



Tersedia Secara Online di

<http://ojs.unik-kediri.ac.id/index.php/jurmateks/index>

<https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v8i1.6652>

JURMATEKS

Studi Mekanisme Kelongsoran dan Alternatif Penanganan Tanah Lunak Pada Ruas Jalan Tol Indrapura – Kisaran (STA 112+850 – STA 112+900)

A. Haririi^{1*}, H. Wahyudi², Y. Lastiasih³

^{1*,2,3}Program Magister Geoteknik Jalan Raya, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya

Email : ^{1*}adnanharirii91@gmail.com, ²herman@ce.its.ac.id,
³yudhi_lastiasih@ce.its.ac.id

ARTICLE INFO

Article history :

Artikel masuk : 12 – 12 – 2024
Artikel revisi : 10 – 01 – 2025
Artikel diterima : 07 – 02 – 2025

Keywords :

Geotekstil, Prefabricated Vertical Drain (PVD), Spun Pile, Stabilitas Timbunan

Style IEEE dalam mensitasi artikel ini:

A. Hariri, H. Wahyudi, dan Y. Latiasih “Studi Mekanisme Kelongsoran dan Alternatif Penanganan Tanah Lunak Pada Ruas Jalan Tol Indrapura – Kisaran (STA 112+850 – STA 112+900)” *Jurmateks*, vol.8, no.1, pp. 1 – 16, 2025, doi: 10.30737/jurmateks.v8i1.6652

ABSTRACT

Embankment stability is a critical aspect of transportation infrastructure projects, especially in constructing on soft soil. Soft soil has low bearing capacity, high compressibility and low permeability. These characteristics increase the risk of structural failure, such as landslides and excessive settlement necessitating appropriate reinforcement methods. Beyond safety considerations, soil strengthening must also factor in cost-effectiveness and construction time to ensure an efficient and economical approach. This study aims to evaluate the effectiveness of Prefabricated Vertical Drain (PVD), geotextile, spun pile, as well as a combination of PVD and geotextile reinforcement methods. Field investigations and laboratory test provided soil and geometric data. This data is used as input in modeling using a finite element approach with Plaxis 2D software. The analysis results include safety factor (SF) values, which are then calculated for strengthening costs and implementation time. A multi-criteria analysis is employed to determine the most optimal reinforcement method based on SF, cost, and implementation duration. The results indicate that the combination of PVD and geotextile provides the highest value, with a safety factor of 1.73, construction costs of IDR 1.57 billion, and implementation duration of 90 days. This strengthening is able to balance the three aspects considered. The combination of PVD which accelerates consolidation and geotextiles which strengthen the embankment structure has been proven to increase stability without significantly increasing costs. These findings contribute to the optimization of soft soil strengthening strategies in selecting efficient and economical strengthening methods.

1. Pendahuluan

Stabilitas timbunan merupakan salah satu aspek mendasar dalam perencanaan dan konstruksi proyek infrastruktur transportasi. Proyek jalan tol sering melibatkan pembangunan timbunan tinggi di atas tanah lunak yang memiliki karakteristik geoteknik kurang mendukung. Ketidakstabilan timbunan dapat memicu kegagalan lereng dan penurunan berlebih yang berdampak terhadap keselamatan struktur dan kelancaran operasional. Risiko ini akan semakin meningkat dengan kondisi tanah dasar yang tidak mampu menahan beban konstruksi akibat rendahnya kekuatan geser dan tingginya kompresibilitas tanah. Tanah dengan karakteristik seperti ini merupakan tanah lunak (*soft soil*), yang memiliki daya dukung rendah, permeabilitas kecil, serta potensi penurunan konsolidasi yang tinggi. Tanah lunak sering terdiri dari lanau (*silt*) dan lempung (*clay*) dengan kadar air tinggi, yang menyebabkan rendahnya kekuatan geser (*shear strength*) serta meningkatkan risiko kelongsoran timbunan akibat beban konstruksi.

Berdasarkan hasil investigasi lapangan, tanah pada ruas jalan Indrapura - Kisaran STA 112+875, di mana menunjukkan bahwa lapisan tanah lunak mendominasi hingga kedalaman 24 meter, dengan nilai SPT < 5 , yang mengindikasikan tanah sangat lunak. Kondisi ini diperburuk oleh kadar air tanah yang tinggi (30–50%) serta kejenuhan tanah yang menyebabkan lemahnya kekuatan geser. Tanah lunak dengan nilai SPT rendah menunjukkan bahwa struktur butiran tanah cenderung lepas dengan kohesi yang sangat kecil, sehingga mudah mengalami penurunan (*settlement*) dan kelongsoran (*shear failure*) akibat beban konstruksi di atasnya. Selain itu, tingginya kadar air memperlambat proses disipasi tekanan air pori, yang semakin mengurangi daya dukung tanah serta meningkatkan risiko deformasi berlebihan pada timbunan. Jika tidak dilakukan upaya perkuatan yang tepat, timbunan yang dibangun di atas tanah ini berpotensi mengalami penurunan diferensial yang signifikan, ketidakstabilan lereng, serta kegagalan struktur dalam jangka panjang.

Penelitian terdahulu telah menunjukkan berbagai metode perkuatan diterapkan untuk mengatasi permasalahan stabilitas timbunan di atas tanah lunak. Spun pile digunakan untuk meningkatkan daya dukung vertikal dengan menyalurkan beban ke lapisan tanah keras yang lebih dalam [1]. Metode ini sering diterapkan pada proyek-proyek dengan kondisi tanah yang memiliki lapisan keras di kedalaman tertentu [2]. Selain itu, *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) berperan dalam mempercepat proses konsolidasi dengan memperpendek jalur drainase air pori, sehingga tekanan air pori yang berlebih dapat terdisipasi lebih cepat [3]. Geotekstil dan geogrid digunakan sebagai perkuatan horizontal untuk meningkatkan kekuatan geser tanah serta mengontrol deformasi lateral [4]. Selain metode tersebut, teknik lain seperti soil mixing,

yang mencampur bahan stabilisasi dengan tanah lunak untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuannya, serta metode stabilisasi kimia dan elektrokinetik telah digunakan dengan hasil yang bervariasi tergantung pada kondisi lapangan [5]. Kombinasi beberapa metode perkuatan juga dinilai lebih efektif dalam meningkatkan stabilitas timbunan dibandingkan metode tunggal. *Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported Embankment* (GRPSE) menggabungkan tiang pancang atau kolom dengan lapisan geosintetik untuk mendistribusikan beban secara merata dan mengurangi penurunan [6]. Metode ini efektif untuk timbunan tinggi di area dengan kondisi tanah lunak yang ekstrem karena mekanisme transfer beban yang mengurangi tekanan pada lapisan tanah dasar [7]. Selain itu, kombinasi kolom batu (*stone columns*) dengan geosintetik telah terbukti meningkatkan daya dukung dan stabilitas timbunan [8].

