

文章编号: 1000-7598(2013)03-0811-07

甘肃黄土高边坡可靠度研究

李 萍, 黄丽娟, 李振江, 李新生, 李同录

(长安大学 地质工程系, 西安 710054)

摘 要: 以甘肃省 266 个黄土自然极限状态坡为研究对象, 将其按地形地貌、地层岩性等特征划分为 4 个亚区, 对每个亚区的极限状态坡高与坡宽进行双对数线性模型回归和不同置信度下的统计分析, 给出 4 个亚区不同置信度下坡高与坡宽的相关关系。以 1 024 组黄土物理力学指标统计结果作为计算参数, 用 Bishop 法的稳定系数计算公式建立极限状态方程, 利用 Monte Carlo 法对各亚区不同置信度下的边坡进行可靠度模拟, 系统分析了坡高、坡度、参数变异性对失效概率的影响, 以及失效概率与稳定系数的关系。结果表明, 临洮-永靖亚区边坡坡度低于 31.5° , 失效概率可控制在 10% 以下; 陇东亚区、兰州-定西-会宁亚区和天水-秦安-通渭亚区在强度参数变异系数取当地平均水平, 稳定系数为 1.3 情况下失效概率在 10% 以内, 稳定系数为 1.2 情况下, 失效概率多在 20% 以内。

关 键 词: 黄土边坡; Monte Carlo 法; 可靠度; 失效概率; 极限状态坡

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

Study of reliability for loess high slopes in Gansu area

LI Ping, HUANG Li-juan, LI Zhen-jiang, LI Xin-sheng, LI Tong-lu

(Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to analyze reliability of loess high slopes, 266 natural ultimate state slopes are measured in Gansu area. According to the characteristics of topography and lithology, the studied region is divided into 4 subareas. The correlations of ultimate state slope height and width are given by means of double log-linear regression in different confidences for the 4 subareas respectively. Meanwhile, 1 024 groups of physico-mechanical indices obtained from reports are statistically analyzed. Based on the above, the ultimate state equation is built by means of Bishop's method. Reliability analysis for slopes under different confidences in 4 subareas is carried out with the Monte Carlo method. The effects of slope height, slope ratio and variability of parameters on the probability of failure are systematically analyzed. The results show that the slope ratio in Lintao-Yongjing subarea is smaller than 31.5° if the probability of failure (P_f) is kept within 10%. In the condition of the average coefficient of variation in Longdong subarea, Qin'an Lanzhou-Dingxi-Huining subarea and Tianshui-Qin'an-Tongwei subarea, the maximum of P_f of loess slopes is less than 10% with safety factor (F_s) of 1.3, as well as P_f less than 20% with $F_s=1.2$.

Key words: loess slope; Monte Carlo method; reliability; failure probability; ultimate state slopes

1 引 言

甘肃省黄土具有 3 个主要特点: ①厚度大, 最厚达 307 m^[1], 200 m 以上的黄土自然边坡较为常见; ②在较干旱条件下形成, 粒度粗, 黏粒含量低, 砂粒含量较高, 古土壤不发育, 对水极敏感, 湿陷性高; ③发育有厚度达 50 m 以上的马兰黄土。由于甘肃省黄土的这些特殊性质, 自然边坡破坏严重, 并以大、中型黄土层内滑坡或黄土泥岩复合型滑坡

为主。陇西黄土高原区占甘肃滑坡强烈发育区的 59%, 主要分布在东乡县巴谢河流域、武山-甘谷-秦安-天水-静宁等渭河流域以及兰州地区的黄河高阶地上, 为甘肃省滑坡最为集中发育的地区之一。陇东黄土高原区主要分布有合道-三岔、茹河-蒲河、泾河干流、及正宁等滑坡强烈发育区, 以中、小型黄土层内滑坡为主要类型^[2]。在这些滑坡易发区修建公路、铁路及工业与民用建筑, 诱发新老滑坡的可能性极大。如 212 线兰临高速公路西果园滑坡为

收稿日期: 2012-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40772181); 国家自然科学基金项目(No. 40972182)。

第一作者简介: 李萍, 女, 1971 年生, 博士, 副教授, 主要从事地质工程教学、黄土强度特性及黄土边坡可靠度研究。E-mail: dcdgx07@chd.edu.cn

一稳定的老滑坡,因开挖桥基复活,威胁到西果园特大桥的安全;312 国道多处受到黄土滑坡影响;而兰州、天水市区深受黄土滑坡之害。因此,甘肃省在公路、铁路、工业与民用建设中,黄土边坡(滑坡)的稳定性评估及其风险分析,是各行业都面临的一个重点课题。

