

PENGARUH RANGKAIAN GEMPA UTAMA – GEMPA SUSULAN TERHADAP REDUNDANSI DAN KERUNTUHAN PROGRESIF STRUKTUR RANGKA PEMIKUL MOMEN BETON BERTULANG

Hendry D Zacharias^{1,*}, Junaedi Utomo¹, Yoyong Arfiadi¹, Ade Lisantono¹

¹Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta
Jln Babarsari 43 Yogyakarta

*Corresponding authors: hendryzacharias2@gmail.com

Abstract: Seismic sequence increases the cumulative damage to structures due to the increase in interstory drift especially for strong seismic potential areas or important buildings. Redundancy depends on the dynamic and geometric characteristics of the structure and the nature of the earthquake excitation. Increasing redundancy cannot be defined as a criterion for improving the seismic behavior of the structure but is closely related to progressive collapse. This study examines the effect of a mainshock (MSEq)-aftershock (ASEq) earthquakes sequence on the redundancy and progressive collapse of 16 reinforced concrete moment resisting frame structural models with varying number of bays and number of stories but with the same plan area, by looking at the values of interstory drift and beam rotation as well as the ratio of axial force to column axial capacity under several column removal scenarios. The MSEq-ASEq earthquake sequence has a very significant effect on the need for structural redundancy as seen from the increase in the value of interstory drift but not for progressive collapse where there is no increase in the value of beam rotation and column axial force (ratio ≈ 1). Increasing the number of bays in the plan does not necessarily reduce the amount of interstory drift, but it is effective in reducing the value of beam rotation and the ratio of axial force to column axial capacity

Keywords: redundancy, progressive collapse, seismic sequence, structural response, OpenSees

Abstrak: Rangkaian kejadian gempa meningkatkan kerusakan kumulatif pada struktur karena meningkatnya simpangan antar lantai, terutama untuk daerah potensi gempa kuat atau bangunan penting. Redundansi bergantung pada karakteristik dinamis dan geometris strukturnya serta sifat eksitasi gempa, peningkatan redundansi tidak dapat didefinisikan sebagai kriteria untuk meningkatkan perilaku seismik struktur, namun sangat berkaitan erat dengan keruntuhan progresif. Penelitian ini melihat pengaruh rangkaian gempa utama (MSEq)– gempa susulan (ASEq) terhadap redundansi dan keruntuhan progresif dari 16 model struktur rangka pemikul momen beton bertulang dengan variasi jumlah bentangan dan jumlah lantai tapi dengan luas denah yang sama, dengan melihat nilai simpangan antar lantai dan rotasi balok serta rasio gaya aksial terhadap kapasitas aksial kolom pada beberapa skenario pelepasan kolom. Rangkaian gempa MSEq-ASEq berpengaruh sangat signifikan terhadap kebutuhan redundansi struktur terlihat dari peningkatan nilai simpangan antar lantai namun tidak untuk keruntuhan progresif dimana tidak terjadi peningkatan nilai rotasi balok dan gaya aksial kolom (rasio ≈ 1). Menambah jumlah bentangan pada denah tidak selalu mengurangi besaran simpangan antar lantai, namun efektif untuk mengurangi nilai rotasi balok dan rasio gaya aksial terhadap kapasitas aksial kolom

Kata kunci: : redundansi, keruntuhan progresif, rangkaian gempa, respon struktur, OpenSees

PENDAHULUAN

Penelitian yang dilakukan terhadap kejadian gempa di masa lalu menunjukkan bahwa rangkaian kejadian gempa meningkatkan kerusakan kumulatif pada struktur (Erdik dkk., 2012; Potter dkk., 2015). Gempa utama dengan mempertimbangkan komponen vertikal serta gempa yang berurutan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap simpangan antar lantai

rangka pemikul momen beton bertulang. (Massumi dkk., 2021). Demikian juga beberapa penelitian terkait pengaruh rangkaian gempa (Bao dkk., 2022; Fikri dkk., 2022; Zhou dkk., 2021) menunjukkan bahwa bahaya gempa susulan mempunyai dampak paling besar terhadap risiko seismik di tingkat sistem dan signifikan pada daerah dengan potensi gempa kuat atau bangunan-bangunan penting (Pang dkk., 2023).

Rekaman gempa utama (MSEq) mengandung konten frekuensi yang lebih kaya pada periode yang lebih rendah, sedangkan rekaman gempa susulan (ASEq) memiliki nilai spektral yang lebih tinggi pada periode yang lebih lama dapat menghasilkan perbedaan yang mencolok pada kapasitas keruntuhan (Shokrabadi dkk., 2018).

Redundansi telah menjadi perhatian serius setelah gempa bumi Northridge tahun 1994. Redundansi biasanya dikaitkan dengan tingkat ketidakpastian statis dan bergantung pada karakteristik “dinamis” dan geometri struktur serta sifat eksitasi gempa (Faroughi dkk., 2021). Keandalan sistem rangka tergantung pada jumlah komponen penahan beban lateral (ATC-19, 1995). Faktor ρ , yang dikenal sebagai faktor keandalan/redundansi, ditambahkan pada *National Earthquake Hazards Reduction Program* (NEHRP), *Uniform Building Code* (UBC) dan *International Building Code* (IBC) sejak tahun 1997 yang merupakan fungsi dari konfigurasi sistem dan jumlah komponen seismik dan tidak bergantung pada parameter struktur yang melekat seperti kekuatan lebih dan daktilitas (Wen dkk., 2003).

Massumi dkk. (2016) meneliti pengaruh redundansi struktur untuk rangka beton bertulang 3 dimensi (RC-3D) dengan elemen penahan beban lateral yang sama, hasilnya menunjukkan bahwa peningkatan redundansi saja dalam perencanaan tidak dapat didefinisikan sebagai kriteria untuk meningkatkan perilaku seismik struktur. Jiang dkk. (2019) meneliti karakteristik redundansi bangunan dinding geser komposit bertingkat menengah dengan menggunakan metodologi *response-based sensitivity* (RBSM), dan digunakan untuk mengidentifikasi kelemahan dan mekanisme keruntuhan bangunan. Hasilnya menunjukkan bahwa komponen yang teridentifikasi dengan redundansi terendah merupakan komponen yang gagal pada model uji.

Keruntuhan progresif adalah keruntuhan yang ditandai dengan hilangnya daya dukung sebagian kecil elemen struktur akibat beban abnormal yang secara berurutan memicu terjadinya rangkaian kegagalan yang mempengaruhi seluruh atau sebagian besar struktur, atau dengan kata lain, kegagalan lokal pada suatu komponen struktur utama

mengakibatkan runtuhnya elemen struktur yang bersebelahan, yang kemudian menyebabkan keruntuhan yang lebih lanjut (USGSA, 2003). Selain definisi-definisi di atas, terdapat juga definisi lain dari keruntuhan progresif yaitu keruntuhan seluruh atau sebagian besar struktur yang dipicu oleh kegagalan atau kerusakan pada bagian yang relatif kecil (Nair, 2006), atau keruntuhan struktur parsial atau total yang terjadi sebagai akibat dari suatu kejadian yang menyebabkan kerusakan struktur terlokalisasi yang tidak dapat diserap oleh kontinuitas dan daktilitas yang melekat pada sistem struktur tersebut (Ellingwood dkk., 2005).