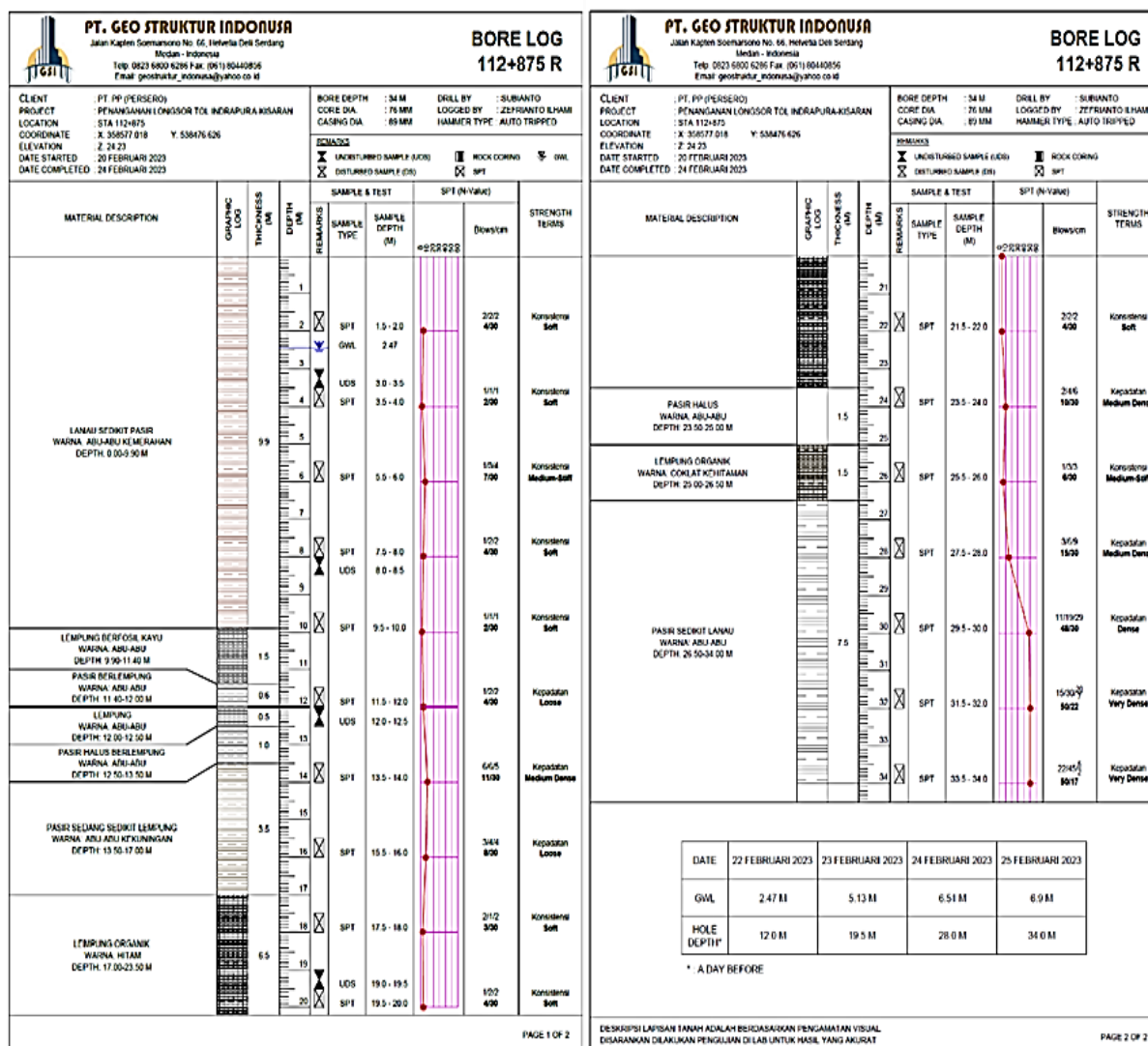
Berbagai studi telah mengungkapkan efektivitas berbagai metode perkuatan serta kombinasi beberapa metode perkuatan. Namun, terdapat identifikasi pendekatan metode perkuatan yang paling optimal berdasarkan multi-kriteria dengan mempertimbangkan aspek keamanan, biaya, dan waktu pelaksanaan masih belum banyak dikaji. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas berbagai metode perkuatan PVD, geotekstil, spun pile, serta kombinasi PVD dan geotekstil. Analisis dilakukan dengan memperhitungkan beberapa kriteria utama, yaitu faktor keamanan (SF), biaya konstruksi, dan durasi pelaksanaan dengan pendekatan pembobotan multi-kriteria untuk menentukan metode perkuatan yang paling optimal. Hasil penelitian diharapkan dapat digunakan sebagai acuan pemilihan metode perkuatan yang efisien dan ekonomis.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini diawali dengan pengumpulan data melalui uji laboratorium dan investigasi lapangan, termasuk bore log, uji CPTu, serta karakteristik mekanik tanah. Data yang diperoleh kemudian digunakan untuk menganalisis kondisi eksisting menggunakan metode elemen hingga pada perangkat lunak Plaxis 2D, guna mengevaluasi stabilitas timbunan tanpa perkuatan. Selanjutnya, dilakukan simulasi berbagai skenario perkuatan, yaitu penggunaan geotekstil, PVD, kombinasi PVD dan geotekstil, serta spun pile dengan variasi kedalaman 20 m, 26 m, dan 28 m. Setiap skenario dianalisis untuk menilai efektivitasnya dalam meningkatkan stabilitas timbunan berdasarkan faktor keamanan, pola deformasi, dan efisiensi biaya, serta waktu pelaksanaan konstruksi. Hasil analisis dari masing-masing metode perkuatan kemudian dibandingkan untuk menentukan solusi yang paling optimal dengan mempertimbangkan keamanan struktur, kelayakan ekonomi, serta durasi pengerjaan yang efisien.

