

# 向家坝水电站左岸近坝边坡抬升变形数值模拟

蒋中明<sup>1,2</sup>, 李双龙<sup>1</sup>, 冯树荣<sup>3</sup>, 钟辉亚<sup>3</sup>, 李学政<sup>3</sup>, 曾祥喜<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南长沙 410004; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南长沙 410004; 3. 中国电建中南勘测设计研究院有限公司, 湖南长沙 410014)

**摘要:**为深入认识向家坝水电站左岸近坝边坡的抬升变形现象,利用流固耦合数值试验研究了岩体的扩容变形机理,在此基础上采用流固耦合数值分析方法对向家坝水电站左岸近坝边坡的抬升变形过程进行了数值模拟,得到了近坝边坡抬升变形的空间分布,并对泄压孔泄压对抬升变形的控制效果进行了评价。结果表明:岩体扩容体积应变随岩体渗透系数增大而增大,随变形模量增大而减小,岩体初始应力对抬升变形的影响微弱;渗流场改变是引起近坝边坡抬升变形的直接诱因,边坡抬升变形是岩土体内渗流场和应力场相互作用的结果,采用流固耦合理论揭示近坝边坡的抬升变形机制是合理的;深层泄压孔可以有效控制近坝边坡的抬升变形量。

**关键词:**边坡; 抬升变形; 泄压孔; 流固耦合理论; 数值仿真; 向家坝水电站

**中图分类号:**TV741; TU457      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2018)04-0064-06

**Numerical simulation of uplift deformation of left bank slope near dam of Xiangjiaba Hydropower Station//JIANG Zhongming<sup>1,2</sup>, LI Shuanglong<sup>1</sup>, FENG Shurong<sup>3</sup>, ZHONG Huiya<sup>3</sup>, LI Xuezheng<sup>3</sup>, ZENG Xiangxi<sup>3</sup>(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410004, China; 3. PowerChina Zhongnan Engineering Co., Ltd., Changsha 410014, China)**

**Abstract:** To further understand the uplift deformation phenomenon that occurs at the left bank slope near the dam of Xiangjiaba Hydropower Station, hydro-mechanical coupling numerical tests were used to study the mechanism of rock mass expansion and deformation. Based on the hydro-mechanical coupling analysis, the uplift deformation process was simulated. The spatial distribution of the deformation was obtained and the control effect of the pressure relief holes on the uplift deformation was evaluated. The results indicate that the volume expansion strain of the rock mass increases with the permeability coefficient and decreases with the increase of deformation modulus. The initial stress has little effect on uplift deformation. Variation of the seepage field is the direct cause of uplift deformation and the uplift deformation is also the result of the interaction between seepage field and stress field. It is reasonable to use hydro-mechanical coupling theory to reveal the uplift deformation mechanism. Deep drainage holes for pressure relieving are effective for the controlling of the uplift deformation.

**Key words:** slope; uplift deformation; pressure relief hole; hydro-mechanical coupling theory; numerical simulation; Xiangjiaba Hydropower Station

水库蓄水后大坝及近坝边坡产生抬升变形是水利工程中比较少见的现象。蓄水导致大坝及岸坡产生抬升变形的最早记录是吉尔吉斯斯坦的托克托古尔重力坝,随后苏联境内的其他一些水利工程也出现了类似的情况<sup>[1]</sup>。在国内,铜街子水电站在1992年4月5日蓄水后,坝体和右岸岩体也产生了显著的抬升变形,抬升变形最大值分别达到22.2 mm和24.3 mm<sup>[2-3]</sup>;江垭水库在1998年蓄水后,大坝及近坝山体同样产生抬升,所测山体最大抬升变形达到

21.8 mm,120 m 高程廊道最大抬升34.5 mm<sup>[4,9]</sup>;向家坝水电站初期蓄水后,左岸近坝边坡也出现了不同程度的抬升变形现象,其最大变形量超过13.0 mm。

针对水库蓄水引起大坝及近坝边坡抬升变形的问题,国内外学者进行了初步研究。Liu等<sup>[3]</sup>认为铜街子大坝及右岸近坝山体抬升变形的主要原因是坝址区承压含水层的作用和坝基强度参数的弱化以及构造应力的组合影响;伍法权等<sup>[5]</sup>结合监测数据

