

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.04.010

宜兴抽水蓄能电站上库主坝重力挡墙位移影响因素分析

王柳江^{1,2},赵志杰^{1,2},刘斯宏^{1,2},鲁洋^{1,2},沈超敏^{1,2}

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 大坝长效特性及环保修复技术中西联合实验室,江苏 南京 210098)

摘要: 利用宜兴抽水蓄能电站上库主坝重力挡墙的位移观测资料,初步分析了挡墙位移变化规律及其影响因素;基于温度应力计算原理,采用沈珠江流变模型和改进的湿化模型(C_w - D_w)对坝体和挡墙应力变形进行数值模拟。结果表明:墙后坝体堆石流变、湿化以及环境温度变化是影响运行期挡墙位移的主要因素;坝体运行初期挡墙往上游侧偏移,这主要与墙后堆石体偏应力流变量相对较大有关;降雨入渗造成堆石湿化变形,导致挡墙往坝体下游侧的水平位移显著增大;挡墙位移的周期性变化与环境温度相关;墙顶位移、墙后土压力的监测值和计算值基本一致,证明了该数值计算方法的有效性。

关键词: 重力挡墙;位移;土压力;流变;湿化变形;温度应力;宜兴抽水蓄能电站
中图分类号: TV743;TV223 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)04-0358-08

Analysis of influence factors on gravity retaining wall displacement of main dam for the upper-reservoir of Yixing Pumped-Storage Hydropower Station

WANG Liujiang^{1,2}, ZHAO Zhijie^{1,2}, LIU Sihong^{1,2}, LU Yang^{1,2}, SHEN Chaomin^{1,2}
(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. International Joint Laboratory of Long-Term Behaviour & Environmentally Friendly Rehabilitation Technologies on Dams, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this work, by utilizing the monitoring data of a gravity retaining wall in the upper-reservoir of Yixing Pumped-Storage Hydropower Station, the variations of retaining wall displacement and their influence factors were studied. After that, a numerical simulation was conducted to investigate the displacements of rockfill dam and retaining wall with the consideration of the coupled effect of temperature. Here, the rheological model and wetting model (C_w - D_w) proposed by Shen were used to model the rheological deformation and wetting deformation of rockfill materials. The results show that the rheological deformation, wetting deformation, and environmental temperature are three main influence factors for the displacement of retaining wall in the operation period. In the early stage of dam operation, there was a displacement for the retaining wall occurred towards upstream, which was mainly attributed to the relatively larger rheological deviator strain for rockfill materials near this place. The wetting deformation of rockfill materials was caused by rainfall infiltration and led to the increase of displacement of retaining wall towards downstream. The cycling variations of displacement were related to the environmental temperature. In addition, the calculated displacement and earth pressure agreed well with measured values, which indicates that the numerical method used in this study was effective.

Key words: gravity retaining wall; displacement; earth pressure; rheology; wetting deformation; thermal stress; Yixing Pumped-Storage Hydropower Station

挡墙位移对挡墙侧向土压力的性质、大小及分布形式影响显著,国内外相关学者分别从模型试验和计算方法两个角度对此进行了研究。Terzaghi 等^[1-3]根据模型试验结果认为,墙体位移模式和相对位移量对土压力的大小、作用点及分布影响较大。在模型试验的基础上,一些学者开展了非极限状态下的土压力理论和方法研究,提出了考虑挡墙位移影响的刚性挡墙土压力计算方法^[4-8],得到墙背土压力大小和分布与挡墙位移

基金项目: 国家自然科学基金雅砻江重点项目(U1765205);中央高校基本科研业务费专项(2019B11214)
作者简介: 王柳江(1985—),男,副教授,博士,主要从事土石坝工程及地基处理技术研究。E-mail:15850514642@163.com
引用本文: 王柳江,赵志杰,刘斯宏,等. 宜兴抽水蓄能电站上库主坝重力挡墙位移影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):358-365.
WANG Liujiang, ZHAO Zhijie, LIU Sihong, et al. Analysis of influence factors on gravity retaining wall displacement of main dam for the upper-reservoir of Yixing Pumped-Storage Hydropower Station[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 358-365.

模式及位移量关系密切的结论。因此,研究挡墙位移变化规律对于合理预测墙后土压力大小及分布规律极其重要。

宜兴抽水蓄能电站位于江苏省宜兴市西南郊约 7 km 的铜官山区,是一座日调节抽水蓄能电站。上水库位于铜官山主峰附近的沟源坳地,由主坝、副坝和库周山岭围成。其中,上水库主坝上游由钢筋混凝土面板挡水,下游堆石体建立在陡倾的斜坡上,尾部由最大高度为 45.9 m 的重力挡墙拦截坝体,形成了目前国内外少见的混合坝型(图 1)。由于重力挡墙较高且建在倾斜基岩面,同时墙后还承受了坝体下游堆石作用的土压力,使得重力挡墙不可避免地产生了一定的位移。因此,考虑水库运行期墙体的位移模式及位移量对挡墙和墙后坝坡稳定至关重要,应对其进行重点研究^[9]。本文通过原型观测和数值模拟,分析该抽水蓄能电站上水库重力挡墙的位移及其影响因素,以期对工程安全运行提供参考。