2.1 Sifat Fisik dan Mekanik Tanah

Data tanah diambil dari lereng pada timbunan tinggi di jalan akses Bangkinang jalan tol Indrapura - Kisaran STA 112+875 saat sebelum dan setelah kelongsoran terjadi.



Sumber: Data Penulis (2024).

Gambar 1. Hasil Bore Log

Berdasarkan hasil bore log, tanah di lokasi penelitian terdiri dari beberapa lapisan dengan karakteristik yang bervariasi. Pada kedalaman 24 – 26 m, ditemukan pasir halus dan lempung organik dengan nilai SPT 23 – 26 yang memiliki kepadatan medium soft hingga medium dense. Nilai kedalaman 26 hingga 34 m menunjukkan nilai SPT yang lebih dari 30, hal ini menunjukkan kepadatan dense hingga very dense. Selain itu permukaan air tanah (GWL) ditemukan pada kedalaman 2,47 m, yang menunjukkan bahwa tanah lunak pada bagian atas dalam kondisi jenuh, sehingga berpotensi menyebabkan instabilitas timbunan jika tidak

diperkuat. Selain itu hasil uji laboratorium sifat fisik dan mekanik tanah ditunjukkan pada **Tabel 1**.

1.

Tabel 1. Sifat Fisik dan Mekanik Tanah

Properties Tanah	Nilai	Satuan
D10	0,00	mm
D30	0,023	mm
D60	0,061	mm
Gravel	0,13	%
Sand	27,27	%
Silt and Clay	72,60	%
Water Content	30 - 50	%
Liquid Limit	62,77	%
Plastic Limit	36,68	%
Plasticity Index	24,09	%
Soil Type	MH	
Specific Gravity	2,575	
Kohesi, c	0,185	Kg/cm ²
Angle of Friction, ϕ	0	
Compression Index, Cc	0,133	
Swelling Index, Cs	0,021	

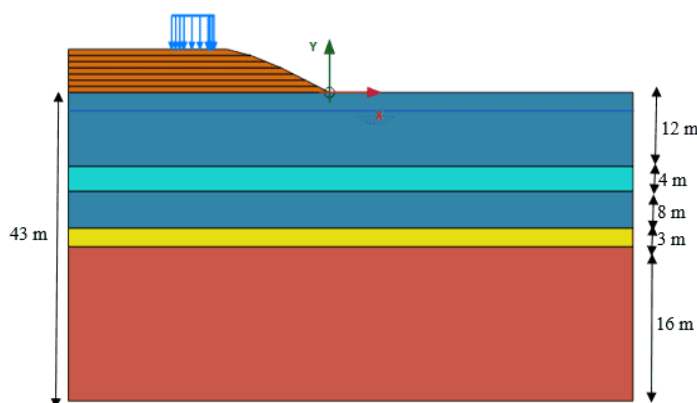
Sumber: Data Penulis (2024).

Berdasarkan hasil pengujian sifat fisik dan mekanik tanah, tanah di lokasi penelitian didominasi oleh lanau organik dengan plastisitas tinggi (MH), sebagaimana ditunjukkan oleh persentase silt dan clay sebesar 72,60%. Selain itu analisis butiran menunjukkan nilai $D_{60} = 0,061$ mm, $D_{30} = 0,023$ mm, dan $D_{10} = 0,00$ mm, yang mengindikasikan bahwa tanah memiliki ukuran butiran halus dengan karakteristik impermeabel. Tanah ini memiliki kadar air berkisar antara 30 – 50%, dengan batas cair (LL) sebesar 62,77%, batas plastis (PL) 36,68%, dan indeks plastisitas (PI) 24,09%, yang menunjukkan bahwa tanah memiliki potensi kembang-susut yang cukup tinggi. Nilai berat jenis tanah (G_s) sebesar 2,575 mendukung klasifikasi ini, menunjukkan kandungan mineral lempung yang dominan. Dari aspek mekanik, tanah memiliki kohesi (c) sebesar 0,185 kg/cm² dengan sudut geser dalam (ϕ) = 0°, yang menunjukkan bahwa tanah ini memiliki sifat kohesif tinggi tetapi tidak memiliki kekuatan geser internal yang signifikan, sehingga rentan terhadap deformasi dan kelongsoran. Selain itu, nilai *compression index* (C_c) sebesar 0,133 dan *swelling index* (C_s) sebesar 0,021 menunjukkan bahwa tanah memiliki sifat pemampatan yang cukup besar serta potensi perubahan volume akibat perubahan kadar air.

2.2 Pemodelan Stabilitas Timbunan

Pemodelan stabilitas timbunan dilakukan menggunakan metode elemen hingga pada perangkat lunak Plaxis 2D untuk mengetahui nilai *safety factor* berbagai metode perkuatan. Pemodelan ini mencakup penentuan parameter input, konfigurasi geometri, dan tahapan pemodelan [9]. Parameter input mencakup sifat fisik dan mekanik tanah, seperti berat jenis

tanah (γ), kohesi (c'), sudut geser dalam (ϕ'), modulus elastisitas (E), dan parameter konsolidasi (C_c , C_s , dan C_v). Parameter ini digunakan dalam pemodelan dengan asumsi menggunakan model *Mohr-Coulomb*, yang sesuai untuk menganalisis kestabilan tanah lunak di bawah beban timbunan. Selain parameter tanah, pemodelan juga mempertimbangkan parameter beban yang bekerja pada timbunan. Beban yang dimasukkan meliputi beban lalu lintas dan beban timbunan. Berdasarkan klasifikasi jalan, jalan ini termasuk dalam kelas Arteri II, dengan muatan sumbu terberat (MST) sebesar 10 ton, yang dikonversikan menjadi 98,0665 kN. Beban lalu lintas terhitung sebesar 109,2 kN/m². Sehingga beban total yang bekerja pada timbunan terhitung sebesar 207 kN/m². Selain itu, beban timbunan sendiri sebesar 16 kN/m².



Sumber: Data Penulis (2024).

Gambar 2. Geometri Pemodelan

Geometri pemodelan dibuat berdasarkan kondisi eksisting di lokasi penelitian seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2**. Model dibuat dalam bentuk bidang tegak lurus (*plane strain*) dengan domain lebar yang cukup untuk menghindari efek batas terhadap hasil analisis. Pemodelan mencakup tiga kondisi utama, yaitu kondisi eksisting tanpa perkuatan, perkuatan dengan metode PVD dan geotekstil, serta perkuatan dengan spun pile pada berbagai kedalaman (20 m, 26 m, dan 28 m). Perkuatan spun pile menggunakan diameter 0,6 m. Sedangkan geotekstil yang digunakan adalah *Geotextile Woven 200kN* sebanyak 7 dengan nilai kuat Tarik 40,81 kN/m. Selain itu, PVD yang digunakan ditanam pada kedalaman 12 m dengan jarak 2 m.

