

城市建成区水文地质条件复杂区域地面沉降灾害治理的关键技术研究

丁声敏

江苏省生态地质调查大队

DOI: 10.12238/jpm.v6i11.8540

[摘要] 在城市化进程加速与地下空间开发强度提升的背景下，水文地质条件复杂的城市建成区成为地面沉降灾害高发区域。此类区域因地下水动态变化复杂、人工干扰因素多、工程活动与地质环境耦合作用强，传统沉降治理技术常面临精准性不足、治理周期长、与城市功能冲突等问题。本文系统梳理全链条治理技术体系，提出适配复杂水文地质条件的技术优化路径，为城市建成区地面沉降灾害防控、保障城市地质安全提供理论支撑与技术参考。

[关键词] 城市建成区；水文地质复杂区域；地面沉降；治理技术；监测预警

[中图分类号] P642

[文献标识码] A

Research on key technologies for controlling land subsidence disasters in areas with complex hydrogeological conditions in urban built-up areas

Ding Shengmin

Jiangsu Provincial Ecological Geological Survey Brigade

[Abstract] Against the backdrop of accelerated urbanization and increased intensity of underground space development, urban built-up areas with complex hydrogeological conditions have become high-risk areas for ground subsidence disasters. Due to the complex changes in groundwater dynamics, multiple artificial interference factors, and strong coupling between engineering activities and geological environment, traditional subsidence control techniques often face problems such as insufficient accuracy, long treatment cycles, and conflicts with urban functions in such areas. This article systematically reviews the entire chain governance technology system and proposes a technical optimization path that adapts to complex hydrogeological conditions, providing theoretical support and technical reference for the prevention and control of land subsidence disasters in urban built-up areas and ensuring urban geological safety.

[Key words] urban built-up area; Complex hydrogeological regions; Ground subsidence; Governance technology; monitoring and early warning

引言

地面沉降作为城市建成区典型的缓变性地质灾害，其本质是地质体在自然因素与人为因素共同作用下发生的竖向位移，而水文地质条件复杂区域因地质体稳定性差、地下水与岩土体相互作用强烈，成为沉降灾害的高敏感区。城市建成区密集的建筑群、地下管线、交通枢纽等基础设施，进一步放大了地面沉降的危害。传统地面沉降治理多聚焦于地下水回灌、限制开采等单一技术，难以适配城市建成区复杂的水文地质条件，因此，系统研究适配水文地质复杂区域的地面沉降治理技术，构建精准化、低干扰、长效化的治理体系，成为保障城市可持

发展的关键任务。

1 城市建成区水文地质复杂区域地面沉降的诱发机制

1.1 地下水动态失衡引发的有效应力变化

水文地质复杂区域的地面沉降，核心诱因是地下水开采导致的含水层有效应力增加。一方面，过量开采浅层潜水或深层承压水，会使含水层水位持续下降，岩土体孔隙水压力降低，有效应力上升，引发砂土压缩、黏性土固结；另一方面，多层含水层间的越流补给会导致不同含水层水位同步下降，形成全域应力调整，加剧沉降范围与幅度。此外，城市建成区的地下水污染、雨水管网泄漏等问题，会改变岩土体的渗透性与压缩

性，进一步放大地下水动态变化对沉降的影响。

1.2 工程活动对地质体稳定性的破坏

城市建成区的地下空间开发与地面工程建设，会直接破坏水文地质结构，诱发局部沉降。深基坑开挖过程中，降水作业会导致坑周含水层水位骤降，引发坑外地表沉降；地铁隧道盾构施工若穿越软土夹层或含水层界面，易造成岩土体扰动与孔隙水流失，形成隧道沿线沉降槽；高层建筑桩基的竖向荷载会使下部土层产生附加应力，若桩基穿越压缩性高的软土层，会诱发桩周土固结沉降，进而影响周边地面。

1.3 软土等特殊岩土体的固有压缩特性

水文地质复杂区域常伴随软土、淤泥质土等特殊岩土体，此类土具有高含水率、高压缩性、低渗透性的特点，是地面沉降的敏感载体。一方面，软土的长期固结特性会导致沉降持续时间长，即使地下水水位恢复，软土的回弹量也远小于前期压缩量，形成不可逆沉降；另一方面，城市建成区的振动荷载会加剧软土的次固结，导致已稳定的沉降再次激活，增加治理难度。

2 城市建成区水文地质复杂区域地面沉降的治理难点

2.1 治理精准性不足，难以匹配复杂水文地质结构

传统治理技术多采用粗放式模式，无法适配多层含水层、岩性突变带等复杂水文地质条件。例如，单一井孔的地下水回灌可能仅补给某一层含水层，无法实现多层含水层水位同步恢复，导致局部沉降缓解、整体沉降持续；注浆加固若未针对软土夹层的分布特征优化注浆参数，易出现加固不彻底或浆液扩散污染地下水的问题。

