第 34 卷 第 1 期
2012 年 3 月

地 球 科 学 与 环 境 学 报
Journal of Earth Sciences and Environment

Vol. 34 No. 1
Mar. 2012

文章编号:1672-6561(2012)01-0104-07

西安白鹿塬北缘黄土边坡稳定的可靠度分析

王阿丹,王昌业,李 萍,李同录

(长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054)

摘 要:在西安白鹿塬北缘实测了 14 个黄土自然边坡断面,建立了地质模型,通过采样测试并收集已有的测试资料,获得了各时代黄土地层的物理力学参数,将 Morgenstern-Price 法稳定性计算公式作为极限状态方程,分别采用 Monte-Carlo 法和 Duncan 法进行了边坡稳定的可靠度分析。结果表明:采用 Monte-Carlo 法和 Duncan 法得到的 14 个边坡稳定系数分别为 1.11~1.41 和 1.09~1.33,显示这些边坡处于基本稳定—稳定状态;采用上述两种方法得到的边坡可靠指标分别为 0.56~1.79 和 0.39~1.60,得到的失效概率分别为 3.4%~29.0%和 5.5%~34.8%,并且共有 75%的边坡失效概率大于 10%,失效可能性较大。统计结果表明:白鹿塬区边坡的坡高和坡度存在负相关性。低而陡的边坡潜在最危险滑面剪出口较高,失效概率较小;坡高达到 50 m 及以上时,边坡高而缓,剪出口较低,失效概率较大,其中河流下切深,有 N_2 泥岩出露的极高边坡,稳定性最差。Duncan 法求解的稳定系数略小于 Monte-Carlo 法求得的结果,而前者求解的失效概率略大于后者,两种方法计算结果较为接近。由于 Duncan 法理论简单,计算量小,更宜于在实际工程中应用。

关键词:黄土;边坡;稳定系数;Monte-Carlo 法;Duncan 法;可靠度;失效概率

中图分类号:P642.13^{+}1;X141 **文献标志码**:A

Reliability analysis for stability of loess slopes along the northern edge of Bailuyuan, Xi'an

WANG A-dan, WANG Chang-ye, LI Ping, LI Tong-lu

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

Abstract: The sections of 14 loess natural slopes were measured along the northern edge of Bailuyuan, Xi'an, and then the geologic models were built. The parameters of physical mechanics of loess strata in different periods were obtained by in-suit testing and collecting data. Monte-Carlo Method and Duncan Method were used for slope reliability analysis based on the limit state equation of Morgenstern-Price Method. The results showed that the stability coefficients of 14 slopes calculated by Monte-Carlo Method and Duncan Method were 1.11-1.41 and 1.09-1.33 respectively, and the slopes were basically stable-stable; the reliable indicator of slopes calculated by the above methods were 0.56-1.79 and 0.39-1.60 and the failure probabilities of slopes were 3.4%-29.0% and 5.5%-34.8%, respectively; the failure probabilities of 75% slopes were more than 10%, and the failure Likelihoods were high. The statistical results indicated that the relationship between height and gradient of slopes was negative. The landslide shear crack of most dangerous potential slip surface in the low-steep slope was high, and the failure probability was small; when the height of slope was 50 m or more, it was high and slight, the landslide shear

收稿日期:2011-04-10

基金项目:国家自然科学基金项目(40772181,40972182)

作者简介:王阿丹(1987-),男,陕西西安人,工学硕士研究生,从事黄土边坡稳定性研究,E-mail:546010583@qq.com。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

crack was low, the failure probability was high, and because of the deep stream trenching, there was highest slope in mudstone from strata N_2, and the stability was most poor. The stability coefficients calculated by Duncan Method were a little less than that by Monte-Carlo Method, the failure probabilities calculated by the former were a little more than that by the latter, so the results calculated by the two methods were close. Because of the simple theory and small amount of calculation, Duncan Method was more appropriate for practical engineering.

