

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.132



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基坑开挖下倾斜长短组合桩的受力变形特性

王际凯¹, 石钰锋¹, 刘伟煌¹, 詹刚毅², 蒋亚龙¹, 徐长节^{1,3}

(1. 华东交通大学 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 南昌 330013;
2. 中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200070; 3. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058)

摘要: 倾斜长短组合桩兼具变形控制能力良好和造价低的优点。目前, 对倾斜长短组合桩的研究较少, 尚缺乏对其工作机理的认识。利用模型试验结合数值模拟的方法, 研究开挖过程中倾斜长短桩在不同倾角和桩长组合下的变形受力特性, 继而探讨其工作机理。结果表明: 对于倾斜长短组合桩而言, 其支护效果与倾角成正比, 与排桩的桩长成反比, 且倾角的影响最大, 桩长次之; 在总桩长一定且短桩满足一定嵌入深度时, 倾角存在一个临界值, 当倾角小于临界值时, 最佳桩长分配受倾角大小的影响, 而当倾角大于临界值时, 斜桩越长, 支护效果越好。

关键词: 基坑开挖; 倾斜长短组合桩; 土体与支护结构位移; 桩身弯矩

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)04-0035-10

Mechanical and deformation characteristics of inclined long short composite pile under foundation pit excavation

WANG Jikai¹, SHI Yufeng¹, LIU Weihuang¹, ZHAN Gangyi², JIANG Yalong¹, XU Changjie^{1,3}

(1. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China; 2. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, P. R. China; 3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China)

Abstract: The inclined long short composite pile has the advantages of good deformation control ability and low cost. Currently, there are limited studies on this aspect and understanding of its working mechanism is still lacking. In view of this, through the model test and numerical method, the deformation and mechanical characteristics of long and short inclined piles under different inclination and pile length combinations during excavation are studied, and then the working mechanism is discussed. The results show that: For inclined long short composite piles, the supporting effect is directly proportional to the inclination angle and inversely proportional to the pile length of row piles, and the influence of inclination angle is the greatest, followed by the pile length; When the total pile length is fixed and the short pile meets a certain embedded depth, the inclination angle has a critical value. When the inclination angle is less than the critical

收稿日期: 2021-03-02

基金项目: 江西省自然科学基金(20192BAB206043); 国家地区科学基金(51768020)

作者简介: 王际凯(1996-), 男, 主要从事基坑工程研究, E-mail: 512797846@qq.com.

石钰锋(通信作者), 男, 博士(后), E-mail: 270347713@qq.com.

Received: 2021-03-02

Foundation items: Jiangxi Natural Science Foundation (No. 20192BAB206043); National and Regional Science Foundation Project (No. 51768020)

Author brief: WANG Jikai (1996-), main research interest: foundation pit engineering, E-mail: 512797846@qq.com.

SHI Yufeng (corresponding author), postdoctor, E-mail: 270347713@qq.com.

value, the optimal pile length distribution is affected by the inclination angle. When the inclination angle is greater than the critical value, the longer the inclined pile, the better the supporting effect.

Keywords: foundation pit excavation; inclined long short composite pile; displacement of soil and supporting structure; pile bending moment

基坑工程的排桩围护结构一般采用直桩,而将直桩倾斜一定的角度,则为倾斜桩。在相同条件下,倾斜桩能够减小排桩的变形与内力,进而无需水平支撑^[1-2]。近年来,陆续有学者对倾斜桩在基坑工程中的应用展开了研究。

在现场试验方面,孔德森等^[3]通过模型试验的方法对倾斜悬臂桩的桩顶水平位移、桩后土体沉降和桩身弯矩进行了研究,从而探讨其受力特性。刘涛^[4]将倾斜桩拓展使用至基坑支护工程,通过开展现场试验和有限元数值模拟分析,着重研究了倾斜支护桩在基坑中的作用机理。Han 等^[5]根据基础板的垂直应力和倾斜角度,探讨了倾斜基础板对埋入式桩端承载力和桩底土性的影响。Goit 等^[6]在 1g 条件下进行了模型物理缩尺试验,获得了埋置在干砂中的倾斜单桩的竖向响应。孔德森等^[7]根据基坑支护倾斜悬臂桩模型试验,对比分析了倾斜角度、布桩方式、桩顶约束方式、桩位置 4 种因素对基坑支护倾斜悬臂桩受力变形特性的影响。

在倾斜桩竖向承载特性研究方面,郑刚等^[8]提出了基坑斜-直交替支护桩的 3 个工作机理效应,即刚架效应、斜撑效应和重力效应。孔德森等^[9]为了研究动力荷载作用下倾斜桩的动力 $p-y$ 曲线规律,采用数值模拟的方法构建了液化场地倾斜桩-土数值分析模型。Misir 等^[10]采用室内模型试验和数值分析相结合的方法,研究了水平荷载作用下均质/层状砂土中垂直/倾斜放置情况下短桩的抗拔性能。刁钰等^[11]将主动控制技术与斜直交替倾斜桩支护技术相结合,提出了一种新型的可以有效控制基坑变形的主动式无支撑支护技术。王耀鹏^[12]通过模型试验研究了竖向荷载作用下无桩周土侧向位移和有桩周土侧向位移的 3 种倾斜率下桩的竖向承载变形性状。

