

**STUDIO PRELIMINARE DI UN EDIFICIO PILOTA IN ACCIAIO
SISMO-RESILIENTE DOTATO DI CONNESSIONI A BASSO
DANNEGGIAMENTO**

**PRELIMINARY STUDY OF A SEISMIC-RESILIENT STEEL
PILOT BUILDING EQUIPPED WITH LOW-DAMAGE
CONNECTIONS**

Elena Elettore, Sabatino Di Benedetto
Antonella Bianca Francavilla
Massimo Latour, Rosario Montuori*
Elide Nastri, Vincenzo Piluso
Gianvittorio Rizzano
University of Salerno
Dept. of Civil Engineering
*Dept. of Pharmacy
Fisciano, Italy
eelettore@unisa.it
sdibenedetto@unisa.it
afrancavilla@unisa.it
mlatour@unisa.it
r.montuori@unisa.it
enastri@unisa.it
v.piluso@unisa.it
g.rizzano@unisa.it

Mario D'Aniello
Raffaele Landolfo
Roberto Tartaglia
University of Naples
Dept. of Structures for En-
gineering and Architecture
Naples, Italy
mario.daniello@unina.it
raffaele.landolfo@unina.it
roberto.tartaglia@unina.it

Fabio Freddi
University College London
Dept. of Civil, Env.
and Geomatic Engineering
London, UK
f.freddi@ucl.ac.uk

ABSTRACT

According to current seismic design codes, in the case of rare seismic events, structures are designed to concentrate the seismic damage into dissipative fuses, characterized by high ductility and energy dissipation capacity. This approach allows the achievement of the safety requirements, with considerable damage to the structural components, thus compromising the building's reparability. To overcome these drawbacks, recent efforts are aimed at developing innovative seismic-resilient structures. In this direction, relevant research studies have been carried out within the RFCS-FREEDAM project, demonstrating the high potential of beam-to-column joints equipped with friction devices in drastically reducing the seismic damage of steel Moment Resisting Frames. The FREEDAM technology is going to be implemented in a demonstration building to be

erected at the University of Salerno. The present paper illustrates the preliminary design and results of the numerical simulations in OPENSEES. Non-linear static analyses and Incremental Dynamic Analyses are performed to obtain the engineering demand parameters of interest while accounting for the record-to-record variability.

SOMMARIO

Secondo i codici moderni, in caso di eventi sismici ‘rari’, le strutture sono progettate affinché il danno sismico sia concentrato in zone caratterizzate da alta duttilità e capacità di dissipazione dell’energia sismica in ingresso. Questo approccio, se da un lato consente di raggiungere i requisiti di sicurezza specificati nei codici sismici, dall’altro lato, può causare perdite economiche dovute ad un significativo danneggiamento e grandi spostamenti residui. Per ovviare a tali inconvenienti, molti lavori di ricerca si sono concentrati sullo sviluppo di strutture ‘sismo-resilienti’, in cui gli elementi danneggiati dal sisma possono essere facilmente sostituiti e/o riparati. In questa direzione, nell’ambito del progetto RFCS-FREEDAM, sono stati condotti importanti studi che hanno dimostrato le potenzialità dei collegamenti dotati di dissipatori ad attrito di ridurre drasticamente il danneggiamento strutturale nei telai sismo-resistenti in acciaio, anche in seguito di gravi eventi sismici. La tecnologia FREEDAM sarà implementata in un edificio-pilota realizzato presso il Campus Universitario di Salerno, che rappresenta un passo avanti nelle tecnologie disponibili per la protezione sismica degli edifici in acciaio. Il presente lavoro illustra il progetto preliminare ed i risultati delle simulazioni numeriche in OPENSEES. Sono eseguite analisi statiche non lineari e Analisi Dinamiche Incrementali al fine di ottenere i parametri ingegneristici di domanda di interesse, considerando la variabilità da record a record.

