

静钻根植排水桩承载特性数值分析

孙嘉峰¹, 邓岳保^{1*}, 邵飞瑜¹, 张日红^{1,2}

(1. 宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波中淳高科股份有限公司, 浙江 宁波 315042)

摘要: 静钻根植排水桩是一种新型技术, 其承载特性有必要开展深入研究. 本文结合数值模拟, 开展静钻根植排水桩有限元分析. 首先对静钻根植排水桩模型进行模拟, 并将试验模拟结果与实测结果进行比较, 由此检验数值模型的可靠性. 然后在此基础上, 围绕工程实际进行建模, 研究排水桩的承载特性, 重点分析真空负压抽排水时间对桩基承载性能的影响. 研究成果可为静钻根植排水桩的研发推广提供参考.

关键词: 静钻根植桩; 真空负压; 抽排水; 承载力

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 02-0067-06

20 世纪 80 年代日本发明了植入式桩工法, 近几年我国在此基础上改进并研发了静钻根植桩技术^[1]. 静钻根植桩是一种由水泥土和预制桩相结合的桩型, 施工时先钻孔至持力层, 搅拌并灌入水泥浆, 然后使预制桩依靠桩身自重植入孔内, 随着水泥浆逐渐固化, 最终形成由水泥土包裹预制桩的复合桩^[2]. 由于该桩具有高承载力、低噪音、低排放等特性, 引起了理论界与工程界的强烈兴趣, 并开展了不少相关研究.

周佳锦等、黄晟等^[3-8]研究了静钻根植桩的荷载传递机理, 并通过模型试验和数值模拟, 分析了软土地区静钻根植桩承载力特性. 肖偲等^[9]研究了静钻根植桩的振动特性和动力响应. 张日红等^[2]探讨了其设计方法和竖向抗压承载力的估算方法, 并介绍了工程实例. 钱铮等^[10]开展了 3 组共 6 根桩的水平静载试验, 研究了静钻根植桩在水平荷载作用下的变形特性. 凌造等^[11]、王卫东等^[12-13]系统分析了上海地区静钻根植桩成桩效果与质量, 并基于现场抗压、抗拔静载试验及桩身内力测试, 研究静钻根植桩的竖向承载变形特性以及桩身轴力和侧摩阻力分布. 徐胜锋等^[14]在宁波轨道交通建设项目中采用自平衡法检测了 2 根试桩, 测试了静钻根植桩的竖向承载力. 郦亮^[15]介绍了静钻根植

桩在宁波轨道交通工程项目中的应用案例. 李鹏等^[16]介绍了静钻根植竹节桩在温州沿海软土地区的应用情况, 并对静钻根植竹节桩的力学原理及适用范围进行了探讨. 在排水桩技术方面, 李富荣等^[17]设计了一种包括预制桩和砂衬的自排水桩; 曹沂风等^[18]提出带砂衬的齿纹面排水桩; 乐腾胜等^[19]开展了有孔管桩静压沉桩超孔隙水压力消散室内模型试验; 梅国雄等^[20]提出透水管桩技术.

我国沿海地区多为深厚软土地质, 其中软弱黏土层具有含水率高、渗透系数小、抗剪强度低和压缩性高等特点. 受这些不利因素影响, 静钻根植桩的桩侧摩擦阻力较小; 另外, 由于桩周水泥土固化较慢, 导致桩基初期承载力低. 为解决这些问题, 本项目组采用静钻根植排水桩技术, 开展了排水桩与传统桩对比模型试验, 测试并检验了静钻根植排水桩在承载力和抗变形能力方面的优越性^[21]. 但到目前为止, 关于静钻根植排水桩的承载性能还缺乏深入研究, 且抽排水时间对桩基承载力的影响尚不清楚.

对此, 本文将采用 PLAXIS 3D 有限元软件对静钻根植排水桩的承载性能进行模拟. 首先将模拟结果与模型试验结果进行比较, 验证所建立模型的可靠性. 并在此基础上, 对现场工况下的静钻

收稿日期: 2022-08-09.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省基础公益研究计划(LGG21E080005); 宁波市重大科技攻关暨揭榜挂帅项目(2022Z030).

第一作者: 孙嘉峰(1998-), 男, 浙江温州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 排水桩. E-mail: 787359025@qq.com

*通信作者: 邓岳保(1983-), 男, 湖南岳阳人, 博士/教授, 主要研究方向: 软土地基处理. E-mail: dengyuebao@nbu.edu.cn

根植排水桩的承载性能进行分析与研究.

