

文章编号: 1006-6616 (2002) 04-0376-07

金沙江虎跳峡水电站龙蟠坝区 坝肩边坡的稳定性研究

汪波¹, 李渝生¹, 王运生¹, 谢鸿煜²

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059;

2. 中铁二局集团机械筑路分公司, 成都 610031.)

摘要: 论文从龙蟠地区的基本地质环境入手, 分析了工程区的地貌地质特征, 以此获取了客观的计算模型。在此基础上, 对在现今应力场作用下工程坝肩边坡的稳定性采用了有限元模拟, 并对模拟的结果进行分析, 得出坝肩边坡在现今应力场作用下左岸岩体应力-形变处于明显卸荷状态, 右岸滑坡体处于明显的应力松弛阶段, 但总体来说坝肩边坡在天然状态下是处于稳定状态的; 同时对右岸滑坡体采用不平衡推力法对各种工况条件下的稳定性进行计算, 并对计算结果进行分析得出右岸滑坡体在各种工况条件下也是处于稳定状态的。

关键词: 边坡; 滑坡; 有限元模拟; 稳定性

中图分类号: P642.5 **文献标识码:** A

0 引言

拟建的虎跳峡水电站位于金沙江干流, 设计坝高均在 200m 以上, 正常蓄水位为 2012m, 总库容 $374 \times 10^8 \text{m}^3$, 装机容量 $400 \times 10^4 \text{kW}$ 。研究区的地质条件较为复杂, 顺河轴线有一条大的断裂分布, 河谷的右岸, 有一较大的滑坡体 (图 1、图 2)。此外, 工程区附近中强地震发生频繁, 中强震发震构造距规划河段最近的只有几公里。因此, 坝肩边坡在现今的应力场作用及中强地震频繁发生时是否遭到破坏, 以及大坝建成后, 在逐渐蓄水阶段对坝肩边坡的稳定性, 特别是右岸滑坡体的稳定性产生多大影响, 将是一个非常值得关注的问题, 它对于能否在此区拟建水库大坝具有非常重要的现实意义。

