

缓倾坡内层状岩质高边坡稳定性分析——以黄桷湾危岩高边坡的主斜坡为例*

董雪^① 刘文连^② 徐则民^①

(^①昆明理工大学 昆明 650093)

(^②中国有色金属工业昆明勘测设计研究院 昆明 650011)

摘要 黄桷湾危岩高边坡是泥岩和砂岩呈类似“夹心饼干”状软硬互层结构、缓倾坡内的岩质高切坡。危岩高边坡除坡顶的陡崖处厚层砂岩发生崩塌失稳外,主斜坡体下部还存在局部的切层失稳。为确保高边坡下部的工程建设的顺利开展和居民的安全,采用数值模拟的方法对高边坡的主斜坡进行稳定性评价,选取天然自重和地震动荷载两种工况进行分析。计算结果表明:(1)主斜坡岩体在两种工况下仍处于稳定状态,但在地震动荷载作用下稳定系数下降显著;(2)陡崖和主斜坡接触带附近及主斜坡坡脚处应力集中现象明显,发生破坏的可能性更大;(3)主斜坡潜在滑动面位于坡内中深部,剪出口位置可能位于主斜坡的坡脚处。

关键词 高切坡 缓倾坡内 数值模拟 稳定性分析

中图分类号:TU457 文献标识码:A

STABILITY ANALYSIS OF HIGH ROCK SLOPE WITH GENTLE BEDDING DIP AT HUANG JUEWAN

DONG Xue^① LIU Wenlian^② XU Zemin^①

(^①Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093)

(^②Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals industry, Kunming 650011)

Abstract Huang Juewan high-steep rock slope is composed by mudstone and sandstone. The rock beddings are similar to the “cookies”. They have soft and hard layers with gentle dip layered structure. The high-steep slope in addition to the top of the steep cliff in thick sandstone occurred collapses. Outside the instability main slope body bottom, there are local cutting layer instability. To ensure a smooth start of the lower part of high slope and the safety of the residents, this paper uses the method of numerical simulation on the high slope of the stability evaluation. The paper selects the natural dignity and seismicity load as the two conditions for slope stability analysis. The results show that:(1)Main slope rock mass in the two kinds of working conditions is still in the stable state; but seismic loads slope stability reduced significantly influence;(2)Steep cliff and main slope near the contact zone and the ramp slope foot place obvious stress concentration phenomenon more likely to damage;(3)the potential sliding surface of slope is located in the central slope. The cut points may be located at the slope toe.

* 收稿日期:2013-01-20;收到修改稿日期:2013-05-10.

基金项目:国家自然科学基金-云南联合基金重点项目(U1033601),国家自然科学基金项目(4057215940772189)资助.

第一作者简介:董雪,主要从事滑坡灾害研究. Email: 252959461@163.com

通讯作者简介:徐则民,主要从事滑坡灾害研究. Email: abc500@188.com

Key words High-steep rock slope, Gentle dip bedding, Numerical simulation, Stability analysis

1 引言

黄桷湾高边坡是云南省昭通市普洱渡镇内地质灾害程度很严重的一处危岩高边坡,镇内居民长期遭受崩塌、滑坡等地质灾害的侵扰和威胁。据查,黄桷湾危岩高边坡的类型属于薄层砂岩和厚层泥岩构成的类似“夹心饼干”状的软硬互层的缓倾坡内的层状结构的高边坡。该危岩高边坡主要由上部陡崖和主斜坡组成,其中陡崖发生失稳为厚层砂岩崩塌,而类似主斜坡这种缓倾坡内软硬互层状的岩质高边坡破坏方式据以往研究^[1-5],主要是边坡顶部发生的崩塌、坠落,对于高边坡斜坡部位发生切层滑坡的规模少有提及;赵晓等^[6]研究了西南某电站坝肩层间软弱面发育的切向坡,得出切向坡的破坏以浅部破坏为主且规模较小的结论。但高切坡发生大规模破坏也确有实例,如南昆铁路八渡滑坡就是深层巨型切层古滑坡^[7]。现场调研发现,主斜坡下游段新区公路边有一处发生岩体错落,剩余滑落体的体积约为 2600m³,滑体趾部因修建新区公路时被清除而导致错落体前缘岩体再次发生拉裂破坏,形成小规模切层失稳块体,已严重危及新区公路的安全运营(图 1)。这再次印证:切向高边坡的稳定性好是相对而言的,在一定的地质环境因素影响下,就有可能发生较大规模的变形破坏、失稳滑出。既然主斜坡岩体局部已发生切层滑动,那么就不能排除主斜坡有发生较大规模切层滑动的可能。一旦主斜坡发生

