

陕北地区黄土自然高边坡与填方边坡可靠度分析

王雪艳¹, 袁一力², 张珊珊^{2,3}

(1. 西安工程大学 城市规划与市政工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 德州市房屋建设综合开发集团有限公司, 山东 德州 253000)

摘要: 针对陕北某高填方工程典型黄土 Q_2 、 Q_3 的抗剪强度指标分布概率模型及变异性进行了统计分析, 并将结果应用于黄土自然高边坡和填方边坡可靠度分析中。对比了可靠度分析与有限元分析的边坡稳定性计算结果, 并初步探讨了基于可靠度分析法的黄土填方边坡坡率优化办法。研究结果表明: Q_2 和 Q_3 的 c 、 φ 值均接受正态分布和对数正态分布, 且 c 值的变异性较大, φ 值的变异性较小; φ 值变异性对黄土自然边坡的可靠性指数影响程度普遍大于 c 值; 相对应地, 对于填方边坡而言 c 值变异性的影响更大, 这可能与土体颗粒得重新排列与结构重新分布有关; 通过方法的对比分析, 验证了可靠度分析方法的准确性与适用性, 在缺乏模型试验及监测数据的支撑下, 可用于黄土边坡的可靠度分析及坡率优化; 若要求填方边坡失效概率小于 10%, 则坡高与最小坡度系数的关系式为 $y=0.008\ 2x+1.422$ 。

关键词: 黄土边坡; 可靠度分析; c 、 φ 变异性; 坡率优化

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)05-0665-08

Reliability analysis of natural high loess slope and backfill slope in Northern Shaanxi area

WANG Xueyan¹, YUAN Yili², ZHANG Shanshan^{2,3}

(1. School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. Dezhou Housing Construction Comprehensive Development Group Co., Ltd., Shandong Dezhou 253000, China)

Abstract: The distribution probability model and variability of shear strength index of typical loess Q_2 and Q_3 in a high fill project in northern Shaanxi were statistically analyzed, and the results were applied to the reliability analysis of natural high loess slope and backfill slope. The slope stability calculation results of reliability analysis and finite element analysis were compared, and the optimization method of loess backfill slope ratio was preliminarily discussed based on reliability analysis. The results show that both normal and lognormal distribution is capable of describing the mechanical behavior c and φ of Q_2 and Q_3 loess, and the cohesion c tends to have a larger variability than φ . The effect of φ value variability on the reliability index of loess natural slope is generally greater than that of c value. Correspondingly, the variability of c value has a greater impact on the fill slope, which may be related to the rearrangement of soil particles and the redistribution of soil structure. The accuracy and applicability of the reliability analysis method are verified by comparative analysis. The method can be used for reliability analysis and slope rate optimization of loess slope without support of model test and monitoring data. If the failure probability of fill slope is required to be less than 10%, the relational expression between slope height and minimum slope coefficient is $y=0.008\ 2x+1.422$

Key words: loess slope; reliability analysis; variability of c 、 φ ; slope rate optimization

对于边坡工程的可靠性而言, 土体的强度参数的概率分布模型与模型参数的选取与确定起着决定性作用^[1-4]。随着西部地区“一带一路”政策的深入实施, 机场、新城区、高速公路等大型工程

在西北湿陷性黄土地区建设速度加快, 黄土边坡工程大量涌现。然而, 实际工程中因缺乏工程经验及设计依据而导致黄土滑坡事故频发^[5-8], 黄土边坡各方面的安全稳定问题亦在逐增^[9-13]。边坡可

收稿日期: 2021-07-13

修改稿日期: 2021-09-16

基金项目: 陕西省重点研发计划基金资助项目(2021SF-523); 陕西省教育厅科研计划基金资助项目(19JK0381)

第一作者: 王雪艳(1984—), 女, 讲师, 博士, 主要从事土木工程建设与管理研究。E-mail: wxy19860412@163.com

靠度分析由于考虑了强度参数的随机性与变异性,其分析结果往往比稳定性分析更能全面反映边坡的安全性程度。因此,进行黄土边坡稳定性的可靠度分析显得尤为重要。

土体抗剪强度指标的分布概率模型和变异性对可靠度的计算结果影响较大。诸多专家学者研究发现,土体抗剪强度指标均可接受正态分布和对数正态分布^{[1][14-15]}。然而,岩石抗剪强度指标的概率密度分布形式依据不同屈服准则而有所差异, c 、 φ 值并不严格服从正态分布, c 值均呈正偏态分布^[16]。Monte-Carlo 作为岩土工程可靠性分析的主要方法近年来得到了广泛的应用。K. Kiyonobu 等^[17]结合了极限平衡法与 RFEM 方法,并借助 Monte-Carlo 法进行了边坡可靠度的分析。李典庆等^[18]采用基于应力的有限元边坡稳定性分析方法,研究了抗剪强度参数的空间变异性对二维边坡 CSS 分布的影响。郑亚楠等^[19]选取临县—离石公路沿线 9 个工点的实验数据,统计了该区 c 、 φ 值的变异系数,并对其变异性进行了分析。将 c 、 φ 值变异系数进行组合,进行了 Monte-Carlo 模拟。蒋水华等^[20]提出了一种基于蒙特卡罗模拟评估空间变化土壤中边坡稳定性的系统失效概率 $P-f$ 、 $P-s$ 的方法,该方法利用代表性滑动面(即主要的边坡破坏模式)和多个随机响应面进行边坡系统可靠性分析。宫凤强等将正态信息扩散原理运用到岩土抗剪强度指标概率分布函数的推断,其计算误差远小于正态分布和对数正态分布,但其应用尚不广泛^[21]。Cho^[22]基于土体抗剪强度指标的变异性对边坡稳定性进行了概率分析。上述研究成果为黄土自然高边坡和填方边坡的可靠性研究奠定了良好的基础。为研究可靠度分析方法在湿陷性黄土高边坡和填方边坡稳定性分析中的适用性,本文依托陕北某高填方工程,见图 1,统计分析了 Q_2 、 Q_3 黄土 c 、 φ 值的分布概率模型及变异性,并将结果应用于湿陷性黄土自然高边坡和填方边坡可靠度分析中。对比可靠度分析法与有限元强度折减法得到的安全系数,并研究了填方边坡的坡率优化问题。

