

Study on Compressive Bearing Capacity of Pre-Bored Grouting Planted Nodular Pile in Rail Transit Engineering

Fengxiang Li¹, Yongming Li¹, Xu Zhu¹, Rihong Zhang²

¹Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research, Hangzhou Zhejiang

²ZCONE High-Tech Piling Industry Holdings Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

Email: 530006607@qq.com

Received: Apr. 22nd, 2019; accepted: May 7th, 2019; published: May 14th, 2019

Abstract

Pre-bored grouting planted nodular pile (PGPN pile) is a kind of pile with great application potential, which uses embedding method to construct pre-stressed precast pile. In this paper, the compressive bearing capacity of the PGPN piles which are located a few meters away from the bored pile foundation of a viaduct of Ningbo rail transit project, is tested and compared with that of the adjacent bored piles. The result shows that under the same geological condition, the ultimate compressive bearing capacity of 800 mm diameter PGPN pile is about 30% higher than that of 1200 mm diameter bored pile and the estimated cost is about 32% lower. In view of the good performance of compressive bearing capacity and remarkable cost saving advantages, the PGPN pile can be widely applied in rail transit engineering in the future.

Keywords

Pre-Bored Grouting Planted Nodular Pile, Compressive Capacity, Rail Transit Engineering

静钻根植桩在轨道交通工程中的抗压承载性能研究

李凤翔¹, 李永明¹, 朱旭¹, 张日红²

¹浙江省交通规划设计研究院有限公司, 浙江 杭州

²浙东建材集团, 浙江 宁波

Email: 530006607@qq.com

收稿日期: 2019年4月22日; 录用日期: 2019年5月7日; 发布日期: 2019年5月14日

摘要

静钻根植桩采用埋入法施工预应力预制桩，是一种非常有应用潜力的桩型。本文在宁波轨道交通工程某高架区间现场进行了非工程部位的静钻根植桩的抗压承载性能研究，并与相邻钻孔灌注工程桩进行对比。结果表明，相同地质条件下直径800 mm的静钻根植桩的抗压极限承载力比直径1200 mm的钻孔灌注桩高约30%，而且估算造价比后者低约32%。鉴于静钻根植桩良好的抗压承载性能和显著的经济优势，今后可在轨道交通工程中推广应用。

关键词

静钻根植桩，抗压极限承载力，轨道交通工程

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

桩基础在轨道交通工程中应用广泛，在高架桥墩基础中主要承受竖向和水平荷载，在地下车站中主要承受地下水浮力。良好的桩基工程质量对轨道交通结构的安全、稳定及建成后的安全运营都有重要影响。

目前，在轨道交通工程中最常用的桩基型式为钻孔灌注桩和预制桩。钻孔灌注桩在施工过程中需排放大量的泥浆，不利于环境保护，而且成桩质量受钻孔和混凝土浇筑工艺影响较大。预制桩在施工过程中存在挤土效应，穿过性质良好的土层时存在困难，采用锤击法时存在噪声污染和振动效应，并可能对桩体造成损害。因此，这两种常用桩型日益不能满足工程质量和环保要求。

静钻根植桩是近年来发展起来的一种采用埋入法施工预应力预制桩的新型桩[1][2]，在浙江及上海地区已广泛应用于高层办公楼、高层住宅、工业厂房等多种类型建筑物的基础，取得了良好的社会效益和经济效益。浙江大学的龚晓南、王奎华课题组对静钻根植桩的承载性能和机理进行了广泛研究。周佳锦等[3][4]采用试验和数值模拟的方法对静钻根植桩的抗压、抗拔承载性能进行了研究，结果表明桩端水泥土扩大头直径对承载力影响最为明显，而水泥土的强度和变形参数影响不大，水泥土-桩周土界面摩擦系数是影响桩承载力的一个重要因素。钱铮和王奎华[5]对静钻根植桩的水平承载性能进行了试验研究。吴磊磊等[6]对静钻根植桩在复合荷载作用下的承载特性进行了现场试验研究。周佳锦等[7][8]研究了静钻根植桩的承载力和沉降计算方法。李振亚等[9]研究了静钻根植桩的纵向振动响应特性。

