

坡顶超载下倾斜桩和直桩加固边坡效果的数值模拟分析

陈娥梅¹,李红顺¹,颜棕松¹,闵建刚²,张磊²,杨旭峰³,王创业^{4*}

(1.云南省曲靖市交通建设投资集团有限公司,云南 曲靖 655000;2.云南省曲靖市交通工程质量安全

监督站,云南 曲靖 655000;3.中铁建大桥工程局集团第五工程有限公司,四川 成都 610000;

4.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为研究坡顶超载作用下倾斜桩加固边坡的效果,该文采用Flac^{3D}建立数值分析模型,考虑桩土相互作用,并基于强度折减法探讨桩体倾斜度及位置对边坡稳定性的影响,对比分析坡顶超载作用下倾斜桩和直桩的水平位移和弯矩变化规律差异。研究表明:随着“负斜”抗滑桩倾斜度增大,边坡安全系数随之增大、而水平位移和弯矩随之减小;“负斜”抗滑桩的水平位移、桩身弯矩随桩体深度的变化规律与直桩一致。水平位移随深度增加而减小,随坡顶超载增加而增加,桩顶增长率最大。桩身弯矩沿桩长先增大后减小,弯矩最大值出现在0.58L(L为桩长)附近;实际工程中,可将抗滑桩设置成“负斜”,增强抗弯能力,桩体设置在边坡中上部的效果更佳。

关键词:边坡稳定性;倾斜桩;数值模拟;加固效果

中图分类号:U418.5

文献标志码:A

0 引言

近年来,中国工程建设蓬勃发展,高填深挖现象常见^[1],常采用抗滑桩加固^[2],通过桩锚结构^[3]、双排桩^[4]等措施增大桩体抗弯刚度^[5]及抗滑效果,但成本增加,性价比一直是探索攻关的重点。

抗滑桩属于侧向加载的“被动桩”,承受土体作用于桩身的侧向压力^[6]。Maeda等^[7]基于离心试验发现负斜桩挡墙的桩身水平位移及弯矩要小于竖直桩挡墙,最大桩身位移和弯矩均分别位于桩顶和桩身中部。特定倾斜方向的倾斜桩比直桩具有更好的水平承载性能,可提供更大的水平抗力^[8-9]。侧向加载的“被动倾斜桩”研究较少,李棋^[10]通过模型试验研究了岩质边坡倾斜桩基在不同荷载组合工况下的横向承载性能;林旺照等^[11]对倾斜微型桩群加固边坡的安全性进行有限元分析,发现微型桩最佳加固位

置位于边坡中下部,最优设桩倾斜角度为50°;胡明等^[12]采用有限元软件研究了不同倾角微型桩加固边坡,发现倾斜微型桩支护后的边坡稳定性得到提高。侧向卸载的“被动倾斜桩”研究较多,例如,郑刚等^[13]、孔德森等^[14]通过模型试验研究了基坑开挖过程中倾斜支护桩工作性状,通过与竖直桩进行对比,发现支护桩倾斜呈“负斜”状态的布置方式可以更加有效地减小桩顶位移、桩身弯矩,认为将倾斜桩代替竖直桩作为基坑支护结构可增大结构的刚度、提高抗倾覆能力;王恩钰等^[15]、宋福渊等^[16]采用有限元软件Plaxis 3D建立三维数值模型研究悬臂式支护桩和倾斜支护桩变形与桩周土沉降规律,认为负斜桩比直桩约束效果好,有效减小了桩身侧移,采用负斜桩支护可增大基坑开挖深度;Ye等^[17]采用Flac^{3D}对倾斜支护桩的承载性能进行评估,发现负斜桩挡墙的承载力远大于垂直桩墙。

基于侧向加载的“被动倾斜桩”研究较少的现

收稿日期:2023-06-10(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278329);湖南省交通运输厅科技项目(编号:202019,202247);湖南省研究生科研创新项目(编号:CX20210765,CX20210774,CX20220875)

作者简介:陈娥梅,女,大学本科,高级工程师.E-mail:19599904@qq.com

*通信作者:王创业,男,博士研究生.E-mail:wangcy95@foxmail.com

状,借鉴侧向卸载的“被动倾斜桩”研究方法,本文采用 Flac^{3D} 数值模拟软件,利用考虑桩-土相互作用的强度折减法,建立坡顶平面超载作用下的抗滑桩-边坡体系分析模型,探究分级加载工况下抗滑桩位置及倾斜角度对边坡稳定性的影响,揭示抗滑桩水平位移和弯矩变化特征,以期促进倾斜桩在边坡工程加固及滑坡治理中的推广应用。

