 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i8.11448

Research on Risk Prevention and Control for Shield Tunneling Through Complex Strata Underneath Residential Building Groups

Longjun Liao

China Water Conservancy and Hydropower Seventh Engineering Bureau Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

In response to the construction challenges of shield tunneling through dense residential buildings in complex composite strata of coastal alluvial plains, this paper, based on actual engineering, identified three types of core risks, clarified the formation mechanism and disaster consequences of six levels of typical risks, and through the calibration of key construction parameters in the test tunneling section, constructed a full-process risk prevention and control system covering pre-treatment before the underpass, dynamic control during the tunneling process, and lagging settlement sealing after the tunneling. The Shazhisan~Bupeng shield tunneling interval project of the Shenzhen Metro Line 12 Phase II demonstrates that this technical system can control the deformation of the strata and buildings, avoid safety hazards such as building cracking and ground collapse, and can provide a reference for similar shield tunneling through complex strata and residential buildings.

Keywords

shield tunnel; complex composite strata; underpassing of buildings; risk prevention and control

复杂地层盾构下穿房屋建筑群风险防控研究

廖龙君

中国水利水电第七工程局有限公司，中国 · 四川 成都 610000

摘　要

针对海冲积平原复杂复合地层盾构下穿密集房屋建筑群的施工难题，本文依托实际工程，研判三类核心风险，明确六级典型风险的形成机理与致灾后果，通过试验掘进段标定关键施工参数，构建出涵盖下穿前预处理、掘进中动态管控、贯通后滞后沉降封堵的全流程风险防控体系。依托深圳地铁12号线二期沙三站~步涌盾构区间工程项目表明，该技术体系可控制地层与建筑变形，规避房屋开裂、地面塌陷等安全隐患，能为同类复杂地层盾构下穿建筑群施工提供参考。

关键词

盾构隧道；复杂复合地层；建筑群下穿；风险防控

1 引言

城市轨道交通隧道建设中，盾构下穿密集房屋建筑群施工风险极高，在海冲积平原上软下硬的复合地层中再加上地下水、风化孤石等不良地质条件，易造成姿态偏移、土体流失、地层沉降等问题。老旧浅基础房屋抗变形能力差，施工扰动很容易导致建筑开裂、倾斜甚至坍塌，而且多重风险叠加又加大了施工控制的难度。为了有效防止施工安全事故的发生，保证周边居民的财产和施工安全，急需针对复杂的地层盾构下穿建筑群开展风险辨识及防控技术的研究，形成适应现场工况的标准化管控体系。

【作者简介】廖龙君（1990–），男，苗族，中国重庆人，本科，工程师，从事盾构施工研究。

2 项目概况

本文依托深圳地铁 12 号线二期沙三站～步涌盾构区间开展研究，区间配置两台 Φ6470 土压平衡盾构，自步涌站始发、沙三站接收，双线总长 1972m，最大纵坡 25‰。核心风险段为蚝三社区建筑群，隧道埋深 15.28~21.58m，表层分布 0.5~7.7m 饱和淤泥，洞身穿越风化花岗岩，左右线上软下硬地层分别长 46m、67m。隧道 30m 影响范围含 84 栋浅基础民房，近距离下穿 DN2500 污水管、外环高速桩基、排涝河，施工扰动易造成房屋开裂坍塌。项目编制下穿专项方案，配套全过程监测与应急体系，为本研究提供实体工程依托。

3 工程风险基础研判

3.1 复合地层固有地质风险

区间原始场地为海冲积平原，通过人工回填整平，地

层竖向分层差异显著。该项目场地表层大范围分布饱和淤泥层，厚度 0.5~7.7m，土体含水量高、压缩性极强，受盾构掘进扰动后承载力会大幅衰减，极易产生超量沉降；中部为粉质黏土、砂质黏性土；隧道洞身穿越全风化、砂土状强风化、块状强风化、中风化混合花岗岩，形成典型上软下硬地层结构，右线上软下硬区段长 67m，左线长 46m。

