

文章编号: 1007-2993(2026)03-0358-08

钻孔灌注复合桩的受力性能研究

蒋功成 王红军

(中信建筑设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430014)

【摘要】 劲性复合桩因具有施工便捷和承载力高的优势, 在土木工程领域得到了广泛应用。然而, 对于土中存在孤石或岩层较浅的复杂地质区域, 会存在预先搅拌困难, 沉桩振动和噪声较大等缺点。本文结合某实际工程, 提出了预先钻孔灌注细石混凝土并植入预应力混凝土实心方桩的旋挖植桩技术, 解决了预制桩不能进入中等风化等硬质岩层的难题, 通过现场载荷试验验证了该钻孔灌注复合桩技术的可靠性和实用性, 并采用 ABAQUS 有限元软件对钻孔灌注复合桩的荷载传递规律及承载性能进行了分析。结果表明: 预先钻孔灌注细石混凝土可使预制桩端进入硬质岩层, 能有效降低预制桩的沉降, 提高预制桩的承载能力; 预应力混凝土实心芯桩-细石混凝土接触面能有效传递上部荷载, 在加载过程中表现出了良好的稳定性及可靠性; 钻孔灌注复合桩在施工过程中对桩周土产生挤密作用, 使桩的侧摩阻力得到强化。

【关键词】 钻孔灌注复合桩; 载荷试验; 旋挖植桩; 有限元分析

【中图分类号】 TU473.1

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2024-0571

Load-bearing performance of composite bored piles

JIANG Gongcheng WANG Hongjun

(CITIC General Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430014, Hubei, China)

【Abstract】 Strength composite piles have been widely used in the field of civil engineering due to their advantages of convenient construction and high bearing capacity. However, in complex geological areas with boulders in the soil and relatively shallow rock strata, there are disadvantages such as difficulty in pre-mixing and relatively large noise and vibration during pile driving. This paper, combined with an actual project, puts forward a rotary drilling and pile-implanting technique of pouring fine stone concrete after drilling and implanting precast prestressed concrete solid square piles (composite bored piles), which solves the problem that precast piles cannot enter moderately weathered rock strata. Through on-site load tests, the reliability and practicability of this drilled and poured composite pile have been verified. The load transfer law and bearing capacity of the composite bored piles were analyzed using ABAQUS finite element software. The results showed that pour fine concrete after drilling can effectively reduce the settlement of pre-fabricated piles and improve their bearing capacity; The interface between the prestressed concrete solid core pile and the fine aggregate concrete can effectively transfer the upper load, demonstrating excellent stability and reliability during the loading process. The bored grouted composite pile effectively induces compaction of the surrounding soil during construction, and under the action of the upper load, the lateral friction resistance along the pile shaft can be significantly enhanced.

【Key words】 composite bored pile; load test; rotary bored piling; finite element analysis

0 引言

我国南方部分地区地层结构中软土与基岩(砂岩、泥岩、灰岩等)复合地层分布较为广泛, 传统的钻孔灌注桩在施工过程中易出现孔壁坍塌、断桩、施工周期长等一系列问题, 预制管桩在成桩过程中, 也难以进入中等风化—微风化岩层。在软土地区, 以劲性复合桩为代表的组合式工艺应用逐渐增多, 此类桩以水泥土作为外芯, 由高强度芯桩传递荷载, 通过搅拌

植桩工艺成桩, 施工过程不易塌孔, 承载力较高, 并且造价低廉, 在节省施工工期的同时能有效保护环境, 具有较好的经济效益^[1-6]。在软土夹孤石以及浅岩地区, 常规劲性复合桩适应性差, 为适应此类地层条件, 劲性复合桩可采用旋挖植桩工艺。

旋挖植桩法采用旋挖钻机成孔, 灌入水泥砂浆或混凝土填补空隙, 在水泥砂浆或混凝土凝固前植入预制桩成桩, 达到提高管桩侧阻力及端阻力的效果。

而水泥土复合桩大多采用搅拌植桩法,应用于深厚淤泥、淤泥质土地层,对于土中存在孤石、岩层较浅的岩土复杂地质区域,旋挖植桩法施工管桩相比传统灌注桩、静压管桩及水泥土复合桩更具优势。近年来,国内专家学者对以旋挖植桩法施工的复合桩进行了大量的工程实践和试验研究。韦超俊^[7]对旋挖复合管桩进行了载荷试验,结果表明旋挖复合管桩能有效发挥管桩的材料强度,沉降更少,造价更低,而且成桩质量更好。陈怀智等^[8]通过试验与研究发现,旋挖植桩法施工的管桩在铁路桩基应用中具有较好的竖向、水平承载能力,并具有一定经济性。万鸿志等^[9]在沿海孤石多发地区对旋挖植入桩进行了现场试验,并与锤击管桩进行了对比,结果表明旋挖植入桩单桩承载力更大,沉降变形更小。

上述学者针对采用旋挖植桩法施工的复合桩开展了广泛而深入的研究,取得了诸多具有重要意义的研究成果。但总体而言,现有研究多聚焦于其宏观应用效果与施工工艺,对桩-土体系内在作用机理的探讨仍相对不足。本文以湖北某商业住宅项目为工程背景,采用旋挖植桩工艺对钻孔灌注复合桩进行了现场施工试验,并基于试验数据及工程应用资料,建立相应的有限元数值模型进行数值模拟分析,研究旋挖植桩法劲性复合桩的荷载传递机理和承载特性。