在倾斜桩水平向承载特性研究方面,Wang 等^[13]建立了 Timoshenko 梁-Pasternak 地基(T-P)模型,以估算水平荷载作用下倾斜桩的水平动力阻抗和相互作用系数。周越洲等^[14]结合珠海市某工程项目,利用有限元程序模拟了土方开挖过程中桩侧不平衡土压力对桩受力和变形的影响。Zhou

等^[15]借助数值模拟技术,研究了斜交 PCP 桩基础的变形特性,提出了斜向桩的加固方案。

上述对于倾斜桩的研究多以等长桩为研究对象,但由弹性地基梁法可知,基坑开挖面以下,围护结构受到被动土体的反向作用力,桩体下部承受较小弯矩,因此,可以通过减小部分桩长,形成长短桩,来实现降低造价的目的。基于此,笔者对倾斜长短组合桩的工作性状、支护能力进行了研究探讨。

1 倾斜长短桩试验研究

1.1 试验目的与内容

为探究基坑开挖下倾斜长短组合桩的支护效果,通过室内模型试验研究基坑开挖对冠梁侧向位移、桩身内力、土体沉降等方面的影响。已有研究表明,全斜桩支护能力弱于斜直交替桩型^[11],故试验设计为一长一短组合(组合 1~3)及对照组试验,具体见表 1。

表 1 试验设计概况

Table 1 Overview of experimental design

组合	长桩桩长/cm	短桩桩长/cm	长桩角度/(°)	短桩角度/(°)
组合 1	70	60	0	0
组合 2	70	60	10	0
组合 3	70	60	20	0
对照组	70	70	0	0

倾斜桩的倾斜方式以及采集装置的布设见图 1。模型基坑分 4 次开挖,根据对称原则,取一半基坑进行模拟,故开挖范围为 $1.74 \text{ m} \times 0.74 \text{ m}$,模型桩以空心 PVC 管模拟,其外径 32 mm、壁厚 2 mm、桩距为 53.7 mm,冠梁规格为 $1.73 \text{ m} \times 0.06 \text{ m} \times 0.06 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),分为冠梁顶板及冠梁底板,其大小尺寸相同。

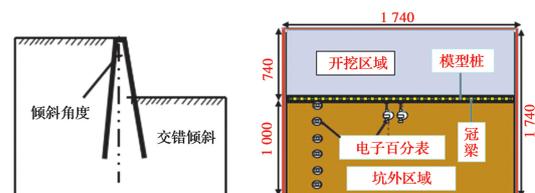


图 1 基坑示意图

Fig. 1 Schematic diagram of foundation pit

1.2 试验概况

模型箱主体框架为防锈钢材,四面布置厚度 10 mm的透明钢化玻璃以便于观察试验现象,并承受水平土压力以保证试验安全进行,如图 2 所示。



图 2 模型箱
Fig. 2 Model box

1.3 冠梁与模型桩

1.3.1 冠梁 根据试验需要,冠梁底板的预留桩孔设置 0°、10°、20°的倾斜角度。底板预留桩孔直径为 32 mm、孔位中心间距为 53.7 mm。冠梁顶板预留桩孔起到限制桩顶穿过冠梁以及便于导线穿过的作用,其直径为 15 mm。冠梁如图 3 所示。

1.3.2 模型桩 因为基坑开挖模拟试验中支撑结



图 3 冠梁材料

Fig. 3 Crown beam material

构所承受的土压力较小,模型桩材料的弹性模量不宜太大,故参考文献[3],模型桩采用 PVC(聚氯乙烯)管作为主体材料。桩体通过冠梁底板的预留桩孔来达到不同倾斜角度。此外,为了采集试验数据,在选定的模型桩上的特定位置(管材内壁)布设应变片。

1.4 试验用砂

采用试验室内储量颇丰的河砂作为地基填筑材料。为了去除砂土中的杂物,保证土样的均匀性,需要对河砂进行筛分,本试验采用了 5 mm 筛对河沙进行筛分,其主要物理力学参数见表 2,颗粒级配曲线见图 4。

表 2 试验用砂的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of test sand

颗粒组成/%					$\gamma/$	$C/$	$\varphi/$	$E_s/$
>2.0 mm	$2.0\sim 0.5$ mm	$0.5\sim 0.25$ mm	$0.25\sim 0.1$ mm	<0.1 mm	($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	($^{\circ}$)	MPa
25	44	16	11	4	17.75	2	24	18

注: γ 为土的重度; C 为土的黏聚力; φ 为土的摩擦角; E_s 为土的压缩模量。

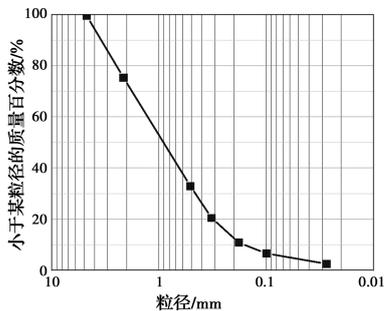


图 4 颗粒级配曲线

Fig. 4 Particle size distribution curve

2)对基坑内部的土体进行分次开挖,并记录相应的试验数据。

3)试验结束后静置 24 h,观察试验现象。



(a) 基坑开挖

(b) 试验现象

图 5 试验过程

Fig. 5 Test process

1.5 试验过程

试验过程见图 5,具体如下:

1)模型桩采用预先埋入法成桩,即先将桩固定在模型槽中一定深度后,在直桩迎土面布置止砂帷幕,再用沙雨法填筑预定高度。

2 试验结果分析

2.1 冠梁侧向位移

图 6 给出了倾角为 0°、10°、20°情况下的一长一

短组合桩与等长长桩的冠梁侧向位移。

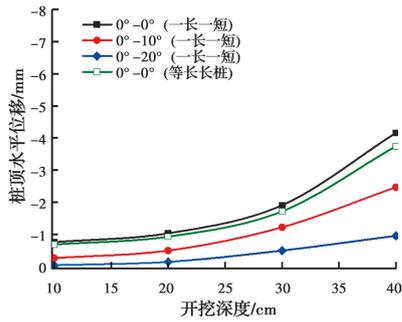


图 6 冠梁侧向位移变化曲线

Fig. 6 Lateral displacement curve of crown beam

根据冠梁侧向位移变化图可知：

1)随着基坑开挖深度的增加,冠梁侧向位移增大。当开挖至坑底时,除倾角为 20°外,其余桩型的冠梁侧向位移的增长速率突然加快,被动区土体产生了塑性变形,土体的约束变小,对变形的约束较小。

2)倾角为 0°的长短组合桩与等长长桩的冠梁侧向位移曲线极为接近,且二者的差值随着开挖深度的增加而增大。当开挖至坑底时,等长长桩的冠梁侧向位移为 3.74 mm,而一长一短组合桩倾角为 0°、10°、20°时,冠梁侧向位移分别为 4.16、2.46、0.95 mm,相比等长长桩,其冠梁侧向位移增长率为 11.2%、-34.2%、-74.6%。说明在整个支护体系中,斜桩起到斜撑的作用,进而影响整体支护作用,其中,倾斜的角度为传递此力的关键因素。

综上可知,在长短组合桩中,减小桩长会增大冠梁侧向位移,但变化的程度较小;增大长桩倾角会减小冠梁侧向位移,且变化的程度较大。

2.2 地表沉降

图 7 给出了当基坑开挖深度 $H=40$ cm 时,不同倾角下的一长一短组合桩与等长长桩的地表沉降结果。

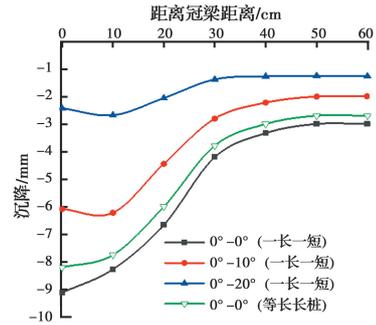


图 7 地表沉降结果

Fig. 7 Surface subsidence results

根据地表沉降结果,可知：

1)开挖至坑底时,等长长桩的最大地表沉降为 8.21 mm,而倾角为 0°时的地表沉降最大值为 9.12 mm,增长率为 11.0%,与冠梁侧向位移增长率接近。由此可见,当长短组合桩倾角为 0°时,减小其桩身长度都会增大冠梁侧向位移和最大地表沉降,且对二者的影响程度相当。

2)对比等长长桩可知,当倾角为 10°、20°时,地表沉降最大值分别为 6.22、2.67 mm,其地表沉降最大值增长率为 -24.4%、-67.5%。由此可知,长桩倾角增大时,地表沉降减小幅度小于冠梁侧向位移,但相差较小,效果同样显著。这是因为基坑支护导致坑外土体沉降,基坑开挖导致坑底土体回弹,二者使支护桩两侧产生差值,导致桩顶水平位移增大,也因此使桩后土体产生沉降。

2.3 桩身弯矩

图 8 给出了开挖至坑底时 0°、10°、20°倾角下的一长一短组合桩与等长长桩的桩身弯矩结果。图 8 中弯矩分析只考虑大小,不考虑正负。

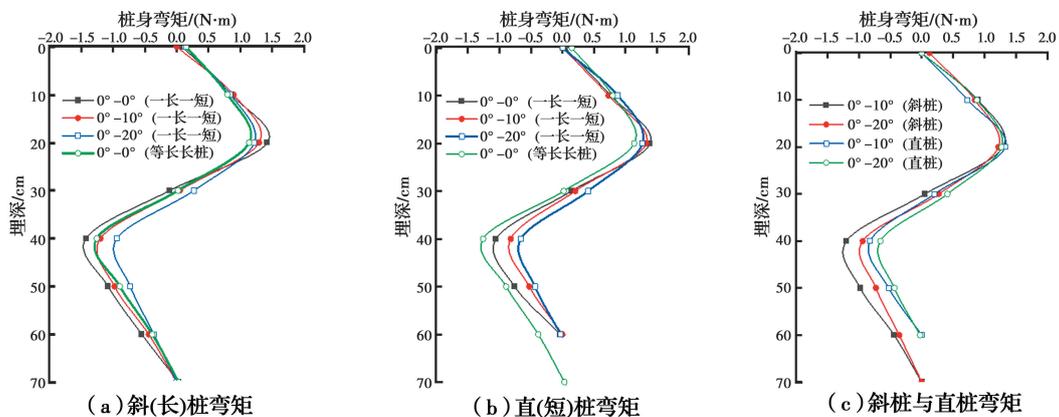


图 8 桩身弯矩对比曲线

Fig. 8 Comparison curves of pile bending moment

根据桩身弯矩变化规律可知:

1)由刚架效应可知,冠梁将长短支护桩连接成一个整体,形成一种“三角形刚架支护体系”,其中,排桩中的斜桩承受较大的土压力,进而分担了直桩受到的作用力,使支护体系的抗倾覆性增强。

2)桩身上下弯矩符号相反,变化处为反弯点。在反弯点上部的桩身受压,下部的受拉。其中,斜桩的负弯矩值大于直桩的负弯矩值,这是因为在开挖过程中前排斜桩受到的被动土压力更大,类似于普通双排桩结构的前后排桩受力机理。

当倾角为 0° 时,对于开挖面以上的桩身弯矩最大值而言,等长长桩最小,最大弯矩为 $1.14 \text{ N}\cdot\text{m}$,长短组合桩略大,其长桩与短桩的最大弯矩分别为 1.42 、 $1.39 \text{ N}\cdot\text{m}$,长桩、短桩的弯矩增长率分别为 24.6% 、 21.9% 。这主要是因为桩长减小降低了嵌固长度。

4)当倾角为 10° 、 20° 时,斜桩在基坑开挖面以上的最大弯矩分别为 1.29 、 $1.22 \text{ N}\cdot\text{m}$,基坑开挖面以下分别为 1.20 、 $0.94 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。与倾角为 0° 时的长桩相比,在开挖面以上斜桩桩身最大弯矩分别减小 9.2% 、 14.1% ;开挖面以下则分别减小 15.5% 、 33.8% 。故由此可知,长短组合桩中长桩的弯矩随

倾角增大而减小,且在开挖面以下弯矩减小的趋势显著。

5)当倾角为 10° 、 20° 时,其短桩在基坑开挖面以上的最大弯矩分别为 1.33 、 $1.27 \text{ N}\cdot\text{m}$,基坑开挖面以下分别为 0.82 、 $0.66 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。与倾角为 0° 时的短桩相比,在开挖面以上短桩的桩身最大弯矩分别减小 4.3% 、 8.6% ;开挖面以下分别减小 21.9% 、 37.1% 。故由此可知,长短组合桩中短桩的弯矩随倾角增大而减小,且在开挖面以下弯矩减小的趋势显著。

6)当倾角为 10° 、 20° 时,在基坑开挖面以上,斜桩的最大弯矩值稍小于直桩,而在基坑开挖以下,斜桩弯矩明显大于直桩弯矩。可以看出,开挖面以上,斜桩分担的弯矩略小于直桩;而开挖面以下,斜桩分担的弯矩更多。

3 数值模拟研究

借助有限元分析方法,按照相似比还原试验原型并拓展研究,在长桩、短桩的总桩长一定的条件下合理分配长桩、短桩的桩长。长桩、短桩总桩长为 31.2 m ,其中,CD1-1和CD1-2的桩长比值与试验对应,具体设计桩长分配方式如表3所示。

表3 桩长分配表

Table 3 Pile length distribution table

名称	长桩		短桩		桩径/m	材料	$E/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	$\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	ν
	桩长/m	倾角/ $(^\circ)$	桩长/m	倾角/ $(^\circ)$					
CD1-1	16.8	10	14.4	0	0.8	C30 砼	30 000	25.5	0.2
CD1-2	16.8	20	14.4	0	0.8	C30 砼	30 000	25.5	0.2
CD2-1	16.08	10	15.12	0	0.8	C30 砼	30 000	25.5	0.2
CD2-2	16.08	20	15.12	0	0.8	C30 砼	30 000	25.5	0.2
CD3-1	15.6	10	15.6	0	0.8	C30 砼	30 000	25.5	0.2
CD3-2	15.6	20	15.6	0	0.8	C30 砼	30 000	25.5	0.2

3.1 模型建立

由于基坑具有对称性,故取一半的基坑进行模拟,同时模型试验结果表明,在长桩倾角达到 20° 时,基坑的极限开挖深度有所增加。因此,模型在研究桩长分配影响规律的同时,基坑将分7次开挖,以此来探究极限开挖深度。为减小边界效应,模型横向、竖向分别取 71.8 、 50 m ;为对桩变形受力特性进行精细化模拟,桩和冠梁采用梁单元,土体采用实体单元,网格采用混合网格,且对桩与基坑周围局部加密,模型共计 $23\ 175$ 个单元,如图9所示。

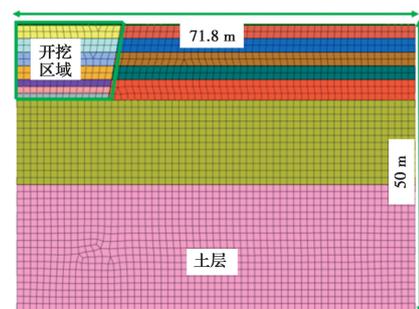


图9 土体网格划分

图9 Soil mesh generation

有限元软件 Midas-GTS 可以通过设置施工工况对基坑施工的全过程进行模拟,数值分析的工况如表 4 所示。

表 4 三维施工模拟主要计算工况表

Table 4 Main calculation conditions of 3D construction simulation

工况	施工模拟
工况 1	地应力平衡
工况 2	施工支护桩
工况 3	放坡开挖第 1 层(-2.4 m)
工况 4	放坡开挖第 2 层(-4.8 m)
工况 5	放坡开挖第 3 层(-7.2 m)
工况 6	放坡开挖第 4 层(-9.0 m)
工况 7	放坡开挖第 5 层(-10.8 m)
工况 8	放坡开挖第 6 层(-12 m)
工况 9	放坡开挖第 7 层(-13.2 m)