失稳,必将危及主斜坡下部新区居民的安全。因此,展开对黄桷湾危岩高边坡主斜坡岩体的稳定性分析是很有必要的。

2 黄桷湾危岩高边坡地质环境概况

2.1 危岩高边坡研究区地质概况

黄桷湾危岩高边坡研究区地形、地貌特征表现为高山和河流侵蚀相间的峡谷地貌。高边坡的坡脚即为关河的右岸岸坡,关河的流向为 NW307°,大体与边坡坡向垂直,因关河下切侵蚀,两岸边坡呈“V”字型对称;研究区地层岩性从新到老分别为第四系坡残积(Q^{dl+el})、崩塌积(Q^{col+dl})等零星堆积于坡体表面,且土层很薄,侏罗系上沙溪庙组(J₂S²)薄层砂岩与厚层泥岩呈互层状构成高边坡主要岩性;研究区域水文地质条件简单,地下水位较深,地表也未见水源点出露,大气降雨通过坡面径流直接排放到坡脚下的关河;研究区域处于北北东向老鹰嘴向斜和北东向贾村背斜之间;据《盐津县志》记载,普洱镇及其外围发生 5.0 级以上的地震 3 次,最大震级 5.5 级(1933 年),3.0 级以上地震 5 次,3.0 级以下多次,另据相关资料^[8],普洱渡镇范围 50a 超概率 10% 的地震动峰值加速度约为 0.10g,相应的地震基本烈度为Ⅷ度。

2.2 主斜坡的工程地质特征

(1) 主斜坡在平面上呈“倒喇叭口形状”,上游



图 1 黄桷湾危岩高边坡全貌

Fig. 1 The physiognomy of Huang Juewan high-steep rock slope

较宽,下游较窄。主斜坡的坡高为 108 ~ 180m,坡宽为 160 ~ 290m,边坡坡度为 $30^{\circ} \sim 34^{\circ}$,坡面延伸走向 295° ,岩层产状:倾向 $300^{\circ} \sim 325^{\circ} \angle 5^{\circ} \sim 13^{\circ}$,由此可见,主斜坡属于典型的缓倾坡内的高陡边坡。

(2)引言中提及的主斜坡下游的切层滑坡被裂隙分割成 4 个小滑块,小滑块的后缘顶部与滑坡后壁形成了开度约为 40cm 宽但尚未将 4 个块体全部贯通的拉张裂缝,拉张裂缝还有不断扩展的趋势。4 个小滑块中有 3 个处于累计变形阶段,另 1 个块体的裂隙已经贯通至底部,且滑距明显大于其他 3 个,已经演变成为一块小型濒危岩体,威胁新区公路的安全运营。

3 主斜坡的稳定性分析

3.1 边坡破坏模式分析^[9]

缓倾坡内软硬互层状结构的主斜坡破坏的力学模式为蠕滑-拉裂(Creep-Sliding and Fracturing),主要特征是岩体向坡前临空面方向发生剪切蠕变,岩体后缘向坡体内部产生微小拉张裂缝,随着岩体蠕变累积,坡体内的潜在滑移面逐渐贯通整个坡体,岩体达到强度极限时,坡体破坏滑出。上文中提到的切层滑坡就是这种类型,这种变形破坏模式也可以是深层岩体的破坏类型。

