

历史风貌建筑地下增建与换胆式更新中的外墙 保护技术及三维有限元分析

陆陈英 罗志华

(上海勘察设计研究院(集团)股份有限公司, 上海 200093)

【摘要】 在城市更新与历史建筑保护协同发展的背景下, 以上海苏河湾 42 街坊 42C 地块为工程实例, 聚焦深基坑施工扰动引发的历史建筑外墙稳定性难题, 提出“锚杆静压钢管桩托换+背撑式钢框架加固”的主动保护技术方案, 通过单桩承载力计算与筏板抗冲切验算, 验证了方案的力学可靠性。为系统评估施工对保留建筑及周边环境的影响, 采用 Midas GTS NX 软件构建三维有限元模型, 全过程模拟搅拌桩施工、地连墙成槽至基坑开挖的结构变形与内力响应, 并通过 Midas Gen 2020 软件对临时加固体系进行专项分析。结果表明: 所提托换与加固方案可有效控制历史保留外墙及基础的变形与结构内力, 各项指标均满足现行规范要求; 同时能够严格控制邻近地铁隧道变形, 隧道响应远低于工程安全控制限值。研究可为同类工程提供技术参考。

【关键词】 历史建筑; 保留外墙; 基础托换; 锚杆静压桩; 有限元分析

【中图分类号】 TU473

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2026-0176

Protection technology and 3D finite element analysis for exterior walls of historic buildings subjected to underground addition and core-replacement renovation

LU Chenying LUO Zhihua

(SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

【Abstract】 Against the backdrop of the coordinated development of urban renewal and heritage building conservation, taking the 42C plot of Block 42 in Shanghai Suhe Bay as a case study, this paper addresses the stability challenges of historical building facades induced by deep foundation pit construction disturbances. An active protection scheme integrating “anchor static-pressed steel pipe pile underpinning and back-braced steel frame strengthening” was proposed. The mechanical reliability of this scheme was verified through single pile bearing capacity calculations and raft punching shear verifications. To systematically evaluate the impact of construction on the retained building and the surrounding environment, a three-dimensional finite element model was established using Midas GTS NX software. The entire process, from mixing pile construction and diaphragm wall trenching to foundation pit excavation, was simulated to analyze structural deformation and internal force responses. Additionally, a specialized analysis of the temporary strengthening system was conducted using Midas Gen 2020 software. The results indicate that the proposed underpinning and strengthening scheme can effectively control the deformation and structural internal forces of the retained historical facade and its foundation, with all indicators meeting current code requirements. Meanwhile, the deformation of the adjacent subway tunnel is strictly controlled, and the tunnel response remains well below the engineering safety control limits. This study can provide valuable technical references for similar projects.

【Key words】 historic building; exterior wall preservation; foundation underpinning; anchor static pressure pile; FEA

0 引言

在我国城市快速更新进程中, 城市核心区域更新建设与历史建筑保护的矛盾日趋突出^[1]。历史建筑承载城市文脉与时代价值, 是城市风貌传承的重要载体, 开展科学保护已成为行业共识^[2-4]。以上海为代表的近代开放城市, 中心城区留存有丰富的近代历

史建筑, 普遍存在结构老化、耐久性下降、地基承载力不足等问题。加之周边地下空间开发施工扰动, 进一步加剧了结构安全风险, 如何统筹城市更新与历史建筑协同保护, 已成为亟须解决的关键问题^[5-6]。

换胆式更新以保留原有外墙、重构内部结构为核心, 可兼顾历史风貌留存与建筑功能升级, 在城市

更新改造中应用广泛。已有学者围绕外墙保留改造的临时支护体系开展了大量研究。蔡颖估^[7]依托历史建筑加固工程,验证了钢桁架在墙体背撑与基础托换中的应用效果;张敏^[8]总结了以钢桁架为核心的多种外墙临时支护形式;司瑞娟^[9]提出模块化可回收支护体系方案。现有工程实践与理论研究,为历史建筑外墙保留和改造升级设计积累了参考经验。

邻近历史建筑的基坑开挖易诱发建筑附加变形,甚至结构损伤,基础托换是控制施工扰动、保护既有历史建筑的有效技术手段。国内学者分别结合不同历史建筑改造及邻近基坑建筑保护工程,采用锚杆静压桩、组合桩、桩基托换等技术开展工程应用,均有效控制了建筑沉降与结构变形,充分证实了基础托换技术在近基坑历史建筑保护中的适用性与可靠性,为类似工程提供了借鉴^[10-13]。

本研究以上海苏河湾 42 街坊保留建筑南北外墙基础托换与临时支撑加固工程为例,提出了一种适用于复杂地质条件、邻近地铁隧道与深基坑交互工况的“地上托换-地下扩建”技术,并通过三维有限元精细化建模分析其技术有效性,可为历史文物建筑保护与加固工程提供技术参考。

1 工程概况

1.1 项目概况

上海苏河湾 42 街坊 42C 地块位于上海市静安区,北临北苏州路,南至曲阜路,西接甘肃路,地块北侧(沿曲阜路)位于地铁 12 号线隧道安全保护区内。该地块建设项目属于城市更新项目,项目建设需保留南北两侧历史风貌外墙。为确保历史风貌外墙稳定,需对其基础进行加固,并对外墙采取临时支撑。

该地块拟建建筑地上 5 层、地下 3 层,基坑开挖深度 14.3~14.7 m,基坑分为 III、IV 两个区域,III 区基坑面积 6587 m²,IV 区基坑面积 2390 m²,基坑北侧为已运营曲阜路站-天潼路站区间隧道,隧道埋深约 16.7 m,距 IV 区基坑最近处约 16.5 m,基坑南侧距苏州河防汛墙最近处约 17.2 m。拟建基坑围护结构采用 800 mm 厚地下连续墙+3 道钢筋混凝土水平支撑,地下连续墙深度为 30~35 m。保留外墙与拟建基坑平面关系如图 1 所示。

如图 1 所示,拟建基坑平面范围内保留建筑群包含 5 栋历史建筑(编号分别为 01, 04, 05, 08, 09),均为该地区内具有年代风貌特征的近代历史遗存,建筑形制、立面风貌具备保留保护价值。本项目新建工程的核心要求为完整保留场地内南北侧位于红线外的历史外墙(包括 01 楼南北墙、09 北墙、04 楼南

墙、08 楼南墙)以及东侧一跨原有结构(05 楼)。特别是南北两侧拟保留的历史外墙,高度达 20~25 m,距拟建基坑地下连续墙仅 5~6 m,剖面关系如图 2 所示。

