

文章编号: 1006-6616 (2016) 03-0725-08

# 三峡库区近水平厚层斜坡滑动稳定性研究 ——以重庆巫山箭穿洞危岩为例

王文沛<sup>1</sup>, 李 滨<sup>2</sup>, 黄波林<sup>3</sup>, 张 楠<sup>1</sup>, 韩 笑<sup>1</sup>

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100083;  
2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;  
3. 中国地质调查局武汉中心, 武汉 430223)

**摘 要:** 以重庆巫山箭穿洞近水平巨厚层危岩体为例, 通过地质环境条件、基座位移及应力监测数据等分析, 总结归纳了危岩体目前的变形和受力状态, 发现危岩体的强度仍在持续降低。同时, 运用 FLAC<sup>2D</sup> 模拟手段, 设置了初始天然、初始饱和、临滑、失稳 4 种模拟工况, 研究了危岩基座岩体及泥质条带灰岩层面对危岩体阻滑规律。研究结果表明, 基座泥质条带灰岩层强度的持续降低将会使得危岩体处于临滑乃至失稳状态。该稳定性分析也为进一步的防治设计提供了依据。

**关键词:** 三峡库区; 近水平厚层斜坡; 箭穿洞危岩体; 安全系数

**中图分类号:** P642. 22

**文献标识码:** A

## 1 厚层危岩稳定性分析方法研究现状

厚层危岩广泛分布西陵峡、巫峡和瞿塘峡。不少学者从岩体强度特征的角度对厚层状岩体进行过稳定性评价研究, 如: Terzaghi<sup>[1]</sup> 在研究高陡岩质边坡稳定性时发现, 岩体中普遍存在的断续节理之间形成若干岩桥, 从而提出滑面有效粘聚力概念, 滑坡失稳过程实际上是岩桥连续接替发生破坏, 破裂面的贯通最终导致滑坡整体失稳; Goodman 等<sup>[2]</sup> 提出了层状岩质边坡倾倒崩塌稳定性计算公式, 公式中将条块分为稳定、倾倒、滑动破坏 3 种状态, 通过比较条块间推力大小确定条块状态; 陈祖煜<sup>[3]</sup> 改进了 Goodman-Bray 方法<sup>[2]</sup>, 考虑了条块底滑面上岩桥的作用, 同时考虑了条块的抗弯能力, 在折减剪切强度指标  $C$  和  $\tan\varphi$  值时, 也对抗拉强度进行折减; Hungr 等<sup>[4]</sup> 在研究高陡岩质滑坡失稳模式分类时, 根据岩体强度上限值定义“应力稳定数”  $N_s$ , 当  $N_s > 0.25$  时, 滑坡更易发生缓慢的塑性滑移崩塌; 殷跃平等<sup>[5]</sup> 在重庆武隆鸡尾山厚层岩质滑坡滑动机制分析中, 强调关键块体对整个滑坡的阻滑作用, 提出了侧向阻滑下滑坡平面稳定性的强度折减法; 黄波林等<sup>[6]</sup> 认为三峡库区周期性的水位涨落会使得岩体承受反复荷载作用, 致使岩体裂隙率上升, 含水量提高, 进而提出了箭穿洞危岩基座岩体进一步劣化的可能。虽然以上

收稿日期: 2016-06-25

基金项目: 国家自然科学基金“库水变动下堆积层滑坡渗透失稳机理研究”(41502305)

作者简介: 王文沛 (1985-), 男, 高工, 主要从事地质灾害与防治研究, E-mail: wangwenpei1985@163.com

通讯作者: 李 滨 (1981-), 男, 副研究员, 主要从事工程地质与地质灾害研究, E-mail: libin1102@163.com

研究中考虑到岩体强度变化会影响近水平层状巨厚层危岩稳定性,但究竟如何影响危岩体的稳定性尚未深入研究。因此,本文在该危岩体的现场调查、地质分析及监测数据分析基础上,通过FLAC<sup>2D</sup>强度折减法数值模拟近水平层状巨厚层危岩滑动稳定性,强调库水变动对基座层间软弱带的淘蚀、对基座岩体进一步劈裂使得危岩体处于临滑乃至滑动失稳状态,从而为此类危岩体的治理提供科学依据。

