

均质土坝基础混凝土防渗墙应力变形特性研究

王瑞骏, 李炎隆, 韩艳丽

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

【摘要】 **【目的】**研究均质土坝坝基、坝肩混凝土防渗墙及其与土体接触面的应力变形特性,为工程设计提供依据。**【方法】**结合在建的陕西榆林横山县王圪堵水库混凝土防渗墙的均质土坝工程,在研究建立应力变形计算模型及计算方案的基础上,运用三维非线性有限元法,对施工期和运行期大坝典型断面、防渗墙及其与土体接触面的应力变形特性进行分析。**【结果】**在施工期和运行期,局部坝段的坝基防渗墙上部及左坝肩防渗墙左半部分区域存在小范围的拉应力区,但防渗墙不产生抗拉破坏;局部坝段的坝基防渗墙上部和左坝肩防渗墙大部分区域,以及防渗墙与上、下游土体之间的接触面,均存在拉应力区及剪切破坏区。**【结论】**为确保大坝安全,建议在坝基混凝土防渗墙周边尤其是在防渗墙与坝体填土衔接部位,设置变形过渡层,以改善接触面的应力状况。

【关键词】 均质土坝;混凝土防渗墙;接触面;应力变形特性

【中图分类号】 TV641.2⁺2

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)09-0222-07

Research on stress-deformation characteristic of foundation concrete cutoff wall of homogeneous earth dam

WANG Rui-jun, LI Yan-long, HAN Yan-li

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: **【Objective】** The study was to research the stress-deformation characteristic of concrete cutoff wall of homogeneous earth dam foundation and dam abutment, and its contact face with the earth to provide a basis for engineering design. **【Method】** Combining the concrete cutoff wall of Wang Ge-Du homogeneous earth dam in the construction period in Yulin city, Shaanxi Province, the paper analyzed the stress-deformation characteristic of typical cross section and concrete cutoff wall of the dam, and its contact face with the earth in the construction period and operation period on the basis of research on establishing computation model and computation scheme for stress deformation by using three-dimensional nonlinear finite element method. **【Result】** In the construction and operation period, in the upper part of cutoff wall of partial dam foundation and left part of cutoff wall of left dam abutment there exists small pulling stress area, but the cutoff wall will not occur tensile damage; in the upper part of partial dam foundation and most area leave dam abutment, contact face between cutoff wall and earth of upper and lower reaches there exist pulling stress area and shear failure area. **【Conclusion】** To protect the security of the dam, we advise that the interlocking layer surrounding the cutoff wall of dam foundation should be set, especially the conjunction part between cutoff wall and the dam earth part, so that the stress condition of the contact face could be improved.

Key words: homogeneous earth dam; concrete cutoff wall; contact face; stress-deformation characteristic

随着水利水电工程建设的逐步深入,深覆盖层地基已成为工程建设的常见问题。若在深覆盖层上

* [收稿日期] 2010-02-10

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50779051)

[作者简介] 王瑞骏(1963—),男,陕西宝鸡人,教授,主要从事坝工应力研究。E-mail: wrj7163@xaut.edu.cn

[通信作者] 韩艳丽(1985—),女,河北保定人,在读硕士,主要从事水工结构分析及数值仿真研究。E-mail: gracie901@163.com

筑坝,均质土坝将成为一种有竞争力的备选坝型。此时,由于深厚覆盖层属强透水层,而且层厚又较大,因此其防渗问题是影响此种坝型合理性与经济性的关键所在。常用的深覆盖层坝基的防渗措施有混凝土防渗墙、帷幕灌浆、高压旋喷灌浆及混凝土沉井等。其中混凝土防渗墙以其防渗效果好、适应性强、施工工艺和质量检测方法成熟、造价较低、运行可靠等诸多优点,目前已成为首选的覆盖层坝基的防渗设施^[1-6]。混凝土防渗墙是在松散透水地基中连续造孔成槽,以泥浆固壁,在孔槽内浇筑混凝土而建成。由于防渗墙混凝土的弹性模量与深厚覆盖层土体的变形模量相差悬殊,因此在大坝施工期及运行期,防渗墙本身以及防渗墙与周围土体接触面的应力变形特性及其演变规律,成为影响大坝整体运行安全性的一个关键因素,但目前工程界关于该问题的研究还不够深入^[7]。本研究拟结合在建的采用混凝土防渗墙的均质土坝工程,运用三维非线性有限元法进行大坝应力变形仿真分析,研究各种工况下混凝土防渗墙的应力变形特性,以期为工程设计

