

文章编号:1672-6561(2012)02-0081-09

## 山西乡宁—吉县地区黄土高边坡可靠度研究

李 萍,赵纪飞,李同录

(长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054)

**摘 要:**在山西乡宁—吉县地区实测了 7 个具有代表性的自然极限状态黄土高边坡断面,建立边坡地层结构模型;选取研究区合理的黄土物理力学参数,并分地层年代对 10 个典型工点的黄土强度参数内聚力和内摩擦角的变异性进行分析;选取 6 组典型的强度参数变异系数组合,基于 Monte-Carlo 法进行可靠度模拟,评价该区边坡稳定性;采用自然类比法进行边坡设计。结果表明:边坡失效概率随坡高的变化趋势一致,均是中等坡高(49.8 m)的边坡失效概率较大,低坡和高坡的失效概率较低;当变异系数较小时,边坡失效概率对坡高和坡度的变化敏感,而当变异系数较大时,边坡失效概率对坡高和坡度的变化不敏感;当坡型一定、强度参数变异系数较小时,边坡的稳定系数基本不变,而当参数变异系数超过某一界限时,稳定系数随变异系数的增大而增大,二者存在非线性相关关系;研究区黄土边坡处于基本稳定状态,但其失效概率最大达 69.3%,平均 21.1%,介于 20%~30%的比例为 33.3%,大于 30%的比例为 14.3%,可靠度指标介于 $-0.5 \sim 8.5$ ,其中小于 2.7 的比例为 88.1%;对于坡高约为 50 m 的黄土高边坡,若取 30%作为可接受失效概率,边坡坡度需降至 45°以下,如果期望可接受失效概率在 10%以内,则坡度不宜超过 34°。

**关键词:**黄土;边坡;可靠度;Monte-Carlo 法;变异系数;失效概率;稳定系数;极限状态

中图分类号:P642.13<sup>+</sup>1;TU413.6<sup>+</sup>2

文献标志码:A

## Study on Reliability for Loess High Slopes in Xiangning-Jixian Area of Shanxi Province

LI Ping, ZHAO Ji-fei, LI Tong-lu

(School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** The sections of 7 representative natural limit state loess high slopes in Xiangning-Jixian Area of Shanxi Province were measured, and the strata structure models were built; the optimal physical and mechanical parameters of loess in the area were selected, and the variability of cohesions and internal frictional angle of loess in different strata ages from 10 typical sites was analyzed; 6 typical groups of coefficient of variation for strength parameters were selected, and the reliability was simulated by Monte-Carlo Method, and the stability of loess slopes was evaluated. The results showed that the variation of failure probability coincided with height of slope, the failure probability of slope with middle height (49.8 m) was high, but higher and lower slopes were low; the failure probability was sensitive to height and gradient of slope when the coefficient of variation was small, but it was insensitive when the coefficient was large; when the height and gradient of slope were constant and the coefficients of variation of strength parameters were small, stability coefficient was basically constant; but when the coefficients of variation exceeded a certain limit, stability coefficient increased with the coefficients of variation,

收稿日期:2012-04-20

基金项目:国家自然科学基金项目(40772181,40972182)

作者简介:李 萍(1988-),女,陕西咸阳人,工学硕士研究生,E-mail:lp19881028@163.com。

and there was nonlinear correlativity between them; the loess slopes in the area were basically stable, but the maximum failure probability was 69.3%, the average was 21.1%, and the proportion of slopes with 20%-30% failure probability was 33.3%, and the proportion with failure probability ( $>30\%$ ) was 14.3%; reliability indexes were  $-0.5-8.5$ , and the proportion of slopes with the indexes ( $<2.7$ ) was 88.1%; for the loess high slope with about 50 m height, if 30% was taken as the acceptable failure probability, the gradient of slope would decrease to less than  $45^\circ$ , and if the acceptable failure probability was less than 10%, the gradient would be lower than  $34^\circ$ .

**Key words:** loess; slope; reliability; Monte-Carlo Method; coefficient of variation; failure probability; stability coefficient; limit state

## 0 引言

山西乡宁—吉县地区地处黄河以东,吕梁山以西,以黄土塬、梁、峁等地貌为主,冲沟密布,植被稀少,地质灾害发育。近年来,随着基础设施的建设,人为诱发滑坡灾害频繁发生,给当地工程建设和人民生命财产安全带来极大危害。2005 年 5 月,发生在吉县水洞沟的黄土滑坡造成 11 户村民窑洞被埋,24 人伤亡,209 国道阻断。因此,开展黄土边坡稳定性评价以及建设安全经济的边坡工程具有较大的现实意义。

目前,工程中常用的评价边坡稳定性方法有定值分析法和可靠度分析方法等<sup>[1-4]</sup>。定值分析法简便直观,易于操作,广泛应用于边坡勘察设计中,但无法反映岩土体性质的不确定性,评价结果随机性较大。可靠度分析方法则是建立在概率统计基础上,能较好地考虑变量的随机性,并用失效概率度量边坡的安全度,在边坡稳定性评估和风险分析中具有较大的优越性。20 世纪 80 年代起,很多学者展开了岩土可靠度研究<sup>[5-8]</sup>。Wong 提出了用响应面法分析土坡可靠性<sup>[9]</sup>;Schweiger 等提出了用随机集合理论解决岩土工程中不确定性问题的理论框架<sup>[10]</sup>;高大钊针对地基土抗剪强度指标提出了系统的统计方法<sup>[11]</sup>;祝玉学将概率统计理论与工程数据有机结合起来,阐述了直方图、概型检验、可靠性模型等的操作方法等<sup>[12]</sup>。这些研究成果多半是针对岩质边坡或非黄土土质边坡,对于黄土边坡的可靠度分析研究较少。因此,将可靠度分析方法应用到黄土边坡的稳定性评价中,对于黄土覆盖面积约为  $63 \times 10^4 \text{ km}^2$  的中国具有重大意义。

