

水位下降对堤防边坡稳定性影响研究*

Study on Stability of Embankment Slope under Different Drawdown Conditions

李鸿娟¹, 徐啸川²

- (1. 河南省地质矿产勘查开发局第四地质勘查院, 河南 郑州 472000;
2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为研究水位下降速度对堤防边坡稳定性的影响, 选取松花江某段堤防断面作为模型试验设计断面, 通过室内模型试验, 利用地形自动测量系统和高精度传感器对不同水位下降速度下堤防边坡的位移、孔隙水压力和土压力进行监测, 同时利用 Geo-Studio 软件对不同水位下降速度条件下的堤防边坡浸润线与稳定性进行分析。研究表明: 堤防内部的土水总应力与孔隙水压力均随水位的下降而下降, 下降速度随着水位下降速度的增大而增大, 且靠近上游坡面处的下降幅度大于坡体内部, 有效应力呈上升趋势, 当水位下降至坡底后, 土水总应力与孔隙水压力的下降速度开始逐渐减小; 堤防迎水坡发生最大沉降的位置主要集中水位与边坡交界附近, 在边坡中部位置出现了较大的拱起位移, 且随水位下降速度增大, 边坡最大沉降和最大拱起位移均呈现增大的趋势; 堤防边坡的稳定性系数随水位下降先快速下降, 稳定性系数的下降速度随水位下降速度的增大而增大, 当水位下降至坡脚后, 边坡稳定性系数逐渐增大, 然后趋于不变, 不同水位下降速度工况下边坡最终达到的稳定性系数基本一致。

关键词: 堤防边坡; 水位下降速度; 模型试验; 数值模拟; 边坡稳定性

中图分类号: TV697.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249(2024)02-0031-09

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.007

LI Hongjuan¹, XU Xiaochuan²

- (1. The Fourth Geological Exploration Institute of Henan Geology and Mineral Bureau, Zhengzhou 472000, China;
2. School of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to study the influence of water level drawdown speed on the stability of embankment slope, this paper selects a section of the Songhua River embankment section as a model test design section. Through indoor model tests, the displacement, pore water pressure and earth pressure of embankment slope under different water level drawdown speeds are monitored by using automatic terrain measurement system and high-precision sensors. At the same time, Geo-Studio software was used to analyze the infiltration line and stability of embankment slopes under different water level drop rates. Research shows that: The total soil water stress and pore water pressure inside the embankment decrease with the decrease of water level, and the decrease rate increases with the increase of water level decrease rate. The decrease amplitude near the upstream slope surface is greater than that inside the slope body, and the effective stress

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51779155)。

作者简介: 李鸿娟(1987—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 地质灾害防治、矿山地质环境治理等工作。

通信作者: 徐啸川(1988—)男, 博士, 主要研究方向: 岩土工程、地质灾害防治研究。

收稿日期: 2023-07-12

岩土力学

shows an upward trend. When the water level drops to the bottom of the slope, the decrease rate of total soil water stress and pore water pressure begins to gradually decrease. The location where the maximum settlement occurs on the upstream slope of the embankment is mainly concentrated near the boundary between the water level and the slope. There is a significant arch displacement in the middle of the slope, and as the water level decreases, both the maximum settlement and arch displacement of the slope show an increasing trend. The stability coefficient of the embankment slope first rapidly decreases with the decrease of water level, and the decreasing speed of the stability coefficient increases with the increase of water level decreasing speed. When the water level drops to the foot of the slope, the stability coefficient of the slope gradually increases, and then tends to remain unchanged. The stability coefficient of the slope ultimately reaches the same level under different water level decreasing speed conditions.

Keywords: embankment slope; the rate of water level decline; model testing; numerical simulation; slope stability

0 引言

堤防作为最常见的汛河流防洪工程，在保护人民生命财产安全上发挥了重要作用，堤防的稳定性是在洪水发生时堤防工程发挥作用的前提。堤防在汛期经洪水高水位长时间浸泡后，若水位下降过快，堤防坡体内的孔隙水压力来不及消散，会导致堤防稳定性降低^[1]。近些年来，因汛期后水位下降过快导致的堤防边坡失稳屡见不鲜，对于汛期后水位下降过程中堤防稳定性的研究具有重要意义。目前，国内外关于水位变化影响堤防边坡稳定性的研究已经取得了一些成果，常用的研究方法有模型试验和数值模拟。贾官伟等^[2]利用大型模型试验对水位骤降引起的临水边坡失稳原因及模式进行了研究；段祥宝等^[3]利用砂槽模型试验模拟了不同岩性的堤防边坡在水位下降过程中的非稳定渗流过程，探究了水位下降过程中堤防上游边坡的渗流场特点；詹美礼等^[4]利用模型试验研究了水位升降条件下堤坝非饱和区负压的变化规律及相关的影响因素；吕雪超^[5]采用砂槽模型实验和有限元数值模拟相结合的方法，对渗流场与应力场耦合作用下的堤防边坡稳定性以及变形破坏模式进行了研究；李清华等^[6]利用室内模型试验和 Geo-Studio 数值模拟相结合的方法，研究了汛期路基边坡在水位升降条件下的孔隙水压力和安全系数的变化规律；黄勇博等^[7]利用 Geo-Studio 建立了均质土堤防边坡的数值模型，分析堤防边坡安全系数的变化规律及影响因素；何忠明等^[8]利用有限元方法对不同水位下降条件下边坡的渗流特征进行了研究；岑威钧等^[9]利用有限元方法对降雨入渗、提前水位上升及持续强降雨耦合作用

