

深厚覆盖层地基渗流控制措施效果数值分析

温立峰¹, 范亦农³, 柴军瑞^{1,2}, 王晓¹, 许增光¹

(1. 西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 西安 710048; 2. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 中国水电建设集团十五工程局有限公司, 西安 710068)

摘要: 结合某工程实例,应用有限元分析方法,分析了地基防渗墙深度、铺盖长度及覆盖层土体渗透性等因素对坝基渗流控制效果的影响。结果表明:覆盖层渗透系数较大时,覆盖层成为大坝渗流的主要通道,防渗墙只有完全截断覆盖层才能取得较好的防渗效果;当采用悬挂式防渗墙时,防渗墙深度取其覆盖层厚度之比为0.7左右时较为合理;单纯依靠铺盖不能有效控制覆盖层地基渗流;覆盖层渗透性是坝基渗流控制较敏感因素,其渗透系数大小及渗透各向异性均对大坝渗流场有一定影响。

关键词: 水工结构; 深厚覆盖层; 渗流控制; 数值分析; 面板堆石坝

中图分类号:TV139.14 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2014)01-0127-06

Numerical analysis on effect of seepage control measure for deep overburden foundation

WEN Lifeng¹, FAN Yinong³, CHAI Junrui^{1,2}, WANG Xiao¹, XU Zengguang¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Northwest Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Sinohydro Corporation Engineering Bureau 15 CO., Ltd, Xi'an 710068, China)

Abstract: Combining with a project example and using the finite element method, the paper systematically analyzed the impact of anti-seepage wall depth, blanket length and permeability of the overburden on the effect of seepage control. The computed result shows that when the permeability coefficient of overburden is relatively larger, the overburden becomes the main seepage channel and it will not achieve good anti-seepage results until the anti-seepage wall inserts into the relatively impermeable layer. When the hung-upside down imperious wall is used, the relative depth ratio between the anti-seepage wall and overburden is suggested as 0.7. The waterproof blanket can not effectively control seepage when the permeability coefficient of the overburden is relatively larger. The permeability of the overburden is a more sensitive factor of seepage control of dam foundation and whose size and permeability anisotropic have some impact on dam seepage field.

Key words: hydraulic structure; deep overburden; seepage control; numerical analysis; concrete face rockfill dam

1 研究背景

随着水利水电事业的不断深入发展,大坝建设过程中所面临的地质条件变得越来越复杂,众多大坝均修建在复杂坝基之上,深厚覆盖层便是一种典型的复杂坝基^[1],其广泛分布于我国西部地区,特

别是西南地区。在深厚覆盖层上建坝,坝基渗流及地基的渗透稳定是地基存在的主要问题^[2]。实践结果表明,工程的安全性很大程度上取决于是否进行了正确的渗流分析、采用了合理的渗流控制措施。

深厚覆盖层的渗流控制主要采取上游水平铺盖

收稿日期:2013-10-12; 修回日期:2013-11-13

基金项目:陕西省重点科技创新团队(2013KCT-015);陕西省自然科学基金项目(2013JQ7010);中国博士后科学基金(2013M540765)

