

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE**

*Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Strutture e del Recupero Edilizio e Urbano*

**XIII Ciclo N.S. (2012-2014)**

**THEORY OF PLASTIC MECHANISM CONTROL  
FOR ECCENTRICALLY BRACED FRAMES:  
CLOSED FORM SOLUTION**

*Autore: Elide Nastri*

**Abstract**

Il controllo del meccanismo di collasso è universalmente riconosciuto come uno dei principali obiettivi da perseguire nell'ambito della progettazione sismica. Lo scopo è quello di evitare i meccanismi di collasso di tipo parziale, come quello di "piano soffice", che sono insoddisfacenti in termini di capacità di dissipative e di garantire lo sviluppo di un meccanismo di collasso di tipo globale che si ottiene proprio quando tutte le zone dissipative sono attivate mentre le zone non dissipative rimangono in campo elastico.

Queste considerazioni sono alla base dei principi del "capacity design", che affermano che le zone dissipative devono essere progettate sulla base delle massime caratteristiche della sollecitazione derivanti dalle condizioni di carico di progetto, mentre, quelle non dissipative devono essere progettate utilizzando le massime caratteristiche della sollecitazione che le zone dissipative, progettate ed incrudite al limite della loro resistenza ultima trasmettono alle zone non dissipative. Pertanto, al fine di ridurre la probabilità di formazione delle cerniere plastiche nelle zone non dissipative, quali le colonne, i telai devono essere progettati con travi deboli e colonne forti come riportato all'interno delle moderne normative come anche nell'Eurocodice 8 [1].

Sebbene gli studi su tale argomento siano incominciati parecchie decadi fa per le strutture in cemento armato [2-6] in particolare in Nuova Zelanda [7], tali regole introdotte nell'Eurocodice 8 garantiscono solo che si eviti il meccanismo di "piano soffice" ma non assicurano lo sviluppo di un meccanismo di collasso di tipo globale. Le motivazioni per cui il criterio di gerarchia trave-colonna non riesce a garantire un meccanismo di collasso di tipo globale sono molteplici e sono stati ampiamente discussi sia con riguardo alle strutture in cemento armato [8] che con riferimento a quelle in acciaio [9]. Per quanto riguarda i motivi per cui il criterio di gerarchia trave-colonna fallisce nel raggiungimento del risultato atteso, probabilmente il più importante e difficile da includere in un approccio di progettazione semplificato è la variazione del diagramma dei momenti durante l'evento sismico che conduce, all'atto dello sviluppo del meccanismo, ad una distribuzione dei momenti flettenti sostanzialmente diversa da quella risultante dalle prescrizioni contenute nelle norme [10-11]. In particolare, la variazione della posizione del punto di nullo del diagramma dei momenti nelle colonne è causata dalla formazione di cerniere plastiche nelle travi adiacenti alla colonna e in molti casi alle estremità della colonna stessa. Queste plasticizzazioni alterano la rigidezza del sistema trave-colonna e, di conseguenza, la distribuzione dei momenti. Il principale motivo per cui tali aspetti evolutivi della distribuzione delle sollecitazioni flessionali non possono essere tenuti in conto per mezzo di regole di progetto semplificate, come il criterio di gerarchia trave-colonna, è che il secondo principio del "capacity design" [12] non risulta di semplice applicazione nel caso di meccanismi resistenti non collocati in serie. Infatti, in accordo con il secondo principio del "capacity design", le zone non dissipative (le colonne nel caso dei telai) devono essere progettate

considerando le massime azioni interne che le zone dissipative (le estremità delle travi nel caso dei telai) plasticizzate ed incrudite, ossia nelle loro condizioni ultime, sono in grado di trasmettere alle zone non dissipative.

Il criterio di gerarchia trave-colonna si basa sulla possibilità di valutare accuratamente in ogni nodo la somma dei momenti flettenti che le travi sono in grado di trasmettere nelle loro condizioni ultime. Tuttavia, a causa della variabilità del punto di nullo del diagramma del momento nelle colonne durante l'evento sismico, è praticamente impossibile prevedere come tale somma si ripartisca alle estremità delle sezioni superiore ed inferiore delle colonne che convergono nel nodo. Per questo motivo, è noto che il criterio di gerarchia trave-colonna, basandosi su un semplice equilibrio nodale è in grado di prevenire soltanto il meccanismo di "piano soffice", ma non permette lo sviluppo di un meccanismo di collasso globale.

