

沙漠地区钻孔灌注桩后注浆提升竖向承载力研究

杨松松¹, 李吉阳², 章定文^{1*}

(1. 东南大学 交通学院 / 道路交通工程国家级实验教学示范中心, 江苏 南京 211189;
2. 中建一局集团建设发展有限公司, 北京 100102)

摘要: 部分地区由于缺乏入岩钻机导致钻孔灌注桩的应用受到极大的限制。为了解决桩基无法入岩而引起的承载力不足问题, 采用后注浆工艺改善桩侧土体性质, 可以减少桩基入岩深度, 提升灌注桩承载力。以埃及新首都 CBD 项目钻孔灌注桩后注浆工程为研究背景, 通过现场静载试验研究沙漠地区后注浆施工对于桩基承载力的提升情况, 分析桩基后注浆施工的经济效益, 并总结沙漠地区桩端与桩周注浆参数的取值。研究表明沙漠地区采用后注浆工艺桩基的承载力可以提升桩基承载力 1.5 倍; 沙漠地区桩侧的注浆压力保持在 1.5~3.0 MPa, 桩端的注浆压力保持在 2.0~5.0 MPa, 可以达到较好的注浆加固效果; 采用后注浆工艺可以显著的节约施工成本。

关键词: 灌注桩; 后注浆; 沙漠地层; 承载力; 静载试验; 注浆参数

中图分类号: TU94

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)S-0115-06

Study on post and grouting of bored piles in desert areas to improve vertical bearing capacity

YANG Song-song¹, LI Ji-yang², ZHANG Ding-wen^{1*}

(1. School of Transportation / National Demonstration Center for Experimental Road and Traffic Engineering Education, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China; 2. China Construction First Group Construction & Development Co., Ltd., Beijing 100102, China)

Abstract: In areas where the lack of rock entry drilling rigs has resulted in the application of bored piles being greatly restricted. In order to solve the problem of inadequate bearing capacity caused by the inability of the pile foundation to enter the rock, the post grouting process is used to improve soil properties around the pile, which can reduce the embedded depth of pile foundation and improve the bearing capacity of the grouted pile. The post grouting of bored pile foundations in the CBD project in the new capital of Egypt was used as the background of the study. The improvement of the bearing capacity of pile foundations by post grouting construction in desert areas was investigated through on-site static load tests. The economic benefits of post grouting pile foundations were analysed and the values of the pile end and perimeter grouting parameters in desert areas were summarised. The study shows that the bearing capacity of pile foundations in desert areas can be increased by 1.5 times by using post grouting process. A better grouting reinforcement effect can be obtained if the grouting pressure at the pile side was kept at 1.5-3.0 MPa and the grouting pressure at the pile end was kept at 2.0-5.0 MPa. The construction cost can be significantly saved by using post grouting technology.

Key words: bored pile; post-grouting; desert strata; bearing capacity; static load test; grouting parameters

0 引言

钻孔灌注桩因施工便捷、承载力高等特点, 被广泛应用于桥梁、高层建筑物的基础, 通过桩体将

上部荷载传递至底部基岩, 但是部分地区由于缺乏入岩钻机或者基岩埋深过大 (130 m 以上) 导致灌注桩应用受限^[1]。为了提高灌注桩的承载力, 降低灌注桩的长度, 工程上采用后注浆技术提升灌注桩

收稿日期: 2022-02-19

作者简介: 杨松松 (1994—), 男, 陕西咸阳人, 博士研究生, 主要从事桥梁桩基抗震研究。E-mail: 230208806@seu.edu.cn。

*通信作者: 章定文 (1978—), 男, 湖南常德人, 教授, 博士生导师, 主要从事地基处理方面的研究工作。E-mail: zhang@seu.edu.cn。