1 研究区的地质特征

1.1 研究区的地貌特征

收稿日期: 2002-09-02

作者简介: 汪波 (1975-), 男, 硕士研究生, 从事岩土工程方面的研究工作。

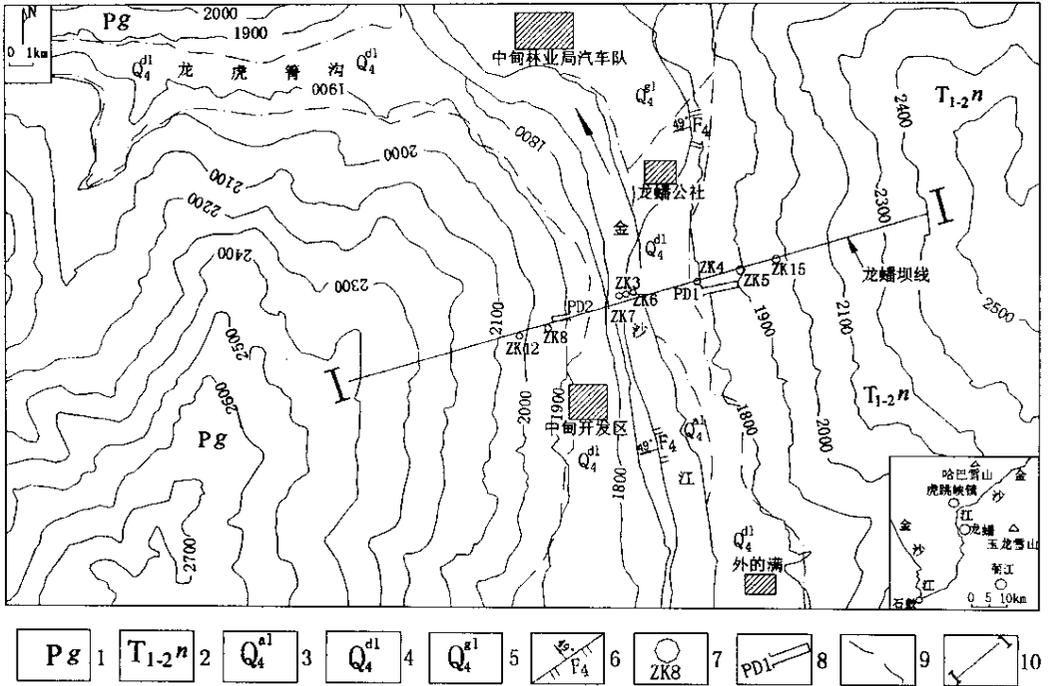


图 1 龙蟠坝区工程地质平面图

Fig.1 The engineering geology of Longpan dam region

1. 二叠系冈达概组玄武岩及板岩；2. 三叠系泥汝组片岩及结晶灰岩；3. 河床冲积砂卵石；4. 冰碛砾岩；5. 崩塌堆积混合堆积体；6. F_4 断裂；7. 钻孔编号；8. 平碉编号；9. 地层分界线；10. 剖面线（坝线）

本研究区位于金沙江河段宽谷段，河谷走向 $NW350^\circ$ ，河床宽 175m，两岸山体相对高程 600m~800m，地形坡度总体为 $25^\circ \sim 35^\circ$ ，河道平直（图 1）。研究区在剖面上大体呈“V”字型，正常蓄水位时的水面宽约 1.1km，建坝可利用长度 1.80km（图 2）。

1.2 研究区的地质特征

从剖面图上看，该研究区的地质特征有以下几个特点：

(1) 以河床 ZK7 为界，左岸河谷及岸坡岩体均为二叠系冈达概组玄武岩 (P_g)，并夹有少量的绢云母绿泥石板岩条带。右岸为三叠系中一下统泥汝组下段 (T_{1-2}^n) 片岩及千枚岩，同时夹有少量的灰岩条带。地层走向与坡面走向基本一致，但倾向相反。

(2) 在 ZK7 附近有一条呈舒缓波状近 SN 走向的顺河切过坝段的 F_4 断裂，断裂的倾角约为 $40^\circ \sim 50^\circ$ ，倾向 W，上盘 P_g 玄武岩向东逆冲于下盘 T_{1-2}^n 片岩之上（图 2）。断裂带宽数米至数十米不等，岩体强烈破碎，揉皱发育，具摩擦镜面结构。据现场调研及已有的研究资料表明，断裂力学性质总体上表现为强烈的压性逆断性质^[1]。

(3) 河床堆积物较厚，最厚处约为 100m，堆积物以河床冲积砂卵石层 (Q_4^{dl})、钙质胶结冰碛砾岩 (Q_4^{gl})、崩塌积松散块碎石粘性土混合堆积体 (Q_4^{dl}) 及基岩滑坡体等组成（图 1）。

(4) 河谷的右岸边坡 2300m 高程处为一规模较大的滑坡体（图 2），虽然该部分岩体的地层层序仍基本保持原有的相对状态，但从 PD1（平碉 1）及 ZK4（钻孔 4）、ZK5（钻孔 5）、ZK15（钻孔 15）等的勘探结果显示该岩体已经明显的松动解体，变形岩体的地层产状与该

