

文章编号: 1005-0523(2025)01-0016-10



## 劲性复合管桩支护结构水平受力变形特性研究

余少华<sup>1</sup>, 郑小晴<sup>2</sup>, 夏良利<sup>3</sup>, 方焘<sup>3</sup>, 罗如平<sup>3</sup>, 付丽<sup>3,4</sup>, 朱晓杰<sup>3</sup>

(1. 江西省交通设计研究院有限责任公司, 江西 南昌 330052; 2. 建华建材(江西)有限公司, 江西 南昌 330225; 3. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与重点实验室, 江西 南昌 330013; 4. 江西水利职业学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 为了研究劲性复合管桩(SCP桩)与传统管桩在基坑支护中的性能差异, 运用室内模型试验与有限元模拟的方法, 研究SCP桩支护结构在开挖过程中的受力变形特性, 并揭示水泥土参数对其支护效果的影响规律。研究表明: 在实验条件下, 水泥土包裹管桩的支护效果提升显著; 相较于传统管桩, SCP桩桩顶水平位移下降范围为24.7%~58.3%, 外侧土体沉降减小幅度为11.4%~44.9%, 桩身弯矩减小幅度为10.9%~24.6%。水泥土可以有效地提高管桩作为支护结构的支护能力, 并且提高水泥土的弹性模量以及增加其厚度均能显著增强劲性复合桩的支护效果, 不过, 相比之下, 增加厚度对支护效果的提升作用更为突出。

**关键词:** 劲性复合管桩; 支护结构; 室内模型试验; 支护结构与土体位移; 桩身弯矩

**中图分类号:** TU473.1; [U25]

**文献标志码:** A

**本文引用格式:** 余少华, 郑小晴, 夏良利, 等. 劲性复合管桩支护结构水平受力变形特性研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(1): 16-25.

## Research on the Horizontal Stress and Deformation Characteristics of the Strength Composite Pipe Pile Support Structure

Yu Shaohua<sup>1</sup>, Zheng Xiaoqing<sup>2</sup>, Xia Liangli<sup>3</sup>, Fang Tao<sup>3</sup>, Luo Ruping<sup>3</sup>, Fu Li<sup>3,4</sup>, Zhu Xiaojie<sup>3</sup>

(1. Jiangxi Communications Design and Research Institute Co., Ltd., Nanchang 330052, China; 2. Jianhua Building Materials (Jiangxi) Co., Ltd., Nanchang 330225, China; 3. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 4. Jiangxi Water Resources Institute, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In order to study the performance differences between the strength composite pipe pile (SCP pile) and traditional pipe piles in foundation pit support, using indoor model tests and finite element simulation methods, the stress and deformation characteristics of SCP pile support structure during excavation are studied, and the influence of cement soil parameters on its support effect is revealed. The research results indicate that under experimental conditions, the support effect of cement soil wrapped pipe piles is significantly improved; Compared to traditional pipe piles, the horizontal displacement at the top of SCP piles decreases by 24.7% to 58.3%, the settlement of the outer soil decreases by 11.4% to 44.9%, and the bending moment of the pile body decreases by 10.9% to 24.6%. Cement soil can effectively improve the support capacity of pipe piles as supporting structures, and increasing the elastic modulus of cement soil and increasing its thickness can significantly enhance the sup-

收稿日期: 2024-05-08

基金项目: 江西省交通运输厅科技项目(2022H0023)

porting effect of reinforced composite piles. However, in contrast, increasing the thickness has a more prominent effect on the supporting effect.

**Key words:** strength composite pipe pile; support structure; indoor model test; supporting structure and soil displacement; pile bending moment

**Citation format:** YU S H, ZHENG X Q, XIA L L, et al. Research on the horizontal stress and deformation characteristics of the strength composite pipe pile support structure[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(1): 16–25.

SCP桩是一种新型桩型,通过将刚性桩嵌入水泥土柔性桩中,实现了复合受力和互补增强。这种桩型融合了水泥土搅拌桩和预制混凝土桩的优点,不仅确保了高承载力,还提供了较大的摩阻力。其施工难度小,黏结力强,工作性能近似于刚性单桩,施工效率则可与钻孔灌注桩相媲美。尤为重要的是,劲性复合桩的单位承载力造价降低了35%,充分体现了其高效且经济的显著优势<sup>[1-5]</sup>。

近年来,众多学者对劲性复合桩的承载特性开展了一系列研究。在承受竖向荷载方面,Wu等<sup>[6]</sup>对2根模型桩和24根全尺寸单桩的承载性能进行对比研究,结果表明劲性复合桩竖向承载性能和灌注桩相似,是同直径水泥土搅拌桩的2.66~3.57倍。李立业<sup>[7]</sup>采用室内直剪试验探究混凝土-水泥土的界面特性,其界面剪切强度约为水泥土无侧线抗压强度的0.188倍。Jamsawang等<sup>[8]</sup>研究水泥掺量对混凝土-水泥土界面摩擦特性的影响,得到15%的水泥掺量产生了最佳的界面抗剪强度。刘汉龙等<sup>[9]</sup>通过静荷载试验,发现高喷插芯组合桩在同一截面的芯桩与水泥土的轴力比值约为其弹性模量之比,内外摩阻力比值约为外径和芯桩直径之比。Wonglert等<sup>[10]</sup>发现劲性复合桩芯桩对竖向极限承载性能的提高主要取决于芯桩尺寸、体积比和水泥土的强度。顾士坦等<sup>[11]</sup>推导出了芯桩的轴向应力及界面剪应力的数学表达式,并发现水泥土的弹性模量对应力分布范围具有显著影响。任连伟等<sup>[12]</sup>针对JPP桩的不同组合,采用多种力学模型模拟其非线性特性,并基于荷载传递法提出了简化计算方法。Wang等<sup>[13]</sup>基于剪切位移法,得到了桩基轴向应力与位移的封闭解及荷载-位移响应。