2.2 治理活动与城市功能的空间冲突

城市建成区密集的建筑物、地下管线、交通路网，使地面沉降治理工程面临空间受限、干扰性强的挑战。一方面，地下水回灌井、沉降监测点的布设需避开地下管线与建筑物基础，导致监测与治理范围不连续，难以形成全域覆盖；另一方面，注浆加固、基坑支护等治理工程需占用地面或地下空间，可能影响交通通行、居民生活与商业运营，治理周期与城市建设进度难以协同。

2.3 长效性不足，治理后易出现沉降反弹

水文地质复杂区域的地面沉降治理需兼顾短期控制与长期稳定，但城市建成区的持续工程活动与地下水需求，易导致治理效果反弹。例如，若仅通过限制地下水开采实现短期沉降控制，后续城市新增用水需求可能迫使地下水开采重启，引发沉降复发；软土的长期次固结特性也会导致治理后沉降缓慢增加，若未建立长期监测与动态调控机制，易出现治理-反弹-再治理的恶性循环。

3 城市建成区水文地质复杂区域地面沉降治理的关键技术体系

3.1 监测预警技术

监测预警是治理工作的前提，核心是通过多源监测技术融合，实现地下水动态、岩土体变形、地面沉降的同步监测与风

险预警，适配水文地质复杂区域的多参数耦合特征。一是多维度地下水监测技术。针对多层含水层系统，采用分层水位监测、水质监测、渗透性监测的组合技术：通过安装分层水位计，实时监测不同含水层的水位变化，识别越流补给通道；通过水质传感器监测地下水的 pH 值、污染物浓度，判断是否存在管网泄漏或污染引发的渗透性变化；通过抽水试验与压水试验，定期评估含水层与弱透水层的渗透性参数，为沉降机理分析提供基础数据。二是高精度地面与地下变形监测技术。结合城市建成区的空间特征，采用卫星遥感、地面监测、地下监测的立体监测网络：利用 InSAR 技术实现大范围沉降区域的动态监测，识别沉降热点区；在高层建筑、地下管线等关键区域，布设 GNSS 监测站与静力水准监测点，获取毫米级地面沉降数据；在地铁隧道、综合管廊等地下工程周边，采用测斜仪、多点位移计监测岩土体深层变形，提前预警工程诱发的局部沉降。三是多参数耦合预警模型。基于监测数据，构建地下水动态、岩土体变形、地面沉降耦合预警模型：通过数值模拟再现不同水文地质条件下的沉降过程，预测地下水开采、工程活动对沉降的影响；设定多级预警阈值，结合城市基础设施的沉降容忍度，实现针对性风险预警，为治理决策提供依据。

3.2 源头管控技术

源头管控是治理工作的核心，通过优化地下水开采模式、规范工程活动、调整城市建设布局，从根本上减少对水文地质系统的干扰，降低沉降诱发风险。一是地下水开采的精细化管理技术。针对多层含水层系统，采用分质供水、限量开采、人工回灌的协同管控策略，根据不同含水层的水质与水量特征，划分饮用水源含水层、工业用水含水层，实现分质供水，减少优质含水层开采；通过建立地下水开采总量控制制度，结合实时水位监测数据动态调整开采量，避免单一含水层过度开采；在地下水开采区周边布设回灌井，采用分层回灌技术，维持含水层水位稳定，抵消开采引发的沉降。二是工程活动的水文地质保护技术。规范城市建成区工程建设中的水文地质保护措施，减少工程诱发沉降，深基坑施工采用封闭式降水、止水帷幕技术，阻断坑内降水对抗外含水层的影响，控制坑周沉降；地铁隧道施工穿越软土或含水层时，采用土压平衡盾构+同步注浆技术，实时调整盾构推力与注浆压力，减少岩土体扰动与孔隙水流失；高层建筑桩基设计优先采用超长桩穿越软土层，将荷载传递至下部稳定岩层，避免桩周软土固结沉降。三是城市建设布局的适应性调整技术。结合水文地质勘察结果，优化城市建成区的空间布局，在软土分布区、地下水敏感区，限制高层建筑与地下空间开发强度，优先布局绿地、广场等低荷载用地；将雨水管网、污水处理厂等可能影响地下水的设施，布置在渗透性低的岩层区域，减少管网泄漏对水文地质系统的干扰；构建海绵城市设施，增加雨水入渗，补充浅层地下水，缓解地下水水位下降趋势。