3.2 主斜坡的稳定性计算^[10-14]

据中国有色金属工业昆明勘察设计院的野外地

质勘察资料,选取具有代表性的 P3-P3' 地质剖面为计算剖面(图 2)。

根据主斜坡岩层取样的室内实验数据和现场大型剪切试验,并采用工程类比法结合周边地区的相似岩性的物理力学参数^[15],确定本次稳定性计算的参数(表 1);在对主斜坡岩体进行稳定性分析时,选取坡体在自重状态和地震动荷载作用下的 2 个工况,两种工况选取摩尔-库伦本构模型;边界条件为模型底部为水平向、竖直向均固定,左右边界为仅水平向固定,坡体表面为自由边界;X 方向朝坡体临空面为正,Y 方向与重力方向相反为正。工况 2 计算时先分析主斜坡自重状态下的初始应力分布,然后输入汶川地震波形数据,截取地震波加速度时程为 30.0s,设置水平向地震峰值加速度为 0.10g,不考虑竖直向加速度的影响,地震波从模型底部边界向坡体表面传播,地震动使斜坡岩土体产生永久变形量,再采用 Newmark(纽马克)分析方法,得到斜坡岩体在地震动荷载情况下的坡体安全系数、主应力、位移矢量、剪应变云图等数据,将两种工况下的计算结果进行综合性分析,得出坡体的稳定性结果。

据以上数据建立的地质概化模型,通过软件计算而得的两种工况下的安全系数如表 2 所示。

3.3 主斜坡稳定性计算结果分析

根据表 2 结果,工况 1 边坡的安全系数较高,边坡处于稳定状态;地震动荷载对于边坡岩体的稳定性有很不利的影响,虽然边坡仍处于稳定状态,但坡体的安全系数已经急剧降低。两种工况分析虽然采

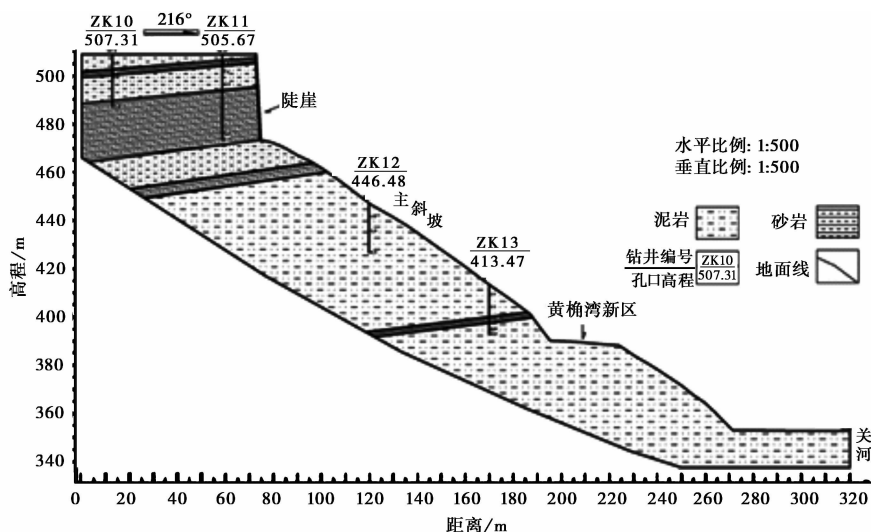


图 2 高边坡(P3-P3')工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering geological section of P3-P3' profile of high-steep rock slope

表1 边坡稳定性计算参数表

Table 1 The slope stability calculation parameters table

岩性	密度 $\rho/g \cdot cm^{-3}$	内摩擦力 c/MPa	内摩擦角 $\Phi/(^{\circ})$	泊松比 ν	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	抗拉强度 T/MPa	阻尼比
砂岩	2.6	4.3	50	0.21	6.0	4.3	3.0	0.05
泥岩	2.4	1.5	35	0.28	6.6	3.4	0.5	0.07