制定相应的处理措施提供依据。

1 工程概况

王圪堵水库位于陕西省榆林市横山县境内的无定河干流上,水库正常蓄水位为 1 046.00 m,死水位为 1 027.00 m,总库容为 3.89 亿 m³,属大(2)型工程。水库枢纽大坝采用均质土坝,坝高最大 46.0 m,坝顶长度为 949 m,坝顶宽度为 8 m,坝底宽度为 265.50 m。坝体采用土料填筑。上游坝坡坡比为 1:3.0,在 1 024.00 m 高程设一平台,平台宽度为 2 m。下游坝坡坡比为 1:2.5,在 1 030.00 m 高程设一马道,马道宽度为 2 m。坝基存在厚度为 8~13 m 的砂砾石覆盖层,左坝肩存在厚层砂层。坝基覆盖层和坝肩厚层砂层中设计布置 C20 混凝土防渗墙,防渗墙厚度为 0.80 m,坝基防渗墙顶部高程为 1 014.0 m,墙底深入基岩面以下 1.0 m;坝肩混凝土防渗墙顶部高程为 1 053.0 m,墙底深入基岩面以下 1.0 m。大坝标准横剖面见图 1^[8]。

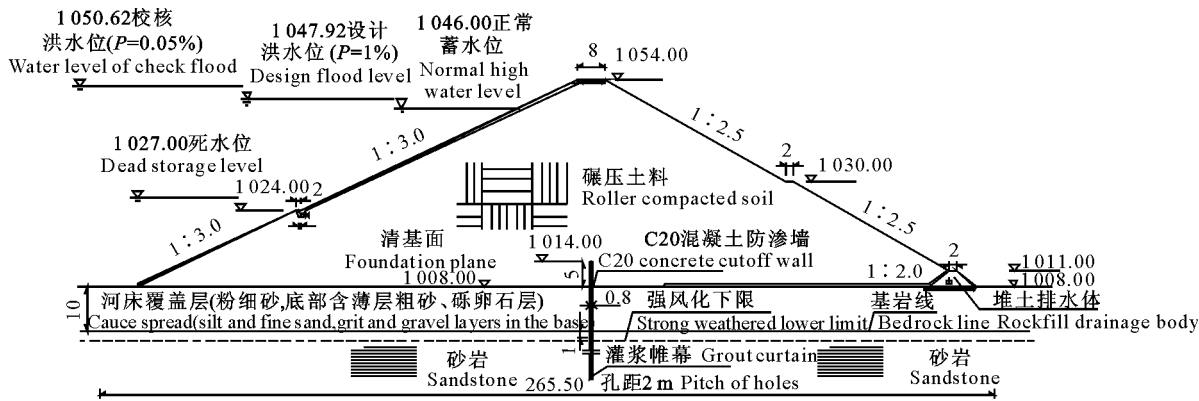


图 1 王圪堵水库大坝标准横剖面图

图中高程、尺寸单位以 m 计

Fig.1 Standard dam cross section of Wang Ge-Du reservoir

In the picture,the unit of elevation and dimension is metre

2 计算模型与计算方案

2.1 土石料的非线性本构模型

《碾压式土石坝设计规范》(SL274-2001)规定,土石坝应力变形计算宜采用非线性弹性应力应变关系进行分析。目前,在工程实际中较为常用的非线性弹性应力应变关系(本构模型)为邓肯-张 E~B 本构模型,该模型的基本原理以及相应的有限元分析方法参见文献^[9-12]。

2.2 防渗墙与坝基(肩)土体之间接触面的计算模型

目前,工程实际对于有厚度或无厚度接触界面

的有限元模拟,大多采用 Goodman 单元、薄层单元或接触摩擦单元。研究表明,Katona 提出的三维接触摩擦单元,由于以节点接触力作为基本未知量,将接触单元的约束方程与结构的整体平衡方程耦合为一个维数扩大的方程,从而避免了前 2 种单元中刚度系数的选取,只需选用库仑摩擦定律中的 c 、 φ 2 个参数,使参数的确定相对简单,并有较多的工程经验作为基础,因此其应用更为普遍^[13-15]。根据软弱夹层的工程地质特性及其变形特性,本研究拟选用接触摩擦单元进行坝基软弱夹层的模拟计算。接触摩擦单元刚度-约束方程的一般形式为^[15]:

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ \mathbf{SC}' \end{Bmatrix} \begin{pmatrix} (\mathbf{SC}')^T \\ \mathbf{R}^T \mathbf{SR} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\sigma \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta F \\ \mathbf{S}\alpha^* \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} (\mathbf{SC}'')^T \Delta\sigma \\ (\mathbf{I} - \mathbf{R}^T) \mathbf{SR} \Delta\sigma \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\Delta\alpha$ 及 ΔF 分别为整体坐标系中增量节点位移矢量和增量等效节点力矢量, $\Delta\sigma$ 为局部坐标系中增量节点接触应力矢量, α^* 为按接触状态确定的节点相对位移或接触应力矢量, $\mathbf{C}$ 为坐标转换矩阵, $\mathbf{R}$ 为对角矩阵, $\mathbf{S}$ 为由单元插值函数积分得到的对称正定矩阵, $\mathbf{C}'$ 为矩阵 $\mathbf{C}$ 的转置矩阵, $\mathbf{C}''$ 为矩阵 $\mathbf{C}$ 与 $\mathbf{C}'$ 的差, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

根据式(1),得等效单元刚度-约束矩阵及等效载荷向量分别为^[15]:

$$[\mathbf{K}_c]^e = \begin{Bmatrix} 0 \\ \mathbf{SC}' \end{Bmatrix} \begin{pmatrix} (\mathbf{SC}')^T \\ \mathbf{R}^T \mathbf{SR} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\{f_c\}^e = \begin{Bmatrix} -(\mathbf{SC}'')^T \Delta\sigma \\ \mathbf{S}\alpha^* - (\mathbf{I} - \mathbf{R}^T) \mathbf{SR} \Delta\sigma \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式(2)、式(3)可用标准的有限元集成规则迭加到总刚度矩阵和总荷载向量中。

关于接触面的破坏准则,法线方向的容许接触应力 $[\sigma]$ 取最大拉应力,切线方向的容许接触应力 $[\tau]$ 按 Mohr-Coulomb 准则确定。即:

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (4)$$

$$[\tau] = c - \sigma \tan \varphi \quad (5)$$

式中: σ 为接触面法向正应力,以拉为正; c 为凝聚力; φ 为内摩擦角。

2.3 计算方案

结合王圪堵水库工程大坝设计及其地质条件,经分析确定的计算方案如下。

2.3.1 采用三维有限元模型实施计算 考虑到王圪堵水库工程的大坝体型呈现沿坝轴线方向长度(949 m)相对较长、而坝高(46 m)相对较小的特点,并结合坝基及坝肩的工程地质条件,本次计算在不影响既定分析目标的前提下,确定计算模型的范围为:大坝坝体取左岸侧共计 530 m 长的坝段(坝 0+000~坝 0+530),坝基底部取至基岩面以下至少 10 m、高程 982.40 m 处,坝基上、下游河床分别取至距上、下游坝坡坡角 1 倍坝高(46 m)处,左岸坝肩取至从坝 0+000 向左岸延伸 50 m 处。在不影响计算精度的前提下,对坝体断面进行了适当简化,上游坝坡取单一坡比 1:3.0,下游坝坡取单一坡比 1:2.5。根据左坝肩的坡面特征,忽略其坡面的起伏变化,左坝肩坡面取单一坡比 1:2.0。坝基覆盖层及左坝肩中的混凝土防渗墙,均严格按设计布置

及尺寸进行建模。

2.3.2 坝基(肩)土体与混凝土防渗墙之间接触面的构造 在坝基覆盖层和坝肩厚层砂层中设计布置了厚度为 0.8 m 的混凝土防渗墙。鉴于混凝土与覆盖层或厚砂层材料特性的差异较大,在二者的接触界面上将产生不连续的应力及变形,因此建模时在二者的全部接触界面均构造接触面单元,单元模型采用前述的接触摩擦单元。