1 INTRODUZIONE

Secondo la filosofia sismica di progetto suggerita dai codici e delle linee guida attuali (*e.g.*, [1][2]), in caso di eventi sismici ‘rari’, ad alta intensità, (*i.e.*, Stato Limite Ultimo) le strutture sono progettate affinché il danno sismico sia concentrato in zone specifiche in grado di fornire elevata duttilità e capacità di dissipazione di energia. Nei telai sismo-resistenti (*i.e.*, Moment Resisting Frames MRFs) in acciaio, questa strategia si traduce nell’adozione di colonne e connessioni sovra-resistenti, mentre il danneggiamento è tipicamente concentrato alle estremità delle travi ([3]). Questo approccio, se da un lato consente di raggiungere i requisiti di sicurezza specificati nei codici sismici, dall’altro lato, ha l’inconveniente di causare grandi perdite economiche dirette ed indirette che non sono accettabili dal punto di vista sociale ed economico (*e.g.*, [3][5]).

Per ovviare a questi inconvenienti, negli ultimi decenni, molti lavori di ricerca, si sono concentrati sullo sviluppo di sistemi strutturali ‘sismo-resilienti’, in cui gli elementi danneggiati dal sisma possono essere facilmente sostituiti o riparati (*e.g.*, [6][7]). In quest’ottica, nei MRFs in acciaio, le tradizionali connessioni trave-colonna a completo ripristino di resistenza possono essere sostituite da collegamenti dotati di dissipatori ad attrito. Un esempio è rappresentato dagli studi e dalle applicazioni dello ‘Sliding Hinge Joint’ [8][9] che hanno dimostrato l’efficacia ed i vantaggi dei sistemi a basso danneggiamento ed hanno promosso lo sviluppo di numerosi studi successivi.

Recentemente, nell’ambito del progetto di ricerca europeo RFCS-FREEDAM (FREE from Damage) [10], sono stati condotti diversi studi sui collegamenti trave-colonna dotati di dispositivi ad attrito (*e.g.*, [11][12]). Sono state testate e studiate diverse configurazioni di dispositivi ad attrito rimovibili simmetrici, osservando una prestazione complessiva soddisfacente con una risposta isteretica stabile e prevedibile controllata regolando adeguatamente la coppia di serraggio dei bulloni precaricabili ad alta resistenza (*e.g.*, [13][14]). Tale progetto ha condotto un’indagine approfondita sul comportamento dei giunti ad attrito, tra cui un’ampia serie di test sperimentali, modellazione agli elementi finiti, simulazioni numeriche e regole analitiche, ed ha fornito inoltre regole

di progettazione e componenti standardizzati ([15][16]). Vale la pena sottolineare che, sebbene tali connessioni siano in grado di garantire un'elevata capacità di dissipazione di energia e un comportamento esente da danno, non sono dotate di capacità di ricentraggio. Per risolvere questo problema sono già disponibili tecnologie basate sull'utilizzo di cavi o barre post-tese ([18][19]). Nell'ambito del progetto RFCS-DREAMERS, la tecnologia FREEDAM [10] sarà implementata in un edificio costruito presso il Campus Universitario di Salerno, rappresentando un passo avanti nelle tecnologie disponibili per la protezione sismica dell'acciaio edifici in Europa. Gli obiettivi principali dei progetti sono: *i)* promuovere l'uso di strutture in acciaio resilienti e sostenibili nei paesi ad alto rischio sismico; *ii)* sensibilizzare sulla competitività di un edificio esente da danni e aumentare i livelli prestazionali; *iii)* proteggere le persone dai disagi derivanti dall'interruzione della funzionalità dell'edificio a seguito di gravi eventi sismici; *iv)* dimostrare la semplicità costruttiva ed i vantaggi derivanti dall'applicazione di giunti a basso danneggiamento. Il presente lavoro illustra il progetto preliminare ed i risultati delle simulazioni numeriche in OPENSEES del progetto DREAMERS. Sono eseguite analisi statiche non lineari per valutare sia il comportamento sismico globale dell'edificio che la risposta locale dei collegamenti di attrito. Inoltre, vengono eseguite analisi dinamiche incrementali (IDA) [20] al fine di valutare la risposta dinamica della struttura, oltre a tenere in conto della variabilità da record a record.

