

LINK RICENTRANTE A BASSO DANNEGGIAMENTO PER STRUTTURE CON CONTROVENTI ECCENTRICI

DAMAGE-FREE SELF-CENTRING LINK FOR ECCENTRICALLY BRACED FRAMES

Annarosa Lettieri
Amparo de la Peña
Massimo Latour
University of Salerno
Department of Civil Engineering
Fisciano, Italy
alettieri@unisa.it,
a.delapena@studenti.unisa.it,
mlatour@unisa.it

Fabio Freddi
University College London
Department of Civil, Environmental and Geo-
matic Engineering
London, UK
f.freddi@ucl.ac.uk

ABSTRACT

Innovative structural systems must address performance goals associated with reducing structural repair costs and business downtime, thus promoting seismic resilience. In this context, this study presents a damage-free self-centring Eccentrically Braced Frames (EBFs) relying on a damage-free self-centring device as a seismic link. Post-tensioned high-strength steel bars with disk springs are employed to provide the self-centring behaviour to the link, and friction dampers are included to dissipate the seismic energy. A four-storey EBF complying with Eurocode 8 provisions is used for case-study purposes to investigate the efficiency of the proposed solution. The third storey of the structure is extracted to investigate the behaviour of a sub-assembly upgraded with the proposed seismic device. A 3D nonlinear finite element model of the device is developed in ABAQUS to evaluate the local behaviour. The results of the conventional and upgraded systems are compared, showing the effectiveness of the solution.

SOMMARIO

Al fine di promuovere il comportamento resiliente delle strutture in acciaio a seguito di eventi sismici di elevata intensità, molti lavori di ricerca hanno sviluppato sistemi ricentranti in grado di ridurre o eliminare il danneggiamento sismico. In tale contesto, questo lavoro presenta un link ricentrante a basso danneggiamento da impiegare all'interno di sistemi in acciaio con controventi eccentrici. Il sistema impiega barre in acciaio ad alta resistenza post-tese per fornire capacità ricentranti e dissipatori ad attrito che ne assicurano il comportamento a basso danneggiamento. Per investigare il comportamento del dispositivo, la tecnologia proposta è stata applicata ad un sistema

sismo-resistente con controventi eccentrici in acciaio a quattro piani progettato secondo l'Eurocodice 8, e modelli numerici sono stati sviluppati in ABAQUS considerando il terzo piano della struttura nelle configurazioni con link convenzionale e ricentrante. I risultati numerici sono poi comparati per mostrare i benefici ottenuti adottando il dispositivo proposto.

1 INTRODUZIONE

Le procedure di progettazione sismica correnti [1] si basano sulla dissipazione dell'energia sismica in ingresso attraverso la plasticizzazione di alcuni elementi strutturali identificati come dissipativi. Nel caso di strutture in acciaio con controventi eccentrici (*i.e.*, Eccentrically Braced Frames, EBFs) tale filosofia si applica concentrando la dissipazione nella porzione di trave compresa tra le due diagonali (*i.e.*, link). Nonostante tale approccio consenta di rispettare i requisiti prestazionali prescritti, l'elevato danneggiamento atteso a seguito di sismi di elevata intensità, può compromettere la riparabilità nonché la resilienza delle strutture [2] e delle comunità colpite [3].

Per superare tali inconvenienti, diversi lavori di ricerca hanno sviluppato sistemi strutturali innovativi in grado di concentrare il danno sismico in zone facilmente riparabili, nonché fornire capacità ricentranti al sistema stesso. Molti studi si sono occupati di soluzioni innovative per strutture a telaio (*i.e.*, Moment Resisting Frames, MRFs) [4]-[9] o strutture con controventi concentrici [10], mentre poca attenzione è stata rivolta allo sviluppo di soluzioni innovative per EBFs.

