

公伯峡面板堆石坝堆石流变特性反演分析

孔维耀¹,王子健¹,王玉洁²,朱锦杰²,王柳江¹,刘斯宏¹,张学峰¹

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 国家电力监管委员会大坝安全监察中心,浙江 杭州 310014)

摘要:为了分析堆石流变特性及其对公伯峡混凝土面板应力变形的影响,利用原位观测资料对公伯峡面板堆石坝的变形性态进行分析,采用 Merchant 黏弹性流变模型,反演计算得到相应的流变参数,并用反演得到的流变参数对大坝受力变形进行计算分析。结果表明:堆石的流变作用较明显,流变期间沉降计算值与实测值的变化规律较吻合,堆石流变对面板应力变形、垂直缝和周边缝变形有较大影响;所采用的流变模型和反演得到的流变参数较合理,能够预测面板坝轴向应力和裂缝的发展趋势。

关键词:面板堆石坝;变形性态;堆石流变;反演分析;裂缝;公伯峡水电站

中图分类号:TV641.4⁺3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)05-0026-05

Back analysis of rheological deformation characteristics of Gongboxia Concrete-Faced Rockfill Dam//KONG Weiyao¹, WANG Zijian¹, WANG Yujie², ZHU Jinjie², WANG Liujiang¹, LIU Sihong¹, ZHANG Xuefeng¹(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Large Dam Safety Supervision Center, State Electricity Regulatory Commission, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to study the rheology of rockfills and its influence on the stress and deformation of the concrete face, the monitoring deformation data of the Gongboxia Concrete-Faced Rockfill Dam was analyzed. The viscoelastic rheological model Merchant was applied to determine the relevant rheological parameters of the rockfills by back analysis. The stress and deformation of the dam during the operation were calculated using the obtained rheological parameters. The results show that the rheology of rockfills is relatively obvious and the computed results agree well with the measured values. The rheology of rockfills has great impact on the stress and deformation of concrete faces, vertical joints and peripheral joints. The rheological model and parameters obtained by back analysis are reasonable, and can be used to predict the development of axial stress and the cracks occurring trend in the concrete face.

Key words: CFRD; deformation behavior; rockfill rheology; back analysis; crack; Gongboxia Hydropower Station

面板堆石坝的沉降主要是由堆石填筑过程中的压缩变形和竣工后的流变引起的,其中堆石流变是指堆石的变形随时间的变化,且在大多数情况下,堆石流变在现场观测中都表现得比较明显^[1-2]。堆石流变会影响铺设在其上的防渗面板的受力变形,在已建的面板堆石坝工程中,罗马尼亚的里苏(Lesu)坝(坝高60m)在堆石流变影响下,竣工数年后造成面板压碎破坏^[3]。因此,堆石流变特性已引起工程界的广泛关注^[4-7]。

研究堆石流变特性主要有3种途径:一是根据室内试验,研究堆石的流变性质,得出相关规律和参数,从而建立堆石流变模型,如沈珠江等^[8-10]根据室内流变试验得到了流变模型,但该方法耗费巨大,得到的试验参数不一定具有代表性;二是理论研究方

法,采用力学元件分别描述弹性、塑性和黏性,这些元件组合成为流变模型,例如沈珠江等^[11]提出的三参数黏弹塑性模型(Merchant流变模型);三是利用堆石坝的观测资料进行反演分析^[12],得到描述堆石流变的规律和参数,进而类比分析其他工程。

本文在分析公伯峡面板堆石坝沉降观测资料的基础上,基于沈珠江等^[11]提出的Merchant流变模型,进行反演分析得到流变参数,再进行应力变形计算并与实测资料对比,验证了参数的可靠性,最后分析了堆石流变对面板受力变形、垂直缝和周边缝变形的影响及其发展趋势。

1 工程概况

公伯峡水电站位于青海省循化县与化隆县交界

基金项目:江苏高校优势学科建设工程(YS11001)