目前工程实践中主要采用安全系数法与经验相结合进行边坡稳定性评估。在边坡修建过程中,工程师对自己设计的边坡存在的风险水平不甚了解,尽管采用可靠度方法与风险分析对边坡稳定性评估较为有效^[3-7],但在黄土边坡工程中还没有广泛应用。本文采用李萍^[8-9]提出的极限状态坡概念,对甘肃黄土极限状态坡进行系统地调查与测量,在对研究区进行亚区划分的基础上,根据所测各亚区极限状态坡特征及坡高与坡宽的双对数线性回归结果,对各亚区不同坡高与坡度的边坡进行可靠度分析,系统评估甘肃省黄土边坡的可靠度,以促进风险分析在甘肃黄土边坡设计中的应用。

2 甘肃黄土极限状态坡调查与测量

李萍^[8]在对陕西黄土边坡系统研究的基础上,

提出了极限状态坡的概念。根据极限状态坡的野外判别依据,在甘肃测得极限状态坡 266 个。根据地形地貌、水文地质、地层岩性及区域边坡破坏特征,将甘肃黄土地区分为 4 个亚区,分别为陇东亚区、兰州-定西-会宁亚区、天水-秦安-通渭亚区和临洮-永靖亚区,具体位置如图 1 所示。对每个亚区的测量边坡进行坡高与坡宽的相关性统计,结果见表 1。表 1 方程中 L 为边坡宽度(m), H 为边坡高度(m),采用双对数线性回归,并做了 0.95、0.85、0.75 共 3 种置信度下的统计分析,表中所列不同置信度下的值为回归方程中常数项的置信上限值,一次项的系数在不同置信度下保持不变。



图 1 分区及测点位置示意图

Fig.1 Sketch of subarea and the surveying sites

表 1 甘肃 4 个亚区边坡统计特征

Table 1 Statistical characteristics of slopes in the four subareas of Gansu province

亚区	坡数/个	均值回归方程	相关系数 R^2	0.95 置信度常数项	0.85 置信度常数项	0.75 置信度常数项
陇东	63	$\ln L = 1.449 \ln H - 1.734$	0.93	-1.345	-1.450	-1.508
兰州-定西-会宁	109	$\ln L = 1.404 \ln H - 1.660$	0.95	-1.367	-1.446	-1.489
天水-秦安-通渭	54	$\ln L = 1.814 \ln H - 3.243$	0.93	-2.657	-2.817	-2.903
临洮-永靖	40	均值: 32.8, 标准差: 3.90		31.6°	32.2°	32.4°

临洮-永靖亚区为马衔山以西的洮河流域及黑方台等黄河高阶地地区。该亚区地层上部为厚 50 m 左右的 Q_4 、 Q_3 和 Q_2 黄土,黑方台地区黄土下部一般有一层河流相粉质黏土和砂砾石层的二元结构,其下为巨厚的红色白垩系河口群(K_{hk})泥岩或泥砂岩,在贯通的滑动面上黏聚力基本为 0^[2]。滑坡部分从泥岩顶部剪出,属黄土滑坡,部分顺泥岩层内滑出,属黄土-泥岩顺层滑坡。该区共测极限状态坡 40 个,所测边坡高度 20.1~164 m,由图 2 可见,该亚区边坡坡高与坡度不相关,边坡稳定性与坡高无关。说明该区黄土黏聚力小,边坡稳定性仅与内摩擦角有关。该区所测极限状态坡坡度在 26.5°~40°范围内,均值为 32.8°,去掉大于均值的数据,再取其平均值为 28.7°,称该值为小值平均值。将这些统计坡度值用于后续可靠度分析的地质模型中。

