentrato alla sottostruttura approssima bene il comportamento del telaio completo dove l'incremento avviene sul carico uniformemente distribuito. Il campione simmetrico è stato appena realizzato ed è rappresentato in Figura 10. I risultati della prova saranno pubblicati nei prossimi mesi.



Figura 10 – Campione di prova simmetrico

5. RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano l'European Grant RFSR-CT-2012-00029 grazie al quale la ricerca è stata possibile.

BIBLIOGRAFIA

- [1] EN 1990 – Eurocode: Basis of Structural Design, CEN 2002.
- [2] EN 1991-1-7 – Eurocode 1: Action on structures - Part 1-7: Accidental Actions, CEN 2006.
- [3] Giuliani, L., Wolff, M. (2006) – Strategie per il conseguimento della robustezza strutturale: Connessione e compartimentazione, CRASC '06, Convegno Nazionale, Crolli e affidabilità delle strutture civili, Messina, Italy.
- [4] RFS-CR-04046 (2007) – Robust structures by joint ductility (ROBUSTNESS) 2004-2007.
- [5] Kuhlmann U., Roelle L., Izzuddin B.A., Pereira M.F., (2012) – Resistance and Response of Steel and Steel-Concrete Composite Structures in Progressive Collapse Assessment, *Structural engineering international*, Vol:22, ISSN:1016-8664, Pages:86-92.
- [6] EN 1992 – Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN 2004.
- [7] EN 1993 – Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN 2004.
- [8] EN 1994 – Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN 2004.
- [9] CSI SAP 2000 – Linear and nonlinear static and dynamic analysis and design of three-dimensional structures: Basic analysis reference manual, Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, 2011.
- [10] ABAQUS – Analysis user's manual, version 6.10, Simulia Dassault Systems, 2010.
- [11] Baldassino, N., Freddi, F., Zandonini, R. (2013) – Robustness of moment resisting steel-concrete composite frame: the floor resisting mechanism in the case of column collapse, *XXIV Giornate Italiane delle Costruzioni in Acciaio (CTA 2013)*, Turin, Italy.
- [12] Zandonini, R., Baldassino, N., Freddi, F. (2014) – Experimental assessment of robustness of flooring systems in 3-D frames, *EUROSTEEL 2014*, Naples, Italy.