

堆填作用下滨海软土地层既有建筑 桩基病害治理实践

钟贵荣^{1,2}

(1. 福建省建筑科学研究院有限责任公司, 福建 福州 350108;
2. 福建省绿色建筑技术重点实验室, 福建 福州 350108)

摘要: 滨海软土地层开发前常需进行地表堆填处理, 堆填土层内碎石含量高及地下水丰富等特性对工程建设产生不利影响, 堆填土层产生的附加荷载作用会影响已建建筑的基础稳定。通过分析地下室结构的变形特性, 并采用开挖方式检查既有建筑桩基的变形情况, 研究堆填作用下滨海软土地层中既有建筑桩基产生病害的原因, 并提出适合地下室结构特点及堆填土层特性的锚杆静压桩治理方案和关键技术。实践表明, 通过设置临时钢支撑及在底板增加配重堆载, 均可提高压桩阶段地下室结构的稳定性; 采用跨承压桩及降低外墙承压桩速率等方式可以有效控制附加沉降; 在地下室外墙开孔泄压及承台内布置降水井可有效降低地下水位。本工程的顺利实施可为类似项目的桩基病害分析、加固方案设计及实施提供参考。

关键词: 滨海软土; 堆填; 桩基; 病害治理; 锚杆静压桩

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)06-0611-07

Practice of reinforcing pile foundation of existing buildings in coastal soft soil layers under landfill action

ZHONG Guirong^{1,2}

(1. Fujian Academy of Building Research Co., Ltd., Fuzhou 350108, Fujian, China;
2. Fujian Key Laboratory of Green Building Technology, Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract: Before using coastal soft soil layers, surface filling treatment is often required. The loading effect of the filling and the characteristics of the filling soil layer will have an impact on engineering construction and foundation stability. This paper analyzes the deformation characteristics of underground structures and examines the deformation of foundation piles of existing buildings through excavation methods. This study investigates the causes of foundation pile defects for existing buildings in coastal soft soil layers under landfill action and proposes a technical remediation plan and key remediation technologies for foundation piles using anchor jacked piles, tailored to the structural features of basements and the characteristics of landfill soil layer. The practice of pile foundation treatment has shown that the stability of basement during piling can be improved by setting temporary steel supports and adding counterweight stacking loads to the bottom plate. The additional settlement caused by piling can be effectively controlled by using methods such as cross-cap piling and lengthening the piling process. Creating pressure-relief openings in the external basement walls and installing dewatering wells inside the caps can effectively lower the groundwater level. The successful remediation of foundation pile defects provides a reference for defect analysis, reinforcement scheme design, and remediation implementation for similar projects.

Key words: coastal soft soil; landfill; foundation piles; defect remediation; anchor jacked pile

收稿日期: 2024-03-20

基金项目: 福厦泉国家自主创新示范区协同创新平台项目(35022CQXT202202); 福建省对外合作科技计划项目(202210014); 福建省建设科技项目(2022-K-143)。

作者简介: 钟贵荣(1985—), 男, 福建宁化人, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程技术研发工作。E-mail: 240854967@qq.com。

0 引言

我国东南沿海一带广泛分布淤泥质软土地层,该土层具有高含水率、低强度、高压缩性、流变性等特点。滨海淤泥质软土地层在开发建设前普遍需进行堆填处理,堆填地层内常带有大量的碎石或块石,这些因素对工程建设及地基稳定均带来不利影响。

滨海淤泥质软土地区建筑常采用预制桩或灌注桩基础,但在桩基础施工前,应对软土地层进行地基处理,否则可能产生桩基承载力不足的问题,引起不均匀沉降,进而影响建筑物的正常使用,甚至危及结构安全。既有建筑桩基事故及治理技术已有较多工程案例^[1-8],但大面积堆填处理后,滨海软土地层除了会发生竖向固结变形外,还具有显著的侧向位移效应^[9],桩基病害治理面临滨海软土复杂的时空变形效应、堆填层复杂的水文情况、结构自

