

文章编号:1673-9469(2023)02-0052-05

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.02.008

考虑土体参数非平稳特性下开挖边坡稳定性可靠度分析

张磊^{1,2},王迪¹,李昀霖¹,刘奇立¹,赵子豪^{3*}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210024;2. 杭州市公路与港航管理服务中心,浙江 杭州 311202;3. 沈阳建筑大学 土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要: 基于极限分析上限法和随机场理论,采用蒙特卡洛模拟针对不排水条件下开挖边坡的稳定性开展可靠度分析。黏土不排水抗剪强度被模拟为非平稳随机场,并在参数敏感性分析中重点研究了非平稳程度和变异系数对边坡可靠度指标的影响。其中,将随机场中边坡的失效模式分为三类,研究了不同随机参数输入组合下每种失效模式的发生概率。结果表明边坡的可靠度指标随着非平稳程度的增加而增加,随着变异系数的增大而减小。结果显示,土体的空间变异性对边坡的失效模式影响显著。在考虑的随机参数组合下,失效模式以深部破坏模式为主,并且随着非平稳程度和变异系数的增加,深部破坏模式的发生概率逐渐降低,但坡趾破坏和深部坡趾破坏模式的发生概率增加。

关键词: 黏土;边坡稳定性;可靠度分析;非平稳随机场;失效模式

中图分类号: TU43

文献标识码: A

Reliability Analysis of Excavated Slopes Considering Non-stationary Random Fields of Soil Parameter

ZHANG Lei^{1,2}, WANG Di¹, LI Yunlin¹, LIU Qili¹, ZHAO Zihao^{3*}

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 2. Hangzhou Highway and Port Management Service Center, Hangzhou, Zhejiang 311202, China; 3. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China)

Abstract: Based on the upper bound limit analysis and random field theory, this paper investigates the reliability of excavated slopes in undrained conditions within the framework of Monte Carlo simulation. The soil undrained shear strength is simulated as random fields. The effects of degree of non-stationarity and coefficient of variation on the slope stability are highlighted in the parametric sensitivity analysis. The results indicate that the slope reliability index increases with the increase of degree of non-stationarity and reduces as the coefficient of variation increases. Meanwhile, the soil spatial variability affects significantly the failure mechanism of slopes. Under the combination of random parameters considered in this paper, the failure mode is mainly of deep failure. With the increase of degree of non-stationarity and coefficient of variation, the probability of occurrence for the deep failure mode gradually reduces and the probability of occurrence for the toe failure and deep toe failure modes increase accordingly.

Key words: clay; slope stability; reliability analysis; non-stationary random field; failure mechanism

边坡稳定性是土力学与岩土工程中基本问题之一,一直是研究的热点和难点。在长期的实践中,工程界普遍采用传统的安全系数体系来指导

边坡设计工作,把安全系数作为评价边坡是否安全的首要指标。然而组成边坡的土体和岩体均是在漫长的时间中由各种地质作用形成的,同时由

收稿日期:2022-10-23

基金项目:中央高校基本科研业务费项目(B220202013);国家自然科学基金资助项目(51878248,52008268);辽宁省博士科研启动项目(2022-BS-195)