下，提前水位上升过程的非稳定渗流进行数值仿真分析；曾润忠等^[10]利用 ABAQUS 软件建立了含砂层边坡的数值模型，研究了降雨与库水位涨落耦合作用下土质库岸边坡的渗流特征与稳定性问题；张立舟等^[11]利用 FLAC 3D 软件建立某水电站右岸边坡数值模型，研究了水位变化时边坡内部孔隙水压力和渗流场变化规律。上述研究大多仅考虑了边坡的相关参数在水位下降条件下对边坡稳定性的影响，针对水位下降速度对堤防边坡稳定性影响的研究较少。鉴于此，依托松花江某段典型砂性土堤防，设计室内模型试验，结合有限元数值模拟，研究不同水位下降速度条件对堤防稳定性的影响，以期为堤防工程的设计施工以及后续的研究提供借鉴参考。

1 试验设计

1.1 试验材料

试验模型由黏土、砂土两种土填筑而成，试验用土均取自松花江某段典型砂性土堤防。将所取土样按照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》的相关要求进行试验。根据测试结果，得到砂土和黏土的级配曲线如图 1 所示，砂土的不均匀系数 C_u 为 6.5，曲率系数 C_c 为 0.47，砂土为级配不良砂；黏性土的液限为 38.7%，塑限为 24.4%，黏性土分类为低液限黏土，土样的主要物理力学指标见表 1。

表 1 土体材料物理力学参数						
Table 1 Physical and mechanical parameters of soil materials						
土料	容重/(g/cm ³)		含水率 /%	渗透系数 /(cm/s)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /°
	湿	干				
砂土	1.85	1.53	8~12	3.0×10^{-2}	0	35.0
黏土	1.90	1.49	15~20	2.0×10^{-6}	40	8.5

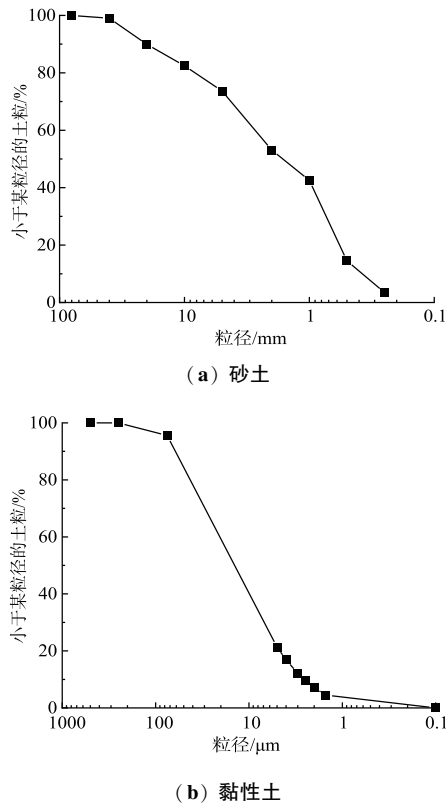


图 1 土体级配曲线
Fig. 1 Soil grading curve

1.2 模型设计及制作

将松花江某段堤防断面作为模型试验设计断面，地面高程为 74~78 m，设计洪水位高程为 80 m。堤防断面由加高增厚层（砂土）和老堤（低液限黏土）组成。考虑到试验的可操作性，对模拟断面进行了概化，如图 2 所示，其中堤顶宽为 0.8 m，堤底宽为 4.7 m，堤身高为 0.6 m，迎水坡坡比为 1 : 3，背水坡为 1 : 3.5，模型中对对应设计洪水位高程为堤防边坡高度 0.4 m。

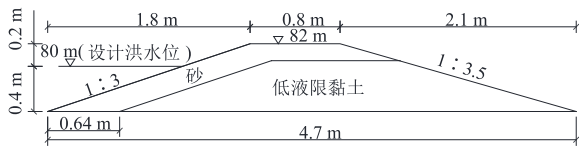


图 2 堤防概化断面图
Fig. 2 Schematic cross-section of embankment (mm)

为保证试验现象与研究对象实际的物理现象相似，需要以相似原理为基础建立模型与研究对象之间的相似关系。试验以几何尺寸和密度作为基本量纲，综合考虑确定原型堤防和模型箱的尺寸，确定基本量纲的相似常数，再根据 Buckingham π 定理，

得到其余物理量的相似常数，见表 2。

表 2 试验关键物理量相似系数
Table 2 Similarity coefficients of key physical quantities in experiments

物理量	相似关系	相似常数
几何尺寸 L	λ_L	10
密度 ρ	λ_ρ	1
有效孔隙率 μ	λ_μ	1
渗透系数 k	λ_k	1
流速 v	$\lambda_v = \lambda_k / \lambda_\mu$	1
渗流时间 t	$\lambda_t = \lambda_L / \lambda_\mu$	10