在工程应用范围逐渐扩大和相关研究工作逐渐深入的基础上，目前浙江省已编制建筑标准设计结构标准图集《复合配筋先张法预应力混凝土管桩》[10]和《静钻根植先张法预应力混凝土竹节桩》[11]，以及地方标准《静钻根植桩基础技术规程》(DB 33/T 1134-2017)[12]，为静钻根植桩的推广应用奠定了基础。

虽然静钻根植桩在工业与民用建筑工程中已取得广泛应用，但在轨道交通工程中的应用还处于空白阶段。为了评价静钻根植桩在轨道交通工程中的适用性，本文选取宁波轨道交通工程某高架区间现场进行了非工程部位(距离高架桥墩钻孔灌注桩约5 m~10 m)的静钻根植桩的抗压承载能力现场试验，并与相邻钻孔灌注桩进行对比，通过抗压承载性能和经济效益两个方面的探讨，得到了一些有益的结论。

2. 静钻根植桩简介

2.1. 工法

静钻根植桩的施工流程主要分为五步，如图 1 示。首先采用专用的单轴钻机，按照设计深度钻进成孔，钻孔过程中根据地层情况注水或膨润土混合液，钻孔直径比桩径大 50 mm~150 mm。第二步是在桩底打开钻头扩大翼进行扩孔，扩底直径不宜大于钻孔直径的 1.6 倍，扩底高度不宜小于钻孔直径的 3 倍。第三步是在桩端注入水泥浆，注浆时上下反复升降钻机，注入量为扩底部分体积的 100%，浆液水灰比宜取 0.6~0.7。第四步是在桩周注入水泥浆，注入量为(钻孔体积 - 扩底部分体积 - 桩身混凝土体积) × 30%，浆液水灰比宜取 1.0~1.2。最后是植桩，在桩端水泥浆注入后 2 小时内必须开始植桩，植入过程中随时检测，确保桩端到达设计深度以及桩的垂直度。可以看出，静钻根植桩虽为预制桩，但不存在挤土效应，与钻孔灌注桩相比，几乎无泥浆污染，排土量大幅降低，也不存在孔壁泥皮、孔底沉渣的情况。静钻根植桩集成了预制桩、钻孔灌注桩、水泥石搅拌桩和扩底桩的优点，并且实现了施工全过程可视化可控化，可极大地保证施工质量。

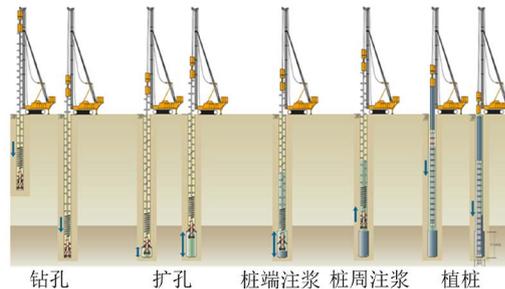


Figure 1. Construction process of pre-bored grouting planted nodular pile
图 1. 静钻根植桩施工流程

通常根据荷载的特点确定静钻根植桩的配桩形式，但最下节桩应采用预应力混凝土竹节桩(PHDC) [11]，以增强桩身与水泥土的握裹力。主要承受竖向压力时，最上节桩宜采用预应力高强混凝土管桩(PHC)或复合配筋先张法预应力混凝土管桩(PRHC) [10]。主要承受上拔力或较大水平荷载时，最上节桩宜采用 PRHC 桩。

2.2. 竖向抗压极限承载力

静钻根植桩的桩体混凝土强度等级可达 C80 及以上，桩周水泥土可使侧摩阻力提高约 10%，桩端扩底增大了支承面积，进而增大了端承力。这些因素都对静钻根植桩的承载能力有利。初步设计时，静钻根植桩的单桩竖向抗压极限承载力标准值可采用式(1)估算 [12]

$$Q_{uk} = \sum u_i q_{sik} l_i + A_p q_{pk} \quad (1)$$

式中， u_i 为桩身周长，PHDC 桩按竹节外径计算，其他类型桩按桩外径计算； q_{sik} 为桩周第 i 层土的极限侧摩阻力标准值，可取预制桩的极限侧摩阻力标准值； l_i 为第 i 层土的厚度， A_p 为桩端截面面积，不扩底时取钻孔底部截面面积，扩底时取扩底部位截面面积； q_{pk} 为极限桩端阻力标准值，可按预制桩极限端阻力标准值乘以表 1 中的折减系数取值，桩端不扩底时折减系数取 0.6。

