

深覆盖层上面板堆石坝防渗墙应力变形性状影响因素的研究

郦能惠, 米占宽, 孙大伟

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 采用数值分析方法对深覆盖层上混凝土面板堆石坝的防渗墙应力变形性状进行了研究。研究了覆盖层特性、防渗墙混凝土特性、防渗墙施工顺序、防渗墙与坝趾之间距离和防渗墙形状对于面板堆石坝防渗墙应力变形性状的影响。总结出一些规律并提出相应的工程建议。

关键词: 面板堆石坝; 数值分析; 防渗墙; 应力变形性状; 影响因素

中图分类号: TV223.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2007)01-0026-06

作者简介: 郦能惠(1940-), 男, 浙江诸暨人, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事水利水电工程和电力建设工程中的岩土力学、水工结构的研究工作。E-mail:nhli@nhri.cn。

Study on affecting factors of stress-deformation of diaphragm walls for concrete face rockfill dams built on thick alluvium deposit

LI Neng-hui, MI Zhan-kuan, SUN Da-wei

(Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The stress-deformation behavior of diaphragm walls of concrete face rockfill dam built on thick alluvium deposit was analyzed using the numerical analysis method. The influences of the properties of alluvium deposit, the properties of diaphragm wall concrete, the construction sequence of diaphragm walls, the distance between diaphragm walls and dam toe and the shape of diaphragm walls on the stress-deformation behaviors of diaphragm walls of concrete face rockfill dams were studied. Some laws and corresponding engineering proposals were also put forward.

Key words: concrete face rockfill dam; numerical analysis; diaphragm wall; stress-deformation behavior; affecting factor

0 前言

深厚覆盖层的防渗措施一般都采用混凝土防渗墙, 国内外对此施工有着成功的经验, 但其设计大都仍处于在成功实践基础上的经验性设计^[1]。长江三峡工程二期深水高土石围堰关键技术研究时, 对围堰及其防渗设施——混凝土防渗墙进行了应力应变分析和离心模型试验, 并在2002年二期围堰拆除过程中测定了防渗墙墙体材料和泥皮的特性, 这是迄今为止对混凝土防渗墙性状的较为深入和全面的研究^[2-3]。高土石围堰中的防渗墙的工作性状与深覆盖层中的防渗墙的工作性状有较大的差异, 为此有必要研究面板堆石坝坝基深覆盖层中防渗墙的应力变形性状, 以期防渗墙乃至面板堆石坝的设计与施工提供技术依据。

1 计算模型及计算参数

本项研究的依托工程选取察汗乌苏面板砂砾石堆

石坝, 察汗乌苏水电站是新疆和静县内一个以发电为主的大(2)型水电枢纽工程, 该坝最大坝高107.60 m, 坝基砂砾石覆盖层最大厚度为46.70 m, 覆盖层内中粗砂夹层平均厚度为8.50 m。在河床覆盖层内设置一道混凝土防渗墙防渗, 防渗墙最大深度40.80 m。

坝体和覆盖层的本构模型采用双屈服面弹塑性模型(南水模型), 该模型引入体积屈服面和剪切屈服面, 它结合了剑桥模型和邓肯-张模型的优点, 物理概念清楚, 较好地反映了堆石体的蓄水卸荷时体缩特性, 计算参数见表1。此本构模型已经应用于长江三峡工程二期深水围堰防渗墙工程^[2-3]和水布垭、天生桥、吉林台等高面板堆石坝^[4]及梅溪等覆盖层上面板堆石坝工程, 用此模型得到的计算结果与实测结果比较一致, 模型的两个基本变量为切线杨氏模量 E_t 和切线体积

