

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202007055



高层办公楼的桩端桩侧复式 后注浆灌注桩比较分析

田化¹, 林伟松²

(1. 华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021;

2. 厦门合道工程设计集团有限公司, 福建 厦门 361004)

摘要: 以位于福建省厦门市湖滨南路 328 号地块的高层超限办公楼基础工程为研究对象, 结合工程现场的地质条件等复杂情况, 从可行性方面选择机械成孔混凝土灌注桩的嵌岩桩基础、后注浆非嵌岩桩基础、复合桩筏基础和可控刚度桩筏基础 4 种形式, 从基础造价估算、施工技术、施工周期等方面进行全面分析、对比、论证基础选型后, 采用后注浆灌注桩方案. 通过 5 根试验桩, 在桩径和桩长相等的情况下, 对比不注浆和桩端桩侧复式后注浆的单桩抗压静载荷试验结果. 结果表明: 桩端桩侧后注浆旋挖灌注桩方案的施工技术安全可行、节省造价、缩短工期, 并得到试验桩的后注浆侧阻力增强系数 β_s 的实测值.

关键词: 高层办公楼; 灌注桩; 桩端桩侧复式后注浆; 侧阻力增强系数; 基础选型

中图分类号: TU 473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)03-0358-11

Comparative Analysis of Tip and Side Compound Post Grouting for Cast-in-Situ Piles in Tall Office Building

TIAN Hua¹, LIN Weisong²

(1. School of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Xiamen Hordor Engineering Design Group Limited Company, Xiamen 361004, China)

Abstract: The foundation design of tall over-limit office buildings at block 328, Hubin South Road, Xiamen, Fujian is taken as the research object. In combination with complex geological conditions on the project site, four feasible foundation forms are selected, including the rock socketed pile of mechanical boreholed concrete cast-in-situ, non-rock socketed pile of post grouting, composite pile raft, pile raft with controllable stiffness. After comprehensive analysis, comparison and demonstration from the aspects of foundation cost estimation, construction technology and construction period, *et al*, the post grouting cast-in-situ pile scheme is adopted. Through 5 test piles with the same diameter and length, the static compressive loads of single pile of non-grouting pile, tip and side compound post grouting pile are investigated. The results show that: the scheme of tip and side pile post grouting rotary digging cast-in-situ is adopted with safety, feasibility, cost saving and the construction period Shortening. The value of the post grouting lateral resistance enhancement coefficient β_s of the test pile is measured.

Keywords: tall office building; cast-in-situ pile; pile tip and side compound post grouting; side resistance enhancement coefficient; foundation selection;

收稿日期: 2020-07-29

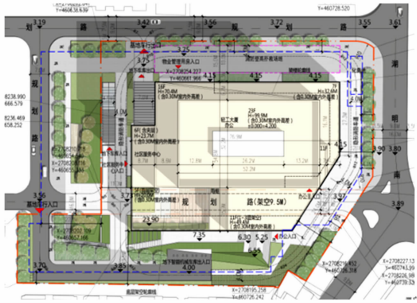
通信作者: 田化(1978-), 女, 实验师, 主要从事结构设计、历保建筑及文保建筑的保护与修缮的研究. E-mail: 13606797@qq.com.

基金项目: 华侨大学“华人华侨研究”专项经费资助一般项目(HQHRYB2019-07)

灌注桩后注浆工法用于桩端桩侧一定范围土体的加固,可提高灌注桩承载力、减少桩数、降低工程成本。除了 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》^[1]、JGJ 106—2014《建筑基桩检测技术规范》^[2],福建省在 2017 年 1 月批准实施的 DBJ/T 13-247—2016《福建省灌注桩后注浆施工技术规范》^[3]中对灌注桩后注浆的注浆设计、材料和设备的配置、施工实施细则等做了规定和说明,但在设计施工实践中,场地、环境、项目、设计参数、施工工艺经验等因素导致后注浆方式对灌注桩承载力影响有偏差。本文结合福建省厦门市湖滨南路 328 号地块的超限高层公建基础工程实例,对基础选型、后注浆设计参数选取、试验桩施工技术难点进行分析。

1 项目概况

项目位于厦门市湖滨南路 328 号地块,东侧为湖明南路,南侧为 11 层住宅,西侧为幼儿园储备用地,北侧为思明区法院。项目总用地面积为 9 212.95 m²(建设用地面积为 8 363.48 m²,道路面积为 849.47 m²),总建筑面积为 82 091.03 m²(计容建筑面积为 54 000 m²)。项目定位为一个现代简洁、配套完善、品味高尚的中高端办公楼建筑。建筑总平面图及其鸟瞰图,如图 1 所示。



(a) 建筑总平面图



(b) 鸟瞰图

图 1 办公楼建筑图

Fig. 1 Architectural drawing of office building

主楼地下有 3~4 层、地上有 23 层,主要屋面高度为 99.6 m,顶部高度为 112.4 m。地下室分为普通汽车库(共 3 层,层高 3.6~3.9 m)和智能机械停车库(共 4 层,层高 2.9~3.4 m),地下室的建筑面积为 26 870.65 m²。地上部分一层结构层高为 6.6 m,2~3 层层高为 4.8 m,标准层层高为 4.2 m,地上建筑面积为 55 220.38 m²。

工程采用框架-核心筒结构体系,楼面采用钢筋混凝土梁板楼面体系。建筑抗震设防类别为丙类;建筑结构安全等级为 2 级;所在地区的抗震设防烈度为 7 度;基本地震加速度为 0.15g(g 为重力加速度),地震分组为第 3 组;场地类别为 II 类,50 a 一遇的基本风压为 0.8 kN·m⁻²;地面粗糙度为 C 类。

