

# 基于FLAC3D的隧洞循环进尺数值模拟分析

李旭辉

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年7月26日; 录用日期: 2025年8月16日; 发布日期: 2025年8月28日

## 摘要

为确定某抽水蓄能电站引水隧洞浅埋V级围岩段的合理开挖循环进尺, 保障施工安全与效率, 采用FLAC3D建立三维数值模型, 模拟全断面法下1 m、1.5 m、2 m、2.5 m四种循环进尺的开挖过程, 分析围岩位移、支护结构内力及塑性区分布特征。结果表明: 随着循环进尺增大, 拱顶沉降(6.1 mm→6.83 mm)和水平净空收敛(6.14 mm→6.94 mm)略有增加, 但均满足允许值; 支护结构内力(锚杆轴向应力、弯矩)显著增大, 1.5 m进尺时锚杆轴向应力比1 m增大1.2倍, 2 m时比1.5 m增大2.4倍, 2.5 m时比2 m增大3.4倍, 而1.5 m进尺时支护内力相对较小; 1~2 m进尺时围岩塑性区未连贯成环, 稳定性较好, 2.5 m时塑性区略有扩展但仍可控。综合围岩稳定性与支护受力分析, 全断面法循环进尺1.5 m为最经济合理的选择, 既满足开挖稳定要求, 又优化了支护内力分布, 可为类似工程提供参考。

## 关键词

FLAC3D, 隧洞开挖, 循环进尺, 数值模拟

# FLAC3D-Based Numerical Simulation Analysis of Tunnel Excavation Advance Rates

Xuhui Li

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power,  
Zhengzhou Henan

Received: Jul. 26<sup>th</sup>, 2025; accepted: Aug. 16<sup>th</sup>, 2025; published: Aug. 28<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

To determine the reasonable excavation cycle advance rate for the shallow-buried Grade V

surrounding rock section of a water diversion tunnel in a pumped-storage power station and ensure construction safety and efficiency, a 3D numerical model was established using FLAC3D. The model simulated the excavation process of the full-face method with four cycle advance rates (1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m), and the characteristics of surrounding rock displacement, support structure internal force, and plastic zone distribution were analyzed. The results indicate that: with the increase of cycle advance rate, the vault settlement (6.1 mm to 6.83 mm) and horizontal clearance convergence (6.14 mm to 6.94 mm) increased slightly, but all remained within the allowable limits; the internal force of the support structure (axial stress of bolts, bending moment) increased significantly—compared to the 1 m advance rate, the axial stress of bolts at 1.5 m increased by 1.2 times; at 2 m, it was 2.4 times higher than that at 1.5 m; and at 2.5 m, it was 3.4 times higher than that at 2 m. However, the internal force of the support structure at 1.5 m advance rate was relatively small. For advance rates of 1~2 m, the plastic zone of the surrounding rock did not form a continuous ring, exhibiting good stability; at 2.5 m, the plastic zone expanded slightly but remained controllable. Comprehensively analyzing the surrounding rock stability and support force, the 1.5 m cycle advance rate of the full-face method is the most economical and reasonable choice. It not only meets the requirements of excavation stability but also optimizes the distribution of support internal force, providing a reference for similar projects.

## Keywords

FLAC3D, Tunnel Excavation, Cycle Advance Rate, 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

隧洞开挖循环进尺作为控制围岩稳定性的核心施工参数，直接关系到工程安全与施工效率的平衡。现有研究虽已取得一定成果，但仍存在显著不足：首先，多数研究基于单一工程背景，如李林毅等针对巴哈高速公路东天山隧道 2#斜井的研究[1]，王怀正等针对富水弱胶结地层大断面隧道的研究[2]，均未提炼出具有普遍适用性的理论框架；其次，缺乏对支护结构内力突变机制的定量分析，韩峰等虽采用有限元法模拟全断面、台阶法开挖过程[3]，但对支护内力的非线性增长规律缺乏深入解析；戚长军等通过现场监测与数值模拟相结合[4]，揭示了围岩变形与衬砌内力的相关性，但研究重点偏向定性描述。张坚等采用正交试验法分析土层参数对衬砌内力的影响[5]，段长高等从围岩竖向位移、隧道净空收敛、支护结构内力、围岩塑性区四个角度进行分析[6]，但均未系统性地建立进尺优化的决策模型。