模型试验设备包括模型箱、数据采集系统和地形自动测量系统等。其中模型箱主要由试验槽和调水装置组成，通过管道进行连接，其中调水装置主要起到调节水位下降的作用，试验槽的长度为 6 m，宽度为 1 m，高度为 1.3 m，为便于观察实验过程中堤坝的破坏情况，模型箱的四壁采用厚度为 12 mm 的透明钢化玻璃制作，侧面采用角钢进行固定支撑，同时为测量坡体内部的瞬时孔隙水压力，在水槽的钢化玻璃一侧设置测压孔，外接测压管，水槽前端侧壁设立标尺，用来观测水位，如图 3 所示。

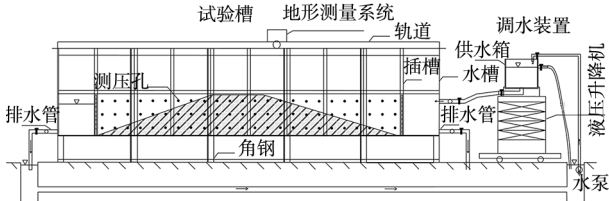


图 3 模型箱示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the model box

数据采集系统主要由传感器和数据采集仪构成，主要用于采集孔隙水压力和土压力的数据，在模型内部埋设了 6 个渗压计和 4 个土压力计，监测实验过程中孔隙水压力和土压力的变化过程，传感器布置如图 4 所示。渗压计编号为 S1~S6，土压力计编号为 T1~T4。其中土压力计 T1、T2、T3、T4 分别与渗压计 S1、S2、S4、S5 位置深度相同。

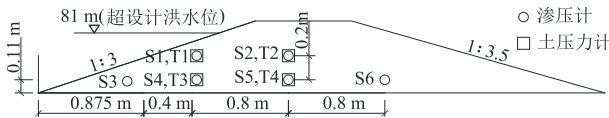


图 4 传感器布置图
Fig. 4 Sensor layout

地形自动测量系统利用测车携带超声测量组件在测桥上沿模型断面移动，测量床面的垂直高程，同时固定于测桥一端的激光测距组件测量测车的水平位置，可根据以上两组数据画出断面的地形图。

岩土力学

模型的填筑需先将老堤防填筑完成后再填筑加高增厚的砂土,在填筑的过程中采取分层填筑的方法,设计填筑每分层的厚度为 5 cm,根据设计土体密度计算每分层土的重量,称取对应重量的土均匀抛洒在模型箱内,然后将其夯实至设定位置,在完成每一分层的夯实后,均需取样测量土体的密度、含水率等指标,并在预先设计的位置埋设传感器。在模型填筑完成后,利用刮刀削坡的方法得到所需坡形,填筑完成的模型如图 5 所示。



图 5 模型土体填筑效果图
Fig. 5 Effect diagram of model soil filling

1.3 试验工况

为研究水位下降速度对堤防稳定性的影响,选取超设计洪水位为 81 m (对应模型中堤防边坡高度 0.5 m),堤防在超设计洪水位长期浸泡后下降,依据 GB50286—2013《堤防工程设计规范》中对水位下降速度的分类指标,利用相对比值 k/uv 判别水位下降速度的快慢,其中 k 和 u 分别为渗透系数和给水度; v 为水位下降速度,计算得到:在该模型试验中,当水位下降速度 $v>0.632\text{ cm/s}$ 时,水位下降速度为骤降,当水位下降速度 $v<0.001\text{ cm/s}$ 时,水位下降速度为缓降,将骤降和缓降之间的水位下降速度定义为快降。试验设计了 3 种不同的水位下降速度的工况,分别为 0.059 cm/s (快降)、 0.556 cm/s (快降)、 0.667 cm/s (骤降),水位下降高度为 0.5 m ,对应的水位下降时间为 850、90、75 s。

