

# Comportamento sismico e attività di messa in sicurezza di edifici industriali

## Seismic behaviour and retrofit of precast industrial buildings

Andrea Belleri<sup>1</sup>, Paolo Riva<sup>2</sup>, Roberto Nascimbene<sup>3</sup> ■

### Sommario

Gli eventi sismici dello scorso maggio hanno messo in luce le vulnerabilità degli edifici prefabbricati industriali tipici del panorama italiano già evidenziate in precedenti terremoti. Gli edifici in oggetto sono stati costruiti prima dell'entrata in vigore delle recenti normative antisismiche e presentano carenze costruttive principalmente legate al trasferimento delle sollecitazioni orizzontali tra elementi strutturali.

Spesso le connessioni tra travi e pilastri e tra elementi di copertura prefabbricati e travi sono state affidate all'attrito o a collegamenti spinottati non progettati con criteri anti-sismici. Tali tipologie di connessione, o assenza di connessione, hanno provocato la perdita dell'appoggio e il conseguente crollo degli elementi strutturali, data l'elevata flessibilità delle costruzioni in oggetto che porta a una domanda di spostamento sismico maggiore rispetto a edifici con altezze d'interpiano minori. Tale flessibilità può portare anche all'incompatibilità di spostamento tra elementi strutturali e non strutturali, come ad esempio gli elementi di chiusura perimetrali, e provocarne la caduta.

Il presente articolo prende in esame le vulnerabilità sismiche riscontrate nello scorso terremoto in edifici prefabbricati industriali e i relativi interventi di messa in sicurezza e di riduzione della vulnerabilità.

### Abstract

*Last May seismic events in Northern Italy highlighted the seismic vulnerability of precast industrial buildings typical of the Italian building practice. This vulnerability was already observed in previous earthquakes: the damaged buildings were built before the enforcement of the more recent seismic design regulations and exhibit structural deficiencies mainly related to the distribution of the horizontal forces between the structural elements.*

*The connections between precast beams and columns and between roof elements and beams have been often designed to transfer horizontal forces by friction or by steel dowel connections not designed according to specific seismic criteria. The use of these types of connections led to the loss of support of the structural elements and to their consequent collapse: the seismic displacement demand of these industrial buildings is larger compared to traditional reinforced concrete frame structures due to the higher flexibility of the former associated to the static scheme, fixed end cantilever, and to the higher inter-storey height. Moreover, this high flexibility could also lead to displacement incompatibility between structural and non-structural elements, such as precast wall panels, and cause them to fall.*

*This paper examines the seismic vulnerabilities of precast industrial buildings observed in the aforementioned earthquakes and investigates the related retrofit solutions in order to secure the structures and to reduce seismic vulnerability.*

### 1. Introduzione

Le strutture prefabbricate hanno trovato largo impiego in tutto il territorio italiano, soprattutto in ambito industriale, grazie alla rapidità di costruzione, alla copertura di grandi luci con elementi precompressi e al migliore controllo dei materiali e degli elementi strutturali rispetto alle tradizionali strutture in cemento armato gettato in opera. La tipologia strutturale tipica è costituita principalmente da pilastri isostatici a tutta

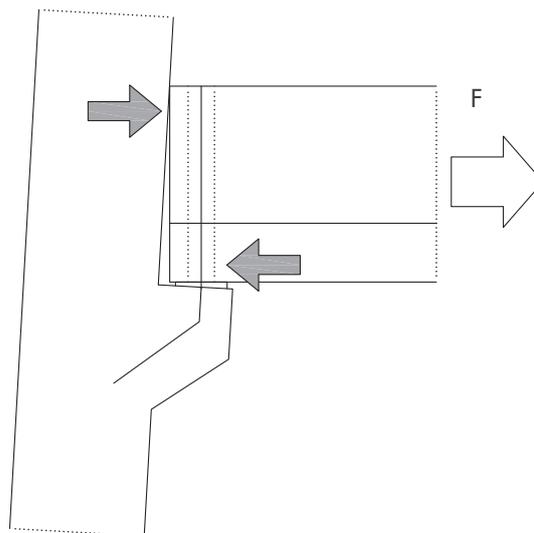
altezza inseriti in plinti a pozzetto o connessi alla fondazione tramite connettori metallici o l'inserimento delle chiamate della fondazione all'interno di tubi in acciaio corrugato nei pilastri successivamente riempiti con malte a basso ritiro (Belleri e Riva, 2012). I collegamenti tra trave e pilastro e tra elementi di copertura e trave sono costituiti da connessioni spinottate. Il conseguente schema statico utilizzato in fase di progettazione è quindi costituito da telaio con