1 坡型及土体抗剪强度指标概率模型

1.1 边坡类型

依据陕北某高填方工程地质勘察报告及工程设计图选取典型的 7 个自然边坡和 5 种填方边坡作为研究对象,位置见图 1。该地区自然边坡主要由

Q_3 和 Q_2 地层组成; Q_2 地层构成黄土梁峁主体; Q_3 地层遍布于黄土梁峁顶部。填方边坡的黄土填料主要来自黄土梁峁,挖填线以上各土层,以 Q_3 、 Q_2 黄土为主。各边坡坡型见图 2 和表 1。

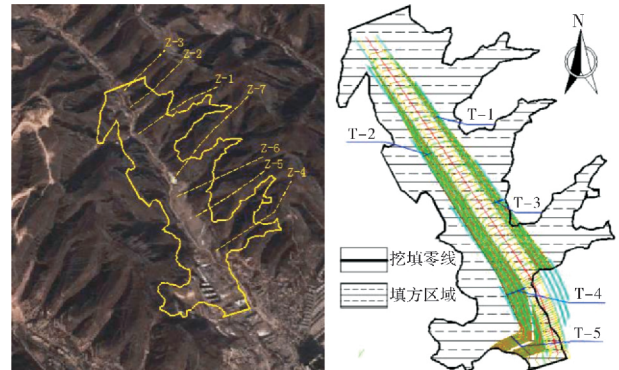


图 1 工程分布图

Fig. 1 Engineering distribution

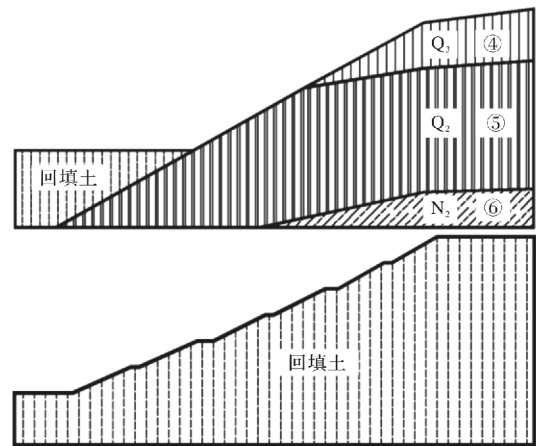


图 2 地层剖面图

Fig. 2 Geological section

1.2 土样来源及土样抗剪强度指标的性质

本文 Q_2 、 Q_3 原状黄土土样取自延安地区典型的湿陷性黄土分布区,各地层土体抗剪强度指标基本参数如表 2 所示。

1.3 Q_2 、 Q_3 原状黄土 c 、 φ 值分布概率模型

统计分析了陕北晋西地区三个典型工程的 Q_2 、 Q_3 黄土的 c 、 φ 值,其数据分布直方图及概率密度曲线如图 3 所示。利用 K-S 法对数据进行了分布假设检验,检验结果见表 3。其中, D_{max} 为样本观察值的经验分布函数与理论分布函数相减的最大绝对值,如果 D_{max} 小于可接受的临界值 $D_{n\alpha}$ (其中: α 为显著性水平; n 为样本数据个数),则认为该样本数据符合假定的分布概型,反制则假设不成立,拒绝假定的分布概型。本文的检验结果表明: Q_2 和 Q_3 的 c 、 φ 值均接受正态分布和对数正态分布。

表 1 黄土边坡坡型

Tab. 1 Parameters of loess slopes

边坡类型	自然边坡							填方边坡				
剖面	Z-1	Z-2	Z-3	Z-4	Z-5	Z-6	Z-7	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
坡高/m	32	46	57	77	100	110	119	20	32	40	48	56
坡度/(°)	26.6	27	27	24.4	21	18.5	20.5	23	23	23	23	23