作者简介:孔维耀(1989—),男,江苏南京人,硕士研究生,主要从事水工结构研究。E-mail:kongweiyao1989@126.com

处的黄河干流上。电站以发电为主,兼有防洪、灌溉、供水等综合功能。工程主要包括钢筋混凝土面板堆石坝、右岸引水发电系统、左岸溢洪道及左右岸泄洪洞、两岸灌溉取水口等。2002 年 8 月 1 日大坝填筑开工,2003 年 10 月 22 日完工;2003 年 10 月 22 日浇筑混凝土面板,2004 年 8 月 8 日水库蓄水发电运行。

大坝为钢筋混凝土面板堆石坝,坝顶长 429.0 m,宽 10.0 m,最大坝高 132.2 m。大坝主要筑坝材料为主堆石 3BI、3BII 和次堆石 3C。在坝左 0+75 m 断面 1980.00 m 高程布置 3 个测点(测点 18~20),坝左 0+130 m 断面 1920.00 m、1950.00 m 和 1980.00 m 高程布置 15 个测点(测点 1~7、8~12 和 21~23),坝左 0+230 m 断面 1950.00 m 和 1980.00 m 高程布置 8 个测点(测点 13~17 和 24~26),共布设 26 个水管式沉降仪监测坝体内部沉降,坝左 0+130 m 断面测点分布情况见图 1。

2 变形性状分析

坝体填筑从 2002 年 8 月 1 日开始,到 2003 年 10 月 22 日结束。图 2 是 0+130 m 断面 1950.00 m 高程处测点 9、10 和 12 的沉降过程线。可以看出:①在 2003 年 10 月 22 日前坝体填筑阶段,沉降随坝体的升高而增大,沉降曲线较陡;②坝轴线下游侧沉降(测点 12)大于上游侧(测点 9),这是由于下游次堆石区堆石的弹性模量及压实要求低于上游主堆石区;③在水库蓄水以后,沉降值随着时间的增加而增加,逐渐趋于平稳,堆石流变较为明显。图 2 中在坝体填筑完成至水库开始蓄水期间,测点测值明显减小,不符合常理。这是由于观测室调整引起仪器回水不畅导致的,仪器经修理后能够正常使用。表 1 是 0+130 m 断面上测点 8~12 和测点 21~23 在水库蓄水后,2004 年 8 月 22 日和 2010 年 3 月 23 日各测点的沉降值以及在此期间各测点由流变作用引起的沉降值。测点 8 在测得的流变引起的最大沉降值

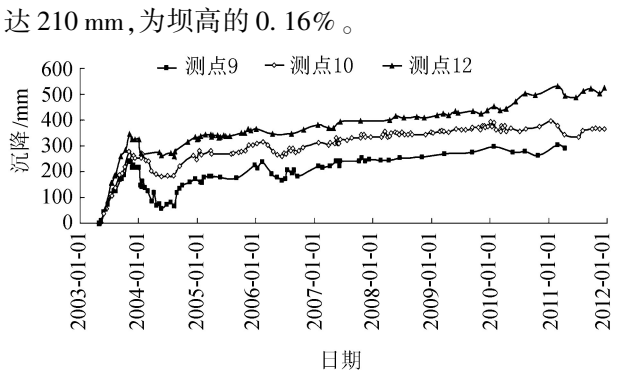


图 2 0+130 m 断面 1950.00 m 高程沉降过程线

表 1 水库蓄水后各测点沉降值 mm

测点	2004 年 8 月 22 日 沉降值	2010 年 3 月 23 日 沉降值	流变引起的 沉降值
8	180	390	210
9	140	270	130
10	217	360	143
11	227	387	160
12	260	457	197
21	150	310	160
22	150	342	192
23	167	385	218

3 流变参数反演分析

岩土工程中常用位移观测量反演材料参数,其基本思路是:将参数的反演问题转化成为一个目标函数的寻优问题,将数值分析方法和最优化理论结合起来,通过不断修正材料的未知参数,使得现场实测值和相应的数值计算值的差异达到最小。本文采用模拟退火算法进行材料参数反演。

模拟退火算法中采用的目标函数为

$$F(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^d (U_{it} - U_{it}^*)^2 \tag{1}$$

式中: U_{it} 为第*i*测点在*t*时段末的计算位移值; U_{it}^* 为第*i*测点在*t**时段末的实测位移值; X 为待反演的参数; n 为时间步数; d 为可用观测点数。

