

钻孔灌注桩正反循环泥浆护壁对孔径的影响研究

王 强^{1,2}, 赵春风^{1,2}, 赵 程^{1,2}, 薛金贤³, 楼 云⁴

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 深圳高速工程顾问有限公司, 广东 深圳 518000; 4. 浙江省交通运输厅质量监督局, 浙江 杭州 311215)

摘 要: 在软土地区, 钻孔灌注桩的成孔过程都要采用泥浆护壁。结合上海浦东某高层住宅小区钻孔灌注桩孔径实测数据, 对成桩过程中两种泥浆循环方式对孔径的影响进行了对比研究, 并对其机理进行了探讨。研究结果表明: 在上海软土地区, 采用正循环泥浆护壁能在一定程度上增大孔壁粗糙度, 扩大桩孔直径, 对增加桩的承载力有一定作用。
关键词: 桩基工程; 钻孔灌注桩; 泥浆; 正反循环; 孔径

中图分类号: TU473.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0205-04

作者简介: 王 强(1986-), 男, 四川泸州人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: tongjiwangqiang@gmail.com。

Influence of normal and reverse mud circulations on hole diameter of cast-in-situ bored piles

WANG Qiang^{1,2}, ZHAO Chun-feng^{1,2}, ZHAO Cheng^{1,2}, XUE Jin-xian³, LOU Yun⁴

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shenzhen Expressway Engineering Consulting Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; 4. Zhejiang Transportation Hall Quality Supervision Bureau, Hangzhou 311215, China)

Abstract: In soft soil area it is necessary to take use of mud protection in the forming process of cast-in-situ bored piles. Based on the measured data of cast-in-situ bored piles of a high-rise residential in Pudong District of Shanghai, the influence of two kinds of mud circulations on the diameter of pile hole is studied, and its mechanism is discussed. The results show that in Shanghai, the soft soil area, the normal mud circulation rather than the reverse mud circulation can increase the roughness of hole wall and expand the diameter of pile hole to some extent, and it plays a role in increasing the bearing capacity of the piles.

Key words: pile foundation; cast-in-situ bored pile; mud; normal and reverse circulation; hole diameter

0 引 言

近年来, 钻孔灌注桩在建筑基础、桥梁、港口码头等各种岩土工程领域得到了广泛的应用。对于机械成孔灌注桩, 成孔质量的好坏将直接影响到最终的成桩质量, 严重的会影响到桩的承载特性。因此, 在浇灌混凝土之前进行成孔检测极为重要。通过成孔质量检测可以获得孔径在深度范围内的分布数据, 这对于提高灌注桩的施工质量及指导施工都具有重要意义。一些学者也针对机械成孔灌注桩的孔径变化特性作了相关研究, 例如, 张建新等^[2], 刘利民^[3]研究了孔壁粗糙度对钻孔灌注桩桩侧阻力的影响, 并提出了增加孔壁粗糙度的方法; 楼晓明等^[4]分析了孔壁形状对承载力的影响; 舒翔等^[5]分析了施工因素对钻孔灌注桩承载力的影响等。

为了了解正反泥浆循环对孔径的影响, 在施工过程中对 4 根相邻桩位的钻孔灌注桩在其他条件相同的情况下进行了正循环和泵吸反循环成孔, 用全自动数字成孔质量检测仪器对孔径变化进行了量测, 通过对实测数据的分析, 总结出泥浆正反循环对孔径的影响, 并对其机理进行了探讨, 对指导工程实践有一定的作用。

1 成孔孔径统计方法^[6]

针对某一时刻单次成孔孔径实测数据进行统计, 实测孔数记为 n , 对第 i 个桩孔所在土层按照自上向

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972180); 上海市重点学科建设项目 (B308); 光华同济大学土木工程学院基金-应用基础研究项目 (0200165023)