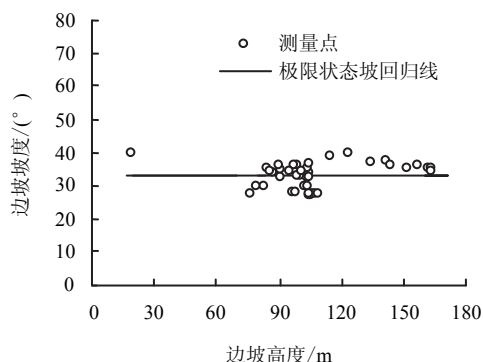


图 2 临洮-永靖亚区极限状态坡统计

Fig.2 Statistics of limit state slopes in Lintao-Yongjing subarea

陇东亚区为六盘山以东子午岭以西的区域。主要为泾河上游和其支流马莲河流域。以环县的合道

川为界,以南为黄土塬区,以北为黄土梁峁区。塬区 Q_4 黄土埋深 2 m 左右, Q_3 马兰黄土埋深 12 m 左右;梁峁区 Q_4 黄土较厚,一般有 5 m 左右,马兰黄土埋深在 15 m 左右。塬区和梁峁区 Q_2 离石黄土埋深约 65 m 左右,其下的 Q_1 午城黄土埋深达 200 m^[10]。研究表明^[10], Q_2 上部的黄土也具有一定的湿陷性,与马兰黄土性质相似。李文^[11]对甘肃黄土研究后认为,按干密度对黄土分层,更能反映黄土的强度特性,并将 1.4 g/cm^3 和 1.7 g/cm^3 作为划分界限。本文采用这一成果,将收集到的该亚区土工试验数据按干密度分层,该亚区 1.4 g/cm^3 埋深约在 20 m 左右, 1.7 g/cm^3 埋深约在 60 m 左右,并粗略地认为,干密度小于 1.4 g/cm^3 的为 Q_4 、 Q_3 黄土,干密度在 $1.4 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ 的为 Q_2 黄土,大于 1.7 g/cm^3 的为 Q_1 黄土。该亚区共测极限状态坡 63 个,测得最高边坡 103.6 m,坡度 37.6° ,最低边坡 14.3 m,坡度 55.1° 。所测得的 63 个点边坡的坡高与坡宽散点图及相关分析曲线见图 3(a)。

兰州-定西-会宁亚区为马衔山以东六盘山以西,渭源-通安驿-新站-党家岷-界石铺一线以北的区域,主要分布在祖厉河流域及黄河高阶地上。黄

土高原最厚的黄土地层发育在该亚区内。从 Q_1 至 Q_4 的黄土地层齐全,根据文献[12]提供的该亚区地层剖面, Q_3 黄土厚达 50 m 以上, Q_2 和 Q_1 黄土多在 100 m 以上。整体上该亚区黄土中黏粒含量较低,粉粒和砂粒含量较高,黄土对水极敏感,湿陷性强烈,坡面易被冲刷,滑坡现象严重,高速公路的高边坡问题较为突出。该亚区所测得的 109 个点边坡的坡高与坡宽散点图及相关分析曲线见图 3(b),测得最高边坡为 215.7 m,坡度为 24.3° ,最低边坡为 20.1 m,坡度为 73.4° ,边坡高而陡,150 m 高的边坡坡度达 40° 以上,200 m 以上的超高边坡较为常见。

天水-秦安-通渭亚区为鸟鼠山以东,渭源-通安驿-新站-党家岷-界石铺一线以南地区,主要为渭河流域及其支流葫芦河流域。该亚区基岩出露较高,基岩上部为 Q_2 及以上黄土, Q_3 黄土厚度一般在 30 m 左右, Q_2 黄土厚度在 60 m 左右,静宁的北部相对较厚一些,下部为 N_2 泥岩及泥砂岩。该亚区所测得的 54 个点边坡的坡高与坡宽散点图及相关分析曲线见图 3(c),测得最高边坡为 148.6 m,坡度为 22.6° ,最低边坡为 18.0 m,坡度为 69° ,低坡较陡,高坡较缓。

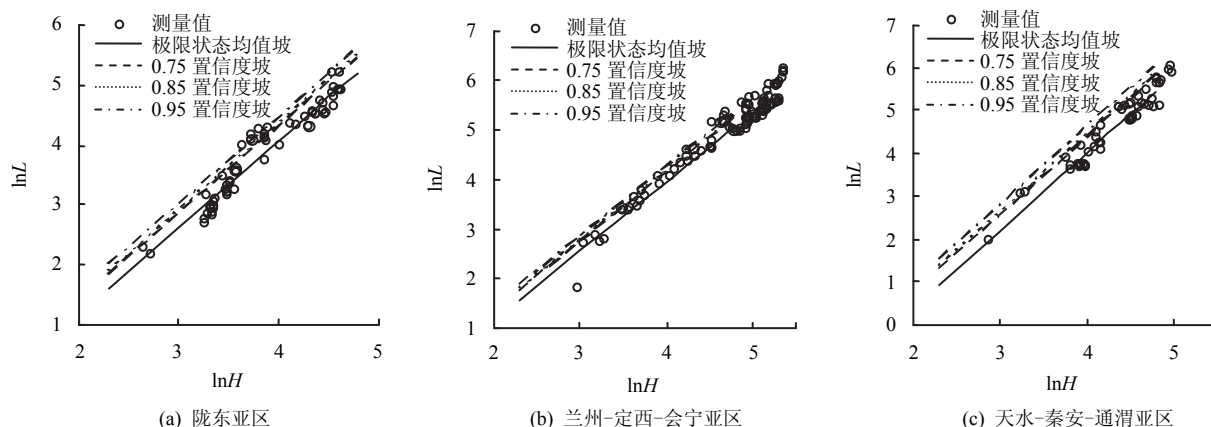


图3 三亚区极限状态坡高与坡宽统计

Fig.3 Statistical curves of limit state slopes between height and width in the three subareas

