

Pengaruh Pemodelan *Soil-Structure Interaction* (SSI) terhadap Karakteristik Dinamik dan Perilaku Nonlinier Pilar Jembatan pada Tanah Lunak

M. Hasanuddin¹, A. F. Setiawan^{1*}, I. Satyarno¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: angga.fajar.s@mail.ugm.ac.id

INTISARI

Sifat tanah lunak yang memiliki daya dukung rendah serta deformasi yang tinggi dapat memicu faktor amplifikasi seismik yang besar, sehingga tanah lunak dapat menurunkan kekakuan struktur jembatan yang berimplikasi pada peningkatan periode getar. Akibatnya, kebutuhan dimensi pilar dan fondasi perlu ditingkatkan untuk mempertahankan kapasitas lateral. Pergerakan lateral dinamik akibat beban gempa yang terjadi dapat menjadi penyebab kegagalan struktur pilar jembatan. Studi komparatif dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh *soil-structure interaction* (SSI) terhadap karakteristik dinamik dan perilaku nonlinier pilar struktur eksisting pada tanah lunak, meliputi Model A dengan tumpuan jepit dan Model B dengan SSI. Dua model numerik dibuat menggunakan perangkat lunak SAP2000. Hasil studi menunjukkan bahwa Model B menerima peningkatan periode getar alami sebesar 17,12% akibat berkurangnya kekakuan struktur yang berdampak pada perubahan distribusi gaya dan deformasi. Selain itu, respons deformasi lateral pada model SSI meningkat dibanding *fixed base* hingga 92,09% pada ujung pilar. Pada sisi lain, analisis *pushover* menggambarkan penurunan kekakuan struktur dengan SSI hingga 60,03% pada pilar 7 dan penurunan kapasitas lateral pilar hingga 1,07% pada pilar. Dengan demikian, pemodelan struktur jembatan secara menyeluruh dapat memengaruhi karakteristik dinamik struktur dan kapasitas lateral pilar secara realistik pada tanah lunak.

Kata kunci: Pilar, Fondasi, Tanah Lunak, *Soil-Structure Interaction* (SSI), *Pushover*

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jembatan Tol Semarang-Demak yang terletak pada pesisir utara jawa menghadapi tantangan geoteknik yang kompleks. Penelitian sebelumnya sudah memperlihatkan karakteristik tanah pada lokasi jembatan tol Semarang-Demak yang mengandung tanah yang sangat lunak hingga mencapai kedalaman 80 meter (Ralindra, 2022). Tanah lunak adalah tanah kohesif yang sebagian besar terdiri atas butir-butir yang sangat kecil seperti lempung dan lanau. Tanah lunak memiliki karakteristik daya dukung rendah, plastisitas dan kemampatan tinggi, rendahnya gaya geser, serta tingginya deformasi pada lapisan tanah terlebih jika terjadi gempa (Liu dkk., 2025). Hal tersebut akan memengaruhi secara signifikan keadaan *superstructure* jembatan dan respons dinamik struktur secara keseluruhan. Selain itu, tanah lunak dapat mengubah frekuensi dominan dari gelombang seismik, di mana frekuensi yang lebih rendah sering kali diperkuat, yang dapat menyebabkan resonansi dan kerusakan struktural pada bangunan dengan periode alami yang bertepatan dengan frekuensi tersebut (Firman, 2022).

Respons spektra tanah lunak biasanya menunjukkan puncak yang lebih tinggi pada frekuensi tertentu dibandingkan dengan batuan dasar yang menunjukkan bahwa struktur di atas tanah lunak merespons gerakan tanah dengan lebih intens pada frekuensi tertentu. Hal ini perlu diperhitungkan dalam desain bangunan tahan gempa (Safitri dkk., 2023). Tanah lunak cenderung memperpanjang durasi dan memperbesar amplitudo gerakan tanah, sehingga menyebabkan peningkatan beban gempa pada elemen-elemen struktur, terutama pilar dan fondasi (Kramer, 1996). Dalam situasi ini, interaksi antara tanah dan struktur memiliki peran penting pada jembatan, terutama interaksi antara abutment (penguat) dengan tanah dan interaksi antara fondasi pilar dengan tanah saat terkena beban gempa (İmamoğlu & Dicleli, 2024). Pemodelan interaksi antara tanah dan struktur atau dikenal dengan *soil-structure interaction* (SSI) mampu merepresentasikan perilaku dinamis struktur secara realistik sehingga dapat menentukan nilai frekuensi alami dan periode dominan struktur jembatan yang berpengaruh pada analisis respons gempa.

Percobaan yang dilakukan oleh Tiwari dan Prakash (2024) menunjukkan bahwa hasil pemodelan SSI pada jembatan integral memiliki nilai frekuensi yang rendah mengacu pada Dash dkk (2017) yaitu 1,73 Hz dan 1,72 Hz pada arah longitudinal dan arah transversal. Ini menunjukkan bahwa pemodelan SSI sangat menggambarkan perilaku dari tanah lunak yang berpotensi pada liquifikasi. Hasil dari studi Boulanger dkk (1999) mendukung secara eksperimental pada pemodelan SSI dengan penggunaan *p-y* *spring* linier yang menggambarkan keadaan tanah dalam merespons perilaku

struktur secara dinamik. Perbedaan pendekatan ini tidak hanya berdampak pada hasil analisis dinamik semata, tetapi juga berpengaruh langsung terhadap desain komponen struktural, seperti pilar, abutmen, kepala pilar, dan girder.

Pilar merupakan komponen struktur jembatan yang paling kritis saat terjadinya gempa, terlebih pada daerah dengan intensitas seismik tinggi dan berada pada tanah lunak. Perilaku inelastis struktur pilar harus menjadi acuan dalam mengetahui level kinerja struktur dalam kapasitas beban lateral sehingga didapatkan pula mekanisme keruntuhan pilar. Jika struktur jembatan melebihi kapasitas *life safety protection*, material beton dari struktur tiang akan terlepas sehingga kapasitas strukturnya akan jauh berkurang dan tidak dapat lagi mendukung beban layan (Haroki dkk., 2023). Oleh karena itu, desain kapasitas struktur terhadap beban seismik yang memadai harus dipertimbangkan

Studi komparatif dilakukan dengan menyusun dua pendekatan pemodelan numerik. Pendekatan pertama merupakan model jembatan dengan asumsi kondisi jepit sempurna pada pangkal pilar (*fixed base*). Pendekatan kedua mempertimbangkan interaksi tanah-struktur (*Soil-Structure Interaction*) melalui elemen linier berupa peletakan *p-y curve* untuk *lateral soil resistance*, *t-z curve* untuk *shaft resistance*, dan *q-z curve* untuk *end bearing* di dalam *software SAP2000* sebagaimana ditentukan dalam API (2011). Fokus utama studi ini adalah mengevaluasi perbedaan nilai periode getar alami yang dihasilkan dari kedua pendekatan tersebut untuk mengetahui pengaruh SSI dalam mode struktur serta melakukan analisis *pushover* pada masing-masing pilar jembatan sehingga dapat melihat kapasitas nonlinier pilar dan perbedaan mekanisme keruntuhan dari kedua model tersebut.