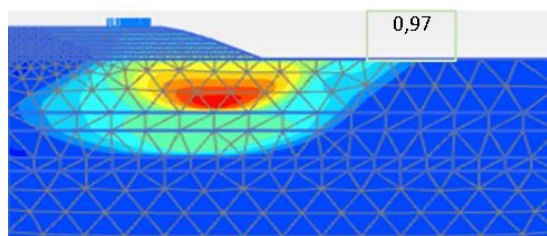
Simulasi metode perkuatan meliputi pemasangan PVD dan preloading untuk melihat pengaruhnya terhadap percepatan konsolidasi tanah lunak, serta pemasangan geotekstil sebagai perkuatan horizontal untuk meningkatkan stabilitas lereng. Untuk metode spun pile, dilakukan simulasi elemen *pile-soil interaction*. Berdasarkan beberapa model tersebut, nilai *safety factor* akan dievaluasi pada masing masing perkuatan.

2.3 Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk menentukan metode perkuatan timbunan yang paling optimal berdasarkan faktor keamanan (SF), biaya konstruksi, dan waktu pelaksanaan. Evaluasi ini menggunakan metode pembobotan multi-kriteria, di mana setiap aspek diberi nilai. Aspek keamanan dievaluasi berdasarkan nilai SF, dengan bobot lebih tinggi diberikan pada metode yang mampu mencapai $SF \geq 1,5$ sesuai standar kestabilan timbunan. Aspek keamanan memainkan peran yang sangat penting sehingga diberikan bobot sebesar 40. Aspek biaya dianalisis berdasarkan total anggaran yang diperlukan untuk setiap metode, di mana metode dengan biaya lebih rendah memperoleh skor lebih tinggi. Aspek biaya mempunyai bobot sebesar 25. Sementara itu, aspek waktu pelaksanaan dihitung berdasarkan durasi pengerjaan yang dibutuhkan, di mana metode yang dapat diselesaikan dalam waktu lebih singkat memperoleh skor lebih baik. Aspek waktu mempunyai bobot 35. Berdasarkan hasil skor ini, perkuatan yang mempunyai skor tertinggi dipilih sebagai teknik perkuatan yang paling optimal karena selain mempertimbangkan aspek keamanan, juga mempertimbangkan biaya dan waktu perkuatan tersebut.

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Kondisi Eksisting



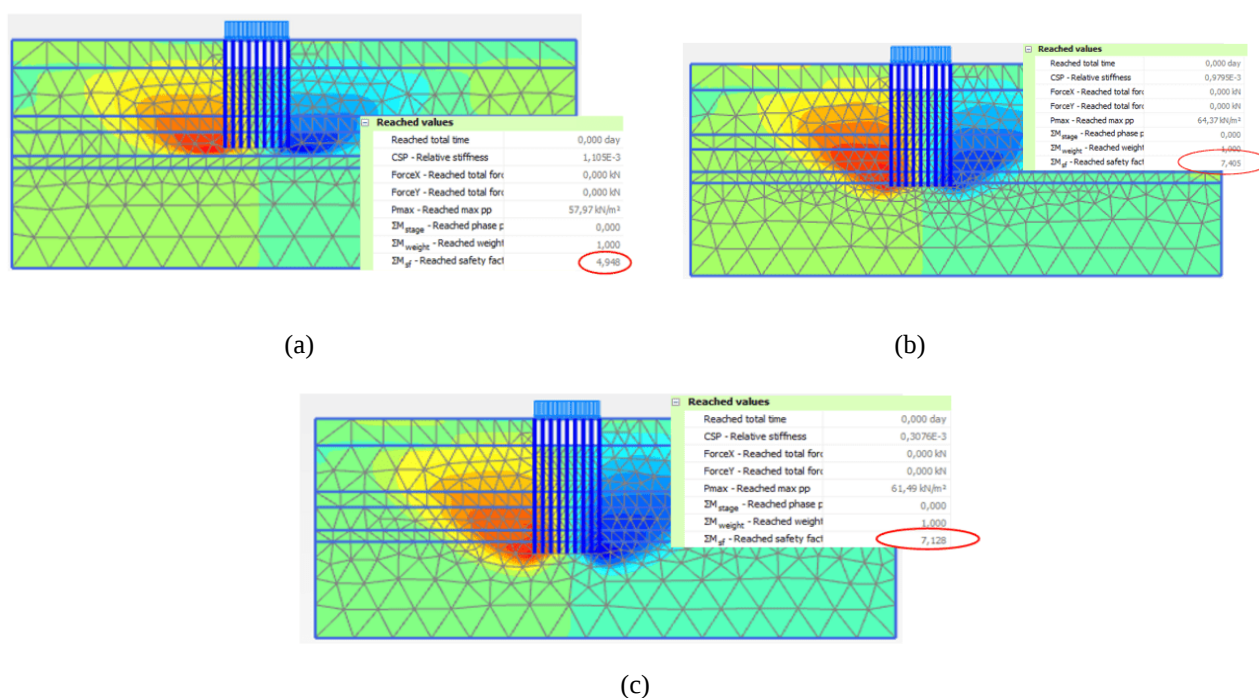
Sumber: Olah Data Penulis (2024).

Gambar 3. Kondisi Eksisting

Hasil analisis menunjukkan bahwa faktor keamanan (SF) pada kondisi eksisting hanya 0,97, yang berada di bawah nilai minimum yang disyaratkan untuk stabilitas timbunan ($SF \geq 1,5$). Nilai ini mengindikasikan bahwa timbunan berada dalam kondisi kritis dan sangat rentan terhadap kelongsoran. Penyebab utama rendahnya faktor keamanan adalah keberadaan tanah lunak dengan daya dukung rendah di bawah timbunan, yang tidak mampu menahan beban timbunan secara optimal. Selain itu, kondisi tanah yang basah dengan kadar air 30 – 50% dan memiliki plasticity indeks 24,09 menyebabkan timbunan mengalami penurunan signifikan, sehingga menurunkan stabilitas lereng secara keseluruhan.

