

基于有限元模拟的填砂竹节桩工作性能研究

蔡邦国¹, 姜玉龙^{1*}, 童魏烽², 王奎华², 刘鑫²

(1.浙江温州沈海高速公路有限公司, 浙江 温州 325000; 2.浙江大学 滨海与城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 利用 ABAQUS 有限元软件建立理论模型, 对新型复合桩基——填砂竹节桩的工作性能进行了理论分析. 结果表明: (1)在地基处理中, 填砂竹节桩比传统圆管桩具有一定的优越性; (2)竹节桩的竹节间距越大, 竹节高度越小, 桩周土体孔隙水压力消散越快, 竹节厚度对其影响不大; (3)对于填砂竹节桩工艺, 填砂的级配和渗透系数对桩周土体孔隙水压力消散影响很小.

关键词: ABAQUS; 填砂竹节桩; 桩土应力比; 孔隙水压力

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 01-0068-04

在我国建筑行业中, 桩基础被广泛应用于住宅、道桥、港口等重要构筑物中, 尤其在东部沿海地区的软土地基处理中, 桩基础可有效提高地基承载力, 减小上部建筑的沉降. 当前主流的桩基础形式为钻孔灌注桩和预制桩. 由于施工方法限制, 灌注桩容易出现离析、沉渣、环境污染等问题; 而预制桩则存在侧摩阻力不高, 桩身材料强度发挥不充分等问题.

竹节桩技术起源于日本, 近年来逐渐应用于我国东部软土地区. 静钻根植工法是一种竹节桩的常用施工方法, 通过钻孔、扩底、注浆、植桩等一系列工序完成, 但该种工法较为复杂, 影响施工效率. 张日红等^[1]提出一种新型的填砂竹节桩工法, 采用打桩机直接打桩, 同时向桩土间空隙中填砂, 形成填砂竹节桩复合地基. 相较而言, 此法更为高效, 施工过程中只需保证填砂充盈率即可; 另一方面, 由于填砂层的存在, 地基土中的孔压能快速消散, 固结沉降快速稳定, 相应地工后沉降减小.

竹节桩的工作性能已有众多学者进行了相关研究. 日本学者对竹节桩的抗压、抗拔性能做了理论研究和现场试验^[2-4], 周佳锦等^[5-6]对静钻根植工法下的竹节桩工作性能做了较为详细的研究, 总结了其承载力计算公式.

而对于填砂竹节桩新工艺的工作性能而言,

国内外开展的研究较少. 本文将基于填砂竹节桩在软粘土地基处理中的应用, 利用大型有限元软件 ABAQUS 建立理论分析模型, 研究其在桩土应力分担比、孔压消散方面的优势, 并分析不同工艺参数对填砂竹节桩工作性能的影响.

1 建模

建立合适的分析模型, 对有限元分析结果的准确性至关重要. 根据温州某高速公路路段进行现场试验时所使用填砂竹节桩尺寸, 建立其二维模型(图 1), 竹节间距 $L=1\text{ m}$, 竹节高度 $H=200\text{ mm}$, 竹节厚度 $D=25\text{ mm}$. 考虑到填砂竹节桩在地基处理中的应用, 不作特殊说明情况下, 在进行数值分析时均采用以下基本参数, 桩距(土体建模宽度) 2.2 m , 基桩弹性模量 $E_p=38\text{ GPa}$, 泊松比 $\nu_p=0.15$, 桩长 14 m . 黏土弹性模量 $E_s=5.5\text{ MPa}$, 泊松比 $\nu_s=0.3$, 渗透系数 $k_s=1\times 10^{-7}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. 填砂 $E_{sa}=200\text{ MPa}$, 泊松比 $\nu_{sa}=0.2$, 渗透系数 $k_{sa}=0.02\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. 竹节桩 P_0 长 14 m , 最大处外径 400 mm , 竹节间距 $1\,000\text{ mm}$, 竹节高度 100 mm , 竹节横向厚度 25 mm . 为了对比分析其优势, 建立相同材料参数的圆管桩模型, 圆管桩 P_c 长 14 m , 外径 400 mm . 考虑到对称性和计算简化, 取一半桩土建模, 网格划分的单元类型分别为 CAX4 和 CAX4P.

收稿日期: 2018-04-16.

