

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2831

软土地区填砂竹节桩抗压承载性能研究

周佳锦¹, 龚晓南¹, 严天龙³, 张日红^{2,3}

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211;
3. 中淳高科桩业股份有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘 要: 软土地区土体工程性质较差, 土体所能提供桩侧摩阻力和桩端阻力较小, 预制桩桩身材料强度无法充分发挥。在预制桩压入土体过程中灌入砂石能够改善桩周土体性质, 提高桩-土接触面摩擦性能, 从而提高桩基的抗压极限承载力。为了研究填砂竹节桩的抗压承载性能, 进行了一组现场静载试验和 ABAQUS 三维建模计算, 通过对试验和计算结果的分析可以得出以下结论: 软土地基中填砂竹节桩的抗压承载性能相比常规等截面管桩有了显著提高; 填砂竹节桩桩身轴力在竹节节点处减少幅度较大, 竹节节点能够提高桩侧承载性能; 软土地基中填砂竹节桩桩侧承载性能相比常规等截面管桩有了显著提高, 且侧阻增大系数为 1.15~1.40。

关 键 词: 竹节桩; 填砂; 承载性能; ABAQUS; 三维建模

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)09-3425-08

Behavior of sand filled nodular piles under compression in soft soil areas

ZHOU Jia-jin¹, GONG Xiao-nan¹, YAN Tian-long³, ZHANG Ri-hong^{2,3}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;
2. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;
3. ZCONE High-tech Pile Industry Holdings Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315000, China)

Abstract: The geological properties of the soil are poor in soft soil areas, and the ultimate skin friction and tip resistance provided by the foundation soil are also limited in these areas. The material strength of the precast pile shaft can't be fully mobilized in soft soil areas. Filling sand into the foundation soil in precast pile construction process can improve the properties of the foundation soil and promote the frictional capacity of the pile-soil interface as well. The compressive bearing capacity of pile foundation can then also be enhanced. A group of field tests as well as ABAQUS simulation are used to investigate the bearing capacity of the sand filled nodular pile. The following conclusions can be gained based on the measured and simulation results: the compressive bearing capacity of the sand filled nodular pile is obviously better than the compressive bearing capacity of the conventional pipe pile in soft soil areas; the axial force of the sand filled nodular pile decreases sharply at the nodes along the nodular pile, and the nodes along the nodular pile can promote the shaft bearing capacity of the pile foundation; the shaft bearing capacity of the sand filled nodular pile is much better than that of the conventional pipe pile in soft soil areas, and the enlarged shaft resistance coefficient is about 1.15-1.40.

Keywords: nodular pile; sand filled; bearing capacity; ABAQUS; three-dimensional modeling

1 引 言

预制管桩由于其工厂化生产、桩身质量可靠、施工周期短、经济性能好以及施工过程无泥浆污染等优点被广泛应用于我国基础工程中;然而在我国东南沿海深厚软土地区由于土体工程性质较差,其

所能提供的侧阻及端阻值较小,桩基极限承载力由桩周土体及桩端土体强度所控制,在预制桩桩身强度远未充分发挥时桩基承载力即达到极限值,造成桩身材料浪费。

为了提高软土地基中的桩基极限承载力,随着工程经验的积累和理论研究的深入,出现了一些异

收稿日期: 2016-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.51578498,51579217); 中国博士后科学基金(No.2017M611995)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51578498, 51579217) and the China Postdoctoral Science Foundation (2017M611995)

第一作者简介: 周佳锦, 男, 1989 年生, 博士, 主要从事桩基工程, 地基处理等方面的研究工作。E-mail: zhoujiajin@zju.edu.cn

通信作者: 龚晓南, 男, 1944 年生, 博士, 院士, 教授, 博士生导师, 主要从事基础工程、基坑工程和地基处理等方面的研究工作。E-mail: gongxn@zju.edu.cn

型桩。巨玉文等^[1-2]、高笑娟^[3]都对挤扩支盘桩进行过研究,并指出挤扩支盘桩桩身支盘在荷载传递过程中表现出端承性质,能够显著提高桩基承载力;黄敏等^[4-5]通过现场试验以及有限元模拟对一种带翼板预应力管桩的承载性能进行了研究,指出该桩型适用于深厚软土地基,桩端扩大头、桩侧按一定间隔设置翼板并在翼板间灌砂,分别能够提高桩端阻力及桩侧阻力,能显著提高桩基极限承载力;吴策^[6]也对一种相似的带肋填砂预应力管桩的承载性能进行了研究,并指出与普通管桩相比,带肋填砂管桩能大幅提高单桩竖向承载力。

钻孔挤土桩(drilled displacement pile)^[7-8]由于其施工速度快、承载性能好等优点近年来在国外得到了广泛应用。Dan等^[9]通过对试验结果的分析指出,在钻孔挤土桩钻孔过程中加入砂土和碎石能够提高桩土界面摩擦性质,且加入碎石的效果要好于添加砂土的效果。

