

深厚覆盖层土石坝渗流控制及三维数值分析

刘豪杰, 任杰, 杨杰, 程琳, 张晓飞
(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 深厚覆盖层地基和两岸坝肩绕坝渗漏的存在, 将影响水库的安全运行及水库工程效益的发挥, 有必要采取相应的防渗措施, 降低坝基及两岸坝肩的渗透流量。以某水库为例, 建立了能够准确反映该水库的主要地质构造、坝体及坝基几何形状的三维有限元分析模型, 考虑正常蓄水位下防渗墙厚度(0.6、0.8、1.0和1.2 m)、延长两岸坝肩(50、60、70和80 m)及地基⑥-2地层的深度(3、6、9、12和15 m)等方案, 从地下水位线等值线、渗透比降、渗透流量等方面研究坝基和两岸坝肩的渗流场特性及稳定性分析。通过增加防渗墙厚度、延长坝基及两岸坝肩的深度, 坝体、坝基及两岸坝肩内的地下水位等值线均向防渗墙处靠近, 防渗墙内水头损失增大; 坝体、坝基各分区及防渗墙的最大渗透比降满足渗流稳定性要求; 延长防渗墙深入两岸坝肩的深度能有效降低坝肩的渗透比降, 同时也能有效控制坝肩渗透流量, 降低墙后坝肩浸润面; 单纯改变防渗墙厚度并不能有效控制坝基渗透流量, 需加深防渗墙深入坝基的深度来控制坝基渗透流量。建立的某深厚覆盖层土石坝的三维渗流有限元数值模型, 进行了渗流控制方案的合理优化, 该研究可为我国深厚覆盖层土石坝渗漏及渗透稳定问题评价研究提供重要依据。

关键词: 深厚覆盖层; 土石坝; 防渗墙; 渗透比降; 渗透流量; 渗流控制; 三维数值模拟

中图分类号: TV223.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0219-06

The seepage control and three-dimensional numerical analysis of earth-rock dam on deep overburden foundation

LIU Haojie, REN Jie, YANG Jie, CHENG Lin, ZHANG Xiaofei

(Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The safety operation and the utilization of reservoir engineering benefits are significantly influenced by the existence of deep overburden foundation and the seepage dam leakage on both sides of the dam. Thus, it is necessary to take corresponding prevention measures to reduce the seepage discharge of dam foundation and dam abutment. The established three-dimensional finite element analysis of the case study can accurately reflect the main geological structure, dam body and dam foundation geometry. Considering the thickness of the cut-off wall at normal water level (0.6, 0.8, 1.0 and 1.2 m), extending the cross-strait abutment (50, 60, 70 and 80 m) and foundation ⑥-2 formation depth (3, 6, 9, 12 and 15 m), the seepage field characteristics and stability of the dam foundation and the abutment of the two sides are studied from the isoline of groundwater level, the seepage gradient and the seepage discharge. By increasing the thickness of the cut-off wall and extending the depth of the dam foundation and crossbar abutment, the distance between the groundwater level isoline of both sides of the dam and the cut-off wall decreases. Meanwhile, the head loss in the cut-off wall increases. The maximum percolation ratios of dams, dam foundations, and cutoff walls meet the requirements for seepage stability. Extending the depth of seepage walls deep into the abutments of both banks can effectively reduce the seepage ratio drop of abutments, and can also effectively control aquifer penetration and reduce the abutment surface of the abutment behind the wall. However, the changes on cut-off wall thicknesses cannot effectively control the seepage discharge of the dam foundation, and the depth of the dam foundation should be deepened to

收稿日期: 2017-09-11; 修回日期: 2017-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679194、51479168); 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2018JZ5010)

作者简介: 刘豪杰(1992-), 男, 新疆和硕人, 硕士研究生, 主要从事工程渗流特性分析与控制方法研究。

通讯作者: 任杰(1980-), 男, 河南信阳人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事工程渗流特性分析与控制方法研究。

control the seepage discharge of the dam foundation. The finite element numerical model of three-dimensional seepage is established to optimize the seepage control scheme. This study can provide important basis for the evaluation of leakage and seepage stability of deep overburden foundation dams in China.

