

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.12.016

挡土抗拔桩倾斜荷载承载特性试验与数值分析

袁海平, 李艳龙, 李恒喆

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为研究挡土抗拔桩承受不同角度倾斜上拔荷载的极限承载力,文章通过室内相似模拟试验,获取单桩荷载-桩顶位移曲线;在试验得到的参数与FLAC 3D软件数值模拟结果近似一致的基础上,进一步探讨荷载倾角对挡土抗拔桩极限承载力的影响以及桩侧摩阻力分布、荷载传递性状和桩侧摩阻力发挥特性等。结果表明:挡土抗拔桩的荷载-桩顶位移曲线呈陡变型,极限承载力增大幅度随着荷载倾角的减小而减小;倾斜荷载下由于桩侧摩阻力的存在,上拔力分量随着水平力分量的增大而增大;挡土抗拔桩极限承载力大小较等截面桩不同倾角荷载作用下均有较大提升。该研究成果对挡土抗拔桩的设计和计算具有一定的参考价值,可利用其承载力特性应用于工程实际。

关键词:挡土抗拔桩;倾斜荷载;室内相似模拟试验;数值分析;作用机制

中图分类号:TU473.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)12-1686-07

Bearing characteristic experiment of inclined load of soil retaining pile and numerical analysis

YUAN Haiping, LI Yanlong, LI Hengzhe

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to investigate the ultimate bearing capacity of soil retaining pile under the inclined pull-up load at different angles, the load-top displacement curve of the pile was obtained through the indoor similar simulation test. Based on the consistency between the experimental parameters and the numerical simulation results of the FLAC 3D software, the influence of the load inclination on the ultimate bearing capacity of the soil retaining pile, the distribution of the pile side friction resistance, the load-transferring behavior and the characteristics of the pile side friction resistance were further discussed. The results indicate that the load-top displacement curve of soil retaining pile presents a steep type, and the increase in the ultimate bearing capacity decreases with the fall of the inclination of the load. Due to the existence of the pile side friction resistance, the component of the pull-up load increases with the rise of the component of the horizontal force under the inclined load. The ultimate bearing capacity of soil retaining pile increases vastly compared with that of the constant section pile under the action of different load inclinations. The research results have a specific reference value for the design and calculation of soil retaining pile, which can be applied to engineering practice.

Key words: soil retaining pile; inclined load; indoor similar simulation test; numerical analysis; mechanism of action

0 引言

随着桩基工程的快速发展,抗拔桩基础应用

越来越广泛。桩基础逐渐被应用于许多建(构)筑物的倾斜上拔,例如输电线路电线杆塔的临时锚固、桥梁斜拉基础等,这就对桩基础的抗倾斜上拔

收稿日期:2023-03-03;修回日期:2023-04-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874112)

作者简介:袁海平(1976—),男,江西九江人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

能力有了更高的要求。

目前国内外学者对于倾斜上拔桩基工程做了充分的研究,主要运用理论方法、现场原位试验及数值模拟等判断桩基在斜拉荷载下的受拉特性和破坏模式,并取得了丰富的研究成果,广泛的应用于工程实践中。文献[1]通过模型试验研究模型桩在黏土中的极限承载力;文献[2]根据理论结合试验分析给出刚性桩的斜拉极限承载力计算公式;文献[3]观察试验现象发现水平荷载较大时,上拔荷载会降低桩周土体强度,使得土体位移增大;文献[4-5]通过对比分析桩身在不同倾角荷载下的受力性能,得出上拔荷载与水平荷载之间存在耦合作用;文献[6]研究单桩承受倾斜上拔荷载时桩顶压力对极限承载力的影响,提出桩顶压力与极限承载力的半经验公式;文献[7]通过理论推导得出组合荷载下刚性桩的抗拔承载力计算公式;文献[8]假定破裂面的形状,列出 3 种普通桩基破坏模式,推导出抗拔桩的破裂面方程;文献[9]通过研究上拔荷载斜桩在密砂中的受力性能发现,桩身上部与下部摩阻力方向不同,且斜桩倾角越大,桩身弯矩越大;文献[10]对桩体扩大头研究发现,在土体旁压作用下,扩大头侧摩阻力远大于竖向分力;文献[11]研究发现,嵌岩短桩的极限抗拔力与水平分力和竖向分力的比例相关。

