

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.02.019

围垸堤防防渗措施对垸内渗流状况的影响分析

万利台¹, 余成学¹, 谢石², 周柏林², 赵晓峰¹

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 湖南省洞庭湖水利工程管理局, 湖南 长沙 410011)

摘要: 堤防加固以后,在堤防内布置了混凝土防渗墙。为了研究混凝土防渗墙的施工是否会导致垸内地下水状况的变化以及影响垸内生产、生活,需要对堤防加固后垸内渗流场进行计算分析。利用三维渗流有限元方法,计算分析了堤防内设置防渗体对于垸内区域渗流场的影响。首先在分析区域地层、水文及水文地质基础上,建立了有限元计算模型,确定了计算方案。然后,针对洪水期、常态期及枯水期,分别计算了无防渗设施、有防渗设施情况下的区域渗流场;在此基础上,对比分析了渗流场的差异、渗流量的变化情况等。最后得出结论:除了堤防局部位位置外,防渗设施对于垸内地下水分布范围基本没有影响;在洪水期,防渗体具有明显抗灾作用;而在常态期外湖水下降,垸内需水时,防渗体对于垸内渗流量影响相应下降,且在下降到一定水位后,几乎没有影响;在枯水期,防渗体则具有抑制垸内水流外渗的益处。

关键词: 围垸;堤防;渗流;防渗;地下水;有限元法

中图分类号: TV551.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)02-0088-07

Analysis for Impact of Anti-seepage Measures in Embankment on Seepage Status in Flood Storage Polders

WAN Li-tai¹, SHE Cheng-xue¹, XIE Shi², ZHOU Bo-lin², ZHAO Xiao-feng¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Sciences, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

2. Dongting Lake Water Conservancy Engineering Administration Bureau of Hu'nan Province, Changsha, Hu'nan 410011, China)

Abstract: After the embankment is reinforced, the seepage control walls are built in it. The seepage field is necessary to be calculated in order to study whether the seepage control wall will lead to the change of the groundwater and the influence on people's life. The impact of setting the impervious body in the embankment on the seepage field of the flood storage polders is calculated and analyzed by using 3-D seepage FEM. Firstly, based on the analysis of regional geological structure and hydrogeology conditions, a finite element model is created, and the calculation scheme is determined. Then, the regional seepage fields under seepage control measures and without prevention facilities are calculated separately in connection with the flood period, normal period and dry season. On this basis, the seepage field and seepage flow changes are compared and analyzed. Finally, The conclusions are obtained as follows: In addition to the local positions of the embankment, the seepage control facilities have little impact on the groundwater distribution in the embankment; In the flood period, the impervious body has obvious effect on disaster preventing; In the normal period, the water level outside the lake drops, when water is needed inside the embankment, the influence of impervious body on the seepage flow inside the embankment is decreased. When falling to a certain level, the effect is disappeared. In the dry season, the impervious body has the benefits to inhibit the leakage inside the embankment.

Keywords: flood-storage polder; embankment; seepage; seepage control; groundwater; FEM

1 引言

洞庭湖区筑堤围垸有悠久的历史,人们在地势相对较高的河、湖、洲、滩上修建简易堤防。1949 年以后,洞庭湖区兴起了规模空前的围垦高潮。目前,洞庭湖区已有的防洪大堤全长达 3 471 km。因修筑堤防增加的可利用土地的面积为 10 493 m²。其中耕地面积 5 720 m²;受堤防保护的人口为 811 万^[1]。

由于历史上种种原因,这些修建的堤防存在大量隐患,堤防塌方破坏的现象比较普遍,直接威胁到洞庭湖区人民的生命财产安全,迫切需要进行加固。在堤防加固中,比较普遍地设计布置了混凝土防渗墙和劈裂灌浆等防渗设施^[2-4]。这些防渗设施的设计施工,显著地保护了堤防安全;但这些防渗设施是否能显著改变垸内渗流状态,对垸内居民的生产、生活用水造成影响?这就需要对比垸内地下水的变化情

