



软弱夹层边坡抗滑稳定分析与抗滑桩桩位选择

李华勇, 王志鹏

(江西省港航建设投资集团有限公司, 江西南昌 330008)

摘要: 结合某枢纽二线船闸深基坑边坡工程, 建立概化模型, 通过强度折减法分析软弱夹层边坡稳定性, 并与规范比较得出边坡须进行加固处理。在对夹层边坡进行抗滑支护时, 研究桩位对边坡稳定性的影响, 并对不同桩位的抗滑桩内力分布规律进行分析。结果表明: 抗滑桩从坡底沿着坡面向坡顶方向布置时, 边坡安全系数呈现先增大后减小的变化规律, 边坡塑性区塑性应变呈现先减小后增大的变化规律, 抗滑桩剪力作用方向反转临界点和弯矩最大值均位于软弱夹层带附近; 当抗滑桩位于边坡中部时, 边坡安全系数最大, 塑性区塑性应变最小, 抗滑桩剪力与弯矩达到最大, 抗滑效果最佳。

关键词: 软弱夹层边坡; 数值模拟; 强度折减法; 抗滑桩

中图分类号: TU 457; U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)09-0187-07

Anti-sliding stability analysis of weak interlayer slope and selection of anti-sliding pile position

LI Hua-yong, WANG Zhi-peng

(Jiangxi Provincial Port & Waterway Construction Investment Group Co., Ltd., Nanchang 330008, China)

Abstract: Combining with the deep foundation pit slope project of the second ship lock of a hub, we establish a generalized model, analyze the stability of the weak interlayer slope by the strength reduction method, and compare with the code to obtain that the slope should be reinforced. We study the influence of the pile position on the stability of the slope when carrying out anti-sliding support for the interlayer slope, and analyze the internal force distribution law of the anti-sliding pile under different pile positions. The results show that when the anti-sliding piles are arranged from the bottom of the slope along the slope face to the top of the slope, the safety factor of the slope first increases and then decreases, and the plastic strain of the plastic zone first decreases and then increases. The critical point of the direction of the anti-sliding pile's shear force reversal and the maximum value of the bending moment were both located near the weak interlayer. When the anti-sliding pile is located in the middle of the slope, the slope safety factor is the maximum, the plastic zone is the smallest, the shear force and the bending moment of the anti-sliding pile are the largest, and the anti-sliding effect is the best.

Keywords: weak interlayer slope; numerical simulation; strength reduction method; anti-slide pile

伴随我国腹地经济的快速增长, 内河水运建设给人们的生产生活带来巨大的便利, 船闸作为内河水运的一个组成部分, 对内河水运建设和发展具有重要的作用^[1]。目前, 大部分二线船闸与原有一线船闸距离较近, 基坑开挖时必须考虑开挖边坡的稳定性, 特别在地质条件较差且场地有

限的工程中, 基坑边坡稳定是整个工程中不可忽视的一环^[2]。软弱夹层作为影响边坡稳定性的一个重要因素, 处理不当将引发边坡失稳^[3]。在一些施工场地受限的二线船闸深基坑中, 软弱夹层面若全部清除, 不仅增大工程造价, 而且对临近建筑物结构安全造成影响, 尤其在一些新扩建船

闸与原船闸距离较近且夹层位于两船闸之间时，若新扩建船闸基坑开挖选择清除软弱夹层时，将直接对原船闸结构安全造成影响。因此，基坑放坡开挖距离受限且遇软弱夹层时，开挖边坡须采取支护措施。目前，基坑工程中抗滑桩支护运用较为普遍。对于抗滑桩桩位布置，目前工程界尚无明确规定，仅部分学者进行了研究，如彭文哲等^[4]采用有限元极限分析软件 OptumG2，分析不同边坡坡比和土质参数下抗滑桩桩位对边坡稳定性的影响特征，得出最佳支护桩位于边坡中部附近、坡比和岩土体参数对桩位影响较小、但其对边坡安全系数影响较大的结论；汪志刚等^[5]、雷文杰等^[6]分别研究了桩位对均质边坡、软弱夹层边坡的影响，得出最佳支护桩均位于边坡中部区域且与边坡特性无关、远离边坡中部安全系数逐渐减小的结论；韩高升等^[7]通过研究不同滑带对滑坡的影响，结果表明影响滑坡稳定性的主要因素源于滑带；辛建平等^[8]通过研究微型抗滑桩的破坏机制，得出抗滑桩受力最大区域位于软弱夹层带附近的结论。上述研究在一定程度上解决了抗滑桩的桩位布置问题，但在船闸深基坑中边坡往往为多梯级开挖，上述支护桩最优桩位布置的结论是否可用须进一步研究。

