

某水电站引水隧洞出口高边坡 变形机理研究

陈兴周¹, 柴军瑞¹, 白俊光²

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

摘要: 在运行过程中,某水电站引水隧洞出口高边坡监测数据显示,边坡中上部出现了反常的向上游变形的趋势,此种变形有别于一般边坡的变形规律.在详细分析地质资料、监测数据和外界影响因素的基础上,对引水隧洞出口高边坡的变形机理进行了深入探讨,结果发现1998年库区遭遇的千年一遇的洪水是边坡变形趋势改变的重要诱因,边坡上硬下软的岩体构造特性和充分发育的层间剪切带是其变形的内在原因,边坡岩体的卸荷流变、库水位变化、降雨和泄洪雾化、岩体风化、水-岩长期作用等是变形发展的外界因素.目前,边坡各监测点的变形基本趋于稳定,但在后期运行过程中边坡变形发展趋势仍然值得关注.因此,必须坚持长期监测,发现异常情况应及时分析处理.

关 键 词: 引水隧洞; 高边坡; 变形机理

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)02-0033-06

大型水利水电工程建设中,开挖往往会形成大量岩体结构复杂、稳定性差的边坡,在降雨及工程开挖影响下,出现不同规模的变形或失稳现象,严重影响工程建设和运行期间的安全.例如,锦屏一级水电站各个水工建筑物岩体在开挖过程中将形成一系列高边坡,自然边坡达到1 000 m,开挖边坡的高度达到了300~500 m,边坡变形机理与稳定性问题十分突出^[1-2].因此,研究水电工程高边坡的变形破坏机理,对边坡治理设计与工程运营安全具有重要的工程价值.本文拟研究的引水隧洞出口开挖边坡高达170~220 m(如图1所示),引水隧洞出口及电站厂房均布置在高边坡坡脚位置附近,是水电站的关键性部位之一.引水隧洞出口开挖边坡不但坡高而且范围大,一旦失稳,将对整个工程的建设 and 运行带来难以设想的后果.高边坡开挖始于1987年3月,1991年1月完成,1993年4月开始蓄水,1996年6月达到正常蓄水位200 m高程;为确保电站建筑物安全运行,在施工期开始即对开挖边坡进行了现场监测.施工期和蓄水期的监测结果分析表明,高边坡的总体变形趋势是比较符合常规的,一些学者也从监测资料分析和稳定性计算等方面^[3-7]对该边坡进行了相关分析和评价,结果表明该边坡总体是稳定的;但是,1998年下半年以来,边坡中上部岩体逐渐出现反常的朝向上游侧的变形趋势,这与一般边坡开挖后岩体向临空侧(即下游方向)变形的规律是不同的;然而,目前针对此问题的研究相对较少.因此,本文拟从边坡岩体特殊的地质构造和外部影响因素入手,对边坡



图1 高边坡工程照片

Fig. 1 The engineering photo of the high slope

引水隧洞出口开挖边坡高达170~220 m(如图1所示),引水隧洞出口及电站厂房均布置在高边坡坡脚位置附近,是水电站的关键性部位之一.引水隧洞出口开挖边坡不但坡高而且范围大,一旦失稳,将对整个工程的建设 and 运行带来难以设想的后果.高边坡开挖始于1987年3月,1991年1月完成,1993年4月开始蓄水,1996年6月达到正常蓄水位200 m高程;为确保电站建筑物安全运行,在施工期开始即对开挖边坡进行了现场监测.施工期和蓄水期的监测结果分析表明,高边坡的总体变形趋势是比较符合常规的,一些学者也从监测资料分析和稳定性计算等方面^[3-7]对该边坡进行了相关分析和评价,结果表明该边坡总体是稳定的;但是,1998年下半年以来,边坡中上部岩体逐渐出现反常的朝向上游侧的变形趋势,这与一般边坡开挖后岩体向临空侧(即下游方向)变形的规律是不同的;然而,目前针对此问题的研究相对较少.因此,本文拟从边坡岩体特殊的地质构造和外部影响因素入手,对边坡

收稿日期: 2012-10-09

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金资助项目(50579092);教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(N2CET-05-0679)

作者简介: 陈兴周(1980-),男,陕西周至人,博士研究生,主要从事边坡与岩土体渗流方面研究.

