

复杂加载条件对高面板堆石坝力学行为的影响

岑威钧¹, 王 帅¹, 杨宏昆², 卢培灿², 周 涛²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 四川省清源工程咨询有限公司, 四川 成都 610072)

摘要 : 针对高面板堆石坝因采用坝体分区填筑和面板分期浇筑互相交错的复杂施工方式使得高面板坝呈现出复杂的力学行为这一问题, 借助某拟建高面板堆石坝, 采用三维非线性有限元法对其进行复杂加载条件下的结构仿真分析。结果表明, 复杂加载条件下坝体应力变形等力学行为均在合理范围之内, 但坝体沉降极值较大坝全断面施工时有约 12% 的减小量; 分二期浇筑的面板在竣工期下部一期面板凸向上游, 容易引起脱空现象, 需引起注意。

关键词 : 复杂加载; 高面板堆石坝; 力学行为; 有限元分析

中图分类号 : TV641.4+3

文献标识码 : A

文章编号 : 1006-7647(2011)06-0046-04

Influences of complex loading mode on mechanical behaviors of high concrete face rockfill dams // CEN Wei-jun¹, WANG Shuai¹, YANG Hong-kun², LU Pei-can², ZHOU Tao² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Sichuan Qingyuan Engineering Consultant Co., Ltd., Chengdu 610072, China)

Abstract : The high concrete face rockfill dams (CFRDs) usually adopt complex construction mode, that is, filling of zoned dam body and placing of concrete face slabs in stages. Thus, the high CFRDs exhibit complex mechanical behaviors. Based on a high CFRD to be constructed, the 3D nonlinear finite element method was applied to the structural simulation under complex loading conditions. The results indicate that the stress and deformation behaviors of the dam under complex loading conditions are reasonable. Compared with the behaviors of full section filling of dam body, the maximum settlement of the dam has a decrease of about 12%. The first stage face will be convex to the upstream at the completion stage under the placing of the concrete face slabs in two stages, which will cause separation between the concrete slab and the cushion layer, and it should be noticed.

Key words : complex loading; high CFRD; mechanical behavior; finite element analysis

现代面板堆石坝因采用大型碾压机械施工解决了早期抛投堆石坝变形过大的问题, 同时对地形、地质和气候等条件有广泛的适应性, 已成为当今最具有竞争力的坝型之一。随着我国水电资源的进一步开发及筑坝技术的不断发展, 混凝土面板堆石坝的数量以较快的速度增长, 坝高逐渐增大, 坝高 100 m 以上的面板堆石坝已有 40 余座。当前高面板堆石坝的设计和建造在一定程度上依然凭借经验和参照类似工程实例。与中低面板堆石坝不同, 高面板堆石坝的大坝施工加载方式较为特殊^[1]。中低面板堆石坝一般多采用坝体全断面水平分层碾压, 逐级施工至坝顶后再浇筑上游混凝土面板, 这种施工次序在仿真计算时称为简单加载条件。对于高面板堆石坝, 因施工强度、周期和拦洪度汛等原因, 坝体一般需要分区分期填筑, 在坝体内形成了复杂子断面。同时, 混凝土面板的浇筑和水库的蓄(退)水也往往

与坝体的施工过程交错在一起。在这样的复杂加载条件下, 高面板堆石坝所呈现出来的应力变形等力学特性有所不同^[2]。另外, 高面板堆石坝还存在复杂的坝体应力路径^[3]、坝体分区堆石料造成的力学差异性、面板脱空预防、河谷形状的影响^[4]等问题需要进一步研究。为了使高面板堆石坝健康成熟的快速发展, 有必要对上述问题进行专门的理论分析和数值模拟研究, 以期在理论上有较为深入的认识, 进而指导高面板堆石坝工程的设计和施工。

某拟建混凝土面板堆石坝坝高 138 m, 坝顶高程为 2925.0 m, 坝顶宽 10 m, 坝顶长 292 m, 上下游坝坡均为 1:1.4, 趾板基础固结灌浆深 10 m, 坝基帷幕灌浆最大深度约为 75 m。因施工强度、周期、临时断面度汛等问题, 大坝需要分区分期填筑, 混凝土面板也需要分二期浇筑(图 1), 造成坝内应力路径复杂。笔者以该面板堆石坝为例, 采用三维非线性有限元

