

伊洛瓦底江河道水位及微型木桩对土质边坡变形和稳定的影响

徐超群¹, 甘磊¹, 吴志刚², 胡继峰², 李健², 齐建飞², 甘元楠², 刘源¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国安能集团第二工程局有限公司, 江西 南昌 330095)

摘要:结合饱和-非饱和渗流和固结理论, 构建了伊洛瓦底江干流某土质边坡三维渗流分析模型, 研究了不同水位降幅和降速工况下边坡稳定性变化规律, 评价了微型木桩对边坡的加固效果。结果表明, 河道水位降速越快、汛期水位越高时, 水位下降过程中坡面附近的渗透坡降越大, 安全系数越低。布设微型木桩群, 当木桩群高度为2、4、6 m时, 其边坡稳定安全系数相较无加固情况分别提高了4.50%、9.00%、39.60%, 说明微型木桩群的加固效果较好, 具有一定推广价值。

关键词:微型木桩; 河道水位; 渗流; 边坡稳定; 伊洛瓦底江

中图分类号:TV871

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)03-0088-07

Effects of water level in Irrawaddy River and micro wood piles on deformation and stability of soil slopes//XU Chaoqun¹, GAN Lei¹, WU Zhigang², HU Jifeng², LI Jian², QI Jianfei², GAN Yuannan², LIU Yuan¹(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Anneng Group Second Engineering Bureau Co., Ltd., Nanchang 330095, China)

Abstract: Combined with saturated-unsaturated seepage and consolidation theories, a three-dimensional seepage analysis model of a soil slope in the main stream of the Irrawaddy River was established to investigate the change rule of slope stability under different water level reduction magnitude and reduction speed conditions, and to evaluate the reinforcement effect of the micro wood piles on the slope. The results show that the faster the river water level decreases and the higher the water level is during the flood season, the greater the permeation slope drop near the slope surface is during the water level decrease process, and the lower the safety coefficient is. By installing a group of micro wood piles, the slope stability safety coefficient increased by 4.50%, 9.00%, and 39.60%, respectively, when the height of the wood pile group was 2, 4, and 6 m compared with the case of no reinforcement, indicating that the reinforcement effect of micro wood pile group is good and has some popularization value.

Key words: micro wood pile; river water level; seepage; slope stability; Irrawaddy River

边坡稳定问题广泛存在于水库库区、河道两岸和山区公路等区域, 是水利和岩土工程领域的重点研究课题。边坡失稳诱因包括两方面: ①边坡土体内部存在裂隙带或软弱结构面; ②边坡受降雨、水位变化、外部荷载等影响, 其变形超出允许承载范围。在库区及河道等水位频繁变动区域, 水位下降所引起的非稳定渗流是诱发边坡附近土体失稳的主要因素。水位变动过程中, 岸坡内外水分相互作用, 边坡渗流场发生动态演变, 引起孔隙水压力变化, 致使边坡失稳^[1], 多发于洪水过后的退水期间^[2]。

近年来研究水位变化对边坡稳定性影响的成果

较丰硕^[3-4]。例如: 刘磊等^[5]建立了三峡库区万州库岸段三维斜坡稳定性分析模型和瞬态降雨入渗模型, 探究了不同库水位状态和降雨条件下的岸坡稳定变化特征, 提出库区岸坡稳定性的时空演变规律; 吴琮等^[6]提出了降雨和库水位升降作用下边坡浸润线的近似解析解, 研究了边坡浸润线变化规律, 并用于某边坡稳定分析中; 张旭等^[7]基于非饱和土力学理论, 建立了流固耦合模型, 分别采用极限平衡法和有限元法, 计算了库水位升降条件下三峡库区巫峡段龚家坊堆积层滑坡体稳定安全系数演化规律。

当前, 水利工程加固增稳措施较多, 如锚固、抗

基金项目:国家自然科学基金项目(52379123); 中国安能集团自筹科技项目(823166816)

作者简介:徐超群(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事工程渗流分析与控制研究。E-mail: 221302020033@hhu.edu.cn