2 工程地质条件概况

地勘平面图,如图 2 所示。3-3' 剖面图,如图 3 所示。

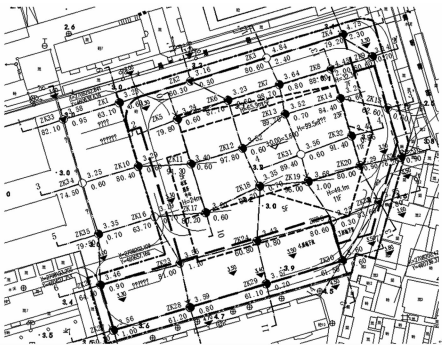


图 2 地勘平面图

Fig. 2 Geological plan diagram

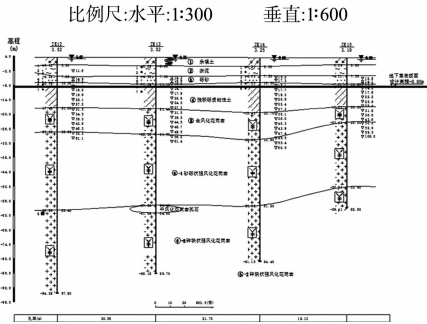


图 3 3-3' 剖面图

Fig. 3 3-3' profile diagram

场地中土层分布如下:1) 杂填土,回填 10 a 以上基本完成自重固结,层厚度为 2.1~5.5 m;2) 淤泥呈软塑-流塑状、饱和,层厚度为 0.8~5.9 m;3) 砾砂呈稍密-中密状、饱和、不液化,层厚度为 1.4~7.2 m;4) 粉质粘土呈可-硬塑状、饱和,7 个钻孔有揭露,层厚度为 1.1~2.8 m;5) 残积砾质粘性土呈可塑-硬塑状、硬塑为主,经杆长修正后,锤击数为 11.1~29.4,层厚度为 6.5~17.0 m;6) 全风化花岗岩,按修正后标贯锤击数(N) $30 \leq N < 50$ 确定,层厚度为 2.1~16.4 m;7) 砂砾状强风化花岗岩,按修正后标贯锤击数 $N \geq 50$ 确定,岩石质量指标 $RQD=0$,等级属“极差的”,岩体结构类型为散体状结构,岩体极破碎,属极软岩,岩体基本质量等级为 V 级,部分钻孔未揭穿,钻孔揭露厚度为 4.6~44.5 m;8) 碎块状强风化花岗岩,岩石质量指标 $RQD=0$,等级属“极差的”,岩体结构类型为碎裂状结构或块状结构,该岩石为软岩,岩体极破碎,岩体基本质量等级为 V 级。

场区基岩属花岗岩,无岩溶诱因,勘探未发现软夹层、空洞、临空面等不利情况,该层在 32 个钻孔有揭露,受勘探孔深限制,各勘探孔均未揭穿,钻孔揭露厚度为 7.0~46.6 m。

碎块状强风化花岗岩点荷载换算饱和单轴抗压强度标准值为 11.82 MPa,各岩土层设计参数建议值,如表 1 所示。表 1 中: f_{ak} 为单桩竖向承载力特征值; η_b 为基础宽度修正系数; η_d 为埋置深度修正系数; q_{sik} 为预制桩桩侧极限摩阻力标准值; q_{pk} 为桩端极限端阻力标准值; q_i 为冲(钻)孔灌注桩桩侧极限摩阻力标准值; q_{ipk} 为冲(钻)孔灌注桩桩端桩极限端阻力标准值。

表 1 各岩土层设计参数建议值
Tab. 1 Recommended values of each soil layer design parameters

岩土名称	f_{ak}/kN	η_b	η_d	q_{sik}/kPa	q_{pk}/MPa	q_i/kPa	q_{ipk}/MPa
杂填土	80	0	1.0	30	—	25	—
淤泥	45	0	1.0	20	—	15	—
砾砂	200	3.0	4.4	75	—	60	—
粉质粘土	190	0	1.6	55	—	45	—
残积砾质粘性土	220	0.3	1.6	70	5.6	50	—
全风化花岗岩	350	—	—	90	7.0	80	—
砂砾状 强风化花岗岩	500	—	—	110	11.0	85	3.0
碎块状 强风化花岗岩	800	—	—	—	—	120	6.0

干湿交替情况和长期浸水下,地下水对砼结构和其中的钢筋有微腐蚀性;地下水位以上地基土对钢筋混凝土结构和其中的钢筋有微腐蚀性。

3 基础选型分析

灌注桩的费用按 $1\,600\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$,砼按 $400\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$,钢筋按 $3\,000\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$ 计算; $\Phi 1\,200\text{ mm}$ 桩的注浆按 $6\,000\text{元}\cdot\text{根}^{-1}$, $\Phi 1\,000\text{ mm}$ 桩注浆按 $5\,000\text{元}\cdot\text{根}^{-1}$ 计算。可控刚度桩筏的调节阀和后期桩顶封闭费用按 $10\,000\text{元}\cdot\text{根}^{-1}$ 计算。嵌岩桩、后注浆桩需另加的核心筒与主楼柱间底板费用约为 32 万元。主楼基础造价估算,如表 2 所示。表 2 中: d 为桩身直径; l 为有效桩长; n 为根数。

表 2 主楼基础造价估算
Tab. 2 Cost estimation of main building foundation

方案	d/mm	f_{ak}/MN	$n/\text{根}$		l/m		基础费用估算/ 万元
			核心筒	主楼柱	核心筒	主楼柱	
嵌岩桩基础	1 200	9.5	50	61	52.4	50.3	$>1\,181.0$
复合桩筏基础	1 000	5.4, 4.6	65	155	39.0	32.5	1 188.0
后注浆管(规范)	1 200	9.5	50	61	40.0	40.0	$>1\,024.6$
后注浆管(折减)	1 200	9.5	50	61	47.0	47.0	$>1\,165.6$
后注浆管(折减)	1 000	7.0	70	79	40.0	40.0	>925.5
可控刚度桩筏基础	1 000	3.8	共 151		26.0	26.0	>984.5

根据建筑图±0.000 m 相当于黄海高程 4.200 m,室内、外高差为 0.3 m,室内覆土为 0.6 m,室外

覆土为 1.2 m，主楼停车库层高为 5.1 m+3.6 m+3.6 m，底板结构面层黄海高程为-8.800 m，机械停车库层高为 3.6 m+2.9 m+3.4 m+3.4 m，底板结构面层黄海高程为-10.200 m，抗浮水位按室外地坪即黄海高程为 3.600 m，高层主楼承台厚度约为 2.2 m，地下室承台厚度约为 1.5 m。主楼框柱下轴力标准值约为 21.0~36.5 MN，核心筒墙下竖向力标准值约为 4.2~7.0 MN·m⁻¹。

工程位于市中心，不可采用锤击桩型，且场地条件有限，基坑较深。根据基坑设计单位图纸，需做 2 道内支撑。由于大型静压机械的施工高度无法满足，因此，无法到坑底进行施工。若在现有地面施工，则地面至承台底约有 15 m 的无效侧阻力，使压桩质量无法保证，后续试验准确性也有问题。因此，从施工可行性角度，排除静压预应力高强度混凝土 (PHC) 管桩、静压方桩、静压预制高强度混凝土薄壁钢 (TSC) 管桩、静压沉管灌注桩，仅比较机械成孔混凝土灌注桩的嵌岩桩基础、后注浆非嵌岩桩基础、复合桩筏基础 (桩基规范)、可控刚度桩筏基础。嵌岩桩基础、后注浆非嵌岩桩基础、复合桩筏基础 (桩基规范)、可控刚度桩筏基础平面布置图，如图 4 所示。