身压重不足及地下空间狭窄等各种问题,因此对堆填作用下滨海软土地层既有建筑桩基病害治理技术进行研究具有重要意义。

1 工程概况

1.1 建筑及地质条件概况

某工程位于滨海淤泥质软土地区,场地主要分布有素填土层、第四系海陆交互沉积层、第四系冲海积层、第四系冲洪积层及第四系残积层,下伏基岩为白垩系石帽山群下组上段英安质熔结凝灰岩及凝灰熔岩岩脉,自上而下典型土层分布及主要物理力学参数见表1。场地地下水赋存、运移于①素填土、③卵石及基岩各风化带的孔隙、裂隙中,其中①素填土为建设开发前的堆填处理层,素填土碎石含量约40%~50%,碎石粒径为2~16 cm,渗透性具有不均匀性,总体属中等-强透水层,水量较丰富,为表层潜水。

表1 典型土层分布及主要物理力学参数

Table 1 Typical soil layer distribution and physical and mechanical parameters

土层名称	厚度/m	重度/(kN/m ³)	桩侧阻力标准值/kPa	桩端阻力标准值/kPa
①素填土	4.30~6.50	19.6	23	—
②淤泥	8.30~15.80	15.5	16	—
③卵石	5.20~8.20	22.3	95	5 200
④砂土状风化凝灰岩	3.92~34.50	20.3	100	7 100

本工程包括5栋28层的高层住宅楼,统一设置1层地下室,住宅楼主体为剪力墙结构,地下室部分为框架结构。地下室层高约为4.5 m,地下室埋深约为3.5 m,地下室占地面积约21 000 m²。采用Φ500/Φ600预应力管桩基础,共计954根,以③卵石为持力层,桩尖进入持力层深度不少于6.0 m,单桩长度约为28.0 m。地下室外墙与主楼距离约为10.0 m,地下室外墙与市政道路路基边缘距离约为20.8 m,场地典型局部平面布置图见图1。

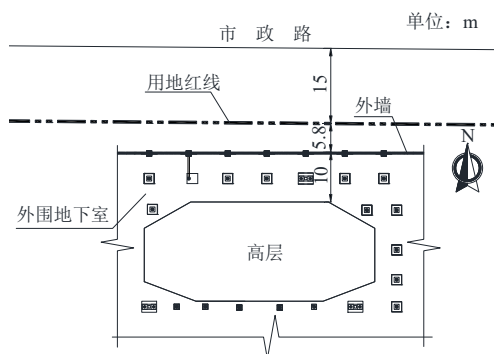


图1 典型局部平面布置图

Fig. 1 Typical local layout plan

1.2 变形分析

2021年4月地下室结构施工完毕,2021年6月完成肥槽回填工作,2021年9月开始陆续发现外围的地下室发生不同程度的沉降,其中地下室外墙一侧沉降大,而靠近主楼一侧沉降小,外墙最大沉降速率达0.25 mm/d,沉降速率不收敛且有变大的趋势,而不均匀沉降导致的地下室结构最大倾斜率为0.36%,最大倾斜率已经超过0.3%的限值。地下室底板、外墙、框架柱顶和柱底均发现裂缝,不及时处理可能导致严重安全后果。本工程地下结构变形剖面见图2。

已有研究结果表明^[9-10],软土在外荷载作用下竖向及横向均极易变形,结合本工程地下结构变形特点、地层特性及外部工况,分析地下结构变形因素:

(1) 地下室埋深约3.5 m,地下室外侧3.5 m厚的大面积堆填土层荷载(①素填土)及市政路基堆载会在桩基上形成水平附加土压力,在水平附加土压力作用下,预制桩发生水平变形(见图2),水平变形又使预制桩竖向承载力减小,严重时可导致

预制桩接头开裂、桩基失效。离堆载越近，附加水平土压力越大，桩基变形也越大，这也是外墙部位下沉较大的原因，由此分析堆填荷载是桩基下沉的主要因素。同时通过开凿地下室底板检验既有桩基，发现边墙承台底预制桩已偏离原桩位，预制桩被推移至承台边缘并形成明显裂缝（见图3），裂缝错位方向均由边墙指向地下室内，桩与承台的锚固连接已脱开，桩基承载性能降低。

