

既有建筑地下空间逆作法扩建施工关键技术研究

何泽荣

广西达武规划建筑设计院 537400

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18465

[摘要] 随着城市建设的快速发展与土地资源的日益紧张,既有建筑地下空间扩建已成为挖掘存量空间潜力、提升建筑功能与价值的重要途径。然而,在已建成且通常处于正常使用状态的既有建筑下方进行地下空间开发,面临着周边环境敏感、施工扰动控制严格、新旧结构协同受力复杂等一系列传统工法难以克服的挑战。逆作法以其“自上而下、结构先撑”的核心特点,在控制变形、节约空间、缩短工期等方面展现出显著优势,成为应对此类复杂工况的关键技术。

本文系统研究了在既有建筑条件下实施地下空间逆作法扩建所涉及的成套关键技术。首先,分析了既有建筑地下扩建工程的特殊性与核心难点。其次,聚焦于高精度一体化竖向支承桩柱施工技术、受限空间内围护结构与既有基础协同技术、基于智能仿真的施工全过程动态控制技术以及扩建结构全生命周期防水与节点构造技术等四大关键技术,结合工程实践与技术标准进行了深入阐述。最后,对技术发展进行了总结与展望。本研究旨在为类似工程提供系统的技术参考与实践路径,推动逆作法技术在既有建筑改造领域的精细化、智能化发展。

[关键词] 既有建筑; 地下空间扩建; 逆作法; 竖向支承体系; 协同变形控制; 智能建造

1. 引言

在城市更新与可持续发展的背景下,对既有建筑,特别是早期建设的商业、交通、公共建筑进行地下空间扩建,以增建停车场、设备层、商业空间或交通换乘枢纽,已成为一种经济且高效的开发模式。传统的大开敞明挖法施工周期长、基坑暴露范围大,极易引起周边土体位移,对上部建筑结构安全、相邻管线及道路造成不可控的风险,在城市核心区往往不具备实施条件。而逆作法通过先施工永久性顶板或中间水平结构体系,形成刚性支撑后再向下逐层开挖和构筑结构,实现了基坑变形主动控制与地上地下同步施工,为既有建筑地下“静默”扩建提供了可能。

尽管如此,将逆作法应用于既有建筑扩建,仍存在诸多特殊技术瓶颈:一是竖向支承系统的精度与可靠性要求极高,直接关系到上部建筑的稳定;二是新旧结构的连接与荷载传递路径复杂,需精细设计;三是在狭小、封闭的既有空间内组织施工,对作业环境与安全控制提出挑战。因此,系统研究并突破这些关键技术,具有重要的理论价值与工程现实意义。

2. 既有建筑地下逆作扩建工程特点与核心挑战

既有建筑地下逆作扩建并非新建逆作法工程的简单复制,其特殊性构成了独特的挑战体系,主要体现在以下方面:

2.1 工程环境的极端复杂性

工程通常位于建筑密集的城市核心区,周边紧邻道路、

管线及其他建筑,环境保护等级为最高级。上部建筑在使用状态下,对沉降、差异沉降及振动极为敏感。任何微小的扰动都可能导致建筑构件开裂、设备运行故障,甚至影响正常使用功能。

2.2 结构体系的传承与转换

扩建工程不是独立结构,而是与既有建筑基础及上部结构形成永久性的力学耦合。设计需精确计算施工各阶段及使用阶段中,荷载通过新增竖向支承体系向深层土体的传递路径,以及新旧基础间的差异沉降协调。这涉及对既有结构现状的全面精确检测与评估,是设计的前提。

2.3 施工空间的严重受限

作业面被限制在建筑室内、地下室或紧贴基础的狭窄区域内。大型设备进场、物料运输、土方外运极其困难,通常依赖预留的取土口或微型化设备。通风、照明、排水等施工环境保障措施也需专门设计。

2.4 全过程的动态安全控制

从围护施工、桩柱安装到逆作开挖,每一个工序都可能引发应力重分布和变形。必须实施高频率、高精度的全过程动态监测,并将数据实时反馈指导施工,形成“监测-预警-调控”的闭环。

