强风化泥岩地层中干成孔旋挖桩优化实践

王俊淞*
（上海长凯岩土工程有限公司，上海 200093）

摘　要　干成孔旋挖桩受限于工艺特点，桩端沉渣难以清除干净。当其持力层为强风化泥岩地层时，叠加强风化泥岩风化显著、强度不均、遇水软化的不利因素，单桩承载力可能达不到设计要求。通过合理的设计、严格的施工管理，可以有效地提高单桩承载力，从而优化桩基工程造价。本文介绍了福建某项目中旋挖灌注桩的优化方案，通过采用桩端后注浆工艺有效地提高了单桩承载力，较原方案节约了30%的工程造价，并通过大量静载试验证明了优化方案的可靠性。本文总结了灌注桩后注浆工艺的关键控制要素，可为类似工程项目提供一定的参考。

关键词　强风化泥岩，干成孔，旋挖桩，桩基优化，桩端注浆
中图分类号：TU443　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.202604.0018

Optimization Practice of Dry Hole Rotary Drilling Piles in Strongly Weathered Mudstone Stratum

WANG Junsong*
（Shanghai Changkai Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200093, China）

Abstract　Due to the inherent nature of dry hole rotary drilling, complete removal of sediment from the pile tip remains difficult. When the bearing stratum consists of strongly weathered mudstone, the adverse effects—namely significant weathering, uneven strength distribution, and softening upon water exposure—are exacerbated, often resulting in a single-pile bearing capacity below design requirements. Effective enhancement of pile capacity can be achieved through rational design and stringent construction management, thereby optimizing pile foundation costs. This paper details the optimization of rotary drilling cast-in-place piles in a Fujian-based project. The adoption of pile tip post-grouting effectively increased bearing capacity, yielding a 30% cost saving over the original plan. The reliability of this approach was validated via extensive static load testing. Furthermore, the critical control elements of the post-grouting technique are outlined to provide reference for analogous projects.

Keywords　strongly weathered mudstone, dry hole, bored pile, pile optimization, post-grouting

0　引　言

旋挖灌注桩是指利用旋挖钻机成孔后灌注混凝土成桩的工艺，根据成孔方式不同，分为护壁成孔和干成孔两大类。干成孔为采用旋挖钻直接出土，无需静浆护壁或全护筒护壁的成孔工艺[1]。对于地下水位较低、桩周土自立性较好的地层，采用干成孔旋挖工艺可以提高成桩效率，减少泥浆

收稿日期：2025-05-14
* **联系作者**：王俊淞（1987-），男，硕士研究生，高级工程师，一级注册岩土工程师，主要从事岩土工程设计咨询工作。E-mail：junsongwang@126.com

污染。但是受限于施工工艺，旋挖钻机使用钻筒取土时，桩底的沉渣难以完全清除干净。沉渣过厚会降低桩端承载力，导致单桩承载力达不到设计要求。

强风化泥岩具有风化显著、强度不均、遇水软化的性质，受到扰动后强度会显著降低。其作为干成孔旋挖桩桩端持力层时，若暴露时间较长或桩端浸水，基岩承载力会降低，从而导致桩基承载力显著降低。

因此，在强风化泥岩地层中使用干成孔旋挖工艺成桩时，采取有效的措施处理沉渣、保证强风化泥岩强度是提高单桩承载力的关键。桩端注浆是一种处理桩端沉渣、提高桩基承载力的有效的处理手段。桩端注浆是指在桩身混凝土达到一定强度后，通过预埋在桩身的注浆管路，向桩端地层均匀地注入能固化的浆液。压力浆液对桩端地层、桩端沉渣及桩端附近的桩周土层起到渗透、填充、置换、劈裂、压密及固结或多种形式的不同组合作用，改变其物理化学力学性能及桩与岩、土之间的边界条件，消除沉渣隐患，从而提高桩的承载力以及减少桩基的沉降量[2]。近年来，桩端注浆广泛地应用于各类工程，取得了良好的效果[3-6]，但在干成孔旋挖桩中的应用记载较少。

目前有一些项目总结了干成孔旋挖桩的控制要点和应用效果。余政兵等[7]介绍了重庆地区中风化岩作为持力层时干成孔旋挖桩的沉渣控制措施，具体来说是当旋挖钻机钻到预定孔深后在原深处进行空转清土，并可加注 3 m 深的清水用旋挖机专业清孔器进行多次清理，直到清孔器内无沉渣为止。但因强风化泥岩遇水软化，该方式不适用于强风化泥岩。雷皓等[8]介绍了某项目干成孔旋挖桩的质量缺陷处理过程，指出塌孔和混凝土供应时间问题是导致桩底沉渣的原因。王一凡等[1]通过对干成孔灌注桩施工工艺的分析，结合工程实例中出现的问题，总结了各类常见施工难点的处理方式。