作者简介:温立峰(1989-),男,江西赣州人,硕士研究生,主要从事水工渗流力学与数值仿真方面的研究。

通讯作者:柴军瑞(1968-),男,陕西眉县人,教授,博士生导师,主要从事水工结构、岩土体水力学方面的研究工作。

防渗和垂直防渗两种方法,很多专家学者均进行了相关的研究工作。毛昶熙等^[3]从理论的角度分析了悬挂式防渗墙控制管涌的发展;毛昶熙^[4]、张家发^[5]、周晓杰等^[6]分别进行了悬挂式防渗墙控制堤基渗透变形的砂槽模型试验,得出悬挂式防渗墙渗流控制效果不显著,但是对于抑制渗透变形的发展有着显著作用;谢兴华、王国庆^[7]从防渗墙底部局部渗透稳定的角度出发,进行了深厚覆盖层坝基防渗墙深度研究;蔡元奇、朱以文等^[8]对深厚覆盖层上堆石坝采用倒悬挂式防渗墙的长度和深度、覆盖层渗透性等因素对坝基渗流场的影响进行过相关研究。同时众多学者对无限深透水地基上土石坝防渗进行了有关研究^[11-13]。上述有关内容多是为解决某一特定问题而进行的某一方面的研究,未对覆盖层地基的防渗进行系统分析。为了系统分析深厚覆盖层上大坝基础的合理渗流控制措施以及这类地基上坝体和坝基的渗流场分布规律。本文从某实际工程中概化分析模型,采用三维有限元算法,设计计算工况,系统分析覆盖层防渗墙深度、覆盖层铺盖长度、覆盖层土体渗透性等因素对坝基渗流控制效果

的影响,得出深厚覆盖层坝基渗流控制的一些有益结论以及大坝渗流场分布的有关规律。

2 计算模型和参数

2.1 工程概况

某水电站混凝土面板堆石坝坝顶长 348.20 m,坝顶宽 10.0 m,最大坝高 111 m,上游坡度 1:1.4,下游局部坡度 1:1.35 和 1:1.4,下游综合坡比 1:1.55。坝顶设有高度为 5.2 m 的“L”型防浪墙与面板相接,坝顶高程 805.0 m。坝址地处高山峡谷地区,河谷呈“V”型,山势陡峻。河床覆盖层一般厚 88~112 m。两岸山体高出河水位 400 m 以上,岸坡角 42°~45°。坝址区河床基本无强风化,两岸强风化分布较少,一般小于 5 m。弱风化岩体河床深度一般 6~15 m,两岸 30~40 m。河床覆盖层厚度 44~48 m,其中表部水库淤积层厚约 2~4 m,上部含碎石块石砂卵石层厚 6~20 m,中部砂卵石层厚 12~15 m,是河床覆盖层的主体层;底部含块碎石的砂卵石层厚 5~10 m。

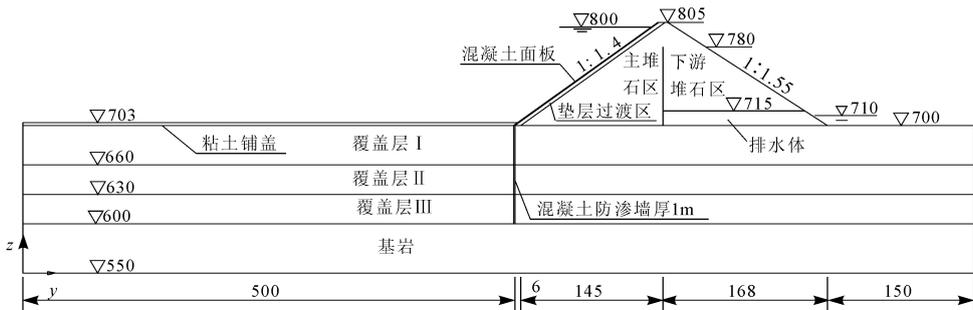


图1 模型概化图(单位:m)

2.2 计算模型

模型坝轴线剖面概化图见图1。建立有限元分析模型的坐标系取左岸指向右岸为 X 轴正方向、上游指向下游为 Y 轴正方向、由下到上为 Z 轴正方向。计算选取范围为:计算模型沿坝踵向上游取 500 m、坝趾向下游取 150 m,两岸坝肩向左右岸分别延伸 100 m,左岸坡脚取 45°,右岸坡脚取 40°。河床覆盖层总共取 100 m(分3层, I、II、III层依次取 40、30、30 m),基岩取 50 m,防渗墙厚取为 1 m。为了简化计算,将过渡区和垫层简化为一个分区,厚度取 6 m。整体模型 X 、 Y 、 Z 尺寸为 548 m × 970 m × 255 m。使用空间 8 节点 6 面体等参单元对模型进行网格剖分,共剖分单元总数 22880,节点总数 26090,三维有限元分析网格见图2。

