

分布式后压浆工艺对深长大直径灌注桩 承载性能影响试验研究

万志辉¹, 郭子龙¹, 段 畅¹, 戴国亮², 龚维明²

(1. 南京工业大学 交通运输工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘 要: 为研究分布式后压浆工艺对桩基承载性能的影响, 通过模型桩开挖试验直观分析了分布式后压浆工艺浆液扩散机制以及土体加固效果, 并基于安罗高速原阳至郑州段项目3根大直径钻孔灌注桩的自平衡法静载试验结果, 分析了分布式压浆前、后大直径后压浆桩承载性状的差异, 同时深入探究了长径比以及桩端持力层对桩基承载能力和压浆效果的影响。研究表明: 分布式后压浆工艺可实现小间距、高密度、多断面压浆, 相较于组合式后压浆更能改善钻孔灌注桩施工的桩侧泥皮和土体扰动问题, 并且不同土层中的浆液扩散机制和加固效果存在明显差异; 分布式后压浆和组合式后压浆均可显著提升桩基承载性能, 极限承载力分别提高了116%~121%和118%, 而在加载后期分布式后压浆表现出更优的改善效果, 同时长径比以及持力层均对试桩压浆前、后的承载力以及压浆效果有明显影响; 分布式后压浆桩浆液利用效率相较于组合压浆桩更高, 其轴力略大; 而在分布式后压浆桩中, 细砂持力层试桩的压浆效果优于粉质黏土持力层试桩; 分布式后压浆和组合式后压浆对桩侧土体均有显著加固作用, 但分布式后压浆工艺小间距、高密度的特点使其桩侧摩阻力增强系数分布更加集中; 不同持力层试桩压浆后桩端阻力均有明显提高, 且细砂持力层的分布式后压浆桩由于浆液渗透和胶结作用使其具有更大的桩端阻力增强系数。

关 键 词: 钻孔灌注桩; 分布式后压浆; 自平衡法静载试验; 承载性能; 持力层; 浆液扩散

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2026) 04-1373-13

Experimental study on the influence of distributed post-grouting technology on the bearing performance of deep and long large-diameter bored piles

WAN Zhi-hui¹, GUO Zi-long¹, DUAN Chang¹, DAI Guo-liang², GONG Wei-ming²

(1. College of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract: To investigate the impact of distributed post-grouting technology on pile foundation-bearing capacity, the grout diffusion mechanism and soil reinforcement effects of this technology were intuitively analyzed through model pile excavation tests. Furthermore, based on the self-balancing load test results of three large-diameter bored piles from the Yuanyang to Zhengzhou section of the Anyang to Luoshan Expressway project, the differences in bearing behavior of large-diameter post-grouted piles before and after distributed grouting were analyzed. The influences of the length-to-diameter ratio and the holding layer on pile foundation bearing capacity and grouting effectiveness were thoroughly explored. The results of the study show that: The distributed post-grouting process can realize small spacing, high density and multi-section grouting, which is more capable of improving the pile-side mud skin and soil disturbance problems of the bored pile construction compared with the combined post-grouting, and there is a significant difference in the mechanism of grout diffusion and reinforcement effect in different soil layers. Both distributed post-grouting and combined post-grouting can significantly improve the bearing performance of pile foundation, and the ultimate bearing capacity is increased by 116%–121% and 118%, respectively, while distributed post-grouting shows better improvement in the late loading stage, and at the same time, the length-to-diameter ratio as well as the holding layer both have significant influence on

收稿日期: 2025-04-02

录用日期: 2025-07-11

基金项目: 国家自然科学基金 (No.52008100); 江苏省高等学校基础科学 (自然科学) 研究重大项目 (No.23KJA560005); 江苏省水利科技项目 (No.2023057); 江苏省研究生科研与实践创新计划 (No.SJCX25_0614)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52008100), the Major Program of Natural Science Foundation of Jiangsu Higher Education Institutions (23KJA560005), the Water Conservancy Science and Technology Program of Jiangsu Province (2023054) and the Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (SJCX25_0614).

第一作者简介: 万志辉, 男, 1990年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土与地下工程方面的教学与科研工作。E-mail: wanzhihui@njtech.edu.cn

通信作者: 戴国亮, 男, 1975年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事深基坑、深基础等方面的教学和科研工作。E-mail: daigl@seu.edu.cn

the bearing capacity of the test piles before and after grouting, as well as the effect of grouting. Compared with the combined post-grouted piles, the distributed post-grouted piles are more efficient in grout utilization and their axial force is slightly larger; while in the distributed post-grouted piles, the grouting effect of the test piles in the fine sand holding layer is better than that of the test piles in the pulverized clay holding layer. Distributed and combined post-grouting have significant reinforcement effects on the soil at the pile side, but the small spacing and high density of the distributed post-grouting process results in a more centralized distribution of friction enhancement coefficients at the pile side. The pile tip resistance of test piles with different holding layers is significantly increased after grouting, and the distributed post-grouted piles with fine sand holding layer have greater pile tip resistance enhancement coefficient due to grout infiltration and cementation.

Keywords: bored pile; distributed post-grouting; self-balancing static load test; bearing performance; holding layer; grout diffusion

1 引言

钻孔灌注桩因其承载力高、无挤土效应、环境污染小等优点,已成为高层建筑、大跨度桥梁等基础工程设计的首选桩型。然而,在施工过程中对桩周土体的扰动以及产生的桩侧泥皮会影响桩基承载性能,同时桩端沉渣也会明显影响桩基的承载能力和沉降量。后压浆技术则可以有效改善钻孔灌注桩的此类问题,压入的浆液通过对桩周土体的压密、渗透和劈裂等作用加固桩周土体,改善桩-土界面,降低桩侧泥皮对桩基承载性能的影响,并且固结桩端沉渣从而提高桩端阻力的发挥。后压浆技术优势明显,能够显著提高桩基承载性能并减小沉降量,因此被广泛应用于工程实践^[1-3]。

后压浆技术发展至今已较为成熟,众多学者提出了很多创新性的压浆装置。Gouvenot 等^[4]最早提出了一种桩侧压浆装置,该装置在钢桩内放入管径 160 mm 的压浆管,并将压浆孔口每间隔 1 m 进行布置,单孔压浆时其他孔通过双隔离板的充水膨胀系统保持密封状态;Sze 等^[5]在香港某工程实例中描述了方桩或地下连续墙内沿着钢筋笼纵向布置压浆管的桩侧压浆装置,将打好孔的钢管绑扎在钢筋笼外侧,并对其出浆孔进行临时封闭以防止浇筑混凝土而造成堵塞;Lai 等^[6]报道了一种在越南地区超高层建筑中常用的桩侧压浆装置,并利用现场试验证明了该装置的合理性;Thiyyakkandi 等^[7-8]介绍了在无黏性土中开展的新型喷射压浆预制桩的施工及现场静载试验的情况,试验结果表明采用该压浆工艺的桩基承载力是同尺寸钻孔灌注桩的 2.5 倍以上。由于施工成本等因素,上述报道的压浆装置设置断面数量较少,对钻孔灌注桩的桩侧泥皮以及土体扰动的改善主要集中在预设的少量点位。为了更好地提高后压浆技术对桩基性能的改善效果,课题组研发出一套分布式后压浆装置,该装置沿桩身方向设置纵向压浆管,并在压浆管上设置多个小间距的桩侧压浆器,通过压浆芯管在纵向压浆管中提升定位

达到对桩端以及桩侧进行多断面密集压浆的目的,并且此装置中部分核心设备可回收再利用,经济效益更高。万志辉等^[9]开展了分布式后压浆桩模型试验,结果表明对于提高桩基承载性能,分布式后压浆技术更优于传统环向点式后压浆。目前,关于后压浆桩承载性能的研究主要集中在单一的桩端压浆桩或桩侧压浆桩^[10-12],对分布式后压浆桩和组合式后压浆桩承载性状的研究鲜有报道,特别是分布式后压浆在实际工程中的应用更是少有提及。因此,研究分布式后压浆技术在大直径钻孔灌注桩实际工程中的应用效果有重要意义和推广价值。

原位静载试验是最符合桩基实际承载情况的现场测试方法。然而,国内外对直径 1.5 m 以上的大直径后压浆桩静载试验的报道并不多见,其主要原因是大直径后压浆桩的承载力非常高,试验加载常常受到设备限制,导致常规的原位静载试验无法满足荷载需求。因此,很多学者将自平衡法静载试验应用于后压浆桩等荷载需求更大的桩基承载性能测试中。如 Safaqaq 等^[13]对苏通长江大桥的大直径后压浆试桩进行了自平衡法静载试验,结果表明桩端压浆不仅能增强桩端阻力,还能改善桩-土界面性质;王卫东等^[14]对静钻根植桩进行现场自平衡法静载试验,实现了直接对扩底桩端极限承载性能的量测与分析。众多学者的研究结果表明,自平衡法静载试验是对具有更大荷载需求的大直径后压浆桩进行现场承载能力测试的有效方法^[15-18]。

