

大河水电站深覆盖层上面板堆石坝变形和应力性状分析

孙大伟¹, 邓海峰¹, 田斌¹, 郇能惠²

(1. 三峡大学, 湖北 宜昌 443002; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 国内外已建成的在覆盖层上坝高超过 50 m 面板堆石坝的工程实例并不多, 设计和施工上也还没有形成成熟的经验。拟建中的大河面板堆石坝坝高为 50.8 m, 位于 20~37 m 深的砂砾石覆盖层上。该坝最右侧以一块 41.7 m 高混凝土面板与山体垂直相连接, 左侧以 15.3 m 高趾板与山体垂直相连接, 此山体地形条件及相应的如此高的垂直接缝布置方案明显不同于覆盖层上的其它面板堆石坝。设计者担心这两处周边缝的止水结构会因接缝的变形较大而破坏。为此, 需进行三维应力变形分析。采用先进的网格离散技术建立了包含四周山体及覆盖层在内的面板堆石坝三维有限元巨型网格, 共剖分 19250 个单元。计算程序中采用了与此巨型网格相适应的有限元加速计算技术, 使计算机时从 40 h 缩短为 20 min, 从而很快得到了大坝的应力变形性状以及防渗体系接缝的最大变形值, 为大坝最终设计方案的确定提供了有力的支撑。

关键词: 面板堆石坝; 覆盖层; 有限元; 变形应力

中图分类号: TD853.34

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)03-0434-06

作者简介: 孙大伟(1971-), 男, 黑龙江省克东县人, 博士, 副教授, 主要从事水工和岩土计算分析。E-mail: daweisun@126.com。

Deformation and stress analysis of Dahe CFRD built on thick alluvium deposits

SUN Da-wei¹, DENG Hai-feng¹, TIAN Bin¹, LI Neng-hui²

(1. China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: There are few CFRDs built on thick alluvium deposits with dam height of more than 50 m. So do the relative design and construction experience. The 50.8 m-high Dahe CFRD built on 20~37 m-thick alluvium deposits is now in the preliminary design phase. Its right face slab 41.7 m in height is perpendicularly connected with the right bank of a mountain and the left toe slab 15.3 m in height is perpendicularly connected with the left bank of another mountain. Such topographic characteristics of mountain body and the relative design scheme are apparently different from those of other CFRDs built on thick alluvium deposits. Since the excessive deformation of perimetric joint would lead to failure of seal materials and cause water leakage, 3D finite element stress-deformation analysis was carried out. 3D finite element mesh with 19250 elements including surrounding mountain and thick alluvium deposits was established by use of advanced grid discreteness technique. Large scales of equations solving method were adopted in the procedure and the computer calculation time was greatly reduced from 40 hours to 20 minutes. Therefore the behavior of the dam and the joint of seepage prevention system was obtained in a short time, and the results would be helpful to the design of Dahe CFRD.

Key words: concrete face rockfill dam; alluvium deposit; finite element analysis

0 引言

近年来国内在覆盖层上修建面板堆石坝, 但已建成的趾板座落在覆盖层上坝高超过 50 m 的工程实例并不多。国外已建的覆盖层上面板堆石坝有圣塔约那(Santa Juana)坝和帕克拉罗(Puclaro)坝, 圣塔约那坝有限元计算所得蓄水期防渗墙顶水平位移达 19 cm, 但至今未见该大坝原型观测资料。虽然覆盖层上已建的低坝大都表现出良好的运行性状, 但是在设计和施工上还没有形成成熟的经验。深覆盖层上的面板堆石

坝依靠防浪墙—面板—趾板—连接板—防渗墙这个防渗体系挡水, 防渗体系对于覆盖层上混凝土面板堆石坝的安全是至关重要的。因此, 研究深覆盖层上的面板堆石坝的应力变形性状及其影响因素是必要的^[1]。

