

DOI: 10.11779/CJGE2019S1020

微型钢管灌注桩的竖向承载性状研究

潘 健, 袁文俊*, 韦莎丽, 程 赛

(华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘 要: 微型钢管灌注桩属于微型桩的一种, 经常用于建筑物的基础加固工程。基于广州市白云区金沙洲某基础加固工程的微型钢管灌注桩静载试验成果, 利用 ABAQUS 有限元软件建立钢管-核心混凝土-土-岩共同作用模型, 探讨了基岩模量、嵌岩深径比、钢管壁厚等因素对微型钢管灌注桩承载力的影响。静载试验的数值模拟表明: 对于上覆土层为软土的情况, 微型钢管灌注桩虽是超长桩, 但桩端阻力仍是承载力的主要部分; 桩的承载力随基岩的弹性模量增加而增加, 但并非线性关系, 其增长趋势最终变缓; 桩的竖向承载力随钢管壁厚增加而线性增加; 嵌岩深径比对桩的竖向承载力基本没有影响。

关键词: 基础加固; 微型钢管灌注桩; 承载性状; 钢管混凝土本构模型; ABAQUS

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S1-0077-04

作者简介: 潘 健(1963—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事岩土工程设计方法和风险分析研究。E-mail: cvpan@scut.edu.cn。

Shaft bearing behaviors of micro cast-in-place piles with steel tubes

PAN Jian, YUAN Wen-jun, VAISHALI Sharma, CHENG Sai

(Department of Civil and Transportation Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The micro cast-in-place pile with steel tubes is one of the micro-piles, which is often used in the foundation reinforcement of buildings. Based on the static load test results of micro cast-in-place piles with steel tubes in a foundation reinforcement project in Jinshazhou, Baiyun District, Guangzhou City, a model for the interaction between steel tubes, core concrete, soil and rock is established by using the ABAQUS finite element software. The influences of the modulus of foundation rock, the ratio of depth to diameter of rock socket and the thickness of steel tube on the bearing capacity of the micro cast-in-place piles with steel tubes are discussed. The numerical simulation of static load tests shows that the resistance of pile tip is still the main part of bearing capacity for super-long piles with overlying soft soil. The bearing capacity of piles increases with the increase of the elastic modulus of bedrock, but the nonlinear relationship leads to a slower growth trend. The vertical bearing capacity of piles increases linearly with the increase of the thickness of steel tube wall. It has little effect on the vertical bearing capacity of piles.

Key words: foundation reinforcement; micro cast-in-place pile with steel tube; shaft bearing behavior; constitutive model of concrete filled steel tube; ABAQUS

0 引 言

微型钢管灌注桩由于其桩径小、施工简便、引起附加下沉微小, 广泛用于基础托换等加固处理中。它是在小直径钢管中灌注混凝土(或水泥砂浆)形成的一种微型桩, 工程中其直径大多在 100~300 mm 范围内。黄小许等^[1]认为微型钢管灌注桩的承载力主要由桩底基岩承载力和桩周基岩黏结力组成, 可以不考虑上覆土层的侧阻力。

高旭^[2]认为, 微型钢管灌注桩上覆土层侧阻力、嵌岩段侧阻力、嵌岩桩端阻力对桩顶荷载的分担比例, 主要与土层性质、桩底沉渣及入岩深度有关, 其工作

机理类同一般摩擦端承桩, 一般可按嵌岩灌注桩设计。谷伟平等^[3]经过几个工程案例的现场测试结果分析, 建议当微型钢管桩的变形处于弹塑性阶段时, 各单桩的承载力设计值按桩的变形要求确定。黄穗欢等^[4]通过分析多项工程的现场试验结果, 认为由于微型钢管灌注桩入岩孔径小, 清孔质量易保证, 其承载力主要由嵌岩段桩身与岩层的黏结摩擦力提供。

以往的研究中大部分集中在施工工艺上, 而对于

收稿日期: 2019-04-29

*通讯作者 (E-mail: 1984604138@qq.com)

承载变形特性，大都认为与普通嵌岩桩类似，很少进行过单独的论证。本文基于广州市白云区金沙洲某基础加固工程的静载试验成果，通过 ABAQUS 建立三维有限元模型，对微型钢管灌注桩进行有限元模拟，探讨其竖向承载力的影响因素。

1 静载试验的有限元模拟

1.1 静载试验的有限元模型

广州市白云区金沙洲某项目为地下一层的下沉式结构，基础采用钢管桩。项目投入使用后，基础出现了显著不均匀下沉，勘察资料表明基础下存在较厚的高含水量淤泥。为了控制建筑物的沉降，最终采用 307 根 $\Phi 150 \times 3.5$ mm 的微型钢管灌注桩进行加固，并在现场进行单桩静载试验。