况进行评估,以便为工程决策提供参考意见。

本文以共双茶蓄洪垸为例,针对其防渗体布置情况,对多种工况下的区域渗流场进行计算分析,对堤防防渗设施造成的影响进行分析评估。

2 共双茶垸基本情况

共双茶垸位于南洞庭湖北侧,沅江市北部,呈东西展布,由共华垸、双华垸及茶盘洲垸三垸组成,东西向长约 50 km,两端宽 7 km~9 km,中部宽仅 2 km~2.5 km,平面形态整体为哑铃形。图 1 为共双茶垸平面图,围堤总长 121.74 km,堤外为河流所包围,北边为草尾河,西、南、东边为黄土包河。在洞庭湖低水位时,两条河流以河流的形式呈现;在洞庭湖高水位时,河流与洞庭湖构成一体。垸内河湖水系发育,有八形叉河等河流,沟渠纵横交错。

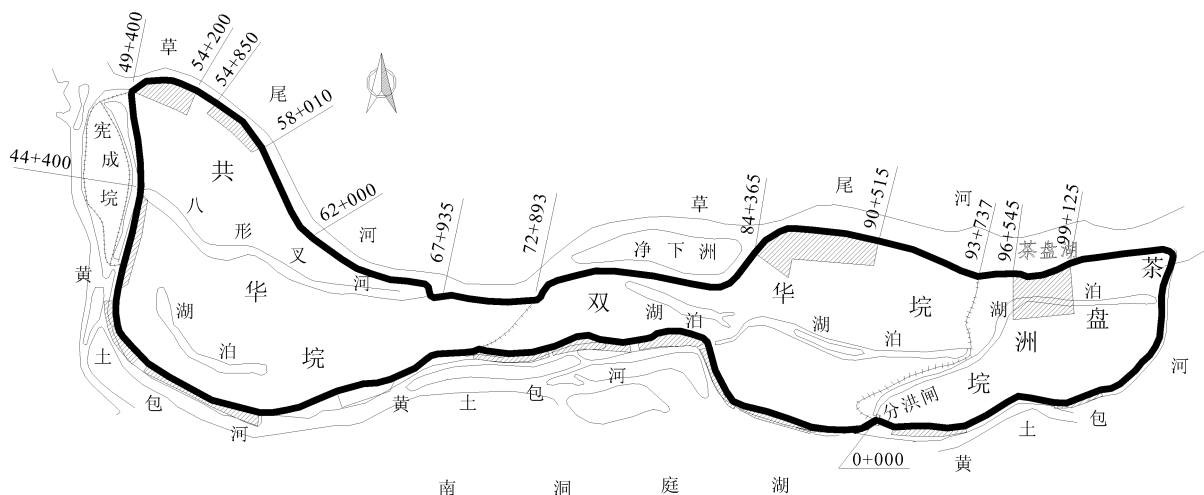


图 1 共双茶垸平面图

区内按赋存介质为第四系孔隙潜水。地下水接受大气降水和地表河、湖水补给,与河湖、沟渠等地表水系呈互补关系,汛期堤外河、湖水补给地下水并向堤内转移,并可在堤内局部地段以散浸、管涌等形式逸出;枯水季节时,垸内地下水位高,地下水由垸内向垸外江河排泄。

垸内主要地层由第四系上更新统冲积层,全新统冲湖积层、冲洪积层组成。其中第四系上更新统冲积层主要为 a1-1Q₄ 粉质粘土与粉砂互层等,平均厚度约 8 m;全新统冲湖积层主要为 a1Q₃ 粘土,一般 5 m~10 m;冲洪积层主要为 a1Q₃ 粉细砂、碎石层,一般 2~6 m。围堤堤身为粉质粘土、粉质壤土及粘土。围堤防添加固设施主要有劈裂灌浆及水泥土防渗墙两类。劈裂灌浆处理段长 19.436 km,灌浆

深度至堤基以下 1/3 堤身高度处,灌浆帷幕厚度取 0.10 m;采取水泥土防渗墙进行处理的堤段共 22 段长度 26.341 km,深度大约在堤基以下 10 m 左右,水泥土防渗墙厚度 0.25 m。