收稿日期: 2011-08-02

下的顺序分土层进行编号，土层的总数目计为 s_i ；第

表 1 主要土层参数
Table 1 Main parameters of soil layers

土层名称	埋置深度 /m	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	压缩系数 $a_{0.1-0.2}/(\text{MPa}^{-1})$	压缩模量 $E_{\text{S}0.1-0.2}/(\text{MPa})$	状态
③淤泥质粉质黏土	0~4.8	12	18	0.79	3.22	软塑
③夹黏质粉土	1.0~2.3	6	28.0	0.22	9.04	软塑—流塑
④淤泥质黏土	4.8~13.45	14	11.5	1.26	1.99	流塑
⑤ _{-1a} 灰色黏土	13.45~18.2	16	13.5	0.60	3.54	软塑—可塑
⑤ _{-1b} 灰色粉质黏土	18.2~20.2	16	20.0	0.44	4.60	可塑
⑥暗绿—黄色粉质黏土	20.2~24.6	52	15.5	0.25	6.89	可塑—硬塑
⑦ ₁ 灰色—黄色砂质粉土	24.6~32.55	3	30.5	0.15	12.28	中密—密实
⑦ ₂ 黄—灰色粉砂	32.55~65.5	0	33.5	0.11	16.73	密实

i 个桩孔在第 m 个土层内的测点总数为 t_{im} ，第 i 个桩孔在第 m 个土层内第 j 个测点所测得的孔径记为 D_{imj} 。 i 为实测桩孔编号 ($i=1,2,\cdots,I,\cdots,n$)； m_i 为桩孔所在的土层编号 (自上而下；1, 2, \cdots , s_i)；第 i 桩孔孔径测点总个数为

$$U_i = \sum_{m=1}^{s_i} t_{im} \quad (1)$$

第 i 桩孔孔径总平均值为

$$\bar{D}_i = \frac{1}{U_i} \sum_{m=1}^{s_i} t_{im} \sum_{j=1}^{t_{im}} D_{imj} \quad (2)$$

第 i 桩孔孔径总变异系数为

$$\delta_i = \frac{1}{\bar{D}_i} \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{s_i} \sum_{j=1}^{t_{im}} (D_{imj} - \bar{D}_i)^2}{U_i - 1}} \quad (3)$$

Horvath 等^[7]提出了用凹凸度因子 R_f 来定量描述孔壁粗糙度的方法：

$$R_f = \frac{\overline{\Delta r}}{r_s L_s / L_t} \quad (4)$$

式中 $\overline{\Delta r}$ 是径向凸出部分尺寸的平均值，mm； r_s 是孔壁半径的平均值，mm； L_s 是钻孔深度，mm； L_t 是沿孔深剖面曲线的总长度，mm。其中， $\overline{\Delta r}/r_s$ 是孔壁凹凸度的相对量，表示了孔壁沿径向的变化情况； L_t/L_s 表示了孔壁沿深度方向总形状的变化。

2 孔径实测数据

正循环钻进成孔是由钻机带动钻杆和钻头回转切削破碎岩土，钻进时用泥浆护壁、排渣；泥浆由泥浆泵经地表管线压入钻杆内孔，经钻头的出浆口射出，携带岩土屑沿钻具与孔壁之间的环状间隙上返，从孔口流出后进入泥浆沉淀池中净化，再供使用。泥浆在泥浆泵、钻杆、钻孔和泥浆池之间反复循环。

反循环钻进成孔是泥浆沿钻杆与孔壁外环间隙进入孔内，携带钻头切削下来的岩土屑沿钻杆内腔高速

返回地表泥浆池。反循环钻成孔按泥浆的动力来源和工作原理可分为泵吸反循环、气举反循环和喷射反循环等方法^[1]。本工程采用最常用的泵吸反循环。它是利用砂石泵的抽吸作用在钻杆内形成上返泥浆流，砂石泵吸管与主动钻打水龙头连接，通过钻杆，砂石泵的抽吸作用在钻杆内形成负压，在大气压力作用下，地表池内的泥浆由外环空间流至孔底，然后携带岩土屑由钻杆内经水龙头、砂石泵排至地表，经沉淀后再流入孔内，形成反循环。

