

KINERJA PILAR JEMBATAN SUNGAI PACONGKANG SULAWESI SELATAN DENGAN *PUSHOVER ANALYSIS*

Mohammad Junaedy Rahman¹, Hanafi Ashad², Faldy Asran^{3*}

¹Program Studi Teknik Sipil Bangunan Gedung, Universitas Negeri Makassar, Jl. Daeng Tata, Makassar

e-mail: moh.junaedy.rahman@unm.ac.id

²Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Muslim Indonesia, Jl. Urip Sumoharjo No. 225, Makassar

e-mail: hanafi.ashad@umi.ac.id

^{3*}Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Muslim Indonesia, Jl. Urip Sumoharjo No. 225, Makassar

e-mail: faldyasran@gmail.com

ABSTRAK

Jembatan Sungai Pacongkang di Sulawesi Selatan merupakan salah satu infrastruktur penting yang dirancang menggunakan faktor modifikasi respons (R) berdasarkan SNI 2833:2016. Namun, menurut AASHTO GSID 2014, nilai R untuk *substructure* dibatasi maksimum 1,5, sehingga perlu dilakukan evaluasi kesesuaian nilai R yang digunakan dalam perencanaan. Selain itu, kondisi situs yang berada di dekat Sesar Walanae menimbulkan potensi pengaruh interaksi tanah-struktur (*Soil-Structure Interaction*, SSI) yang signifikan terhadap respons dinamik pier dan fondasi. Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah menentukan sejauh mana nilai R aktual sesuai dengan nilai desain, menilai tingkat kinerja seismik pier, serta memastikan apakah sistem struktur memenuhi prinsip *Strong Foundation Weak Pier*. Penelitian ini menggunakan metode *pushover analysis* sebagai pendekatan *Performance-Based Seismic Design* (PBSD). Pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak Midas Civil melalui dua skenario: model tanpa SSI dan model dengan SSI menggunakan *nonlinear spring* dari hasil *p-y curve* program LPILE. Parameter seismik diturunkan dari *Deterministic Seismic Hazard Analysis* (DSHA) terhadap Sesar Walanae. Hasil analisis menunjukkan nilai R aktual pier column sebesar 1,64 (longitudinal) dan 0,95 (transversal), serta bored pile sebesar 1,58 dan 1,56. Evaluasi berdasarkan FEMA 440 dan NCHRP 440 menunjukkan seluruh elemen berada dalam kategori *Fully Operational* dengan *drift ratio* < 1%. Pembentukan sendi plastis pada pangkal pier menegaskan bahwa sistem memenuhi kriteria *Strong Foundation Weak Pier*.

Kata kunci: *pushover analysis*, *soil-structure interaction*, faktor modifikasi respons, kinerja seismik

1. PENDAHULUAN

Jembatan Sungai Pacongkang yang tergolong kategori keutamaan sebagai jembatan lainnya menggunakan pier dengan tipe kolom majemuk sehingga dalam perencanaan digunakan faktor modifikasi respon (R) 3.0 untuk arah longitudinal dan 2.0 untuk arah transversal berdasarkan SNI 2833:2016, namun AASHTO GSID 2014 membatasi faktor modifikasi respon (R) tidak lebih dari 1.5 untuk semua *substructure* sehingga digunakan R sama dengan 1.50 untuk struktur pier baik pada arah longitudinal maupun arah transversal, sedangkan untuk fondasi digunakan nilai R sama dengan 1.0. Sebagai bahan perbandingan nilai R yang didapatkan dari standar/code yang digunakan dalam perencanaan maka perlu dilakukan perhitungan faktor modifikasi respon (R) aktual untuk memastikan pier dan fondasi masih dalam batasan-batasan dan perilaku sesuai yang diharapkan pada tahap perencanaan. Salah satu cara untuk menghitung faktor modifikasi respon (R) aktual adalah *pushover analysis*. Selain nilai R, dengan melakukan *pushover analysis*, tingkat kinerja struktur pier juga dapat dievaluasi termasuk urutan terjadinya sendi plastis untuk memastikan kriteria strong foundation weak pier.

Berdasarkan latar belakang di atas maka tujuan dari penulisan ini antara lain, untuk mendapatkan faktor modifikasi respon (R) aktual pada pier column dan fondasi, untuk mengetahui tingkat kinerja (performance) struktur pier berdasarkan FEMA, dan untuk mengecek kriteria strong foundation weak pier.

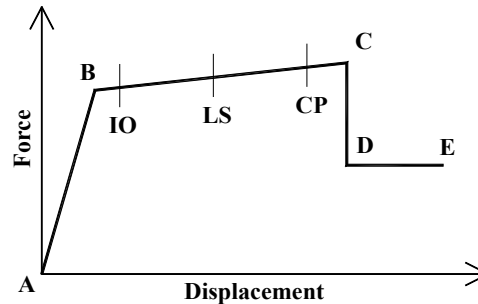
2. KAJIAN PUSTAKA DAN METODOLOGI

Performance based seismic design (PBSD)

Performance Based Seismic Design (PBSD) merupakan pendekatan modern dalam perencanaan struktur tahan gempa yang menekankan pada pencapaian kinerja tertentu ketika struktur mengalami gempa dengan tingkat intensitas tertentu. Tidak seperti pendekatan tradisional yang hanya berfokus pada kekuatan struktur, PBSD bertujuan untuk mengendalikan tingkat kerusakan dan memastikan fungsi struktur tetap sesuai target pasca-gempa. Hubungan gaya-deformasi (*force-deformation relationship*) dalam struktur, dikaitkan dengan level kinerja (*performance level*) berdasarkan FEMA 356 dapat dilihat pada Gambar 1.