作者简介:张磊(1984-),男,浙江杭州人,硕士研究生,工程师,从事边坡稳定性方面的研究。

* 通讯作者:赵子豪(1991-),男,河南安阳人,博士研究生,副教授,从事岩土基础工程方面的研究。

于受到不同荷载历史的影响,就会导致岩土体参数具有一定的空间变异性,即土体参数在不同位置下的值并不相同,但内在又具有一定的相关性。

目前考虑边坡土体空间变异性的可靠度分析已经越来越多地得到了国内外众多学者的重视。杨亮等^[1]提出一种不排水抗剪强度垂直排水板方向衰减的非平稳随机场模型,并以水泥土堤坝边坡为例,结合强度折减法 and 蒙特卡洛模拟,对比提出的非平稳随机场模型和传统平稳随机场模型、深度趋势非平稳随机场模型对边坡安全系数和滑动面分布的影响。Wu 等^[2]使用基于相关抽样技术的一次二阶矩法对单层黏性土边坡,高陡土质边坡以及堆石坝进行了可靠度分析。傅方煜等^[3]提出了基于响应面法的边坡稳定二阶可靠度分析的实用算法并讨论了可靠度分析结果中参数敏感性和物理属性问题。Li 等^[4]提出了边坡可靠度分面法,该方法能有效地求解具有空间变异性的边坡可靠度问题。周罕等^[5]提出将有限差分强度折减法和响应面法相结合的边坡可靠性的方法。其结果表明,均值强度较高的边坡岩土体,如果变异系数较大,便仍处于较高风险水平,虽然边坡整体的安全系数满足工程要求;均值安全系数和最小可靠度指标对应的破坏模式也是有差别的。然而,文献中大多数研究都考虑土体参数的平稳特性,现实中土体参数随深度体现出一种线性变化的趋势。同时,对于土体参数非平稳情况下边坡失效机制的研究在文献中也鲜有报道。

本文将随机场理论、塑性极限分析上限法和蒙特卡洛模拟相结合,探究非平稳条件下土体参数空间变异性对边坡稳定性的影响。将边坡失效机制划分为三种类型,研究不同随机参数组合输入下各种失效模式的发生概率。研究结果可以为边坡的稳定性评价以及局部加固提供理论依据。

1 随机极限分析法

本文考虑纯黏性土边坡稳定性,因此土体的不排水抗剪强度 s_u 被模拟为随机场,符合对数正态分布。考虑土体强度参数的非平稳特性,即其均值随着深度呈线性增加趋势,可用如下公式描述:

$$s_u = s_{u0} + kz \quad (1)$$

式中: s_{u0} 为坡顶处不排水抗剪强度, k 为土体不排水抗剪强度非平稳程度, z 为深度。Koppula^[6]的研究表明土体不排水抗剪强度非平稳程度取值一

一般在 0 到 3.5 kPa/m 之间。 s_u 的变异系数 COV 则被定义为不排水抗剪强度的均值与标准差之比,取值范围为 0.1 到 0.5 之间(Phoon 和 Kulhawy^[7])。土体的不排水抗剪强度参数内在的相关性,可以用相关距离来表示,相关距离是指土层中任意两个互不相关点的最小距离。考虑到指数型相关函数形式简单、对应的特征值和特征函数无需求解 Fredholm 积分方程即可获得,应用较为方便,本文选取指数型相关函数作为土体参数随机场的相关函数,其形式为:

$$\rho(\tau_x, \tau_z) = \exp\left[-\left(\frac{2\tau_x}{l_x} + \frac{2\tau_z}{l_z}\right)\right] \quad (2)$$

式中: l_x 和 l_z 分别代表水平相关距离和竖直相关距离; τ_x 和 τ_z 分别为水平和竖直方向上的滞积距离。本文将重点研究黏土不排水抗剪强度非平稳程度和变异系数对边坡稳定性的影响,因此,不排水抗剪强度非平稳程度 k 取 0、1、2 和 3 kPa/m;变异系数 COV 取 0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5;考虑各向同性的相关距离,此时水平和竖直相关距离都等于 10 m。所有随机参数的取值均在文献所报导的取值范围之内。随机场通过 Shu 等^[8]提出的基于谱表示法的随机场模拟方法进行模拟。

采用随机场理论与边坡极限分析上限法相结合的可靠度分析方法对边坡稳定性进行分析。通过空间离散思想,对滑动面进行离散,将其划分成 i 等分的微元线段,建立如图 1 所示的软土边坡的失稳离散破坏机构。滑动体以及圆弧滑动面下方土体作为刚体进行考虑。

