

桩端后注浆灌注桩承载力增强机理试验研究

张 恒¹, 刘干斌^{1*}, 周 晔¹, 韩 仲²

(1. 宁波大学 岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211; 2. 中铁上海工程局集团有限公司, 上海 200436)

摘要: 为进一步研究灌注桩桩端后注浆承载机理, 对宁波某施工场地的4根灌注桩开展了现场试验研究. 4根灌注桩均采用自平衡方式加载, 以加载方式获得每根桩的 $Q-s$ 曲线, 并通过桩身内部埋设的传感器得到加载期间桩身及桩底的应力数据, 根据应力分析研究桩身弯矩及桩侧摩阻力的变化. 测试结果表明: 桩端后注浆能提高钻孔桩竖向极限承载力约 20%; 注浆期间, 桩侧摩阻力的重新分布使桩身轴力发生较大变化, 且桩端承受弯矩会对桩体结构造成一定破坏; 加载期间, 注浆桩的桩端部分承载力主要由桩侧摩阻力提供, 而非注浆桩的桩端部分承载力主要由端阻力提供; 在透水地层中, 桩承载力的提高依赖于桩侧摩阻力的影响, 而在不透水地层中扩大头的产生也会成为影响因素.

关键词: 桩端后注浆; 灌注桩; 自平衡加载

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2021) 04-0072-07

钻孔灌注桩由于其施工工艺简单、承载力高等优点, 在宁波地区的建筑、道路、桥梁和厂房等基础建设中被广泛地应用. 由于施工过程中, 其泥浆护壁会降低侧阻, 且孔底残渣会降低桩端阻力, 致使钻孔灌注桩承载力不足. 桩端后注浆技术的出现能有效改善以上问题. 通过向桩底注入水泥浆, 加固桩端部分的残渣, 达到提高桩端承载力的效果. 现已有不少学者对该工艺进行过研究^[1-4].

1958 年马拉开波湖大桥工程首次将后注浆法用于预制桩的底部注浆, 此后该技术通过不断研究创新得到了越来越广的应用^[5]. 张忠苗等^[6]通过现场的静载试验, 对比了注浆桩与非注浆桩的承载力和变形量, 结果表明注浆能提高单桩承载力 20%~40%, 并且能保证群桩沉降均匀. 黄生根等^[7]根据自平衡静载试验得到的数据, 研究了后注浆对超大直径桩桩端阻力与侧阻力的影响, 结果表明端阻增量远大于侧阻. 何剑^[8]基于现场静载试验, 研究了 2 根注浆桩与非注浆桩的荷载传递机理, 并分析了桩侧阻力与端阻力的发挥情况, 发现桩端后注浆使桩-土能更紧密地形成一个整体, 有效地

改善了桩的承载性能. 王忠福等^[9]对比分析了后注浆桩、三岔双向挤扩桩、挤扩支盘桩的现场静载试验, 发现后注浆工艺桩的承载力大于另外 2 种类型桩. 张忠苗等^[10]通过注浆桩与非注浆桩的静载荷试验, 分析了桩在不同持力层的 $Q-s$ 曲线与承载力变化, 发现土层颗粒的大小明显影响注浆效果.

当前, 国内对于钻孔灌注桩桩端后注浆承载特性机理研究较多, 其方法多为理论计算, 基于现场试验研究较少. 因此, 本文通过对 1 000 mm 直径的注浆与非注浆钻孔灌注桩的自平衡加载试验, 研究桩端后注浆对桩极限承载力、桩身内力、桩侧摩阻力的影响, 并分析注浆提高承载力的机理, 为软土地区桩端后注浆施工提供有效参考.

1 桩端后注浆试验方案

1.1 试验概况

本次试验对象为 4 根钻孔灌注桩, 编号分别为 1#桩(不注浆)、2#桩(不注浆)、3#桩(注浆)、4#桩(注浆). 其中, 1#桩、4#桩的桩底持力层为⑨_{1a} 粉质黏土圆砾, 2#桩、3#桩的桩底持力层为⑨_{2b} 圆砾. 4 根

收稿日期: 2020-06-04.

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

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LGF20E080012).

