

# 四川某水电站新桥 1<sup>#</sup> 滑坡体成因及稳定性分析

韩祥森, 黄润秋, 裴向军

(成都理工大学 环境与土木工程学院, 成都 610059)

**摘 要:**新桥 1<sup>#</sup> 滑坡体位于美姑河拟建某水电站库区中部左岸, 由于方量大, 所以该滑坡的稳定性对水库的安全运行有直接影响。根据野外实地调查及采样试验等数据, 阐明其成因及特征, 并采用有限元法对其做三维数值模拟分析其稳定性, 对于水电站施工期及运行期采用何种方式支护或处理该滑坡具有实际意义。

**关键词:**滑坡体; 有限元; 三维数值模拟; 稳定性

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)03-0146-03

## Analysis on Genesis and Stability of Xinqiao 1<sup>#</sup> Landslide on Meigu River

HAN Xiang-sen, HUANG Run-qiu, PEI Xiang-jun

(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Xinqiao 1<sup>#</sup> landslide locates at left bank of the middle of the reservoir of Niuniuba hydroelectric station on Meigu River, owing to the huge volume, the stability of the landslide is very important to run the reservoir safety. Based on the data obtained by the field investigations and tests of core samples, the authors illuminated the genesis deeply, and made a three-dimensional numerical model by using the method of finite element analysis, all these works have great practicality significance to decide which method to choose to deal with the landslide during construction period or running period of the hydroelectric station.

**Key words:** landslide; finite element analysis; three-dimensional numerical simulation; stability

### 1 前 言

有限单元法是数值模拟方法在边坡稳定评价中应用得最早的方法,也是目前最广泛使用的一种数值方法,可以用来求解弹性、弹塑性、黏弹塑性、黏塑性等问题。其优点是部分地考虑了边坡岩土体的非均质和不连续性,可以给出岩土体的应力、应变大小和分布,避免了极限平衡分析法中将滑体视为刚体而过于简化的缺点,可近似地根据应力、应变规律去分析边坡的变形破坏机制。在实际工作中常常采用的是二维有限元法分析某个滑坡的典型剖面来评价该滑坡的稳定性,虽然在一般的情况下二维计算能满足工程的要求,但严格的讲,边坡稳定分析是一个三维问题,特别是对于具有复杂几何形状的情况时,二维计算不能满足实际需要。采用三维有限元法计算滑坡的稳定性就能较好的反映实际情况。

### 2 地质概况

研究区属构造侵蚀浅切中山岸坡地貌,整个滑坡区呈围椅状地形,前缘高程 1 650 m,抵美姑河岸边,后缘 1 900 m,为风化侵蚀后退的斜面山脊。高程 1 650~1 675 m 坡角 40°~50°,高程 1 675~1 900 m 间有两个侵蚀退化台地,该段坡角 10°~30°;顺(沿)河长 708 m,横河宽 610 m,坡面面积 148 280 m<sup>2</sup>(图 1)。从分布在坡体上的钻孔揭露情况看,滑坡左侧宽 20 m 范围内的堆积层较厚,厚度为 30~50 m。其余部分厚 18~25 m,估算滑坡堆积体体积为 2 965 600 m<sup>3</sup>。

右侧覆盖层下可见基岩与散裂、碎裂岩体接触面,左侧为浅切割的季节性冲沟,切割深度(地表出露)自上而下 3~10 m,冲沟上部为源自坡面的冲洪积物(P1+alQ<sub>4</sub>)。该滑坡区出露崩坡积层(Q<sub>4</sub>l),冲洪积层(P1+alQ<sub>4</sub>),下伏基岩为侏罗系中统沙溪庙组(J<sub>2</sub>S)泥岩夹粉砂岩,岩层产状 N20~40°W/NE∠65~85°,为陡倾坡外顺向层状岸坡。