通信作者:甘磊(1987—), 男, 教授, 博士, 主要从事工程渗流分析与控制研究。E-mail: ganlei2015@hhu.edu.cn

滑桩、挡土墙和削坡等。因河道受汛期、早期交替变化影响,其施工周期受限,传统硬质边坡整治工程投资大、工期长。微型抗滑桩具有适应性强、施工方便和价格低等优势,且与植生袋绿化技术相结合的生态护坡技术日趋成熟^[8]。近年来,微型抗滑桩被广泛应用于东南亚国家边坡抢险加固工程^[9],其桩长细比大于30,桩径小于300 mm,利用桩-土相互作用及协调变形机制,实现边坡体加固^[10]。国内外学者已针对微型抗滑桩开展了一定的试验研究,就受荷载差异^[11]、土体类型^[12]、桩径尺寸^[13]、布置方案^[14]等因素进行了分析。就涉水工程而言,微型抗滑桩群的稳定效果与桩群基础的浸水条件关系密切,桩群地基浸水后可发生湿化变形,并伴随孔隙水压力变化,从而影响土体应力变形状态和稳定安全性。如盛明强等^[15]开展了浸水饱和与天然含水率条件下黄土地基上的微型木桩抗压和抗拔承载性能试验,发现其力学性能差异显著,浸水饱和后微型木桩基础极限承载力损失更大,但涉及水位变动所诱发的滑坡研究还不完善。

本文基于饱和-非饱和流固耦合理论,建立伊洛瓦底江某典型土质边坡三维渗流分析模型,对比分析不同水位降幅、降速和微型木桩加固前后的边坡稳定安全系数和变形特征,研究水位下降工况下微型木桩群的加固效果,以期为类似岸坡加固整治工程提供借鉴。

1 模型构建

1.1 计算模型

伊洛瓦底江河源分为东、西两支,东源起于中国西藏伯舒拉岭山脉西南麓,西源起于缅甸北部山区,汇合后由北向南贯穿缅甸,支流众多,全长约2 714 km,流域面积达43万 km²。汛期内伊洛瓦底江水位变幅较大,两岸岸坡频繁出现崩岸和滑坡现象。本文选取伊洛瓦底江干流某典型河段,采用有限元软件 COMSOL Multiphysics 进行渗流和岸坡稳定计算,计算模型如图1所示。模型宽180 m、高50 m、厚4 m,其中河道底宽20 m,边坡底宽80 m,坡后岸体底宽80 m,边坡高度40 m,河床以下地基高度10 m,将地基地面定为基准面。模型底边界设为不透水边界,右侧地下水位 H_1 设为45 m,为常年平

均水位,河道内早期水位 H_2 为15 m。土体分区由上至下共分为4层,依次为土石混合层、强风化层、弱风化层和以石英砂岩为主要成分的基岩层。微型木桩直径 D 为0.2 m,沿重力方向刺入坡面,共布设7排,由坡顶至坡脚依次标号为1~7号。各排木桩沿坡面水平向距离相隔10 m,每排布设2根微型木桩,其横向间隔为2 m。

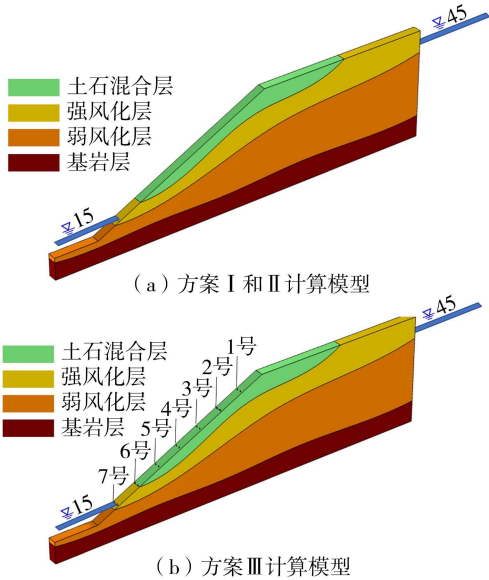


图1 计算模型示意图(单位:m)

本文所研究水位变化工况为地下水补给明河类型,在浸润线以下,边坡土体基本为饱和状态。随河道水位升降,渗流边界发生变化,浸润线随之改变,引起土体水分含量与孔隙水压力增减,从而影响边坡整体应力变形状态。在水位升降过程中,浸润线附近土体饱和度并非定值,为模拟该变化过程,采用 Richards 方程作为变饱和水流模拟的控制方程^[16]。随饱和度变化,土体渗透性改变,可通过 Mualem^[17]所定义的渗透系数来表征,将渗透系数定义为与饱和度和体积含水量相关的函数^[18],体积含水量、饱和度和基质吸力之间的关系采用土水特征曲线(SWCC)来体现,本文采用 Van Genuchten (VG) 模型^[19]进行模拟,关于渗透力对边坡稳定性的影响通过非饱和土有效应力理论完成计算^[20]。桩-土接触面通过添加接触对方式进行模拟,其摩擦因子设为0.3,木桩以弹性体考虑,各土层及微型木桩基本物理力学参数如表1所示。

