

## 坝基两道防渗墙水头分担情况有限元分析

吴梦喜<sup>1</sup>, 胡小红<sup>2</sup>, 伍小玉<sup>2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 中水顾问集团成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 深覆盖层坝址上的高心墙堆石坝, 在河床覆盖层中常设置两道混凝土防渗墙防渗。采用笔者开发的有限元软件, 参照砂卵石覆盖层深度近 50 m 的某心墙堆石坝工程的情况, 分析了主、副防渗墙 6 种设置方案中坝基的稳定渗流场, 得到了主墙、副墙和覆盖层的水头分担比例。所有方案中河床覆盖层上的水头小于 3%。当主、副两道墙下部灌浆情况相同, 端部之间设置灌浆帷幕封堵绕渗时, 副墙承担的水头接近主墙; 如果取消封堵绕渗的帷幕, 副墙承担的水头下降到总水头的 20%~30%; 而副墙底部和主、副墙两端均不设帷幕的情况下, 副墙上承担的水头比例下降到总水头的 8%~11%。副墙位于主墙的下游侧时, 其上承担的水头比例比副墙位于主墙上游侧的情况略高。防渗墙承担的水头比例取决于墙整体的防渗能力, 而对防渗墙本身的厚度变化不敏感。

**关键词:** 防渗墙; 渗流; 有限元; 水头

**作者简介:** 吴梦喜(1967-), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程渗流与变形的数值方法研究。

### 0 前言

自我国 1958 年在山东省青岛月子口水库混凝土防渗墙试验成功后, 设置防渗墙成为砂砾石坝基上渗流控制的主要措施<sup>[1]</sup>。现代砂砾石上的高土质心墙堆石坝, 其防渗体系一般由土质心墙、混凝土防渗墙、防渗墙下部和两岸的灌浆帷幕组成。根据德国 H. 贝伊尔得等的试验研究, 防渗墙的允许水力梯度与其混凝土的密实性关系密切, 采用导管法浇注的密实混凝土的极限水力梯度  $J=300$ , 允许水力梯度  $J=150$ , 这也是混凝土面板坝面板的允许水力梯度<sup>[2]</sup>。由于防渗墙的渗透系数(小于  $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ )远远低于覆盖层砂砾石的渗透系数(大于  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ), 坝首的水头绝大部分由防渗墙承担, 加拿大高 107 m 的马尼克—3 号坝的原型观测结果显示, 双排防渗墙(墙距 24 m)上承担的水头高达总水头的 90%<sup>[2]</sup>。当前混凝土防渗墙的厚度一般 0.40~1.4 m, 厚度越大, 对施工机具的要求越高, 施工难度越大。因此, 对于坝高超过 150 m 以上的高心墙堆石坝, 往往需要设置两道防渗墙来分担水头。国内对防渗墙本身力学性能、渗透系数、允许渗透坡降, 以及对防渗墙的施工方法、应力变形、渗流控制效果、和防渗墙开裂后坝基的渗透稳定性方面进行了大量的研究<sup>[3-6]</sup>, 但对两道防渗墙不同设置方式及其水头分担比例的探讨很少。

本文结合某心墙堆石坝工程的情况, 计算两道防渗墙不同设置方案情况下坝基的稳定渗流场, 分析不同设置方式对两道防渗墙水头分担比例的影响。

### 1 计算条件

某心墙堆石坝坝高 147 m, 坝顶高程 2138 m, 上游坡度 1:2, 下游坡度 1:1.8。心墙顶部高程 2136 m, 顶宽 4 m, 底部高程 1990 m, 上下游坡度均为 1:0.25。心墙底部河床覆盖层厚 48 m 左右。水库正常蓄水位为 2133.0 m, 下游水位 1990.0 m。由于防渗体与砂砾石地基及混凝土防渗墙三