A ke B menggambarkan struktur masih berperilaku elastis (linear), artinya setelah beban dilepas, struktur akan kembali ke bentuk semula tanpa kerusakan permanen. B adalah titik leleh (*yield point*). Mulai dari sini, struktur mulai

mengalami deformasi plastis (permanen). B ke C menggambarkan struktur masih mampu menahan beban, namun masuk ke fase *non-linear* yaitu mengalami kerusakan permanen yang makin bertambah. C adalah titik kapasitas maksimum dimana gaya maksimum masih dapat ditahan struktur sebelum mengalami penurunan kekuatan. C ke D menggambarkan struktur mengalami penurunan kekuatan yang drastis (*softening* atau *collapse*) sedangkan D ke E menggambarkan struktur benar-benar gagal (*collapse*) dan tidak dapat lagi menahan beban.



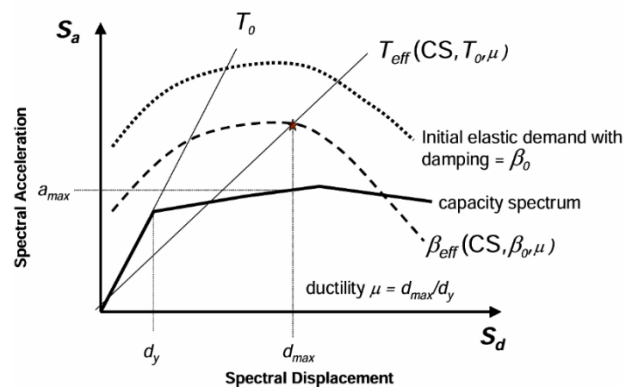
Gambar 1. Hubungan gaya-deformasi dengan *performance level*

Simbol *performance level* berdasarkan FEMA 356 :

1. IO (*Immediate Occupancy*): Struktur hanya mengalami kerusakan ringan, masih bisa digunakan segera setelah gempa. Nilai IO tidak lebih dari nilai 0.67 kali LS.
2. LS (*Life Safety*): Struktur rusak parah tapi tetap melindungi jiwa penghuni, meskipun bangunan mungkin harus diperbaiki berat atau dibongkar. Nilai LS sama dengan 0.75 kali dari nilai titik C.
3. CP (*Collapse Prevention*): Struktur hampir ambruk, tapi tetap berdiri cukup lama untuk memungkinkan evakuasi. Nilai CP adalah nilai pada titik C dan tidak lebih besar dari 0.75 kali nilai titik E.

Pushover analysis

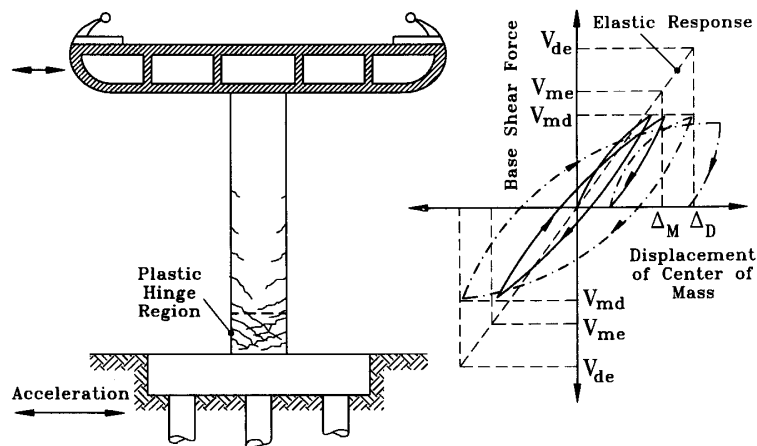
Salah satu metode untuk mengevaluasi kinerja seismik dalam PBSD adalah analisis *pushover*. Analisis ini dilakukan dengan memberikan beban lateral bertahap pada model jembatan untuk mengidentifikasi perilaku nonlinear hingga mencapai kondisi keruntuhan. Beban lateral ini biasanya mewakili efek gempa dalam arah longitudinal atau transversal. Melalui analisis ini, dapat diperoleh kurva kapasitas (*capacity curve*) yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar dan simpangan struktur. Kurva ini kemudian dibandingkan dengan *demand spectrum* untuk menilai tingkat performa struktur. Kurva ini juga digunakan untuk menentukan tingkat kerusakan potensial serta kinerja seismik berdasarkan kriteria tertentu, seperti yang tercantum dalam FEMA 440.



Gambar 2. *Acceleration-displacement response spectrum (ADRS)*

Faktor modifikasi respon (R)

Faktor modifikasi respon (R) adalah suatu faktor yang digunakan dalam desain seismik untuk memperhitungkan kapasitas struktur dalam mendisipasikan energi gempa melalui perilaku inelastik. Nilai R digunakan untuk mengurangi gaya gempa nominal yang dihitung berdasarkan asumsi perilaku elastis penuh, dengan mempertimbangkan kemampuan struktur untuk berdeformasi plastis tanpa mengalami keruntuhan.



Gambar 3. Respon daktilitas pada kolom pier

Dengan melihat Gambar 3, nilai R merupakan perbandingan gaya geser elastik (V_{de}) dan gaya geser desain (V_{md}).

$$R = \frac{V_{de}}{V_{md}}$$

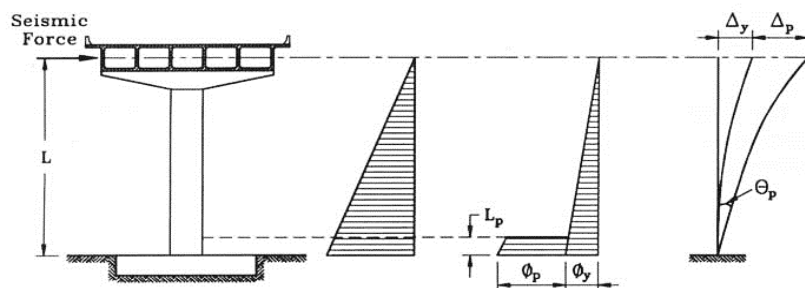
Sendi plastis

Sendi plastis pada jembatan adalah wilayah terbatas pada elemen struktur, seperti kolom atau pier, yang dirancang untuk mengalami deformasi plastis saat terjadi beban gempa besar. Tujuan utama pembentukan sendi plastis adalah untuk mendisipasikan energi gempa melalui perilaku inelastis yang terkendali, sehingga menghindari keruntuhan total struktur.

