

小湾水电站坝基开挖岩体卸荷裂隙发育特征

祁生文¹, 伍法权¹, 庄华泽², 刘 彤¹, 晏长根¹, 柴建峰³

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021;

3. 中交公路规划设计院, 北京 100010)

摘要: 小湾水电站是澜沧江中下游河段梯级开发的龙头水库和巨型电站, 设计坝型为混凝土双曲拱坝, 最大坝高 292 m, 是世界上在建的第二高拱坝。由于河谷狭窄, 谷坡高陡, 地应力值较高, 在坝基开挖过程中产生了强烈的卸荷松弛, 使得岩体性质劣化, 带来了一系列工程问题。介绍小湾水电站坝址区的工程地质环境, 分析坝基开挖卸荷裂隙的宏观特征, 发现: (1) 当高程由大变小, 坝基开挖卸荷裂隙的倾角由大逐渐变小; (2) 两岸卸荷裂隙倾向相反, 相对产出; (3) 裂隙面发育与坝基开挖面近于平行, 形成兜底缝。把卸荷裂隙分为继生型卸荷裂隙、扩展型卸荷裂隙以及新生型卸荷裂隙三类, 分析其生成机制。在此基础上, 通过监测资料和声波分析资料, 确定坝基开挖卸荷裂隙的分布特征及分布范围。这对于岩体开挖卸荷问题的研究及岩体加固处理措施的选择均具有重要意义。

关键词: 水利工程; 小湾水电站; 开挖; 卸荷裂隙

中图分类号: TV 223.1

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 1 - 2907 - 06

CHARACTERISTICS OF UNLOADING FISSURES IN DAM'S BASE OF XIAOWAN HYDROPOWER STATION

QI Shengwen¹, WU Faquan¹, ZHUANG Huaze², LIU Tong¹, YAN Changgen¹, CHAI Jianfeng³

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Yunnan Provincial Investigation, Design and Research Institute of Water Conservancy and Hydropower, Kunming, Yunnan 650021, China; 3. China Highway Planning and Design Institute(HPDI) Consultants, Inc., Beijing 100010, China)

Abstract: Xiaowan Hydropower Station is a huge powerstation located in the middle-lower reach of Lancangjiang river. It is a double-curvature arc concrete dam with a maximum height of 292 m, the second highest arch dam under construction in the world. Owing to the narrow, high and steep valley as well as the higher geostress, strong unloading, the development in the dam's base during excavation is discussed which worsens the rock mass and leads to a series of troubles. The geological conditions of the dam site, the macroscopical characteristic of the unloading fissures of the base are considered and it finds that: (1) the dip angle of the unloading fissures changes from big to small gradually from the top to the bottom; (2) the unloading fissures in the both banks are inversed in dip direction; (3) the surface of the unloading fissures is almost parallel to the surface of excavation base. Meanwhile, the unloading fissures are classified into three classes as successive fissures, extensive fissures and fresh fissures. Finally, the distribution pattern and scope of the unloading fissures are analyzed. All these are

收稿日期: 2006 - 10 - 18; **修回日期:** 2007 - 01 - 30

基金项目: 中国青年科学基金项目(40302032); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412700)

作者简介: 祁生文(1975 -), 男, 博士, 1996 年毕业于原西安地质学院水文地质与工程地质专业, 现为副研究员, 主要从事岩体工程地质学、岩土体动力学以及数值模拟方面的研究工作。E-mail: qishengwen@mail.iggcas.ac.cn

meaningful to understand excavation unloading problem as well as to choose suitable measures to strengthen rock masses.

