

**VALUTAZIONE DELL'EFFETTO DELLE SEQUENZE
SISMICHE SU CONTROVENTI IN ACCIAIO A DIAGONALE
TESA ATTIVA IN EDIFICI INDUSTRIALI MONOPIANO**

**EVALUATION OF THE EFFECT OF SEISMIC SEQUENCES ON
STEEL BRACING WITH ACTIVE TENSILE DIAGONAL IN
SINGLE-STOREY INDUSTRIAL BUILDINGS**

Luca Bomben, Marco Fasan, Claudio Amadio
Università degli Studi di Trieste
Dipartimento di Ingegneria e Architettura
Trieste, Italy

luca.bomben@phd.units.it, mfasan@units.it, amadio@units.it

ABSTRACT

This work concerns about the study of the effect of the seismic sequences on steel mono-storey industrial buildings equipped with X-CBFs, with the aim to evaluate a code change to adequately consider this issue. Indeed, current technical regulations do not take into account this phenomenon, thus the structures are designed only to withstand a single main-shock, without considering the possible accumulation of damage due to the after-shocks. In this work it is instead shown how this effect has to be properly considered and evaluated. First, a mono-storey industrial building is analysed as preliminary case study. Fragility curves are built for both sequences and single main events, thus obtaining an important comparison. Then the study focuses on a single X-CBF, validated through an experimental test from literature. The calibrated system is subjected to both seismic sequences and corresponding mainshocks. Analyses are carried out also by varying brace profiles. The obtained results show a significant influence of the seismic sequences on the increase of the ductility request of the structure. Therefore, with the aim to properly represent the effect of the sequences, it is considered necessary to require a reduction of the available behavior factor, providing a precautionary estimate. This operation wants to give a first preliminary estimate of the increase of the seismic risk only on the seismic vulnerability side of this kind of structures.

SOMMARIO

Il presente lavoro tratta lo studio dell'effetto delle sequenze sismiche su edifici industriali monopiano in acciaio con controventi concentrici a croce di Sant'Andrea, allo scopo di stimare eventuali modifiche normative necessarie a tenere in debito conto questo problema. Il fenomeno

delle sequenze sismiche, infatti, non è considerato dalle vigenti normative tecniche, per cui le strutture vengono progettate per resistere ad un singolo evento sismico, senza tenere in conto il possibile accumulo di danneggiamento causato dagli aftershocks. In questo lavoro si dimostra invece come questo dovrebbe essere adeguatamente considerato e valutato. Inizialmente viene analizzato un caso studio preliminare, dato da un edificio industriale monopiano controventato con controventi ad X. Per questo vengono costruite curve di fragilità sia per sequenze che per singoli mainshock, ottenendo un importante confronto. Successivamente lo studio si concentra sul comportamento del solo controvento concentrico ad X, considerando un modello numerico validato attraverso prove sperimentali da letteratura. Il sistema calibrato è assoggettato sia a sequenze sismiche che ai corrispondenti mainshock. Le analisi sono condotte considerando diversi profili per la diagonale di controvento. I risultati finali mostrano una significativa influenza delle sequenze in termini di incremento di richiesta di duttilità alla struttura. Conseguentemente, in modo tale da rappresentare l'effetto delle sequenze, si ritiene necessario imporre una riduzione del fattore di struttura disponibile, fornendo delle prime stime cautelative. Tale operazione fornisce una valutazione preliminare dell'incremento di rischio sismico solo dal punto di vista della vulnerabilità sismica di questa particolare tipologia strutturale.

1 INTRODUZIONE

Come noto, gli eventi sismici non sono in generale eventi isolati. Spesso, infatti, possono essere seguiti da aftershocks, con intensità anche comparabile a quella del mainshock. Ruiz Garcia in [3] ha sottolineato che, mentre il mainshock sia sempre da considerare come l'evento con magnitudo massima, in un determinato sito un aftershock può essere caratterizzato da PGA anche superiore a quella del mainshock. Questo può condurre ad un progressivo accumulo di danneggiamento, se il tempo che intercorre tra gli eventi non è sufficiente a permettere la riparazione della struttura.

Le vigenti normative tecniche [1], [2] non considerano il possibile accumulo di danneggiamento in presenza di eventi ripetuti. L'obiettivo del lavoro è dunque quello di valutare quali modifiche normative possano essere adottate per tenere in conto di questa problematica su strutture controventate con controventi concentrici ad X.