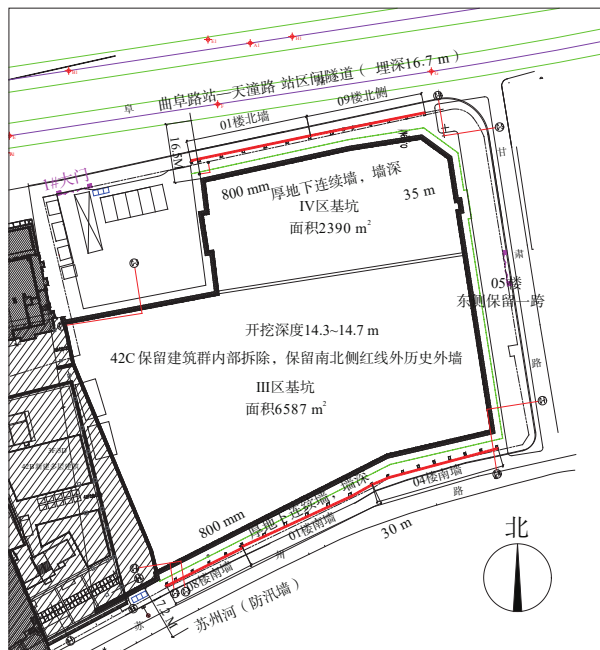


图 1 保留外墙及拟建基坑平面布置示意图

Fig. 1 Schematic plan layout of retained exterior walls and the proposed foundation pit

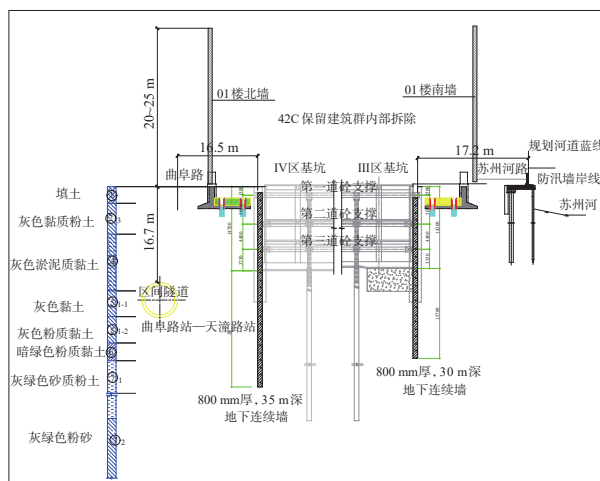


图 2 保留外墙及拟建基坑剖面示意图

Fig. 2 Sectional view of retained exterior walls and proposed excavation pit

1.2 工程地质及水文地质条件

本项目建设场区地貌属滨海平原,揭露范围内的地基土共划分 8 类土层、12 个亚层,除填土层为人工堆积层外,其余各土层均为第四系松散沉积层,其中第②、④、⑤层土为全新统(Q₄)沉积地层,第⑥、⑦、⑧、⑨层土为上更新统(Q₃)沉积地层。

场地浅部赋存的地下水类型为潜水,水位埋深

1.03 ~ 2.80 m(平均 1.37 m), 相应水位标高 1.43 ~ 2.20 m(平均标高 1.72 m)。潜水水位动态受降雨、地表水补给及蒸发作用调控。上海地区常年地下水埋深具有如下特征: 高水位平均埋深 0.5 m, 低水位平均埋深 1.5 m; 在地下 4 m 深度范围内, 水位受气温变化影响明显, 4 m 以下水温相对稳定, 为 16 ~ 20 ℃。拟建场地南侧与苏州河隔路相望, 苏州河与本工程基坑的最近距离约 13 m。场区潜水埋深较浅, 受地表水体及区域地下水径流影响, 场地潜水水位与苏州河水位存在一定水力联系, 河水水位涨落可对场区潜水水位产生动态调控作用。

1.3 保留墙体危险源及影响分析

保留墙体均为临街建筑的外墙结构, 结构形式为板柱结构, 此类结构的构件节点强度与刚度整体弱于常规框架结构。考虑到沿街单立墙在失去内部及屋顶支撑后会形成悬臂受力状态, 结构的抗失稳能力将显著减弱。尤其在构件拆除阶段, 原本弱于常规框架的节点刚度易导致体系向静定化转变, 进而引发局部失效或整体倒塌。若此时产生超限位移, 除了危及作业安全外, 对建筑使用阶段的功能完整性亦有负面影响。

保留外墙靠近新建地下室范围, 在新建地下室区域, 基坑施工会对周边土体产生扰动并引发变形, 进而导致既有保留结构出现不均匀沉降与开裂。原有墙体既有基础因截面宽度较窄, 整体刚度相对较弱, 在围护结构施工与深基坑开挖的叠加影响下, 单靠基础自身的受力体系已难以遏制潜在的位移风险, 抗变形能力严重不足。

新旧结构的基础形式与荷载分布存在差异, 且两者仅通过侧向支撑连接, 两者存在一定的差异沉降, 长期使用过程中的不均匀沉降会导致连接部位及墙体表面出现破坏性裂缝, 影响建筑美观。

可供保留外墙临时支撑布设的空间较为狭窄, 且保留时间横跨整个施工期, 临时支撑的设置要满足其自身的安全稳定要求, 同时结合场地条件, 尽可能避免影响其他施工工序。地下室施工期间, 场地内有大型机械作业, 临时支撑在平面上要尽量避让机械作业路线, 还要考虑高空作业影响范围, 采取措施避免机械意外碰撞外墙与临时支撑结构。

2 保留外墙保护设计

2.1 总体思路

本项目以“满足刚性保护要求、无扰动地铁运营”为核心目标, 兼顾保留外墙稳定性与地下空间开

发需求, 整体采用“主动加固、先托后挖”的策略, 通过提前完成基础托换加固, 形成可靠受力体系后再开展基坑开挖作业, 控制施工扰动影响。

在托换桩选型阶段, 对比了锚杆静压桩、微型桩等主流方案, 围绕振动控制、空间限制、承载力需求三大核心目标进行综合研判。微型桩虽施工灵活, 但承载力有限, 且施工振动易对历史外墙及周边地铁产生潜在影响; 锚杆静压桩施工空间需求低, 其承载力可通过调整桩径、桩长灵活适配项目要求, 无需通过调整桩型来满足承载力需求。锚杆静压桩可选用预制桩与钢管桩两种类型, 综合考虑保留外墙与地铁 12 号线隧道的敏感性, 为减小压桩挤土效应、降低施工对周边敏感构筑物的扰动, 选用 $\phi 273 \times 10$ mm 钢管桩。该桩型适配项目狭窄施工空间, 依托锚杆静压工艺实施, 施工过程无明显振动, 既能满足对保留外墙的刚性保护需求, 又可减小对保留外墙与地铁 12 号线隧道的扰动。