第一作者: 张恒(1996-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 软土地下结构. E-mail: 1123377498@qq.com

*通信作者: 刘干斌(1976-), 男, 江西吉安人, 教授, 主要研究方向: 土结构动力相互作用. E-mail: liuganbin@nbu.edu.cn

桩桩长均为 70 m, 桩身直径 1 m.

1.2 测点埋设

考虑到注浆期间桩底浆液压力分布的不均匀, 本次试验选 2 个土压力计作为一组桩端压力测试传感器, 一个放置在桩底的正中心, 一个放置在桩底的侧边(图 1). 桩身内力通过钢筋应力计进行测试, 沿桩深方向设置了 12 个测试断面, 深度分别为 2.0、6.0、14.7、21.4、30.1、40.8、49.5、56.2、60.2、64.9、68.9、70.0 m. 为了测取桩身弯矩, 每个测试断面埋设 2 个钢筋应力计.



图 1 土压力计安装

1.3 自平衡加载

加载采用基桩自平衡法, 每根试桩通过一个环形荷载箱进行加载, 荷载箱安装在距离桩端 6.5 m 处(图 2). 加载共分为 9 级, 分级加载量为预估极限承载力的 1/10(即 900 kN), 第 1 级按 2 倍分级加载量加载(即 1 800 kN), 第 2 级加载值为 2 700 kN, 第 3 级加载值为 3 600 kN, 以此类推, 直到第 9 级加载值为 9 000 kN. 通过以上加载可得到每级加载值与桩身向上、桩身向下位移的分段关系曲线, 运用简化转换方法^[11], 将分段曲线转换为受压桩的一条等效桩顶 $Q-s$ 曲线. 桩顶等效荷载 Q 和桩顶位移 s 由式(1)、(2)确定:

$$Q = K(Q_u - G_p) + Q_d, \quad (1)$$

式中: K 为上段与下段桩向静载受压的转化系数;



图 2 荷载箱安装

Q_u 、 Q_d 分别为平衡点向上及向下的荷载; G_p 为上段桩的自重.

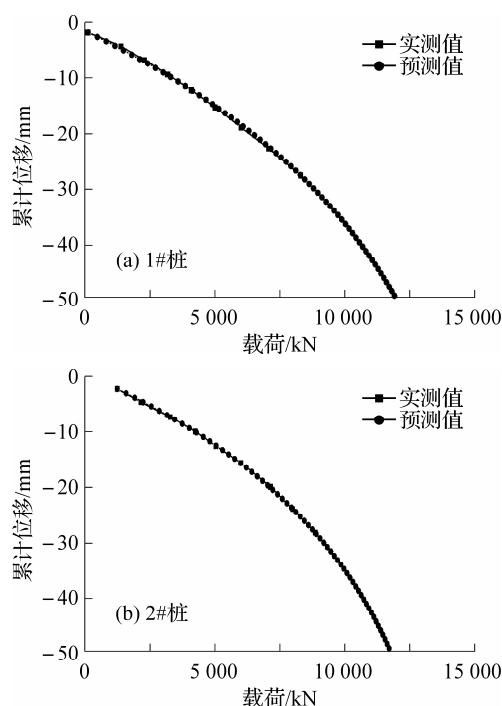
$$s = s_d + \Delta s, \quad (2)$$

式中: s_d 为等效受压桩下段的位移; Δs 为受压桩上段的桩身压缩量.

2 自平衡加载结果

将自平衡加载试验的数据进行转换, 发现 4 根桩的最终沉降量均未超过 30 mm, 根据文献[12]的要求, 对桩端直径为 1 000 mm 的桩, 单桩竖向抗压极限承载力可取 s 等于 50 mm 对应的荷载, 因此为确定 4 根桩的极限承载力, 本文运用灰色理论来预测桩基极限承载力. 灰色理论是一种对含有不确定因素系统进行预测的方法^[13], 该方法通过分析系统因素发展趋势的差异程度, 对一系列的原始数据进行生成处理, 并建立相应的微分方程, 从而预测事物的全貌, 基于该理论建立 $Q-s$ 曲线的 GM(1,1)微分方程模型能有效地预测单桩未达到破坏的极限承载力, 且已有不少学者通过工程实例验证了该方法预测的精确性^[14-17].