本研究首先通过模型桩开挖试验分析分布式后压浆在黏土和砂土中的浆液扩散机制以及对土体的加固效果,并与传统组合式后压浆工艺进行对比分析,以直观研究不同土层中分布式后压浆与传统组合式后压浆方式的压浆效果差异。然后以安罗高速原阳至郑州段项目为背景,通过自平衡法静载试验对 3 根大直径钻孔灌注桩进行压浆前、后的承载能力测试,从荷载-位移曲线、桩身轴力、桩侧摩阻力以及桩端阻力等方面研究分布式后压浆对桩基承载性能的影响以及不同长径比、不同持力层

下试桩承载能力和压浆效果的差异。研究结果对后期项目桩基工程优化设计具有重要参考价值，并为类似地层的桩基分布式后压浆工程提供有益参考。

2 背景工程

2.1 工程简介

安罗高速原阳至郑州段项目起于原阳县太平镇虎张村西北，终点顺接已建的安罗高速机场西段，路线全长约 21.655 km，其中，黄河特大桥全长 15.223 5 km。本项目建设规模大，桩基数量多，为保证桩基础施工质量和上部结构的安全可靠，在工程正式实施前进行必要的试桩。结合地层条件和上部结构荷载需求，试桩采用大直径钻孔灌注桩数量为 3 根，均布置在桥轴线上。

为提高桩基承载力、降低沉降量以及提供更高的经济效益，对 3 根试桩分别采用传统桩端-桩侧组合式后压浆技术和分布式后压浆技术，为后续桩基工程设计以及类似工程提供参考。

2.2 工程地质概况与试桩概况

通过对桥位区工程地质调查，揭露试验场地土层以细砂层为主，还包括部分粉土层和粉质黏土层，其物理力学参数通过土工试验得出，如表 1 所示。

为给桩基工程设计提供有益参考，对 3 根大直径后压浆钻孔灌注桩进行测试，编号为 SZ1、SZ2 和 SZ3。各试桩具体参数如表 2 所示。其中，试桩 SZ2 和 SZ3 采用分布式后压浆工艺，旨在研究分布式后压浆对桩基承载性能以及桩周土体的影响。而 SZ1 采用传统环管+直管组合式后压浆技术，以对比研究不同压浆方式下桩基承载性状的差异。原位静载试验受到场地限制、安全性考虑以及承载力测试加载需求等因素的影响，因此综合考虑后，3 根试桩均采用双荷载箱自平衡法静载试验。

表 1 场地各主要土层参数

Table 1 Parameters of major soil layers at the site

层号	土层名称	密度或状态	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	含水率 $\omega/\%$	承载力基容许值 f_{ak}/kPa	侧阻力标准值 q_{sk}/kPa
①	粉土	稍密	19.2	14.7	22.9	22.7	120	35
① ₂	粉土	稍密	20.1	14.9	22.2	20.0	130	40
① ₄	粉质黏土	可塑	18.8	29.7	13.6	29.8	130	40
②	细砂	中密	—	—	—	—	150	45
② ₄	粉质黏土	可塑	20.1	25.8	14.2	22.2	180	50
③	细砂	中密	—	—	—	—	220	55
④	细砂	密实	—	—	—	—	250	60
⑤	细砂	密实	—	—	—	—	280	65

表 2 试桩参数

Table 2 Parameters of test piles

试桩编号	桩径 D/m	桩长 L/m	长径比 L/D	桩端持力层	桩顶高程/ m	桩底高程/ m	压浆工艺
SZ1	1.8	80	44.44	粉土	83.3	3.3	组合式后压浆
SZ2	1.8	80	44.44	粉质黏土	84.2	4.2	分布式后压浆
SZ3	2.2	110	50.00	细砂	83.5	-26.5	分布式后压浆

3 分布式后压浆技术

3.1 工艺组成

分布式后压浆系统包括地上压浆系统和地下压浆系统，其中地上压浆系统包括智能压浆设备、提升定位装置等，地下压浆系统则主要包括分布式压浆器、桩端压浆器、压浆管以及压浆芯管等。分布式后压浆流程如图 1 所示。

地上压浆系统中的智能压浆设备进行浆液的制备、泵送与数据监测，是分布式后压浆工艺的重要组成部分。浆液泵送至分布式绕管机，由其进行压浆芯管的提升与定位，从而使压浆芯管出浆口精确定位至预设断面。地下压浆系统中的桩侧分布式压浆器在纵向压浆管上串联布置，因其不需要另外的桩侧压浆管，从而可以低成本、多深度、高密度设置。压浆芯管有多个出浆口以及两个橡胶囊袋，压浆过程中压浆芯管可分为 3 个状态：①未压浆提升状态，此状态下浆液停止泵送且上、下橡胶囊袋均未注水膨胀，易于在压浆管中移动至预设断面；②桩端压浆状态，此状态上橡胶囊袋注水膨胀，隔绝上橡胶囊袋以下空间，从而使浆液仅从桩端压浆器压入桩端土体；③桩侧压浆状态，此状态上、下橡胶囊袋均注水膨胀，在橡胶囊袋之间形成密闭空间，从而使浆液只从预设断面的分布式压浆器压入桩侧土体。

传统桩端后压浆和桩侧后压浆无法独立解决泥皮、沉渣以及土体扰动问题，而结合了两者的组合式后压浆则较为全面^[19-21]。但其仍然在管路设置和压浆效果方面存在局限性。首先，每个断面均需单独设置压浆环管和对应的注浆管，并且无法回收，其次由于管路成本限制，预设断面数量较少，桩侧压浆均匀性受到影响。而分布式后压浆利用纵向压浆管和分布式压浆器即可完成所有预设断面的布置，可节省传统后压浆工艺中的多套压浆环管及配套的竖管，并且在压浆完成后，地上压浆系统全部设备以及地下压浆系统中的压浆芯管均可回收循环利用，显著降低了施工成本和施工难度。

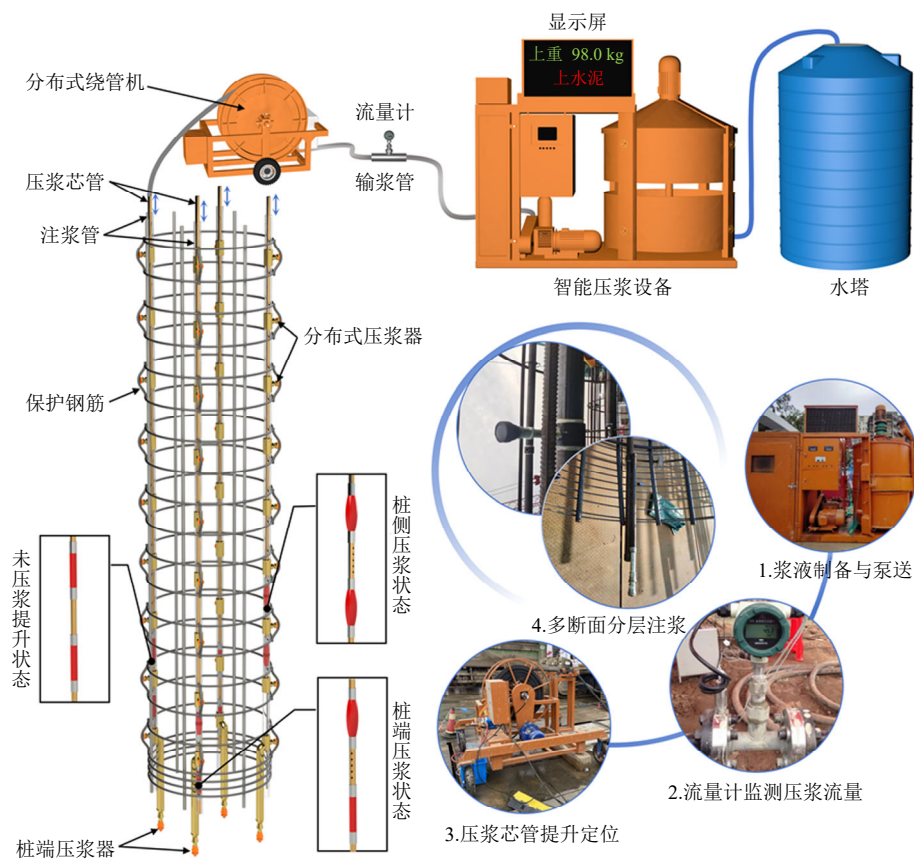


图1 分布式后压浆流程示意图

Fig.1 Schematic diagram of distributed post-grouting process

因此, 分布式后压浆工艺在桩侧高密度地串联压浆器, 通过提升定位装置准确定位压浆芯管出浆口至预设断面, 再由智能压浆设备泵送浆液, 从而实现小间距、高密次、多断面、高效率的智能压浆。并且分布式后压浆与传统组合式后压浆的压浆终止条件相同, 均为压浆量和压浆压力双重控制, 其中压浆量为主要控制方式。

