

软土对盾构施工的影响及对应控制措施

王亚峰

北京城建勘测设计研究院有限责任公司南京分院, 北京 100000

[摘要]随着城市化进程的不断推进, 地下空间的开发已逐渐成为提升城市承载能力的关键途径。为此, 盾构施工技术因其出色的适应复杂地质条件的能力, 已成为城市地下工程建设的主流方法。然而, 在软土地区, 由于土壤的高压缩性和特殊水文条件, 施工难度显著增加, 土体沉降及结构变形等问题可能随之而来。为确保软土地区盾构施工的顺利进行, 必须采取有效的控制措施, 确保工程的稳定性与安全性。

[关键词]软土; 地下水; 盾构施工; 影响; 控制措施

DOI: 10.33142/aem.v7i2.15740

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

The Impact of Soft Soil on Shield Tunneling Construction and Corresponding Control Measures

WANG Yafeng

Nanjing Branch of Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Limited, Beijing, 100000, China

Abstract: With the continuous advancement of urbanization, the development of underground space has gradually become a key way to enhance urban carrying capacity. Therefore, shield tunneling technology has become the mainstream method for urban underground engineering construction due to its excellent ability to adapt to complex geological conditions. However, in soft soil areas, due to the high compressibility of the soil and special hydrological conditions, the difficulty of construction significantly increases, and problems such as soil settlement and structural deformation may arise. In order to ensure the smooth progress of shield tunneling construction in soft soil areas, effective control measures must be taken to ensure the stability and safety of the project.

Keywords: soft soil; groundwater; shield tunneling construction; impact; control measures

引言

盾构施工作为一种高效、环保的地下工程技术, 已广泛应用于隧道及城市地下设施的建设中。与传统施工方法相比, 盾构法通过全机械化操作, 显著减少了地面扰动, 同时提升了施工的安全性。软土地区的低承载力、高压缩性及丰富地下水等特殊地质条件, 使盾构施工面临的挑战更加复杂。因此, 研究软土对盾构施工的影响及相关控制措施, 不仅能有效提高施工效率与安全性, 更是确保项目顺利完成的关键。

1 盾构施工概述

盾构法是一种全机械化的暗挖施工技术, 广泛应用于隧道建设中, 特别是在城市地下工程和复杂地质条件下的隧道开挖作业。与传统的明挖法相比, 盾构法能够在地下完成隧道的挖掘与衬砌作业, 避免了对地面交通和周围建筑物的影响。其基本原理是盾构机通过切削装置开挖土体, 推动盾构机前进, 利用盾构外壳与预制混凝土管片支撑周围土层, 防止隧道坍塌, 确保施工区域的稳定性。出土机械将挖掘出的土体运出隧道, 而千斤顶则提供推进力, 推动盾构机持续向前。自 1847 年发明以来, 盾构机的工作原理不断得到改进和优化。现代盾构机通常分为敞开式和封闭式, 其中封闭式盾构应用较为广泛。封闭式盾构在开挖面前方设有一个注入膨润土液的密封室, 膨润土液既能

平衡土体压力与地下水压力, 又充当输送土体的介质。这种设计使得盾构机在各种复杂地质条件下, 特别是水丰富的环境中, 能够顺利作业。盾构机的结构一般由前端切口环、中部支撑环和后端盾尾三部分组成, 外形多为圆形, 也有椭圆形、马蹄形等多种形式, 根据不同的地质条件选择适合的结构。作为一种高效的施工设备, 盾构机不仅仅是土体开挖的工具, 更是一种临时支撑结构, 能够抵抗外部水压和地层压力, 保持施工区域的稳定。这一特性使得盾构法在软土层、地下水丰富或岩层复杂的环境中具有明显优势, 能够有效降低施工过程中的风险, 确保隧道的安全与稳定。