通过该理论得到的预测值如图 3 所示. 从图中可以看出, 桩端后注浆可提高桩基承载力约 20%. 未注浆的 1#桩及 2#桩的承载力较为接近, 注浆后 3#桩和 4#桩的承载力较为接近, 1#桩与 4#桩的地层



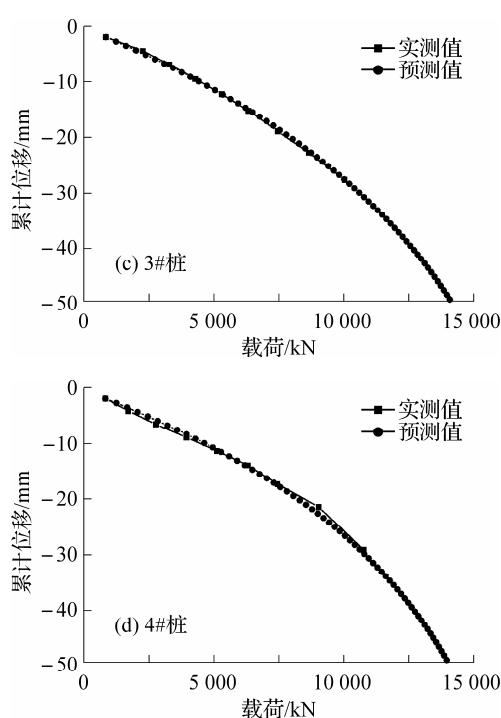


图3 桩极限承载力预测

较为接近, 2#桩与3#桩的地层较为接近, 由于4根桩的施工工艺都是相同的, 因此可以认为2种不同桩端地层注浆所提高的承载力是接近的。

3 桩身轴力及桩底压力测试成果

3.1 成桩期间数据分析

从图4和图5可以看出浇筑后, 初期桩身轴力自上向下呈现先增大后减小的规律。桩端部分的桩身轴力均较小, 且成桩期间桩端的土压力变化很小, 其数值远小于桩端地层反力。由此可见, 本次试验的4根桩均为摩擦桩, 且桩端因沉渣造成孔隙较多。测试得到的桩身最大轴力主要集中在40~60 m深度范围内。随着水化热的散去及桩体在自重作用下的下沉, 桩身的轴力逐渐减小, 并在桩的

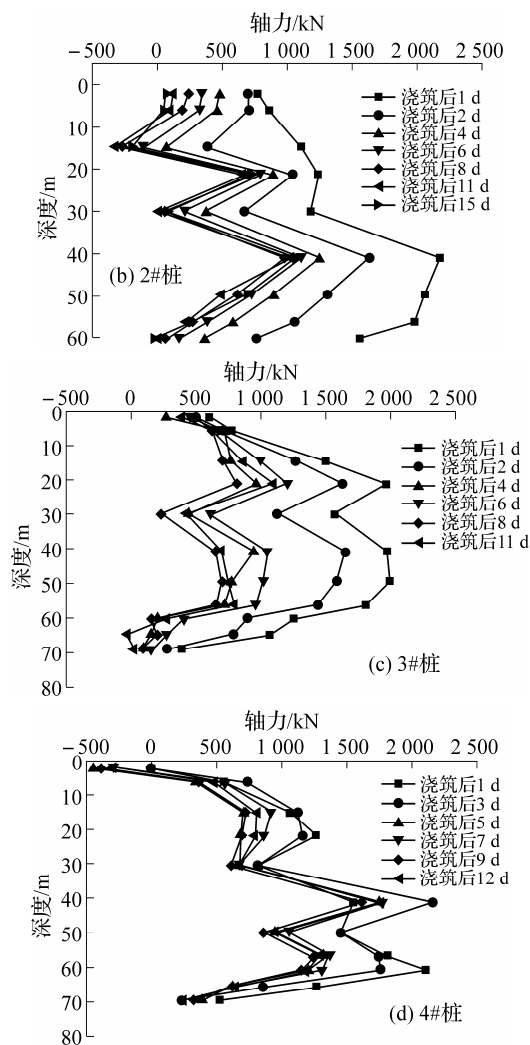
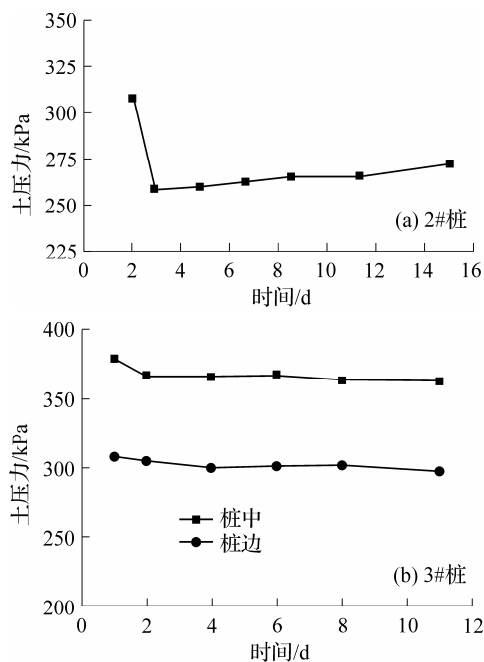


