

建筑工程中地下结构施工技术的挑战与应对策略研究

欧梁如

广东建科建设咨询有限公司 广东 广州 510000

摘要: 建筑工程中地下结构施工面临地质条件复杂、地下水问题、施工难度大及安全风险高等挑战。软土、岩层、富水地层差异显著,不均匀地质易致施工风险;地下水渗流与突水危害大,邻近建筑物沉降控制难;深基坑支护稳定性、大体积混凝土裂缝控制等难题突出。需通过精细化地质勘察、动态监测、合理选择工法、强化安全管理与监测、采用机械化施工及模块化施工等策略应对,确保施工安全与质量。

关键词: 建筑工程;地下结构施工技术;挑战;应对策略

引言:随着城市化进程加速,地下空间开发成为建筑工程的重要方向。然而,地下结构施工面临复杂地质条件、地下水渗流、深基坑支护稳定性差等多重挑战,导致施工难度大、安全风险高、成本上升。研究地下结构施工技术的挑战与应对策略,不仅有助于提升施工效率与质量,更能保障工程安全,对推动城市地下空间可持续发展具有重要意义。

1 建筑工程中地下结构施工技术的核心挑战

1.1 地质条件复杂性

(1) 软土、岩层、富水地层等差异影响显著。软土地层承载力低、压缩性高,易导致基坑变形;岩层硬度不均会增加盾构机刀具磨损与推进阻力,延长施工周期;富水地层则需额外投入排水设备,否则易引发管涌等问题,大幅提升施工成本与难度。(2) 不均匀地质导致的施工风险突出。同一施工区域内若存在“软土-岩层”交互层或局部溶洞,会使地下结构受力失衡,如桩基施工时易出现桩身倾斜,底板浇筑后可能因地基沉降差异产生结构性裂缝,威胁工程安全。

1.2 环境与安全风险

(1) 地下水渗流与突水事故危害大。当地下水水压超过支护结构承载极限时,易发生渗流,若未及时处理,可能引发突水,导致基坑坍塌,造成设备损坏与人员伤亡,如地铁隧道施工中曾因突水导致工期延误数月。(2) 邻近建筑物的沉降控制难度高。地下开挖会扰动周边土体应力,若支护刚度不足或降水不当,易导致邻近建筑地基沉降,引发墙体开裂、管线破损等问题,需投入大量资源监测与加固。(3) 施工粉尘、噪音等环境污染问题突出。地下结构施工中钻孔、爆破等工序会产生大量粉尘,盾构机运行噪音可达80分贝以上,不仅影响周边居民生活,还可能违反环保法规,面临停工整改风险^[1]。

1.3 技术实施难点

(1) 深基坑支护稳定性问题关键。随着基坑深度增加,支护结构需承受更大土压力与水压力,若支护方案设计不合理,易出现支护桩位移、锚杆失效等情况,如深达20米的基坑曾因支护失稳导致坍塌事故。(2) 大体积混凝土裂缝控制难度高。地下结构底板、墙体等大体积混凝土浇筑后,水化热释放集中,内外温差易超过25°C,引发温度裂缝,影响结构防水性能与耐久性。(3) 地下结构抗浮与防水难题突出。当地下水位较高时,结构易受浮力作用出现上浮位移;同时,施工缝、变形缝等部位易成为渗漏通道,若防水工艺不到位,会导致后期渗漏维修成本激增。

1.4 管理与协调挑战

(1) 多工种交叉作业的协调效率低。地下结构施工涉及土方、钢筋、混凝土、盾构等多个工种,各工种作业时间、空间交叉频繁,若协调不当,易出现工序冲突,如钢筋绑扎与盾构推进同步进行时,可能因场地占用问题导致工期延误。(2) 应急预案与动态风险管控不足。施工前若未针对突水、坍塌等风险制定详细应急预案,或未实时监测地质、支护结构数据,易错过风险处置最佳时机,如某项目因未及时监测到基坑位移,导致事故扩大。

2 建筑工程中地下结构施工技术的应对策略

2.1 地质条件适应性技术

(1) 地质勘察精细化与动态监测需构建“勘察-设计-施工”闭环体系。勘察阶段突破传统单一钻探模式,整合“钻探取样+地质雷达扫描+跨孔CT成像”技术,例如在岩溶发育区域,通过地质雷达探测地下溶洞分布范围与填充情况,结合钻孔压水试验测定岩层渗透系数,精准获取岩土体物理力学参数(如黏聚力、内摩擦角)及地下水赋存状态。施工期间搭建多层次监测网络,针对

