

高地应力环境下坚硬岩体河床坝基开挖的变形破坏机理研究*

吴琦^① 夏雄彬^② 吴艺楠^③

(^①华北水利水电大学资源与环境学院 郑州 450011)

(^②中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院 昆明 650051)

(^③西北农林科技大学资源环境学院 杨凌 712100)

摘要 小湾水电站坝基岩体在开挖过程中, 暴露出一系列的变形破坏现象, 主要表现为“板裂”、表面岩爆、沿已有裂隙张开、扩展和错动等。在对上述变形现象分析的基础上, 研究了高地应力环境下坝基岩体开挖的地质力学响应, 发现: 河床坝基岩体在开挖过程中所表现出的变形主要集中在坝基浅表, 且具有时效性。根据变形破坏现象分析和变形响应研究, 对高地应力环境下坚硬岩体河床坝基开挖的变形破坏机理有了新的认识, 是河谷下切和开挖卸荷过程中的应力重分布造成的浅表生改造的结果。最终, 将河床坝基岩体的变形破坏归纳为“压致拉裂—卸荷回弹”模式, 且以压致拉裂为主。

关键词 高地应力 坚硬岩体 坝基开挖 变形破坏

中图分类号: TU4 文献标识码: A

DEFORMATION AND DAMAGE OF HARD ROCK MASS RIVER BED DUE TO DAM FOUNDATION EXCAVATION UNDER HIGH IN-SITU STRESS

WU Qi^① XIA Xiongbin^② WU Yinan^③

(^①School of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011)

(^②HydroChina Kunming Engineering Corporation, Kunming 650051)

(^③College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100)

Abstract The rock mass forming the dam foundation of Xiao Wan hydroelectric station during excavation revealed a series of deformation and fracture phenomena. It mainly behaved as a “split plate” and surface rock bursts, and cracks along the existing structure, expansion and dislocation, and so on. On the basis of the analyses of the above-mentioned phenomena, this paper studies the geological mechanic response of the rock mass due to the dam foundation excavation in the high in-situ stress environment. It is found that the rock mass deformation during excavation is mainly concentrated on the shallow surface of the dam foundation, which has time effect characteristics. According to analyses of deformation-destruction phenomenon and the study of deformation responses, the mechanism of deformation-destruction is understood. The mechanism applies to the excavation of the hard rock river bed of the dam foundation in the high in-situ stress environment. Shallow and superficial transformation result from the stress redistributed during down-cutting of river and unloading of excavation. Ultimately, it can be summarized that the deform-

* 收稿日期: 2013-02-25; 收到修改稿日期: 2013-08-26.

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201301034)资助.

第一作者简介: 吴琦, 从事地质工程方面研究. Email: 495426367@qq.com

ation and fracture of river bed are a “pressure rupture-unloading rebound” model, and the pressure-rupture is the main type.

Key words High ground stress, Hard rock mass, Dam foundation excavation, Deformation and damage

1 引言

工程开挖会引起岩体的应力释放、卸荷变形和损伤破坏,不仅使岩体的变形与强度特性劣化,影响其质量和完整性,而且还可能改变岩体结构^[1]。高地应力环境下的开挖会使岩体的应力释放、变形和损伤破坏等比常规地应力条件更加显著。例如,拉西瓦水电站位于高地应力区,为减少坝基开挖后的卸荷回弹,选择了减轻坝基卸荷破坏程度的开挖方式^[2];二滩电站坝区存在高地应力现象,开挖过程中产生一系列与应力释放有关的变形和破坏^[3];小湾坝基开挖引起岩体强烈卸荷变形破坏的前提条件就是高地应力背景、坚硬的岩体、大规模开挖^[4]。

针对小湾坝基开挖卸荷现象,许多学者进行了研究。例如,李朝政等^[5]通过现场和室内多种试验研究了小湾水电站松弛岩体抗剪特性;任爱武等^[6]针对小湾坝基开挖卸荷现象提出了相应力学模式;林锋等^[7]根据试验结果研究了小湾水电站低高程坝基开挖卸荷松弛机理;周华等^[8]采用三维非线性有限元法对卸荷松弛效应进行了评价;杨根兰等^[9]采用三维数值模拟,分析了开挖卸荷条件下小湾坝基岩体变形破坏特征,确定出河床坝基开挖卸荷影响深度及强度。