Banyak penelitian mengenai keruntuhan progresif telah dilakukan dan menyimpulkan bahwa keruntuhan progresif merupakan salah satu penyebab keruntuhan bangunan (Ameri Mohammad dkk., 2019; Kokot, 2022; Qian dkk., 2020). Caredda dkk. (2023) meneliti 40 kasus keruntuhan bangunan di Amerika, Eropa dan Asia, menemukan bahwa keruntuhan progresif terbesar (65% kasus) disebabkan oleh kesalahan konstruksi dan desain dengan mekanisme keruntuhan terbesar (94% kasus) adalah tipe pancake dan zipper dan hampir semua kasus dicirikan dengan hilangnya kapasitas dukung satu atau lebih kolom sehingga perambatan keruntuhan terjadi secara horizontal (keruntuhan tipe zipper dan domino) dan vertikal (keruntuhan tipe pancake). Namun apabila kerusakan awal terjadi pada balok, maka perambatannya hanya terjadi ke arah horizontal.

Penelitian ini untuk melihat pengaruh dari rangkaian MSEq –ASEq terhadap redundansi struktur rangka pemikul momen beton bertulang menggunakan 16 model struktur dengan variasi jumlah lantai dan jumlah bentangan, namun memiliki luas denah yang sama. Analisis nonlinier riwayat waktu menggunakan data gempa Northridge tahun 1994 yang terdiri dari 14 rekaman gempa, meliputi tujuh gempa MSEq dan tujuh gempa ASEq. Pengaruh MSEq –ASEq terhadap redundansi struktur dilihat dari rasio simpangan antar lantai akibat gempa MSEq-ASEq (AS) terhadap simpangan antar lantai akibat MSEq (Ms) untuk variasi jumlah bentangan dan jumlah lantai.

1.1 Data Gempa

Pada penelitian ini digunakan tujuh rangkaian gempa MSEq-ASEq dari gempa

Nothridge tahun 1994. Parameter gerakan tanah yang akan dilihat pengaruhnya terhadap respon struktur berupa PGA, durasi antara sebagai interval waktu antara awal dan akhir dengan batas PGA 0.05 g (Bolt, 1973) serta periode pradominan. Data rekaman gempa dan parameter gerakan tanah dari 14 rekaman gempa yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1.

1.2 Redundansi Struktur

Ukuran ketahanan struktur harus diperoleh dengan membandingkan kinerja struktur sistem pada keadaan semula dan dalam keadaan terganggu (Biondini dkk., 2012) sedangkan redundansi struktural dapat didefinisikan sebagai kemampuan sistem struktur untuk mendistribusikan kembali beban yang tidak

dapat lagi ditanggung oleh komponen lain yang rusak setelah terjadinya kegagalan lokal (Biondini dkk., 2010). Penggunaan sistem penahan gaya lateral dan vertikal yang cukup sangat dianjurkan dalam berbagai pedoman (FEMA, 2020; SNI-1726:2019, 2019). Redundansi struktural biasanya dikaitkan dengan tingkat ketidakpastian statis (Frangopol dkk., 2014). Derajat ketidakpastian struktur rangka momen tiga dimensi, dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Nst = 6NM + NR - 6NJ - NC \quad (1)$$

dengan Nst adalah derajat ketidakpastian statis, NM adalah jumlah elemen, NR adalah jumlah reaksi tumpuan, NJ adalah jumlah join dan NC adalah jumlah persamaan kesetimbangan (Ameri Mohammad dkk., 2019).

Tabel 1. Data Gempa Northridge Tahun 1994

No	Stasiun Pencatat	Komponen	Magni- tudo	Durasi (detik)	PGA (g)	Durasi Antara (detik)	Periode Pradominan (detik)
Gempa Utama							
1	Jensen Filter Plant Adm. Building	JEN292	6.69	28.595	0.62	19.185	1.059
2	Newhall – Fire Sta	NWH090	6.69	39.980	0.58	14.68	0.57
3	Rinaldi Receiving Sta	RSS228	6.69	19.900	0.87	16.24	0.38
4	Sylmar – Converter Sta East	SCE011	6.69	54.685	0.85	16.965	1.16
5	Tarzana – Cedar Hill A	TAR090	6.69	39.980	1.78	27.32	0.35
6	Pacoima Kagel Canyon	PKC90	6.69	39.980	0.30	11.26	0.86
7	Sun Valley – Roscoe Blvd	RO3000	6.69	30.270	0.28	13.06	0.45
Gempa Susulan							
1	Jensen Filter Plant Adm. Building	JEN292	5.28	40.76	0.30	6.39	0.28
2	Newhall – Fire Sta	NWH090	5.28	19.980	0.05	0.02	0.43
3	Rinaldi Receiving Sta	RSS228	5.28	5.980	0.53	4.2	0.37
4	Sylmar – Converter Sta East	SCE011	5.28	6.480	0.15	3.45	0.28
5	Tarzana – Cedar Hill A	TAR090	5.28	45.040	0.37	10.2	0.26
6	Pacoima Kagel Canyon	PKC90	5.28	19.980	0.15	2.2	0.68
7	Sun Valley – Roscoe Blvd	RO3000	5.28	6.230	0.13	1.41	0.52

METODE PENELITIAN

Penelitian ini akan melakukan analisis nonlinier riawayat waktu terhadap 16 model struktur dengan variasi jumlah lantai dan bentangan, namun memiliki luas denah yang sama untuk melihat pengaruh rangkain gempa MSEq-ASEq terhadap redundansi dan keruntuhan progresif struktur.

1. Model Struktur

Model struktur pada penelitian ini diambil sama dengan penelitian yang dilakukan oleh

Ameri Mohammad dkk. (2019), sedangkan perbedaannya pada metode analisis dan tujuan penelitian yang akan dicapai. Denah dan tampilan skematik 16 model struktur dengan variasi 6, 9, 12 dan 15 lantai serta 3, 4, 5 dan 6 bentangan, namun memiliki luas denah yang sama sebagaimana ditunjukkan pada . Dimensi balok, kolom dan jumlah tulangan longitudinal yang digunakan pada model struktur ditunjukkan pada Tabel 2 dimana huruf B dan C masing-masing adalah singkatan dari balok dan kolom dan indeks

mewakili rangkaian skenario tertentu, dengan konfigurasi sebagai berikut:

1. Untuk struktur enam lantai, balok dan kolom sama pada setiap dua lantai yang berdekatan;

2. Untuk struktur lainnya (9, 12 dan 15 lantai), balok dan kolom sama pada setiap tiga lantai yang berdekatan.

Tabel 2. Dimensi Balok dan Kolom

Lantai	Tipe	Dimensi (cm)				Tulangan Memajang			
		Bentangan				Bentangan			
		3	4	5	6	3	4	5	6
6 Lantai	C1	60x60	50x50	40x40	40x40	24D25	20D25	20D22	18D22
	C2	55x55	45x45	35x35	35x35	20D25	20D22	16D22	16D22
	C3	50x50	40x40	30x30	30x30	20D22	18D22	16D19	16D19
	B1	40x50	35x40	30x35	30x35	10D22	10D19	8D19	8D19
	B2	35x40	30x35	25x30	25x35	10D19	8D19	8D16	8D16
	B3	30x35	30x30	25x25	25x30	8D19	8D16	6D16	6D16
9 Lantai	C1	65x65	55x55	40x40	40x40	28D25	22D25	20D22	20D22
	C2	55x55	45x45	35x35	35x35	22D25	20D25	18D22	18D22
	C3	50x50	40x40	30x30	30x30	20D25	20D22	18D19	18D19
	B1	40x45	40x45	35x40	30x35	10D22	10D22	10D19	8D19
	B2	35x45	35x45	30x35	25x30	10D22	8D22	8D19	6D19
	B3	35x40	35x40	25x30	20x25	10D19	8D22	8D16	6D16
12 Lantai	C1	80x80	60x60	45x45	45x45	30D29	22D29	20D25	20D22
	C2	70x70	55x55	40x40	40x40	28D25	22D25	20D22	20D22
	C3	55x55	45x45	35x35	35x35	22D25	20D25	18D22	18D22
	C4	50x50	40x40	30x30	30x30	20D25	20D22	18D19	18D19
	B1	40x50	40x50	40x45	35x40	12D22	12D22	12D19	10D19
	B2	40x45	40x45	35x40	30x35	12D19	10D19	8D19	8D19
	B3	35x45	35x45	30x35	25x30	10D22	10D22	8D19	8D16
	B4	35x40	35x40	25x30	20x25	10D19	8D22	8D16	6D16
15 Lantai	C1	90x90	70x70	50x50	50x50	32D29	30D25	24D25	24D25
	C2	80x80	60x60	45x45	45x45	30D29	22D29	20D25	20D22
	C3	65x65	55x55	40x40	40x40	26D25	22D25	20D22	20D22
	C4	55x55	50x50	35x35	35x35	22D25	20D25	18D22	18D22
	C5	50x50	45x45	30x30	30x30	20D25	20D22	18D19	18D19
	B1	45x50	45x50	45x50	45x50	12D22	12D22	12D22	12D19
	B2	40x50	40x50	40x50	40x50	12D22	12D22	12D19	12D19
	B3	40x45	40x45	40x45	35x40	12D19	12D19	10D19	8D19
	B4	35x45	35x45	35x40	30x35	10D22	10D22	10D19	8D16
	B5	35x40	35x40	30x35	20x25	10D19	8D22	10D16	6D16

2. Permodelan Struktur

Permodelan struktur menggunakan pendekatan *simplified finite-element* dengan OpenSees, elemen balok-kolom dimodelkan menggunakan elemen berbasis gaya (*distributed-plasticity*) dengan 5 titik integrasi di sepanjang elemen. Perilaku nonlinier dimodelkan pada tingkat material melalui diskritisasi serat (*fiber discretization*) penampang elemen pada setiap titik integrasi. Baja tulangan dimodelkan dengan menggunakan *Steel02 Material* dan *Concrete02 Material* untuk beton terkekang (*confined concrete*) dan beton tidak (*unconfined concrete*)

(Mazzoni dkk., 2006). Sifat-sifat material yang digunakan dalam pemodelan struktur adalah: kuat tekan beton $f'_c = 27$ MPa; kuat leleh tulangan $f_y = 420$ MPa; modulus Young untuk beton $E_c = 25$ GPa, dan untuk baja $E_s = 200$ GPa. Selain itu, kombinasi beban gravitasi ($1.2D + 0.5L$) diterapkan pada seluruh bangunan untuk menghitung aksi yang dikendalikan oleh deformasi dan gaya selama keruntuhan progresif.

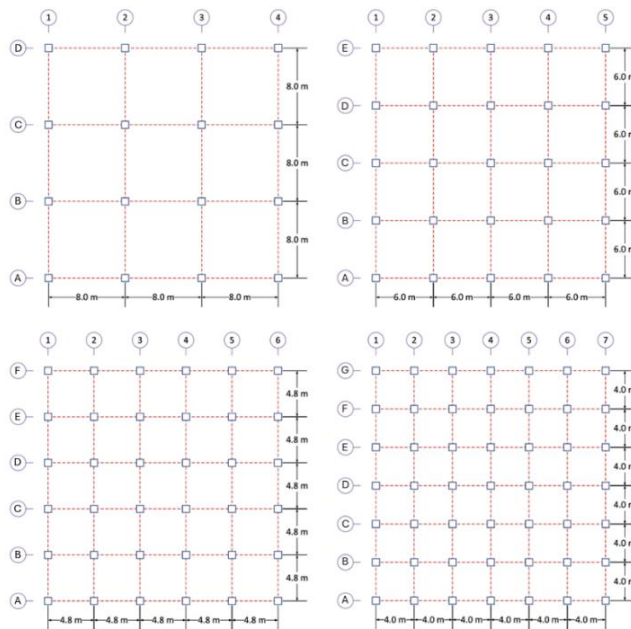
2.3. Analisis Struktur

Model struktur dalam penelitian ini dianalisis menggunakan analisis dinamis nonlinier riwayat waktu, dengan menerapkan 14 rekaman gempa yang terdiri dari tujuh komponen gempa utama dan tujuh komponen gempa susulan. Rangkaian kejadian gempa ini disusun dengan memberikan jeda waktu 60 detik di antara kejadian gempa utama dan gempa susulan, untuk menghentikan struktur sepenuhnya. Selanjutnya rasio simpangan antar lantai, rotasi balok yang berdekatan dengan kolom yang dilepas dan rasio gaya aksial maksimum terhadap kapasitas aksial pada kolom di atas kolom yang dilepas antara gempa utama (MSEq) dan gempa susulan

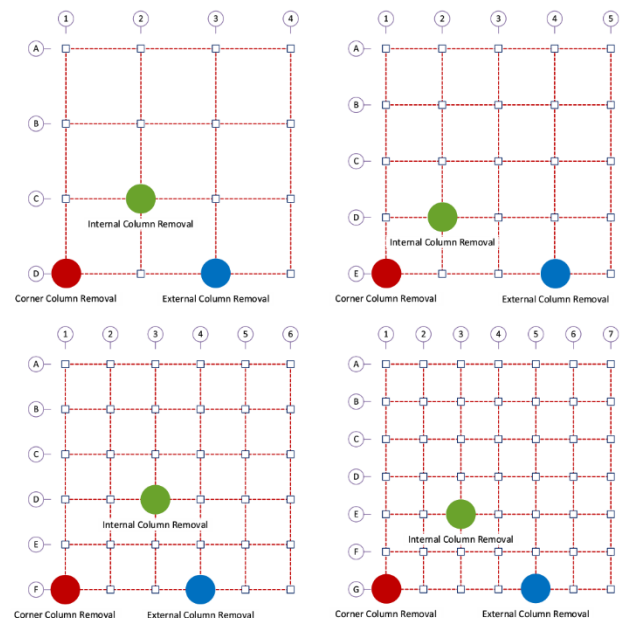
(ASEq) dipelajari. Pengaruh rangkaian gempa MSEq-ASEq terhadap keruntuhan progresif dipelajari dengan menggunakan tiga skenario pelepasan kolom pada denah maupun lantai tertentu yaitu kolom sudut (C), kolom luar (E), dan kolom dalam (I) yang ditampilkan pada Gambar 2 dan Tabel 3.