3 根钻孔灌注桩的压浆材料均采用水灰比为 0.5~0.6 的 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥, 各试桩压浆关键参数如表 3 所示。需要特别说明的是, 试桩 SZ2 在实施桩侧压浆过程中, 部分断面压浆压力值偏低, 因此增加该断面处 10% 的水泥浆液量。

表 3 试桩压浆参数
Table 3 Grouting parameters for test piles

桩号	实际压浆量/ 10^3kg		终止压力范围值/MPa		浆液水灰比
	桩端	桩侧	桩端	桩侧	
SZ1	5.8	8.6	1.61~3.75	0.88~1.94	0.5~0.6
SZ2	5.5	9.5	4.74	0.69~5.20	0.5~0.6
SZ3	6.1	12.8	7.32	2.16~6.83	0.5~0.6

3.2 分布式后压浆模型桩开挖试验

3.2.1 试验方法

为直观了解分布式后压浆在不同土层中的浆

液分布以及对土体的加固效果, 开展包括传统普通后压浆与创新型分布式后压浆两种压浆方式的模型桩开挖试验。模型箱装置以及压浆孔布置如图 2 所示。

通过自行设计的简易压浆设备开展两种压浆方式的压浆试验以模拟实际工程中钻孔灌注桩的后压浆过程, 并利用室内模型试验手段在黏土层与砂土层中采取定位回填方式模拟钻孔灌注桩非挤土成桩。模型桩选用小比例尺铝管桩, 其外径为 50 mm, 壁厚为 1.5 mm, 有效长度为 800 mm。模型箱尺寸满足模型桩与其内壁和端部距离的要求, 且符合内填介质为半无限体的条件。黏土模型桩试验采用 1 m×1.1 m (直径×高)、侧壁和底部厚度为 3.5 cm 的圆柱形钢桶改装而成, 砂土模型桩试验采用 2 m×1 m×1 m (长×宽×高) 的方形钢制模型箱。普通后压浆模型桩桩身预钻 1 道断面共 2 处 8 mm 的压浆孔, 模拟传统压浆布置方案的实施, 而分布式后压浆模型桩桩身预制 3 道断面共 6 处 8 mm 的压浆孔, 模拟分布式后压浆多断面、小间距的压浆特点, 压浆量均为 1.0 L。

3.2.2 浆液扩散情况开挖分析

为直观分析压入的水泥浆液在黏土中的扩散

情况,将压浆后的模型桩 MP1、MP2 桩侧黏土挖出,浆液分布情况如图 3 所示。由图可知,2 根模型桩的浆液在黏土中的扩散形式主要分为两种:①沿桩身上返、下渗,主要分布在桩身表面,见图 3(a);②在黏土中劈裂,形成片状、条状固结体,见图 3(b)。图 3(c)和图 3(d)分别为模型桩 MP1 和 MP2 挖出的固结体。需要说明的是,开挖工作因黏土黏聚力较大而进行困难,导致部分固结体脱落或折断,图中所展示的仅为部分桩侧水泥固结体,但从当前图中依然可看出,相较于传统普通压浆桩 MP1,分布式后压浆桩 MP2 桩侧浆液上返、下渗作用更为显著,在桩身表面形成了分布更广且更为完整的桩侧固结体,从而能够更为有效地改善桩-土界面的力学性能。

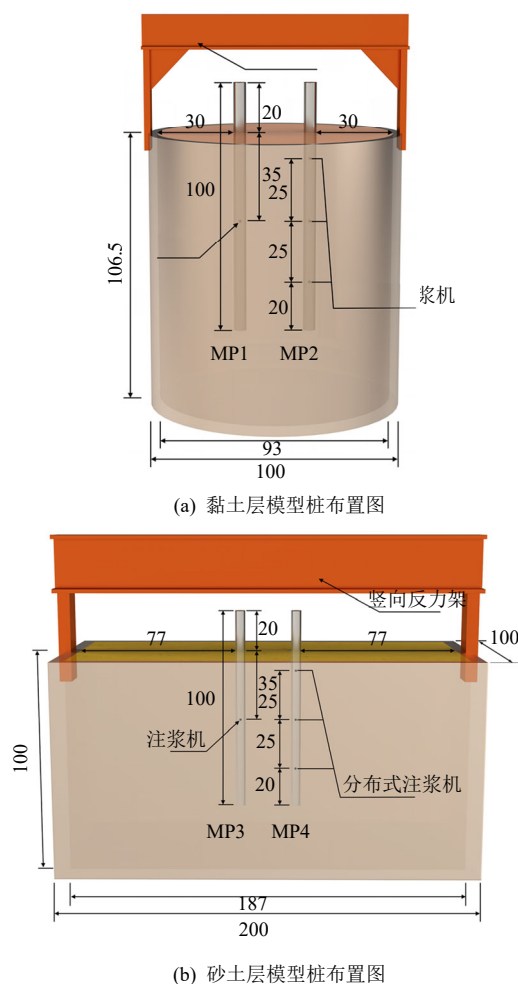


图2 模型箱装置及压浆孔布置图(单位:cm)

Fig.2 Model box apparatus and grouting hole layout diagram (unit: cm)

压浆完成后将普通后压浆桩 MP3 和分布式后压浆桩 MP4 从模型箱中挖出以直观分析桩基后压浆工程中浆液在砂土层中的扩散机制。图 4 呈现出砂土层中的浆液扩散形态特征。从图中可以直观地

看出,在砂土中水泥浆液的扩散形式主要为压密式,并没有发生劈裂作用。普通后压浆桩 MP3 的浆液沿桩身小范围上返、下渗,在桩侧形成了长度约 15 cm,厚度约 18 cm 的套筒状固结体,经测算普通后压浆形成的固结体与桩身黏接面积约积为 135 cm²。分布式后压浆桩 MP2 突出小间距、多密次的工艺特点,多断面压浆在桩侧形成了更加连续、完整的浆液固结体,并且在压浆口处形成了最大直径约 12 cm 的不规则固结体,经测算分布式后压浆形成的固结体与桩身黏接面积约为 192 cm²,较普通后压浆增加了 42%。因此,分布式后压浆可以使桩-土体系有效形成一个更紧密协同工作的系统,从而进一步提升桩基的竖向承载性能。



图3 黏土模型桩开挖结果实拍图

Fig.3 Actual photographs of model pile excavation results in clay

4 现场试验与结果分析

4.1 双荷载箱自平衡法静载试验

自平衡法静载试验不受试验场地的限制并且具有更高的加载上限,是开展大直径长桩原位静载试验的有效方法。为满足本项目 3 根试桩的加载需求并减少试验的时间与成本,3 根试桩均采用双荷载箱自平衡测试法。双荷载箱自平衡测试法主要包括基准梁、上荷载箱、下荷载箱、加载设备、位移传感器和数据采集系统等设备,试验示意图如图 5 所示。

