

PERILAKU PONDASI TIANG PANCANG DENGAN MEMPERTIMBANGKAN INTERAKSI TANAH-TIANG-STRUKTUR PADA GEDUNG BERTINGKAT MENGGUNAKAN SAP2000

¹Minson Simatupang, ²Masykur Kimsan, ³Nur Adriyani Filzah

^{1, 2, 3}Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Halu Oleo University, Indonesia

Koresponden Author : minson.simatupang@uho.ac.id

ABSTRAK

Interaksi antara struktur atas dan struktur bawah pada sebuah bangunan bertingkat akan sangat mempengaruhi perilaku struktur secara keseluruhan. Interaksi tanah-tiang-struktur tidak dapat diabaikan karena akan mengakibatkan disain struktur yang kurang tepat. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku tiang pancang dengan mempertimbangkan interaksi tanah-tiang-struktur. Pada penelitian ini, digunakan program SAP2000 untuk memodelkan struktur yang diteliti. Perhitungan analisis dinamik tanah, tiang, dan struktur menggunakan metode elemen hingga (FEM) pada SAP2000. Kekakuan tanah, spektrum respon desain situs, serta analisis time history menggunakan rekaman data gempa El-Centro N-S (Amerika Serikat), Koyna (India) dan Loma Prieta (Amerika Serikat). Simpangan antar lantai, base shear dan joint displacement diperlukan untuk mengetahui besaran interaksi yang terjadi pada tiang pancang dan tanah.

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan pada tiang pancang bangunan yang ditinjau nilai lateral displacement maksimum untuk gempa El-Centro, Koyna, dan Loma adalah 2,0608 cm, 1,4174 cm, dan 1,7028 cm. dan untuk bending momennya sebesar 55,8629 kN.m untuk El-Centro, -37,6745 kN.m untuk Koyna dan 87,6565 kN.m untuk Loma Prieta. Untuk bending moment yang terjadi pada struktur akibat gempa tidak melampaui nilai batasan moment lentur berdasarkan perhitungan dan analisa momen lentur pada tiang.

Kata Kunci : Interaksi Tanah-Tiang-Struktur, Perpindahan Lateral, Momen Lentur

ABSTRACT

Interaction between upper and bottom structure on the multistory building really influences the behavior of all structures. Soil-pile-structure interaction cannot be ignored because it will cause inaccurate structural design. Hence, the goal of the research is to know the behaviour of the piles considering soil-pile-structure interaction. In this study, SAP2000 programme was implemented for modeling the structure under investigation. The dynamic analysis calculation of soil, pile, and structure used finite element method (FEM) available on SAP2000. The soil stiffness, design spectrum responses of the site, and the time history analysis used data record of El Centro N-S (United States), Koyna (India), and Loma Prieta (United States) earthquake. Deviation between floor, base shear, and joint displacement is needed to know the interaction between piles and soil.

According to the test results, maximum lateral displacement of pile foundation on structure investigated by implementing El Centro, Koyna, dan Loma Prieta earthquake are 2,0608 cm, 1,4174 cm, dan 1,7028 cm respectively. On case bending moment, maximum values are 55,8629 kN.m, -37,6745 kN.m, and 87,6565 kN.m. Bending moment happened on the structure due to these of earthquakes as aforementioned doesn't exceed bending moment limitation required.

Keywords : Soil-Pile-Structure Interaction, Lateral Displacement, Bending Moment

PENDAHULUAN

Struktur gedung bangunan sipil pada umumnya terdiri dari struktur atas dan struktur bawah. Pada konstruksi bangunan bawah, fungsi pondasi memegang peranan yang sangat penting. Selain sebagai media untuk meneruskan beban yang berasal dari berat struktur di atasnya ke lapisan tanah keras di bawahnya juga ke lapisan tanah di sekitarnya (Khodair and Abdel-Mohti, 2014; Patel et al., 2011).

