

Structural behaviour of an innovative precast system for light-weight wall panels

Comportamento strutturale di un sistema innovativo per pareti prefabbricate alleggerite

B. Dal Lago¹, M. Muhaxheri², L. Ferrara¹

¹ *Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy*

² *Faculty of Construction and Architecture, University of Pristina, Pristina, Kosovo*

ABSTRACT: The total prefabrication of medium-rise r.c. buildings typically consists of large panel structures having high mass and burdensome connections. A discretely-connected innovative light-weight panel element with vertical voids has been invented and patented by DLC Consulting-Milan and studied within a collaboration between Politecnico di Milano and University of Pristina. The structural behaviour of the wall subjected to lateral action has been investigated by means of non-linear analyses with damage-sensitive 2D elements. Such elements allow to estimate the crack pattern and to draw monotonic capacity curves, investigating the effect of different reinforcement arrangements on the structural behaviour of the wall. An innovative solution is also proposed to increase the ductility of the wall when subjected to seismic action and heavily reinforced in shear. Furthermore, the efficiency of a simplified beam model of the wall with distributed plasticity is validated against the results from pseudo-dynamic tests performed at the ELSA/JRC laboratory of Ispra (Italy) in the framework of the Safecast project on a full scale prototype of multi-storey precast building being braced by the walls under investigation. / La prefabbricazione integrale di edifici di media altezza in c.a. è tipicamente realizzata con strutture a grandi pannelli caratterizzate da elevata massa e connessioni non duttili di gravosa esecuzione, che spesso pregiudicano il potenziale di duttilità dei muri e le prestazioni sismiche della struttura. Un innovativo elemento di parete alleggerito con canne verticali e collegato puntualmente è stato inventato e brevettato dalla DLC Consulting di Milano e studiato in una collaborazione tra Politecnico di Milano e Università di Pristina. Il comportamento strutturale di tale muro sotto carico laterale è stato studiato attraverso analisi non lineari con elementi a guscio sensibili a danneggiamento. Tali elementi permettono di stimare il profilo di fessurazione atteso e di studiare l'effetto di differenti disposizioni di armatura sul comportamento strutturale dei muri. Una soluzione innovativa viene proposta per migliorare la duttilità dei muri soggetti a carichi sismici quando vengono significativamente armati contro la rottura a taglio. Un modello semplificato dei muri con elementi "trave" a plasticità diffusa viene inoltre validato attraverso simulazioni dinamiche non lineari confrontate con i risultati sperimentali ottenuti con prove pseudo-dinamiche effettuate su una struttura prefabbricata multipiano in scala al vero dotata dei muri oggetto di studio nel laboratorio ELSA/JRC di Ispra (VA) nell'ambito del progetto di ricerca Safecast.

KEYWORDS: precast concrete; bearing panels; non-linear modelling; seismic behaviour; damage-sensitive elements; pseudo-dynamic testing / strutture prefabbricate; pannelli portanti; modellazione non lineare; comportamento sismico; elementi sensibili a danneggiamento; prove pseudodinamiche.

1 INTRODUZIONE

La memoria presenta lo studio numerico svolto su un elemento di muro prefabbricato innovativo, denominato Master[®], sviluppato grazie ad una collaborazione tra DLC Consulting e Politecnico di Milano (Dal Lago, 2006). Tale elemento è stato concepito per resistere ad azioni verticali e laterali in complessi strutturali formati da muri isolati o accoppiati lateralmente attraverso l'attivazione di connessioni meccaniche. La presente memoria si focalizza sul comportamento di un muro isolato soggetto a carichi laterali, indotti da azioni statiche o dinamiche.

La concezione dell'elemento può essere ricondotta allo sforzo internazionale che si sta compiendo in

tempi recenti per lo sviluppo di sistemi intelligenti assemblati a secco per una prefabbricazione in calcestruzzo finalizzata all'ottenimento della massima industrializzazione dell'intero processo costruttivo (Dal Lago et al., 2016a).

Sistemi strutturali a pannelli portanti assemblati a secco sono stati e sono tuttora utilizzati in diverse parti del mondo. Tipicamente, i sistemi a grandi pannelli adottati nei paesi dell'Europa orientale e dell'Asia, che rappresentano le aree di principale diffusione, sono basati sull'assemblaggio di pannelli con connessioni fragili, come giunti saldati, che possono compromettere le potenziali capacità di duttilità e dissipazione energetica di tali sistemi (Simeonov et al., 1985 e Sun et al., 2015). Inoltre, la sperimenta-

zione su scala reale delle prestazioni di tali muri a fronte di azioni gravitazionali o laterali riportata in letteratura è scarsa, principalmente a causa della necessità di apparati di sperimentazione di dimensione eccezionale ed ai costi relativi. Muri post-tesi longitudinalmente con cavi non aderenti, sviluppati per basculare rigidamente sotto azione sismica, sono stati sperimentati da Schoettler et al. (2009) e da Perez et al. (2007) in scala al vero, e da Priestley et al. (1999) in scala ridotta. Una sprototipo in scala reale di struttura prefabbricata di tre piani è stato sottoposto a prove pseudodinamiche presso il laboratorio ELSA del Centro Comune di Ricerca di Ispra (VA), nell'ambito delle finalità del progetto di ricerca Safecast (FP7-SME-2007-2, Grant agreement No. 218417, 2009 - Toniolo, 2012). Tale prototipo è stato sottoposto a prova in diverse configurazioni strutturali, inclusa una accoppiata telaio - muri di controvento (Negro et al., 2013). I muri di controvento utilizzati sono i medesimi oggetto di studio della presente memoria.

Vi sono diverse tecniche di modellazione numerica non lineare del comportamento strutturale di elementi a pannelli in calcestruzzo armato, incluse metodologie a trave equivalente con macro-elementi e plasticizzazione concentrata (Fischinger et al., 2008, 2012) o con elementi a fibre con plasticizzazione distribuita (Orakcal et al., 2006), e tecniche più sofisticate con elementi a guscio. Modelli a danno sono stati utilizzati per cogliere i profili di fessurazione e di deformazione attesi in elementi anche complessi (di Prisco & Mazars, 1996, Ferrara & di Prisco, 2001 e Muhaxheri, 2014).