2.2 基础托换设计

在原有基础条件下采用锚杆静压工艺施工钢管桩, 通过优化基础的整体刚度分布, 提升其与土体间的形变协调效率, 以应对地表可能出现的各类不确定性位移响应^[14-16]。根据上海市规范《地基基础设计标准》(DGJ 08—11—2018), 钢管桩抗压、抗拔承载力分别按下式计算:

$$R_d = \frac{R_{sk}}{\gamma_s} + \frac{R_{pk}}{\gamma_p} = \frac{U_p \sum f_{si} l_i}{\gamma_s} + \frac{f_p A_p}{\gamma_p} \quad (1)$$

$$R'_k = \frac{U_p}{\gamma_s} \sum \lambda_i f_{si} l_i + G_p \quad (2)$$

式中: R_d 为单桩竖向抗压承载力设计值; R_{sk} 和 R_{pk} 分别为钢管桩侧阻力和端阻力标准值; γ_s 和 γ_p 分别为侧阻力和端阻力修正系数; U_p 为钢管桩横截面周长; f_{si} 为桩周第 i 层土的极限摩阻力标准值; l_i 为第 i 层土体厚度; f_p 为桩端土极限端阻力标准值; A_p 为桩端截面积; R'_k 为单桩抗拔承载力设计值; λ_i 为第 i 层土的抗拔系数; G_p 为桩身自重。

综合考虑地层条件与承载力计算, 确定桩长为 30 m(进入砂质粉土⑦₁层), 按单桩竖向承载力设计值 $R_d = 500$ kN, 单桩抗拔承载力设计值 $R'_k = 200$ kN 进行基础托换设计。考虑到保留外墙下部的基础需满足永久荷载工况的性能标准, 钢管桩沿原结构墙体走向紧贴墙体排布, 以实现荷载的最优传递, 平均每根柱位下方设 2 根桩, 同时在墙体内侧靠近基坑一侧增设 1 根桩, 共同提供竖向支撑和抗侧移刚度。

压桩采用锚杆静压工艺,可充分利用原有保留建筑的基础及上部结构自重。以 01 楼北侧保留外墙为例,其原有基础为梁板式筏板基础,板厚 228 mm,原有桩基为小方桩。施工时,在原筏板上开设孔洞进行压桩,随后叠浇宽度约 3 m、厚度 500 mm 的 C35 现浇混凝土托换板。通过新增叠浇层与原有基础的有效连接,充分发挥原有基础的整体性,从而增大结构整体刚度。临时支撑柱脚及保留墙柱均落于加固后的基础板上,依托厚板刚度实现沉降协调。基础托换加固平面与剖面布置如图 3、图 4 所示。

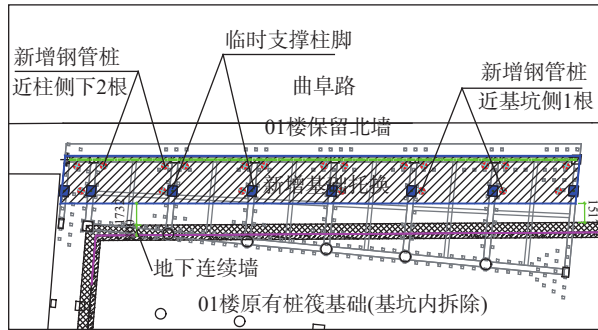


图 3 基础托换加固平面布置示意图

Fig. 3 Plan view of foundation underpinning and strengthening

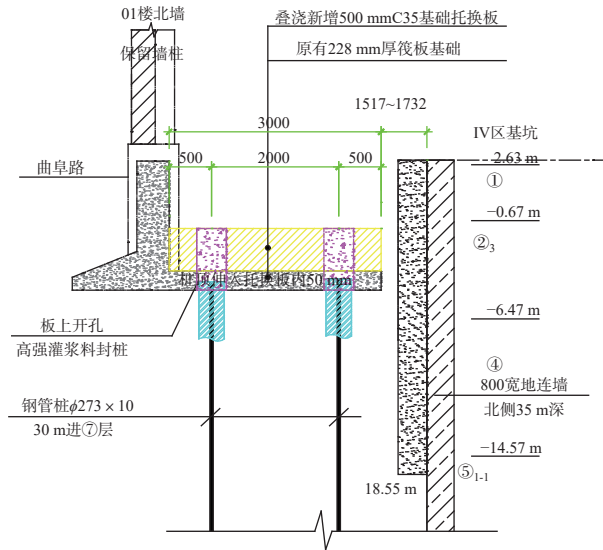


图 4 基础托换加固剖面布置示意图(单位:mm)

Fig. 4 Sectional view of foundation underpinning and strengthening (Unit: mm)

如图 4 所示,钢管桩锚入新增基础托换板内 50 mm,基桩抗冲切验算时不计入原有基础贡献,抗冲切验算截面如图 5 所示。根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008),筏板受内部桩冲切的承载力按式(3)计算:

$$N_1 \leq 2.8(b_p + h_0)\beta_{hp}f_t h_0 \quad (3)$$

式中: b_p 为桩身截面有效宽度,对于 $\phi 273 \times 10$ mm 的钢管桩,取外径的 0.8 倍,即 $b_p = 0.8 \times 273 = 218.4$ mm; h_0 为托换板的有效高度,取筏板厚度(500 mm)减去钢管桩锚入长度(50 mm),即 $h_0 = 450$ mm; β_{hp} 为筏板受冲切承载力截面高度影响系数,当筏板厚度 $h \leq 800$ mm 时,取 1.0; f_t 为托换板混凝土(强度等级 C35)的轴心抗拉强度设计值,取 1.67 N/mm²; N_1 为基桩的冲切反力设计值,按最不利工况取 $N_1 = 1.35R_d = 675$ kN。将上述参数代入式(3)进行验算,有:

$$2.8 \times (0.218 + 0.45) \times 1.0 \times 1.67 \times 0.45 \times 1000 = 1975 \text{ kN} > 675 \text{ kN}$$

因此,托换板抗桩冲切验算可满足规范要求。

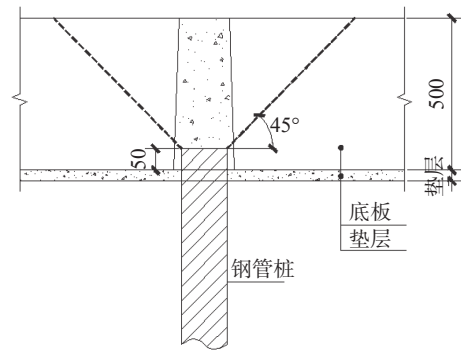


图 5 基桩抗冲切验算截面(单位:mm)

Fig. 5 Section for punching shear verification of pile (Unit: mm)

2.3 结构临时加固设计

若对保留外墙采用传统三角形桁架支撑,会因场地占用过多而制约增建地下室基坑地下连续墙的作业效率。为了在保证保留外墙整体稳定性的同时克服上述不足,保留外墙临时支撑设计需满足以下四项核心要求:①场地占用量小,适配现场施工条件,可以避免围护结构施工区域,无需对地下室设计方案进行调整;②具备充足刚度,能够有效抵御外部载荷导致的几何形变;③施工便捷,通过缩减墙体孤立暴露的时间,大幅提高工序速度,实现在短时间内构建起稳固的抗侧力体系;④方便拆除,连接部位的构造细节应充分考虑后期拆卸的便捷性,防止撤除临时支撑时对既有外墙造成二次损伤。