2.3.3 大坝应力变形的非线性有限元计算 计算时,坝体碾压土料、坝基覆盖层、坝肩厚砂层等土石料,均采用非线性弹性的邓肯-张 E~B 本构模型,坝基及坝肩防渗墙混凝土采用线弹性模型。目前,材料非线性问题的有限元解法有增量法、迭代法、初应力法及初应变法等,对于土石坝工程而言,增量法是目前公认的较为合理而有效的方法^[16]。具体计算时,按照施工组织设计所制定的坝基开挖、坝体填筑及水库蓄水和降水的先后顺序,采用逐级加载、卸载的方法,模拟大坝的实际施工过程及蓄水、降水过程,依次计算获得与各级荷载对应的结点位移增量及单元应力增量,通过叠加获得各级荷载始末的结点位移及单元应力,进而获得大坝各个计算期(工况)的应力变形结果。根据工程实际情况,计算中共拟定 16 个荷载级,其中施工期的坝基开挖及坝体填筑共分 10 级,运行期的水库蓄水共分 3 级。

2.3.4 渗流对大坝应力变形的影响 采用应力场与渗流场的耦合分析方法进行研究^[17]。具体计算渗流对大坝应力变形的影响时,将坝体土料及坝基(肩)砂视作孔隙介质,在定义其材料性质时,除给出其邓肯-张 E~B 本构模型计算参数外,还同时给出其渗透系数及渗透边界条件。

2.4 有限元模型

根据几何模型的具体特点,将模型进行分解,共划分出 121 个五面体及六面体,并设置 72 个接触面。对上述各个五面体及六面体采用 8 结点等参单元进行剖分,共剖分实体单元 11 057 个,结点总数为 12 957 个。对上述各个接触面采用接触摩擦单元进行剖分,共剖分接触单元 157 个,接触结点总数为 732 个。模型边界条件为:模型底部边界取为固定,模型上、下游及左侧面边界取为沿相应界面法向的水平约束,模型右侧面边界取为对称约束,所得有限元模型见图 2。

坐标系的正向约定为:沿坝轴线方向自左向右为 X 轴正向,沿上下游方向为 Y 轴正向,竖直向上为 Z 轴正向。

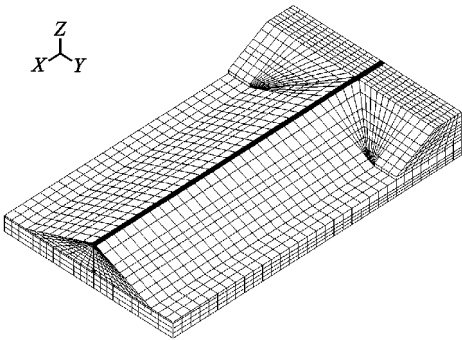


图 2 王圪堵水库大坝有限元分析模型
Fig. 2 Three-dimensional finite element model of Wang Ge-Du reservoir dam

3 计算工况与计算参数

3.1 计算工况

结合计算内容,拟定计算工况如下:(1)施工期:坝体从坝基面高程 1 008 m 填筑至坝顶高程 1 054 m。坝上、下游水位均取主河床高程 1 008 m。

(2)运行期:包括水库初次蓄水至正常蓄水位以及此后的大坝稳定渗流期。水库水位从 1 008 m 蓄

至正常蓄水位 1 046 m,坝下游水位为 1 008 m。

3.2 计算参数

3.2.1 坝体及坝基材料的渗透系数 根据该工程地质报告并参考类似工程经验,确定坝体及坝基材料的渗透系数见表 1。

表 1 坝体及坝基材料的渗透系数
Table 1 Penetration coefficient of dam and dam foundation material

材料 Material	渗透系数/(cm·s ⁻¹) Coefficient of permeability	
	K _x	K _y
坝体土料 Dam body earth	1.80×10 ⁻⁵	1.80×10 ⁻⁵
混凝土防渗墙 Concrete cutoff wall	1.00×10 ⁻⁷	1.00×10 ⁻⁷
帷幕灌浆 Curtain grouting	1.00×10 ⁻⁵	1.00×10 ⁻⁵
坝基砂 Sand of dam foundation	3.00×10 ⁻³	3.00×10 ⁻³
弱风化砂岩 Weak weathered sandstone	5.00×10 ⁻⁴	5.00×10 ⁻⁴

本工程缺少坝体及坝基(肩)材料邓肯-张 E~B 本构模型参数试验结果,因此在本次计算时,选取某相近工程的该本构模型参数试验结果,如表 2 所示。表 2 中各符号的意义见文献[9]。

表 2 坝体及坝基(肩)材料邓肯-张 E~B 本构模型的参数

Table 2 Duncan-chang model (E-B) parameter of dam and dam foundation (dam abutment) material