当前对于异形截面倾斜荷载上拔桩承载特性的研究较少,主要为扩底桩等。鉴于此,本文将通过逐级施加荷载模型试验与 FLAC 3D 数值模拟对比分析,探讨挡土抗拔桩的桩身弯矩、桩侧摩阻力等受力性能和极限承载力,并与等截面抗拔桩比较,得出挡土板对桩抗拔性能的影响,拟可为类似工程应用设计提供参考依据。

1 模型试验概况

1.1 试验装置及方案

试验装置由模型箱、加载装置和测量装置 3 个部分组成,如图 1 所示。箱体尺寸(长×宽×高)为 1 000 mm×300 mm×750 mm,骨架用角钢焊制,采用 2 块有测量刻度 15 mm 厚的钢化玻璃作为前后挡板,用作可视化抗拔桩受荷后的位移变化情况。

试验所用模型桩为带有挡土板模型桩,桩身及挡土板假定为刚性,桩顶穿孔用以穿绳方便荷载加载,桩身采用 10 mm 宽方形截面钢条,桩长 150 mm,桩顶额外加长 20 mm 用于百分表测量位移。挡土板宽 45 mm,高 75 mm。

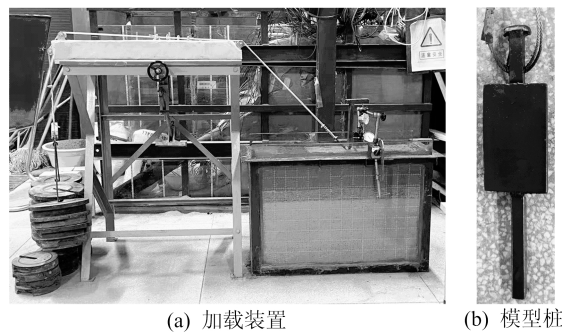


图 1 试验加载装置及模型桩

加载装置主要通过钢丝绳穿过定滑轮两端分别固定在抗拔桩顶和砝码盘上实现。每次加载后记录砝码质量换算成拉拔力。位移的测量主要由 2 个位移百分表组成,用来测量水平位移和竖向位移,如图 2 所示。

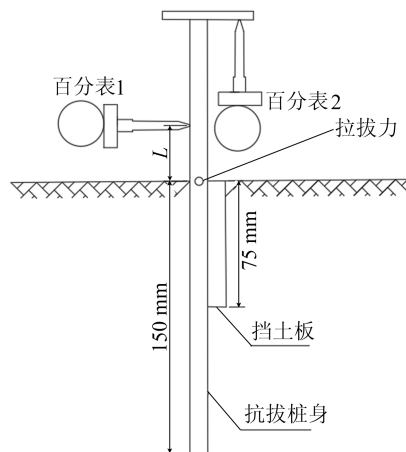


图 2 测量装置示意图

本文室内试验设计了 1 组土样 4 个角度的试验,分别是垂直 90°、75°、60°、45°,土样参数见表 1 所列,试验重复 3 次取平均值。试验中土样 4 个角度试验用以考虑荷载倾角对抗拔桩极限承载力的影响。

表 1 试验用砂土的主要参数指标

土层名称	重度 γ / (kN/m ³)	弹性模量 E /MPa	μ	直剪(固快)	
				c /kPa	φ (°)
浅层土	20.25	186.03	0.35	172.27	52.40
持力层	22.13	234.51	0.25	201.30	54.60
下卧层	22.87	246.31	0.25	184.54	60.40

1.2 试验准备及试验步骤

模型桩在砂土地基的加载过程中影响范围为 3D~8D, D 为桩径^[12]。本次试验桩上部直径为 45 mm,下部直径为 10 mm,桩端底部土层厚度为 300 mm,桩外壁距模型箱内壁为 6D,桩身挡土板迎土区留存 300 mm×300 mm 区域,满足边界效

应要求。参考文献[13]关于地基土的制备方法,通过室内土工试验测出砂土主要参数指标(表1)。试验用土样分3层装填。最底层是模拟中风化岩层,中间层密实砂性土模拟持力层;最上层是模拟浅层土体,承担桩土作用区的功能。