3.3 工程修复技术

工程修复是针对已发生沉降的区域,通过岩土体加固、地下水环境修复等技术,实现沉降控制与地质体稳定性恢复,适配城市建成区的空间约束与功能需求。一是软土等特殊岩土体的加固技术。针对软土、淤泥质土等易压缩岩土体,采用原位加固与复合地基技术,通过深层搅拌桩对软土进行原位固化,提高岩土体强度与压缩模量,减少后续沉降;在高层建筑或重要基础设施周边,采用碎石桩+水泥土桩复合地基技术,通过桩体分担荷载、改善地基排水条件,加速软土固结,控制沉降速率;对于已发生沉降的地下管线区域,采用微型钢管桩、注浆加固技术,通过钢管桩提供竖向支撑,注浆填充岩土体孔隙,防止管线进一步沉降破坏。二是地下水环境修复与沉降补偿技术。针对地下水失衡引发的沉降,采用水位恢复与孔隙压力调控技术:在深层承压水沉降区,采用再生水回灌与气压渗透技术,通过回灌井向含水层注入处理后的再生水,结合气压辅助渗透,提高回灌效率,快速恢复水位;在多层含水层越流沉降区,采用弱透水层注浆封堵技术,通过向弱透水层注入低渗透性浆液,阻断越流通道,减少不同含水层间的水位干扰;在沉降严重区域,采用人工抬升技术,对建筑物基础进行微量抬升,补偿已发生的沉降,恢复基础设施功能。三是城市基础设施的沉降适应性改造技术。针对已发生沉降的地面与地下基础设施,采用结构加固与柔性适配技术,对沉降导致开裂的道路,采用沥青加铺土工格栅技术,通过土工格栅增强路面抗拉强度,沥青加铺层适应微量沉降;对倾斜的建筑物,采用基础加固+纠偏技术,恢复结构稳定性;对地下管线,采用柔性接口与管廊改造技术,将刚性接口更换为柔性接口,适应微量沉降,或对重要管线进行管廊化改造,通过管廊结构抵御沉降影响。

3.4 动态调控技术

动态调控是保障治理效果长效性的关键,通过建立监测、评估、调整的闭环机制,根据水文地质条件变化与治理效果反馈,实时优化治理策略,适配城市建成区的动态发展需求。一是治理效果动态评估技术。基于多维度监测数据,构建沉降速率、水位变化、岩土体变形的综合评估指标体系,定期评估地下水回灌的水位恢复效率,判断是否存在回灌井堵塞、越流通道未封堵等问题;评估工程修复区域的沉降速率与稳定性,判断加固技术是否达到预期效果;结合城市基础设施的运行状态,评估治理活动对城市功能的影响,为后续调整提供依据。二是治理策略动态优化技术。根据评估结果,动态调整治理技术参数与方案,若地下水回灌效率低,可优化回灌井布局、调整回灌压力与浆液配比;若工程加固区域仍存在沉降,可补充加固措施;若治理活动与城市交通、居民生活冲突,可优化施工时序,减少干扰。三是长效管理与应急响应技术。建立地面沉降长效管理机制,将水文地质勘察数据、沉降监测数据纳入城市地质信息系统,为城市规划、工程建设提供基础支撑;制定地面沉降应急预案,针对突发沉降事件,明确应

急监测、临时加固、人员疏散的流程与责任主体,确保快速响应、减少损失。

4 关键技术优化方向与未来展望

4.1 精准化

通过三维地质建模技术,构建一体化三维模型,精准识别多层含水层分布、软土夹层位置、地下管线走向,为治理技术选型与参数优化提供可视化支撑;开发靶向回灌、靶向注浆技术,通过定向钻孔与智能控压系统,将治理措施精准作用于沉降敏感区域,减少无效治理与资源浪费。

4.2 低碳化

推广低能耗、低污染的绿色治理技术:开发太阳能驱动地下水回灌系统,利用太阳能为回灌设备供电,降低治理能耗;研发环保型注浆材料,减少传统化学浆液对地下水与土壤的污染;利用城市再生水作为回灌水源,实现水资源循环利用,降低治理成本与环境影响。

4.3 智能化

构建物联网+AI智能治理系统,通过物联网传感器实时采集地下水水位、沉降速率、岩土体变形等数据,实现监测数据的自动传输与存储;利用AI算法分析监测数据,识别沉降诱发因素的主次关系,预测沉降发展趋势;开发智能控制平台,实现地下水回灌量、注浆压力等参数的自动调整,减少人工干预,提升治理响应速度与精度。

5 结束语

城市建成区水文地质条件复杂区域的地面沉降治理,是一项涉及地质科学、工程技术、城市管理的系统性工程,其核心在于精准识别沉降诱发机制、适配城市空间约束与功能需求,构建全链条技术体系。当前,针对多层含水层、软土夹层等复杂水文地质条件的治理技术,已从粗放式向精准化升级,但仍面临治理长效性不足、与城市功能协同度低等问题。未来,可进一步提升治理技术的精准性、低碳性与智能化水平,保障城市地质安全与可持续发展。

[参考文献]

- [1]张琳.水文地质因素对矿山地质灾害的影响及防治措施[J].中国金属通报,2023,(12):177-179.
- [2]王其合,张鹏,李程,等.控制地面沉降的地下水限采方案研究[J].城市轨道交通研究,2023,(S2):92-99.
- [3]阮艳妹,徐文田,李牧羽.沿海复杂地层深基坑地下水控制引发的地表沉降规律分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2023,55(05):712-719.
- [4]陈立根,刘国锋.探讨如何防治矿山建设中的地下水诱发地质灾害[J].世界有色金属,2023,(20):220-222.
- [5]陈书海,王子驰.水文地质因素对矿山地质的影响及防治措施分析[J].世界有色金属,2023,(18):106-108.