

文章编号: 1000-7598-(2006)10-1653-05

深覆盖层上面板堆石坝的圆弧型防渗墙

郇能惠, 孙大伟, 米占宽

(南京水利科学研究院, 南京 210024)

摘 要: 覆盖层的防渗设施大都采用混凝土防渗墙。防渗墙在靠近两岸部位及靠近顶部常存在较大的拉应力, 易导致混凝土开裂并产生渗漏, 影响大坝的安全。采用平面上防渗墙轴线呈圆弧型的防渗墙来改善防渗墙的应力性状, 并用三维有限元法数值分析对圆弧型防渗墙与直线型防渗墙的应力变形性状进行分析比较, 论证了以圆弧型防渗墙替代直线型防渗墙的技术合理性, 建议面板堆石坝坝基防渗采用圆弧型防渗墙更为有利。

关 键 词: 深覆盖层; 面板堆石坝; 防渗墙; 圆弧型; 有限元法数值分析; 应力变形性状

中图分类号: TV 223.4

文献标识码: A

Arc type diaphragm wall for concrete face rockfill dam built on deep alluvium deposit

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

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

Abstract: A concrete diaphragm wall is always used to prevent the seepage through the deep alluvium deposit for concrete face rockfill dam built on it. The tensile stress distributed the zones near by the both riversides and the top zone of the concrete diaphragm wall are usually big and sometimes are even larger than the tensile strength of concrete, that usually leads to cracking of diaphragm wall which decreases the safety of diaphragm wall and dam. In order to solve this complex problem, a new idea— arc type diaphragm wall is suggested. Comparison between the stress-deformation behavior of arc type diaphragm wall and that of plane type diaphragm wall has been made by using three-dimensional finite element method numerical analysis. The calculation result shows that the tensile stress of arc type diaphragm wall is much less than that of plane type diaphragm wall although the compression stress of arc type diaphragm wall is a little larger. Since the tensile strength of concrete is only less than 10 percent of compression strength, tensile stress is the main control factor of diaphragm wall. So the arc type diaphragm wall is probably reasonable especially for concrete face rockfill dam built on a deep alluvium deposit.

Key words: deep alluvium deposits; concrete face rockfill dam; arc type diaphragm wall; finite element numerical analysis; stress-deformation behavior

1 引 言

西部大开发促使在深覆盖层上建造更多的高土石坝和高面板堆石坝工程。覆盖层的防渗常采用混凝土防渗墙, 以往防渗墙在水平面上呈直线布置, 即防渗墙体处于同一平面内, 笔者称之为直线型防渗墙。数值计算和原型观测资料都表明, 防渗墙在靠近左右两岸的部位及顶部存在较大的拉应力, 甚至大于防渗墙混凝土设计抗拉强度, 易导致混凝土开裂并产生渗漏, 影响大坝的安全, 例如, 冶勒水电站防渗墙在靠近两岸的部位存在较大拉应力, 最大拉应力计算值为 -2.6 MPa , 若采用 C30 混凝土, 其抗拉强度设计值^[1]只有 -2.0 MPa 。如何采取有效

的方法来减小防渗墙的拉应力, 这是设计和研究人员一直关注的问题。采用弹性模量较低的塑性混凝土来减小防渗墙的应力是一个途径, 但由于塑性混凝土的抗拉强度和抗压强度都较低, 难以满足要求^[2]。本文提出了以圆弧型防渗墙替代常规的直线型防渗墙减小防渗墙拉应力的新途径。

2 圆弧型防渗墙的优点和可行性

2.1 圆弧型防渗墙的优点

为适应复杂的地形条件或避开不良的地质条件, 在平面布置上, 防渗墙轴线可布置成折线或曲线^[3], 例如三峡工程二期深水土石围堰和长江大桥桥墩等工程, 为改善防渗墙应力状态, 笔者提出了

采用圆弧形防渗墙的新概念。圆弧形防渗墙的优点在于防渗墙在水平面上呈弧形后,上游水压力在防渗墙上产生压应力,使防渗墙靠近两岸及顶部附近拉应力减小,只需选择适当的圆弧半径,可使防渗墙上的最大拉应力小于混凝土的抗拉强度。