本工程的临时支撑由背撑式钢框架构成,旨在通过空间排架效应提供稳定约束。通过在原混凝土框架柱后部配置钢立柱,并利用钢管支撑件将两者锚固为一体;横向维度则引入钢桁架作为联系构件,利用其高抗弯刚度来提升整个支撑系统的力学性能,确保支撑体系的稳定性和可靠性。

钢结构支撑体系施工时原有主体结构予以保留,先搭设整层脚手架实施临时托换,保障施工钢立柱与楼层支撑体系的安全稳定,同时对支撑体系后方拟拆除区域的楼板采用托板钢梁先行临时托换(见图6)。

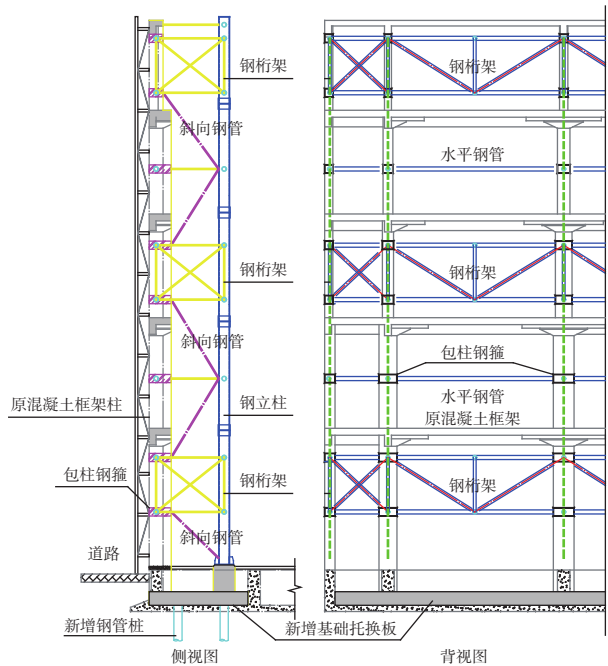


图6 临时支撑体系示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the temporary support system

钢柱采用箱形截面,截面尺寸 400 mm×300 mm×16 mm,托板钢梁规格为 HN300×150 mm,钢桁架主杆采用 $\phi 159\times 8$ mm 焊接圆管,腹杆采用 $\phi 108\times 6$ mm 焊接圆管。钢柱和托板钢梁材质采用 Q345B,其余钢构件材质均采用 Q235B。

3 外墙基础托换的有限元分析验证

3.1 有限元模型建立

鉴于此类工程的复杂性,有限元方法已成为托换设计过程中不可或缺的核心分析工具^[17-18]。据此,本文采用 Midas GTS NX 系统实施了有限元仿真演算,旨在通过数值模拟手段还原场地的力学响应特征。

结合基坑开挖深度及保留建筑物结构的分析需求,本次建立的整体三维有限元模型尺寸确定为 250 m×250 m×63 m,模型充分考虑了加撑托换及建筑拆除后的结构构件,同时,为模拟基坑地连墙围护及搅拌桩施工对保留建筑的影响,在靠近保留建筑的基坑南北两侧建立了模拟搅拌桩单元。有限元分析模型如图7—图9所示。

3.2 计算参数

为简化计算,对模型进行如下假定:

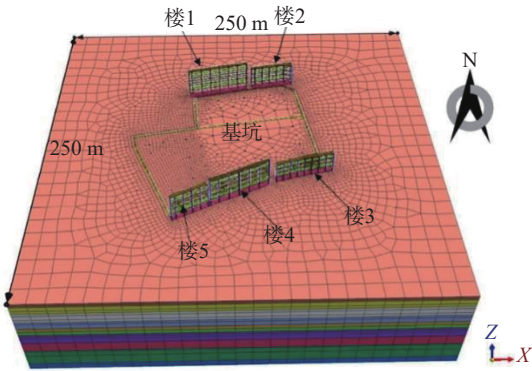


图7 整体三维模型

Fig. 7 3D model of the entire structure

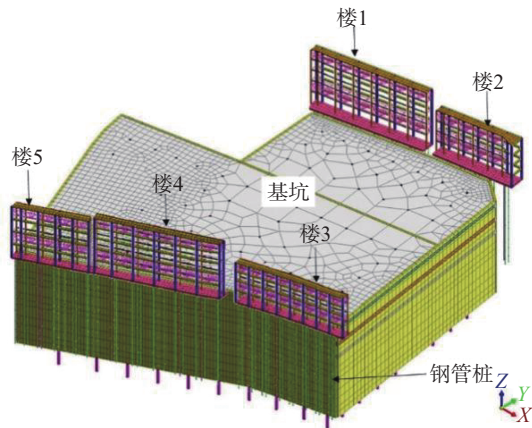


图8 基坑与保留建筑三维模型

Fig. 8 3D model of the foundation pit and retained buildings

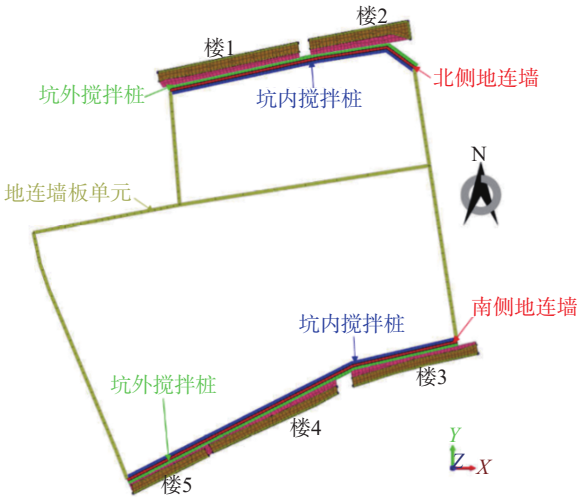


图9 基坑与保留建筑平面位置关系

Fig. 9 Plan view of the positional relationship between the foundation pit and the retained building

- (1)同一层土体为均质、各向同性,采用修正 Mohr-Coulomb 材料模型,由非线性弹性模型和弹塑性模型组合,计算参数如表1、表2所示;
- (2)靠近保留建筑外墙的基坑南侧和北侧地连墙采用三维实体结构单元模拟,其余地连墙、圈梁、支

表 1 土体计算参数
Tab. 1 Soil calculation parameters

土层编号及名称	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c /kPa	φ /($^{\circ}$)	E_{50}^{ref} /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa
①杂填土	19.0	3	10	7	21
② ₃ 粉质黏土	18.4	5	31	9	27
④淤泥质黏土	16.8	11	11.5	5.5	16.5
⑤ ₁₋₁ 黏土	17.7	13	14	7	21
⑤ ₁₋₂ 粉质黏土	18.2	17	18.5	8	24
⑥粉质黏土	19.7	41	19.5	12	36
⑦ ₁ 砂质粉土	18.8	5	34	21	63
⑦ ₂ 粉砂	19.0	4	35	50	150
⑧ ₁ 粉质黏土	17.9	15	17.5	9	27
⑧ ₂ 粉质黏土粉砂互层	18.5	16	21.5	14	42