Alcune attività di ricerca hanno investigato l'utilizzo di sistemi duali combinando EBFs e MRFs per prevenire eccessive deformazioni residue [11]. Tali soluzioni utilizzano EBFs con link dissipativi rimovibili e MRFs progettati elasticamente per fornire le forze di ripristino necessarie a ricentrare il sistema. Ulteriori ricerche hanno proposto soluzioni ricentranti per EBFs combinando l'utilizzo di dispositivi dedicati (*e.g.*, dispositivi ad attrito) per dissipazione dell'energia sismica, con meccanismi di rocking elastici, ottenuti impiegando barre o cavi post-tesi all'interfaccia link-trave [12]-[13] o in corrispondenza del collegamento trave-colonna [14]-[15].

Il presente lavoro investiga l'utilizzo di un dispositivo ricentrante a basso danneggiamento come link sismico per EBFs (*i.e.*, self-centring link, SC-link). Il SC-link si compone di due parti principali: 1) un sistema ad attrito a cui è affidata la dissipazione dell'energia sismica; 2) un sistema di ricentraggio composto da barre ad alta resistenza post-tese e rondelle coniche in grado di sviluppare le forze di richiamo elastiche necessarie a ricentrare il sistema. Nelle sezioni seguenti, sono inizialmente presentate le equazioni che descrivono il comportamento isteretico teorico del dispositivo; successivamente, una struttura in acciaio con controventi eccentrici è progettata secondo l'Eurocodice 8 ed equipaggiata con SC-links. Il comportamento locale del dispositivo è analizzato attraverso modelli agli elementi finiti (FEM) sviluppati in ABAQUS [16] per il terzo piano della struttura sia nella configurazione con link convenzionale sia con il dispositivo ricentrante a basso danneggiamento. Le risposte dei due sistemi sono confrontate per mostrare i benefici legati all'utilizzo del dispositivo ricentrante a basso danneggiamento.

2 LINK RICENTRANTE A BASSO DANNEGGIAMENTO

2.1 Descrizione del dispositivo e legame isteretico teorico

Il SC-link proposto è illustrato in **Fig. 1** con una vista 3D (**Fig. 1(a)**), e una vista esplosa (**Fig. 1(b)**) dei principali componenti. La sua sezione riproduce quella di un profilo a doppio T ed è composta da un piatto a T e due piatti ad L collegati alle travi esterne con cerniere. I dispositivi ad attrito sono realizzati con piatti rivestiti di materiale ad attrito posti all'interfaccia tra i piatti a T e ad L. Essi sono pre-tensionati con bulloni ad alta resistenza per attivare il meccanismo dissipativo fornito dallo scorrimento longitudinale tra il piatto a T (opportunosamente asolato per consentire lo scorrimento) e i piatti ad L. Il sistema di ricentraggio, invece, si compone di barre filettate ad alta resistenza poste

simmetricamente rispetto all'anima del SC-link ed ancorate a piatti esterni i quali trasferiscono al dispositivo la forza ricentrante. Inoltre, per bilanciare il rapporto rigidezza-resistenza del sistema e assicurare il comportamento elastico delle barre durante la rotazione del SC-link, sono impiegate rondelle coniche ('disk springs') disposte in serie e in parallelo.

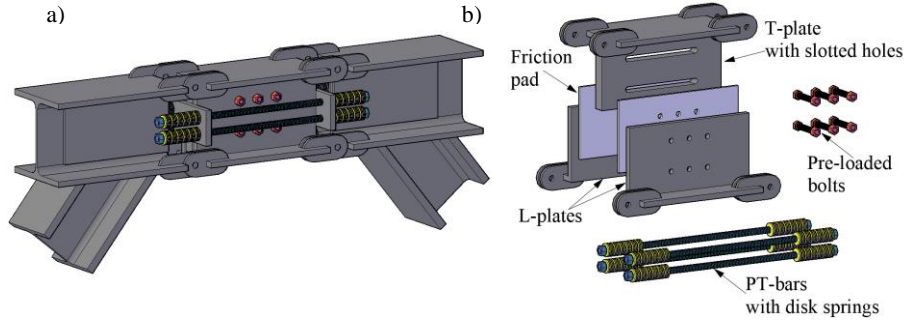


Fig. 1. Layout del dispositivo proposto: (a) vista 3D; (b) esploso 3D.