从上面的分析看出,甘肃黄土地区的4个亚区土性特征与边坡特征有较为显著的差异。在进行黄土边坡可靠度分析时,分亚区进行边坡地质模型的建立和参数统计,是非常必要的。

3 强度参数的统计分析

根据甘肃省近年来已建和在建的高速公路、铁路地质勘探报告以及测量极限状态坡过程中取样测试结果,共统计了1 024组各亚区不同年代的地层物理力学指标,结果见表2。每一亚区地层划分综合了地层年代和土的天然干密度。强度指标 c 、 φ 值

由直接快剪试验测得,表中统计结果综合了勘察报告统计值、11个滑坡反演值和作者在各亚区取样测试值。经 $K-S$ 检验,各亚区不同地层的 c 、 φ 值多服从正态分布。

4 甘肃省黄土的变异性特征

选取40个工点或距离较近的工程场地勘察报告中 c 、 φ 值测试结果,分层对 c 、 φ 值变异系数进行了统计,统计结果见表3。从表可见,甘肃省黄土黏聚力变异系数 COV_c 和内摩擦角变异系数 COV_φ

的大小在各亚区有很大的不同。1~10 工点多属临洮-永靖亚区,主要为砂质黄土,黏粒含量低,黏聚力小,在较小含水率下 c 值小于 20 kPa,这种土 COV_c 和 COV_ϕ 都极小,统计样本 COV_c 和 COV_ϕ 范围在 0.02~0.10,均值仅 0.04 左右。28~34 工点属陇东亚区,在该亚区,黄土黏粒含量高,在低含水率下强度较高,高含水率下强度降低幅度较大,黏聚力和内摩擦角变异性大,尤其是 COV_c ,最大达 0.83,

均值为 0.60。兰州-定西-会宁亚区和天水-秦安通渭亚区的 COV_c 平均值仅有 0.35。

将陇东亚区、兰州-定西-会宁亚区和天水-秦安-通渭亚区一起统计, COV_c 范围为 0.04~0.83,均值为 0.39,13%小于 0.10,27%小于 0.20,33%小于 0.30,53%小于 0.40,60%小于 0.50; COV_ϕ 的范围为 0.04~0.35,均值为 0.15,27%小于 0.10,63%小于 0.20,80%小于 0.30。

表 2 甘肃黄土物理力学指标统计表

Table 2 Physico-mechanical indices of loess in Gansu province

分区	年代	$\rho_d /(\text{g}/\text{cm}^3)$	样本数	$w/\%$	$\rho /(\text{g}/\text{cm}^3)$	$\rho_d /(\text{g}/\text{cm}^3)$	e	$S/\%$	$w_L/\%$	$w_P/\%$	$I_P/\%$	c/kPa	$\phi /(^{\circ})$
陇东亚区	Q ₃	$\rho_d < 1.4$	189	16.3	1.56	1.34	1.014	43.8	26.6	17.6	8.9	24.0	23.5
	Q ₂	$1.4 < \rho_d < 1.7$	145	18.2	1.81	1.54	0.770	65.4	28.7	18.3	10.3	32.4	26.6
	Q ₁	$\rho_d > 1.7$	21	19.9	2.10	1.75	0.556	95.9	32.1	18.8	13.3	41.0	26.8
天水-秦安-通渭亚区	Q ₃	$\rho_d < 1.4$	24	15.7	1.49	1.29	1.094	38.3	32.2	20.0	12.2	27.2	26.8
	Q ₂	$1.4 < \rho_d < 1.7$	72	18.2	1.85	1.57	0.742	68.6	31.4	19.8	11.6	39.6	26.8
	Q ₁	$\rho_d > 1.7$	21	18.8	2.09	1.76	0.545	93.4	35.4	19.5	15.9	71.7	28.3
泥砂岩					2.32							34	35.2
兰州-定西-会宁亚区	Q ₃	$\rho_d < 1.4$	266	12.1	1.43	1.28	1.130	28.8	27.9	18.9	9.1	23.8	27.3
	Q ₂	$1.4 < \rho_d < 1.7$	219	17.0	1.79	1.53	0.788	60.2	27.5	18.4	9.1	26.1	28.0
	Q ₁	$\rho_d > 1.7$	32	20.0	2.11	1.76	0.543	96.9	32.0	20.8	11.2	85.1	26.5
临洮-永靖亚区	Q ₄ /Q ₃ /Q ₂		35	13.6	1.56	1.37	0.973	38.3	26.6	17.7	8.8	3.9	29.6
	泥岩		11		2.34							0	30.9

