

VALUTAZIONE DELL'INFLUENZA DELLE CONNESSIONI A CERNIERA DI NODI TRAVE-PILASTRO NELL'ANALISI DI VULNERABILITA' DI STRUTTURA PREFABBRICATE

ANDREA BELLERI, *Università di Bergamo*
MAURO TORQUATI, *Università di Bergamo*
PAOLO RIVA, *Università di Bergamo*

SUMMARY

The analysis of the mechanical behavior of precast concrete elements connections is particularly relevant in the definition of the structural static scheme adopted in both the seismic design and the seismic vulnerability evaluation procedures. Jointed connections performance influences the global building response under an earthquake and modify the structural performance significantly.

The paper takes into account the force-displacement relationship of dowel connections available in the literature in order to define the moment-rotation relationship adopted in the vulnerability analysis of pin-jointed precast concrete frames.

The building vulnerability is evaluated according to a displacement approach (Displacement Based Assessment) where the procedure input data are the displacement shape associated to the first inelastic vibration mode at yielding of either the column base or the connection and the displacement shape at the lateral displacement at which the return period needs to be estimated.

1. INTRODUZIONE

La maggior parte degli edifici prefabbricati in Italia è stata progettata in accordo a precedenti normative senza considerare gli effetti della sollecitazione sismica; diventa pertanto importante definire delle procedure di valutazione della vulnerabilità sismica di strutture prefabbricate esistenti che siano di rapida esecuzione ed affidabili. Negli ultimi tempi numerosi sono stati i progressi nella progettazione sismica e l'attenzione si è spostata allo sviluppo di metodologie di progettazione in grado di controllare le prestazioni degli edifici per differenti stati limite sia rispetto a elementi strutturali che

non strutturali (Performance Based Design). La procedura di valutazione della vulnerabilità presentata in questo articolo è basata sul Direct Displacement Based Design (DDBD, Priestley et al. 2007) e pone l'attenzione sul controllo degli spostamenti laterali di un sistema strutturale (Direct Displacement Assessment – DBA).

Lo scopo del presente studio è valutare la vulnerabilità sismica di strutture prefabbricate tipiche del panorama italiano con schema statico a telaio incernierato tenendo in considerazione le caratteristiche meccaniche della connessione trave pilastro in termini di resistenza e deformabilità. La valutazione della vulnerabilità con approccio agli spostamenti (DBA) è applicata a un caso studio costituito da un telaio incernierato prefabbricato di due piani e confrontata al variare della modalità di modellazione delle connessioni trave-pilastro.

2. PROCEDURA DI VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA'

La procedura di valutazione della vulnerabilità di edifici prefabbricati esistenti è basata su un approccio agli spostamenti (DBA) e deriva direttamente dal Direct Displacement Based Design (DDBD) di Priestley et al. (2007). Il primo passo del DBA consiste nella definizione della deformata inelastica della struttura da cui ricavare i parametri che caratterizzano il sistema a un grado di libertà (SDOF) equivalente in modo del tutto analogo al DDBD. Nella procedura utilizzata in questa sede, la deformata inelastica si ottiene direttamente da un'analisi di tipo pushover, in modo da considerare l'effettiva non linearità degli elementi strutturali e delle connessioni. La curva di pushover è poi bilinearizzata e la deformata corrispondente allo snervamento ($\Delta_{y,i}$) è utilizzata per valutare lo spostamento a snervamento ($\Delta_{y,se}$) della struttura SDOF equivalente:

$$\Delta_{y,se} = \frac{\sum m_i \cdot (\Delta_{y,i})^2}{\sum m_i \cdot \Delta_{y,i}}$$