在前人研究成果基础上,本文对小湾水电站河床坝基开挖的变形破坏机理和模式进行研究。本文所说的河床坝基是指位于河谷中部 980m 高程以下的部分,包括河谷中部的 21#、22#、23#和 24#坝段。

2 工程地质概况

小湾水电站坝址区位于澜沧江的中游,河谷总体呈“V”字型,两岸岸坡上缓下陡。河床坝基设计开挖到 955m 高程,最底部呈水平状,向上顺山势变陡,总体上呈相对宽缓的弧形(图 1)。

坝址区基岩以黑云花岗岩片麻岩和角闪斜长片麻岩为主,均夹呈薄层透镜状分布的片岩夹层,在新鲜完整状态下均属坚硬类岩石。岩层呈单斜构造,横河分布,总体产状为 $280^{\circ} \angle 75^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。

坝址区地质构造主要受古老东西向构造体系控



图 1 小湾水电站河床坝基开挖面貌及浅表部近似平行建基面的缓倾角卸荷裂隙

Fig. 1 Excavation face of Xiaowan hydropower station dam foundation and the superficial part of approximate parallel foundation inclined unloading fracture

制,构造线方向 EWW。节理发育,主要有 3 组,第 1 组为近 SN 向陡倾角节理;第 2 组为近 EW 向陡倾角节理;第 3 组为顺坡向中缓倾角节理,该组节理在微风化—新鲜岩体内延伸短小。

通过地应力场测试得出:最大主应力 σ_1 的方向,浅表部为 NE 向,向坡内 >200m 深度后变成 NW 向。 σ_1 量级表层为 8.2~11.2MPa;中埋深为 16.3~17.3MPa;深埋为 16.4~26.7MPa。总体上最大主应力与河流流向近于垂直。

小湾水电站边坡开挖采用了预裂爆破技术,通过两个月的爆破实验,不断地调整爆破参数和优化改进爆破工艺,边坡开挖爆破效果得到明显的改善,开挖面无爆破裂隙出现^[10]。

3 开挖变形现象分析

河床坝基开挖后,浅表部岩体表现出如下几种形式的卸荷松弛和变形破裂现象:

3.1 “板裂”现象

开挖后,低高程坝基浅表部普遍可见岩体“板裂”现象,该现象可分为两类:(1)新生裂隙形成的“板裂”;(2)沿先期隐裂隙形成的“板裂”。

3.1.1 新生裂隙形成的“板裂”

