

# 长河坝水电站坝基防渗墙与土心墙连接研究

张丹

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,四川成都 610072)

**摘要:**长河坝水电站砾石土心墙堆石坝最大坝高240 m,坝基河床覆盖层厚度为60~70 m,对于河床部位心墙建基面下厚度约53 m的强透水覆盖层采用两道全封闭混凝土防渗墙防渗。防渗墙与土心墙的连接部位是坝体和坝基防渗系统的薄弱及关键部位,其连接设计是否成功是大坝设计的关键点和难点。通过对坝基防渗墙与土心墙连接型式的对比选择、副防渗墙插入心墙高度研究、主防渗墙与土心墙廊道式连接研究及防渗墙与土心墙连接部位高塑性粘土设置研究,精细化了防渗墙与土心墙连接部位的结构设计,选择出了适宜长河坝水电站砾石土心墙堆石坝防渗墙与土心墙的连接方案。

**关键词:**长河坝水电站;心墙堆石坝;坝基;防渗墙与土心墙连接

**中图分类号:**TV7;TV222;TV641

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2016)01-0035-04

## 1 概述

长河坝水电站砾石土直心墙堆石坝建造于深厚覆盖层地基上,最大坝高240 m,坝顶高程1 697 m,坝底高程1 457 m。

坝基河床覆盖层厚60~70 m,局部达79.3 m,结构较复杂,自下至上由老至新分为3层。第①层:漂(块)卵(碎)砾石层( $f_{gl}Q_3$ ),分布于河床底部,厚3.32~28.5 m;第②层:含泥漂(块)卵(碎)砂砾石层( $alQ_4^1$ ),厚5.84~54.49 m,分布于河床覆盖层中部及一级阶地上,②层中上部有②-C砂层分布;第③层:漂(块)卵砾石层( $alQ_4^2$ ),厚4~25.8 m。坝基覆盖层漂(块)卵砾石层渗透系数 $K=8 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-1}$  cm/s,具强透水性;②-C砂层渗透系数 $K=6.86 \times 10^{-3}$  cm/s,具中等透水性。漂(块)卵砾石颗粒大小悬殊,结构不均一,允许渗透坡降 $J=0.1 \sim 0.15$ ,局部架空层 $J=0.07$ ;砂层允许渗透坡降 $J=0.2 \sim 0.25$ ,渗透坡降较低,抗渗稳定性差,易产生管涌破坏;此外,河床覆盖层具多层结构且夹有砂层,由于渗透性的差异,有产生接触冲刷的可能性,存在渗漏和渗透变形问题。

对于河床部位心墙地基在挖除②-C砂层后还余厚度约53 m的强透水覆盖层采用两道全封闭混凝土防渗墙进行防渗,两墙之间净距14 m,形成一主一副布置格局。主防渗墙厚1.4 m,布置于坝轴线平面内,副防渗墙厚1.2 m,布置于坝

轴线上游。防渗墙与土心墙的连接部位是坝体和坝基防渗系统的薄弱及关键部位,同时,合理地接头设计以协调防渗墙混凝土与土心墙之间的应力变形是大坝设计的难点。因此,防渗墙与土心墙如何进行可靠的连接是大坝防渗和应力变形协调设计中的关键问题。

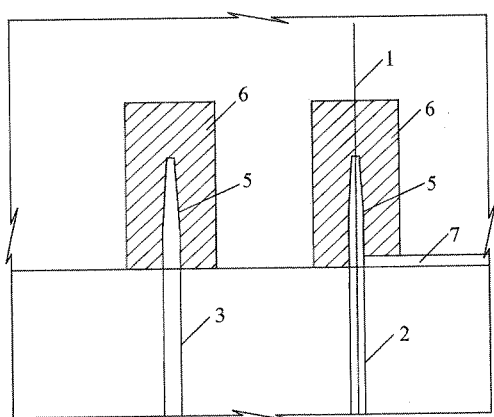
## 2 防渗墙与土心墙连接型式的选择

国内外基础防渗墙与大坝土质防渗体的连接型式主要有两种:一种是将防渗墙直接插入土质防渗体的型式,即插入式连接型式;另一种是在防渗墙顶设廊道的型式,即廊道式连接型式。插入式连接型式的防渗墙墙体受力状态相对简单,在廊道式连接出现前,防渗墙与土心墙均采用插入式连接。近年来,多座坝高为100~200 m的高坝防渗墙与土心墙采用了廊道式连接。廊道式连接因其具有诸多优点而不断被推广应用。笔者针对插入式和廊道式连接的优缺点、结合工程情况,拟定了图1所示的两种连接型式并进行了比较研究。

