

文章编号:1672-6561(2013)02-0107-08

甘肃天水地区黄土极限状态边坡的统计分析

李同录^{1,2}, 刘 超¹, 李 萍^{1,2}

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质调查局西安地质调查中心 国土资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘 要:在实际工程边坡设计中,往往参考临近自然边坡的坡率设计来进行人工开挖边坡。基于这种工程类比法,现场实测甘肃天水地区 51 个坡高 40~150 m 的黄土极限状态边坡断面,获得其坡高、坡宽及坡度参数,统计发现坡高与坡宽符合双对数线性关系,建立二者的相关方程;再将坡高按 10 m 间距分段,每个坡高段取 3 个极限坡高,利用 Morgenstern-Price 法反演了不同坡高段的强度参数(内聚力和内摩擦角)。由反演结果发现,随着坡高的增大,黄土的综合内聚力增大,内摩擦角减小,此特点与黄土强度参数值随所处深度的变化规律基本一致。基于反演的强度参数和极限状态边坡坡高与坡宽的回归方程,进一步计算获得不同稳定系数下的坡高与坡宽的关系曲线,将该曲线制成图,可用来直接判定一个已知边坡的稳定系数,也可以用来确定拟设计边坡的坡度。

关键词:黄土边坡;极限状态;参数反演;内聚力;内摩擦角;稳定系数;天水地区;甘肃

中图分类号:P642.13⁺1;TU413.6⁺2

文献标志码:A

Statistical Analysis of the Limit State Loess Slope in Tianshui Area of Gansu

LI Tong-lu^{1,2}, LIU Chao¹, LI Ping^{1,2}

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

2. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area of Ministry of Land and Resources, Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: For the practical slope design, the angle of adjacent natural slope is often used as reference to design a cutting engineering slope, which is called as engineering analogical method. Based on the method, the profiles of 51 loess limit state slopes with the height of 40-150 m were surveyed in Tianshui area of Gansu, and the height, width and angle of the slopes were measured; the relationship between height and width of slope was double logarithmic linear, and the correlation equation was built; and then, the slope height was divided at intervals of 10 m, and three heights of limit state slopes for each interval were collected to calculate the strength parameters of cohesion and internal friction angle with Morgenstern-Price method. The inversion results showed that synthetically cohesion of loess increased, and internal friction angle decreased with the height of slope increasing, which was in accordance with the relationship between the strength parameters of loess and depth. Based on the inversive strength parameters and the regression equation of the height and width of limit state slope, the relationship curves between the height and width of slope were calculated with different stability coefficients, and the curves were drawn as a chart, which was used to determine the stability coefficient of a known slope and

收稿日期:2013-04-19

基金项目:国家自然科学基金项目(40772181)

作者简介:李同录(1965-),男,甘肃正宁人,长安大学教授,博士研究生导师,理学博士,E-mail:dcdgx08@chd.edu.cn。

to confirm the angle of designed cutting slope.

Key words: loess slope; limit state; parametric inversion; cohesion; internal friction angle; stability coefficient; Tianshui area; Gansu

0 引言

在边坡稳定性分析中,由于岩土体性质及其所处环境的复杂性,必须将定性分析和定量计算相结合^[1-5]。定性分析一般是基于边坡变形的迹象或类似边坡的类比分析。理论计算方法可分为基于物理模型的稳定性计算方法和统计计算方法^[6-11]。基于物理模型的方法目前已很成熟,无论是各种极限平衡法,还是基于强度折减的数值方法,都能取得十分一致的结果,其中强度参数取值是理论计算的核心问题^[12-13]。统计计算方法是对已破坏的边坡进行统计分析,一般是建立滑坡有关参数(坡高、坡度、滑体体积)的关系,主要用于判断相近地质条件滑坡的破坏范围。文献[14]中,Heim 假定边坡破坏后,不再有内聚力,由于起点和终点动能均为 0,坡体在下滑时的重力势能全部转化为摩擦能消耗掉,在此基础上提出了一个雪橇模型(sled model),该模型很好地反映了滑坡体在运动过程中的能量转化,他将坡体起点和终点连线的倾角定义为综合摩擦角,综合摩擦角的大小反映了滑坡运动距离的远近。一些学者也称之为平均摩擦角或似摩擦角。Hus 最早统计了世界上一些大型滑坡的似摩擦角和滑体体积的关系,得出二者总体规律具有反相关性,但数据离散性大,相关性不是很好^[15];Okuda 在 Hus 的数据中加入了日本一些滑坡的案例,总体规律相似^[16]。