2 PROGETTO DELL'EDIFICIO E DEI COLLEGAMENTI

L'edificio pilota sarà realizzato presso l'Università degli Studi di Salerno su un lotto situato nella parte settentrionale del Campus di Fisciano (SA). L'ingresso principale è posto al piano terra. Il primo e il secondo piano sono dedicati rispettivamente a laboratorio medico e uffici. Il vano scala è concepito per essere strutturalmente indipendente dal corpo principale, ed è posto sul lato Est. La Fig. 1 (a) mostra la vista in pianta dell'edificio, che ha 3 piani, 5 campate nella direzione x e 3 campate nella direzione y. Due MRFs perimetrali sono posizionati in entrambe le direzioni principali, mentre la parte interna è composta da telai gravitazionali. Per i solai si impiega il sistema di ArcelorMittal con la soluzione composta acciaio-calcestruzzo COFRADAL 260, con travi di tipo 'cut-off' HEB300 e HEB240. I carichi e le masse applicati alla struttura sono riassunti in Tabella 1. Il progetto è eseguito secondo l'Eurocodice 8 (2005) [1] e le Norme Tecniche per le costruzioni Italiane (NTC, 2018) [2]. Per brevità, questo studio riguarda la risposta sismica dei MRFs posti in direzione y, la cui vista in elevazione è mostrata nella Fig. 1 (b).

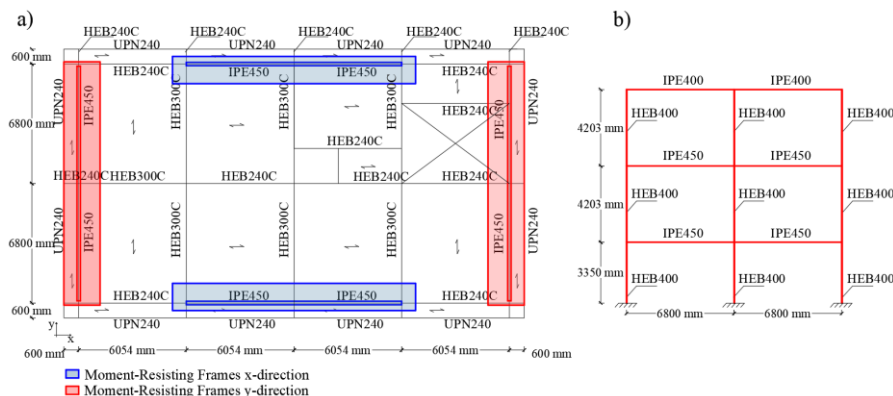


Fig. 1. Viste in pianta (a) ed in elevazione (b) dell'edificio

Per la definizione dello Stato Limite Ultimo (*i.e.*, ULS, $T_R = 712$) viene considerato lo spettro di risposta elastico di Tipo 1 con Peak Ground Acceleration (*i.e.*, PGA) pari a 0.178g, tipo di suolo B e classe III (es. $C_U = 1.5$). Il fattore di comportamento (q) utilizzato per la definizione dello spettro di progetto è assunto pari a 6, come indicato dalle NTC (2018) [2] per MRFs in classe di duttilità alta. Inoltre, le verifiche di resistenza vengono eseguite anche per l'OLS (*i.e.*, Stato Limite di Operatività) considerando un fattore di comportamento $q = 1$ e per il DLS (*i.e.*, Stato Limite di Danno) con $q = 1.5$ [2]. I profili usati per le travi sono IPE 450 per i primi due piani e IPE 400 all'ultimo piano, mentre tutte le colonne sono HEB400. L'acciaio impiegato è di tipo S355JR. Il limite di spostamento di interpiano per i requisiti DSL è assunto pari allo 0.5% [1].

Tabella 1. Carichi e masse agenti sulla struttura

	Primo livello	Secondo livello	Terzo livello
Carico permanente (kN/m^2)	5.75	5.75	4.55
Tompagni (kN/m)	4.41	4.41	-
Carico variabile (kN/m^2)	3.00	3.00	-
Massa (tons)	305.00	305.00	210.00

La Fig. 2 mostra la configurazione verticale (*i.e.*, VFC) del giunto FREEDAM trave-colonna in cui il piano del dissipatore ad attrito è parallelo all'anima della trave. Il giunto è costituito da un ringrosso bullonato alla flangia della trave inferiore e da elementi a L bullonati al ringrosso ed alla flangia della colonna. I dissipatori ad attrito sono realizzati con piatti in acciaio rivestiti con materiale spruzzato termicamente e sono collegati all'elemento ad L con bulloni precaricati ad alta resistenza. La flangia della trave superiore è collegata alla flangia della colonna con un elemento a T bullonato, dove è localizzato il Centro di Rotazione. Ulteriori informazioni sono fornite in [15]-[16]. Le principali proprietà dei dispositivi adottati sono riportate in Tabella 2. Inoltre, il progetto viene anche eseguito e verificato seguendo la Teoria del Controllo del Meccanismo Plastico (TPMC) proposta da Mazzolani e Piluso (1997) [3] per assicurare lo sviluppo di un meccanismo di collasso globale [21]-[22].