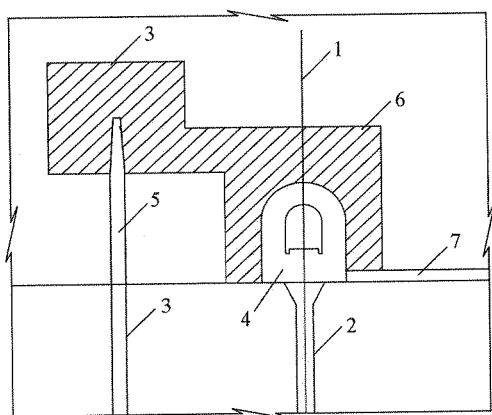
对图1所示的两种连接型式进行了三维渗流及应力变形计算分析比较,两方案从渗流和应力变形上看均成立,没有明显的优劣。但主防渗墙与土心墙采用廊道式连接具有以下优点:

(1)廊道可作为运行期防渗墙补强的通道,使后期基础补强方便、快捷、经济。防渗墙及基础帷幕灌浆等属于地下隐蔽工程,尽管目前在该方

收稿日期:2015-11-05



(1) 两墙插入式连接



(2) 副墙插入、主墙廊道式连接

1 坝轴线;2 主防渗墙;3 副防渗墙;4 廊道;  
5 插入式连接段;6 高塑性粘土;7 反滤层

图1 混凝土防渗墙与土心墙连接型式示意图

面的施工技术已得到了长足的发展,在施工过程中也进行了各种各样的质量控制,但仍难免存在各种各样的缺陷,且这些缺陷多在水库蓄水后才能集中暴露出来,如无廊道,后期进行缺陷补强将非常困难或不可能。

(2) 可减少工程的直线工期。设置廊道后,防渗墙下部的基岩帷幕灌浆可以在廊道内进行,墙下的帷幕灌浆可以不占用直线工期。根据规范要求,长河坝水电站大坝主防渗墙平面内主防渗帷幕伸入3 Lu 分界线以下5 m。若不设廊道,防渗墙下的灌浆帷幕施工约占8个月的直线工期。

(3) 廊道可作为大坝运行期的观测通道。目前基础防渗墙的监测手段较少且监测仪器的存活率普遍偏低,设置墙顶廊道后,可以随监测仪器的发展和运行需要补设监测仪器。

(4) 基础廊道也是连接大坝左、右岸的通道,

可方便坝内左、右岸的交通。

综上所述,最终确定长河坝水电站坝基主防渗墙与土心墙采用廊道式连接,副防渗墙与心墙采用插入式连接。

### 3 副防渗墙插入式连接的研究

《碾压式土石坝设计规范》DL/T5395-2007规定:当混凝土防渗墙与土心墙为插入式连接方式时,插入土质防渗体高度宜为1/10坝高,高坝可适当降低。长河坝水电站可研阶段拟定副防渗墙插入心墙的高度为10 m、15 m和20 m,二维有限元渗流分析表明上述三种插入高度情况下防渗墙与心墙平均接触坡降分别为7.2、4.8和3.1。根据高塑性粘土与混凝土接触面渗透试验(未模拟接触面应力状态),接触面取允许渗透坡降 $J=6$ ,取副防渗墙插入心墙高度为15 m。

表1 高塑性粘土与混凝土防渗墙接触三轴渗流应力耦合试验成果表

围压 /MPa	偏应力 /MPa	渗透系数 / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	渗透坡降
0.5	0.2	$7.15 \times 10^{-8}$	190(未破坏)
0.5	0.4	$5.27 \times 10^{-8}$	181(未破坏)
0.5	0.5	$5.55 \times 10^{-8}$	162
0.5	0.6	$4.24 \times 10^{-8}$	148
1	0.6	$6.28 \times 10^{-8}$	210(未破坏)
1	0.8	$5.51 \times 10^{-8}$	238(未破坏)
1	1.0	$5.84 \times 10^{-8}$	200
1	1.2	$4.31 \times 10^{-8}$	219
1.5	1	$3.81 \times 10^{-8}$	195(未破坏)
1.5	1.2	$4.58 \times 10^{-8}$	267(未破坏)
1.5	1.4	$3.41 \times 10^{-8}$	267(未破坏)
1.5	1.6	$3.69 \times 10^{-8}$	210
1.8	1.2	$3.31 \times 10^{-8}$	352
1.8	1.4	$2.91 \times 10^{-8}$	362
1.8	1.6	$2.09 \times 10^{-8}$	257(未破坏)
1.8	1.8	$2.37 \times 10^{-8}$	257(未破坏)
1.8	2	$1.83 \times 10^{-8}$	267(未破坏)

长河坝水电站招标阶段进行了高塑性粘土与混凝土防渗墙局部接触三轴渗流应力耦合试验研究,试验测得了不同三轴应力状态下高塑性粘土与防渗墙接触面的渗透系数和破坏坡降如表1所示。实际上,副防渗墙插入段的混凝土与高塑性粘土之间的接触面更接近三轴应力状态。根据高