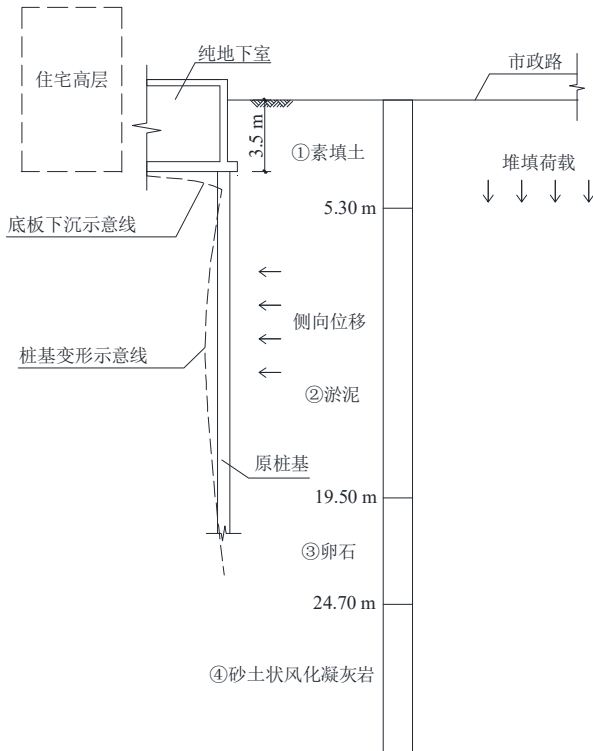


图2 地下结构变形剖面

Fig. 2 Deformation profile of underground structure



图3 桩基裂缝

Fig. 3 Cracks in foundation piles

(2) 地下室底板底与淤泥层顶面之间尚存在0.80~3.00 m厚的堆填层，堆填层作为淤泥层上覆荷载，使得淤泥层发生固结沉降，而堆填层回填时间较短，尚未固结稳定的淤泥层在桩基侧壁产生向

下的负摩阻力，负摩阻力与堆载水平附加土压力共同作用，导致桩基进一步下沉，负摩阻力亦是地下室下沉的因素之一。

(3) 地下室外墙回填完毕时主楼尚在施工，地下室外墙边缘顶板违规堆置大量建筑材料，包括钢材和砌体材料，材料堆置区域地下结构下沉量显著大于未堆置区域，顶板违规堆置材料也是导致地下室下沉的因素之一。

1.3 基础加固的重难点

本项目的基础加固需考虑施工空间、地质特点等因素，具体包括以下重难点：

(1) 既有建筑基础加固普遍存在施工空间狭窄的问题，本工程竖向净空约为3.7 m，应选用满足狭窄空间作业的加固方法，当前常用锚杆静压桩工艺，桩基材料可以选择预制混凝土桩、钢管桩或型钢桩，可根据桩基设计承载力、地层特性、既有地下结构、工艺可靠性、工程造价等因素综合选择；

(2) 地下室外墙下承台边缘与墙边净距仅为0.4 m，其他承台边缘与框架柱净距约0.5 m，承台面积小，无法在空隙处再钻孔压桩，因此采用扩大承台、预留压桩孔的方式新增加固桩；

(3) 地下室结构自重荷载有限，无法满足大吨位锚杆静压桩的压桩荷载需求，需考虑设置临时支撑措施保护既有结构，避免基础加固可能引发的结构二次损坏；

(4) 本工程位于滨海深厚软土地层，强度低，在软土层内新增桩基时，压桩过程中软土的拖带效应将导致既有桩基发生附加沉降^[1]，压桩过程应能有效控制附加沉降；

(5) 堆填层碎石含量大，水位较高，潜水埋深约0.80 m，地下室外墙及底板裂缝已发生渗漏，底板渗漏水具有承压水特性。水流侧向补给速度极快，基础加固过程应能有效控制地下室水位，确保作业安全和加固效果。

2 基础加固方案

2.1 基础加固方案概况

经对比分析，采用适合狭窄空间作业的锚杆静压桩工艺，操作简便且工艺成熟。桩型选用300 mm×300 mm预制混凝土方桩，单节桩长度为2.50 m，桩节采用角钢连接，桩身混凝土强度为C35。单桩竖向承载力特征值为600 kN，设计压桩

力为 1 200 kN，选取③卵石作为持力层。锚杆静压桩用 4 根 $\Phi 32$ 的精轧螺纹钢提供反力。

地下室不同部位的下沉情况不同，因此桩基病害采用分批加固方式实施，其中图 1 为首批加固部

位的一个典型区域，图 1 地下室原工程桩有 15 根，按图 4 所示布置锚杆静压桩，在每根边桩承台旁增加 2 根锚杆静压桩，而在地下室内部的每个承台旁增加 4 根锚杆静压桩，新增锚杆静压桩共计 42 根。