1 工程概况

该项目为住宅类项目,由4栋26层住宅楼和1~2层商业裙房组成,住宅为剪力墙结构,商业裙房为框架结构,共设一层地下室,地基基础设计等级为乙级。根据该项目工程结构荷载及场地岩土工程条件,塔楼及商业裙楼均采用桩基础。

根据项目勘察报告,场地地势较为平缓,钻孔深度范围内自上而下依次分布有素填土、粉质黏土、强

风化—中等风化砂岩,各土层连续性及其厚度均有变化,场地类型为II类场地。以某栋住宅楼为例,基础底面绝对标高18.800 m,典型剖面图如图1所示。基底自上而下分布有粉质黏土、砂岩层。岩土主要物理学指标如表1所示。

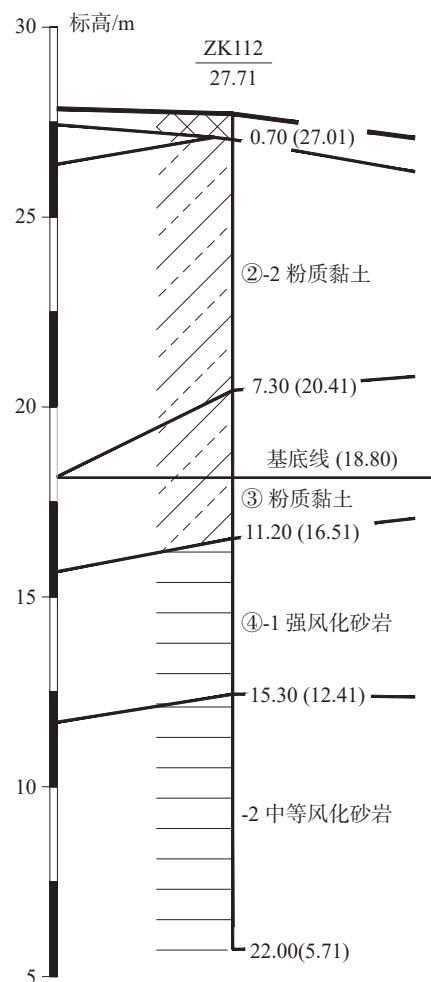


图1 典型剖面图

Fig. 1 Typical cross-section

表1 岩土层主要物理力学参数

Tab. 1 Soil parameters

土层名称	厚度/m	承载力 f_{ak} /kPa	压缩模量 E_s /MPa	压缩系数 a_{1-2} /MPa ⁻¹	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ (°)
②-2粉质黏土	0~4.9	120	6	0.33	26.6	12.2
③粉质黏土	0~2.3	200	10	0.17	42	16.9
④-1强风化砂岩	3.6~8.6	500	46	0.15	50	28
④-2中等风化砂岩	未揭穿	1800				

该项目地基岩土种类较多,工程性质较差,基岩风化层岩面在项目范围内起伏变化较大,且部分区域岩层较浅,若采用传统钻孔灌注桩方案,沉桩噪声较大,同时工程造价较高,若采用预制桩方案,桩身易存在断裂风险,对桩的承载力产生不利影响^[10]。并且,

依据湖北省地方标准《建筑地基基础技术规范》(DB 42/242—2014)^[11],预制桩不应利用中等、微风化硬质岩作为桩端持力层。另外,相比于水泥砂浆等其他外包体材料,细石混凝土的抗裂性和耐久性更好。因此,该项目最终采用旋挖植桩的方法,预旋挖引孔后浇筑

细石混凝土,然后再施工预制方桩,解决了预制桩不能进入中等风化岩层的难题,且桩基承载力及变形均能满足设计要求。

2 钻孔灌注复合桩单桩承载力计算

该项目采用钻孔灌注复合桩桩型,该复合桩设计桩长 8 m,以④-2 中等风化砂岩层作为钻孔灌注复合桩持力层,桩端进入持力层深度不小于 1 m,钻孔直径 700 mm,灌注 C25 细石混凝土,内芯为边长 450 mm 的预应力混凝土实心方桩(桩型为《预制混凝土方桩》(20G361)中的 YZH-450A),设计单桩承载力特征值为 2800 kN。钻孔灌注复合桩大样如图 2 所示。

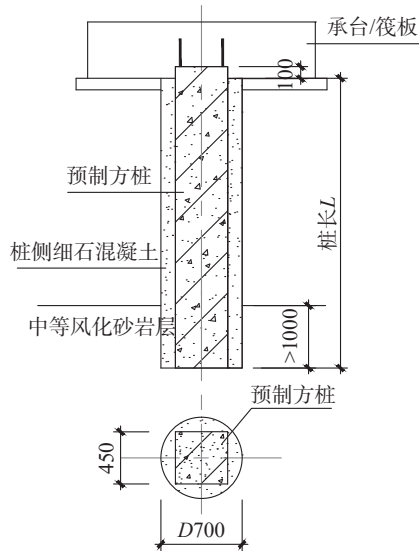


图 2 钻孔灌注复合桩构造(单位:mm)