本次模型试验采用预埋式成桩法,即将模型箱内土体填埋至一定高度后,放入桩体保持桩身垂直于水平面,保持竖直向下。采用砂雨法分层铺筑填土,每层虚铺厚度约100 mm,共铺4层,然后采用击实锤(质量2.75 kg)遍布击实,遍击次数满足土工规范手册。此外,每次试验在桩周预埋4个环刀以测土体密度,土体压实完毕后静置2 d。

试验采用逐级荷载加载法,每级加载水平为0.100 kN,每级加载完成后每隔5 min记录一次读数,当连续3次水平位移和竖向位移读数间隔均小于0.01 mm时视为加载稳定^[14],即可进行下一级加载。每级加载后,观察土体裂纹扩展情况,数据记录重点标记模型桩水平位移或竖向位移达 $0.15D$ ^[15],随后加载至桩身被全部拔出,记录荷载-位移完整曲线。位移测量通过水平与竖向2个百分表完成(图2)。百分表1、百分表2测得水平位移 Δ_1 、竖向位移 Δ_2 ,桩顶的水平位移为:

$$\Delta_x = \left(1 - \frac{150}{150 + L}\right)\Delta_1 \quad (1)$$

其中, L 为百分表1测点到地面的距离。

1.3 试验结果及分析

由室内试验得到的单桩破坏示意图如图3所示,桩前迎土区域呈现扇形破坏区,有明显隆起,桩后无明显影响区域。



图3 破坏后桩土示意图

经过统计整理得到单桩各角度荷载-位移曲线如图4所示。由图4可知,曲线前端较为平缓,达到一定荷载值时出现拐点,桩身位移大幅增长。通过曲线分析单桩在不同角度荷载下的抗拔极限承载能力,可知随着荷载倾角的减小,极限抗拔能力也随之增大。

试验结果见表2所列。由表2可知:极限抗拔承载力逐级增幅减缓,由于侧向挡土板扩大了桩身迎土区域,在水平分力的作用下竖向分力有了显著的提升;水平分力使得桩侧迎土面摩擦力增强,当水平分力增加到一定程度后,桩侧摩擦力会到达极限值,竖向分力不再增长,此时抗拔极限承载力的增长主要由水平分力来提供。因此,荷载倾角减小到一定程度后,对单桩极限抗拔能力提升效果减弱。

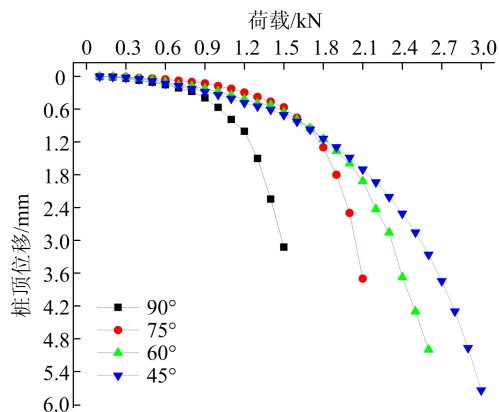


图4 荷载-位移曲线

表2 试验结果

试验名称	实测极限抗拔承载力/kN	水平分力/kN	竖向分力/kN	极限荷载时上拔位移量/mm
90°竖向上拔	0.900	0	0.900	0.752
75°倾斜上拔	1.100	0.285	1.062	0.472
60°倾斜上拔	1.500	0.750	1.299	0.963
45°倾斜上拔	1.800	1.273	1.273	1.627

2 抗拔试验数值模拟

2.1 数值模型的建立

因为本文设计初采用钢轨桩为原型,所以数值模拟仍用标准12 kg/m钢轨桩进行模拟。本文采用FLAC 3D软件进行建模分析,为便于讨论,作出以下基本假设^[16]:设定土体是半无限且均质水平,采用摩尔-库伦模型,桩身材料采用线弹性模型,桩-土接触面选用库伦摩擦模型,使用弹塑性模型模拟桩-土接触面,接触面强度折减系数设为2/3。

模型均用实体单元模拟,建立三维模型如图5所示,土体模型的尺寸(长×宽×高)为480 mm×420 mm×225 mm。为了更直观揭示数值模拟与试验真实情况的对照,模型桩与试验尺寸保持一致,桩身长为150 mm,侧面挡土板尺寸(高×宽×