笔者课题组对静钻根植竹节桩进行过一些研究,并指出这种由预制桩和水泥土组合而成的组合桩基在软土地区中的抗压、抗拔承载性能相比钻孔灌注桩都有所提高^[10-14]。静钻根植竹节桩中所用预制竹节桩,其形式与桩身带肋管桩相似,都是沿桩身相隔一定距离设置一个突起节点,因此在竹节桩施工过程中通过桩身竹节节节点将碎石、砂土等散体材料压入土体中形成填砂竹节桩,其形式与钻孔挤土桩中加入碎石和砂土类似。

本文通过填砂竹节桩和普通等截面管桩的现场静载试验以及ABAQUS建模对两者的承载性能进行了比较与分析,并结合现场试验数据以及有限元模拟结果提出了填砂竹节桩的承载力简化计算公式。

2 填砂竹节桩介绍

2.1 竹节桩及填砂竹节桩介绍

预应力高强混凝土竹节桩是一种采用特制钢模制成的桩身每隔一定距离设置一个节点的预制混凝土异形桩,目前常用竹节桩有以下几种规格:800(600) mm(桩身直径为600 mm,节点直径为800 mm)、650(500) mm、550(400) mm以及450(300) mm竹节桩,相邻竹节间距为1 m,竹节桩示意图如图1所示。

从图1中可以看到,竹节桩桩身每隔1 m会出现一个节点,在采用锤击或者静压法将竹节桩打入土体过程中在孔口设置一个钢制锥形漏斗,并采用带散体材料计量的简易皮带输送机将碎石、砂土等散



图1 竹节桩示意图

Fig.1 Sketch of precast nodular piles

体材料输送到锥形漏斗中,碎石、砂土等散体材料通过桩身节点压入到土体中,并充满竹节节节点之间的空隙形成填砂竹节桩。

2.2 填砂竹节桩荷载传递路径分析

采用锤击或者静压法进行竹节桩施工过程中,将碎石、砂土压入到土体中,不仅能够挤密桩周土体,碎石、砂土层还能充当排水带,加速土体固结,提高桩周土体性质,且施工过程中对周边已有建筑的影响也会有所减小。管桩与填砂竹节桩荷载传递路径如图2所示。

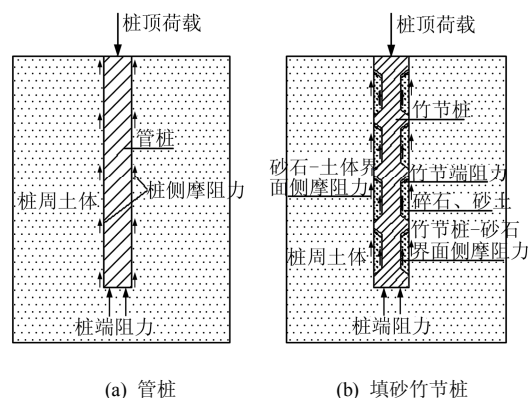


图2 管桩与竹节桩荷载传递路径

Fig.2 Load transfer paths of conventional pipe pile and sand filled nodular pile

从图2中可以看出,普通管桩的承载力由侧摩阻力和端阻力两部分组成,而在软土地基中侧摩阻力及端阻力值均较小,桩基承载性能较差。由于碎石、砂土的灌入,填砂竹节桩的荷载传递路径比较复杂,图2(b)所示填砂竹节桩为理想状态桩基形式,灌入碎石、砂土刚好填满竹节之间空隙,且碎石层外径与竹节外径相同。在上部荷载作用下填砂竹节桩所受侧摩阻力可能由竹节桩-砂石界面或砂石-桩周土体界面所提供,其中竹节桩-砂石界面所提供侧摩阻力包括砂石层对竹节桩桩身向上的侧摩阻力

以及对竹节节点的端阻力，竹节桩桩身节点作用与挤扩支盘桩桩身支盘作用类似，表现出端承性质；而砂石-桩周土体界面所提供侧摩阻力为土体对砂石层以及竹节桩竹节处的侧摩阻力，由于碎石、砂土的灌入以及砂石层的排水带作用，桩周土体受扰动固结完成后的工程性质会有所改善，其所能提供的极限侧摩阻力值也会有所提高。填砂竹节桩所受侧摩阻力将由上述两个接触面中所能提供极限侧摩阻力值较小界面提供；从图2(b)中还可以看到，竹节桩桩端直径与竹节节点直径相同，较大的桩端截面积能够提高桩基的桩端承载性能。