目前,针对特定域和特定类型的滑坡有许多统计关系,但都是针对已发生的滑坡,可用于预测滑坡的破坏范围,但是很少有针对未滑动破坏边坡的统计。这是由于边坡稳定性不易直接确定,将不同稳定性的边坡进行统计是没有意义的。李萍等提出了极限状态边坡的概念,对黄土高原地区进行系统调查和研究,发现极限边坡主要分布在河流侵蚀岸坡,并提出 4 点判别标准^[17-19]:①坡顶有拉裂隙;②坡面局部滑塌,地形破碎;③现有新滑坡恢复的原始坡形;④新滑坡两侧与其坡高、坡度相当的边坡。显然,应用极限状态坡概念,假定其稳定系数为 1.0,可对其进行统计分析。

由于自然黄土边坡是在当地特定的地理与气候环境下形成的^[20-25],极限状态边坡也反映了黄土边坡对所在环境的最大承受度,所以该方法依据可靠,

容易被工程设计人员接受。对黄土成因及发育过程相同、土坡结构一致的各临界边坡剖面进行统计分析,可使工程类比定性分析法系统化和定量化。基于此,笔者在甘肃天水地区现场实测 51 个坡高 40~150 m 的极限状态坡地形断面,在断面上测量其坡高、坡宽及坡度等参数,统计获得了坡高与坡宽的双对数线性相关方程;再将坡高按 10 m 间距分段,每个坡高段取 3 个极限坡高,利用 Morgenstern-Price 法反演不同坡高段的强度参数(内聚力和内摩擦角);基于反演的强度参数和极限状态边坡坡高和坡宽的回归方程,进一步计算获得不同稳定系数下坡高与坡宽的关系曲线,将该曲线制成图表,可用来直接判定该地区一个已知边坡的稳定系数,也可以给定安全系数,确定一个拟设计边坡的坡度。

1 研究区概况

天水地区位于六盘山以西,秦岭北麓,陇西盆地东南部,天水、秦安、通渭一带,主要为渭河流域及其支流葫芦河流域(图 1)。该地区自古近纪末至新近纪初,受东昆仑—秦岭断裂系左旋走滑活动控制,形成北西—南东向拉张盆地与隆起山地交错的古地形面貌^[26-27]。新近纪末期,从大约 11 Ma 到 7 Ma 期间是较大规模的侵蚀阶段,形成以长梁为主的地

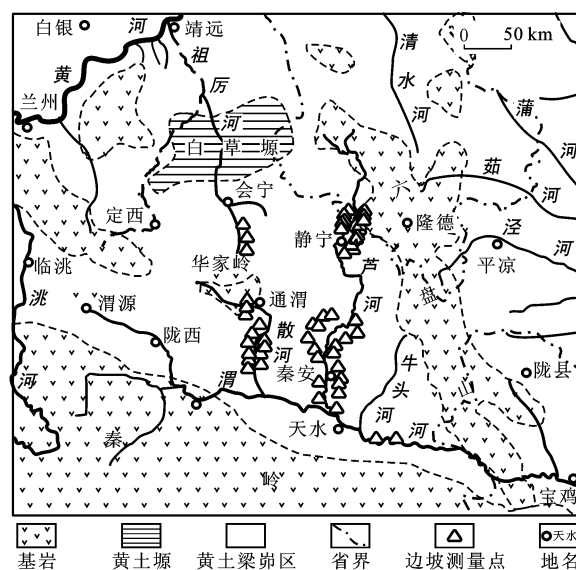


图 1 区域地质概况及边坡测量点位置

Fig. 1 Regional Geological Condition and Positions of Slope Survey Sites

貌^[28-29],成为第四纪风积黄土沉积的基底^[30]。由于缺乏宽阔平坦的沉积环境,该区第四纪黄土堆积层明显比西北部会宁地区薄。第四纪初期陇西盆地随青藏高原及周围山地一起抬升,剥蚀面解体,渭河及其支流下切,沿河两岸形成六级阶地,呈现出现在的黄土梁、峁地貌以及山梁、沟壑等地形。