表 2 基坑围护、建筑及地铁隧道结构参数
Tab. 2 Parameters of foundation pit support, building, and tunnel structures

结构	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν
基坑地连墙	25	31.5	0.20
基坑搅拌桩(南、北侧)	23	22	0.20
基坑圈梁、支撑	25	30.5	0.20
基坑立柱	79	200	0.20
基坑立柱桩	25	31.5	0.20
建筑顶楼板、底板	25	31.5	0.20
建筑托换柱、托梁	79	200	0.25
建筑层间支撑、水平桁架	79	200	0.25
建筑钢管桩	79	200	0.25
地铁盾构隧道	25	32.5	0.20

撑、立柱及立柱桩均采用线弹性材料模型;

(3)基坑南侧和北侧地连墙、坑内坑外搅拌桩采用降低土体强度的方法模拟成槽施工。地连墙、搅拌桩完成后采用线弹性材料模型;

(4)保留建筑底板和顶楼板,梁柱及钢管桩,地铁盾构隧道采用线弹性材料模型;

(5)基坑四周地面超载 20 kPa。

3.3 保留外墙结构的变形

有限元模拟分析表明,基坑开挖至坑底是最不利工况。在基坑围护施工阶段,保留外墙结构南北向水平位移约 5 mm,竖向沉降约 2 mm。在基坑开挖至坑底时,上部结构产生了明显的水平位移,最大南北向水平变形量达 11 mm,变形方向均朝向坑内(见图 10(a));最大竖向变形量为 5 mm,均表现为沉降(见图 10(b))。

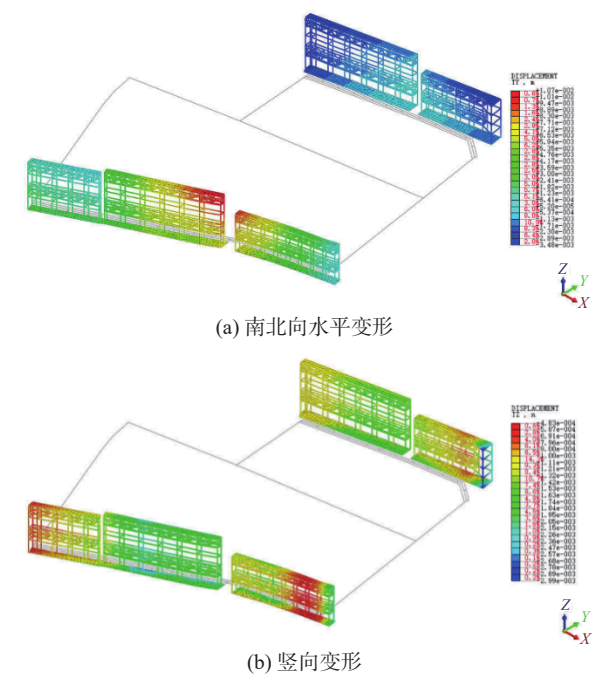


图 10 基坑挖至坑底时保留外墙结构变形
Fig. 10 Structural deformation of retained exterior wall at final excavation stage

工程实施过程中,沿保留建筑布设倾斜和沉降监测点,在基坑围护施工期间,保留建筑累计竖向沉降 0.26 ~ 3.08 mm,上部结构水平位移为 1 ~ 3 mm;基坑开挖至坑底后,保留建筑累计竖向沉降为 0.16 ~ 6.42 mm,上部结构水平位移为 2 ~ 6 mm。保留建筑外墙变形满足现行工程设计规范及历史建筑保护要求,说明对保留建筑外墙实施的基础托换方案是有效的,施工影响被控制在安全阈值内,确保了历史建筑在基坑工程实施过程中的结构安全。

保留外墙变形的有限元分析结果与监测数据基本吻合,验证了本研究数值模型的合理性和可靠性。

3.4 钢管桩变形及内力

针对搅拌桩施工、地连墙成槽以及基坑开挖至坑底三个关键工况,采用有限元软件对保留建筑基础托换钢管桩的结构响应进行了模拟和评估。其中,搅拌桩和地连墙成槽对钢管桩产生的变形影响极小。基坑开挖至坑底是最不利工况,钢管桩水平变形最大值达到 19 mm,变形方向朝向基坑内部,如图 11(a)所示,该变形量与周围土体的水平变形基本一致,表明基坑侧壁的整体侧向位移对紧邻的托换桩产生了强烈的推挤作用。桩身竖向变形呈现差异化分布,桩身底部表现为隆起,最大隆起量为 1.2 mm,如图 11(b)所示,该隆起由基坑开挖引起的坑底土体卸载隆起效应直接传递至桩底所致;桩身上部表现为沉降,最大沉降量为 2.4 mm。桩身轴力最大值 790 kN,轴力的

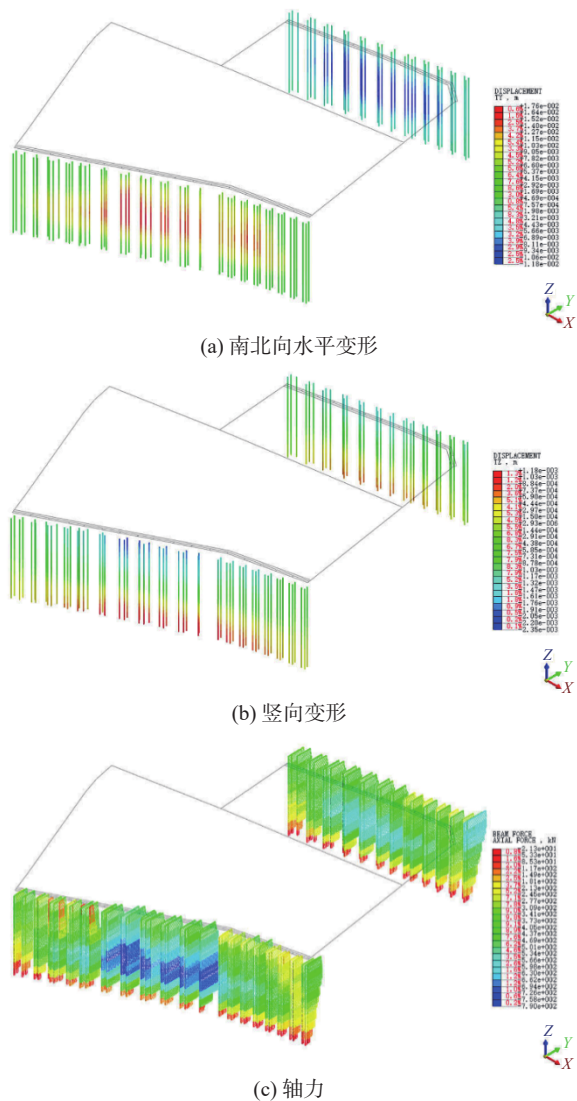


图 11 基坑挖至坑底时钢管桩变形和轴力分布

Fig. 11 Deformation and axial force distribution of steel pipe piles at the final excavation stage

增长反映了基坑开挖导致土体侧向约束减弱及上部结构荷载传递路径的重分布,如图 11(c)所示。根据有限元模拟结果,基坑开挖施工对邻近的保留建筑外墙的影响处于安全可控范围。

3.5 压桩对邻近隧道的影响分析

地铁 12 号线隧道直径 6.2 m, 隧道顶埋深约 16.7 m, 底埋深约 22.9 m, 距离项目北侧楼 1 和楼 2 的钢管桩水平距离仅约 9 m。为了分析钢管桩施工对邻近地铁隧道产生影响^[19-20], 本文对钢管桩静压施工过程进行有限元模拟分析, 数值模型如图 12 所示。

有限元模拟结果表明, 钢管桩静压施工对地铁隧道的位移影响较小且局部化。隧道结构产生的最大水平位移约为 0.1 mm。变形方向为远离桩基一侧, 如图 13 所示, 主要由桩体挤土对侧向土体产生的应力波及扰动所致。隧道结构产生的最大竖向位移约

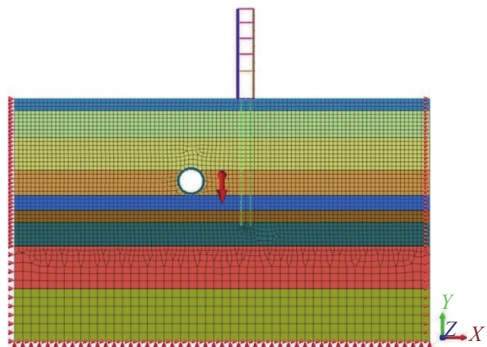


图 12 二维有限元模型

Fig. 12 2D finite element model

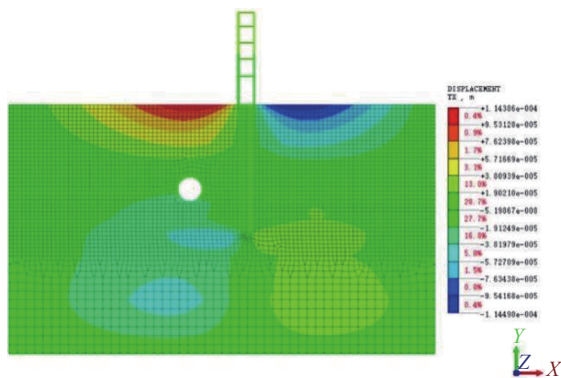


图 13 模型整体水平变形云图

Fig. 13 Contour of overall model horizontal deformation

为 0.44 mm, 表现为下沉, 如图 14 所示, 主要由桩体挤压效应导致土体应力场重新分布引起。

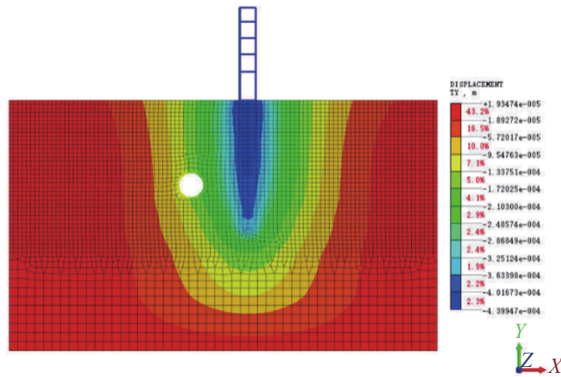


图 14 模型整体竖向变形云图

Fig. 14 Contour of overall model vertical deformation

有限元分析显示, 地铁隧道管片结构在压桩施工后产生的附加内力变化处于安全范围。隧道结构的最大竖向沉降和最大水平位移均处于毫米量级。依据上海市《城市轨道交通结构安全保护技术标准》(DG/TJ 08—2434—2023), 对地铁安全保护区内外外部作业的变形控制要求为绝对位移限值 ≤ 20 mm, 有限元分析所得各项位移量值均远低于该限值。表明采用钢管桩静压施工工艺能够有效避免冲击和振动对邻近地铁隧道产生的不利影响, 是一种可行且安全

的托换技术。

4 外墙临时加固的有限元分析验证

本研究使用 Midas Gen 2020 对钢结构支撑体系进行整体分析。桁架水平支撑腹杆与斜撑腹杆均假定为与主杆铰接; 楼层处钢管支撑与混凝土框架柱连接形式假定为铰接, 与钢立柱连接形式假定为刚接; 钢框架柱假定为固端支座, 加固施工时顶至顶层楼面梁下, 采用植筋锚板与柱顶焊接, 柱顶假定为铰接; 保留外墙间支撑体系断开。分别针对墙 1—墙 5 建立数值计算模型。

4.1 计算荷载

墙体倾斜荷载: 因保留外墙未进行倾斜鉴定, 依据周边建筑 04 号楼、09 号楼南北向倾斜预估, 假定南北侧外墙存在 0.05% 的初始倾斜(朝坑内方向), 按不利荷载考虑, 以力平衡原则将墙体自重考虑倾斜后折算为水平荷载, 以节点力形式作用在框架上。

风荷载: 基本风压 $\omega_0=0.55 \text{ kN/m}^2$, 体形系数 $\mu_s=1.3$, 风振系数 $\beta=2$ (考虑本结构墙面有较多开洞, 取开洞率为 50%), C 类场地。

支座位移: 依据三维有限元分析内容, 对原混凝土框架柱及钢框架柱柱脚施加水平位移(向坑内)及垂直竖向沉降位移, 以线性变化强制位移形式加于支座。

4.2 计算结果

结合本工程支撑体系设计、基础托换要求及现场施工条件, 根据实际施工情况, 可分为以下三个施工阶段:

(1)拆除内部结构施工阶段: 取最不利情况, 即内部结构完全拆除, 荷载组合为 1.0 恒载+1.5 风荷载(朝坑内方向)+1.0 初始倾斜, 根据墙体实测平均倾斜率, 按内力等效换算为柱脚位移差(10 mm), 不叠加施工扰动位移, 设定为工况 1。

(2)基坑围护施工阶段(搅拌桩施工、地墙成槽): 施工扰动引起土体位移, 在工况 1 荷载组合基础上叠加围护阶段产生的支座强制位移, 取 1.0×支座位移 1, 即 5 mm 水平位移(向坑内)与 2 mm 竖向沉降设定为工况 2。

(3)地下室开挖阶段: 随着基坑的开挖对地表土体的影响加剧, 在工况 1 荷载组合基础上叠加 1.0×支座位移 2, 即 11 mm 水平位移(向坑内)与 5 mm 竖向沉降设定为工况 3。