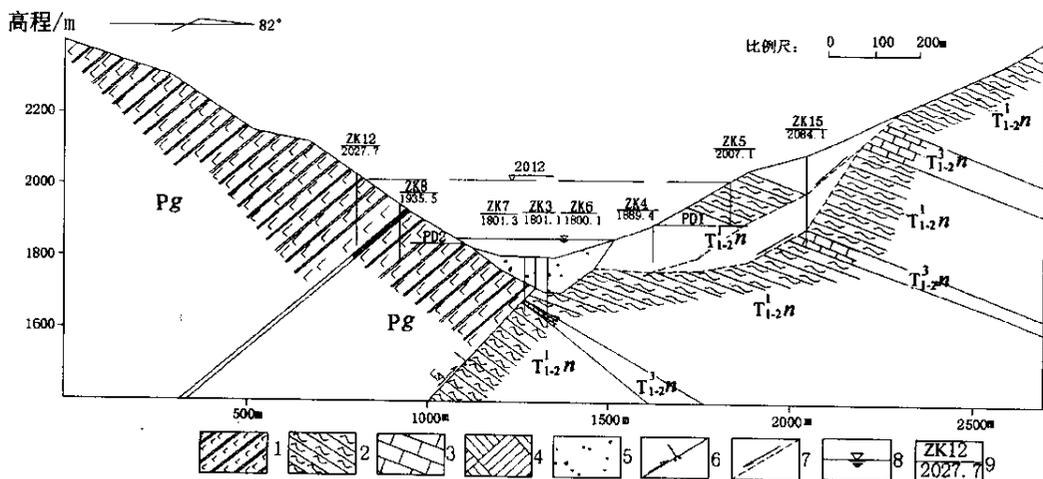


图2 工程地质剖面简图

Fig.2 Cross section of the engineering geology

1. 二叠系冈达概组玄武岩; 2. 三叠系中—下统泥汝组下段片岩; 3. 三叠系中—下统泥汝组上段结晶灰岩;
4. 二叠系冈达概组板岩; 5. 河床; 6. F_4 断裂; 7. 滑带; 8. 水位线; 9. 钻孔标号及孔位高程

地段 T_{1-2n} 原始地层产状相差较大。同时该滑体除了主滑面之外, 存在多个次级滑面 (本文只取两个滑带进行研究), 从现场的滑带取样看, 滑带以粘性土为主, 试验测得滑带土粘聚力 C 值及内摩擦角 ϕ 值均较小。滑体的宽度约 600m ~ 1100m, 高约 380m ~ 480m, 厚度据钻孔资料估计为 120m ~ 180m, 总体积约为 $0.69 \times 10^8 \text{m}^3 \sim 1.05 \times 10^8 \text{m}^3$, 有关该滑坡体的成因环境、力学机制、发展规模等问题将另文讨论。

从以上研究区的地质描述可以看出, 在该区复杂的地质条件下, 坝肩边坡的稳定, 特别是坝区蓄水后坝肩右岸滑坡体的稳定, 都是值得研究的问题。

2 坝区岩体的稳定性研究

2.1 坝区河谷应力场的有限元模拟

所谓应力场的有限元模拟分析, 就是将地质原型转化为力学—数学模型, 采用有限单元计算法, 通过不断地改变边界力的作用方式与量级, 使计算区内的一些特定点的应力与实际资料达到最佳拟合。由此, 找出岩体中应力集中的部位和相对稳定区, 以便对工程岩体稳定性现状作出评价并对其未来的发展变化趋势作出合理预测, 同时也为岩体的稳定性的改善和工程施工提供科学合理的依据^[2]。

2.1.1 模型的建立 确定模型的合理计算范围是保证精度的一个重要的方面, 本次计算所确定的模型范围, 是在充分研究了坝区附近的地质环境和地质构造基础上, 尽量减少一些所谓的“边界效应”前提下, 尽可能使计算范围缩小到所讨论的重点地区, 故此采用计算模型的高度为 1000m, 宽度为 2700m, 共划分 1614 个节点及 1540 个单元 (图 3)。

本模型在建立时尽可能地做到了与实际一致, 既地质原型是在地应力及自重应力共同作用下的情形, 同时考虑到地应力的方向 (近 SN 向), 所以在模型的左边界施加了梯形荷载, 将模型的右边界加上水平方向支座约束, 模型的底部加上垂直方向上的支座约束。