由于在地勘报告中,土体弹性模量 E 并未给出,故根据经验公式 $E_0 = (2 \sim 5)E_s$ 进行调整。在数值分析中不考虑地下水影响。支护桩、冠梁均采用 C30 混凝土。

表 5 土层参数

Table 5 Soil parameters

土层名称	$\gamma /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$C /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$\varphi / (^{\circ})$	E_s / MPa
杂填土	18.0	8	10	2.0
粉质黏土	18.68	24.93	9.56	5.76
中砂	19.0	0	26	14.0
砾砂	19.5	0	35	23.0
强风化砂岩	20.5	40	30	100
中风化砂岩	22	100	40	200

3.2 材料参数的确定

以南昌地区典型的上软下硬地层为基础,选用经典模型本构修正 MC 本构,土层参数如表 5 所示,

3.3 有限元模拟结果分析

3.3.1 桩身深层水平位移分析 将不同桩长分配下的桩身深层水平位移与开挖深度的变化关系绘制成图 10。

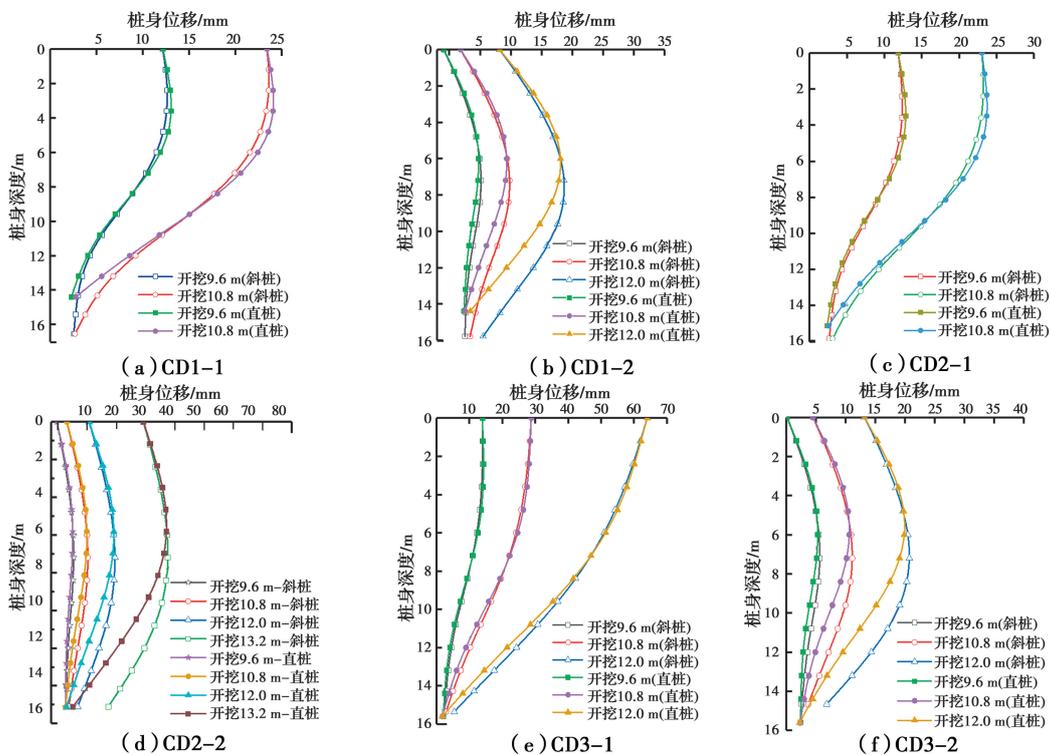


图 10 不同开挖深度时的桩身深层水平位移

Fig. 10 Deep horizontal displacement of pile with different excavation depth

由图 10 可知:

1) 在同一开挖深度下,倾角越大,桩身深层水平

位移最大值越小,说明倾角增大可以有效控制桩身深层水平位移。此结论符合模型试验研究中倾角对

冠梁侧向位移和地表沉降的影响趋势,故数值结果与模型试验可相互验证。

2) 倾角为 10°时,桩身深层水平位移曲线变化规律为从桩顶到桩底,位移逐渐减小,这是因为斜桩桩底的支点力在水平方向的分量并不大,对限制桩顶水平位移的作用相对较小。

3) 倾角为 20°时,桩身深层水平位移曲线变化趋势呈现“中间大,两头小”的规律,这是因为倾角较大时,冠梁、直桩、斜桩组成的空间超静定结构更加稳定,斜桩可以看成斜撑,将桩顶牢牢固定住。

4) 在模型试验和数值分析中,开挖至坑底时,倾角为 20°时的冠梁侧向位移与地表沉降值均未产生大幅度增长,说明被动区土体并未发生塑性变形,故得出倾角增大可以提高基坑极限开挖深度的结论。

