

DOI: 10.11779/CJGE2016S2048

# 高面板堆石坝施工期上游坡面变形规律研究

胡再强, 兰官奇, 于 森, 李宏儒

(西安理工大学土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 结合龙背湾水电站混凝土面板堆石坝工程施工实际情况, 采用三维有限元分析方法模拟面板坝施工过程中挤压边墙的变形发展过程, 分析研究面板堆石坝施工期坝体变形规律和受坝体变形而导致挤压边墙变形的发展规律。依据监测资料, 对施工期挤压边墙变形进行了系统分析, 并通过对比大坝三维仿真分析计算结果及实测数据, 验证了对大坝进行三维仿真分析的合理性。根据大坝三维计算的结果对大坝填筑方案进行了优化, 计算结果表明优化坝体填筑顺序后, 施工期挤压边墙的变形有明显减小。

**关键词:** 面板堆石坝; 上游坡面; 挤压边墙; 变形规律

中图分类号: TV31 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S2-0293-06

作者简介: 胡再强(1964-), 男, 陕西周至人, 教授, 博士生导师, 主要从事黄土力学与工程的研究。E-mail: huzq@xaut.edu.cn。

## Deformation law of upstream slope during construction of high concrete-faced rock-fill dam

HU Zai-qiang, LAN Guan-qi, YU Miao, LI Hong-ru

(Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Combining the actual construction situation of Longbeiwanyan hydropower station concrete face rockfill dam project, the three-dimensional finite element analysis method is used to simulate the deformation development process of extruded sidewall during the construction process of concrete face rockfill dam. The dam deformation rules and development rules of extruded sidewall due to dam deformation are investigated. According to the monitoring data, deformations of the dam body and extruded sidewall are analyzed. By comparing the calculated results of three-dimensional simulation with the measured data. The reasonableness of three-dimensional simulation analysis for the dam is verified. The filling program for the dam is adjusted according to the calculated results. The deformation of extruded sidewall during construction is significantly reduced after the filling order for the dam is adjusted.

**Key words:** concrete face rockfill dam; upstream slope; extruded sidewall; deformation law

## 0 引言

近年来随着混凝土面板堆石坝的快速发展, 一些新的施工工艺不断涌现<sup>[1-2]</sup>。其中挤压式混凝土边墙技术因其在施工方面有明显的先进性, 得到了广泛的应用<sup>[3]</sup>。尽管采用挤压式边墙施工有许多的优点<sup>[4]</sup>, 但它在面板堆石坝上得以应用的时间还很短, 人们对许多方面的问题<sup>[5]</sup>认识的还不是十分清楚, 例如: 在许多采用挤压式边墙固坡技术的堆石坝施工过程中挤压边墙都出现了不同程度变形, 从而需要对已经成型的边墙进行挖除和修补, 这不仅会对边墙的力学性能造成影响, 而且对控制工期非常不利, 因此弄清楚挤压边墙在施工期的变形规律以及如何减小挤压边墙在施工期的变形变得十分必要。

到目前为止, 大多数关于挤压式混凝土边墙的研

究集中在边墙对面板即坝体的影响上<sup>[6-7]</sup>, 罗先启研究了挤压边墙对水布堰面板堆石坝应力-应变的影响<sup>[8]</sup>, 并指出挤压式边墙不仅可以改善面板的受力状态, 而且对面板的变形也是有利的。侯文峻研究了不同的挤压边墙表面处理措施对面板与边墙接触面力学特性的影响规律<sup>[9]</sup>。但以上研究均没有系统的分析挤压边墙在施工期的变形规律。

本文结合湖北龙背湾水电站混凝土面板堆石坝工程施工实际情况, 通过数值模拟方法研究了面板坝施工过程中挤压边墙的变形发展规律, 并通过将数值计算结果与实测数据的对比验证了数值计算的合理性。

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程重点实验室项目(2014Szs15-Z02)

收稿日期: 2016-05-19

基于数值计算结果, 对大坝填筑方案经行了调整, 力求减小施工期挤压边墙的变形。

龙背湾水电站混凝土面板堆石坝位于湖北省竹山县堵河支流官渡河上, 为第一级电站, 距竹山县城 90 km。大坝为钢筋混凝土面板堆石坝, 坝顶轴线长度 465 m, 坝顶宽 10 m, 坝顶高程 524.30 m, 河床趾板建基面高程 366.00 m, 最大坝高 158.3 m, 大坝上游坡为 1:1.4, 下游综合坡度 1:1.44。图 1 为坝体材料分区。