Kondisi ini menunjukkan bahwa timbunan tidak stabil dan berisiko mengalami kelongsoran. Selain potensi longsor, penurunan yang berkelanjutan juga dapat menyebabkan deformasi permukaan timbunan, yang berisiko mengganggu fungsi jalan tol di atasnya. Oleh karena itu, diperlukan strategi perkuatan untuk meningkatkan faktor keamanan dan memastikan stabilitas jangka panjang timbunan.

3.2 Perkuatan Spun Pile



Sumber: Olah Data Penulis (2024).

Gambar 4. Perkuatan Spun Pile; (a) Kedalaman 20 m; (b) Kedalaman 26 m; (c) Kedalaman 28 m

Pada pemodelan spun pile dengan kedalaman 20 m, didapatkan faktor keamanan sebesar 4,948, namun masih terdapat kemungkinan deformasi lateral yang cukup besar akibat interaksi antara spun pile dan tanah lunak di bawahnya. Ketika kedalaman spun pile ditambah menjadi 26 m, nilai SF mengalami peningkatan signifikan menjadi 7,405. Hal ini menunjukkan bahwa sistem perkuatan ini mampu menahan beban timbunan secara lebih optimal. Namun, saat kedalaman spun pile ditingkatkan lagi menjadi 28 m, SF justru mengalami sedikit penurunan menjadi 7,128, yang menunjukkan bahwa peningkatan kedalaman tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan stabilitas.

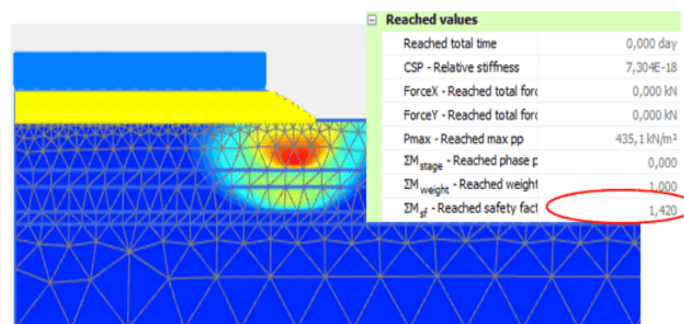
Hasil analisis menunjukkan bahwa spun pile dengan kedalaman 26 m menghasilkan faktor keamanan tertinggi dibandingkan dengan kedalaman lainnya. Hal ini disebabkan oleh karakteristik tanah di lokasi penelitian, di mana lapisan tanah lunak dominan hingga kedalaman

24 meter, sementara pada kedalaman 26 meter ditemukan lapisan tanah dengan daya dukung lebih tinggi (**Gambar 1**). Ujung spun pile yang mencapai lapisan tanah keras mampu mendukung beban yang berada di atasnya, sehingga memberikan peningkatan SF yang paling optimal dibandingkan lapisan tanah lunak [10].

Sebaliknya, pada spun pile dengan kedalaman 20 meter, ujung tiang masih berada dalam lapisan tanah lunak, yang menyebabkan daya dukung vertikal dan lateralnya belum maksimal. Akibatnya, meskipun terjadi peningkatan SF dibandingkan kondisi eksisting, nilai yang diperoleh masih jauh lebih rendah dibandingkan spun pile 26 m. Sementara itu, pada spun pile dengan kedalaman 28 meter, daya dukung tanah memang lebih baik, tetapi tidak menunjukkan peningkatan signifikan dibandingkan spun pile 26 meter. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan tanah pada kedalaman 26 meter sudah cukup memberikan resistensi optimal terhadap beban, sehingga peningkatan kedalaman lebih dari itu tidak memberikan keuntungan yang signifikan dalam stabilitas. Penambahan kedalaman akan meningkatkan biaya material dan pekerjaan tanpa memberikan peningkatan SF yang sebanding [11], [12]. Hal ini menegaskan bahwa pentingnya menentukan kedalaman optimal dari sebuah tiang [13].

3.3 Perkuatan Geotekstil

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa penerapan geotekstil pada timbunan meningkatkan faktor keamanan (SF) dari 0,97 menjadi 1,429. Meskipun terdapat peningkatan yang cukup signifikan dibandingkan kondisi eksisting, nilai SF masih berada di bawah ambang batas stabilitas yang disyaratkan ($SF \geq 1,5$) untuk kondisi aman. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan geotekstil woven 200 kN/m memberikan kontribusi dalam meningkatkan stabilitas timbunan, namun belum cukup untuk mencapai kondisi aman secara keseluruhan. Penyebab utama dari masih rendahnya SF adalah karakteristik tanah dasar yang sangat lunak dan memiliki daya dukung rendah, sehingga perkuatan horizontal saja belum cukup untuk mencegah potensi kelongsoran.

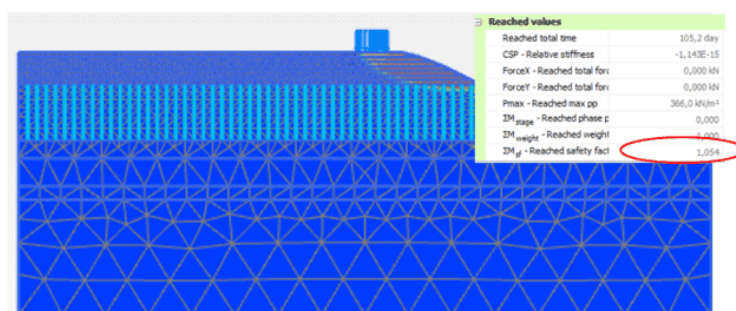


Sumber: Olah Data Penulis (2024).

Gambar 5. Perkuatan Geotekstil

Geotekstil berfungsi sebagai elemen perkuatan tarik, yang membantu menahan deformasi lateral dan mengurangi penurunan diferensial [14]. Namun, karena tanah lunak di bawah timbunan masih mengalami deformasi berlebih, maka terjadi redistribusi tegangan yang tetap menyebabkan potensi kegagalan geser [15]. Selain itu, efektivitas geotekstil sangat bergantung pada kekuatan geser tanah dasar yang dalam kasus ini masih tergolong rendah berdasarkan hasil uji mekanik tanah (**Tabel 1**).

3.4 Perkuatan PVD



Sumber: Olah Data Penulis (2024).