Fig. 2 Construction of composite bored pile (Unit: mm)

钻孔灌注复合桩外芯为 C25 细石混凝土,其物理力学参数远高于桩周土体,计算时暂不考虑芯桩-细石混凝土外芯接触面破坏^[12],假定桩侧破坏面位于细石混凝土外芯与桩周土接触面。根据《建筑地基基础技术规范》(DB 42/242—2014)^[11]规定,单桩竖向承载力特征值可按式(1)估算:

$$R_a = u_p \sum q_{sia} l_i + q_{pa} A_p \quad (1)$$

式中: u_p 为桩身截面周长,钻孔灌注复合桩外芯为振捣密实的细石混凝土,桩身周长可按外护壁周长取值; q_{sia} 为桩侧第 i 层土的侧阻力特征值; l_i 为桩侧第 i 层土的厚度; q_{pa} 为桩端阻力特征值; A_p 为桩端横截面积。

该项目钻孔灌注复合桩单桩竖向承载力由复合桩桩周土侧阻力及嵌岩段总阻力组成,根据湖北省地方标准《预制芯桩复合桩技术规程》(DB 42/T 2221—2024)规定,单桩竖向抗压承载力特征值可按

式(2)估算^[13]:

$$R_a = u \sum q_{sia} l_i + 0.5 \zeta_r f_{rk} A_p^c \quad (2)$$

式中: u 为复合桩周长,桩身周长可按外护壁周长取值; q_{sia} 为桩侧第 i 层土的侧阻力特征值; l_i 为桩侧第 i 层土的厚度; ζ_r 为桩嵌岩段侧阻和端阻综合系数,按 1.71 取值; f_{rk} 为岩石饱和单轴抗压强度标准值,根据项目勘察报告,取 8.4 MPa; A_p^c 为复合桩芯桩截面积。

以试桩 ZH1 为例,试桩 ZH1 桩长为 8 m,地层条件如图 1 所示,桩基设计计算相关参数见表 2。将相关参数代入式(2)可得,钻孔灌注复合桩单桩竖向承载力特征值计算值为 2921 kN。若按直径 700 mm 钻孔灌注桩代入式(1)计算,单桩承载力特征值计算值约为 2429 kN。钻孔灌注复合桩承载力理论值高于钻孔灌注桩承载力理论值约 20.2%,钻孔灌注复合桩较 450 mm 预制方桩单位摩阻力提高约 22.1%(因项目勘察报告中未给出预制桩桩基设计参数,因此计算的预制方桩单位摩阻力仅为估算)。综上,钻孔灌注复合桩理论计算值更大。

表 2 基桩设计参数

Tab. 2 Design parameters of pile foundation

土层名称	厚度/m	侧阻力特征值 q_{sik} /kPa	端阻力特征值 q_{pk} /kPa
②-2粉质黏土	0~4.9	30	
③粉质黏土	0~2.3	43	
④-1强风化砂岩	3.6~8.6	80	
④-2中等风化砂岩	未揭穿	150	2500

3 钻孔灌注复合桩工程试验

3.1 施工情况

该项目一标段共布置 3 根试桩,试桩均为坑底检测,试桩桩长约 8~9.5 m,设计单桩竖向抗压承载力特征值 2800 kN。复合桩采用旋挖钻机进行旋挖成孔,在钻孔前进行钢护筒埋设,旋挖过程中采用泥浆护壁,防止孔壁坍塌。在钻孔过程中,无孔壁坍塌等现象发生,旋挖结束后,取出砂岩岩芯,并对孔底进行清渣处理。成孔完成后,在 700 mm 直径桩孔内采用导管灌入 C25 细石混凝土,为避免灌入细石混凝土过量或不足,经计算,混凝土浇捣量约为 0.52 倍的桩长,其中,混凝土坍落度按 180~220 mm 控制。待外芯混凝土灌注完毕后,采用静压沉桩对预制方桩进行沉桩,以压桩力为主,设计桩长为辅进行双控沉桩,待压桩力荷载稳定后停止。整个项目桩基施工过

程中,施工产生的噪声均较小,无断桩存在,旋挖植桩法施工也大大缩短了施工工期。

3.2 静载试验结果

此工程试桩静载试验依据我国现行标准《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[14]进行,试桩的沉降变形通过桩头位移传感器测量,分级荷载为预估极限承载力的 1/10,最大试验荷载为 5600 kN,单桩竖向抗压承载力静载检测结果汇总情况如表 3 所示,

荷载-位移曲线如图 3 所示。由图 3、表 3 可知,复合桩单桩承载力特征值检验结果均 ≥ 2800 kN,且在极限荷载作用下沉降较小。复合桩相较于静压管桩,能减少挤土效应,更有效地控制桩身沉降,充分发挥管桩材料强度;与钻孔灌注桩相比,因素混凝土外芯的存在,在成桩过程中可提高周围土体的有效应力和侧壁阻力,使单桩承载力能达到预期目标。