花岗岩有球状风化现象，地层中散布着随机分布的风化孤石，掘进时刀盘受力不均，盾构姿态很容易发生偏移，直接导致盾尾间隙失衡，造成地层损失。该项目场地同时存在上层滞水、孔隙微承压水、基岩裂隙承压水，排涝河地表水和地下含水层水力联系，掘进时容易产生渗水、涌砂现象，加大了地面及建筑物变形的风险。

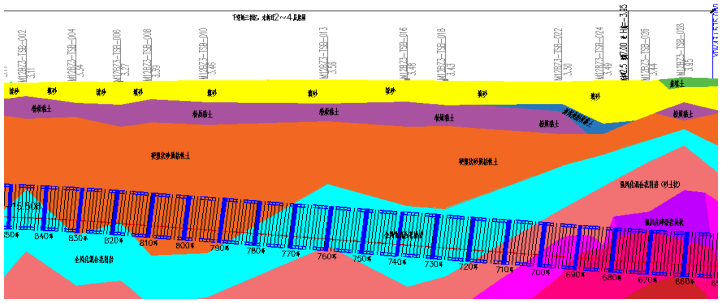


图 1 区间左右线下穿段地质剖面图

3.2 下穿房屋环境风险特征

隧道轮廓线向外 30m 范围内共计 84 栋建构筑物，包含 2~4 层居民自建房、小型加工厂房，建筑基础埋深仅 2~5m，无桩基加固层，自身墙体普遍存在原生抹灰裂缝，抵御地层变形能力薄弱。该项目区间同步交叉下穿大型污水管道、城市桥梁桩基、内河河道，房屋、管线、桥梁多重风险相互叠加。沙井路一期桥梁桩基和隧道的最小水平净距只有 1.65m，土体微小的位移就会同步传递到上部房屋，风险传导速度很快，事故演化周期短。

3.3 盾构施工衍生工艺风险

本工程采用 Φ6470 土压平衡盾构，25‰大坡度下坡掘进造成诸多施工问题，下坡工况下土仓内土体稳定性差，容易造成螺旋机喷涌，同步注浆浆液受重力影响沿坡度向下流淌，管片背部填充有空洞，后期滞后沉降不断增大，盾构如果因为设备故障长时间停机，掌子面土体持续蠕变变形，直接危及上方成片房屋安全。结合地质、周边环境、施工工艺三种风险，梳理核心风险分级及危害见表 1。

表 1 复杂地层盾构下穿房屋核心风险分级与致灾后果

风险编号	风险类别	风险等级	形成机理	潜在安全后果
R1	上软下硬地层盾构姿态失控	Ⅱ级	花岗岩硬岩段刀盘受力不均衡，千斤顶大幅纠偏，盾尾间隙不均匀，土体流失量增大	房屋产生不均匀沉降，墙体出现贯通斜裂缝
R2	软土地层超量土体损失	Ⅱ级	出土量超出理论标准、土仓保压不足，淤泥层失稳变形	地面局部塌陷、地下大型管道断裂、平房倾斜
R3	同步注浆填充不密实	Ⅲ级	下坡工况浆液下滑，管片背部留存空隙，后期持续沉降	门窗变形卡死，房屋新增结构性裂缝
R4	下穿段盾构非正常长时间停机	Ⅱ级	设备故障造成土仓压力持续衰减，裂隙水冲刷掌子面土体	老旧砖混房屋局部坍塌、路面沉陷坑洞
R5	渣土改良失效刀盘结泥饼	Ⅲ级	风化黏土黏附刀盘，掘进扭矩大幅上升，被动超挖加剧沉降	房屋墙面大面积龟裂，地表沉降速率突增
R6	地下水涌砂渗漏	Ⅲ级	基岩裂隙水贯通盾尾，泥沙持续流失形成地下空洞	道路塌陷、给排水管道渗漏破损