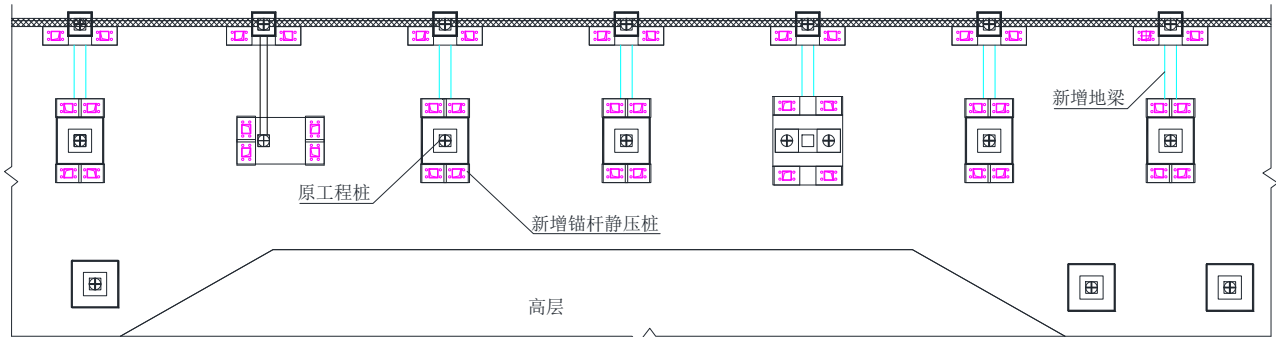


图 4 加固桩平面布置图

Fig. 4 Reinforcement pile layout plan

2.2 旧承台改造

原承台面积小导致无法在原承台上钻孔补桩，需加宽原承台尺寸以预留压桩孔洞，其中边墙承台加宽后尺寸为 800 mm×3 200 mm，新承台边缘距内墙净距为 800 mm。非边墙承台选择在原承台两侧进行加宽，加宽的尺寸为 800 mm。补桩孔位全部位于新增承台范围内，详见图 4。

原承台厚度为 800 mm，锚杆静压桩设计压桩力为 1 200 kN，原承台无法提供足够的锚固长度，为满足设计压桩要求的锚固力，改造后的承台厚度设计为 1 500 mm，承台改造详见图 5。

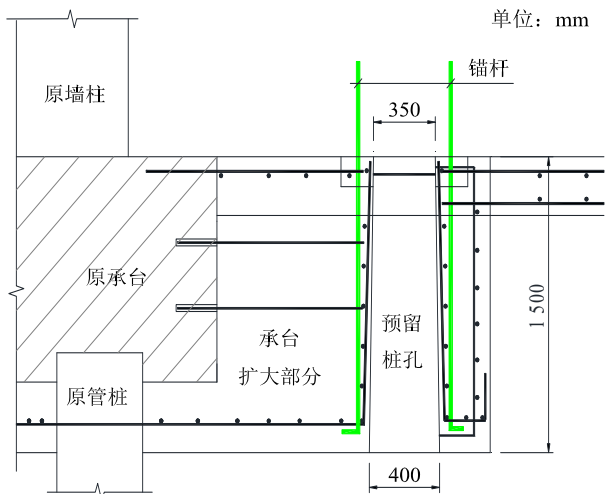


图 5 承台改造图

Fig. 5 Platform renovation diagram

2.3 增加承台连系梁

为增强结构的整体稳定性，在边墙承台和内部承台间设置连系梁，连系梁截面尺寸为 500 mm×700 mm，平面布置见图 4。

3 施工控制关键技术

本工程桩基加固的施工流程为：地下结构刚支撑临时加固→底板凿除（新增承台及新增地梁部位）→承台土方开挖（小型挖掘设备）→降水井施工→旧承台底剩余土方（人工开挖）→新承台施工→锚杆静压桩施工→检测→封桩→封井→底板恢复。与常规既有建筑基础加固相比，滨海软土地层既有建筑桩基加固具有自身特性，以下是本工程桩基病害治理成功的关键技术。