<sup>1</sup> Università degli Studi di Bergamo - ✉ andrea.belleri@unibg.it

<sup>2</sup> Università degli Studi di Bergamo - ✉ paolo.riva@unibg.it

<sup>3</sup> Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Pavia - ✉ roberto.nascimbene@eucentre.it

Figura 1  
Sollecitazioni aggiuntive  
nella connessione trave-  
pilastro associate a  
modifica dello schema  
statico.



incastro alla base del pilastro e collegamenti incernierati tra i restanti elementi strutturali.

Sebbene le attuali norme tecniche per le costruzioni (D.M. 2008) prevedano l'utilizzo di connessioni meccaniche fra gli elementi strutturali prefabbricati, tuttavia tale obbligo sussiste in zona sismica dal D.M. 1987 e un'aggiornata zonazione sismica del territorio italiano risale all'O.P.C.M. 2004. Sono pertanto presenti numerosi edifici industriali sul territorio italiano in cui le connessioni trave-pilastro e trave-elementi di solaio sono affidate al solo attrito, sia perché costruiti prima del 1987 sia perché progettati senza considerare l'azione sismica.

È stata proprio l'assenza o il sottodimensionamento delle connessioni tra gli elementi strutturali a provocare i danni maggiori agli edifici industriali nella sequenza sismica dello scorso maggio, poiché l'incapacità di trasferire le sollecitazioni orizzontali tra gli elementi strutturali ha causato la perdita dell'appoggio degli stessi e di conseguenza il loro crollo. Inoltre, a tale perdita d'appoggio può avere contribuito anche la spazialità del moto sismico che può provocare spostamenti differenziali alla base dei pilastri se privi di collegamenti tra le loro fondazioni.

L'importanza del corretto dimensionamento delle connessioni in fase di progettazione di edifici prefabbricati è ben nota in letteratura (Magliulo e al. 2008, Schoettler e al. 2009, Riva e al. 2011, Negro e Toniolo 2012), tuttavia l'elevata flessibilità delle strutture in oggetto può portare a una modifica dello schema statico dei collegamenti; ad esempio, il contatto tra trave e pilastro (Figura 1) a seguito della loro rotazione relativa crea un grado d'incastro e delle sollecitazioni aggiuntive nella connessione non considerate nella progettazione. Le connessioni devono perciò essere dimensionate sia per

rispettare l'equilibrio con le sollecitazioni sismiche sia per garantire la compatibilità degli spostamenti relativi tra elementi strutturali imposti dal sisma, essendo le connessioni sede della richiesta di deformazioni data la loro rigidità inferiore rispetto agli elementi prefabbricati ad esse collegati. Questa compatibilità di spostamento deve essere valutata sia per gli elementi principali che per gli elementi secondari come ad esempio i pannelli di chiusura prefabbricati. Rispetto a edifici tradizionali in C.A. gettato in opera, gli edifici industriali in oggetto sono più flessibili, sia per lo schema statico associato, telaio incernierato, sia per l'elevata altezza di interpiano; inoltre la rigidità effettiva a snervamento dei pilastri può essere ben inferiore al 50% della rigidità della sezione interamente reagente, valore suggerito dal D.M. 2008. Tutto ciò può portare a spostamenti maggiori del previsto con conseguenti interazioni tra gli elementi strutturali e possibili rotture delle connessioni degli elementi principali e degli elementi secondari o non strutturali ad essi connessi, come ad esempio i pannelli di chiusura prefabbricati. Diventa perciò importante limitare e valutare in modo corretto la richiesta di spostamento indotta dal sisma anche avvalendosi di metodi di progettazione prestazionali basati sul controllo degli spostamenti, come ad esempio il Direct Displacement Based Design (Priestley e al. 2007).

Nel seguito dell'articolo sono indicate le principali vulnerabilità sismiche registrate negli edifici industriali e gli interventi locali e globali per la messa in sicurezza e l'adeguamento sismico. Le considerazioni riportate derivano da quanto discusso durante la redazione delle linee di indirizzo per interventi locali e globali su edifici industriali monopiano non progettati con criteri antisismici (AA.VV. 2012).