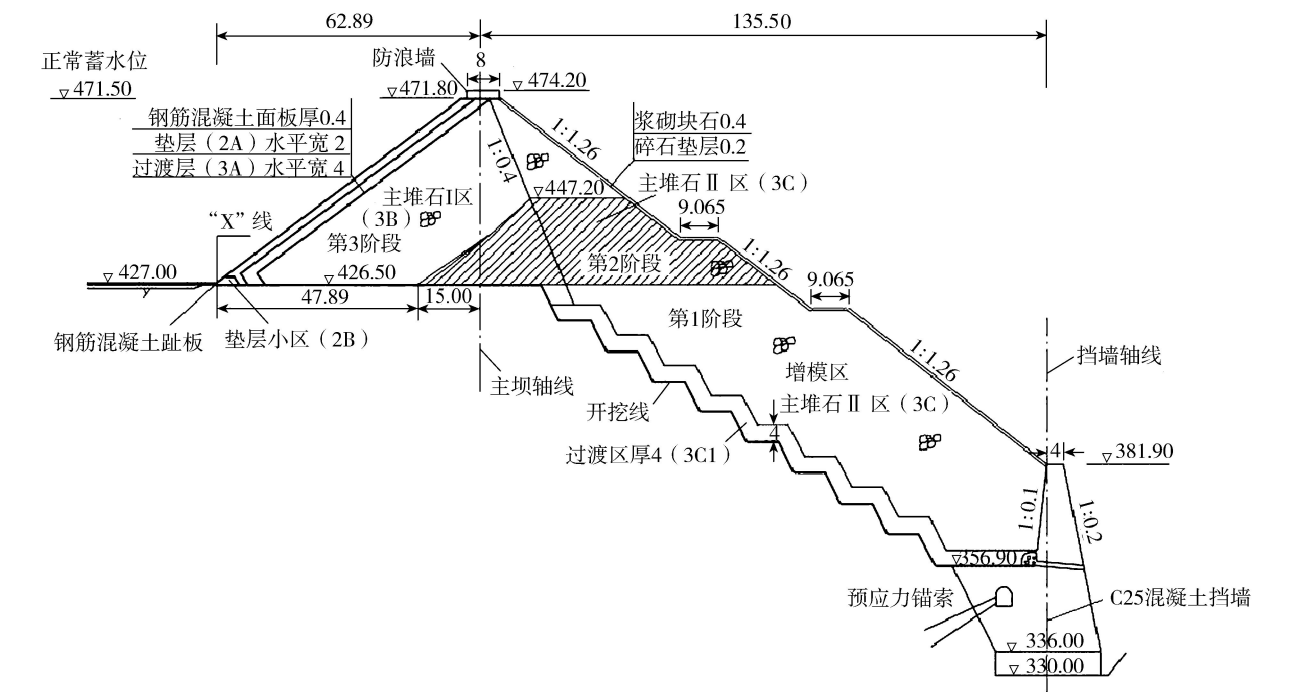


图 1 上水库面板堆石混合坝标准断面(单位:m)
Fig.1 Sketch of concrete faced rockfill dam in upper reservoir (units: m)

1 重力挡墙位移监测分析

由于坝体下游侧重力挡墙变形对下游坝坡稳定影响显著,在墙顶设置了外部变形监测点。图 2 为 15 号挡墙段(最大高度挡墙)2005 年 5 月至 2016 年 2 月墙顶水平和竖向位移实测过程线。主坝填筑自 2004 年 12 月 15 日开始,2006 年 9 月 8 日竣工。从图 2 可以看出,从 2005 年 5 月到 2006 年 2 月,受墙后堆石填筑产

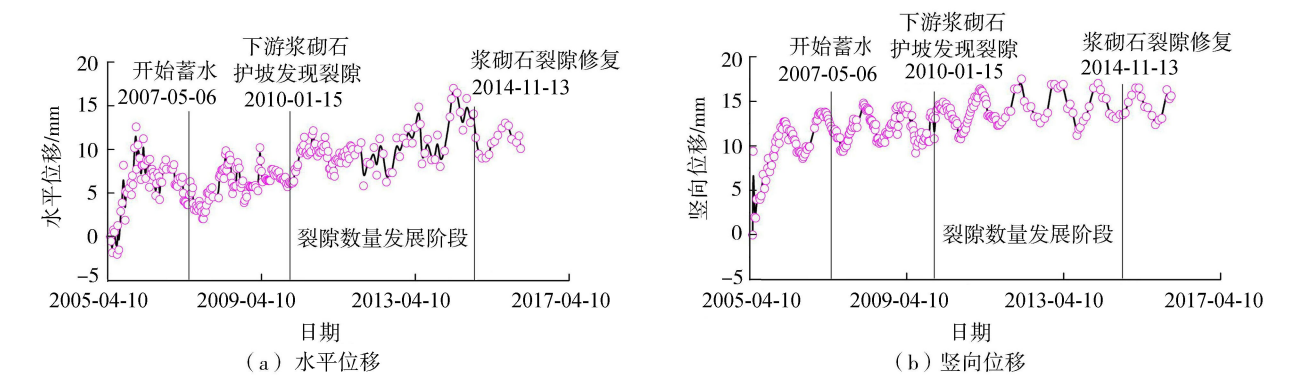


图 2 15 号挡墙墙顶位移实测过程
Fig.2 Measured crest displacement process of No.15 retaining wall

