

# 湖南皂市水利枢纽右岸高边坡稳定性研究

蔡耀军<sup>1</sup>, 刘世斌<sup>2</sup>, 吴宏钧<sup>2</sup>

(1. 长江水利委员会 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010; 2. 长江岩土工程总公司, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 皂市水利枢纽右岸开挖边坡高达 110 m, 施工开挖前通过地质结构分析和数值模拟, 对开挖变形进行预测。根据地质研究结论、设计方案进行针对性的处理。在采取针对性的支护处理后, 边坡变形趋于稳定。施工期及运行后监测表明, 边坡整体稳定, 局部变形破坏形式与前期研究预测一致, 边坡加固措施有效。

**关键词:** 边坡工程; 皂市水利枢纽; 高边坡; 稳定性

**中图分类号:** P 642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 2 - 4452 - 06

## STUDY ON STABILITY OF HIGH SLOPE OF RIGHT BANK OF ZAOSHI HYDROPOWER PROJECT, HUNAN PROVINCE

CAI Yaojun<sup>1</sup>, LIU Shibin<sup>2</sup>, WU Hongjun<sup>2</sup>

(1. Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan, Hubei 430010, China; 2. Changjiang Geotechnical Corporation, Wuhan, Hubei 430010, China)

**Abstract:** The height of the excavated slope on the right bank of Zaoshi hydropower project reaches 110 m. Before the excavation, the deformation and failure were forecasted according to the geologic structure and numerical modeling. The slope is composed of Devonian sandstone and Silurian shale. The strike direction of the stratum is almost perpendicular to the river, which is favorable to the slope stability. But three sets of discontinuities could compose some blocks and cause local instability. In the early stage of excavation above 146 m of the right abutment, some fissures and deformation occurred. So the reinforcement by pre-stressed cables and the drainage tunnel at different altitudes were then performed following the excavation. The monitoring system is in function during and after the excavation, showing that the treatment is effective.

**Key words:** slope engineering; Zaoshi hydropower project; high slope; stability

## 1 引言

皂市水利枢纽是国家“十五”重点工程, 位于澧水 I 级支流澧水上, 由拦河大坝、右岸坝后式厂房、左右岸灌溉渠首、右岸斜面升船机(预留)等建筑物组成。由于河谷较窄, 建筑物布置造成两岸边坡较大规模的开挖, 尤其是为了满足厂房的布置, 右岸边坡开挖形成高约 110 m 的人工高边坡, 其稳定性直接影响到电站厂房甚至整个枢纽的运行安

全。高程 145 m 左右为已建成的右岸上坝公路, 其内侧设有高程为 161, 176, 191 m 三级马道, 施工过程中曾发生跨塌。因此在厂房边坡开挖前, 对边坡稳定性作了分析预测, 并据此进行了工程设计和加固处理<sup>[1]</sup>。

坝址区为“U”型河谷, 出露地层主要为志留系及泥盆系沉积碎屑岩, 为倾向上游偏左岸的单斜岩层。规模稍大的断层均为顺河向, 其中 F3 位于右岸边坡中部, 对右岸边坡稳定不利<sup>[2]</sup>。

开挖边坡稳定问题是本工程除坝基岩体利用

**收稿日期:** 2007 - 09 - 11; **修回日期:** 2007 - 11 - 11

**作者简介:** 蔡耀军(1963 -), 男, 博士, 1984 年毕业于成都地质学院水文地质专业, 现任教授级高级工程师, 主要从事水利水电岩土工程勘察方面的研究工作。E-mail: caiyaojun88@163.com

之外的最主要的工程地质问题, 特别是在上坝公路开挖引发较大范围开裂变形后更是引起了所有参建方的高度关注。

## 2 边坡工程地质特征

### 2.1 边坡形态

右岸边坡上游至右坝肩一带, 下游至导流洞出口。右岸边坡整体走向 160°左右, 山脊高程 300~340 m, 坡脚高程 70~75 m, 坡面形态从上游向下游略呈弧面, 凸向河谷。自然坡度上游 45°左右, 下游 30°~35°。