Tabel 3. Skenario Pelepasan Kolom pada Tiap Lantai

No.	Model	Lantai
1	6 lantai	1 dan 3
2	9 lantai	1 dan 4
3	12 lantai	1, 4, dan 7
4	15 lantai	1, 5, dan 9



Gambar 1. Denah Model Struktur

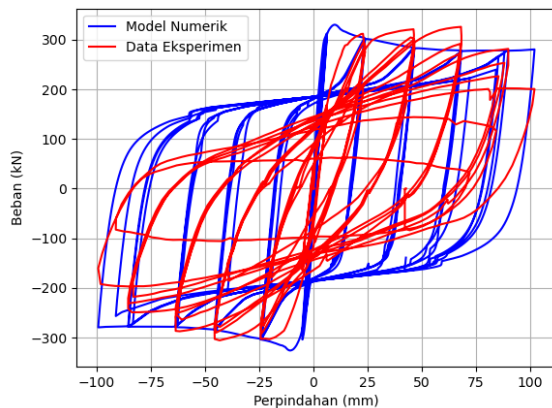


Gambar 2. Skenario Pelepasan Kolom pada Denah

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Verifikasi Model

Untuk memvalidasi model dalam penelitian ini, sebuah data eksperimental hasil penelitian yang dilakukan oleh Saatcioglu dkk. (1989) yang menguji kolom katilever persegi dengan dimensi 350x350 mm terhadap lentur dibuatkan. model numeriknya menggunakan OpenSees dan dianalisis menggunakan analisis *static pushover*. Selanjutnya kurva respon beban lateral vs perpindahan dari data eksperimen dan hasil numerik diplot bersama untuk melihat kesesuaiannya (Gambar 1), dimana menunjukkan kesesuaian yang cukup baik di antara kedua hasil tersebut. Sedikit perbedaan antara hasil numerik dan eksperimen lebih disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya pendekatan penggunaan *Steel02 Material* dan *Concrete02 Material* untuk memodelkan material baja dan beton, elemen *nonlinearBeamColumn* untuk memodelkan kolom (Mazzoni dkk., 2006) serta, model beton terkekang Mander (Mander dkk., 1988) digunakan untuk mensimulasikan perilaku beton terkekang. Karena merupakan pendekatan secara numerik tentunya akan berbeda dengan perilaku material dan struktur sebenarnya yang dikerjakan pada laboratorium.



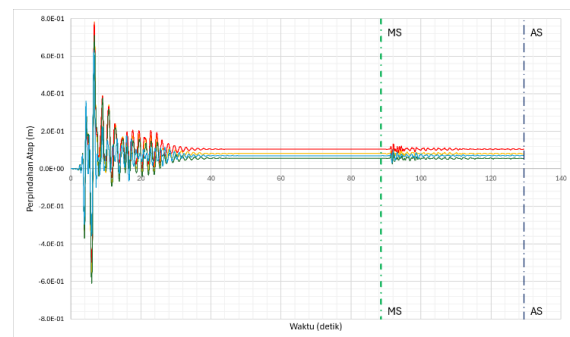
Gambar 1. Verifikasi Model Analisis

2. Analisis Model

Untuk mempermudah penyajian hasil analisis digunakan simbol α S-Eq β dan simbol α S-Eq β - γ F- δ CR untuk mendefinisikan model analisis dimana α menunjukkan jumlah lantai dan β menunjukkan rekaman gempa, γ menunjukkan lantai dimana rencana kolom dihilangkan, dan δ menunjukkan lokasi kolom yang dihilangkan yaitu untuk kolom yang berada di sudut disimbolkan dengan huruf C, kolom yang berada

di luar dengan huruf E, atau kolom yang berada di dalam dengan huruf I. Sebagai contoh, 12S-Eq2-F4-ICR menunjukkan struktur 12 lantai yang dianalisis menggunakan rekaman gempa kedua (MSEq2 dan ASEq2), dengan skenario penghilangan kolom dalam (I) di lantai 4.

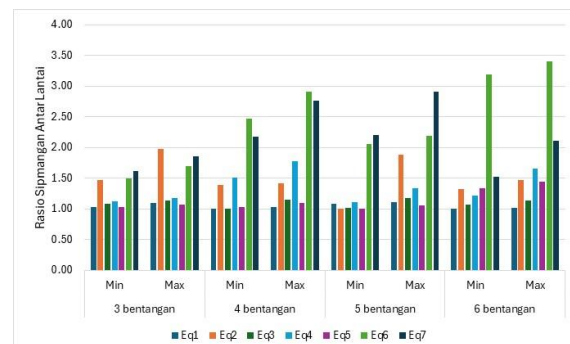
Rasio simpangan antar lantai, rotasi balok dan aksial kolom (AS/MS) merupakan perbandingan antara respon struktur permanen setelah dikenai gempa MSEq yang diukur setelah jeda waktu 60 detik (MS) dan setelah dikenai rangkaian gempa MSEq-ASEq dengan jeda waktu 60 detik diantara kedua kejadian tersebut (AS) sebagai mana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Posisi Pengambilan Nilai MS dan AS

Model Struktur Enam Lantai

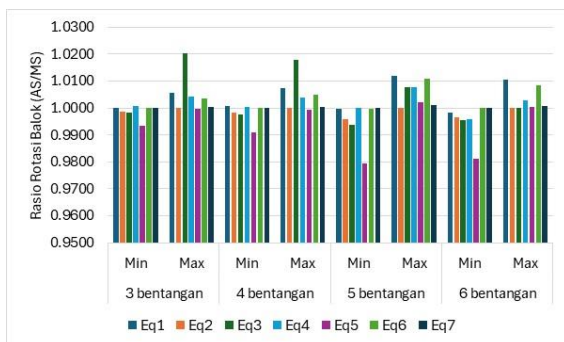
Rasio simpangan antar lantai (AS/MS) berkisar antara 1.00 s/d 3.41, dengan nilai rasio tertinggi pada struktur 6 bentangan yang dikenai gempa Eq6 (struktur 6SEq6). Rangkaian gempa MSEq-ASEq mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan simpangan antar lantai pada struktur yang dikenai gempa Eq2, Eq4, Eq6 dan Eq7 dengan perubahan nilai rasio simpangan antar lantai tidak mengikuti penambahan jumlah bentangan.



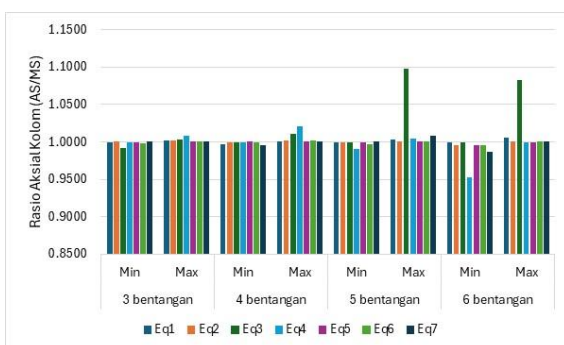
Gambar 3. Rasio Simpangan Antar Lantai (AS/MS) Struktur Enam Lantai

Rangkaian gempa MSeq-ASEq tidak mempunyai pengaruh signifikan pada peningkatan nilai rotasi balok yang merangka pada kolom yang dilepas dan peningkatan nilai aksial kolom di atas kolom yang dilepas untuk semua variasi bentangan maupun skenario pelepasan kolom, terlihat dari nilai rasio ≈ 1 yang ditampilkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.

Karena nilai rasio untuk rotasi balok dan aksial kolom ≈ 1 , maka untuk melihat pengaruh variasi bentangan, digunakan nilai rotasi balok dan rasio gaya aksial (P) terhadap kapasitas aksial kolom (N) maksimum (P/N) sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 6 dan Gambar 7, dimana nilai rotasi balok tertinggi terjadi pada struktur tiga bentangan yang dikenai gempa Eq3, diikuti gempa Eq1 sedangkan gempa yang lainnya relatif sama besar. Secara keseluruhan nilai rotasi balok dan rasio P/N mengalami penurunan mengikuti penambahan jumlah bentangan.