1 模型试验数值模拟

1.1 数值模型

参考项目组所开展的模型试验^[21], 建立静钻根植排水桩对比试验三维模型, 尺寸为 $l \times b \times h = 1.7 \text{ m} \times 1.7 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$. 根据模型试验情况, 将模型地基设为一个土层, 地下水位在 0.0 m 标高位置. 如图 1 所示, 模型地基中设置两种不同规格的竹节桩, 对它们分别开展静钻根植桩和静钻根植排水桩对比试验. 模型桩插入深度为 1.2 m , 桩间距为 0.8 m . 具体尺寸信息及排水通道设置情况见表 1, 表中: L 为桩长; d 为桩径; D 为竹节直径.

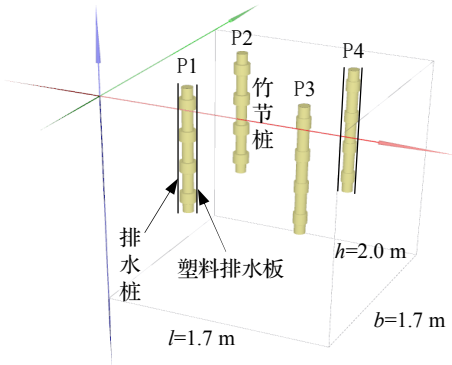


图 1 模型地基及桩基布置

表 1 不同桩基尺寸

桩号	桩尺寸	排水通道
P_1	$L=1.2 \text{ m}, d=8 \text{ cm}, D=10 \text{ cm}$	无
P_2	$L=1.2 \text{ m}, d=8 \text{ cm}, D=10 \text{ cm}$	有
P_3	$L=1.2 \text{ m}, d=8 \text{ cm}, D=12 \text{ cm}$	无
P_4	$L=1.2 \text{ m}, d=8 \text{ cm}, D=12 \text{ cm}$	有

利用实体桩单元模拟静钻根植桩, 以及利用排水线模拟塑料排水板. 模型桩采用线弹性本构

关系进行模拟, 材料参数见表 2. 模型桩完全由水泥土包裹, 水泥土直径为 14 cm ; 参考有关资料^[7,11], 水泥土采用 CTS 模型进行模拟(适用于水泥土、混凝土的弹塑性模型), 相关材料参数见表 3. 土体采用硬化 HS 模型以模拟土体材料, 相关土层参数见表 4. 此外, 桩-水泥土-土体界面单元属性通过设置相应的强度折减系数 R_{inter} 来控制.

表 2 桩参数信息表

材料模型	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E/kPa	ν	R_{inter}
线弹性	25	3×10^7	0.24	0.5

由于模型试验中采用四周封闭的模型箱, 所以设置数值模型的排水边界为四周封闭不渗透. 其中, 四周位移边界为法向固定、竖向自由, 底部边界为完全固定, 顶部边界为自由边界.

材料参数设置及结构模型建立完成后进行网格划分. 首先开展网格敏感性分析, 采用平面三角形 10 节点单元, 划分单元 52 257 个, 节点 74 141 个, 网格划分情况如图 2 所示.

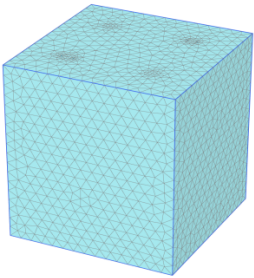


图 2 网格划分图

网格划分完成后, 定义施工步骤, 共 4 个阶段: (1)初始应力阶段, 利用“ K_0 过程”对模型进行初始应力场计算; (2)静钻根植桩及静钻根植排水桩的施工处理; (3)抽真空阶段, 利用稳态地下水渗流模式计算, 激活排水线进行抽真空, 抽真空时间设置

表 3 水泥土参数信息表

材料模型	排水模型	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	e_{init}	ν	$k/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	R_{inter}	E_{28}/kPa
CTS	排水	14.9	1.10	0.2	$0.864 0 \times 10^{-3}$	0.7	100 000

表 4 模型地基土层参数信息表

土层信息	排水类型	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	e_{init}	$c'_{\text{ref}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	$\phi'/(^\circ)$
软土	不排水	14.6	1.10	1	10
$k/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	$E_{50}^{\text{ref}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	$E_{\text{osd}}^{\text{ref}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	m	R_{inter}
0.864e-3	600	600	6 000	0.9	0.7