表 1 给出了共双茶垸堤身桩号 44+400~67+935 范围内防渗体分布情况。

表 1 共双茶垸堤身 44+400~67+935 段防渗体分布表

桩号	防渗体类型	防渗体底部高程/m
44+400~49+400	水泥土防渗墙	17~18
49+400~54+200	无	—
54+200~54+850	水泥土防渗墙	19~23
54+850~58+010	无	—
58+010~62+000	劈裂灌浆	24~30
62+000~67+935	水泥防渗墙	18~24

3 计算模型及计算方案

3.1 计算模型

整个垸内区域面积大,取全部区域计算存在困难。由于计算主要的目的是分析防渗体系对垸内渗流场的影响,因此,从考虑代表性及方便计算角度,取图 1 中左上部分区域,即共华垸左上部,以草尾河为上边界,黄土包河为左边界,垸内八形叉河为下边界围成的部分作为分析对象。该区域堤防大部分已经进行了防渗墙施工,同时仍有部分没有施加混凝土防渗墙的堤段,因此从形式上具有代表性。

对计算区域做适当概化。堤防采用标准断面,在堤防下部的地基,则根据地质报告情况,划分成三层,从上到下分别为: a_1-1Q_4 粉质粘土与粉砂互层等、 a_1Q_3 粘土和 a_1Q_3 粉细砂、碎石。

堤防外侧向外延伸 100 m,用于模拟堤外湖区及河道等的作用;在堤防内侧,由于地势平坦,因此地表按同一高程处理;由于小型沟渠纵横,不便一一模拟,考虑到沟渠主要是对渗流的出流形式有影响,对于外湖与垸内地下水的交换机制不会有影响,所以不模拟垸内小型沟渠的作用。

草尾河、黄土包河河床底部高程为 25.0 m,垸内八形叉河河床底部高程为 26.0 m;堤内地面高程 28.5 m。

根据图 1 提供的水泥土防渗墙和劈裂灌浆布置情况,模拟防渗墙及劈裂灌浆层的作用。

在此基础上划分有限元计算网格,见图 2,所有网格均为等参单元,其中网格总数为 98 539,单元节点总数为 107 988。

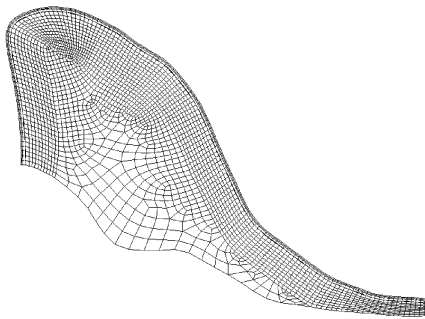


图 2 渗流计算有限元网格

3.2 计算方案

在定性分析垸内、外水位变化情况的基础上,划分洪水期、常态期以及枯水期等三种情况,进行渗流计算分析。其中,洪水期指的是垸外湖水高,垸内水位低,渗流由垸外向垸内渗流;常态期指的是湖区水

位在洪、枯水之间变化,但湖区水位大于垸内水位,渗流由外湖向垸内流动的时期;枯水期指的是垸内水位大于外湖水头,渗流由垸内向垸外流动的时期。因此,上述洪水期、常态期和枯水期,涵盖了全部的渗流时期和状态。

针对洪水期、常态期和枯水期,分别选择外湖、垸内代表性水位组合:

(1) 洪水期,外湖区水位按 33.65m 考虑,垸内八形叉河水头取略低于垸内地面高程,按 28 m 考虑。

(2) 常态期,在垸内八形叉河位置,取常态情况下的水头,即 27.1 m;外湖水头取上述湖区洪水头与垸内水位的平均水位,即 30.82 m。

(3) 枯水期,垸内水位比垸外水位高,渗流从垸内向垸外流动。在垸内的八形叉河位置,河道水位取常年运行水位,即 27.1 m;垸外草尾河及黄土包河中水位按枯水位 26.54 m 考虑。

分别对无、有防渗设施两种情况进行渗流计算分析,全面分析比较在洪水期、常态期和枯水期地下水渗流场的变化情况,分析防渗设施对渗流场的影响,并进行综合评价。

由于计算的目的是对比无、有防渗设施两种情况下渗流场的差异,因此,完全可以用稳定渗流的计算结果来进行对比分析。

4 堤防设置防渗设施前、后的渗流场计算分析

三维稳定渗流有限元方法已为大家熟悉和广泛应用^[5-14],在此不再赘述。为了对比分析堤防内设置防渗体对蓄洪垸内渗流场的影响,分别对洪水期、常态期和枯水期三种情况下堤防设置防渗体前、后的渗流场进行了计算。