计算模型的边界条件如下:模型坝基底面、上下游侧面及左右岸侧面按不透水边界考虑,上游库水位以下地表边界及上游坝面按已知水头边界考虑,按正常蓄水位施加,模型中大坝上游水深取为 100 m,以坐标原点为基准点,上游施加总水头值为 250 m。下游水位以下地表边界及下游坝面按已知水头边界考虑施加总水头值为 160 m。

2.3 计算参数

根据工程实际的试验结果并类比其它工程资料,模型各分区材料渗透系数取值见表1。进行覆盖层渗透系数敏感性分析时,各覆盖层的渗透系数取相同值且假设从 1×10^{-6} m/s 逐渐增大到 5×10^{-4} m/s。

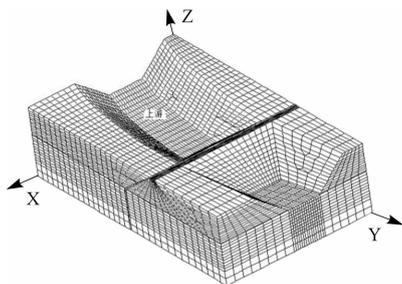


图 2 三维有限元分析网格

表 1 各区材料渗透系数 m/s

序号	材料名称	渗透系数	允许渗透坡降
1	面板	1.0×10^{-12}	
2	垫层过渡料	1.0×10^{-5}	
3	主堆石体	3.2×10^{-3}	
4	下游堆石体	1.9×10^{-3}	
5	排水体	5.0×10^{-2}	
6	两岸山岩	2.0×10^{-7}	
7	覆盖层 I	$4.6 \times 10^{-4} \sim 6.9 \times 10^{-4}$	0.10 ~ 0.20
8	覆盖层 II	$4.6 \times 10^{-4} \sim 5.8 \times 10^{-4}$	0.20 ~ 0.40
9	覆盖层 III	$4.6 \times 10^{-4} \sim 5.8 \times 10^{-4}$	0.20 ~ 0.40
10	粘土铺盖	1.0×10^{-8}	
11	防渗墙	1.0×10^{-9}	
12	基岩	2.0×10^{-7}	

2.4 计算工况

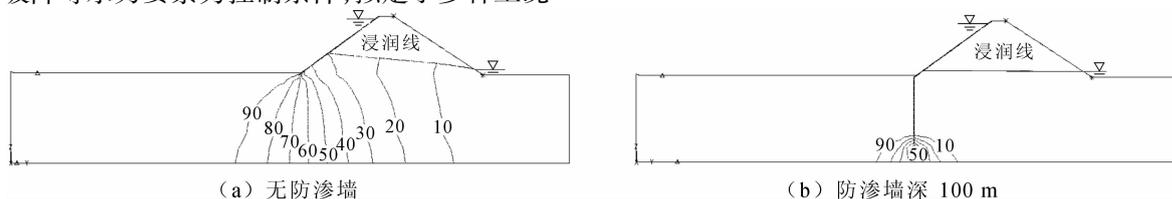
由于坝基渗流控制的主要目的是确保坝基的渗透稳定和控制坝基的渗透流量。因此,为了全面分析建于深厚覆盖层上大坝坝基的合理渗流控制措施以及这类地基上坝体和坝基的渗流场分布规律。本文主要以大坝水头分布、大坝的渗流量、特征部位的水力坡降等水力要素为控制条件,拟定了多种工况