Gambar 4. Rasio Rotasi Balok (AS/MS) Struktur Enam Lantai



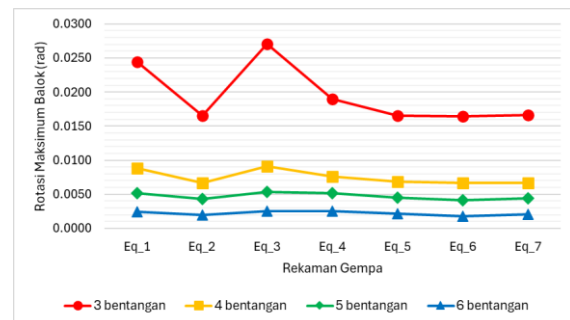
Gambar 5. Rasio Aksial Kolom (AS/MS) Struktur Enam Lantai

Model Struktur Sembilan Lantai

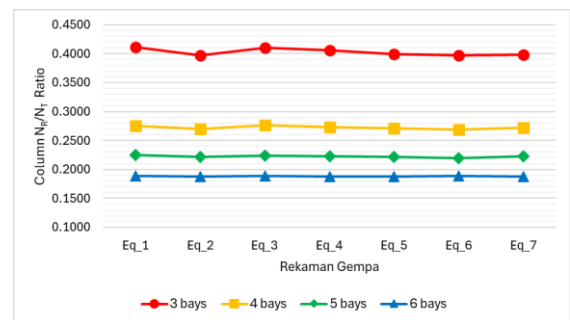
Rasio simpangan antar lantai (AS/MS) berkisar antara 1.00 s/d 3.59, dengan nilai rasio tertinggi pada struktur 5 bentangan yang dikenai gempa Eq5 (struktur 9SEq5). Terlihat bahwa rangkaian gempa MSeq-ASEq mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan

simpangan antar lantai pada struktur yang dikenai gempa Eq2, Eq4, dan Eq7. Untuk gempa Eq6 baru signifikan pengaruhnya pada struktur 5 dan 6 bentangan, untuk semua struktur dengan nilai rasio yang besar perubahan nilai rasio simpangan antar lantai tidak mengikuti penambahan jumlah bentangan sebagai mana terlihat pada Gambar 8.

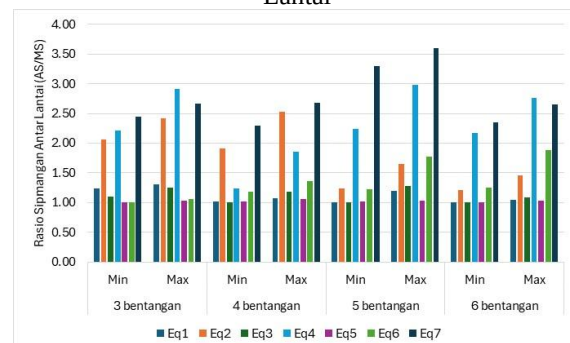
Pada struktur sembilan lantai rangkaian gempa MSeq-ASEq tidak mempunyai pengaruh signifikan pada peningkatan nilai rotasi balok yang merangka pada kolom yang dilepas dan peningkatan nilai aksial kolom di atas kolom yang dilepas untuk semua variasi bentangan maupun skenario pelepasan kolom, terlihat dari nilai rasio ≈ 1 yang ditampilkan pada Gambar 9 dan Gambar 10.



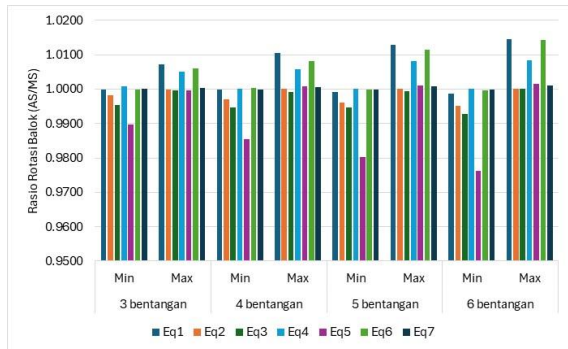
Gambar 6. Rotasi Maksimum Balok Struktur Enam Lantai



Gambar 7. Rasio P/N Maksimum Struktur Enam Lantai

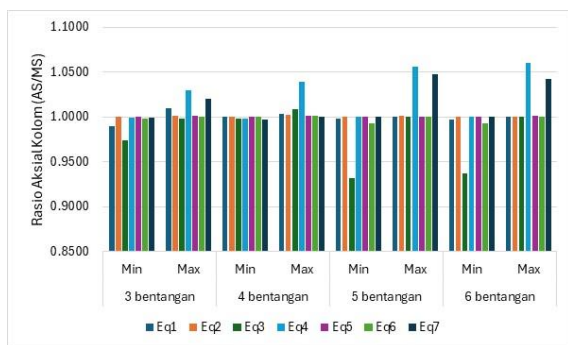


Gambar 8. Rasio Simpangan Antar Lantai (AS/MS) Struktur Sembilan Lantai

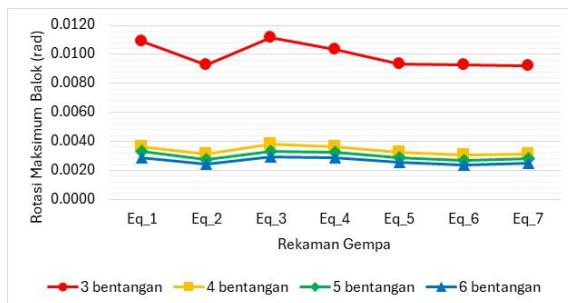


Gambar 9. Rasio Rotasi Balok (AS/MS) Struktur Sembilan Lantai

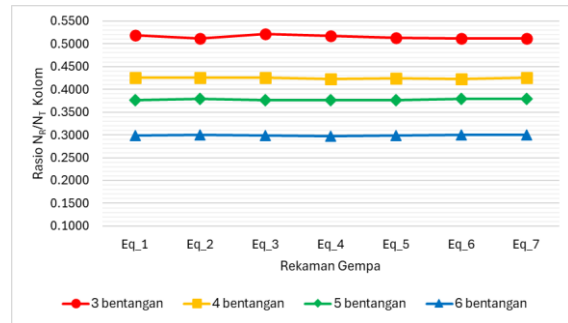
Karena nilai rasio untuk rotasi balok dan aksial kolom ≈ 1 , maka untuk melihat pengaruh variasi bentangan, ditinjau nilai rotasi balok dan rasio aksial (P/N) maksimum untuk semua variasi bentangan dan rekaman gempa sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 11 dan Gambar 12, dimana nilai rotasi balok tertinggi terjadi pada struktur tiga bentangan yang dikenai gempa Eq3, diikuti gempa Eq1 sedangkan gempa yang lainnya relatif sama besar. Secara keseluruhan nilai rotasi balok dan rasio P/N maksimum mengalami penurunan mengikuti penambahan jumlah bentangan.



Gambar 10. Rasio Aksial Kolom (AS/MS) Struktur Sembilan Lantai



Gambar 11. Rotasi Maksimum Balok Struktur Sembilan Lantai

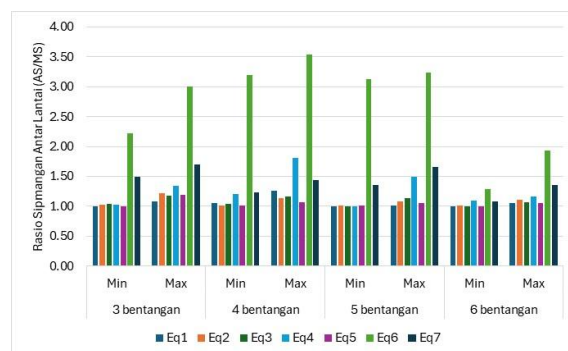


Gambar 12. Rasio P/N Maksimum Struktur Sembilan Lantai

Model Struktur 12 Lantai

Rasio simpangan antar lantai (AS/MS) struktur 12 lantai untuk semua variasi bentangan dan rekaman gempa berkisar antara 1.00 s/d 3.54, dengan nilai rasio tertinggi pada struktur 4 bentangan yang dikenai gempa Eq6 (struktur 12SEq6). Dari Gambar 13 terlihat bahwa rangkaian gempa MSeq-ASeq mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan simpangan antar lantai pada struktur yang dikenai gempa Eq4, Eq6 dan Eq7, dengan perubahan nilai rasio simpangan antar lantai tidak mengikuti penambahan jumlah bentangan.