这类“板裂”可分为两种情况:当开挖面平顺时(图 2a)，“板裂”呈薄板状,岩板厚度一般 3~20cm,

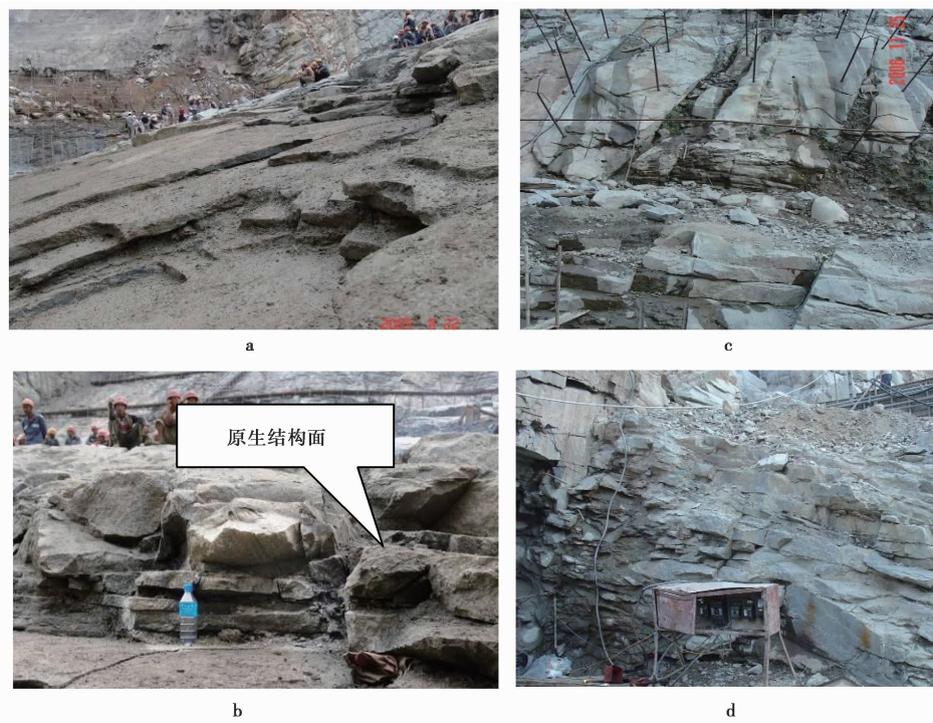


图2 “板裂”现象

Fig. 2 “Board split” phenomenon

a. 河谷底部开挖, 开挖面平顺; b. 左岸坝基下游侧缺陷槽开挖; c. EL965~970m 水垫塘开挖面; d. 水垫塘左岸 955m 主排水洞洞口下

主要出现在河床坝基面表层; 当坝基面有局部横向临空条件时 (图 2b、图 2c), “板裂”呈厚板状, 由于受近 EW 向陡倾结构面的限制, 延伸不大。这类“板裂”形成一般在开挖完后开始, 有一定的时间效应, 一般 1~2d。

3.1.2 沿先期隐裂隙形成的“板裂”

主要发育在坝基面内规模较大的缺陷槽周围 (图 2d), “板裂”呈中厚板状, 且表部岩体松弛。开挖完成后, 隐裂隙闭合, 显现出岩体较完整; 随着时间的推移, 由于受卸荷作用的影响, 暴露出显裂隙, 显现出中厚层岩板; 随着时间的进一步推移, 显现出松弛特征。从整个发展过程看, 时间效应很明显^[11, 12]。

3.2 岩爆现象

河床坝基开挖过程中, 局部曾经 3 次发生了岩爆现象^[11, 12] (图 3)。

3.3 沿已有裂隙错动、张开和扩展

在坝基开挖前, 坝基岩体中的缓倾角结构面在低高程产状近水平 (一般为 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$), 呈现“似层状”结构特征, 开挖后浅表层岩体明显卸荷松弛, 缓



图3 右岸建基面 962m 高程发生的岩爆

Fig. 3 Rock burst on the right bank foundation at 962m elevation

倾裂隙普遍有张开现象, 且随暴露时间增长, 裂隙张开宽度明显增加, 且有贯通趋势。

近 EW 向陡倾角结构面横向分布, 导致该组结构面两侧的岩体由于向临空面方向不均匀变形而发生剪切错动或张开。当坝基开挖局部加深, 如缺陷槽开挖、撬挖以及排水洞施工等 (图 4), 该组结构面作为侧向边界, 在一定程度上可以限制卸荷向深处发展。

近 SN 向中缓倾角裂隙, 倾向坡外, 倾角一般小于开挖面坡角。开挖面附近, 该组裂隙因岩体差异卸荷回弹导致其张开、蠕滑松弛及局部块体的失稳 (图 5) 等。

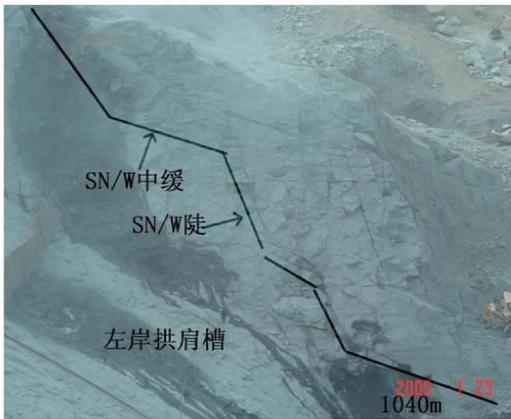


图4 左岸坝基下游侧缺陷槽开挖

Fig. 4 Defect excavation on downstream side of the left dam foundation



a



b

图5 坝基岩体的局部蠕滑松弛现象

Fig. 5 Local creep relaxation phenomena on the dam foundation rock mass

a. 河床建基面岩体的蠕滑松弛; b. 左岸缺陷槽附近的蠕滑松弛

综上所述,差异回弹导致岩体新裂隙的产生和先期隐裂隙的张开,卸荷发展到一定程度,致使浅表层岩体内缓倾角结构面的张开、贯通和卸荷松动。

4 坝基变形响应分析

4.1 原开挖方案完成后的河床坝临时滑移测微计成果分析

2005年8月12日坝基原开挖方案基本完成。之后,在21[#]、22[#]和23[#]坝段坝基中心线附近,埋设了3个滑动测微计 A21-HV、A22-HV 和 A23-HV,用于临时监测,孔口高程分别为 952.278m、951.997m 和 952.158m。首次监测是在 2005年9月25日,但由于 975m 高程以下开始二次开挖(2005年10月17日以后)破坏了临时监测孔,实际监测维持了1个月左右。3个孔的监测成果(图6)表明:

(1)回弹变形主要发生坝基开挖面以下0~3m范围内,表现为裂隙张开;3m以下,卸荷回弹变形程度明显降低。

(2)坝基卸荷回弹变形具有明显的时间效应^[11,12]。

4.2 河床坝基多点位移计监测成果分析

为指导施工初期坝基固结灌浆和大坝混凝土浇筑,在河床22[#]和23[#]坝段 EL.950.5m 布置了6套6测点式多点位移计(图7)。但多点位移计首次监测的时间比较晚,首次监测最早的在2006年6月21日,此时大坝混凝土盖重层接近10m,至2006年8月,混凝土盖重层约30m左右。多点位移计和前述滑移测微计监测结果显示:坝基向上回弹变形已经抑制,并开始回压。监测成果表明:变形量最大的区段在开挖面以下0~3m范围内。

5 岩体开挖变形机理及模式

前述的变形规律分析表明,河床坝基岩体开挖变形主要沿河谷底部的缓倾角结构面而产生的,而缓倾角结构面主要是河谷自然下切时岩体的浅表生改造的结果,因此,要说明河床坝基岩体开挖变形机理,首先,需要了解河谷底部缓倾角结构面的形成过程和机制。河谷底部的缓倾角结构面主要形成过程可以用图8所示机制模型来解释。随着河谷下切,河谷底部附近应力场为适应新的平衡而进行调整,形成二次应力场。谷底应力集中,且最大主应力近于水平,最小主应力近于垂直河谷底面。在这样的天然应力环境下,谷底新缓裂的形成和发展大体可以分为两个阶段,首先,在坝基开挖的情况下,最小

