

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201700833

静钻根植竹节桩抗压与抗拔承载特性分析

龚晓南^{1,2}, 解 才^{1,2}, 邵佳函^{1,2}, 舒佳明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.浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;
3.中淳高科桩业股份有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘 要:静钻根植竹节桩是利用静钻根植工法将预制竹节管桩插入到水泥土中而形成的管桩-水泥土组合桩基。采用有限元软件ABAQUS建立现场抗压试桩与抗拔试桩的分析模型, 计算得到的荷载-位移曲线与现场静载试验结果吻合, 验证了模型的可靠性, 采用数值计算方法, 分析了竹节桩的抗压与抗拔承载特性。研究表明: 软土地区, 静钻根植竹节桩的抗压承载性能优于抗拔承载性能; 桩身竹节可以使竹节桩与水泥土紧密结合, 竹节不直接与土接触分担上部荷载; 桩身非扩径段水泥土在荷载作用下只起到传递剪应力的作用, 不分担上部荷载; 桩顶位移60 mm时, 管桩承担抗压桩总端阻的25.8%, 承担抗拔桩总端阻的16.6%, 均小于水泥土扩大头分担的端阻; 竹节桩长度比 R_N 从0增大到0.375时, 抗压桩极限承载力从3 045 kN增大到6 173 kN, 抗拔桩极限承载力从1 910 kN增大到2 441 kN; 竹节桩长度比从0增大到0.375时, 抗压桩与抗拔桩桩端水泥土扩径段承担的荷载也明显增大; 当竹节桩长度比从0.375增大到0.625时, 静钻根植竹节桩的极限承载力、总侧摩阻力、管桩分担端阻和水泥土分担端阻改善效果不明显。

关键词:竹节桩; 抗压桩; 抗拔桩; 承载特性; 竹节桩长度比

中图分类号:TU47

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)05-0102-08

Analysis of Bearing Characteristics of the Static Drill Rooted Nodular Piles Under Tension and Compression

GONG Xiaonan^{1,2}, XIE Cai^{1,2}, SHAO Jiahuan^{1,2}, SHU Jiaming³

(1.Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Eng., Zhejiang Univ., Hangzhou 310058, China; 2.Key Lab. of Soft Soils and Geoenvironmental Eng., Ministry of Education, Zhejiang Univ., Hangzhou 310058, China; 3.ZCONE High-tech Pile Industry Holdings Company Limited, Ningbo 315000, China)

Abstract: The static drill rooted nodular pile is a kind of composite pile foundation by inserting the prefabricated nodular pile into the cemented soil. The FEM models of the PGP (pre-bored grouting planted nodular) pile under compression and tension were established using ABAQUS, and the reliability of the model was verified by comparing the calculated load-displacement curves with the field test results. The axial bearing characteristics of the pile were analyzed by using numerical calculation method. The results show that the bearing characteristics of the PGP pile under compression are better than that of pile under tension. The nodes along pile shaft can be closely combined with the surrounding cemented soil and that nodes do not bear the load from the soil directly. The cemented soil along the pile shaft only transfers the shear stress between pipe pile and soil. When $S=60$ mm, the pipe pile tip resistance accounts for 25.8% of the total pile tip resistance for pile under compression, and it accounts for 16.6% of the total pile tip resistance for pile under tension, which is less than the load borne by enlarged cemented soil pile base. When the nodular pile length ratio increases from 0 to 0.375, the ultimate bearing capacity of the pile under compression increases from 3 045 kN to 6 173 kN, and the ultimate bearing capacity of the pile under tension increases from 1 910 kN to 2 441 kN. At the same time, the enlarged pile base resistance increases significantly. However, when the length ratio is increased from 0.375 to 0.625, the ultimate bearing capacity, total pile shaft capacity, pipe pile tip resistance and enlarged pile base resistance are not improved obviously.

Key words: pre-bored grouting planted nodular pile; compressive pile; uplift pile; bearing characteristics; nodular pile length ratio

收稿日期:2017-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278450)

作者简介:龚晓南(1944—),男,教授,博士,博士生导师。研究方向:软土地基处理;基坑工程;隧道工程等。E-mail: xngong@hzcnc.com

网络出版时间:2018-08-29 23:56:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180829.2356.010.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

静钻根植竹节桩是在均匀搅拌的水泥土桩孔中插入高强度竹节管桩而形成的组合桩基础。一方面,可以利用混凝土管桩提高桩身强度;另一方面,桩周水泥土可以增大与土体的接触从而增大桩侧摩阻力。为了分析静钻根植竹节桩的荷载传递机理,国内外学者开展了一系列研究工作^[1-2]。Zhou等^[1]根据现场静载试验结果分析得出,静钻根植竹节桩的抗压承载性能优于钻孔灌注桩,软土层中静钻根植竹节桩的侧摩阻力是钻孔灌注桩的1.05~1.10倍。Hirai等^[2]根据Winkler地基模型,利用理论分析对竖向荷载作用下竹节桩-筏板基础中的竹节单桩进行了计算,并在明德林解的基础上,得到了竹节桩端承载力和桩端位移的函数关系,并分析了竖向荷载作用下竹节桩与筏板各自承载的百分比及其随影响因素的变化规律。杨森^[3]结合现场试验和数值分析,分析了静钻根植竹节桩极限承载力的影响因素,在此基础上,提出了考虑竹节影响效应的静钻根植竹节桩极限承载力公式。

