

文章编号:1673-9469(2016)01-0091-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2016.01.020

雅砻江中游某滑坡形成机制及稳定分析

毛硕,王运生

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都 610059)

摘要:雅砻江右岸某滑坡位于拟建坝址区上游,木里县卡拉乡,该滑坡一旦失稳,威胁坡脚居民以及拟建水电站的安全运行。本文在野外工程地质测绘、钻探、室内试验基础上,采用三维有限差分软件 FLAC3D 对滑坡进行数值模拟分析,对滑坡基本特征、形成机制以及稳定性进行分析评价。结果表明:该滑坡为特大型岩质滑坡,形成演化经历了剪切蠕动-滑移弯曲-贯通破坏三个阶段,天然状态下滑坡整体上稳定性较好,暴雨状态下处于欠稳定状态,局部表层存在二次滑动可能。

关键词:滑坡;形成机制;稳定性;三维数值模拟;FLAC3D

中图分类号:P642.2

文献标识码:A

Formation mechanism and stability evaluation of a landslide in Yalong River

MAO Shuo, WANG Yun-sheng

(State Key Laboratory of Geo-hazards Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Sichuan Chengdu 610059, China)

Abstract: A landslide lies in the upstream of dam site at the right bank of Yalong River. Once the landslide is damaged. It will have an impact on the local residents and safe operation of the preparing hydropower station. This paper based on the field engineering geological mapping, drilling and laboratory test, the stability is analyzed by the numerical simulation using three-dimensional finite difference software (FLAC3D). It analyzes the basic characteristics, formation mechanism and stability of the landslide. The result shows that the landslide is a oversize rock? landslide. Its formation and evolution has passed three stages: shear peristalsis, flexural slumping? and transfixion failure. The landslide is stable under natural state and lacked of stability in , but secondary sliding may occur on local surface.

Key words: landslide; formation mechanism; stability; three-dimensional numerical simulation; FLAC3D

雅砻江位于四川盆地与青藏高原过渡带,河谷深切,地质环境脆弱,近年来由于水电设施的开发,人类工程活动增强,地质灾害威胁也随之增大。该滑坡位于雅砻江中游右岸,木里县卡拉乡,坡脚有村民居住,前缘有县道通过,如果该滑坡一旦复活,很可能堵塞雅砻江,威胁当地居民生命财产安全和即将规划修建的水电设施。本文通过详细的野外调查以及工程地质测绘和室内试验,对滑坡的形态、变形特征进行了剖析,研究了滑坡的

形成机制,并运用 FLAC-3D 软件对滑坡进行了数值模拟,分析了滑坡的稳定性,并采用 FLAC-3D 强度折减法和极限平衡理论对滑坡稳定性进行了评价。

1 滑坡概况

1.1 地质环境条件

该区为强烈侵蚀的高山峡谷地貌,河谷为

收稿日期:2015-09-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41072231);中国地质调查局项目资助项目(12120113010100)

作者简介:毛硕(1990-),男,满族,河北遵化人,硕士,主要从事地质工程及地质灾害评价与预测等研究工作。

“V”型谷。气候有明显的垂直差异性,降雨主要集中在6~9月,月平均降雨量为100~200 mm,占全年降雨量的81%。基岩主要为三叠系上统杂谷脑组(T3z)岩层,岩性主要为砂质板岩及炭质板岩,岩层产状N20°W/NE∠50°。该滑坡区为单斜地层,滑坡位于前波断裂的北东盘(下盘),地质构造相对简单。该地区地震动峰值加速度等于0.10 g,地震基本烈度等于Ⅶ度,历史地震活动水平和频度都很低,仅有破坏性地震1次,即1944年四川冕宁西5 $\frac{3}{4}$ 级地震,对该地区影响烈度为Ⅵ度。