Una campagna di analisi numeriche non lineari è stata condotta tramite una collaborazione tra Politecnico di Milano e Università di Pristina con l'obiettivo di cogliere il comportamento strutturale del muro oggetto di studio quando soggetto a carichi laterali attraverso l'utilizzo di elementi sensibili al danneggiamento. Un muro utilizzato nelle prove sperimentali presso il laboratorio ELSA/JRC è stato scelto come caso studio. Ulteriori analisi numeriche non lineari sono state svolte presso il Politecnico di Milano con una modellazione attraverso elementi beam con l'obiettivo di cogliere il comportamento dinamico non lineare sotto accelerogramma del prototipo sperimentale.

2 MURO OGGETTO DI STUDIO

Il muro oggetto di studio presenta le seguenti innovazioni tecnologico-strutturali: (a) il muro è notevolmente alleggerito da cavità verticali lasciate dall'estrazione di anime metalliche dopo il processo di maturazione accelerata condotto entro speciali casseri verticali, (b) cavità prescelte (normalmente le più esterne) sono riempite di calcestruzzo e formano dei "pilastri" continui dalle fondazioni alla sommità

del muro, (c) una sottile fessura orizzontale di costruzione viene lasciata in corrispondenza della zona alleggerita ad ogni sovrapposizione di pannelli, che avviene a ciascun interpiano (Figura 1a).

L'elemento risulta quindi essere un muro portante con funzioni di controvento con contenuto di cls notevolmente inferiore rispetto ad un muro gettato in opera avente le medesime dimensioni. Il suo peso ridotto facilita le operazioni di trasporto e montaggio. L'elemento è di fatto strutturalmente ottimizzato nei confronti del comportamento flessionale, mantenendo armatura passante e notevole area di calcestruzzo agli estremi del muro. Il comportamento pressoflessionale di un muro oggetto di studio è comparato a quello di un muro tradizionale in Figura 1.

La resistenza puramente assiale del muro è ridotta rispetto a quella di un muro pieno in funzione dell'area delle cavità di alleggerimento, e ridotta è anche la resistenza a taglio del muro stesso, a causa della riduzione di spessore pieno nelle aree alleggerite. In generale, un comportamento flessionale duttile può essere raggiunto solo se le modalità di rottura per taglio e per taglio-scivolamento sono evitate in accordo al principio di gerarchia delle resistenze.

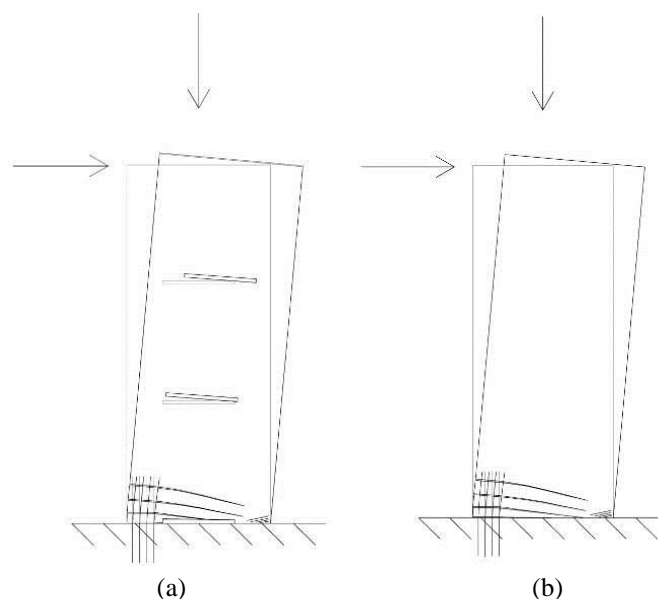


Figure 1. Axial-flexural behaviour of a 3-storey (a) precast wall under investigation and (b) equivalent cast-in-situ wall / Comportamento pressoflessionale di un muro di 3 piani (a) prefabbricato oggetto di studio e (b) gettato in opera.

La connessione tra pannelli sovrapposti è realizzata attraverso le porzioni non alleggerite del manufatto (i "pilastri" passanti), attraverso due differenti soluzioni tecnologiche: (1) il riempimento con cls delle cavità prescelte dopo l'inserimento in opera delle gabbie di armatura ad ogni interpiano, (2) l'attivazione di connessioni meccaniche tipo accoppiatori (Dal Lago et al., 2016b) inserite in fase di produzione entro le porzioni già riempite e il completamento in opera con il getto di un piccolo volume di malta ad alta resistenza tixotropica. La seconda soluzione garantisce una maggiore velocità di

assemblaggio. La Figura 1c mostra sezioni e prospetti strutturali di un modulo di muro estratte dai disegni esecutivi riferiti al prototipo sottoposto a prova presso ELSA/JRC. La soluzione tecnologica (1) è stata adottata per questo elemento.

