

考虑地层渗透性各向异性的堤防工程 三维防渗结构优化分析

刘武¹, 袁文俊¹, 严周为², 程锦¹, 尚金行¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽水安建设集团股份有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘要: 在透水地基上修建长堤防工程, 堤基防渗结构的渗控效应直接影响堤防的安全运行。根据岷江干流虎渡溪工程库区区长堤防工程地质条件, 采用三维渗流分析方法, 对堤基高喷防渗墙的布置结构进行优化分析。结果表明: 高喷防渗墙可有效降低堤后地下水水位, 减小库水向堤后低洼保护区域渗漏, 但其渗控效应受防渗结构空间展布长度、深度与渗透性以及地层材料渗透性各向异性的影响。满足低洼保护区域不溢出要求的防渗墙最小展布长度随其布置深度的增大和施工质量提高而减小, 防渗墙渗透系数小于 1×10^{-5} cm/s 并将透水性强的覆盖层截断时, 其渗控效应明显, 若进一步提升防渗墙质量和布置深度则效果不显著。防渗墙质量的提高对堤防渗控效应的提升受地层材料渗透性各向异性的影响较小, 而布置深度增大在渗透性各向异性比较大时对渗控效应与防渗结构优化设计的影响较大。随着地层材料渗透性各向异性比的增大, 防渗墙所需最小空间展布长度逐渐增大, 由各向同性时的 180 m 增大到 220 m, 且当渗透性各向异性比较大时, 可能有必要增加防渗墙布置深度。

关键词: 堤防工程; 三维渗流; 渗透性各向异性; 防渗结构优化; 渗流控制

中图分类号: TV871

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)03-0151-07

Optimization analysis of three-dimensional seepage control structure in dike engineering considering stratum permeability anisotropy

LIU Wu¹, YUAN Wenjun¹, YAN Zhouwei², CHENG Jin¹, SHANG Jinhang¹

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Shui'an Construction Group Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: The performance of the seepage control structure directly affects the safe operation of the dike when it is constructed on a permeable foundation with long stretch. According to the engineering geological conditions of the long dike in the Huduxi Project reservoir area on the Minjiang River, the layout of the high-pressure jet grouted cut-off wall at the dike foundation is optimized and analyzed using the three-dimensional seepage analysis method. Calculation results show that the high-pressure jet grouted cut-off wall can effectively reduce the groundwater level and the leakage of reservoir water to the protected low-lying area behind the dike, but its seepage control effect is affected by the spatial distribution length, depth and permeability of the seepage control structure and the permeability anisotropy of the stratum materials. The minimum spatial length of the cut-off wall that meets the requirement of no overflow in the protected low-lying area decreases with the increase of its layout depth and the improvement of construction quality. The seepage control effect is obvious when the hydraulic conductivity of the cut-off wall is lower than 1×10^{-5} cm/s and the strong permeable stratum is cut off; however, further enhancement of the construction quality and layout depth does not significantly improve the seepage control effect. The permeability anisotropy has little influence on the improvement of the seepage control effect caused by the enhanced construction quality of the cut-off wall, whereas increasing the layout depth has a great influ-

收稿日期: 2022-10-08; 修回日期: 2023-03-01

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(2208085ME153); 安徽高校协同创新项目(GXXT-2022-020)

作者简介: 刘武(1988—), 男, 湖北仙桃人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水利岩土渗流及耦合效应分析方面的研究。

通讯作者: 袁文俊(1996—), 男, 安徽合肥人, 硕士, 主要从事水利岩土渗流及其控制方面的研究。

ence on the seepage control effect and the optimization design of seepage control structure when the permeability anisotropy is relatively large. With the increase of the material permeability anisotropy ratio, the required minimum spatial length of the cut-off wall increases gradually from 180 m under the isotropic case to 220 m. Moreover, when the permeability anisotropy ratio is relatively large, it may be necessary to increase the depth of the cut-off wall.

Key words: dike engineering; three-dimensional seepage; permeability anisotropy; seepage control structure optimization; seepage control

1 研究背景

堤防为水利工程中应用广泛的挡水建筑物,一般直接修建于透水性强的天然地基上,在两侧水位差的作用下,渗流问题往往十分突出。若无法有效控制渗流,堤后易出现翻砂、冒水现象,严重时还会引起堤防不均匀沉降、局部塌陷,甚至垮塌^[1-2]。因此,堤防工程通常需布置诸如高压旋喷桩、混凝土防渗墙等防渗结构,以有效提高区域地层的抗渗性能,保证堤防工程及堤后保护工程的安全稳定^[3-4]。堤防工程往往布置范围大,其防渗结构的三维空间展布长度、深度与施工质量等均对渗控效应影响显著,在堤防防渗结构设计中尤为关键^[5-6]。此外,天然地基往往地质条件复杂,受内部絮凝微观结构、节理裂隙等发育影响,地层材料渗透性可能呈显著的各向异性特征,其对堤防工程渗流的影响不可忽视,在防渗结构设计中需要重视^[7-9]。