本文结合某枢纽二线船闸上游导航墙基坑边坡，建立概化模型，分析二级软弱夹层边坡安全稳定性特征、塑性区塑性应变和位移分布规律，并在此基础上研究抗滑桩桩位的选择对边坡加固效果的影响，以期对类似实际工程提供参考。

1 计算理论与模型构建

1.1 工程概况

某枢纽二线船闸工程等级为Ⅲ级，闸室为分离式结构，闸首为整体式结构，两线船闸间距为80 m，上游导航墙基坑开挖形成二级坡，坡比近似为1:1，总坡高为14 m。地质条件主要为强风化板岩、中风化板岩和粉质黏土，其中中风化板岩位于地层较深处，对基坑边坡影响小，强风化板岩则易发生软化和风化，开挖后因长期暴露在表

面，力学性能与粉质黏土相差较小，并且强风化岩层中夹杂软弱粉土，地质特征较差，在施工期间为防止边坡失稳，采取了桩基支护方式对基坑边坡进行加固处理。

1.2 理论依据

1.2.1 强度折减法基本理论

强度折减法由英国科学家 Zienkiewicz 于 1975 年提出，该方法主要研究土体破坏特征，是边坡稳定性分析的一种方法。相比于传统的极限平衡法，强度折减法具备明显的优势，其不需要假定边坡滑动面，仅通过降低土体力学指标的方式来确定边坡的稳定性，对于地质复杂和有支护的边坡具有较好的模拟效果^[9]。

强度折减法是通过不断降低土体的黏聚力与内摩擦角使土体达到极限破坏。该方法主要表现为土体内的最大抗剪强度 τ_{\max} 与外部荷载作用土体产生的实际剪应力 τ 的比值，具体是将原土体抗剪强度力学指标的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 用折减系数 F_s 折减成为一个新的力学指标 c' 、 φ' ，并取代原力学指标：

$$c' = c/F_s \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan[(\tan\varphi)/F_s] \quad (2)$$

式中： c 、 c' 为折减前、后的黏聚力； φ 、 φ' 为折减前、后的内摩擦角。

根据强度折减法的基本计算理论得知，要使边坡达到失稳破坏，土体的内摩擦角与黏聚力须在原有的基础上发生折减，折减系数 F_s 即为边坡的安全系数。

1.2.2 边坡失稳判别依据

目前对于边坡失稳的评判标准主要有 3 类^[10]：第 1 类为边坡发生临界塑性贯穿面；第 2 类为模型计算求解不收敛；第 3 类为边坡某一特征点的位移发生突变。针对本文所研究的问题，若以临界塑性贯穿面作为判别依据，会因为计算过程中塑性应变的不断变化，临界塑性贯穿面难以明确界定，会使安全系数有较大偏差；若以求解不收敛作为判别依据，容易导致边坡产生较大的位移，并且高估了边坡安全系数，使计算的边坡偏于危

险。因此本文采用边坡中某一特征点位移突变作为判别依据, 为了避免曲线上出现位移拐点不明确的情况, 将 F_s-U_x 过程线 (U_x 为 x 向位移) 拟合成一条光滑曲线, 在曲线两端做切线, 切线交点竖直投影于曲线上的点为位移突变拐点, 如图 1 所示。