基金项目: 国家电力公司重点科学技术项目

收稿日期: 2005-11-11

比 μ_t , 其表达式分别为

$$E_t=E_i(1-R_fS_1)^2 \quad , \quad (1)$$

$$\mu_t=2c_d(\sigma_3/p_a)^{n_d}\frac{E_iR_s}{\sigma_1-\sigma_3}\frac{1-R_d}{R_d}\left(1-\frac{R_s}{1-R_s}\frac{1-R_d}{R_d}\right), \quad (2)$$

式中, E_i 为初始切线模量, S_1 为应力水平。

$$E_i=Kp_a\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^n \quad , \quad (3)$$

$$S_1=\frac{(\sigma_1-\sigma_3)(1-\sin\varphi)}{2ccos\varphi+2\sigma_3sin\varphi} \quad . \quad (4)$$

南水双屈服面弹塑性模型的参数可用邓肯 $E-\nu$ 模型的参数来换算, 其切线体积比 μ_t 可由下式得到

$$\mu_t=1-2\nu_t \quad , \quad (5)$$

式中, ν_t 即为邓肯 $E-\nu$ 模型中的切线泊松比, 其表达式为

$$\nu_t=\frac{G-Flg(\sigma_3/p_a)}{[1-D(\sigma_1-\sigma_3)/E_i(1-R_fS_1)]^2} \quad . \quad (6)$$

有限元计算网格剖分见图 1, 计算中, 面板、趾板、连接板和混凝土防渗墙采用线弹性模型, 面板、趾板、连接板和垫层之间设置薄层单元模拟接触面性状, 面板垂直缝和周边缝用分离缝模型模拟。

防渗墙厚度 0.8 m, 嵌入基岩 1 m, 为了使数值计算较准确地反映防渗墙的实际工作状态, 将防渗墙划

分为 5 排有限元网格, 在防渗墙的侧面与端部和底部都设置了低模量的薄层单元, 即在防渗墙两侧面设置泥皮单元, 在嵌入基岩的防渗墙两侧面也设置了泥皮单元, 防渗墙底部设置了沉渣单元, 避免了假定防渗墙底部与基岩的连接方式对于防渗墙应力变形计算结果合理性的影响。依据长江三峡二期深水围堰等工程的实测资料^[3], 选取了泥皮单元和沉渣单元的计算参数。

根据依托工程坝体填筑和防渗墙施工形象进度图, 有限元法应力变形计算仿真模拟施工全过程和分期蓄水过程, 施工过程分 47 步模拟, 蓄水过程分 11 步模拟^[5]。

2 覆盖层特性对防渗墙应力变形性状的影响

防渗墙的材料是混凝土, 坝基覆盖层一般是第四纪砂卵石层, 也有的是砂砾石层、砂层或碎石土层, 在坝体填筑荷载和水压力作用下覆盖层的沉降远大于防渗墙的垂直变形, 覆盖层沉降对防渗墙两侧面形成的摩擦力是影响防渗墙应力变形性状的主要荷载, 因此覆盖层特性是防渗墙应力变形性状的主要影响因素。