### 2.2 岩性组合及边坡结构

边坡分布志留系(S<sub>2x</sub>)及泥盆系(D<sub>2y</sub>)的碎屑岩, 岩性组合在空间分布上具有如下特征: 上游为云台观组石英细砂岩夹少量粉砂岩, 向下游逐渐过渡为小溪组粉砂岩夹细砂岩, 岩性总体上由硬变软。由于岩层倾向上游偏左岸, 岩层走向与边坡走向交角较大, 视倾角倾向坡外, 边坡岩体上部为泥盆系云台观组石英砂岩(硬岩), 下部为志留系小溪组粉砂岩(软岩), 为典型的上硬下软的地质结构类型, 如图 1 所示。

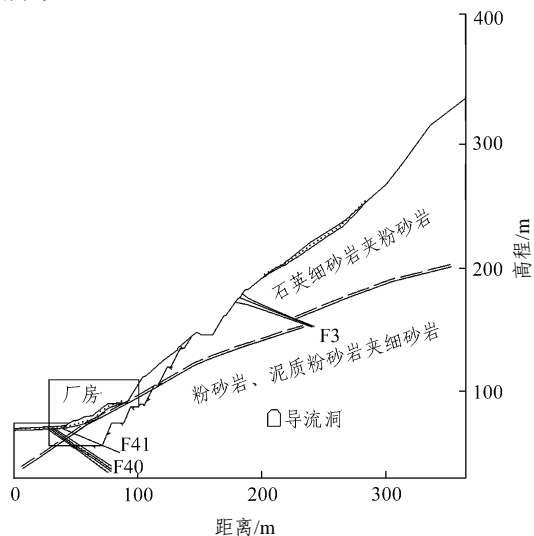


图 1 边坡结构典型剖面示意图

Fig.1 Sketch profile of typical slope structure

### 2.3 软弱夹层

泥盆系地层主要由石英细砂岩夹粉砂岩、泥质粉砂岩, 在层间错动、地下水的的作用下, 形成层间的相对软弱带(软弱夹层)。坝区软弱夹层分为 3 种类型: I 类软岩夹层; II 类破碎夹层, 根据夹层含泥量及夹泥连续性又分为两个亚类 II<sub>1</sub> 类破碎夹层、II<sub>2</sub> 类破碎夹泥夹层; III 类泥化夹层<sup>[3]</sup>。

从泥盆系地层上部至下部, 软弱夹层密度逐渐增大(见表 1), 性状逐渐变差。这种规律体现在边坡的空间分布上即为, 由上游至下游、由边坡上部至下部软弱夹层密度逐渐增大, 性状逐渐变差。

表 1 软弱夹层统计表

Table 1 Statistic of the soft intercalation

| 岩层名称                           | I               | II              |                              | III            | 揭露地层厚度/m |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|----------------|----------|
|                                |                 | II <sub>1</sub> | II <sub>2</sub> <sup>n</sup> |                |          |
| D <sub>2y</sub> <sup>2-2</sup> | (3.13~3.175)/10 | (0.05~0.12)/1   | (0.23)/3                     | 0              | 25.64    |
| D <sub>2y</sub> <sup>2-1</sup> | (2.36~2.47)/8   | (0.91)/4        | (0.12~0.71)/5                | 0              | 45.82    |
| D <sub>2y</sub> <sup>1-2</sup> | (5.7~6.10)/14   | (0.45~0.56)/7   | (1.425~1.67)/13              | (0.51~0.58)/10 | 44.97    |
| D <sub>2y</sub> <sup>1-1</sup> | 0               | 0               | (0.52~1.03)/5                | (0.18~0.54)/6  | 6.64     |