目前,较多学者对堤防、土石坝、基坑围堰等涉水工程防渗体系的渗控效应评价与优化分析等开展了研究,较为详细地讨论了不同防渗墙的布置方案及防渗墙缺陷对工程渗流场的影响^[10-14]。王常明等^[15]以土石围堰为例,通过开展不同混凝土防渗墙尺寸方案下的渗流有限元分析,发现增加防渗墙的布置深度,可有效控制单宽渗流量,而增加防渗墙厚度对于防渗墙截渗效果提升不明显。段玲玲等^[16]对修建于深厚覆盖层上的土石坝进行了渗流分析,确定了防渗墙最优深度,并评价了在不同水位下沥青混凝土心墙与防渗墙组成的防渗体系对渗流场的影响。高江林等^[17]采用 ABAQUS 软件对土石坝加固过程中防渗墙出现缺陷的情况进行了模拟计算,发现若防渗墙体底部未入岩体会增大坝后渗漏量,出现缺陷的墙底开叉宽度越高,浸润线的高度越大,越不利于土石坝的渗透稳定。

上述研究为完善透水地基上涉水工程防渗结构的设计理论和方法提供了重要参考,透水地基上防渗结构布置空间展布越长、深度越深、施工质量越好,其防渗效果往往越好,但相应的工程费用也越

高,如何确定经济合理的防渗结构非常重要。然而,目前的研究多集中在考虑防渗结构布置深度的影响且认为地层材料渗透性各向同性的条件下,综合分析堤防工程三维防渗结构展布长度、深度与施工质量的影响,而考虑地层材料渗透性各向异性特征的研究还不够完善。

为此,本文结合某实际库区长堤防工程,采用三维有限元渗流分析方法,综合分析地层材料渗透性各向异性参数与防渗墙空间展布长度、布置深度和施工质量对堤防渗流的影响,确定不同渗透性各向异性参数、防渗墙深度与渗透性下所需的防渗墙空间展布长度,为堤防工程防渗设计提供参考。

2 工程概况

在建的虎渡溪航电枢纽工程位于四川省眉山市,属岷江干流航电梯级开发中的第6级,坝址距上游眉山市青神县城约3.5 km,库区正常蓄水位为391 m。为保证库区右岸眉山市东坡区城区的安全,水库右岸沿线布置有长堤防工程,堤身为砂卵石,迎水面布置混凝土面板护坡。地基表层为透水性强的砂卵石石覆盖层,平均深度为14 m,基岩为粉砂质泥岩,受风化作用的影响,其上部约有深4 m的中等透水性风化层。地基基础地层材料均由风化沉积作用形成,覆盖层中存在透水性差的夹层,材料具有各向异性特征。

以库区右岸 HYL0 + 800 m ~ HYL3 + 200 m 段堤防为研究对象,工程修建前天然河水水位低于堤后地面高程,堤后不会产生地下水溢出,其中 HYL2 + 400 m ~ HYL2 + 500 m 段堤后一段低洼区域因不受天然河水渗流影响而被保护使用。但工程建成后蓄水将引起岷江河水水位大幅抬升,库水会通过渗流抬升堤防背水侧地下水水位,地下水水位的上涨可能会对堤后低洼区域的正常使用产生不良影响。为保护堤后低洼区域的安全,工程拟采用高喷防渗墙对堤防基础进行防渗加固,高喷防渗墙的三维空间尺寸则需通过优化分析确定。研究段堤防几何模型见图1。

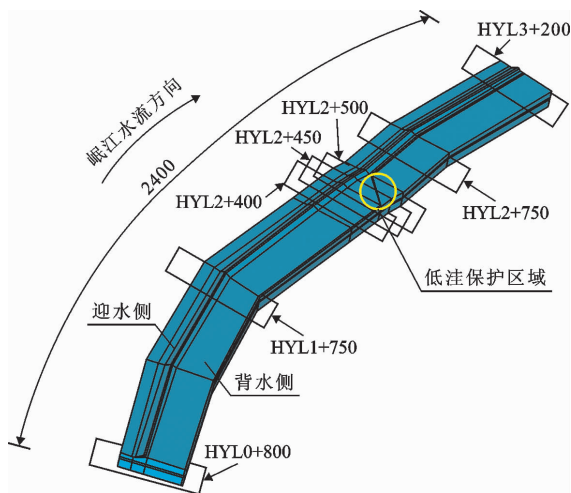


图 1 库区右岸 HYL0 + 800 m ~ HYL3 + 200 m 段堤防几何模型(单位:m)