表 2 土体抗剪强度指标的参数表

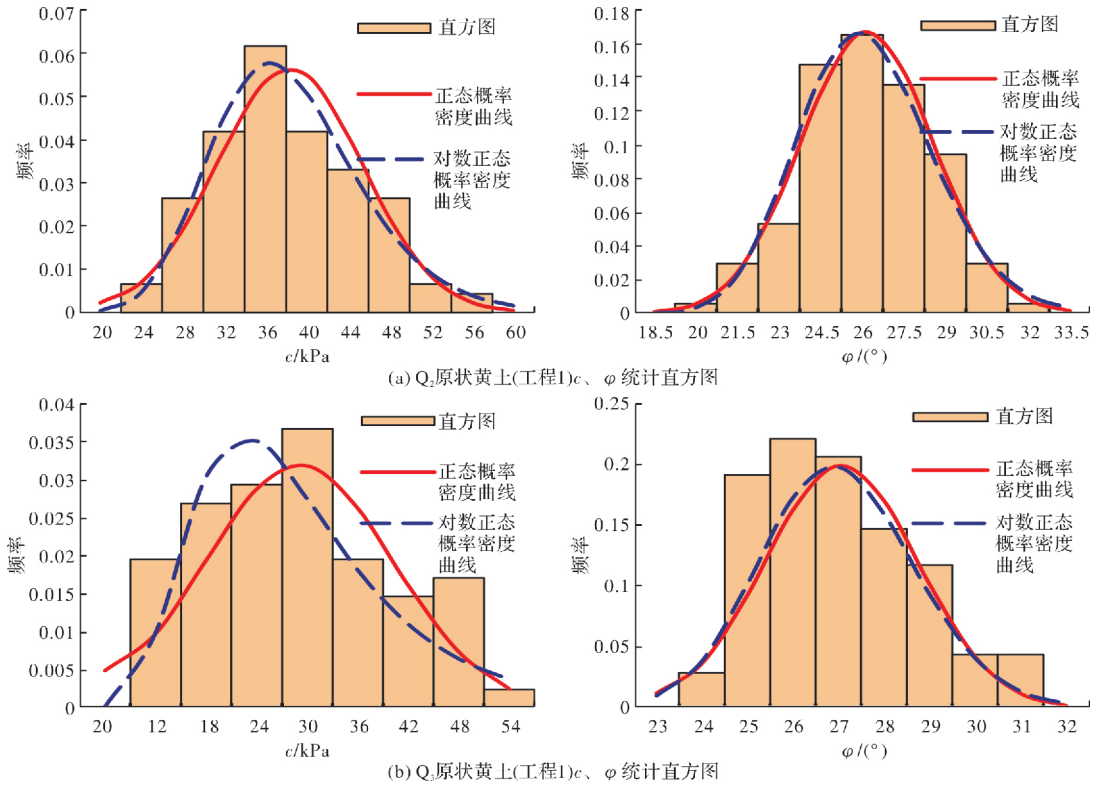
Tab. 2 Statistical table of parameters of loess shear strength index

指标	地层	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数	频数
黏聚力 c/kPa	Q_3 ④	43	7	22.8	8.79	0.39	73
	Q_2 ⑤	49	21	35.7	6.62	0.19	116
	N_2 ⑥	49	38	42.2	3.92	0.09	6
	回填土	32	16	23.3	5.5	0.2	7
内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	Q_3 ④	29.3	23.5	26.4	1.49	0.06	73
	Q_2 ⑤	29.9	20.6	25.5	2.11	0.08	116
	N_2 ⑥	24.3	20.3	22.5	1.56	0.07	6
	回填土	29.3	25.6	27.1	1.3	0.05	7

表 3 分布假设检验结果

Tab. 3 Results of distribution hypothesis test

地层	图号	检验参数	验证结果				可接受的临界值 $/D_n^c(\alpha=0.05)$
			正态分布		对数正态分布		
			结果	D_{\max}	结果	D_{\max}	
Q_2	3a	c 值	✓	0.069	✓	0.080	0.127 9
		φ 值	✓	0.071	✓	0.070	
	3b	c 值	✓	0.097	✓	0.092	0.164 9
		φ 值	✓	0.104	✓	0.107	
Q_3	3c	c 值	✓	0.084	✓	0.053	0.155 0
		φ 值	✓	0.100	✓	0.096	
	3d	c 值	✓	0.102	✓	0.113	0.181 7
		φ 值	✓	0.076	✓	0.060	