2 METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian terletak pada proyek Tol Semarang-Demak (Semarang-Sayung Section) pada *section 1*. Area tersebut secara geografis terletak pada garis lintang $6^{\circ}57'2.42''$ LS dan garis bujur $110^{\circ}26'50.29''$ BT di pesisir utara Semarang dan memiliki karakteristik tanah yang sangat lunak. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi penelitian (*Google earth*).

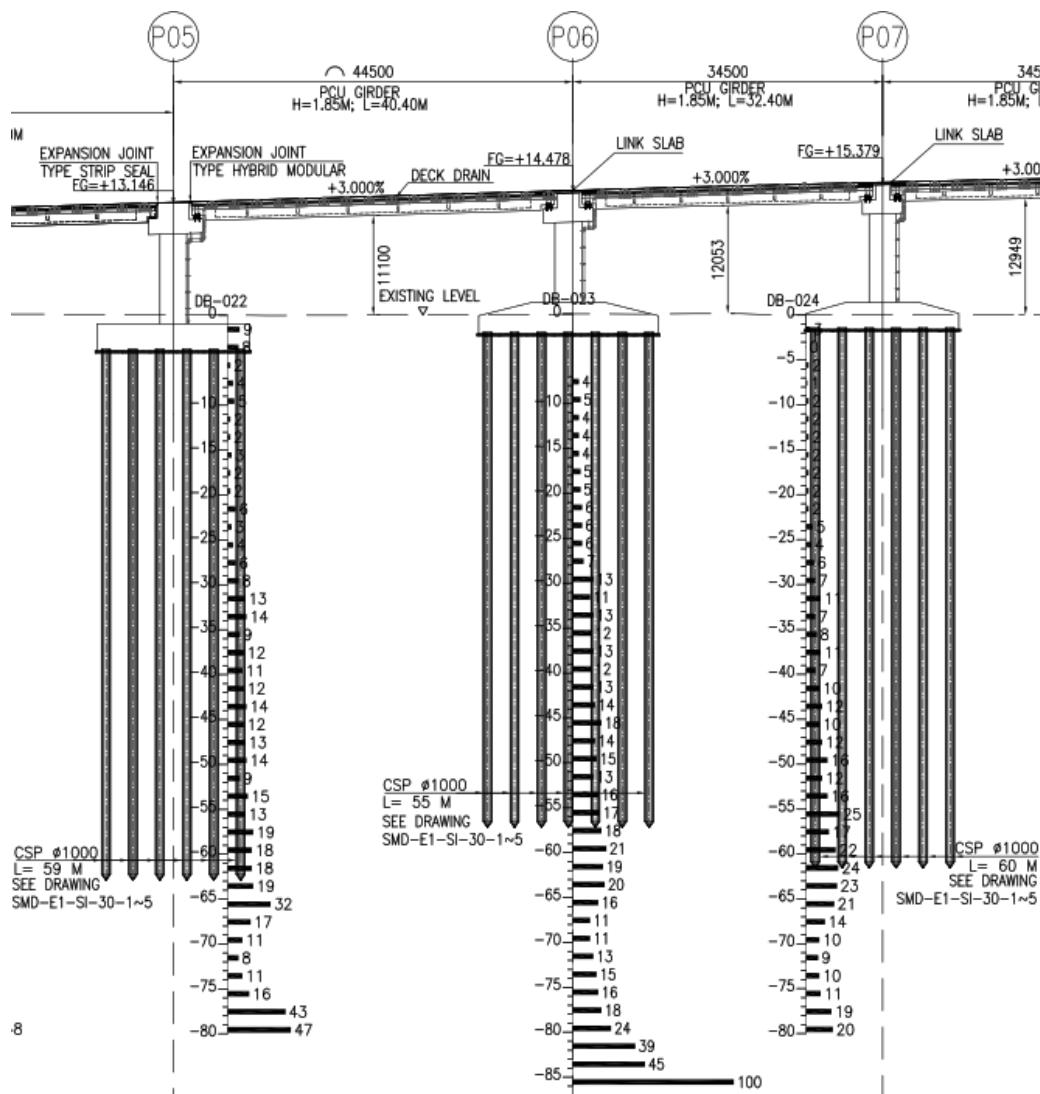
2.2 Data Penelitian

Penelitian pada studi kasus ini didukung oleh data penyelidikan tanah. Data penyelidikan tanah didapatkan dari dokumen yang dibuat oleh PT. LAPI ITB. Penelitian ini mengacu pada *detail engineering design* (DED) struktur jembatan tol Semarang-Demak di Jawa tengah. Segmen jembatan yang ditinjau pada penelitian ini berada pada titik P05 hingga P07 yang membentang sepanjang 79 m, terdiri dari 2 bentang dan 3 pilar. Jembatan ini menggunakan jenis struktur atas PC-U girder dengan tambahan tumpuan *base isolator* jenis LRB yang terletak pada masing-masing

tumpuan girder. Selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 2 dan pada Tabel 1 diperlihatkan salah satu data tanah yang ditinjau pada titik P06.

Tabel 1. Parameter salah satu data tanah di titik P06 (PT LAPI ITB, 2021)

Kedalaman (m)	N	N ₆₀	Jenis Tanah	C _u (kPa)	Berat Volume (kN/m ³)	P _{ult} (kN/m)	t _{maks} (kPa)
1.55	6	5.85	Soft	29.25	15.40	134.29	23.99
3.55	2	1.95	Very Soft	9.75	15.69	102.27	9.75
5.55	2	1.95	Very Soft	9.75	15.69	87.75	9.75
7.55	4	3.90	Soft	19.5	15.71	175.5	17.94
9.55	5	4.87	Soft	24.37	15.70	219.37	19.9
:	:	:	:	:	:	:	:
55.55	17	16.57	Very Stiff	82.87	17.06	745.87	42.27



Gambar 2. Potongan memanjang jembatan (PT LAPI ITB, 2021).

