

文保建筑群下方开发地下空间项目中的原位托换技术研究

张弛 章谊 朱伟敏

上海建工二建集团有限公司, 上海 200080

[摘要]文中介绍了上海张园城市更新项目中, 利用原位托换技术完成砌体结构的传统浅基础向临时静压锚杆桩基础转换, 再通过与静压锚杆桩连接的托盘结构, 实现静压锚杆桩与室内低净空钻孔灌注桩的永久桩基转换, 并通过利用新型的“环梁节点”和“桩柱一体”的概念, 实现文保建筑群原位托换, 和原建筑下方地下空间的逆向开发。文中首先介绍了托换技术的整体流程。再结合整体流程, 依次详细介绍各项专项工艺, 包括上部预加固、托盘施工、低净空静压锚杆桩、低净空钻孔灌注桩、顶升与调平等。在既有建筑完成后, 逆作实施地下空间结构的施工, 尤其是新型的“桩柱一体”与“环梁节点”的设计与结构试验。

[关键词]文保建筑群; 托换; 地下空间开发; 托盘结构

DOI: 10.33142/ec.v6i11.9937

中图分类号: TU755.2

文献标识码: A

Research on In-situ Support Technology in Underground Space Development Projects under Cultural Preservation Buildings

ZHANG Chi, ZHANG Yi, ZHU Weimin

Shanghai Construction No. 2 Construction Group Co., Ltd., Shanghai, 200080, China

Abstract: In the Shanghai Zhangyuan urban renewal project, the traditional shallow foundation of masonry structures was transformed into a temporary static pressure anchor pile foundation using in-situ support technology. Then, a tray structure connected to the static pressure anchor pile was used to achieve the permanent pile foundation conversion between the static pressure anchor pile and the indoor low clearance bored pile. By utilizing the new concepts of "ring beam nodes" and "pile column integration", the in-situ support of cultural preservation buildings was achieved, reverse development of underground space below the original building. The article first introduces the overall process of the replacement technology. Combined with the overall process, a detailed introduction will be given to various special processes, including upper pre reinforcement, tray construction, low clearance static pressure anchor piles, low clearance bored piles, and jacking and leveling. After the completion of the existing building, the construction of the underground space structure will be carried out in reverse, especially the design and structural testing of the new "pile column integration" and "ring beam node".

Keywords: cultural preservation buildings; underpinning; underground space development; tray structure

引言

我国建筑业由大规模新建逐步过渡到新建与更新并举的阶段^[1]。城市更新项目涵盖既有建筑的加固保护、抗震能力的提升^[2]、或是地下空间的开发等。具体而言, 地下空间开发涉及桩基加固或托换、基坑、降水, 和土方等分项工程^[1]。

其中, 基础托换是对既有建筑的基础进行加固和更换, 以改善基础工作状态的工程技术^[3]。它主要包括基础加宽法、墩式托换、柱式托换、地基加固法以及综合加固^[4]。目前, 工程中常用的压桩或成桩设备由于尺寸大、移动效率低, 无法在多数既有建筑和改造中使用。低净空条件下, 常用的压桩设备一般采用小型挖机、小型振动锤、小型液压设备, 以及锚杆静压桩架等进行施工。涉及的主要工艺包含 CHV 工艺、树根桩、室内静压桩, 和锚杆静压桩等^[5]。

完成桩基托换后, 既有建筑的地下空间开发的技术研究领域还包括: 托换结构的选型与设计^[6]、托换结构的承载力验算与有限元分析、逆作基坑内竖向支撑的拆换与移

位^[7]、柱墙与托换板之间的节点处理、地下建筑物的不均匀沉降等^[8]。

1 工程概况

张园, 位于上海南京西路历史文化风貌保护区。历史悠久, 社会文化丰富, 被誉为近代中国第一公共空间。这里文保和优秀历史建筑汇聚, 是近代石库门里弄的博物馆。

张园城市更新项目, 依托张园过往的灿烂历史以及南京西路核心商圈, 旨在打造“文商旅”为一体的“世界性地标区域”。通过保护活化历史建筑、综合开发地下空间、慢行系统及纵向设计等, 使张园焕发崭新的活力。张园项目也因其规模性和高难度, 使得开发难度增加, 面临一系列新的工程技术难题:

首先, 是平方公里级历史风貌区建筑文化留存与价值评估问题、石库门里弄保护建筑更新及空间格局再生问题、石库门里弄保护建筑改造技术与工艺问题; 成片历史保护建筑下地下空间扩展设计理论与控制技术难题、历史保护建筑一体化开发问题, 以及改造新设备与技术难题等。

2 整体流程

建筑基础托换设计与变形调控技术研究是本工程的重大技术创新点。它主要是针对保护建筑的原位托换、平移、顶升等工程需要，建立托换结构的承载力计算模型；研究石库门里弄建筑砖砌无筋扩展基础托换布置方式；研究夹墙梁与抬墙梁作用分担机制；分析锚杆静压桩施工在基础梁与砌体结构中的传递路径，最终形成保护建筑基础托换及主动调平变形控制技术。

在采用托换技术来实现结构传力形式的转换，从传统浅基础形式转换成较深的桩基形式，从而可以逆作土方开挖之前，需要对传统砌体结构（砖混或砖木类）文保建筑上部结构进行临时加固，再施工基础夹墙梁和锚杆静压桩，从而形成整体托盘结构。

锚杆静压桩主要作用是初始开挖阶段的基础预加固，同时可以用于提升和调平建筑，减小工程桩和首层梁板施工过程对既有建筑的影响，为首层逆作楼板的开挖提供施工空间。钻孔灌注桩是使得锚杆静压桩转换成浅桩基变成深桩基，从而为逆作实现地下空间的开发提供竖向支撑体系。逆作三层地下室的文保建筑为例，其原位托换技术施工总体流程如下：土方开挖、托盘梁施工、临时加固施工、静压桩施工、调平装置安装、一柱一桩施工、B1 层土方开挖、B1 层地下结构施工、主动托换拆除，最后地下室施工。

3 专项工艺

3.1 上部预加固

以三层的砖木或砖混建筑文保建筑为例。需要加固门窗、墙体，以及室内的部分地坪或者结构构件，如楼梯、壁炉等。首层门窗封堵，二三层钢框支撑。采用对拉螺栓结合钢立柱来实现墙体的竖向加固；通过长型钢内外拉接来实现墙体横向加固；通过长拉杆拉接来实现室内横向加固；外部采用直臂吊机和垂直升降机车来实现临时加固；所有型钢与墙体之间采用模板及方木作为垫板来保护墙体（如图 1 所示）。

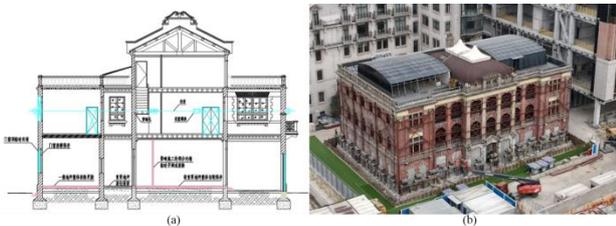


图 1 (a) 某砖混结构上部结构加固剖面图；(b) 某砖混结构外墙体、门窗加固（顶升与调平装置安装）

3.2 托盘施工

托盘梁的结构形式根据既有建筑基础形式可设计成不同的加固方式，包括单侧地梁、一侧地梁一侧筏板、双侧地梁、夹墙梁及托盘结构。

3.2.1 墙体凿毛

对原基础墙面进行凿毛，露出新鲜的面层，露出新鲜

面积不低于 75%，清除表面的松散层，凹凸面深度达到 6mm，清除凿毛面的杂物，用水清洗干净，充分湿润，但不得有积水。为了增加接触面的整体性，可采取构造植筋，植筋不能破坏原有钢筋，植筋深度不够时贯穿墙体（图 4. a），锚入夹墙梁内不小于 300mm。

