



Analisis Elasto Plastik Bukaan Silindris Berbasis *Hoek-Brown* pada Terowongan Kalilingseng

Hanif Khalilullah^{1*}, Singgih Saptono¹

¹Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia.

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v6i4.1550>

Article Info:

Received : 12 September 2025
Revised : 08 Oktober 2025
Accepted : 22 Oktober 2025
Published : 15 November 2025

Correspondence:

Hanif Khalilullah

Phone

Abstract: The stability of tunnels excavated within heterogeneous rock masses necessitates analytical approaches capable of realistically representing elasto-plastic behavior. This study evaluates the elasto-plastic response of the Kalilingseng Tunnel (Kulon Progo) employing the Hoek–Brown (H–B) failure criterion and the analytical formulation of Carranza-Torres and Fairhurst (CTF) for cylindrical openings. Rock-mass parameters were derived from field-based classification (GSI = 50) and back-analysis using RocLab, yielding $m = 1.509$, $s = 0.003866$, $a = 0.5057$, $E_{rm} = 1.76$ GPa, and $\nu = 0.28$. The in-situ stresses at a depth of 34 m indicate $\sigma_v = 0.637$ MPa, $\sigma_h = 0.322$ MPa, and a normalized stress $S_0 = 0.0252$. Analytical results show an onset of plasticity characterized by a critical internal support pressure $P_i^* = 0.00213$, a relative plastic zone radius $\xi = 1.010$ ($\approx 1\%$ beyond the excavation boundary), and a nondimensional radial closure $U_r = 0.000487$, corresponding to an actual displacement $u_r \approx 0.73$ mm for a tunnel radius $b = 1.5$ m. The wall-stress profile yields $\sigma_r(b) = 0.0017$ MPa and $\sigma_\theta(b) = 0.958$ MPa, both well below the rock-mass strength. The resulting Ground Reaction Curve (GRC) exhibits a smooth, nonlinear decay without any abrupt deformation, consistent with the mild yielding regime described in the nondimensional CTF framework. These findings confirm that the rock mass remains inherently stable, implying that support strategies required for the tunnel are primarily deformation-control measures rather than structural reinforcement.

Keywords: Hoek–Brown, Ground Reaction Curve, GSI, elasto-plastic behavior, tunnel stability

Citation: Khalilullah, H., & Saptono, S. (2025). Analisis Elasto Plastik Bukaan Silindris Berbasis Hoek-Brown pada Terowongan Kalilingseng. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 6(4), 1228–1233. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v6i4.1550>

Pendahuluan

Kestabilan terowongan pada massa batuan heterogen merupakan isu utama dalam perancangan pekerjaan bawah tanah. Di banyak proyek infrastruktur dan pertambangan Indonesia, kondisi geologi yang terlapuk, bersekat, dan tidak seragam sering memicu respon elasto-plastik yang sulit diprediksi bila hanya mengandalkan pendekatan elastik linier. Karena itu, kriteria kegagalan empiris Hoek-Brown (H-B) dan kerangka *convergence-confinement* banyak digunakan untuk menangkap perilaku massa batuan nyata dan mengaitkannya dengan kebutuhan penyanggaan [1],

[2]. Salah satu kasus menarik ditemukan pada Terowongan Kalilingseng di Kulon Progo, yang telah bertahan selama puluhan tahun tanpa penyangga permanen. Fenomena ini menimbulkan pertanyaan mendasar: bagaimana massa batuan di sekitar bukaan mampu menahan redistribusi tegangan tanpa menyebabkan keruntuhan. Rasa penasaran tersebut menjadi dasar penelitian ini, yang bertujuan membuktikan kestabilan alami terowongan melalui pendekatan analitik berbasis teori elasto-plastik Hoek-Brown dan formulasi Carranza-Torres & Fairhurst (CTF).