近 20 年来,可靠度分析方法已经逐步应用于岩土工程、结构工程、基础工程、边坡工程、滑坡灾害评价治理等,并取得了显著成果<sup>[13-20]</sup>。山西乡宁—吉

县地区黄土变异性较大,采用可靠度分析方法探讨边坡稳定性更符合客观实际。目前可靠度指标的计算方法主要有点估计法、一次二阶矩法、Monte-Carlo 法等,各模型的使用条件、实现的难易程度及精度都不同<sup>[21-31]</sup>。笔者选取山西乡宁—吉县地区实测的 7 个具有代表性的自然极限状态黄土高边坡,建立了地层结构模型,分地层年代探讨黄土物理力学参数的变异性,选取 6 组内聚力( $c$ )和内摩擦角( $\varphi$ )的变异系数组合,采用 Monte-Carlo 法进行可靠度模拟,评价研究区内黄土边坡的可靠性,为该在工程实践中遇到的黄土高边坡设计提供参考。

## 1 研究区边坡特征与地层结构

用全站仪在山西乡宁—吉县地区实测了 7 个具有代表性的自然极限状态黄土高边坡的坡高与坡度值(图 1、表 1)。极限状态边坡是指边坡处于稳定极限状态或接近极限状态的边坡。在同等条件下(如土质条件和边坡坡高相同),这种边坡的坡度进一步增大极有可能产生大的变形破坏;这种边坡的坡度如果降低,则在长时间内,即使经历一定的自然因素作用(如降雨等),也不会发生破坏<sup>[32-33]</sup>。极限状态边坡的野外判别标准有:①坡顶有拉张裂缝的边坡;

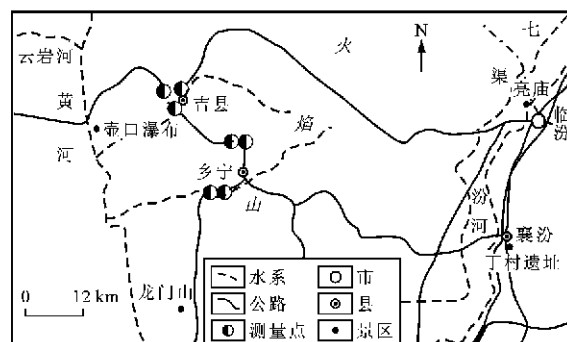


图 1 边坡测量点位置

Fig. 1 Locations of Measuring Points of Slopes

表 1 实测自然黄土边坡位置及参数

Tab. 1 Position and Parameters of Natural Loess Slopes Measured

边坡序号	边坡位置	经度	纬度	高程/m	边坡坡高/m	边坡坡度/(°)
①	吉县三墩村 G209 国道凸侧	110°46′05″E	36°02′13″N	1 196	106.2	36.2
②	吉县西北 11 km 处	110°34′12″E	36°02′52″N	682	88.9	28.9
③	吉县水洞沟	110°40′57″E	36°05′00″N	884	80.1	35.2
④	乡宁县南 10 km 张马村旁	110°45′14″E	35°56′25″N	842	60.2	45.4
⑤	吉县三墩村 G209 国道凸侧	110°46′05″E	36°02′13″N	1 196	49.8	55.4
⑥	乡宁县南 10 km 张马村旁	110°48′14″E	35°58′51″N	842	41.6	48.7
⑦	吉县鲁家河梨村沟桥南 300 m 处	110°43′51″E	36°11′38″N	974	30.0	68.1

②坡面破碎,局部滑塌较多的边坡;③处于已发生滑坡的两侧,并与其工程地质条件、坡型相同的边坡;④已有滑坡恢复的边坡。只要满足以上任意一点,即认为是极限状态边坡。

研究区内  $Q_4$  黄土层较薄,多为  $Q_3$  和  $Q_2$  黄土。 $Q_3$  马兰黄土及上覆  $Q_4$  黄土厚 10 m 左右, $Q_2$  离石黄土厚 50 m 左右, $Q_1$  午城黄土有些地方缺失,而有些地方厚度在 60 m 以上。黄土层总厚度在 150 m 以上,下覆基岩主要为泥砂岩。依据干密度粗略划分地层,干密度( $\gamma_d$ )小于  $1.4\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  的地层为  $Q_4$  和  $Q_3$  地层,干密度为  $1.4\sim 1.7\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  的地层为  $Q_2$  地层,干密度大于  $1.7\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  的地层为  $Q_1$  地层,典型地层剖面见图 2。据此建立地层结构,采用 Monte-Carlo 法计算失效概率及可靠度指标,将 Morgenstern-Price 法稳定性计算公式作为极限状态方程,借助 Geo-studio2007 软件完成可靠度计算。

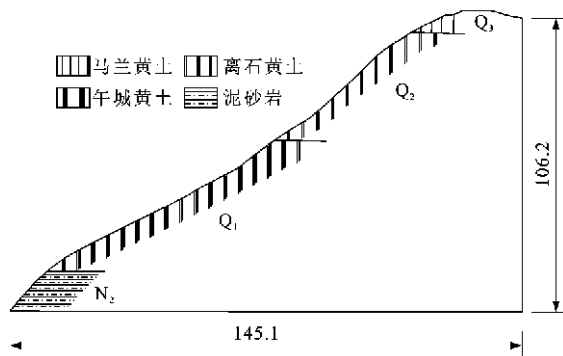


图 2 边坡地层结构模型(单位:m)