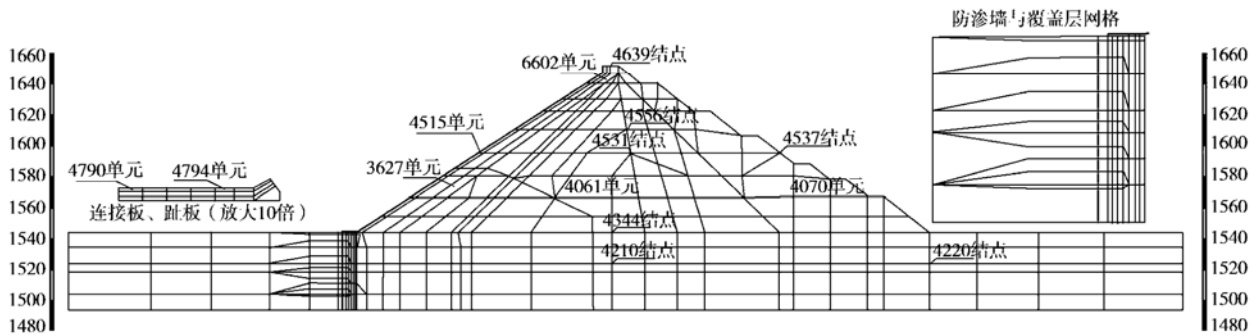


图 1 有限元网格剖分图

Fig. 1 FEM mesh

表 1 计算参数

Table 1 Calculating parameters

材料	密度/(g·cm ⁻³)	K	K_{ur}	n	G	F	D	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\Delta\varphi/(\text{^\circ})$	R_f
坝基砂卵石	2.11	800	1200	0.44	0.39	0.14	3.60	0	48.5	7.2	0.84
坝基中粗砂	1.85	600	900	0.33	0.50	0.10	6.50	0	46.45	3.15	0.745
主砂砾石	2.02	1260	1890	0.36	0.42	0.18	4.15	0	47.6	7.4	0.83
次砂砾石	1.98	930	1395	0.28	0.47	0.23	3.30	0	47.3	7.8	0.814
下游堆石	2.1	900	1350	0.34	0.46	0.22	5.60	0	54.4	10.7	0.866
砾石排水区	2.02	600	900	0.24	0.33	-0.11	4.25	0	47.6	7.4	0.83
反滤层	2.02	600	900	0.24	0.33	-0.11	4.25	0	47.6	7.4	0.83
过渡层	2.086	1400	2100	0.42	0.45	0.20	5.90	0	51.2	7.9	0.95
垫层	2.10	1500	2200	0.42	0.45	0.20	5.90	0	51.2	7.9	0.95
薄层单元	2.086	1200	1800	0.52	0.43	-0.26	6.29	0	51.2	7.9	0.95
泥皮单元	1.20	100	150	0.45	0.30	0.04	0.50	3	10.0	0.0	0.50
沉渣单元	1.60	800	1200	0.50	0.36	-0.026	1.32	6	36	0.0	0.68

在对依托工程进行可行性研究设计时,曾采用旁压仪在坝址现场原位测试覆盖层的旁压模量 E_m ,利用法国梅纳的经验公式,得到覆盖层的变形模量为:砂卵石 $E_0=95\sim 263$ MPa,中粗砂 $E_0=49\sim 73$ MPa。在室内进行覆盖层扰动样压缩试验,得到的压缩模量为:砂卵石 $E_s=32\sim 256$ MPa,中粗砂 $E_s=24\sim 209$ MPa。

利用旁压试验反演得到覆盖层的计算参数为:砂卵石 $K=2479$, $n=0.35$,中粗砂 $K=1013$, $n=0.33$;通过室内三轴压缩试验得到覆盖层的计算参数为: $\rho_d=2.15$ g/cm³的砂卵石, $K=1000$, $n=0.24$; $\rho_d=2.11$ g/cm³的砂卵石, $K=500$, $n=0.44$;中粗砂 $K=657$, $n=0.33$ 。

考虑到混凝土面板堆石坝坝址的覆盖层特性会有较大差别,因而本项研究时选取表 2 所示覆盖层计算参数进行敏感性分析,相应的 n 、 φ 、 $\Delta\varphi$ 等其他计算参数也根据室内实验与现场旁压试验结果进行了匹配。

表 2 坝基计算参数组合

Table 2 Calculating parameters of alluvium deposit			
坝基计算参数组合	1	2	3
坝基砂砾石 K (厚 35.3 m)	800	1920	500
坝基中粗砂 K (厚 4.7 m)	600	900	650
坝基平均 K (按厚度加权平均)	776.5	1800	517.6

