

A New Methodology for Seismic Collapse Risk Assessment of Mid-Rise Concrete Buildings

Sassan Eshghi

Associate Professor, Structural Engineering Research Center
eshghi@iiees.ac.ir

Mazdak Zahedi

The lessons learned from past destructive earthquakes in recent decades reveal that, mostly, human fatalities and injuries during and after the earthquake are due to the collapse of buildings. Therefore, collapse is the important performance level of seismic risk assessment of these buildings. This study presents a new method for the collapse assessment of RC buildings. The new method is proposed according to the basis of the modern seismic guidelines (FEMA-P695 and FEMA-P2018). Through this new method, seismic collapse risk assessment are carried out for the existing mid-rise reinforced concrete buildings. Some buildings containing 7-story and 10-story frames were selected for demonstrating the proposed methodology. These frames, named archetype, exhibit configuration of identical buildings in urban areas in Iran. The archetype buildings are selected in a way that flexural failure mode under seismic loads would be dominant for them, as well as the occurrence of other failure modes are assessed for them. Several nonlinear analyses, under far-field records, were performed to evaluate structural responses of this archetype. All nonlinear analytical models were implemented in the OpenSees (2016) structural analysis software. A simulation model for the structural system and its components capable of capturing flexural collapse modes are used. This model comprises of a concentrated plasticity model that can detect severe deterioration, which may result in sideway collapse. Several parameters, as calibrated in FEMA-P695, are adopted in this model. In this methodology, pushover analysis has been performed up to collapse of the structure. Then, the matrix of critical drifts (MCD) is extracted from pushover analysis for an archetype RC building to distinguish between the partial collapse of each story and the conventional collapse detection through IDA curves. The matrix of critical drifts (MCD) affects the collapse capacity of the reinforced concrete buildings intensely. One of the ambiguities of IDA curves is that the location of structure in which the maximum of EPD (engineering demand parameter) occurred is not identified. This ambiguity could limit the application of IDA curves. The framework of this new methodology deal

توسعه روش برآورد ریسک فروریزش لرزه‌ای ساختمانهای بتنی موجود

ساسان عشقی

دانشیار پژوهشکده مهندسی سازه
eshghi@iiees.ac.ir

مزدک زاهدی

تجربه‌های زلزله‌های مخرب در دهه‌های اخیر نشان می‌دهند که، تلفات و صدمات جانی انسانها که در زلزله‌ها اتفاق می‌افتد، به طور عمده، ناشی از فروریزش ساختمانها می‌باشند. بنابراین فروریزش مهم‌ترین سطح عملکردی برای ارزیابی لرزه‌ای ساختمانها می‌باشد. این مطالعه روش جدید برای ارزیابی فروریزش ساختمانهای بتن مسلح ارائه می‌کند. روش جدید بر اساس مبانی دستورالعمل‌های نوین لرزه‌ای (FEMA-P695) و (FEMA-P2018) پیشنهاد شده است. بر اساس روش جدید ارائه شده در این مطالعه می‌توان فروریزش لرزه‌ای ساختمانهای میان مرتبه موجود را ارزیابی نمود.

این مطالعه، بر قله‌های ساختمانی ۷ و ۱۰ طبقه بتن مسلح اعمال شده است. این ساختمانها که در این تحقیق سرنمونه (Archetype) نامیده شده‌اند، مشخصات ساختمانی مشابه در مناطق شهری ایران را نشان می‌دهند. ساختمانهای سرنمونه به گونه‌ای انتخاب شده‌اند، که مود غالب شکست آنها تحت اثر بارهای لرزه‌ای موجود مود خمشی باشد. همچنین احتمال وقوع سایر مودهای تخریب از جمله خمشی-برشی نیز در آنها بررسی شده است. تعداد زیادی تحلیل‌های غیرخطی با نرم‌افزار OpenSees (۲۰۱۶) تحت اثر شتاب نگاشتهای حوزه دور، برای ارزیابی پاسخ‌های سازه‌ای این سر نمونه‌ها انجام شد. مدل استفاده شده برای سیستم سازه‌ای و اجزای آن به گونه‌ای انتخاب شدند که قابلیت در نظر گرفتن مودهای تخریب خمشی را داشته باشند. این مدل ماکرو از مدل پلاستیسته متمرکز تشکیل شده است که قابلیت اثر دادن زوال را داشته باشد؛ به طوری که این زوال ممکن است به فروریزش جانبی منجر شود. تعدادی از پارامترهای این مدل در FEMA-P695 کالیبره شده‌اند که از نتایج آنها در این تحقیق استفاده شده است.