4.1 洪水期渗流计算

计算边界条件:处于水下的垸外堤防坡面、草尾河及黄土包河床、湖底等按第一类边界考虑,水头 33.65 m。在垸内,堤防坡面及垸内地表均按逸出边界处理;在八形叉河位置,河道水下坡面按第一类边界条件处理,其水头为 28 m。

图 3(a)为无防渗体时整个区域的渗流测压管水头云图,图 3(b)为有防渗体时整个区域的渗流测压管水头云图。根据表 1 显示的堤防各个分段的防渗体布置情况,为了与后面有防渗体情况进行比较,在各个分段位置取代表性断面,用于反映断面上的渗流情况。限于篇幅,本文仅给出桩号 46+900 断

面的测压管水头分布情况,见图 4。

从图 3(a)、图 4(a)看到,在垸外高水位情况下,渗流向垸内流动,在没有防渗设施作用情况下,在堤防部分,渗流在堤防的垸内一侧表面渗出,逸出点位置比较高;而在垸内广大的平坦区域范围内,绝大部

分地表面有水自由渗出;只有在靠近八形叉河附近位置的地表面,由于河道水位较地表面低,具有排水作用,局部降低了地下水位,因此有少量区域地表没有水渗出。

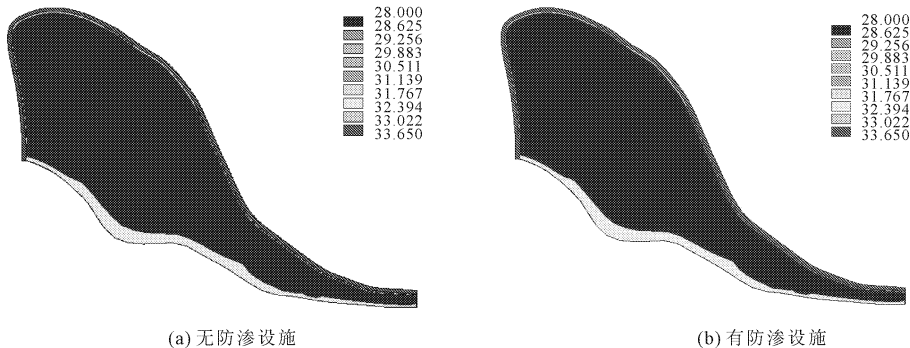


图 3 设置防渗体前、后洪水期垸内外渗流测压管水头云图(单位:m)

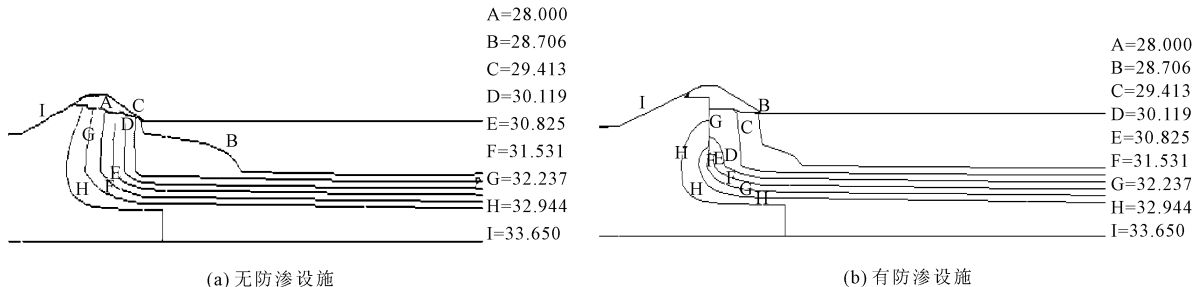


图 4 设置防渗体前、后洪水期桩号 46 + 900 断面测压管水头等值线分布图(单位:m)

