

DOI: 10.11779/CJGE20240035

低净空下旋喷静压钢管复合桩竖向抗压承载特性的 试验研究

王曙光^{1,2,3}, 尹浩¹, 段启伟^{1,3}, 王浩宇^{1,3}, 李钦锐^{1,3}, 李湛^{1,3}

(1. 中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013; 2. 住房和城乡建设部防灾研究中心, 北京 100013;
3. 北京市既有建筑改造工程技术研究中心, 北京 100013)

摘要: 旋喷静压钢管复合桩技术是适用于既有建筑低净空下作业的新型专利技术。通过室内足尺试验对旋喷静压钢管复合桩的竖向抗压承载特性进行研究, 并与锚杆静压桩、旋喷桩和钻孔灌注桩的竖向抗压承载特性进行对比。试验结果表明: 旋喷静压钢管复合桩主要表现为摩擦桩的特性; 当桩径相当时, 旋喷静压钢管复合桩的单桩承载力显著高于灌注桩和旋喷桩; 锚杆静压桩由于直径较小, 单桩承载力也最低; 在极限荷载作用下, 旋喷桩表现为桩顶材料强度破坏, 桩的侧阻力与端阻力未充分发挥; 旋喷静压钢管复合桩由于芯桩的植入, 弥补了旋喷桩桩身强度的不足, 桩的侧阻力得以充分发挥, 其承载力高于旋喷桩; 与灌注桩相比, 旋喷静压钢管复合桩桩身界面不规则、旋喷工艺明显改善桩土的界面特性, 因而旋喷静压钢管复合桩承载力高于同直径的灌注桩。根据试验结果从工程实用的角度, 通过引入侧阻力增大系数和端阻力折减系数, 对灌注桩的单桩极限承载力公式进行修正, 得到旋喷静压钢管复合桩单桩极限承载力的表达式, 并给出相关参数的取值建议。

关键词: 旋喷静压钢管复合桩; 抗压承载特性; 室内足尺试验; 锚杆静压桩; 旋喷桩; 灌注桩

中图分类号: TU43; TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2025)06-1318-09

作者简介: 王曙光(1972—), 男, 工学博士, 研究员, 主要从事上部结构地基基础共同作用、基坑支护、地基基础等方面的研究工作。E-mail: wshgcabr@aliyun.com。

Experimental study on vertical bearing mechanism of jet grouting jacked steel composite piles in low-clearance environments

WANG Shuguang^{1,2,3}, YIN Hao¹, DUAN Qiwei^{1,3}, WANG Haoyu^{1,3}, LI Qinrui^{1,3}, LI Zhan^{1,3}

(1. Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. Disaster Prevention Research Center, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Beijing 100013, China; 3. Beijing Existing Building Renovation Engineering Technology Research Center, Beijing 100013, China)

Abstract: The jet grouting jacked composite pile is a kind of new patented technology which is suitable to the construction in the existing buildings with low clearance. The vertical bearing mechanism of the jet grouting jacked composite piles is studied through the indoor full size tests and compared with that of the jacked piles, jet grouting piles and cast-in-place piles. The tests show that the jet grouting jacked composite pile is mainly characterized by a kind of friction pile. The vertical bearing capacity of the jet grouting jacked composite pile is higher than that of the jet grouting pile and the cast-in-place pile with the same diameter. The vertical bearing capacity of the jacked pile is the lowest due to the smaller diameter. The jet grouting pile fails due to the fracture of the pile shaft materials on the top of the pile under the ultimate load, and the side resistance and tip resistance do not fully play their roles; since the pile body strength of the jet grouting jacked composite pile is improved by jacking the core pile in the jet grouting pile, the side resistance can fully play its roles and improve the bearing capacity. Compared to that of the cast-in-place pile, the interface between jet grouting jacked composite pile and soil is irregular and the shear behavior of the interface is improved by grouting, and the vertical bearing capacity of the jet grouting composite pile is higher than that of the cast-in-place pile. Based on the test results and from an engineering practical point of view, a modified expression for the vertical ultimate bearing capacity of single jet grouting jacked composite pile is obtained by introducing an amplification coefficient for the side resistance and a reduction coefficient for the tip resistance to that of single cast-in-place

基金项目: 住房和城乡建设部科学计划项目 (2020-k-151)

收稿日期: 2024-01-11

pile. The values of the relevant parameters are recommended.

Key words: jet grouting jacked steel composite pile; bearing mechanism; indoor full size test; jacked pile; jet grouting pile; cast-in-place pile

0 引 言

在既有建筑加固改造或事故工程处理工程中经常会用到桩基托换^[1]。在既有建筑内部低净空条件下的桩基施工可采用锚杆静压桩、微型桩、灌注桩等工艺。锚杆静压桩是通过在基础上埋设锚杆固定压桩架,以既有建筑自重荷载作为压桩反力,用千斤顶将桩段从基础中预留或开凿的压桩孔内逐段压入土中,再将桩与基础连接在一起,从而达到提高基础承载力和控制沉降的目的。锚杆静压桩施工设备简单,适合既有建筑低净空下作业,因此经常被采用,但是锚杆静压桩的桩长、桩径受限,单桩承载力通常不高。微型桩通常采用地质钻机或改装的钻机施工,桩径、桩长和单桩承载力受限。钻孔灌注桩尽管可以施工桩径、桩长较大的桩,但常规的施工设备在低净空下无法施工,需要对常规设备进行改装,且采用泥浆护壁工艺施工时,造成泥浆污染,因此也较少采用。由此可见,采用目前常规的设备和工艺无法解决在既有建筑低净空下施工大桩径、大桩长、高承载力基础桩的难题。笔者根据多年的工程实践,将锚杆静压桩技术和水泥土复合桩技术相结合,提出低净空下旋喷静压钢管复合桩技术,并研发了旋喷静压一体化成套设备^[2],该技术能够有效地解决既有建筑加固改造中桩基设计、施工的难点问题。