与江垭水库地质资料,认为热水含水层中的有效应力减小导致岩体卸荷扩容,进而产生抬升变形;祁生文等<sup>[6]</sup>利用 FLAC3D 数值软件对江垭大坝进行了抬升变形过程模拟,认为水库蓄水是抬升变形的本质原因;蒋中明等<sup>[10]</sup>提出了水库蓄水条件下的抬升变形水文地质结构模式,探讨了水库枢纽区不同地质条件对抬升变形的影响。尽管现有研究在大坝及近坝边坡抬升变形机制研究方面取得了初步的有效成果,然而,在抬升变形内在机理方面的研究还有待完善,同时大坝及近坝边坡抬升变形对工程安全的影响以及抬升变形的控制措施方面研究也还不足。为此,本文尝试从流固耦合数值试验的角度,进一步研究大坝及近坝边坡抬升变形的内在机理,在此基础上采用流固耦合分析方法研究向家坝水电站左岸近坝边坡变形发展的时间和空间分布规律,以及抬升变形对灌浆帷幕工程等可能带来的不利影响,并评价泄压孔泄压对抬升变形的控制效果。

## 1 岩体扩容机制变形数值试验

王兰生等<sup>[7]</sup>在江垭水电站大坝抬升变形研究中,通过对裂隙岩体在高渗压条件下的体积变形物理试验,提出了岩体的孔隙水压力扩容机制,指出岩体孔隙水压力改变可以引起固体骨架发生相应的变形。岩体的孔隙水压力扩容机制实质为岩体与高压孔隙(裂隙)水的相互作用行为(即流固耦合作用),孔隙(裂隙)水压的增大导致岩体有效应力降低,进而使岩体产生扩容行为。为进一步说明岩体扩容中的流固耦合作用行为,基于流固耦合数值分析方法,采用数值试验分析岩体扩容变形机理在抬升变形中的适用性,同时对孔隙水压力变化作用下岩体变形规律进行探讨。数值模型试件尺寸为  $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ ,计算网格如图 1 所示。

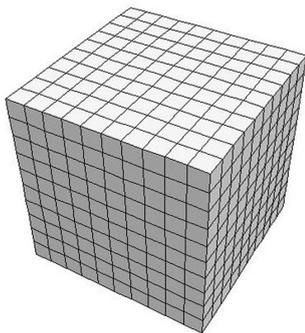


图 1 数值试件网格

流体边界:试件上下面施加孔隙水压力边界,其余各面为不透水边界,如图 2(a)所示(图中  $q$  为流量,  $p_0$  为初始孔隙水压力,  $\Delta p$  为施加的孔隙水压力增量)。

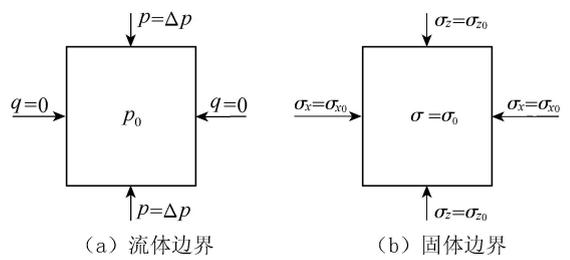


图 2 计算边界

固体边界条件:试件 6 个面上分别施加应力边界,如图 2(b)所示(图中  $\sigma_0$  为初始应力,  $\sigma_{x0}$  为水平方向施加的应力,  $\sigma_{z0}$  为竖直方向施加的应力)。

初始条件:实际工程中产生抬升变形的岩体一般都具有一定的初始地应力和孔隙水压力,因此,计算模型分别考虑不同的初始应力和初始孔隙水压力对岩体扩容变形的影响。

### 1.1 计算方案

数值试验主要考察岩体孔隙水压力升高对数值试件扩容变形的影响,同时也考察岩体初始应力场、岩体渗透系数和岩体变形模量等因素变化对数值试件扩容变形的影响。为此,数值试验设计了以下 3 种方案:

a. 方案 1。初始孔隙水压力一定,岩体变形模量取  $5.0\text{ GPa}$ ,渗透系数取  $1.0 \times 10^{-5}\text{ cm/s}$ ,分别改变初始应力场大小和试件中孔隙水压力增量。本方案主要考察不同初始应力场条件下,岩体孔隙水压力变化对岩体体积应变的影响。

b. 方案 2。初始孔隙水压力一定,初始应力一定,岩体变形模量取  $5.0\text{ GPa}$ ,分别改变岩体渗透系数和试件中孔隙水压力增量。本方案主要考察不同岩体渗透系数条件下,岩体孔隙水压力变化对岩体体积应变的影响。

c. 方案 3。初始孔隙水压力一定,初始应力一定,渗透系数取  $1.0 \times 10^{-4}\text{ cm/s}$ ,分别改变岩体变形模量和试件中孔隙水压力增量。本方案主要考察不同岩体变形模量条件下,岩体孔隙水压力变化对岩体体积应变的影响。