2.3 Metode Analisis

2.3.1 Pemodelan *soil-structure interaction* (SSI)

Dalam pemodelan *Soil-Structure Interaction* (SSI), tanah tidak lagi dianggap sebagai media kaku atau elastik linier, melainkan dimodelkan menggunakan pegas nonlinier yang merepresentasikan perilaku tanah terhadap deformasi

struktur. Berdasarkan ketentuan dari API (2011) dan rekomendasi dari Dash dkk (2017), ada 3 jenis pegas yang dimodelkan berdasarkan arah respons tanah, yaitu kurva $p-y$ yang merepresentasikan hubungan antara gaya lateral tanah (p) terhadap perpindahan relatif *pile* (y) pada tiap kedalaman tanah; kurva $t-z$ yang menggambarkan hubungan gaya geser tanah (t) terhadap perpindahan relatif arah vertikal *pile* (z); dan kurva $q-z$ yang menunjukkan hubungan gaya tahanan ujung tiang (q) dengan perpindahan relatif arah vertikal (z) pada dasar fondasi. Masing-masing *spring* dimodelkan dengan memasukkan nilai *damping* sebesar 5% untuk tanah lempung lunak sesuai yang disyaratkan (Bowles, 1996). Nilai kekakuan efektif tanah pada masing-masing arah didapatkan melalui Persamaan (2) hingga Persamaan (4). Selanjutnya dapat diketahui respons struktur pada tiap mode serta distribusi massa yang terjadi direpresentasikan dari hasil analisis modal.

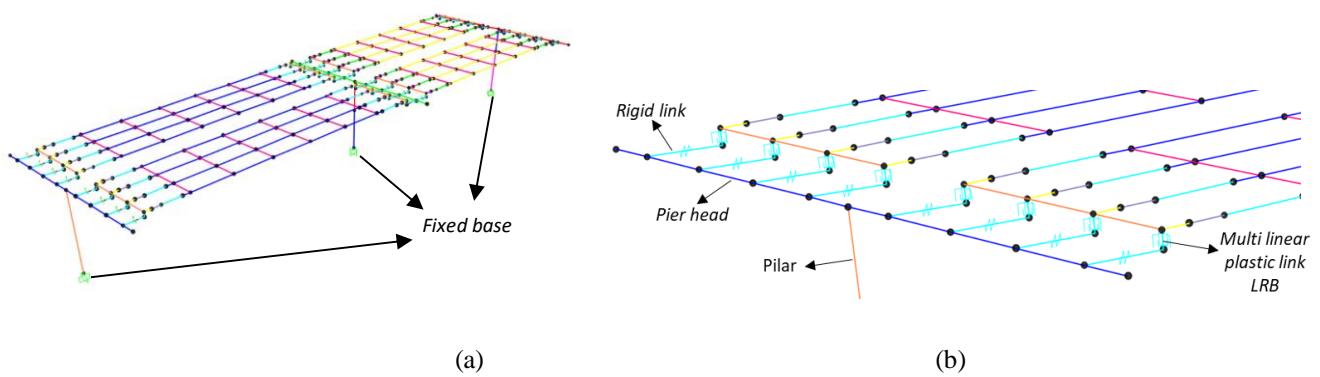
2.4 Pemodelan Numerik

Pemodelan jembatan pada penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu Model A dan Model B. Pemodelan Model A menggunakan tumpuan jepit yang terdiri dari elemen struktur atas dan pilar saja, sedangkan pemodelan Model B menggunakan *Soil-Structure Interaction* (SSI) yang dimodelkan dengan seluruh elemen struktur jembatan termasuk memodelkan tanah sebagai tumpuan nonlinier. Struktur jembatan dimodelkan dengan bantuan *software* SAP2000 dan selanjutnya akan dilakukan analisis modal untuk mengetahui karakteristik dinamik dari kedua model. Hasil yang akan dibandingkan berupa periode getar dan bentuk mode getar dari struktur jembatan. Visualisasi Model A dapat dilihat pada Gambar 3 dan model B dapat dilihat pada Gambar 4.

Peletakan tumpuan girder memakai peletakan LRB dengan mengacu pada gambar desain (PT. LAPI ITB) sesuai ketentuan AASHTO (2012). LRB dapat mendisipasi energi ketika menerima gaya geser dan memiliki nilai kekakuan yang ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$K_{eff} = \frac{Q_d}{d} + K_d \quad (1)$$

Parameter Q_d merupakan tegangan pada saat regangan nol, d adalah nilai perpindahan struktur atas, dan K_d adalah kekakuan *post yield*.



Gambar 3. (a) Struktur jembatan model A, (b) peletakan LRB pada model A.

Pada model B, tanah dimodelkan sebagai *spring element* dengan nilai kekakuan berdasarkan Persamaan (2) hingga Persamaan (4) dari Bowles (1996) dan FEMA P-2091 (2020).