厚)为 75 mm×45 mm×3 mm。

边界约束分别为:顶面不设约束,侧面约束水平位移,底面固定。通过逐级加载模式,记录加载过程中所需的应力和位移数据。加载过程中,将桩体位移突然增大、位移曲线骤降作为计算的终止条件^[16],数值模拟参数全部由室内土工试验给出。

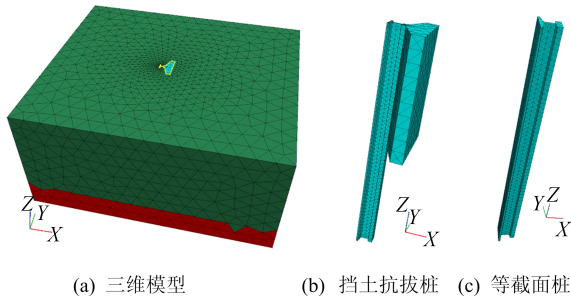


图 5 三维实体模型整体网格图

2.2 模型的可靠性验证

为验证模型的合理性,结合室内模型试验数据,对试验桩及等截面桩进行数值模拟分析。由于数值模拟模型桩与试验桩尺寸一致,可从数值模拟值与试验值结果验证。数值模拟结果如图 6 所示。

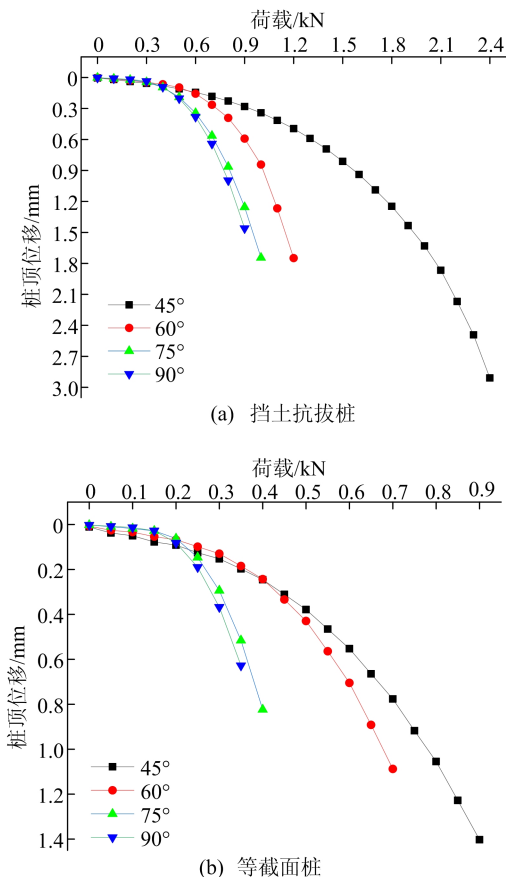


图 6 数值模拟各角度荷载-位移曲线

本试验分别得到 4 个不同荷载倾角桩数值模拟与相似模拟试验的荷载-位移曲线。以荷载倾角 45°为例进行对比,抗拔试验桩与抗拔模拟桩曲线对比结果如图 7 所示。

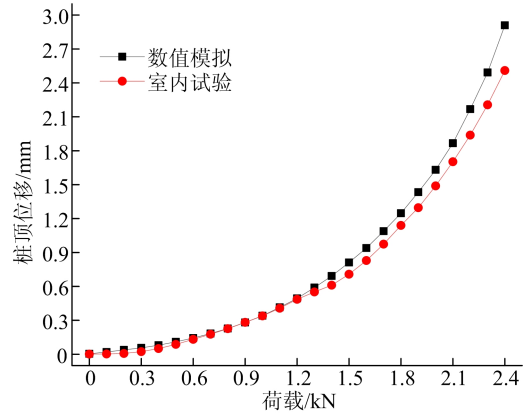


图 7 试验桩试验与数值模拟曲线对比

从图 7 可以看出,数值模拟与现场试验的荷载-位移曲线趋势基本一致,两曲线吻合度较高,且在极限状态下的抗拔承载力和桩顶位移基本接近。

荷载-位移曲线可以分为直线段、曲线段和直线段 3 段^[17]。前段直线段数值模拟值略高于试验值,桩周土体进入平稳进入弹性变形阶段。中段数值模拟值与试验值相符,桩周土体逐渐由弹性转向塑性变形阶段。末段随着桩周土体的屈服剪切破坏,模拟值较试验值逐级加大,所产生的误差也随之增大。