地质演化历史控制了该区黄土边坡的成因及发育过程^[31-33]。对该地区边坡地层结构进行调查,发现坡高30 m 以下的边坡主要为 Q₃ 地层,30~60 m 极限边坡含 Q₂、Q₃ 地层,90 m 以上边坡含 Q₁—Q₃ 的连续沉积序列。调查的极限状态边坡中,低坡陡,

高坡缓,坡度随坡高的增高而降低幅度增大。按照上述极限状态边坡判别标准,对现场确认的极限状态边坡测量了其地形断面,共测边坡断面 51 个。根据断面统计了各边坡的坡高、坡度(θ)和坡宽(斜坡线的水平投影),统计结果列于表 1。所测最高边坡为 148.6 m,坡度为 22.6°;最低边坡为 44.4 m,坡度为 41.9°。采用坡高(H)和坡宽(L)进行相关性分析,将坡高和坡宽均取自然对数,绘制在双对数坐标上,可见符合双对数线性关系(图 2)。其拟合方程为

$$\ln(H/\text{m})=0.516\ln(L/\text{m})+1.950 \quad R^2=0.94 \quad (1)$$

式中: R 为相关系数。

表 1 实测极限状态边坡坡度和坡高

Tab. 1 Measured Grades and Heights of Limit State Slopes

序号	坡高/m	坡度/(°)	序号	坡高/m	坡度/(°)	序号	坡高/m	坡度/(°)
1	44.4	41.9	18	64.3	47.7	35	99.7	32.0
2	45.7	51.1	19	65.2	43.4	36	104.8	30.4
3	45.9	48.8	20	65.4	32.5	37	107.7	32.3
4	47.3	35.4	21	80.1	26.9	38	110.2	24.7
5	50.2	50.2	22	80.3	27.2	39	113.7	35.3
6	51.5	52.5	23	82.0	28.7	40	115.6	31.7
7	51.5	53.1	24	85.6	27.4	41	119.2	36.7
8	51.6	52.3	25	90.1	28.1	42	123.4	23.6
9	52.3	51.4	26	90.9	38.7	43	125.5	22.0
10	53.6	52.4	27	91.0	37.2	44	125.9	22.5
11	54.1	53.2	28	91.8	36.7	45	126.2	24.2
12	54.4	55.1	29	92.3	38.6	46	127.8	37.7
13	57.2	46.1	30	92.5	27.3	47	128.3	24.3
14	61.4	45.4	31	93.2	35.7	48	130.5	23.8
15	61.8	34.8	32	94.8	37.9	49	142.7	20.7
16	62.7	39.2	33	99.1	37.3	50	146.7	19.8
17	62.9	42.5	34	99.6	25.5	51	148.6	22.6

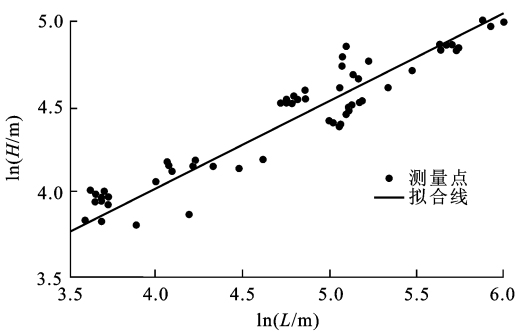


图 2 极限状态边坡坡宽和坡高的关系

Fig. 2 Relationship Between Height and Width of Limit State Slope

2 强度参数反演

通过测量和统计,可以获得极限状态边坡坡高

和坡宽的关系。但是在工程实际中,一般不会按极限状态进行设计,而是有一定的安全储备,给定安全系数,设计坡度或坡宽^[34]。为此,可根据极限状态边坡进行参数反演,再根据反演得到的参数计算不同安全系数下的坡宽和坡高,并制成图表,以便工程应用。