注: ρ_d 为干密度, w 为含水率, ρ 为天然密度, e 为孔隙比, S 为饱和度, w_L 为液限, w_P 为塑限, I_P 为塑性指数, c 为黏聚力, ϕ 为内摩擦角。

表 3 强度参数变异系数特征

Table 3 Characteristics of COV_c and COV_ϕ

序号	取样地点	年代	样数	COV_c	COV_ϕ	序号	取样地点	年代	样数	COV_c	COV_ϕ
1	营儿村	Q ₃	7	0.10	0.04	21	平定 XK207	Q ₃	26	0.34	0.22
2	永登车站	Q ₃ /Q ₂	24	0.09	0.03	22	平定 XK209	Q ₃	17	0.26	0.25
3	清寺车站	Q ₃	7	0.06	0.07	23	平定 XK209	Q ₃	24	0.38	0.17
4	大路车站	Q ₃	8	0.05	0.04	24	平定 XK209	Q ₃	15	0.58	0.19
5	兰-广铁路涵洞	Q ₃	14	0.03	0.02	25	平定 K241	Q ₃	8	0.38	0.10
6	兰-广铁路路基	Q ₃	18	0.04	0.04	26	平定 CXK246	Q ₃	14	0.05	0.04
7	咀头隧道	Q ₃	6	0.06	0.04	27	平定 CSK249	Q ₃	14	0.11	0.08
8	金家坪特大桥	Q ₃	8	0.02	0.04	28	西长风 K1-K8	Q ₃	33	0.51	0.22
9	大草滩段 CK53	Q ₃ /Q ₂	19	0.03	0.04	29	西长风 K11-K18	Q ₃	34	0.61	0.11
10	黑方台	Q ₃ /Q ₂	8	0.09	0.10	30	西长风 K20-K29	Q ₃	43	0.64	0.21
11	平定 K130	Q ₃	11	0.11	0.08	31	西长风 K30-K38	Q ₃	27	0.79	0.17
12	平定 AK258	Q ₂	27	0.44	0.35	32	西长风 K41-K52	Q ₃	45	0.83	0.12
13	平定 K265	Q ₃	26	0.13	0.10	33	西长风	Q ₂	24	0.59	0.18
14	平定 K268	Q ₃	17	0.34	0.20	34	西长风	Q ₁	25	0.53	0.11
15	平定 K330	Q ₃	19	0.04	0.08	35	谗柳 K2-K7	Q ₃	25	0.27	0.12
16	平定 CSK207	Q ₃	23	0.06	0.12	36	谗柳 K12-K19	Q ₃	47	0.37	0.07
17	平定 CXK207	Q ₃	24	0.08	0.12	37	谗柳 K20-K27	Q ₃	53	0.58	0.17
18	平定 SK207	Q ₃	30	0.55	0.24	38	谗柳 K30-K39	Q ₃	83	0.50	0.14
19	平定 SK209	Q ₃	24	0.31	0.16	39	谗柳 K40-K44	Q ₃	36	0.67	0.07
20	平定 SK209	Q ₃	24	0.55	0.17	40	天定	Q ₃	13	0.20	0.10

5 可靠度计算及结果分析

5.1 可靠度计算模型的建立

陇东亚区、兰州-定西-会宁亚区和天水-秦安-通渭亚区边坡坡高与坡宽采用表 1 公式计算,最低

坡高从 20 m 算起,参考自然边坡高度和工程边坡的高度,陇东亚区和兰州-定西-会宁亚区最高计算边坡高为 120 m;天水-秦安-通渭亚区最高边坡高为 100 m,每个亚区不同置信度下 10 m 一个步长。3 个亚区共计算了 124 个地质模型,临洮-永靖亚区

采用了极限状态坡的均值、0.95 置信度、0.85 置信度、0.75 置信度、小值平均值和测试最低值共 6 个坡度, 由于该区强度基本没有考虑黏聚力, 坡高对边坡稳定性没有影响, 因此, 只选用了 80 m 一个坡高, 共进行了 6 个地质模型的计算。根据各亚区的地层特征, 并综合了干密度的值, 4 个亚区可靠度计算的地层厚度按表 4 取值。

用 Bishop 法建立极限状态方程^[8], 采用 Monte-Carlo 法进行边坡可靠度模拟, 计算软件用 GeoStudio2007。各地层强度参数 c 、 φ 值的均值和天然密度按表 2 给出的数据取值。按照各工点 c 、 φ 值的变异性特点, 临洮-永靖亚区变异性较小, 且仅与内摩擦角有关, 因此, COV_φ 分别取 0.04、0.10、0.15 共 3 种类型。其他 3 个亚区将 COV_c 和 COV_φ 进行组合并编号, 见表 5。重度的变异系数统一取 0.06。4 个亚区共进行了 1 506 次 Monte-Carlo 模拟, 每次模拟随机抽样 5 000 次。