3.2.2 托盘梁施工

钢筋加工的形状、尺寸应符合设计及规范要求。钢筋直径大于等于 20mm 时采用滚轧直螺纹接头，小于 20mm 时，采用绑扎接头，搭接长度要符合规范的规定。

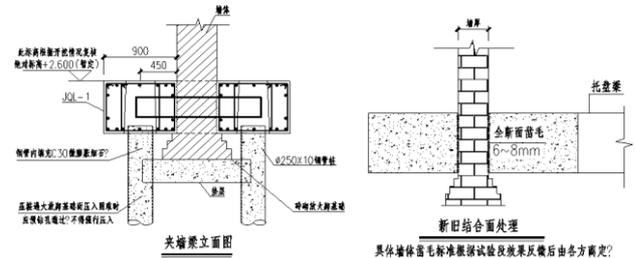


图 2 夹墙梁施工立面设计图。

托盘结构主要由托盘梁、板，以及预留给桩位的洞口组成。托盘梁体系中的梁又可以根据作用分为夹墙梁（见图 2）、穿墙梁，和基础反力梁等。其中，托盘梁体系总体施工流程依次为：测量放线、梁墙洞开设、洞口加固、墙体凿毛、绑扎钢筋、模板支设、浇筑砼，和养护拆模。

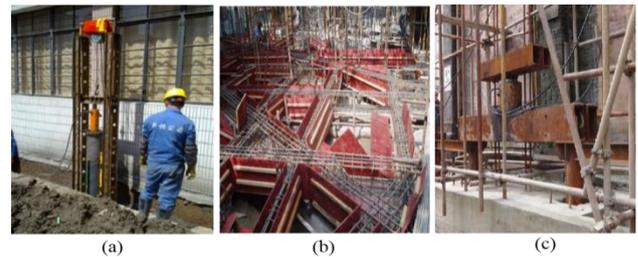


图 3 (a) 外立面静压锚杆桩施工；(b) 室内托盘结构模板与钢筋绑扎；(c) 利用顶升系统进行托换梁调平

托盘梁施工原则是由两侧向中间分区施工，施工中注意对原建筑的主体保护，严禁施工过程中碰坏及污染原建筑需要保护的部位，宁可增加防护措施，也不冒险施工。

第二阶段是在预加固基础上施工托盘结构，使既有建筑的浅基础转化为锚杆静压桩基础。首先需要根据设计图纸在墙边等位置上施工静压锚杆桩（见图 3. a），再施工整个托盘梁体系（见图 3. b），最后通过竖向的液压千斤顶完成托盘梁的顶升与调平（见图 3. c）。

3.2.3 预留孔及预埋构件

托盘梁钢筋绑扎时需要预留压桩孔（图 4. b），桩孔预留成上小下大锥形截面，上口 330×330mm，下口 430×430mm，同时预埋压桩反力支架螺杆与预应力 M32 精轧螺纹钢，所有预留及预埋件均需固定牢靠，预埋件必须保证垂直度（图 4. c）。

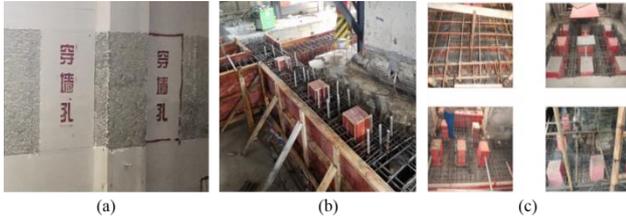


图4 (a) 穿墙梁墙面预留的穿墙孔位置; (b) 托盘结构支模及预留孔; (c) 各种形式的预留孔及预埋构件

3.3 低净空静压锚杆桩

待夹墙梁强度达到开孔要求后,进行静压锚杆桩施工。首先在建筑基础上开出桩位孔(图5.a),压桩(图5.b),再封桩(图5.c)。

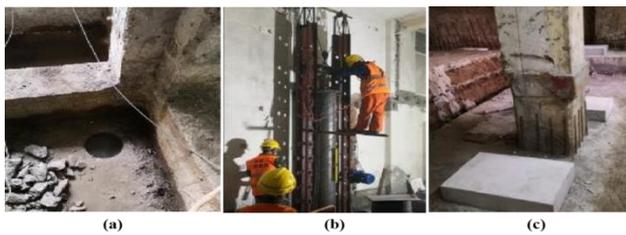


图5 (a) 开桩孔; (b) 压桩; (c) 封桩



图6 (a) 锚杆静压桩托换施工(含托盘结构); (b) 常规静压桩施工; (c) 超净空锚杆静压桩; (d) 抱箍式锚杆静压桩施工; (e) 上压式锚杆静压桩; (f) 上压式锚杆静压桩原理示意图

