

文章编号: 1007-2993(2024)01-0121-06

印尼软土地区后注浆钻孔灌注桩现场试验研究

门青波^{1,2} 乔建伟^{1,2} 夏玉云^{1,2} 马佳仪¹ 邵兵厂¹

(1. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西西安 710043;

2. 陕西省特殊岩土性质与处理重点实验室, 陕西西安 710043)

【摘要】 后注浆钻孔灌注桩在软土地区工程中应用广泛, 但对后注浆灌注桩承载特性的理论研究仍滞后于工程实践。依托印尼软土地区某工程, 开展不同桩长普通钻孔灌注桩和后注浆钻孔灌注桩的现场试验。结果表明, 后注浆钻孔灌注桩极限承载力是同条件下普通钻孔灌注桩的 1.20~1.26 倍, 后注浆灌注桩的回弹率和弹性变形相应增加; 研究区地质条件下后注浆水泥浆液上返高度约为 12.4~13.8 m, 桩端以下水泥浆下渗深度约为 1.3~2.1 m(约为桩径的 1.6~2.6 倍); 后注浆灌注桩水泥浆上返高度以下桩侧和桩端以下岩土层的标贯击数较压浆前均显著提高, 后注浆导致的桩侧摩擦阻力和桩端阻力的提高是钻孔灌注桩承载性能提高的主要因素。研究成果对指导印尼软土地区后注浆设计和施工具有一定的借鉴意义。

【关键词】 软土; 钻孔灌注桩; 后注浆; 承载性能; 静载试验

【中图分类号】 TU473.1

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.01.022

Field Tests Study on Post-Grouting Cast-in-place Bored Piles in Soft Soil Area of Indonesia

Men Qingbo^{1,2} Qiao Jianwei^{1,2} Xia Yuyun^{1,2} Ma Jiayi¹ Shao Bingchang¹

(1. China JIKAN Research Institute of Engineering Investigations and Design Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Laboratory for the Property and Treatment of Special Soil and Rock, Xi'an 710043, Shaanxi, China)

【Abstract】 Post-grouting bored piles are widely used in soft soil engineering in Indonesia, but the theoretical research on the bearing characteristics of post-grouting bored piles still lags behind engineering practice. Based on a project in Indonesia's soft soil region, field tests of bored piles with different pile lengths and post-grouting bored piles were carried out. The results show that the ultimate bearing capacity of post-grouting bored piles is 1.20 to 1.26 times that of bored piles, and the rebound rate and elastic deformation of post-grouting bored piles are correspondingly increased. Under the geological conditions of the study area, the upward flow height of post-grouting cement slurry is 12.4~13.8 m, and the downward penetration depth of cement slurry below the pile tip is 1.3~2.1 m, which is 1.6~2.6 times the pile diameter. The blow counts of the standard penetration test (SPT) of the rock and soil layers below the cement slurry return height of the post-grouting pile and below the pile end are significantly increased compared to those before grouting. The improvement of the pile side friction resistance and pile end resistance caused by post-grouting is the main factor for improving the bearing performance of the bored pile. The research results have reference significance for the design and construction of post-grouting in soft soil areas in Indonesia.

【Key words】 soft soil; cast-in-place bored pile; post-grouting; bearing performance; static loading test

0 引言

钻孔灌注桩因其具有较好的经济性、施工便捷性和承载力高等优点而广泛应用于高层建筑、桥梁

和海上石油平台等工程^[1]。但由于其在施工过程中对桩周土和桩端土产生扰动, 形成泥皮和桩底沉渣, 而对桩侧摩擦阻力和桩端阻力的发挥产生不利影响。

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划项目(2023-CX-TD-34, 2022-KJXX-05, 2023-CX-PT-46); 国机集团青年科技基金项目(QNJJ-PY-2022-41, QNJJ-ZD-2022-17); 西安市英才计划青年项目(2022XAYC-03)