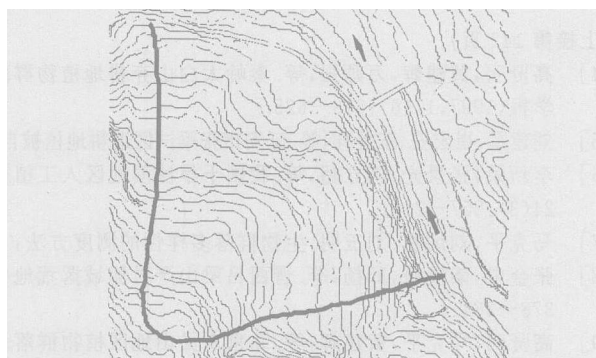


图 1 新桥滑坡地形图

### 3 滑坡体的成因分析及其特征

滑坡体(古滑坡)的形成,是崩积物反复滑动形成的,可称之为崩积滑坡体。它是一段时期内活动、休止,再复活多次反复运动形成的结果。尽管崩积滑坡体上的滑坡特征已退化严重,如滑壁变缓、台地被夷平等。但从以下方面可以认定为滑坡地形,如“圈椅”形滑动面—前缘敞开式的堆积体在美姑的

冲刷作用下, 依然保持着“扇形”非水流堆积形成的厚层“凸岸”, 并使河流绕行(如图 1); 坡体前缘砖厂开挖的 15 m 高剖面凌乱的碎石土物相组成及在地形图上滑体周围山坡等高线大致是平行的, 而滑坡上部的等高线突然收缩(滑坡壁)、中部三处鼓出(中部平台)和前缘部位再收缩等等。

从总体上看, 新桥 1 号滑坡体具有如下特征:

(1) 该滑坡堆积体的形成已有较长的历史, 勘探孔资料提示堆积体厚度整体上呈中上部厚、下部薄, 左侧厚、右侧薄的特点; 斜坡前缘无阶地覆盖, 堆积体直抵砂岩河床。

(2) 斜坡岩土体结构复杂, 岩土成分分层不明显, 表现为块体与细体混杂, 局部有松动、架空现象, 较易于地下水活动。

(3) 滑坡土体透水性高, 埋藏着丰富的地下水, 基岩为相对隔水层。

(4) 坡体中统一滑面或层面不明显, 但自地表向下 9~20 m 范围内的碎石土中黏粒含量高, 是潜在的滑带。可推测堆积体随机地存在多个次级滑面, 也存在堆积层堆积断面剪出的可能。

4 数值模拟及稳定性分析

4.1 模型的建立

在工程地质问题分析中, 有限单元法从 50 年代开始盛行, 至今得到了广泛的应用, 在大型边坡隧道等工程中进行数值模拟分析中应用效果尤为显著。该滑坡的三维形态如图 2 所示, 建立的模型见图 3, 采用弹塑性材料属性, M-C 屈服准则。

堆积体边坡由基岩、弱风化和松散的堆积物组成。计算模型中力学参数取值根据现场取样后实验室试验所得数据, 如表 1 所示。

表 1 岩土体物理力学参数取值

岩土体	容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内摩擦角/ $^{\circ}$		内聚力/MPa	
		天然	饱水	天然	饱水
基岩	26.50	42.00		1.00	
第一层堆积体	20.23	17.80	16.50	0.0198	0.016
第二层堆积体	20.5	21.00	19.50	0.024	0.020
第三层堆积体	21	25.00	23.00	0.020	0.018

