

MODELISASI ANALISIS NUMERIK GAYA LATERAL PADA *ELEVATED REINFORCED CONCRETE PILE CAP* PADA TANAH NON KOHESIF

Alvin Lo¹, Hendy Wijaya², Amelia Yuwono³

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara Jakarta
Email: alvin.325160148@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara Jakarta
Email: hendyw@ft.untar.ac.id

³Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara Jakarta
Email: yuwonoamelia@gmail.com

Masuk: 17-08-2020, revisi: 31-03-2021, diterima untuk diterbitkan: 05-04-2021

ABSTRAK

Jembatan adalah struktur konstruksi yang dibangun untuk menghubungkan bagian jalan yang terputus oleh rintangan-rintangan seperti lembah yang dalam, alur saluran irigasi. Untuk membangun sebuah jembatan, diperlukan fondasi yang kuat, ekonomis dan mudah untuk dibangun untuk memikul beban dari jembatan dan juga gaya gempa. Masalah yang umum ditemui pada konstruksi fondasi jembatan adalah terjadinya erosi pada sekitar fondasi dikarenakan gerusan air yang menyebabkan tanah terangkat dan memperlihatkan sebagian tiang fondasi, yang sering disebut dengan *elevated reinforced concrete pile-cap foundations*. Pada penelitian ini dilakukan analisis secara numerik terhadap kelompok tiang pada *elevated reinforced concrete pile-cap foundations* yang dibebani gaya lateral pada tanah berpasir untuk melihat perilaku daktilitas tiang dengan bantuan program berbasis geoteknik dan membandingkan dengan hasil penelitian terdahulu. Analisis menyertakan model kepala tiang dan hubungan antara tanah dengan tiang serta mempertimbangkan efek kelompok tiang. Analisis dilakukan untuk melihat kondisi struktural dan geoteknikal pada perilaku daktilitas fondasi yang ditanam sebagian pada tanah pasir. Hasil yang didapatkan adalah perbandingan nilai daktilitas dan *overstrength* yang dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam mendesain *elevated reinforced concrete pile-cap foundations*.

Kata kunci: *Elevated RC pile-cap foundations*; analisis numerik; gaya lateral; daktilitas

ABSTRACT

Bridges are construction structures that are built to connect parts of the road that are cut off by obstacles such as deep valleys, irrigation channel paths. In order to build a bridge, a strong, economical and easy to build foundation is needed to carry gravity loads and also earthquake force. A common problem encountered in bridge foundation is the occurrence of erosion around the piles due to scouring of water which causes exposing some portion of the piles, which are often referred as *elevated reinforced concrete pile-cap foundations*. In this study, a numerical analysis of pile groups on *elevated reinforced concrete pile-cap foundations* is carried out with lateral forces on sandy soil to see the ductility behavior of piles using geotechnical-based programs and to compare the results with the previous studies. The analysis includes the pilecap model and the soil-to-pile interaction and also considers the pile group effect. The analysis was carried out to see the structural and geotechnical conditions on the ductility behavior of a partially embedded piles on sandy soil. The result obtained is a comparison of the ductility and *overstrength* values that can be used as a consideration in designing *elevated reinforced concrete pile-cap foundations*.

Keywords: *Elevated RC pile-cap foundations*; numerical analysis; lateral force; ductility

1. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Jembatan adalah salah satu prasarana yang penting dalam kehidupan masyarakat, karena selain sebagai penghubung untuk mempermudah transportasi darat antara dua ataupun lebih daerah yang terpisah oleh sungai ataupun lembah, dengan adanya sebuah jembatan, secara tidak langsung akan meningkatkan pertumbuhan perekonomian di suatu daerah. Secara struktur, jembatan dipisahkan menjadi dua bagian, yaitu struktur bangunan atas jembatan dan struktur bangunan bawah jembatan. Struktur bangunan bawah jembatan terdiri dari pangkal jembatan (*abutment*), pilar jembatan (*pier*), dan fondasi jembatan.

Masalah yang umum ditemui dalam konstruksi fondasi jembatan adalah terjadinya erosi pada sekitar fondasi dikarenakan adanya gerusan air yang menyebabkan tanah terangkat dan memperlihatkan sebagian tiang fondasi, yang biasa disebut *Elevated RC Pile Cap Foundation* (EPFs).