表1 土层基本物理力学参数

土层	密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比	内聚力/kPa	摩擦角/(°)	孔隙率	渗透系数/10 ⁻⁴ cm/s
土石混合层	2 100	30	0.31	20	20	0.25	3.3
强风化层	2 220	800	0.28	50	30	0.33	5.1
弱风化层	2 400	2 000	0.28	400	35	0.18	0.2
基岩层	2 450	25 000	0.27	2 000	50	0.10	0.1
微型木桩	790	11 000	0.30				

1.2 计算工况

为分析河道岸坡稳定性变化规律,设计3组计算方案,分别用于研究水位降速、汛期水位和微型木桩桩高等因素对边坡稳定性的影响,具体计算工况见表2。方案I设计了3组不同水位降速工况^[2,21],水位降速取1.0、1.5、2.0 m/d,其汛期水位为40 m。方案II设定水位降速为1.0 m/d,设计了3组不同汛期水位工况,水位依次为40、35、30 m。方案III在原计算模型内加设微型木桩,布置方式见图1(b),不同模型内的木桩高度 L 分别为2、4、6 m,露出段长度恒定为0.5 m,仅考虑锚固段长度发生增减。

表2 计算工况				
方案	工况	汛期水位/m	水位降速/(m/d)	微型木桩桩高/m
I	I-1	40	1.0	
	I-2	40	1.5	
	I-3	40	2.0	
II	II-1	40	1.0	
	II-2	35	1.0	
	II-3	30	1.0	
III	III-1	40	1.0	2
	III-2	40	1.0	4
	III-3	40	1.0	6

2 结果与分析

2.1 不同水位降速工况

图2是工况I-1下的边坡水平位移变化图,水

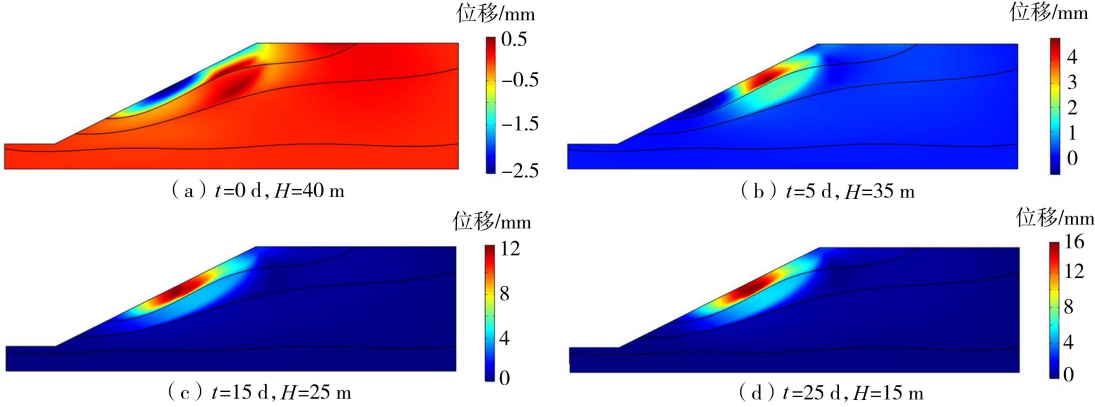


图2 工况I-1下边坡水平位移变化

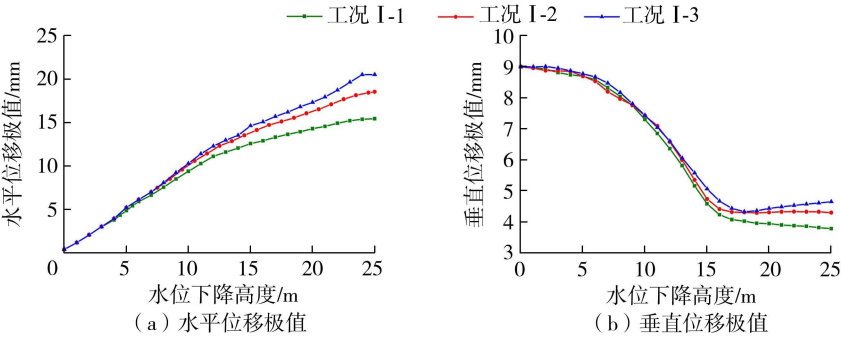


图3 不同水位降速工况下边坡位移极值变化

平位移方向以指向河道内侧为正。由图2可知,河道内侧水位 H 为40 m,水位尚未消退时,受迎水面水压力影响,边坡整体向岸后推移。近水处边坡土体变形较严重,向岸后偏移2.42 mm。随着河道内侧水位消退,历时 t 为5 d时水位降至35 m,边坡迎水面静水压力作用范围和大小均有所降低,土体由上至下逐渐回弹,近水处土体上部水平位移回弹至4.89 mm;河道水位降至15 m时,受渗流作用边坡土体水平位移基本指向河道,其极值可达15.00 mm,较水位下降初期增大了29.61倍。