材料 Material	K	n	R _f	K _b	m	c/kPa	φ ₀ /(°)	Δφ/(°)	K _{ar}
坝体土料 Dam body earth	180.793	0.492	0.684	95.264	0.325	30	21	0	358.088
坝基(肩)砂 Sand of dam foundation	1 042.45	0.328	0.683	787.89	-0.148	0	28	5	2 239.900

3.2.2 混凝土防渗墙及其与土体接触面参数 混凝土防渗墙密度为 2 400 kg/m³,弹性模量为 1 GPa,泊松比为 0.167。坝基及坝肩混凝土防渗墙与坝基(肩)土体之间接触面的计算参数,参照类似工程经验选取,内摩擦角为 11.5°,凝聚力为 0。

4 计算结果与分析

按照上述计算方案,通过连续增量计算,获得了 3 种工况下大坝应力变形的三维有限元计算结果。施工期的坝基开挖及坝体填筑共分 10 级荷载实施计算,结果表明,最不利的应力变形发生在坝体填筑到坝顶即大坝竣工时,因此下述的施工期均指“大坝竣工时”。在施工期应力变形计算的基础上,再将水库蓄水按 3 级荷载进行施加,进行运行期大坝应力变形计算,结果表明,最不利的应力变形发生在正常蓄水位 1 046 m 时,因此下述的运行期均指“水库正常蓄水位 1 046 m 时”。应力变形计算时,位移以沿相应方向的坐标轴正向为正;主应力、正应力以拉为

正,以压为负。
通过计算,获得了施工期及运行期大坝整体的应力变形结果。限于篇幅,本研究仅列出了运行期大坝最大断面垂直、水平位移及大主应力、小主应力等值线图(图 3~6)。

本研究经过计算同时获得了施工期、运行期坝基和左坝肩混凝土防渗墙及其与土体接触面的应力变形结果,其中各期防渗墙中心剖面的大主应力等值线如图 7、图 8 所示,施工期防渗墙上、下游接触面的大主应力等值线分别见图 9 和图 10。

4.1 施工期及运行期大坝典型断面的应力变形特性分析

计算结果表明,施工期大坝水平及垂直位移的分布特征与一般均质土坝的位移分布规律基本一致。其中,大坝最大断面的最大垂直位移为 0.40 m,向上游的最大水平位移为 0.31 m,向下游的最大水平位移为 0.35 m。由于防渗墙的基础开挖以及浇筑施工等原因,在坝基防渗墙附近的上、下游坝

基中垂直位移出现了 2 个极值区,但方向均竖直向下;此外,大坝最大断面处防渗墙上、下游的最大垂直位移基本相同,为 0.42 m。施工期坝体沿坝轴线方向(X 方向)的位移总体呈现向右岸方向位移、左岸坝坡坝段上中部位移最大,向右位移逐渐减小的分布特点,位移最大值为 0.05 m。施工期大坝各断面的大、小主应力分布均基本呈现出压应力、从坝面向坝内应力逐渐增大,且最大值均发生在坝体底部的坝基防渗墙附近,上下游坝面局部存在较小拉应力的特点。其中,大坝最大断面的大主应力最大

为 1.07 MPa,位于坝体底部的坝基防渗墙上下游两侧,为压应力;小主应力最小值为 0.08 MPa,位于下游坝面中上部,为拉应力。在各断面的坝基中,大、小主应力均呈现为压应力,在防渗墙周边应力较为集中,梯度相对较大,大主应力最大值发生在防渗墙下部,小主应力最小值发生在下游坝坡坡角处的河床面上。其中,大坝最大断面的坝基大主应力最大值为 2.0 MPa,为压应力;小主应力最小值为 0.05 MPa,为压应力。

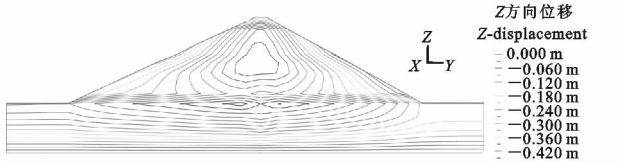


图 3 运行期大坝最大断面垂直位移等值线

Fig. 3 Largest section of vertical displacement isolines of the dam in the operation period

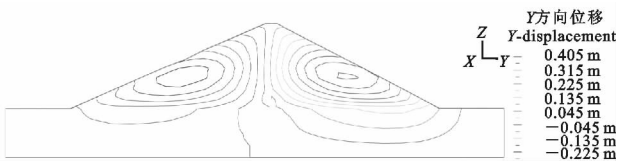


图 4 运行期大坝最大断面水平位移等值线

Fig. 4 Largest section of horizontal displacement isolines of the dam in the operation period

