文章编号: 1672 - 3317 (2023) 12 - 0125 - 07

坡高及坡比对渠道边坡可靠度的影响

朱磊^{1,2}, 高欣悦^{1,2}, 万愉快^{1,2*}

(1.宁夏大学, 银川 750021;

2.宁夏大学 宁夏回族自治区黄河水联网数字治水重点实验室, 银川 750021)

摘 要:【目的】探讨坡高和坡比对渠道边坡可靠度的影响,为渠道边坡的优化设计提供科学依据。【方法】利用 Karhunen-Loève(K-L)展开法建立土体参数的二维随机场模型,使用简化的 Bishop 法计算渠道边坡的安全系数, 通过 Monte Carlo 模拟渠道边坡的失效概率和可靠度指标,分析坡高和坡比对渠道边坡可靠度的影响。【结果】不考 虑和考虑土体参数的空间变异性时,可靠度指标均随坡比的增大而减小;不考虑土体参数的空间变异性时,可靠度 指标随坡高的增大而逐渐减小,但在粘聚力变异系数较大而内摩擦角变异系数较小时,可靠度指标呈现随坡高增大 而增大的特殊现象;考虑土体参数的空间变异性时,在粘聚力变异性较小而内摩擦角变异性较大时,可靠度指标随 坡高的增大而减小,其他情况均呈现随坡高的增大而增大的特殊现象。【结论】相对于降低坡高而言,采取减小坡 比的措施可以更好地保障边坡可靠度,降低渠道边坡工程风险。

关键词:渠道边坡;可靠度分析;坡高;坡比;极限平衡 中图分类号:TV91 文献标志码:A doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022633 OSID:

SID:

朱磊, 高欣悦, 万愉快. 坡高及坡比对渠道边坡可靠度的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 125-131. ZHU Lei, GAO Xinyue, WAN Yukuai. Influence of Slope Height and Slope Ratio on Reliability of Channel Slopes[J].

Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 125-131.

0 引 言

【研究意义】输水渠道在保障农业灌溉、水资 源调配方面发挥着巨大作用,渠道边坡的稳定性是 保障输水渠道安全运行的重要因素。受物质组成、 沉积历史、固结压力等因素的影响,土体参数具有 空间变异性^[1]。当土体参数存在空间变异性时,使 用安全系数评价边坡稳定性会导致边坡工程计算结 果与实际不符,增加边坡工程的安全隐患。边坡工 程引入可靠度理论,使用可靠度指标评价土体参数 空间变异条件下的边坡可靠程度。坡高和坡比是影 响边坡可靠度的重要因素,研究土体参数空间变异 条件下的坡高和坡比对渠道边坡可靠度的影响,可 为渠道边坡的优化设计和除险加固提供理论依据。

【研究进展】土体参数的空间模拟通常是基于随机场理论^[2-4]。以往研究将随机场理论与边坡稳定 性分析有限单元法和极限平衡法相结合,提出了边

收稿日期: 2022-11-13修回日期: 2023-08-04基金项目: 国家自然科学基金 (51879134); 宁夏重点研发项目 (引才专项) (2020BEB04004); 宁夏回族自治区重点研发计划项目 (2021BEG03023); 宁夏高等学校一流学科建设 (水利工国家自然科学基金程)资助项目 (NXYLXK2021A03)

通信作者:万愉快(1990-),男。博士,讲师,主要从事边坡工程研究。 E-mail: wanyukuai@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

坡可靠度分析的随机有限单元法(RFEM)^[3,5]和随 机极限平衡法(RLEM)^[2]。虽然 RFEM 具有不需 要对滑动面的大小和形状进行假定的优点,但其中 的强度折减过程需要逐步减小土体强度参数的数值, 最终使得土体达到极限平衡的状态,计算依然耗时 较长^[2]。因此,边坡可靠度分析随机极限平衡法 (RLEM)被广泛采用^[6-8]。目前,国内外边坡可靠 度的研究主要针对可靠度计算方法及土体参数的空 间变异性开展^[9-11],而关于坡高和坡比对边坡可靠度 的影响规律研究较少。陈鹏等^[12]采用 Rosenblueth 法 分析了几何参数变异条件下的边坡失效概率,指出 几何参数的不确定性是边坡可靠度分析中不可忽视 的重要因素。几何参数的观测精度高、误差小,其 不确定性对边坡可靠度分析结果的影响相对较小。 Christian 等^[13]计算了坡高为 6、12 m 和 23 m 的边坡 可靠度指标,发现可靠度指标随着坡高的增大而增 大,这与几何参数对边坡安全系数的影响规律不同。 为了进一步探讨几何参数对边坡可靠度的影响规律, 李政韬等^[14]基于极限平衡 Fellenius 法推导了可靠度 指标的解析表达式,分析了边坡几何参数、土体强 度参数及其变异性对边坡可靠度指标的影响规律, 发现在特定的参数条件下边坡可靠度指标会随坡高 的增大而提高。

