

堤防锥探灌浆加固后的渗流及稳定性比较分析

武娟¹,岑威钧^{2*},张鸣¹,牛超群^{2,3}

(1.南京市高淳区水资源管理中心,江苏南京 211301;2.河海大学水利水电学院,江苏南京 210024;
3.水发规划设计有限公司,山东济南 250100)

摘要:总结了某堤防工程主要病险问题与安全现状,提出了相应的加固设计方案,重点对长期存在的堤身渗水问题开展灌浆防渗方案比较分析,对优选的锥探灌浆进行了较为详细的设计。在此基础上,采用饱和-非饱和、稳定-非稳定渗流有限元计算理论,对锥探灌浆防渗加固前、后的堤防开展稳定渗流场以及水位骤降工况下非稳定渗流场计算,对堤身孔压变化规律等渗流性态进行研究,并开展相应的堤坡稳定计算。结果表明,采用锥探灌浆加固后,堤身渗流量和逸出坡降明显减小,浸润线降低,防渗效果显著,且各工况下堤坡抗滑稳定安全系数提升明显。

关键词:锥探灌浆;水位骤降;防渗性能;堤坡稳定性;效果评价

中图分类号:TV871

文献标识码:A

Comparative Analysis of Seepage Property and Stability of Reinforced Dikes Using Cone Probe Grouting

WU Juan¹, CEN Weijun^{2*}, ZHANG Ming¹, NIU Chaoqun^{2,3}

(1. Gaochun District Water Resources Management Center, Nanjing, Jiangsu 211301, China;
2. Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China;
3. Shuifa Planning and Design Co., Ltd, Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract: The main safety problems and reinforcement design schemes of the substandard dike of a dike project, focuses on the comparative analysis of grouting seepage prevention schemes of the dike, and designs the optimized cone probe grouting in detail. On this basis, the saturated-unsaturated, stable-unstable seepage finite element calculation theory is adopted to calculate the stable seepage field and the unstable seepage field under the condition of sudden drop of water level of the dike before and after seepage control and reinforcement by cone probe grouting, and the seepage behavior such as the variation law of pore water pressure of the dike body is studied, and the corresponding stability calculation of the dike slope is carried out. The results show that, after the reinforcement by cone probe grouting, the seepage flow and escape slope of the embankment are obviously reduced, the infiltration line is lowered, and the anti-seepage effect is remarkable, and the safety factor of anti-sliding stability of the embankment slope is obviously improved under various working conditions.

Key words: cone grouting; drop of water level; impermeable property; stability of dike; effect evaluation

截止到2018年,我国已建5级及以上江河堤防 31.2×10^4 km,累计达标堤防 21.8×10^4 km,达标率为69.8%^[1]。由于各地堤防建造标准、施工质量、运行管理、当地经济水准等方面差异性较大,

当前未达标的堤防主要问题包括防洪标准偏低、堤身单薄、堤坡稳定性不足、堤身防渗性差(如局部渗漏、管涌等)等,在洪水期、水位骤降、持续降雨等不利运行条件下可能产生渗流破坏和堤坡失

收稿日期:2022-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2243223,U2243244);广东省水利科技创新项目(2020-05)