不同工况下的有限元计算结果如表 3、表 4 所示。

计算结果显示, 最不利变形出现在工况 2 阶段,

表 3 墙 1—墙 5 顶部位移计算结果 mm

Tab. 3 Top displacements of Wall 1 to Wall 5

序号	工况1	工况2	工况3
墙1	16.3	26.1	24.7
墙2	7.7	43.7	22.1
墙3	11.4	47.3	21.6
墙4	24.5	55.1	33.6
墙5	15.1	38.9	26.6

表 4 墙 1—墙 5 应力区间计算结果 N/mm²

Tab. 4 Stress ranges of Wall 1 to Wall 5

序号	工况1	工况2	工况3
墙1	-80.9/48.3	-139.5/47.6	-80.9/48.3
墙2	-40.5/28.6	-77.4/42.9	-60.0/36.9
墙3	-67.5/52.9	-75.4/110.5	-68.2/113.6
墙4	-74.1/52.9	-83.8/53.5	-74.8/51.4
墙5	-60.4/35.2	-72.8/35.0	-71.6/37.0

即基坑围护施工期间, 各墙整体变形及应力分布如图 15 所示, 其中左图为应变图, 右图为应力图。数值模拟结果表明, 支撑结构顶部的位移增量(15 ~ 30 mm)与倾斜变化(0.00075 ~ 0.0015)已进入显著形变影响区间。场地红线约束导致的支撑横向展布宽度不足是诱发该现象的核心因素, 这使得体系对不均匀沉降产生了明显的几何放大效应, 即仅 3 ~ 5 mm 的微小柱间差异沉降, 便足以驱动顶端产生数倍的水平偏差。尽管形变表现活跃, 但由于主体构件的抗力水平尚有盈余, 且倾斜指标未突破设计阈值, 系统整体仍维持在稳定受控状态。为精准防控沉降风险, 后续需落实信息化施工准则, 通过动态调配成槽速率、优化重型机械动载路径, 并辅以高精度全过程监测, 实现对柱间差异沉降的有效控制。

5 结论

上海苏河湾 42 街坊 42C 地块历史建筑外墙保护工程邻近深基坑和地铁隧道, 施工作业空间狭窄, 针对上述复杂工况, 制定了一套基础托换与临时加固的技术方案, 并通过三维有限元模拟进行了验证, 得出以下结论:

(1)单桩承载力与基础抗冲切验算表明, 由 $\phi 273 \text{ mm}$ 灌芯钢管桩和 C35 混凝土筏板组成的“桩-筏”主动托换体系满足历史建筑外墙的长期承载要求, 其协同工作机制可有效保障基础的整体性。

(2)三维有限元模拟结果显示, 从基坑围护施工到基坑开挖完成的全周期内, 保留外墙结构最大水平

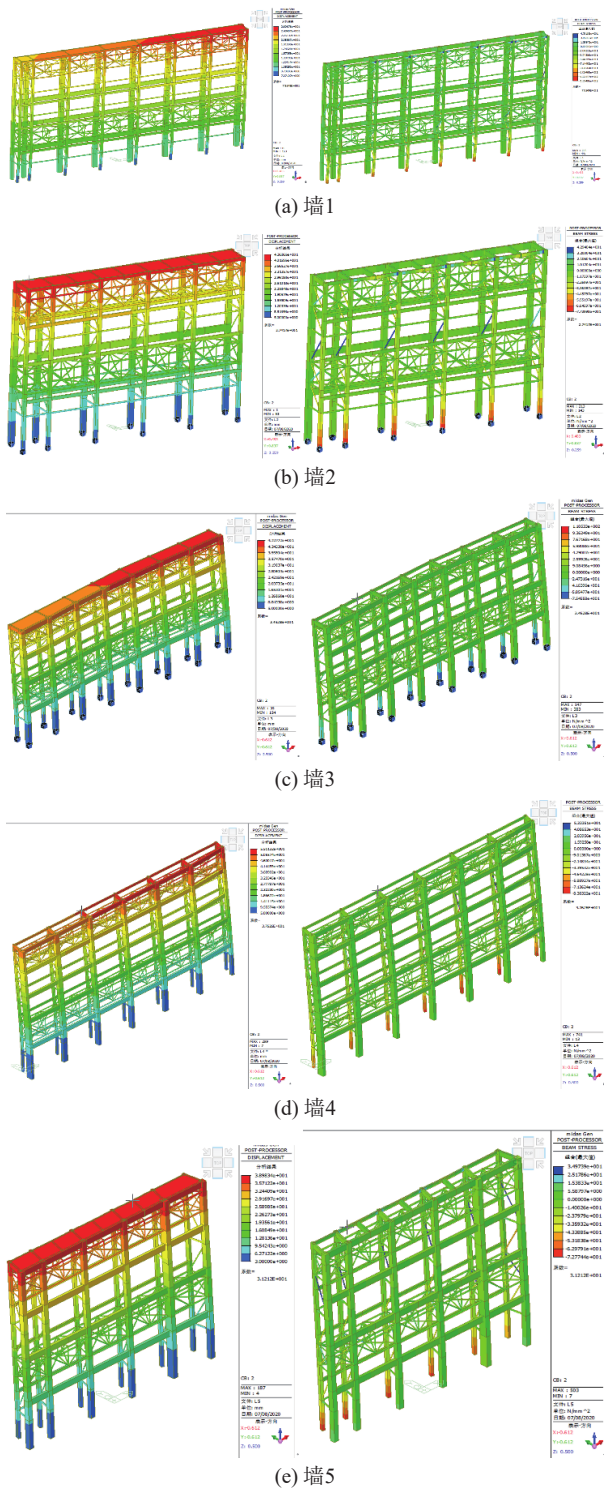


图 15 工况 2 下墙体整体变形及应力分布
Fig. 15 Deformation and stress distribution of walls under Case 2

位移为 11 mm, 最大竖向沉降为 5 mm, 钢管桩最大水平变形 19 mm, 最大轴力 790 kN, 各项核心参数均满足现行技术标准与历史建筑保护要求, 验证了托换方案的有效性与安全性。

(3)背撑式钢框架临时加固体系通过优化构件选

型与节点设计, 在满足狭小场地施工需求的同时, 实现了刚度匹配与便捷拆改的双重目标。多工况模拟表明, 在基坑围护施工的最不利条件下, 支撑体系顶部位移增量可控制在 15 ~ 30 mm 范围内, 倾斜增量约为 0.00075 ~ 0.0015, 整体处于安全可控范围。

(4)针对邻近地铁 12 号线隧道的敏感区域, 钢管桩静压施工的无振动、低扰动优势显著, 数值模拟显示, 钢管桩施工引发邻近地铁 12 号线隧道最大竖向位移 0.44 mm, 最大水平位移 0.1 mm, 远低于地铁运营保护限值。