以静载试验中某长 15 m 试桩为研究对象，其嵌岩深度为 0.6 m，最大加载量为 400 kN，未达到极限承载力，本文采用 ABAQUS 有限元软件对该桩进行三维数值模拟，模型的网格划分如图 1 所示。



图 1 1/4 模型的网格划分

Fig. 1 Mesh generation of 1/4 model

由于微型钢管灌注桩桩径很小，在实际工作中其核心混凝土处于塑性工作阶段^[3]，且钢管对混凝土有约束作用，故本文采用了清华大学韩林海^[5]提出的钢管混凝土本构模型。钢管采用等向弹塑性模型，使用 von-Mises 屈服准则，土层采用屈服准则，岩层采用 Drucker-Prager 屈服准则。为了考虑钢管 - 核心混凝土 - 岩 - 土之间的相互作用，本文采用基于 Mohr-Coulomb 模型的面-面接触算法，岩土参数取值参照表 1。

表 1 岩土参数

Table 1 Parameters of soil and rock

序号	土层	厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	饱和单轴抗压强度/MPa
①	杂填土	1.4.0	17.0	10	12	—
②	淤泥质土	13.0	17.2	8	7	—
③	微风化灰岩	6.6	26.0	—	—	33.7~104.4

1.2 有限元模拟结果与实测值的比较

将实测的荷载 - 位移曲线与有限元数值模拟结果

进行对比可知，两条曲线的变化趋势较为一致，有限元模拟值与实测值比较吻合（如图 2），因此，可认为本文建立的微型钢管灌注桩有限元模型比较可靠。

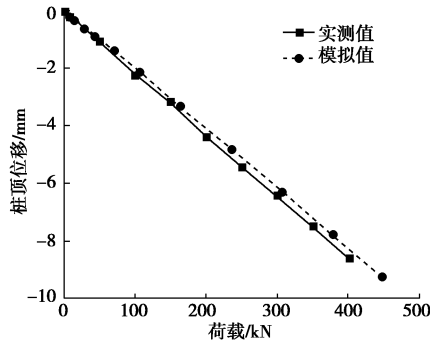


图 2 模拟值与实测值的对比

Fig. 2 Comparison between simulated and measured values

2 影响因素分析

基于上述静载试验的计算模型，本节将对微型钢管灌注桩竖向承载力的影响因素进行分析。由于大多数桩基础的首要问题是在于控制其沉降量^[6]，故本文选取桩顶位移为控制标准，取桩顶沉降 0.1D 对应的荷载为其承载力进行研究。

为了初步了解微型钢管灌注桩承载性状的影响因素，基于其受力特点，可以将基岩简化为单位长度的弹簧，桩侧摩阻力以及钢管与核心混凝土切向的相互作用，用切向弹簧进行描述^[7]，最终简化为如图 3 的杆系模型。

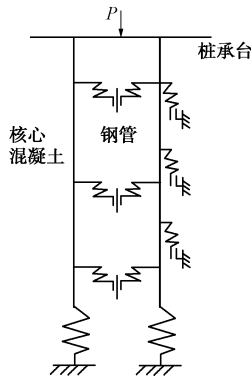


图 3 简化模型

Fig. 3 Simplified model

其中，钢管底部与核心混凝土底部基岩简化成单位长度弹簧后的刚度分别为 $E_r A_s$ ， $E_r A_c$ 。钢管的刚度为 $E_s A_s$ ，核心混凝土的刚度为 $E_c A_c$ 。则桩顶下沉 Δ 时对应的外荷载为

$$P = \frac{1}{L} \left(\frac{E_c A_c \cdot E_r A_c}{E_c A_c + E_r A_c} + \frac{E_s A_s \cdot E_r A_s}{E_s A_s + E_r A_s} \right) \cdot \Delta + \sum u_s \cdot \tau_s(z) + \sum u_r \cdot \tau_r(z) \quad (1)$$

式中， E_c ， E_s ， E_r 分别为混凝土、钢管和基岩的弹性模量； A_c ， A_s 分别为简化成杆系构件后各截面的面

积; L 为桩长; u_s 为土层段桩周面积, u_r 为嵌岩段桩周面积; $\tau_s(z)$ 为土层段桩周剪应力, $\tau_r(z)$ 为嵌岩段桩周剪应力, 其大小与桩和土、岩的相对位移有关。

从式 (1) 中可知, 当桩的桩径、桩长以及桩顶沉降一定时, 影响桩承载力的变量有 E_c , E_s , E_r , A_c , A_s , $\tau_s(z)$, $\tau_r(z)$ 。由于在工程使用中混凝土和钢管的弹性模量变化不大^[8], 钢管壁厚对混凝土面积的影响很小, 故本文主要探讨基岩模量、深径比和钢管壁厚对微型钢管灌注桩承载性状的影响, 采用单一变量的原则进行分析。