作者简介:武娟(1982-),女,山西汾阳人,硕士,工程师,主要从事水利工程规划和管理工作的。

* 通讯作者:岑威钧(1977-),男,浙江慈溪人,博士,教授,主要从事土石坝安全分析和水工渗流计算方面的研究。

稳,极端条件下局部堤段还可能出现洪水漫顶溃决等重大安全问题^[2]。因此,非常有必要对一些未达标堤防开展现场调查和检测、病害分析、复核计算、安全评价及修复加固等方面的研究工作。在影响堤防安全的外在因素中,水位及其变化往往是引起堤防险情的主要诱因。在迎水坡水位变动时,堤身土体处于非稳定条件下的饱和-非饱和渗流状态,饱和区与非饱和区的孔隙水互相流动,浸润线不断变化。特别是水位骤降时,堤防渗流场水头分布可能在短时间内发生较大变化,堤内孔隙水压力来不及扩散和消散,可能导致局部孔压梯度较高,堤坡逸出点偏高,使堤坡发生局部渗透破坏或失稳^[3-4]。为此,不少研究人员开展了大量相关的研究工作,如岑威钧等^[5]开展了持续强降雨引发水位耦合变化条件下堤防渗流特性及稳定性分析;刘俊新^[6]研究了非饱和地表径流-渗流耦合条件下降雨入渗对堤坡稳定性的影响;孙冬梅等^[7]探讨了堤防在水位下降过程中气相对边坡稳定的影响;Axel等^[8]分析了库水位升降对土石坝坝坡稳定性的影响;吴平等^[9]开展了库水位骤降偶遇地震作用时上下游坝坡渗流特性及抗震稳定性。詹美礼^[10]开展了堤外水位升降条件下非稳定渗流模型试验研究。总体上,以往研究大多借助数值模拟或模型试验手段,主要集中在降雨和库水等外在条件对堤坝渗流特性及边坡抗滑稳定性等方面的影响研究。

本文依托南京市境内水阳江干流堤防工程,在现场调查和检测分析基础上,对未达标堤段存在的病险问题和现状安全进行了阐述分析,提出相应的加固设计方案。重点对锥探灌浆加固前、后堤防非饱和瞬态渗流场进行计算,分析堤身渗流场分布及变化规律,并进行堤坡稳定性影响分

析,最终对防渗加固方案效果进行综合评价。

1 堤防病险与加固设计

南京市高淳区境内水阳江干流堤防,全长 8 873 m,堤顶高程 12.76 m,堤顶宽度 6 m,堤防设计洪水水位为 10.81 m,设计枯水位为 2.70 m。根据《防洪标准》《堤防工程设计规范》等相关规定,堤防防洪标准为 20~40 年一遇,等级为 4 级。经过现场调查、日常巡查、设计资料、地勘资料、物探检测等综合分析,发现堤防存在以下主要安全隐患等问题:局部堤段高程低、堤顶宽度不足、内外边坡较陡,局部堤身断面未达标。另外,有些堤段堤基软弱土层深厚,土体强度低,特别是迎水坡堤身高度高,淤泥质土层在河岸出露,容易引发失稳问题。由于早期堤防填筑质量未严格控制,调查发现全线绝大部分堤段的堤身和堤基抗渗能力较差,遇高洪水位时常出现渗水现象,历史上出现多次迎水坡局部崩塌险情。针对上述问题,通过方案论证分析,开展有针对性的加固设计研究,主要包括对堤身加培、增设平台、防渗补强等措施,堤防加固前、后的典型断面对比见图 1^[11]。

由历次险情记录、现场调查和物探分析发现,局部堤身存在填土不密实引起的较大范围裂缝、孔洞、松土层,现场条件不允许对堤身进行开挖重新压密回填。因此,堤身防渗加固时考虑采用充填灌浆、锥探灌浆、劈裂灌浆等防渗加固措施。充填灌浆一般用于对已知孔洞和缝隙的加固,劈裂灌浆适用于渗透性大的堤防。综合现场情况,分析认为本工程堤身渗水主要因为局部堤身填土不密实以及可能存在的孔洞空隙,宜选取灌浆压力较小,对堤身原状土扰动小的锥探灌浆。现场查勘和论证分析后,决定对桩号 GX0+000—GX1+953、