در این مطالعه، تحلیل پوش‌آور (Pushover) تا مرحله فروریزش سازه ادامه پیدا کرده است. پس از انجام تحلیل پوش‌آور، ماتریسی تحت عنوان ماتریس دریفت‌های بحرانی (Matrix of critical drifts) برای ساختمان بتن مسلح سرنمونه بدست آمده است. ماتریس بدست آمده تفاوت فروریزش جزئی هر طبقه و تعریف فروریزش، که بر مبنای منحنی IDA به دست می‌آید، را مشخص می‌کند. ماتریس دریفت‌های بحرانی، ظرفیت فروریزش ساختمانهای بتن مسلح را به شدت تغییر می‌دهد. همان‌طور که در ادبیات فنی نیز در مورد منحنی‌های IDA آمده است، این منحنی‌ها، موقعیت طبقه‌ای از سازه که دریفت بیشینه در آن اتفاق می‌افتد را مشخص نمی‌کند، بنابراین این ابهام برای استفاده از منحنی IDA در ارزیابی فروریزش سازه‌ها، محدودیت ایجاد می‌کند. روش ارائه شده در این تحقیق، به گونه‌ای است که نقص منحنی‌های IDA را برای ارزیابی فروریزش سازه‌ها را برطرف می‌کند. در این پژوهش، محدودیت روش پیشنهادی و عدم قطعیت‌های آن نیز مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از این روش به حصول نتایج قابل اطمینان

with the deficiency of IDA curves for collapse assessment of structures. Also, the existing limitations and uncertainties of this proposed methodology are summarized and discussed. An attempt is made to achieve reliable results for the studied archetype structures. The new method, as mentioned before, has been conducted for two 7-story and 10-story archetype sets. Each set has four archetypes. Archetype frames are all engineered buildings constructed in urban areas in Iran's seismic prone area during the past 25 years. Whereas it would be better if the shaking table tests were conducted to assess seismic demands on stories, the experimental tests are cost demanding and not beneficial for the simplified method. Hence, the demands on the structures conducted through IDA analyses. It is worth mentioning that the primary advantage of this method is its simple model and its simplicity to be used by practicing engineers. Therefore, the proposed method would provide more safety in terms of building collapse possibility. However, it can be acceptable because of the destructive consequences of the probable collapse. This method can mark 'killer RC buildings' in a residential area. Adopting suitable policies of emergency management requires detecting killer buildings essentially. Thus, the first the casualties and the second, economic loss will be decreased remarkably through retrofitting and detecting or evacuating 'killer buildings'.

In this study, seismic collapse assessments are conducted for two 7-story and 10-story archetype sets and a low-rise of damaged buildings set of Sar-e-Pole Zahab (earthquake in Iran, 2017). The achievements of these study are categorized into five sections as following below (A, B, C, D and E):

A. Seismic collapse assessment for three sets of residential building in urban area:

A-1: Empirical analytical relations are calibrated through full scale model on shaking table;

A-2: Setting uncertainties parameter of records for the buildings, previously mentioned according to the Iranian existing buildings;

A-3: Including uncertainties of buildings configurations and proportioning of columns and beams for seismic collapse assessment;

A-4: Verification of the new method through Sar-e-Pole Zahab (2017) real earthquake for one set buildings.