不同水位降速工况下边坡位移极值变化规律如图3所示。随着河道水位降低,指向河道内侧水平位移极值呈增长趋势,垂直向上位移极值呈下降趋势,且河道内水位降速越快,则边坡水平位移极值增长越迅速,垂直向上位移极值下降越缓慢。工况I-1~I-3下边坡水平位移极值分别由0.49 mm增至15.00、19.00、21.00 mm,垂直位移极值分别由9.05 mm降至3.80、4.31、4.65 mm。图4为工况I-1水位下降末期的渗流场分布图。由图4可知,在水位下降过程中,边坡土体渗流场的水头损失集中在坡面近水处,此处流速较高,渗透力较大,且方向与坡面近似平行,故指向迎水方向的水平位移随水位下降逐渐增加,而垂直向上位移极值由于受渗透力的垂直分力影响而逐渐减小。因边坡土体内的孔隙水变化存在滞后性,外界水位变化越快,则边坡近水

处的局部孔隙水压差越高,土体变饱和范围越广,导致近水处土体渗透坡降越大,相应的渗透力越大(图5)。在水位下降末期,工况 I-1 ~ I-3 下边坡渗透坡降极值从 0.42 分别增至 7.98、10.44、12.74。

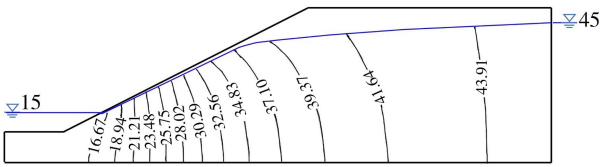


图4 工况 I-1 水位下降末期渗流场分布(单位:m)

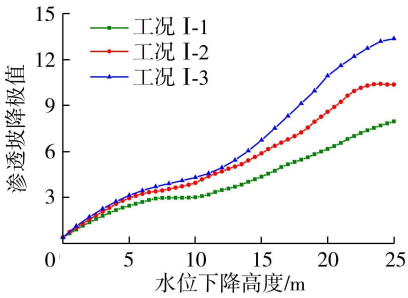


图5 不同水位降速工况下边坡渗透坡降极值变化

图6为不同水位降速工况下边坡稳定安全系数变化曲线。由图6可知,在水位下降过程中,各工况下的边坡稳定安全系数逐渐降低,降速逐渐减缓,下降末期工况 I-1 ~ I-3 的边坡稳定安全系数分别为 1.048、1.032 和 1.028。因该坡段稳定状态并不直接危及工程安全,故以三级边坡工程安全等级标准来评价,其允许值为 1.25,可见各工况下水位下降末期时的边坡属于欠稳定状态。

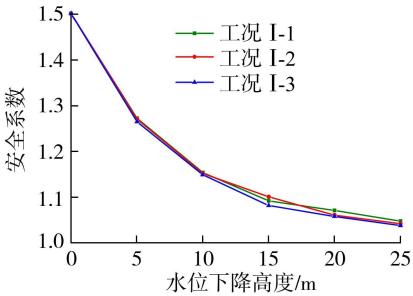
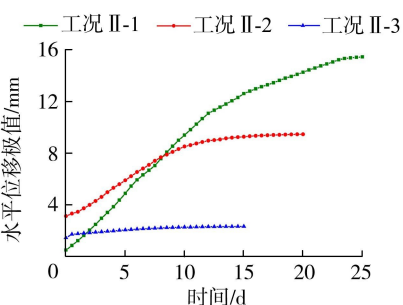


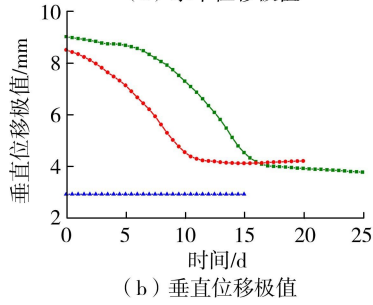
图6 不同水位降速工况下边坡稳定安全系数变化

2.2 不同汛期水位工况

图7为同一水位降速、不同汛期水位下的边坡位移极值变化曲线。由图7可知,汛期水位越高,边坡水平位移极值增长越快,垂直位移极值下降越明显。如工况 II-1 的水平位移极值由 0.49 mm 增至 15.00 mm,增大了约 14.51 mm,其他两组工况仅增大 6.40 mm 和 0.89 mm。主要原因为:汛期水位越高,则边坡内变饱和和土体占据范围越大,下降过程中孔压场变化越明显,局部形成高水头差作用,致使渗透压力增长加快。



(a) 水平位移极值



(b) 垂直位移极值

图7 不同汛期水位工况下边坡位移极值变化

图8为不同汛期水位工况下边坡稳定安全系数变化曲线。为便于综合比较边坡稳定变化趋势,新增两组极端工况,分别是汛期水位为 15 m,即早期水位作用下的稳定渗流,和汛期水位为 45 m,即水位高度与远离岸坡处地下水位相持平情况。取水位下降末期各工况边坡稳定安全系数进行分析,由图8可知,随着汛期水位高度增加,水位降幅增大,边坡稳定安全系数迅速降低。汛期水位分别为 15、30、35、40、45 m 工况下,在水位下降至早期水位时,边坡稳定安全系数分别为 1.213、1.178、1.053、1.048、0.781,其变化规律符合指数函数形式,拟合效果见图8。

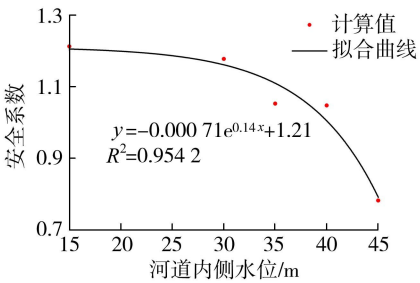


图8 不同汛期水位工况下边坡稳定安全系数变化

2.3 不同微型木桩桩高加固工况

表3为不同桩高的微型木桩加固后的边坡土体变形和稳定计算成果。随着锚固深度的增加,微型木桩埋深段由土石混合层表层逐渐过渡至深层,直至深入强风化层岩体之间。由表3可知,随着微型木桩桩高的增加,边坡位移极值逐渐减小,说明增加微型木桩埋深有助于限制边坡土体变形滑动,增强边坡稳定性。但仅当桩体锚固段基本贯穿土石混合层时,加固效果较为明显。当桩高增加至 6 m 后,

5 号桩锚固段深入强风化层岩体,1~4 号桩桩体基本贯穿土石混合层,有效减小了滑坡体的变形,边坡水平位移极值与 2、4 m 高桩体相比分别降低了 5.10、4.70 mm,即分别降低了 53.13%、51.09%。此外,其稳定安全系数提高显著,增大至 1.463,较工况 I-1 提高了 39.60%。

表 3 不同桩高工况下边坡土体变形和稳定计算成果				
桩高/m	水平位移极值/mm	垂直向上位移极值/mm	稳定安全系数	提升效果/%
2	9.60	4.30	1.095	4.50
4	9.20	4.10	1.142	9.00
6	4.50	4.10	1.463	39.60

图 9 为不同桩高微型木桩桩体水平位移极值变化图,定义 1 号桩处为 0 点,沿坡面行进,水平方向每间隔 10 m 记录桩体变化特征,依次为 2~7 号桩。由图 9 可知,1~7 号微型木桩中 3 号桩的整体水平位移最大。主要原因为在水位消退过程中,因土石混合层抗剪断强度低,中下部土体率先发生塑性变形,滑动趋势明显,锚固于该处土体附近的 3 号桩所承受推力较大,故其水平位移相对较大。随着微型木桩桩高的增加,边坡土体滑移变形受到抑制,木桩整体水平位移减小。如桩高为 6 m 时,其 3 号桩水平位移极值分别为 2.60、4.30 mm,较桩高为 2 m 和 4 m 工况,平均极值分别减小了 5.30、5.65 mm。这说明增加锚固深度可提高土体抵抗滑移能力,但埋深增加后桩体长细比增大,刚度降低,且与土体接触面积增加致使桩体所承受推力提高,单一桩体变形增大。该变化特征反映在桩体水平位移极值上表现为极值差增大,如桩高由 2 m 增至 6 m 时,微型木桩群 3 号桩的水平位移极值差分别为 0.70、0.80、1.70 mm,桩高增至 6 m 时木桩变形明显。

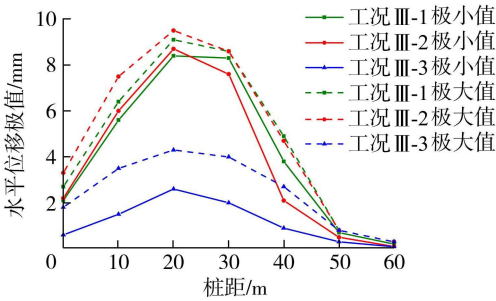


图 9 不同桩高工况下桩体水平位移极值

图 10 为不同桩高微型木桩桩体应力极值变化曲线。桩高增加后桩体刚度降低,弯曲程度加大,应力极值也随之增加,易出现断裂和剪切破坏。桩高增至 6 m 后,5 号桩桩体拉、压应力极值分别增至 2.37、2.53 MPa,其压应力极值较桩高为 2 m 和 4 m 高的 5 号桩桩体分别增大了 2.12、1.95 MPa。

图 11 为变形系数放大 670 倍后,桩高为 6 m 的

各排桩体第一主应力分布图。由变形特征和桩体应力分布可知,1~4 号桩桩体贯穿土石混合层大部分区域,但并未深入至较坚硬土层(强风化层)内,故其变形特征较为相似,桩体中下部受到土体较大推力发生弯曲变形和滑动偏转,2 号桩变形最大,其第一主应力极值为 1.26 MPa。5 号桩底部深入强风化层,下端变形较小,上端承受土压力向前偏转,在强风化层和土石混合层交界处出现应力集中,第一主应力极值达到 2.37 MPa,易出现断裂现象。6 号桩和 7 号桩大部分深埋于强风化层,受土层滑动影响较小,变形特征不明显。

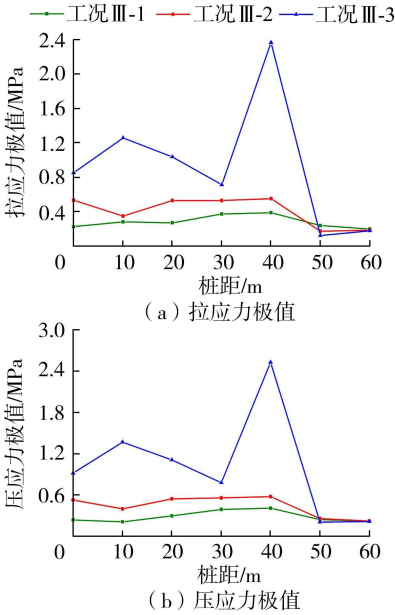


图 10 不同桩高工况下桩体应力极值变化曲线

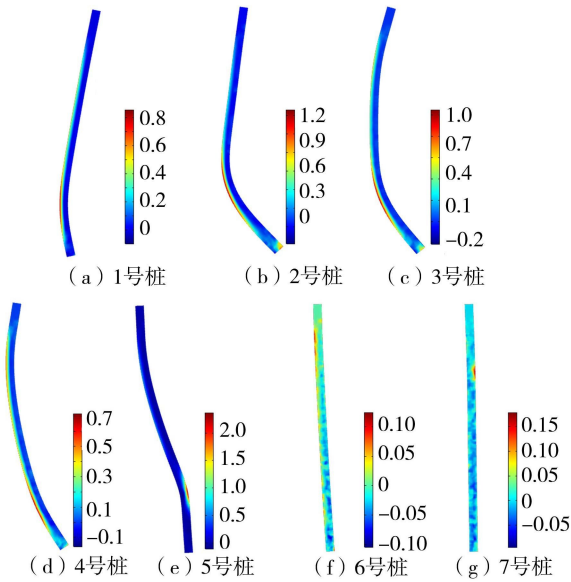


图 11 工况 III-3 下各排桩体第一主应力分布(单位:MPa)

3 结 论

a. 在水位下降过程中,岸坡内孔压相比外界水

位变化滞后,边坡抗滑安全系数逐渐降低。在同一水位下,随水位降速增大,近水处边坡土体的局部孔隙水压差增高,渗透坡降增大,致使指向河道的水平位移极值随之增加。

b. 汛期水位越高,则在水位下降过程中,边坡土体变饱和和区域范围越广,局部可形成高水头差作用,使坡面近水处的渗透力快速增长,从而使部分土体出现向河道方向滑移的趋势,边坡稳定安全系数随之降低。

c. 边坡土层布置微型木桩群,增强了边坡稳定性。当木桩埋深较浅情况下,边坡下侧土体加固效果较差,木桩群出现滑移和偏转现象较为突出,整体加固效果有限。随埋深增加,边坡稳定性显著提高,但桩体变形程度随之增大,在土层分界处易出现应力集中现象。

参考文献:

[1] 杨继红,王俊梅,董金玉,等. 水库蓄水过程中堆积体边坡瞬态稳定性分析[J]. 岩土力学,2011,32(增刊1): 464-470. (YANG Jihong, WANG Junmei, DONG Jinyu, et al. Analysis of transient stability of deposits slope in process of reservoir impounding [J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(Sup1) :464-470. (in Chinese))