4 试验段前置参数标定

正式进入房屋下穿区段前，选取右线 150~200 环、左线 150~220 环作为试验掘进段，该段地层、埋深、坡度与下穿房屋区段完全一致，全程 24 小时不间断采集掘进数据与地表变形数据，优化全套施工控制指标，避免理论计算参数与现场实际地层不匹配带来的安全隐患 [1]。

4.1 土仓压力控制标准

结合隧道埋深、上部浅基础房屋保护要求，综合大坡度下坡土体失稳风险，该项目在理论计算基准上整体抬高土仓压力，最终确定下穿房屋全程土仓控制区间为 1.6~2.5bar，掘进过程结合当日监测沉降数据小幅动态上调、下调，保证开挖面始终处于微隆起稳定状态，从源头减少土体向隧道内流失。动态调参要严格按照小幅度高频次的原则进行，不得出现压力突然变化的状况来影响地层结构。

4.2 出土量管控标准

结合盾构开挖断面尺寸、管片宽度计算出单环理论渣土实方量，考虑淤泥、风化岩渣土的膨胀特性，得出每环出

土总量控制范围为 64±2m³。现场采用渣车容积计量、皮带称重双重核验方式，一旦出土量超出上限，立即降低螺旋输送机转速、小幅提升土仓压力，严格杜绝超挖行为。双重核验机制可以准确避免由于计量误差造成的土体流失量控制不准的问题。

4.3 同步注浆控制标准

管片与围岩之间存在环形建筑空隙，复合地层空隙易被地下水、软土填充，该项目注浆填充系数取值 1.3~1.8，单环注浆总量控制在 5.2~7.3m³，注浆压力稳定维持 2.5~3.0bar，盾尾四路注浆管道同步均衡注浆。针对 25‰下坡工况，适当提高拱顶注浆流量，抵消浆液向下流淌带来的填充空缺问题，保证管片四周浆液均匀包裹。全程对注浆压力进行实时监测，及时调节流量保证填充密实度 [2]。

4.4 渣土改良控制标准

区间黏性土、风化岩占比高，刀盘极易黏附黏土形成泥饼，加大掘进扭矩与土体扰动。试验段确定泡沫改良材料配比标准，泡沫原液掺配比例 3%，混合液每分钟供给量不低于 70L，泡沫膨胀倍率维持 12~14；掘进过程实时监测渣土温度，渣土温度超过 35℃时加大泡沫注入量，正反交替转动刀盘清理黏附土体，将掘进扭矩稳定控制在 1200~2000kN·m 区间内。精确的渣土改良参数可以有效减小刀盘磨损和土体扰动的风险。

5 盾构下穿房屋全流程分层风险管控技术

5.1 穿越前期前置预防措施

房屋现状全面建档：该项目委托第三方房屋检测机构对所有 84 栋建筑进行入户勘查，详细记录原有裂缝、墙体破损、门窗变形等状况，并留存影像资料做为施工前后对比的参照，同时获取所有住户的联系方式，建立街道、社区、施工单位之间的应急联系渠道，提前布置房屋初始沉降、倾斜监测点并采集齐全初始数据，为后续变形判断奠定基础。

地层隐患预处理：对前期勘察留下的勘探孔洞进行注浆封堵，用地质雷达扫描隧道上方所有地层，提前查明淤泥透镜体、风化孤石的分布位置，对应区域提前预设保守的掘进参数，排查线路下方雨污、燃气管线的位置，提前标出重点保护的管线，并制定专门的防护措施。

盾构整机全面维保：下穿前，该项目完整检修盾尾密封、主轴承密封、螺旋机闸门，磨损刀具全部更换；足量储备泡沫剂、盾尾油脂、双液注浆材料、管片配件，杜绝下穿途中材料短缺、设备故障停机，同步检修电瓶车、龙门吊等配套运输设备，保障掘进工序连续不间断开展。