注: 括号内数字为夹层累计厚度(m), “/”后数字为夹层条数。

志留系地层总体性状较软。上部为细砂岩与粉砂岩及泥质粉砂岩互层, 粉砂岩与细砂岩的接触界面多有泥化现象。下部为粉砂岩及泥质粉砂岩, 有较多泥化夹层。

### 2.4 结构面及其组合特征

边坡主要存在层面(夹层)、断层、节理等 3 类结构面。这类结构面既破坏了坡体的完整性, 亦能相互组合切割, 形成不稳定块体, 同时对边坡变形也起一定的控制作用。

岩层走向 90°~100°, 倾向上游, 倾角 40°~60°。断层出露长度均小于 500 m, 多为顺河向, 倾向山内。规模稍大且影响边坡稳定的有分布于边坡中部的 F3 及坡脚部位的 F40 系列。F3 是右岸边坡出露最大的一条断层, 倾向山内, 倾角 35°~50°, 断层带宽度为 0.3~0.9 m, 最宽处约 2 m, 发育构造角砾岩及碎裂石英砂岩、岩屑、岩粉, 泥质胶结少量钙质胶结。F3 的存在, 降低了边坡岩体的整体性, 断层带强度较低, 易压缩变形。在坡脚、河床右侧分布有一组顺河向、倾向山里的断层共 4 条: F30, F40, F41, F42 及 F43。构造岩主要为碎裂岩, 局部为断层泥及泥质胶结角砾岩, 性状较差。

泥盆系石英砂岩中含有软弱夹层, 常成为边坡变形及楔形块体失稳的控制性界面。边坡裂隙较发育, 主要有走向 NE30°~40°及走向 NW300°~315°两组(见图 2)。裂面一般平直稍粗, 间距一般 0.1~0.5 m, 局部密集。在 D<sub>2y</sub> 石英砂岩中, 裂隙较长大;

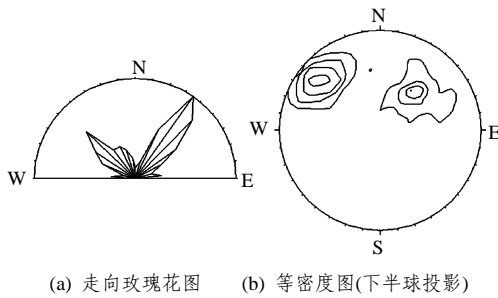


图2 裂隙统计图  
Fig.2 Statistic diagram of discontinuity

$S_{2x}$  粉砂岩及泥质粉砂岩中裂隙一般较短小，而且较隐蔽，不易观察到。石英砂岩强度高、结构面发育，具有典型的硬、脆、碎的特点，天然情况下岩块间咬合较为紧密，但容易受外部环境变化影响，从而使边坡稳定性对开挖较为敏感。

### 2.5 岩体风化与卸荷特征

岩体风化主要受岩性控制<sup>[4~6]</sup>。上游石英砂岩坚硬，抗风化能力强，一般沿裂隙风化，形成的自然斜坡相对较陡。而下游粉砂岩、泥质粉砂岩性状相对较软，抗风化能力较差。强风化岩体主要分布于尾水渠内侧志留系粉砂岩及泥质粉砂岩中。弱风化带厚度一般为 15~40 m，岩石内矿物基本未变，仅沿裂隙有一定的蚀变，或裂面附铁锰质。

由于河谷下切，在坡面以内一定深度范围形成卸荷带。卸荷带内裂隙多数张开或微张，张开程度由表部向深部逐渐变小。由于岩性、地形不同，卸荷作用的强烈程度及影响深度也呈现一定的差异性，在  $D_{2y}$  石英砂岩中卸荷作用相对较强烈，卸荷裂隙发育，卸荷带宽度 20 m 左右；在  $S_{2x}$  粉砂岩、泥质粉砂岩坡段，裂隙张开不明显，一般都在数毫米以内，受卸荷作用岩体的宽度 15 m 左右。