2.3 挡土抗拔桩与等截面桩模拟结果分析

基于图 6 曲线统计挡土抗拔桩及等截面桩数值模拟结果,见表 3 所列。

当荷载为 90°竖向上拔时,前者有挡土板而后者没有,因此前者极限抗拔承载力稍大于后者。当荷载为 75°倾斜上拔时,由于水平分力的存在,挡土板开始发挥作用,桩前扩大的迎土面使得桩侧摩阻力增强,需要更高的竖向分力上拔桩身;而等截面桩因为水平分力使得桩后桩土接触面分离,桩身整体侧摩阻力下降,所以竖向分力较 90°竖向上拔时大幅下降,前者较后者抗拔力提升了 66.7%。当荷载为 60°倾斜上拔时,水平分力的增大使得挡土抗拔桩和等截面桩侧摩阻力均有所提升,前者较后者抗拔力提升了 80.0%。同理,当荷载为 45°倾斜上拔时,前者较后者抗拔力提升了 142.8%。

通过分析数据结果可知:有无挡土板对受倾

斜上拔荷载桩极限抗拔力有较大影响,桩前迎土面的大小影响抗拔力的极限值;等截面桩倾斜荷载抗拔极限承载力较竖向有大幅减少。

同时,分析表 2 和表 3 试验值与模拟值可知,模拟桩极限值在各荷载倾角时均不同程度小于试验值,且随着荷载倾角的减小,两者误差逐渐减小。其中 45°荷载时两者数值相近,试验差仅为 5.55%。因此,综合分析在较小荷载倾角时,挡土板承担水平力越充分越能发挥自身挡土优势,提升抗拔承载能力。在此基础上,深入研究挡土板对桩倾斜荷载极限抗拔力的影响有重要意义。

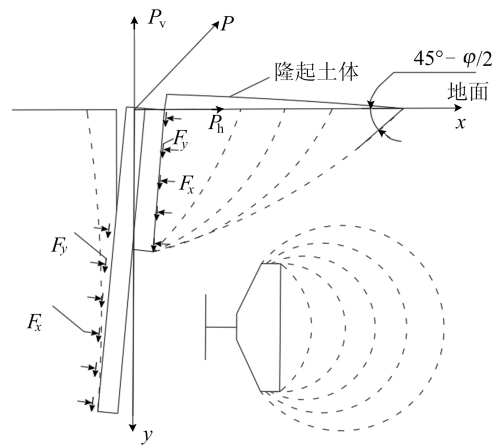


图 8 挡土板受力示意图位移云图

表 3 抗拔桩数值模拟结果

桩型	试验名称	实测极限抗拔承载力/kN	极限荷载时上拔位移量/mm
挡土 抗拔桩	90°竖向上拔	0.350	0.121
	75°倾斜上拔	0.500	0.126
	60°倾斜上拔	0.900	0.132
等截面桩	45°倾斜上拔	1.700	0.847
	90°竖向上拔	0.250	0.103
	75°倾斜上拔	0.300	0.189
	60°倾斜上拔	0.500	0.457
	45°倾斜上拔	0.700	0.764

3 数值模拟云图分析

3.1 挡土板对倾斜抗拔性能的影响

从表 2 和表 3 可以看出,挡土抗拔桩的核心优势由挡土板提供。挡土板受力示意图如图 8 所示。

桩顶水平分力 P_h 带动挡土板主动作用于土,土反作用于挡土板,使得桩前上部分和桩后下部分法向应力 F_x 增大,进而在桩顶竖向分力 P_v 的作用下,桩身上拔,桩侧产生较大摩阻应力 F_y ,因此可以将挡土抗拔桩承载力的提高归因于挡土板对抗拔阻力的提高。随着荷载倾角加大以及上拔力 P 增大,桩前土体受影响区域逐渐加大,当土体发生塑性剪切破坏时,破坏面与地面形成 $45^\circ - \varphi/2$ 的夹角。结合桩侧土体复合剪切破坏理论及数值模拟结果分析,当土体发生滑动破坏时,滑动面的形成主要与水平分力 P_h 有关,竖向分力 P_v 影响范围较小,不足以影响到滑动面的形成。

