

堆积层滑坡垂直位移方向率的数值模拟研究

张 冰, 贺可强, 张 娟, 徐鹏飞

(青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘 要:以长江三峡库区巴东县境内的黄腊石滑坡工程实例为背景,运用大型有限元软件 FLAC3D 进行数值模拟,引入能反映滑坡位移方向改变的特征参数-滑坡垂直位移方向率作为滑坡稳定状态的评价参数,研究在边坡稳定演化过程中垂直位移方向率时空变化特征,发现了滑坡垂直位移方向率由稳定时的恒定值到失稳时的突然增大或减小的突变规律,得出边坡垂直位移方向率可以作为边坡稳定状态的预测判据。

关键词:边坡稳定性分析;堆积层边坡;垂直位移方向率;数值模拟;黄腊石滑坡

中图分类号:P642.22

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)06-0048-07

Study on Numerical Simulation of the Directional Rate of Vertical Displacement in Landslide of Colluvial Layer

ZHANG Bing, HE Keqiang, ZHANG Juan, XU Pengfei

(College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China)

Abstract: Based on the monitoring data of displacements resulted from the Huanglashi landslide, this paper completed a study on the change characters of time and space in directional rate of vertical displacement in the process of slope stability evolution by means of the large-scale finite element software FLAC3D and the eigen parameter-directional rate of vertical displacement which reflected the change of slope displacement direction was introduced as the parameter of evaluating the slope stability state. We found that the directional rate of vertical displacement had an anomalous regulation from the constant value in stable stage to sudden increase or decrease of values in unstable stage. The conclusion is that the directional rate of the vertical displacement can be used for the criterion of predicting the slope stability.

Key words: slope stability analysis; slope of colluvial layer; directional rate of vertical displacement; numerical simulation; Huanglashi landslide

滑坡是一个复杂的地质体,影响滑坡稳定性的内外因素多样,各因素对滑坡的影响程度各异,并且在滑坡演化过程中,这些因素又是动态变化的,决定了滑坡变形机制与变形特点的复杂性。国内外专家学者在对滑坡的研究中发现,滑坡从稳定状态到不稳定状态直到失稳的整个发展演化过程中,坡体不同部位的位移矢量或位移方向会表现出不同的特征。David 等^[1]利用 GRS 的实时监测技术对纽约中北部的一个大型滑坡进行了监测,从监测数据和生成的图表中可以看出滑坡前缘的监测点 REM1 的位移方向在监测过程表现为逐渐向上偏转,而且位移量也不断变大。张斌等^[2]在对泥岩边坡开挖前后的时效变形研究中,发现前缘剪出

收稿日期:2011-10-26

基金项目:国家自然科学基金项目(40872184);三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放基金项目(2008KDZ04)。

作者简介:张 冰(1985—),男,山东威海人,硕士研究生,主要从事滑坡预测预报与防治技术方面的研究。

E-mail: woai606@126.com.

贺可强(1960—),男,山东蓬莱人,教授,博士生导师,主要从事地质灾害综合评价及滑坡形成机制和预测方面的研究。E-mail: keqianghe@163.com.