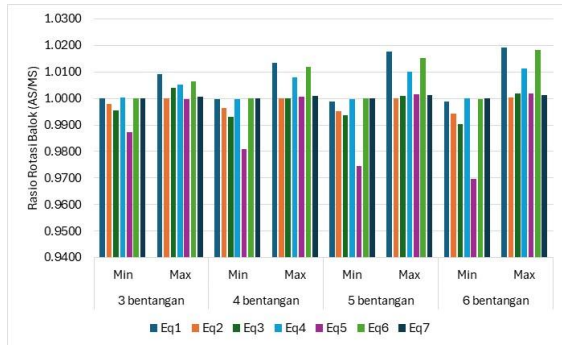
Terhadap peningkatan nilai rotasi balok yang merangka pada kolom yang dilepas dan peningkatan nilai aksial kolom di atas kolom yang dilepas, rangkaian gempa MSeq-ASeq tidak mempunyai pengaruh signifikan untuk semua variasi bentangan maupun skenario pelepasan kolom, hal ini terlihat dari nilai rasio ≈ 1 sebagai mana ditampilkan pada Gambar 14 dan Gambar 15.



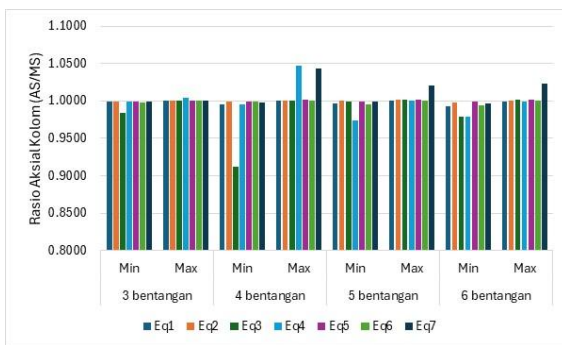
Gambar 13. Rasio Simpangan Antar Lantai (AS/MS) Struktur 12 Lantai

Karena nilai rasio untuk rotasi balok dan aksial kolom ≈ 1 , maka pengaruh variasi bentangan pada struktur 12 lantai dipelajari dengan melihat nilai rotasi balok dan rasio P/N maksimum sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 16 dan Gambar 17, dimana nilai rotasi

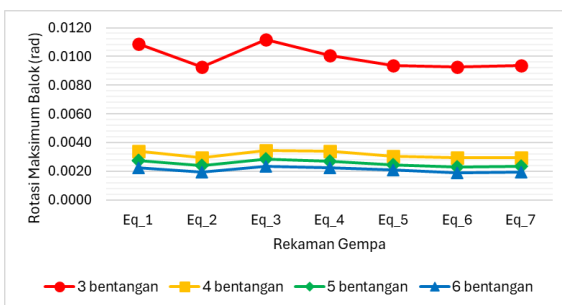
balok tertinggi terjadi pada struktur tiga bentangan yang dikenai gempa Eq3, diikuti gempa Eq1 sedangkan untuk gempa lainnya relatif mempunyai nilai yang sama besar. Secara keseluruhan nilai rotasi balok dan rasio P/N maksimum mengalami penurunan mengikuti penambahan jumlah bentangan.



Gambar 14. Rasio Rotasi Balok (AS/MS) Struktur 12 Lantai



Gambar 15. Rasio Aksial Kolom (AS/MS) Struktur 12 Lantai

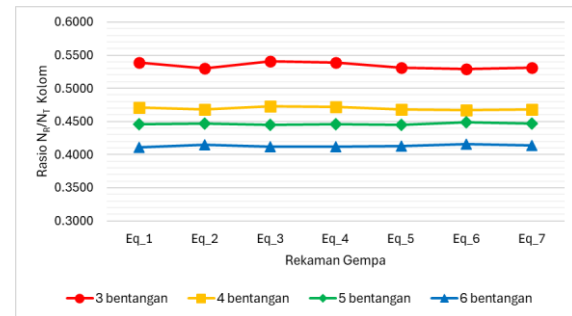


Gambar 16. Rotasi Maksimum Balok Struktur 12 Lantai

Model Struktur 15 Lantai

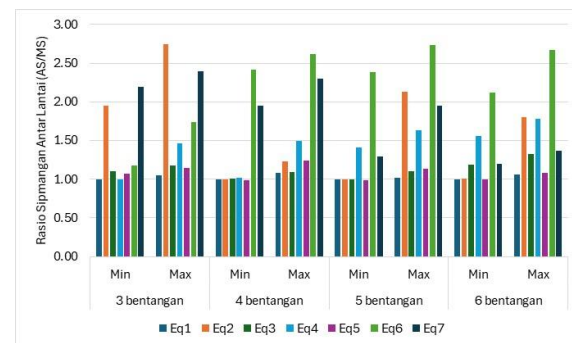
Rasio simpangan antar lantai (AS/MS) struktur 15 lantai berkisar antara 1.00 s/d 2.74, dengan nilai rasio tertinggi pada struktur 3 bentangan yang dikenai gempa Eq2 (struktur 15Seq2). Secara keseluruhan rangkaian gempa MSEq-ASEq mempunyai pengaruh yang signifikan pada terhadap peningkatan simpangan antar lantai pada struktur yang dikenai gempa Eq2, Eq4, Eq6 dan Eq7, dengan perubahan nilai

rasionya tidak mengikuti penambahan jumlah bentangan (Gambar 18).

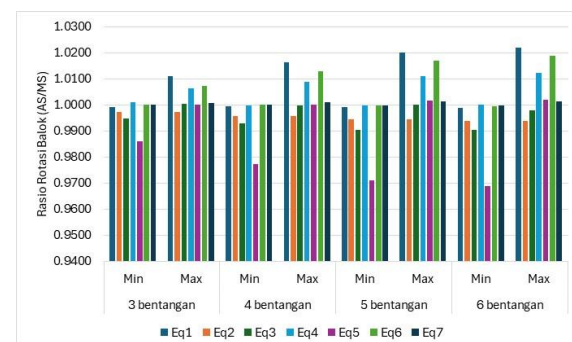


Gambar 17. Rasio P/N Maksimum Struktur 12 Lantai

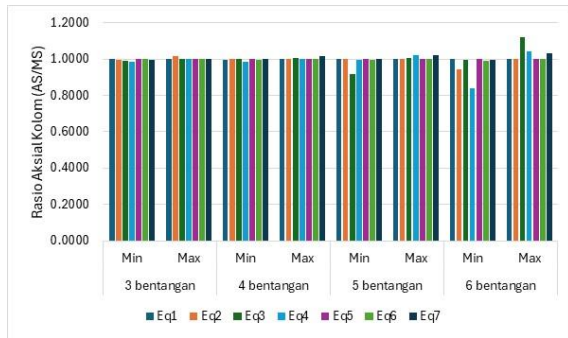
Dalam kaitannya dengan rotasi balok dan rasio aksial kolom, rangkaian gempa MSEq-ASEq tidak mempunyai pengaruh signifikan pada peningkatan nilai rotasi balok yang merangka pada kolom yang dilepas dan peningkatan nilai aksial kolom di atas kolom yang dilepas untuk semua variasi bentangan maupun skenario pelepasan kolom, hal ini terlihat dari nilai rasio ≈ 1 sebagai mana yang ditampilkan pada Gambar 19 dan Gambar 20