Priestley memberikan rumus empiris untuk menghitung panjang sendi plastis (*plastic hinge length*, L_p) sebagai berikut:

$$L_p = 0.08L + 0.0022f_{ye}d_{bl} > 0.044f_{ye}d_{bl} \quad (\text{MPa})$$

Dimana L adalah jarak (mm), d_{bl} diameter tulangan longitudinal (mm), f_{ye} tegangan leleh baja tulangan (MPa).



Gambar 4. Deformasi inelastik pada kolom pier

Setelah menentukan panjang sendi plastis, selanjutnya menentukan rotasi plastis dengan persamaan sebagai berikut.

$$\theta_p = L_p \phi_p = L_p (\phi_u - \phi_y)$$

Dimana L_p adalah panjang sendi plastis, sedangkan f_p , f_u , dan f_y berturut-turut adalah kurvatur plastis, kurvatur ultimit, dan kurvatur kondisi leleh yang didapatkan dari kurva momen-kurvatur.

3. PEMODELAN

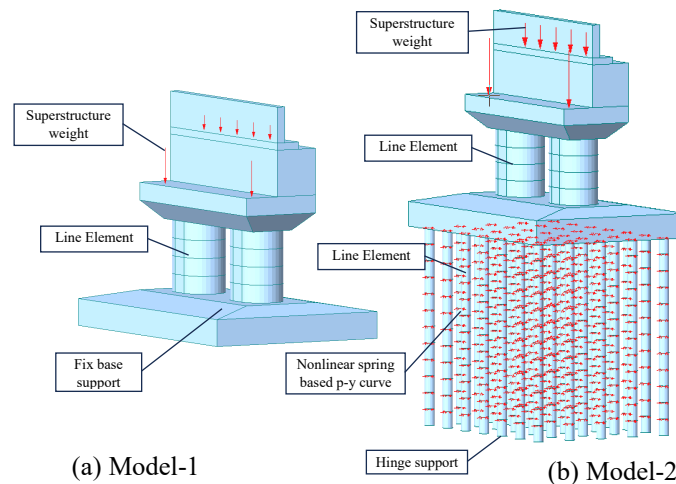
Pemodelan

Pemodelan dan analisis dilakukan dengan program bantu *Midas Civil*. Struktur pier dan *bored pile* dianggap sebagai kolom kantilever yang mengalami lentur, geser, dan gaya aksial akibat berat dari struktur atas dan gaya lateral dari beban gempa atau beban-beban layan lainnya, sehingga dimodelkan sebagai elemen garis (*general beam*). Pada

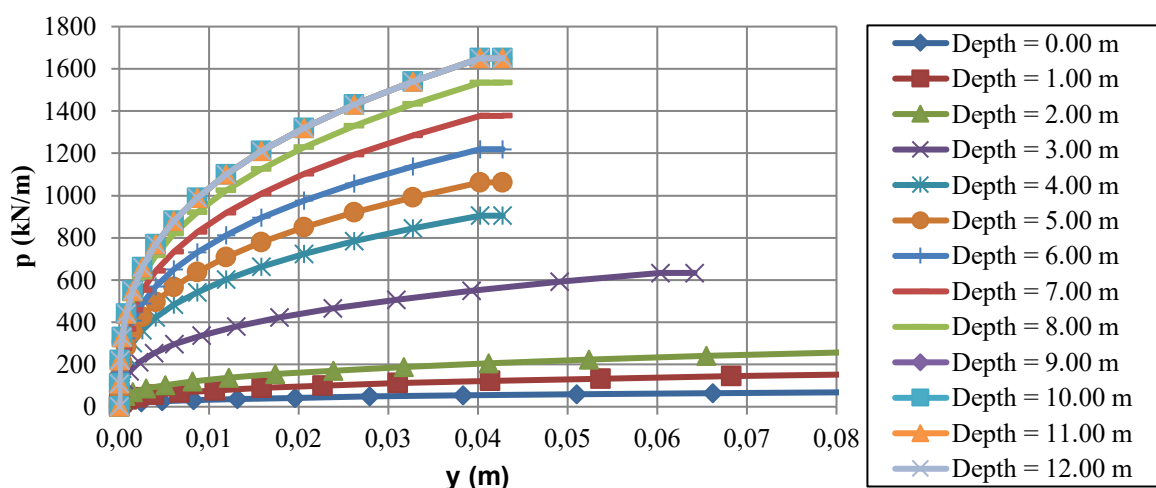
elemen yang mempunyai node tidak berimpit dengan node dari elemen lain maka akan dihubungkan dengan *rigid link*. Berat dari bangunan atas dimodelkan sebagai beban titik pada struktur *pier*.

Pada penelitian ini digunakan 2 jenis model, yaitu model-1 dan model-2 seperti pada Gambar 5a dan Gambar 5b. Model-1 digunakan untuk menganalisis struktur pier tanpa memodelkan fondasi agar deformasi pada *bottom pilecap* atau kepala tiang tidak diperhitungkan. Oleh karena itu pada model ini digunakan tumpuan *fix support* di dasar *pilecap*. Model-1 ini hanya menitikberatkan pada penentuan *performance* pada *pier column*. Struktur *pier* dan fondasi *bored pile* menggunakan mutu beton $f_c' 30$ MPa. Baja tulangan menggunakan $f_y 420$ MPa untuk tulangan utama dan $f_y 280$ MPa untuk tulangan geser. *Casing* pada *bored pile* menggunakan mutu baja SS 400 dengan $f_y 235$ MPa.