学者们在水平承载特性上也取得了一些研究成果。岳建伟等<sup>[14]</sup>指出,组合桩具有较好的水平承

载力,且这一承载力受到水泥土强度以及芯桩位置影响。黄晓亮等<sup>[15]</sup>通过对3根组合桩进行水平承载力试验,得出了组合桩的 $m$ 值与实际受力状态相符,考虑芯桩和搅拌桩的抗弯刚度 $EI$ 的代数和,可采用 $m$ 法近似计算。Wang等<sup>[16]</sup>通过试验表明复合桩水平极限承载力比钻孔灌注桩提高64.2%~68.9%,同时能够降低最大弯矩,提高桩头刚度。张孟环<sup>[17]</sup>研究劲性复合桩水平受荷变形特性的影响规律,建立了适用于不同水泥土参数水平承载力的计算公式。王安辉等<sup>[18-19]</sup>通过现场实测数据与数值模拟分析相结合的方式,发现劲性复合桩相较于管桩,在水平极限承载力上提升了40%,最大弯矩降低了20%,桩顶位移减小了30%~67%;在此基础上构建了适用于软黏土中劲性复合桩水平承载特性的 $p$ - $y$ 曲线计算方法。

上述研究已在一定程度上阐明了劲性复合桩单桩的承载机制和界面特性,然而,关于劲性复合桩排桩支护体系的承载特性分析,尤其是支挡结构的力学特性,目前仍鲜有研究报道。鉴于此,本研究采用室内模型试验与数值模拟相结合的方法,深入探究了劲性复合管桩支护结构在开挖过程中的受力与变形特性,并分析了水泥土参数对其支护效果的影响规律。通过这一研究,获得了不同水泥土条件下的支护性能参数,进一步拓展了SCP桩在支护领域的应用范围,为其在工程实践中的广泛应用提供了科学指导。

## 1 支护桩室内模型试验

### 1.1 试验概况

考虑到实验室条件及模型箱边界效应,选用了净空尺寸为2 m(长)×0.8 m(宽)×1.3 m(高)的模型箱。试验中采用的土样与徐翔<sup>[20]</sup>在先期研究中使用的砂土为同批次,具体参数见表1。水泥土制备

所用土为粉质黏土,土样参数如表2所示。试验砂土和粉质黏土颗粒级配曲线如图1所示。

表1 砂土参数  
Tab.1 Parameters of sand soil

$\varphi /(^{\circ})$	$c/\text{kPa}$	$\omega/\%$	$e$	$G_s$	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$
33.5	3.56	0.6	0.587	2.62	1.661

表2 粉质黏土物理性质指标  
Tab.2 Physical property indicators of experimental soil

$\omega/\%$	$\rho/(\text{t}/\text{m}^3)$	$\omega_p/\%$	$\omega_L/\%$
14.4	1.8	14.7	25.4

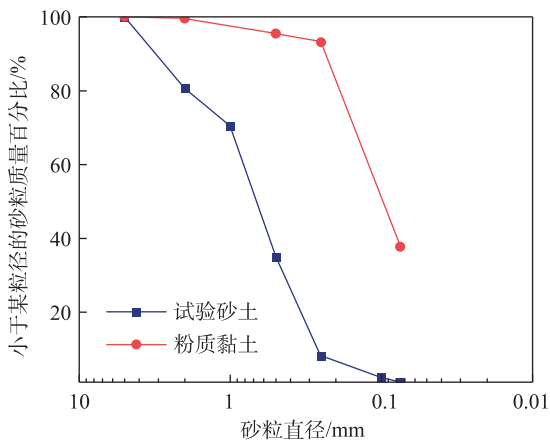


图1 试验砂土和粉质黏土颗粒级配曲线  
Fig. 1 Particle size distribution curves of experimental sand and silty clay

根据现场使用PHC I 800预应力管桩,通过几何相似比10:1对模型桩等比例缩小,选择直径为80 mm,厚10 mm有机玻璃管模拟管桩。有机玻璃

弹性模量为3.2 GPa,实际工程中预应力管桩该材料的弹性模量为30~38 GPa,符合模型试验10:1的相似比要求。根据现场取样测得水泥土弹性模量为500 MPa。设计了水泥掺量分别为5%,8%,11%,14%和18%的水泥土试块,并利用WDW-100C电子万能试验机测得试块抗压强度和弹性模量<sup>[21]</sup>,结果如图2所示。为了满足材料相似比的要求,选择了水泥掺量为8%、水灰比为1的水泥土作为试验材料。