## 2 地质条件及水位变动

重庆巫山箭穿洞危岩体位于长江左岸,地处神女峰背斜核部(见图1)。2012年6月调查发现,箭穿洞危岩下方基座已经被压得支离破碎,严重威胁三峡航道和沿岸人民生命财产安全。特别是神女峰、神女溪旅游景区和青石居民集聚区附近,涌浪灾害风险较大。殷跃平等<sup>[7]</sup>通过固-液耦合流体动力学计算分析,认为箭穿洞危岩滑落入水形成的涌浪最大高度将达到17.3 m,若以倾倒模式入江,涌浪最大高度甚至可达47.1 m。

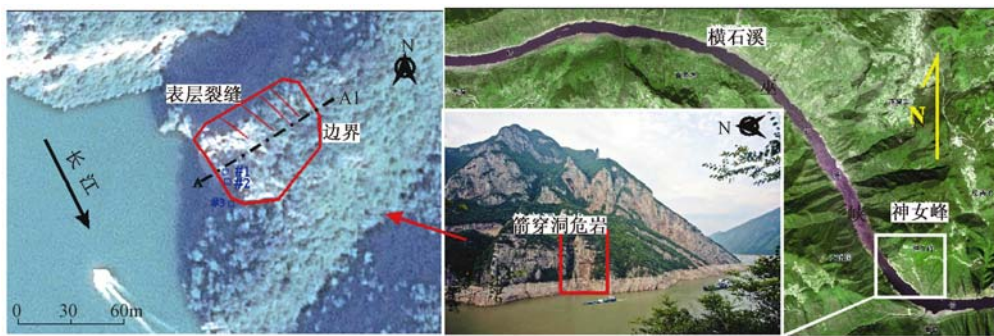


图1 箭穿洞危岩平面卫星图(引自Google Earth)

Fig. 1 RS images showing border of Jianchuandong rockmass

近水平层状巨厚层危岩多指岩层倾角小于 $10^\circ$ ,主要由厚层状碎屑岩、碳酸盐岩以及黏土岩组成,具有典型的软硬相间或上硬下软的“二元结构”特征<sup>[8]</sup>,箭穿洞危岩体即具有以上特征(见图2)。

箭穿洞危岩体后缘高程为278~305 m,基座高程为155 m,高差为123~150 m,平均高差135 m,危岩平均横宽约50 m,平均长度约55 m,体积约 $35.75 \times 10^4 \text{ m}^3$ <sup>[9]</sup>。

危岩体上部及后缘高程280 m以上,由下三叠统嘉陵江组第一段( $T_1^j$ )组成,岩性为薄—中厚层状白云岩,层厚约15 m;中风化岩体较完整,表层风化强烈,强风化层厚度1.0~1.5 m;其上为浅灰色中厚层状泥质灰岩,岩体较完整,锤击声脆,强度高,强风化层缺失。

危岩体主要由下三叠统大冶组第四段( $T_1^d$ )组成,分布高程155~280 m;岩性主要为灰色、肉红色中—厚层状泥质灰岩、灰岩,层厚约115 m;顶部见波痕,岩体较完整,锤击声脆,强度高,强风化层缺失。