大河面板堆石坝位于长江北岸一级支流大宁河干流上游, 坝高 50.8 m, 河床趾板位于在砂砾石覆盖层上。大坝基础为河床砂砾石深覆盖层, 厚 20~30 m,

基础部分计算范围为：顺水流方向长度取 301 m，沿坝轴向方向长度取 301 m，垂直方向取 50 m。

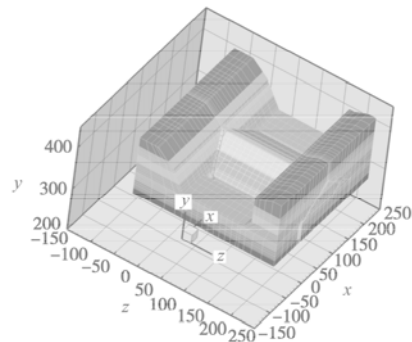


图 3 大河面板堆石坝及基础三维网格图
Fig. 3 3D mesh of Dahe CFRD and foundation

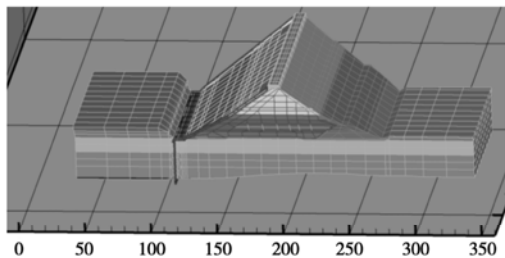


图 4 大河面板堆石坝三维网格图
Fig. 4 3D mesh of Dahe CFRD

1.2 计算模型

本项计算分析采用了多种不同的本构模型：混凝土面板、趾板、防渗墙、基岩采用线弹性模型；筑坝材料以及覆盖层采用 Duncan—Chang E—B 模型；堆石体与混凝土面板、防渗墙与覆盖层、防渗墙与基岩间的相互作用采用有厚度的接触面单元来模拟；混凝土面板间垂直缝、连接板与防渗墙间接缝均采用连接单元模拟。

1.3 计算参数

大河面板堆石坝三维有限元计算参数见表 1。

表 1 堆石 E—B 模型参数表

Table 1 E—B parameters of rockfill materials

材料分区	重度 (kN·m ⁻³)	石料 种类	ϕ_0	$\Delta\phi$	R_f	k	k_{ur}	n	k_b	m
垫层区(2A)	22.0	灰岩	49	7	0.79	1030	2100	0.30	1100	0.24
过渡区(3A)	21.8	灰岩	50	8	0.76	900	1600	0.36	700	0.19
主堆石区(3B)	21.5	灰岩	52	12	0.85	940	1880	0.34	420	0.18
次堆石区 3C1	21.5	灰岩	50	7	0.76	1000	1800	0.35	400	0.19
次堆石区 3C2	21.5	砂砾料	48	5	0.76	900	1500	0.50	600	0.10
堆石棱体	21.0	灰岩	50	10	0.75	800	1400	0.25	255	0.12
砂砾层覆盖层	20.5		38	5	0.65	900	1500	0.50	600	0.10

接触面单元计算参数采用： $k_s=4800$ ， $n=0.58$ ， $R_f=0.74$ ， $\delta=36^\circ$ ；

依据试验结果，面板、趾板、连接板、混凝土计算参数采用：重度 24.5 kN/m³，泊松比 0.17，混凝土弹性模量 28 GPa。基岩计算参数采用：重度 26.0 kN/m³，弹性模量 20 GPa，泊松比 0.20。

1.4 荷载施加方式

荷载施加模拟坝体填筑过程，采用逐级施加的方式，蓄水按 11 级水荷载施加，共计 26 级主增量。此外，为尽可能提高计算精度，各级主增量均分为 2~3 级微增量进行施加。

1.5 巨型网格加速计算技术

巨型网格、巨型方程组的计算分析需要采用与之相适应的加速计算技术。通过对程序中数组、循环结构进行改写，特别是改进方程组的迭代算法，在保证原来精度的基础上，可大幅度地缩短计算时间。基于该加速计算技术的程序 CFRD3D 曾用于水布垭面板堆石坝的计算。