2.2 圆弧形防渗墙的可行性

目前混凝土防渗墙的造孔机械、造孔技术与墙段连接技术都有了很大的发展。钢绳冲击式钻机、冲击式反循环钻机、回转式钻机、抓斗挖槽机等主要造孔机械都可适用于曲线型或圆弧形防渗墙的造孔施工。造孔成槽施工方法有以下几种:①钢绳冲击式钻机先钻进主孔,后劈打副孔,用接砂斗或砂石泵出渣;②冲击式钻机钻凿主孔、抓斗抓取副孔,可以用两钻一抓、三钻两抓或四钻三抓法;③抓斗挖槽机,可以单抓成槽,也可分主、副孔施工,多抓成槽。这些施工方法都可以形成圆弧形防渗墙。

趾板建在覆盖层上的混凝土面板堆石坝的坝基防渗措施一般都采用在覆盖层中建造防渗墙,由于坝体和覆盖层与面板和防渗墙是质量和刚度相差很大的两类建筑物,坝体的填筑引起的覆盖层变形对于防渗墙和趾板的应力有显著的影响,为改善防渗墙和趾板的应力变形形状,防渗墙顶部通过连接板与面板坝的趾板相连接,笔者在文[4]中介绍了覆盖层上高面板坝连接板长度优化分析研究成果,只需改变连接板的长度,圆弧形防渗墙的顶部就可以与直线型面板或折线型面板的趾板相连接,并不增加技术难度。

圆弧形防渗墙墙顶长度一般只比直线型防渗墙长 2%~3%,以下节所述的察汗乌苏水电站坝基防渗墙为例,直线型防渗墙顶长度为 96 m,若采用圆弧形防渗墙,弦高 9 m,墙顶长 98.2 m,因而采用圆弧形防渗墙的工程量所增甚少,若上游覆盖层较浅,采用圆弧形防渗墙的工程量可能不会增加反而略有减小。

3 两种防渗墙方案的数值分析

3.1 计算实例

选取拟建的深覆盖层上察汗乌苏水电站面板堆石坝为例,该坝最大坝高 107.60 m(可研设计阶段),坝基砂砾石覆盖层最大厚度为 46.7 m,覆盖层内中粗砂夹层的平均厚度为 8.50 m。在河床覆盖层内设置一道混凝土防渗墙,其顶部用连接板与面板堆石坝的趾板和面板相连,建成后将是建在深覆盖层上的最高的面板堆石坝,用此工程实例笔者等进行了三维有限元法应力变形数值分析^[5],比较了直线型防渗墙和圆弧形防渗墙的应力变形性状。圆弧形防

渗墙的尺寸及有限元网格见图 1 和图 2,直线型防渗墙顶长 96 m,圆弧形防渗墙弦长 96 m,弧长 98.2 m,弦高 9 m,圆弧半径为 132.5 m。为便于比较,两种型式防渗墙沿厚度方向都划分为 5 排单元,整个计算都是 7 526 个单元,9 319 个节点。

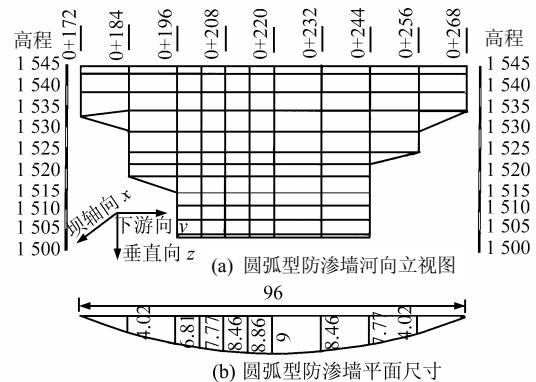


图 1 圆弧形防渗墙 (单位: m)
Fig.1 Arc type diaphragm wall (unit: m)