的承载能力,以解决此类问题^[2-3]。后注浆技术是在钢筋笼中提前布设侧向和底部注浆管,混凝土浇筑完成后的8~12 h利用注浆泵向注浆孔中注水,使混凝土保护层破裂,最后在注浆管内进行后注浆施工。国内外学者对后注浆技术进行了广泛的研究,马海龙等^[4]通过室内模型试验研究了不同加载点与加载方向对单桩荷载传递规律的影响,确定了后注浆的最佳注浆位置。刘彦峰等^[5]依据预应力桥梁桩基现场试验研究了桩基的承载与变形能力,研究表明桩侧后注浆可以提高桩基的承载能力,降低桩周土的不均匀沉降。王华强^[6]通过对注浆加固土的微观进行研究,水泥的掺入能够显著的改善细砂的剪切特性,土体在较小的位移下可以发挥较大的承载力。李永辉等^[7]基于19根大直径灌注桩现场足尺试验,研究了后注浆桩基的承载能力与桩侧土体的变形能力。安康等^[8]以南京地区钻孔灌注桩桩底后注浆工艺为研究背景,研究了后注浆过程中的注浆量与注浆压力及桩体的承载特性。ZHOU等^[9]研究了不同类型的灌注桩后注浆的承载特性,研究表明后注浆可以改善端承桩的承载特性。王安辉等^[10]通过水泥土加固管桩桩周,研究了桩基桩周土加固对水平循环荷载与抗震性能,从而提出了桩周土加固设计方法。

基于现场的足尺试验可以准确地反映后注浆对于桩基承载能力的提升情况,上述文献中后注浆主要应用于软土、细砂、粉土等地层。对于沙漠地区后注浆参数的选取,以及细砂地层中后注浆提升桩基的承载能力尚不清楚。因此结合埃及新首都CBD项目灌注桩后注浆工艺,研究沙漠地区桩基后注浆施工的注浆参数选取,并通过现场静载试验分析后注浆对于灌注桩的承载力提升情况。

1 工程概况

埃及新行政首都CBD项目位于埃及开罗东部,地处炎热干燥的沙漠腹地。埃及新行政首都中央商务区项目P3标段总用地面积24 000 m²、总建筑面积约17.5万m²,由两栋高层建筑C11与C12及对应群楼组成。图1为C11与C12大楼,C11、C12两栋楼建筑外形一致,建筑物高度均为142.10 m,南侧外立面倾斜,形成具有立体感的双子塔构造。工程所在地属于北非热带沙漠地区,全年炎热干燥少雨,首都开罗年降雨量仅为80 mm。图2为C11大楼地质剖面图,根据地质钻探揭露C11场内主要分布的地层从上往下为人工回填土、砂层、中部充

斥粉质黏土、砂岩、泥岩层,下伏基岩为中度分化玄武岩,根据地勘报告分析埃及沙漠地区地质分布比较复杂,57 m以下为不同风化程度、不同硬度的玄武岩层,深度直至100 m。C12场内主要分布的地层从上往下为人工回填土、砂层、中部充斥粉质黏土、砂岩、泥岩层与C11类似,仅土层厚度不同。下伏基岩为中度分化玄武岩,根据地勘报告分析埃及沙漠地区地质分布比较复杂,钻孔100 m深度均未发现地下水。

根据地质报告及设计要求,采用钻孔灌注桩作为建筑物基础,直径为1.2 m,桩长为52 m,桩端持力层为中风化玄武岩,桩体浇筑采用P.O42.5普通硅酸盐水泥配制,水灰比为0.6,桩基设计入岩深度为2 m。由于埃及地区缺乏入岩钻机,并且嵌岩桩施工速度较慢。为了解决埃及地区缺乏入岩钻机以及缩短施工工期,本工程采用钻孔灌注桩桩侧后注浆施工工艺来提高灌注桩的承载力,将端承摩擦桩修改为摩擦桩,缩短施工工期的同时并提高灌注桩的竖向承载能力。