作者简介: 门青波, 男, 1982 年生, 汉族, 安徽萧县人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事海外岩土工程勘察和地基处理工作。E-mail: ximenqingbo@163.com

通讯作者: 乔建伟, 男, 1990 年生, 汉族, 安徽砀山人, 博士, 高级工程师, 主要从事特殊岩土工程性质与地基处理技术的研究工作。E-mail: 15029207728@163.com

大量研究结果表明,桩端后注浆技术不仅能有效消除上述不利影响,还能大幅度提高桩基承载力并减小桩基沉降量,在国内外不同工程中得到广泛应用^[2-7]。如无锡江海西路快速路工程采用桩端后注浆后,桩基性能显著提高^[5];郑州某工程采用桩端后注浆后,桩端阻力显著提升^[6];唐山 LNG 项目接收站采用桩端后注浆后,桩侧摩阻力显著增加^[7]。然而,受加固方式多样性和地质条件复杂性等因素的影响,桩端后注浆理论研究滞后于工程实践,桩端后注浆研究仍处于初级阶段,目前尚未形成统一的后注浆设计和施工规范^[8-10]。

我国学者结合工程建设对软土地区后注浆灌注桩的承载特征开展了大量研究,发现后注浆钻孔灌注桩在软土地区具有较好的经济性、施工便捷性、适用性等优点^[11-13]。随着“一带一路”倡议的持续推进,我国对外工程总承包呈蓬勃发展态势。印尼是我国海外工程建设的主要地区之一,在工程建设中发现该区浅地表广泛发育软土^[14],地基基础方案多建议采用后注浆灌注桩。然而,目前关于印尼软土地区后注浆灌注桩承载特征的研究和工程应用还相对较少,本文依托印尼某工程,通过静载试验、钻孔取芯和标贯试

验对比分析了普通钻孔灌注桩和后注浆灌注桩的承载特性,在此基础上对后注浆加固机制进行了探讨,研究成果可为印尼软土地区后注浆灌注桩的工程应用提供借鉴。

1 场地地质条件与试验方案设计

1.1 场地地层特征

场地地表多被植物残体或腐殖质物覆盖,地势较平坦,地形起伏较小。场地地下水位埋深为地面下 0.00 ~ 1.90 m,以潜水为主,下伏基岩中赋存有基岩裂隙水,地下水主要受大气降水的补给,向周边低洼地带、河流和海洋排泄。场地水位受周围环境影响较大,按地下水季节变化规律,地下水位动态变化幅度约为 2.5 m。场地地貌单元属滨海沼泽,地层主要为第四系全新统海陆交互相沉积层和下伏基岩及其风化残积层,50 m 深度范围内地层从上至下依次为①腐殖土、②细中砂、③淤泥质土、③₁粉质黏土、③₂中细砂、④细中砂、⑤粉质黏土、⑥粉质黏土、⑦粉质黏土、⑧全风化凝灰岩、⑨强风化凝灰岩、⑩中等风化凝灰岩。实际工程中将上部①层腐殖土全部挖除换填,其余各层的基本物理力学指标如表 1 所示。

表 1 场地地层基本物理力学参数

层号	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	标贯击数	动探击数	压缩模量 E_s/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	地基承载力 特征值 f_{sk}/kPa	极限侧阻力标准值 q_{sk}/kPa 极限端阻力标准值 q_{pk}/kPa	
								灌注桩	
②	16.5	4	2.2	5	0	30	90	18	
③	15.5	1		1	5	5	50	15	
③ ₁		4		2	10	20	70	30	
③ ₂		9		6	0	30	100	35	
④	17.0	17		8	0	30	130	40	
⑤	17.5	4	2.7	2	10	20	70	35	
⑥	17.5	8	9.7	3	12	20	90	45	
⑦	18.0	27	17.4	6	13	22	160	55	600
⑧	19.5	70	44.3	25	13	22	280	90	1200
⑨	20.5		71.3	30			350	150	1800
⑩	21.5		82.7				1000	180	2600

