

不同后注浆类型下大直径灌注桩承载性能分析

李永辉¹, 郭院成¹, 周同和²

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学综合设计研究院有限公司, 河南 郑州 450002)

摘要 目的 针对黄河中下游冲积地层, 研究不同后注浆类型下大直径灌注桩承载性能及其内在机理, 为该类地层条件的大直径灌注桩及其后注浆的设计与施工提供参考. 方法 整理大量现场试桩实测数据, 对比分析相同场地条件下桩端后注浆桩与桩端桩侧复式后注浆桩承载变形、荷载传递、桩侧阻力与桩端阻力及水平承载的异同, 在此基础上, 进行后注浆类型影响机理的探讨. 结果 两类后注浆大直径灌注桩竖向承载变形性状相近, 荷载传递规律基本一致, 桩端阻力占承载比例均较小, 但复式后注浆桩承载变形性能发挥更为稳定; 复式后注浆桩在桩身上部侧阻软化范围较大, 其在浅层土中侧阻小于桩端后注浆桩, 但在深层土体中, 复式后注浆桩桩侧摩阻力极限值普遍大于桩端后注浆桩; 桩侧注浆对桩周土体加固作用使得复式后注浆桩水平承载性能明显高于桩端后注浆桩. 结论 对于该类场地条件的大直径灌注桩, 承受竖向荷载时, 在确保后注浆施工可靠的前提下, 可仅采用桩端后注浆提高其竖向承载力, 若承受较大的水平荷载时, 增加桩侧注浆可显著提高其水平承载性能.

关键词 大直径灌注桩; 桩端后注浆; 桩端桩侧复式后注浆; 承载性能

中图分类号 TU 473.1

文献标志码 A

Analysis of Bearing Capacities of Large-diameter Bored Pile with Different Types of Post Grouting

LI Yonghui¹, GUO Yuancheng¹, ZHOU Tonghe²

(1. College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, China, 450001; 2. Zhengzhou University Comprehensive Design and Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou, China, 450002)

Abstract: For large-diameter bored piles in alluvial deposits in the middle and lower reaches of the Yellow River, the bearing capacities and mechanism of the piles with different types of post grouting are studied. These can provide references for design and construction of the large-diameter post grouted bored piles in the similar stratum. According to a large amount of field measured results, similarities and differences of bearing deformation, load transfer, pile side resistance, pile end resistance, and laterally bearing capacity of the pile tip post grouted pile and the pile tip and shaft compound post grouted pile are analyzed. The results show that the two types of post grouted pile

收稿日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508522)

作者简介: 李永辉(1983—), 男, 博士, 主要从事桩基工程方面研究.

have similar vertical bearing capacity and load transfer rules. The ratios of the pile tip resistance to the pile bearing capacity of the two type piles are both small. However, the compound post grouted pile shows more stable bearing deformation behaviors. The softening range of the pile shaft friction of the compound post grouted pile is larger than that of the pile tip post grouted pile. Compared with the pile tip post grouted pile, the pile shaft resistances of the compound post grouted pile are smaller in the shallow soils and larger in the deep soils. Because of soil reinforcement around the pile after pile shaft grouting, the lateral bearing capacity of the compound post grouted pile is significant higher than that of the pile tip post grouted pile. Therefore, if construction quality can be guaranteed, the vertical ultimate bearing capacity of the large-diameter bored piles in the similar field conditions can be significantly improved by only pile tip post grouting. However, the lateral bearing capacity of the bored pile can be improved significantly after adding pile shaft grouting.

Key words: large-diameter bored pile; pile tip post grouting; pile tip and shaft compound post grouting; bearing capacity

1958年委内瑞拉 Maracaibo 大桥基础采用了桩端后灌浆,为后注浆技术在桩基工程中首次成功应用^[1-3];之后,Bustamante 等^[4]研制了一种适用于渗透性差、黏性低的粉砂、粉细砂土层的桩端注浆装置;Stocker^[5]采用袖阀管与压力腔联合压浆的后压浆技术,大幅度提高灌注桩的桩侧阻力和桩端阻力;Fleming^[6]介绍了开式 U 形管后注浆工艺,其成为目前欧洲地区常用的后注浆方式。在国内,1974年在天津塘沽新港首次将注浆技术应用于桩基础^[7];沈保汉^[8]、张忠苗^[3]、刘金砺^[9]等为桩基后注浆工艺研发及推广应用做了大量的工作。目前,桩基后注浆方法由复杂变得相对简单,注浆类型从桩端后注浆发展到桩侧后注浆及桩端桩侧复式后注浆,注浆装置由最初的闭式注浆,发展到开式注浆,并呈现出多样化的发展趋势,注浆的适用性由中小直径、中短桩,发展到大直径、超长桩。

大直径灌注桩通常采用的后注浆类型有桩端后注浆和桩端桩侧复式后注浆。目前,桩端后注浆大直径灌注桩承载机理的研究较多^[2-3],桩端桩侧复式后注浆大直径灌注桩承载特性亦有学者研究^[10-11],但两者承载性能的差异分析较少。王卫东等^[12]基于上海中心大厦试桩对两类后注浆大直径灌注桩承载规律的差异进行了对比分析,但该试桩处于深厚软土地区,对于黄河中下游以中密~密