1 数值分析方法

1.1 桩-土相互作用原理

在 Flac^{3D} 中拥有不同材料和参数各异的结构单元来模拟实际结构构件,单元节点与桩周实体单元建立连接,从而实现结构与岩土体间的相互作用。本文采用 Pile 单元进行模拟,通过切向和法向耦合弹簧的力学特性实现桩土相互作用。耦合弹簧的力学机制见图 1、2。图中 F_s/L 和 F_n/L 为桩单元单位长度上作用的剪切力和法向力; k_s 、 k_n 为切向和法向的弹簧刚度; c_s 、 c_n 为桩-土交界面的黏结强度; φ_s 、 φ_n 为交界面的内摩擦角; p 为桩身截面周长; σ_m 为桩周应力; g 为法向裂缝使用标志。

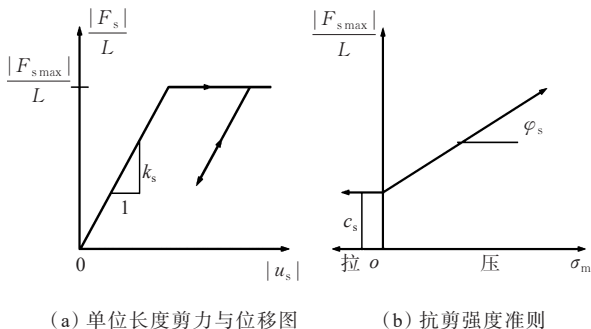


图 1 剪切方向力学性质

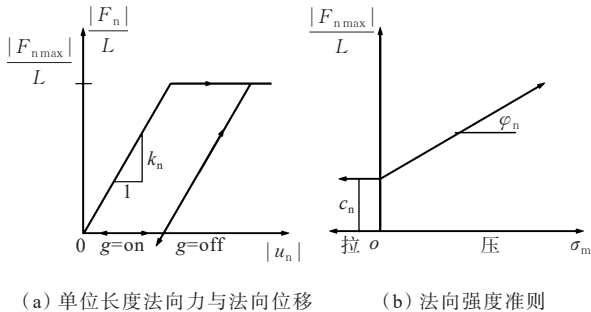


图 2 法向力学特性

1.2 强度折减法

强度折减法的基本原理是将岩土体的强度指标

c 和 φ 进行调整,用一个折减系数 F_{trial} 进行折减,然后用折减后的 c_F 和 φ_F 对边坡进行稳定性分析,反复试算直到临界破坏状态,岩土体单元形成连续滑动面,此时对应的折减系数 F_{trial} 为边坡的安全系数。

$$c_F = \frac{c}{F_{\text{trial}}} \quad (1)$$

$$\varphi_F = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{F_{\text{trial}}}\right) \quad (2)$$

使用强度折减法无需预先假定滑动面的形态和位置,考虑了桩土的应力-应变关系,与实际情况相符,可直接得出边坡的安全系数和坡体的位移矢量。基于强度折减法用于边坡失稳的判据准则^[18],按照解的收敛判断准则及本文的研究目的,以数值计算是否收敛作为边坡破坏的依据。

2 计算模型及方案

2.1 数值模型与基本参数

分析抗滑桩加固边坡的桩间土体位移等值线,发现采用二维平面应变能够较好地模拟桩-土相互作用的三维特征,故将抗滑桩-边坡稳定性问题简化为平面应变问题进行分析^[19]。

本文使用 Flac^{3D} 建立抗滑桩-边坡数值模型如图 3 所示。该边坡高 20 m,坡度为 1:1,坡后缘长 30 m,坡前缘长 30 m。建立模型时考虑网格疏密对单元精度的影响,对靠近边坡临坡面和浅层土体的网格进行加密处理,以使计算结果更加精确。

