

# 基于 ABAQUS 的倾斜微型桩护坡承载特性研究

陈国军, 毛少霞, 张雪云, 任 凯

(甘肃土木工程科学研究院有限公司, 兰州 730020)

**摘要:**为了充分研究倾斜微型桩的护坡受力承载特性、荷载传递规律、不同参数变量与边坡稳定性系数间的关系,利用数值计算方法 ABAQUS 软件建立多种模型进行分析。结果表明:倾斜微型桩桩身分布形态近似呈“S”形分布,在桩体埋深 1/2 位置处弯矩值最大,弯矩沿着桩身两侧分布,受荷段与锚固段弯矩明显;桩后土压力呈钟形分布,随着桩体埋深的增加,土压力先增大后减小,在滑面附近土压力达到最大值;在距离边坡底部 3 m 处即 1/3 边坡位置时,边坡稳定性系数达到最大值,因此为使微型桩发挥更有效的护坡承载效果,微型桩应设置于距坡角 1/3~1/2 位置处;随着微型桩倾斜角度的增加,稳定性系数先增大后减小,在倾斜角度为 40°即与坡面近乎垂直时达最大值 1.449,倾斜桩体能更好地增强边坡的整体稳定性;随着桩间距的增大边坡稳定性系数逐渐减小,随着桩排数的增加稳定性系数近似直线型增加,在同等条件状况下,增加桩排数能显著增加边坡稳定性,达到快速加固边坡的效果。

**关键词:**边坡工程;数值计算;ABAQUS;微型桩;边坡稳定性

**中图分类号:**TU473 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)19-0145-06

对于边坡滑坡的相关治理工作一直是研究的热点问题。滑坡常常给工农业生产以及人民生命财产带来巨大的损失,有的甚至是毁灭性的灾难。对于边坡工程的治理常用的方法手段有抗滑挡土墙、抗滑桩、预应力锚杆、锚索桩、普通砂浆锚杆锚固、土锚钉、加筋土等<sup>[1-3]</sup>。其中微型桩因施工机具小,适用于狭窄的施工作业区;施工振动、噪声小,适用于公害受到严格控制的市区;长细比大,单桩耗用材料少等优点受到广泛的应用<sup>[4-6]</sup>。对于微型桩的试验研究<sup>[7-10]</sup>结果表明微型桩桩径对水平承载力的影响较大,桩间距的大小直接影响群桩效应的性能;数值计算<sup>[11-13]</sup>研究发现微型桩设置桩位在坡面中下部时对边坡加固稳定性好,边坡布置倾斜桩的加固效果要强于布置竖直桩,多排桩能够起到更好的加固效果;工程实践<sup>[14-15]</sup>表明随着护坡工程向轻型化、小型化方向发展,对施工成孔技术的不断提高,微型桩已经被越来越多地应用到边坡防护当中。

但对于微型桩具体的工作机理和受力特性方面的研究尚有待更进一步探索,对边坡稳定性方面的研究不足,理论不足以撑起工程实践的需要,所以对于边坡工程大面积使用还有待商榷。在相关学者所做

研究之上,利用数值计算方法深入研究了倾斜微型桩护坡承载特性,对支护体系的受力状态、荷载传递规律和桩后土压力分布规律进行分析,并且根据在同一边坡条件下,不同桩位、不同桩体倾斜角度、不同桩间距及排数等参数变量与边坡稳定性间的数值关系,分析研究了各参数变化对边坡稳定性的影响。

## 1 模型建立

建立边坡滑坡模型,尺寸为长×宽×高=24 m×20 m×14 m,边坡坡角为 45°,微型桩长为 8 m,桩径为 0.25 m,微型桩位于边坡体中间位置,微型桩与竖直反向为 45°即与坡面垂直。边坡土体及微型桩材料具体参数见表 1。模型接触属性采用最常用的表面与表面接触,以微型桩桩体外表面为主从面,相应位置土体表面为从面,建立接触对,桩体与土体的切向摩擦公式采用罚函数,各向同性,摩擦系数为 0.5,法向采用“硬”接触。微型桩模型网格划分单元形状选用六面体,网格划分技术采用扫掠形式,网格划分算法采用中性轴算法,单元类型选择八结点线性六面体单元,缩减积分(C3D8R)。为了数值计算的精确性及有效性,对土体微型桩桩位周围位置单元形状采用楔形,单元类型选择六结点母性三棱柱单元(C3D6),其