Key words: deep overburden foundation; earth-rock dam; cut-off wall; seepage gradient; seepage discharge; seepage control; three-dimensional; numerical simulation

建在深厚覆盖层上的土石坝,其坝体、坝基以及两岸坝肩的渗流特性和稳定性分析一直是国内外相关学者所研究的工程科学问题。渗流控制方案的合理优化直接关系到水库大坝的正常运行与工程投资。深厚覆盖层是指堆积于河谷之中,厚度大于 30m 的松散堆积物,其岩层不连续,结构偏松散,且成因类型较复杂,物理力学性质不均匀,工程地质条件差,且透水性强,易造成水库渗漏及坝体破坏^[1-4]。我国现在已建水库中土石坝占总数的 90% 以上,其中由于渗漏而导致坝体失事的占总数的 29%^[2]。因此,对于以土石坝为主要坝型的水利工程,坝体、坝基及两岸坝肩渗漏及渗透稳定问题是研究坝体安全的重要组成部分。

深厚覆盖层土石坝防渗控制的主要措施有水平防渗、垂直防渗和联合防渗等,国内外很多学者针对土石坝的渗控结构优化做了大量的研究^[5-7]。沈振中等^[2]从防渗措施的角度出发,结合工程实例分析了深厚覆盖层上土石坝的防渗措施及优化方法,给出了防渗建议;任杰等^[8-9]建立了三维渗流有限元模型,研究了土坝和右坝肩的绕坝渗流场特性,分析了浸润面、地下水位分布、渗透坡降和渗透稳定性,确定了防渗处理范围,提出了满足要求的优化方案;谢兴华等^[10]以防渗墙局部渗透稳定为出发点,进行了深厚覆盖层坝基防渗墙深度研究;吕海东等^[11]通过建立三维渗流有限元模型,对左岸坝肩防渗墙延伸深度的方案进行了比较研究,得出随着延伸深度的增加,绕坝渗流流量有所减小,但差异并不显著;耿计计等^[12]根据工程实例研究了坝肩防渗墙深度与绕坝渗透特性改善之间的关系。同时还有一些学者考虑了土工膜的缺陷^[13]、周边采煤活动^[14]、防渗墙深度^[15-16]以及无限透水地基上防渗墙深度^[17-18]等对土石坝渗流场渗透特性的影响。上述研究均是针对单一防渗措施而进行的渗漏控制优化研究,并未综合考虑坝基及坝肩同时出现渗漏的问题而进行分析。

因此,坝体、坝基以及两岸坝肩的渗流场特性和稳定性分析需要寻求既能考虑多种控制方案又能快速求解的计算方法。COMSOL Multiphysics 软件由于在三维有限元数值模型建立和计算中具有建模快

速、后处理功能强大等优势被广泛用于各个行业之中。本文尝试应用 COMSOL Multiphysics 对土石坝及其渗控优化进行渗流特性和稳定性分析。基于 COMSOL Multiphysics 平台提供的渗流分析模块,结合某水库大坝工程,建立了三维渗流有限元数值模型,分析不同防渗墙厚度、深入坝基及两岸坝肩的深度对坝体、坝基以及两岸坝肩的渗流特性和稳定性进行分析。

1 工程概况

某水库是一座以供水及灌溉供水、抗旱应急等为主的水利枢纽。水库总库容为 $4.86 \times 10^6 \text{ m}^3$,有效库容为 $2.3 \times 10^6 \text{ m}^3$,水库校核洪水位 1 209.03 m,设计洪水位 1 208.50 m,正常蓄水位 1 207.00 m。水库大坝采用均质土坝,坝顶高程 1 208.80 m,坝基高程 1 193.80 m,最大坝高 16.20 m,坝顶长 275.11 m,坝顶宽 5.00 m。

上游坡比为 1:3,设混凝土护坡;下游坝坡为 1:2.5,在高程 1 203.00 m 处设置宽 1.50 m 的马路,下游坝脚设堆石棱体排水。坝基垂直防渗采用塑性混凝土防渗墙,防渗墙深入坝体 1 m,深入⑥-2 地层 3 m。坝基的覆盖深厚层主要地层岩性为:

(1)粗砂、砾卵石层,厚度为 5.0~11 m,分布于河床、漫滩及一级阶地上,渗透率 $k = 4.9 \times 10^{-12} \text{ m}^2$,为中等透水性。

(2)坝区河谷两岸由细砂夹薄层壤土组成,厚度为 15~28 m,渗透系数 $k = 9.08 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 。

(3)坝基下部以长石、石英、云母为主,稍密~中密,厚度大于 35 m。其中上部⑥-1 层渗透率 $k = 3.42 \times 10^{-12} \text{ m}^2$,下部⑥-2 层渗透率 $k = 2.86 \times 10^{-13} \text{ m}^2$,均为中等透水性。