表2 不同工况安全系数计算结果

Table 2 Calculation results of different cases

拟计算工况	分析方法	计算方法	安全系数
1. 坡体自重	静态分析	强度折减法	4.38
2. 地震动荷载	动荷载分析	有限元单位应力法	1.4437

用两款不同软件和计算方法,但对于边坡潜在滑动面的位置、深度、形状基本相似,破坏区域均为坡体的中部,滑动面剪出口位于新区公路以下的斜面^[16, 17]。

(1)由图3看到,高边坡岩体内的最大主应力迹线在靠近斜坡临空面的时候近于平行坡面,而最小主应力近于垂直坡面,主斜坡应力分布符合一般坡体内应力分布特征^[18];在陡崖和主斜坡接触带、主斜坡坡脚附近,应力集中现象很明显,最大主应力显著增高,且在表面处愈来愈高,数值分别为2.0MPa和1.0MPa(图3a);最小主应力显著降低,数值分别为0.5MPa和0.25MPa,在陡崖上部,甚至出现拉应力(图3b),这与现场勘察时发现的陡崖中上部岩体出现大量的拉张裂缝相一致,由于偏应力(最大主应力与最小主应力之间的差值)越大,岩体越容易发生剪切破坏,则主斜坡坡脚处的岩体发生破坏的方式为压剪破坏。

(2)由图4可知,天然自重状态下边坡上部位

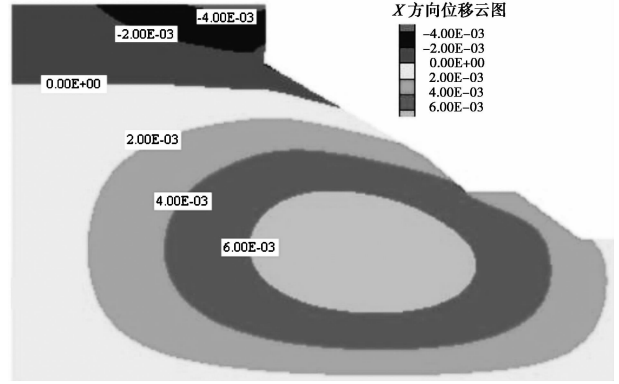


图4 工况1水平方向的位移云图

Fig. 4 The X-displacement contour of the case 1

移矢量向下表现为“沉降”,与坡面近于平行,表现为“剪切”,下部位移矢量在渐进坡脚处表现为“剪出”;陡崖上部位最大水平移值为4mm;边坡最大水平位移矢量指向坡外临空面,位置在主斜坡坡脚附近岩体内,数值为6mm,说明岩体破坏面处于主斜坡坡体内的中部。

(3)由图5看到,高边坡在陡崖后缘和主斜坡坡脚处都有应变,陡崖后缘以拉应变为主,数值在 $3.0E-2$,主斜坡坡脚处剪应变最大,数值为 $5.0E-2$,剪应变由表面向坡体内部延伸,在数值上呈减小的趋势,但达到一定深度后,剪应变为0,未能在坡体内部形成贯通至陡崖的破裂面。

