

Analisis Stabilitas Lereng Pada Ruas Jalan Nasional Timor Raya Km. 43+300 Dengan Perkuatan Bored Pile

Welem MWL Daga¹, Yermias E. Lay², Joko Suparmanto³, Indradhi Lasmana^{*4}, Michael F. Milla^{*5}

¹²³⁴⁵Teknik Sipil, Politeknik Negeri Kupang
Jl. Adisucipto PO. BOX 139, Penfui Kupang 85113
* E-mail: welem.mwl.daga@gmail.com

ABSTRAK

Ruas Jalan Nasional Oesao - Bokong khususnya pada STA 43+300 yang letaknya berdekatan dengan anak sungai, senantiasa menghadapi permasalahan teknis berupa kerusakan perkerasan jalan aspal yang ditandai dengan terjadinya retak memanjang, bergelombang pada permukaan jalan dan longsor pada permukaan jalan. Data dari Satuan Kerja Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional Provinsi Nusa Tenggara Timur, paket penanganan longsor Camplong, STA 43+300, ruas Oesao - Bokong, Pada bulan Oktober 2018, terjadi longsor dan menyebabkan amblesan sebagian badan jalan dan bahu jalan dengan panjang longsor kurang lebih 100 meter. Penanganan yang dilakukan adalah pemasangan gabion. Pada tahun 2022, permukaan jalan kembali ambles sejauh 40 meter dan beda elevasi berkurang kurang lebih 20 cm. Mitigasi longsor dengan menggunakan gabion belum efektif dalam menanggulangi permasalahan longsor yang terjadi di Jalan Nasional Oesao-Bokong khususnya pada STA 43+300. Berdasarkan kajian penanganan longsor, beberapa metode dapat digunakan untuk mitigasi potensi longsor pada lereng, salah satunya adalah penggunaan tiang bor. Tiang bor digunakan sebagai penahan geser apabila dinding penahan saja tidak mampu menahan tekanan tanah lateral. Tiang bor juga dapat memberikan daya dukung yang lebih efektif. Hasil kajian penanganan ruas jalan Timor Raya KM 43+300 dengan Perkuatan Tiang Bor menunjukkan bahwa penyebab longsor yang terjadi pada ruas jalan Nasional Oesao – Bokong STA. 43+300 adalah geometri lereng yang tidak stabil, penurunan tanah pada tanggul yang kurang rapat, limpasan air sehingga terjadi rembesan yang membentuk aliran akibat curah hujan yang tinggi menyebabkan lereng dalam kondisi jenuh dan adanya gaya luar yang mempengaruhi kestabilan lereng yaitu beban kendaraan. Analisis lereng menggunakan pemodelan alternatif 4 dengan menggunakan Software Geo5 menghasilkan faktor keamanan (SF) sebesar 1,30 dengan menggunakan tiang bor berdiameter 50 cm dan kedalaman 8 meter serta jarak antar tiang 1,2 meter.

Keywords : Landslide, Slope Stability, Bored Pile

ABSTRACT

The Oesao-Bokong National Road section, especially at STA 43+300, which is located adjacent to a tributary, always faces technical problems in the form of damaged asphalt road pavement which is characterized by the occurrence of longitudinal cracks, waviness on the road surface, and landslides on the road surface. Data from the National Road Planning and Supervision Work Unit of East Nusa Tenggara Province, Camplong landslide handling package, STA 43+300, Oesao - Bokong section. In October 2018, a landslide occurred and caused a subsidence of part of the road and shoulder with a landslide length of approximately 100 meters. The handling carried out was the installation of gabions. In 2022, the road surface sank again by 40 meters and the elevation difference decreased by approximately 20 cm. Landslide mitigation using gabions has not been effective in addressing the landslide problem that occurred on the Oesao-Bokong National Road, particularly at STA 43+300. Based on landslide management studies, several methods can be used to mitigate potential landslides on slopes, one of which is the use of bored piles. Bored piles are used as shear barriers when retaining walls alone are unable to withstand lateral soil pressure. Bored piles can also provide more effective bearing capacity. The results of the study on the handling of the Timor Raya road section KM 43+300 with Bored Pile Reinforcement showed that the causes of landslides that occurred on the Oesao – Bokong STA. 43+300 National road section was unstable slope geometry, subsidence in less dense embankments, water runoff resulting in seepage that formed a flow due to high rainfall, causing the slope to be in a saturated condition, and the presence of external forces that affected the stability of the slope, namely vehicle loads. Slope analysis used alternative modeling 4 using Geo5 Software, resulting in a safety factor (SF) of 1.30 using a bored pile with a diameter of 50 cm and a depth of 8 meters, and a distance between piles of 1.2 meters.

