

富水砂卵石地层盾构掘进沉降控制与质量保障技术

华超

中交一公局第八工程有限公司 天津 300171

摘要：富水砂卵石地层因其高渗透性、低粘聚力、强透水性及颗粒不均匀等特性，被公认为盾构施工中最具挑战性的地层之一。在此类地层中掘进极易引发地表沉降失控、滞后沉降乃至塌陷等严重工程事故，对周边环境和施工安全构成巨大威胁。本文系统阐述了富水砂卵石地层的工程地质特性及其对盾构施工带来的核心挑战；深入剖析了盾构掘进诱发地表沉降的机理，特别是滞后沉降的形成过程；并在此基础上，从渣土改良、掘进参数优化、同步注浆控制、实时监测反馈及风险预警等多个维度，构建了一套完整的沉降控制与质量保障技术体系。最后，结合成都地铁等典型工程案例，验证了该技术体系的有效性与先进性，旨在为类似复杂地质条件下的盾构隧道工程建设提供理论参考与实践指导。

关键词：富水砂卵石地层；盾构掘进；地表沉降；滞后沉降；质量保障

引言

随着我国城市化进程的不断加速，地下空间的开发利用已成为缓解城市交通拥堵、提升基础设施承载能力的关键举措。盾构法作为一种高度机械化、自动化且对地面干扰较小的隧道施工方法，在城市地铁、市政管网及越江跨海隧道等工程中得到了广泛应用。然而，当盾构机穿越特殊不良地质体时，其施工安全与质量控制面临严峻考验。其中，富水砂卵石地层以其独特的物理力学性质，成为公认的“盾构施工禁区”或“高风险区”。富水砂卵石地层广泛分布于我国西部及部分平原地区（如成都、兰州等地），其典型特征是地下水位高、卵石含量高（通常超过40%）、粒径差异悬殊（从细砂到直径超过30cm的漂石均有分布）、颗粒间无胶结或弱胶结，导致地层整体呈松散状态，自稳能力极差。在盾构掘进扰动下，该地层极易发生颗粒重排、孔隙水压力骤变及局部失稳，从而引发一系列复杂的工程问题，最突出的表现即为难以预测和控制的地表沉降。本文旨在系统梳理和总结近年来在该领域的研究成果与工程实践经验，构建一套科学、系统、可操作的技术体系，以期对未来类似工程的安全高效建设提供坚实支撑。

1 富水砂卵石地层特性及盾构施工挑战

1.1 地层工程地质特性

富水砂卵石地层的工程地质特性可概括为“三高一大”。首先，其高渗透性源于地层中存在大量连通孔隙，渗透系数 k 通常高达 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$ ，远高于一般粘性土，这使得地下水极易流动，并在开挖面形成强大的水头压力。其次，该地层普遍具有高含水量的特点，地下水位常年处于较高水平，甚至常常高于隧道开挖面，这

为施工过程中发生涌水、喷涌现象埋下了隐患。第三，地层中的卵石不仅含量高，而且强度极大，多为坚硬的石英岩、花岗岩等，单轴抗压强度可达100MPa以上，这对盾构刀具构成了严峻的磨损考验。最后，地层颗粒呈现出极大的离散性，从粉细砂到巨卵石共存，级配宽泛，导致其力学性质极不均匀，整体上表现出显著的非连续介质特征，给施工带来了极大的不确定性。

1.2 盾构施工面临的核心挑战

上述复杂的地层特性直接转化为盾构施工中的一系列核心挑战。首当其冲的是掌子面稳定性控制难题，高水压与松散结构的双重作用使得维持开挖面稳定异常困难，一旦土仓压力设定不当，极易引发掌子面失稳甚至坍塌，进而传导至地表形成沉降。其次，高强度卵石对刀盘刀具造成剧烈磨损，而大粒径漂石则可能卡滞螺旋输送机，导致设备频繁停机检修，不仅延误工期，更增加了施工过程中的安全风险^[1]。再者，为了满足土压平衡盾构的工作需求，必须通过高效的渣土改良技术，将原本流动性差、渗透性强的原状渣土，转变为具有塑性流动性、低渗透性和良好止水性的“类泥”状态，这对改良剂的选择和配比提出了极为严苛的要求。然而，所有这些挑战最终都指向一个最为核心和关键的问题——地表沉降的控制。由于地层松散、颗粒间粘聚力几乎为零，盾构掘进形成的建筑空隙若不能被及时、有效地填充，上覆土体中的细颗粒将在高水头压力驱动下持续向空隙内迁移流失，从而引发难以预测和控制的沉降，尤其是具有高度隐蔽性和突发性的滞后沉降，这极大地增加了工程的风险。