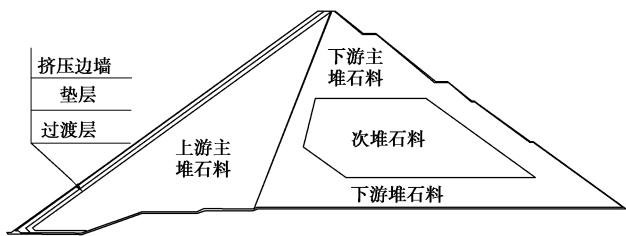


图 1 填筑过程分区断面示意图

Fig. 1 Zoning of materials of dam

## 1 计算原理与方法

### 1.1 计算原理及材料模型

本文中挤压边墙采用线弹性本构模型<sup>[10]</sup>。堆石料采用的是非线性弹性的邓肯 E-B 模型, 计算中采用的是中点增量法<sup>[11-14]</sup>。

中点增量法是在增量法的基础上, 用每级荷载下的平均应力所对应的弹性矩阵来进行计算。为了求出平均应力, 需要先进行一次试算, 即按增量法先算一次, 取初始应力与得出应力的平均值, 即为该级荷载下的中点应力(平均应力), 依据该中点应力通过邓肯-张模型求出其所对应的  $E$  和  $B$ , 然后即可求得弹性矩阵 $[D]$ , 重复此步骤得到最终计算结果。

### 1.2 计算程序

三维应力变形分析采用了西安理工大学自主研发的 EFES3D 程序, 程序含有线弹性、非线性弹性、弹塑性等多种土的本构模型, 在计算中可考虑固结变形, 时程动力分析。该程序用于多座土石坝的应力位移分析, 可较好的模拟施工及蓄水过程中的坝体及挤压边墙应力和变形。该程序经过大量实际工程验证, 不仅可以很好的模拟工程的实际情况, 而且可真实的反映坝体的静、动反应特征, 计算结果真实可靠。

## 2 计算模型

### 2.1 有限元模型

按照坝体材料分区及填筑方案进行三维实体建模和网格划分, 得到的三维计算网格划分图如图 2 所示。

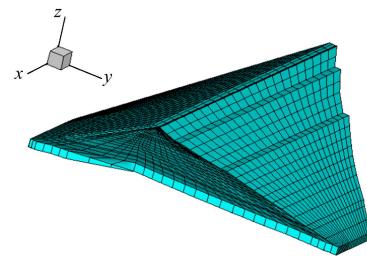


图 2 坝体网格划分图

Fig. 2 Generation of dam mesh

堆石体、坝体及地基主要采用三维八结点六面体等单元来模拟。其中单元数为 14076, 节点数为 12342。采用位移边界约束条件, 模型左右侧面及底部均为全约束。将挤压边墙等效地简化成一整块混凝土连续薄板<sup>[15]</sup>, 边墙厚度等效为 24 cm。挤压式边墙和垫层料之间设置薄层单元作为等效接触面, 薄层单元厚度为 10 cm, 其模量取垫层的模量。

### 2.2 荷载及施加方式

大坝施工期, 荷载为堆石体自重, 坝体上、下游无水, 模拟施工过程, 即从基础至坝顶高程计算施工过程中挤压边墙的应力应变过程。荷载施加共 10 级, 挤压边墙从坝体第 2 级填筑时与坝体填筑平起施工。图 3 为大坝典型剖面施工顺序。

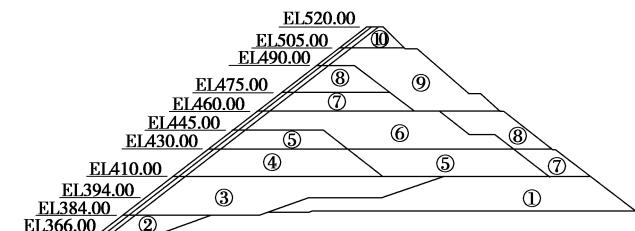


图 3 坝体填筑顺序图

Fig. 3 Filling sequence of dam

### 2.3 材料模型参数

大坝材料模型参数见表 1。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

坝体 分区	$\rho$ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\phi_0$	$c$	$K$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$
垫层	2.28	54	11	906	0.28	0.61	450	0.35
过渡层	2.28	54	11	1043	0.24	0.63	520	0.35
主堆石	2.25	53	11	1014	0.23	0.67	500	0.35
下游主堆石	2.25	51	11	755	0.28	0.71	380	0.35
次堆石	2.24	50	10	673	0.28	0.67	336	0.4
冲积层	2.22	51	10	1052	0.27	0.69	526	0.4
混凝土材料	2.40	0	0	5000	0.00	0.00	1e5	0.0