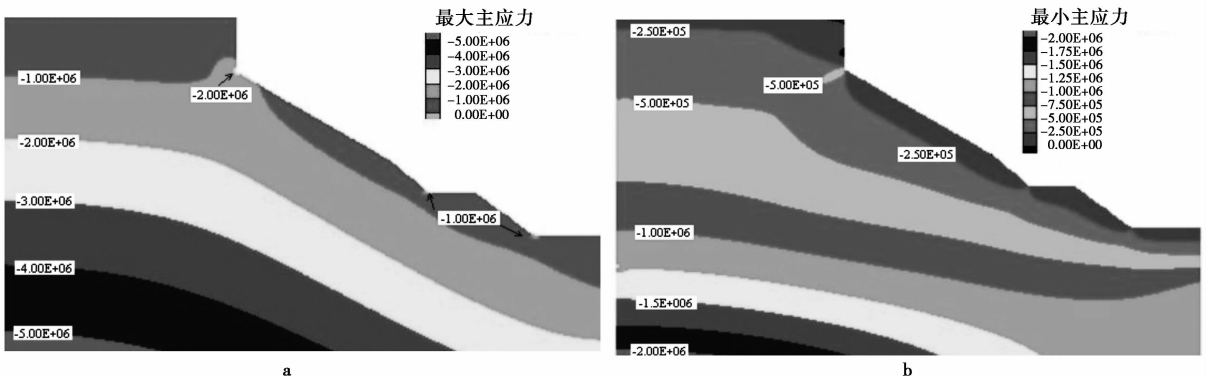


图3 工况1下主应力云图

Fig. 3 The principal stress contours of the case 1

a. 最大主应力云图; b. 最小主应力云图

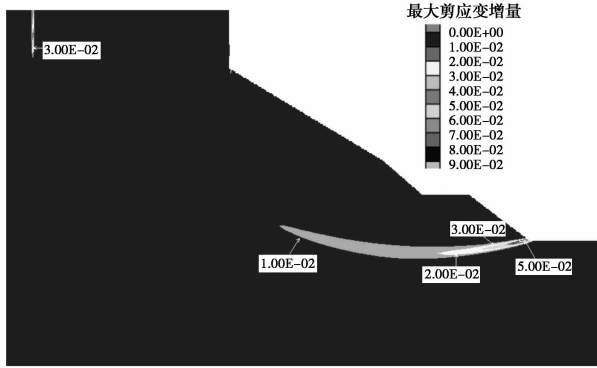


图5 工况1 剪应变云图

Fig. 5 The shear strain contour of the case 1

(4)对于工况2,主应力在坡体内部表现为随深度的增加而增大趋势,总体来说主应力云图与工况1特征相似。但有分布不均现象,在陡崖与主斜坡交界处及主斜坡坡脚最大主应力数值为0.15MPa(图6a),坡体表面处最小主应力数值为0.02MPa,且等值线在主斜坡中部出现向坡内方向的凸起,这与缓内倾层状的薄层砂岩有关,主斜坡的破坏不可能沿着砂岩与泥岩的交界面发生破坏,只能表现为切层剪断破坏(图6b)。

(5)由图7,与天然状态相比,危岩高边坡在水平加速度峰值为0.10g的地震动荷载作用下,水平位移量明显增大,最大水平位移出现在陡崖近临空面处,数值为14cm,陡崖发生破坏的可能性增大,主斜坡中上部水平位移数值为12cm,新区公路破脚下水平位移量为4cm。

(6)由图8,剪应变主要发生在陡崖上部和主斜坡坡脚处,数值分别为 $0.1E-3$ 和 $0.65E-3$,主斜坡坡脚处剪应变数值最大,坡脚岩体首先发生剪切屈服,随着应力集中的范围不断向坡体内延伸、扩展,