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

第一作者: 蔡邦国 (1974—), 男, 浙江温州人, 高级工程师, 主要研究方向: 工程建设及管理. E-mail: 82282053@qq.com

*通信作者: 姜玉龙 (1973—), 男, 湖南岳阳人, 高级工程师, 主要研究方向: 建筑与土木工程. E-mail: 690561392@qq.com

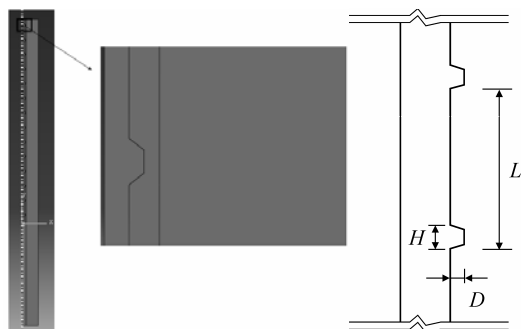


图1 模型示意图

2 数值分析

2.1 桩土应力分担比和孔压消散分析

进行桩土应力分担比研究时, 考虑到高速公路等工程特点, 在基桩和土层顶部施加相同位移沉降. 为方便对比, 将桩顶平均应力值和桩径值作为一个应力单位和距离单位, 对应力 S 和距桩中心的距离 x 进行归一化处理, 得到竹节桩和圆管桩不同位置点所对应的应力大小(图 2), $\bar{S}$ 为归一化处理的应力, $\bar{x}$ 为归一化处理的距桩中心距离. 进行孔隙水压力研究时, 同样为方便对比, 以初始孔压值进行归一化处理, 并且当孔压变化小于 1×10^{-8} 时, 视为稳定, 得到竹节桩和圆管桩桩底和桩中孔隙水压力随时间的变化规律(图 3 和图 4), 其中, t 为时间, $\bar{p}$ 为归一化处理后的孔隙水压力.

由于应力值做了归一化处理, 由图 2 可知, 圆管桩和填砂竹节桩的桩顶应力为 1, 但两者桩间应力相差很大, 圆管桩桩间应力约为 0.7, 而填砂竹节桩桩间应力仅为 0.08, 表明在该种工况下, 填砂竹节桩桩土应力比约为圆管桩 10 倍. 这是由于竹节管桩在嵌入地基土的同时, 不断投入砂石, 改变了桩土间的接触关系; 同时由于砂石层和周围土体的相互作用, 使得其等效直径要大于其竹节外径一致的圆管桩, 从而致使其与周围土体的静刚度之比相较于普通圆管桩要大. 因此, 在地基上部荷载相同时, 填砂竹节桩能承担更多应力, 考虑到混凝土的强度和弹性模量都远大于土体, 基桩分担的应力越多, 地基承载力便越大, 同时地基沉降也越小. 因此从桩土应力角度来讲, 填砂竹节桩复合地基具有相对较好的承载和沉降特性.

比较图 3 和图 4 可知, 经填砂竹节桩处理后的地基孔压消散明显快于圆管桩处理后的地基, 且

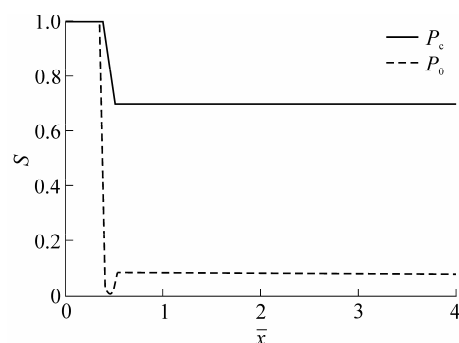


图2 距桩中心点不同位置处的归一化应力值

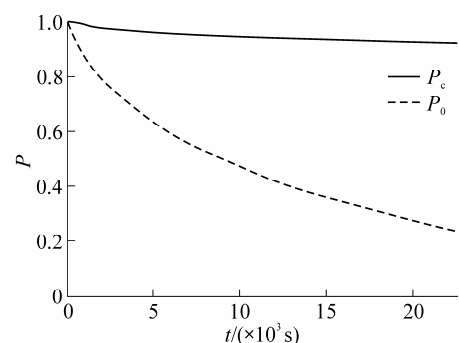


图3 2种桩型桩底地基土孔隙水压力对比

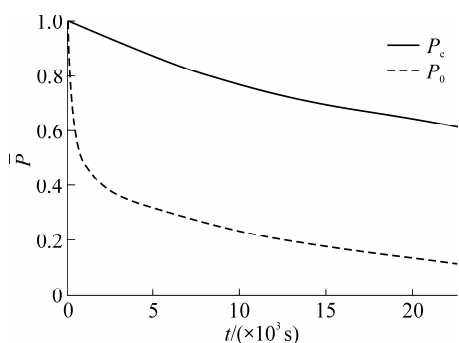


图4 2种桩型桩中处地基土孔隙水压力对比

桩身中间位置的孔压消散快于桩底. 这是由于在填砂竹节桩施工过程中, 竹节间隙利用砂石填充, 而砂石较好的渗透性为地基土提供了可靠的排水通道, 由上部荷载引起的超孔隙水压可以较快地消散, 桩周土体强度可以较快地提高, 从而提供可以更大的侧摩阻力, 同时地基沉降也会更快地达到稳定. 因此, 从孔隙水压力消散角度来讲, 填砂竹节桩同样具有相对较好的工作性能.