流变计算采用指数衰减型 Merchant 黏弹性流

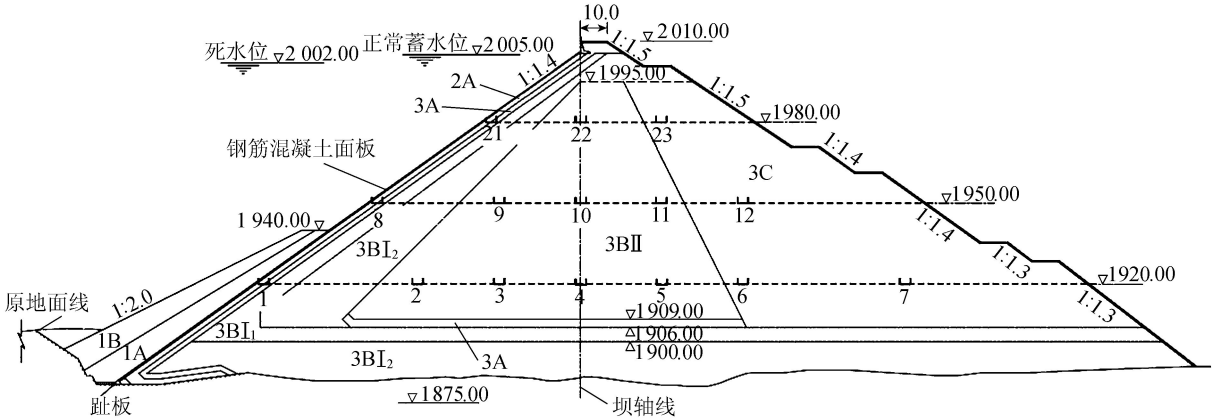


图 1 坝左 0+130 m 断面测点分布(单位:m)

变模型^[13],假定在复杂受力条件下,体应变速率 ε_v 和剪切应变速率 γ 具有如下形式:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_v &= \alpha(\varepsilon_{vf} - \varepsilon_{vi}) \\ \gamma &= \alpha(\gamma_f - \gamma_i) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: ε_{vi} 和 γ_i 分别为 t 时刻的体积流变和剪切流变; ε_{vf} 和 γ_f 分别为最终体积流变和最终剪切流变; α 为模型参数。根据流变试验研究的结果,最终体积流变和最终剪切流变用以下公式表示:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{vf} &= b\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^{m_1} + c\left(\frac{q}{p_a}\right)^{m_2} \\ \gamma_f &= d\left(\frac{S_1}{1 - S_1}\right)^{m_3} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: σ_3 为最小主应力; p_a 为大气压强; S_1 为应力水平; q 为偏应力; b, c, d, m_1, m_2, m_3 为模型参数,加上式(2)中 α 共7个 Merchant 流变模型参数,其中 α 主要控制流变的速度, b, c, d 主要控制流变的大小。

图3为公伯峡面板堆石坝堆石流变参数反演分析三维有限元模型,单元总数37 024个,节点总数39 474个,点A~P为面板顶部沿坝轴向分布的特征点。面板与垫层料、面板与挤压边墙和挤压边墙与堆石料间设置接触面单元,混凝土面板周边缝及垂直缝采用缝单元模拟。

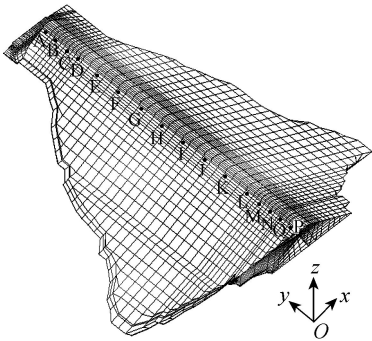


图3 三维有限元网格及特征点

筑坝土石材料的邓肯 $E-B$ 模型参数不进行反演计算,通过室内试验以及工程类比确定,如表2所示。根据表2中 $E-B$ 模型参数进行三维有限元静力计算,在计算过程中模拟了实际的施工填筑、面板浇筑及水库蓄水过程,忽略填筑和蓄水时的流变效应。表3为0+130 m断面上测点8~12的竣工期沉降计算值与实测值,可以看出计算值与实测值较为吻合。