3 理论与方法

3.1 优化分析思路

已有研究表明,影响防渗墙截渗效果的因素主要为防渗墙的深度、墙体宽度以及防渗墙出现缺陷等^[18-19]。堤防工程纵向跨度大,设计其基础防渗墙时需要确定防渗墙的空间展布长度、深度、墙体厚度以及墙体渗透系数。墙体渗透系数受墙体施工质量的影响,墙体质量越好,则渗透性越弱,渗透系数越小。防渗墙深度设计时一般需将透水性强的地层截断。墙体厚度对渗控效应影响较小,一般可根据墙体抗渗性与耐久性要求参照经验选取。堤基防渗墙优化设计的思路是在满足渗控要求的基础上,寻找最优的防渗墙布置结构,使得工程费用最低。考虑堤基防渗墙渗控效应受地层材料渗透性各向异性的影响,可将堤防基础防渗墙优化设计问题表示为如下的数学形式:

$$\begin{cases} \min \text{Cost}(h, l, k) \\ \text{s. t. } f(h, l, k, m) \in \bar{f} \end{cases} \quad (1)$$

式中: h 为防渗墙布置深度, m ; l 为防渗墙空间展布长度, m ; k 为防渗墙渗透系数, cm/s ; m 为表征地层材料特性对渗控效应影响的参数,本次研究中代表材料渗透性各向异性比, $m = k_z/k_x$, 其中 k_z 和 k_x 分别为材料垂直方向和水平方向的渗透系数(两个水平方向渗透系数相同,即 $k_x = k_y$); f 为表征堤基防渗墙渗控效应的渗流分析成果,如堤防渗流量、堤后地下水水位、地层渗透比降等, \bar{f} 则代表 f 需满足的工程设计规定值。根据虎渡溪工程库区右岸堤后低洼保护区域不能在库水作用下产生渗水的要求,本

次研究中 f 代表该低洼区域的溢出流量,其规定值 \bar{f} 表示不发生溢出,即溢出流量为零。

3.2 计算分析模型

根据虎渡溪航电枢纽工程库区右岸的工程地质与水文地质条件,建立考虑地层结构、堤防结构、堤后低洼保护区域、高喷防渗墙等的整体三维渗流有限元分析模型,如图 2 所示。模型顺河方向长度约为 2.4 km,跨河方向宽度约为 160 m,底部平面位于新鲜基岩以下约 22 m 处。模型主要模拟了坝体砂卵石、覆盖层、高喷防渗墙、混凝土面板以及新鲜与风化粉砂质泥岩等材料,总单元和节点数分别为 127 438 和 136 214。

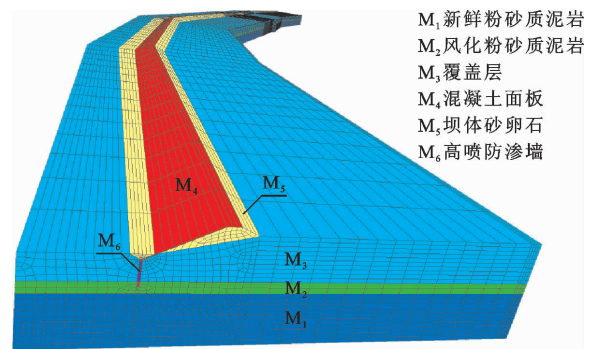


图 2 堤防整体三维渗流有限元分析模型

3.3 计算参数与条件

依据工程地勘资料和室内外试验结果,模型计算区域各材料的渗透系数取值如表 1 所示。模型渗流分析边界条件为:模型底部与上、下游侧边界设为不透水边界;堤防迎水侧岷江河水淹没区域内的模型上表面节点设为固定水头条件,水位值为 391 m;堤防背水侧模型边界根据研究区域地下水水位监测资料设为固定水头边界,水位值为 386 m;模型上表面的其他节点设为潜在溢出边界。渗流数值计算的关键在于自由水面线与溢出点的确定,在模型计算中采用理论上更为完备的 Signorini 型变分不等式算法进行求解计算^[10]。

表 1 堤防及地层区域的渗流计算参数

材料名称	渗透系数 $k_x / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
新鲜粉砂质泥岩	1.7×10^{-5}
风化粉砂质泥岩	7.2×10^{-4}
覆盖层	2.9×10^{-2}
混凝土面板	1.0×10^{-6}
坝体砂卵石	1.5×10^{-3}

高喷防渗墙结构的设计包括空间展布长度、深

度、厚度和施工质量,其中防渗墙厚度根据经验取为0.6 m。根据公式(1)给出的堤防三维防渗结构优化分析思路,通过研究防渗墙空间展布长度、布置深度、渗透系数以及地层材料渗透性各向异性对堤防防渗结构渗控效果的影响,计算不同防渗墙深度与质量以及地层材料渗透性各向异性组合条件下所需的最小防渗墙空间展布长度(保证堤后低洼保护区不发生溢出,记为临界防渗墙空间展布长度),进而优选适宜的防渗结构布置型式。防渗墙深度的变化范围为0~12.9 m,其中0代表堤基趾板上未布置防渗墙,9.4 m代表防渗墙底部恰好截断覆盖层,12.9 m代表防渗墙底部恰好截断风化粉砂质泥岩。防渗墙渗透系数变化范围为 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-6}$ cm/s,空间展布长度的变化范围为100~1 000 m,以确定不同情形下临界展布长度。选取地层材料渗透性各向异性比变化范围为0.1~10,其符合已有研究^[7-8,20-22]中的参数取值范围,渗透性各向异性模拟时保持地层材料水平方向渗透系数不变。

