

斜土钉支护边坡三维极限承载力及可靠度分析

赵彬¹, 陈光辉^{2,3}

(1. 国家铁路局装备技术中心, 北京市 100070; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 现有文献尚未有对斜土钉支护边坡三维极限承载力及考虑岩土强度参数随机性的斜土钉支护边坡可靠度的研究。在此背景下, 首先以极限分析上限法为框架, 借助粒子群优化算法, 确定了斜土钉支护边坡坡顶三维极限承载力及相应失稳面, 开展了斜土钉支护边坡三维稳定性的评估; 然后将所得结果与数值模拟结果进行对比, 验证了所提出模型的有效性; 最后借助某边坡现场测量和地质勘探资料的统计结果, 构建了斜土钉支护边坡的可靠度分析模型, 获得了该边坡可靠度指标和失稳概率。研究结果表明, 该边坡工程满足设计要求。

关键词: 斜土钉支护边坡; 极限分析上限法; 三维极限承载力; 可靠度分析; 失稳概率

中图分类号: U416.1⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0302-06

Analysis on Three-dimensional Ultimate Bearing Capacity and Reliability of Inclined Soil Nail-supported Slope

ZHAO Bin¹, CHEN Guanghui^{2,3}

(1. Equipment Technology Center of State Railway Administration, Beijing 100070, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The existing literature has not yet conducted research on the three-dimensional ultimate bearing capacity of inclined soil nail-supported slopes and the reliability of inclined soil nail-supported slopes considering the randomness of geotechnical strength parameters. Under this background, firstly, taking the upper limit method of limit analysis as the framework and leveraging the particle swarm optimization algorithm, the three-dimensional ultimate bearing capacity at the top of inclined soil nail-supported slope and corresponding instability surfaces are determined to evaluate the three-dimensional stability of inclined soil nail-supported slopes, and then the obtained results are compared with the results of numerical simulation to verify the effectiveness of the proposed models. Finally, with the help of statistical results of on-site measurements and geological exploration data of a slope, a reliability analysis model of inclined soil nail-supported slope is constructed to obtain the reliability index and the instability probability of the slope. The study result shows that the slope engineering satisfies the design requirements.

Keywords: inclined soil nail-supported slope; ultimate analysis upper limit method; three-dimensional ultimate bearing capacity; reliability analysis; instability probability

0 引言

我国国民经济发展极大促进了高速公路与铁路的发展, 导致大量高陡边坡应运而生, 对高速公路和铁路的运营安全造成了极大威胁。为了保障边坡的稳定, 大量的加固措施被提出并得到了广泛应用,

如土工格栅、土钉、挡土墙、抗滑桩等^[1-3]。研究以上加固措施作用下的边坡稳定性, 可指导实际边坡工程的加固设计工作。本文以土钉支护为例, 研究在其支护作用下的边坡稳定性, 并在考虑岩土强度参数随机性的基础上, 对土钉支护边坡的可靠度进行评估。

目前常用于土钉支护边坡稳定性研究的方法主要有: 模型试验法^[4-5]、数值模拟法^[6-8]和理论分析法^[9-12]。相比于模型试验法和数值模拟法, 理论分析法计算效率高且可用于处理多种复杂工况, 已在边坡稳定性分析中得到了广泛应用^[8]。基于二维失效机制, He等^[6]借助水平极限地震荷载系数, 研究了土钉支护边坡的稳定性; Wei等^[9]借助安全系数, 评估

收稿日期: 2025-01-24

基金项目: 湖南省交通科技项目(202238); 湖南省交通运输科技项目(202303)