Keywords: Digital Culture, Employee Performance, Work Discipline

Pendahuluan

Indonesia merupakan wilayah yang secara geologis, geomorfologis, meteorologis, klimatologis, dan sosial ekonomi sangat rawan terhadap bencana [1], [2], [3]. Salah satunya adalah bencana tanah longsor. Tanah longsor merupakan salah satu bencana alam yang cukup potensial di Indonesia dan dapat menimbulkan dampak kerugian besar bagi kehidupan manusia. Sebagian besar wilayah di Indonesia memiliki topografi berupa pegunungan dengan kemiringan lereng yang dapat dikatakan curam[4], [5], [6].

Menurut Undang - Undang Nomor 24 Tahun 2007, tanah longsor merupakan salah satu jenis gerakan massa tanah atau batuan, ataupun percampuran keduanya, menuruni atau keluar lereng akibat terganggunya kestabilan tanah atau batuan penyusun lerengnya[7], [8], [9]. Adapun faktor penyebab tanah longsor seperti kondisi geologi, topografi, iklim, perubahan cuaca dan intensitas curah hujan[10], [11], [12]. Sedangkan faktor non alami meliputi penggunaan lahan dipermukaan lereng serta penggalian dikaki lereng[13], [14], [15]. Dalam menjaga stabilitas suatu tanah dari kelongsoran pada daerah dengan daya dukung tanah yang kurang baik, maka harus dilakukan suatu sistem perkuatan tanah. Kelongsoran suatu tanah dapat diartikan sebagai akibat dari peningkatan tegangan geser tanah atau menurunnya kekuatan geser suatu massa tanah. Kekuatan geser dari massa suatu tanah tidak mampu untuk memikul beban kerja yang terjadi di atasnya.

Jalan Nasional antara Kota Kupang dengan Kabupaten Kupang merupakan sarana transportasi darat utama yang mendukung dalam peningkatan pertumbuhan ekonomi, pengembangan wilayah serta sosial dan budaya. Ruas Jalan Nasional Oesao - Bokong khususnya pada STA 43+300 merupakan salah satu ruas jalan yang menghubungkan Kota Kupang dan Kabupaten Kupang dan terletak berdampingan dengan anak sungai, sejak lama pada ruas jalan ini selalu menghadapi permasalahan teknis berupa rusaknya perkerasan aspal jalan yang ditandai dengan terjadinya retak-retak memanjang, bergelombang pada badan jalan dan longsor badan jalan. Jalan Nasional antara Kota Kupang dengan Kabupaten Kupang merupakan sarana transportasi darat utama yang mendukung dalam peningkatan pertumbuhan ekonomi, pengembangan wilayah serta sosial dan budaya. Ruas Jalan Nasional Oesao - Bokong khususnya pada STA 43+300 merupakan salah satu ruas jalan yang menghubungkan Kota Kupang dan Kabupaten Kupang dan terletak berdampingan dengan anak sungai, sejak lama pada ruas jalan ini selalu menghadapi permasalahan teknis berupa rusaknya perkerasan aspal jalan yang ditandai dengan terjadinya retak-retak memanjang, bergelombang pada badan jalan dan longsor badan jalan[16], [17], [18].