### 1.2 计算成果分析

图 3 为数值试件岩体变形模量为  $1.0\text{ GPa}$ 、渗透系数为  $1.0 \times 10^{-5}\text{ cm/s}$  条件下,孔隙水压力升高  $0.5\text{ MPa}$  时得到的位移矢量图。由图 3 可知,立方体试件在边界应力不变条件下,由于试件内孔隙水压力升高,引起了整个试件产生体积膨胀变形,即试件在孔隙水压力升高的条件下产生了扩容现象。这一结论与物理试验得到的结论相同。由此可见,可采用流固耦合分析理论模拟岩体在孔隙水压力升高条件下的扩容现象。

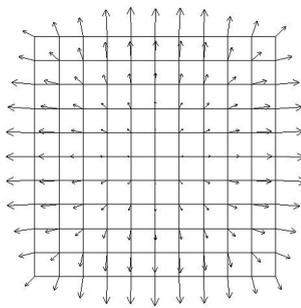


图3 数值试件位移矢量

孔隙水压力增加引起的体积应变有较大影响。

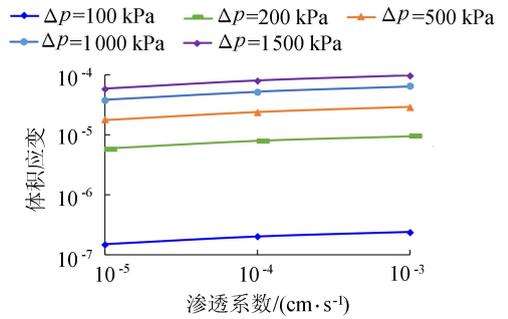


图6 岩体体积应变与渗透系数关系

a. 岩体孔隙水压力增量对体积应变的影响。图4为岩体初始应力、渗透系数及变形模量一定的情况下,数值试件的体积应变与孔隙水压力增量关系曲线。图4中3条曲线呈现的规律基本一致,体积应变在孔隙水压力增量为200 kPa附近变化幅度最大;孔隙水压力增量较小时,引起的体积应变增量小;孔隙水压力增量较大情况下,体积应变增量较大。

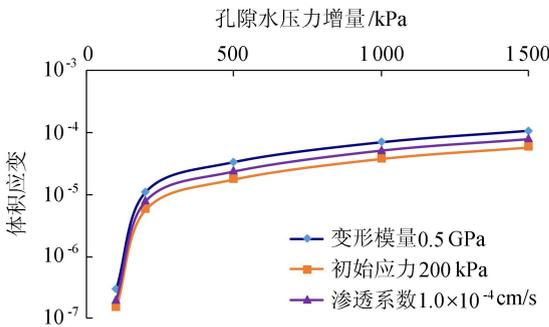


图4 岩体体积应变与孔隙水压力增量关系

d. 岩体变形模量对体积应变的影响。图7为数值试件的体积应变与变形模量关系曲线,在孔隙水压力增量相同的情况下,岩体体积应变与变形模量呈近似线性相关关系。岩体变形模量越小,孔隙水压力引起的体积应变越大。

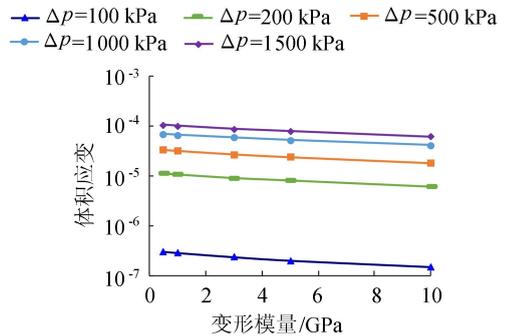


图7 岩体体积应变与变形模量关系

b. 岩体初始应力大小对体积应变的影响。图5为数值试件的体积应变与初始应力关系曲线,可看出,在孔隙水压力增量相同的情况下,岩体体积应变与初始应力大小之间基本呈水平变化关系,表明岩体中的初始应力大小对孔隙水压力引起的体积应变影响很微弱。

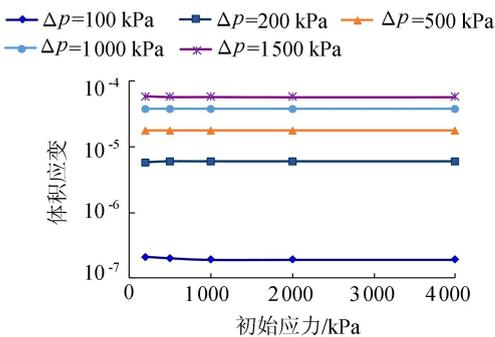


图5 岩体体积应变与初始应力关系

c. 岩体渗透系数对体积应变的影响。图6为数值试件的体积应变与渗透系数关系曲线,在孔隙水压力增量相同的情况下,岩体体积应变随渗透系数增大而增大。岩体渗透系数增加1个数量级,体积应变增加20%~40%,表明岩体渗透系数大小对