Dalam analisis struktur, sering kali struktur dianggap tertumpu diatas suatu tumpuan yang tidak berdeformasi. Bila struktur terletak di atas tanah, maka dianggap tanah mempunyai kekakuan tak berhingga sehingga tanah tidak mengalami deformasi. Kenyataannya, tanah bukanlah suatu material dengan kekakuan tak berhingga sehingga akan selalu mengalami deformasi bila mengalami pembebanan (Al Samadi, 2014). Deformasi yang dialami oleh tanah akibat pergerakan tiang pancang akan mempengaruhi gerakan struktur begitu pula

pergerakan dari struktur akan mempengaruhi respon tanah dan tiang pancang di bawahnya yang disebut sebagai interaksi tanah-tiang-struktur (soil-pile-structure interaction-SPSI) (Venanzi et al., 2014; Wijaya, 2000; Wolf, 1985).

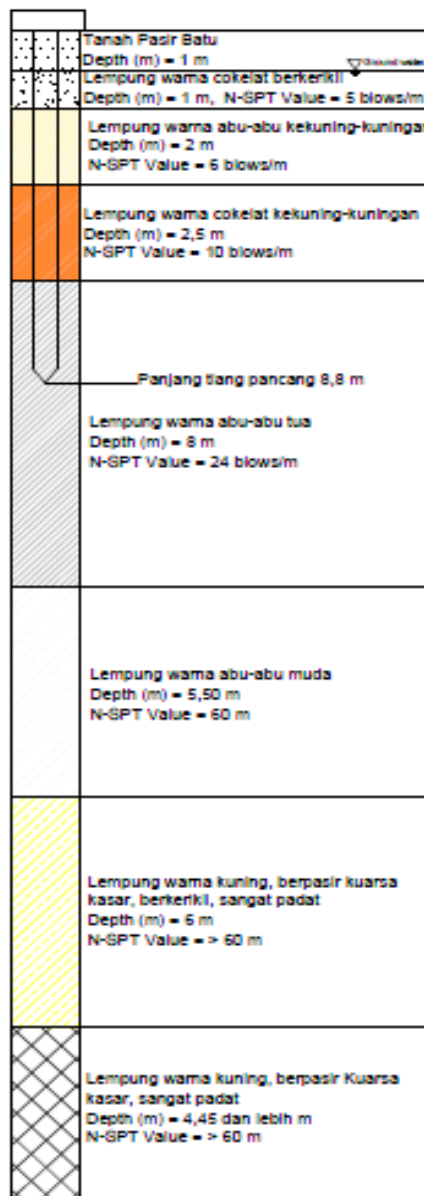
Interaksi tanah-tiang-struktur pada struktur bangunan akan memberikan hasil yang berbeda bergantung pada tanah yang digunakan sebagai dasar pada bangunan tersebut. Mengabaikan pengaruh interaksi tersebut dapat mengakibatkan desain struktur yang kurang tepat (Kramer, 1996; Wolf, 1985), sehingga akan mempengaruhi pembiayaan. Oleh karena itu, penting untuk memperhitungkan interaksi tanah-struktur yang terjadi pada suatu bangunan. Defleksi tiang pancang sangat tergantung pada struktur yang dipikulnya dan reaksi tanah di sekelilingnya. Demikian juga sebaliknya reaksi tanah dipengaruhi oleh defleksi tiang pancang yang memikul struktur di atasnya.

Dalam metode desain konvensional, analisa struktur atas dan bawah sering kali dievaluasi secara terpisah dengan mengabaikan kemungkinan interaksi langsung diantara mereka. Hal tersebut diperkirakan dapat mengakibatkan kesalahan dalam desain, sebab gerakan struktur atas akan berpengaruh langsung terhadap respon struktur bawah dalam hal ini pondasi tiang dan sebaliknya. Pendekatan demikian tidak bisa diharapkan akan menghasilkan perkiraan yang akurat terhadap perilaku tiang. Penelitian tentang perilaku tiang pancang dengan menganalisa struktur atas secara terpisah telah banyak dilakukan (Abdrabbo and Gaaver, 2012; Elhakim, 2016; Haeri et al., 2012; Hazzar et al., 2017; Jardine and Standing, 2012; Khodair and Abdel-Mohti, 2014; Rahmani et al., 2018; Rollins et al., 1998; Tamura et al., 2012; Tsuha et al., 2012). Sangat terbatas penelitian terhadap perilaku tiang dengan memperhitungkan interaksi langsung antara struktur atas dan bawah (Li et al., 2014; Markou et al., 2015; Mylonakis and Gazetas, 2000; Venanzi et al., 2014). Tulisan ini menghadirkan dan mendiskusikan hasil-hasil dari serangkaian analisa tiga dimensi (3D) menggunakan SAP2000 terhadap pondasi tiang gedung bertingkat dengan memperhitungkan interaksi langsung diantara tanah-tiang-struktur.