者结合部位容易造成渗透破坏<sup>[1]</sup>, 两道防渗墙的设计方案中, 主防渗墙(简称主墙)与心墙底部的灌浆廊道刚性连接, 副防渗墙(简称副墙)插入心墙内 10 m 高, 并在心墙底部铺设防渗薄膜, 阻断覆盖层与心墙之间的渗流; 心墙与两岸相连处设混凝土板封闭岩石裂隙。心墙与两岸山体之间, 心墙与河床覆盖层之间的水力联系很小, 因而坝基的渗流可单独分析, 坝基与心墙的接触面当作不透水界面处理。

由于河谷基本对称, 两岸水文地质条件差别不太显著, 加之两岸的渗流性状对坝基覆盖层内的渗流性状影响不大, 因而分析两道防渗墙之间的水头分担关系时, 不妨按对称情况处理, 岩层的渗流各向异性也不考虑。计算范围取坝轴线上下游各 250 m, 沿河谷中心线截取一半, 顺河谷方向地质条件也取为一致。计算模型如图 1(a) 所示, 图中左边为河床, 河床中最上面的三层为砂卵石覆盖层, 渗透系数比较接近, 可以取相同的参数; 右边为河岸, 正常蓄水位以上部位不参与渗流计算, 因而从模型中去掉。岸坡岩体的最上面两层为强透水层, 第三层与第四层为中等透水层, 第 5 层为弱透水层, 其下为微新岩体。如图 1(b) 所示, 主防渗墙(简称主墙), 与两岸基岩灌浆帷幕位于坝轴线所在的平面内, 主墙下面基岩灌浆帷幕和坝肩基岩灌浆帷幕均灌至相对不透水层底线, 共同构成防渗主平面。主墙厚度 1.2 m。副防渗墙(简称副墙)位于主墙的上游侧或下游侧, 与主墙净距 12 m, 厚度 1.2 m, 下部灌浆帷幕同主墙。主、副墙之间于坡底处设置 4 m 宽度的垂直灌浆帷幕, 深度达到相对不透水层, 将主副墙之间的覆盖层封闭起来。计算网格见图 1(c)。边界条件为心墙上游岸坡和河床表面为上游已知水头边界; 心墙下游岸坡

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10472122)

收稿日期: 2006-07-30

表 1 材料渗透参数

材料	强风化岩	中风化岩	弱风化岩	微新岩体	覆盖层	防渗墙	灌浆体
渗透系数/(m·s <sup>-1</sup> )	$3 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-7}$

和河床表面及下游河床覆盖层截断处为下游已知水头边界或可能的溢出面边界; 其他边界为不透水边界。

所采用的计算软件为第一作者开发的非饱和非稳定三维渗流有限元程序 SEEPAGE, 该程序已经用于多个水利工程的渗流分析。计算采用的单元为 20 节点六面体单元。各种材料的渗透系数如表 1。

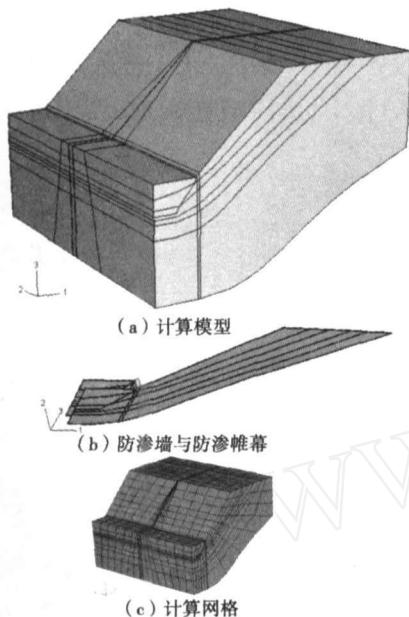


图 1 计算模型与网格

## 2 计算方案与计算结果

计算主要比较副防渗墙下部和两道防渗墙端部之间是否设置灌浆帷幕、副墙位于主墙的上游侧或下游侧的情况下主、副墙承担水头比例的情况。计算方案有 6 个: ①副墙设于主墙的上游侧, 副墙下部设帷幕, 主、副墙两端之间设帷幕; ②副墙设于主墙的上游侧, 副墙下部设帷幕, 主、副墙两端之间不设帷幕; ③副墙设于主墙的上游侧, 副墙下部不设帷幕, 主、副墙两端之间不设帷幕; ④、⑤、⑥为副墙位于主墙下游侧, 其他条件分别对应前三个方案。所有计算方案可以采用图 1 中的计算网格。通过修改副防渗墙下部和两墙之间的帷幕部位的材料属性和调换上下游水位可以实现不同的帷幕设置方案和主、副墙相对位置的变换。