## 2 抬升变形数值模拟

### 2.1 工程概况

向家坝水电站位于金沙江下游河段,坐落于四川省与云南省交界处,是金沙江梯级水电站的最末一级电站。电站大坝为混凝土重力坝,最大坝高162 m,坝顶高程384 m,坝顶轴线总长约910 m。向家坝水电站蓄水前,在左岸近坝边坡各高程位置分别布设了水文观测孔及位移监测仪器(图8)。2012年10月蓄水后的监测资料表明,大坝左岸坝山体出现不同程度的抬升变形现象,最大变形量超过13.0 mm。

现场地质勘测成果表明,除主要地层岩组  $J_{1-2Z}$ 、 $T_3^4$ 、 $T_3^3$ 、 $T_3^{2-6.4}$ 、 $T_3^{2-6.3}$ 、 $T_3^{2-6.2}$ 、 $T_3^{2-6.1}$ 、 $T_3^{2-5}$ 、 $T_3^{2-4}$ 、 $T_3^{2-3}$ 、 $T_3^{2-2}$ 、 $T_3^{2-1}$ 、 $T_3^1$  外,左岸近坝岩体还存在一层挤压破碎带。现场原位试验及室内试验表明,挤压破碎带变形模量相对较低,多组试样测得变形模量为0.6~1.0 GPa,压水试验测得透水率为0.66~0.93 Lu。

### 2.2 数值模型

数值模型考虑的地层岩组有  $J_{1-2Z}$ 、 $T_3^4$ 、 $T_3^3$ 、 $T_3^{2-6.4}$ 、 $T_3^{2-6.3}$ 、 $T_3^{2-6.2}$ 、 $T_3^{2-6.1}$ 、 $T_3^{2-5}$ 、 $T_3^{2-4}$ 、 $T_3^{2-3}$ 、 $T_3^{2-2}$ 、 $T_3^{2-1}$  和  $T_3^1$  以及挤

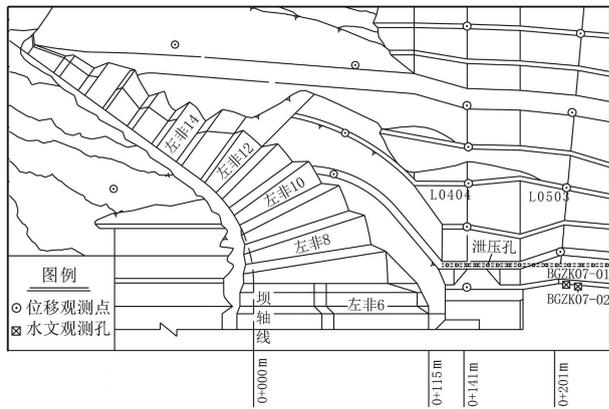


图8 部分测点布置示意图

压破碎带,同时对左岸坝基混凝土置换区、左非5至左非19坝段及灌浆帷幕等结构进行了模拟;泄压孔按线单元建模。计算网格249 648个,网格节点49 005个。图9(a)为整体数值计算网格,图9(b)为帷幕和挤压破碎带数值计算网格。

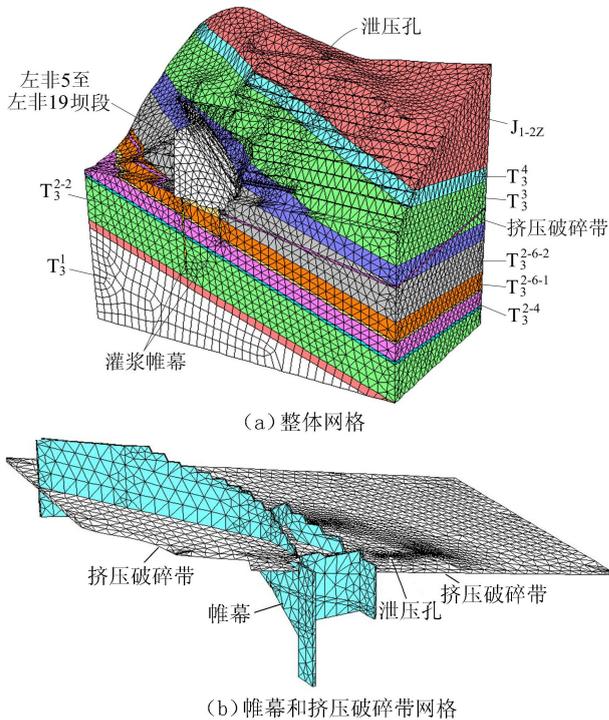


图9 数值计算网格

初始渗流场根据左岸水文观测孔的水位资料拟合得到。

固体边界:铅直边界取水平位移约束;计算模型底边界取铅直水平位移约束。

流体边界:顺河向上下游铅直面取不渗透边界;河流及水库淹没边界为变水头边界,山体内侧边界为水头边界;模型底边界为不渗透边界。

渗流本构律采用达西流定律;力学本构模型采用基于摩尔库伦屈服准则的弹塑性本构模型。力学分析所需的计算参数见表1,水工结构物及岩层渗透系数取值见表2。

表1 力学计算参数

岩体类别	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	抗剪强度参数		变形 模量/ GPa	泊松比
		黏聚力/MPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )		
III <sub>1</sub>	2600	1.00	43	8.0	0.250
III <sub>2</sub>	2600	0.80	39	4.5	0.280
IV	2600	0.55	31	2.5	0.300
挤压破碎带	2350	0.40	22	1.0	0.350
混凝土	2450	1.10	45	30.0	0.167