实粉土、粉细砂及可塑~硬塑粉质黏土为主的冲积地层,尚无两类后注浆灌注桩的对比研究。众所周知,桩与土是桩基的统一整体,桩周土层的性质不仅决定桩基荷载传递,也会显著影响后注浆工艺的作用特性,因此,针对黄河中下游冲积地层,笔者基于郑州市快速路工程大直径灌注桩现场载荷试验,对比分析相同场地条件下桩端后注浆桩与桩端桩侧复式后注浆桩现场实测数据,研究两者承载变形、荷载传递、桩侧阻力与桩端阻力发挥及水平承载的差异,在此基础上,探讨其内在机理。通过研究,以期为该类型地层条件的大直径灌注桩及其后注浆的设计与施工提供参考。

1 工程概况

1.1 试桩概况

郑州市快速路工程主要采用高架桥形式,基础采用大直径灌注桩,并采用后注浆工艺提高桩基承载性能。为获得单桩承载力,优化桩基设计,笔者沿快速路工程多个场地开展了大量的现场载荷试验,桩型有未注浆灌注桩、桩端后注浆灌注桩及桩端桩侧复式后注浆灌注桩。现场试桩概况如表1所示。

现场试桩采用正循环旋挖成孔,气举反循环清孔,水下灌注混凝土成桩。竖向载荷试验采用慢速维持荷载法,水平承载试验采用单向多循环加载法;试验时,不仅量测了试桩的

桩顶变形,其中抗压试桩还通过桩身埋设应变传感器,获得了丰富的单桩受力测试数据.

表 1 现场试桩概况

Table 1 Overview of the test piles				
试验 场地	场地 编号	桩长/ m	桩径/ mm	桩端 持力层
西三环陇海路	X-LH	40	1 200	粉质黏土
西三环航海路	X-HH	38	1 200	粉土
南三环新郑路	N-XZ	45	1 200	粉土
北三环徐寨	B-XZ	45	1 200	粉质黏土
北三环丰庆路	B-FQ	45	1 200	粉质黏土
107 辅道姚桥	107-YQ	48	1 000	粉土
107 辅道连霍高速	107-LH	48	1 000	细砂
南三环东延 107 辅道	N-107	40	1 200	粉质黏土
中州大道世纪欢乐园	Z-SJ	45	1 200	粉砂
中州大道森林公园	Z-SL	40	1 200	粉质黏土
南三环京广路	N-JG	45	1 200	粉质黏土

根据地质钻探及原位测试结果,试验场地勘探深度 80 m 以内,除浅表分布 1~2 m 厚杂填土外,主要为第四系全新土、上更新统和中更新统冲积地层.试桩长度范围内主要成层分布有粉土、粉质黏土及粉细砂土;浅层粉土或粉细砂土呈稍密~中密状态,粉质黏土为可塑~硬塑,标准贯入击数普遍小于 20;深层粉土或粉细砂土为密实状态,粉质黏土为硬塑,标准贯入击数基本在 20~40.

1.2 后注浆施工概况

桩端后注浆采用声测管兼作注浆管,其中一根作为主注浆管,一根作为备用管,当主注浆管出现意外注浆失败时启用.声测管为Φ50 钢管,绑扎布置在钢筋笼内侧,随钢筋笼一起下入孔底.兼作注浆管的声测管下端采用三通管联接一根内径 25 mm 带钢丝的柔性高压管作为注浆喷头管,注浆喷头管加工成环形,外侧打孔并对其进行缠防水包装带密封.桩端后注浆装置构造如图 1 所示.

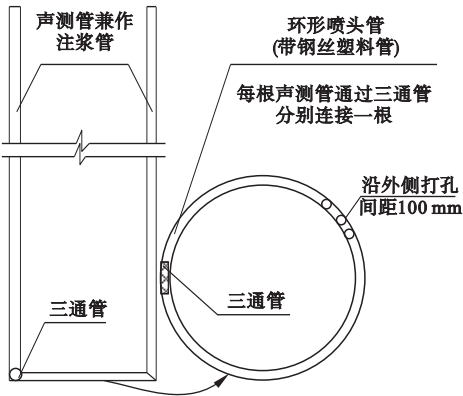


图 1 桩端后注浆装置构造示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the pile tip grouting devices

桩侧后注浆采用 DN25 钢管作为注浆管.侧注浆阀设置:桩长 45 m 及以上设置 3 道,桩长 45 m 以下设置两道,下部侧注浆阀距桩底 12~18 m,上部侧注浆阀距桩顶 8~15 m,每道侧注浆阀竖向间距为 12 m.注浆管绑扎布置在钢筋笼外侧,随钢筋笼一起下孔.各桩侧注浆管端部分别采用三通管联接注浆喷头管,注浆喷头管亦为一根内径 25 mm 带钢丝的柔性高压管,其绕桩身沿钢筋笼外侧环形布置,并沿外侧打孔后缠防水包装带密封.桩侧后注浆装置构造如图 2 所示.

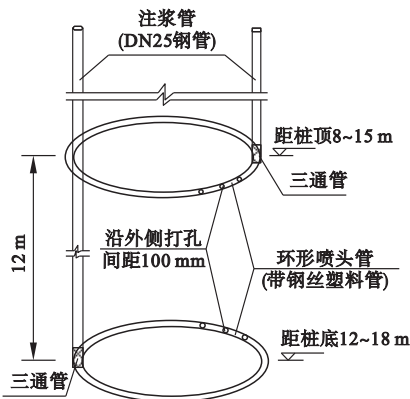


图 2 桩侧后注浆装置构造示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the pile shaft grouting devices

后注浆前,在混凝土浇注后 12~24 h 采用清水开塞并冲洗注浆管道.桩端后注浆在

混凝土浇筑后 3 ~ 14 d 内完成. 桩端桩侧复式后注浆的注浆顺序: 先桩侧注浆, 后桩端注浆, 桩侧注浆先上后下; 桩侧注浆和桩端注浆时间间隔为 3 ~ 6 h.