【切入点】目前,国内外在围绕边坡可靠度方

作者简介:朱磊(1980-),男。博士,教授,主要从事土壤水分运动研究。E-mail: nxuzhulei@163.com

面的研究主要针对可靠度计算方法及土体参数的空间变异性开展,而对于坡高和坡比对边坡可靠度的影响规律研究甚少,土体参数空间变异条件下的坡高和坡比对渠道边坡可靠度的影响规律尚不明确。 【拟解决的关键问题】鉴于此,本研究基于 Karhunen-Loève(K-L)展开法生成二维随机场以模 拟土体参数的空间变异性,利用简化 Bishop 法计算 渠道边坡的安全系数,结合 Monte Carlo 模拟渠道边 坡的失效概率和可靠度指标,系统分析坡高和坡比 对渠道边坡可靠度的影响规律。本研究结果对于保障 边坡可靠度、降低渠道边坡工程风险具有重要意义。

1 随机场的生成

相比其他级数展开法,K-L 展开法在相同的精 度要求下,所需的展开项数较少,因此更适用于均 匀性质材料的模拟^[2]。本研究利用指数型随机场对 土体参数的空间变异性进行模拟。将渠道边坡的截 面划分成独立的网格,使用网格中心点的参数值来 代表网格的整体参数值,渠道边坡的一次随机场实 现见图 1。



图1 渠道边坡的一次随机场

Fig.1 Random field of channel slope

正态随机场可以利用均值 $\mu(x)$ 、方差 $\sigma(x)$ 和相关函数 $\rho(\Delta x, \Delta y)$ 进行定义。本研究选用指数型相关函数,如下:

$$\rho(\Delta x, \Delta y) = \exp\left\{-\left[\left(\frac{\Delta x}{L_h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{L_v}\right)^2\right]\right\}, \quad (1)$$

式中: Δx 为 2 个网格中心点的水平距离; Δy 为 2 个 网格中心点的垂直距离; L_h 为水平方向的相关长度; L_y 为垂直方向的相关长度。其中,相关长度可以反 映 2 个网格中心点之间的土体性质相关性。

采用以往研究^[1-2]广泛使用的 K-L 展开法对随机 场进行离散化处理。二维对数随机场的在空间上的 展开式为:

$$H(x,\theta) = \exp\left\{\mu(x) + \sum_{i=1}^{M} \sqrt{\lambda_i} \xi_i(\theta) \varphi_i(x)\right\}, x \in \Omega, \quad (2)$$

式中: $\xi_i(\theta)$ 为一系列服从平均值为 0、方差为 1 的随 机变量; θ 为随机特性参量; λ_i 和 $\varphi_i(x)$ 分别为协方差 矩阵的特征值和特征向量。

2 计算方法

Bishop 法假定滑动面为圆弧,忽略土体侧面切向作用力,通过整体力矩平衡求解安全系数,安全系数计算式如下:

$$F_{\rm s} = \frac{\sum \frac{1}{m_{\alpha i}} \left[(W_i - \mu_i b) \tan \varphi' + c' b \right]}{\sum W_i \sin \alpha_i} , \qquad (3)$$

其中:

$$m_{ai} = \cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi' \sin \alpha_i}{F_{\rm s}}, \qquad (4)$$

式中: φ'为土体的内摩擦角; c'为土体的黏聚力; W_i 为重力; μ_i为孔隙水压力; b 为土条宽度。

失效概率为安全系数<1发生的次数与总模拟次 数之比,计算式如下:

$$P_{\rm F} = \frac{N_{\rm f}}{N} \,, \tag{5}$$

式中: N_f为计算安全系数<1 发生的次数; N 为总模 拟次数。失效概率 P_F的计算流程如图 2 所示。



Fig.2 Canal slope reliability analysis

3 算例分析

3.1 程序验证

白桃等^{[11}将随机场理论与极限平衡 Morgenstern-Price 法相结合,使用算例 1~3 研究了土体参数空间 变异性与边坡安全系数和失效概率之间的关系。算 例 1~3 的几何参数(坡高和坡比)和土体参数(重 度 γ 、粘聚力c、粘聚力变异系数 Cov_c 、内摩擦角 φ 、 内摩擦角变异系数 Cov_{φ} 、水平相关长度 L_h 、竖直相 关长度 L_{ν})如表 1 所示。采用本研究所述方法对算 例 1~3 进行重新分析,安全系数和失效概率的计算 结果如表 2 所示。由表 2 可知,本文所得出的失效 概率及安全系数与白桃等^{[11}的研究结果十分接近, 安全系数和失效概率的最大相对误差分别为 1.6%和 2.0%,证明本研究方法和程序的准确性。