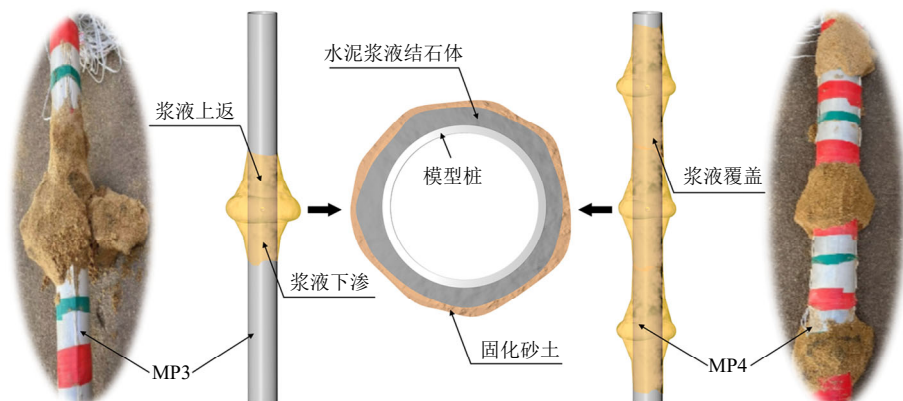


图4 砂土模型桩浆液扩散形态

Fig.4 Grout diffusion patterns of model piles in sandy soils

基准梁作为基桩位移的参考, 结合位移杆和位移传感器对各级荷载下的桩顶、桩端以及荷载箱位置的位移进行采集并记录。上、下荷载箱则根据试桩受力平衡点位置布置, 通过油管连接加载设备以在试验时提供外部荷载。针对压浆前、后进行的两次静载试验的预估加载值与位移量, 选用的荷载箱位移量程为 200 mm, 并且压浆前的静载试验结束后荷载箱并不进行复位, 在压浆完成后进行第 2 阶段的试验。静载试验完成后对荷载箱位置进行注浆, 保证桩身质量满足设计要求。桩身钢筋骨架上焊接钢筋计以获取压浆前、后桩身应力-应变关系。试验分别在压浆前与压浆后进行, 采用慢速维持荷载法, 荷载加卸载方法的具体细则按照《建筑基桩自平衡静载试验技术规程》(JGJ/T 403—2017) [22]。实践研究表明^[22-24], 注入的水泥浆液经过 20 d 的休止时间, 土体可完全恢复, 水泥浆液的增强反应基本完成, 此时可认为压浆前的试桩静载试验对压浆后的静载试验影响较小或可忽略不计, 因此, 可对同一试桩进行压浆前、后的静载试验以及结果对比分析。并且相较于采用工况相似的不同试桩, 分析同一根试桩的两阶段静载试验结果可以更加真实地反映后压浆桩压浆前、后的承载性能差异。

4.2 桩顶荷载-桩顶位移曲线

桩顶荷载 Q -桩顶位移 s 曲线能够较为直观地反映桩基础承载变形特性, 也是评价试桩安全稳定性的重要参考标准。根据《建筑基桩自平衡静载试验技术规程》[22]中规定等效转换方法, 将自平衡测试结果转换为传统静载测试得到的桩顶荷载-桩顶位移曲线, 得到转换后 Q - s 曲线如图 6 所示。

由图 6 可知, 试桩压浆前、后 Q - s 曲线变化趋势相同, 最后均呈现出陡降趋势。与压浆前相比,

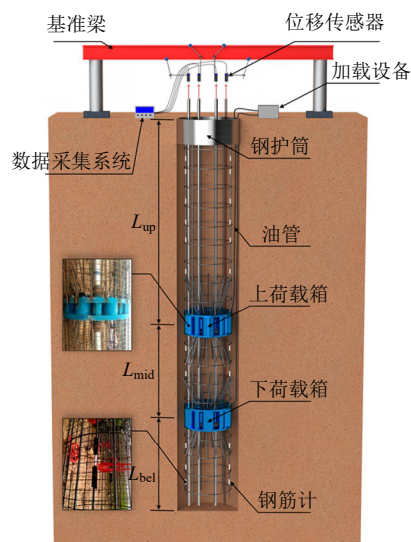
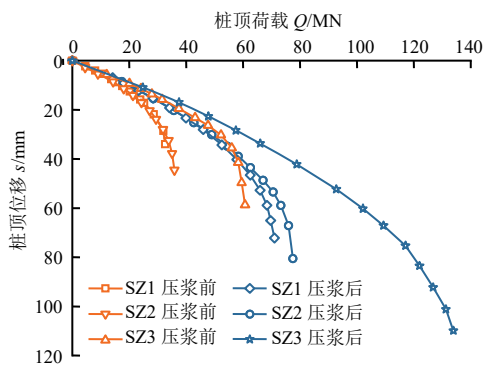


图5 双荷载箱自平衡法静载试验示意图

Fig.5 Schematic diagram of self-balancing static load test with double load box

图6 试桩等效转换 Q - s 曲线Fig.6 Equivalent conversion Q - s curves for test piles

压浆后试桩 Q - s 曲线趋于平缓, 极限承载力得到明显提高。加载初期, 桩-土作用处于弹性变形阶段, 桩顶沉降随着荷载施加呈线性增长。而随着荷载的增加, 桩-土作用逐步进入到塑性变形阶段, 桩-土

位移调动桩基阻力得到进一步发挥,此时试桩压浆前、后的荷载-位移曲线逐渐表现出差异性。

由图6还可以看出,在长径比相同且持力层相似的情况下,组合式压浆桩SZ1和分布式压浆桩SZ2压浆前的 $Q-s$ 曲线几乎一致。压浆后,虽在加载初期两试桩 $Q-s$ 曲线表现出一致性,但在45MN荷载后,分布式压浆工艺表现出更为优越的改善效果,同级荷载下分布式压浆桩SZ2的桩顶沉降量小于组合式压浆桩SZ1。但限于压浆后试桩加载值足以满足预期荷载需求,试桩未能加载至极限值,导致分布式压浆桩SZ2和组合式压浆桩SZ1承载力提升效果差异性未能进一步得到体现。虽试桩SZ2和SZ3的压浆方式均为分布式压浆,但长径比和桩端持力层不同导致压浆前、后两试桩的 $Q-s$ 曲线均表现出明显差异。试桩SZ2的持力层为粉质黏土层,长径比为44.44,而试桩SZ3的持力层为细砂层,长径比为50。由图6可知,压浆前试桩SZ3的 $Q-s$ 曲线相较于试桩SZ2更趋于平缓,压浆后加载初期其曲线与压浆前差异并不大,但随着荷载增大,差异愈加明显。这是由于试桩SZ3有更大的长径比,从而有更大的桩侧摩阻力发挥,随着荷载增大,荷载沿桩身传递,桩侧摩阻力累计值差距也更加明显,并且桩端持力层的影响使试桩SZ3有更好的桩端阻力发挥,从而使其具有比试桩SZ2更优的承载性能。

在某一特定荷载等级下, $Q-s$ 曲线出现明显拐点,此时认为试桩达到竖向极限承载力,拐点处前一级的荷载值可认为是该桩极限承载力^[25-26]。而由图6可知,各试桩的 $Q-s$ 曲线并没有出现明显的陡降,故取最后一级荷载为单桩竖向极限承载力。因此,压浆前试桩SZ1、SZ2和SZ3极限承载力分别为32.6、35.9MN和60.7MN,压浆后的极限承载力分别为71.1、77.5MN和133.9MN,压浆后较压

浆前极限承载力分别提升了118%、116%和121%。试验结果表明,压浆后各试桩总极限承载力均得到大幅度提高,并在相同荷载作用下能够有效控制桩顶位移,试桩压浆后的承载性能明显优于压浆前。由于试桩未加载至极限值,因此相似工况下分布式压浆桩与组合压浆桩极限承载力的增幅并无明显差别,但从当前曲线可知,加载后期分布式压浆表现出比组合压浆更好地改善效果。而均为分布式压浆的试桩SZ2和SZ3由于长径比和持力层不同,其承载能力以及分布式压浆效果均有明显差异。持力层为细砂层且长径比更大的试桩SZ3压浆前、后极限承载力均显著大于持力层为粉质黏土且长径比较小的试桩SZ2,且极限承载力增幅也略高于试桩SZ2,表明长径比更大的大直径长桩有着更好的桩侧摩阻力发挥,细砂层作为持力层可提供更大的桩端阻力,且分布式压浆在细砂地层中表现出更好的改善效果。

统计极限荷载作用下桩身压缩量如表4所示,并定义极限荷载作用下的桩身压缩量与桩顶位移的比值为桩身压缩比。从表4可以看出,试桩SZ1~SZ3压浆前、后的桩身压缩比分别为50%~58%、59%~72%,压浆后桩身压缩比均大于压浆前,表明压浆后桩身的沉降更多地来源于桩身压缩而非桩端位移,桩端浆液对土体有显著的加固作用。压浆前试桩SZ3极限荷载作用下的桩端位移略大于试桩SZ2,而压浆后却略小于试桩SZ2,表明分布式后压浆在砂土中有更加显著的改善效果。而通过对比SZ2和SZ3的桩身压缩比可知,相较于持力层为粉质黏土的小长径比试桩SZ2,持力层为砂土的大长径比试桩SZ3的压缩比在压浆前和压浆后均明显大于SZ2,表明在砂土环境中桩端位移占比更小,且大长径比桩具有相对更大的桩身压缩量,其在桩顶位移中的占比更大。