Tiang pancang adalah bagian konstruksi yang dibuat dari kayu, beton, atau baja, yang digunakan untuk mentransfer beban-beban permukaan ke tingkat-tingkat permukaan yang lebih rendah dalam massa tanah (Bowles, 1997). Proses transfer beban ini dapat melalui distribusi secara vertikal di sepanjang permukaan tiang dengan mengandalkan friksi atau gesekan antara tiang dengan tanah, atau dapat pula transfer beban dilakukan secara langsung pada ujung tiang yang bertumpu pada lapisan tanah yang keras. Berdasarkan jumlah tiangnya, tiang pancang dibedakan menjadi tiang tunggal dan tiang kelompok.

Pembebanan siklik pada tiang yang diberi gaya lateral biasa terjadi pada bangunan di laut, jembatan, *overhead sign*, *breasting dolphin*, *mooring dolphin* dan struktur lainnya. Untuk tanah lempung keras di atas permukaan air dan tanah pasir, efek *cyclic loading* sangat berpengaruh. Sedangkan untuk tanah lempung jenuh di bawah permukaan air, termasuk lempung lunak, pembebanan siklik memberikan hasil yang sama dengan *static loading*. Percobaan telah menunjukkan bahwa tanah keras tetap terdorong pada bagian permukaan ketika tiang mengalami defleksi. Pengaplikasian ulang menyebabkan air dipaksa untuk bergerak menggerus tanah. Sebagaimana hasilnya adalah pengikisan tanah disekitar tiang (*scour*) yang menyebabkan daya tahan lateral berkurang. Dalam percobaan dengan tanah lempung keras, pengikisan tanah disekitar tiang (*scour*) akibat pembebanan siklik dapat dilihat pada bagian depan dan belakang tiang (Reese, et al., 2001). Jarak yang terbentuk di sekitar tiang tidak terlalu terlihat pada tanah lempung lunak, dikarenakan tanah tersebut sangat mudah runtuh ketika beban diberikan, namun demikian pembebanan siklik tetap menyebabkan kehilangan tahanan lateral yang signifikan (Matlock, 1970).

Daktilitas adalah kemampuan suatu struktur untuk mengalami simpangan paska-elastik yang besar secara berulang kali dan bolak-balik akibat beban gempa diatas beban gempa yang menyebabkan terjadinya pelelehan pertama, sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup, sehingga struktur tersebut tetap berdiri, walaupun sudah berada dalam kondisi diambang keruntuhan (SNI 1726:2012). Faktor daktilitas dinyatakan dalam *term displacement* sebagai berikut:

$$\mu\Delta = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (1)$$

dengan $\mu\Delta$ = daktilitas, Δu = *displacement* pada keadaan batas *post-elastic* dan Δy = *displacement* pada keadaan leleh pertama.

Overstrength mempunyai peran penting dalam melindungi bangunan terhadap gempa. Hal ini menjelaskan tentang adanya struktur yang mempunyai kekuatan lebih walau tidak diperhitungkan dalam desain. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi efek dari *overstrength* pada respons seismik dari beton bertulang dan rangka penahan momen pada bangunan. Hasil studi menunjukkan bahwa *overstrength* bergantung pada beberapa faktor, dan yang paling utama adalah daktilitas rangka. Dalam studi, didapatkan bahwa bentuk dan daktilitas dari struktur sangat mempengaruhi faktor *overstrength factor* (Propika et al., 2017). *Overstrength* biasa didefinisikan sebagai *overstrength factor* yang menunjukkan rasio dari *maximum base shear* pada kuat leleh struktur:

$$R_s = \frac{V_y}{V_1} \quad (2)$$

dengan R_s = faktor kuat lebih, V_y = *lateral force* pada keadaan batas *post-elastic* dan V_1 = *lateral force* pada keadaan leleh pertama.

