

· 西部陆海新通道——平陆运河工程建设专栏 (12) ·



平陆运河航道边坡稳定性受水位影响的研究*

杜沛霖, 吴志龙, 黄道刚, 刘国宝

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 为保证平陆运河航道边坡在长期浸水和强降雨等多重因素的作用下的稳定性, 对航道两岸的典型边坡在不同航道水位、地下水位的影响下, 边坡稳定安全系数的变化情况进行分析。结果表明, 随着航道内水位的抬升, 边坡稳定安全系数逐渐提高, 且对于地质条件较差的边坡, 航道内水位变化的影响更为明显, 在航道内水位由正常蓄水位抬升至设计洪水位, 抬升高度 7.17 m 时, 安全系数最大提高 0.19。随着坡体内地下水位的抬升, 边坡稳定安全系数逐渐降低, 近似呈线性变化, 地下水位每升高 2 m, 安全系数降低约 0.03。提出在航道工程中, 对岩性较差、安全系数较小的边坡, 应通过设置深入坡体的排水管、坡面的截水沟和急流槽等工程措施增强边坡排水能力, 减小降雨量较大时边坡失稳的概率。

关键词: 平陆运河; 航道工程; 水位; 边坡稳定; 安全系数

中图分类号: U612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0001-07

Research on stability of bank slope affected by water level along Pinglu Canal

DU Peilin, WU Zhilong, HUANG Daogang, LIU Guobao

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract To ensure the stability of the bank slopes of the Pinglu Canal under the influence of long-term immersion and heavy rainfall and other multiple factors the changes in the stability safety factor of typical slopes on both sides of the canal under the influence of different channel water level and underground water level are analyzed. The results show that as the water level in the canal rises the stability safety factor of the slope gradually increases and for slopes with poor geological conditions the influence of the water level change in the canal is more obvious. When the water level in the canal rises from the normal storage level to the design flood level with a rise of 7.17 m the safety factor increases by up to 0.19. As the groundwater level in the slope body rises the stability safety factor of the slope gradually decreases approximately in a linear manner. For every 2 m increase in the groundwater level the safety factor decreases by about 0.03. It is proposed that in channel engineering for slopes with poor rock properties and small safety factors engineering measures such as setting up drainage pipes deep into the slope body setting up water interception ditches and rapid channels on the slope surface should be adopted to enhance the drainage capacity of the slope and reduce the probability of slope instability during heavy rainfall.

Keywords: Pinglu Canal; channel engineering; water level; slope stability; safety factor

边坡是公路、铁路及水运等工程建设中的常见结构, 在一些大型工程中存在着几十米至上百米的高边坡, 其发生坡体变形、滑坡、失稳等破坏会对周边环境及安全造成严重危害。引起边坡失稳的影响因素复杂多样, 包括坡体自身地质条件

差、节理及裂隙发育、强降雨以及地震影响等^[1]。研究表明, 持续的强降雨作用导致边坡失稳的比例极高, 坡前水位的变化也会导致坡体发生滑坡危害^[2-8]。张培锦等^[9]采用 Midas-GTS/NX 有限元分析软件, 研究了降雨量及河流水位上升对沿河

收稿日期: 2024-11-30

*基金项目: 国家重点研发计划课题项目(2023YFC3206105); 广西科技重大专项资助项目(桂科 AA23023018)

作者简介: 杜沛霖(1995—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为航道工程。

路基边坡稳定性的影响。张立舟等^[10]针对四川某水电站库水位变化过程中,岩质边坡内孔隙水压力和渗流场的变化规律进行分析。肖志勇等^[11]采用 Geo-studio 软件,研究了三峡库区中某堆积体的滑坡稳定性受水位间歇性下降的影响。

在平陆运河航道工程中,由于航道内需要长期维持保证船舶通航的水深,导致设计水位以下岩土体长期处于饱和状态,可能对边坡稳定产生不利影响。航道内水位的升降受区域内降雨量、上游来水与下游泄水量、以及灌溉用水和生活用水量等多种因素综合控制。同时,受降雨强度和坡体排水能力的影响,航道两岸边坡内地下水位的升降也会影响边坡的稳定。以往的文献中对运河工程中边坡稳定性受水位影响的分析研究相对

较少,因此,本文基于平陆运河航道两岸典型边坡断面的地质勘察信息和设计开挖坡比,分析航道两岸边坡的稳定性受航道内水位和坡体内地下水位的影响情况。

1 地质条件与计算方法

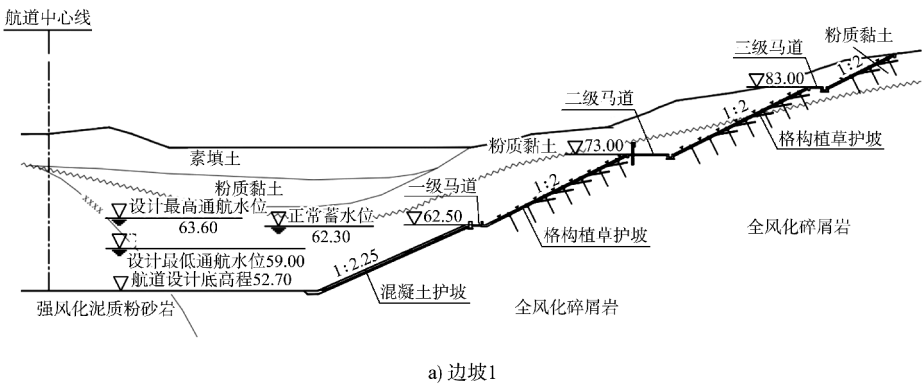
本文的研究对象为平陆运河航道马道枢纽上游段,所处地区主要为丘陵地貌,设计航道底高程为 52.7 m,研究范围内航道两岸的开挖高度为 30~50 m,每间隔 10 m 高程差设置一级马道,以便施工车辆和人员行走。综合考虑地质条件、岩层产状及结构面的力学性质等因素确定设计开挖坡比。根据区域地质资料、地质勘察取得的岩土层原位测试及室内试验结果,得到岩土体的主要指标取值见表 1。

表 1 岩土体指标取值
Tab. 1 Rock and soil index values

岩土体	天然密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	岩、土体抗剪强度标准值			
			黏聚力/kPa		内摩擦角/($^{\circ}$)	
			天然	饱和	天然	饱和
粉质黏土	1.90	2.05	38	35	17	14
全风化碎屑岩	1.95	2.10	45	40	18	16
强风化泥质粉砂岩	2.15	2.30	60	55	23	22
中风化上部泥质粉砂岩	2.50	2.60	300	300	27	27
中风化下部泥质粉砂岩	2.60	2.65	400	400	31	31

本次计算选取 3 个航道典型边坡进行分析,边坡断面见图 1。典型边坡 1 位于航道右岸,开挖高度 35.2 m,坡体主要为全风化碎屑岩,最上 1~2 级坡为粉质黏土。典型边坡 2 位于航道左岸,开挖高度 46.4 m,坡体主要为强风化泥质粉砂岩,最上一级坡为全风化碎屑岩,表层覆有粉质黏土。典型边坡 3 位于航道右岸,开挖高度 43.5 m,最

下一级坡为中风化下部泥质粉砂岩,第 2~4 级坡为中风化上部和强风化泥质粉砂岩,最上一级坡为全风化碎屑岩,表层覆有粉质黏土。由于第 1 级边坡常年位于正常蓄水位以下,采用混凝土护坡,第 2~4 级边坡采用格构植草护坡,顶部第 5 级边坡采用加筋麦克垫护坡。