从图 4(a)中还可以看到,在垸内除了堤防附近外,浅部地层中渗流流动缓慢,渗流向地表面渗出。在较深部位,alQ₃ 砂卵砾石层和砂性土层为相对透水层,在该透水层中渗流比较缓慢;水流向上透过相对不透水的 alQ₃ 粘性土层,进入上部浅表地层中,即深部地层向上部浅表地层补水。由外湖通过堤防及基础流入垸内的渗流量为 0.14827 m³/s。

从图 4(b)中看到,在部分堤段设置防渗墙等防渗设施情况下,由于受防渗体的阻水作用影响,在防渗体的两侧具有较大的水位差,防渗设施具有明显的阻水作用。在堤防局部位置,堤防在垸内一侧的坡面几乎没有渗流渗出,相对于没有防渗墙等防渗设施情况,渗流逸出点位置明显降低;而在垸内广大平坦区域范围内,绝大部分地表面有水自由渗出;只有在靠近八形叉河附近位置的地表面,有少量区域地表没有水渗出。与前面没有防渗设施情况对比,两者在垸内出逸面积基本相同,垸内的渗流规律、补给等基本一致。由外湖通过堤防及基础流入垸内的渗流量为 0.12596 m³/s。

4.2 常态期渗流计算

边界条件处理同前,外湖区水头 30.82 m,在八形叉河位置水头 27.1 m。图 5(a)为常态期无防渗措施时整个区域的渗流测压管水头分布云图,图 5(b)为常态期有防渗措施时整个区域的渗流测压管水头分布云图,图 6 为桩号 46 + 900 断面的测压管水头等值线图。

从图 5(a)、图 6 可以看到,在没有防渗墙等防渗设施作用下,在堤防位置,渗流在堤防的垸内一侧表面渗出,逸出点位置很低,接近垸内地表面,即在堤防坡脚位置逸出。在垸内广大平坦区域范围内,绝大部分地表面有水自由渗出;只有在靠近八形叉河附近位置的地表面有少量区域没有水渗出。

在桩号 46 + 900 断面,除了堤防局部区域,从渗流的整体趋势变化、补给情况来看,与前面洪水期的渗流趋势大致一致。由外湖通过堤防及基础流入垸内的渗流量为 0.05794 m³/s。

在设置有防渗体的情况下,与图 5(a)所示没有设置防渗设施去情况相比,除了堤防位置的局部区域,在垸内的水头分布、补给基本一致。由外湖通过

堤防及基础流入坑内的渗流量为 $0.05176 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

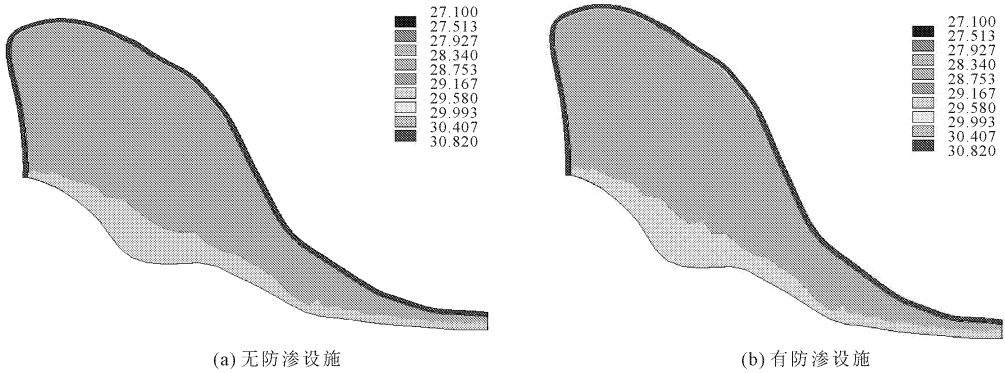


图 5 常态情况设置防渗体前、后坑内外渗流测压管水头云图(单位:m)

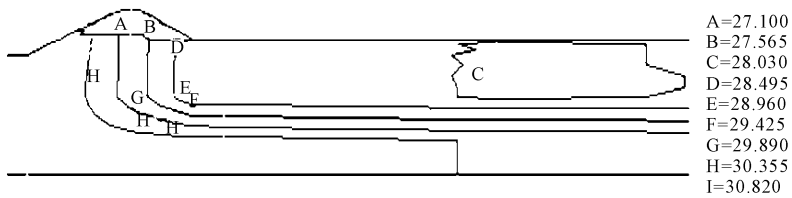


图 6 无防渗常态情况桩号 46+900 断面测压管水头等值线分布图(单位:m)