Key words: hydraulic engineering; Xiaowan Hydropower Station; excavation; unloading fissures

1 引言

小湾水电站位于澜沧江与支流黑惠江汇合口的下游 1.5 km 处,是澜沧江中下游河段梯级开发的龙头水库和巨型电站。设计坝型为混凝土双曲拱坝,最大坝高 292 m,是世界上在建的第二高拱坝。总库容 $151.36 \times 10^8 \text{ m}^3$,总装机容量 4 200 MW。该电站建成后,不仅可以缓解我国西南和广东省的电力紧张状况,而且对电站周围地区的灌溉、防洪、航运开发具有重要意义。

小湾水电站坝基开挖工程于 2002 年元月开工,由于河谷狭窄,谷坡高陡,地应力值较高,加之开挖规模较大、开挖体型复杂,在坝基开挖过程中坝基岩体发生了强烈卸荷松弛,并出现所谓“葱皮”现象^[1],岩体卸荷问题十分突出,它所带来的岩体稳定及岩体性状劣化问题不容忽视,研究坝基岩体开挖卸荷的形成机制及其工程效应问题是目前小湾水电站工程设计和施工中面临的一个重大关键技术问题,对于优化工程措施,保证施工期、运行期的工程安全都至关重要。因此研究小湾水电站坝基开挖岩体卸荷裂隙的发育特征,其重要性不言而喻。

2 坝址区基本工程地质概况

小湾水电站工程地处西南地区著名的“三江构造带”的南端,地质构造复杂^[2]。澜沧江自挽近时期以来,深切成谷,形成宏伟的峡谷地貌景观。两岸山体雄厚,谷坡陡峻。枢纽区河段长 2 300 m,河谷呈“V”字形,河道平直,河床纵坡降约 0.057 9%,总体流向由北向南,平均坡度 $35^\circ \sim 40^\circ$,自然边坡高达 1 000 m,从开口线到建基面开挖边坡高达 600~687 m。图 1 中的台阶状线为坝基的开挖线,其垂直开挖最大深度可达 89.5 m,水平开挖最大深度可达 130.1 m。

枢纽区分布的地层为中~深变质岩系(M)及第四系(Q),变质岩系的时代未查明,其岩石类型主要有黑云花岗片麻岩、角闪斜长片麻岩并夹少量片岩^[1~3]。黑云花岗片麻岩为灰白色,呈中粗粒鳞片状变晶结构,片麻状构造,局部眼球状结构;主要矿物成分为石英、斜长石及少量黑云母,抗风化能力较强。角闪斜长片麻岩为深灰、青灰色,中细粒鳞片粒状变晶结构,片麻状构造;主要矿物成分为斜长石、角闪石及少量黑云母,抗风化能力较黑云

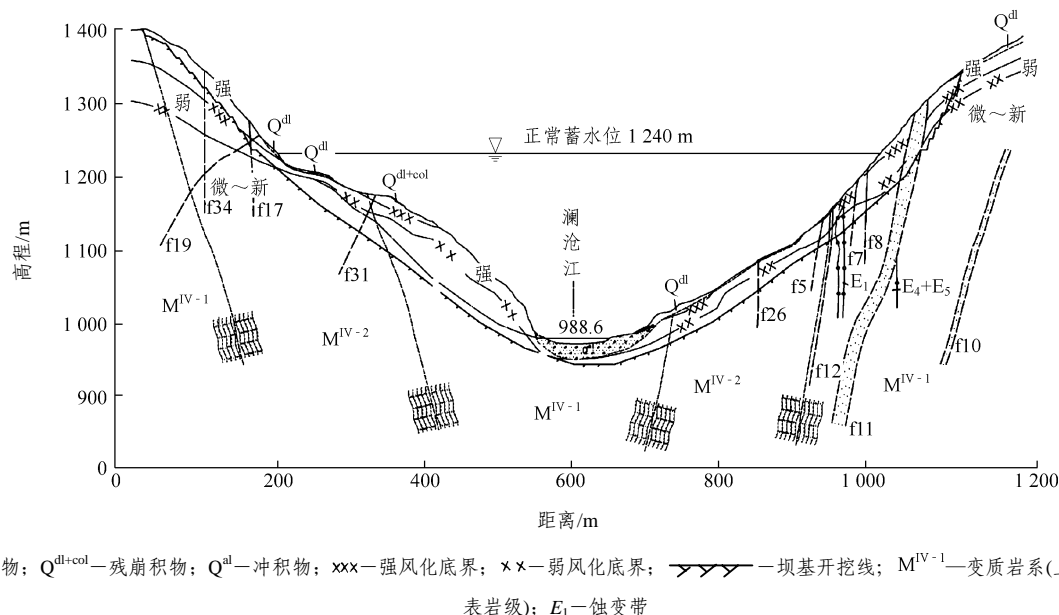


图 1 小湾水电站拱坝中心线工程地质剖面图^[3]