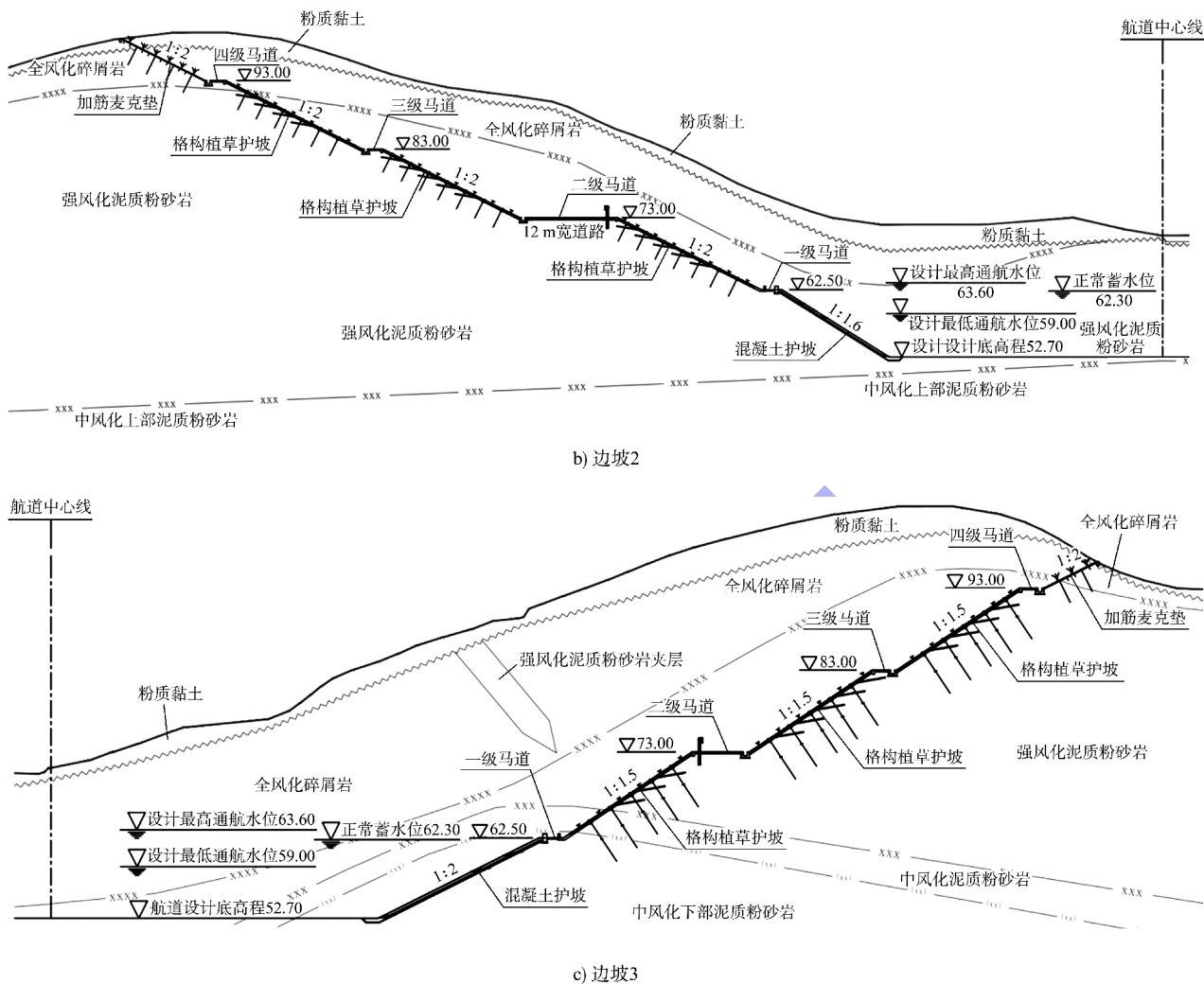


图 1 典型边坡断面 (单位: m)
Fig. 1 Typical slope profile (unit: m)

结合地质条件分析,选取的航道边坡体主要为土质、风化岩质边坡,其可能的破坏形式为圆弧式滑动,采用简化毕肖普法进行抗滑稳定计算,得到边坡抗滑稳定安全系数^[12]。在边坡内部浸润线以上的岩土体采用天然容重计算自重,抗剪强度标准值采用天然状态下参数,浸润线以下的岩土体采用饱和容重计算自重,抗剪强度标准值采用饱和状态下参数。