后注浆浆液采用标号为 P. O 42. 5 普通硅酸盐水泥配制, 水灰比为 0. 6. 注浆量根据文献[13]进行计算, 直径 1 000 mm 的试桩, 桩端注浆量为 2. 5 t, 桩侧单点注浆量为 1 t; 直径 1 200 mm 的试桩, 桩端注浆量为 3. 0 t, 桩侧单点注浆量为 1. 2 t. 桩端后注浆压力为 3 MPa; 桩侧后注浆压力为 2 ~ 2. 5 MPa.

2 抗压承载性能对比分析

2.1 承载变形性状

图 3 所示为 6 个不同场地两类后注浆大直径灌注桩抗压承载变形曲线($Q \sim s$ 曲线)对比图. 由图可知, 同一场地, 随桩顶荷载增加, 两类后注浆桩桩顶变形发展规律较为一致, 变形量相差亦不大; 两类后注浆桩 $Q \sim s$ 曲线均基本表现为缓变型, 但部分场地桩端后注浆试桩出现刺入陡降变形, 表明两类后注浆大直径灌注桩具有较为相似的竖向承载变形规律, 且复式后注浆桩承载变形性能发挥较为稳定.

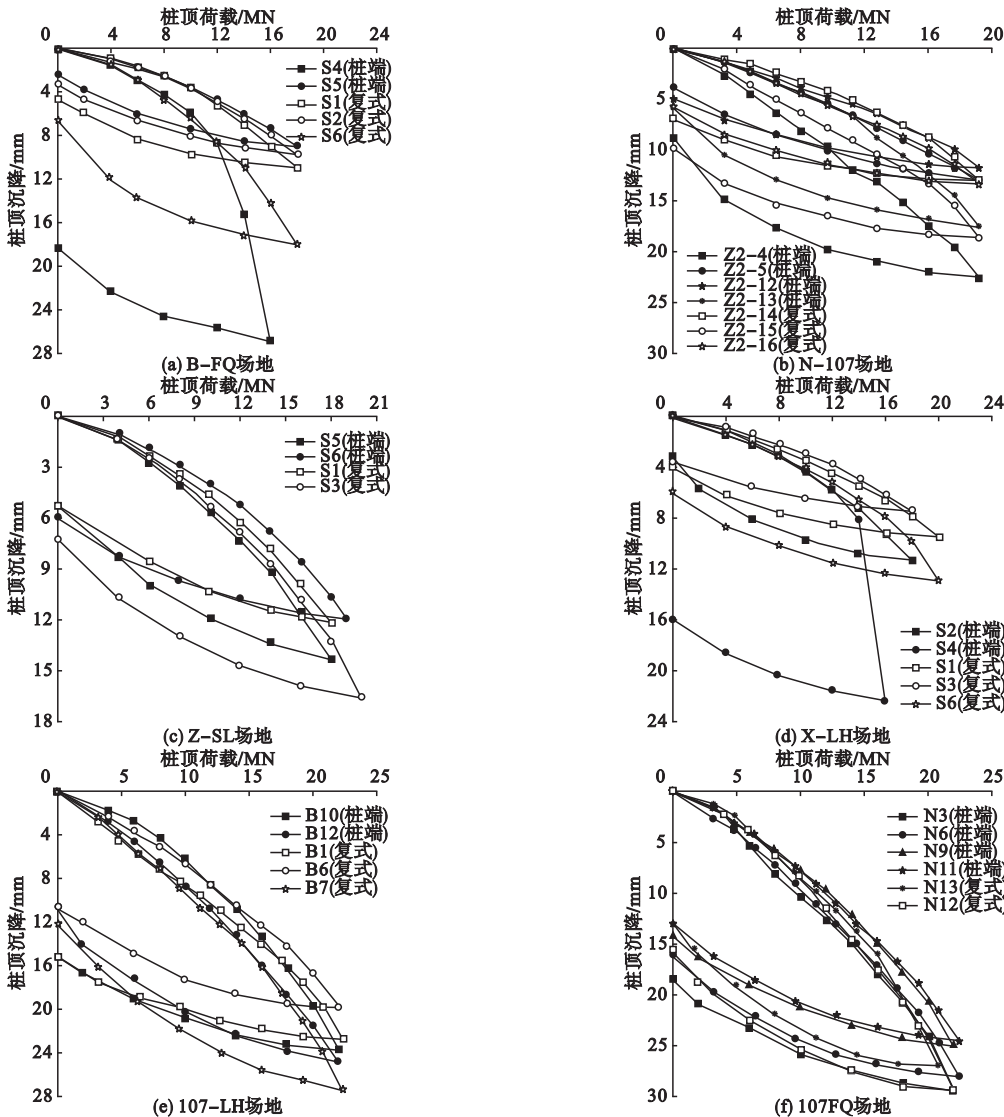


图 3 试桩 $Q \sim s$ 曲线对比图

Fig. 3 Comparison of Q - s curves of the test piles

提取各场地试桩极限承载力或最大桩顶加载及相应的桩顶沉降值,按同一桩长和桩径进行汇总,结果如图4所示.由图可知,两类后注浆大直径灌注桩承载力均明显高于未注浆桩,说明采用后注浆技术能大幅度提高

灌注桩承载性能;对于图中散点的分布,相比于桩端桩侧复式后注浆桩,桩端后注浆桩离散性较大,进一步表明复式后注浆桩承载力发挥具有更好的稳定性.

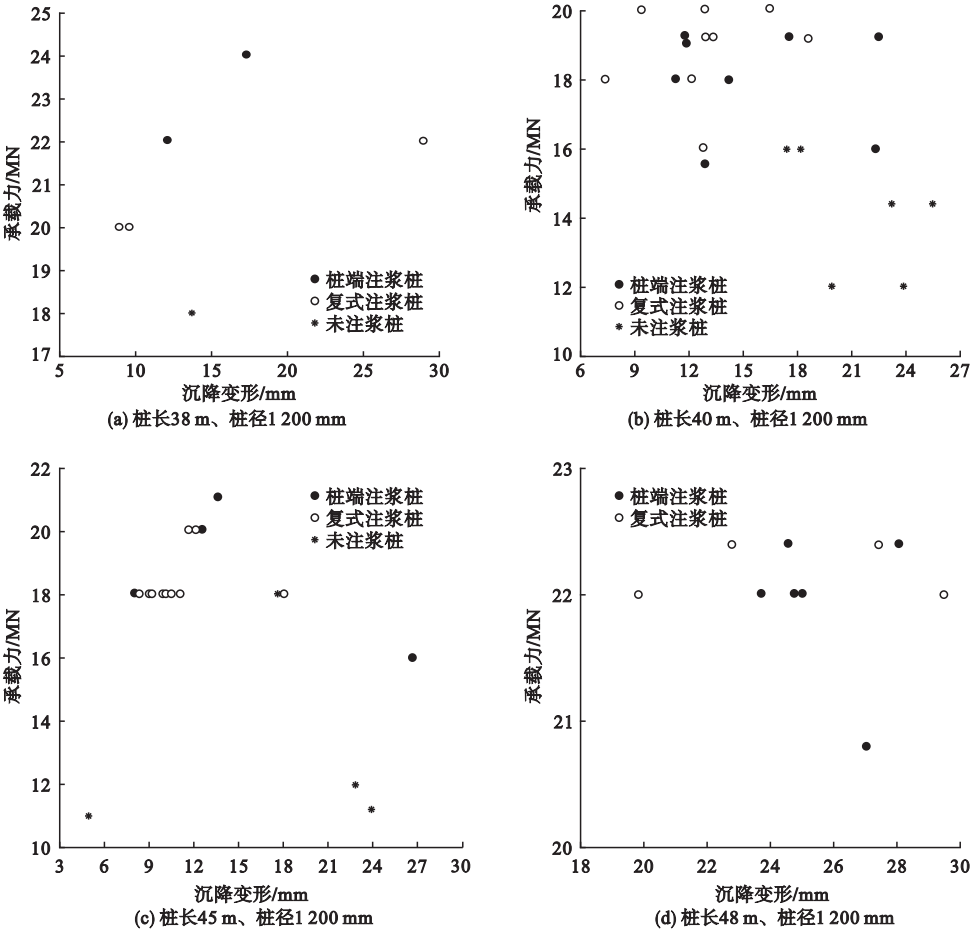


图4 试桩承载力及其沉降变形对比

Fig. 4 Comparison of bearing capacities and settlement deformations of the test piles

2.2 荷载传递规律

限于篇幅,笔者仅选择4个场地8组试桩(1个场地2组试桩,桩端后注浆桩和复式后注浆桩各1组),绘制其桩身轴力分布曲线,并进行对比(见图5).由图5可知,随桩顶加载等级增加,荷载沿桩身逐渐向下传递,伴随着桩身轴力的提高,桩侧摩阻力也得到逐步发挥,但在最大加载等级下,传递至桩端的荷载仍较小,表明两类后注浆大直径灌注

桩承载力均以桩侧摩阻力发挥为主;同一场地,两类后注浆大直径灌注桩桩身轴力分布相近,表明两类后注浆桩桩顶荷载沿桩身传递的规律较为一致;但相比而言,相同荷载作用下,在桩身中部两类后注浆桩轴力分布差异稍大,由于桩身轴力曲线斜率代表桩侧摩阻力的大小,表明后注浆类型对大直径灌注桩桩身中部桩侧摩阻力发挥影响较大.

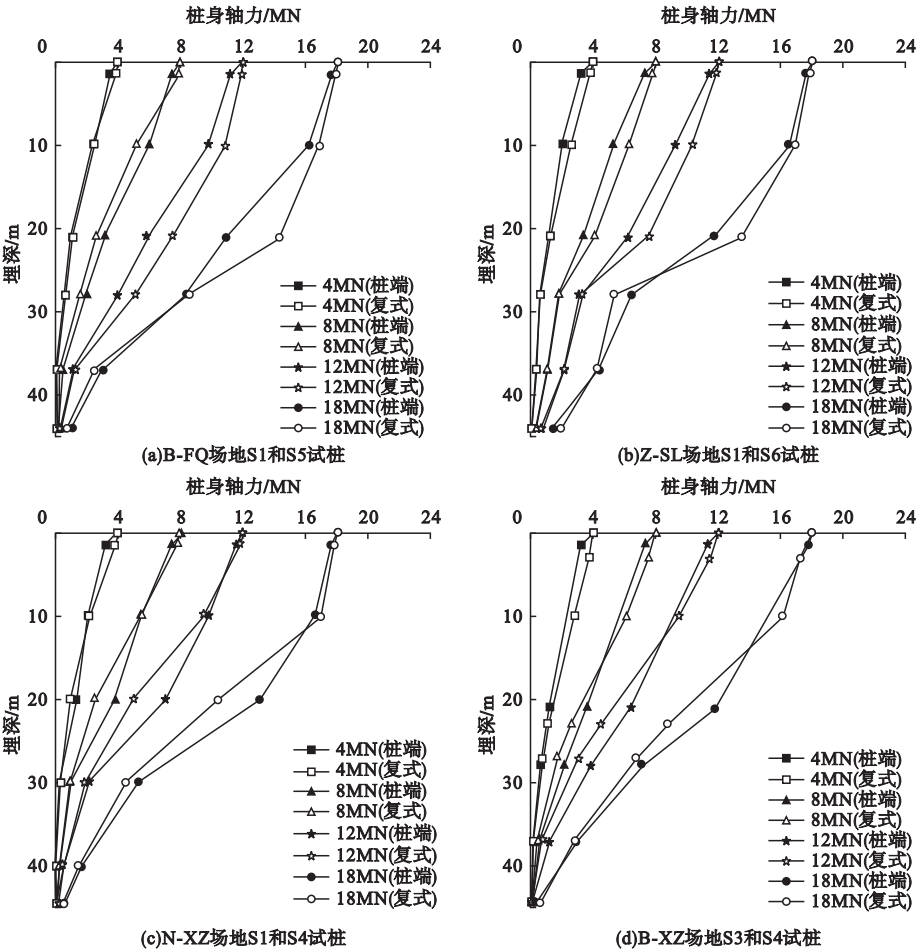


图5 试桩桩身轴力分布对比

Fig. 5 Comparison of pile shaft axial forces distributions of the test piles

将不同场地各类试桩桩端阻力占单桩承载比例分别取平均并进行汇总(见图6).由图可知,未注浆灌注桩与后注浆灌注桩的桩端阻力所占承载比例均比较小,表明在该场地土层条件下,桩长40 m左右的大直径灌注桩的承载力发挥以桩侧阻力为主^[14];对于后注浆试桩,在最大加载等级下,较少发生刺入破坏,桩端位移也较小,说明其桩端阻力尚未得到充分发挥;相比而言,未注浆桩桩端阻力占单桩承载的比例最高,约为10%左右,桩端后注浆桩较小,占比约为5%左右,复式后注浆桩最小,其占比不足5%,由于各场地两类后注浆桩桩顶加载等级基本相同,说明复式后注浆桩桩侧阻力发挥水平整体上稍高于桩端后注浆桩.

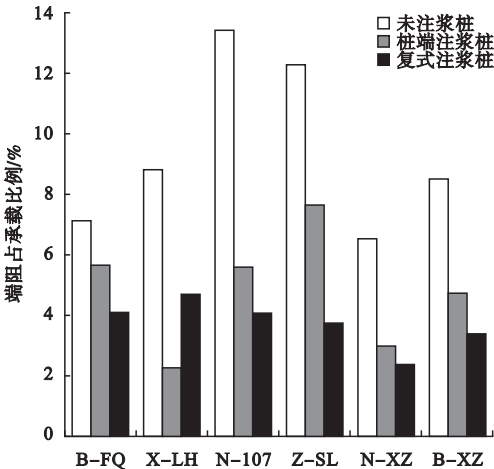


图6 试桩桩端阻力占单桩承载比例对比

Fig. 6 Comparison of pile tip resistance ratios of the test piles

2.3 桩侧阻力发挥特性

两类后注浆试桩桩身不同埋深段桩侧摩阻力发挥情况对比如图 7 所示(限于篇幅,仅绘制 4 个场地 8 组试桩实测结果).由图可知,随着桩顶荷载的增加,各桩段桩侧摩阻力逐步发挥,埋深较浅的桩段桩侧摩阻力呈现软化现象,较深土层中的桩侧摩阻力未出现软化,并表现出继续增大的趋势,表明桩身中下部桩侧摩阻力仍具有发挥空间;对比两类

后注浆桩桩侧摩阻力软化现象,复式后注浆桩出现软化的范围(埋深 20 m 以内)大于桩端后注浆桩(埋深 10 m 以内),但同一软化土层,复式后注浆桩桩侧摩阻力峰值普遍大于桩端后注浆桩,究其原因可能为桩侧注浆使得桩土接触界面刚度增大,导致桩土摩擦作用表现出“脆性”增加的趋势,使得桩侧出现摩阻力峰值增大,软化范围亦增大的现象,这与文献 [12] 中试桩实测数据及分析结果相一致.

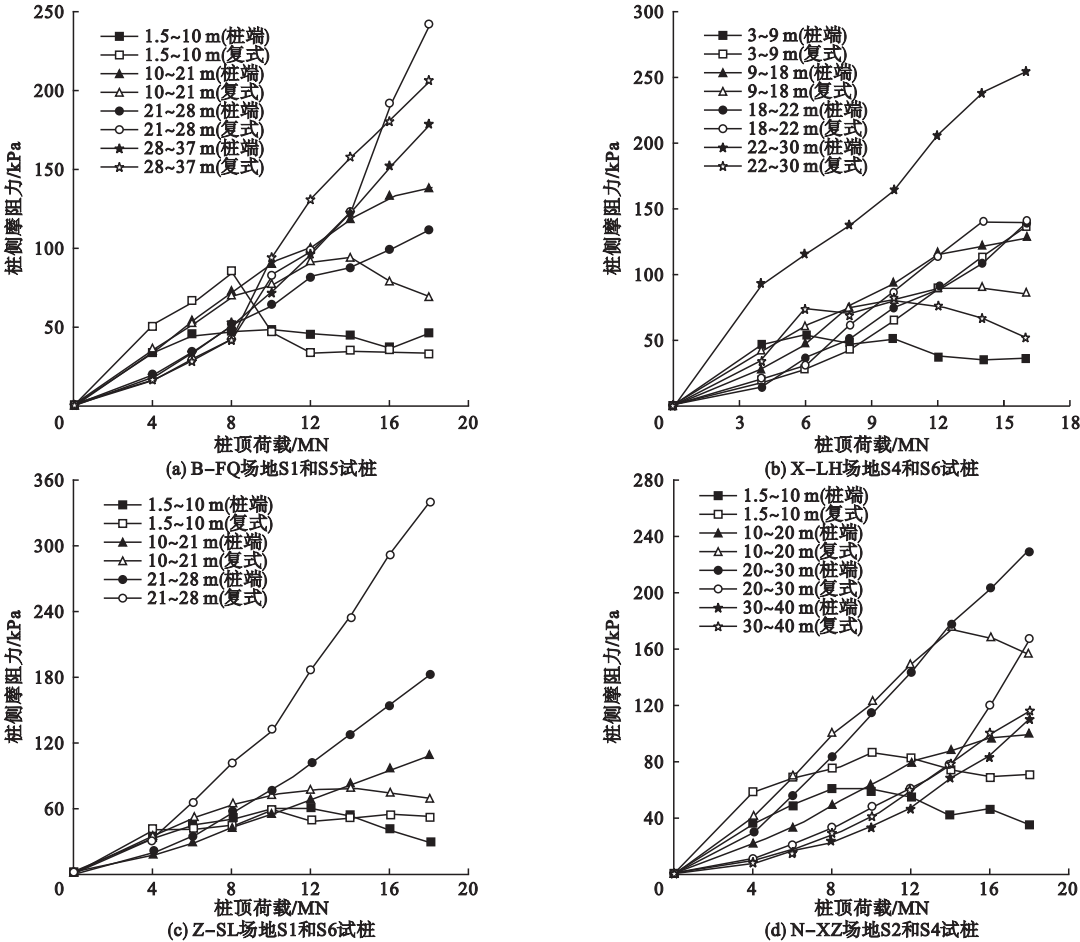


图 7 试桩桩侧摩阻力发挥对比

Fig. 7 Comparison of pile shaft resistance developments of the test piles

各类试桩在不同土层中桩侧摩阻力极限值(桩侧摩阻力出现软化时,取其残余值)沿埋深分布如图 8 所示.由图可知,各土层中两类后注浆灌注桩桩侧摩阻力极限值均明显大于未注浆灌注桩,且桩身埋深越深相差越大,表明无论采用桩端桩侧复式后注浆,还是仅采用桩端后注浆,均能较大幅度提高桩侧摩阻力

发挥水平;桩身埋深较浅时,复式后注浆桩桩侧摩阻力极限值通常小于桩端后注浆桩,这与其桩身上部桩侧摩阻力软化有关,但随着桩身埋深的增加,复式后注浆桩桩侧摩阻力极限值普遍大于桩端后注浆桩,表明大直径灌注桩在桩端后注浆基础上增加桩侧注浆有利于进一步提高桩身中下部桩侧摩阻力发挥水平.

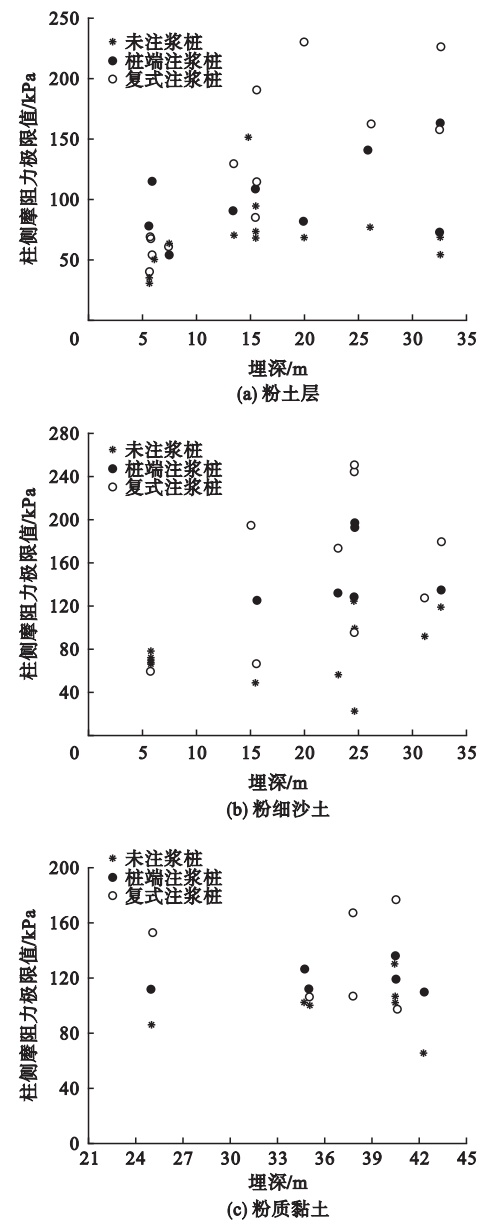


图8 不同土层极限桩侧摩阻力对比

Fig.8 Comparison of ultimate pile shaft resistances in different soils

表2 试桩的水平承载及其变形汇总表

Table 2 Summary of horizontal loads and deformations of the test piles						
场地编号	试桩编号	注浆类型	H_{cr}/kN	S_{cr}/mm	H_u/kN	S_u/mm
N-JG	HJ1	复式	1 000	9.25	1 400	20.68
	HJ2	桩端	600	6.58	900	20.75
	HS1	复式	750	4.98	1 050	10.56
32Z-SL	HS2	复式	600	4.64	900	11.26
	HS3	桩端	450	4.28	750	15.76