法按设计施工进度安排,对大坝分区填筑和面板分期浇筑进行复杂加载条件下的仿真计算,重点研究坝体和防渗系统的应力变形特性,进而评价大坝设计的合理性和安全性。

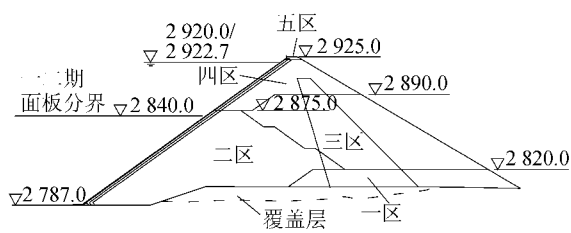


图1 大坝典型剖面及分区施工示意图(单位:m)

1 筑坝材料力学模型

1.1 堆石料力学模型

坝体堆石料的变形行为不仅受荷载(自重和水荷载)大小影响,还与加载路径相关,其应力应变关系呈现明显的非线性特点。Duncan等^[5]于1970年提出的 $E-\mu$ 双曲线模型因概念明确,参数确定方便,工程应用经验丰富,目前已在土石坝应力变形分析中广泛使用。1980年Duncan等^[6]提出了 $E-B$ 模型。一般认为 $E-B$ 模型更适合堆石坝结构分析,尤其对坝体水平变形的刻画更为准确^[7-8]。由于模型是在常规三轴试验基础上建立的,不能考虑中主应力的影响。顾淦臣等^[9]对其进行了改进,将其推广至三维计算。改进的邓肯 $E-B$ 模型的主要计算公式如下:

$$E_t = KP_a \left(\frac{p}{P_a} \right)^n \left[1 - R_f q \frac{\sqrt{3} \cos \theta_\sigma + \sin \varphi \sin \theta_\sigma}{3p \sin \varphi + 3c \cos \varphi} \right]^2 \quad (1)$$

$$B_t = K_b P_a \left(\frac{p}{P_a} \right)^m \quad (2)$$

$$E_{ur} = K_{ur} P_a \left(\frac{p}{P_a} \right)^n \quad (3)$$

式中: E_t 为切线弹性模量; P_a 为大气压; p 为平均主应力; q 为广义剪应力; θ_σ 为 Lode 应力角; B_t 为切线体积模量; E_{ur} 为回弹模量; $c, \varphi, K, K_{ur}, n, R_f, K_b$ 和 m 为材料试验参数,可根据三轴试验测定。

当土体单元应力状态同时满足 $S_i \leq 0.95 S_{i-1}$ 和 $\sigma_{1,i-1} - \sigma_{3,i} \leq 0.95 (\sigma_{1,i-1} - \sigma_{3,i-1})$ 时(S 为应力水平, i 为加载级数),该单元处于卸载或再加载状态,采用回弹模量进行计算。

1.2 面板与垫层接触力学模型

大坝垫层区在斜坡碾压定型后常采用乳化沥青或 6 cm 厚的无砂混凝土对上游面进行固坡,再在上面浇筑钢筋混凝土面板。混凝土面板与其下接触层间力学相互作用较为复杂,通常采用 Goodman 等^[10]提出的无厚度接触单元对两者力学行为的传递进行

刻画,其中接触面的切向劲度 K_s 按式(4)计算:

$$K_s = K_1 \rho_w g \left(\frac{\sigma_n}{P_a} \right)^{n'} \left(1 - \frac{R'_f}{\sigma_n \tan \delta} \right)^2 \quad (4)$$

式中: ρ_w 为水的密度; σ_n 为接触面的法向应力; δ 为两接触材料之间的摩擦角; K_1, n' 和 R'_f 为试验参数。

1.3 止水材料力学模型

接缝(周边缝和垂直缝)止水材料力学行为的精确模拟是面板坝结构分析的关键内容之一,直接影响接缝和面板的变形及面板的应力,进而影响止水的的设计和面板的分缝及配筋。目前公认的接缝止水材料力学行为的数值模拟模式是顾淦臣^[11]基于止水材料三向拉伸试验基础上提出的连接单元模型,即用一个无厚度的六面体单元模拟止水片的三向受力变形特性(图2),其受力变形关系见式(5):

$$\begin{Bmatrix} \tau_{zx} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{zy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{zx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{zz} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{zx} \\ \delta_{zz} \\ \delta_{zy} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中: k_{zx}, k_{zz} 和 k_{zy} 分别为由止水片受力与相对剪切、拉压和剪切位移试验曲线求得得到的劲度系数; δ_{zx} 为止水片两侧在顺坝坡向或沿趾板轴线方向的相对剪切位移; δ_{zz} 为止水片两侧相对拉开或压紧的位移; δ_{zy} 为止水片两侧在垂直坝坡面或趾板的相对剪切位移,即相对沉陷。