卸荷作用追踪原有结构面的现象十分明显，天然边坡常见沿 2~3 组结构面发生块体破坏现象，坝肩边坡开挖后的拉裂和变形也主要沿已有结构面发生。

### 2.6 水文地质特征

由于坡度陡且地形单一，地表集水域面积不大，地表水主要以面流的形式向漂水排泄，少部分向地下入渗。

地下水主要赋存于泥盆系的石英砂岩裂隙中，埋深一般 20 m 左右，局部 45 m。云台观组地层中的软弱夹层相对隔水。

地下水径流在泥盆系地层中具有各向异性的特

点，地下水主要沿层面方向运动。完整新鲜的志留系地层具有良好的隔水性，但在风化卸荷带赋存少量裂隙水。

岩体的透水性及岩性、岩体内结构面的发育程度、卸荷程度密切相关， $D_{2y}$  石英砂岩透水性相对较大，岩体具有弱~中等透水性； $S_{2x}$  粉砂岩泥质粉砂岩透水性相对较小。

## 3 边坡岩体等效力学单元划分

组成边坡岩体岩性由上游硬岩逐渐向下游过渡为软岩，主要为石英细砂岩、粉砂岩及泥质粉砂岩。相同的岩性力学性质相近，但岩体受到风化作用后，其矿物组成会发生某种程度的改变，从而岩体的力学性质也会发生改变。另外，由于构造作用，岩体内部产生各种方向的结构面，结构面密度、结构面的充填情况、结构面形态等使得岩体作为一个整体在承受外力时表现出来的力学性质也会不同。在划分等效力学单元时，以岩性为基础，结合岩体结构、风化卸荷状态、构造特征等进行划分。典型剖面等效力学单元划分见图 3，图中①~⑥为单元编号。

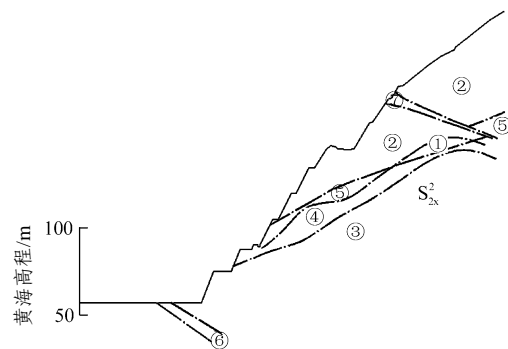


图3 典型剖面等效力学单元划分  
Fig.3 Division of equivalent mechanical unit of typical section

## 4 开挖边坡稳定性分析预测

### 4.1 坝基及电站开挖前边坡稳定性

右岸边坡的地质结构有利于其整体稳定，没有发现影响边坡整体稳定的倾向坡外的控制性结构面，天然边坡经过了漫长的地质历史时期的演变，天然情况下整体处于稳定状态。失稳模式主要表现为局部的卸荷拉裂变形、块体失稳，局部卸荷松动岩体出现小范围崩塌。

受 F3 断层的影响，上坝公路施工过程中，内侧边坡由于开挖成形后没有及时支护，多处出现开

裂及塌方, 在支护完成以后, 坡面多处出现了变形裂缝。高程 90 m 公路内侧靠近导流洞出口附近为志留系地层, 坡眉出现多处纵向的拉张裂缝, 局部发生坍塌。

### 4.2 设计开挖形态

根据设计方案, 边坡开挖主要为右岸坝肩至厂房一带, 尾水渠内侧基本保持原有自然边坡形态。开挖边坡单级坡高 15 m, 马道宽 3 m, 坡比 1 : 0.5, 最上一级坡比 1 : 0.65。