图4 成桩期间的桩身轴力曲线



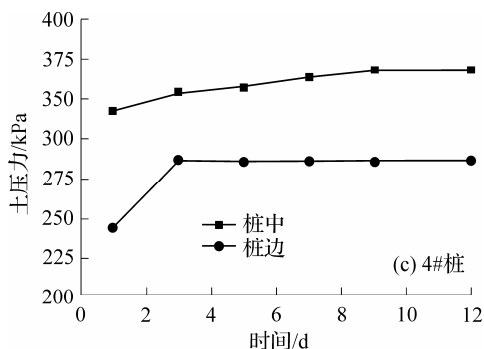


图5 成桩期间的桩端压力曲线

下沉过程中, 桩侧土体的摩阻力会使桩身局部出现拉应力。

3.2 注浆期间数据分析

从图6可以看出在注浆初期, 桩底注浆对桩身轴力的深度影响范围为40~70 m。注浆引起桩身下半部分轴力增大, 其原因是浆液充满桩底周边空隙后, 浆液会对桩底面产生向上的顶力, 该顶力会显著降低桩侧原有的摩阻力, 致使桩身轴力增大。由于浆液充满桩端空隙后, 会沿桩体的侧壁继续向上流动, 这种浆液填充桩端侧壁空隙的过程会显著增强桩端上部区域原有的桩侧摩阻力, 且浆液作用在侧壁上的向上顶力也会增加桩身的轴力, 所以注浆完成且稳定后, 桩身增加的轴力主要位

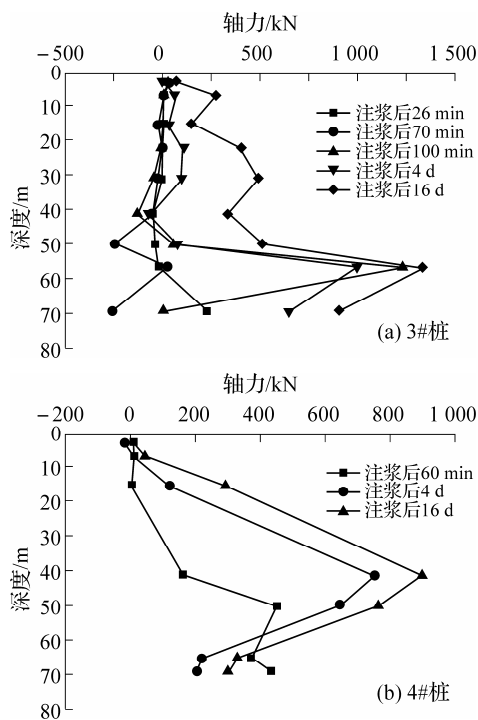


图6 注浆期间及注浆后轴力曲线

于桩端上部15~30 m范围内, 注浆引起的最大轴力为1 332 kN。

从图7可以看出, 桩端极限压力处于790~939 kPa范围内。本试验桩端埋深为70 m, 桩端地层为圆砾层, 该地层为承压含水层, 承压水头距离地表7 m, 即桩端承压水的压力约为630 kPa, 其压力略小于桩端极限压力。根据以上数据分析可推测桩端地层注浆的极限压力由两部分组成, 一是承压水的压力, 二是桩端沉渣的劈开荷载。所以桩端压力不会随着持续注浆而无限增大, 当桩端压力超过极限压力时, 浆液会劈开地层, 释放多余应力。