带上的特征点,在初始应力阶段其水平位移和数值方向位移基本保持不变,到边坡开挖阶段水平和数值位移变大,特别在降雨过程中,坡体前缘的水平位移产生明显的加速,在竖直方向表现为前缘上抬。唐承平等^[3]通过理论分析和 FLAC 数值模拟对重力侵蚀下冲刷切沟作用的喇嘛溪沟边坡研究,发现边坡位移方向在边坡运动初期表现为向坡外倾斜,当边坡在接近破坏时坡脚处的位移方向接近水平,说明坡脚的位移方向在这个过程中发生向上偏转。贺可强等^[4]通过对堆积层边坡不同稳定性演化阶段的变形性质和基本构成分析,发现堆积层边坡表层位移矢量角在整体滑移阶段,其挤压剪出口区的位移矢量角呈现由大变小的规律,而引张松动区的位移矢量角将出现由小变大的规律。徐鼎平等^[5]在对太和铁矿西端帮冰碛土边坡这一具体工程研究过程中,给出位移矢量在边坡破坏时的特征:边坡上部位移矢量垂直向下,表现为沉降;中部位移矢量近乎与坡面平行,表现为剪切;下部位移矢量在渐近坡趾处表现为剪出。王光进等^[6]借助 FLAC 软件分析了西源岭 413 台阶排土场现状边坡,发现在滑坡失稳时,上部位移矢量表现为下沉,其下沉方向与坡面保持同向,中部位移矢量表现为剪切,下部位移矢量略有反抬升的趋势。从滑坡位移矢量和位移方向的国内研究现状来看,国内外学者对滑坡失稳时的位移场的方向已有广泛研究,而且还可以发现滑坡的位移场的变化与滑坡的稳定性状态有着必然的联系。为此,本研究提出能反映滑坡位移方向改变的特征参数-滑坡垂直位移方向率作为滑坡稳定状态的评价参数,并以黄腊石滑坡为例研究其在滑坡演化过程中的规律。

1 边坡垂直位移方向率及其与稳定系数的关系

1.1 垂直位移方向率的提出

本文垂直位移方向率指位移矢量的垂直位移与水平位移的比值,是边坡整体垂直位移方向协调性的评价参数,它反映坡体侧向应变和纵向应变的本质特征,其大小和变化仅与边坡稳定性状态及变形性质有关。因此位移方向率特征参数在刻画和评价边坡的稳定性中更具有其代表性和稳定性。

1.2 有限元强度折减法建立数学模型

边坡的安全系数可通过静力有限元进行求解,本文采用有限元模拟软件 FLAC3D 内置的有限元强度折减法^[7-8]求解边坡的安全系数,下面首先对有限元强度折减法做简单介绍。

1)有限元强度折减法基本原理

有限元强度折减法是通过不断降低边坡岩土体抗剪切强度参数使其达到极限破坏状态,程序自动根据弹塑性有限元计算结果得到破坏滑动面,同时得到边坡的强度储备安全系数的一种方法,其定义为:在外荷载保持不变的情况下,边坡内部土体所能提供的最大抗剪强度与外荷载在边坡内所产生的实际剪应力之比。对于摩尔库仑材料,强度折减安全系数可表示为:

$$c' = c / F_s; \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan((\tan \varphi) / F_s)。 \quad (2)$$

其中: c —黏聚力; φ —内摩擦角; c' —折减后的黏聚力; φ' —折减后的内摩擦角; F_s —折减系数。

FLAC3D 通过 Solve fos 命令自动寻找安全系数,实现强度折减法求解安全系数。

2)屈服准则和失稳判据的选择

一般计算中将岩土体假设成理想弹塑性体,模型采用摩尔-库仑准则。

本研究采用有限元强度折减法分析边坡稳定性的一个关键问题是如何由有限元计算结果来判别边坡是否处于整体破坏状态。目前,判别土体破坏的标准有:

①以有限元静力平衡计算不收敛作为滑坡整体破坏的标志;

②以塑性区从坡脚到坡顶贯通作为滑坡整体破坏的标志;