5) 倾角不同,桩身深层水平位移曲线趋势也并不相同,CD1-2 组的桩顶侧向位移在开挖深度为 9.6 m 时为负值,即向坑外移动,且斜桩下部侧向位移皆大于直桩。这是因为倾斜越大,斜桩端部支点力水平分量越大,且斜桩下部越靠近基坑中部位置,受到坑内土体卸荷回弹的作用更大。

为了便于对比不同倾角、不同桩长分配方式的倾斜长短组合桩桩身深层水平位移曲线变化规律,以开挖深度 10.8 m 为例,将不同桩长分配下斜桩与直桩的桩身深层水平位移随倾角的变化曲线分别绘制于图 11。

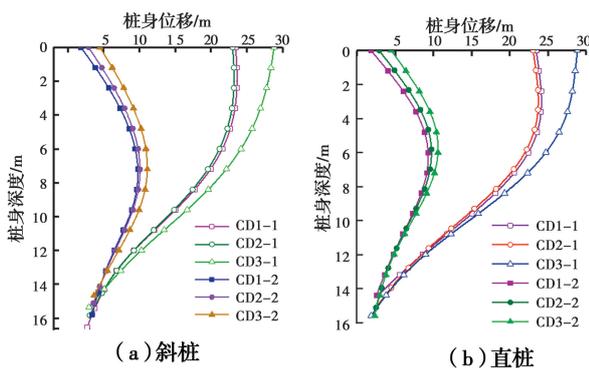


图 11 不同桩长分配时的桩身深层水平位移曲线

Fig. 11 Horizontal displacement curve of deep layer of pile with different pile length distribution

由图 11 可知:

1) 在开挖深度相同的条件下,当倾角为 10°时,不同桩长分配下斜桩、直桩的桩身位移从大到小依次为 $S_{CD3-1} > S_{CD1-1} > S_{CD2-1}$; 当倾角为 20°时,不同桩

长分配下斜桩、直桩的桩身位移从大到小依次为 $S_{CD3-2} > S_{CD2-2} > S_{CD1-2}$ 。

2) 当长短组合桩总桩长一定时,倾斜长短组合桩在控制支护结构位移方面是要明显优于等长倾斜桩的。

3) 当长短组合桩总桩长一定时,桩长分配对支护结构位移的影响与倾角有关。

3.3.2 土体与支护结构位移分析 各组在不同开挖深度下的支护结构最大侧向位移变化情况如表 6 所示。

表 6 不同开挖深度下的支护结构最大侧向位移变化情况
Table 6 Variation of maximum lateral displacement of supporting structure under different excavation depth

开挖深度/m	位移/mm					
	CD1-1	CD1-2	CD2-1	CD2-2	CD3-1	CD3-2
2.4	0.68	0.67	0.68	0.68	0.70	0.69
4.8	1.38	1.36	1.39	1.38	1.42	1.40
7.2	3.52	1.99	3.43	2.03	3.61	2.06
9.6	13.1	5.17	12.9	5.22	14.4	5.63
10.8	24.1	9.80	23.7	10.1	28.9	11.2
12		18.7		19.4	64.5	20.7
				38.5		

由表 6 可知:

1) 同等条件下,倾角在 0°~20°范围内,2 种倾斜长短组合桩支护效果各有强弱,当倾角为 10°时,在斜桩桩长增加的过程中,支护效果先增强后减弱,而当倾角为 20°时,支护效果随斜桩桩长增加而增强。由以上可知,在总桩长一定且短桩满足一定嵌入深度时,倾角存在一个临界值,当倾角小于临界值时,最佳桩长分配受倾角大小的影响,而当倾角大于临界值时,斜桩越长,支护效果越好。

2) 对于倾斜长短组合桩而言,极限开挖深度随着倾角增大而明显增加,而等长倾斜桩的极限开挖深度受桩身嵌入深度的影响更大,倾角的增加更可能导致斜桩的嵌入深度不足。

3.3.3 桩身弯矩分析 图 12 为不同开挖深度时的桩身弯矩。弯矩分析只考虑大小,不考虑正负。表 7~表 10 分别为以上 6 组在不同开挖深度下的基坑开挖面上下斜桩与直桩的最大弯矩值。