1.2 滑坡基本特征

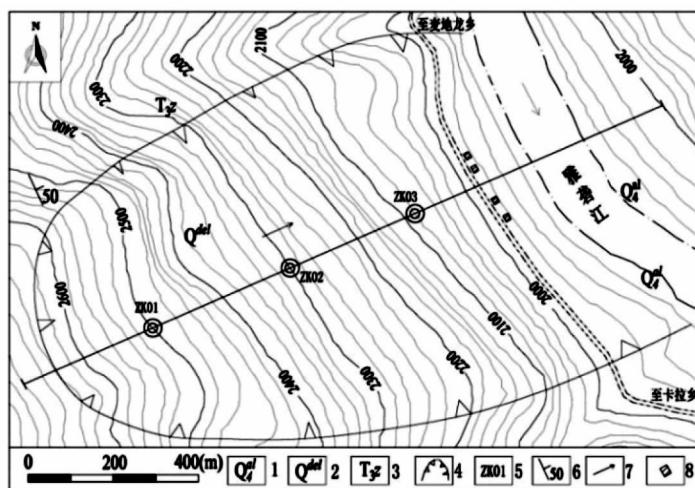
滑坡整体形状呈开阔“U”字形(如图1),前陡后缓,大致以高程2 500 m为界,2 500 m以上地形坡度20~30°,2 500 m以下地形坡度35~50°。滑坡体后缘以缓坡基岩为界,坡度约26°左右,高程2 650 m,边界线以外岩层产状正常;滑坡前缘至雅砻江边,高程1 950 m;滑坡侧缘以深切冲沟为界。前后缘高差约700 m,沿江宽(近南北向)约950 m,纵向上(近东西向)长约1 150 m,面积 109×10^4 m²。从剖面图来看(如图2),平均厚度80 m,其中最大垂直揭露厚度102 m,总方量约 $8 700 \times 10^4$ m³,为特大型岩质滑坡。滑坡体内发育有多条冲刷形成的深切冲沟,一般下切深度50

~70 m,延伸至高程2 400 m后规模变小,冲沟为季节性冲沟。

滑坡体组成物质较复杂,据钻孔、平洞揭露,滑坡堆积体物质组成主要为碎块石土,其中滑坡堆积层根据破碎程度可细分为二个亚层:碎石土层、块石层。碎石土分布在表层,灰黑色、灰黄色,碎石成分主要为砂质板岩、含炭质板岩,呈强风化状,碎石约占60~70%,间隙充填角砾、粉质粘土,泥质胶结,胶结较好,结构不均,稍密~中密,厚度分布不均匀,一般为10~40 m;块石层分布在碎石土以下,因滑坡形成过程中岩层未完全解离而形成,岩层层理多可辨,岩层缓倾山内,与原始基岩倾向相反,岩层多呈挤压状,产状变化大,岩块风化较强烈,呈全~强风化状。滑带土成分主要为粉质粘土夹砾石,砾石呈次磨圆状,泥质胶结,胶结一般。

1.3 滑坡变形特征

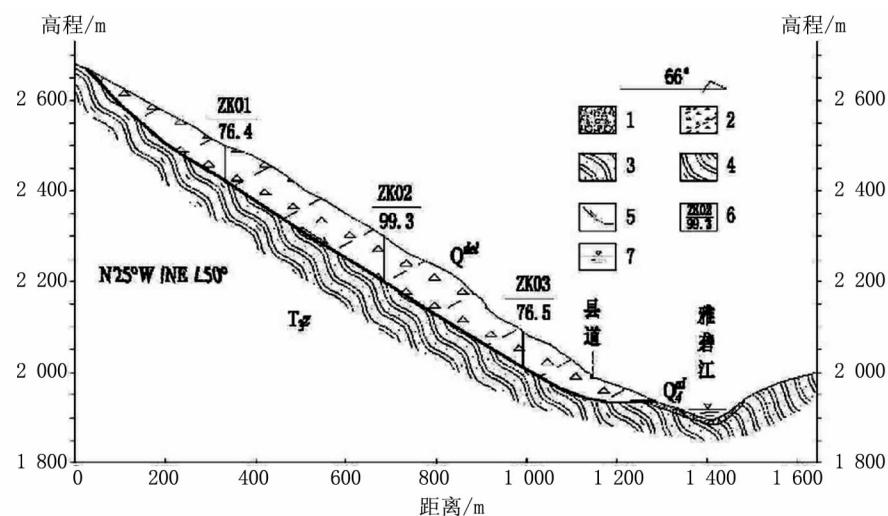
据地表调查,滑坡前缘未见鼓胀隆起现象,滑坡体没有出现大规模拉张裂缝,变形破坏迹象主要表现为局部表层蠕滑,具有明显的季节性。表层蠕滑变形区主要分布于冲沟两侧岸坡和滑坡体中下部的较陡部位,变形区物质成分主要为浅表层碎石土,滑坡体上灌木林向坡外倾斜,而高大乔木则未受滑坡体表层蠕滑变形影响,仍直立生长。