Email: haniif.khalilullah@gmail.com

Kriteria Hoek-Brown menyediakan relasi kekuatan massa batuan berbasis parameter lapangan terutama *Geological Strength Index (GSI)*, konstanta material m_i , serta faktor kerusakan yang memungkinkan estimasi kekuatan dan kekakuan massa batuan dari data praktis lapangan dan uji laboratorium [2],[3]. Pengembangan selanjutnya menghubungkan kriteria ini dengan estimasi modulus massa batuan untuk analisis deformasi, sehingga respons dinding terowongan terhadap pelepasan tegangan dapat dinilai lebih realistis [2]. Pada sisi analitis, formulasi klasik Carranza-Torres & Fairhurst (CTF) menurunkan solusi elasto-plastik tertutup untuk bukaan silindris dan sferis pada massa batuan yang memenuhi Hoek-Brown, memperkenalkan besaran tak berdimensi seperti *scaled far-field stress* (S_0) dan *scaled support pressure* (P_i), serta menurunkan besaran kunci: tekanan dinding kritis awal plastis (P_i^*), radius zona plastis relatif (ξ), dan *wall closure* (U_r) [1]. Kerangka ini secara langsung mengaitkan kondisi in-situ, parameter H-B, dan kebijakan penyanggaan di sepanjang kurva respons tanah (*Ground Reaction Curve, GRC*), sehingga cocok untuk evaluasi awal stabilitas terowongan [1],[4]. Pendekatan tersebut juga banyak dikembangkan dalam studi modern, salah satunya oleh Chang et al. [5], yang menggabungkan analisis analitik dan numerik untuk meningkatkan ketepatan prediksi *ground response* pada massa batuan nyata.

Pendekatan analitik serupa juga dikembangkan oleh Ghorbani et al. [6], yang menyajikan solusi eksak untuk perilaku tegangan dan perpindahan pada bukaan silindris dalam massa batuan Hoek-Brown. Walaupun banyak studi internasional membahas respons elasto-plastik dengan H-B dan CTF, publikasi terapan yang mengulas kasus spesifik Indonesia dengan kombinasi kondisi tegangan dangkal-menengah, GSI menengah, dan litologi setempat masih terbatas. Penelitian ini menutup celah tersebut dengan studi kasus Terowongan Kalilingseng (Kulon Progo), menggunakan parameter hasil klasifikasi GSI lapangan dan back-analysis RocLab untuk menurunkan set parameter H-B (m_b , s , a) beserta kekakuan massa batuan, kemudian mengevaluasi respon elasto-plastik dan GRC-nya [2],[7].

Tujuan penelitian ini adalah: (i) mengkarakterisasi massa batuan terowongan menggunakan kriteria Hoek-Brown berbasis GSI, (ii) menghitung besaran elasto-plastik kunci P_i^* , ξ , U_r serta profil tegangan dinding, dan (iii) menyusun serta menafsirkan GRC untuk menilai implikasi kestabilan dan kebutuhan penyanggaan awal. Lingkup kajian dibatasi pada bukaan silindris, kondisi isotropik, beban in-situ hidrostatik dangkal-menengah, dan skenario tanpa penyangga permanen (*unsupported*) sebagai basis evaluasi awal; isu spesifik seperti *time-dependent*

behavior, anisotropi kuat, dan pengaruh air tanah berada di luar cakupan makalah ini [1].

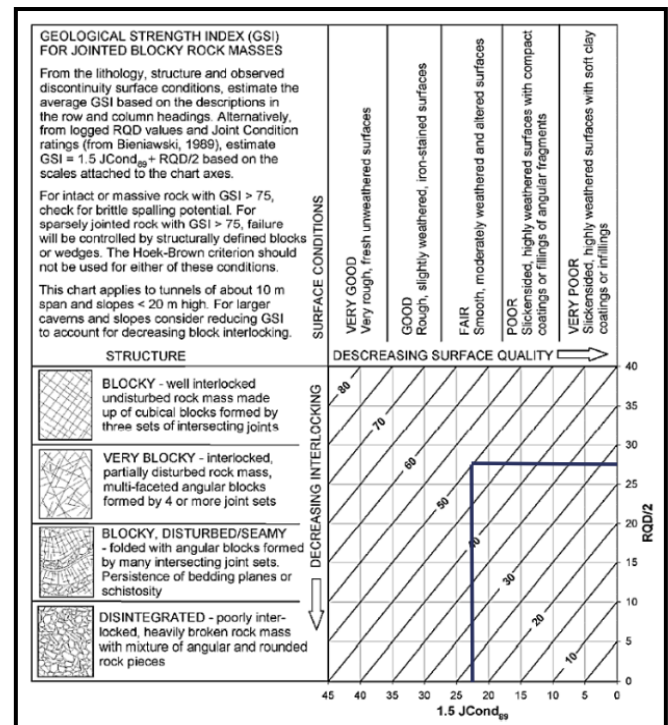
Kontribusi makalah ini bersifat praktis-analitis: menyajikan penerapan terpadu H-B-CTF pada konteks geologi lokal (GSI menengah) untuk kedalaman kerja representatif, lengkap dengan parameterisasi yang transparan (berbasis RocLab) dan interpretasi geomekanik yang langsung operasional bagi perencana penyanggaan. Hasilnya diharapkan memperkaya studi kasus domestik dan menjadi rujukan awal desain berbasis *convergence-confinement* pada proyek serupa [1],[2],[4].