③土体破坏标志是滑体无限移动,以土体滑移面上应变和位移发生突变且无限发展,作为滑坡整体破坏的标志^[7]。

本研究选择土体滑移面上应变和位移发生突变且无限发展作为边坡失稳的判据。

2 研究区概况和计算模型

2.1 研究区概况

黄腊石滑坡位于长江三峡库区巴东县城东 1.5 km 的长江北岸,下距三峡坝址 66 km,其主体东起李家包,西至奔龙溪,在地形上呈南北向长条形凹槽。后缘高程约 800 m,前缘在长江枯水位 66 m 处,纵长约 1 500 m,沿江最大宽度为 840 m。滑体厚 10~102 m,总体积为 $1\ 800 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。黄腊石滑坡群东部滑区由江边的石榴树包滑坡,周家湾滑坡和后缘的响石镬滑坡组成。石榴树包滑坡前缘剪出口高程为 65~70 m,呈弧形槽状,后缘高程约 605 m。据勘探及平面显示,石榴树包滑坡为一个推移式复合型滑面的岩质滑坡,面积 0.34 km^2 ,体积为 $1\ 720 \times 10^4 \text{ m}^3$,后缘高程 390 m,前缘滑床反倾山内,最大滑体厚 100 余 m,滑坡平面是舌形。滑坡主要由泥灰岩和粉砂岩、泥岩的碎裂岩体、散裂岩体构成,其上部有少量堆积的长石石英砂岩碎石块实体,三层滑坡呈曲线形,显示了多期滑移的特点,处于基本稳定状态,但在目前三峡库区蓄水后有可能失稳下滑。

2.2 计算模型

根据图 1,采用 MIDAS/GTS 和 FLAC3D 仿真模拟分析软件建立计算模型如图 2 所示。在确定石榴树包滑坡体计算范围时,后缘取至大周滑坡的后缘处,前缘取至河床中心,底部深度延至滑坡高度的 3 倍左右,以保证计算精度要求。

计算模型为二维大型边坡模型,水平方向为 X 轴,竖直方向为 Z 轴(高程);边坡长 900 m,高 550 m;边坡为双层模型,上层为浅层堆积物,下层为基岩层。

坐标系:垂直向上为 Z 轴的正向,水平背向河床为 X 轴的正向,原点为石榴树包滑坡体后缘起点,高程为 0,按照平面应变建立模型。

边界条件:在滑体前后缘的垂直边界上为水平约束,底部约束条件为双向固定约束。

2.3 物理力学参数

进行数值模拟分析时,滑坡材料分为滑体和基岩两种。其计算模型的物理力学指标见表 1。

3 模拟结果分析

为了便于空间分析,根据滑坡的空间形态特征,将黄腊石滑坡划分为四个部分来研究:前缘、后缘、滑带、滑坡基岩,从每个部位选取 2 个具有普遍性的节点来进行分析。节点 2、3 位于滑坡体前缘,节点 4、5 位于滑坡体后缘,节点 6、7 位于滑带,节点 8、9 位于滑坡基岩,如图 3 所示。现取前缘和后缘的点进行分析。

3.1 前缘部分

从图 4 可以看出,滑坡的垂直位移方向率开始为基本稳定的值,到安全系数为 1.1 左右时,垂直位移方向率开始增大,在安全系数降为 0.9 时(即临滑),前缘部位的垂直位移方向率急剧增大,