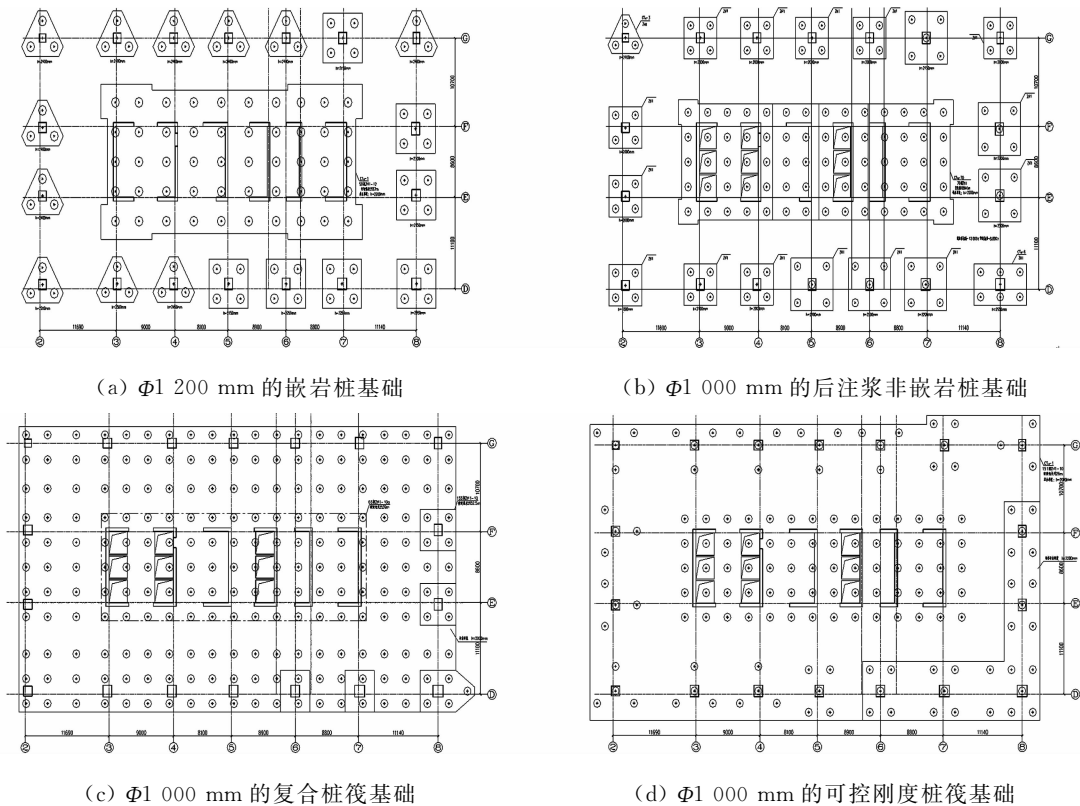


图 4 基础平面布置图

Fig. 4 Foundation layout plan diagram

嵌岩桩基础的桩端持力层为碎块状强风化花岗岩；后注浆非嵌岩桩基础的桩端持力层为砂砾状强风化花岗岩，采用桩端桩侧复式注浆。单桩竖向承载力特征值由桩身承载力进行控制， $\Phi 1\ 200\ \text{mm}$ 嵌岩桩基础为 9.5 MN， $\Phi 1\ 000\ \text{mm}$ 后注浆非嵌岩桩基础为 7.0 MN。复合桩筏基础 (桩基规范)、可控刚度桩筏基础的桩端持力层为砂砾状强风化花岗岩，筏板的持力层为残积砂质粘性土。核心筒复合桩筏的单桩竖向承载力特征值取 5.4 MN，主楼柱单桩竖向承载力特征值取 4.6 MN，可控刚度桩筏基础的单桩竖向承载力特征值取 3.8 MN。

工程由于碎块状强风化花岗岩埋置较深，若按嵌岩桩需入岩 3 d 才能满足承载力要求，则有效桩长需 52 m 左右，加上空孔，施工桩长将达 67 m，已达一般旋挖机的最大钻孔深度。施工难度大，清孔可能不干净，造价较高。若按复合桩筏基础^[1]，根据桩距与桩径的比值、承台厚度与桩长的比值，承台效应系数在 0.06~0.80 变化，项目效应系数约为 0.10。不能有效发挥基底土的承载力，造价较高。若按可控刚度桩筏基础，筏板在每根桩顶需预留 3 根注浆管，待主体荷载 (含装修活载) 大部分到位后再进行二次注浆，将基桩顶与筏板间的空腔填满。未注浆前基坑地下室存在渗水的隐患需进行降水，时间长、成本高，影响地下室负 3 层地面装修及竣工验收。建设施工期间如发生地震时，可控刚度桩筏基础有一定风险。

采用施工技术成熟且造价节约的 $\Phi 1\ 000\text{ mm}$ 后注浆非嵌岩桩基础^[4-12] 方案. 桩身水下混凝土等级为 C40, 有效桩长为 40 m, 桩身进入砂砾状强风化花岗岩持力层不小于 22 m, 单桩竖向承载力的特征值为 7.0 MN. 目前, 后注浆桩通常采用的类型有桩端后注浆和桩端桩侧复式后注浆^[13-15], 因此, 采用 5 根试验桩的方案, 试验桩分 2 组, 第 1 组(3 根)做桩端桩侧复式后注浆; 第 2 组(2 根)不做后注浆.

4 试验桩

4.1 试验桩参数和施工概况

根据 JGJ 94—2018《建筑桩基技术规范》^[1] 和 DBJ/T 13-247—2016《福建省灌注桩后注浆施工技术规程》^[3] 中的规定, 对试验桩有如下 14 点施工控制.

1) 在泥浆护壁的机械成孔混凝土灌注桩施工中, 护壁的泥浆应采用膨润土拌制(遇特殊地质可能需掺入少量纤维素), 并严格执行反循环施工、清孔和测量沉渣. 对于地基基础设计等级为甲级的机械成孔桩, 循环出的泥浆应通过泥浆过滤机处理后, 方可再进入循环. 灌注混凝土前, 孔底 500 mm 以内的泥浆相对密度应小于 1.25, 含砂率不得大于 8%, 黏度不得大于 28 s. 现场配备相关注浆备件.

2) 灌注混凝土之前, 必须清除孔底沉渣, 清孔后, 沉渣厚度不大于 50 mm, 并应立即灌注水下混凝土. 控制最后一次灌注量, 超灌高度宜为 0.8~1.0 m, 凿除泛浆后, 必须保证暴露的桩顶混凝土强度达到设计的等级.

3) 桩身混凝土充盈系数不小于 1.1.

4) 桩端桩侧后注浆管采用 DN25 国标镀锌钢管, 注浆管(声测管)应沿钢筋笼圆周对称设置, 伸出作业地面 200 mm 左右, 注浆管固定在钢筋笼内侧, 并与钢筋笼加劲筋绑扎固定或焊接, 深度直达桩底.

5) 设置 2 根 $\Phi 1\ 000\text{ mm}$ 桩端后注浆管. 在有效桩长范围内, 桩顶 8 m 以下, 每隔 8~10 m 设置一道桩侧注浆阀. 桩长 40 m 设置 3 道桩侧注浆阀, 每道桩侧注浆阀不少于 2 个, 且对称布置, 每个注浆阀对应一根注浆管, 即设 6 根桩侧压浆管. 桩身截面图, 如图 5 所示.