## 2. Vulnerabilità sismiche riscontrate in edifici industriali

In questa sezione vengono illustrati i principali danni rilevati dalle ispezioni condotte su edifici prefabbricati industriali a seguito del terremoto dello scorso maggio. Come anticipato, i danni principalmente riscontrati sono associati alla caduta di elementi strutturali di piano a seguito della perdita dell'appoggio data la mancanza o la ridotta capacità di connessioni meccaniche tra tali elementi (Figura 2 e Figura 3).

Un'altra tipologia di danno ricorrente è il collasso degli elementi di chiusura perimetrali sia costituiti da muratura in laterizio sia da pannelli prefabbricati in cemento armato. Per quanto riguarda i tamponamenti in laterizio, il collasso (Figura 4) è associato all'elevata snellezza e flessibilità fuori piano di tali pareti spesso prive di ammortamenti laterali in prossimità dei pilastri e di cordoli in cemento armato, inoltre la sommità di tali pareti è spesso sormontata da finestrature a nastro. Questo fa sì che il meccanismo di collasso sia molto prossimo al ribaltamento della parete come corpo rigido con un conseguente basso moltiplicatore orizzontale dei carichi.

Per quanto riguarda la caduta di pannelli prefabbricati di chiusura orizzontali (Figura 5) o

verticali (Figura 6), questa è da attribuirsi alla rottura delle connessioni meccaniche di collegamento agli elementi principali quali travi o pilastri. Infatti tali connessioni sono state progettate per sostenere i carichi gravitazionali dei pannelli ed evitarne il ribaltamento per sollecitazioni orizzontali quali ad esempio il vento, tuttavia l'elevata flessibilità degli edifici industriali considerati fa sì che gli spostamenti laterali dell'edificio in caso di sisma provochino elevate sollecitazioni nelle connessioni, dove si concentrano le domande di spostamento e rotazioni relative data l'elevata rigidità degli elementi prefabbricati che collegano.

I danni riscontrati nei pilastri sono di vario tipo. La prima tipologia di danno è associata alla perdita di verticalità dei pilastri (Figura 7) dovuta a rotazioni o spostamenti relativi permanenti delle fondazioni, data l'assenza di collegamenti tra i plinti di fondazione. Sono inoltre state osservate rotture da pilastro corto in presenza di tamponamenti in laterizio perimetrali e finestrature a nastro (Figura 8) e rotture per raggiunta capacità flessionale o a taglio delle forcelle di alloggio delle travi (Figura 9) con conseguente aumento della possibilità di perdita d'appoggio trasversale delle stesse. Più raramente sono stati rilevati danni alla base dei pila-

Figura 2  
Caduta di elementi di copertura per perdita dell'appoggio.

Figura 3  
Caduta di travi per perdita dell'appoggio.

Figura 4  
Collasso di tamponamenti perimetrali in laterizio.

Figura 5  
Caduta di pannelli prefabbricati orizzontali.



Figura 6  
Caduta di pannelli prefabbricati verticali.



Figura 7  
Perdita di verticalità del pilastro.



Figura 8  
Formazione di pilastro corto per presenza di tamponatura e finestre a nastro.

Figura 9  
Rottura della forcella per sollecitazioni fuori piano della trave.

stri quali l'espulsione del copriferro e l'instabilità delle armature longitudinali data l'assenza di dettagli costruttivi di tipo antisismico nella zona di formazione della cerniera plastica.

Infine si osserva come il piano di copertura degli edifici in oggetto sia da considerarsi flessibile data l'assenza di collegamenti meccanici tra i tegoli, la presenza di lucernari o di elementi tipo shed o micro-shed. Questo fa sì che le sollecitazioni sismiche orizzontali di tali elementi si trasferiscano direttamente alle travi con possibile

raggiungimento della capacità portante fuori piano delle stesse e conseguente collasso.

### 3. Interventi per la messa in sicurezza e l'adeguamento sismico

La messa in sicurezza degli edifici prefabbricati industriali deve innanzi tutto risolvere le carenze legate all'assenza o all'insufficienza di connessioni tra travi e pilastri e tra travi e elementi di piano prefabbricati ed impedire il collasso degli

elementi di tamponatura o dei pannelli prefabbricati di chiusura. Tali interventi devono essere compatibili con lo schema statico scelto in fase di progettazione, solitamente telaio incernierato, oppure tenere in considerazione l'effettivo grado d'incastro realizzato valutando la domanda derivante sia sugli elementi strutturali che sulle connessioni. La flessibilità degli edifici industriali in oggetto, la conseguente ridotta richiesta di duttilità in termini di spostamento nonché l'as-

senza di dettagli di tipo antisismico nelle cerniere plastiche alla base dei pilastri fanno sì che la valutazione della sicurezza e il progetto dell'intervento vengano effettuati considerando fattori di struttura "q" bassi, dell'ordine di  $q = 1.5$ , per determinare la domanda sugli elementi strutturali e sulle connessioni. È inoltre importante valutare la compatibilità in termini di spostamento tra gli interventi di messa in sicurezza e adeguamento sismico e gli elementi strutturali e non strutturali