4.3 枯水期渗流计算

在坑内的堤防坡面及坑内内表面没有水流;在八形叉河位置,河道水位 27.1 m ;在坑外草尾河及黄土包河水位 26.54 m 。

图 7 为无防渗措施时整个计算区域的渗流测压管水头分布云图。图 8 为桩号 46+900 断面的测压管水头等值线图。

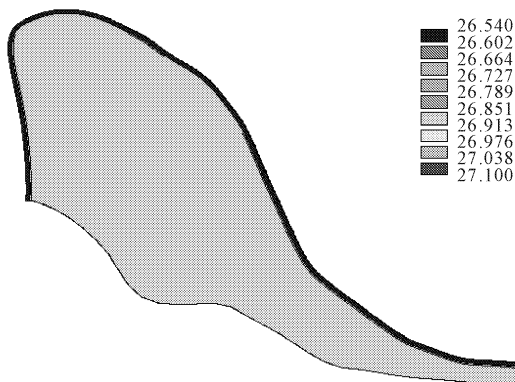


图 7 无防渗设施枯水期坑内外渗流测压管水头云图(单位:m)

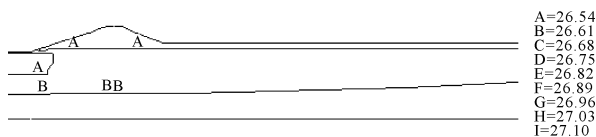


图 8 无防渗设施枯水期桩号 46+900 断面测压管水头等值线分布图(单位:m)

在枯水期,坑外水位相对较低,坑内水位相对较高,因此渗流由坑内向坑外渗流。由于坑内河道水位比地表面高程相对较低,因此,在枯水季节,在不考虑降雨补给情况下,坑内地表面没有水流渗入或逸出,渗流均在坑内地下流动;而在坑外,渗流出逸后汇入外河道。在桩号 46+900 断面,在坑内地层内,渗流非常缓慢,水头下降很小。由坑内通过堤防及基础流入外河道的渗流量为 $0.000395 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

设置防渗体后,由计算得到的坑内水位分布与图 8 所示的分布非常接近。主要的区别在于堤防局部位置。由于受防渗墙等防渗设施的阻水作用,渗流流动受到阻碍,相对于没有防渗墙等防渗设施情况,在坑内一侧,地下水位略有所提高。由坑内向坑外流出的渗流量为 $0.000393 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

5 计算结果分析

从上述计算分析可以看到,对于整个渗流区域,可以分为堤防局部区域和坑内区域两大部分。

在堤防局部区域,在设置了防渗墙等防渗设施后,局部渗流场发生较大的变化。针对无、有防渗墙等防渗设施两种情况,在表 1 所示各桩号堤防段取代表性断面,在洪水期、常态期以及枯水期,由渗流场计算得到的特征位置(防渗体的坑内一侧位置)的水头列于表 2。

表 2 设置防渗体前/后的特征位置水头

单位:m

断面	洪水位		常态情况		枯水位		备注
	无防渗	有防渗	无防渗	有防渗	无防渗	有防渗	
46 + 900 断面	31.89	29.77	29.69	29.04	26.55	26.58	水泥土防渗墙
51 + 800 断面	31.90	31.90	29.70	29.70	26.55	26.55	无
54 + 500 断面	31.90	30.10	29.70	29.16	26.55	26.57	水泥土防渗墙
56 + 430 断面	31.90	31.89	29.70	29.70	26.55	26.55	无
60 + 000 断面	31.89	30.47	29.69	29.29	26.56	26.57	劈裂灌浆段
65 + 000 断面	31.94	30.46	29.72	29.30	26.58	26.90	水泥土防渗墙

注:表中备注项指的是有防渗设施时防渗体情况。

由表 2 可以看到,在洪水期,由于防渗体的作用,自由面具有比较大的水头下降。而对于常态情况,在防渗体位置,渗流自由面也有所下降,但量值已大大减小;当外湖水位继续下降,渗流自由面继续下降。即在洪水期,防渗设施能有效拦截渗流;而在常态期,随外湖水位越低,防渗设施对于渗流拦截作用不断减小。