Berdasarkan data Satuan Kerja Perencanaan Dan Pengawasan Jalan Nasional Provinsi Nusa Tenggara Timur paket penanganan longsor camplong STA 43+155 ruas Oesao Bokong, pada bulan oktober tahun 2018 telah terjadi longsor akibat pergerakan tanah disertai curah hujan tinggi, dampak longsor tersebut menyebabkan penurunan sebagian badan jalan dan bahu jalan dengan panjang longsor kurang lebih 100 meter, penanganan yang dilakukan adalah pemasangan bronjong di sepanjang lereng jalan yang merupakan tepi sungai, pada tahun 2022 terjadi kembali penurunan badan jalan sepanjang 40 meter dan beda tinggi elevasi penurunan sekitar 20 cm. Penanganan longsor menggunakan bronjong belum efektif dalam menangani permasalahan longsor yang terjadi pada Jalan Nasional Oesao - Bokong khususnya pada STA 43+300[19], [20], [21].

Berdasarkan kajian penanganan longsor terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk menanggulangi potensi longsor pada lereng salah satunya adalah dengan menggunakan pondasi bored pile. Penggunaan pondasi bored pile sebagai penahan geser bila sewaktu-waktu dinding penahan tanah saja tidak mampu menahan tekanan tanah dari arah lateral selain itu dengan adanya bored pile dapat memberikan daya dukung yang lebih efektif. Bored pile juga berfungsi untuk menstabilkan tanah pada kondisi tanah di area lereng alam, lereng buatan maupun lereng akibat urugan tanah. Dalam mengoptimalkan fungsinya, maka struktur dinding penahan tanah dan bored pile harus mampu menahan beban dari tanah dan beban dari luar. Analisis kestabilan lereng pada umumnya berdasarkan pada konsep keseimbangan plastis batas (limit plastic equilibrium) (Hardiyatmo, 2010). Kelongsoran lereng terjadi di sepanjang permukaan bidang longsor tertentu dan dapat dianggap sebagai masalah bidang 2 dimensi Massa tanah yang longsor dianggap berupa benda yang pasif Tahanan geser dari massa tanah yang setiap sepanjang bidang longsor tidak tergantung dari orientasi permukaan longsor, atau dengan kata lain kuat geser tanah dianggap isotropis Faktor aman didefinisikan dengan memperhatikan tegangan geser rata-rata sepanjang bidang longsor yang potensial dan kuat geser tanah rata-rata sepanjang permukaan longsor. Jadi, kuat geser tanah mungkin terlampaui di titik-titik tertentu pada bidang longsornya, padahal mungkin faktor aman hasil hitungan lebih besar 1,5.

Penelitian serupa juga dilakukan oleh [22], [23], [24] dengan judul “ Analisis Stabilitas Lereng dengan perkuatan tiang bor (bored pile) dan bronjong pada proyek Maelang Biontong Atinggola” memberikan hasil faktor keamanan (FK) yang dianalisis secara manual dengan metode bishop sebelum perkuatan sebesar 0,81 yang artinya lereng dalam keadaan labil. Untuk faktor keamanan yang dianalisis dengan bantuan software Plaxis 2D sebelum perkuatan sebesar 1,1923 yang artinya lereng dalam keadaan kritis, dan faktor keamanan sesudah perkuatan sebesar 4,2617 yang artinya lereng dalam keadaan stabil.

Metode Penelitian

Lokasi Penelitian

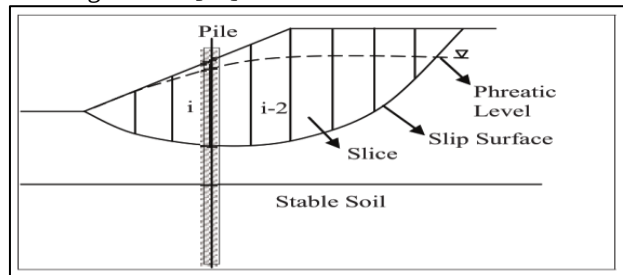
Dalam penulisan Penelitian ini penulis mengambil lokasi penelitian pada Ruas Jalan Nasional Oesao - Bokong STA 43+300 yang merupakan salah satu ruas jalan yang menghubungkan Kota Kupang dan Kabupaten Kupang dan terletak berdampingan dengan anak sungai. Secara geografis lokasi Ruas Jalan Nasional Oesao - Bokong khususnya pada STA 43+300 terletak pada koordinat $10^{\circ}02'48.0''\text{S}$, $123^{\circ}54'34.2''\text{E}$ dan dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Metode Pengumpulan Data