3 填砂竹节桩静载试验

3.1 试验概况

为了研究填砂竹节桩在软土地基中的抗压承载性能，在温州某实际基础工程中进行了填砂竹节桩的静载试验。该工程位于温州某工业园区内，场地具有深厚软黏土层，工程性质较差，设计拟采用桩基础。为了研究填砂竹节桩的承载性能，在场地上设置了3根试桩，其中2根为填砂竹节桩，1根

为不填砂普通管桩。2根填砂竹节桩中1根试桩长度为45 m，选用650（500）mm竹节桩（1号试桩），另一试桩（2号试桩）长度为56 m，其中650（500）mm竹节桩长度也为45 m，桩身上部为11 m长的600 mm直径的管桩；不填砂管桩（3号试桩）直径为700 mm，桩长为56 m。试桩参数如表1所示。

场地工程地质条件如表2所示，其中 w 为土体含水率； e 为土体孔隙比； φ 和 c 分别为土体内摩擦角和黏聚力，由固结不排水剪切试验测得； E_{s1-2} 为土体压缩模量； q_{pa} 和 q_{sa} 分别为根据静力触探试验实测数据总结出的基于预制桩的桩端阻力和桩侧摩阻力特征值，试桩持力层均为5-2层粉质黏土层。

表1 试桩参数汇总

Table 1 Summary of test pile parameters

试桩编号	试桩类型	直径/mm	桩长/m	桩身混凝土等级
1	填砂竹节桩	650（500）	15+15+15	C80
2	填砂竹节桩	600、650（500）	11+15+15+15	C80
3	管桩	700	11+15+15+15	C80

表2 试验场地土层分布及物理力学指标

Table 2 Soil profiles and physico-mechanical indexes

土层	土名	土层厚度/m			$w/\%$	e	三轴试验（CU）		E_{s1-2}/MPa	预制桩	
		1号试桩	2号试桩	3号试桩			$\varphi/(\circ)$	c/kPa		q_{pa}/kPa	q_{sa}/kPa
1	黏土	2.1	1.5	1.4	33.1	0.858	13.7	23.0	3.80	/	16.0
2-1	含砂淤泥	8.2	7.8	8.4	51.2	1.512	8.0	11.0	2.10	/	7.0
2-2	淤泥	15.3	15.9	13.8	57.1	1.622	7.4	13.3	1.96	/	6.5
3-1	淤泥质黏土	1.6	3.2	2.7	49.2	1.403	9.2	16.8	2.42	/	8.5
4-1	黏土	1.5	2.3	2.5	33.2	0.950	17.8	24.5	4.19	800	20.0
4-2	黏土	13.8	15.2	15.0	37.6	1.064	16.6	22.5	3.80	550	15.0
5-2	粉质黏土	未揭穿	未揭穿	未揭穿	31.2	0.916	19.2	26.8	4.37	850	20.0

填砂竹节桩在施工过程中通过竹节节点将锥形漏斗内的砂石压入到土体中，施工过程如图3所示。竹节桩施工过程中压入土体中的砂石的体积可以通过带散体材料计量的简易皮带输送机测得。理论所需填入砂石体积 V 可用下式进行估算：

$$V = \pi(D_n^2 - d^2)l/4 \quad (1)$$

式中： D_n 为竹节桩节点直径； d 为桩身直径； l 为桩长。现场实测1号试桩和2号试桩的充盈系数（实测灌注砂石体积与理论计算体积之比）分别为1.75和1.83，这是因为砂石在压入土体过程中密实度有所增加以及砂石填充区域超出竹节节点之间空隙范围。

3.2 试验结果分析

为了确定3根试桩的抗压极限承载力，在试桩施工完成后参照建筑桩基检测技术规范^[15]进行单桩抗压静载试验。采用慢速维持荷载方法进行分级加载，根据试验所测得的原始数据，经整理后所绘制的试桩荷载-位移曲线如图4所示。从图中可以看出，1号试桩在桩顶荷载增加到4 000 kN时桩顶位移突然增加，试桩破坏，其抗压极限承载力为3 600 kN；2号试桩在加载过程中各级桩顶沉降连续稳定无突变，在桩顶荷载为4 800 kN时桩顶位移为23.68 mm，试桩未发生破坏；3号试桩在桩顶荷载达到4 800 kN时桩顶位移突然增大，发生桩端刺入破坏，其抗压极限承载力为4 400 kN。