表 3 桩基检测结果

Tab. 3 Test results of pile foundation

序号	桩号	最大试验荷载/kN	对应沉降/mm	残余沉降/mm	极限承载力/kN	承载力特征值/kN	对应沉降/mm
1	ZH1	5600	15.24	12.63	≥ 5600	2800	3.69
2	ZH2	5600	20.51	18.26	≥ 5600	2800	5.63
3	ZH3	5600	17.19	15.03	≥ 5600	2800	4.82

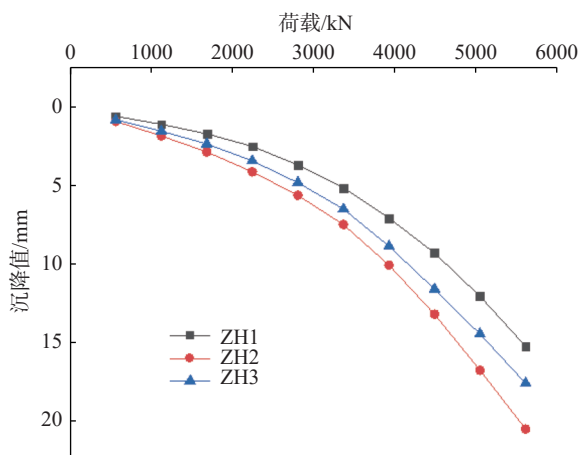


图 3 荷载-位移曲线图

Fig. 3 Load-displacement curve

4 钻孔灌注复合桩有限元分析

4.1 有限元模型

根据钻孔灌注复合桩工程桩 ZH1 尺寸及地质参数,使用 ABAQUS 有限元分析软件建立钻孔灌注复合桩的有限元模型,对其力学行为进行模拟分析,并通过试桩检测结果进行验证。为尽量减少边界效应,土体水平方向长度取 20 倍桩身直径,深度方向取 2 倍设计桩长^[15],模型及网格划分如图 4 所示。其中,桩内芯、混凝土外芯及桩周土均采用三维实体单元建模,桩为线弹性体,细石混凝土外芯及桩周土均为弹塑性材料,其中,细石混凝土外芯采用损伤塑性模型^[16-17]定义混凝土的材料属性,应力-应变曲线见图 5;桩周土选用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型。预应力混凝土实心方桩内芯混凝土强度等级为 C60,弹性模量取 36 GPa,泊松比取为 0.15。根据施工现

场检测结果,桩周混凝土外芯强度等级为 C25,弹性模量取为 28 GPa,泊松比取为 0.2。土体参数按地勘报告的土质参数取值。其中,考虑地勘取样对土体的扰动影响^[18-19],土体的弹性模量 E 按式(3)计算取值。

$$E = kE_s \quad (3)$$

式中: E_s 为各土层压缩模量; k 为比例常数,各土层均按 3 取值。

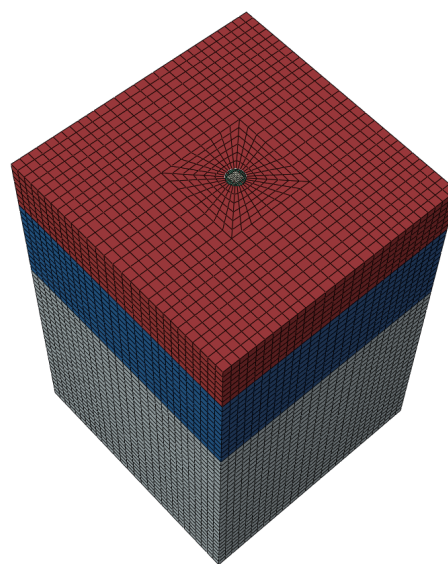


图 4 ABAQUS 模型及网格划分

Fig. 4 ABAQUS model and mesh generation

钻孔灌注复合桩数值模型为三介质两界面模型,三介质即芯桩、细石混凝土外芯以及桩周土三种材料,两界面指芯桩-细石混凝土外芯、细石混凝土外芯-桩周土两个接触面。为了更好地模拟芯桩-细石混凝土外芯-桩周土的荷载传递规律,芯桩-细石混

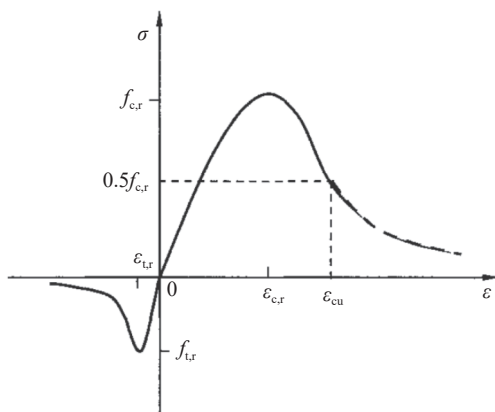


图5 混凝土单轴应力-应变关系曲线

Fig. 5 Uniaxial stress-strain relationship curve of concrete

混凝土外芯界面采用黏聚力-摩擦混合接触的方式, 细石混凝土外芯-桩周土界面采用黏聚力模型^[20]进行模拟。土体模型底部固定, 顶部为自由边界, 四周施加水平方向约束。为保证有限元分析的收敛性和精确性, 在局部及节点处进行网格细化, 并采用位移加载的方式进行分级加载。同时, 建立 450 mm 边长的预应力混凝土实心方桩模型(对比模型 1)及外芯为水泥砂浆的钻孔灌注复合桩模型(对比模型 2), 进行对比分析。其中, 水泥砂浆选用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型, 弹性模量取 20 GPa, 泊松比取为 0.25。