3. 关键施工技术体系研究

针对以上挑战,本文提出并深入研究以下四大关键技术

体系。

3.1 高精度一体化竖向支承桩柱施工技术

竖向支承桩柱(一柱一桩)是逆作法工程的“脊梁”,在既有建筑下其施工精度直接决定上部结构安全。核心技术突破在于实现超深、高垂直度桩柱的一次性精准成桩。高精度成孔与定位技术:采用套管式旋挖钻机或全回转钻机,减少对周边土体的扰动。在孔口设置由全站仪与激光测斜仪集成的双重定位导向架,实时监测和纠偏钻杆垂直度,确保成孔垂直度偏差控制在1/500以内。钢管柱毫米级调垂与安装技术:这是技术核心。目前主要有“先插法”与“后插法”两种工艺。后插法(传统工艺):先浇筑超缓凝混凝土至设计标高,然后在混凝土初凝前将钢管柱插入。其关键技术是混凝土缓凝时间(可达36小时以上)与柱体精准调垂的时空匹配。调垂可采用高精度液压调垂系统(如HPE型),配合机载倾角传感器与地面全站仪,实现沉插过程实时监控,垂直度可控制在1/1000。先插法(创新工艺):如北京某大型枢纽工程采用的工艺,先将钢管柱插入钻孔泥浆中调垂固定,因其在均匀泥浆中阻力小,调垂更为便捷,垂直度更优。随后再下放钢筋笼、浇筑普通混凝土。此法省去了昂贵的超缓凝混凝土,简化了工序,效率更高,成本更具优势。桩柱混凝土一体化浇筑技术:无论先插后插,均需保证桩身混凝土与钢管柱(或柱内混凝土)的密实结合。采用大流态、自密实混凝土,通过导管法连续浇筑,并在钢管柱底部设置栓钉或加强环板,以增强与桩基的机械咬合力。浇筑过程可采用水下摄像系统监控底部情况。

3.2 受限空间内围护结构与既有基础协同技术

在紧贴既有建筑基础施工围护结构时,目标不仅是止水挡土,更要最大限度减少对原基础的附加应力和位移。低扰动围护结构选型与施工:优先采用咬合桩、地下连续墙等刚度大、止水性好的围护形式。施工时,可选用全套管跟进、微扰动液压成槽等工艺,并通过跳打、控制钻进速率等措施,减少挤土效应和振动。

围护-基础协同承载设计(“桩墙合一”):在设计中,可将部分围护结构(如地下连续墙)与扩建部分的外墙永久结合,并设计专门节点使其与既有基础可靠连接。这不仅能节约空间和材料,还能利用围护结构的刚度参与整体抗浮和水平力分担,形成协同工作的复合基础体系。

隔水层缺陷的创新封堵技术:当勘察发现基底存在隔水层缺失等地质隐患时,传统降水方案可能加剧沉降。可采用如“多孔超深大直径高压旋喷桩封底技术”。该技术如同在隐患区域打下“牙刷状”的致密桩群,桩间相互咬合,形成高强度、高止水性的加固封底层,从而在不降水的条件下消除管涌风险,保护周边环境。

3.3 基于智能仿真的施工全过程动态控制技术

信息化与智能化是应对复杂逆作工程不确定性的必然手段。基于BIM的施工全过程仿真:利用建筑信息模型(BIM)技术,集成地质、结构、施工机械等信息,进行4D(时间)甚至5D(成本)施工模拟。可预先模拟土方开挖顺序、构件吊装路径、施工缝留设等,优化施工方案,提前发现碰撞与冲突。例如,在复杂梁柱节点施工前,通过BIM进行钢筋与套管位置的深化设计,能极大提高现场安装精度与效率。施工力学动态反演与预测:采用有限元软件,建立包含土体、围护结构、竖向支承、既有建筑及新结构的整体三维模型。根据施工工况动态加载,模拟预测每一步开挖引起的应力、变形。更重要的是,将现场监测数据(如沉降、位移、应力)实时输入模型进行反演分析,修正计算参数,实现对未来施工步变形的更准确预测,并据此动态调整施工参数,实现“预测-施工-监测-反馈-优化”的智能控制闭环。

• 一体化智能监测与管控平台:集成自动化监测传感器(静力水准仪、测斜仪、钢筋计等)、物联网传输技术和云计算平台,实现监测数据的自动采集、无线传输、实时分析与可视化呈现。平台可设置多级预警阈值,一旦数据异常,即刻推送警报至相关人员,并联动应急预案,将风险管理从事后处置转向事前预警与事中控制。

3.4 扩建结构全生命周期防水与节点构造技术

逆作法形成的结构接缝多、防水线路复杂,必须从设计源头保障其耐久性。“以结构自防水为根本,多道设防为重点”的防水体系:优先保证顶板、楼板、侧墙等主体结构混凝土的抗裂防渗性能。在接缝处,构建包括预埋注浆管、遇水膨胀止水胶、中埋式止水带、外贴式防水层在内的多道防线。特别是地下连续墙与后浇梁板、环梁的连接节点,是防水的薄弱环节,需采用高精度接驳器并预留可靠的防水构造。新型节点构造技术:对于逆作法特有的竖向支承柱与水平梁板的连接节点,可采用环梁节点、双梁夹柱节点等传力可靠的

