

盾构下穿隧道变形机理分析及控制措施研究

文 / 马 瀛 西安市轨道交通集团有限公司

马 辰 西安市轨道交通集团有限公司

摘要：本文通过对盾构隧道变形机理进行深入分析，探讨了变形的分类及其表现形式，分析了纵向变形与横向变形的主要影响因素，并通过定量分析方法研究了施工参数、地层条件及结构参数对变形的影响规律。在此基础上，提出了包括施工参数优化、结构加固、地层改良及智能监测预测在内的变形控制关键技术，结合工程案例验证了相关技术的有效性。研究结果表明，合理优化施工参数，针对不同地质条件采取适宜的地层加固措施，并引入智能监测与预测技术，可有效减少盾构隧道变形，提高施工安全性及隧道长期运营的稳定性。

关键词：盾构隧道；变形机理；施工参数优化；地层改良

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.11.050

引言

目前，国内外针对盾构隧道变形的研究主要集中在地层损失机理、数值模拟分析及现场监测技术等方面。已有研究表明，盾构施工过程中地层损失率、推进速度、同步注浆量等施工参数对隧道变形具有显著影响，而地层类型、地下水位及结构刚度等因素也对变形特征起着关键作用。然而，不同项目的地质条件及施工环境存在较大差异，如何结合具体工程背景，优化施工参数，合理选择地层加固及变形监测技术，以实现盾构隧道变形的精细化控制，仍然是当前工程实践中的重点和难点问题。因此，本文在分析盾构隧道变形机理的基础上，结合数值模拟及工程实例，探讨施工参数、地层条件及结构参数对变形的影响规律，并提出针对性的控制措施，为盾构隧道施工变形控制提供理论指导与工程参考。

一、盾构隧道变形机理分析

(一) 变形分类与表现形式

盾构隧道在施工及运营过程中受地层条件、施工参数及外部荷载的影响，可能产生不同类型的变形，主要包括纵向变形、横向变形和环向变形。纵向变形主要表现为盾构推进方向上的沉降和隆起。在实际工程中，地表沉降通常控制在10~50mm之间，但在软土地层或施工控制不当的情况下，最大沉降量可能超过100mm，形成不均匀沉降，对隧道结构及周边环境造成不利影响。横向变形表现为盾构隧道断面的侧向位移和径向收敛。例如，在软土层中，隧道两侧受力不均可能导致横向偏移5~20mm，在极端情况下甚至可能达到30mm以上，影响隧道的线形控制和运营安全。环向变形主要包括管

片接缝的开合变形和断面椭圆化，一般管片接缝的开合量控制在3~8mm，但在受力较大的区域，如隧道拐弯段或受偏压影响的区域，接缝开合量可能增大至10mm以上，影响隧道的防水性能和结构稳定性。

(二) 纵向变形机理

盾构隧道的纵向变形主要受地层扰动、盾构推进参数和隧道结构刚度等因素的影响。在盾构推进过程中，土体损失是引起纵向沉降的主要原因。通常情况下，盾构掘进产生的地表沉降曲线可用高斯分布模型近似描述，对于6.0m直径的盾构隧道，当土体损失率控制在0.5%~2.0%时，地表最大沉降量通常在10~50mm之间；当损失率超过2.5%，最大沉降可能超过80mm，严重影响周边建筑及管线安全。此外，盾构推进力的不均匀分布也会引起纵向变形。

(三) 横向变形机理

盾构隧道的横向变形主要来源于盾构推进姿态误差、地层不均匀侧向压力以及管片拼装精度不足等因素。在盾构推进过程中，若推进力分布不均，如左右侧推力相差50~100kN，可能引起盾构机姿态偏转0.5°~1.0°，导致隧道横向位移10~30mm。

二、变形影响因素定量分析

(一) 施工参数敏感性分析

盾构隧道的变形受多种施工参数的影响，包括推进速度、土压力控制、同步注浆量及管片拼装精度等。为了分析这些参数对隧道变形的敏感性，表1列举一组基于实际工程数据的对比分析。