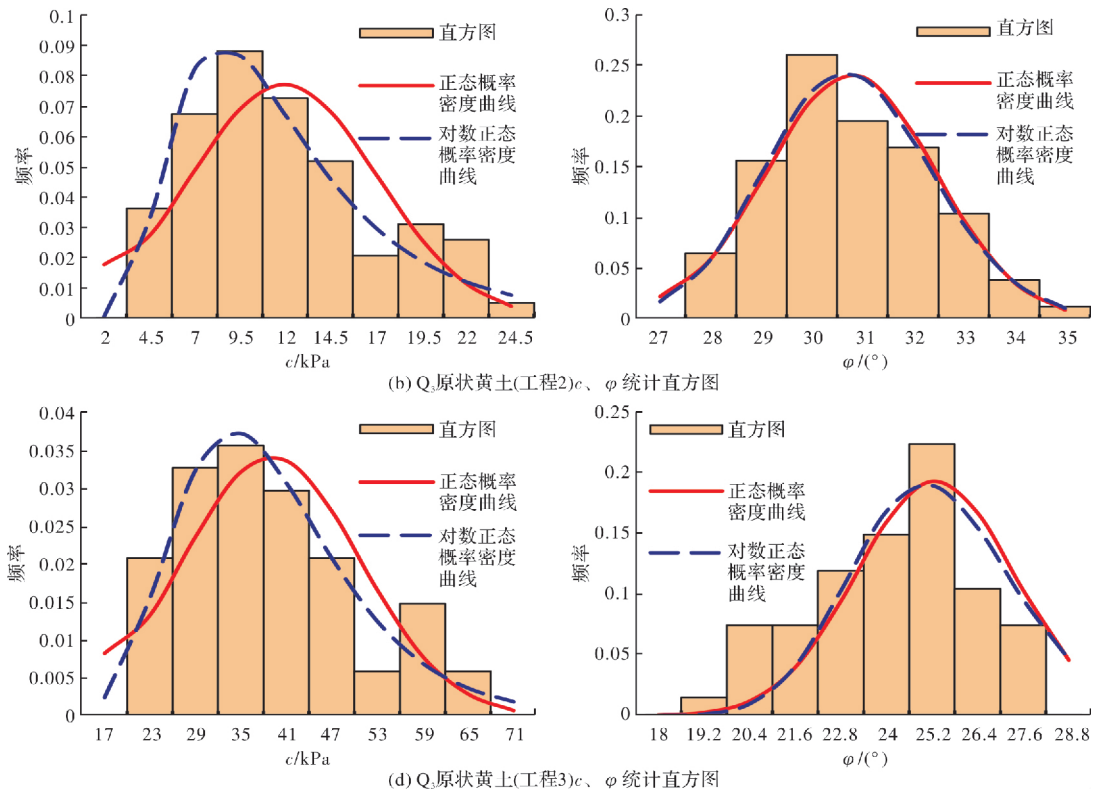


图 3 c 、 φ 值分布

Fig. 3 Distribution of c 、 φ value

2 c 、 φ 变异性分析

为确定黄土强度参数 c 、 φ 的变异性, 将变异系数为分析对象进行了研究. 由于分析数据同时包含了 CD、CU、UU 三种直剪试验, 同时不同地层土体的试验数量也有差异, 因而本文通过在计算变异系数时采取了加权平均法处理. 分析结果如图 4 所示, 共 12 组数据: 其中黏聚力的变异系数(COV_c) 在 0.09~0.49 区间内变化, 具有较高的变异性, 均值 0.25, 大于 0.35、0.25、0.1 的数据占比分别为 30%、38%、91%, 数据离散性大; 内摩擦角的变异系数(COV_φ) 在 0.04~0.16 区间内变化, 具有较低的变异性, 均值 0.08, 大于 0.1、0.08、0.05 的数据占比分别为 10%、58%、96%, 离散性较小. 黄土抗剪强度指标 c 、 φ 的建议标准值分别为 0.3、0.1. 考虑其工程中变异系数范围及规范建议值, 下文模拟分析中的 COV_c 、 COV_φ 取值见表 4.

表 4 c 、 φ 值的变异系数组合

Tab. 4 Variation coefficient combination of c 、 φ value

组合序号	COV_c	COV_φ
组合 1	0.1	0.1
组合 2	0.3	0.1
组合 3	0.5	0.1
组合 4	0.6	0.1
组合 5	0.3	0.05
组合 6	0.3	0.15
组合 7	0.3	0.2

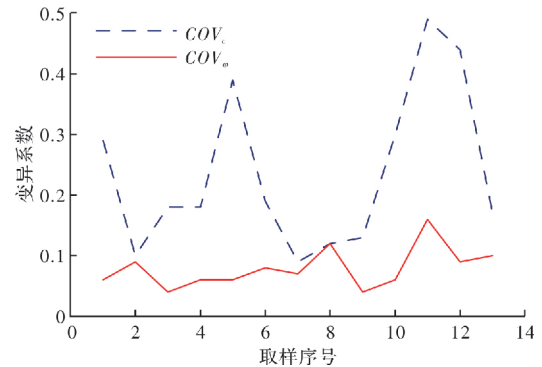


图 4 c 、 φ 值的变异系数

Fig. 4 Variation coefficient of c 、 φ value

3 黄土边坡可靠度分析

3.1 可靠度理论

从 20 世纪 70 年代开始, 边坡工程领域越来越多地采用可靠性理论进行安全性评价分析, 近年来, 可靠性理论在边坡可靠性评价和风险分析中的应用取得重大的进展^[23].

边坡可靠度分析往往以失效概率 P_f 或可靠指标 β 作为评价指标. 失效概率 P_f 和可靠度 P_r 互补, 它们之间具有如下的关系:

$$P_r + P_f = 1 \quad (1)$$

由于边坡稳定性受多种因素(状态变量)的控制, 设状态变量为 X , 抗力为 R , 荷载效应为 S , 用状态变量建立边坡稳定性的状态函数:

$$Z=R(X)-S(X)=g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2)$$

$g(X)$ 为状态变量 X 的函数,代表了边坡的稳定性状态,其中 X 代表了边坡系统的主要结构与环境要素,具有随机性和不确定性.若令状态函数 $Z=0$,可得到极限状态方程:

$$Z=R(X)-S(X)=g(X_1, X_2, \dots, X_n)=0 \quad (3)$$

公式(3)在 n 维空间代表的曲面称之为极限状态曲面,可将空间划分为稳定($Z>0$)、破坏($Z<0$)两个区域^[23].如果 $f_R(r)$ 和 $f_S(s)$ 分别为 R 和 S 的概率密度函数,且 R 和 S 相互独立,则