表1 上压式锚杆静压桩和抱箍式静压桩对比。

| 压桩设备 | 设备尺寸 | 压桩能力 | 桩尺寸 | 净空要求 | 距墙边净距 |
|------|--------------|------|---------------|----------|-------|
| 上压式 | 500×600×3500 | 500t | 钢管桩: 500mm | 1.5~3.5m | 10cm |
| | | | 方桩: 450×450mm | | |
| 抱箍式 | 500×600×3500 | 500t | 钢管桩: 400mm | 2.3m | 30cm |
| | | | 方桩: 350×350mm | | |

注: 上压式设备尺寸大小、高度可调、可拆卸; 抱箍式尺寸可微调。
在某些城市更新项目中,尤其是低净空条件下的静压锚杆桩施工,需要选取甚至研发新的合适尺寸的锚杆桩静压桩机(图6)。目前,根据静压桩机原理可以分为上压式和抱箍式两种,见表1。

3.4 低净空钻孔灌注桩

在完成砌体结构的浅基础到临时桩基础(该工程采用了静压锚杆桩)的转换后,施工逆作法中的永久性的“一体化桩柱”。在托盘结构预留的孔洞中施工低净空钻孔灌注桩时,建筑顶升后需调平,并开始施工地下室顶板,与灌注桩和上部建筑相连。本桩基工程中,施工难点之一是低净空桩基施工,除了需要小型化传统锚杆静压桩设备,因此为了本工程还研发了新型的低净空钻孔灌注桩、钢筋拼接夹具、新型钢筋笼,以及钻孔灌注桩的打桩机械设备。通过在托换结构下设置新的永久性桩基础,将基础及其上部结构的荷载部分或全部转移到新的钻孔灌注桩桩基础上。从而最终完成了临时性桩基向永久型桩基的转换。

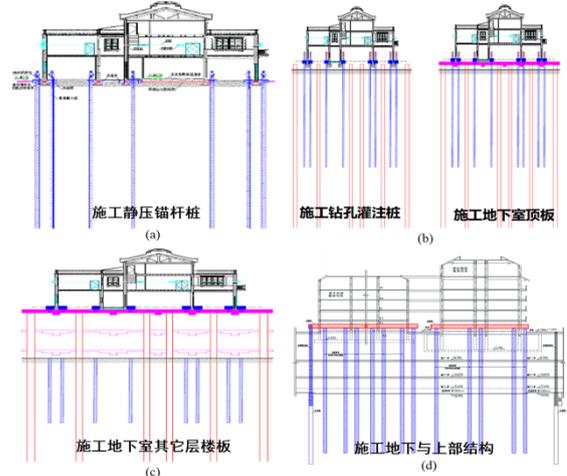


图7 (a) 施工房屋外围狭小空间和室内低净空的锚杆静压桩; (b) 施工室内低净空钻孔灌注桩并施工地下室顶板; (c) 逆作开挖地下室结构; (d) 逐层逆作形成地下室空间

3.4.1 施工机械

张园石库门建筑群中,房间的最小净宽是2.3m,最小净空是3.8m。专门研发了新型SMD7-C73型钻孔桩机。钻深60m,电动机功率55+18.5kW,钻杆转速10~170rpm,最大扭矩7.5kNm,最大钻孔直径1000mm,钻机重量1.8t。