Metode

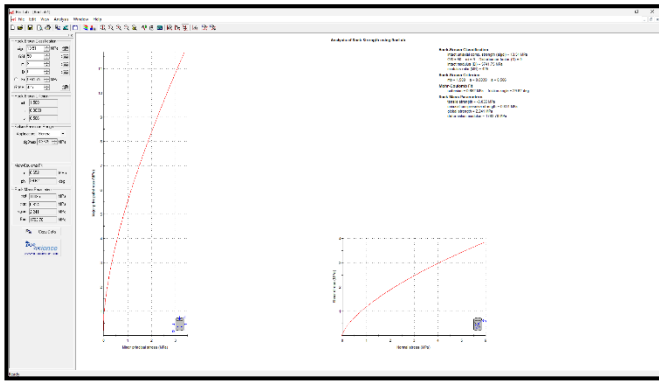
Lokasi, Data, dan Perangkat

Penelitian dilakukan untuk bukaan terowongan Kalilingseng (Kulon Progo) pada kedalaman efektif $h = 34$ m dengan berat isi massa batuan $\gamma = 18.74$ kN/m³. Data kekuatan batuan utuh dan klasifikasi massa batuan diambil dari pengujian laboratorium serta pemetaan lapangan (GSI). Parameter Hoek-Brown diturunkan menggunakan RocLab.

Perhitungan elasto-plastik mengikuti formulasi Carranza-Torres & Fairhurst (CTF) untuk bukaan silindris [1]. Inputan: $GSI = 50$; $\sigma_{ci} = 13.51$ MPa; $m_i = 9$; $D = 0$; $E_i = 5741.75$ MPa; $\nu = 0.28 \rightarrow E_{rm} = 1763.78$ MPa; $G_{rm} = 688.98$ MPa; $m_b = 1.509$; $s = 0.003866$; $a = 0.5057$; $K_0 = 0.5057$; jari-jari bukaan $b = 1.5$ m.



Gambar 1. Diagram klasifikasi GSI dan posisi hasil pengamatan (GSI = 50)



Gambar 2. Parameter Hoek-Brown hasil pengolahan RocLab ($m_b, s, a, c, \phi, E_{rm}$)

Model Konstitutif dan Parameterisasi

Kekuatan massa batuan dimodelkan dengan kriteria Hoek-Brown [2]. Parameter (m_b, s, a) diperoleh dari (GSI, m_i, D) dan σ_{ci} ; konversi ke Mohr-Coulomb ekuivalen (c, ϕ) hanya dipakai untuk rujukan desain dan interpretasi, bukan untuk pemodelan utama [2]. Kalibrasi parameter m_i berbasis indeks kekakuan sebagaimana ditinjau oleh Morteza et al. [8] memperkuat validitas parameterisasi H-B pada GSI menengah. Kekakuan massa batuan E_{rm} diestimasi dari hubungan empiris berbasis GSI [2]; modulus geser:

$$G_{rm} = \frac{E_{rm}}{2(1 + \nu)}$$

Asumsi dan Kondisi Batas

Geometri: bukaan silindris tak berujung dengan $b = 1.5$ m. Kondisi regangan: regangan bidang sepanjang sumbu terowongan (*plane strain*); masalah sumbu-simetris [1]. Sifat massa batuan: homogen-isotropik pada skala rekayasa; perilaku elastis-plastis sempurna mengikuti Hoek-Brown. Tegangan in-situ: hidrostatik dangkal-menengah dengan rasio $K_0 = 0.5057 \rightarrow \sigma_v = \gamma h = 0.637$ Mpa, $\sigma_h = K_0 \sigma_v = 0.322$ Mpa, rata-rata $\sigma_0 = (\sigma_v + \sigma_h) / 2 = 0.480$ Mpa. Skenario penyangga: *unsupported* (tekanan dinding aktual menuju nol), digunakan sebagai basis evaluasi awal *ground response* [4].