1.2 试验方案设计

试验桩设计桩径 800 mm,共设计 3 种桩长,分别为 24 m、35 m 和 39 m,每种桩长的普通钻孔灌注桩各 2 根,编号为 S1—S6,对应每种桩长的后注浆钻孔灌注桩各 2 根,编号为 S1'—S6'。各试桩桩周地层、桩长和桩端持力层如图 1 所示,试桩编号和参数如表 2 所示。考虑到地表为腐殖土,为保证试桩设备正常工作,试桩前将其挖除后铺设厚约 50 cm 的

压实黏土,桩顶标高统一控制为 5.10 m。

试桩采用旋挖钻进成孔、气举反循环清孔,桩身混凝土强度等级为 C30。试桩 S1'—S6'桩端后注浆在成桩后 5 d 进行,采用直管法桩端注浆,实行压浆量和压浆压力联合控制的原则。浆液采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥配制,水灰质量比为 0.4,单根桩压浆水泥用量为 1.4 ~ 2.0 t,压浆压力为 2.8 ~ 4.2 MPa,桩顶上抬量 < 3 mm。

1.3 竖向抗压静载荷试验

竖向抗压静载荷试验于桩端后注浆结束后 28 d 进行, 采用慢速维持荷载法, 按《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014) 的规定, 每级加载为预估极限荷载值的 1/10, 加压至极限状态, 试验的终止和卸载条件均符合规范规定。每级加载、卸载后的数据测读均按照规范规定的时间间隔执行。

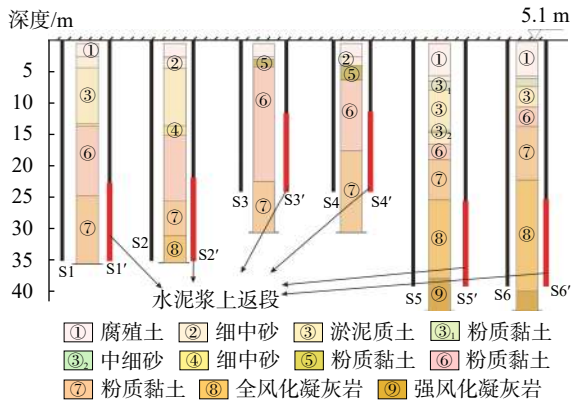


图 1 桩长范围内地层分布图

表 2 试桩参数表

桩号	桩径/mm	桩长/m	桩顶标高/m	桩端持力层	桩端压浆情况
S1	800	35	5.10	粉质黏土⑦层	否
S1'					是
S2	800	35	5.10	全风化凝灰岩⑧层	否
S2'					是
S3	800	24	5.10	粉质黏土⑦层	否
S3'					是
S4	800	24	5.10	粉质黏土⑦层	否
S4'					是
S5	800	39	5.10	强风化凝灰岩⑨层	否
S5'					是
S6	800	39	5.10	全风化凝灰岩⑧层	否
S6'					是

1.4 钻探取样与标准贯入试验

静载试验结束后在各试桩外侧 25 cm 处布设 1 个钻孔进行全孔取芯, 水泥浆消失处为终孔深度, 并于水泥浆出露段进行标准贯入试验, 同一地质条件下未注浆试桩深度段也进行标准贯入试验。

2 试验结果与分析

2.1 静载试验过程分析

绘制各试桩的 $Q-t$ 和 $s-t$ 曲线, 发现普通钻孔灌注桩与后注浆钻孔灌注桩沉降量随时间变化曲线可分为 3 段, 以 S1 桩和 S1' 桩为例, 即①缓慢增加段、②急剧增加段、③卸载段。①缓慢增加段为初始加