2 软土对盾构施工的影响

2.1 软土的流变特性与盾构机性能的匹配

软土是指天然孔隙比 $e \geq 1.0$, 且天然含水量 w 大于液限 w_L , 具有高压缩性、低强度、高灵敏度和高流变性的土壤类型。与坚硬岩土相比, 软土的土体结构松散, 土粒间的黏聚力较弱, 这使得盾构机在推进过程中, 软土容易出现过度变形、坍塌或不均匀沉降等问题。其流变特性, 即土体在外力作用下的变形与流动特性, 对盾构机的性能提出了更高要求。在软土施工环境下, 土体的流变性较强, 表现出较高的塑性与黏性, 导致盾构机无法像在坚硬岩土中那样迅速、直接地进行切割。为有效切割土体, 盾构机

的刀盘需要更大的推力以及较高的转速。在这种环境下,盾构机往往需维持较高的推进压力与支护力度,以避免开挖面前土体崩塌。但过高的推进压力不仅可能引起土体扰动,还可能引发地面沉降或对周围建筑物造成损害,从而影响施工区域的稳定性。软土的流变特性同样影响盾构机的推进效率与安全性,在推进过程中,软土通常会发生显著的塑性流动,特别是在盾构机刀盘切割后,土体容易出现侧向变形,这种不均匀的反应使得盾构机难以保持稳定的推进方向,增加了施工的复杂性。为应对软土的特殊性质,盾构机的设计与操作参数需要调整,包括优化刀盘设计、提升推进力以及精确控制推进速度,以确保盾构机能够在软土中稳定推进。

2.2 软土对盾构机推进力与土体扰动的影响

软土的高压缩性与低承载力对盾构机推进力的影响显著,尤其在推进过程中,盾构机需要克服较大的摩擦力与阻力。由于软土的密实度较低,表现出较强的塑性流动性,刀盘在切削时,土体的变形是逐渐发生的,而非瞬时产生的。在这种土层中推进时,盾构机不仅需要提供足够的推进力,还必须精确控制推进速度与压力,以避免过大的推进力引发土体的过度扰动。在推进过程中,软土的压缩性要求盾构机不断增加切削力与推进力,以适应土体的变形。由于软土具有较强的塑性,刀盘切削时,周围土体在切削力的作用下容易发生大范围的塑性变形。这种土体扰动可能影响盾构机的正常运行,甚至导致隧道周围土层的不均匀沉降。特别是在地下水位较高的软土区,过大的推进力或速度可能使土体失去稳定性,进而引发局部坍塌,增加施工风险。软土的扰动还可能引发所谓的“土体流动”现象,这是一种土体在压力作用下软化并失去原有结构,形成类似泥流的物质。这对盾构机而言是极大的挑战,不仅增加了推进阻力,还可能导致刀盘卡滞或损坏。在软土区施工时,盾构机必须精确控制推进力,避免推进过度,确保土体扰动处于可控范围,从而降低对隧道结构的潜在风险。

2.3 软土对盾构隧道稳定性与变形的影响

软土对盾构隧道的稳定性及变形影响显著,这主要归因于其低承载力与高度压缩性的特性。在软土地区施工时,隧道的稳定性极易受到周围土层变化及外部环境因素的干扰。由于软土的物理属性,在长期荷载作用下,其不可避免地发生压缩与变形。这些变形不仅使隧道外形受到影响,还可能导致隧道内衬出现不均匀沉降,甚至形成裂缝或其他结构性损伤。隧道的稳定性问题与软土的高压缩性密切相关。在盾构机推进过程中,软土受压力作用易发生不可逆变形,尤其是在土层较为松软或地下水位较高的区域,软土在盾构机推进压力及土体荷载的共同作用下,沉降现象时常发生,这种沉降不仅可能导致隧道壁发生变形,裂缝的产生亦无法避免,从而对隧道的安全性及长期使用