Dalam pengumpulan data yang diperlukan dalam penelitian ini, peneliti menggunakan langkah-langkah sebagai berikut: 1. Metode observasi: Untuk memperoleh data yang berhubungan dengan data teknis penelitian ini diperoleh langsung dari hasil survei Kementerian PUPR BPJN Provinsi Nusa Tenggara Timur. 2. Pengambilan data: Pengambilan data yang diperlukan untuk penelitian ini diperoleh dari kemen. PUPR BPJN Provinsi NTT berupa hasil data topografi, data penyelidikan tanah dan data pengujian laboratorium. 3. Metode Analisis Data: Analisis data stabilitas lereng akan dimodelkan pada model komputasi Geoslope dengan perkuatan borepile yang didasarkan pada analisis kesetimbangan batas [25].



Gambar 2. Potongan melintang lereng dengan perkuatan bored pile

Data-data yang telah terkumpul kemudian dianalisa sehingga konstruksi yang direncanakan sesuai dengan kebutuhan dan dapat dilaksanakan. Analisa yang dilakukan adalah:

Analisa data tanah

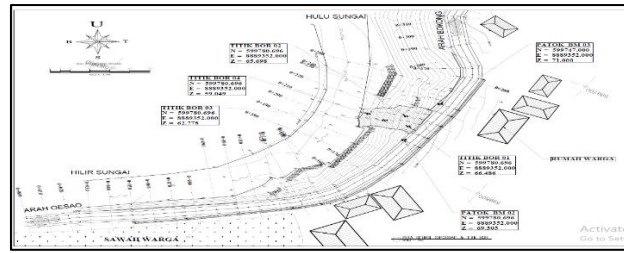
Dari data tanah yang diperoleh diketahui sifat fisis tanah diantaranya analisa saringan, berat jenis tanah, kadar air, batas cair dan batas p^lastis serta sifat mekanis tanah diantaranya kuat geser tanah dan bor SPT (Standard Penetration Test). Hal ini berkaitan dengan keamanan struktur yang akan direncanakan, sehingga tanah pada lokasi penelitian harus memiliki daya dukung yang memadai.

Analisa data topografi

Dari data yang diperoleh diketahui kondisi lereng pada lokasi penelitian memungkinkan apabila dilaksanakan pembangunan pondasi tiang bored pile. tetapi kepadatan arus lalu lintas yang melewati ruas jalan tersebut menjadi perhatian khusus dalam pelaksanaan pembangunan bored pile. Pengolahan data-data tersebut diatas dilakukan menggunakan software Geoslope dan perhitungan manual menggunakan Microsoft excel.

Hasil Dan Diskusi

Data topografi yang diperoleh oleh penulis adalah data topografi yang sudah dalam bentuk peta topografi dapat dilihat pada gambar 2 berikut :



Gambar 3. Hasil pengukuran topografi lokasi penelitian

Data tanah yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan data sekunder bersumber dari Satuan Kerja P2JN Provinsi Nusa Tenggara Timur tahun 2018. Data propertis tanah pada lokasi longoran STA. 43+300 ruas jalan Nasional Oesao – Bokong, Kabupaten Kupang. Dari hasil pengujian di laboratorium diketahui jenis tanah adalah lempung plastisitas sedang dengan konsistensi teguh, menurut klasifikasi tanah USCS adalah CL (SNI 6371:2015). data lapisan tanah dibagi menjadi 2 lapisan yaitu lapisan 1 kedalaman mulai dari 0 meter sampai dengan 6 meter dan lapisan 2 kedalaman mulai dari 6 meter sampai dengan 11 meter, dengan parameter-parameter tanah sebagai berikut :