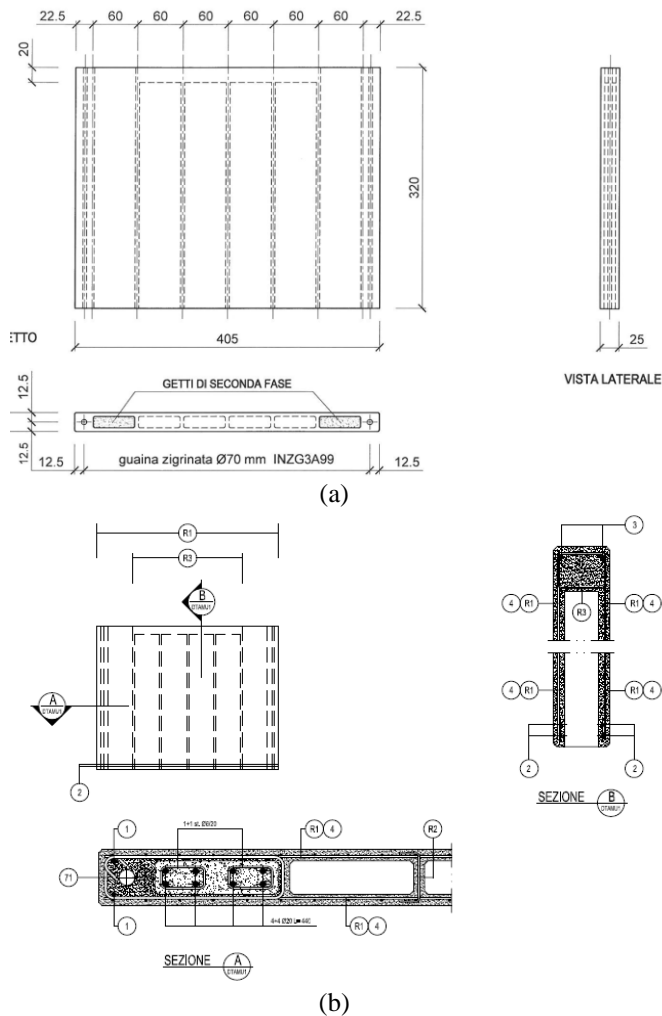


Figure 2. One modulus of Master[®] wall used in the ELSA/JRC prototype: (a) sections, (b) reinforcement details / Un modulo di muro Master[®] utilizzato nel prototipo ELSA/JRC: (a) carpenteria, (b) dettagli di armatura.

3 ANALISI STATICA NON LINEARE

Le analisi statiche non lineari sono state effettuate con il programma CAST3M modellando un muro isolato con elementi 2D con modello costitutivo del calcestruzzo a danno “crush-crack”, sviluppato implementando l’energia dissipata in trazione e compressione come stabilizzatrice delle funzioni di evoluzione del danneggiamento.

Il comportamento meccanico in compressione e trazione del cls classe C45/55 è stato attribuito sulla base delle prescrizioni fornite nel documento *fib-Model Code 2010*, in cui la resistenza a trazione e l’energia di frattura sono calcolate sulla base di valori di resistenza a compressione misurati sperimentalmente. Mentre il comportamento a compressione riprende il modello di Sargin (1971), la curva costitutiva in trazione consiste in quattro rami: ramo ela-

stico fino al 90% della resistenza, ramo di maggiore inclinazione che tiene in conto la formazione delle microfessure fino al picco, ramo discendente lineare conseguente al raggiungimento della localizzazione della fessura fino ad una tensione residua pari al 20% della resistenza, corrispondente all’ampiezza di prima fessurazione w_1 , e ramo terminale fino a completa apertura di fessura w_c , corrispondente a tensione residua nulla.

Il comportamento meccanico dell’acciaio dolce classe B450C è modellato in trazione e compressione con un diagramma bilineare caratterizzato dal tratto elastico sino al raggiungimento dello snervamento e un conseguente tratto incrudente lineare indefinito passante per la resistenza a trazione dell’acciaio, raggiunta alla deformazione del 7,5%. Sono utilizzati i valori caratteristici di resistenza.

Il comportamento strutturale del muro sottoposto a carichi laterali è stato studiato con riferimento a una sezione ad I, dove lo spessore dell’anima è dato dalla somma di quelli delle pareti esterne (100 mm). Ai fini dello studio del comportamento pressoflessionale del muro, questa semplificazione non introduce alcun errore. Sono state considerate quattro tipologie di muro:

- Gettato in opera equivalente, Figura 3a
- Prefabbricato non armato a taglio, Figura 3b
- Prefabbricato armato a taglio, Figura 3c
- Prefabbricato armato a taglio con guaine, Fig. 3d

Tutti i muri sono armati longitudinalmente con 8 barre $\Phi 20$ e 2 barre $\Phi 16$ per bordo. In ciascuna parete esterna del muro prefabbricato armato a taglio è inserita una rete $\Phi 8/150$ mm, in aggiunta a 4 barre $\Phi 20$ orizzontali disposte in cima e in basso a ciascun modulo di muro, con funzione di tirante. Il muro prefabbricato armato a taglio con guaine ha, in aggiunta al precedente, delle guaine installate sulla parte inferiore di tutte le armature longitudinali di ogni pannello, in grado di annullare l’aderenza delle barre per una lunghezza di 600 mm.

In Figura 4 sono riportate le curve forza-spostamento dei quattro modelli di muro. La presenza delle fessure di costruzione orizzontali altera poco il comportamento strutturale dell’elemento. Invece, una rilevante diminuzione di duttilità si verifica nel caso del muro prefabbricato armato a taglio, rispetto ai precedenti. Tale diminuzione è attribuibile al fatto che la rete di armatura al taglio è installata nelle pareti dell’elemento, e tale rinforzo non è passante tra moduli sovrapposti e tra il modulo di base e la fondazione. La sovrapposizione con le armature longitudinali, che avviene ben presto per via del ridotto diametro dell’armatura di pelle, incrementa la resistenza pressoflessionale dei tratti centrali di ciascun modulo di muro, concentrando la richiesta di duttili-

tà nella piccola altezza della zona di sovrapposizione dei muri.

Tale effetto è stato anche osservato e discusso in Dal Lago et al., 2016b con riferimento ai pilastri dotati di alcune connessioni meccaniche di collegamento con la fondazione. I risultati mostrano inoltre che l'uso di guaine per la disattivazione dell'aderenza delle barre longitudinali alla base di ogni modulo, che porta ad un aumento dell'altezza di plasticizzazione delle barre longitudinali calibrabile con l'altezza delle guaine stesse, può portare a miglioramenti di duttilità significativi, qualsivoglia sia l'entità dell'armatura di pelle.