防渗墙的应力变形计算结果见表 3~5 所示。一个典型计算结果,即坝基计算参数组合 1 时防渗墙变形与应力分布见图 2、3 所示。

从表 3 和图 2 可知,覆盖层的特性对于防渗墙的变形有显著影响。覆盖层的刚度越大,防渗墙变形越

表 3 防渗墙变形

Table 3 Deformation of diaphragm walls			
坝基计算参数组合	1	2	3
趾板施工前墙顶水平位移	-5.42	-2.56	-8.19
趾板施工前墙顶垂直位移	0.33	0.24	0.38
竣工期墙顶水平位移	-13.47	-6.67	-19.35
竣工期墙顶垂直位移	0.73	0.54	0.83
运行期墙顶水平位移	1.06	1.10	0.10
运行期墙顶垂直位移	2.01	1.45	2.29
运行期墙中部水平位移	2.16	1.99	2.38
运行期墙中部垂直位移	1.54	1.04	1.60

注:水平位移指向上游为负,指向下游为正;垂直位移向下为正;防渗墙计算参数 $K=315000$ 。

小,坝基计算参数组合 2 的模量系数 K 大约是坝基计算参数组合 1 的 2.3 倍,大约是坝基计算参数组合 3 的 3.5 倍,在防渗墙材料均为 C35 混凝土、坝体填筑与蓄水方案均相同时,施工期与竣工时防渗墙顶水平位移几乎与 K 值成反比,计算组合 2 的水平位移是计算参数组合 1 的 1/2~1/2.1,也是计算参数组合 3 的 1/2.9~1/3.2,垂直位移也有类似现象,但是只有 1/1.35~1/1.58。也就是说防渗墙刚度和坝基覆盖层的刚度的比值对防渗墙的变形有相当大的影响。

水库蓄水时防渗墙上游侧以及趾板与连接板顶部均受到水压力,因而进一步增加了覆盖层相对于防渗墙向下的位移,在墙的上、下游侧面均产生较大的摩擦力,从而使防渗墙应力 σ_1 、 σ_z 有较大幅度增加;防渗墙侧面的摩擦力从文献[3]介绍的防渗墙侧面泥皮有明显擦痕的调查实录可以佐证。