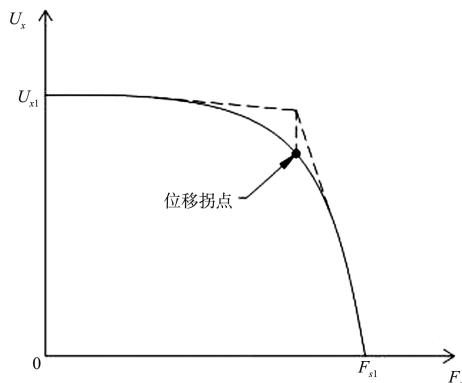


图 1 计算位移拐点

1.3 数学模型的构建与分析

为避免模型计算时边界条件的影响, 将模型计算域设置为长 55.5 m、高 34 m, 同时为了简化计算, 截取边坡中某段进行分析, 截取宽度为 2 m。本模型边坡坡面分 2 个梯级, 每个梯级的高度和宽度均为 7 m, 边坡坡比均为 1:1, 马道平台宽 2 m。边坡由两道相连夹层带贯穿, 夹层厚度为 1 m, 从坡脚延伸的夹层带水平角为 15°, 向坡顶部贯穿的夹层带水平角为 72°, 夹层带以上为滑体, 以下为滑床, 见图 2。滑体、滑床以及软弱夹层的力学指标见表 1。模型中岩土体材料为摩尔库仑模型, 桩基采用线弹性模型, 模型中 x 、 y 、 z 轴正方向见图 3, 左右两侧边界 $U_x=0$, 前后侧边界 $U_z=0$, 底部边界 x 、 y 、 z 向位移 U_x 、 U_y 、 U_z 均为 0。模型中桩基网格单元为 0.25 m, 与桩基接触的土体和软弱夹层网格为 0.25 m, 其他区域网格边长为 1 m, 桩底与土体为绑定接触方式, 侧边与土体为摩擦接触, 网格类型为用 8 节点六面体的三维实体单元。

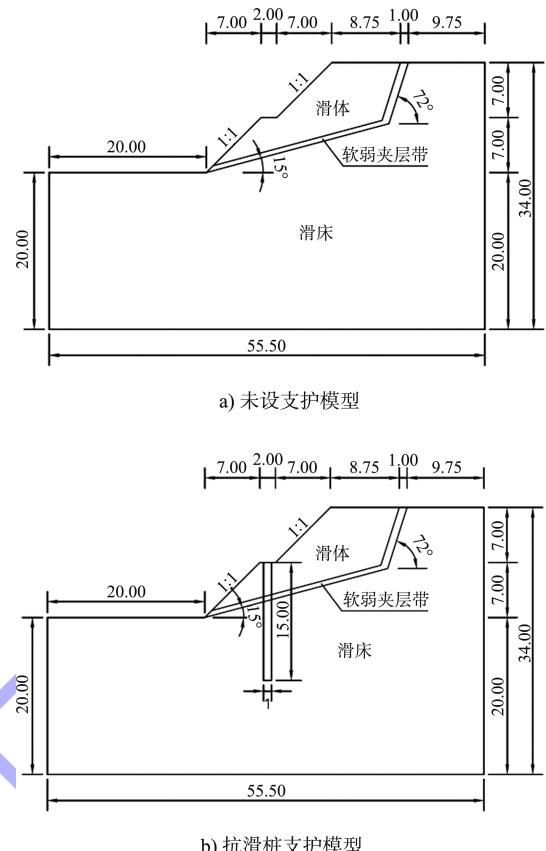
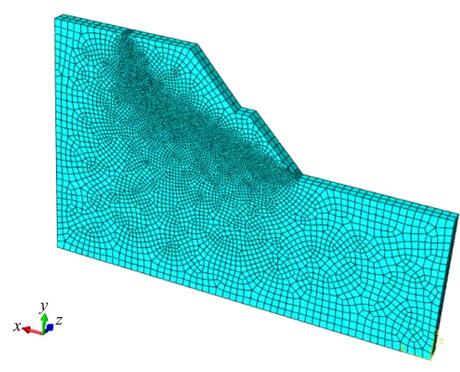


图 2 计算模型断面 (单位: m)

