

Studi Numerikal Grup Fondasi Elevated Pile Cap Pada Tanah Pasir

Fathia Handayani Kamal¹⁾, Widjojo Adi Prakoso²⁾, Mulia Orientilize³⁾

^{1,2,3)}Departemen Teknik Sipil, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia

Email: fathia.handayani@ui.ac.id¹⁾, wprakoso@eng.ui.ac.id²⁾, mulia@eng.ui.ac.id³⁾

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v12i1.682>

(Received: December 2021 / Revised: February 2022 / Accepted: March 2022)

Abstrak

Elevated Pile Cap (EPC) merupakan fondasi tertanam sebagian di dalam tanah yang rentan terhadap beban gempa karena momen fleksural yang terjadi lebih besar daripada jenis fondasi yang tertanam sepenuhnya. Studi numerikal dengan metode BNWF menggunakan aplikasi OpenSees berbasis eksperimen yang dilakukan peneliti lain dilakukan untuk mempelajari perilaku non-linear fondasi di tanah pasir. Fondasi berkonfigurasi tunggal, 2x2, dan 2x3 dimodelkan dan divalidasikan terhadap penelitian tersebut. Variasi nilai densitas pasir dan pemberian nilai *p-multiplier* yang berbeda diperhitungkan per baris fondasi grup. Analisis pushover monotonik dilakukan untuk mengetahui perilaku inelastik fondasi. Semua model membentuk sendi plastis pada sambungan dan di bawah tanah pada tiang *leading row*. Perbandingan respons individu tiap tiang dengan respons rata-rata fondasi per tiang digunakan untuk mengetahui distribusi gaya pada fondasi yang dipengaruhi oleh nilai *p-multiplier*. Kuat geser tanah divariasikan untuk mengetahui keelastisitasan tanah saat pembebanan di titik tertentu, di mana semakin padat tanah maka semakin cepat fase plastis tercapai. Secara keseluruhan, variasi kepadatan tanah dan nilai *p-multiplier* mempengaruhi perilaku inelastis fondasi.

Kata kunci: *EPC, fondasi grup, sendi plastis, p-multiplier, analisis pushover*

Abstract

Elevated Pile Cap (EPC), a partially-embedded foundation, is vulnerable under seismic loadings since it suffers more flexural moment than average foundations. A BNWF numerical study was performed using OpenSees based on an experiment conducted in China. The 1x1, 2x2, and 2x3 rectangular EPC groups were modeled and validated by the test result. Each model is embedded in sand with a varied density and A different value of *p-multiplier* for each pile rows was considered. Monotonic pushover analysis was performed, and its inelastic behavior were investigated. All models suffer double plastic hinges on the leading row, located in connection and underground, depending on the soil density. The ratio of each pile row response to the average pile group response is an indicator to examine the forces distribution, influenced by *p-multiplier* only. The soil shear strength was investigated to observe the elasticity of soil when it reach its yield, ultimate, and the formed of plastic hinges. The *p-multiplier* and varied soil density affects the soil strength for pile rows, the denser the soil, the faster it reaches its plastic state. Overall, both *p-multiplier* and soil density affect inelastic behavior of foundations.

Keywords: *EPC, group foundation, plastic hinge, p-multiplier, pushover analysis*

1. Latar Belakang

Peta gempa tahun 2017 menunjukkan terjadinya peningkatan *seismic demand* dibandingkan peta gempa tahun 2010. Hal ini tentunya menaikkan tingkat kerusakan pada struktur, sehingga diperlukan desain struktur yang dapat mengakomodasi perubahan peta gempa untuk meminimalkan kerugian dan kerusakan akibat risiko gempa. Terlebih pada struktur bawah seperti fondasi yang sulit dilakukan perbaikan akibat lokasi kerusakan di bawah tanah, sehingga dibutuhkan desain fondasi yang tetap bersifat elastis di bawah beban seismik (Budek and Benzoni, 2009) untuk menghindari kegagalan di bawah tanah. Namun, hal ini dianggap tidak efektif dan ekonomis karena dibutuhkan kekakuan fondasi yang besar untuk memenuhi kriteria tersebut. Maka dari itu, perlu diinvestigasi perilaku inelastis fondasi untuk menjaga kemandirian fondasi diluar kondisi elastisnya dalam pembebanan seismik.

Elevated Pile Cap (EPC) merupakan fondasi tiang beton bertulang yang ditancap sebagian dalam tanah dengan *pile cap* yang letaknya ditinggikan dari permukaan tanah, mengakibatkan momen fleksural yang lebih besar dari fondasi biasa (Blanco et al., 2019). Maka, karakteristik dari fondasi EPC perlu diinvestigasi untuk memastikan memiliki perilaku non-linier yang mencukupi dalam menahan pembebanan lateral (Liu et al., 2020).

Basis penelitian ini adalah eksperimen yang dilakukan oleh Liu et al. (2020) di China untuk mengetahui mekanisme kegagalan fondasi EPC akibat rotasi *pile cap* dan efek *pile group*. Spesimen fondasi EPC yang digunakan adalah tunggal, 2x2, dan 2x3 yang ditancap pada tanah pasir homogen. Untuk memperhitungkan *shadowing effect* yang menghasilkan reduksi tahanan tanah, selain menggunakan efek *pile group*, adalah dengan mereduksi nilai p pada kurva p - y dengan p -*multiplier*. Dari penelitian sebelumnya, penggunaan p -*multiplier* pada fondasi 3-baris pada tanah pasir (Brown et al., 1988; Morrison and Reese, 1986; Rollins et al., 2006) dan pada tanah lempung (Brown et al., 1987; Ilyas et al., 2004; Rollins et al., 2005) memiliki nilai faktor *center pile* yang lebih besar daripada *rear pile*. Namun pada eksperimen yang lain di tanah lempung, faktor pada *rear pile* lebih besar daripada *center pile* (Rollins et al., 1998).

Penggunaan nilai p -*multiplier* ini kemudian digunakan pada penelitian selanjutnya yang dilakukan pada jenis tanah lempung, pasir, dan batuan (Cho et al., 2001; Huang et al., 2001; Rollins et al., 2000). Maka dari itu, untuk melihat perbandingan hasil antara kedua jenis penggunaan p -*multiplier* pada fondasi 3 baris, dilakukan permodelan fondasi 2x3 sebanyak 2 buah. Model fondasi 2x3(1) menggunakan faktor *center pile* lebih besar dari *rear pile* dan model fondasi 2x3(2) adalah sebaliknya.