2 模型建立

2.1 数值模拟

计算坐标原点取大地坐标 $x = 36591113.38 \text{ m}$, $y = 4180365.17 \text{ m}$ 。 x 轴与坝轴线平行,右岸指向为正; y 轴垂直坝轴线,指向下游为正; z 轴为垂直方向,向上为正。上、下游边界至坝轴线 100.00 m。坝左边界至原点 69.00 m,坝右边界至原点 390.00

m。本模型沿河流方向(x 方向)长 200.00 m,垂直河流方向(y 方向)宽 459.00 m。铅直方向取 1 193.80 m 为基准面,正方向最大高度为 45.68 m,负方向最大深度 44.32 m。图 1 为计算模型截取范围及主要剖面位置。

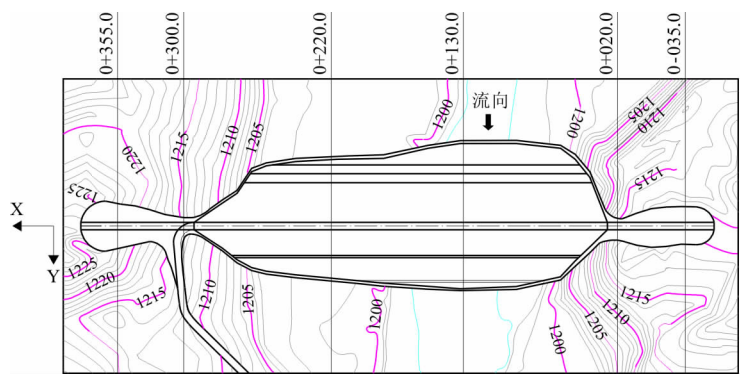


图 1 计算模型范围和主要剖面位置(单位:m)

稳定渗流分析的边界类型有以下 3 种:(1)已知水头边界包括上游水位、下游水位以及底高程以上的坝体截取边界;(2)出渗边界为坝体两侧上下游水位以上的截面;(3)不透水边界包括坝体左右两截取边界及模型底面。

2.2 计算参数

根据水库的工程地质和水文地质资料,假定材料各向同性,各区允许渗透比降和渗透率的取值情况如表 1 所示。

表 1 计算模型各分区的材料参数

分区	深度 /m	允许渗透比降	渗透率/ m^2
大坝		0.65	4.44×10^{-14}
防渗墙	80 ~ 100		1.02×10^{-16}
排水棱体			1.02×10^{-11}
两岸坝肩		0.25	9.08×10^{-13}
河床、漫滩及一级阶地	11.67	0.15	4.90×10^{-12}
⑥-1 地层	14.50	0.22	3.42×10^{-12}
⑥-2 地层	24.40	0.22	2.86×10^{-13}

2.3 计算方案

针对坝基及两岸坝肩的渗漏问题,本文拟定了 12 个方案进行三维渗流有限元计算分析,方案如表 2 所示。各个计算方案中坝基与坝体两岸防渗墙连接在一起,构成封闭的防渗体系。正常蓄水位为上游水位 1 207.00 m,下游无水;通过改变防渗墙厚度、深入地层⑥-2 及两岸坝肩深度,分析坝体、坝基以及两岸坝肩的渗流特性。

依据建立的地质模型,采用 COMSOL Multiphysics 软件对计算模型进行剖分。网格剖分采用软件自带的功能进行,计算模型共剖分 1 001 747 个域单元,99 224 个边界单元。计算模型网格单元剖分如图 2 所示。

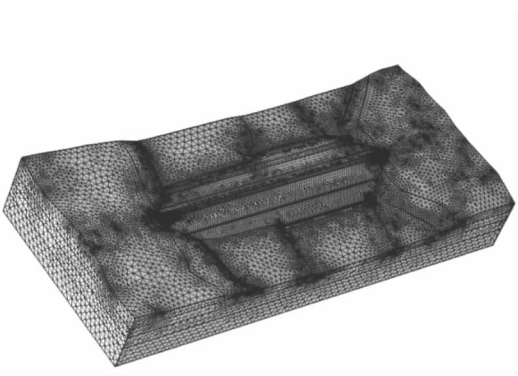


图 2 计算模型有限元网格

表 2 稳定渗流分析计算方案

方案	说明	防渗墙厚度	防渗墙深度	
			深入坝基⑥-2 层深度	深入两岸岸深度
方案 1	正常蓄水位	0.6	3	0
方案 2	正常蓄水位	0.6	3	50
方案 3	正常蓄水位	0.6	3	60
方案 4	正常蓄水位	0.6	3	70
方案 5	正常蓄水位	0.6	3	80
方案 6	正常蓄水位	0.6	6	50
方案 7	正常蓄水位	0.6	9	50
方案 8	正常蓄水位	0.6	12	50
方案 9	正常蓄水位	0.6	15	50
方案 10	正常蓄水位	0.8	3	50
方案 11	正常蓄水位	1.0	3	50
方案 12	正常蓄水位	1.2	3	50