(a) 待灌填砂石



(b) 施工现场

图 3 填砂竹节桩施工过程

Fig.3 Sand filled nodular pile construction

由于试桩桩身没有埋设钢筋应力计,无法得到准确的桩侧摩阻力及桩端阻力,Fleming 等^[16]指出桩基侧摩阻力完全发挥时所需位移为 $(0.5\% \sim 2.0\%)D$ (D 为桩身直径),远小于桩端承载性能发挥时的位移 $(5\% \sim 10\%)D_b$, D_b 为桩端直径。3 号试桩桩长为 56 m,荷载作用下桩身压缩量较大,侧阻完全发挥时所需桩顶位移也较大,可以认为侧阻完全发挥时所需桩顶位移为 $2.0\%D$ 。由图 4 可知,当 3 号试桩的桩顶位移为 14 mm($2.0\%D$)时,桩顶荷载为 3 750 kN,当桩顶荷载为 3 750 kN 时 3 号试桩的近似桩身弹性压缩量为 13.55 mm(假设桩身轴力沿桩身线性减小,且桩端阻力为 0),因此可以认为 3 号试桩桩顶位移为 14 mm 时桩侧摩阻力完全发挥,而桩端阻力发挥程度较小,3 号试桩总桩侧摩阻力为 3 750 kN。

1 号试桩和 2 号试桩为填砂竹节桩,竹节桩桩身直径为 500 mm,竹节节点直径为 650 mm,且竹节节点在荷载传递过程中可能表现出端承性质,无法采用传统等截面桩基标准区分其侧阻与端阻。然

而,由试桩结果可知,2 号试桩极限承载力(大于 4 800 kN)大于 3 号试桩极限承载力(4 400 kN),2 号试桩为 600 mm 管桩和 650(500) mm 竹节桩形成的填砂竹节桩,而 3 号试桩为 700 mm 管桩,两根试桩桩长都为 56 m,可以认为填砂竹节桩在软土地基中的抗压承载性能优于相同直径常规管桩。

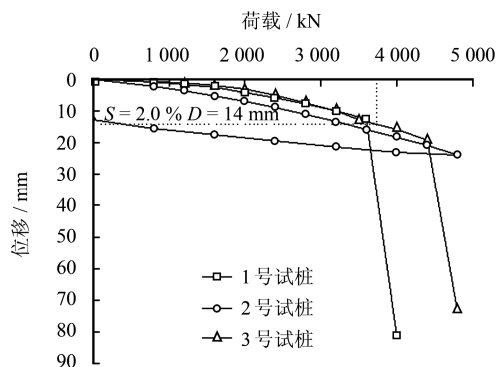


图 4 试桩荷载-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curves of test piles

4 ABAQUS有限元模拟

4.1 三维建模

由于填砂竹节桩施工过程的特殊性,在桩身设置钢筋应力计及应变片等测量桩身轴力的传感器比较麻烦,且施工过程中容易损坏。本文通过 ABAQUS 有限元软件对填砂竹节桩的荷载传递过程进行三维建模模拟,从而对其荷载传递机制进行更加详细的分析与研究。建模过程中将预制桩定义为线弹性材料,桩周土体以及砂石层定义为 Mohr-Coulomb 弹塑性材料,建模所用砂石层、预制桩以及土体参数分别如表 3 和表 4 所示。表 4 中桩周土体的分布形式以及参数选取主要参考表 2 中

表 3 预制桩及砂石层参数

Table 3 Parameters of precast pile and filled sand layer

名称	长度 /m	密度 ρ /(g/cm^3)	弹性模量 E /MPa	泊松比 ν	c /kPa	φ /($^\circ$)
砂石层	56(45)	2.0	30	0.35	0.5	35
预制桩	56(45)	2.5	40 000	0.25		

表 4 土体参数

Table 4 Parameters of foundation soils

土层	土层名称	土层厚度/m			ρ /(g/cm^3)	E /MPa	ν	c /kPa	φ /($^\circ$)
		1 号试桩	2 号试桩	3 号试桩					
1	淤泥	23	24	22	1.8	6	0.38	13	7.5
2	黏土	15	18	18	1.8	15	0.35	23	16.6
3	粉质黏土	32	38	40	1.8	20	0.32	27	19.2

给出的试验场地的地质情况, 为了使有限元计算易于收敛, 对土层分布进行了一定的简化。

考虑竹节桩与砂石层以及砂石层与桩周土体两个接触面, 接触面定义相同, 法向均为硬接触, 切向为 Coulomb 剪切模型, 定义接触摩擦系数, 考虑土体自重应力产生的初始应力场, 运用位移控制法施加竖向荷载^[17]。接触面摩擦系数的选定对建模计算过程十分重要, 文献[17]中给出了桩-土界面摩擦系数推荐计算公式:

$$\mu = \tan(0.75 \sim 1.0)\varphi \quad (2)$$

式中: μ 为桩-土界面摩擦系数。

Randolph 等^[18]提出桩-土接触面摩擦系数可按下式进行计算:

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \varphi \cos \varphi}{1 + \sin^2 \varphi} \right) \quad (3)$$

$$\mu = \tan \psi \quad (4)$$

式中: ψ 为桩-土接触面摩擦角。桩-土界面摩擦性

质会受到桩基类型、施工工法、土层情况以及桩基施工质量等多种因素的影响, 需综合上述公式进行接触面摩擦系数的计算, 建模过程中需设定上层淤泥质黏土与桩身摩擦系数 μ_1 , 下层黏土与桩身摩擦系数 μ_2 , 对于填砂竹节桩还需定义竹节桩, 与砂石层之间的摩擦系数 μ_3 , 且对于填砂竹节桩, 其桩-土接触面摩擦系数相比管桩的桩-土接触面摩擦系数可能会有所提高。在建模过程中先确定管桩桩-土接触面摩擦系数, 再以管桩接触面摩擦系数为基准确定填砂竹节桩桩-土接触面摩擦系数。

采用上述方法分别对现场试验中的 3 根试桩进行建模计算, 建模过程中模型结构以及网格划分如图 5 所示。从图中可以看出, 建模所用竹节桩尺寸与实际试桩尺寸完全一致, 而砂石层仅填充竹节之间空隙, 即竹节桩节点处没有碎石, 土体平面直径为 40 m, 达到 20 倍桩身直径, 桩端至土体底面为 24 m, 也达到 20 倍桩径。限制桩周土体外围平面方向位移以及桩端土体底部 3 个方向的位移, 并将桩基轴心面 YSYMM 赋值为 0。

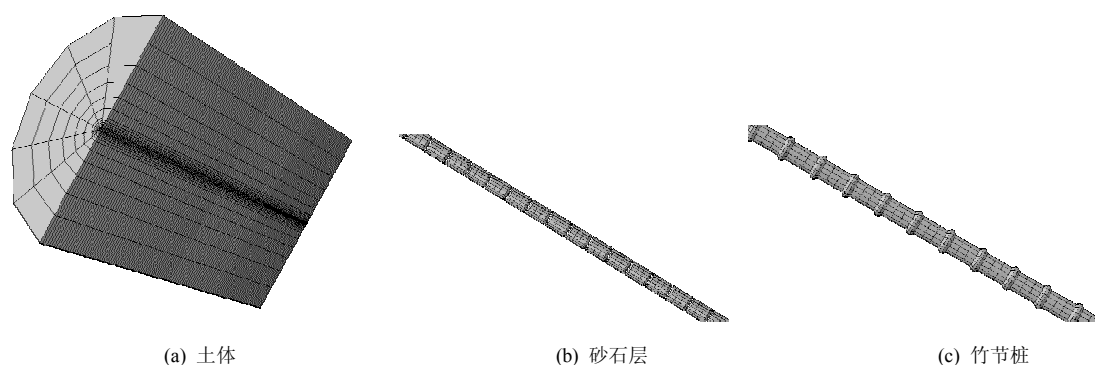


图 5 建模图形示意图

Fig.5 Sketch of simulation objects

4.2 计算结果

根据上述建模过程进行计算, 所得计算与实测对比曲线如图 6 所示。图 6(a) 为 3 号试桩实测与计算对比曲线, 从图中可以看出, 有限元计算所得曲线与实测曲线有一定的差距, 然而两条曲线整体变化趋势相同, 且都出现了桩端刺入破坏, 抗压极限承载力也十分接近, 考虑到建模过程中对桩周土体进行了一定的简化, 可以认为本文所建立的模型以及所选取参数是比较合理的。

图 6(b) 为 1 号试桩实测与计算对比荷载位移曲线。从图中可以看出, 当桩侧接触面的摩擦系数取值与 3 号试桩中所取摩擦系数相同时, 计算所得曲线与实测曲线差距较大, 且计算所得极限承载力值远

小于实测极限承载力; 由于砂石层内摩擦角较大, 竹节桩与砂石层之间摩擦系数大于砂石层与土体界面摩擦系数, 保持竹节桩与砂石层界面摩擦系数不变, 将两层土体与砂石层界面的摩擦系数分别提高到管桩桩土接触面摩擦系数的 1.4 倍 (侧阻增大系数 $e_x = 1.4$) 时计算所得曲线与实测曲线比较接近, 且计算所得极限承载力与实测值几乎相同。

图 6(c) 为 2 号试桩计算与实测对比曲线, 2 号试桩总长 56 m, 其中靠近桩顶处 11 m 为普通管桩, 管桩下部为竹节桩, 竹节桩长 45 m。从图中可以看出, 当填砂竹节桩的桩侧摩擦系数取值与不填砂管桩相同时, 计算所得荷载位移曲线与实测曲线偏差较大; 保持桩身上部 11 m 范围内桩侧摩擦系数不变, 下部

45 m桩侧摩擦系数分别增加到1.3倍(侧阻增大系数 $e_x = 1.3$)时计算所得曲线与实测曲线较为接近,且抗压极限承载力十分接近。

从上述分析中可以发现,填砂竹节桩施工过程中砂石的灌入使桩周土体性质得到了改善,1号试桩和2号试桩的侧阻增大系数 e_x 分别为1.4和1.3,可以认为填砂竹节桩在软土地基中的抗压承载性能明显优于常规等截面管桩。

