

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0456

剪力键支护体系的构想及模型试验研究

申 翊¹, 李 晓¹, 雷美清², 徐文博¹, 余秀玲¹

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中科院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 针对深大基坑支护工程中存在的问题提出了一种新型的支护形式-剪力键支护体系, 由竖直桩和斜向支撑的剪力键构成。通过模型试验, 对剪力键组和单排悬臂桩组分别量测了不同开挖深度时的桩顶水平位移及桩身内力, 同时进行了有限元的数值模拟。结果表明剪力键组的桩顶最大水平位移约为悬臂组的 1/10, 桩身最大弯矩值约为悬臂组的一半左右。剪力键支护体系具有更大的刚度, 能够有效减小桩顶位移及桩身最大弯矩, 且耗材相对较少, 支护深度较大, 占据空间较少, 不影响主体地下室施工, 可节约工期和成本, 为深大基坑的支护提供了新的型式。

关 键 词: 深大基坑; 剪力键支护体系; 单排悬臂桩; 水平位移; 桩身弯矩

中文分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 07-2574-07

Conception and model test of shear bond supporting system

SHEN Hong¹, LI Xiao¹, LEI Mei-qing², XU Wen-bo¹, YU Xiu-ling¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: In this paper, a new type of support form-shear bond supporting system, which is composed of vertical and oblique piles, is put forward for deep and large foundation pit construction. Through model test, the horizontal displacement of pile top and internal force of pile body are measured at different excavation depths for shear bond group and single row cantilever pile group, respectively. Finite element numerical simulation is carried out at the same time. The results show that the maximum horizontal displacement of the pile top in shear bond group is about 1/10 of that in cantilever group, and the maximum bending moment of the pile in shear bond group is about half of that in cantilever group. Shear bond supporting system has greater stiffness, and it can effectively reduce the displacement of pile top and the maximum bending moment of pile body. It consumes less material, is able to support deeper excavation, and occupies less space, which will not hinder the construction of the main basement. Therefore, it can save time and cost, and provide a new idea for deep foundation pit supporting.

Keywords: deep and large foundation pit; shear bond supporting system; single row cantilever pile; horizontal displacement; pile bending moment

1 引 言

目前国内城市在进行深大基坑支护时通常采用桩锚或桩+水平支撑等型式, 但往往由于周边环境条件苛刻, 很多情况下无法施打锚索^[1], 而常规大面积水平支撑的施工往往耗时过长, 影响工期。

许多学者致力于新型基坑支护型式的探索并已获得一些宝贵的经验。丁杰明等^[2]针对“上海中心大厦”的特殊地质条件和周边情况采用圆筒形无内支

撑围护结构型式, 将基坑土压力转化为环箍的轴向压力, 发挥混凝土的抗压性能, 此种型式在香港、东京等地都有应用。夏彪^[3]通过实际工程监测数据及有限元分析, 探究 h 型双排桩的变形性状, 认为在一定条件下, h 型双排桩与传统双排桩一样具有结构刚度大、侧向位移小的特点, 能够保证基坑安全且较传统双排桩而言节约了成本。李启民等^[4]通过模型试验探究新型挤扩支盘桩的性状, 与普通悬臂支护桩相比较, 在更少的嵌固深度的情况下, 可

收稿日期: 2018-03-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 11672215)。

This work was supported by the General Program of the National Natural Science Foundation of China (11672215).

第一作者简介: 申翊, 女, 1969 年生, 博士, 副教授, 主要从事基础工程、地基处理、地灾防治等方面的科研和教学。E-mail: shenhong@whut.edu.cn

通讯作者: 李晓, 男, 1993 年生, 硕士研究生, 主要从事基坑支护方面的设计和研究。E-mail: 493252591@qq.com

以大大减少桩顶位移, 减小桩身弯矩, 支护高度增加 20%~30%, 同时提出了其计算模型。徐源等^[5]在模型试验中将双排桩中的前排桩以一定角度倾斜, 对比分析了不同倾角、不同排距及前后排桩不同布置形式时双排桩的工作性状。郑刚等^[6-7]通过模型试验探究了多级支护的分离式、整体式、关联式 3 种破坏模式的特征。马邸^[8]通过研究, 系统地阐述了“圆环型支撑”的工作机制并得出解析式, 根据国内已有的理论模型及规范, 应用 VB.NET 语言编制了双排桩设计软件以满足工程设计需要^[9]。