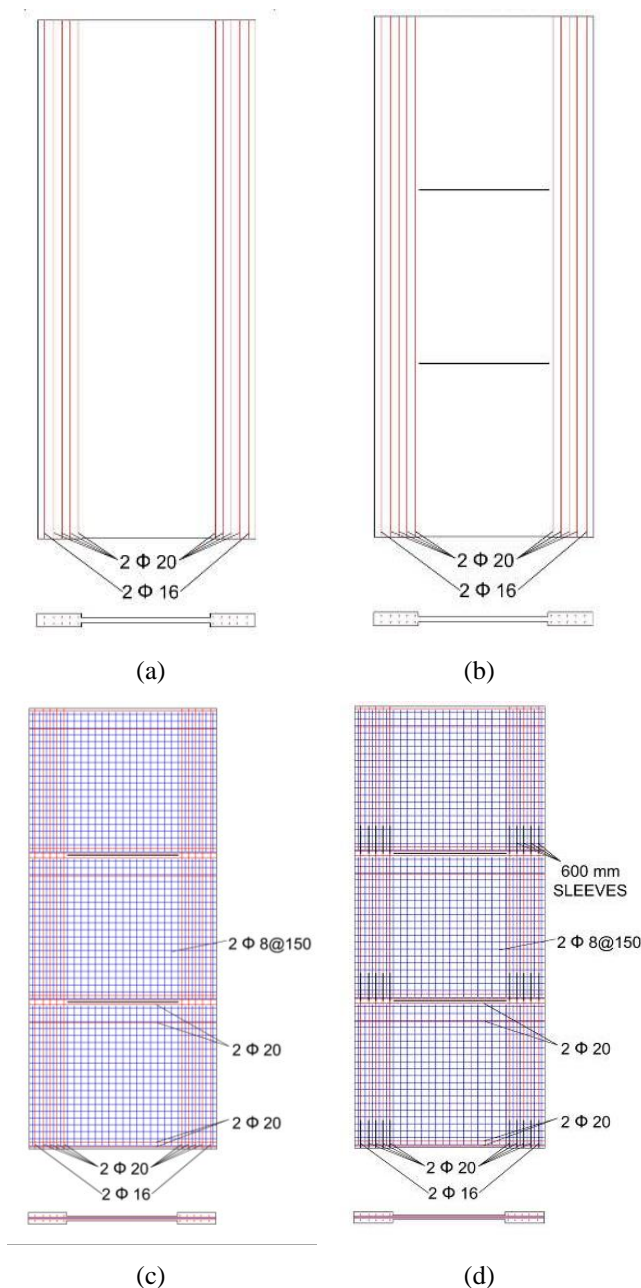


Figure 3. Wall configurations: (a) plain wall (cast-in-situ equivalent), (b) precast wall without shear reinforcement, (c) precast wall with shear reinforcement, (d) precast wall with shear reinforcement and de-bonding sleeves / Configurazioni del muro: (a) gettato in opera equivalente, (b) prefabbricato non armato a taglio, (c) prefabbricato armato a taglio, (d) prefabbricato armato a taglio con guaine.

Il profilo di danneggiamento per ciascuno dei quattro muri è riportato in Figura 5. Tutti i muri sviluppano fessure orizzontali, tipiche della flessione, nel lato sinistro della base del muro, che si trova ad essere in trazione per effetto del momento flettente, e fessure diagonali che si sviluppano nella zona centrale dei pannelli per effetto del taglio. La presenza delle sottili fessure di costruzione concentra il danneggiamento in corrispondenza degli angoli di ciascun modulo di muro. Il danneggiamento di queste aree prosegue in maniera incontrollata solo nel caso in cui non sia disposta armatura a taglio, mentre in tale caso lo sviluppo di danneggiamento è controllato dalla presenza dell'armatura di pelle e delle barre aggiunte orizzontali. In tutti i casi, la fessurazione per flessione è distribuita lungo l'altezza del muro, portando ad una conseguente miglior distribuzione di plasticizzazione nei casi (a) e (b), mentre nei casi (c) e (d) la richiesta di plasticizzazione è limitata alla base del muro. Se, però, nel caso (c) ampie fessurazioni alla base del muro corrispondono a picchi concentrati di deformazione nelle barre longitudinali, nel caso (d) tale richiesta di deformazione è spalmata lungo l'altezza delle guaine. Ciò può anche essere osservato dai diagrammi di distribuzione di sforzo lungo una barra di armatura esterna, riportati in Figura 6.

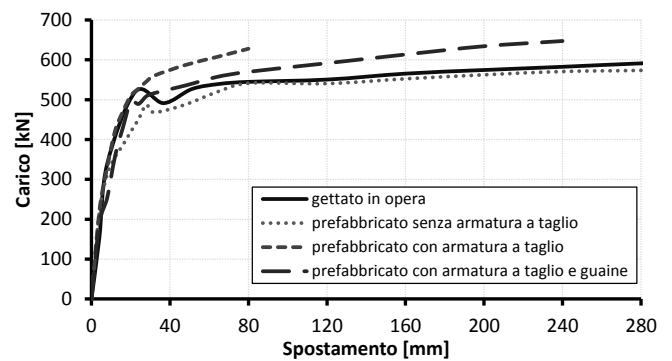


Figure 4. Base shear vs top displacement pushover curves / Diagrammi di spinta taglio alla base - spostamento.

