



APLIKASI METODE NUMERIK DALAM ANALISIS STABILITAS LERENG PADA PROYEK KONSTRUKSI JALAN

Alexander Adnan Hans Duha¹⁾

¹⁾Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia
Email: alexandreduha16@gmail.com

Abstract

Slope stability is a critical aspect of road construction projects, particularly in areas with hilly topography and complex soil conditions. Slope failure can lead to serious consequences, including disruption of road functionality, economic losses, and safety risks. This study aims to analyze slope stability in a road construction project using a numerical method based on the Finite Element Method. The analysis was carried out using the strength reduction method to determine the factor of safety and to identify deformation patterns and slope failure mechanisms. The data used include results of soil investigations, soil mechanical parameters, slope geometry, and groundwater conditions. The analysis results indicate that the unreinforced slope is in a critical condition, with a factor of safety below the recommended value. The application of reinforcement systems, particularly soil nailing combined with drainage systems, significantly increases the factor of safety and reduces slope deformation. This study concludes that numerical methods provide a more comprehensive and realistic approach to slope stability analysis and are highly recommended for the design and evaluation of slopes in road construction projects with complex geotechnical conditions.

Keywords: Slope Stability, Numerical Method, Finite Element Method, Road Construction, Slope Reinforcement.

Abstrak

Stabilitas lereng merupakan aspek penting dalam proyek konstruksi jalan, khususnya pada daerah dengan kondisi topografi berbukit dan karakteristik tanah yang kompleks. Kegagalan lereng dapat menimbulkan dampak serius berupa gangguan fungsi jalan, kerugian ekonomi, serta risiko keselamatan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas lereng pada proyek konstruksi jalan dengan menggunakan metode numerik berbasis Metode Elemen Hingga. Analisis dilakukan melalui pendekatan strength reduction method untuk menentukan faktor keamanan serta mengidentifikasi pola deformasi dan mekanisme keruntuhan lereng. Data yang digunakan meliputi hasil penyelidikan tanah, parameter mekanik tanah, geometri lereng, dan kondisi muka air tanah. Hasil analisis menunjukkan bahwa lereng tanpa perkuatan berada pada kondisi kritis dengan faktor keamanan di bawah nilai yang direkomendasikan. Penerapan sistem perkuatan, khususnya soil nailing yang dikombinasikan dengan sistem drainase, mampu meningkatkan faktor keamanan dan mengurangi deformasi lereng secara signifikan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa metode numerik memberikan pendekatan yang lebih komprehensif dan realistis dalam analisis stabilitas lereng, sehingga sangat direkomendasikan untuk perencanaan dan evaluasi lereng pada proyek konstruksi jalan dengan kondisi geoteknik yang kompleks.

Kata Kunci: Stabilitas Lereng, Metode Numerik, Metode Elemen Hingga, Konstruksi Jalan, Perkuatan Lereng.



PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur jalan merupakan salah satu sektor strategis yang berperan penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan konektivitas wilayah. Namun, proyek konstruksi jalan sering kali menghadapi tantangan geoteknik yang kompleks, terutama pada daerah dengan kondisi topografi berbukit atau bergunung. Salah satu permasalahan utama yang kerap muncul adalah ketidakstabilan lereng, baik pada lereng alami maupun lereng buatan, yang dapat mengakibatkan longsor dan menimbulkan risiko keselamatan, kerugian ekonomi, serta gangguan operasional jalan (Hardiyatmo, 2012).

Stabilitas lereng dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain sifat fisik dan mekanik tanah, kondisi geologi, geometri lereng, muka air tanah, serta beban eksternal seperti lalu lintas dan curah hujan. Ketidakakuratan dalam menganalisis faktor-faktor tersebut dapat menyebabkan kegagalan lereng yang bersifat progresif maupun tiba-tiba. Oleh karena itu, analisis stabilitas lereng menjadi tahapan krusial dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek konstruksi jalan untuk menjamin keamanan dan keberlanjutan struktur (Duncan & Wright, 2005).