此处分别以挡土抗拔桩、等截面桩 90°上拔和 45°倾斜上拔为例,研究桩顶不断上拔过程中挡土板受力的构成与发挥过程。

3.2 等截面桩与挡土抗拔桩位移云图分析

等截面桩 0.3 kN 荷载施加位移云图如图 9 所示。

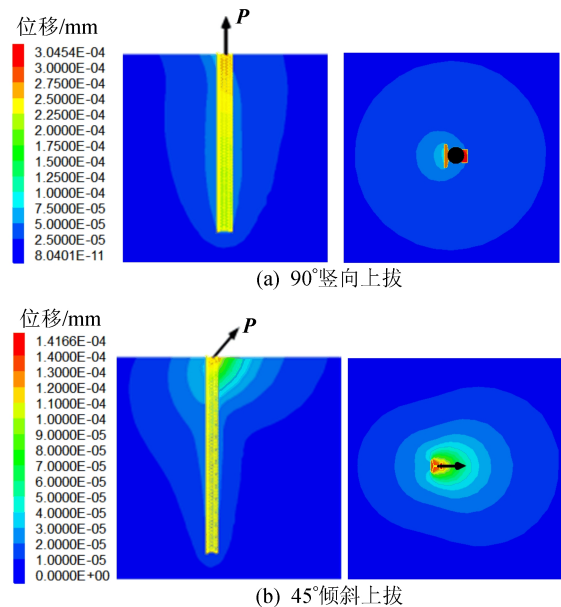


图 9 等截面桩 0.3 kN 荷载施加位移云图

等截面桩 90°竖向加载时,桩侧土体位移近似以桩心为圆心,均匀变化,可等效成圆柱形变化。45°倾斜上拔加载时,由于桩前土体受压,桩顶土体位移变化主要分布在桩前且呈扇形区域。沿桩身深处土体位移变化区域主要分布在桩身上部浅层土体区域,形成圆弧形曲面,桩后土体由于受拉位移变化微小。

挡土抗拔桩 0.6 kN 荷载施加位移云图如图 10 所示。挡土抗拔桩 90°竖向加载时,桩侧土体位移变化与等截面桩相近,可等效成半径更大的圆柱形变化。45°倾斜上拔加载时,由于挡土板扩大桩前桩土接触面积,桩顶土体位移变化范围

更大也呈扇形区域。沿桩身深处土体位移变化区域更深,形成更大范围的圆弧形曲面,桩后土体出现较明显的反位移。由于桩前土体影响范围区域变大,桩体侧摩阻力发挥更充分,桩体极限承载力有了较大幅度的提升。

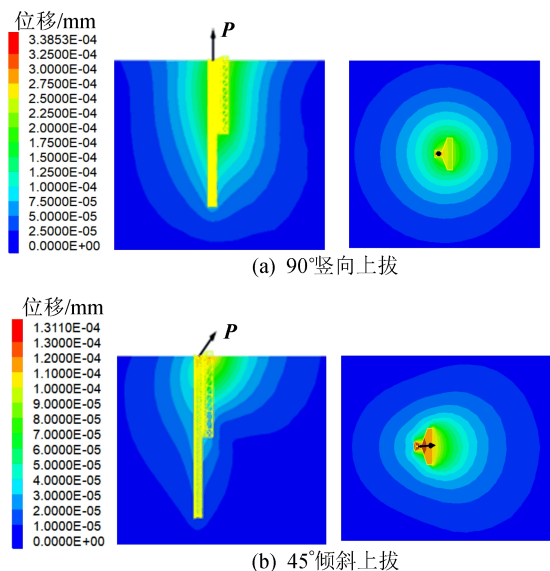


图 10 挡土抗拔桩 0.6 kN 荷载施加位移云图

3.3 桩侧摩阻力分析

以 45° 倾斜上拔加载时等截面桩与挡土抗拔桩为例,研究其侧摩阻力分布。分析图 8 可知,侧摩阻力主要作用于桩前上部与桩后下部区域,其分布如图 11 所示,在荷载作用下等截面桩上部侧摩阻力先发挥作用,随着桩身倾斜,下部摩阻力开始发挥作用。反弯点出现在桩身 60~75 mm 深处,桩身下部与土体结合紧密,随着深度增加,侧摩阻力增幅减缓。