单排悬臂桩在开挖深度较大时由于桩身内力和桩顶位移过大而不再适用, 双排桩悬臂支挡深度可达 9~10 m^[5], 当基坑开挖深度更大时也存在同样的问题。此时, 若将部分悬臂桩抽出来改为斜向桩, 与其余直立的悬臂桩通过腰梁连接, 构成剪力键支护体系, 在不影响主体地下室施工的前提下, 可期望增大支护结构的整体刚度, 减小桩顶位移和桩身内力。为此, 笔者研制了剪力键支护体系的模型, 在学校的院士基地进行了模拟基坑开挖试验, 量测了开挖过程中竖直悬臂桩及斜向桩(剪力键)的桩身内力及桩顶位移。作为对照, 也进行了单排悬臂桩的模型试验, 单排悬臂桩数量与剪力键支护体系中悬臂桩及斜向桩的数量之和相同; 同时进行了有限元的数值模拟分析。通过对比分析剪力键支护体系和单排悬臂桩支护结构中桩顶位移及桩身内力随开挖深度的变化规律, 以揭示剪力键支护体系的工作机制。

2 试验方案

2.1 试验设计

2.1.1 模型试验槽

试验首先需要搭建模型试验槽, 本文设计的试验槽用砖砌, 尺寸为 2.5 m×1.3 m×1.5 m (长×宽×高), 模型槽正面设置的观察窗采用钢化玻璃制成, 尺寸为 1 200 mm×850 mm×12 mm (长×宽×厚) (见图 1)。试验槽内壁铺设聚乙烯薄膜以减小与填土的摩擦。试验槽的尺寸考虑了直立桩的有效长度 1.2 m, 为保证试验槽长度和深度超出桩后填土可能的圆弧滑动范围以外^[10], 将试验槽长度设置为 2.5 m, 高度设为 1.5 m, 坑底铺设 20 cm 厚度垫层, 避免桩与坑底地面直接接触。

2.1.2 单排悬臂桩及剪力键支护体系

考虑到 PVC 管刚度较小, 变形明显, 试验效果更加显著, 另外 PVC 管较易剖开便于在管内壁粘贴应变片, 故选用 PVC 管作为模型桩。鉴于工程中常

用的 800 mm@1 200 mm 的钢筋混凝土灌注桩, 本文模型桩选用 50 mm×2 mm (外径×壁厚) 的 PVC 管。模型悬臂桩 17 根, 桩长为 1.3 m, 预留 10 cm 用以架设百分表, 有效桩长为 1.2 m, 桩间距为 75 cm。17 个φ50 PVC 管直通与扁钢片用螺栓固定加工成冠梁, 将 17 根悬臂桩分别插入直通固定, 形成单排悬臂桩, 如图 2 所示。



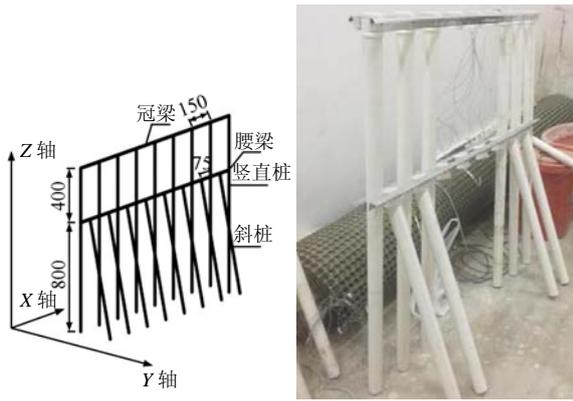
图 1 模型试验槽
Fig.1 Model box



图 2 单排悬臂桩模型
Fig.2 Single row cantilever pile model

设计的剪力键支护体系中, 直立的悬臂桩 9 根, 作为剪力键的斜向桩 8 根, 悬臂桩长度为 1.3 m, 斜向桩长度为 83 cm, 与直立的悬臂桩成 15°夹角, 其桩底与直立桩桩底平齐, 桩顶与悬臂桩通过角钢制作的腰梁相连接, 腰梁与悬臂桩间利用螺栓固定, 如图 3 所示。腰梁设置在桩底以上 80 cm 位置。