Key words: loess; slope; stability coefficient; Monte-Carlo Method; Duncan Method; reliability; failure probability

0　引　言

陕西省西安市东郊白鹿塬边缘地带是滑坡易发区，主要集中在 3 个区段：灞河南岸、浐河边和鲸鱼沟边。由于地形相对高差大，切割强烈，白鹿塬北缘的灞河南岸滑坡尤为发育[1-2]，这些频繁发生的滑坡灾害对当地人民的生命财产安全造成极大危胁。因此，白鹿塬地区滑坡的危险性分析就尤为重要。

滑坡的诱发因素主要有降水、地下水位、地震及人类的工程行为等，其中许多因素具有不确定性[3-7]。在现行各行业的规范中，边坡稳定性都采用稳定系数评价，但在工程中所得到的稳定系数虽然是定值，但不能定量地表示边坡的安全度，这也是该方法的局限性[8]。以往针对白鹿塬地区滑坡的研究多采用定值算法，由于参数的不确定性，使得计算结果的可信度不高。为了有效考虑这种不确定性，可靠度理论被引入到斜坡的稳定性评价中[9-15]。在边坡稳定的可靠度分析方面，已有很多学者从不同角度进行了研究；对于土质边坡，主要是将极限平衡法（如 Bishop 法、Janbu 法、Morgenstern-Price 法、Spencer 法等）与可靠度分析方法（如 FOSM 法、Monte-Carlo 法等）相结合[16-26]。近年来，也有学者研究了边坡稳定的有限元可靠度分析方法[27-29]。目前常用的可靠度分析方法有 FOSM 法（一次二阶矩法）、Monte-Carlo 法、Rosenbleuth 法等。其中，Monte-Carlo 法需要对随机变量大样本进行抽样，FOSM 法需要进行多次迭代求解，Rosenbleuth 法在土层较多时计算量较大；这些方法在实际工程中的应用都有困难。因此，笔者应用一个计算可靠度更为简便的 Duncan 法，结合极限平衡法确定边坡的可靠指标与失效概率，并与 Monte-Carlo 法计算结果进行对比，评价白鹿塬地区黄土自然边坡的可靠度，进一步讨论白鹿塬边坡在自然状态下坡高、坡度与边坡稳定性的关系。

1　工程地质条件

白鹿塬地处西安市城区东南，骊山西南，浐河、灞河分流于白鹿塬两侧，塬长约 28 km，宽 7～10 km，面积 238 km^2，是西安市附近最大的黄土塬。塬面向西南倾斜，塬北与灞河高差 260～350 m，塬南与浐河高差 150～200 m。鲸鱼沟横切塬面。对白鹿塬地区遥感影像做照片增强处理，取其底片图像见图 1[2]，地理位置如图 2。

由于塬边斜坡高差不同，白鹿塬南北两侧出露

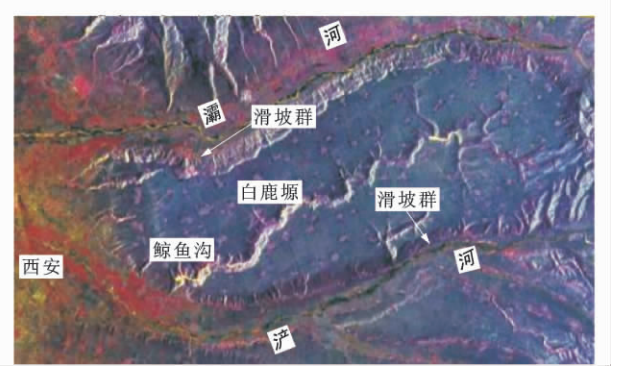
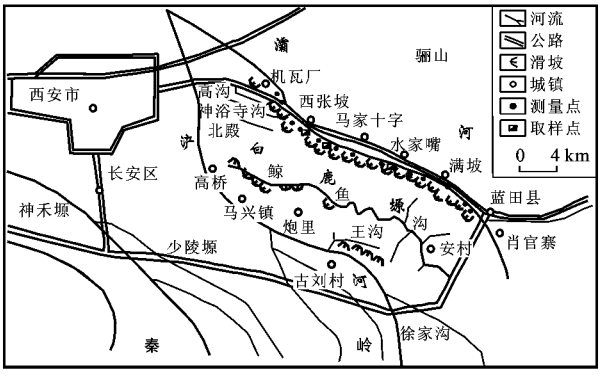