1—冲积物; 2—滑坡堆积体; 3—杂谷脑组; 4—滑坡边界; 5—钻孔; 6—岩层产状; 7—滑动方向; 8—房屋

图1滑坡工程地质平面图

Fig. 1 Engineering geological plane of the landslide



1—冲积物；2—滑坡堆积体；3—砂质板岩；4—炭质板岩；5—滑面；6—钻孔及孔深；7—雅砻江

图2 滑坡工程地质剖面图

Fig. 2 The section of engineering geological of the landslide

2 滑坡形成机制

根据现场调查和勘探成果,斜坡坡体结构为中倾顺向坡,倾角大于坡脚,岩性为砂质板岩、炭质板岩软硬相间,综合分析滑坡的形成机制为滑移-弯曲^[1-2]。形成演化过程主要分为三个阶段:剪切蠕动-滑移弯曲-贯通破坏。

剪切蠕动阶段:中更新世晚期以来,雅砻江快速下切,斜坡前缘浸泡在江水之中,板理面长期浸水而软化,强度降低,岩体在自重作用下沿层间软弱带发生顺层剪切蠕动。

滑移弯曲阶段:随着蠕动的加剧,在斜坡上部产生拉应力集中,形成拉裂缝,在层间软弱带由于剪应力增大,产生较大的滑移变形,由于倾倒大于坡脚,岩层滑移变形受阻,发生弯曲,坡脚隆起;随着变形的发展,上部岩体不断挤压,弯曲增强,出现共轭X节理,差异性变形导致岩体扩容,隆起加剧,岩体松动,局部剥落。

贯通破坏阶段:随着弯曲加剧,倾向破内的X节理逐渐变缓,一旦缓倾坡内的X节理与和剪切滑移面、不断向深部下部扩展的后缘拉裂面贯通,产生滑移-弯曲型滑坡。

该区主要由软弱的砂板岩、含炭质板岩构成,可以积累较大的变形。受前波断层影响,岩层挠曲现象比较严重,在此基础上的滑移-弯曲变形可以持续较长时间,进而产生大范围的弯曲变形,滑坡下游侧至猪白沟沿线大面积分布强烈弯曲岩体就是最好的例证。

3 滑坡稳定性分析

3.1 滑坡稳定性定性分析

根据对滑坡的变形分析,前缘未发生隆胀、后缘未见长大拉张裂缝等现象,滑坡体中没有泉水出露,钻孔也没有发现次级滑带,滑坡整体上稳定,局部表层蠕滑,在暴雨地震等条件下局部可能发生破坏。

3.2 数值模拟分析

为了详细了解堆积体应力变形特征,分析滑坡的稳定性,采用ISTA公司开发的FLAC-3D软件对滑坡进行模拟^[3-4],为稳定性评价提供参考。

(1) 模型的建立

根据现场调查、工程地质测绘以及钻探资料建立模型,只分析滑坡堆积体的应力、变形特征,对模型进行了优化,堆积体和基岩采用实体单元,采用接触面单元模拟滑带。模型垂直河谷方向(Y轴,顺坡向为正)长1640 m,竖直方向(Z轴,垂直向上为正)右侧高170 m,左侧高845 m(底面高程1830 m)。模型共计26376个单元,6349个节点。对模型底面及四周采用法向约束,坡面为自由表面。滑坡堆积体、基岩均采用弹塑性模型,采用摩尔-库伦屈服准则,不考虑构造应力的作用,只考虑自身重力的作用。

(2) 参数的选取

通过现场采样、试验及类比该地区同类工程,综合确定岩土体物理力学参数见表1。

表1 计算模型岩土介质参数

Tab. 1 The mechanics parameters of rock soil medium

岩性	密度/kg/m ³		内聚力/MPa		内摩擦角/°		抗拉强度/GPa	体积模量/GPa	剪切模量/GPa
	天然	暴雨	天然	暴雨	天然	暴雨			
堆积体	2 100	2 150	0.035	0.033	34	30	0	0.753	0.185
基岩	2 500	2 550	1.1	1.0	40	38	2.4	8.5	4.7
接触面	\		内聚力/MPa		内摩擦角/°		切向刚度/GPa/m	法向刚度/GPa/m	\
滑带	\		0.030	0.028	30	27	1.2	1.2	\