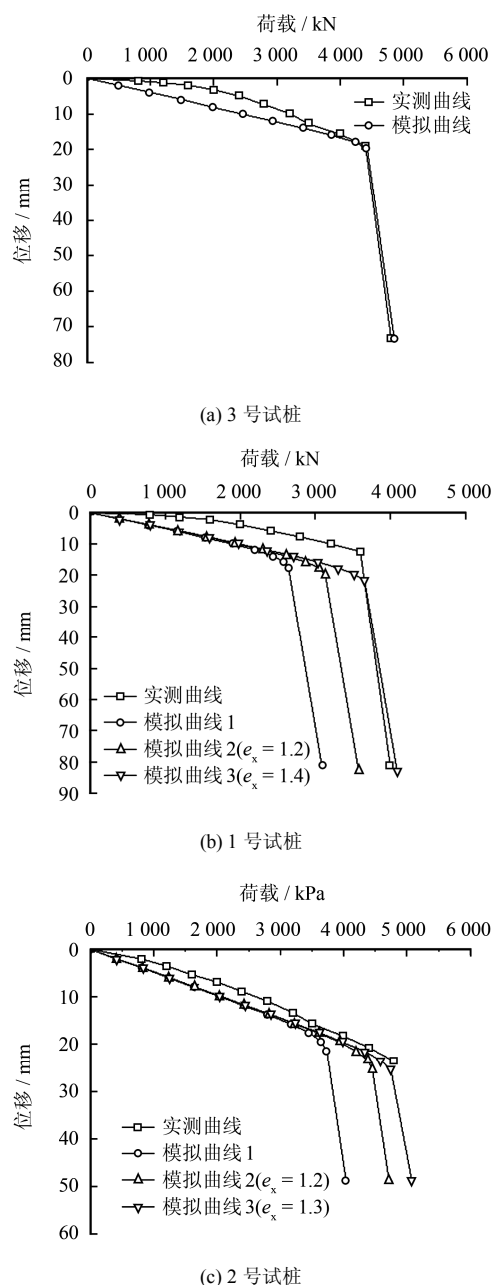


图6 有限元计算荷载-位移曲线与实测曲线对比

Fig.6 Comparison of load-displacement curves calculated by FEM and measured results

4.3 桩身轴力分析

为了对竹节桩桩身节点在荷载传递过程中所起作用进行分析与研究,分别选取计算所得2号试

桩和3号试桩桩身30~40 m范围内桩身轴力数据。试桩桩身轴力曲线如图7所示。

从图7(a)中可以看出,由于30~40 m深度范围内试桩周围为黏土层,桩周土体性质相同,3号试桩(管桩)桩身轴力沿桩身逐步减小,且桩身轴力曲线为直线。从图7(b)中可以看到,在30~40 m范围内,2号试桩(填砂竹节桩)的桩身轴力曲线在竹节处的变化幅度较大,说明竹节节点处桩身轴力减小值较大,竹节节点表现出端承性质。由上述结果可知,填砂竹节桩由于砂土的灌入以及桩身竹节的端承作用使其桩侧承载性能优于等截面管桩。

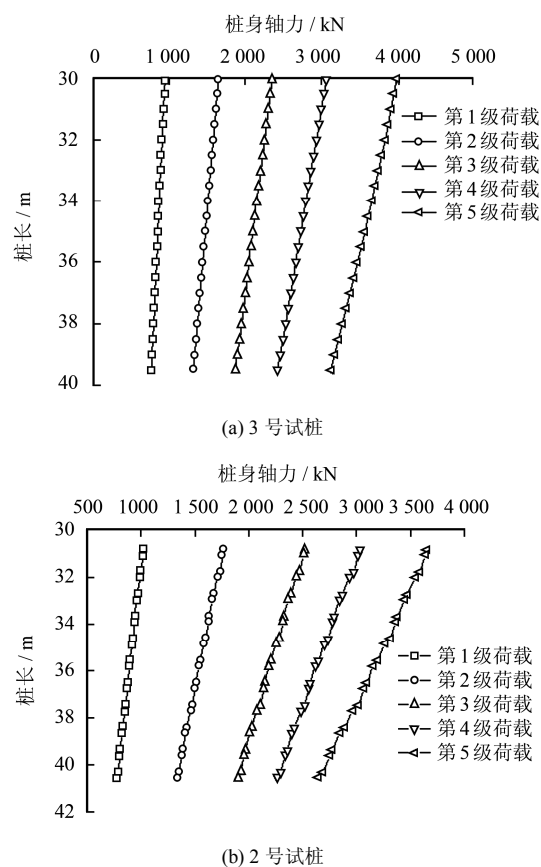


图7 不同荷载下有限元计算所得桩身轴力曲线

Fig.7 Axial forces calculated by FEM under different loads

4.4 填砂竹节桩承载力计算

建筑桩基技术规范^[19]中给出了单桩竖向极限承载力经验计算公式:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p \quad (5)$$