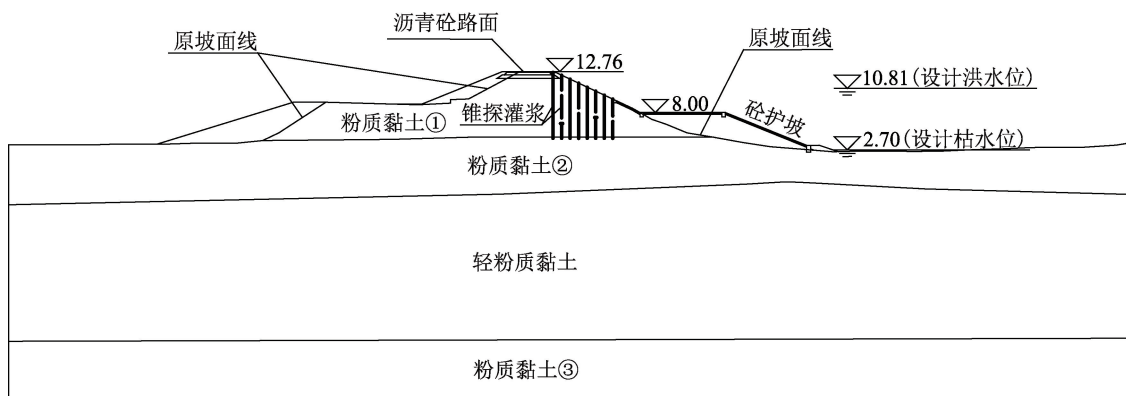


图 1 堤防断面图

Fig. 1 Cross-section of dike

GX2+730—GX3+300、GX3+970—GX9+650等3段共计长8.203 km堤段进行锥探灌浆防渗处理。由于现状堤顶路面为混凝土结构,对其预钻孔实施锥探灌浆施工较困难,同时对堤顶道路交通干扰大,因此考虑在堤肩和迎水坡侧布孔实施锥探灌浆,相比之下较易施工。结合以往经验和现场试验,设计时每延米堤防断面锥探灌浆排数4排,灌浆孔排距为1.0 m,同排孔距2.0 m,平面呈梅花型布置,深入堤基土层1.0~2.0 m,一般取底高程5.0 m,孔深一般为7.5~8.5 m,开孔直径为26~28 mm。锥探灌浆压力一般控制在0.05 MPa以下,浆液采用砂料含量低,流动性大的黏土料浆,黏粒含量不小于20%。

2 渗流场计算理论与计算模型

2.1 渗流场计算理论

三维条件下多孔介质饱和-非饱和非稳定渗流场的微分方程为^[12-13]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c) \right] = (C(h_c) + \beta S_s) \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (1)$$

式中, x_i 为坐标; h_c 为压力水头; k_{ij}^s 为饱和渗透张量; $k_r(h_c)$ 相对渗透系数; $C(h_c)$ 为容水度; β 在非饱和区等于0,饱和区等于1; S_s 为单位贮存系数。

相应的初始条件和边界条件为:

$$\text{初始条件: } h_c(x_i, 0) = h_c(x_i, t_0) \quad (2)$$

$$\text{边界条件: } h_c(x_i, t) |_{\Gamma_1} = h_{c1}(x_i, t) \quad (3)$$

$$- [k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c)] n_i |_{\Gamma_2} = q_n \quad (4)$$

$$- [k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c)] n_i |_{\Gamma_3} \geq 0$$

$$\text{且 } h_c |_{\Gamma_3} = 0 \quad (5)$$

$$- [k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c)] n_i |_{\Gamma_4} = q_\theta$$

$$\text{且 } h_c |_{\Gamma_4} < 0 \quad (6)$$

式中, q_n 为已知流量边界法向流量, q_θ 为非饱和逸出面边界法向流量,以外法线方向为正; n_i 为外法线方向余弦; t_0 为初始时刻; Γ_1 为已知水头边界; Γ_2 为已知流量边界; Γ_3 为饱和逸出面边界; Γ_4 为非饱和逸出面边界。

式(1)~式(6)用于描述最一般的三维饱和-非饱和非稳定渗流场,去掉相关项可退化为二维渗流情况。

2.2 计算模型

对图1所示的堤防典型断面进行有限元建模,将加固前、后的断面进行区分,对锥探灌浆区域、迎水坡混凝土面板、护坡及其垫层均进行了细致模拟(图中红色区域为加培堤身),有限元网格见图2,其中节点数为7 564,单元数为7 400。图2中的颜色分区与图1对应。

根据地质勘探资料和现场试验,结合工程实际情况,拟定域主要材料的饱和渗流计算参数,见表1。堤身粉质黏土①按非饱和渗流特性考虑^[14],其非饱和特征特征曲线见图3,其它地基土体按饱和和材料处理。表1中亦给出了相关物理学参数,用于堤坡稳定计算。

