

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.S2.050

桩端后注浆对大直径灌注桩影响的现场 对比试验研究

李永辉¹, 朱 翔^{1,3}, 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;

3. 河南五建建设集团有限公司, 河南 郑州 450000)

摘 要: 基于郑州三环快速路工程开展的 6 个场地 19 根大直径灌注桩现场足尺试验, 通过对比分析后注浆桩与未注浆桩实测结果, 研究桩端后注浆对大直径灌注桩承载变形性状、荷载传递规律、桩端承载特性及桩侧摩阻力发挥性状的影响。结果表明, 桩端后注浆条件下大直径灌注桩承载变形性能明显提高, 且提高幅度受注浆龄期影响较为显著; 在黄河中下游以中密~密实粉土、粉细砂及可塑~硬塑粉质黏土为主要冲积地层中桩长 40 m 左右的大直径灌注桩表现为摩擦型桩, 但相比于未注浆桩, 桩端后注浆桩传递至桩身下部及桩端的荷载更小; 桩端后注浆在桩端下形成水泥沉渣坚硬固结体, 有效地处理了桩端沉渣问题, 且通过渗透劈裂作用, 形成深度可达 1 m 的网状分布的水泥胶结体, 加之对桩端土层的压密效应, 显著提高了桩端支承性能与承载刚度; 桩端后注浆显著提高大直径灌注桩桩侧极限摩阻力发挥水平, 并降低了桩侧极限摩阻力对应的桩土相对位移, 使得大直径灌注桩在较小的沉降下表现出较高的承载能力。

关 键 词: 大直径灌注桩; 桩端后注浆; 现场试验; 承载特性; 桩土相对位移

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 增 2-0388-09

Experimental study of effects of pile tip post grouting on bearing characteristics of large-diameter bored pile

LI Yong-hui¹, ZHU Xiang^{1,3}, ZHOU Tong-he²

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

Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450002, China; 3. Henan Wujian Construction Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract: Based on 19 field pile load tests in 6 sites of Zhengzhou third ring rapid road engineering, pile bearing and deformation characteristics, load transfer laws, pile tip bearing capacities and pile friction behaviors of the pile tip grouted large-diameter bored pile are studied by comparing the field test results of the post grouted pile and pile without grouting. The results show that the bearing capacity of large-diameter bored pile is significantly improved under the condition of pile tip grouting. The influence of the capacity increasing amplitude is significantly influence by the grouting age. In alluvial deposits with soils mainly of medium dense to dense silt, fine sand and plastic to hard plastic silty clay in the middle and lower reaches of the Yellow River, the large-diameter bored pile with a length of about 40 m shows characteristics of friction pile. However, the loads that are transferred to the lower part of the pile shaft and pile bottom of the pile tip grouted pile are smaller. Hard cement sediment concretion body be form under the pile tip by the pile tip post grouting, which is effectively deal with the problem of the sediment under the pile tip. Moreover, cement bond body with mesh distribution be also form in the soil with a depth of nearly 1 m under the pile tip through the fracturing and penetration effect of the post grouting. Coupled with the compaction effect of pile tip soil by the high pressure grouting, the bearing performances of the pile tip and the bearing stiffness are significantly improved; pile side friction ultimate resistances of the large-diameter bored pile is significantly improved by the pile tip post grouting. However, the pile-soil relative displacements which are correspond to the pile ultimate side friction resistances are reduced by the grouting. These are why the post grouted large-diameter bored pile shows higher bearing capacity in the small settlement.

Keywords: large-diameter bored pile; pile tip post grouting; field test; bearing characteristic; pile-soil shear displacement

收稿日期: 2016-07-26

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51508522); 郑州市重大科技专项课题 (No. 113PSHKS439)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51508522) and Major Science and Technology Project in Zhengzhou City (113PSHKS439).

第一作者简介: 李永辉, 1983 年生, 男, 博士, 主要从事地基基础、桩基工程方面的研究工作。E-mail: liyh109930@163.com

1 引言

具有高承载性能的大直径灌注桩已广泛应用于建筑、市政及桥梁工程中,钻孔施工时大直径灌注桩桩端沉渣及桩端土体扰动在所难免,不利于其承载性能的发挥^[1-2],工程中常采用桩端后注浆工艺解决桩端沉渣、虚土问题。研究表明^[3],桩端后注浆不仅影响桩端支承能力,而且由于桩端阻力与桩侧摩阻力相互作用效应^[4]及浆液沿桩侧上泛对桩侧受力性状的改善作用^[5],其对桩侧摩阻力发挥、荷载传递规律及桩基整体承载性能亦产生显著影响。

现场载荷试验是研究桩基问题最直接有效的手段,文献[6-11]基于现场试桩实测数据,分析了桩端后注浆对竖向受荷钻孔灌注桩承载性状的影响规律,研究成果大多针对深厚软土地区桩基工程,对于黄河中下游以中密~密实粉土、粉细砂及可塑~硬塑粉质黏土为主要冲积地层中的大直径灌注桩,有关桩端后注浆影响之研究较为匮乏,受限于研究手段及实测数据,仍处于定性分析阶段,尤其在大直径灌注桩桩端注浆对桩侧摩阻力发挥的影响方面尚缺乏深入探讨及丰富的实测数据。考虑到认知及利用桩端后注浆提高大直径灌注桩承载性能的实际工程意义,有必要进一步积累相关数据,并深入分析其内在影响规律。

本文基于郑州三环快速路工程开展的6个场地19组大直径灌注桩现场载荷试验^[12],通过对比分析后注浆桩与未注浆桩实测结果,研究桩端后注浆对大直径灌注桩承载特性的影响规律,对试桩桩身受力、变形进行了精心量测和对部分试桩开展了桩端取芯和芯样强度试验,深入探讨了桩端后注浆条件下大直径灌注桩承载变形、荷载传递及桩端阻力与桩侧摩阻力发挥等方面影响规律,以期为大直径灌注桩设计与施工提供参考。