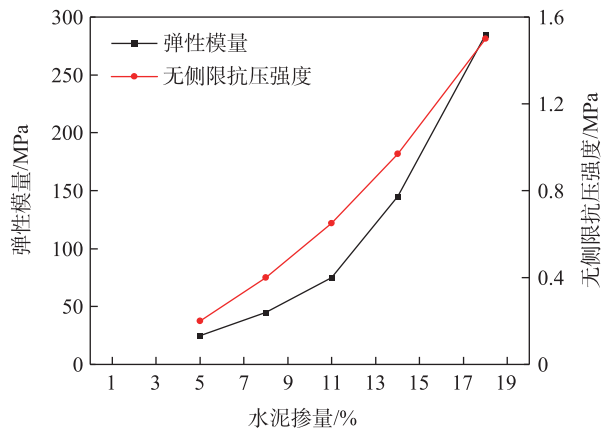
### 1.2 模型桩与测量系统

SCP桩桩径100 mm,其中桩芯直径为80 mm,壁厚为10 mm有机玻璃管(PMMA),水泥土厚度为10 mm;桩距120 mm,控制SCP桩支护结构总长为1 000 mm。管桩直径为80 mm,壁厚为10 mm有机玻璃管,控制管桩支护结构总长为1 000 mm。冠梁由3块尺寸为800 mm×100 mm×18 mm的木板组合连接而成。

图3和图4分别为桩体水平位移和地表竖向沉降的测量布置情况。在模型箱的侧面预设位置钻孔,插入钢棒和空心玻璃管。钢棒通过热熔胶紧密黏附于桩体表面,其一端延伸至模型箱外部,并与位移百分表紧密相连;另一端则套有空心玻璃管,该玻璃管虽与桩体表面有所接触但并不固定。为确保稳固,使用热熔胶填充并固定模型桩侧面的缝隙以及玻璃管。至于地表竖向沉降的测量,我们在位移百分表与地表接触的位置放置铁片,以避免在测量过程中砂土发生局部下沉,具体如图4(b)所示。



(a) 水泥土试块



(b) 不同水泥掺量下弹性模量 and 无侧限抗压强度曲线

图2 水泥土制备和强度曲线  
Fig. 2 Cement soil preparation and strength curve



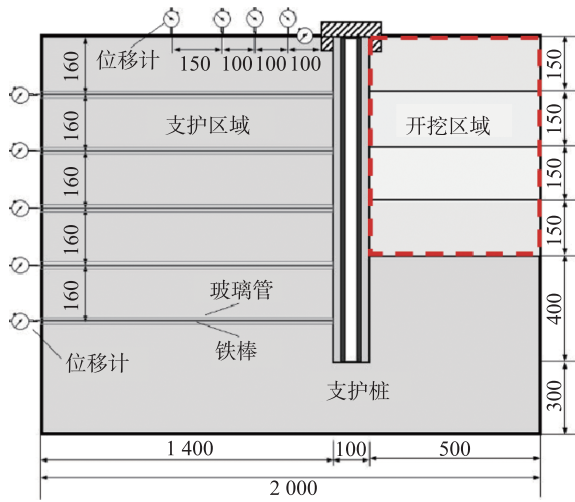


图3 基坑开挖示意图(单位:mm)

Fig. 3 Schematic diagram of foundation pit excavation(Unit: mm)

法进行填筑,放入支护桩前,在支护桩外侧粘上网格纱布,以防止试验开挖过程中砂土外漏,如图5(a)所示。分4组工况开挖,开挖深度分别为150,300,450,600 mm。每次开挖完稳定后采集数据,如图5(b)所示。



(a) SCP 桩

(b) 管桩

图5 实验过程

Fig. 5 Test process



(a) 地表沉降测点布置



(b) 位移测点细部图



(c) 水平位移测点布置

图4 位移测量系统布置图

Fig. 4 Layout diagram of displacement measurement system

### 1.3 试验过程

试验前,为了降低砂土与模型箱内壁之间的摩擦,在模型箱内壁先涂抹一层凡士林。在模型箱上标注排桩安放位置、砂土堆填高度、开挖的深度以及仪器测量的位置。在填筑过程中,采用人工砂雨

## 2 试验结果分析

### 2.1 桩体水平位移

图6为不同工况下桩身水平位移曲线。随着开挖深度的增加,桩身水平位移逐渐增大,当开挖到基坑底部,桩身位移增长速率变大,SCP桩和管桩最大水平位移分别为4.25 mm和5.81 mm。在不同工况下,SCP桩相较于管桩,在桩顶位置的水平位移减少量分别为0.07,0.33,0.65 mm和1.56 mm,减小的幅度为24.7%~58.3%。

SCP桩因水泥土的加入,其嵌固能力得到了显著提升,从而有效减小了桩身的位移。同时,水泥

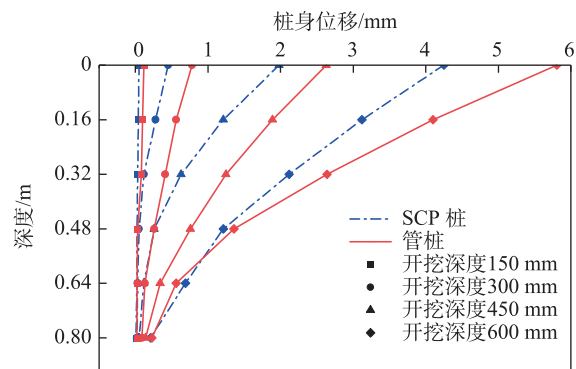


图6 不同工况下的桩身水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of pile under different working conditions