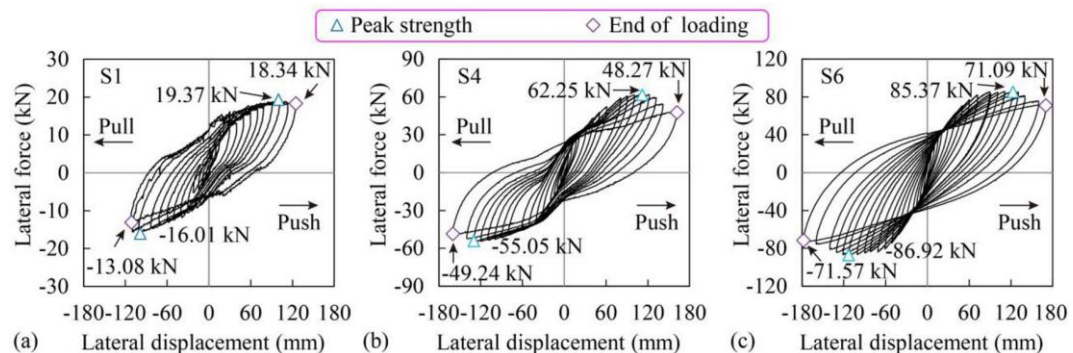
Selain p -*multiplier*, kerapatan relatif tanah pasir juga mempengaruhi perilaku inelastis fondasi. Maka dari itu, pada penelitian ini dimodelkan fondasi grup pada densitas tanah yang bervariasi, dengan nilai densitas tanah yang diambil adalah 0.3, 0.45, 0.5, dan 0.7.

Permodelan dilakukan dengan menggunakan aplikasi OpenSees sehingga menghasilkan model yang dapat merepresentasikan eksperimen yang sebenarnya, dengan parameter yang dianalisis untuk menunjang tujuan penelitian ini adalah penggunaan p -*multiplier* dan densitas relatif tanah pasir.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh densitas relatif tanah pasir yang bervariasi dan perbedaan pemberian nilai *p-multiplier* terhadap perilaku inelastis fondasi EPC, baik secara keseluruhan maupun per masing-masing baris tiang untuk memastikan desain fondasi EPC yang efektif.

2. Metode Penelitian

Spesimen yang dimodelkan pada paper ini berasal dari eksperimen Liu et al (2020) yang terdiri dari tunggal, 2x2, dan 2x3. Tiang fondasi merupakan 0.15 x 0.15 m tiang persegi, dengan pajang tiang sedalam 3.7 m tertancap di tanah pasir dan 0.8 m berada di atas permukaan tanah. Pada eksperimen, fondasi tunggal, 2x2, dan 2x3 dilabeli dengan nama S1, S4, dan S6 masing-masing. Beban lateral diberikan dengan metode *quasi-static* pada *pile cap* yang dikontrol oleh besar perpindahan hingga tiang mengalami kegagalan. Hasil dari pembebanan menghasilkan kurva histeresis beban-perpindahan untuk masing-masing jenis fondasi S1, S4, dan S6 ditampilkan pada Gambar 1. Kurva histeresis digunakan sebagai basis validasi model numerikal pada penelitian ini dengan cara membandingkan kurva *backbone* model numerikal dengan kurva histeresis Gambar 1.



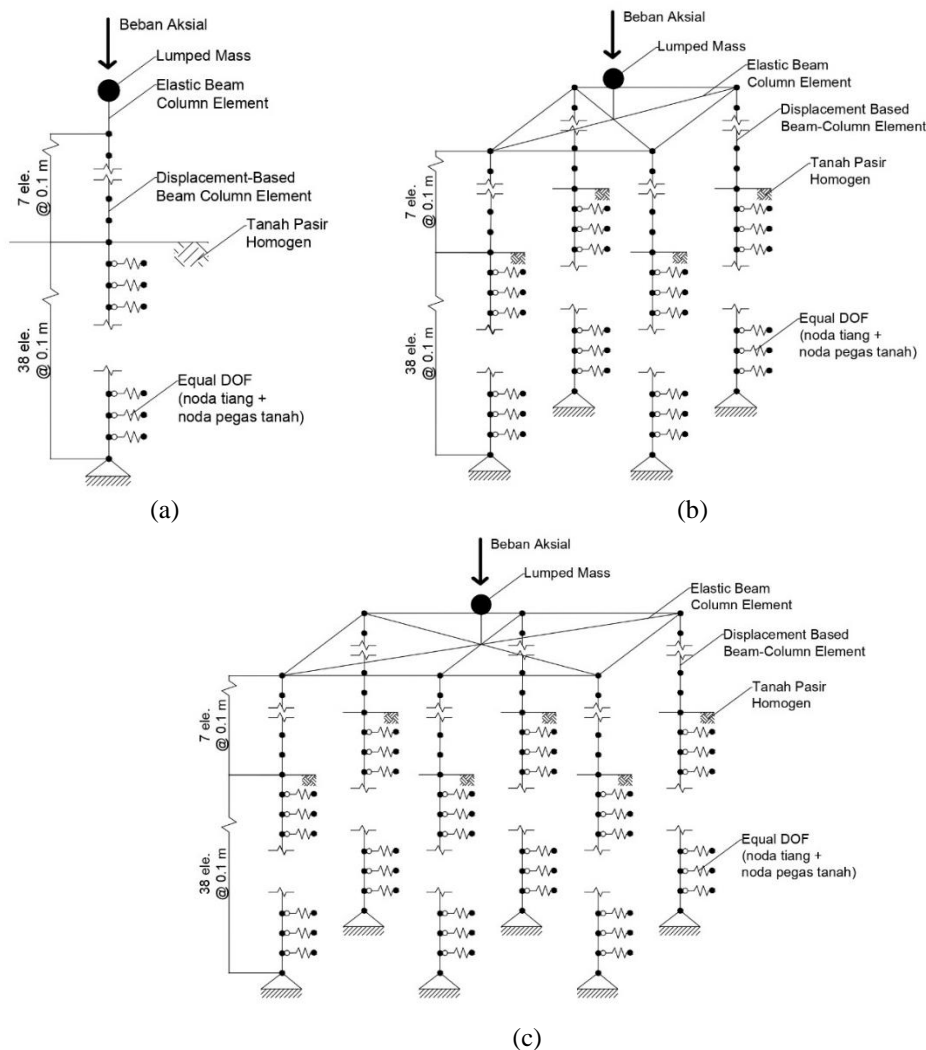
Gambar 1 Kurva Histeresis Beban – Perpindahan Eksperimen Liu et al. (2020); (a) S1, (b) S4, dan (c) S6