为3 h; (4)静载阶段, 激活各个桩顶荷载, 加载方式模拟慢速维持荷载法, 进行逐级加载, 直至破坏。

1.2 数值模拟结果

1.2.1 孔隙水压力

根据模型试验测试情况, 排水线的真空度设置为 -40 kPa, 进行分步施工计算, 得到土层孔隙水压力变化。抽真空3 h后的孔压云图如图3所示。根据数值模拟结果, 发现模型地基抽真空3 h后, 大小竹节桩侧孔压变化分别为27 kPa和25 kPa; 临近排水通道0.25 m处, 孔压变化1 kPa左右; 超过0.5 m时, 土中孔压变化不明显。数值模拟孔压变化与模型试验实测值比较结果见表5, 由表中数据可知, 数值模拟孔压结果与模型试验孔压测试结果相对误差在15%~67%之间。

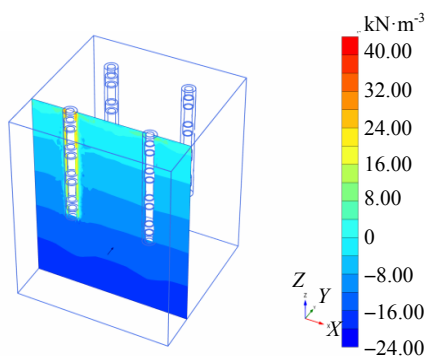


图3 孔压变化图

表5 孔压变化量对比表

位置	实测值	模拟值
小竹节桩侧	20	25
大竹节桩侧	23	27
临近排水通道 0.25 m	3.0	0.8
临近排水通道 0.50 m	0.20	0.14

1.2.2 桩基承载特性

模拟慢速维持荷载法, 在桩顶分级施加0~1.8 kN(360 kPa)的荷载来模拟静载试验中的桩顶荷载, 级差为0.15 kN。荷载分级激活, 由此得到各级荷载作用下的沉降, 进一步得到荷载—沉降曲线($Q-s$ 曲线)。由两种规格竹节桩的 $Q-s$ 曲线的模拟值与实测值对比情况(图4、图5)可知, 静钻根植桩早于静钻根植排水桩发生破坏; 在相同荷载作用下, 静钻根植排水桩破坏程度小, 产生沉降小, 表明排水桩承载性能更好。大小竹节桩的模拟曲线与试验曲线趋势均大致吻合, 表明本文所建立的三维

模型及所选参数合理。

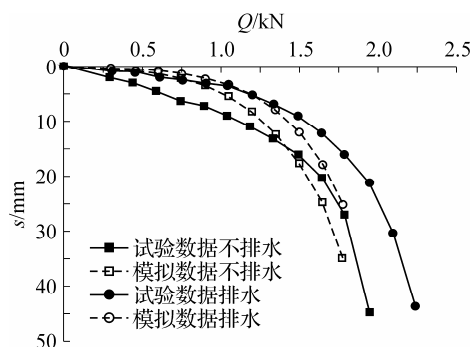


图4 大竹节桩荷载—沉降曲线对比图

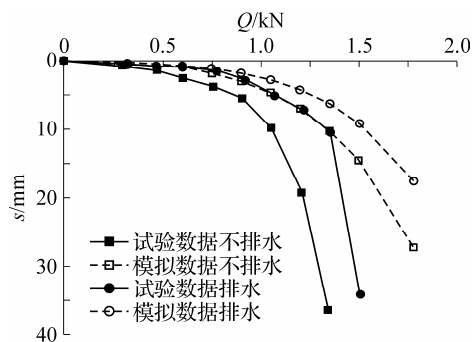


图5 小竹节桩荷载—沉降曲线对比图

2 现场工况数值模拟

2.1 数值模型

拟建项目为街道卫生院, 地处浙江省宁波市海曙区, 测试场地位于HJ01-05-n2地块, 并根据该地块岩土工程勘察报告, 场地典型的地质条件及桩基(静钻根植桩)设计资料如图6所示。数值模型为单桩地基三维模型, 模型尺寸为 $l \times b \times h = 8.0 \text{ m} \times 8.0 \text{ m} \times 55.0 \text{ m}$ 。根据测试场地勘察报告, 将地基土层简化为5个土层(图6), 地下水位在 -2.0 m标高位置。土层名及厚度分别如下: 黏土2 m、淤泥13 m、黏土20 m、粉质黏土10 m、含卵石粉质黏土10 m。模型地基中设置一根静钻根植桩, 开展有无塑料排水板的对比数值试验。其中, 桩长 $L=45.0$ m, 桩径 $d=0.5$ m, 钻孔直径 $D_1=0.65$ m, 扩底直径 $D_2=1.04$ m。