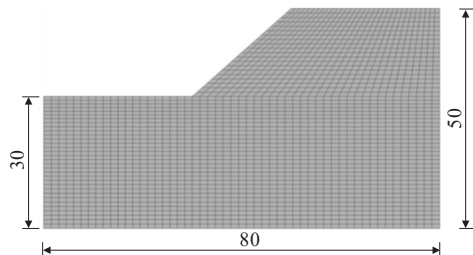


图 3 数值计算模型(单位:m)

假定土体为理想弹塑性体,采用能同时考虑关联流动拉伸屈服和非关联流动剪切屈服的 Mohr-Coulomb 准则来描述其特性,所采用的边坡岩土体物理力学参数见表 1。

模型边界条件采用标准固定边界,即位移约束,模型顶部设置为自由边界,模型两侧竖直面采用法向约束,模型底部采用固定约束。

表1 土体力学参数^[8]

土体	厚度/ m	密度/ (kg·m ⁻³)	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)	弹性模 量/MPa	泊松 比
填土	3	1 600	10	18	20	0.3
可塑土	12	1 700	15	20	30	0.3
硬质土	10	1 900	20	22	50	0.3
强风化岩	15	2 000	55	25	150	0.2
弱风化岩	10	2 200	120	30	300	0.2

抗滑桩选用桩结构单元进行模拟,桩身截面为矩形,桩截面的宽度 $b=1.0$ m,高度 $h=1.5$ m,桩长 $L=24$ m,弹性模量为 4×10^4 MPa,泊松比为0.2;假定桩-土接触面为粗糙接触面,避免两者发生切向相对滑动,接触面切向与法向刚度 k_s 和 k_n 均取5.2 GPa;黏聚力 c_s 和 c_n 则分别取80 GPa和8 GPa;内摩擦角 φ_s 和 φ_n 均取 20° 。

2.2 桩位布设与倾斜角度

抗滑桩加固位置选取其水平投影到坡脚的距离 L_x ,桩体由坡脚向坡顶逐渐移动,每步长度设置为2.5 m,边坡水平投影长度 $L=20$ m,可知 L_x/L 的比值范围为 $[0.125, 1]$,分别对应 $P_1\sim P_8$ 的位置。

在上述相关参数保持不变的情况下,考虑将抗滑桩以桩顶为转动中心顺时针转动 10° 形成倾斜桩。假定抗滑倾斜桩的长度足够大,坡顶超载将使该倾斜桩的倾斜度减小,该倾斜桩属于“负斜桩”^[6]。对上述设桩位置分别编号为 $P_1, P_2, \dots, P_8, P_1$ 靠近坡脚, P_8 位于坡顶,其桩体布置示意图见图4。

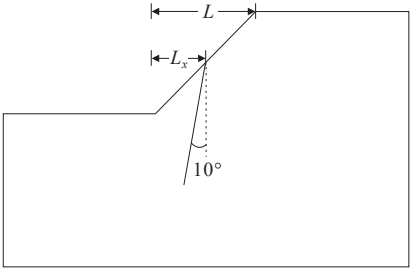


图4 抗滑桩布置示意图

计算分析时,首先获得天然地基的初始应力,然后激活桩单元,采用弹塑性求解法,防止在计算过程中出现屈服流动。在施加荷载之前需要清除模型速度场与位移场,防止对加载过程中模型平衡结果的干扰,然后在坡顶进行均布荷载的施加,每级增量为10 kPa,并分别模拟分级堆载工况下的边坡状态,直到发生边坡失稳为止。

2.3 模型验证

计算边坡在自然状态下的状态,利用强度折减法计算得到该边坡自重作用下的安全系数为0.952^[5],最大剪应变增量云图如图5所示,观察可知:坡体内部剪应变区形成了贯通带,说明该边坡在自重作用下处于失稳状态。

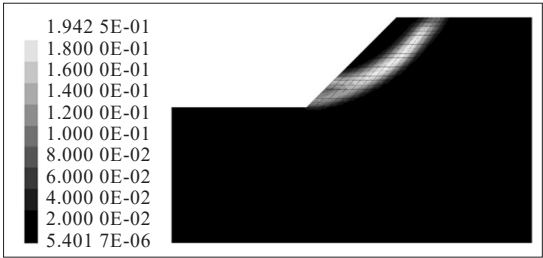


图5 自然状态下边坡最大剪应变云图

当边坡采用抗滑桩加固后,桩的布设位置与边坡稳定性系数的关系见图6,可知边坡稳定性系数均比无桩加固时有所增加,桩体从 $P_4\sim P_6$ 过程中,边坡稳定性系数先增大后减小,最大值位于 P_5 ,最佳设桩位置为边坡中上部,与学者们的观点一致^[5, 19],说明本文模型合理,可以用来进行抗滑桩加固边坡的相关研究。

