

网络出版时间:2014-09-10 18:19

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.10.033

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.10.033.html

面板与坝体的分期施工高差对面板脱空变形的影响

王瑞骏¹, 薛一峰², 杜鑫¹

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

[摘要] **【目的】**研究高面板堆石坝面板与坝体的分期施工高差对于面板脱空变形的影响。**【方法】**在分析面板脱空机理的基础上,运用三维有限元子模型法,考虑堆石体的流变变形,以国内某高面板堆石坝工程为例,对不同面板与坝体分期施工高差方案所产生的面板脱空变形特征进行分析。**【结果】**面板与坝体的分期施工高差对各期面板的脱空变形影响显著,分期施工高差越大,各期面板的脱空变形相应越小;对于 200 m 级的高面板堆石坝,为有效避免面板脱空现象,面板与坝体的分期施工高差宜控制在 15 m 以上。**【结论】**对于采用分期施工方案的高面板堆石坝,应结合工程实际情况,通过有限元计算等方法合理选择适宜的面板与坝体的分期施工高差。

[关键词] 高面板堆石坝;分期施工高差;面板脱空变形;三维有限元子模型法

[中图分类号] TV641.4

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2014)10-0205-06

Effect of height difference in stage construction on the separation deformation between concrete face slab and cushion layer of CFRD

WANG Rui-jun¹, XUE Yi-feng², DU Xin¹

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

2 Shaanxi Province Institute of Water Resource and Electric Power Investigation and Design, Xi'an, Shaanxi 710001, China)

Abstract: **【Objective】** This paper studied the influence of height difference in stage construction on the void and deformation of CFRD. **【Method】** Based on the analysis of void mechanism, 3D sub model method was used to study the effects of height difference in stage construction with the consideration of rock fill rheological characteristics of dam body. Taking a domestic CFRD as example, the void of CFRD caused by different panels and different stage construction methods was analysed. **【Result】** The height difference in stage construction of panels and dam body had a great influence on void of CFRD. With the increase of the height difference, the void of CFRD decreased gradually. To effectively avoid the void for 200 m CFRD, the height difference of stage construction between panel and dam should be controlled to larger than 15 m. **【Conclusion】** For installment construction based high CFRD, appropriate height difference between panel and dam body should be chosen with the consideration of actual situation and finite element calculation method.

Key words: high CFRD; stage construction; void of CFRD; 3D sub model method

在混凝土面板堆石坝建筑施工过程中,随着坝高的增大,不得不采用分期施工方案,即将坝体和面板均按若干期进行分步施工,这样一来,堆石坝体的

沉降变形与面板变形之间就存在一个多次相互影响的问题。国内许多工程建设实践表明,采用分期施工方案以后,不少高面板堆石坝工程在施工期均出

[收稿日期] 2013-06-14

[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,博士,主要从事坝工应力研究。E-mail: wrj7163@xaut.edu.cn

现了程度不同的面板与垫层料之间的脱空问题^[1-4]。面板脱空将使堆石坝的工作性状严重恶化,易于产生裂缝,若不妥善处理将会危及大坝安全。研究表明,导致面板脱空的因素十分复杂,其中面板与坝体之间的分期施工高差乃是一个不容忽视的重要影响因素^[4-5]。目前工程界关于高面板堆石坝面板与坝体的分期施工高差对于面板脱空影响的研究还不够深入,尤其是对 200 m 级的高坝,还未对此问题形成全面和系统的认识^[5-6]。本研究拟在对面板脱空机理进行分析的基础上,运用三维有限元子模型法,考虑堆石体的流变变形,以国内某高面板堆石坝工程为例,对不同面板与坝体分期施工高差方案所产生的面板脱空变形特征进行对比,以期深入探讨高面板堆石坝面板与坝体的分期施工高差对面板脱空变形的影响规律。