生的侧向土压力作用,墙顶产生往下游侧的水平位移,且随着坝体填筑高程的增大而增大。2006年2月到2007年9月,墙顶往下游侧的水平位移逐渐减小,由此可见,墙顶往下游侧的水平位移主要发生在主坝填筑完1a内,初步推测由墙后堆石料的流变引起。上水库运行后,墙顶水平往下游侧位移呈周期性波动并逐渐增大的趋势。值得注意的是,自2012年6月之后,墙顶水平位移增长速率明显加快,并在2014年4月达到了峰值,此后逐渐减小,并趋于稳定。根据运行阶段的现场巡查,自2010年1月起,挡墙后的堆石体浆砌石护坡表面开始出现裂隙,此后裂隙数量呈逐渐增加趋势。这些裂隙为降雨提供了快速入渗通道,渗入坝体内的雨水使得堆石发生湿化变形,同时还减小了坝体与坝基间的接触摩擦作用,导致墙顶往下游侧水平位移增大。根据库区降雨资料,墙顶水平位移增长速率加快的阶段较好地对应了降水量较大的时期。与此同时,针对坝坡裂隙逐渐增多的情况,电站对下游坝坡浆砌石护坡进行了修补,于2014年11月完工,此后墙顶水平位移明显减小。综上可知,降雨入渗引起的堆石湿化变形是影响挡墙运行期位移变化的主要因素之一。此外,墙顶水平位移随着时间发生周期性波动,这主要是因为重力挡墙受环境温度影响的缘故。

对于竖向位移,其在坝体填筑过程中随墙后坝体填筑高程增大而增大;进入运行阶段后,墙顶竖向位移呈周期性变化且呈缓慢增长趋势。可以看出,墙顶竖向位移受环境温度影响较大,受堆石流变和湿化变形影响相对较小。

2 数值分析

通过监测资料分析,初步判断坝体填筑、堆石流变、湿化以及环境温度变化是重力挡墙变形的主要影响因素。进一步进行数值模拟分析以验证上述影响因素并研究挡墙及墙后土压力的变形规律。计算采用河海大学刘斯宏课题组自主开发的土石坝静动力计算软件SDAS^[10]。

2.1 温度应力计算原理

在计算域Ω内任何一点处,不稳定温度场T(x,y,z,t)须满足热传导连续方程:

∂T/∂t = a(∂²T/∂x² + ∂²T/∂y² + ∂²T/∂z²) + ∂θ/∂τ (∀(x,y,z) ∈ Ω) (1)

式中:T——温度,℃;a——导温系数,m²/h;θ——绝热温升,℃;τ——龄期,d;t——时间,d。

求解式(1)的初始条件和边界条件如下:

初始条件 T = T₀(x,y,z) (2)

第一类已知温度边界 T(x,y,z,t) = f(x,y,z,t) (3)

第二类绝热边界 ∂T(x,y,z,t)/∂n = 0 (4)

第三类表面放热边界 -λ ∂T(x,y,z,t)/∂n = β[T(x,y,z,t) - Tₐ(x,y,z,t)] (5)

式中:β——混凝土表面的放热系数,kJ/(m²·h·℃);λ——导热系数,kJ/(m·h·℃);Tₐ——环境温度,℃。

利用变分原理,对式(1)进行空间域离散,引入初始条件和边界条件,采用向后差分法,得到温度场有限元计算的递推方程:

(H + 1/Δtₙ R) Tₙ₊₁ - 1/Δtₙ R Tₙ + Fₙ₊₁ = 0 (6)

式中:H——热传导矩阵;R——热传导补充矩阵;Tₙ、Tₙ₊₁——结点温度列阵;Fₙ₊₁——结点温度荷载列阵;n——时段序数;Δtₙ——时间步长。

由于重力挡墙为大体积混凝土结构,混凝土在复杂应力状态下的应变增量包括弹性应变增量、徐变应变增量、温度应变增量和收缩应变增量:

Δεₙ = Δεₙₑ + Δεₙc + ΔεₙT + Δεₙs (7)