## 3 计算结果分析

图 4 为挤压边墙竣工期  $z$  方向位移,  $y$  方向位移

及  $x$  方向位移分布图。可以看出竣工期挤压边墙最大沉降发生在边墙中部坝高  $2/3$  附近, 大小为  $-28 \text{ cm}$ , 靠近岸坡处由于受到两岸坝肩的约束边墙竖向变形相对较小, 向内由于约束作用逐渐减小, 边墙竖向变形逐渐变大, 基本上是以坝轴线呈对称轴分布。竣工期挤压边墙最大上游向顺河位移发生在边墙中部最大坝高  $1/3$  附近, 最大值是  $-29.7 \text{ cm}$ , 基本上是以坝轴线呈对称轴分布, 且呈环状向上逐渐减小。边墙在坝高  $3/4$  处出现了下游向收缩变形, 最大值是  $6 \text{ cm}$ 。挤压边墙竣工期轴向位移方向为由两岸向中间, 基本上是以坝轴线呈对称轴分布, 并在两岸附近形成位移峰值, 左、右岸峰值分别为  $6.3 \text{ cm}$  及  $-5.9 \text{ cm}$ 。

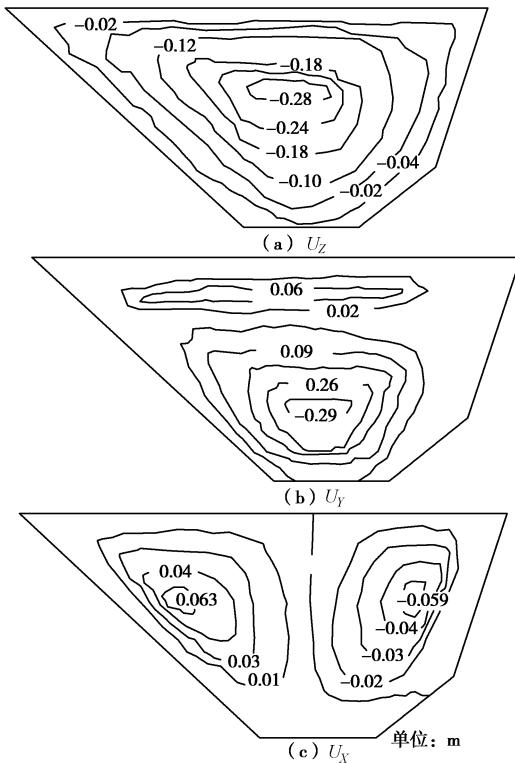


图 4 挤压边墙竣工期  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向位移等值线图

Fig. 4 Displacement contours of extruded sidewall at completion period in directions of  $X$ ,  $Y$  and  $Z$

## 4 挤压边墙施工期变形监测

为了评价施工质量, 监测龙背湾面板堆石坝坝体在施工期的安全状态, 防止坝体意外事故的发生, 针对混凝土面板堆石坝工程特点, 根据相关规程规范要求布设了比较全面的安全监测系统, 进行施工期原型观测。鉴于本次主要探讨挤压边墙的变形特性。故以下只对挤压边墙变形相关的数据进行对比分析。挤压边墙的变形监测主要包括边墙在施工期的垂直、顺河向及轴向位移监测。

### 4.1 监测系统布置

为监测施工期挤压边墙垂直、顺河向及轴向位移,

在边墙顺流向设置 6 个横断面, 分别为: 坝横 0+079、0+165、0+240、0+295、0+350 及 0+413。边墙轴向由高程 378, 418 及 468 m 向上每  $10 \text{ m}$  设置一个监测点, 其中断面 0+079 设置监测点 4 个, 断面 0+165 及 0+413 各设置监测点 9 个, 断面 0+240、0+295 及 0+350 各设置监测点 13 个。其监测点布置见图 5。

