

深基坑涉铁施工关键技术与安全控制研究 ——以深圳宝安国际机场5号下穿通道工程为例

陈清云

中国水利水电第十六工程局有限公司 福建 福州 350003

摘要：城市机场片区基建与轨道交通协同发展背景下，临近既有地铁线路的深基坑施工，面临施工扰动大、安全管控严苛、地质条件复杂等多重难题。深圳宝安国际机场5号下穿通道工程为机场关键配套项目，涉铁段基坑最大开挖深度12.1m，近距离上跨运营地铁20号线与深大城际铁路，围护结构与地铁隧道最小净距仅2.1m，软土地层叠加丰富地下水，施工风险极高。本文结合该工程实例，针对性采用复合支护、分层分段对称开挖、土体预加固及地下水综合控制等关键技术，构建全流程涉铁安全管控体系与自动化动态监测预警机制，全程严控施工扰动与结构变形。实际施工中，基坑变形及地铁隧道沉降、收敛均控制在规范限值内，实现工程建设与地铁运营双安全，可为同类机场片区涉铁深基坑工程提供可靠实践参考。

关键词：深基坑；涉铁施工；地铁结构保护；变形监测；安全管控

引言

城市机场片区临近轨道交通的深基坑施工，是兼具工程建设与运营安全双重管控压力的超危大工程，施工扰动防控难度极大。本文以深圳宝安国际机场5号下穿通道涉铁深基坑工程为实例，针对基坑最大开挖深度12.1m、与地铁隧道最小净距仅2.1m、软土及填石复合地层、地下水丰富等核心难点，系统研究复合支护体系、分层分段对称开挖、土体预加固、地下水联合控制等关键施工技术，构建涉铁专项安全管控与自动化动态监测应急体系。工程实践表明，通过全流程精准管控，基坑变形及既有地铁隧道结构位移均严格控制在规范预警限值内，未对地铁正常运营造成任何影响，实现了施工安全与运营保障的双重目标，可为同类机场片区近地铁深基坑工程提供可复制的技术与管控参考。

1 工程概况与施工重难点分析

1.1 工程基本概况

深圳宝安国际机场5号下穿通道续建工程，坐落于机场卫星厅北侧与拟建T2航站楼南侧，属于机场飞行区核心配套交通工程，工程全线总长359.6m，整体划分为箱涵段、U槽段以及地面段三个结构区段，承担着机场内部交通疏导与枢纽衔接的关键作用。该工程核心难点集中于涉铁施工区段，线路上跨深大城际铁路与地铁20号线，涉铁影响段总长约180m，基坑开挖深度介于2-12.1m，与既有地铁隧道最小竖向净距6.2m，围护桩底与隧道顶部最小净距仅2.1m，按照轨道交通近接施工风险等级划分，属于近地铁高影响等级超危大工程。场地地质条件复杂，自

上而下分布人工填土、淤泥、粉质黏土等多层土体，同时赋存孔隙潜水与承压水，地下水资源丰富，软土层流变性较强，土体自稳能力偏弱，极易诱发基坑沉降与周边土体变形，给施工管控带来极大挑战。

1.2 主要施工重难点

结合工程区位、地质及涉铁特殊要求，本次施工核心重难点集中在四方面：其一，基坑最大开挖深度达12.1m，软土地层自稳性极差，开挖过程中易出现坑底隆起、边坡滑移等问题，施工扰动会快速传导至邻近地铁隧道，威胁结构稳定；其二，工程与既有地铁线路净距极小，土方开挖、机械作业、基坑降水等关键工序，极易引发地铁隧道沉降、收敛变形，直接影响地铁正常运营安全，管控容错率极低；其三，场地内承压水与浅层潜水并存，地下水控制难度大，若管控不当，易引发管涌、流砂等病害，破坏基坑整体稳定与地铁周边土体受力平衡；其四，涉铁施工执行极高安全标准，需全程开展动态实时监测，且要求应急响应快速高效，必须全程杜绝各类安全隐患与运营干扰事故，施工管控流程与标准远超普通基坑工程。

2 深基坑涉铁施工关键技术

2.1 地基加固技术

针对本工程软土流变性、土体自稳能力差的地质缺陷，同时阻断施工扰动向地铁隧道传导，涉铁段基坑采用三轴水泥搅拌桩开展全域地基预加固。施工全程采用两搅两喷、间隔跳打的标准化工序，严格把控水泥掺入比、水灰比及桩体养护强度等核心参数，确保桩身均

匀性与整体性达标。结合涉铁段特殊工况,优化桩位平面布置与施工先后顺序,重点加固基坑底部与临近地铁侧周边土体,全面提升加固区域土体承载力与抗侧向变形能力,从源头削弱基坑开挖、降水等工序带来的土体扰动,有效抑制基坑后期沉降与侧向位移,规避扰动传导至既有地铁结构,筑牢涉铁施工底层安全保障^[1]。