Dove m_i è l'i-esima massa di piano. Il rapporto tra lo spostamento target selezionato, corrispondente a un predefinito stato limite, e lo spostamento a snervamento, entrambi ottenuti dall'analisi pushover, è la duttilità in termini di spostamento necessaria per calcolare lo spostamento target della struttura SDOF equivalente:

$$\Delta_{u,se} = \Delta_{y,se} \cdot \mu_{\Delta}$$

La massa efficace m_{eff} , la rigidezza efficace k_{eff} (rigidezza secante corrispondente allo spostamento target della struttura SDOF equivalente) e il periodo efficace T_{eff} sono valutati nel seguente modo:

$$m_{eff} = \frac{\sum m_i \cdot \Delta_{u,i}}{\Delta_{u,se}}; \quad k_{eff} = \frac{V_u}{\Delta_{u,se}}; \quad T_{eff} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_{eff}}{k_{eff}}}$$

Il punto corrispondente al periodo efficace e allo spostamento target giace sullo spettro di spostamento smorzato ($S_{D,in}$). Per valutare il periodo di ritorno corrispondente allo stato limite considerato è necessario risalire allo spettro di spostamento elastico ($S_{D,el}$):

$$S_{D,el}(T_{eff}) = S_{D,in}(T_0, \mu_\Delta) \sqrt{\frac{5 + \xi_{eq}}{10}}$$

Dove lo smorzamento viscoso equivalente (ξ_{eq}) è determinato in accordo alla procedura DDBD, trascurando, nel presente articolo, la dissipazione energetica associata alle connessioni trave-pilastro.

Il periodo di ritorno (T_R) è ottenuto dall'interpolazione tra due coppie $TR - PGA$ (accelerazione di picco del terreno), $TR_1 - PGA_1$ and $TR_2 - PGA_2$, conoscendo la PGA associata allo spettro di spostamento elastico:

$$T_R = T_{R1} \cdot e^{\frac{\ln\left(\frac{T_{R2}}{T_{R1}}\right)}{\ln\left(\frac{PGA_2}{PGA_1}\right)} [\ln(PGA) - \ln(PGA_1)]}$$

3. VALUTAZIONE ANALITICA DEL COMPORTAMENTO DI CONNESSIONI TRAVE-PILASTRO

Lo studio del comportamento delle connessioni trave-pilastro è fondamentale per la corretta valutazione della vulnerabilità sismica di una struttura prefabbricata: la zona di connessione rappresenta una concentrazione di sforzi e deformazioni, che influenzano sensibilmente la risposta globale dell'edificio.

Le connessioni trave-pilastro tipiche della prefabbricazione italiana sono comunemente costituite da spinotti annegati all'interno della mensola d'appoggio del pilastro e inseriti poi in fori posti all'estremità della trave. Dopo il posizionamento della trave, i fori vengono generalmente riempiti con malta (Figura 1).

Tali connessioni rappresentano un vincolo agli spostamenti relativi fra i due elementi strutturali collegati. La rotazione è generalmente consentita da questa tipologia di collegamenti, purché la distanza tra la testa della trave e il lato del pilastro sia tale da evitarne il contatto.

Il raggiungimento del contatto fra la trave e il pilastro corrisponde a un notevole incremento di rigidezza della connessione, cui è associato un incremento di taglio negli spinotti (Figura 2).

Tale aumento di taglio può portare a un prematuro collasso della connessione trave-pilastro. Diviene quindi necessario prendere in considerazione il reale comportamento delle connessioni per una corretta valutazione della vulnerabilità dell'edificio.

Il comportamento delle connessioni viene descritto in termini di relazioni forza-spostamento e momento-rotazione.

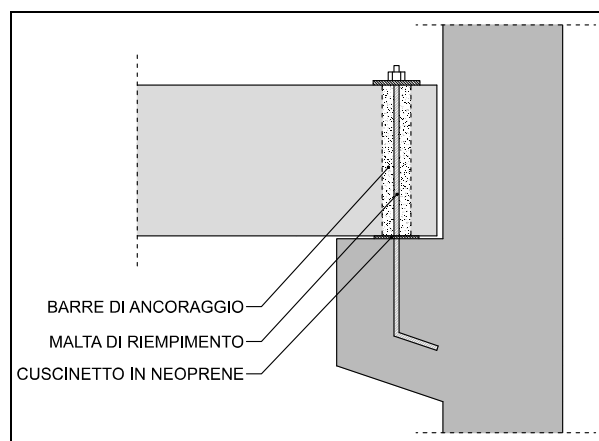


Figura 1. Esempio di connessione trave-pilastro tipica della prefabbricazione italiana.