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} f_S(s) \left[\int_s^{+\infty} f_R(r) dr \right] ds \quad (4)$$

式(4)往往无法显式表达,因而,通常采用 Monte-Carlo 法、一次二阶矩法、JC 法、响应面法等简介获取结果.本文采用 GeoStudio 软件中的 Monte-Carlo 法求解边坡安全系数,并据此得到边坡失效概率 P_f 及可靠指标 β .其中可靠性指数 β 公式如下.

$$\beta = (\mu - 1) / \sigma \quad (5)$$

式中: μ 是安全系数的平均值, σ 是安全系数的标准差.

3.2 计算参数及分布概率模型的选择

进行边坡可靠度计算时,需要提供3个土性参数,即天然重度 γ 、粘聚力 c 和内摩擦角 φ .土体抗剪强度指标 c 、 φ 值对计算结果影响最大,而天然重度 γ 的变异性往往较小因此,只考虑粘聚力 c 和内摩擦角 φ 的变异性对边坡可靠度的影响.由前述分析结果可知, c 、 φ 值均接受正态分布和对数正态分布,考虑到正态分布的优良性质,可靠度分析中优先选用正态分布.

3.3 c 、 φ 变异性对边坡可靠性的影响

为研究 c 、 φ 变异性对湿陷性黄土边坡可靠性的影响,以陕北某高填方工程7个典型自然边坡和5个填方边坡(边坡高度和坡度见表1)为背景建立模型,分析了不同变异系数组合下边坡的可靠性指数 β (失效概率均为0),将计算结果与坡高变化的趋势绘制成曲线,见图5和图6.

如图5所示为按表4不同变异系数组合下的分析结果,7种情况所得的可靠性指数结果范围为2.272~7.914,随坡高的增加呈倒“S”型变化.对比 c 、 φ 两种情况可看出: φ 值变异性对湿陷性黄土自然边坡的可靠性指数影响程度普遍大于 c 值.由图5(a)可知,固定 COV_φ 值改变 COV_c 值时, COV_c 对边坡可靠性的影响呈现出随坡高逐渐减小的趋势,且以坡高77 m为分解呈现出了较为明显

的区别.由图5(b)可知,固定 COV_c 值改变 COV_φ 值时, COV_φ 对边坡可靠性的影响呈现出随着坡高的增加先降低后升高的趋势,46~77 m 区间呈现出较低的影响,而两侧则影响较大.