土还显著提高了极限开挖深度。然而,随着开挖深度的不断加大,水泥土对桩身位移减小的影响逐渐减弱。

## 2.2 地表竖向位移

图7为不同工况下地表沉降位移曲线。SCP桩和管桩支护结构的地表竖向位移变形曲线都表现为凹形,且在距冠梁20 cm处测得的地表沉降最大。对比SCP桩与管桩可知,地表竖向位移最大值分别为1.39, 1.89 mm, SCP桩支护结构相较于管桩支护结构的竖向位移减少了11.4%~44.9%。且两类桩的沉降增长速率, SCP桩是一直增大,管桩是先增大后减缓,说明在管桩支护结构支护下,被动区土体发生塑性变形,同时期SCP桩还未达到此情况。

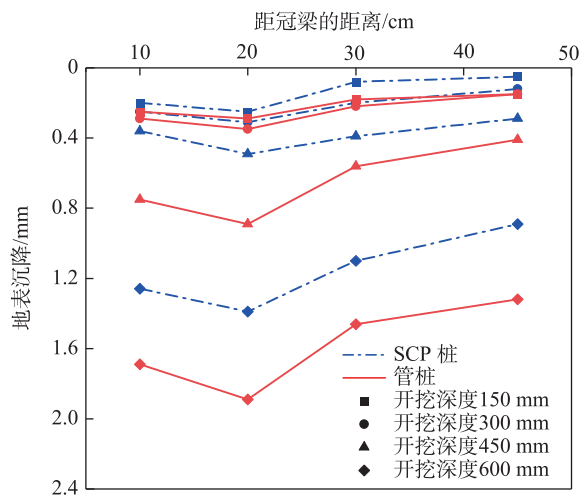


图7 不同工况下的地表沉降  
Fig. 7 Surface settlement under different working conditions

## 2.3 桩身弯矩

如图8所示, SCP桩在不同开挖深度下的最大桩身弯矩相较于管桩, 分别下降了14.5%, 10.9%, 24.6%和18.7%。随着开挖深度的递增, 桩体所承受的土侧压力也随之增大, 导致其弯矩增加。同时, 最大正弯矩点、反弯矩点以及最大负弯矩点均呈现向下移动的趋势。此外, 两种桩在不同工况下的桩身弯矩曲线均呈现出反“S”形状。

开挖至450 mm时, SCP桩和管桩的最大正弯矩和最大负弯矩分别为5.12, 6.79 N·m和-4.23, -6.02 N·m, 最大正弯矩减少24.6%, 最大负弯矩减少29.7%。开挖至600 mm时, SCP桩和管桩的最大正弯矩和最大负弯矩分别为7.23, 8.89 N·m和-4.69,

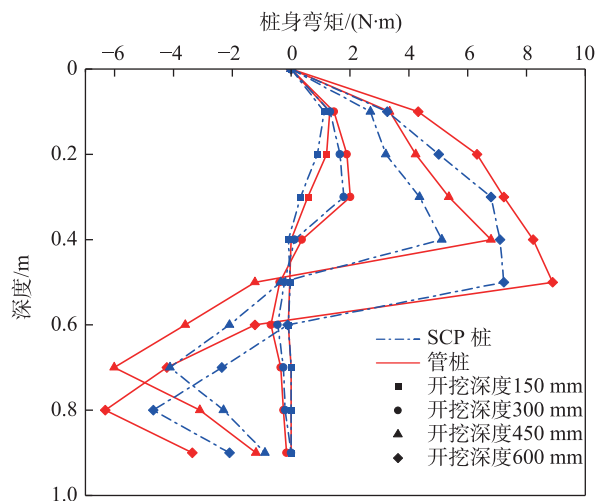


图8 不同工况下的桩身弯矩  
Fig. 8 Bending moment of pile under different working conditions

-6.32 N·m, 最大正弯矩减少18.7%, 最大负弯矩减少25.8%。

从图8中可以看出, SCP桩的支挡效果优于管桩。特别地, 当开挖至450 mm时, SCP桩的效用达到了最大值。此外, 在开挖至600 mm时, 采用复合桩(即低强度水泥土包裹管桩)的支挡效果相较于管桩提升了约20%。使用低强度水泥土包裹管桩不仅能增加管桩的桩径, 还能承担部分水平荷载, 从而提高管桩的支挡能力。水泥土与管桩共同变形, 有效减少了桩身的水平位移, 进而增强了管桩的整体支挡效果。

## 3 数值模拟研究

利用PLAXIS 3D软件, 以1:1模拟了室内模型试验, 以此验证所建模型的准确性和可靠性。随后, 通过应用相似比原理, 还原了试验原型, 并进一步拓展了研究范围, 深入探讨了SCP桩在不同水泥土参数条件下的支挡效果及其对SCP桩支护结构力学特性的影响。其中, 1号模型严格对应室内试验, 其详细设计参数参见表3。

### 3.1 模型本构与相关材料参数

为了模拟基坑周围土体的变形情况, 选择了土体硬化模型(HS)。水泥土层采用Mohr-Coulomb(MC)模型<sup>[22]</sup>本构, 管桩采用线弹性, 而冠梁选择梁单元模拟。芯桩和土体接触类型都选择Soil&Interfaces, 以充分考虑桩芯与周围土体之间的相互作用, 并计算二者之间应力传递的界面强度 $R_{inter} = 0.7$ <sup>[23]</sup>。

表3 相关材料参数  
Tab.3 Related material parameter

编号	水泥土参数				芯桩参数							
	厚度/ mm	弹性模量/ MPa	$\nu$	$\gamma /$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^3$ )	桩型	材料	弹性模量/ MPa	$\nu$	$\gamma /$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^3$ )	桩长/ m	桩径/ mm	桩间距/ mm
1	10	45	0.2	16	$\phi 80\times 10$	PMMA	3 200	0.5	11.8	1	100	160
2	0	—	0.2	16	$\phi 800\times 100$	C80	38 000	0.2	25.5	10	800	1 600
3	100	500	0.2	16	$\phi 800\times 100$	C80	38 000	0.2	25.5	10	1 000	1 600
4	200	500	0.2	16	$\phi 800\times 100$	C80	38 000	0.2	25.5	10	1 200	1 600
5	400	500	0.2	16	$\phi 800\times 100$	C80	38 000	0.2	25.5	10	1 600	1 600
6	100	750	0.2	16	$\phi 800\times 100$	C80	38 000	0.2	25.5	10	1 000	1 600
7	100	1 000	0.2	16	$\phi 800\times 100$	C80	38 000	0.2	25.5	10	1 000	1 600

注: $\phi 80\times 10$ 表示桩径为80 mm,壁厚为10 mm。

1号三维模型尺寸长宽高为2 m $\times$ 0.8 m $\times$ 1.3 m, 单层砂土,模型砂土参数取自参考文献[20],见表4。土体界限与室内试验相同,底端约束全部自由度,四

周施加法方向位移约束;冠梁弹性模量为8 GPa,泊松比为0.35。基坑分4次开挖,每次开挖深度为0.15 m,总深度为0.6 m。有限元模型如图9所示。

表4 模型试验用砂参数  
Tab.4 Parameter of sand for model test

材料	$\gamma /$ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	$E_{50}^{\text{ref}} /$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} /$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	$E_{\text{oad}}^{\text{ref}} /$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	$c / \text{kPa}$	$\varphi / (^\circ)$	$\psi$	$V_{\text{ur}}$	$m$	$K_0^{\text{NC}}$	$R_f$
砂土	17.3	30 000	90 000	30 000	3.56	33.5	5	0.2	0.5	0.43	0.9

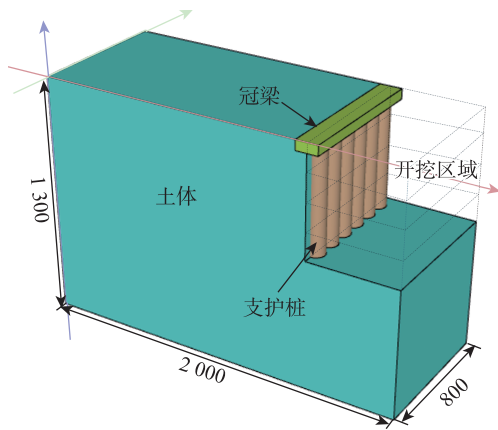


图9 有限元模型(单位:mm)  
Fig.9 Finite element model(Unit:mm)

2~7号三维模型尺寸长宽高均为20 m $\times$ 8 m $\times$ 20 m,土层参数如表5所示。土体界限与室内模型试验相同,底端约束全部自由度,四周施加法方向位移约束;冠梁采用C30混凝土。单次开挖,开挖深度为4.5 m,不考虑地下水的影响。

对土体和支护结构进行网格划分,对开挖部分、支护排桩、冠梁处进行适当的网格加密,通过软件自动生成。有限元模拟数值分析步骤如表6所示。

### 3.2 有限元模拟结果分析

#### 3.2.1 数值模型验证

将试验结果与1号数值模拟结果中关于桩身水平位移和桩身弯矩的变化关系进行了对比,并将这一对比结果绘制成了图10。

表5 南昌地区典型土层参数  
Tab.5 Typical stratigraphic parameter in Nanchang

土层参数	$H/\text{m}$	$\gamma /$ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	$P^{\text{ref}} / \text{kPa}$	$E_{50}^{\text{ref}} /$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} /$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	$E_{\text{oad}}^{\text{ref}} /$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	$c / \text{kPa}$	$\varphi / (^\circ)$	$\psi$	$V_{\text{ur}}$	$m$	$K_0^{\text{NC}}$	$R_f$
淤泥质粉质黏土	4.5	18.2	100	3 130	9 390	3 130	6.43	16.31	0	0.2	0.5	0.719	0.9
粉质黏土	4.0	19.1	100	10 500	31 500	10 500	49.62	22.62	0	0.2	0.5	0.615	0.9
细砂	5.0	15.8	100	18 000	54 000	18 000	0	30.00	0	0.2	0.5	0.500	0.9
中砂	6.5	17.9	100	18 070	54 210	18 070	0	32.00	2	0.2	0.5	0.470	0.9