Data Geoteknik Lokasi Studi

Gambar 1 mengilustrasikan profil tanah di lokasi studi dengan menggunakan alat bor. Dari gambar tersebut terlihat dengan jelas bahwa profil

tanah didominasi oleh lapisan lempung dengan berbagai warna dengan lapisan permukaan berupa pasir/batu sedalam 1 m. Muka air tanah berada pada kedalaman 1 m dari permukaan tanah. Data N-SPT yang diperoleh untuk tiap lapisan seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Berikut gambaran lapisan tanah berdasarkan hasil bor.



Gambar 1. Lapisan Tanah Hasil Bor

Gambar 1 adalah gambaran umum lapisan tanah yang terdapat pada situs. Data lain ditentukan berdasarkan ketentuan yang ada pada SNI 1726:2012 sesuai dengan data tanah yang terdapat

pada hasil pengujian sebelumnya, seperti tertera pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Klasifikasi Situs

Kelas situs	\bar{v}_s (m/detik)	\bar{N} atau \bar{N}_{60}	\bar{s}_u (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100

Sumber : SNI 1726:2012, 2012

Tabel 2. Hasil perhitungan situs tanah

Situs	\bar{V}_s	\bar{N}
Tanah pada lokasi penelitian	284,807	27,154

Berdasarkan Tabel 2 didapatkan hasil $\bar{V}_s = 284,807$ dan $\bar{N} = 27,154$, yang menurut karakteristik situs pada Tabel 1 masuk kedalam kategori situs SD.

Deskripsi Struktur dan Bahan yang Digunakan

Bangunan yang diteliti merupakan struktur beton bertulang 14 lantai. Struktur bangunan dianalisa tiga dimensi menggunakan SAP2000 dengan mempertimbangkan interaksi tanah-tiang-struktur. Analisa terhadap tiang pancang menggunakan model Winkler. Dimensi struktur bangunan dan tiang pancang seperti ditunjukkan pada lampiran. Struktur yang akan diuji termasuk tiang pancang menggunakan mutu beton dengan $f'c = 30$ MPA. Nilai modulus elastisitasnya sesuai dengan SNI 1726:2012 adalah sebesar $E = 4700\sqrt{f'c}$ (SNI 1726:2012, 2012).

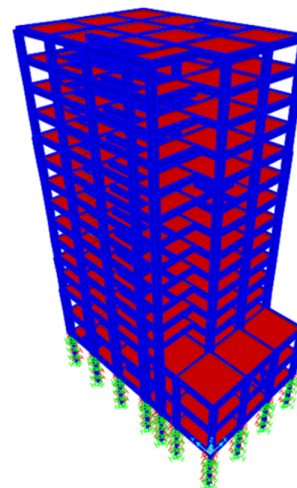
Pada studi ini, tanah disekitar pondasi dimodelkan sebagai system pegas (*spring*) dengan kekakuan k. Sebelum mencari nilai kekakuan, pertama-tama yang harus dicari adalah nilai kekakuan tanah atau *modulus of subgared* (k_s) yang didapatkan melalui metode aproksimasi berdasarkan nilai kapasitas daya dukung tanah (q_a) menurut Bowles (1993).

$$K_{sv} = 40 SF \times q_a \quad \dots\dots\dots (1)$$

dimana :

- k_s : kekakuan tanah (kN/m³)
- SF : safety factor

Besarnya *modulus of subgrade reaction* kearah horizontal pada umumnya lebih besar dibandingkan k_{sv} . Untuk perhitungan praktis k_{sh} sama dengan 2 kali k_{sv} . (Bowles, 1993).