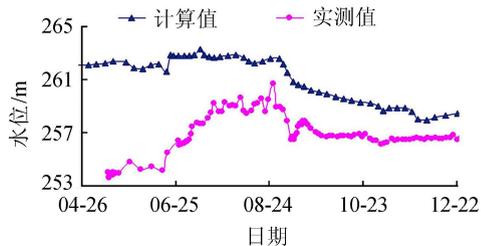
表2 渗透系数取值

不同埋深岩层			防渗 帷幕	挤压 破碎带	混凝土
0~110 m	110~230 m	23~360 m			
100.37	53.3	11.27	1.2	0.9	$1.0 \times 10^{-5}$

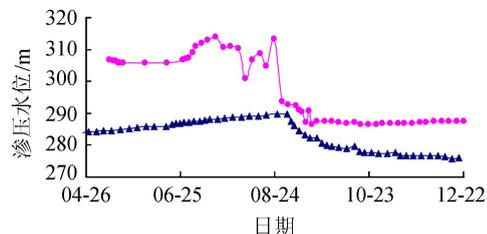
计算步骤为:①边坡自重初始应力场计算;②边坡初始渗流场计算,关闭应力场计算模块;③打开应力场计算模块,流固耦合计算,计算时段2012年1月1日至10月9日;④第1期蓄水过程模拟,流固耦合计算,计算时段2012年10月10日至2013年6月24日;⑤第2期蓄水过程模拟,流固耦合计算,计算时段2013年6月25日至9月6日;⑥第3期蓄水过程模拟,流固耦合计算,计算时段2013年9月7日至2014年3月30日。

### 2.3 孔隙水压力变化过程及空间分布

图10为左岸非溢流坝段后近坝边坡典型水文观测孔BGZK07水位变化过程线。BGZK07-01孔底位于左岸挤压破碎带上盘,BGZK07-02孔底位于左岸挤压破碎带下盘。该水文观测孔记录时间始于2013年5月11日,8月20日左右附近泄压孔开始排水。由图10可知,观测孔水位计算值与实测值总体变化趋势一致。6月25日蓄水后,水文观测孔内的水位因水库第2期蓄水逐渐上升。由于第2期蓄水水位上升量相对较小(高程354~370m),观测孔



(a) BGZK07-01



(b) BGZK07-02

图10 2013年4—12月水文观测孔水位变化过程线

内的水位上升幅度相对较小。为控制左岸边坡的抬升变形,2013年8月20左右左岸泄压孔开始泄压。在泄压孔排水效应作用下,观测孔水位计算值和实测值都出现较大幅度降低,表明泄压孔的泄压作用效果明显。

图11为左岸0+201m断面的孔隙水压力等值线。从孔隙水压力的空间分布来看,由于前两期蓄水水位相差只有16.0m,再加上第2期蓄水期末前(约2周)左岸边坡泄压孔开始泄压,故第1期蓄水期末和第2期蓄水期末位于大坝下游的左岸0+201m断面孔隙水压力分布只有微小变化。第3期蓄水后,位于下游的0+201m断面处的孔隙水压力分布在泄压孔泄压作用下,出现较大变化。泄压孔周围孔隙水压力出现较大幅度的降低,表明泄压孔泄压对左岸下游边坡局部孔隙水压力的降低效果明显。

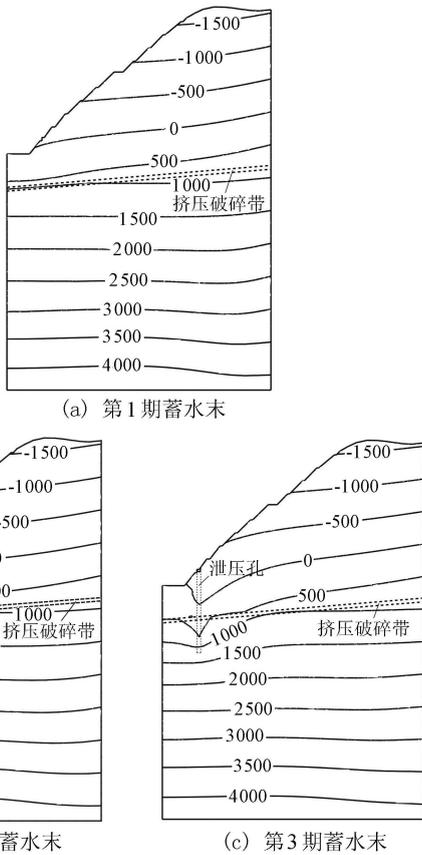


图11 0+201m断面孔隙水压力等值线(单位:kPa)