Fig. 2 Strata Structure Model of Slope(Unit:m)

2 参数选取

收集临汾至吉县高速公路乡宁—吉县段的 853 组黄土物理力学指标,统计结果见表 2。各土层强度参数  $c$ 、 $\varphi$  经 K-S 检验,除了  $Q_2$  地层  $c$  不服从正态分布,其余均服从正态分布,各地层  $c$  还服从

Weibull 分布,但各土层  $c$ 、 $\varphi$  都不服从对数正态分布,理论概率密度曲线见图 3,检验结果见表 3。表 3 中,  $D_{\max}$  是检验样本测试值累积频率与假设理论概率分布差值的最大值;  $D_n^{\alpha}$  是可接受假设概型的临界值,其中,  $n$  是样本个数,  $\alpha$  是显著水平。如果  $D_{\max} < D_n^{\alpha}$ , 接受该概率分布,反之则拒绝。由于各地层强度参数多数服从正态分布,所以在计算时将所有强度参数均按正态分布处理。

3 黄土边坡可靠度分析

3.1 极限状态方程的建立

边坡体所受力可以分解为促使边坡稳定的力( $F_r$ )和导致边坡破坏的力( $F_t$ )。当  $F_r > F_t$  时,边坡处于稳定状态;当  $F_r < F_t$  时,边坡处于失稳状态;当  $F_r = F_t$  时,边坡处于极限状态,该方程称为极限状态方程

$$F_r - F_t = 0 \tag{1}$$

将现有边坡稳定性分析方法转化为可靠性分析方法,以稳定系数计算公式为基础,定义功能函数,将极限状态方程改写为

$$k - 1 = 0 \tag{2}$$

式中:  $k$  为通过某种方法获得的边坡稳定系数,  $k = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$ ,  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$  为  $m$  个影响边坡稳定性的随机变量。

可靠度指标  $\beta$  为

$$\beta = \frac{\mu_k - 1}{\sigma_k} \tag{3}$$

式中:  $\mu_k$  和  $\sigma_k$  分别为稳定系数  $k$  的均值和标准差。

在 Monte-Carlo 法中,边坡失效概率  $P_f$  定义为稳定系数小于 1 的样本个数  $n$  与抽样总数  $N$  的比

$$P_f = \frac{n}{N} \tag{4}$$

可靠度指标和失效概率的关系为

$$P_f = \Phi(-\beta) \tag{5}$$

式中:  $\Phi(-\beta)$  为  $\beta$  的正态分布函数。

表 2 黄土物理力学性质指标  
Tab. 2 Physical and Mechanical Parameters of Loess

地层	指标	体积含水率	天然重度	孔隙比	液限	塑限	内聚力	内摩擦角
Q <sub>3</sub>	样本数	92	92	92	92	92	92	92
	最大值	24.8%	17.8 MPa	1.482	28.7%	17.6%	95.9 kPa	31.4°
	最小值	4.6%	12.0 MPa	0.739	24.0%	16.2%	1.60 kPa	12.2°
	平均值	9.2%	14.2 MPa	1.094	26.3%	16.8%	41.2 kPa	25.2°
	标准差	3.94%	1.26 MPa	0.172 6	1.09%	0.31%	27.30 kPa	4.23°
	变异系数	0.43	0.09	0.16	0.04	0.02	0.66	0.17
Q <sub>2</sub>	样本数	536	536	536	536	536	536	536
	最大值	24.9%	20.2 MPa	1.043	35.6%	20.3%	95.40 kPa	35.8°
	最小值	5.6%	14.3 MPa	0.546	23.4%	16.1%	0.84 kPa	2.1°
	平均值	17.5%	18.2 MPa	0.759	26.8%	17.0%	54.30 kPa	24.2°
	标准差	5.58%	1.70 MPa	0.114 4	2.27%	0.77%	25.19 kPa	6.34°
	变异系数	0.32	0.09	0.15	0.08	0.05	0.58	0.26
Q <sub>1</sub>	样本数	225	225	225	225	225	221	221
	最大值	27.1%	22.1 MPa	0.860	41.1%	22.6%	249.7 kPa	40.2°
	最小值	7.3%	16.7 MPa	0.391	18.9%	15.3%	0.8 kPa	4.0°
	平均值	18.9%	20.2 MPa	0.599	28.1%	17.4%	71.5 kPa	22.9°
	标准差	2.85%	0.72 MPa	0.067 4	2.88%	0.91%	35.12 kPa	6.20°
	变异系数	0.15	0.04	0.11	0.10	0.05	0.49	0.27