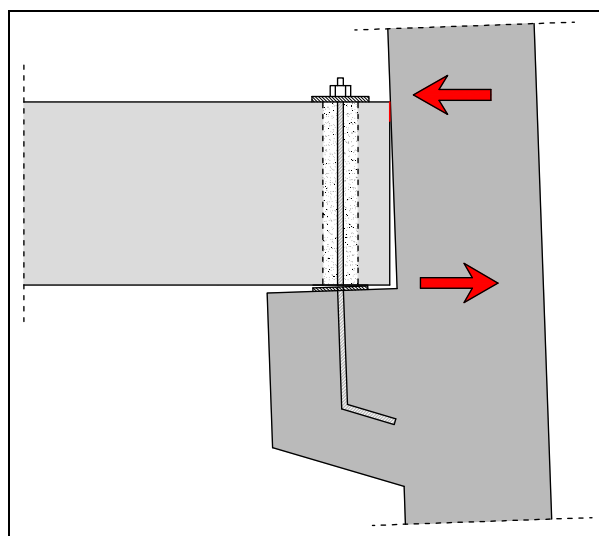


Figura 2. Forze nella connessione a contatto trave-pilastro avvenuto.

3.1. LEGAME FORZA-SPOSTAMENTO

In letteratura sono disponibili molti studi sulla valutazione del legame forza-spostamento di connessioni trave-pilastro spinottate (CNR 10025, Doneux et al. 2006, Ferreira et al. 2000, Soroushian et al. 1987, Vintzeleou 1987, Tsoukantas et al. 1989, Biondini e Toniolo 2009, Negro e Toniolo 2012). Il confronto tra le formulazioni disponibili e i dati sperimentali (Capozzi et al. 2011, Fan et al. 2008, Ferreira et al. 2000, Kramar et al. 2010) mostrano una grande variabilità durante la determinazione della resistenza ultima a taglio.

In questo studio, le espressioni fornite da Ferreira et al. (2000) sono prese come riferimento per la determinazione del legame forza-spostamento. La scelta è giustificata dalla completezza dei calcoli, che tengono in considerazione sia la post-tensione delle barre, sia la presenza di un cuscinetto in neoprene all'appoggio. Inoltre sono presenti delle prove sperimentali a validare i calcoli analitici proposti. Sono presi in considerazione tre diversi contributi per ottenere la deformazione globale della connessioni: la deformazione delle barre annegate nel calcestruzzo, la deformazione delle barre annegate nella malta, la deformazione del cuscinetto in neoprene.

3.2. LEGAME MOMENTO-ROTAZIONE

Nel presente articolo è stato valutato in modo analitico il legame momento-rotazione di connessioni prefabbricate tipiche italiane costituite da spinotti e da un cuscinetto in neoprene.

Il diagramma è stato calcolato prendendo in considerazione:

- La rotazione corrispondente allo snervamento degli spinotti;
- La rotazione corrispondente al raggiungimento del momento ultimo;
- La rotazione corrispondente a un eventuale contatto fra la testa della trave e il lato del pilastro;
- La rottura degli spinotti
- La rotazione corrispondente alla caduta della trave dall'appoggio.

Per una data connessione, il legame momento-rotazione può essere differente per momento orario o antiorario, a causa della possibile eccentricità delle barre e del possibile contatto fra la testa della trave e il pilastro. Un esempio di calcolo è riportato nel capitolo successivo.