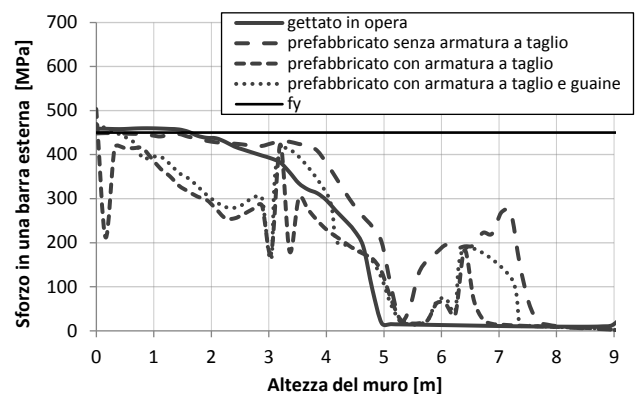
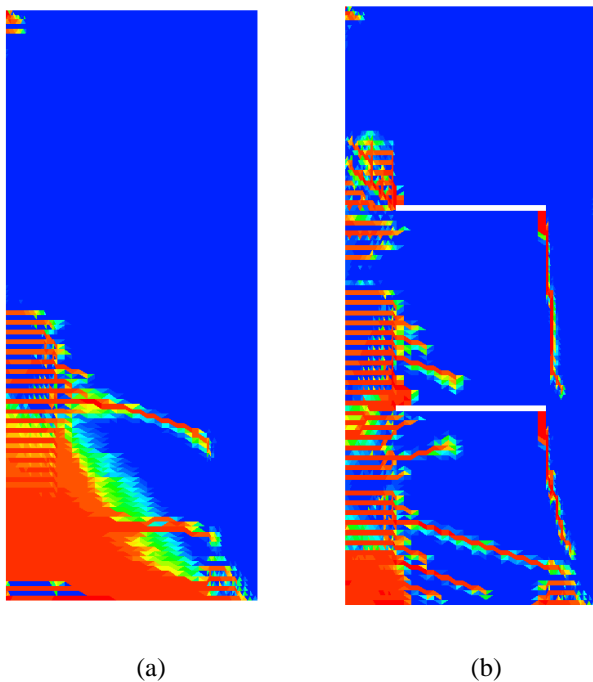
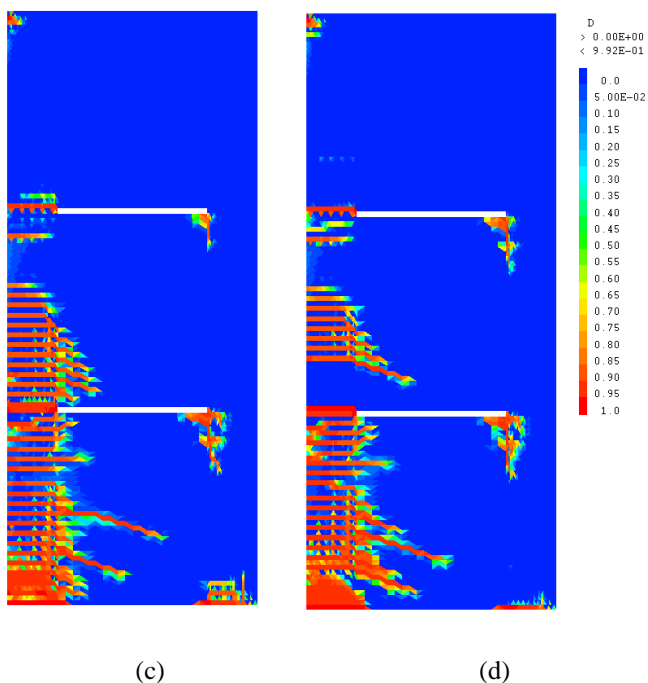


Figure 6. Stress distribution in the outer tensioned rebar for 65 mm of imposed displacement / Distribuzione di sollecitazione di una barra esterna per 65 mm di spostamento imposto.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figure 5. Damage pattern of the walls at 65 mm of imposed displacement / Profilo di danneggiamento dei muri a 65 mm di spostamento imposto.

4 ANALISI DINAMICA NON LINEARE

Il prototipo in scala reale di edificio prefabbricato di tre piani sottoposto a prove sperimentali presso il laboratorio ELSA/JRC è stato concepito e progettato dalla DLC di Milano, partner del progetto Safecast, in accordo alle regole contenute nell'EuroCodice 8 con una PGA a SLV pari a 0,30g e un fattore di struttura q pari a 3,0. L'edificio è stato prodotto, assemblato e smantellato dalla Pizzarotti di Parma. In Figura 7 sono riportate una fotografia del prototipo e

un dettaglio degli alleggerimenti verticali di uno dei due muri. Si tratta dell'edificio prefabbricato più grande al mondo costruito per scopi scientifici.

I dettagli geometrici e distributivi dell'edificio e delle prove sperimentali, omessi nella presente memoria per brevità, sono contenuti in Negro et al., 2013. La carpenteria dei muri è descritta in Figura 2. Una rete $\Phi 5/150$ mm è stata disposta su ciascuna parete.

Un modello ad elementi finiti di trave alla Timoshenko non lineari è stato sviluppato in ambiente STRAUS7. Al codice di calcolo sono stati assegnati i diagrammi momento-curvatura non lineari delle sezioni dei differenti elementi componenti il sistema resistente alle azioni orizzontali, ovvero muri e pilastri, considerati perfettamente incastrati alla base. Il codice risolve il problema dinamico non lineare attraverso l'automatica distribuzione di punti di Gauss-Lobatto in ciascun elemento. Agli elementi è stata attribuita la legge isteretica di Takeda (Takeda et al, 1970).

I diagrammi momento-curvatura sezionali sono stati calcolati risolvendo le equazioni di equilibrio traslazionale e rotazionale sulla base dei diagrammi caratteristici dei materiali. Per il calcestruzzo C45/55 è stato utilizzato il modello di Sargin precedentemente descritto per le parti non confinate, ed un modello con plateau a partire dalla resistenza di picco fino alla deformazione ultima suggerita dal *fib-Model Code 2010* per le porzioni confinate dall'armatura trasversale. Per l'acciaio è stato adottato un diagramma elasto-incrudente simile a quello già descritto. Le travi e i tegoli hanno nodi incernierati, e pertanto non partecipano al sistema resistente alle azioni orizzontali. Essi sono stati modellati con elementi beam elastici.