Diversi studi hanno recentemente investigato sui possibili effetti negativi delle sequenze sismiche sulle strutture in acciaio. In [4] sono stati analizzati gli effetti di eventi ripetuti sulla risposta di sistemi SDOF con comportamento non-lineare e su telai con un comportamento prevalente a flessione; in esso si è sottolineato come il ripetersi in un tempo sufficientemente breve di eventi sismici possa comportare un significativo accumulo di danno ed una conseguente riduzione del fattore di struttura disponibile. In [5], per tenere in conto degli effetti negativi del fenomeno, è stato proposto uno spettro di risposta a duttilità costante per sistemi SDOF assoggettati a eventi multipli, lontani e vicini alla sorgente, esaminando sequenze artificiali generate da combinazioni di reali eventi sismici. In [6] è stata valutata la risposta di sistemi SDOF e di reali strutture MDOF sottoposte a sequenze: telai a flessione con giunti rigidi, telai a flessione con giunti semi-rigidi e telai controventati. È stato inoltre proposto un criterio di progetto semplificato volto al controllo del danneggiamento dei telai in acciaio, che consiste nell'esecuzione di un'analisi elastica utilizzando un fattore di struttura ridotto rispetto a quello utilizzato per la progettazione in caso di singolo evento. Ruiz Garcia et al. in [7] hanno investigato sull'influenza degli aftershocks in termini di aumento di drift di interpiano su telai a flessione esistenti, evidenziando l'importanza del fenomeno su tali strutture. In [8] sono stati analizzati sistemi SDOF caratterizzati da diversi comportamenti isteretici; è stato in particolare sottolineato come le sequenze dovrebbero essere adeguatamente considerate nelle regioni ad elevata sismicità, quelle caratterizzate da una probabilità di accadimento della sequenza superiore. Nello stesso articolo, per mitigare l'aumento di vulnerabilità in seguito ad eventi multipli, è stato proposto l'utilizzo di dissipatori viscosi oppure, anche qui, la riduzione del fattore di struttura. In [9] lo studio dell'effetto delle sequenze si è

focalizzato in particolare sui sistemi controventati, analizzando sia sistemi MDOF che SDOF equivalenti.

Così come la presenza di eventi ripetuti comporta una maggiore probabilità di accumulo del danno su una struttura, e dunque un incremento della sua vulnerabilità/fragilità, allo stesso modo si ha un aumento della probabilità di superamento di una certa soglia di accelerazione spettrale o di PGA. In tal senso, dunque, le sequenze sismiche influenzano non solo la vulnerabilità ma anche la pericolosità sismica. Diversi studi, come [10] e [11], sono rivolti alla valutazione dell'effetto delle sequenze in termini di incremento della pericolosità sismica.

Nel presente lavoro viene approfondito il problema relativo all'influenza delle sequenze sismiche sull'incremento di vulnerabilità di strutture controventate dotate di controventi concentrici a croce di Sant'Andrea. Nella Sezione 2 viene analizzato un tipico edificio monopiano industriale assoggettato a sequenze sismiche; sono costruite le curve di fragilità sia per i controventi che per i telai trasversali, allo scopo di identificare l'elemento più vulnerabile della struttura. Successivamente, nella Sezione 3, lo studio si concentra sul comportamento del singolo controvento concentrico ad X, con lo scopo di valutare il massimo possibile effetto delle sequenze. Le analisi vengono condotte su un modello numerico opportunamente validato attraverso prove sperimentali da letteratura, considerando diversi profili di diagonale. Viene proposta una adeguata riduzione del fattore di struttura disponibile, rappresentativo dell'effetto delle sequenze sismiche. Si sottolinea come tale approccio sia mirato alla sola valutazione dell'incremento di vulnerabilità sismica, mentre l'influenza sulla pericolosità sismica non viene qui considerata ed è rinviata ad altri studi.

2 CASO STUDIO PRELIMINARE

Come caso studio preliminare viene analizzato l'edificio industriale monopiano, controventato con controventi concentrici ad X, progettato da Scozzese et al. [12], [13] in accordo alla normativa italiana [14] ed ubicato a L'Aquila (**Fig. 1**). La struttura è modellata mediante il software Seismostruct [15], che utilizza un approccio a fibre per la modellazione del comportamento inelastico degli elementi, secondo una formulazione agli elementi finiti basata sulle forze. Per rappresentare il legame ciclico uniaassiale sforzo-deformazione dell'acciaio viene adottato il modello di Menegotto-Pinto [16].

Il modello implementato è validato attraverso la conduzione di una serie di analisi pushover sull'intera struttura e sul confronto tra sforzo assiale critico da calcolo analitico (in accordo alle relazioni da Eurocodice 8) e di output del modello numerico.