4. CASO STUDIO

In questo esempio è stato studiato il comportamento di un telaio incernierato prefabbricato di due piani con altezza di interpiano piano pari a 4 m e luci delle campate pari a 8 m. Le travi sono collegate ai pilastri tramite connessioni spinottate.

La valutazione della vulnerabilità è stata eseguita utilizzando un metodo agli spostamenti (Displacement Based Assessment - DBA) e studiando il telaio (Figura 3) nelle seguenti configurazioni:

- Connessioni modellate come semplici cerniere;
- Connessioni modellate come molle non lineari per rappresentarne il reale comportamento.

I pilastri sono incastrati alla base e l'interazione suolo-struttura non è stata considerata.

Il caso studio si trova in un luogo caratterizzato dai seguenti parametri di sismicità: terreno tipo C, categoria topografica T1, T^*_C pari a 0.347s, F_0 pari a 2.364 e a_g associata a un periodo di ritorno di 475 anni pari a 0.261g.

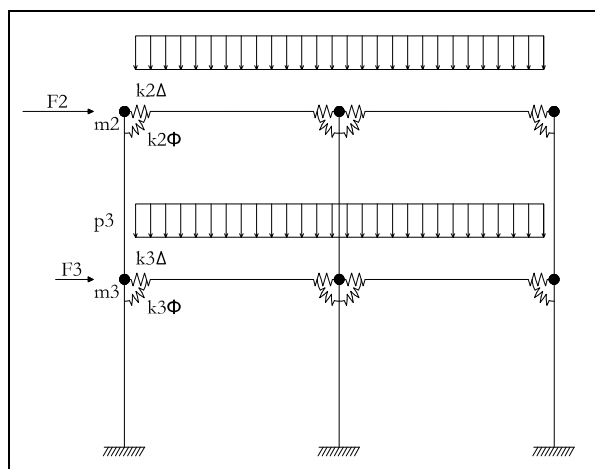


Figura 3. Modellazione del caso studio

La connessione considerata (Figura 4) è costituita da due barre $\phi 16$ in acciaio ($E_s = 205000$ MPa) post-tensionate con una forza pari al 70% della resistenza a snervamento $f_{yk} = 240$ MPa, e un cuscinetto di appoggio in neoprene ($G = 1$ MPa) di dimensioni 150x300x10 mm.

I fori della trave sono riempiti con malta, la cui resistenza è pari a $f_{ck,min} = 30$ MPa. I pilastri e le travi hanno rispettivamente dimensioni di 350x350 mm e 300x500 mm con resistenza del calcestruzzo pari a $f_{ck,max} = 59$ MPa.

La distanza fra la testa della trave e il lato del pilastro è pari a 10 mm.

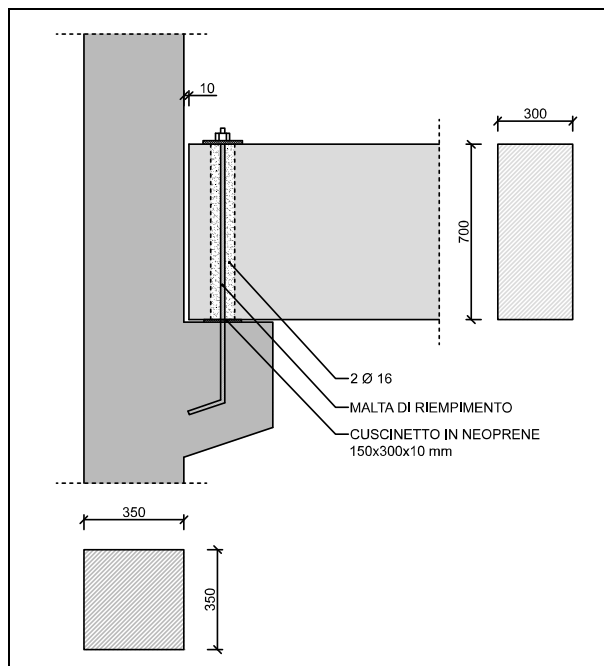


Figura 4. Dettaglio della connessione trave-pilastro considerata.