性能造成威胁。软土的低强度及流变特性决定了其在隧道施工后,土体支撑能力较弱,过度变形易于发生。在地下水渗透及荷载作用下,软土可能发生滑移或流动,使得隧道沉降进一步加剧。这类变形不仅影响隧道的结构稳定性,对周围建筑物或地下设施同样会造成潜在危害。盾构机推进过程中,局部土体扰动难以避免,隧道周围土层的塌陷、裂缝或不均匀沉降均可能由此引发。常规的支持措施难以完全消除这些风险,因此,在设计及施工阶段,必须充分评估软土对隧道稳定性的影响,并采取科学合理的加固措施,如优化盾构机推进控制、采用土体加固技术等,以确保隧道的长期稳定性与安全性。

2.4 软土对盾构衬砌结构的影响

软土对盾构隧道衬砌结构的影响主要体现在稳定性与耐久性两个方面。由于软土的高压缩性和低承载力,在长期荷载作用下,土体不可避免地发生沉降或变形,从而直接威胁衬砌的完整性及使用寿命。盾构隧道的衬砌通常由预制混凝土管片拼装而成,其核心功能在于提供隧道稳定支撑、防止土体坍塌,并承受外部水压及地层压力。在软土区域施工时,土体的不均匀变形和沉降往往使衬砌结构承受较大的应力变化与形变。由于软土的高压缩性,盾构隧道推进过程中沉降易于发生,进而导致衬砌结构的不均匀变形。随着土体的逐步压缩,衬砌接缝可能发生错位,裂缝的形成也难以避免,从而影响整体结构的稳定性。同时,不均匀变形引起的错位裂缝使得地下水易于渗入隧道内部,长期的渗水还会引发衬砌的腐蚀与老化,进一步降低耐久性。盾构机推进时,软土因扰动较大,局部土体松动或流动的情况时常发生,这一过程对衬砌结构施加了不均匀的力学作用,使得应力集中现象较为明显。长期的应力不均,不仅可能诱发衬砌裂缝,甚至会导致其整体结构受损。因此,衬砌设计中,软土的特性必须加以充分考虑,通过优化衬砌的连接方式,使其既具备足够的强度,又能在一定程度上调整受力,以有效分散外部压力,降低应力集中所带来的风险。软土区域地下水位的变化对衬砌结构的影响同样不容忽视。由于软土含水量较高,地下水位波动可能进一步加剧衬砌的受力变化,从而引发水土流失,甚至造成防水层的失效。为降低此类风险,衬砌设计时需采取高效的防水措施,并结合实际情况,合理配置加固技术,以有效抵御地下水渗透压力,确保衬砌结构的长期稳定性。

3 软土地区盾构施工的控制措施

3.1 施工前的地质勘察与分析

在软土地区开展盾构施工时,施工前的地质勘察与地质分析至关重要,为后续施工提供了基础保障。通过对土层特性的深入了解,能够有效评估施工中可能遭遇的地质环境及潜在风险,为盾构机选型、施工参数的设定及风险控制提供科学依据。土层勘察的核心不仅在于获取土壤的

基本物理性质,更在于深入掌握土体的流变特性、地下水条件及可能存在的异常地质结构。常用的土层勘察手段包括钻探、取样和原位测试等,通过这些方法可以获取土壤的分布、厚度密实度和物理力学参数等关键数据^[1]。尤其是在软土层中,由于土体的承载力和强度较低,勘探数据能够帮助工程师充分了解土层的稳定性、压缩性及其对盾构机推进力的影响。与此同时,地下水位、渗透性以及水文条件也是影响施工的关键因素,这些因素直接决定着盾构机推进的安全性及施工的可行性。过高的地下水位可能引发软土的液化或土体流动,从而增加施工的难度。获取勘探数据后,接下来的步骤是对土层进行深入的地质分析。通过对不同土层力学性质、应力分布及流变特性的分析,工程师能够进一步评估土层的沉降潜力、稳定性及变形特征,从而为盾构机性能的选择提供有力支持。此外,地质分析还能预测施工过程中可能出现的土体扰动、隧道变形及衬砌问题,为优化施工方案及设计提供可靠依据。