2 现场试验概况

郑州市三环快速路工程全长44.0 km,高架桥总长26.9 km,高架桥基础采用大直径灌注桩。为提高桩基承载力,优化桩长,降低工程造价,桩基工程采用了后注浆工艺。然而,处于敏感性粉土及粉细砂地层中的大直径灌注桩,其成孔施工易产生土体扰动及桩端沉渣问题,且其采用桩端后注浆技术工程实践较少,因此,开展对比性试验,探究桩端后注浆对该地区大直径灌注桩承载特性的实际影响规律。

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。桩端后注浆浆液采用标

号为P.O 42.5普通硅酸盐水泥配制,水灰比为0.6,单根桩后注浆水泥用量为3 t,注浆压力为2 MPa,桩端后注浆采用声测管兼做注浆管,成桩后第3天进行,现场试桩概况见表1。

表1 现场试桩概况
Table 1 Overview of test piles

试验场地	桩号	桩长/m	桩径/mm	是否注浆	桩端持力层
西三环 陇海路	LH-S2, LH-S4	40	1 200	是	粉质
	LH-S5, LH-S7			否	黏土
西三环 航海路	HH-S1	38	1 200	否	粉土
	HH-S2, HH-S3			是	粉土
森林 公园	SL-S4	40	1 200	否	粉质
	SL-S5, SL-S6			是	黏土
南三环 新郑路	XZ-S4, XZ-S6	45	1 200	是	粉土
	XZ-S5			否	粉土
北三 环徐寨	BX-S4, BX-S5	45	1 200	是	粉质
	BX-S6			否	黏土
北三环 丰庆路	FQ-S3	45	1 200	否	粉质
	FQ-S4, FQ-S5			是	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有粉土、粉质黏土及粉细砂土。各试验场地桩长范围内土层分布剖面图及土层标准贯入试验击数如图1所示^[12]。

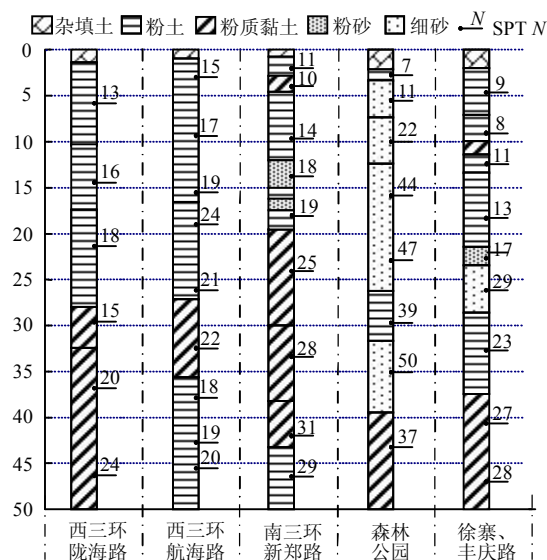


图1 试验场地土层分布剖面图(单位:m)

Fig.1 Distribution profile of soil layers of test sites(unit: m)

3 承载变形性状对比与分析

图2为各场地桩端后注浆大直径灌注桩与未注浆大直径灌注桩Q-s曲线对比。从图中可以看出,各

场地桩端后注浆桩承载性能明显优于未注浆桩。加载初期,两类桩承载变形性状较为相似;随着荷载等级的增加,未注浆桩沉降变形增长幅度明显大于桩端后注浆桩,此时,大直径灌注桩虽未发生破坏,但桩端后注浆显著提高其控制沉降变形性能;继续增

加荷载,未注浆桩 $Q-s$ 曲线出现拐点,承载力达到极限,而此时桩端后注浆桩仍具有较大的承载空间。整体上,未注浆大直径灌注桩 $Q-s$ 曲线呈现较为明显的“陡降型”特性,而桩端后注浆条件下,大直径灌注桩 $Q-s$ 曲线基本表现为“缓变型”发展规律。