在单排悬臂桩、剪力键支护体系安装前, 先选择测试桩, 将其对半剖开, 在管内壁沿坑外侧粘贴应变片以采集桩身应变。悬臂桩试验组对称取 4 根测试桩, 剪力键试验组对称取 8 根测试桩, 其中悬臂桩 4 根, 斜向桩 4 根。应变片沿桩长布置, 间距为 10~15 cm, 贴好应变片后用专门的 PVC 管胶将桩身合拢复原, 并用透明胶绑好固定。



(a) 模型设计 (单位: mm) (b) 模型制作中

图3 剪力键模型设计及制作过程图
Fig.3 Design and production process of shear bond supporting system

2.2 其他试验材料与设备

(1) 填砂

试验约需要填砂 4.875 m³, 经颗分试验定名为细砂。通过试验得到填砂的黏聚力为 0, 内摩擦角为 35°, 重度为 18.3 kN/m³。

(2) 应变采集仪与电脑

试验采用的 TS3866 分布式静态电阻应变仪是一种高速静态应变测试系统, 测量范围: 0~±20 000×10⁻⁶, 分辨率: ±1×10⁻⁶, 准确度: ±0.3%±3×10⁻⁶, 采样速率: 1 s, 初始值记忆: ±20 000×10⁻⁶ (不平衡量)。电脑要求使用 Windows XP 系统。

(3) 百分表

量程为 50 mm, 使用磁性底座固定于桩顶处, 测头顶在冠梁部位。

(4) 聚乙烯薄膜

试验采用填砂模拟基坑土层, 在支护结构迎土侧铺设一层面积大于支护结构范围的聚乙烯薄膜, 模拟实际工程中的桩间混凝土喷面以防止桩间土掉落。

3 试验过程

3.1 模型桩的标定

试验开始前, 对 PVC 管 (模型桩) 进行标定试验。用模型桩构造一个简支梁, 采用加载的方式标定桩身应变与弯矩的数值关系, 分级加载砝码测量其应变, 得出桩身弯矩与微应变关系, 确定模型桩的弹性模量 E=3.032 GPa。

3.2 试验步骤

(1) 将支护模型按设计的位置放入试验槽内就位, 如图 4 所示。

(2) 采用简易砂雨法填砂, 每次填砂将相同质量的砂装入漏斗中, 人工移动漏斗, 落距为 30 cm, 保证每次来回移动时间相同, 确保每次填筑高度相同, 以保证密实度。在支护模型两侧均匀填砂并避免模型桩发生倾斜, 每填筑 10 cm 应停下整平砂面, 并静置一段时间后继续填筑, 确保填料的密实度一致, 直到填至桩底以上 1.2 m 位置处。

(3) 填砂完毕后在桩顶架设百分表, 将测试桩应变片导线连接应变采集仪, 应变采集仪与电脑连接, 完成后静置 2 d。

(4) 准备分级开挖, 每级开挖 10 cm, 试验槽侧壁上事先画好刻度。每级开挖完毕后刮平表面, 待其稳定后记录数据, 稳定标准为每 10 min 桩顶位移变化不超过 0.01 mm。共开挖 80 cm, 分 8 次进行, 当桩顶位移大于 40 mm 或发生基坑失稳时立即终止试验, 并对试验现象拍照。

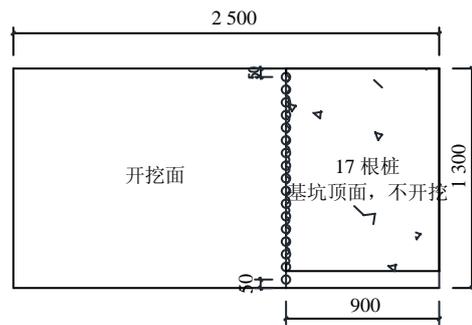


图4 桩的平面布置示意图 (单位: mm)
Fig.4 Plane layout of pile (unit: mm)