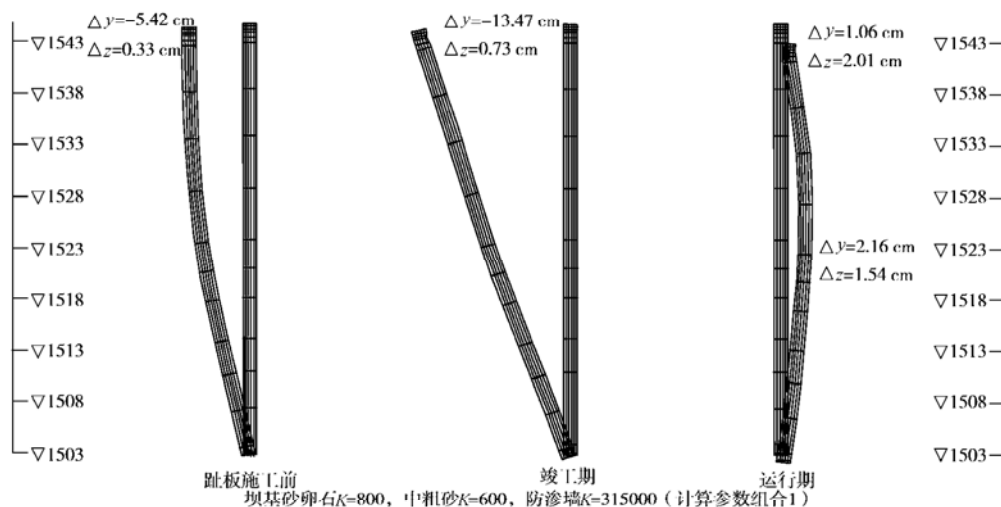


图 2 防渗墙变形示意图

Fig. 2 Deformation of diaphragm walls

表 4 防渗墙大主应力 σ_1 最大值和小主应力 σ_3 最小值

工况	坝基计算参数组合 1				坝基计算参数组合 2				坝基计算参数组合 3			
	竣工期		运行期		竣工期		运行期		竣工期		运行期	
	上游	下游	上游	下游	上游	下游	上游	下游	上游	下游	上游	下游
	面	面	面	面	面	面	面	面	面	面	面	面
σ_1/MPa	8.56	4.02	11.62	10.88	4.42	3.47	8.95	8.51	7.05	5.21	13.66	11.86
σ_3/MPa	-0.15	-0.19	0.52	-0.05	0.06	-0.47	0.78	0.15	-0.39	-0.07	0.35	-0.01

注: 压应力为止, 拉应力为负。

表 5 防渗墙垂直应力 σ_z 最大值和水平应力 σ_y 最小值

工况	坝基计算参数组合 1				坝基计算参数组合 2				坝基计算参数组合 3			
	竣工期		运行期		竣工期		运行期		竣工期		运行期	
	上游	下游	上游	下游	上游	下游	上游	下游	上游	下游	上游	下游
	面	面	面	面	面	面	面	面	面	面	面	面
σ_z/MPa	8.53	3.99	11.61	10.43	4.38	3.05	8.95	8.51	6.70	5.14	13.64	11.74
σ_y/MPa	-0.05	-0.16	0.95	-0.04	0.50	0.24	0.23	0.38	0.41	0.25	1.04	0.35

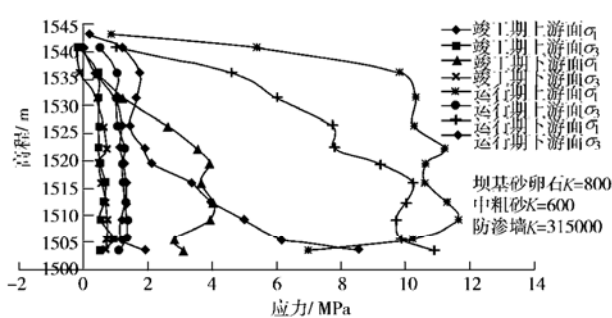


图 3 防渗墙应力沿高程分布图
Fig. 3 Stress of diaphragm walls

从表 4、5 可以明显看出: 坝基覆盖层特性对于防渗墙应力有显著影响。覆盖层刚度越大, 即坝基模量系数 K 越大, 防渗墙应力越小, 对于运行期防渗墙压应力 σ_1 或 σ_z 尤其如此。其主要原因就是坝基覆盖层刚度越小, 在坝体填筑荷载和水压力作用下的压缩变形越大, 防渗墙侧面的摩擦力越大, 从而引起防渗墙的压应力 σ_1 或 σ_z 越大。

3 防渗墙材料特性对防渗墙应力变形性状的影响

混凝土防渗墙的材料一般有两种, 一种是普通混凝土, 其弹性模量 E_c 一般在 25.5~36.0 GPa (相应于强度等级 C20~C60), 另一种是塑性混凝土, 其抗压强度和弹性模量一般只有普通混凝土的 1/5~1/10。

“八五”国家科技攻关期间, 研制成功的塑性混凝土的弹性模量 0.5~1.0 GPa, 弹性模量和抗压强度的比值在 110 左右。

因而本项研究时比较了这两种混凝土作为防渗墙材料时对防渗墙应力变形性状的影响, 普通混凝土弹性模量 $E_c=31.5$ GPa (相应于 C35 混凝土, 轴心抗压强度 17.5 MPa), 计算参数 $K=315000$; 塑性混凝土弹性模量 $E_c=1$ GPa, 计算参数 $K=10000$ 。

防渗墙材料特性对防渗墙应力变形性状的影响的计算结果见表 6 所示。

从表 6 可知防渗墙材料对防渗墙应力状态有相当大的影响。对于坝基计算参数组合 1, 即坝基砂砾石 $K=800$ 、坝基中粗砂 $K=600$ 时, 坝体填筑和蓄水方案均相同时, 若防渗墙材料采用塑性混凝土、防渗墙应力有很大改善, 最大压应力减小到 3.30 MPa 以内, 在运行期大主应力 σ_1 或垂直应力 σ_z 只有普通混凝土的 1/3~1/4。