李政韬等^[14]选取 4 组边坡模型,计算其安全系 数和可靠度指标,分析了安全系数和可靠度指标随 坡高和坡比的变化规律。本研究选取其中 2 组算例 (组别 1 和组别 2)进行重新计算,以进一步验证 本文方法和程序的正确性。组别 1 和组别 2 的土体 参数及其空间变异性、边坡几何参数如表 3 所示。 组别 1 和组别 2 的水平和竖直方向的相关长度均为 +∞,使用本研究方法生成的随机场将保证土体参数 的空间均匀分布,这一设定和李政韬等^[14]的假定保 持一致。本研究计算结果和李政韬等^[14]的计算结果 对比如图 3 所示。本研究计算结果与李政韬等^[14]的 计算结果十分接近,安全系数和可靠度指标的平均 相对误差分别约为 1%和 2%,进一步证明了本研究 方法和程序的正确性。

Table 1Soil parameters of example 1~3									
算例 -	土体参数							边坡几何参数	
	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	c/kPa	$arphi$ $^{\circ}$	Cov_c	Cov_{φ}	L_h/m	L_{ν}/m	坡比	坡高 H/m
1	19.0	10.0	8.0	0.25	0	20	2	1:2.00	5
2	19.0	19.0	0.0	0.25	0	20	2	1:2.00	5
3	19.0	15.8	0.0	0.63	0	20	2	1:2.00	5

表1 算例 1~3 土体参数

表 2 算例 1~3 的安全系数和失效概率对比									
Table 2Comparisons of the safety factors and failure probability of example 1~3									
算例 —	白桃等[1]			本文	失效概率	平均安全系数			
	失效概率	平均安全系数	失效概率	平均安全系数	相对误差/%	相对误差/%			
1	0.074	1.15	0.073	1.159	1.4	0.8			
2	0.193	1.15	0.196	1.147	1.6	2.0			
3	0.074	1.39	0.074	1.39	0.0	0.0			

表3组别1和组别2的土体参数和几何参数



图 3 组别 1 和组别 2 安全系数和可靠度指标的对比

Fig.3 Comparisons of the safety factors and reliability index of group 1 and group 2

图 4 为算例 1 的失效概率 P_F 与 Monte Carlo 模 趋于收敛。为得到合理的结果,本研究通过运行 拟次数之间的关系。模拟次数为 10 000 时, P_F 值 10 000 次的 Monte Carlo 模拟获得边坡的失效概率。



number of simulations

3.2 坡高和坡比对边坡可靠度指标的影响规律

参考李政韬等^[14]使用的边坡模型设置边坡的土体强度参数和几何参数,如表 4 所示。总结国内外不同地域及不同试验条件下的结果发现,*Cov*_c取值

范围为 0.19~0.55, Cov_{φ} 的取值范围为 0.05~0.40^[15]。 参考 Cov_c 和 Cov_{φ} 的取值范围,本研究设置 Cov_c 和 Cov_{φ} 较小、 Cov_c 和 Cov_{φ} 适中、 Cov_c 和 Cov_{φ} 较大、 Cov_c 较大而 Cov_{φ} 较小、 Cov_c 较小而 Cov_{φ} 较大几个 情景,具体参数如表 4 所示。El-Ramly 等^[4]研究表 明, L_h 的取值范围为 10~40 m, L_v 的取值范围为 1~3 m。参考土体强度参数的相关长度,本研究设定 L_h 和 L_v 的取值分别为 20 m 和 2 m, K-L 展开法生成的 随机场示意如图 1 所示。此外,本研究还设置了 L_h 和 L_v 的取值为+∞的情况,即不考虑土体强度参数的 空间变异性。以上对 L_h 和 L_v 取值设定的目的是分析 不考虑和考虑土体强度参数的空间变异性时,坡高 和坡比对边坡可靠度指标的影响规律。使用本文所 述方法计算组别 3 和组别 4 的安全系数和可靠度指 标,结果如图 5 和图 6 所示。