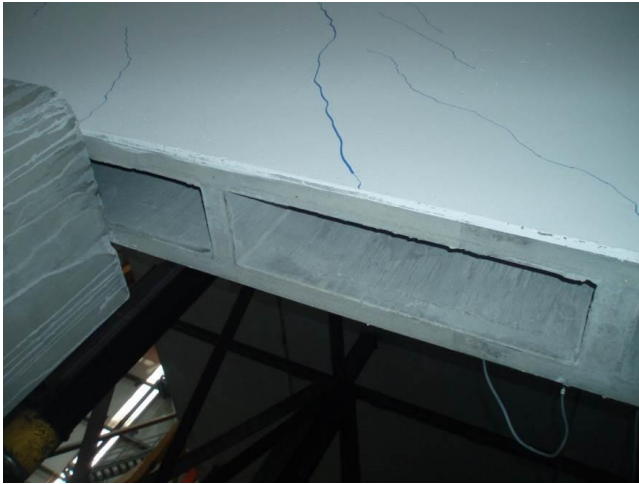
Le masse sismiche introdotte nella procedura pseudodinamica prevedevano, oltre al peso proprio strutturale, i carichi tipici per edificio adibito ad uffici nell'opportuna combinazione sismica, per un totale di 567 ton. Nel modello, sono state attribuite ad ogni piano delle masse concentrate in corrispondenza dei pilastri tenendo conto dell'effettiva area di pertinenza di ciascuno. Nel calcolo dei diagrammi momento-curvatura e nel modello (per tenere in conto degli effetti del 2° ordine) sono state inoltre introdotte le forze assiali realmente agenti, funzione dei soli carichi strutturali, per un totale di 3950 kN.

Sono state effettuate due analisi dinamiche non lineari applicando l'accelerogramma di Tolmezzo modificato (Negro et al., 2013) con PGA scalata a 0,15g (SLD) e 0,30g (SLV). Uno smorzamento viscoso alla Rayleigh del 2% è stato applicato ai primi due modi di vibrare della struttura.

I risultati dell'analisi sono riportati in Figura 8 per PGA di 0,15g e in Figura 9 per PGA di 0,30g, sovrapposti a quelli ottenuti dalla sperimentazione.



(a)

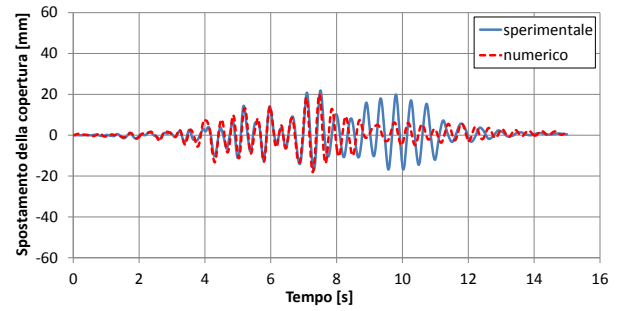


(b)

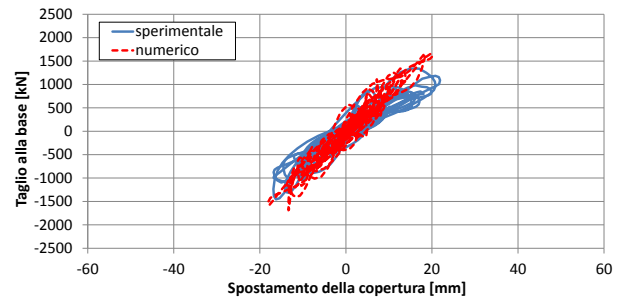
Figure 7. Full-scale prototype tested at ELSA/JRC: (a) general view, (b) detail of the wall lightning / Prototipo in scala al vero sottoposto a prova presso ELSA/JRC: (a) vista generale, (b) dettaglio degli alleggerimenti del muro.

L'accordo tra curve numerica e sperimentale per accelerogramma scalato a PGA di 0,15g è ottimo sino all'incirca a 8 secondi, dopodichè si nota un aumento del periodo e una vibrazione significativamente maggiore nella curva sperimentale. Ciò può essere attribuito ad un indebolimento delle connessioni trave-muro (in Figura 10a si nota la perdita di malta nelle zone esterne di una connessione). Si specifica che la configurazione dell'edificio accoppiato pilastri-muri è solamente una delle quattro configurazioni strutturali che sono state sperimentate sul prototipo in oggetto, mentre le altre fanno riferimento a Telai ad Assetto Variabile (Dal Lago & Dal Lago, 2012b), che sono stati studiati disaccoppiando i muri dalla struttura a telaio successivamente allo svolgimento delle prove qui discusse.

La connessione tra telaio e muri è stata progettata per compressione semplice tra il dente esterno delle travi perimetrali ed i muri, laddove la tolleranza lasciata in fase di progetto è stata colmata col getto di malta ad alta resistenza tixotropica. Tale scelta è stata dettata dalla necessità di rimuovere facilmente tale connessione dopo le due prove previste.

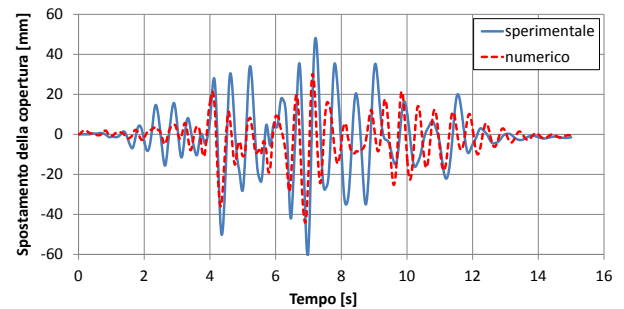


(a)

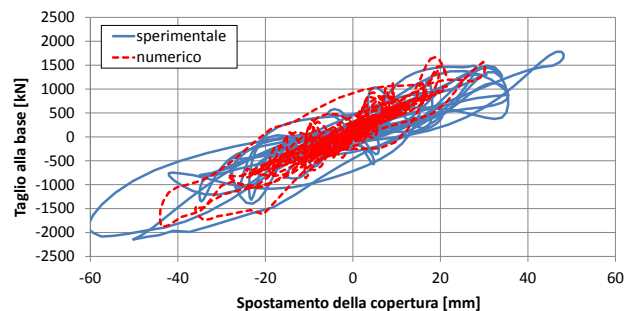


(b)

Figure 8. Accelerogram scaled at PGA of 0,15g: (a) vibratory curves, (b) base shear vs displacement curves / Accelerogramma scalato a PGA di 0,15g: (a) curve vibratorie, (b) curve taglio alla base - spostamento in sommità.