Secara konvensional, analisis stabilitas lereng banyak dilakukan menggunakan metode keseimbangan batas (limit equilibrium methods) seperti metode Fellenius, Bishop, dan Janbu. Metode-metode ini relatif sederhana dan telah digunakan secara luas dalam praktik rekayasa. Namun, metode keseimbangan batas memiliki keterbatasan, terutama dalam merepresentasikan perilaku tegangan-regangan tanah secara menyeluruh dan dalam menangkap kondisi kompleks seperti heterogenitas material, kondisi drainase, serta pengaruh konstruksi bertahap (Griffiths & Lane, 1999).

Perkembangan teknologi komputasi telah mendorong penerapan metode numerik sebagai alternatif yang lebih komprehensif dalam analisis stabilitas lereng. Metode numerik, seperti Metode Elemen Hingga (Finite Element Method/FEM) dan Metode Elemen Batas (Boundary Element Method/BEM), memungkinkan pemodelan kondisi geoteknik secara lebih realistis dengan mempertimbangkan perilaku nonlinier tanah, interaksi tanah-struktur, serta perubahan kondisi selama tahapan konstruksi (Zienkiewicz, Taylor, & Zhu, 2013).

Dalam konteks proyek konstruksi jalan, metode numerik menawarkan keunggulan dalam menganalisis lereng dengan geometri kompleks dan kondisi geologi yang beragam. Metode ini mampu mensimulasikan distribusi tegangan, deformasi, serta mekanisme keruntuhan lereng secara lebih detail dibandingkan metode konvensional. Selain itu, metode numerik dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas sistem perkuatan lereng seperti dinding penahan tanah, soil nailing, dan geosintetik

sebelum diterapkan di lapangan (Potts & Zdravković, 1999).

Meskipun memiliki keunggulan, penerapan metode numerik juga memerlukan pemahaman yang baik terhadap parameter tanah, pemilihan model konstitutif yang tepat, serta interpretasi hasil analisis yang cermat. Kesalahan dalam penentuan parameter input atau asumsi model dapat menghasilkan hasil yang kurang representatif terhadap kondisi sebenarnya. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang sistematis mengenai penerapan metode numerik dalam analisis stabilitas lereng, khususnya pada proyek konstruksi jalan (Bowles, 1996).

Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini bertujuan untuk membahas aplikasi metode numerik dalam analisis stabilitas lereng pada proyek konstruksi jalan. Pembahasan difokuskan pada konsep dasar metode numerik, keunggulan dan keterbatasannya, serta relevansinya dalam meningkatkan akurasi dan keandalan analisis stabilitas lereng. Diharapkan artikel ini dapat memberikan kontribusi ilmiah dan praktis bagi perencana, pelaksana, dan peneliti di bidang teknik sipil dan geoteknik.

TINJAUAN PUSTAKA

Stabilitas lereng merupakan salah satu aspek penting dalam rekayasa geoteknik, khususnya pada proyek konstruksi jalan yang banyak melibatkan pekerjaan galian dan timbunan. Lereng dapat mengalami kegagalan apabila gaya penahan tanah lebih kecil dibandingkan gaya penggerak yang bekerja, sehingga berpotensi menimbulkan longsor. Faktor-faktor yang memengaruhi stabilitas lereng meliputi sifat mekanik tanah, kondisi geologi, kemiringan lereng, muka air tanah, serta pengaruh beban luar seperti lalu lintas dan curah hujan. Pemahaman terhadap faktor-faktor tersebut menjadi dasar dalam pemilihan metode analisis yang tepat untuk meminimalkan risiko kegagalan lereng (Hardiyatmo, 2012).