在桩基础研究中,单桩抗拔与抗压承载特性存在紧密联系^[4-5],并定义抗拔桩总侧摩阻力与抗压桩总侧摩阻力的比值为极限侧摩阻力折减系数^[6]。通常可以根据抗压桩极限承载力来大致预测抗拔桩极限承载力大小。因此将单桩抗压与抗拔受力特性进行对比分析是非常重要的研究方向^[6-7]。

现有的静钻根植竹节桩研究主要是根据现场试验数据来分析其荷载传递规律,针对竹节桩身竹节突起的作用,以及桩端水泥土扩大头在抗压桩与抗拔桩中所起到的作用缺少研究。同时,过去的研究都是根据混凝土芯桩中竹节桩的长度始终保持不变开展的。作者基于静钻根植竹节桩现场抗压与抗拔静载试验,结合有限元数值分析,讨论了竹节桩的长度比(竹节桩的长度 L_z 与预制管桩总长度 L_d 的比值)对静钻根植竹节桩竖向承载性能的影响。

1 试桩现场静载试验

1.1 试验概况

以浙江宁波某工程施工现场布置的静钻根植竹节桩为研究对象,来分析其抗压与抗拔承载特性。现场共进行了4组静载试验,其中包括2组抗压静载试验和2组抗拔静载试验,抗压试桩编号为CP1、CP2,抗拔试桩编号为TP1和TP2。现场试验采用慢速维持荷载法进行分级加载与卸载,整个过程均执行《建筑桩基检测技术规范》^[8]中对单桩竖向静载试验的相关规定。

单桩在竖向荷载作用下,会受到周围土体施加的侧摩阻力,且随着桩入土深度的增大,桩侧摩阻力

值也就越大。因此,随着桩身横截面与桩顶的距离加大,桩身轴力就越小^[9]。因此工程中通常在预应力竹节管桩上部焊接横截面积较大的圆形截面管桩,以提高桩身上部承载力。本工程静钻根植竹节桩总长度为40 m,选用的上部圆形截面管桩长为25 m,预制竹节管桩长为15 m。其中,圆形截面管桩直径为600 mm,壁厚为130 mm;预制竹节管桩竹节突起处直径为650 mm,非竹节处直径为500 mm,壁厚也为130 mm。桩周水泥土直径为750 mm,桩端水泥土扩大头直径为1 200 mm,高度为2 400 mm。静钻根植竹节桩现场试桩的示意图如图1所示。

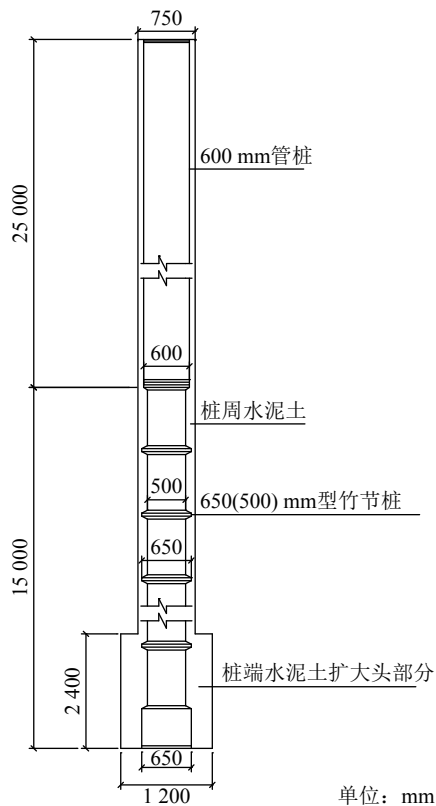


图1 静钻根植竹节桩示意图

Fig. 1 Sketch of PGPN pile

试验场地土层分布情况和土体物理力学参数指标如表1所示。其中, γ 为土体重度, c 和 φ 分别为由室内固结不排水(CU)三轴试验测得的土体粘聚力和内摩擦角, f_{ak} 为地基土承载力特征值, E_s 为土体压缩模量; q_{sa} 和 q_{pa} 分别为桩侧摩阻力特征值和桩端阻力特征值, λ_i 为抗拔系数。

1.2 试验结果分析

根据单桩承载力设计要求,静钻根植竹节桩抗压试桩CP1和CP2的单桩承载力特征值均为1 550 kN,最大试验荷载为3 100 kN;静钻根植竹节桩抗拔试桩TP1和TP2单桩承载力特征值分别为880 kN和968 kN,最大试验荷载分别为1 760 kN和1 936 kN。依据试验

表 1 土层分布和土体物理力学指标
Tab. 1 Soil profiles and properties

土层	土名	土层厚度/m			$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^3)$	c/kPa	φ	f_{ak}/kPa	E_s/MPa	管桩		钻孔灌注桩		λ_i
		场地	CP1	TP1						q_{sa}/kPa	q_{pa}/kPa	q_{sa}/kPa	q_{pa}/kPa	
1-1	杂填土	4.10~0.70	0.5	1.1	17.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1-2	黏土	1.70~0.30	0.8	0.5	18.4	26.3	14.5	80	4.19	16	—	14	—	0.60
2	淤泥质黏土	13.30~10.80	0.0	12.6	17.0	11.2	10.6	60	2.32	9	—	8	—	0.55
5-1	黏土	8.50~2.20	13.1	2.8	18.7	28.8	14.2	150	7.27	28	1 200	26	450	0.70
5-2	粉质粘土	8.00~1.90	9.3	6.3	18.5	23.2	13.8	130	4.70	22	750	20	320	0.70
6-1	粉质粘土	20.00~12.30	16.2	14.6	18.4	22.6	13.7	110	4.44	20	650	18	280	0.75
6-2	中砂	2.70~0.40	2.0	1.5	19.8	6.9	34.0	200	25.0	35	—	33	—	0.60
6-3	黏土	13.00~5.90	8.7	9.2	18.1	35.2	16.4	120	5.38	22	700	20	300	0.75
6-4	粉质粘土	10.30~1.60	6.1	4.0	18.9	26.3	17.2	140	6.74	29	800	27	350	0.75
6-5	砾砂	5.20~0.60	1.7	1.4	19.6	—	—	350	30.0	45	3 000	43	1 300	0.60