(a)



(b)

Figure 9. Accelerogram scaled at PGA of 0,30g: (a) vibratory curves, (b) base shear vs displacement curves / Accelerogramma scalato a PGA di 0,30g: (a) curve vibratorie, (b) curve taglio alla base - spostamento in sommità.

I risultati relativi all'analisi con accelerogramma scalato a PGA di 0,30g mostrano una tendenza sostanzialmente simile, anche se accompagnata da spostamenti sperimentali maggiori di quelli stimati numericamente. Si può notare come le differenze di spostamento per i picchi di maggiore intensità siano pari a 15~20 mm. Tale differenza può essere spiegata con il severo danneggiamento subito dalle connessioni trave-muro durante questa prova (Dal Lago &

Dal Lago, 2012a). In molti casi, il getto di malta è ceduto su tutto il suo spessore (circa 20 mm) o si è verificata la rottura del puntone compresso nella trave (Figura 10b). Quando si viene a creare una distanza, la struttura vibra in accordo con lo schema statico assai flessibile di un telaio prefabbricato nell'intorno dello spostamento nullo. La presenza di picchi confusi nel diagramma sperimentale taglio-spostamento intorno allo spostamento nullo sembra confermare questa osservazione, in quanto tale comportamento è tipico di una forte influenza degli effetti dei modi superiori di vibrare, significativi per il telaio prefabbricato ma trascurabili per la struttura accoppiata muri-telaio.

L'osservazione dei risultati numerici fornisce una chiara indicazione sul fatto che il comportamento dei muri nella prova a SLD non ha portato a snervamento delle armature longitudinali, mentre nella prova a SLV la base dei muri è stata sollecitata oltre il limite elastico. In particolare, la richiesta di duttilità sezionale stimata numericamente è stata maggiore di 7.

Il profilo di fessurazione sperimentale osservato nel pannello inferiore di un muro è riportato in Figura 11, evidenziato con pennarello. Tale profilo mostra chiaramente la formazione di fessure orizzontali per flessione in corrispondenza dei "pilastri" del muro. Queste fessure proseguono inclinandosi nella parete centrale, a causa della presenza del taglio, e per effetto dell'inversione della sollecitazione si osserva la formazione di un profilo romboidale concentrico. Sono state inoltre osservate delle fessure verticali in corrispondenza del cambio di sezione. Si riporta che le fessure, pur non misurate, erano in generale di ben modesta apertura, difficilmente osservabile ad occhio nudo. Si noti come questo profilo di fessurazione sia in ottimo accordo con quello rilevato dall'analisi statica non lineare con elementi sensibili al danneggiamento, che per un corretto confronto con l'azione ciclica indotta dal sisma dovrebbe essere specchiata.



Figure 10. Detail of one beam-to-wall connection after the test with PGA of (a) 0,15g, (b) 0,30g / Dettaglio di una connessione trave-muro dopo la prova con PGA di (a) 0,15g e (b) 0,30g.



Figure 11. Marked crack pattern on one bottom modulus of wall after the tests / Profilo di fessurazione evidenziato a pennarello sul modulo inferiore di un muro dopo le prove.

5 CONCLUSIONI E FUTURI SVILUPPI

The structural behaviour of an innovative lightweight precast wall has been studied through non-linear numerical investigation. The results of static non-linear analyses performed with a damage-sensitive shell finite element model show that the technological peculiarities of the wall, including horizontal thin construction slots, do not affect its resistance and ductility potentials when considering the longitudinal reinforcement only. However, the splicing of non-passing shear reinforcement located in correspondence of the external screeds of each wall modulus causes a concentration of ductility demand in short lengths of the wall, located at its bottom and top, strongly reducing the ductility of the full element when subjected to lateral loads. The introduction of de-bonding sleeves provides a solution to this problem, allowing for concentrated cracking but distributing the plastic strain of the longitudinal rebars along the length of the sleeves. A simplified non-linear beam model of the wall was used for the simulation of two pseudo-dynamic tests performed at ELSA/JRC on a full scale prototype of a 3-storey precast structure provided with two innovative bracing walls. The results are in good agreement, with a certain mismatching in the ULS test due to the progressive damaging of the frame-to-wall connections. The walls were efficient in bracing the very flexible precast frame provided with hinged beam-to-column connections. The structure behaved elastically when subjected to the accelerogram scaled at a PGA of 0,15g and entered the plastic field for the ULS accelerogram, scaled at 0,30g, guaranteeing the required ductility and dissipation of energy. The crack pattern observed at the end of the tests is compatible with the one predicted by the numerical damage-sensitive model. It can be concluded that the innovative precast wall herein investigated represents a promising technological solution for the evolution of the precast concrete construction, providing safe and robust seismic performance if properly designed and detailed.