式中:Δεₙₑ——弹性应变增量;Δεₙc——徐变应变增量;ΔεₙT——温度应变增量;Δεₙs——收缩应变增量。

关于温度应力的有限元计算方法见文献[11]。

2.2 计算模型和参数

按照实际坝体堆石料分区和填筑过程,同时考虑坝基岩体,建立了 15 号典型挡墙段的坝体有限元网格,网格节点总数 8824 个,单元总数 4 273 个。坝体与基岩、堆石和挡墙之间设置了 Goodman 接触面单元,参数通过接触面剪切试验和工程类比确定。基岩、混凝土面板和挡墙采用线弹性模型计算,筑坝土石材料采用 E - B 模型计算,参数通过室内试验和反演分析确定^[12](表 1、表 2)。堆石流变采用沈珠江流变模型^[13],利用运行期的坝体变形资料反演计算得到流变模型参数如下: $\alpha=0.008\text{ d}^{-1}$, $R_b=0.000\ 9$, $R_c=0.000\ 3$, $R_d=0.003$, $m_1=0.8$, $m_2=0.6$, $m_3=0.6$ 。受篇幅限制,反演过程不再赘述。堆石湿化模拟采用考虑围压 σ_3 对湿化体变影响的改进 C_w - D_w 模型^[14],模型参数通过室内试验和工程类比确定^[15]: $W_a=14.3$, $W_b=146$, $D_w=0.009$ 。此外,混凝土和筑坝土石材料的热力学参数主要通过室内试验和工程类比确定,如表 3 所示。

表 2 筑坝土石材料 E - B 模型参数

Table 2 Calculation parameters of E - B model for rockfill material								
材料	R_f	K	n	K_b	m	φ_0	$\Delta\varphi$	容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)
垫层	0.79	654	0.25	400	-0.04	56.4	12.8	23.2
过渡层	0.79	791	0.15	464	-0.20	55.8	11.2	23.0
主堆石增模区	0.89	913	0.42	482	0.33	55.1	8.9	22.5
主堆石	0.88	655	0.31	366	0.29	53.1	7.8	21.5

表 3 材料主要热力学计算参数

Table 3 Main thermal parameters of materials						
材料	$a/(\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1})$	$\lambda/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{℃}^{-1})$	比热/($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{℃}^{-1}$)	线膨胀系数/(10^{-6}℃^{-1})	$\beta(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{℃}^{-1})$	
基岩	0.0039	9.65	0.94	7.0	45.6	
挡墙	0.0051	11.71	0.955	6.2	51.3	
面板	0.0056	11.87	0.95	7.5	55.6	
垫层	0.0026	5.32	0.88	0.3	41.2	
过渡层	0.003	6.18	0.88	0.3	41.2	
主堆石	0.002	4.42	0.98	0.85	29.5	

对于混凝土材料,还需要考虑徐变度 $C(t,\tau)$ 、自身收缩变形 $\varepsilon_0(\tau)$ 、绝热温升 $\theta_{c20}(\tau)$ 和龄期弹性模量 E 等特性,计算公式分别为

$$C(t,\tau)=7.69\times(1+9.20\tau^{-0.45})[1-e^{-0.30(t-\tau)}]+17.5\times(1+1.70\tau^{-0.45})[1-e^{-0.005(t-\tau)}]$$

(8)

$$\varepsilon_0(\tau)=\frac{\tau}{152.8+3.3\tau}$$

(9)

$$\theta_{c20}(\tau)=32.1\times(1-e^{-0.44\tau^{0.69}})$$

(10)

$$E=22\times(1-e^{-0.4\tau^{0.39}})$$

(11)

根据坝址区多年实测气温统计资料,大气温度 T_a 采用下式拟合:

$$T_a=17.3+14.3\cos\left[\frac{\pi}{6}(t-6.7)\right]$$

(12)

式中: t ——月份。

2.3 计算过程

根据工程实际施工和运行情况,计算模拟了挡墙浇筑、坝体填筑、面板浇筑、蓄水以及坝体竣工后 10 a (2006 年 9 月至 2016 年 9 月)的运行过程。计算考虑了堆石流变、湿化变形以及环境温度的影响,其中堆石流变从 2005 年 12 月增模区填筑完成 2 个月时开始。堆石湿化根据坝体变形和降雨实测资料分为 3 个阶段:第一阶段为 2007 年 5 月至 2008 年 5 月,受上水库初期蓄水影响;第二、第三阶段为雨水较为充足的年份,分别为 2010 年 1 月至 2010 年 12 月、2013 年 1 月至 2014 年 4 月。在第二阶段,下游坝坡浆砌石护坡刚开始出现缝隙,降雨入渗量相对较少;在第三阶段,浆砌石护坡表面缝隙分布显著,且年降水量较平常年份显

著增大,所以降雨入渗量较大。计算通过墙后地下水位变动激活湿化单元,同一单元不考虑二次湿化。

3 计算结果分析

3.1 坝体变形分析

与常规土石坝不同,该大坝下游坝体建基面位于陡倾的斜坡上,不利于坝体稳定。为控制下游堆石体的变形,工程填筑施工时采用了增模技术以提高其变形模量。图 3 为竣工期坝体位移分布,位移方向规定如下:顺河向位移往下游为正,沉降量向上为正。从图 3 可以看出,坝体整体往下游侧位移,最大顺河向位移和沉降均位于下游堆石区,竣工期最大顺河向位移和沉降量分别为 128 mm 和-233 mm。由于对下游堆石体进行了增模处理,最大位移对比同类工程相对较小。若以挡墙建基面作为坝底高程,最大沉降量仅为最大坝高 135.8m 的 0.17%,远小于规范要求的 1%。图 4 为运行 10 a 后的坝体位移分布。考虑堆石流变和湿化的共同作用,坝体位移较竣工期略有增大,最大顺河向位移和沉降量分别为 148 mm 和-260 mm,较竣工期增加了 20 mm 和 27 mm,可见堆石流变和湿化对下游堆石区位移的影响相对较小。此外,重力挡墙能够有效抑制坝体往下游侧的位移,挡墙处的顺河向位移趋向于 0。综上,该大坝设计施工合理,整体结构稳定,能确保抽水蓄能电站安全运行。