2.2 填砂竹节桩工艺参数分析

由上文可知, 在软土地基处理应用中, 填砂竹节桩具有相对较好的工作性能. 然而相比于圆管桩, 填砂竹节桩的工艺参数更为复杂, 除了桩长与桩径外, 还有竹节的间距、高度、厚度以及填砂渗

透性等. 为了更充分地分析研究填砂竹节桩的工作性能, 就相关参数对桩底孔隙水压力的影响进行讨论, 设置对比桩型和工况数据(表 1).

表 1 不同桩型和工况参数

编号	竹节间距/ mm	竹节高度/ mm	竹节厚度/ mm	填砂渗透系 数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
P_0	1 000	100	25	2
P_1	2 000	100	25	2
P_2	2 400	100	25	2
P_3	1 000	400	25	2
P_4	1 000	700	25	2
P_5	1 000	100	50	2
P_6	1 000	100	100	2
P_7	1 000	100	25	0.2
P_8	1 000	100	25	0.02

比较图 5~7 可知, 竹节间距越大, 竹节高度越小, 孔压消散越快, 且更快达到稳定状态, 而竹节厚度对孔压消散的影响不显著. 这是因为竹节间距增大, 竹节高度降低, 都能增加砂石和粘土的有效接触面积, 从而增加排水面积, 形成更为良好的排水通道, 而竹节厚度的变化对提升排水面积的作用不大, 因而其对孔隙水压力的消散影响很小.

根据苏立君等^[8]对砂石粒径与渗透系数的相关研究, 将填砂渗流系数分级对比. 由图 8 可知, 填砂渗流系数越大, 孔隙水压力消散越快. 这是因为传统管桩处理的复合地基中, 孔隙水一般只能从地基土顶面排出, 而填砂层的存在直接增加了地基土孔隙水的侧向排水通道. 随着填砂层粒径级配和渗透系数的改变, 孔隙水的排水条件也相应变化, 并且直接影响孔压消散的时间.

3 工程对比

为验证上述理论规律合理性, 在甬台温高速公路复线温州瑞安至苍南段第七标段课题试验段进行了现场试验. 现场采用填砂竹节桩工艺打入 14 m 长的竹节桩, 桩距 2.2 m, 共打设(7×12) 84 根桩. 选取打桩区域中间位置, 埋入孔压计测量桩底孔压的变化, 得到实测曲线与模型计算曲线对比如图 9 所示. 由图可见, 由于现场工程地质条件较为复杂, 有限元软件很难精确模拟现场实际工况, 因此计算曲线和实际曲线之间存在一定差异, 但