Sebelum melakukan permodelan parametrik, dilakukan permodelan validasi terhadap spesimen eksperimen Liu et al. (2020) untuk merepresentasikan keadaan yang sebenarnya. Modeling dilaksanakan pada platform *finite element*, yaitu *Open System for Earthquake Engineering Simulation* (OpenSees). OpenSees adalah aplikasi *open source* yang memberikan simulasi performa sistem struktur dan tanah terhadap gempa. Aplikasi ini dapat memodelkan dan menganalisis respons non-linier sistem dengan menggunakan beragam model material, elemen, dan algoritma solusi (Mazzoni, 2006)

Pertama, model fondasi tunggal dimodelkan secara 2D untuk memudahkan permodelan, sedangkan fondasi grup 2x2 dan 2x3 dimodelkan secara 3D. Setiap tiang spesimen dimodelkan dengan elemen *displacement-based beam-column* dengan 5 titik integrasi. Tiap tiang dibagi menjadi 45 elemen, dengan tiap elemen memiliki panjang 0.1 m. Ujung tiang bawah ditahan secara vertikal dan horizontal karena pada eksperimen terdapat padatan tanah pasir tepat di bawah tiang yang memungkinkan tidak terjadi pergerakan vertikal dan horizontal. *Pile cap* dimodelkan sebagai *lumped mass* pada OpenSees, yang mana *pile cap* tidak

dimodelkan secara eksplisit, namun disubstitusikan sebagai beban diatas tiang. Lokasi *lumped mass* tersebut berada di titik berat *pile cap*, dan dihubungkan dengan elemen *elastic beam-column* sebagai representasi sambungan *pile cap* terhadap *pile head*. Diberikan beban aksial yang memenuhi rasio kuat tekan aksial nominal ($\alpha = 0.05$) di atas *pile cap*. Dipertimbangkan efek P- Δ pada model.

Untuk material yang digunakan, model Kent-Scott-Park digunakan untuk permodelan beton *confined* dan *unconfined* pada tiang. Model ini dipilih dengan pertimbangan perilaku model yang dapat merepresentasikan pembebanan monotonik pada beton di keadaan yang sebenarnya. Tulangan longitudinal dimodelkan menggunakan model baja Chang-Mander, yang mana dapat berperilaku baja yang detail, seperti fase *hardening*, *softening*, *yield plateau*, dan *linear elastic*. Material ini juga dapat menggambarkan asumsi degradasi baja atau *fatigue* pada eksperimen. Nilai kuat *ultimate* baja yang telah terdegradasi adalah berkurang hingga 90% nilai aslinya, seperti yang ditampilkan Tabel 1. *Fiber section* menggunakan perintah *Patchquad* karena fondasi memiliki tiang persegi berukuran 0.15 x 0.15 m dengan selimut setebal 0.02 m.



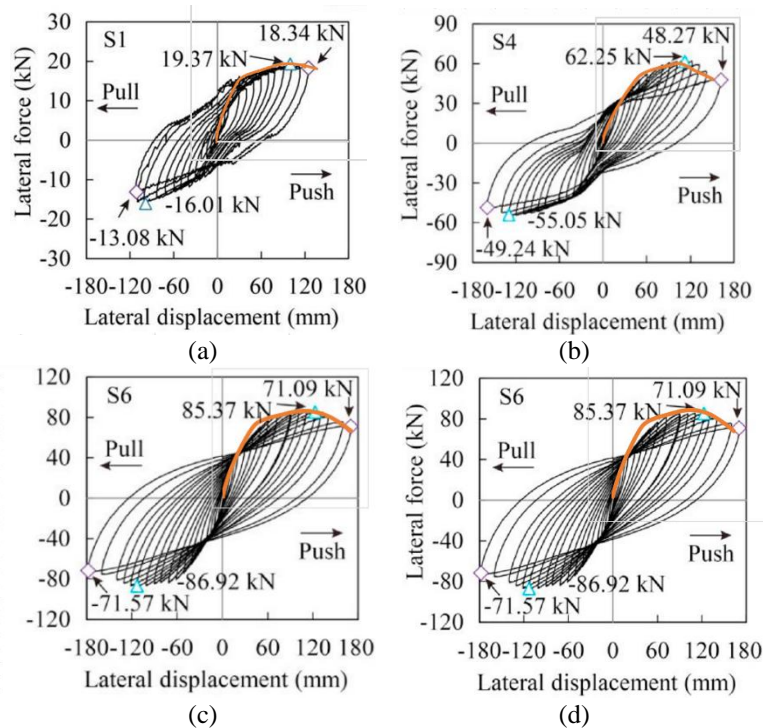
Gambar 2 Model numerikal fondasi grup; (a) 1x1, (b) 2x2, dan (c) 2x3

Tanah pasir dimodelkan menjadi pegas p-y yang diadopsi oleh American Petroleum Institute (API) dan diaplikasikan untuk setiap noda tanah. Noda tanah dan noda tiang merupakan 2 noda berbeda yang memiliki koordinat yang sama, dan kedua noda disambungkan dengan elemen *ZeroLength*. Elemen tersebut berguna untuk menyambungkan dua jenis noda yang identitasnya berbeda di tempat yang sama. Dan pada elemen tersebut pula didefinisikan pegas p-y API. Kurva p-y yang digunakan dari API adalah untuk tiang tunggal, sehingga jika ingin menggunakannya untuk tiang grup, kurva p-y harus dikalibrasikan akibat efek grup fondasi. Untuk mereduksi kuat resistensi tanah (p) untuk merepresentasikan efek fondasi grup, digunakan faktor *p-multiplier* pada tiap baris tiang. Khusus untuk fondasi 3-baris, 2 teori diaplikasikan pada model, yaitu untuk nilai *p-multiplier center row* lebih besar dari *rear row* dan kebalikannya, seperti yang ditampilkan pada Tabel 1. Beban yang diberikan pada model adalah beban sendiri fondasi, beban aksial tambahan dengan rasio 0.05, dan beban lateral secara monotonik. Pembebanan lateral diberikan di titik berat *pile cap*, dan perpindahannya dikontrol hingga fondasi mengalami kegagalan. Perintah diatas menghasilkan model numerikal seperti Gambar 2.