图 1　白鹿塬滑坡分布遥感影像

Fig. 1　Remote sensing image of distribution of landslides in Bailuyuan



注：据文献[2]遥感影像解译。

图 2　白鹿塬地理位置及滑坡分布

Fig. 2　Location of Bailuyuan and distribution of landslides

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

地层有一定差异，灞河一侧斜坡相对高差大，第三系和第四系地层均有出露，浐河一侧则仅有第四系地层出露。白鹿塬边坡为老黄土与红黏土组合型，地层剖面如图 3。其中，离石黄土(Q_2)厚 20～52 m；午城黄土(Q_1)厚度变化大，最厚为 80 m 以上。马兰黄土(Q_3)漫覆于老黄土上，厚度 3～10 m，三趾马红土(N_2)仅在坡脚出露，厚度变化大，富含钙质结核。塬区黄土原生节理和构造节理较发育。塬区潜水类型为黄土间孔隙裂隙水，水位埋深 60 m 以上。塬区地下水排泄主要有：塬边向灞河、浐河排泄；塬中向鲸鱼沟排泄[1-2]。

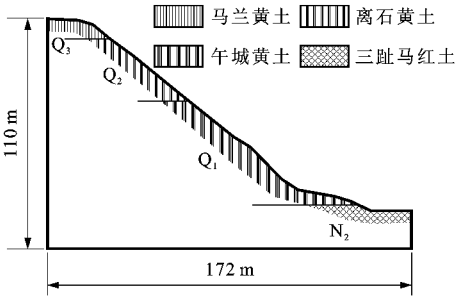


图 3 白鹿塬边坡地层结构模型

Fig. 3 Strata structure model of slope in Bailuyuan

2 边坡测量与地层参数统计

白鹿塬灞河一侧共测得 14 个自然边坡断面，建立地质模型，其坡高与坡度统计结果见表 1，测量点位置见图 2。现场取马兰黄土样品 2 组和离石黄土样品 1 组，室内做不同含水率的基本指标测试，并收集了已发表的该区黄土物理力学参数[1-2,30-35]，见表 2。其目的是为了便于探讨基本随机变量的不确定性，尤其是内聚力(c)和内摩擦角(φ)的变异性对边坡稳定性的影响。

表 1 白鹿塬自然边坡实测坡度和坡高

Tab. 1 Measured gradient and height of slopes in Bailuyuan

统计项目	坡度	坡高	坡比
样本数	14	14	14
最大值	39.35°	77.52 m	0.82
最小值	32.76°	41.62 m	0.64
平均值	36.43°	61.36 m	0.74
标准差	2.040°	12.260 m	0.050
变异系数	0.06	0.20	0.07

注：坡比指斜坡高度与水平距离的比值。

3 边坡可靠度分析方法

根据表 2 的统计结果，塬区边坡各土层 c、φ 的变异系数分别为 0.49～0.58 和 0.13～0.25，变异性都较大，采用确定性方法探讨边坡的稳定性具有较大的不确定性，而可靠度方法能充分考虑到参数的变异性，因此采用可靠度分析方法探讨该区边坡稳定性更为合理。笔者将 Morgenstern-Price 法稳定性计算公式作为极限状态方程，并借助 GEO-slope 软件分别采用 Monte-Carlo 法和 Duncan 法得到 14 个边坡的稳定系数，结果分别为 1.11～1.41 和 1.09～1.33(表 3)，并依据这两种可靠度分析方法计算该区边坡的可靠度。