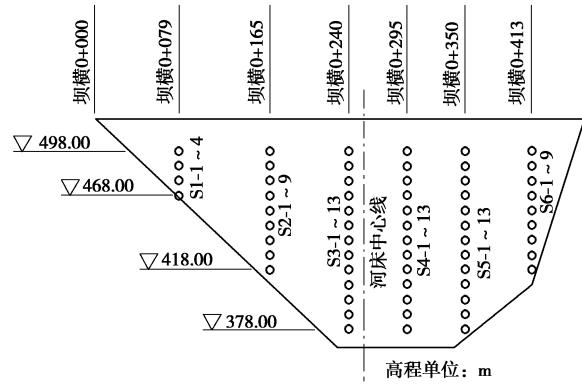


图 5 挤压式边墙变形监测布置

Fig. 5 Arrangement of deformation monitoring for extruded sidewall

### 4.2 监测数据整理与分析

由于施工期挤压边墙轴向位移数值较小, 以下只对挤压边墙的沉降量及顺河向位移加以整理分析。

(1) 图 6 为挤压边墙各监测点施工期沉降量分布。从图中可以看出, 施工期挤压边墙的沉降分布, 各监测点沉降量在边墙上呈现出: 边墙中部沉降量较大, 向边墙四周逐渐减小, 监测点沉降量最大值为  $34.7 \text{ cm}$ , 发生在高程  $448 \text{ m}$  处。图 7 为高程  $458 \text{ m}$  挤压边墙沉降量分布实测数据与数值计算结果对比图。从图中可以看出: 与实测数据相比, 三维计算得出的挤压边墙最大沉降量减小了约  $19\%$ , 边墙沉降规律与实测相近, 能较好的反映出边墙沉降发生的规律。

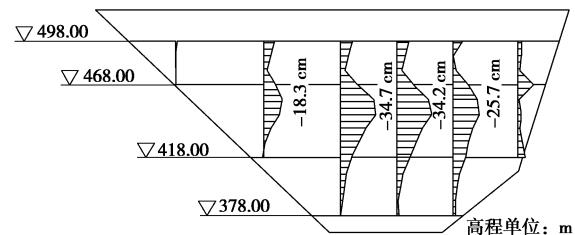


图 6 挤压边墙总沉降量

Fig. 6 Total settlements of extruded sidewall

(2) 图 8 为挤压边墙各监测点施工期顺河向位移分布。从图中可以看出, 施工期挤压边墙的顺河向位移分布, 各监测点顺河向位移在边墙上呈现出: 边墙整体顺河向位移呈向上游鼓出的趋势, 边墙中下部监测点位移较大, 向边墙四周逐渐减小, 监测点顺河向位移最大值为  $32.2 \text{ cm}$ , 发生在高程  $418 \text{ m}$  处。图 9

为断面 0+295 挤压边墙顺河向位移分布实测数据与数值计算结果对比图。从图中可以看出: 三维计算得出的挤压边墙最大顺河向位移与实测边墙最大顺河向位移相差不大, 且顺河向位移分布规律相近, 能较好的反映出边墙顺河向位移变化规律。