对模型进行三维渗流有限元计算分析。分析防渗墙以及铺盖的渗流控制效果时,为不失一般性,从覆盖层的渗透系数范围内取 3 组不同的值(3 组中 I、II、III 各层渗透系数分别取为:第一组 5×10^{-4} 、 4.6×10^{-4} 、 4.8×10^{-4} m/s ,第二组 5.5×10^{-4} 、 5.2×10^{-4} 、 5.4×10^{-4} m/s ,第三组 6.9×10^{-4} 、 5.8×10^{-4} 、 5.8×10^{-4} m/s)分别计算防渗墙深度从 0 m 增加到 100 m 以及铺盖长度从 0 m 增加到 450 m 各种工况下的各水力要素;进行覆盖层渗透系数敏感性分析时,取各覆盖层渗透系数相同,计算其从 1×10^{-6} m/s 逐渐增大到 5×10^{-4} m/s ,同时防渗墙深度从 0 m 增加到 100 m 各工况的结果;分析覆盖层渗透各向异性对渗流场影响时,取各覆盖层的渗透系数相同且水平方向系数 $k_x = k_y = 5 \times 10^{-4}$ m/s 不变,分别控制 k_y / k_z 等于 1、5 和 10 模拟覆盖层渗透各向异性程度,进行防渗墙深度为 70 m 时的渗流计算。

3 计算结果与分析

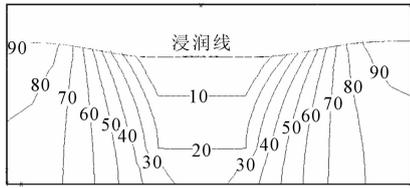
3.1 垂直防渗墙深度对防渗效果的影响

分别计算得覆盖层取 3 组不同渗透系数时,防渗墙深度从 0 增加到 100 m 时的水头等值线、坝基渗流量以及大坝特征部位的水力坡降。图 3 和图 4 分别为覆盖层取第一组渗透系数时,无防渗墙及防渗墙深为 100 m 时,模型 $X = 230$ m 及 $Y = 654$ m (坝轴线)剖面处的水头等值线。图 5 为通过坝基的渗流量与防渗墙深度之间的关系曲线。图 6 大坝特征部位水力坡降与防渗墙深度之间的关系曲线。各图中第一组系数、第二组系数、第三组系数分别指覆盖层取对应的三组不同的渗透系数。

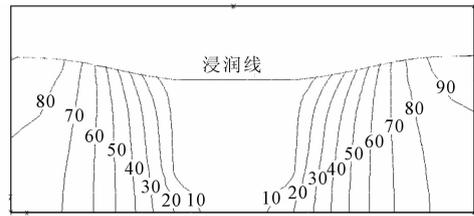
图 3 $X = 230$ m 横剖面水头等值线图(单位:%)

由图 3 和图 4 可以看出,防渗墙附近水头差最大,水头等值线最密,离开防渗墙后水头等值线逐渐变疏。防渗墙消杀水头作用明显,当防渗墙深为 100 m(到达基岩)时,总水头基本被防渗墙消杀。同时,防渗墙越深水头等值线越向防渗墙靠拢,底端水头线越密集,因此防渗墙底部覆盖层水力坡降将会较大,此部位容易发生渗透破坏,特别是采用悬挂

式防渗墙时,此部位安全储备较低,应特别注意对其进行防护。同时,两岸具有较明显的绕坝渗流,且左右岸水头消杀效果有所差异,这是进行二维渗流计算所无法体现的。由图 4 还可以看出,采用防渗墙后,坝体浸润线明显降低,说明防渗墙对降低坝体浸润线有一定作用,有利坝坡稳定。其它 2 组覆盖层渗透系数下的计算结果均得到相同规律。



(a) 无防渗墙



(b) 防渗墙深 100 m

图4 坝轴线剖面水头等值线图(单位:%)