Model-2 digunakan untuk analisis struktur *pier* secara global dengan turut memodelkan fondasi dan *nonlinear spring* yang dapat merepresentasikan *Soil-Structure Interaction (SSI)*. Nilai kekakuan *nonlinear spring* ini didapatkan dari *p-y curve* yang dihasilkan dari program bantu *LPILE* dengan melakukan korelasi empiris nilai N-SPT ke parameter berat volume tanah (g), kohesi undrained (c_u), dan nilai e_{50} yang menjadi *input* pada program tersebut. Untuk tumpuan pada ujung fondasi digunakan tumpuan sendi karena dianggap struktur sudah tidak mengalami penurunan. Gambar 6 memperlihatkan *p-y curve* di sepanjang kedalaman fondasi yang dihasilkan dari program *LPILE*. Gambar tersebut memperlihatkan kekakuan pada spring akan semakin meningkat seiring pertambahan kedalaman fondasi.



Gambar 5. Pemodelan struktur *pier*



Gambar 6. *p-y curve* fondasi *pier* P2

Eigenvalue Analysis

Eigenvalue *analysis* dilakukan dengan program bantu *Midas Civil* untuk mendapatkan waktu getar alami struktur. Dengan jumlah mode yang digunakan yaitu 15 mode, maka telah cukup untuk mencapai partisipasi massa $> 90\%$ pada

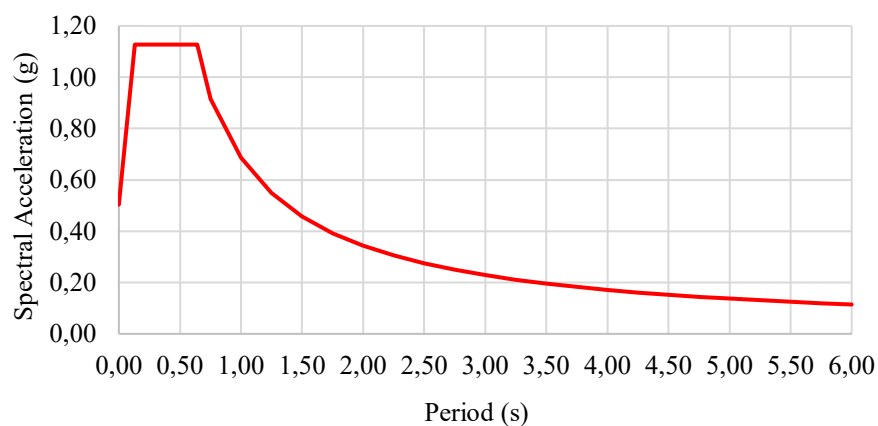
arah X, Y, dan Z. Waktu getar alami pada model-1 adalah 0.249 detik pada arah-x dan 0.073 pada arah-y. Untuk model-2 didapatkan 0.306 detik pada arah-x dan 0.165 detik pada arah-y. Waktu getar ini akan digunakan dalam perhitungan gaya gempa elastik dengan metode respon spektrum.

Tabel 1. Waktu getar alami struktur

Model	Mode shape	Waktu Getar (detik)
<i>Model-1</i>	Translasi-x	0.249
	Translasi-y	0.073
<i>Model-2</i>	Translasi-x	0.306
	Translasi-y	0.165

Respon Spektrum

Respon spektrum yang digunakan adalah respon spektrum yang dihasilkan dari prosedur spesifik situs yang telah dilakukan oleh penulis dengan pendekatan *Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA)* karena lokasi jembatan ini termasuk dalam kriteria situs dekat sesar yaitu sesar walanae. Dari hasil kajian DSHA didapatkan nilai A_s 0.503 g, S_{DS} 1.127 g, dan S_{DI} 0.687 g.



Gambar 7. Respon spektrum

Moment-Curvature

Moment-curvature pada penampang dihitung dengan analisa penampang dengan menggunakan program bantu XTRACT dengan memodelkan beton *confined* dan *unconfined* dari Mander. Momen dan kurvatur pada kondisi *yield* dan *ultimate* dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 2. Momen dan kurvatur pada kondisi *yield* dan *ultimate*

Penampang	Kondisi Beban	Moment M (kNm)	Curvature f (1/m)
<i>Pier column</i> arah-x	Ultimate	42870	0.020240
	Yield	40080	0.001579
<i>Pier column</i> arah-y	Ultimate	56690	0.010700
	Yield	53420	0.001197
<i>Bored pile</i>	Ultimate	1346	0.025030
	Yield	1241	0.006014

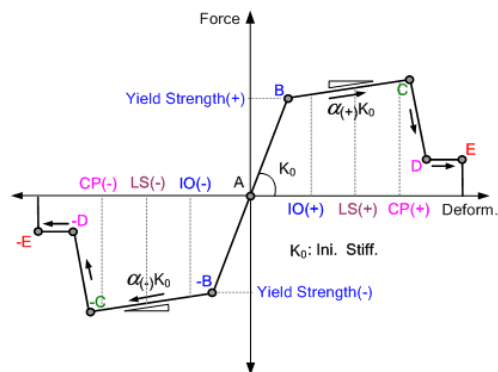
Backbone Curve

Berdasarkan kurva momen-kurvatur yang dihasilkan dari analisa penampang selanjutnya dilakukan perhitungan hubungan momen-rotasi pada Tabel 3.