软土地层基坑，沿边坡每隔5米布设测斜管监测深层位移，在邻近建筑物基础设置沉降观测点（观测频率不少于1次/天），同时利用孔隙水压力计实时追踪水位变化。当监测数据出现异常（如基坑水平位移超30mm），立即联动设计单位调整方案，如采用高压旋喷注浆加固周边土体，确保施工安全。（2）不同地层下的施工工法选择需实现“地层特性-工法优势”精准匹配。软土地层优先采用盾构法，以土压平衡盾构机为例，通过调节土仓压力与推进速度，平衡周边土体应力，减少地表沉降（沉降量可控制在5mm以内），适用于城市地铁区间隧道施工；若施工区域管线密集，浅埋暗挖法更具优势，其“中隔壁法（CD法）”“交叉中隔壁法（CRD法）”可通过分步开挖、及时支护，降低对管线的扰动。岩层地层首选TBM法，硬岩TBM刀具切削硬度达150MPa以上，日掘进速度可达10-15米，显著优于传统钻爆法；对于破碎岩层，搭配管棚超前支护技术（管棚长度8-12米），可有效防止塌方。富水地层以明挖法为主，同步构建止水帷幕，如采用三轴搅拌桩形成深度20-25米的防渗墙，搭配井点降水系统（井点间距1.5-2米），将地下水位降至基坑底以下1米，避免管涌事故^[2]。

2.2 安全风险防控措施

（1）地下水治理技术需根据水文地质条件差异化应用。富水砂层施工中，多级井点降水技术最为常用，一级井点适用于水位埋深3-5米地层，采用直径50mm井点管，滤管长度1.5米，通过真空泵形成负压降水；若水位埋深超8米，需采用二级或三级井点，上下级井点间距控制在1.5-2米，防止降水盲区。邻近古建筑或精密构筑物区域，必须配套回灌井点，回灌水量与降水水量保持1:1.2比例，平衡地下水位，如某历史街区地下工程中，通过回灌技术将周边建筑沉降量控制在2mm以内。止水帷幕技术中，地下连续墙适用于深基坑（深度超20米），墙体厚度600-800mm，混凝土强度等级C30，渗透系数小于 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ ；高压旋喷桩则适用于中浅层基坑，桩径600-800mm，桩间距500-600mm，可形成连续防渗体^[3]。（2）智能化监测系统需融合物联网与BIM技术实现“感知-分析-预警”一体化。基于物联网技术，在支护桩、钢支撑等关键部位布设应变传感器、倾角传感器，数据采集频率达1次/15分钟，通过4G/5G网络实时传输至云端平台。借助BIM技术构建三维可视化模型，将监测数据与模型构件关联，如当某根钢支撑轴力超设计值10%时，模型对应部位自动高亮报警，并推送预警信息至管理人员手机端。同时，集成数值模拟功能，通过FLAC3D软件预测后续施工风险，例如模拟基坑开挖至底标高时

的位移趋势，提前调整支护参数。某地铁车站施工中，该系统成功预警3次基坑位移异常，避免事故发生。

2.3 技术创新与应用

（1）新型支护结构可显著提升施工效率与资源利用率。可回收式钢支撑技术突破传统混凝土支撑“一次性使用”局限，采用Q355钢材制作支撑构件，通过液压千斤顶安装与拆卸，回收率达95%以上，相比混凝土支撑节省材料成本40%。该技术适用于软土地区深基坑，支撑间距3-6米，轴力承载能力达5000kN，且可根据施工进度灵活调整支撑长度，如上海某超深基坑项目应用该技术，工期缩短20天。此外，装配式地下连续墙技术采用工厂预制墙段，现场吊装拼接，接缝处采用止水条密封，施工效率提升30%，墙体垂直度误差控制在1/500以内，减少现场湿作业。（2）绿色施工材料可实现“环保性能”与“工程性能”双重提升。自修复混凝土通过掺入微生物菌剂（如芽孢杆菌）与营养盐，当混凝土出现裂缝（宽度 $\leq 0.5 \text{mm}$ ）时，菌剂遇水激活，分泌碳酸钙填充裂缝，自修复率达80%以上，延长地下结构使用寿命（可提升至100年）。环保防水卷材采用改性沥青与聚酯胎基，VOCs排放量较传统卷材降低60%，同时具备优异的耐根穿刺性能与抗老化性能，适用于地下车库、综合管廊等工程。某综合管廊项目应用该材料，防水合格率达100%，且施工过程无刺激性气味^[4]。