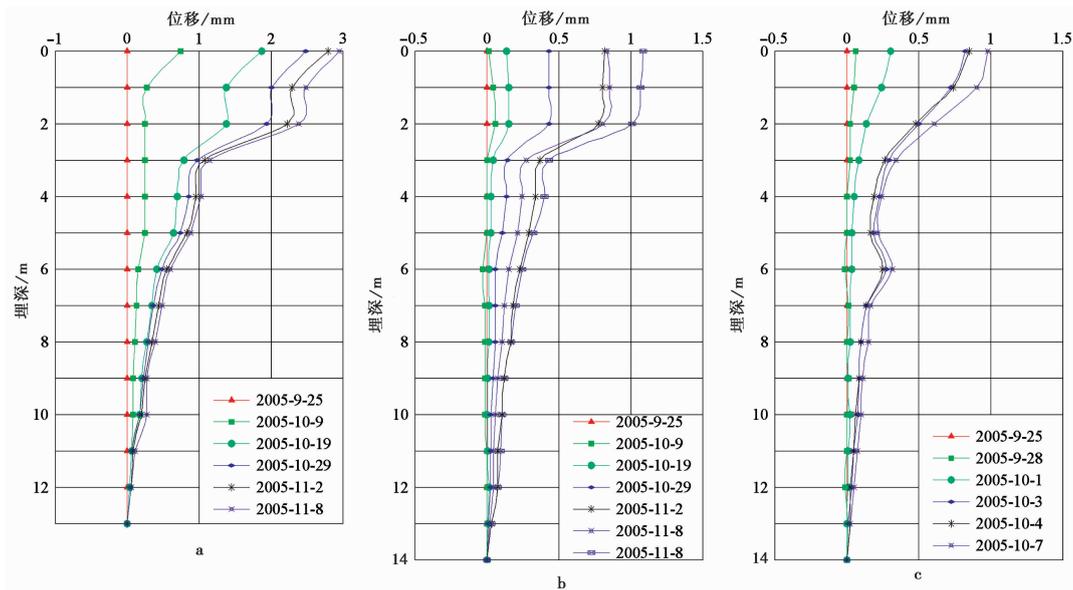


图 6 滑动测微计时间—位移—深度曲线

Fig. 6 Temporary sliding micrometer time-displacement-depth curve

a.21#坝段; b.22#坝段; c.23#坝段

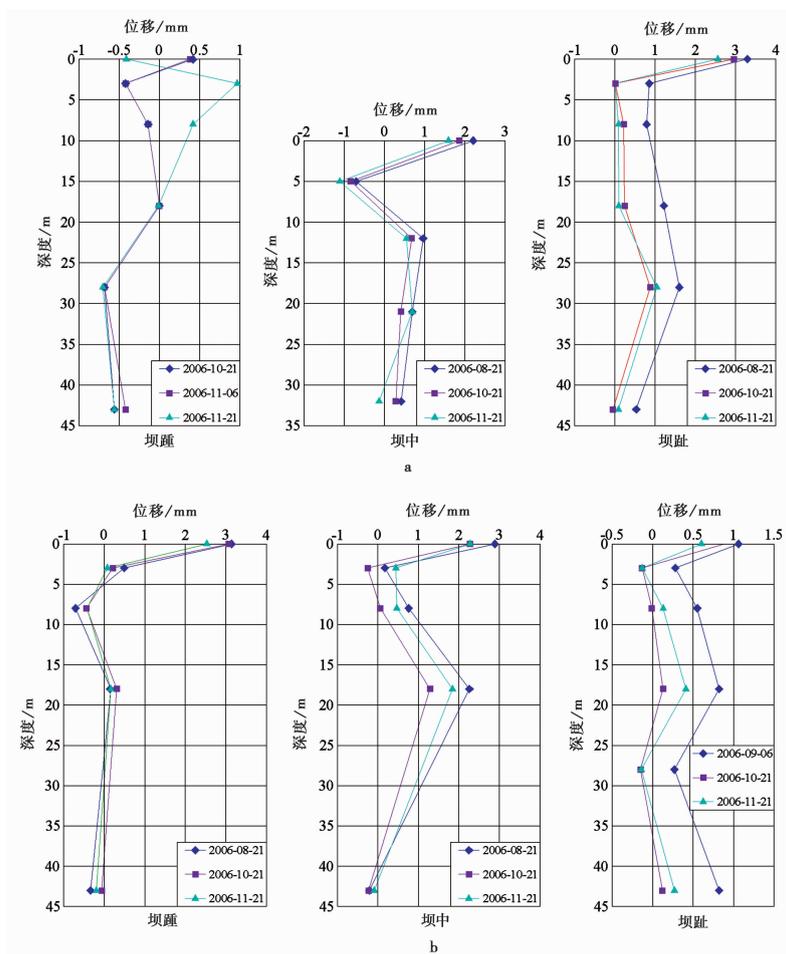


图 7 多点位移计监测的不同深度测点位移

Fig. 7 Displacements at different depth measurement points with multi-point extensometer monitoring

a.22#坝段; b.23#坝段

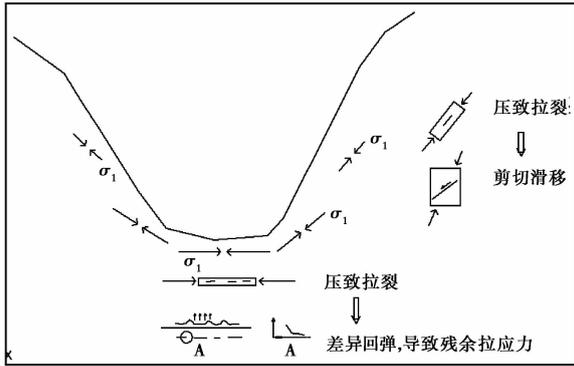


图8 缓倾角结构面表生改造机制模型

Fig. 8 Surface modification mechanism model of inclined structural surface

主应力进一步减小,至开挖面表面为零。随着最小主应力减小,坝基浅表部岩体基本处于两向受压状态(图8),当满足格里菲斯强度准则的压致拉裂破坏条件时,形成新生裂隙;其次,由于新生缓裂的存在,导致浅表层岩体出现差异卸荷回弹,从而在裂隙端部出现拉应力,当拉应力达到一定量级时,岩桥被拉断,造成缓裂扩展及贯通^[11, 12]。