基座为灰白色泥质条带状灰岩,呈薄层—中厚层状,层厚约10 m。岩体较破碎,存在大量的劈裂状高倾角裂隙,锤击易碎,强度较低,强风化层缺失。

基座以下为下三叠统大冶组第三段( $T_1^d$ ),岩性为浅灰色泥质灰岩,中厚层状构造,

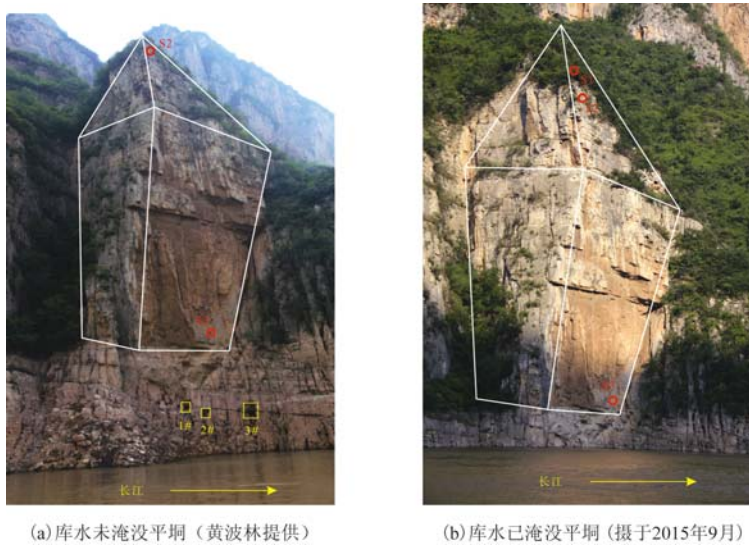


图2 箭穿洞危岩立面图

Fig. 2 Vertical view of the Jianchuandong rockmass at the water level of 145 m and 160 m

岩体较完整, 锤击声脆, 强度高, 强风化层缺失。

箭穿洞危岩位于神女峰背斜轴部—南东翼的转折段, 区内无断层及活动性断裂。轴部岩层产状为  $NE255^{\circ}-265^{\circ} \angle 5^{\circ}-7^{\circ}$ , 南东翼岩层倾向为  $NE150^{\circ}-160^{\circ} \angle 10^{\circ}-24^{\circ}$ 。

经勘查, 箭穿洞危岩体北西、南东两侧和北东后缘边界裂缝清晰, 已全部贯通, 仅靠底部泥质条带状灰岩支撑, 平面形态呈不规则的长条状 (见图2、图3)。

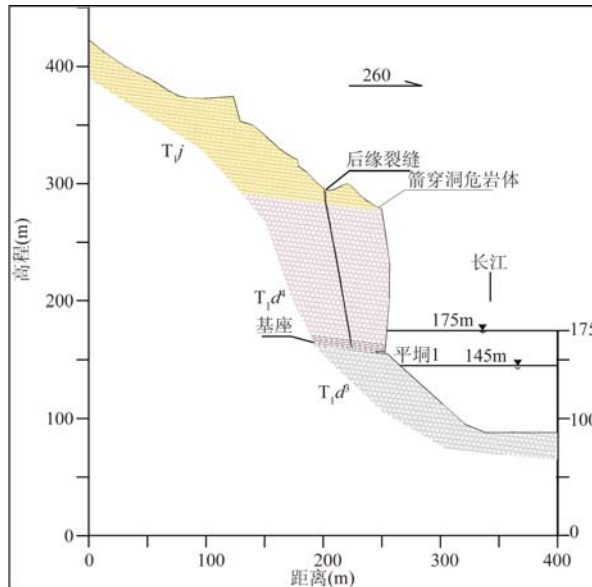


图3 箭穿洞危岩 A-A<sub>1</sub> 工程地质剖面图 (剖面位置见图1)

Fig. 3 A-A<sub>1</sub> engineering geological section of the Jianchuandong rockmass

除3条主要构造裂缝外, 岩体顶部表层发育多条竖向卸荷裂缝。危岩体边界由3条主要

构造裂缝构成：①北西侧边界以陡崖冲沟为界（ $NE325^{\circ}-335^{\circ} \angle 85^{\circ}-88^{\circ}$ ）；②南东侧边界裂缝在临江陡崖面上清晰可见（ $NE300^{\circ}-315^{\circ} \angle 78^{\circ}-85^{\circ}$ ），上宽下窄，局部充填碎石土，并向下逐渐收敛至 153 m 高程尖灭；③北东后缘边界发育在距离陡崖临空面约 50~60 m 处，发育标高约 305 m，后缘卸荷裂缝（ $NE255^{\circ}-265^{\circ} \angle 70^{\circ}-80^{\circ}$ ），走向约  $340^{\circ}$ ，裂隙张开度最大达到 3.15 m，裂隙在高程 286 m 以下底部均被碎石所填充。