**收稿日期:**2023-05-31

**作者简介:**陈国军(1992—),男,甘肃临洮人,甘肃土木工程科学研究院有限公司,工程师,硕士,研究方向为岩土力学与工程应用;毛少霞(1996—),女,甘肃定西人,甘肃土木工程科学研究院有限公司,硕士,研究方向为基础工程;张雪云(1988—),男,甘肃张掖人,甘肃土木工程科学研究院有限公司,工程师,研究方向为岩土力学及工程应用;任凯(1985—),男,甘肃兰州人,甘肃土木工程科学研究院有限公司,高级工程师,硕士,研究方向为岩土工程勘察、检测、设计及施工。

余区域单元形状为六面体,单元类型 C3D8R。经过对模型网格划分的调整与检查,最终整个模型结点总数为 65 360,单元总数为 68 944。边坡模型网格划分及初始应力场云图分别如图 1、图 2 所示。

表 1 模型参数

类型	重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/ $(^\circ)$	泊松 比	单元 类型	本构 模型
土体	20.2	8	32.4	17.7	0.32	实体	弹塑性
微型桩	25.0	$3.7\times 10^4$	—	—	0.20	实体	弹性

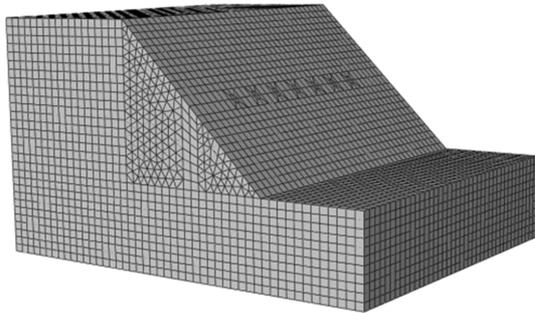


图 1 边坡模型网格划分

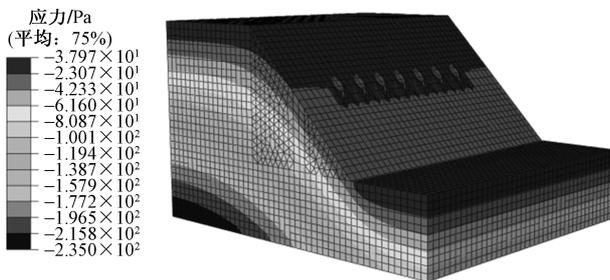


图 2 初始应力场云图

## 2 数值计算结果分析

### 2.1 桩身弯矩

在边坡顶部施加均布荷载,每级 15 kPa,分 8 级加载,共 120 kPa。在每级荷载作用下,倾斜微型桩桩身弯矩如图 3 所示。由图 3 分析可知,桩体弯矩沿着桩身分布形态近似呈倒“S”形,桩顶与桩底位置弯矩值最小,趋于 0,随着桩体埋深的增加,弯矩值从桩顶到桩底先增加后反向增大,最后在桩底减小至 0 左右,整个桩身弯矩最大值出现在桩体埋深 4 m 即 1/2 桩体位置处,负最大值  $-14.6 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,正最大值  $5.06 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ;当加载荷载较小时弯矩在桩身分布均匀,桩体受力合理,极大地发挥了微型桩的作用。倾斜微型桩桩体弯矩沿着桩身两侧分布,受荷段与锚固段弯矩明显,能充分体现微型桩抗滑机理,使整个桩体发挥抗滑效果,对微型桩桩身的利用效果更明显。