Fig.1 Cross-section of engineering geology along centralline of arch dam in Xiaowan Hydropower Station^[3]

花岗片麻岩弱。片岩包括角闪黑云片岩、角闪片岩和黑云斜长片岩, 为黑灰色、青灰色或浅黑色, 巨粒鳞片状变晶结构, 片状构造; 主要矿物成分为黑云母或角闪石、斜长石, 抗风化能力与所含的矿物成分有关, 以角闪黑云片岩最差。枢纽区变质岩层呈单斜构造横河分布, 陡倾上游。片岩类岩石呈薄透镜状夹杂在片麻岩层中, 其厚度变化大(一般厚 0.10~0.40 m, 个别厚约 7 m)。连续性差, 分布不均匀, 中间夹片麻岩和石英条带或透镜体^[1~3]。

由于枢纽区经受多期构造活动, 断裂构造比较发育。已查明枢纽区无区域性的 I 级断层通过^[1~3], II 级断层仅有一条, III 级断层共 20 条和若干分属 IV, V 级结构面的小断层、挤压面和节理组。III 级结构面以 NWW 走向的陡倾角断层为主, 多属顺层挤压错动性质, 破碎带物质主要由糜棱岩、碎裂岩、角砾岩及断层泥组成。IV 级结构面的小断层和挤压面较发育, 其产状主要分 2 组: (1) 第 1 组: $N70^{\circ}\sim 85^{\circ}W$, $NE\angle 75^{\circ}\sim 90^{\circ}$; (2) 第 2 组: $N10^{\circ}W\sim N10^{\circ}E$, $WE\angle 80^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 。第 1 组(近 EW 向)属顺层错动, 大部分顺片岩类夹层发育。破碎带特征一般是两壁附近有数厘米厚连续分布的岩屑夹泥的软弱物质。该组结构面发育的平均间距, 左岸为 14.5 m, 右岸为 16.4 m, 延伸长度一般大于 40 m。第 2 组(近 SN 向)多属张性, 破碎带宽度一般小于 20 cm, 主要由碎块岩组成, 有少量糜棱岩和不连续泥膜。该组结构面发育的平均间距, 左岸为 19 m, 右岸为 24.2 m。

3 坝基开挖岩体卸荷裂隙的宏观特征

调查发现, 小湾坝基开挖岩体卸荷裂隙的宏观特征如下:

- (1) 沿河谷两岸高程由大变小, 卸荷裂隙倾角由陡逐渐变缓, 在基坑底部近于水平(图 2);
- (2) 两岸卸荷裂隙倾向相反, 相对产出;
- (3) 裂隙面发育与坝基开挖面近于平行, 形成兜底缝。

小湾坝基开挖过程中顺坡向卸荷裂隙倾角随高程变化的统计曲线及照片均较好反映了上述特征(图 2, 3), 在极点等密度图上成对称分布(图 4)。

从高程上来看, 缓倾裂隙倾角具有高程差异分布规律, 如果以高程 1 100 m 为界, $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 倾角主要分布在该高程之下; 而 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 倾角的裂隙在该高程附近发育多; 倾角为 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 的裂隙在 1 100 m 以上边坡中发育(表 1)。



(a) 右岸顺坡向卸荷裂隙



(b) 基坑底部近似水平的卸荷裂隙



(c) 左岸顺坡向卸荷裂隙

图 2 拱肩槽建基面卸荷裂隙发育特征

Fig.2 Characteristics of unloading fissures development in spandrel groove of arch dam abutment