Gambar 6. Perkuatan PVD

Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan Prefabricated Vertical Drain (PVD) dengan preloading meningkatkan faktor keamanan dari 0,97 menjadi 1,054. Meskipun terdapat peningkatan, nilai ini masih berada di bawah batas aman $SF \geq 1,5$, yang menunjukkan bahwa metode ini belum cukup efektif jika digunakan sebagai satu-satunya solusi stabilisasi. Salah satu faktor utama yang memengaruhi efektivitas PVD adalah koefisien permeabilitas tanah [16], [17]. Tanah dasar pada lokasi penelitian didominasi oleh lempung dengan kadar air tinggi yang dan memiliki permeabilitas sangat rendah. Meskipun PVD telah berfungsi mempercepat jalur keluarnya air pori, tanah lunak dengan permeabilitas rendah tetap membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai derajat konsolidasi yang cukup [18]. Tekanan air pori berlebih yang belum sepenuhnya terdisipasi, mengakibatkan tanah memiliki daya dukung rendah dan belum mengalami peningkatan kekuatan geser yang signifikan [19].

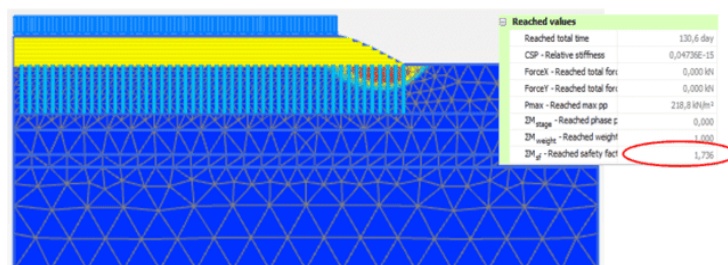
Selain itu, berdasarkan teori konsolidasi Terzaghi, kecepatan peningkatan kekuatan tanah akibat preloading sangat bergantung pada koefisien konsolidasi (C_v) dan jarak antar PVD [20]. Jika C_v rendah dan jarak antar drain terlalu besar, maka waktu yang diperlukan untuk mencapai derajat konsolidasi 90-95% menjadi lebih lama [21], [22]. Dalam studi kasus ini, kondisi tanah lunak di lapisan terdalam masih mempertahankan tekanan air pori yang tinggi, sehingga peningkatan kekuatan geser tanah belum maksimal. Oleh karena itu, SF yang

dihasilkan masih berada di angka 1,054, yang belum cukup untuk menjamin stabilitas jangka panjang timbunan.

Selain itu, hasil uji laboratorium menunjukkan tanah lunak pada lokasi ini memiliki undrained shear strength (S_u) yang sangat rendah, berkisar antara 10 – 20 kPa. Karena PVD hanya mempercepat proses konsolidasi tanpa memberikan efek kekuatan langsung, peningkatan kekuatan geser baru akan terjadi seiring waktu setelah tanah mengalami pemadatan yang cukup [3]. Namun, dengan waktu preloading yang terbatas, peningkatan daya dukung tanah masih belum signifikan, sehingga SF tetap berada di bawah batas aman.

3.5 Perkuatan PVD dan Geotekstil

Hasil analisis menunjukkan bahwa kombinasi Prefabricated Vertical Drain (PVD) dan geotekstil meningkatkan faktor keamanan (SF) dari 0,97 menjadi 1,736. Nilai ini telah melampaui batas aman yang direkomendasikan ($SF \geq 1,5$), yang menandakan bahwa kombinasi metode ini efektif dalam meningkatkan stabilitas timbunan di atas tanah lunak. Jika dibandingkan dengan penggunaan PVD ($SF = 1,054$) dan geotekstil ($SF = 1,429$), kombinasi kedua metode ini memberikan peningkatan SF yang lebih signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa kedua perkuatan tersebut bekerja secara sinergis dalam memperkuat tanah dasar dan mengurangi risiko kelongsoran.



Sumber: Olah Data Penulis (2024).

Gambar 7. Perkuatan PVD dan Geotekstil

Peran utama PVD dalam sistem ini adalah mempercepat proses konsolidasi tanah lunak dengan mengurangi tekanan air pori yang berlebih. Pada tanah lunak yang memiliki permeabilitas rendah, air pori membutuhkan waktu yang lama untuk keluar secara alami, sehingga tanpa adanya percepatan konsolidasi, tanah akan tetap dalam kondisi lunak dalam waktu yang lama [23]. Sementara itu, geotekstil berfungsi sebagai elemen tarik yang memperkuat struktur timbunan dan mengontrol deformasi lateral. Dalam kondisi tanah lunak, timbunan cenderung mengalami penyebaran lateral akibat rendahnya kekuatan geser tanah dasar [24]. Geotekstil membantu mengurangi fenomena ini dengan menyediakan tahanan terhadap gaya geser dan meningkatkan distribusi tegangan pada timbunan, sehingga mencegah

deformasi berlebihan dan ketidakstabilan lereng [25]. Kombinasi kedua metode ini menghasilkan sinergi yang efektif dalam meningkatkan stabilitas timbunan.

3.6 Optimalisasi Perkuatan

Pada kondisi eksisting, timbunan tanpa perkuatan memiliki biaya pembangunan sebesar Rp 1,28 miliar, dengan durasi pekerjaan 90 hari. Namun, dengan faktor keamanan (SF) hanya 0,9, kondisi ini tidak memenuhi standar kestabilan, sehingga berisiko mengalami kelongsoran. Dibandingkan dengan kondisi eksisting, metode perbaikan tanah menggunakan PVD saja membutuhkan biaya sekitar Rp 1,37 miliar, dengan waktu pengerjaan yang sama yaitu 90 hari. Meskipun terdapat peningkatan keamanan ($SF = 1,05$), metode ini belum cukup efektif untuk mencapai kestabilan yang diharapkan. Sementara itu, perkuatan menggunakan geotekstil woven memiliki biaya sedikit lebih tinggi, yaitu Rp 1,49 miliar, dengan durasi pekerjaan yang juga 90 hari, namun faktor keamanan yang dihasilkan ($SF = 1,42$) masih berada di bawah batas aman. Solusi yang lebih baik adalah kombinasi antara PVD dan geotekstil, yang menghasilkan $SF = 1,73$ dengan biaya Rp 1,57 miliar dan waktu pengerjaan 90 hari. Meskipun biayanya lebih tinggi dibandingkan metode PVD atau geotekstil secara terpisah, kombinasi ini mampu meningkatkan faktor keamanan hingga melampaui batas aman, menjadikannya solusi yang lebih efektif dibandingkan metode lainnya yang bergantung hanya pada satu jenis perkuatan.