2.1 基岩模量的影响

深径比取 4、钢管壁厚为 3.5 mm, 基岩模量从 0.3 GPa 到 10 GPa 进行变化, 探讨基岩模量对承载力的影响。

从图 4、图 5 可知:

(1) 桩的承载力随着基岩模量的增加而增加, 但并非线性的关系, 其增加趋势逐渐变缓, 基岩模量增加至 10 GPa 时承载力的增加量甚微; 桩端阻力 (Q_p) 先增加后减小, 嵌岩段侧阻力 (Q_r) 逐渐增加, 土层侧阻力 (Q_s) 略微呈下降趋势。

(2) 桩端阻力分担的荷载大于桩侧摩阻力, 其占总荷载的比例超过 60%。这是因为上覆土层为软土, 钢管与土的摩擦系数较小, 且钢管桩直径过小, 导致桩周土体所提供的摩阻力偏小, 因此桩端阻力仍是承载力主要部分^[9]。

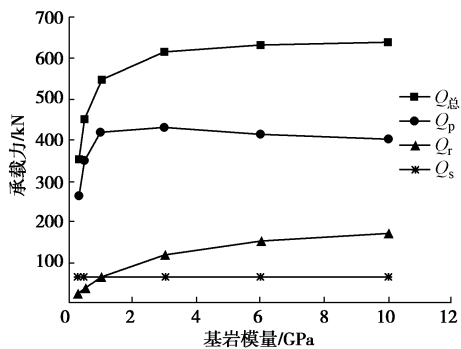


图 4 承载力随基岩模量变化

Fig. 4 Variation of bearing capacity with change of modulus of bedrock

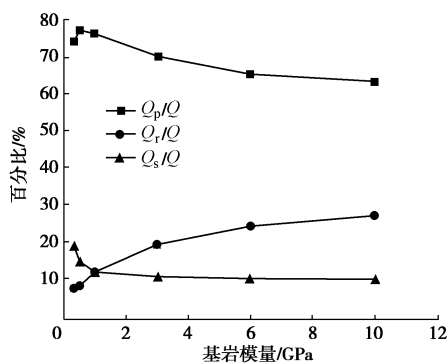


图 5 不同基岩模量下荷载占比

Fig. 5 Load distribution under different moduli of bedrock

2.2 嵌岩深径比的影响

基岩模量取 3 GPa、钢管壁厚为 3.5 mm, 深径比从 2 到 10 进行变化, 探讨深径比对承载力的影响。

由图 6 可知, 随着深径比的增加, 桩身承载力基本保持不变, 但是桩端阻力逐渐下降, 嵌岩段侧阻增加, 土层侧阻力基本没有变化。

故当桩顶沉降为控制因素时, 嵌岩深径比对桩身承载力基本没有影响。这是因为桩侧阻力先于桩端阻力发挥, 并且前者发挥的程度以及发挥所需的位移均比后者大。当嵌岩深度增加时, 嵌岩段侧阻首先增加, 且增加量大于桩端阻力, 但其增加的代价是消耗过多的桩顶沉降, 两者的综合作用最终导致在桩顶沉降一定时桩的承载力基本没有变化。

因此, 在工程设计中, 当要求以变形控制为目标时, 不必过分强调嵌岩的深度, 满足构造上的要求即可。一味地增加嵌岩深度, 既不能增加桩的承载力, 同时也加大施工难度以及增加工程造价^[10]。

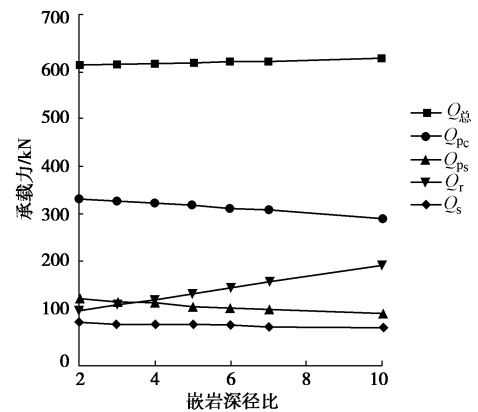


图 6 承载力随深径比变化

Fig. 6 Variation of bearing capacity with change of ratio of socket depth to pile diameter