表2 筑坝土石材料邓肯 $E-B$ 模型参数

堆石料	K	n	R_f	K_b	m	$\varphi_0/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$
垫层料 2A	1050	0.44	0.65	610	0.41	49.2	8.7
过渡料 3A	1180	0.56	0.79	630	0.30	51.4	6.4
主堆石料 3B I ₁	850	0.51	0.72	560	0.27	50.4	13.4
主堆石料 3B I ₂	720	0.54	0.72	480	0.13	49.4	6.2
砂砾石料 3B II	1250	0.35	0.63	700	0.34	45.8	11.0
次堆石料 3C	550	0.45	0.65	245	0.13	61.0	6.6

表3 竣工期各测点沉降计算值与实测值

测点	计算值/mm	实测值/mm
8	90	132
9	220	232
10	275	270
11	286	280
12	300	320

坝体填筑完成后到水库开始蓄水期间,由于仪器自身问题导致观测数据有误,故本文依据蓄水完成后0+130 m断面上测点8~12和21~23共8个测点(其余测点的规律性及连续性不理想)2004年8月22日至2011年8月22日的观测数据,反演计算得到流变模型的7个参数,如表4所示。在反演计算时,采用等步长分析方法,步长为30 d。由于反演起始时间定在水库蓄水完成一段时间之后,故认为填筑和蓄水过程中的变形已趋于稳定,流变反演得到的计算值是由流变作用所引起的,不考虑填筑和蓄水过程中的流变效应。

表4 筑坝土石材料流变参数反演结果

堆石料	α	b	c	d	m_1	m_2	m_3
垫层料 2A	0.0005	0.0003	0.00018	0.005	0.769	0.635	0.550
过渡料 3A	0.0005	0.0003	0.00025	0.005	0.769	0.635	0.550
主堆石 3B I ₁	0.0006	0.0004	0.00026	0.006	0.657	0.575	0.455
主堆石 3B I ₂	0.0006	0.0004	0.00026	0.006	0.657	0.575	0.455
主堆石 3B II	0.0005	0.00025	0.00012	0.003	0.615	0.511	0.421
次堆石 3C	0.0006	0.0020	0.00080	0.013	0.831	0.714	0.518

利用表4的参数反演结果计算得到2010年3月23日0+130 m断面沉降分布如图4所示,与实测资料基本相符,测点8和21的实测值偏大,可能是这两个测点靠近上游面板,受到施工以及蓄水的影响较大。表5为2004年8月22日至2011年8月22日1950.00 m高程测点8~12流变引起的沉降计算值与实测值,两者基本吻合。图5为2004年8月22日以后测点9流变引起的沉降计算值与实测值的过程线对比,可以看出,沉降计算值和实测值的过程线比较吻合,尤其是在初始运行期和2010年以后,两者的变化趋势基本一致;从2016年开始堆石沉降过程线趋于收敛,可以认为堆石的流变作用越来越小,堆石变形在2016年以后趋于稳定。可见所采用的流变模型和反演得到的流变参数较合理。

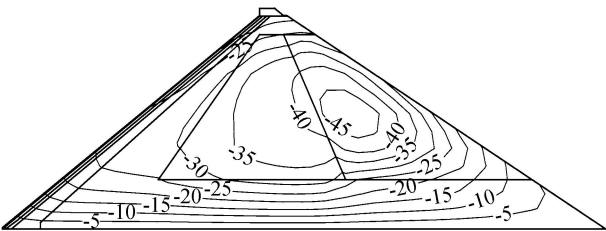


图4 0+130 m断面2010年3月23日沉降分布(单位:cm)