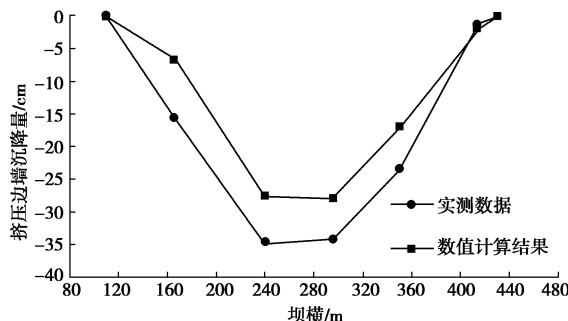


图 7 高程 458 m 挤压边墙沉降量分布

Fig. 7 Settlements of extruded sidewall at elevation 458 m

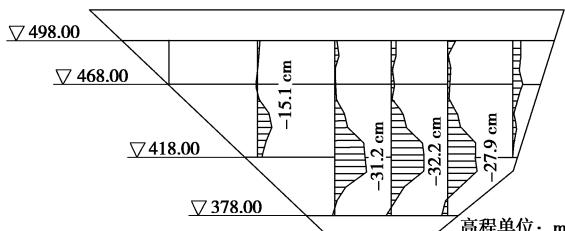


图 8 挤压边墙不同位置的顺河向位移

Fig. 8 Horizontal displacements extruded sidewall

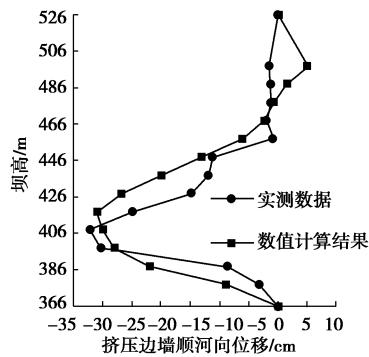


图 9 断面 0+295 挤压边墙顺河向位移分布图

Fig. 9 Horizontal displacements of extruded sidewall at section 0+295

## 5 填筑方式对挤压边墙变形特性的影响

### 5.1 大坝填筑方案分析

图 10 分析了原填筑顺序下挤压边墙的最大顺河向位移情况, 反映出挤压边墙最大顺河向位移随大坝填筑高度增加有两次明显的增大: 大坝在进行第 4 阶段及第 7 阶段填筑时边墙的最大顺河向位移均增大了 10 cm。

分析其原因是由于: 坝体填筑的第 6 阶段早于第

7 阶段, 第 6 阶段填筑的区域, 一部分为主堆石区, 一部分为次堆石区。第 7 阶段填筑也包含部分下游堆石区, 其中含有大量的强风化料, 坝料较差, 沉降变形较大。在第 7 阶段填筑过程中, 下部第 6 阶段填筑的次堆石区坝料在上部填料的重力作用下发生的水平位移和垂直位移都远大于第 6 阶段填筑的主堆石区坝料, 受其影响, 第 6 阶段填筑的主堆石区坝料必将产生额外的附加沉降, 增加挤压边墙的顺河向位移, 恶化边墙的应力应变状态。大坝在进行第 4 阶段填筑时的情况与上述相同。

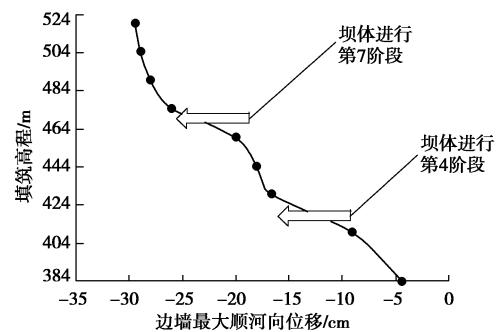


图 10 边墙最大顺河向位移随填筑高度变化

Fig. 10 Variation of maximum horizontal displacements along river with fill height

正是基于这种变形规律, 对坝体填筑顺序进行了修改。修改后的填筑顺序先进行大坝上游区域主堆石区域的填筑, 如图 11 中的第 2 阶段和第 6 阶段, 再对大坝下游堆石区及次堆石区进行同时平齐平筑, 促使较差坝体料填筑区的较大沉降变形尽快完成, 减少它对上游坝体填料沉降的附加影响。修改后填筑方案荷载施加共 11 级, 挤压边墙从坝体第 1 级填筑时与坝体填筑平起施工。

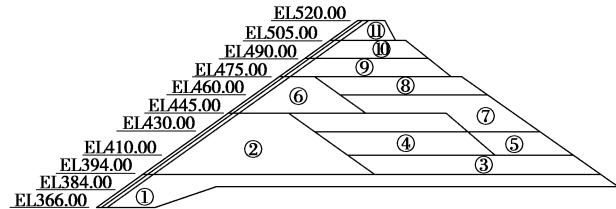


图 11 修改后坝体填筑顺序图

Fig. 11 Modified sequence for dam filling

### 5.2 修改后填筑方案计算结果分析

图 12 为修改后填筑顺序下挤压边墙竣工期  $z$  方向位移,  $y$  方向位移分布图。

从图 12 可以看出挤压边墙最大沉降量为 25 cm, 与原填筑方案相比边墙整体沉降量有所减小, 分布规律相近。上游向顺河位移最大值是 20 cm, 下游向收缩变形最大值是 4.5 cm。与原填筑方案相比挤压边墙