大河面板堆石坝计算任务的委托方希望 5 d 内完成该坝的三维计算分析工作，因为该设计院已完成两个混凝土坝的总报告急待大河面板堆石坝的报告完成，三个报告一起送审。因此，提高程序的计算速度、缩短计算时间对尽早提交报告意义重大。在 CPU 为酷睿 2 E6300 (1.86 GHz) 的单台计算机上，未采用此技术的老程序的计算时间为 40 h，采用巨型网格加速计算技术后，大河面板堆石坝计算时间为 20 min，模型计算精度与老程序的计算精度相同。

2 计算结果分析

2.1 堆石体变形、应力

竣工期堆石体变形见表 2。

表 2 堆石体位移极值表

Table 2 Maximum displacement of rockfill materials

工况	水平向下游 位移/cm	水平向上游 位移/cm	垂直沉降 /cm
竣工期	4.0	5.1	30.5
蓄水期	9.2	—	32.4

蓄水至 300 m 高程时，大主应力最大值为 1.31 MPa，小主应力最大值为 0.5 MPa，应力水平最大值为 0.6。

2.2 面板应力变形

蓄水至 300 m 高程时面板应力极值见表 3。

表 3 面板应力极值表

Table 3 Maximum stress of face slabs

应力方向	拉应力/MPa	压应力/MPa
顺坡向	-0.30	3.60
坝轴向	-1.34	2.00
面板法向	-0.61	2.36

顺坡面板向应力的分布大部分为压应力区, 压应力最大值为 3.6 MPa; 局部应力为拉应力, 最大值为 -0.30 MPa。面板沿坝轴向应力压应力较小, 最大坝轴向压应力值为 2.0 MPa; 局部拉应力相对较大, 最大拉应力值为-1.34 MPa。面板法向应力压应力最大值 2.36 MPa; 拉应力区峰值出现在与周边山体相接处, 最大拉应力值为-0.61 MPa。

水位升至 300 m 高程时面板变形极值见表 4。

表 4 面板位移极值表

Table 4 Maximum displacement of face slabs		
顺坡向	法向	坝轴向
3.92	-8.2	-0.6

2.3 防渗墙变形应力

蓄水至 300 m 高程时防渗墙变形最大值见表 5 和图 5~7, 其中图 6 中“+”为向下游方向。

表 5 防渗墙变形极值表

Table 5 Maximum deformation of diaphragm walls at water level of 300 m

工况	水平位移/cm	垂直位移/cm	轴向位移/cm
竣工期	-1.4(向上游)	-1.2 (向下)	0.1(两岸向河槽)
运行期	3.5(向下游)	-1.2 (向下)	0.2(两岸向河槽)