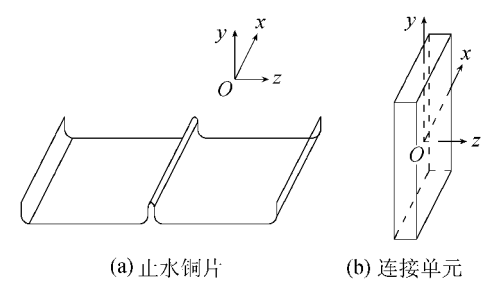


图2 止水铜片和连接单元模型

2 有限元建模及计算条件

2.1 有限元模型

根据地形地质条件、大坝结构设计、坝基与覆盖层情况,以及土石坝的一般受力变形特点,合理确定面板坝的有限元计算域,并对其进行网格剖分。坝体单元以六面体单元为主,局部填充五面体单元和四面体单元,以更好地适应几何形状的剧烈变化和材料分区的过渡。在混凝土面板与垫层之间设置无厚度六面体单元和五面体接触单元。在面板各板块之间及面板与趾板之间设置无厚度六面体连接单元。有限元网格结点总数为 4 906 个,单元总数为 3 808 个,其中面板单元数量为 163 个,接触单元数量为 163 个,接缝连接单元数量为 169 个。面板及接

缝止水连接单元网格见图 3。

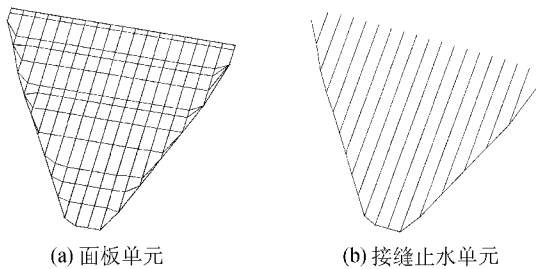


图 3 面板及接缝止水系统网格

2.2 计算参数

由三轴试验得到的堆石料及坝基覆盖层邓肯 E-B 模型计算参数见表 1。

表 1 坝料及覆盖层邓肯 E-B 模型计算参数

分区	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\varphi_0/(\text{^\circ})$	$\Delta\varphi/(\text{^\circ})$	K	n	R_f	K_b	m
过渡层	2.17	47.2	5.6	1187	0.29	0.72	403	0.21
垫层	2.18	47.8	5.7	1232	0.38	0.73	431	0.29
主堆石	2.10	49.0	6.0	997	0.26	0.72	345	0.20
次堆石	2.04	45.9	5.4	925	0.25	0.71	304	0.15
覆盖层	2.19	41.0	4.0	760	0.39	0.65	320	0.40

面板与垫层之间的接触面模型计算参数借用天生桥一级水电站面板堆石坝的试验参数,即 $K_1 = 4800$, $n' = 0.56$, $R'_f = 0.86$, $\delta = 11^\circ$ 。止水材料连接单元计算参数见文献 [12] 中表 7.6。混凝土面板和趾板采用 C25 混凝土,其弹性参数取为: $E = 28 \text{ GPa}$, $\mu = 0.167$ 。

2.3 加载条件

根据图 1 所示的坝体分区填筑及面板分期浇筑施工进度安排对大坝(坝基)填筑施工、面板浇筑、水库蓄水共分 20 级进行加载模拟,其中第 1 级模拟坝基覆盖层,第 2~7 级模拟一、二区坝体填筑,第 8 级模拟一期混凝土面板浇筑,第 9~18 级模拟三、四、五区坝体填筑,第 19 级模拟二期面板浇筑,第 20 级模拟水库蓄水。