式中: Q_{uk} 为单桩极限承载力标准值; Q_{sk} 和 Q_{pk} 分别为桩侧阻力和桩端阻力; u 为桩身周长; q_{sik} 和 l_i 分别为第 i 层土体极限侧摩阻力标准值和第 i 层土体厚度; q_{pk} 为极限端阻标准值; A_p 为桩端面积。

由填砂竹节桩现场静载试验及有限元模拟计

算结果可知, 填砂竹节桩主要通过砂土的填入以及桩身竹节的端承作用提高桩基的侧摩阻力, 而其桩端承载性能与普通管桩相似, 因此填砂竹节桩单桩极限承载力可用下式进行计算:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = e_x u_p \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p \quad (6)$$

式中: u_p 为竹节桩桩身直径。由有限元计算结果可知, 1 号试桩和 2 号试桩侧阻增大系数分别为 1.4 和 1.3。

为了确定填砂竹节桩的侧阻增大系数, 将另一实际工程中的填砂竹节桩与管桩静载试验数据进行比较, 该工程也位于温州龙湾区滨海园区内, 场地土体分布及性质如表 5 所示。

表 5 土层分布及物理力学指标
Table 5 Soil profiles and physico-mechanical indexes

土层	土名	土层厚度 D/m	管桩	
			q_{sa} / kPa	q_{pa} / kPa
1	冲填土	2.0	6	/
2-1	含细砂淤泥	9.9	7	/
2-2	淤泥	14.1	6	/
3-2	粉质黏土	5.8	16	/
4-1	粉质黏土	11.7	15	800
4-2	粉质黏土	0.0	20	500
5-1	粉质黏土	12.8	24	750

试验场地内共设置了 4 根试桩并进行了抗压静载试验, 其中 2 根试桩为 550 (400) mm 填砂竹节桩, 另有 2 根直径分别为 550 mm 和 600 mm 的管桩, 试桩长度都为 48 m, 持力层都为 5-1 粉质黏土层。试桩静载试验结果如表 6 所示, 其中 550 (400) mm 竹节桩壁厚为 95 mm, 550 mm 管桩和 600 mm 管桩的壁厚分别为 100 mm 和 110 mm。

表 6 试验结果
Table 6 Experimental results

试桩编号	试桩规格	充盈系数	抗压极限承载力 /kN
a	550 (400) mm 竹节桩	1.62	2 800
b	550 (400) mm 竹节桩	1.72	2 500
c	550 mm 管桩	/	2 800
d	600 mm 管桩	/	3 200

按表 5 给出的 5-1 层粉质黏土层桩端阻力特征值计算试桩 a、b、c、d 的极限端阻分别为 202、202、212、254 kN, 从而可以得到试桩 a、b、c、d 的极限侧摩阻力分别为 2 598、2 298、2 588、2 946 kN。试桩 a 和试桩 b 相比于试桩 c 的侧阻增大系数分别为 1.38 和 1.22, 相比于试桩 d 的侧阻增大系数分别

为 1.32 和 1.17。

Dan 等^[9]也指出, 在钻孔挤土桩中加入砂土使桩侧摩阻力分别提高了 16% 和 25%, 而加入碎石使桩侧摩阻力提高了 50%。本次试验中填砂竹节桩的桩侧摩阻力提高程度与在钻孔挤土桩施工过程中加入砂土得到承载力提高程度比较接近。

综合上述两个实际工程中填砂竹节桩与不填砂管桩静载试验数据, 可以提出一个填砂竹节桩抗压极限承载力的简化计算公式:

$$Q_{uk} = e_x u_p \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p \quad (7)$$

式中: e_x 可取为 1.15~1.40。

5 结 论

本文主要介绍了填砂竹节桩这种在深厚软土地区有着广泛应用前景的桩基础, 通过填砂竹节桩的现场静载试验以及 ABAQUS 有限元模拟对这种桩基的承载性能进行了分析与研究, 可以得出以下结论:

(1) 在竹节桩打入土体过程中通过桩身竹节将砂石压入土体中形成填砂竹节桩能够有效改善桩基承载性能, 提高桩基的极限承载力, 使桩身材料强度得到发挥。

(2) 本文所建立的 ABAQUS 有限元模型以及参数选取比较合理, 能够有效地模拟填砂竹节桩的荷载传递过程, 计算曲线与实测曲线吻合度较好。

(3) 软土地区填砂竹节桩主要通过砂土的填入以及竹节桩桩身节点的端承作用提高了其桩侧承载性能, 且侧阻增大系数为 1.15~1.40。

(4) 填砂竹节桩实际工程应用还较少, 所给出的侧阻增大系数所基于试桩数据较少, 且在不同地质情况中侧阻增大系数会有所不同, 需要结合更多的现场试验总结出不同土体中的侧阻增大系数, 为填砂竹节桩的推广应用提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 巨玉文, 梁仁旺, 白晓红, 等. 挤扩支盘桩承载变形特性的试验研究及承载力计算[J]. 工程力学, 2003, 20(6): 34—38.
- [2] JU Yu-wen, LIANG Ren-wang, BAI Xiao-hong, et al. Experimental study of bearing and deformation behavior of squeezed branch pile and its bearing capacity calculation[J]. **Engineering Mechanics**, 2003, 20(6): 34—38.
- [2] 巨玉文, 梁仁旺, 赵明伟, 等. 竖向荷载作用下挤扩支

- 盘桩的试验研究及设计分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 309—314.
- JU Yu-wen, LIANG Ren-wang, ZHAO Ming-wei, et al. Experimental investigation and design analysis of vertically loaded cast-in-situ pile with expanded branches and plates[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 20(6): 34—38.
- [3] 高笑娟. 挤扩支盘桩承载性状试验和数值模拟分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- GAO Xiao-juan. Study on load bearing characteristic of squeezed branch and plate pile with full-scale test and numerical methods[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [4] 黄敏, 龚晓南. 一种带翼板预应力管桩及其性能初步研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(5): 59—62.
- HUANG Min, GONG Xiao-nan. A prestressed concrete pipe with wing plates and its behavior[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2005, 38(5): 59—62.
- [5] 黄敏, 龚晓南. 带翼板预应力管桩承载性能的模拟分析[J]. 土木工程学报, 2005, 38(2): 102—105.
- HUANG Min, GONG Xiao-nan. A study on the behavior of prestressed pipe pile with wing plates under axial load[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2005, 38(2): 102—105.
- [6] 吴策. 带肋填砂预应力管桩承载性能的研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- WU Ce. Study on bearing behavior of ribbed and sand-filled prestressed tube pile[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [7] PARK S, ROBERTS L A, MISRA A. Design methodology for axially loaded auger cast-in-place and drilled displacement piles[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2012, 138(12): 1431—1441.
- [8] BASU P, PREZZI M, SALGADO R. Modeling of installation and quantification of shaft resistance of drilled-displacement piles in sand[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2014, 14(2): 214—229.
- [9] DAN B, DREW C. Axial capacity of augered displacement piles at Auburn university[C]//Geo-Denver. Denver: [s. n.], 2000: 397—403.
- [10] ZHOU J J, WANG K H, GONG X N, et al. Bearing capacity and load transfer mechanism of a static drill rooted nodular pile in soft soil areas[J]. **Journal of Zhejiang University(Science A)**, 2013, 14(10): 705—719.
- [11] ZHOU Jia-jin, GONG Xiao-nan, WANG Kui-hua, et al. Testing and modeling the behavior of pre-bored grouting planted piles under compression and tension[J]. **Acta Geotechnica**, 2017(9): 1—15.
- [12] 周佳锦, 王奎华, 龚晓南, 等. 静钻根植竹节桩桩端承载性能试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2603—2609.
- ZHOU Jia-jin, WANG Kui-hua, GONG Xiao-nan, et al. A test on base bearing capacity of static drill rooted nodular pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(9): 2603—2609.
- [13] 周佳锦, 龚晓南, 王奎华, 等. 层状地基中静钻根植竹节桩单桩沉降计算[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 109—116.
- ZHOU Jia-jin, GONG Xiao-nan, WANG Kui-hua, et al. A simplified approach to calculating settlement of a single pre-bored grouting planted nodular pile in layered soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(1): 109—116.
- [14] 周佳锦, 龚晓南, 王奎华, 等. 静钻根植竹节桩抗拔承载性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 570—576.
- ZHOU Jia-jin, GONG Xiao-nan, WANG Kui-hua, et al. Behavior of the static drill rooted nodular piles under tension[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(3): 570—576.
- [15] 中国建筑科学研究院. JGJ106—2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- China Academy of Building Research. JGJ106—2014 Building pile testing technology code[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.
- [16] FLEMING W G K, WELTMAN A J, RANDOLPH M E, et al. Piling engineering[M]. London: Taylor & Francis, 2009.
- [17] 费康, 张建伟. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- FEI Kang, ZHANG Jian-wei. ABAQUS in geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009.
- [18] RANDOLPH M F, WROTH C P. Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles[J]. **Geotechnique**, 1981, 31(1): 143—157.
- [19] 中国建筑科学研究院. JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- China Academy of Building Research. JGJ94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.