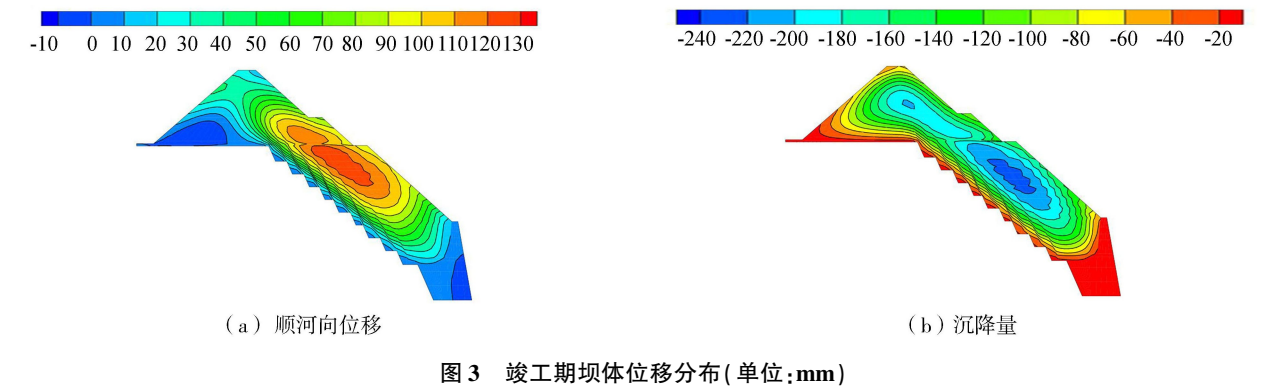


Fig. 3 Distributions of displacement after construction of rockfill dam(unit:mm)

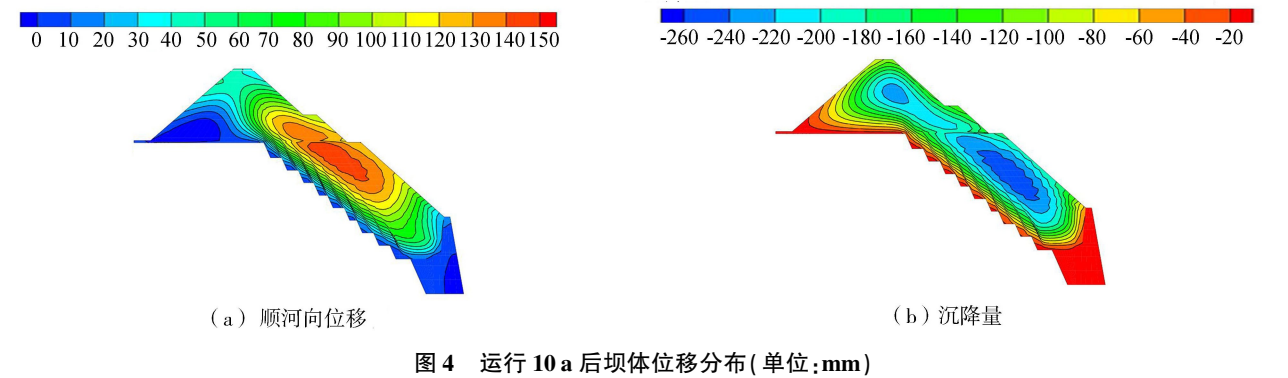


Fig. 4 Distributions of displacement after 10-year operation for rockfill dam(unit:mm)

3.2 挡墙位移分析

图 5 为墙顶位移计算值和实测值的对比情况。从图 5(a)可以看出,墙顶水平位移计算值与实测值变化趋势基本吻合,说明考虑堆石料流变、湿化以及温度场共同影响的计算方法是合理的。挡墙在 2006 年 2 月至 2007 年 9 月产生了往上游侧的顺河向位移,考虑到该位移主要发生在填筑期和坝体竣工后 1 a 内,分析初步表明是由堆石流变所致。

为分析挡墙位移内在的影响机制,本文增加了不考虑堆石流变工况的对比。图 6 为考虑流变和不考虑流变工况下竣工期至 2007 年 9 月产生的顺河向位移增量。从图 6 可以看到,当考虑堆石流变时,运行期顺河向位移整体朝向下游,但在下游挡墙部位出现局部往上游侧的位移。分析其原因与下游坝体靠近挡墙部位的应力水平有关。根据沈珠江流变模型^[13],此时偏应变流变量较大,使下游挡墙部位堆石体产生局部向上游位移。当不考虑流变时,竣工期至 2007 年 9 月的坝体位移主要受温度影响,此时挡墙部位的下游堆石