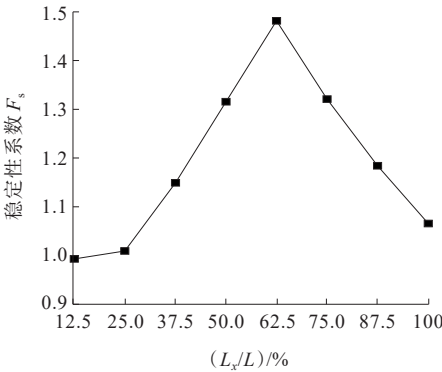


图6 稳定性系数随桩位变化规律

3 结果与分析

3.1 坡顶超载下桩的位置和倾斜度对边坡稳定性的影响

图7为坡顶超载强度变化时, 0° 直桩和 10° 、 20° 倾斜抗滑桩加固边坡的稳定性系数随桩位的变化曲线。

由图7可知:

(1) 抗滑桩位置相同时,边坡稳定性系数随坡顶超载增加而减小,符合工程常识,说明模拟方法正确。

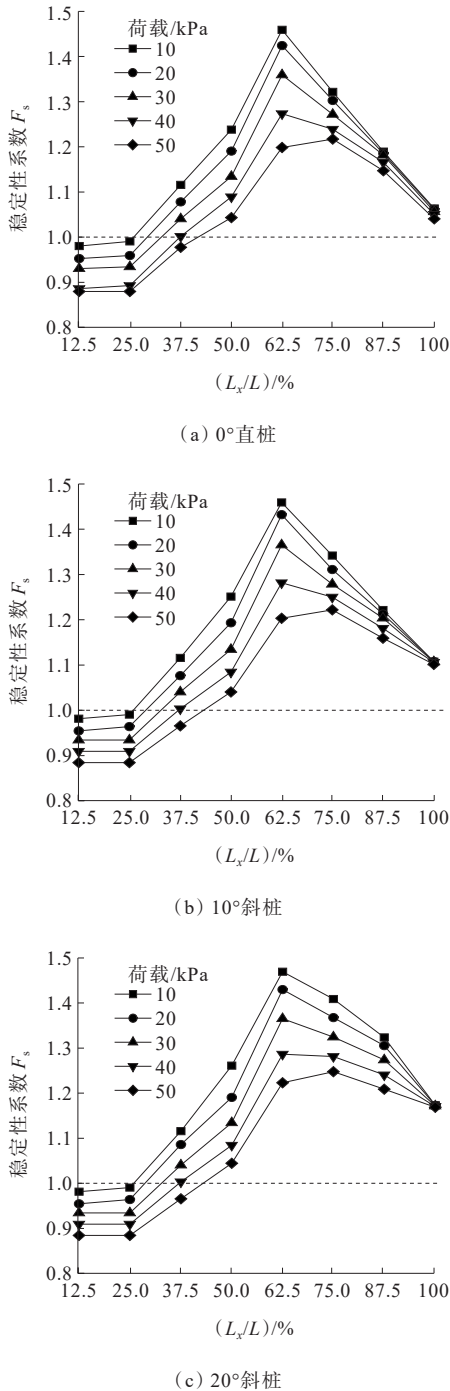


图 7 不同超载下边坡稳定性系数随桩位变化规律

(2) 相同超载下,倾斜桩加固边坡的稳定性系数随桩位的变化规律与竖直桩相同,抗滑桩靠近加载区才有利于增强边坡稳定性系数。抗滑桩从坡脚向坡顶移动过程中,边坡稳定性系数先增大后减小,峰值位于边坡的中上部。当荷载小于 50 kPa 时, P_5 位置处对应的安全系数最大,随荷载的变化幅度也最大。当桩体布设在坡脚到边坡中下部附近时($P_1 \sim P_2$),边坡稳定性系数小于 1,边坡处于失稳状