## 2.4 抬升变形过程及空间分布

图12为左岸非溢流坝段后边坡位移观测点地表位移变化过程线。由图12可知,在第1期蓄水后测点开始出现抬升变形。抬升变形过程与水库水位升高密切相关。泄压孔泄压后,测点位移计算值和实测值都出现明显降低过程,表明泄压孔泄压对降低测点的抬升变形效果显著。第3期蓄水后,测点实测抬升位移出现轻微增加现象,但由于泄水孔泄压的控制作用,其后期抬升变形量很小。

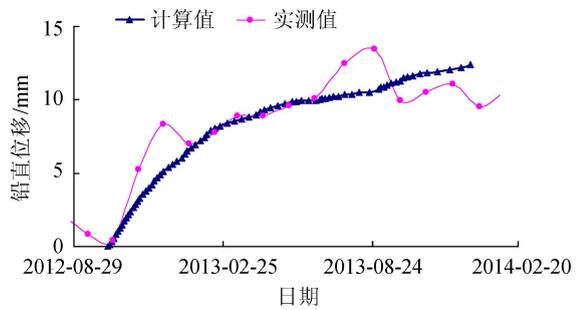


图12 位移测点L0404抬升变形过程线

左岸近坝边坡水文观测孔水位变化过程与位移观测点抬升位移变化过程揭示了抬升变形产生根源是左岸边坡渗流场引起边坡渗透力发生了改变。

图13为左岸近坝边坡铅直位移等值线。在高程380m水库蓄水压力作用下,水库淹没范围的边坡体产生沉降位移,最大沉降变形约12.0mm。左岸坝基及下游边坡产生较明显的抬升变形。抬升变形最大部位出现在左坡0+140m至左坡0+300m范围内,最大抬升变形计算值约14.5mm。抬升变形范围与抬升变形最大值都与实测值一致。图14为左岸0+201m断面铅直位移等值线,左岸0+201m断面开挖边坡附近的岩体在蓄水引起的渗透力作用下,产生了大范围的抬升变形。挤压破碎带下部岩土体抬升变形从下至上逐渐增大,挤压破碎带上部岩土体的变形沿边坡高程逐渐减小。第2期蓄水后边坡表面抬升变形较第1期蓄水引起的抬升变形增加量要小,其原因是第2期蓄水抬升的水位较小。在水库第3期蓄水和左岸边坡泄压孔泄压共同作用下,边坡抬升变形值出现一定程度的降低。由此可见,左岸边坡抬升变形是蓄水引起左岸边坡渗流场发生改变,进而导致应力场改变而引起岩体变形积累的结果。

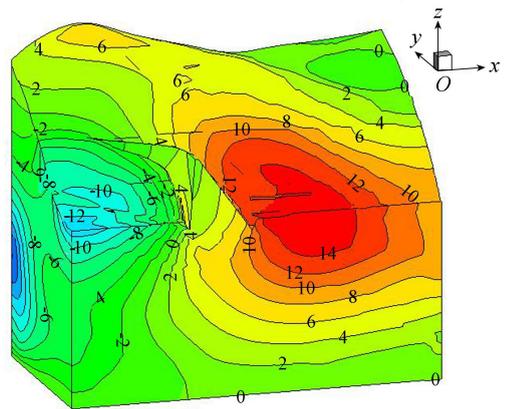


图13 左岸近坝边坡铅直位移等值线(单位:mm)