表4 极限荷载作用下试桩桩身压缩量
Table 4 Compression of test piles under ultimate loads

试桩 编号	极限承载力/MN		桩顶位移/mm		桩端位移/mm		桩身压缩量/mm		桩身压缩比/%	
	压浆前	压浆后	压浆前	压浆后	压浆前	压浆后	压浆前	压浆后	压浆前	压浆后
SZ1	32.6	71.1	33.9	72.2	14.8	30.0	19.1	42.2	56	59
SZ2	35.9	77.5	44.5	80.5	22.3	32.1	22.3	48.4	50	60
SZ3	60.7	133.9	58.7	109.9	25.0	31.2	33.7	78.7	58	72

4.3 桩身轴力分布

通过布设于桩身内的钢筋计采集桩身应变,根据钢筋与混凝土变形相协调原理以及钢筋与桩身混凝土截面相对轴向刚度即可得到桩身不同断面处的轴力^[27]。第*i*截面的轴力 P_i 可按下式求得:

$$P_i = \frac{\varepsilon_{1i} + \varepsilon_{2i} + \varepsilon_{3i} + \varepsilon_{4i}}{4} (E_s A_{si} + E_c A_{ci}) \quad (1)$$

式中: ε_{1i} 、 ε_{2i} 、 ε_{3i} 、 ε_{4i} 为第*i*截面对称的4个钢筋应力计应变值; E_s 和 E_c 分别为钢筋和混凝土的弹性模量; A_{si} 和 A_{ci} 分别为第*i*截面钢筋与混凝土

截面积。

压浆前、后各级荷载作用下桩身轴力随深度变化曲线如图 7 所示。由于自平衡加载受力机制不同于传统的自上而下静载测试方法,得到的轴力随深度变化曲线明显不同于传统静载测试曲线。传统自上而下静载测试获取到的桩身轴力变化近似倒梯形分布,轴力值自上而下随深度逐渐递减,而自平衡测试轴力值则以荷载箱为界,逐渐向上、下方向递减,呈三角形分布形态。加载初期,轴力变化值相对较小,压浆前、后试桩仅在靠近荷载箱处桩段轴力曲线变化存在斜率,此段桩侧摩阻力率先发挥,而距离荷载箱较远位置的桩侧摩阻力并未开始发挥。随着荷载等级逐渐增大,轴力沿着桩身向上、下桩端传递,促使更多桩长范围的侧摩阻力得到发挥。下荷载箱工作时,桩身下段的轴力也是率先由该段侧摩阻力进行抵消,轴力传递到桩端土层时桩端阻力才会得到发挥。可见,桩侧和桩端阻力是异步发挥的过程。压浆后桩身轴力相较于压浆前斜率

变化更大,水泥浆液对桩侧和桩端土层的改善激发更大桩侧摩阻力和桩端阻力发挥,表明分布式后压浆和组合式后压浆均可以明显提高桩基承载性能。

而由图 7 可知,在相似条件下,分布式后压浆桩 SZ2 轴力值略大于组合式后压浆桩 SZ1,其曲线变化斜率也相较组合压浆桩大,这表明分布式后压浆工艺相对普通后压浆工艺对桩基承载力改善效果更好,水泥浆液包裹桩身更均匀带动桩身侧摩阻力得到更大发挥,浆液利用效率更高。而对比试桩 SZ2 和 SZ3 的轴力分布可知,两试桩均为分布式后压浆桩,但由于试桩 SZ3 的长径比更大,其具有更好的桩侧摩阻力发挥,下荷载箱以上轴力曲线斜率相较于试桩 SZ2 更大。由于持力层的差异也导致桩端阻力发挥不同,极限荷载作用下试桩 SZ2 和试桩 SZ3 压浆前的桩端轴力分别为 6 323、8 658 kN,压浆后桩端轴力值分别为 14 645、21 079 kN,压浆后其桩端轴力分别提高了 132%和 143%。可见,压浆前、后持力层为砂土层的试桩 SZ3 桩端轴力值均大

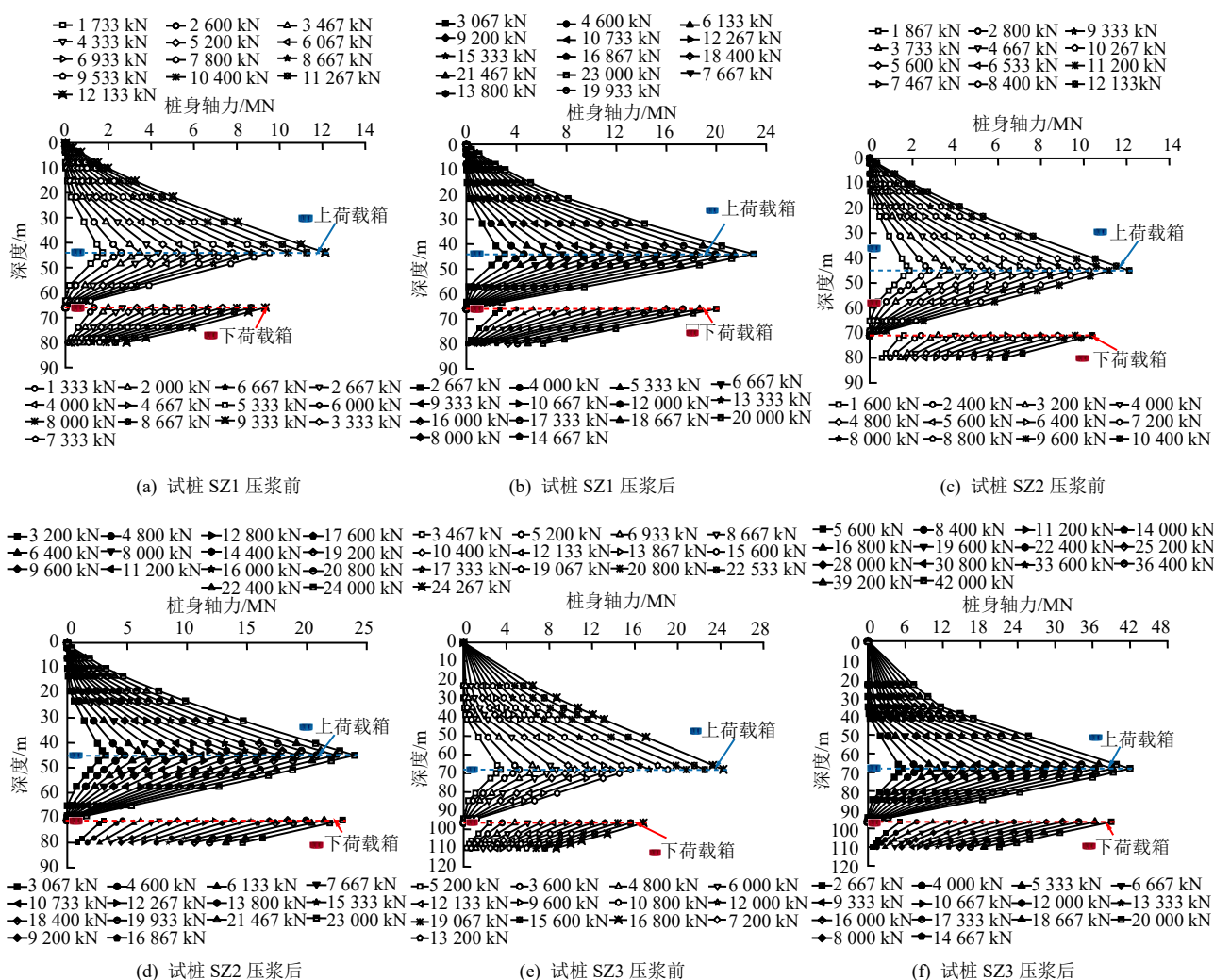


图 7 试桩压浆前、后轴力分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of axial force of test piles before and after grouting

于持力层为粉质黏土的试桩 SZ2, 且压浆后砂土层的桩端轴力增幅更大, 表明砂土层作为持力层可提供更大的桩端阻力并且分布式后压浆对砂土层的改善效果更为显著。

4.4 桩侧平均摩阻力分布

不同荷载作用下各土层的侧摩阻力可根据桩身轴力以及桩身截面尺寸换算得到^[27]。桩侧平均摩阻力 q_s 的计算公式如下:

$$q_s = \frac{\Delta P}{\pi D L_i} \quad (2)$$

式中: ΔP 为桩身相邻测试截面之间的轴力差; D 为桩身直径; L_i 为相邻测试截面桩段长度。试桩 SZ1、SZ2 和 SZ3 压浆前、后在加载过程中桩侧平均摩阻力沿深度分布图如图 8 所示。