E-mail: xzchen0416@163.com

出现此类变形的机理进行深入研究.

1 高边坡监测数据分析

高边坡监测测点布置见图 2,一共布置了 4 个监测断面,21 个监测点.引水隧洞出口高边坡分为正面边坡和侧面边坡,其中 I-I 和 III-III 断面在东侧边坡,测点分别布置在 165.00,180.00,195.00 和 210.00 m 高程;IV-IV 和 V-V 断面在引水洞出口边坡的 1#~4#引水隧洞之间,测点分别布置在 128.00,150.00,165.00,180.00,195.00 和 206.00 m 高程.每个断面在不同高程的马道上,仅布置了 1 个测点,利用连续垂线监测边坡的水平变形.

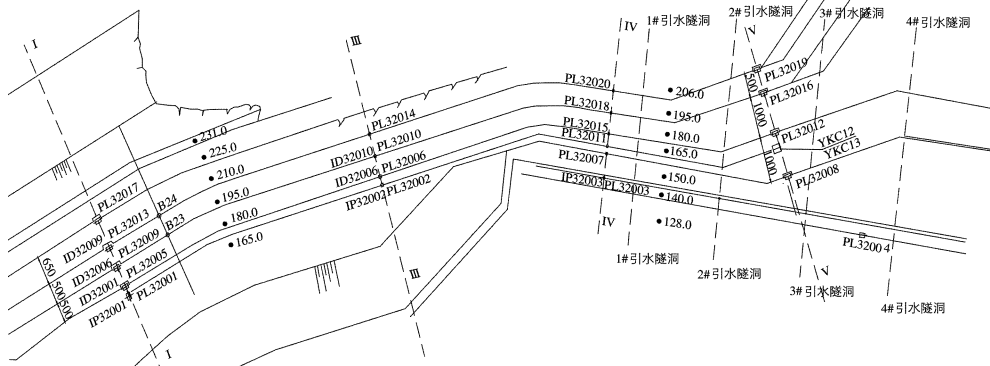


图 2 变形监测平面布置图(单位:m)
Fig.2 Schematic diagram for arrangement of slope monitoring points (unit:m)

本文列出了 1998 年以来的监测数据(见表 1),部分典型测点的监测变形趋势见图 3.结合表 1 和图 3 可见,自 1998 年底开始,引水隧洞出口高边坡中上部变形总体呈现倾向上游侧的趋势,而且这个趋势一直持续到 2001 年左右才逐渐趋于稳定,这个变形趋势明显有别于一般边坡的变形.因此,有必要对此进行深入研究.

表 1 监测结果
Tab.1 Monitoring results

断 面	测点编号	测点高程/ m	上下游变形/ mm			
			最小值	最大值	变 幅	变形方向
I	IP32001	165.00	-1.78	1.85	3.63	倾向下游
	PL32005	180.00	-1.24	0.27	1.51	倾向上游
	PL32013	210.00	-1.82	1.20	3.02	倾向上游
	PL32017	226.10	-1.27	2.37	3.64	倾向上游
III	IP32002	165.00	0.13	1.74	1.61	倾向下游
	PL32006	180.00	-0.80	1.19	1.99	倾向下游
	PL32010	195.00	-1.37	1.39	2.76	倾向上游
	PL32014	210.00	4.50	6.29	1.79	倾向下游
IV	PL32011	165.00	-0.46	3.01	3.47	倾向上游
	PL32015	180.00	-0.21	4.21	4.42	倾向上游
	PL32018	195.00	-1.53	3.83	5.36	倾向上游
	PL32020	206.00	-1.07	7.82	8.89	倾向下游
V	IP32004	128.00	-3.06	0.19	3.25	倾向下游
	PL32008	165.00	-2.63	3.73	6.36	倾向上游
	PL32012	180.00	-1.84	4.09	5.93	倾向上游
	PL32016	195.00	-3.26	0.93	4.19	倾向上游
	PL32019	206.00	-1.68	5.84	7.52	倾向上游

注: 向下游为正,向上游为负.