Gambar 2. Struktur yang Diteliti (3D)

Setelah mengetahui besar nilai *modulus of subgrade reaction*, maka nilai kekakuan pondasinya dihitung seperti berikut.

$$K_h = K_{sh} \times \Delta h \times L \quad \dots\dots\dots (2)$$

dimana :

- K_h = kekakuan pondasi (kN/m)
- Δh = jarak antar spring (m)
- L = kedalaman pondasi (m)

Tabel 3. Nilai Kekakuan Pondasi

Kedalaman (m)	Q_p kN/m ²	Q_s kN/m ²	Q_{ult} kN/m ²	Q_a kN/m ²	K_{sv} kN/m ³	K_{sh} kN/m ³	K_v kN/m	K_h kN/m
-1	1,9	0,72	2,58	0,86	103,18	206,35	2063,50	4127,00
-2	36,0	8,82	44,82	14,94	1792,66	3585,32	35853,18	71706,36
-4	216,0	18,07	234,07	78,02	9362,76	18725,52	374510,39	749020,78
-6,5	612,0	38,48	650,48	216,83	26019,21	52038,42	1300960,53	2601921,06
-14,5	828,0	60,90	888,90	296,30	35555,97	71111,94	5688954,89	11377909,79
-20	2160,0	111,26	2271,26	757,09	90850,33	181700,65	9993535,89	19987071,79

Selain kekakuan pondasi yang dimodelkan sebagai pegas (*spring*), terdapat juga kekakuan rotasi pada pondasi (K_θ) yang didefinisikan sebagai momen yang dibutuhkan untuk memberikan rotasi sebesar 1 unit pada pondasi.

$$K_\theta = (h+P/K_h) \times h \times K_h \quad \dots\dots\dots (3)$$

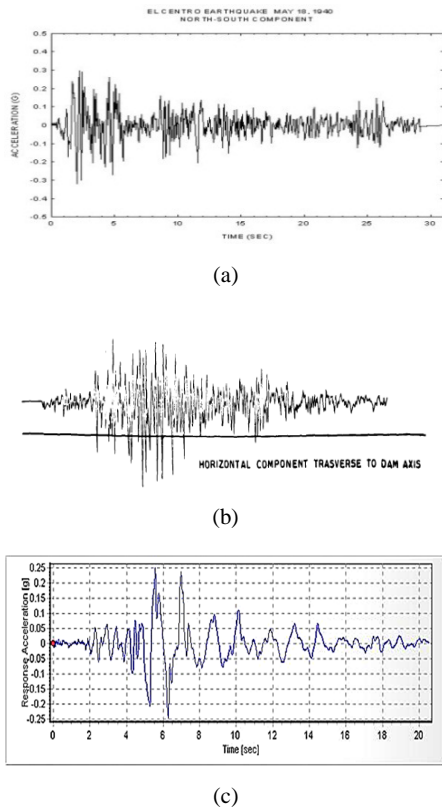
Nilai kekakuan rotasi pada pondasi sangat dipengaruhi oleh beban aksial pada tiangnya,

seperti ditunjukkan pada Persamaan (3). Jadi, nilai kekakuan rotasi pada tiang berbeda seperti terdapat pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai Kekakuan Rotasi Pondasi

Tiang	Krx	Kry	Tiang	Krx	Kry	Tiang	Krx	Kry	Tiang	Krx	Kry
A-1	11990142,6	5997976,35	B-1	11993423,2	6001256,94	C-1	11994077,4	6001911,18	D-1	11993999,3	6001833,07
A-2	12001047,4	6008881,17	B-2	12017246,5	6025080,27	C-2	12019451,2	6027284,94	D-2	12020444,8	6028278,52
A-3	12019751,4	6027585,19	B-3	12022742,7	6030576,5	C-3	12027093,3	6034927,1	D-3	12026046,7	6033880,49
A-4	12017422,6	6025256,39	B-4	12026919,5	6034753,23	C-4	12029106,7	6036940,41	D-4	12029414,4	6037248,19
A-5	12023689,1	6031522,85	B-5	12028280,6	6036114,34	C-5	12030315,1	6038148,83	D-5	12030197,4	6038031,12
A-6	12025586,1	6033419,83	B-6	12028611,9	6036445,7	C-6	12029495,8	6037329,59	D-6	12029141,9	6036975,67
A-7	12025743,1	6033576,87									

Untuk analisis *time history* data rekaman gempa yang digunakan adalah El-Centro, Koyna dan Loma Prieta dan Loma Prieta