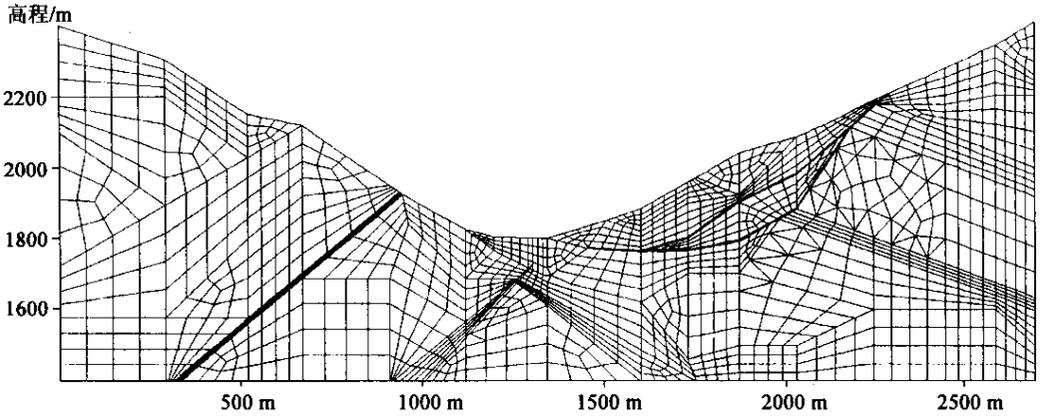


图 3 岩体网格剖分图

Fig.3 Calculation mesh of the rock mass

本模型的地质结构基本上反映了原型的地质特征，既完整的玄武岩、片岩、断裂带及滑坡等。

2.1.2 介质物理力学参数的选取 经简化后，计算模型所需的参数为：岩石的弹性模量、泊松比、内聚力、内摩擦角、残余内聚力、残余内摩擦角、岩石密度及抗拉强度。本文中这些参数的选取通过试验及经验类比的方法获得（表 1）。

表 1 模型介质力学参数的取值

Table 1 Physical mechanics parameter value of the model

岩 性 \ 指 标	弹性模量 /MPa	泊松比 μ	内聚力 /MPa	内摩擦 角 ($^{\circ}$)	残余内聚 力/MPa	残余内摩 擦角 ($^{\circ}$)	密度 (g/cm^3)	抗拉强 度/MPa
千枚状片岩	12000	0.23	3.50	43.5	0.7	31.5	2.70	1.2
绢云母绿泥石板岩	10000	0.24	2.8	38.0	0.5	29.3	2.60	1.0
F ₄ 断裂带	4000	0.30	0.5	31.0	0.0	26.5	2.40	0.0
卵，砾石夹淤泥（河床）	2000	0.33	0.08	29.0	0.0	25.5	2.30	0.0
滑带土	1500	0.35	0.061	21.8	0.0	17.5	2.10	0.0
结晶灰岩	31500	0.21	6.8	51.5	1.8	40.5	2.75	3.5
破碎千枚状片岩（滑体）	8000	0.28	0.90	34	0.02	28.0	2.50	0.0
玄武岩	30500	0.22	5.0	48.5	1.3	38.0	2.75	3.0

2.1.3 计算结果及分析 按以上的分析和计算，得到了该岩体的最大主应力等值线图、最小主应力等值线图和最大剪应力等值线图，如图 4 至图 6 所示。具体特征主要表现在以下几个方面：

①河谷两岸岩体一定的深度范围内，主应力方向发生明显的偏转。

②河谷岩体最大主应力 (σ_1) 量值分布情况总体上呈现由深部向地表逐渐降低的平稳递变状态，在某些特殊的地质结构部位出现了一定的应力分异现象。特别值得注意的是靠近左岸的 F₄ 断裂及右岸滑坡体底部出现极为明显的主应力低异常梯度带，应力值降低可达 4MPa

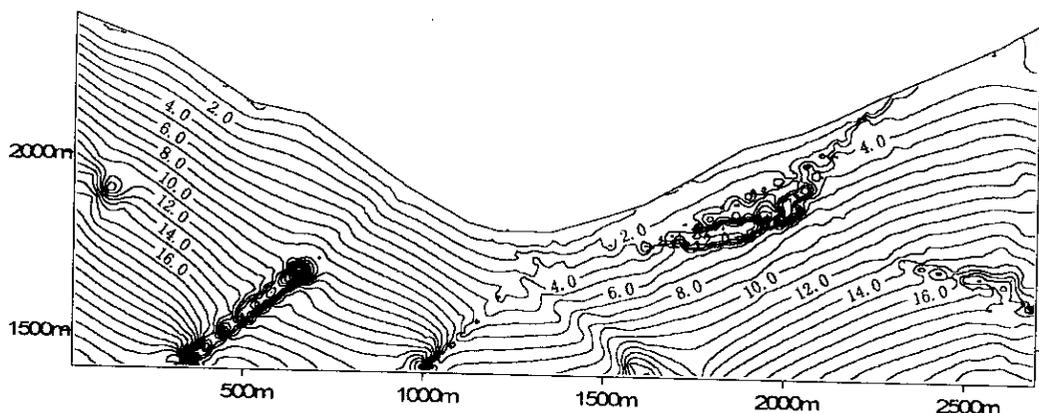


图4 最大主应力 (σ_1) 等值线图

Fig.4 Contour lines of the maximal principal stress

(注: 图中量值的单位为 MPa)