Tabel 3. Momen dan kurvatur pada kondisi *yield* dan *ultimate*

Penampang	Kondisi Beban	Moment M (kNm)	Curvature f (1/m)	Hinge Length L_p (m)	Rotation q (rad)	M / M_y	q / q_y
Pier column arah-x	Ultimate	42870	0.020240	0.462	0.0094	1.070	12.818
	Yield	40080	0.001579	0.462	0.0007	1.000	1.000
Pier column arah-y	Ultimate	56690	0.010700	0.462	0.0049	1.061	8.939
	Yield	53420	0.001197	0.462	0.0006	1.000	1.000
Bored pile	Ultimate	1346	0.025030	0.983	0.0246	1.085	4.162
	Yield	1241	0.006014	0.983	0.0059	1.000	1.000

Berdasarkan hubungan momen-rotasi pada Tabel 3, selanjutnya ditentukan *Backbone Curve* berdasarkan FEMA pada Tabel 4.

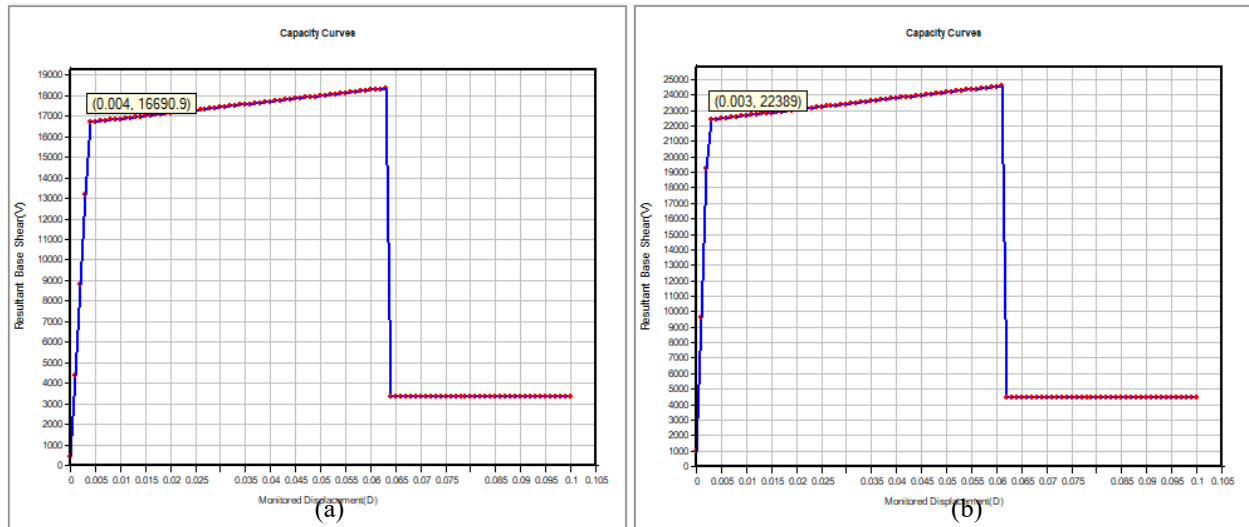
Gambar 8. *Backbone Curve*Tabel 4. Momen dan kurvatur pada kondisi *yield* dan *ultimate*

Penampang	Point	F	d
Pier column arah-x	A	0.00	0.00
	B	1.00	1.00
	C	1.07	12.82
	D	0.21	12.82
	E	0.21	19.23
Pier column arah-y	A	0.00	0.00
	B	1.00	1.00
	C	1.06	8.94
	D	0.21	8.94
	E	0.21	13.41
Bored pile	A	0.00	0.00
	B	1.00	1.00
	C	1.08	4.16
	D	0.22	4.16
	E	0.22	6.24

Acceptance criteria untuk kinerja elemen ditentukan mengacu kepada NCHRP 440 Synthesis yaitu CP sama dengan batas ultimit, LS sama dengan 0.75 kali CP, dan IO sama dengan 0.67 kali LS.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Faktor modifikasi respon (R) *pier column*



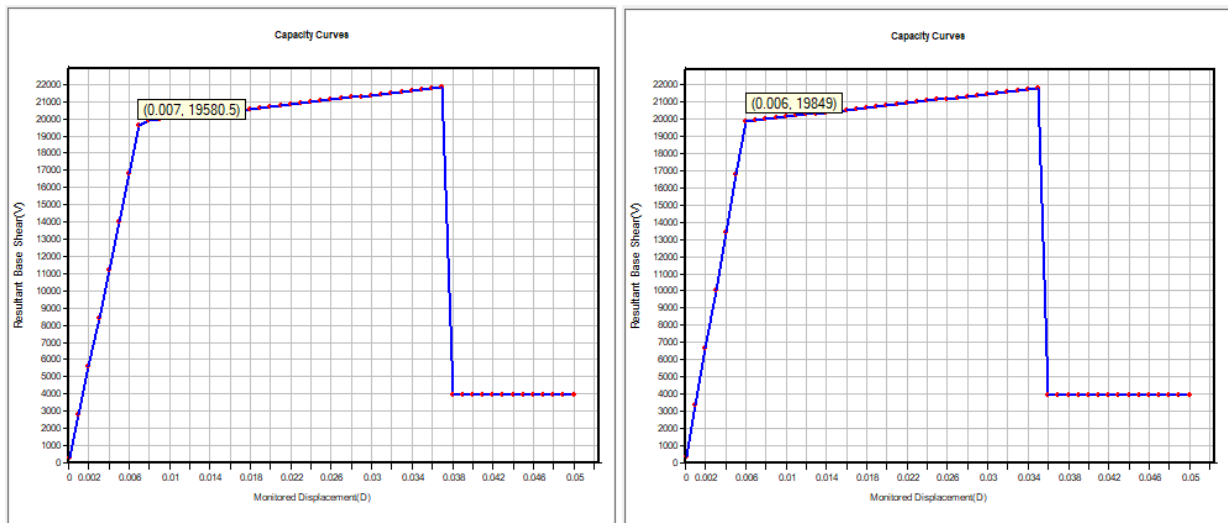
Gambar 9. Kurva kapasitas *pier column*, (a) arah longitudinal, (b) arah transversal