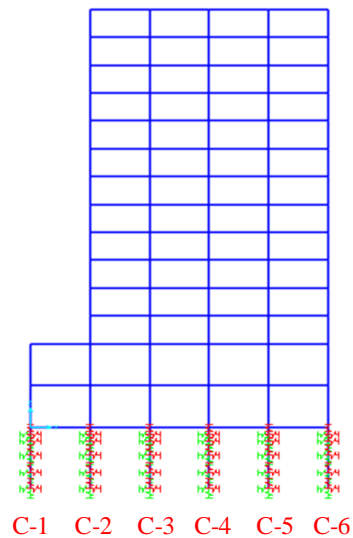
Gambar 3. Data Gempa untuk analisa *time history* (a) El-Centro (b) Koyna (c) Loma Prieta
 Sumber : <http://vibrationdata.com>

Metode yang digunakan untuk menghitung interaksi tanah-tiang-struktur adalah metode langsung yaitu Metode Elemen Hingga (FEM) (Paz and Leigh, 2004) pada aplikasi SAP2000 yang akan menghasilkan lateral displacement dan bending moment dengan memasukkan riwayat

gempa EL-Centro, Koyna dan Loma Prieta kedalam analisis.

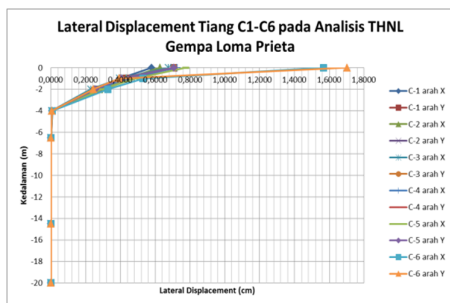
HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Lateral Displacement



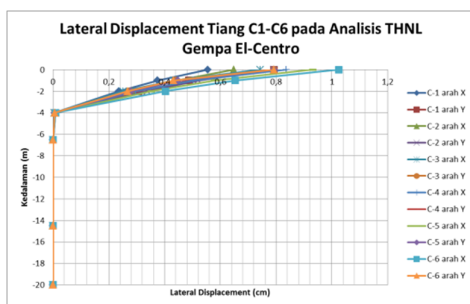
Gambar 4. Letak tiang pancang

Untuk menghitung lateral displacement pada pertemuan antara struktur dan tanah sekelilingnya digunakan analisis respon spektrum dan *time history* pada SAP2000. Pada tiang C1-C6, grafik dari lateral displacement untuk analisis respon spektrum dan *time history* ditampilkan seperti Gambar 5. Lateral displacement dalam meter dan bending moment dalam kNm.



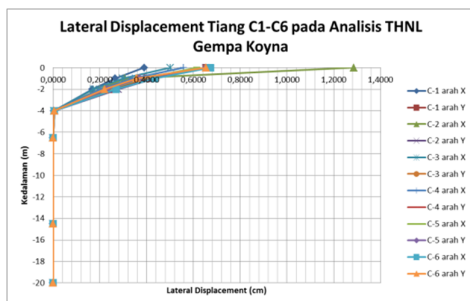
Gambar 5. Lateral Displacement akibat Respon Spektrum pada Tiang C1 – C6

Gambar 5 menampilkan nilai perpindahan lateral pada masing-masing tiang. Nilai lateral displacement terbesar berada pada tiang C6 arah X dengan nilai 3,985 cm dan untuk arah Y sebesar 2,908 cm yang disebabkan oleh beban lateral pada situs SD.



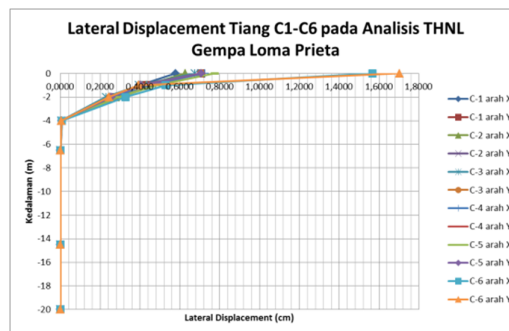
Gambar 6. Lateral displacement analisis *time history* gempa El-Centro

Gambar 6 menunjukkan nilai lateral displacement maksimal pada tiang C1-C6 yaitu sebesar 1,025 cm pada arah X dan 0,792 cm arah Y. Hal ini berarti bahwa beban lateral yang diterima struktur akibat permodelan gempa El-Centro menimbulkan perpindahan yang lebih kecil jika dibandingkan dengan perpindahan pada analisis respon spektrum situs SD pada perhitungan sebelumnya.