6) 采用声波投射法检测桩身完整性, 需对称埋设 3 根 $\Phi 50\text{ mm}$ 的无缝钢管.

7) 注浆管底部应设置单向注浆阀(逆止阀), 注浆阀应能承受 1.0 MPa 以上的静水压力, 注浆阀外部保护层应能抵抗砂石等硬质物的刮撞而使管阀不致受损.

8) 后注浆胶凝材料宜采用普通硅酸盐水泥, 可掺入适量外加剂. 水泥强度等级不应低于 42.5 级; 同一单位工程内的灌注桩后注浆应采用同一品种、同一强度等级和同一厂家的水泥.

9) 后注浆浆液的水灰比应根据土的饱和度、渗透性确定. 对于饱和土, 水灰比宜为 0.45~0.65, 对于非饱和土, 水灰比宜为 0.7~0.9; 桩端终止注浆压力不宜小于 4 MPa, 桩侧终止注浆压力应根据各土层性质及注浆点深度确定. 对于饱和土, 注浆压力不宜小于 2 MPa, 注浆流量不宜超过 $40\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. 桩端、桩侧总注浆量不小于 $5\text{ t}\cdot\text{根}^{-1}$, 其中, 桩端注浆量不小于 $2\text{ t}\cdot\text{根}^{-1}$, 桩侧注浆量不小于 $3\text{ t}\cdot\text{根}^{-1}$. 桩侧注浆量各注浆标高可均分. 后注浆作业开始前, 宜进行注浆试验, 优化并最终确定注浆参数.

10) 声波投射法检测桩身完整性应在后注浆之后进行.

11) 注浆作业时间宜于成桩 2 d 后开始, 不宜迟于成桩 30 d 后, 注浆作业与成孔作业点的距离不宜小于 8~10. 对于饱和土中的复式注浆顺序宜先桩侧后桩端; 对于非饱和土宜先桩端后桩侧; 多断面桩侧注浆应先上后下; 桩侧桩端注浆间隔时间不宜少于 2 h; 对于桩群注浆宜先外围后内部.

12) 当注浆压力长时间低于正常值, 地面出现冒浆或周围桩孔串浆时, 应改为间歇注浆, 间歇时间宜为 30~60 min, 或调低浆液的水灰比.

13) 当满足下列条件之一时可终止后注浆: 注浆总量和注浆压力均达到设计要求; 注浆总量已达到设计值的 80%, 且注浆压力达到设计值的 1.5 倍并维持 5 min 以上; 注浆总量已达到设计值的 80%, 且桩顶或地面出现明显上抬. 若多根注浆管的注浆量仍达不到上述要求时, 应实行间歇注浆以达到设计注

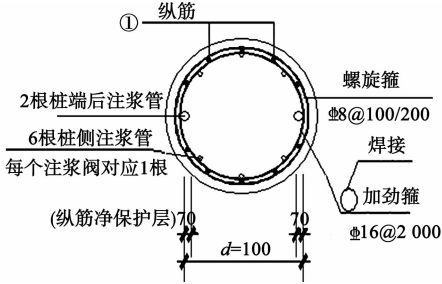


图 5 桩身截面图(单位:mm)

Fig. 5 Pile section (unit: mm)

浆量,若多次间歇注浆仍达不到设计值的 80%时,注浆压力应连续达到 8 MPa 且稳定 3 min 以上,该桩终止注浆,同时,加大相邻桩的注浆量。

14) 在桩身混凝土强度达到设计要求的条件下,承载力检验应在注浆完成 20 d 后进行. 当浆液中掺入早强剂时,可于注浆完成 15 d 后进行。

现状地面黄海高程为 3.500 m,参考桩长为 54 m(从地面算起). 考虑有效桩顶标高至试验地面有约 14 m(含桩顶超灌 1 m)的无效侧阻力,静载试验最大荷载由 14.0 MN 修正为 15.5 MN。

4.2 试验描述及结果分析

实验根据福建省建筑工程质量检查中心有限公司提供的《轻工大厦基础、地下室及上部主体工程单位工程 I 桩基工程质量评估报告》(简称《评估报告》)的有关规定进行. 5 根试验桩的加载方式均采用慢速维持荷载法. 在最大试验荷载作用下的桩顶累计沉降量均小于 50 mm(0.05D,D 为桩端直径),且在每级荷载作用下的各级沉降量均无明显增大现象,故 5 根试验桩均未达到极限承载状态. 取最大试验荷载 15.5 MN 为各试验桩的单桩竖向抗压极限承载力,满足设计要求。

5 根试验桩的抗压静载试验结果,如表 3 所示. 表 3 中: Q_{max} 为最大试验荷载; s_1 为最大试验荷载作用下的桩顶累计沉降量; δ 为残余变形; Q_{uk} 为单桩竖向抗压极限承载力; s_2 为极限承载力作用下的桩顶沉降量;1#,3#,5# 试验桩采用桩端柱侧复式后注浆,并进行桩身内力测试。

表 3 试验桩的抗压静载结果
Tab. 3 Results of compressive static load of test piles

试验桩 编号	Q_{max}/MN	s_1/mm	δ/mm	Q_{uk}/MN	s_2/mm
1#	15.5	9.09	1.35	15.5	9.09
2#	15.5	14.00	3.94	15.5	14.00
3#	15.5	7.80	1.60	15.5	7.80
4#	15.5	45.18	29.81	15.5	45.18
5#	15.5	12.30	1.08	15.5	12.30