## 2.5 抬升变形对工程的不利影响

图15给出了防渗帷幕的塑性区分布。由图15可知,由于挤压破碎带抗剪强度低,左岸近坝边坡挤压破碎带部位的防渗帷幕在边坡变形作用下出现了

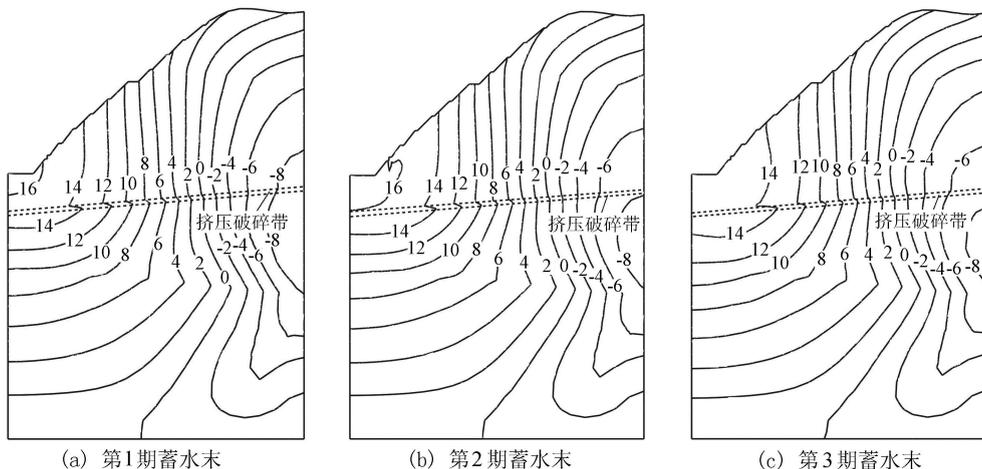


图 14 0+201 m 断面铅直位移等值线 (单位:mm)

较大范围的剪切塑性区,因此,挤压破碎带附近的防渗帷幕产生剪切裂缝破坏的可能性较大。

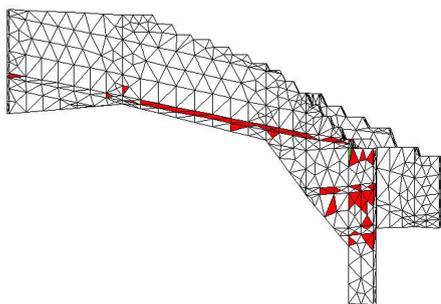


图 15 防渗帷幕塑性区分布

### 3 结 论

**a.** 数值试验结果表明:岩体扩容变形随岩体渗透系数的增大而增大,随变形模量的增大而减小,岩体初始应力对抬升变形的影响微弱。

**b.** 渗流场改变是引起近坝边坡抬升变形的直接诱因,岩体抬升变形是岩体内渗流场和应力场相互作用的结果,采用流固耦合理论揭示边坡和坝基岩体的抬升变形机制是合理的。

**c.** 向家坝左岸近坝边坡抬升变形是水库蓄水引起的渗流场改变进而导致岩体产生的变形,深层泄压孔泄压可以有效控制岸坡岩体的抬升变形量。

#### 参考文献:

[ 1 ] 张景秀,韩风禹.高坝附近基岩的一些变形现象[J].大坝与安全,1992,19(1):42-51. (ZHANG Jingxiu, HAN Fengyu. Deformation phenomenon of rock mass in the foundation near high dam[J]. Dam and Safety, 1992,19(1):42-51. (in Chinese))

[ 2 ] 张超萍,王东,沈定斌,等.铜街子水电站右岸坝抬升原因浅析[J].长江科学院报,2015,32(5):57-60. (ZHANG Chaoping, WANG Dong, SHEN Dingbin, et al. Causes of uplift deformation on the right bank of the dam

of Tongjiezi Hydropower Station [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015,32(5):57-60. (in Chinese))

[ 3 ] LIU Xiaoli, WANG Sijing, WANG Enzhi. A study on the uplift mech-anism of Tongjiezi Dam using a coupled hydro-mechanical model [J]. Engineering Geology, 2011, 117:134-150.

[ 4 ] 汪士同.关于江垭坝区岩体抬升变形问题的研究[J].水利水电科技进展,2001,21(增刊1):13-15. (WANG Shitong. Research on uplift and deformation of rock mass in Jiangyaba Area [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2001,21(Sup1):13-15. (in Chinese))

[ 5 ] 伍法权,祁生文.江垭水库大坝及近坝山体抬升变形机理[J].岩土工程学报,2003,25(4):449-45. (WU Faquan, QI Shengwen. Mechanism of uplift deformation of the dam foundation of Jiangya Reservoir and the nearby mountains [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2003,25(4):449-454. (in Chinese))

[ 6 ] 祁生文,伍法权.江垭水库大坝及近坝山体抬升发展趋势[J].岩土工程学报,2004,26(2):259-263. (QI Shengwen, WU Faquan. Development of uplift deformation of dam foundation and surrounding mountains of Jiangya Water Power Station [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2004,26(2):259-262. (in Chinese))

[ 7 ] 王兰生,金德濂,骆诗栋.江垭大坝山体抬升的形成机制与趋势分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(6):1107-1116. (WANG Lansheng, JIN Delian, LUO Shidong. Formation mechanism and trend analysis of lifting of valley and dam in Jiangya Hydraulic Project [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(6):1107-1115. (in Chinese))

[ 8 ] 高兴中.江垭水库坝基温泉对坝区岩体抬升变形的影响[J].水电自动化与大坝监测,2003,27(3):68-73. (GAO Xingzhong. Effects of hot spring on uplift distortion of Jiangya dam basal terrane [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2003,27(3):68-73. (in Chinese))