水泥土复合桩由水泥土桩和芯桩复合而成,施工过程是先施工水泥土桩,再将芯桩在水泥土初凝前植入水泥土桩中。水泥土复合桩综合了水泥土桩和刚性桩的优点,由刚性桩承担竖向荷载,然后把荷载传递给水泥土,再由水泥土通过较大的摩阻面传递给桩周土,从而达到提高单桩承载力。目前已有很多学者对水泥土复合桩进行了研究^[3-5],主要针对搅拌桩形成水泥土桩、预应力管桩为芯桩的水泥土复合桩承载性能进行了试验研究,也有学者对搅拌桩为水泥土桩的水泥土复合桩的芯桩与水泥土界面特性进行了试验研究^[6-7],

仅有少数学者对以旋喷桩为水泥土桩的水泥土复合桩进行了研究^[8-9],该研究是针对旋喷桩为水泥土桩、植入预应力管桩形成的旋喷复合桩的承载特性进行了研究。对于旋喷静压钢管复合桩的研究很少见到。

旋喷静压钢管复合桩是采用低净空下旋喷静压一体化成套设备施工旋喷桩,再将钢管桩在水泥土初凝前压入或旋入旋喷桩中形成的复合桩。本文拟通过室内足尺试验对旋喷静压钢管复合桩的竖向抗压承载特性进行研究,与既有建筑加固改造中常用的锚杆静压桩的承载能力进行对比;与旋喷桩进行对比,探讨植入芯桩后二者荷载传递和破坏模式的变化;并和钻孔灌注桩的竖向抗压承载特性进行对比,对其竖向承载力计算公式进行修正得到适合旋喷静压钢管复合桩的承载力计算公式。通过以上研究为旋喷静压钢管复合桩的设计提供技术支撑。

1 室内足尺试验

本次室内足尺试验在中国建筑科学研究院地基基础研究所实验室的试验坑内进行。本次试验将试验坑内人工换填3 m的粉质黏土,其下为天然老土,仍为粉质黏土,土质均匀,试验前对地基土取样并进行土工试验,土的物理、力学性质指标见表1,其中黏聚力 c 和内摩擦角 φ 为直剪快剪指标。

本次试验拟对4种桩型进行对比,分别是静压钢管桩、旋喷桩、旋喷静压钢管复合桩、灌注桩,试验桩的参数见表2,详图见图1,其中静压钢管桩、旋喷桩和旋喷静压钢管复合桩都是采用自主研发的低净空下旋喷静压复合桩的设备施工,该专利设备既可单独施工静压桩和旋喷桩,也可施工旋喷静压钢管复合桩,旋喷桩采用单管旋喷工艺,喷浆压力20~30 MPa,钻进速度15~20 cm/min,旋转速度15~20 r/min,预估旋喷直径500 mm,静压桩及旋喷静压钢管复合桩的芯桩采用直径219 mm的Q235B钢管。本次试验的灌

表 1 土性指标
Table 1 Indices of soil properties

取土深度/ m	含水率 w / %	密度 ρ / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	孔隙比 e	压缩模量 E_{s1-2} /MPa	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)
0~0.5	16.25	1.96	10.1	0.12	0.52	8.12	25.1	19.64
0.5~1.0	16.98	1.97	10.4	0.09	0.57	7.94	24.7	18.46
1.0~1.5	17.21	1.92	9.7	0.16	0.63	8.45	23.1	17.94
1.5~2.0	16.47	1.88	10.0	0.02	0.58	7.64	20.4	19.26
2.0~2.5	15.67	1.91	10.1	0.10	0.57	7.12	21.6	20.24
2.5~3.0	16.24	1.89	10.1	0.17	0.60	7.46	22.8	17.94
3.0~5.0	17.21	1.94	9.6	0.16	0.58	7.35	24.6	16.94

表 2 试验桩参数
Table 2 Parameters of test piles

桩型及桩号	桩长/m	桩径/mm	芯桩直径/mm	壁厚/mm
静压桩 (编号 JY-1/JY-2/JY-3)	5	219		3
高压旋喷桩 (编号 XP-1/XP-2/XP-3)	5	500		—
旋喷静压钢管复合桩 (编号 FH-1/FH-2/FH-3)	5	500	219	3
灌注桩 (编号 GZ-1/GZ-2/GZ-3)	5	500	—	—

注桩采用机械洛阳铲成孔、灌注混凝土成桩的工艺，桩身混凝土强度等级为 C30。

本次试验的测试内容主要是荷载、位移及桩身应力。对于静压桩、旋喷静压钢管复合桩以及灌注桩对桩身应力进行测试，静压桩和旋喷静压钢管复合桩采用应变片对钢管的内力进行测试，本次试验的灌注桩未设置钢筋笼，试验时浇筑完混凝土后在桩中心的部位植入直径 60 mm 的钢管，在钢管上布置应变片，以测试桩身内力，试验桩的应变片布置如图 1 所示。应变片间距 1 m，最上部和最下部的应变片分别距离桩顶和桩底 0.2 m，为保证应变片的存活率，应变片尽量多布置，本次试验在每个截面上对称布置 4 个应变片，对于静压桩和旋喷静压钢管复合桩，为便于应变片的保护，将应变片粘贴在芯桩的内壁，但是对于灌注桩，由于采用直径 60 mm 的钢管，只能将应变片粘贴在钢管的外壁。

加载装置如图 2 所示，采用实验室内的反力梁提供反力，采用千斤顶加载，试验桩桩顶与千斤顶之间设置了垫板，垫板为圆形钢板，直径与桩径相同，厚度为 20 mm，采用力传感器量测荷载，在桩顶刚性载荷板上对称布置 4 个位移传感器测量桩顶位移，在试验过程中采用 TSD-540 设备对桩身应变进行自动采集。本次试验加载按照《建筑地基基础设计规范：GB50007—2011》^[10]附录 Q 的相关规定，采用慢速维持荷载法进行试验。