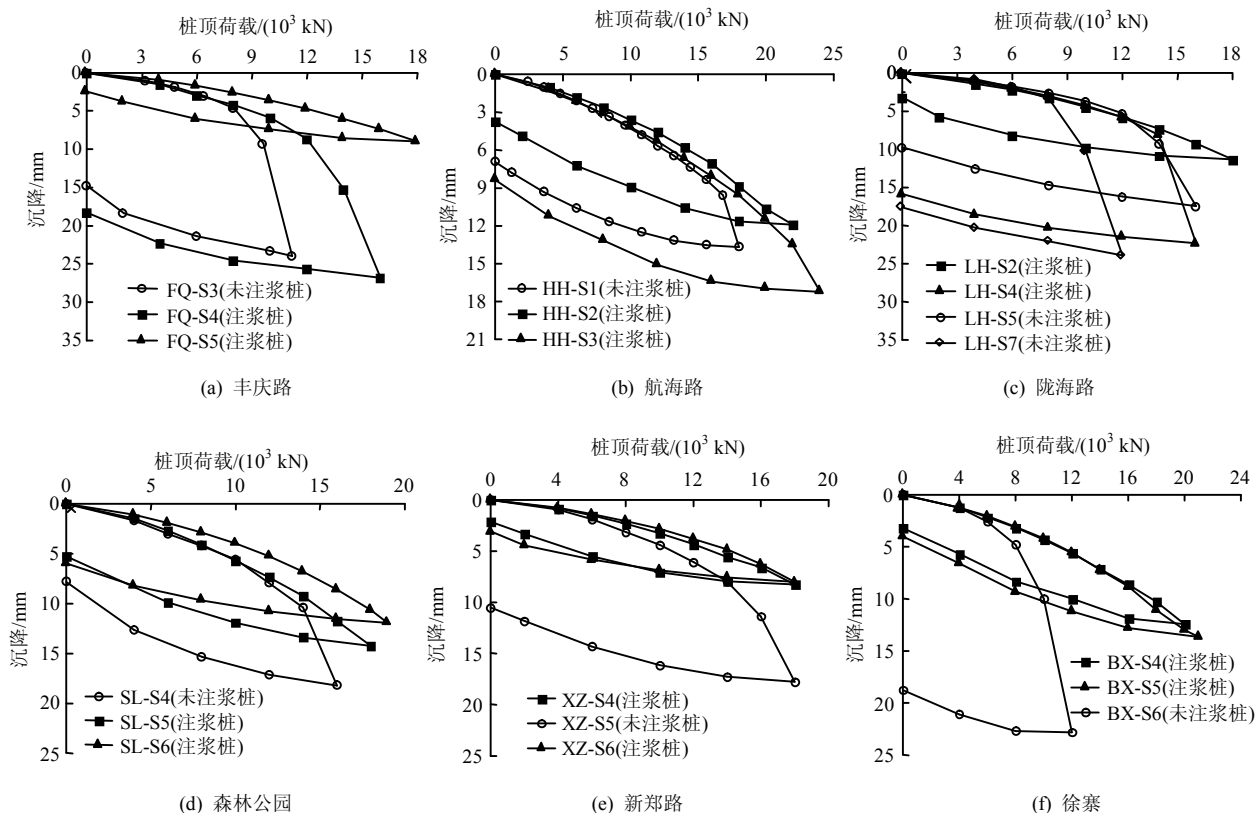


图2 试桩 $Q-s$ 曲线对比
Fig.2 Comparison of $Q-s$ curves of test piles

以 $Q-s$ 曲线出现陡降拐点对应的桩顶荷载为试桩极限承载力(未出现拐点的试桩为其最大加载值),将各场地大直径灌注桩极限承载力及其对应的桩顶沉降变形进行汇总,见表2。由表可知,各场地桩端后注浆大直径灌注桩极限承载力均在16 000 kN以上,而未注浆大直径灌注桩极限承载力,不仅数值较小,且各场地差异较大,表明桩端后注浆能有效地消除桩端沉渣、桩侧泥皮及桩周土体施工扰动的不利影响,并进一步改善桩土受力性状,这不仅大幅度提高大直径灌注桩极限承载力,且显著增加其承载力发挥的稳定性。

针对桩端后注浆龄期,现场开展了对比性载荷试验(丰庆路试验场地),不同注浆龄期试桩 $Q-s$ 曲线如图3所示。从图中可以看出,随注浆龄期增加,桩端后注浆大直径灌注桩不仅承载力明显提高,且其控制沉降变形能力也显著增强。究其原因为随

着时间的增长,桩端水泥土固化体强度增加,使得桩端支承能力增强,进而提高了大直径灌注桩承载性能;此外,桩端后注浆时,浆液通常沿桩身上泛,引起桩侧与土体相互作用体系受力性状随时间的增长逐步改善,这对桩承载性能的提高亦有促进作用。

表2 各场地试桩极限承载力及沉降变形汇总表
Table 2 Summary table of ultimate bearing capacities and settlements of test piles in each field

场地名称	未注浆桩		桩端后注浆桩		注浆桩承载力提高比例/%
	承载力/(10 ³ kN)	变形/mm	承载力/(10 ³ kN)	变形/mm	
丰庆路	9.6	9.28	18.0	8.97	87.5
航海路	16.8	9.60	22.0	12.73	31.0
陇海路	12.0	9.78	16.0	9.73	33.3
森林公园	14.0	10.38	18.5	13.09	32.1
新郑路	16.0	11.40	18.0	8.16	12.5
徐寨	10 000	10.00	20 500	13.05	105.0

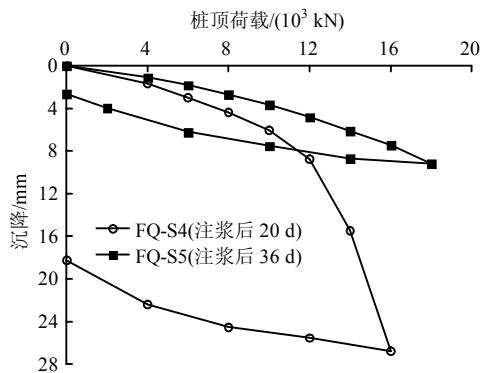


图3 不同注浆龄期试桩 $Q-s$ 曲线对比
Fig.3 Comparison of $Q-s$ curves of test piles under different grouting ages