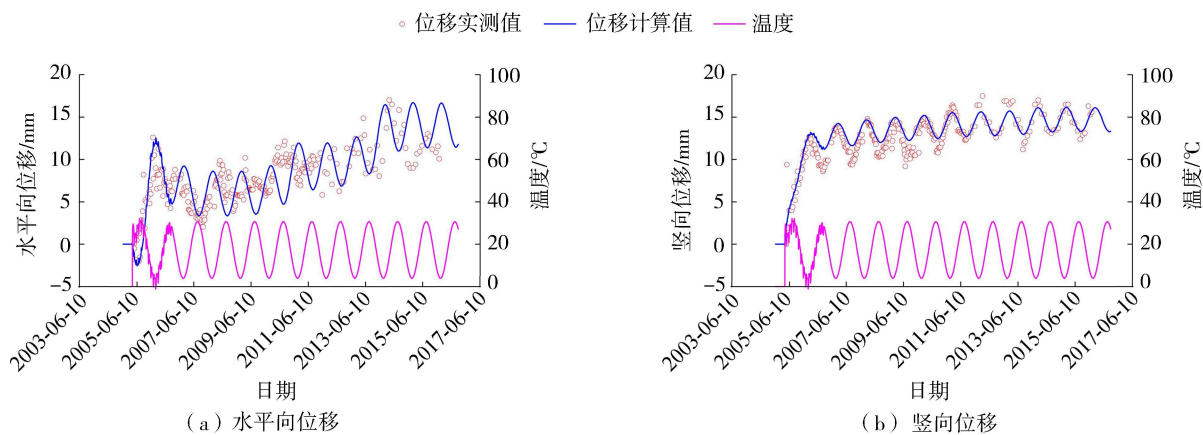


图 5 墙顶位移计算值与实测值对比

Fig. 5 Comparison between measured and calculated crest displacements for No. 15 retaining wall

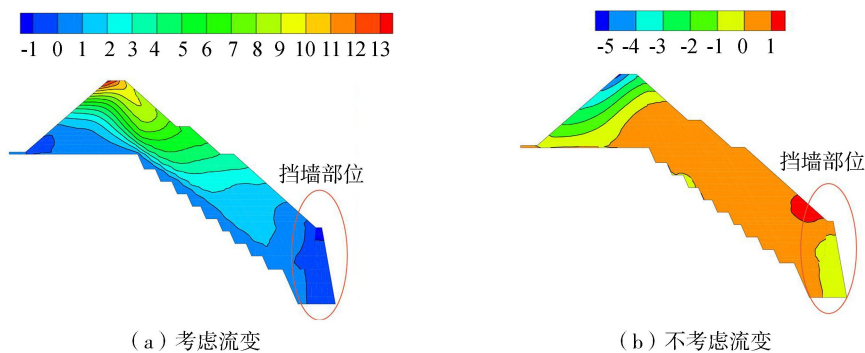


图 6 竣工期至 2007 年 9 月坝体顺河向位移增量分布(单位:mm)

Fig. 6 Distribution of incremental horizontal displacement from time of completion to September 2007(unit:mm)

未出现往上游侧位移,这进一步验证了堆石流变是导致挡墙在 2006 年 2 月至 2007 年 9 月整体往上游偏移的主要因素。当考虑墙后堆石湿化变形时,挡墙往下游侧位移呈明显的增长趋势。因此,当下游坝体浆砌石护坡出现较多缝隙时,降雨入渗引起的墙后堆石湿化变形是导致挡墙往下游侧位移增大的主要因素之一。此外,温度对墙顶水平位移具有影响,主要表现为负相关性。当温度升高时,挡墙下游侧温度升高,混凝土产生膨胀变形,相对于低温季节产生指向上游的位移增量,使得往下游侧位移减小;反之,温度降低使得挡墙往下游侧位移增大。该位移主要是由于混凝土随环境温度胀缩变形所致,对坝体整体稳定性影响不大。

由图 5(b)可见,墙顶竖向位移的计算值与实测值同样吻合较好。在坝体开始填筑到 2006 年 2 月,沉降呈递增趋势,该位移由堆石填筑引起的墙后土压力增加和挡墙混凝土自身收缩变形引起;此后,墙顶竖向位移主要受环境温度的影响,随着环境温度的上升,混凝土产生膨胀变形,沉降值减小,反之增加。此外,挡墙后期沉降受堆石流变和湿化影响略有增加,但增加幅度较小,符合变形监测规律。

图 7 为不同时间挡墙水平位移沿高程分布计算值。由图 7 可以看出,在土压力作用下,挡墙的位移模式为绕墙底部一点的转动模式(RBT 模式),不同时刻的位移量变化显著。2006 年 5 月,当坝体填筑到高程 426.50 m 时,墙顶最大水平位移为 10.1 mm;受堆石流变以及环境温度变化的影响,2007 年 7 月墙顶最大水平位移减小至 5.3 mm;考虑墙后堆石湿化变形的影响,2014 年 4 月墙顶最大水平位移增加到 17.1 mm。设计阶段,挡墙土压力计算采用了 Coulomb 土压力理论,未考虑挡墙位移的影响。因此,运行期的挡墙土压力可采用非极限状态下的土压力理论计算得到。