为了揭示防渗墙的渗控效应,并分析其空间展布长度、布置深度、质量以及地层材料渗透性各向异性等因素对堤防渗流的影响,选取的渗流计算工况如表2所示。

4 结果与分析

4.1 防渗墙的渗控效应分析

为评价高喷防渗墙的渗控效应,取防渗墙空间展布长度为1 000 m(桩号 HYL1 + 750 m ~ HYL2 + 750 m 段)进行渗流分析,典型剖面总水头和压力水头分布计算结果如图3所示。

由图3可知,未布置高喷防渗墙时总水头等值线分布均匀,自由水面线平缓,而布置后总水头等值线在高喷防渗墙处分布密集,压力水头等值线发生折减。由此可见防渗墙可以有效削减水头,降低堤后地下水水位,使堤后自由水面线低于低洼保护区底部,表明防渗墙对堤后低洼保护区起到了有效的保护作用。

表2 渗流计算工况表

工况分析目标	防渗墙空间展布长度/m	防渗墙布置深度/m	防渗墙渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	地层材料渗透性各向异性比
防渗墙渗控效应评价	1000	9.4	1×10^{-5}	1.0
防渗墙空间展布长度因素分析	100~1000	9.4	1×10^{-5}	0.1~10
防渗墙布置深度因素分析	100~1000	0~12.9	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$	0.1~10
防渗墙质量因素分析	100~1000	9.4	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$	0.1~10

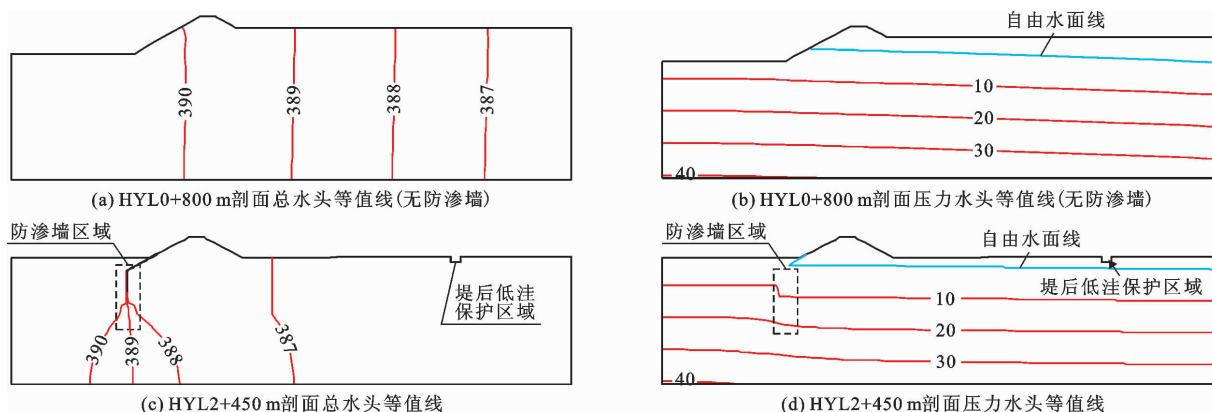


图3 堤防典型剖面总水头与压力水头分布(单位:m)

高程为371 m水平剖面上的总水头分布如图4所示。由图4可看出,布置高喷防渗墙区域的堤后总水头明显低于未布置高喷防渗墙的区域。总水头等值线在未布置防渗墙的堤段分布较均匀,而在防渗墙布置区域分布密集,表明防渗墙的截渗作用改变了整体堤防的渗流场,防渗墙的渗控效应显著。

4.2 防渗墙空间展布长度对渗控效应的影响

根据堤后低洼保护区的空间位置,高喷防渗墙的基准展布长度取为100 m,展布长度的变化按照两侧各5 m的方式对称增加,如图5所示。通过改变防渗墙空间展布长度,研究空间展布长度变化对堤防渗流场的影响。

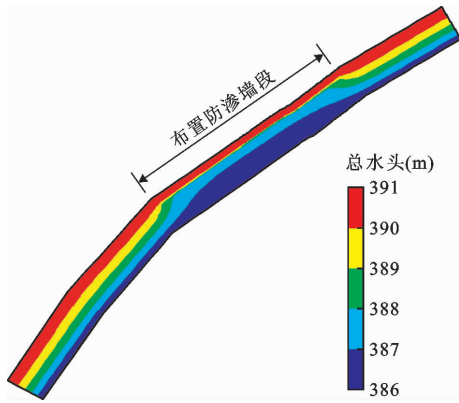


图 4 堤防高程 371 m 水平剖面上总水头分布云图

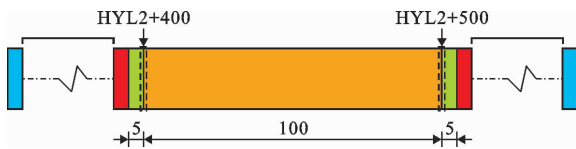


图 5 防渗墙空间展布示意图(单位:m)