Gambar 7. Lateral displacement analisis *time history* gempa Koyna, India

Gambar 7 menunjukkan perpindahan akibat gempa Koyna pada struktur. Akibat beban dinamik gempa Koyna, terjadi perpindahan lateral terbesar pada tiang C6 yaitu sebesar 0,6732 cm untuk arah X dan 0,6551 cm pada arah Y seperti terlihat pada Gambar 7. Gempa Koyna juga disebut gempa dengan frekuensi tinggi.

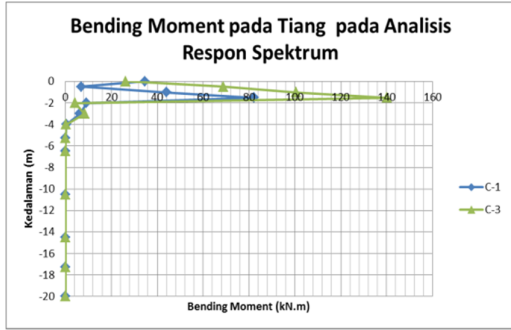


Gambar 8. Lateral displacement analisis *time history* gempa Loma Prieta

Gempa Loma Prieta menghasilkan perpindahan lateral sebesar 1,5675 cm arah X dan 1,7028 cm untuk arah Y. Dan perpindahan terbesarnya berada pada arah Y, hal ini menunjukkan perpindahan yang diakibatkan oleh gempa Loma Prieta cenderung bergerak ke arah Y, jika dibandingkan dengan gempa El-Centro dan Koyna yang perpindahannya cenderung ke arah X. Pada penelitian sebelumnya oleh Mokhtar et al., (2014) perpindahan lateral displacement akibat respon spektrum tanah jenuh “saturated soil” sebesar 0,64 m pada perpindahan maksimal, jika dibandingkan dengan hasil perpindahan lateral untuk respon spektrum situs SD sebesar 4,6277 cm. Hal ini berarti jenis tanah lempung mampu menahan tiang pancang dari perpindahan lateral akibat beban lateral yang terjadi pada tanah dibandingkan dengan tanah jenuh maupun tanah biasa. Walaupun tiang pancang pada struktur ini sedalam -20 m, tetapi didukung oleh tanah lempung pada kedalaman -1 m hingga -20 m.

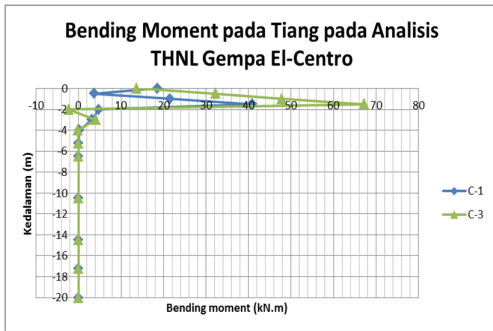
2. Bending Moment

Nilai momen lentur (*bending moment*) tiang pancang beton dari hasil analisis berdasarkan software SAP2000 dapat dilihat pada grafik berikut.

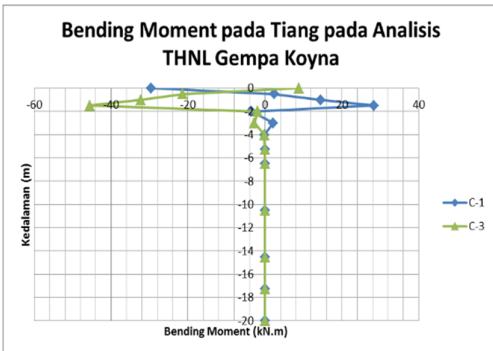


Gambar 9. Bending moment pada pondasi tiang untuk respon spektrum situs SD

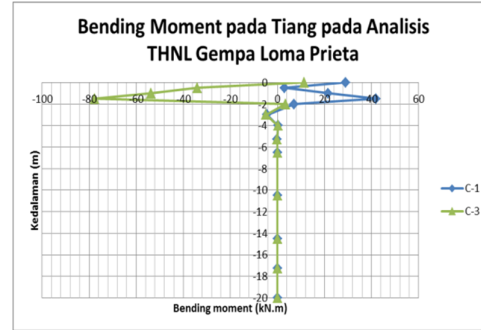
Untuk moment lentur yang terjadi pada analisis respon spektrum situs SD sebesar 140,174 kNm pada pile cap tiang pancang pada kedalaman -1 sampai -2 m, dan nilai bending momen terbesar ada pada kedalaman -1,5 m atau pada tengah pile cap.