B. Presenting a more accurate method for detecting collapse state in residential buildings:

B-1: Determining of the Matrix of critical drifts as collapse criteria;

برای سازه‌های سرنمونه، مورد مطالعه منجر شد. این روش به دو مجموعه ساختمان هفت و ده طبقه، که هر مجموعه نیز از چهار سرنمونه تشکیل شده است، اعمال گردید. قابهای سرنمونه نیز، قابهای مهندسی ساخته شده در مناطق شهری ایران با خطر نسبی خیلی زیاد هستند، که ظرف ۲۵ سال گذشته ساخته شده‌اند.

دقیق‌ترین ارزیابی فروریزش از طریق آزمایش ساختمان با مقیاس واقعی بر روی میز لرزان خواهد بود، اما از آنجایی که این روش زمانبر و هزینه بر است؛ بنابراین در پژوهش حاضر روشی پیشنهاد شده است، که در عین سادگی دارای دقت قابل قبول نیز هست. نتایج بدست آمده در ارزیابی فروریزش در روش جدید نشان می‌دهند که ظرفیت فروریزش با حاشیه اطمینان بالاتری، برآورد می‌شود. این ظرفیت‌های محاسبه شده برای فروریزش با توجه به تبعات زیانبار فروریزش، قابل قبول خواهند بود. با استفاده از روش پیشنهادی ساختمانهای مرگ آفرین (Killer Buildings) در مناطق مسکونی قابل شناسایی خواهند بود. اتخاذ سیاستهای مناسب در برنامه‌های مدیریت بحران به طور اساسی نیازمند شناسایی ساختمانهای مرگ آفرین می‌باشد؛ چراکه با شناسایی و بهسازی این ساختمانها یا عدم استفاده از این ساختمانها، تلفات انسانی در وهله اول و در الویت بعدی زیانهای اقتصادی به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

در این تحقیق برای دو دسته از ساختمانهای بتنی ۷- طبقه و ۱۰- طبقه و همچنین یک دسته ساختمانهای کوتاه مرتبه آسیب‌دیده در زلزله سرپل ذهاب (۱۳۹۶) ارزیابی فروریزش انجام شد. دستاوردهای این تحقیق را در پنج بخش الف، ب، ت، ث و ج به شرح ذیل می‌توان ارائه نمود:

الف- ارزیابی فروریزش برای سه دسته ساختمانها با کاربری مسکونی در مناطق شهری:

۱- انجام صحت‌سنجی برای کاربرد روابط تجربی عددی در یک مدل واقعی آزمایشی بر روی میز لرزه؛

۲- بدست آوردن پارامتر عدم قطعیت رکورد برای ساختمانهای مورد مطالعه بر اساس وضع موجود ساختمانهای کشور؛

۳- در نظر گرفتن عدم قطعیت مشخصات ساختمان و تناسب‌بندی تیر و ستون در ارزیابی فروریزش ساختمانهای مورد مطالعه؛

۴- ارزیابی فروریزش برای یک دسته از ساختمانها در زلزله واقعی کرمانشاه و بررسی روش ارائه شده در این تحقیق.

ب- ارائه روش دقیق‌تر در کاربرد منحنی IDA برای تعیین حالت فروریزش در ساختمان:

۱- معرفی ماتریس دریافت‌های بحرانی به عنوان معیار فروریزش؛

۲- بررسی اثر مودهای بالاتر نیز در تحلیل استاتیکی غیر خطی در نظر گرفته شده است؛

۳- بررسی اثر اتصال گره اتصال نیز در نظر گرفته شده است.

ت- ارتباط عدم قطعیت و تعریف فروریزش در ساختمانهای مورد مطالعه؛

ث- مقایسه عدم قطعیت‌های بدست آمده در این تحقیق با عدم قطعیت دستور العمل FEMA-P695؛

ج- بدست آوردن ریسک فروریزش سالیانه برای ساختمانهای مورد مطالعه. از نتایج تحقیقات انجام شده، نمودار و جدول ذیل به عنوان نمونه آورده شده است.