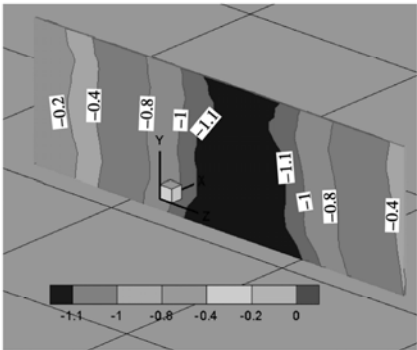


图 5 蓄水至 300 m 高程防渗墙沉降分布图

Fig. 5 Settlement of diaphragm walls at water level of 300 m

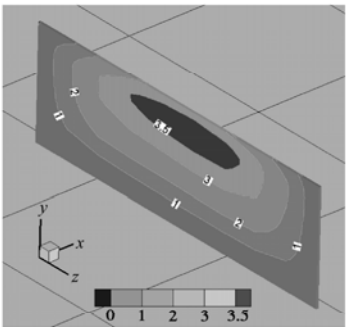


图 6 蓄水至 300 m 高程防渗墙水平位移分布

Fig. 6 Horizontal displacement of diaphragm walls at water level of 300 m

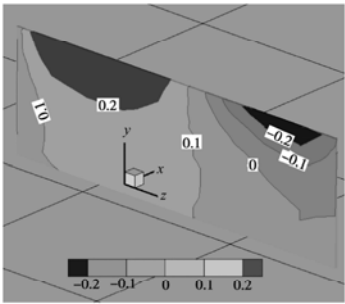


图 7 蓄水至 300 m 高程防渗墙轴向位移分布图

Fig. 7 Axial displacement of diaphragm walls at water level of 300 m

蓄水至 300 m 高程防渗墙大主应力最大压应力为 4.3 MPa, 拉应力最小值为-1.1 MPa。

3 接缝的变形

3.1 接缝计算结果

蓄水运行期接缝的变形极值见表 6, 变形分布规律见图 8~10。

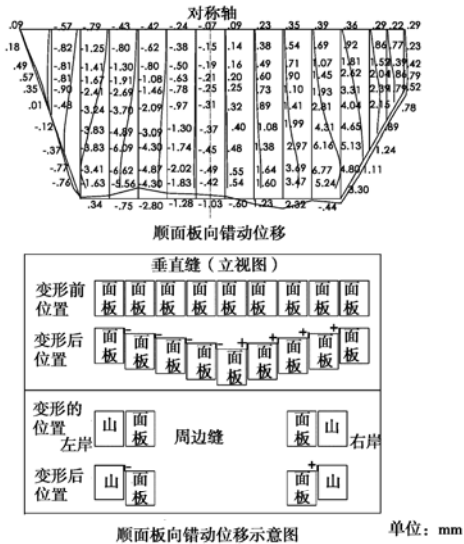


图 8 蓄水至 300 m 高程顺面板向错动位移

Fig. 8 Joint deformation along face slabs at water level of 300 m

表 6 运行期接缝变形对比表

Table 6 Maximum displacement of joints at water level of 300 m

接缝名称	方向	变形值
垂直缝	顺面板向错动	6.77
	垂直面板向错动	2.33
	坝轴向错动张开	2.46
周边缝	顺面板向错动	3.30
	垂直面板向错动	19.6
	坝轴向错动张开	7.46
连接板-防渗墙接缝	水平向错动	11.7
	垂直向错动	17.5
	坝轴向错动	0.4
趾板-连接板接缝	水平向错动	4.8
	垂直向错动	0.1
	坝轴向错动	0.1

