



DIPERTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE

***Dottorato di Ricerca in Rischio e
sostenibilità nei sistemi
dell'ingegneria civile, edile ed
ambientale***

XXXI CYCLE - N.S. (2015-2018)

Università di Salerno

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE

***Dottorato di Ricerca in Strutture in
Acciaio e Miste***

Università di Coimbra

Abstract

***PSEUDO DYNAMIC TESTS AND NUMERICAL ANALYSIS OF FREE FROM
DAMAGE MULTISTOREY STEEL BUILDINGS WITH INNOVATIVE
CONNECTIONS***

Giovanni Ferrante Cavallaro

Tutor

Prof. Gianvittorio Rizzano

Co-tutor

Prof. Vincenzo Piluso

Presidente del Collegio di dottorato

Prof. Fernando Fraternali

Tutor

Prof. Aldina Santiago

Co-tutor

Prof. Luís Simões da Silva

Presidente del Collegio di dottorato

Prof. Luís Simões da Silva

Uno dei sistemi strutturali più diffusi è rappresentato dai telai sismo resistenti. Questo sistema strutturale è costituito da telai capaci di resistere alle azioni sismiche attraverso stati tensionali prevalentemente flessionali. La rigidezza e la resistenza laterale del sistema dipendono dalla resistenza flessionale delle membrature e delle connessioni mentre la formazione di zone plastiche garantisce la dissipazione dell'energia sismica in ingresso. La localizzazione delle zone dissipative varia in funzione dell'approccio progettuale adottato, tipicamente nelle travi, nelle colonne e nelle connessioni. La filosofia progettuale più diffusa prevede di avere colonne forti, travi deboli e collegamenti a completo ripristino di resistenza, in questo modo tutta l'energia sismica tende ad essere dissipata dalle cerniere plastiche alle estremità delle travi ed alla base delle colonne del primo impalcato.

Allo scopo di superare l'approccio progettuale classico, il presente lavoro di ricerca introduce un nuovo tipo di collegamento trave-colonna capace di esibire una notevole rigidezza in condizioni di servizio (SLE) ed in grado di esibire una notevole capacità dissipativa quando sollecitato da un evento sismico raro. I codici attualmente in uso prevedono che per eventi sismici caratterizzati da un periodo di ritorno comparabile con la vita utile della struttura, eventi definiti frequenti o occasionali, le strutture restino in campo elastico garantendo che l'energia sismica sia completamente dissipata attraverso lo smorzamento viscoso. Viceversa, l'energia sismica deve essere dissipata attraverso escursioni in campo plastico di alcune parti della struttura che dovranno esibire cicli di isteresi ampi e stabili per eventi sismici rari e molto rari con un periodo di ritorno di circa 500 anni. Lo sviluppo dell'isteresi comporta danneggiamento strutturale che dovrà essere tale da non portare al collasso della struttura in modo da garantire la salvaguardia della vita di coloro che occupano l'edificio. La previsione del comportamento della struttura in campo non-lineare per eventi sismici rari rappresenta un aspetto che solo la ricerca sperimentale può descrivere in modo approfondito sviluppando nuovi modelli analitici e filosofie progettuali innovative. L'esecuzione di test quasi-statici può fornire elementi utili al fine di investigare il comportamento di non lineare delle membrature e degli assemblaggi sebbene difficilmente i carichi o la storia di spostamenti applicati corrispondono alle azioni che si hanno durante un evento sismico reale. Le informazioni ottenute attraverso tali procedure di prova sono però utili per calibrare modelli analitici e confrontare il comportamento dei componenti strutturali. La possibilità di svolgere prove su modelli di strutture in scala reale rappresenta il modo migliore per cogliere il comportamento globale di un sistema strutturale visto nella sua interezza ed a tale scopo, per una conoscenza più completa circa la risposta in campo dinamico delle strutture, le prove pseudo-dinamiche rappresentano un protocollo di prova in grado di fornire informazioni della risposta strutturale di un componente o di una struttura in campo dinamico attraverso un test statico.

Lo scopo principale di questo lavoro, sviluppato nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato dalla Comunità Europea denominato FREEDAM, è quello di sviluppare un tipo di connessione trave-colonna innovativo. Queste connessioni innovative sono dotate di uno smorzatore

supplementare in grado di dissipare l'energia derivante da eventi sismici distruttivi. La connessione trave-colonna FREEDAM, attraverso un'opportuna progettazione delle varie componenti è in grado di resistere a terremoti frequenti quanto ad eventi rari senza comportare danni agli elementi strutturali.

La tesi è suddivisa in sei capitoli.

Il **Capitolo 1** riporta un'analisi dello stato dell'arte sulle connessioni trave-colonna specificando le caratteristiche delle diverse tipologie di connessione e la loro influenza sul comportamento delle strutture resistenti a flessione. Nella parte finale del capitolo viene introdotto il nodo dissipativo FREEDAM specificando le sue peculiarità e i benefici che apporta la sua introduzione all'interno del sistema strutturale. Il **Capitolo 2** è dedicato alla descrizione dei risultati ottenuti da una estesa campagna sperimentale sviluppata presso il laboratorio STRENGTH dell'Università di Salerno, per la scelta del materiale per i dissipatori attritivi utilizzati nelle connessioni FREEDAM effettuando una caratterizzazione statistica dei coefficienti di attrito statico e dinamico. Il **Capitolo 3** raccoglie i risultati di una ulteriore campagna sperimentale svolta presso il laboratorio dell'Università di Salerno e volta allo studio delle perdite di serraggio per sistemi di bulloni da precarico equipaggiati con diverse rondelle. All'interno del **Capitolo 4** è stata definita una procedura per il progetto delle connessioni trave-colonna ad attrito, tale procedura è stata poi applicata per progettare due diverse tipologie di connessioni che sono state testate sperimentalmente presso il Laboratorio dell'Università di Coimbra (PT). Nello stesso capitolo sono stati descritti i layout di prova ed i risultati ottenuti dalle prove cicliche effettuate sui nodi dotati di dissipatori di tipo FREEDAM, sviluppandone poi dei modelli agli elementi finiti ed effettuando un confronto tra i risultati sperimentali e i modelli computerizzati. Infine nel **Capitolo 5** sono riportati i risultati delle prove pseudo-dinamiche svolte su un telaio in acciaio a scala reale equipaggiato in un primo caso con connessioni trave-colonna di tipo tradizionale a completo ripristino di resistenza (dogbone) e in un secondo caso equipaggiato con le connessioni innovative oggetto di studio. Tali risultati sono poi stati messi a confronto tra loro e con i risultati ottenuti da modelli agli elementi finiti.