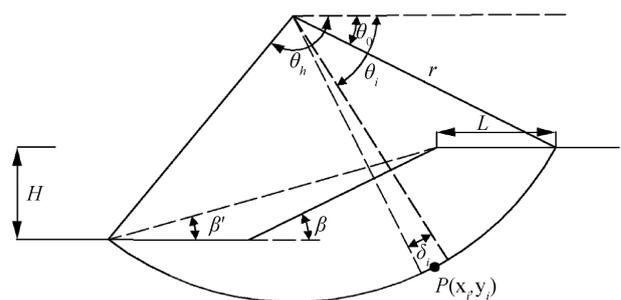


图1 离散机构

Fig. 1 Discretization failure mechanism

在该机构中,速度间断面可以近似看作由 i 个中点坐标为 $P(x_i, y_i)$ 的微元线段组成, θ_i 为速度间断面上微元中点与水平方向的极角, δ_i 为微元线段的端点与旋转中心连线的夹角, i 的大小为滑动面划分后的线段数,决定了该离散机构的计算精度。通过大量计算结果表明,当 $i=100$ 时,该离散机构具有足够的计算精度。

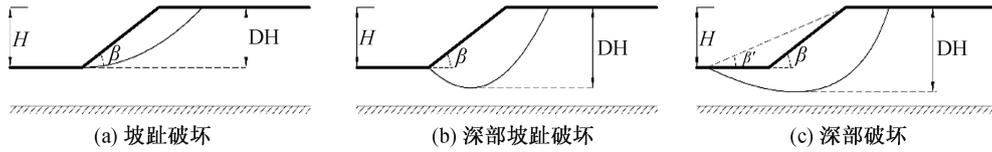


图2 失效模式分类

Fig. 2 Types of failure mechanism

因此,当已知 θ_0, θ_h , 以及 β' 的情况下,分段线中点坐标 (x_i, y_i) 可以由下式求出:

$$x_i = \left(\frac{H}{\sin\theta_h - \sin\theta_0} \right) \left(\cos \left[\theta_0 + \frac{(\theta_h - \theta_0)(2i - 1)}{200} \right] \right) + L - r \cos\theta_0 \quad (3)$$

$$y_i = \left(\frac{H}{\sin\theta_h - \sin\theta_0} \right) \left(\sin \left[\theta_0 + \frac{(\theta_h - \theta_0)(2i - 1)}{200} \right] - \sin\theta_0 \right) \quad (4)$$

将土体离散成一系列间距为 0.5 m 的点阵, 每一个土体都有一个特定的坐标。使用谱表示法生成的土体强度随机场将通过特定的坐标赋值给离散后的土体点阵。距离分段线中点最近的土体离散点的土体强度值将会被用于计算对应分段的能量耗散率, 最后求和得到速度间断面上的能量耗散率, 从而求得对应的安全系数。滑动面能量耗散和土体重力做功的详细计算方法可以参考文献[9]。

根据 Taylor^[10] 对于圆弧失效滑动面的定义, 通过边坡滑动面最大深度 DH 以及滑出点和坡肩连线与水平面形成的夹角 β' 与边坡坡度 β 之间的关系来划分滑动面。滑动面被划分成三类, 如图 2 所示, 具体判别条件如下:

- (1) 坡趾破坏: 滑动面最大深度 $DH \leq 1.01H$ 且 $\beta' \geq \beta$;
- (2) 深部坡趾破坏: 滑动面最大深度 $DH > 1.01H$ 且 $\beta' \geq \beta$;
- (3) 深部破坏: 滑动面最大深度 $DH > 1.01H$ 且 $\beta' < \beta$ 。

2 黏性土坡可靠度分析

本文所考虑的边坡模型如图 3 所示。边坡坡高 $H = 10 \text{ m}$, 深度 $D/H = 2$; 坡度取 $\beta = 18^\circ$ 和 45° , 对应的坡率分别为 1:3 和 1; 土体重度 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ 。土体本构模型采用 Tresca 屈服准则并符合相关关联流动法则。