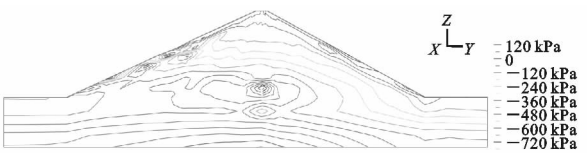


图 5 运行期大坝最大断面大主应力等值线

Fig. 5 Largest section of major principal stress isolines of the dam in the operation period

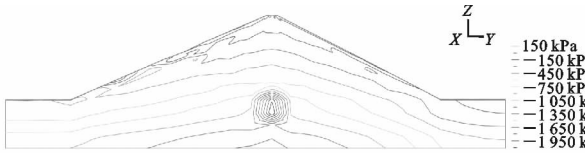


图 6 运行期大坝最大断面小主应力等值线

Fig. 6 Largest section of minor principal stress isolines of the dam in the operation period



图 7 施工期混凝土防渗墙中心剖面大主应力等值线
Fig. 7 Major principal stress isolines of concrete cutoff wall in the construction period



图 8 运行期混凝土防渗墙中心剖面大主应力等值线
Fig. 8 Major principal stress isolines of concrete cutoff wall in the operation period

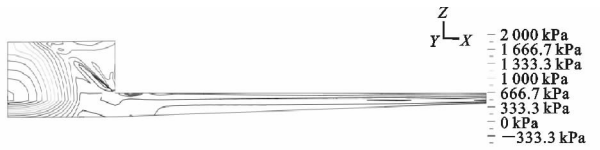


图 9 施工期防渗墙上游接触面大主应力等值线
Fig. 9 Major principal stress isolines of upstream face in the construction period

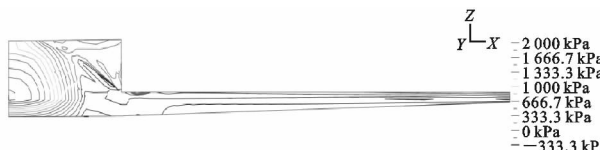


图 10 施工期防渗墙下游接触面大主应力等值线
Fig. 10 Major principal stress isolines of downstream face in the operation period

从图 3~6 可以看出,运行期大坝垂直位移的分布规律与施工期垂直位移的分布规律基本相同,但垂直位移的最大值有所增大。其中,大坝最大断面

的坝体最大垂直位移为 0.43 m,坝基最大垂直位移为 0.45 m,方向均竖直向下。运行期大坝水平位移的分布规律与施工期水平位移的分布规律也基本相

同,但由于水库蓄水作用,坝体上游部分向上游的水平位移有所减小,坝体下游部分向下游的水平位移有所增大。其中,大坝最大断面坝体向上游的最大水平位移为 0.26 m,向下游的最大水平位移为 0.41 m。相对于施工期,蓄水期坝体沿坝轴线方向的位移变化很小,其分布规律及大小与施工期基本相同。与施工期相比,各断面坝体大、小主应力的分布规律与施工期基本相同,但大、小主应力的绝对值均有所增大。其中,坝 0+200 断面坝体大主应力最大值为 1.50 MPa,位于防渗墙上下游侧的坝体底部,为压应力;坝体小主应力最小值为 0.09 MPa,位于上游坝面中下部,为拉应力。在各断面的坝基及左坝肩中,大、小主应力的分布规律及大小与施工期基本相同,变化很小。

文献[18]采用二维有限元模型对该大坝最大断面进行了应力变形的初步计算,与本研究结果相比,就大坝最大断面应力变形的分布规律而言,二者所

获结果基本一致。

4.2 施工期及运行期防渗墙及其与土体接触面的应力变形特性

施工期、运行期防渗墙及其与土体接触面的位移、应力和应力水平计算结果见表 3。表 3 中所示位移及应力的极值点位置见图 7~10。

4.2.1 防渗墙的应力变形 计算结果表明,在施工期和运行期,坝基及左坝肩混凝土防渗墙的位移特征为:(1)水平位移整体呈现向下游位移的特点;各断面坝基防渗墙最大水平位移大体均位于上部,向下部则逐渐减小;左坝肩防渗墙的水平位移分布则呈现出右端中下部最大、向左逐渐减小趋势。(2)垂直位移方向均竖直向下;各断面坝基防渗墙最大垂直位移均发生在其上部左端,向下部并向右端则逐渐减小;左坝肩防渗墙由于受到坝体变形的影响,因此垂直位移分布呈现出右端上部最大、向左向下则逐渐减小的分布特点。