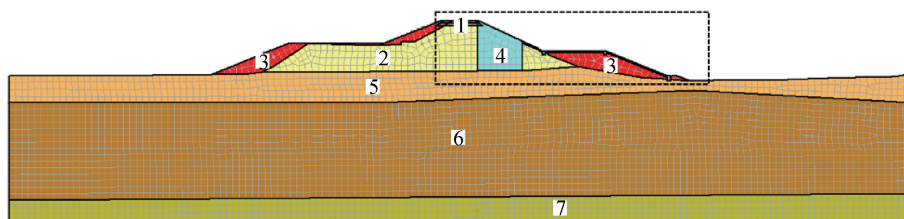


图2 堤防有限元网格

Fig. 2 Finite element mesh of dike

注:数字1~7分别代表坝顶区、原堤身粉质黏土①、加固部分的粉质黏土①、锥探灌浆区、粉质黏土②、轻粉质壤土和粉质黏土③。

表1 土体物理力学参数和渗透系数

Tab. 1 Physical and Mechanical Parameters and Permeability of Soil

材料	$K_x / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$k_y / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	C / kPa	$\Phi / (^\circ)$
粉质黏土①	8.50×10^{-5}	7.60×10^{-5}	19.55	18.00	10.50
粉质黏土②	6.83×10^{-6}	6.20×10^{-6}	19.75	16.0	11.10
粉质黏土③	1.18×10^{-6}	1.18×10^{-6}	18.20	15.00	9.20
轻粉质壤土	1.4×10^{-4}	1.4×10^{-4}	20.48	35.50	12.30
锥探灌浆	4×10^{-6}	4×10^{-6}	18.90	20.00	14.50
砂砾垫层	3×10^{-3}	3×10^{-3}	21.10		

3 渗流场特性分析

3.1 防渗加固前后稳态渗流场特性

图4分别为设计洪水水位下堤防防渗加固前、后稳定渗流场等水头线图(截取图2中堤防主体区域进行成果展示;蓝色虚线为浸润线,数字为水头值)。上游堤坡采取防渗加固前,堤身部分等水头线总体上分布均匀,浸润线沿程缓慢降落,符合均质堤坝渗流场一般规律;同时,由于堤防地基多个分层,且各自渗透性差异较大,因此等水头线在相邻地基分层处有明显转折。计算得到堤防单宽渗流量为 7.95×10^{-4} L/s/m, 逸出坡降为 0.55, 虽然单宽渗流量不大,但是逸出坡降超过了所在土层的允许值 0.40, 有发生渗透破坏的可能。当迎水坡采用锥探灌浆防渗加固后,等水头线在迎水坡锥探灌浆处分布相对密集,削减水头显著,浸润线有明显的局部下降,之后沿程逐渐降低。加固后堤防的单宽渗流量降至 3.26×10^{-4} L/s/m, 逸出坡降减小为 0.35。由此可见,采用锥探灌浆防渗加固后,堤防渗流量和逸出坡降均明显减小,逸出坡降满足了规范要求,说明堤防迎水坡实施锥探灌浆起到了较好的防渗效果,在堤防工程中可以推广使用。

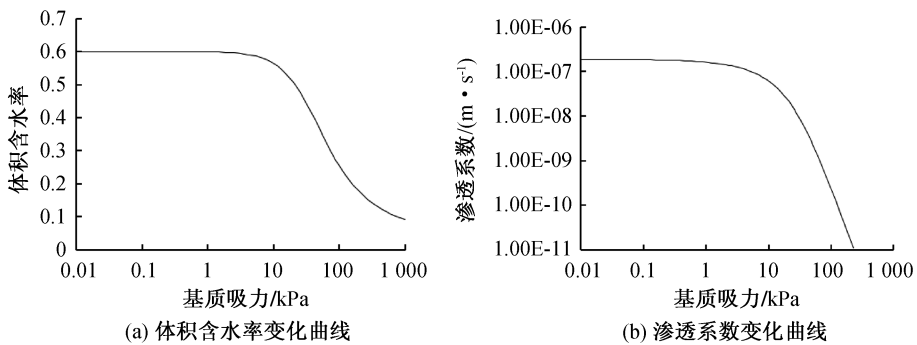


图3 堤身土体非饱和和渗流特征曲线
Fig.3 Characteristic curve of dike soil

3.2 水位骤降时堤防浸润线变化

图5为堤防防渗加固前、后堤前水位以不同速度(2、1和0.5 m/d)下降时堤身内浸润线变化图(注:为了清晰显示计算成果,截取图2中虚线框范围进行成果展示),图中数字为浸润线所处时刻,单位为d。