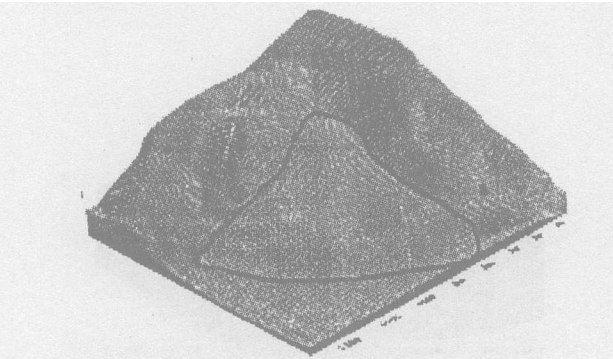


图 2 滑坡三维形态图

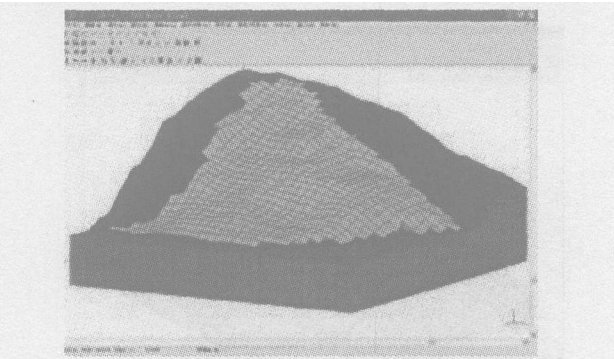


图 3 滑坡三维模型

4.2 计算结果及其分析

计算工况分为天然情况和 1 740 m 高程蓄水位。在上述两种工况下, 对边坡的稳定性进行分析。

4.2.1 天然状态

天然状态下最大主应力(图 4)在堆积体内部为压应力, 在量值上前缘小于后缘, 浅表部小于中深部; 最小主应力在坡体的后缘出现轻微的拉应力, 表明该部分坡体受拉。它们在拉应力作用下, 有可能产生拉裂缝, 而拉裂缝的产生往往是坡

体发生破坏的标志或前兆。也就是说, 拉裂缝的存在, 使水更容易入渗, 坡体的岩土体力学性质也随之发生变化, 在静水与动水压力的作用下, 坡体有可能最终产生较大的变形而发生破坏。从坡体上来看, 剪应变增量较大的部位是坡体的两侧边界、坡体的后缘及坡体前缘鼓起的部位是剪应变增量较大的部位, 所以应注意控制该部位的变形及其发展。

根据安全率图(图 5)也可以看出, 该滑坡体整体稳定性较好。

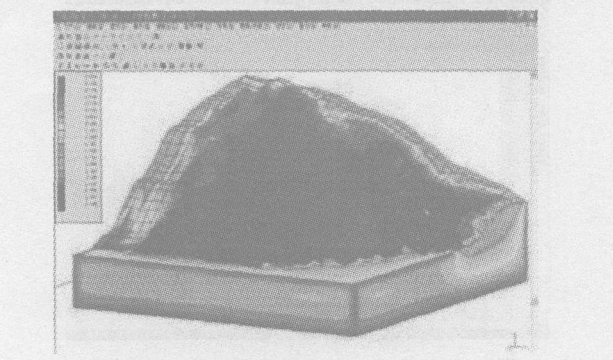


图 4 天然状态下最大主应力图

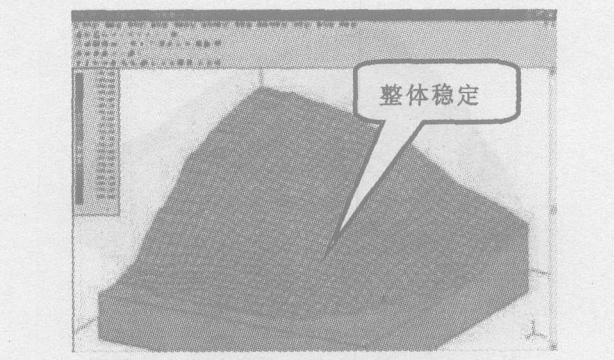


图 5 天然状态下安全率图

4.2.2 蓄水至 1 740 m 高程

(1) 应力分析。蓄水后最大主应力(图 6)在堆积体内部仍为压应力, 在量值上前缘小于后缘, 浅表部小于中深部; 最小主应力在坡体的后缘出现轻微的拉应力, 表明该部分坡体受拉。相比蓄水前, 区别在于压应力量值的变大和拉应力区范围的扩展。这说明在蓄水条件下岩土体由于水的作用参

数的变化产生向美姑河临空面方向的滑移变形, 进一步加大了后缘及两侧边界产生拉裂缝的可能性。在蓄水情况下, 更有可能产生拉裂缝且范围变大, 宽度也变宽, 使坡表面的水和降雨更加容易入渗, 坡体有可能最终产生较大的变形而发生破坏。在蓄水条件下, 可能失稳的模式应为牵引式的滑动破坏。