测得荷载和位移数据，整理得到静钻根植竹节抗压桩与抗拔桩的 $Q\sim S$ 曲线如图2所示，其中 Q 为桩顶荷载， S 为桩顶位移。

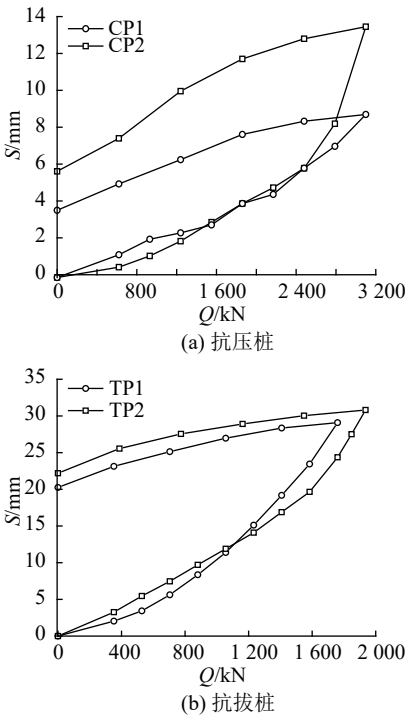


图 2 试桩荷载-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves of test piles

从图2(a)中可以看出，在桩顶施加荷载小于2 790 kN过程中，2根抗压试桩的 $Q\sim S$ 曲线走势基本一致，各级沉降稳定、连续、无突变，均近似保持线性增长。当桩顶荷载达到3 100 kN时，CP1桩顶位移明显增大，但未发生破坏，桩顶累积沉降量达到12.92 mm；CP2沉降稳定变化，桩顶累积沉降量达到8.4 mm。由图2(b)可知，荷载作用下2根抗拔桩的荷载-位移曲线也基本上呈线性变化。当试桩TP1桩顶荷载达到

1 760 kN时，桩顶位移29.09 mm；试桩TP2桩顶荷载为1 936 kN时，桩顶位移为30.81 mm。2根抗拔试桩在加载过程中各级上拔位移稳定、连续、无突变。由此可知，现场静钻根植竹节桩试桩抗压和抗拔承载力均满足单桩承载力设计要求。

2 ABAQUS有限元模型建立

数值分析因其可以较好地模拟复杂材料的本构关系，从而解决各类岩土工程问题，所以在桩基础研究中也得到广泛应用^[10-11]。基于静钻根植竹节桩现场静载试验结果，结合有限元软件ABAQUS建立抗压试桩CP1和抗拔试桩TP1的3维分析模型，按照控制位移法在预制管桩顶部施加竖向位移以模拟试桩在荷载作用下的工作性状。将数值计算得到的桩顶荷载位移曲线与试验结果对比，可以验证模型的有效性。在此基础上，可以深入分析静钻根植竹节桩的承载特性。

竖向荷载作用下，管桩-桩周水泥土-土体的荷载传递过程属于轴对称问题，这里取一半模型进行建模分析，土体模型沿径向范围取为20 m，沿桩长方向取60 m为1.5倍桩长，从而消除模型的边界效应。预制管桩和桩周水泥土尺寸如图1所示。根据管桩、水泥土和土体的应力应变特点，将管桩材料性质定义为线弹性模型，桩周水泥土和土体材料性质定义为Mohr-Coulomb模型。按照工程实际桩周、桩端水泥土配比制作水泥土立方体试块，进行无侧限抗压强度试验，得到桩周水泥土弹性模量为200 MPa，桩端水泥土弹性模量为2 500 MPa；桩周、桩端水泥土泊松比分别取为0.3和0.25；预制管桩弹性模量取为38 GPa，泊松比取为0.15^[12]；抗压试桩CP1和抗拔试桩TP1桩周土层性质和厚度如表1所示。

在有限元建模中,接触面的定义对计算结果影响很大,接触属性定义不合理往往导致计算不收敛或结果与实际情况相差较大。该模型共定义了3个接触对,分别是:桩-水泥土、水泥土-土以及桩-土。3个接触对均由接触面和目标面构成,且均定义为法向硬接触、切向库伦剪切模型,并定义接触摩擦系数。其中,竹节桩-水泥土之间的接触摩擦系数 μ 取为0.75,这是因为桩-水泥土界面摩擦性质好于水泥土-土接触界面,以保证桩的破坏是沿水泥土-土接触界面发生的;桩-土接触面摩擦系数按式(1)进行计算:

$$\begin{cases} \psi = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \varphi \cos \varphi}{1 + \sin^2 \varphi} \right), \\ \mu = \tan \psi \end{cases} \quad (1)$$