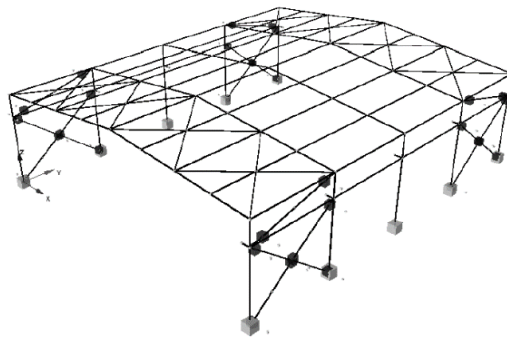


Fig. 1. Schema strutturale del caso studio preliminare.

Il sistema validato è dunque assoggettato ad analisi dinamiche non lineari, attraverso l'applicazione sia di sequenze sismiche che del corrispondente mainshock. Vengono selezionate una serie di 40 sequenze significative naturali italiane e giapponesi. Gli eventi costituenti le sequenze sono ottenuti attraverso l'Engineering Strong Motion database (ESM- INGV) [17] per gli eventi italiani e lo Strong-Motion Seismograph Networks [18] per i giapponesi. Le sequenze sono composte dai segnali registrati lasciando 30 secondi di pausa tra essi, con l'obiettivo di bloccare completamente la struttura prima di assoggettarla ad un nuovo evento della sequenza. A titolo di esempio si riporta la caratterizzazione della sequenza di Friuli-Forgaria Cornino è data in **Tabella 1** e in **Fig. 2**. In totale vengono analizzate 40 sequenze sismiche, da comparare con i rispettivi 40 mainshocks.

Tabella 1. Eventi componenti la sequenza sismica di Friuli – Forgaria Cornino.

Sequenza sismica	Stazione	Data	Ora	M	Direzione	PGA	Distanza epicentrale	Profondità	Durata
		[yyyymmdd]	[hhmmss]			[cm/s ²]	[km]	[km]	[s]
Friuli – Forgaria Cornino	FRC	19760511	224400	5	HNE	300.26 2	4.6	12.3	18.09
	FRC	19760611	171640		HNE	85.740 14	2.8	9.9	13.02
	FRC	19760911	1631105.2		HNE	109.74 31	16.6	9.8	15.04
	FRC	19760911	1635015.6		HNE	229.36 3	18.6	4.3	18.56
	FRC	19760915	31518	5.9	HNE	210.12 53	17.4	6.8	21.99 5
	FRC	19760915	92118	6	HNE	326.84 8	16.2	11.3	24.59 5

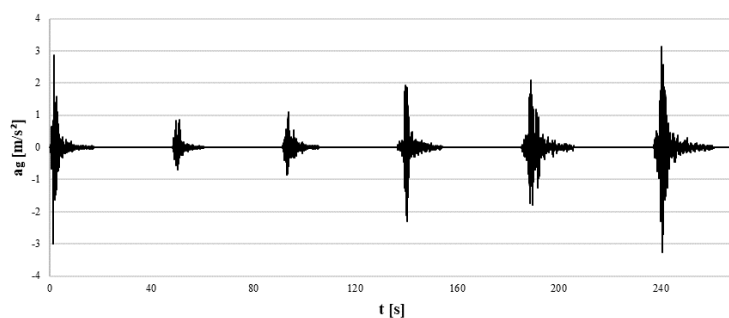


Fig. 2. Accelerazione al suolo in funzione del tempo per la sequenza naturale di Friuli– Forgaria Cornino.

Successivamente vengono costruite le curve di fragilità, con l'obiettivo di valutare la vulnerabilità della struttura. In generale, una curva di fragilità definisce la probabilità di superamento di un certo livello di danno (definito da uno stato limite) al variare di un parametro di misura dell'intensità sismica (IM – Intensity Measure). In questo lavoro si adotta la metodologia "Cloud Analysis" [19]–

[22], considerando la PGA come IM e il drift di interpiano come “Engineering Demand Parameter” (EDP). Come valori limite di drift si considera quanto riportato nella normativa americana [23], secondo gli stati limite di “limited damage” (DL), “severe damage” (SD) e “near collapse” (NC). In totale vengono condotte 160 analisi dinamiche time-history, considerando per ogni segnale due diverse combinazioni delle componenti orizzontali dell’azione sismica. Le curve di fragilità vengono costruite distinguendo tra la risposta del controvento e quella dei portali trasversali. I risultati finali, forniti in Fig. 3, mostrano come in generale le curve di fragilità dovute alle sequenze siano a sinistra rispetto a quelle dovute ai singoli mainshocks, indicando dunque un certo accumulo di danno in seguito alla successione di eventi. Tuttavia, l’incremento di probabilità di superamento degli stati limite risulta piuttosto limitato e intorno ad un valore del 6% per lo stato limite NC, con valori inferiori per gli altri stati limite. In particolare, si osserva come l’effetto delle sequenze sia più rilevante per i controventi ad X che per i telai trasversali, per i quali gli effetti sono ancor più ridotti.