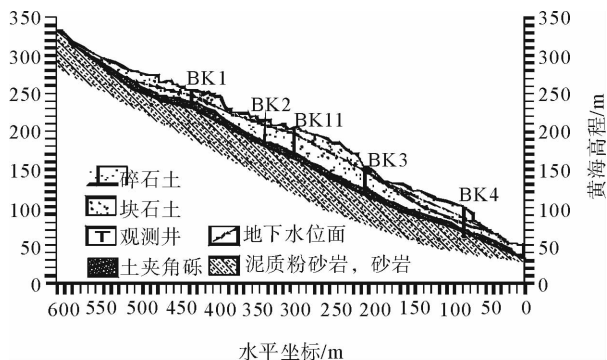


图 1 石榴树包滑坡地质剖面图

Fig. 1 The geological section of Shiliushubao landslide

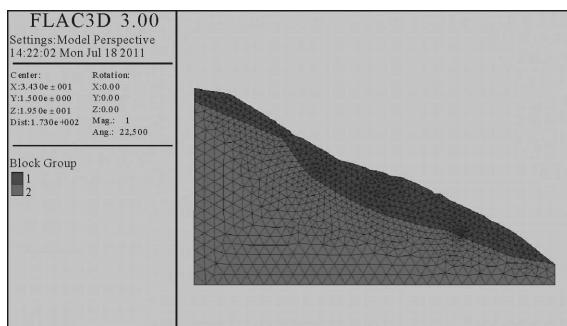


图 2 石榴树包滑坡计算模型及网格划分图

Fig. 2 The calculation model and grid division of Shiliushubao landslide

表 1 岩土体物理力学计算参数表(据中国环境监测院,2003)
Tab. 1 Physical and mechanical parameters of rock mass (after China Institute of Environmental Monitoring, 2003)

岩土体	E/MPa	μ	c/MPa	$\varphi/(\text{°})$	天然容重/ (kN/m^3)	饱和容重/ (kN/m^3)
滑体	0.01×10^4	0.35	0.03	32.8	20.0	22.0
基岩	2.137×10^4	0.22	1.00	45.0	25.0	26.0

表明滑体在下滑力的作用下有向临空方向运动的趋势,在前缘表现为剪切口形成,滑体剪出。在数值上,前缘部分的垂直位移方向率为正值,表现为位移方向向上,在弹性阶段(稳定状态)时保持在 0~5 的一个常数,进入塑性阶段(欠稳定状态)时,滑坡的垂直位移方向率开始逐渐增大,直到剪切口的形成、滑体剪出,垂直位移方向率急剧增大,发生突变破坏。这主要是由于前缘 Z 方向位移在滑体上部下滑力的挤推作用下发生上抬而产生的。其模拟结果的垂直位移方向率数据如表 2 所示。

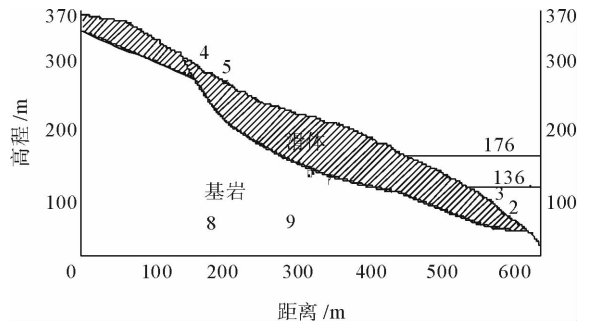


图 3 石榴树包滑坡空间节点位置分布图

Fig. 3 The location distribution of spatial nodes in Shiliushubao landslide

表 2 前缘监测点的垂直位移方向率数据表

Tab. 2 The data of the directional rate of vertical displacement of monitoring points at front edge of landslide

安全系数	2点垂直位移 方向率	3点垂直位移 方向率	安全系数	2点垂直位移 方向率	3点垂直位移 方向率
1.60	2.25	2.24	1.22	2.25	2.24
1.58	2.25	2.24	1.20	2.25	2.24
1.56	2.25	2.24	1.18	2.25	2.24
1.54	2.25	2.24	1.16	2.25	2.24
1.52	2.25	2.24	1.14	2.25	2.24
1.50	2.25	2.24	1.12	2.63	2.62
1.48	2.25	2.24	1.10	2.94	2.91
1.46	2.25	2.24	1.08	3.19	3.17
1.44	2.25	2.24	1.06	3.27	3.26
1.42	2.25	2.24	1.04	3.33	3.30
1.40	2.25	2.24	1.02	4.28	4.00
1.38	2.25	2.24	1.00	6.55	4.55
1.36	2.25	2.24	0.98	10.53	6.53
1.34	2.25	2.24	0.96	16.01	8.01
1.32	2.25	2.24	0.94	23.52	15.52
1.30	2.25	2.24	0.92	34.55	24.55
1.28	2.25	2.24	0.90	60.93	45.93
1.26	2.24	2.23	0.88	102.49	87.49
1.24	2.25	2.24			