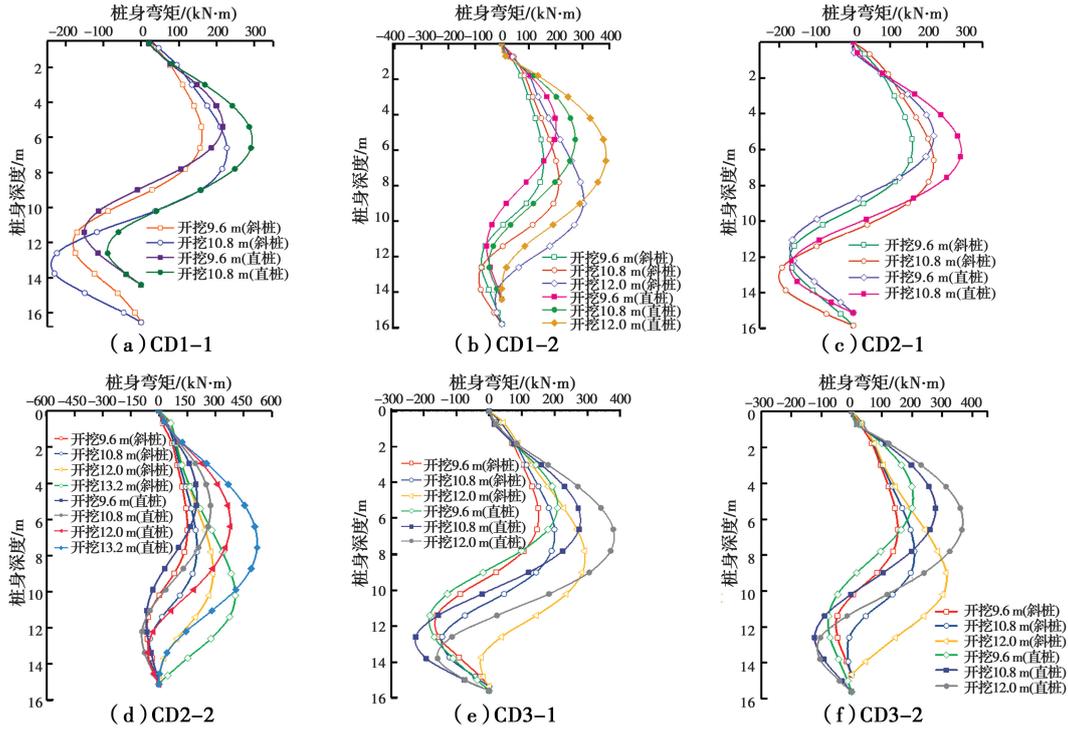


图 12 不同开挖深度时的桩身弯矩

Fig. 12 Pile bending moment at different excavation depths

表 7 斜桩在基坑开挖面以上最大弯矩值

Table 7 Maximum bending moment of inclined pile above excavation surface of foundation pit

开挖深度/m	弯矩/(kN·m)					
	CD1-1	CD1-2	CD2-1	CD2-2	CD3-1	CD3-2
9.6	160	156	159	151	149	153
10.8	228	213	218	201	199	208
12		205		288	292	313
13.2				406		

表 9 斜桩在基坑开挖面以下最大弯矩值

Table 9 Maximum bending moment of inclined pile under excavation surface of foundation pit

开挖深度/m	弯矩/(kN·m)					
	CD1-1	CD1-2	CD2-1	CD2-2	CD3-1	CD3-2
9.6	174	75	167	63	160	47
10.8	230	79	193	49	144	11
12		19		0	24	0
13.2				0		

表 8 直桩在基坑开挖面以上最大弯矩值

Table 8 Maximum bending moment of straight pile above excavation surface of foundation pit

开挖深度/m	弯矩/(kN·m)					
	CD1-1	CD1-2	CD2-1	CD2-2	CD3-1	CD3-2
9.6	217	200	218	199	209	200
10.8	291	274	291	275	278	275
12		388		379	379	365
13.2				522		

表 10 直桩在基坑开挖面以下最大弯矩值

Table 10 Maximum bending moment of straight pile under excavation surface of foundation pit

开挖深度/m	弯矩/kN·m					
	CD1-1	CD1-2	CD2-1	CD2-2	CD3-1	CD3-2
9.6	151	56	165	65	181	77
10.8	89	47	168	91	225	126
12		0.5		60	158	105
13.2						

根据桩身弯矩变化规律并由表7~表10可知:

1)在开挖面以上,随着开挖深度的增加,斜桩、直桩的最大弯矩值增加;在开挖面以下,随着开挖深度的增加,斜桩、直桩最大弯矩值先增加后减小,直至面向基坑开挖的一侧桩身由受压转为全部受拉。

2)在倾斜长短组合桩中,随着倾角的增大,斜桩、直桩的最大弯矩值呈减小的趋势;且开挖面以下变化显著。该结论与模型试验所得弯矩结论可相互验证。

3)在等长倾斜桩中,随着倾角的增大,斜桩、直桩的最大弯矩值呈减小的趋势;且开挖面以下变化显著。

图13为不同桩长分配时的桩身弯矩。

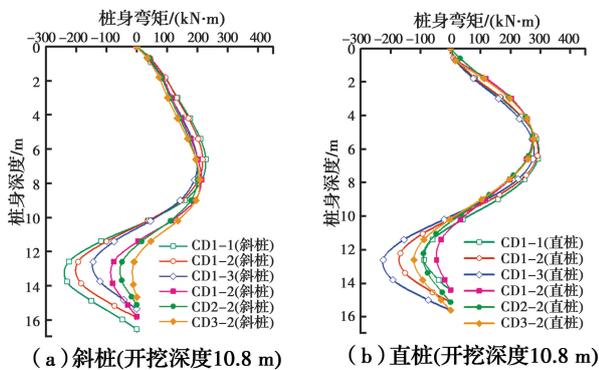


图13 不同桩长分配时的桩身弯矩

Fig. 13 Bending moment of pile body with different pile length distribution

由图13可知:

1)在总桩长一定的条件下,在开挖面以上,斜桩、直桩的桩身最大弯矩值基本相近;在开挖面以下,当倾角为 10° 时,斜桩的桩身最大弯矩值从小到大依次为 $M_{CD3-1} < M_{CD2-1} < M_{CD1-1}$;直桩的桩身最大弯矩值从小到大依次为 $M_{CD1-1} < M_{CD2-1} < M_{CD3-1}$ 。

