

洪水和渗漏作用下河堤的稳定性分析

程 硕¹, 龚 畅², 马 悦²

(1. 江苏省骆运水利工程管理处, 江苏 宿迁 223800; 2. 江苏省水利科教中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 极端降水形成的洪水会造成堤坝渗漏, 而渗漏会加剧堤坝溃决的风险。溃坝事件发生由三个主要因素共同造成, 即洪水事件、堤坝的水力薄弱环节和岩土工程薄弱环节。通过以江苏省宿迁市南部的一处河堤为例, 分析其在洪水和渗流下的稳定性。分别从水文学、水力学和岩土学角度确定河堤破坏过程的影响因素, 研究结果指出洪水和渗漏导致的交通堤坝溃决的主要因素为内部侵蚀, 包括土壤淤积和集中管道侵蚀等过程。研究结果对评估洪水和渗漏下交通堤坝的稳定性具有实际的指导意义。

关键词: 河堤; 洪水; 渗流; 内部侵蚀; 边坡稳定性

中图分类号: TV871

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2025)10-0054-0005

Analysis of the stability of river embankments under flood and seepage

CHENG Shuo¹, GONG Chang², MA Yue²

(1. Luoyun Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Suqian 223800, China;

2. Jiangsu Water Conservancy Science and Education Center, Nanjing 210029, China)

Abstract: Floods formed by extreme precipitation can cause seepage in embankments, and seepage will increase the risk of dam break. The occurrence of dam break events is jointly caused by three main factors, namely flood events, the weak link of the hydraulic system of the embankment and the weak link of geotechnical engineering. This paper takes a river embankment in the south of Suqian City, Jiangsu Province as an example to analyze its stability under flood and seepage. In particular, the influencing factors of the river embankment failure process were determined from the perspectives of hydrology, hydraulics and geotechnical engineering. The research results indicate that the main factor causing the breach of transportation embankments due to floods and seepage is internal erosion, which includes processes such as soil silting and concentrated pipe erosion. These results have practical guiding significance for evaluating the stability of transportation embankments under floods and seepage.

Key words: river embankment; flood; seepage; internal erosion; slope stability

上游水头造成的渗流会导致堤坝全面溃决, 但对于位于铁路或公路与排水管网相交的临界点处的交通河堤往往被忽视。对于交通河堤而言, 与渗流相关的风险与上游侧临时和偶发性蓄水有关^[1]。上游蓄水一般由两种不同情况的事件共同造成。

第一种情况可定义为“洪水事件”, 涉及排水管网中的洪峰流量或暴雨造成的所谓次生洪水。第二种情况是交通堤坝的“水力薄弱环节”, 这是由排水沟、涵洞、桥梁以及一般的水力地段在洪水期间很容易受阻, 或对特定洪水事件的设计保障不足决定

收稿日期: 2025-04-18

作者简介: 程硕(1994—), 男, 工程师, 本科, 主要从事防汛防旱工作。E-mail: xcqk1236@163.com

的^[2]。在排水集水面积小,排水管网不明显或洪水很少的情况下,以往用于优化工程造价的工程方法在设计程序中一般不考虑上游蓄水导致堤坝溃决的风险,其可靠性往往很低。此外,如果在水力设计中忽视洪水事件和水力弱点,则会提高堤坝坍塌造成经济损失和人员伤亡的风险。

河堤坍塌的危害既取决于洪水事件的概率,也取决于河堤的特性。从岩土工程的角度来看,河堤内的渗流会产生沿堤坡的滑动破坏和河堤内部的侵蚀。在特定条件下,滑动和侵蚀都可能在后续阶段发生演变,甚至造成河堤的全面溃决^[3]。因此,本文选择江苏省宿迁市南部的一处河堤坝为研究对象,基于渗流过程的有限元分析、河堤边坡的极限平衡计算和内部侵蚀可能性的评估,以探讨造成交通堤坝溃决的关键影响因素。

1 材料与方法

1.1 研究概况

本文以江苏省宿迁市的一处曾因洪水而溃决的河堤为研究对象,具体参数如表1所示,以确定最有可能造成堤坝溃决的原因作为研究目标。河堤横截面见图1,河堤内部由宽级配的堆石料组成,堆石体由两层较细的土组成,厚度在80~150 cm之间,沿河堤边坡分布。河堤堆石料粒径分布曲线如图2所示。曲线显示,内部填石由粗砾石(25%)、中砾石(45%)、细砾石(15%)和砂(15%)组成,砂成分由6%的细砂和中砂以及9%的粗砂组成。