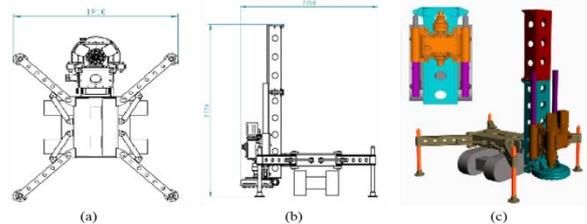


图8 适合低净空施工的SMD SMD7-C73型桩机, (a) 平面设计图; (b) 竖向设计图; (c) 3D示意图

此外，已经成熟的 SMD-75 型号的桩基电机功率 45Kw+30Kw。钻机最大扭矩 10000N·M。最大钻孔深度 70m。单节钻杆长度/重量/直径 1500mm/约为 63.3Kg/φ180×8。钻机输出转速 26r/min~85r/min。钻机提升速度 6m/min。最大提升力 160KN。卷扬容绳量/绳径 60M/φ14mm。操作方式为有线结合无线遥控，并配有应急模式。设备总重量（标配）约 9000Kg。桩架外形尺寸（长×宽×高）为 3000m×1720m×3.05m。

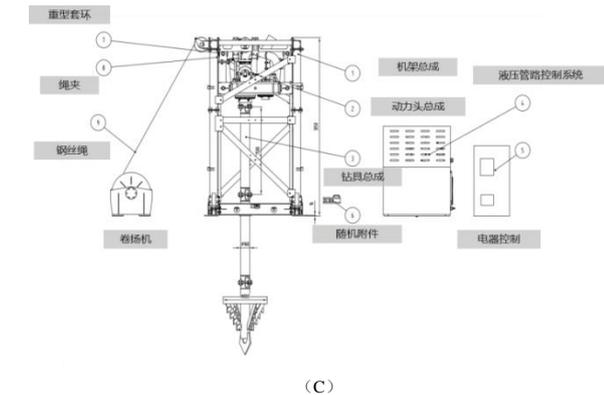
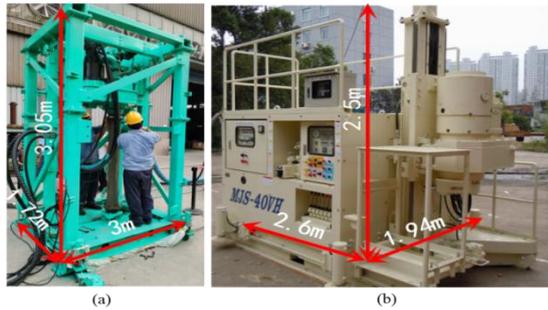


图 9 (a)SMD750 型桩机构件分解设计示意图；(b)SMD750 型桩机工作剖面图；(c)SMD750 型桩机设备斜向视图

3.4.2 效率对比

常规桩架和 SMD 型桩架打桩作对比分析，相关的参数和分析结果如下表所示（表 2）。

常规桩架和 SMD 型桩架打桩在同时钻 60m 深度的孔洞时，两者所需要的工况时间作对比分析，相关的参数和分析结果如图 10 所示。

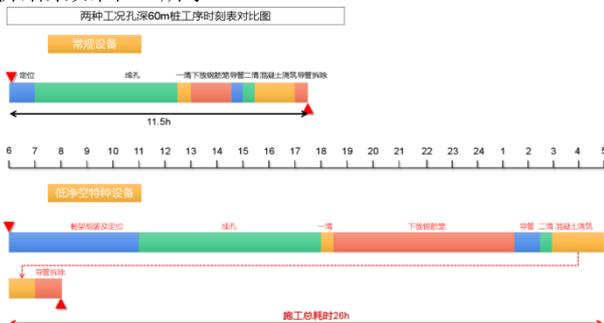


图 10 两种工况下钻孔深度为 60 米时，制作整个钻孔灌注桩所需工序时刻表对比图

3.5 顶升与调平

整体提升施工方法要点是首先搭设整体操作平台。随后采用了螺杆提升、人工旋紧螺母跟随装置，每顶升 1mm，工人随时旋紧柱底牛腿下的螺母，保证了顶升全过程上部结构的安全，除了千斤顶本身的保险装置外，还有螺旋装置的可靠防护。再采用螺杆提升方案，每顶升一个行程，通过螺母在螺杆上的锚固作为临时支撑，只要将每个行程顶升完成后的螺母保持在同一标高，千斤顶回油后上部结构将水平地落在螺母锚具上，顶升过程中产生任何不均匀沉降均可消除，而且不存在累积误差。