作者简介: 赵彬(1979—), 女, 硕士, 工程师, 从事铁路工务方向研究工作。

通信作者: 陈光辉(1993—), 男, 博士, 讲师, 从事交通岩土工程极限分析与可靠性评估工作。电子邮箱: 15700731178@163.com

了土钉支护边坡的稳定性。实际边坡的失稳破坏多表现三维特征,如 2024 年 5 月 1 日发生在广东梅大高速大埔往福建方向 K11+900 m 附近的路基边坡坍塌破坏(见图 1)。二维的失效机制无法实现对边坡三维破坏特征的精准描述,且忽略了土钉列间距对边坡稳定性的影响,因而无法实现对土钉支护边坡稳定性的准确评估^[10]。为了解决以上问题,Yang 等^[10]引入了三维失效机制来模拟边坡的三维失稳特征,并借助安全系数对土钉支护边坡三维稳定性进行了研究。但该研究局限于水平土钉支护边坡,而在实际工程中,为了提高土钉的支护强度,在设计和施工中土钉往往与水平方向存在一定倾角,即实际工程中多采用斜土钉对边坡进行支护^[13]。此外,已有大量研究表明,在自然条件下,岩土强度参数多表现为随机性^[14],这使得考虑岩土强度参数随机性的边坡可靠度评估尤为迫切。综上,已有大量学者对土钉支护边坡稳定性进行了研究,并取得了丰硕成果,但目前尚未有文献涉及斜土钉支护边坡三维极限承载力及考虑土体强度参数随机性的斜土钉支护边坡可靠度的研究。因此,亟须进一步开展斜土钉支护边坡三维稳定性和可靠度的研究,旨在为斜土钉关键支护参数的设计提供参考。

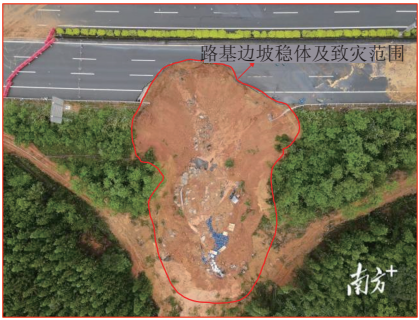


图 1 广东梅大高速大埔往福建方向 K11+900 m 附近路基边坡坍塌破坏(来自网络)

本文在极限分析上限法框架下,提出了斜土钉支护边坡三维失效机制,并借助粒子群优化算法,确定了边坡极限承载力及相应失稳面,研究了斜土钉支护边坡三维稳定性。最后,借助某边坡现场测量和地质勘探资料的统计结果,构建了考虑土体强度参数随机性的斜土钉支护边坡可靠度分析模型,实现了对该边坡可靠度指标和失稳概率的研究。

1 斜土钉支护边坡三维稳定性分析

1.1 斜土钉支护边坡三维失效机制

斜土钉支护边坡的三维失效机制示意图见图 2。

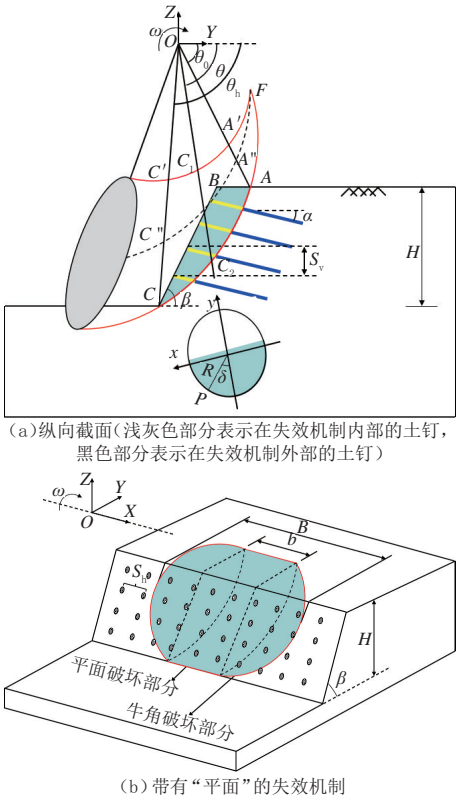


图 2 斜土钉支护边坡的三维失效机制示意图

图 2 所示的三维失效机制由 2 条对数螺旋线 CAF(用 r 表示)和 $C'A'F$ (用 r' 表示)约束。线 CAF 和线 $C'A'F$ 的表达式为^[15]:

$$\begin{cases} r = r_0 e^{(\theta - \theta_0) \tan \varphi} & (\text{线 CAF}) \\ r' = r'_0 e^{-(\theta - \theta_0) \tan \varphi} & (\text{线 C'A'F}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $r_0=OA$ (或 OA'); φ 为摩擦角; θ_0 和 θ 可从图 2 中获得;基于式(1),中线 $C''A''F$ (用 r_m 表示)的表达式为:

$$r_m = \frac{1}{2}(r + r') \quad (2)$$

通过旋转中心 O 的截面圆 C_1C_2 的半径 R 为:

$$R = \frac{1}{2}(r - r') \quad (3)$$

根据图 2 中的几何条件,在截面圆 C_1C_2 上的点 $P(x_p, y_p, z_p)$ 可表示为:

$$\begin{cases} x_p = R \cos \delta + x_0 \\ y_p = (r_m - R \sin \delta) \cos \theta + y_0 \\ z_p = (r_m - R \sin \delta) \sin \theta + z_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: δ 可从图 2 中获得; x_0, y_0 和 z_0 表示旋转中心 O 的坐标。

结合式(1)与式(4),可得到三维失效机制的牛角破坏部分(见图 2(a))。为了使三维失效机制可过渡到二维失效机制,引入了一个“平面”来分割三维离散牛角的破坏部分^[12](见图 2(b))。

$$\frac{R_{fi}}{\sin(-\theta_{fi}-\alpha)} \cdot \sin\left[\frac{\pi}{2}-\arctan\left(-\frac{y_{si}-y_0}{z_{si}-z_0}\right)-\theta_{fi}\right] \quad (18)$$

$$= \sqrt{(x_{si}-x_{fi})^2+(y_{si}-y_{fi})^2+(z_{si}-z_{fi})^2}$$

土体重度功率 W_γ 可表示为:

$$W_\gamma = \iiint_V \gamma v dV = \sum_i (\omega \gamma R_i V_i \cos \theta_i) \quad (19)$$

式中: V_i 为对应于 S_i 的单元体积 (见图 3); θ_i 和 R_i 为体积 V_i 的旋转角和旋转半径。

如图 3 所示,坡顶荷载功率 W_q 为:

$$W_q = \iint_{S_m} q v dS_m = \sum_j \omega q_j A_j R_j \cos \theta_j \quad (20)$$

式中: S_m 为三维失效机制在坡顶的面积; A_j 为点 $P_{\max,j}, P_{\max,j+1}, P'_{\max,j+1}, P'_{\max,j}$ 所构成单元面的面积 (见图 3); R_j 和 θ_j 分别为单元面积 A_j 的旋转半径和旋转角; q_j 为单元面积 A_j 处的荷载。本文假定坡顶荷载为一均值。

结合式 (5)~(20), 边坡极限承载力 q_{cr} 为:

$$q_{cr} = \frac{W_c + W_n - W_\gamma}{\iint_{S_m} v dS_m} \quad (21)$$

粒子群算法是一种并行算法,该算法从随机解出发,通过不断迭代获取局部最优值,并以获得的局部最优值出发搜索获取全局最优值。因此,本文借助粒子群优化算法,通过将所有可能的 $r_h, \theta_h, r'_h/r'_h$ 和 b/H 代入式 (21), 计算获得边坡三维极限承载力。类似评估边坡稳定性的安全系数、水平极限地震荷载系数和极限坡高等,均可采用上述过程计算获得。图 5 所示为基于本文所提出方法计算所得的边坡三维极限承载力及相应失稳面。