3.1 既有地下结构稳定控制技术

为减轻基础加固过程中各工艺对既有地下结构扰动导致结构二次损坏，正式施工前在每个旧承台与顶梁之间采用 $\Phi 325 \times 12$ 钢管做临时支撑，保护结构安全，地下室钢管临时支撑详见图 6。



图 6 钢管临时支撑

Fig. 6 Temporary steel pipe support

本工程锚杆静压桩的最大压桩力为 1 200 kN，边墙部位压桩影响范围内的结构可提供约 800 kN

自重荷载，非边墙部位压桩影响范围可以提供约 1 000 kN 自重荷载，均小于最大压桩荷载，直接压桩可能导致地下结构抬升或破坏。现场通过在地下室底板堆放钢坯方式解决自重不足的问题，钢坯堆放在新增连系梁或靠近承台的位置，或在承台上架设钢梁堆放钢坯，避免破坏底板结构。

3.2 附加沉降控制技术

滨海淤泥质软土地层具有高含水率、低强度等特性，已有研究表明^[11]，地基越软弱，灵敏性

越高，锚杆静压桩引发的拖带效应就越明显，压桩附加沉降越大。压桩挤土效应可在软土层内形成较大的超孔隙水压力，使软土强度降低，进一步加大软土层的沉降量。现场采用跨承台方式施工锚杆静压桩，边墙承台和内侧承台交错压桩，压桩路径见图 7。在沉降较大的边墙部位采用慢速压桩以减小附加沉降效应。压桩过程中密切关注地下结构变形情况，如有异常则重新调整施工顺序和压桩速率。

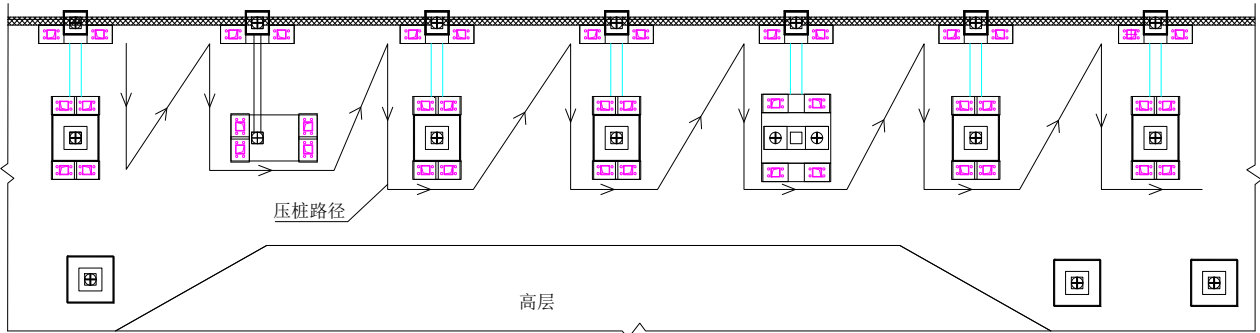


图 7 压桩路径
Fig. 7 Piling path

3.3 地下水控制技术

场地水位高于底板面约 2.5 m，新增承台厚度为 1.5 m，锚杆静压桩承台施工所需的降水深度不小于 4.00 m。开挖过程中发现堆填层地下水补给速度极快，采用水泵明排难以疏干作业面地下水。为此，在底板以上 0.50 m 处的外墙开孔泄水，泄水孔间距约为 2.00 m。结合承台部位堆填层开挖，在承台内设置降水井以抽排地下水，考虑到承台尺寸，仅在内部承台布置降水井，根据水量大小及堆填层厚度，各承台布置 1~2 口降水井，承台降水井布置见图 8。井管规格为 $\Phi 219 \times 3.0$ 钢管，井管深度比改造后承台底深约 1.20 m。现场降水井见图 9。



图 9 现场降水井
Fig. 9 On site dewatering well

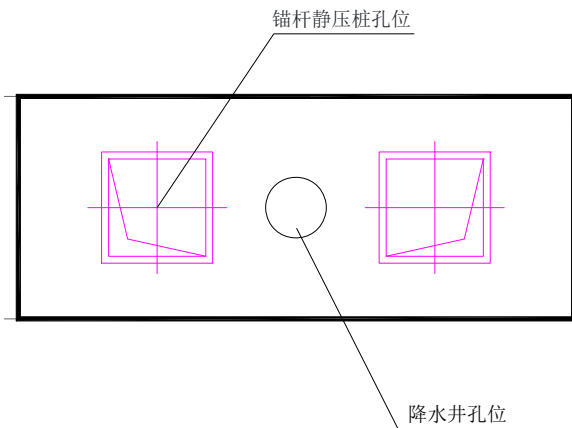


图 8 承台降水井布置
Fig. 8 Layout of dewatering well on pile cap

本工程地下室内部作业净高约 3.7 m，底板凿除后，先采用小型挖掘设备进行承台土石方开挖，至改造后承台设计底标高，而后施工降水井并进行降排水作业，最后掏土挖除旧承台底部土方。整个施工过程中，需保证降排水正常工作，特别是在承台浇筑及封桩阶段，应确保水位在承台底以下，避免新浇筑的混凝土在水中离析而影响工程质量。锚杆静压桩封桩完毕后，对降水井进行专项封堵。

3.4 锚杆静压桩复压

在软土地层中，后施工的锚杆静压桩会对先施工的桩产生挤压效应和拖带效应，且本工程锚杆静压桩间距较小，因此锚杆静压桩施工完毕后，在封桩前对已经压好的桩复压 1~2 次，确保单桩承载力满足要求，并采用带压封堵工艺进行封桩。

4 基础加固效果

首批 120 根锚杆静压桩施工时间为 2021 年 10 月—12 月, 共历时约 3 个月。施工完成后按设计及规范要求进行了静载试验检测, 锚杆静压桩单桩竖向承载力特征值为 600 kN, 设计要求最大试验荷载为 1 300 kN, 本次检测桩数量为 3 根, 采用锚杆静压桩设备进行加载。3 根桩所测得的特征值均为 650 kN, 检测结果均满足设计承载力要求。

地下室每根柱位均设置了沉降观测点, 桩基病害治理期间柱位典型沉降曲线见图 10。该测点所在柱位从第 12 天开始进行补强承台的土方开挖, 第 26 天进行压桩, 第 28 天封桩完毕。受承台土方开挖及压桩扰动影响, 这两个阶段的柱位沉降速率显著加快, 封桩后柱位沉降速率逐渐减缓。施工期间框架柱最大沉降增量为 18 mm。桩基加固施工完毕时, 加固部位地下室最大斜率为 0.42%。桩基加固完成后 150 d, 加固部位地下室柱位最大沉降增量为 5.2 mm, 最大斜率为 0.48%。再持续观测 100 d, 最大沉降速率约为 0.021 mm/d, 满足规范要求, 判断地下室结构变形已经稳定^[12]。

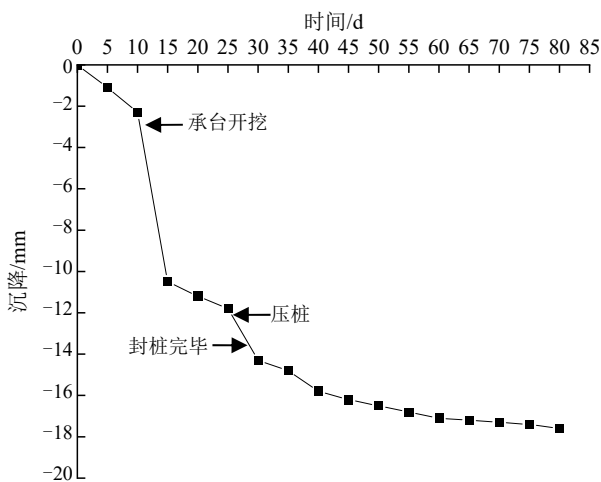


图 10 柱位典型沉降曲线

Fig. 10 Typical settlement curve of column position

需要注意堆填荷载会在较长时间内对软土产生影响, 随着时间推移, 新增桩基受力状态发生变化, 可能产生新的破坏, 因此本阶段病害初步治理后还应进行长期的日常巡查和监测, 观察地下室周边地表及地下结构的表观情况。在类似地层的桩基设计中应充分调查堆填土层的地质特性, 考虑堆填地层对工程施工及对已施工桩基稳定性的影响, 减