同时也比较了采用不同标号普通混凝土时, 即普通混凝土 K 值从 100000 变化到 335000 时大主应力 σ_1 最大值的变化, 见表 7 所示, 从表 7 可知: 随着混凝土强度和弹性模量增加, 混凝土模量系数 K 增大, 应力最大值也增大, 但是从 $K=220000$ 到 $K=335000$, 应力值增加得很少, 因为混凝土的模量已经远大于覆盖层的模量时, 混凝土模量增加 50% 已经不会对防渗墙应力产生显著的影响。

4 防渗墙施工顺序对防渗墙应力变形性状的影响

如上所述, 坝体填筑荷载引起覆盖层沉降, 在防渗墙侧面产生的摩擦力是影响防渗墙应力和变形的主要因素, 同时坝体填筑荷载也使得防渗墙下游侧土压力有所增加, 这也是影响防渗墙变形应力性状的另一个主要因素。为此有必要研究先填筑部分坝体、再建造防渗墙时防渗墙变形与应力状态改善的程度。

本项研究考虑了依托工程两种防渗墙施工顺序: ①方案一: 在坝体填筑同时建造防渗墙, 防渗墙竣工时, 坝体填筑到 1585 m 高程; ②方案二: 先填筑坝体至 1595 m 高程, 然后再建造防渗墙。计算结果见表 8、9 所示。

竣工期防渗墙最大水平位移发生在防渗墙顶部, 蓄水期在水压力作用下防渗墙最大水平位移发生在防

表 6 防渗墙材料对防渗墙应力的影响

Table 6 Influence of diaphragm wall materials on its stress state

防渗墙材料	C35 混凝土 $K=315000$				塑性混凝土 $K=10000$				
	工况	竣工期		运行期		竣工期		运行期	
	位置	上游面	下游面	上游面	下游面	上游面	下游面	上游面	下游面
大主应力 σ_1 最大值/MPa		8.56	4.02	11.62	10.88	2.61	2.18	3.29	3.19
小主应力 σ_3 最小值/MPa		-0.15	-0.19	0.52	-0.05	0.15	-0.15	0.67	0.51
垂直应力 σ_z 最大值/MPa		8.53	3.99	11.61	10.43	2.57	2.11	3.30	3.17
水平应力 σ_y 最小值/MPa		-0.05	-0.16	0.95	-0.04	0.28	0.31	0.62	0.74

表 7 不同标号普通混凝土防渗墙的应力最大值

Table 7 The maximum values of σ_1 and σ_z of diaphragm walls used for normal concrete

混凝土强度等级	K	不同强度混凝土 $\nabla 1509.25$ m 高程防渗墙应力值/MPa							
		竣工期				运行期			
		上游面		下游面		上游面		下游面	
		σ_1	σ_z	σ_1	σ_z	σ_1	σ_z	σ_1	σ_z
	100000	4.07	4.02	3.85	3.77	9.15	9.15	8.07	8.07
C10	175000	4.54	4.48	3.90	3.79	10.47	10.47	9.01	9.01
C15	220000	4.90	4.82	3.92	3.80	11.64	11.64	9.60	9.60
C25	280000	4.99	4.91	3.94	3.81	11.71	11.71	9.69	9.69
C35	315000	5.01	4.94	3.94	3.81	11.73	11.73	9.74	9.74
C45	335000	5.01	4.94	3.95	3.82	11.77	11.77	9.76	9.76