Gambar 18. Rasio Simpangan Antar Lantai (AS/MS) Struktur 15 Lantai

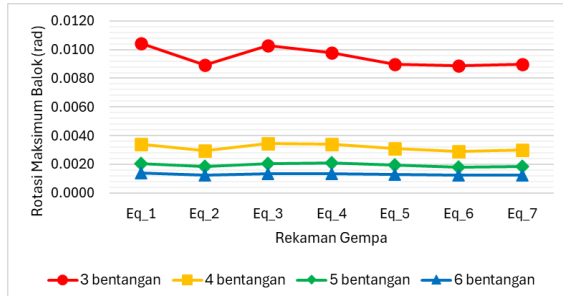


Gambar 19. Rasio Rotasi Balok (AS/MS) Struktur 15 Lantai

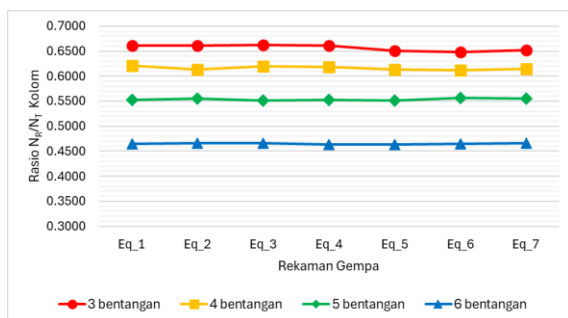


Gambar 20. Rasio Aksial Kolom (AS/MS) Struktur 15 Lantai

Karena nilai rasio untuk rotasi balok dan aksial kolom pada struktur 15 lantai ≈ 1 , maka untuk melihat pengaruh variasi bentangan, ditinjau nilai rotasi balok dan rasio P/N maksimum dimana nilai rotasi balok tertinggi terjadi pada struktur tiga bentangan yang dikenai gempa Eq3, diikuti gempa Eq1 dengan nilai yang hampir sama, sedangkan gempa yang lainnya lebih rendah dengan nilai yang relatif sama besar. Secara keseluruhan nilai rotasi balok dan rasio P/N maksimum mengalami penurunan mengikuti penambahan jumlah bentangan, sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 21 dan Gambar 22.



Gambar 21. Rotasi Maksimum Balok Struktur 15 Lantai



Gambar 22. Rasio P/N Maksimum Struktur 15 Lantai

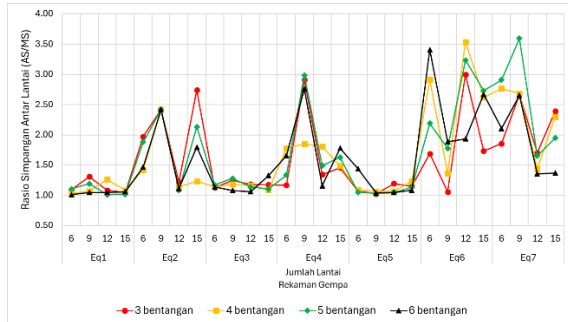
Pengaruh Parameter Gerakan Tanah

Pengaruh parameter gerakan tanah akibat gempa dilihat dari rasio simpangan antar lantai (AS/MS) maksimum, rotasi balok dan rasio Pu/Pn maksimum kolom diplotkan dalam satu grafik. Dari Gambar 23 terlihat bahwa dimana rasio simpangan antar lantai (AS/MS) maksimum terbesar terjadi pada struktur yang dikenai gempa Eq2, Eq4, Eq6 dan Eq7 yang jika dikaitkan dengan parameter gerakan tanah pada Tabel 1, merupakan gempa dengan periode pra-dominan yang besar baik untuk MSeq atau ASeq hal ini tentunya berkaitan dengan potensi amplifikasi respon struktur pada saat periode pra-dominan mendekati sama dengan periode resonansi struktur (Hardiyatmo, 2022).

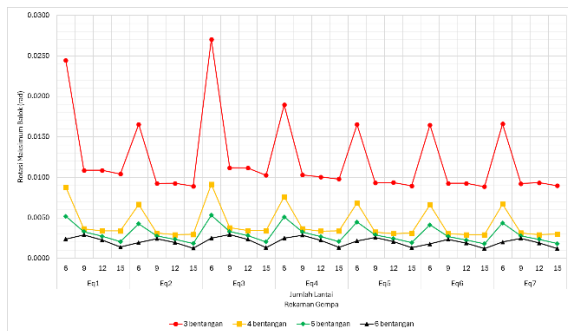
Selain itu dalam kaitannya dengan variasi bentangan terlihat bahwa pada rekaman gempa dengan nilai rasio yang besar, perubahan besarnya tidak mengikuti penambahan jumlah bentangan, sedangkan pada struktur yang dikenai gempa Eq1, Eq3, dan Eq5 (rasio relatif kecil) mengalami penurunan mengikuti penambahan jumlah bentangan. Hal ini menunjukkan bahwa menambah jumlah bentang pada denah untuk rangka pemikul momen beton bertulang tidak selalu memperbaiki dan meningkatkan perilaku seismik struktur terutama pada saat kapasitas struktur yang dibutuhkan lebih besar dari kapasitas yang tersedia (Massumi dkk., 2016). Terhadap variasi jumlah lantai perubahan besaran tidak mengikuti pola penambahan jumlah lantai.

Nilai rotasi maksimum balok yang merangka pada kolom yang dilepas merupakan nilai maksimum dari semua skenario pelepasan kolom untuk tiap variasi bentangan. Dari Gambar 24, terlihat bahwa nilai rotasi maksimum terbesar pada struktur 3 bentangan yang dikenai gempa Eq3 diikuti oleh gempa Eq1 dan Eq4 yaitu gempa dengan parameter PGA dan durasi antara yang besar pada gempa MSeq, sedangkan untuk gempa lainnya relatif sama (gempa ASeq tidak mempunyai pengaruh yang signifikan). Nilai rotasi maksimum balok terbesar pada struktur 6 lantai untuk skenario CCR di lantai 3. Hal ini berkaitan dengan jumlah balok yang merangka pada kolom yang dilepaskan dan panjang balok. Pola yang sama juga terjadi untuk struktur dengan 4 dan 5 bentangan, sedangkan untuk struktur dengan 6 bentangan mempunyai nilai yang relatif sama.

Dalam kaitannya dengan variasi jumlah bentangan, terlihat bahwa untuk semua rekaman gempa dan semua variasi jumlah lantai, nilai rotasi maksimum balok mengalami penurunan mengikuti penambahan jumlah bentangan.



Gambar 23. Rasio Simpangan Antar Lantai (AS/MS) Maksimum



Gambar 24. Rotasi Maksimum Balok

Rasio P/N maksimum dari kolom di atas kolom yang dilepaskan merupakan nilai maksimum dari semua skenario pelepasan kolom untuk tiap variasi bentangan. Dari Gambar 25, terlihat bahwa nilai rasio P/N maksimum kolom terbesar pada struktur 15 lantai dengan 3 bentangan pada skenario penghilangan kolom ICR untuk lantai 1 dan berkurang untuk struktur dengan jumlah lantai lebih kecil dengan pola yang sama untuk semua rekaman gempa. Dari kondisi tersebut bisa dikatakan bahwa rasio P/N kolom di atas kolom yang dilepaskan lebih dipengaruhi oleh beban gravitasi.