(3) 模拟结果分析

考虑数值模拟分析边坡变形破坏判断标准^[5-7],主要从系统不平衡力、剪应变增量、位移、监测点位移变化曲线等方面进行分析。

系统不平衡力:图3为系统不平衡力演化曲线。由图可知,不平衡力在开始1 000步之内波动较大,但是系统不平衡力随着迭代的进行而衰减,最终收敛,达到平衡。从系统不平衡力的演变过程可以得出:不考虑构造应力,堆积体在自重作用下,应力不断调整达到自稳。因此,在自然状态下,滑坡变形也会慢慢稳定,滑坡整体处于稳定状态。

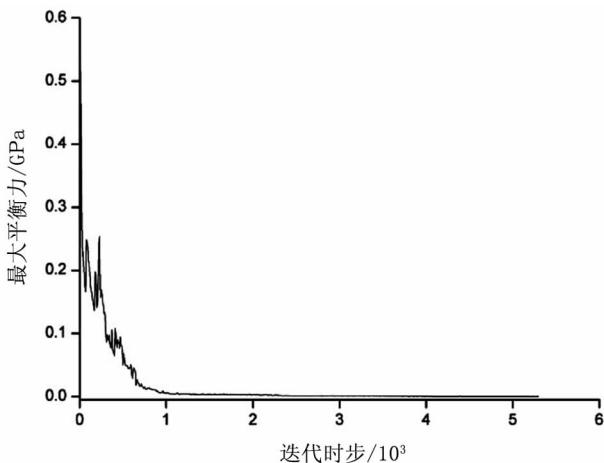


图3系统不平衡力演化曲线

Fig. 3 Evolution curve of systemic unbalancing force

剪应变增量:一些学者把剪应变贯通作为边坡失稳的判断依据^[8-10]。从剪应变增量云图看出(图4),剪应变集中的地方主要是主滑带中部,局部坡体表面,其他部位增量均较小。主滑带剪应变增量集中带并未贯通,大部分为锁骨段,为抗滑段。剪应变增量集中的地方是最可能发生破坏的区域^[11]。由此表明:主滑带并未贯通,滑坡堆积体整体稳定,发生整体滑动可能性较小,但是局部坡表可能发生局部破坏。

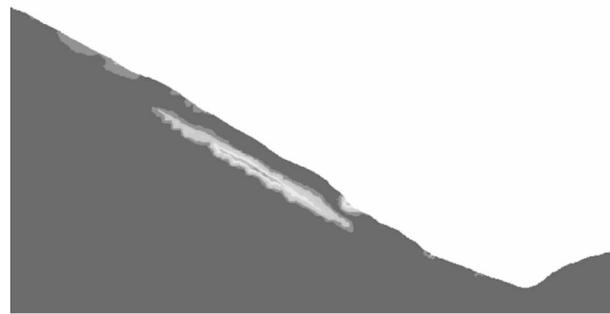


图4 剪应变增量云图

Fig. 4 Contour of shear strain increment

位移分析:从滑坡总位移云图(图5)可以看出,在自重作用下,堆积体变形趋于稳定,总体表现向临空方向运动,滑坡前后缘变形较小,中部较陡部位位移最大,集中在坡表,约39.8 cm,由坡表向破内减小,因此滑坡体变形主要是在自重作用下表层滑动为主。位移分析表明:滑坡目前主要是中部陡坡表层变形明显,与目前调查的变形破坏迹象吻合。

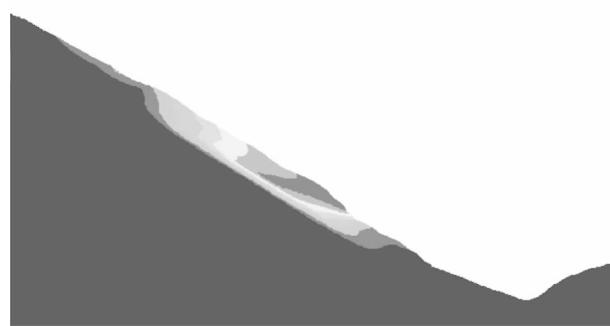


图5 总位移云图

Fig. 5 The nephogram of displacement

监测曲线:为了更好掌握堆积体变形状况,在前缘(H1,模型高度166 m)、中部陡坡(H2,模型高度308 m)、后缘(H3,模型高度707 m)设立监测点,各个监测点位移曲线如图6。从监测点位移曲线可以看出,H1、H2、H3监测点的最大位移约为4.15、32.98、9.05 cm,中部陡坡处位移最大。在滑坡形成初期,位移迅速增大;但是随着时间的推移,经过一阵波动,增长速率逐渐降低,位移缓慢增加,最终总位移值趋于稳定。因此,该滑坡整体上处于稳定状态。