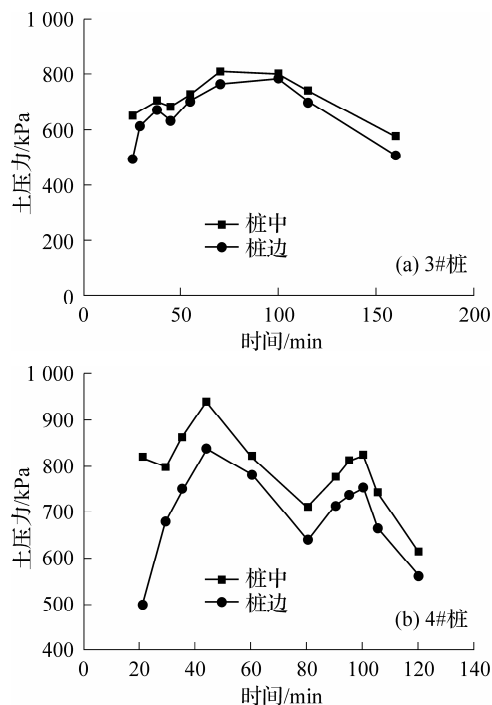


图7 注浆期间桩端压力—时程曲线

从图8可以看出, 注浆桩与非注浆桩在注浆后15 d的桩身轴力变化差异较为明显, 注浆桩的桩身

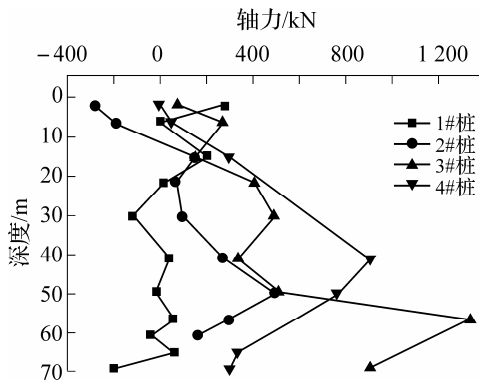


图8 1#~4#桩注浆后15 d 桩身轴力变化

轴力增量普遍大于非注浆桩的桩身轴力增量。该轴力增量的产生主要有两个原因,一是注浆改变了桩侧摩阻力,使得原有桩侧摩阻力重新进行分布;二是注浆产生了桩端残余应力,此残余应力减小了总桩侧摩阻力,并增大了桩端部分的轴力。

桩端注浆期间,由于注浆管位于钢筋笼一侧,注浆时浆液集中在桩体一侧,在浆液压力的作用下,桩端部分将承受较大的弯矩。从图9可以看出,注浆产生的最大弯矩达到1 688 kN·m,主要位于桩端上部10~20 m,最大弯矩出现的时间约在注浆开始1 h后。本试验钻孔桩桩径1 m,混凝土强度C30,其理论极限抗弯弯矩为2 945 kN·m。当桩体承受的弯矩超过该数值时,桩体会产生强度破坏。而本次注浆产生的弯矩超过了极限弯矩的一半,会对桩体结构安全造成一定的影响。