4 试验结果与分析

4.1 桩顶水平位移分析

比较悬臂桩试验组与剪力键体系试验组的桩顶水平位移与开挖深度的关系, 如图 5 所示。

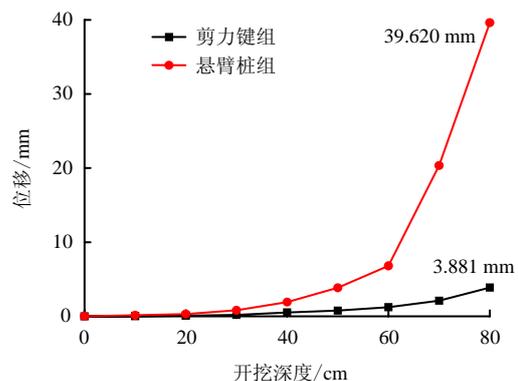


图5 桩顶水平位移与开挖深度关系
Fig.5 Displacement versus excavation depth

剪力键组的耗材约为悬臂桩试验组的 3/4。由图 5 可见: 剪力键组在桩顶水平位移方面性能明显优于悬臂桩组, 二者的桩顶最大水平位移分别为 3.881、39.620 mm, 相差近十倍。另外, 模型基坑开挖到 80 cm 时已经不满足《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-2012)^[11]规定的悬臂桩最小嵌固深度 $0.8H$ (H 为基坑开挖深度), 开挖至 60 cm 时, 悬臂桩组的桩顶位移开始急剧增大, 而剪力键组的位移增长却比较平稳。这证明剪力键体系比悬臂桩具有更大的支护深度。

剪力键支护体系与单排悬臂桩比较, 相当于部分悬臂桩转化成为斜向的剪力键, 剪力键与悬臂桩通过腰梁连接, 使整个支护体系从悬臂变为了单支点的支护结构, 剪力键与悬臂桩及两种桩之间的土体形成了刚度更大的支护体系, 增加了整体稳定性, 更好地抑制了由土压力引起的位移。试验开挖过程中, 悬臂桩组开挖 40 cm 时, 桩后填土开始出现细微裂缝, 随着开挖深度的增加, 裂缝不断扩展。而剪力键组则是在开挖到 80 cm 时, 桩后填土才开始出现细微裂缝。图 6 为开挖 70 cm 时两个试验组中桩后填土的外观对比, 悬臂桩组的桩后填土有 2~3 条明显开展的裂缝, 其中离支护桩最近 (15 cm) 的裂缝宽度最大, 而剪力键组桩后填土并无明显裂缝。



(a) 悬臂桩组



(b) 剪力键组

图 6 开挖 70 cm 时桩后填土外观对比
Fig.6 Contrast of soil appearance at the excavation of 70 cm

4.2 桩身弯矩分析

试验过程中记录桩身应变, 利用标定试验得到的刚度, 可以计算开挖过程中桩身的弯矩。

悬臂桩组桩身弯矩与开挖深度的关系如图 7 所示。由图 7 可以看出, 在悬臂桩组开挖过程中最大弯矩的位置由上往下慢慢降低, 最终开挖至 80 cm 时, 最大弯矩为 $21.09 \text{ N} \cdot \text{m}$, 出现在桩底以上 10 cm 处, 受拉侧为迎土侧。桩顶处弯矩先增大后减小, 这是由于开挖深度较小时, 靠近桩顶部分是弯矩最大处, 随着开挖深度增大, 桩顶处逐渐成为自由端, 弯矩逐渐趋近于 0。

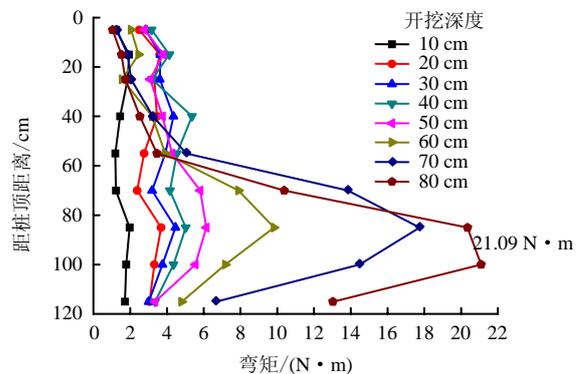


图 7 悬臂桩身弯矩与开挖深度关系
Fig.7 Relationship between bending moment of cantilever pile and depth of excavation