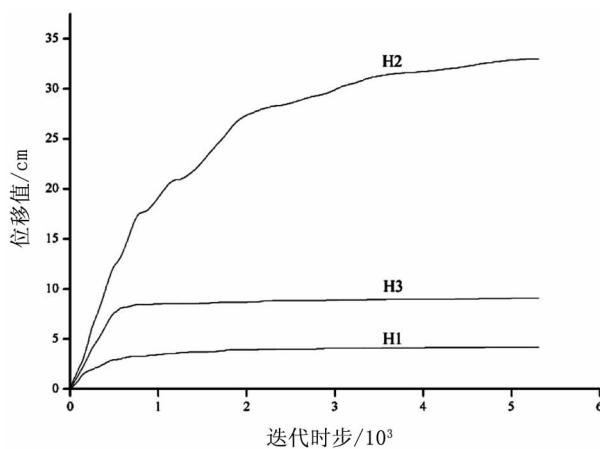


图6 监测点位移时步曲线

Fig. 6 The displacement-time step curves at some points

3.3 滑坡稳定性评价

目前滑坡稳定性评价方法主要有极限平衡分析法和数值模拟法^[12]。数值模拟法,基于强度折减理论,优点在于不用假定滑面,考虑岩土体弹塑性本质,通过折减物理力学参数,计算得到最危险滑面,并且能够分析极限状态下的应力变形特征^[13]。

本文采用 FLAC - 3D 内置强度折减法^[14]和传统极限平衡理论 Morgenstern - Price、Biop 法进行了稳定性计算。考虑天然和暴雨条件,计算结果如表 2。图 7 为天然状态下折减系数 $Fos = 1.2$ 时的剪应变增量云图,从图 7 可以看出,滑坡强度折减后,剪应变增量贯通,堆积体处于临界失稳状态。

表 2 稳定性计算成果

Tab. 2 The landslide stability of calculation result

工况	FLAC 强度 折减法	Morgenstern - Price	Biop
天然	1.20	1.21	1.19
暴雨	1.03	1.02	1.04

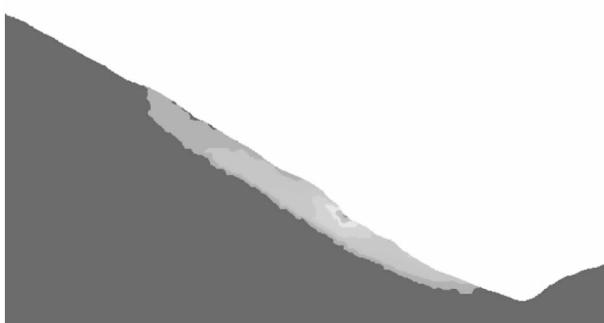
图7 $Fos=1.20$ 剪应变增量云图

Fig. 7 Contour of shear strain increment when $Fos=1.20$

计算结果表明:FLAC3D 强度折减法计算的稳定性系数和传统极限平衡法所得较为一致,在天然状态下,堆积体处于稳定状态,暴雨状态下处于欠稳定状态。但是强度折减法还能观察堆积体内部应力、变形状态,分析出潜在滑动面。

4 结论

1)根据现场调查和勘探成果,斜坡坡体结构为中倾顺向坡,倾角大于坡脚,岩性为砂质板岩、炭质板岩软硬相间,综合分析滑坡的形成机制为滑移 - 弯曲。其形成演化过程主要分为剪切蠕动 - 滑移弯曲 - 贯通破坏三个阶段。

2)通过 FLAC - 3D 强度折减法与传统极限平衡分析方法对滑坡进行稳定性评价,评价结果相近、合理,并且 FLAC - 3D 强度折减法还能分析判断出潜在滑面。

3)根据现场调查以及数值模拟分析,天然状态下滑坡整体稳定性较好,暴雨状态下处于欠稳定状态,但是中部陡坡处稳定性较差,局部表层存在二次滑动可能。

参考文献:

- [1]张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理(第三版)[M].北京:地质出版社,2008.
- [2]吉锋,唐兴君,石豫川.雅砻江中游某滑坡群形成条件及工程影响分析[J].长江科学院院报,2011,28(5):9-13.
- [3]张利洁,黄正加,雷菁. FLAC - 3D 在边坡岩体稳定性分析中的应用[J].岩土力学,2005(S2):61-64.
- [4]张雪东,陈剑平,黄润秋,等.呷爬滑坡稳定性的 FLAC - 3D 数值模拟分析[J].岩土力学,2003(S1):113-116.
- [5]GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3):387-403.
- [6]宋二祥.土工结构安全系数的有限元计算[J].岩土工程学报,1997,19(2):1-7.
- [7]赵尚毅,郑颖人,张玉芳.极限分析有限元法讲座—II 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J].岩土力学,2005,26(2):332-336.
- [8]连镇营,韩国城,孔宪京.强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J].岩土工程学报,2001,23(4):407-411.
- [9]MANZARI M T, NOUR M A. Significance of soil dilatancy in slope stability analysis [J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, ASCE, 2000, 126(1):75-80.
- [10]李茂田,武亚军,年廷凯.强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J].防灾减灾工程学报,2003,23(3):1-8.
- [11]丁秀美,刘光士,黄润秋,等.剪应变增量在堆积体边坡稳定性研究中的应用[J].地球科学(下转第 104 页)

4 结论

1)通过公式推导,得出了有限元法和极限平衡法相结合的理论公式,并对公式中未知参数的求解过程给出了程序化编程步骤。

2)结合工程实例,与其他方法计算结果相比,采用本文方法所得边坡的安全系数大小处于中间位置,即使在特殊工况下也能得到满意的结果,验证了本文方法计算边坡稳定性的合理性,其计算结果能够较为真实地反映边坡的实际稳定状态及滑动面应力状态。

参考文献:

- [1] ATAEI MS, BODAGHABADI S. Comprehensive analysis of slope stability and determination of stable slopes in the Chador - Malu iron ore mine using numerical and limit equilibrium methods [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 18(4): 488 - 493.
- [2] 王庆乐,周彬. 基于强度折减法对水电站坝头边坡稳定性分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2010, 27(1): 34 - 37.
- [3] WEI W B, CHENG Y M, et al. Three - dimensional slope failure analysis by the strength reduction and limit equilibrium methods [J]. Computers and Geotechnics, 2008, 36 (1): 70 - 80.
- [4] 陈晓磊,孙树林,尚文涛,等. 基于坐标输入的电算化边坡稳定性分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2013, 30(3): 54 - 57.
- [5] ZHENG HONG, YANG ZHAO LIANG, et al. Extremum solutions to the limit equilibrium method subjected to physical admissibility[J]. Natural Hazards, 2013, 65(1): 79 - 96.
- [6] 萨茂田,金崇磐,林皋. 土体稳定分析极限平衡法改进及其应用[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(Z): 20 - 29.
- [7] ZHU D Y, LEE C F, et al. Generalised framework of limit equilibrium methods for slope stability analysis [J]. Geotechnique, 2003, 53 (4): 377 - 395.
- [8] BENNI THIEBES, RAINER BELL, et al. A WebGIS decision - support system for slope stability based on limit - equilibrium modeling[J]. Engineering Geology, 2013, 158: 109 - 118.
- [9] LOW B K, GILBERT IRB, et al. Slope reliability analysis using generalized method of slices[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 1998, 224: 350 - 362.
- [10] ZHENG H, LIU D F, et al. On the Assessment of Failure in Slope Stability Analysis by the Finite Element Method [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2008, 41 (4): 629 - 639.
- [11] RABIE M. Comparison study between traditional and finite element methods for slopes under heavy rainfall[J]. HBRC Journal, 2014, 10(2): 160 - 168.
- [12] 郭子仪,范振华,朱云升,等. 边坡稳定性分析中的有限元极限平衡法[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 38 (1): 79 - 84.
- [13] 于斯灌,邵龙潭,刘士乙. 基于有限元极限平衡法的尾矿坝坝体稳定分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1185 - 1190.
- [14] 朱大勇,李焯芬,姜弘道,等. 基于滑面正应力修正的边坡安全系数解答[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2788 - 2791.

(责任编辑 李军)

(上接第 95 页) 学进展, 2004, 19(Z): 318 - 323.

- [12] 李宏杰,戴福初,杨军,等. 某滑坡蓄水后的三维稳定性数值分析[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 59 - 62.
- [13] 季聪,佴磊,马宏,等. FLAC3D 强度折减理论在边坡稳

定分析中的应用[J]. 世界地质, 2013, 32(1): 158 - 164.

- [14] 薛雷,孙强,秦四清,等. 非均质边坡强度折减法折减范围研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 275 - 280.

(责任编辑 李军)