表4组别3和组别4的土体参数和几何参数

		Table 4	Son para	neters and s	lope geometr	y of group :	s and group	4	
组别	土体参数							边坡几何参数	
	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	c/kPa	φ / °	Cov_c	Cov_{φ}	L_h/m	L_v/m	坡比	坡高 H/m
3	19.5	10	30	0.10	0.05	20	2		2~8 步长 0.5
				0.30	0.15			1:2.00	
4	19.5	20	30	0.50	0.25	$+\infty$	$\infty +$	1:1.75	
				0.50	0.05			1:1.50	
				0.05	0.25				

图 5 和图 6 分别为不考虑和考虑土体强度参数 空间变异性条件下,安全系数和可靠度指标随坡高 和坡比的变化规律。随着坡高和坡比的增大,安全 系数逐渐减小,而可靠度指标可能增大也可能减小。 坡高不变时,随着坡比的增大,安全系数逐渐减小, 可靠度指标整体呈逐渐减小的趋势。在不考虑土体 参数的空间变异性条件下,当坡比不变时,随着坡 高的增大,安全系数逐渐减小,可靠度指标整体呈



逐渐减小的趋势,但在 Cov_c 较大而 Cov_φ 较小 (Cov_c =0.50、Cov_φ =0.05)的条件下,可靠度指标 呈逐渐增大的趋势。在考虑土体参数的空间变异性 条件下,坡比不变时,随着坡高的增大,安全系数 逐渐减小,可靠度指标整体呈逐渐增大的趋势,但 在 Cov_c较小而 Cov_φ较大 (Cov_c =0.05、Cov_φ =0.25) 的条件下,可靠度指标呈逐渐减小的趋势。





Fig.5 The effects of the slope height on the reliability index and the safety factors $(L_h = +\infty, L_v = +\infty)$





(d) 组别2 Covc =0.30, Covo=0.15



Fig.6 The effects of the slope height on the reliability index and the safety factors $(L_h=20 \text{ m}, L_v=2 \text{ m})$

4 讨 论

坡高和坡比是影响渠道边坡安全系数和可靠度 指标的重要因素。实际工程中,可以通过改变坡高 和坡比来调控边坡的安全系数和可靠度指标。安全 系数只与土体的强度参数和边坡几何参数有关,其 不利变化会引起边坡稳定性降低、安全系数减小。 除上述因素外,边坡可靠度指标随坡高和坡比的变 化规律还与土体强度参数的空间变异性(变异系数 和相关长度)有关。在不考虑土体强度参数的空间 变异性条件下,当粘聚力变异性较小而内摩擦角变 异性较大时,可靠度指标随坡高的增大而增大,这 与李政韬等[14]的研究结论一致。考虑土体强度参数 的空间变异性时,在粘聚力变异性较小且内摩擦角 变异性较大时,可靠度指标随坡高的增大而减小, 其他情况均随坡高的增大而增大,这与不考虑土体 强度参数空间变异性所得出的结论不同。在边坡可 靠度分析中,不考虑和考虑土体强度参数空间变异 性时,可靠度指标可能呈现完全不同的变化规律。 受物质组成、沉积历史、固结压力等因素的影响,

土体强度参数具有空间变异性^[1-2],边坡可靠度分析 中应考虑土体强度参数的空间变异性,否则可能造 成工程计算结果与实际不符,使边坡工程存在较大 的安全隐患。实际工程中,虽然降低坡高和减小坡 比均可提高边坡的安全系数,但可靠度指标可能会 出现随坡高的减小而减小的特殊现象。与降低坡高 相比,减小坡比更有利于提高可靠度指标,降低边 坡工程的安全风险。