~5MPa。由此可见, 在该河谷特定的岩体力学条件下, 滑体的应力变形特征处于应力松弛状态。

③河谷岩体的最小主应力 (σ_3) 现今的分布特征总体上与 σ_1 相似。但应注意的是, 左岸 2000m 高程附近及其以上岸坡岩体, 出现明显的张应力分布区; 右岸滑体及其以上较大范围的岸坡岩体, 出现最小主应力 (σ_3) 低异常分布区, 应力量值为 0.0~1.0MPa, 据此可以判断, 右岸岩体及滑体附近, 岩体应力-形变处于明显的卸荷状态 (图 5)。

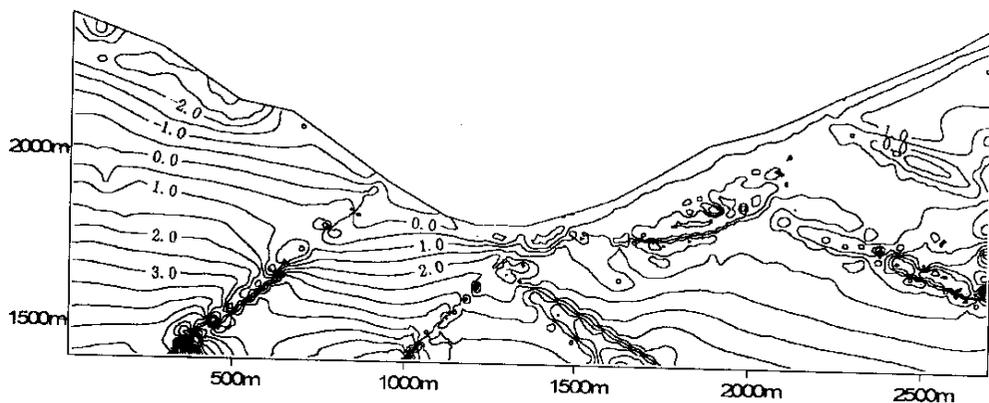


图5 最小主应力 (σ_3) 等值线图

Fig.5 Contour lines of the minimal principal stress

(注: 图中量值的单位为 MPa)

④图 6 所示的最大剪应力 (τ_{\max}) 分布情况表明, 河谷岩体中未出现明显的剪应力高异常集中现象, 沿 F_4 断裂带及滑动带等软弱岩带的最大剪应力 (τ_{\max}) 的分布表现为相对较弱的低异常梯度变化, τ_{\max} 量值的变幅小于 2.0MPa。

2.2 稳定性计算

从以上分析可以看出, 有限元模拟只能从整体上对河谷右岸滑坡在现今的应力场作用下的稳定性作出定性的趋势分析, 而不能从定量的方面进行说明。为了从定量的方面对滑坡进

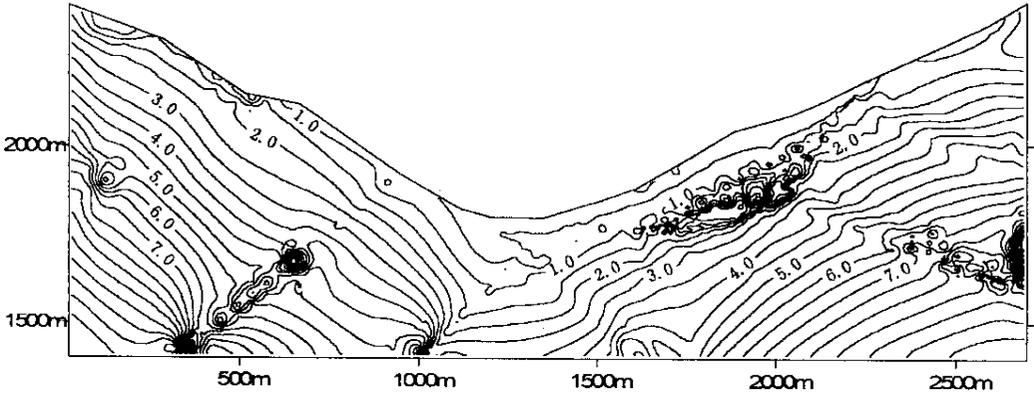


图 6 最大剪应力 (τ_{max}) 等值线图

Fig.6 Contour lines of the maximal shearing stress

(注：图中量值的单位为 MPa)