3.2 后缘部分

同样,如图 5 所示,滑坡的垂直位移方向率开始为基本稳定的值,到安全系数为 1.1 左右时,垂直位移方向率开始逐渐减小,在安全系数降到 0.9 时(临滑),后缘部位的垂直位移方向率急剧减小,表现为滑体在下滑力的作用下“下沉坐落”。在数值上,后缘部分的垂直位移方向率为负值,表现为位移方向向下,在弹性阶段(稳定状态)时保持在 0~-5 的一个常数,进入塑性阶段(欠稳定状态)时,滑坡的垂直位移方向率开始逐渐减小,直到发生突变破坏,垂直位移方向率急剧减小。其模拟结果的垂直位移方向率数据见表 3。

表 3 后缘监测点的垂直位移方向率数据表

Tab. 3 The data of the directional rate of vertical displacement of monitoring points at rear edge of landslide

安全系数	4 点垂直位移 方向率	5 点垂直位移 方向率	安全系数	4 点垂直位移 方向率	5 点垂直位移 方向率
1.60	-2.26	-2.25	1.22	-2.26	-2.25
1.58	-2.26	-2.25	1.2	-2.26	-2.25
1.56	-2.26	-2.25	1.18	-2.26	-2.25
1.54	-2.26	-2.25	1.16	-2.26	-2.25
1.52	-2.26	-2.25	1.14	-2.26	-2.25
1.50	-2.26	-2.25	1.12	-2.64	-2.63
1.48	-2.26	-2.25	1.1	-2.97	-2.94
1.46	-2.26	-2.25	1.08	-3.21	-3.19
1.44	-2.26	-2.25	1.06	-3.28	-3.27
1.42	-2.26	-2.25	1.04	-3.36	-3.33
1.40	-2.26	-2.25	1.02	-4.00	-4.08
1.38	-2.26	-2.25	1.00	-8.55	-7.85
1.36	-2.26	-2.25	0.98	-14.53	-14.83
1.34	-2.26	-2.25	0.96	-24.01	-22.61
1.32	-2.26	-2.25	0.94	-31.52	-30.78
1.30	-2.26	-2.25	0.92	-44.55	-40.55
1.28	-2.26	-2.25	0.9	-55.67	-53.67
1.26	-2.25	-2.24	0.88	-76.43	-72.43
1.24	-2.26	-2.25			

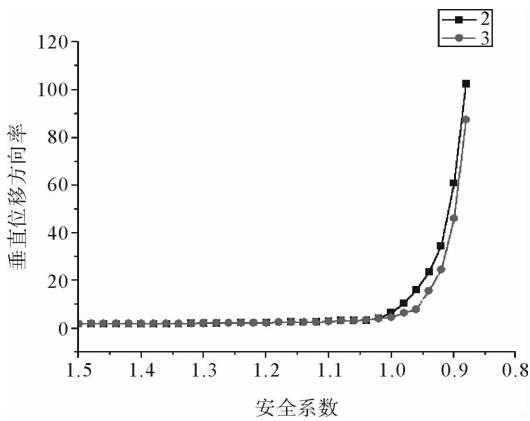


图 4 滑坡前缘垂直位移方向率与稳定性关系曲线图

Fig. 4 The relation curves between the directional rate of vertical displacement and stability at front edge of landslide

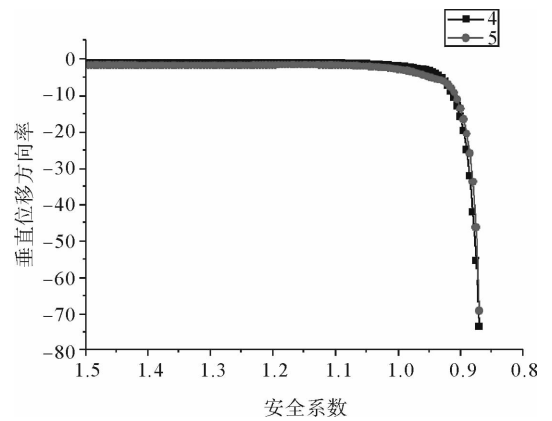


图 5 滑坡后缘垂直位移方向率与稳定性关系曲线图

Fig. 5 The relation curve between the directional rate of vertical displacement and stability at rear edge of landslide