Duncan 用点估计法对挡土墙的抗滑稳定性进行可靠度分析，提出了一种计算可靠度更为简单的方法[5-6]，具体思路如下。

边坡的极限状态 Z 常用功能函数描述

$$Z = F(X_1, X_2, \cdots, X_n) - 1 \tag{1}$$

式中：$F(X_1, X_2, \cdots, X_n)$ 为功能函数，$X_1, X_2, \cdots, X_n$ 分别为内摩擦角、内聚力、重度等基本随机变量。岩土体的基本随机变量中，c、φ 是影响边坡稳定性的首要因素，因此，这里仅考虑 c、φ 为基本随机变量。表 2 中 c、φ 经 K-S 检验服从正态分布。根据 Duncan 法，按式(2)对 c、φ 进行两点估计

$$\left.\begin{aligned} c^+ &= \mu_c + \sigma_c \\ c^- &= \mu_c - \sigma_c \\ \varphi^+ &= \mu_\varphi + \sigma_\varphi \\ \varphi^- &= \mu_\varphi - \sigma_\varphi \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：μ_c、μ_φ 分别为内聚力和内摩擦角的平均值；σ_c、σ_φ 分别为内聚力和内摩擦角的标准差；c^+、c^-、φ^+、φ^- 均为中间变量。

$$\left.\begin{aligned} F_c^+ &= F(c^+, \mu_\varphi) \\ F_c^- &= F(c^-, \mu_\varphi) \\ F_\varphi^+ &= F(\mu_c, \varphi^+) \\ F_\varphi^- &= F(\mu_c, \varphi^-) \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中：F_c^+、F_c^-、F_φ^+、F_φ^- 均为中间变量。当黄土边坡为单一土层时，c^+、c^-、φ^+ 和 φ^- 共有 4 种组合。通过这些组合可以得到 4 个不同的稳定系数。以此类推，当边坡由 m 层土组成时，c^+、c^-、φ^+ 和 φ^- 就会有 $2^2 \times m$ 种组合，可以算出 $2^2 \times m$ 个稳定系数，求得这 $2^2 \times m$ 个稳定系数的均值 μ_F 和标准差 σ_F。再根据 μ_F 和 σ_F 求得可靠指标(β)。具体计算公式为

$$\sigma_F = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \left(\frac{\Delta F_i}{2}\right)^2} \tag{4}$$

$$\beta = \frac{\mu_F - 1}{\sigma_F} \tag{5}$$

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　白鹿塬地区边坡不同地层的模型参数

Tab. 2　Parameters of model for different strata of slopes in Bailuyuan

地层	项目	含水率	天然重度	孔隙比	液限	塑限	弹性模量	泊松比	内聚力	内摩擦角
Q_3	样本数	77	55	38	26	16	26	26	58	59
	最大值	40.0%	22.3 MPa	1.450	47.0%	26.0%	80 MPa	0.32	83.0 kPa	30.0°
	最小值	5.0%	14.0 MPa	0.540	27.0%	13.0%	40 MPa	0.30	6.0 kPa	9.0°
	平均值	20.3%	17.1 MPa	0.942	32.3%	18.2%	68 MPa	0.30	30.5 kPa	21.5°
	标准差	7.24%	1.96 MPa	0.200 0	3.95%	2.49%	17.0 MPa	0.000	17.65 kPa	4.75°
	变异系数	0.36	0.12	0.21	0.12	0.14	0.25	0.01	0.58	0.22
Q_2	样本数	58	42	24	13	4	21	21	63	51
	最大值	39.9%	26.2 MPa	1.362	34.8%	17.7%	90 MPa	0.33	93.0 kPa	29.0°
	最小值	6.7%	14.9 MPa	0.471	28.2%	17.7%	70 MPa	0.30	0.7 kPa	11.9°
	平均值	19.4%	18.0 MPa	0.888	30.7%	17.7%	85 MPa	0.31	42.1 kPa	23.6°
	标准差	6.69%	2.35 MPa	0.250 0	2.43%		4.72 MPa	0.010	20.50 kPa	3.06°
	变异系数	0.35	0.13	0.28	0.08		0.06	0.02	0.49	0.13
Q_1	样本数	13	14	5	2	2	1	1	12	11
	最大值	28.4%	22.4 MPa	0.869	28.2%	17.3%	84 MPa	0.30	90.0 kPa	30.9°
	最小值	13.0%	16.6 MPa	0.522	28.2%	17.3%	84 MPa	0.30	20.0 kPa	11.9°
	平均值	20.4%	19.0 MPa	0.658	28.2%	17.3%	84 MPa	0.30	57.5 kPa	25.4°
	标准差	4.77%	2.13 MPa						28.68 kPa	4.98°
	变异系数	0.23	0.11						0.50	0.20
N_2	样本数	3	4	6			1	1	8	7
	最大值	39.7%	24.4 MPa	0.893			80 MPa	0.35	92.6 kPa	35.0°
	最小值	16.2%	16.3 MPa	0.521			80 MPa	0.35	23.8 kPa	14.2°
	平均值	25.5%	19.9 MPa	0.664			80 MPa	0.35	54.0 kPa	26.7°
	标准差			0.140 0					27.78 kPa	6.76°
	变异系数			0.21					0.51	0.25

注：含水率指土体中水的质量与土颗粒质量之比；孔隙比指土体中孔隙体积与骨架体积之比。

式中：μ_F 和 σ_F 分别为稳定系数的均值和标准差；ΔF_i 为第 i 种组合的稳定系数差值。根据标准正态分布函数表，可进一步求得边坡的失效概率。

4　边坡可靠度计算

按图 3 形式建立实测断面的地质结构模型，各层土强度参数的均值及标准差见表 2。借助 GEOslope 软件，采用 Monte-Carlo 法、Duncan 法等两种可靠度分析方法对白鹿塬自然边坡进行可靠度计算。其中，Monte-Carlo 法采用随机抽样 10 000 次进行计算，极限状态方程采用 Morgenstern-Price 法稳定性计算公式。

由表 3 可见，不论采用确定性方法还是上述两种可靠度方法，所得的稳定系数基本一致。由稳定系数结果可知，该区边坡处于基本稳定—稳定状态。但采用 Duncan 法和 Monte-Carlo 法得到的边坡可靠指标分别为 0.56～1.79 和 0.39～1.60，得到的失效概率分别为 3.4%～29.0% 和 5.5%～34.8%，并且共有 75% 的边坡失效概率大于 10%。其中 Duncan 法的分析结果显示有 5 个边坡失效概率大于 20%，7 个边坡失效概率为 10%～20%，仅有 2 个失效概率小于 10%，可见该区多数边坡失效可能性较大。

对比可知：Duncan 法求解的稳定系数略小于 Monte-Carlo 法，差值为 0.02～0.08；失效概率略大于 Monte-Carlo 法求得的结果，差值为 0.02%～6.56%；两种方法计算结果相差较小。由于 Duncan 法理论简单，计算量小，所以更宜于在实际工程中应用。

根据表 3 的边坡坡高与坡度测量值，可以建立坡高与坡度的相关关系。图 4 中 4 个自然边坡中有 3 个边坡高且陡，1 个边坡低且缓，不符合自然状态下边坡趋于稳定的一般规律，故予以删除。其相关关系为

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 采用 Monte-Carlo 法和 Duncan 法得到的可靠度计算结果