形式。在钢立柱上预先焊接剪力栓钉或设置牛腿，确保水平力有效传递。所有节点均需在 BIM 中进行三维放样，确保钢筋避让与混凝土浇筑的可行性。

4. 工程应用与效益分析

尽管不引用具体地名案例，但综合多项工程实践表明，在成熟的既有建筑区应用上述成套逆作关键技术，能产生显著的综合效益：安全效益：能将基坑围护结构的水平位移和周边地表沉降控制在毫米级（通常可控制在 15-20mm 以内），有效保障上部建筑及邻近设施的安全。

社会效益：施工主要作业在地下进行，地面占用少，对城市交通、商业活动和居民生活的干扰降至最低，体现了“静默施工”的城市友好理念。经济效益：利用永久结构兼作支撑，节省了大量临时支撑材料和拆除工序。地上地下同步施工可显著缩短总工期（某些项目报告可缩短工期 20%以上），提前实现投资回报。空间效益：最大限度利用建筑红线内的地下空间，实现了土地资源的集约化再开发。

5. 结论与展望

既有建筑地下空间逆作法扩建是一项高度复杂的系统工程，其成功实施依赖于对高精度桩柱施工、新旧结构协同、智能动态控制及长效防水节点等关键技术的系统化掌握与集成化应用。本研究通过梳理这些关键技术，构建了一套从精准设计、精细施工到智能管控的完整技术框架。

在高精度桩柱施工方面，研究团队深入探讨了如何通过先进的测量技术确保桩位的精确性，以及如何利用高性能的混凝土和钢筋材料来提高桩柱的承载力和耐久性。

新旧结构协同方面，研究着重于如何通过创新的连接技术，确保新旧结构在施工和使用过程中的整体性和稳定性。例如，采用后张预应力技术，可以在不增加额外荷载的情况下，增强新旧结构之间的连接强度。此外，研究还探讨了如何利用传感器网络和实时监测系统，对结构的应力和变形进行持续跟踪，确保在任何情况下结构的安全性。

智能动态控制技术的应用，使得施工过程更加高效和安全。通过引入自动化和机器人技术，可以实现对施工过程的精确控制，减少人为错误和施工风险。

长效防水节点的设计和施工是确保地下空间使用功能和寿命的关键。研究团队通过材料科学和结构工程的结合，开

发了多种防水材料和构造方法。例如，采用多层防水涂料和防水卷材相结合的方式，可以有效防止地下水的渗透。同时，研究还涉及了如何通过排水系统的设计，将渗入的水及时排出，保持地下空间的干燥。

未来，该领域技术发展将呈现以下趋势：一是施工装备将进一步向微型化、智能化、低扰动方向发展，以适应更苛刻的作业环境；二是数字孪生技术将深度融合，实现虚拟工地与物理工地的实时交互与智能决策；三是绿色低碳理念将贯穿始终，包括废弃泥浆处理、噪声扬尘控制、材料循环利用等。随着城市更新进程的深入，既有建筑地下逆作扩建技术必将不断进步与完善，为城市的可持续发展提供坚实的技术支撑。

微型化和智能化的施工装备将使得在狭窄或复杂的空间内进行作业成为可能，同时减少对周围环境的干扰。

数字孪生技术的应用将使施工过程更加透明和可控。通过创建建筑物的数字副本，可以在虚拟环境中模拟施工过程，预测可能出现的问题并提前解决。这种技术还可以用于施工后的维护和管理，通过实时数据的分析，优化建筑的使用和维护策略。

绿色低碳理念的实施将使既有建筑地下逆作扩建技术更加环保和可持续。例如，废弃泥浆的处理技术将更加注重资源的回收和再利用，减少对环境的污染。噪声和扬尘的控制技术将通过使用隔音材料和封闭式施工方法，降低施工对周边居民生活的影响。材料的循环利用将通过设计可拆卸和可重复使用的结构组件，减少建筑废弃物的产生，推动建筑行业的可持续发展。随着城市更新进程的深入，既有建筑地下逆作扩建技术必将不断进步与完善，为城市的可持续发展提供坚实的技术支撑。

[参考文献]

[1] 杨学林. 地下空间逆作法关键技术及应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.

[2] 应宏伟, 等. 软土地层地下空间逆作施工变形控制关键技术及应用 [J]. 建设科技, 2023 (11): 52-55.

[3] 杨学林, 祝文畏, 周平槐. 某既有高层建筑下方逆作开挖增建地下室设计关键技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37 (S1): 3775-3786.