### 4.3 边坡失稳模式分析预测

在右坝肩坚硬岩分布区, 由于开挖, 边坡表部分荷载被解除, 卸荷回弹, 坡体表部易追踪原有裂隙拉裂。厂房内侧一带, 边坡岩体结构具上硬下软的地质特点, 坡脚部位分布有 F40 断层, 开挖后下部较软岩及 F40 断层易产生压缩变形。在靠近导流洞出口一带边坡, 志留系岩性较软、破碎, 边坡自稳能力差, 开挖可能引起坍塌, 由于岩体强度较低, 这种破坏并不一定严格受原有结构面控制。在右岸坝肩开挖槽的下游侧坡, 开挖时如层面临空, 易形成顺层滑移。局部风化卸荷松动岩体可能产生崩塌。志留系中的粉砂岩、泥质粉砂岩失水干裂后易崩解, 具有快速风化的特点, 风化后岩体表部易呈碎片状剥落。岩体中层间与 NE 组裂隙的组合易形成如图 4 所示的块体失稳, 这种块体的规模取决于 NE 组裂隙的连通情况。

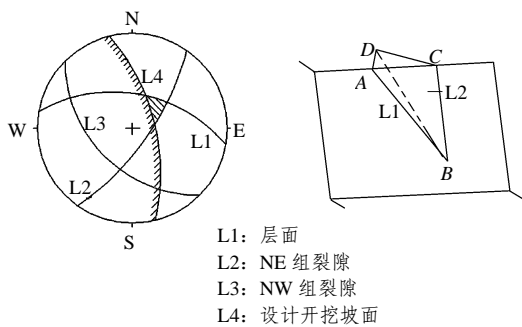


图 4 块体赤平投影及立体图

Fig.4 Bloc formed by 3 groups of discontinuities

### 4.4 边坡开挖数值模拟

#### (1) 边坡地质力学模型

由于软弱夹层、裂隙等不连续面的存在, 实际岩体表现为弹塑性的非线性力学性质。岩体稳定程度采用 Drucker-Prager 破坏准则。

#### (2) 计算模型

为尽量减少二维有限元模型中边界约束条件对

计算结果产生的不利影响, 计算模型的边界范围按照以下原则确定: 水平方向跨越地貌单元的突变点, 即河床方向到河谷的中央、山顶方向跨过山脊, 垂直方向上, 自边坡最低点向下取一倍坡高。计算模型如图 3 所示。

根据设计坡型, 划分 7 个开挖步。模型中, 岩层、夹层以及断层均采用有厚度的实体单元加以模拟。边坡剖分为 6 140 个单元, 6 257 个节点。计算时所施加的边界约束条件: 地表为自由边界, 模型的左右边界分别受  $x$  轴方向的位移约束, 模型的下部边界受  $y$  轴方向的位移约束。

#### (3) 计算参数的选取

计算时边坡岩体的力学参数根据等效力学单元来取值(见表 2)。对于单层厚度较小的细砂岩与粉砂岩互层的岩组, 其力学参数采用二者的加权平均值。软弱夹层参数的选取考虑了其连续性及其起伏情况对整体强度的影响。F3 断层带参数  $c' = 0.03$  MPa,  $f' = 0.55$ , 变形模量  $E = 0.60$  GPa; F40 断层带参数为:  $c' = 0.05$  MPa,  $f' = 0.35$ , 变形模量  $E = 0.30$  GPa, 泊松比  $\mu = 0.4$ , 重度为  $25$  kN/m<sup>3</sup>。