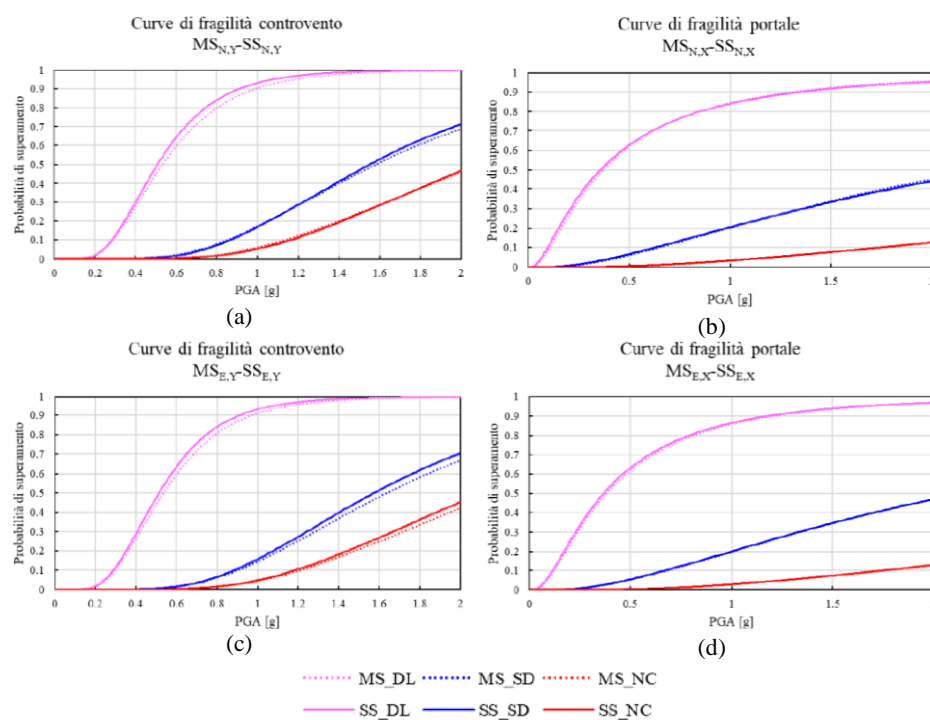


Fig. 3. Curve di fragilità con differenziazione tra controventi ad X e portali trasversali, con PGA assunta come IM, sia per la valutazione del solo mainshock (MS) che dell’intera sequenza sismica (SS) e per tutti e tre gli stati limite indagati (DL: limited damage; SD: severe damage; NC: near collapse): (a) caso con componente di accelerazione Nord-Sud (N) applicata in direzione longitudinale (Y) sul controvento; (b) caso con componente di accelerazione Nord-Sud (N) applicata in direzione trasversale (X) sul telaio trasversale; (c) caso con componente di accelerazione Est-Ovest (E) applicata in direzione longitudinale (Y) sul controvento; (d) caso con componente di accelerazione Est-Ovest (E) applicata in direzione trasversale (X) sul telaio trasversale.

2 ANALISI SUL SINGOLO CONTROVENTO

In questa sezione vengono studiati gli effetti delle sequenze sismiche su singoli controventi ad X. In particolare si considera il modello “BC0” testato sperimentalmente da Wakabayashi [24] (le caratteristiche geometriche dei giunti, non descritte da Wakabayashi, sono desunte da [25]). Il modello numerico è implementato in Seismostruct [15]. Le imperfezioni geometriche iniziali sono state prese pari a $L/1000$ (valore suggerito dalla relazione di Dicleli e Calik [26]) e applicate nel piano di controvento nel punto di mezzeria di ogni semi-diagonale. In **Fig. 4** viene mostrata la grande corrispondenza tra cicli taglio-spostamento sperimentale e numerico, garantendo la validazione del modello di calcolo. Successivamente, allo scopo di valutare un sistema caratterizzato da più elevate masse sismiche, vengono applicate due masse concentrate pari a 70 tonnellate ciascuna, nei due nodi di sommità (**Fig. 5**). Tali valori corrisponderebbero alle masse applicate ai controventi ad X appartenenti alla struttura industriale monopiano analizzata in Sezione 2 ma con un maggior numero di portali trasversali, 13 anziché i 5 presenti nel caso studio preliminare.