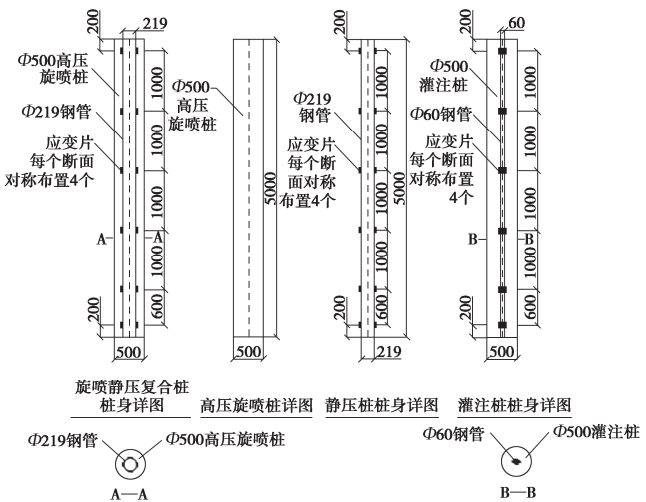


图 1 试验桩详图

Fig. 1 Schematic diagram of model piles

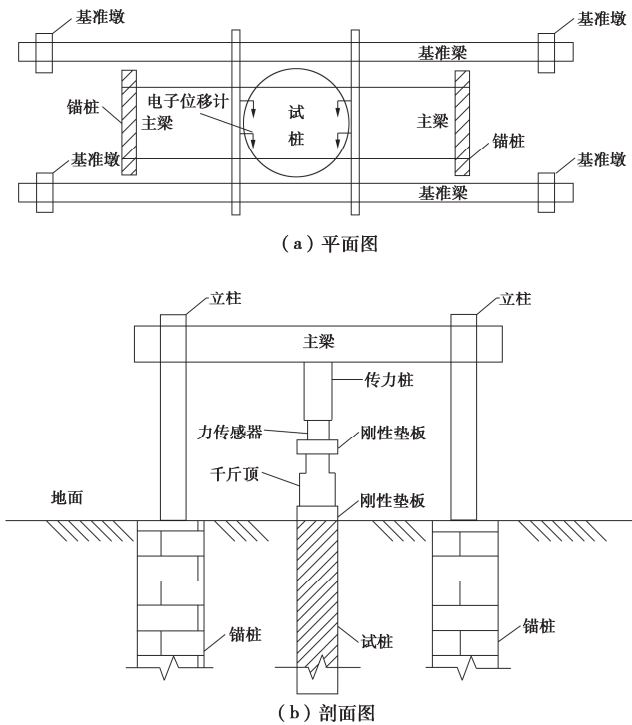


图 2 加载装置

Fig. 2 Loading devices

2 试验结果分析

2.1 单桩载荷试验

本次现场试验，在试验桩施工完成 43 d 后，对试验桩进行了单桩竖向抗压静载试验，试验桩的荷载-位移曲线如图 3 所示，试验桩的单桩极限承载力见表 3。

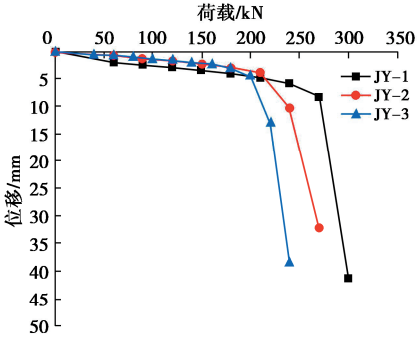
从图 3 (a) 可以看出，静压桩的荷载-位移曲线为陡降型，在极限荷载作用下，桩体未发生破坏，桩的侧阻、端阻充分发挥。

从图 3 (b) 可以看出高压旋喷桩的荷载-位移曲线均为陡降型，在试验过程中高压旋喷桩在达到极限承载力时桩顶部位不同程度地发生桩身材料破坏，破坏状况如图 4 所示，由此可见旋喷桩的破坏机理为桩身材料破坏，而土体对桩的承载能力未充分发挥。

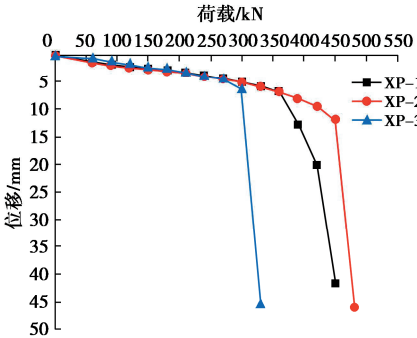
从图 3 (c) 可以看出，旋喷静压钢管复合桩的荷载-位移曲线皆为缓变型，与旋喷桩相比，旋喷静压钢管复合桩承载性能有了明显的改善，由于芯桩的植入补足了桩身强度的不足，达到极限承载力时桩身材料

表 3 试验桩极限承载力
Table 3 Bearing capacities of model piles

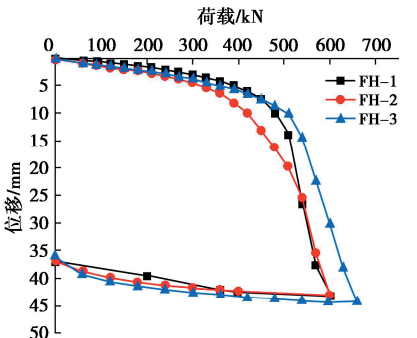
静压桩		旋喷桩		旋喷静压钢管复合桩		灌注桩	
编号	极限承载力/kN	编号	极限承载力/kN	编号	极限承载力/kN	编号	极限承载力/kN
JY-1	270	XP-1	420	FH-1	570	GZ-1	330
JY-2	240	XP-2	450	FH-2	570	GZ-2	420
JY-3	220	XP-3	300	FH-3	630	GZ-3	390
平均值	243.3	平均值	390	平均值	590	平均值	380