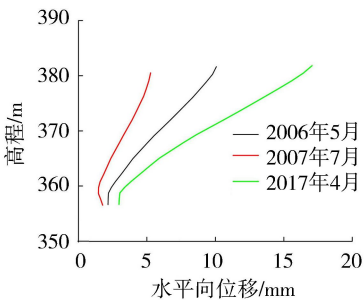


图 7 不同时间挡墙水平位移沿高程分布

Fig. 7 Horizontal displacement distribution of retaining wall along the depth at different time

3.3 挡墙土压力分析

图8为计算得到的墙后土压力与实测值的对比情况。从图8可以看出,不同特征点(B_1 、 B_2 、 B_3)处的挡墙土压力计算值与实测值随时间变化规律吻合较好。填筑期挡墙土压力随着墙后堆石填筑高程的增大而增大,也就是说挡墙所支撑的堆石体越高,作用在挡墙上的土压力越大,这符合重力挡墙的土压力变化规律。此外,挡墙土压力存在明显的温度影响区,越靠近墙顶,墙后土压力受温度作用越明显,而靠近墙底位置几乎不受温度影响。值得注意的是,实测墙底土压力随温度波动明显,这与传感器输出频率受温度影响有关,由于传感器温度率定参数不确定,本文无法对实测土压力值进行修正。从图8可以看到,挡墙土压力与温度之间表现为正相关,土压力随温度的上升而上升,随温度的下降而下降。这是由于温度升高时,混凝土膨胀,挡墙往被动土压力方向移动,温度降低时则往主动土压力方向移动。根据计算结果还可以发现,受堆石湿化影响,墙后土压力出现了增长趋势,建议加强坝体防降雨入渗和墙后排水等措施。

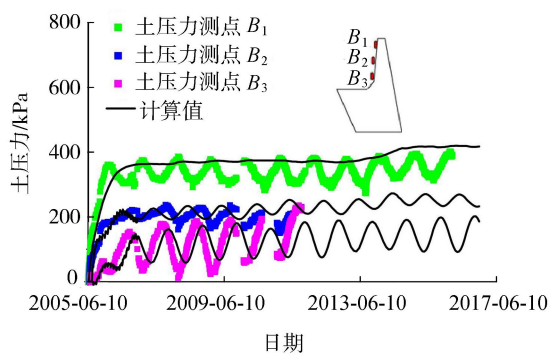


图8 墙后土压力计算值与实测值对比
Fig.8 Comparison between measured and calculated earth pressures behind retaining wall

4 结 论

- a. 坝体堆石流变、降雨入渗引起的堆石湿化以及环境温度变化是影响运行期上库重力挡墙位移的主要因素,其中堆石湿化主要是由于下游浆砌石护坡破损出现较多缝隙,加快降雨入渗所致。
- b. 堆石流变对坝体填筑期和运行初期的挡墙位移变化影响较大,对后期影响较小;堆石湿化导致挡墙水平位移在2013—2014年显著增大,并导致墙后土压力增大;环境温度的周期性变化使得挡墙位移和土压力产生周期性波动。
- c. 本工程混合坝下游坝体建于斜坡上,坝体形式较为复杂,但其总体变形控制较好,能够满足坝体稳定,说明本工程设计施工是合理的。
- d. 考虑堆石料流变、湿化以及温度场的数值计算方法是符合工程实际的。

参考文献:

[1] TERZAGHI K. Record earth pressure testing machine[J]. Engineering News Record,1932,109:365-369.

[2] FANG Y S,ISHIBASHI I. Static earth pressures with various wall movements[J]. Journal of Geotechnical Engineering,1986,112(3):317-333.

[3] 徐日庆,陈页开,杨仲轩,等. 刚性挡墙被动土压力模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2002,24(5):569-575. (XU Ri-qing, CHEN Yekai,YANG Zhongxuan,et al. Experimental research on the passive earth pressure acting on a rigid wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2002,24(5):569-575. (in Chinese))

[4] CHANG M F. Lateral earth pressure behind rotating walls[J]. Canadian Geotechnical Journal,1997(34):498-509.

[5] 徐日庆,龚慈,魏刚,等. 考虑平动位移效应的刚性挡墙土压力理论[J]. 浙江大学学报(工学版),2005,39(1):119-122. (XU Ri-qing,GONG Ci,WEI Gang,et al. Theory of earth pressure against rigid retaining walls considering translational wall movement effect[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2005,39(1):119-122. (in Chinese))

[6] 彭述权,刘爱华,樊玲. 不同位移模式刚性挡墙主动土压力研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(1):32-35. (PENG Shu-quan,LIU Aihua,FAN Ling. Active earth pressure for rigid retaining walls with different displacement modes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2009,31(1):32-35. (in Chinese))

[7] 宋飞,张建民. 考虑挡墙位移效应的被动侧土压力计算方法[J]. 岩土力学,2011,32(1):151-157. (SONG fei,ZHANG Jianmin. Computational method of earth pressure at passive side considering wall displacement effect[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(1):151-157. (in Chinese))