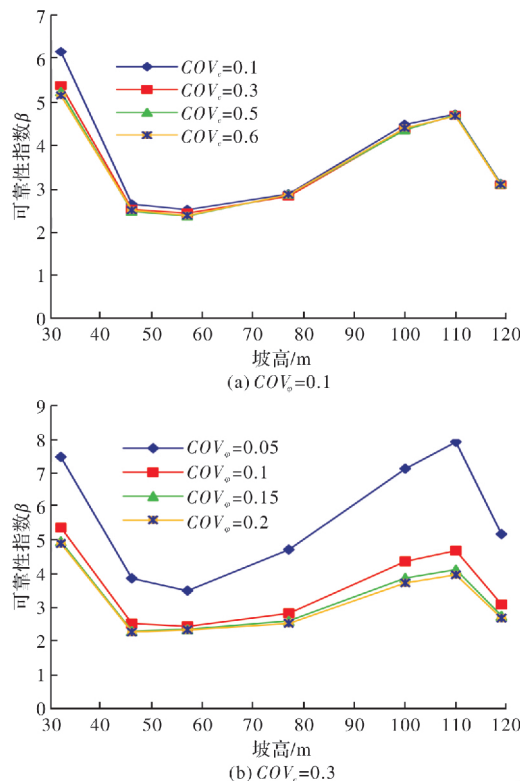


图5 不同高度自然边坡的可靠性指数

Fig. 5 Reliability index of natural slope with different heights

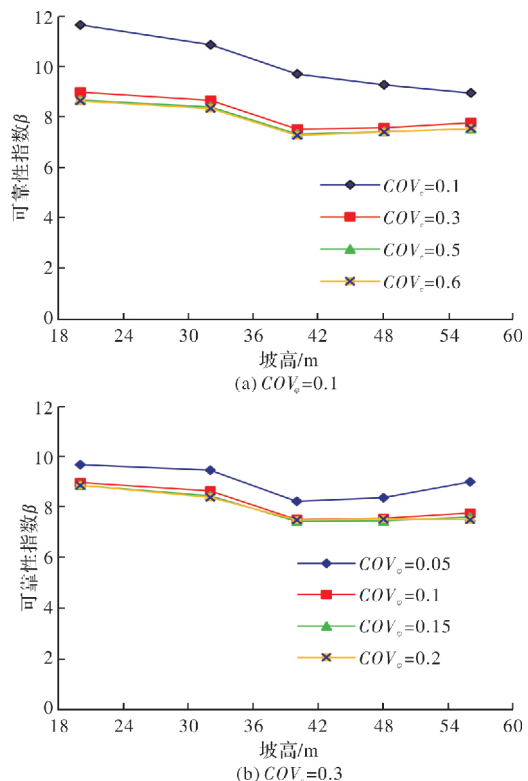


图6 不同高度填方边坡的可靠性指数

Fig. 6 Reliability index of fill slope with different heights

由图6可知,不同变异系数组合下5个边坡的可靠性指数在7.261~11.615之间,可靠性指数随坡高的增加整体呈下降趋势。对比 c 、 φ 两种情况可看出:固定 COV_φ 值改变 COV_c 值时, COV_c 对低坡的可靠性指数的影响较大;当 COV_c 值相同, COV_φ 值不同时, COV_φ 对高坡的可靠性指数的影响较大; c 值变异性对湿陷性黄土填方边坡的可靠性指数影响程度普遍大于 φ 值,与自然边坡情况相反,这可能与土体颗粒得重新排列与结构重新分布有关。

4 可靠度分析法与稳定性分析法的结果分析

有限元强度折减法通过安全系数判断边坡稳定性。其基本原理为,将边坡强度参数以同一比率 F_r 同步折减, F_r 由大到小逐渐降低,并在参数变化过程中不断代入模型进行试算,直至边坡土体强度减小至极限状态,边坡发生滑移失稳,此时对应的强度折减系数 F_r 就是边坡的最小安全系数 F_s 。经过折减后的抗剪强度参数 c_m 和 φ_m 可分别表达为

$$c_m = c/F_r \quad (6)$$

$$\varphi_m = \arctan(\tan\varphi/F_r) \quad (7)$$

式中: c 和 φ 是土体所能提供的抗剪强度; c_m 和 φ_m 是土体实际发挥的抗剪强度; F_r 是强度折减系数。

4.1 对比分析最大可能滑移面

运用可靠度分析法和有限元强度折减法计算填方边坡在天然状态、饱和状态下的安全系数,自然边坡与填方边坡计算模型的最大可能滑移面如图7。结果表明:两种方法计算出的同一个模型边坡的最大可能滑移面基本一致。

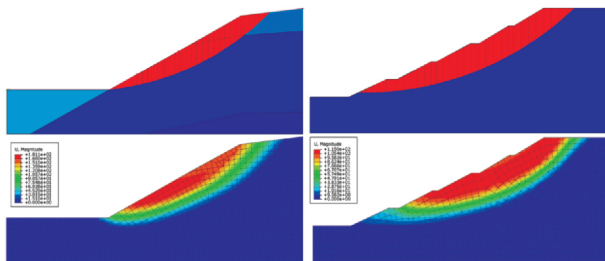


图7 模型边坡滑移面

Fig. 7 Slip surface of model slope

4.2 对比分析坡高与安全系数的相关性结果

边坡高度与安全系数具有一定的相关性,其函数关系见图8。由图8可知,安全系数随边坡高度线性减小;天然状态下,可靠度分析结果中坡

高与安全系数的相关性更大;饱和状态下,有限元分析法的计算结果中坡高与安全系数的相关性更大;两种方法计算出的安全系数的差值仅在0~0.046之间,差距很小。

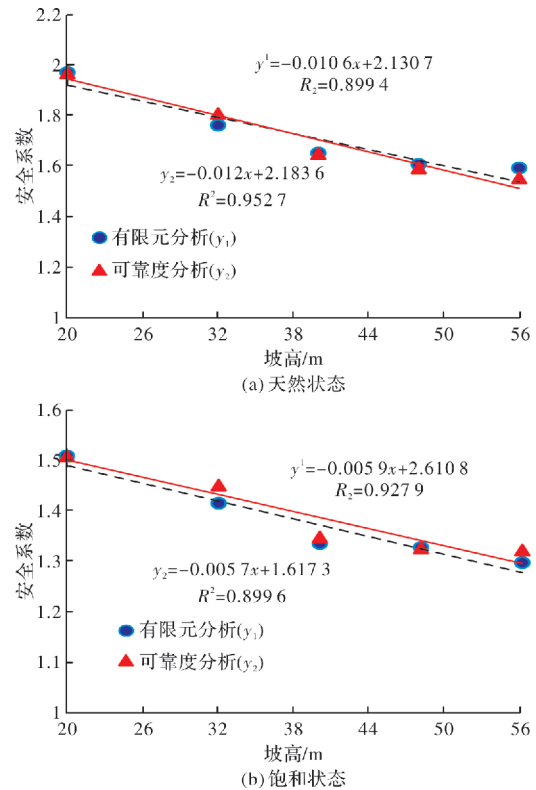


图8 边坡高度与安全系数的关系曲线

Fig. 8 Relation curve of slope height and safety factor

两种方法的结果分析表明:可靠度分析法与有限元法的分析结果具有较高的一致性,增加了可靠度分析法的可信度。

5 填方边坡的坡率优化

边坡的坡率是边坡稳定的重要影响因素之一,同时也对施工过程与工程造价产生一定的影响。因此,工程设计如何考虑选择合理的边坡坡率显得尤为重要。

边坡坡率指边坡垂直高度与坡面水平方向上的投影长度之比,按1:m的形式表示,其中,m为坡度系数。根据本文的模拟结果,5个典型填方边坡断面在坡比为1:2.35(即坡度23°)的失效概率均为0,表明边坡是稳定的,因此,基于失效概率对边坡坡比进行尝试性优化。选择坡高为56 m、48 m、40 m和32 m的边坡进行试算,当 $COV_c = 0.2$, $COV_\varphi = 0.1$ 时,四种边坡在不同坡比下的边坡失效概率如图9所示。