本工程为上海浦东某高层住宅小区建设项目，主要土层参数如表 1 所示。为比较正循环和反循环对孔径变化的影响，选取了 4 根相邻的桩#2，#3，#4，#5 进行对比试验以克服土层差异的影响。4 根桩均采用 GPS-15 型钻机，设计孔径 800 mm，设计桩长为 65 m，所用的钻头直径为 818 mm。在其他条件相同的情况下，#3，#4 桩采用泵吸反循环成孔，而#2，#5 桩采用正循环成孔。成孔曲线见图 1，2，成孔数据经统计整理，结果见表 2。

表 2 正反循环成孔数据
Table 2 Hole drilling data with normal and reverse mud circulations

孔径	反循环		正循环	
	#3	#4	#2	#5
钻孔时间/h	11.2	10.5	16.5	14.8
平均值/mm	826.5	822.8	828.8	830.3
变异系数	0.025	0.012	0.029	0.026
最大值/mm	918	870	941	941
最小值/mm	802	808	801	806
粗糙度	0.013	0.011	0.020	0.025

3 数据对比及分析

从图1, 2所示的成孔曲线可以看出, 4根桩在上段(约10 m左右)均有严重扩孔现象, 说明上部土层发生了塌孔现象。这是因为这层土主要是呈软塑到流塑之间的淤泥质土, 性质极不稳定, 易受各种因素的影响而扰动。但由于这层土较为松软, 承载力非常低, 对于桩的极限承载力 Q_u 作用不大。而对于桩的中下部(约15 m以下), 通过图1(a)、(b)可以看出, #3, #4桩成孔曲线较为平滑, 孔径的变异系数较小, 分别为0.025, 0.012。相比之下, 由图2(a)、(b)可知, 采用正循环的#2, #5桩成孔曲线则呈凹凸不平的锯齿状, 粗糙度明显大于#3, #4的成孔曲线, 变异系数也较大, 分别为0.029, 0.026。而从表1中可以看出, #3, #4钻孔的粗糙度分别为0.013, 0.011, 而#2, #5钻孔的粗糙度分别为0.020, 0.025, 这也说明了#3, #4钻孔较为平滑, #2, #5钻孔较为粗糙。本文将从正反循环的成孔工艺对这一结果加以解释。