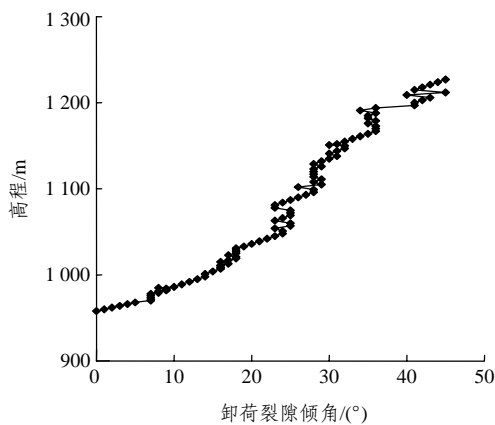


图 3 坝基卸荷裂隙倾角与高程关系曲线^[4]

Fig.3 Relation curve between dip angle of unloading fissures in dam base and elevation^[4]

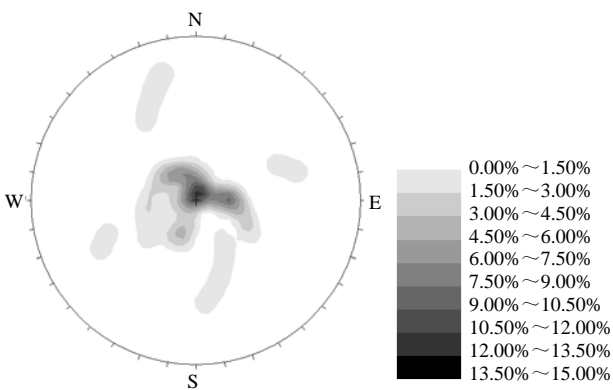


图 4 卸荷裂隙极点等密度图

Fig.4 Poles isodense diagram of unloading fissures

表 1 部分探硐缓倾角裂隙分布统计^[4]

Table 1 Statistics of fissures of gentle dip angle in part exploratory tunnel^[4]

缓倾角裂隙倾向/(°)	统计总数	高程/m	数量
15~30	16	1 000~1 100	11
		1 100~1 245	5
30~45	62	1 000~1 100	26
		1 100~1 245	36
45~60	14	1 000~1 100	4
		1 100~1 245	10

4 坝基开挖岩体卸荷裂隙的分类及其力学机制

根据野外大量的观察发现，开挖岩体卸荷裂隙可以分为三类：一类是继承早期构造裂隙发育，使得早期的构造裂隙面拉开，称之为继生型卸荷裂隙，这种卸荷裂隙多是受张应力作用造成的；一类是受早期构造裂隙控制的，但是在构造裂隙的基础上有所扩展，有时会把不同的构造裂隙连接起来，形成 S 型或者反 S 型，称之为扩展型卸荷裂隙，这种裂隙既有受张应力造成的，也有受剪应力作用造成的，也有二者复合作用造成的；另一类卸荷裂隙是在开挖过程中或者开挖以后新产生的裂隙，称之为新生型卸荷裂隙，多为张应力作用造成。

根据勘探成果，早期的构造节理裂隙在未风化未卸荷岩体中一般闭合，随着坝基岩体开挖卸荷，早期的中缓倾角构造裂隙被拉开，形成了继生型卸荷裂隙和扩展型卸荷裂隙。早期裂隙的运动特点与其继生裂隙倾角和边坡中主应力的夹角相关。由于应力分异作用，边坡表部的应力状态近于二维，最大主应力与边坡表面近于平行^[5]。因此，裂隙的运

动特点主要决定于其继生裂隙倾角和最大主应力的夹角。若继生裂隙的倾角与最大主应力平行，则裂隙会表现为引张的特点，垂直于裂隙面拉开，这类裂隙最为常见(图 5(a))。若继生裂隙的倾角与最大主应力有一定的夹角，则裂隙的运动往往表现为张剪的特点。假定裂隙长轴与最大主应力夹角为 β ，根据 Griffith 准则，则裂隙尖端的生长方向与裂隙长轴延伸方向夹角为 2β ，如图 5(b)所示。有时缓倾结构面会和陡倾结构面组合，表现为缓剪陡张^[6]的特点，如图 5(c)所示，有时单个裂隙也会向两端生长，与相邻裂隙沟通，形成 S 型或者反 S 型，有些地方形成菱形结环，如图 5(d)所示。