表6 三维施工模拟主要计算步骤表

Tab.6 Main calculation step for 3D construction simulation

步骤	有限元模拟
1	根据模型条件建立有限元数值模型
2	激活所有土层, 施加边界条件, 地应力平衡, 获得土体初始应力
3	激活所有梁、柱单元
4	冻结第1层土体, 从Z=0到Z=-0.15 m, 开挖第1层
5	重复步骤4, 直至基坑开挖结束
6	对建立的数值模型进行计算

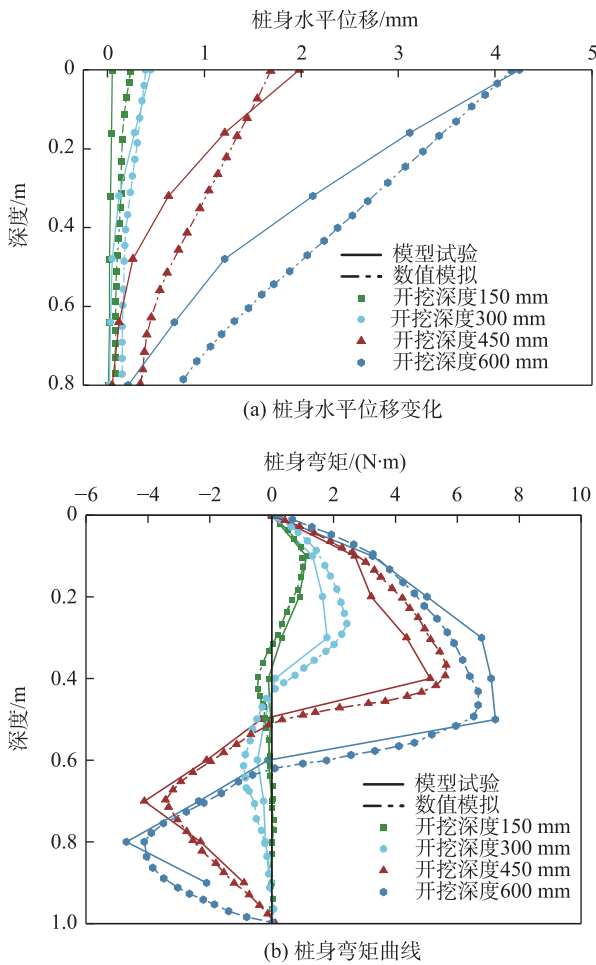


图10 桩身水平位移与弯矩曲线图

Fig. 10 Horizontal displacement and bending moment curves of pile body

从图中看出数值模拟与室内模型试验有一定的偏差, 但差距不大, 且总体的变化趋势是一致的。模拟值与试验值二者的桩身弯矩分布趋势相同, 都呈反“S”形, 随着开挖深度的增加, 最大正弯矩和最大负弯矩也随之增加, 反弯矩点的位置也随之加深。故数值结果与模型试验可相互验证。

### 3.2.2 水泥土厚度参数分析

图11展示了不同水泥土厚度配置下SCP桩支护结构的桩身位移、地表沉降及桩身弯矩的曲线图。通过观察图11中的曲线变化趋势, 可以得出以下结论: 水泥土厚度的增加, 导致支护结构侧的竖向沉降减小, 桩身水平位移也逐渐降低, 同时桩身所承受的弯矩也随之减少。桩顶水平位移分别为3.4, 3.1, 2.6, 1.7 cm, 相比于模型2, 减少幅度分别为8.82%, 23.53%, 50.00%; 支护侧位移沉降最大值分别为2.58, 2.33, 2.07, 1.71 cm, 都在距冠梁10 cm左右位置, 减小幅度分别为9.69%, 19.77%, 33.72%。水泥土可以抑制桩体的位移, 减小地表沉降, 并且厚度越大, 抑制效果越明显。桩身最大弯矩分别为334.35, 322.86, 311.26, 290.67 kN·m, 减小幅度分别为3.44%, 6.91%, 13.06%, 随着水泥土厚度增加, 桩身弯矩逐渐减小, 但水泥土厚度对管桩弯矩影响较小。当水泥土厚度在0~40 cm范围内, 随着厚度增加, SCP桩支护效果一直提升, 但由于排桩间距的因素, 水泥土厚度并不能无限制地增加。

### 3.2.3 水泥土弹性模量参数分析

图12展示了在不同水泥土弹性模量条件下, SCP桩支护结构的水平位移、土体沉降以及桩身弯矩的曲线变化。在保持水泥土厚度为10 cm不变的情况下, 可以观察到, 随着水泥土弹性模量的增加, 在相同的开挖深度下, 桩身位移、土体沉降以及弯矩均呈现出逐渐减小的趋势。特别地, 当水泥土的弹性模量从500 MPa提升至1 000 MPa时, SCP桩的各项支护性能指标均得到了显著改善。桩顶水平位移分别为3.1, 3.0, 2.8 cm, 减小幅度分别为3.22%, 9.67%; 支护侧土体沉降最大值分别为2.33, 2.23, 2.08 cm, 减小幅度分别为4.29%, 10.73%。桩身最大弯矩分别为322.86, 296.20, 289.73 kN·m, 减小幅度分别为8.26%, 10.26%。随着水泥土弹性模



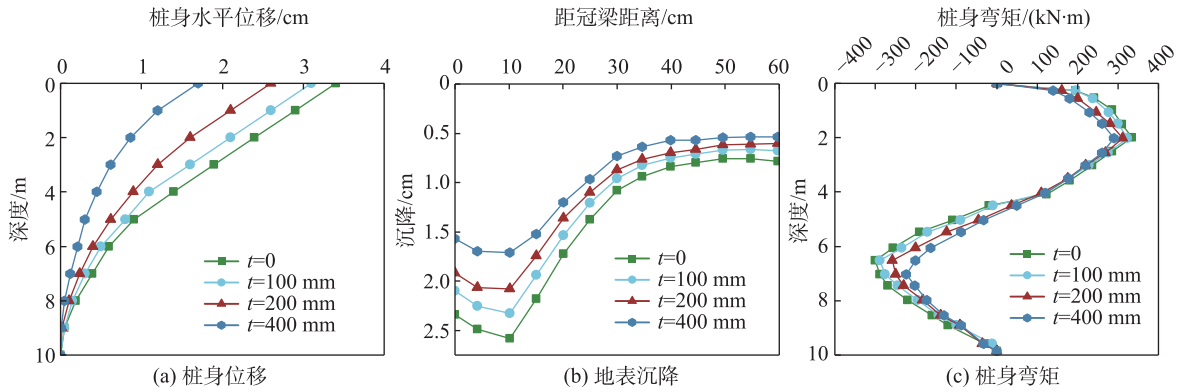


图 11 不同水泥土厚度的桩身位移、地表沉降、桩身弯矩曲线图

Fig. 11 Pile displacement, surface settlement and pile bending moment curves of different cement soil thickness

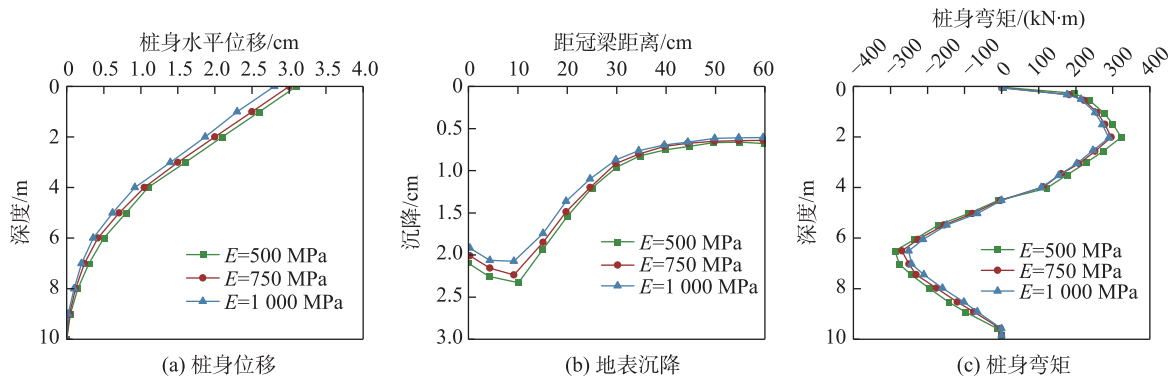


图 12 不同水泥土弹性模量的桩身位移、地表沉降、桩身弯矩曲线图

Fig. 12 Curves of pile displacement, surface settlement, and pile bending moment for different cement soil elastic moduli

量的增大,桩周水泥土能够承受更多的土压力,从而使得转移到桩身上的荷载相应减少。这一变化导致桩身位移和弯矩也随之减小。值得注意的是,桩身内力并不会随着水泥土弹性模量的增加而线性减少。实际上,随着弹性模量的提升,桩身内力的减少速率会显著降低。

#### 4 结论

基于室内模型试验和有限元软件探究在基坑开挖下劲性复合管桩与管桩的支护效果,研究水泥土参数对 SCP 桩支护性能影响规律,得到以下结论。

1) 由模型试验可知,当 SCP 支护桩开挖至桩长的 45% 时,桩顶位移和桩身最大弯矩分别减少 24.7% 和 24.6%;开挖至桩长的 60% 时,桩顶位移和桩身最大弯矩分别减少 30.6% 和 18.7%。说明包裹水泥土可以有效的提高管桩作为支护结构的支护能力,减少芯桩的变形,提高基坑的稳定性。

2) 随着水泥土厚度的增加,SCP 桩的桩身位移和弯矩逐渐减小,同时支护效果逐渐增强。而当水泥土的弹性模量增大时,SCP 桩的桩身位移和弯矩同样逐渐减小,不过其变化趋势起初表现为较为快速的减小,随后逐渐放缓。

3) 在工程实践中,提升预制桩的支护效果可以通过增加水泥土的厚度或提高其强度来实现。然而,相比之下,增加水泥土厚度所带来的效果通常优于提高水泥土强度。

#### 参考文献:

[1] DONG P, QIN R, CHEN Z Z. Bearing capacity and settlement of concrete cored DCM pile in soft ground[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, 22(1): 105-119.  
 [2] GAO X N, LIU S, DONG P. Application of concrete-cored DCM pile in soft ground treatment of highway bridgehead[C]// New Orleans: 4th International Conference on Grouting and Deep Mixing, 2012: 261-271.

- [3] 董平, 陈征宙, 秦然. 砼芯水泥土搅拌桩在软土地基中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 204-207.  
DONG P, CHEN Z Z, QIN R. Use of concrete-cored DCM pile in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 204-207.
- [4] 钱于军, 许智伟, 邓亚光, 等. 劲性复合桩的工程应用与试验分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 998-1001.  
QIAN Y J, XU Z W, DENG Y G, et al. Engineering application and test analysis of strength composite piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 998-1001.
- [5] 宋义仲, 程海涛, 卜发东, 等. 管桩水泥土复合基桩工程应用研究[J]. 施工技术, 2012, 41(5): 89-91.  
SONG Y Z, CHENG H T, BU F D, et al. Study on engineering application of composite pile made up of jet mixing cement and PHC with core concrete[J]. Construction Technology, 2012, 41(5): 89-91.
- [6] WU M, ZHAO X. Bearing behaviors of stiffened deep cement mixed pile[J]. Transactions of Tianjin University, 2006(3): 209-214.
- [7] 李立业. 劲性复合桩承载特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
LI L Y. Study on the bearing capacity of stiffened DCM pile[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [8] JAMSAWANG P, BERGADO D T, BANDARI A, et al. Investigation and simulation of behavior of stiffened deep cement mixing (SDCM) piles[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 2(3): 229-246.
- [9] 刘汉龙, 任连伟, 郑浩, 等. 高喷插芯组合桩荷载传递机制足尺模型试验研究[J]. 岩石力学, 2010, 31(5): 1395-1401.  
LIU H L, REN L W, ZHANG H, et al. Full-scale model test on load transfer mechanism for jet grouting soil-cement-pile strengthened pile[J]. Rock and Soil Mechanics 2010, 31(5): 1395-1401.
- [10] WONGLERT A, JONGPRADIST P. Impact of reinforced core on performance and failure behavior of stiffened deep cement mixing piles[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 69: 93-104.
- [11] 顾士坦, 施建勇, 王春秋, 等. 劲性搅拌桩芯桩荷载传递规律理论研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2473-2478.  
GU S T, SHI J Y, GANG C Q, et al. Theoretical study of core pile load transfer regularity of reinforced mixing pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2473-2478.
- [12] 任连伟, 刘希亮, 王光勇. 高喷插芯组合单桩荷载传递简化计算分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1279-1287.  
REN L W, LIU X G, WANG G Y. Simplified calculation and analysis of load transfer behavior for single JPP[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1279-1287.
- [13] WANG A, ZHANG D, DENG Y. A simplified approach for axial response of single precast concrete piles in cement-treated soil[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(10): 1491-1501.
- [14] 岳建伟, 凌光容. 软土地基中组合桩水平受荷作用下的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(6): 1284-1289.  
YUE J W, LING G R. Test of composite piles under lateral loading in soft ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007 (6): 1284-1289.
- [15] 黄晓亮, 岳建伟, 李连东, 等. 组合桩地基土水平抗力系数的比例系数  $m$  的计算方法[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S2): 192-196.  
HUANG X L, YUE J W, LI L D, et al. Calculation method for horizontal resistance coefficient of foundation soil with composite piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2): 192-196.
- [16] WANG L, HE B, HONG Y, et al. Field tests of the lateral monotonic and cyclic performance of jet grouting reinforced cast-in-place piles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(5): 06015001.
- [17] 张孟环. 劲性复合桩的水平承载特性及其实用计算方法[D]. 南京: 东南大学, 2019.  
ZHANG M H. The horizontal bearing capacity of the strength composite pile and its practical calculation method[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [18] 王安辉, 章定义, 刘松玉, 等. 水平荷载下劲性复合管桩的承载特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47 (4): 853-861.  
WANG A H, ZHANG D W, LIU S Y, et al. Bearing capacity behavior of strength composite pipe pile subjected to lateral loading[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47 (4): 853-861.
- [19] 王安辉, 章定义, 谢京臣. 软黏土中劲性复合桩水平承载特性  $p$ - $y$  曲线研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 381-389.  
WANG A H, ZHANG D W, XIE J C.  $p$ - $y$  curves for lateral

bearing behavior of strength composite piles in soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42 (2): 381-389.

- [20] 徐翔. 不同密实度下有限土体支护桩变形特性试验研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.

XU X. Experimental study on the influence of soil density on the supporting pile of limited soil foundation pit [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021.

- [21] 黄鹤, 张俐, 杨晓强, 等. 水泥土材料力学性能的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2000(6): 705-709.

HUANG H, ZHANG L, YANG X Q, et al. Experimental study of mechanical properties of cemented-soil[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2000 (6): 705-709.

- [22] 王安辉. 软弱地层中劲芯复合桩的水平承载性状与抗震性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.

WANG A H. Lateral bearing behavior and seismic resistance of strength composite piles in soft soils[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.

- [23] 付丽. 劲性复合管桩支护结构力学特性研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2023.

FU L. Study on mechanical properties of rigid composite

pipe pile supporting structure[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2023.



第一作者: 余少华(1975—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为道路工程, 桥梁工程。E-mail: 59813387@qq.com。



通信作者: 方焘(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为深基坑工程, 地下空间及隧道工程, 路基工程。E-mail: 378766675@qq.com。

(责任编辑: 吴海燕)