式中, φ 为土体内摩擦角, ψ 为桩土界面摩擦角。由于水泥土强度远远大于桩周土体,具有类似刚性桩的性质,因此水泥土-土接触面的摩擦系数也可以参照式(1)进行取值。网格单元划分时,根据圣维南原理的含义,将距离荷载较近区域的网格进行加密处理,按照这个规律,距离荷载较远的土体网格单元划分就稀疏,这样可以提高有限元分析的效率。将网格单元类型定义为C3D8R,建立的有限元模型网格划分结果如图3所示。

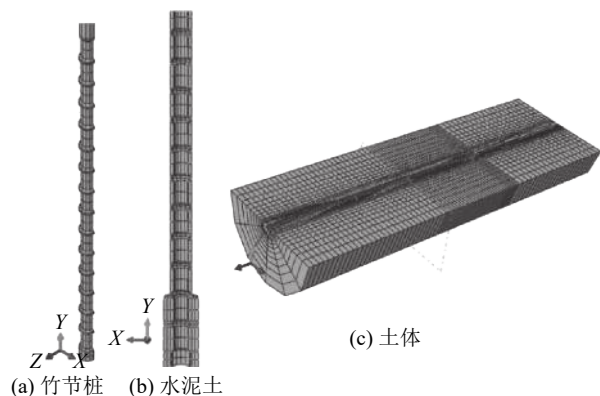


图3 有限元模型网格划分示意图

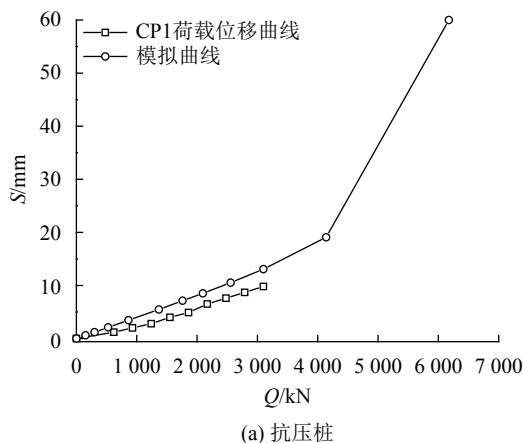
Fig. 3 Sketch of finite element model

3 数值计算结果分析

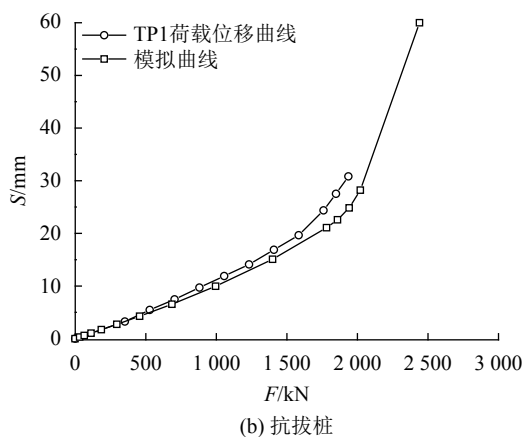
3.1 模型验证

为了验证本文数值分析模型的可靠性,将试桩实测荷载位移曲线与计算值进行对比,另外根据抗压桩桩端阻力与桩端位移理论计算公式,得到二者之间的理论曲线,然后将其与数值计算结果对比。首先按照控制位移法^[13]对模型进行加载,得到抗压桩与抗拔桩的荷载-位移曲线,数值计算与现场实测数据对比结果如图4所示。图4(a)为抗压桩桩顶累计位

移达到60 mm过程中的 $Q \sim S$ 曲线与试验 $Q \sim S$ 曲线对比。从图4(a)中可以看出,计算结果与实测值比较吻合,且整体上二者变化趋势保持一致。图4(b)为抗拔桩 $Q \sim S$ 曲线对比结果。由图4(b)可知,计算曲线与试验值基本完全吻合,二者之间差异很小,且在现场试桩荷载位移曲线转折点附近,数值计算得到的荷载位移曲线也开始出现转折。



(a) 抗压桩



(b) 抗拔桩

图4 数值模拟与实测荷载位移曲线对比

Fig. 4 Comparison of load displacement responses between field test and numerical simulation

Randolph等^[14]根据半无限空间弹性体受到竖向荷载作用时的变形提出了桩端阻力与桩端位移之间的关系,式(2):

$$S_b = \frac{P_b(1-\nu_b)}{4r_b G_b} \quad (2)$$

其中, S_b 为桩端位移, P_b 为桩端阻力, G_b 和 ν_b 分别为桩端土体的剪切模量和泊松比, r_b 为桩端半径大小。

Han等^[7]提出了桩端土体剪切模量随桩端阻力变化的函数关系,式(3):

$$G_b = G_{bi} \left(1 - R_f \frac{P_b}{P_{bmax}} \right)^2 \quad (3)$$

式中, G_{bi} 为桩端土体的初始剪切模量, R_f 为破坏比,

P_{bmax} 为最大桩端阻力值。

将持力层土层参数和桩端半径代入式(2)和(3)计算得到当破坏比 R_f 取0.65时,静钻根植竹节抗压桩端阻力与桩端位移之间的理论曲线,根据有限元计算结果得到抗压桩端阻力随桩端位移的变化曲线,并将二者进行对比,结果如图5所示。由图(5)可知,理论计算曲线能够很好地拟合数值分析得到的桩端阻力与位移之间的关系。