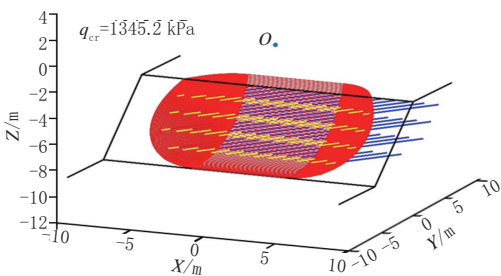


图 5 基于所提出方法计算获得的边坡三维极限承载力及相应失稳面

1.3 模型验证

由于尚未有文献涉及斜土钉支护边坡三维极限承载力的研究,本节基于 FLAC3D 构建的数值模型 (见图 6) 来验证所提出方法的有效性。模型构建采用的参数见表 1。数值模型和理论计算过程中设置

$B/H=3$ 。图 7 所示为采用数值模型计算边坡极限承载力的流程图。

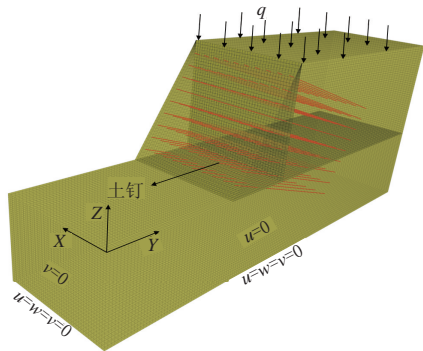


图 6 所构建斜土钉支护边坡数值模型示意图

表 1 模拟所采用参数

类别	参数	取值
边坡	坡高 H/m	5
	坡角 $\beta/(^{\circ})$	40
土体	黏聚力 c/kPa	20
	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	15~30
	剪胀角 $\psi/(^{\circ})$	0
	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	20
	杨氏模量 E/MPa	180
	泊松比 ν	0.3
土钉	直径 d/m	0.1
	长度 L/m	12
	倾角 $\alpha/(^{\circ})$	10
	列间距 S_h/m	1
	行间距 S_v/m	1
	杨氏模量 E_s/GPa	45.44
土钉与周围土体之间的极限黏结强度 $[\tau]/\text{kPa}$		50
屈服强度 T_s/kPa		400

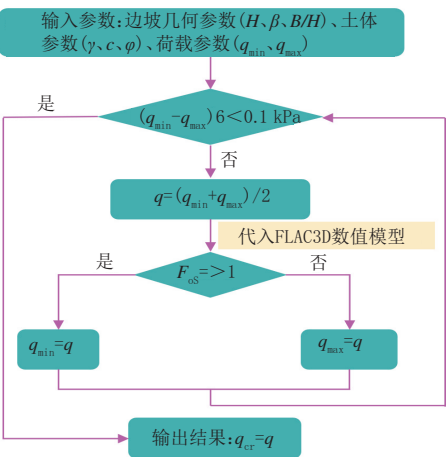


图 7 数值模型计算边坡极限承载力流程图

在图 7 中, F_{os} 为基于 FLAC3D 计算的边坡安全系数。 $F_{os}>1$ 表示边坡处于安全状态; $F_{os}<1$ 表示边坡处于失稳状态; $F_{os}=1$ 表示边坡处于极限状态。 $q_{\min}$ 表示相对较小的坡顶荷载, 当 $q=q_{\min}$ 时, $F_{os}>1$; $q_{\max}$ 表示相对较大的坡顶荷载, 当 $q=q_{\max}$ 时, $F_{os}<1$ 。采用图 7 所

示流程图,通过循环迭代,直至 $(q_{\max}-q_{\min})<0.1$ kPa,输出此时的 q 值,即为坡顶极限荷载 q_{cr} 。表2比较了基于FLAC3D和本文所提出方法计算的坡顶极限荷载值。

由表2可见,根据本文所提出方法计算的三维极限承载力与FLAC3D计算结果均随着摩擦角的增大而增大,且本文所提出方法计算结果略小于FLAC3D计算结果,两者最大差异小于5.7%。以上对比结果验证了本文所提出方法的有效性,说明本文所提出方法可用于对倾斜土钉支护边坡三维极限承载力的准确分析。