表 1 各材料物理力学参数

材料	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ (t·m ⁻³)	黏聚力/ kPa	摩擦角/ (°)
滑体	8.45	0.250	1.890	25	25
软弱夹层	6.45	0.250	1.750	8	10
滑床	350	0.250	2.100	200	45
抗滑桩	15 000	0.167	2.400	-	-



a) 未设支护模型

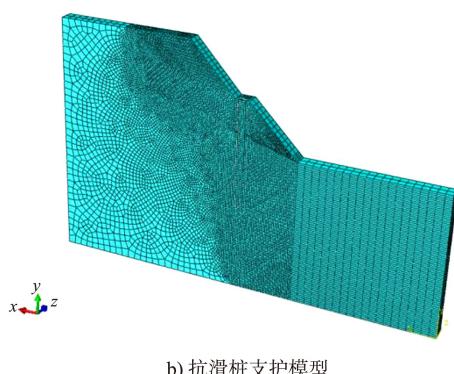


图3 计算模型网格划分

1.4 边坡滑裂面分析与安全系数比较

抗滑支护前后软弱夹层边坡的位移分布云图见图4, 支护前后边坡塑性区(土体塑性区物理量为塑性应变, 即土体发生应变后的体积增量与土体应变前体积的比值, 无量纲)分布云图见图5。可以看出, 未设置抗滑桩时, 边坡沿着软弱夹层带滑动, 位移明显, 塑性区塑性应变也较为明显; 采用抗滑桩支护后, 抗滑桩阻止了上部土体的滑移, 塑性区在抗滑桩附近出现中断, 边坡位移与塑性区塑性应变均远小于未支护工况。