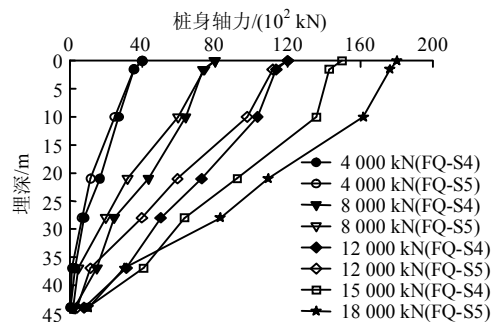
4 荷载传递影响规律对比与分析

图4为不同荷载等级下桩端后注浆大直径灌注桩与未注浆大直径灌注桩桩身轴力分布对比。从图中可以看出,荷载等级较小时,桩端后注浆桩与未注浆桩桩身轴力分布较为相近,两类桩桩顶荷载沿桩身向下传递特征基本一致。由于桩承受的荷载是平衡桩侧摩阻力向下传递的,桩身轴力分布曲线的斜率大小代表桩侧摩阻力发挥水平的高低,在较小的荷载作用下两类桩桩侧摩阻力发挥大小比较接近。随着桩顶荷载的增加,两类桩桩身轴力分布出现差异,未注浆桩桩身下部轴力明显大于桩端后注浆桩,特别是桩端附近桩段,即使桩端后注浆桩承受更高的荷载,其轴力仍小于未注浆桩,表明在较大荷载等级下桩端后注浆桩桩身上部桩侧摩阻力发挥水平较高,因此,传递至桩身下部的荷载相对较小。将桩端处桩身轴力视作桩端阻力,则大直径灌注桩传递至桩端的荷载占桩承载比例比较小,相比于未注浆桩,桩端后注浆桩桩端阻力所占承载比例更小,表明桩长40 m左右的大直径灌注桩表现为摩擦型桩。

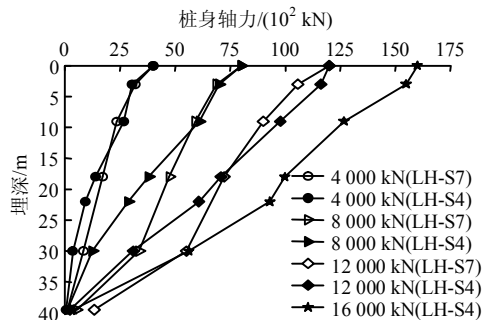
5 后注浆对桩端的影响分析

5.1 桩端取芯结果与分析

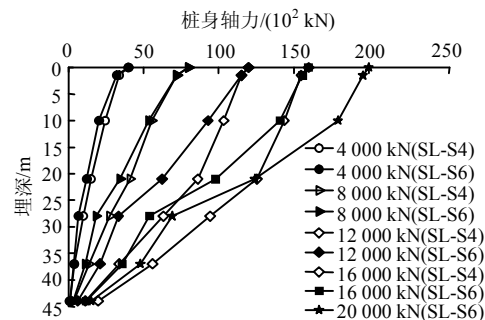
现场试验对森林公园、新郑路等场地采用“预埋管”法进行了桩端钻孔取芯检测,取样深度为桩端下2.0 m,如图5所示。未注浆桩桩端下存在糊状沉渣,厚度约为10~30 cm,此芯样通常无法成型,强度极低;沉渣之下所取芯样为桩端土体,从表观上见,取样深度0.5 m下芯样接近于原状土。桩端后注浆桩紧邻桩端处,所取芯样为含有少量混凝土骨料的水泥沉渣固结体,材质坚硬,强度较高,其下为水泥胶结体网状分布于桩端土层中的水泥土



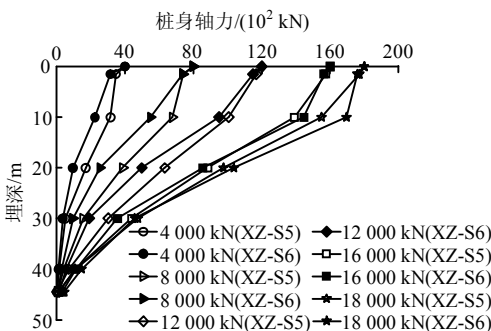
(a) 丰庆路



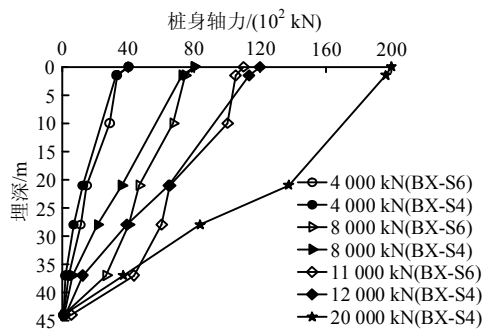
(b) 陇海路



(c) 森林公园



(d) 新郑路



(e) 徐寨

图4 不同荷载等级下试桩桩身轴力对比
Fig.4 Comparison of pile shaft axial forces under different load grades