2 计算结果与分析

2.1 航道内水位对边坡稳定性影响

正常运用条件下,坡体地下水以勘察钻孔揭露的稳定地下水位为基准,航道内水位分别取设计洪水位 69.47 m、最高通航水位 63.6 m、正常蓄水位 62.3 m、最低通航水位 59.0 m 及死水位 57.8 m,并补充计算 65.5、67.5 m 两个水位,各典型边坡

的边坡稳定安全系数随航道内水位的变化情况见图 2。可以得出,在地下水位不变的情况下,随着航道内水位的升高,典型边坡 1、2 的边坡稳定安全系数均明显增加,且典型边坡 1 的安全系数变化幅度更大,典型边坡 3 的边坡稳定安全系数仅在设计洪水位和最高通航水位的情况下略有增大。

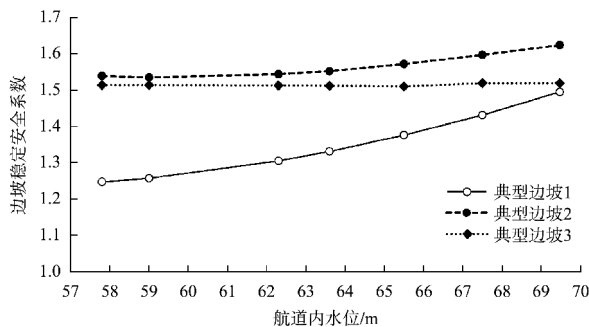


图 2 安全系数随航道内水位变化
Fig. 2 Safety factor variation with water level in channel

对比各典型边坡在正常蓄水位 62.3 m 和设计洪水位 69.47 m 时边坡最危险滑动面位置及对应安全系数, 见图 3~5。可以看出, 在不同水位下, 典型边坡 1、2 的最危险滑动面均是从坡顶到坡脚, 典型边坡 3 的最危险滑动面圆弧与中风化岩层上部相切。即在不同航道水位的工况下, 虽然安全系数有一定变化, 但最危险滑动面的位置基本不变。由正常蓄水位到设计洪水位, 典型边坡

1~3 的安全系数分别增加 0.19、0.08、0.006。由于典型边坡 1 的坡体主要为全风化碎屑岩, 典型边坡 2 的坡体主要为强风化泥质粉砂岩, 可见当坡体岩性更好时, 航道内水位变化对边坡稳定安全系数的影响更小; 典型边坡 3 中风化岩层的高度在正常蓄水位以上, 略低于设计洪水位, 最危险滑动面与中风化岩层相切, 航道内水位变化对该边坡的安全系数基本没有影响。