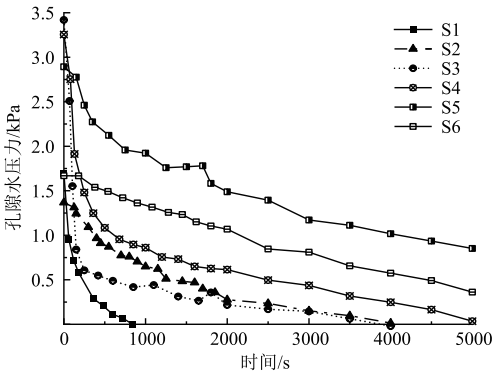
2 试验结果分析

根据试验方案,进行堤防水位下降过程中不同降速情况下的孔隙水压力、土压力的变化规律以及边坡变形破坏特征试验分析。

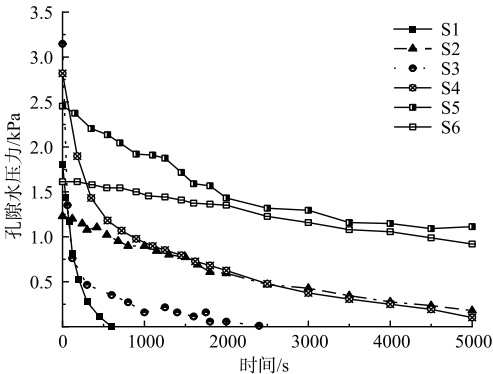
2.1 孔隙水压力变化特征

试验布置了 6 组渗压计,监测不同水位下降速度条件下堤防不同深度不同位置的孔隙水压力,如图 6

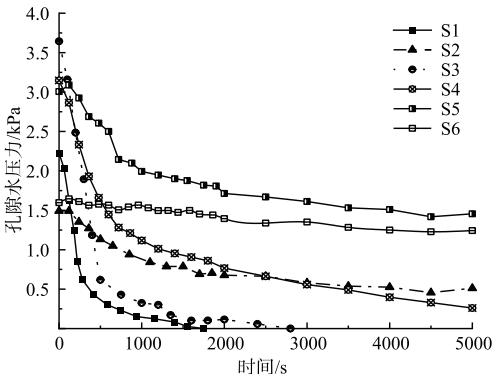
所示。经过长期浸泡堤防坡内土体完全饱和后,模型内部逐渐形成稳定渗流,孔隙水压力趋于稳定。在水位下降过程中,堤防内部稳定渗流被改变,形成非稳定渗流,孔隙水压力随着坡外水位的下降而变化。



(a) $v=0.667\text{ cm/s}$



(b) $v=0.556\text{ cm/s}$



(c) $v=0.059\text{ cm/s}$

图 6 水位下降阶段孔隙水压力变化
Fig. 6 Changes in pore water pressure during the stage of water level decline

由图 6 可知,堤防内部的孔隙水压力随水位的下降而下降,且在不同水位下降速度条件下, S1、S3

和 S4 传感器监测的孔隙水压力下降速度明显大于其他位置的孔隙水压力下降速度,说明堤防上下游不同位置孔隙水压力变化不相同,靠近上游坡面处的孔隙水压力下降幅度大于坡体内部。以 $v=0.667$ cm/s 工况为例,从超设计洪水位 (0.5 m) 下降到坡底 (0 m) 的过程中,孔隙水压力不断减小,此时 S3、S4、S5、S6 传感器测得的孔隙水压力下降值分别为 1.06、0.75、0.33、0.03 kPa,均小于坡外孔隙水压力下降值 5.0 kPa。以不同水位下降速度条件下 S1 位置处的孔隙水压力变化为例,孔隙水压力的下降速度随水位下降速度增大而增大,当水位下降至坡底后,坡内孔隙水压力下降速度开始逐渐减小。由此可得出结论:水位在快降和骤降情况下,外部水位降到坡底时,边坡内部的孔隙水压力由于无法及时消散,高于靠近上游坡面处的孔隙水压力,压力差导致堤防中存在由坡内指向坡外的渗流,从而导致堤防发生变形破坏。

2.2 土压力变化特征

试验布置了 4 组土压力计,对堤防不同深度不同位置 (T1、T2、T3、T4) 的土水总压力及有效应力进行监测,土水总压力变化曲线如图 7 所示。土压力计 T1、T2、T3、T4 分别与渗压计 S1、S3、S4、S5 位置深度相同,埋设深度分别为 11.5、29、31.5、49 cm。

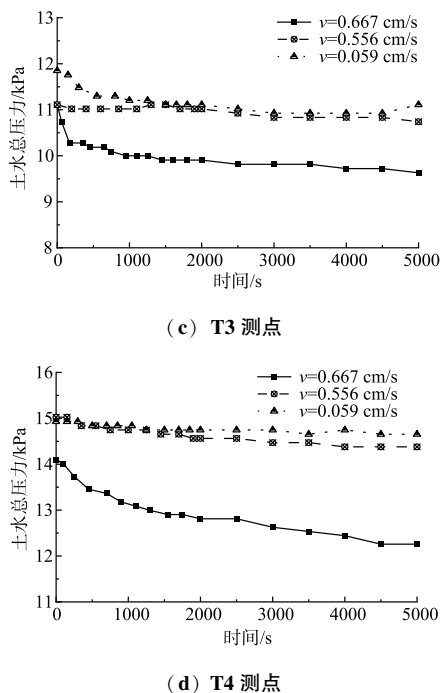
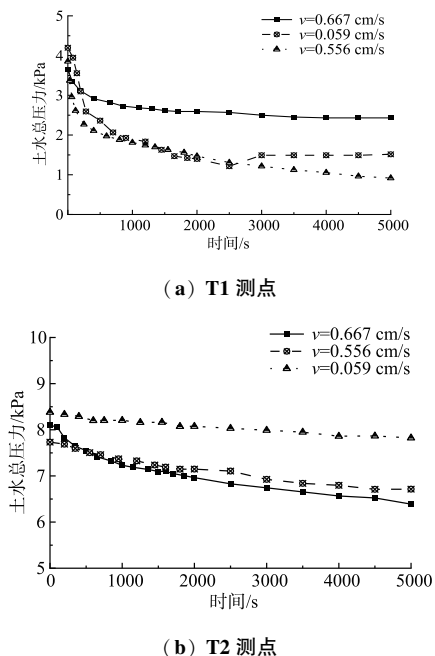


图 7 不同水位下降速度的土水总压力变化
Fig. 7 Changes of total soil-water pressure at different falling rates of water level