由图5(a)(c)(e)可以看出,堤防加固前,随着水位下降,堤身内的浸润线也随之下落,堤身内浸润线下降有明显的滞后现象。初始水位状态(即水位下降0 d)时浸润线最高点位于堤防上游堤坡;水位下降后,由于孔隙水压力来不及消散而滞留在堤身内,使浸润线最高点位于堤身内部,随时间增长,堤身内浸润线最高点从上游堤坡处逐渐向堤身中部移动。且浸润线最高点始终高于上游水位,孔隙水在上游坡面逸出,形成逆流现象。水位下降速度越快,逆流现象越明显。不同水位下降速度下,浸润线在经过 20 d 后变化趋势基本相同,逸出点位置接近。

由图5(b)(d)(f)可以看出,堤防加固后,由于堤防上游侧的锥探灌浆的防渗作用,初始水位下堤身内锥探灌浆后的浸润线明显降低;水位下降后,锥探灌浆处孔隙水压力不易消散,浸润线出现壅高现象。水位下降速度越快,壅高现象越明显。迎水坡下部加固新增的混凝土护坡有一定的阻水

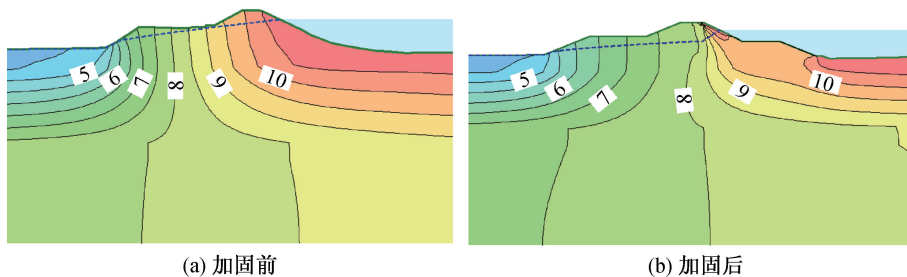


图4 堤防等水头线分布图(单位:m)
Fig.4 Distribution of isolines of dike

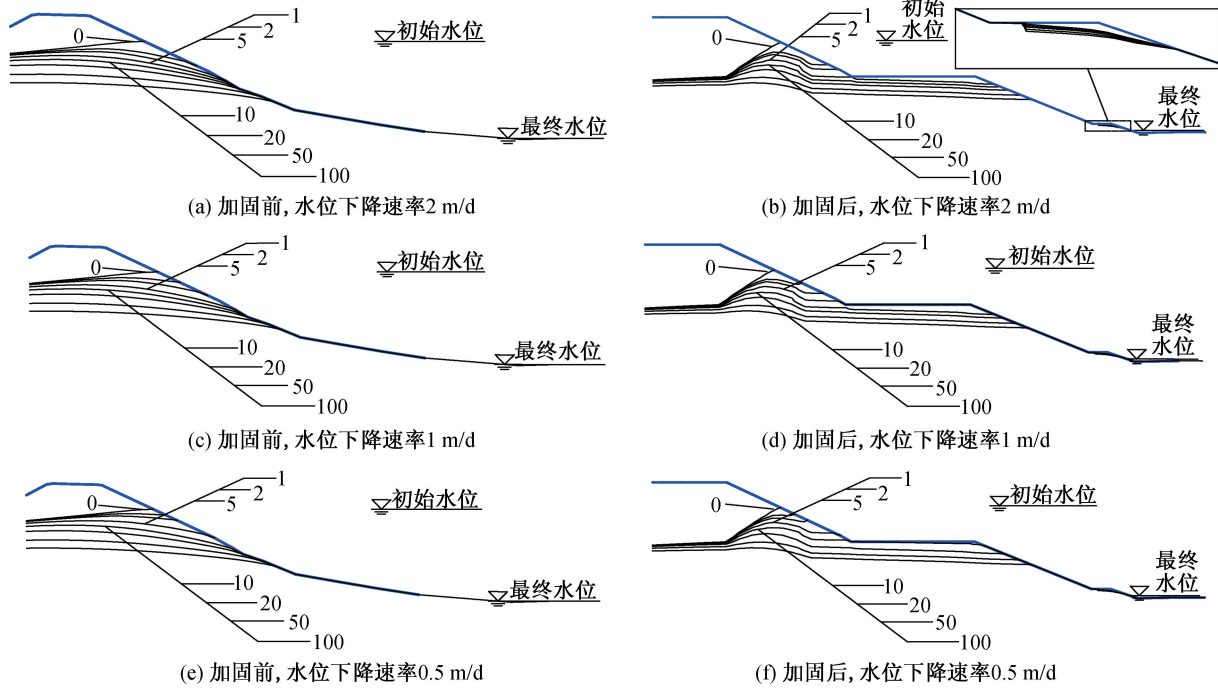


图 5 防渗加固前、后堤防浸润线变化图(单位:d)

Fig. 5 Changes of seepage lines of dike before and after anti-seepage reinforcement

作用。上游水位下降到最低水位后,浸润线壅高趋势逐渐减小,至 50 d 后壅高现象基本消失。不同水位下降时刻,在最终水位附近的小平台处浸润线呈现密集(图 5(b)中的局部放大图),位置基本接近。

3.3 水位骤降时堤防孔隙水压力变化

为进一步分析水位骤降时堤防非饱和渗流特性,在堤身迎水侧和背水侧各取两个观测点,见图 6。

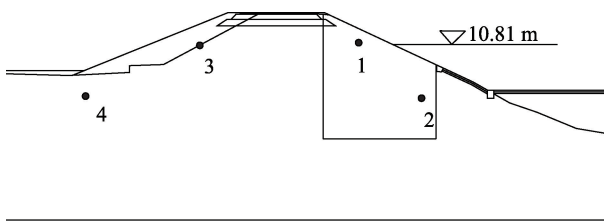


图 6 堤身测点位置图