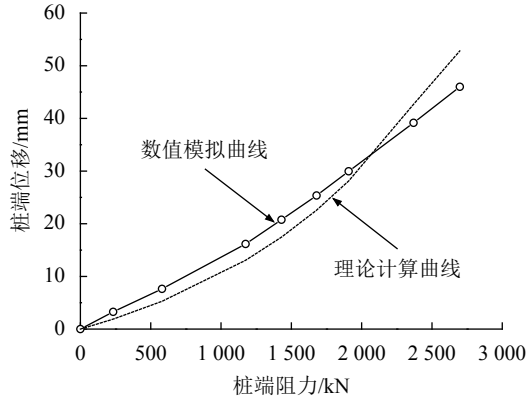


图 5 桩端阻力与桩端位移对比曲线

Fig. 5 Relationship between pile tip resistance and displacement

通过以上分析可知,作者建立的静钻根植竹节桩分析模型可以较真实地反映现场试桩的工作性状,在此基础上,可以分析静钻根植竹节桩的抗压与抗拔承载特性。

3.2 荷载传递规律

图6为桩顶位移 $S=60、50、40、30、20、10$ 和 5 mm 时,抗压桩与抗拔桩的预制管桩轴力 F_N 变化曲线。由图6可知,各级位移作用下,管桩轴力随深度逐渐减小,竹节桩段轴力随深度递减速率大于上部圆形截面管桩。对于竹节突起位置上下两横截面的轴力并没有发生突变,这与挤扩支盘桩支盘上下界面轴力变化有所不同^[15],这是因为支盘桩各支盘下部土体分担了轴力,而竹节桩的竹节是为了与桩周水泥土紧密结合,并通过水泥土传递剪应力,而不直接分担桩身轴力。在桩端水泥土扩大头位置,管桩轴力减小速度明显加快,这是因为水泥土扩大头增大了与土的接触面积,扩大头周围土体施加的阻力增大,导致桩身轴力快速减小。当 $S=60\text{ mm}$ 时,抗压桩总端阻为 $2\,698\text{ kN}$,管桩承担端阻力为 697 kN ,占比为 25.8% ;抗拔桩总端阻为 289 kN ,管桩承担端阻为 48 kN ,占比为 16.6% 。由此可知,无论对抗压桩还是抗拔桩,管桩承担的端阻力均小于水泥土扩大头所承担的阻力。另外,抗拔桩端阻力远远小于抗压桩的桩端阻力。

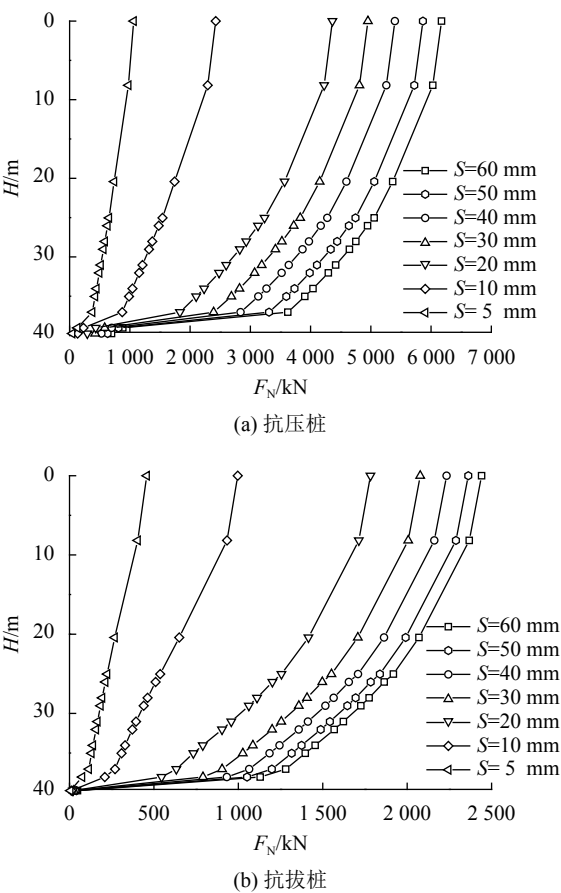


图 6 各级荷载作用下管桩轴力曲线

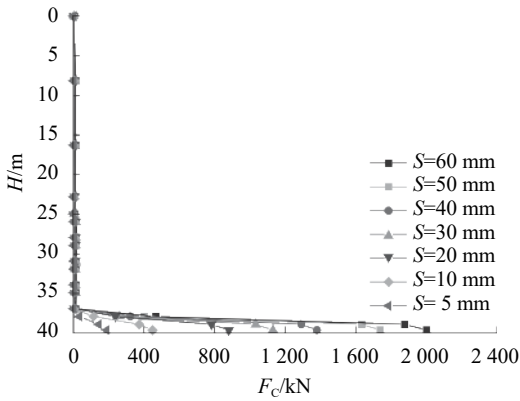
Fig. 6 Axial force of core pile with different displacement

图7为桩顶位移 $S=60、50、40、30、20、10$ 和 5 mm 时,静钻根植竹节抗压桩与抗拔桩桩周水泥土中的轴向应力 F_c 沿桩入土深度 H 的变化规律。由图7可知,抗压桩与抗拔桩在各级荷载作用下,桩周非扩径段水泥土中的轴力水平较低,介于 $0\sim30\text{ kN}$ 之间,这说明桩周水泥土不直接分担桩顶荷载,而只是起到增大桩土接触面积并传递桩-土之间剪应力的作用。在桩端水泥土扩径段,水泥土轴力明显增大,且随着桩顶位移的增大而逐级增加。这说明桩端水泥土不仅可以增大桩土接触面积,而且还起到分担桩端阻力的作用。