从箭穿洞危岩的地形条件和空间形态来看，后缘及两侧边界裂缝贯通性好，地形坡度陡，向长江的排泄条件好，暴雨时在后缘裂隙充水、形成较高水头的可能性小，形成后缘裂隙水压力致使危岩体倾倒破坏的可能性小。

此外，抗日战争时期在 157 m 高程开挖了 3 个平硐（用作峡江防守掩体），自长江上游编号分别为 1#、2#和 3#，延伸长度分别为 8.2 m、13.7 m 和 11.0 m，硐室截面尺寸为 2 m × 2 m，从而破坏了底部岩体的完整性。目前，在上部岩体荷载作用下，基座岩体已形成劈裂状。三峡水库 175 m 蓄水后，基座岩体中存在的平硐和张性裂缝有利于库水的贯入、冲刷、淘蚀和软化基座的泥质条带灰岩，进一步降低了基座岩体的强度（见图 2、图 3）。2013 年和 2014 年调查发现：1#平硐顶部和上游侧，坡面岩体均发生了不同程度崩塌，规模 1~5 m<sup>3</sup>。根据近年来 175 m 水位蓄水对基座岩体的影响分析，层间泥质条带被淘蚀和侵蚀高度达 1~15 cm，横向和纵向上的延伸长度达 2.9 m。

### 3 危岩体位移及应力监测

#### 3.1 位移监测

图 2 显示了箭穿洞危岩位移监测点的位置，由上至下分别为 S1、S2 和 S3，监测频率为每周 1 次。位移监测曲线<sup>[9]</sup>（见图 4）表明：①危岩体整体竖向变形曲线平缓，处于缓慢沉降过程，2012 年 10 月至 2014 年 6 月间，累计沉降位移量最大约 -20.0 mm，并且竖向变形与水位变动之间并无明显相关性；②2012 年 10 月至 2013 年 12 月间，危岩体整体水平位移在缓慢增加，累计水平位移最大为 25 mm，发生在坡顶监测点 S1；然而，2013 年 12 月至 2014 年 6 月，随着水位的下降，监测点 S1 累计水平位移开始减少，至 2014 年 6 月已经减少到 5~10 mm，而 S2 和 S3 累计水平位移仍然在缓慢增加，最大增加到 30.9 mm（S2）。也就是说水位变动已可能造成危岩体顶部表面出现新的局部张拉裂缝。结合巡查监测情况分析，危岩整体处于基本稳定状态。

#### 3.2 基座应力监测

基座的 3 个平硐内（高程约 157 m）均布置自动压力监测（见图 2），因篇幅限制，仅介绍危岩体正下方基座内 1#平硐监测点<sup>[9]</sup>。1#平硐含 4 个监测点（a0、a1、b0、b1），监测频率为每天 1 次，应力监测曲线（见图 5）表明，应力受水位变动影响较大，水位上升时，压应力从 1.5~2.0 MPa 迅速下降，甚至降到 0；水位下降时，压应力迅速恢复上升，局部甚至达到约 3.0 MPa。结合 2013 年和 2014 年调查 1#平硐顶板发生垮塌的现状，可以判断箭穿洞危岩的破坏主要在下方基座处。