表 5 测点 8~12 流变引起的沉降计算值与实测值

测点	计算值/mm	实测值/mm
8	252	240
9	143	157
10	149	159
11	166	173
12	233	210

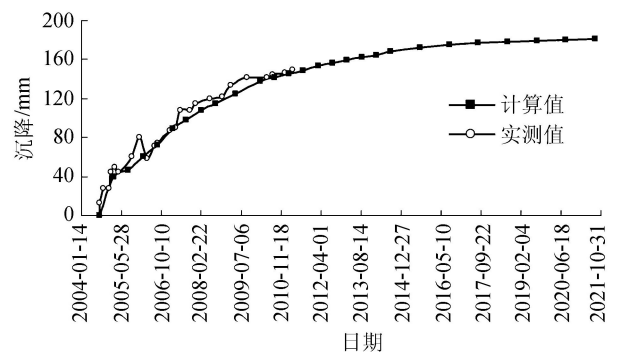


图 5 测点 9 流变引起的沉降计算值与实测值对比

4 堆石流变对面板受力变形影响的反演分析

根据堆石流变反演结果可以分析堆石流变对面板受力变形的影响。图 6 为 2004 年和 2016 年面板挠度等值线,图 7 为 2004 年和 2016 年面板坝轴向应力等值线,图中以压为正,拉为负。由图 6 可知,在水压力作用和堆石长期流变效应的影响下,面板挠度有向两岸扩散的趋势,挠度最大值出现在坝体最大断面的 1/3 坝高处,由蓄水初期的 18.0 cm 增加至稳定期的 24.3 cm;由图 7 可知,面板坝轴向压应力主要集中在面板中间区域,最大压应力由蓄水初期的 8.4 MPa 增至稳定期的 9.0 MPa,在稳定期两岸靠近山体处的面板出现拉应力区,最大拉应力达到 15.0 MPa,发生在右岸面板顶部。图 8 是运行 12 a 后(2016 年)较蓄水初期(2004 年)的面板垂直缝和周边缝的变形差(图中“Δ”和“·”分别表示面板

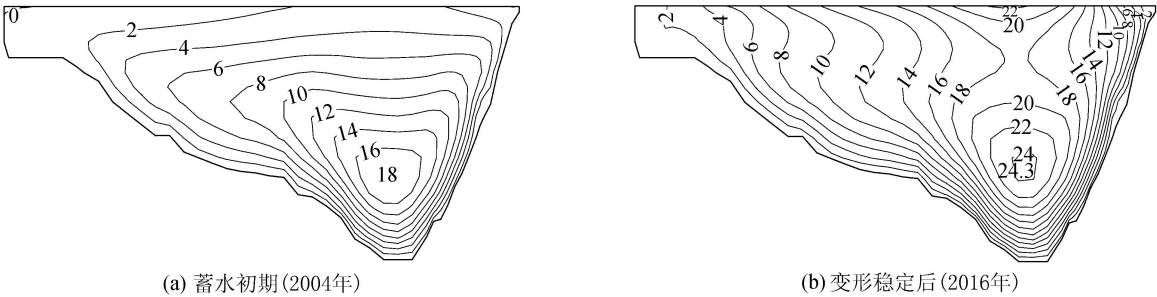


图 6 面板挠度等值线(单位:cm)

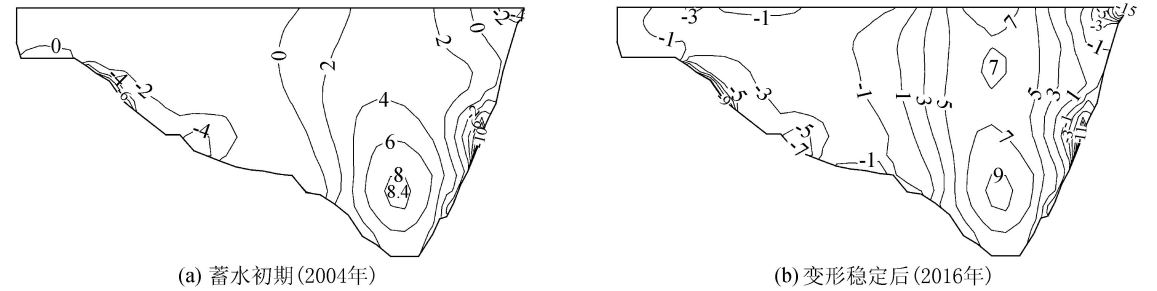


图 7 面板坝轴向应力等值线(单位:MPa)