Tabel 2. Hasil Pembobotan Masing – Masing Perkuatan

Jenis Penanganan	Aspek Keamanan	Nilai	Skor	Aspek Biaya	Nilai	Skor	Aspek Waktu	Nilai	Skor	Total
Kondisi Eksisting	$0,9 < 1,5$	0	0	Rp1.285.317.989	95	23,75	90 Hari	70	24,5	48,25
Perkuatan Timbunan dengan Geotekstile	$1,42 < 1,5$	0	0	Rp1.490.825.022	85	21,25	90 Hari	70	24,5	45,75
Perbaikan Tanah Dasar dengan PVD	$1,05 < 1,5$	0	0	Rp1.373.274.989	90	22,5	90 Hari	70	24,5	47
Perbaikan Tanah Dasar dengan PVD + Perkuatan Timbunan dengan Geotekstile	$1,73 > 1,5$	100	40	Rp1.578.782.022	80	20	90 Hari	70	24,5	84,5
Perkuatan Spun Pile 20 m	$4,95 > 1,5$	50	20	Rp4.168.447.829	50	12,5	30 Hari	90	31,5	64
Perkuatan Spun Pile 26 m	$7,40 > 1,5$	100	40	Rp4.340.217.212	45	11,25	30 Hari	90	31,5	82,75
Perkuatan Spun Pile 28 m	$7,13 > 1,5$	100	40	Rp4.426.101.903	40	10	30 Hari	90	31,5	81,5

Sumber: Olah Data Penulis (2024).

Metode perkuatan dengan spun pile memiliki durasi pekerjaan yang lebih singkat, yaitu 30 hari untuk semua kedalaman, tetapi dengan biaya yang jauh lebih tinggi. Penggunaan spun pile 20 m memiliki biaya Rp 4,16 miliar, dengan faktor keamanan $SF = 4,95$. Peningkatan kedalaman menjadi 26 m meningkatkan SF menjadi 7,40, namun biaya juga meningkat menjadi

Rp 4,34 miliar. Spun pile 28 m, meskipun memiliki SF yang masih tinggi (7,13), tidak menunjukkan peningkatan yang signifikan dibandingkan kedalaman 26 m, namun memiliki biaya tertinggi, yaitu Rp 4,42 miliar. Dari segi waktu, metode spun pile unggul dengan durasi hanya 30 hari, jauh lebih cepat dibandingkan metode berbasis konsolidasi seperti PVD dan geotekstil yang membutuhkan 90 hari. Namun, perbedaan waktu ini perlu diseimbangkan dengan biaya yang jauh lebih tinggi, karena spun pile memiliki biaya konstruksi yang hampir tiga kali lipat lebih besar dibandingkan kombinasi PVD dan geotekstil.

Hasil evaluasi skor pembobotan menunjukkan bahwa kombinasi PVD dan geotekstil menjadi solusi terbaik dengan total skor 84,5, tertinggi dibandingkan metode lainnya. Metode ini memberikan keseimbangan optimal antara keamanan ($SF = 1,73$), biaya (Rp 1,57 miliar), dan waktu pelaksanaan (90 hari). Metode PVD dan geotekstil unggul karena memberikan stabilitas yang cukup tanpa biaya tinggi. PVD mempercepat konsolidasi tanah, sementara geotekstil memberikan penguatan struktural. Hal ini mampu menciptakan kombinasi yang efektif dalam meningkatkan daya dukung tanah lunak. Temuan ini sejalan dengan penelitian terdahulu dimana kombinasi beberapa metode diperlukan untuk memperkuat tanah lunak agar mampu mendukung beban [26]. Selain itu, PVD telah banyak dikaji terkait efektivitasnya dalam mempercepat dissipasi tekanan air pori [27]. Begitu juga geotekstil telah terbukti mampu meningkatkan faktor keamanan [28]. Penelitian ini menunjukkan bahwa kedua metode tersebut terbukti mampu secara sinergis dalam memperbaiki tanah lunak.

4. Kesimpulan

Kombinasi metode Prefabricated Vertical Drain (PVD) dan geotekstil menjadi perkuatan yang paling optimal untuk meningkatkan stabilitas timbunan di atas tanah lunak. Kombinasi ini menghasilkan faktor keamanan (SF) sebesar 1,73 yang telah melampaui ambang batas kestabilan minimum dengan biaya dan waktu pelaksanaan yang lebih efisien dibandingkan metode lain. PVD berperan dalam mempercepat proses konsolidasi dengan mengurangi tekanan air pori, sementara geotekstil memberikan kekuatan tarik tambahan yang mampu mengendalikan deformasi lateral dan meningkatkan distribusi tegangan. Dibandingkan dengan metode spun pile yang memiliki SF lebih tinggi, kombinasi PVD dan geotekstil menawarkan efisiensi biaya yang lebih baik. Temuan ini memberikan kontribusi dalam pemilihan strategi perkuatan tanah lunak yang efektif dan ekonomis.

Daftar Pustaka

- [1] A. Bhandari and J. Han, "Evaluation of high-capacity composite spun piles," *Transp. Res. Rec.*, no. 2116, pp. 53–61, 2009, doi: 10.3141/2116-08.
- [2] C. Irawan, P. Suprobo, I. Gusti Putu Raka, and R. Djamaluddin, "A review of prestressed concrete pile with circular hollow section (Spun pile)," *J. Teknol.*, vol. 72, no. 5, pp. 115–123, 2015, doi: 10.11113/jt.v72.3950.
- [3] C. Qi, R. Li, F. Gan, W. Zhang, and H. Han, "Measurement and Simulation on Consolidation Behaviour of Soft Foundation Improved with Prefabricated Vertical Drains," *Int. J. Geosynth. Gr. Eng.*, vol. 6, no. 2, 2020, doi: 10.1007/s40891-020-00208-z.
- [4] J. Liu, J. Pan, B. Wang, C. Hu, and Q. Liu, "Study on the shear and deformation characteristics of geogrid-reinforced gravelly soils based on large-scale triaxial tests," *Front. Earth Sci.*, vol. 12, 2024, doi: 10.3389/feart.2024.1287718.
- [5] H. Dou and Y. Wang, "Strength of deep mixed soft clay with cement," in *16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2019*, 2020. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084944593&partnerID=40&md5=95d04560adb3199ab746231bebac1d30>
- [6] M.-T. Pham, D.-D. Pham, D.-L. Vu, and D. Dias, "Embankments Reinforced by Vertical Inclusions on Soft Soil: Numerical Study of Stress Redistribution," *Geotechnics*, vol. 3, no. 4, pp. 1279–1293, 2023, doi: 10.3390/geotechnics3040069.
- [7] Y. Jiang *et al.*, "Integrated Analytical Model for Characterizing Stress Distribution of Geosynthetic-Reinforced and Pile-Supported Embankments," *Int. J. Geomech.*, vol. 22, no. 12, 2022, doi: 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0002584.
- [8] K. Deb, A. Dhar, and P. Bhagat, "Evolutionary approach for optimal stability analysis of geosynthetic-reinforced stone column-supported embankments on clay," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 16, no. 7, pp. 1185–1192, 2012, doi: 10.1007/s12205-012-1797-9.
- [9] A. Kushwaha and P. K. Jain, "Stabilization of Slopes Using Soil Nailing: Comparative Study of the Design by Conventional Method and Numerical Simulation," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2025, pp. 295–306. doi: 10.1007/978-981-97-6172-2_25.
- [10] Z. Feng, Y. Dong, J. Wen, H. Hu, X. Li, and J. He, "Method for Calculating Bearing Capacity of Bridge Pile Foundation in Ningbo Soil with Deep Soft Base," *Tianjin Daxue Xuebao (Ziran Kexue yu Gongcheng Jishu Ban)/Journal Tianjin Univ. Sci. Technol.*, vol. 52, pp. 16–22, 2019, doi: 10.11784/tdxbz201902026.