Diberlakukannya SNI 1726:2019 yang menggantikan SNI 1726:2012 memunculkan beberapa daerah tertentu yang mengalami kenaikan percepatan gempa, sehingga gaya gempa yang diterima oleh fondasi turut meningkat (Morrischo et al., 2020). Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis terhadap suatu kelompok tiang dengan berbagai percepatan gempa, salah satunya adalah dengan metode analisis *quasi-static*. Dalam analisis *quasi-static*, beban diterapkan secara perlahan sehingga struktur berdeformasi secara perlahan, yang artinya pengaruh gaya inersia sangat kecil sehingga dapat diabaikan (Doyle, 1991).

Uji pembebanan siklis pada EPFs di tanah non-kohefif yang dilakukan oleh Xiaowei Wang (Wang et al., 2015) menunjukkan perilaku daktil dengan nilai faktor daktilitas sebesar 3.64. Hasil eksperimen juga memperlihatkan adanya hubungan linier antara daktilitas dengan rotasi pada kepala tiang (*pile-cap*). Pada tahun 2019, Guillermo Blanco (Blanco et al., 2019) melakukan pengembangan terhadap penelitian tersebut untuk mempelajari lebih mendalam perihal daktilitas dari EPFs pada tanah non-kohefif.

Rumusan Masalah

Pada penelitian ini akan dikaji nilai faktor daktilitas dan *overstrength factor* dari tiang pancang kelompok persegi EPFs dengan konfigurasi tiang 2x3 menggunakan metode analisis numerik. Nilai faktor daktilitas akan dibandingkan dengan nilai faktor daktilitas dari hasil penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Xiaowei Wang (Wang et al., 2015).

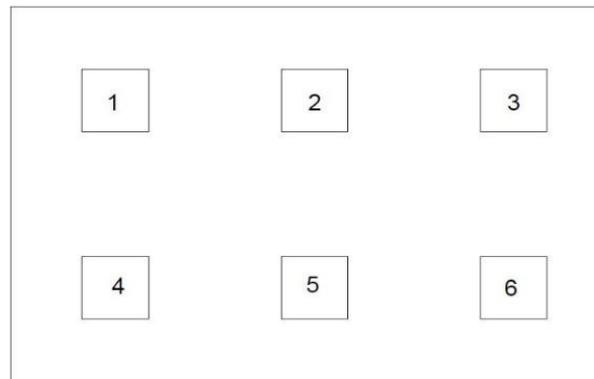
2. METODE PENELITIAN

Metode Pengumpulan Data

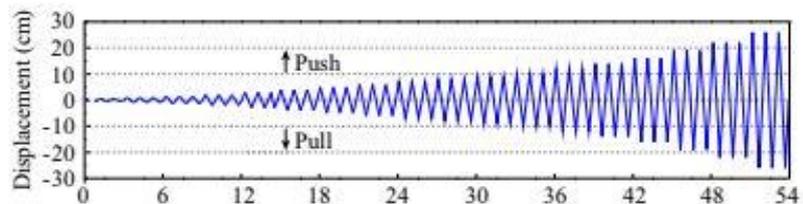
Pada penelitian ini, ukuran fondasi yang digunakan mengacu pada hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Guillermo Blanco (Blanco et al., 2019). Ukuran *pile-cap* yang digunakan adalah 1.45m x 1m x 0.6m (panjang x lebar x tebal) yang memiliki 6 tiang persegi berukuran 0.15m x 0.15m, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Dasar *pile-cap* berada pada ketinggian 0.8m di atas permukaan tanah. Jenis tanah yang digunakan berupa tanah pasir hasil tes laboratorium. Parameter tiang yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Sedangkan parameter tanah yang digunakan mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Xiaowei Wang (Wang et al., 2015) dan Guillermo Blanco (Blanco et al., 2019), seperti yang tersaji pada Tabel 3. Tipe pembebanan siklik yang digunakan berupa beban *displacement* dengan siklus pembebanan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

Metode Pengolahan Data

Data parameter-parameter yang telah dikumpulkan kemudian di-*input* ke dalam program berbasis geoteknik (PLAXIS b.v., 2002). Hasil dari analisis program selanjutnya diolah sebagai dasar perhitungan nilai faktor daktilitas dan *overstrength factor*. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 1. Tiang kelompok 6 tiang



Gambar 2. Loading cycle (Blanco et al., 2019)