(a)

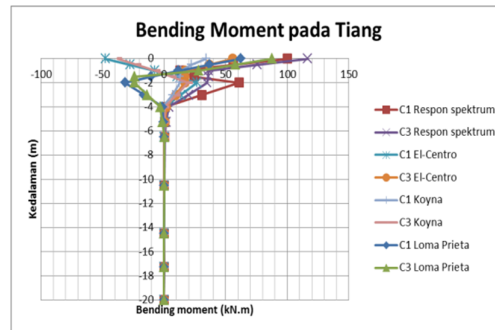


(b)



(c)

Gambar 10. Bending moment analisa Time History (a) Gempa El-Centro (b) Gempa Koyona (c) Gempa Loma Prieta



Gambar 11. Grafik rekapitulasi bending moment pada tiang analisa respon spektrum dan time history

Untuk bending moment pada analisis *time history* menggunakan data gempa El-Centro, Koyona dan Loma Prieta menghasilkan nilai masing-masing 67,2176 kNm, -45,6321 kN.m, dan -77,6242 kN.m.. Berdasarkan hasil analisis bending moment diatas, masih terbilang cukup aman karena tidak melewati batasan bending moment maksimum pada tiang pancang dengan ukuran 450 mm x 450 mm seperti yang digunakan pada struktur yakni sebesar 271,51 kNm. Janalizadeh and Zahmatkesh, (2015) menyatakan ketika pile cap sebuah tiang itu fixed maka nilai maksimum bending momentnya akan berada pada pile cap dan pada pertemuan 2 lapis tanah antara lapis yang dapat terlikuifaksi dan lapis yang tidak dapat terlikuifaksi. Karena lapisan tanah pada situs ini adalah lempung (lapis yang tidak dapat terlikuifaksi) maka moment maksimumnya berada pada kepala tiang atau pile cap. Bisa dibilang bahwa berdasarkan hasil analisis struktur cukup aman jika dibandingkan dengan batas aman yang telah dihitung sebelumnya.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang dilakukan menggunakan software SAP2000, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada hasil analisa Respon spektrum maupun analisa time history non-linear pada struktur, didapati titik fixity point berada pada kedalaman 4,5 m, nilai lateral displacement untuk respon spektrum situs SD sebesar 3,9850 cm untuk arah X dan arah Y sebesar 2,9080 cm. Untuk lateral displacement analisis THNL gempa El-Centro didapatkan nilai perpindahan sebesar 1,0252 cm untuk arah X dan untuk arah Y sebesar 0,7920 cm. untuk gempa konya untuk arah X sebesar 0,6732 cm dan arah Y sebesar 0,6551 cm, sedangkan untuk gempa Loma Prieta lateral displacement yang terjadi pada arah X sebesar 1,5675 cm dan arah Y sebesar 1,7028 cm arah Y.
2. Untuk nilai bending moment atau momen lentur dari tiang pancang pada struktur akibat analisa respon spektrum dan THNL untuk gempa El-Centro, Konya, dan Loma Prieta adalah berturut-turut sebagai berikut 140,1747 kN.m, 67,2176 kN.m, -45,6321 kN.m, dan -77,6242 kN.m.
3. Dari hasil bending moment yang terjadi pada tiang pancang, nilai yang dihasilkan tidak melewati batasan momen lentur berdasarkan hasil perhitungan dan berdasarkan hasil analisa menggunakan software PCA.COL yakni 271,15 kN.m
4. Besarnya pergerakan tanah akibat spektrum respon situs SD maupun akibat pergerakan gempa yang dimodelkan kedalam analisa time history menyebabkan terjadinya lateral displacement dan bending moment pada tiang pancang.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdrabbo, F.M., Gaaver, K.E., 2012. Simplified Analysis of Laterally Loaded Pile Groups. Alexandria Eng. J. 51, 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.05.005>
- Al Samadi, S.M., 2014. Resonance Effect on Structures Subjected to Earthquake Loads Due to Soil Structure Interaction. University of Jordan. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2380.1760>
- Bowles, J.E., 1993. Analisa dan Desain Pondasi, Edisi Keem. ed. Erlangga, Jakarta-Indonesia.
- Elhakim, A.F., 2016. Three Dimensional Modeling of Laterally Loaded Pile Groups Resting in Sand. HBRC J. 12, 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2014.08.002>
- Haeri, S.M., Kavand, A., Rahmani, I., Torabi, H., 2012. Response of a Group of Piles to Liquefaction-Induced Lateral Spreading by Large Scale Shake Table Testing. Soil Dyn. Earthq. Eng. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.02.002>
- Hazzar, L., Hussien, M.N., Karray, M., 2017. Influence of Vertical Loads on Lateral Response of Pile Foundations in Sands and Clays. J. Rock Mech. Geotech. Eng. 9, 291–304. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.09.002>
- Janalizadeh, A., Zahmatkesh, A., 2015. Lateral Response of Pile Foundations in Liquefiable Soils. J. Rock Mech. Geotech. Eng. 7, 532–539. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.05.001>
- Jardine, R.J., Standing, J.R., 2012. Field axial cyclic loading experiments on piles driven in sand. Soils Found. 52, 723–736. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.07.012>
- Khodair, Y., Abdel-Mohti, A., 2014. Numerical Analysis of Pile – Soil Interaction under Axial and Lateral Loads 8, 239–249. <https://doi.org/10.1007/s40069-014-0075-2>
- Kramer, S.L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ 07458.
- Li, M., Lu, X., Lu, X., Ye, L., 2014. Influence of Soil-structure Interaction on Seismic Collapse Resistance of Super-tall Buildings. J. Rock Mech. Geotech. Eng. 6, 477–485. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.04.006>
- Markou, G., Sabouni, R., Suleiman, F., El-chouli, R., 2015. Full-Scale Modeling of the Soil-Structure Interaction Problem Through the use of Hybrid Models (HYMOD) Full-Scale Modeling of the Soil-Structure Interaction Problem Through the use of Hybrid Models (HYMOD). Int. J. Curr. Eng. Technol. 5, 885–899.