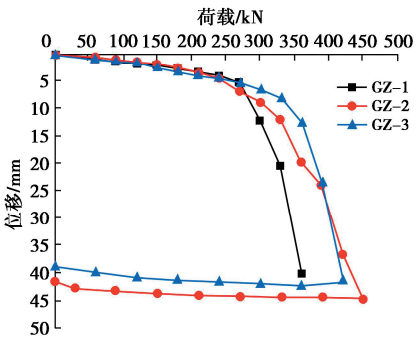
(a) 静压桩



(b) 高压旋喷桩



(c) 旋喷静压钢管复合桩



(d) 灌注桩

图 3 试验桩的荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves of model piles



(a) XP-1



(b) XP-2



(c) XP-3

图 4 旋喷桩桩顶破坏照片

Fig. 4 Failure of jet grouting piles

未发生破坏,也未发生芯桩与水泥土界面之间的破坏,因此土体对桩的承载能力得到充分发挥。

从 3 (d) 可以看出,灌注桩的荷载-位移曲线为缓变型,桩身材料未发生破坏。

由以上试验结果可知,本次试验 4 种桩型中,静压桩桩径最小,其平均单桩极限承载力也最低;灌注桩、高压旋喷桩、旋喷静压钢管复合桩桩径相当,灌注桩和高压旋喷桩的平均单桩极限承载力相当,旋喷静压钢管复合桩平均单桩极限承载力显著高于灌注桩和高压旋喷桩。各种桩型的承载力有明显差别,这与各种桩型的承载机理有很大的关系,高压旋喷桩在达到极限承载力时发生桩顶材料破坏,其他桩达到极限

承载力时桩身材料均未发生破坏,本次试验高压旋喷桩与旋喷静压钢管复合桩的桩径相当,但是高压旋喷桩发生材料强度破坏,而旋喷静压钢管复合桩由于芯桩的植入补足了高压旋喷桩桩身强度不足的短板,从而桩身未发生强度破坏,旋喷静压钢管复合桩的承载力明显高于高压旋喷桩,说明高压旋喷桩发生材料强度破坏时其侧阻、端阻尚未全部发挥;而旋喷静压钢管复合桩承载力高于灌注桩,充分说明旋喷工艺明显改善了桩土界面特性,这与文献[11]的规律基本一致。

2.2 试验误差分析

本次试验尽管对应变片做了保护,但试验过程中仍有一定数量的应变片失效,静压桩和旋喷静压钢管复合桩将应变片粘贴在钢管内壁,应变片的保护相对较好,灌注桩的应变片粘贴在钢管外侧,应变片的保护效果相对差一些,导致试验桩 GZ-1、GZ-3 得不到连续的应变数据,后续的桩身轴力、侧阻力、端阻力分析也只是针对 JY-1、JY-2、JY-3、FH-1、FH-2、FH-3、GZ-2 这 7 根桩展开。根据这 7 根试验桩的桩身应力测试结果进行了误差分析,本次试验顶部的应变片距离桩顶 200 mm,假定顶部应变片的测试结果反算的桩身轴力为桩顶轴力,实测的试验荷载与计算桩顶轴力之差即为试验误差(实测试验荷载由力传感器测得),对试验桩在各级荷载作用下的试验误差与实测荷载的比值进行分析,得到各级荷载作用下的平均误差率和最大误差率如表 4 所示,本次试验的平均误差率范围约为 3.33%~9.31%,试验误差率不大,说明试验所测得的应变值是真实可靠的。

表 4 试验误差率分析

Table 4 Error ratio analysis of model piles

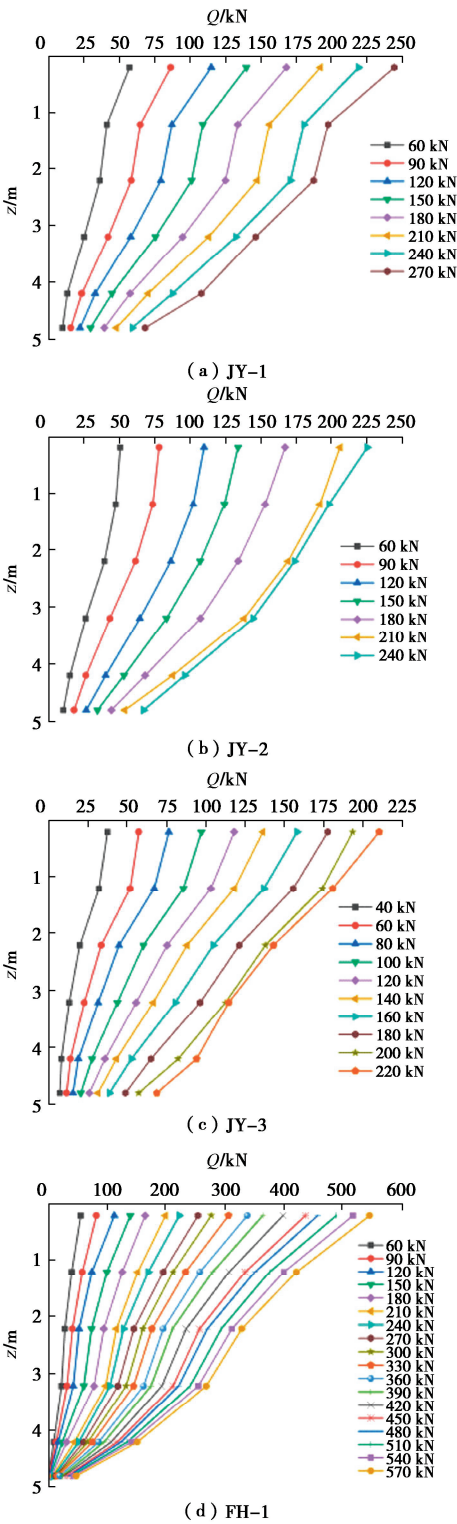
桩号	平均误差率/%	最大误差率/%
JY-1	7.21	11.04
JY-2	9.31	13.54
JY-3	3.33	6.53
FH-1	5.91	8.42
FH-2	6.26	10.81
FH-3	6.39	10.00
GZ-2	5.44	8.26