反演结果相当于一个原型试验,可克服试验参数的离散性和不确定性,但反演结果不代表某一具体土层的参数,是整个边坡地层的综合参数^[35-36]。

对于极限状态边坡,可设定边坡稳定系数(F_s)为 1.0。重度的变异性小,各层取统计平均值。由于强度参数有 2 个,即内聚力(c)和内摩擦角(φ),只能给定其中一个反演另一个。为了同时获得 c 、 φ 值,可选用 2 个以上极限边坡断面,分别给定一系列 φ 值,计算 c 值,并将其绘制于 c - φ 图中,不同边坡断

面的 c - φ 关系曲线交于一点, 该点的值即为强度参数的反演结果(图 3)。

不同高度的边坡地层结构不同, 该地区 30 m 以下的边坡主要由 Q_3 地层构成, 30~60 m 的边坡主要由 Q_2 、 Q_3 地层构成, 90 m 以上的边坡主要由 Q_1 — Q_3 的连续地层构成。不同时代地层的物理力

学性质有较大差异。因此, 当坡高差异较大时, 由于其强度参数不同, 各边坡断面的 c - φ 关系曲线可能没有交点或相互之间出现多个交点。为此, 需要按高度分区间进行反演。坡高下界取 40 m, 上界取 150 m, 每 10 m 一个坡高区间, 取区间内最大值、最小值及中值为输入坡高, 根据式(1)计算出相应理论