从变形现象的分析中可以看出,河床坝基岩体首先表现出“板裂”现象,而这种现象在河谷底部主要是由于压致拉裂造成的;其次,在岩体完整、应力局部进一步集中的部位发生了岩爆,而岩爆正是应力突然释放、变形更加剧烈的表现;第三,缓裂普遍表现出张开和差异回弹,使缓裂张开度和贯通性增加。

变形响应的分析表明,河谷底部开挖之后,建基面岩体表现出上抬的变形,该变形主要是由于缓倾裂隙松弛张开而引起,且具有明显的时间效应,随暴露时间增长,裂隙张开宽度明显增加。坝体混凝土浇筑之后,上覆盖重增加,缓裂趋于闭合。

为验证上述分析,对坝址区河谷下切和坝基开挖过程进行了数值模拟,坝基开挖的模拟结果表明:河床坝基岩体开挖之后,河谷底部附近应力场在二次应力场的基础上进一步调整,首先是谷底的应力集中依然存在,应力方向无大的变化;其次,由于河谷开挖,建基面岩体上覆盖重减小,造成最小主应力进一步减小,甚至出现拉应力;最大主应力和中间主应力虽然也有所减小,但幅度不大。应力场调整的结果:压致拉裂依然存在,在此基础上又叠加了卸荷回弹变形。另外,拉裂缝的产生和扩展可以用格里菲斯强度理论来判断。从考虑抗拉强度为3MPa的格里菲斯破坏区图中(图9)可见,当坝基岩石的

抗拉强度较大,格里菲斯破坏区仅限于开挖面浅表层,考虑到小湾坝基岩体特性,其抗拉强度应不低于3MPa,则格里菲斯破坏区的发育深度为表层3~7m;如果坝基岩体抗拉强度较小,则格里菲斯破坏区会向两岸坡脚方向和坝基深部扩展。一般开挖面表层岩体质量会有降低,而深部岩体质量不会明显改变,这样,格里菲斯破坏区的实际扩展方向为向两侧坡脚方向扩展,向坝基深处的扩展程度是有限的,即只会在低高程坝基表层发生卸荷松弛,其主要方式为压致拉裂式破坏。

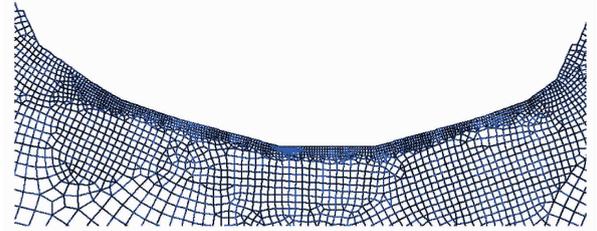


图9 河谷岸低高程岸坡据格里菲斯强度理论的破坏单元分布图

Fig. 9 Failure unit distribution map according to the Griffith theory of strength in valley bank of low-elevation slope
岩体抗拉强度为3MPa的破坏区分布,局部放大

6 结论

通过对高地应力环境下坚硬块状岩体河床坝基开挖的变形现象、变形响应、变形破坏机理及模式的研究,得到如下主要认识:

(1)河谷下切过程中,坝基岩体浅表生改造对河床坝基岩体结构影响较大,具体表现为缓倾角结构面的产生和贯通,这是开挖过程中河床坝基岩体变形破坏的基础。

(2)开挖过程中,河床坝基岩体的变形破坏表现为“板裂”现象、岩爆、沿已有结构面的张开和卸荷回弹,总体上变形以缓裂的变形为主,深度较浅。

(3)变形监测结果表明,河床坝基岩体变形主要是缓倾角裂隙的张开和扩张,且具有时效性。

(4)数值模拟结果表明,坝基开挖过程中,谷底的应力集中依然存在,应力方向无大的变化;由于建基面岩体上覆盖重减小,造成最小主应力进一步减小,甚至出现拉应力;最大主应力和中间主应力虽然也有所减小,但幅度不大。用格里菲斯强度理论来判断,格里菲斯破坏区的发育深度为表层3~7m。