Tabel 1 Tabel parameter kalibrasi model

Model Numerikal	Parameter	Nilai Kalibrasi
1x1	<i>P-multiplier</i>	-
	Reduksi Kuat Baja <i>Ultimate</i>	90% $f_u = 440$ MPa
2x2	<i>Leading Pile P-multiplier</i>	0.49
	<i>Rear Pile P-multiplier</i>	0.3
	Reduksi Kuat Baja <i>Ultimate</i>	90% $f_u = 440$ MPa
2x3 (1)	<i>Leading Pile P-multiplier</i>	0.7
	<i>Center Pile P-multiplier</i>	0.35
	<i>Rear Pile P-multiplier</i>	0.25
	Reduksi Kuat Baja <i>Ultimate</i>	90% $f_u = 440$ MPa
2x3 (2)	<i>Leading Pile P-multiplier</i>	0.7
	<i>Center Pile P-multiplier</i>	0.25
	<i>Rear Pile P-multiplier</i>	0.35
	Reduksi Kuat Baja <i>Ultimate</i>	90% $f_u = 440$ MPa

Perbandingan antara eksperimen dan model numerikal dilakukan untuk kurva pushover pada Gambar 3. Kedua model numerikal untuk 2x3(1) dan 2x3(2) dibandingkan kepada spesimen S6. Karena eksperimen tidak menyediakan data eksak untuk kurva histeresis, maka validasi secara visual dilakukan. Disimpulkan bahwa numerikal model cukup mendekati spesimen eksperimen karena kekakuan awal, puncak, dan kondisi *ultimate* model dan eksperimen adalah sama.



Gambar 3 Kurva pushover untuk validasi model berdasarkan Liu et al. (2020); (a) 1x1, (b) 2x2, (c) 2x3(1), (d) 2x3(2)

Studi numerikal menggunakan parameter densitas relatif yang berbeda dilakukan. Densitas relatif yang digunakan adalah 0.3, 0.45, 0.5, dan 0.7, masing-masing dinamakan pasir lepas, pasir sedang 1, pasir sedang 2, dan pasir padat. Parameter lainnya yang mengikuti densitas relatif untuk memodelkan tanah menggunakan model API adalah berat jenis dan sudut geser. Kedua parameter tersebut dikorelasikan terhadap relatif densitas, dan menghasilkan parameter seperti di Tabel 2. Secara keseluruhan terdapat 16 model untuk studi ini untuk mengetahui lokasi sendi plastis, rasio antara baris tiang terhadap performa rata-rata fondasi, dan kuat geser tanah.

Tabel 2 Variasi parameter tanah pasir yang digunakan

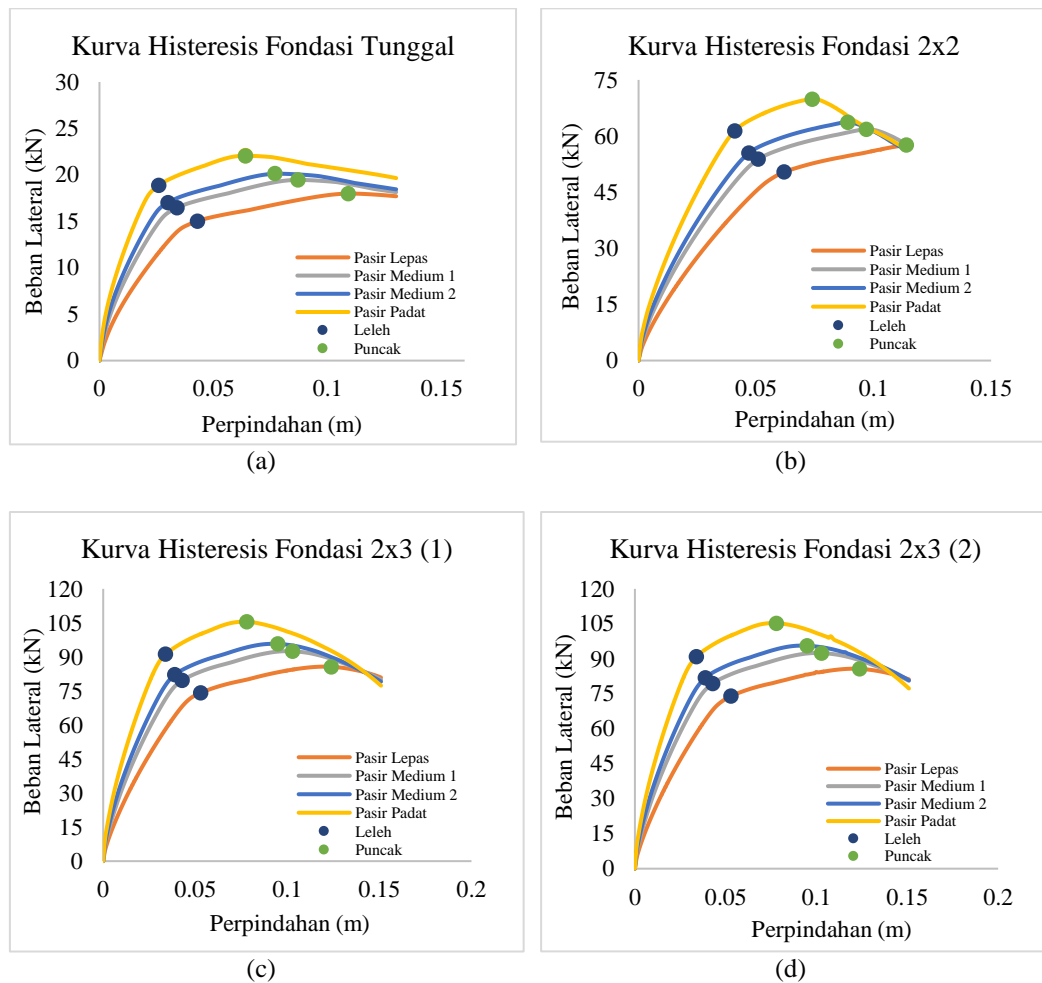
Jenis tanah	Desntias relatif	Berat jenis (kN/m ²)	Sudut geser (°)
Pasir Lepas	0.3	14	29.5
Pasir Sedang 1	0.45	16	31.5
Pasir Sedang 2	0.5	16	33
Padat	0.7	18	38

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Perilaku EPC

Hal pertama diinvestigasi melalui model numerikal adalah kurva *backbone* histeresis atau kurva pushover, seperti pada Gambar 4, dihasilkan dari masing-masing model di tanah yang berbeda. Dapat terlihat jenis tanah dan konfigurasi

fondasi mempengaruhi kurva, yang mana semakin padat tanah pasir dan semakin banyak jumlah tiang pada fondasi maka semakin besar kurva yang dihasilkan. Perbedaan kecil antara dua parameter yang ditinjau adalah semakin padat pasir maka perpindahan pada kondisi puncak dan *ultimate* akan semakin kecil, walaupun beban lateral yang dapat ditahan lebih besar. Sedangkan untuk semakin banyak tiang pada fondasi grup, semakin besar perpindahan yang dihasilkan. Karena analisis pushover menghasilkan performa fondasi secara keseluruhan, tidak ada perbedaan yang berarti antara kurva pushover 2x3(1) dan 2x3(2) yang memiliki perbedaan teori *p-multiplier* yang digunakan. Hal ini dikarenakan nilai *p-multiplier* yang digunakan adalah sama walaupun penempatan nilai *p-multiplier*nya berbeda.