Tabel 1. Parameter tiang analisis

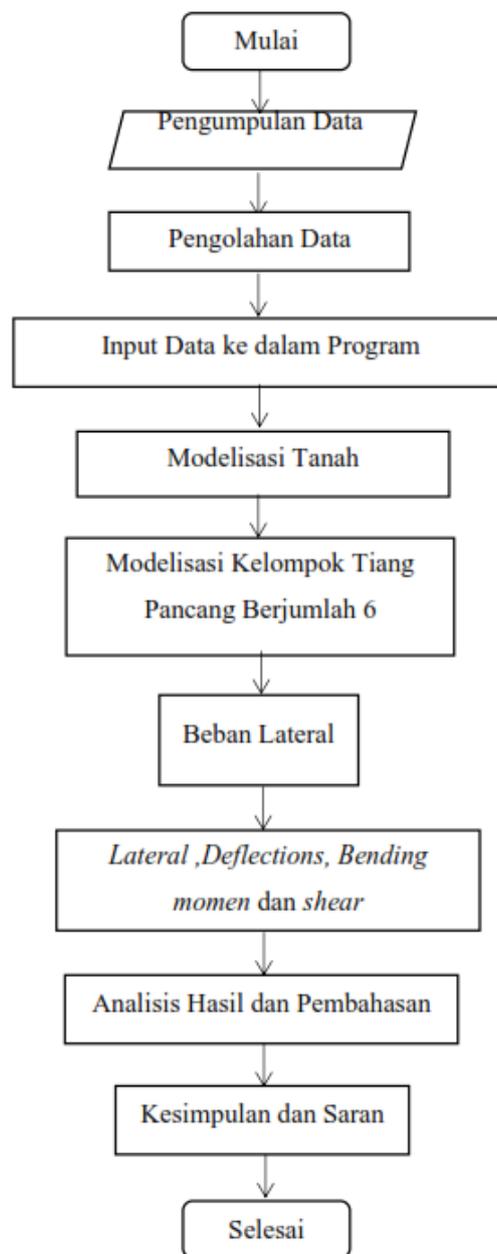
Parameter	Unit	Value
E	kN/m^2	2.54E+07
γ	kN/m^3	24
Width	m	0.15
A	m^2	0.0225
I	m^4	4.22E-05
Skin Resistance, Ttop	kN/m	11.4
Skin Resistance, Tbot	kN/m	73.13

Tabel 2. Parameter tiang *back analysis*

Parameter	Unit	Value
E	kN/m^2	3.96E+05
γ	kN/m^3	24
Width	m	0.15
A	m^2	0.0225
I	m^4	4.22E-05
Skin Resistance, Ttop	kN/m	11.4
Skin Resistance, Tbot	kN/m	73.13

Tabel 3. Parameter tanah

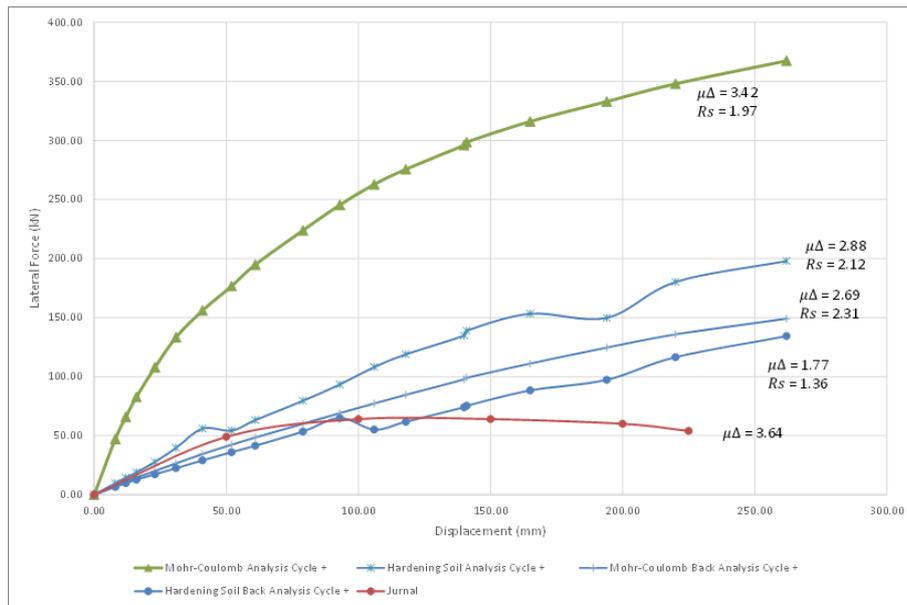
Parameter	Unit	Value
Unit weight	γ	kN/m^3 15.6
Moisture content	ω	% 0.37
Friction angle	ϕ	degrees 31
Relative density	Dr	% 65