态;桩体布设在边坡中部到坡顶范围内时($P_4 \sim P_8$),安全系数始终大于 1,说明在靠近坡脚设置抗滑桩对改善边坡稳定性的作用有限。

为了探究“负斜”抗滑桩倾斜度对边坡稳定性的影响,比较无超载($q=0$)和坡顶有超载($q=50$ kPa)时抗滑桩加固边坡的稳定性系数与倾斜度的关系,结果见图 8。

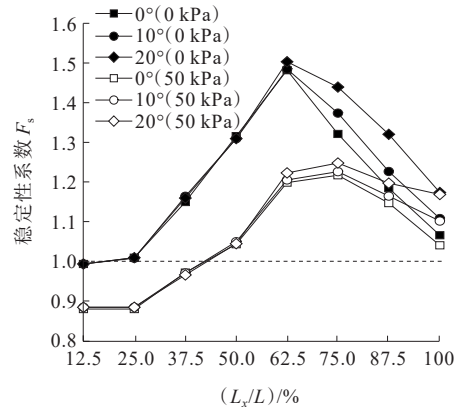


图 8 抗滑桩倾斜度对边坡稳定性系数的影响

由图 8 可知:

(1) 边坡稳定性系数随“负斜”抗滑桩倾斜度增大而增大。

(2) “负斜”抗滑桩加固边坡的效果与位置有关,靠近加载区的效果更好。桩体布设在 $P_1 \sim P_4$ 时,桩体倾斜对边坡稳定性的影响较小;布设在 $P_5 \sim P_8$ 时,采用“负斜”桩加固边坡的安全系数大于竖直桩,桩位越靠近桩顶越明显,桩体倾斜度越大加固效果越好。

3.2 超载作用下倾斜抗滑桩变形特征

上述分析发现,坡顶超载 $q=50$ kPa 时,抗滑桩布设在 P_6 时的边坡稳定性系数最大,为研究“负斜”状态抗滑桩变形特征,继续探讨坡顶超载作用下, 0° 直桩和 10° 倾斜抗滑桩的桩身变形规律。采用 Flac^{3D} 内置命令流对桩体位移及内力响应进行监测,通过 Fish 语言提取模型相应数据并进行可视化后处理。

图 9 为坡顶超载强度变化下 0° 和 10° 倾斜抗滑桩水平位移分布曲线。

由图 9 可知:

(1) 坡顶超载作用下,直桩和“负斜”抗滑桩的水平位移随深度增加而减小,随坡顶超载增加而增加,桩顶增长率最大。当坡顶超载较小时($q=10$ kPa),桩身几乎没有位移,当荷载大于 10 kPa 时,水平位移

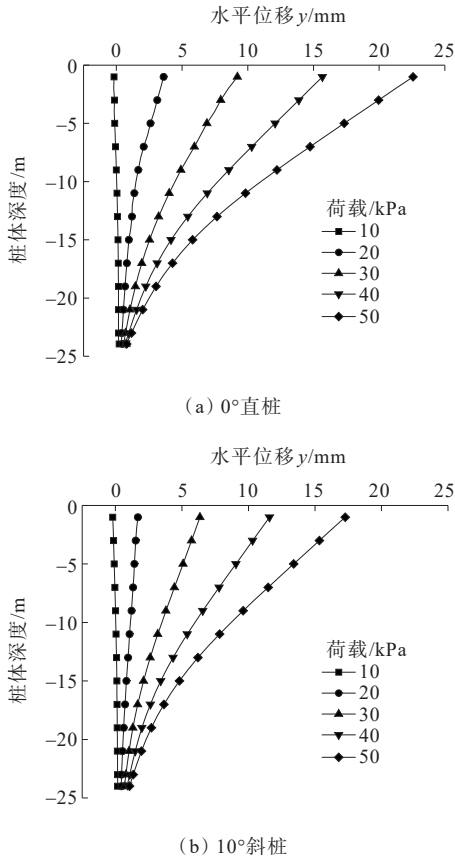


图9 坡顶超载下抗滑桩桩身水平位移分布曲线

最大值位于桩顶,沿桩顶到桩底逐渐减小,桩底位移接近于0,且随着荷载的增加,桩身上部水平位移增量远大于桩身下部。这是因为坡顶超载作用下,边坡浅层土体首先承受荷载并发生变形,土压力主要作用于桩身上部。