塑性粘土与混凝土防渗墙接触三轴渗流应力耦合试验成果,考虑到副防渗墙插入心墙高度15 m时插入段薄墙立模施工难度较大,在招标阶段拟定了副防渗墙插入心墙高度为9 m的方案进行研究。三维有限元渗流分析成果表明:当副防渗墙插入心墙高度9 m时,高塑性粘土与副防渗墙和廊道接触面的最大渗透坡降为17.1,远小于高塑性粘土与混凝土防渗墙接触三轴渗流应力耦合试验接触面破坏坡降。三维有限元应力变形分析成果表明:当副防渗墙插入心墙高度从15 m降低到9 m时,副防渗墙插入段和廊道周围土体中的拉应力区明显减小,插入高度的降低对连接部位局部应力变形有利。通过上述研究,最终将副防渗墙插入心墙高度优化至9 m,同时加强了对接触面渗透出逸部位的反滤保护。

#### 4 主防渗墙廊道式连接研究

##### 4.1 廊道与两岸连接分缝位置的研究

根据目前的防渗墙施工工艺,坝基覆盖层内的防渗墙为地下连续墙,没有设置结构缝。防渗墙与廊道通常采用刚性连接,因此,廊道在防渗墙范围内不设置结构缝,以防止廊道结构缝变形将防渗墙拉裂而发生渗漏。廊道在跨过河床防渗墙顶后与两岸灌浆平洞连接的部位通常设置结构缝,已建的硃砂、狮子坪、瀑布沟等工程将该结构缝设置于基覆分界线部位,在施工和运行过程中发现,廊道分缝处张开和错动变形较大且变形状态复杂。尽管对该结构缝止水参照面板坝周边缝的止水进行设计,但所设计的多道止水仍难以适应这种变形,廊道两端结构缝止水出现了破坏。为了减小分缝位置的变形量,避免结构缝止水破坏,长河坝工程对廊道的分缝位置进行了研究。首先考虑了取消结构缝,即廊道直接伸入基岩不分缝方案,这样实施可以直接避免结构缝的止水设计难题。计算发现:如果不分缝,廊道与两岸连接的支座处拉压应力很大。因此,考虑了廊道伸入基岩一定长度后分缝并研究了廊道伸入基岩的合适长度。另外,对多个工程应用的基覆分界线处的分缝方案也进行了对比研究。

对廊道与两岸连接不分缝、伸入基岩分缝和

在基覆分界线处分缝三种方案采用三维有限元子结构进行应力变形分析对比研究分析发现三种方案各有其优缺点:(1)廊道不分缝的优点是有效地减小了分缝位置的错位,缺点是廊道两岸支座处出现了很大的拉压应力。(2)在基覆分界线处分缝的优点是廊道应力极值及区域相较最小,缺点是分缝处错位较大,止水结构设计困难。(3)伸入基岩分缝方案廊道两岸支座端的拉压应力及结构缝变位介于不分缝方案和基覆分界线处分缝方案之间。考虑到基覆分界线位置分缝方案止水结构难以保证质量,而不分缝方案廊道在两岸位置拉压应力过大导致廊道结构和配筋设计困难,因此而选择伸入基岩分缝方案进行了深入研究。

对伸入基岩分缝方案进行多个伸入基岩分缝长度对比研究发现:当廊道伸入基岩长度增长时,廊道两岸支座处的拉压应力增大,但结构缝变形和错位减小。分析发现:当廊道伸入基岩1 m时,廊道支座端的应力和结构缝变形与错位适中,廊道结构配筋和结构缝止水设计问题均能得到解决,因此,最终选择了伸入基岩1 m的分缝方案。经研究决定,该方案使用时在廊道伸入基岩段廊道和基岩之间设置了弹性垫层,进一步减小了廊道在支座端的应力集中。

##### 4.2 廊道与防渗墙刚性连接的倒梯形型式研究

主防渗墙和廊道采用刚性连接,根据结构特点和已有的工程经验,在防渗墙槽孔段和廊道之间设置了一个倒梯形段,可以改善廊道特别是廊道底板的受力状态。根据类似工程经验,对倒梯形连接比较了三种方案(图2)。