2)当倾角为 20° 时,斜桩的桩身最大弯矩值从小到大依次为 $M_{CD3-2} < M_{CD2-2} < M_{CD1-2}$;直桩的桩身最大弯矩值从小到大依次为 $M_{CD1-2} < M_{CD2-2} < M_{CD3-2}$ 。由此可见,在开挖面以下,当总桩长一定且倾角相同时,斜桩、直桩桩长越长,桩身最大弯矩值越大。

4 结论

基于室内模型试验探究基坑开挖下倾斜长短组合桩的支护效果,并通过数值手段研究总桩长一定时,长桩与短桩的桩长比值变化对支护效果的影响。得到如下主要结论:

1)长短组合桩的支护效果与桩的倾角和桩长分配有关。

2)倾角增大,基坑抗倾覆性增强,极限开挖深度提高;在基坑开挖面以上,斜桩分担弯矩总是小于直桩,而在开挖面以下,则反之。

3)在长短组合桩中,随着倾角的增大,斜桩、直桩的最大弯矩值和最大水平位移呈减小的趋势,且主要体现在基坑开挖面以下。

4)由模型试验可知,减小部分桩长会造成长短组合桩支护效果的减弱,增大倾角会增强长短组合桩支护效果,且后者的影响大于前者。

5)在总桩长一定且短桩满足一定嵌入深度时,倾角存在一个临界值,当倾角小于临界值时,最佳桩长分配受倾角大小的影响,而当倾角大于临界值时,斜桩越长,支护效果越好。

参考文献:

- [1] 徐江, 龚维明, 张琦, 等. 大口径钢管斜桩竖向承载特性数值模拟与现场试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2434-2440, 2447.
- XU J, GONG W M, ZHANG Q, et al. Numerical simulation and field test study on vertical bearing behavior of large diameter steel of inclined piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2434-2440, 2447. (in Chinese)
- [2] CHEN Y D, DENG A, WANG A T, et al. Performance of screw-shaft pile in sand: Model test and DEM simulation [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 104: 118-130.
- [3] 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.
- KONG D S, ZHANG J, WANG S Q, et al. Experimental study on stress and deformation characteristics of cantilever inclined retaining pile for foundation pit support [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(1): 160-168. (in Chinese)
- [4] 刘涛. 倾斜桩在基坑支护中的作用机理和简化计算方法[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- LIU T. The function mechanism and simplified calculation method of inclined pile in foundation pit support [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)

- [5] HAN K, SEO M J, HONG W T, et al. End-bearing capacity of embedded piles with inclined-base plate: Laboratory model tests [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2020, 146(8): 04020063.
- [6] GOIT C S, SAITOH M, IGARASHI T, et al. Inclined single piles under vertical loadings in cohesionless soil [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(4): 1231-1245.
- [7] 孔德森, 张杰, 王士权, 等. 倾斜悬臂支护桩受力变形特性模型试验[J]. *工业建筑*, 2019, 49(3): 117-121,70.
KONG D S, ZHANG J, WANG S Q, et al. Model test on bearing and deformation characteristics of inclined cantilever pile in deep excavation support [J]. *Industrial Construction*, 2019, 49(3): 117-121,70. (in Chinese)
- [8] 郑刚, 何晓佩, 周海祚, 等. 基坑斜-直交替支护桩工作机理分析[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(Sup1): 97-100.
ZHENG G, HE X P, ZHOU H Z, et al. Working mechanism of inclined-vertical retaining piles in excavations [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(Sup1): 97-100. (in Chinese)
- [9] 孔德森, 李文胜, 常龙龙. 液化场地倾斜桩动力 $p-y$ 曲线研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2019, 39(4): 41-56.
KONG D S, LI W S, CHANG L L. Study on the dynamic $p-y$ curves of inclined pile in liquefied ground [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2019, 39(4): 41-56. (in Chinese)
- [10] MISIR G, LAMAN M. Numerical analysis of laterally loaded battered rigid piles [J]. *Teknik Dergi*, 2019, 30(5): 9507-9531
- [11] 刁钰, 苏奕铭, 郑刚. 主动式斜直交替倾斜桩支护基坑数值研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(Sup1): 161-164.
DIAO Y, SU Y M, ZHENG G. Numerical study on oblique-straight alternate piles for active support of excavations [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(Sup1): 161-164. (in Chinese)
- [12] 王耀鹏. 有桩周土侧向位移的倾斜桩竖向承载性能研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2017.
WANG Y P. Study on lateral displacement of the pile with soil pile vertical bearing capacity of the deflection of accident and reinforcement research [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2017. (in Chinese)
- [13] WANG J, ZHOU D, JI T J, et al. Horizontal dynamic stiffness and interaction factors of inclined piles [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(9): 04017075.
- [14] 周越洲, 李重阳, 李国清, 等. 软土地基倾斜桩竖向承载力研究[J/OL]. *建筑结构学报*. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0349>.
ZHOU Y Z, LI C Y, LI G Q, et al. Research on vertical bearing capacity of inclined pile in soft soil foundation [J/OL]. *Journal of Building Structures*, <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0349>. (in Chinese)
- [15] ZHOU D Q, FENG C X. Engineering characteristics and reinforcement program of inclined pre-stressed concrete pipe piles [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(9): 3907-3923.

(编辑 胡玲)