[2] 张涛,张慧,黄文雄. 坡面水位下降对非饱和土质边坡稳定性影响的有限元分析[J]. 重庆大学学报,2020,43(6): 12-20. (ZHANG Tao, ZHANG Hui, HUANG Wenxiong. Finite element analysis of the stability of unsaturated soil slope under surface water drawdown conditions[J]. Journal of Chongqing University,2020,43(6):12-20. (in Chinese))

[3] 苏国韶,燕柳斌,丁雷,等. 库水位骤降条件下涉水边坡抗滑桩加固效果[J]. 水利水电科技进展,2013,33(4):22-26. (SU Guoshao, YAN Liubin, DING Lei, et al. Research on reinforcement effect of anti-slide pile at riverside slope under water level plummeting condition [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(4):22-26. (in Chinese))

[4] 赵杰,马卓娜,黄会宝,等. 水位上升条件下陡坡破坏离心模型试验研究[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):86-91. (ZHAO Jie, MA Zhuona, HUANG Huihao, et al. Centrifuge modeling of steep slope failure under water-level rising conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(6):86-91. (in Chinese))

[5] 刘磊,殷坤龙,徐勇,等. 考虑降雨及库水位变动的区域滑坡灾害稳定性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(2): 403-414. (LIU Lei, YIN Kunlong, XU Yong, et al. Evaluation of regional landslide stability considering rainfall and variation of water level of reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

2018,37(2):403-414. (in Chinese))

[6] 吴琼,唐辉明,王亮清,等. 库水位升降联合降雨作用下库岸边坡中的浸润线研究[J]. 岩土力学,2009,30(10):3025-3031. (WU Qiong, TANG Huiming, WANG Liangqing, et al. Analytic solutions for phreatic line in reservoir slope with inclined impervious bed under rainfall and reservoir water level fluctuation [J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(10):3025-3031. (in Chinese))

[7] 张旭,谭卓英,周春梅. 库水位变化下滑坡渗流机制与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(4): 713-723. (ZHANG Xu, TAN Zhuoying, ZHOU Chunmei. Seepage and stability analysis of landslide under the change of reservoir water levels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(4):713-723. (in Chinese))

[8] 刘洋,陈丽,何矾,等. 边坡筋锚三维网柔性防护结构的稳定性分析[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):65-70. (LIU Ze, CHEN Li, HE Fan, et al. Stability analysis of flexible protection structure for slope reinforced anchor 3D-geomat [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(4):65-70. (in Chinese))

[9] 唐传政,舒武堂. 微型钢管群桩在基坑工程事故处理中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(增刊2): 5459-5463. (TANG Chuanzheng, SHU Wutang. Application of micro steel pipe piles to deal with pit destruction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(Sup2):5459-5463. (in Chinese))

[10] 裴振伟,年廷凯,万驰,等. 基于 BIM 技术的边坡支护结构微型抗滑桩群设计方法[J]. 自然灾害学报,2022,31(5):193-201. (PEI Zhenwei, NIAN Tingkai, WAN Chi, et al. Design method of slopes reinforced with micro-piles group based on BIM technology [J]. Journal of Natural Disasters,2022,31(5):193-201. (in Chinese))

[11] 陈正,梅岭,梅国雄. 柔性微型桩水平承载力数值模拟[J]. 岩土力学,2011,32(7): 2219-2224. (CHEN Zheng, MEI Ling, MEI Guoxiong. Numerical simulation of lateral bearing capacity of flexible micropile [J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(7):2219-2224. (in Chinese))

[12] KONAGAI K, YIN Y B, MURONO Y. Single beam analogy for describing soil-pile group interaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2003,23(3):31-39.

[13] JEONG S, KIM B, WON J, et al. Uncoupled analysis of stabilizing piles in weathered slopes [J]. Computers and Geotechnics,2003,30(8):671-682.