表 4 各亚区地层划分表

Table 4 Stratigraphical division in each subarea		
亚区	年代及地层	厚度/m
陈东	Q ₄ /Q ₃ 黄土	20
	Q ₂ 黄土	50
	Q ₁ 黄土	50
兰州-定西-会宁	Q ₄ /Q ₃ 黄土	30
	Q ₃ /Q ₂ 黄土	60
	Q ₂ 黄土	30
天水-秦安-通渭	Q ₄ /Q ₃ 黄土	30
	Q ₂ 黄土	30
	Q ₂ /Q ₁ 黄土	30
临洮-永靖	N ₁ 泥岩	10
	Q ₃ /Q ₂ 黄土	50
	泥岩	30

表 5 黄土变异系数组合表

Table 5 Combination of variation coefficient		
COV 组合	c 变异系数 COV_c	φ 变异系数 COV_φ
组合 1	0.1	0.10
组合 2	0.1	0.15
组合 3	0.1	0.20
组合 4	0.2	0.10
组合 5	0.2	0.15
组合 6	0.2	0.20
组合 7	0.3	0.10
组合 8	0.3	0.15
组合 9	0.3	0.20
组合 10	0.4	0.10
组合 11	0.4	0.15
组合 12	0.4	0.20

5.2 模拟结果分析

临洮-永靖亚区随边坡坡度增大, 失效概率增高。而当 $COV_\varphi=0.04$ 时, 边坡坡度控制在 31.5° 以下, 边坡失效概率可控制在 5% 以下; 当 $COV_\varphi=0.1$ 时, 边坡坡度控制在 29.5° 以下, 边坡失效概率控制在 10% 以下; 可见 COV_φ 对该区边坡失效概率起了关键作用。由图 4 可见, 边坡坡度陡于 31.5°, 失效概率随坡度的增大急骤上升。因此, 该亚区不论是高坡还是低坡, 坡度都不宜大于 31.5°。

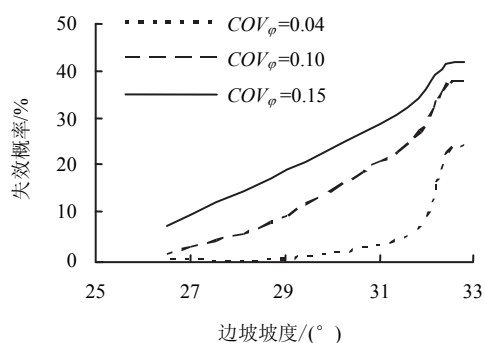


图 4 临洮-永靖亚区边坡坡度与失效概率关系曲线

Fig.4 Relationships between slope ratio and P_f in Lintao-Yongjing subarea

取 COV 组合 11, 即均值组合 $COV_c=0.40$, $COV_\varphi=0.15$, 将兰州-定西-会宁亚区、天水-秦安-通渭亚区和陇东亚区极限状态均值坡高与失效概率的关系绘于图 5。由图可见, 采用极限状态均值坡计算得失效概率在 50% 左右, 但变化范围较大, 随坡高的增大, 中等坡高失效概率最大, 高坡和低坡较小。0.95 置信度坡指测量的极限状态坡样本有 97.5% 陡于该坡度。采用不同置信度坡进行可靠度计算, 实质上是不同程度地放大了自然极限状态坡。在 COV 组合 8 情况下, 在不同坡高下失效概率的最小值与最大值范围, 0.75 置信度兰州-定西-会宁亚区为 15.1%~35.5%, 天水-秦安-通渭亚区为 0.04%~29.3%, 陇东亚区为 2.1%~21.6%; 0.85 置信度兰州-定西-会宁亚区为 10.8%~31.0%, 天水-秦安-通渭亚区为 0.02%~23.1%, 陇东亚区为 0.9%~15.2%; 0.95 置信度兰州-定西-会宁亚区为 5.4%~22.5%, 天水-秦安-通渭亚区为 0.0~14.6%, 陇东亚区为 0.2%~11.8%。可见不同坡高下失效概率的变化范围较大, 在 COV_c 和 COV_φ 相差较小时, 最大值与最小值较为接近。一般 COV_c 高, 低坡的失效概率较高; COV_φ 值高, 高坡的失效概率较高^[13]。陇东亚区在边坡高度大于 80m 以后, 失效概率较低, 天水-秦安-通渭亚区边坡高度大于 40 m,

即地层含有老黄土且坡度较缓,稳定性较高,失效概率较低。失效概率随着坡度的降低而降低,但即使在 0.95 置信度下,在各亚区失效概率最大值仍然大于 10%。兰州-定西-会宁亚区的失效概率大于其他两个亚区。