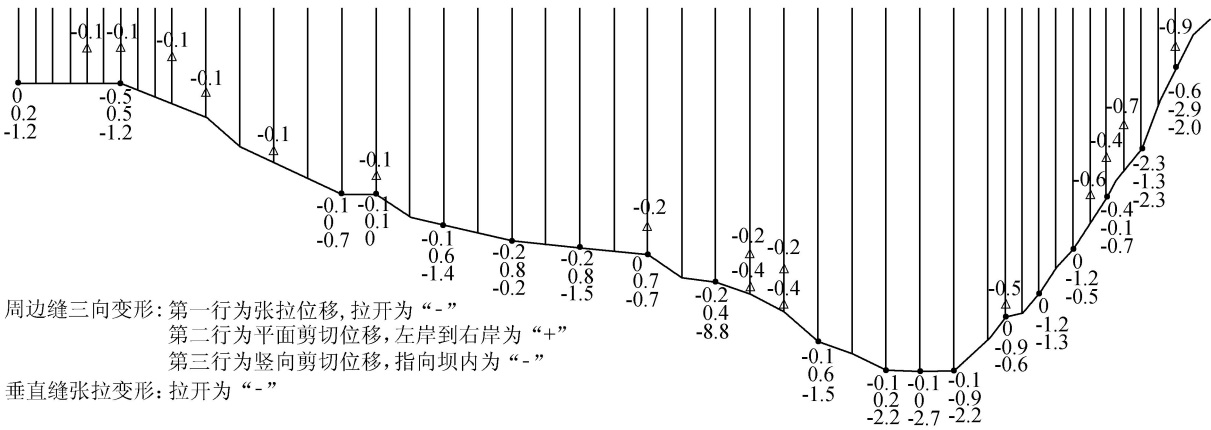


图 8 面板垂直缝和周边缝 2016 年较 2004 年的变形差(单位:mm)

垂直缝和周边缝变形所发生的位置),可以看出,面板垂直缝和周边缝变形差值都不大;面板垂直缝变形主要发生在坝体左右岸和中部区域,变形最大值发生在右岸顶部,为0.9 mm;在堆石流变的影响下周边缝三向变形呈现出一定的规律性:周边缝张拉变形有一定增长,平面剪切位移均指向最大断面处,竖向剪切位移均指向坝内。总体来说,面板受到的压应力不大,增长趋势较缓慢,但在靠近坝顶及两岸边坡处存在一定的受拉区,尤其是右岸坝顶处面板坝轴向拉应力较大,极易出现裂缝,面板垂直缝大部分处于闭合状态,周边缝三向变形差值不大,局部增长明显。

比较蓄水初期和变形稳定后面板的坝轴向应力可以发现,在堆石流变的影响下,坝顶处面板的坝轴向应力有逐渐增大的趋势,故选取面板顶部的特征点A~P(图3)分析其坝轴向应力的发展趋势。

通过计算可知,A~I点和N、O、P点表现为拉应力,J~M点为压应力,即以河谷最深面板为中间线,左岸所有面板顶部和右岸靠近山体面板在流变过程中,在山体约束下表现为拉应力,只有中间靠右岸部分面板受到挤压作用表现为压应力。尤其是C、D、O、P这4点在现期受到的坝轴向拉应力都超过了面板的抗拉强度2.2 MPa,面板会出现裂缝。由于靠近右岸坝体较倾斜,最大坝轴向拉应力发生在面板最右端顶部(P点),达到了15.0 MPa,见图9。表6为除去坝轴向压应力点(J~M点)外其他的特征点坝轴向拉应力在2016年较2012年的增长幅度,可见,面板两端(A~E点和I~P点)坝轴向拉应力还将有5%~8%的增大趋势,而面板中间(F、G、H点)增大幅度较小,到2016年趋于稳定。从现场观