不同渗透性各向异性比条件下,防渗墙空间展布长度变化对堤后低洼保护区域溢出流量的影响如图 6 所示。

由图 6 可知,随着防渗墙展布长度的增加,低洼保护区域溢出流量呈非线性减小。不考虑地层材料渗透性各向异性 ($k_x/k_z = 1$),防渗墙空间长度为 100 m 时,低洼保护区域溢出流量为 166.11 m³/d;长度增至 120 m 时,溢出流量为 99.04 m³/d;长度增至 160 m 时,流量减小为 10.36 m³/d;长度达到 180 m 时低洼保护区域不产生溢出。防渗墙展布长度的增加对堤防渗控效应的影响受地层材料渗透性各向异性的影响,低洼区域溢出流量随着渗透性各向异性比的增大而增加。渗透性各向异性比较小时,防渗墙展布长度变化对低洼区域溢出流量的影响较小,而各向异性比较大时,防渗墙展布长度的增加对控制溢出流量的作用非常显著。地层材料渗透性各向异性比为 0.1、0.25、1、4、10 时,防渗墙临界空间展布长度分别为 140、160、180、200、220 m。

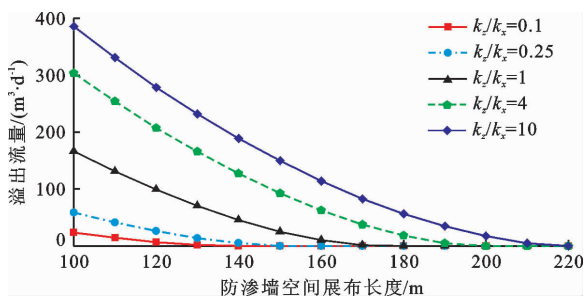


图 6 防渗墙空间展布长度变化对堤后低洼保护区域溢出流量的影响

4.3 防渗墙布置深度对渗控效应的影响

堤防渗控效应受防渗墙布置深度的影响,布置深度越大,渗控效应越好,但费用越高。防渗墙空间展布长度为 100 m 时,不同渗透性各向异性比及防渗墙质量条件下,布置深度变化对堤后低洼区域溢出流量的影响如图 7 所示。

由图 7 可知,不同地层材料渗透性各向异性比和防渗墙质量下,防渗墙布置深度由 0 增至 9.4 m 时,低洼保护区域溢出流量均大幅降低,之后随着布置深度的增大溢出流量的减小幅度明显变小。地层材料渗透性各向同性条件下,当防渗墙深度为 0 时,堤后低洼保护区域溢出流量为 405.77 m³/d,防渗墙深度增加至 9.4 m 将覆盖层截断时,溢出流量为 166.11 m³/d,降幅达 59%,再增至 12.9 m 将风化岩层截断时,溢出流量为 147.24 m³/d,降幅仅增大了 4.7%。由此可知,布置防渗墙时必须将透水性强的覆盖层截断,其对渗控效应的提升效果非常显著,而在风化岩层中进一步增加防渗墙布置深度对渗控效应的提升效果却有限。随着地层材料渗透性各向异性比的增大,防渗墙布置深度的增大对渗流量的影响更为明显。当各向异性比较小时,增加防渗墙布置深度对渗控效应的提升不明显,推荐防渗墙底部截断透水性强的覆盖层即可。当地层材料渗透系数各向异性比较大时,可能有必要采取增加防渗墙布置深度的设计。

4.4 防渗墙质量对渗控效应的影响

堤防渗控效应受防渗墙施工质量的影响,施工质量越好,则渗透系数越低。防渗墙渗透系数变化对堤防渗控效应的影响结果如图 8 所示。

由图 8(a)可知,地层材料渗透性各向同性时,随着防渗墙渗透系数的减小,相同防渗墙空间展布长度下低洼保护区域溢出流量逐渐降低。在防渗墙空间展布长度为 100 m 的条件下,防渗墙渗透系数为 1×10^{-4} cm/s 时,堤后低洼保护区域溢出流量为 187.86 m³/d;防渗墙渗透系数减小为 1×10^{-5} cm/s 时,溢出流量为 166.11 m³/d;防渗墙渗透系数减小为 1×10^{-6} cm/s 时,溢出流量为 163.62 m³/d。由图 8(b)可知,考虑地层材料渗透性各向异性时,100 m 展布长度防渗墙不同渗透系数下,堤后低洼保护区域溢出流量均随着各向异性比的增加而增大,但防渗墙渗透系数变化对渗控效应的影响与各向同性情况时一样。由此可见,防渗墙渗透系数在 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-5}$ cm/s 范围内提高施工质量,对堤防渗流控制效果提升明显,而渗透系数在 $1 \times 10^{-5} \sim 1$