Il comportamento strutturale di un innovativo muro prefabbricato alleggerito è stato studiato con analisi numeriche non lineari. I risultati dell'analisi statica non lineare effettuata con modelli ad elementi finiti a guscio sensibili al danneggiamento mostrano che le peculiarità tecnologiche del muro, inclusa la presenza di fessure orizzontale di costruzione ad ogni interpiano, non modificano il comportamento strutturale del muro quando soggetto a carichi laterali. Si è osservato, però, come l'introduzione di una forte armatura di pelle diffusa, disposta per incrementare la resistenza a taglio del muro, provochi la concentrazione di richiesta di duttilità nei giunti di sovrapposizione dei diversi moduli del muro, portando ad una drastica diminuzione della duttilità. L'introduzione di guaine sulle armature longitudinali permette una soluzione al problema, localizzando l'apertura di fessura plastica ma distribuendo la deformazione plastica lungo l'altezza delle guaine. Un modello semplificato del muro con elementi di trave a plasticità distribuita è stato usato per simulare due prove pseudodinamiche effettuate presso ELSA/JRC su un prototipo in scala al vero di 3 piani di struttura prefabbricata accoppiata telaio-muri. I risultati sono in buon accordo, con una discrepanza non trascurabile osservata nella prova a SLV dovuta al progressivo danneggiamento delle connessioni telaio-muro. I muri si sono dimostrati efficaci nel controventare il flessibile telaio prefabbricati avente nodi travopilastro incernierati. I risultati mostrano che i muri si sono comportati in campo elastico sotto l'accelerogramma di SLD e in campo elasto-plastico sotto quello di SLV, garantendo duttilità e dissipazione energetica richieste dal sisma. Il profilo di fessurazione osservato alla fine delle prove è compatibile con quello simulato con l'analisi statica non lineare con elementi sensibili a danneggiamento. Può essere concluso che l'innovativo muro prefabbricato oggetto di studio rappresenti una soluzione tecnologica promettente per l'evoluzione del campo della prefabbricazione, garantendo una robusta prestazione sismica se adeguatamente progettato e dettagliato.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la società DLC Consulting di Milano, specialmente A. Dal Lago e U. Marchetti per la concezione dell'elemento strutturale oggetto di studio e per la progettazione del prototipo sottoposto a prova pseudodinamica nell'ambito del progetto Safecast (FP7-SME-2007-2, Contratto 218417, 2009). La Pizzarotti di Parma è altresì ringraziata per la produzione, il montaggio e lo smontaggio del prototipo. La squadra dello European laboratory of Structural Assessment (ELSA) del Centro Comune di Ricerca (JRC) di Ispra (VA) è ringraziata per l'esecuzione delle prove sperimentali, specialmente P. Negro, F.J. Molina, P. Pegon, P. Caperan e D. Bournas. Infine, i proff. G. Toniolo e F. Biondini, M. Lamperti e A. Titi del Politecnico di Milano sono ringraziati per il loro contributo al progetto.

REFERENCES

- CEA. 2000. *CAST3M computer program*. Saclay, France.
- CEB-fib. 2010. *Model Code for Concrete Structures*. Fédération Internationale du Béton, Lausanne, Switzerland.
- Dal Lago, A. 2006. Sistema di prefabbricazione di pareti a fori verticali. *16th CTE Congress*, Parma, Italy, November 9-11.
- Dal Lago, A. & Dal Lago, B. 2012a. Progetto SAFECAST: problematiche riscontrate confrontando progetto e prove sismiche. *19th CTE Congress*, Bologna, Italy, November 8-10:553-562.
- Dal Lago, B. & Dal Lago, A. 2012b. Precast structures with adaptable restraints. *15th WCEE*, Lisbon, Portugal, September 24-28, No. 2305.
- Dal Lago, B., Dal Lago, A. & Franceschelli, F. 2016a. Innovation for smart industrial housing. *Concrete Plant International*, 2:298-300.
- Dal Lago, B., Toniolo, G. & Lamperti Tornaghi, M. 2016b. Influence of different mechanical column-foundation connection devices on the seismic behaviour of precast structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, doi:10.1007/s10518-016-0010-9.
- di Prisco, M. & Mazars, J. 1996. Crush-crack: a non-local damage model for concrete. *Journal of Mechanics of Cohesive and Frictional Materials*, 1:321-347.
- EN 1998-1:2004. *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. ECS, Brussels, Belgium.
- Ferrara, L. & di Prisco, M. 2001. Mode I Fracture behavior in concrete: Nonlocal damage modelling. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 678-692.
- Fischinger, M., Kramar, M. & Isaković, T. 2008. Using macro elements to predict near-collapse performance of two typical RC building structural systems with lightly reinforced walls and slender precast columns. *14th WCEE*, Beijing, China.
- Fischinger, M., Rejec, K. & Isaković, T. 2012. Modeling inelastic shear response of RC walls. *15th WCEE*, Lisbon, Portugal, No. 2120.
- Muhaxheri, M. 2014. *Behaviour of coupling beams retrofitted with advanced cementitious composites: experiments and modelling*. PhD thesis, Politecnico di Milano, Italy.
- Negro, P., Bournas, D.A. & Molina, J. 2013. Pseudodynamic Tests on a full-scale 3-storey precast concrete building: global response. *Engineering Structures*, 57:594-608.
- Perez, F., Sause, R. & Pessiki, S. 2007. Analytical and Experimental Lateral Load Behavior of Unbonded Posttensioned Precast Concrete Walls. *Journal of Structural Engineering*, ASCE:1531-1540.
- Priestley, M.J.N., Sritharan, S., Conley, J.R. & Pampanin, S. 1999. Preliminary Results and Conclusions from the PRESSS Five-story Precast Concrete Test-building. *PCI Journal*, 44(6):42-67.
- Orakcal, K., Massone, L.M. & Wallace, J.W. 2006. *Analytical modeling of reinforced concrete walls for predicting flexural and coupled shear - flexural Responses*. PEER Report 2006/07. University of California, Berkeley.
- Sargin, M. 1971. *Stress-strain relationship for concrete and analysis of structural concrete sections*. Study n. 4, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Canada.
- Schoettler, M.J., Belleri, A., Zhang, D., Restrepo, J.I. & Fleischman, R.B. 2009. Preliminary results of the shake-table testing for the development of a diaphragm seismic design methodology. *PCI Journal*, Winter:100-124.
- Simeonov, S. et al. 1985. *Building Construction Under Seismic Conditions in The Balkan Region - Design and Construction of Prefabricated Reinforced Concrete Building Systems*. Report from RER/79/015.
- Strand7 Pty Limited. 2010. Using Strand7 (Straus7) - introduction to the Strand7 finite element analysis system, edition 3.
- Sun, J., Qiu, H. & Xu, J. 2015. Experimental verification of vertical joints in an innovative prefabricated structural wall system. *Advances in Structural Engineering*, 18(7):1071-1086.
- Takeda, T., Sozen, M.A. & Nielsen, N.N. 1970. Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes. *Journal of the Structural Division*, ASCE, 96(12):2557-2573.
- Toniolo, G. 2012. SAFECAST project: European research on seismic behaviour of the connections of precast structures. *15th WCEE*, Lisbon, Portugal, September 24-28, No. 1389.