整体顺河向位移均有所减小。挤压边墙竣工期轴向位移, 左、右岸峰值分别为 6.1 cm 及 -5.8 cm。与原填筑方案相比挤压边墙轴向位移变化不大。

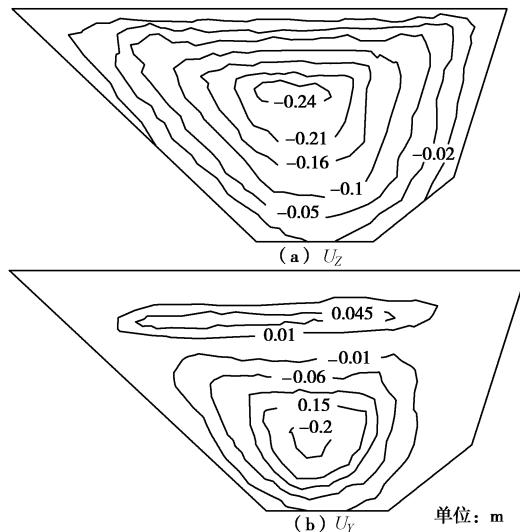


图 12 挤压边墙竣工期  $Y$ ,  $Z$  方向位移等值线图

Fig. 12 Displacement contours of extruded sidewall at completion period in directions of  $Y$ ,  $Z$

图 13 为两种填筑方案下边墙中轴线顺河向位移沿坝高分布, 可以发现在修改后的填筑方案中边墙的整体顺河向位移有了明显的减小, 边墙最大顺河向位移减小了近  $1/3$ , 边墙产生收缩变形的区域向边墙下部移动, 且产生的收缩变形量也有所减小。

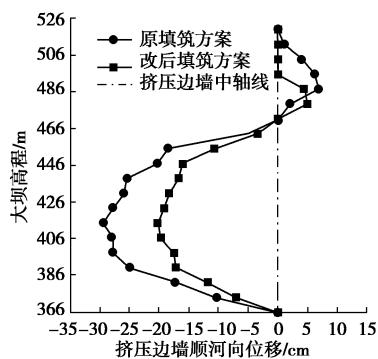


图 13 挤压边墙顺河向位移沿坝高分布图

Fig. 13 Distribution of horizontal displacement of extruded sidewall along dam height

为了更好更直观的对比两种填筑方案下边墙的变形情况, 现将计算结果统计如下, 从表中可以清楚的看出边墙在两种填筑方案下的变形情况的最大值及变化率。

表 2 是龙背湾面板堆石坝的两种填筑方案下挤压边墙各项指标计算结果对比统计表。从表 2 中可以看出坝体填筑顺序的改变对边墙的沉降变形及水平变形影响较为明显边墙沉降量减小了  $14.3\%$ , 顺河向位移

减小了  $33.3\%$ 。

表 2 两种填筑方案计算结果对比

Table 2 Comparison of calculated results of two kinds of filling schemes

统计指标	位置			
	研究方案	原填筑方案	修改后填筑方案	变化率 /%
最大沉降/cm	最大沉降/cm	28.0	24.0	-14.3
最大顺河向位移/cm	最大顺河向位移/cm	29.7	20.0	-33.3
最大轴向位移/cm	最大轴向位移/cm	6.3	6.1	-3.2

## 6 结语

从数值计算分析结果可以发现, 挤压边墙在施工期的变形趋势为: 挤压边墙最大沉降发生在边墙中部最大坝高  $2/3$  处; 挤压边墙中下部由于受到堆石反向压力有向上游鼓出的趋势, 挤压边墙产生下游向的收缩变形, 位移最大值出现在边墙中部最大坝高  $1/3$  处, 边墙上部产生的下游向收缩变形区域较小, 因此在施工期间为防止挤压边墙产生较大变形对面板铺设造成影响, 可以在坝体填筑期间参照挤压边墙的位移趋势预留适当的变形空间; 边墙轴向位移呈由两岸向中间挤压的趋势, 位移值均较小。

由大坝三维计算结果与实测数据的对比分析, 计算值总体小于实测数据, 但总体来说三维计算结果与大坝实测数据相差不大, 挤压边墙变形分布规律基本一致, 说明有限元计算方法合理, 计算结果可信。

通过对大坝原填筑顺序的修改, 挤压边墙最大沉降量减小了  $14\%$ , 最大上游向顺河位移减小了  $33\%$ , 轴向位移变化不大, 各位移分布规律基本一致。对原填筑方案进行修改后边墙整体沉降量及顺河向位移均有所减小, 且边墙最大上游向顺河位移减小较为显著, 说明修改后的填筑方式可以有效的减小挤压边墙在施工期的变形。