Il comportamento isteretico del dispositivo è descritto da un legame costitutivo a bandiera e dipende dai contributi dei dispositivi ad attrito e del sistema di ricentraggio. **Fig. 2(a)** mostra le azioni che si sviluppano durante la rotazione del SC-link, mentre **Fig. 2(b)** mostra il legame isteretico teorico. Quest'ultimo e i contributi principali delle componenti del SC-link sono espressi come forze e spostamenti che si sviluppano nella direzione longitudinale del SC-link (*i.e.*, F_{long} e δ_l).

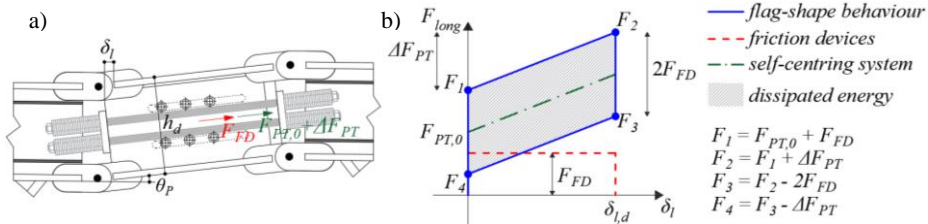


Fig. 2. (a) Interazione tra le azioni principali durante la rotazione del SC-link; (b) relazione teorica forza-spostamento in direzione longitudinale del dispositivo.

In **Fig. 2**, F_{FD} è la forza di scorrimento che si sviluppa all'interfaccia dei dispositivi ad attrito la quale può essere ricavata dalla seguente relazione:

$$F_{FD} = \mu n_s n_b F_{preload,FD} \quad (1)$$

dove μ è il coefficiente di attrito all'interfaccia, n_s è il numero di interfacce ad attrito (*i.e.*, due nella presente configurazione), n_b è il numero di bulloni pre-tensionati impiegati nel dissipatore, $F_{preload,FD}$ è la forza di serraggio assiale applicata ai bulloni.

$F_{PT,0}$ è la post-tensione iniziale delle barre, mentre ΔF_{PT} rappresenta lo sforzo assiale aggiuntivo che si sviluppa nelle barre per effetto del loro allungamento durante la rotazione del SC-link e può essere calcolata applicando le seguenti relazioni:

$$\Delta F_{PT} = K_{eq} \delta_{l,d}; \quad (2)$$

$$K_{eq} = \frac{K_{PT}K_{ds}}{K_{PT} + K_{ds}}; \quad K_{PT} = \frac{n_{PT}E_{PT}A_{PT}}{l_{PT}}; \quad K_{ds} = \frac{n_{ds,par}}{n_{ds,ser}}K_{ds,1};$$

dove K_{eq} rappresenta la rigidezza assiale equivalente del sistema di ricentraggio, $\delta_{l,d}$ è lo scorrimento massimo del dispositivo; K_{PT} e K_{ds} rappresentano rispettivamente la rigidezza delle barre post-tese e delle rondelle coniche; n_{PT} è il numero di barre impiegate nel sistema; E_{PT} , A_{PT} , l_{PT} sono rispettivamente il modulo di elasticità, l'area e la lunghezza di ogni singola barra presente nel sistema; $n_{ds,par}$ e $n_{ds,ser}$ rappresentano il numero di rondelle coniche impiegate rispettivamente in parallelo e in serie.

Osservando il legame di **Fig. 2(b)**, il comportamento ricentrante del sistema è assicurato se è soddisfatta la seguente relazione:

$$F_4 \geq 0 \rightarrow F_{PT,0} \geq F_{FD} \quad (3)$$

2.2 Domanda sismica e progetto delle componenti

La domanda sismica può essere definita in termini di forze e scorrimenti longitudinali (F_l e $\delta_{l,d}$), e quantificata utilizzando la condizione cinematica e lo schema di forze libere agenti su un sistema EBF in condizioni ultime, mostrati rispettivamente in **Fig. 3(a)** e **(b)**. Tali schemi si basano sull'assunzione di Kasai *et al.* [17] secondo cui le azioni flettenti alla base di colonne e diagonali possono essere trascurate, considerando il sistema incernierato alla base.