表1 河堤土体物理与力学参数

参数名称	数值
宽级配堆石料粒径范围(mm)	0.1~2.5
堆石料饱和渗透系数(m/s)	5×10^{-3}
边坡细土饱和渗透系数(m/s)	4×10^{-7}
粗砾石含量(%)	25
中砾石含量(%)	45
细砾石含量(%)	15
砂含量(%)	15
堆石料内摩擦角 ϕ (°)	36
堆石料黏聚力 c (kPa)	0
边坡细土动摩擦角 ϕ'_m (°)	36(无黏聚力)
边坡细土动黏聚力 C'_m (kPa)	5(有黏聚力)

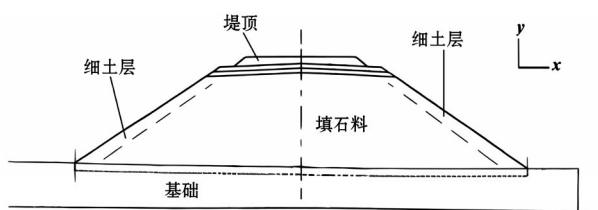


图1 河堤横截面

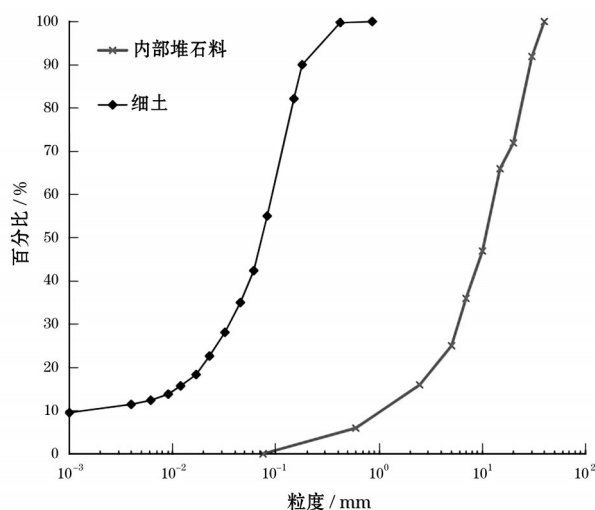


图2 河堤内填石和边坡细土的粒度分布曲线

1.2 研究方法

通过有限元分析、极限平衡分析和数值模拟来研究河堤边坡的稳定性。分析的目的是评估河堤土体材料的稳定性,并根据管涌、溢流和渗漏等主要侵蚀过程评估河堤对内部侵蚀的敏感性。评估基于河堤的几何形状以及土壤物理和水力特性数据,这些数据从河堤设计和建造时进行的现场和实验室调查的结果中获得。

1.2.1 瞬态渗流有限元模拟

基于Richards方程建立非饱和-饱和渗流模型:

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \nabla \cdot [K(h) \nabla h] \quad (1)$$

式中: h 为土壤孔隙水头,m; $\theta(h)$ 为含水量, m^3/m^3 ; $K(h)$ 为渗透系数,m/s。

为了表征不同吸力下的含水关系,采用Van Genuchten模型:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|h|)^n\right]^m}, m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

式中: θ_s 和 θ_r 分别为饱和与残余含水量, m^3/m^3 ;参数 α (单位: $1/\text{m}$)、 n (无量纲)通过粒径分布反演获得。

基于Mualem-Van Genuchten联合模型,计算相对渗透率:

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right] \quad (3)$$

式中: K_s 为饱和渗透系数, m/s; S_e 为有效饱和度。

边界条件上游侧施加时变水头边界, 下游侧设置自由排水, 下底面为无渗透边界; 初始条件假定坝体底部含水状态为初始平衡。网格划分参见图 3, 以确保孔隙水压力场计算精度。

1.2.2 边坡极限平衡稳定性评价

瞬态渗流模拟输出的孔隙水压力将直接影响抗剪强度计算。采用 Mohr-Coulomb 准则:

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (4)$$

式中: τ 为临界抗剪强度, kPa; c' 为有效黏聚力, kPa; σ 为总法向应力, kPa; ϕ' 为有效内摩擦角, °。结合 Morgenstern-Price 方法, 分割滑动体计算安全系数 F_s :

$$F_s = \frac{\sum_i [c' L_i + (W_i \cos \alpha_i - u_i L_i \tan \phi')]}{\sum_i W_i \sin \alpha_i} \quad (5)$$

式中: W_i 为第 i 个单元重力, N; L_i 为滑面长度, m; α_i 为滑面倾角, °。

1.2.3 内部侵蚀敏感性分析

在边坡稳定性之外, 还需识别坝体内部细粒流失风险。依据实验室筛分检测, 获取土样比重 G_s (无量纲) 和空隙比 e , 计算临界水力坡降:

$$i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (6)$$

式中: i_{cr} 为临界水力坡降, 无量纲。当实际渗流坡降 $i = \Delta h / \Delta l$ 超过此值时, 表明细粒容易被携带流失。通过粒径分布曲线计算均匀系数 $CU = D_{60} / D_{10}$ 与粒配形状系数 $F = D_{60} / D_{10}$, 反映土粒级配的宽度和细密程度。

敏感性分析通过稳定性指数 I_s 进行判断

$$I_s = H / F = i / F \quad (7)$$

式中: H 为单位长度的水头损失, 无量纲; 即 $H = \Delta h / \Delta l$ (与渗流坡降 i 相同); F 为粒配形状系数, 无量纲。

该指数通过将渗流坡降 i 归一化至不同级配结构的形状系数上, 实现了对不同土样抗管涌能力的可比评估。随后, 绘制 I_s 与粒径 D (单位: mm) 关系曲线, 结合临界值 i_{cr} / F 的对比, 可直观识别易受管涌影响的关键级配区间。

1.2.4 管道集中侵蚀风险评估

最后, 考虑在堤内渗管道时局部剪切冲刷风险。根据流体静力学, 管壁剪应力

$$\tau = \frac{\gamma_w d i}{4} \quad (8)$$

式中: τ 为管壁剪应力, kPa; γ_w 为水的密度, N/m³; d 为管道内径, m; i 为水头损失坡降, 无量纲。

将计算结果与填石材料的临界剪应力 τ_{cr} 对比, 即可评估集中侵蚀风险。

2 结果与分析

2.1 渗流分析

考虑到土壤的非饱和条件, 对河堤内的瞬态渗流过程进行有限元分析, 以研究上游一侧的洪水对流态的影响随时间的变化情况。计算所采用的网格见图 3。在上游面施加随时间变化的边界条件 (图 4)。沿下游面设置自由排水边界条件, 堤坝底部设置防渗边界条件。假定河堤底部的浸润线为初始条件 ($t=0$), 并且河堤的两种材料都具有各向同性的水力学性质。由粒径分布推导出河堤内部堆石体形成的饱和土渗透系数为 $K_1 = 5 \times 10^{-3}$ m/s, 而沿边坡的细土的饱和渗透系数为 $K_2 = 4 \times 10^{-7}$ m/s。在相应粒度分布的基础上, 根据 Van Genuchten 的关系推导出了岩填土的土壤-水特性曲线, 根据 Arya-Paris 关系推导出了细粒土的土壤-水特性曲线, 渗透系数随吸力的变化规律则是根据 Green-Corey 方法确定的。