参 考 文 献

[1] 田忠诚, 谭天乐, 刘华军, 等. 历史建筑平移及修缮保护研究——以姜家庄玉皇庙为例 [J]. 山东建筑大学学报, 2025, 40(6): 74-81. (TIAN Z C, TAN T L, LIU H J, et al. Research on the relocation and restoration conservation of historic buildings: a case study of Jade Emperor Temple in Jiangjiazhuang[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2025, 40(6): 74-81. (in Chinese))

[2] 肖曙光. 基础托换技术在古迹建筑修复工程中应用分析 [J]. 四川建材, 2019, 45(10): 116-118. (XIAO S G. Application analysis of underpinning technology in historic monument rehabilitation[J]. Sichuan Building Materials, 2019, 45(10): 116-118. (in Chinese))

[3] 王建永. 浅基础文物建筑平移工程设计与施工 [J]. 建筑施工, 2020, 42(1): 74-78. (WANG J Y. Design and construction of translation engineering of shallow foundation listed building[J]. Reconstruction & Expansion Project, 2020, 42(1): 74-78. (in Chinese))

[4] 单永新. 基于历史建筑保护的加固实用技术研究 [J]. 中国医院建筑与装备, 2019, 20(12): 99-102. (SHAN Y X. Research on practical reinforcement technology for historical building protection[J]. Chinese Hospital Architecture & Equipment, 2019, 20(12): 99-102. (in Chinese))

[5] 吴 双, 陈建兰, 赵 昕, 等. 地上托换地下扩建工程方案选型及技术要点 [J]. 建筑结构, 2023, 53(S1): 2039-2044. (WU S, CHEN J L, ZHAO X, et al. Scheme selection and technical key points of underground extension project with the underpinning[J]. Building Structure, 2023, 53(S1): 2039-2044. (in Chinese))

[6] 孙 为, 吴 江, 万展君, 等. 邻近深基坑保留建筑拆除改造基础托换加固技术 [J]. 河南科技, 2021, 40(13): 100-102. (SUN W, WU J, WAN Z J, et al. Foundation underpinning reinforcement technology for demolition and reconstruction of retaining buildings adjacent to deep foundation pit[J]. Journal of Henan Science and

- Technology, 2021, 40(13): 100-102. (in Chinese))
- [7] 蔡颖洁. 历史建筑保护修缮中的技术创新——以上海美丰洋行历史建筑保留外墙改造为例 [J]. 遗产与保护研究, 2018, 3(6): 107-113. (CAI Y J. The technological innovation in the conservation and restoration of historic buildings——Taking the reconstruction of the preserved external walls of Andrew & George Building in Shanghai as an example[J]. Research on Heritages and Preservation, 2018, 3(6): 107-113. (in Chinese))
- [8] 张敏. 历史建筑群“热水瓶换胆”改造中的外墙支护体系研究 [J]. 建筑施工, 2022, 44(4): 743-746. (ZHANG M. Study on external wall support system in reconstruction of "hot water bottle tank exchange" of historical buildings[J]. Formwork & Scaffold, 2022, 44(4): 743-746. (in Chinese))
- [9] 司瑞娟. 模块化支护体系在历史建筑外墙保留中的研究与应用 [J]. 建筑施工, 2025, 47(11): 1651-1656. (SI R J. Research and application of modular support system in external wall retention of historic buildings[J]. Building Construction, 2025, 47(11): 1651-1656. (in Chinese))
- [10] 梁志荣, 陈颖, 黄开勇. 紧邻历史保护建筑深基坑设计实践及监测分析 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 483-488. (LIANG Z R, CHEN Y, HUANG K Y. Design practice and monitoring analysis of deep excavations adjacent to protective historic buildings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 483-488. (in Chinese))
- [11] 刘冬. 锚杆静压桩在某邻近深基坑历史保护建筑基础加固中的应用 [J]. 建筑结构, 2017, 47(S1): 1078-1081. (LIU D. Application of anchor jacked piles in the foundation reinforce of heritage building near deep foundation pit[J]. Building Structure, 2017, 47(S1): 1078-1081. (in Chinese))
- [12] 侯胜男, 刘陕南, 刘征, 等. 紧邻深基坑某历史建筑变形实测分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 977-982. (HOU S N, LIU S N, LIU Z, et al. Deformation analysis of historical buildings adjacent to deep excavations[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(5): 977-982. (in Chinese))
- [13] 杜策, 张振, 张力, 等. 桩基托换对邻近深基坑历史建筑的变形影响控制研究 [J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(23): 23-28. (DU C, ZHANG Z, ZHANG L, et al. Application of pile underpinning in deformation influence control of historic building adjacent to deep excavation[J]. Construction Technology, 2024, 53(23): 23-28. (in Chinese))
- [14] 张广乾, 李向阳, 吴彪, 等. 大口径钢管静压桩托换加固技术应用探讨 [J]. 路基工程, 2023(6): 214-218. (ZHANG G Q, LI X Y, WU B, et al. Discussion on application of underpinning reinforcement technology for large diameter steel pipe static pressure pile[J]. Subgrade Engineering, 2023(6): 214-218. (in Chinese))
- [15] 王奇山, 何腊平. 坑式静压桩托换法在某基础加固工程中的应用 [J]. 山西建筑, 2017, 43(9): 64-66. (WANG Q S, HE L P. Application of pit-jacked pile underpinning construction in basement consolidation[J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(9): 64-66. (in Chinese))
- [16] 石亚斌. 锚杆静压桩概念性基础托换加固的应用 [J]. 山西建筑, 2020, 46(11): 84-85. (SHI Y B. Application of conceptual foundation underpinning reinforcement of anchor static pressure pile[J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(11): 84-85. (in Chinese))
- [17] 李靖, 徐中华, 王卫东. 基础托换对基坑周边建筑物变形控制作用的三维有限元分析 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S2): 157-161. (LI J, XU Z H, WANG W D. Three-dimensional finite element analysis of effects of foundation underpinning on deformation control of existing buildings adjacent to a deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2): 157-161. (in Chinese))
- [18] 李红, 王初生. 隧道桩基主动托换加固效果仿真评价方法 [J]. 计算机仿真, 2021, 38(04): 188-192. (LI H, WANG C S. Simulation Evaluation Method for Reinforcement Effect of active underpinning of tunnel pile foundation[J]. Computer Simulation, 2021, 38(04): 188-192. (in Chinese))
- [19] 向福稳. 铁路隧道下穿建筑物基础托换技术研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4(7): 25-28. (XIANG F W. Research on the foundation underpinning technology of railway tunnels passing beneath buildings[J]. Modern Engineering Technology, 2025, 4(7): 25-28. (in Chinese))
- [20] 林尚月. 大跨径地铁隧道下穿桥梁桩基础托换研究 [J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 2128-2131. (LIN S Y. Research on pile foundation replacement of bridge piles when large-size tunnel underpasses[J]. Building Structure, 2021, 51(S1): 2128-2131. (in Chinese))

收稿日期: 2026-01-09