蒙特卡洛模拟次数对边坡可靠度结果精确程度有着重要的影响, 一般来说模拟次数越多结果

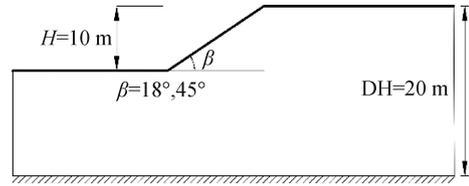
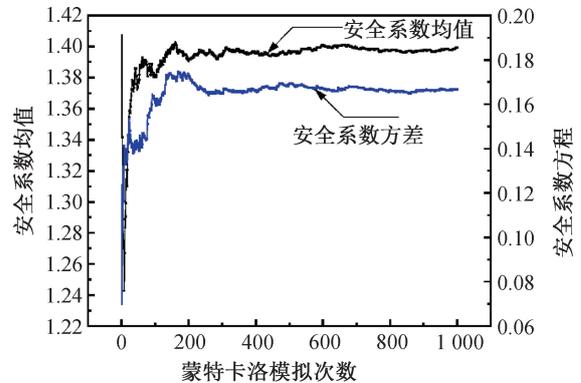


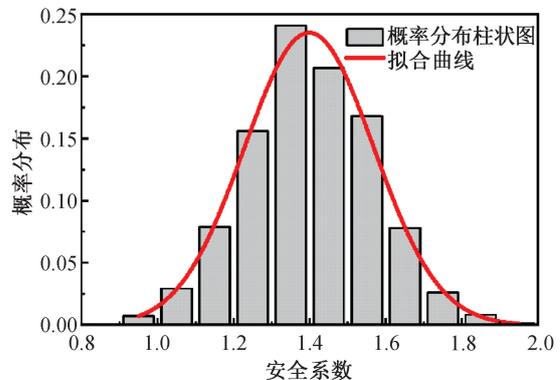
图3 边坡模型

Fig. 3 Slope model

越准。以工况 $k = 1 \text{ kPa/m}$, $COV = 0.3$ 和 $\beta = 18^\circ$ 为例, 研究边坡安全系数的随机响应, 结果如图 4 所示。从图 4(a) 中可以发现安全系数的均值和标准差在约第 400 次蒙特卡洛模拟时得到了收敛, 因此本文选取 1 000 次蒙特卡洛模拟进行参数敏感性分析^[11-12]。图 4(b) 为安全系数概率密度分布直方图, 可以看出对数正态分布曲线可以很好地将安全系数直方图拟合。因此边坡的稳定性可以用可靠度指标 β_s 量化边坡的稳定性^[13-14], 具体公式如下:



(a) 蒙特卡洛模拟次数对安全系数均值和方差的影响



(b) 安全系数概率分布

图4 蒙特卡洛模拟结果

Fig. 4 Results of Monte Carlo simulations

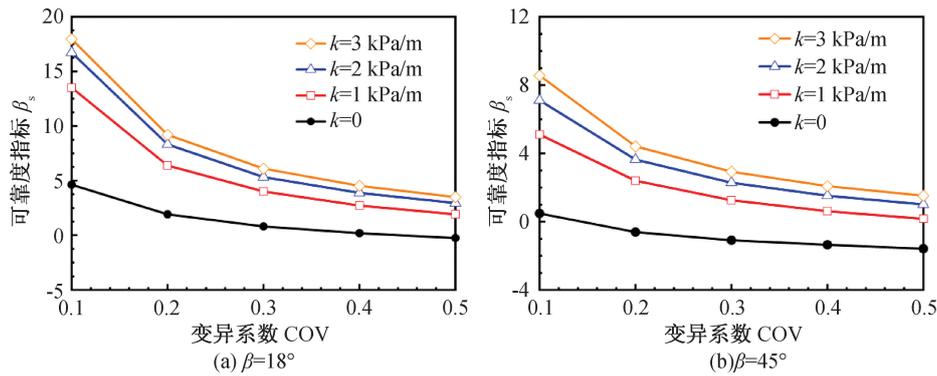


图 5 可靠度指标随变异系数变化规律

Fig. 5 Variation of reliability index with COV

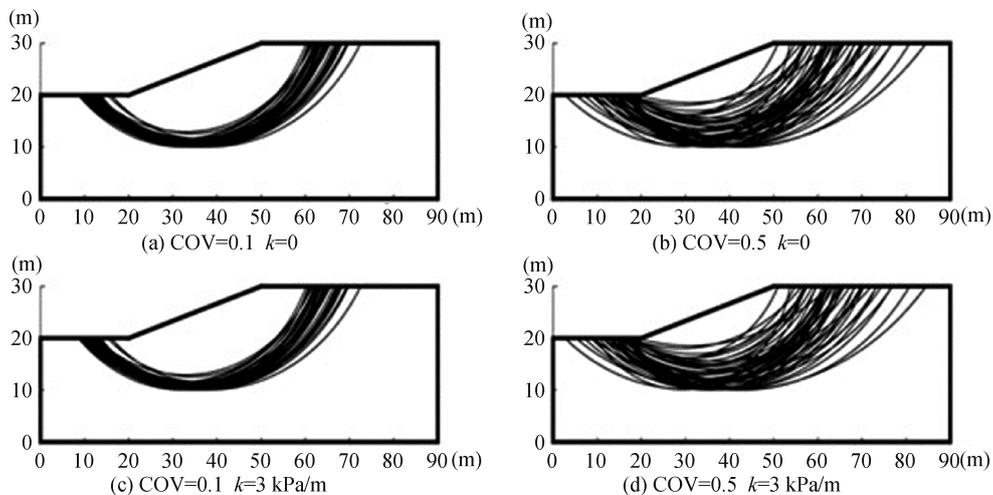


图 6 滑动面轨迹

Fig. 6 Trace of sliding surfaces

$$\beta_s = \frac{\mu_{FS} - 1}{\sigma_{FS}} \quad (5)$$

其中, μ_{FS} 和 σ_{FS} 分别为安全系数的均值和标准差。

图 5 给出了可靠度指标与非平稳程度系数和变异系数的变化规律。从图中可以看出,非平稳程度系数越大,土体的不排水抗剪强度也随之增大,边坡愈加稳定。随着变异系数的增加,可靠度指标逐渐减小。这是由于变异系数的增加使得边坡土体中会出现强度较小的区域,从而导致可靠度指标的降低。对比图 5(a)和图 5(b),可以发现坡角对可靠度指标的影响也是显著的,相同的随机参数输入下,坡角越大,可靠度指标越小。

图 6 为部分工况中前 50 次蒙特卡洛的典型滑动面。可以看出土体的空间变异性导致了失效模式类型的变化。特别是变异系数的变化使得边坡滑动面的深度、滑入点和滑出点的位置都出现了较大的离散,使得边坡的失效模式也发生了改变。

表 1 和表 2 给出了典型工况中不同失效模式的发生概率。如表 1 所示,坡度较缓时,没有坡趾破坏类型出现,滑动面类型主要为深部坡趾破坏和深部破坏,且深部破坏类型的发生概率始终占主导地位。非平稳程度 k 和变异系数 COV 对边坡失效模式的影响是相似的。非平稳程度 k 或变异系数 COV 的增加使得深部坡趾破坏模式逐渐增加而深部破坏模式减少。

当坡角较大时,如表 2 所示,坡趾破坏模式开始出现。随着非平稳程度 k 或变异系数 COV 的增加,坡趾破坏和深部坡趾破坏的发生概率增大,深部破坏的发生概率持续减少。与坡度 $\beta = 18^\circ$ 的情况相类似,在本文考虑的所有参数范围内,失效模式以深部破坏为主;但是,当变异系数 COV 较小时,深部坡趾破坏模式占比最大。例如当变异系数 COV 等于 0.1,非平稳程度 k 等于 3 kPa/m 时,深部坡趾破坏模式的发生概率为 62.2%,而坡趾破坏和深部破坏的发生概率分别为 28.1%和 9.7%。

表 1 不同失效模式发生概率($\beta=18^\circ$)Tab. 1 Probability of occurrence for different failure modes($\beta=18^\circ$)

COV	$k/(\text{kPa} \cdot \text{m}^{-1})$	坡趾 破坏/%	深部坡趾 破坏/%	深部 破坏/%
0.1	0	0	0.0	100.0
	1	0	2.5	97.5
	2	0	14.4	85.6
0.3	3	0	27.8	72.2
	0	0	3.5	96.5
	1	0	15.5	84.5
0.5	2	0	24.5	75.5
	3	0	31.3	68.7
	0	0	11.0	89.0
	1	0	22.6	77.4
	2	0	28.7	70.9
	3	0	34.4	65.4