3 水平承载性能对比分析

表2所示为南三环京广路场地(N-JG)和中州大道森林公园场地(Z-SL)大直径灌注桩水平静载试验结果汇总表.由表可知,相比于桩端后注浆桩,复式后注浆桩水平临界荷载 H_{cr} 高50%以上,水平极限承载力 H_u 高30%以上,表明大直径灌注桩增加桩侧注浆,能较大幅度提高其水平承载性能.单桩的水平承载能力与桩周土体的性质密切相关,桩周土体强度越大、越密实,其水平承载力越大.对于复式后注浆大直径灌注桩,在高压作用下,水泥浆液向桩侧周围土层内渗透、充填和挤压,增强桩侧土体强度和硬度,特别是显著提高了桩周围一定范围内的土体强度和硬度.因此,工程实践中可以通过桩侧后注浆技术改善大直径灌注桩的水平承载能力.

4 后注浆类型影响机理的探讨

笔者通过大量现场试桩测试数据,对比分析了大直径灌注桩在不同后注浆类型条件下承载性能的差异,其主要原因与后注浆施工工艺、后注浆作用机理及大直径灌注桩荷载传递机理密切相关.

灌注桩高压后注浆时,水泥浆液必然沿其所受阻力最小的方向流动.对于桩端后注浆,水泥浆液首先挤密填充桩端沉渣及扰动土层,进而对桩端附近土层产生劈裂渗透作用,且水泥浆液在桩端处所受阻力逐渐增大.众所周知,采用泥浆护壁的钻孔施工,在桩侧易产生软弱泥皮及扰动层,这使得桩侧成为

桩端注浆时水泥浆液流动路径,文献[15]对桩端后注浆上返高度进行了分析和计算,并通过工程实例表明水泥浆液上返高度可达数十米,笔者现场桩端后注浆试桩亦出现桩顶附近水泥浆渗出现象。对于复式后注浆,注浆顺序为先桩侧后桩端,桩侧注浆时,先上后下,其浆液不仅对桩侧注浆位置处附近土层产生挤密、渗透及劈裂作用,也会沿着桩侧泥皮层产生流动,使得桩侧泥皮及扰动层的产生挤密及固化作用,随后桩端注浆浆液上返受阻,导致其主要在桩端附近产生浆液流动;笔者现场试验复式后注浆时,桩端设计注浆量也较难达到,终止注浆条件通常为超过注浆压力设计值和达到设计注浆量的75%^[13]。

基于上述,复式后注浆灌注桩水泥浆分布及加固范围,特别在桩侧,通常是大于桩端后注浆灌注桩的。对于水平受荷单桩,其承载性能与桩侧土体水平向承载能力密切相关,因此,桩侧注浆加固范围较大的复式后注浆灌注桩,其水平向承载力必然大于桩端后注浆桩。对于抗压桩,其桩侧阻力大小取决于桩侧剪切作用面位置及其剪切强度,若剪切面发生在加固区与土层界面,则加固范围相当于增大桩径,此时,桩侧阻力大小与水泥浆加固范围直接相关;若桩侧剪切面仍发生在泥皮层,则桩侧阻力不受加固范围影响,仅与剪切面强度有关;因此,增加桩侧注浆扩大桩周加固范围未必使得桩侧阻力发挥水平的大幅提高。

此外,研究表明桩端支承条件不仅影响桩端承载能力,且由于桩端阻力与桩侧阻力具有相互作用^[16],其对桩侧摩阻力发挥、荷载传递规律及单桩整体承载性能亦产生显著影响^[14,17];因此,即使仅采用桩端后注浆,因其填充加固了桩端土体,改善了桩端支承条件,增强桩端承载性能,加强了桩端的嵌固作用,使得桩侧摩阻力可以发挥到较高的水平,特别是在桩端附近的桩侧摩阻力,从而使得桩基总的极限承载力大幅提高。

竖向荷载条件下,两类后注浆大直径灌注桩桩端阻力所占单桩承载比例均比较小,其原因一方面为后注浆对桩侧阻力发挥水平的增强作用,提高了桩侧阻力对单桩承载力的贡献,另一方面,桩端阻力充分发挥需要的桩端位移较大,通常为桩侧摩阻力充分发挥所需要的桩土相对位移10~30倍^[18],因此,在桩顶位移较小,桩身下部桩侧摩阻力尚未充分发挥时,桩端阻力值及其占承载力比例必然较小。

5 结 论

(1)桩端后注浆大直径灌注桩与复式后注浆大直径灌注桩竖向承载变形性状相似, $Q-s$ 曲线均基本呈现为缓变型,但复式后注浆桩承载变形性能发挥更为稳定;此外,复式后注浆桩水平承载性能明显高于桩端后注浆桩。