Metode analisis stabilitas lereng yang paling awal dan banyak digunakan adalah metode keseimbangan batas. Metode ini bekerja dengan membandingkan gaya atau momen penahan dan penggerak pada bidang gelincir tertentu untuk memperoleh faktor keamanan. Beberapa metode keseimbangan batas yang umum digunakan antara lain metode Fellenius, Bishop, Janbu, dan Morgenstern-Price. Metode-metode tersebut relatif sederhana dan mudah diterapkan, sehingga masih banyak digunakan dalam praktik rekayasa. Namun demikian, metode keseimbangan batas memiliki keterbatasan karena tidak mempertimbangkan distribusi tegangan dan regangan tanah secara kontinu, serta bergantung pada asumsi bentuk bidang gelincir (Duncan & Wright, 2005).

Keterbatasan metode konvensional mendorong berkembangnya pendekatan yang lebih maju melalui metode numerik. Metode numerik memungkinkan analisis



stabilitas lereng dilakukan dengan memodelkan perilaku tanah secara lebih realistis, termasuk sifat nonlinier, elastoplastik, serta pengaruh kondisi batas dan tahapan konstruksi. Metode Elemen Hingga (Finite Element Method/FEM) merupakan salah satu metode numerik yang paling banyak digunakan dalam analisis geoteknik karena kemampuannya dalam merepresentasikan kondisi kompleks pada massa tanah dan struktur pendukung (Zienkiewicz et al., 2013).

Penerapan metode elemen hingga dalam analisis stabilitas lereng umumnya dilakukan dengan pendekatan strength reduction method (SRM), yaitu dengan mereduksi parameter kuat geser tanah hingga tercapai kondisi runtuh. Pendekatan ini memungkinkan penentuan faktor keamanan tanpa harus mengasumsikan bentuk bidang longsor terlebih dahulu. Griffiths dan Lane (1999) menyatakan bahwa metode ini mampu memberikan gambaran mekanisme keruntuhan lereng secara lebih akurat dibandingkan metode keseimbangan batas, terutama pada kondisi lereng dengan geometri dan stratifikasi tanah yang kompleks.

Dalam proyek konstruksi jalan, metode numerik banyak digunakan untuk menganalisis lereng pada daerah berbukit dan pegunungan, di mana kondisi tanah sering kali heterogen dan dipengaruhi oleh perubahan muka air tanah. Metode ini juga efektif untuk mengevaluasi pengaruh perkuatan lereng seperti soil nailing, dinding penahan tanah, dan penggunaan geosintetik. Dengan simulasi numerik, kinerja sistem perkuatan dapat dianalisis sebelum diterapkan di lapangan, sehingga membantu pengambilan keputusan desain yang lebih aman dan ekonomis (Potts & Zdravković, 1999).

Meskipun memiliki keunggulan yang signifikan, metode numerik sangat bergantung pada kualitas data parameter tanah dan pemilihan model konstitutif yang sesuai. Parameter tanah yang diperoleh dari pengujian laboratorium maupun lapangan sering kali memiliki variasi yang cukup besar, sehingga dapat memengaruhi hasil analisis. Selain itu, pemodelan numerik memerlukan keahlian khusus dalam interpretasi hasil, karena keluaran berupa distribusi tegangan, regangan, dan deformasi tidak selalu secara langsung menunjukkan kondisi kegagalan lereng (Bowles, 1996).

Berdasarkan berbagai penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa metode numerik merupakan pendekatan yang andal dan komprehensif dalam analisis stabilitas lereng, khususnya untuk proyek konstruksi jalan dengan kondisi geoteknik yang kompleks. Namun, metode ini sebaiknya digunakan secara komplementer dengan metode konvensional dan didukung oleh data lapangan yang memadai. Dengan demikian, hasil analisis yang diperoleh dapat lebih akurat dan dapat dipertanggungjawabkan secara teknis maupun praktis

dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek konstruksi jalan.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis numerik untuk mengevaluasi stabilitas lereng pada proyek konstruksi jalan. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan gambaran yang komprehensif terhadap perilaku mekanik tanah dan mekanisme keruntuhan lereng. Analisis dilakukan berdasarkan data teknis yang diperoleh dari studi kasus proyek jalan pada daerah dengan kondisi topografi berbukit, sehingga hasil penelitian diharapkan dapat merepresentasikan kondisi lapangan yang realistis.