现有工程实践对桩端后注浆在干成孔旋挖桩中的应用研究较少，未给出桩基设计过程和桩端注浆的控制要点，且往往桩基静载检测数量较少，缺少统计数据。本文介绍福建某项目桩基优化案例，通过采用桩端注浆工艺，提高了干成孔旋挖桩的桩基承载力，给出了设计优化过程和注浆控制要点，并通过大量静载试验给出了桩基承载力的统计数据，检验了施工效果，证明了优化方案的可靠性，可为类似工程提供一定的经验借鉴。

1 工程概况

本项目包括 25 栋 18~27 层的高层建筑，结构形式为钢筋混凝土剪力墙结构，采用桩筏基础，桩基础采用干成孔旋挖灌注桩。

1.1 地质条件

本项目场地原为山坡地，经挖山整平，孔口高程介于 415.09~446.71 m 之间，场地高差约 31.20 m。场区岩土层自上而下可分为 12 层，勘察提供的地层参数见表 1。

表 1 地层参数

Table 1 The parameters of soil layers

层号	土层名称	冲(钻)孔灌注桩		负摩阻力系数
		q_{sk}/kPa	q_{pk}/kPa	
①	夯实填土	25.0	–	–
$①_1$	素填土	20.0	–	0.25
$①_2$	杂填土	20.0	–	0.25
②	粉质黏土	25.0	–	–
$②_1$	含角砾碎石粉质黏土	40.0	–	–
③	泥岩残积黏性土	35.0	–	–
④	砂土状强风化泥岩	85.0	2 500	–
$⑤_1$	碎块状强风化泥岩	110.0	4 500	–
$⑤_2$	碎块状强风化粉砂岩	110.0	4 500	–
$⑤_3$	碎块状强风化砂岩	110.0	4 500	–
$⑥_2$	中风化炭质粉砂岩	130.0	8 000	–
$⑥_3$	中风化砂岩	130.0	10 000	–

场地地下水主要是赋存于基岩风化裂隙中的裂隙水，勘探期间测得稳定水位埋深为 24.64~30.04 m。

1.2 原桩基设计方案

设计方案采用旋挖灌注桩，以$⑤_1$层碎块状强风化岩层或$⑥_2$层中风化炭质粉砂岩为持力层。岩面起伏较大，考虑填土的负摩阻力后，对于填土厚度小于 10 m 处，要求桩端入岩层 20 m；对于填土厚度大于 10 m 处，要求桩端入岩层 32 m。原设计方案无桩端后注浆。旋挖桩采用干成孔施工工

艺，桩基设计方案详见表2。

表2 原桩基设计方案

Table 2 Original pile foundation design scheme

桩径/mm	承载力特征值/kN	入岩深度/m		注浆
		填土厚度<10 m	填土厚度>10 m	
1 200	5 500	20	32	无
1 000	4 700			
800	3 700			