Gambar 25. Rasio P/N Maksimum Kolom

KESIMPULAN

Dari analisis dan pembahasan di atas dapat ditarik beberapa kesimpulan antara lain:

- Rangkaian gempa MSeq-ASeq mempunyai pengaruh signifikan terhadap kebutuhan akan redundansi struktur, hal ini terlihat dari peningkatan nilai simpangan antar lantai terutama untuk gempa dengan periode pradominan tinggi;
- Rangkaian gempa MSeq-ASeq tidak mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap keruntuhan progresif, hal ini terlihat dari tidak adanya peningkatan nilai rotasi balok yang merangka pada kolom yang dilepas dan rasio gaya aksial terhadap kapasitas aksial kolom di atas kolom yang dilepas (nilai rasio ≈ 1) untuk semua variasi bentangan, jumlah lantai dan skenario pelepasan kolom;
- Menambah jumlah bentangan pada denah untuk rangka pemikul momen tidak selalu mengurangi besaran simpangan antar lantai, namun efektif untuk mengurangi nilai rotasi balok dan rasio gaya aksial terhadap kapasitas aksial kolom, dimana struktur dengan 4 bentangan secara rata-rata paling besar persentase pengurangan nilai rotasi balok (65.38%) dan rasio gaya aksial kolom (17.05%) jika dibandingkan dengan struktur dengan jumlah bentangan sebelumnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ameri Mohammad, R., Massumi, A., dan Masoomi, H. (2019). Effect of Structural Redundancy on Progressive Collapse Resistance Enhancement in RC Frame Structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(1), 04018092. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001244](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001244)
- ATC-19. (1995). Structural Response Modification Factors. In *ATC-19 Report*. Redwood City, California: Applied Technology Council.
- Bao, X., Zhai, C., dan Xu, L. (2022). Time-Dependent Risk Assessment of a Containment Building Subjected to Mainshock-Aftershock Seismic Sequences. *Journal of Structural Engineering*, 148(4), 04022010.

- doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003300](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003300)
- Biondini, F., dan Frangopol, D. (2010). *Structural robustness and redundancy of deteriorating concrete bridges*. Paper presented at the Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization, 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS2010).
- Biondini, F., Frangopol Dan, M., dan Restelli, S. (2012). On Structural Robustness, Redundancy, and Static Indeterminacy. *Structures Congress 2008*, 1-10. doi:[https://doi.org/10.1061/41016\(314\)237](https://doi.org/10.1061/41016(314)237)
- Bolt, B. A. (1973). *Duration of strong ground motion*. Paper presented at the Proceedings of the 5th world conference on earthquake engineering.
- Caredda, G., Makoond, N., Buitrago, M., Sagaseta, J., Chryssanthopoulos, M., dan Adam, J. M. (2023). Learning from the progressive collapse of buildings. *Developments in the Built Environment*, 15, 100194. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100194>
- Ellingwood, B. R., dan Dusenberry, D. O. (2005). Building Design for Abnormal Loads and Progressive Collapse. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20(3), 194-205. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2005.00387.x>
- Erdik, M., Kamer, Y., Demircioğlu, M., dan Şeşetyan, K. (2012). 23 October 2011 Van (Turkey) earthquake. *Natural Hazards*, 64(1), 651-665. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-012-0263-9>
- Faroughi, A., Sarvghad Moghadam, A., dan Ghanooni Bagha, M. (2021). The Effects of Number and Location of Bracing Bays on Redundancy of Eccentrically-Braced Steel Moment Frames. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(8), 5-20. doi:<https://doi.org/10.22065/jsce.2020.235234.2170>
- FEMA. (2020). NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures—Volume I. In *FEMA P-2082-1* (pp. 145-147). Seattle, Washington: Federal Emergency Management Agency (FEMA).
- Fikri, R., dan Ingham, J. (2022). Seismic response and aftershock fragility curves for Non-ductile Mid-rise buildings comprised of reinforced concrete frame with masonry infill. *Structures*, 45, 1688-1700. doi:<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.09.108>
- Frangopol, D., dan Tsompanakis, Y. (2014). *Maintenance and safety of aging infrastructure: Structures and infrastructures book series, vol. 10* (Vol. 10). Boca Raton FL: CRC press.
- Hardiyatmo, H. C. (2022). *Rekayasa gempa untuk analisis struktur dan geoteknik*: UGM Press.
- Jiang, L., dan Ye, J. (2019). Redundancy of a mid-rise CFS composite shear wall building based on seismic response sensitivity analysis. *Engineering Structures*, 200, 109647. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109647>
- Kokot, S. (2022). Response spectrum of a reinforced concrete frame structure under various column removal scenarios. *Journal of Building Engineering*, 49, 103992. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.103992>
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., dan Park, R. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1826. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)
- Massumi, A., dan Mohammadi, R. (2016). Structural redundancy of 3D RC frames under seismic excitations. 9(1), 15-36. doi:<https://doi.org/10.12989/sem.2016.59.1.015>

- Massumi, A., Sadeghi, K., dan Ghaedi, H. (2021). The effects of mainshock-aftershock in successive earthquakes on the response of RC moment-resisting frames considering the influence of the vertical seismic component. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 393-405. doi:<https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.04.005>
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., dan Fenves, G. L. (2006). OpenSees command language manual. In (pp. 137-158). Berkeley, California: Pacific earthquake engineering research center.
- Nair, R. S. (2006). Preventing Disproportionate Collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20(4), 309-314. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2006\)20:4\(309\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2006)20:4(309))
- Pang, R., Zhou, Y., Chen, G., Jing, M., dan Yang, D. (2023). Stochastic Mainshock-Aftershock Simulation and Its Applications in Dynamic Reliability of Structural Systems via DPIM. *Journal of Engineering Mechanics*, 149(1), 04022096. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0002176](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002176)
- Potter, S. H., Becker, J. S., Johnston, D. M., dan Rossiter, K. P. (2015). An overview of the impacts of the 2010-2011 Canterbury earthquakes. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, 6-14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.01.014>
- Qian, L., Li, Y., Diao, M., Guan, H., dan Lu, X. (2020). Experimental and Computational Assessments of Progressive Collapse Resistance of Reinforced Concrete Planar Frames Subjected to Penultimate Column Removal Scenario. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(3), 04020019. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001420](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001420)
- Saatcioglu, M., dan Ozcebe, G. J. S. J. (1989). Response of reinforced concrete columns to simulated seismic loading. 86(1), 3-12.
- Shokrabadi, M., Burton Henry, V., dan Stewart Jonathan, P. (2018). Impact of Sequential Ground Motion Pairing on Mainshock-Aftershock Structural Response and Collapse Performance Assessment. *Journal of Structural Engineering*, 144(10), 04018177. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002170](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002170)
- SNI-1726:2019. (2019). Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung. In (pp. 63-64). Jakarta: Badan Standar Nasional (BSN).
- USGSA. (2003). *Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects*. Washington, DC: US General Services Administration.
- Wen, Y. K., dan Song, S. H. (2003). Structural Reliability/Redundancy under Earthquakes. *Journal of Structural Engineering*, 129(1), 56-67. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:1\(56\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:1(56))
- Zhou, Z., Yu, X. H., dan Lü, D. G. (2021). Study on incremental damage ratios of structures due to mainshock-aftershock earthquake sequences. *Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics*, 38(11), 147-159. doi:<https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.11.0791>