3.3 滑带部分

图 6 给出了滑带中部点的垂直位移方向率-时间曲线, 滑坡的垂直位移方向率开始为基本稳定的值, 到安全系数为 1.1 时, 垂直位移方向率开始减小, 在安全系数降到 0.9 (临滑) 时, 滑带部位的垂直位移方向率发生急剧减小。在数值上, 滑带部分的垂直位移方向率为负值, 表现为位移方向向下, 在弹性阶段 (稳定状态) 时保持在 $0 \sim -5$ 的一个常数, 进入塑性阶段 (欠稳定状态) 时, 滑坡的垂直位移方向率开始逐渐减小, 直

到发生突变破坏,垂直位移方向率急剧减小。节点 6、7 的垂直位移方向率降幅和出现时间的不同,是因为由中部滑体受后缘的挤推作用及前缘剪出牵引的作用强度不同引起的。其模拟结果的垂直位移方向率数据见表 4。

表 4 滑带监测点的垂直位移方向率数据表

Tab. 4 The data of the directional rate of vertical displacement of monitoring points in the gliding zone of landslide

安全系数	6 点垂直位移 方向率	7 点垂直位移 方向率	安全系数	6 点垂直位移 方向率	7 点垂直位移 方向率
1.60	-2.26	-2.25	1.22	-2.26	-2.25
1.58	-2.26	-2.25	1.2	-2.26	-2.25
1.56	-2.26	-2.25	1.18	-2.26	-2.25
1.54	-2.26	-2.25	1.16	-2.26	-2.25
1.52	-2.26	-2.25	1.14	-2.26	-2.25
1.50	-2.26	-2.25	1.12	-3.06	-2.63
1.48	-2.26	-2.25	1.10	-3.95	-3.24
1.46	-2.26	-2.25	1.08	-5.12	-4.09
1.44	-2.26	-2.25	1.06	-8.53	-4.87
1.42	-2.26	-2.25	1.04	-11.23	-5.83
1.40	-2.26	-2.25	1.02	-14.67	-7.08
1.38	-2.26	-2.25	1.00	-18.23	-8.85
1.36	-2.26	-2.25	0.98	-22.53	-15.83
1.34	-2.26	-2.25	0.96	-29.01	-20.61
1.32	-2.26	-2.25	0.94	-37.52	-32.78
1.30	-2.26	-2.25	0.92	48.67	-41.55
1.28	-2.26	-2.25	0.90	-67.52	-58.67
1.26	-2.25	-2.24	0.88	-95.43	-85.43
1.24	-2.26	-2.25			

3.4 滑坡基岩部分

从图 7 可以看出,滑坡基岩处的 8、9 点在滑坡的整个演化过程中,其垂直位移方向率始终都为一个定值,而在这个过程中基岩的材料基本上一直处于弹性阶段(稳定状态),这也很好地说明了垂直位移方向率的大小和变化仅与边坡稳定性状态及变形性质有关。

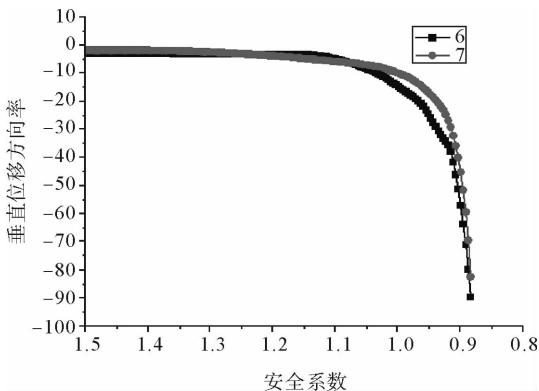


图 6 滑坡滑带垂直位移方向率与稳定性关系曲线图

Fig. 6 The relation curves between the directional rate of vertical displacement and stability in gliding zone of landslide