Fig. 6 Location of measuring points in dike

堤防加固前后,水位下降速度为 2 m/d 时,测点 1~4 在水位开始下降后 40 d 内孔隙水压力变化过程如图 7 所示。

从图 7(a)可以看出,当上游水位从 10.81 m 降至 2.81 m 时,位于上游迎水坡的 1 号测点孔隙水压力从 -0.64 m 减小至 -1.16 m 用了 4 d,下降速率为 0.13 m/d,4 d 后下降速率逐渐减小;位于上游迎水坡的 2 号测点孔隙水压力从 3.06 m 减小

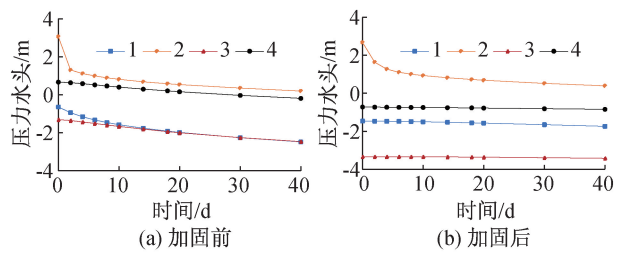


图 7 水位下降时堤防测点孔隙水压变化过程图

Fig. 7 Process diagram of pore water pressure change at dike measuring point when water level drops

至 1.12 m,下降速率为 0.49 m/d,之后下降速率逐渐减小。位于下游堤坡的 3 号测点孔隙水压力从 -1.31 m 减小至 -1.43 m,下降速率为 0.03 m/d,之后以较为平稳的下降速率逐渐减小;位于下游堤坡的 4 号测点孔隙水压力从 0.67 m 减小至 0.58 m,下降速率为 0.02 m/d,之后也较为平稳的逐渐减小。水位下降 8~40 d 时(8 d 时已下降到最低水位),1 号测点的孔隙水压从 -1.46 m 降低到 -2.48 m,下降速率为 0.032 m/d,2 号测点的孔隙水压从 0.894 m 降低到 0.197 m,下降速率为 0.026 m/d,3,4 号测点的孔隙水压力下降速率则较小。由图 7(b)可以看出,加固后 1~4 号测点孔隙水压力变化规律虽然整体上与加固前相似,但是各测点在同一时刻孔隙水压力均小于加固前各测点相应值,这正是迎水坡内锥探灌浆防渗体造成的。加固后,锥探灌浆削减水头作用显著,堤身