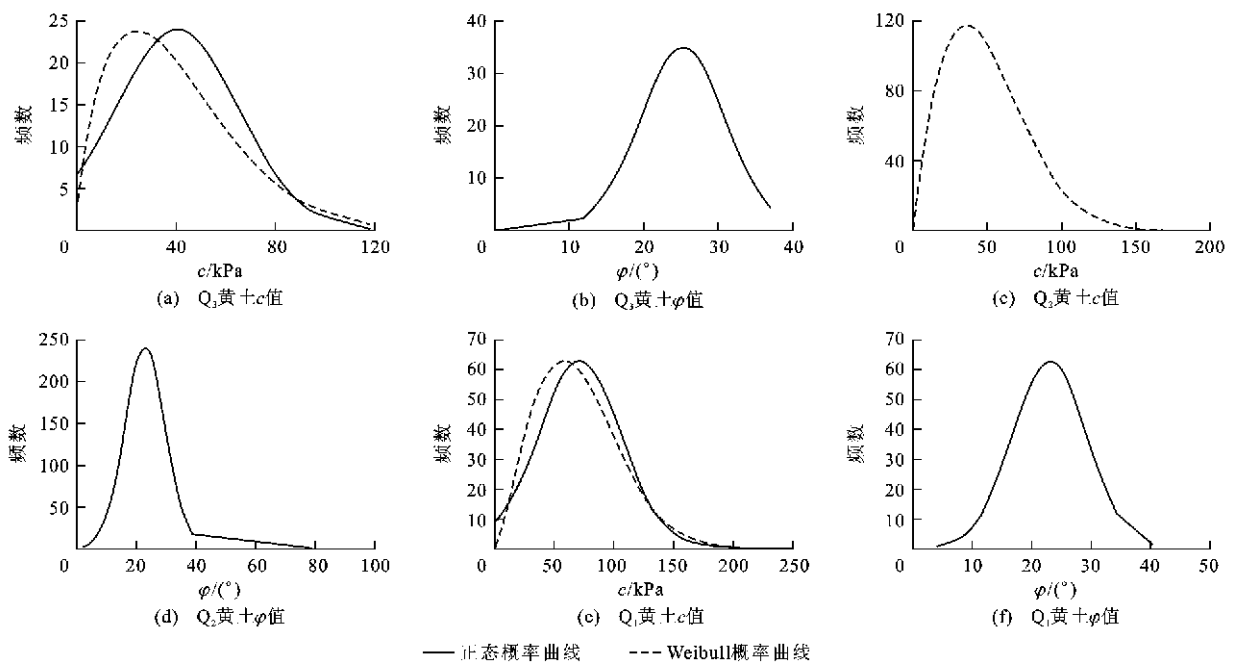


图 3 不同黄土的内聚力和内摩擦角概型分布

Fig. 3 Scheme Distributions of Cohensions and Internal Friction Angles in Different Loesses

3.2 内聚力与内摩擦角的变异系数组合

大范围统计得到的黄土强度参数  $c$ 、 $\varphi$  的变异系数相对于一个特定工点来说偏大或偏小,不具有代表性,因此有必要在小范围内重新统计  $c$ 、 $\varphi$  的变异系

数。依据乡宁—吉县地区的工程勘察报告,分地层年代统计了 10 个工点  $c$ 、 $\varphi$  的变异系数。结果表明,该地区  $c$  的变异系数  $\delta_c$  为 0.16~0.94,均值 0.54;  $\varphi$  的变异系数  $\delta_\varphi$  为 0.12~0.38,均值 0.23。因此,采用变

表 3  概型分布检验结果

Tab. 3  Inspection Findings of Scheme Distribution

地层	干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	强度指标	概型分布检验结果						$D_n^a$
			正态分布		对数正态分布		Weibull 分布		
			验证结果	$D_{\max}$	验证结果	$D_{\max}$	验证结果	$D_{\max}$	
Q <sub>3</sub>	1.10~1.56	$c$	是	0.127 7	否	0.142 7	是	0.060 6	0.139 7
		$\varphi$	是	0.131 6	否	0.191 6	否	1.000 0	
Q <sub>2</sub>	1.33~1.75	$c$	否	0.063 3	否	0.105 6	是	0.048 0	0.058 3
		$\varphi$	是	0.054 4	否	0.135 7	否	1.000 0	
Q <sub>1</sub>	1.46~1.94	$c$	是	0.064 9	否	0.106 2	是	0.054 4	0.090 6
		$\varphi$	是	0.067 0	否	0.136 4	否	1.000 0	

化范围为 0.10~2.00 的  $\delta_c$  和变化范围为 0.05~0.50 的  $\delta_\varphi$  组成 6 组典型的变异系数组合(表 4)。

表 4  典型的内聚力和内摩擦角变异系数组合

Tab. 4  Groups of Coefficient of Variation for Typical Cohesion and Internal Frictional Angle

组合编号	A	B	C	D	E	F
$\delta_c$	0.10	0.20	0.50	0.54	1.00	2.00
$\delta_\varphi$	0.05	0.10	0.15	0.23	0.20	0.50

由于干密度的变异系数较小,对失效概率影响不敏感,所以计算中将其视为常量。每个黄土边坡模型在 6 组变异系数组合变换下进行可靠度模拟。 $c$ 、 $\varphi$  均值按表 2 取值。每次运用 Monte-Carlo 法模拟随机抽样 10 000 次。

3.3 模拟结果分析

从图 4、5 可以看出,不同的变异系数组合下,边坡失效概率随边坡坡高的变化趋势一致,均是中等坡高(49.8 m)的边坡失效概率较大,低坡和高坡的失效概率较低;不同坡高和坡度的边坡模拟结果均显示出参数变异性越大,边坡失效概率越大,如坡高 41.6 m、坡度 48.7°的边坡,当  $\delta_c=0.10$ 、 $\delta_\varphi=0.05$  时,其失效概率接近于 0,但在  $\delta_c=0.50$ 、 $\delta_\varphi=0.15$  时失效概率为 11.8%,当  $\delta_c=2.0$ 、 $\delta_\varphi=0.50$  时失效概率为 26.1%;当变异系数较小时,边坡失效概率对坡高和坡度的变化敏感,不同坡高和坡度的边坡失效概率差异较大,如当  $\delta_c=0.20$ 、 $\delta_\varphi=0.10$  时,从最高坡到最低坡,失效概率依次为 2.3%、0.1%、1.0%、11.7%、59.6%、0.9%、13.6%,而当变异系数较大时,边坡失效概率对坡高和坡度的变化不敏感,所有边坡无论坡高坡低、坡陡坡缓,失效概率都较大,如  $\delta_c=2.00$ 、 $\delta_\varphi=0.50$  时,从最高坡到最低坡,失效概率依次为 27.2%、19.1%、26.7%、33.2%、41.0%、26.0%、31.9%;当坡型一定、强度