剪力键组桩身弯矩与开挖深度的关系如图 8 所示。对于直立桩部分 (见图 8(a)), 桩顶弯矩随着开挖深度的增大, 由负变正最后趋近于 0, 绝对值先变小后增大最后趋近于 0, 临土侧受拉、弯矩为正。虽然开挖深度不同, 但桩身弯矩分布规律相似, 分别出现两个极值, 当开挖深度到达 80 cm 时, 弯矩极值分别出现在斜桩与直立桩腰梁连接的部位 (桩底以上 80 cm) 和“基坑底”以下 5 cm 处, 分别为 $9.78 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $-13.50 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。两极值的绝对值都是随着开挖深度的增大而增大, 位置逐渐下移。

对于斜桩部分 (见图 8(b)), 桩身弯矩共有 3 个极值点, 分别在与直立桩连接部位附近处、腰梁以下 55 cm 处和 65 cm 处。当开挖深度达到 80 cm 时, 弯矩极值分别为 -6.16 、 -5.88 、 $5.50 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。就桩身弯矩分布规律而言, 斜桩的桩顶 (与直立桩用腰梁连接处) 弯矩较大, 且是坑内侧受拉, 此处弯矩绝对值随开挖深度增大而增大。弯矩最大值发生在开挖到 60 cm 时桩底以上 25 cm 处, 此处弯矩绝对值呈递增关系, 开挖到 50~60 cm 时达到峰值 $-6.54 \text{ N} \cdot \text{m}$, 之后有所下降, 整个曲线开始向右偏移, 逐渐开始在桩底以上 15 cm 处出现第 3 个特征

极值点,此时为坑外侧受拉,在开挖到80 cm时达到峰值5.50 N·m。

对比两组试验结果不难发现,悬臂桩组的最大弯矩明显大于剪力键组的直立桩或斜桩最大弯矩,其关系为 $M_{max \text{ 悬臂}} > M_{max \text{ 直}} > M_{max \text{ 斜}}$; $M_{max \text{ 悬臂}} > M_{max \text{ 直}} + M_{max \text{ 斜}}$ 。剪力键支护体系增大了支护结构的刚度,且有效地将原来作用在直立桩上的最大弯矩分解为两部份,分别施加到直立桩和斜桩上,减小了体系的最大弯矩。可见,对于同样的设计弯矩,剪力键支护体系可以用更少的耗材、配筋和更小的桩径来替代单排悬臂桩。

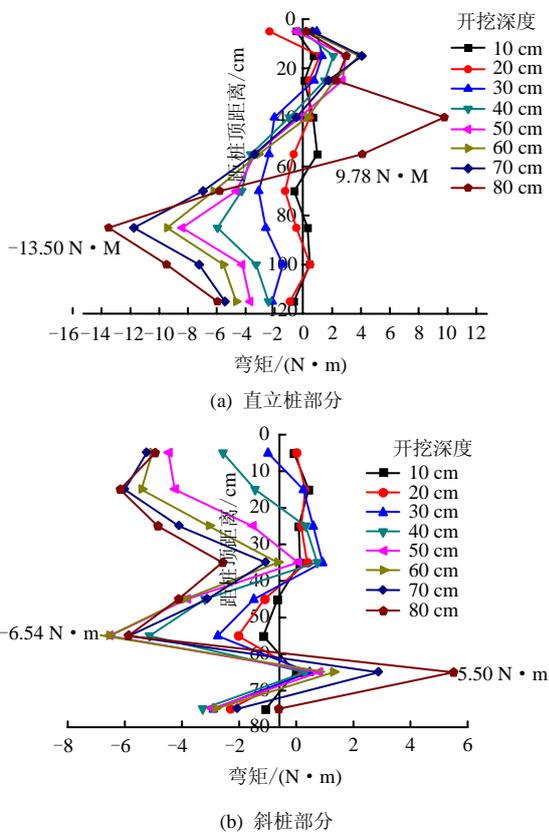


图8 剪力键体系桩身弯矩与开挖深度关系
Fig.8 Relationship between bending moment and excavation depth of shear bond supporting system

5 有限元数值模拟

本文采用Midas-GTS对试验过程进行了数值模拟,为探究剪力键支护体系的性能提供更多的依据。所选材料参数如表1所示。

建立如图9所示模型,共分悬臂桩组和剪力键组两组模型,隐去部分土层的剪力键模型如图10所示。土体使用摩尔-库仑本构模型。将模型的前后侧面和左右侧面各截面的法向位移设为0作为各边