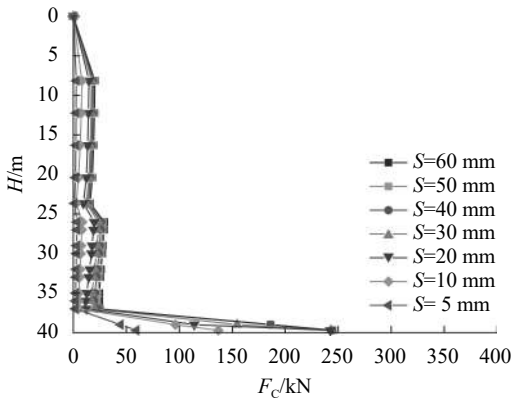
4 竹节桩长度比对荷载传递规律影响

4.1 竹节桩长度比对承载力影响

为了研究预制管桩中竹节桩长度对单桩承载性能的影响,定义竹节桩的长度 L_z 与管桩总长度 L_d 的比值为竹节桩长度比 R_N 。图8为静钻根植竹节桩荷载位移曲线随竹节桩长度比的变化规律。由图8可知,当 $R_N=0$ 时,抗压桩与抗拔桩在极限荷载作用下桩顶位移会突然增加,静钻根植桩发生突然破坏;当 $R_N=0.375$ 或 0.625 时,静钻根植竹节桩的 $Q\sim S$ 曲线随桩顶



(a) 抗压桩



(b) 抗拔桩

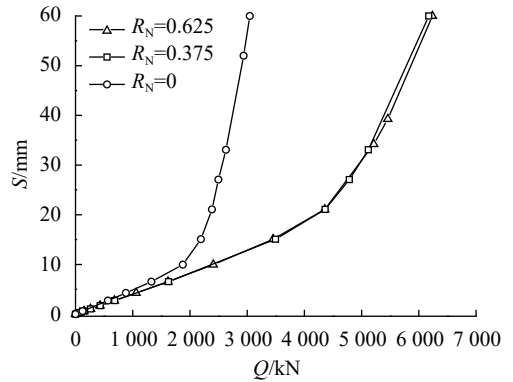
图7 各级荷载作用下桩周水泥土轴力曲线

Fig.7 Axial force of cemented soil along pile shaft

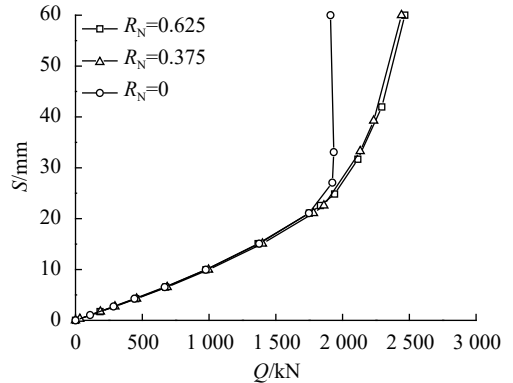
位移的增加缓慢增长,竹节桩在荷载作用下不会发生突然破坏。由图8(a)可知,当桩顶位移达到60 mm,竹节桩长度比为0、0.375和0.625时,抗压桩的桩顶荷载分别为3 045、6 173和6 237 kN;由图8(b)可知,当桩顶位移达到60 mm,竹节桩长度比为0、0.375和0.625时,抗拔桩的桩顶荷载分别为1 909、2 441和2 467 kN。以上计算结果表明,提高竹节桩的长度比可以增加静钻根植竹节桩的承载能力,但是当竹节桩长度比达到一定值时,竹节桩承载力的增长速率会明显下降。产生该现象的原因主要有:1)桩顶荷载作用下,竹节突起对周围水泥土的法向支持力沿水平方向分力增大了土体与水泥土之间的压力,使得桩侧摩阻力增大;2)竹节可以使管桩与水泥土紧密结合在一起,在桩顶施加荷载时,桩周水泥土与土体之间的相对位移会增大,土体侧摩阻力能够得到充分发挥。另外,抗压桩桩端水泥土扩大头与竹节桩紧密结合为一个整体,在荷载作用下,桩-水泥土相对位移很小,水泥土分担的桩端阻力也会增大。

4.2 竹节桩长度比对荷载传递规律影响

图9为桩顶位移 $S=60$ mm时,管桩轴力 F_N 随竹节桩长度比 R_N 的变化规律。由图9可知,随着竹节桩长



(a) 抗压桩



(b) 抗拔桩

图8 竹节桩长度比对静钻根植竹节桩 $Q-S$ 曲线影响

Fig.8 Effect of nodular pile length ratio on $Q-S$ curves

度比的增大,管桩轴力明显增大。在桩身非扩径段,桩身轴力衰减速率比较平缓,且管桩竹节桩段的轴力衰减速率大于非竹节桩段。在桩端水泥土扩大头位置,混凝土管桩轴力减小速率明显增大。由图9(a)可知,当 $R_N=0$ 、0.375和0.625时,抗压桩混凝土管桩桩端阻力分别为1 045、1 071和978 kN;由图9(b)可知,当 $R_N=0$ 、0.375和0.625时,抗拔桩混凝土管桩桩端阻力分别为146、168和196 kN。因此,无论对抗压桩还是抗拔桩,竹节桩长度比对混凝土管桩桩端阻力影响并不大。