如前所述, 自平衡加载测试机制与传统测试方法有所不同。靠近上下荷载箱处桩侧摩阻力率先被

调动, 随着荷载等级加大, 近处桩段桩侧摩阻力得到充分发挥, 而距离荷载箱较远处的土层侧摩阻力往往由于荷载箱处位移陡变而停止加载, 没有发挥到极限侧摩阻力值。依据《建筑基桩自平衡静载试验技术规程》^[22] 的相关条文规定对上荷载箱以上部分桩侧摩阻力进行等价转换。

由图 8 可知, 土层性质不同会使桩侧摩阻力发挥产生较大差异, 同一土层的不同深度也会影响桩侧摩阻力的发挥。压浆前试桩 SZ1、SZ2 和 SZ3 桩侧摩阻力极限值分别为 90、81 kPa 和 92 kPa, 压浆后侧摩阻力极限值分别为 188、168 kPa 和 228 kPa, 试桩压浆后相较于压浆前极限侧阻分别增长了 109%、107% 和 148%。对比不同压浆工艺的试桩 SZ1 和 SZ2 桩侧摩阻力发挥情况可知, 压浆后试桩 SZ2 的极限侧摩阻力值略低于试桩 SZ1, 这是由于传统压浆工艺桩侧单一断面处的压浆量高于分布式后压浆桩, 相同压浆位置处, 桩侧摩阻力改善效

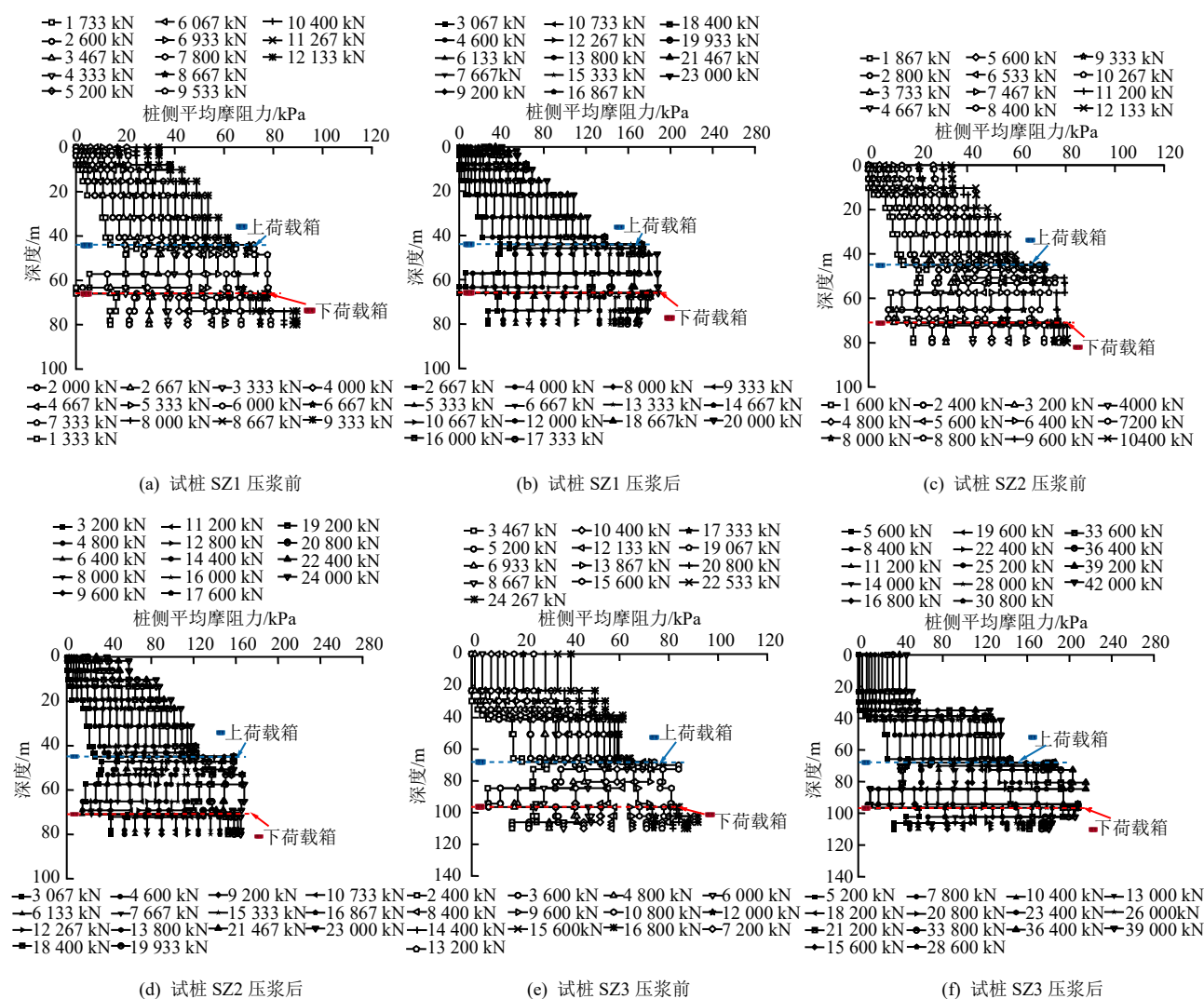


图 8 试桩压浆前、后桩侧摩阻力分布曲线

Fig.8 Distribution curves of pile-side resistance of test piles before and after grouting

果受到压入水泥浆液量的影响,局部桩段改善效果优于分布式后压浆桩。但总体来看,由于分布式后压浆桩压浆断面数量大于普通压浆桩,小间距、密集化压浆孔的布置使得浆液覆盖桩身范围更广泛,桩身整体侧摩阻力改善效果要优于传统压浆桩。对于具有更大长径比试桩 SZ3 而言,桩侧摩阻力受到深层土体围压的影响,压浆前实测桩身下段极限侧摩阻力值较上部土层极限值更大,试桩 SZ3 采用分布式后压浆之后,桩侧摩阻力的发挥受到围压和水泥浆液的共同作用,其增强效果得到进一步的提升。

表 5 给出了试桩 SZ1、SZ2 和 SZ3 的桩侧摩阻力增强系数分布以及各土层的规范推荐增强系数。由表 5 可知,分布式后压浆和组合式后压浆工艺对桩侧摩阻力增强效果均十分显著,这说明后压浆技术应用在大直径桩基中改善桩基承载力具有切实可行性。组合式后压浆桩 SZ1 侧摩阻力实测压浆增强系数为 1.8~2.4,分布式后压浆桩 SZ2 桩侧压浆增强系数为 1.9~2.2,其中舍弃了靠近桩顶处桩段压浆增强系数。可见,粉土层和粉质黏土层压浆后桩侧摩阻力的增强效果小于细砂层,这是因为粉土和粉质黏土层的渗透系数小于细砂土层,水泥浆液在

粉土及黏性土层中压浆加固机制主要为削弱桩周泥皮和降低施工扰动,而在砂土层压浆还可以胶结砂土颗粒从而大幅度提升桩周土层的强度。另外,相较于传统压浆,分布式后压浆工艺使得压入的水泥浆液在桩身覆盖范围更广,尽管局部断面压浆增强效果不如传统压浆桩,但分布式后压浆对桩侧整体土层以及桩-土接触面加固效果更均匀,从而使桩侧摩阻力增强系数分布也更为集中。由表 5 还可以看出,压浆增强系数随深度增加而呈现递增趋势,意味着压浆增强系数也受到桩周土层围压的影响具有深度效应,在超长桩 SZ3 中表现更加明显。值得注意的是,该地土层分布以细砂层为主,《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)^[28]中推荐细砂层压浆增强系数为 1.6~1.7,实测得到的压浆增强系数大于规范建议增强系数值,分析其原因,可能是由于自平衡测试在不同桩段施加荷载,试桩中、下段桩周土层侧摩阻力均得到充分发挥,且本次试验开展试桩均为大直径长桩,建议规范适当提高该地层大直径长桩侧摩阻力压浆增强系数,同时可细化不同压浆方式的增强系数划分范围。

表 5 各试桩桩侧摩阻力增强系数
Table 5 Enhancement factor of pile-side resistance for test piles