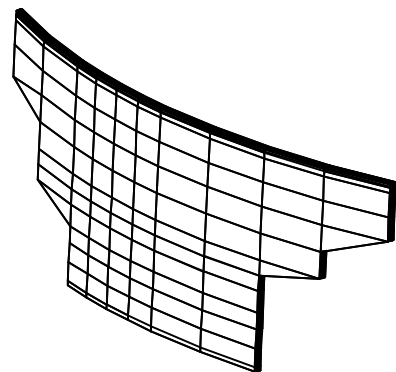


图 2 圆弧形防渗墙方案网格剖分图
Fig.2 Finite element mesh of arc type diaphragm wall

3.2 计算模型与计算方法

三维有限元法应力变形计算的筑坝材料与坝基覆盖层的本构模型采用“南水”双屈服面弹塑性模型,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、连接板和垫层料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,防渗墙嵌入基岩,受到三峡工程二期围堰拆除实录的启发^[6],在防渗墙的上下游侧面设置泥皮单元,墙底部设置沉渣单元,采用自行编制的面板堆石坝三维有限元静力计算程序,仿真模拟防渗墙施工、大坝施工填筑和分期蓄水运行全过程。

3.3 计算参数

两种防渗墙方案的计算参数相同,大坝各分区筑坝材料、坝基覆盖层和混凝土防渗墙等的计算参数见表 1。

表 1 计算参数
Table 1 Calculating parameters

材料	密度 /g·cm ⁻³	<i>K</i>	<i>K_{ur}</i>	<i>n</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>D</i>	<i>c</i> /kPa	ϕ_0 /(°)	$\Delta\phi$ /(°)	<i>R_f</i>
坝基砂砾石	2.37	800	1200	0.44	0.39	0.14	3.60	0	48.5	7.2	0.84
坝基中粗砂	2.16	600	900	0.33	0.50	0.10	6.50	0	46.5	3.15	0.745
防渗墙	2.20	315 000	315 000								
面板、趾板、连接板	2.40	280 000	280 000								
主砂砾石	2.30	1 260	1 890	0.36	0.42	0.18	4.15	0	53.2	10.0	0.83
次砂砾石	2.27	930	1 395	0.28	0.47	0.23	3.30	0	51.4	9.3	0.814
下游堆石	2.14	900	1 350	0.34	0.46	0.22	5.60	0	54.4	10.7	0.866
砾石排水区	2.12	600	900	0.24	0.33	-0.11	4.25	0	53.2	10.0	0.83
反滤层	2.12	600	900	0.24	0.33	-0.11	4.25	0	51.2	7.9	0.83
过渡层	2.24	1 400	2 100	0.42	0.45	0.20	5.90	0	51.2	7.9	0.95
垫层	2.32	1 500	2 200	0.42	0.45	0.20	5.90	0	51.2	7.9	0.95
基岩	2.70	29 700	29 700								
泥皮薄层单元	1.47	50	75	0.45	0.30	0.04	0.50	9	4.0	0.0	0.50
沉渣薄层单元	2.26	4 000	8 000	0.50	0.36	-0.026	1.32	6	36.0	0.0	0.68
防渗墙与基岩间	2.65	1 000	2 000	0.50	0.36	-0.026	1.32	6	36.0	0.0	0.68
趾板垫层	2.32	1 200	1 800	0.52	0.43	-0.26	6.29	0	51.2	7.9	0.95

4 两种防渗墙应力变形性状的比较

4.1 防渗墙变形性状

计算结果表明运行期防渗墙的压应力和拉应力值最大，为控制工况，本文只选取了运行期防渗墙的应力变形性状进行比较。图 3(a)为运行期直线型

防渗墙的顺河向变形，图 4(a)为坝轴向变形，图 5(a)为垂直向变形；图 3(b)运行期圆弧型防渗墙的顺河向变形，图 4(b)坝轴向变形，图 5(b)垂直向变形，可以看出防渗墙变形分布规律基本相同，两种防渗墙运行期变形最大值见表 2。