3.5.1 顶升工艺

顶升施工要点是首先进行试压；再根据锚杆静压桩施工顺序由外向内，由四周向中间。

减小压桩引起上部结构沉降；保证压桩与安装调平装置同步施工，尽快加压，消除静压桩回弹，减小土体扰动后上部结构的沉降；相当于带压封桩。

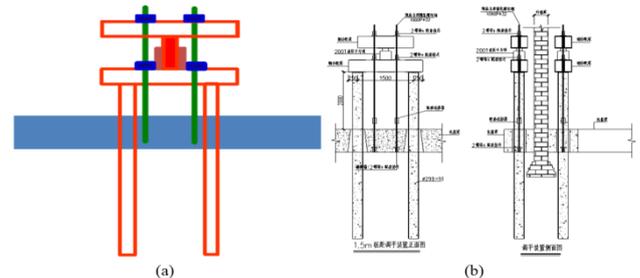


图 11 (a) 螺杆提升工艺示意图；(b) 螺杆提升工艺正、剖面图

3.5.2 调平工艺

调平装置安装需要将钢梁及顶升设备安装至桩顶，这部分结构重达数百公斤，桩顶高达 1~2m，在建筑物室内无法使用吊机，单纯依靠人工效率低以及存在一定的安全风险。设计一种利用桩基作为反力的提升装置，拼装方便、构件重量轻。

4 逆作地下结构

在建筑提升完成后，具有 2.5m 的空间可进行地下结构逆作。在顶板施工时，需分区分块施工，每 100m² 施工一块顶板。

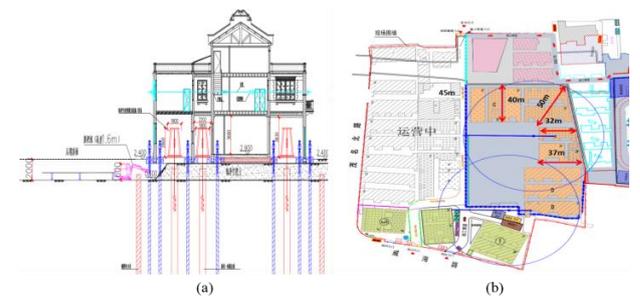


图 12 (a) 建筑桩基完成后侧向挖土；(b) 张园城市更新项目中的分区与逆作首层顶板的竖向取土口设置

表 2 常规桩架和 SMD 型桩架的对比分析表

| 序号 | 工序名称 | 设备类型 | 对比分析 | 耗时 (h) |
|----|-------|----------|--|--------|
| 1 | 桩架定位 | 常规桩架 | 优点: 桩架移位、磨盘整平、钻杆定位时间短; | 1 |
| | | SMD750 型 | 缺点: 施工前桩架需拼装、钻杆需进行待定操作定位, 耗时较长; | 5 |
| 2 | 成孔 | 常规桩架 | 优点: ①钻杆定尺寸长度约 6m, 共计 15 节, 钻杆通过磨盘快速拧丝拼接, 时间短; ②根据土层调整钻速, 一般稳定于 50-60r/min, 钻进速度快; | 5.5 |
| | | SMD750 型 | 钻头直径可达 800mm; 钻杆定尺长度 1.7m, 共计 36 节, 钻杆连接方式为法兰式接头, 并通过特定操作进行, 耗时长; | 7 |
| 3 | 一清 | 常规桩架 | 均可采取正循环清孔 | 0.5 |
| | | SMD750 型 | | 0.5 |
| 4 | 下放钢筋笼 | 常规桩架 | 优点: ①钢筋笼每节 9m, 6 节钢筋笼, 钢筋笼易于制作, 过程焊接工作量少; | 1.5 |
| | | SMD750 型 | 缺点: 钢筋笼每节 2.5m, 21 节钢筋笼, 现场不易且制作耗时长, 注浆管及声测管需定制, 钢筋笼接头焊接量大; | 7 |
| 5 | 下放导管 | 常规桩架 | 优点: 导管每节长度为 2.5~3m, 导管下放较快; | 0.5 |
| | | SMD750 型 | 缺点: 导管需定做, 每节长度约 1.5m, 下放过程耗时较长; | 1 |
| 6 | 二清 | 常规桩架 | 均可采取正循环清孔 | 0.5 |
| | | SMD750 型 | | 0.5 |
| 7 | 混凝土灌注 | 常规桩架 | 优点: 采取搅拌机直接浇捣灌注; | 1.5 |
| | | SMD750 型 | 缺点: 因空间限制, 搅拌机无法进入, 现场需搭设泵送管路进行灌注, 耗时较长; | 3 |
| 8 | 导管拆除 | 常规桩架 | 优点: 采取搅拌机直接浇捣灌注; | 0.5 |
| | | SMD750 型 | 缺点: 导管需定做, 每节长度约 1.5m, 下放过程耗时较长; | 1 |