载至极限荷载, 沉降随时间缓慢增加, 沉降量主要为桩身压缩和桩体沉降, 此时桩的承载力由侧摩阻力起主要作用逐渐变化为侧摩阻力和端承力共同承担; ②急剧增加段为极限荷载至破坏荷载段, 该段沉降表面桩体发生整体破坏或桩端产生刺入破坏; ③卸载段为破坏荷载至卸载完成, 该段沉降主要为桩体的回弹变形(见图 2)。

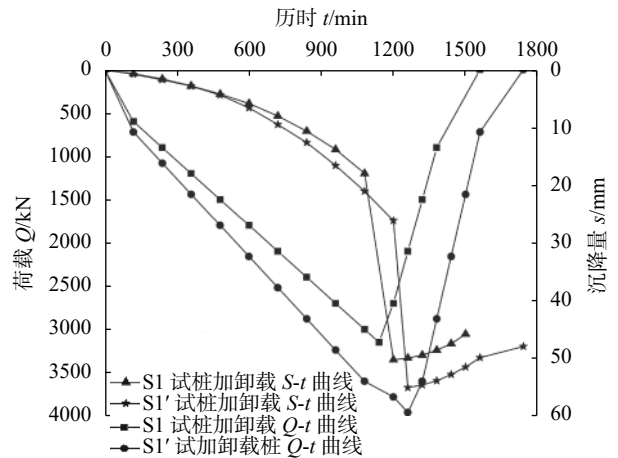


图 2 试桩 $Q(s)-t$ 曲线

2.2 单桩竖向抗压极限承载力

各试桩静载试验 $Q-s$ 曲线如图 3 所示。不同桩长的普通钻孔灌注桩和后注浆钻孔灌注桩荷载-沉降曲线均可分为 3 段, 即变形增加阶段、破坏阶段和回弹阶段。变形增加阶段曲线均呈下凹型, 表明沉降速率随荷载增加而增加, 表现出较大的塑性变形。回弹阶段变形曲线呈线性变化, 表明回弹量随荷载减小和线性增加。相同地层条件时, 相同荷载条件下各后注浆钻孔灌注桩沉降量均小于钻孔灌注桩, 且 $Q-s$ 曲线整体缓于普通钻孔灌注桩, 表明后注浆灌注桩可减小桩体的沉降。

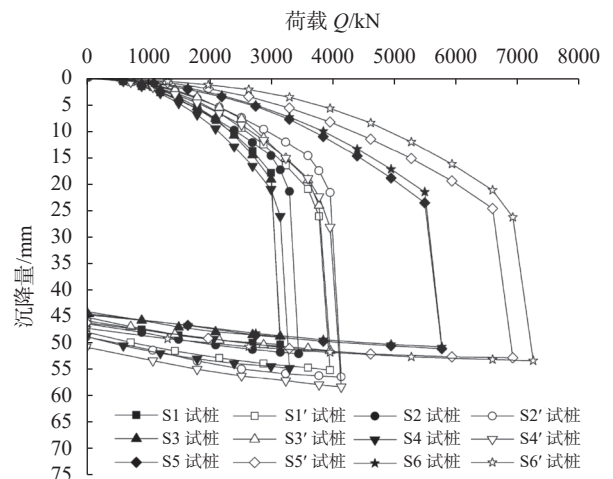


图 3 静载试验 $Q-s$ 曲线

不同桩长的普通钻孔灌注桩与后注浆钻孔灌注桩的极限承载力统计情况见表3。相同地层条件下各后注浆钻孔灌注桩的极限承载力均大于普通钻孔灌注桩,承载力提高系数为1.20~1.26。因此,后注浆灌注桩不仅可以有效减小桩体的沉降,还可显著提高单桩承载力。