2.3 轴力分析

试验桩的桩身轴力为实测应变值与桩身材料的弹性模量以及截面面积的乘积。本次试验静压桩和灌注桩桩身材料都是单一材料(灌注桩中的钢管仅为应变采集用,不考虑其对桩身强度的贡献),静压桩的桩身面积取钢管的截面面积,钢管的弹性模量取值为 206 GPa^[12];灌注桩的模量(C30 混凝土)模量取值为 30 GPa^[13]。对于旋喷静压钢管复合桩,本次试验由于未发生芯桩与水泥土桩之间的界面破坏,因此假定芯桩与水泥土的桩身应变相同,桩身轴力为芯桩和水泥土桩轴力之和,芯桩的轴力计算与静压桩相同,水泥土桩轴力计算时,水泥土的弹性模量根据旋喷桩取芯做

室内试验得到,本次试验结束后沿 FH-2 桩身 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 m 处分别取芯,实测水泥土的无侧限抗压强度平均值为 2.0 MPa,弹性模量平均值为 0.31 GPa,水泥土桩的轴力约占旋喷静压钢管复合桩桩身轴力的 12.5%,由此可见旋喷静压钢管复合桩所承受的竖向荷载主要由芯桩承担。

图 5 为 7 根试验桩根据实测桩身应变计算的轴力曲线,由图可见,试验桩的桩身轴力都是上大下小,桩身轴力沿深度衰减的,衰减的斜率与桩侧阻力有关。



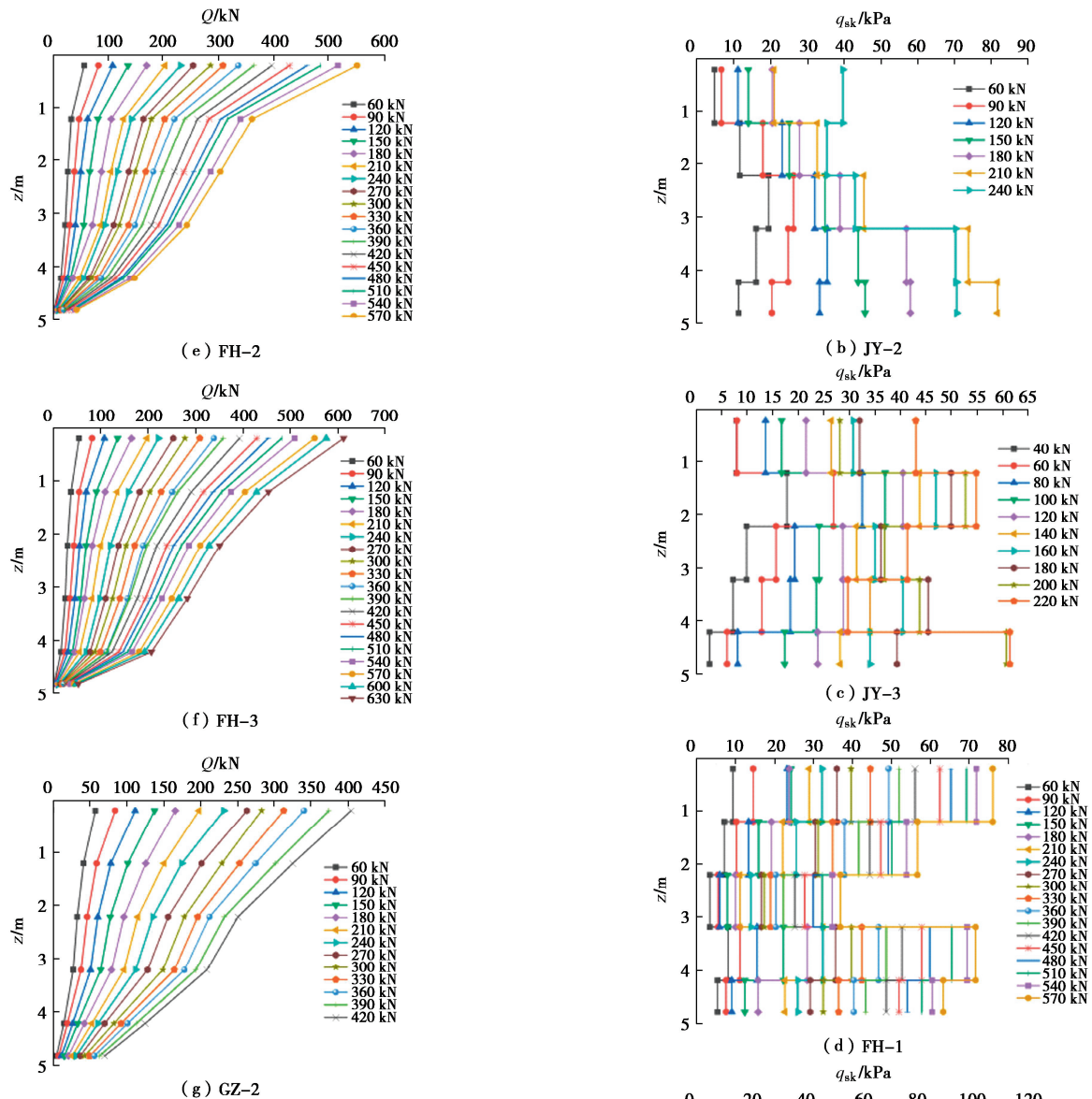
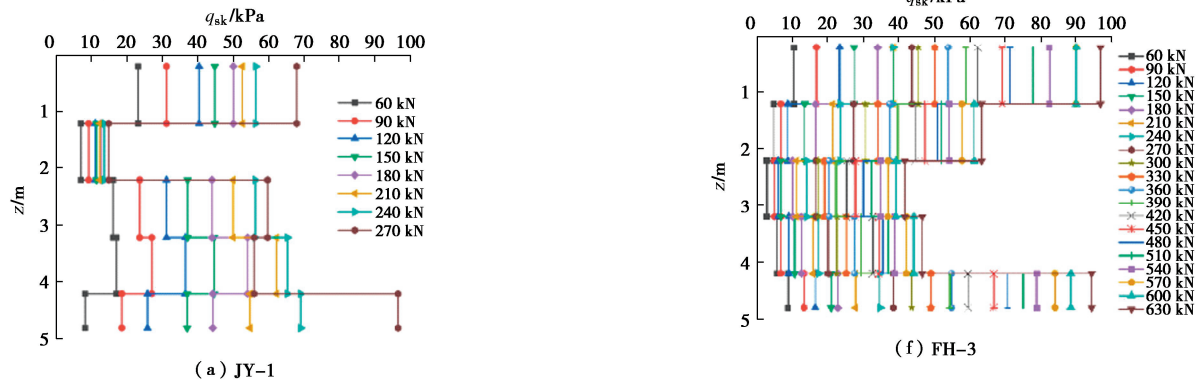