根据模型试验模拟结果, 现场工况的数值模拟采用与之相同的结构模型及本构关系。利用实体桩单元模拟静钻根植桩, 利用排水面模拟塑料排水板。桩采用线弹性本构关系进行模拟, 相应材料参数见表2。桩基完全由水泥土包裹, 水泥土采

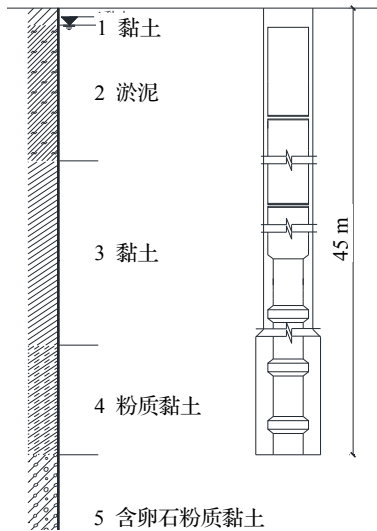


图6 土层分布及桩基资料

用 CTS 模型进行模拟, 水泥土中水泥掺量为原状土质量的 15%, 其材料参数见表 6. 土体采用硬化 HS 模型模拟土体材料, 排水类型设为不排水(A); 根据地勘报告中各土层的物理力学参数(典型值)进行模型地基的参数设置, 其具体土层参数见表 7. 桩-水泥土-土体界面单元通过设置相应的强度折减系数 R_{inter} 来控制.

表 6 水泥土参数

材料模型	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	e_{init}	ν'	$k / (\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	R_{inter}	E_{28} / kPa
CTS	14.9	1.1	0.2	0.864×10^{-3}	0.7	250.1×10^3

模型边界条件、四周位移边界、底部边界、顶部边界与上文模型相同设置. 网格划分采用平面三角形 10 节点单元, 划分单元 35 093 个, 48 234 个

节点. 结合排水桩实际, 同样将施工步定义为上文的 4 个阶段, 其中第 3 阶段的抽真空阶段时间分别设置为 1、3、7、28 d.

2.2 数值模拟结果及分析

2.2.1 孔隙水压力

结合实际工况, 排水面真空度设置为 -90 kPa (因为塑料排水带埋深至地下 2 m 处, 密封性较好, 可达到较高真空度), 抽真空时间设置为 0~28 d, 进行分步施工计算, 输出相对应孔压云图. 由图 7 不同阶段的孔压及超孔压变化可知: (1)抽真空 7 d 后, 土内孔压相较于初始状态有一定程度上变小, 影响程度随离排水面的距离增大而减弱, 且抽真空效果随深度的增加而减弱. (2)伴随排水面的激活, 土内产生超静孔压, 此时的土层渗透性越小, 而孔压值越大, 且超静孔压影响程度随离排水面距离的增大而增大. 上述情况表明, 抽真空期间, 真空负压传递到地基中, 在地基土体发生排水固结, 其抗变形能力及抗剪切强度均得到提升.

2.2.2 桩基承载特性

将静钻根植排水桩模型的抽真空时间分别设置为 1、3、7、28 d. 抽真空完成后, 分别进行静载荷试验. 模拟慢速维持荷载法, 在桩顶上分级施加荷载, 级差为 500 kN, 并分级激活荷载, 由此得到各荷载—位移曲线($Q-s$ 曲线). 并在此基础上, 对比不同抽真空时间下排水桩与不排水桩承载力的区别. 由图 8 可知, 随着抽排水时间的增加, 桩基承载力提升; 相对来说, 在初期承载力提升更明显. 根据《建筑地基基础设计规范》, 当 $Q-s$ 曲线无