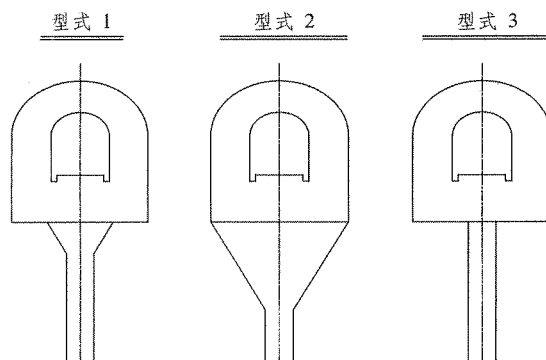


图2 主防渗墙与廊道连接的倒梯形型式示意图

采用有限元子结构法对图2所示的几种倒梯形大小进行了三维应力变形分析研究。研究成果表明:接头型式变化时,廊道及防渗墙的变形情况变化不大,廊道的顶部应力状况基本不变,而廊道边墙和底部、接头本身以及接头与防渗墙连接部位则对接头型式的变化相对较为敏感。型式3廊道底板出现了较大的剪应力而导致底板的主拉应力较大;型式2相对于型式1加大了廊道底倒梯形的大小,在倒梯形和防渗墙的连接部位出现了一定的应力集中,但廊道底板的主拉应力、顺河向和竖向正应力及两侧边墙的竖向压应力值明显减小,接头本身拉应力和压应力绝对值亦减小。细部应力变形分析表明:型式3不宜采用,型式1和型式2各具优缺点,可视工程情况选用。但选用型式1时,倒梯形边缘宜位于廊道边墙范围内。

#### 5 连接部位高塑性粘土设置的研究

对于防渗墙与土心墙连接,无论是插入式连接还是廊道式连接,其连接部位通常设置一定大小的高塑性粘土区。高塑性粘土比心墙土料更软,适应变形能力更强,能在产生较大变形的情况下不产生裂缝,即使在产生较大变形或裂缝的情况下仍具有较好的抗渗性,并且相对于心墙土料具有更好的裂缝自愈能力。最终将防渗墙与土心墙连接廊道或插入段均设计为混凝土结构,相对于心墙土模量较高,在其周围布置了一定大小的高塑性粘土区以更好地协调其与土心墙变形的差异,防止连接段周围心墙土体出现裂缝。对于长河坝工程,因高塑性粘土料运距较远,因此,在满足工程要求的情况下,高塑性粘土区的设置尽量考虑了节省高塑性粘土料,将副防渗墙上游侧和廊道下游侧高塑性粘土区厚度设置为3 m,廊道和副防渗墙顶部高塑性粘土区的厚度通过比较确定,对所拟定的高塑性土区的厚度分别为5 m、3 m、8 m三种方案进行了研究。

采用三维有限元子结构法对三种方案进行了应力变形对比分析研究,研究成果表明:高塑性粘土区的大小对心墙、廊道及防渗墙的应力变形均有一定的影响。高塑性土区增大有利于改善廊道和防渗墙应力,但心墙的变形将增加,高塑性土区顶部一定范围内心墙的拱效应明显增大,因此,高

塑性土区不宜太大,但也不宜过小。就长河坝工程而言,在所研究的廊道和防渗墙插入段顶3 m、5 m、8 m三种厚度的方案中,3 m方案中廊道与主防渗墙应力情况相对最差,8 m方案中廊道与主防渗墙应力情况相对最好,但高塑性粘土区上部30 m以内区域的心墙压应力值明显减小,而廊道与主防渗墙应力状况与5 m方案相比则没有大幅度的改善,因此,最终选择了比较适中的5 m厚方案。

#### 6 结语

防渗墙与土心墙的连接部位是长河坝水电站高砾石土心墙堆石坝防渗系统中的关键部位,该连接部位应力变形状态复杂,刚性和柔性材料的接触使变形协调问题突出。该连接部位从两道混凝土防渗墙防渗过渡至心墙防渗,连接部位承受水压力高,防渗结构尺寸及材料突变。因此,如何选择合理、可靠的连接方式进行连接部位的细部结构设计成为长河坝水电站深厚覆盖层上修建高土石坝的关键技术问题。

通过对坝基防渗墙与土心墙连接型式的对比选择、副防渗墙插入心墙高度研究、主防渗墙与土心墙廊道式连接研究及防渗墙与土心墙连接部位高塑性粘土设置研究,精细化了防渗墙与土心墙连接部位的结构设计,选定了更适宜长河坝水电站砾石土心墙堆石坝防渗墙与土心墙的连接方案。

#### 参考文献:

- [1] 肖白云. 混凝土防渗墙墙体材料及接头型式的研究[J]. 水力发电, 1998, 45(3): 29-31.
- [2] 吴秋军, 傅少君. 子模型方法研究瀑布沟土石坝防渗结构[J]. 武汉大学学报, 2006, 39(3): 55-59.
- [3] 熊 莹, 何蕴龙, 伍小玉, 董园林. 长河坝坝基廊道应力变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1767-1774.
- [4] 陈 刚, 马光文, 付兴友. 瀑布沟大坝基础防渗墙廊道连接型式研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2005, 37(3): 32-36.

#### 作者简介:

张丹(1979-),女,四川眉山人,设计副总工程师,高级工程师,硕士,从事水工结构设计工作。

(责任编辑:李燕辉)