$$k_h = k_s * A_s \quad (2)$$

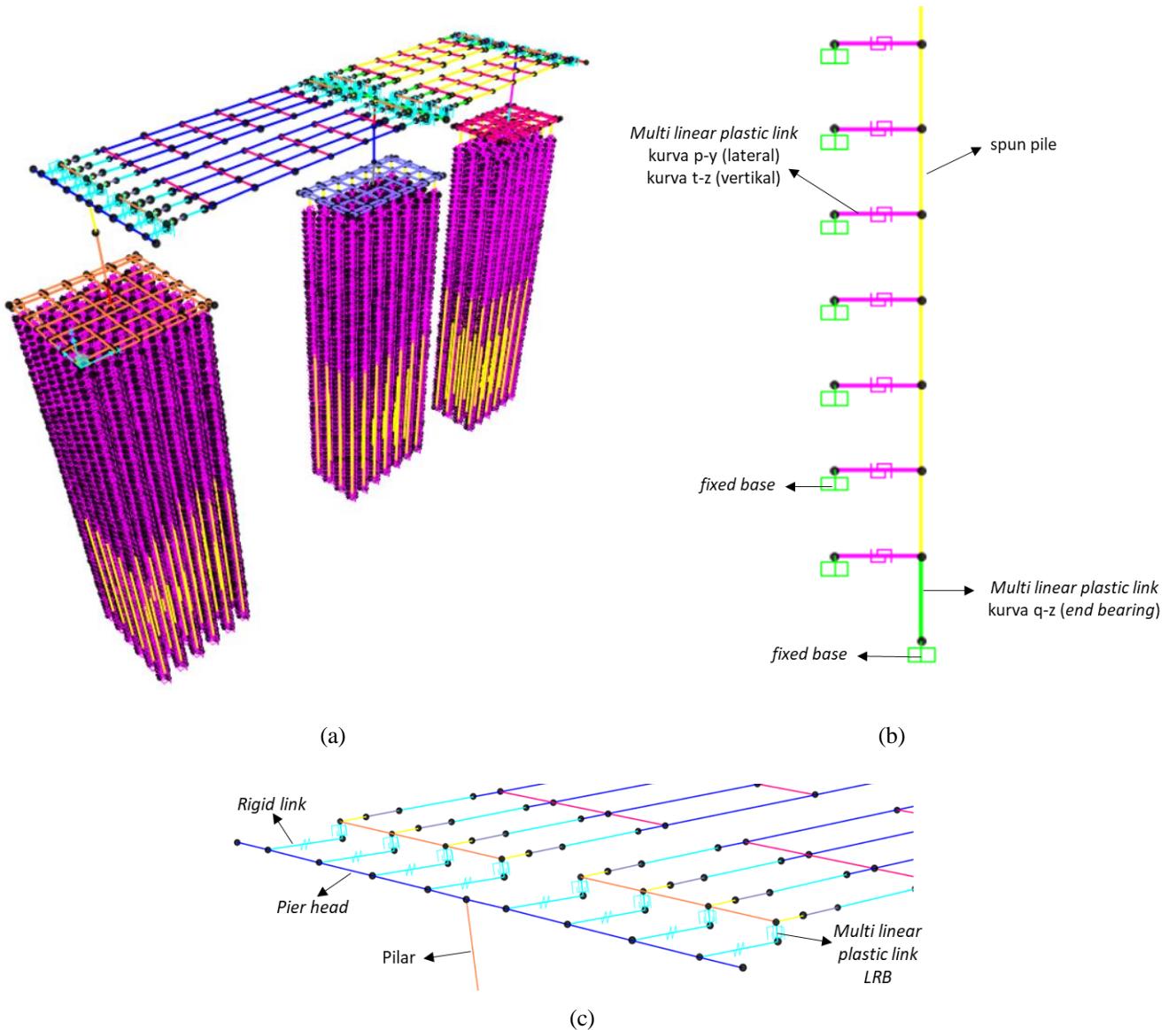
Parameter k_h adalah kekakuan lateral tanah setiap kedalaman tanah, k_s adalah modulus reaksi lateral tanah, dan A_s adalah luas selimut fondasi sepanjang jarak antar *spring*.

$$k_{sv} = \frac{f_s * A_{sv}}{\Delta_z} \quad (3)$$

Parameter k_{sv} merupakan kekakuan gesek permukaan fondasi pada arah vertikal, f_s adalah gaya gesek tanah, dan A_{sv} adalah luas selimut fondasi sepanjang jarak antar *spring*, dan Δ_z adalah nilai *displacement* tanah lempung.

$$k_{vb} = k_{sv} * A_b \quad (4)$$

Parameter K_{vb} merupakan kekakuan pada *end bearing* fondasi, K_{sv} adalah modulus subgrade arah vertikal, dan A_b adalah luas penampang *pile* pada *end bearing*.



Gambar 4. (a) Struktur jembatan model B, (b) Pemodelan SSI, (c) peletakan LRB model B.

2.5 Analisis Pushover

Analisis pushover pada struktur bawah jembatan dilakukan untuk mengetahui kapasitas deformasi inelastis struktur, menentukan titik kinerja (*performance point*) terhadap beban gempa rencana, dan menggambarkan mekanisme terjadinya sendi plastis pada struktur pilar. Analisis *pushover* dilakukan secara terpisah pada masing-masing pilar dengan meninjau perpindahan pada ujung pilar yang dibatasi sejauh 1000 mm. Efek $P-\Delta + large displacement$ diperhitungkan dalam analisis karena struktur atas memberikan kontribusi beban gravitasi yang cukup besar. Pembebaan *pushover* ditinjau terhadap arah longitudinal (X) dan arah transversal (Y) sehingga dapat diketahui kapasitas pilar pada masing-masing arah. Sendi plastis didefinisikan pada bagian pangkal pilar dengan menggunakan penampang *fiber* sehingga dapat menggambarkan perilaku nonlinier material yang menangkap nilai momen dan kurvatur terbesar pada pilar. Dalam menentukan panjang zona sendi plastis pilar, Priestley (1996) dalam AASHTO (2012) telah mengusulkan nilai panjang zona sendi plastis melalui Persamaan (7) yang mencakup parameter panjang sendi plastis (L_p), tinggi kolom/pilar (L), tegangan leleh tulangan longitudinal (f_y) dan diameter tulangan longitudinal (d_{bl}).

$$L_p = 0.08L + 0.022f_y d_{bl} \geq 0.044f_y d_{bl} \quad (7)$$

Pada elemen *spun pile*, sendi plastis dimodelkan di titik terjadinya momen terbesar ketika diberikan gaya lateral (Darmawan dkk., 2024). Momen maksimum *spun pile* terletak pada ujung *pile* pada *pilecap*. Momen terbesar selanjutnya tergantung pada kedalaman pilar dan tahanan lateral tanah yang bisa diasumsikan sebagai kedalaman jepit *pile*. Dalam studi ini, sendi plastis dimodelkan pada 2 titik *pile* yaitu pada ujung atas *pile* dan pada kedalaman jepit *pile* sesuai dengan kondisi tanah pada masing-masing lokasi pilar. Kedalaman sendi plastis setiap pilar yaitu 11,5 m pada pilar P5; 12,86 m pada pilar P6; dan 14,8 m pada pilar P7.