表1 施工参数敏感性分析

施工参数	参数范围	地表沉降量 (mm)	隧道横向变形量 (mm)	环向变形量 (mm)
推进速度 (mm/min)	20 ~ 30	10 ~ 25	5 ~ 12	3 ~ 8
	30 ~ 50	25 ~ 50	10 ~ 20	5 ~ 12
	>50	>50	>20	>12
土舱压力 (kPa)	100 ~ 150	15 ~ 35	8 ~ 18	5 ~ 10
	150 ~ 200	10 ~ 25	5 ~ 12	3 ~ 8
	>200	<10	<5	<3
注浆量 (m ³ /m)	0.8 ~ 1.0	>50	15 ~ 30	10 ~ 15

续表 1

施工参数	参数范围	地表沉降量 (mm)	隧道横向变形量 (mm)	环向变形量 (mm)
管片拼装偏差 (°)	1.0 ~ 1.5	20 ~ 40	8 ~ 15	5 ~ 10
	1.5 ~ 2.0	10 ~ 25	5 ~ 10	3 ~ 8
	<1.0	5 ~ 10	3 ~ 8	2 ~ 5
	1.0 ~ 2.0	10 ~ 25	5 ~ 12	3 ~ 8
	>2.0	>25	>12	>8

(二) 地层条件影响规律

地层条件对盾构隧道的变形影响显著,主要体现在地层类别、含水率、密实度和不均匀性等方面。一般而言,软土层(如淤泥质土、粉质黏土等)对盾构隧道的变形影响较大,而密实砂层和基岩地层的变形较

小。在软土地区,土体自稳能力较差,地表沉降量通常在 30 ~ 80mm 之间,甚至可能超过 100mm,隧道横向变形也较为显著,可达 10 ~ 20mm。而在密实砂层或硬黏土层,土体的抗变形能力较强,地表沉降量可控制在 10 ~ 30mm 以内,横向变形通常小于 10mm。

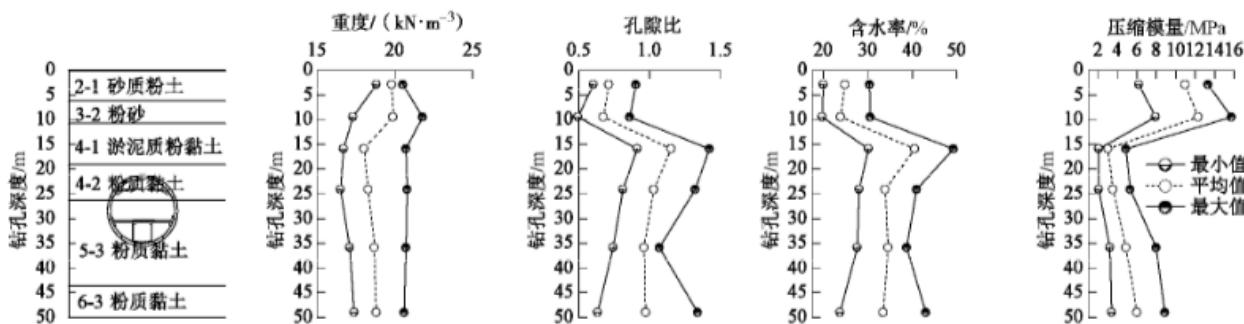


图 1: 土体分层变化曲线

(三) 结构参数作用机制

盾构隧道结构参数(如管片厚度、纵环向刚度、接缝设计等)对隧道变形控制具有重要作用。一般而言,管片厚度越大,隧道结构刚度越高,抗变形能力越强。在常见的盾构隧道设计中,管片厚度通常为 250 ~ 400mm,对于较大的埋深和高水压环境,通常选用 350mm 及以上的管片厚度,以提高隧道刚度,减少变形。在结构刚度相同的情况下,采用双排螺栓及楔形拼装设计的管片,其抗变形能力优于普通拼装方式,可减少接缝开合变形 20% ~ 30%。

从接缝设计角度看,双密封圈设计可有效减少接缝处的开合量,降低隧道变形对结构耐久性的影响。在纵缝设计中,采用企口+止水胶条结构可提高抗剪能力,减少隧道纵向不均匀沉降。在横缝设计中,采用斜拼装方式可提高隧道环向整体刚度,使隧道在受力时变形更均匀。

三、变形控制关键技术

(一) 施工参数优化技术

盾构隧道施工过程中,合理优化施工参数是控制变形的关键。主要涉及盾构推进速度、土舱压力、同步注浆、刀盘转速及管片拼装精度等方面的优化。

首先,推进速度的控制对变形影响显著。推进速度过快容易导致土体扰动增大,形成较大的地表沉降,而推进速度过慢则可能造成管片后方注浆不充分,导致局部沉降不均匀。一般建议在软土地区推进速度控制在 20 ~ 40mm/min,在密实砂层或硬黏土层可适当提高至 40 ~ 60mm/min,以减少地层扰动。