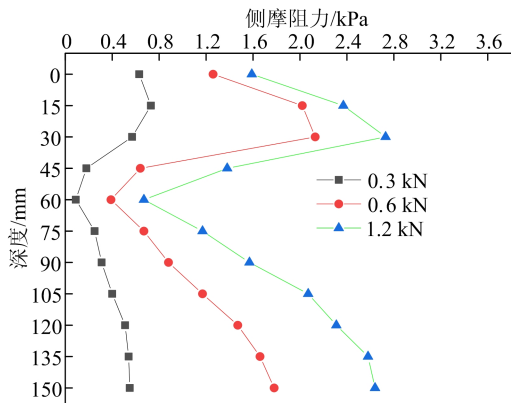


图 11 45° 倾斜上拔时等截面桩侧摩阻力分布

挡土板扩大了桩身上部桩土接触面,在水平

力的作用下使得桩身下部承受较大的法向应力,因此桩侧有较大的侧摩阻力,其分布如图 12 所示。反弯点位置也较等截面桩有所下降,位于桩身 75 mm 深处。随着荷载的增大,倾斜上拔荷载桩侧摩阻力近似呈“葫芦形”分布。

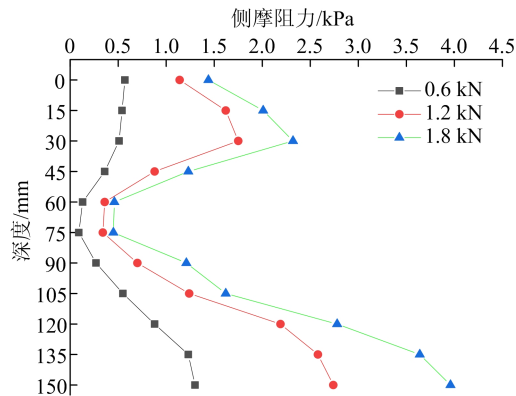


图 12 挡土板扩大时 45° 荷载等截面桩侧摩阻力分布

4 结 论

本文通过自行设计的室内挡土抗拔桩倾斜荷载上拔试验研究及等截面桩的数值模拟,得到结论如下。

1) 通过对桩 4 个倾角荷载-桩顶位移曲线的分析可得,挡土抗拔桩比等截面桩具有更好的倾斜抗拔承载力。挡土抗拔桩作用倾斜上拔荷载时,挡土板扩大了桩前桩土接触面,使得在相同荷载时挡土抗拔桩较等截面桩位移较小,且抗拔极限承载力有显著提升。

2) 随着荷载倾角的减小,挡土抗拔桩的极限承载力增幅有所减缓,水平分力较竖向分力逐渐发挥更大的作用。桩前土体发生滑动破坏时,破坏面与地面形成 $45^\circ - \varphi/2$ 的夹角。竖向分力对土体的滑动破坏影响较小,水平分力是土体产生滑动破坏的主要原因,因此倾角越小,桩前土体破坏区域越大。

3) 倾斜上拔荷载桩侧摩阻力大致呈“葫芦形”分布。由于水平分力与土反力的相互作用,桩身反弯点以下存在较大侧摩阻力。

[参 考 文 献]

[1] SHIN E C, DAS B M, PURI V K, et al. Ultimate uplift capacity of model rigid metal piles in clay[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1993, 11(3): 203-215.
 [2] MEYERHOF G G. The uplift capacity of foundations under