5 根试验桩的压桩力-沉降量($Q-s$)曲线、沉降量-时间曲线($s-\lg t$)曲线,如图 6~10 所示。

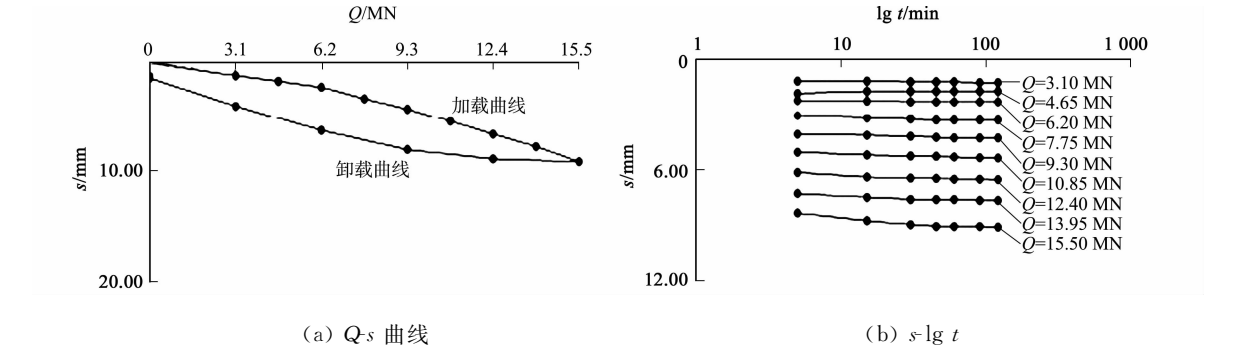


图 6 1# 试验桩曲线
Fig. 6 Curve of 1# test pile

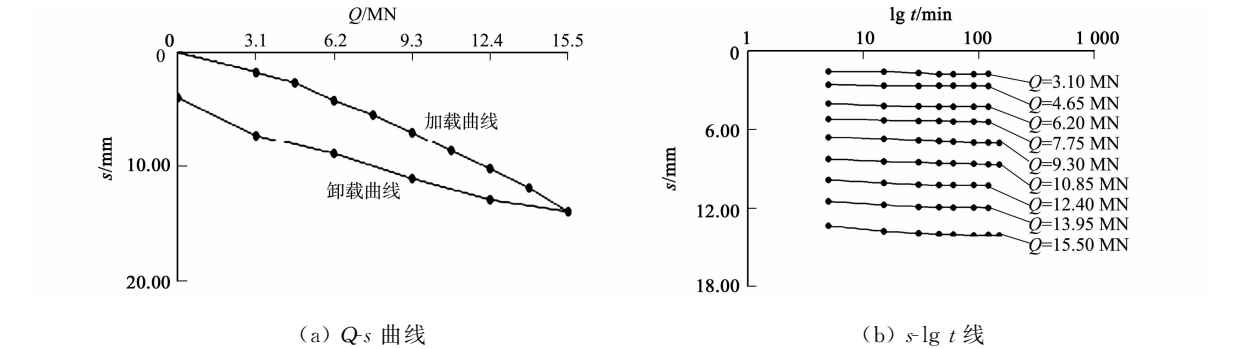


图 7 2# 试验桩曲线
Fig. 7 Curve of 2# test pile

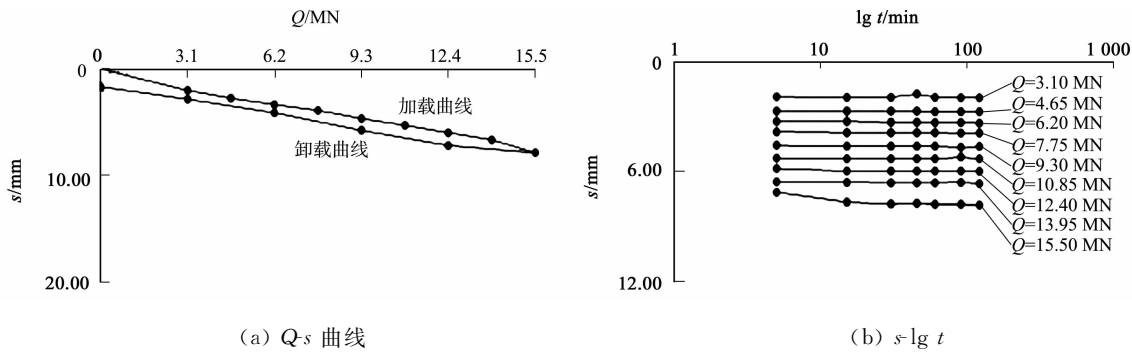


图 8 3# 试验桩曲线
Fig. 8 Curve of 3# test pile

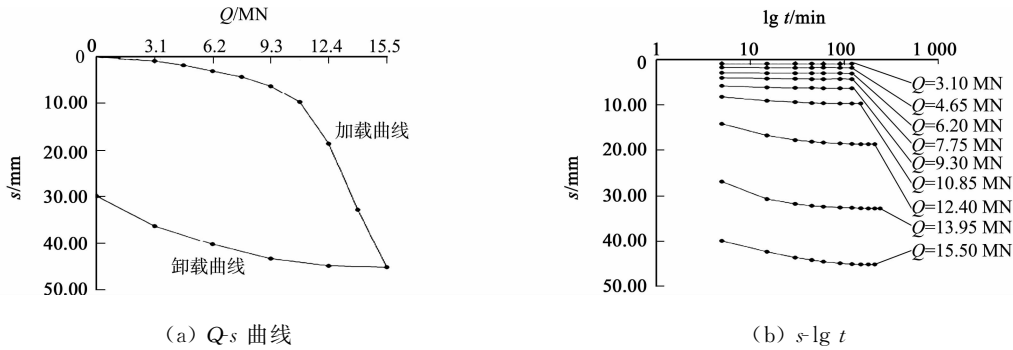


图 9 4# 试验桩曲线
Fig. 9 Curve of 4# test pile

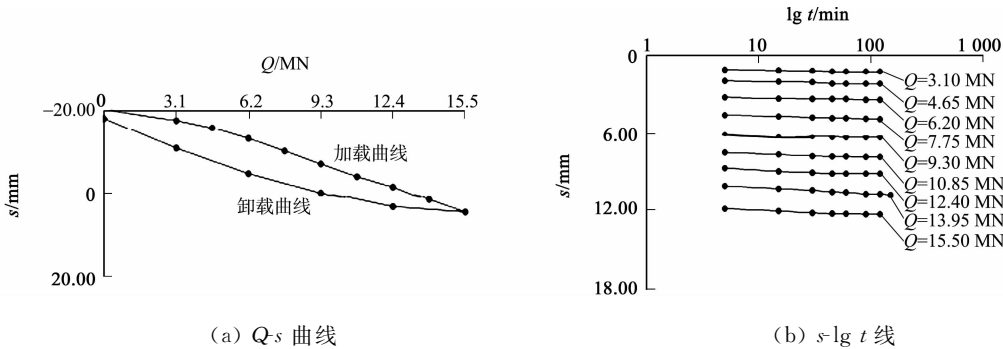


图 10 5# 试验桩曲线
Fig. 10 Curve of 5# test pile

采用桩端桩侧复式后注浆,对 1#,3#,5# 试验桩埋设的振弦式钢筋计(XGJ-1 型钢筋应力传感器)进行内力测试,直径选择与试验桩主筋相同.钢筋应力传感器连接图,如图 11 所示.在每个内力测量断面对称布置 4 个钢筋应力传感器,在竖直方向上,桩帽以下 2 m 处,设置标定断面,其余内力测量断面设置在不同土层的交界面附近.桩端进入砂砾状强风化花岗岩持力层,加密测量断面,在距离桩端 1 倍桩径处设置端阻力测量断面.测量断面布置示意图,如图 12 所示.图 12 中:A0~A6 为标定断面.