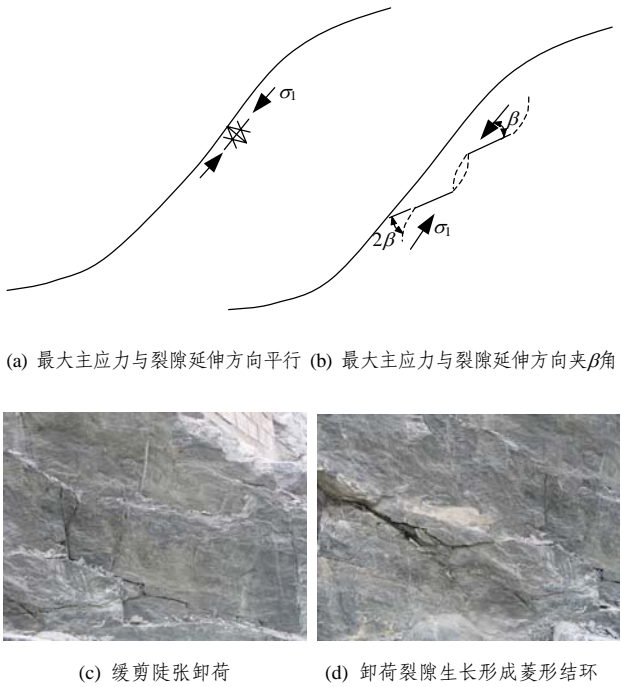


图 5 卸荷裂隙及其形成机制

Fig.5 Unloading fissures and its formation

调查中还发现了新生型卸荷裂隙，典型的现象就是“葱皮”现象。在两岸坝基建基面较完整的块状岩体表面，普遍可以观察到岩体成片状剥离，薄片厚度一般为 0.5~5 cm，形成建基面层次不齐，如鱼鳞状、又如层层剥开的“葱皮”。图 6(a)为左岸建基面上出现的“葱皮”现象。

有人认为，“葱皮”现象是建基面开挖爆破造成的，这不是很全面的看法。调查发现，“葱皮”现象造成的片状剥离类似于片帮，应是蕴含高应变能的岩体在开挖爆破震动作用下的产物，属于开挖卸荷作用的范畴。“葱皮”现象一般在开挖较深的坝基上游侧较明显，当地段高程低而坝基高程较高时明显。

除“葱皮”现象外，还可以见到引张产生的新



(a) 左岸建基面上的“葱皮”现象



(b) 引张的新生型卸荷裂隙

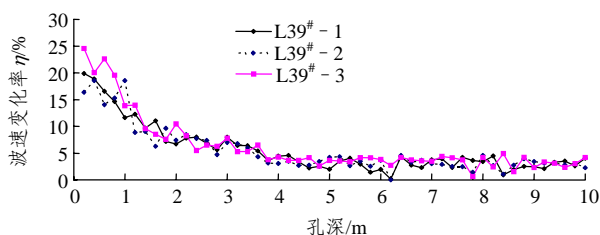
图 6 建基面上的新生型卸荷裂隙

Fig.6 Fresh unloading fissures in dam base

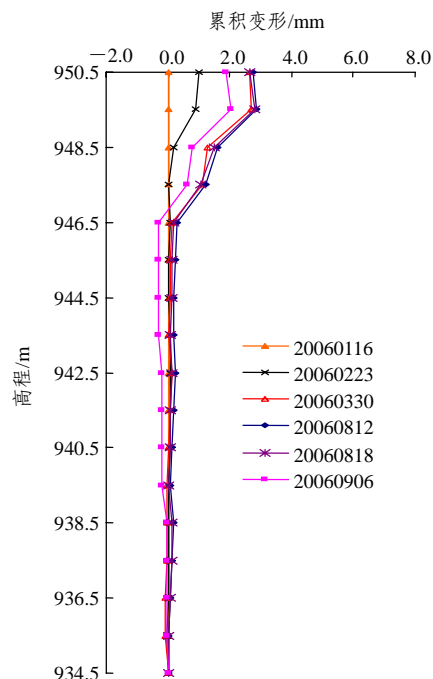
生型卸荷裂隙, 如图 6(b)所示。新生型卸荷裂隙一般产生于近似完整的块状岩体之中。