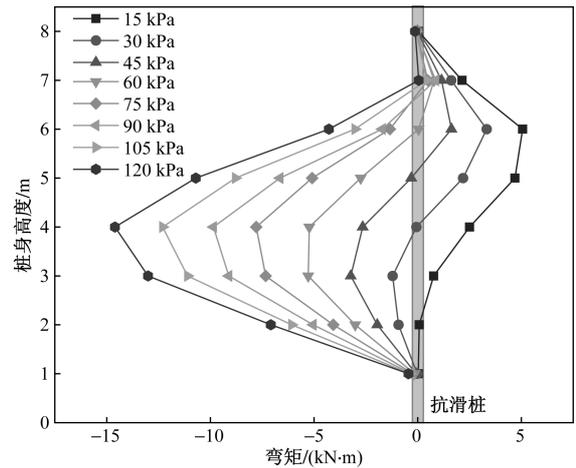


图 3 不同荷载下倾斜微型桩桩身弯矩

### 2.2 桩后土压力

在每级荷载作用下,倾斜微型桩桩后土压力如图 4 所示。由图 4 分析可知,倾斜微型桩桩后土压力分布形态近似呈钟形,在加载荷载作用下,随着桩体埋深的增加,土压力值先增大后减小,桩顶位置土压力值最小,从桩顶至桩体埋深 2 m 处土压力值一直增大,且从桩顶至桩深 5 m 处增长速度较快,而后增长速度慢相对趋于稳定,土压力最大值为 231.38 kPa;在桩底附近土压力值突然减小,这与微型桩锚固段受力形态相吻合,体现了微型桩锚固段起到了良好的作用。

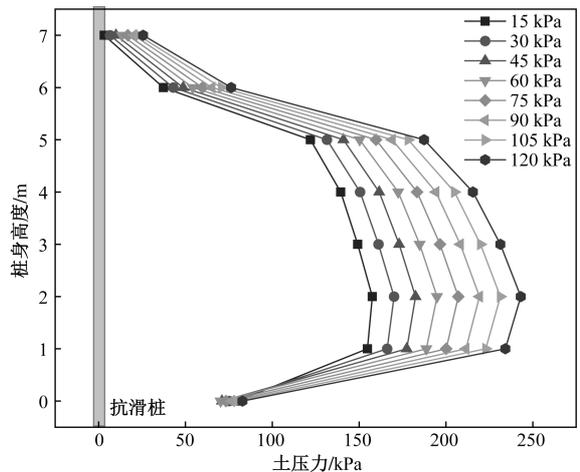


图 4 不同荷载下倾斜微型桩桩后土压力

### 2.3 桩顶位移

倾斜微型桩桩体各桩顶位移如图 5 所示。随着加载荷载值的不断增大,各桩桩顶位移值线性增大,倾斜桩顶最小位移为 3.82 mm,最大位移为 30.95 mm。各桩桩顶位移变化基本保持一致,体现了微型抗滑桩互相协同受力抵抗土体下滑力的特性。

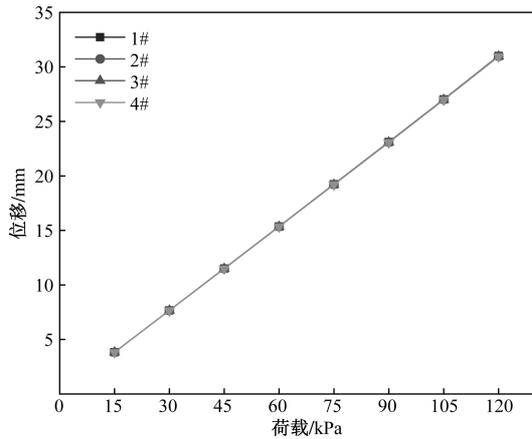


图5 不同荷载各倾斜微型桩桩顶位移

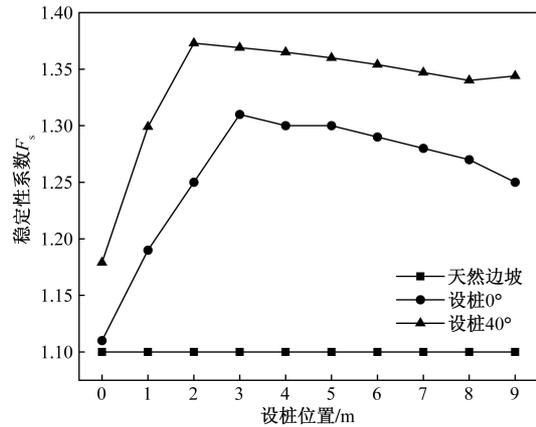
### 3 参数分析

边坡稳定性分析是边坡工程的重要研究内容,实际工程中通过监测边坡稳定性的大小,对边坡的防治提供指导<sup>[16-18]</sup>。依据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)抗滑力与下滑力的比值即为边坡稳定性系数  $F_s$ 。当  $F_s > 1$  时,边坡处于稳定状态;当  $F_s = 1$  时,边坡处于极限平衡状态;当  $F_s < 1$  时,边坡发生失稳破坏。边坡结构工程设计中,根据边坡的安全等级要求及不同工况情况,一般认为  $F_s > 1.35$  时能满足一级边坡在一般工况下的要求。边坡稳定性验算常用的方法有极限平衡法和数值计算法<sup>[19-22]</sup>。根据在同一边坡条件下,不同桩位、不同桩体倾斜角度、不同桩间距及排数等变量参数建立与边坡稳定性间的数值关系,分析研究各参数变化对边坡稳定性的影响。