图10为桩顶位移为 $S=60$ mm时,竹节桩长度比对静钻根植竹节桩桩周水泥土轴力分布的影响规律。

由图10(a)可知,抗压桩桩周水泥土轴力非常小,这说明在水泥土的非扩径段,水泥土不直径承担荷载,而只是作为媒介来传递竹节桩与土体之间的剪应力。对于桩端水泥土扩径段,水泥土的轴力明显增大,这说明水泥土起到承担荷载的作用。当 $R_N=0$ 、0.375和0.625时,抗压桩桩端水泥土承担桩端阻力分别为696、949和2 049 kN。由此可知,竹节桩可以增加水泥土的端阻力。这是因为,竹节桩与水泥土结合更紧密,桩端水泥土与竹节桩同步位移,导致水泥土扩大头阻力可以充分发挥。由图10(b)抗拔桩水泥土

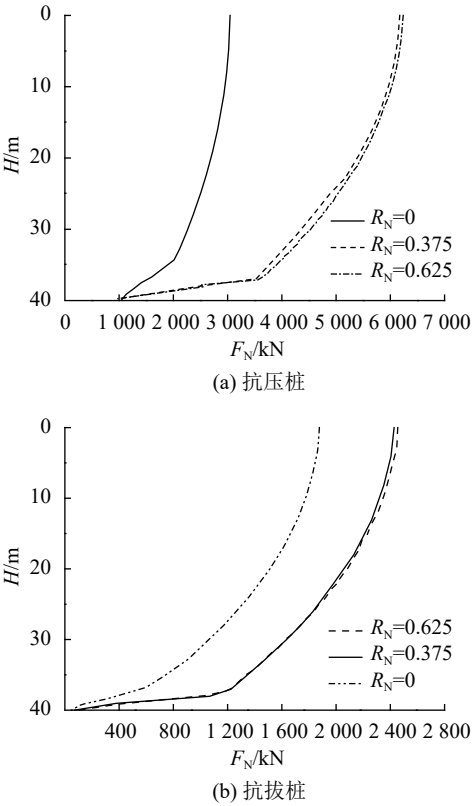


图 9 竹节桩长度比对管桩轴力的影响

Fig. 9 Effect of nodular pile length ratio on axial force

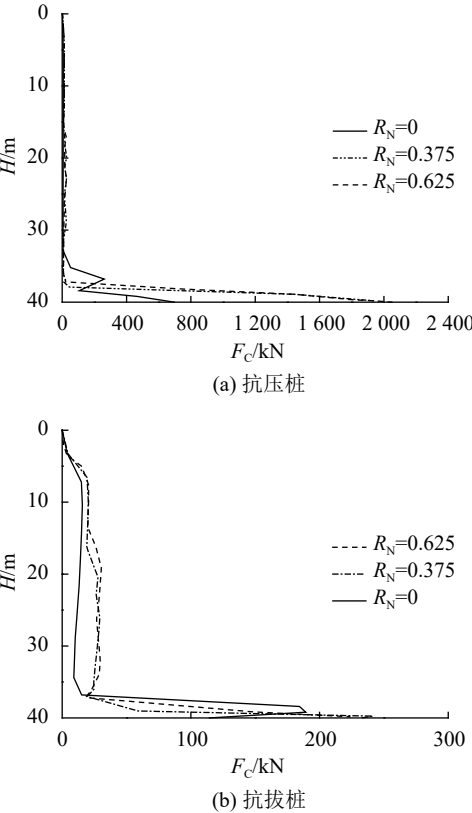


图 10 竹节桩长度比对桩周水泥土轴力的影响

Fig. 10 Effect of nodular pile length ratio on axial force of cemented soil along pile shaft

轴力分布规律可知, 桩周非扩径段水泥土也不分担上部荷载, 而只是起到传递荷载的作用。桩端扩径水泥土在上拔荷载作用下, 轴力明显增大, 说明桩端水泥土分担桩顶上拔荷载。当 $R_N=0$ 、0.375和0.625时, 桩端水泥土桩端阻力分别为114、223和233 kN。

图11为桩顶位移为 $S=60$ mm时, 竹节桩长度比对静钻根植竹节桩桩顶荷载分担量的影响。

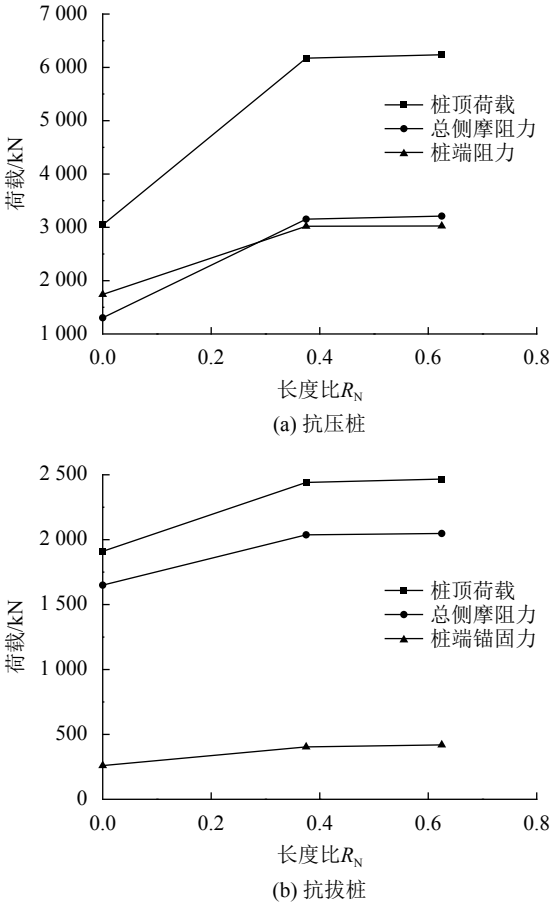


图 11 竹节桩长度比度荷载分担量的影响

Fig. 11 Effect of nodular pile length ratio on load shared by skin friction and pile end resistance