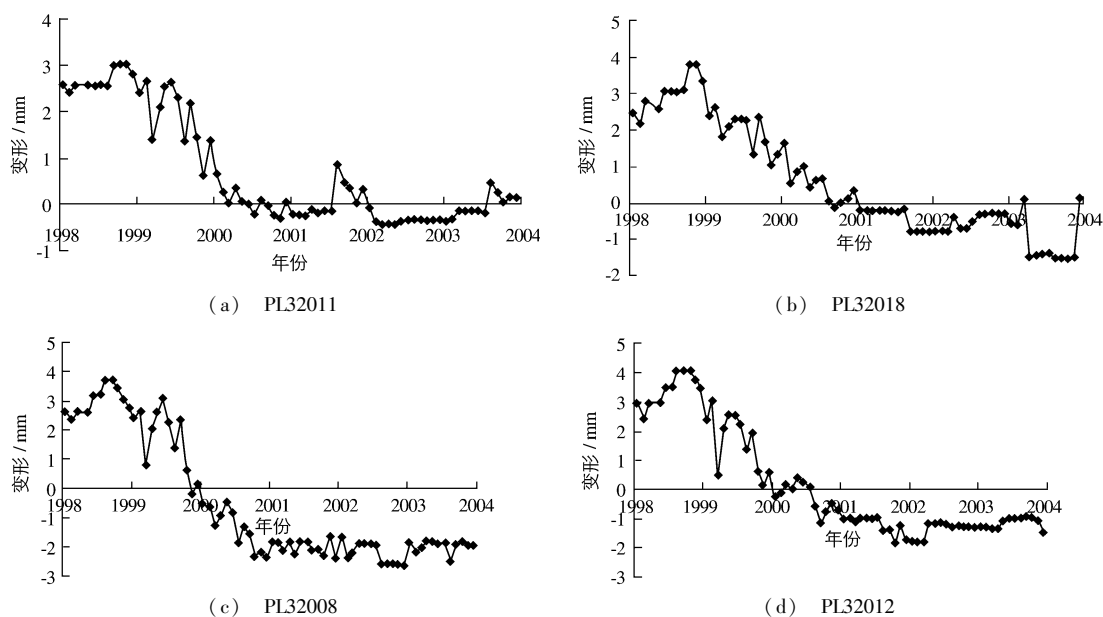
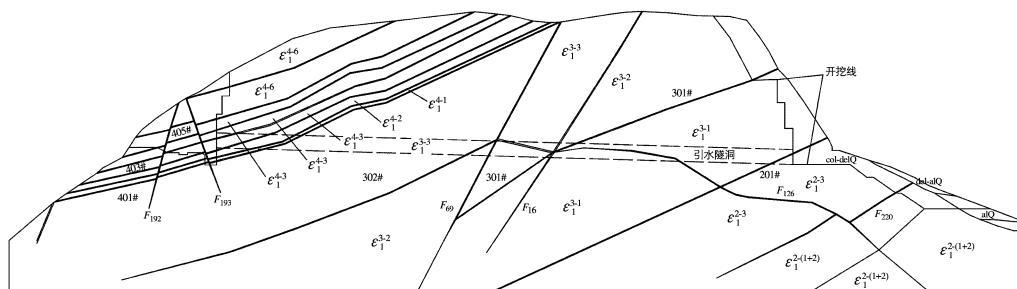