$\times 10^{-6}$ cm/s 范围内提高施工质量,对堤防渗流控制效果提升作用不大。因此,为保证防渗结构渗控效

应的可靠性,建议防渗墙施工质量按照渗透系数不大于 1×10^{-5} cm/s 进行控制。

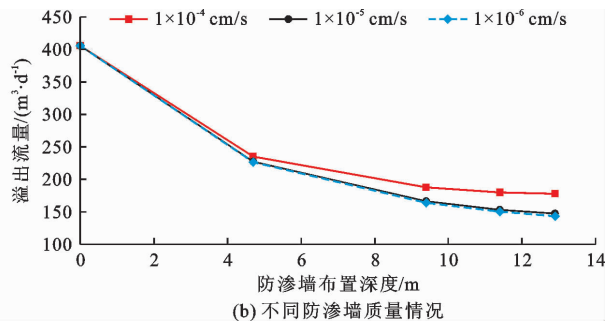
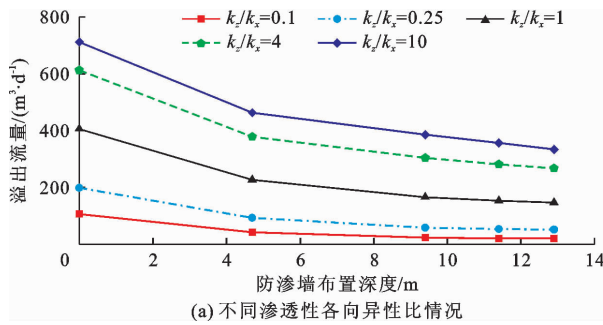


图7 防渗墙布置深度变化对堤后低洼保护区域溢出流量的影响

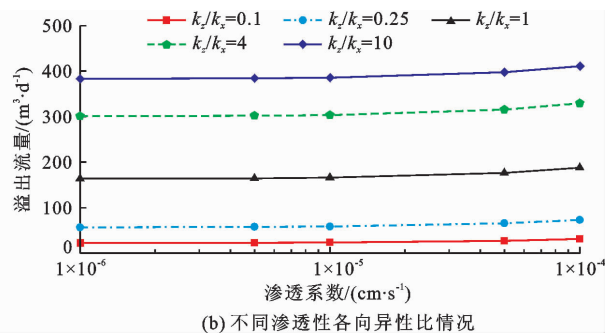
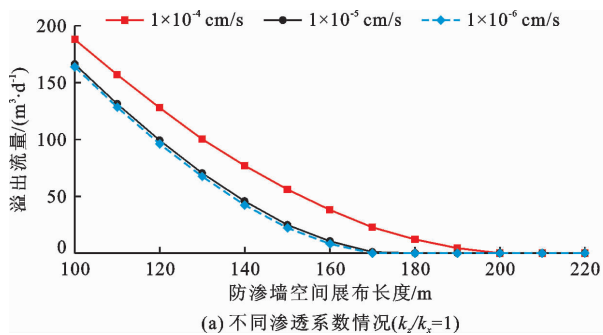


图8 防渗墙渗透系数变化对堤后低洼保护区域溢出流量的影响

4.5 地层材料渗透性各向异性对渗控效应的影响

堤防防渗结构优化设计时需考虑地层材料渗透性各向异性的影响。防渗墙不同布置深度和渗透系数情况下,地层材料渗透性各向异性对渗控效应的影响如图9所示。

由图9(a)可知,随着防渗墙布置深度的增大,临界防渗墙空间展布长度逐渐减小,且各向异性比越大,减小幅度越明显。以防渗墙布置深度从9.4 m增至11.4 m为例,不考虑地层材料渗透性各向异性时($k_z/k_x = 1$),临界展布长度由180 m减小至170 m;各向异性比为10时,临界展布长度由220 m减小至190 m。由此可见,渗透性各向异性比越大,防渗墙布置深度的增加对减小所需最小防渗墙空间展

布长度的作用越明显。当地层材料渗透性各向异性比小于1时,增加防渗墙布置深度对渗控效应的提升不明显,为节约工程费用,更宜采取增长防渗墙展布长度的设计;当地层材料渗透性各向异性比较大时,可能有必要采取增加防渗墙布置深度的设计。由图9(b)可知,在防渗墙渗透系数相同的情况下,临界防渗墙空间展布长度随着各向异性比的增加而增加。防渗墙渗透系数从 1×10^{-4} cm/s 减小至 1×10^{-5} cm/s 时,相同的地层材料渗透性各向异性比下,临界防渗墙空间展布长度会显著减小;防渗墙渗透系数从 1×10^{-5} cm/s 减小至 1×10^{-6} cm/s 时,渗透性各向异性比的增加对临界防渗墙空间展布长度的影响甚微。