少类似病害的发生。

5 结论

结合工程实例, 提出了符合堆填地层特性、地下结构特点的滨海软土既有桩基锚杆静压桩治理方法, 得出如下结论:

(1) 堆填产生的附加荷载是本工程实例中滨海软土桩基变形破坏的主要因素;

(2) 结合临时钢支撑对既有地下结构进行稳定控制、压桩过程中附加沉降控制、地下水控制及锚杆静压桩复压等几个关键技术, 可较好地解决堆填作用下滨海软土既有建筑桩基病害治理的问题;

(3) 存在堆载作用的滨海软土地层桩基设计应充分考虑堆载作用的影响。

参考文献

- [1] 邱磊. 既有建筑采取锚杆静压桩结合堆载压重综合纠偏方法的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012.
QIU Lei. The comprehensive correcting method research of existing building with anchor static pile combined with surcharge preloading[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2012.
- [2] 胡建昌, 梁志荣. 锚杆静压桩在软土地区既有建筑基础加固中的应用[J]. 地基处理, 2020, 2(3): 241-244.
HU Jianchang, LIANG Zhirong. Application of statically pressed anchoring pile in improvement of foundation of existing building in soft soils[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(3): 241-244.
- [3] 李明. 软土地区高层建筑桩基加固技术的应用研究[J]. 地基处理, 2023, 5(6): 512-518.
LI Ming. Application and research on pile foundation strengthening technology of high-rise building in soft soil area[J]. Journal of Ground Improvement, 2023, 5(6): 512-518.
- [4] 李晓勇. 既有高层建筑物纠偏及桩基补强案例分析[J]. 地基处理, 2020, 2(2): 143-147.
LI Xiaoyong. Case study on rectification and pile foundation reinforcement for existing high-rise buildings[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(2): 143-147.
- [5] 杨砚宗. 超大吨位锚杆静压桩加固超高层建筑实践[J]. 工程勘察, 2023, 51(7): 30-35.

- YANG Yanzong. Practice of super high-rise buildings reinforced with super large tonnage anchor static pressure pile[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2023, 51(7): 30-35.
- [6] 张林波, 廖建忠, 王擎忠, 等. 超高吨位钢管锚杆静压桩在高层建筑基础控沉与纠倾微调处理中的应用实践[J]. *建筑结构*, 2023, 53(增刊 1): 2601-2607.
- ZHANG Linbo, LIAO Jianzhong, WANG Qingzhong, et al. Ultra high tonnage based control in high-rise building steel anchor rod static pressure piles and the application of rectifying inclination fine-tuning treatment practice[J]. *Building Structure*, 2023, 53(S1): 2601-2607.
- [7] 吴江斌, 王向军, 宋青君. 锚杆静压桩在低净空条件下既有建筑地基加固中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(增刊 2): 162-165.
- WU Jiangbin, WANG Xiangjun, SONG Qingjun. Application of foundation reinforcement by anchor-jacked piles under low clearance[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(S2): 162-165.
- [8] 梁志荣, 李忠诚, 李成巍. 深松软地基条件下工程桩事故分析及对策[J]. *上海交通大学学报*, 2012, 46(1): 69-72, 78.
- LIANG Zhirong, LI Zhongcheng, LI Chengwei. An engineering accident analysis and treatment of prefabricated engineering piles in Shanghai[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2012, 46(1): 69-72, 78.
- [9] 吴培贵. 大面积堆载作用下滨海软土侧向位移空间效应试验研究[J]. *福建建筑*, 2023(3): 70-73.
- WU Peigui. Experimental study on spatial effect of lateral displacement of coastal soft soil under large load[J]. *Fujian Architecture & Construction*, 2023(3): 70-73.
- [10] 柳志鹏. 水平加载对滨海深厚软土中桩基影响的试验研究[D]. 福州: 福州大学, 2018.
- LIU Zhipeng. Experimental study on effect of horizontal loading on pile foundation in deep soft soil of coastal area[J]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018.
- [11] 宋晓光. 锚杆静压桩加固既有建筑基础沉降分析[J]. *土工基础*, 2023, 37(2): 209-212.
- SONG Xiaoguang. Settlement analysis of anchor jacked pile reinforcing of the existing building foundations[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2023, 37(2): 209-212.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑变形测量规范: JGJ 8—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Deformation Measurement of Building and Structure: JGJ 8—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.