图1 C11与C12大楼
Fig. 1 C11 and C12 buildings

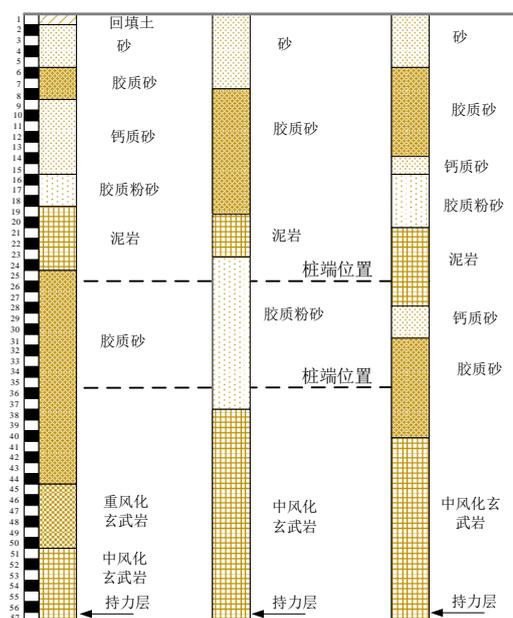


图2 C11大楼地质剖面
Fig. 2 Geological profile of building C11

2 钻孔灌注桩后注浆现场静载试验研究

按照设计要求单桩的承载力必须满足 1 300 t, 现场为了确定后注浆工艺提高承载力系数, 将试验桩设计成 4 组相同桩长的钻孔灌注桩, 一种为普通摩擦桩, 一种为后注浆的钻孔灌注桩, 通过静载试验对比后注浆能否提高单桩承载力, 整个项目共设置 4 根普通试验桩, 4 根后注浆试验桩进行试验对比。注浆与非注浆桩基桩长均为 35 m, 桩基直径为 1.2 m。图 3 为现场灌注桩静载试验, 每级加载为设计承载力的 25%, 每级卸载为设计承载力的 50%, 每级荷载加载、卸载持续时间为 1 h。



图 3 现场静载试验

Fig. 3 Field static load test

图 4 为 35 m 长钻孔灌注桩注浆与非注浆 $Q-S$ 曲线, 从图中可以看到后注浆施工的钻孔灌注桩在相同的荷载下沉降更小。当加载达到设计荷载 1 300 t 时, 注浆施工的桩基的竖向沉降约 3 mm, 而非注浆桩基的沉降已经达到 7 mm, 达到设计承载力时非注浆桩基的沉降是后注浆桩基沉降的两倍以上。当荷载继续增大后注浆施工的桩基承载力随着荷载的增大而逐渐增大, 荷载与沉降呈现良好的线性关系, 但是非注浆桩基的荷载达到 1 905 t 后, 桩基的竖向位移突然出现显著增大, 说明此时已经达到了桩基的极限承载力。当荷载继续增大时, 桩周土体已经出现破坏, 桩基的竖向位移迅速增大。从注浆与非注浆桩基的卸载曲线可以看出注浆桩基每一级卸载后桩基的沉降差不超过 1 mm, 而非注浆桩基在加载、卸载过程中的最大沉降差达到了 10 mm, 桩周土体产生了不可恢复的塑性变形。在卸载结束后注浆与非注浆桩基加载、卸载的最终沉降差约 1 mm, 而非注浆桩基的最终沉降差约为 7.5 mm, 这说明通过后注浆工艺使浆液渗透到桩侧、桩端的特细砂、风化岩、砂质粉土中, 形成了强度较高的水泥土, 改善了桩、土接触面之间的摩擦力, 提高了桩周土