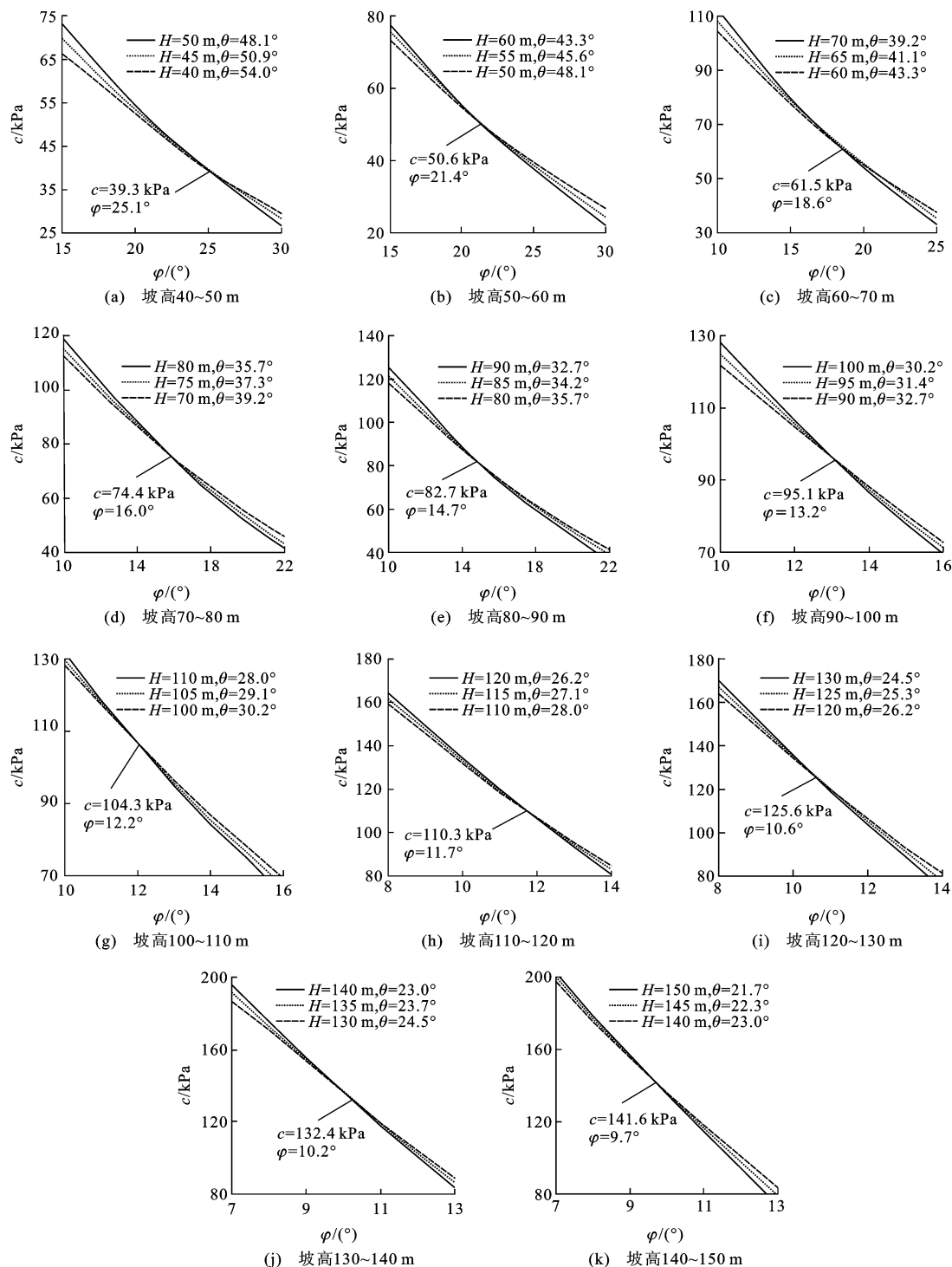


图3 不同坡高段综合强度参数反演曲线

Fig. 3 Inversion Curves of Synthetically Strength Parameters Under Different Slope Heights

坡宽及坡度,各区间内采用的边坡高度与坡度见图3。地层 Q_1-Q_3 的重度采用统计平均值,分别为20.9、18.5、14.9 $kN \cdot m^{-3}$ 。对于40 m以上的高边坡,涉及多层黄土,各层土重度取不同的值,反演时的 c 、 φ 值按均质土层考虑,反演结果只有1组,为边坡的综合强度参数。计算方法采用 Morgenstern-Price 法,将每个区间3个坡高下的反演所得 c - φ 关系曲线绘制成图。每个区间中3条曲线交点作为该坡高区间的强度参数反演值,将各坡高区间的反演值绘制于同一曲线(图4)。

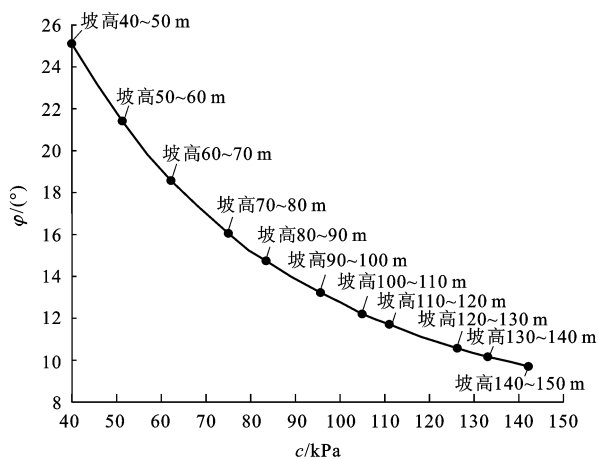


图4 综合强度参数反演结果

Fig. 4 Inversion Results of Synthetically Strength Parameters

图4表明,随着坡高增大,黄土的内聚力增大,而内摩擦角减小。尽管反演的是综合强度参数,但也反映出强度参数随地层时代的变化特点。黄土的内摩擦角和内聚力跟其物质成分及密实度有关。黏粒含量高,内聚力增大,内摩擦角减小;密实度增大,内聚力增大。反演的强度参数随边坡高度的变化总体上符合黄土的成分及结构随深度的变化规律,这与文献[37-38]中实测结果基本一致。

黄土的极限状态边坡是自然形成的,但强度参数是其内在的控制因素。反演结果也反映出外在的边坡状态是黄土内在性质的体现。

3 边坡稳定性判别

给定坡高和不同的稳定系数,利用反演所得内聚力和内摩擦角,仍采用 Morgenstern-Price 法,可计算获得相应稳定系数下的坡度^[39-41]。将计算结果绘制成图(图5),即坡高在40~150 m之间的坡度与稳定系数的对应关系。该图可用来直接判定一个已知边坡的稳定系数,也可以用来确定拟设计边坡