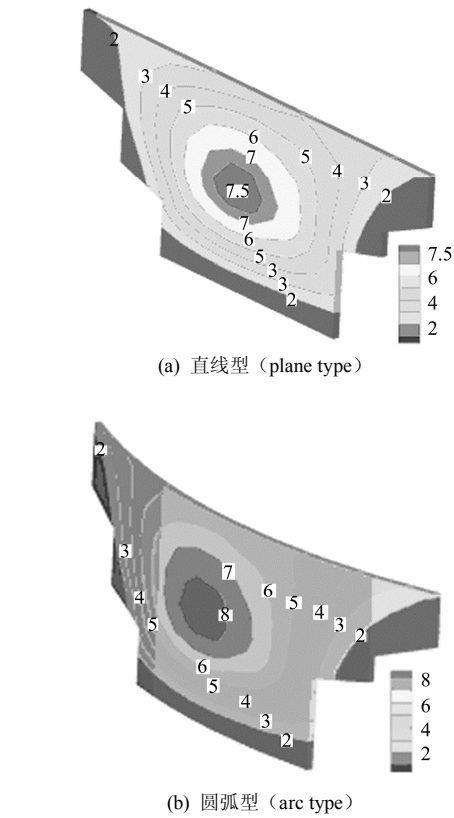


图 3 防渗墙顺河向的变形 (单位: cm)
Fig.3 Stream direction deformation of diaphragm wall(unit: cm)

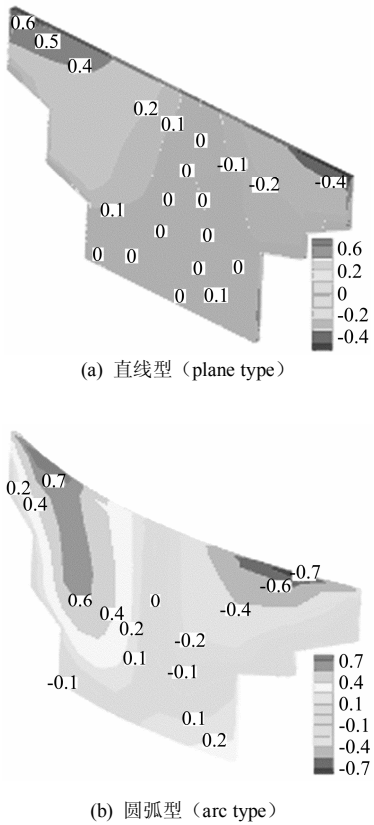
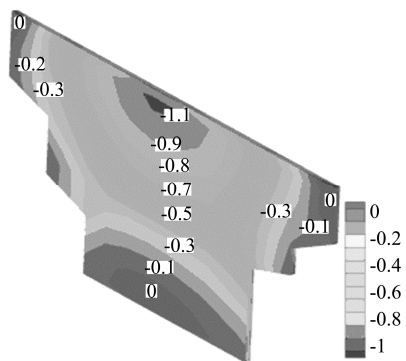
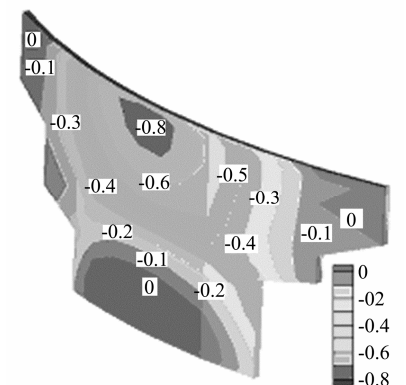


图 4 防渗墙的坝轴向的变形 (单位: cm)
Fig.4 Axial direction deformation of diaphragm wall (unit: cm)



(a) 直线型 (plane type)



(b) 圆弧形 (arc type)

图 5 防渗墙的垂直面变形 (单位: cm)
Fig.5 Vertical direction deformation of diaphragm wall (unit: cm)

表 2 防渗墙运行期变形最大值

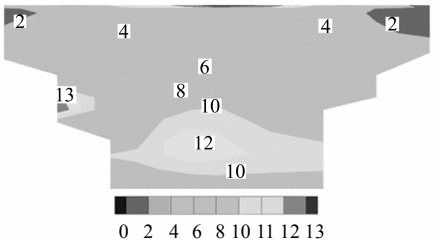
Table 2 Maximum deformation values of diaphragm wall during operation