1 面板脱空机理及其计算方法

1.1 面板脱空的产生机理及影响因素

对于高面板堆石坝,由于度汛、施工强度及提前发电等因素的影响,通常采用分期施工方案,即将坝体和面板均按若干期进行分步施工。这样一来,在前期面板浇筑完成后,随着后期坝体填筑的升高,面板所依托的前期坝体将在后期坝体的自重及流变等因素作用下产生较大的体积收缩,垫层料随之发生较大变形,顺河向水平位移一般表现为中下部向坡面外凸、上部向内凹陷的特征。但是由于面板变形模量较大,属薄板结构,因而其将随着坝体的变形而产生转动以及挠曲变形,当其难以完全适应堆石体的这种坡面变形时,面板与垫层之间势必产生分离,即面板脱空现象。因此,面板脱空的产生实质上是由于面板与坝体堆石料尤其是垫层料变形不协调所导致的,在大坝分期施工的条件下,这种现象往往更难以避免^[3-5]。研究表明,影响面板脱空的主要因素包括面板与坝体之间的分期施工高差、筑坝材料的密实度及其压缩模量、坝体分区方式、分期施工坝体预沉降期的长短等^[4-5]。

1.2 材料本构模型及堆石体的流变模型

根据面板及坝体堆石料的变形特性,混凝土面板一般可取线弹性模型,坝体堆石料则可选用目前应用较为广泛的邓肯-张 E-B 非线性弹性模型^[7]。

根据本研究中所探讨问题的性质,堆石体的流变计算拟采用沈珠江院士等^[8]提出的 3 参数 Merchant 黏弹性模型。该模型在常应力下的 ϵ_t 衰减

曲线形式^[9]如下:

$$\epsilon_t = \epsilon_i + \epsilon_f(1 - e^{-\alpha t}). \tag{1}$$

式中: ϵ_t 为 t 时刻的流变量, ϵ_i 为初始流变量, ϵ_f 为 t 时刻的最终流变量, α 为初始相对变形率。

对上式求导可得流变速率,将流变速率分解为体积流变速率 $\dot{\epsilon}_v$ 和剪切变形速率 $\dot{\gamma}$,计算公式如下:

$$\dot{\epsilon}_v = \alpha \epsilon_{vf}(1 - \epsilon_{vt}/\epsilon_{vf}), \tag{2}$$

$$\dot{\gamma} = \alpha \gamma_f(1 - \gamma_t/\gamma_f). \tag{3}$$

式中: ϵ_{vf} 和 γ_f 分别表示最终体积流变量和最终剪切流变量, ϵ_{vt} 和 γ_t 分别表示 t 时刻已经累计的体积流变量和剪切流变量。

式(2)、(3)中的 ϵ_{vf} 和 γ_f 可按下式计算:

$$\begin{aligned} \epsilon_{vf} &= b \cdot \sigma_3 / P_a, \\ \gamma_f &= d \cdot S_1 / (1 - S_1). \end{aligned} \tag{4}$$

式中: b 、 d 为计算参数, σ_3 为小主应力, P_a 为 1 个标准大气压, S_1 为应力水平值。

式(2)、(3)中的 ϵ_{vt} 和 γ_t 可按下式计算:

$$\epsilon_{vt} = \sum \dot{\epsilon}_v \Delta t, \gamma_t = \sum \dot{\gamma} \Delta t. \tag{5}$$

式中: Δt 为时间增量。

根据 Prandtl-Reuss 流动法,则流变变形速率张量的表达式^[8]为:

$$\{\dot{\epsilon}\} = \dot{\epsilon}_v / 3 + \dot{\gamma} \{s\} / q. \tag{6}$$

式中: $\{s\}$ 为偏应力, q 为广义剪应力。

1.3 堆石流变效应的有限元分析方法

为模拟堆石坝体逐层施工进而导致其流变产生的起始时间并不相同这一特征,本研究采用增量法来模拟堆石坝体的流变效应^[10]。设在某一时间段 (Δt) 内的体积流变增量 ($\Delta \epsilon_v$) 和剪切流变增量 ($\Delta \gamma$) 为^[10]:

$$\Delta \epsilon_v = \dot{\epsilon}_v \Delta t, \tag{7}$$

$$\Delta \gamma = \dot{\gamma} \Delta t. \tag{8}$$

则在 $t = \sum \Delta t$ 时刻累计的体积流变量和剪切流变量的表达式如式(5)所示。根据 Prandtl-Reuss 流动法则,流变增量表达式为:

$$\begin{Bmatrix} \Delta \epsilon_x \\ \Delta \epsilon_y \\ \Delta \epsilon_z \\ \Delta \gamma_{xy} \\ \Delta \gamma_{yz} \\ \Delta \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{1}{3} \dot{\epsilon}_v \Delta t \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \frac{\dot{\gamma}}{q} \Delta t \begin{Bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \\ 2\tau_{xy} \\ 2\tau_{yz} \\ 2\tau_{zx} \end{Bmatrix}. \tag{9}$$

式中: $\{\Delta \epsilon_x \ \Delta \epsilon_y \ \Delta \epsilon_z \ \Delta \gamma_{xy} \ \Delta \gamma_{yz} \ \Delta \gamma_{zx}\}^T$ 为整体坐标系下的流变增量向量, $\{s_x \ s_y \ s_z \ 2\tau_{xy} \ 2\tau_{yz} \ 2\tau_{zx}\}^T$ 为整体坐标系下的偏应力向量。流变有限元分析的具体步骤参见文献^[10]。

1.4 接触面及接缝的模拟

关于面板与垫层之间接触面的模拟,本研究采用考虑接触摩擦特性的无厚度 Goodman 单元;关于面板接缝的模拟,虽也采用无厚度 Goodman 单元,但不同方向的劲度系数由接缝止水材料的拉压和剪切试验结果确定^[11-15]。

1.5 面板脱空的模拟计算方法

为了更全面而准确地模拟面板脱空变形的产生与发展规律,本研究拟采用三维有限元子模型法进行面板脱空的分析计算。具体按以下 2 个阶段分析计算:

1)大坝整体计算。建立大坝整体有限元模型,利用单元生死功能来模拟坝体填筑、面板浇筑及蓄水过程,按以下步骤进行面板脱空变形的初步计算:①当一期坝体填筑完成后,将其单元应力予以输出;②对分析模型加以修改,去除已填筑坝体单元的自重,将已输出的坝体单元应力作为初始应力,激活一期面板单元重新提交计算;③继续模拟二期坝体填筑或蓄水过程,至二期面板浇筑前即可得到一期面

板的脱空变形结果;④依此类推,可获得各期面板的脱空变形结果。

2)坝段子模型计算。选取通过上述初步计算确定的发生最大脱空宽度的坝段,运用三维有限元子模型法进行面板脱空的模拟计算。具体步骤为:①创建三维子模型,重新剖分网格,为提高关于面板脱空的计算精度,此时适当加密垫层区的网格;②将子模型边界上通过上述整体计算得到的位移结果作为子模型的驱动变量;③设置子模型的边界条件、载荷、接触以及约束条件;④提交子模型进行计算。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

国内某水电站大坝为混凝土面板堆石坝,最大坝高 178 m,坝顶长 1 104 m,上游坝坡坡比为 1:1.4,下游平均坝坡坡比为 1:1.4,坝顶宽度为 12 m。坝基开挖后整体位于坚硬且相对完整的基岩上。大坝标准剖面见图 1^[3]。图中 EL 为高程符号。

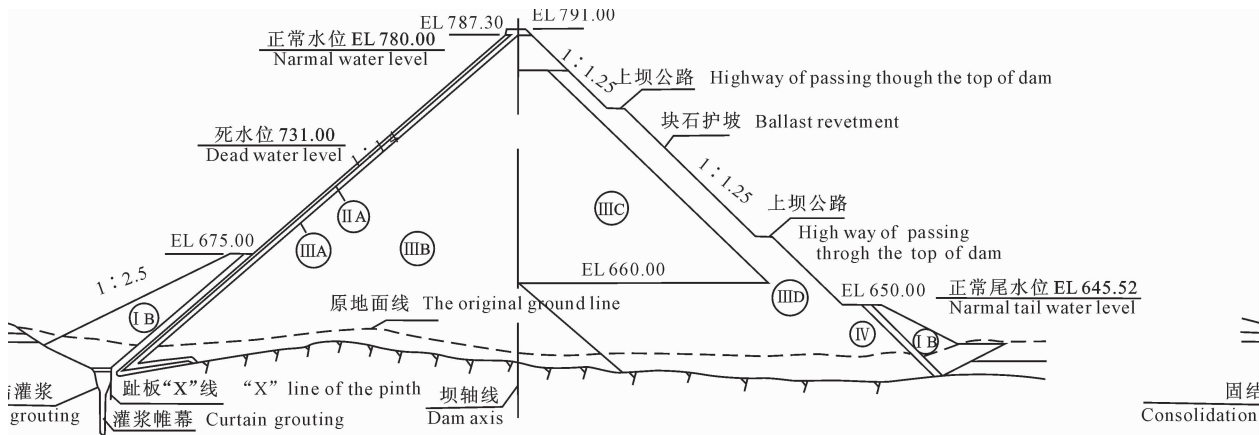


图 1 某混凝土面板堆石坝大坝标准剖面图
I B. 任意料区; III A. 过渡料区; III C. 软岩料区; IV. 黏土料区; II A. 垫层料区; III B. 主堆石区; III D. 次堆石区

Fig. 1 Standard profile of CFRD

I B. Arbitrary material; III A. Transition material; III C. Soft rock stuff area; IV. Clay material;
II A. Cushion material; III B. Main rock-fill area; III D. Secondary rock-fill zone

2.2 有限元计算模型

1)计算范围。模型上、下游方向分别取至上、下游坝坡坡脚,两坝肩取至基岩岸坡,坝底取至建基面。

2)边界条件。底部取为固定约束,两坝肩施加相应的法向约束。

3)单元剖分。选用 8 结点六面体单元和 6 结点三棱柱单元进行模型剖分,共剖分得到 6 194 个单元、8 128 个结点。三维有限元网格见图 2。

2.3 计算参数

混凝土面板按线弹性材料考虑,取材料密度 $\rho_d=2\ 400\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E=24\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.167$ 。坝体各区材料邓肯-张 E-B 模型参数见表 1^[3]。表 1 中, ρ 为材料密度, φ_0 为当围压为一个标准大气压时的内摩擦角, $\Delta\varphi$ 为围压相对于标准大气压增大 10 倍时的内摩擦角递减量, K 为初始切线弹模系数, n 为初始切线弹模指数, R_f 为破坏比, K_b 为切线体积模量系数, m 为切线体积模量指数, K_{ur} 为

卸荷模量系数, n_{ur} 为卸荷模量指数。堆石坝坝体各区材料的料流变模型计算参数见表 2^[3]。

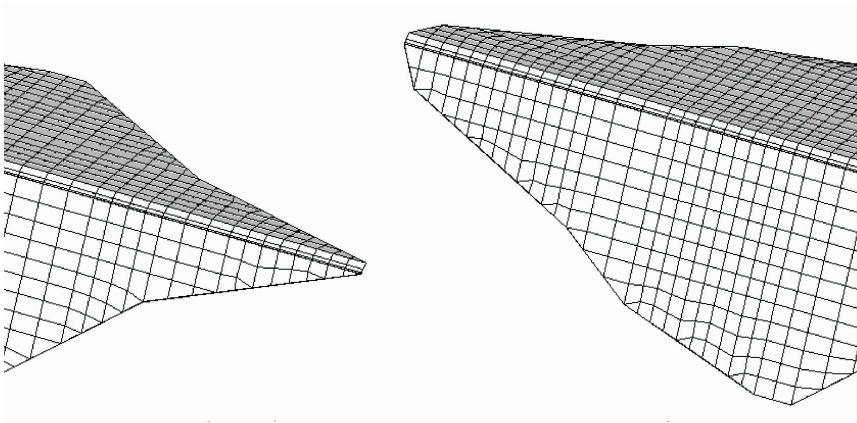


图 2 某混凝土面板堆石坝大坝三维有限元网格图

Fig. 2 3D finite element mesh of CFRD

表 1 面板堆石坝坝体各区材料的邓肯-张 E-B 模型参数

Table 1 Duncan-Chang E-B model parameters of CFRD materials

材料 Material	$\rho/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	$\varphi_0/(\text{^\circ})$	$\Delta\varphi/(\text{^\circ})$	K	n	R_f	K_b	m	K_{ur}	n_{ur}
垫层料(ⅡA) Cushion material(ⅡA)	2.20	50.6	7.0	1 050	0.354	0.706	476	0.236	2 210	0.204
过渡料(ⅢA) Transition material(ⅢA)	2.10	52.5	8.0	970	0.361	0.760	440	0.193	2 000	0.210
主堆石(ⅢB) Main rock-fill(ⅢB)	2.10	54.0	13.0	940	0.350	0.849	340	0.180	1 980	0.200
次堆石(ⅢD) Second rock-fill(ⅢD)	2.05	54.0	13.5	720	0.303	0.798	800	-0.180	1 550	0.160
软岩料(ⅢC) Soft rock material(ⅢC)	2.15	48.0	10.0	500	0.250	0.727	250	0.000	1 050	0.120

表 2 面板堆石坝坝体各区材料的流变模型计算参数

Table 2 Rheological model calculation parameters of CFRD materials

流变参数 Rheological parameter	垫层料 Cushion material	过渡料 Transition material	主堆石 Main rock-fill	次堆石 Second rock-fill	软岩料 Soft rock material
α	0.003 5	0.003 5	0.003 5	0.003 6	0.003 8
b	0.009 0	0.009 0	0.009 5	0.010 0	0.012 0
d	0.002 1	0.002 1	0.002 1	0.002 9	0.002 5

2.4 加载过程

拟定加载过程如图 3 所示。荷载级共分为 51 级。

根据设计确定的坝体施工及水库蓄水过程^[15],

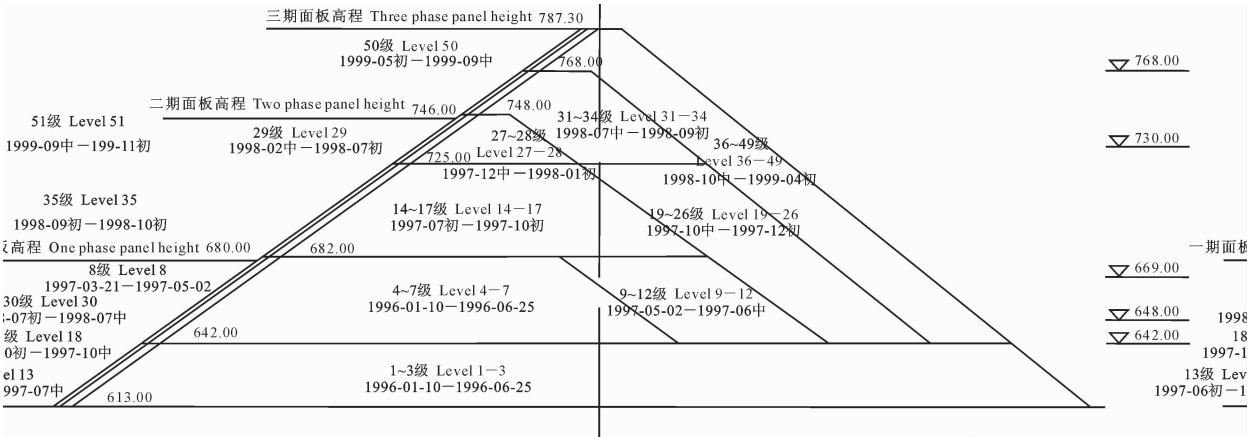


图 3 某混凝土面板堆石坝坝体分期施工及水库蓄水过程(单位:m)

Fig. 3 Process of dam body stage construction and water storage process of CFRD (Unit:m)

2.5 计算方案

为研究面板与坝体的分期施工高差对于面板脱空的影响,本研究拟定 3 种分期施工高差方案,其分期施工高差分别为 2、5 和 10 m。除分期施工高差外,假定 3 种方案的其他计算条件均相同,其中面板分期按 3 期考虑。

2.6 计算结果及其分析

采用 1.5 节所述的模拟计算方法,首先进行大坝整体的三维有限元计算。大坝整体计算结果表明,各计算方案的面板脱空均呈现如下特点:①面板的脱空区域均位于各期面板的上部;②在发生脱空的任一坝体横断面上,脱空宽度在面板顶部最大,向下则逐渐减小直至闭合;③沿坝轴线方向,河床坝段的面板脱空变形最大,而两岸坝段则逐渐减小直至无脱空;④随着分期施工高差的逐渐增大,各期面板的脱空变形及范围均明显减小,说明分期施工高差对于各期面板的脱空变形影响显著。

然后,在大坝整体计算的基础上,选取一、二期

面板顶部出现最大脱空宽度的河床坝段(15 m 长)建立三维子模型,运用子模型法重新进行计算。经计算,一期面板浇筑之后至二期面板浇筑之前,与 3 种分期施工高差方案相应的一期面板沿坝坡面的最大脱空深度依次为 12、8 和 2 m,一期面板顶部沿坝轴向的脱空长度依次为 261.46、166.02 和 86.23 m;二期面板浇筑之后至三期面板浇筑之前,与 3 种分期施工高差方案相应的二期面板沿坝坡面的最大脱空深度依次为 10、6 和 0 m,二期面板顶部沿坝轴向的脱空长度依次为 142.32、45.74 和 0 m。不难发现,从沿坝坡面的最大脱空深度及面板顶部沿坝轴向的脱空长度而言,一期面板均大于二期面板。由此说明,位于坝体下部的早期面板更易受到后期坝体填筑及水库蓄水等荷载的影响而产生较大的脱空范围。

各方案相应的一期面板顶部脱空宽度随荷载级的发展过程见表 3,二期面板顶部脱空宽度随荷载级的发展过程见表 4。

表 3 不同荷载级下某混凝土面板堆石坝一期面板脱空宽度的发展过程

Table 3 Evolution of the opening width between stage I face slab and cushion layer of CFRD under different load		cm		
荷载级 Load grade	填筑及蓄水时段 Filling and water storage period	方案一 (分期施工高差 2 m) Scheme one (Stage construction height difference 2 m)	方案二 (分期施工高差 5 m) Scheme two (Stage construction height difference 5 m)	方案三 (分期施工高差 10 m) Scheme three (Stage construction height difference 10 m)
12	断面下游填筑至 682.00 m 高程 Downstream sections filled to 682.00 m elevation	0.0	0.0	0.0
13	蓄水至 642.00 m 高程 Water elevation to 642.00 m	0.0	0.0	0.0
17	填筑至 725.00 m 高程 Filling elevation to 725.00 m	9.4	5.3	1.5
18	蓄水至 648.00 m 高程 Water elevation to 648.00 m	9.7	5.3	1.5
26	断面下游填筑至 725.00 m 高程 Downstream sections filled to 725.00 m elevation	10.5	5.7	1.6
28	填筑至 748.00 m 高程 Filling elevation to 748.00 m	12.2	6.8	2.3

表 4 不同荷载级下某混凝土面板堆石坝二期面板脱空宽度的发展过程

Table 4 Evolution of the opening width between stage II face slab and cushion layer of CFRD under different load		cm		
荷载级 Load grade	填筑及蓄水时段 Filling and water storage period	方案一 (分期施工高差 2 m) Scheme one (Stage construction height difference 2 m)	方案二 (分期施工高差 5 m) Scheme two (Stage construction height difference 5 m)	方案三 (分期施工高差 10 m) Scheme three (Stage construction height difference 10 m)
30	蓄水至 669.00 m 高程 Water elevation to 669.00 m	0.0	0.0	0.0
34	填筑至 768.00 m 高程 Filling elevation to 768.00 m	5.8	3.1	0.0
35	蓄水至 730.00 m 高程 Water elevation to 730.00 m	4.8	2.6	0.0
43	全断面填筑至 725.00 m 高程 Full face filling to 725.00 m height	5.5	2.9	0.0
47	全断面填筑至 768.00 m 高程 Full face filling to 768.00 m height	6.7	3.6	0.0
49	全断面填筑至 787.30 m 高程 Full face filling to 787.30 m height	7.6	4.1	0.0

从表 3 及表 4 可以看出:①高差变化对面板脱空值影响很大,随着高差的增大,脱空宽度明显减小;②面板承受水压力时,水位较低时面板脱空有增大趋势,而水位较高时面板顶部被逐渐压向垫层料,有贴紧脱空部位的趋势;③各方案相比,高差越大,脱空宽度随荷载步的增大其增加幅度越小。

比较表 3 与表 4 可以看出,对同一分期施工高差方案,一期面板的脱空变形明显大于二期面板;对本研究的大坝实例而言,为有效控制施工期的面板脱空,较为合理的面板与坝体之间的分期施工高差宜控制在 15 m 以上。

3 结 语

1)在混凝土面板堆石坝的分期施工过程中,分期施工高差对各期面板的脱空变形影响明显。随着分期施工高差的逐渐增大,各期面板的脱空变形均明显减小。

2)各期面板的脱空均呈现如下特点:①脱空区域均位于各期面板的上部;②在发生脱空变形的任一坝体横断面上,脱空宽度在面板顶部最大,向下则逐渐减小直至闭合;③沿坝轴线方向,河床坝段的面板脱空变形最大,而两岸坝段则逐渐减小直至无脱空。

3)对同一分期施工高差方案,一期面板的脱空变形明显大于二期面板。

4)本实例研究表明,对于 200 m 级的高面板堆石坝,为有效避免面板脱空现象,面板与坝体的分期施工高差宜控制在 15 m 以上。

虽然上述结论是结合工程实例获得的,但鉴于目前国内 200 m 级的高面板堆石坝大多均采用与该实例工程基本相似的分期施工方案,坝体填筑及面板浇筑施工过程基本相同,坝体材料性质大同小异,施工质量控制标准基本一致。因此,本研究成果对于国内类似工程具有重要的参考和借鉴意义。

[参考文献]

[1] 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 Z Y,Zhou J P,Jiang G C,et al. Development of concrete faced rock-fill dam in China [J]. Water Power,2011(2):18-23. (in Chinese)
[2] 曹克明,汪易森,徐建军,等. 混凝土面板堆石坝 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2008:62-65.
Cao K M,Wang Y S,Xu J J,et al. Concrete face rock-fill dam [M]. Beijing:China WaterPower Press,2008:62-65. (in Chi-

nese)
[3] 张宗亮,徐 永,刘兴宁,等. 天生桥一级水电站枢纽工程设计与实践 [M]. 北京:中国电力出版社,2007:32-33,47,53,234.
Zhang Z L,Xu Y,Liu X N,et al. Design and practice of project of Tianshengqiao hydropwer station [M]. Beijing:China Electric Power Press,2007:32-33,47,53,234. (in Chinese)
[4] 黄锦波,王德军. 洪家渡面板堆石坝分期填筑方案研究 [J]. 人民长江,2004(7):1-2.
Huang J B,Wang D J. Quarry blasting of filling material for concrete-faced rock-fill dam of Hongjiadu hydropower station [J]. Yangtze River,2004(7):1-2. (in Chinese)
[5] 赵增凯. 高混凝土面板堆石坝防止面板脱空及结构性裂缝的探讨 [C]//关志诚. 混凝土面板堆石坝筑坝技术与研究. 北京:中国水利水电出版社,2005:38-44.
Zhao Z K. Study on preventing the void of CFRD and structural cracks of high concrete face rock-fill dam [C]//Guan Z C. Concrete faced rock-fill dam technology and research. Beijing:China WaterPower Press,2005:38-44. (in Chinese)
[6] 徐泽平,邓 刚. 国际高混凝土面板堆石坝的发展概况及评述 [C]//水电水利规划设计总院. 土石坝技术-2008 论文集. 北京:中国电力出版社,2008:35-52.
Xu Z P,Deng G. Development situation and review of international high concrete face rock-fill dam [C]//China Renewable Energy Engineering Institute. Earth-rockfill dam technology-2008 memoir. Beijing:China Electric Power Press,2008:35-52. (in Chinese)
[7] Duncan J M,Byrne P,Wong K S,et al. Strength,stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stress and movement in soil masses [R]. Barkeley:Univ of California,1980.
[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. 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.
Shen Z J,Zuo Y M. Experimental study on creep deformation of rock-fill [C]//China Civil Engineering Society. The academic conference Chinese Civil Engineering Society sixth of soil mechanics and foundation engineering memoir. Shanghai:Tongji University Press,1991:443-446. (in Chinese)
[9] 余亚鹏,王永明,卢继旺,等. 200 m 级面板堆石坝流变研究 [J]. 水电能源科学,2010,28(4):90-92.
She Y P,Wang Y M,Lu J W,et al. Rheological study of 200 m-class face rock-fill dam [J]. Water Resources and Power,2010,28(4):90-92. (in Chinese)
[10] 王瑞骏,丁战峰,刘 伟. 流变效应对面板堆石坝应力变形的影响规律分析 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(10):226-234.
Wang R J,Ding Z F,Liu W. Analysis of rheology effects on the stress and deformation of the rock-fill dam [J]. Journal of Northwest A&F University:Nat Sci Ed,2012,40(10):226-234. (in Chinese)

[6] Kalkan L, Lee J H. Effect of shrinkage restraint on deflections of reinforced self-compacting concrete beams [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, 17(7): 1672-1681.

[7] Aslani F, Nejadi S. Bond behavior of reinforcement in conventional and self-compacting concrete [J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 15(12): 2033-2051.

[8] Anna H. Influence new-to-old concrete interface qualities on the behaviour of support zones of composite concrete beams [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25: 4072-4078.

[9] Ourania T T, Andreas P L, Stephanos E D. Experimental investigation of interface behaviour of RC beams strengthened with concrete layers [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 50-59.

[10] Long G C, Xie Y J, Ding W W, et al. Lon-transport characteristics of new-old concrete composite system [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(2): 790-798.

[11] Santos P M D, Julio E N B S. Factors affecting bond between new and old concrete [J]. ACI Materials Journal, 2011, 108(4): 449-456.

[12] 陈 峰, 郑建岚. 自密实混凝土与老混凝土的黏结收缩试验研究 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2009, 48(6): 844-847.

[13] 陈 峰, 郑建岚. 自密实混凝土与老混凝土的黏结-滑移性能 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(6): 56-60.

[14] 罗素蓉, 郑建岚, 王国杰. 自密实高性能混凝土力学性能的研究与应用 [J]. 工程力学, 2005, 22(1): 164-169.

[15] Austin S, Robins P, Pan Y. Shear bond testing of concrete repairs [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(7): 1067-1076.

[16] Chen F, Zheng J L. Experimental research on shrinkage of adherence of self-compacting concrete on old concrete [J]. Journal of Xiamen University: Natural Science Edition, 2009, 48(6): 844-847. (in Chinese)

[17] Chen F, Zheng J L. Bond-slip relationship between self-compacting concrete and old concrete [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(6): 56-60. (in Chinese)

[18] Luo S R, Zheng J L, Wang G J. Study on mechanical property of self-compacting concrete and its engineering application [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(1): 164-169. (in Chinese)

[19] Liang C G. Construction program of the concrete facing rock-fill dam of Tianshengqiao First-cascade Hydropower Station [J]. Water Power, 1999(3): 32-35.

(上接第 210 页)

[11] 沙迎春, 吴中如. 用 Marc 软件提供的接触分析功能简化网格划分 [J]. 红水河, 2003(2): 61-64.

[12] 杜丽惠, 邓良军, 陈宏钧, 等. 直接约束法在水工建筑物接触分析中的应用 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(11): 1534-1537.

[13] Goodman R E, Taylor R L, Brekke T L. A model for the mechanics of jointed rock [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1968, 94(3): 637-660.

[14] 费 康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 1-4, 126-134, 343-392.

[15] 梁传国. 天生桥一级水电站混凝土面板堆石坝施工程序 [J]. 水力发电, 1999(3): 32-35.

[16] Sha Y C, Wu Z R. Simplification of the mesh partitioning through contact analysis provided by MSC. Marc [J]. Red Water River, 2003(2): 61-64. (in Chinese)

[17] Fei K, Zhang J W. ABAQUS application in geotechnical engineering [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2010: 1-4, 126-134, 343-392. (in Chinese)

[18] Liang C G. Construction program of the concrete facing rock-fill dam of Tianshengqiao First-cascade Hydropower Station [J]. Water Power, 1999(3): 32-35.

[19] Du L H, Deng L J, Chen H J, et al. Direct constraint procedure to solve contact problems in hydrostructures [J]. J Tsinghua Univ: Nat Sci Ed, 2003, 43(11): 1534-1537. (in Chinese)