Formulasi Elasto-Plastik (CTF)

Analisis mengikuti solusi tertutup CTF untuk bukaan silindris pada massa batuan Hoek-Brown [6]. Besaran dinondimensikan untuk menggabungkan kondisi in-situ dan sifat massa batuan:

$$S_0 = \frac{\sigma_0}{m_b \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2}, \quad P_i = \frac{p_i}{m_b \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2}$$

Dengan data ini diperoleh $S_0 = 0.0252$ dan $P_i = s/m_b^2 = 0.00170$ untuk kondisi tanpa penyangga ($P_i \rightarrow 0$). Solusi CTF menyediakan ekspresi untuk awal plastis P_i^* , radius zona plastis relatif $\xi = r_p/r$, serta penutupan

dinding U_r (tak berdimensi). Profil tegangan elastik di zona luar ($r \geq r_p$) mengikuti bentuk Lamé: dengan konstanta A, B dari syarat batas pada $r = r_p$ dan $r \rightarrow \infty$ [1],[4].

$$\sigma_r(r) = A - \frac{B}{r^2}, \quad \sigma_\theta(r) = A + \frac{B}{r^2}$$

Prosedur Perhitungan (Replikasi)

Prosedur perhitungan dalam studi ini dimulai dengan penentuan parameter Hoek-Brown (H-B) dan kekakuan massa batuan. Parameter m_b, s , dan a dihitung dari GSI, m_i, D , dan σ_{ci} menggunakan RocLab, kemudian dilakukan estimasi modulus massa batuan E_{rm} dan modulus geser G_{rm} . Selanjutnya, tegangan in-situ dihitung melalui penentuan tegangan vertikal $\sigma_v = \gamma h$, tegangan horizontal $\sigma_h = K_0 \sigma_v$, dan tegangan rata-rata σ_0 . Nilai-nilai tersebut kemudian dinondimensikan untuk memperoleh S_0 dan P_i . Setelah itu, kondisi awal plastis dievaluasi dengan menentukan P_i^* sebagai fungsi dari S_0, m_b, s , dan a . Zona plastis dan konvergensi dihitung untuk mendapatkan ξ serta perpindahan radial U_r (termasuk komponen elastik $U_r^{(e)}$). Profil tegangan dinding kemudian ditentukan dengan menghitung konstanta A dan B untuk memperoleh tegangan radial $\sigma_r(b)$ dan tegangan melingkar $\sigma_\theta(b)$ pada radius $b = 1.5$ m. *Ground Reaction Curve* (GRC) disusun dari pasangan (P_i, U_r) dan selanjutnya dikonversi menjadi (p, u_r) . Sebagai validasi kualitatif, posisi (S_0, P_i) diplot pada diagram nondimensi Convergence-Confinement (CTF). Studi ini menghasilkan nilai-nilai kunci : $P_i^* = 0.00213, \xi = 1.010, U_r = 0.000487$ m, $\sigma_r(b) = 0.0017$ MPa, $\sigma_\theta(b) = 0.958$ MPa serta lima titik utama pada kurva GRC.

Formulasi Elasto-Plastik (CTF)

Analisis tidak memasukkan anisotropi kuat, efek waktu (*time-dependent*), dan air tanah eksplisit. Untuk uji kepekaan (bila diperlukan), variasikan GSI (± 10 poin), K_0 (± 0.1), dan σ_{ci} ($\pm 20\%$) untuk menilai pengaruhnya terhadap P_i^*, ξ, U_r [2],[7]. Hasil sensitivitas dapat digunakan sebagai *upper-lower bound* keputusan penyangga awal.