#### 3.1 不同桩位的影响

以所建模型坡角位置为基准,整个坡面高 9 m,由坡角到坡面不同高度  $h$  的变化,分析研究未设桩天然边坡、桩角  $\theta = 0^\circ$  即垂直桩体、桩角  $\theta = 40^\circ$  3 种工况下在边坡不同位置的稳定性系数变化情况,如图 6 所示。

由图 6 可知,此工况下边坡未设桩天然状态下  $F_s = 1.1$ ,  $\theta = 0^\circ$  和  $\theta = 40^\circ$  两种工况下边坡稳定性系数均随着设桩位置的增加而增加,但设桩  $40^\circ$  整体稳定性大于垂直桩体,在设桩位置为 3 m 即距离坡角位置 1/3 处稳定性系数最大,此处设桩  $0^\circ$  时  $F_s = 1.31$ ,设桩  $40^\circ$  时  $F_s = 1.373$ ,与不设桩天然土坡相比分别增加了 19.1% 和 24.82%。大于 3 m 时稳定性系数随着设桩位置的增加而减小,但减小的幅度不大。这为微型桩在边坡工程中的设桩位置提供了可行的参考,即设桩位置在距离坡脚 1/3 ~ 1/2

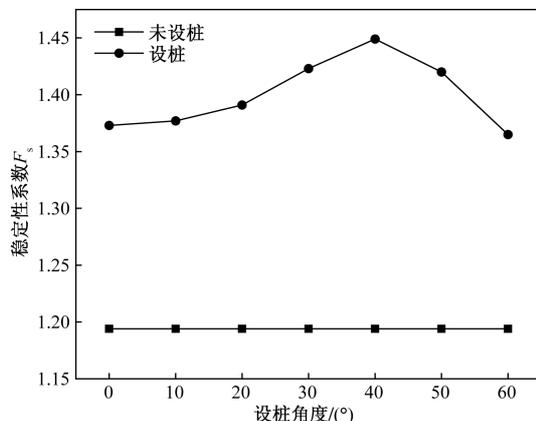
图6 不同设桩位置与  $F_s$  的关系

时,微型桩能发挥更有效的护坡效果,提供更强大的阻滑力,从而使边坡稳定性系数趋于最大值,土体边坡处于稳定状态。

#### 3.2 不同倾斜角度的影响

在确定不同设桩位置与  $F_s$  的关系中,以桩体在坡角 1/3 处为基准,建立倾斜角度为  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$  时的模型,此时不同设桩倾斜角度与边坡稳定性系数间的关系如图 7 所示。

由分析可知,在此模型中未设桩天然边坡稳定性系数为 1.194,设桩边坡稳定性系数随着设桩角度的增加先增大后减小,在设桩角度为  $40^\circ$  左右时,达到最大值 1.449,设桩最小边坡稳定性系数为设桩角度为  $60^\circ$  时为 1.365,桩体垂直状态时边坡稳定性系数为 1.373。边坡设桩整体稳定性系数明显比未设桩增强,体现了微型桩发挥护坡作用的效果显著,垂直桩体与倾斜  $40^\circ$  时桩体比未设桩时稳定性系数分别增加了 15% 和 21.36%,由此可知在边坡工程设计中倾斜桩体能更好地增强边坡的整体稳定性,使微型桩护坡作用发挥更充分,效果更明显。桩体在不同倾斜角度时与土体形成的有效滑移面如图 8 所示。