如图 7 所示,经过长期浸泡堤防坡内土体完全饱和后,模型内部逐渐形成稳定渗流,在水位下降过程中,堤防内部稳定渗流被改变,形成非稳定渗流,孔隙水压力随着坡外水位的下降而变化。在水位下降过程中,土水总应力与孔隙水压力同时减小,由于孔隙水压力随水位下降的降速更快,有效应力呈上升趋势。以 $v=0.667$ cm/s 工况为例, T1 位置处的土压力由 3.45 kPa 下降至 2.25 kPa; S1 位置处的孔隙水压力由 1.75 kPa 下降至 0; T3 位置处的土压力由 11.45 kPa 下降至 9.96 kPa; S3 位置处的孔隙水压力由 1.58 kPa 下降至 0。由此可知,孔隙水压力在土水总压力下降中占主导地位。在水位下降的过程中,靠近坡面处的水位下降的速度大于坡体内部,且坡面处的土体发生下滑,使坡面处土水总压力的下降幅度大于坡体内部。

2.3 边坡变形形式

为监测堤防边坡的变形情况,将模型沿 X 轴方向划分为 24 个断面,断面间的距离为 20 cm,如图 8 所示。根据对堤防在水位下降过程中的边坡破坏形式及过程进行观测,可知在水位下降过程中的堤防主要出现了沉降和拱起变形破坏。不同水位下降速度下的堤防边坡平均变形量如图 9 所示。

岩土力学

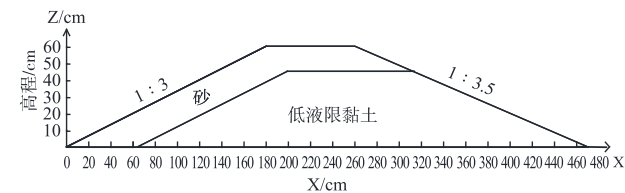


图 8 模型坐标系
Fig. 8 Coordinate system of model

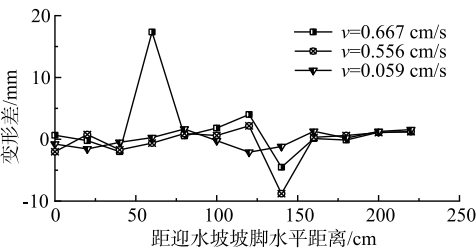


图 9 不同水位下降速度下的堤防边坡平均变形量
Fig. 9 Average deformation of embankment slopes under different water level drop speeds

由图 9 可知，当 $v=0.667\text{cm/s}$ 时，最大断面平均沉降 0.45 cm ，最大断面平均拱起 1.74 cm ；当 $v=0.556\text{ cm/s}$ 时，最大断面平均沉降 0.88 cm ，最大断面平均拱起 0.22 cm ；当 $v=0.059\text{ cm/s}$ 时，最大断面平均沉降 0.21 cm ，最大断面平均拱起 0.17 cm 。从统计结果可以看出，堤防迎水坡发生最大沉降的位置主要集中水位与边坡交界附近 $120\sim160\text{ cm}$ 断面，由于边坡上部沉降对边坡下部土体产生挤压作用，在边坡中部位置出现了较大的拱起位移，且随着水位下降速度的增大，边坡的最大沉降和最大拱起位移呈现增大的趋势。原因为，随着水位下降速度的增大，土水总压力的下降速度也在增大，导致边坡内的饱和孔隙水未能及时排出，边坡内残余的孔隙水压力增大，土体抗剪强度降低，同时有效应力的增幅随水位下降速度的增大而增大，导致顺坡下滑方向的作用力越大，边坡变形不断增大。

3 数值模拟计算

3.1 数值模型建立

根据堤防断面工况利用有限元软件 Geo-Studio 中的 SEEP/W 模块进行渗流场模拟，然后将计算结果导入 SLOPE/W 模块中进行耦合计算，采用极限平衡理论计算水位下降下坝体迎水侧在渗流工况下的稳定系数，数值模型如图 10 所示，迎水坡坡顶高程

为 58.4 m ，坡脚高程为 52.4 m ，水深 4 m ，迎水面坡比为 $1:3.5$ ，50 年一遇水位为 56.4 m ，模型共 696 个计算单元，774 个计算节点。岩土体的本构模型采用摩尔-库仑模型，根据现场勘查和室内试验结果，选取数值模型的计算参数见表 3。

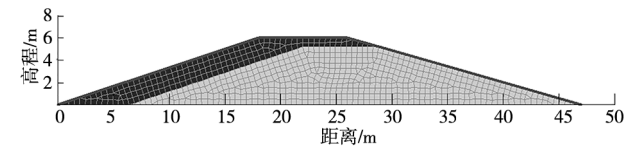


图 10 典型断面堤防边坡分析有限元模型和网格剖分
Fig. 10 Finite element model and meshing of slope

表 3 数值计算参数取值
Table 3 Numerical calculation parameter values

土层	密度 /(g/cm ³)	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /°	渗透系数 /(cm/s)
砂土	1.85	15.6	10.8	0	35	3.0×10^{-2}
黏土	1.90	5.5	4.2	40	8.5	2.0×10^{-6}