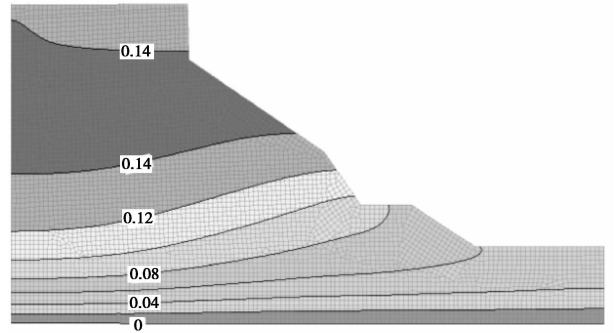


图7 工况2 水平方向的位移量

Fig. 7 The X-displacement contour of the case 2

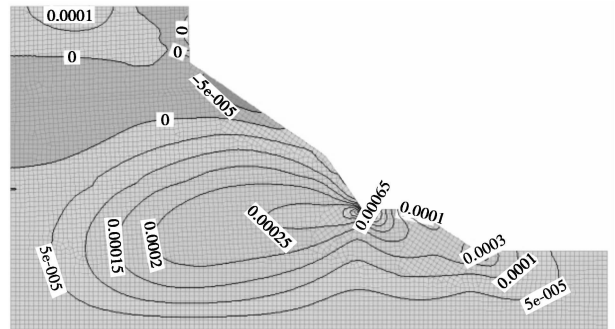
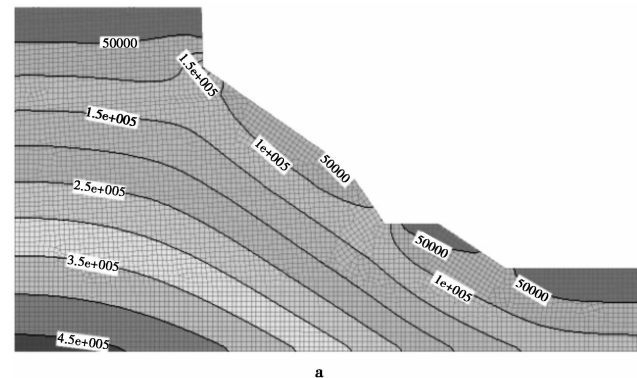


图8 工况2 剪应变云图

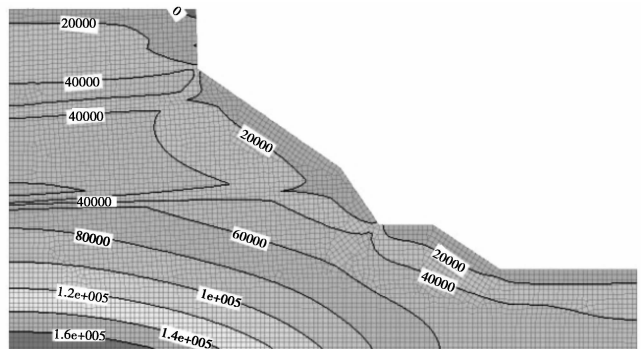
Fig. 8 The shear strain contour of the case 2

但终未能与上部陡崖处破坏面贯通。主斜坡坡脚部位的破坏性质为压剪性破坏,陡崖部发生拉裂破坏,这种破坏方式符合水平层状斜坡破坏的规律^[19]。

(7)由图9,工况2的安全系数在0~30s时间内不断地发生变化,最小安全系数为1.4437,出现时间为8.0s,边坡的破坏实际上是个累积性破坏的过程,并不是在安全系数最低的某一时刻发生破坏^[20]。