4.1 土方开挖与搬运

托换完成后, 开始逐层施工地下结构。为了节省工期, 并完成在狭小空间下大量出土的土方工程需求, 专门研发了新型的可 90 度转向的爬挖一体机和长距离可拼接的皮带运输机。



图 13 (a) 传统挖机翻运土方; (b) 新型长距离取土运土挖运一体履带斗装载机; (c) 传统挖机与皮带机合作输送运土; (d) 新型长距离皮带可拼接的皮带运输机

4.2 竖向取土

在逆作施工过程中, 仍然有竖向取土的需求, 其相关的机械和取土方法见图 14。



图 14 (a) 长臂反铲; (b) 液压抓斗; (c) 机械抓斗

逆作暗挖条件下的高效取土运土技术及装备包含长臂反铲、液压抓斗、克林吊, 与机械抓斗等。以电动克林吊为例, 改进后土方运输效率为每班效率约 600m³。

4.3 地下结构施工

首先形成逆作顶板。为控制建筑的整体沉降, 施工时将建筑分为若干小份, 分块施工。提升完毕后向下开挖, 静压锚杆桩随挖随割, 上部结构荷载全部转移至钻孔灌注桩。托换完成后, 开始逐层施工地下结构。逆作地下结构施工见图 15。

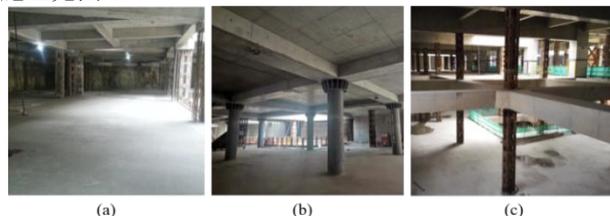


图 15 (a) 一般逆作顶板与钢格构柱; (b) 采用环梁节点的逆作顶板与圆柱; (c) 围护支撑与顶板完成后的逆作地下空间图

4.4 环梁节点

新型环梁节点的设计可解决低净空下钢骨安放难度大,且随着碳中和及绿色施工等要求,故考虑“桩柱一体”的设计思想和施工工艺。为此,设计并试验了三种新型的环梁节点。相应的设计与节点力学对比实验已完成。