所有方案中河床覆盖层内防渗墙表面沿深度方向的水头是变化不大的, 选取覆盖层下 4 m 即高程 1986 m 的值来对比分析防渗墙所承担的水头比例。表 2 为防渗墙中部各种方案中主、副墙和覆盖层上的水头承担在总水头中所占的百分比。总的来说, 覆盖层内承担的水头小于 3%, 水头承担基本上由两道防渗墙分担。方案①和方案④, 两

道防渗墙厚度一致, 墙下灌浆帷幕相同, 两墙端部设帷幕封堵绕渗, 副墙上承担的水头比例略低于主墙; 方案②和方案⑤, 主、副墙下部帷幕相同, 而两墙端部之间未设帷幕封堵绕渗, 副墙上承担的水头大为减小, 副墙承担的水头比例下降到总水头的 20%~30%; 方案③和方案⑥, 副墙底部和主、副墙两端都不设帷幕, 副墙上承担的水头比例下降到总水头的 8%~11%。方案①、②、③与方案④、⑤、⑥对比, 可以看出副墙位于主墙的下游侧时, 副墙上承担的水头比例比副墙位于主墙上游侧的情况略高。

表 2 各方案主、副墙与覆盖层水头承担比例

方案	①	②	③	④	⑤	⑥
副墙/%	47.2	22.6	8.2	48.7	28.2	10.4
主墙/%	51.1	75.4	89.5	49.9	70.2	87.5
覆盖层/%	1.7	2.0	2.3	1.4	1.6	2.1

图 2 为各方案副墙在 1986 m 高程承担的水头比例沿坝轴线方向的变化情况。其中河谷中心的坐标为 0.5, 防渗墙右端部的坐标为 1.0。图中可见副防渗墙底部灌浆而防渗墙端部之间不灌浆封堵的情况, 副墙上承担的水头比例由中部向两端是显著减小的, 其他情况中部与两端差别不大, 说明两端灌浆封堵后防渗墙之间覆盖层内的渗流速度很小, 而副墙下部设置帷幕, 两端不设灌浆帷幕的情况绕渗严重。

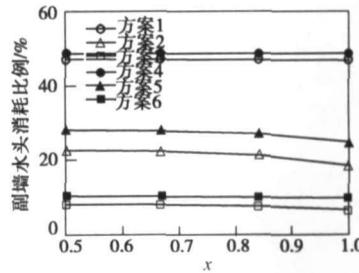


图 2 各方案副墙承担的水头比例

图 3 为方案①1986 m 高程水平剖面上的稳定渗流等水头线, 图 3 中水平轴 320 m 右侧为防渗墙两端之间垂直灌浆的部位, 从该处密集的等水头线可见灌浆起到了封堵渗流绕过副防渗墙两端进入防渗墙之间覆盖层的作用, 使副墙能有效分担水头。可见防渗墙端部两墙之间的灌浆封堵, 是有效减小两墙之间的绕流, 提高副墙水头分担比例的关键措施之一。

图 4 为方案①河谷中心铅直纵剖面稳定渗流等水头线, 从中可以清楚地看出两道防渗墙基本平均分担水头。

图 5、图 6 分别为方案②高程 1986 m 水平剖面和河谷中心纵剖面上的稳定渗流等水头线, 可见防渗墙两端不设封堵帷幕时, 副墙上承担的水头大为降低, 可见两端设