Berdasarkan kurva kapasitas *pier column* di atas didapatkan gaya geser desain 16690.90 kN pada arah longitudinal (arah-x) dan 22389.00 kN pada arah transversal (arah-y)

	Arah-x	Arah-y	
Parameter respon spektra	0.503	0.503	g
$A_s =$	1.127	1.127	g
$S_{DS} =$	0.687	0.687	g
$S_{D1} =$	0.122	0.122	s
$T_o =$	0.609	0.609	s
$T_s =$	0.249	0.073	s
Waktu getar struktur		0.878	g
$T < T_o$	1.127		g
$T_o \leq T \leq T_s$			g
$T > T_s$	1.127	0.878	g
Digunakan koefisien respon elastik	24229.84	24229.84	kN
Berat total struktur	1.00	1.00	
Faktor modifikasi respon gempa	27316.83	21269.56	kN
Gaya geser dasar elastik	16690.90	22389.00	kN
Gaya geser dasar desain	1.64	0.95	
Faktor modifikasi respon aktual	1.50	1.50	
Faktor modifikasi respon desain			

Dari perhitungan di atas didapatkan faktor modifikasi respon (R) aktual 1.64 pada arah longitudinal (arah-x) dan 0.95 pada arah transversal. Sedangkan faktor modifikasi respon (R) desain yang digunakan 1.50 baik pada arah longitudinal maupun pada arah transversal. Pada arah longitudinal R aktual lebih besar dari pada R desain, ini mengindikasikan pier column memiliki daktilitas dan kemampuan menerima gaya gempa lebih besar dari yang direncanakan sehingga lebih aman dan konservatif. Sebaliknya pada arah transversal, R aktual lebih kecil dari pada R desain sehingga memiliki daktilitas dan kemampuan menerima gaya gempa yang lebih kecil dari yang direncanakan, ini mengindikasikan ada potensi keruntuhan dini (*brittle failure*) atau kapasitas energi disipasi energi gempa yang terbatas pada arah *transversal pier column*.

Faktor modifikasi respon (R) *bored pile*



(a)

(b)

Gambar 10. Kurva kapasitas *bored pile*, (a) arah longitudinal, (b) arah transversal

Berdasarkan kurva kapasitas *bored pile* di atas didapatkan gaya geser desain 19580.50 kN pada arah longitudinal (arah-x) dan 19849.00 kN pada arah transversal (arah-y)

Parameter respon spektra

$$A_s =$$

$$S_{DS} =$$

$$S_{D1} =$$

$$T_o =$$

$$T_s =$$

$$T =$$

Waktu getar struktur

$$T < T_o$$

$$T_o \leq T \leq T_s$$

$$T > T_s$$

$$C_{sm} = (S_{DS} - A_s) * T / T_o + A_s =$$

$$C_{sm} = S_{DS} =$$

$$C_{sm} = S_{D1} / T =$$

$$C_{sm} =$$

$$W_t =$$

$$R =$$

$$V_e = C_{sm} * W_t / R =$$

$$V_y =$$

$$R_{aktual} = V_e / V_y =$$

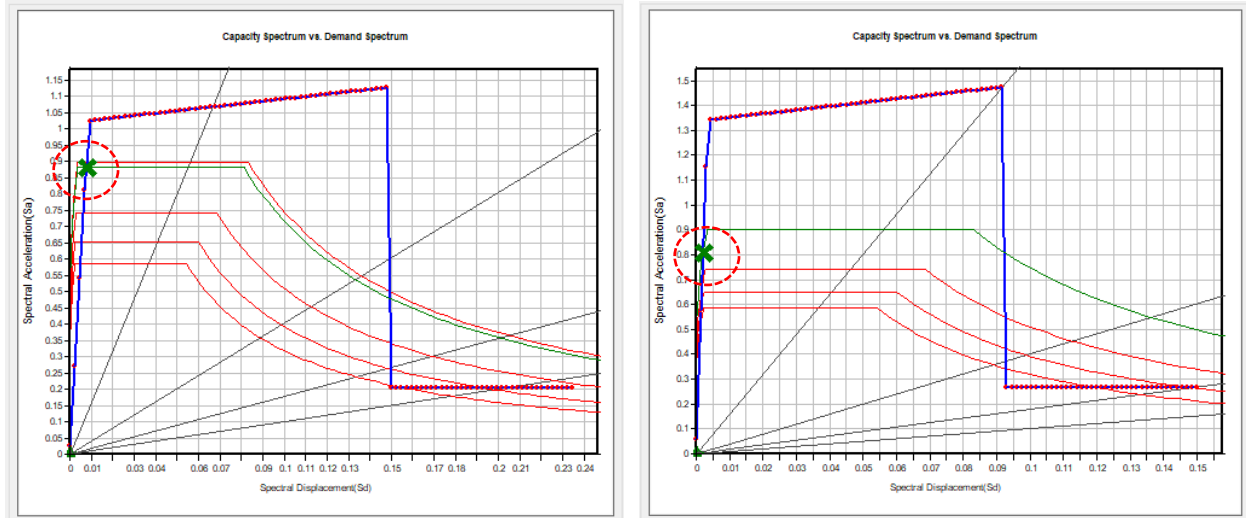
$$R_{desain} =$$

Arah-x Arah-y

0.503	0.503	g
1.127	1.127	g
0.687	0.687	g
0.122	0.122	s
0.609	0.609	s
0.306	0.165	s
		g
1.127	1.127	g
		g
1.127	1.127	g
27387.23	27387.23	kN
1.00	1.00	
30876.49	30876.49	kN
19580.50	19849.00	kN
1.58	1.56	
1.00	1.00	

Dari perhitungan di atas didapatkan faktor modifikasi respon (R) aktual 1.58 pada arah longitudinal (arah-x) dan 1.56 pada arah transversal. Sedangkan faktor modifikasi respon (R) desain yang digunakan 1.00 baik pada arah longitudinal maupun pada arah transversal. Pada kedua arah yaitu longitudinal dan transversal, R aktual lebih besar dari pada R desain, ini mengindikasikan *bored pile* memiliki daktilitas dan kemampuan menerima gaya gempa lebih besar dari yang direncanakan sehingga lebih aman dan konservatif.