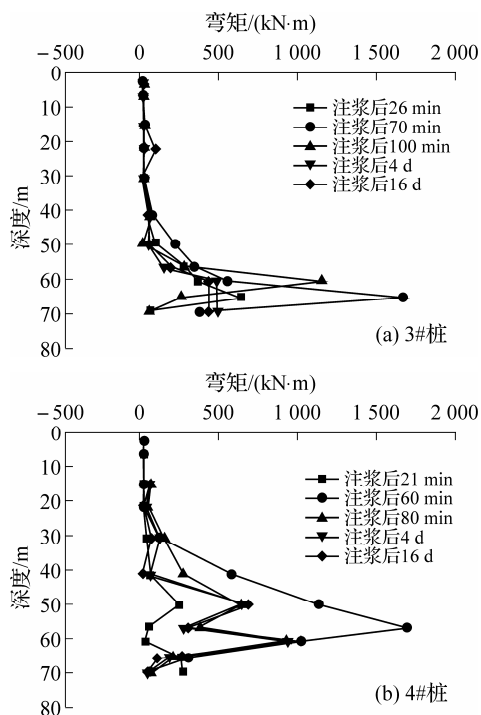


图9 注浆期间桩身弯矩曲线

3.3 加载期间数据分析

在加载过程中,注浆桩下部桩身轴力增量普遍大于未注浆桩,而非注浆桩的桩端压力增量要远大于注浆桩,造成以上现象的原因是桩端注浆期间,浆液只会沿着地层软弱面扩散。因为桩端中心区域的地层抗力比桩周的地层抗力要大,浆液从桩侧喷出时,仅有少量浆液向桩端中心区域流动,而大部分扩散到桩侧的地层,这会使得注浆后桩

端部分的承载力主要由强化的桩土界面摩阻力提供,桩端底部的承载力还不能得到有效发挥,而未注浆的桩端部分承载力则主要由桩端底部的端阻力提供(图10)。

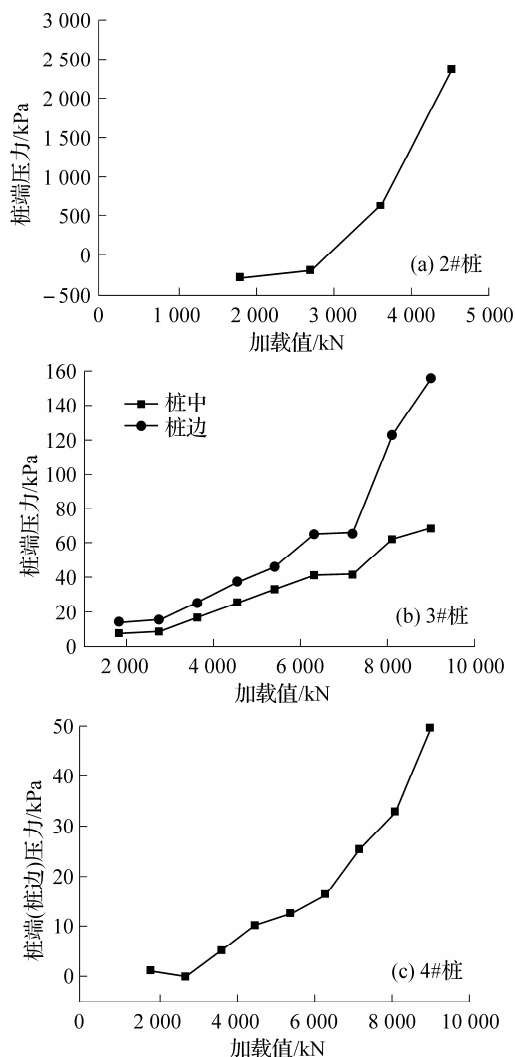


图10 加载期间桩端压力曲线

对比3#桩及4#桩的桩端部分桩身轴力(图11),可以发现3#桩的桩身轴力没有随着加载的增大而迅速增大,4#桩的桩身轴力从第3级加载开始,随着加载的增大而迅速增大。其原因主要是4#桩处于粉质黏土层,该地层的透水性差,浆液遇到的阻力主要是土压力,而侧面的土压力要小于顶面土压力,所以当浆液注入这种地层时,浆液不会直接沿着侧壁向上流动,而是先对周边的不透水地层产生挤密及劈裂作用,产生一个较大的浆包^[18](图12(a)),然后再沿着侧壁向上流动,会在桩端形成了一个扩大头。扩大头进而改变了桩身的轴力分