防渗墙型式	防渗墙变形最大值/cm		
	顺河向	轴向	垂直向
直线型	7.5	0.6	1.1
圆弧形	8.0	0.7	0.8

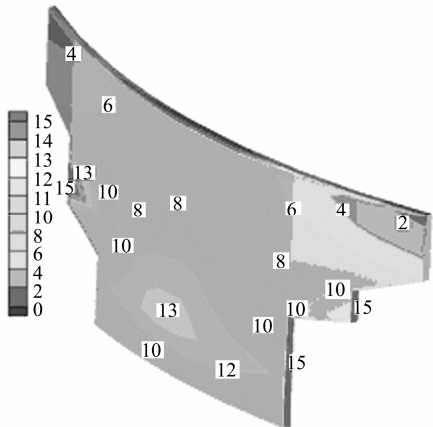
在水压力作用下防渗墙顺河向的变形是最大的,但是深覆盖层中防渗墙的变形受到两侧覆盖层的限制,顺河向变形主要取决于下游侧覆盖层的刚度特性,因而直线型与圆弧形防渗墙的顺河向变形相差不大。两种型式防渗墙的轴向变形还受到水压力的影响,因而圆弧形防渗墙轴向变形略大。

4.2 防渗墙应力性状

直线型防渗墙运行期防渗墙上游面的大主应力 σ_1 分布见图 6(a),小主应力 σ_3 分布见图 7(a)。圆弧形防渗墙运行期上游面的大主应力 σ_1 分布见图 6(b),小主应力 σ_3 分布见图 7(b),可以看出圆弧形防渗 σ_1 和 σ_3 的分布规律与直线型防渗墙基本相同。两种型式防渗墙运行期应力最大值见表 3。

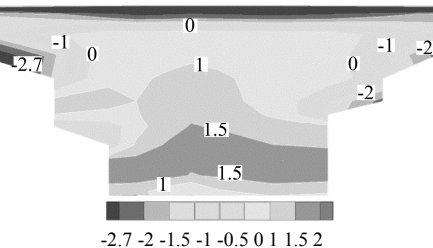


(a) 直线型 (plane type)

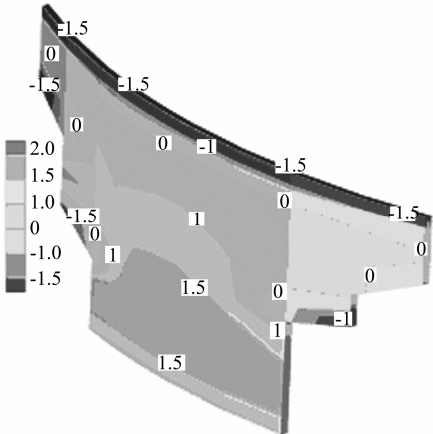


(b) 圆弧形 (arc type)

图 6 防渗墙上游面大主应力 (单位: MPa)
Fig.6 Stress σ_1 of upstream face of diaphragm wall (unit: MPa)



(a) 直线型 (plane type)



(b) 圆弧形 (arc type)

图 7 防渗墙上游面小主应力 (单位: MPa)
Fig.7 Stress σ_3 of upstream face of diaphragm wall (unit: MPa)

表 3 防渗墙运行期应力最大值和混凝土强度设计值
Table 3 Maximum stress values of diaphragm wall during operation

防渗墙 型式	防渗墙应力 最大值/MPa		C35 混凝土强度 设计值/MPa	
	压应力 σ_1	拉应力 σ_3	抗压强度	抗拉强度
直线型	13.0	-2.7	17.5	-1.65
圆弧型	15.0	-1.5	17.5	-1.65