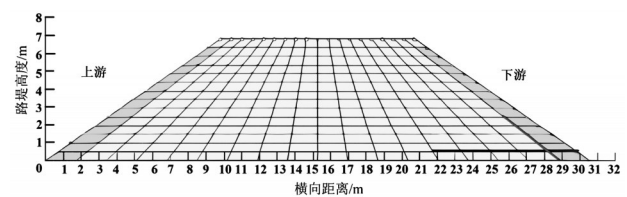


图3 网格和边界条件

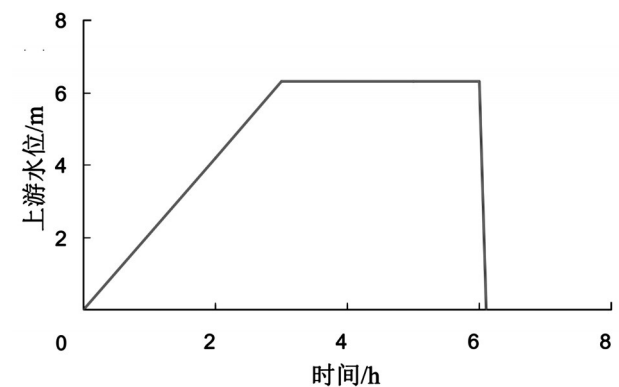


图4 水头随时间变化的条件下上游边坡边界渗流分析

渗流分析结果表明, 在蓄水水位抬升过程中, 河堤中的浸润线达到最大值, 在河堤基底以上约 3 m 处, 河堤中的浸润线仍保持水平 (图 5)。上游细土层中浸润线的几何形态与上游边界条件的变化直接相关。图 5 还表明, 浸润线随时间的变化受 2 种

土渗透性差异的显著影响。如图6所示,将这种渗流域与模拟均质河堤条件的类似分析所得出的渗流域进行比较,发现河堤边坡沿线细土层的影响尤为突出。两种流动过程导致了河堤内不同的孔隙压力分布。在均质河堤情况下,图7比较了沿图2中填堆石料的均质堤坝情况下计算的孔隙压力值,以及在 $t=6\text{ h}$ 时(即水库最高水位恒定3 h后)有2个细土层边坡的堤坝情况下预测的孔隙压力值。从图7可以看出,在有细土层边坡的情况下,当堤坝高度低于3 m时,孔隙压力值高于均质情况下的孔隙压力值。同样计算了 $t=6\text{ h}$ 时图2中沿细土曲线节点处的水平水力坡降值,图8比较了两种结构堤坝的水平水力坡降值。均质堆石河堤的水力坡降在下游面($i_h=0.65$)处达到最大值,然后沿着堤坝长度方向逐渐减小,至堤坝最内侧处降至 $i_h=0.3$ 以下。而对于那些沿坝面分布有低渗透性土的堆石河堤,

情况则有所不同。在细土层区域($i_h=1.2\sim 1.9$),水力坡度达到最高值。随后,水平水力坡度值在相邻的堆石区内虽有所降低,但仍保持显著性($i_h=0.4\sim 1.2$)。最终,在最内侧区域,水力坡度值变得可以忽略不计。