参数变异性较小时,边坡的稳定系数基本不变;而当参数变异性超过某一界限时,稳定系数随变异性的增大而增大(图 6)。以坡高 49.8 m、坡度 55.4°的边坡为例,探讨边坡稳定系数与  $\delta_c$  或  $\delta_\varphi$  的关系(图 7)。结果表明,强度参数  $c$  和  $\varphi$  的变异性均对边坡的稳定系数有影响,当变异系数取较大值时,稳定系数随变异系数增大而增大,二者之间具有一定的非线性相关关系。

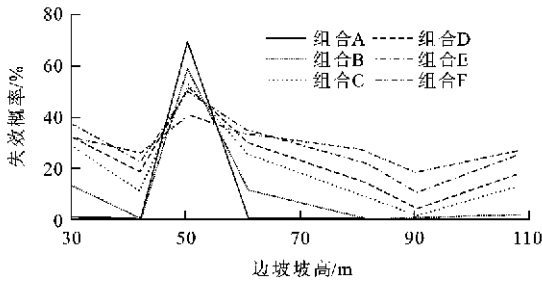


图 4  失效概率与边坡坡高的关系

Fig. 4  Relationship Between Failure Probability and Height of Slope

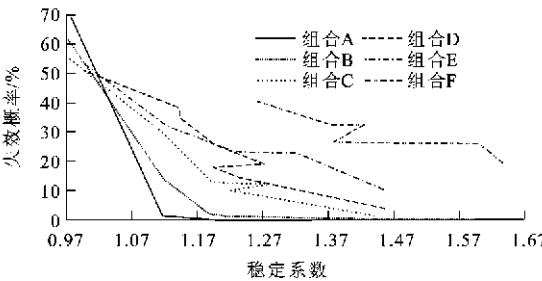


图 5  失效概率与边坡稳定系数的关系

Fig. 5  Relationship Between Failure Probability and Stability Coefficient of Slope

所有坡型和参数变异性的组合中,稳定系数最大值为 1.64,最小值为 0.98,均值 1.24,其中稳定系数小于 1 的只有 9.5%,可见若采用定值分析法,则研究区黄土边坡处于基本稳定状态。但该区黄土

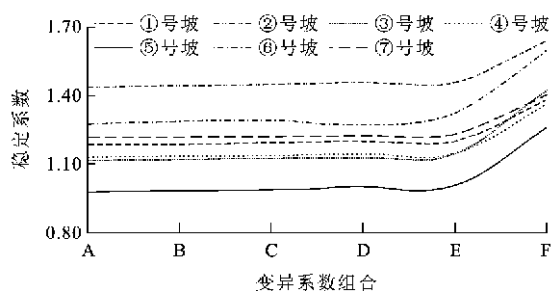


图 6 不同变异系数组合下的稳定系数变化

Fig. 6 Changes of Stability Coefficients Under Different Groups of Coefficient of Variation

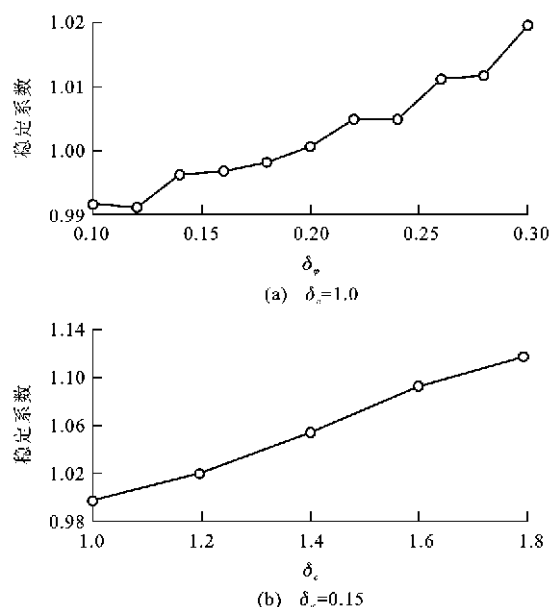


图 7 稳定系数与内聚力、内摩擦角变异系数的关系

Fig. 7 Relationships Between Stability Coefficients and Coefficients of Variation for Cohesions and Internal Frictional Angles

边坡的失效概率最大值达 69.3%，均值为 21.1%，介于 20%~30% 的比例为 33.3%，大于 30% 的比例为 14.3%；可靠度指标介于 -0.5~8.5，均值为 1.4，其中小于 2.7 的比例为 88.1%。建筑设计按工程的安全等级提出目标可靠度设计指标<sup>[34]</sup>，该指标和《水利水电工程边坡设计规范》(SL 386—2007)<sup>[35]</sup>中关于边坡的可靠度指标规定相同；公路工程结构可靠度设计按公路工程等级，对路基(路堤)提出目标可靠度指标<sup>[36]</sup>；香港地区边坡工点设计可靠度指标为 -3.0~4.0，失效边坡的设计可靠度指标峰值约为 -0.7，失效概率为 76%，没有失效边坡的可靠度指标峰值约为 1.4，失效概率则为 8%<sup>[37-39]</sup>；黄润秋等将边坡的稳定状态分为 4 级，稳定与较稳定的可靠度指标界限为 1.3<sup>[40]</sup>(表 5)。从表 5 可以看出，研究区黄土边坡