Il legame forza-spostamento, calcolato in accordo con le formulazioni proposte da Ferreira et al. (2000), è mostrato in Figura 5.

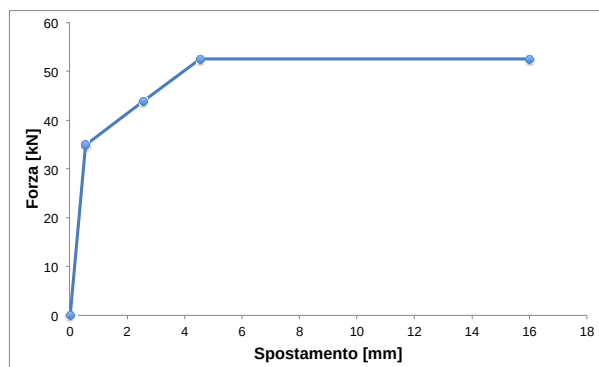


Figura 5. Legame forza-spostamento

Il diagramma momento-rotazione è calcolato sia per momento agente in senso orario, sia per momento agente in senso antiorario.

Il primo passo consiste nella valutazione del momento a snervamento M_y , associato allo snervamento degli spinotti, e della corrispondente posizione dell'asse neutro 'x':

$$M_y = 14 \text{ kN} \cdot \text{m}; \quad x = 5.41 \text{ cm}$$

La deformazione iniziale delle barre associata alla pretensione è pari a:

$$\varepsilon_{s,pret} = \frac{0.7 f_{yk}}{200000} = \frac{168}{200000} = 0.084 \%$$

La rotazione della sezione corrispondente allo snervamento è valutata come:

$$\begin{aligned} \varphi_y &= \varphi_{y,0} - \varphi_{y,pret} = \frac{\varepsilon_s \cdot (20\phi + h_{neoprene})}{d - x} - \frac{\varepsilon_{s,pret} \cdot (20\phi + h_{neoprene})}{d - x} = \\ &= \frac{0.0012 \cdot 330}{150 - 54.1} - \frac{0.00084 \cdot 330}{150 - 54.1} = 1.24 \cdot 10^{-3} \text{ rad} \end{aligned}$$

con ε_s deformazione a snervamento degli spinotti (f_{yk}/E_s).

Il secondo passo consiste nel calcolo del momento ultimo, con corrispondente posizione dell'asse neutro e della deformazione della barra:

$$M_u = 16.7 \text{ kN} \cdot \text{m}; \quad x = 1.778 \text{ cm};$$

$$\varepsilon_s = 1.21 \%$$

La rotazione corrispondente è:

$$\begin{aligned} \varphi_{Mu} &= \frac{\varepsilon_s \cdot (20\phi + h_{neoprene})}{d - x} - \varphi_{y,pret} = \frac{0.0121 \cdot 330}{150 - 17.78} - 2.89 \cdot 10^{-3} = \\ &= 27.31 \cdot 10^{-3} \text{ rad} \end{aligned}$$

Nel caso di momento antiorario, come accennato in precedenza, la testa della trave potrebbe andare a contatto con il lato del pilastro. La rotazione disponibile prima del contatto è:

$$\varphi_{disp} = \frac{gap}{H + h_{neoprene}} = \frac{10 \text{ mm}}{700 \text{ mm} + 10 \text{ mm}} = 1.41 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

Nel caso specifico tale contatto avviene tra il momento a snervamento e ultimo della sezione d'appoggio. Il momento associato al contatto è:

$$M_{contact} = 15.36 \text{ kNm}$$

Dopo il raggiungimento del contatto si ha un incremento di rigidezza. Il nuovo valore del momento ultimo è questa volta associato al collasso a taglio ($F_{v,tot}$) delle barre:

$$\begin{aligned} M_{contact,u} &= F_{v,tot} \cdot 0.9 \cdot (H + e) = \\ &= 52500 \cdot 0.9 \cdot (700 + 5) = 33.31 \text{ kNm} \end{aligned}$$

La capacità di rotazione della connessione a contatto avvenuto è funzione della capacità di spostamento a taglio degli spinotti residua. In Figura 6 viene rappresentato il legame momento-rotazione sia per momento orario (valori di

rotazione e momento negativi) sia per momento antiorario (valori di rotazione e momento positivi).