Figura 10  
Collegamento trave-pilastro con vincolo a cerniera.

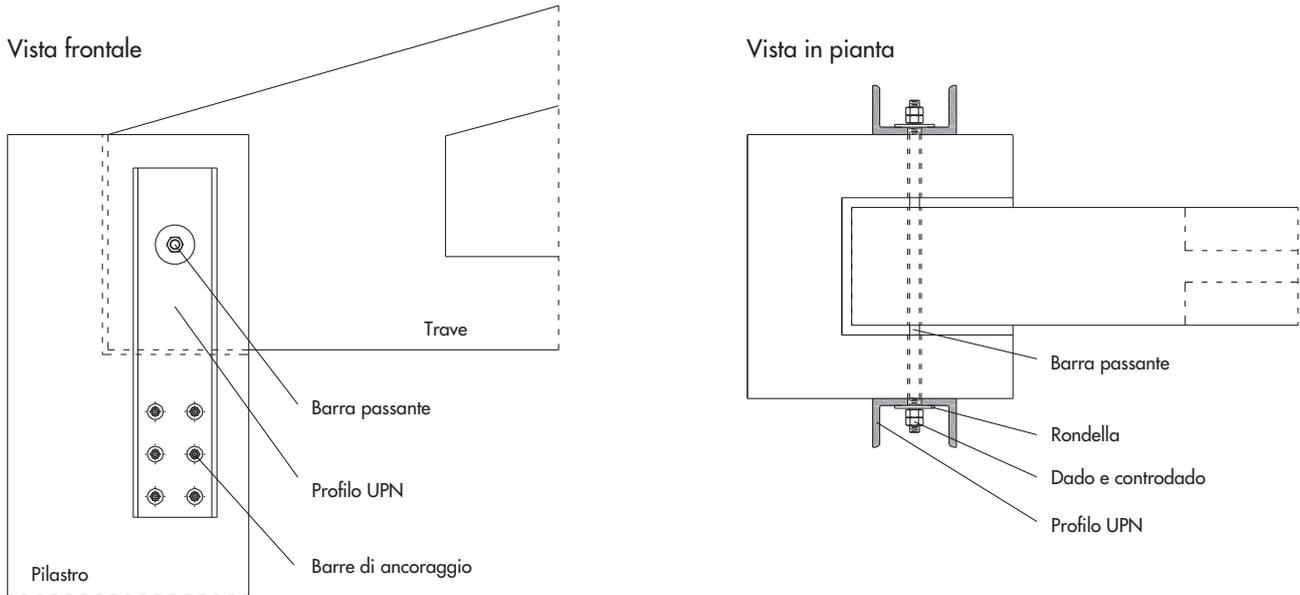
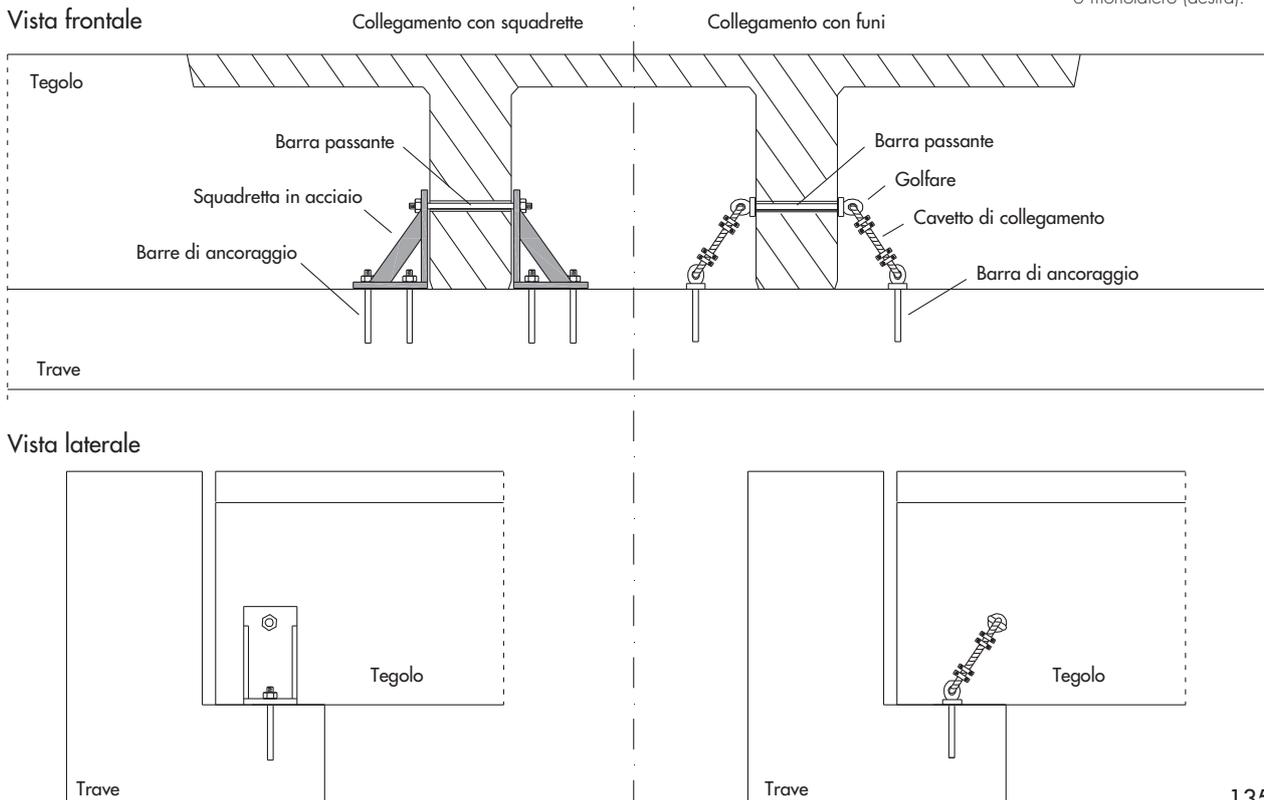