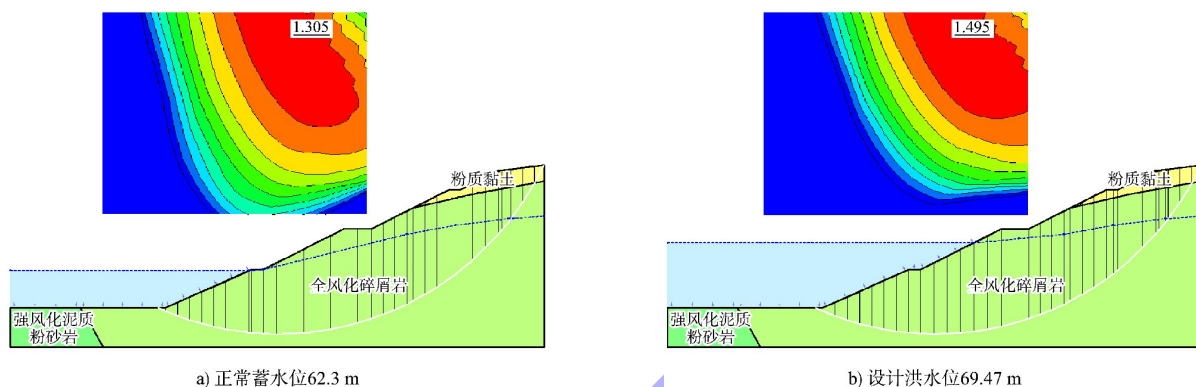


图 3 典型边坡 1 边坡滑动面计算结果

Fig. 3 Calculation results of sliding surface of typical slope 1

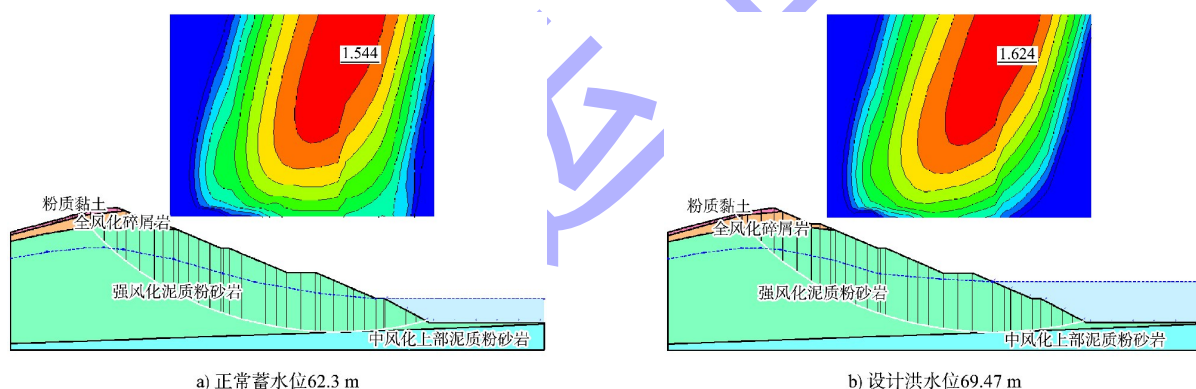


图 4 典型边坡 2 边坡滑动面计算结果

Fig. 4 Calculation results of sliding surface of typical slope 2

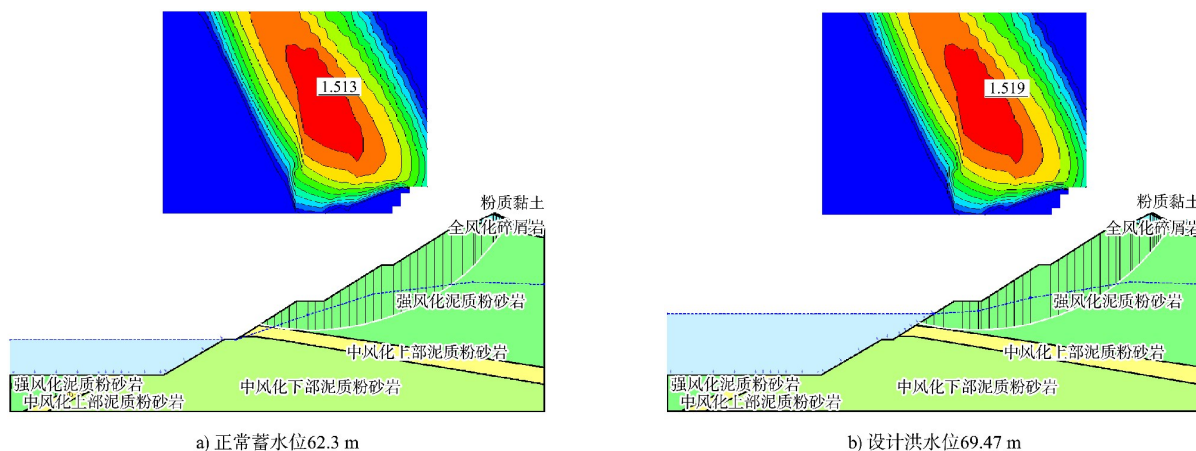


图 5 典型边坡 3 边坡滑动面计算结果

Fig. 5 Calculation results of sliding surface of typical slope 3

2.2 坡体内水位对边坡稳定性影响

在持续降雨量较大时,可通过向下游泄水控制航道内水位,但难以避免边坡坡体内地下水位抬升,从而可能会对边坡稳定产生不利影响。航道内水位取正常蓄水位 62.3 m,坡体地下水位以勘察钻孔揭露的稳定地下水位为基准,依次抬升 2、4、6、8、10 m,并补充计算枯水期可能出现的地下水位下降的工况。各典型边坡的边坡稳定安全系数随地下水位的变化情况见图 6。可以得出,在航道内水位不变的情况下,随着地下水位的升高,典型边坡 1~3 的边坡稳定安全系数均明显下降,且安全系数随地下水位的变化情况近似为线性变化,地下水位每升高 2 m,安全系数降低约 0.03。