表 7 土层参数

土层信息	排水类型	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	e_{init}	$c'_{ref} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	$\phi' / (^{\circ})$	$k / (\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$
黏土	不排水(A)	17.8	1.100	26.0	13.0	0.895×10^{-3}
淤泥	不排水(A)	16.2	1.561	9.3	7.3	0.440×10^{-3}
黏土 2	不排水(A)	17.6	1.158	26.0	13.0	0.895×10^{-3}
含卵石粉质黏土	不排水(A)	18.0	0.898	28.8	15.3	0.864×10^{-1}
	不排水(A)	19.5	0.708	35.4	16.0	0.864×10^{-1}
土层信息	排水类型	$E_{50}^{ref} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	$E_{oed}^{ref} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	$E_{ur}^{ref} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	m	R_{inter}
黏土	不排水(A)	3 000	3000	15 000	0.9	0.7
淤泥	不排水(A)	600	600	6 000	0.9	0.7
黏土 2	不排水(A)	3 000	3 000	15 000	0.9	0.7
含卵石粉质黏土	不排水(A)	4 000	4 000	25 000	0.9	0.7
	不排水(A)	5 000	5 000	25 000	0.9	0.7

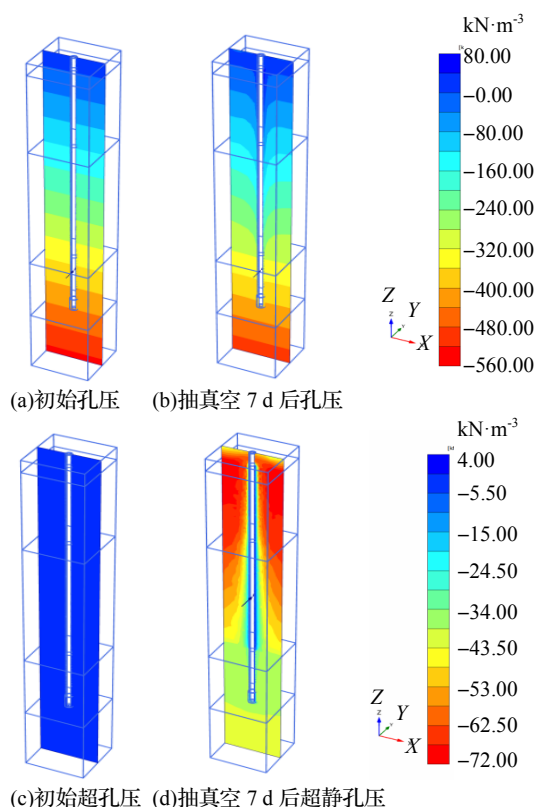
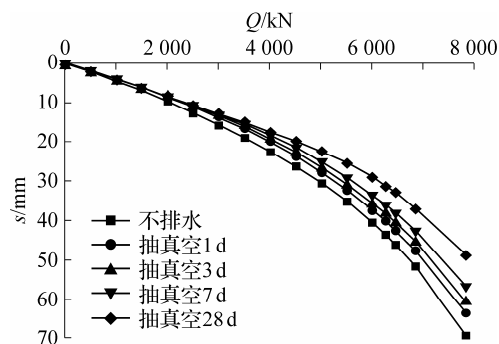


图7 不同阶段孔压及超静孔压变化

明显的拐点时,取桩顶总沉降为 40 mm 时相应的荷载值为单桩极限承载力,并据此可以得到不同抽真空时间下的桩基极限承载力。

图8 $Q-s$ 曲线对比图

由表8的不同抽排水时间条件下桩基极限承载力对比可知,随抽真空时间增加,桩基承载力提升程度上升,抽真空1 d时,排水桩相较不排水桩单桩极限承载力提升5.15%;抽真空7 d时,极限承载力提升11.19%;抽真空28 d时,极限承载力提升约20%。进一步可知,随着真空作用时间增加,桩基承载力效率不断提升,但这种提升效应随抽排水时间增加而逐渐趋缓。对桩基承载力提升随时间

变化进行拟合,拟合公式为 $y=0.0427\ln(x)+0.0397$ 。考虑到桩基承载力在3~4个月会达到稳定,据此可得最终承载力提升值约为25%。但关于抽排水时间的最优值需要根据承载性能的提升效果、工期和造价来综合确定。

表8 不同抽排水时间条件下的桩基承载力

桩基情况	承载力/kN	提升率/%
不排水桩	5 962.70	—
排水 1 d	6 269.90	5.15
排水 3 d	6 415.22	7.59
排水 7 d	6 629.76	11.19
排水 28 d	7 107.27	19.20

3 结语

在已有研究基础上,基于 PLAXIS 3D 软件建立静钻根植排水桩有限元模型,通过比较数值模拟结果与实测结果,检验有限元分析的可靠性。在此基础上开展案例分析,得到的主要结论如下:

(1)现场工况下,对桩基进行真空负压排水固结模拟,发现抽真空使桩侧土体孔压下降,且其影响程度随离排水面的距离增大而减弱,表明真空负压传递到地基当中,使土体发生排水固结,增强其抗变形能力及抗剪切强度。

(2)结合现场工况进行排水桩承载能力分析,发现相较于不排水桩,排水桩极限承载能力提升5%~20%;随着抽真空时间的增加,排水桩承载力提升值越大,但提升趋势逐渐减缓,最终的承载力提升值为25%。

(3)数值模拟进一步验证了静钻根植排水桩技术的可行性。该技术增加的成本和工期不明显,但桩基承载力可得到明显提升。其次,可通过控制抽真空时间,有选择性地提升桩基承载力,由此来优化桩基布局,达到科学布桩、提升建筑物安全稳定性的目标。

参考文献:

- [1] 方伟定,龚健,余智恩,等. 静钻根植桩的设计、施工与试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(S1): 205-209.
- [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.
- [4] Zhou J J, Gong X N, Wang K H, et al. A model test on the behavior of a static drill rooted nodular pile under compression[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2016, 34(3):293-301.
- [5] Li Z Y, Wang K H, Wu W B, et al. Longitudinal dynamic impedance of a static drill rooted nodular pile embedded in layered soil[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018, 36(3):253-263.
- [6] 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.
- [7] 周佳锦, 龚晓南, 王奎华, 等. 静钻根植竹节桩荷载传递机理模型试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(3):531-537; 546.
- [8] 黄晟, 周佳锦, 龚晓南, 等. 静钻根植桩抗压抗拔承载性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(1):30-36.
- [9] 肖僇, 王奎华, 张日红, 等. 静钻根植桩低应变动力响应的现场试验和数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(4):406-412.
- [10] 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, 36(S2):588-594.
- [11] 凌造, 吴江斌, 王卫东. 软土地层静钻根植桩承载性状数值模拟分析[J]. 建筑科学, 2020, 36(S1):94-102.
- [12] 王卫东, 凌造, 吴江斌, 等. 上海地区静钻根植桩成桩效果与质量试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(12):115-119.
- [13] 王卫东, 凌造, 吴江斌, 等. 上海地区静钻根植桩承载特性现场试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2):238-245.
- [14] 徐胜锋, 陈洪雨, 张正龙, 等. 宁波轨道交通静钻根植桩的承载力自平衡测试[J]. 土工基础, 2018, 32(4):445-448.
- [15] 郦亮. 静钻根植桩在轨道交通中的应用研究[J]. 施工技术, 2018, 47(S1):111-113.
- [16] 李鹏, 裘国荣, 庄千收. 淤积软土地区静钻根植竹节桩适用性研究[J]. 施工技术, 2020, 49(7):13-16.
- [17] 李富荣, 周乾, 吴发红. 预制自排水桩的试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(9):96-100.
- [18] 曹沂风, 郭兆泉. 带砂衬的齿纹面排水桩: CN101122129A[P]. 2008-02-13.
- [19] 乐腾胜, 雷金波, 周星, 等. 有孔管桩静压沉桩超孔隙水压力消散室内模型试验分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(4):83-87.
- [20] 梅国雄, 梅岭, 张乾, 等. 塞孔式减压排水管桩及其制备工艺: CN102277869A[P]. 2011-12-14.
- [21] 邓岳保, 张日红, 孙嘉烽, 等. 静钻根植排水桩技术及模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(8):293-302.

Numerical analysis of bearing characteristics of static drilling rooted drainage piles

SUN Jiafeng¹, DENG Yuebao^{1*}, SHAO Feiyu¹, ZHANG Rihong^{1,2}

(1.School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Zhongchun Hi-Tech Co., Ltd., Ningbo 315042, China)

Abstract: The static drilling rooted drainage pile is a new technology, and its bearing characteristics need to be studied in depth. Combined with numerical simulation, the finite element analysis of static drilling and rooted drainage piles is carried out. Firstly, the model test of static drilling and rooted drainage piles is simulated, and the reliability of the numerical model is verified by the comparison between the simulation and the experiment results. On this basis, modeling is carried out according to the engineering scenario to study the bearing characteristics of drainage piles, focusing on the effect of vacuum negative pressure pumping drainage time on the bearing performance of pile foundation. The research results can provide reference for the promotion and application of static drilling root drainage piles.

Key words: static drilling rooted pile; vacuum pressure; pumping and drainage; bearing capacity

(责任编辑 章践立)