Figura 11  
Collegamento tegolo-trave con vincolo bilatero (sinistra) o monolatero (destra).



che collegano. Infine si nota come i sistemi di rinforzo dovrebbero essere progettati in modo che il collasso del singolo collegamento sia preferibilmente duttile anziché fragile, date le incertezze insite nella valutazione sia delle forze sia della domanda di spostamento nelle connessioni. I principali interventi riguardano, come già anticipato, il ripristino del trasferimento delle sollecitazioni sismiche tra elementi strutturali e prevedono il collegamento trave-pilastro e tegolo-trave. In riferimento al collegamento della trave al pilastro, la soluzione più opportuna pare l'aggiunta di profili in acciaio laterali (Figura 10) collegati alla trave con un unico perno in modo da mantenere il vincolo di cerniera, a tal fine il foro nella carpenteria metallica in corrispondenza del perno dovrebbe presentare un'asolatura verticale per non ostacolare le rotazioni relative tra gli elementi strutturali. Inoltre la posizione laterale di tali profili consente di trasferire al pilastro anche le sollecitazioni trasversali

della trave. In modo del tutto analogo si può procedere per il collegamento tegolo-trave utilizzando delle squadrette metalliche, vincolo bilatero, oppure utilizzando dei cavetti in acciaio, vincolo monolatero (Figura 11).

Per evitare la caduta dei pannelli prefabbricati di chiusura orizzontali e verticali si possono aggiungere delle connessioni che entrano in funzione alla rottura dei collegamenti esistenti (Figura 12 e Figura 13). Tali connessioni devono essere in grado di incassare gli spostamenti relativi, indotti dal sisma, tra i pannelli e gli elementi strutturali. In particolare, nel caso si utilizzino delle squadrette metalliche, queste dovranno presentare dei fori con asolatura orizzontale, nel caso invece di cavetti in acciaio, gli stessi dovranno essere disposti in posizione più ortogonale possibile alle pareti e non pretesi.

Gli interventi di miglioramento e adeguamento sismico dei pilastri possono essere distinti in: rinforzo in corrispondenza di aperture che pos-

Figura 12  
Collegamento pilastro – pannelli prefabbricati orizzontali con squadrette in acciaio con asolatura orizzontale (sinistra) o cavetti in acciaio (destra).