Hasil dan Pembahasan

Karakterisasi massa batuan berdasarkan parameter Hoek-Brown dan pengolahan RocLab menunjukkan bahwa Terowongan Kalilingseng berada pada kondisi batuan berkualitas menengah dengan GSI = 50. kuat tekan batuan utuh 13.51 MPa, serta modulus massa batuan sekitar 1.76 GPa yang merepresentasikan kekakuan sedang. Parameter turunan Hoek-Brown ($m_b = 1.509; s = 0.003866; a = 0.5057$) beserta konversi ekuivalen Mohr-Coulomb ($c = 0.652$ MPa dan $\phi = 29.62^\circ$) mengindikasikan bahwa massa batuan masih memiliki kekuatan yang cukup untuk menopang bukaan tanpa

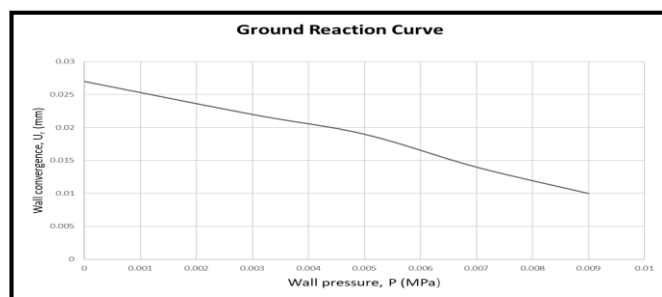
dukungan penuh. Pada kondisi tegangan in-situ dangkal-menengah dengan kedalaman 34 m dan berat isi 18.74 kN/m³, diperoleh tegangan vertikal 0.637 MPa dan tegangan horizontal 0.322 MPa, menghasilkan tegangan rata-rata 0.480 MPa. Ketika nilai ini dinondimensikan dalam kerangka Carranza-Torres & Fairhurst, diperoleh $S_0 = 0.02523$ dan $P_i = 0.0016975$ yang menunjukkan bahwa tegangan geostatik relatif kecil dibandingkan kekuatan massa batuan sehingga respons elastik dominan dalam tahap awal pelepasan tegangan. Evaluasi kondisi awal plastis memberikan tekanan kritis awal plastisasi $P_i^* = 0.002133$, sangat dekat dengan kondisi tanpa penyangga, menjelaskan terbentuknya zona plastis tipis dengan radius relatif $\xi = 1,010$ atau sekitar 1% di luar dinding bukaan.

Hal ini menandakan bahwa massa batuan berada pada rezim *mild yielding* dan tetap kompeten pada kedalaman tersebut. Konvergensi dinding yang dihasilkan sangat kecil, yakni 0.73 mm, mencerminkan deformasi stabil dan sesuai dengan sifat batuan yang relatif kaku. Profil tegangan elastik di dinding menunjukkan bahwa tegangan radial sebesar 0.0017 MPa dan tegangan tangensial sekitar 0.958 MPa masih jauh di bawah kekuatan massa batuan ($\sigma_{cm} \approx 2.24$ MPa), sehingga tidak terdapat indikasi *spalling* atau keruntuhan tarik di sekitar bukaan. Temuan ini konsisten dengan analisis Tan et al. [9] yang melaporkan pola distribusi tegangan serupa pada sistem dua bukaan bawah tanah.

Data numerik $P - U_r$ yang dihitung:

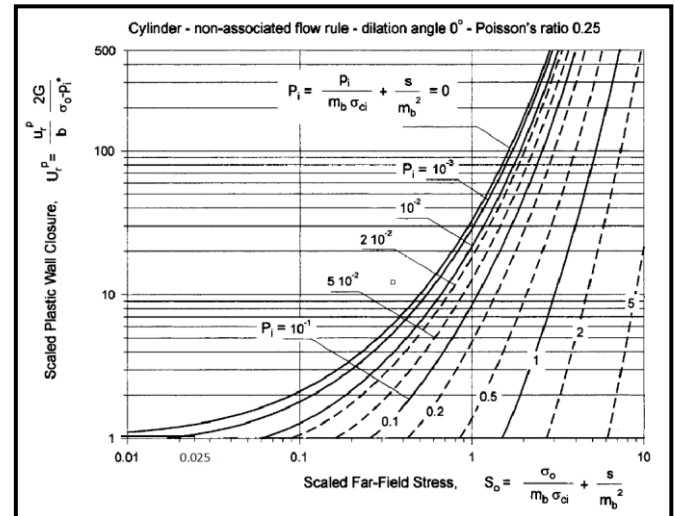
Tabel 1. Data numerik kurva respons tanah (GRC): $P_i - U_r$ dan konversi $p - u_r$