表3 试桩竖向极限承载力

桩号	桩长/m	桩端持力层	竖向极限承载力/kN	提高系数
S1	35	粉质黏土⑦层	3000	1.26
S1'			3780	
S2	35	全风化凝灰岩⑧层	3300	1.20
S2'			3960	
S3	24	粉质黏土⑦层	3000	1.26
S3'			3780	
S4	24	粉质黏土⑦层	3150	1.26
S4'			3960	
S5	39	强风化凝灰岩⑨层	5500	1.20
S5'			6600	
S6	39	全风化凝灰岩⑧层	5500	1.26
S6'			6930	

对比钻孔灌注桩S1和S3及S2和S4,发现尽管两试桩的桩长相差11.0m,但其极限承载力均相同,分析其原因主要是桩S1和S2桩周土发育厚度约为11.0m的③层淤泥质土,而S3和S4桩周土不发育③层淤泥质土,据此推测该区③层淤泥质土可能为欠固结土,工程设计时需考虑③层淤泥质土对桩的负摩阻力,其中性点位置约位于③层淤泥质土厚度的中间位置,两者共同作用下③层淤泥质土对桩的侧阻力约为0。因此,该区设计钻孔灌注桩时应充分考虑该区实际地层情况。

对比S1'和S2'桩端后注浆效果,发现桩端为⑧层全风化凝灰岩的后注浆桩基承载力提高系数小于⑦层粉质黏土;根据S1'、S3'和S4'桩端后注浆效果,发现桩端为⑦层粉质黏土的后注浆桩基承载力提高系数均为1.26;对比S5'和S6'桩端后注浆效果,⑧层全风化凝灰岩的后注浆桩基承载力提高系数大于⑨层强风化凝灰岩。

2.3 单桩变形与回弹特征

不同桩长的普通钻孔灌注桩与后注浆钻孔灌注桩的沉降量和回弹量如表4所示。普通钻孔灌注桩回弹量为4.46~6.63mm,回弹率为8.87%~12.97%;后注浆灌注桩的回弹量为6.11~7.65mm,回弹率为11.45%~13.56%。因此,后注浆灌注桩的回弹量和

回弹率均相应增加,表明后注浆灌注桩的弹性变形相应增加。

表4 试桩回弹量与回弹率统计表

桩号	最大沉降量/mm	最大回弹量/mm	回弹率/%
S1	50.28	4.46	8.87
S1'	55.11	7.15	12.97
S2	52.06	5.67	10.89
S2'	56.40	7.65	13.56
S3	48.76	4.65	9.54
S3'	51.46	6.30	12.24
S4	54.42	5.62	10.33
S4'	58.33	7.55	12.94
S5	51.11	6.63	12.97
S5'	52.81	6.61	12.52
S6	50.73	6.03	11.89
S6'	53.34	6.11	11.45

2.4 钻孔取芯结果

根据12根试桩桩侧全孔取芯结果,普通钻孔灌注桩桩侧全孔深度范围内未见明显水泥浆,后注浆钻孔灌注桩桩侧可见水泥浆,但水泥浆分布不连续,充填不均匀,多以薄层状分布,层厚一般为0.2~0.3cm,局部为5~6cm,水泥浆含量随距桩端距离减小而显著增加,但桩底水泥浆仍有部分尚未凝固,随着时间推移桩底水泥浆会持续凝固,从而进一步提高桩端承载力。

后注浆钻孔灌注桩桩侧初见水泥浆深度和水泥浆终止深度统计情况见表5。不同桩长水泥浆桩端上返高度为12.4~13.8m,未达到③层淤泥质软土。桩端以下水泥浆下渗深度1.3~2.1m,约为桩径的1.6~2.6倍。

表5 桩侧压浆取芯结果

孔号	孔深/m	初见水泥浆深度/m	水泥浆终止深度/m	上返高度/m	桩端入渗/m
S1'	37.00	22.60	36.30	12.40	1.30
S2'	37.80	21.80	37.10	13.20	2.10
S3'	26.00	11.60	25.40	12.40	1.40
S4'	26.50	11.40	25.70	12.60	1.70
S5'	41.50	25.50	40.70	13.50	1.70
S6'	41.50	25.20	40.90	13.80	1.90