由图11(a)可知, 随着竹节桩长度比的增加, 抗压桩桩端阻力和总侧摩阻力均增大。当 $R_N=0$ 时, 桩端阻力分担荷载大于桩侧摩阻力, 当 $R_N=0.375$ 和0.625时, 桩侧摩阻力大于桩端阻力, 其中, 桩端阻力是由混凝土管桩和水泥土共同组成。当 $R_N=0$ 、0.375和0.625时, 侧摩阻力分担荷载占比分别为42.8%、51.1%和51.5%。图11(b)为竹节桩长度比对抗拔桩荷载分担量影响。由图11(b)可知, 抗拔桩的桩侧摩阻力始终大于桩端阻力, 抗拔桩的桩端锚固力也是由管桩和水泥土共同组成。当 $R_N=0$ 、0.375和0.625时, 桩端锚固力占比分别为13.6%、16.5%和17.0%。

5 结 论

根据现场静载试验,对比了静钻根植竹节桩的抗压与抗拔承载力。以现场试桩为对象,建立了可靠的静钻根植竹节桩的3维分析模型,对竹节桩、桩周水泥土、水泥土扩径段的承载特性进行了分析,并通过改变竹节桩长度比研究芯桩中竹节桩长度对承载规律的影响,得到以下结论:

1) 竖向荷载作用下,静钻根植竹节桩桩周水泥土可以增大桩-土接触面积从而增大桩侧摩阻力;桩身非扩径段水泥土只起到传递桩与土之间剪应力的作用,而桩端水泥土扩大头在抗压桩与抗拔桩中分别承担74.2%和83.4%的端阻力。因此,工程中桩端水泥土强度要高于桩周水泥土强度。

2) 静钻根植竹节桩是由混凝土预制管桩与桩周水泥土组成。其中,预制管桩是由上部PHC管桩与下部竹节桩连接而成。为了研究芯桩中竹节桩的长度对静钻根植竹节桩承载性能影响,定义了竹节桩的长度比,即竹节桩的长度与管桩总长度的比值。

3) 当竹节桩长度比 R_N 从0增大到0.375时,静钻根植竹节桩的竖向承载力能够得到明显提高;当 R_N 从0.375增大到0.625时,竹节桩的抗压与抗拔承载力均没有明显提高,说明竹节桩长度比存在一个最优值,从而既能保证竹节桩的承载力,又能减少施工成本。

4) 在一定范围内,竹节桩长度比的增加可以明显提高桩端水泥土所分担的桩端阻力,但竹节桩长度比的改变对管桩所分担的桩端阻力影响不大;竹节桩长度比的增加也可以明显提高静钻根植竹节桩的桩侧摩阻力。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Hirai H. Analysis of piled raft with nodular pile subjected to vertical load using a Winkler model approach[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2016, 40(13): 1863-1889.
- [3] 杨森. 新型螺旋成孔根植注浆竹节管桩抗压抗拔承载特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [4] Das B M. A procedure for estimation of uplift capacity of

rough piles[J]. *Soils and Foundations*, 2008, 23(3): 122-126.

- [5] Lai Ying, Jin Guofang. Uplift behavior and load transfer mechanism of prestressed high-strength concrete piles[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2010, 17(1): 136-141.
- [6] Chen Xiaoqiang, Zhao Chunfeng, Gan Aiming. Study of model test of uplift and compression piles in sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 738-744. [陈小强, 赵春风, 甘爱明. 砂土中抗拔桩与抗压桩模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 738-744.]
- [7] Han J, Ye S L. A field study on the behavior of micropiles in clay under compression or tension[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, 43(1): 19-29.
- [8] 中国建筑科学研究院. 建筑基桩检测技术规范: JG J106—2003[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [9] Liu Hanlong, Ren Lianwei, Zheng Hao, 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. [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]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1395-1401.]
- [10] Zheng Gang, Wang Li. Effect of loading level and sequence of vertical and lateral load on bearing capacity of single pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(12): 1796-1804. [郑刚, 王丽. 竖向及水平荷载加载水平、顺序对单桩承载力的影响[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(12): 1796-1804.]
- [11] Wang Rui, Zhang Jianmin. Three dimensional elastic-plastic analysis method for piles in liquefiable ground[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(11): 1979-1985. [王睿, 张建民. 可液化地基中单桩基础的三维数值分析方法及应用[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(11): 1979-1985.]
- [12] 黄孟秋. 材料力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2001.
- [13] 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.
- [14] Randolph M F, Wroth C P. Analysis of deformation of vertically loaded pile[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1978, 104(12): 465-488.
- [15] Wang Yili, Xu Liangying, Li Biqing, et al. Finite element numerical study on the axial bearing behaviors and factors of squeezed branch pile[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(s2): 158-162. [王伊丽, 徐良英, 李碧清, 等. 挤扩支盘桩竖向承载力特性和影响因素的数值研究[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(增刊2): 158-162.]

(编辑 张 琼)

引用格式: Gong Xiaonan, Xie Cai, Shao Jiahua, et al. Analysis of bearing characteristics of the static drill rooted nodular piles under tension and compression[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(5): 102-109. [龚晓南, 解才, 邵佳函, 等. 静钻根植竹节桩抗压与抗拔承载特性分析[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(5): 102-109.]