2.2 基坑支护体系施工技术

涉铁高风险区段采用“挂网喷锚放坡+咬合桩+混凝土支撑+钢支撑+换撑”复合支护体系,兼顾挡土、止水与控形三重功效。咬合桩选用 $\phi 1000$ 全套筒施工工艺,分素砼桩与钢筋砼桩序贯交替施工,全程严控桩身垂直度与咬合搭接质量,形成密闭连续的止水挡土结构,彻底杜绝桩间渗漏隐患;支护上部设置冠梁与混凝土腰梁,搭配 $\Phi 609 \times 16$ 钢支撑形成刚性支撑体系,严格遵循“先撑后挖”原则,精准把控钢支撑安装时序与预应力施加值,严控基坑侧向变形;基坑放坡区段同步实施挂网喷锚支护,及时喷射混凝土封闭边坡,防止土体风化剥落与地表水渗入坍塌,保障边坡整体稳定^[2]。

2.3 分层分段对称开挖技术

涉铁段土方开挖严格恪守“开槽支撑、先撑后挖、分层开挖、严禁超挖、竖向分层、水平分段”的核心原则,全程严控开挖节奏与扰动范围。水平方向分段长度控制在20m以内,竖向分层厚度不大于2m,软土薄弱区段进一步缩减分层厚度,降低无支撑暴露时长;采用由南向北退挖施工工艺,避免机械作业对已开挖区域造成二次扰动,坑底预留300mm厚土层采用人工清理,杜绝大型机械直接扰动原状基底土。开挖工序与支护、支撑施工无缝衔接,随挖随撑,最大限度缩短基坑土体暴露时间,减小土体应力释放带来的变形,全方位降低对邻近地铁隧道的扰动影响。

2.4 地下水综合控制技术

结合场地地下水丰富、含承压水的特点,构建“坑内疏干井+盲沟集水井+坑外止水”联合控水体系,实现疏排与防渗双重管控。涉铁段均匀布设 $\phi 650$ 疏干井,合理把控井距与成井深度,提前30天开展预降水,将地下水位稳定降至开挖面以下1m,满足干槽施工要求;基坑底部同步布设排水盲沟与集水井,实时疏排坑内残留积水与渗水;降水过程中严控降水速率,严禁快速、过度降水,防止引发地铁周边土体不均匀沉降;配合外侧咬合桩止水帷幕形成全封闭防渗体系,杜绝坑外水土流失与土体流失,保障基坑周边及地铁隧道下方土体受力平衡^[3]。

3 涉铁施工安全控制与地铁保护措施

3.1 土方施工地铁专项保护措施

土方施工阶段以降低土体扰动、保护地铁结构为核心,全面优化施工管控细节。提前规划开挖顺序,主动避开地铁早晚运营高峰时段施工,减少高峰期施工干扰;严格管控基坑周边堆载行为,坡顶2m范围内严禁堆放任何建材、土方,周边区域堆载总量严格控制在20kPa以内,防止额外荷载引发土体沉降;沿基坑边界闭环设置截水沟,阻断地表水渗入坑内软化软弱土层,避免土体承载力下降;基坑开挖至设计标高后,快速开展垫层浇筑与结构封底施工,最大限度缩短坑底暴露时间,有效抑制坑底隆起变形,同时防止地铁隧道出现异常上浮,保障隧道受力稳定^[4]。

3.2 施工机械振动与噪音控制措施

针对机械振动易传导至地铁隧道引发结构变形的问题,全程落实减振降噪管控。优先选用低振动、低噪音型号施工机械,桩机、挖机、运输车辆等设备底部均铺设厚钢板缓冲减震,阻断振动向地下土体及地铁结构传导;严控各类机械施工参数,禁止大功率、高频次连续振动作业,避免土体共振加剧变形;进一步优化施工时段,地铁运营高峰期全面缩减、暂缓高振动工序施工,非必要不开展重型机械作业;定期开展机械振动监测,实时采集振动数据,评估对地铁结构的影响,根据监测结果动态调整施工工艺与作业节奏,将振动影响降至规范允许最低值。

3.3 既有地铁构筑物专项保护要求

施工全程严守地铁安保区管控规定,落实全流程结构保护。施工前严格办理涉铁施工专项审批手续,主动接受地铁运营单位、监管部门全程监督;施工过程中划定地铁保护红线,严禁任何设备、人员触碰地铁隧道结构,围护桩施工精准把控桩底标高,杜绝桩体侵入地铁限界;强化地铁隧道周边土体防护,严格按照设计方案开挖,严禁超挖、漏挖、掏底开挖,防止隧道出现侧向位移、不均匀沉降;主体结构施工完毕后,及时开展基坑回填作业,分层夯实回填土体,快速恢复周边土体原有压力,保障地铁结构长期受力平衡,避免后期变形。