Setelah dilakukan *pushover*, kapasitas pilar dapat dilihat melalui Level kinerja struktur berdasarkan NCHRP (2013) yang disajikan pada Tabel 2. Ada lima kategori level kinerja pilar yang dapat dilihat dari regangan tulangan, regangan beton, dan *drift ratio* dari simpangan yang terjadi pada pilar setelah dilakukan *pushover*.

Tabel 2. Level kinerja pilar (NCHRP, 2013)

Level kerusakan	Level kinerja	Deskripsi kerusakan	Regangan beton	Regangan baja	Drift %
I	<i>Fully operational</i>	Retak rambut	<0,0032	<0,005	<1,0
II	<i>Operational</i>	Retak melebar, pelehan pertama pada tulangan longitudinal	0,0032	0,005	1,0
III	<i>Life safety</i>	Selimut beton pecah, deformasi inelastik, terjadi retak arah diagonal	0,01	0,019	3,0
IV	<i>Near collapse</i>	Beton retak dan pecah semakin melebar	0,027	0,048	5,0
V	<i>Collapse</i>	Terjadi tekuk pada tulangan longitudinal, tulangan transversal pecah, dan beton <i>core</i> pecah	0,036	0,063	8,7

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Modal

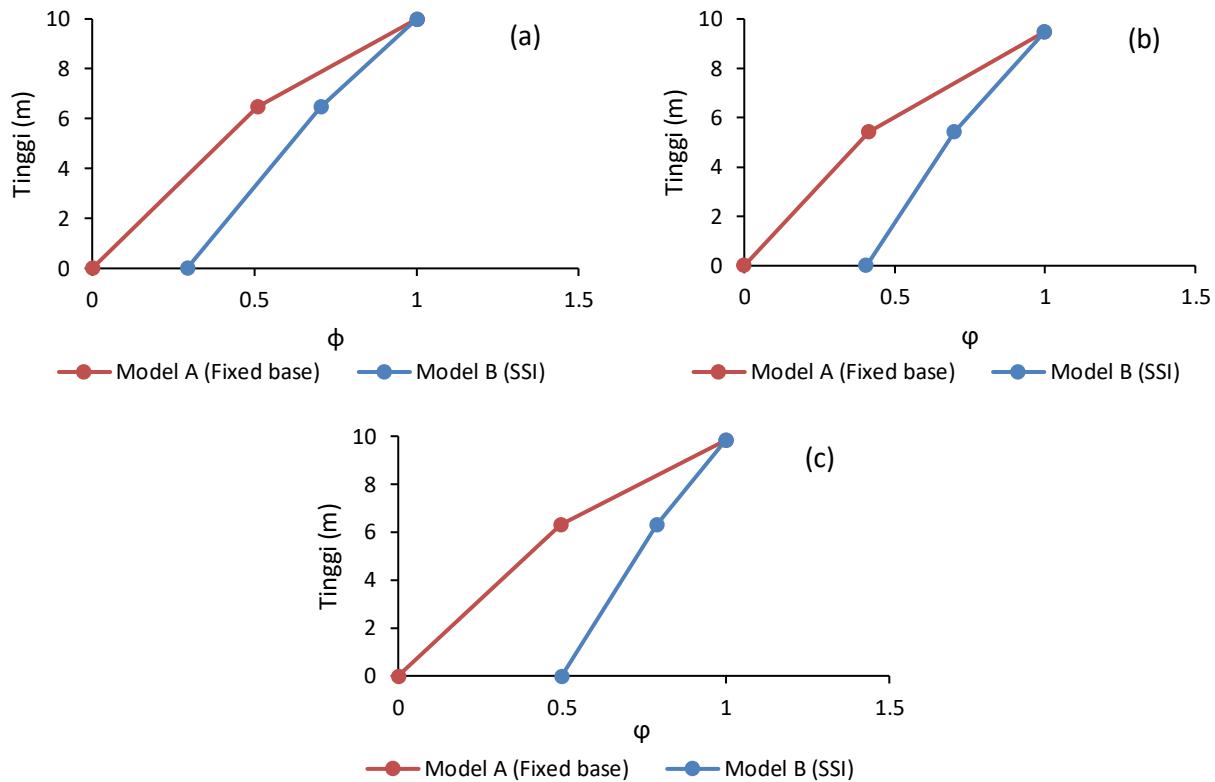
Model A dan Model B menunjukkan perbedaan nilai periode pada kondisi kekakuan *initial* struktur. Pada Model A, fondasi dianggap kaku total sehingga memberikan nilai periode yang lebih rendah. Sebaliknya, ketika efek SSI dimasukkan ke dalam pemodelan, terjadi peningkatan nilai periode getar akibat adanya deformasi tambahan pada tanah di sekitar fondasi, sehingga struktur menjadi lebih fleksibel. Selisih perbedaan nilai periode semakin meningkat dengan pertambahan jumlah mode. Pada studi ini, mode dihitung hingga mencapai partisipasi massa sebesar 90% pada kedua arah. Model A mencapai mode ke-58 dan Model B mencapai mode ke-326 untuk mencapai 90% partisipasi massa. Tabel 3 menunjukkan nilai periode (*T*), partisipasi massa pada kedua arah, dan selisih periode alami dari kedua model. Selain itu, Tabel 4 memperlihatkan perbedaan *mode shape* pada tampak atas untuk kedua model.

Tabel 3. Perbandingan nilai frekuensi dan periode struktur

Model A (<i>Fixed base</i>)						Model B (SSI)						Selisih
Mode	Periode (detik)	M _x (%)	M _y (%)	Arah dominan	Mode	Periode (detik)	M _x (%)	M _y (%)	Arah dominan	(%)		
1	1,142	0	59	Transversal	1	1,378	0	41	Transversal	17,12		
2	1,072	1x10 ⁻⁵	59	Transversal	2	1,258	55	0	Longitudinal	14,78		
3	1,042	1x10 ⁻⁵	67	Transversal	3	1,177	55	41,1	Transversal	11,46		
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:		
58	0,119	95	91	Transversal	326	0,100	90	99	Longitudinal	15,96		