水位下降高度 4.0 m ，设置 5 种水位下降速度计算工况，分别为 0.05 、 0.10 、 0.15 、 0.20 和 2 m/s （水位骤降），对应的水位下降时间分别为 8000 、 4000 、 3000 、 2000 和 200 s 。

计算过程分 3 步：第 1 步，水位高度为 4.0 m ，计算经过浸泡初始渗流场计算；第 2 步，在第 1 步初始渗流场的基础上，计算堤防水位下降过程中堤防的渗流，计算时长为 1 d ；第 3 步，在第 2 步的基础上，计算 1 d 内不同时段时堤防边坡的稳定系数，找出稳定系数最小值。

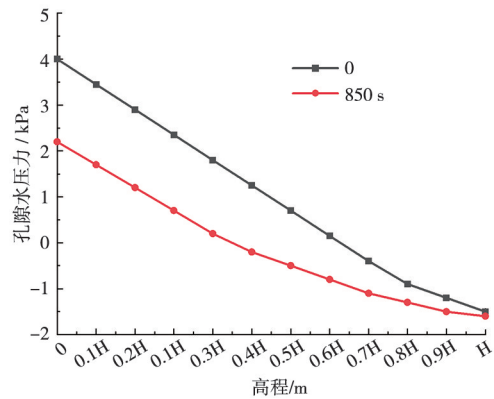
3.2 数值计算结果分析

3.2.1 数值模型验证

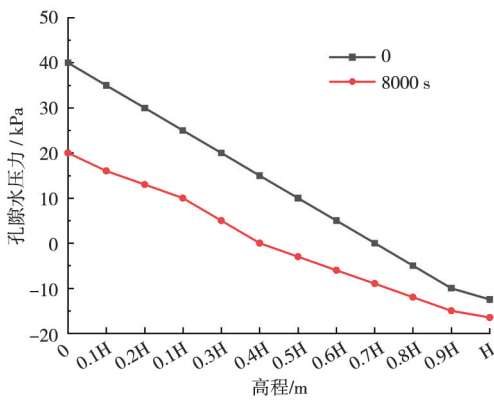
将数值计算的结果与室内模型试验进行对比分析，比较室内模型试验在水位下降速度为 0.059 cm/s 工况时水位下降 0 和 850 s 时刻的孔隙水压力实测值与数值计算在水位下降速度为 0.05 cm/s 工况时水位下降 0 和 8000 s 时刻的孔隙水压力实测值，如图 11 所示。由于模型试验为缩尺试验，比尺为 $1:10$ ，因此模型试验得到的孔隙水压力值与现场实际的孔隙水压力值之比理论上也为 $1:10$ 。

室内模型试验在水位下降 850 s 时得到的迎水坡沿高程的孔隙水压力变化曲线与数值计算在水位下降 8000 s 时得到的孔隙水压力趋势基本一致，孔隙水压力数值之比约为 $1:10$ ，故可以判断数值计算结果与室内模型试验结果差距较小，验证了数值计算

在工况选择、土的物理力学参数和断面边界条件等方面选择的合理性。



(a) 模型试验

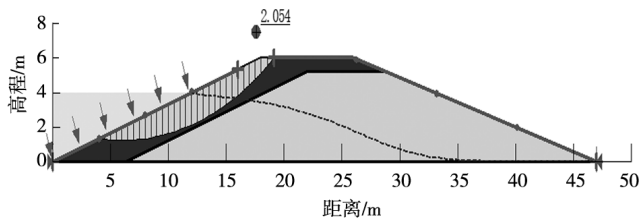


(b) 数值模拟

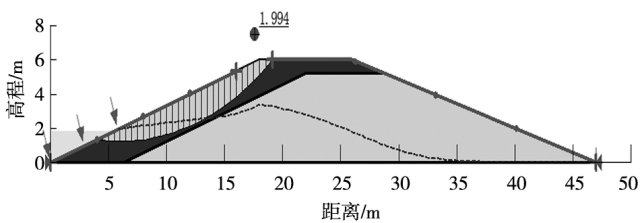
图 11 模型试验与数值模拟迎水坡沿高程孔隙水压力对比
Fig. 11 Comparison between model test and numerical simulation of opre water pressure along the upstream slope

3. 2. 2 水位下降过程中的堤防边坡稳定性分析

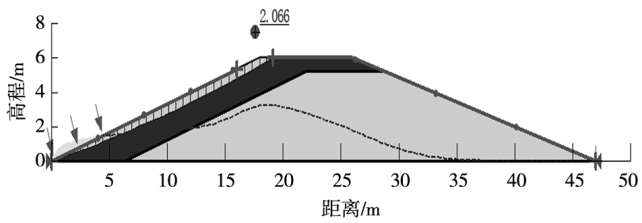
根据数值计算结果，以水位下降速度 0.05 cm/s 工况为例，得到堤防边坡在水位下降过程中不同时刻的浸润线和稳定系数，如图 12 所示。