图7 不同设桩倾角与  $F_s$  的关系

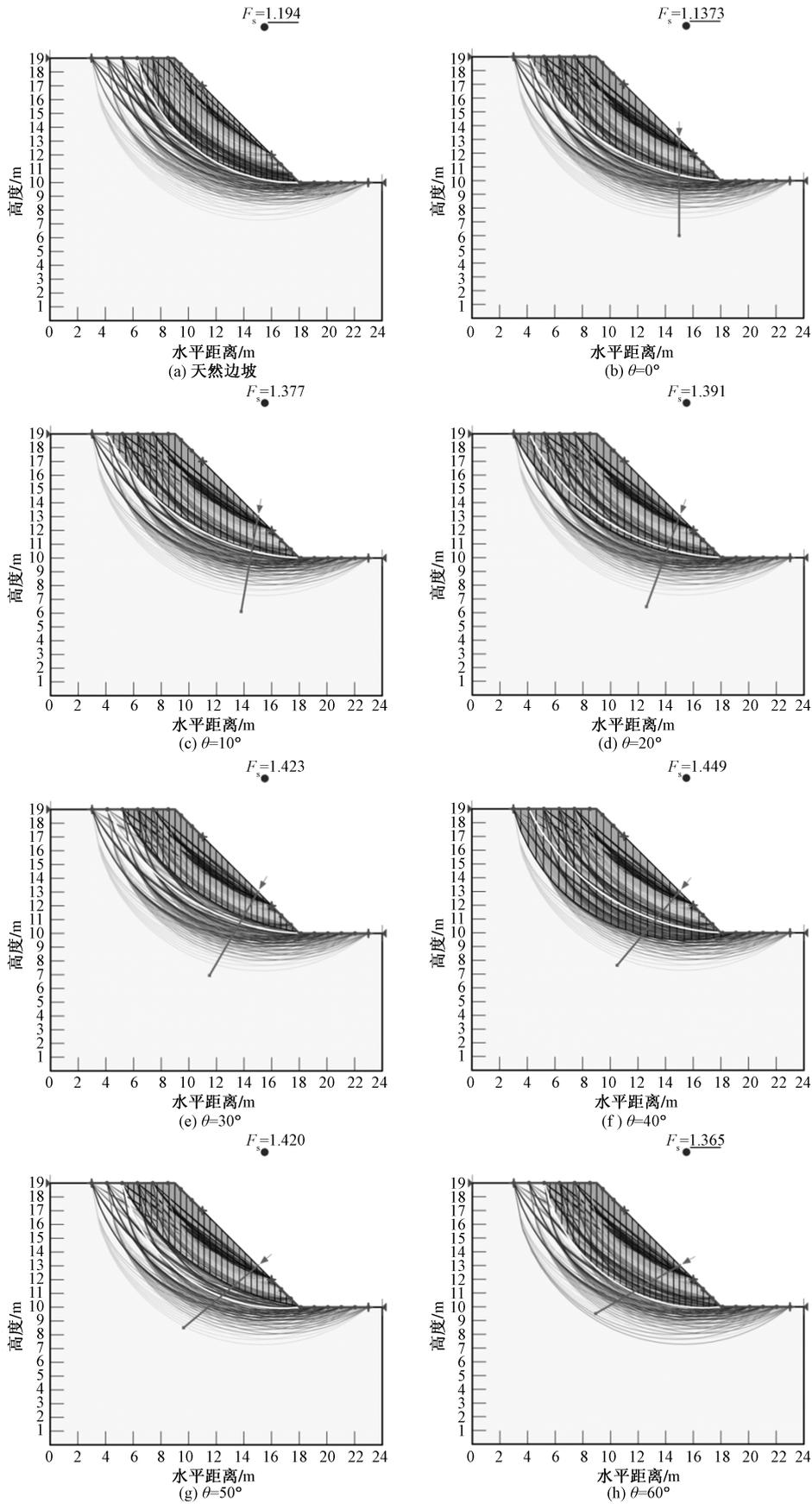


图 8 桩体不同倾角时有效滑动面

### 3.3 不同桩间距及排数的影响

在桩位为坡角 1/3 处、桩体倾斜角度为 40°的基础上,分别研究不同桩间距及不同桩排数对稳定性系数的影响,如图 9 所示。

由图 9 可知,随着桩间距的增大边坡稳定性系数逐渐减小,减小的幅度越来越小,这主要与微型桩的工作机理息息相关,微型桩土拱效应的形成与桩间间距有着直接的关系,桩间距过大,滑动土体容易从两桩中间挤出,达不到抗滑护坡承载效果,一般认为桩间距取 3~5 倍桩径是比较合理可行的。随着桩排数的增加稳定性系数近似直线型增加,4 排桩时边坡土体稳定性系数达到 2.297,与单排桩相比增加了 75.34%,并且随着桩排数的继续增加稳定性系数有增大的趋势。由此说明一个快速有效增加边坡稳定性达到护坡承载效果的方法就是增加桩排数,相较于改变桩间距和桩体结构形态改变桩排数能达到更好的效果。