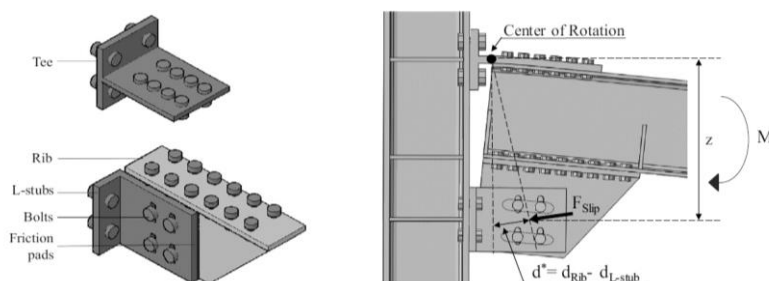


Fig. 2. Connessione FREEDAM (adattato da Tartaglia et al., 2021)

Tabella 2. Proprietà dei dispositivi FREEDAM

	Primo livello	Secondo livello	Terzo livello
Nome	FREEDAM – IPE 450/0.4	FREEDAM – IPE 450/0.4	FREEDAM – IPE 400/0.3
$F_{slip,Rd}$ [kN]	D-2A	D-2A	D1
$M_{i,Rd}$ [kNm]	345.3	345.3	244.2
Bulloni	242	242	139
Numero bulloni n_b	M20 HV 10.9	M20 HV 10.9	M16 HV 10.9
Numero superfici n_s	4	4	4
Preserraggio, F_{pd} [kN]	93.64	93.64	66.23

3 MODELLAZIONE NUMERICA

Un modello bidimensionale agli elementi finiti della struttura è sviluppato in OPENSEES [23]. Le travi sono modellate con un approccio di plasticità concentrata in cui la parte interna delle travi è modellata con *'elastic beam-column elements'*. Al contrario, le colonne sono modellate con un approccio di plasticità distribuita, con elementi a fibra *'non-linear beam-column elements'*. Travi e colonne sono modellate utilizzando il materiale *'Steel01'* [23] con resistenza allo snervamento pari a 355 MPa e un incrudimento pari a 0.2%. Per quanto riguarda il collegamento FREEDAM, la strategia di modellazione è coerente con [17]. Il dispositivo ad attrito è modellato con un elemento *'zero-length element'* caratterizzato da *'uniaxial hysteretic material'* con legge forza-spostamento trilineare simmetrica. Questo materiale adotta una forza di snervamento pari alla forza di scorrimento e un bassissimo incrudimento post-elastico. Inoltre, il modello tiene in conto delle non linearità geometriche. Gli effetti P- Δ relativi allo spostamento e alle forze assiali nelle colonne gravitazionali sono considerati con una *'leaning column'* [24].

4 ANALISI PUSHOVER

Sono state eseguite analisi statiche non lineari con una distribuzione delle forze laterali affine al primo modo di vibrazione. I risultati sono mostrati nella Fig. 3 (a), che illustra il taglio alla base (V_{base}) del telaio rispetto allo spostamento dell'ultimo piano (δ_{top}). Vale la pena sottolineare che, grazie alla procedura di progetto, le strutture sono caratterizzate da una domanda inelastica omogenea a tutti i piani. Inoltre, grazie alla procedura della TPMC, la curva del meccanismo di modalità di rottura globale caratterizza la condizione di collasso della struttura [3]. Inoltre, le analisi pushover forniscono anche informazioni preliminari sulla gerarchia di attivazione dei diversi meccanismi all'interno della struttura. Ad esempio, la Fig. 3 (b) mostra la curva momento-rotazione di un giunto FREEDAM posto al secondo piano includendo l'indicazione dei punti corrispondenti ai diversi stati limite. Come previsto, le connessioni FREEDAM non si attivano all'OLS, mentre iniziano a scorrere al DLS, come previsto dal progetto.