由图9可知:坡比相同时,填方边坡的失效概率随坡高的增加而增大;坡比等于1:2时,四种

填方边坡的失效概率几乎均为0;坡比等于1:1.9时,四种填方边坡的失效概率均小于8.65%;坡比等于1:1.85时,坡高为40 m和32 m的填方边坡的失效概率均小于2.1%;坡比等于1:1.8时,坡高为40 m、32 m的填方边坡的失效概率均小于0.84%。因此,填方边坡坡高小于40 m时,坡比可设计成1:8;坡高大于40 m、小于56 m时,坡比可设计成1:1.9;坡高大于56 m时,设计时应小于等于1:2的范围内考虑坡比。

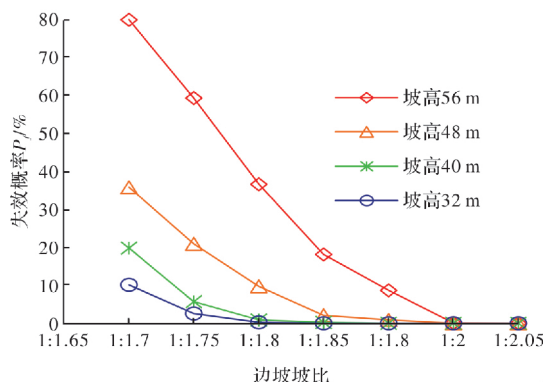


图9 不同坡比下边坡失效概率

Fig. 9 Probability of failure of different slope ratio

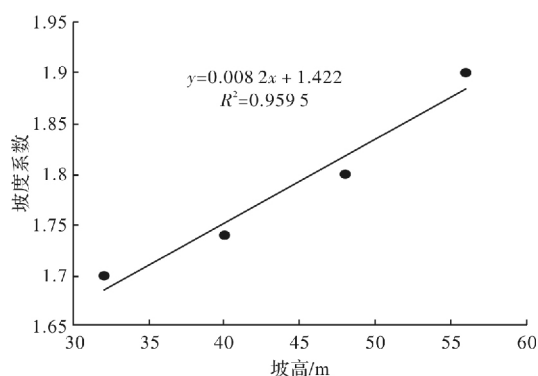


图10 不同坡高与最小坡比的关系($P_f < 10\%$)

Fig. 10 Relationship between slope height and the minimum slope ratio($P_f < 10\%$)

由上述结果可知,若要求边坡失效概率不超过10%,则边坡设计坡率不应小于某个坡度系数。填方边坡的坡高与最小坡度系数的关系式为 $y = 0.0082x + 1.422$,如图10。

6 结 论

(1)对陕北等湿陷性黄土地区进行边坡可靠度分析时, Q_2 和 Q_3 的 c 、 φ 值均接受正态分布和对数正态分布。 c 值的变异性较大, φ 值变异性较小;

(2)对于湿陷性黄土自然边坡, φ 值变异性对可靠性指数影响程度较大。而对于湿陷性黄土填方边坡 c 值变异性影响程度更大,这可能与土体颗

粒得重新排列与结构重新分布有关;

(3)可靠度分析法与有限元法的分析结果规律一致,增加了可靠度分析法的可信度。在缺乏模型试验及监测数据的支撑下,可以用于湿陷性黄土边坡的可靠度分析及坡率优化;

(4)进行坡率优化时,若要求填方边坡失效概率不超过10%,则坡高与最小坡度系数的关系式为 $y = 0.0082x + 1.422$ 。

参考文献 References

- [1] 陈立宏,陈祖煜,刘金梅. 土体抗剪强度指标的概率分布类型研究[J]. 岩土力学,2005(1): 37-40,45.
CHEN Lihong, CHEN Zuyi, LIU Jinmei. Probability distribution of soil strength[J]. Rock and Soil Mechanics. 2005,26(1): 37-40,45.
- [2] LI Xibing, GONG Fengqiang. A method for fitting probability distributions to engineering properties of rock masses using Legendre orthogonal polynomials[J]. Structural Safety, 2009, 31(4):335-343.
- [3] 蒋水华,魏博文,姚池,杨建华. 考虑概率分布影响的低概率水平边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报,2016,38(6):1071-1080.
JIANG Shuihua, WEI Bowen, YAO Chi, et al. Reliability analysis of soil slopes at low-probability levels considering effect of probability distributions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2016. 38(6): 1071-1080.
- [4] 黄景华,陈朝晖,莫玻,等. 参数特性及分布形式对边坡稳定可靠性的影响分析[J]. 四川大学学报(工程科学版),2014,46(3):23-30.
HUANG Jinghua, CHEN Zhaohui, MO Bo, et al. Influence Analysis of Characteristics and Distribution Types of Soil Parameters on Slope Reliability[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition). 2014,46(3):23-30.
- [5] 方汕澳,许强,修德皓等. 基于斜率模型的突发性黄土滑坡失稳时间预测[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 169-179.
FANG Shanao, XU Qiang, XIU Dehao, et al. A study of the predicted instability time of sudden loess landslides based on the SLO model[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2021 48(4):169-179.
- [6] 叶伟林,康丽娟,安亚鹏等. 甘肃永靖焦家村上庄2·28滑坡特点及成因分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2021,57(3):369-375,381.
YE Weilin, KANG Lijuan, AN Yapeng, et al. Analysis of the characteristics and causes of Jiaojia landslide on February 28, 2019 in Yongjing County, Gansu Province[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2021,57(3):369-375,381.