a



b

图6 工况2 主应力云图

Fig. 6 The principal stress contours of the case 2

a. 最大主应力云图; b. 最小主应力云图

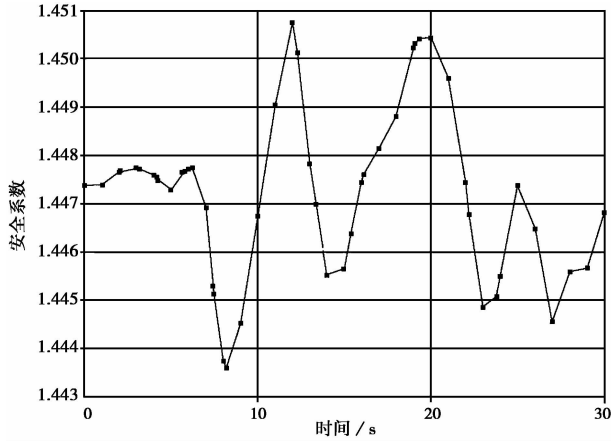


图9 安全系数时程曲线

Fig. 9 The time-history curve of safety factor

4 结 论

(1) 黄桷湾危岩高边坡的破坏模式为蠕滑-拉裂, 这种破坏模式在主斜坡下游段的小滑坡得到证实。

(2) 主斜坡岩体目前仍处于稳定状态, 因陡崖与主斜坡交界处应力集中显著, 仍不能排除有发生局部破坏的可能, 陡崖处可能会发生拉裂性的破坏, 主斜坡坡脚部位的破坏性质为压剪性破坏, 若主斜坡缓倾内的岩层发生破坏, 只能是切层破坏。

(3) 在地震动荷载的作用下, 主斜坡岩体稳定系数急剧下降, 陡崖发生拉裂破坏、坡脚处发生压剪性破坏的可能性更大。

(4) 主斜坡发生的破坏区域可能主要是中浅部区域, 剪出口位于新区公路以下的斜坡面。

参 考 文 献

- [1] 董金玉, 伍法权, 等. 三峡库区软硬互层近水平地层高切坡崩塌研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 151~156.
Dong Jinyu, Wu Faquan, et al. Research on collapse of high cutting slope with horizontal soft-hard alternant strata in Three Gorges Reservoir area. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 151~156.
- [2] 肖先焯, 夏克勤, 许模. 三峡库区某滑坡稳定性模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2013, **21**(1): 45~52.
Xiao Xianxuan, Xia Keqin, Xu Mo. Stability of landslide on Three-gorges dam reservoir with physical simulation on model. Journal of Engineering Geology, 2013, **21**(1): 45~52.
- [3] 董好刚, 彭明轩, 等. 缓倾层状高切坡典型破坏模式及宏观判据研究[J]. 长江科学院院报, 2009, **26**(8): 36~41.
Dong Haogang, Peng Mingxuan, et al. Typical failure modes

and identification of low-angled stratofabric rock slope. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, **26**(8): 36~41.

- [4] 沈强, 陈从新, 等. 三峡库区水平层状边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2005, **26**(增): 16~20.
Shen Qiang, Chen Congxin, et al. Study on stability of horizontal bedded rocky slopes in Three Gorges Reservoir area. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(S): 16~20.
- [5] 祝介旺, 伍法权, 苏天明. 三峡库区万州段高切坡破坏模式和防护措施研究[J]. 工程地质学报, 2007, **15**(1): 8~16.
Zhu Jiewang, Wu Faquan, Su Tianming. Failure modes and stabilization methods of highly incised slopes in Wanzhou mountainous region of Three Gorges Reservoir. Journal of Engineering Geology, 2007, **15**(1): 8~16.
- [6] 赵晓, 等. 层间软弱夹层发育的切向边坡失稳失稳模式及稳定性分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2006, (3): 110~115.
Zhao Xiao, et al. Study on failure model and stability of one tangential slope. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2006, (3): 110~115.
- [7] 王恭先, 马惠民. 滑坡防治 100 例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
Wang Gongxian, Ma Huimin. The 100 Examples of Landslide Control. Beijing: People's Communications Publishing House, 2008.
- [8] 中国有色金属工业昆明勘察设计院. 云南省盐津县普洱镇地质灾害防治工程勘查设计大纲[S]. 昆明: 2011.
Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry. Geological Disaster Prevention Project Survey and Design. Kunming: 2011.
- [9] 张倬元, 王士天, 黄润秋, 等. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Huang Runqiu, et al. The Principle of Engineering Geological Analysis. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [10] 林杭, 曹平, 等. 层状岩质边坡破坏模式及稳定性数值分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(10): 3300~3304.
Lin Hang, Cao Ping, et al. Numerical analysis of failure modes and stability of stratified rock slopes. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(10): 3300~3304.
- [11] 李果, 黄润秋, 巨能攀. 软弱基座型滑坡震裂机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(5): 712~718.
Li Guo, Huang Runqiu, Ju Nengpan. Earthquake cracking mechanism of landslide with soft foundation. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(5): 712~718.
- [12] 赵彪, 陈洪凯. 边坡地震稳定性完全动力分析法[J]. 重庆交通大学学报, 2011, **30**(1): 580~583.
Zhao Biao, Chen Hongkai. Fully dynamic analysis method for seismic stability of slope. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2011, **30**(1): 580~583.
- [13] 黄诚, 王安明, 任伟中. 水平向与竖向向地震动的时程耦合模式对边坡动力安全系数的影响[J]. 岩土力学, 2010, **31**(11): 3404~3410.