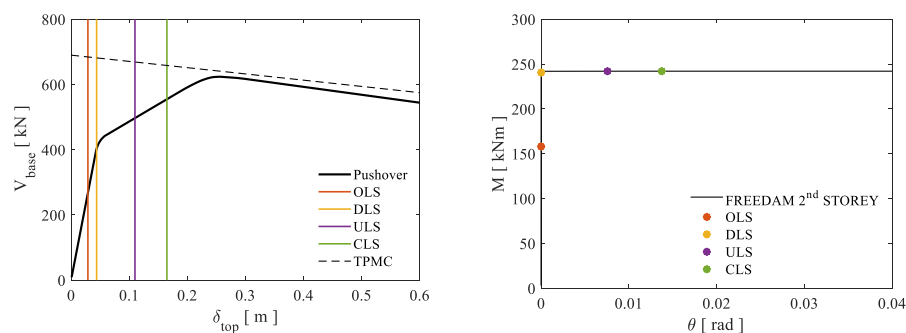
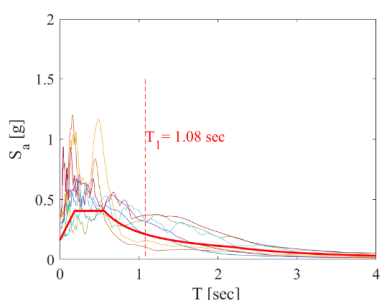


Fig. 3. Risultati dell'analisi statica non-lineare: (a) Curva Pushover; (b) Legame momento-rotazione di una connessione FREEDAM al secondo piano

5 ANALISI DINAMICHE INCREMENTALI

Al fine di analizzare e valutare la risposta sismica del telaio, sono state eseguite analisi dinamiche non-lineari [20] considerando una serie di registrazioni accelerometriche scalate per intensità crescenti. L'accelerazione spettrale corrispondente al primo modo di vibrare della struttura ($S_a(T_1)$) viene utilizzata come misura dell'intensità sismica (IM) dove $T_1 = 1,08$ sec. Un set di 7 accelero-

grammi naturali è stato selezionato dal Database ITALIANO [25] con i parametri riassunti in **Fig. 4**. I record sono stati selezionati in modo tale che il loro spettro elastico medio sia mantenuto tra il 90% e il 130% dello spettro di progetto. I parametri ingegneristici di domanda (EDP) [i.e., gli spostamenti di interpiano massimi (θ_{s-max}) e gli spostamenti di interpiano residui (θ_{s-res})] sono registrati per studiare la risposta sismica del telaio tenendo conto dell'influenza della variabilità da record a record. In tutte le figure sono evidenziate le curve medie come sintesi dei valori di domanda per entrambe le grandezze, mentre le singole curve IDA sono mostrate in grigio.



Parametri di selezione

Magnitudo M_w inclusa nel range da 5 a 7
 Distanza epicentrale $R < 30$ km
 Suolo di tipo B
 Spettro-compatibilità tra $0.2 T_1$ e $2 T_1$

Fig. 4. Spettri degli accelerogrammi selezionati

La Fig. 5 mostra gli spostamenti di interpiano massimi θ_{s-max} e residui θ_{s-res} rispetto all'IM per tutti i piani. Per valutare la capacità ricentrante dell'edificio si considerano due limiti: il limite di deriva dello 0.5%, che è convenzionalmente associato alla riparabilità dell'edificio [3] e il limite dello 0.2%, che assicura che nessun riallineamento strutturale è necessario [26]. È possibile osservare che il telaio subisce θ_{s-res} inferiori a $\theta_{s-res-Limit} = 0.5\%$ all'ULS e al CLS per tutti i piani. Al contrario, il limite $\theta_{s-res-Limit} = 0.2\%$ non è sempre soddisfatto.