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

PhD course in Risk and Sustainability in Civil, Architecture and Environmental Engineering Systems

XXXI CYCLE - N.S. (2015-2018)

University of Salerno

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

PhD course in Steel and Composite Construction

University of Coimbra

Abstract

PSEUDO DYNAMIC TESTS AND NUMERICAL ANALYSIS OF FREE FROM DAMAGE MULTISTOREY STEEL BUILDINGS WITH INNOVATIVE CONNECTIONS

a.a. 2018/2019

Giovanni Ferrante Cavallaro

Tutor

Prof. Gianvittorio Rizzano

Co-tutor

Prof. Vincenzo Piluso

President of the Doctoral College

Prof. Fernando Fraternali

Tutor

Prof. Aldina Santiago

Co-tutor

Prof. Luís Simões da Silva

President of the Doctoral College

Prof. Luís Simões da Silva

One of the most widespread structural systems is represented by Moment Resisting Frames (MRFs). resistant seismic frames. This structural system is made up of frames capable of resisting seismic actions through predominantly flexural tension states. The stiffness and lateral resistance of the system depend on the flexural strength of the members and the type of connection, while the development of the plastic hinges guarantee the dissipation of the seismic input energy. The location of the dissipative zones varies according to the design approach adopted, typically they develop in beams, columns and connections. The most widespread design philosophy is to have strong columns, weak beams and full-strength rigid connections with complete resistance restoration, in this way all the seismic energy tends to be dissipated by the plastic hinges at the ends of the beams and at the base of the columns of the first level.

In order to overcome the traditional design approach, the present research work introduces a new type of beam-column connection capable of exhibiting a remarkable rigidity in service conditions (SLE) and able to exhibit a remarkable dissipative capacity when a rare seismic event occurs. The codes currently in force provide that for seismic events characterized by a period of return comparable with the useful life of the structure (frequent or occasional events) the structures remain in the elastic field ensuring that the seismic energy is completely dissipated through viscous damping. Vice versa, the seismic energy must be dissipated through plastic engagement of parts of the structure, with wide and stable hysteresis cycles, for rare and very rare seismic events with a return period of about 500 years. The development of the hysteresis involves structural damage that have to be such as not to lead to the collapse of the structure in order to guarantee the protection of the life of those who occupy the building. The prediction of the behaviour of the structure in non-linear field for rare seismic events represents an aspect that only experimental research can describe in depth by developing new analytical models and innovative design philosophies. The execution of quasi-static tests can provide useful information in order to investigate the nonlinear behaviour of the members and the assemblages even if the forces or the displacement histories applied during the tests do not correspond exactly to the actions that occur during a real seismic event. The information obtained through these test procedures is however useful for calibrating analytical models and comparing the behaviour of structural components. The execution of tests on real scale structures is the best way to investigate the global behaviour of a structural system. For a more complete knowledge about the response in the dynamic field, the pseudo-dynamic tests represent a test protocol able to provide information of the structural response of a component or of a structure in a dynamic field through a static test.

The main purpose of this work, developed within the FREEDAM research project financed by the European Community, is to develop an innovative beam-column connection. These innovative connections are equipped with an additional damper able to dissipating the energy deriving from destructive seismic events.

The FREEDAM beam-column connection, through an appropriate design of the various components, is able to withstand frequent earthquakes and rare events without causing damage to the structural elements.

The thesis is divided into six chapters.

The **Chapter 1** reports a brief introduction to the traditional beam-column connections, specifying the characteristics of the different types of connection and their influence on the behaviour of the Moment Resisting Frames. In the last part of the chapter the FREEDAM dissipative connection is presented, specifying its peculiarities and the benefits that its introduction into the structural system brings. The **Chapter 2** is devoted to the description of the results obtained from an extensive experimental campaign developed at the STRENGTH laboratory of the University of Salerno, for the choice of material for the friction dampers used in the FREEDAM connections by carrying out a statistical characterization of the static and dynamic friction coefficients. The **Chapter 3** collects the results of a further experimental campaign carried out at the University of Salerno laboratory and aimed at studying the tightening losses for pre-loading bolt systems equipped with different washers. In **Chapter 4** a design procedure has been defined for the FREEDAM beam-column connections, then this procedure has been applied in order to design two different types of connections that have been experimentally tested at the University of Coimbra Laboratory (PT). In the same chapter, the test layouts and the results obtained from the cyclic tests carried out on the nodes equipped with FREEDAM friction dampers have been described, finally developing models to the finite elements and comparing the experimental results with the computerized models. Finally, the **Chapter 5** shows the results of the pseudo-dynamic tests carried out on a full-scale steel Moment Resistant Frame equipped in a first case with traditional full strength beam-column connections (dogbone) and in a second case equipped with the innovative connections proposed. These results have been compared to each other and with the results obtained from finite element models.