置封堵绕渗的帷幕与防渗墙下部设置帷幕对副墙有效分担水头同样重要。

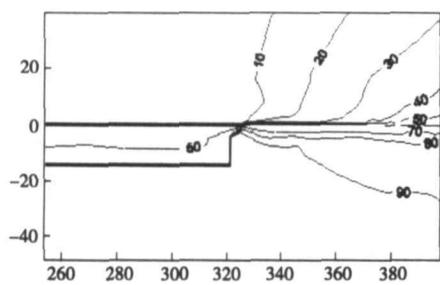


图3 方案①高程 1986 m 水平剖面稳定渗流等水头线/%

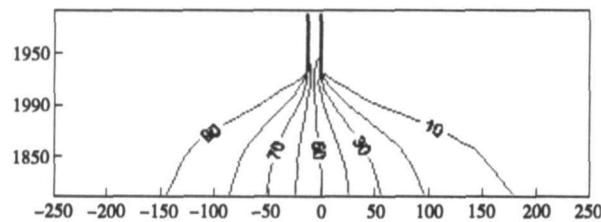


图4 方案①河谷中心铅直纵剖面稳定渗流等水头线/%

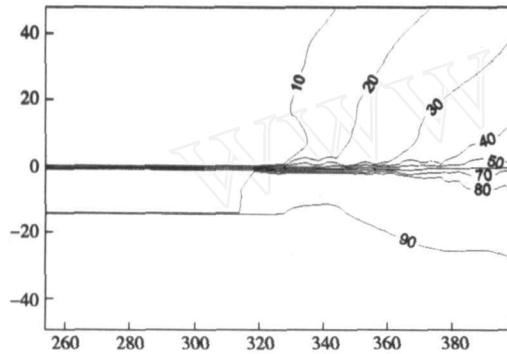


图5 方案②高程 1986 m 水平剖面稳定渗流等水头线/%

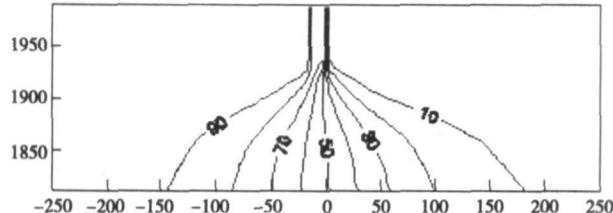


图6 方案②河谷中心铅直纵剖面稳定渗流等水头线/%

图7、图8分别为方案④高程 1986 m 水平剖面和河谷中心纵剖面上的稳定渗流等水头线, 和方案①类似, 两道防渗墙端部绕渗封堵帷幕中的水头降落很大, 起到了有效的绕流封堵作用。

从以上图表可知, 对于厚度相同、设置深度相同的两道防渗墙, 使副墙充分分担水头的关键, 是同时控制期底部绕流和两端绕流。

### 3 防渗墙厚度对水头承担比例的影响

表3为主墙厚度仍为 1.2 m, 而副墙厚度减小到 0.8 m

后, 有限元计算所得的各方案主、副墙与覆盖层水头承担比例, 与表2对比, 各方案副墙上承担的水头比例下降了0.1%~1.9%, 主副墙厚度同为1.2 m方案中副墙上承担的水头越小的方案, 水头承担比例变化越小。可见, 主副防渗墙上分别承担的水头比例, 取决于副墙底部和主副墙两端之间的灌浆情况, 而主副防渗墙本身的厚度, 对其上承担的水头比例影响很小。