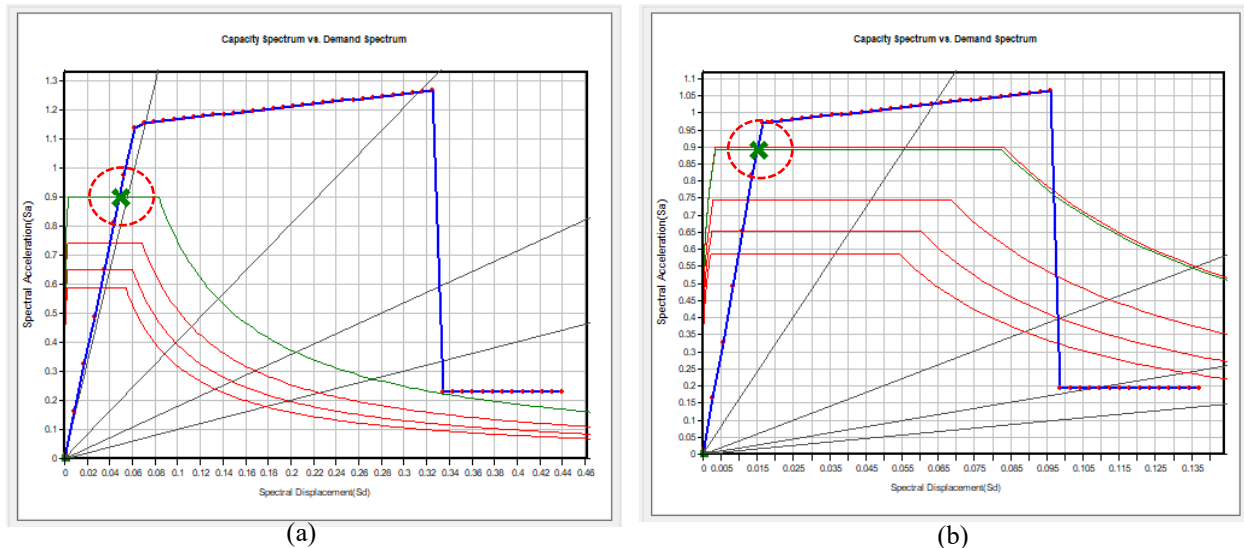
Performance (FEMA) pier column



Gambar 11. Performance point pier column, (a) arah longitudinal, (b) arah transversal

Performance point yang dihasilkan pada arah longitudinal adalah 14350 kN pada deformasi 0.003329 m, sedangkan pada arah transversal dihasilkan 13540 kN dan 0.001409 m. Diketahui tinggi pier column 4.00 m, sehingga dengan membagi displacement yang terjadi dengan tinggi pier column pada masing-masing arah (longitudinal dan transversal) maka didapatkan drift ratio pada arah longitudinal $0.003329/4.00 = 0.08\%$ dan pada arah transversal $0.001409/4.00 = 0.04\%$. Oleh karena itu berdasarkan acceptance criteria NCHRP Synthesis 440 maka pier column berada dalam kategori Fully Operational dimana drift ratio $< 1.00\%$.