- [11] Y. Trinidad González, V. R. Schaefer, and D. K. Rollins, "Statistical Assessment of Factor of Safety for Pile-Reinforced Slopes," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 146, no. 9, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002323.
- [12] M. Qiu, J. Liu, R. Qiu, and W. Gao, "Study on vertical additional stress coefficient for the single piles based on Mindlin's stress solution theory," *Tumu Gongcheng Xuebao/China Civ. Eng. J.*, vol. 47, no. 3, pp. 130–137, 2014, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84896958642&partnerID=40&md5=830f03306bf8cc1c595981d9639bf03c>
- [13] Z. Li, H. Wang, G. Dai, and F. Huang, "Study on Design Method of Vertical Bearing Capacity of Rock-Socketed Piles Based on Reliability," in *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 2022, pp. 762–772. doi: 10.1007/978-3-031-11898-2_50.
- [14] H. Al-Salamy, M. Al-Naddaf, and R. R. Almuhanha, "A Review on the Effective Use of Geosynthetic Reinforcement to Increase Soil Bearing Capacity," in *AIP Conference Proceedings*, 2024. doi: 10.1063/5.0205645.
- [15] X. Wang, "Experimental Study on Geotextile-Soil Interface Shear Properties of Cement-modified Reinforced Soil," *Bull. Chinese Ceram. Soc.*, vol. 39, no. 4, pp. 1171–1177, 2020, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85169037687&partnerID=40&md5=4640769cff1b59b18411d82732462667>
- [16] J. Xie *et al.*, "An interfacial flow contact model for 2D plane strain consolidation analysis of layered saturated soil under continuous drainage boundaries," *Comput. Geotech.*, vol. 179, 2025, doi: 10.1016/j.compgeo.2024.106993.
- [17] B. Indraratna, C. Bamunawita, I. W. Redana, and A. S. Balasubramaniam, "Modeling of vertical drains in soft clay," in *Soft Soil Engineering*, 2017, pp. 329–338. doi: 10.1201/9780203739501.
- [18] S. Ande, C. Nageshwar Rao, and M. Madhira, "Relationship Between Various Consolidation Parameters of Compressible Soils," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022, pp. 185–195. doi: 10.1007/978-981-16-3383-6_17.
- [19] E. Cascone, G. Biondi, and O. Casablanca, "Influence of earthquake-induced excess pore water pressures on seismic bearing capacity of shallow foundations," in *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions- Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, 2019, 2019, pp. 566–581. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

- [20] D. Sarkar, A. Debnath, and S. K. Pal, “A Study of the 3D Consolidation Characteristics of Bottom Ash Treated Soil Emphasizing Vertical and Radial Drainage Paths,” in *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2025, pp. 485–494. doi: 10.1007/978-981-97-1757-6_35.
- [21] A. C. Mert, A. Önalp, and E. Arel, “Analysis of a Prefabricated Vertical Drain (PVD) Soil Improvement Project,” *Tek. Dergi/Technical J. Turkish Chamb. Civ. Eng.*, vol. 33, no. 1, pp. 11521–11541, 2022, doi: 10.18400/tekderg.641218.
- [22] Y.-M. Chen, X.-W. Tang, and N. Jia, “Consolidation of sensitive clay with vertical drain,” *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, vol. 31, no. 15, pp. 1695–1713, 2007, doi: 10.1002/nag.620.
- [23] S. Shen and Z. Hu, “Consolidation by Vertical Drains Considering the Rheological Characteristics of Soil under Depth and Time-Dependent Loading,” *Sustain.*, vol. 15, no. 7, 2023, doi: 10.3390/su15076129.
- [24] M. S. Balreddy, S. V Dinesh, and T. G. Sitharam, “Liquefaction Behavior of Low to Medium Plasticity Sand-Fines Mixtures,” in *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2021, pp. 181–191. doi: 10.1007/978-981-33-4001-5_17.
- [25] S. Kumar and L. B. Roy, “Rainfall Induced Geotextile Reinforced Model Slope Embankment Subjected to Surcharge Loading: A Review Study,” *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 29, no. 5, pp. 3203–3221, 2022, doi: 10.1007/s11831-021-09688-2.
- [26] G. Kumar, “Combined Encased Stone Column and Vacuum Consolidation Technique for Soft Clay Improvement,” in *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Ground Improvement and Geosynthetics*, 2018, pp. 169–177. doi: 10.1007/978-981-13-0122-3_19.
- [27] J. Ramirez, S. Dashti, A. Liel, and B. Paramasivam, “An Experimental and Numerical Study of Prefabricated Vertical Drains as a Liquefaction Countermeasure for Mat-Founded Structures,” in *Geotechnical Special Publication*, 2019, pp. 219–228. doi: 10.1061/9780784482100.023.
- [28] J. R. Carneiro, F. Almeida, D. M. Carlos, and M. de Lurdes Lopes, “Nonwoven geotextiles in civil and environmental engineering,” in *Nonwoven Fabric: Manufacturing and Applications*, 2020, pp. 155–194. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85125388156&partnerID=40&md5=a16456d55a7a17fd993b177f0032e8e2>