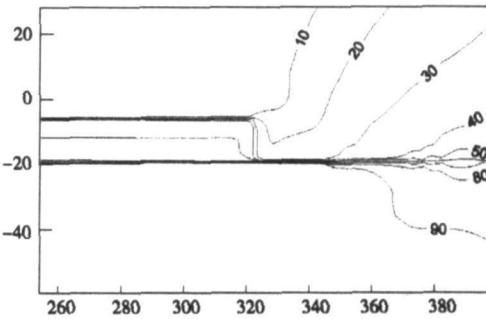


图7 方案④高程 1986 m 水平剖面稳定渗流等水头线/%

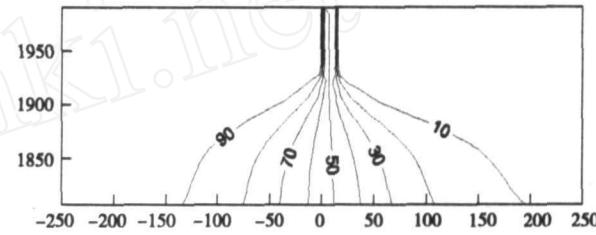


图8 方案④河谷中心铅直纵剖面稳定渗流等水头线/%

表3 副墙厚度 0.8 m 主、副墙与覆盖层水头承担比例

方案	①	②	③	④	⑤	⑥
副墙/%	45.4	22.3	8.1	46.8	28.3	10.3
主墙/%	52.8	75.8	89.6	51.7	70.2	87.6
覆盖层/%	1.8	1.9	2.3	1.5	1.6	2.1

### 4 两道墙上水头分担机理探讨

渗流场与电场是相似的, 因而可以利用电路图来探讨两道防渗墙上水头分担的机理, 并评估两道墙上水头承担的比例。电路图中的电阻相当于土体的透水能力的倒数, 电阻两端的压降相当于土体上承担的水头。图9为防渗墙承担水头比例电路分析, 图中  $R_{1a}$ 、 $R_{1b}$ 、 $R_{1c}$  分别指电流穿过第一道防渗墙的电阻、电流穿过灌浆体及其前后风化岩体进入两墙之间覆盖层的电阻、电流穿过灌浆体底部和两端岩体及其前后风化岩体进入两墙之间覆盖层的电阻,  $R_{2a}$ 、 $R_{2b}$ 、 $R_{2c}$  分别为第二道防渗墙对应部位的电阻。防渗墙两端的等效电阻是其各部位电阻并联后的阻值, 因而如果其底部或两端不灌浆, 这一部位的电阻就小, 这道防渗墙两端的电压就低, 所以这道防渗墙上的水头承担比例就小。而由于防渗墙本身的渗透系数小, 防渗墙本身减薄, 虽然防渗墙这一支路的电阻增加, 但对防渗墙两端的等效电阻的影响并不大, 因而防渗墙的厚度变化对水头承担比

例的影响不敏感。

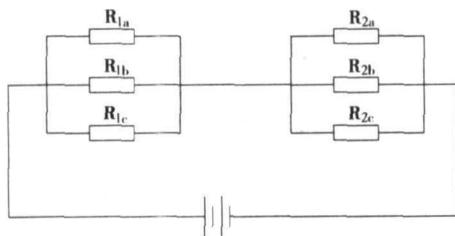


图 9 防渗墙承担水头比例电路分析图

## 5 结 论

从以上的分析可知, 设置两道防渗墙, 两道墙上水头承担的比例, 取决于防渗墙下部和两端的透水情况。副墙下部同样灌浆, 并灌浆封堵副墙两侧进入或流出两墙之间覆盖层内的绕流, 就可以使副墙有效的分担水头。当然, 由于各个工程的地质情况的差异, 响应方案两道墙上的水

头分担比例的数值会存在一定的差异, 需要结合具体情况通过有限元计算确定。

### 参考文献:

- [1] 刘杰. 混凝土防渗墙渗流控制几个问题实例分析[J]. 大坝观测与土工测试, 1992, 16(5):39 - 43.
- [2] 郭成谦. 论双排防渗墙的设计[J]. 水力发电, 1992(9): 18 - 22.
- [3] 程频. 国内混凝土防渗墙施工技术发展概述[J]. 水力发电, 1991(7): 37 - 38, 71.
- [4] 陈惠远. 土石坝坝基混凝土防渗墙的应力和变形[J]. 水力学报, 1990(4): 11 - 21.
- [5] 许国安, 武桂生. 混凝土防渗墙出现裂缝的渗流分析研究[J]. 水力发电, 1993(11): 31 - 35.
- [6] 殷昆亭, 傅文润. 防渗墙塑性混凝土原状样渗透特性试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(1): 88 - 91.