安全等级较低，不论用于建筑工程还是公路工程，其可靠度指标均不能满足要求，失效概率较大；根据滑坡稳定状态划分标准，研究区黄土边坡多为较稳定状态。

表 5 目标可靠度指标分级

Tab. 5 Classification of Target Reliability Index

工程类型	目标可靠度指标			
	一级 (稳定)	二级 (较稳定)	三级 (较不稳定)	四级 (不稳定)
建筑工程 <sup>[34-35]</sup>	延性破坏	3.7	3.2	2.7
	脆性破坏	4.2	3.7	3.2
公路边坡工程 <sup>[36]</sup>	2.5~3.0	2.4~2.9	2.2~2.6	
滑坡稳定状态 <sup>[40]</sup>	>1.3	0.4~1.3	-0.4~0.4	<-0.4

## 4 边坡设计

基于可靠度分析，研究区黄土边坡失效的可能性较大，若要减小边坡破坏的风险，则需要增加支挡工程量或减缓坡度。笔者采用自然类比法进行边坡设计。自然类比法是基于极限状态坡的标准放缓坡度的方法，有助于降低失效概率，增加边坡稳定性<sup>[41]</sup>。由极限状态边坡定义可知，处于极限状态的边坡在天然状态下稳定系数为 1，失效概率为 50%。根据以上计算结果，坡高 49.8 m、坡度 55.4°的边坡在各种变异系数组合下的稳定系数均接近于 1，所对应的失效概率接近于 50%，天然状态下为极限状态边坡，因此以该坡型为标准，采用工程中常用的坡比 1:1、1:1.25、1:1.5、1:1.75、1:2、1:2.25 (对应坡度为 45.0°、39.0°、34.0°、30.0°、27.0°、24.0°) 进行削坡，对削坡后的边坡建立地层结构模型，在不同变异系数组合下进行可靠度分析(表 6)。在变异系数组合取该区平均水平( $\delta_c = 0.54$ 、 $\delta_\phi = 0.23$ )下，对于坡高约 50 m 的黄土边坡设计，若取 30% 作为可接受失效概率，则边坡坡度不宜超过 45°，对应的稳定系数为 1.15，目标可靠度指标为 0.5；若取 20%，则坡度不宜超过 40°，对应的稳定系数为 1.28，目标可靠度指标为 0.9；若取 10%，则坡度不宜超过 34°，对应的稳定系数为 1.43，目标可靠度指标为 1.2。坡度越缓，边坡越稳定，失效概率越小，但是工程的经济投入也越多，减少经济投入必定要承担一定风险，这就需要根据工程的重要性在投资与风险之间找到平衡点。

## 5 结 语

(1) 在不同的变异系数组合下，边坡失效概率随

表 6 削坡前后可靠度分析结果对比  
Tab. 6 Comparison of Reliability Analysis Results  
Before and After Slope Cutting

组合 编号	计算指标	削坡前	削坡后					
		55.4°	45.0°	39.0°	34.0°	30.0°	27.0°	24.0°
A	$k$	0.98	1.13	1.27	1.42	1.56	1.70	1.87
	$P_f/\%$	69.30	1.30	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	$\beta$	-0.5	2.3	4.2	6.0	7.2	8.3	9.4
B	$k$	0.98	1.14	1.28	1.42	1.57	1.70	1.87
	$P_f/\%$	59.600	12.100	1.700	0.200	0.020	0.010	0.001
	$\beta$	-0.2	1.2	2.1	3.0	3.6	4.2	4.9
C	$k$	0.98	1.14	1.28	1.42	1.57	1.71	1.88
	$P_f/\%$	53.9	28.3	15.6	6.9	3.8	1.6	0.8
	$\beta$	-0.1	0.6	1.0	1.5	1.8	2.1	2.4
D	$k$	1.00	1.15	1.28	1.43	1.58	1.72	1.89
	$P_f/\%$	52.6	30.6	19.6	10.9	6.5	4.3	2.4
	$\beta$	0.0	0.5	0.9	1.2	1.5	1.7	1.9
E	$k$	1.00	1.20	1.32	1.45	1.59	1.73	1.90
	$P_f/\%$	50.5	33.7	25.6	19.6	14.8	11.4	8.6
	$\beta$	0.0	0.4	0.7	0.9	1.1	1.2	1.4
F	$k$	1.26	1.55	1.69	1.82	1.99	2.12	2.31
	$P_f/\%$	41.0	27.3	22.8	19.9	16.2	14.7	13.2
	$\beta$	0.4	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1

坡高的变化趋势一致,均是中等坡高(49.8 m)的边坡失效概率较大,低坡和高坡的失效概率较低。

(2)黄土强度参数内聚力和内摩擦角的变异性越大,边坡失效概率越大。当变异系数较小时,边坡失效概率对坡高和坡度的变化敏感,不同坡高和坡度的边坡,失效概率差异较大;当变异系数较大时,边坡失效概率对坡高和坡度的变化不敏感,所有边坡无论坡高坡低、坡陡坡缓,失效概率都较大。

(3)当坡型一定、强度参数变异性较小时,边坡的稳定系数基本不变,而当参数变异性超过某一界限时,稳定系数随变异系数的增大而增大,二者之间具有一定的非线性相关关系。

(4)研究区黄土边坡处于基本稳定状态,但其失效概率最大达 69.3%,均值为 21.1%,介于 20%~30%的比例为 33.3%,大于 30%的比例为 14.3%,可靠度指标介于-0.5~8.5,均值为 1.4,其中小于 2.7 的比例为 88.1%。

(5)采用自然类比法进行边坡设计,对于坡高约为 50 m 的黄土高边坡,在黄土强度参数变异性取该区平均水平时,若取 30%作为可接受失效概率,边坡坡度需降至 45°以下,如果期望可接受失效概率在 10%以内,则坡度不宜超过 34°。

参 考 文 献 :

References :

[1] 王 强,刘仰韶,傅旭东,等.砂土路基湿化变形和稳定性的可靠度分析[J].中国公路学报,2007,20(6):7-12.  
WANG Qiang, LIU Yang-shao, FU Xu-dong, et al. Reliability Analysis for Wetting Deformation and Stability of Sand Soil Roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(6): 7-12.