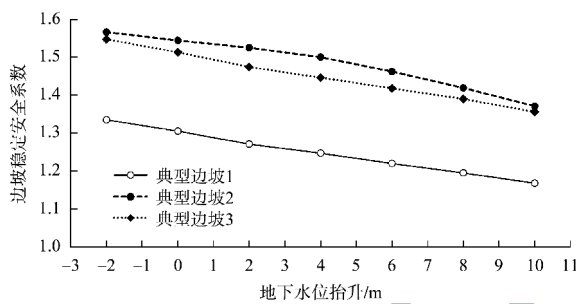


图 6 安全系数随地下水位变化

Fig. 6 Safety factor variation with underground water level

对比各典型边坡在地下水位下降 2 m 和抬升 6 m 时边坡最危险滑动面位置及对应安全系数,见图 7~9。可以看出,地下水位变化对最危险滑动面的位置基本没有影响。由地下水位下降 2 m 到地下水位抬升 6 m,典型边坡 1~3 的安全系数分别降低 0.115、0.104、0.129,3 种典型边坡的安全系数均出现了明显的下降。因此,对于本身岩性较差、安全系数较小的边坡,应通过设置深入坡体的排水管、坡面的截水沟和急流槽等工程

措施增强边坡排水能力,减小降雨量较大时地下水位升高导致边坡失稳的概率。

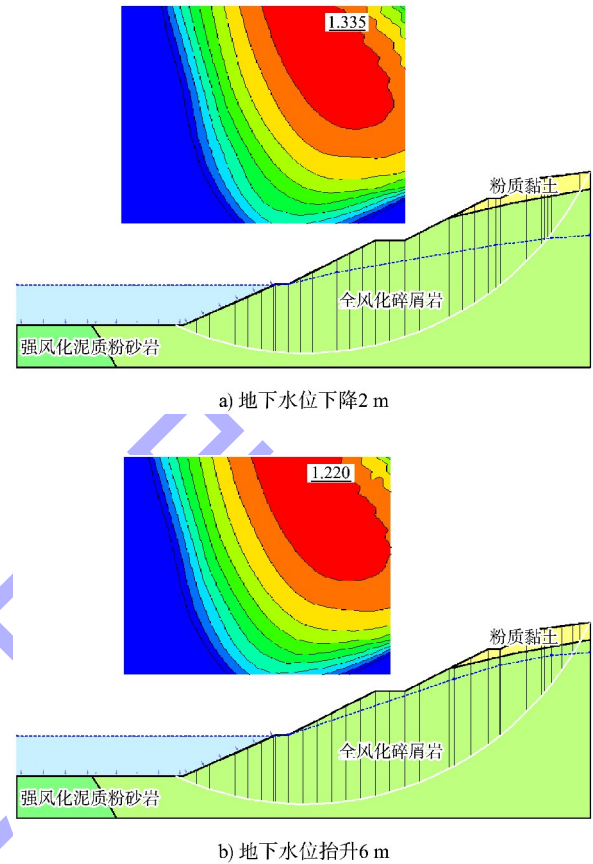
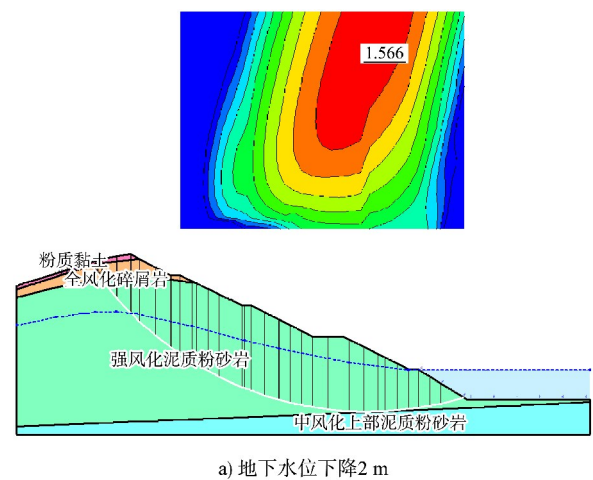