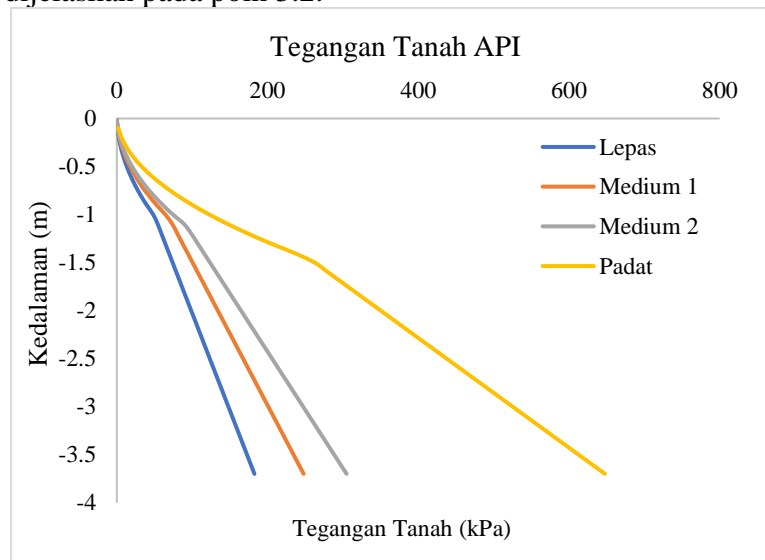


Gambar 4 Kurva Pushover Model Numerikal; (a) 1x1, (b) 2x2, (c) 2x3(1), (d) 2x3(2)

Sendi plastis terjadi ketika momen plastis penampang tercapai. Nilai momen plastis didapatkan menggunakan OpenSees, kemudian dibandingkan dengan nilai gaya dalam momen yang dialami node tiap kedalaman pada tiap model. Ketika besar gaya dalam momen tiang lebih besar nilainya dari momen plastis, maka pada lokasi tersebut terjadi sendi plastis. Sendi plastis terbentuk dua kali untuk tiap model fondasi. Sendi plastis pertama terbentuk di daerah sambungan ke bawah hingga 0.7 m dibawah permukaan bawah *pile cap*. Sendi plastis kedua terbentuk di

bawah tanah, dengan kedalamannya bergantung dengan jenis jenis tanah yang digunakan. Semakin padat tanah pasir maka semakin dalam pembentukan sendi plastis kedua. Dilihat bahwa sendi plastis terbentuk di *leading row* untuk setiap model fondasi grup, dan untuk tiang tunggal sendi plastis selalu terbentuk dua kali di tiang tersebut. Perpindahan ketika sendi plastis terbentuk akan mengecil ketika fondasi berada di tanah pasir yang lebih padat, sehingga sendi plastis terbentuk lebih cepat. Terdapat perbedaan kecil antara dua jenis *p-multiplier* yang diberikan pada fondasi 2x3, yang mana akan dibahas pada poin 3.2.

Model tanah pasir API yang digunakan untuk merepresentasikan kondisi sebenarnya pada OpenSees menghasilkan ketahanan tanah sepanjang kedalaman tanah yang dapat dihitung jika parameter tertentu diketahui. Ketahanan tanah tersebut dihitung menurut jenis tanah tiap model, yang menghasilkan grafik pada Gambar 5. Nilai *p-multiplier*, sesuai dengan nilai yang ditetapkan pada Tabel 1, diberikan pada tegangan tanah API untuk meninjau tegangan tanah tiap baris model fondasi, dan kemudian dibandingkan dengan tegangan tanah tiap baris yang dihasilkan oleh model OpenSees. Perbandingan tersebut menghasilkan apakah tanah berperilaku elastis atau plastis di kedalaman tertentu. Jika tegangan tanah yang dihasilkan OpenSees lebih besar dari tegangan tanah API, maka tanah pasir berperilaku plastis. Dari model disimpulkan bahwa semakin padat tanah pasir maka semakin cepat tanah berperilaku sebagai plastis. Hal ini terjadi karena semakin padat pasir maka semakin besar renggang tegangan tanah model numerikal terhadap tegangan tanah API, dengan tegangan tanah model memiliki nilai lebih besar dari pada API. Terdapat perbedaan antara 2 jenis penggunaan *p-multiplier* yang akan dijelaskan pada poin 3.2.



Gambar 5 Tegangan tanah API

3.2 Efek *P-Multiplier*

Akibat penggunaan *p-multiplier* yang bervariasi pada model numerikal untuk fondasi 3-baris, perbandingan dibuat pada output yang dihasilkan melalui OpenSees. Model 2x3(1) dibuat menurut Marrison dan Reese (1986), yang mana *p-multiplier* pada *center row* lebih besar daripada *rear row*, sedangkan model

2x3(2) dibuat berdasarkan Rollins et al. (1998) yang mana *p-multiplier rear row* lebih besar daripada *center row*. Sehingga, sesuai dengan Tabel 1, nilai *p-multiplier* yang digunakan untuk 2x3(1) adalah 0.7, 0.35, dan 0.25 untuk *leading row*, *center row*, dan *rear row*. Sedangkan untuk 2x3(2) adalah 0.7, 0.25, dan 0.35. Hal pertama yang dibandingkan adalah kurva histeresis atau kurva pushover, yang mana dilihat tidak terlalu mempengaruhi hasil yang dikeluarkan. Hal ini disebabkan oleh kurva pushover yang meninjau performa fondasi sebagai satu kesatuan, sehingga nilai *p-multiplier* yang sama, walaupun memiliki lokasi penempatan yang berbeda, tidak akan mempengaruhi performa keseluruhan fondasi.