表 2 计算参数选用值表  
Table 2 Parameters for modeling

| 岩层名称           | 岩性   | 风化状态 | 重度 / (kN · m <sup>-3</sup> ) |      | 抗剪断强度     |           | 变形模量 / GPa |
|----------------|------|------|------------------------------|------|-----------|-----------|------------|
|                |      |      | 干                            | 湿    | $f'$      | $c'$ /MPa |            |
| $D_{2y}^{2-2}$ | 石英砂岩 | 微新   | 24.2                         | 24.7 | 1.30~1.40 | 1.10      | 12.00      |
|                |      | 弱    |                              |      | 1.20~1.30 | 1.10      | 6.00       |
| $D_{2y}^{2-1}$ | 石英砂岩 | 微新   | 24.3                         | 24.8 | 1.20~1.30 | 1.10      | 10.00      |
|                |      | 弱    |                              |      | 1.20      | 1.05      | 5.00       |
| $D_{2y}^{1-2}$ | 石英砂岩 | 微新   | 24.6                         | 25.1 | 1.20      | 0.90~0.95 | 8.00       |
|                |      | 弱    |                              |      | 1.10      | 0.80~0.85 | 4.00       |
| $D_{2y}^{1-1}$ | 石英砂岩 | 微新   |                              |      | 1.10~1.20 | 0.85~0.90 | 6.00       |
|                |      | 弱    |                              |      | 1.00~1.10 | 0.75~0.85 | 3.00       |
| $S_{2x}$       | 粉砂岩  | 微新   | 25.5                         | 25.9 | 0.75      | 0.55      | 4.00       |
|                |      | 软弱夹层 |                              |      | 0.40      | 0.05      | 0.50       |
| $S_{2x}$       | 粉砂岩  | 微新   | 25.8                         | 26.2 | 0.75      | 0.55      | 4.00       |
|                |      | 强    |                              |      | 0.65      | 0.50      | 2.00       |
|                |      |      |                              |      | 0.50      | 0.30      | 0.50       |

#### (4) 计算结果及分析

根据设计方案,分7步开挖。计算结果显示,天然状态下在边坡上部沿夹层局部出现较小拉应力区,拉应力为0.9 MPa。开挖引起的变形主要是卸荷回弹;位移较大的部位主要出现在软弱夹层部位;第1层开挖由于离F3断层较近,导致F3断层上部软弱夹层与断层相交的附近岩体有较大的位移,为此地质建议在开挖前先对此地加固;在 $D_{2y}^{1-2}$ 地层的坡面处、软弱夹层的附近区域有较小的拉应力出现;第一层开挖后余下几层的开挖引起的软弱夹层两侧岩层的相对位移较小;塑性应变和区域主要集中在软弱夹层,位于第一层开挖台阶以上和F3断层之间的区域由于受到断层上部岩层的变形挤压,有较大的塑性变形,在坡脚处F40断层带有塑性区,深度约10 m。第7层开挖完成后,在第1层、第2层开挖坡面处以及坡体内部F3断层与软弱夹层接触的部位出现拉应力。图5为第7层开挖后引起的位移矢量。

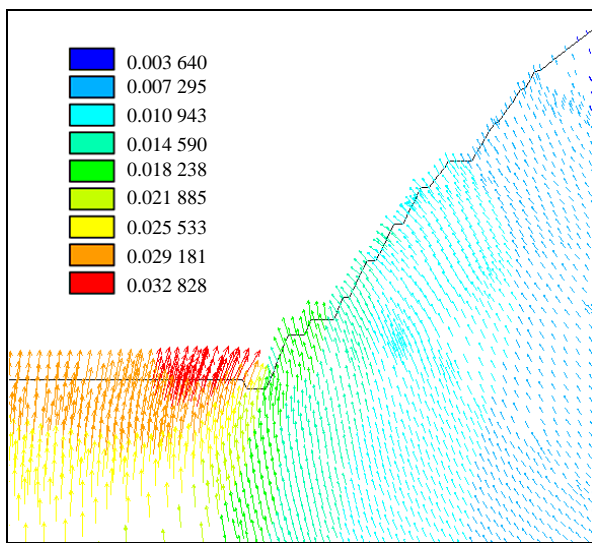


图5 第7层开挖后引起的位移矢量图(单位: m)  
Fig.5 Displacement vectors after the 7th step excavation (unit: m)

### 5 边坡处理措施及开挖期稳定性

坡面保护措施主要采用厚度10 cm的挂网喷射混凝土,高程90~105 m单级边坡因沿江公路通过坡脚,增设混凝土护面墙。坡面排水措施采取在开口线及各级马道内侧布置截排水沟;坡内排水采用深5 m、间距4 m×4 m排水孔,在距坡面约30 m,