图 7 典型边坡 1 边坡滑动面计算结果

Fig. 7 Calculation results of sliding surface of typical slope 1



a) 地下水位下降 2 m

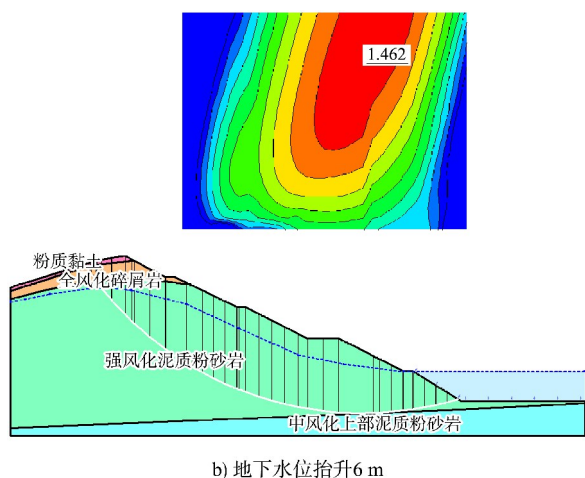


图 8 典型边坡 2 边坡滑动面计算结果

Fig. 8 Calculation results of sliding surface of typical slope 2

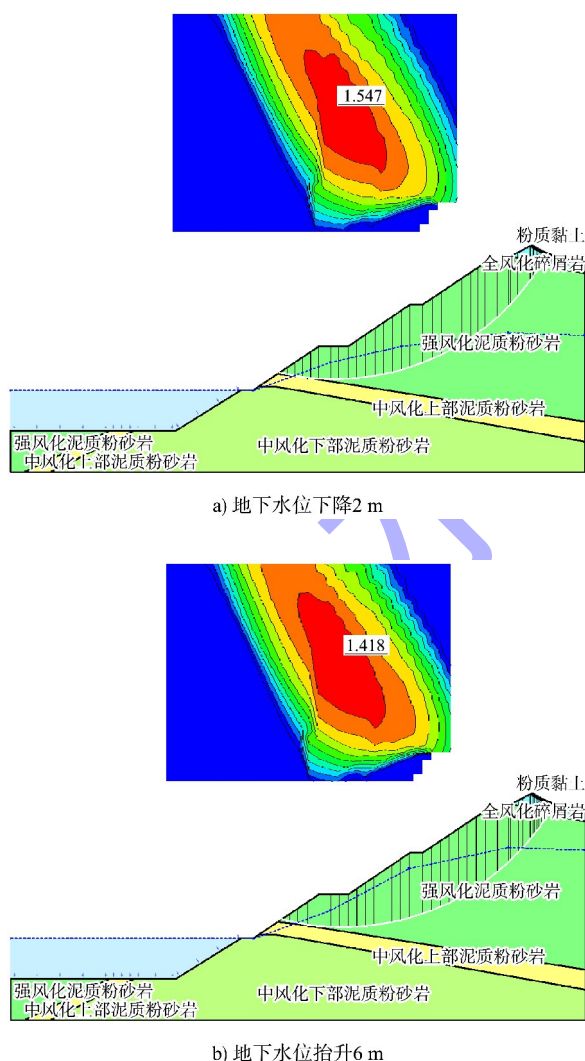


图 9 典型边坡 3 边坡滑动面计算结果

Fig. 9 Calculation results of sliding surface of typical slope 3

3 结论

1) 边坡最危险滑动面的位置主要受边坡本身的岩层构成影响, 航道内水位与坡体内地下水位的变化一般不会引起边坡最危险滑动面的改变。

2) 当最危险滑动面位于航道内水位以下时, 在地下水位不变的情况下, 随着航道内水位的抬升, 边坡稳定安全系数逐渐增大, 且对于地质条件较差的边坡, 航道内水位变化的影响更为明显。当最危险滑动面位于航道内水位以上时, 安全系数基本不受航道内水位变化的影响。