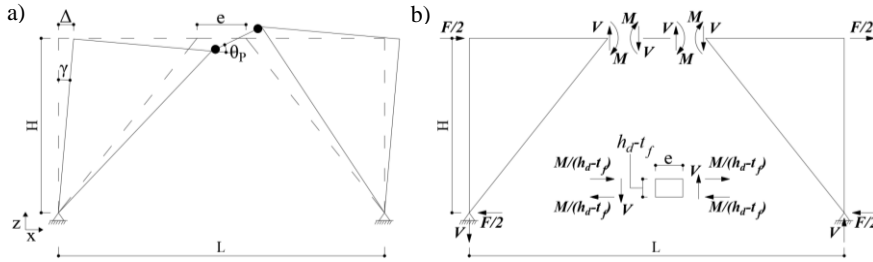


Fig. 3. (a) deformata cinematica e (b) schema statico per EBF in condizioni ultime

Il valore di $\delta_{l,d}$ rappresenta lo scorrimento longitudinale massimo di progetto e può essere calcolato utilizzando le relazioni che legano i parametri deformativi (**Fig. 3(a)**) alle caratteristiche geometriche del SC-link:

$$\theta_p \cong \gamma \frac{L}{e} = \frac{\Delta L}{H e}; \quad \delta_l \cong \theta_p (h_d - t_f); \quad (4)$$

dove θ_p è la rotazione tra il link e la trave, γ è lo spostamento di interpiano, Δ è lo spostamento laterale del EBF, δ_l è lo scorrimento longitudinale all'interno del dispositivo. Nel presente lavoro, $\delta_{l,d}$ è calcolato assumendo una rotazione ultima di progetto del SC-link pari a 0.08 rad, equivalente al valore fornito dall'Eurocodice 8 [1] per link corti, consentendo così il confronto delle performance sismiche del sistema innovativo e convenzionale.

In riferimento allo schema statico di **Fig. 3(b)** le sollecitazioni taglianti, flettenti e longitudinali (*i.e.*, V , M e F_{long}) agenti nel SC-link possono essere calcolate applicando le seguenti relazioni:

$$V = \frac{FH}{L}; \quad M = V \frac{e}{2}; \quad F_{long} = 2 \frac{M}{h_d - t_f} = \frac{FHe}{L(h_d - t_f)}; \quad (5)$$

dove H è l'altezza di piano, L è la lunghezza della campata, F è il tagliante di piano agente sullo schema eccentrico, e rappresenta la lunghezza del link, t_f e h_d sono rispettivamente lo spessore della flangia e l'altezza della sezione del link. La domanda sismica in termini di forze longitudinali (F_l nel legame teorico di **Fig. 2(b)**), è ottenuta per un tagliante sismico F calcolato a partire dall'azione sismica di progetto.

Il progetto delle componenti del dispositivo è eseguito considerando come azioni di progetto del sistema di ricentraggio e dei dissipatori ad attrito rispettivamente le forze $\gamma_{SC}F_l$ e $(1-\gamma_{SC})F_l$; γ_{SC} è un coefficiente di ripartizione che, in accordo alla condizione di ricentraggio espressa in Eqn. 3, deve essere maggiore di 0.5. Nello specifico, $\gamma_{SC}F_l$ rappresenta la post-tensione iniziale da fornire al sistema di ricentraggio ($F_{PT,0}$) e definisce numero e dimensioni delle barre (n_{PT} e A_{PT}); $(1-\gamma_{SC})F_l$ è la forza di scorrimento del dissipatore ad attrito (F_{FD}) e determina numero e pre-tensione dei bulloni (n_b e $F_{preload,FD}$). Lo snervamento delle barre post-tese in corrispondenza di $\delta_{l,d}$, è, infine, evitato disponendo un numero di rondelle coniche in parallelo e serie ($n_{ds,par}$ e $n_{ds,ser}$) calcolato in base alle seguenti relazioni:

$$n_{ds,par} = \frac{N_{y,PT}}{F_{ds,1}}; \quad \frac{N_{y,PT} - F_{PT,0}}{\delta_{l,d}} \geq K_{eq} \rightarrow n_{ds,ser}; \quad (6)$$

dove $N_{y,PT}$ è la forza di snervamento di una barra e $F_{ds,1}$ è la resistenza di una rondella conica.