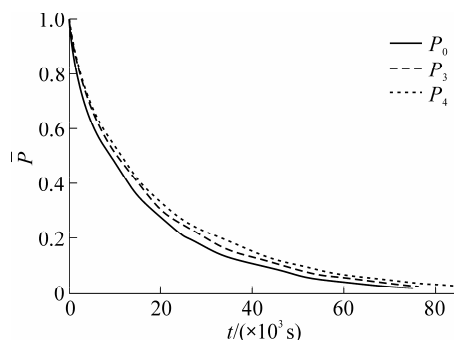


图 5 竹节高度对桩底孔隙水压力的影响

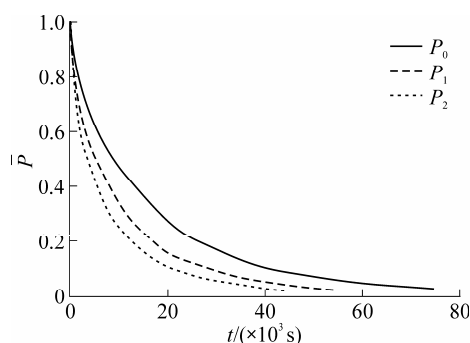


图 6 竹节间距对桩底孔隙水压力的影响

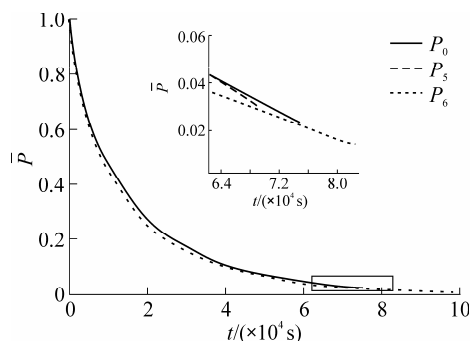


图 7 竹节厚度对桩底孔隙水压力的影响

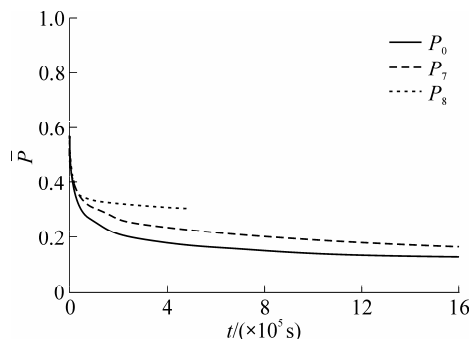


图 8 填砂渗透系数对桩底孔隙水压力的影响

其基本规律相同. 桩底孔压理论值和实测值均随着时间的累积而逐步消散, 并且理论孔压随时间的消散曲线和实际的孔压消散曲线走向趋势基本

一致. 因此可认为, 本文所建立的理论模型和使用的分析方法较为合理, 可以用来进行上述各项研究, 同时也验证了上文研究结果规律的正确性.

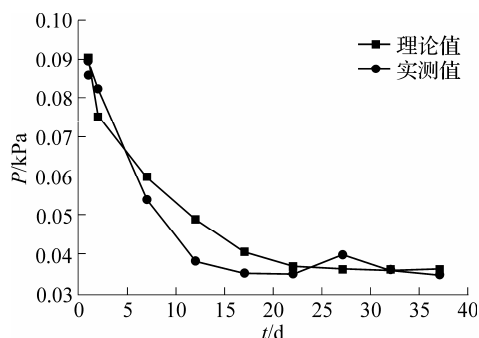


图9 实测曲线与计算曲线对比

4 结论

通过 ABAQUS 建立有限元模型, 从桩土应力比和孔隙水压力入手, 对比分析了填砂竹节桩的工作性能, 并研究了不同工艺和工况参数对其孔隙水压力的影响, 得到以下结论:

(1)在软土地基处理中, 相比于传统圆管桩, 填砂竹节桩的桩土应力比更大, 地基土的孔隙水压力消散更快, 具有相对较好的承载和沉降特性.

(2)填砂竹节桩的工艺参数更为复杂, 不同参数对填砂竹节桩孔隙水压力消散的影响程度不同, 竹节间距越大, 竹节高度越小, 桩周土体的孔隙水压力消散越快, 而竹节厚度对桩周土体孔隙水压力消散的影响不大.

(3)填砂竹节桩复合桩基工艺中, 桩土间空隙由砂石料填充, 填砂的粒径和级配会导致其渗透系数改变, 渗透系数越大, 孔隙水压力消散越快.

参考文献:

- [1] 张日红, 吴磊磊, 陈洪雨, 等. 一种填砂竹节桩及其施工方法: 104389305A[P]. 2015-03-04.
- [2] Horiguchi T, Karkee M B. Load tests on bored PHC nodular piles in different ground conditions and the bearing capacity based on simple soil parameters[J]. Journal of Architecture & Building Science, 2017, 1(1): 89-94.
- [3] Honda T, Hirai Y, Sato E. Uplift capacity of belled and multi-belled piles in dense sand[J]. Soils & Foundations, 2011, 51(3):483-496.
- [4] Karkee M B, Kanai S, Horiguchi T. Quality assurance in bored PHC nodular piles through control of design capacity based on loading test data[EB/OL]. [2017-12-15]. http://www.japanpile.co.jp/ir/uploads/02_7.pdf.
- [5] 周佳锦, 王奎华, 龚晓南, 等. 静钻根植竹节桩承载力及荷载传递机制研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(5):1367-1376.
- [6] 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.
- [7] 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, 2013:88-125.
- [8] 苏立君, 张宜健, 王铁行. 不同粒径级砂土渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(5):1289-1294.

Performance analysis of sand-filled nodular pile based on finite element simulation

CAI Bang-guo¹, JIANG Yu-long^{1*}, TONG Wei-feng², WANG Kui-hua², LIU Xin²

(1. Zhejiang Wenzhou Shenhai Express Way Co. Ltd., Wenzhou 325000, China;

2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Theoretical analysis of the working performance of sand-filled nodular pile has been carried out by using finite element software ABAQUS. The results show that: (1) The sand-filled nodular pile has some advantages in foundation treatment compared with the conventional circle pile; (2) For the sand-filled nodular pile, the larger the node distance and the smaller the node height, the quicker the pile soil dissipation of the pore-water pressure, and it is little affected by the node thickness; (3) The particle gradation and the permeability coefficient of the filled sand have little influence on the dissipation of pore-water pressure.

Key words: ABAQUS; sand-filled nodular pile; pile-soil stress ratio; pore-water pressure

(责任编辑 章践立)