

盾构隧道下穿施工引起的地层变形及控制方法

文 / 马 辰 西安市轨道交通集团有限公司

马 瀛 西安市轨道交通集团有限公司

摘要：盾构隧道施工过程中，盾构机对地层的扰动导致应力重分布，引发地层变形，尤其在下穿重要基础设施时，对地层沉降的控制要求极为严格。本文围绕盾构隧道下穿施工引起的地层变形机理，分析变形产生的应力重分布理论及超前、同步、滞后三阶段变形规律，并探讨影响变形的关键因素，包括施工参数、地质条件及外部荷载。基于此，提出地层变形控制技术体系，从主动控制技术（施工参数优化、同步注浆创新、土体改良）和被动防护技术（隔离屏障、预加固、动态补偿）两方面进行探讨，同时引入监测预警系统，实现动态变形控制。

关键词：盾构施工；地层变形；下穿工程；沉降控制

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.15.038

引言

本文系统分析盾构隧道下穿施工引起的地层变形机理，探讨变形产生机制及关键影响因素，并提出主动控制技术、被动防护技术及监测预警系统的综合控制方法。最后，以西安地铁1号线盾构隧道下穿徐兰高速铁路基工程为案例，研究CFG桩加固效果及盾构施工对高速铁路基的影响，为类似工程提供理论依据和实践指导。

一、盾构下穿施工地层变形机理

（一）变形产生机制

盾构隧道施工导致地层变形的本质是应力的重新分布和土体结构的扰动。随着盾构掘进机的推进，前方土体受到扰动，施工过程中产生超前、同步及滞后三个阶段的变形。综合来看，地层变形主要受到以下两个因素的影响：

1. 应力重分布理论

开挖面前方的超前松弛效应。盾构机刀盘对前方土体产生扰动，使其内部原始应力释放，导致局部应力重分布，进而引发超前变形。

在盾构隧道掘进完成后，开挖面后的地层失去原始约束，进入新的平衡状态。由于盾尾间隙的存在，土体需要通过自身位移和同步注浆填充以达到新的稳定状态^[1]。

最后，盾尾同步注浆填充盾构机与地层间的间隙，浆液在凝固过程中会产生体积收缩效应，导致地层进一步变形。这一过程属于滞后变形阶段。

2. 三阶段变形规律

盾构施工过程中的地层变形可分为三个主要阶段：超前变形、同步变形和滞后变形。不同阶段的变形特征和影响因素如表1：

表1 三阶段变形规律

变形阶段	主要影响因素	变形特点	控制措施
超前变形（刀盘扰动）	盾构机掘进面前方的应力释放，刀盘的扰动作用	盾构机前方 1-2D（D 为盾构直径）范围内土体松弛，引发地表隆起或沉降	通过合理调节开挖面支护压力、减少前方扰动，提高开挖面稳定性
同步变形（盾尾空隙）	盾尾与隧道衬砌间隙、同步注浆效果	盾尾通过后地层因间隙未及时填充而产生额外沉降	采用高效同步注浆技术，提高注浆饱满度，避免盾尾空隙
滞后变形（注浆固结）	注浆材料收缩、土体自身的蠕变效应	注浆固结后，地层仍可能因浆液收缩和地层蠕变导致长期沉降	选用低收缩、高强度注浆材料，并进行二次补浆

（二）关键影响因素

1. 施工参数

施工参数是影响地层变形的关键因素之一，主要包括盾构推进速度、开挖面支护压力、盾尾间隙控制以及同步注浆量等。推进速度的合理控制对于地层稳定至关重要，一般推荐盾构推进速度控制在 20 ~ 50 mm/min，若速度过快，开挖面压力难以维持均衡，可能导致超挖或地表突沉；若推进过慢，则支护压力可能过大，导致地层隆起。开挖面支护压力应尽量维持在与原始地层土压力相近的范围内，通常控制在 $0.8 \sim 1.2 \gamma H$ （ γ 为土体重度，H 为埋深，单位：kPa），支护压力过高可能导致地表隆起，过低则可能引发地表沉降。盾尾间隙的控制同样影响施工质量与地层稳定，盾构外径与衬砌

外径之间的间隙通常在 10 ~ 30 mm，若间隙过大，地层容易塌陷，过小则可能影响衬砌拼装质量^[2]。

2. 地质条件

地质条件决定了盾构施工过程中地层的稳定性，不同地质条件下的变形特征和施工风险存在显著差异，关键参数包括土体类型、孔隙率、渗透系数、含水量和地下水压力等。土体类型对盾构施工的影响较大，例如软黏土（黏聚力 $c=5 \sim 20\text{kPa}$ ，内摩擦角 $\phi=10 \sim 20^\circ$ ）易发生蠕变变形，而砂土（渗透系数 $k=10^{-2} \sim 10^{-3}\text{cm/s}$ ）由于渗透性强，容易出现流砂现象。孔隙率较高的土层（ $n=0.3 \sim 0.6$ ）对盾构施工更加敏感，高孔隙率意味着更大的压缩变形潜力，而对于高渗透性土体（如饱和砂土），容易在掘进过程中发生流砂或突水，影响施工稳定性^[3]。

3. 外部荷载

外部荷载是盾构施工过程中影响地层变形的重要因素，主要包括地表建筑荷载、地面交通荷载以及已有地下结构的影响。地表建筑荷载会将附加应力传递至盾构施工区域，例如5~10层混凝土建筑的基础压力通常在100~200kPa，若建筑基础较浅（埋深<5m），盾构施工下穿时容易引发沉降，需采取加固措施，如地基注浆或桩基托换等。

（三）变形传播特征

1. 地表沉降槽宽度系数*i*与隧道埋深*H*的关系

盾构施工引起的地表沉降通常呈抛物线分布，其横向宽度可用沉降槽宽度系数*i*表征。经验公式 $i=K \times H$ （*K*为沉降影响系数，*H*为隧道埋深）表明，沉降影响范围随埋深增加而增大。*K*值在0.4~0.6之间，黏性土取0.4~0.5，砂土取0.5~0.6。沉降槽半宽度 $X_0=i \times H$ ，如*H*=20m，*K*取0.5，则 $X_0=10m$ 。这说明盾构施工影响范围远超隧道本身，施工过程中应加强监测，并对邻近建筑采取保护措施，以减少沉降影响。

2. 纵向影响范围

盾构施工引起的变形沿纵向传播，影响范围主要分为超前沉降、同步沉降、滞后沉降。超前沉降影响范围1.0~1.5*D*，同步沉降1.5~2.5*D*，滞后沉降2.5~4.0*D*（*D*为隧道直径）。如*D*=6m，则纵向影响范围可达6~24m。推进速度过快、同步注浆不足或地层稳定性差会加剧纵向沉降，应优化施工参数、调整注浆工艺，并实时监测地层变形，确保施工安全和环境稳定。

二、地层变形控制技术体系

（一）主动控制技术

1. 施工参数优化

优化施工参数是控制盾构隧道地层变形的核心措施，包括开挖面支护压力、推进速度、刀盘转速、土压平衡控制等。开挖面支护压力应保持在 $0.8 \sim 1.2 \gamma H$ （ γ 为土体重度，*H*为埋深），以维持土体稳定，避免超挖或隆起。推进速度建议控制在20~50mm/min，过快易导致地层扰动，过慢可能引发土体膨胀或地表隆起。刀盘转速应根据土质条件调整，如砂土层可适当提高至2~3rpm以减少结泥饼风险。

2. 同步注浆创新

同步注浆是盾构施工控制地层变形的重要技术，传统水泥浆或水泥-水玻璃浆容易出现填充不足或固结收缩问题。创新注浆技术包括双液浆、泡沫注浆、高分子注浆等，可提高填充密实度和固结效果。双液浆（如水泥-水玻璃浆）能快速凝固，提高注浆饱满度；泡沫注浆降低浆液流动性，提高填充效果；高分子注浆（如聚氨酯）可适应高渗透性地层，提高支撑能力。

3. 土体改良技术

土体改良技术是盾构施工前针对不良地层采取的主动控制措施，以提高地层稳定性，减少掘进扰动引起的地层变形。主要方法包括化学注浆、冻结法和搅拌桩加固。

化学注浆常用于松散砂层或高渗透性地层，采用水泥-水玻璃浆、聚氨酯浆或硅酸钠浆填充孔隙，提高地层强度和止水能力。注浆压力通常控制在0.5~1.5MPa，注浆量按土体孔隙率计算，确保均匀渗透，防止施工扰动引起的涌砂或坍塌。

冻结法适用于高水压地层或需严格控制变形的环境，如地铁车站、既有隧道下穿段。液氮或盐水制冷可使土体温度降至-10~-30℃，形成稳定的冻结壁，增强土体强度并防止涌水。但冻结法施工周期长，成本高，适用于高风险施工段。

搅拌桩加固常用于软弱黏土地层，通过水泥土搅拌桩、粉喷桩等增强地基承载力，减少盾构掘进引起的沉降。桩径一般为0.6~1.0m，桩长根据盾构埋深调整，通常达到隧道底部以下2~5m以确保稳定性。

（二）被动防护技术

1. 隔离屏障体系

隔离屏障体系用于降低盾构施工对周围地层的扰动，常见方法包括地下连续墙、桩墙结构和帷幕注浆。地下连续墙（厚度600~1200mm，深度15~30m）可形成坚固屏障，有效阻挡地层移动，适用于盾构近距离下穿建筑物区域。桩墙结构（如钢管桩、咬合桩）通过桩间挤密作用减少施工引起的沉降，可用于盾构临近深基坑施工。帷幕注浆在盾构周边形成低渗透性土层，常用水泥-水玻璃浆、聚氨酯浆，注浆深度3~5m超过隧道顶部，以减少地层损失和水土流失。

2. 预加固措施

预加固措施是在盾构掘进前对特殊地段采取的局部加固方案，以增强地层稳定性，减少盾构施工引起的变形。管棚加固适用于软弱地层或隧道穿越既有结构时，采用 $\Phi 89 \sim \Phi 150mm$ 的钢管，以1.0~1.5*D*的长度向前延伸，形成拱形支撑，提高隧道围岩承载能力。超前小导管注浆（管径25~50mm，间距200~400mm）可提高前方地层强度，减少刀盘扰动引起的超前沉降。

（三）监测预警系统

1. 多源监测网络

多源监测网络利用多种监测技术，构建全面的地层变形观测体系，主要包括地表沉降监测、隧道结构监测、地下水位监测和施工参数监测。地表沉降监测采用全站仪、GNSS（全球导航卫星系统）和激光测距仪，测量精度达±1mm，用于跟踪施工引起的地表沉降趋势。隧道结构监测使用分布式光纤测温、位移传感器和测缝计，实时监测衬砌变形和接缝开裂情况。

2. 智能预警平台

智能预警平台基于大数据分析、人工智能和物联网技术，实现盾构施工地层变形的实时预测和智能预警。平台通过BIM（建筑信息模型）+GIS（地理信息系统）集成，可视化展示盾构掘进过程中的地层变形情况，并结合机器学习算法分析历史数据，预测未来沉降趋势。

三、典型工程案例——西安地铁1号线盾构下穿徐兰高速铁路工程

(一) 施工难点与控制要求

本工程盾构隧道下穿段位于CFG桩加固高速铁路基下方，要求确保高铁轨道沉降控制在±2 mm以内，以保证列车高速运行的安全性。施工难点主要包括：

高精度沉降控制要求：高铁轨道对沉降要求极为严格，必须采取有效的加固与监测措施。

地层变形传递复杂：盾构掘进会引起轨道-路基-CFG桩-土体-盾构隧道系统的联动变形，需要精细化建模分析。

施工扰动与加固优化：盾构施工可能影响CFG桩的受力性能，导致桩体松散，影响加固效果。

(二) 监测数据分析与数值模拟

本研究通过现场监测与Plaxis-3D数值模拟，分析盾构施工对轨道沉降的影响。监测结果表明，盾构下穿后在地表形成50 m长的沉降槽，沉降分布呈双驼峰曲线，说明沉降影响范围较广。CFG桩底部在盾构穿越后松散，最终有效桩长仅为原长的75%。横断面分析表明，CFG桩的松散影响范围约为(-12.6 m, 12.6 m)，即盾构掘进影响区域内的桩体承载力明显降低。

(三) 施工控制措施

针对施工难点，本工程采取了多项主动控制与被动防护措施，包括：

优化盾构施工参数：合理控制推进速度(20~40 mm/min)、土舱压力(0.8~1.2 γH)和同步注浆量(开挖体积的1.0~1.2倍)，确保地层扰动最小化。

CFG桩联合加固：采用CFG桩+注浆+加固板的组合方案，增强桩体抗沉降能力，确保盾构施工期间的桩体稳定性。

实时监测与动态补偿：建立多源监测系统(GNSS、全站仪、渗压计)，结合二次注浆补偿技术，动态控制轨道沉降，确保沉降量控制在±2 mm以内。

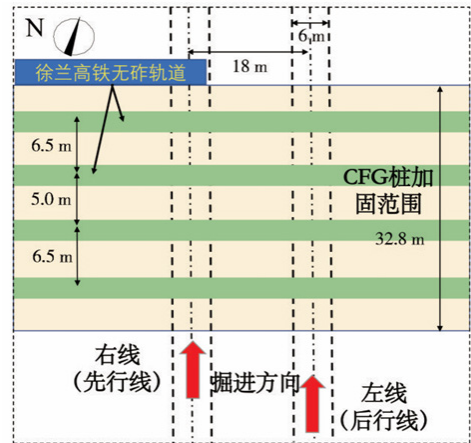


图1 下穿段平面位置

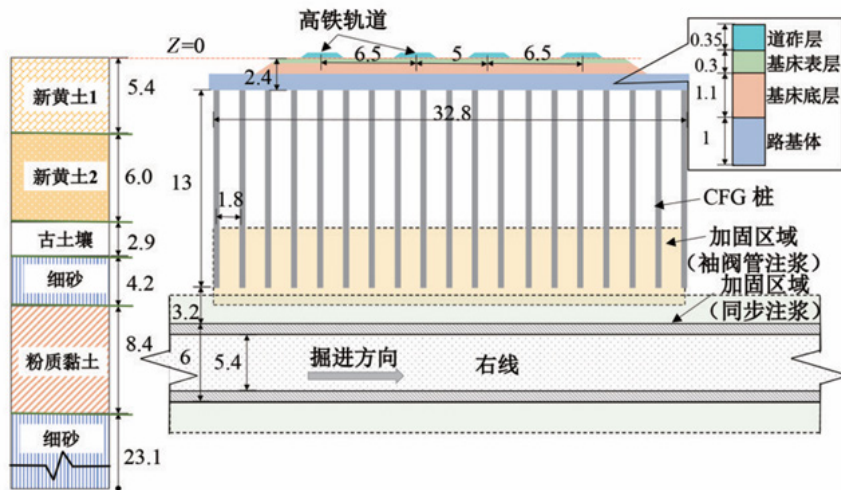


图2 隧道下穿段工程地质剖面图(单位:m)

结语

综上，通过分析地层变形机理，可知变形主要经历超前、同步及滞后三个阶段，并具有显著的横向沉降槽分布及纵向影响范围。采用施工参数优化、同步注浆创新及土体改良等主动控制技术，可有效降低盾构施工对地层的扰动，而隔离屏障体系、预加固措施及动态补偿系统等被动防护技术则可进一步提高沉降控制精度。

参考文献

[1] 杨树毅. 软土地区六管盾构隧道穿越区深基坑交叉施工的结构安全控制技术[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(7): 95-100.

[2] 张玄, 肖颖, 梁寿, et al. 盾构近距离侧穿高铁下的隔离桩-同步注浆施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(10): 59-63, 69.

[3] 张晓东. 海底超大直径双线泥水盾构相向施工扰动数值分析研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(10): 64-69.

作者简介: 马辰(1989.8-), 女, 汉族, 山西运城, 大学本科, 工程师, 研究方向: 工程管理、土木工程、地铁工程。