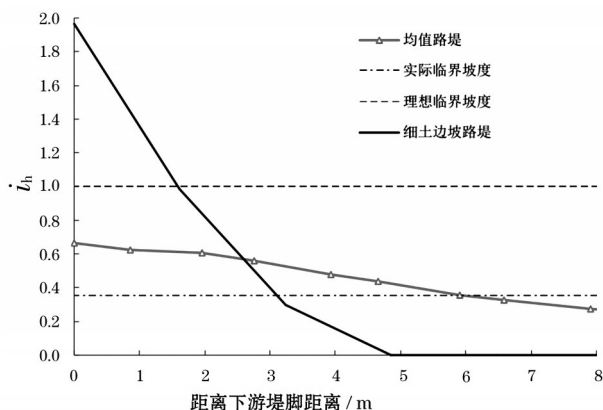


图8 $t=6\text{ h}$ 不同堤坝结构的水力梯度与临界梯度值

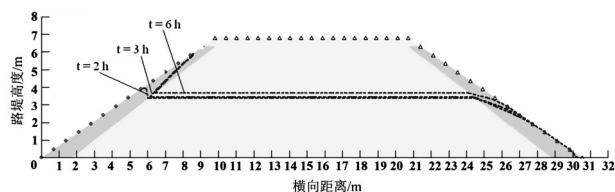


图5 含低渗透土层堤坝不同时间河堤内的浸润线

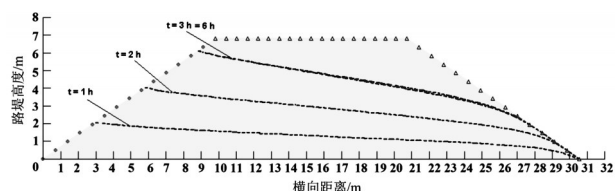


图6 均质河堤不同时间河堤内的浸润线

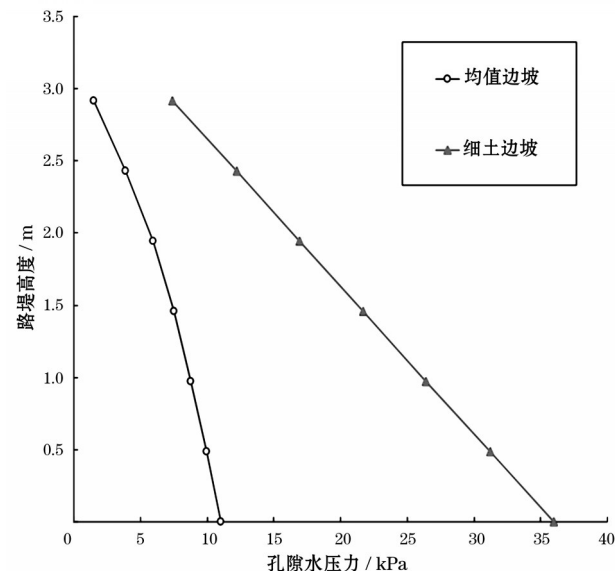


图7 $t=6\text{ h}$ 不同河堤构型下游趾端区域处的孔隙水压力

2.2 河堤边坡稳定性分析

根据瞬态渗流分析计算出了孔隙压力分布,采用Morgestern-Price方法对河堤沿线的滑动面进行了极限平衡反分析,这些滑动面与实地观察到的滑动面高度吻合(见图9)。堆石料的强度参数 $c=0\text{ kPa}$ 和 $\phi=36^\circ$,这些参数代表了所考察河堤抗剪强度的下限。而对于河堤边坡沿线细土层的移动强度参数,则是通过分析得出的结果。

假设蓄水开始到 $t=6\text{ h}$ 时刻的孔隙压力分布和细土层的动黏聚力分别为 0 kPa 和 5 kPa ,根据图9(a)中下游坡面滑动面的反分析结果,可以得出细土层的动摩擦角分别为:当动黏聚力 $C'_m=0\text{ kPa}$ 时,摩擦角 $\varphi'_m=36^\circ$;当动黏聚力 $C'_m=5\text{ kPa}$ 时,摩擦角 $\varphi'_m=25^\circ$ 。而图9(b)所示的沿上游边坡的滑动面的动摩擦角值较高:当动黏聚力 $C'_m=0\text{ kPa}$ 时,摩擦角 $\varphi'_m=42^\circ$;当动黏聚力 $C'_m=5\text{ kPa}$ 时,摩擦角 $\varphi'_m=38^\circ$ 。这些相对较高的移动强度参数值表明,在洪水泛滥期间,由于河堤内部水流条件的高度不稳定性,堤坝下游和上游的边坡都可能发生了浅层边坡失稳的过程。此外,根据粒径分布情况,所涉及的土壤性质属于易发生液化和流动滑动的范畴,因此流动滑动也是一种可能的失稳模式。且由于下游边坡的渗流量较大,因此不得不考虑下游边坡出现崩塌的可能性。