2 富水砂卵石地层盾构掘进沉降机理分析

2.1 沉降形成的基本原理

盾构掘进引起地表沉降的根本原因在于开挖卸荷和由此产生的地层损失。经典的Peck公式通过高斯沉降槽模型描述了这一过程，但其基本假设是地层为均质连续介质。然而，在富水砂卵石地层中，这一假设往往失效，因为其松散、非连续的特性使得沉降的产生和发展过程远比连续介质模型所描述的要复杂得多。

2.2 富水砂卵石地层特有的沉降模式——滞后沉降

在富水砂卵石地层中，沉降过程最显著的特征是表现为滞后沉降。其内在机理是一个随时间演化的动态过程。当盾构机刀盘切削前方土体并向前推进时，会首先引起一定的即时扰动和微小沉降。然而，真正的风险发生在盾构机通过之后。此时，管片外壁与周围松散地层之间会不可避免地形成环形建筑空隙。在高水头压力的持续驱动下，地层中细小的砂粒会迅速通过卵石骨架间的孔隙向这个空隙内迁移、流失。上覆地层在失去下方支撑后，会尝试通过颗粒重排形成新的应力传递路径，即所谓的“拱效应”，但由于地层本身过于松散，这种临时形成的拱结构极不稳定。随着时间的推移，细颗粒的持续流失导致上覆地层内部逐渐形成更大的空洞，土体结构不断弱化^[2]。最终，当空洞发展到无法再承受上覆土体重量的临界点时，便会突然发生塌陷，此时地表沉降急剧增大，形成滞后沉降峰值。这一过程具有明显的延迟性，沉降峰值可能在盾构机通过数小时甚至数天后才出现，其隐蔽性和突发性给工程安全带来了极大的威胁。因此，控制此类地层沉降的关键，不仅在于减少掘进过程中的即时地层损失，更在于采取有效措施阻止细颗粒的持续流失，并确保建筑空隙能够被及时、饱满地填充，从而切断滞后沉降的演化链条。

3 富水砂卵石地层盾构掘进沉降控制关键技术

针对上述沉降机理，沉降控制应采取“源头预防、过程控制、末端封堵”的综合策略，形成一套环环相扣的技术体系。

3.1 高效渣土改良技术

渣土改良是确保掌子面稳定和控制沉降的第一道防线，其核心目标是通过物理化学手段改善渣土的流变特性。具体而言，需要将原本渗透性强、流动性差的原状渣土，转变为具有良好塑性流动性、低渗透性、高保水性和适当内摩擦角的“理想”状态。在实际工程中，常根据地层的具体情况选择泡沫、膨润土泥浆或新型高分子聚合物（如衡盾泥）等改良剂，或采用多种改良剂复合使用的方式。泡沫能有效填充颗粒孔隙，降低渗透性并改善流动性；膨润土泥浆则能显著提升渣土的粘性和

保水能力，有助于在开挖面形成稳定的泥膜；而衡盾泥等新型材料则兼具多种优点，尤其适用于高水压、大粒径的极端工况^[3]。改良效果的优劣需通过室内试验与现场观察相结合的方式进行动态评价，并据此实时调整改良剂的配比和注入量，确保渣土始终处于最佳工作状态。

3.2 掘进参数精细化动态调控

掘进参数是连接地质条件与施工行为的桥梁，其设定的合理性直接决定了施工的成败。在富水砂卵石地层中，必须摒弃一成不变的参数模式，转而实施精细化、动态化的调控策略。土仓压力作为维持掌子面稳定的核心参数，其设定值应略高于开挖面处的静止水土压力，以提供足够的支撑力，但又不能过高以免造成超挖或对前方土体过度挤压。推进速度宜遵循“慢速、匀速”的原则，过快的速度会加剧对地层的扰动，不利于掌子面稳定和后续同步注浆的充分填充。同时，刀盘扭矩、转速和总推力等参数也需与土仓压力、贯入度相匹配，既要保证掘进效率，又要避免设备过载或姿态失控。所有这些参数的调整，都必须建立在对地层反馈信息的深刻理解和实时分析之上。

3.3 同步注浆精准控制技术

如果说渣土改良和参数调控是过程控制，那么同步注浆就是沉降控制的最后一道也是最关键的屏障，其作用是及时、饱满地填充盾构机通过后形成的建筑空隙。在富水砂卵石地层中，传统的单液惰性浆液极易被地下水冲刷稀释而失效，因此必须对浆液进行优化。工程实践中常采用双液快凝浆液（如水泥-水玻璃浆液）或在单液浆中添加膨润土、粉煤灰等材料进行改性，以提高浆液的早期强度、抗水分散能力和充填性能^[4]。在注浆过程中，注浆压力应略高于该处的水土压力，以确保浆液能有效注入空隙，但压力过高又可能导致地层劈裂。注浆量则需大于理论建筑空隙的150%-200%，用以补偿浆液在注入过程中的损失和后期的收缩。最关键的是注浆的时机，必须做到“掘进一环、注浆一环”，确保浆液在盾尾脱出后立即对空隙进行封堵，最大限度地阻止细颗粒的流失，从根本上抑制滞后沉降的发生。