1#,3#,5# 试验桩的轴力分布图,如图 13 所示.图 13 中: h 为压桩的深度.桩侧土层的摩擦力随着桩顶荷载的增大而自上而下逐渐增大的,桩顶荷载通过桩侧摩阻力传递到桩周土层中,桩身轴力和桩身混凝土压缩变形随深度递减.在桩顶荷载较小时,桩身混凝土的压缩仅限于桩的上部,随着桩顶荷载的增加,桩身压缩量和桩土相对位移逐渐增大.可以推测,当桩土界面相对位移大于桩土极限位移时,桩身上部土的桩侧极限摩阻力将增大至最大值并出

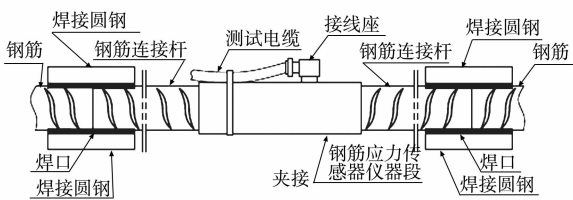


图 11 钢筋应力传感器连接图
Fig. 11 Connection diagram of reinforcement stress sensor

现滑移,此时,桩身下部土的桩侧极限摩阻力进一步增大,桩端极限端阻力亦随之增大.

不同深度土层的桩侧极限摩阻力及桩端阻力是异步增大的,只有当桩顶荷载传递到相应部位并产生压缩变形时,才会产生相对的桩侧极限摩阻力及桩端阻力.测试的 1#,3#,5# 试验桩在最大试验荷载作用下,桩端轴力分别为 768,157,967 kN,占最大试验荷载的 4.95%,1.01%,6.24%,比重较小,3 根试验桩均为摩擦桩.

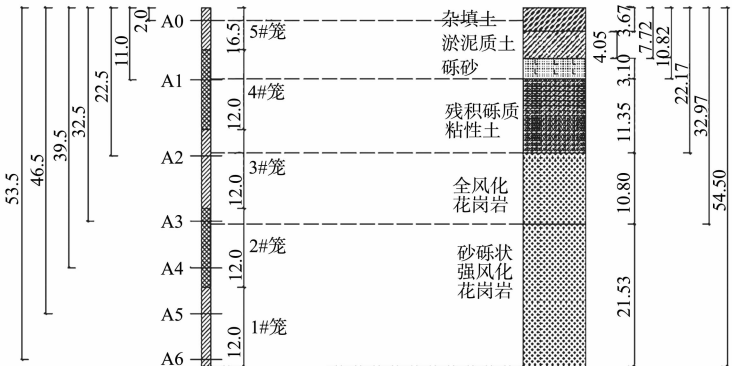


图 12 测量断面布置示意图

Fig. 12 Schematic diagram of measured sectional arrangement

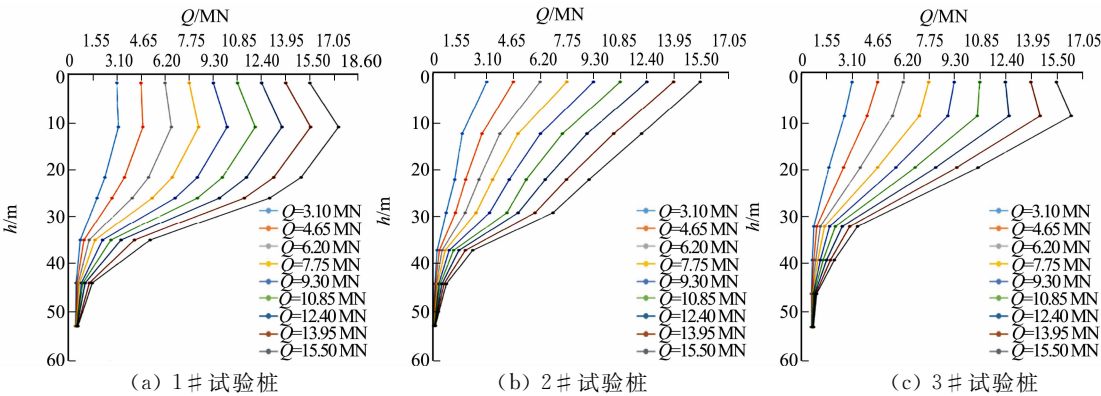


图 13 试验桩轴力分布图(单位:mm)

Fig. 13 Axial force distribution diagram of test piles (unit: mm)

3 根试验桩桩周土层的桩侧极限摩阻力标准值(未注浆, q_{sik})、实测值(q'_{sik})及后注浆增强系数(β_{si}),如表 4 所示.《评估报告》中桩侧极限摩阻力建议值如下:残积砾质粘土(后注浆)为 10 kPa;全风化花岗岩(后注浆)为 140 kPa;砂砾状强风化花岗岩层(后注浆)为 170 kPa.《评估报告》中桩端极限端阻力建议值:砂砾状强风化花岗岩层(未注浆)为 3.0 MPa.

表 4 桩侧摩阻力后注浆增强系数

Tab. 4 Enhanced coefficient of post-grouting pile shaft resistance

试验桩编号	岩土层名称	q_{sik}/kPa	q'_{sik}/kPa	β_{si}
1 #	残积砾质粘性土	50	≥ 73	1.5
	全风化花岗石	80	≥ 150	1.9
	砂砾状强风化花岗石	85	≥ 278	3.3
3 #	残积砾质粘性土	50	≥ 102	2.3
	全风化花岗岩	80	≥ 97	1.2
	砂砾状强风化花岗岩	85	≥ 190	2.2
5 #	残积砾质粘性土	50	≥ 168	3.4
	全风化花岗岩	80	≥ 191	2.4
	砂砾状强化化花岗石	85	≥ 46	—

一方面,采用桩端桩侧复式后注浆工艺,桩周上部-中部土层侧摩阻力得到极大提高;另一方面,试验桩下部砂砾状强风化岩的侧摩阻力及端阻力均未得到有效增大,再次印证 3 根试验桩均未达到极限承载状态,承载力尚有富余.

1#,3#,5# 试验桩实测桩顶沉降量均小于 20 mm,3 根试验桩均未达到极限承载状态.3 根试验桩下部桩侧摩阻力及桩端阻力尚未完全增大,承载力尚有富余.

冲击成孔旋挖法采用静态泥浆护壁,泥浆浓度低,泥皮薄.后注浆承压浆液易于加固泥皮、充填间隙,在桩侧土体中渗透压密.桩侧表面积的增加、桩侧土强度与刚度的提高都将调动起更大范围内的桩

周土体参与桩的承载,增大剪切滑动面,改变桩与桩侧土之间的性能,提高桩身侧摩阻力.

5 设计调整

根据《评估报告》,5 根试验桩均满足承载力要求. 4 号试验桩的单桩竖向抗压极限承载力为 10.85 MN;桩顶总沉降量为 45.18 mm,已接近允许沉降量 50.00 mm. 若按未注浆方案进行大面积施工,则存在安全隐患. 因为 3 根试验桩的后注浆侧阻力增强系数 β_{si} 离散性较大,其极差均大于算术平均值 30%,所以 β_{si} 取低值用于复核设计. 后注浆侧阻力增强系数 β_{si} 复核值,如表 5 表示.