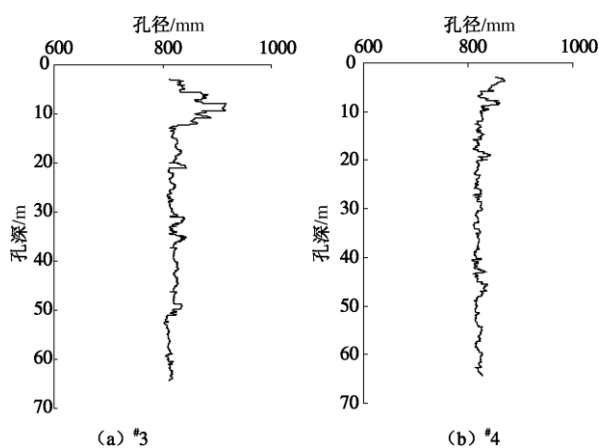


图1 #3、#4桩反循环成孔曲线

Fig. 3 Curves of hole wall with reverse mud circulation

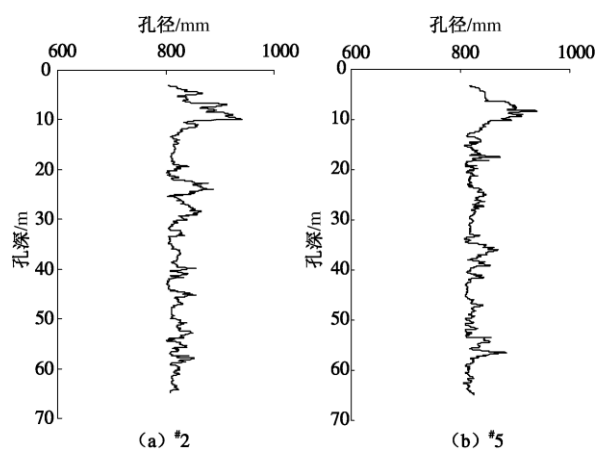


图2 #2, #5桩正循环成孔曲线

Fig. 2 Curves of hole wall with normal mud circulation

正循环成孔孔底钻屑的上返主要是通过泥浆的悬浮力将其携带至孔口, 本工程所用泥浆是由孔内地层

自然造浆而形成, 相对于膨润土造浆而言, 孔内不同孔段不同地层其造浆能力各有不同, 性质也差异较大。由于正循环成孔转速较高, 单位时间内钻头钻取的钻屑量较多, 此时若该孔段地层造浆能力弱, 泥浆性能差, 则孔底钻屑难以及时被携带至地表, 会产生钻屑的重复破碎, 这样在相应孔段必然会出现适度局部扩径; 而当某个孔段地层造浆能力强, 泥浆性能稳定, 具有较强的悬浮力, 则孔底钻屑可以及时被携带出孔内, 不会发生重复破碎现象, 在此孔段就可保持正常的钻进速度, 并形成正常的孔径。这样正循环成孔所形成的全孔段会出现多处适度局部扩径, 其孔身结构类似锯齿状(或凹凸形)。而反循环成孔一般转速较低, 单位时间内钻取的钻屑量较少, 加之较大的泵量和抽吸压力, 可使钻头产生的钻屑及时地被抽吸至地表, 因此反循环成孔很少发生钻屑的重复破碎, 也不会形成孔壁的多处适度局部扩径, 所形成的孔壁基本上光滑完整, 粗糙度较小, 难以形成锯齿状孔身结构, 所构成的桩基本上是直径相同的柱状体^[8]。

通过对土层资料的分析, 可以证明上述解释的合理性。土层最上面两层分别为③淤泥质粉质黏土和④淤泥质黏土, 其中③中还夹有软弱的粉质黏土, 这两层土力学性质较差, 承载力非常低, 极易受各种外部因素的影响, 因此不管正循环成孔还是反循环成孔, 在这一深度范围内都有较大程度的扩孔。第⑤层土是灰色黏土和灰色粉质黏土, 力学性质较为稳定, 所造泥浆护壁效果较好, 因此正循环成孔曲线在这一段变异较小。第⑥层是粉质黏土, 第⑦层砂质粉土和粉砂, 这两层土力学性质相对较好, 承载力较高, 压缩系数较小, 但在这两层泥浆质量较差, 黏度较小, 因此对于泥浆护壁效果不是很好, 容易出现局部的扩孔, 如图2所示。

软土地区采用正循环这一点对于提高钻孔灌注桩承载力来说是很利。上海地区的灌注桩主要以摩擦桩和端承摩擦桩为主, 孔壁形状光滑、平直的桩, 桩体与土层咬合作用较差, 接触面受泥皮厚度的影响较大, 泥皮“涂抹”作用明显, 桩土间易发生剪切滑动, 不利于桩周土摩阻力的充分发挥; 反之, 如果孔壁凹凸不平, 由于混凝土与土之间的咬合作用, 接触面的抗剪强度受泥皮的影响较小, 使得桩侧摩阻力能得到比较充分的发挥^[9]。文献[8]给出了一例对2根分别采用正、反循环成孔的灌注桩的静载试验记录。从数据来看, 在相同条件下的2根试桩, 采用正循环的试桩极限承载力可达到8500 kN, 而采用反循环的试桩极限承载力仅为4250 kN, 反循环成孔的孔壁过于平滑是造成承载力过低的一个重要的原因。由此可见, 在上海等软土地区采用正循环成孔能增加孔壁的粗糙