- Huang Cheng, Wang Anming, Ren Weizhong. Influence of time combination pattern of horizontal and vertical ground motions on slope seismic safety factor. *Rock and soil Mechanics*, 2010, **31**(11): 3404 ~ 3410.
- [14] 汪茜. 地震作用下顺层岩质边坡变形破坏机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
Wang Qian. Study on Deformation Characteristics and Failure Mechanism of Bedding Rock Slope under Earthquake. Changchun: JinLin University, 2010.
- [15] 高德军, 徐卫亚, 等. 长江三峡大石板滑坡计算参数反分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, **34**(1): 74 ~ 78.
Gao Dejun, Xu Weiya, et al. Back analysis of calculation parameters for Dashiban landslide at Three-Gorges Reservoir on Yangtze river. *Journal of Hohai University (Nature Sciences)*, 2006, **34**(1): 74 ~ 78.
- [16] 陈玉民, 徐鼎平. FLAC/FLAC^{3D}基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
Chen Yumin, Xu Dingping. FLAC/FLAC^{3D} Foundation and Engineering Examples. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2008.
- [17] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
Liu Bo, Han Yanhui. The Principle of FLAC, Instances and Application Guide. Beijing: People's Communications Publishing House, 2005.
- [18] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, (8): 1 ~ 20.
Huang Runqiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, (8): 1 ~ 20.
- [19] 范文, 俞茂宏, 李同录, 等. 层状岩体边坡变形破坏模式及滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(增): 983 ~ 986.
Fan Wen, Yu Maohong, Li Tonglu, et al. Failure pattern and numerical simulation of landslide stratified rock. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, **19**(S): 983 ~ 986.
- [20] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋. 地震边坡破坏机制及破坏面的分析探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(8): 1714 ~ 1723.
Zheng Yingren, Ye Hailin, Huang Runqiu. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(8): 1714 ~ 1723.

第十一届全国桩基工程学术会议

(一号通知)

随着高层建筑以及公路、铁路、跨海桥隧等基础设施的大规模开发建设, 桩基成为工程中应用最广泛的基础形式。近年来, 桩基工程理论和技术研究不断取得新进展, 桩基工程设计、施工、检测实践中涌现出诸多新经验和新问题, 桩基工程研究人员和工程技术人员面临前所未有的机遇与挑战。第十一届全国桩基工程学术会议将于 2013 年 10 月 16 日到 18 日在江苏宜兴召开, 将对我国近年来桩基工程领域的最新研究进展进行广泛的学术交流。

主办单位:中国土木工程学会土力学及岩土工程分会桩基础学术委员会; 中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会; 江苏省土木建筑学会

承办单位:宜兴市建设局; 建基建设集团有限公司; 浙江理工大学

论文议题:①理论与试验研究; ②桩基工程设计研究与实践; ③桩基施工技术与管理控制; ④高铁、路桥、码头工程中的桩基技术; ⑤特殊岩土中的桩基工程; ⑥桩基工程事故处理与典型案例; ⑦基桩检测与桩基风险评估; ⑧桩基工程技术标准有关问题。

联系方法

中国建筑科学研究院地基所 李大展

地址:北京市北三环东路 30 号 邮编:100013

联系电话:010-64517585 传真:010-84283086 电子邮箱:lidazhan22@163.com