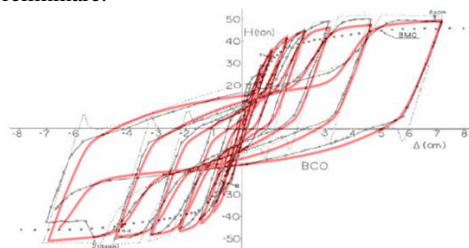


Fig. 4. Confronto tra i cicli taglio-spostamento ottenuti da modello numerico (in rosso) e da prova sperimentale (curva BC0 in tratto continuo; immagine adattata da [24])

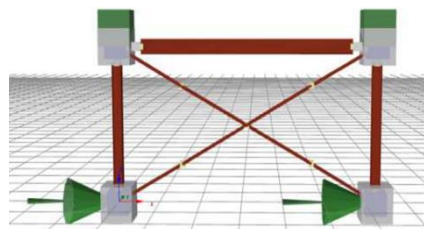


Fig. 5. Modello calibrato con applicazione di masse concentrate in sommità.

Oltre alla configurazione data da modello di prova sperimentale, vengono analizzati altri due controventi con diversi profili di diagonale, caratterizzati da un diverso valore di snellezza normalizzata $\bar{\lambda}$. Si valutano in particolare i seguenti tre profili:

- RHS 120x40x4 ($\bar{\lambda} = 1,47$)
- H100x50x4x6 ($\bar{\lambda} = 2,12$; profilo utilizzato nel modello BC0 di Wakabayashi)
- R50x20 ($\bar{\lambda} = 4,21$)

L'effetto delle sequenze sismiche viene anche qui valutato, come fatto per il caso studio preliminare, andando a confrontare le richieste di spostamento da singoli mainshock e da intere sequenze. A titolo esemplificativo si riportano alcuni risultati ottenuti con la sequenza di Fergaria Cornino (caratterizzata in **Tabella 1** ed in **Fig. 2**). Tale sequenza costituisce un tipico caso di eventi ripetuti di intensità comparabile. In particolare, questa sequenza è confrontata con il suo sesto evento, caratterizzato dalla massima accelerazione spettrale in corrispondenza dei periodi di vibrazione principale delle tre diverse strutture analizzate. I cicli taglio-spostamento da sequenza e da singolo mainshock sono riportati in **Fig. 6**, per ogni controvento valutato. L'incremento di richiesta di duttilità viene valutato misurando, sia per la sequenza che per il mainshock, le seguenti quantità:

- $\delta_{\max,+}$: massimo spostamento in direzione positiva;
- $\delta_{\min,-}$: massimo spostamento in direzione negativa;
- δ_{\max} : massimo spostamento in valore assoluto;
- Δ : massima escursione di spostamento (differenza tra massimo positivo e minimo negativo).

In **Tabella 2** si riportano tali valori per sequenza e per mainshock, insieme al rapporto tra i due. Si può osservare come essi varino significativamente, in funzione della snellezza considerata e del parametro di confronto considerato. Si osserva infatti come tale sequenza abbia un effetto particolarmente significativo sulla struttura con diagonale più tozza (quella con snellezza normalizzata pari a 1.47), con rapporti di spostamento superiori ad 1. Viceversa, per i controventi con diagonali più snelle si riscontrano rapporti più bassi.