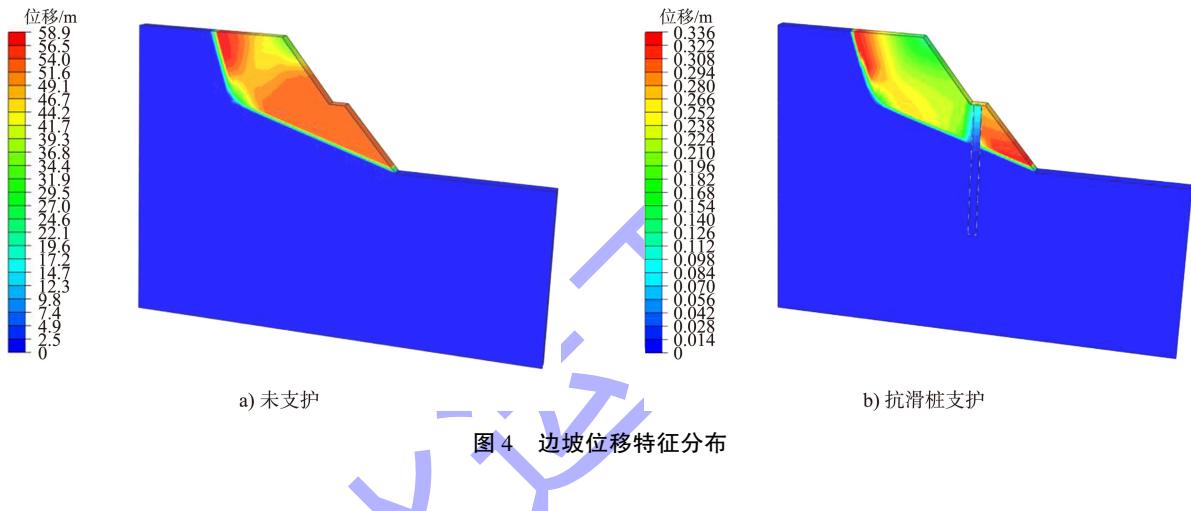


图4 边坡位移特征分布

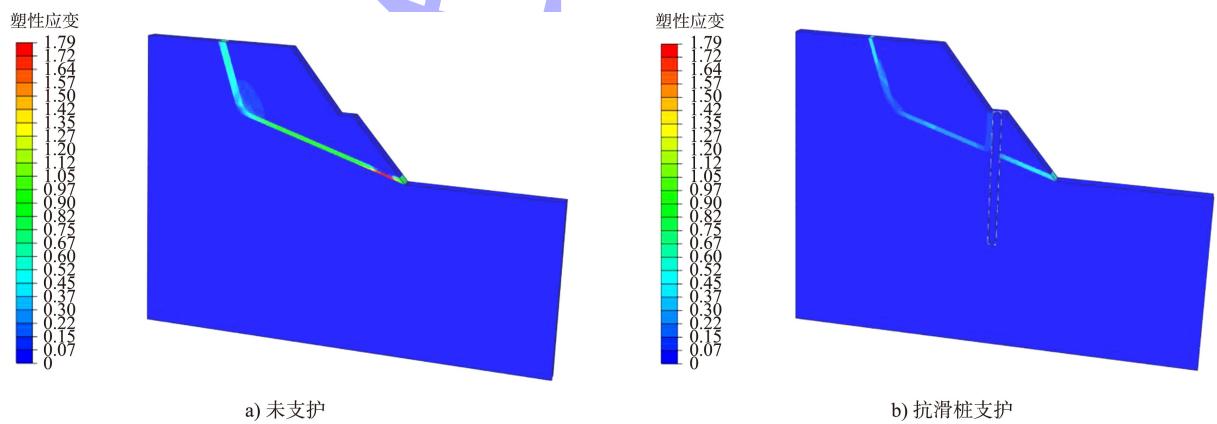
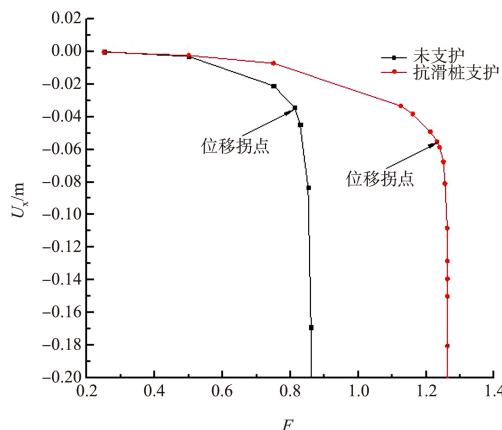


图5 边坡塑性区特征分布

抗滑支护前后软弱夹层边坡的 F_s-U_x 关系曲线见图6。可以看出, 随着折减系数 F_s 的增加, 支护前后的边坡水平位移先呈现缓慢增加趋势, 当 F_s 达到某一特定的数值区域时, 水平位移出现转折拐点, 随后位移急剧增大, 出现位移拐点的 F_s 数值代表着边坡的安全系数, 对应的水平位移为边

坡出现破坏时的水平位移。支护前边坡安全系数为0.81, 低于《水利水电工程围堰设计规范》^[11]规定的4、5级围堰边坡1.05的边坡稳定安全系数, 边坡不稳定, 须进行支护; 对软弱夹层边坡进行抗滑桩支护后, 边坡安全系数为1.21, 边坡稳定性得到明显提升。

图 6 边坡 F_s - U_x 关系曲线

2 抗滑桩加固影响分析

为研究桩位对软弱夹层边坡的安全稳定性影响特征, 将抗滑桩分别置于 L_x/L 为 0、0.25、0.50、0.75、1.00 处, 固定抗滑桩长为 15 m(图 7), 嵌固滑床深度均满足《建筑桩基技术规范》^[12]规定的嵌岩深度大于 $0.4d$ (d 为桩径)和 0.5 m 要求, 以分析不同桩位下边坡安全系数和塑性应变区的变化情况, 并对比抗滑桩的内力分布特性。