图3 河流向变形过程曲线

Fig. 3 Deformation curve along the river

2 高边坡地质岩性构成分析

高边坡的典型地质剖面如图4所示,边坡为逆向坡,上部为坚硬的石龙洞灰岩,下部为软弱的石碑页岩,岩层走向 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$,倾南东,倾角 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$. 引水洞进水口底板高程142.50 m,隧洞段山体完整,高程175~245 m,上覆岩体厚达25~100 m. 隧洞出口底板高程128 m,走向北东 70° 转北东 30° ,坡面倾向北西,平均坡度50余度,陡壁高60~80 m,灰岩陡壁以下为页岩,呈 $30^{\circ} \sim 38^{\circ}$ 左右的缓坡. 地形为上陡下缓边坡形态,坡脚地面高程87 m,坡顶处地面高程210~230 m.



平善坝组: ϵ_1^{4-1} -灰绿色、黄绿色板状砂质页岩及细砂岩; ϵ_1^{4-2} -深灰色厚层粗粒鳞状灰岩; ϵ_1^{4-3} -灰绿色页岩; ϵ_1^{4-4} -深灰色薄层泥质条带灰岩; ϵ_1^{4-5} -灰绿色钙质页岩; ϵ_1^{4-6} -灰色、深灰色薄层泥质条带灰岩;石龙洞组: ϵ_1^{3-1} -深灰色厚层及薄层泥质条带白云质灰岩夹少量细粒鳞状灰岩; ϵ_1^{3-2} -深灰色薄层泥质条带灰岩; ϵ_1^{3-3} -深灰色厚层泥质斑纹硅质、白云质灰岩;石碑组: ϵ_1^{2-1} -灰绿色砂质页岩; ϵ_1^{2-2} -深灰、灰绿色页岩夹少量粉砂岩; ϵ_1^{2-3} -灰绿色粉砂岩夹页岩;第四系:alQ-河流冲积层;al-alQ-残积坡积层;col-delQ-崩积、坡积.

图4 典型地质剖面(4#引水隧洞)

Fig. 4 Typical geological profile (4# diversion tunnel)

引水隧洞出口边坡开挖形成不同形式的人工边坡,128.00 m以上为灰岩,按多级台阶开挖,每级坡高15 m,马道5 m;下部为页岩,页岩段整体开挖坡角为 $29^{\circ} \sim 45^{\circ}$. 厂房区在近代一、二级阶地上,一级阶地高程90 m,台面宽20~30 m,基岩面高程75 m;二级阶地高程95 m,台面宽30~40 m,基岩面高程75~80 m,地势

开阔平坦。

边坡地质构造主要表现为断层、裂隙、层间剪切带等,原有山体经历自然作用与卸荷影响已逐步分解,局部地区岩体破碎明显。上游一侧层间剪切特别发育,与边坡密切相关的剪切破碎泥化带或层间剪切面主要有 401#,403#,405#和 406#;边坡下游一侧层间剪切和断层交错布置,岩体整体性较差,在灰岩与页岩的交界面处,剪切破坏极为明显,多出现连续稳定的剪切破碎泥化带;与边坡密切相关的剪切破碎泥化带和断层有 201#,301#,302#,F69,F16,F220,F126 和 F624 等,其中 201#剪切破碎泥化带尤为发育。如图 4 所示,按岩组性质、边坡整体可以近似分为 4 段:

(1)边坡 401#剪切带以上的区域,该区域内层间剪切特别发育,为灰岩和页岩互层,厚约 110 m,主要位于边坡上游一侧,对下游侧边坡开挖影响较小;

(2)边坡 401#与 301#,302#剪切带之间为薄层泥质条带灰岩夹细粒鲕状灰岩,厚约 100 m,该区域内为相对完整的灰岩段;

(3)边坡 301#,302#与 201#剪切带之间为厚层或薄层泥质条带灰岩夹细粒鲕状灰岩,厚约 70 m,受断层切割,完整性较差,其中,301#层间剪切面发生在石龙洞灰岩下段顶部的疙瘩状泥灰岩中,错动面平直,有黄色糜棱岩,遇水易泥化;