高程90,120,144 m顺边坡走向布置3条排水洞,洞顶向上布设长30~35 m排水孔,上下层排水孔衔接,形成完整排水幕。

在高程146 m处布置上坝公路,公路以上分别在高程161,176,191 m设置宽2 m马道,各单级坡坡比依次为1:0.5,1:0.4,1:0.35。初期支护完成后,由于受中下部F3断层及汛期降雨量大等因素影响,边坡上部卸荷变形有加大趋势。后根据F3分布形态,在边坡下游段高程188.5 m、上游段高程173.5 m分别布设9束、16束2 000 kN锚索,之后边坡趋于稳定。

高程146 m以下边坡每15 m设置一级宽3 m马道,单级坡比1:0.5;135~146 m单级坡在距坡顶、底2 m分别采用两排间距4 m、长度40 m、2 000 kN锚索加固;135 m以下采用每级布置两排间距4 m、长度30 m、1 000 kN锚索加固。考虑到边坡走向因建筑物布置需要局部转折,转折部位易形成拉应力集中分布区,且顺向坡部位软弱夹层在锚索张拉时变形将导致锚固端压应力不均匀分布,因此在上述部位设置了钢筋混凝土面板。局部顺向坡在开挖过程中因未及时支护曾发生滑塌,后期施工采取开挖下一级同时支护上一级逐级开挖支护的方法保障了施工期边坡稳定。

### 6 开挖后边坡稳定性

右岸边坡开挖后至今已4 a多,地表变形、深层位移、应力等方面的监测成果如图6~9所示。监测结果表明:右岸边坡地表位移自2003年10月~2006年4月处于卸荷变形较明显期,2006年4月至今已处于稳定期;多点位移计监测成果揭示边坡在2004年11月~2006年6月期间深层位移增幅较快,

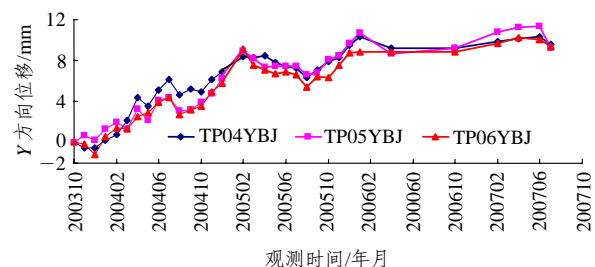


图6 典型断面高程146 m以上各测点位移过程线(Y方向—河谷临空方向)

Fig.6 Displacement of typical cross-section of the monitoring points above elevation 146 m (direction Y toward to the river)

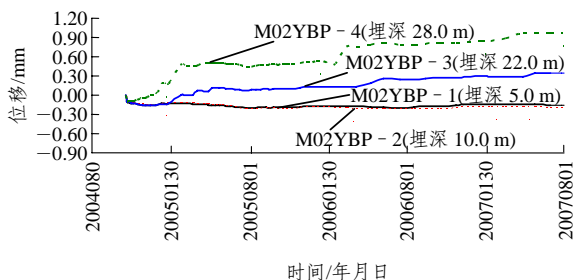


图 7 典型断面 M02YBP 多点位移计位移 - 时间过程线  
Fig.7 Displacement versus time of typical cross-section of monitoring point M02YBP

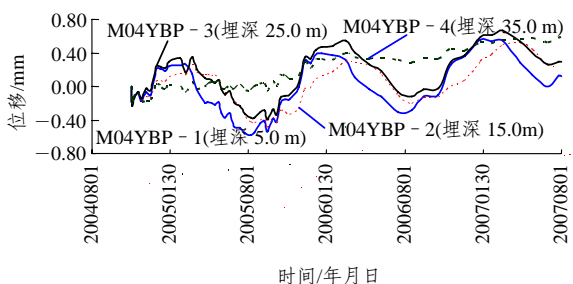


图 8 典型断面 M04YBP 多点位移计位移 - 时间过程线  
Fig.8 Displacement versus time typical cross-section of monitoring point M04YBP