在枯水期,渗流由垸内向垸外渗流,对于有防渗设施情况,防渗体在垸内一侧的渗流自由面略有提高,说明了防渗体对由垸内向外的渗流具有拦截作用,这对于枯水期,垸内缺水情况下涵养水分是有积极意义的。

对于垸内区域,从渗流逸出分布区域情况来看,设置防渗设施与否,对于垸内渗流出逸面积几乎没有影响;对于深部地下水补给情况也几乎没有影响。即使将堤防全部设置防渗体,这种状态也基本不变。

进一步从流量方面来看,将前述计算的渗流量汇总,并列出了全部堤防设置防渗设施的计算结果,见表 3。分别计算了有防渗设施相对于无防渗设施情况的流量差异。

表 3 各工况计算的渗流量 单位:m³/s

工况	无防渗设施		部分防渗设施		全部防渗设施	
	流量	差异/%	流量	差异/%	流量	差异/%
洪水期	0.1483	0.1260	15	0.1125	24	
常态期 30.82 m 水位	0.0579	0.0518	10.5	0.0477	17.6	
常态期 28.82 m 水位	0.0085	0.0082	3.5	—	—	
枯水期(垸内向垸外渗透)	0.000395	0.000393	-0.5	0.000385	-2.5	

注:其中的差异是相对于无防渗设施情况计算的;表中负号表示由垸内向垸外流动。

将设置防渗设施后各外湖水位及对应的流量差异点绘在图中,见图 9 所示。

从图 9 曲线可以很明显看到:

(1) 在外湖水位大于 27.1 m 时,防渗设施阻碍渗流向垸内流动,但这种阻碍效应不是常数,而是随

外湖水位的降低而降低。在洪水位时,阻碍作用最大。在常态期,若部分堤防布置防渗设施外湖水位小于 29.2 m 左右时或若全部堤防布置防渗设施在外湖水位小于 28.1 m 左右时,由防渗设施导致的相对于无防渗设施情况的渗流量差异小于 5%。

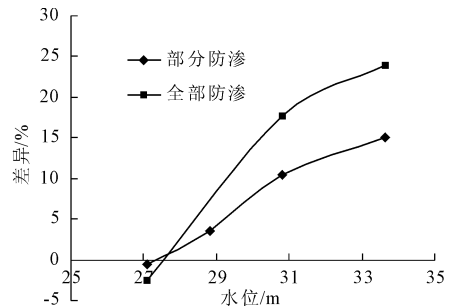


图 9 水位 - 流量差异曲线

(2) 在枯水期,防渗设施阻碍渗流由垸内向垸外流动,且外湖水位越低,这种阻碍作用越大。

因此,从流量角度来看,在洪水期,防渗设施可以明显阻碍外湖水向垸内的渗流,从而起减灾作用。而在常态期,在外湖水位较低时(可能也是垸内需要水的时期),尽管防渗设施仍然有阻碍渗流的作用,但这种作用随外湖水位降低越来越小,直至没有影响。在枯水期,垸内水位比外湖水位高,防渗设施有少量的阻碍渗流的作用,这对于枯水期涵养水分是有利的。

6 结论

通过上述计算对比分析,可以得出结论如下:

(1) 在洪水期或常态期,尽管防渗设施对堤防中的局部渗流场分布有影响,但对于垸内渗流分布区域影响不明显。在极端情况下,即使所有堤防都布置了防渗设施,情况也是如此。换言之,在垸内,在无防渗设施情况下有地下水的区域,设置防渗设施后仍然有地下水。

(2) 对于深部位置的透水层,其渗流不受堤防

防渗体的影响,渗流在透水层中缓慢流动,并穿过相对不透水层,向浅表地层补水。这种补水机制不会因为防渗体的布置而改变。

(3) 在枯水季节,渗流由坑内向坑外流动,而防渗设施的布置,有阻止渗流向外出流的作用,可以略微提高坑内地下水水位,这对于枯水期坑内地下水的涵养是有益的。枯水期坑内可提供的水源越多,地下水位越高,这种涵养效果将越明显。