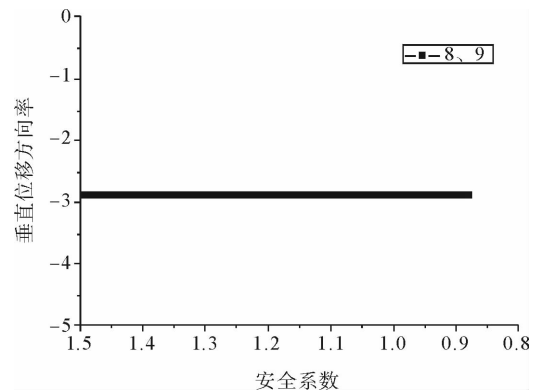


图 7 滑坡基岩垂直位移方向率与稳定性关系曲线图

Fig. 7 The relation curve between the directional rate of vertical displacement and stability in the bedrock of landslide

4 结论

从数值计算所获得的垂直位移方向率与稳定系数关系曲线图可以看出,垂直位移方向率曲线具有较强的稳定性和抗干扰性,很好地反映了滑坡位移方向的变化,即在边坡稳定阶段,其垂直位移方向率数值一般为固定值,位移方向也基本保持不变,但边坡整体失稳前,滑体部分的垂直位移方向率会急剧变化,同时位移的方向也会发生很大的偏转。因此,垂直位移方向率所表现的变化规律能反映边坡的真实稳定性状态。

参考文献:

- [1] DAVID R, JACK G, JOHN K. Advances in real-time gps deformation monitoring for landslides, volcanoes, and structures [C]//The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, 19-22 March, 2001: 110-121.
- [2] 张斌, 刘高, 聂德新, 等. 高速公路泥岩边坡时效变形破坏机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 1988-1993.
ZHANG Bin, LIU Gao, NIE Dexin, et al. Mechanism of time-dependent deformation and failure of mudstone slope of express highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(12): 1988-1993.
- [3] 唐承平, 王昊宇, 廖昕, 等. 喇嘛溪沟冲刷切割模型稳定性 FLAC 数值分析[J]. 路基工程, 2010, 151(4): 44-46.
TANG Chengping, WANG Haoyu, LIAO Xin, et al. FLAC numerical analysis on scouring and cutting model stability for Nama channel[J]. Subgrade Engineering, 2010, 151(4): 44-46.
- [4] 贺可强, 阳吉宝, 王思敬. 堆积层边坡位移矢量角的形成作用机制及其与稳定性演化关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 185-192.
HE Keqiang, YANG Jibao, WANG Sijing. Study on the forming mechanism of displacement vector angle and stability evolution relation of accumulative-formation slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 185-192.
- [5] 徐鼎平, 朱大鹏. 太和铁矿西端帮冰碛土边坡稳定性分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增2): 3335-3340.
XU Dingping, ZHU Dapeng. Study on stability analysis method for moraine soil slope in west wall of taihe iron mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(s2): 3335-3340.
- [6] 王光进, 杨春和, 张超, 等. 超高排土场的粒径分级及其边坡稳定性分析研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 905-914.
WANG Guangjin, YANG Chunhe, ZHANG Chao, et al. Research on particle size grading and slope stability analysis of super-high dumping site[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 905-914.
- [7] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346.
ZHAO Shangyi, ZHEN Yingren, SHI Weimin, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343-346.
- [8] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381-3388.
ZHEN Yingren, ZHAO Shangyi. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3381-3388.