(下转第94页)

- Chinese))
- [20] OLSEN J R, LAMBERT J H, HAIMES Y Y. Risk of extreme events under nonstationary conditions [J]. Risk Analysis, 1998, 18(4): 497-510.
- [21] PAREY S, HOANG T T H, DACUNHA-CASTELLE D. Different ways to compute temperature return levels in the climate change context [J]. Environmetrics, 2010, 21: 698-718.
- [22] OBEYSEKERA J, SALAS J D. Frequency of recurrent extremes under nonstationarity [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2016, 21(5): 1-9.
- [23] ROOTZÉN H, KATZ R W. Design life level: quantifying risk in a changing climate [J]. Water Resources Research, 2013, 49(9): 5964-5972.
- [24] READ L K, VOGEL R M. Reliability, return periods, and risk under nonstationarity [J]. Water Resources Research, 2015, 51(8): 6381-6398.
- [25] 梁忠民, 胡义明, 黄华平, 等. 非一致性条件下水文设计值估计方法探讨 [J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 52-55. (LIANG Zhongmin, HU Yiming, HUANG Huaping, et al. Study on the estimation of design value under non-stationary environment [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(1): 52-56. (in Chinese))
- [26] 梁忠民, 胡义明, 王军, 等. 基于等可靠度法的变化环境下工程水文设计值估计方法 [J]. 水科学进展, 2017, 28(3): 399-406. (LIANG Zhongmin, HU Yiming, WANG Jun, et al. Estimation of design flood using equivalent reliability method under changing environment [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(3): 399-406. (in Chinese))
- [27] YAN L, XIONG L H, GUO S L, et al. Comparison of four nonstationary hydrologic design methods for changing environment [J]. Journal of Hydrology, 2017, 551: 132-150.
- [28] HU Yiming, LIANG Zhongmin, CHEN Xi, et al. Estimation of design flood using EWT and ENE metrics and uncertainty analysis under non-stationary conditions [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2017, 31: 22617-2626.
- [29] 冯平, 李新. 基于 Copula 函数的非一致性洪水峰量联合分析 [J]. 水利学报, 2013, 44(10): 1137-1147. (FENG Ping, LI Xin. Bivariate frequency analysis of non-stationary flood time series based on Copula methods [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(10): 1137-1147. (in Chinese))
- [30] BENDER J, WAHL T, JENSEN J. Multivariate design in the presence of non-stationarity [J]. Journal of Hydrology, 2014, 514: 123-130.
- [31] SARHADI A, BURN D H, CONCEPCIÓN A M, et al. Time varying nonstationary multivariate risk analysis using a dynamic Bayesian Copula [J]. Water Resources Research, 2016, 52(3): 2327-2349.
- [32] LIANG Zhongmin, CHANG Wenjuan, LI Binqun, et al. Bayesian flood frequency analysis in the light of model and parameter uncertainties [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2012, 26: 721-730.
- [33] 梁忠民, 宁方贵, 王钦钊. 权函数水文频率分析方法的一种应用 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(4): 95-98. (LIANG Zhongmin, NING Fanggui, WANG Qinzha. Application of weighted function method to hydrological frequency analysis [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2001, 29(4): 95-98. (in Chinese))
- [34] 冯平, 黄凯. 水文序列非一致性对其参数估计不确定性影响研究 [J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1145-1154. (FENG Ping, HUANG Kai. A study about the impacts of non-stationary characteristic on the uncertainties of parameters estimation in hydrological series [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10): 1145-1154. (in Chinese))
- [35] LIMA C H R, LALL U. Spatial scaling in a changing climate: a hierarchical Bayesian model for non-stationary multi-site annual maximum and monthly streamflow [J]. Journal of Hydrology, 2010, 383(3/4): 307-318.
- [36] SUN X, MERZ B, LALL U, et al. Hierarchical Bayesian clustering for nonstationary flood frequency analysis: application to trends of annual maximum flow in Germany [J]. Water Resources Research, 2015, 51(8): 6586-6601.
- (收稿日期: 2017-08-21 编辑: 熊水斌)
- .....
- (上接第 69 页)
- [9] YAN Fuzhang, TU Xinbin, LI Guangchen. The uplift mechanism of the rock masses around the Jiangya Dam after reservoir inundation, China [J]. Engineering Geology, 2004, 76: 141-154.
- [10] 蒋中明, 李双龙, 丁鹏, 等. 水库枢纽区抬升变形水地质结构模式研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2026-2033. (JIANG Zhongming, LI Shuanglong, DING Peng, et al. Modes of hydro-geological structure for uplift deformation near reservoir pivot [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 2026-2033. (in Chinese))
- (收稿日期: 2017-08-22 编辑: 熊水斌)