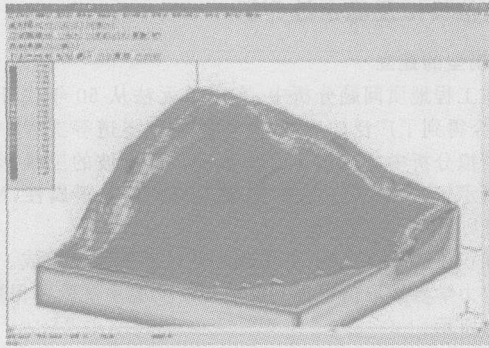


图 6 蓄水至 1 740 m 高程最大主应力图

根据蓄水至 1 740 m 高程安全率图(图 7)也可以看出,在蓄水后产生多处的局部不稳定区域,所以,在蓄水期间应做好观测和采取措施控制变形的增加。

(2) 变形分析。蓄水后总位移变化不是很明显,从量值上来看,最大位移由 11.2 cm 增加至 12.2 cm 左右。与天然状态下一样,从边坡的变形可以看出,在 1 820 m 高程左右



图 7 蓄水至 1 740 m 高程安全率图

一个相对平缓的平台处和滑坡的前缘变形最大,因为在自重应力作用下,边坡产生倾向河谷方向(临空方向)的位移和垂直方向的压缩变形,所以在蓄水情况下,边坡的垂直变形仍然是最主要的,也就是说,边坡此时的变形仍然以自重应力作用下的压缩变形为主。(图 8)

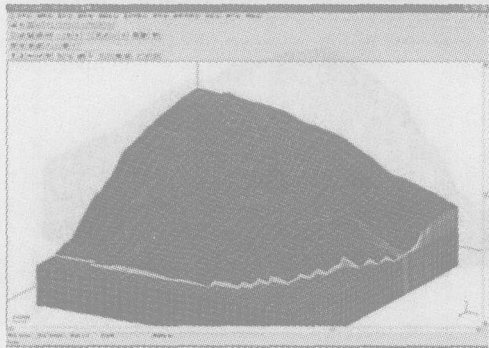


图 8 蓄水至 1 740 m 高程整体位移图

X 方向(水平正西方向)的位移分量在蓄水后量值上变化不大,而在范围上则向上和向上下游两边扩展,,其最大值接近 2 cm,而其它部位的位移则一般情况下小于 1 cm。见图 9 所示。

Y 方向(垂直方向)的位移分量在蓄水后基本没有太大的变化,这是因为 Y 方向的位移主要受自重应力的影响,而在蓄水至 1 740 m 高程后只淹没坡体下部的以小部份,其自

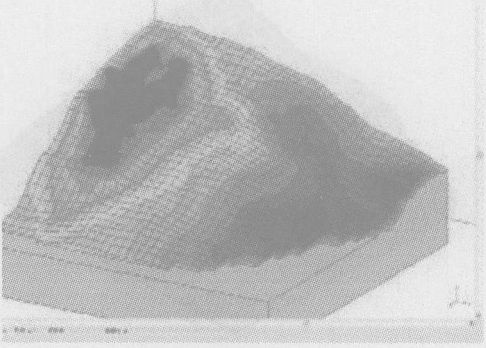


图 9 蓄水至 1 740 m 高程 X 方向位移图

重应力变化很小。见图 10。

同 X 方向的位移分量一样,Z 方向(水平正北方向)的位移分量的变化也是量值上变化小,范围上有所扩展。同天然情况下一样,Z 方向的位移分量在该坡体的前缘上游部分位移量较大,其最大值接近 2 cm,而其它部位的位移则一般情况下小于 1 cm,整体上来说该区的变形并不是太大,属于局部蠕滑-拉裂型。见图 11 所示。