5 结 论

 1)不考虑土体参数的空间变异性时,安全系数 随坡高的增大而逐渐减小;在粘聚力变异系数较大 而内摩擦角变异系数较小时,可靠度指标随坡高的 增大而增大。

2)考虑土体参数的空间变异性时,安全系数 随坡高的增大而逐渐减小;在粘聚力变异性较小、 内摩擦角变异性较大时,可靠度指标随坡高的增大 而减小。

3) 对于边坡工程,减小坡比不仅可提高边坡安

全系数,还可提高边坡的可靠度指标;与降低坡高 相比,减小坡比有利于保障边坡可靠度,降低边坡 工程的潜在安全风险。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 白桃,黄晓明,李昶.考虑土体参数空间变异性的边坡稳定性研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(12): 2 221-2 226.
 BAI Tao, HUANG Xiaoming, LI Chang. Slope stability analysis considering spatial variability of soil properties[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(12): 2 221-2 226.
- [2] CHO S E. Probabilistic assessment of slope stability that considers the spatial variability of soil properties[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(7): 975-984.
- [3] GRIFFITHS D V, FENTON G A. Probabilistic slope stability analysis by finite elements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(5): 507-518.
- [4] EL-RAMLY H, MORGENSTERN N R, CRUDEN D M. Probabilistic slope stability analysis for practice[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3): 665-683.
- [5] GRIFFITHS D V, HUANG J S, FENTON G A. Influence of spatial variability on slope reliability using 2-D random fields[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(10): 1 367-1 378.
- [6] JAVANKHOSHDEL S, CAMI B, CHENARI R J, et al. Probabilistic analysis of slopes with linearly increasing undrained shear strength using RLEM approach[J]. Transportation Infrastructure Geotechnology, 2021, 8(1): 114-141.
- [7] LIU Hui, ZHENG Junjie, ZHANG Rongjun, et al. Probabilistic stability analysis of reinforced soil slope with non-circular RLEM[J]. Geosynthetics International, 2021, 30(4): 432-448.

- [8] IZADI Ardavan, CHENARI Reza Jamshidi, CAMI Brigid, et al. Full and quasi-stochastic slope stability analyses using random limit equilibrium method (RLEM)[C]. Geo-Congress (ASCE), 2020: 667-676.
- [9] JIANG S H, HUANG J S, GRIFFITHS D V, et al. Advances in reliability and risk analyses of slopes in spatially variable soils: A stateof-the-art review[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 141: 104 498.
- [10] WANG Bin, LIU Leilei, LI Yuehua, et al. Reliability analysis of slopes considering spatial variability of soil properties based on efficiently identified representative slip surfaces[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(3): 642-655.
- [11] LIU Leilei, DENG Zhiping, ZHANG Shaohe, et al. Simplified framework for system reliability analysis of slopes in spatially variable soils[J]. Engineering Geology, 2018, 239: 330-343.
- [12] 陈鹏, 徐博侯. 基于因素敏感性的边坡稳定可靠度分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(4): 42-48.
 CHEN Peng, XU Bohou. Reliability analysis of slope stability based on factors sensitivity[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(4): 42-48.
- [13] CHRISTIAN John T, LADD Charles C, BAECHER Gregory B. Reliability applied to slope stability analysis[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(12): 2 180-2 207.
- [14] 李政韬,罗强,蒋良潍,等.几何参数对边坡稳定可靠度影响规律分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(7): 1 748-1 755.
 LI Zhengtao, LUO Qiang, JIANG Liangwei, et al. Influence of slope geometry on slope reliability evaluation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(7): 1 748-1 755.
- [15] 吴兴正,蒋良潍,罗强,等. 路堤边坡稳定可靠度计算中的模型不确 定性分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 665-672.
 WU Xingzheng, JIANG Liangwei, LUO Qiang, et al. Analysis of model uncertainty for stability reliability of embankment slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 665-672.

Influence of Slope Height and Slope Ratio on Reliability of Channel Slopes

ZHU Lei^{1,2}, GAO Xinyue^{1,2}, WAN Yukuai^{1,2*}

(1. Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Key Laboratory of the Internet of Water and Digittal Water Governance of the Yellow River, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Background] Slope height and slope ratio are the most important design parameters affecting slope stability. This paper investigates their combined impact on reliability of channel slopes in attempt to help optimize design and remediation of such slopes. [Method] The spatial variation of soil cohesion was calculated using the Karhunen-Loève (K-L) expansion method. With spatial variation of soil cohesion considered, the safety factor was calculated using the simplified Bishop method. The failing probability of the slope was calculated by the Monte Carlo simulation, from which we analyzed the influence of slope height and ratio on slope reliability. [Result] The reliability index gradually decreased with the increase in slope ratio. Without considering spatial variability of the soil strength parameters, the reliability index gradually decreased with the increase in slope height. When the coefficient of variation of the cohesion was large and the coefficient of variation of the internal friction angle was small, the reliability index increased with the increase in slope height. Considering spatial variability of soil mechanical parameters, the reliability of the internal friction angle was large. [Conclusion] In comparison to reducing slope height in exchange for slope stability, reducing the slope ratio was more effective in improving slope reliability and minimizing engineering risks.

Key words: channel slope; reliability analysis; slope height; slope ratio; limit equilibrium

责任编辑:韩洋