界的约束条件,底面取零位移全约束,上表面定义为自由面,无约束。桩与梁连接的各节点按固结处理。模型开挖过程共分8次,每次开挖10 cm。

表1 材料参数
Table 1 Material parameters

名称	所用材料	弹性模量 /MPa	泊松比	重度 /(kN/m ³)	c /kPa	φ /(°)
冠(腰)梁	合金	70 000	0.25	76.9	/	/
模型桩	PVC管	3 032	0.34	14.0	/	/
试验用砂	砂	20	0.30	18.3	0	35

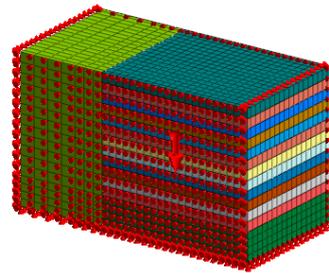


图9 整体模型图
Fig.9 Illustration of integrated model by FEM

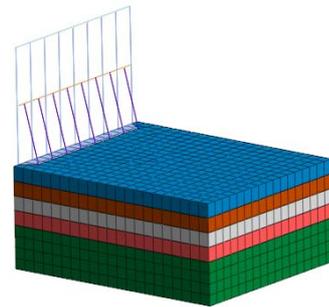


图10 剪力键模型图
Fig.10 Illustration of shear bond system model by FEM

在计算结果中提取悬臂组的位移、弯矩,如图11~12所示。提取剪力键组的位移、弯矩,如图13~15所示。

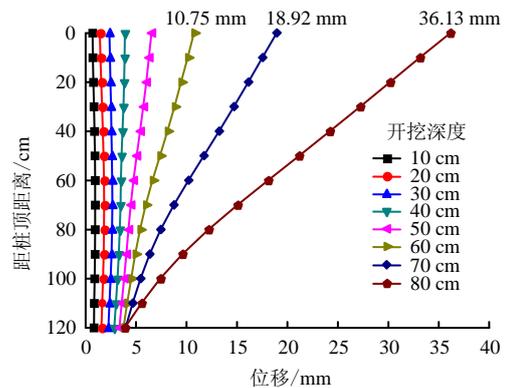


图11 悬臂桩水平位移
Fig.11 Horizontal displacement of cantilever pile

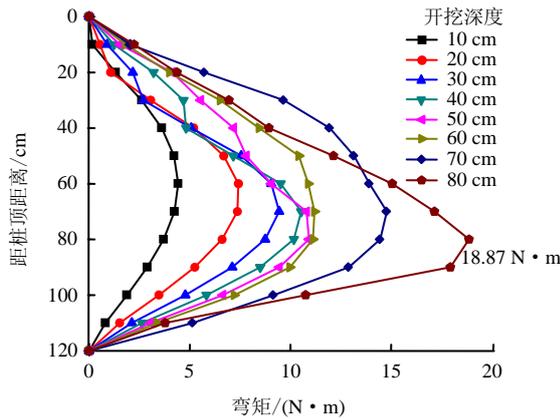


图 12 悬臂桩桩身弯矩分布

Fig.12 Bending moment distribution of cantilever pile

从图 11~12 可以看出，桩顶及桩身水平位移和桩身最大弯矩均随开挖深度的增加而增大，只是在数值上有细微差别。对于桩身弯矩，桩身的上半部分并没有像试验结果一样呈现弯矩整体数值较小且无明显增长趋势的情况，而是从桩顶开始就稳步增大的趋势。悬臂桩其它模拟结果的规律与试验结果一致，这里就不再赘述。

从图 13 的剪力键位移图可以看出，随开挖深度增大，桩顶向坑内倾斜，腰梁部位由于斜向桩的存在对直立桩的水平位移有抑制作用，腰梁以下到桩底整体呈现“弓形”，斜桩在连接处的弯矩为坑内侧受拉，这是因为前排斜桩顶住直立桩，在单支力点与土压力的作用下整体呈现绕腰梁节点部位“扭转”的趋势。