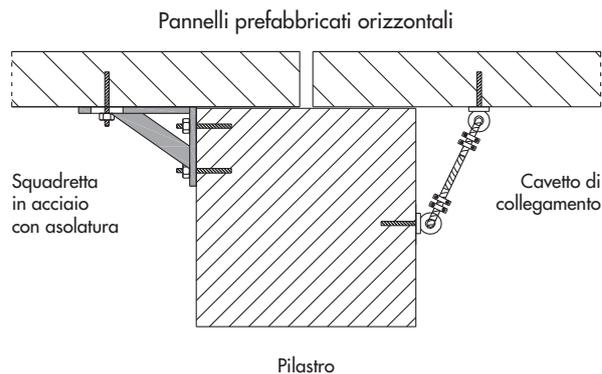
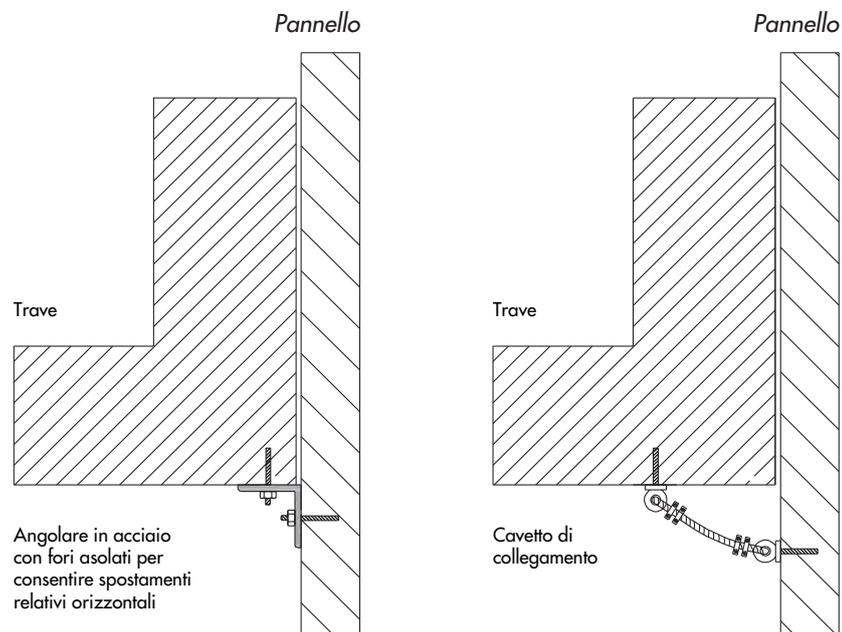


Figura 13  
Collegamento pilastro – pannelli prefabbricati verticali con angolari con fori asolati (sinistra) o cavetti in acciaio (destra).



sono provocare la rottura a taglio del pilastro (pilastro corto); collegamento della base dei pilastri al pavimento industriale per mitigare gli spostamenti relativi delle fondazioni (Figura 14); ripristino della resistenza a flessione e/o a taglio alla base dei pilastri (Figura 15) attraverso fasciatura con materiale polimerico fibrorinforzato (FRP), inserimento di angolari e calastrelli in acciaio, incamiciatura con calcestruzzo armato tradizionale o con calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni (HPFRC).

In riferimento alla vulnerabilità fuori piano di travi esistenti, interventi di miglioramento possono riguardare l'incremento della capacità per

momento flettente, momento torcente e taglio delle stesse o più semplicemente, se possibile, la creazione di un diaframma di piano attraverso il collegamento dei tegoli di copertura tra loro in modo da trasferire direttamente agli elementi sismo-resistenti verticali le sollecitazioni della copertura. In questo caso, se non presente, devono essere predisposti degli elementi con funzione di cordolo perimetrale per la ripartizione delle sollecitazioni sismiche.