Table 1. Reduction coefficient of end resistance of pre-bored grouting planted nodular pile when the end of pile is enlarged
表 1. 桩端扩底时静钻根植桩桩端阻力的折减系数

岩土名称	粘土、粉土、全风化岩	粉砂、细砂、中砂	粗砂、砾砂、强风化岩	砾石、卵石、中风化岩
折减系数	0.45~0.50	0.50	0.55	0.60

当桩体轴心受压时, 桩身正截面受压承载力应满足式(2)的要求

$$N \leq \psi_c A f_c \quad (2)$$

式中, N 为作用于单节桩的竖向压力设计值, 对非最上节桩宜按桩顶荷载扣除其上部桩节的侧摩阻力后取值; ψ_c 为成桩工艺系数, 取值不宜大于 0.90; A 为桩身截面面积, 对 PHDC 桩取非竹节突起部位的值; f_c 为桩身混凝土轴心抗压强度设计值。

最终, 静钻根植桩竖向抗压极限承载力的初步设计值取式(1)和(2)的较小值。

3. 试验结果分析

在宁波轨道交通工程某高架区间现场进行了非工程部位(距离高架桥墩钻孔灌注桩约 5 m~10 m)的静钻根植桩的抗压承载性能试验, 该场地为典型的软土地层, 土层分布及桩基设计参数如表 2 示。共施工 2 根静钻根植试验桩, 编号分别为 S2 和 S4, 桩长均为 64 m, 桩顶露出地面 0.6 m, 配桩型式为 PRHC 800 (130) II (15 m) + 三根 PHC 800 (130) AB (15 m + 15 m + 12 m) + PHDC 800-600 (110) AB (7 m), 桩身混凝土强度为 C80。钻孔直径为 900 mm, 扩底直径和高度分别为 1350 mm 和 3000 mm。持力层为⑨₂ 圆砾层, 由 2.2 节中的方法预估的单桩极限承载力为 11,600 kN。

Table 2. Soil layer distribution and suggested design parameters of pile foundation

表 2. 土层分布情况及桩基设计参数建议值

土层编号	岩土名称	厚度/m	桩基承载力参数建议值			
			预制桩		钻孔灌注桩	
			q_{pk}/kPa	q_{sik}/kPa	q_{pk}/kPa	q_{sik}/kPa
① _{1a}	杂填土	5.0				
① ₂	粘土	1.15		45		40
② ₂	淤泥质粘土	6.85		18		16
② _{2b}	粉土夹粉砂	4.0		31		28
② ₃	淤泥质粉质粘土	2.0		20		17
④ ₁	淤泥质粉质粘土	4.0		20		17
④ ₂	粘土	8.0		40		36
⑤ ₁	粉质粘土	3.3		62		54
⑤ ₅	圆砾	2.1		119		108
⑥ ₁	粉质粘土	3.6		55		50
⑥ ₂	粉质粘土	3.2		42		36
⑥ ₅	圆砾	3.3		130		120
⑧ ₃	砾砂	4.3		160		108
⑨ ₁	粉质粘土	2.1		60		58
⑨ _{1a}	碎石	4.0		120		126
⑨ ₁	粉质粘土	4.25		60		58
⑨ ₂	圆砾	11.6	5000	130	480	120

静载荷试验采用自平衡法, 将环形荷载箱和预制桩焊接在一起植入充满水泥土的钻孔内, 荷载箱位于桩身平衡点处, 如图 2(a)示。自平衡法的原理如图 2(b)示, 试验过程中由地面上的高压油泵通过油管向荷载箱加载, 荷载箱将力传递到上、下段桩身, 上节桩的侧摩阻力与下节桩的侧摩阻力 + 端阻力相平

衡, 桩体位移由位移丝或位移杆测得, 由此可分别得到上、下两段桩的荷载 - 位移曲线, 然后通过换算得到等效于传统静载荷试验的桩顶荷载 - 位移($Q-S$)曲线, 从而得到试桩的抗压极限承载力。具体试验过程和数据处理方法详见试验规程[13]。