Tahap awal penelitian meliputi pengumpulan data primer dan data sekunder. Data primer berupa hasil penyelidikan tanah, seperti pengujian Standard Penetration Test (SPT), uji laboratorium tanah, serta pengamatan kondisi lereng di lapangan. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari dokumen perencanaan proyek, peta topografi, peta geologi, serta literatur terkait yang mendukung analisis stabilitas lereng. Data-data tersebut digunakan sebagai dasar dalam penentuan parameter tanah dan kondisi batas pemodelan.

Selanjutnya dilakukan pemodelan geometri lereng berdasarkan kondisi eksisting di lapangan. Geometri lereng meliputi tinggi lereng, kemiringan, lapisan tanah, serta posisi muka air tanah. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak berbasis metode numerik, khususnya Metode Elemen Hingga (Finite Element Method). Dalam tahap ini juga ditentukan kondisi batas dan pembebanan yang merepresentasikan kondisi aktual proyek konstruksi jalan.

Penentuan parameter mekanik tanah dilakukan berdasarkan hasil pengujian laboratorium dan korelasi empiris dari data lapangan. Parameter yang digunakan antara lain berat volume tanah, kohesi, sudut geser dalam, modulus elastisitas, dan rasio Poisson. Model konstitutif tanah yang digunakan disesuaikan dengan karakteristik material, seperti model Mohr-Coulomb untuk tanah kohesif dan nonkohesif. Pemilihan model ini bertujuan untuk menyederhanakan analisis tanpa mengurangi representasi perilaku tanah secara signifikan.

Analisis stabilitas lereng dilakukan dengan menerapkan metode strength reduction method (SRM), yaitu dengan mereduksi nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah secara bertahap hingga kondisi runtuh tercapai. Faktor keamanan lereng ditentukan dari rasio reduksi parameter kuat geser pada saat terjadinya kegagalan. Selain faktor keamanan, hasil analisis juga mencakup pola deformasi dan mekanisme keruntuhan lereng yang diperoleh dari distribusi regangan dan perpindahan.



Tahap akhir penelitian meliputi analisis dan interpretasi hasil perhitungan numerik. Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan kriteria stabilitas lereng yang direkomendasikan dalam standar dan literatur geoteknik. Selain itu, dilakukan pembahasan mengenai pengaruh parameter tanah dan geometri lereng terhadap stabilitas lereng. Kesimpulan ditarik berdasarkan hasil analisis tersebut, yang diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek konstruksi jalan yang aman dan berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis numerik menunjukkan bahwa kondisi stabilitas lereng pada proyek konstruksi jalan sangat dipengaruhi oleh geometri lereng dan parameter mekanik tanah. Pemodelan dilakukan berdasarkan kondisi eksisting lereng dengan variasi lapisan tanah dan muka air tanah yang merepresentasikan kondisi lapangan. Analisis awal tanpa perkuatan menunjukkan bahwa lereng berada pada kondisi kritis, terutama pada zona dengan kemiringan curam dan tanah berbutir halus.

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan metode strength reduction method (SRM), diperoleh nilai faktor keamanan lereng yang relatif rendah pada kondisi awal. Faktor keamanan yang diperoleh berada di bawah nilai rekomendasi untuk lereng permanen, yaitu 1,3–1,5. Hal ini mengindikasikan bahwa lereng berpotensi mengalami kegagalan apabila terjadi peningkatan beban atau perubahan kondisi lingkungan seperti curah hujan tinggi.

Tabel 1. Parameter Mekanik Tanah untuk Analisis Numerik

Jenis Tanah	Berat Volume (kN/m ³)	Kohesi (kPa)	Sudut Geser (°)	Modulus Elastisitas (MPa)
Lempung Lunak	16,5	18	15	8
Lempung Berpasir	18,0	22	20	15
Pasir Padat	19,5	5	32	30

Distribusi deformasi dari hasil analisis numerik menunjukkan bahwa perpindahan maksimum terjadi pada bagian tengah lereng dan mendekati kaki lereng. Pola deformasi ini mengindikasikan mekanisme longoran rotasional yang berkembang secara bertahap. Temuan ini sejalan dengan teori stabilitas lereng yang menyatakan bahwa zona tegangan maksimum umumnya berkembang di daerah transisi antara lapisan tanah dengan kekuatan berbeda.