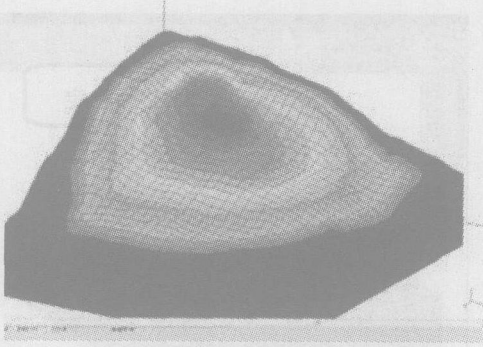


图 10 蓄水至 1 740 m 高程 Y 方向位移图

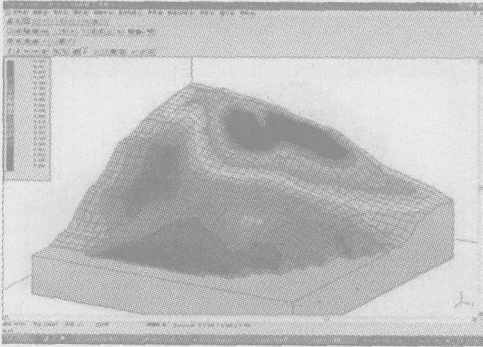


图 11 蓄水至 1 740 m 高程 Z 方向位移图

5 结 论

综上所述,可以得出如下结论:

(1) 新桥 1# 滑坡在天然状态下整体稳定,无需做系统的支护措施;前缘局部位置因其临空条件较好有较明显变形迹象和趋势,由于紧临公路与民房,目前及施工阶段应做一些

挡墙等形式的简单支护处理。

(2) 在水电站蓄水条件下,坡体上将出现多处不稳定的局部块体,有可能引起该滑坡体的整体失稳,将直接威胁水电站的安全运行,由于蓄水后 1 740 m 以下被淹没,所以应在 1 740 m 高程以上采取抗滑桩进行支护。

(下转第 150 页)

2 级: 褐变, 黄褐色 ( $1/4 < A \leq 1/2$ );  
3 级: 较严重褐变, 褐色 ( $1/2 < A \leq 3/4$ ); 4 级: 严重褐变, 黑褐色 ( $A > 3/4$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 生长素对愈伤组织生长及褐化的影响

生长素主要作用在于诱导愈伤组织的形成<sup>[3]</sup>。所以本实验首先比较了 2, 4- D、NAA、IAA 三种不同的生长素对冬凌草愈伤组织增殖及褐化的影响。每种生长素设定两种浓度 (1.5 mg/L、2.5 mg/L) 进行对比实验。结果显示, 同一种生长素不同浓度实验结果趋势基本一致, 既 2.5 mg/L 组比 1.5 mg/L 组愈伤组织生长旺盛期提早 1~2 d, 生长量有一定提高, 但褐化等级基本一致; 而不同生长素种类的对比实验结果为: 2, 4- D 组明显优于 NAA 组和 IAA 组, 尤其是 2.5 mg/L 2, 4- D 愈伤组织增殖率最高 (3.98 倍), 质量最好; 而 NAA 组和 IAA 组结果基本相同 (见表 1)。

表 1 不同生长素对愈伤组织增殖及褐化的影响				
激素/ (mg · L <sup>-1</sup> )	褐化等级		生长情况	
	愈伤组织	培养基	旺盛生长始期/d	增殖率/倍
2, 4- D (1.5)	1	2	26	3.14
2, 4- D (2.5)	1	2	24	3.98
NAA (1.5)	2	3	27	3.12
NAA (2.5)	2	3	26	3.65
IAA (1.5)	2	3	27	2.89
IAA (2.5)	2	3	26	3.23

### 2.2 细胞分裂素对愈伤组织生长及褐化的影响

在红豆杉愈伤组织生长中附加一定浓度的 KT 或 6- BA 的有减轻褐变的作用<sup>[4]</sup>。所以本实验在含 2 mg/L 2, 4- D 的培养基中, 分别实验了 KT 和 6- BA 两种不同浓度 (0.2 mg/L、0.5 mg/L) 对冬凌草愈伤组织生长及褐化的影响, 结果表明: 在培养基添加适宜浓度的 KT 及 6- BA 都有减轻愈伤组织褐化和促进愈伤生长的作用。两种不同的细胞分裂素中, KT 对褐化的抑制作用好于 6- BA。特别是 0.2 mg/L 的 KT, 愈伤组织增殖率高, 褐变最低。(见图 1)。