(4) 在洪水期,防渗设施具有最大的阻碍渗流作用;在常态期,这种作用随外湖水位的降低而降低,直至没有影响。若堤防部分布置防渗设施,在外湖水位比较低,相应坑内缺水时,防渗体的阻碍渗流作用很小。

(5) 总之,在堤防的加固过程中,防渗措施的布置对蓄洪坑内外的渗流作用有较大影响,洪水季节有利于缓解坑内的洪涝灾害,枯水季节有利于坑内地下水的涵养;但是,对坑内的渗流区域影响较小,即不会影响坑内的生活、生产用水。

参考文献:

- [1] 何建军. 不适当筑堤围坑对洞庭湖区环境的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 139-141, 146.
- [2] 张晓斌. 防渗墙在洞庭湖堤防渗控技术中的应用与研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [3] 付成华, 陈敏林. 非均质土堤防加固工程措施的防渗效果分析[J]. 湖北水力发电, 2004, (1): 26-28.

- [4] 张晓斌. 防渗墙在洞庭湖堤防渗控技术中的应用与研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [5] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [6] 张晓元, 李长城, 余成学. 吴岭水库大坝渗流及对坝坡稳定影响的分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(3): 53-56.
- [7] 陈守开, 刘尚蔚, 郭利霞, 等. 中、小型土石坝渗流场三维有限元分析方法及应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(4): 612-621.
- [8] 周建国, 李涛, 郭雪莽. 土坝渗流对地下水位动态影响三维有限元分析[J]. 水利水电技术, 2006, 37(2): 110-112.
- [9] 周桂云. 饱和-非饱和非稳定渗流有限元分析方法的改进[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(1): 5-7, 11.
- [10] 吴良骥, Bloomsburg G L. 饱和-非饱和区中渗流问题的数值模型[J]. 水利水运科学研究, 1985, (2): 213-217.
- [11] 毛昶熙, 冯玉宝, 段祥宝. 堤防设计中的非稳定渗流计算[J]. 水利学报, 2002, 33(12): 56-62, 67.
- [12] 郑秀培. 土石坝地基混凝土防渗墙设计与计算[M]. 水利电力出版社, 1979.
- [13] 王云峰, 李杨红. 有限元分析法在罗定市城区堤防工程非稳定渗流计算中的应用[J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2006, (1): 45-48.
- [14] 任苇. 堤防稳定渗流形成条件初探[J]. 陕西水利水电技术, 2000, (2): 19-21.

(上接第 87 页)

参考文献:

- [1] 刘能铸. 基于灰色理论的隧道围岩稳定性预测分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2007: 47-56.
- [2] 万利. 高速公路隧道施工监测技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2006: 34.
- [3] 亢会明. 隧道围岩稳定性分析智能决策支持系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
- [4] 靳晓光, 李晓红, 高芑, 等. 隧道围岩位移的灰色优化模型预测[J]. 重庆大学学报, 2001, 25(1): 1-5.
- [5] 张建龙, 谢漠文. 围岩失稳的灰色预报[J]. 水利电力大学学报, 1993, 31(4): 43-46, 55.
- [6] 刘思峰, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科技出版社, 2004.
- [7] 邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1998.
- [8] 许秀莉. 灰色关联、聚类、预测的改进及应用[D]. 厦门: 厦门大学, 2001.
- [9] 王义国, 刘晓燕, 韩爱民. 隧道围岩变形的灰色预测模型研究[J]. 江苏建筑, 2009, (3): 45-47.
- [10] 霍玉华. 隧道围岩变形量预测的灰色模型应用比较研究[J]. 北京: 北京交通大学学报, 2006, 30(4): 42-45.
- [11] 夏才初, 李永盛. 地下工程测试理论与监测技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999.
- [12] 黄明华, 刁心宏, 杨华. 隧道变形预测的灰色模型研究[J]. 南昌: 华东交通大学学报, 2008, 25(2): 22-24.
- [13] 夏才初, 潘国荣, 等. 土木工程监测技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [14] 吴建兵. 软岩隧道快速掘进中变形预测及支护方案优化的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003: 47-48.