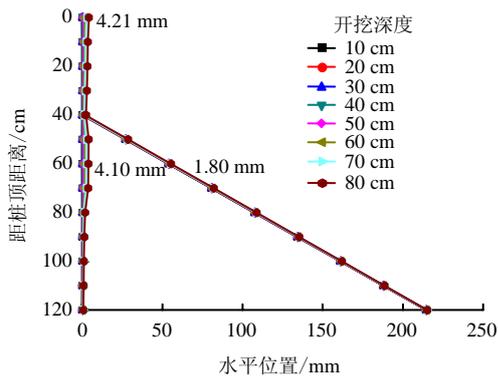


图 13 剪力键桩身水平位置变化示意图

Fig.13 Change of horizontal position of shear bond supporting system

图 14 中剪力键体系中直立桩的弯矩分布规律整体上与试验结果相同，但是反弯点的下移现象更加明显。

图 15 中呈现的剪力键斜桩的弯矩分布显然比试验结果更具规律性，弯矩由坑内侧受拉的负弯矩最大值逐渐转变为正弯矩，反弯点逐渐下移。可以

看出这种规律趋势与试验结果一致，但并未出现试验曲线中的在坑底部位斜桩弯矩会出现极小值的情况，这是由于实际开挖过程中在坑底处直立桩与斜桩发挥协同作用。试验结果表明，此处附近直立桩弯矩逐渐增大出现极大值，而斜向桩则出现极小值。以开挖 80 cm 为例，有限元模拟悬臂组与剪力键组的整体效果对比如图 16 所示，剪力键组在开挖完成后的最大弯矩绝对值、最大沉降值、最大隆起值、

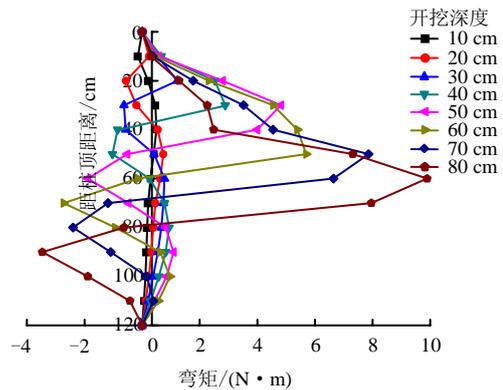


图 14 剪力键体系直立桩弯矩分布图

Fig.14 Bending moment distribution of vertical pile in shear bond supporting system

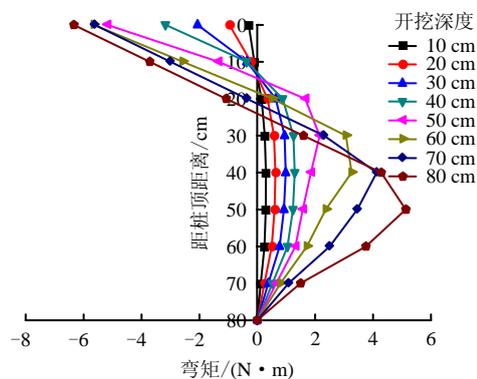


图 15 剪力键体系斜桩弯矩分布图

Fig.15 Bending moment distribution of oblique pile in shear bond supporting system

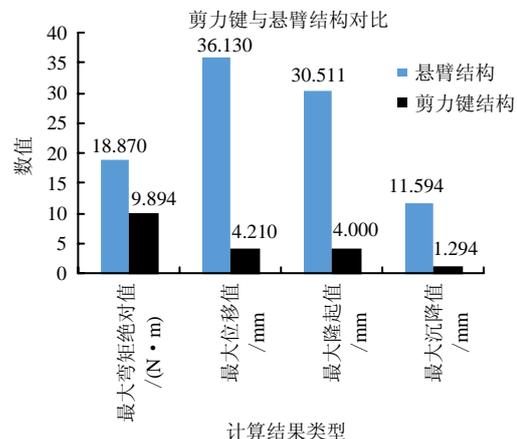


图 16 计算结果对比柱状图

Fig.16 Column graph of calculated results

最大水平位移值均远远小于悬臂组。最大弯矩值约为悬臂组的一半左右，最大位移约为悬臂组的十分之一。由此可见，在同样开挖条件下，剪力键支护体系的效果远远优于单排悬臂桩。