### 2.3 GA<sub>3</sub> 对愈伤组织生长及褐化的影响

GA<sub>3</sub> 是促进细胞生长和分裂的调节因子<sup>[3]</sup>。在红豆杉的愈伤组织继代中, 盛长忠等<sup>[5]</sup>证明 GA<sub>3</sub> 有抑制 PPO 活性、减轻褐化的作用。所以本研究在含 2.5 mg/L 2, 4- D+0.2 mg/L KT (CK) 的培养基中, 分别添加了 0.1 mg/L、0.3 mg/L、0.5 三种浓度的 GA<sub>3</sub>, 实验 GA<sub>3</sub> 对冬凌草愈伤组织生

长及褐化的影响。结果如表 2 所示: GA<sub>3</sub> 三种浓度处理都能促进愈伤组织生长, 减轻褐化。但浓度之间差别不大。



左: 2, 4- D (2.5) + 6- BA (0.2) 右: 2, 4- D (2.5) + KT (0.2)  
图 1 不同细胞分裂素对愈伤组织增殖及褐化的影响

表 2 GA <sub>3</sub> 对愈伤组织生长及褐化的影响				
激素组合 (mg/L)	褐化程度		生长情况	
	愈伤组织	培养基	旺盛生长始期/d	增殖率(倍)
2, 4- D (2.5) + KT (0.2) (CK)	0	1	25	3.98
2, 4- D (2.5) + KT (0.2) + GA <sub>3</sub> (0.1)	0	1	25	3.99
2, 4- D (2.5) + KT (0.2) + GA <sub>3</sub> (0.3)	0	0	24	4.08
2, 4- D (2.5) + KT (0.2) + GA <sub>3</sub> (0.5)	0	1	25	4.02

## 3 讨论

本研究通过在培养基中添加不同种类、浓度及其组合的植物激素, 系统的研究了其对冬凌草叶片诱导愈伤组织及褐变影响, 获得了最佳配比, 这为冬凌草的细胞培养奠定了一定的基础。

在植物组织培养过程中褐化现象是常遇到的问题, 但一般多以木本植物中较严重<sup>[3]</sup>。但冬凌草属草本植物, 在培养中褐化也较严重。这也正说明了植物组培中褐化机理 (酶促褐变非酶促褐变、) 的复杂性, 影响因素 (如植物种类、基因型、外植体类型、生理年龄等) 的多样性、培养条件 (如培养基种类、激素、pH、温度、光照等) 的相关性等特点<sup>[3]</sup>。所以, 有关防止和克服愈伤组织褐化方法较多。如在培养基中添加一些抗氧化剂或吸附剂等加以防止<sup>[6]</sup>。但作为药用植物应该尽可能避免使用过多的化学药剂, 以免影响其药效。因为植物激素是组培中不可缺少的要素之一。那么在冬凌草组培中, 探索合理的植物激素种类及配比, 以期在调控生长的同时, 也能对褐化起到较好的抑制作用是最简易、首选的方法之一。

[1] 刘晨江, 赵志鸿. 冬凌草的研究进展[J]. 中国药学杂志, 1998, 33(10): 577-581.  
[2] 魏景芳, 李冬杰, 张进献, 等. 冬凌草组织培养与快速繁殖[J]. 安徽农业科学, 2004, 33(7): 12-27.  
[3] 曹孜义, 刘国民, 王蒂, 等. 实用植物组织培养技术教程[M]. 甘肃: 甘肃科学技术出版社, 1996.  
[4] 张宗勤, 杨建英, 吴耀武. 南方红豆杉组织培养及紫杉醇的产生[J]. 西北植物学报, 1998, 18(4): 488-492.  
[5] 盛长忠, 王淑芳, 王宁宁, 等. 红豆杉愈伤组织培养中褐变现象的初探[J]. 南开大学学报, 2001, 34(4): 120-122.  
[6] 梅兴国, 董妍玲, 潘学武. 红豆杉细胞继代培养防褐变措施的研究[J]. 天然产物研究与开发, 2001, 13(4): 8-11.

(上接第 148 页)

参考文献:  
[1] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.  
[2] 曹伯勋. 第四纪地质与地貌[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1995.  
[3] 潘别桐, 黄润秋. 工程地质数值法[M]. 北京: 地质出版社, 1994.  
[4] 崔政权, 李宁一. 边坡工程——理论与实践新进展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.  
[5] 张倬元. 典型人类工程活动与地质环境相互作用研究[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1994.