2.4 管理优化策略

（1）全生命周期风险管理框架需覆盖“施工前-施工中-竣工后”全阶段。施工前开展风险辨识，采用LEC法（作业条件危险性评价法）对突水、坍塌等风险评级，制定专项应急预案，明确应急物资储备（如抽水设备、应急照明）与响应流程。施工中实施动态风险管控，每周召开风险评估会议，结合监测数据更新风险等级，如将“高风险”工序（如基坑开挖）的管控频次提升至每日2次。竣工后建立风险追溯机制，将施工过程风险数据纳入工程档案，为后续运维提供参考。某地下综合管廊项目通过该框架，风险事故发生率降低70%。（2）信息化施工管理平台需基于5D-BIM集成“进度-成本-质量-安全”数据。平台以BIM三维模型为基础，关联施工进度计划（4D）与成本数据（5D），实现“模型构件-进度节点-费用明细”一一对应，如点击模型中“底板混凝土”构件，可查看浇筑时间、施工班组、材料用量及成本消耗。同时，集成质量验收模块，管理人员通过手机APP上传验收照片与数据，自动生成验收报告；安全管理模块则实时统计违章作业次数，关联班组考核。某超高层建筑地下工程应用该平台，成本偏差率控制在3%以内，质

量验收效率提升50%。

3 建筑工程中地下结构施工技术的未来发展趋势与建议

3.1 技术发展趋势

(1) 智能化施工将实现“无人化作业-智能预测”深度融合。施工环节中,地下盾构机器人可搭载视觉识别与自主导航系统,自动规避岩层裂隙、地下管线等障碍,实现24小时不间断掘进,预计掘进精度可提升至 $\pm 2\text{mm}$,人工成本降低60%;AI预测技术通过整合历史施工数据与实时监测数据,构建风险预测模型,如基于LSTM神经网络算法,提前72小时预测基坑位移、混凝土裂缝发展趋势,准确率达90%以上,为风险处置预留充足时间,避免事故发生。(2) 低碳化与可持续技术成为行业主流方向。施工设备将全面升级为新能源动力,如电动盾构机、氢能起重机,相比传统燃油设备减少碳排放80%;同时,建筑固废循环利用大幅提升,基坑开挖产生的渣土可经破碎、筛分后制成再生骨料,用于地下结构垫层施工,利用率达95%以上;地下空间还将集成光伏发电系统,如在地下车库顶板铺设光伏板,为施工及后期运维提供清洁能源,实现“施工-运维”全阶段低碳运行。

3.2 政策与管理建议

(1) 完善地下工程标准规范需强化“全流程-差异化”覆盖。针对不同地质条件(如岩溶、冻土)制定专项施工标准,明确勘察精度、支护参数、监测频率等指标;同时,补充智能化技术应用规范,规定物联网传感器布设密度、BIM模型精度等级等技术要求,避免因标准缺失导致技术应用混乱。此外,建立动态更新机制,结合新型技术(如可回收支护结构)的应用实践,每3-5年修订一次规范,确保标准与行业发展同步。(2) 加强施工人员技能培训需构建“理论-实操-考核”体系。培训内容涵盖智能化设备操作(如盾构机器人调试)、BIM模型应用等新型技术,采用“VR模拟+现场实操”模式,让学员在虚拟场景中演练突水、坍塌等应急处置流程,再到施工现场实操验证;考核环节实行“持证上岗”制

度,考核不合格者需重新培训,确保施工人员具备应对新技术与复杂工况的能力,减少因操作失误引发的安全事故。

3.3 研究方向展望

(1) 极端地质条件下的施工技术需突破“适应性-安全性”瓶颈。针对深海、高寒冻土等极端环境,研发抗高压、抗低温的特种施工设备,如深海沉管隧道施工专用的高压盾构机,可承受10MPa水压;同时,探索新型支护技术,如在冻土区采用相变材料填充的支护结构,通过材料吸热、放热调节支护体系温度,防止冻土冻胀融沉导致结构破坏。(2) 地下结构全生命周期维护技术需实现“主动监测-智能修复”一体化。借助分布式光纤传感技术,实时监测地下结构应力、渗漏水情况,监测范围覆盖结构全断面;当发现结构损伤时,可通过预埋的自修复胶囊释放修复剂,自动填充裂缝,或采用机器人携带修复材料进入地下空间进行针对性修补,大幅延长地下结构使用寿命,降低后期维护成本。

结束语

建筑工程中地下结构施工技术挑战重重,但通过精细化地质勘察、科学选型施工工法、强化安全风险防控、应用新型支护结构与绿色材料,以及构建全生命周期管理与信息化施工平台等策略,可有效化解难题。未来,随着智能化、低碳化技术的深入发展,地下结构施工将迈向更高效、安全、可持续的新阶段,为城市地下空间建设提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1] 郗宜君.住宅建筑工程地下空间既有风亭结构托换法施工技术应用研究[J].居舍,2024,(04):53-54.
- [2] 武思明,陈永华,蒋作栋,等.建筑工程地下结构防水施工技术实践[J].江西建材,2023,(14):164-166.
- [3] 陆利文,胡素兵.逆作法施工地下室结构设计要点分析[J].绿色环保建材,2020,(08):82-83.
- [4] 潘鑫,窦永昌.建筑工程地下结构后浇带提前封闭施工技术及应用[J].价值工程,2022,(09):97-99.