本文旨在解决浅埋 V 级围岩全断面开挖中如何定量平衡支护结构内力突变风险与施工效率这一更具普遍性的问题。通过建立 FLAC3D 三维数值模型，系统分析不同循环进尺(1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m)对围岩位移、支护结构内力及塑性区分布的影响，揭示进尺变化与围岩响应的协同机制，为类似工程提供科学的决策依据。

## 2. 工程概况

某抽水蓄能电站引水隧洞工程，为水利工程短距离隧道。隧道中间有 60 m 长的浅埋段，为圆形隧道，洞径为 4 m，隧道埋深 15.0 m，工程纵剖面如图 1 所示。该隧道主要穿过地层岩性云梦山组二段岩性，石英砂岩、长石砂岩、泥岩、页岩、粘土质砂岩互层，多呈弱风化~微风化状态，石英砂岩、长石砂岩属



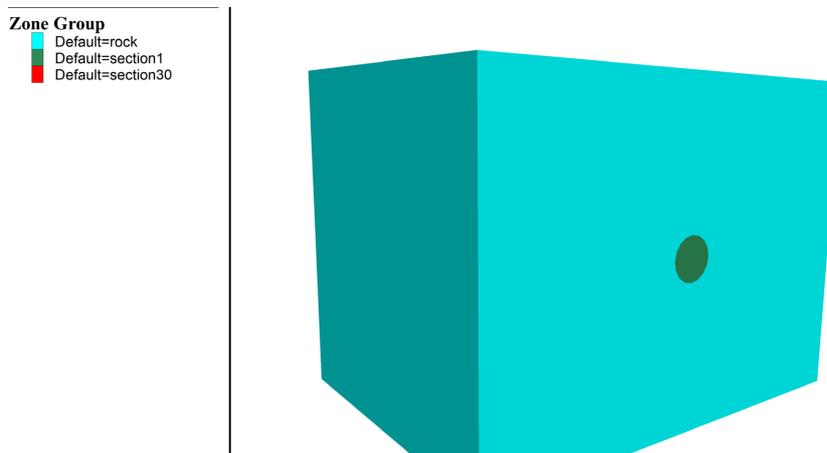


Figure 2. Full-face excavation method model diagram

图 2. 全断面开挖方法模型图

### 3.2. 模拟工况及参数选取

为了确定合理的循环进尺方案,本研究基于地质勘查及岩土试验数据见表 1,通过数值模拟方法对 V 级围岩条件下的隧道开挖过程进行了系统分析。根据工程经验, V 级围岩的循环进尺通常控制在 1~2 m 范围内[7],研究采用全断面开挖法,针对 4 种不同循环进尺工况(见表 2)了多工况模拟计算。

Table 1. Model material parameters

表 1. 模型材料参数

材料类型	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/GPa	泊松比	粘聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )
强风化砂岩	2050	0.12	0.24	50	29
C20 喷射混凝土	2400	25.5	0.2		
支护锚杆	7850	206	0.24		

Table 2. Numerical simulation condition

表 2. 数值模拟工况

开挖方法	循环进尺/m
全断面法	1
全断面法	1.5
全断面法	2
全断面法	2.5

## 4. 结果与分析

### 4.1. 围岩竖向位移分析

图 3 为全断面法 1.0、1.5、2 和 2.5 m 循环进尺长度引起的围岩竖向位移变化云图。通过对全断面法不同循环进尺长度的对比分析发现,当进尺长度为 1.0 m、1.5 m、2.0 m 和 2.5 m 时,对应的拱顶沉降值分别为 6.1 mm、6.45 mm、6.7 mm 和 6.83 mm,呈现出随着进尺长度增加而沉降值逐渐增大的趋势。虽然四种进尺方案均能满足隧道开挖的稳定性要求,但从控制围岩变形的角度来看,1.0 m 进尺长度下的拱

顶沉降值最小, 仅为 6.1 mm, 明显优于其他三种方案。这表明较短的循环进尺能更有效地控制围岩扰动, 减少地层变形, 因此在工程实践中, 1.0 m 进尺长度是最优选择, 能够在确保施工安全的同时最大限度地降低拱顶沉降风险。