4.2 有限元计算结果分析

(1) 荷载位移曲线

在 ABAQUS 后处理中, 提取桩端加载处在各荷载步中的荷载、位移数据, 可得到基桩的荷载-位移曲线。钻孔灌注复合桩模型、对比模型及试桩静载试验荷载-位移曲线对比情况如图 6 所示。由图 6 可以看出, 三者的荷载-位移曲线较为接近。对比钻孔灌注桩数值模型及 ZH1 现场静载试验数据可知, 在同一荷载水平下, 数值模拟的沉降比现场荷载试验略大, 可能是因为现场荷载试验在复合桩植桩过程中, 外芯素混凝土对桩周土体有挤压密实作用, 间接增大了外芯混凝土与桩周土的侧摩阻力。以 2800 kN 荷载作用下的沉降值为例, 复合桩数值模拟沉降值为 4.25 mm, 对比模型 1 数值模拟沉降值为 6.67 mm, 对比模型 2 数值模拟沉降值为 4.51 mm, 复合桩沉降量约为对比模型 1 沉降量的 63.7%, 与对比模型 2 沉降值较为接近。以 5600 kN 荷载作用下的沉降值为例, 复合桩数值模拟沉降值为 18.76 mm, 对比模型 1 数值模拟沉降值为 31.87 mm, 对比模型 2 数值模拟沉降值为 21.36 mm, 复合桩沉降量约为预制方桩沉降量的 58.9%, 约为对比模型 2 沉降量的 88%。由此可知, 旋挖植桩法使预制方桩内芯与桩周土的接触面增

大, 从而提高了单桩的侧摩阻力。在同等荷载作用下, 旋挖灌注复合桩沉降变形更小。模型显示, 在极限荷载作用下, 细石混凝土外芯塑性变形较水泥砂浆外芯小, 且沉降值更小。

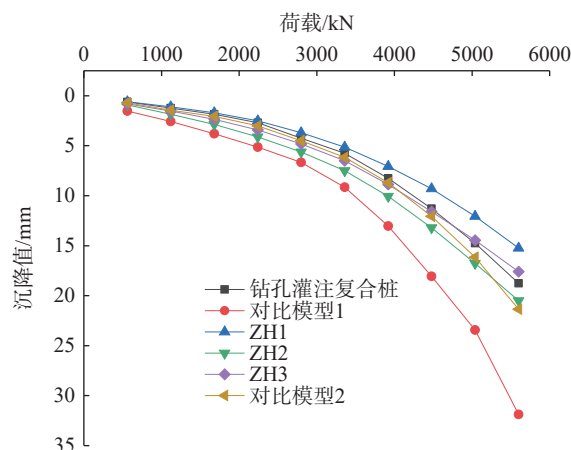


图6 荷载-位移曲线图

Fig. 6 Load-displacement curve

(2) 桩身承载力分析

在 ABAQUS 后处理中, 提取桩身在不同荷载作用下基桩轴力数据, 可得到基桩轴力分布曲线。预应力混凝土实心方桩内芯、细石混凝土外芯以及钻孔灌注复合桩的轴力分布曲线如图 7—图 9 所示。

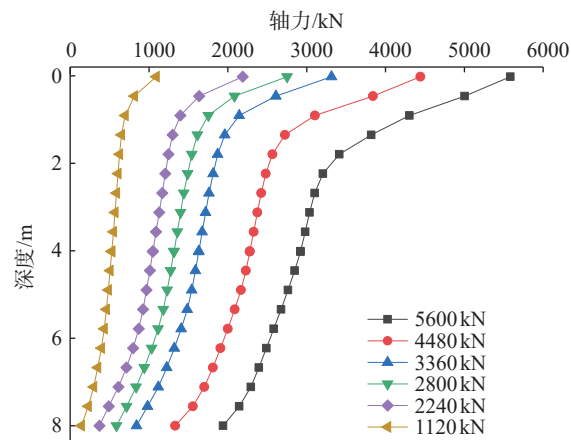


图7 芯桩轴力分布曲线

Fig. 7 Axial force distribution of core pile

由数值模拟结果可知, 不同荷载下芯桩、细石混凝土外芯及钻孔灌注复合桩轴力变化趋势基本一致。由图 7 可知, 整体表现为桩身上部轴力衰减较快, 而后趋于稳定, 桩身通过侧摩阻力将部分荷载传递给混凝土外芯, 而后传递给桩周土体, 使得桩身下部所受有效荷载逐渐降低。因芯桩为线弹性体, 因此芯桩轴向应变趋势与图 7 中曲线变化趋势一致。由图 8 可知, 细石混凝土外芯上部轴力增长较快, 轴力因芯桩与细石混凝土接触迅速传递, 而后因不同土层侧摩阻