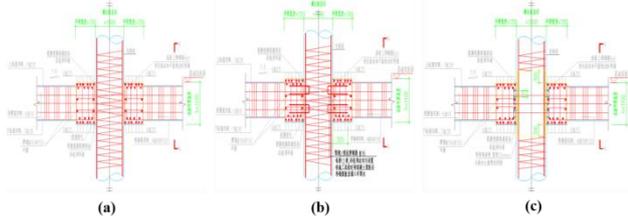


图 16 三种环梁节点的设计图。(a) 方案一: 桩侧界面凿毛处理;(b) 方案二: 桩侧预埋 U 型钢筋;(c) 方案三: 桩侧预埋钢套管+栓钉

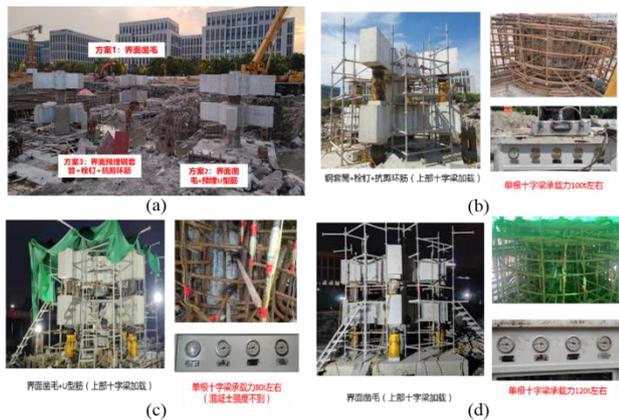


图 17 (a) 三种环梁节点;(b) 方案一: 界面凿毛环梁节点;(c) 方案二: 界面凿毛+U 型试验结果;(d) 方案三: 预埋钢套管+栓钉+抗剪环梁试验结果。

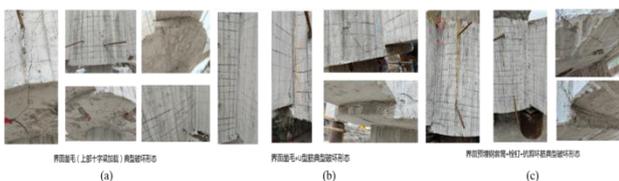


图 18 (a) 界面凿毛环梁节点破坏模式;(b) 界面凿毛+U 型钢试验结果;(c) 预埋钢套管+栓钉+抗剪环梁破坏试验结果

对于界面凿毛试验裂缝首先出现在环梁十字梁交界处附近,随着荷载的增大逐渐向环梁内部扩展,进而导致

结构失效。界面凿毛+U 型筋界面的破坏形式和界面凿毛基本一致,裂缝首先出现在环梁与十字梁交界处附近,并逐渐向环梁内部扩展,进而导致环梁出现剪切破坏,构件失去承载力。千斤顶移至环梁下部加载前,环梁已存在较大的损伤,单点加载到 140t 左右时原有的剪切突然迅速开展并伴随明显的响声。

5 结论

在完成对文保类建筑平移或托换前的预加固之后,通过托盘结构的施工和低净空的锚杆静压桩施工使得原有建筑的浅基础转换为锚杆静压桩桩基。并通过新型低净空钻孔灌注桩与狭小空间内的 MJS 围护施工,使得含有锚杆静压桩的位于托盘结构上的原有建筑具备了向下逆作开发地下空间的条件,通过创新爬塔挖土设备,以及新型“桩柱一体”和“环梁节点”等的设计与创新,进一步优化逆作法技术,拓展了地下空间开发的可能。

[参考文献]

- [1]徐文,周凯.既有建筑地下增层基础施工工艺[J].山西建筑,2020,46(2):70-72.
 - [2]文兴红,王永祥,徐意翔.高大砖砌墙体整体托换设计与施工[J].工程设计施工与管理,2019(13):103-105.
 - [3]黄民水,鄢毛志,刘佳,丁志强.钢管桩在既有建筑基础托换中的应用[J].华中科技大学(城市科学版),2009,26(4):36-39.
 - [4]周友富.综合加固法在既有建筑物托换工程中的应用[J].岩土工程界,2005,8(4):33-35.
 - [5]潘宇,贾强,夏风敏,等.既有建筑地下增层托换梁设计研究[J].山东建筑大学学报,2018,33(3):32-37.
 - [6]任文.古建筑平移托换结构安全储备分析[J].低温建筑技术,2015(3):38-40.
 - [7]程永康,张蝶.深基坑内支撑立柱桩托换施工技术应用分析[J].工程技术,2018,45(18):73-74.
 - [8]王俊诗.浅埋独立或条形基础站房托换施工技术[J].国防交通工程与技术,2017(6):45-49.
- 作者简介:张弛(1985.6—),毕业院校:加拿大拉瓦尔大学博士,清华大学助理研究员,博士后,所学专业:土木工程,就职单位:上海建工二建集团,职务:技术主管,职称:高级工程师。