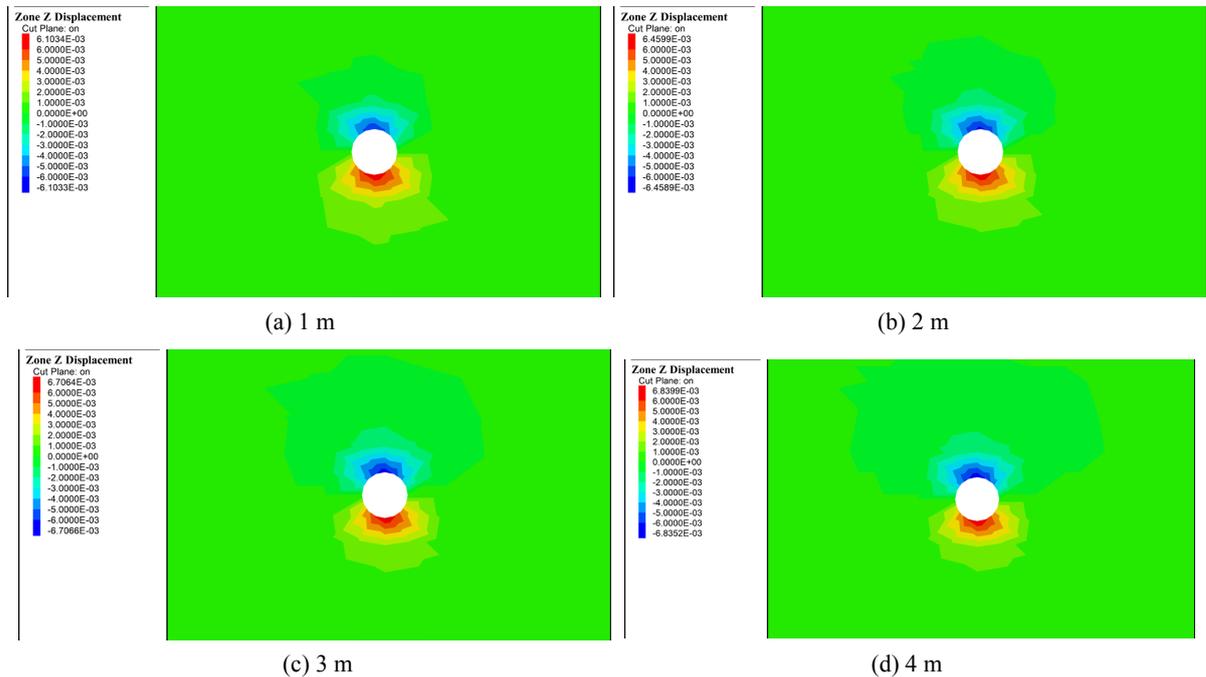
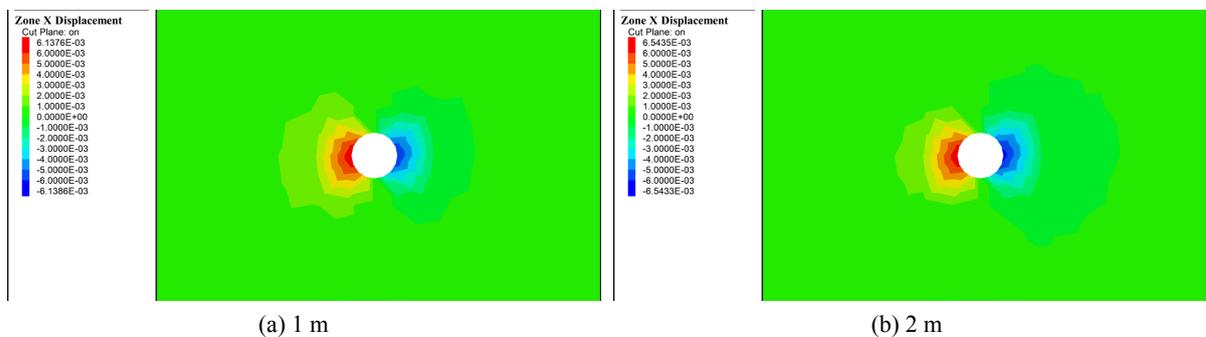


Figure 3. Vertical displacement field contour map of surrounding rock  
图 3. 围岩竖向位移场云图

#### 4.2. 围岩水平位移分析

图 4 为全断面法 1.0、1.5、2 和 2.5 m 循环进尺长度引起的围岩水平位移变化云图。在全断面法施工过程中, 通过对四种不同循环进尺长度(1.0 m, 1.5 m, 2.0 m, 2.5 m)的对比分析发现, 围岩水平位移的变化趋势基本保持一致, 表明进尺长度的变化并未显著改变围岩变形的总体规律。然而, 水平净空收敛值的实测数据却呈现出明显的差异性, 其中 1.0 m 进尺条件下的收敛值最小, 仅为 6.14 mm, 而随着进尺长度的增加, 收敛值逐渐增大, 至 2.5 m 进尺时达到最大值 6.94 mm, 增幅达到 13%。这一结果表明, 较短的循环进尺能够更有效地控制围岩变形, 尤其是 1.0 m 进尺在四种方案中表现最为突出。因此, 从控制水平净空收敛的角度出发, 全断面法采用 1 m 循环进尺的施工方案效果最佳, 既能保证施工效率, 又能有效抑制围岩变形, 具有显著的工程应用价值。



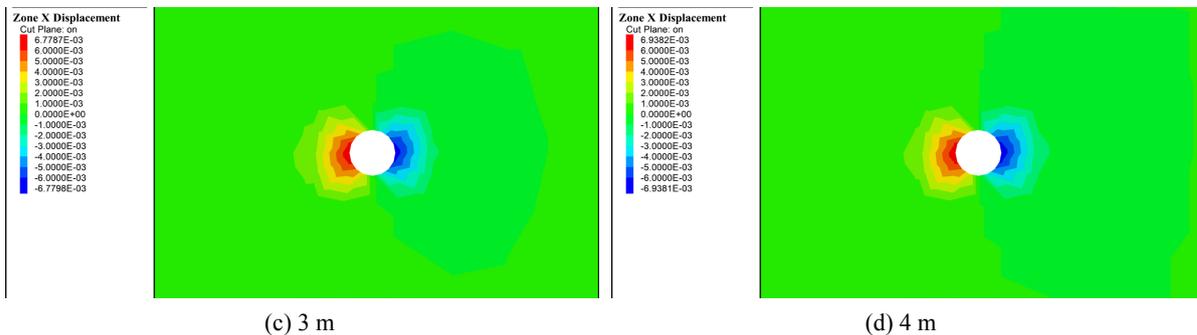


Figure 4. Horizontal displacement field contour map of surrounding rock  
图 4. 围岩水平位移场云图

### 4.3. 结构支护内力分析

图 5 为全断面法 1.0、1.5、2 和 2.5 m 循环进尺长度引起的支护结构内力变化云图。

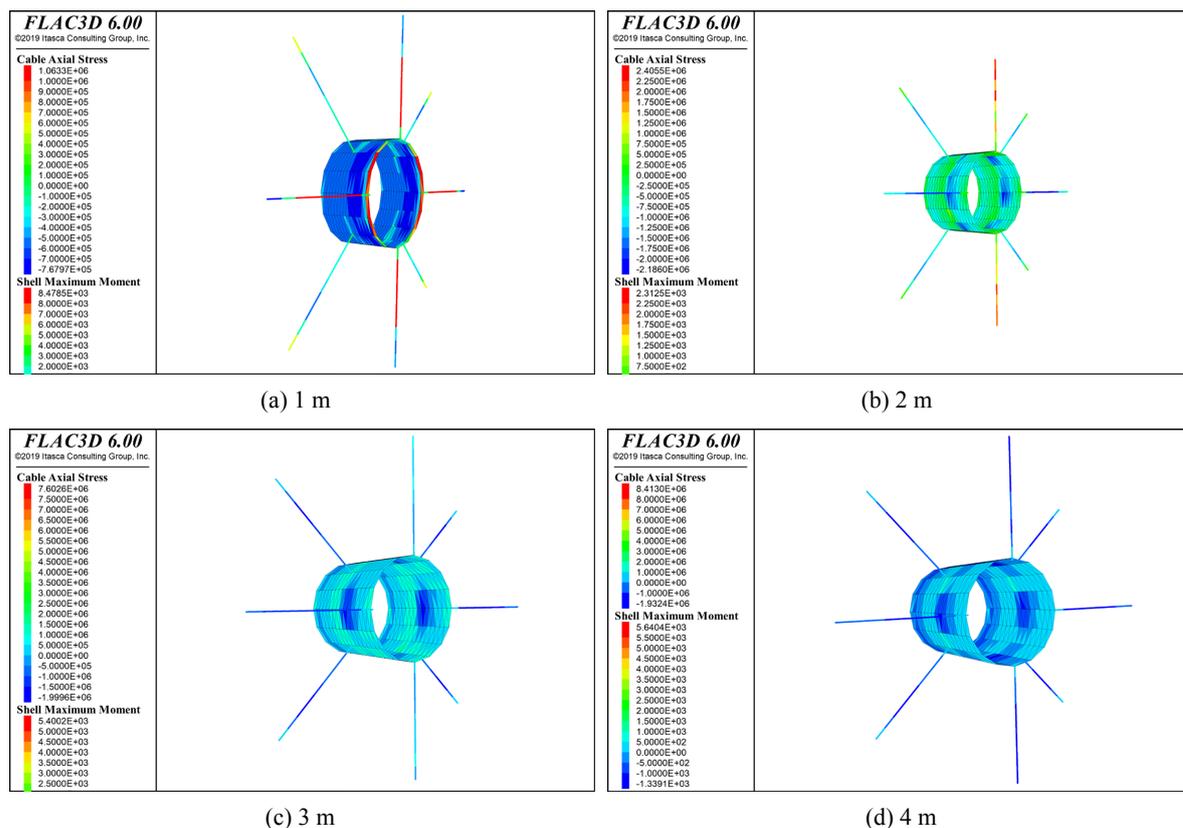


Figure 5. Internal force variation contour map of supporting structure  
图 5. 支护结构内力变化云图

随着隧道施工中循环进尺长度的增加，支护结构的内力分布呈现出明显的恶化趋势，其中轴向应力和弯矩的变化尤为显著。研究表明，当进尺从 1 米增加到 1.5 米时，锚杆轴向应力上升至原来的 1.2 倍，而弯矩则大幅下降了 72.7%；然而继续增大进尺至 2 米时，轴向应力急剧攀升至 1.5 米工况的 2.1 倍，弯矩也反弹增加了 1.3 倍；最值得注意的是，当进尺达到 2.5 米时，轴向应力骤增至 2 米工况的 3.4 倍，弯矩更是激增了 4.4%。这些数据清晰地表明，虽然 1.5 米进尺时支护结构内力相对较小，但过大的进尺长

度(如 2.5 米)会严重恶化支护结构的受力状态,导致轴向应力和弯矩呈非线性增长,因此在实际工程中应避免采用过大的循环进尺长度,1.5 米可能是一个较为合理的平衡点。

#### 4.4. 围岩塑性区分析

图 6 为全断面法 1.0、1.5、2 和 2.5 m 循环进尺长度引起的围岩塑性区分布云图。从图 6 塑性区分布可知,在 1 m、1.5 m 和 2 m 三种循环进尺条件下,围岩塑性区均呈现出良好的分布特征,未出现连贯成环的现象,这表明围岩整体稳定性较高,发生坍塌的风险较小。从净空收敛的角度来看,四种不同进尺条件下的收敛位移差异并不显著,但其中 1 m 进尺最能满足开挖稳定性的要求。而在支护结构内力方面,1.5 m 进尺表现出最优的内力分布特性,对支护结构最为有利。综合开挖效率与稳定性的平衡考虑,采用全断面法配合 1.5 m 循环进尺是最优的施工工法选择,既能保证施工进度,又能有效控制围岩变形和支护结构受力,实现安全与效率的双重目标。