1. Lapisan 1 (satu) kedalaman 0 meter sampai dengan 6 meter.

Gama sub	: 19 kN/m ³
Sudut geser dalam	: 17 °
Kohesi (cu)	: 10 kPa
PI	: 13,37
LL	: 34,03
PL	: 20,65
Poisson rasio (v)	: 0,4 (lempung)
Modulus deformasi	: 20 Mpa
N-SPT rata-rata	: 16

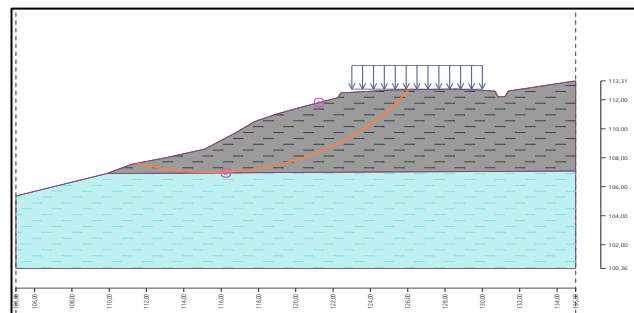
2. Lapisan 2 (dua) kedalaman 6 meter sampai dengan 11 meter.

Gama sub	: 19 kN/m ³
Sudut geser dalam	: 18 °
Kohesi (cu)	: 26 kPa
PI	: 15,3
LL	: 34,03
PL	: 18,74
Poisson rasio (v)	: 0,4 (lempung)
Modulus deformasi	: 20 Mpa
N-SPT rata-rata	: 22

Permodelan Analisis Lereng

Untuk analisis ini akan digunakan 4 permodelan lereng yaitu :

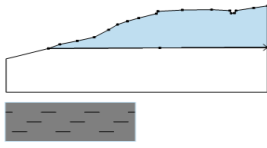
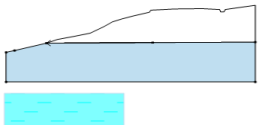
1. Model 1 analisis lereng dengan beban lalu lintas 15 kN/m² ,
 - a) Titik koordinat penghubung



Gambar 4. Model Lereng dengan beban jalan lalu lintas 15kN/m³

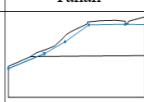
- b) Jenis tanah permukaan

Tabel 1. Jenis tanah permukaan lereng 1

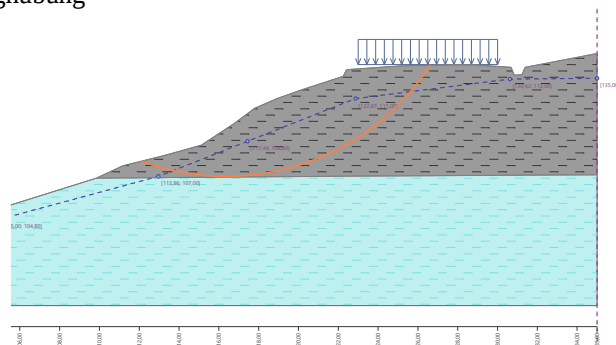
No.	Lokasi Permukaan dan Jenis Tanah	Titik Koordinat Permukaan [m]			
		x	z	X	Z
1		122,64	107,01	135,00	107,08
		135,00	113,31	133,41	113,00
		131,39	112,60	131,22	112,22
		130,84	112,20	130,68	112,60
		128,59	112,74	125,23	112,68
		122,42	112,48	122,25	112,14
		120,23	111,47	118,93	111,00
		117,80	110,50	116,76	109,71
		115,12	108,60	113,18	108,05
		111,18	107,54	109,86	106,91
2		122,64	107,01	109,86	106,91
		106,01	105,68	105,00	105,36
		105,00	100,36	135,00	100,36
		135,00	107,08		