SZ1			SZ2			SZ3		
土层	深度/m	增强系数	土层	深度/m	增强系数	土层	深度/m	增强系数
①粉土	1.80	1.3	①粉土	1.80	1.2	②细砂	23.16	1.2
①粉土	3.73	1.8	①粉土	6.19	1.9	③细砂	29.66	1.0
①粉土	7.93	1.8	④粉质黏土	10.29	1.9	④细砂	35.00	1.0
④粉质黏土	10.13	1.8	② ₂ 粉土	13.29	2.1	④细砂	38.66	2.5
①粉土	15.33	1.7	②细砂	19.29	2.2	④ ₃ 粉质黏土	41.16	2.1
② ₄ 粉质黏土	21.73	1.8	②细砂	23.29	2.2	⑤细砂	50.66	2.5
③细砂	31.73	2.2	③细砂	31.19	2.2	⑥细砂	65.80	2.4
④细砂	40.73	2.3	④细砂	40.29	2.2	⑥细砂	68.00	2.4
⑤细砂	44.00	2.4	⑤细砂	43.20	2.2	⑥细砂	70.06	2.5
⑤细砂	45.80	2.4	⑤细砂	45.00	2.2	⑥ ₃ 粉质黏土	72.66	2.2
⑤细砂	48.43	2.4	⑤细砂	47.19	2.2	⑦ ₁ 细砂	80.66	2.7
⑤细砂	57.13	2.4	⑤细砂	50.79	2.2	⑦ ₁ 细砂	84.66	2.8
⑥细砂	63.33	2.4	⑥ ₂ 粉土	53.09	2.0	⑧细砂	94.30	2.8
⑥细砂	66.00	2.4	⑥ ₃ 粉质黏土	57.49	2.1	⑧细砂	96.50	2.6
⑥细砂	67.80	2.3	⑥细砂	65.19	2.2	⑧细砂	102.29	2.4
⑥细砂	73.93	2.4	⑥细砂	69.20	2.1	⑧ ₂ 粉质黏土	106.09	2.0
⑦粉质黏土	78.20	1.9	⑥细砂	71.00	2.0	⑨细砂	107.80	2.1
⑦ ₃ 粉土	80.00	1.9	⑥细砂	72.19	2.1	⑨细砂	110.00	2.1
			⑦ ₁ 细砂	78.20	2.0			
			⑦粉质黏土	80.00	2.0			

4.5 桩端阻力-桩端位移曲线

桩端阻力可由下荷载箱荷载值减去下段桩侧摩阻力值获取,下荷载板位移值减去下段桩桩身压缩量得到桩端位移值,绘制各试桩桩端阻力位移曲线如图 9 所示。

由图 9 可知,试桩 SZ2 和 SZ3 压浆前、后桩端阻力-位移关系曲线变化趋势大致相似,压浆后桩端阻力得到一定提高,而试桩 SZ1 压浆后曲线形态相较于压浆前曲线在桩端位移 3~12 mm 处出现局部异变现象。究其原因,一方面可能是由于试桩

SZ1 桩端持力层为粉土, 其浆液渗透效果不如砂土层; 另一方面, 由于压入的水泥浆液扩散机制相对复杂多变, 且受施工过程人为影响较大, 导致最后成桩质量具有不确定性。如表 6 所示, 总体来看后压浆技术对不同桩端持力层试桩端阻力均有提高, 压浆后试桩 SZ1、SZ2 和 SZ3 极限桩端阻力分别提高了 110%、132%和 143%, 表明桩端沉渣、虚土在压浆后得到有效固结。另外, 试桩压浆前桩端阻力占比为 9%~18%, 表现出长桩作为摩擦桩的应有的承载特性, 压浆后桩端阻力虽有提高但未能改变摩擦桩的承载特性, 桩端阻力占比为 9%~19%。值得注意的是, 分布式后压浆和普通后压浆工艺在压浆实施中的主要区别在于桩侧压浆方式的不同, 而试桩 SZ2 桩端阻力和桩端阻力占比均高于组合式压浆试桩 SZ1 的, 究其原因, 桩端阻力的发挥不仅受到持力层强度的影响, 还与桩周土的性质和桩-土相互作用机制有关。从地基中应力传递规律来解释此现象, 土颗粒受到黏聚力或内摩擦角作用促使颗粒间相互作用, 桩受荷与桩侧土产生相对位移时会带动桩侧土颗粒同向运动, 进而桩-土接触界面的土颗粒带动更多的桩周土参与受力变形, 这种运动趋势是沿着桩周径向传递并逐渐减弱。需要说明的是,

桩周土对持力层处施加的附加应力在不同地基土层处表现不一样的大小, 本质是受到土颗粒的抗剪强度强弱的影响, 抗剪强度好的土层会带动更多周围土颗粒参与受力, 从而为桩端持力层带来更大的附加应力, 使桩端土受到更强的约束作用而更加密实。试桩 SZ1、SZ2 和 SZ3 压浆后桩端阻力增强系数分别为 2.2、2.3 和 2.5, 砂土持力层下的增强系数显著高于黏性土, 这是不同土层浆液扩散机制差异导致的, 与前文模型桩开挖试验结果吻合, 浆液对砂土的渗透胶结作用进一步提高了土体强度。

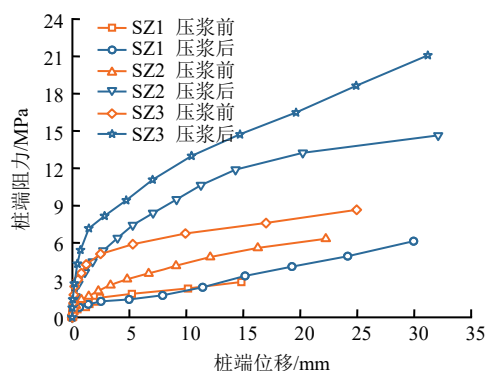


图9 各试桩压浆前、后桩端阻力-桩端位移曲线
Fig.9 Pile end resistance-pile end displacement curves of test piles before and after grouting

表6 桩基阻力分配占比情况
Table 6 Percentage distribution of pile resistance

试桩 编号	桩顶荷载/ MN		桩侧摩阻力/ MN		桩端阻力/ MN		桩端阻力占比/ %	
	压浆前	压浆后	压浆前	压浆后	压浆前	压浆后	压浆前	压浆后
SZ1	32.6	71.1	29.7	65.0	2.9	6.1	9	9
SZ2	35.9	77.5	29.6	62.9	6.3	14.6	18	19
SZ3	60.7	133.9	52.0	112.8	8.7	21.1	14	16

试桩 SZ1 和 SZ2 桩端持力层为粉土和粉质黏土层, 其桩端压浆增强系数要高于《公路桥涵地基与基础设计规范》^[28]中的增强系数推荐值 1.8~2.1、1.6~1.8, 增强系数深度效应在超长桩 SZ3 中得到进一步体现。

5 结 论

本文通过模型桩开挖试验研究了分布式后压浆在砂土和黏性土中的扩散机制和加固效果, 并对比分析了分布式后压浆与传统组合式后压浆的差异。基于安罗高速原阳至郑州段项目 3 根大直径钻孔灌注桩自平衡静载试验结果, 研究了分布式后压浆对桩基承载性能影响以及与传统组合式后压浆工艺的差异, 同时深入探讨了长径比和桩端持力层对桩

基承载力和分布式后压浆效果的影响。主要结论如下:

(1) 模型桩开挖试验结果表明, 分布式后压浆工艺可实现小间距、高密次、多断面压浆, 浆液覆盖桩身范围更广、浆液利用率更高, 相较于普通后压浆更能改善桩侧泥皮以及土体扰动问题。砂土层浆液扩散机制以压密和渗透为主, 与黏土层的压密、填充和劈裂不同, 砂土层中浆液可以胶结砂土颗粒从而使桩周土层的强度大幅提高。

(2) 桩顶荷载-位移曲线表明, 压浆后试桩承载性能明显优于压浆前, 3 根试桩极限承载力分别提高了 118%、116%和 121%, 加载后期分布式后压浆表现出优于组合式后压浆的改善效果。大长径比桩压浆前、后均表现出更大的承载能力, 同时其桩

身压缩量以及桩身压缩比也更大,并且其分布式后压浆效果要优于小长径比桩。持力层为砂土的试桩压浆前、后均具有更大的极限承载力,且分布式压浆后细砂层中桩端位移增幅小于粉土层和粉质黏土层,表现出更好的桩端土改善效果。

(3) 桩身轴力分布表明,分布式后压浆和组合式后压浆均能有效提高桩侧摩阻力和桩端阻力的发挥,且分布式后压浆桩浆液利用效率更高,其轴力值略大于组合式后压浆桩。大长径比桩具有更好的桩侧摩阻力发挥,其桩身轴力曲线的斜率相较于小长径比桩更大。持力层为细砂层的试桩极限荷载作用下的桩端轴力在压浆前、后均明显大于持力层为粉质黏土的试桩,且分布式后压浆桩 SZ2 和 SZ3 的桩端轴力分别提高了 132% 和 143%,表明细砂层中分布式后压浆的改善效果更优。