样,其强度亦较土样高,随取样深度增加,土体中水泥胶结体减少,桩端下 1.0 m 左右土体中水泥胶结物较为少见。

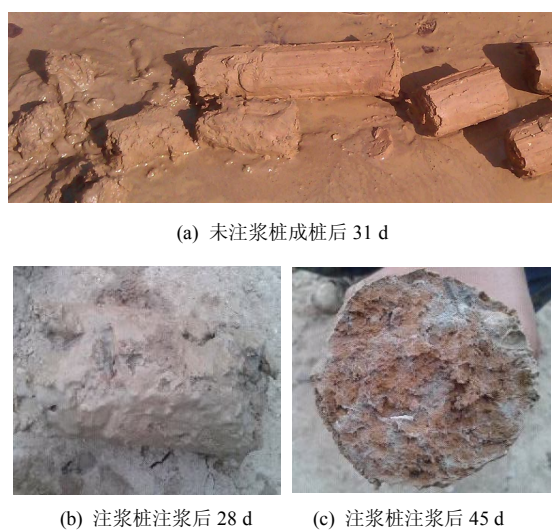


图 5 桩端钻孔取样照片

Fig.5 Photos of core samples under pile tip of the piles

对桩端钻孔所取芯样进行无侧限抗压强度试验,选取桩端下 0~50 cm、51~100 cm、101~150 cm 和 151~200 cm 四组取样深度分别制备试样,由于紧邻桩端的芯样(0~50 cm)通常无法成型或断裂破碎,很难完成试样制备,则无侧限抗压强度试验以其他 3 组取样深度为主,试验测试结果如图 6 所示。从图中可以看出,桩端后注浆桩桩端芯样强度明显高于未注浆桩;对于桩端后注浆桩,随注浆时间的增长,芯样强度逐渐增大,符合水泥土强度随龄期增加而增长的规律,也佐证图 3 现象为桩端支承能力提高的解释;随取样深度增加,芯样强度略有减小,究其原因是在桩端下较深处,土体中水泥胶结物较少,芯样强度的增加以注浆引起的土体压密为主;虽然桩端下较深处土体中水泥胶结物较少,但所取芯样强度随时间增加仍有较大的提高,其原因可能为注浆引起的土体扰动逐步恢复的结果。对于未注浆桩,随时间增长,芯样强度有所增加,且越靠近桩端,增加的幅度越大,这主要为距离桩端越近,桩端土体受成孔施工扰动越大,进而随时间增加强度恢复量越大;随取样深度的增加,芯样强度越大,也说明桩端土体存在施工扰动影响;桩端 1.5 m 以下土样强度变化较小,表明所取芯样强度接近于原状土。

综上所述,桩端后注浆能较好地解决桩端沉渣及施工扰动引起的持力层强度降低问题,且能通过胶结、压密作用,改善桩端土层受力性状,不仅对

桩端支承刚度及桩端承载性状产生积极影响,也有有效地改善单桩整体承载性能。

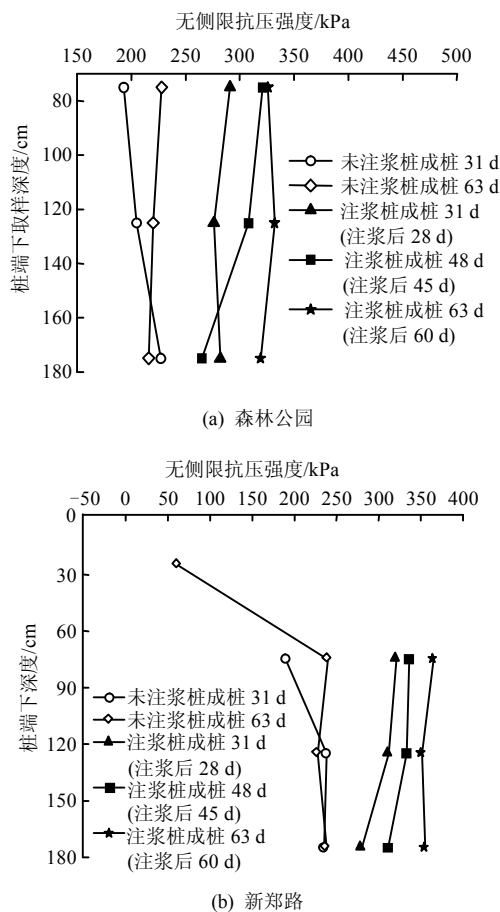
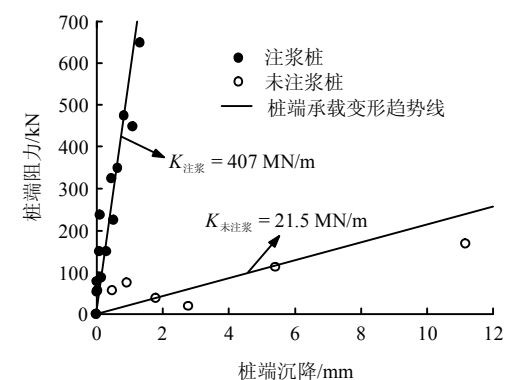


图 6 桩端芯样强度对比

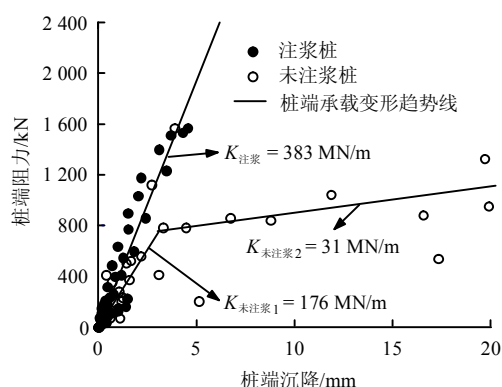
Fig.6 Comparison of strength of core samples under pile tips

5.2 桩端承载性状对比与分析

笔者汇总两类桩桩端阻力与桩端变形数据,给出了相应的桩端承载变形发展趋势线及其刚度系数,如图 7 所示。从图中可以看出,未注浆桩桩端承载与变形数据较为分散,与其桩端沉渣情况及土体扰动程度相关;桩端后注浆桩桩端承载与变形数据较为集中,具有明显的线性分布规律,且两种持力层(粉土、粉质黏土)桩端刚度系数较为接近,表明通过后注浆对桩端持力性状的改善作用,显著增加了大直径灌注桩桩端承载性能发挥的稳定性。对于桩端承载刚度,持力层为粉土的未注浆桩桩端刚度系数远小于桩端后注浆桩,持力层为粉质黏土的未注浆桩,桩端变形较小时,桩端刚度稍大,但随着桩端变形的增大,其桩端刚度显著降低,与桩端后注浆桩相比,其刚度系数亦明显较低,表明桩端后注浆能显著提高桩端承载变形性能与支承刚度。