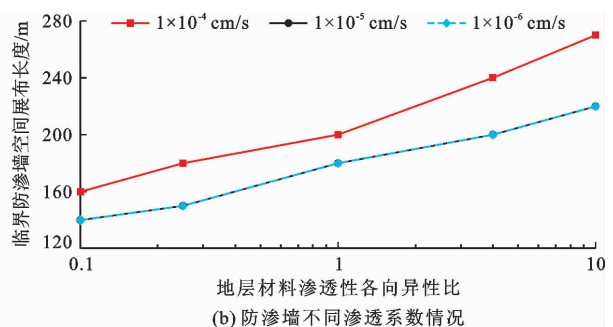
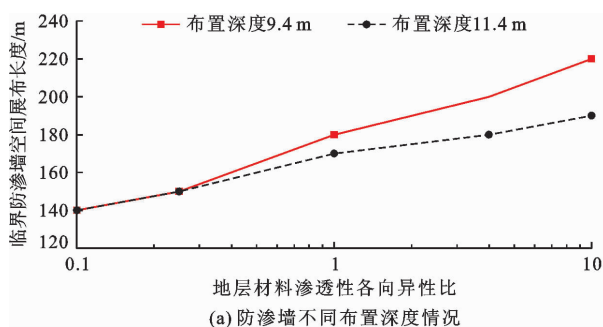


图9 地层材料渗透性各向异性比对临界防渗墙展布长度的影响

5 讨论

大量研究表明,堤防、基坑等涉水工程的渗控效应受防渗结构空间布置方案、施工质量等因素的影响。目前,对于防渗墙深度、渗透系数对工程渗控效应影响的研究分析成果较多^[2,5,13,15],但是考虑防渗墙空间展布长度以及地层材料渗透性各向异性对工程渗控效应影响的研究分析成果相对较少。杨旭亮等^[21]在南水北调渠坡渗流计算中指出考虑土层的渗透性各向异性影响更符合实际,并分析归纳得出随着各向异性参数的增大,渗流越强烈,渗流量也越大,这与本文的研究成果一致。需要指出的是,本文从优化防渗结构的角度出发,通过系统分析综合揭示了防渗墙空间展布长度、防渗墙深度、防渗墙质量以及地层材料渗透性各向异性对堤防渗控效应的影响,并为防渗结构参数的选取提出了参考建议。相比于多数文章以总渗流量评价防渗结构的渗流控制效果,本文依据实际长堤防工程的渗控需求,引入防渗墙临界展布长度(确保堤防背水侧低洼保护区无流量溢出)这一评价指标,展示了地层材料渗透性各向异性对堤防防渗结构优化设计的影响,可为防渗结构参数的选取提供参考。

6 结论

本文采用三维渗流分析方法,开展了虎渡溪航电枢纽工程库区右岸堤防高喷防渗墙结构布置的优化分析,揭示了不同防渗墙空间展布长度、布置深度、防渗墙质量以及地层材料渗透性各向异性对堤防渗控效应的影响。主要研究结论如下:

(1)高喷防渗墙将透水性强的覆盖层截断时,总水头等值线在防渗墙区域分布密集,压力水头等值线经过防渗墙区域明显折减,表明高喷防渗墙可有效降低堤后自由水面线和堤防渗流量,具有良好的渗控效应。

(2)增加防渗墙空间展布长度和防渗墙布置深度以及提高防渗墙质量均可以提高堤防渗控效应。地层材料渗透性各向异性比小于1时,优选防渗墙空间展布长度为180 m,平均布置深度为9.4 m,即截断透水性强的覆盖层,施工质量按照满足渗透系数低于 1×10^{-5} cm/s进行控制。而当地层中发育断层、节理裂隙等结构引起竖向透水性增强,渗透性各向异性比显著增大时,防渗墙布置深度宜进一步增加。

(3)地层材料渗透性各向异性对堤防渗控效应

与防渗结构优化设计具有较大影响。地层材料渗透性各向异性比越大,则堤后低洼保护区的溢出流量越大,所需布置的防渗墙空间长度与深度都将增大。实际工程中地层中若存在大量断层、节理裂隙密集带等透水通道,则需要结合地层材料的渗透性各向异性特征对堤防防渗结构方案进行合理设计。

参考文献:

- [1] 金洪杰,甘磊,沈振中,等.某船闸枢纽主要分区渗透参数敏感性反演分析[J].水资源与水工程学报,2022,33(3):149-155.
- [2] 王硕,沈振中,姬阳,等.某深厚覆盖层上引水式电站防渗系统优化研究[J].水资源与水工程学报,2022,33(1):144-151+158.
- [3] 王复明,李嘉,石明生,等.堤坝防渗加固新技术研究与应用[J].水力发电学报,2016,35(12):1-11.
- [4] 李思慎.长江重要堤防隐蔽工程建设中的防渗处理[J].长江科学院院报,2000,17(S1):4-8.
- [5] 杨金孟,赵兰浩,沈振中,等.某抽水蓄能电站上水库防渗帷幕深度优选研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(2):209-216.
- [6] 张文兵,沈振中,陈官运,等.岩溶发育地质条件下的库区三维渗流场分析及渗控效果评价[J].水资源与水工程学报,2020,31(5):218-224+234.
- [7] 袁俊平,蔺彦玲,丁鹏,等.裂隙诱导各向异性对边坡降雨入渗的影响[J].岩土工程学报,2016,38(1):76-82.
- [8] 宋云奇,武朝军,叶冠林.上海浅部黏土渗透系数及其各向异性[J].岩土力学,2018,39(6):2139-2144.
- [9] LIU Wu, CHEN Yifeng, HU Ran, et al. A two-step homogenization-based permeability model for deformable fractured rocks with consideration of coupled damage and friction effects [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 89: 212-226.
- [10] 刘武,陈益峰,胡冉,等.基于非稳定渗流过程的岩体渗透特性反演分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(2):362-373.
- [11] 庞琼,王士军,谷艳昌,等.土石坝垂直防渗加固措施综述[J].水利水运工程学报,2014(4):28-37.
- [12] 刘豪杰,任杰,杨杰,等.深厚覆盖层土石坝渗流控制及三维数值分析[J].水资源与水工程学报,2018,29(2):219-224+228.
- [13] 郑海圣,周嵩,刘武,等.防渗墙深度对闸坝深厚透土层渗流特性的影响[J].水电能源科学,2013,31(9):76-78+11.
- [14] 岑威钧,陈司宁,李邓军,等.考虑土工膜缺陷的石渣坝三维渗流特性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):413-418.

(下转第173页)

- ation and lining responses due to shield tunneling considering groundwater level variation in clays[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 120: 103443.
- [12] 傅鹤林,张加兵,黄震,等.复合地层中浅埋盾构隧道开挖引起的地层位移及应力预测分析[J].*现代隧道技术*,2017,54(4):97-106.
- [13] MUSKHELISHVILI N I. *Mathematical theory of elasticity* [M]. Leyden: International Publishing, 1954.
- [14] 汤伏全.西部厚黄土层矿区开采沉陷预计模型[J].*煤炭学报*,2011,36(S1):74-78.
- [15] 宋浩然,张顶立,房倩.地面荷载及围岩自重作用下浅埋隧道的围岩应力解[J].*中国铁道科学*,2015,36(5):54-60.
- [16] STRACK O E, VERRUIJT A. A complex variable solution for a deforming buoyant tunnel in a heavy elastic half-plane[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2002, 26(12): 1235-1252.
- [17] VERRUIJT A. Deformations of an elastic half plane with a circular cavity [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1998, 35(21): 2795-2804.
- [18] FANG Qian, SONG Haoran, ZHANG Dingli. Complex variable analysis for stress distribution of an underwater tunnel in an elastic half plane [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2015, 39(16): 1821-1835.
- [19] 宋文杰,项彦勇,刘毅,等.盾构隧道变位复变函数解的验证与参数分析[J].*地下空间与工程学报*,2021,17(6):1751-1761.
- [20] 雷国辉,孙华圣,吴宏伟.半无限平面问题的相对位移[J].*岩土力学*,2014,35(5):1224-1230+1240.
- [21] 晏莉,杨海涛.盾构隧道施工引起地层位移的复变函数修正解[J].*水资源与水工程学报*,2022,33(4):192-201.
- [22] 李亚勇.浅埋圆形隧道力学行为理论分析及应用[D].重庆:重庆大学,2016.
- [23] 阳军生,刘宝琛.城市隧道施工引起的地表移动及变形[M].北京:中国铁道出版社,2002.
- [24] 韩焯,李宁.隧道施工引起地层位移预测模型的对比分析[J].*岩石力学与工程学报*,2007,26(3):594-600.
- [25] 贾宝新,高宗贤,惠鹏飞.上软下硬地层隧道盾构施工引起的地表沉降研究[J].*安全与环境学报*,2021,21(3):1083-1088.
- [26] 马乾瑛,业嘉超,蒋小慧.考虑土拱效应的盾构隧道施工地表沉降预测研究[J].*现代隧道技术*,2021,58(6):148-154.

(上接第157页)

- [15] 王常明,鲁鋈,马栋和.土石围堰中混凝土防渗墙设计方案的数值优化[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2020,50(3):857-865.
- [16] 段玲玲,邓华锋,支永艳,等.某土石坝悬挂式混凝土防渗墙深度优选[J].*人民黄河*,2019,41(12):83-88+92.
- [17] 高江林,严卓.土石坝加固工程中缺陷防渗墙渗流特性研究[J].*人民黄河*,2017,39(9):125-128+134.
- [18] 毛海涛,侍克斌,王晓菊,等.土石坝防渗墙深度对透水地基渗流的影响[J].*人民黄河*,2009,31(2):84-86.
- [19] 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.
- [20] 袁帅,冯德旺.考虑渗透系数各向异性的盾构隧道开挖面稳定性数值极限分析[J].*同济大学学报(自然科学版)*,2020,48(12):1717-1725.
- [21] 杨旭亮,季日臣,陈晨,等.分层碾压的填方渠坡稳定渗流分析[J].*水电能源科学*,2014,32(10):119-122.
- [22] 王铁行,杨涛,鲁洁.干密度及冻融循环对黄土渗透性的各向异性影响[J].*岩土力学*,2016,37(S1):72-78.