3.2 盾构机选型与施工参数调整

在软土地区进行盾构施工时,选择合适的盾构机以及合理调整施工参数,是确保工程顺利进行的关键。盾构机的选型不仅需要考虑土层的特性,还应结合隧道的设计要求、施工环境及技术需求,以确保设备能够适应软土的特殊性质,从而保障施工的平稳与高效。盾构机的类型选择应依据具体土层条件来确定,软土通常具有较低的承载力和较强的流变性,这就要求选用的盾构机必须具备足够的推进力与适应性。对于软土及地下水丰富的区域,常见的盾构机类型包括泥水平衡盾构机与土压平衡盾构机^[2]。泥水盾构机通过注水形成泥浆屏障,能够有效平衡土体压力,减少土体扰动,特别适用于地下水丰富的环境。相比之下,土压平衡盾构机则能够在高土体压力的环境中,通过调节土压保持稳定推进,更适合流变性较强的软土。因此,根据土层的流变特性、压缩性以及地下水位等因素,选取最合适的盾构机类型显得尤为重要。施工过程中,施工参数的调整是确保盾构施工高效稳定的另一个关键因素,由于软土的流变性较强,容易引起不均匀沉降及土体扰动,因此必须精细调节盾构机的推进力、推进速度及刀盘转速等参数。软土区施工时,地下水渗透问题同样不可忽视,由于该地区地下水位较高,盾构机的排水系统与防水设计必须相应进行调整,以确保施工过程不受水压影响。该防水设计对于保障施工进度与安全至关重要,它能有效防止地下水渗透对隧道施工造成不利影响。

3.3 推进压力与速度的控制

在软土地区进行盾构施工时,精确控制推进压力与推进速度是确保施工顺利进行的关键。软土的流变性与低承载力要求在施工过程中对推进力进行细致调整,以避免推进压力过大或过小对隧道稳定性及周围土体产生负面影响。推进压力必须保持在适当的范围内,若推进压力过大,土体扰动、沉降甚至坍塌的风险将大大增加;反之,若推进压力过小,施工效率则会受到限制。为了达到平衡,盾构机通常配备有实时压力监测系统,根据土层变化的情况动态调整推进压力,确保土体能够得到足够的支撑,避免产生过大的应力集中,从而降低土体扰动的风险。推进速度的调节同样至关重要,若推进速度过快可能导致土体扰动过大,引起沉降和变形;而推进过慢,则不仅会延长施工周期,还会使开挖面暴露时间过长,增加坍塌、涌水等风险。因此,推进速度应根据土体的密实度及推进力的具体情况进行灵活调整,确保施工的高效性与稳定性^[3]。土体沉降的实时监测在软土区施工中也显得尤为重要,由于软土具有较强的压缩性,容易发生不均匀沉降。通过对沉降情况进行实时监控,并及时调整推进参数,可以有效避免对周围建筑物及设施造成不利影响,从而确保施工过程中的安全性。

4 结语

软土地区盾构施工面临土体流变、地下水控制与沉降等挑战。通过科学的地质勘察、合理选型盾构机、精确控制推进压力与速度可有效应对施工风险。深入了解土壤特性,采取针对性措施,不仅确保隧道安全还能提高效率,减少对周围环境的影响。随着施工与监测技术的进步,未来软土地区盾构施工将更高效、安全,应对复杂地质条件,为城市地下基础设施建设提供强有力支持。

[参考文献]

- [1]王昊,乔佳元.城市轨道交通隧道盾构施工技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(1):157-159.
 - [2]张振,张旭,王萍,等.软土地层隧道盾构掘进对地表沉降的影响研究[J].科技创新与应用,2024,14(36):110-113.
 - [3]刘英杰,曹鸿,司爱兵,等.富水软土地层盾构掘进不同土仓压力影响分析[J].北方交通,2024(7):75-78.
- 作者简介:王亚峰(1992.1—),毕业院校:南京工业大学,所学专业:地质工程,当前工作单位:北京城建勘测设计研究院有限责任公司南京分院,职务:工程主持人。