对比S1'和S2'桩端后注浆效果,发现桩端为⑧层全风化凝灰岩的后注浆上返高度和下渗深度均大于⑦层粉质黏土;对比S5'和S6'桩端后注浆效果,⑧

层全风化凝灰岩的后注浆上返高度和下渗深度均大于⑨层强风化凝灰岩。表明该区后注浆钻孔灌注桩桩端持力层可优先选择⑧层全风化凝灰岩。

2.5 标贯试验结果

相同地层条件下注浆前后桩侧土的标贯击数分布如图 4 所示。与普通钻孔灌注桩相比, 后注浆灌注桩 13 m 以下深度的桩侧土的标贯击数均显著增加, 增加量随深度增加而增加, 且各桩桩端以下标贯击数增加量最大。标贯击数增加范围为 9~15 击, S1' 与 S1 相比平均增加 13.25 击, S2' 与 S2 相比平均增加 12 击, S3' 与 S3 相比平均增加 11.5 击, S4' 与 S4 相比平均增加 13.5 击(见表 6)。表明后注浆产生的桩侧上返水泥浆有效提高了桩侧土层的强度。

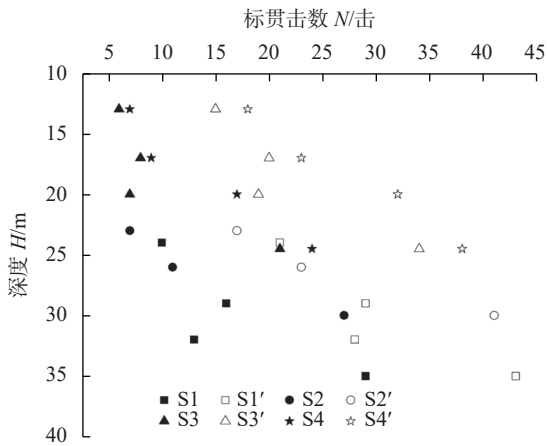


图 4 注浆前后桩侧标贯击数

表 6 不同试桩标贯击数对比

桩号	深度范围/m	标贯击数深度加权平均值	提高击数
S1	24 ~ 35	17	13.25
S1'		30.25	
S2	23 ~ 30	15	12
S2'		27	
S3	13 ~ 24.5	10.5	11.5
S3'		22	
S4	13 ~ 24.5	14.25	13.5
S4'		27.75	

3 后注浆钻孔灌注桩加固机制分析

国内外研究者对后注浆的加固机制开展了大量研究, 认为后注浆主要通过增强桩端土体强度、增强桩侧土层侧摩阻力、形成桩端扩大头和桩端压浆的预压作用等 4 个方面来提高钻孔灌注桩的承载性能^[15-19]。本节结合前文桩端后注浆对桩基承载性状影响、钻孔取芯和水泥浆段标准贯入试验结果分析,

并考虑试桩桩端持力层岩土层的性质, 对压浆加固机理进行分析。

试桩桩侧水泥浆上返高度范围地层主要为粉质黏土层和全风化凝灰岩, 水泥浆上返一方面引起桩侧土层强度的显著提升, 另一方面产生侧向流动填充桩土接触面的缺陷并有效增加土层的水平向应力, 两者共同作用在桩周周围形成加固体, 有效增加桩周的侧摩阻力。水泥浆在压力作用下还向下入渗, 可有效加固桩底持力层岩土层和沉渣, 提高了桩底持力层岩土层的强度和刚度, 表现为桩端以下土层标贯击数增加值最大, 进而提高桩端阻力。此外, 本次试验桩端主要为粉质黏土和不同风化程度凝灰岩, 虽其注入性较差, 但注入水泥浆能产生注浆加固作用, 即水泥浆在压力作用下压入桩底挤密桩端岩土层形成球状浆泡结石体, 并一定程度上增加了桩端的直径。因此, 研究区后注浆承载力的提高主要通过提高桩侧阻力和提高桩端阻力来改善承载性能。