(2)两类后注浆灌注桩桩顶荷载沿桩身传递的规律较为一致,桩端阻力占单桩承载力比例均较小,两类后注浆大直径灌注桩承载力均以桩侧摩阻力发挥为主。

(3)复式后注浆灌注桩在桩身上部侧阻软化范围大于桩端后注浆灌注桩,导致其在浅层土中侧阻较小,但在深层土体中,复式后注浆桩桩侧摩阻力极限值普遍大于桩端后注浆桩。整体而言,复式后注浆桩侧阻力稍大于桩端后注浆桩。

(4)处于类似场地条件的大直径灌注桩,承受竖向荷载时,在确保后注浆施工质量的前提下,可仅采用桩端后注浆提高其竖向承载力,若承受较大的水平荷载时,增加桩侧注浆可显著提高其水平承载性能。

参考文献

- [1] 陈志坚,韩学伟,白炳东.大直径超长钻孔灌注桩桩端后压浆机理探讨[J].河海大学学报(自然科学版),2007,35(4):409-412.
(CHEN Zhijian, HAN Xuewei, BAI Bingdong. Discussion on post-grouting mechanism at end of super-long large-diameter bored piles[J]. Journal of Hohai university(natural sciences),

- 2007,35(4):409-412.)
- [2] 张雁,刘金波. 桩基工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
(ZHANG Yan, LIU Jinbo. Pile foundation handbook[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009.)
- [3] 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 Zhongmiao. Technology and application of post grouting for bored piles[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009.)
- [4] BUSTAMANTE M, GOUVENOT D. Grouting: a method improving the bearing capacity of deep foundation[J]. Proceedings of the 8th European conference on soil mechanics and foundation engineering, 1983(1):131-134.
- [5] STOCKER M F. The influence of post grouting on the load bearing capacity of bored piles[J]. Proceedings of the 8th European conference on soil mechanics and foundations engineering, 1983(1):167-170.
- [6] FLEMING W G K. Improvement of pile performance by base grouting[J]. Civil engineering, 1993, 97(2):88-93.
- [7] 王秀哲,龚维明,薛国亚,等. 桩端后注浆技术的研究现状及发展[J]. 施工技术, 2004, 33(5):28-31.
(WANG Xiuzhe, GONG Weiming, XUE Guoya, et al. Current research status and development of the pile-end post-grouting technology[J]. Construction technology, 2004, 33(5):28-31.)
- [8] 沈保汉. 后注浆桩技术(1):后注浆桩技术的产生与发展[J]. 工业建筑, 2001, 31(5):64-66, 72.
(SHEN Baohan. Post grouting pile technique (1): the invention and development of post grouting piles [J]. Industrial construction, 2001, 31(5):64-66, 72.)
- [9] 刘金砺,祝经成. 泥浆护壁灌注桩后注浆技术及其应用[J]. 建筑科学, 1996(2):13-18.
(LIU Jinli, ZHU Jingcheng. Technology and application of post-grouting for slurry drilling piles [J]. Building science, 1996(2):13-18.)
- [10] 刘纪峰,张会芝,王逢朝. 桩侧桩端联合后注浆提高承载力及其数值模拟[J]. 四川建筑科学研究, 2011, 37(4):114-120.
(LIU Jifeng, ZHANG Huizhi, WANG Fengchao. Post-grouting on the tip and side for ultimate bearing capacity improvement of the foundation pile and its numerical simulation [J]. Sichuan building science, 2011, 37(4):114-120.)
- [11] 郭院成,张景伟,董晓星. 桩端桩侧后注浆钻孔灌注桩承载性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(7):14-18.
(GUO Yuancheng, ZHANG Jingwei, DONG Xiaoxing. Experimental study on bearing capacity of bored piles using pile tip and side post-grouting technology [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2014, 31(7):14-18.)
- [12] 王卫东,李永辉,吴江斌. 上海中心大厦超长灌注桩现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12):1817-1826.
(WANG Weidong, LI Yonghui, WU Jiangbin. Field loading tests on large-diameter and super-long bored piles of Shanghai center tower [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2011, 33(12):1817-1826.)
- [13] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
(China Academy of Building Research. Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2008.)
- [14] 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 Yonghui, ZHU Xiang, ZHOU Tonghe. Experimental study on effects of pile tip post grouting on bearing characteristics of large-diameter bored pile [J]. Rock and soil mechanics, 2016, 37(S2):388-396.)
- [15] 张忠苗,邹健. 桩端后注浆上返高度及桩顶冒浆处理[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(5):1-8.
(ZHANG Zhongmiao, ZOU Jian. Climb height and overflow of grout in shaft base grouting [J]. Journal of civil, architectural & environmental engineering, 2010, 32(5):1-8.)
- [16] 张建新,吴东云. 桩端阻力与桩侧阻力的相互作用研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2):541-544.
(ZHANG Jianxin, WU Dongyun. Research on interaction between resistance at pile and lateral resistance of pile [J]. Rock and soil mechanics, 2008, 29(2):541-544.)
- [17] 刘锟,赵春风. 不同桩端土承压钻孔灌注桩模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3):490-495.
(LIU Kun, ZHAO Chunfeng. Model tests on bored piles under vertical load on different pile-tip soils [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2011, 33(3):490-495.)
- [18] MULLINS G, WINTERS D, DAPP S. Predicting end bearing capacity of post-grouted drilled shaft in cohesionless soils [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2006, 132(4):478-487.