其次,土舱压力的调控直接关系到地层稳定性。土

压平衡盾构应根据地层情况合理调整舱压,避免压力过高导致隧道隆起,或压力不足引发地层坍塌。在软土层中,建议舱压控制在 150 ~ 250kPa 之间,而在砂层或密实土层中可提高至 250 ~ 350kPa。在盾构穿越敏感建筑区域时,舱压波动应控制在 ±10% 以内,以减少对地层的扰动。此外,同步注浆优化是控制盾构尾部沉降的关键。注浆量过小会导致地层损失加大,而注浆量过大可能引发地层隆起。一般推荐同步注浆量控制在 1.0 ~ 1.5m³/m,并根据地层渗透性调整浆液材料,如在高渗透性砂层中应选用水泥-水玻璃双液浆,以提高填充密实度。在特殊环境下,还可采用二次注浆技术,即在盾构推进后 12 ~ 24 小时进行二次补偿注浆,以进一步减少沉降。

(二) 结构加固技术

盾构隧道变形控制体系中,管片刚度提升具备显著作用。高水压、软土或大埋深地层条件下,采用 C60 及以上混凝土作为管片材料,将配筋率提升。钢筋直径从 12mm 增至 16mm,隧道刚度由此增强,管片变形量缩减 10%~20%。钢-混组合管片的应用,其内嵌 5-10mm 厚钢板,抗弯刚度显著提升,结构承载能力同步增强。

接缝结构优化直接影响环向与纵向变形控制。接缝区域常为变形薄弱环节,常规工况下接缝位移约 3-8mm,高应力状态可能突破 10mm 阈值。引入双密封圈配合楔形企口拼装技术,接缝抗剪性能提升 20%-30% 变形量随之下降。纵向接缝配置 M24 及以上级别高强度螺栓,环片间整体刚度强化,接缝松动诱发的过度变形得以抑制。地层突变段等高风险区域施工时,接缝部位增设碳纤维增强层,在此抗剪性能实现二次强化。

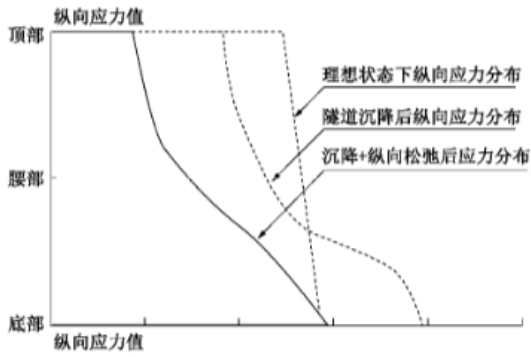


图 2: 纵向应力分布特征

(三) 地层改良技术

注浆加固技术是地层改良的常见手段，主要用于提高土体密实度，减少土体损失及沉降。针对不同地层，采用不同的浆液类型：在松散砂层中，可采用水泥-水玻璃双液浆（比例 1:1 ~ 1:2），其凝固时间可控制在 5 ~ 30min，以快速填充砂层孔隙；在软黏土层，可采用超细水泥浆（固含量 40% ~ 50%），以提高土体抗剪强度。注浆施工时，通常以梅花形布置，注浆孔间距 1.5 ~ 2.0m，浆液扩散半径 0.8 ~ 1.2m，注浆压力控制在 0.5 ~ 1.5MPa，以确保均匀加固效果。在盾构穿越高风险区域（如下穿老旧建筑、地铁站）时，采用双排超前注浆，即在盾构推进前进行 1 ~ 2m 深度的注浆，盾构推进后再进行补偿注浆，可减少 30% ~ 50% 的地表沉降^[1]。

此外，特殊地层处理技术主要针对盾构隧道穿越高水压砂层、粉砂层及膨胀性黏土时的施工风险。如盾构穿越粉砂层（渗透系数 $k > 10^{-3} \text{cm/s}$ ），可采用冻结法加固，即在盾构推进前，沿隧道轴线两侧布置液氮或盐水冷却管，将土体温度降至 $-5^\circ\text{C} \sim -10^\circ\text{C}$ ，形成冻结墙，提高土体抗剪强度，防止隧道坍塌。在膨胀性黏土层，可采用化学加固法，即注入石灰-水泥浆（含水率 30% ~ 40%），降低土体膨胀率，减少盾构施工过程中土体变形的风险。