[8] 杨泰华,贺怀建. 考虑位移效应的土压力计算理论[J]. 岩土力学,2010,31(11):3635-3639. (YANG Taihua,HE Huaijian. Earth pressure calculation theory considering displacement effects[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(11):3635-3639. (in Chinese))

[9] 杨健,刘斯宏,杨建洲. 宜兴抽水蓄能电站高重力挡墙稳定性综合评价[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(增刊2):

4440-4445. (YANG Jian,LIU Sihong,YANG Jianzhou. Complex evaluation on stability of high gravity of high gravity retaining wall of Yixing Pumped-Storage Power Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(Sup2):4440-4445. (in Chinese))

[10] LIU Sihong,WANG Liuijiang,WANG Zijian,et al. Numerical stress-deformation analysis of cut-offwall in clay-core rockfill damon thick overburden[J]. Water Science and Engineering,2016,9(3):219-226.

[11] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国电力出版社,1999.

[12] 郇能惠,武清玺,陆军,等. 挡墙土压力及其分布影响因素的研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(8):1381-1386. (LI Nenghui,WU Qingxi,LU Jun,et al. Influencing factors for earth pressure and its distribution on retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(8):1381-1386. (in Chinese))

[13] 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]. Hydro-Science and Engineering,1994(4):335-342. (in Chinese))

[14] 李全明,于玉贞,张丙印,等. 黄河公伯峡面板堆石坝三维湿化变形分析[J]. 水力发电学报,2005,24(3):24-29. (LI Quanming,YU Yuzhen,ZHANG Bingyin,et al. Three-d mensional analysis for the wetting deformation of GONG Boxia concrete face rock-fill dam on the Yellow River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2005,24(3):24-29. (in Chinese))

[15] 肖贡元. 宜兴抽水蓄能电站上水库主坝下游堆石区设计优化[J]. 水利水电科技进步,2010,30(2):49-52. (XIAO Gongyuan. Design optimization of downstream rockfill zone in main dam of upper reservoir of Yixing Pumped Storage Power[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources. 2010,30(2):49-52. (in Chinese))

(收稿日期:2020 - 05 - 09 编辑:胡新宇)

(上接第 334 页)

[10] 徐祖信,卢士强. 平原感潮河网水动力模型研究[J]. 水动力学研究与进展:A 辑,2003,18(2):176-181. (XU Zuxin, LU Shiqiang. Hydrodynamic model for tidal river network[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2003,18(2): 176-181. (in Chinese))

[11] 李慧玲,陈菁,金秋,等. 水闸规模对河道水动力水环境的影响研究[J]. 人民长江,2019,49(2):181-185. (LI Huiling, CHEN Jing, JIN Qiu, et al. Study on influence of sluice size on hydrodynamic and water environment of river channels[J]. Yangtze River, 2019,49(2): 181-185. (in Chinese))

[12] 刘贵平,唐洪武,雷燕,等. 上海世界博览会园区河网水环境调控[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(3):204-210. (LIU Guiping, TANG Hongwu, LEI Yan, et al. Water environmental regulation for river network in Shanghai World Expo Park[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(3): 204-210. (in Chinese))

[13] 李晓,唐洪武,王玲玲,等. 平原河网地区闸泵群联合调度水环境模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):393-399. (LI Xiao, TANG Hongwu, WANG Lingling, et al. Simulation of water environment under joint operation of gates and pumps in plain river network area[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(5): 393-399. (in Chinese))

[14] 王领元. 丹麦 MIKE11 水动力模块在河网模拟计算中的应用研究[J]. 中国水运(学术版),2007,7(2):106-107. (WANG Lingyuan. Application research of MIKE11 hydrodynamic modle in river network simulation calculation[J]. China Water Transport, 2007,7(2): 106-107. (in Chinese))

[15] 吴天蛟,杨汉波,李哲,等. 基于 MIKE11 的三峡库区洪水演进模拟[J]. 水力发电学报,2014,33(2):51-57. (WU Tianjiao, YANG Hanbo, LI Zhe, et al. Modeling of flood routing for Three Gorges reservoir area based on MIKE11[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 51-57. (in Chinese))

[16] 陈璇,杨根林,杨红卫. 基于 MIKE11 模型的秦淮河流域洪水调度方案[J]. 水电能源科学,2019,37(1):70-73. (CHEN Xuan, YANG Genlin, YANG Hongwei. Flood regulation scheme in the Qinhuai River watershed using MIKE11 model[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(1): 70-73. (in Chinese))

[17] 董亮,俞芳琴,刘俊,等. 太湖流域锡澄片主城区畅流活水方案研究[J]. 中国农村水利水电,2020(1):48-51. (DONG Liang, YU Fangqin, LIU Jun, et al. Research on the scheme of water transfer in the main district of Xicheng area in Taihu basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(1): 48-51. (in Chinese))

[18] 吴挺峰,周镔,崔广柏,等. 河网概化密度对河网水量水质模型的影响研究[J]. 人民黄河,2006,28(3):46-48. (WU Tingfeng, ZHOU E, CUI Guangbo, et al. Research on the influence of river network generalized density on river network water quantity and quality model[J]. Yellow River, 2006,28(3): 46-48. (in Chinese))