[2] 李 伟,康海贵.边坡稳定性模糊随机可靠度分析[J].交通运输工程学报,2010,10(1):19-23.  
LI Wei, KANG Hai-gui. Fuzzy-random Reliability Analysis of Slope Stability[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(1): 19-23.

[3] 罗丽娟,赵法锁,胡江洋,等.基于剩余推力法的黄土高边坡稳定性可靠度分析[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(4):27-31.  
LUO Li-juan, ZHAO Fa-suo, HU Jiang-yang, et al. Reliability of High Loess Slope Stability Based on Residual Thrust Method [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 27-31.

[4] 王小群,游 敏.氡气测试技术在边坡稳定性研究中的应用[J].成都理工大学学报:自然科学版,2010,37(5):574-578.  
WANG Xiao-qun, YOU Min. Application of Radon Measurement to the Evaluation of Slope Stability[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2010, 37(5): 574-578.

[5] ANG A H S, TANG W H. Probability Concepts in Engineering Planning and Design Vol 2: Decision, Risk and Reliability[M]. New York: John Wiley, 1984.

[6] DUNCAN J M. Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(4): 307-316.

[7] 杜宇本,郑 光,蒋良文,等.大瑞铁路澜沧江大桥工程边坡稳定性三维数值模拟分析[J].地质力学学报,2010,16(1):108-114.  
DU Yu-ben, ZHENG Guang, JIANG Liang-wen, et al. 3D Numerical Simulation of Slope Stability of Lancangjiang Bridge on Dali-Ruili Railway[J]. Journal of Geomechanics, 2010, 16(1): 108-114.

[8] 郑 光,许 强,杜宇本.高陡岩质桥隧工程边坡稳定性评价及工程支护措施[J].成都理工大学学报:自然科学版,2011,38(4):430-437.  
ZHENG Guang, XU Qiang, DU Yu-ben. Evaluation of the Stability and the Study of Engineering Support Measures for the High and Steep Rock Slope in a

- Bridge and Tunnel Engineering[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2011, 38(4): 430-437.
- [9] WONG F S. 土坡可靠性和响应面方法[C]// 同济大学岩土工程系. 可靠性理论在地基基础方面的应用译文集. 上海: 同济大学出版社, 1986: 25-30.
- WONG F S. Reliability of Soil Slope and Response Surface Method[C]// Department of Geotechnical Engineering of Tongji University. Corpus of Reliability Theory Applied in Foundation. Shanghai: Tongji University Press, 1986: 25-30.
- [10] SCHWEIGER H F, PESCHL G M. Reliability Analysis in Geotechnics with the Random Set Finite Element Method[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(6): 422-435.
- [11] 高大钊. 土力学可靠性分析原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- GAO Da-zhao. Theory of Soil Mechanics Reliability [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1989.
- [12] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- ZHU Yu-xue. Reliability Analysis of Slope[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993.
- [13] 姚耀武, 陈东伟. 土坡稳定可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 80-87.
- YAO Yao-wu, CHEN Dong-wei. Reliability Analysis of Soil Slope Stability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(2): 80-87.
- [14] 陈祖煜, 张广文. “关于土坡稳定可靠度分析”一文的讨论[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 126-128.
- CHEN Zu-yu, ZHANG Guang-wen. Discussion on “Reliability Analysis of Soil Slope Stability”[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(6): 126-128.
- [15] 张高宁. 岩土工程的可靠度研究浅述[J]. 水文地质工程地质, 2000, 28(1): 26-28.
- ZHANG Gao-ning. Review on Reliability of Geotechnical Engineering[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2000, 28(1): 26-28.
- [16] 唐慧群. 可靠度分析在边坡稳定性分析中的应用[J]. 华东公路, 2005(3): 91-93.
- TANG Hui-qun. Reliability Analysis on Slope Stability [J]. East China Highway, 2005(3): 91-93.
- [17] 唐亚明. 基于可靠度的黄土斜坡稳定性分析[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1217-1222.
- TANG Ya-ming. Loess Slope Stability Analysis Based on Reliability[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(8): 1217-1222.
- [18] 彭小云, 张 婷, 秦 龙. 高陡边坡稳定性的影响因素分析[J]. 西北建筑工程学院学报: 自然科学版, 2002, 19(3): 14-17.
- PENG Xiao-yun, ZHANG Ting, QIN Long. Analysis of Influencing Factors for the Stability of High and Steep Slope[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering: Natural Science Edition, 2002, 19(3): 14-17.
- [19] 郭利平, 叶万军, 方 鹏, 等. 开挖扰动导致黄土边坡产生剥落病害的机理分析[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(4): 462-465, 470.
- GUO Li-ping, YE Wan-jun, FANG Peng, et al. Mechanism of Spalling Hazard in Loess Slope Induced by Excavation Disturbance[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30(4): 462-465, 470.
- [20] 熊 炜, 范 文, 邓龙胜, 等. 基于有限元修正节理岩质边坡稳定性计算的解析解[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(3): 306-310.
- XIONG Wei, FAN Wen, DENG Long-sheng, et al. Amendment of Analytical Solution on Stability of Joint Rock Slope Based on Finite Element Method [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(3): 306-310.
- [21] ROSENBLUETH E. Point Estimates for Probability Moments[J]. PNAS, 1975, 72(10): 3812-3814.
- [22] 王阿丹, 王昌业, 李 萍, 等. 西安白鹿塬北缘黄土边坡稳定的可靠度分析[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(1): 104-110.
- WANG A-dan, WANG Chang-ye, LI Ping, et al. Reliability Analysis for Stability of Loess Slope Along the Northern Edge of Bailuyuan, Xi'an[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(1): 104-110.
- [23] 罗文强, 黄润秋, 张倬元, 等. 几种边坡可靠性数学模型的对比[J]. 山地学报, 2000, 18(1): 42-46.
- LUO Wen-qiang, HUANG Run-qiu, ZHANG Zhuo-yuan, et al. Contrast of Some Mathematical Model of Slope Reliability [J]. Journal of Mountain Science, 2000, 18(1): 42-46.
- [24] 罗文强, 龚 珏, 杨瑞琰. 一次二阶矩方法在斜坡稳定性概率评价中的应用[J]. 地球科学, 1998, 23(6): 639-642.
- LUO Wen-qiang, GONG Jue, YANG Rui-yan. Application of First-order Second-moment Method to Assessing Slope Stability[J]. Earth Science, 1998, 23(6): 639-642.
- [25] 王艳红. 运用蒙特卡罗对黄土边坡进行稳定性分析[J]. 建筑设计管理, 2009, 26(12): 56-57.
- WANG Yan-hong. Analysis of Slope Stability by