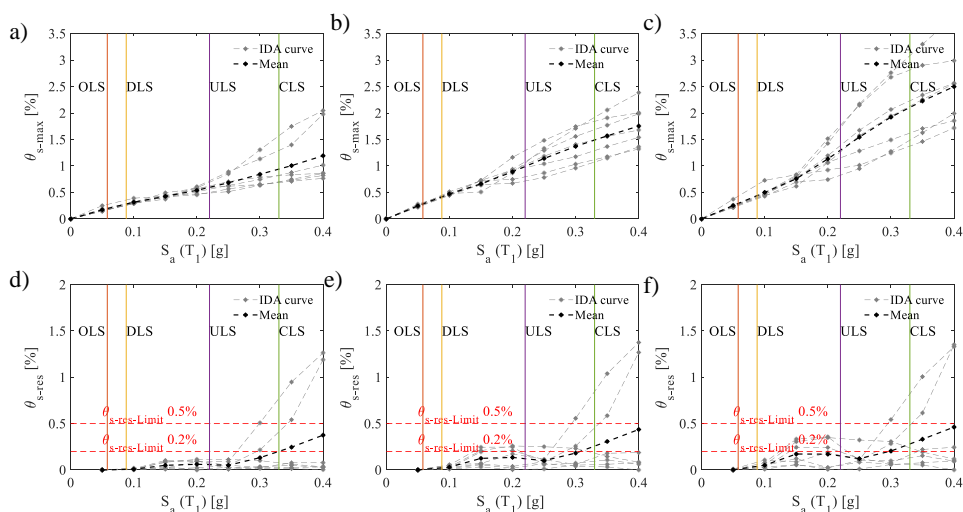


Fig. 5. EDPs globali: Spostamenti di interpiano massimi per il (a) primo; (b) secondo; e (c) terzo piano. Spostamenti di interpiano residui per (d) primo; (e) secondo; e (f) terzo piano

Inoltre, il comportamento locale viene studiato anche monitorando due EDP locali (ovvero, il momento massimo - M_{max} - e la rotazione massima - θ_{max} - delle connessioni FREEDAM). La Fig. 6 mostra il momento massimo raggiunto dai collegamenti posti rispettivamente al primo, secondo e terzo piano. Come previsto dal progetto, lo scorrimento della connessione si ottiene dopo il DLS. Questo comportamento è confermato osservando la rotazione massima (θ_{max}) dei giunti, mostrata in Fig. 6. Inoltre, per un singolo record, la Fig. 7 mostra il comportamento isteretico delle sezioni inferiori delle colonne del primo piano della struttura all'intensità CLS. Si osserva che le colonne di base subiscono grandi deformazioni plastiche e danni, portando così alla necessità di misure di riparazione dopo forti terremoti sia nell'USL che nel CLS. Si valuta quindi la possibilità di inserire nella struttura un sistema, localizzato nelle colonne di base, che faciliti il ricentraggio, nonché la protezione delle colonne del primo piano dall'entrata in campo plastico, evitando così danni non riparabili, anche in caso di eventi sismici di elevata intensità.

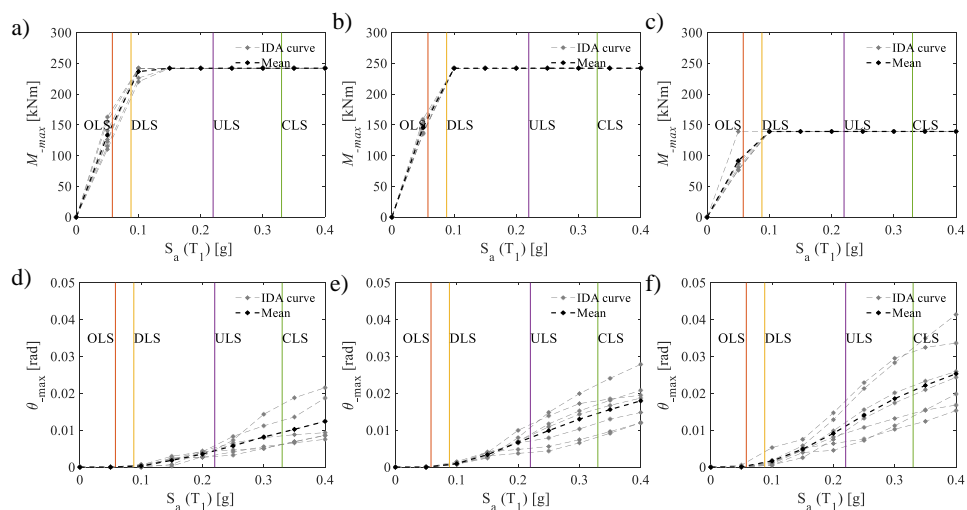


Fig. 6. EDPs locali: Massimo momento del giunto FREEDAM al (a) primo; (b) secondo; e (c) terzo piano. Massima rotazione del giunto FREEDAM al (d) primo; (e) secondo; e (f) terzo piano