- oblique loads [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1973, 10(1):64-70.
- [3] 罗少锋, 杨文星. 上拔与水平力组合作用下单桩静载试验 [J]. 工程勘察, 2012, 40(6):1-4.
- [4] RAMADAN M I, BUTT S D, POPESCU R. Offshore anchor piles under mooring forces; numerical modeling [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(2):189-199.
- [5] RAMADAN M I, BUTT S D, POPESCU R. Offshore anchor piles under mooring forces: centrifuge modeling [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(4):373-381.
- [6] REDDY K M, AYOTHIRAMAN R. Experimental studies on behavior of single pile under combined uplift and lateral loading [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(7):04015030.
- [7] SCHMERTMANN J H. Discussion of "experimental studies on behavior of single pile under combined uplift and lateral loading" by K. Madhusudan Reddy and R. Ayothiraman [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(8):07016015.
- [8] 何思明. 抗拔桩破坏特性及承载力研究 [J]. 岩土力学, 2001, 22(3):308-310.
- [9] 曹卫平, 秦强毅, 赵敏. 砂土中抗拔斜桩性状模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1):3124-3133.
- [10] 吴江斌, 王卫东, 黄绍铭. 扩底抗拔桩扩大头作用机制的数值模拟研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(8):2115-2120.
- [11] 王梓龙, 裴向军, 刘瑶, 等. 嵌岩扩底短桩抗拔承载性能现场试验研究及数值模拟 [J]. 长江科学院院报, 2020, 37(5):139-144.
- [12] ROBINSKY E I, MORRISON C F. Sand displacement and compaction around model friction piles [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1964, 1(2):81-93.
- [13] CHANDRASEKARAN S S, BOOMINATHAN A, DOD-AGO-UDAR G R. Group interaction effects on laterally loaded piles in clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(4):573-582.
- [14] 曹卫平, 夏冰, 赵敏, 等. 砂土中水平受荷斜桩的 $p-y$ 曲线及其应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3):743-753.
- [15] 赵明华, 李微哲, 杨明辉, 等. 成层地基中倾斜偏心荷载下基桩位移特性室内模型试验研究 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(12):95-99.
- [16] 柳晓, 科鹿群, 路士伟, 等. 低裙式吸力桩真空沉贯力及抗拔承载力 [J]. 岩土力学, 2018, 39(6):2089-2098.
- [17] 余江来, 张少钦, 陈乐意, 等. 等截面嵌岩桩抗拔承载性状试验与数值分析 [J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2018, 32(3):19-25.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 1641 页)

- [5] GROSS B, MENDELSON A. Plane electrostatic analysis of V-notched plates [J]. International Journal of Fracture, 1972, 8(3):267-276.
- [6] SHIPMAN B H. Calculation of the generalized stress intensity factors for a V-notched anisotropic body [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2002.
- [7] YAO S L, ZAPPALORTO M, PAN W, et al. Two dimensional displacement and stress fields for tri-material V-notches and sharp inclusions in anisotropic plates [J]. European Journal of Mechanics A (Solids), 2020, 80:103927.
- [8] PHILIPPS A G, KARUPPANAN S, CHURCHMAN C M, et al. Crack tip stress intensity factors for a crack emanating from a sharp notch [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(18):5134-5139.
- [9] LOU B Q, BARLTROP N. Physical differences between models of an infinitesimal crack at a V-notch edge and a crack emanating from a V-notch tip along with their approximate solutions [J]. International Journal of Solids & Structures, 2021, 219:1-10.
- [10] YU Y F, PEI X J, WANG P, et al. A structural stress approach accounting for notch effects on fatigue propagation life: part I theory [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 159:106793.
- [11] SHEN W, CHEN Y W, FU H Q, et al. A semi-analytical formula for estimating notch stress field and N-SIF of double edge V-notched orthotropic thin plate [J]. Archive of Applied Mechanics, 2022, 92(6):1729-1755.
- [12] ZAPPALORTO M, CARRARO P A. Stress fields at sharp angular corners in thick anisotropic composite plates [J]. Composite Structures, 2014, 117(1):346-353.
- [13] ZAPPALORTO M, CARRARO P A. Effect of material orthotropy on the notch stress intensity factors of sharp V-notched plates under tension [J]. Theoretical & Applied Fracture Mechanics, 2019, 104:102375.
- [14] 葛大丽. 双材料反平面 V 形切口应力奇性指数的计算 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010, 33(11):1677-1680.
- [15] 王强. 含 V 型切口结构强度与疲劳寿命研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [16] SHEN W, CHEN Y W, LI G R, et al. Semi-empirical formulas on notch stress field and SIF of orthotropic V-shaped thin plate with initial crack under tensile-bending loads [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 281:109040.
- [17] PARIS P, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws [J]. Journal of Fluids Engineering, 1963, 85(4):528-533.

(责任编辑 闫杏丽)