典型地质剖面如图1所示。

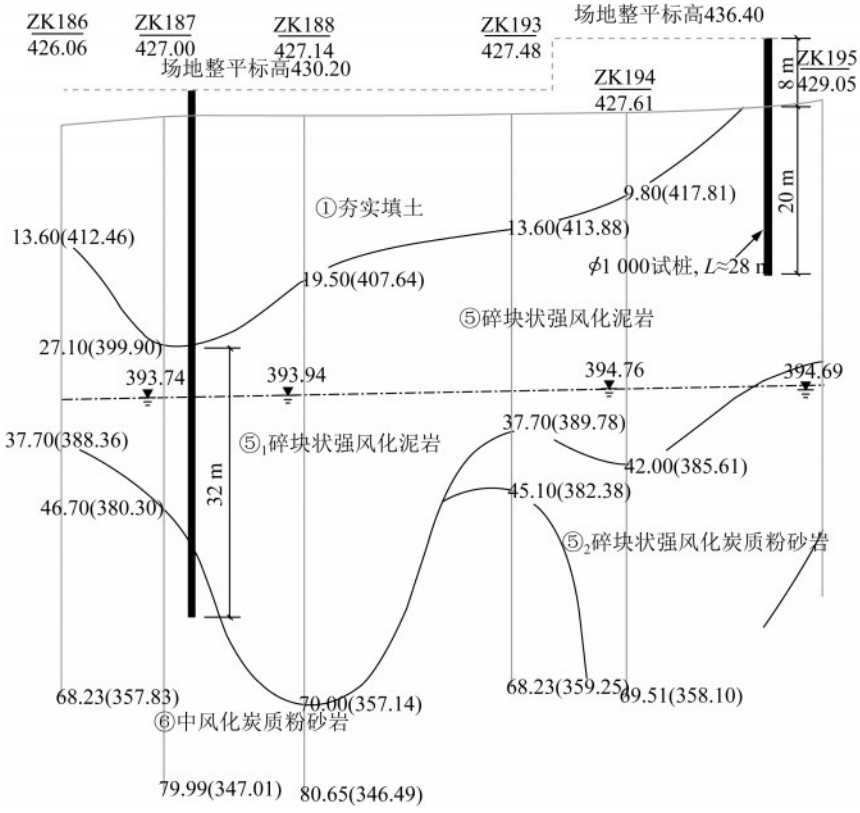


图1 原设计桩长及典型地质剖面

Fig.1 Original design pile length and typical geological profile

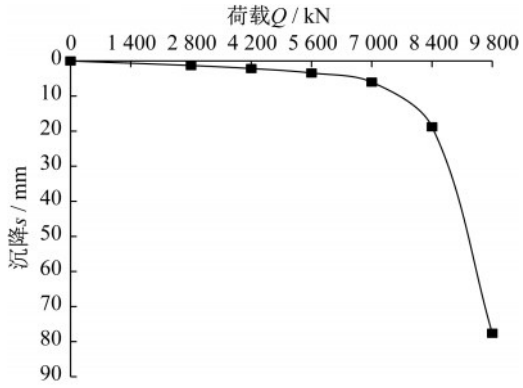


图2 试桩*Q*–*s*曲线

Fig.2 *Q*-*s* curve of the test pile

1.3 原试桩情况

项目进行了1根ϕ1000的灌注桩试桩，桩长约28 m，入岩20 m，持力层为⑤$_1$层碎块状强风化泥岩，未采用桩端后注浆，原计划加载至14 000 kN，但加载至9 800 kN时发生陡降，最终取*Q*–*s*曲线发生明显陡降的起始点对应的荷载值7 000 kN为该桩的单桩竖向抗压极限承载力，即承载力特征值为3 500 kN，未达到设计要求的4 700 kN。试桩静载检测结果见图2。

分析原因，首先是成孔后未及时浇筑混凝土，孔壁土体回弹，应力释放，降低了桩的侧阻力。这种孔壁应力松弛的现象对于直径大于800 mm的大孔径桩尤为明显[9]。其次旋挖成孔时取出的土堆放在孔口边，施工机械行走、钢筋笼吊放时易碰撞堆土，导致土体落入桩孔内，加大了沉渣厚度。最后，浇筑混凝土前，孔底未进行二次清孔，过厚的沉渣会降低桩的端阻力。

1.4 优化方案

根据原位测试数据，碎块状强风化泥岩波速

为548 m/s，未受扰动时工程性质较好。根据相关研究，单桩嵌岩段轴力随深度递减，递减率与岩石弹模和强度有关，深径比 h_r/D=5~10 时衰减为零[10]，即桩端进入岩层5~10倍 D（D 为桩径）即可。缩短入岩深度可以有效地缩短成孔时间，减小孔壁应力释放的不利作用。

项目采用干成孔工艺，虽然不存在桩侧泥皮，但是因旋挖工艺所限，桩端沉渣难以清除干净。为消除沉渣影响，同时加固碎块状强风化泥岩，提高承载力，优化方案采用桩端后注浆工艺。桩端注浆采用间歇、慢速的方法，除能够对桩端沉渣进行加固外，浆液也会沿桩身上翻，对桩侧土体进行加固，对桩的端阻力和侧阻力的提高均有显著作用。

优化方案将桩径统一取至 1 000 mm，进入碎块状强风化泥岩深度统一取至8D，即 8 m。优化后试桩桩位临近原试桩桩位，地层情况与原试桩一致。通过桩端后注浆加固，每根桩注浆水泥用量 5 t，扣除填土负摩阻力后，要求单桩竖向承载力特征值不低于 5 500 kN。桩径和桩端入持力层深度的统一便于施工管理。