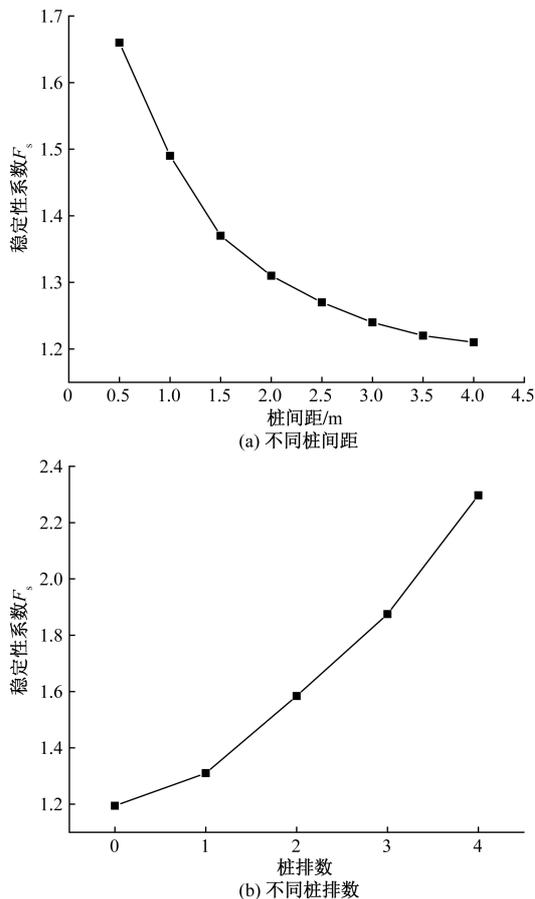


图 9 不同桩间距及排数与  $F_s$  的关系

## 4 结论

基于数值计算的方法,研究了倾斜微型桩工作机理及受力特征,对倾斜微型桩的桩身内力变化规

律、桩后土压力、桩顶位移进行了数据分析。在分析倾斜微型桩护坡承载特性的基础上,建立了不同桩位、不同桩倾斜角度、不同桩间距及排数等变量参数与边坡稳定性间的数值关系,分析研究了各参数变化对边坡稳定性的影响。得到以下主要结论:

1) 倾斜微型桩桩身弯矩呈倒“S”形沿着桩身均匀分布,在桩体中间位置弯矩值最大,抗滑段与锚固段受力分布形式合理,能充分发挥微型桩作用,在相同作用下能承现刚好的护坡效果;土压力值随着桩体埋深先增大后减小,在距离桩底 1/3 左右处达到最大值,这为倾斜微型桩的锚固长度提供了参考,即倾斜微型桩锚固段取桩长的 1/3~1/2 是合理可行的。

2) 边坡稳定性系数随着桩位的增加先增大后减小,在距离坡角 1/3 位置稳定性系数达到最大值,在设置微型桩时桩位在距离坡角 1/3~1/2 时稳定性系数较理想,可为边坡提供可靠的加固稳定程度。

3) 随着桩倾斜角度由垂直状态开始不断增大的过程中稳定性系数先增大后减小,在与坡面垂直时达最大值 1.449,表明倾斜桩体能有效地承受更大的水平承载力,可以更好地限制水平位移的发展,进而限制了塑性区的发展,使边坡稳定性得到提高。

4) 随着桩间距的不断增大,边坡稳定性系数逐渐减小;随着桩排数的增多,边坡稳定性系数线性增大。基于此,桩间距取 3~5 倍桩径是切实可行的。

## 参考文献

- [1] 邓涛,许杰,郑嘉勇,等.深厚软土中抗滑桩的修正悬臂桩计算方法[J].岩土力学,2022,43(5):1299-1305,1316.
- [2] 姚宝宽,王丽艳,巩文雪.格栅条带式加筋胎面挡土墙变形性能数值计算[J].地下空间与工程学报,2022,18(4):1284-1291.
- [3] 高珊,肖成志,丁鲁强,等.台阶式加筋土挡墙面板水平位移与稳定性关系研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(1):235-245.
- [4] 谢财进,饶军应,刘灯凯,等.不同桩芯微型桩抗弯承载力试验研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(3):540-548.
- [5] 任光明,伍禹安,范荣全,等.粉质黏土地区微型桩群桩基础群桩效应研究[J].成都理工大学学报(自然科学版),2022,49(1):111-118.
- [6] 罗辉,张锐,聂如松,等.红层软岩钢管微型桩抗压承载特性试验[J].中国公路学报,2022,35(11):97-106.
- [7] 冯震,王博怡,柳浩然,等.基于坡面形态的 h 型抗滑桩加固效果分析[J].科学技术与工程,2022,22(30):13467-13476.
- [8] 聂玉文,万善通,李国安,等.软弱围岩隧道锁脚微型桩支护结构研究[J].公路,2022,67(1):349-355.