3 CASO-STUDIO

Il caso-studio adottato per valutare il comportamento del SC-link consiste in un edificio di 4 piani progettato in accordo alle prescrizioni dell'Eurocodice 8 [1]. **Fig. 4(a)** e **(b)** mostrano rispettivamente la vista in pianta dell'edificio e la vista in elevazione del telaio perimetrale in direzione x, contenente il sistema sismo-resistente eccentrico oggetto di studio. Il lavoro si focalizza sulla risposta del terzo piano del sistema sismo-resistente, estratto e analizzato in due diverse configurazioni: una convenzionale e una con SC-link (indicati rispettivamente con le sigle EBF e SC-EBF).

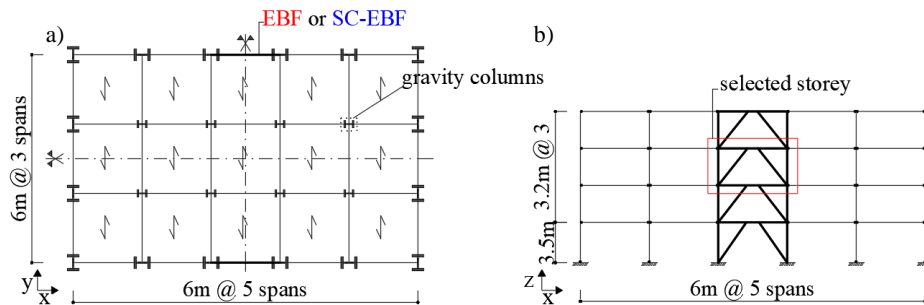


Fig. 4. Edificio caso-studio: (a) pianta dell'edificio (b) vista in elevazione del telaio perimetrale.

L'azione sismica di progetto allo Stato Limite Ultimo (SLU) è definita da uno spettro di risposta elastico di tipo 1 con accelerazione di picco al suolo pari a 0.35g e terreno di tipo C. Il fattore di comportamento q è assunto pari a 6, adottando una classe di duttilità alta (DCH [1]). Tutti gli elementi strutturali (*i.e.*, colonne, diagonali e travi) sono realizzati con acciaio S275 e i links sono classificati come corti [1] in quanto caratterizzati da lunghezze $e < 1.6 M_{p,link}/V_{p,link}$. La progettazione fornisce per il piano investigato: profili HE 200M per le diagonali, HE 280B per le colonne, HE 280B per le travi e link di lunghezza $e = 900$ mm.

Il progetto delle componenti del SC-link (impiegato nella configurazione SC-EBF) è condotto per un'azione longitudinale di progetto F_l pari a 809 kN, ottenuta applicando Eqn. 5 e considerando un

tagliante sismico F pari a 723 kN. Al fine di avere un comportamento ricentrante (*i.e.*, Eqn. 3) l'azione longitudinale viene ripartita con il 60% affidata al sistema di ricentraggio, e il 40% affidata ai dispositivi ad attrito (γ_{SC} pari a 0.6). Sulla base di tali azioni di progetto, il sistema ad attrito è realizzato con sei bulloni M18 in classe 10.9 e uno spessore di 8 mm di acciaio termicamente spruzzato caratterizzato da un coefficiente ad attrito μ pari a 0.53 [18]. Per il sistema di ricentraggio, invece, vengono impiegate quattro barre M20 in classe 10.9 e rondelle coniche caratterizzate da una resistenza di 80 kN e una rigidezza di 80 kN/mm.

4 COMPORTAMENTO LOCALE DEL SISTEMA

Il comportamento locale del sistema è investigato su modelli agli elementi finiti sviluppati in ABAQUS [16], per entrambe le configurazioni dell'assemblaggio estratto: EBF e SC-EBF. Entrambi i modelli sono incernierati alla base e costruiti utilizzando elementi di tipo 'wire' per colonne e una parte delle travi e delle diagonali, ed elementi solidi tridimensionali per le restanti parti (*i.e.*, link/SC-link, travi e diagonali in prossimità del link/SC-link, collegamenti a cerniera, bulloni, sistema di ricentraggio e piatti di ancoraggio). Le saldature presenti nel sistema sono modellate con un 'tie constraint', mentre i contatti tra le superfici sono definiti con la tipologia 'surface-to-surface'. La pre-tensione dei bulloni è simulata con un 'bolt load', mentre la post-tensione applicata alle barre è applicata come un carico termico del tipo 'predefined field temperature'.