表 5 后注浆增强系数(β_{si})复核值
Tab. 5 Review value of post-grouting enhancement coefficient (β_{si})

试验桩编号	岩土层名称	β_{si}	检测建议 β_{si} 值	《建筑桩基技术规范》 β_{si} 值	复核计算 β_{si} 值
1 号	残积砾质粘性土	1.5	2.20	1.4~1.8	1.5
	全风化花岗岩	1.9	1.75	1.4~1.8	1.2
	砂砾状强风化花岗岩	3.3	2.00	1.4~1.8	1.8
3 号	残积砾质粘性土	2.0	2.20	1.4~1.8	1.5
	全风化花岗岩	1.2	1.75	1.4~1.8	1.2
	砂砾状强风化花岗岩	2.2	2.00	1.4~1.8	1.8
5 号	残积砾质粘性土	3.4	2.20	1.4~1.8	1.5
	全风化花岗岩	2.4	1.75	1.4~1.8	1.2
	砂砾状强风化花岗岩	—	2.00	1.4~1.8	1.8

考虑到目前现场施工进度不容乐观且工期较紧的实际情况,认为有效桩长为 38 m,桩端进入持力层砂砾状强风化花岗岩小于 14 m,做桩端桩侧复式后注浆,桩侧注浆阀由 3 道改为 2 道,即桩侧注浆管由 6 根改为 4 根,桩侧注浆量由小于 $3\text{ t}\cdot\text{根}^{-1}$ 改为小于 $2\text{ t}\cdot\text{根}^{-1}$,注浆压力不变.

6 工程桩施工及验收情况

桩基施工从 2017 年 10 月 17 日开始施工,2018 年 7 月 5 日结束,共完成 509 根工程桩,其中,主楼下有基桩 184 根. 因施工场地条件受限制,桩基静载试验在桩基施工完成后、土方开挖前进行. 根据《关于进一步规范桩基检测的通知》(闽建建[017]1 号文)的相关规定,预先选定的受检桩数量不得少于检测数量的 3 倍. 工程预先选定 36 根基桩施工至现有地面(主楼内有 9 根基桩). 2018 年 7 月 5 日—2018 年 8 月 5 日,从预选桩中选取 12 根桩进行静载试验,其中,9 根基桩抗压(主楼内有 3 根基桩: 194 号, 232 号, 327 号),3 根基桩抗拔,结果均符合质量验收标准.

对 194 号, 232 号, 327 号主楼桩进行单桩竖向抗压静载试验,3 根试验桩的每级荷载增量为 1.55 MN,最大试验荷载均加至 15.5 MN,试验均进展顺利,均未出现异常现象. 3 根试验桩在最大试验荷载作用下的桩顶累计沉降量均小于 40 mm,且在每级荷载作用下的各级沉降增量均无明显增大的现象(Q - s 曲线无明显的陡降段),故 3 根试验桩均未达到极限承载状态,取最大试验荷载 15.5 MN 为其单桩竖向抗压极限承载力,满足设计要求. 试验桩的抗压静载试验结果,如表 6 所示.

表 6 主楼桩的抗压静载试验结果
Tab. 6 Test results of compressive static load of main building

试验桩编号	Q_{max}/MN	s_1/mm	δ/mm	Q_{uk}/MN	s_2/mm
194 号	15.5	19.47	3.10	15.5	19.47
232 号	15.5	13.01	1.21	15.5	13.01
327 号	15.5	19.03	4.67	15.5	19.03

194 号, 232 号, 327 号试验桩曲线,如图 14~16 所示. 当沉降量达到桩径的 10%时,才可能出现极限荷载^[2];黏性土中,桩端阻力充分增大所需的桩端位移为桩径的 4%~5%,而砂土中可能高达 15%. 因此,规范按 $s=0.05D$ 确定大直径桩的极限承载力是保守的.

工程桩有效桩长比试验桩少 2 m,桩端注浆不变,桩侧注浆阀由 3 道改为 2 道,桩侧注浆量由不小于 $3\text{ t}\cdot\text{根}^{-1}$ 改为不小于 $2\text{ t}\cdot\text{根}^{-1}$,注浆压力不变的情况下,在极限承载力作用下的桩顶沉降量由试验