表 8 防渗墙变形最大值

Table 8 The maximum values of deformation of diaphragm walls

变形最大值/MPa	连接板长度 0 m				连接板长度 3 m				连接板长度 6 m			
	竣工期		运行期		竣工期		运行期		竣工期		运行期	
	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二
水平位移最大值	4.79	4.71	14.0	13.4	4.45	4.23	13.41	12.86	4.06	3.86	12.84	12.38
垂直位移最大值	1.77	0.32	2.50	1.45	1.51	0.26	1.96	1.00	1.12	0.20	1.63	1.02

表 9 防渗墙主应力最大值

Table 9 The maximum values of principal stress of diaphragm walls

主应力最大值/MPa	连接板长度 0 m				连接板长度 3 m				连接板长度 6 m			
	竣工期		运行期		竣工期		运行期		竣工期		运行期	
	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二
上游面 σ_1 大主应力	4.27	1.66	8.47	7.22	3.61	1.50	7.66	6.84	3.06	1.39	7.53	7.02
下游面 σ_1 大主应力	4.39	1.70	8.69	6.80	3.76	1.55	8.01	6.47	3.23	1.44	7.76	6.55
上游面 σ_3 小主应力	-0.51	-0.17	-0.99	-0.86	-0.59	-0.18	-0.75	-0.63	-0.67	-0.19	-0.32	-0.26
下游面 σ_3 小主应力	-0.19	-0.14	-1.11	-0.92	-0.20	-0.16	-0.72	-0.64	-0.20	-0.16	-0.22	-0.17

渗墙中部 1530 m 高程附近, 由于方案二是先填筑坝体至 1595 m 高程, 后建造混凝土防渗墙, 竣工期仍然是防渗墙顶部位移最大, 蓄水至正常高水位时防渗墙变形是防渗墙中部 1527 m 高程附近最大。从表 8 可知, 防渗墙的施工顺序对于防渗墙本身的变形影响很小。

从表 9 可知, 由于方案二是坝体填筑至高程 1595 m 时才建造防渗墙, 竣工时防渗墙大主应力 σ_1 (或垂直应力 σ_z) 的最大值要比方案一小 2~3 MPa, 运行时防渗墙大主应力 σ_1 (或垂直应力 σ_z) 的最大值也比方案一要小 1 MPa 左右。方案二的小主应力 σ_3 (或水平应力 σ_y) 的拉应力最大值也比方案一稍小一些。因而, 从防渗

墙应力状况来看, 方案二要优于方案一, 即先填筑部分坝体, 再建造防渗墙的施工方案会改善防渗墙的应力状态。

5 防渗墙与坝趾之间距离对防渗墙应力变形性状的影响

堆石坝体与趾板和防渗墙是质量和刚度都相差很大的两类结构物, 施工时和蓄水时各自的变形相差较大, 笔者建议用连接板将坝体、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^[5]。

在趾板长度为 4 m 时本项研究比较了不设连接板、一块连接板 (连接板长 3 m) 和两块连接板的 3

种情况(即连接板长度 0、3 和 6 m), 计算结果也表示在表 8、9 中, 从表可知, 防渗墙与坝趾之间距离越远, 防渗墙变形越小, 防渗墙中部最大水平位移减小约 1 cm; 防渗墙与坝趾之间距离增加, 防渗墙应力状态逐步改善, 以在填筑坝体同时建造防渗墙的方案一为例, 大主应力 σ_1 从 8.47~8.69 MPa 减小到 7.53~7.76 MPa, 约减小 1 MPa, 运行期小主应力 σ_3 从-0.99~-1.11 MPa 拉应力减小到-0.22~-0.32 MPa, 约减小了 20%~30%。因而采用连接板, 可以较好的改善防渗墙应力状态特别是减少了拉应力。