3.4 全过程安全管控措施

构建全覆盖、闭环式安全管控体系,压实各级安全责任。建立项目经理负责制的安全生产责任体系,配备专职安全员全程旁站管控,落实全员岗前安全教育、专项技术交底,确保施工人员熟知涉铁安全要求;严格执行危大工程管理规定,专项施工方案需经专家论证、监理单位及地铁保护办审批通过后方可实施,严禁擅自更改施工工艺;加强现场硬件防护,基坑周边设置标准化防护栏杆、警示标识及夜间警示灯,划定涉铁专属施工

区,严禁无关人员、车辆进入;同步做好环境保护管控,规范处理施工泥浆,落实扬尘喷淋降尘措施,及时清理施工废弃物,避免污染影响地铁运营环境与周边设施。

4 数字化监测与应急保障体系

4.1 全维度自动化监测体系

本工程构建“基坑自身监测+地铁隧道专项监测”双维度自动化管控体系,实现全程动态盯控。基坑监测覆盖坡顶水平与竖向位移、深层土体水平位移、钢支撑轴力、地下水位及周边地面沉降等关键指标,严格按照规范设定监测频率与分级预警阈值;地铁隧道区段采用全自动全站仪24小时不间断自动化监测,重点把控隧道水平位移、竖向沉降及径向收敛变形,搭配人工定期复核校准数据,严控地铁结构累计位移不超过10mm,变形速率严守规范限值,监测数据实时上传平台,异常数据立即触发预警,实现风险早发现。

4.2 数字化施工技术应用

依托BIM技术开展施工全过程模拟,提前优化施工工序、机械行走路线,预判并规避涉铁段施工冲突与工序矛盾;搭建智慧工地管控平台,整合自动化监测数据、现场视频监控、人员及设备定位信息,实现施工全过程可视化、一体化管控;搭配AI智能识别系统,实时抓拍现场违章作业行为,联动扬尘、噪声监测设备与喷淋降尘系统,实现智能预警、自动处置,全面提升涉铁高风险区段数字化管控效率^[5]。

4.3 应急预案与应急处置

搭建完善应急保障体系,成立专项应急领导小组,明确各级人员职责,配齐砂袋、木桩、抽水泵、应急发电机等抢险物资;针对基坑坍塌、渗漏、地铁结构变形超标等突发情况,制定专项应急预案,明晰四级应急响应流程与处置标准;定期组织实战化应急演练,强化抢险人员快速处置能力,提前对接外部救援单位,明确救援

路线,确保突发险情10分钟内启动响应,快速处置遏制险情扩大,守住施工与运营双安全底线。

结束语

深圳宝安国际机场5号下穿通道涉铁段深基坑工程,通过专项关键技术落地与全流程安全管控,全程未发生任何施工安全事故,未对既有地铁20号线运营、深大城际铁路在建结构造成任何不良影响。施工期间,基坑边坡沉降、侧向位移、支撑轴力等各项指标均控制在设计及规范允许范围内,地铁隧道结构沉降、收敛变形远低于预警限值,完全满足涉铁施工零扰动、高安全的管控要求,工程按期顺利推进,顺利完成主体结构施工,实现了工程建设与轨道交通运营、结构保护的协同共赢。

综上,临近地铁的深基坑涉铁施工,需依托复合支护、分层分段开挖、精准降水等核心技术筑牢结构保障,配合专项地铁保护、减振降噪、闭环安全管控实现风险防控,搭配自动化监测与应急体系守住安全底线。本工程的技术方案与管控模式,适配机场片区复杂地质、高安全等级涉铁施工工况,可为同类近接轨道交通深基坑工程提供可靠的实践参考与技术借鉴。

参考文献:

- [1]李锋.上海临港G60科创云廊二期项目基坑工程施工重难点分析与对策研究[J].价值工程,2026,45(08):117-121.
- [2]高芬芬,耿晔宽.软土地区相邻深基坑同步施工安全风险控制关键技术研究[J].江苏建筑,2021,(06):89-91.
- [3]龙敏健,软土地区多地铁盾构待穿区深基坑施工与结构安全控制关键技术研究.安徽省,中建四局第六建筑工程有限公司,2020-03-27.
- [4]李欢秋,刘飞,郭进军.城市基坑工程设计施工实践与应用[M].武汉理工大学出版社:201903:265.
- [5]潘小虎,南宁轨道交通深基坑安全风险控制和关键施工技术.陕西省,中铁一局集团有限公司,2018-09-26.