按相同的变异系数组合,综合了全部置信度坡和坡高,获得了 4 个亚区最大失效概率与稳定系数的关系,如图 6 所示,并取稳定系数 $F_s=1.2$ 情况下不同变异系数组合与失效概率的关系进行了放大,以便于清楚显示。图 6 中每条曲线代表同一稳定系数条件下的最危险情况,即图 7 中曲线的上边缘值。从图 6 可见,在 F_s 接近 1 和 $F_s>1.4$ 情况下,从 COV 组合 1 至组合 12,失效概率较为接近,说明参数变

异性对稳定系数接近 1 的边坡和稳定系数较大的边坡,影响较小;在 $F_s=1.2$ 左右,则影响大。同时可见,当一个参数的变异性较小时,如 $COV_c=0.1$,边坡失效概率将对另一个参数的变异性 COV_ϕ 更敏感。

尽管随着参数变异性的增大,边坡失效概率增大幅度较大,但对于大多数变异系数组合,稳定系数与失效概率总体上有一个量级关系,即稳定系数 1.0 对应着失效概率 50%左右;稳定系数 1.05 对应的失效概率在 40%~50%;稳定系数 1.1 对应的失效概率在 30%~40%;稳定系数 1.15 对应的失效概率在 20%~30%;稳定系数 1.2 对应着失效概率在 10%~20%;稳定系数 1.3 对应着失效概率在 0~10%。

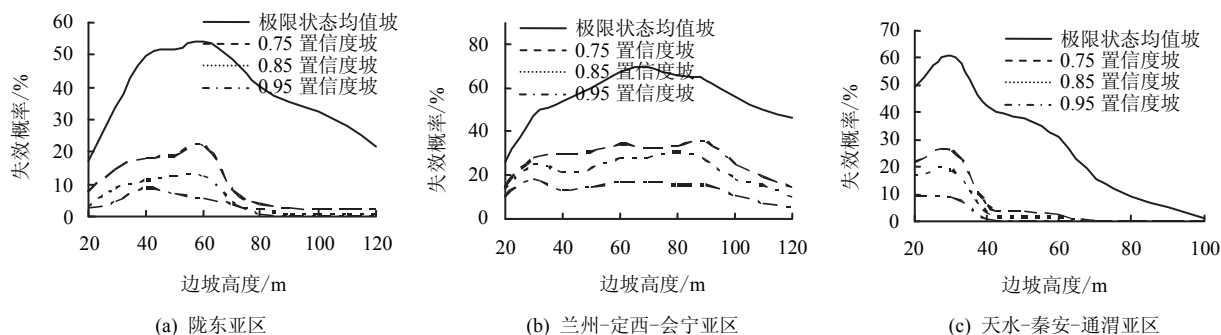


图 5 三亚区坡高与失效概率关系曲线(COV 组合 11)

Fig.5 Relationships between height of slope and P_f in the three subareas (for group $COV11$)

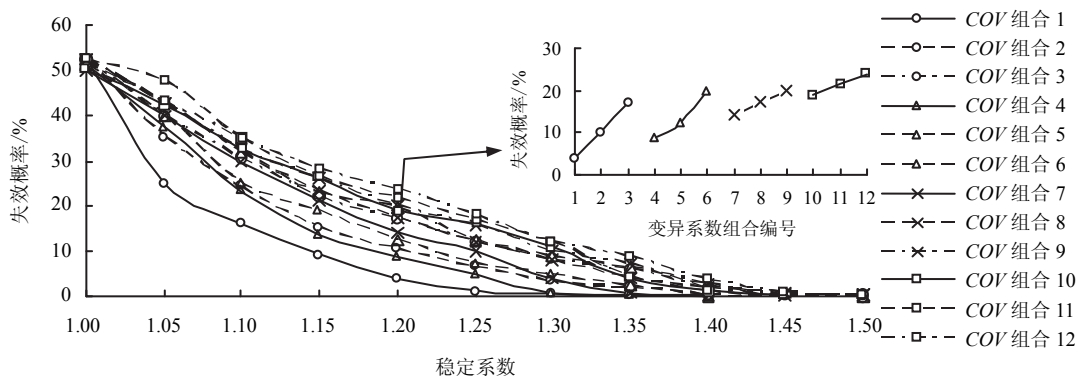


图 6 三亚区最大失效概率与稳定系数关系

Fig.6 Relationships between F_s and the maximum P_f in the three subareas

6 目标可靠度分析

根据图 6,如果 COV_c 和 COV_ϕ 能控制在 0.1 以下,设计边坡失效概率可控制在 1%以内。变异系数组合平均水平 $COV_c=0.4$ 、 $COV_\phi=0.15$,在稳定系数 1.3 条件下失效概率在 10%以内,稳定系数 1.2 条件下失效概率在 22%以内。文献[8]提出,陕西黄土路堑高边坡的可靠度设计标准,对于高速公路和一级公路,设计失效概率为 7%~10%,稳定系数在