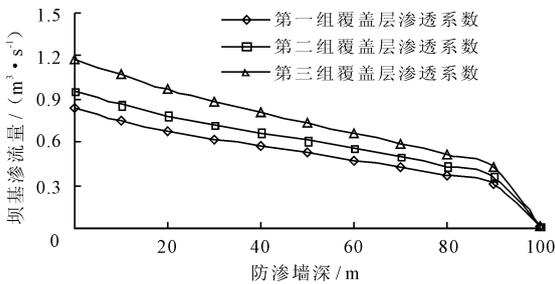
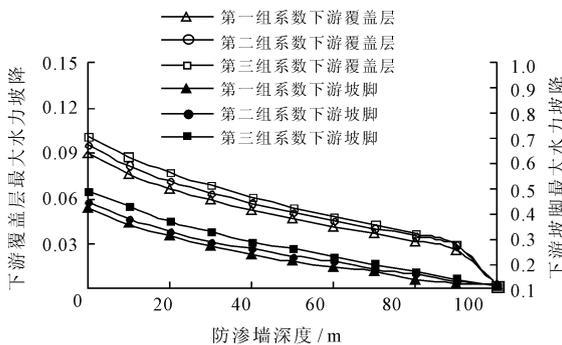
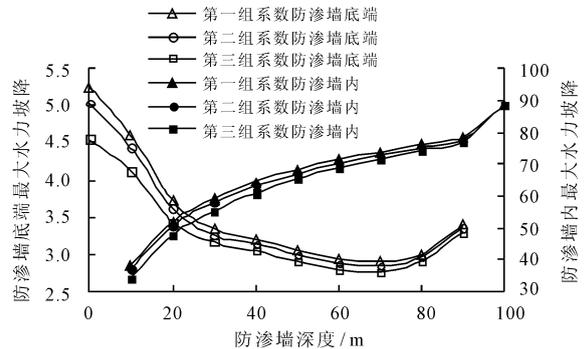


图5 坝基渗流量与防渗墙深度关系曲线

由图5可以看出,防渗墙未达相对不透水层之前,通过坝基的渗流量随防渗墙深度的增加而相应的减少,但减少幅度有限,防渗墙平均每增加10 m,各组流量均减少 $0.058 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右。而当防渗墙达到相对不透水层后各组渗透系数下渗流量骤减为 $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,相对无防渗墙减少量达97.75%,对比各组不同覆盖层渗透系数的结果可知覆盖层渗



(a) 覆盖层及坡脚最大水力坡降



(b) 防渗墙底端及防渗墙内最大水力坡降

图6 大坝特征部位水力坡降与防渗墙深度关系曲线

由图6(b)可知,防渗墙底端的最大水力坡降呈现随防渗墙深度先减少后增加的规律,当防渗墙深为70 m时坡降达最小值,此时防渗墙深度与覆盖层厚度之比为0.7,计算所得结果与文献[12]相关结果基本相似。由前述分析可知,只要防渗墙未截断相对不透水层,其控制渗流量及下游坡脚最大水力坡降的效果均不明显,对保护下游覆盖层的稳定均有一定的效果。因此,若采用悬挂式防渗墙进行渗

透系数越大效果越明显。结果表明,当覆盖层的渗透系数较大时,防渗墙只有完全截断覆盖层,才能够取得较好的控制渗流量的效果。因此,实际工程中,当覆盖层渗透系数相对较大且对水量损失有较高要求时不宜采用悬挂式垂直防渗措施。

由图6(a)可以看出,坝体和坝基逸出点的最大水力坡降随防渗墙深度的增加而逐渐减小,但在防渗墙未达相对不透水层之前,两者坡降的减小幅度不大。其中,当防渗墙到达相对不透水层时,下游坡脚最大水力坡降仍然较大,说明在实际工程中采用下游排水体及排水沟等必要的保护措施是很有必要的,而覆盖层出水点最大水力坡降由原来的0.1降低到0.0025,能够很好地满足稳定的要求。同时,由3组不同覆盖层渗透系数的计算结果可知,覆盖层渗透系数越大,对下游坡脚及覆盖层的稳定越不利。