5 卸荷裂隙发育的空间分布范围

坝基开挖后, 两岸建基面附近岩体均存在卸荷松弛现象。为了研究坝基开挖卸荷的影响范围, 在坝基上共进行了 120 个长期观测孔(其中 30 m 深的孔 16 个, 20 m 深的孔 104 个)、297 个 5 m 浅孔的声波测试工作, 并在左岸布置了 3 个多点位移计和 1 个滑动测微计, 在右岸布置了 6 个多点位移计和 2 个滑动测微计。左岸坝基监测仪器从 2004 年 7 月下旬开始观测, 当时左岸坝基开挖至高程 1 140 m。右岸坝基监测仪器从 2004 年 6 月中旬开始观测, 当时右岸坝基开挖至高程 1 100 m。图 7 为左岸 39 坝

图 7 左岸 39 坝段波速变化率沿孔深的变化曲线图^[7]Fig.7 Curves between wave velocity variation rate and bore hole depth in left No.39 dam section^[7]

段的声波测试结果, 可以看出孔深 3.5 m 以下声波变化率小于 5%, 并趋于稳定, 因此可以认为卸荷裂隙发育底界在该处为 3.5 m。图 8 为右岸 22 坝段的滑动测微计测试结果, 从图 8 可以明显看出, 变形范围的最大深度为 4 m, 累积变形总量不超过 3 mm。

图 8 右岸 22 坝段累积变形随深度的变化^[8]Fig.8 Curves between accumulation deformation and depth in right No.22 dam section^[8]

根据左右岸声波测试资料以及变形监测资料, 可以看出随着两岸坝基的下挖, 建基面以下的岩体都有不同程度的回弹。右岸的回弹量为 3~6 mm, 左岸在 2 mm 以内。回弹量在建基面以下铅直深度 5~10 m 岩体内回弹量几乎占了总量的 50%, 回弹主要集中在几个深度, 初步分析是该深度岩体裂隙张开的结果。根据研究结果, 两岸的卸荷深度差不多, 均不超过 10 m。根据声波资料, 图 9 给出了开挖后坝基卸荷裂隙分布范围。

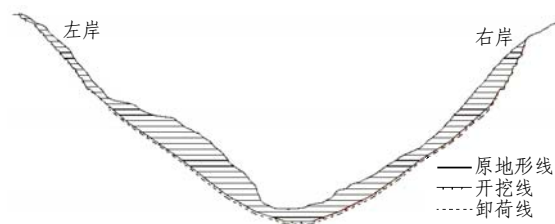


图 9 坝基卸荷裂隙分布范围

Fig.9 Distribution of unloading fissures in dam base

小湾坝基开挖卸荷裂隙发育在空间分布上有以

下特点:

(1) 两岸坝基开挖后均存在卸荷松弛现象, 左岸卸荷松弛现象较普遍且较右岸明显。

(2) 同一岸不同高程的开挖卸荷松弛现象亦有差别, 总体上是高程小的部位较高程大的部位明显, 这是开挖量以及开挖的拱效应共同作用的结果。

(3) 同一高程不同部位的开挖卸荷松弛现象也有所不同, 一般坝踵部位(上游段)较坝趾部位(下游段)明显;

(4) 坝基开挖卸荷松弛现象与岩体的完整性有明显的关系, 在天然状态下较完整的坝基岩体往往集蓄了较高的应力, 开挖后卸荷松弛现象主要位于较完整的岩体中, 而在结构面发育、岩体较破碎的岩体中卸荷松弛现象不明显。

(5) 开挖体型较复杂的部位常有明显的松弛现象, 主要表现在坝基洞口(灌浆洞、排水洞、置换洞等)附近以及地质缺陷槽挖凸出的转角部位。

6 结 论

本文首先分析了坝基开挖卸荷裂隙的宏观特征:

(1) 在小湾水电站坝基开挖中, 当高程由大到小, 卸荷裂隙的倾向由陡逐渐变缓;

(2) 两岸卸荷裂隙倾向相反, 相对产出;

(3) 裂隙面发育与坝基开挖面近于平行, 形成兜底缝。

在此基础上, 把卸荷裂隙分为继生型卸荷裂隙、扩展型卸荷裂隙以及新生型卸荷裂隙三类, 并分析了它们的成生机制, 指出坝基开挖过程中出现的“葱皮”现象本质是高应力在爆破作用下的表象。最后, 通过监测资料和声波分析资料, 给出了坝基开挖卸荷裂隙的分布特征及分布范围, 指出了两岸的卸荷深度均不超过 10 m, 相差不大。

致谢 研究过程中得到中国水电工程顾问集团公司昆明勘测设计研究院的大力协助, 并提供了声波资料和变形监测资料, 在此表示感谢。参加野外工作的同志还有陶波博士、杨小永博士、刘海燕博士、胡秀宏博士, 部分图件由刘春玲女士清绘。感谢审稿人, 他们的意见给作者极大的启发。

参考文献(References):

- [1] 汤献良, 冯汉斌, 杨海江, 等. 小湾水电站枢纽区工程地质条件[J]. 水力发电, 2004, 30(10): 42 - 44.(TANG Xianliang, FENG Hanbin, YANG Haijiang, et al. Engineering geological conditions of Xiaowan Hydropower Project[J]. Water Power, 2004, 30(10): 42 - 44.(in Chinese))
- [2] 黄润秋, 王士天, 胡卸文, 等. 澜沧江小湾水电站——高拱坝坝基重大工程地质问题研究[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996.(HUANG Runqiu, WANG Shitian, HU Xiewen, et al. Significance engineering geological problems of high arch dam——Xiaowan Hydropower Station in Lancangjiang River[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1996.(in Chinese))
- [3] 中国水电工程顾问集团公司昆明勘测设计研究院. 云南澜沧江小湾水电站拱坝坝基 IV 级结构面及开挖卸荷松弛岩体处理措施专题报告[R]. 昆明: 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 2005.(Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co.. Special report of IV structure plane in arch dam base and treatment measures of unloading and relaxation rock mass by excavation in Xiaowan Hydropower Station in Yunnan Lancangjiang river[R]. Kunming: Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., 2005.(in Chinese))
- [4] 柴建峰. 河谷区岩质边坡卸荷变形特征研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2006.(CHAI Jianfeng. Research on unloading character and modes of deformation and failure of slope[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2006.(in Chinese))
- [5] 张俾元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.(ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. Principle of engineering geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.(in Chinese))
- [6] 祁生文, 伍法权. 锦屏一级水电站普斯罗沟左岸深部裂缝变形的细观力学模式[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 817 - 820.(QI Shengwen, WU Faquan. Deep fracture deformation models of Pusiluogou left abutment slope at Jinping first stage hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 817 - 820.(in Chinese))
- [7] 中国水电工程顾问集团公司昆明勘察设计院. 小湾坝基左岸声波测试报告[R]. 昆明: 中国水电顾问集团昆明勘察设计院, 2005. (Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co.. Acoustic wave test report of dam base of Xiaowan Hydropower Station[R]. Kunming: Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., 2005, (in Chinese))
- [8] 中国水电工程顾问集团公司昆明勘察设计院. 小湾水电站大坝坝基变形监测成果汇报[R]. 昆明: 中国水电顾问集团昆明勘察设计院, 2006.(Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co.. Deformation Monitor of arch dam base of Xiaowan Hydropower Station[R]. Kunming: Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., 2006.(in Chinese))

[1] 汤献良, 冯汉斌, 杨海江, 等. 小湾水电站枢纽区工程地质条件[J]. 水力发电, 2004, 30(10): 42 - 44.(TANG Xianliang, FENG Hanbin,