由于覆盖层的刚度小于防渗墙，在坝体填筑和水压力作用下覆盖层的压缩量要远远大于防渗墙的压缩量，防渗墙侧面会受到覆盖层的摩擦力，摩擦力使得运行期防渗墙侧壁 σ_1 随着墙深而增加，上游面中央部位距墙底部约 10 m 处压应力最大。圆弧型防渗墙侧壁的 σ_1 最大值比直线型防渗墙稍有增加。由图 7 可见，防渗墙上游面中央部位 σ_3 均为压应力，但靠近两岸及顶部附近的 σ_3 为拉应力，直线型防渗墙拉应力最大值为-2.7 MPa。圆弧型防渗墙的拉应力最大值为-1.5 MPa，比直线型防渗墙减少了 1.2 MPa，拉应力值减少了 44 %，该工程防渗墙混凝土设计拟采用 C35 混凝土，若选用圆弧型防渗墙，其拉应力在抗拉强度设计值 1.65 MPa 允许范围之内，而采用直线型防渗墙，即使采用 C60 混凝土，其混凝土抗拉强度设计值为 2.2 MPa，也不能满足要求。

影响防渗墙的应力性状的主要荷载是墙体自重、覆盖层对墙侧面的摩擦力和水压力，覆盖层沉降所产生的墙侧摩擦力和墙体自重是防渗墙垂直向应力的主要影响因素，墙上游侧的水压力是产生拉应力的主要因素，圆弧型防渗墙正是采取了结构型的优势，变不利因素为有利因素，利用水压力来减小轴向拉应力。

5 结 语

通过数值分析比较可以看出，圆弧型防渗墙代替直线型防渗墙后，其变形性状与直线型防渗墙的相近，可以有效地降低墙体靠近两岸部位及靠近顶部的拉应力，而防渗墙中央部位的压应力，没有显著增加，因而在覆盖层较深的情况，经过技术经济比较，对面板堆石坝或斜心墙土石坝的坝基防渗设施采用圆弧型防渗墙更为合理，有可能成为推荐方案。

参 考 文 献

[1] 郦能惠, 米占宽, 李国英, 等. 冷勒水电站深覆盖层防渗墙应力变形性状的数值分析[J]. 水利水运工程学报, 2004, (1): 18—23.
LI Neng-hui, MI Zhan-kuan, LI Guo-ying, et al. Numerical analysis of stress deformation behavior of concrete diaphragm wall in supper-deep overburdened layer of Yele Hydropower Station[J]. **Hydro-science and Engineering**, 2004, (1): 18—23.

[2] 成都勘测设计研究院. 混凝土防渗墙墙体材料及接头型式研究(“八五”国家科技攻关研究报告)[R]. 成都: 成都勘测设计研究院, 1995.

[3] 高钟璞, 夏可风, 王綦正, 等. 大坝基础防渗墙[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000. 20—35.

[4] 郦能惠, 孙大伟, 米占宽. 覆盖层上高面板坝连接板长度优化分析[J]. 水利水电技术, 2005, 36(7): 81—85.
LI Neng-hui, SUN Da-wei, MI Zhan-kuan, et al. Optimization analysis of length of connection slab for high concrete faced rockfill dam on deep alluvium deposit[J]. **Water Resonrues and Hydropower Engineering**, 2005, 36(7): 81—85.

[5] 郦能惠, 米占宽, 沈珠江, 等. 深覆盖层地基上混凝土面板堆石坝三维非线性有限元静动力应力变形分析[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2003.

[6] 程展林, 李青云. 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.

工程力学（上下册）

建筑科学类 王振波 孔宪宾主编 2006 年 5 月出版

上册：16K 260 千字 327 页 压膜版 估价：30.00 元 下册：16K 180 千字 243 页 平装 估价：24.00 元

该书分为上、下两册。上册涉及静力学问题，包括传统的理论力学静力学内容和材料力学的大部分内容，并将内力及内力图集合为一章，作为静力学和材料力学联接点。下册则涉及动力学问题，包括传统理论力学中的运动学部分以及材料力学中的动力问题（包括疲劳）。该书体系新颖、内容紧凑、概念清晰、习题量适中。

读者对象：高等院校土木工程专业及相关专业师生，相关工程技术人员。

(摘自科技新书目)