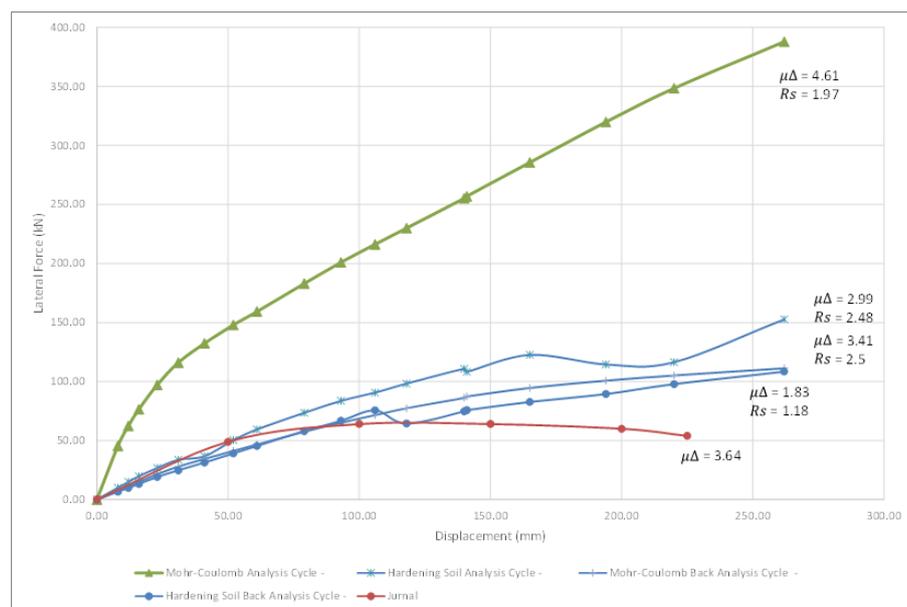
Gambar 3. Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan pemodelan berdasarkan parameter tiang, parameter tanah, dan jenis beban, selanjutnya dilakukan analisis terhadap kelompok tiang tersebut. Pada penelitian ini, kelompok tiang ini dianalisis dengan memberikan beban secara lateral berupa *displacement* dengan model *Mohr-Coulomb* dan *Hardening Soil*. Metode *back analysis* juga dilakukan pada penelitian ini dengan menggunakan estimasi nilai modulus elastisitas tiang yang telah tereduksi. Dari hasil analisis, dapat diperoleh besarnya beban lateral ultimit yang terjadi serta kurva kapasitas dari kelompok tiang tersebut. Dari kurva tersebut dapat diperoleh besarnya nilai daktilitas dan faktor kuat lebih. Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan kurva kapasitas untuk beberapa metode analisis pada kondisi *cycle* positif dan negatif.



Gambar 4. Resume kurva kapasitas *cycle +*



Gambar 5. Resume kurva kapasitas *cycle -*

Dalam analisis, tiang tidak dimodelkan untuk mencapai kondisi elastoplastis, sehingga pada Gambar 4 dan Gambar 5 kurva kapasitas cenderung terus meningkat. Untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat, kondisi elastoplastis pada tiang harus dimodelkan dalam analisis.