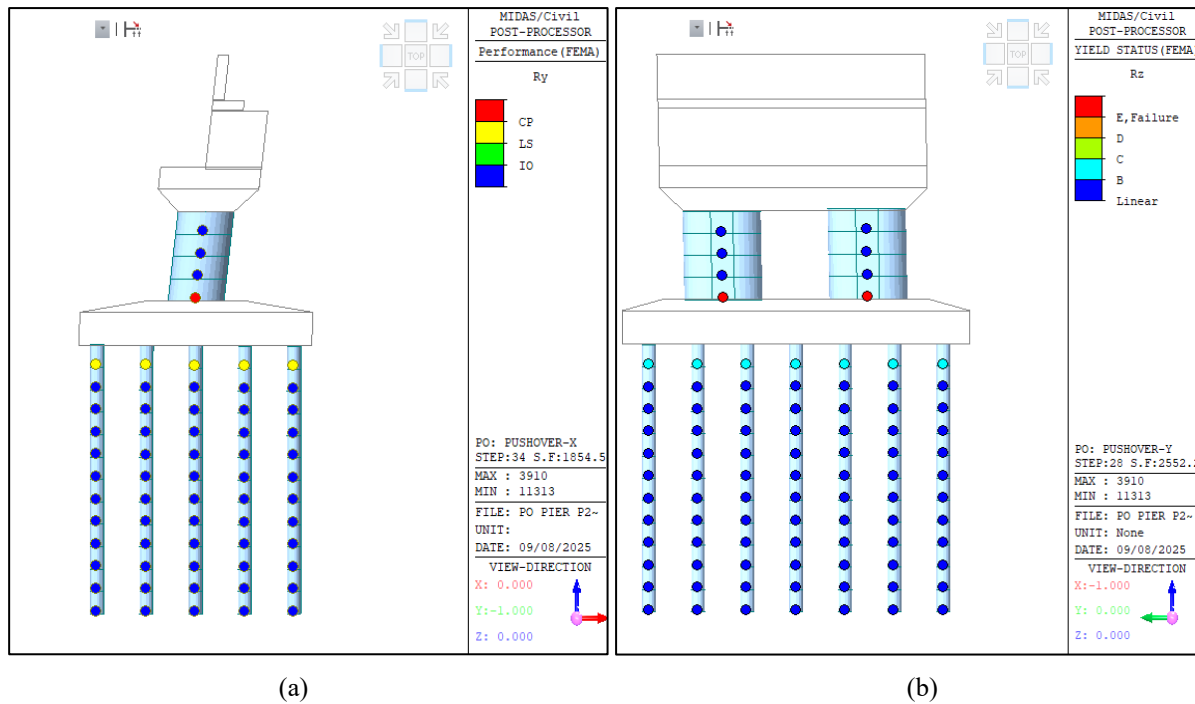
Performance (FEMA) bored pile



Gambar 12. Performance point bored pile, (a) arah longitudinal, (b) arah transversal

Performance point yang dihasilkan pada arah longitudinal adalah 15490 kN dan 0.005539 m, sedangkan pada arah transversal dihasilkan 18290 kN dan 0.005498. Diketahui tinggi bored pile 15.00 m, sehingga dengan membagi displacement yang terjadi dengan tinggi pier column pada masing-masing arah (longitudinal dan transversal) maka didapatkan drift ratio pada arah longitudinal $0.005539/15.00 = 0.04\%$ dan pada arah transversal $0.005498/15.00 = 0.04\%$. Oleh karena itu berdasarkan acceptance criteria NCHRP Synthesis 440 maka bored pile berada dalam kategori Fully Operational dimana drift ratio $< 1.00\%$.

Kriteria *strong foundation weak pier*



Gambar 13. Pembentukan sendi plastis pada *pier column* dan *bored pile*

Dari hasil *pushover analysis* terlihat pada kedua arah (longitudinal dan transversal), sendi plastis pertama terjadi pada pangkal *pier column* tepat di atas *pilecap* ditandai dengan warna merah pada gambar. Ini menunjukkan bahwa elemen tersebut telah mencapai kondisi *Collapse Prevention (CP)* berdasarkan FEMA. Sementara itu, seluruh elemen *bored pile* masih berada dalam kondisi elastis. Hal ini menegaskan bahwa deformasi inelastik terlokalisasi pada *pier column*, sedangkan *bored pile* tetap kuat dan kaku. Dengan demikian, mekanisme keruntuhan sesuai dengan kriteria *Strong Foundation Weak Pier*.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Pada *pier column* dihasilkan faktor modifikasi respon (R) aktual 1.64 pada arah longitudinal dan 0.95 pada arah transversal. Sehingga pada arah longitudinal R aktual > R desain dimana R desain adalah 1.50. Ini mengindikasikan *pier column* memiliki daktilitas dan kemampuan menerima gaya gempa lebih besar dari yang direncanakan. Sementara pada arah transversal R aktual < R desain. Ini mengindikasikan ada potensi keruntuhan dini (*brittle failure*) karena *pier column* pada arah transversal memiliki daktilitas dan kemampuan menerima gaya gempa yang lebih kecil dari yang direncanakan
2. Untuk *bored pile* didapatkan faktor modifikasi respon (R) aktual 1.58 pada arah longitudinal (arah-x) dan 1.56 pada arah transversal. Sedangkan faktor modifikasi respon (R) desain yang digunakan 1.00 baik pada arah longitudinal maupun pada arah transversal. Pada kedua arah yaitu longitudinal dan transversal, R aktual lebih besar dari pada R desain, ini mengindikasikan *bored pile* memiliki daktilitas dan kemampuan menerima gaya gempa lebih besar dari yang direncanakan sehingga lebih aman dan konservatif.
3. Tingkatan kinerja (*performance*) pada elemen struktur *pier column* dan *bored pile* berada dalam kategori *Fully Operational* baik pada arah longitudinal maupun arah transversal yang ditandai dengan *drift ratio* yang masih dalam batasan elastik (<1.00%).
4. Struktur pier memenuhi kriteria *Strong Foundation Weak Pier* yang ditandai dengan sendi plastis pertama terjadi pada pangkal *pier column*.

DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2014). Guide Specification for Seismic Isolation Design 4th Edition. Amerika.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). LRFD Bridge Design Specifications. 8th Edition. Amerika.
- Badan Standarisasi Nasional. (2016). SNI 1725:2016 : Pembebanan untuk Jembatan. BSN. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. (2016). SNI 2833:2016 : Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa. BSN. Jakarta.
- Federal Emergency Management Agency, (2000): Prestandards and commentary for Seismic rehabilitation of Building (FEMA-356), Washington.
- Federal Emergency Management Agency, (2005): Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures (FEMA-440), Washington.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2021). SE No. 06/SE/Db/2021 Tentang Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan. Jakarta.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2022). Pedoman No. 02/P/BM/2022 Pembahasan Penyelenggaraan Keamanan Jembatan Khusus. Jakarta.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2022). Peraturan Menteri Nomor 10 Tahun 2022 Tentang Penyelenggaraan Keamanan Jembatan dan Terowongan Jalan. Jakarta.
- Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2019). Kumpulan Korelasi Parameter Geoteknik Dan Fondasi. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Jakarta.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. (1988). "Theoretical stress-strain model for confined concrete". Journal of structural engineering, 114(8), pp. 1804–1826.
- NCHRP Synthesis 440. 2013. Performance-Based Seismic Bridge Design.
- Priestley, M.J.N., Seible, F. and Calvi, G.M. (1996). Seismic Design and Retrofit of Bridges. John Wiley & Sons.