力的影响而逐渐降低。由图9可知, 钻孔灌注复合桩轴力随着土层侧摩阻力的变化而逐渐降低, 随着上部荷载增大, 端阻力影响随之增大: 1120 kN 上部荷载对应端阻力为 357 kN, 占比约为 31.7%; 2800 kN 荷载对应端阻力为 1193 kN, 占比约为 42.6%; 5600 kN 荷载对应端阻力为 3389 kN, 占比约为 60.6%。钻孔灌注复合桩桩身承载力由侧摩阻力以及端阻力共同承担。

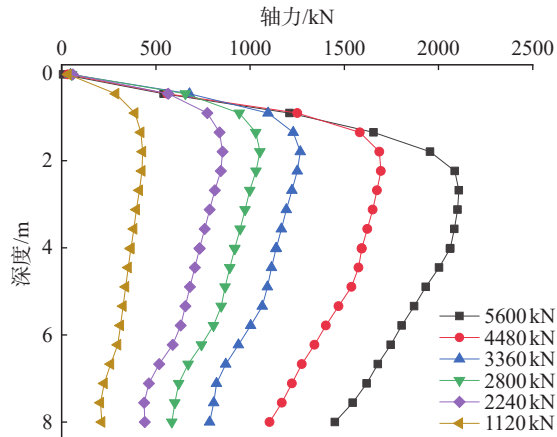


图8 细石混凝土外芯轴力分布曲线

Fig. 8 Axial force distribution curve of fine-aggregate concrete outer core

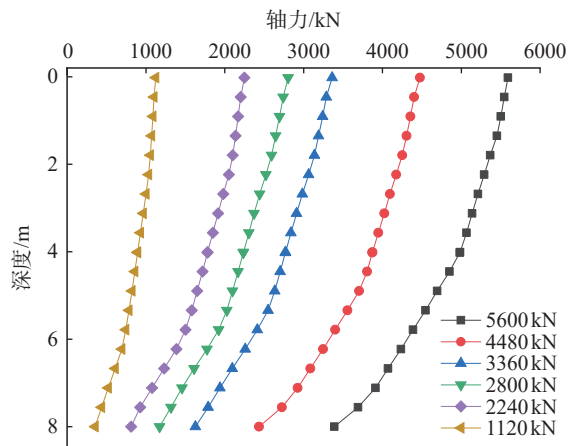


图9 钻孔灌注复合桩轴力分布曲线

Fig. 9 Axial force distribution of composite bored pile

(3) 桩身侧摩阻力分析

在 ABAQUS 后处理中, 提取模型在不同荷载作用下的侧摩阻力, 并结合式(4)的计算值进行复核, 得到钻孔灌注复合桩芯桩-细石混凝土接触面及细石混凝土外芯-桩周土接触面的侧摩阻力分布曲线(见图10、图11)。

$$q_x = \frac{N_x - N_{x-1}}{lH_x} \quad (4)$$

式中: q_x 为桩身侧摩阻力计算值; $N_x - N_{x-1}$ 为相邻两

点间的轴力差值; H_x 为相邻两点间的桩身长度值; l 为芯桩/钻孔灌注复合桩的周长。

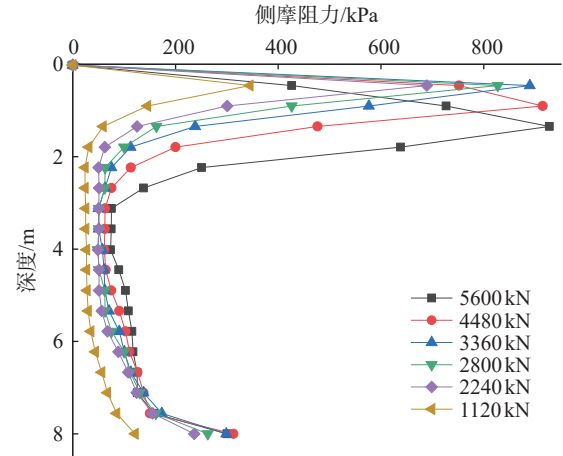


图10 芯桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 10 Side friction resistance distribution of core pile

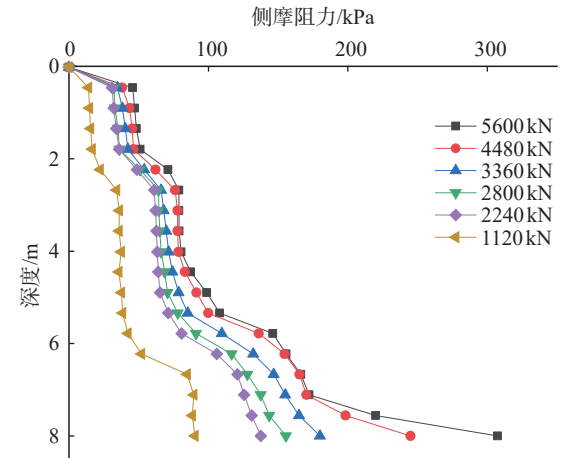


图11 钻孔灌注复合桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 11 Side friction resistance distribution of composite bored pile