Lokasi sendi plastis dan perpindahan saat terbentuk sendi plastis pada fondasi 2x3 dibandingkan. Perbedaannya tidak terlalu banyak, dimana perpindahan yang terjadi untuk membentuk sendi plastis pertama adalah sama, dan untuk membentuk sendi plastis kedua hanya berbeda 1 mm. Untuk membentuk sendi plastis kedua, model 2x3(1) membutuhkan deformasi yang lebih besar daripada model 2x3(2). Sedangkan pada area lokasi pembentukan sendi plastis, model 2x3(2) cenderung memiliki luasan lebih besar, yaitu sekitar 0.1 m, dariada model 2x3(1) terlihat dari Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3 Lokasi sendi plastis model 2x3(1)

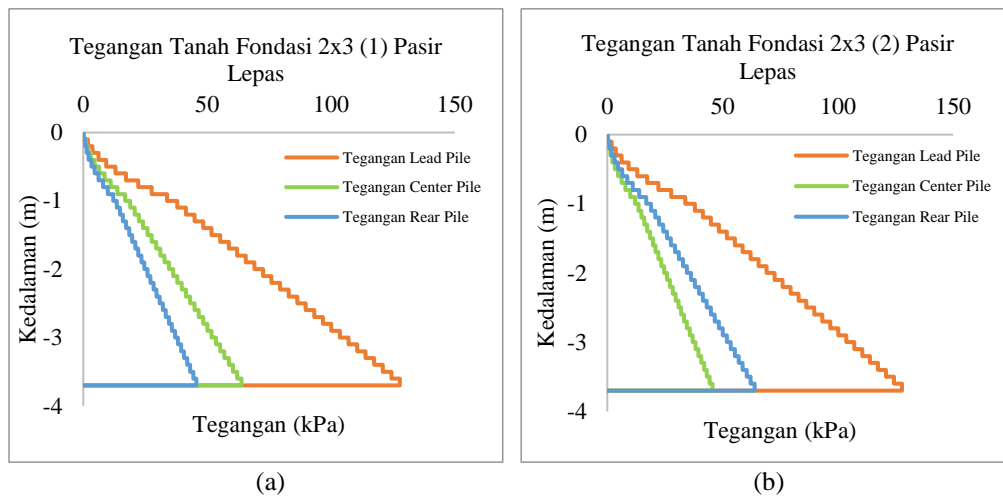
Jenis Tanah	Perpindahan (m)		Lokasi Sendi Plastis	
	Lead Pile			
	Pile Head	Bawah Tanah	Pile Head	Bawah Tanah
Pasir Lepas	0.044	0.110	0.6 ~ 0.7 m	-1.1 ~ -1.7 m
Pasir Sedang 1	0.037	0.086	0.6 ~ 0.7 m	-1 ~ -1.6 m
Pasir Sedang 2	0.034	0.076	0.6 ~ 0.7 m	-0.9 ~ -1.5 m
Pasir Padat	0.029	0.061	0.6 ~ 0.7 m	-0.8 ~ -1.4 m

Tabel 4 Lokasi sendi plastis model 2x3(2)

Jenis Tanah	Perpindahan (m)		Lokasi Sendi Plastis	
	Lead Pile			
	Pile Head	Bawah Tanah	Pile Head	Pile Head
Pasir Lepas	0.044	0.109	0.6 ~ 0.7 m	-1.1 ~ -1.8 m
Pasir Sedang 1	0.037	0.085	0.6 ~ 0.7 m	-0.9 ~ -1.7 m
Pasir Sedang 2	0.034	0.075	0.6 ~ 0.7 m	-0.9 ~ -1.6 m
Pasir Padat	0.029	0.060	0.6 ~ 0.7 m	-0.7 ~ -1.4 m

Nilai *p-multiplier* juga mempengaruhi tegangan tanah, yang mana semakin besar nilai *p-multiplier* maka semakin besar tegangan tanah yang dihasilkan oleh model API dan model numerikal tiap baris. Walaupun demikian, pada pembebanan yang sama untuk tiang dengan nilai *p-multiplier* yang lebih kecil, luasan tanah yang berperilaku menjadi plastis akan lebih besar. Analisis ini berdasarkan bagaimana model fondasi 2x3 berperilaku sendiri. Untuk *leading row* sendiri, tidak ada perbedaan dari kedua model 2x3 karena memiliki nilai dan lokasi yang sama. Namun, untuk *center row* dan *rear row*, yang mana lokasi penempatan nilai *p-multiplier* diubah antara model 2x3(1) dan 2x3(2), analisis diatas akan berlaku.

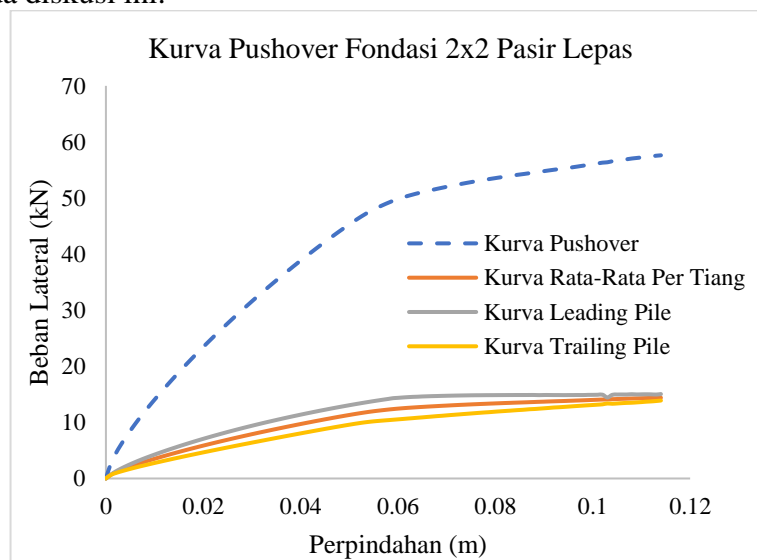
Gambar 6 membuktikan perbedaan tegangan tanah numerikal model, dengan contoh yang digunakan adalah pada tanah pasir lepas.



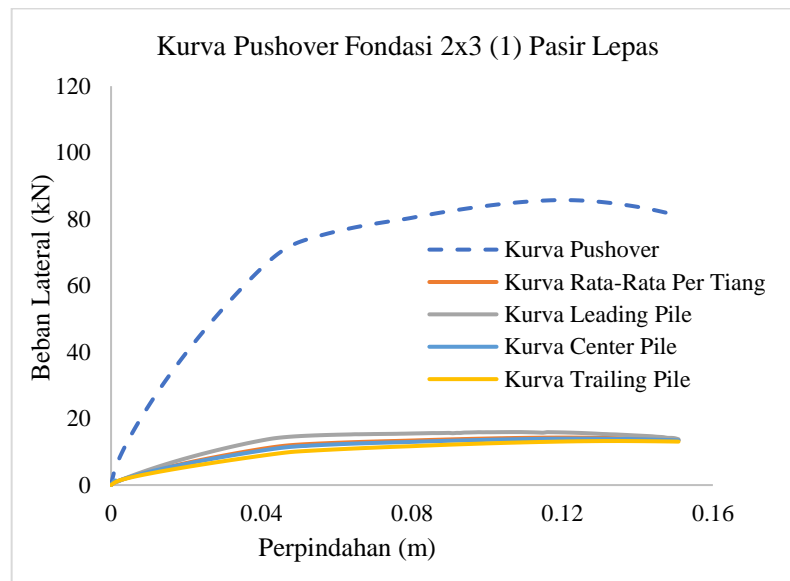
Gambar 6 Tegangan tanah model numerikal (a) 2x3(1) dan (b) 2x3(2)

3.3 Performa Individual Baris Tiang

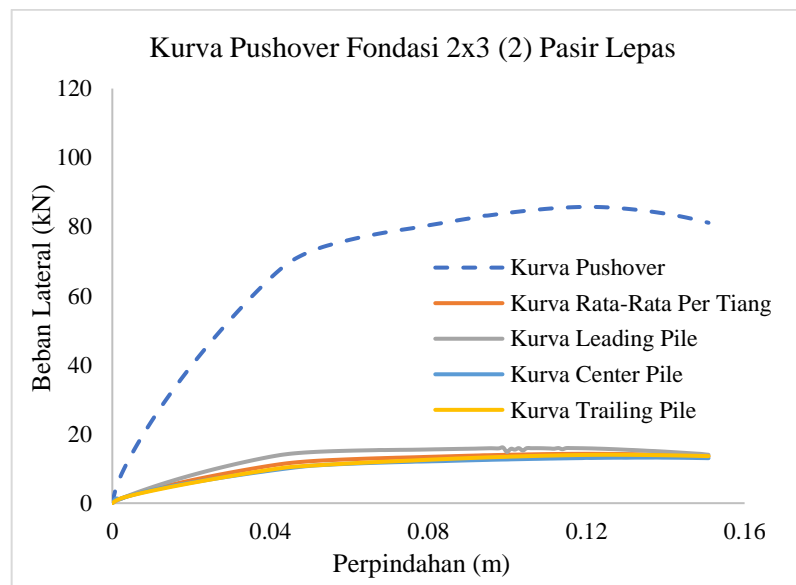
Dari kurva pushover, performa rata-rata fondasi per tiang dan performa individu tiap baris tiang diinvestigasi dan dibandingkan. Performa rata-rata fondasi per tiang adalah kurva pushover, yang merupakan performa keseluruhan fondasi, dibagi dengan jumlah tiang pada fondasi. Kedua hal ini akan menghasilkan rasio antara kapasitas tiang individu dengan kapasitas rata-rata fondasi per tiang. Dari sini juga dapat diasumsikan bagaimana perbedaan pengaruh *p-multiplier* yang diaplikasikan berbeda untuk tiap baris tiang dan *pile group effect* (PGE) yang faktor reduksinya disamaratakan seluruh baris tiang. Untuk fondasi tunggal tidak dianalisis pada diskusi ini.



Gambar 7 Kurva Pushover Dan Kurva Individual Tiang Fondasi 2x2 Pada Tanah Pasir Lepas



Gambar 8 Kurva Pushover Dan Kurva Individual Tiang Fondasi 2x3 (1) Pada Tanah Pasir Lepas



Gambar 9 Kurva Pushover Dan Kurva Individual Tiang Fondasi 2x3 (2) Pada Tanah Pasir Lepas

Salah satu contoh yang dikeluarkan adalah untuk model fondasi 2x2, 2x3(1), dan 2x3 (2) tanah pasir lepas seperti pada Gambar 7, Gambar 8, dan Gambar 9. Nilai kurva rata-rata per tiang didapatkan dari pembagian kurva pushover dengan jumlah tiang pada fondasi grup. Pada gambar 7, untuk fondasi 2x2, dibandingkan kurva beban-perpindahan pada *leading row* dan *trailing row* terhadap kurva rata-rata tersebut dan dipatkan perbedaan antara kedua kurva tiang *leading pile* dan *trailing pile* terhadap rata-rata masing-masing adalah 13.86% dan 13.9%. Persentase ini didapat dari perbandingan lateral load pada tiap perpindahan terhadap kurva rata-rata, kemudian hasil tersebut dirata-ratakan sehingga

menghasilkan nilai diatas. Untuk gambar 8 dan Gambar 9, dilakukan hal yang sama sehingga menghasilkan persentase rasio perbandingan performa individual tiang dengan performa rata-rata fondasi per tiang. Perbandingan ini dilakukan untuk tiap model sehingga menghasilkan Tabel 5.

Tabel 5 Perbandingan performa individual tiang dengan performa rata-rata fondasi per tiang

Model Numerikal	Jenis Tanah	Perbandingan Performa Individual Tiang dengan Performa Rata-Rata Fondasi per Tiang		
		Leading Pile	Center Pile	Rear Pile
2x2	Pasir Lepas	13.857%	-	-13.911%
	Pasir Sedang 1	14.368%	-	-15.172%
	Pasir Sedang 2	15.387%	-	-13.548%
	Pasir Padat	14.741%	-	-17.772%
2x3 (1)	Pasir Lepas	15.061%	-2.745%	-12.128%
	Pasir Sedang 1	15.915%	-3.194%	-12.545%
	Pasir Sedang 2	16.331%	-3.406%	-12.568%
	Pasir Padat	15.837%	-3.112%	-12.147%
2x3 (2)	Pasir Lepas	15.222%	-8.934%	-6.203%
	Pasir Sedang 1	16.416%	-9.592%	-6.486%
	Pasir Sedang 2	17.012%	-9.736%	-6.844%
	Pasir Padat	16.313%	-8.717%	-7.121%