Nilai faktor daktilitas yang didapat dari analisis dengan model *Mohr-Coulumb* dan *Hardening Soil* menunjukkan nilai yang lebih besar dari nilai yang diperoleh pada penelitian terdahulu (Wang, 2015) dengan perbedaan antara 6% - 27%. Sedangkan nilai faktor daktilitas yang didapat dari *back analysis* dengan model *Mohr-Coulumb* dan *Hardening Soil* menunjukkan nilai yang lebih kecil dari nilai yang diperoleh pada penelitian terdahulu (Wang, 2015) dengan perbedaan antara 6% - 105%. Tabel 4 dan Tabel 5 menyajikan ringkasan hasil perbandingan nilai faktor daktilitas yang diperoleh dari beberapa metode analisis dengan nilai faktor daktilitas yang diperoleh pada

penelitian terdahulu. Pada tabel tersebut, terlihat bahwa model *Mohr-Coulumb* memberikan hasil yang lebih mendekati nilai referensi jika dibandingkan dengan model *Hardening Soil*.

Nilai *overstrength factor* yang diperoleh dari hasil beberapa metode analisis memberikan hasil bervariasi antara 1.18 – 2.48. Analisis dengan model *Mohr-Coulumb* memberikan hasil yang lebih kecil jika dibandingkan dengan model *Hardening Soil* dengan variasi antara 7% - 12%. Sedangkan *back analysis* dengan model *Mohr-Coulumb* memberikan hasil yang lebih besar jika dibandingkan dengan model *Hardening Soil* dengan variasi antara 40% - 53%. Tabel 6 dan Tabel 7 menyajikan ringkasan hasil perbandingan nilai *overstrength factor* dari beberapa metode analisis.

Nilai faktor daktilitas yang diperoleh dari hasil analisis dengan model *Mohr-Coulumb* memberikan hasil yang lebih besar jika dibandingkan dengan model *Hardening Soil* dengan variasi antara 11% - 16%. Sedangkan *back analysis* dengan model *Mohr-Coulumb* memberikan hasil yang lebih besar jika dibandingkan dengan model *Hardening Soil* dengan variasi antara 34% - 53%. Tabel 8 dan Tabel 9 menyajikan ringkasan hasil perbandingan nilai faktor daktilitas dari beberapa metode analisis.

Tabel 4. Perbandingan nilai daktilitas cycle +

Tipe	Nilai Daktilitas	Nilai DaktilitasJurnal	Perbandingan (%)
Mohr-Coulomb Analysis	3.4193548	3.64	6.452831394
Hardening Soil Analysis	2.87804884	3.64	26.47457366
Mohr-Coulomb Back Analysis	2.692308	3.64	35.19998455
Hardening Soil Back Analysis	1.774194	3.64	105.1635841

Tabel 5. Perbandingan nilai daktilitas cycle –

Tipe	Nilai Daktilitas	Nilai DaktilitasJurnal	Perbandingan (%)
Mohr-Coulomb Analysis	4.6086955	3.64	21.01886532
Hardening Soil Analysis	2.999999998	3.64	21.33333341
Mohr-Coulomb Back Analysis	3.414634	3.64	6.600004569
Hardening Soil Back Analysis	1.830189	3.64	98.88656308

Tabel 6. Perbandingan nilai *overstrength cycle* + antara *M-C* dan *H-S Analysis*

Tipe	Nilai <i>overstrength</i>	H-S Analysis Nilai <i>overstrength</i>	H-S Back Analysis Nilai <i>overstrength</i>	Perbandingan (%)
M-C Analysis	1.971321536	2.124325754		7.76150492
M-C Back Analysis	2.310207		1.360538	41.10752846

Tabel 7. Perbandingan nilai *overstrength cycle* – antara *M-C* dan *H-S Analysis*

Tipe	Nilai <i>overstrength</i>	H-S Analysis Nilai <i>overstrength</i>	H-S Back Analysis Nilai <i>overstrength</i>	Perbandingan (%)
M-C Analysis	2.224226121	2.484161694		11.68656238
M-C Back Analysis	2.503547		1.182812	52.75455184

Tabel 8. Perbandingan nilai daktilitas cycle + antara *M-C* dan *H-S Analysis*

Tipe	Nilai <i>overstrength</i>	H-S Analysis Nilai <i>overstrength</i>	H-S Back Analysis Nilai <i>overstrength</i>	Perbandingan (%)
M-C Analysis	3.4193548	2.87804884		15.83064618
M-C Back Analysis	2.692308		1.774194	34.10137325