3) 在航道内水位不变的情况下, 随着坡体内地下水位的抬升, 边坡稳定安全系数逐渐降低, 且安全系数随地下水位近似呈线性变化。

参考文献:

- [1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.
HUANG R Q. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2007, 26(3): 433-454.
- [2] 李峰, 郭院成. 降雨入渗对边坡稳定性作用机理分析[J]. 人民黄河, 2007, 29(6): 44-45, 48.
LI F, GUO Y C. Mechanism analysis of rainfall infiltration on slope stability [J]. Yellow River, 2007, 29 (6): 44-45, 48.
- [3] 程曦, 王元战, 马殿光, 等. 基于 ABAQUS 的内河航道岸坡稳定性分析[J]. 水道港口, 2012, 33(2): 152-158.
CHENG X, WANG Y Z, MA D G, et al. Analysis of inland river waterway slope stability through ABAQUS [J]. Journal of waterway and harbor, 2012, 33(2): 152-158.
- [4] 李浩, 牛义磊, 沈雨魁. 水位及坡度比对边坡稳定性影响的数值模拟研究[J]. 新型工业化, 2022, 12(2): 176-179, 189.
LI H, NIU Y L, SHEN Y K. Numerical simulation study on the influence of water level and gradient ratio on slope stability[J]. The journal of new industrialization, 2022, 12(2): 176-179, 189.

- [5] 欧明远. 水位快速升降对土坝稳定性的影响研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 5(3): 11-14.
- OU M Y. Study on effect of rapid rise and fall of water level on stability of soil dam[J]. Hydro science and cold zone engineering, 2022, 5(3): 11-14.
- [6] 严文群, 段祥宝, 张大伟. 地下水渗流对岸坡稳定影响试验研究[J]. 水运工程, 2009(4): 22-26, 37.
- YAN W Q, DUAN X B, ZHANG D W. Experimental research on the effect of groundwater seepage on bank slope's stability [J]. Port & waterway engineering, 2009(4): 22-26, 37.
- [7] 仲南艳, 殷晓明, 王斐. 航道护岸工程中基槽边坡稳定研究[J]. 水运工程, 2007(11): 80-86.
- ZHONG N Y, YIN X M, WANG F. On slope stability of foundation trench in waterway revetment engineering[J]. Port & waterway engineering, 2007(11): 80-86.
- [8] 周世良, 王全, 吴飞桥, 等. 内河大水位差条件下的码头岸坡稳定性分析[J]. 水运工程, 2010(3): 81-84.
- ZHOU S L, WANG Q, WU F Q, et al. Stability analysis of wharf slope under large water level difference in inland river[J]. Port & waterway engineering, 2010(3): 81-84.
- [9] 张培锦, 李海明, 汪磊, 等. 降雨和河流水位上升作用下沿河路基边坡稳定性研究[J]. 公路交通技术, 2023, 39(2): 14-20.
- ZHANG P J, LI H M, WANG L, et al. Study on the stability of subgrade slope along the river under the action of rainfall and river water level rise [J]. Technology of highway and transport, 2023, 39(2): 14-20.
- [10] 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.
- ZHANG L Z, WU N, LI H, et al. Effect of rise and fall of reservoir water level on seepage field in slope[J]. Journal of University of Jinan (science and technology), 2020, 34(2): 113-117.
- [11] 肖志勇, 邓华锋, 李建林, 等. 库水位间歇性下降对堆积体滑坡稳定性的影响[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(8): 114-119.
- XIAO Z Y, DENG H F, LI J L, et al. Influence of intermittent drawdown of reservoir water level on the stability of accumulation landslide[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33 (8): 114-119.
- [12] 水利水电工程边坡设计规范: SL 386—2007 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- Design code for engineered slopes in water resources and hydropower projects: SL 386-2007 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.

(本文编辑 王传瑜)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部