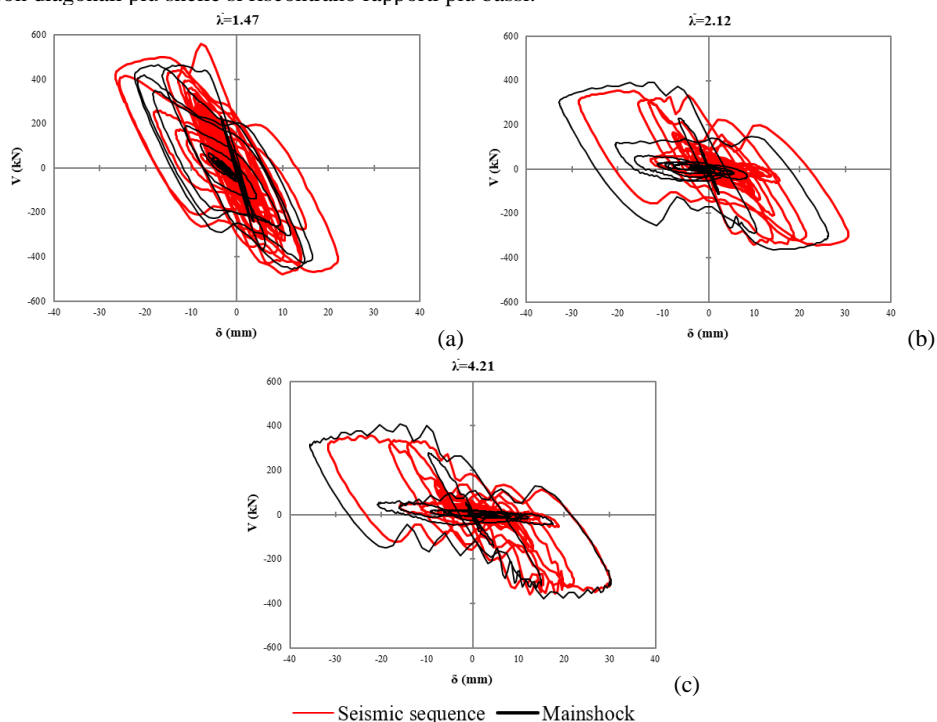


Fig. 6. Confronto tra i cicli dinamici da sequenza sismica e da Mainshock per il caso di sequenza di Friuli–Forgaria Cornino e per ogni snellezza normalizzata: 1.47 (a); 2.12 (b); 4.21 (c).

Tabella 2. Richieste di spostamento per le analisi condotte con gli accelerogrammi relativi alla sequenza sismica di Friuli-Forgaria Cornino; SS = Sequenza sismica; MS = Mainshock; SS/MS = rapporto tra i due; le misure sono in millimetri.

$\bar{\lambda}$		$\delta_{\max,+}$	$\delta_{\min,-}$	δ_{\max}	Δ
1.47	SS	22.2	-27.3	27.3	49.5
	MS	16.6	-23.1	23.1	39.7
	SS/MS	1.34	1.18	1.18	1.25
2.12	SS	30.7	-29.2	30.7	59.9
	MS	26.2	-33.6	33.6	59.8
	SS/MS	1.17	0.87	0.91	1.00
4.21	SS	30.2	-32.4	32.4	62.6
	MS	30.2	-36.3	36.3	66.5
	SS/MS	1.00	0.89	0.89	0.94

Vengono dunque analizzate in totale 40 sequenze sismiche per ogni gruppo di analisi, determinando gli incrementi di richiesta di duttilità per le diverse strutture. Si considerano degli incrementi medi dati dai seguenti indicatori M1 ed M2, relativi ad ogni j-esimo gruppo di analisi (corrispondenti alle tre diverse strutture, con snellezze normalizzate pari a 1.47, 2.12 e 4.21):

$$M1_j = \frac{\sum_i^{n^{\text{seq}j}} \delta_{\text{seq,max},i} / \delta_{\text{main,max},i}}{n^{\text{seq}j}} \quad (1)$$

$$M2_j = \frac{\sum_i^{n^{\text{seq}j}} \Delta_{\text{seq},i} / \Delta_{\text{main},i}}{n^{\text{seq}j}} \quad (2)$$

nei quali i rapporti sono quelli precedentemente definiti, riferibili alle sequenze sismiche (“seq”) o ai singoli mainshock (“main”): M1 viene calcolato considerando i rapporti tra spostamenti massimi in valore assoluto mentre M2 valutando le massime escursioni di spostamento. Tali indicatori sono forniti in **Tabella 3** per ogni gruppo di analisi insieme alle rispettive deviazioni standard. Vengono inoltre forniti i valori finali medi, ottenuti mediando i risultati ottenuti con le diverse snellezze normalizzate.

Tabella 3. Incrementi di richiesta di spostamento per i diversi gruppi di analisi e indicatori medi finali.

Aumento medio di richiesta di spostamento				
Gruppo di analisi	M1	M1+ σ_{M1}	M2	M2+ σ_{M2}
$\bar{\lambda}=1.47$	4.71%	18.11%	6.45%	19.86%
$\bar{\lambda}=2.12$	1.78%	11.34%	3.77%	16.68%
$\bar{\lambda}=4.21$	0.97%	5.20%	3.10%	14.70%
Medie	2.49%	11.55%	4.44%	17.08%

A titolo esemplificativo si riportano in **Fig. 7** le curve di frequenza cumulata dei due rapporti di spostamento insieme agli indicatori M_i and $M_i+\sigma_i$, per il caso particolare di snellezza normalizzata pari a 1.47; si può osservare chiaramente come tali valori medi siano superiori ad 1 e dunque come ci sia un incremento di richiesta di duttilità passando da singoli mainshock a sequenze.