(4)边坡 201#剪切带以下的区域,厚度约 200 m,主要为砂质页岩,表层为第四系阶地堆积层,其中,201#剪切带在石牌页岩与石龙洞灰岩的接触处,灰岩与页岩互层,泥化带厚 4~6 m,由大致层厚 0.1~0.2 m 劈理化页岩和厚 0.4~0.6 m 鲕状灰岩,由一系列密集的层间剪切面组成,错动面夹白色软泥,厚 1~5 mm,有滑感,可沿空面塑性流出,在宏观上形成一个较连续的剪切破碎泥化带。

3 高边坡的变形机理分析

高边坡在施工时基本遵循了自上而下的开挖顺序,受开挖卸荷的影响,施工期基本呈向下游侧变形的趋势,并最终随工程结束而逐渐趋于稳定;蓄水以来,在库水压力的作用下,边坡向下游侧变形趋势有所增加,除局部危岩体有较大变形之外,边坡整体仍然处于稳定状态。较多学者采用各种方法对高边坡在施工期和蓄水期(主要是 1998 年以前)的变形机理和稳定性进行了较多的分析评价^[3-7],而 1998 年年底边坡出现的这种与前期相反的变形趋势是比较反常的。通过对监测数据、地质资料和外界影响因素的综合对比,分析认为边坡出现这样的变形趋势有其发生发展的内在机理,主要可归结为以下几点:

(1)1998 年 8 月,库区遭遇了千年一遇的洪水,大坝蓄水位高达 203.94 m,高出正常蓄水位 3.94 m。从监测资料来看,此次洪水打破了边坡蓄水以来逐渐形成的平衡状态,是边坡变形趋势改变的一个重要的诱因,但是变形趋势的改变与边坡特殊的岩体结构、库水位上涨带来的附加影响因素也是密切相关的。

(2)从岩体结构角度来看,引水隧洞出口高边坡上部为坚硬而裂隙发育的石龙洞组灰岩,下部为软弱的石牌组页岩,在两种岩性交界处为厚 4~6 m 的 201#剪切泥化破碎带,形成了典型的上硬下软的不利岩体结构组合。边坡总体为逆向坡,没有平行边坡走向且倾向坡面的大断层存在,故产生顺坡向大规模滑动的可能性不大,这类边坡的变形,往往是以下部软岩的变形为先导,引起上部岩体的变形,进而控制边坡的整体变形趋势。地质资料显示边坡上游侧和下游侧层间剪切带、泥化带和断层带充分发育,破碎泥化现象明显。1998 年的洪水,一方面导致了边坡上游侧水压力、拱坝推力的明显增大;另一方面,库水位的上涨和持续的强降雨改变了坡体内部的渗流场和应力场、坡体内交错分布的剪切泥化带和断层带进一步发育、强度进一步弱化,在上部岩体压力增大的情况下,201#剪切带下部的页岩表现出逐渐被挤出的趋势,进而导致了剪切带上部岩体有被抬升和向上游旋转的趋势,从而使得边坡上部产生朝向上游的变形。

(3)引水隧洞出口高边坡变形趋势的改变不是短时间完成的,从图 3 可见边坡变形具有明显的滞后效应,一直持续到 2001 年左右才逐渐趋于新的稳定和平衡。从这个变化过程也可看出,1998 年出现的超高洪水位引起了整个坡体内部结构和应力状态的调整,整个调整过程是一个达到新的平衡状态的过程,具有明显的时间效应。在这个调整的过程中,边坡的变形也出现了较大的波动,一方面与库水位的升降变化有关,另一

方面与边坡的内部结构有关,坡体内部层间剪切破碎带和断层带交错发育,岩体的整体性差,在上部荷载变化作用下,应力集中现象明显,坡体内部结构、应力调整过程极为复杂,往往伴随着剪切带、断层带的进一步发育、扩展和岩体的局部破坏,进而导致边坡的变形趋势出现了较大的波动。