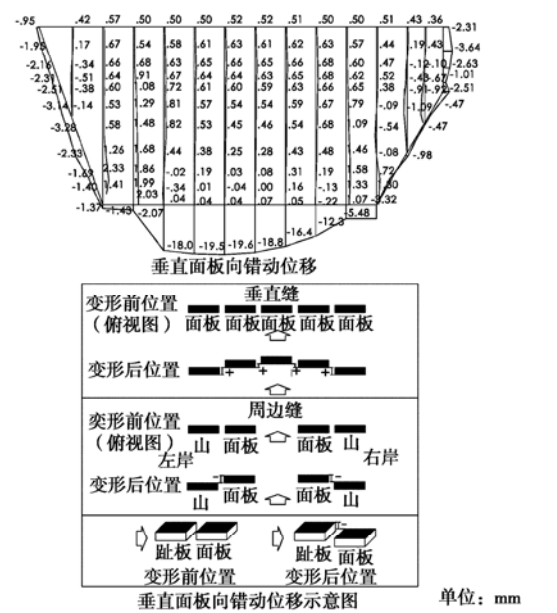


图 9 蓄水至 300 m 高程垂直面板向错动位移

Fig. 9 Joint deformation of vertical face slabs at water level of 300 m

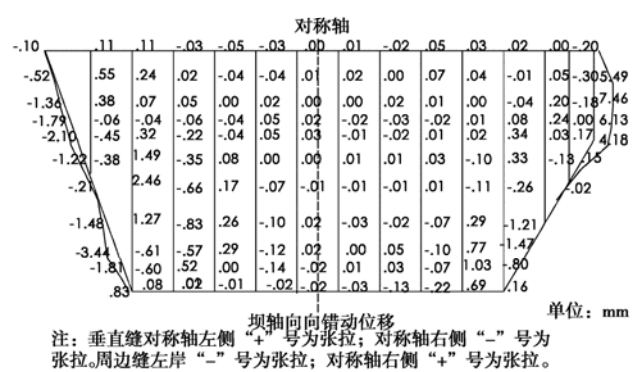


图 10 蓄水至 300 m 高程沿坝轴向错动位移

Fig. 10 Axial deformation of joints at water level of 300 m

3.2 与同类工程的比较

国内已建的覆盖层上的面板坝实测或计算的变形值如表 7 所示。通过与大河面板堆石坝坝高相近的建在覆盖层上的面板堆石坝工程的坝体沉降及接缝变形的实测值或计算值对比分析, 可以看出本文计算值符合通常的规律, 计算结果是合理的。

4 结论和建议

4.1 结论

通过以上计算分析与表 7 所列建在覆盖层上的面板堆石坝的沉降值以及面板接缝变形值比较, 可以得出以下基本结论:

(1)大河面板堆石坝防渗墙采用设计提出强度等级不小于 C30 的混凝土, 计算得到运行期防渗墙最大水平位移为向下游向 3.5 cm, 垂直位移方向向下, 最大变形值为 1.2 cm, 轴向位移为 0.2 cm。最大压应力

表 7 国内面板堆石坝坝体沉降及接缝变形最大值统计表
Table 7 Maximum value of settlement of dam body and joint deformation of CFRDs in China

坝名	坝高 /m	覆盖层厚/m	沉降 /cm	面板周边缝三向位移/mm			备注
				张	沉	错	
梁辉	38.1	25.5	28.0	5.6	7.6	2.2	实测值
丰宁 ^[2]	39.8	15~24	34.0				实测值
梅溪 ^[3]	41.0	30	22.2	3.3	8.1	5.4	实测值
汉坪咀 ^[4]	57.0	40	34.8	2.7	9.4	3.8	计算值
察汗乌苏 ^[5]	107.6	40	79.2				计算值
那兰 ^[6]	108.7	24	42.8	2.1	12.8	6.2	计算值
古洞口	121.0	22	33.8				实测值
黑泉上	123.5	22	41.2				实测值
乌鲁瓦提	131.8	24	38.4				实测值
珊溪	132.5	24	88.0				实测值

4.3 MPa, 最大拉应力-1.1 MPa, 采用设计提出的混凝土标号得出的应力可以满足混凝土强度要求。

(2)坝体与趾板和防渗墙是质量与刚度相差很大的结构物, 施工时和蓄水时各自的变形相差较大, 用连接板将坝体、趾板与防渗墙连接起来, 可以改善防渗墙和趾板的应力状态, 经过计算分析, 大河面板堆石坝采用 3 m 长连接板, 连接板的变形和应力都在规范允许的范围内, 3 m 长连接板方案是可行的。

(3)蓄水至 300 m 高程时, 混凝土面板板间垂直缝顺面板向错动最大值为 6.77 mm, 垂直面板向沉陷最大值为 2.33 mm, 张开最大值 2.46 mm。混凝土面板周边缝顺面板向错动最大值为 3.30 mm, 沉陷最大值为 19.6 mm, 张开最大值 7.46 mm。连接板—防渗墙接缝变形水平向错动 11.7 mm, 垂直向错动 17.5 mm, 轴向错动 0.4 mm。运行期趾板—连接板接缝水平向变形 4.8 mm, 垂直向错动 0.1 mm, 轴向错动 0.1 mm。