Dari Tabel 5, disimpulkan bahwa kurva rata-rata berada di tengah-tengah kurva tiang *leading*, *center* dan *rear pile*, sehingga dapat dikatakan jika performa individu tiap tiang pada fondasi di rata-ratakan, performanya kurang lebih akan sama dengan kurva rata-rata yang didapat dari kurva pushover. Kemudian dari tabel disimpulkan bahwa penggunaan nilai *p-multiplier* yang berbeda mempengaruhi performa tiang tersebut, dengan terdapat perbedaan persentase antara *center pile* dan *rear pile* pada model fondasi 2x3 (1) dan (2). Pada *leading pile* model 2x3 (1) dan 2x3 (2), persentase yang dihasilkan tidak jauh berbeda, yaitu sekitar 16%. Hal ini dikarenakan nilai *p-multiplier* yang digunakan bernilai sama antar 2 model.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Fondasi EPC rentan terhadap beban gempa karena mengalami momen lentur yang lebih besar dari fondasi biasa, sehingga dibutuhkan investigasi perilaku inelastis menggunakan studi numerik metode BNWF melalui aplikasi OpenSees sesuai dengan eksperimen. Dua teori *p-multiplier* diterapkan pada model fondasi 3 baris untuk mengetahui pengaruh masing-masing teori. Kepadatan tanah yang bervariasi diaplikasikan juga pada model.

Untuk kesimpulan dari penggunaan 2 jenis teori *p-multiplier*, tidak ada perbedaan yang signifikan antara kedua teori untuk kurva pushover selama nilai *p-multiplier* yang digunakan adalah sama, walaupun lokasi penempatan faktor

reduksi adalah berbeda. Untuk pembentukan sendi plastis yang terbentuk, perbedaan antara model 2x3 (1) dengan model 2x3 (2) adalah perpindahannya yang lebih besar untuk membentuk sendi plastis kedua, sehingga lebih lambat terbentuk sendi plastis. Selain itu, area terjadinya sendi plastis pada model 2x3 (1) adalah lebih kecil 0.1 m daripada model 2x3 (2). Untuk tegangan tanah yang dihasilkan, semakin kecil nilai *p-multiplier* yang diaplikasikan, maka semakin kecil tegangan tanah yang dihasilkan oleh model tanah API dan model numerikal tiang. Meskipun demikian, pada langkah pembebanan yang sama untuk tiang dengan *p-multiplier* yang lebih kecil, tanah yang berperilaku plastis akan menutupi area yang lebih besar daripada tiang dengan nilai *p-multiplier* yang lebih besar. Untuk performa masing-masing tiang, kurva rata-rata kinerja tiang berada di tengah-tengah kurva tiang *leading*, *center* dan *rear pile*, sehingga dapat dikatakan jika performa tiap tiang pada fondasi grup di rata-ratakan, performanya kurang lebih akan sama dengan kurva rata-rata yang didapat dari kurva pushover dan nilai *p-multiplier* juga mempengaruhi performa tiang.

Untuk pengaruh densitas relatif terhadap perilaku inelastis fondasi EPC, semakin padat pasir, maka semakin cepat mencapai puncak dan ultimit pada kurva pushover. Beban yang dibutuhkan untuk menghasilkan perpindahan juga semakin besar akibat semakin padatnya pasir. Semakin padat tanah pasir maka semakin dalam pembentukan sendi plastis kedua, dengan sendi plastis pertama selalu terbentuk di sambungan. Untuk perbandingan performa individual tiang dengan performa rata-rata fondasi per tiang, densitas tanah tidak mempengaruhi hasil tersebut.

4.2 Saran

Penelitian diharapkan menggunakan beban siklik sehingga dapat merepresentasikan dengan lebih akurat kondisi eksperimen yang menggunakan pembebanan siklik. Selain itu, karena di Indonesia lebih banyak terdapat jenis tanah lempung, maka disarankan menggunakan model tanah lempung pada permodelan untuk mengetahui bagaimana efek tanah lempung terhadap fondasi grup EPC.

Daftar Kepustakaan

- Blanco, G., Ye, A., Wang, X., Goicolea, J.M., 2019. Parametric Pushover Analysis on Elevated RC Pile-Cap Foundations for Bridges in Cohesionless Soils. *Journal of Bridge Engineering* 24, 04018104. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001328](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001328)
- Brown, D.A., Morrison, C., Reese, L.C., 1988. Lateral load behavior of pile group in sand. *Journal of Geotechnical Engineering* 114. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1988\)114:11\(1261\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:11(1261))
- Brown, D.A., Reese, L.C., O'Neill, M.W., 1987. Cyclic lateral loading of a largescale pile group. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering* 113, 1326–1343.

- Budek, A., Benzoni, G., 2009. Obtaining ductile performance from precast prestressed concrete piles. *PCI Journal* 64–80.
- Cho, K.H., Clark, S.C., Keaney, B.D., Gabr, M.A., Borden, R.H., 2001. Laterally loaded drilled shafts embedded in soft rock. *Transportation Research Record*. <https://doi.org/10.3141/1772-01>
- Huang, A.-B., Hsueh, C.-K., O'Neill, M.W., Chern, S., Chen, C., 2001. Effects of Construction on Laterally Loaded Pile Groups. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2001\)127:5\(385\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:5(385))
- Ilyas, T., Leung, C.F., Chow, Y.K., Budi, S.S., 2004. Centrifuge Model Study of Laterally Loaded Pile Groups in Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2004\)130:3\(274\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2004)130:3(274))
- Liu, T., Wang, X., Ye, A., 2020. Roles of pile-group and cap-rotation effects on seismic failure mechanisms of partially embedded bridge foundations: Quasi-static tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 132. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106074>
- Mazzoni, S., 2006. *OpenSees Command Language Manual*.
- Morrison, C., Reese, L.C., 1986. A lateral-load test of full-scale pile group in sand. GR86-1, FHWA.
- Rollins, K.M., Lane, J.D., Gerber, T.M., 2005. Measured and Computed Lateral Response of a Pile Group in Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 131. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2005\)131:1\(103\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2005)131:1(103))
- Rollins, K.M., Olsen, R.J., Egbert, J.J., Jensen, D.H., 2006. Pile spacing effects on lateral pile group behavior: Load tests. *J. Geotech. Geoenviron.* 132, 1262–1271.
- Rollins, K.M., Peterson, K.T., Weaver, T.J., 1998. Lateral Load Behavior of Full-Scale Pile Group in Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(1998\)124:6\(468\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(1998)124:6(468))
- Rollins, K.M., Sparks, A.E., Peterson, K.T., 2000. Lateral load capacity and passive resistance of full-scale pile group and cap. *Transportation Research Record*. <https://doi.org/10.3141/1736-04>