6 防渗墙形状对防渗墙应力变形性状的影响

笔者提出了在平面上防渗墙轴线呈弧线的圆弧型防渗墙的新设想, 利用上游水压力在圆弧型防渗墙上产生压应力, 使防渗墙顶部和靠近两岸的防渗墙部位的拉应力减小, 只需选择适当的圆弧半径, 可使防渗墙的最大拉应力小于混凝土的抗拉强度。三维有限元计算表明: 若将察汗乌苏水电站面板砂砾石坝的防渗墙(直线型防渗墙、墙顶长 96 m)改为圆弧型防渗墙(弧长 98.2 m、弦高 9 m), 可以有效地降低防渗墙顶部和靠近两岸部位墙体的拉应力, 最小主应力 σ_3 拉应力值从-2.5 MPa 减小到-1.5 MPa, 即减小了 40%^[6]。

7 结论和建议

(1) 研究面板堆石坝防渗墙的应力变形性状必须考虑下列情况: 堆石坝体与趾板和防渗墙是质量和刚度都相差很大的两类结构物; 堆石坝体和覆盖层的模量系数 K 一般只有趾板和防渗墙的模量系数 K 的 1/100。

(2) 除了防渗墙自重、覆盖层土压力、上游水压力以外, 作用于防渗墙的荷载主要是覆盖层在坝体填筑荷载和水压力作用下压缩变形引起墙侧面的摩擦力, 防渗墙变形与应力分布规律与墙侧面的摩擦力有密切联系。

(3) 影响防渗墙应力变形性状的主要因素是: 覆盖层特性、防渗墙混凝土特性、防渗墙施工顺序、防渗墙与坝趾之间的距离和防渗墙的形状。

(4) 改善深覆盖层上混凝土面板堆石坝防渗墙的应力变形性状的方法是: 在防渗墙材料强度满足要求的情况, 应尽量降低防渗墙混凝土的弹性模量, 即尽量使防渗墙刚度与覆盖层刚度的比值减小; 在施工许

可的条件下, 先填筑部分坝体, 后建造防渗墙, 最后建造连接板; 适当增大防渗墙与坝趾之间的距离, 用连接板将防渗墙顶部与趾板相连接; 在条件可能时, 宜采用圆弧型防渗墙。前 3 种方法都是通过减小墙侧面的摩擦力这个途径来改善防渗墙的应力变形性状。

参考文献:

- [1] 高钟璜, 等. 大坝基础防渗墙[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.(GAO Zhong-pu, et al. Diaphragm wall in dam foundation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.(in Chinese))
- [2] 哈秋舟, 等. 长江三峡工程关键技术研究[M]. 广州: 广东科技出版社, 2002.(HA Qiu-ling et al. Study on key technology of Yangtze River Three Gorges Project [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2002.(in Chinese))
- [3] 程展林, 等. 三峡二期围堰拆除过程中围堰工程性状的调查验证[R]. 武汉: 长江科学院, 2002.(CHENG Zhan-lin, et al. Investigation and verification of engineering behavior of the second stage cofferdam of Three Gorges Project in its removal process[R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2002.(in Chinese))
- [4] 郦能惠, 李国英, 赵魁芝, 陈铁林. 强震区高面板堆石坝静力和动力应力变形性状[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 183 - 188.(LI Neng-hui, LI Guo-ying, ZHAO Kui-zhi, CHEN Tie-lin. Static and dynamic stress-deformation behavior of high concrete faced rockfill dams in strong ground motion zone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 183 - 188.(in Chinese))
- [5] 郦能惠, 等. 深覆盖层地基上混凝土面板堆石坝三维有限元动静力应力变形分析[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2003.(LI Neng-hui, et al. 3D FEM static and dynamic stress-deformation analysis for concrete face rockfill dam built on thick alluvium deposit[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2003.(in Chinese))
- [6] 郦能惠, 孙大伟, 米占宽. 深覆盖层上面板堆石坝的圆弧型防渗墙[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1653 - 1657.(LI Neng-hui, SUN Da-wei, MI Zhan-kuan. Arc type diaphragm wall for concrete face rockfill dam built on deep alluvium deposit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1653 - 1657.(in Chinese))