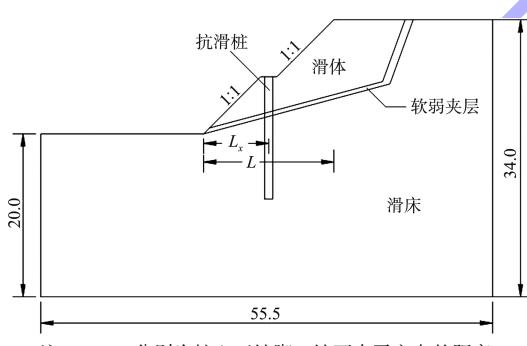


图 7 桩位及尺寸参数

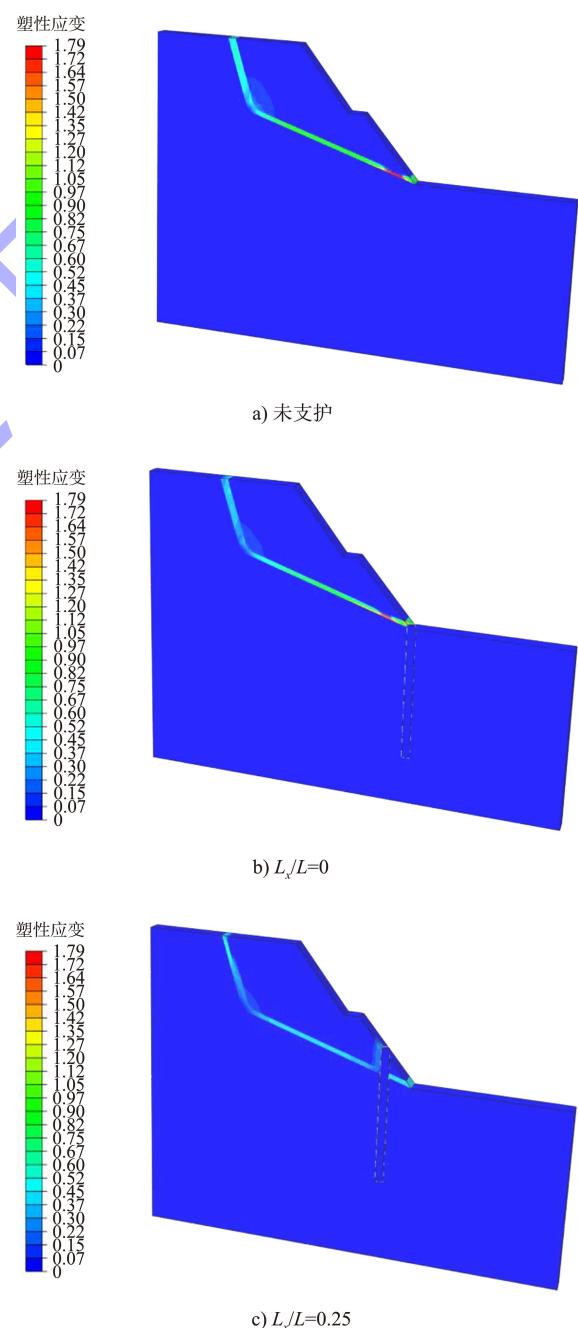
2.1 不同桩位下边坡稳定性分析

不同桩位下边坡安全系数见表 2。可以看出抗滑桩布置在边坡坡底时, 边坡的安全系数与未支护时基本相同, 抗滑桩对软弱夹层边坡不起抗滑支护作用。随着抗滑桩沿坡面向坡顶方向布置时, 边坡安全系数呈现出先增大后减小的趋势, 桩位在边坡中部附近时边坡安全系数达到最大, 说明支护桩的桩位在边坡中部附近时对夹层边坡的支护效果达到最佳。

表 2 不同桩位下边坡安全系数

L_x/L	未支护	0	0.25	0.50	0.75	1.00
安全系数	0.81	0.82	1.01	1.21	1.12	0.93

不同桩位下边坡塑性区塑性应变分布情况见图 8。可以看出, 桩位在 $L_x/L=0$ 与未支护抗滑桩时的塑性应变分布基本相同, 塑性区塑性应变明显, 两者起不到抗滑作用。当抗滑桩沿着边坡坡面向坡顶布置时, 塑性区塑性应变呈现出先减小后增大的变化规律。在 $L_x/L=0.5$ 时, 边坡塑性区塑性应变最小, 靠近抗滑桩区域的塑性应变基本为 0, 表明该桩位下支护效果最为显著。在 $L_x/L=1$ 时, 边坡抗滑桩后侧塑性应变消失, 但边坡坡底处夹层带区域塑性应变最大, 此时边坡底部易发生滑动破坏。