P_i	U_r	p (MPa)	u_r (mm)
0.00215	0.0204	0.009225	0.0107
0.00205	0.0287	0.007186	0.0150
0.00195	0.0366	0.005147	0.0191
0.00185	0.0432	0.003109	0.0226
0.00171	0.0536	0.000254	0.0280



Gambar 3. Ground Reaction Curve (GRC) bukaan silindris

Kurva respons tanah (GRC) yang disusun dari data numerik menunjukkan tren menurun non-linier yang halus, tanpa adanya lonjakan deformasi, menggambarkan transisi elastik-plastis ringan dan stabilitas geomekanik yang baik.



Gambar 4. Diagram nondimensi CTF (S_0 - P_i - ξ) untuk bukaan silindris

Hasil ini selaras dengan posisi (S_0, P_i) pada diagram nondimensi CTF yang menempatkan kondisi terowongan dalam zona *mild yielding*, sehingga memvalidasi perilaku elasto-plastik ringan yang diperoleh dari perhitungan. Secara keseluruhan, kombinasi nilai deformasi yang kecil, zona plastis terbatas, serta tegangan tepi bukaan yang aman menunjukkan bahwa terowongan berada pada kondisi *self-supporting*. Oleh karena itu, kebutuhan penyangga bersifat opsional dan lebih ditujukan untuk kontrol deformasi, misalnya berupa *shotcrete* tipis atau pemasangan *rock bolt* parsial apabila diperlukan untuk meningkatkan stabilitas jangka panjang, dengan catatan bahwa hasil ini berlaku untuk asumsi massa batuan isotropik, kondisi kering, dan beban in-situ seragam sebagaimana diterapkan dalam analisis. Korelasi empiris antara deformasi lapangan dan efektivitas dukungan ringan sebagaimana dijelaskan oleh Musolino et al. [10] mendukung pendekatan desain penyangga berbasis deformasi minimum.

Kesimpulan

Hasil analisis menunjukkan bahwa Terowongan Kalilingseng berada pada kondisi elasto-plastik ringan, sebagaimana ditunjukkan oleh parameter Hoek-Brown hasil *RocLab* ($GSI = 50$; $\sigma_{ci} = 13.51$ MPa; $m_b = 1.509$; $s = 0.003866$; $a = 0.5057$) serta kondisi tegangan *in-situ* dangkal-menengah ($\sigma_v = 0.637$ MPa; $\sigma_{oh} = 0.322$ MPa; $S_0 = 0.0252$). Tekanan dinding kritis awal plastis sebesar P_i^*

= 0.00213, yang sangat dekat dengan nilai $P_i = 0.00170$ untuk kondisi tanpa penyangga, menjelaskan terbentuknya zona plastis tipis segera setelah pelepasan tegangan. Zona plastis tersebut sangat terbatas, ditunjukkan oleh radius plastis relatif $\xi = 1.010$ atau hanya sekitar 1% di luar dinding bukaan, menandakan bahwa massa batuan pada GSI menengah tetap kompeten dan tidak menunjukkan potensi propagasi plastis yang signifikan.

Deformasi dinding juga sangat kecil dan stabil, dengan nilai konvergensi tak berdimensi $Ur = 0.000487$ yang menghasilkan defleksi aktual $ur \approx 0.73$ mm untuk radius bukaan 1.5 m. Kurva *Ground Reaction Curve* (GRC) memperlihatkan tren menurun non-linier tanpa lonjakan deformasi, konsisten dengan dominasi perilaku elastik dan karakter *stable closure*. Evaluasi tegangan di dinding menunjukkan bahwa tegangan radial $\sigma_r(b) = 0.0017$ MPa dan tegangan tangensial $\sigma_\theta(b) = 0.958$ MPa masih jauh di bawah kekuatan massa batuan ($\sigma_{cm} \approx 2.24$ MPa), sehingga tidak terdapat indikasi *spalling* maupun keruntuhan tarik.

Konsistensi perilaku ini diperkuat oleh posisi pasangan (S_0 , P_i) pada diagram nondimensi CTF yang menempatkan kondisi terowongan pada rezim *mild yielding*, selaras dengan kecenderungan hasil numerik.

Secara praktis, terowongan dapat dikategorikan sebagai *self-supporting*, sehingga kebutuhan penyangga yang diterapkan hanya bersifat pengendalian deformasi. Opsi penyangga seperti *thin shotcrete tipis* atau *partial rock bolts* parsial dinilai memadai dan sesuai untuk kondisi ini. Analisis dilakukan dengan asumsi massa batuan homogen-isotropik, kondisi kering, serta beban *in-situ* seragam. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk memasukkan uji sensitivitas terhadap variasi GSI (± 10 poin), K_0 (± 0.1), dan σ_{ci} (± 20 %) guna menilai pengaruhnya terhadap parameter P_i^* , ξ , dan Ur . Selain itu, pengaruh tekanan air tanah serta verifikasi deformasi lapangan di lokasi kerja dapat digunakan untuk mengkalibrasi kurva GRC terhadap perilaku nyata di lapangan. Meskipun hasil menunjukkan kestabilan tinggi, model ini masih berbasis q_{ws} pada homogenisasi massa batuan. Hasil ini mendukung bahwa massa batuan pada kedalaman ± 34 m tergolong stabil alami, dengan potensi deformasi yang kecil serta kapasitas dukung diri yang baik.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada seluruh pembimbing dan penguji yang telah memberikan arahan, masukan, dan koreksi yang sangat berharga selama penyusunan penelitian ini. Penulis juga berterima kasih kepada rekan-rekan laboratorium dan tim lapangan atas bantuan teknis serta dukungan logistik yang memungkinkan pengumpulan data berlangsung dengan baik. Tidak lupa, apresiasi ditujukan kepada keluarga dan semua pihak yang telah memberikan dukungan moral maupun material sehingga penelitian ini dapat

terselesaikan dengan baik.

Daftar Pustaka

- Carranza-Torres, C., & Fairhurst, C. (1999). The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek–Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(6), 777–809. doi: [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00047-9)
- Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), 445–463. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>
- Narimani, S., Davarpanah, S. M., Bar, N., Török, Á., & Vászrhelyi, B. (2023). Geological Strength Index relationships with the Q-system and Q-slope. *Sustainability*, 15(14), 11233. doi: <https://doi.org/10.3390/su151411233>
- Lee, Y. L., Ma, C. H., & Lee, C. M. (2023). An improved incremental procedure for the ground reaction based on Hoek–Brown failure criterion in the tunnel convergence–confinement method. *Mathematics*, 11(15), 3389. doi: <https://doi.org/10.3390/math11153389>
- Chang, L., Alejano, L. R., Cui, L., Sheng, Q., & Xie, M. (2023). Limitation of convergence–confinement method on three-dimensional tunnelling effect. *Scientific Reports*, 13, 1665. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29062-5>
- Ghorbani, A., & Hasanzadehshooiili, H. (2019). A comprehensive solution for the calculation of ground reaction curve in the crown and sidewalls of circular tunnels in the elastic–plastic–EDZ rock mass considering strain softening. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 84, 413–431. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.11.045>
- Wang, L., He, P., Ma, Z., Liu, N., Yang, C., & Gao, Y. (2025). Analytical method for tunnel support parameter design based on surrounding rock failure mode identification. *Geosciences*, 15(9), 369. doi: <https://doi.org/10.3390/geosciences15090369>
- Davarpanah, S. M., Sharghi, M., Vászrhelyi, B., & Török, Á. (2022). Characterization of Hoek–Brown constant m_i of quasi-isotropic intact rock using rigidity index approach. *Acta Geotechnica*, 17(3), 877–902. doi: <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01229-2>
- Tan, L., Wang, G., Ren, T., Dou, L., Yang, X., & Song, S. (2021). Stress distribution and mechanical behaviour of rock mass containing two openings underground: Analytical and

numerical studies. *Geofluids*, 2021, 1917443. doi:
<https://doi.org/10.1155/2021/1917443>

Musolino, M., Chester, C., & Ford, A. (2022). In situ stress data management and analysis: Implications for numerical modelling. In *Proceedings published by the Australian Centre for Geomechanics* (pp. 1265–1278). doi:
https://doi.org/10.36487/acg_repo/2205_88