### 4 库水位上升时危岩体稳定性

强度折减方法是指不断降低岩土体材料的抗剪强度，从而获得斜坡的稳定系数<sup>[10]</sup>。

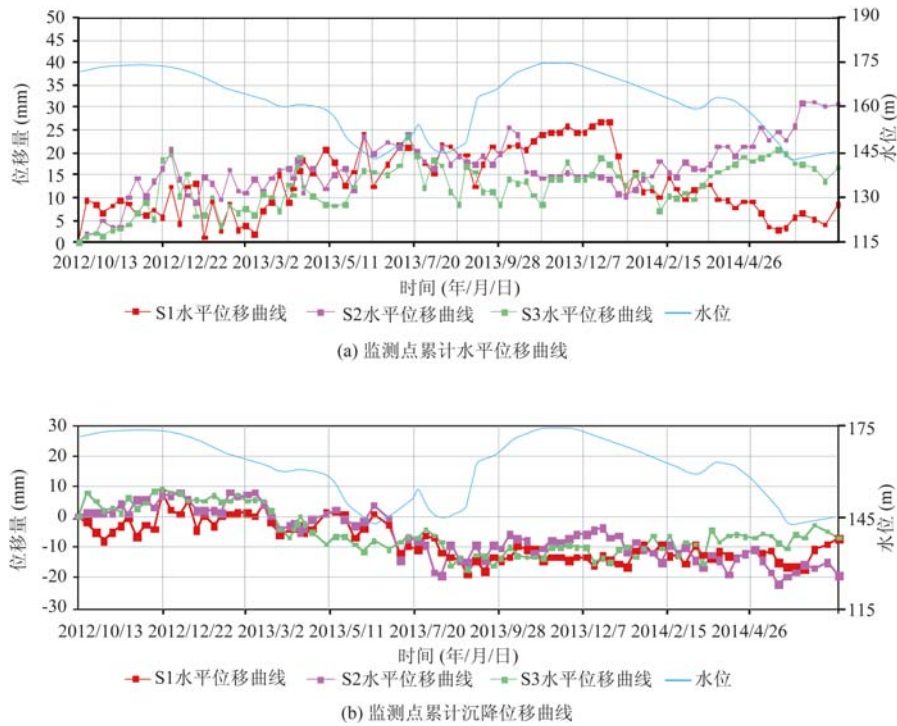


图 4 箭穿洞危岩位移监测曲线

Fig. 4 Displacement monitoring curves of the Jianchuandong rockmass

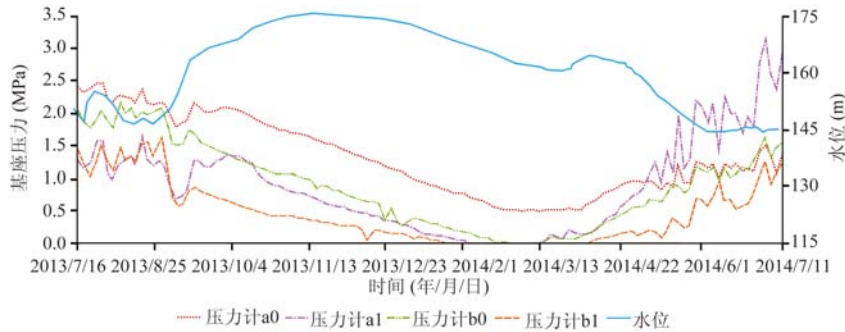


图 5 箭穿洞危岩基座 1#平洞压应力监测曲线

Fig. 5 Pressure stress curves of 1# adit in the Jianchuandong rockmass

本文将采用 FLAC<sup>2D</sup> 软件进行流固耦合模拟分析。由于箭穿洞危岩后缘及两侧边界裂缝贯通性好, 地形坡度陡, 向长江的排泄条件好, 故水位变动不易在危岩体及基座内产生较大的水头差。根据箭穿洞危岩现场勘察结果, 结合工程类比和反演分析法, 建议采用的物理力学参数见表 1。其中, 危岩体整体视为均值弹性体, 基座采用 Mohr-Coulomb 准则的弹塑性模型; 同时, 基座岩体考虑层面被侵蚀、软化的影响, 引入遍布节理本构模型, 节理参数设置同岩层结构面。倾角 7°。抗剪强度指标: 天然粘聚力  $C = 60$  kPa, 内摩擦角  $\varphi = 22^\circ$ ; 饱和粘聚力  $C = 50$  kPa, 内摩擦角  $\varphi = 18^\circ$ 。运用强度折减法时, 节理抗剪强度同时进行折减。

表1 箭穿洞危岩数值计算参数建议表

Table 1 Mechanical parameters of Jianchuandong rockmass

模型	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ MPa	泊松比	抗剪强度		抗拉强度/ kPa	渗透系数/ ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )
				粘聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )		
基座	26.5	$2.06 \times 10^3$	0.28	522	32	224	0.10
危岩体	27.1	$7.16 \times 10^3$	0.22	/	/	/	0 (不透水)