[14] 辛建平,唐晓松,郑颖人,等. 单排与三排微型抗滑桩大型模型试验研究[J]. 岩土力学,2015,36(4): 1050-1056. (XIN Jianping, TANG Xiaosong, ZHENG Yingren, et al. Large-scale model tests of single-row and triple-row anti-slide micropiles [J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(4):1050-1056. (in Chinese))

[15] 盛明强,乾增珍,杨文智,等. 浸水饱和条件下黄土微型桩抗压和抗拔承载力试验[J]. 岩土工程学报,2021,43

- (12):2258-2264. (SHENG Mingqiang, QIAN Zengzhen, YANG Wenzhi, et al. Field compression and uplift tests on micropiles in collapsible loess under completely-soaked and saturated conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(12):2258-2264. (in Chinese))
- [16] 曾季才, 查元源, 杨金忠. 基于 Richards 方程切换的土壤水流及溶质运移数值模拟[J]. 水利学报, 2018, 49(7): 840-848. (ZENG Jicai, ZHA Yuanyuan, YANG Jinzhong. Numerical modeling of soil water flow and solute transport based on Richards' Equation switching [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(7): 840-848. (in Chinese))
- [17] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media [J]. Water Resources Research, 1976, 12(3):513-522.
- [18] 周桂云. 饱和-非饱和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. (ZHOU Guiyun. Improvement of finite element analysis of unstable saturated-unsaturated seepage [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(1):5-7.
- (in Chinese))
- [19] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5):892-898.
- [20] 洪勇, 邵珠山, 石广斌, 等. 基于三维极限分析法的 GIM 和 SRM 边坡安全系数计算结果对比[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4):112-120. (HONG Yong, SHAO Zhushan, SHI Guangbin, et al. Comparison of GIM and SRM calculated slope safety factor based on three-dimensional limit analysis method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4):112-120. (in Chinese))
- [21] 洪文岗, 王尉, 高学成. 库区水位下降对库岸边坡稳定性的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(1):21-26. (ZHANG Wengang, WANG Wei, GAO Xuecheng. Influences of reservoirs water level drawdown on slope stability [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(1):21-26. (in Chinese))
- (收稿日期:2023-05-12 编辑:俞云利)
-
- (上接第 63 页)
- [21] 张校文, 刘超, 荣迎春, 等. 多机组泵站正向进水阵列式隔板整流模拟及试验验证[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(4):378-384. (ZHANG Xiaowen, LIU Chao, RONG Yingchun, et al. Numerical simulation and experimental verification of forward feed array diaphragm rectifier for multi-unit pumping station [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(4):378-384. (in Chinese))
- [22] 徐存东, 李嘉明, 王荣荣, 等. 开机组合对泵站前池水沙流场特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(2):11-16. (XU Cundong, LI Jiaming, WANG Rongrong, et al. Study on the influence of the start-up combinations on the characteristics of the water-sediment flow field in forebay of pumping station [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(2):1-16. (in Chinese))
- [23] 冯建刚, 曹亚萍, 王晓升, 等. 深层隧道进流式泵站前池流态及整流措施研究[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2):1-6. (FENG Jiangang, CAO Yaping, WANG Xiaosheng, et al. Study on flow pattern and rectification measures in forebay of deep tunnel inflow pumping station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2):1-6. (in Chinese))
- [24] 李彦军, 颜红勤, 严登丰, 等. 非对称入流工况下钟形进水流道数值模拟试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(2):70-73. (LI Yanjun, YAN Hongqin, YAN Dengfeng, et al. Numerical simulation and experimental study on bell-shaped suction box under non-symmetric inflow conditions [J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(2):70-73. (in Chinese))
- [25] CHEN L F, ZANG J, HILLIS A J, et al. Numerical investigation of wave-structure interaction using OpenFOAM[J]. Ocean Engineering, 2014, 88:91-109.
- [26] GARGIONI G T, ZDANSKI P S B, VAZ M. Heat transfer enhancement in flow past triangular turbulence promoters in closed channels[J]. Numerical Heat Transfer: Part A: Applications, 2019, 75(5):309-326.
- [27] ISSA R I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting [J]. Journal of Computational Physics, 1986, 62(1):40-65.
- [28] 李坦, 靳世平, 黄素逸, 等. 流场速度分布均匀性评价指标比较与应用研究[J]. 热力发电, 2013, 42(11):60-63. (LI Tan, JIN Shiping, HUANG Suyi, et al. Evaluation indices of flow velocity distribution uniformity: comparison and application [J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(11):60-63. (in Chinese))
- [29] 何春明, 尹航, 唐健, 等. 基于 SEER 数据库的老年肺癌术后患者预后模型构建与内部验证[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2020, 40(11):1554-1561. (HE Chunming, YIN Hang, TANG Jian, et al. Establishment and internal validation of a prognostic model for elderly patients after lung cancer surgery based on SEER [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Medical Science), 2020, 40(11):1554-1561. (in Chinese))
- [30] 辜晋德. 浙江舟山 LNG 取水泵房流道水力特性试验报告[R]. 南京:南京水利科学研究院, 2016.
- (收稿日期:2023-04-21 编辑:熊水斌)