- [9] 武玉萍,付红安,王佳佳,等.黄土地基微型桩水平承载力及群桩效应研究[J].应用力学学报,2022,39(3):543-553.
- [10] 邓友生,陈国军,冯爱林,等.倾斜抗滑桩护坡承载特性试验研究[J].科学技术与工程,2023,23(11):4810-4817.
- [11] 张力,赵振宇,刘力璇,等.基于现场试验与数值模拟的微型桩设计参数优化[J].北京交通大学学报,2019,43(4):52-57.
- [12] 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.
- [13] 黄林,江南,冯君,等.不同地层和滑坡推力分布对微型桩受力影响分析[J].铁道科学与工程学报,2020,17(3):592-600.
- [14] 王春景,卜一鸣,王金星,等.动荷载对微型桩深基坑开挖稳定性影响研究[J/OL].长江科学院院报:1-10[2023-08-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20220824.1159.006.html>.
- [15] 王维国,朱建朝,胡滢之,等.微型桩施工质量检测方法研究与应用[J].公路,2022,67(10):37-41.
- [16] 宁帅,庄妍,崔晓艳,等.各向异性和非均质性的抗滑桩边坡稳定性分析[J].哈尔滨工程大学学报,2022,43(4):529-535.
- [17] 张标,蒋毅,张佳华,等.不同饱和度影响下三维岩质边坡稳定性的上限分析[J/OL].土木工程学报:1-14[2023-08-16]. DOI:10.15951/j.tmgcxb.22060594.
- [18] 齐永正,张航,马文刚,等.复杂工况土质边坡的失稳破坏特征[J].科学技术与工程,2023,23(14):6190-6196.
- [19] 胡家驹,许明,刘先珊,等.基于极限分析上限原理的简化毕肖普法分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2021,57(5):622-626.
- [20] 廖少波,肖华波,刘云鹏.基于正交数值试验的倾倒边坡稳定性影响因素分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(S2):1003-1008.
- [21] 任洋,李天斌,杨玲,等.基于离心模型试验与数值计算的超高陡加筋土填方边坡稳定性分析[J].岩土工程学报,2022,44(5):836-844.
- [22] 张小荣,马艳霞,张吾渝.基于FLAC3D的寒旱环境植被根系分布形态对边坡稳定性的影响[J].科学技术与工程,2023,23(9):3831-3833.

## ABAQUS-based Study on the Bearing Characteristics of Inclined Mini-pile Slope Protection

CHEN Guojun, MAO Shaoxia, ZHENG Xueyun, REN Kai

(Gansu Civil Engineering Scientific Research Institute Co., Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** In order to fully study the slope bearing characteristics of inclined mini-pile, load transfer law, the relationship between different parameter variables and slope stability coefficient, various models were established and analyzed by using numerical calculation method ABAQUS software. The results show that the distribution of inclined mini-pile is approximately "S" shaped distribution, the bending moment value is the largest at the position of 1/2 of the pile body burial depth, the bending moment is distributed along both sides of the pile body, and the bending moment of the loaded section and the anchored section is obvious, the soil pressure behind the pile is bell-shaped distribution, with the increase of the pile body burial depth, the soil pressure increases first and then decreases, and the soil pressure value reaches the maximum near the slip surface. The stability coefficient of the slope reaches the maximum at 3 m from the bottom of the slope, i. e. 1/3 of the slope, so in order to make the mini-pile play a more effective slope protection effect, the mini-pile should be set at 1/3 to 1/2 of the slope angle, with the increase of the tilt angle of the mini-pile, the stability coefficient increases first and then decreases, reaching the maximum at the tilt angle of 40°, i. e. nearly perpendicular to the slope 1.449, the inclined pile body can better enhance the overall stability of the slope, with the increase of the pile spacing slope stability coefficient gradually decreases, with the increase of the number of pile rows stability coefficient nearly linear increase, under the same conditions, increase the number of pile rows can significantly increase the stability of the slope, to achieve the effect of rapid reinforcement of the slope.

**Keywords:** side slope engineering; numerical calculations; ABAQUS; micro pile; slope stability