3 计算结果分析

3.1 地下水位等值线分布

图 3 为防渗墙深入两岸坝肩不同深度时地下水位等值线分布图,以左岸坝肩为例进行研究。由图 3 可知:坝肩防渗墙附近地下水等值线密集分布,且防渗墙内部水头发生骤降,表明防渗墙内部水头损失有较大骤降;随着防渗墙深入两岸坝肩的深度的增加,从 50 m 增加到 80 m,地下水等值线逐渐向防渗墙靠拢,说明防渗墙内部水头损失逐渐加大,且能

有效降低墙后地下水位等值线。因此,在坝肩设置防渗墙能有效控制水头损失并能在较大程度上影响地下水位等值线的分布。

以防渗墙深入两岸坝肩深度 50 m 的情况下,分析防渗墙厚度及深入坝基深度加大的地下水位等值线分布(图 4、5)可知:以剖面 0+130.00 和剖面 0-035.00 为例,当防渗墙厚度及深入⑥-2 地层深度增加时,地下水位等值线均向防渗墙处靠近,但由图 4 中可以看出,相比增加防渗墙厚度,加大防渗墙

深入坝基的深度对地下水位等值线分布的影响更加明显。说明加大防渗墙深入坝基的深度,防渗墙内部的水头损失更大。而图 4 与图 5 相比可以看出,改变防渗墙厚度及深入⑥-2 地层深度时,坝体最大剖面中的地下水位等值线分布变化相比坝肩剖面中地下水位等值线分布变化更加明显。说明在不改变防渗墙深入两岸坝肩深度的情况下,改变防渗墙厚度与防渗墙深入坝基的深度对于坝肩的地下水位等值线分布影响不大。

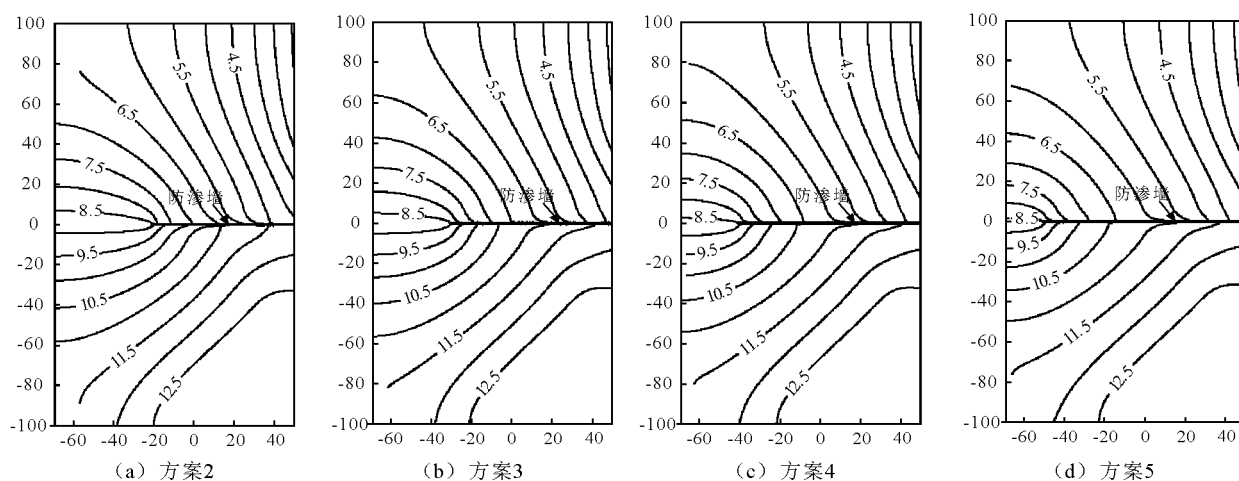


图3 Z=0(0+040~0-069)地下水位等值线(单位:m)