Tab. 3 Results of reliability calculated by Monte-Carlo Method and Duncan Method

坡高/m	坡度/(°)	稳定系数		标准差		可靠指标		失效概率/%	
		Monte-Carlo 法	Duncan 法	Monte-Carlo 法	Duncan 法	Monte-Carlo 法	Duncan 法	Monte-Carlo 法	Duncan 法
57.67	34.61	1.32	1.28	0.22	0.22	1.50	1.29	6.7	9.9
50.46	37.41	1.26	1.21	0.20	0.21	1.33	1.01	9.1	15.6
65.48	34.61	1.28	1.24	0.22	0.23	1.25	1.06	10.2	14.5
75.58	36.33	1.18	1.16	0.21	0.24	0.87	0.68	19.0	24.8
71.91	39.35	1.11	1.09	0.20	0.22	0.56	0.39	29.0	34.8
64.14	38.61	1.16	1.13	0.20	0.22	0.81	0.60	21.4	27.4
72.14	34.71	1.23	1.20	0.22	0.24	1.05	0.83	14.6	20.3
74.82	37.93	1.13	1.11	0.20	0.23	0.66	0.48	25.8	31.6
77.52	34.07	1.23	1.19	0.22	0.18	1.05	1.06	14.4	14.5
54.37	32.76	1.41	1.33	0.23	0.21	1.79	1.60	3.4	5.5
61.69	35.89	1.25	1.22	0.21	0.22	1.21	0.99	11.0	16.1
46.41	39.13	1.25	1.20	0.19	0.21	1.30	0.97	9.7	15.7
45.17	37.22	1.30	1.26	0.25	0.22	1.19	1.16	11.6	16.6
41.62	37.39	1.30	1.25	0.20	0.22	1.55	1.16	5.7	12.3

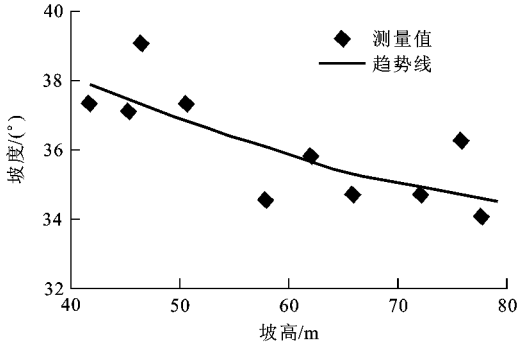


图 4 白鹿塬边坡坡高与坡度关系

Fig. 4 Relationship between height and gradient of slopes

$$\theta=-5.585\ln(H/\mathrm{m})+58.817 \quad R^2=0.592\,3 \quad (6)$$

式中：θ 为坡度；H 为坡高；R^2 为判决系数。

由式(6)的判别系数计算得到不同坡高和相应坡度下的边坡可靠指标和失效概率(图 5)。分析表明：低而陡的边坡潜在最危险滑面剪出口较高，位于 Q_2 土层内，随坡高增大，可靠指标增大，失效概率减小；当坡高达到 50 m 及以上，边坡高而缓，剪出口位于 Q_1 土层内或 N_2 泥岩顶面，随着坡高的增大，可靠指标随坡高的增大而减小，失效概率增大。由此可见，该区域内侵蚀强烈，河流下切深，有 N_2 泥岩出露的极高边坡，尽管边坡总体坡度较小，但稳定性最差。

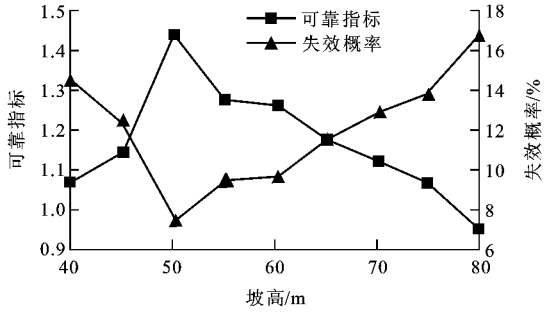


图 5 可靠指标、失效概率与边坡坡高的关系

Fig. 5 Relationships between reliable indicator and height of slope, and failure probability and height of slope