行研究，本文现采用不平衡推力法对其稳定性进行计算^[3]。

由于该滑坡有两个大的滑带，因此要分别进行计算。稳定性计算所需的滑面物理力学参数及抗剪指标的取值依据室内试验获得（表 2）。

表 2 滑坡计算参数取值

Table 2 Computation parameters of the landslide

名称	密度 (g/cm^3)	压缩模量/MPa	内聚力/kPa	内摩擦角 ($^\circ$)
滑带 1、2	2.1	1500	61	21.8

依据以上的计算参数，计算出不同的情况下滑坡体的稳定性安全系数^[3]（表 3）。

表 3 滑坡安全系数计算结果

Table 3 Computing safety coefficient of the landslide

状 况	分 类	滑带 1		滑带 2	
		天然状况	Ⅷ地震	天然状况	Ⅷ地震
天然状态		1.76	1.67	1.62	1.55
蓄水 1809m		1.60	1.55	1.51	1.44
蓄水 1850m		1.56	1.48	1.46	1.39
蓄水 1900m		1.50	1.46	1.43	1.36
蓄水 1960m		1.58	1.49	1.48	1.40
蓄水 2012m		1.61	1.58	1.53	1.49

从表 3 的计算结果看，①在天然状态下，该滑坡的稳定性总体上具有较高的安全储备，其中滑带 2 的安全系数要低于滑带 1；②天然状态下若考虑坝址最强地震力（Ⅷ度地震）作用，取地震水平加速度 $a = 0.22g$ ($g = 980cm/s^2$)，则滑带 1 及滑带 2 的安全系数有所降低，但总体也是稳定的；③随着库水位的逐渐升高，在不考虑其他外力作用的情况下，计算结果显示，滑带 1、2 的安全系数有所降低，在库水位蓄至 1900m 左右，安全系数降至最低，而

后安全系数随着水位的抬高而逐渐升高,但滑坡体仍然是稳定的;④即使在最不利的工况条件下,既在水库蓄水和本区最强地震力共同作用时,该滑体仍有较高的安全系数。

3 结论

通过以上对研究区诸方面对岩体特征的分析计算,可得出以下几点结论:

(1) 该岩体的地质环境复杂,断裂、滑坡等地质构造均存在,对坝肩稳定性有着很大的影响;

(2) 最大、最小主应力及最大剪应力均由底部向地表逐渐减小,并在断层、滑坡、河床及软质、硬质条带处有应力异常分布的现象,同时应力方向在上述的部位都发生了偏转;

(3) 在左岸边坡未来可能会发生拉破坏,在滑带内未来可能会剪切破坏、拉破坏及多种组合形式;

(4) 从稳定性的计算来看,右岸滑坡体在各种工况条件下是稳定的,虽在蓄水及蓄水和地震同时作用时安全系数有所降低,但仍然有较高的安全储备。

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] 尚岳全,黄润秋. 数值分析方法 [M]. 成都:成都科技大学出版社,1991.
- [3] 王士天,黄润秋,李渝生,等. 雅砻江锦屏水电站重大工程地质问题研究 [M]. 成都:成都科技大学出版社,1998.

STUDY ON THE DAM ABUTMENT'S SIDE SLOPE STABILITY OF LONGPAN DAM REGION OF TIGER LEAPING GORGE HYDROELECTRIC STATION IN JINGSHA RIVER

WANG Bo¹, LI Yu-sheng¹, WANG Yun-sheng¹, XIE Hong-yu²

- (1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
- 2. Mechanism Roadbuilding CO. LTD. The Second Group of China Railway, Chengdu 610031, China.)

Abstract: The paper makes a analysis for natures of the basic geological environment and for the geomorphology features in Longpan dam region; as a result, the objective calculative model is obtained. On this condition, the stability of dam abutment is computed with FEM simulation in present tectonic stress field, and landslide of right bank is computed with unequal thrust method, then makes analysis of the results and concludes that the dam abutment's side slope of left bank is on the state of stress release and landslide of right bank is on the stress relaxation condition under the present tectonic stress field, and the dam abutment's side slope is stable under the natural condition, the landslide of right bank is also stable under the various conditions.

Key words: side slope; landslide; FEM simulation; stability