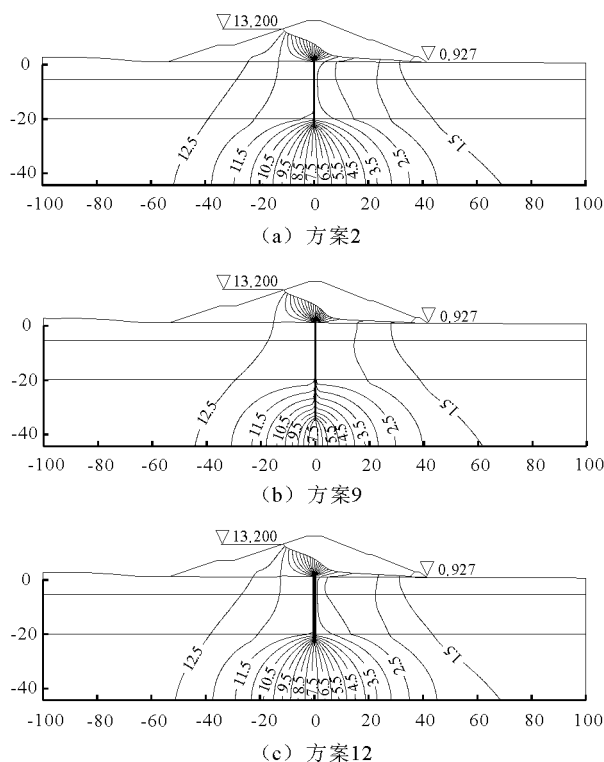


图4 剖面0+130.00地下水位等值线(单位:m)

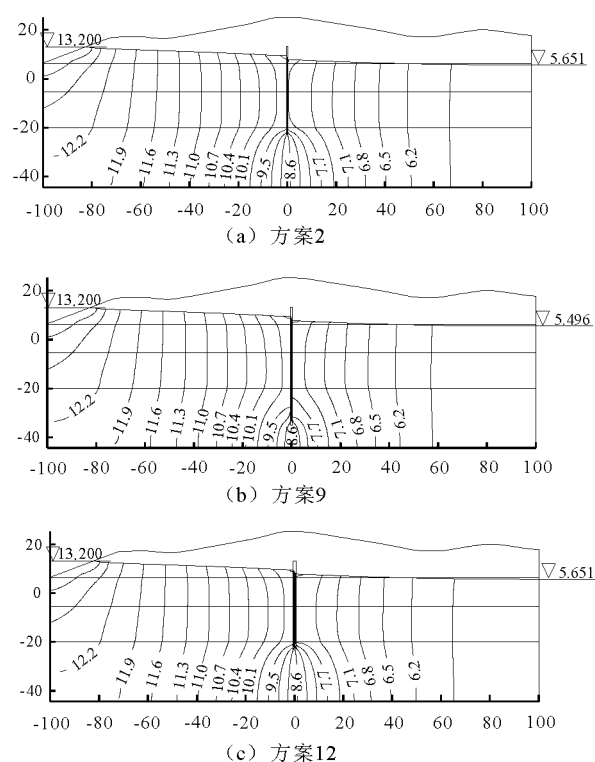


图5 左岸坝肩剖面0-035.00地下水位等值线(单位:m)

表 3 各方案浸润线计算结果 m

方案	防渗墙厚度 - 深入 两岸坝肩深度 - 深入 ⑥ - 2 地层深度	剖面 0 - 035.00m	
		上游最 高点	下游溢 出点
方案 2	0.6 - 50 - 3	13.200	5.651
方案 3	0.6 - 60 - 3	13.200	5.477
方案 4	0.6 - 70 - 3	13.200	5.304
方案 5	0.6 - 80 - 3	13.200	5.177
方案 6	0.6 - 50 - 6	13.200	5.585
方案 7	0.6 - 50 - 9	13.200	5.557
方案 8	0.6 - 50 - 12	13.200	5.525
方案 9	0.6 - 50 - 15	13.200	5.496
方案 10	0.8 - 50 - 3	13.200	5.640
方案 11	1.0 - 50 - 3	13.200	5.631
方案 12	1.2 - 50 - 3	13.200	5.622

表 3 为各个方案中左岸坝肩剖面 0 - 035.00 m 的浸润线上游最高点和下游溢出点较正常蓄水位变化的关系表。由表 3 数据可知,当防渗墙深入左岸坝肩的深度由 50 m(方案 2)增加到 80 m(方案 5)时浸润线最低点降低了 0.474 m。说明加大防渗墙深入两岸坝肩的深度,能有效降低墙后浸润面高度;在保持防渗墙深入坝肩深度为 50 m 的情况下,当防渗墙深入⑥ - 2 地层深度由 3 m(方案 2)到 15 m(方案 9)时,浸润线最低点降低了 0.155 m。说明增加防渗墙深入坝基的深度,能有效降低坝肩内墙后的浸润面高度。当防渗墙厚度由 0.6 m(方案 2)增加到 1.2 m(方案 12)时,浸润线最低点降低了 0.029 m。说明防渗厚度的增加,虽然也能降低坝肩内墙后的浸润面高度,但降低值较小。

综上所述,增加防渗墙深入坝肩的深度能有效降低坝肩内墙后浸润面的高度;而在保持防渗墙深入坝肩深度为 50 m 的情况下,相比增大防渗墙的厚度,加大防渗墙深入坝基的深度更能有效降低坝肩内防渗墙墙后浸润面的高度。