3.4 实时监测与信息化反馈

任何先进的控制技术都离不开精准的信息输入，因此建立全方位、立体化的实时监测网络是实现动态调控的基础。监测内容应覆盖地表沉降、邻近建筑物及地下管线的变形、隧道自身的收敛情况、土体深层水平位移以及孔隙水压力变化等多个维度。尤其是在穿越重要构筑物或高风险源区域时，应加密监测点并采用自动化实时监测系统，以捕捉沉降的细微变化趋势。更为重要

的是,必须建立一个高效的“监测-分析-决策-调整”闭环管理流程。一旦监测数据出现异常或达到预警阈值,相关信息应能迅速传递至决策层,由技术人员和专家团队进行会诊分析,并立即对掘进参数、注浆方案等进行相应调整,甚至启动应急预案,从而将风险扼杀在萌芽状态。

4 质量保障体系构建

沉降控制各项关键技术的有效实施,离不开一个健全、严谨的质量保障体系作为支撑。这一体系首先体现在标准化作业流程(SOP)的制定上,必须编制详细的《富水砂卵石地层盾构掘进专项施工方案》,将各项技术要点、操作标准和责任分工明确化、制度化。其次,人员是执行的关键,必须对盾构司机、注浆工、监测人员等所有关键岗位进行专项技术培训和交底,确保每一位参与者都能深刻理解富水砂卵石地层的特性、沉降风险以及各自的控制职责。再次,设备的适应性至关重要,盾构机本身需进行针对性改造,例如加强刀盘的耐磨性、优化螺旋输送机的结构以防止卡滞、增设高效的渣土改良系统等,并严格执行日常维护保养制度,确保设备始终处于最佳工作状态。最后,必须制定周密的应急预案,针对涌水、喷涌、沉降超限等可能出现的险情,明确处置流程、物资储备和人员分工,并定期组织应急演练,以提升项目团队的整体应急响应能力。

5 工程应用实例分析——以成都地铁为例

成都作为典型的富水砂卵石地层城市,其地铁建设历程生动诠释了从困境到突破的技术演进。以成都地铁1号线、5号线等工程为例,初期的1号线施工曾因对滞后沉降机理认识不足,未能采取系统有效的防控措施,导致多次发生严重的地表塌陷事故,付出了惨痛的代价。这些深刻的教训促使后续工程进行了全面的技术革新。在5号线等后续线路的建设中,系统性地应用了本文所述的沉降控制与质量保障技术体系。例如,在穿越老旧密

集建筑群的关键区间,工程团队通过“泡沫+膨润土”的复合方式对渣土进行改良,严格将土仓压力动态控制在1.2-1.4bar的合理范围内,并采用双液快凝浆液进行同步注浆,辅以高密度的自动化实时监测网络。通过这一系列技术措施的协同作用,最终成功实现了长距离的安全穿越,将最大地表沉降值有效控制控制在30mm以内,远低于设计允许值,有力地保护了周边环境和居民生命财产安全,充分验证了该技术体系的可靠性和先进性。

6 结语

富水砂卵石地层盾构施工是一项系统性、高风险的工程挑战。本文提出的沉降控制与质量保障技术体系,强调了从渣土改良、参数调控、同步注浆到实时监测的全过程、全链条协同控制。实践证明,只有深刻理解地层特性,精准把握沉降机理,并辅以科学严谨的管理体系,才能有效驾驭此类复杂地层,确保盾构隧道工程的安全、优质、高效建成。未来,随着人工智能、大数据和数字孪生技术的发展,盾构施工将向更高层次的智能化迈进。通过构建基于海量施工数据的预测模型,有望实现对沉降风险的超前预判和自动调控,进一步提升在极端复杂地质条件下盾构施工的安全裕度和技术水平。

参考文献

- [1]王建伟.高富水砂卵石地层大盾构区间掘进技术研究[J].建筑科技,2024,8(01):80-83.
- [2]吴恒生.富水砂卵石地层盾构施工掘进技术浅析[J].交通节能与环保,2020,16(06):151-155.
- [3]方泽龙,高超,吕松,等.富水砂卵石地层大直径盾构施工近接既有建(构)筑物施工技术[J].广东建材,2025,41(05):113-118.
- [4]郑太毅.富水砂卵石地层盾构下穿既有房屋结构的扰动沉降特征及控制技术[J].科技创新与应用,2024,14(36):106-109.