表 2 不同失效模式发生概率($\beta=45^\circ$)Tab. 2 Probability of occurrence for different failure modes($\beta=45^\circ$)

COV	$k/(\text{kPa} \cdot \text{m}^{-1})$	坡趾 破坏/%	深部坡趾 破坏/%	深部 破坏/%
0.1	0	0.2	15.9	83.9
	1	7.8	56.1	36.1
	2	17.9	60.9	21.2
0.3	3	28.1	62.2	9.7
	0	6.6	13.9	79.5
	1	11.6	25.7	62.7
0.5	2	16.9	31.5	51.1
	3	20.8	33.7	45.5
	0	7.7	12.8	79.5
	1	12.5	21.6	65.9
	2	14.5	25.0	59.9
	3	16.3	28.2	55.5

3 结论

1) 边坡的可靠度指标随着黏土不排水抗剪强度的非平稳程度的增加而增加。变异系数的增加导致土体不排水抗剪强度分布变得离散,导致边坡可靠度指标减小。

2) 当坡度较小时,边坡失效模式以深部破坏为主。非平稳程度和变异系数的增加使得深部坡趾破坏模式发生概率占比上升,深部破坏模式占比下降。当坡角较大时,坡趾破坏模式才会出现。随着非平稳程度和变异系数的增加,坡趾破坏和深部坡趾破坏的发生概率增加,深部破坏模式的

发生概率降低。

参考文献:

- [1] 杨亮,刘辉,章荣军,等.基于非平稳随机场的水泥土堤坝边坡可靠度分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(5):78-86.
- [2] WU Z Y, SHI Q, GUO Q Q, et al. CST-based First Order Second Moment Method for Probabilistic Slope Stability Analysis [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 85 (5):51-58.
- [3] 傅方煜,郑小瑶,吕庆,等.基于响应面法的边坡稳定二阶可靠度分析[J].岩土力学,2014,35(12):3460-3466.
- [4] LI D Q, JIANG S H, CAO Z J, et al. A Multiple Response-Surface Method for Slope Reliability Analysis Considering Spatial Variability of Soil Properties [J]. Engineering Geology, 2014, 187:60-72.
- [5] 周罕,曹平,张科.基于响应面法和强度折减法的边坡可靠性计算研究[J].中国安全科学学报,2012,22(5):79-84.
- [6] KOPPULA S D. On Stability of Slopes in Clays with Linearly Increasing Strength [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21(3):577-581.
- [7] PHOON K K, KULHAWY F H. Characterization of Geotechnical Variability [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4):612-624.
- [8] SHU S, GAO Y F, WU Y X. Probabilistic Bearing Capacity Analysis of Spudcan Foundation in Soil with Linearly Increasing Mean Undrained Shear Strength [J]. Ocean Engineering, 2020, 204:106800.
- [9] CHEN W F. Limit Analysis and Soil Plasticity [M]. Elsevier, Amsterdam, 1975.
- [10] TAYLOR D W. Stability of Earth Slopes [J]. Journal of Boston Society of Civil Engineers, 1937, 24:197-246.
- [11] GRIFFITHS D V, FENTON G A. Probabilistic Slope Stability Analysis by Finite Elements [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130:507-518.
- [12] ZHU D, GRIFFITHS D V, FENTON G A. Worst-Case Spatial Correlation Length in Probabilistic Slope Stability Analysis [J]. Geotechnique, 2019, 69(1):85-88.
- [13] CHRISTIAN J T, LADD C C, BAECHER G B. Reliability Applied to Slope Stability Analysis [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(12):2180-2207.
- [14] EL-RAMLY H, MORGENSTERN N R. Probabilistic Stability Analysis of a Tailings Dyke on Presheared Clay-Shale [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40 (1):192-192.

(责任编辑 周雪梅)