(a) 粉土持力层



(b) 粉质黏土持力层

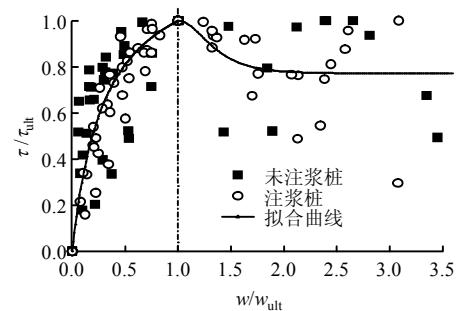
图 7 桩端承载变形关系对比

Fig.7 Comparison of bearing deformation relation of pile tip

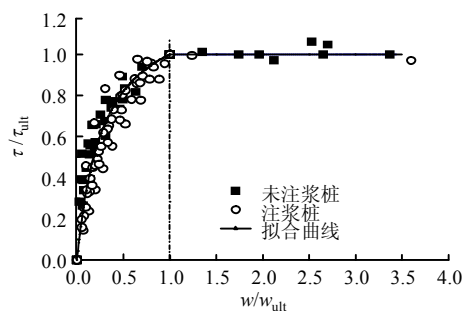
6 后注浆对桩侧受力的影响分析

大直径灌注桩桩侧摩阻力所占承载比例通常较高,其受力性状直接关系到单桩承载性能的发挥。考虑到桩端承载条件对桩侧摩阻力发挥具有较大的影响^[3],参考文献[13]对桩侧摩阻力及桩土相对位移实测数据进行归一化处理,并对比分析两类桩桩侧极限摩阻力及其对应的桩土相对位移,以探究桩端后注浆对大直径灌注桩桩侧受力性状的影响规律。

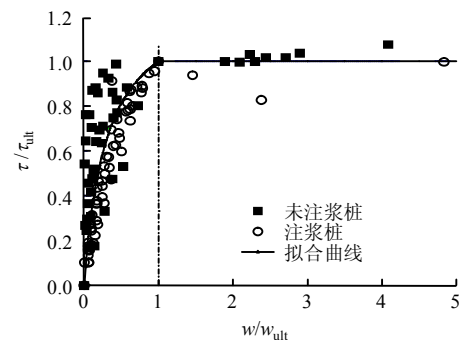
桩侧摩阻力 τ 伴随着桩土相对位移 w 增长逐步发挥至极限^[14],选用桩侧极限摩阻力 τ_{ult} 及其对应的桩土相对位移 w_{ult} 作为标准化参数(若桩侧未达到极限状态,则选用试桩 τ - w 曲线陡降点对应的桩侧摩阻力值或最大侧摩阻力值及对应的桩土相对位移作为标准化参数),将两类桩不同埋深范围内桩侧摩阻力 τ 及其桩土相对位移 w 进行归一化处理,获得 τ/τ_{ult} - w/w_{ult} 数据分布图,如图 8 所示。从图中可以看出,两类桩 τ 、 w 归一化分布规律较为一致,在 0~10 m 埋深范围内桩侧摩阻力均呈现明显的软化特征,其他埋深范围内均未出现明显的侧阻软化现象;当 $w/w_{ult} < 1$ 时,两类桩在各自埋深范围内



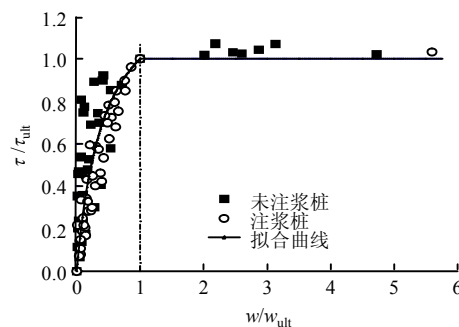
(a) 埋深 0~10 m



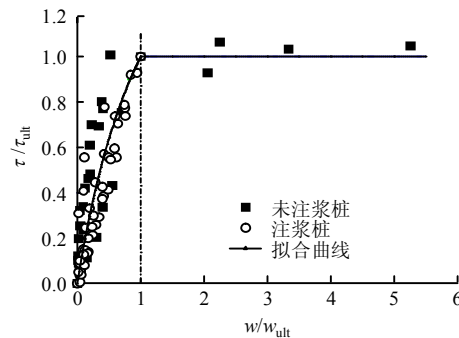
(b) 埋深 10~20 m



(c) 埋深 20~30 m



(d) 埋深 30~40 m



(e) 埋深 40~45 m

图 8 不同桩段 τ 、 w 归一化分布Fig.8 Distribution of normalized τ and w values in different buried depth of the piles

τ/τ_{ult} 随 w/w_{ult} 增长变化趋势均具有非线性, 当 $w/w_{ult} > 1$ 时, 除 0~10 m 埋深范围内数据比较分散外, 其他 τ/τ_{ult} 随 w/w_{ult} 增长均表现为近似直线变化趋势; 对于大直径灌注桩, 可将归一化的无量纲 $\tau/\tau_{ult}-w/w_{ult}$ 关系分为两个阶段, 见图 8 拟合曲线, 桩侧摩阻力达到极限状态前, 可采用双曲线等非线性函数描述, 发挥至极限值之后, 可采用水平直线表示, 至于桩侧摩阻力软化问题, 可引入表征软化程度的折减系数。

将各场地桩侧极限摩阻力及其桩土相对位移进行统计整理, 其沿桩身变化如图 9 所示。从图中可以看出, 两类桩 τ_{ult} 、 w_{ult} 存在较大差异, 其中桩端后注浆桩桩侧极限摩阻力实测值普遍大于未注浆桩, 有些土层中, 两者之差近 2 倍, 未注浆桩沿桩身易出现桩侧极限摩阻力发挥值较小的现象, 甚至小于规范^[15]推荐值的下限, 而桩端后注浆桩桩侧极限摩阻力发挥值普遍高于规范^[15]推荐值的上限。究其原因可归结于桩端后注浆对大直径灌注桩桩端及桩侧受力性状的改善, 桩端后注浆能显著提高桩端