图5 试验桩桩身轴力

Fig. 5 Axial forces of model piles

2.4 侧阻力分析

根据桩身轴力可以反算桩身各段的侧阻力, 试验桩的侧阻力随深度分布曲线如图6所示, 由图6可见由于本次试验桩长不大, 桩的侧阻力发挥基本上都是随桩顶荷载的增长而增大, 但是不同桩的侧阻力沿桩身的分布不同, 由于本次试验的土质较均匀, 后续着重对平均极限侧阻力进行分析。



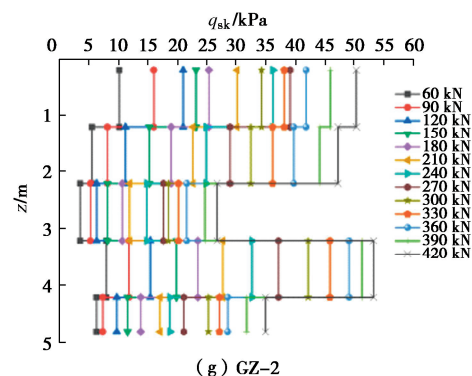


图 6 试验桩侧阻力分布图
Fig. 6 Curves of side resistance of model piles

为了比较各种桩型的侧阻力大小以及随荷载变化的规律，计算各级荷载作用下的桩身侧阻力平均值，其中极限承载力下的各试验桩的平均极限侧阻力见表 5。本次试验，静压桩和灌注桩的桩身直径是确定的，旋喷静压钢管复合桩直径通过实测得到，试验完成后对旋喷静压钢管复合桩进行开挖，分段测量其桩身周长并计算桩身直径，计算桩径随深度的变化结果见表 6，实测结果表明旋喷静压钢管复合桩桩身界面不规则，直径沿桩身略有变化，实测平均桩径 520~552 mm，略大于预估桩径 500 mm，实测桩身直径与预估桩径的差值约为-7.6%~12.9%，说明预估桩径比较合理且具有一定的安全度。旋喷静压钢管复合桩的桩身界面不规则，平均桩径略大于预估桩径，这些都是导致旋喷静压钢管复合桩单桩承载力高的重要原因。

表 5 试验桩的平均极限侧阻力

Table 5 Average ultimate side resistances of model piles							
桩号	JY-1	JY-2	JY-3	FH-1	FH-2	FH-3	GZ-2
平均极限侧阻力/kPa	61.2	52.5	45.8	66.5	63.5	73.7	46.5

表 6 旋喷静压钢管复合桩的实测桩径

Table 6 Measured diameters of composite piles			
桩号	深度/m	桩径/mm	平均桩径/mm
FH-1	0.5	560.51	520
	1	547.77	
	2	528.66	
	2.5	535.03	
	3	506.37	
	4	487.26	
FH-2	0.5	601.91	552
	1	595.54	
	1.5	570.06	
	2	554.14	
	2.5	538.22	
	3	512.74	
FH-3	0.5	566.88	520
	1	554.14	
	1.5	535.03	
	2	522.29	
	2.5	506.37	
	3	487.26	
	4	464.97	

根据各级荷载作用下的平均侧阻力，得到静压桩、旋喷静压钢管复合桩和灌注桩的侧阻力随桩土相对位移的变化曲线如图 7 所示，桩土相对位移按桩顶位移减去桩身压缩量计算得到。由图 7 可以看出，静压桩的平均侧阻力随桩土相对位移变化表现为较明显的弹塑性特征，在加载前期，侧阻力随着位移近似线性增长，当位移达到 3~7 mm 时桩身侧阻力表现为塑性特征，位移持续增长但侧阻力几乎不发生变化；旋喷静压钢管复合桩和灌注桩的规律类似，侧阻力随位移变化持续增长，在加载前期，侧阻力随着位移近似线性增长，当位移超过 10 mm 以后侧阻力随着位移出现非线性增长，增长幅度降低。从图 7 和表 5 可以看出，达到极限承载力时旋喷静压钢管复合桩的平均侧阻力最高，静压桩次之，灌注桩的平均侧阻力最低，说明静压桩施工对于桩周土有一定的挤密作用，从而提高了侧阻力，本次试验静压桩的平均侧阻力比灌注桩平均侧阻力提高了约 14%；与灌注桩相比，旋喷静压钢管桩土界面不规则、旋喷改善了桩土的界面特性，从而有效提高水泥土与桩周土的侧阻力，本次试验旋喷静压钢管复合桩的平均侧阻力为灌注桩平均侧阻力的 1.46 倍，这与文献[14]的规律基本一致。