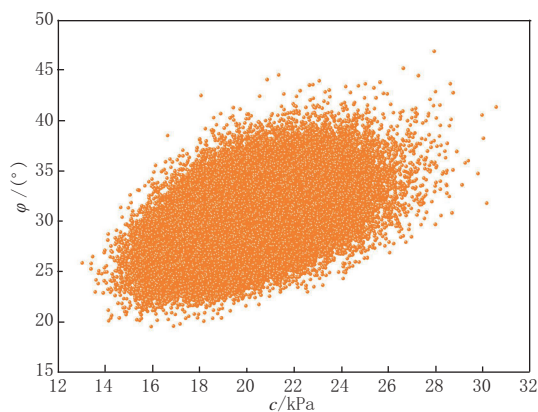
表2 所提出方法的验证

单位:kPa

三维极限承载力	$\varphi=15^\circ$	$\varphi=20^\circ$	$\varphi=25^\circ$	$\varphi=30^\circ$
按本文所提方法计算	374.3	575.8	875.4	1345.2
按FLAC3D计算	392.7	610.2	914.5	1415.2

2 斜土钉支护边坡可靠度分析

某边坡现场测量结果为:边坡高度 $H=5$ m;坡角 $\beta=40^\circ$ 。通过对大量土体样品室内测试和统计分析可知,摩擦角 φ 和黏聚力 c 为随机变量且服从多元正态分布,而 $\ln \varphi$ 和 $\ln c$ 也服从多元正态分布。其中摩擦角 φ 的均值为 30° ,标准差为 3° ;黏聚力 c 的均值为20 kPa,标准差为2 kPa; $\ln \varphi$ 和 $\ln c$ 的相关系数 ρ 为-0.5;土体重度为 19.5 kN/m³。该边坡坡顶承受均布荷载 q 的设计值为800 kPa。设计要求可靠度指标大于1.2,失稳概率小于10%。为了确保该边坡的稳定,设计采用斜土钉对其进行支护。土钉关键支护参数为:土钉长度 $L_s=12$ m;土钉与水平方向倾角 $\alpha=10^\circ$;土钉的行间距 S_v 、列间距 S_h 均为1 m;土钉与周围土体之间的极限黏结强度 $[\tau]$ 设计值为50 kPa;土钉屈服强度 $T_s=400$ kPa。图8所示为基于Matlab中mvnrnd函数生成的摩擦角 φ 和黏聚力 c 的100 000组随机值的散点图。

图8 摩擦角 φ 和黏聚力 c 的随机值散点图

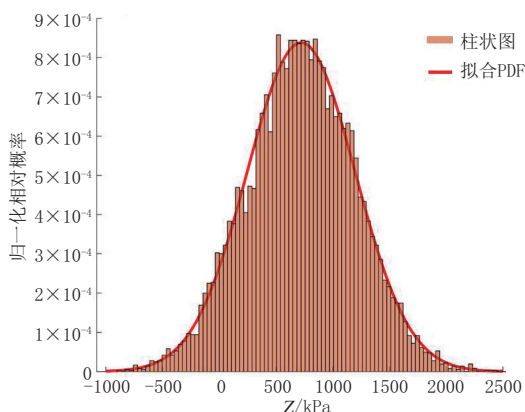
定义边坡功能函数 Z 为:

$$Z = q_{cr} - q \quad (22)$$

由式(22)可知, $Z>0$ 时,表示边坡满足设计要求; $Z<0$ 时,表示边坡发生失稳破坏,无法满足设计要求; $Z=0$ 时,表示边坡处于极限状态。由于该边坡工程仅有摩擦角 φ 和黏聚力 c 为随机变量,因此功能函数 Z 可表示为摩擦角 φ 和黏聚力 c 的函数,表达式为:

$$Z = f(\varphi, c) \quad (23)$$

通过计算,可获得边坡功能函数 Z 的拟合概率密度函数PDF(见图9)。为了便于计算失效概率,图9给出的是功能函数 Z 的归一化相对概率。由图9可见,功能函数 Z 的拟合PDF分布近似为正态分布。参考文献[16],可定义边坡可靠度指标 β_f 为:

图9 功能函数 Z 的概率密度曲线

$$\beta_f = \frac{u_z}{\sigma_z} \quad (24)$$

式中: u_z 和 σ_z 分别为 Z 的均值和标准差。结合图9计算可知, $u_z=721.3$ kPa、 $\sigma_z=476.1$;结合式(24)可得可靠度指标为1.5,满足设计要求。

另外,定义图9中 $Z<0$ 覆盖区域面积 $S_{Z<0}$ 与总面积 S_t 的比值为失效概率 P_f ,表达式为:

$$P_f = \frac{S_{Z<0}}{S_t} \quad (25)$$

结合图9和式(25),可得边坡的失效概率约为6.6%,满足设计要求。

3 结 语

(1)构建了斜土钉支护边坡的三维失稳机制,借助极限分析上限法和粒子群优化算法,确定了用边坡三维极限承载力来进行边坡三维稳定性的评估。对比验证说明了所提出方法的有效性。

(2)借助某边坡现场测量和地质勘探的统计结果,构建了考虑土体强度参数随机性的斜土钉支护

边坡的可靠度分析模型,计算了该边坡可靠度指标和失效概率。研究表明,该边坡工程满足设计要求。

参考文献:

- [1] 张桂芹.抗滑桩加固高边坡受力特征影响因素分析[J].城市道桥与防洪,2024(1):1-84.
- [2] 郭鹏辉.变形协调条件下锚索框架梁-抗滑桩边坡支护体系设计方法研究[J].城市道桥与防洪,2024(1):194-198.
- [3] 陈少轩,余臣相,杜勤.基于离散元的顺层岩质边坡加固及稳定性分析[J].城市道桥与防洪,2024(4):234-237.
- [4] RAWAT S, GUPTA A K. Testing and modelling of screw nailed soil slopes[J]. Indian Geotechnical Journal, 2018(48): 52-71.
- [5] 李国庆,马海春,崔可锐,等.土钉支护边坡影响因素试验分析[J].水利水运工程学报,2018(4):54-60.
- [6] PAK A, MALEKI J, AGHAKHANI N, *et al.* Numerical investigation of stability of deep excavations supported by soil-nailing method[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2021, 16(6): 434-451.
- [7] HE S, OUYANG C, LUO Y. Seismic stability analysis of soil nail reinforced slope using kinematic approach of limit analysis[J]. Environmental Earth Sciences, 2012(66): 319-326.
- [8] 张澜.土钉墙加固边坡稳定性数值模拟分析[J].地下水, 2022(2):44.
- [9] WEI X X, ZOU J F, CHEN G H. Seismic stability analysis of heterogeneous slopes reinforced by inclined soil nails[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2023, 27(16): 4544-4562.
- [10] YANG T, ZOU J F, PAN Q J. Three-dimensional seismic stability of slopes reinforced by soil nails[J]. Computers and Geotechnics, 2020 (127): 103768.
- [11] 胡兴光.土钉支护边坡极限平衡法与有限元法对比分析[J].浙江水利水电学院学报,2023,35(3):65-69.
- [12] 邓东平,李亮,罗伟.地震荷载作用下土钉支护边坡稳定性拟静力分析[J].岩土力学,2012,33(6):1787-1794.
- [13] WEI W B, CHENG Y M. Soil nailed slope by strength reduction and limit equilibrium methods[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(5): 602-618.
- [14] 邓志平,李典庆,曹子君,等.考虑地层变异性和土体参数变异性的边坡可靠度分析[J].岩土工程学报,2017,39(6):986-995.
- [15] NADUKURU S S, MICHALOWSKI R L. Three-dimensional displacement analysis of slopes subjected to seismic loads[J]. Canadian geotechnical journal, 2013, 50(6): 650-661.
- [16] 张研,付闯洁,王鹏鹏,等.基于粒子群优化算法的相关向量机边坡稳定性分析模型[J].科学技术与工程,2023,23(19):8370-8376.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