- Mokhtar, A.A., Abdel-Motaal, M.A., Wahidy, M.M., 2014. Lateral Displacement and Pile Instability due to Soil Liquefaction using Numerical Model. *Ain Shams Eng. J.* 5, 1019–1032. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.05.002>
- Mylonakis, G., Gazetas, G., 2000. Seismic Soil-Structure Interaction: Beneficial or Detrimental? *J. Earthq. Eng.* 4, 277–301. <https://doi.org/10.1080/13632460009350372>
- Patel, C.N., Sharma, K., Patel, H.S., 2011. Modeling of Soil-Structure Interaction as Finite Element Using Using SAP2000.
- Paz, M., Leigh, W., 2004. *Structural Dynamics Theory and Computation*, Fift. ed. Kluwer Academic, Massachusetts.
- Rahmani, A., Taiebat, M., Finn, W.D.L., Ventura, C.E., 2018. Evaluation of p - y Springs for Nonlinear Static and Seismic Soil-Pile Interaction Analysis under Lateral Loading. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 115, 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.07.049>
- Rollins, K.M., Peterson, K.T., Weaver, T.J., 1998. Lateral Load Behavior of Full Scale Pile Group in Clay. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 124, 1211–1214. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124)
- SNI 1726:2012, 2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan non Gedung*.
- Tamura, S., Adachi, K., Sakamoto, T., Hida, T., Hayashi, Y., 2012. Effects of Existing Piles on Lateral Resistance of New Piles. *Soils Found.* 52, 381–392. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.05.001>
- Tsuha, C.H.C., Foray, P.Y., Jardine, R.J., Yang, Z.X., Silva, M., Rimoy, S., 2012. Behaviour of Displacement Piles in Sand under Cyclic Axial Loading. *Soils Found.* 52, 393–410. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.05.002>
- Venanzi, I., Salciarini, D., Tamagnini, C., 2014. The Effect of Soil–Foundation–Structure Interaction on the Wind-Induced Response of Tall Buildings. *Eng. Struct.* 79, 117–130. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.08.002>
- Wijaya, P.K., 2000. *Interaksi Dinamik Tanah Struktur*. Tek. Sipil 1.
- Wolf, J.P., 1985. *Dynamic Soil-Structure Interaction*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.