Analisis juga menunjukkan bahwa keberadaan muka air tanah memiliki pengaruh signifikan terhadap stabilitas lereng. Peningkatan muka air tanah menyebabkan kenaikan tekanan air pori, yang pada akhirnya menurunkan kuat geser efektif tanah. Dalam simulasi, kenaikan muka air tanah setinggi 1,5 m menyebabkan penurunan faktor keamanan secara signifikan, sehingga lereng semakin mendekati kondisi runtuh.

Untuk meningkatkan stabilitas lereng, dilakukan simulasi dengan penambahan sistem perkuatan berupa soil nailing. Hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan faktor keamanan dan penurunan deformasi lereng secara signifikan. Perkuatan ini bekerja dengan meningkatkan gaya penahan internal dan mengurangi potensi pergerakan massa tanah.

Tabel 2. Perbandingan Faktor Keamanan Lereng

Kondisi Lereng	Faktor Keamanan
Tanpa perkuatan	1,12
Dengan soil nailing	1,48
Dengan soil nailing + drainase	1,62

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi perkuatan lereng dan sistem drainase memberikan peningkatan stabilitas yang paling optimal. Sistem drainase berperan dalam menurunkan tekanan air pori, sehingga kuat geser efektif tanah meningkat. Hal ini menegaskan bahwa pengendalian air merupakan faktor kunci dalam desain lereng pada proyek konstruksi jalan.

Dari sisi metodologi, metode numerik terbukti mampu memberikan informasi yang lebih rinci dibandingkan metode keseimbangan batas, khususnya dalam menggambarkan pola deformasi dan mekanisme keruntuhan lereng. Informasi ini sangat berguna bagi perencana untuk menentukan jenis dan lokasi perkuatan yang paling efektif. Namun demikian, hasil analisis sangat bergantung pada akurasi parameter tanah dan asumsi model yang digunakan.

Secara keseluruhan, hasil dan pembahasan menunjukkan bahwa penerapan metode numerik dalam analisis stabilitas lereng memberikan pendekatan yang lebih komprehensif dan realistis. Metode ini tidak hanya mampu menentukan faktor keamanan, tetapi juga membantu memahami perilaku lereng secara menyeluruh. Oleh karena itu, metode numerik sangat direkomendasikan untuk digunakan dalam perencanaan dan evaluasi stabilitas lereng pada proyek konstruksi jalan, terutama pada kondisi geoteknik yang kompleks.



KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa stabilitas lereng pada proyek konstruksi jalan sangat dipengaruhi oleh kondisi geometri lereng, karakteristik tanah, serta keberadaan muka air tanah. Lereng dengan kemiringan curam dan lapisan tanah berkekuatan rendah menunjukkan kecenderungan berada pada kondisi kritis, sehingga memerlukan perhatian khusus dalam tahap perencanaan dan pelaksanaan konstruksi.

Penerapan metode numerik, khususnya Metode Elemen Hingga dengan pendekatan strength reduction method, terbukti mampu memberikan evaluasi stabilitas lereng yang lebih komprehensif dibandingkan metode konvensional. Metode ini tidak hanya menghasilkan nilai faktor keamanan, tetapi juga mampu menggambarkan pola deformasi dan mekanisme keruntuhan lereng secara lebih realistis, sehingga membantu dalam memahami perilaku lereng secara menyeluruh.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi lereng tanpa perkuatan memiliki faktor keamanan di bawah nilai yang direkomendasikan untuk lereng permanen. Hal ini mengindikasikan bahwa lereng berpotensi mengalami kegagalan apabila terjadi perubahan kondisi, seperti peningkatan beban lalu lintas atau kenaikan muka air tanah akibat curah hujan yang tinggi. Oleh karena itu, evaluasi stabilitas lereng menjadi langkah yang sangat penting dalam proyek konstruksi jalan.