(四) 智能监测与预测技术

智能监测技术的核心在于大数据分析和预测模型的应用。基于人工智能算法，如 BP 神经网络、支持向量机 (SVM) 及随机森林模型，可对盾构施工数据进行实时分析，预测未来变形趋势。例如，BP 神经网络基于历史监测数据训练模型，可提前预警盾构推进 50m 范围内的沉降情况，预测精度达 95% 以上，避免因施工参数调整不及时导致突发性变形。在盾构隧道变形模拟方面，利用有限元分析 (FEM) 建立数值模型，结合 FLAC3D、ABAQUS 等软件，模拟不同工况下的地层变形情况。通过调整输入参数，如推进速度、土舱压力、同步注浆量等，可提前计算出地表沉降量、环向收敛量及隧道轴线偏移量，为施工提供科学优化方案。在地层扰动预测方面，结合激光点云扫描数据与长短时记忆网络 (LSTM) 分析，动态评估地层应力分布情况，并预测盾构掘进方向前方 50m 内的地层变形趋势，提前调整施工参数，减少突发变形风险^[2]。

四、典型工程实例分析——西安地铁 5 号线穿越地裂缝段案例研究

(一) 工程背景与技术难点

该盾构区间位于活动性强烈的 F3 地裂缝带，裂缝活动速率为 2 ~ 3mm/a，地层中发育有剪切带、断层泥夹层及地下水富集带，结构错动性强。该区域地应力集中、地质条件复杂，盾构穿越过程中极易引发管片错台、接缝张开与渗漏失效等结构性病害，严重影响隧道耐久性与运营安全。

主要技术难点包括：地裂缝错动可能造成盾构姿态失稳；管片环间接缝受力复杂，渗漏风险高；地层扰动导致同步注浆易形成不均匀压密^[3]。

(二) 主要控制技术与实施策略

1. 结构适应性设计

为适应地裂缝带可能发生的微错动，盾构隧道采用铰接式高适应性管片结构，其关键参数如下：管片环宽设定为 1.2m，采用错缝拼装工艺；每环允许错动位移 5 ~ 8mm；管片接缝部位预设可更换型止水带系统，提高可维护性；管片混凝土强度等级为 C60，配置双向高强螺栓 (M24) 并增设钢纤维增强层。

2. 高性能注浆系统

在注浆材料方面，引入高分子聚合物改性水泥浆，具体为 CMC（羧甲基纤维素）掺量 0.5%，有效提高浆液黏结性和抗渗性能，使渗透系数控制在 $\leq 10^{-7} \text{cm/s}$ ，显著提升止水效果。

3. 动态补偿注浆技术

在穿越地裂缝前后各 10m 区段内布设分布式光纤监测系统（精度达 0.1mm），实时获取环缝张开、管片错动等微变形数据。基于反馈数据实施动态补偿注浆。

结语

研究表明，合理调整推进速度、土舱压力及同步注浆量，可有效减少地层损失，提高隧道施工的精度；在复杂地层条件下，通过注浆加固、冻结法及深层搅拌桩等地层改良措施，可显著降低隧道变形风险；同时，采用高刚度管片、优化接缝设计及设置辅助支护结构，可进一步提高隧道的抗变形能力。此外，智能监测与预测技术的应用，使得盾构施工过程中的变形可实时监测，并通过大数据分析及数值模拟，实现变形趋势预测与动态调整，确保盾构施工的安全性。

参考文献

- [1] 薛新科. 盾构在硬塑性黏土中小半径曲线段施工技术的研究 [J]. 建筑施工, 2023, 45 (7): 1422-1425.
- [2] 汪海波, 吴悦, 徐才厚, et al. 砂泥岩地层双线盾构隧道近距侧穿铁路桥桩基施工优化分析 [J]. 施工技术 (中英文), 2023, 52 (14): 60-65.
- [3] 施柳盛. 北横通道大直径盾构隧道小净距下穿虹口港桥安全性分析及施工控制措施 [J]. 建筑施工, 2023, 45 (9): 1848-1850.