本文设置4种模拟工况稳定系数,反映了箭穿洞危岩基座岩体及泥质条带灰岩层面对危岩体阻滑规律(见图6,表2)。

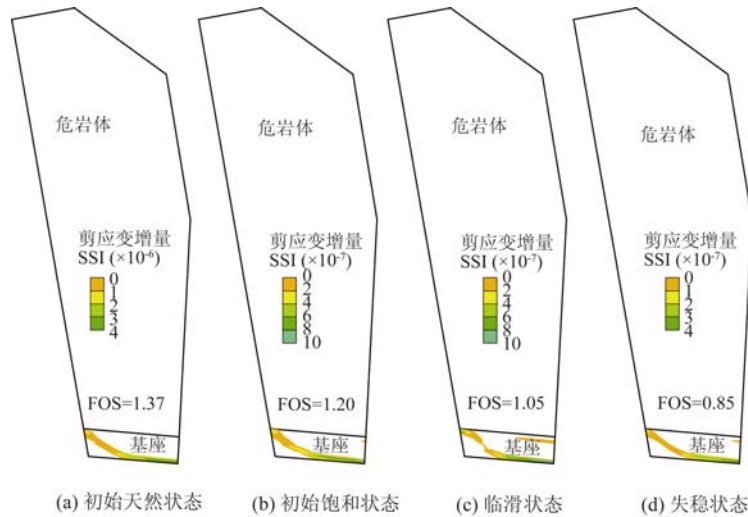


图6 箭穿洞危岩阻滑模拟剪切应变增量结果

Fig. 6 Stimulation results of Jianchuandong rock slide shear strain increment

表2 箭穿洞危岩基座及层面阻滑稳定系数

Table 2 Factors of stability resisted by base rock and bedding plane

工况		抗剪强度		稳定系数	备注
		内摩擦角/( $^{\circ}$ )	粘聚力/kPa		
初始天然状态	基座岩体	32	522	1.37	峰值天然强度 (145m 水位)
	基座层面	22	60		
初始饱和状态	基座岩体	32	522	1.20	峰值饱和强度 (175m 水位)
	基座层面	18	50		
临滑状态	基座岩体	32	522	1.05	层面2/3 强度
	基座层面	14	40		
失稳状态	基座岩体	21	350	0.85	2/3 强度
	基座层面	14	40		

4种工况稳定系数反映了危岩基座岩体及泥质条带灰岩层对上部危岩体阻滑规律,特别是泥质条带灰岩层受长江江水的淘蚀形成层间裂缝,若层面强度降至初始饱和状态层面强度的2/3,危岩体已处于临滑状态。若在库水变动外荷载和坡体应力作用下,岩体进一步劈裂状恶化,强度同样降为初始饱和状态岩体强度的2/3时,危岩滑动失稳。

## 5 结论与建议

箭穿洞近水平厚层危岩被北西、南东两侧和北东后缘竖向构造裂缝切割,仅靠底部泥质条带状灰岩基座支撑。危岩体整体性较好,但基座中岩体已形成劈裂状,在三峡水库175 m蓄水后,基座岩体中存在的平洞(1#、2#和3#)和张性裂缝有利于库水贯入、冲刷、侵蚀和软化基座的泥质条带灰岩,进一步降低了基座岩体的强度。

危岩体整体虽然处于基本稳定状态,但水平向和竖向沉降变形一直在缓慢增加,危岩体顶部表层可能出现新的局部裂缝;同时平洞内应力监测反映库水变动对于危岩体应力变化影响很明显,这种反复荷载作用下易降低基座岩体强度。

FLAC<sup>2D</sup>模拟表明,基座泥质条带灰岩层强度的持续降低将会使得危岩体处于临滑状态。若同时考虑库水变动外荷载和坡体应力作用,基座岩体进一步劈裂状恶化,危岩将处于滑动失稳状态。