的强度, 从而提高了单桩承载力并降低了基础的不均匀沉降。

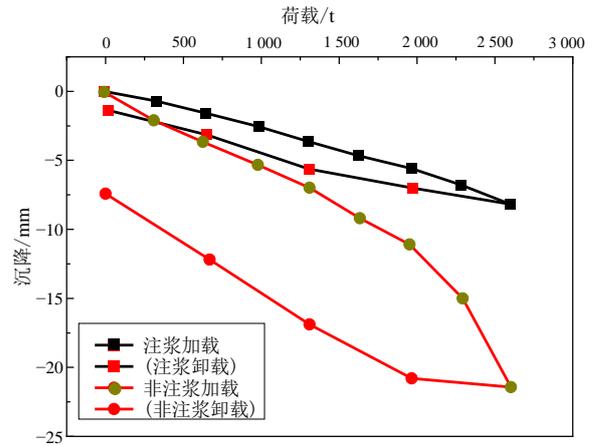


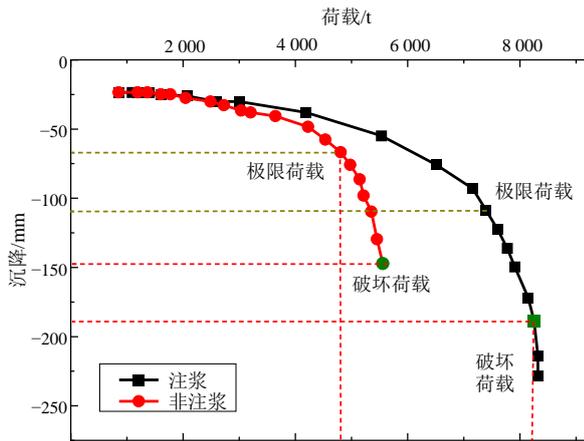
图 4 注浆与非注浆钻孔灌注桩 $Q-S$ 曲线

Fig. 4 $Q-S$ curves for grouted and non-grouted bored piles

图 5 为现场桩基的 $Q-S$ 曲线, 从图中可以看出后注浆桩基的极限承载力为 7 500 t, 破坏荷载为 8 250 t, 非注浆桩基的极限承载能力为 4 750 t, 破坏荷载为 5 000 t。根据现场静载试验可知沙漠地区后注浆施工可提升桩基的竖向承载能力 1.5 倍左右。注浆提高了桩周土的整体性, 使得桩周及桩端加固土具有更高的压缩模量, 桩周土体的破坏位移也会大于未加固土体。因此, 注浆桩体达到极限承载力时的破坏位移比未注浆桩体的位移大 (即破坏变形)。后注浆提升桩基承载力机理主要有以下两个方面:

桩周注浆土层增强机理: (1) 桩周土体通过后注浆改善了桩周土体的力学性能, 使得加固土体的抗剪强度与弹性模量得到了较大提升, 从而使得桩侧摩阻力也相应提高。(2) 后注浆技术改良了桩周泥皮的胶结能力, 同时后注浆增加了桩体的粗糙度, 改良了钻孔灌注桩桩体与软弱泥皮的胶结作用, 提高桩周薄弱层的力学性能。(3) 浆液在注浆压力的作用下浆液沿着土体裂隙扩散, 浆液凝固后提高桩周土的整体性, 从而提高桩周土强度。

桩端承载力增强机理: (1) 消除桩底沉渣: 钻孔灌注桩成孔过程中会在桩端形成沉渣, 沉渣的承载力远低于桩端持力层承载力。通过桩端注浆方式可以使得未被清理的沉渣重新固结, 从而提高了灌注桩桩端的承载力。(2) 增大桩端受力面积: 由于浆液扩散作用导致在桩端位置形成了一个“扩大头”, 增加了桩端土体的受力面积; 浆液与土体形成结石体, 增加了桩端土体的抗剪强度, 从而提高桩端土体的承载能力^[1]。

图5 桩基 $Q-S$ 曲线Fig. 5 $Q-S$ curves for pile foundations on site

3 沙漠地区后注浆工艺与注浆参数取值研究

3.1 沙漠地区后注浆工艺

(1) 后注浆导管应采用钢管, 且与钢筋笼箍筋绑扎固定或焊接。

(2) 桩端后注浆导管及注浆阀数量宜根据桩径大小设置, 对于直径不大于 1200 mm 的桩, 宜沿钢筋笼圆周对称设置 2 根; 对于直径大于 1200 mm 而不大于 2500 mm 的桩, 宜对称设置 3 根。

(3) 对于桩长超过 15 m 且承载力增幅要求较高者, 宜采用桩端桩侧复式注浆; 桩侧后注浆管阀设置数量应综合地层情况、桩长和承载力增幅要求等因素确定, 可在离桩底 5~15 m 以上、桩顶 8 m 以下, 每隔 6~12 m 设置一道桩侧注浆阀, 当有粗粒土时, 宜将注浆阀设置于粗粒土层下部。此外, 对于单个桩或中心距大于 6D 的桩, 上述水泥浆总量应增大 1.2 倍。

在埃及这种环境下进行后注浆施工, 主要依据钻孔时的土质记录, 调整侧面注浆管安装位置, 侧面注浆管共安装两道, 根据现场的地勘情况, 在 5~15 m 范围内地质几乎为沙层、全风化岩层。故第一根注浆管安装在距离桩顶部 1/3 位置, 第二根注浆管安装在桩身 2/3 位置, 局部桩侧注浆孔避开泥岩和砂岩地层。图 6 为桩端注浆孔, 每个注浆截面均匀布置 3 个注浆孔, 桩底布置 3 个注浆孔。

3.2 沙漠地区注浆参数取值研究

地层损失率、土层条件、孔隙率、注浆孔埋深等因素会影响灌注桩后注浆施工的注浆量与注浆压力, 沙漠高温地区桩侧后注浆参数的选取对于成



图6 桩端注浆孔

Fig. 6 Pile end grouting hole

桩质量非常重要。由于埃及当地无后注浆规范及施工经验, 故后注浆计算采用中国《建筑桩基技术规范》(JGJ 106—2014) 进行计算^[12], 单桩注浆量的设计应根据桩径、桩长、桩端桩侧土层性质、单桩承载力增幅及是否复式注浆等因素确定, 可按下式估算:

$$G_c = \alpha_p d + \alpha_s n d \quad (1)$$

式中: α_p 、 α_s 分别为桩端、桩侧注浆量经验系数, $\alpha_p = 1.5 \sim 1.8$, $\alpha_s = 0.5 \sim 0.7$, 对于卵、砾石、中粗砂取较高值; n 为桩侧注浆断面数; D 为桩基设计直径, m; G_c 为注浆量。