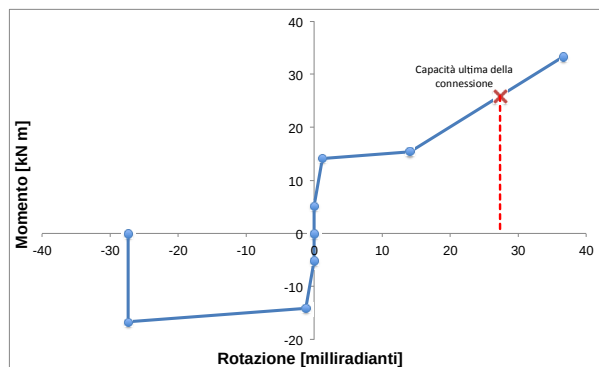


Figura 6. Legame momento-rotazione con contatto trave-pilastro

In Figura 7 sono rappresentate le curve di pushover nel caso di modello con connessioni schematizzate con vincolo a cerniera e nel modello con vincoli trave-pilastro che rispettano l'effettivo comportamento della connessione.

L'applicazione della procedura DBA ai due casi analizzati ha portato alla stima delle accelerazioni di ancoraggio (PGA) e del rispettivo periodo di ritorno (T_R) associati rispettivamente nei due modelli alla rottura del pilastro e delle connessioni trave-pilastro.

Per quanto riguarda il modello con vincoli trave-pilastro di tipo cerniera la PGA è pari a 0.271g mentre il periodo di ritorno è 530 anni. Per il modello con comportamento effettivo delle connessioni trave-pilastro tali valori sono rispettivamente 0.176g e 166 anni.

I risultati ottenuti mostrano l'importanza di considerare nella valutazione della vulnerabilità l'effettivo comportamento meccanico della connessione trave-pilastro e in particolare della capacità di rotazione. Il contatto tra trave e pilastro può infatti portare a un prematuro collasso della connessione.

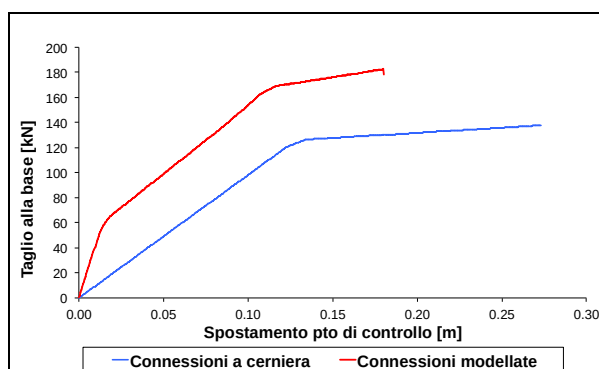


Figura 7. Confronto risultati pushover

5. CONCLUSIONI

Nel presente articolo è stata proposta una procedura di valutazione della vulnerabilità di edifici prefabbricati basata su un approccio agli spostamenti (DBA). Il metodo utilizza un'analisi statica non lineare, pushover, per ottenere la deformata inelastica associata al primo modo di vibrare utilizzata nella definizione dei parametri del sistema a un grado di libertà equivalente. La procedura è stata applicata a un telaio piano prefabbricato di due piani con connessioni trave-pilastro spinottate. Tali connessioni sono state considerate nell'analisi utilizzando il legame taglio-spostamento e momento-rotazione ricavato da relazioni presenti in letteratura e da compatibilità geometriche. Lo smorzamento viscoso equivalente utilizzato per la riduzione dello spettro di spostamento corrisponde al solo contributo della cerniera plastica alla base del pilastro trascurando la dissipazione energetica delle connessioni.