Allo scopo di superare l'inefficienza delle regole di progettazione basate sul criterio di gerarchia trave-colonna, una procedura rigorosa, basata sul teorema cinematico del collasso plastico, è stata presentata nel 1997 [9], con lo scopo di garantire un meccanismo di collasso di tipo globale dove le cerniere plastiche si sviluppano soltanto alle estremità delle travi, mentre tutte le colonne rimangono in campo elastico ad eccezione delle sezioni di base delle colonne del primo piano. Partendo da questo primo lavoro, la "Teoria del controllo del meccanismo plastico" (Theory of Plastic Mechanism Control (TPCM)) è stata individuata come un potente strumento per la progettazione delle strutture sismo-resistenti. La teoria consiste nella estensione del teorema cinematico del collasso plastico al concetto di curva di equilibrio del meccanismo di collasso. Infatti, per ogni tipologia strutturale, le condizioni di progetto che devono essere applicate al fine di prevenire i meccanismi di collasso indesiderati possono essere ricavate imponendo che la curva di equilibrio del meccanismo globale giaccia al di sotto di quelle corrispondenti a tutti i meccanismi indesiderati fino ad uno spostamento massimo di progetto compatibile con le risorse di duttilità locali delle zone dissipative. Tale approccio di progetto è stato successivamente esteso ai telai con collegamenti trave-colonna semi-rigidi a parziale ripristino di resistenza [13], ai telai con collegamenti trave-colonna con "dog-bones" [14], ai telai con controventi eccentrici sia con schema split-K o con schema a D, ossia con link orizzontale [15-16], sia con schema ad Y inversa, ossia con link in verticale [17-18], ai sistemi "knee-braced frames" [19], ai sistemi dissipativi di tipo "truss moment frames" [20-21] ed ai sistemi accoppiati con controventi concentrici [22].

Partendo dall'attuale stato dell'arte, la Teoria del Controllo del Meccanismo Plastico ha visto nuovi sviluppi che per mezzo di nuove considerazioni riguardanti le tipologie di meccanismi di collasso, hanno condotto ad una soluzione in forma chiusa [23]. Le condizioni di progetto che devono essere soddisfatte per prevenire i meccanismi di collasso indesiderati possono essere ora risolte senza nessuna procedura iterativa, cosicché le incognite del problema, cioè le sezioni delle colonne ad ogni piano, possono essere ricavate direttamente. Nel presente lavoro di tesi, vengono riportati i progressi nella teoria del controllo del meccanismo di collasso con particolare riferimento ai alle strutture accoppiate telaio-controventi eccentrici (MRF-EBFs dual systems).

Nell'ambito delle strutture sismoresistenti, i controventi eccentrici (EBFs) costituiscono una tipologia piuttosto recente che ha riscosso successo soprattutto grazie al contributo scientifico di Popov e Kasai [24-26]. Tale tipologia strutturale costituisce un buon compromesso tra i telai sismoresistenti e i controventi concentrici perché esibisce sia una adeguata rigidità [28-29], dovuta al contributo fornito dalle diagonali di controvento, e duttilità dovuta alla capacità del link di sviluppare cicli di isteresi ampi e stabili sotto azioni sismiche [24-29]. Pertanto l'accoppiamento dei telai con i controventi eccentrici costituisce un eccellente sistema accoppiato dove la struttura primaria è costituita dai controventi eccentrici mentre il sistema secondario è costituito dal telaio che può essere considerato come un sistema dissipativo addizionale.

Pertanto, lo scopo principale del lavoro di tesi è di fornire una procedura esaustiva per la progettazione dei sistemi accoppiati telaio-controventi eccentrici finalizzata a garantire lo sviluppo di un meccanismo di collasso di tipo globale. La procedura parte dalla progettazione delle zone dissipative denominate "link", passa per la definizione di un criterio di gerarchia a livello locale, atto ad assicurare che la plasticizzazione sia concentrata solo nei link mentre le travi e le diagonali rimangono in campo elastico e conduce alla progettazione delle sezioni colonne che garantiscono lo sviluppo di un meccanismo di collasso globale per il tramite della Teoria del Controllo del Meccanismo di Collasso.