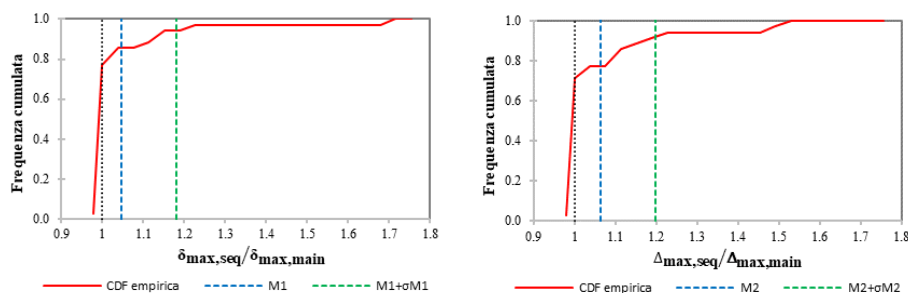


Fig. 7. Curve di frequenza cumulata, medie M_i e medie sommate a deviazioni standard $M_i+\sigma_i$ per i due rapporti $\delta_{\text{max,seq}}/\delta_{\text{max,main}}$ e $\Delta_{\text{max,seq}}/\Delta_{\text{max,main}}$, per il caso di diagonale con snellezza normalizzata pari a 1.47.

Generalmente, valutando i risultati di tutte le sequenze sismiche analizzate, si può osservare come le sequenze che conducono a significativi incrementi di richiesta di duttilità siano quelle caratterizzate da aftershocks con intensità paragonabile a quella del mainshock. Per le altre gli effetti riscontrati sono risultati minimi. L'effetto è inoltre variabile in base all'indicatore considerato e alla struttura analizzata. Si osserva infatti un incremento di richiesta passando da alta

a bassa snellezza normalizzata delle diagonali; ciò è dovuto probabilmente ai periodi dei modi principali di vibrazione, più alti per snellezze alte e che conducono ad accelerazioni spettrali inferiori.

CONCLUSIONI

Nel lavoro presentato sono stati analizzati gli effetti delle sequenze sismiche sulla vulnerabilità di sistemi controventati industriali monopiano con controventi concentrici ad X. Dapprima, è stata analizzata un'intera struttura industriale monopiano come caso studio preliminare, in modo tale da identificare la principale vulnerabilità di questa tipologia strutturale. Successivamente lo studio si è concentrato sul comportamento del singolo controvento ad X, attraverso l'implementazione di un modello numerico calibrato su prove cicliche sperimentali. Sono state valutate tre diverse strutture controventanti, caratterizzate da diversi profili delle diagonali. In modo tale da fornire una stima dell'incremento di richiesta di duttilità, sono stati definiti degli indicatori medi M1 e M2, funzioni degli spostamenti massimi richiesti da singolo mainshock e da intera sequenza sismica. I risultati complessivi delle analisi hanno mostrato in generale grande variabilità in base alle caratteristiche delle sequenze, alla snellezza della diagonale di controvento ed all'indicatore considerato. I valori medi finali, sommati alle deviazioni standard con l'obiettivo di stimare il massimo effetto possibile delle sequenze, sono risultati pari a 11.55% e 17.08%, per M1 ed M2 rispettivamente (**Tabella 3**). Dal momento che una maggiore richiesta di duttilità corrisponde in generale ad un minore fattore di struttura, viene proposto un fattore di struttura ridotto q_{seq} , secondo quanto riportato in (3):

$$q_{seq} = \eta_{seq} q \quad (3)$$

nel quale il fattore di riduzione può essere prudenzialmente considerato pari a $\eta_{seq} \cong 0.8 \div 0.9$, come risultato delle analisi condotte. Questo fattore di struttura ridotto conduce ad una stima preliminare conservativa dell'effetto delle sequenze sismiche su controventi dissipativi ad X in edifici industriali monopiano. Come già sottolineato, si evidenzia come questo approccio sia volto alla valutazione dell'incremento della vulnerabilità di questa tipologia strutturale. L'influenza della pericolosità non è qui considerata. Sviluppi futuri saranno focalizzati sulla valutazione di un set più ampio di sequenze sismiche e di un maggiore numero di strutture analizzate.

RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca è stata finanziata dal Progetto DPC-ReLUIIS 2019-2021 (WP12).