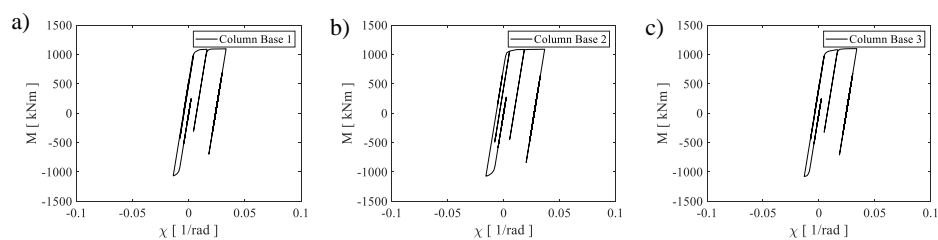


Fig. 7. Legame momento-curvatura nella sezione inferiore delle tre colonne del primo piano per un unico record scalato al CLS

CONCLUSIONI

Il presente lavoro fornisce informazioni preliminari sulla progettazione e sulle simulazioni numeriche in OPENSEES di un edificio pilota in acciaio sismo-resiliente dotato delle connessioni FREEDAM. Sono state eseguite analisi statiche non lineari per valutare sia il comportamento globale dell'edificio che la risposta locale delle connessioni. Inoltre, sono condotte analisi dinamiche incremental (IDA) per valutare la risposta dinamica della struttura tenendo conto della variabilità da record a record. Pertanto, si possono trarre alcune conclusioni preliminari: *i*) i risultati delle analisi statiche e dinamiche non lineari mostrano l'adeguatezza delle ipotesi progettuali e la coerenza della metodologia progettuale; *ii*) I risultati delle analisi statiche non lineari forniscono informazioni preliminari sulla gerarchia di attivazione dei diversi meccanismi all'interno della struttura; *iii*) Il telaio subisce spostamenti di interpiano residui inferiori al limite dello 0,5% per tutti i piani soggetti alle intensità sismiche di interesse, in termini di risposta media. Non è soddisfatto, invece, il limite dello 0,2%; *iv*) Come previsto dalla procedura di progetto, i collegamenti FREEDAM non si attivano all' OLS ed iniziano a scorrere al DLS; *v*) Le colonne di base subiscono deformazioni plastiche e danneggiamento, portando così alla necessità di misure di riparazione dopo forti terremoti. Pertanto, puntando al raggiungimento di un'adeguata resilienza strutturale, si valuta anche la possibilità di inserire un sistema localizzato nelle colonne di base, che faciliti il ricentraggio, nonché la protezione delle colonne dall'entrata in campo plastico, evitando così danni non riparabili, anche in caso di eventi sismici di elevata intensità.

REFERENCES

- [1] CEN, EN 1998-3, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. CEN, European Committee for Standardization, 2005.
- [2] MIT Minister of infrastructures and transport, "NTC 2018 New technical codes for constructions" – M.D. 17/01/18, Official Gazette of the Italian Republic n. 8 published on 2018, January 17th, Rome, Italy, 2018.
- [3] Mazzolani, F.M., Piluso, V., Plastic Design of Seismic resistant Steel Frames. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*; 26, 167-191, 1997
- [4] McCormick, J., Aburano, H., Nakashima, M, Permissible residual deformation levels for building structures considering both safety and human elements, 14th World Conf. Earthq. Eng. 12-17 Oct 2008, Beijing, China
- [5] Freddi, F., Novelli, V., Gentile, R., Velu, E., Andonov, A., Andreev, S., Greco, F., Zhuleku, E., Observations from the 26th November 2019 Albania Earthquake: the Earthquake Engineering Field Investigation Team mission. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 2013-2044, 2021
- [6] Chancellor, N.B., Eartherton, M.R., Roke, D.A., Akbas, T., Self-Centering Seismic Lateral Force Resisting Systems: High Performance Structures for the City of Tomorrow, *Buildings*, no. 4, 520-548., 2014
- [7] Freddi, F., Galasso, C., Cremen, G., Dall'Asta, A., Di Sarno, L., Giaralis, A., Gutiérrez-Urzúa, L.F., Málaga-Chuquitaype C., Mitoulis, S., Petrone, Sextos, C.A., Sousa, L., Tarbali, K., Tubaldi, E., Wardman, J., Woo, G., Innovations in Earthquake Risk Reduction for Resilience: Recent Advances and Challenges, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 60, 102267, 2021
- [8] Butterworth, J. W., Clifton, G. C., Performance of Hierarchical Friction Dissipating Joints in Moment Resisting Steel Frame. 12th World Conference on Earthquake Engineering, 718, 2000