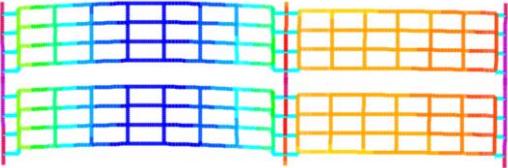
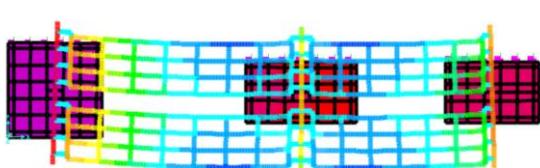
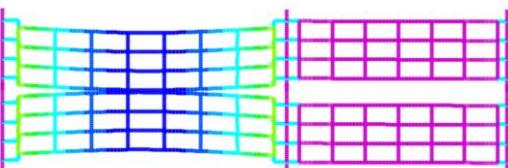
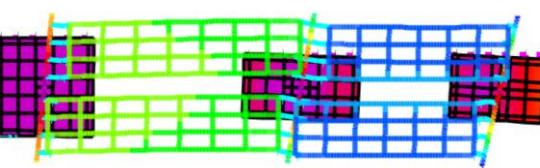
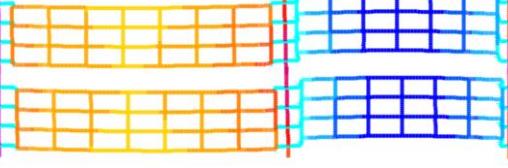
Normalisasi *mode shape* dengan metode *maximum displacement normalization* dilakukan untuk menyeratakan skala simpangan relatif (ϕ) pada setiap mode getar, sehingga nilai simpangan maksimum pada masing-masing mode menjadi 1. Dapat dilihat pada Gambar 5 kurva normalisasi mode 1 pada setiap pilar untuk kedua model yang ditinjau dari pangkal pilar hingga ujung pilar. Hasilnya memperlihatkan bahwa Model B memiliki simpangan awal pada titik pangkal pilar yang mencerminkan kontribusi deformasi tambahan dari pergerakan fondasi akibat kelenturan tanah.

Perbedaan kurva pada Gambar 5 menegaskan bahwa pemodelan dengan SSI memengaruhi bentuk mode fundamental, dengan kecenderungan menggeser konsentrasi simpangan ke bagian atas struktur.



Gambar 5. Normalisasi mode di P5 (a) mode di P6 (b) mode di P7 (c).

Tabel 4. Perbandingan *mode shape* Model A dan Model B

Mode	Model A	Model B
1		
2		
3		

3.2 Deformed Shape

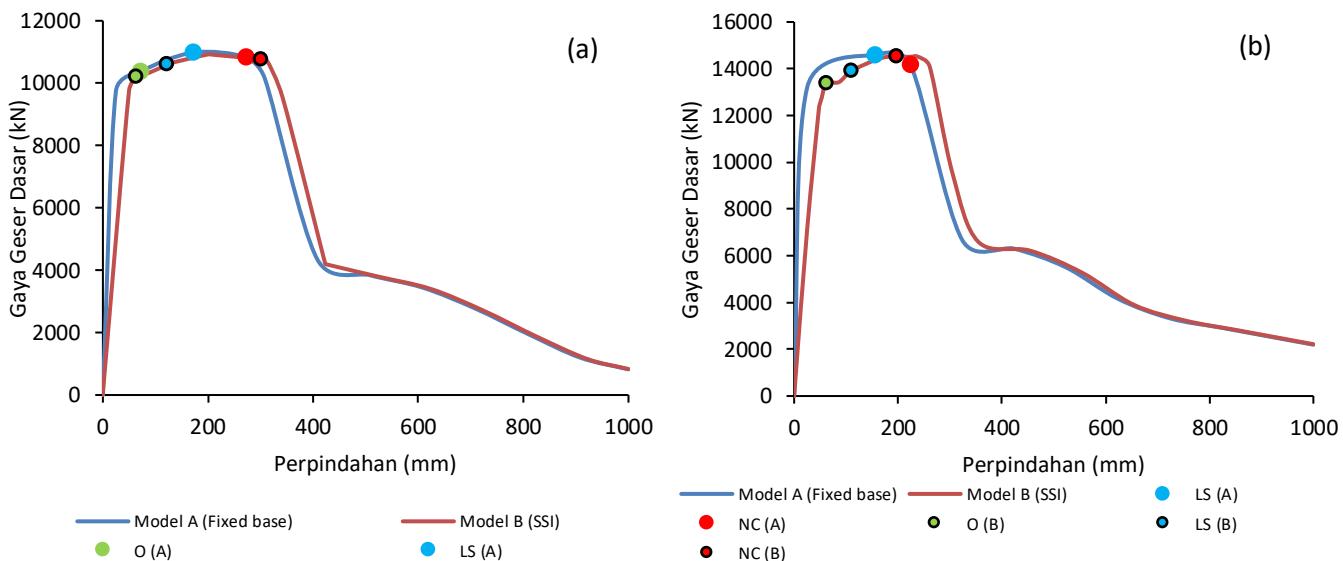
Analisis modal menunjukkan bahwa perbedaan frekuensi alami antara Model A dan Model B cukup besar, didukung dengan hasil deformasi yang memperlihatkan perbedaan respons struktur yang cukup signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh SSI lebih dominan terhadap respons perpindahan. Pada Model A, pilar jembatan dianggap tertanam sempurna (*fully restrained*), sehingga deformasi lateral relatif lebih kecil. Ketika beban gempa diterapkan, pergerakan lateral pilar dibatasi oleh kekakuan tumpuan yang sangat tinggi. Namun, pada Model B, kekakuan fondasi berkurang akibat pengaruh lapisan tanah lunak. Tanah berperan sebagai pegas linier yang menambah fleksibilitas sistem, menyebabkan deformasi lateral pilar meningkat secara signifikan. Berikut hasil deformasi pada beberapa titik struktur jembatan terhadap berat struktur sendiri mulai dari arah longitudinal (U1), transversal (U2), dan vertikal (U3) yang diperlihatkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Komparasi deformasi akibat beban struktur sendiri