- B-2: Taking into account of higher modes effects in Nonlinear static Analysis;
 - B-3: Implementation of panel zone effect in analyses.
 - C. Determining the correlation between uncertainties and detecting of collapse in studied buildings.
 - D. Comparison between calculated uncertainties of this research and FEMA-P695 uncertainties.
 - E. Evaluation of annual collapse risk for studied buildings of this study.
- Some of the calculated results of this study are tabulated and illustrated in Figure (1) and Table (1).

واژه‌های کلیدی: ارزیابی فروریزش لرزه‌ای، ساختمانهای بتن مسلح، تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی، تحلیل استاتیکی غیرخطی، ماتریس دریافت‌های بحرانی (MCD).

Keywords: Seismic collapse assessment, Reinforced-concrete buildings, Nonlinear Dynamic Analysis (IDA), Nonlinear static analysis, Matrix of Critical Drifts (MCD)

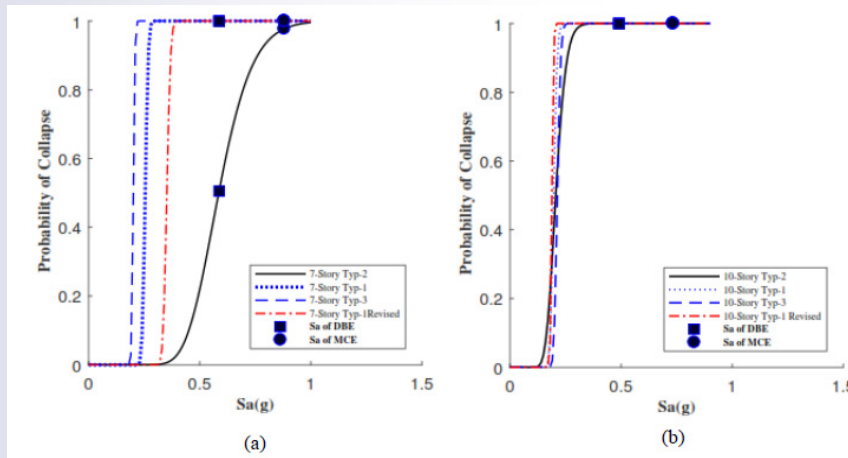


Figure 1: Collapse probability curves (Approach #2): (a) 7-story frame; (b) 10-story frame

No. of stories	7				10			
	1	2	3	1 (revised)	1	2	3	1 (revised)
μ_{lnx}^*	-0.4945	-0.2460	-0.4975	-0.2665	-0.8396	-0.5805	-0.8384	-0.4651
σ_{lnx}^*	0.0821	0.2397	0.0982	0.1215	0.1094	0.2843	0.1236	0.1069
μ_{lnx}^{**}	-1.3682	-0.5352	-1.6039	-1.0448	-1.6296	-1.5808	-1.5470	-1.6690
σ_{lnx}^{**}	0.0420	0.2041	0.0297	0.0382	0.0646	0.1752	0.0555	0.0314
mean CD*	0.0461	0.0561	0.0477	0.0564	0.0553	0.0539	0.0494	0.0586
mean CD**	0.0233	0.0338	0.0185	0.0309	0.0228	0.0191	0.0201	0.0187
standard deviation of CD*	0.000042	0.000073	0.000016	0.000060	0.000004	0.000071	0.000020	0.000061

μ_{lnx}^* = mean; σ_{lnx}^* = standard deviation of x (x denotes S_a with a log-normal distribution evaluated according to approach #1)
 μ_{lnx}^{**} = mean; σ_{lnx}^{**} = standard deviation of x (x denotes S_a according to the approach #2)
 CD* = collapse drift for approach #1; CD** = collapse drift for approach #2

Table 1: Mean and standard deviation of collapse limit states for both methods from IDA curves