大河面板堆石坝最右侧一块 41.7 m 高混凝土面板与右岸山体间垂直周边缝以及左侧以 15.3 m 高趾板与左岸山体垂直周边缝的变形并没有想象中的那么大, 其周边缝变形最大值小于 2 cm, 在止水的最大变形范围以内, 止水结构不会因周边缝的变形过大而破坏。因此, 只要选择好能适应大变形的止水结构和止水材料, 覆盖层上混凝土面板堆石坝的防渗体系的安全性是有保障的。

4.2 建议

(1)大河面板堆石坝面板轴向位移指向河谷, 运行期面板轴向位移最大值为 0.6 cm, 拉应力最大值为 -1.34 MPa, 因此覆盖层上面板堆石坝的这一面板变形和应力特点值得注意, 宜适当增加面板的配筋, 改善混凝土的性能并减小面板裂缝的发生。

(2)大河面板堆石坝可以在坝体填筑完成后尽可能的多放置一段时间, 等坝体堆石完成一部分沉降变形后再进行面板的施工, 例如坝高 39.80 m 的丰宁水

电站面板堆石坝在坝体填筑半年后才进行混凝土面板施工,从而有效的保证坝体与坝基主要沉降在面板施工前完成,避免面板与堆石体的变形不协调问题。

参考文献:

- [1] 孙大伟. 深覆盖层上高面板坝应力变形性状研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006. (SUN Da-wei. Stress - deformation behavior of high concrete face rockfill dams built on thick alluvium deposits[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2006. (in Chinese))
- [2] 李志山. 丰宁水电站混凝土面板砂砾石坝基础深覆盖层处理[C]//土石坝与岩土工程实践及探索—2004 年技术研讨会论文集. 昆明, 2004: 124 - 127. (LI Zhi-shan. Thick alluvium deposits foundation treatment of Fengning Concrete Face Rockfill Dam[C]// Embankment Geotechnical Engineering Practice and Exploration—2004 Technical Seminar Symposium, Kunming, 2004: 124 - 127. (in Chinese))
- [3] 赵魁芝, 李国英, 米占宽. 梅溪覆盖层上混凝土面板堆石坝流变变形反馈分析及安全性研究[C]//第一届中国水利水电岩土力学与工程技术讨论会论文集. 昆明, 2006, 10: 470 - 475. (ZHAO Kui-zhi, LI Guo-ying, MI Zhan-kuan. Back analysis and safety research on rheology behaviour of Meixi Concrete Face Rockfill Dam built on thick alluvium deposits[C]// The 1st China Hydraulic and Hydropower Geotechnical Mechanism and Engineering Technical Seminar Symposium, Kunming, 2004: 124 - 127. (in Chinese))
- [4] 赵魁芝, 李国英, 米占宽. 汉坪咀混凝土面板堆石坝防渗体系设计方案优选[J]. 水利水运工程学报, 2004, 6(2): 45 - 50. (ZHAO Kui-zhi, LI Guo-ying, MI Zhan-kuan. Design optimization for impervious system of Hangpingzui Rockfill Dam with concrete facing slab[J]. Hydro-science and Engineering, 2004, 6(2): 45 - 50. (in Chinese))
- [5] 酆能惠, 米占宽, 等. 深覆盖层地基上混凝土面板堆石坝有限元静动力应力变形分析报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院研究报告, 2003, 9. (LI Neng-hui, MI Zhan-kuan, et al. Finite element static and dynamic stress-deformation behavior of high concrete face rockfill dams built on thick alluvium deposits[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2003, 9. (in Chinese))
- [6] 李国英, 沈 婷. 那兰水电站覆盖层上混凝土面板堆石坝方案优选及应力变形分析[R]. 南京: 南京水利科学研究院研究报告, 2003, 9. (LI Guo-ying, SHEN Ting. Design schemes optimization and stress-deformation behavior of Nalan Concrete Face Rockfill Dam built on thick alluvium deposits[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2003, 9. (in Chinese))