2　试桩分析

2.1　试桩检测结果

优化后试桩参数为桩径 1 000 mm，进入⑤$_1$碎块状强风化岩 8 m，混凝土等级为 C45，采用后注浆工艺，每根桩注纯水泥 5 t，水灰比为 0.5~0.6。采用二次注浆，第一次注 3 t 水泥，第二次注 2 t 水泥，注浆时间间隔 2 h。三根试桩实际桩长见表3。

表 3　　优化后试桩参数

Table 3　Parameters of the optimized test pile

桩号	H1	H2	H3
填土层厚度/m	29.80	30.90	33.30
实际试桩长度/m	38.78	39.33	41.74
入岩深度/m	8.89	8.49	8.24

试桩采用静载荷试验确定承载力，最大加载量为 22 000 kN，加载采用堆载法，配重共 3 000 t，配置6台 630 t 的千斤顶进行加载，见图3。分 11 级加载，第一次加载 4 000 kN，以后每级加载 2 000 kN。试桩静载检测结果见图 4。从检测结果可以看出，三根试桩 Q–s 曲线均为缓变型，沉降量均小于 40 mm，曲线未出现陡降。这表明试桩尚未达到极限状态，极限承载力不小于 22 000 kN。



(a) 堆载照片



(b) 加载千斤顶及主梁

图 3　试桩加载照片

Fig.3　Photos of pile load test

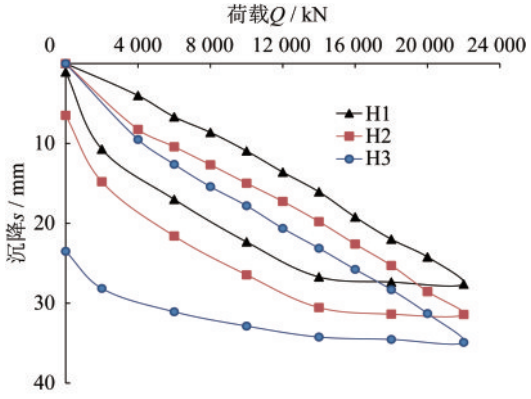


图 4　优化后试桩 Q–s 曲线

Fig.4　Q–s curves of the optimized test piles

2.2　单桩承载力特征值确定

试桩的单桩竖向抗压极限承载力取 22 000 kN，

根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)5.4.3,桩周土沉降可能引起桩侧负摩阻力时,端承桩应满足下式:

$$N_k + Q_g^n \leqslant R_a \quad (1)$$

式中:N_k为荷载效应标准组合轴心竖向力作用下,基桩承担的平均竖向力;Q_g^n为负摩阻力引起基桩的下拉荷载;R_a为单桩竖向承载力特征值。

令:

$$R'_a = R_a - Q_g^n \quad (2)$$

式中:R'_a为扣除负摩阻力后的、可以用于承担上部结构荷载的单桩承载力特征值。

根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)表5.4.4-2,桩端位于基岩时,中性点深度比取1.0,即,岩层以上的填土均考虑负摩阻力。填土越厚,R_a越小,越不利,故对填土最厚的H3号试桩进行计算。

H3号试桩填土厚度为33.5 m。根据勘察资料,填土重度γ=16.5 kN/m^3,q_{sk}=20 kPa,负摩阻力系数为0.25,则试桩阶段填土贡献的侧摩阻力为Q_{sk}=2 104 kN,扣除试桩阶段填土贡献的侧摩阻力后,单桩承载力特征值R_a=9 948 kN。

中性点以上单桩桩周第i层土负摩阻力标准值为:

$$q_{si}^n = \xi_{ni}\sigma_i' \quad (3)$$

式中:q_{si}^n为第i层土桩侧负摩阻力标准值,当计算值大于正摩阻力标准值时,取正摩阻力标准值进行设计;ξ_{ni}为桩周第i层土负摩阻力系数;σ_i'为桩周第i层土平均竖向有效应力。

填土层的平均竖向有效应力σ_i'=276 kPa,计算得q_{si}^n=69 kPa,计算值大于填土正摩阻力标准值20 kPa,取q_{si}^n=20 kPa,则填土对桩基的下拉荷载Q_g^n=2 104 kN。

扣除试桩阶段填土的贡献,并考虑使用阶段填土的下拉荷载后,R'_a=9 948−2 104=7 844 kN。

可见,在考虑最不利的填土下拉荷载后,桩径1 000 mm,进入碎块状强风化岩8 m,扣除负摩阻力后,单桩承载力特征值可以达到7 844 kN。

3 工程桩设计及检测

3.1 工程桩设计方案

根据试桩结果,工程桩均采用直径1 000 mm的旋挖灌注桩,以⑤$_1$碎块状强风化岩层作为持力层,桩端进入持力层8 m,采用桩端后注浆。考虑到不同厚度填土的负摩阻力及实际承载要求,工程桩承载力取值见表4。