2.3 钢管壁厚的影响

基岩模量取 3 GPa、深径比取 4, 钢管壁厚从 1 mm 到 5 mm 进行变化, 探讨钢管壁厚对承载力的影响。

从图 7 可以看出, 微型钢管灌注桩的承载力随钢管壁厚的增加而线性增加。由于微型钢管灌注桩中钢

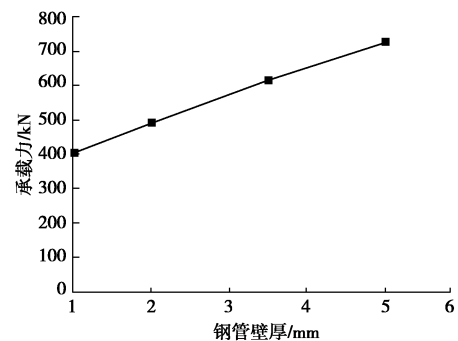


图 7 承载力随钢管壁厚变化

Fig. 7 Variation of bearing capacity with change of wall thickness

管与核心混凝土共同承担荷载, 改变钢管壁厚, 直接影响钢管的承载力; 与此同时, 钢管的厚度影响着核心混凝土的力学行为, 当增加钢管壁厚时, 钢管的约束作用加强, 继而间接提高核心混凝土的承载力^[11]。因此, 钢管壁厚对微型钢管灌注桩的承载力有着重要的影响。

3 结论与建议

本文利用有限元软件 ABAQUS 对微型钢管灌注桩进行了有限元仿真研究, 计算结果表明模拟值与静载试验实测值较为吻合, 在此基础上探讨了在基岩模量、嵌岩深径比和钢管壁厚下对桩身竖向承载力的影响, 初步得到以下结果:

(1) 基岩模量和钢管壁厚对微型钢管灌注桩的承载力影响较大, 但基岩模量增加至一定程度后, 承载力的增加幅度很小。嵌岩的深径比对微型钢管灌注桩的承载力几乎没有影响。

(2) 微型钢管灌注桩一般属于超长桩, 但对于上覆土层为软土的情况, 桩侧摩阻力占总荷载比例较小, 桩端阻力仍为承载力的主要部分。

参考文献:

- [1] 黄小许, 李国雄. 微型钢管灌注桩的研究与应用[J]. 地基基础工程, 1995, 5(4): 19 - 22. (HUANG Xiao-xu, LI Guo-xiong. Research and application of small size bore steel tube cast-in-place pile[J]. Foundation Engineering, 1995, 5(4): 19 - 22. (in Chinese))
- [2] 高旭. 微型钢管灌注桩在基拙加固工程中的设计与应用[J]. 铁道标准设计, 1998, 6(12): 35 - 36. (GAO Xu. Design and application of small size bore steel tube cast-in-place pile in foundation reinforcement engineering[J]. Code Design of Railway, 1998, 6(12): 35 - 36. (in Chinese))
- [3] 谷伟平, 李国雄, 蒋利民, 等. 微型钻孔嵌岩钢管灌注桩[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 344 - 347. (GU Wei-ping, LI Guo-xiong, JIANG Li-min, et al. The small size bore steel tube cast-in-place pile embedded in rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 344 - 347. (in Chinese))
- [4] 黄穗欢, 赖凤葵, 黄小许. 钢管灌注桩在桥基托换工程中的应用[J]. 广东土木与建筑, 2003, 8(7): 9 - 11. (HUANG Hui-huan, LAI Feng-kui, HUANG Xiao-xu. Application of bore steel tube cast-in-place pile in replacement of bridge foundation engineering[J]. Guang Dong Architecture Civil Engineering, 2003, 8(7): 9 - 11. (in Chinese))
- [5] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 68 - 70. (HAN Lin-hai. Concrete filled steel tube structure-theory and practice[M]. Beijing: Science Press, 2004: 68 - 70. (in Chinese))
- [6] 莫海鸿, 杨小平. 基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 118 - 119. (MO Hai-hong, YANG Xiao-ping. Foundation engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014: 118 - 119. (in Chinese))
- [7] MISRA A, CHEN C H. Analytical solution for micropile design under tension and compression[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, 5(22): 199 - 225.
- [8] 潘健, 周森, 林培源, 等. 广州市白云区岩溶塌陷风险初探[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2589 - 2600. (PAN Jian, ZHOU Sen, LIN Pei-yuan, et al. Preliminary study of risks of karst collapse in Guangzhou Baiyun district[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2589 - 2600. (in Chinese))
- [9] 程赛. 微型钢管灌注桩的竖向承载性状研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. (CHENG Sai. Shaft bearing behaviors of micro cast-place pile with steel tube[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese))
- [10] LIN Pei-yuan, CHENG Sai, PAN Jian. Construction technology of steel-pipe pile for the reinforcement in deep and soft silt layer foundation[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 21(22): 7059 - 7071.
- [11] 康希良, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 钢管混凝土套箍机理及组合弹性模量的理论分析[J]. 工程力学, 2007, 24(11): 121 - 125. (KANG Xi-liang, ZHAO Hong-tie, XUE Jian-bin, et al. Theoretic analysis for hooping mechanism and composite elastic modulus of CFST members[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(11): 121 - 125. (in Chinese))

(责编: 明经平)