- c) Verifikasi stabilitas lereng semua metode
 Bishop : $FK = 1,57 > 1,50 \rightarrow \text{OK}$
 Fellenius : $FK = 1,48 < 1,50 \rightarrow \text{Reject}$
 Spencer : $FK = 1,56 > 1,50 \rightarrow \text{OK}$
 Janbu : $FK = 1,63 > 1,50 \rightarrow \text{OK}$
 Morgensten : $FK = 1,56 > 1,50 \rightarrow \text{OK}$
2. Model 2 lereng dengan beban lalu lintas dan muka air tanah 1 meter dibawah muka jalan. Hasil perhitungan $FK < 1,5$ menunjukkan lereng dengan pengaruh air **tidak aman**
- a) Air Tanah

Tabel 2. Koordinat air tanah lereng 2

No	Lokasi Air Tanah	Titik Koordinat Air Tanah [meter]					
		x	z	x	z	x	z
1		105,00	104,80	112,96	107,40	117,44	108,80
		122,87	111,00	130,62	112,00	135,00	112,04

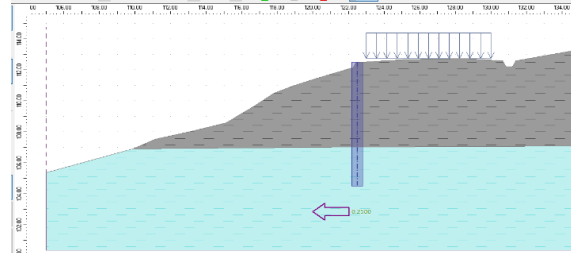
- b) Titik koordinat penghubung



Gambar 5. Model 2 lereng dengan beban lalu lintas 15kN/m3 + pengaruh muka air tanah 1 meter dibawah badan jalan

- c) Verifikasi stabilitas lereng semua metode
 Bishop : $FK = 1,36 < 1,50 \rightarrow \text{Reject}$
 Fellenius : $FK = 1,28 < 1,50 \rightarrow \text{Reject}$
 Spencer : $FK = 1,35 < 1,50 \rightarrow \text{Reject}$
 Janbu : $FK = 1,36 < 1,50 \rightarrow \text{Reject}$
 Morgensten : $FK = 1,35 < 1,50 \rightarrow \text{Reject}$
3. Model 3 lereng dengan beban lalu lintas dan beban gempa dengan $K_h = 0,25$ g faktor keamanan akibat beban gempa $FK < 1,1$ menunjukkan lereng **tidak aman akibat beban gempa**.
- a) Gempa bumi
 Koef. Gempa Horizontal (K_h) : 0,2500
 Koef. Gempa Vertikal (K_v) : 0,0000

- b) Verifikasi stabilitas lereng semua metode
- Bishop : FK 0,94 < 1,1 → **Reject**
- Fellenius : FK 0,91 < 1,1 → **Reject**
- Spencer : FK 0,94 < 1,1 → **Reject**
- Janbu : FK 0,94 < 1,1 → **Reject**
- Morgensten : FK 0,94 < 1,1 → **Reject**
4. Model 4 lereng dengan beban lalu-lintas, muka air tanah 1 meter dan beban gempa yang diperkuat dengan tiang bored pile menunjukkan FK > 1,5 lereng aman. Tiang bored pile yang digunakan diameter 50 cm dan kedalaman 8 meter dengan jarak antar tiang adalah 1,2 meter.
- a) Titik koordinat penghubung



Gambar 6. Lereng yang diperkuat dengan bored pile

- a) Tiang anti geser (*anti slide pile*)

Tabel 3. Tiang Anti Geser Lereng 4

No	Anti-slide Pile	Titik		Kedalaman	Jarak Tiang	Penampang Melintang	Daya dukung bored pile			
		x [m]	z [m]				Distribusi di sepanjang tiang	Maks daya dukung Vu [kN]	Gradien K [-]	Arah Gaya Pasif
1	Yes	122,50	112,00	8,00	1,20	0,50	konstan	120,00		Tegak lurus tiang