4 结论

(1) 普通钻孔灌注桩和后注浆钻孔灌注桩荷载-沉降曲线均可分为 3 个阶段, 即变形增加阶段、破坏阶段和回弹阶段。

(2) 与普通钻孔灌注桩相比, 后注浆桩的承载力显著提高且沉降量相对降低, 承载力提高系数约为 1.20~1.26; 后注浆灌注桩的回弹率有所增加, 且弹性变形也相应增加。

(3) 后注浆灌注桩水泥浆上返高度约为 12.4~13.8 m, 下渗深度约为 1.3~2.1 m, 水泥浆影响范围内的岩土层的标贯击数较压浆前均显著提高。

(4) 后注浆导致桩侧摩阻力和桩端阻力提高, 是后注浆钻孔灌注桩承载性能提高的主要原因。

参 考 文 献

[1] 张忠苗. 桩基工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

[2] 刘红艳, 万志辉. 桩端后压浆对钻孔灌注桩侧摩阻力的增强作用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(12): 1078-1084.

[3] BRUCE D A. Enhancing the performance of large diameter piles by grouting[J]. Ground Engineering, 1986, 19(4): 9-15.

[4] THIYYAKKANDI S, MCVAY M, BLOOMQUIST D, et al. Experimental study numerical modeling of axial prediction approach to base grouted drilled shafts in cohesion less soils[J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(3): 439-454.

- [5] 万志辉,戴国亮,王磊,等.黏性土层中后压浆桩承载性状的对比试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(S2):194-198.
- [6] 何剑.后注浆钻孔灌注桩承载性状试验研究[J].岩土工程学报,2002,24(6):743-746.
- [7] 王忠福,刘汉东,何思明,等.后注浆超长灌注桩竖向承载特性荷载试验研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(2):253-257,262.
- [8] 徐军.软土地基高层建筑钻孔灌注桩桩底后压浆技术的应用[J].宁波大学学报(理工版),2011,24(3):67-70.
- [9] 张晓炜,黄根生.钻孔灌注桩后压浆技术理论与应用[M].武汉:地质大学出版社,2007.
- [10] 戴国亮,万志辉.后压浆桩增强效应作用机制及荷载沉降关系研究[J].岩土工程学报,2017,39(12):2235-2244.
- [11] 周红波,陈竹昌.上海软土地区打入桩基长期沉降性状研究[J].岩土力学,2007,(9):1856-1860.
- [12] 林志豪,陈宏湛,陈仁伟,等.滨海软基后注浆灌注桩承载性状现场试验研究[J].地下空间与工程学报,2022,18(S2):578-586.
- [13] 王志辉,刘斌,庄平辉.大直径桩端压力注浆灌注桩的承载性状试验[J].东北大学学报(自然科学版),2002,23(2):160-163.
- [14] 孙威,张雪婵,刘金波,等.印尼某燃煤发电厂软土地基处理效果评估[J].建筑结构,2020,50(21):139-143,132.
- [15] 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.
- [16] RUIZ M E, PANDO M A. Load transfer mechanisms of tip-post-grouted drilled shafts in sand[C]//Proceedings of International Foundation Congress and Equipment Expo: Contemporary Topics in Deep Foundation, Orlando, 2009.
- [17] 戴国亮,龚维明,薛国亚,等.超长钻孔灌注桩桩端后压浆效果检测[J].岩土力学,2006,27(5):849-852.
- [18] 张忠苗,邹健,刘俊伟,等.桩端后注浆浆液上返高度的理论研究[J].岩土力学,2010,31(8):2535-2540.
- [19] 戴国亮,万志辉,竺明星,等.基于黏度时变性的桩端压力浆液上返高度模型及工程应用[J].岩土力学,2018,39(8):2941-2950.

收稿日期:2023-04-18