布,且比桩身承担了更多的承载力.3#桩处于圆砾层,浆液注入此地层时,浆液会直接沿侧壁向上流动(图12(b)).因为在透水性地层中,浆液遇到的阻力主要是静水压力,而顶面的静水压力要小于侧面及底面.以上2种桩端在不同地层中的注浆均能有效提高桩的承载力,但提高承载力的机理略有不同.在透水地层中进行桩端注浆,其承载力的提高依赖于浆液对桩土接触面的摩阻力影响;而在不透水地层中进行桩端注浆,其承载力的提高除了浆液对桩侧摩阻力的影响外,桩端的扩大头类似于扩径桩的扩径支盘部分,也能有效提高承载力,但扩大头上部的侧摩阻力会出现弱化^[19].

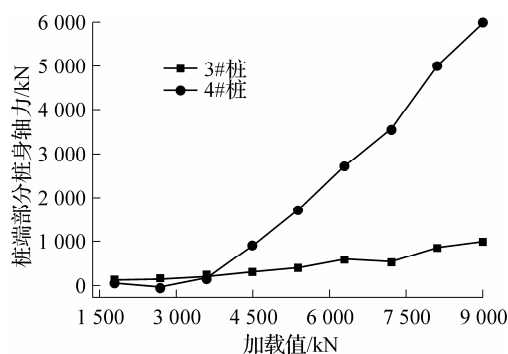


图11 3#桩及4#桩的桩端部分桩身轴力曲线

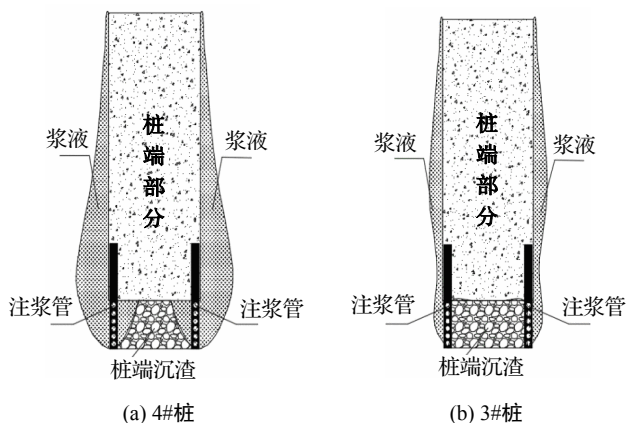


图12 桩端注浆浆液分布示意图

我们可以根据桩身轴力计算得到桩侧摩阻力.当浆液对侧摩阻力的影响在56.2~68.9 m范围内,即浆液上涌距离为13.8 m,与国标中的影响距离12 m较接近^[20];桩端注浆对桩侧56.2~60.2 m范围内(主要是砾砂),侧阻力提高值约为2.5倍(国标2.0~2.5);注浆对60.2~68.9 m范围内(主要是粉质黏土),侧阻力提高值约为1.9倍(国标1.4~1.8).可见试验结果与规范取值较为一致,国标中的后注

浆单桩极限承载力计算公式中的侧阻力增强系数在宁波地区是适用的.

4 结语

本文通过现场试验研究了钻孔桩桩端后注浆对桩基承载力的影响.根据对试验结果的分析,得到如下几点结论:

(1)桩端后,注浆施工工艺能提高钻孔桩的竖向极限承载力约20%.

(2)桩端注浆期间的桩侧摩阻力会被重新分布,使得桩端上部15~30 m的范围内桩身轴力变化强烈;其次桩端在浆液的压力下会承受较大的弯矩,对桩体结构安全会造成一定的危害.

(3)注浆后,桩端部分承载力主要由桩的侧摩阻力提供,而未注浆的桩端部分承载力主要由桩端底部的端阻力提供.

(4)在透水地层中进行桩端注浆,其承载力的提高依赖于浆液对桩土接触面的摩阻力影响;而在不透水地层中进行桩端注浆,其承载力的提高一部分来自浆液对桩侧摩阻力的影响,一部分来自于扩大头,但扩大头上部的侧摩阻力会出现弱化.