5.2 掘进途中实时扰动抑制

盾构姿态精细化管控：上软下硬花岗岩区段坚持少量、多次纠偏，每次纠偏不超过 5mm，严禁一次大调整千斤顶行程造成周边土体开裂；前盾留设径向注浆孔持续注入膨润土浆液填充盾体和围岩之间的间隙，减小盾构机身拖拽土体引起的附加沉降，下坡掘进速度全程控制在 50mm/min 以内，匀速连续推进，减少启停时土仓压力的急剧变化，安排测量人员每环复核盾构轴线偏差，发现微小偏差立即纠正。

同步注浆动态调整：安排专职人员逐环记录注浆压力、注浆总量，当地面单日沉降速率超过 2mm 时，立刻提高注浆填充系数至 1.8，加大拱顶注浆流量；若出现盾尾漏浆，立即加注盾尾密封油脂封堵，防止浆液流失形成地下空洞，每 3 环抽取浆液试样检测初凝、终凝指标，不合格浆液禁止注入地层 [3]。

全天候现场巡查：该项目分成两组巡查人员，24 小时不间断巡查隧道轴线前后 50m 范围内的建筑、路面，主要观察墙体新增裂缝、地面隆起塌陷、管线井渗漏等情况，巡查记录每小时同步到现场管控群，遇到异常立即上报技术班组，及时调整掘进参数，巡查人员随身携带拍照设备，及时留存现场隐患影像以供技术研判。

5.3 穿越完成后滞后沉降封堵措施

复合地层同步单液砂浆凝固速度慢、后期存在收缩变形，房屋下穿完成后土体仍会缓慢蠕变，是施工后期房屋开裂的主要诱因，该项目采用管片吊装孔双液注浆形成环形加固帷幕：注浆时机选择管片脱出盾尾 5 环以后，注浆范围聚焦隧道拱顶 120° 区域；水泥浆与稀释水玻璃按照固定配比混合使用，注浆压力控制在 0.3~0.4MPa；单孔注浆直至溢出清水完全消失再停止，同一环按照先拱顶、后两侧对称施工，通过双液浆快速固结土体，阻断地层持续位移向房屋基础传递，消除长期滞后沉降，注浆完成后持续 7 天加密监测建筑沉降数据，待变形完全收敛后再停止补强注浆作业 [4]。若监测过程中，发现局部区域沉降仍未得到有效控制，需针对沉降异常点位增设补充注浆孔，按照相同参数要求开展二次补强注浆，直至监测数据符合规范允许的变形控制标准。

6 结论

本文结合复杂地层盾构下穿房屋建筑群工程实践，对地质、环境、施工三大类主要风险进行梳理，得出各个风险的危害程度以及演化过程。通过试验段准确标定各种主要掘进参数，有效解决了大坡度下坡掘进、软土扰动、注浆不密实等问题。创建一个全流程分层的风险防控技术体系，采用前置预防、实时控制、后期封堵的方式，对地层滞后沉降和建筑变形进行有效控制。深圳地铁 12 号线二期沙三站～步涌盾构区间工程项目防控技术实用性强、管控效果显著，可为城市复杂地层盾构近穿建构筑物工程提供可靠的参考。

参考文献

[1] 邹振兴,蔡建兵,官媛,等.软硬不均地层土压盾构下穿建筑物沉降控制技术研究[J].福建建设科技,2026,(2):48-51.

[2] 安普振.上软下硬地层大直径盾构下穿建筑群施工技术研究[J].河南科技,2025,52(19):55-60.

[3] 黄德星.地铁盾构隧道下穿房屋管片壁后回填注浆技术研究[J].市政技术,2025,43(8):70-76.

[4] 刘莹莹.大直径盾构下穿对上软下硬地层建筑群沉降的影响分析[J].建材技术与应用,2025,(3):97-100.