Tabel 9. Perbandingan nilai daktilitas cycle – antara *M-C* dan *H-S Analysis*

Tipe	Nilai <i>overstrength</i>	H-S Analysis Nilai <i>overstrength</i>	H-S Back Analysis Nilai <i>overstrength</i>	Perbandingan (%)
M-C Analysis	4.6086955	2.999999998		34.90565827
M-C Back Analysis	3.414634		1.830189	46.40160556

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis yang dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai faktor daktilitas yang diperoleh dari hasil analisis numerik bervariasi antara 2.88 – 4.61, sedangkan nilai faktor daktilitas yang diperoleh dari hasil *back analysis* bervariasi antara 1.77 – 3.41.
2. Nilai faktor daktilitas yang diperoleh dari hasil analisis numerik cenderung memberikan hasil yang lebih besar jika dibandingkan dengan hasil penelitian terdahulu dengan perbedaan antara 6% - 27%, sedangkan hasil *back analysis* memberikan hasil yang lebih kecil jika dibandingkan dengan hasil penelitian terdahulu dengan perbedaan antara 6% - 105%.
3. Dari hasil analisis, model *Mohr-Coulumb* memberikan nilai faktor daktilitas yang cenderung lebih akurat jika dibandingkan dengan model *Hardening Soil*.
4. Nilai *overstrength factor* yang diperoleh dari hasil beberapa metode analisis memberikan hasil bervariasi antara 1.18 – 2.48.
5. Pada penelitian ini, tiang tidak dimodelkan untuk mencapai kondisi elastoplastis sehingga menyebabkan tiang selalu berada pada kondisi elastis. Hal ini mempengaruhi akurasi hasil analisis.

Beberapa saran yang dapat dilakukan untuk pengembangan penelitian ini diantaranya:

1. Perlu dilakukan analisis dengan memodelkan kondisi elastoplastis dari tiang sehingga bisa memberikan hasil yang lebih akurat.
2. Perlu dilakukan variasi pada jumlah tiang dan atau perbedaan tinggi tiang diatas permukaan tanah untuk memperoleh lebih banyak data terhadap perilaku daktilitas tiang *elevated reinforced concrete pile cap* pada desain gempa berbasis gaya lateral dan berbasis perpindahan.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Program Studi Sarjana Teknik Sipil Universitas Tarumanagara yang telah memberi dukungan dengan menyediakan fasilitas perangkat lunak sehingga penelitian ini dapat berlangsung.

REFERENSI

- Blanco, G., Ye, A., Wang, X., & Goicolea, J.M. (2019). Parametric pushover analysis on elevated rc pile-cap foundations for bridges in cohesionless soils. *J. Bridge Engrg.*, 24(1), 1-18.
- Bowles, J.E. (1997). *Analisis dan desain fondasi jilid 1* (Edisi 4). Jakarta: Erlangga.
- Doyle, J.F. (1991). *Static and dynamic analysis of structures with an emphasis on mechanics and computer matrix methods*. Dordrecht: Springer-Science+Business Media.
- Matlock, H. (1970). "Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay". Proceedings of the 2nd Offshore Technology Conference, Houston, 22-24 April 1970, 577-594.
- Morrischo, Wijaya, H., & Yuwono, A. (2020). Analisis kapasitas lateral pada fondasi tiang tunggal dan tiang kelompok pada tanah pasir. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 3(4), 1105-1112.
- PLAXIS b.v. (2002). *PLAXIS 3D foundation version 2.0*. Netherlands: A.A. Balkema Publishers.
- Propika, J., & Caroline, J. (2017). Peningkatan daktilitas *hollow pile* dengan penambahan rasio spiral dan beton cor setempat. *Jurnal IPTEK*, 21(1), 51-60.
- Reese, L.C.I., & Van, W.F. (2001). *Single piles and pile groups under lateral loading* (2nd ed.). Florida: CRC Press.

- SNI 1726-2012. (2012). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Wang, X., Ye, A., He, Z., & Zhang, Y. (2015). Quasi-static cyclic testing of elevated rc pile-cap foundation for bridge structures. *J. Bridge Engrg.*, 21(2), 1-17.