5 结 语

(1)采用 Monte-Carlo 法和 Duncan 法得到白鹿塬 14 个边坡的稳定系数分别为 1.11～1.41 和 1.09～1.33，这些边坡，处于基本稳定—稳定状态，失效概率却多大于 10%，最大达 34.8%，边坡失效可能性较大。

(2)Duncan 法求解的稳定系数略小于 Monte-Carlo 法求得的结果，而前者求解的失效概率略大于后者，结果相差较小。Duncan 法理论简单，计算量小，更宜于在实际工程中应用。

(3)低而陡的边坡，潜在最危险滑面剪出口较高，位于 Q_2 土层内，且随坡高增大，可靠指标增大，失效概率减小；当坡高达到 50 m 及以上，边坡高而缓，剪出口位于 Q_1 土层内或 N_2 泥岩顶面，随着坡高的增大，可靠指标减小，失效概率增大。由此可见，该区域内河流下切深，有 N_2 泥岩出露的极高边坡，稳定性最差。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献：

References：

[1] 雷祥义. 陕西关中人为黄土滑坡类型的研究——人类活动的黄土斜坡地质环境负效应问题[J]. 水文地质工程地质，1996，23(3)：36-39.
LEI Xiang-yi. Research of artificial loess landslides in Guanzhong，Shaanxi—negative problems of loess slopes in geological environment under human activities[J]. Hydrogeology and Engineering Geology，1996，23(3)：36-39. (in Chinese)

[2] 缪卫东. 西安市白鹿塬滑坡特征及成因分析[J]. 防灾减灾工程学报，2007，27(1)：80-85.
MIAO Wei-dong. Analysis of characteristic and cause of formation of landslides at Bailuyuan[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering，2007，27(1)：80-85. (in Chinese)

[3] 楚敬龙，王金生，滕彦国，等. 基于 GIS 的滑坡灾害危险性区划研究——以重庆市万州区为例[J]. 地球科学与环境学报，2010，32(4)：409-415.
CHU Jing-long，WANG Jin-sheng，TENG Yan-guo，et al. Study on landslide hazard zonation based on GIS—taking Wanzhou District of Chongqing City as an example[J]. Journal of Earth Sciences and Environment，2010，32(4)：409-415. (in Chinese)

[4] 苏生瑞，张永双，李　松，等. 汶川地震引发高速远程滑坡运动机理数值模拟研究——以谢家店子滑坡为例[J]. 地球科学与环境学报，2010，32(3)：277-287.
SU Sheng-rui，ZHANG Yong-shuang，LI Song，et al. Numerical analysis on motion mechanism of highspeed and long runout landslide by Wenchuan Earthquake—taking Xiejiadianzi Landslide as an example[J]. Journal of Earth Sciences and Environment，2010，32(3)：277-287. (in Chinese)

[5] 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. (in Chinese)

[6] 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. (in Chinese)

[7] 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. (in Chinese)

[8] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析：原理、方法、程序[M]. 北京：中国水利水电出版社，2003.
CHEN Zu-yu. Stability analysis of soil slope：principles，methods，procedures[M]. Beijing：China Water Conservancy and Hydropower Press，2003. (in Chinese)

[9] 罗文强，黄润秋，张倬元. 斜坡稳定性概率分析的理论与应用[M]. 武汉：中国地质大学出版社，2003.
LUO Wen-qiang，HUANG Run-qiu，ZHANG Zhuo-yuan. Theory and application about probability analysis on stability of slope[M]. Wuhan：China University of Geosciences Press，2003. (in Chinese)

[10] 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. (in Chinese)

[11] 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. (in Chinese)

[12] 李　炜，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. (in Chinese)

[13] 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. (in Chinese)