表4 工程桩设计参数

Table 4 Design parameters of engineering piles

覆土厚度t/m	单桩承载力特征值R'_a/kN(扣除负摩阻力后)	静载加载量/kN
0<t≤5	7 000	14 000
5<t≤12	6 500	17 000
12<t≤20	6 000	
20<t≤27	5 500	19 000
27<t≤35	5 000	

工程桩施工时,需要进行一桩一勘,确保桩端进入持力层满足要求。考虑增加注浆费用后,该方案较原设计方案仍节约造价超30%,直接节约工程费用超2 000万元,同时节约了大量工期。

3.2 工程桩注浆施工

为保证工程桩注浆质量,对注浆施工要求采用低压、慢速、间歇的注浆方式,具体如下:

(1) 注浆采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,浆液水灰比取0.5~0.6,注浆流量不超过50 L/min。分两次等量间歇注浆。第二次注浆距第一次注浆间隔2 h左右。

(2) 填土厚度小于5 m时,每根桩注水泥3 t;填土厚度在5~15 m时,每根桩注水泥4 t;填土厚度大于15 m时,每根桩注水泥5 t。

(3) 注浆以注浆量控制为主。当注浆量少于设计值,但不低于设计值的75%,注浆压力超过4.0 MPa,且稳定3~10 min,也可停止注浆。否则应采取补浆措施。

(4) 旋挖桩施工出土量较大,需充分考虑成桩顺序、出土路径等,做好注浆管的保护工作,避免碰撞损坏注浆管。

3.3 工程桩检测结果

工程桩施工完成后,为检验优化方案的可靠性,根据业主要求,静载检测数量较规范要求有所提高,共收集到85根灌注桩的静载检测数据,见表5。

表 5　工程桩检测结果

Table 5　Test results of engineering piles

最大加载量/kN	桩数/根	平均沉降量/mm	中位数/mm	最大沉降量/mm	最小沉降量/mm
14 000	16	7.14	6.38	13.89	3.83
17 000	30	10.57	10.58	17.14	4.19
19 000	39	14.21	14.27	18.95	7.39

根据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)4.4.2 条,确定单桩竖向抗压极限承载力时,对于缓变型 Q-s 曲线,宜根据桩顶总沉降量,取 s 等于 40 mm 对应的荷载值;对 D(D 为桩端直径)大于等于 800 mm 的桩,可取 s 等于 0.05D 对应的荷载值。对于本工程,工程桩直径均为 1 000 mm,则确定单桩竖向抗压极限承载力时,可取桩顶沉降量 50 mm 对应的荷载值。

由表 5 可见,所有检测桩沉降量均不超过 50 mm,表明单桩承载力极限值均不小于各自对应的最大加载量,满足设计要求,且有较大余量。

具体统计每根桩沉降量与加载量的区间关系,见图 5。可以看出,整体上加载量越大,桩顶沉降量越大。从图中也可以看出不同加载量下,桩顶沉降量的最大分布区间。加载量为 14 000 kN 的 16 根桩,沉降量位于 6~7 mm 区间的有 5 根;加载量为 17 000 kN 的 30 根桩,沉降量位于 11~12 mm 区间的有 6 根;加载量为 19 000 kN 的 39 根桩,沉降量位于 15~16 mm 区间的有 12 根。