从《建筑桩基技术规范》中可以清楚地看到桩侧、桩端的取值应根据工程土层地质条件进行取值, 但是埃及沙漠高温环境中具体的取值参数缺乏相关的参考依据。埃及沙漠地区的土壤调查结果表明, 其土层以“特细砂、砂质粉砂、粉砂质砂、砂岩、黏土岩”等为主, 砾石或粗砂层极少且很薄。结合本工程中灌注桩后注浆量, 可以确定当 α_p 的取值为 1.5, α_s 的取值为 0.5, 计算注浆量与实际注浆消耗量基本一致。桩侧后注浆压力会影响到浆液的扩散半径, 有学者提出了考虑注浆孔埋深与土体重度的注浆压力计算公式^[13]:

$$P = \alpha \gamma t + b \lambda h \quad (2)$$

式中: α 是系数, 一般取 1~3; γ 为注浆孔上覆土体平均重度; t 为注浆孔上覆厚度; b 为注浆段允许增加压力, 一般取 60~80 kPa/m; λ 是系数, 根据土体渗透条件选取, 一般取 0.5~1.5; h 为注浆孔深度。本工程中 α 取值为 2.7, λ 取值与桩侧的注浆经验系数取值保持一致, 取值为 1.5。表 1 为本工程不同桩间距下桩侧与桩端的注浆压力与注浆量参

数取值表。现场施工中第二道注浆孔埋深为 15 m, 根据公式 (2) 计算的注浆压力为 2.11 MPa, 现场注浆压力保持在 2.3 MPa, 可以看出计算的注浆压力可以很好地指导现场施工。

表 1 后注浆参数表

Table 1 Post grouting parameters

桩距/m	注浆压力/MPa		注浆量/t	
	桩底	桩侧	桩端	桩侧
$L \geq 6D$			2.5	1.0
$6D > L \geq 3D$	2.0~5.0	1.5~3.0	2.1~2.5	0.8~1.0
$L < 3D$			1.8~2.1	0.6~0.8

注: 其中, L 为两桩中心之间的距离, D 为桩径。

4 经济效益分析

埃及新行政首都 CBD 项目 P3 标段 C11 与 C12 共计 362 根桩基, 其中 33.4 m 桩长桩基 13 根, 25 m 桩长桩基 181 根, 31 m 桩长桩基 158 根, 原设计桩长 52.3 m。每米钻孔费用 460 美元, 后注浆每根桩基增加费用 600 美元。采用后注浆施工后 P3 标段 C11 与 C12 建筑物桩基数量与原设计基本相同, 但相比于原设计桩基总长度减少了 8 966.8 m, 将灌注桩施工 5 个月工期缩短至 3 个月, 共计节约成本 200 多万美元。从表 2 中可以清楚地看到采用后注浆施工不仅解决了缺乏入岩钻机引起的钻孔问题, 同时极大的缩短了桩基的长度, 节省材料的同时也提高了施工效率, 灌注桩后注浆工艺可以显著的节约施工成本, 具有较高的经济效益。

表 2 灌注桩后注浆经济效益

Table 2 Economic benefits of post grouting

C11、C12 大楼	原设计	桩侧后注浆
桩基长度	52 m	25 m、35 m
数量	362 根	25 m 181 根; 35 m 158 根
总桩长	18 824 m	9 857.2 m
节约成本	0	206.68 万美元

5 结论

以埃及新首都 CBD 中 C11、C12 大楼项目钻孔灌注桩后注浆施工为研究背景, 总结了沙漠高温地区钻孔灌注桩后注浆施工注浆参数进行的选取, 得到了以下结论:

(1) 沙漠地区后注浆施工缺乏相关的经验, 通过对埃及沙漠地区灌注桩后注浆施工工艺进行总

结, 桩端注浆量系数 α_s 为 0.5, 桩侧注浆系数 α_p 为 1.5, 可以准确的计算沙漠地区后注浆消耗量。

(2) 沙漠地区灌注桩后注浆施工, 桩端的注浆压力可以控制在 2.0~5.0 MPa, 桩侧的注浆压力应结合注浆孔埋深选取, 一般在 1.5~3.0 MPa。

(3) 根据现场静载试验结果可知后注浆施工工艺可以显著提高桩基的竖向承载力 1.5 倍左右, 将原来的 5 个月工期缩短为 3 个月。本工程采用后注浆施工 C11、C12 项目大楼共计减小桩长 9 074.6 m, 节约施工成本 206.68 万美元。

参考文献

- [1] 郎绿原. 复杂地质下超大直径钻孔桩二次成孔施工技术[J]. 桥梁建设, 2018, 48(3): 100-104.
LANG Lv-yuan. Construction technique for completing bored holes of very large diameter bored piles in two times under complex geological conditions[J]. Bridge Construction, 2018, 48(3): 100-104.
- [2] 张忠苗. 灌注桩后注浆技术及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
ZHANG Zhong-miao. Post-grouting Technology of Bored Piles and Its Engineering Application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [3] 周亚龙, 王旭, 张延杰, 等. 灌注桩基础桩底复合式后注浆及承载特性研究[J/OL]. 岩土工程学报: 1-10 [2022-05-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20220214.1743.006.html>
ZHOU Ya-long, WANG Xu, ZHANG Yan-jie, et al. Research on composite post-grouting and bearing characteristics of cast-in-place pile foundation pile bottom [J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering: 1-10 [2022-05-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20220214.1743.006.html>.
- [4] 马海龙, 包彦冉, 马宇飞, 等. 单桩荷载传递规律及桩侧注浆合理位置确定[J]. 工业建筑, 2021, 51(9): 173-176, 196.
MA Hai-long, BAO Yan-ran, MA Yu-fei, et al. Single pile load transfer law and determination of reasonable position of pile side grouting[J]. Industrial Architecture, 2021, 51(9): 173-176, 196.
- [5] 刘彦峰, 胡晓明, 马远刚, 等. 后注浆技术在粉细砂地层灌注桩中的应用[J]. 桥梁建设, 2019, 49(增刊 1): 6.
LIU Yan-feng, HU Xiao-ming, MA Yuan-gang, et al. Application of post-grouting technology in cast-in-place

- piles in silty sand formation[J]. *Bridge Construction*, 2019, 49(S1): 6.
- [6] 王华强. 灌注桩桩侧注浆加固机理及试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- WANG Hua-qiang. Research on reinforcement mechanism of shaft grouting and test study[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [7] 李永辉, 朱翔, 周同和. 桩端后注浆对大直径灌注桩影响的现场对比试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(增刊2): 388-396.
- LI Yong-hui, ZHU Xiang, ZHOU Tong-he. Field comparative experimental study on the effect of post-grouting on large-diameter cast-in-place piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S2): 388-396.
- [8] 安康, 刘晔, 刘少林. 南京地区大直径后注浆嵌岩桩静载荷试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(增刊1): 46-54.
- AN Kang, LIU Ye, LIU Shao-lin. Experimental study on large diameter post-grouting rock-socketed piles in nanjing using the method of static loading test[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(S1): 46-54.
- [9] ZHOU Z, XU F, LEI J, et al. Experimental study of the influence of different hole-forming methods on the bearing characteristics of post-grouting pile in Loess Areas[J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 27: 100423.
- [10] 王安辉, 章定文, 张艳芳. 砂土中水泥土复合管桩震动响应试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(增刊 2): 121-124.
- WANG An-hui, ZHANG Ding-wen, ZHANG Yan-fang. Experimental study on vibration response of cement-soil composite pipe pile in sandy soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(S2): 121-124.
- [11] 闫旭. 后注浆钻孔灌注桩的承载性状研究[D]. 济南: 济南大学, 2018.
- YAN Xu. The bearing capacity mechanism study for post-grouting of cast in place pile[D]. Jinan: Jinan University, 2018.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-rural Development of People's Republic of China. Technical Code for Testing of Building Foundation Piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [13] 都君琪. 粉质黏土地层桩侧注浆对既有桩基承载力提升机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- DU Jun-qi. Study on the mechanism of lifting the bearing capacity of existed pile foundation by pile side grouting in silty clay stratum[D]. Jinan: Shandong University, 2020.