(4) 桩侧摩阻力分布表明,分布式后压浆和组合式后压浆对桩侧土体均有显著加固作用,3 根试桩极限桩侧摩阻力分别提高了 109%、107% 和 148%。相似工况下,分布式后压浆桩和组合式后压浆桩的桩侧摩阻力增强系数分别为 1.9~2.2 和 1.8~2.4,两种压浆工艺在极限桩侧摩阻力上并无明显差异,但分布式后压浆工艺小间距、密集化的特点使得桩侧摩阻力增强系数分布更加集中,且增强系数具有深度效应。

(5) 桩端阻力-桩端位移曲线表明,后压浆技术对不同桩端持力层试桩端阻力均有明显提高,试桩 SZ1、SZ2 和 SZ3 压浆后桩端阻力增强系数分别为 2.2、2.3 和 2.5。组合式后压浆和分布式后压浆对桩端阻力的增强效果差异较小,而持力层为细砂层的试桩桩端浆液渗透及胶结作用使其桩端阻力增强效果更为显著,同时增强系数的深度效应应在大长径比的超长桩中进一步体现。

参考文献

- [1] 万志辉,戴国亮,高鲁超,等.大直径后压浆灌注桩承载力和沉降的实用计算方法研究[J].岩土力学,2020,41(8):2746-2755.
WAN Zhi-hui, DAI Guo-liang, GAO Lu-chao, et al. A practical method of calculation of bearing capacity and settlement of large-diameter post-grouting piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(8): 2746-2755.
- [2] ZHANG Z, GONG W M, DAI G L, et al. Enhancement of load bearing of post-grouted drilled shafts based on in situ tests[J]. **Arabian Journal of Geosciences**, 2021, 14(1): 32.
- [3] ZHANG J Q, ZHAO C, ZHAO C F, et al. Theoretical and experimental study on elastic-plastic-sliding load transfer model for pile tip and pile side postgrouting piles[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2025, 25(4): 04025042.
- [4] GOUVENOT D, GABAIX J C. A new foundation technique using piles sealed by cement grout under high pressure[C]//Offshore Technology Conference. Texas, USA: [s. n.], 1975.
- [5] SZE J W C, CHAN K M. Application of shaft grouting technique in deep foundations-Hong Kong experience[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing. New Orleans, Louisiana: American Society of Civil Engineers, 2012.
- [6] LAI V Q, KEAWSAWASVONG S, SHIAU J. Analysis of shaft-grouted piles using load-transfer method[J]. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, 2022, 8(4): 1-10.
- [7] THIYYAKKANDI S, MCVAY M, NEERAJ C R. Full-scale axial load response of jetted and grouted precast piles in cohesionless soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2022, 148(6): 04022030.
- [8] THIYYAKKANDI S. Post-grouted deep foundations: individual and group responses[J]. **Indian Geotechnical Journal**, 2024, 54(1): 301-314.
- [9] 万志辉,戴国亮,周峰,等.黏性土中分布式桩侧后压浆桩水平承载机制试验研究[J].土木工程学报,2023,56(2):80-91.
WAN Zhi-hui, DAI Guo-liang, ZHOU Feng, et al. Experimental study on lateral bearing mechanism of distributed post-grouted pile in cohesive soil[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2023, 56(2): 80-91.
- [10] ZHAI D Z, ZHOU F, ZHOU J F, et al. Experimental study and numerical analysis on bearing characteristics of large diameter ultra long bored piles with post grouting on the tip and side[J]. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2018, 189(2): 022024.
- [11] 饶少华,万志辉,罗志聪,等.强风化岩层大直径后压浆嵌岩桩承载性状试验研究[J].建筑结构学报,2022,43(增刊1):287-295.
RAO Shao-hua, WAN Zhi-hui, LUO Zhi-cong, et al. Experimental study on bearing behavior of large-diameter post-grouted rock-socketed pile in strongly weathered rock formations[J]. **Journal of Building Structures**,

- 2022, 43(Suppl.1): 287-295.
- [12] CAO S, WANG Q K, MA J L, et al. Experimental investigation of vertical bearing characteristics of composite post-grouting piles in sandy soil[J]. **International Journal of Civil Engineering**, 2024, 22(2): 303-315.
- [13] SAFAQAH O, BITTNER R, ZHANG X G. Post-grouting of drilled shaft tips on the Sutong Bridge: a case study[C]//Proceedings of Geo-Denver 2007 Congress: Contemporary Issues in Deep Foundation. Denver: [s. n.], 2007.
- [14] 王卫东, 王萌, 吴江斌. 静钻根植桩扩底桩端极限承载性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(11): 3091-3098. WANG Wei-dong, WANG Meng, WU Jiang-bin. Field study on the ultimate bearing capacity of enlarged grout base of pre-bored grouted planted pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(11): 3091-3098.
- [15] NGUYEN M H, FELLENIUS B H. Bidirectional-cell tests on two 70 m long bored piles in Vietnam[C]//GeoInstitute Geo Congress. Reston: Geotechnical Special Publication, 2014: 482-496.
- [16] 朱建民, 殷开成, 龚维明, 等. 中美欧自平衡静载试验标准若干问题探讨[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3491-3499. ZHU Jian-min, YIN Kai-cheng, GONG Wei-ming, et al. Discussion about several issues of bi-directional load testing in Chinese, American and European standards[J], **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(10): 3491-3499.
- [17] 蔡雨, 徐林荣, 周德泉, 等. 自平衡与传统静载试桩法模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3011-3018. CAI Yu, XU Lin-rong, ZHOU De-quan, et al. Model test research on method of self-balance and traditional static load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(8): 3011-3018.
- [18] 周霄, 王铖铖, 刘新华, 等. 深厚卵石层后压浆灌注桩承载性能研究[J]. 桥梁建设, 2023, 53(增刊 1): 31-37. ZHOU Xiao, WANG Cheng-cheng, LIU Xin-hua, et al. Research on load bearing performance of post-grouting bored piles in deep and thick pebble layer[J]. **Bridge Construction**, 2023, 53(Suppl.1): 31-37.
- [19] 段畅, 万志辉, 戴国亮, 等. 珊瑚礁灰岩层基本性质及后压浆嵌岩桩竖向承载特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(3): 721-736. DUAN Chang, WAN Zhi-hui, DAI Guo-liang, et al. Experimental study on the fundamental properties of coral-reef limestone and the vertical bearing behavior of post-grouted rock-socketed shafts[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2025, 44(3): 721-736.
- [20] GONG W M, ZHANG Z T, LIN Y F, et al. Full-scale field test study of bearing characteristics of post-grouting pile for offshore wind turbines[J]. **Ocean Engineering**, 2023, 268: 113451.
- [21] LIU S W, ZHANG Q Q, LI H T, et al. An analysis method for the response of combined side-and-tip grouting pile[J]. **Acta Geotechnica**, 2023, 18: 3715-3729.
- [22] 东南大学. JGJ/T 403—2017 建筑基桩自平衡静载试验技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017. Southeast University. JGJ/T 403 — 2017 Technical specification for static loading test of self-balanced method of building foundation piles[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [23] 万志辉. 大直径后压浆桩承载力提高机理及基于沉降控制的设计方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2019. WAN Zhi-hui. Research on enhancement mechanism of bearing capacity of large-diameter post-grouted piles and design method based on settlement criterion[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [24] WAN Z H, DAI G L, GONG W M. Field study on post-grouting effects of cast-in-place bored piles in extra-thick fine sand layer[J]. **Acta Geotechnica**, 2019, 14(5): 1357-1377.
- [25] PRAKASH S, SHARMA H D. Pile foundations in engineering practice[M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 1990.
- [26] ZHANG Q Q, LI S C, LI L P. Field study on the behavior of destructive and non-destructive piles under compression[J]. **Marine Georesources & Geotechnology**, 2014, 32(1): 18-37.
- [27] 高鲁超, 戴国亮, 龚维明, 等. 光纤光栅传感技术在大直径灌注桩承载力自平衡法测试中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 688-695. GAO Lu-chao, DAI Guo-liang, GONG Wei-ming, et al. Application of FBG sensors in self-balanced test method for bearing capacity of large-diameter cast-in-place piles[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2019, 49(4): 688-695.
- [28] 中交公路规划设计院有限公司. JTG 3363—2019 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019. CCCC Highway Consultants Co., Ltd. JTG 3363—2019 Specifications for design of foundation of highway bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2019.