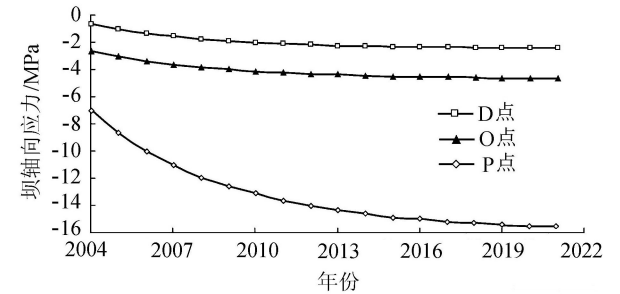


图9 特征点处流变阶段应力时程曲线

表6 特征点处坝轴向拉应力2016年较2012年增长幅度			
特征点	坝轴向应力 增长幅度/%	特征点	坝轴向应力 增长幅度/%
A	1.49	G	0.68
B	4.67	H	1.86
C	8.06	I	4.96
D	7.30	N	2.56
E	5.60	O	5.16
F	0.12	P	6.55

测资料来看,由于温度等因素的作用,在面板顶部平均水位线处出现了呈“中间少两端多”规律的裂缝^[14]。面板坝轴向结构应力的分布可以解析该工程面板顶部裂缝出现“中间少两端多”的原因。

5 结 论

- a. 从坝体沉降过程和典型测点的沉降分布等方面对实测资料进行整理分析,结果显示公伯峡面板堆石坝体的流变作用较为明显。
- b. 采用 Merchant 流变模型,结合模拟退火算法,反演计算得到的流变计算值与实测值过程线比较吻合,验证了所采用的流变模型和反演得到的流变参数的合理性。
- c. 堆石流变对面板应力变形、垂直缝和周边缝变形有较大影响,通过反演计算分析可以预测面板坝轴向应力和裂缝的发展趋势,这种趋势可以解析该工程面板顶部裂缝出现“中间少两端多”的原因。

参考文献:

[1] 殷宗泽. 土工原理 [M]. 北京: 水利水电出版社, 2007.

[2] PARKIN A K, MARANHADAS N E. Advances in rockfill structure [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1991.

[3] 蒋国澄, 傅志安, 凤家骥. 混凝土面板堆石坝工程 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.

[4] NALOR D J, KNIGHT D J, DING D. Coupled consolidation analysis of the construction and subsequent performance of monasavu dam [J]. Computers and Geotechnics: Special Issue of Embankment Dam, 1988, 16(2): 95-120.

[5] 王勇, 殷宗泽. 面板坝中堆石流变对面板应力变形的影响分析 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2000, 28(6): 60-65. (WANG Yong, YIN Zongze. Analysis of effects of rockfill rheology on deformation and stress of force slabs of concrete face rockfill dams [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2000, 28(6): 60-65. (in Chinese))

[6] 余亚鹏, 王永明, 卢继旺, 等. 200 m 级面板堆石坝流变分析 [J]. 水电能源科学, 2010, 28(4): 90-92. (SHE Yapeng, WANG Yongming, LU Jiwang, et al. Rheological analysis of concrete facing rockfill dam with height about 200 m [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(4): 90-92. (in Chinese))

[7] 邵磊, 迟世春, 王振兴. 基于裂缝扩展的堆石料流变细观模型 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 66-75. (SHAO Lei, CHI Shichun, WANG Zhenxing. Rheological model for rockfill based on sub-critical crack expansion theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 66-75. (in Chinese))

(下转第46页)

不运用荆山湖行洪区,田家庵站计算洪峰水位 23.67 m,水位增加 0.06 m,此值较小的原因是荆山湖实际运用时,田家庵已临近洪峰水位,开闸过程中洪峰峰值已过,因此对田家庵的峰值水位影响较小。此外,行洪区的运用加快了所在河段的洪水汇流速度,使田家庵站流量在短时间内有所增加。

6 结 语

根据研究河段的特点,建立了正阳关至吴家渡段水力数学模型,并通过 2005 年、2007 年的实测洪水资料和水工模型试验资料对模型进行了验证。验证计算结果表明,模型具有较高的计算精度,较好地模拟了河道及行洪区水流运动情况,可以用于本段河道治理与行洪区优化调度研究。以荆山湖行洪区为例,分析了其在 2007 年洪水过程中的运用效果,行洪区的运用降低了田家庵站的水位,加快了所在河段的汇流速度。

参考文献:

[1] 杨兴菊,虞邦义. 淮河中游河道近期演变分析[J]. 水利水电技术,2011(8):49-53. (YANG Xingju, YU Bangyi. Analysis on recent channel evolution of middle reach of Huaihe River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2001(8):49-53. (in Chinese))

[2] 虞邦义,郁玉锁. 淮河干流鲁台子至吴家渡河段输沙平衡分析[J]. 南昌大学学报:工科版,2009,31(2):162-

166. (YU Bangyi, YU Yusuo. Analysis on sediment transport balance of Huaihe River main stream from Lutaizi to Wujiadu [J]. Journal of Nanchang University: Engineering & Technology, 2009, 31(2): 162-166. (in Chinese))

[3] 虞邦义,倪晋,杨兴菊,等. 淮河干流浮山至洪泽湖出口段水力数学模型研究[J]. 水利水电技术,2011(8):38-42. (YU Bangyi, NI Jin, YANG Xingju, et al. Research on hydrodynamic numerical model for main stream of Huaihe River from Fushan to outlet of Hongze Lake [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011(8): 38-42. (in Chinese))

[4] MIKE11: a modelling system for river and channels reference manual[R]. Copenhagen:DHI,2009.

[5] MIKE21: flow model FM hydrodynamic module user-guide manual[R]. Copenhagen:DHI,2009.

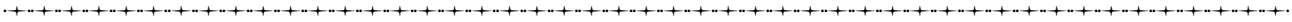
[6] MIKEFLOOD 1D-2D modelling user manual [R]. Copenhagen:DHI,2009.

[7] SMAGORINSKY J. General circulation experiment with primitive equations [J]. Monthly Weather Review, 1963, 91:99-164.

[8] 虞邦义,葛国兴,左敦厚,等. 蚌埠闸扩建工程水工模型试验报告[R]. 蚌埠:安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院,1999.

[9] 水利部水文局,水利部淮河水利委员会. 2007 年淮河暴雨洪水[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

(收稿日期:2012-12-12 编辑:熊水斌)



(上接第 30 页)

[8] 沈珠江,左元明. 堆石料的流变特性试验研究[C]//中国土木工程学会. 第六届土力学及基础工程学术会议论文集. 上海:同济大学出版社,1991:443-446.

[9] 李国英,米占宽,傅华,等. 混凝土面板堆石坝堆石料流变特性试验研究[J]. 岩土力学,2004,25(11):1712-1716. (LI Guoying, MI Zhankuan, FU Hua, et al. Experimental studies on rheological behaviors for rockfills in concrete faced rockfill dam [J]. Rock and Soil Mechanics,2004,25(11):1712-1716. (in Chinese))

[10] 沈珠江. 面板堆石坝应力应变分析的若干问题[C]//中国水力发电工程学会. 中国混凝土面板堆石坝十年学术研讨会论文集(1985—1995). 北京:中国水利水电出版社,1995:43-50.

[11] 沈珠江. 土石料的流变模型及其应用[J]. 水利水运科学研究,1994(4):335-342. (SHEN Zhujiang. A creep model of rock-fill material and determination of its parameters by back analysis [J]. Journal of Nanjing

Hydraulic Reserch Institute, 1994(4):335-342. (in Chinese))

[12] 沈珠江,赵奎芝. 堆石坝流变变形的反馈分析[J]. 水利学报,1998,29(6):1-6. (SHEN Zhujiang, ZHAO Kuizhi. Back analysis of creep deformation of rockfill dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(6): 1-6. (in Chinese))

[13] 沈凤生,陈慧远,潘家铮. 混凝土面板堆石坝的蓄水变形分析[J]. 岩土工程学报,1990,12(1):74-81. (SHEN Fengsheng, CHEN Huiyuan, PAN Jiazheng. Deformation analysis of concrete faced rockfill dam due to reservoir impounding [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(1): 74-81. (in Chinese))

[14] 王玉洁,朱锦杰,刘斯宏,等. 公伯峡水电站面板裂缝成因和危害性分析报告[R]. 杭州:国家电力监管委员会大坝安全监察中心,2012.

(收稿日期:2012-11-06 编辑:熊水斌)