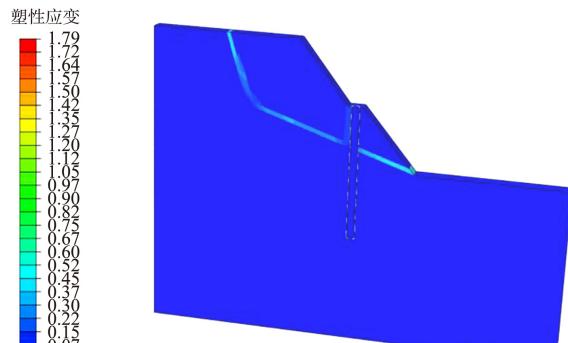
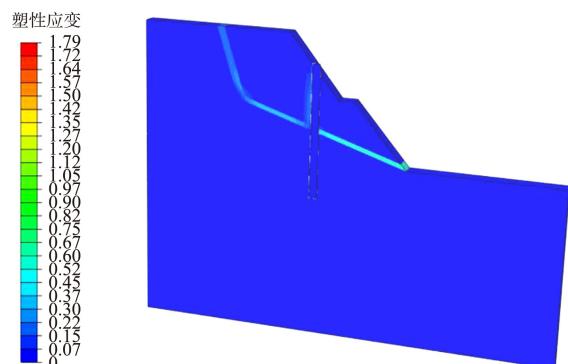
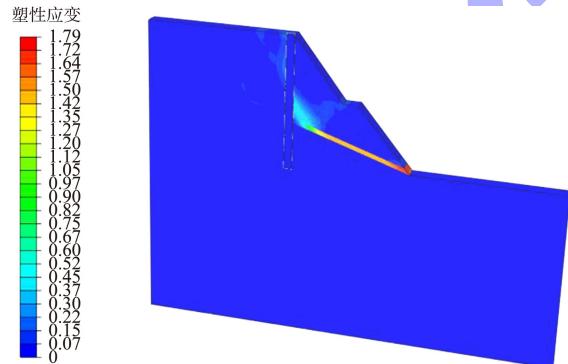
d) $L_x/L=0.50$ e) $L_x/L=0.75$ f) $L_x/L=1.00$

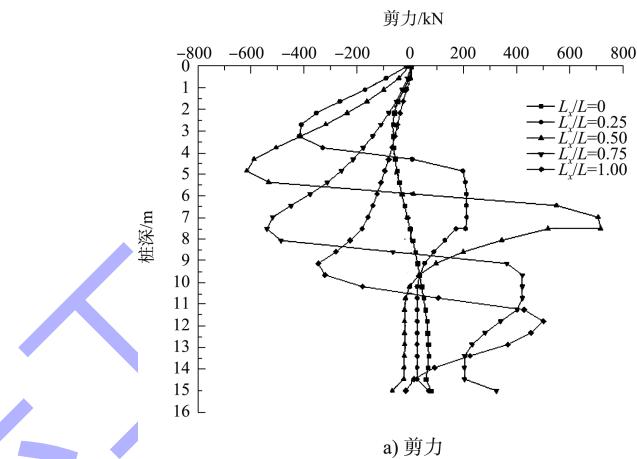
图 8 不同桩位下边坡塑性应变区分布情况

2.2 抗滑桩内力分析

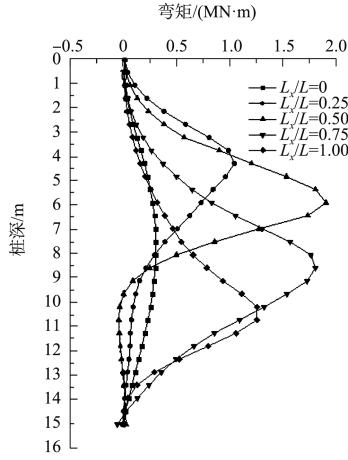
不同桩位下抗滑桩的内力分布规律见图 9。可以看出, 当桩位 $L_x/L=0$ 时, 抗滑桩剪力与弯矩数值较小, 剪力沿桩深呈反对称分布规律, 弯矩在剪力作用方向反转的临界点时达到最大; 随着桩位 L_x/L 的增大, 抗滑桩剪力作用方向反转临界点与桩基弯矩最大值呈现出距离桩顶越来越远的规律。根据不同桩位支护下抗滑桩桩顶与软弱夹层之间的距离, 得知抗滑桩剪力作用方向反转临界

点位于软弱夹层带附近, 夹层带以上区域剪力因滑坡体的作用向 x 轴负方向作用, 以下区域在滑床嵌固作用下向 x 轴正方向作用, 弯矩数值在软弱夹层带附近达到最大。