2.3 内部侵蚀

在水利工程的实践中,对堤坝的稳定性进行定

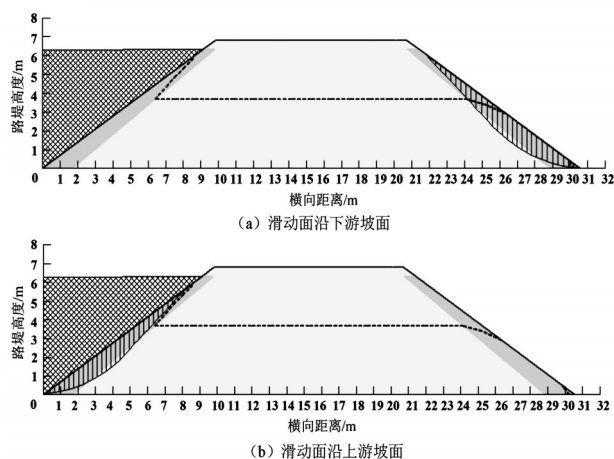


图9 $t=6\text{ h}$ 时河堤边坡的稳定性反演分析

量评估是至关重要的^[4],本次研究的目的是核实堤坝不同内部侵蚀过程发生的可能性。为此,采用了有限元渗流分析方法,将计算所得的水力梯度值与临界水力梯度值进行了详细比较。在分析过程中,依据河堤的粒度分布曲线,绘制了 H - F 图中的“形状曲线”(图10)。这条曲线的 F 值介于0和0.2之间,这一范围的设定是基于材料的均匀系数 $CU>3$ 的特性。从图10可以观察到,河堤堆石料的曲线显著地反映了材料在两个直径范围内的极端不稳定性特征。具体来说,在直径 $D=[0.1,0.3]$ 的范围内,得到了 $H/F=0.57$ 的最小值;而在 $D=[1,1.5]$ 的范围内,也观察到了 $H/F=1.0$ 的相对最小值。这些稳定性指数的数据有力证明了该材料内部的不稳定性敏感性。此外,依据过往的研究成果,河堤堆石料的 D'_{85}/D'_{15} 比值高于4,这一指标进一步表明了材料的不稳定性。基于前人的实验结果^[5],估算出了临

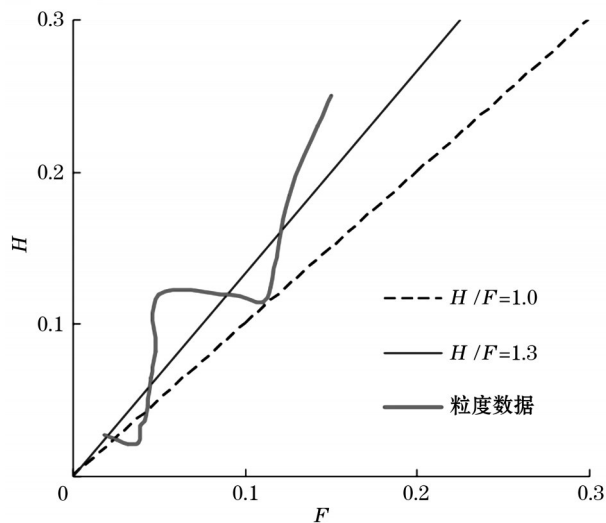


图10 H/F 形状曲线以及与临界 H/F 曲线的比较

界梯度的相应值。特别是,在 H/F 值范围在0.6~1.0的情况下,这种不稳定材料的实际临界梯度平均值可以表示为 $i_{cr}=0.35/0.3*i_c0.35$,其中 $i_c=1.15$ 。这一发现提供了堤坝稳定性评估的重要依据,对于未来堤坝的设计和风险管理具有重要的指导意义。

对于河堤外侧区域而言,计算得出的临界水力梯度值显著高于不稳定材料的临界水力梯度,甚至也高于稳定材料的临界水力梯度值,表明外侧区域具有较高的抗侵蚀能力。然而,在河堤内侧区域,临界水力梯度值下降至可以忽略不计(图8)。在均匀河堤条件下计算的临界水力梯度值与河堤内部区域的临界水力梯度值在同一数量级,而这些临界水力梯度值可能是在上游和下游发生浅层失稳后形成的。因此,这一过程可能会导致溃堤部分的河堤沉降,进而造成河堤倾覆和全面溃决。

在破坏事件发生后的现场调查中观察到的证据表明,在混凝土管道和附近的堆石区之间的接触处(工程薄弱区)存在集中的侵蚀通道。为了初步评估在同样大小的孔洞中集中侵蚀开始和扩展的可能性,本研究对圆柱形管道中的水力剪应力与管道长度的函数关系进行了评估,假设管道的平均直径为 $d=0.5\text{ m}$,摩擦造成的平均水头损失为 $H_f=4\text{ m}$ 。结果如图11所示,剪应力值高于粗粒土提供的临界剪应力。