- Monte-Carlo Method[J]. Architectural Design Management, 2009, 26(12): 56-57.
- [26] 邵中勇. 滑坡稳定性可靠度分析方法及应用[J]. 人民长江, 2011, 42(22): 32-34.  
SHAO Zhong-yong. Application of Reliability Analysis Method of Landslide Stability [J]. Yangtze River, 2011, 42(22): 32-34.
- [27] 张常亮, 李同录, 李 萍. 三维极限平衡法通用形式的建立及应用[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(1): 98-105.  
ZHANG Chang-liang, LI Tong-lu, LI Ping. Constitution and Application of Three-dimensional Limit Equilibrium General Form [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2010, 32(1): 98-105.
- [28] 高江平, 李 芳. 黄土邓肯张模型有限元计算参数的试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(2): 10-13, 21.  
GAO Jiang-ping, LI Fang. Experiments on Parameters of Duncan-Chang Model for Loess [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(2): 10-13, 21.
- [29] 毛巨省. 模糊综合评判在边坡稳定性评价中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(5): 609-612.  
MAO Ju-sheng. Application of Fuzzy Comprehensive Evaluation in Slope Stability Evaluation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30(5): 609-612.
- [30] 康亚明, 杨明成, 胡艳香, 等. 基于重度增加法的边坡稳定性三维有限元分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(4): 49-53.  
KANG Ya-ming, YANG Ming-cheng, HU Yan-xiang, et al. 3D FEM Analysis of Slope Stability Based on Gravity Increase Method[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4): 49-53.
- [31] 李同录, 王刘华, 张常亮, 等. 土质边坡空间临界滑动面搜索的优化算法[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(3): 300-305.  
LI Tong-lu, WANG Liu-hua, ZHANG Chang-liang, et al. Optimistic Method for Searching the Spatial Critical Slip Surface of Earth Slopes [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(3): 300-305.
- [32] 王福恒, 李家春, 田伟平. 黄土边坡降雨入渗规律试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(4): 20-24.  
WANG Fu-heng, LI Jia-chun, TIAN Wei-ping. Test on Rainfall Filtration in Loess Slope [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(4): 20-24.
- [33] 李 萍, 王秉纲, 李同录, 等. 陕西地区黄土路堑高边坡可靠度研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6): 18-25.  
LI Ping, WANG Bing-gang, LI Tong-lu, et al. Study of Reliability for Loess Cutting High Slopes in Shaanxi Province [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(6): 18-25.
- [34] GB 50068—2001, 建筑结构可靠度设计统一标准[S].  
GB 50068—2001, Unified Standard of Reliability Design of Building Structures[S].
- [35] SL 386—2007, 水利水电工程边坡设计规范[S].  
SL 386—2007, Design Code for Engineered Slopes in Water Resources and Hydropower Projects[S].
- [36] GB/T 50283—1999, 公路工程结构可靠度设计统一标准[S].  
GB/T 50283—1999, Unified Standard for Reliability Design of Highway Engineering Structures[S].
- [37] TANG W H, CHEUNG R W M. Bayesian Calibration of Failure Probability from Observed Performance[C]// MAES M, HUYSE L. Reliability and Optimization of Structural Systems. Amsterdam: Balkema A A, 2003: 107-125.
- [38] CHEUNG R W M, TANG W H. Reliability of Deteriorating Slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(5): 589-597.
- [39] CHEUNG R W M, TANG W H. Realistic Assessment of Slope Reliability for Effective Landslide Hazard Management[J]. Geotechnique, 2005, 55(1): 85-94.
- [40] 黄润秋, 许 强, 戚国庆. 降雨及水库诱发滑坡的评价与预测[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
HUANG Run-qiu, XU Qiang, QI Guo-qing. Evaluation and Estimation of Rainfall and Reservoir Induced Landslides[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [41] 李 萍, 王秉纲, 李同录. 自然类比法在黄土路堑边坡设计中的应用研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(2): 1-5.  
LI Ping, WANG Bing-gang, LI Tong-lu. Study on Analogism Used in Highway Cutting Loess Slope Design [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(2): 1-5.