Entrambe le configurazioni sono analizzate considerando una storia ciclica di spostamento laterale. **Fig. 5(a)** e **(b)** mostrano rispettivamente i risultati per EBF e SC-EBF in termini di forza e spostamento laterale ($F-\Delta$). Come si può notare dalle figure, il sistema convenzionale mostra dei cicli isteretici stabili caratterizzati da incrudimento ciclico senza degrado di rigidezza. Il sistema SC-EBF, invece, mostra un legame isteretico a bandiera che evidenzia la capacità ricentrante ottenuta introducendo il SC-link.

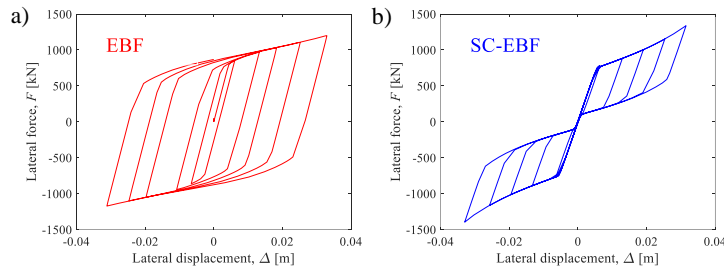


Fig. 5. Risultati della simulazione numerica in termini di forza-spostamento laterale.

Fig. 6(a) riporta le distribuzioni degli sforzi in corrispondenza dello spostamento massimo, mentre **Fig. 6(b)** mostra le deformazioni residue (equivalent plastic strain, PEEQ) al termine delle analisi numeriche. Come si può notare, il sistema convenzionale dissipa l'energia sismica prevalentemente per azioni taglianti. Nel sistema ricentrante, invece, le tensioni si mantengono al di sotto del limite di snervamento per l'intera regione del SC-link confermando il comportamento a basso danneggiamento.

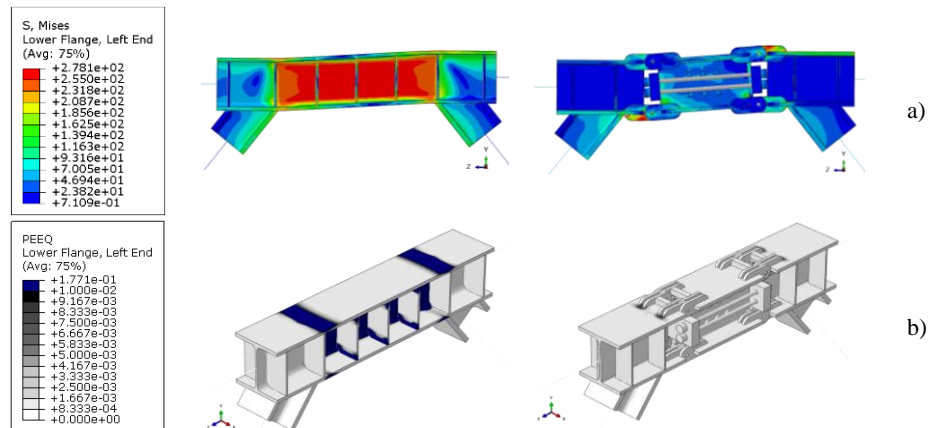


Fig. 6. Risultati della simulazione numerica condotta in ABAQUS in termini di (a) sforzi di Von Mises, (b) deformazioni residue, PEEQ.