È infine possibile utilizzare sistemi di dissipazione energetica aggiuntivi in modo da ridurre le sollecitazioni sugli elementi strutturali e la domanda in termini di spostamento. Nel caso di telaio incer-

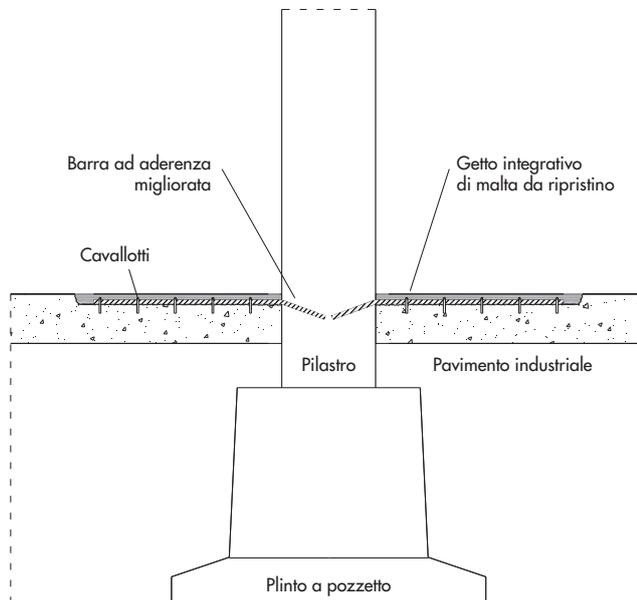
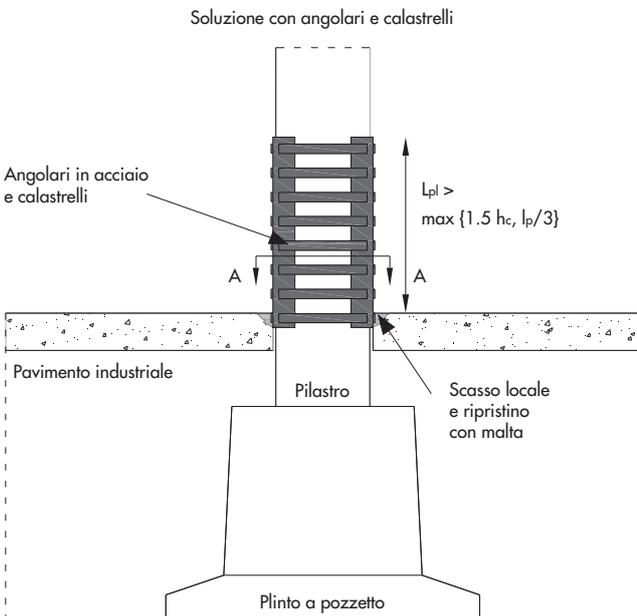


Figura 14  
Collegamento pilastro con pavimento industriale.

Figura 15  
Interventi di confinamento e rinforzo della base del pilastro.

Vista laterale



Sezione AA: Tipologia di intervento

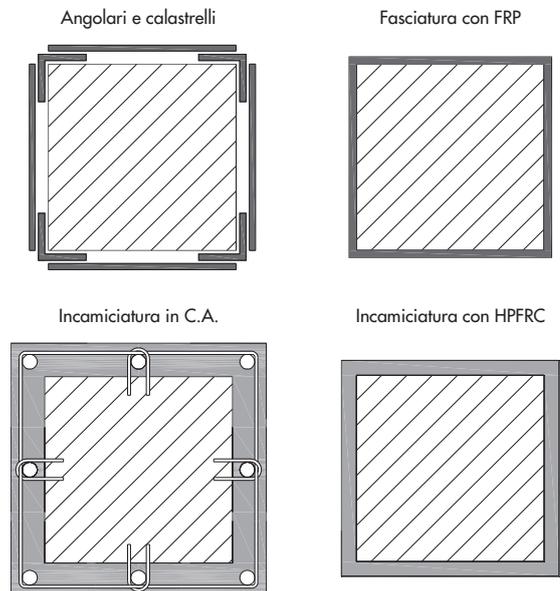
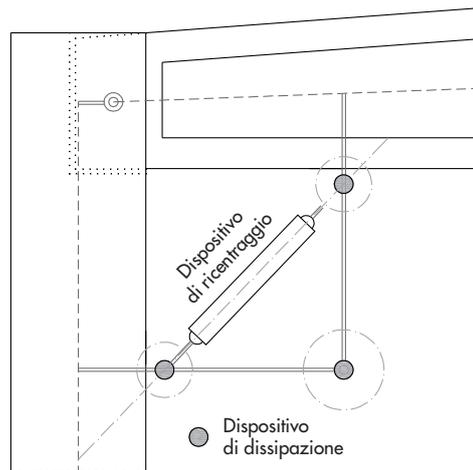


Figura 16  
Posizione ottimale dei  
dispositivi per connessione  
trave-pilastro incernierata.



nierato potrebbero essere utilizzati sia dispositivi di dissipazione, ad esempio ad attrito attivati da rotazioni relative degli elementi strutturali, sia dispositivi di ricentrappio, ad esempio costituiti da molle a tazza precomprese (Belleri e al., 2010). La posizione ottimale di tali dispositivi va ricercata in modo che le loro deformazioni siano compatibili con gli spostamenti e le rotazioni relative indotti dal sisma sugli elementi strutturali a cui sono collegati. In Figura 16 è riportata la posizione ottimale di dispositivi di dissipazione e di ricentrappio per connessioni trave-pilastro incernierate.