对比不同桩位下抗滑桩的内力大小, 得知桩位 $L_x/L=0.50$ 时, 抗滑桩最大剪力与弯矩均大于其他桩位下的剪力和弯矩值。根据抗滑桩的受力特征, 在该桩位下, 滑坡体对抗滑桩的作用力达到最大, 即抗滑桩达到最佳的抗滑效果。



a) 剪力



b) 弯矩

图 9 不同桩位下抗滑桩的内力分布

3 结论

1) 支护前边坡安全系数为 0.81, 低于 1.05 的规范值, 故该夹层边坡须进行抗滑支护, 支护后的边坡安全系数为 1.21。

2) 在抗滑桩桩位影响分析中, 抗滑桩从坡底沿着坡面向坡顶方向布置时, 边坡安全系数呈现先增大后减小的变化规律, 塑性区塑性应变呈现

出先减小后增大的变化规律; 当抗滑桩位于边坡中部时, 边坡塑性区塑性应变最小, 靠近抗滑桩区域的塑性应变基本为 0, 该桩位下支护效果最佳。

3) 通过分析不同桩位下抗滑桩的内力分布规律, 得知随着抗滑桩桩位往坡顶方向发展, 抗滑桩剪力作用方向反转临界点和弯矩最大值均位于软弱夹层带附近。当桩位在边坡中部时, 抗滑桩最大剪力与弯矩均大于其他桩位下的剪力和弯矩值, 滑坡体对抗滑桩的作用力达到最大, 抗滑效果最佳。

参考文献:

- [1] 丁敏, 张婧姝. 新形势下长江内河水运发展趋势[J]. 中国港口, 2017(11): 8-13.
- [2] 罗鹏飞, 刘晓平, 曹周红, 等. 邻近船闸基坑开挖安全影响因素[J]. 水运工程, 2016(4): 113-117.
- [3] 张社荣, 谭尧升, 王超, 等. 多层软弱夹层边坡岩体破坏机制与稳定性研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1695-1702.
- [4] 彭文哲, 赵明华, 肖尧, 等. 抗滑桩加固边坡的稳定性分析及最优桩位的确定[J]. 湖南大学学报(自然科学版),

(上接第 151 页)

- [6] 王其松, 严军, 邓家泉. 绞吸式挖泥船产量优化研究[J]. 水运工程, 2013(3): 48-55.
- [7] 王柳艳, 陈新华, 王伟. 基于 RBF 神经网络的绞吸挖泥船施工产量预测研究及分析[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(12): 64-68.
- [8] 陈秀静, 倪福生, 魏长赟, 等. 考虑时滞影响的绞吸挖泥船产量预测[J]. 计算机与数字工程, 2019, 47(2): 296-299.
- [9] 杨金宝, 倪福生, 魏长赟, 等. 基于双隐含层 BP 神经网络的绞吸挖泥船产量预测[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(7): 1234-1237.
- [10] 张尧庭, 方开泰. 多元统计分析引论[M]. 北京: 科学出

2020, 47(5): 23-30.

- [5] 汪志刚, 朱苦竹, 咸玉建. 基于强度折减法的抗滑桩位置对边坡稳定性影响的数值分析[J]. 路基工程, 2014(4): 85-89.
- [6] 雷文杰, 郑颖人, 冯夏庭. 滑坡治理中抗滑桩桩位分析[J]. 岩土力学, 2006(6): 950-954.
- [7] 韩高升, 李梅, 陈光海, 等. 不同滑带滑坡位移场分布及桩位优化研究[J]. 武汉理工大学学报, 2018, 40(4): 72-75.
- [8] 辛建平, 郑颖人, 唐晓松. 基于弹塑性模型的微型抗滑桩破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4113-4121.
- [9] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [10] 陈力华, 靳晓光. 有限元强度折减法中边坡三种失效判据的适用性研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 136-146.
- [11] 长江勘测规划设计研究院. 水利水电工程围堰设计规范: SL 645—2013[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [12] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

(本文编辑 王璁)

版社, 2013: 322-328.

- [11] NI Q, ZHUANG S X, SHENG H M, et al. An optimized prediction intervals approach for short term pv power forecasting[J]. Energies, 2017(10): 1072-1083.
- [12] DENG W , ZHENG Q , CHEN L . Regularized extreme learning machine [C]//Computational intelligence and data mining, 2009. New York: IEEE, 2009: 389-395.
- [13] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// Proc. of 1995 IEEE Int. Conf. Neural Networks. New York: IEEE, 2011: 1942-1948.

(本文编辑 武亚庆)