Dal suo canto, l'Eurocodice 8, che è la normativa standard per la progettazione delle strutture in Europa, non fornisce alcun criterio di gerarchia per i telai accoppiati con i controventi eccentrici, e pertanto, la procedura di progettazione si basa sulle relazioni semplificate che vengono applicate anche nel caso dei telai. In particolare, la regola applicativa utilizzata per progettare le colonne si basa su un fattore amplificativo il cui scopo è quello di evitare soltanto la plasticizzazione e l'instabilità degli elementi quando le zone dissipative sono plasticizzate al limite della loro resistenza ultima. Riguardo agli elementi non dissipativi, le colonne, le travi e le diagonali, devono rimanere in campo elastico e vengono progettate sulla base delle peggiori condizioni di sforzo normale e flessione.

Come sopra riportato, l'Eurocodice è in grado di evitare solo i meccanismi di tipo "piano soffice" ma non è in grado di condurre alla progettazione di strutture che manifestano al collasso un meccanismo di tipo globale. Per questo motivo, sono stati progettati una serie di telai accoppiati con controventi eccentrici con entrambe le procedure, cioè quella proposta dall'Eurocodice 8 e la Teoria del Controllo del meccanismo di collasso, con lo scopo, da un lato di evidenziare l'accuratezza della procedura di progettazione proposta e dall'altro di manifestare le differenze in termini di performance che si ottengono dal progettare mediante le due procedure. In particolare, si sono implementate sia analisi statiche non lineari, sia analisi dinamiche incrementali.

Infine, è utile sottolineare che il presente lavoro di tesi è incominciato con lo scopo di studiare solo i sistemi accoppiati telaio controvento eccentrico con link verticale (ad Y inversa). Tale lavoro ha condotto a numerose pubblicazioni. Solo in un secondo momento, si è intrapreso lo studio dei sistemi accoppiati telaio controvento eccentrico con tutte le tipologie di link (schemi a K, D e V).

I controventi eccentrici ad Y inversa costituiscono una tipologia strutturale non sufficientemente investigata e diffusa nonostante abbia numerosi vantaggi sia in termini di performance che in termini costruttivi. La sua principale caratteristica riguarda il fatto che, il link, costituente la zona dissipativa, non appartiene a nessuna altra membratura rendendolo facilmente rimovibile al termine di un evento sismico distruttivo. Inoltre, nell'ambito della dissipazione supplementare di energia, si può sostituire il link con particolari dispositivi dissipatori, siano essi isteretici o ad attrito che sono in grado di manifestare un migliore comportamento dissipativo se comparati ai link tradizionali. I link danneggiati possono essere facilmente sostituiti al termine dell'evento sismico e considerando, inoltre, che le altre membrature sono rimaste in campo elastico si può intuire come tale sistema strutturale sia particolarmente vantaggioso. Bisogna osservare però che, solo assicurando un meccanismo di collasso di tipo globale che provenga da un'opportuna progettazione, si può garantire che il danneggiamento si concentri solo nelle zone dissipative mentre le altre (non dissipative) rimangono in campo elastico. Questo obiettivo è, senza dubbio, il punto di forza della Teoria del controllo del meccanismo di Collasso.

## REFERENCES

- [1] **EN 1998-1**: "Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: general Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings", CEN, 2004
- [2] **Bertero V. V., Popov E. P.**: "Seismic behaviour of ductile moment-resisting reinforced concrete frames", in Reinforced Concrete Structures in Seismic Zones, ACI Publication SP-53, American Concrete Institute, Detroit, 1977, pp. 247-291.
- [3] **Lee H.S.**: "Revised rule for concept of strong-column weak-girder design", J. struct. eng. ASCE, 122, 359-364 (1996).
- [4] **Paulay T.**: "Deterministic Design Procedure for Ductile Frames in Seismic Areas", ACI Publication SP-63, American Concrete Institute, Detroit, 1980, pp. 357-381.
- [5] **Paulay T.**: "Seismic design of ductile moment resisting reinforced concrete frames, columns: evaluation of actions", Bull. New Zealand Natl. Soc. Earthquake Eng., 10, 85-94, 1977.
- [6] **Paulay T.**: "Capacity design of earthquake resisting ductile multistorey reinforced concrete frames", Proc. 3rd Canad. conf. on earthquake eng., Montreal, Vol. 2, pp. 917-948, 1979.