由图10可知, 加载后, 芯桩侧摩阻力在芯桩上段迅速增大, 而随着荷载的增大, 上段侧摩阻力的增长效应在明显减小, 上部侧阻力在完全发挥后, 芯桩-细石混凝土接触面产生局部微小界面滑移, 侧摩阻力因此迅速减小, 随着深度的增大, 侧摩阻力随之缓慢增大, 侧摩阻力变化规律与芯桩-细石混凝土外芯轴力传递规律基本吻合。由芯桩侧摩阻力发展规律可知, 保证芯桩-细石混凝土外芯接触面的黏结强度是细石混凝土外芯发挥优势作用的关键, 在工程应用中应予重点关注。由图11可知, 不同荷载下, 复合桩的侧阻力变化规律基本一致, 侧摩阻力随着深度的增加而不断增大。复合桩上段及中部侧摩阻力均未达到极限状态, 在极限荷载作用下, 桩下端侧摩阻力仍随着桩土相对位移的增大而增大, 在 5600 kN 的荷

载作用下,侧摩阻力因复合桩外侧桩周土的破坏而陡增,桩承载力达到极限值。

(4)接触面变形分析

通过定义合适的材料本构及界面接触模型,可以得到芯桩-混凝土外芯以及桩土接触面的变形特征。顶部芯桩-混凝土外芯及桩土接触面相对滑移如图12所示,为直观表达曲线变化,图中芯桩-混凝土外芯接触面相对滑移量放大了5倍。

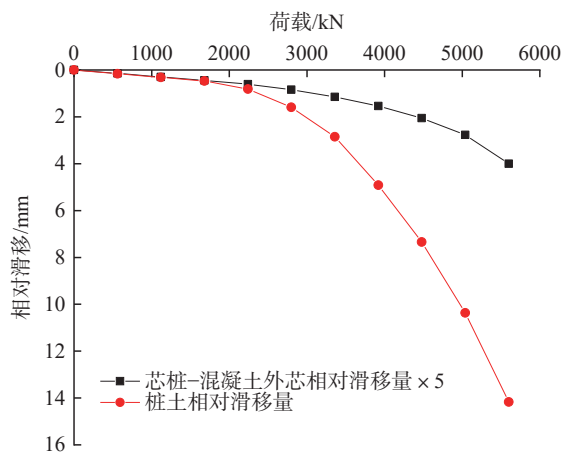


图12 接触面相对滑移量曲线图

Fig. 12 Relative slip amount curve diagram of contact surface

由图12可知,在加载初期,桩土界面变形较小,桩土相对位移不明显,此时桩侧摩阻力主要以静摩擦力形式存在。而随着荷载的增大,桩土界面开始出现滑动,桩侧摩阻力逐渐转化为动摩擦力,桩周土体存在塑性变形,界面相对变形呈现非线性增长的趋势。相对于桩土界面变形,芯桩-混凝土外芯接触面变形相对较小,在加载过程中,接触面表现出了稳定的可靠性。

5 结论

(1)对于土层中存在孤石或岩层埋深较浅的复杂地质区域,采用旋挖植桩工艺可以解决预制桩沉桩障碍和不能进入中等风化岩层的难题,旋挖植桩工艺可以提高桩周土层的有效应力和侧壁阻力,减小挤土效应,从而提高单桩承载力,相比传统灌注桩、静压管桩及水泥土复合桩更具有优势。试桩及工程桩检测结果表明,新型钻孔灌注复合桩承载力满足设计要求,在极限荷载作用下沉降较小。

(2)由式(1)、式(2)理论计算表明,在地质条件和桩长相等的情况下,新型钻孔灌注复合桩单桩承载力特征值高于同外径的钻孔灌注桩和边长450mm的预制方桩(与复合桩芯桩规格相同)。有限元对比分析表明,在同等极限荷载作用下,新型钻孔灌注复

合桩沉降量约为边长450mm预应力混凝土实心方桩沉降量的59.6%。

(3)有限元分析结果显示,在加载过程中,细石混凝土外芯能有效传递芯桩轴力,并提高钻孔灌注复合桩的单桩承载力,相比于水泥砂浆外芯,细石混凝土外芯的界面破坏风险更小。在极限荷载作用下,钻孔灌注复合桩端阻力占比约为42.6%,桩身荷载由侧摩阻力与端阻力共同承担。

(4)有限元分析结果显示,预应力混凝土实心芯桩-细石混凝土接触面能有效传递上部荷载,相对于桩土界面变形,芯桩-混凝土外芯接触面变形相对较小,且在加载过程中表现出了良好的稳定性及可靠性。然而,在较大荷载作用下,接触面可能出现局部微小界面滑移,仍存在界面破坏危险,因此,从安全角度考虑,当桩顶荷载较大时,应重点关注此接触面的黏结强度及细石混凝土外包体的质量。