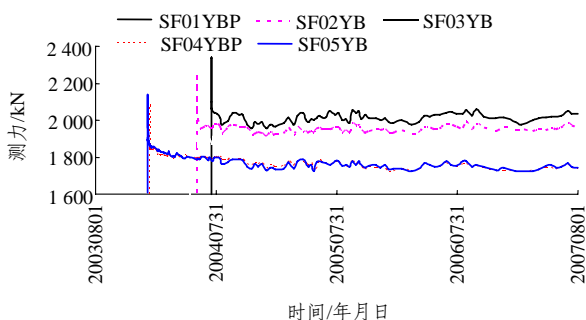


图 9 右边坡锚索测力计测值过程线  
Fig.9 Curves of pretension versus time of cables for right slope

2006 年 6 月至今历时 1 a 多已趋于平稳; 位于边坡下部近坡脚的 1# 排水洞自 2005 年 1 月底开始观测至今流量总体保持稳定, 2007 年 7 月底大暴雨使流量增至 0.45 L/s, 2007 年 8 月初恢复正常流量, 表明地下水与地表水联系紧密, 揭示开挖未对边坡岩体水文地质特性产生明显影响; 锚索测力值表明边坡岩体应力未发生突变, 整体均衡。

### 7 结 论

右岸边坡的物质组成及地质结构特征决定了其

整体稳定性好, 边坡岩体中的软弱夹层、裂隙及 F3, F40 断层是影响边坡变形、局部失稳的主要因素。边坡开挖的破坏形式主要表现为变形、块体失稳及局部崩塌。在采取针对性的支护处理后, 边坡变形趋于稳定, 显示处理措施有效。

### 参考文献(References):

- [1] 蔡耀军, 刘世斌. 湖南溁水皂市水利枢纽右岸高边坡工程地质特征及稳定性研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(增 1): 228 - 232.(CAI Yaojun, LIU Shibin. Engineering geology and the stability study of the right excavated slope at Zaoshi hydropower[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(Supp.1): 228 - 232.(in Chinese))
- [2] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院. 湖南溁水皂市水利枢纽初步设计阶段工程地质勘察报告[R]. 武汉: 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 2002.(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, CWRC. Engineering geology report of the Zaoshi hydropower in Hunan Province for the preliminary design stage[R]. Wuhan: Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, CWRC, 2002.(in Chinese))
- [3] 余永志, 蔡耀军, 颜惠明, 等. 湖南皂市水利枢纽泥化夹层工程地质特性[J]. 资源环境与工程, 2006, 20(5): 519 - 522.(YU Yongzhi, CAI Yaojun, YAN Huiming, et al. The engineering geology characteristics of the soft intercalation in Zaoshi Hydropower, Hunan Province[J]. Resource Environment and Engineering, 2006, 20(5): 519 - 522.(in Chinese))
- [4] 黄润秋, 林 峰, 陈德基, 等. 岩质高边坡卸荷带形成及其工程性状研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 227 - 232.(HUANG Runqiu, LIN Feng, CHEN Deji, et al. Formation mechanism of unloading fracture zone of high slopes and its engineering behaviors[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(3): 227 - 232.(in Chinese))
- [5] 程东幸, 刘大安, 丁恩保, 等. 龙滩水电站左岸边坡工程地质研究及蠕变体 B 区岩体质量评价[J]. 工程地质学报, 2007, 15(3): 362 - 369.(CHEN Dongxing, LIU Da'an, Ding Enbao, et al. Engineering geology research of left bank and rock mass evaluation in creep rock mass zone B of Longtan hydropower station[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(3): 362 - 369.(in Chinese))
- [6] 刘 明, 黄润秋, 严 明. 锦屏一级水电站 IV~VI 山梁雾状边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 2 801 - 2 807.(LIU Ming, HUANG Runqiu, YAN Ming. Study on stability of water-fog slope on IV - VI ridges of Jinping first stage hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 2 801 - 2 807.(in Chinese))