表 3 坝基(肩)防渗墙及其与土体接触面的应力变形计算结果

Table 3 Stress and deformation results among the cutoff wall of dam foundation and its contact face with the earth

纵剖面 Longitudinal section	施工期 Construction period				运行期 Operation period			
	最大垂直 位移 U_{Zmax}/m Maximum vertical displacement	最大水平位移 U_{Ymax}/m Maximum horizontal displacement	大主应力 最大值 σ_{1max}/MPa Maximum major principal stress	应力水平 最大值 S_{max} Maximum stress level	最大垂直 位移 U_{Zmax}/m Maximum vertical displacement	最大水平 位移 U_{Ymax}/m Maximum horizontal displacement	大主应力 最大值 σ_{1max}/MPa Maximum major principal stress	应力水平 最大值 S_{max} Maximum stress level
防渗墙体中心剖面 Center profile of cutoff wall	-0.09	0.007	1.00		-0.16	0.035	0.90	
上游接触面 Upstream contact face			0.90	1.20			0.92	1.32
下游接触面 Downstream contact face			0.92	1.23			0.93	1.35

从图 7 和 8 可以看出,在施工期和运行期,坝基防渗墙的大主应力基本均呈现为压应力,但在局部坝段的防渗墙上部存在小范围的拉应力区。左坝肩防渗墙左半部分的大主应力为拉应力,均位于左坝肩左端中下部,右半部分区域的大主应力为压应力,分别位于左坝肩右段下部及中部。在施工期防渗墙的最大主拉应力为 1.00 MPa,小于其抗拉强度 1.1 MPa,因此其不会产生抗拉破坏。

4.2.2 防渗墙与土体接触面的应力变形 计算结果表明,施工期坝基防渗墙上游接触面的大主应力基本均呈现为压应力。但在靠近左坝肩局部坝段(坝 0+110,坝 0+130)的上游接触面上部,存在小范围的拉应力区。

从图 9 可以看出,施工期在坝基局部坝段(坝 0+110,坝 0+130)的上部及左坝肩大部分区域,上游接触面存在拉应力区,最大主拉应力为 0.90

MPa,这些部位的上游接触面将可能产生局部的张拉裂缝。同时,根据应力水平计算结果,上游接触面局部位置(坝基左侧上部)的应力水平最大值达 1.20,大于 1.0,说明这些部位将可能产生剪切裂缝。考虑到坝基及左坝肩防渗墙均处于深厚砂(卵石)层中,且上述张拉裂缝及剪切裂缝均是局部的、未向坝基(肩)及坝体其他部分扩展,周围砂层在自重应力作用下应该可使这些裂缝逐渐自愈。

从图 10 可以看出,施工期防渗墙下游接触面的大主应力分布特征与上游接触面基本相同,各拉应力区的最大拉应力值相差也较小。因此,关于上游接触面的上述分析结果也同样适用于下游接触面。

与施工期相比,运行期坝基和左坝肩防渗墙上、下游接触面的位移及应力分布变化较小,各种量值相差也较小。但运行期上、下游接触面局部位置(坝基左侧上部)的应力水平明显增大,最大值分别为

1.32 和 1.35,均大于 1.0,说明运行期这些部位发生剪切破坏的可能性增大。

5 结 语

本研究结合在建的王圪堵水库混凝土防渗墙的均质土坝工程,运用三维非线性有限元法对大坝应力变形仿真进行了分析,结果表明:

(1)在施工期和运行期,大坝水平及垂直位移的分布特征与一般均质土坝一致。由于防渗墙的基础开挖以及浇筑施工等原因,在坝基防渗墙附近的上、下游坝基中垂直位移出现了 2 个极值区,大坝各断面的大、小主应力分布均基本呈现出压应力、从坝面向坝内应力逐渐增大,且最大值均发生在坝体底部的坝基防渗墙附近,上下游坝面局部存在较小拉应力的特点。