参考文献

- [1] 邓亚光,郑刚,陈昌富,等. 劲性复合桩技术综述[J]. 施工技术, 2018, 47(S4): 262-264. (DENG Y G, ZHENG G, CHEN C F, et al. Review of SCM composite column pile[J]. Construction Technology, 2018, 47(S4): 262-264. (in Chinese))
- [2] 李鹏,安红林,王柳媛,等. MC劲性复合桩与钻孔灌注桩在某工程项目中应用对比分析[J]. 建筑科学, 2021, 37(11): 147-152. (LI P, AN H L, WANG L Y, et al. Comparative analysis of MC strength composite piles and cast-in-place piles in an engineering project[J]. Building Science, 2021, 37(11): 147-152. (in Chinese))
- [3] VOOTTIPRUEX P, SUKSAWAT T, BERGADO D T, et al. Numerical simulations and parametric study of SDCM and DCM piles under full scale axial and lateral loads[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(3): 318-329.
- [4] 刘金波,柳致富,邓亚光,等. 我国岩土工程施工技术的成就——复合桩[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(13): 69-75, 112. (LUI J B, LIU Z F, DENG Y G, et al. Achievements of geotechnical engineering construction technology in China – composite pile[J]. Construction Technology, 2011, 50(13): 69-75, 112. (in Chinese))
- [5] 俞建霖,徐嘉诚,周佳锦,等. 混凝土芯水泥土复合桩混凝土-水泥土界面摩擦特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(8): 93-104, 117. (YU J L, XU J C, ZHOU J J, et al. Experimental study on frictional capacity of concrete-cemented soil interface of concrete-cored cemented soil column[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(8): 93-104, 117. (in Chinese))

- [6] 李立业, 刘松玉, 章定文, 等. 劲性复合桩承载力计算方法探讨 [J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(S1): 43-47. (LI L Y, LIU S Y, ZHANG D W, et al. Bearing capacity calculations of strength composite piles[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(S1): 43-47. (in Chinese))
- [7] 韦超俊. 基于广西特殊地层的复合管桩植桩工艺及试验研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2018. (WEI C J. Composite pipe pile planting technology and test research based on special stratum in Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2018. (in Chinese))
- [8] 陈怀智, 潘湘文, 阮白一, 等. 旋挖植桩法在铁路桥梁桩基的创新应用 [J]. *铁道建筑技术*, 2021(12): 15-18,60. (CHEN H Z, PAN X W, RUAN B Y, et al. Innovative application of rotary digging pile planting method in railway bridge pile foundation[J]. *Railway Construction Technology*, 2021(12): 15-18,60. (in Chinese))
- [9] 万鸿志, 朱茂茂, 黄青隆. 沿海孤石多发地区预应力管桩施工方法优化研究 [J]. *建筑结构*, 2022, 52(S2): 2927-2932. (WAN H Z, ZHU M M, HUANG Q L. Study on construction method optimization of prestressed pipe pile in coastal solitary rock area[J]. *Building Structure*, 2022, 52(S2): 2927-2932. (in Chinese))
- [10] 李田军, 申亮. 步履式长螺旋钻孔引孔在锤击PHC管桩中的施工技术 [C]//2020年工业建筑学术交流会议论文集(下册). 北京: 中冶建筑研究总院有限公司, 2020. (LI T J, SHEN L. Construction technology of long walking auger pilot hole in hammering PHC pipe pile[C]//Proceedings of the 2020 Industrial Architecture Academic Exchange Conference (Volume II). Beijing: Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group, 2020. (in Chinese))
- [11] 湖北省质量技术监督局, 湖北省住房和城乡建设厅. 建筑地基基础技术规范: DB 42/242—2014[S]. 2014. (Hubei Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision, Department of Housing and Urban-Rural Development of Hubei Province. Technical code for building foundation: DB 42/242—2014[S]. 2014. (in Chinese))
- [12] 周佳锦. 静钻根植竹节桩承载及沉降性能试验研究与有限元模拟 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016. (ZHOU J J. Test and modeling on behavior of the pre-bored grouting planted nodular pile[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese))
- [13] 湖北省住房和城乡建设厅, 湖北省市场监督管理局. 预制芯桩复合桩技术规程: DB 42/T 2221—2024[S]. 2024. (Department of Housing and Urban-Rural Development of Hubei Province, Hubei Provincial Administration for Market Regulation. Technical specification for precast core composite pile foundation. DB 42/T 2221—2024[S]. 2024. (in Chinese))
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))
- [15] 刘清瑶. 软土地区预应力竹节桩承载特性试验与数值模拟研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2023. (LIU Q Y. Experimental and numerical simulation on behavior of pre-stressed high strength concrete (PHC) nodular pile in soft soil area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese))
- [16] YAMADA Y, GALLAGHER R H. Theory and practice in finite element structural analysis: proceedings of the 1973 Tokyo Seminar on Finite Element Analysis[M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1973.
- [17] 王金昌, 陈页开. ABAQUS在土木工程中的应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006. (WANG J C, CHEN Y K. Application of ABAQUS in civil engineering[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese))
- [18] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 [M]. 2版. 北京: 水利电力出版社, 1994. (QIAN J H, YIN Z Z. Geotechnical theory and calculation[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 1996. (in Chinese))
- [19] 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995. (Editorial Committee of the "Pile Foundation Engineering Manual". Pile foundation engineering manual[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1995. (in Chinese))
- [20] 周剑. 预制混凝土空心模剪力墙应用技术研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015. (ZHOU J. Study on the application technology of shear walls with precast concrete hollow moulds[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese))