

软硬不均浅覆土地层隧道衬砌结构受力研究

谢文武¹, 张小飞¹, 李彪¹, 谷冠思²

¹中铁八局集团有限公司, 四川 成都

²同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海

收稿日期: 2024年12月24日; 录用日期: 2025年1月15日; 发布日期: 2025年1月26日

摘要

软硬不均、浅覆土地层的盾构隧道建设面临复杂地质条件和高水压环境的挑战, 其衬砌结构的受力特性直接关系到隧道施工与运营的安全性和稳定性。本文以某核电站排水隧道建设为背景, 基于现场实测数据与数值模拟方法, 系统研究了复杂地层条件下衬砌结构的力学行为及演化规律。研究分析了隧道施工过程中地层扰动对衬砌结构内力分布和变形特性的影响, 探讨了地下水渗流作用及施工参数(如注浆压力、盾构推进速度)对衬砌结构力学性能的作用机制。结果表明: 1) 地层扰动和渗流效应显著影响衬砌结构的内力分布与变形特性, 尤其在软弱土层和浅覆土条件下, 衬砌结构承受的附加荷载显著增大; 2) 适当控制施工参数可有效降低衬砌结构内力峰值和变形幅度; 3) 数值模拟揭示了衬砌结构在施工过程中的应力演化规律, 为优化设计提供了重要依据。本文研究成果不仅为类似复杂地层条件下的隧道工程设计与施工提供技术参考, 还为盾构隧道衬砌结构的优化设计及长期服役性能评价奠定了理论基础。

关键词

盾构隧道, 衬砌, 软硬不均地层, 浅覆土, 数值模拟

Study on the Stress of Tunnel Lining Structure in Uneven Soft and Hard Shallow Soil Layers

Wenwu Xie¹, Xiaofei Zhang¹, Biao Li¹, Guansi Gu²

¹China Railway No.8 Engineering Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

²Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Received: Dec. 24th, 2024; accepted: Jan. 15th, 2025; published: Jan. 26th, 2025

Abstract

The construction of shield tunnels with uneven hardness and shallow soil layers faces challenges

文章引用: 谢文武, 张小飞, 李彪, 谷冠思. 软硬不均浅覆土地层隧道衬砌结构受力研究[J]. 土木工程, 2025, 14(1): 196-207. DOI: 10.12677/hjce.2025.141023

from complex geological conditions and high water pressure environments. The stress characteristics of the lining structure directly affect the safety and stability of tunnel construction and operation. This article takes the construction of a drainage tunnel in a nuclear power plant as the background, and based on on-site measured data and numerical simulation methods, systematically studies the mechanical behavior and evolution laws of lining structures under complex geological conditions. The study analyzed the influence of geological disturbance on the internal force distribution and deformation characteristics of lining structures during tunnel construction, and explored the mechanism of groundwater seepage and construction parameters (such as grouting pressure and shield tunneling speed) on the mechanical properties of lining structures. The results indicate that: 1) geological disturbance and seepage effects significantly affect the internal force distribution and deformation characteristics of the lining structure, especially under weak soil layers and shallow overburden conditions, where the additional load borne by the lining structure increases significantly; 2) Properly controlling construction parameters can effectively reduce the peak internal force and deformation amplitude of the lining structure; 3) Numerical simulation reveals the stress evolution law of lining structure during construction, providing an important basis for optimizing design. The research results of this article not only provide technical references for the design and construction of tunnel engineering under similar complex geological conditions, but also lay a theoretical foundation for the optimization design and long-term service performance evaluation of shield tunnel lining structures.

Keywords

Shield Tunnel, Lining, Uneven Soft and Hard Strata, Shallow Soil Cover, Numerical Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

软硬不均、浅覆土地层的隧道建设是现代地下工程中的一大技术挑战，其施工过程中衬砌结构的受力特征直接关系到工程的安全性和稳定性。此类地层由于地质条件复杂，包括软弱土层与硬质基岩交错分布、地下水丰富以及覆土厚度不足等问题，极易导致施工中的地层扰动、结构变形以及塌方等风险。尤其是在海域隧道施工环境中，高水压和复杂的水土相互作用进一步增加了施工难度，对施工技术和衬砌结构设计提出了更高要求。

盾构隧道施工技术凭借其高效、安全和低扰动的特点，已广泛应用于城市地下空间开发和交通建设。然而，施工过程中不可避免地引发地层扰动，导致衬砌结构承受复杂的外部荷载和内部变形。盾构隧道的衬砌结构不仅需要应对施工期间的地层压力、地下水压力及施工扰动引起的变形，还需满足隧道全生命周期内的安全与稳定要求。因此，分析和评价衬砌结构的力学行为，是保障盾构隧道施工与运营安全的核心研究问题。

隧道施工本质上是对土体的卸荷过程。卸荷后，土体支撑力的消失引发地层变形与应力重分布，对衬砌结构的受力状态产生直接影响。Bernat 和 Cambou (1998)提出，通过分阶段模拟隧道施工过程，可以更准确地揭示地层沉降的演变规律，尤其是在复杂地质条件下[1]。其他研究表明，开挖面稳定性、注浆压力和隧道埋深等施工参数，都会显著影响衬砌结构的内力分布和变形特性。例如，Kasper 等(2006)通过有限元分析指出，支护压力和注浆压力对衬砌内力的影响尤为显著[2]。同时，Hamza 等(1999)在开罗地铁施工案例中发现，地层扰动在土体性质较差的区域可能导致衬砌结构的弯矩和轴力显著增加[3]。

地下水的渗流作用是影响衬砌结构性能的另一关键因素。渗流压力通过改变隧道周围的有效应力，对衬砌产生附加荷载；同时，固结效应可能引发长期沉降和变形。Swoboda 和 Abu-Krishna (1999)揭示了盾构施工中孔压消散的规律，强调泥浆支护压力对孔压分布的影响[4]。Anagnostou (2002)进一步指出，渗流作用不仅降低土体抗剪强度，还可能通过固结效应对衬砌结构产生持续性影响[5]。

近年来，研究者们逐步引入先进的数值模拟技术和实验手段，以更深入地分析盾构隧道衬砌结构的力学行为。例如，Mroueh 和 Shahrour (2008)开发了考虑局部应力释放和无衬区影响的三维分析模型，为衬砌结构设计提供了理论支持[6]。Zheng 等(2018)则基于小应变刚度硬化土模型(HSS 模型)，分析了盾构施工过程中衬砌内力的演化规律[7]。韩峰(2022)通过计算隧道围岩压力和二衬内力，并进行数值模拟分析，研究了软岩隧道施工过程中的稳定性及加固措施[8]。杨朝帅等(2023)通过安全系数法建立了隧道衬砌病害对安全性影响的量化评估方法[9]。杨非易和蒋凯(2024)通过 FLAC3D 软件建立带裂缝衬砌结构的三维数值模型，模拟裂缝发展规律，并研究裂缝深度和环向长度对衬砌截面的影响[10]。陈猛等(2024)分析了高性能混凝土加固隧道衬砌的研究现状，系统探讨了 UHPC、ECC 和钢板-高性能混凝土组合加固的作用机理和力学性能[11]。

本文以某核电站排水隧道建设为背景，聚焦于复杂地层条件下盾构隧道衬砌结构的力学性能分析。通过现场实测数据与数值模拟，系统研究了施工过程中衬砌结构的内力分布、受力特性及变形规律，探讨了不同施工条件对衬砌结构力学行为的影响。研究成果不仅为类似工程提供设计与施工参考，也为盾构隧道衬砌结构的优化设计及长期服役性能评价奠定理论基础。

2. 软硬不均地层复杂盾构施工数值模型

本课题的研究背景以海南昌江核电厂 3、4 号机组排水隧洞工程为载体，聚焦隧道施工过程中的关键技术问题，开展相关技术研究。隧址所在区域普遍存在风化深槽、富水砂层、球状风化体以及基岩凸起“上软下硬”等不良地质特征，且覆土较薄。隧洞顶距海底最浅处为 6.36 米，平均海平面距离约 20 米。

2.1. 模型建立

模型计算流程可划分为四个阶段：1) 地应力平衡阶段；2) 盾壳就位阶段；3) 连续开挖阶段；4) 停止推进阶段。

首先，根据地质勘察结果获取场地土体的物理力学特性。在地应力平衡阶段，根据土体自重计算初始地应力场。在此基础上，通过反复迭代以地应力场与重力平衡为目标，利用 geostatic 分析步获得符合实际情况的地应力场，并以此为后续计算提供初始条件。

完成地应力平衡后，需对盾构施工进行初始化设置。在盾构隧道施工中，通常需先施作工作井，并将盾构机下放至指定位置进行机械连接等操作。为便于盾构机定位，通常需预先挖除部分土体，使盾构机盾体置于地层中，通过周围水土压力确定其轴线位置。然而，本研究主要关注盾构推进过程中地层环境的响应，故在数值模拟中对此过程进行简化，直接将盾壳激活并就位即可。

2.2. 本构模型及相关物理力学参数

本模型包含四类主要材料：土体(地层)、注浆层、钢(盾壳)、混凝土(衬砌)。其中，地层土体需采用弹塑性本构模型描述，而其余材料均可采用线弹性本构模型进行建模(图 1)。

注浆层用于填充土体与衬砌之间的间隙，其力学性能随时间逐渐硬化。因此，注浆层的参数需分别针对注浆初期和注浆后期两个阶段设定。此外，由于盾尾注浆添加了快凝剂，其强度在短时间内迅速增长，弹性模量远高于土体，约高出一个数量级，因此采用线弹性本构模型分析具有合理性。

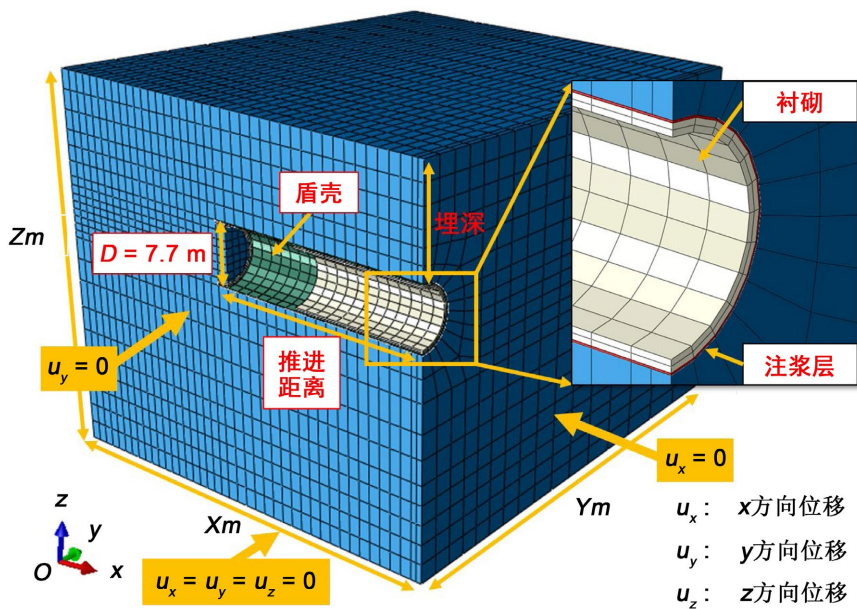


Figure 1. Establishment of complex shield tunneling geometry model
图 1. 复杂盾构推进几何模型建立情况

盾壳在计算中采用壳单元(shell element)进行模拟。壳单元是一种在有限元分析中使用的结构单元，其不占据实际空间，仅具有计算意义上的尺寸。基于实际盾构机外壳的尺寸，并考虑其内部存在空心结构，采用质量等效原则确定盾壳的等效密度。

衬砌管片由钢筋混凝土材料制成。在设计荷载作用下，管片基本不会发生塑性变形，因此同样采用线弹性本构模型描述是合理的。各组成材料的主要物理力学参数详见下表 1。

Table 1. Table of physical and mechanical properties of materials
表 1. 材料物理力学性质表

材料	厚度/m	弹性模量/MPa	密度/(kg/m ³)	泊松比	渗透系数/(m/s)	粘聚力/kPa	内摩擦角/°
淤泥质土	0.35	8.53	−1940	0.37	(7.0 × 10 ^{−2})	8.3	5.8
粉质黏土	1.5	13.05	1920	0.26	1.63 × 10 ^{−3}	20.7	11.6
粉质黏土	2.5	18.54	1920	0.31	1.50 × 10 ^{−4}	30.5	16.5
砂质黏性土	5.5	25.95	1950	0.32	2.14 × 10 ^{−4}	18.1	24.2
全风化黑云母花岗岩	6	−30	2620	0.44	(5 × 10 ^{−6})	22.5	26.3
强风化黑云母花岗岩	15	−45	2640	0.46	(2 × 10 ^{−6})	35.8	30.1
注浆层		150		0.35			
(初期)			1800				
注浆层		200		0.3			
(后期)							
钢	−					−	
(盾壳)		210,000	39,030	0.3			
混凝土							
(衬砌)		28,800	2500	0.175			

*括号中为经验值。

2.3. 边界条件及荷载设定

模型的边界条件主要包括位移边界和孔压边界，具体设置如下。

在岩土工程有限元分析中，土体底部边界通常设置为固定边界，即 $U_x = U_y = U_z = 0$ (U 表示在指定方向上的位移)。这一设置基于施工影响范围有限的假设，一般在距隧道 3 至 5 倍直径之外，施工对地层的影响可忽略不计。在自然状态下，土体受重力作用会发生竖向固结沉降，产生一定的竖向位移。为反映这一特性，土体的侧向边界限制其法线方向的位移，但不限制竖向位移；土体顶部则为自由边界，不限制任何方向的位移。此外，土体作为占据实际空间的实体单元，无需设定转动自由度。而对于盾壳等结构单元，则需要限制其绕 z 轴的转动位移，边界条件设置为 $UR_z = 0$ 。

在 ABAQUS 软件中，模型部件的外表面在默认情况下为不透水边界，且施工步中新产生的开挖面同样默认为不透水。因此，仅需在地层上表面设置孔压边界，用于表征上覆水压力。在地应力平衡步骤中，孔隙水压力通过软件自动迭代计算得到。上覆水压力的大小可依据以下公式进行计算：

$$P_w = \gamma_w \cdot H_w \quad (1)$$

其中， γ_w 为水的重度， H_w 为水头高度。此设置确保了孔压条件与实际地质水文特性相符，为后续模拟提供可靠的边界约束。

3. 衬砌结构变形及受力特征分析

流固耦合模拟中的管片受力分析旨在全面评估盾构隧道施工过程中管片所承受的复杂力学作用。通过模拟流体与固体之间的相互作用，可以精准预测管片在不同施工阶段和工况下的受力状态，从而识别潜在的安全隐患。这种分析有助于优化管片设计，提高其在复杂地质和施工环境中的稳定性与耐久性。

此外，流固耦合模拟能够为盾构施工过程中的动态负荷提供量化依据，帮助工程师优化施工参数，避免过度压力或材料浪费，确保施工安全性和经济性。同时，它还能预测管片在长期运营中的表现，评估地下水、土体压力等因素对管片的持续影响，为隧道的长期稳定性提供科学依据。

管片受力分析通过流固耦合模拟，不仅提高隧道施工的可控性和可预测性，还为设计优化、风险管理和后期维护提供了重要支持，确保隧道工程的整体安全与经济效益。

3.1. 衬砌管片受力特征分析

随着盾构机的推进，衬砌管片在隧道建设过程中会逐步承受来自土体压力、地层变化以及盾构设备产生的各种力。初期，管片的应力通常会随着盾构机的推进而逐渐增大，但随着施工的深入，管片的应力会逐渐趋于稳定，直到达到一个相对平衡的状态。

具体而言，新拼装的管片在初期的应力变化较为剧烈。由于这些管片尚未与周围的土层完全结合，它们的受力状况受到盾构推进、衬砌变形以及土体压力的影响，因此应力会经历一个逐步变化的过程。在这种情况下，衬砌管片的应力并非立即达到稳定值，而是随着施工进度逐渐调整并适应周围环境。

在衬砌管片的受力分布中，最大应力通常出现在管片的侧壁区域。侧壁是管片结构中承受土体侧向压力最强的部分，这部分的受力主要来自于土体的水平压力和盾构机推力的传递。因此，随着盾构推进，侧壁的应力会从一个较低的水平逐渐增加(图 2)。

在初期，侧壁的最大应力可能为 2.7 MPa，但随着隧道的推进和土体压力的逐步传递，这一应力值会逐渐增大，最终可能达到 4.8 MPa 并趋于稳定。这一过程反映了隧道衬砌管片在施工中的逐步适应和承载力的变化。随着施工继续进行，管片与周围土体的摩擦力和粘结力逐渐增强，从而导致应力在一定范围内趋于平衡。

总之，管片受力的逐步稳定和侧壁最大应力的变化过程，不仅为隧道施工的安全性提供了保障，也

为衬砌结构的设计优化和施工策略调整提供了数据支持。

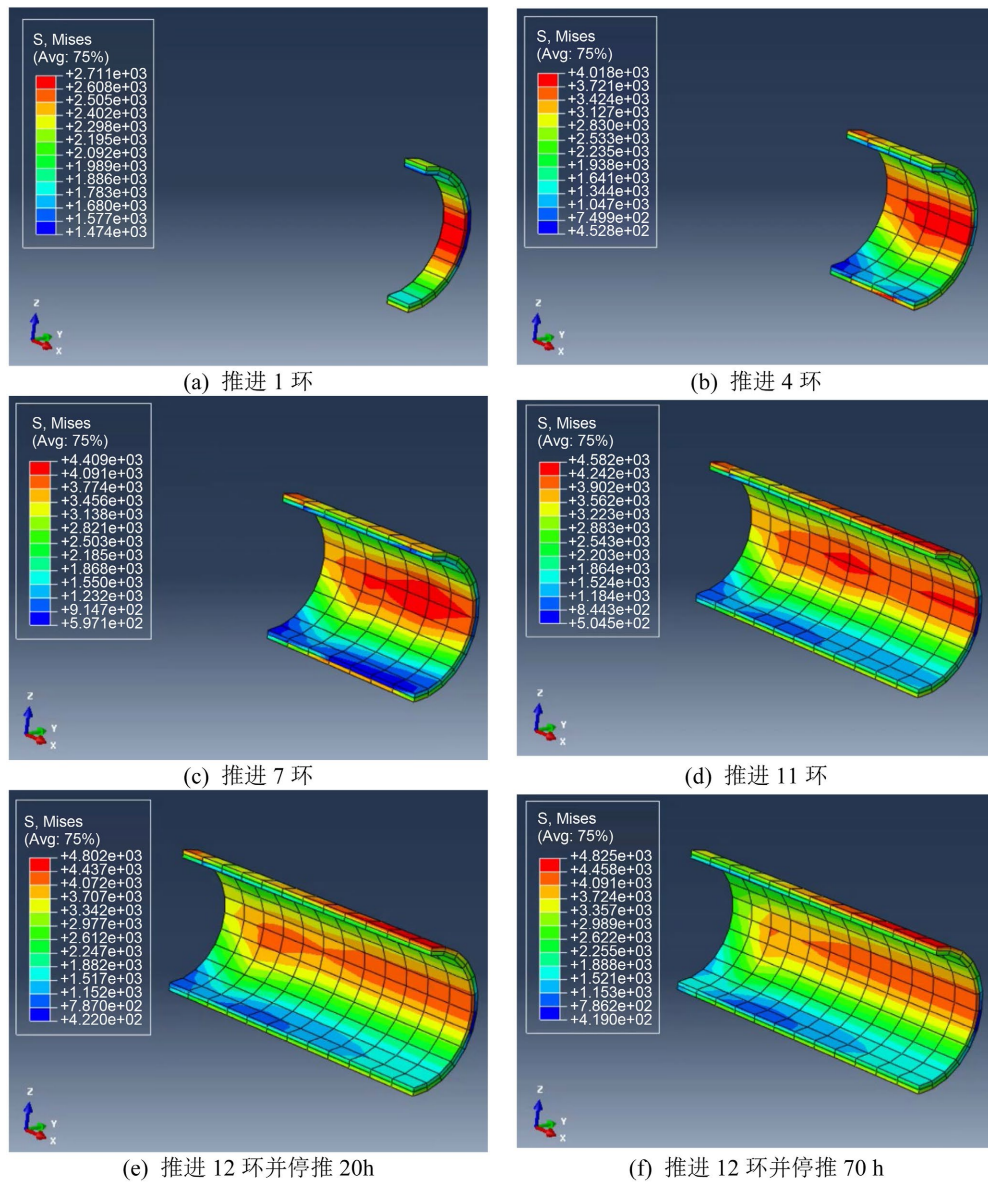


Figure 2. Variation of total lining stress with shield tunneling (kPa)

图 2. 衬砌总应力随盾构推进变化情况(kPa)

在盾构隧道施工过程中,衬砌管片受力特征会随着施工进度和土体环境的变化而逐步发生改变。初期,隧道底部内侧的最大主应力表现出明显的受压特征。这一现象通常出现在施工的早期阶段,是因为盾构推进过程中,盾构机前方的土体受到推进力的压缩作用,衬砌管片底部成为最直接承受土体压力和盾构推进力的区域。

在隧道初期阶段,衬砌管片的底部内侧的最大主应力大约为 0.43 MPa,随着盾构机推进的持续进行,土体压力和管片的承载力逐步积累,底部内侧的最大主应力会逐渐增加,最终达到 0.65 MPa。这一阶段的应力增长反映了隧道底部的逐步承载和衬砌结构的逐步适应。

然而,随着隧道施工的逐渐深入,尤其是当隧道逐步稳定后,管片的最大主应力位置发生了显著变

化。此时,最大主应力不再集中于隧道底部,而是逐渐转移至隧道顶部内侧。隧道顶部内侧承受的压力主要来源于上方土体的自重和地层压力的集中作用,以及隧道顶部上方的土体未完全固结或围岩松动时的额外压力。隧道顶部内侧的最大主应力随着地层压力的增强和隧道逐渐稳定而逐步增大。

在隧道稳定后,顶部内侧的最大主应力最高可达 2.3 MPa。这一数值表明,隧道顶部的受力状态相比底部要显著增强,尤其是在土体的自重和上方土体层的压缩力作用下,顶板区域承受的主应力大幅增加。此时,隧道顶部的稳定性成为影响整体结构安全的重要因素(图 3)。

这一应力转移的过程表明,随着隧道的推进与稳定,管片的受力状态会经历由底部到顶部的变化,这种变化是盾构隧道施工过程中常见的现象。最大主应力的转移意味着隧道从初期的施工应力逐渐过渡到稳定的状态。隧道顶部区域的最大主应力值较高,说明这一部分需要特别关注,以确保隧道的长期稳定性。

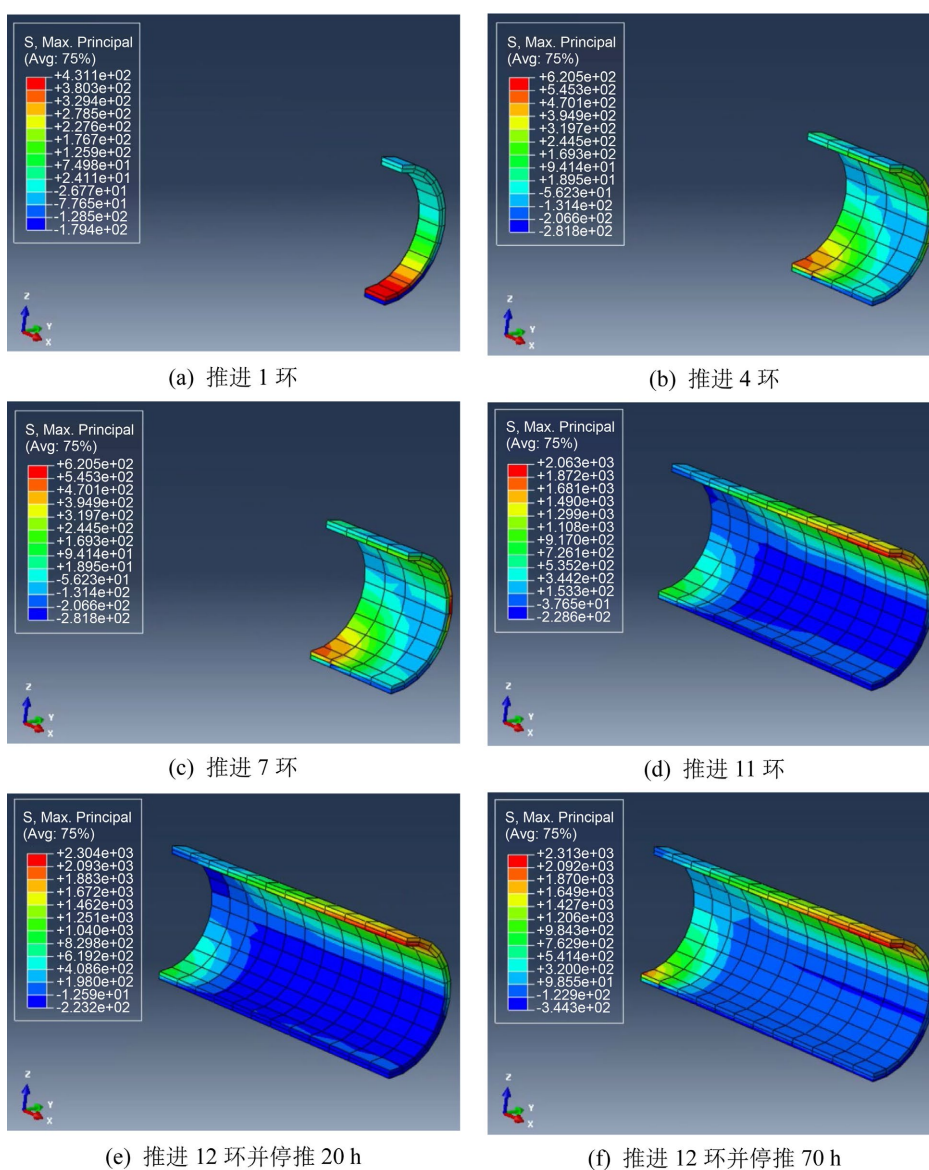


Figure 3. Variation of lining principal stress with shield tunneling (kPa)

图 3. 衬砌大主应力随盾构推进变化情况(kPa)

初期阶段,衬砌最小主应力的值大约为 2.7 MPa。这个阶段,隧道的周围土体尚未完全稳定,土体的沉降和塑性变形会对衬砌产生一定的压力,尤其是在底部外侧和侧壁内侧,受力表现为最小主应力。这些区域的应力主要与盾构推进的前方土体的承压特性和周围围岩的变化有关。在这个阶段,隧道衬砌的底部和侧壁部分通常会面临较大的应力集中,因此,最小主应力的增加反映了这些部位逐渐被围岩和土体压力“拉伸”或“扩展”的过程(图 4)。

随着施工的深入,隧道推进的影响逐渐增大,土体逐渐沉降并固结,衬砌的最小主应力开始逐步增加。这一过程表明隧道的施工逐渐向稳定状态过渡,衬砌管片的最小主应力由最初的 2.7 MPa 逐步增长至 4.6 MPa。随着应力的增加,底部外侧和侧壁内侧的受力情况发生了显著变化,反映出土体和衬砌之间的相互作用在逐步增强。这种最小主应力的增加通常伴随着围岩的进一步压实和土体压力的重新分布。

特别是在隧道的底部外侧和侧壁内侧,由于这些部位较容易受到外部荷载(如周围土层的自重、地下水压力、外部动态荷载等)的影响,它们的最小主应力值会随着盾构机推进的进行而持续变化。随着压力逐渐增大,底部外侧和侧壁内侧的衬砌管片可能会经历拉伸、变形或局部开裂的风险,尤其在应力超过一定阈值时,可能会导致衬砌结构的破坏或影响隧道的稳定性。

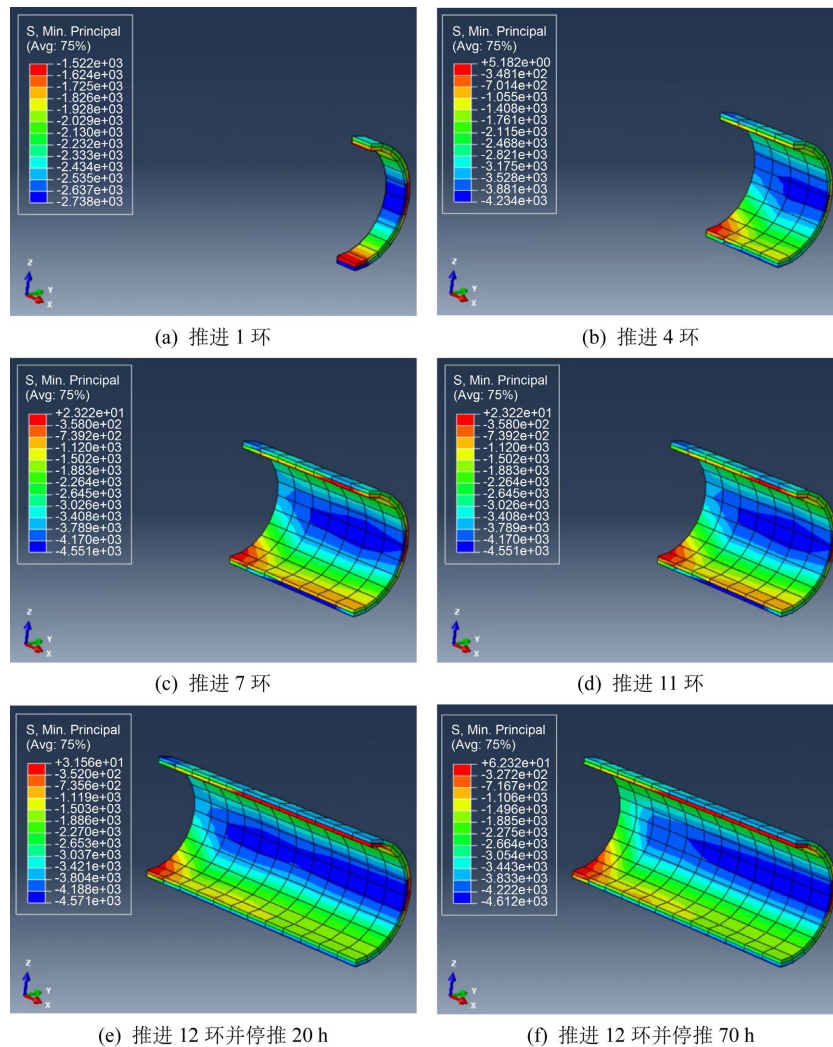


Figure 4. Variation of lining small principal stress with shield tunneling (kPa)
图 4. 衬砌小主应力随盾构推进变化情况(kPa)

3.2. 衬砌管片位移特征分析

在盾构隧道施工过程中，衬砌管片的变形情况是土体与衬砌结构相互作用的重要体现。随着盾构推进，管片的变形经历了明显的变化，初期呈现出下沉趋势，而后随着盾构推进的持续，逐渐上浮并趋于稳定。起初，管片整体呈现下沉趋势，约为 14 mm。这一现象主要由盾构机推进过程中土体扰动和压实效应引起。在盾构推进初期，周围土体受到扰动，超孔压作用下，管片受到向下的压缩力，导致其整体下沉。随着施工进度的推进，土体的扰动逐步消散，超孔压逐渐消失，管片开始逐渐上浮。待土体稳定后，管片整体上浮量约为 5 mm。管片顶部和底部的上浮量有所不同，顶部的最大上浮量为 2 mm，而底部的最大上浮量为 8 mm (图 5)。这一差异主要与土体的压力分布以及衬砌的支撑方式密切相关。顶部受土体上覆压力较为均匀，导致其上浮相对较小；而底部受土体压实作用更为显著，超孔压和土体扰动的消散，使得底部的上浮量较大。

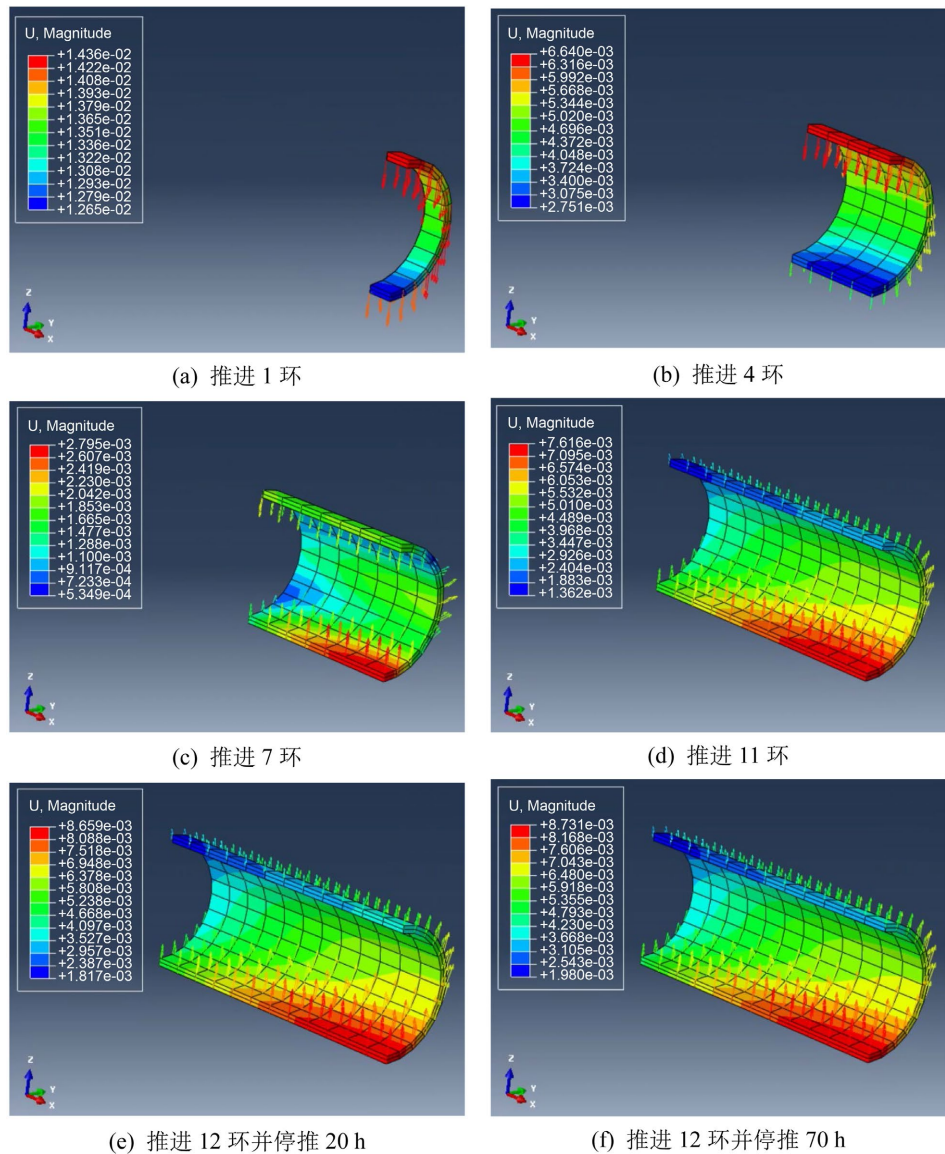


Figure 5. Changes in total displacement of lining with shield tunneling (m)
图 5. 衬砌总位移随盾构推进变化情况(m)

管片的两侧变形是由于盾构机推进过程中与土体的相互作用产生的侧向压力变化所导致的。随着盾构机逐步推进,管片两侧的变形表现为向外的扩展。这一现象通常与隧道周围的土体变形和盾构机推进过程中产生的侧向压力密切相关。初期,管片两侧向外的变形随着盾构推进逐渐发展,呈现出一个逐步增大的趋势。隧道开挖过程中,盾构机会对周围的土体施加一定的压力,尤其是在盾构机刀盘和衬砌管片之间的接触面,土体的变形往往会导致管片两侧出现一定的膨胀性变形。随着盾构推进,土体的扰动逐渐消散,管片的变形趋于稳定,变形值逐渐减小。经过一段时间的施工,管片两侧的向外变形逐渐趋于稳定,最终的变形量较小,最大值通常不超过 2.2 mm (图 6)。这表明,尽管盾构推进过程中土体产生了某种程度的扰动,管片的侧向变形依然保持在一个相对较小的范围内。这种较小的变形值通常意味着衬砌结构在施工过程中能够较好地适应土体的变化,且衬砌的设计和施工质量得到了有效保障。

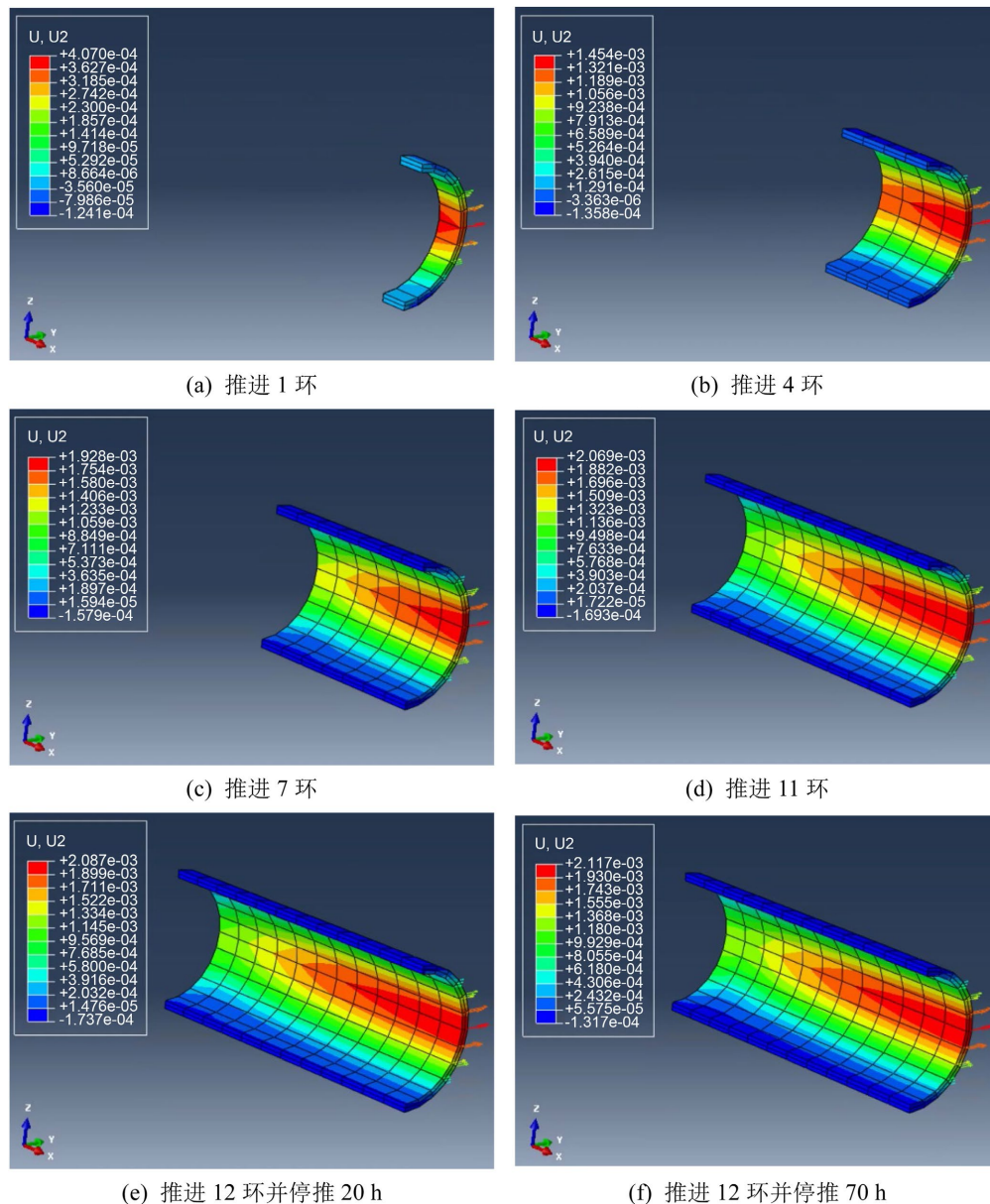


Figure 6. Variation of horizontal displacement of lining with shield tunneling (m)

图 6. 衬砌水平位移随盾构推进变化情况(m)

竖向位移特征与总位移特征相仿,均表现出随着盾构推进逐渐稳定的趋势,且竖向位移在整体变形中占据了主要部分(图7)。具体来说,在盾构施工初期,管片的竖向位移呈现出一定的下沉趋势,随着盾构机的推进,管片逐步受到盾构推进压力和周围土体压力的共同作用,产生下沉现象。此时,管片的竖向位移逐渐增大,直到土体稳定、超孔压消散之后,竖向位移才会趋于稳定。然而,与总位移特征相似,竖向位移的变化表现出一种逐步恢复的趋势。初期的下沉随着施工的进展逐渐减缓,最终达到一个平衡状态。在盾构机推进的过程中,管片整体呈现轻微的上浮趋势,尤其是在隧道顶部和底部区域的竖向位移变化较为显著。待隧道周围的土体得到有效支撑并稳定后,管片的竖向位移逐渐减小,趋于稳定。总的来看,竖向位移的变化和总位移的变化具有相似的规律。由于竖向位移在总位移中占据了主要的变形特征,因此,它直接反映了盾构隧道施工过程中管片在受力作用下的整体稳定性。

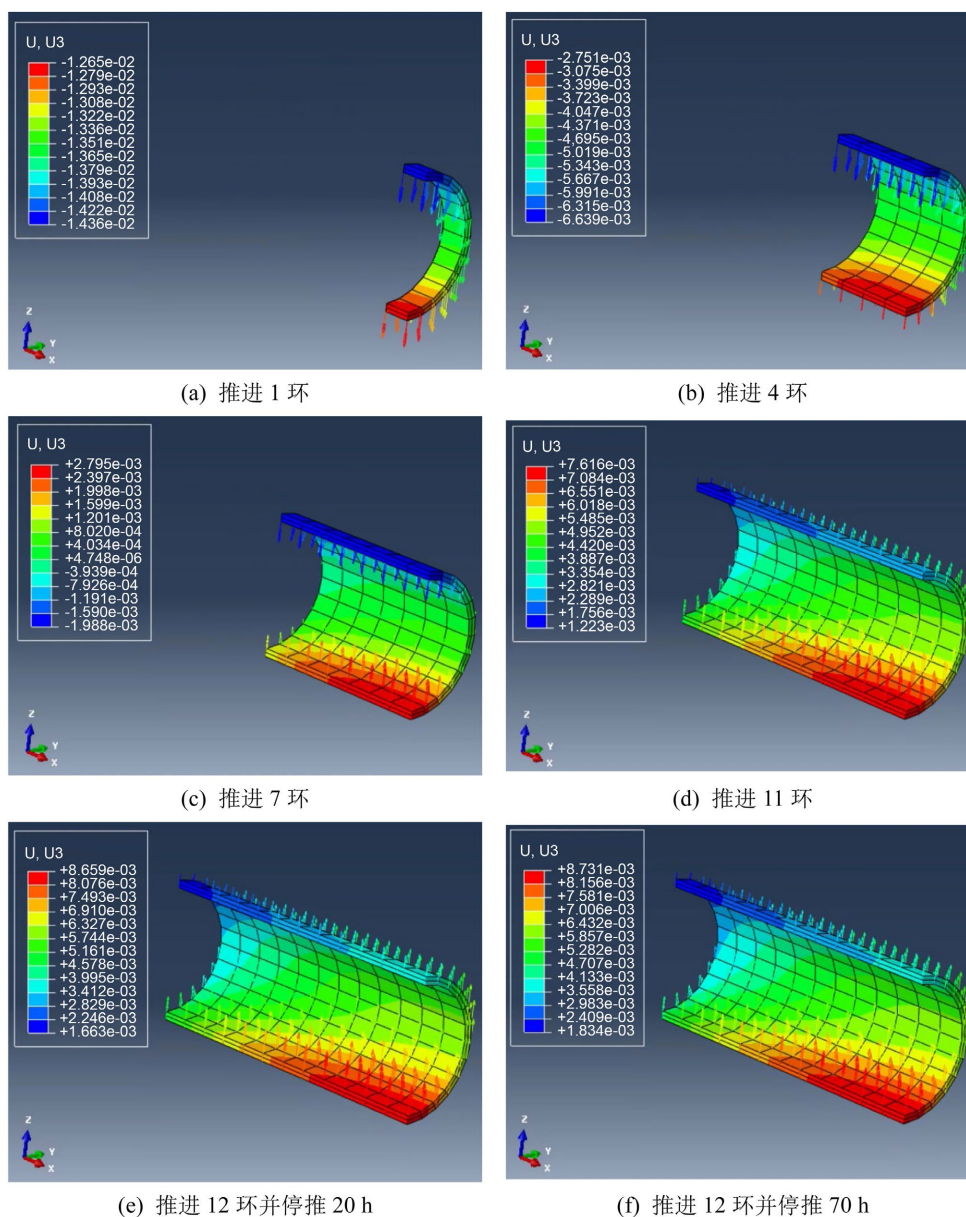


Figure 7. Vertical displacement of lining changes with shield tunneling (m)

图 7. 衬砌竖向位移随盾构推进变化情况(m)

4. 结论

本文通过现场实测数据和数值模拟分析,研究了软硬不均、浅覆土地层下盾构隧道衬砌结构的力学性能及受力特性,得出以下主要结论。

1) 隧道施工过程中,地层扰动引起的应力重分布对衬砌结构产生显著影响。尤其在软弱土层和浅覆土条件下,衬砌结构需承受更大的外部荷载和变形,可能导致内力增大和变形加剧。

2) 地下水渗流通过改变土体有效应力,增加衬砌结构的附加荷载,进而影响其力学性能。渗流压力的作用在不同施工阶段对衬砌结构产生长期的影响,尤其在高水压环境下,衬砌结构需要更高的抗渗能力和耐久性。

3) 数值模拟方法能够准确揭示隧道施工过程中衬砌结构的应力演化规律,并为实际工程中衬砌结构设计及优化提供了重要依据。采用非线性土体模型和考虑施工扰动的三维分析方法,能够更全面地评估衬砌结构在复杂地层条件下的受力特性。

本文的研究成果为类似复杂地层条件下的隧道工程设计与施工提供了宝贵的技术参考,特别是在软硬不均地层及海域隧道施工中,能够有效指导衬砌结构的设计与施工管理,确保隧道的安全性和稳定性。

参考文献

- [1] Bernat, S. and Cambou, B. (1998) Soil-Structure Interaction in Shield Tunnelling in Soft Soil. *Computers and Geotechnics*, **22**, 221-242. [https://doi.org/10.1016/s0266-352x\(98\)00007-x](https://doi.org/10.1016/s0266-352x(98)00007-x)
- [2] Kasper, T. and Meschke, G. (2006) A Numerical Study of the Effect of Soil and Grout Material Properties and Cover Depth in Shield Tunnelling. *Computers and Geotechnics*, **33**, 234-247. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.04.004>
- [3] Hamza, M., Ata, A. and Roussin, A. (1999) Ground Movements Due to the Construction of Cut-And-Cover Structures and Slurry Shield Tunnel of the Cairo Metro. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **14**, 281-289. [https://doi.org/10.1016/s0886-7798\(99\)00044-9](https://doi.org/10.1016/s0886-7798(99)00044-9)
- [4] Swoboda, G. and Abu-Krishna, A. (1999) Three-Dimensional Numerical Modelling for TBM Tunnelling in Consolidated Clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **14**, 327-333. [https://doi.org/10.1016/s0886-7798\(99\)00047-4](https://doi.org/10.1016/s0886-7798(99)00047-4)
- [5] Anagnostou, G. (2002) Urban Tunnelling in Water Bearing Ground; Common Problems and Soil-Mechanical Analysis Methods. Eidgenoessische Technische Hochschule Zuerich.
- [6] Mroueh, H. and Shahrour, I. (2008) A Simplified 3D Model for Tunnel Construction Using Tunnel Boring Machines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **23**, 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.11.008>
- [7] Zheng, G., Yang, X., Zhou, H., Du, Y., Sun, J. and Yu, X. (2018) A Simplified Prediction Method for Evaluating Tunnel Displacement Induced by Laterally Adjacent Excavations. *Computers and Geotechnics*, **95**, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.10.006>
- [8] 韩峰. 软岩隧道衬砌内力计算与开挖过程数值模拟[J]. 铁道建筑技术, 2022(08): 149-153.
- [9] 杨朝帅, 崔臻, 牛富生, 等. 隧道衬砌病害对结构安全性影响机理研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(4): 180-186.
- [10] 杨非易, 蒋凯. 衬砌裂缝对隧道结构影响的数值模拟研究[J]. 土工基础, 2024, 38(3): 473-478, 529.
- [11] 陈猛, 梁中龙, 于航, 等. 高性能混凝土加固隧道衬砌力学性能综述[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(3): 61-71.