

# 地铁盾构穿越富水砂层地表沉降控制技术研究

刘朱晨

浙江省建投交通基础建设集团有限公司 浙江 杭州 310012

**【摘要】**：地铁盾构穿越富水砂层时，地表沉降易引发周边建筑物损坏、地下管线断裂等安全隐患，合理的控制技术是保障施工安全与周边环境稳定的核心。针对富水砂层透水性强、颗粒黏聚力小、自稳性差的特点，聚焦地表沉降控制的核心需求，分析沉降产生的核心诱因，探索适配该地质条件的控制技术路径，优化施工环节管控措施，实现对地表沉降的有效管控。研究明确了沉降控制的关键环节与技术要点，形成一套贴合工程实际的综合控制方案，可有效降低富水砂层盾构施工的沉降风险，为同类工程施工提供技术参考。

**【关键词】**：地铁盾构；富水砂层；地表沉降；控制技术

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.080

## 引言

富水砂层是地铁盾构施工中常见的复杂地质条件，其地下水量丰富、透水性强，砂粒间黏聚力微弱，自稳性极差，盾构掘进过程中极易扰动周边地层，引发地表沉降。此类沉降若得不到有效控制，会破坏周边道路、桥梁等基础设施，威胁邻近建筑物安全，甚至导致施工中断，造成重大经济损失。盾构法因高效、安全、对地面干扰小的优势，成为城市地铁建设的主流工艺，但在富水砂层中施工时，沉降控制难度大幅提升，现有控制措施常因适配性不足难以达到理想效果。深入探索适配富水砂层的地表沉降控制技术，破解施工中的沉降难题，既能保障施工顺利推进，也能推动地铁盾构施工技术在复杂地质条件下的完善与发展。

## 1 地铁盾构穿越富水砂层地表沉降相关概述

### 1.1 富水砂层地质特性解析

富水砂层是由不同粒径的砂粒组成的特殊地层，砂粒粒径分布范围较广，形状、磨圆度和分选性存在差异，这些特性直接影响砂层的孔隙结构与渗透性。磨圆度较好、分选性较高的砂层，孔隙分布相对均匀，透水性更强，地下水能够在孔隙中快速流动，形成丰富的地下水体。该地层的核心特性体现在透水性强、颗粒黏聚力小、自稳性差三个方面，天然状态下可维持基本稳定，但一旦受到外界扰动，平衡状态极易被打破。地下水位较高时，砂层处于饱和状态，颗粒间的有效应力减小，自稳性进一步降低，为后续盾构施工引发地表沉降埋下隐患。同时，富水砂层的抗剪强度较低，主要依靠颗粒间的摩擦力提供强度，受到盾构掘进的外力作用时，极易发生变形和破坏，进而导致地层损失，引发地表沉降。

### 1.2 地铁盾构施工对富水砂层的扰动影响

地铁盾构掘进过程中，多个施工环节都会对富水砂层产生扰动，进而诱发地表沉降。盾构机刀盘切削土体时，会直接破坏富水砂层的原有结构，打破土体的应力平衡，导致开挖面土体松弛、变形，形成地层损失。盾体推进过程中，与周围砂层

紧密接触并产生相对运动，二者之间的摩擦力会进一步扰动土体，改变土体的初始应力状态，引发土体剪切变形和位移<sup>[1]</sup>。盾尾脱离管片后，管片与周边砂层之间会形成空隙，若不能及时填充，砂层土体就会向空隙内移动，加剧地层损失。盾构施工中的排土作业、地下水扰动等环节，也会破坏富水砂层的稳定性，导致砂粒流失、地下水位变化，间接引发地表沉降，且沉降范围会随着施工推进逐渐扩大。

### 1.3 地表沉降的主要危害与影响范围

地铁盾构穿越富水砂层引发的地表沉降，会对周边环境和工程施工造成多方面危害。沉降量过大时，会导致地面塌陷，破坏城市道路、桥梁等基础设施的正常使用，影响交通安全，甚至造成交通中断。周边建筑物会因沉降出现开裂、倾斜等损坏，严重时可能引发建筑物坍塌，威胁人员和财产安全。地下管线也会因沉降发生变形、断裂，导致供水、供电、燃气等管线泄漏，影响居民正常生活，引发次生灾害。地表沉降的影响范围与盾构掘进参数、砂层地质条件密切相关，通常会覆盖盾构隧道周边一定区域，若控制不当，沉降范围会持续扩大，进一步增加危害程度，给施工后续处置带来极大难度。

## 2 地铁盾构穿越富水砂层地表沉降的核心诱因

### 2.1 地质条件本身的先天影响

富水砂层自身的地质特性是导致地表沉降的先天因素，其透水性强、颗粒黏聚力小、自稳性差的特点，决定了该地层在受到外界扰动时极易发生变形。地下水量丰富且流动性强，盾构施工过程中，地下水的流失会导致砂层土体有效应力增加，引发土体固结沉降，同时地下水的流动还会带走部分细小砂粒，加剧地层损失。砂层颗粒间缺乏足够的黏聚力，无法形成稳定的土体结构，盾构刀盘切削和盾体推进产生的扰动，会直接导致砂层土体松散、坍塌，进而引发地表沉降。富水砂层的承载力较低，难以承受盾构施工产生的外力荷载，进一步加剧了土体变形和地表沉降的可能性。

## 2.2 盾构施工参数控制不合理

盾构施工参数的合理控制是预防地表沉降的关键，参数设置不当会直接诱发或加剧沉降。土压力设定不合理是主要诱因之一，若土仓内土压力设定过低，无法平衡开挖面的主动土压力，会导致开挖面土体向土仓内位移，造成土体松弛和地层损失；若土压力设定过高，则会过度挤压周边砂层，导致土体发生塑性变形，同样会引发地表沉降<sup>[2]</sup>。刀盘转速、推进速度控制不当也会产生影响，推进速度过快会增加对砂层的扰动强度，刀盘转速不合理则会导致切削不均匀，出现超挖或欠挖现象，进一步破坏砂层稳定性。渣土排放速度与掘进速度不匹配，会导致土仓压力波动，间接引发地层扰动和地表沉降。

## 2.3 施工辅助措施实施不到位

施工辅助措施的有效实施是控制地表沉降的重要保障，若措施实施不到位，会大幅增加沉降风险。同步注浆是填充盾尾空隙、减少地层损失的核心措施，若注浆不及时、注浆量不足，无法充分填充盾尾空隙，土体就会向空隙移动，引发地表沉降；注浆材料选择不当，强度和流动性不符合要求，会导致注浆效果不佳，无法有效固定周边砂层。地下水控制措施不到位也会加剧沉降，若降水不彻底，地下水位过高，会导致砂层处于饱和状态，自稳性下降，且地下水流动会带走砂粒；排水系统不畅则会导致隧道内积水，进一步扰动砂层。施工过程中的监测措施不完善，无法及时发现沉降异常，也会导致沉降问题持续发展，无法及时处置。

## 3 地铁盾构穿越富水砂层地表沉降控制的前期准备措施

### 3.1 地质勘察与精准研判

前期地质勘察是沉降控制的基础，需采用钻探、物探相结合的方式，全面查明富水砂层的分布范围、厚度、颗粒组成、磨圆度和分选性等地质参数，明确地下水位标高、地下水补给情况及渗透性特点。通过详细勘察，精准掌握砂层的物理力学特性，判断地层的稳定性和沉降风险点，为后续施工参数设定和控制措施制定提供依据。勘察过程中，需重点排查砂层中的透水通道、薄弱区域，明确这些区域的地质隐患，提前制定针对性的防控方案。同时，结合勘察结果，对盾构穿越路径进行优化，避开地质条件极差的区域，最大限度降低沉降风险，为后续沉降控制工作奠定坚实基础。

### 3.2 施工方案优化与完善

结合地质勘察结果，优化完善盾构施工方案，聚焦地表沉降控制核心需求，明确各施工环节的技术要求和管控重点。根据富水砂层的地质特性，选择适配的盾构机类型，针对砂层磨蚀性强的特点，加强刀盘和刀具的耐磨性能，避免因刀具磨损过快导致切削效率下降，加剧地层扰动。优化盾构掘进参数，初步确定合理的土压力、刀盘转速、推进速度和渣土排放速度，

明确参数调整的原则和范围，确保施工过程中参数能够根据地层变化灵活调整<sup>[3]</sup>。同时，完善同步注浆、地下水控制等辅助施工方案，明确注浆材料、注浆压力、注浆量等关键参数，制定地下水降水、排水的具体措施，确保辅助措施与主体施工协同推进，提升沉降控制效果。

## 3.3 前期地层加固处理

针对富水砂层自稳性差、易坍塌的特点，在盾构掘进前对穿越区域的地层进行加固处理，提升砂层的稳定性和承载力，减少施工过程中的地层变形和沉降。根据砂层的地质条件，选择合适的加固方式，常用的加固方法包括袖阀管注浆加固、高压旋喷桩加固等，通过向砂层中注入加固材料，填充砂粒间的孔隙，增加颗粒间的黏聚力，提升砂层的抗剪强度和自稳性。加固范围需覆盖盾构掘进影响区域，确保加固效果能够有效抵御施工扰动，重点加固砂层薄弱区域和透水通道，防止施工过程中出现涌水涌砂和地层坍塌。加固完成后，需对加固效果进行检测，确认砂层稳定性达到施工要求后，方可开展盾构掘进施工。

## 4 地铁盾构穿越富水砂层地表沉降的施工过程控制技术

### 4.1 盾构掘进参数的动态调控

施工过程中，根据地质条件的变化和沉降监测结果，对盾构掘进参数进行动态调控，确保参数始终处于合理范围，最大限度减少对富水砂层的扰动。实时监测开挖面土压力变化，结合砂层特性和施工进度，灵活调整土仓内土压力，使其始终与开挖面主动土压力保持平衡，防止开挖面土体松弛或过度挤压。合理控制刀盘转速和推进速度，避免推进速度过快、刀盘转速过高导致的地层扰动加剧，根据砂层密度调整切削力度，确保切削均匀，减少超挖、欠挖现象。同步协调渣土排放速度与掘进速度，保持土仓压力稳定，避免压力波动引发的地层扰动，进而有效控制地表沉降。

### 4.2 同步注浆与二次注浆管控

强化同步注浆环节管控，确保注浆及时、均匀、充足，有效填充盾尾空隙，减少地层损失。选用早强、低收缩的注浆材料，兼顾流动性和强度要求，确保注浆材料能够快速填充空隙并凝固，及时支撑周边砂层，防止土体移动。严格控制注浆压力和注浆量，注浆压力需略高于土压力，确保注浆材料能够充分渗透到砂层孔隙中，注浆量需达到理论空隙的合理范围，避免注浆不足导致空隙残留<sup>[4]</sup>。针对同步注浆效果不佳的区域，及时开展二次注浆，采用双液浆等强度较高的注浆材料，补充填充空隙，进一步加固周边砂层，抑制地表沉降发展。注浆过程中，实时监测注浆效果，根据监测结果调整注浆参数，确保注浆质量。

### 4.3 地下水的科学控制

科学控制地下水是富水砂层地表沉降控制的关键环节,需采取降水、排水相结合的方式,合理控制地下水位,减少地下水对砂层稳定性的影响。根据地下水位标高和砂层渗透性,设置合理的降水井点,采用井点降水等方式,将地下水位降至盾构掘进影响范围以下,降低砂层饱和程度,提升砂层自稳性。完善隧道内排水系统,及时排出掘进过程中涌入的地下水,避免隧道内积水导致砂层扰动加剧,同时防止地下水流失过快带走砂粒,引发地层损失。施工过程中,实时监测地下水位变化,根据水位变化调整降水、排水措施,确保地下水位保持稳定,避免因水位波动引发

## 5 地铁盾构穿越富水砂层地表沉降控制的后期保障与优化

### 5.1 沉降监测体系的完善与实施

建立完善的沉降监测体系,实现对地表沉降的全程监测,及时发现沉降异常并采取处置措施。在盾构隧道周边、周边建筑物及地下管线上布设监测点,监测点布设需覆盖沉降影响范围,重点区域适当加密监测点,确保监测数据的全面性和准确性。采用自动化监测与人工巡测相结合的方式,实时采集沉降数据,监测频率根据施工进度和沉降情况灵活调整,掘进过程中适当提高监测频率,确保能够及时捕捉沉降变化。对监测数据进行实时分析,判断沉降发展趋势,当沉降速率或沉降量接近预警值时,及时发出预警,为参数调整和处置措施实施提供依据,防止沉降问题进一步扩大。

### 5.2 施工后期沉降处置与修复

盾构施工完成后,针对可能出现的后期沉降,采取针对性的处置与修复措施,确保周边环境和基础设施安全。对监测中

发现的沉降超标区域,及时开展加固处置,采用二次注浆、补浆等方式,进一步加固周边砂层,抑制沉降发展。针对因沉降导致的建筑物开裂、地下管线变形等问题,组织专业人员进行修复,采用加固、防渗等措施,恢复建筑物和管线的正常使用功能,避免次生灾害发生<sup>[5]</sup>。对地表沉降区域进行平整修复,恢复地面原貌,确保道路、绿化等基础设施的正常运行。后期处置过程中,持续开展沉降监测,直至沉降趋于稳定,确保处置效果达到要求。

### 5.3 控制技术的复盘与优化提升

施工完成后,对富水砂层地表沉降控制技术的实施过程进行全面复盘,总结施工过程中的经验与不足,针对存在的问题优化提升控制技术。梳理施工过程中的参数调整、辅助措施实施等情况,分析不同控制措施的实施效果,明确各类措施的适用场景和优化方向。结合施工实际,完善沉降控制技术体系,优化地质勘察、施工参数设定、辅助措施实施等环节的技术要求,提升控制技术的适配性和有效性。将复盘总结的经验应用于同类工程施工中,进一步完善地铁盾构穿越富水砂层地表沉降控制技术,推动该领域施工技术的持续发展,为后续工程提供更可靠的技术支撑。

## 6 结语

本文围绕地铁盾构穿越富水砂层地表沉降控制技术展开研究,结合富水砂层地质特性,明确了沉降核心诱因,构建了全流程控制体系。通过前期地质勘察、地层加固,施工中参数调控、注浆及地下水控制,后期监测与修复等措施,有效解决了沉降难题,降低了施工风险,保护了周边环境安全。研究成果贴合工程实际,为同类复杂地质条件下地铁盾构施工的地表沉降控制提供了实用参考,助力相关施工技术的完善与应用。

## 参考文献:

- [1] 张京,吴艳青,汤铖.盾构钢套筒始发穿越既有地铁明挖区间案例研究[J].建筑机械化,2026,47(01):60-65.
- [2] 樊嘉栋.盾构穿越及地铁运营对桩基托换桥梁的影响分析[J].施工技术(中英文),2026,55(01):49-55+73.
- [3] 吴广兴,王锴鑫,张延冰,等.地铁盾构穿越桥梁桩基变形控制分析及应用[J].现代城市轨道交通,2025,(11):41-47.
- [4] 王冬.城市地铁盾构穿越大管径埋地输水管道稳定性研究[J].中国水能及电气化,2025,(08):65-70.
- [5] 罗桂军,刘维正,肖洪波,等.地铁盾构穿越高铁运营车站的施工影响与控制分析[J].路基工程,2025,(05):134-142.