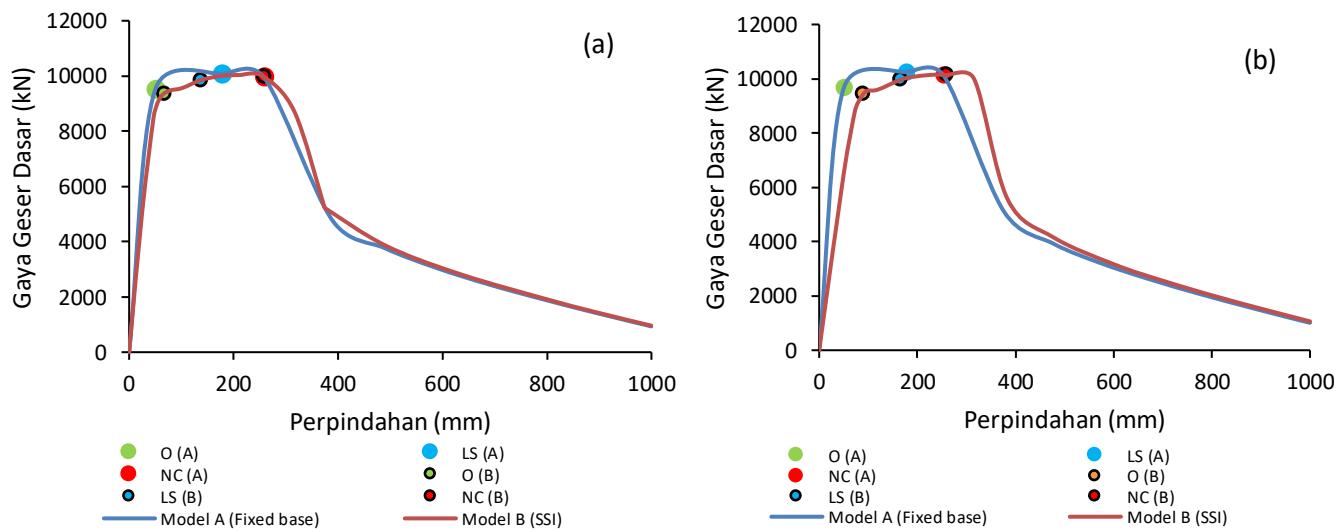
Struktur	Arah	Model A (<i>Fixed base</i>) (mm)	Model B (SSI) (mm)	Selisih (%)
Pangkal pilar P5	U1	0	26,705	100
	U2	0	8,088	100
	U3	0	5,575	100
Ujung pilar P5	U1	8,589	43,604	80,30
	U2	3,627	20,737	82,5
	U3	0,6274	6,187	89,85
Struktur	Arah	Model A (<i>Fixed base</i>) (mm)	Model B (SSI) (mm)	Selisih (%)
Pangkal pilar P6	U1	0	48,513	100
	U2	0	22,616	100
	U3	0	8,113	100
Ujung pilar P6	U1	11,306	63,737	82,26
	U2	8,845	42,134	79
	U3	1,032	9,123	88,68
Struktur	Arah	Model A (<i>Fixed base</i>) (mm)	Model B (SSI) (mm)	Selisih (%)
Pangkal pilar P7	U1	0	65,472	100
	U2	0	28,68	100
	U3	0	7,409	100
Ujung pilar P7	U1	8,317	78,506	89,4
	U2	5,321	44,246	87,97
	U3	0,635	8,031	92,09

3.3 Analisis Pushover

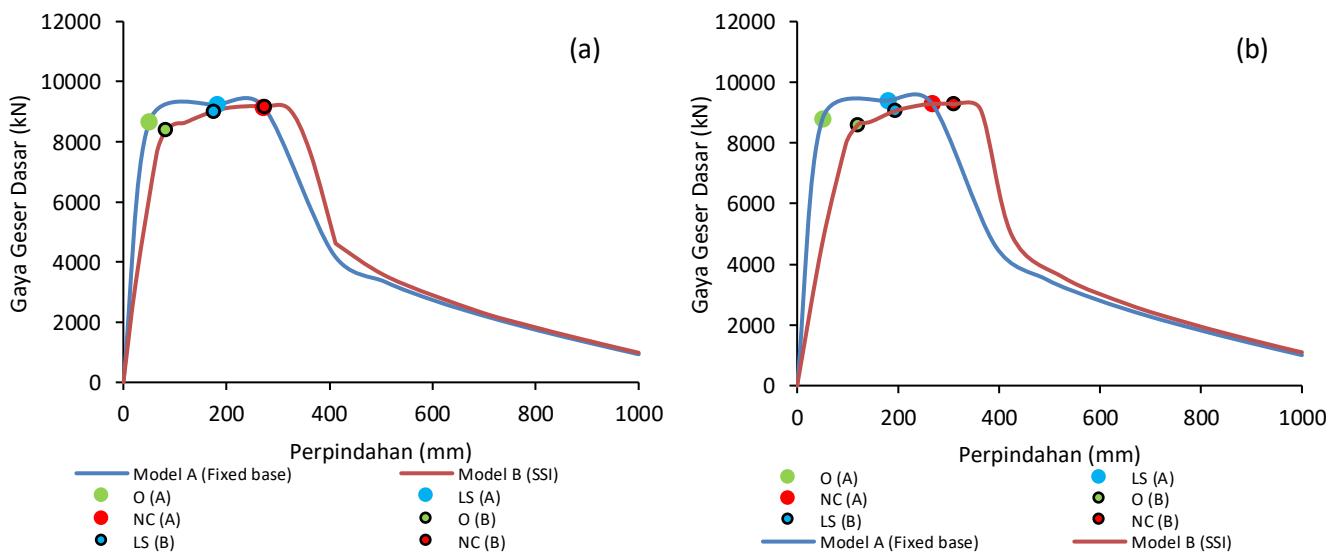
Hasil analisis *pushover* menunjukkan gaya geser yang diterima pilar seiring dengan perpindahan lateral ujung pilar sepanjang 1000 mm. Hasilnya berupa kurva skeleton masing-masing pilar yang ditunjukkan pada Gambar 6 hingga Gambar 8. Berdasarkan hasil *pushover*, level performa tiang ditentukan oleh batas nilai regangan tekan untuk beton dan regangan tarik untuk tulangan berdasarkan Tabel 2. Nilai *pushover* untuk kedua model memiliki karakteristik yang sama, namun perbedaan terletak pada kekakuan Model B yang lebih rendah sehingga membuat grafik pada pemodelan SSI mengalami pergeseran dengan *slope* yang lebih landai dan perpindahan struktur yang lebih besar akibat kontribusi deformasi tanah. Berdasarkan *pushover*, didapatkan nilai kekakuan awal struktur pada pilar P5 dengan perbedaan kekakuan arah longitudinal dan transversal secara berturut-turut sebesar 50 % dan 46,1 %. Nilai kekakuan awal struktur pilar P6 memiliki perbedaan 23,27 % dan 47,30 %. Nilai kekakuan awal struktur pilar P7 memiliki selisih 39,08 % dan 60,03 %. Selain itu, nilai gaya geser dasar yang terjadi pada model B lebih rendah walaupun tidak signifikan dibandingkan model A. Selisih terbesar pada gaya geser dasar maksimum hanya sebesar 1,07% yang terjadi pada pilar P7. Meskipun penurunannya tidak signifikan, pemodelan dengan SSI mengindikasikan bahwa deformabilitas tanah lunak dapat menyebabkan penurunan kapasitas lateral struktur. Mekanisme terjadinya sendi plastis pertama kali terjadi ketika pilar mengalami perpindahan lateral setelah melampaui 50 mm pada level kinerja *operational*.