1.3 左右;对于二级及二级以下公路,设计失效概率为 14%~16%,稳定系数在 1.2 左右,这个标准是在 $COV_c=0.3$ 、 $COV_\phi=0.15$ 条件下提出的。如果稳定系数达 1.3,甘肃 4 个亚区 $COV_c=0.3$ 、 $COV_\phi=0.15$ 条件下失效概率小于 8.0%, $F_s=1.2$ 情况下失效概率小于 17%,与陕西的标准较为接近,该变异系数组合中的 COV_c 略低于甘肃 3 个亚区的 COV_c 平均值。而 COV_ϕ 达到了平均水平。因此,文献[8]的标准可作为甘肃各亚区黄土路堑高边坡可靠度设计的参

考。对于建筑边坡,在目前工程中以直剪试验为主要强度测试方法及分厚层进行指标统计的基础上,建议设计失效概率应控制在1%以下,边坡稳定系数需达1.45。

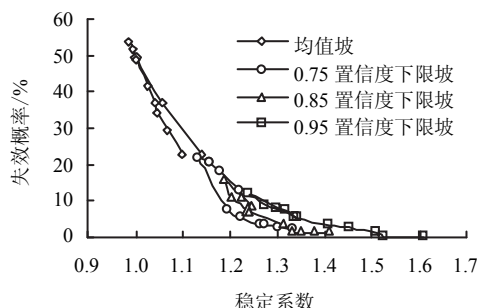


图7 稳定系数与失效概率关系(COV 组合 11)

Fig.7 Relationships between F_s and P_f (for group COV11)

7 结 论

(1) 不同坡高情况下,临洮-永靖亚区边坡坡度都不宜大于 31.5° ,缓于该坡度边坡失效概率基本能控制在10%以下。

(2) 陇东亚区、兰州-定西-会宁亚区和天水-秦安-通渭亚区黄土高边坡设计中应综合考虑失效概率与稳定系数2个指标进行稳定性评估,在强度参数变异系数取平均水平的情况下,稳定系数达到1.3,失效概率多小于10%;稳定系数达到1.2,失效概率多小于20%。

(3) 建议对于高速公路和一级公路,设计失效概率小于10%,稳定系数可控制在1.3左右;对于二级及二级以下公路,设计失效概率小于20%,稳定系数可控制在1.2左右。对于工民建边坡,建议设计失效概率应控制在1%以内,稳定系数需达到1.45。

参 考 文 献

- [1] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [2] 吴玮江, 王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006.
- [3] GRIFFITHS D V, HUANG JIN-SONG, FENTON G A. On the reliability of earth slopes in three dimensions[J]. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences**, 2009, 465(2110): 3145-3164.
- [4] CHING Jian-ye, PHOON Kok-kwang, HU Yu-gang. Efficient evaluation of reliability for slopes with circular slip surfaces using importance sampling[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2009, 135(6): 768-777.
- [5] DÜZGÜN H S B, ÖZDEMİR A. Landslide risk assessment and management by decision analytical procedure for Dereköy, Konya, Turkey[J]. **Nat Hazards**, 2006, 39: 245-263.
- [6] 谢全敏, 边翔, 夏元友. 滑坡灾害风险评价的系统分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 71-74.
XIE Quan-min, BIAN Xiang, XIA Yuan-you. Systematic analysis of risk evaluation of landslide hazard[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(1): 71-74.
- [7] 李典庆, 吴帅兵. 考虑时间效应的滑坡风险评估和管理[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2239-2245.
LI Dian-qing, WU Shuai-bing. Landslide risk assessment and management considering time effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(12): 2239-2245.
- [8] 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 slope in Shaanxi province[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2009, 22(6): 18-25.
- [9] 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(1): 1-5.
LI Ping, WANG Bing-gang, LI Tong-lu. Study of analogism used in highway cutting loess slope design[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2009, 26(1): 1-5.
- [10] 张贵义, 曹家泉, 王治军, 等. 陇东黄土工程地质[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2001.
- [11] 李文. 含水率对甘肃黄土边坡抗剪强度的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [12] 张宗祜, 张之一, 王芸生. 中国黄土[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- [13] 张常亮, 李萍, 陶福平, 等. 黄土强度指标对边坡稳定性的影响研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(3): 20-24.
ZHANG Chang-liang, LI Ping, TAO Fu-ping, et al. Research of effect of strength index on loess slope stability[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2011, 28(3): 20-24.