BIBLIOGRAFIA

- [1] European Committee for Standardization, *Eurocode 8, design of structures for earthquake resistance*. 2004.
- [2] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, *Norme tecniche per le costruzioni 2018*. Italy, 2018.
- [3] J. Ruiz Garcia, 'Discussion on "Effects of multiple earthquakes on inelastic structural response"', *Eng. Struct. Engineering Structures*, vol. 58, pp. 110–111, 2014.
- [4] C. Amadio, M. Fragiaco, and S. Rajgelj, 'The effects of repeated earthquake ground motions on the non-linear response of SDOF systems', *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 32, pp. 291–308, 2003.
- [5] G. D. Hatzigeorgiou, 'Ductility demand spectra for multiple near- and far-fault earthquakes', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 30, no. 4, pp. 170–183, 2010.
- [6] M. Fragiaco, C. Amadio, and L. Macorini, 'Seismic response of steel frames under repeated earthquake ground motions', *Engineering Structures Engineering Structures*, vol. 26, no. 13, pp. 2021–2035, 2004.

- [7] J. Ruiz Garcia and J. C. Negrete-Manriquez, 'Evaluation of drift demands in existing steel frames under as-recorded far-field and near-fault mainshockaftershock seismic sequences', *Engineering structures.*, vol. 33, no. 2, pp. 621–634, 2011.
- [8] G. Rinaldin, C. Amadio, and M. Fragiaco, 'Effects of seismic sequences on structures with hysteretic or damped dissipative behaviour', *Soil dynamics and earthquake engineering.*, vol. 97, pp. 205–215, 2017.
- [9] G. Rinaldin, M. Fasan, L. Sancin, and C. Amadio, 'On the behaviour of steel CBF for industrial buildings subjected to seismic sequences', *ISTRUC Structures*, vol. 28, pp. 2175–2187, 2020.
- [10] B. Lolli and P. Gasperini, *Aftershocks hazard in Italy Part I: Estimation of time-magnitude distribution model parameters and computation of probabilities of occurrence*. Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [11] I. Iervolino, M. Giorgio, and B. Polidoro, 'Sequence-based probabilistic seismic hazard analysis', *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 104, no. 2, pp. 1006–1012, 2014.
- [12] F. Scozzese, G. Terracciano, A. Zona, G. Della Corte, A. Dall'Asta, and R. Landolfo, 'RINTC PROJECT: Nonlinear dynamic analyses of italian code-conforming steel single-storey buildings for collapse risk assessment', Jun. 2017.
- [13] ReLUIS, I. Iervolino, and Eucentre, *The implicit risk of code-conforming structures in italy: a joint Reluis-Eucentre project*. DoppiaVoce, 2018.
- [14] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, *Norme tecniche per le costruzioni 2008*. Italy, 2008.
- [15] Seismosoft, 'SeismoStruct'. 2020.
- [16] M. Menegotto and P. E. Pinto, *Method of analysis for cyclically loaded R.C. plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending*. IABSE, 1973.
- [17] 'Engineering Strong Motion Database (INGV)'.
- [18] 'Strong-motion seismograph networks (K-NET, KiK-net)'. <https://www.kyoshin.bosai.go.jp/> (accessed Apr. 28, 2022).
- [19] F. Jalayer, R. Risi, and G. Manfredi, 'Bayesian Cloud Analysis: efficient structural fragility assessment using linear regression', *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 1183–1203, 2015.
- [20] K. Porter, 'A Beginners Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk', pp. 1–29, 2021.
- [21] F. Hosseinpour and A. E. Abdelnaby, 'Fragility curves for RC frames under multiple earthquakes', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 98, pp. 222–234, 2017.
- [22] R. Han, Y. Li, and J. van de Lindt, 'Impact of aftershocks and uncertainties on the seismic evaluation of non-ductile reinforced concrete frame buildings', *Engineering structures*, vol. 100, pp. 149–163, 2015.
- [23] Applied Technology Council, United States, Federal Emergency Management Agency, and Building Seismic Safety Council (U.S.), *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [24] M. Wakabayashi, C. Matsui, K. Minami, and I. Mitani, *Inelastic Behavior of Full-Scale Steel Frames with and without Bracings*. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2010.
- [25] B. Faggiano, A. Formisano, G. Vaiano, and F. M. Mazzolani, 'Numerical Study on Concentric Braced X Frames under Monotonic and Cyclic Loads', *KEM*, vol. 763, pp. 633–641, Feb. 2018.
- [26] M. Diccioli and E. E. Calik, 'Physical Theory Hysteretic Model for Steel Braces', *Journal of structural engineering.*, vol. 134, no. 7, p. 1215, 2008.
- [27] C. Amadio, L. Bomben, and S. Noè, 'Analytical pushover curves for concentric braced steel frames with active tension diagonal bracings', 2022.

PAROLE CHIAVE

Controventi concentrici a croce di Sant'Andrea – Sequenze sismiche - Buckling – Rigidezza laterale – Analisi dinamiche non lineari