(5)综合几个方面的结果,可以将开挖过程中

河床坝基岩体的变形破坏归纳为“压致拉裂+卸荷回弹”模式,且以压致拉裂为主。

参 考 文 献

- [1] Sheng Q, Yue Z Q, Lee C E. Estimating the excavation disturbed zone in the permanent shiplock slopes of the Three Gorges project, China[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, **39**(2): 165~184.
- [2] 董彬, 侯先廷, 王裕彪. 拉西瓦水电站混凝土双曲高拱坝坝基开挖[J]. 水力发电, 2007, **33**(11): 59~60.
Dong Bin, Hou Xianting, Wang Yubiao. Foundation excavation of high double-curvature arch dam of Laxiwa hydropower station. Water Power, 2007, **33**(11): 59~60.
- [3] 袁志君. 高地应力对坝基岩体稳定的影响[J]. 四川水力发电, 1999, **18**(3): 25~27.
Yuan Zhijun. Influence of high in-situ stress on stability of dam foundation rock. Sichuan Water Power, 1999, **18**(3): 25~27.
- [4] 伍法权, 刘彤, 汤献良, 等. 坝基岩体开挖卸荷与分带研究——以小湾水电站坝基岩体开挖为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(6): 1091~1098.
Wu Faquan, Liu Tong, Tang Xianliang, et al. Research on unloading and zonation of rock mass dam foundation excavation: A case study of Xiaowan hydropower station. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(6): 1091~1098.
- [5] 李朝政, 沈蓉, 李伟, 等. 小湾水电站坝基卸荷岩体抗剪特性研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(增): 485~490.
Li Chaozheng, Shen Rong, Li Wei, et al. Research on shear resistance of dam foundation unloading rockmass of Xiaowan hydropower station. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(S): 485~490.
- [6] 任爱武, 伍法权, 王东, 等. 大规模岩体开挖卸荷现象及其力学模式分析[J]. 长江科学院院报, 2009, **26**(5): 34~36.
Ren Aiwu, Wu Faquan, Wang Dong, et al. Analysis on unloading phenomenon of rock excavation and its mechanics model of Xiaowan power station. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, **26**(5): 34~36.
- [7] 林锋, 黄润秋, 蔡国军. 小湾水电站低高程坝基开挖卸荷松弛机理试验研究[J]. 工程地质学报, 2009, **17**(5): 606~611.
Lin Feng, Huang Runqiu, Cai Guojun. Experimental study for unloading and relaxation of dam base during excavation at Xiaowan hydropower station. Journal of Engineering Geology, 2009, **17**(5): 606~611.
- [8] 周华, 王国进, 傅少君, 等. 小湾拱坝坝基开挖卸荷松弛效应的有限元分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(4): 1175~1180.
Zhou Hua, Wang Guojin, Fu Shaojun, et al. Finite element analysis of foundation unloading and relaxation effects of Xiaowan arch dam. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(4): 1175~1180.
- [9] 杨根兰, 黄润秋, 林锋, 等. 西南某电站河床坝基开挖卸荷条件下变形破坏的数值分析[J]. 工程地质学报, 2007, **15**(3): 356~361.
Yang Genlan, Huang Runqiu, Lin Feng, et al. Numerical analysis for deformation damage in hydropower station dam foundation due to excavation in southwest China. Journal of Engineering Geology, 2007, **15**(3): 356~361.
- [10] 王应周. 小湾水电站高边坡开挖预裂爆破施工[J]. 水利水电施工, 2008, **110**(4): 6~9.
Wang Yingzhou. High slope excavation blasting construction of Xiaowan hydropower station. Construction of Hydroproject, 2008, **110**(4): 6~9.
- [11] 林锋, 黄润秋, 吴琦, 等. 小湾水电站坝基缓倾角结构面地质模型研究[R]. 成都: 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 2006.
Lin Feng, Huang Runqiu, Wu Qi, et al. Study on the Geological Model about Low-Angled Structural Planes of Dam Foundation of Xiaowan Hydropower Station. Chengdu: National Laboratory of Geohazards Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, 2006.
- [12] 蔡国军. 澜沧江小湾水电站坝基岩体结构面发育机理及其工程地质特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
Cai Guojun. Study on Genesis and Engineering Geological Characteristics of the Rock Mass Discontinuities in the Dam Foundation of Xiaowan Hydropower Station of Lancang River. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.