6 CONCLUSIONI

Il presente lavoro propone un sistema ricentrante a basso danneggiamento da impiegare come link nelle strutture in acciaio con controventi eccentrici. Il dispositivo sismico utilizza barre ad alta resistenza post-tese con rondelle coniche per controllare la capacità ricentrante del sistema e dispositivi ad attrito per dissipare l'energia sismica in ingresso. Lo studio del comportamento del dispositivo considera come caso studio un edificio di 4 piani con controventi eccentrici progettato secondo l'Eurocodice 8. Il comportamento locale del sistema è investigato attraverso modelli agli elementi finiti in ABAQUS per entrambe le configurazioni con link convenzionale e con link ricentrante a basso danneggiamento. Il confronto dei risultati numerici consente di osservare come l'introduzione del dispositivo proposto, sia in grado di dotare il sistema della capacità ricentrante e limitare il danneggiamento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] EN 1998-1, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels.
- [2] McCormick J., Aburano H., Nakashima M., Permissible residual deformation levels for building structures considering both safety and human elements, 14th World Conference of Earthquake Engineering, Beijing, China, pp. 12–17, 2008.
- [3] Freddi F., Novelli V., Gentile R., Veliu E., Andonov A., Andreev S., Greco F., Zhuleku E., Observations from the 26th November 2019 Albania Earthquake: the Earthquake Engineering Field Investigation Team (EEFIT) mission. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(5), 2013–2044, 2021.
- [4] Garlock M.M., Sause R., Ricles J.M., Behavior and Design of Posttensioned Steel Frame Systems, *Journal of Structural Engineering*, 133, 389–399, 2007.
- [5] Latour M., Rizzano G., Santiago A., Da Silva L., Experimental response of a low yielding, self-centering, rocking CB joint with friction dampers, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 116, 580–592, 2019.

- [6] Freddi F., Dimopoulos C., Karavasilis T.L., Experimental evaluation of a rocking damage-free steel column base with friction devices. *Journal of Structural Engineering*, 146(10), 04020217, 2020.
- [7] Elettore E., Freddi F., Latour M., Rizzano G., Design and analysis of a seismic resilient steel moment resisting frame equipped with damage-free self-centering column bases, *Journal of Constructional Steel Research*, 179, 106543, 2021.
- [8] Elettore E., Lettieri A., Freddi F., Latour M., Rizzano G., Performance-Based Assessment of Seismic-Resilient Steel Moment Resisting Frames Equipped with Innovative Column Bases Connections, *Structures*, 32, 1646–1664, 2021.
- [9] Pieroni, L., Freddi, F., Latour M., Effective placement of Self-Centering Damage-Free Connections for Seismic-Resilient Steel Moment Resisting Frames, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2022. DOI: [10.1002/eqe.3615](https://doi.org/10.1002/eqe.3615).
- [10] O'Reilly G.J., Goggins J., Experimental testing of a self-centring concentrically braced steel frame, *Engineering Structures* 111521, 2021. [https://doi.org/10.1016/j-engstruct.2020.111521](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111521).
- [11] Dubina D., Stratan A., Dinu F., Dual high-strength steel eccentrically braced frames with removable links, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37, 1703-1720, 2008.
- [12] Cheng C.T., Hsu C.H., Seismic behaviour of self-centering designed eccentrically braced frames, *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, 2012.
- [13] Rezvan P., Zhang Y., Nonlinear seismic performance study of D-type self-centring eccentric braced frames with sliding rocking link beams, *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 1-21, 2021.
- [14] Tong L., Zhang Y., Zhou X., Keivan A., Li R., Experimental and Analytical Investigation of D-Type Self-Centering steel eccentrically braced frames with replaceable hysteretic damping devices, *Journal of Structural Engineering*, **145**(1), 2019.
- [15] Al-Janabi Q., Yang T.Y., Performance assessment of novel self-centring friction-based eccentrically braced frames, *Engineering Structures*, **241**, 112456, 2021.
- [16] ABAQUS – Analysis User's Manual Version 6.17, Abaqus Inc., 2017.
- [17] Kasai K., Han X., New EBF design method and applications: Redesign and analysis of US-Japan EBF, *2nd International Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA)*, 1997.
- [18] Cavallaro G.F., Francavilla A.B., Latour M., Piluso v., Rizzano G., Cyclic behaviour of friction materials for low yielding connections, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114, 404-423, 2008.

KEYWORDS

Seismic Resilience, Steel Structures, Eccentrically Braced Frames, Damage-Free, Self-Centring, Residual Drifts.