6 结 论

(1) 剪力键组桩顶水平位移随开挖深度的增加而增大，每层开挖后的桩顶位移均小于悬臂桩试验组，桩顶最大水平位移在开挖完毕时约为悬臂桩的1/10左右。开挖完毕后，悬臂桩组桩后填土出现明显裂缝，而剪力键组并无明显裂缝开展。

(2) 剪力键支护体系的桩身分布规律与单排悬臂桩完全不同，其斜向桩与直立桩连接处和坑底以下部位弯矩较大。剪力键组桩身最大弯矩明显小于悬臂桩组，其关系为 $M_{\max \text{ 悬臂}} > M_{\max \text{ 直}} > M_{\max \text{ 斜}}$ ； $M_{\max \text{ 悬臂}} > M_{\max \text{ 直}} + M_{\max \text{ 斜}}$ 。

(3) 剪力键支护体系的工作机制可以表述为：由于斜向桩与直立桩通过腰梁连接，原来的悬臂结构转化为单支点的支护结构，斜桩、直桩以及桩间土共同形成了刚度更大的支护体系，能够有效减小桩顶位移及桩身最大弯矩。

在实际工程中可先施工竖向支护桩，然后根据设计的平面位置和角度，通过特殊斜孔钻机钻孔至预定深度，在斜孔中安放事先预制好的剪力键构件，并立即向斜孔中灌注混凝土。待土方分层开挖至冠梁底标高时，施工冠梁，开挖至腰梁底标高时，制作钢筋混凝土腰梁将剪力键和竖向支护桩进行有效连接。剪力键支护体系运用在实际工程中，可望减少耗材，增大支护深度，减少占地，不影响主体地下室施工，节约工期和成本。

参 考 文 献

- [1] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Handbook of deep excavation engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.
- [2] 丁杰明, 巢丝, 吴宏磊, 等. 上海中心大厦绿色结构设计关键技术[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(3): 134—40.
DING Jie-min, CHAO Si, WU Hong-lei, et al. Key technology of green building in the Shanghai Tower structural design[J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(3): 134—140.
- [3] 夏彪. h型双排桩在基坑工程中的变形特性研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2016.
XIA Biao. The deformation characteristics research of h-type double-row piles in foundation engineering[D]. Hengyang: University of South China, 2016.
- [4] 李启明, 何满潮, 唐业清. 挤扩支盘支护桩试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1667—1670.
LI Qi-ming, HE Man-chao, TANG Ye-qing. Experimental study on squeezed branch piles as retaining and protecting of foundation excavation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(10): 1667—1670.
- [5] 徐源, 郑刚, 路平. 前排桩倾斜的双排桩在水平荷载下的性状研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊1): 93—98.
XU Yuan, ZHENG Gang, LU Ping. Behaviors of double-row contiguous retaining piles with raking front-row piles under horizontal loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(Suppl.1): 93—98.
- [6] 郑刚, 聂东清, 程雪松, 等. 基坑分级支护的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 784—794.
ZHENG Gang, NIE Dong-qing, CHENG Xue-song, et al. Experimental study on multi-bench retaining foundation pits[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(5): 784—794.
- [7] 郑刚, 聂东清, 刁钰, 等. 基坑多级支护破坏模式研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊1): 313—322.
ZHENG Gang, NIE Dong-qing, DIAO Yu, et al. Failure mechanism of multi-bench retained foundation pit[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(Suppl. 1): 313—322.
- [8] 马郛. 武汉长江 I 级阶地超深基坑支护结构设计参数选取与变形关系研究——以中海国际大厦超深基坑工程为例[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
MA Yun. Research on the relationship between deformation and design parameters for ultra deep foundation pit retaining structure in Wuhan Yangtze River I terrace—take ultra deep foundation pit of Zhonghai International Building as example[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.
- [9] 马郛, 魏志云, 徐光黎, 等. 基坑双排桩支护结构设计软件开发及应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 862—870.
MA Yun, WEI Zhi-yun, XU Guang-li, et al. Development of design software of double-row piles for foundation pits and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(3): 862—870.
- [10] 俞晓. 深基坑开挖与支护的模型试验与 ANSYS 分析研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
YU Xiao. Research on model test of deep excavation bracing and numerical simulation with ANSYS[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. JGJ 120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.