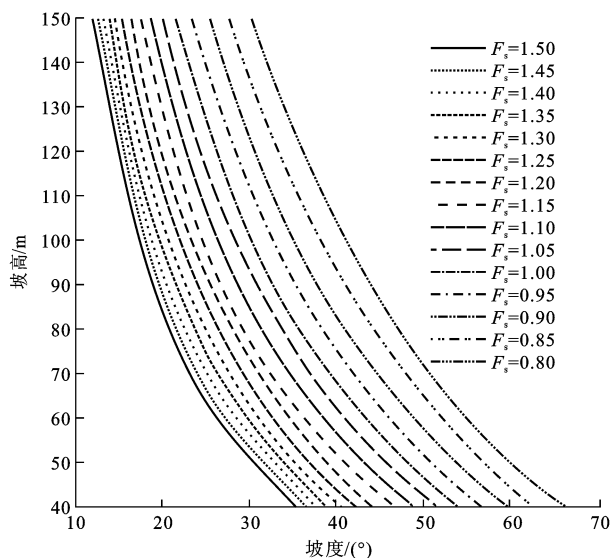


图5 不同稳定系数下水天地区边坡坡高与坡度的关系

Fig. 5 Relationships Between Height and Grade of Slope Under Different Stability Coefficients in Tianshui Area

的坡度。

现场实测以高于40 m的黄土高边坡为主,最高接近150 m,因此该图对高边坡更为适用。需要指出的是,黄土地层结构和性质在区域上随着沉积环境和气候条件的变化而变化,在一定沉积区域则相对稳定。图5是根据天水地区黄土极限状态边坡统计得出的结果,在该地区是适用的,对于其他地区则必须考虑黄土地层结构和性质与该地区是否相近,若差异较大则不适用。

图5是根据图1的统计结果得出的,采用的是最佳拟合线,但从图1可以看出,测量点的分布也有一定的离散性,在拟合直线的上下均有分布。因此,图5反映了该区域边坡稳定性的统计规律,代表总体情况。对于具体边坡,在利用图5定性分析的基础上,需要再做具体分析。

4 结 语

(1)甘肃天水地区黄土临界状态边坡坡高和坡宽呈反相关关系,并符合双对数线性关系,拟合度较高。该统计关系代表黄土高边坡的统计规律。

(2)按坡高分段,分别反演获得不同坡高段极限边坡的综合强度参数,结果反映出随着坡高的增大,黄土的综合内聚力增大,内摩擦角减小。此特点与黄土强度参数随深度的变化规律基本一致。

(3)基于反演的强度参数和极限状态边坡的回归方程,可进一步计算获得不同稳定系数下坡高与坡宽的关系曲线,将该曲线制成图,可用来直接判定

一个已知边坡的稳定系数,也可以用来确定拟设计边坡的坡度。

参考文献:

References:

- [1] 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.
- [2] 张旭辉,龚晓南,徐日庆. 边坡稳定影响因素敏感性的正交法计算分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 37-40.
ZHANG Xu-hui, GONG Xiao-nan, XU Ri-qing. Orthogonality Analysis Method of Sensibility on Factor of Slope Stability[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 37-40.
- [3] 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. 3-D FEM Analysis of Slope Stability Based on Gravity Increase Method[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4): 49-53.
- [4] 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.
- [5] 杨伟,黄俊生,余海生. 公路边坡稳定性评价方法及滑坡防治措施[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(4): 1-4.
YANG Wei, HUANG Jun-sheng, YU Hai-sheng. Assessment Method of Highway Slope Stability and Measurement for Landslide Control[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2007, 24(4): 1-4.
- [6] 孔纪名,韩培峰,张引. 基于地球多传感器网络信息的潜在滑坡判别模型[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(1): 97-102.
KONG Ji-ming, HAN Pei-feng, ZHANG Yin. Potential Landslide Discrimination Model Based on Information of Earth Multi-sensor Net[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(1): 97-102.
- [7] 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.
- [8] 罗丽娟,赵法锁,蔡志勇. 基于剩余推力法和复形优化的边坡稳定性分析[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2009, 29(5): 47-53.
LUO Li-juan, ZHAO Fa-suo, CAI Zhi-yong. Slope Stability Analysis Based Residual Thrust Method and Complex Optimization[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(5): 47-53.
- [9] 刘海松,倪万魁,颜斌. 地质结构模型在公路黄土边坡设计中的作用[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 1-6.
LIU Hai-song, NI Wan-kui, YAN Bin. Effect of Geologic Structure Model in Highway Loess Slope[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 1-6.
- [10] 张亚国,张波,李萍,等. 基于点估计法的黄土边坡可靠度研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 615-619.
ZHANG Ya-guo, ZHANG Bo, LI Ping, et al. Research on Loess Slope Reliability Based on the Point Estimate Method[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 615-619.
- [11] 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.
- [12] 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.
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.
- [13] 雷晓峰,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.
- [14] SASSA K. Geotechnical Model for the Motion of Landslides[C]//BONNARD C. Proceeding of the 5th International Symposium on Landslides. Rotterdam: Balkema, 1988: 37-56.
- [15] HSU K J. Catastrophic Debris Streams (Sturzstroms) Generated by Rockfalls[J]. GSA Bulletin, 1975, 86(1): 129-140.
- [16] OKUDA S. Features of Debris Deposits of Large Slope Failures Investigated from Historical Records[R]. Kyoto: Kyoto University, 1984.
- [17] 李萍, 张波, 李同录. 黄土高原边坡特征与破坏规律的分区研究[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(3): 89-98.
- LI Ping, ZHANG Bo, LI Tong-lu. Study on Regionalization for Characteristic and Destruction Rule of Slope in Loess Plateau[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(3): 89-98.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 谢星, 赵法锁, 王东红. 西安地区 Q_2 黄土非线性流变模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(5): 41-46.
- XIE Xing, ZHAO Fa-suo, WANG Dong-hong. Non-linear Rheological Model for Q_2 Loess in Xi'an Region[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(5): 41-46.
- [21] 雷胜友, 李志远, 王吉庆, 等. 含水量对非饱和黄土强度的影响[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 1-5.
- LEI Sheng-you, LI Zhi-yuan, WANG Ji-qing, et al. Effect of Water Content on Strength of Unsaturated Loess[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 1-5.
- [22] 彭小云, 叶万军, 折学森, 等. 黄土沟壑区湿软路基沉降预测模型[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(2): 70-75.
- PENG Xiao-yun, YE Wan-jun, SHE Xue-sen, et al. Settlement Prediction Model of Wettest-soft Loess Subgrade in Ravine Regions[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(2): 70-75.
- [23] 谢永利, 胡晋川, 王文生. 黄土公路路堑边坡稳定性状离心模型试验[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5): 1-7.
- XIE Yong-li, HU Jin-chuan, WANG Wen-sheng. Centrifugal Model Test for Stability Characteristics of Highway Cut Slope in Loess[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(5): 1-7.
- [24] 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.
- [25] 韩佳明, 苏三庆. 降雨入渗下渭北地坑黄土窑洞稳定性分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(3): 104-110.
- HAN Jia-ming, SU San-qing. Stability Analysis of Weiwei Pitted Loess Cave Dwellings in Rainfall Infiltration[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(3): 104-110.
- [26] 张岳桥, 马寅生, 杨农, 等. 西秦岭地区东昆仑—秦岭断裂系晚新生代左旋走滑历史及其向东扩展[J]. 地球学报, 2005, 26(1): 1-8.
- ZHANG Yue-qiao, MA Yin-sheng, YANG Nong, et al. Late Cenozoic Left-slip Faulting Process of the East Kunlun-Qinling Fault System in West Qinling Region and Its Eastward Propagation[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(1): 1-8.
- [27] 袁宝印, 郭正堂, 郝青振, 等. 天水—秦安一带中新世黄土堆积区沉积—地貌演化[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 161-171.
- YUAN Bao-yin, GUO Zheng-tang, HAO Qing-zhen, et al. Cenozoic Evolution of Geomorphic and Sedimentary Environments in the Tianshui-Qin'an Regions[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(2): 161-171.
- [28] 方小敏, 李吉均, 朱俊杰, 等. 甘肃临夏盆地新生代地层绝对年代测定与划分[J]. 科学通报, 1997, 42(14): 1457-1471.
- FANG Xiao-min, LI Ji-jun, ZHU Jun-jie, et al. Dating of the Absolute Age and Stratum Division for the Cenozoic in the Linxia Basin, Gansu Province[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(14): 1457-1471.
- [29] 李吉均, 方小敏, 马海洲, 等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起[J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(4): 136-146.
- LI Ji-jun, FANG Xiao-min, MA Hai-zhou, et al. Geo-