[14] 苏永华，赵明华，李志勇，等. 基于虚拟试验的边坡失稳概率分析方法[J]. 中国公路学报，2008，21(6)：14-19.
SU Yong-hua，ZHAO Ming-hua，LI Zhi-yong，et al. Instability probability analysis method of slope based on Dummy Test[J]. China Journal of Highway and Transport，2008，21(6)：14-19. (in Chinese)

[15] 康海贵，李　炜. 基于安全系数解析式的边坡稳定评价体系研究[J]. 中国公路学报，2008，21(3)：1-5.
KANG Hai-gui，LI Wei. Research on evaluated system for slope reliability based on calculation formula of safety factor[J]. China Journal of Highway and Transport，2008，21(3)：1-5. (in Chinese)

[16] DUNCAN J M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2000，126(4)：307-316.

[17] 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. (in

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Chinese)

[18] MALKAWI A I H, HASSAN W F, ABDULLA F A. Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability[J]. Structural Safety, 2000, 22(2): 161-187.

[19] AUVINET G, GONZALEZ J L. Three-dimensional reliability analysis of earth slopes[J]. Computers and Geotechnics, 2000, 26(3/4): 247-261.

[20] BHATTACHARYA G, JANA D, OJHA S, et al. Direct search for minimum reliability index of earth slopes[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(6): 455-462.

[21] 雷晓锋,肖 曼,张 林,等. 公路黄土边坡强度参数的选取及应用[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011, 31(4): 27-33.
LEI Xiao-feng, XIAO Man, ZHANG Lin, et al. Selection and application of strength parameters of highway loess slope[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(4): 27-33. (in Chinese)

[22] 陈晓平,孙慕群,吴起星. 软基上复杂土坡稳定可靠度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 925-929.
CHEN Xiao-ping, SUN Mu-qun, WU Qi-xing. Reliability study of complex slope stability on soft soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 925-929. (in Chinese)

[23] 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. (in Chinese)

[24] 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. (in Chinese)

[25] 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. (in Chinese)

[26] 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. (in Chinese)

[27] 刘 宁. 可靠度随机有限元法及其工程应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2001.
LIU Ning. Reliability of stochastic finite element method and its engineering application[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2001. (in Chinese)

[28] GRIFFITHS D V. Probabilistic slope stability analysis by finite elements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(5): 507-518.

[29] 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. (in Chinese)

[30] 龚宪伟,易念平,张信贵. 对边坡工程安全系数的思考[J]. 广西大学学报:自然科学版, 2006, 31(3): 265-270.
GONG Xian-wei, YI Nian-ping, ZHANG Xin-gui. Discussion for the safety factor of slope project[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2006, 31(3): 265-270. (in Chinese)

[31] 李 萍. 黄土边坡可靠性研究[D]. 西安:长安大学, 2006.
LI Ping. Reliability applied to stability analysis of loess slope[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006. (in Chinese)

[32] 高德彬. 公路黄土路堑高边坡稳定性研究[D]. 西安:长安大学, 2008.
GAO De-bin. Study on the stability of highway loess cutting slope[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)

[33] 俞宗卫,常光明,许 魁. 西安黄土地区静力压入桩承载特性的试验研究[J]. 铁道建筑, 2006(9): 63-66.
YU Zong-wei, CHANG Guang-ming, XU Kui. Experimental study on load-bearing characteristics of static pressure pile in Xi'an loess region[J]. Railway Engineering, 2006(9): 63-66. (in Chinese)

[34] 叶万军,折学森,陈志新,等. 基于可靠度理论的黄土高边坡优化设计[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(2): 82-85.
YE Wan-jun, SHE Xue-sen, CHEN Zhi-xin, et al. Optional design of high loess slope in highway based on reliability method[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2005, 27(2): 82-85. (in Chinese)

[35] 徐世强,折学森,刘怡琳,等. 公路黄土坝式路堤稳定性计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 42-46.
XU Shi-qiang, SHE Xue-sen, LIU Yi-lin, et al. Stability computation method of highway loess dam-like embankment[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3): 42-46. (in Chinese)

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net