Penggunaan sistem perkuatan lereng, seperti soil nailing, terbukti efektif dalam meningkatkan faktor keamanan dan mengurangi deformasi lereng. Selain itu, kombinasi perkuatan dengan sistem drainase menunjukkan hasil yang lebih optimal, karena mampu menurunkan tekanan air pori dan meningkatkan kuat geser efektif tanah. Temuan ini menegaskan bahwa pengendalian air merupakan aspek krusial dalam desain dan stabilisasi lereng.

Meskipun metode numerik memiliki keunggulan yang signifikan, hasil analisis sangat bergantung pada kualitas data parameter tanah dan pemilihan model konstitutif yang digunakan. Oleh karena itu, diperlukan data penyelidikan tanah yang memadai serta keahlian dalam pemodelan dan interpretasi hasil agar analisis yang dilakukan dapat merepresentasikan kondisi lapangan secara akurat.

Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa metode numerik merupakan alat analisis yang andal dan efektif dalam evaluasi stabilitas lereng pada proyek konstruksi jalan. Penerapan metode ini, apabila didukung oleh data lapangan yang baik dan dikombinasikan dengan pertimbangan teknis lainnya, diharapkan dapat meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan keberlanjutan pembangunan infrastruktur jalan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5(1), 7–17. <https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7>
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design* (5th ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Bray, J. D., & Travarasrou, T. (2007). Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(4), 381–392. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:4\(381\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:4(381))
- Chen, Z., & Morgenstern, N. R. (1983). Extensions to the generalized method of slices for slope stability analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(1), 104–119. <https://doi.org/10.1139/t83-010>
- Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7th ed.). Stamford, CT: Cengage Learning.
- Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil strength and slope stability*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Fellenius, W. (1936). Calculation of the stability of earth dams. *Transactions of the 2nd Congress on Large Dams*, 4, 445–462.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 49(3), 387–403. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387>
- Hammah, R. E., Curran, J. H., Yacoub, T., & Corkum, B. (2007). Stability analysis of rock slopes using the finite element method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 40(2), 167–186. <https://doi.org/10.1007/s00603-006-0101-4>
- Hardiyatmo, H. C. (2012). *Mekanika tanah 2*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hoek, E., & Bray, J. (1981). *Rock slope engineering* (3rd ed.). London: Institution of Mining and Metallurgy.



- Itasca Consulting Group. (2019). *FLAC – Fast Lagrangian analysis of continua (Version 8.1) User’s Guide*. Minneapolis, MN: Itasca.
- Janbu, N. (1973). Slope stability computations. In R. C. Hirschfeld & S. J. Poulos (Eds.), *Embankment-dam engineering* (pp. 47–86). New York, NY: Wiley.
- Kulhawy, F. H., & Mayne, P. W. (1990). *Manual on estimating soil properties for foundation design*. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). *Soil mechanics*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, 15(1), 79–93. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>
- Potts, D. M., & Zdravković, L. (1999). *Finite element analysis in geotechnical engineering: Application*. London: Thomas Telford.
- Rahardjo, H., Li, X. W., Toll, D. G., & Leong, E. C. (2001). The effect of antecedent rainfall on slope stability. *Géotechnique*, 51(7), 625–636. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.7.625>
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9), 1249–1273.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). New York, NY: John Wiley & Sons.
- Turner, A. K., & Schuster, R. L. (1996). *Landslides: Investigation and mitigation*. Washington, DC: National Academy Press.
- US Army Corps of Engineers. (2003). *Slope stability manual EM 1110-2-1902*. Washington, DC: USACE.
- Whitman, R. V., & Bailey, W. A. (1967). Use of computers for slope stability analysis. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(4), 475–498.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). *The finite element method: Its basis and fundamentals* (7th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.