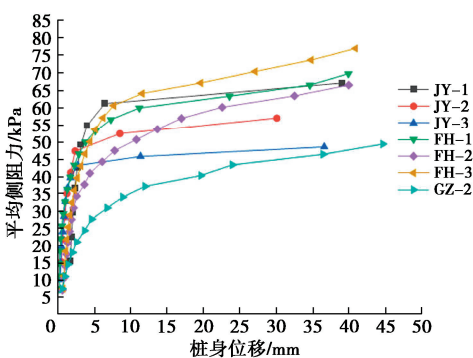


图 7 平均侧阻力随桩身位移的变化曲线

Fig. 7 Average side resistance-settlement curves of model piles

2.5 端阻力分析

本次试验采用桩顶荷载减去实测桩侧阻力得到总桩端阻力，进而计算出总端阻力与桩顶荷载之比，即端阻比。静压桩、旋喷静压钢管复合桩以及灌注桩的端阻比随桩顶荷载的变化曲线如图 8 所示，极限荷载作用下试验桩的端阻比见表 7。从图 8 可以看出，本次试验的对于静压桩、灌注桩、旋喷静压钢管复合桩，其端阻比都是随着桩顶荷载的增加近似线性增长，直至破坏，静压桩的端阻比最高，斜率也最大，灌注桩次之，旋喷静压钢管复合桩的端阻比最低，斜率也最低。静压桩单桩极限承载力对应的端阻比为 22%~28.4%，平均值为 25.1%，灌注桩单桩极限承载力对应的端阻比为 13.2%，旋喷静压钢管复合桩单桩极限承载力对应的端阻比为 3.5%~4.7%，平均值为 4.3%，

静压桩和灌注桩表现为摩擦端承桩的特性, 而旋喷静压钢管复合桩主要表现为摩擦桩的特性。

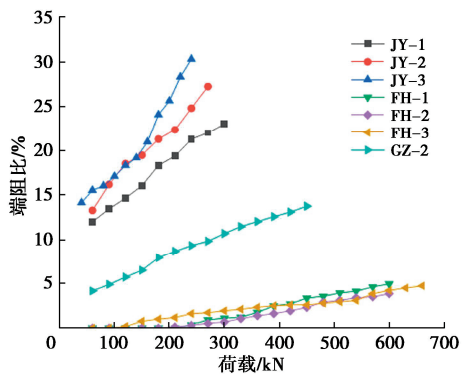


图 8 试验桩端阻比随荷载变化曲线

Fig. 8 Curves of load-ratio of tip resistance to ultimate load of model piles

表 7 极限承载力下试验桩的端阻比

Table 7 Ratios of tip resistance to ultimate load of model piles			
桩号	单桩极限承载力/kN	总极限端阻力/kN	端阻比/%
JY-1	270	59.5	22.0
JY-2	240	59.6	24.8
JY-3	220	62.5	28.4
FH-1	570	26.8	4.7
FH-2	570	20.2	3.5
FH-3	630	28.7	4.6
GZ-2	420	55.3	13.2

由总端阻力除以桩身面积即可得到端阻力, 由桩顶位移减去总桩身压缩量得到桩端位移, 试验桩的端阻力随桩端位移的变化曲线如图 9 所示, 由图 9 可以看出, 静压桩、旋喷静压钢管复合桩和灌注桩的端阻力随位移的变化规律基本一致, 在加载前期, 端阻力随着位移近似线性增长, 当位移达到 3~7 mm 后端阻力随着位移出现非线性增长, 增长幅度减小。达到极限承载力时, 静压桩的平均极限端阻力为 1608 kPa, 旋喷静压钢管复合桩的平均极限端阻力为 115 kPa, 灌注桩的极限端阻力为 282 kPa, 静压桩的端阻力远大于旋喷静压钢管复合桩和灌注桩, 说明静压桩施工对桩端土有很好的压密作用, 使得端阻力大幅提高, 旋喷静压钢管复合桩的端阻力略小于灌注桩。

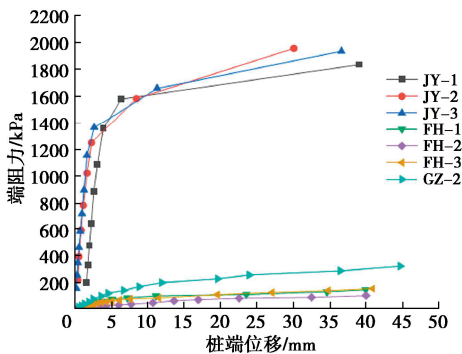


图 9 端阻力随桩端位移的变化曲线

Fig. 9 Tip resistance-settlement curves of model piles

3 旋喷静压钢管复合桩承载力计算方法探讨

旋喷静压钢管复合桩桩身荷载传递过程中存在两个界面, 一是芯桩与水泥土界面, 二是水泥土与桩周土界面。对于旋喷静压钢管复合桩的设计, 首先要确保芯桩与水泥土界面不先于水泥土和桩周土界面发生破坏, 一旦发生芯桩界面破坏, 旋喷静压钢管复合桩的承载力就无法充分发挥, 因此设计中要避免这种破坏模式发生, 首先要验算钢管与水泥土界面的承载性能, 确保其不先于水泥土和桩周土界面发生破坏 (芯桩与水泥土的界面特性另文探讨), 在此前提下, 从工程实用的角度, 旋喷静压钢管复合桩的单桩极限承载力计算可根据灌注桩的单桩极限承载力公式进行修正, 建议旋喷静压钢管复合桩单桩极限承载力表达式如下:

$$Q_{uk} = u \sum \beta_i q_{sik} l_i + \lambda q_{pk} A_p \quad (1)$$

式中: u 为旋喷静压钢管复合桩的桩身周长; β_i 为第 i 层土的极限侧阻力增大系数; q_{sik} 为第 i 层土的极限侧阻力; l_i 为第 i 层土的厚度; λ 为极限端阻力折减系数; q_{pk} 为极限端阻力; A_p 为旋喷静压钢管复合桩的桩身截面面积。