Gambar 6. Pushover P5 arah longitudinal (a) Pushover P5 arah transversal (b).



Gambar 7. Pushover P6 arah longitudinal (a) Pushover P6 arah transversal (b).



Gambar 8. Pushover P7 arah longitudinal (a) Pushover P7 arah transversal (b).

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dijalankan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

- a. Periode getar alami yang diperoleh untuk model *fixed base* adalah sebesar 1,142 detik, sedangkan model SSI adalah sebesar 1,377 detik pada mode pertama, dengan selisih sebesar 17,12 %. Hasil ini menunjukkan bahwa struktur jembatan cenderung bersifat fleksibel. Hasil analisis modal menjadi dasar untuk memahami perilaku dinamik struktur jembatan.
- b. Deformasi yang terjadi pada kedua model menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan, terutama pada titik-titik kritis struktur mulai dari 80,3% hingga 92,09 % pada ujung pilar. Hasil ini menegaskan bahwa pemodelan SSI mampu menangkap mekanisme deformasi yang lebih realistik akibat fleksibilitas tanah, terutama pada struktur yang berdiri di atas tanah lunak.
- c. Hasil analisis *pushover* menunjukkan bahwa kekakuan struktur SSI mengalami penurunan mulai dari 23,27% hingga 60,03% dibanding model *fixed base* sehingga kurva skeleton pada model SSI akan bergeser landai dan mengalami perpindahan yang lebih panjang dibanding model tanpa SSI. Pemodelan SSI menunjukkan bahwa pemodelan tanah dapat menurunkan kekakuan struktur secara *global* dan menurunkan kapasitas lateral struktur dibanding pemodelan struktur jembatan dengan model tanpa memperhitungkan SSI.

REFERENSI

- AASHTO. (2012). Bridge Design Specifications. In *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* (hal. 1661). <https://bit.ly/3qDFdFv>
- API. (2011). Recommended Practice for Geotechnical Foundation Design Consideration. In *Recommended Practice for Geotechnical Foundation Design Consideration*.
- Boulanger, R., Curras, C., Kutter, B., Wilson, D., & Abghari, A. (1999). Seismic Soil-Pile-Structure Interaction Experiments and Analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG*, 125. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1999\)125:9\(750\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:9(750))
- Bowles, J. E. (1996). Foundation Analysis and Design. In *Civil Engineering Materials*.
- Darmawan, M. F., Setiawan, A. F., Satyarno, I., & Awaludin, A. (2024). Nonlinear Simulations To Evaluate the Code-Based Response Modification Factor for Seismic Design of Slab-on-Pile Structure. *ASEAN Engineering Journal*, 14(1), 101–111. <https://doi.org/10.11113/aej.V14.20155>
- Dash, S., Rouholamin, M., Lombardi, D., & Bhattacharya, S. (2017). A practical method for construction of p-y curves for liquefiable soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97(March), 478–481. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.03.002>
- FEMA P-2091. (2020). A Practical Guide to Soil-Structure Interaction. *Applied Technology Council, December*, 1–218. www ATCouncil.org
- Firman, A. (2022). ANALISIS PENURUNAN LAPISAN TANAH DASAR (SUBGRADE) JALAN SEMARANG – DEMAK (STA 0 + 300 s/d 2 + 000). *Pena Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 36, 73. <https://doi.org/10.31941/jurnalpena.v36i0.2016>
- Haroki, Y., Awaludin, A., Priyosulistyo, H., Setiawan, A. F., & Satyarno, I. (2023). Seismic Performance Comparison of Simply Supported Hollow Slab on Pile Group Structure with Different Operational Category and Shear Panel Damper Application. *Civil Engineering Dimension*, 25(1), 10–19. <https://doi.org/10.9744/ced.25.1.10-19>
- İmamoğlu, Ç., & Dicleli, M. (2024). Effect of dynamic soil-structure interaction modeling assumptions on the calculated seismic response of railway bridges with single-column piers resting on shallow foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 181(March). <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108624>
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India.
- Liu, W., Tan, J., Lv, W., Chen, C., & Qu, S. (2025). Characteristics and predictions of accumulative deformation of structured soft soil under long-term cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 189(July 2024), 109088. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.109088>
- NCHRP. (2013). Performance-Based Seismic Bridge Design. In *Performance-Based Seismic Bridge Design*. <https://doi.org/10.17226/22632>
- Priestley, M. J. N. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges* (F. Seible & G. M. Calvi (ed.)) [Book]. Wiley.
- PT LAPI ITB. (2021). *PROYEK JALAN TOL SEMARANG-DEMAK (SEMARANG-SAYUNG SECTION)*.
- Ralindra, D. F. (2022). Modifikasi Perbaikan Tanah Dasar Tol Semarang–Demak: Metode Vacuum Preloading dengan Prefabricated Vertical Drain. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 20(2), 163. <https://doi.org/10.12962/j2579-891x.v20i2.11188>

Safitri, F., Adrianto, L., & Nurjaya, I. W. (2023). Pemetaan Kerapatan Ekosistem Mangrove Menggunakan Analisis Normalized Difference Vegetation Index di Pesisir Kota Semarang. *Jurnal Kelautan Tropis*, 26(2), 399–406. <https://doi.org/10.14710/jkt.v26i2.18173>

Tiwari, A. K., & Prakash, B. (2024). *INFLUENCE OF LIQUEFACTION ON THE DYNAMIC BEHAVIOR OF INTEGRAL*. *INFLUENCE OF LIQUEFACTION ON THE DYNAMIC BEHAVIOR OF INTEGRAL*. December. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35429.72167>