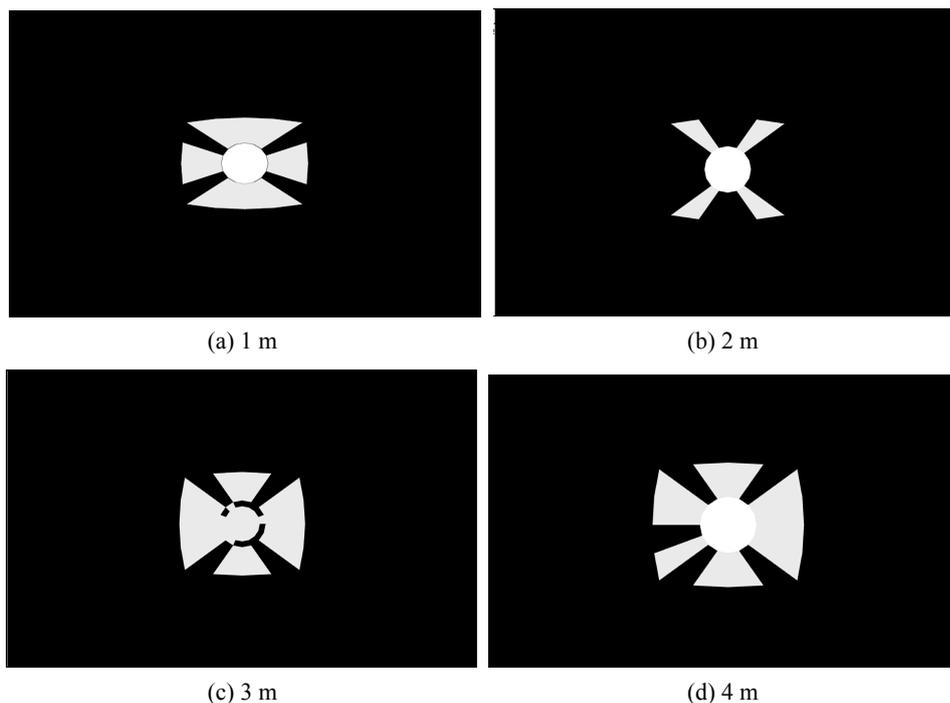


Figure 6. Plastic zone distribution contour map of surrounding rock  
图 6. 围岩塑性区分布云图

## 5. 结论与展望

### 5.1. 结论

通过对围岩竖向位移、隧道净空收敛、支护结构内力以及围岩塑性区等关键指标的综合分析,可以从不同方面评估不同循环进尺对隧道开挖稳定性的影响。研究表明,1 m 的循环进尺在控制围岩竖向位移和净空收敛方面表现最佳,能够更好地满足围岩稳定性的要求;而 1.5 m 的循环进尺则在支护结构内力分布上更具优势,其应力状态更为合理,同时在经济性方面也显著优于 1 m 进尺,能够降低施工成本并提高作业效率。综合考虑围岩稳定性、支护结构受力性能以及经济性等因素,采用全断面法施工时,最优循环进尺应选择 1.5 m,这一方案不仅能够保证开挖过程中的围岩稳定,还能实现经济效益与工程质量的平衡,是较为理想的施工参数选择。

## 5.2. 展望

尽管本文通过数值模拟确定了合理循环进尺,但仍存在以下局限性,需在未来研究中进一步完善:

1) 本文围岩采用摩尔-库伦本构模型,未考虑岩体的应变软化、黏弹塑性及 anisotropy (各向异性)。未来可采用更精确的本构模型(如弹塑性损伤模型、黏弹塑性模型),更真实反映V级围岩及支护结构的复杂力学行为。

2) 研究未考虑地下水对围岩的软化作用(工程区泥岩、页岩遇水易崩解),而渗透压力会显著改变围岩有效应力状态。未来需开展渗流-应力-损伤耦合数值模拟,分析地下水对循环进尺选择的影响,尤其是富水地层中的进尺优化。

## 参考文献

- [1] 李林毅, 阳军生, 谢壮, 等. 基于 FLAC<sup>3</sup>D 的隧道单层衬砌结构力学特征研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(10): 74-82.
- [2] 王怀正, 宋战平, 张学文, 等. 富水弱胶结地层大断面隧道施工方案优化与工程应用研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 210-219.
- [3] 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(8): 149-153.
- [4] 戚长军, 余芳涛, 邵兵厂. 隧道围岩变形及其衬砌内力特征研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(2): 94-96.
- [5] 张坚, 邢心魁, 李迎, 等. 土层参数对双圆盾构衬砌内力的影响[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(9): 121-124.
- [6] 段长高, 杨杰. 循环进尺对大断面浅埋隧道稳定性的影响[J]. 公路工程, 2019, 44(3): 128-132.
- [7] 宋玉婷, 巢万里. 连拱隧道渗流防护措施的数值模拟研究[J]. 公路工程, 2016, 41(3): 111-116.