流控制时,可以从防渗墙底渗透稳定的角度来确定最优的防渗墙深度。因此,防渗墙并不是越深越好,其深度取其覆盖层厚度之比为0.7左右时较为合理。由图6(b)还可看出,防渗墙内的最大平均水力坡降均也随防渗墙的增加而增大,当防渗墙到达相对不透水层时,防渗墙所承受的最大水力坡降为达88。因此,严格地把握防渗墙的设计、施工程序和质量对于整体的防渗也是非常重要的。

3.2 水平铺盖长度对防渗效果的影响

计算得覆盖层分别取 3 组不同渗透系数,铺盖长度从 0 增加到 450 m (4.5 倍上游水头) 时,通过坝基的渗流量与铺盖长度之间的关系曲线见图 7。图 8 为大坝特征部位水力坡降与铺盖长度之间的关系曲线。

由图 7 可以看出,随着铺盖长度的增加,通过坝基的渗流量相应减小,但减小的幅度并不大,即使铺盖长度为 450 m (4.5 倍上游水头) 时,渗流量仍然较大,继续延长铺盖长度,坝基渗流量基本没有变化。说明当覆盖层的渗透系数较大时,延长铺盖长度具有一定的防渗作用,但它并不能有效地控制渗

流量,当铺盖长度到达某一长度后(如 4 倍上游水头),继续延长铺盖,其防渗效果并不明显。计算的各项覆盖层渗透系数下的结果均相似。

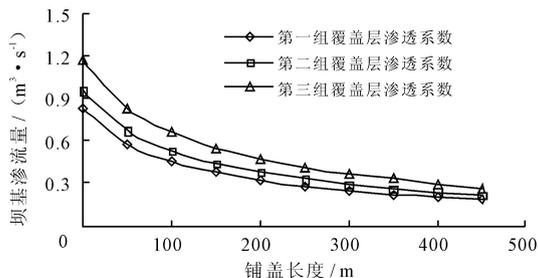
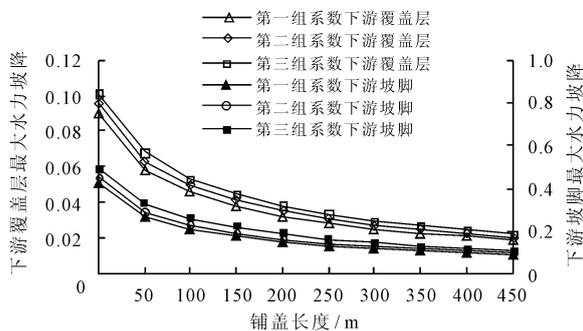
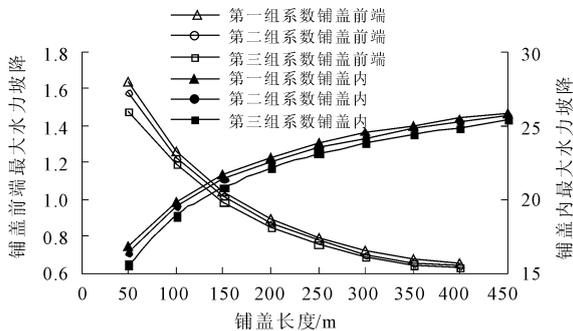


图 7 坝基渗流量与铺盖长度关系曲线



(a) 覆盖层及坡脚最大水力坡降



(b) 覆盖前端及铺盖内最大水力坡降

图 8 大坝特征部位水力坡降与铺盖长度关系曲线

由图 8 可以看出,随着铺盖长度的增加,坝体和坝基逸出点的最大水力坡降均随之减少,其中下游坡脚最大水力坡降减少幅度有限,铺盖长度即使延伸到 450 m 时,其坡降为 0.1 左右,仍然有较大可能发生渗透破坏,而下游覆盖层最大水力坡降降低较明显,能基本满足其渗透稳定要求。说明当覆盖层采用铺盖进行防渗时,铺盖取到一定长度时对保证下游覆盖层的稳定有一定功效,但需要注意加强下游坡脚的保护措施。由图 8(b) 还可看出,铺盖前端的最大水力坡降随着铺盖延长有较大的减小,采用铺盖防渗时,这一部位较容易达到稳定要求。对于铺盖中最大的水力坡降,它随铺盖长度增加有一定增大。