- [7] YANG Dongdong, QIU Haijun, PEI Yanqian, et al. Spatial and temporal evolution of the infiltration characteristics of a loess landslide[J]. Isprs International Journal of Geo-Information, 2020,9(1):1-13.
- [8] SHI J S, WU L Z, WU S R, et al. Analysis of the causes of large-scale loess landslides in Baoji, China[J]. Geomorphology, 2016, 264:109-117.
- [9] 龚伟翔, 张晓超, 裴向军, 等. 基于高陡交填界面软弱带影响下黄土填方边坡失稳模式研究[J/OL]. 工程地质学报, {3}{4}{5}: 1-11 [2021-07-19]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-250>.
GONG Weixiang, ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, et al. Study on the instability model of loess filled slope based on the influence of weak zone of high and steep filling interface[J/OL]. Journal of Engineering Geology. {3}{4}{5}:1-11[2021-07-19].
- [10] 谢永利, 刘新荣, 晏长根, 等. 特殊岩土体工程边坡研究进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(9):93-105.
XIE Yongli, LIU Xinrong, YAN Changgen, et al. Research progress of special soil and rock engineering slopes[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(9): 93-105.
- [11] 梅源, 胡长明, 魏弋峰, 等. Q_2 、 Q_3 黄土深壑中高填方地基变形规律离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12):3473-3481.
MEI Yuan, HU Changming, WEI Yifeng, et al. A centrifugal test study of the deformation of high back-fill foundation in deep ravine of Q_2 and Q_3 loess[J]. Rock and Soil Mechanics. 2015 36(12):3473-3481.
- [12] CHENG Yuxiang, HUO Aadi, ZHAO Zhixin, et al. Analysis of loess fracture on slope stability based on centrifugal model tests[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021(4):1-11.
- [13] ZHUANG Jianqi, PENG Jianbing, XU Yonglong, et al. Assessment and mapping of slope stability based on slope units: A case study in Yan'an, China[J]. Journal of Earth System Science, 2016, 125 (7): 1439-1450.
- [14] 何秉顺, 马东亮, 王庆苗, 等. 淮河堤防土体抗剪强度指标概率模型与参数优化估计[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(3):195-200.
HE Bingshun, MA Dongliang, WANG Qingmiao, et al. The probability model of shear strength and parameters optimizing estimation of Huai River dike [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010 8(3):195-200.
- [15] 苏卫卫, 黄宏伟, 张洁. 上海软黏土抗剪强度指标概率分布类型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(S2): 1695-1699.
SU Weiwei, HUANG Hongwei, ZHANG Jie. Risk analysis of the underground passage through rail transit construction scheme[J]. Chinese Journal of Under-ground Space and Engineering, 2012 8 (S2): 1695-1699.
- [16] 崔洁, 江权, 冯夏庭, 等. 岩石抗剪强度参数的理论概率分布形态研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(5):1261-1274.
CUI Jie, JIANG Quan, FENG Xiating, et al. Theoretical probability distribution of shear strength parameters for rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1261-1274.
- [17] KIYONOBU K, ANDREW J W. Effect of spatial variability on the slope stability using random field numerical limit analysis[J]. Georisk Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2015, 10(1):42-54.
- [18] QI Xiaohui, LI Dianqing. Effect of spatial variability of shear strength parameters on critical slip surfaces of slopes [J]. Engineering Geology, 2018: S0013795217317209.
- [19] 郑亚楠, 侯晓坤, 李萍, 等. 晋西隰县—离石地区黄土高边坡可靠度研究 [J]. 工程地质报, 2014, 22 (3): 372-378.
ZHENG Yanan, HOU Xiaokun, LI Ping, et al. Reliability study of loess high slope stability in Xixian—Lishi area of Western Shanxi Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2014 22(03):372-378.
- [20] JIANG S H, LI D Q, CAO Z J, et al. Efficient system reliability analysis of slope stability in spatially variable soils using Monte Carlo simulation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015 141(2): 04014096.
- [21] 官凤强, 黄天朗, 李夕兵. 岩土抗剪强度参数的最优概率分布函数推断方法[J]. 岩土工程报, 2016, 38(S2): 204-209.
GONG Fengqiang, HUANG Tianliang, LI Xibing. Inference method for optimal probability distribution function of shear strength parameters in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016 38(S2):204-209.
- [22] 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.
- [23] 胡长明, 梅源, 刘增荣, 等. 湿陷性黄土高贴坡变形模式和稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (12):2585-2592.
HU Changming, MEI Yuan, LIU Zengrong, et al. Deformation mode and stability analysis of high sticking slope of collapsible loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (12): 2585-2592.

(编辑 沈 波)