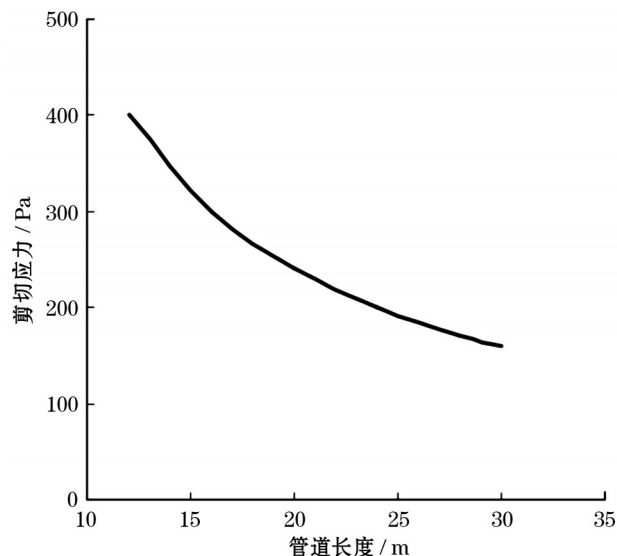


图11 管道内水力剪切应力随管道长度的变化

3 结 论

本研究基于堤河堤稳定性分析,旨在评估位于

(下转第64页)

具体应用路径。

通过分析江苏省水闸工程运行维护管理业务内容及信息,设计了“模型-数据-应用”三层架构,通过建立 BIM 运行维护模型并整合多源信息形成标准化数据库,结合物联网、大数据分析等新兴技术,从而实现动态监测、安全预警与管理决策。研究成果可为水闸运行维护管理提供新型管理模式,对进一步提升水闸工程运行维护水平具有一定参考意义。

参考文献:

- [1] 孙少楠,宋宜昌. 基于 BIM+GIS 的水利工程全生命周期建设管理研究[J]. 中国农村水利水电,2022(10):131-137.
- [2] 杨建峰,陈云,王铁力,等. BIM 技术在水利工程运维管理中的应用[J]. 水利水电技术,2020,51(增刊1):185-190.
- [3] 任海文,刘永强,闫文杰. 基于 BIM 技术的堤防工程运

维信息管理系统设计与实现[J]. 水电能源科学,2020,38(10):116-120.

- [4] 中国水利水电勘测设计协会. 水利水电工程设计信息模型交付标准:T/CWHIDA 00006—2019[S]. 北京:中国水利水电出版社,2019.
- [5] 潘永杰,刘晓光,蔡德钧,等. 面向运维的铁路桥梁 BIM 模型及全生命周期信息关联研究[J]. 中国铁路,2020(5):73-80.
- [6] 中国水利水电勘测设计协会. 水利水电工程信息模型设计应用标准:T/CWHIDA 00005—2019[S]. 北京:中国水利水电出版社,2019.
- [7] 马莉,蒋佳慧,邢云飞,等. 基于 BIM+GIS 技术的大型智慧灌区运维管理研究[J]. 现代农业科技,2023(23):141-145.
- [8] 徐青,陆轶群,徐麟,等. 大中型闸站自动化、信息化和智能化建设的若干思考[J]. 江苏水利,2023(5):35-39.

(上接第 58 页)

特定区域的堤防存在的危害,这些区域由于强烈的洪水可能会发展瞬时上游水库,从而导致堤坝内部侵蚀和相同结构的灾难性破坏。分析结果表明,交通河堤的坍塌是由堤坝内部侵蚀过程引起的,主要形式包括形成河堤的土壤淤积,以及沿填石层和混凝土涵洞接触处的集中侵蚀,这些侵蚀会在几小时内导致大部分结构全面坍塌。渗流和极限平衡分析还表明,在下游和上游边坡上观察到的浅层边坡坍塌是由堤坝内瞬时流动过程引起的高孔隙水压力造成的。然而,这些浅坡坍塌不是河堤坍塌的主要原因,而是通过加剧堤坝内部侵蚀过程,从而演化为河堤坍塌。

参考文献:

- [1] 魏功槐. 降雨条件下高陡路基的稳定性分析[J]. 交通世界,2023(36):19-21.
- [2] 余亮,林森,邓温梯,等. 降雨入渗引起的高填河堤病害机理分析[J]. 甘肃水利水电技术,2023,59(3):28-34,47.
- [3] 曹金春,孟令峰,张本科. 强降雨作用下沿河河堤滑坡失稳机理研究[J]. 土工基础,2021,35(4):472-475.
- [4] 闫慧,张晨阳. 降雨对河堤边坡渗流规律及稳定性影响分析[J]. 土工基础,2022,36(5):743-746,751.
- [5] 孙东亚,姚秋玲,赵雪莹. 堤坝涵管接触冲刷破坏模式分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2021,19(2):276-280.