(2)“负斜”抗滑桩水平位移随桩体深度和坡顶超载的变化规律与直桩一致。

为了剖析“负斜”抗滑桩与直桩的变位差异,绘制出50 kPa时水平位移随桩体深度的变化曲线见图10。

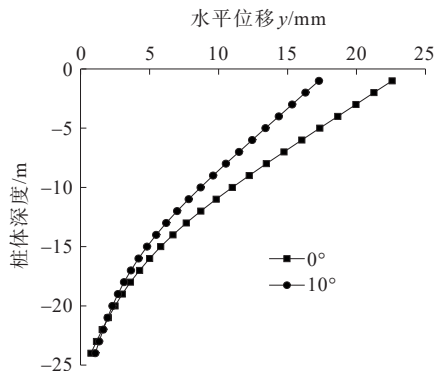


图10 50 kPa时水平位移随桩体深度的变化曲线

由图10可知:

(1)“负斜”抗滑桩水平位移比直桩小。桩顶处,10°抗滑桩和直桩最大位移分别为17.3 mm和22.6 mm,减小了约23%,表明了抗滑桩呈“负斜”状态可提高桩身水平承载能力,抵抗坡顶超载作用。

(2)“负斜”抗滑桩水平位移与直桩水平位移差值随桩体入土深度的增加而减小。

3.3 超载作用下倾斜抗滑桩弯矩变化规律

图11为坡顶超载强度变化下0°和10°倾斜抗滑桩弯矩分布曲线。

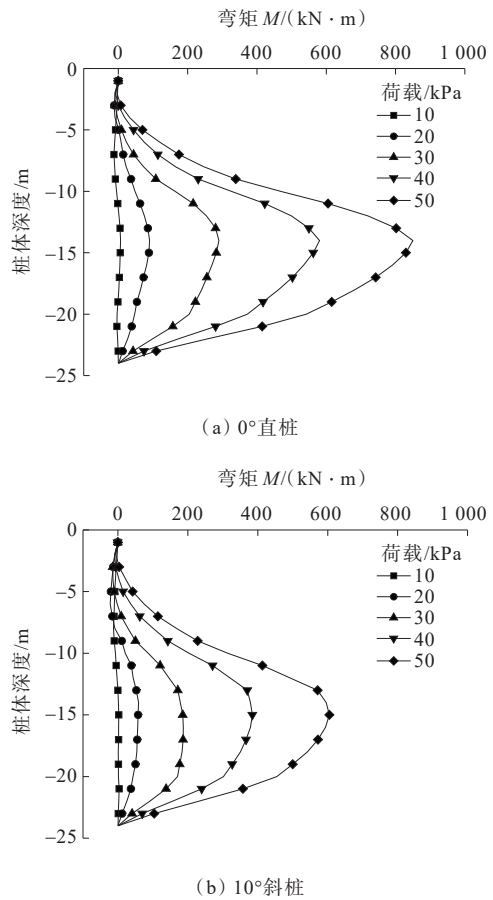


图11 不同超载强度下抗滑桩弯矩分布曲线

由图11可知:

(1)坡顶超载作用下,直桩和“负斜”抗滑桩的桩身弯矩沿桩长先增大后减小,弯矩最大值出现在0.58L附近,桩顶和桩底弯矩接近于0。随坡顶超载增加而增加,桩身中部弯矩增量最大。由此推理,直桩和“负斜”抗滑桩容易在桩身中部发生弯曲破坏。

(2)“负斜”抗滑桩弯矩随桩体深度和坡顶超载的变化规律与直桩一致。

为了剖析“负斜”抗滑桩与直桩的弯矩差异,绘

制出 50 kPa 时弯矩随桩体深度的变化曲线见图 12。

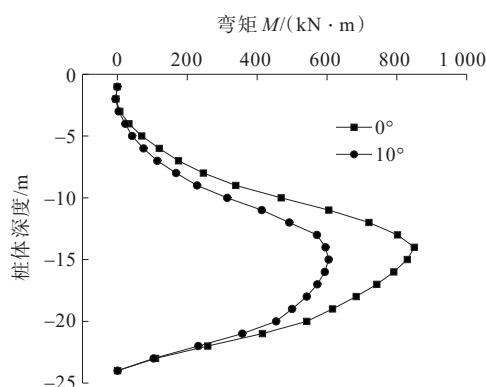


图 12 50 kPa 时抗滑桩弯矩随桩体深度的变化曲线

由图 12 可知:

(1) “负斜”抗滑桩弯矩比直桩小,桩身中部最明显。 10° 抗滑桩弯矩分布曲线在 0° 抗滑桩分布曲线的左侧,最大弯矩值分别为 $605 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 和 $850 \text{ kN} \cdot \text{m}$,减小了约 28%。

(2) 实际工程中,可将抗滑桩设置成“负斜”,增强抗弯能力。

4 结论

本文采用 Flac^{3D} 建立边坡数值模型,基于强度折减法原理,开展了“负斜”抗滑桩加固边坡效果的数值分析,得到以下结论:

(1) 随着“负斜”抗滑桩倾斜度增大,边坡稳定性系数随之增大、水平位移和弯矩随之减小。

(2) “负斜”抗滑桩的水平位移、桩身弯矩随桩体深度和坡顶超载的变化规律与直桩一致。水平位移随深度增加而减小,随坡顶超载增加而增加,桩顶增长率最大。桩身弯矩沿桩长先增大后减小,弯矩最大值出现在深度为 $0.58L$ 附近。

(3) 实际工程中,可将抗滑桩设置成“负斜”,增强抗弯能力。在天然状态和坡顶超载作用下,边坡稳定性与加固桩位置密切相关,将桩体设置在边坡中上部的效果更好。

参考文献:

[1] 严琼,张化进,吴顺川,等.公路软岩边坡稳定性及支护设计优化研究[J].中外公路,2022,42(1):1-6.
[2] 刘新荣,梁宁慧,黄金国,等.抗滑桩在边坡工程中的研究进

展及应用[J].中国地质灾害与防治学报,2006,17(1):56-62.

- [3] 唐咸远,王诗海,邹前.抗滑桩+树根桩综合处治膨胀土地基上路堤开裂[J].中外公路,2021,41(5):31-34.
[4] 黄小艳,徐年丰,王汉辉,等.双排抗滑桩受力规律的数值研究[J].人民长江,2012,43(1):4-8.
[5] 王聪聪,李江腾,廖峻,等.抗滑桩加固边坡稳定性分析及其优化[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(1):231-237.
[6] 周德泉,王创业,周毅,等.被动倾斜桩应用研究与展望[J].中外公路,2023,43(2):1-10.
[7] MAEDA T, SHIMADA Y, TAKAHASHI S, et al. Design and construction of inclined-braceless excavation support applicable to deep excavation[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2013:2051-2054.
[8] ASHOUR M, ALAAELDIN A, ARAB MG. Laterally loaded battered piles in sandy soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(1):06019017.
[9] 周德泉,蔡强,王创业,等.负斜桩顶部水平受拉响应及 p-y 曲线特征试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2023, 50(1):198-207.
[10] 李棋.岩质边坡倾斜桩基横向承载性能的模型试验研究[D].成都:西南交通大学,2017.
[11] 林旺照,李帅.微型桩不同设桩方案对边坡影响的数值模拟研究[J].公路,2020,65(9):50-54.
[12] 胡明,雷用,赵晓柯.基于 ANSYS 的倾斜微型桩支护边坡稳定分析[J].地下空间与工程学报,2014,10(S1):1689-1693.
[13] 郑刚,白若虚.倾斜单排桩在水平荷载作用下的性状研究[J].岩土工程学报,2010,32(S1):39-45.
[14] 孔德森,张杰,王士权,等.基坑支护倾斜悬臂桩受力变形特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(1):160-168.
[15] 王恩钰,周海祚,郑刚,等.基坑倾斜桩支护的变形数值分析[J].岩土工程学报,2019,41(S1):73-76.
[16] 宋福渊,油新华.深基坑斜桩支护受力性能研究[J].建筑技术,2020,51(9):1028-1032.
[17] YE J, HE X. Performance of batter pile walls in deep excavation: Laboratory test and numerical analysis[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2021, 28 (14):1-10.
[18] 邹盛堂,戴自航.抗滑桩加固土坡效果及合理桩位的三维有限元分析[J].福州大学学报(自然科学版),2012,40(5):664-669.
[19] 朱泳,朱鸿鹄,张巍,等.抗滑桩加固边坡稳定性影响因素的参数分析[J].工程地质学报,2017,25(3):833-840.