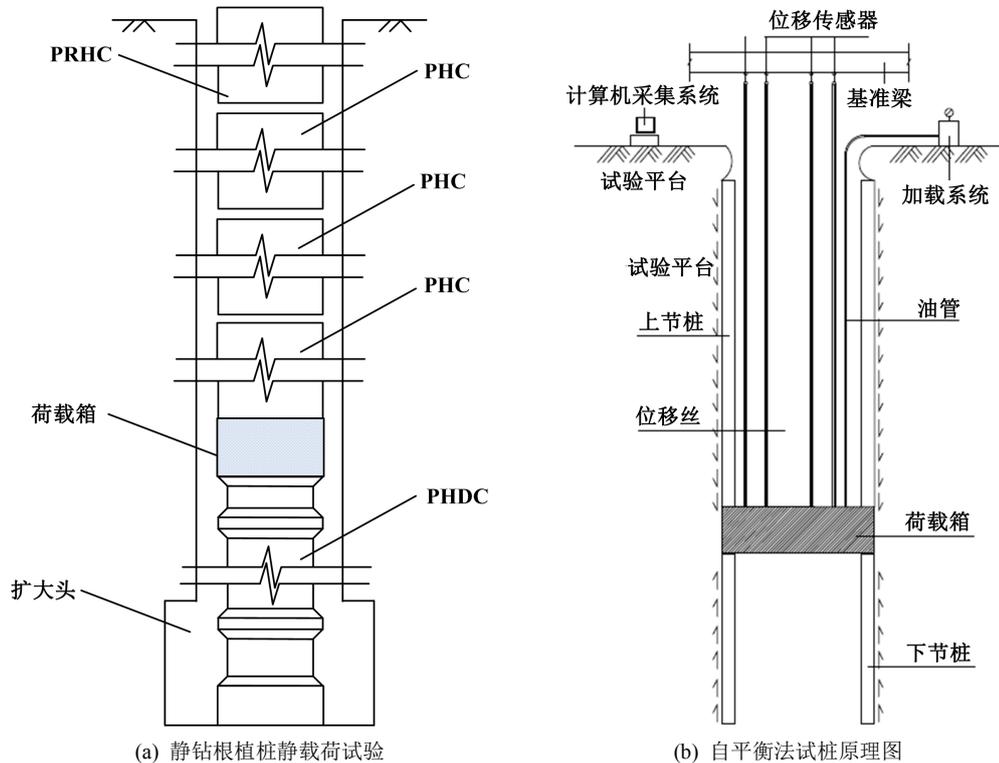


Figure 2. Schematic diagram of static load test by self-balancing method
图 2. 自平衡法静载荷试验示意图

经过 12 级加载, 两根试验桩均未出现破坏, 但达到了荷载箱的最大加载能力, 停止加载。经数据处理后得到桩顶的 $Q-S$ 曲线如图 3 示。可以看出, S2 与 S4 试桩的桩顶沉降都随荷载增加而近似线性增加, 未出现拐点; 当桩顶荷载达到 16,773 kN 时, 二者的桩顶沉降分别为 43.61 mm 和 43.90 mm。因此, 本试验中可取 16,773 kN 作为抗压极限承载力, 比预估值 11,600 kN 高约 45%。

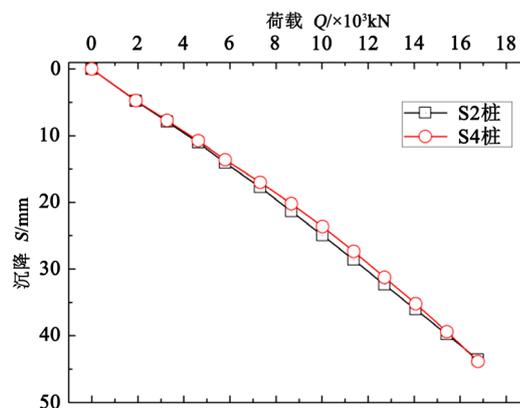


Figure 3. $Q-S$ Curve of static load test for Pre-bored grouting planted nodular pile
图 3. 静钻根植桩的静载荷试验 $Q-S$ 曲线

相邻高架桥墩的钻孔灌注工程桩也采用自平衡法进行了单桩竖向抗压承载力的检测,与静钻根植桩试验结果对比如表 3 示。可以看出,相同地质条件下,直径 800 mm 的静钻根植桩承载力比直径 1200 mm 的钻孔灌注桩高约 30%,略小于直径 1500 mm 的钻孔灌注桩,说明静钻根植桩的抗压承载性能优良。需要说明的是,钻孔灌注桩试验桩作为工程桩使用,也未加载至承载能力极限状态。因此,本工程中 800 mm 的静钻根植桩可以实现 1:1 替代 1200 mm 的钻孔灌注桩承受竖向荷载。