3.3 覆盖层渗透系数敏感性分析

计算获得不同防渗墙深度情况下,不同覆盖层渗透系数与通过坝基渗流量之间的关系曲线见图 9。由图 9 可知,随着覆盖层渗透系数的增加,通过坝基的渗流量也随着增加。覆盖层渗透系数 $k = 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 为覆盖层渗透性相对大小的一个分界值,当覆盖层渗透系数小于 $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 时,各个防渗墙深度下流量变化曲线基本没有变化,而当 $k > 1$

$\times 10^{-5} \text{ m/s}$ 时,曲线明显出现拐点,流量有较大的变化。

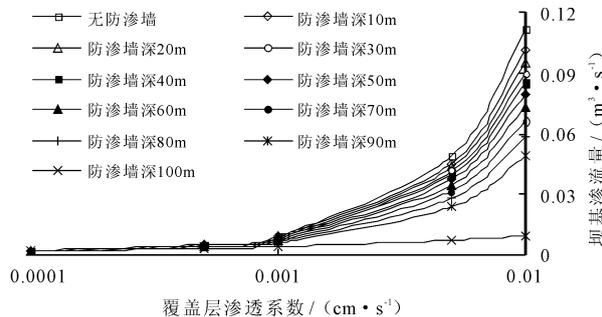


图 9 坝基渗流量与覆盖层渗透系数关系曲线

可以得出,当覆盖层渗透系数相对较大即 $k > 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 时,只要防渗墙未达到相对不透水层,通过坝轴线的总渗流量均较大,此时覆盖层渗透性对通过坝基的渗流量起控制作用,覆盖层成为渗流的主要通道,而当覆盖层渗透系数相对较小时,各工况下通过坝轴线总渗流量都相对较小,覆盖层渗透性不再对渗流量起控制作用。同时,覆盖层渗透系数对其它渗流水力要素的影响,均无对渗流量的影响明显,说明覆盖层渗透性大小对大坝渗流量影响

较大。当覆盖层渗透系数较大时,应采取严格的地基渗流控制措施,而当覆盖层渗透系数相对较小时,覆盖层地基较容易满足防渗要求,在实际工程中采取何种地基处理措施,应依实际情况具体分析而定。

3.4 覆盖层渗透各向异性对防渗效果的影响

天然地基中,覆盖层的渗透性是不可能达到各向同性的,总是会呈现渗透各向异性。根据前面分析的有关结论,计算防渗墙深度为70 m时,覆盖层水平渗透系数取 5×10^{-4} m/s且与垂直渗透系数的比值取为1、5、10时坝基渗流量、特征部位的水力坡降等有关水力要素,计算结果见表2。

表2 水力要素计算结果 m^3/s

k_y/k_z	坝基	下游坡脚最	下游覆盖层	防渗墙底端
	渗流量	大水力坡降	最大水力坡降	最大水力坡降
1	0.47	0.031	0.02	2.84
5	0.36	0.029	0.014	3.09
10	0.33	0.018	0.01	3.19