- [7] **New Zealand Standard Code of Practice for the Design of Concrete Structures:** NZS 3101:Part 1; Commentary NZS 3101: Part 2; Standard Association of New Zealand, Wellington, New Zealand, 1982.
- [8] **Panelis G.G., Kappos A.J.:** "Earthquake-Resistant Concrete Structures", E&FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, 1997.
- [9] **Mazzolani F.M., Piluso V.:** "Plastic Design of Seismic Resistant Steel Frames", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, pp. 167-191, 1997.
- [10] **Park R., Paulay T.:** Reinforced Concrete Structures, Wiley, New York, 1975, pp. 566-568, 602-604.
- [11] **Kappos, A.J.:** "Evaluation of the Inelastic Seismic Behaviour of Multistorey Reinforced Concrete Buildings", PhD Thesis (in Greek), Scientific Annual of the Faculty of Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 1986.
- [12] **Engelhardt M.D., Popov E.P.:** "Behaviour of long links in eccentrically braced frames", Report N. UCB/EERC-89/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1989.
- [13] **Montuori R., Piluso V.:** "Design of Semi-Rigid Steel Frames for Failure Mode Control", Moment Resistant Connections of Steel Frames: Design and Reliability, London: E&FN Spon, Taylor & Francis Group, pp. 461-483, 2000.
- [14] **Montuori R., Piluso V.:** "L'Uso dei "Dog Bones" nella Progettazione a Collasso Controllato dei Telai Sismo-Resistenti", XVII Congresso C.T.A. Italian Conference on Steel Construction, Napoli, 3-5 Ottobre, vol. 1, pp. 301-310, 1999.
- [15] **Mastrandrea L., Montuori R., Piluso V.:** "Failure mode control of seismic resistant EB-frames", Stessa, 4<sup>th</sup> International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas, 2003.
- [16] **Mastrandrea L., Montuori R., Piluso V.:** "Shear-moment interaction in plastic design: eccentrically braced frames", STESSA 2003, 4<sup>th</sup> International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas, Naples, Italy, 9-12 June. Rotterdam: Balkema, 2003.
- [17] **Montuori R., Nistri E., Piluso V.:** "Rigid-plastic analysis and Moment-shear interaction for Hierarchy Criteria of Inverted Y EB-Frames", accepted for publication on Journal of Constructional Steel Research, 2014.
- [18] **Montuori R., Nistri E., Piluso V.:** "Theory of Plastic Mechanism Control for Eccentrically Braced Frames with inverted Y-scheme", Journal of Constructional Steel Research, Volume 93, pp. 122-135, 2014.
- [19] **Conti M.A., Mastandrea L., Piluso V.:** "Plastic Design and Seismic Response of Knee Braced Frames", Advanced Steel Costructions, Vol. 5, n.3 September, pp. 343-363, 2009.
- [20] **Longo A., Montuori R., Piluso V.:** "Theory of Plastic Mechanism Control of Dissipative Truss Moment Frames", Engineering Structures, Vol. 37, pp. 63-75, 2012.
- [21] **Longo A., Montuori R., Piluso V.:** "Failure Mode Control and Seismic Response of Dissipative Truss Moment Frames", Journal of Structural Engineering, Vol. 138, pp.1388-1397, 2012.
- [22] **Longo, A., Montuori R., Piluso V.:** "Theory of plastic mechanism control for MRF-CBF dual systems and its validation." Bulletin of Earthquake Engineering (2014): 1-31.
- [23] **Piluso V., Nistri E., Montuori R.:** "Advances in Theory of Plastic Mechanism Control: Closed Form Solution for Mr-Frames", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2015.
- [24] **Kasai K., Popov E.P.:** "General behavior of WF steel shear link beams", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 112, Issue 2, pp. 362-382, 1986.
- [25] **Kasai K., Han X.:** "New EBF design method and applications: Redesign and analysis of US-Japan EBF. Proceedings of Stessa 97 – 2<sup>nd</sup> international conference on behaviour of steel structures in seismic areas, 1997.
- [26] **Kasai K., Han X.:** "Refined Design and Analysis of Eccentrically Braced Frames", Journal of Structural Engineering, ASCE, 1997.
- [27] **Hera Publication P4001:2013,** "Seismic Design of Eccentrically Braced Frames", Earthquake Engineering, 2013.
- [28] **Roeder C.W., Popov E.P.:** "Eccentrically braced steel frames for earthquakes", ASCE, Journal of Structural Division, Vol. 104, Issue 3, pp. 391-412, 1978.
- [29] **Hjelmstad K.D., Popov E.P.:** "Cyclic behavior and design of link beams", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 109, Issue 10, pp. 2387-2403, 1983.