3 大坝力学行为

3.1 坝体及覆盖层变形和应力

竣工期大坝向上、下游的水平位移极值分别为 34.2 cm 和 32.3 cm,前者大于后者,这与水平分层填筑条件(即简单加载条件)下大坝的水平变形规律正好相反。这是由于先期填筑了一、二区坝体,在大坝上游形成了子坝体。在复杂加载方式下,大坝沉降极值为 107.1 cm,沉降率为 0.78%;如果大坝按简单加载方式进行仿真计算,则大坝沉降极值增至 119.8 cm,比复杂加载方式时增加了约 12% 的沉降量。可见,高面板堆石坝采用分区分期填筑是控制大坝变形的有效方法之一。图 4 为蓄水期坝体及覆

盖层变形等值线,大坝变形等值线主要在上游部位发生变化,向上游的水平位移极值减小至 15.6 cm,向下游的水平位移极值增至 39.6 cm,大坝沉降值增加至 113.8 cm,沉降中心向上游方向前移,这些都是库水压力经面板传递至坝体的结果。

竣工期和蓄水期坝体和坝基大小主应力分布符合一般规律,极值也较合理。竣工期绝大部分坝体应力水平在 0.85 以内,仅岸坡接触带坝体局部应力水平稍高,极值在 0.9 左右,坝体不会出现塑性破坏。覆盖层应力水平不大,极值不超过 0.5。蓄水后,因坝体上游区域接近水平方向的小主应力增量大于接近竖向的大主应力增量,引起坝体应力水平在蓄水后有所减小,这对上游部位坝体的安全是有利的。

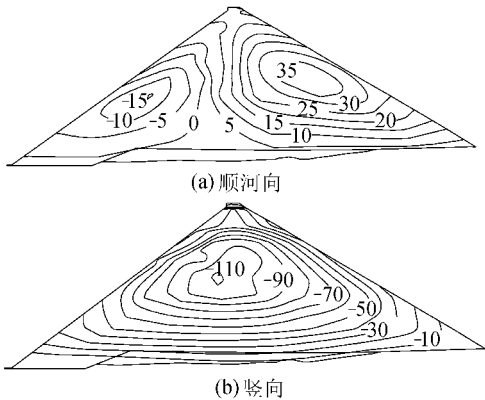


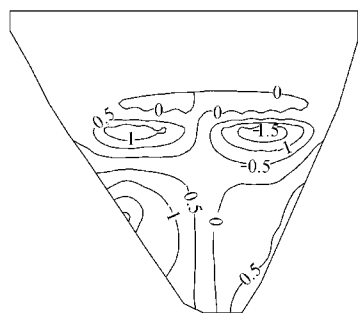
图 4 蓄水期坝体及覆盖层变形等值线(单位: cm)

3.2 面板变形和应力

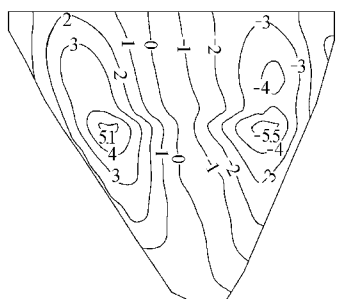
计算得到的面板变形等值线分布规律与简单加载条件下得到的结果不同。图 5 为面板坝轴向变形等值线。由图 5 可见,由于先期坝体(一、二区)在后期坝体(三、四、五区)压力下向两岸变形,进而“牵引”一期面板向两岸变形。而二期面板在后期坝体变形和自身重力影响下由两岸朝河床中央变形,这一点与常规面板一期浇筑时有所不同。蓄水后,面板坝轴向位移表现为两岸面板向河床中央变形,极值大致位于靠近两岸坝坡一、二期面板交接处,左右岸变形极值分别为 5.1 cm 和 5.5 cm。

图 6 为面板变形挠曲线。竣工期因面板“继承”了坝体朝上游方向的变形,一期面板凸向上游,二期面板朝坝内变形。蓄水后一、二期面板在水压力作用下均被压向坝内,面板最大挠度值为 27.8 cm。这种分期浇筑面板产生的变形特点容易引起一期面板顶部出现脱空现象,蓄水后被库水压裂,需引起注意。

正常蓄水期面板顺坡向应力基本以受压为主,极值为 9.6 MPa,顶部小范围内出现微小拉应力,其极值为 0.2 MPa,拉应力和压应力极值分别小于 C25 混凝土的抗拉和抗压强度。面板坝轴向应力呈现河床中央部位受压、两岸部位受拉的特点。中部应力极值为