(2)坝基和左坝肩混凝土防渗墙的垂直位移方向及水平位移均较小,坝基防渗墙的大主应力基本均呈现为压应力,只在局部坝段的防渗墙上部存在小范围的拉应力区,左坝肩防渗墙左半部分的大主应力为拉应力,右半部分区域的大主应力为压应力。坝基及左坝肩防渗墙的最大拉应力均小于防渗墙混凝土的抗拉强度,因此防渗墙不产生抗拉破坏。

(3)在施工期和运行期,坝基局部坝段的上部及左坝肩大部分区域,防渗墙与上、下游土体之间的接触面存在拉应力区及剪切破坏区,这些部位的上、下游接触面将可能产生局部的张拉裂缝及剪切裂缝。考虑到坝基及左坝肩防渗墙均处于深厚砂(卵石)层中,周围砂层在自重应力作用下可使这些裂缝逐渐自愈。但为确保大坝安全,建议在设计时,在坝基混凝土防渗墙周边,尤其是在防渗墙与坝体填土衔接部位,设置变形过渡层,以改善接触面的应力状况。

【参考文献】

- [1] 高仲璞. 大坝基础防渗墙 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000: 211-225.
Gao Z P. Dam-based cutoff wall [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000: 211-225. (in Chinese)
- [2] 林 昭. 碾压式土石坝设计 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003: 122-136.
Lin Z. Design of roller compacted earth-rock dam [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2003: 122-136. (in Chinese)
- [3] 司 政, 陈尧隆, 李守义. 土石坝坝基塑性混凝土防渗墙应力变形分析 [J]. 水力发电, 2008, 34(2): 32-35.
Si Z, Chen Y L, Li S Y. Stress-deformation analysis of plastic concrete diaphragm wall in dam foundation earth-rockfill dam

- [J]. Water Power, 2008, 34(2): 32-35. (in Chinese)
- [4] 李焯明. 塑性混凝土墙在病险土石坝加固中的应用 [J]. 中国农村水利水电, 2009(6): 79-84.
Li X M. Research on the application of plastic concrete walls to the reinforcement of dangerous earth-rockfill dams in Fujian Province [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(6): 79-84. (in Chinese)
- [5] 姚汝方. 高土石坝防渗墙混凝土性能试验 [J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(4): 44-46.
Yao R F. Experiment on the concrete properties of cutoff wall of high earth-rock dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(4): 44-46. (in Chinese)
- [6] 殷宗泽. 高土石坝的应力与变形 [J]. 岩土工程学报, 2009, 51(1): 1-14.
Yin Z Z. Stress and deformation of high earth and rock-fill dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 51(1): 1-14. (in Chinese)
- [7] 郎小燕. 混凝土防渗墙在土石坝工程中的应用与发展 [J]. 水利水电技术, 2007, 38(8): 42-45.
Lang X Y. Application of concrete cut-off wall to rock-earth dam and its development [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(8): 42-45. (in Chinese)
- [8] 陕西省水利电力勘测设计研究院. 陕西省榆林市王圪堵水库工程可行性研究报告 [R]. 西安: 陕西省水利电力勘测设计研究院, 2006: 112-253.
Shaanxi Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design. Feasibility study report of Wang Ge-du reservoir engineering, Yulin city, Shaanxi Province [R]. Xi'an: Shaanxi Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, 2006: 112-253. (in Chinese)
- [9] 《水布垭面板堆石坝前期关键技术研究》编写委员会. 水布垭面板堆石坝前期关键技术研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 71-92.
Research to Front Period of Key Technique about Shuibuya Concrete Face Rock-fill Dam Prepared by the Committee. Research to front period of key technique about Shuibuya concrete face rock-fill dam [M]. Beijing: China Water Power Press, 2005: 71-92. (in Chinese)
- [10] 姜亭亭, 高志军, 王运霞. 邓肯-张模型研究现状和在工程中的应用讨论 [J]. 西部探矿工程, 2009(6): 9-11.
Jiang T T, Gao Z J, Wang Y X. The research and engineering application of Duncan-Chang Model [J]. West-Ching Exploration Engineering, 2009(6): 9-11. (in Chinese)
- [11] Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1970, 96(SM5): 1629-1653.
- [12] 陈五一, 韩 永, 刘 品, 等. 基于邓肯-张模型的土石坝有限元分析 [J]. 人民长江, 2008, 39(8): 60-63.
Chen W Y, Han Y, Liu P, et al. Embankment dam's finite element analysis based on Duncan-Chang Model [J]. Yangtze River, 2008, 39(8): 60-63. (in Chinese)