支承性能, 这有利于桩侧摩阻力发挥水平的提高, 同时, 高压注浆使得浆液沿桩侧上泛, 这将有效处理桩侧泥皮、提高桩侧与土体相互作用性能。因此, 基于后注浆对桩端、桩侧受力的有利作用, 桩端后注浆大直径灌注桩桩侧极限摩阻力不仅数值较大, 发挥也较为稳定。

对于桩侧极限摩阻力对应的桩土相对位移值 w_{ult} , 随埋深增加, 两类桩基本表现为减小的趋势, 在数值上, 未注浆大直径灌注桩 w_{ult} 基本在 5~10 mm 之间分布, 桩端后注浆 w_{ult} 值略小, 分布于 2~6 mm 之间。由此可知, 桩端后注浆后大直径灌注桩桩侧摩阻力发挥至极限需要的桩土相对位移减小, 有利于大直径灌注桩在较小的沉降变形下表现出较高的承载力, 或相同荷载下表现出较高的沉降变形控制能力。对于桩端后注浆灌注桩桩土临界相对位移小于未注浆灌注桩的现象, 其原因可能是水泥浆液沿桩侧上泛, 使得桩土接触界面剪切刚度增大, 桩土相互作用呈现“脆裂性”, 导致桩土界面产生滑移所需剪切位移减小。

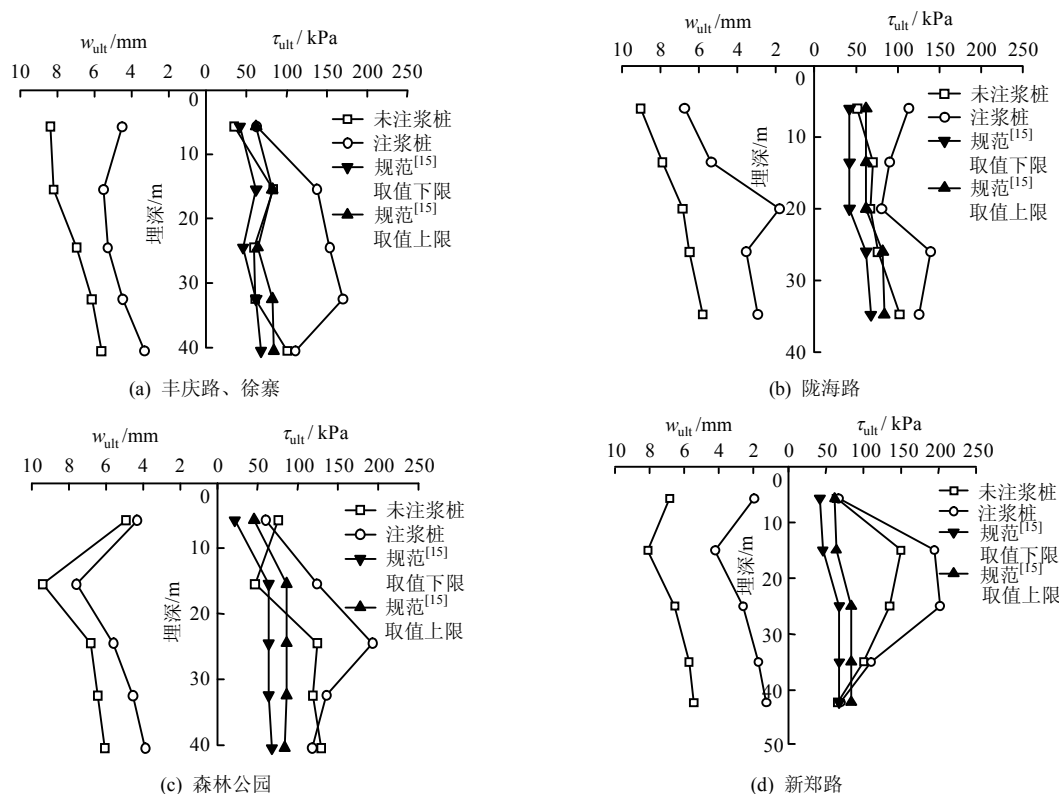


图 9 桩侧极限摩阻力及其桩土相对位移对比

Fig.9 Comparison of τ_{ult} and w_{ult} in different buried depths of piles

7 结 论

(1) 桩端后注浆能显著地提高大直径灌注桩承载性能, 提高幅度受注浆龄期影响较大。未注浆大

直径灌注桩 $Q-s$ 曲线呈现较为明显的“陡降型”特性, 桩端后注浆条件下大直径灌注桩 $Q-s$ 曲线通常表现为“缓变型”发展规律。

(2) 相同荷载下桩端后注浆大直径灌注桩传递

至桩身下部的荷载明显小于未注浆桩。在以密实粉土、粉细砂及硬塑粉质黏土为主的黄河中下游冲积地层中, 桩长 40 m 左右的大直径灌注桩表现为摩擦型桩, 但桩端后注浆桩桩端阻力所占单桩承载比例更小。

(3) 桩端后注浆在桩端下形成水泥沉渣坚硬固结体, 有效地处理了桩端沉渣问题, 且通过渗透劈裂作用, 形成深度可达 1.0 m 的网状分布的水泥胶结体, 加之对桩端土层的压密效应, 显著提高了桩端支承性能与承载刚度。

(4) 桩端后注浆桩桩侧极限摩阻力明显大于未注浆桩, 且其发挥较为稳定; 桩端后注浆桩桩侧极限摩阻力对应的桩土相对位移分布于 2~6 mm 之间, 略小于未注浆桩实测值 (5~10 mm), 使得大直径灌注桩桩端注浆后不仅具有较高的承载性能, 且在较小的沉降变形下表现出较高的承载能力。