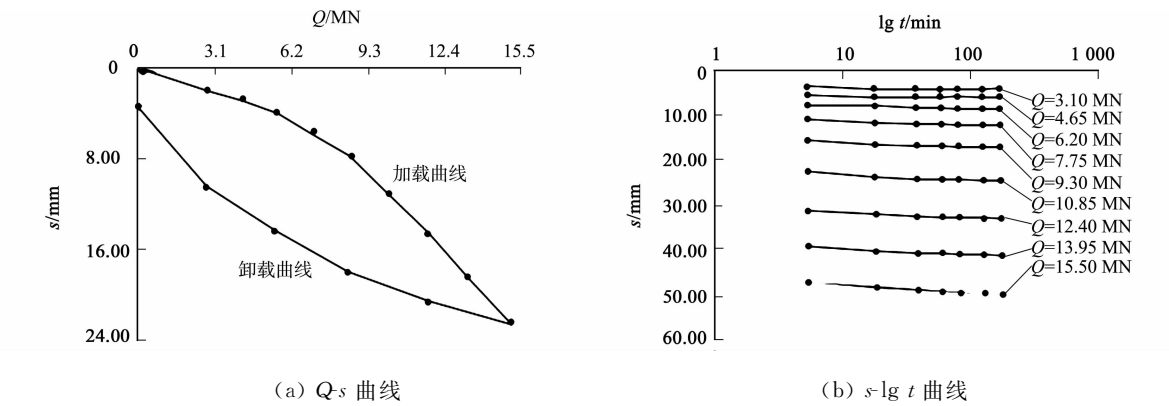


图 14 194# 试验桩曲线
Fig. 14 Curve of 194# test pile

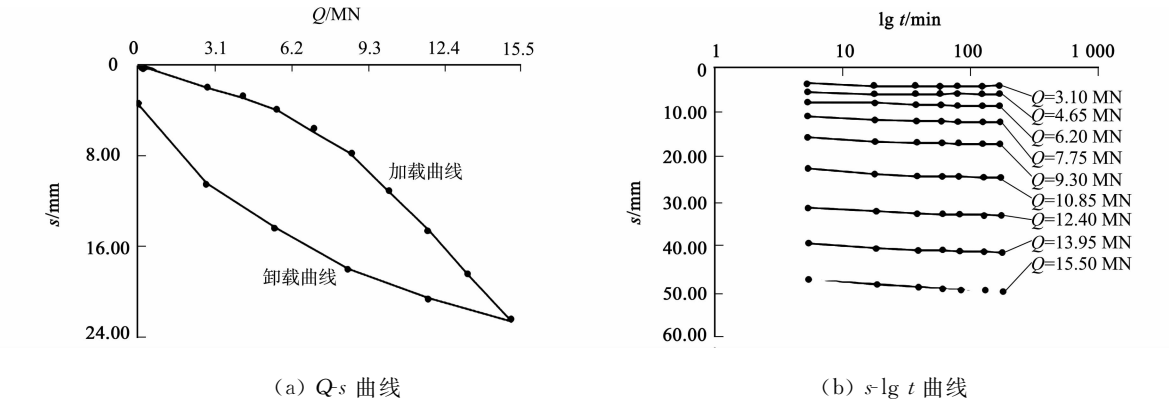


图 15 232# 试验桩曲线
Fig. 15 Curve of 232# test pile

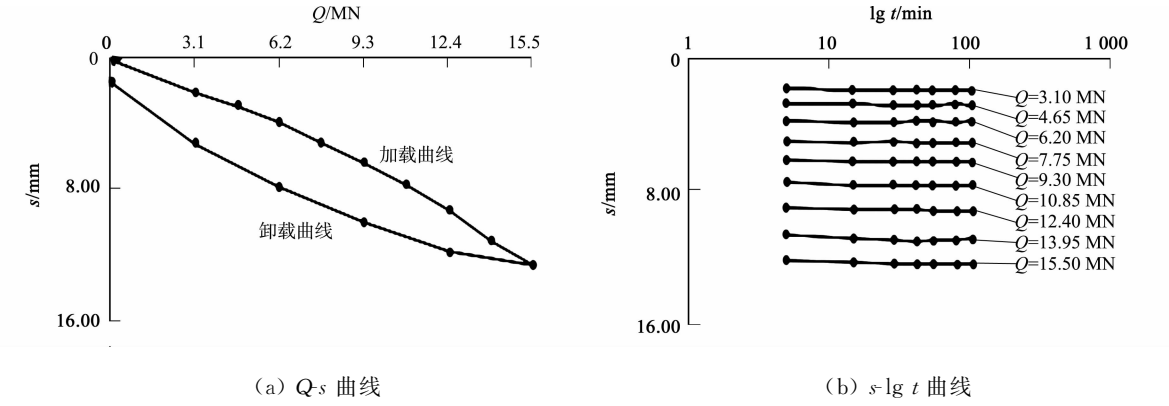


图 16 327# 试验桩曲线
Fig. 16 Curve of 327# test pile

桩静载时的 7.80~12.30 mm 增加至 13.01~19.47 mm, 桩侧及桩端阻力得到更好的增大, 避免浪费, 且累计沉降量为规范允许值的 40%, 可见仍有相当的安全储备. 由于工程基坑较深且场地受限, 采用 2 道内支撑, 工程进度较慢, 2019 年 11 月 15 日—2020 年 1 月 10 日对各选取的桩基分别进行低应变法、声波透射法试验, 均符合质量验收标准; 其中, 低应变法试验共检测 250 根桩基, I 类桩 248 根, II 类桩 2 根; 声波透射法试验共检测 51 根, 51 根均为 I 类桩. 目前基础已验收合格, 地下室正在施工.

7 结论

1) 项目位于厦门市湖滨南路 328 号地块, 从可行性、基础造价估算、施工技术、施工周期等方面进行全面分析、对比论证后, 基础选型采用桩端桩侧后注浆旋挖灌注桩方案. 在场地受限、基坑较深、上部荷载较大、工期较紧等诸多不利因素影响的情况下, 基础在工期内完工并已验收合格, 为其他类似工程

提供案例和参考.

2) 后注浆增强系数 β_{si} 是一个区间取值^[1], 工程试验桩 β_{si} 实测值离散性较大, 其极差均大于算术平均值 30%, 所以 β_{si} 取低值用于复核设计.

3) 相对冲击成孔, 旋挖法施工采用的静态泥浆护壁, 泥浆浓度低, 泥皮薄. 桩端桩侧复合后注浆承压浆液易于加固泥皮、充填间隙, 并在桩侧土体中渗透压密, 改变桩与桩侧土之间的性能, 提高桩身侧摩阻力, 也可有效提高基桩承载力, 减少桩长, 节约造价.

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[2] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

[3] 福建建工集团总公司, 福建省二建建设集团有限公司. 福建省灌注桩后注浆施工技术规范: DBJ/T 13-247—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[4] 钟杰, 李粮纲, 金宗川, 等. 滨海软土中超长后注浆灌注桩承载性能研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(11): 108-113. DOI: 10.19701/j.jzjg. 2020. 11. 019.

[5] 安一清. 变刚度调平、灌注桩后注浆技术在广奇财富中心二期工程的应用[J]. 建筑结构, 2018, 48(9): 108-111. DOI: 10.19701/j.jzjg. 2018. 09. 019.

[6] 刘焕存, 孙凤玲, 刘涛. 水下钻孔灌注桩后注浆承载特性试验研究[J]. 岩土工程技术, 2020, 34(4): 243-249. DOI: 10.3969/j. issn. 1007-2993. 2020. 04. 013.

[7] 刘涛, 刘焕存, 孙凤玲. 钻孔灌注桩单桩竖向承载力判定方法在武汉某工程中的对比研究[J]. 岩土工程技术, 2020, 33(3): 166-172 DOI: 10.3969/j. issn. 1007-2993. 2019. 03. 010.

[8] 祁福富. 福州地区钻孔灌注桩后注浆技术的应用[J]. 河南建材, 2019(4): 20-23. DOI: 10.3969/j. issn. 1008-9772. 2019. 04. 013.

[9] 陈涛. 钻孔灌注桩桩端后注浆技术及应用[J]. 低温建筑技术, 2019(2): 100-102. DOI: 10.13905/j.cnki.dwjz. 2019. 02. 028.

[10] 钟建敏. 苏州地区大直径超长后注浆钻孔灌注桩试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(6): 122-127. DOI: 10.19701/j.jzjg. 2019. 06. 023.

[11] 张武, 高炳琪, 姚晓旭, 等. 后注浆方式对灌注桩承载力影响的试验研究[J]. 建筑科学, 2018(11): 83-87. DOI: 10.13614/j.cnki. 11-1962/tu. 2018. 11. 012.

[12] 万征, 秋仁东. 桩侧桩端后注浆灌注桩水平静载特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 3588-3596. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme. 2014. 0566.

[13] 张利新, 康丽娟. 后注浆灌注桩单桩承载力影响因素分析及设计取值探讨[J]. 建筑结构, 2015, 45(20): 92-97. DOI: 10.19701/j.jzjg. 2015. 20. 017.

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

[15] 李永辉, 郭院成, 周同和. 不同后注浆类型大直径灌注桩承载性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(6): 984-993. DOI: 10.11717/j. issn: 2095-1922. 2017. 06. 04.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)