参考文献:

- [1] Fang K, Zhao T B, Tan Y L, et al. Prediction of grouting penetration height along the shaft of base grouted pile[J]. Marine Science and Engineering, 2019, 212(7):1-9.
- [2] Wang Z H, Dai G L, Guo W M. Field study on post-grouting effects of cast-in-place bored piles in extra-thick fine sand layers[J]. ACTA Geotechnica, 2019, 14(5):1357-1377.
- [3] Pooranampillai S, Elfass S, Vanderpool W, et al. The effects of compaction post grouting of model shaft tips in fine sand at differing relative densities: Experimental results[C]//Art of Foundation Engineering Practice Congress, West Palm Beach, Florida, USA, 2010.
- [4] Ruiz M E, Pando M A. Load transfer mechanisms of tip post-grouted drilled shafts in sand[C]//International Foundation Congress and Equipment Expo, Orlando, Florida, USA, 2009.
- [5] Bruce D A. Enhancing the performance of large diameter piles by grouting[J]. Ground Engineering, 1985, 19(4): 9-15.

- [6] 张忠苗, 吴世明, 包风. 钻孔灌注桩桩底后注浆机理与应用研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6):681-686.
- [7] 黄生根, 龚维明. 超长直径桩压浆后的承载性能研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1):113-117.
- [8] 何剑. 后注浆钻孔灌注桩承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6):743-746.
- [9] 王忠福, 刘汉东, 贾金禄, 等. 大直径深长钻孔灌注桩竖向承载力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9):2663-2670.
- [10] 张忠苗, 辛公锋. 不同持力层钻孔桩桩底后注浆应用效果分析[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(6):85-90; 94.
- [11] 龚维明. 桩承载力自平衡测试技术及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [12] JGJ-106-2014. 建筑桩基检测技术规范[S].
- [13] 罗战友, 董清华, 龚晓南. 未达到破坏的单桩极限承载力的灰色预测[J]. 岩土力学, 2004, 25(2):304-307.
- [14] 周国林. 单桩极限承载力的灰色预测[J]. 岩土力学, 1991, 12(1):37-43.
- [15] 蒋复量, 戴兴国, 唐四联, 等. 钻孔扩底灌注桩沉降量的灰色预测[J]. 矿业研究与开发, 2005, 25(1):31-33.
- [16] 王凤梅, 陈枝东, 张领帅, 等. 灰色系统理论在桩基竖向荷载试验中的预测应用研究[J]. 土工基础, 2019, 33(3):366-369.
- [17] 曹文贵, 张永杰, 赵明华, 等. 基桩极限承载力的改进变步长灰色预测模型研究[J]. 岩土力学, 2011, 33(1):394-398.
- [18] 邝健政. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [19] 汤炀, 熊勇林, 刘干斌, 等. 软土地基扩径桩竖向承载性能研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2019, 32(5):52-58.
- [20] JGJ 94-2008. 建筑桩基技术规范[S].

Experimental study on enhancement mechanism of bearing capacity of base post-grouting cast-in-situ pile

ZHANG Heng¹, LIU Ganbin^{1*}, ZHOU Ye¹, HAN Zhong²

(1. Institution of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Shanghai Civil Engineering Group Co., Ltd. of CREC, Shanghai 200436, China)

Abstract: Field tests were performed on 4 cast-in-situ piles at a construction site in Ningbo in order to further study the bearing mechanism of post-grouting cast-in-situ pile. The four piles were all loaded by self-balanced method. $Q-s$ curve of each pile was obtained by loading, and the stress of pile body and pile base during loading was measured by embedded sensors. According to stress analysis, the changes of bending moment and skin frictional resistance of pile were studied. The results show that the base post-grouting technique can increase the vertical ultimate bearing capacity by about 20%. During grouting, the redistribution of skin frictional resistance causes the axial force changing drastically, and the bending moment may lead to certain damage to the structure. During loading, the bearing capacity of the grouting pile base is mainly provided by the skin frictional resistance, while that of the non-grouting pile base is mainly provided by the base resistance. In permeable strata, the enhancement of pile bearing capacity depends on the influence of skin frictional resistance, and the generation of enlarged heads may turn to be an influencing factor as well.

Key words: pile base post-grouting; cast-in-situ pile; self-balanced loading

(责任编辑 章践立)