## 参考文献:

- [1] 曹克明. 混凝土面板堆石坝[M]. 北京: 水利水电出版社, 2008. (CAO Ke-ming. Concrete face rockfill dam[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 2008. (in Chinese))
- [2] 杨泽艳, 周建平, 蒋国澄, 等. 中国混凝土面板堆石坝的发展[J]. 水力发电, 2011(2): 18 - 23. (YANG Ze-yan, ZHOU Jian-ping, JIANG Guo-cheng, et al. Development of concrete faced rockfill dam in China[J]. Water Power, 2011(2): 18 - 23.

- (in Chinese))
- [3] 颜建军. 面板堆石坝垫层施工及坡面防护技术的发展[J]. 水力发电, 2003(4): 44 - 47. (JIE Jian-jun. The development of the cushion construction and the slope protection technology of concrete faced rock dam construction[J]. Water Power, 2003(4): 44 - 47. (in Chinese))
- [4] 刘政伟, 彭东海. 面板堆石坝垫层固坡施工方法对比分析[J]. 四川水利, 2015(2): 50 - 51. (LIU Zheng-wei, PENG Hai-dong. Comparative analysis of construction methods of the slope of concrete face rockfill dam[J]. Sichuan Water Conservancy, 2015(2): 50 - 51. (in Chinese))
- [5] 徐存东, 李海成, 周琳博. 挤压边墙在混凝土面板堆石坝中的应用[J]. 水力发电, 2011(12): 47 - 49. (XU Cun-dong, LI Hai-cheng, ZHOU Lin-bo. Application of concrete extrusion side wall in RCC dam construction[J]. Water Power, 2011(12): 47 - 49. (in Chinese))
- [6] 张丕华, 杨天秀. 挤压式边墙护坡技术在芭蕉河面板坝工程中的应用[J]. 中国水利, 2004(14): 39 - 40. (ZHANG Pi-hua, YANG Tian-xiu. Application of slope protection technology of compressed side wall in bajiao river plate dam construction[J]. China Water Resources, 2004(14): 39 - 40. (in Chinese))
- [7] 孙玉军, 洪 镛, 武选正. 公伯峡面板堆石坝混凝土挤压式边墙技术的应用[J]. 水力发电, 2002(8): 45 - 47. (SUN Yu-jun, HONG Di, WU Xuan-zheng. Application of the concrete crushing-type sidewall technology in Gongboxia concrete face rockfill dam[J]. Water Power, 2002(8): 45 - 47. (in Chinese))
- [8] 罗先启, 吴晓铭, 童富果, 等. 基于挤压边墙技术水布堰面板堆石坝应力 - 应变研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(13): 2342 - 2349. (LUO Xian-qi, WU Xiao-ming, TONG Fu-guo, et al. Research on the stress-strain of ShuiBuYa concrete face rockfill dam based on the concrete crushing-type side wall technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(13): 2342 - 2349. (in Chinese))
- [9] 侯文峻, 张 嘎, 张建民. 面板堆石坝挤压式边墙与面板接触面力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1356 - 1360. (HOU Wen-jun, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Behavior of interface between extrusion-sidewall and slab face of CFRD[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1356 - 1360. (in Chinese))
- [10] 宋玉普. 多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (SONG Yu-pu. Constitutive relation and failure criterion of a variety of concrete materials[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2002. (in Chinese))
- [11] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Principle and calculation of geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1996. (in Chinese))
- [12] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress-strain for soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1970: 1629 - 1653.
- [13] DUNCAN J M. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stresses and movements in soil masses[R]. Berkeley: University of California, 1980.
- [14] 谢定义, 姚仰平, 党发宁. 高等土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. (XIE Ding-yi, YAO Yang-ping, DANG Fa-ning. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese))
- [15] 张建民, 张 嘎, 刘 芳. 面板堆石坝挤压式边墙的概化数值模型及应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 249 - 253. (ZHANG Jian-min, ZHANG Ga, LIU Fang. A simplified equivalent numerical model of extrusion-sidewall for CFRD and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 249 - 253. (in Chinese))

(责任编辑 黄贤沙)