(4) 岩体开挖卸荷作用,包括瞬时卸荷和卸荷流变两个方面;卸荷效应引起的岩体质量劣化,是一个长期而缓慢的过程,具有明显的时间效应。此外,库水位升降变化、降雨和泄洪雾化、温度变化^[8]、岩体风化和水-岩相互作用^[9]等其他因素也会促进卸荷流变^[10]的发展。

下部软弱页岩的力学强度低,是整个坡体内的薄弱部位,卸荷流变引起的扩容变形特别明显,这也是导致边坡中上部产生朝向上游的变形的原因之一。

(5) 在开挖过程中,为了防止 201#剪切带及下部区域页岩不进一步劣化,工程中采用混凝土置换部分区域软弱夹层(如图 5 所示),对坡面岩体浅层失稳起到了抑制作用;但是,由于软弱岩体分布区域较大、较深,混凝土置换对边坡的整体稳定的贡献是有限的。表 1 中的监测结果表明,1998 年以来,各监测剖面低高程监测点出现了明显的倾向下游侧的变形,也印证了上述分析所提出的“挤出”现象。

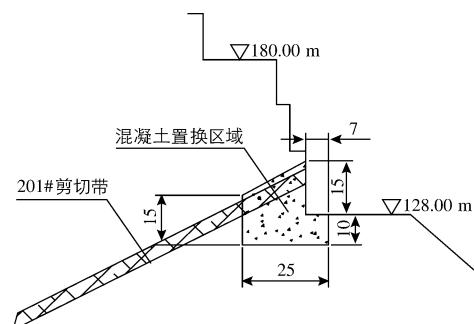


图 5 混凝土置换区域示意图(单位: m)

Fig. 5 Concrete replacement region (unit: m)

4 结 语

(1) 在详细分析地质资料、监测数据和外部影响因素的基础上,对引水隧洞出口高边坡反常的变形趋势进行了深入研究;1998 年库区遭遇千年一遇的洪水是边坡变形趋势改变的重要诱因,边坡上硬下软的岩体构造特性和充分发育的层间剪切带、断层带是其变形的内在原因,边坡岩体的卸荷流变、库水位变化、降雨和泄洪雾化、岩体风化、水-岩长期作用等是变形发展的外界因素。

(2) 工程监测数据显示,2001 年之后,边坡各测点的变形基本趋于稳定,说明经过 3 年左右的调整,边坡内部的结构、应力等达到新的平衡状态;但是,在后期的运行过程中,如果再次遭受外界较强的触发因素(如高水位的洪水、地震等)的影响,边坡的变形趋势是否会继续发生变化,则不可预测;因此,必须坚持长期监测,发现异常情况应及时分析处理。

(3) 由于边坡岩体特殊的地质构造,层间剪切带反倾构造,断层裂隙分布较多,在降雨、泄洪雾化作用下,水易顺着裂缝渗入到软弱岩层中,特别是渗入到充分发育的层间剪切带中,会使其力学性状进一步恶化,从而导致沿层间剪切带变形的进一步发展;因此,必须注意坡面排水措施,并对出露裂缝、断层及时进行回填封闭等坡面防护措施。

参 考 文 献:

- [1] 王继敏,段绍辉,胡书红. 锦屏一级水电站左岸坝肩复杂地质条件高陡边坡处理[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1597-1606. (WANG Ji-min, DUAN Shao-hui, HU Shu-hong. Treatment of high and steep slopes with complicated geological conditions at left abutment of Jinping I Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1597-1606. (in Chinese))
- [2] 漆祖芳,姜清辉,唐志丹,等. 锦屏一级水电站左岸坝肩边坡施工期稳定分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 531-539. (QI Zu-fang, JIANG Qing-hui, TANG Zhi-dan, et al. Stability analysis of abutment slope at left bank of Jinping-I Hydropower Project during construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 531-539. (in Chinese))
- [3] 王在泉,朱瑞赓,陆文兴. 隔河岩电站厂房高边坡工程开挖系统安全监控及应用研究[J]. 1997, 19(3): 35-40. (WANG Zai-quan, ZHU Rui-geng, LU Wen-xing. Stability monitoring controlling and application to the excavation system of slope engineering in Geheyan Hydraulic Power Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering[J]. 1997, 19(3): 35-40. (in Chinese))