由表2可见,随着覆盖层渗透各向异性程度的加大,坝基渗流量有所减少,但减少的幅度不大, $k_y/k_z = 10$ 时相对于 $k_y/k_z = 5$ 渗流量减少仅为8.3%。坝体浸润线的高度、各特征部位的最大水力坡降随着各向异性程度的加大也在随着减少,但是它们的变化均不是很大,其中 $k_y/k_z = 5$ 相对于 $k_y/k_z = 1$ 时下游坡脚和防渗墙底端的最大水力坡降相对减少量分别为6.5%和8.8%。因此,当防渗墙插入覆盖层较深时,考虑覆盖层渗透各向异性时各水力要素与不考虑覆盖层渗透各向异性时的相应结果相差不大,而且实际工程中覆盖层渗透各向异性的系数又较难获取,故在进行渗流计算时,可以不考虑覆盖层渗透各向异性对计算结果的影响。

4 结论与建议

本文应用有限元法,对深厚覆盖层地基上面板堆石坝地基进行了渗流控制数值分析,对比分析大量计算工况的结果,得出以下规律和建议:

(1)当覆盖层地基渗透系数较大时,防渗墙达到相对不透水层,能取得较好的防渗效果。若覆盖层无法被截断而采用悬挂式防渗墙时,其存在一个最优深度,防渗墙深度取其与覆盖层厚度之比为0.7左右时较为合理。

(2)采用水平铺盖可以减少渗流量,但其作用有限,即使铺盖长度达到4倍上游水头,其对渗流的控制效果也不明显。采用铺盖防渗总体效果不明

显,最好结合其它防渗措施一起使用。

(3)对深厚覆盖层地基进行渗流控制时,渗透系数 1×10^{-5} m/s可作为覆盖层地基渗透性相对大小的参考值。覆盖层渗透系数较大时,其透水性较强,对通过大坝的渗流量起控制作用,而当覆盖层渗透系数相对较小时,地基不再是渗流的控制因素。

(4)覆盖层渗透各向异性对各渗流水力要素有一定影响,但与各向同性时的计算结果相差不大。故在渗流计算时,可不考虑覆盖层渗透各向异性对渗流计算结果的影响。

参考文献:

- [1] 王启国. 金沙江虎跳峡河段河床深厚覆盖层成因及工程意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1455 - 1466.
- [2] 党林才, 方光达. 深厚覆盖层上建坝的主要技术问题[J]. 水力发电, 2011, 37(2): 24 - 28 + 45.
- [3] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金榜, 等. 悬挂式防渗墙控制管涌发展的理论分析[J]. 水利学报, 2005, 36(2): 174 - 178.
- [4] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金榜, 等. 悬挂式防渗墙控制管涌发展的试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(1): 42 - 50.
- [5] 张家发, 吴昌瑜, 朱国胜. 堤基渗透变形扩展过程及悬挂式防渗墙控制作用的试验模拟[J]. 水利学报, 2002, 33(9): 108 - 110 + 116.
- [6] 周晓杰, 丁留谦, 姚秋玲, 等. 悬挂式防渗墙控制堤基渗透变形发展模型试验[J]. 水力发电学报, 2007, 26(2): 54 - 59.
- [7] 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.
- [8] 蔡元奇, 朱以文, 唐红, 等. 在深厚覆盖层坝基上建堆石坝的防渗研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(1): 18 - 22.
- [9] 沈振中, 张鑫, 陆希, 等. 西藏老虎嘴水电站左岸渗流控制优化[J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1230 - 1234.
- [10] 王学武, 党发宁, 蒋力, 等. 深厚复杂覆盖层上高土石围堰三维渗透稳定性分析[J]. 水利学报, 2010, 41(9): 1074 - 1078 + 1086.
- [11] 徐毅, 侍克斌, 徐千军, 等. 无限深透水地基上土石坝微透水水平防渗体对渗流的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(1): 89 - 92.
- [12] 哈丽木热木·阿布都热西提, 侍克斌, 李玉建, 等. 非均质无限深透水地基上土石坝微透水防渗墙渗流控制研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(2): 114 - 117.
- [13] 常卓强, 侍克斌, 毛海涛, 等. 非均质无限深透水坝基垂直防渗墙深度对渗流影响的初步研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(2): 73 - 76.