采用该公式进行旋喷静压钢管复合桩单桩极限承载力计算时, 侧阻力和端阻力的取值仍可按灌注桩取值, 该公式与灌注桩的承载力计算公式相比, 增加了两个系数, 分别是极限侧阻力增大系数 β_i 和极限端阻力折减系数 λ , 这两个系数可以根据地区经验取值, 当没有地区经验时, 对于极限侧阻力增大系数 β_i , 可参考《劲性复合桩技术规程: JGJ/T 327—2014》^[15] 取值, 对于极限端阻力折减系数 λ 可取 0.4~0.8。

4 结 论

(1) 本次室内足尺试验结果表明: 旋喷静压钢管复合桩单桩极限承载力高于相同桩径、相同桩长的灌注桩和高压旋喷桩。

(2) 高压旋喷桩在达到极限荷载作用下发生桩顶材料破坏, 桩的侧阻、端阻未充分发挥; 旋喷静压钢管复合桩由于芯桩的植入补足了高压旋喷桩桩身强度不足的短板, 桩身强度主要取决于芯桩, 桩的侧阻可充分发挥, 承载力高于高压旋喷桩。

(3) 与灌注桩相比, 旋喷静压钢管复合桩桩身界面不规则、旋喷工艺改善了桩土的界面特性, 旋喷静压钢管复合桩的侧阻力高于同直径的灌注桩。

(4) 旋喷静压钢管复合桩主要表现为摩擦桩的特性, 本次试验旋喷静压钢管复合桩的端阻比约为

4.3%。

(5) 根据试验结果从工程实用的角度, 引入极限侧阻力增大系数 β 和极限端阻力折减系数 λ , 对灌注桩的单桩极限承载力公式进行修正, 得到旋喷静压钢管复合桩单桩极限承载力的表达式。今后还应加强对旋喷静压钢管复合桩的工程实测及经验积累, 进一步完善参数取值。

参考文献:

- [1] 李 湛, 李钦锐, 李兆明. 历史建筑地下空间拓展工程[J]. 地下空间与工程学报, 2022, **18**(3): 714-723. (LI Zhan, LI Qinrui, LI Zhaoming. Underground space expansion project of a historical building[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, **18**(3): 714-723. (in Chinese))
- [2] 王曙光, 段启伟, 等. 既有建筑低净空下旋喷静压复合桩施工方法及应用装置. ZL202111077103.4[P]. 2023.07.04. (WANG Shuguang, DUAN Qiwei, et al. Construction method and application device for the jet grouting jacked composite pile which is suitable to the construction in the existing buildings with low clearance: CHINA, ZL202111077103.4[P]. 2023-07-04. (in Chinese))
- [3] 凌光容, 安海玉, 谢岱宗, 等. 劲性搅拌桩的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, **22**(2): 92-96. (LING Guangrong, AN Haiyu, XIE Daizong, et al. Experimental study on concrete core mixing pile[J]. Journal of Building Structures, 2001, **22**(2): 92-96. (in Chinese))
- [4] 刘金波, 柳致富, 等. 我国岩土工程施工技术的成就—复合桩[J]. 施工技术, 2011, **50**(13): 69-75. (LUI Jinbo, LIU Zhifu, et al. Achievements of geotechnical engineering construction technology in China—composite pile[J]. Construction Technology, 2011, **50**(13): 69-75. (in Chinese))
- [5] 李俊才, 张永刚, 邓亚光, 等. 管桩水泥土复合桩荷载传递规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊 1): 3068-3076. (LI Juncui, ZHANG Yonggang, HUA Xiaolong. Load transfer mechanism of composite pile composed of jet-mixing cement and phc pile with core concrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S1): 3068-3076. (in Chinese))
- [6] 彭 涛, 李立业, 章定文. 水泥土—混凝土界面特性试验研究[J]. 现代交通技术, 2017, **14**(3): 19-23. (PENG Tao, LI Liye, ZHANG Dingwen. Experimental research on interfacial performance between cement treated soil and concrete[J]. Modern Transportation Technology, 2017, **14**(3): 19-23. (in Chinese))
- [7] 吴 迈, 赵 欣, 窦远明, 等. 水泥土组合桩室内试验研究[J]. 工业建筑, 2004, **34**(11): 45-48. (WU Mai, ZHAO Xin, DOU Yuanming, et al. Experimental study on stiffened DCM pile in laboratory[J]. Industrial Construction, 2004, **34**(11): 45-48. (in Chinese))
- [8] 卜发东, 宋义仲, 李建明, 等. 水泥土复合管桩复合地基技术及应用[J]. 山东建筑大学学报, 2017, **32**(3): 276-283. (BU Fadong, SONG Yizhong, LI Jianming, et al. Technology of pipe pile embedded in cement soil composite foundation and its application[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2017, **32**(3): 276-283. (in Chinese))
- [9] 刘汉龙, 任连伟, 郑 浩, 等. 高喷插芯组合桩荷载传递机制足尺模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 1395-1401. (LIU Hanlong, REN Lianwei, ZHENG Hao, et al. Full-scale model test on load transfer mechanism for jet grouting soil-cement-pile strengthened pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1395-1401. (in Chinese))
- [10] 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012. (Code for Design of Building Foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese))
- [11] 刘金波. 干作业复合灌注桩的试验研究及理论分析[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2000. (LIU Jinbo. Experimental Study and Theoretical Analysis of Dry-Working Composite Cast-in-Place Pile[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2000. (in Chinese))
- [12] 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. (Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese))
- [13] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. (Code for Design of Concrete Structures: GB 50010—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese))
- [14] 郑 刚, 顾晓鲁, 姜忻良. 水泥搅拌桩复合地基承载力辨析[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(4): 487-489. (ZHENG Gang, GU Xiaolu, JIANG Xinliang. Discussion on the bearing capacity of cement treated composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(4): 487-489. (in Chinese))
- [15] 劲性复合桩技术规程: JGJ/T 327—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Technical Specification for Strength Composite Piles: JGJ/T 327—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))