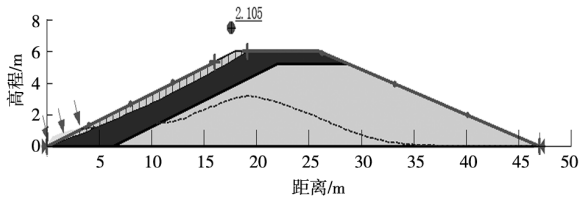
(a) 0 h



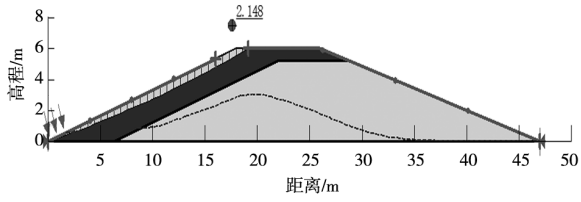
(b) 1.2 h



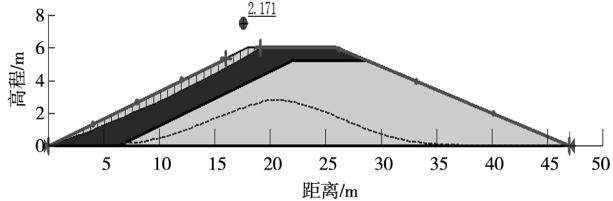
(c) 2.3 h



(d) 4.2 h



(e) 8.4 h



(f) 24 h

图 12 边坡在水位下降过程中不同时刻的浸润线与稳定性系数
Fig. 12 Infiltration line and stability coefficient of slope at different time during water level decline

堤防边坡在初始渗流场下维持较高的浸润线；水位在 2.2 h（约 8000 s）下降 4 m 后，砂土层的孔隙水快速排出，浸润线快速下降，黏土层的孔隙水补充给砂土层；黏土层的浸润线形成抛物线形状且

岩土力学

背水侧的黏土层浸润线几乎不变。在水位下降过程中,堤防边坡的潜在滑动面为圆弧形,最深处达到砂土与黏土的交界位置,堤防边坡稳定性系数瞬间下降。当水位下降至坡脚位置之后,由于砂土渗透系数较大,孔隙水压力逐渐消散,滑坡体重度减小,坡体下滑力相较于抗滑力下降明显,所以堤防边坡稳定性系数逐渐增大,边坡的潜在滑动面与坡体表面近似平行。

3.2.3 不同水位下降速度边坡稳定性分析

对不同水位下降速度条件下的堤防边坡进行稳定性计算,得到不同工况下的边坡稳定性系数随时间的变化曲线,如图 13 所示。

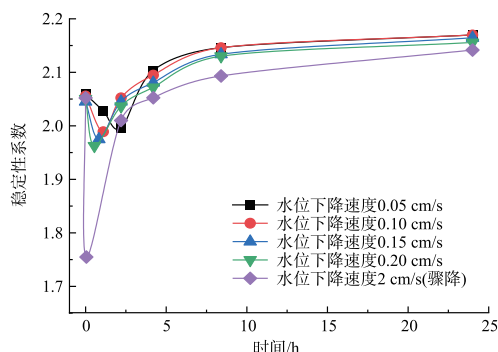


图 13 不同水位下降速度下堤防边坡的稳定性系数
Fig. 13 Stability coefficient of embankment slope under different water level drop speeds

堤防边坡的稳定性系数随着水位下降先快速下降,当水位下降至坡脚后,随着堤防内部孔隙水压力消散,堤防边坡稳定性系数逐渐增大后趋于不变。以水位下降速度 2 cm/s 为例,在水位从设计水位下降至坡脚的过程中,边坡的稳定性系数从 2.05 迅速减小至 1.75,在水位下降至坡脚后,边坡的稳定性系数在短时间内迅速增大至 2.0,然后随着时间的发展逐渐增大至 2.14。随着水位下降速度的逐渐增大,堤防边坡在水位下降过程中的稳定性系数下降速度越快,在水位下降至坡脚后堤防边坡稳定性系数的增大速度也越快,不同水位下降速度工况下边坡最终达到的稳定性系数基本一致,约为 2.15。

4 结论

依托松花江某堤防工程,选取某段堤防断面作为模型试验设计断面,通过室内模型试验,利用地形自动测量系统和高精度传感器对不同水位下降速度下堤防边坡的坡表位移、孔隙水压力和土压力进

行监测,同时利用有限元软件 Geo-Studio 对堤防边坡不同水位下降速度条件下的浸润线与稳定性进行分析,得到如下结论:

(1) 堤防内部的孔隙水压力随水位的下降而下降,且靠近上游坡面处的孔隙水压力下降幅度明显大于坡体内部。孔隙水压力的下降速度随着水位下降速度的增大而增大,当水位下降至坡底后,坡内孔隙水压力下降速度开始逐渐减小。

(2) 当水位在快降和骤降情况时,边坡内部的孔隙水压力无法及时消散,从而内部孔隙水压力高于坡面处的孔隙水压力,产生坡体内部指向坡外的渗流,这是引起堤防边坡变形破坏的重要原因。

(3) 在水位下降过程中,堤防内部的土水总应力与孔隙水压力均减小,有效应力增大,靠近上游边坡的土水总压力下降幅度大于坡体内部。

(4) 堤防迎水坡发生最大沉降的位置主要集中水位与边坡交界附近,由于边坡上部沉降对边坡下部土体产生挤压作用,在边坡中部位置出现了较大的拱起位移,且随着水位下降速度的增大,边坡的最大沉降和最大拱起位移呈现增大的趋势。

(5) 堤防边坡的稳定性系数随水位下降先快速下降,堤防边坡的潜在滑动面为圆弧形,最深处达到砂土与黏土的交界位置。当水位下降至坡脚后逐渐增大,然后趋于不变。随着水位下降速度的逐渐增大,堤防边坡的稳定性系数下降与增大均随水位下降速度的增大而增大,不同水位下降速度工况下边坡最终达到的稳定性系数基本一致,约为 2.15。

参 考 文 献

- [1] 李子晗. 高水位长期浸泡堤防工程多工况试验及数值模拟计算研究 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2018.
- [2] 贾官伟, 詹良通, 陈云敏. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究 [J]. 岩土力学与工程学报, 2009, 28 (9): 1798-1803.
- [3] 段祥宝, 段祥宝, 谢罗峰, 等. 水位降落条件下非稳定渗流试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2009, 26 (10): 7-12.
- [4] 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 (增刊 1): 91-96, 111.
- [5] 吕雪超. 渗流作用下二元混合堤防边坡稳定性研究 [D].

(下转第 74 页)

岩土力学

究,得到以下结论:

(1) 灰色理论预测模型主要是基于“小样本、贫数据”的情况,预测结果数据能较好地反映基坑的真实沉降变形情况,而过多的监测数据会造成过大的残差,影响预测精度。

(2) 预测模型精度较高,预测精度能满足工程需要。预测值在前期相对较大,表明预测结果相对于实际观测值表现出超前现象。

(3) 后期预测值与实际观测值的误差较大,表明基坑开挖过程中需进行远期沉降值预测时,预测模型的精度需进一步分析验证。

由于基坑开挖过程中的沉降变形受多种复杂因素的影响,因此有必要采用其他方法进行进一步的分析验证。

参 考 文 献

- [1] 王超,朱勇,张强勇,等.深基坑桩锚支护体系的监测分析与稳定性研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊1):2918-2923.
- [2] 林楠,李伟东,张文春,等.最小二乘支持向量机在深基坑变形预测中的应用[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2014,33(11):1471-1474.
- [3] 赵健赞,哈华林,宋宜容.利用BP-ANN模型进行深基坑变形预测分析的探讨[J].施工技术,2015,44(7):87-89.
- [4] 刘洪斌.深基坑变形预测模拟及其实践[D].重庆:重庆大学,2011.
- [5] 张韬.深基坑变形预测模拟研究及工程应用[D].长沙:中南大学,2009.
- [6] 沈简,邱子锋,徐晓瑜.基坑开挖对边坡顶建筑物沉降及稳定性影响[J].岩土工程学报,2014,36(增刊2):337-342.
- [7] 辛振科.基于PB神经网络的输电铁塔加固构件极限承载力预测模型[J].山东电力高等专科学校学报,2021,24(6):6-9,13.
- [8] 王磊,高峰.基于时间序列-BP神经网络在基坑方面的应用研究[J].测绘与空间地理信息,2018,41(6):201-205.
- [9] 郭超,郭延勇,李洪宝,等.地铁深基坑施工引起周边地表沉降变形规律分析[J].粉煤灰综合利用,2018(2):71-74.
- [10] 张旭.基于灰色理论的基坑支护结构变形预测[J].四川建材,2015,41(6):93-94.
- [11] 鲁海涛,张远芳,李炎,等.基于灰色理论的深基坑支护变形分析[J].山西建筑,2016,42(4):46-48.
- [12] 于玲,王晓光,包龙生.基于灰色理论的基坑桩顶水平位移预测[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(3):459-465.
- [13] 彭程,张莲花.基于灰色理论的深基坑桩顶水平位移预测研究[J].现代商贸工艺,2017(30):175-178.
- [14] 王兴.几种常用基坑变形预测模型的比较与分析[J].山西大同大学学报(自然科学版),2016,32(1):62-65.
- [15] 潘顺琪.基坑开挖变形预测及数值分析[D].兰州:兰州交通大学,2018.
- [16] 华博深.灰色组合模型在基坑监测数据处理中的运用[D].成都:成都理工大学,2012.
- [17] 苟胜荣,付江涛.基于趋势性分析模型的地铁基坑变形预测研究[J].地理空间信息,2020,18(1):115-118.
- [6] 李清华,肖田,邱博超,等.水位变化对路基边坡渗流场及稳定性影响分析[J].科学技术与工程,2022,22(13):5403-5410.
- [7] 黄勇博,孙树林,周宏博.土质堤防边坡稳定安全系数影响因素研究[J].科学技术与工程,2012,12(11):2607-2611.
- [8] 何忠明,史振宁,付宏渊,等.水位下降对沿湖路堤边坡渗流特征及稳定性的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(9):3227-3233.
- [9] 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(自然科学版),2016,44(4):364-369.
- [10] 曾润忠,谢典,祝俊华,等.水位升降与降雨耦合作用下库岸边坡稳定性分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2022,41(5):118-126.
- [11] 张立舟,武娜,李宏,等.库水位升降对边坡内渗流场的影响[J].济南大学学报(自然科学版),2020,34(2):113-117.

(上接第38页)

哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.