#### 4. Conclusioni

Il presente articolo ha messo in luce le vulnerabilità degli edifici prefabbricati industriali tipici del panorama italiano illustrando i principali danni riscontrati a seguito degli eventi sismici dello scorso maggio. In particolare è stato mostrato come la principale causa dei crolli registrati sia imputabile alla perdita dell'appoggio degli elementi strutturali dovuta all'assenza o all'insufficienza meccanica delle connessioni. Altri danni rilevanti sono stati causati dal distacco dei pannelli perimetrali di chiusura per l'incapacità delle connessioni di assecondare gli spostamenti indotti dal sisma.

Sono stati inoltre illustrati possibili interventi per la messa in sicurezza e l'adeguamento sismico

delle strutture esistenti eliminando le vulnerabilità associate all'assenza o insufficienza delle connessioni tra gli elementi strutturali, al possibile collasso fuori piano delle travi per raggiunta capacità flessionale o a taglio o per ribaltamento associato alle sollecitazioni trasmesse dagli elementi di piano, alla ridotta capacità flessionale e a taglio dei pilastri e alla possibile caduta degli elementi non strutturali come i pannelli prefabbricati di chiusura.

È stato infine introdotto l'utilizzo di possibili sistemi di dissipazione e ricentrappio, compatibili con la tipologia strutturale considerata, in grado di ridurre le sollecitazioni e la domanda di spostamento degli elementi strutturali.

#### Ringraziamenti

Si ringrazia il gruppo di lavoro "Agibilità Sismica dei Capannoni Industriali" per le discussioni costruttive sorte nel corso della redazione delle "Linee di indirizzo per interventi locali e globali su edifici industriali monopiano non progettati con criteri antisismici". Si ringraziano inoltre l'Area Analisi Strutturale di Eucentre (Pavia) per avere fornito le immagini dei danni subiti dagli edifici industriali a causa del terremoto e l'ing. Mauro Torquati per l'aiuto prestato nella redazione dei dettagli costruttivi degli interventi di messa in sicurezza e adeguamento sismico.

#### Bibliografia

- AA.VV. (2012) - Linee di indirizzo per interventi locali e globali su edifici industriali monopiano non progettati con criteri antisismici
- Belleri A., Riva P. (2012) - Seismic performance and retrofit of precast grouted sleeve connections. PCI Journal, Vol. 57:1, pp. 97-109.
- Belleri A., Riva P., Bolognini D., Nascimbene R. (2010) - Metodi di protezione sismica di strutture

prefabbricate mediante dispositivi di dissipazione, 18° Congresso CTE, Brescia.

- D.M. 3/12/1987 (1987) - Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo delle costruzioni prefabbricate.
- D.M. 14/01/2008 (2008) - Norme tecniche per le costruzioni.
- Magliulo G., Fabbrocino G., Manfredi G. (2008) - Seismic assessment of existing precast industrial

- buildings using static and dynamic nonlinear analyses, *Engineering Structures*, Vol. 30:9, pp. 2580-2588.
- Negro P., Toniolo G. (2012) - Design guidelines for connections of precast structures under seismic actions, JRC scientific and policy reports, European Commission.
- O.P.C.M. 3274 23/03/2003 (2003) - Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.
- Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsky M.J. (2007) - Displacement-Based Seismic Design of Structures, IUSS Press, Pavia.
- Riva P., Belleri A., Torquati M. (2011) - Problematiche progettuali legate al comportamento sismico di alcune tipologie di connessioni di strutture prefabbricate, *Industrie manufatti cementizi*, Vol. 18, pp. 26-34.
- Schoettler M.J., Belleri A., Zhang D., Restrepo J.I., Fleishman R.B. (2009) - Preliminary results of the shake-table testing for the development of a diaphragm seismic design methodology, *PCI Journal*, Vol. 54:1, pp. 100-124.