**致谢** 本文得到高杨、赵瑞欣等同志的帮助和指导,监测数据由重庆市地质灾害防治工程勘察设计院无偿提供,在此一并表示感谢!

### 参 考 文 献

- [1] Terzaghi K. Stability of steep slopes on hard unweathered rock [J]. *Geotechnique*, 1962, 12: 251 ~ 270.
- [2] Goodman R E, Bray J W. Toppling of rock slopes [C] //Proc. Specialty Conf. on Rock Engrg. for Foundations and Slopes. ASCE, 1977: 201 ~ 234.
- [3] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理、方法、程序 [M]. 北京: 水利水电出版社, 2003.  
CHEN Zu-yu. Soil slope stability analysis: Theory, method and program [M]. Beijing: Water & Power Press, 2003.
- [4] Hungr O, Evens S G. The occurrence and classification of massive rock slope failure [J]. *Felsbau*, 2004, 22 (2): 16 ~ 23.
- [5] 殷跃平. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 19 (2): 217 ~ 226.  
YIN Yue-ping. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide—a case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 19 (2): 217 ~ 226.
- [6] 黄波林, 刘广宁, 王世昌等. 三峡库区高陡岸坡成灾机理研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
HUANG Bo-lin, LIU Guang-ning, WANG Shi-chang, et al. Failure mechanism of high steep slope in Three Gorges Reservoir area [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [7] Yin Y P, Huang B L, Liu G N, et al. Potential risk analysis on a Jianchuandong dangerous rockmass-generated impulse wave in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Earth Science*, 2015, 74 (3): 2595 ~ 2607.
- [8] 冯振, 李滨, 贺凯. 近水平厚层高陡斜坡崩塌机制研究 [J]. *地质力学学报*, 2014, 20 (2): 123 ~ 131.  
FENG Zhen, LI Bin, HE Kai. Rock collapse mechanism on high-steep slope failure in sub-horizontal thick-bedded mountains [J]. *Journal of Geomechanics*, 2014, 20 (2): 123 ~ 131.
- [9] 重庆市地质灾害防治工程勘察设计院. 重庆市三峡库区巫山县箭穿洞危岩应急抢险勘(调)查及治理工程初步设计 [R]. 重庆: 重庆市地质灾害防治工程勘察设计院, 2013.  
Chongqing Prospecting and Design Institute of Geological Hazard Control. Preliminary design and improvement of

Jianchuandong dangerous rockmass emergency prospect ( survey ) [ R ]. Chongqing: Chongqing Prospecting and Design Institute of Geological Hazard Control, 2013.

- [ 10 ] Itasca Consulting Group, Inc. . FLAC ( Fast Lagrangian Analysis of Continua ) slope user' s guide ( Version 5.0 ) [ M ]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc. , 2005.

## STABILITY ANALYSIS OF SUB-HORIZONTAL THICK-BEDDED SLOPE IN THREE GORGES RESERVIOR AREA : A CASE STUDY OF JIANCHUANDONG DANGEROUS ROCKMASS IN WUSHAN, CHONGQING

WANG Wen-pei<sup>1</sup>, LI Bin<sup>2</sup>, HUANG Bo-lin<sup>3</sup>, ZHANG Nan<sup>1</sup>, HAN Xiao<sup>1</sup>

( 1. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100083, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

3. Wuhan Centre of China Geological Survey, Wuhan 430223, China )

**Abstract:** Taking Jianchuandong dangerous rockmass in Wushan for an example, based on analyzsis of geological conditions, displacement of base and stress monitoring data, we summarized the present deformation and stress state of the dangerous rockmass, then found that the strength of it remaining reduce. Meanwhile, using FLAC<sup>2D</sup> we set up four simulation conditions, including Initial natural, Initial saturation, critical sliding and destabilizing to research the rule of rock base and shale strip limestone when facing up rock slide. The results show that decreasing of base strength of argillaceous limestone will make dangerous rockmass in a state of critical sliding. Stability analysis of the above also provides a basis for further control of the design.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; sub-horizontal thick-bedding slope; Jianchuandong dangerous rockmass; factor of safety