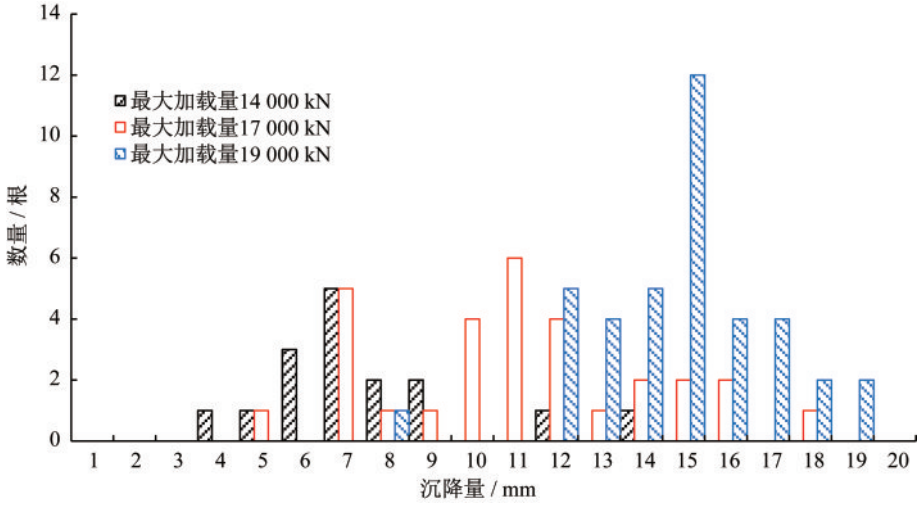


图 5　检测桩沉降统计图

Fig.5　Statistical chart of settlement of test piles

4　结　论

根据本桩基优化工程实践,得出以下结论:

(1) 当成桩采用干成孔旋挖工艺,桩端为碎块状强风化泥岩时,采用桩端后注浆是有效的处理沉渣、提高单桩承载力的手段。

(2) 对于碎块状强风化岩层作为持力层时,桩端入岩深度可以按照 5~10D 控制,本项目工程桩桩径 1 000 mm,桩端入岩深度 8 m,叠加桩端后注浆工艺,单桩承载力极限值均大于 14 000 kN。

(3) 采用桩端后注浆工艺时,需严格管控注浆质量,采用低压、慢速、分次注浆的工艺,可以大幅提高桩基承载力。

参　考　文　献

[1] 王一凡,罗丁,李智轩,等.旋挖干成孔灌注桩基础综合施工技术[J].施工技术,2018,47(11):78-82.
Wang Yifan, Luo Ding, Li Zhixuan, et al. Comprehensive construction technique of rotary dry cast-in-place pile foundation [J]. Construction Technology,2018,47(11):78-82.(in Chinese)

[2] 龚晓南.桩基工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.
Gong Xiaonan.Pile foundation engineering manual[M]. Beijing: China Architecture and Building Press,2016.(in Chinese)

[3] 李韬.上海地区桩端后注浆超长桩承载力估算方法研究[J].工程勘察,2018,46(4):1-6,22.

Li Tao. Study on estimation of the bearing capacity of super long base-grouted piles in Shanghai region [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(4): 1-6, 22. (in Chinese)

[4] 鹿存亮. 深厚砂层桩端后注浆灌注桩现场试验研究[J]. 工程勘察, 2023, 51(3): 7-11, 39.
Lu Cunliang. Field test of post-grouting bored pile in thick sand layer [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2023, 51(3): 7-11, 39. (in Chinese)

[5] 马东亚. 上海地区某高层建筑桩基设计研究[J]. 结构工程师, 2021, 37(3): 229-234.
Ma Dongya. Pile foundation design and research of a high-rise building in Shanghai area [J]. Structural Engineers, 2021, 37(3): 229-234. (in Chinese)

[6] 刘伟伟, 巢斯. 钻孔灌注桩后注浆的分析和探讨[J]. 结构工程师, 2010, 26(6): 84-88.
Liu Weiwei, Chao Si. Discussion and analysis on post-grouted bored piles [J]. Structural Engineers, 2010, 26(6): 84-88. (in Chinese)

[7] 雷皓, 范进. 旋挖干成孔灌注桩施工过程控制及质量缺陷处理[J]. 江西建材, 2022(3): 41-43.
Lei Hao, Fan Jin. Construction process control and quality defect treatment of rotary excavated dry hole cast-in-place pile [J]. Jiangxi Building Materials, 2022(3): 41-43. (in Chinese)

[8] 余政兵, 徐建华, 李小成. 干成孔旋挖桩施工技术浅析[J]. 重庆建筑, 2012, 11(8): 25-27.
Yu Zhengbing, Xu Jianhua, Li Xiaocheng. Analysis on construction technology of dry hole rotating drill pile [J]. Chongqing Architecture, 2012, 11(8): 25-27. (in Chinese)

[9] 周景星, 李广信, 张建红, 等. 基础工程[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
Zhou Jingxing, Li Guangxin, Zhang Jianhong, et al. Foundation engineering [M]. Third Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2015. (in Chinese)

[10] 刘金砺. 桩基研究与应用若干进展浅析[J]. 施工技术, 2000, 29(9): 2-4.
Liu Jinli. Simple explanation on the advances of research and application of pile foundation [J]. Construction Technology, 2000, 29(9): 2-4. (in Chinese)