Table 3. Comparison of ultimate bearing capacity of bored cast-in-place pile and pre-bored grouting planted nodular pile
表 3. 钻孔灌注桩和静钻根植桩的抗压极限承载力对比

桩型	桩号	桩径(mm)	桩长(m)	抗压极限承载力(kN)
钻孔灌注桩	A20-1	1200	67.5	12,860
	A42-5	1500	60.0	17,106
静钻根植桩	S2	800	63.4	16,773
	S4	800	63.4	16,773

经济性方面,桩长按 60 m 考虑,单根直径 800 mm 的静钻根植桩的估算造价为 64,500 元,比直径 1200 mm 的钻孔灌注桩(95,000 元)低约 32%,说明同等竖向承载力条件下静钻根植桩的经济优势显著。

4. 结论

静钻根植桩采用埋入法施工预应力预制桩,在施工工艺方面与传统的钻孔灌注桩和预制桩相比具有明显的优点,并可根据承载特点选择相应的配桩形式,是一种非常有应用潜力的桩型。本文在宁波轨道交通工程某高架区间现场进行了非工程部位的静钻根植桩的抗压承载性能研究,并与相邻钻孔灌注工程桩进行对比,得到以下结论:

- 1) 相同地质条件下,直径 800 mm 的静钻根植桩的抗压极限承载力比直径 1200 mm 的钻孔灌注桩高约 30%,略小于直径 1500 mm 的钻孔灌注桩,表明静钻根植桩的抗压承载性能优良。
- 2) 单根直径 800 mm 的静钻根植桩的估算造价比直径 1200 mm 的钻孔灌注桩低约 32%,同等竖向承载力条件下静钻根植桩的经济优势显著。
- 3) 鉴于静钻根植桩过程可控和环境友好的施工工艺、良好的抗压承载性能和显著的经济优势,今后可在轨道交通工程中推广应用。

参考文献

- [1] 张日红. 新型预制桩产品与工法[C]//中国硅酸盐学会,中国混凝土与水泥制品协会. 中国硅酸盐学会钢筋混凝土制品专业委员会、中国混凝土与水泥制品协会预制混凝土桩分会 2011-2012 年度年会暨学术交流会议论文集. 天津, 2012: 12-20.
- [2] 张日红, 吴磊磊, 孔清华. 静钻根植桩基础研究与实践[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 1200-1203.
- [3] 周佳锦, 龚晓南, 王奎华, 等. 静钻根植竹节桩抗压承载性能[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(5): 835-842.
- [4] 周佳锦, 王奎华, 龚晓南, 等. 静钻根植抗拔桩承载性能数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(11): 2135-2141.
- [5] 钱铮, 王奎华. 静钻根植桩水平承载性能试验研究[J]. 岩土力学, 2015(S2): 588-594.
- [6] 吴磊磊, 张日红, 陈洪雨, 等. 复合荷载作用下静钻根植桩承载特性试验研究[J]. 科技通报, 2017, 33(2): 186-191.
- [7] 周佳锦, 龚晓南, 王奎华, 等. 静钻根植竹节桩在软土地基中的应用及其承载力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4359-4366.

- [8] 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.
- [9] 李振亚, 王奎华, 高柳. 考虑土体竖向波动效应的静钻根植竹节桩纵向振动阻抗研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1791-1802.
- [10] 浙江省建筑标准设计结构标准图集. 复合配筋先张法预应力混凝土管桩(2012 浙 G36) [S]. 杭州: 浙江工业大学出版社, 2012.
- [11] 浙江省建筑标准设计结构标准图集. 静钻根植先张法预应力混凝土竹节桩(2012 浙 G37) [S]. 杭州: 浙江工业大学出版社, 2012.
- [12] 叶亮, 等. DB33/T 1134-2017. 静钻根植桩基础技术规程[S]. 杭州: 浙江工商大学出版社, 2017.
- [13] 龚维明, 等. JT/T 738-2009. 基桩静载试验自平衡法[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org