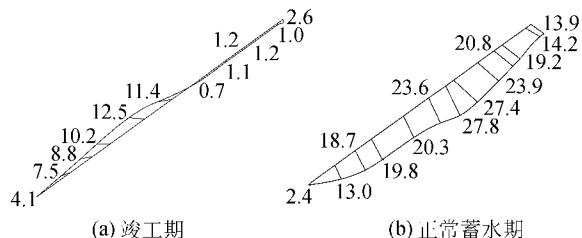


(a) 竣工期



(b) 正常蓄水期

图5 面板坝轴向变形等值线(单位:cm)



(a) 竣工期

(b) 正常蓄水期

图6 面板变形挠曲线(单位:cm)

11.2 MPa。两岸局部区域(大致位于左右岸一、二期面板交界处)出现拉应力,极值为 3.9 MPa。因此两岸局部区域面板可能会出现拉裂缝,建议适当增加钢筋量,以保证混凝土面板正常发挥挡水作用。

3.3 接缝系统变形

竣工期面板周边缝和垂直缝大多数处于受压状态,三向变形值较小,不是控制工况。水库水位为正常蓄水位时面板垂直缝呈现两岸变形拉开的特点,河床部位周边缝以相对沉陷变形为主,极值为 0.79 cm,两岸周边缝出现拉开变形,极值为 1.15 cm。面板垂直缝和周边缝三向变形分布规律较为合理,均小于止水材料的设计可变形量。因此,现有设计条件下垂直缝和周边缝止水材料能够正常工作。

图7给出了周边缝和垂直缝拉开变形示意图,其中虚线为拉开后的接缝,实线为初始或受压的接缝。由图7可见,两岸周边缝拉开,极值主要位于一、二期面板交界处附近。同时,两岸区域的面板垂直缝也拉开,极值区与周边缝拉开区域相一致。周边缝和垂直缝的这些变形特点与两岸面板出现坝轴向拉应力区相吻合。河床部位的周边缝受压,与面板底部顺坡向应力受压相吻合。

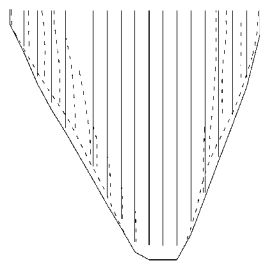


图7 蓄水后接缝拉开变形示意图

4 结 语

通过对某138 m高的混凝土面板堆石坝进行复杂加载条件下的三维有限元计算分析可知,大坝在分区分期填筑和面板分期浇筑的情况下的变形和应力分布以及极值均在合理范围之内。采用复杂施工加载方式可以较为有效地减小大坝沉降量。分期浇筑的面板在竣工期下部一期面板凸向上游,容易引起顶部面板出现脱空现象。而蓄水后面板全部压回坝内,在脱空区易导致面板压裂,需引起注意。

参考文献:

- [1] 徐泽平. 超高混凝土面板堆石坝建设中的关键技术问题[J]. 水力发电, 2010, 36(1): 51-54.
- [2] 高蓬士, 宋文晶, 汪召华. 高面板堆石坝变形控制的若干问题[J]. 水利学报, 2002, 33(5): 3-8.
- [3] 相彪, 张宗亮, 迟世春. 复杂应力路径下堆石料本构关系研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1716-1722, 1728.
- [4] 岑威钧, 任旭华, 李启升. 复杂地形条件下高面板堆石坝的应力变形特性分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(4): 452-455.
- [5] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1970, 96(5): 1629-1653.
- [6] DUNCAN J M, BYRNE P, WONG K S, et al. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stresses and movements in soil masses[R]. Berkrlly: University of California, 1980.
- [7] 姜弘道. 水工结构工程与岩土工程的现代计算方法及程序[M]. 南京: 河海大学出版社, 1992.
- [8] 岑威钧, 朱岳明, 罗平平. 面板堆石坝有限元仿真计算及参数敏感性研究[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(4): 16-25.
- [9] 顾淦臣, 黄金明. 混凝土面板堆石坝的堆石本构模型与应力变形分析[J]. 水力发电学报, 1991(1): 12-24.
- [10] GOODMAN R E, TAYLOR R L, BRECKE T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1968, 94(3): 637-659.
- [11] 顾淦臣. 钢筋混凝土面板堆石坝非线性有限元静动力分析: 七·五“国家科技攻关项目报告[R]. 南京: 河海大学, 1990.
- [12] 顾淦臣, 沈长松, 岑威钧. 土石坝地震工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

(收稿日期: 2011-05-09 编辑: 骆超)