本文针对黄河中下游以中密~密实粉土、粉细砂及可塑~硬塑粉质黏土为主要冲积地层中的大直径灌注桩, 通过现场实测结果的对比分析, 研究了桩端后注浆对大直径灌注桩承载特性的影响规律, 实测数据虽比较丰富, 但仍需进一步积累现场实测结果, 进行进一步归类总结与分析, 以完善桩端后注浆大直径灌注桩承载性能的量化指标, 并建立更为合理的设计计算方法, 为其经济合理地应用于工程实践提供参考。

参 考 文 献

- [1] 喻小明, 潘军, 杨年宏, 等. 桩端沉渣与桩周泥皮对大直径钻孔灌注桩竖向承载力的影响分析[J]. 矿冶工程, 2006, 26(6): 9—12.
YU Xiao-ming, PAN Jun, YANG Nian-hong, et al. Impact of bottom settlements and mud cake on vertical supporting capacity of large-diameter predrilled cast-in-place pile[J]. **Mining and Metallurgical Engineering**, 2006, 26(6): 9—12.
- [2] 王奎华, 吕述晖, 吴文兵, 等. 考虑应力扩散时桩端土性对单桩沉降影响分析方法[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 621—630.
WANG Kui-hua, LÜ Shu-hui, WU Wen-bing, et al. A new method for analyzing influence of pile tip soil properties on single pile settlement considering stress dispersion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(3): 621—630.
- [3] 张雁, 刘金波. 桩基手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [4] 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 Jian-xin, WU Dong-yun. Research on Interaction between resistance at pile and lateral resistance of pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 541—544.
- [5] 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—7.
ZHANG Zhong-miao, ZOU Jian. Climb height and overflow of grout in shaft base grouting[J]. **Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering**, 2010, 32(5): 1—7.
- [6] 张忠苗, 吴世明, 包风. 钻孔灌注桩桩底后注浆机制与应用研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 681—686.
ZHANG Zhong-miao, WU Shi-ming, BAO Feng. Study of mechanism and application on bored pile end grouting[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 681—686.
- [7] 黄生根, 龚维明. 超长大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.
HUANG Sheng-gen, GONG Wei-ming. Study on bearing behavior of super long-large diameter piles after grouting[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(1): 113—117.
- [8] 程晔, 龚维明, 张喜刚, 等. 超长大直径钻孔灌注桩桩端后压浆试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3885—3892.
CHENG Ye, GONG Wei-ming, ZHANG Xi-gang, et al. Experimental research on post grouting under super-long and larger-diameter bored pile tip[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.2): 3885—3892.
- [9] 王卫东, 李永辉, 吴江斌. 上海中心大厦大直径超长灌注桩现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1817—1826.
WANG Wei-dong, LI Yong-hui, WU Jiang-bin. 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.
- [10] 邹金锋, 安爱军, 邓宗伟, 等. 深厚软土地区长钻孔灌注桩后注浆试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(3): 823—828.
ZOU Jin-feng, AN Ai-jun, DENG Zong-wei, et al. Post-grouting in-situ of length bored pile in deep soft

- regions[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2011, 42(3): 823—828.
- [11] 曾志军, 刘建华, 张瑞坤, 等. 钻孔灌注桩桩端后注浆增强效应研究[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(1): 144—150.
- ZENG Zhi-jun, LIU Jian-hua, ZHANG Rui-kun, et al. Research on the pile-base post-grouting enhancement effect of bored pile[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2014, 43(1): 144—150.
- [12] 郑州市市政建设中心, 郑州大学. 城市快速路工程施工工艺工法与应用—桩基后注浆技术试验与应用研究[R]. 郑州: 2012.
- Zhengzhou Municipal Construction Center, Zhengzhou University. Construction method and application technology of city expressway engineering—test and application study of pile post grouting technique[R]. Zhengzhou: Zhengzhou Municipal Construction Center, 2012.
- 上接第 380 页
- [8] 林杭, 曹平. 锚杆长度对边坡稳定性影响的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 163—167.
- LIN Hang, CAO Ping. Numerical analysis for effect of bolt length on stability of slopes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(3): 163—167.
- [9] 林杭, 钟文文, 熊威, 等. 锚杆长度与边坡坡率对最优锚固角的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 15—19.
- LIN Hang, ZHONG Wen-wen, XIONG Wei, et al. Effect of bolt length and slope rate on optimum anchorage angle[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(Supp.2): 15—19.
- [10] 唐湖北, 蒋华春, 黄伟. 锚杆支护方式对边坡稳定性的影响研究[J]. 公路工程, 2012, 37(1): 67—70.
- TANG Hu-bei, JIANG Hua-chun, HUANG Wei. Investigative of the influences of anchoring supporting[J]. **Highway Engineering**, 2012, 37(1): 67—70.
- [13] 王向军. 基于试桩试验的桩侧注浆抗拔桩承载变形特性的荷载传递法[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 2): 321—326.
- WANG Xiang-jun. A load transfer method for analyzing side-grouting uplift piles based on pile tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Supp.2): 321—326.
- [14] 王卫东, 李永辉, 吴江斌. 超长灌注桩桩-土界面剪切模型及其有限元模拟[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3818—3825.
- WANG Wei-dong, LI Yong-hui, WU Jiang-bin. Pile-soil interface shear model of super long bored pile and its FEM simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12): 3818—3825.
- [15] 中国建筑科学研究院. JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- China Academy of Building Research. JGJ 94—2008 Technical code for building pile foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [11] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50330—2013 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50330—2013 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.
- [12] SARMA S K. Stability analysis of embankments and slopes[J]. **Journal of Geotechnical Engineering ASCE**, 1979, 105: 1511—1524.
- [13] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381—3388.
- ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3381—3388.