- b) Verifikasi stabilitas lereng semua metode
- Bishop : FK = 1,95 > 1,50 → **OK**
- Fellenius : FK = 1,88 > 1,50 → **OK**
- Spencer : FK = 2,03 > 1,50 → **OK**
- Janbu : FK = 2,13 > 1,50 → **OK**
- Morgensten : FK = 1,98 > 1,50 → **OK**

Pada kondisi terjelek / paling kritis dimana lereng dimodelkan dengan beban lalu lintas, muka air tanah 1 meter dan terjadi gempa jika dipasang perkuatan bored pile dengan kedalaman 8 meter diameter 0,5 meter dan jarak antar tiang bored pile 1,2 meter maka lereng akan menjadi aman dengan semua metode perhitungan nilai factor aman lebih besar dari 1,5.

Simimpulan

Longsoran yang terjadi di ruas Jalan Nasional Oesao – Bokong STA. 43+300 disebabkan oleh geometri lereng yang tidak stabil, yang terlihat pada hasil pemodelan lereng 2 di mana kombinasi beban lalu lintas dan muka air tanah yang tinggi menghasilkan nilai faktor aman kurang dari 1,1. Namun, hasil analisis dengan pemodelan 4 menggunakan software Geo5/Geoslope menunjukkan bahwa dengan perkuatan bored pile berdiameter 50 cm, kedalaman 8 meter, dan jarak antar tiang 1,2 meter, faktor keamanan (FK) dapat ditingkatkan menjadi lebih dari 1,5, sehingga lereng berada dalam kondisi stabil.

Daftar Pustaka

- [1] J. j.Zhou, “Field tests on behavior of pre-bored grouted planted pile and bored pile embedded in deep soft clay,” *Soils and Foundations*, vol. 60, no. 2, pp. 551–561, 2020, doi: 10.1016/j.sandf.2020.03.013.
- [2] J. j.Zhou, “Field behavior of pre-bored grouted planted nodular pile embedded in deep clayey soil,” *Acta Geotechnica*, vol. 15, no. 7, pp. 1847–1857, 2020, doi: 10.1007/s11440-019-00891-x.
- [3] J. j.Zhou, “Field study on the behavior of pre-bored grouted planted pile with enlarged grout base,” *Acta Geotechnica*, vol. 16, no. 10, pp. 3327–3338, 2021, doi: 10.1007/s11440-021-01208-7.
- [4] M. E.Al-atrroush, “Behavior of a large diameter bored pile in drained and undrained conditions: Comparative analysis,” *Geosciences Switzerland*, vol. 10, no. 7, pp. 1–19, 2020, doi:

- 10.3390/geosciences10070261.
- [5] X.Zhao, "Load-bearing performance of caisson-bored pile composite anchorage foundation for long-span suspension bridge: 1-g model tests," *Acta Geotechnica*, vol. 18, no. 7, pp. 3743–3763, 2023, doi: 10.1007/s11440-023-01808-5.
- [6] H.Zhao, "Vertical Load Transfer for Bored Piles Buried in Cohesive Intermediate Geomaterials," *International Journal of Geomechanics*, vol. 20, no. 10, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001810.
- [7] Y. H.Ong, "Bored piles in tropical soils and rocks: Shaft and base resistances, t-z and q-w models," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering*, vol. 174, no. 2, pp. 193–224, 2021, doi: 10.1680/jgeen.19.00106.
- [8] T.Hu, "Full-scale tests on the grouting effectiveness of offshore bored piles with various bearing strata," *Applied Ocean Research*, vol. 141, 2023, doi: 10.1016/j.apor.2023.103791.
- [9] X.Zhao, "Caisson-Bored Pile Composite Anchorage Foundation for Long-Span Suspension Bridge: Feasibility Study and Parametric Analysis," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 27, no. 12, 2022, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001969.
- [10] Y. C.Yu, "Numerical simulation and field tests on vertical load bearing behaviour of bored root piles," *Computers and Geotechnics*, vol. 159, 2023, doi: 10.1016/j.compgeo.2023.105453.
- [11] T.Hu, "Field study of the effects of composite excavation and combined grouting on the response of large-diameter and superlong rock-socketed bored piles," *Acta Geotechnica*, vol. 19, no. 4, pp. 1853–1871, 2024, doi: 10.1007/s11440-023-02021-0.
- [12] Z.Zhou, "Application of load transfer method for bored pile in loess area," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 26, no. 10, pp. 4457–4475, 2022, doi: 10.1080/19648189.2020.1854125.
- [13] M.Tang, "The Vertical Bearing Mechanism of Hybrid Bored Pre-stressed Concrete Cased Piles," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 293–302, 2020, doi: 10.1007/s40999-019-00466-7.
- [14] Y. I.Cui, "Field test research on post-grouting effect for super-long cast-in-place bored pile in thick soft foundation," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 39, no. 7, pp. 4833–4842, 2021, doi: 10.1007/s10706-021-01796-x.
- [15] J. I.Yu, "The frictional capacity of smooth concrete pipe pile–cemented soil interface for pre-bored grouted planted pile," *Acta Geotechnica*, vol. 18, no. 8, pp. 4207–4218, 2023, doi: 10.1007/s11440-023-01842-3.
- [16] Y.Xu, "Experimental study on long-term bearing behaviors of base post-grouting bored piles," *Jianzhu Jiegou Xuebao Journal of Building Structures*, vol. 42, no. 4, pp. 139–146, 2021, doi: 10.14006/j.jzjgxb.2020.C299.
- [17] L.Gao, "Experimental Study of Deformation Measurement of Bored Pile Using OFDR and BOTDR Joint Optical Fiber Sensing Technology," *Sustainability Switzerland*, vol. 14, no. 24, 2022, doi: 10.3390/su142416557.
- [18] S.Alzabeebee, "Development of an optimized model to compute the undrained shaft friction adhesion factor of bored piles," *Geomechanics and Engineering*, vol. 28, no. 4, pp. 397–404, 2022, doi: 10.12989/gae.2022.28.4.397.
- [19] X.Zheng, "Evaluating the effect of post-grouting on long bored pile based on ultra-weak fiber Bragg grating array," *Measurement Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 214, 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2023.112743.
- [20] A.Oteuil, "Robust Analysis and Design of Bored Pile Considering Uncertain Parameters," *Indian Geotechnical Journal*, vol. 52, no. 3, pp. 720–734, 2022, doi: 10.1007/s40098-021-00588-7.
- [21] Y.Zhang, "Identification of bored pile defects utilizing torsional low strain integrity test: Theoretical basis and numerical analysis," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 17, no. 5, pp. 3035–3053, 2025, doi: 10.1016/j.jrmge.2024.08.021.
- [22] Y.Wu, "Effect of grout conditions on the mechanical behaviors of unloading sand-concrete interface for reinforcing bored pile foundation," *Construction and Building Materials*, vol. 243, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118218.
- [23] V. H.Huynh, "A novel direct SPT method to accurately estimate ultimate axial bearing capacity of bored PHC nodular piles with 81 case studies in Vietnam," *Soils and Foundations*, vol. 62, no. 4, 2022, doi: 10.1016/j.sandf.2022.101163.
- [24] B. T.Pham, "Estimation of ultimate bearing capacity of bored piles using machine learning models," *Vietnam Journal of Earth Sciences*, vol. 44, no. 4, 2022, doi: 10.15625/2615-9783/17177.
- [25] Q. q.Zhang, "Behaviour analysis on the vertically loaded bored pile socketed into weak rocks using slip-line theory arc failure surface," *Computers and Geotechnics*, vol. 128, 2020, doi: 10.1016/j.compgeo.2020.103852.