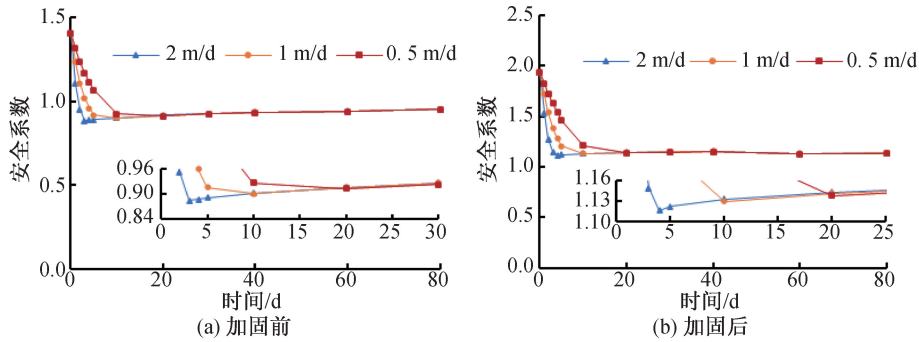


图8 水位骤降时迎水坡抗滑稳定安全系数变化图

Fig. 8 Variation of safety factor of slope when water level drops sharply

内浸润线明显下降后,1、3、4测点距离浸润线较远,受堤身内自由水面下降影响较小,所以1、3、4测点的孔隙水压力变化平稳。

当堤防上游水位骤降时,受水分运移的影响,堤防内各处的孔隙水压力存在不同幅度和不同速率的下降。其中,堤身上游侧孔隙水压力的下降速率明显大于下游侧孔隙水压力的下降速率。堤身靠近上游侧,在水位下降过程中,高程越高,孔隙水压力下降速率越小,而当水位下降到最低水位后,孔隙水压力变化趋势逐渐减小并趋于稳定,此时高程越高,孔隙水压力下降速率越大,但下降速率相差较小。

4 堤坡稳定性分析

4.1 稳定渗流下堤坡稳定性

考虑稳定或非稳定渗流作用,采用毕肖普法对堤坡加、固前后迎水坡和背水坡的抗滑稳定安全系数进行计算^[15],计算结果见表2。由表2可以看出,加固后堤坡抗滑稳定安全系数均有不同程度的提升,原先迎水坡抗滑稳定安全系数不足(1.185)的情况也提升到1.295,满足了规范要求。

表2 抗滑稳定安全系数计算成果

Tab. 2 Safety factor of anti-sliding stability

工况	加固前	加固后	增幅/%
设计洪水位迎水坡	1.407	1.884	33.90
设计洪水位背水坡	1.237	1.376	11.24
设计枯水位迎水坡	1.185	1.295	9.28
设计枯水位背水坡	1.654	1.655	0.06

4.2 水位骤降时堤防迎水坡稳定性

上游水位骤降时,由于堤身土体渗透性较低,

堤体内孔隙水压力消散滞后,会出现高孔压区,上游堤坡逸出点偏高,会对上游堤坡稳定性造成不利影响。同时,由于上游水位对堤防迎水坡的静水压力有利于上游堤坡的稳定,上游水位的下降会导致上游堤坡稳定安全系数降低。图8为不同水位下降速度下,堤防加固前、后迎水坡抗滑稳定安全系数随水位下降的变化图。

由图8可以看出,上游水位开始下降后,迎水坡抗滑稳定安全系数快速下降,水位下降越快,安全系数下降越快,安全系数最小值越小,这是由于堤身内孔隙水压力消散滞后所致。迎水坡抗滑稳定安全系数下降到最小值后,呈现出缓慢增大并逐渐趋于稳定的趋势,且不同水位下降速度下稳定后的安全系数几乎相同。这是由于上游水位降低到最低点后,随着时间增长,堤身内各点孔隙水压力变化逐渐趋于稳定。在上游水位下降的整个过程中,防渗加固后迎水坡抗滑稳定安全系数明显大于加固前的相应值,说明采用锥探灌浆防渗加固后的堤坡稳定性也得到了有效提升。

5 结论

本文对某堤防工程锥探灌浆防渗加固前后的堤身渗流特性和堤坡稳定性进行了有限元计算并作比较分析,考虑了特征水位下堤防稳定渗流和水位骤降条件下的非稳定渗流情况。相比未加固前的原始情况,堤身采用锥探灌浆防渗加固后,其渗流量和逸出坡降明显减小,浸润线降低,说明锥探灌浆防渗效果显著。在稳定渗流和非稳定渗流下,防渗加固后的堤坡抗滑稳定安全系数提升明显,均满足了规范要求。由于锥探灌浆施工方便,费用较低,可为平原地区类似土质堤防工程渗漏消险时借鉴使用。

参考文献:

- [1]张清明,王荆,汪自力,等.我国典型堤防工程管理现状调查分析[J].中国水利,2020(10):36-38.
- [2]毛昶熙.堤防工程手册[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [3]时铁城,阮建飞,张晓.库水位骤降情况下土石坝坝坡稳定分析[J].人民黄河,2014,36(2):93-94+97.
- [4]朱朋,卢书强,薛聪聪,等.库水位升降与降雨条件下滑坡的渗流及稳定性分析[J].长江科学院院报,2015,32(11):87-92.
- [5]岑威钧,李邓军,和浩楠.持续强降雨引发水位耦合变化条件下堤防渗流及稳定性分析[J].河海大学学报.2016,44(4):364-369.
- [6]刘俊新.非饱和渗流条件下红层路堤稳定性研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [7]孙冬梅,张杨,SEMPRICH S,等.水位下降过程中气相对土坡稳定性的影响[J].地下空间与工程学报,2015,11(2):511-518.
- [8]AXEL M, PIETER A V, MAXIMILIAN H. A Probabilistic Finite Element Analysis of Embankment Stability Under Transient Seepage Conditions[J]. Georisk Assessment & Management of Risk for Engineered Systems & Geohazards, 2011, 5(2): 110-119.
- [9]吴平,万燎榕.库水位骤降偶遇地震作用下黏土心墙坝渗透及抗震稳定性分析[J].水资源与水工程学报,2019,3(6):194-199.
- [10]詹美礼,踪金梁,严飞,等.堤外水位升降条件下非稳定渗流模型试验研究[J].岩土力学,2012,33(S1):91-96+111.
- [11]徐照明,易思勇,宋子亨,等.南京市高淳区水阳江干流左岸(小蔡河—乌溪河段)堤防加固工程初步设计报告[R].武汉:长江勘测规划设计研究有限责任公司,2020.
- [12]沈振中,岑威钧,徐力群,等.工程渗流分析与控制[M].北京:科学出版社,2020:35-40.
- [13]毛昶熙,段祥宝,李祖贻,等.渗流数值计算与程序应用[M].南京:河海大学出版社,1999,22-24.
- [14]GENUCHTEN M T V. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils[J]. Journal of the Soil Science Society of America, 1980, 44(5): 892-898.
- [15]岑威钧,邓同春,石从浩,等.复杂渠坡稳定性分析方法比较[J].水利水运工程学报,2013(4):29-34.
- (责任编辑 周雪梅)
-
- (上接第61页)
- [14]孔令云,管明阳,全秀洁. APAO&SBS 复合改性沥青性能研究[J].应用化工,2020,49(12):3051-3054.
- [15]SHENOY A. Nonrecovered Compliance From Dynamic Oscillatory Test Vis-a-Vis Nonrecovered Compliance From Multiple Stress Creep Recovery Test in the Dynamic Shear Rheometer[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2008, 9(5): 329-341.
- [16]林江涛,樊亮,马士杰,等.温度扫描下 SBS 改性沥青动态力学行为分析[J].新型建筑材料,2012,39(8):39-41.
- [17]薛振华,樊兴华.碳纳米管改性沥青的性能及改性机理研究[J].新型建筑材料,2021,48(6):106-110.
- (责任编辑 周雪梅)