- [4] 张漫, 张保军. 隔河岩水电站岩石边坡变形分析[J]. 大坝观测与土工测试, 1997, 21(3): 13-16. (ZHANG Man, ZHANG Bao-jun. Deformation analysis on rock slope of Geheyan Hydropower Station[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1997, 21(3): 13-16. (in Chinese))
- [5] 任德记. 隔河岩电站厂房高边坡孔口位移回归分析[J]. 长江科学院院报, 1996, 16(3): 25-28. (REN De-ji. Regression analysis of displacement data of boreholes on high slope of Geheyan Hydroplant[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1996, 16(3): 25-28. (in Chinese))
- [6] 李建林, 刘杰. 隔河岩水电站厂房后边坡与拱坝的相互作用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 459-466. (LI Jian-lin, LIU Jie. Study on interaction between back powerhouse slope and arch dam of Geheyan Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 459-466. (in Chinese))
- [7] 覃毅宝, 刘聪元, 张保军. 隔河岩电厂高边坡运行期的稳定性[J]. 人民长江, 2007, 38(1): 135-137. (QIN Yi-bao, LIU Cong-yuan, ZHANG Bao-jun. Study on high slope stability at run-time of Geheyan Hydropower Plant[J]. Yangtze River, 2007, 38(1): 135-137. (in Chinese))
- [8] 李迪, 肖汉江, 崔建华. 气温变化对隔河岩水电站岩体边坡位移场的影响[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(2): 14-16. (LI di, XIAO han-jiang, CUI jian-hua. Effect of air temperature variation on displacement field of rock slope at Geheyan Hydropower Station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(2): 14-16. (in Chinese))
- [9] 邓华锋. 库水变幅带水-岩作用机理和作用效应研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010. (DENG Hua-feng. Study on the mechanism and effects of water-rock interaction under water level change region[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. (in Chinese))
- [10] 邓华锋, 李建林, 易庆林. 软岩高边坡开挖卸荷变形研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1731-1734. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, YI Qing-lin. Research on the unloading deformation of high slope with soft rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1731-1734. (in Chinese))

Research of deformation mechanism for high slope linked with a hydropower station diversion tunnel outlet

CHEN Xing-zhou¹, CHAI Jun-rui¹, BAI Jun-guang²

(1. Institute of Water Conservancy and Hydropower, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710048, China; 2. Northwest Hydro Consulting Engineering, CHECC, Xi'an 710065, China)

Abstract: During the operation of a hydropower station diversion tunnel linked with a high slope, the monitored data show that the upper slope has an abnormal deformation tendency towards the upstream, which is different from the general slope deformation law. The deformation mechanism of the high slope linked with the hydropower station diversion tunnel outlet is analyzed in detail based on detailed analysis of the geological data, monitored data and external influence factors. A thousand-year frequency flood in 1998 is an obvious primary factor affecting the change in deformation tendency. At the same time, slope's structural features of rigidity upwards and weakness downwards and the fully developed interlayer shear zones are the internal reasons of the slope deformation; excavation unloading of the slope, reservoir impoundment, change in reservoir water level, rain, flood atomization, rock mass weathering, long-term interaction given by water and rock mass must be the other external factors influencing and aggravating the rock mass deformation. At present, the deformation at the basic monitoring points trends towards stability, however the joints, fractures, faults and interlayer shear zones have a very important role in the deformation and stability of the slope. Therefore, it is important to keep the long-term monitoring, and any unusual case must be analyzed and handled in time.

Key words: diversion tunnel; high slope; deformation mechanism