- [9] Yang, T., Popov, E., Experimental and analytical studies of steel connections and energy dissipators, Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, 1995
- [10] FREEDAM: FREE from DAMage steel connections, 2015-2018, Final report, Fund for Coal and Steel Grant Agreement No. RFSR-CT-2015-00022.
- [11] Cavallaro, G.F., Francavilla, A., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., Experimental behaviour of innovative thermal spray coating materials for FREEDAM joint. *Composites Part B*, 115, 289-299, 2017
- [12] Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., Experimental analysis of beam-to-column joints equipped with sprayed aluminium friction dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, 146, 33-48, 2018
- [13] Latour, M., D'Aniello, M., Zimbru, M., Rizzano, G., Piluso, V., Landolfo, R., Removable friction dampers for low-damage steel beam-to-column joints. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, 66-81, 2018
- [14] Piluso, V., 2018. Smart Connections for Seismic-Resistant Frames: a Brief Overview. *Costruzioni Metalliche*, Vol. 3 (May-June).
- [15] Francavilla, A., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., Design criteria for beam-to-column connections equipped with friction devices, *Journal of Constructional Steel Research*, 172, 106240, 2020
- [16] Tartaglia, R., D'Aniello, M., Campiche, A., Latour, M., Symmetric friction dampers in beam-to-column joints for low-damage steel MRFs, *Journal of Constructional Steel Research*, 184, 106791, 2021
- [17] Di Benedetto, S., Francavilla, A. B., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., Experimental response of a large-scale two-storey steel building equipped with low-yielding friction joints. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 152, 107022, 2021
- [18] Elettore, E., Freddi, F., Latour, M., Rizzano, G., Design and analysis of a seismic resilient steel moment resisting frame equipped with damage free self-centring column bases, *Journal of Constructional Steel Research*, 179, 106543, 2021
- [19] Elettore, E., Lettieri, A., Freddi, F., Latour, M., Rizzano, G., Performance-based assessment of seismic-resilient steel moment resisting frames equipped with innovative CB connections. *Structures*, 32, 1646-1664, 2021
- [20] Vamvatsikos, D., Cornell, C.A., Incremental Dynamic Analysis, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3, 491-514, 2002
- [21] Montuori, R., Nastri, E., Piluso, V., Advances in theory of plastic mechanism control: Closed form solution for MR-Frames. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, no. 44(7), 1035-1054, 2015
- [22] Nastri, E., D'Aniello, M., Zimbru, M., Streppone, S., Landolfo, R., Montuori, R., Piluso, V., Seismic response of steel Moment Resisting Frames equipped with friction beam-to-column joints, 119, 144-157, 2019
- [23] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L, 2009. OPENSEES: Open System for earthquake engineering simulation, Pacific Earthquake Engineering Research Centre (PEER), 2009, Univ. of California, Berkeley, CA
- [24] Ahmadi O., Ricles, J. M., Sause, R., Modelling and seismic collapse resistance study of a steel SC-MRF. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113, 324-338, 2018
- [25] Iervolino, I., Galasso, C., Cosenza, E., 2010, REXEL: Computer aided record selection for code-based seismic structural analysis, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8, 339-362
- [26] FEMA P58-1, 2012. Seismic performance assessment of buildings. Volume 1-Methodology. Applied Technology Council, Redwood City, CA.

KEYWORDS

Strutture in acciaio, Edificio pilota, Connessioni a basso danneggiamento, Dispositivi ad attrito, Resilienza sismica.