3.2 渗透比降分析

由表 4 可知:随着防渗墙深入两岸坝肩深度的增加(方案 1 ~ 5),两岸坝肩的渗透比降值逐渐变小,当防渗墙深入两岸坝肩深度达 80 m 时,两岸坝肩的渗透比降值达到最小,为 0.0208,说明加大防渗墙深入两岸坝肩的深度,能延长渗径,有效降低两岸坝肩渗透比降;而当防渗墙深入⑥ - 2 地层深度增加(方案 2 和方案 6 ~ 9),防渗墙及两岸坝肩的渗

透比降均有所增加,但两岸坝肩的渗透比降值变化不大,防渗墙内部渗透比降值由 9.51 变为 11.55,其余特征部位的渗透比降值均逐渐变小。说明增加防渗墙深入坝基的深度能有效降低坝基各地层的渗透比降,同时防渗墙内部的渗透比降有所升高,但对坝肩的渗透比降影响不大;当防渗墙厚度增加(方案 2,方案 10 ~ 12),防渗墙内部渗透比降逐渐降低,其余各特征部位除⑥ - 2 底层外渗透比降均有所降低,但其渗透比降值变化不大。说明改变防渗墙厚度能有效降低防渗墙内部的渗透比降,但对其他特征部位的渗透比降影响不大;坝体最大渗透比降出现在上游坝坡入渗点附近处,渗透比降为 0.485,且不随防渗墙厚度、深入坝基及两岸坝肩深度的增加而发生变化。

各方案中坝体各部位的最大渗透比降均小于允许渗透比降,因此坝体、坝基各分区及两岸坝肩渗透比降均满足渗透稳定性要求。

3.3 渗流量分析

该水库大坝坝址处多年平均径流量为 13375.34 m³/d,设计采用大坝坝基及两岸坝肩渗透流量的控制标准为多年平均径流量的 6.5%,即 869.397 m³/d。为了清楚地表述各计算方案渗流量的变化情况,并与设计标准比较,将其计算结果绘图,见图 6。

由图 6 可知:除方案 1 外,其余各方案计算得出的渗透流量均小于设计控制标准;随着防渗墙深入两岸坝肩的深度加大(方案 1 ~ 5),总渗透流量由 1 050.11 m³/d 减小到 769.11 m³/d,减小值为 281.00 m³/d,并且渗透流量的减少量与防渗墙深入两岸坝肩的深度呈线性变化。说明在坝肩两岸设置防渗墙能有效降低坝肩渗透流量;防渗墙深入⑥ - 2 地层深度增加(方案 1,方案 6 ~ 9),总渗透流量由 835.64 m³/d 减小到 725.16 m³/d,减小值为 109.48 m³/d,且防渗墙深入⑥ - 2 地层深度与渗透流量的减小量呈正相关。说明加大防渗墙深入坝基的深度是控制坝基渗透流量的有效措施;防渗墙厚度增加(方案 2,方案 10 ~ 12),渗透流量减小量与防渗墙厚度呈正比,但当防渗墙厚度由 0.6 m 增加到 1.2 m 时,总渗透流量仅从 826.23 m³/d 减小到 813.46 m³/d,减小值为 12.77 m³/d,说明增加防渗墙厚度并不能有效减低坝基渗透流量。

综上所述,在坝基及两岸坝肩设置防渗墙能有效控制渗透流量;当防渗墙厚度增加时,渗透流量虽逐渐变小,但是对渗透流量的影响不大,因此单纯依靠增加防渗墙厚度来控制坝基渗透流量的措施是不

可行的;当增加防渗墙深入两岸坝肩的深度时,能有效降低总渗透流量,且增加防渗墙深入两岸坝肩的

深度与渗透流量值的减小成正相关;加大防渗墙深入坝基的深度是控制坝基渗透流量的有效措施。

表 4 特征部位单元平均渗透比降最大值

方案	防渗墙厚度(m) – 深入两岸坝肩深度(m) – 深入⑥-2 地层深度(m)	防渗墙内部	河床、漫滩及一级阶地	两岸坝肩	⑥-1 地层	⑥-2 地层
方案 1	0.6 – 0 – 3	9.51	0.0402	0.0485	0.0331	0.0136
方案 2	0.6 – 50 – 3			0.0364		
方案 3	0.6 – 60 – 3			0.0296		
方案 4	0.6 – 70 – 3			0.0246		
方案 5	0.6 – 80 – 3			0.0208		
方案 6	0.6 – 50 – 6	9.94	0.0326	0.0368	0.0285	0.0134
方案 7	0.6 – 50 – 9	10.23	0.0276	0.0371	0.0250	0.0131
方案 8	0.6 – 50 – 12	10.45	0.0239	0.0373	0.0222	0.0127
方案 9	0.6 – 50 – 15	11.55	0.0207	0.0375	0.0190	0.0123
方案 10	0.8 – 50 – 3	7.21	0.0395	0.0364	0.0326	0.0136
方案 11	1.0 – 50 – 3	5.80	0.0387	0.0364	0.0322	0.0136
方案 12	1.2 – 50 – 3	4.88	0.0380	0.0365	0.0318	0.0136