I risultati della valutazione di vulnerabilità mostrano che la non corretta definizione dello schema statico, in particolare delle caratteristiche meccaniche delle connessioni trave-pilastro, porta a risultati non conservativi.

6. BIBLIOGRAFIA

- [01] **BIONDINI, F., TONIOLO, G., 2009.** Experimental Research on Seismic Behaviour of Precast Structures, Industria Italiana del Cemento No. 3.
- [02] **CAPOZZI, V., (2008).** Comportamento sismico dei collegamenti nelle strutture prefabbricate, Phd Thesis, Department of Structural Engineering, University of Napoli, Italy.
- [03] **CAPOZZI V., MAGLIULO G., MANFREDI G. (2011).** Prove a taglio su connessioni trave-pilastro spinottate nelle strutture prefabbricate, XVI meeting ANIDIS 18-22 September 2011, Bari, Italy.
- [04] **CNR 10025 (1984).** Istruzioni per il progetto, l'esecuzione e il controllo delle strutture prefabbricate in conglomerato cementizio e per le strutture costruite con sistemi industrializzati.
- [05] **DONEUX C., HAUSOUL N., PLUMIER A. (2006).** Analysis of 3 precast RC structures with dissipative connections, Risk mitigation for Earthquake and Landslides Integrated Project.
- [06] **FAN L., LU X. (2008).** Investigation on Siesmic Behavior of Jointed Precast Concrete Frame Structures, The 14 th

- World Conference on earthquake engineering - October 12 - 17 2008, Beijing, China.
- [07] **FERREIRA, A., EL DEBS M. K.** (2000). Deformability of beam-column connection with elastomeric cushion and dowel bar to beam axial force, 2nd international symposium on prefabrication, Finland.
- [08] **GRANT D.N., BLANDON C.A., PRIESTLEY M.J.N.,** (2004). Modelling Inelastic Response in Direct Displacement-Based Design, IUSS Press Pavia, Italia.
- [09] Italian building code: D.M. 14 gennaio 2008, Nuove norme tecniche per le costruzioni.
- [10] **KRAMAR M., ISACOVIC T., FISCHINGER M.** (2010). Experimental investigation of “pinned” beam-to-column connections in precast industrial buildings, *14 th ECEE, August 30 - September 03 2010*, Ohrid, Macedonia.
- [11] **NEGRO P., TONIOLO G., 2012.** “Design guidelines for connections of precast structures under seismic actions”, JRC scientific and policy reports, European Commission
- [12] **PRIESTLEY M.J.N.** (2003). Myths and Fallacies in Earthquake Engineering, Revisited, The Ninth Mallet Milne Lecture, IUSS Press, Pavia, Italy.
- [13] **PRIESTLEY M.J.N., CALVI G.M., KOWALSKY M.J.** (2007). Displacement-Based Seismic Design of Structures, IUSS Press, Pavia, Italy.
- [14] **SOROUSHIAN P., OBASEKI K., ROJAS M., NAJM H. S.** (1987). Behavior of bars in dowel action against concrete cover, *Acı Structural Journal*, 84-S18, 170-176.
- [15] **TSOUKANTAS S. G., TASSIOS T. P.** (1989). Shear resistance of connections between reinforced concrete linear precast elements, *Acı Structural Journal*, 86-S26, 242-249.
- [16] **VINTZELEOU E. N., TASSIOS, T. P.** (1987). Behavior of Dowels under Cyclic Deformation, *Acı Structural Journal*, 84-S3, 18-30.

Contatti con gli autori:

Andrea Belleri: andrea.belleri@unibg.it
Mauro Torquati: mauro.torquati@unibg.it
Paolo Riva: paolo.riva@unibg.it