度, 进而有效地提高桩的承载能力。

另外, 从表 1 可以看出, #3, #4 桩孔径的平均值分别为 826.5, 822.8 mm, 均小于#2, #5 桩的孔径平均值 828.8 mm 和 830.3 mm。在软土地区, 正循环钻压大、钻速高、钻头和钻杆转速高, 离心力大, 泥浆对孔壁产生冲刷作用, 能在一定程度上扩大桩孔直径, 有利于提高桩的承载力; 反循环钻进软土层钻压小, 转速比正循环低, 离心力小, 泥浆对孔壁产生冲刷作用也小, 由此引起的扩径也就很小。孔径增大, 桩的截面积相应增大, 对提高桩的承载力也有一定的作用。

4 结 论

(1) 采用正循环泥浆护壁成孔方式, 所成的孔壁粗糙度较之反循环泥浆护壁大, 成孔曲线成较为不规则锯齿形, 变异系数较大, 而反循环泥浆护壁成孔曲线较为平滑, 变异系数较小。

(2) 采用正循环泥浆护壁成孔方式, 所成的孔径平均值大于反循环泥浆护壁成孔方式, 说明在扩孔效果方面正循环泥浆护壁要优于反循环泥浆护壁。

(3) 对于以摩擦桩和端承摩擦桩为主的上海地区, 采用正循环泥浆护壁比反循环泥浆护壁更能发挥出桩侧摩阻力。

参考文献:

- [1] 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995. (The Compilation Board Of Handbook of Pile Foundations. handbook of pile foundations[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995. (in Chinese))
- [2] 张建新, 刘利民. 孔壁粗糙度对钻孔灌注桩桩侧阻力的影响[J]. 工程勘察, 2003(1): 13 - 15. (ZHANG Jian-xin, LIU Li-min. The effect of hole side roughness on the pile side resistance for cast-in-site piles[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2003(1): 13 - 15. (in Chinese))
- [3] 刘利民. 增加孔壁粗糙度提高钻孔灌注桩承载力的原理及施工措施[J]. 建筑技术, 2002, 33(3): 188 - 189. (LIU Li-min. Enhanceing the bearing capacity of bored pile by improving roughness of the hole[J]. Architecture Technology, 2002, 33(3): 188 - 189. (in Chinese))
- [4] 楼晓明, 戴仁厚, 张一鸣. 孔壁形状对钻孔灌注桩承载特性的影响[J]. 工程勘察, 1998(2): 6 - 9. (LOU Xiao-ming, DAI Ren-hou, ZHANG Yi-ming. Influence of hole wall shape on bearing feature of bored pile[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1998(2): 6 - 9. (in Chinese))
- [5] 舒 翔, 刘利民. 施工因素对钻孔灌注桩承载力的影响[J]. 施工技术, 2003, 32(1): 25 - 27. (SHU Xiang, LIU Li-min. Influence of construction factors on bearing capacity of drilled grouting pile[J]. Construction Technology, 2003, 32(1): 25 - 27. (in Chinese))
- [6] 鲁 嘉, 黄安芳, 赵春风, 等. 土层及钻机差异对灌注桩孔径变化规律的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(2): 341 - 347. (LU Jia, HUANG An-fang, ZHAO Chun-feng. Research on effect of different soil layer character and drilling machine on variation of diameter of cavities of cast in place bored piles[J]. Chinese Journal of Under ground Space and Engineering, 2010, 6(2): 341 - 347. (in Chinese))
- [7] HORVATH R G, KENNV T C, KOZICHI P. Method of improving the performance of drilled piles in weak rock[J]. Canada Geotechnical Journal.col, 20(4): 758 - 772.
- [8] 刘 琰. 灌注桩的时间空间力学参数研究[D]. 上海: 同济大学, 2006. (LIU Yan. Reseach on time-and-space mechanical parameters of cast-in-plaece pile[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese))
- [9] 林景华. 浅谈提高钻孔灌注桩承载力的两种有效措施[J]. 山西建筑, 2005, 31(14): 95 - 96. (LIN Jing-hua. Two kinds of valid measures of promoting the hole-digging grouting pile's carrying capacity[J]. Shanxi Architecture, 2005, 31(14): 95 - 96. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)