- morphic Evolution of the Upper Reach of the Yellow River and Uprising of the Qinghai-Tibet Plateau in the Late Cenozoic Era[J]. *Science in China: Series D*, 1996, 26(4): 136-146.
- [30] 刘小丰, 潘保田, 高红山, 等. 天水黄土沉积特征与环境变化[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(3): 373-378.
LIU Xiao-feng, PAN Bao-tian, GAO Hong-shan, et al. Loess Deposit Feature and Environmental Change in Tianshui, Gansu Province[J]. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(3): 373-378.
- [31] 杨永红, 王选仓, 韩国杰, 等. 甘肃黄土地区土基回弹模量[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2005, 25(3): 7-10.
YANG Yong-hong, WANG Xuan-cang, HAN Guo-jie, et al. Rebound Module of Subgrade in Gansu Loess Area[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2005, 25(3): 7-10.
- [32] 李 萍, 黄丽娟, 李振江, 等. 甘肃黄土高边坡可靠度研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(3): 811-817.
LI Ping, HUANG Li-juan, LI Zhen-jiang, et al. Study of Reliability for Loess High Slopes in Gansu Area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(3): 811-817.
- [33] 陈春利, 邢鲜丽, 李 萍, 等. 甘肃黑方台黄土边坡稳定性的可靠度分析[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(4): 550-554.
CHEN Chun-li, XING Xian-li, LI Ping, et al. Analysis on Loess Slope Stability of Heifangtai, Gansu Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(4): 550-554.
- [34] 刘庆雪, 刘晓玲, 李 明, 等. 某煤矿工业场地黄土高边坡稳定设计分析[J]. *西安科技大学学报*, 2012, 32(3): 314-319.
LIU Qing-xue, LIU Xiao-ling, LI Ming, et al. The Stability Analysis of Landslide for the Site Construction of the Coal Industry[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2012, 32(3): 314-319.
- [35] 郑明新. 论滑带土强度特征及强度参数的反算法[J]. *岩土力学*, 2003, 24(4): 528-532.
ZHENG Ming-xin. Research of Strength Characteristic of Landslide Slip and Revised Counter Calculation Method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(4): 528-532.
- [36] 王慧婷, 臧运民, 刘军熙. 马钢新区土坡力学参数的反演及边坡稳定性分析[J]. *岩土工程界*, 2008, 11(6): 58-60.
WANG Hui-ting, ZANG Yun-min, LIU Jun-xi. Reverse Analysis of the Mechanical Parameters and Stability Assessment for the Soil Slopes in Magang New-exploit District[J]. *Geotechnical Engineering World*, 2008, 11(6): 58-60.
- [37] 扈胜霞, 周云东, 陈正汉. 非饱和原状黄土强度特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(4): 660-663.
HU Sheng-xia, ZHOU Yun-dong, CHEN Zheng-han. Test Study on Strength Character of Unsaturated and Undisturbed Loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(4): 660-663.
- [38] 李保雄, 苗天德. 黄土抗剪强度的水敏感性特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5): 1003-1008.
LI Bao-xiong, MIAO Tian-de. Research on Water Sensitivity of Loess Shear Strength[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 1003-1008.
- [39] 王阿丹, 王昌业, 李 萍. 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 Slopes Along the Northern Edge of Bailuyuan, Xi'an[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2012, 34(1): 104-110.
- [40] 李 萍, 赵纪飞, 李同录. 山西乡宁—吉县地区黄土高边坡可靠度研究[J]. *地球科学与环境学报*, 2012, 34(2): 81-89.
LI Ping, ZHAO Ji-fei, LI Tong-lu. Study on Reliability for Loess High Slopes in Xiangning-Jixian Area of Shanxi Province[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2012, 34(2): 81-89.
- [41] 李 文, 龙建辉, 李同录, 等. 陕西泾阳南塬黄土滑坡滑带土残余剪切强度特性[J]. *地球科学与环境学报*, 2012, 34(4): 95-101.
LI Wen, LONG Jian-hui, LI Tong-lu, et al. Residual Shear Strength Characteristics of Landslide Soil in Loess Landslide of Jingyang Southern Highland, Shaanxi[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2012, 34(4): 95-101.