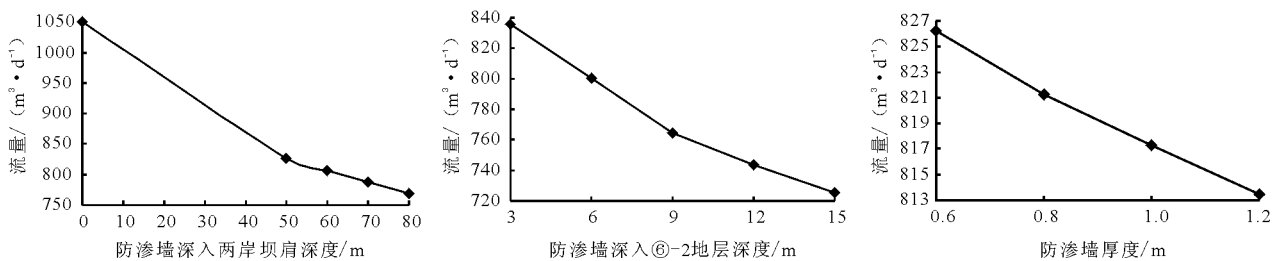


图 6 各方案渗透流量变化

4 结 论

本文尝试应用 COMSOL Multiphysics 软件,结合某水库大坝工程,对深厚覆盖层土石坝及其渗漏控制优化进行渗流特性和稳定性分析,得出以下规律和结论:

(1)通过改变防渗墙的厚度、深入坝基及两岸坝肩的深度均能影响地下水等值线的分布;随着防渗墙的厚度、深入坝基及两岸坝肩的深度增加,能使地下水位等值线向防渗墙处靠近,表明防渗墙内部水头损失加大;相比防渗墙的厚度及深入坝基的深度增加,加大防渗墙深入两岸坝肩的深度更能有效降低坝肩渗透比降,同时也能有效降低坝肩墙后的浸润面高度。

(2)通过改变防渗墙厚度、深入地层及两岸坝肩深度,均能有效降低坝基各地层内的渗透比降;加大防渗墙深入两岸坝肩的深度能有效降低坝肩的渗

透比降;随着防渗墙厚度的增加,墙内渗透比降值也逐渐降低,而随着防渗墙深入地层的深度增加,防渗墙内部渗透比降值有所增加;各方案中坝体、坝基各分区及防渗墙的渗透比降均能满足允许渗透比降。

(3)从渗透流量计算结果来看,通过改变防渗墙厚度、深入地层及两岸坝肩深度,均能有效降低坝基及两岸坝肩渗透流量,但单纯增加防渗墙厚度对降低坝基渗透流量的影响不大;改变防渗墙深入坝基的深度能有效降低坝基渗透流量。因此,增加防渗墙深入坝基的深度是控制坝基渗透流量的有效措施;加大防渗墙深入两岸坝肩的深度是解决坝肩绕渗的有效措施,能有效降低两岸的绕渗流量。

参考文献:

- [1] 郭江涛, 张爱军. 深厚覆盖层上土石坝的渗流控制方案研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012,30(20):181 – 187.

(下转第 228 页)

峰值对应的 P_5 含量为 70%, 而现场试验最大干密度峰值对应的 P_5 含量为 80%, 随着粗粒料粒径的增大, 最优 P_5 含量不断增大。

(2) 根据室内模型级配料的干密度、最小干密度和现场实测最小干密度来推求现场原型级配料最大干密度的方法有一定的借鉴意义, 但并不具有普适性, 施工质量的控制指标还应该以现场碾压试验结果为依据, 并加强施工期间的施工质量控制管理。

参考文献:

- [1] 翁厚洋, 朱俊高, 余挺, 等. 粗粒料缩尺效应研究现状与趋势[J]. 南京: 河海大学学报, 2009, 37(4): 425 - 429.
- [2] 杨建明, 刘录录, 杨海华. 白杨镇水库混凝土面板坝坝料碾压试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4): 237 - 240.
- [3] 吕立新, 焦恩东. 土石坝坝体填筑料料场选择、试验与施工[J]. 吉林水利, 2008(12): 42 - 46.
- [4] 徐拥军. 浅谈碾压式土石坝填筑常见问题的预防处理措施[J]. 建筑与工程, 2011(17): 303.
- [5] 谢定松, 蔡红, 魏迎奇, 等. 粗粒土渗透试验缩尺原则与方法探讨[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 369 - 373.
- [6] 朱晟. 粗粒筑坝材料现场压实质量的控制标准研究[J]. 水力发电, 2011, 37(12): 22 - 26 + 30.
- [7] 朱晟, 王永明, 翁厚洋. 粗粒筑坝材料密实度的缩尺效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 348 - 357.
- [8] 张少宏, 康顺祥, 骆亚生. 分段法确定无黏性超粒径粗粒土最大干密度[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(3): 51 - 53.
- [9] 郭庆国, 刘贞草. 超粒径粗粒土最大干密度的近似测定方法[J]. 水利学报, 1993(10): 70 - 78.
- [10] 史彦文. 大粒径砂卵石最大密度的研究[J]. 土木工程学报, 1981(2): 53 - 58.
- [11] 何建新, 刘亮, 张敬东. 超粒径粗粒土现场干密度确定方法[J]. 人民黄河, 2012, 34(2): 121 - 122 + 125.
- [12] 田树玉. 用渐近线辅助拟合法确定大粒径砂卵石最大干容重[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(1): 35 - 43.
- [13] 田树玉, 史彦文. 测定粗粒料最大密度之 HUMPHREY 公式的校正[J]. 水力发电学报, 1994(1): 28 - 34.
- [14] 向尚君, 赵兴安, 邱焱兴, 等. 旁多水利枢纽砂砾石坝壳料现场碾压质量控制曲线[J]. 水利水电科技进步, 2011, 31(3): 92 - 94.
- [15] 中华人民共和国水利部. SL237 - 1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [2] 沈振中, 邱莉婷, 周华雷. 深厚覆盖层上土石坝防渗技术研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 27 - 35.
- [3] 许强, 陈伟, 张倬元. 对我国西南地区河谷深厚覆盖层成因机理的新认识[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 448 - 456.
- [4] 白勇, 柴军瑞, 曹镜英, 等. 深厚覆盖层地基渗流场数值分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(S1): 90 - 94.
- [5] 王正成, 毛海涛, 姜海波, 等. 基于流固耦合的坝基中弱透水层对渗流的影响分析[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2017, 32(3): 316 - 324.
- [6] 李铎, 白云, 魏爱华. 基于三维渗流模拟的坝基渗漏和渗透稳定分析——以哇沿水库为例[J]. 水文, 2016, 36(5): 46 - 49 + 78.
- [7] ATHANI S S, SHIVAMANTH, SOLANKI C H, et al. Seepage and stability analyses of earth dam using finite element method[J]. Aquatic Procedia. 2015, 4: 876 - 883.
- [8] 任杰, 沈振中, 王谊, 等. 哈达山水利枢纽右岸三维渗流场特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2010(3): 89 - 94.
- [9] 任杰, 沈振中, 王谊, 等. 哈达山水利枢纽右岸渗流控制优化方案研究[J]. 水力发电, 2010, 36(8): 28 - 30 + 89.
- [10] 谢兴华, 王国庆. 深厚覆盖层坝基防渗墙深度研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2708 - 2712.
- [11] 吕海东, 王瑞骏, 李章浩, 等. 深厚砂层坝肩绕坝渗流规律及防渗方案研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(12): 215 - 220.
- [12] 耿计计, 王瑞骏, 赵一新. 土石坝绕坝渗流分析方法及防渗措施研究[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5): 77 - 81.
- [13] 岑威钧, 和浩楠, 李邓军. 土工膜缺陷对土石坝渗流特性的影响及控制措施[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 61 - 65 + 71.
- [14] 王卓然, 武雄. 周边采煤活动对岳城水库库区大坝和坝基的渗流影响研究[J]. 地学前缘, 2018, 25(1): 276 - 285.
- [15] 温立峰, 范亦农, 柴军瑞, 等. 深厚覆盖层地基渗流控制措施效果数值分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 127 - 132.
- [16] 黄梅琼, 柴军瑞, 白勇, 等. 深覆盖层地基防渗措施对渗流场影响数值分析[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(10): 126 - 128.
- [17] 毛海涛, 何华祥, 邵东国. 无限深透水坝基上悬挂式防渗墙控渗试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2014(4): 44 - 51.
- [18] 哈丽木热木·阿布都热西提, 侍克斌, 李玉建. 非均质无限深透水地基上土石坝微透水防渗墙的有限元渗流计算[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(6): 88 - 91.

(上接第 224 页)