

深埋隧洞TBM施工围岩参数劣化特性及演化机理研究

赵 杰¹, 程华仁¹, 李锦琪²

¹武汉地质勘察基础工程有限公司, 湖北 武汉

²中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年1月10日; 录用日期: 2026年2月2日; 发布日期: 2026年2月13日

摘 要

鉴于隧洞开挖会导致损伤区岩体参数发生一定程度劣化的工程实际, 依托某大型深埋软岩引水工程, 通过构建相应的数值试验模型, 分析了TBM (Tunnel Boring Machine)连续开挖工况下隧道围岩参数的动态调整过程, 探索了深埋软岩隧道围岩参数的动态劣化规律。结果表明采用TBM连续开挖时, 隧道损伤区围岩参数劣化是一个连续的过程。具体表现为开挖过程中围岩的摩擦角由初始值 φ_0 逐渐增大为 φ_e , 黏聚力由初始值 c_0 逐渐减小为 c_e ; 随着支护结构的完成, 围岩的摩擦角较开挖过程中表现出降低的趋势, 由 φ_e 最终衰减为 φ_d , 而黏聚力则较开挖过程中开始增大, 最终由 c_e 演变为 c_d 。

关键词

TBM, 软岩, 参数劣化, 数值分析

Study on Deterioration Mechanism of Surrounding Rock Parameters in TBM Construction of Deep-Buried Tunnel

Jie Zhao¹, Huaren Cheng¹, Jinqi Li²

¹Wuhan Geological Prospecting & Foundation Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei

²Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Wuhan Hubei

Received: January 10, 2026; accepted: February 2, 2026; published: February 13, 2026

Abstract

In the engineering fact that tunnel excavation will cause a certain degree of deterioration of rock

文章引用: 赵杰, 程华仁, 李锦琪. 深埋隧洞 TBM 施工围岩参数劣化特性及演化机理研究[J]. 土木工程, 2026, 15(2): 147-154. DOI: 10.12677/hjce.2026.152034

mass parameters in the damaged zone of surrounding rock, based on a large-scale municipal transportation project, a corresponding numerical test model is established., a numerical model of the diversion tunnel under the condition of TBM (Tunnel Boring Machine) continuous excavation is established. By analyzing the dynamic adjustment process of tunnel surrounding rock parameters during TBM continuous excavation, the dynamic deterioration law of surrounding rock parameters in deep-buried soft rock tunnels is studied. It is considered that when TBM is used for continuous excavation of deep-buried soft rock tunnels, the deterioration of surrounding rock parameters in the damaged zone is a continuous process, which is specifically manifested in that during the excavation process, the friction angle of the surrounding rock gradually increases from the initial value φ_0 to φ_e , and the cohesion gradually decreases from the initial value c_0 to c_e ; with the completion of the support structure, the friction angle of the surrounding rock shows a decreasing trend compared with that in the excavation process, finally attenuating from φ_e to φ_d , while the cohesion starts to increase compared with that in the excavation process, eventually evolving from c_e to c_d .

Keywords

TBM, Soft Rock, Degradation, Numerical Analyzing

Copyright © 2026 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

围绕国家“十四五”发展规划的战略布局,地下空间的开发利用将进入了一个高速发展期,地下空间工程的安全高效建设成为重中之重。大量工程实际表明,开挖扰动会导致在距洞壁一定范围内,生成一个岩体摩擦角 φ 与黏聚力 c 较开挖前产生明显劣化的损伤区。工程设计中往往认为岩体的各项力学参数为固定值,这在一定程度上高估了岩体强度及其抗变形能力,容易导致支护结构无法提供足够的抗力来限制围岩变形,严重时会引起衬砌破坏、强烈缩径等严重工程问题。因此,研究卸荷条件下围岩的力学参数劣化规律对工程实践具有重要意义。

大量学者针对围岩力学参数的劣化特性开展了大量研究。周家文[1]基于大量数值加载试验结果,对比分析了不同本构模型下岩石应力-应变曲线间的区别,并采用应变软化模型分析了某地下洞室群的开挖稳定性。王延宁[2]综合分析了塑性变形与围压共同作用下围岩的受力变形特征,建立了考虑围压影响的黏聚力、内摩擦角、弹性模量和剪胀角随塑性变形变化的数学模型,并在此基础上通过开展数值试验,分析了圆形洞室开挖过程中岩体力学参数的劣化过程。张帅[3]基于 D-P 屈服准则分析了深埋圆形洞室围岩的刚度和强度劣化特性,认为距洞壁一定范围内的岩体参数发生了劣化,且该区域内岩体的抗变形能力与弹性区相比有所降低。孟庆彬[4]通过分析不同条件下岩体的应变软化与扩容特性,建立了考虑岩体劣化特性的围岩弹塑性力学模型,并在此基础上分析了岩体劣化对围岩塑性区发育的影响规律。杨朝帅[5]依托于某隧道围岩跨孔声波测试结果,建立了考虑围压与塑性应变影响的围岩参数劣化模型,并分析了地下洞室开挖过程中围岩参数劣化的空间分布规律。刘学伟[6]将围岩分区方法与参数反演模型相结合,提出了一种考虑分区劣化的围岩力学参数反演模型,并综合现场实测变形数据,通过正算结果验证了反演精度。周火明[7]开展了包括岩体声波测试等多种岩体原位试验手段,研究了卸荷扰动区范围内及岩体力学参数劣化程度与劣化规律。胡建华[8]基于卸荷岩体力学理论,建立了岩体卸荷等效模型,认为卸荷过程中内摩擦角、凝聚力和弹性模量等岩体各项力学参数均出现不同程度的劣化趋势。李文婷[9]基于

Mohr-Coulomb 准则, 以内摩擦角为中间变量, 建立了岩石应力 - 应变曲线中, 峰后区对应的岩体力学非线性应力 - 应变关系, 得出内摩擦角和黏聚力随岩石峰后强度变化而变化的结论。江权[10]以等效塑性应变为中间变量, 研究了某硬岩洞室卸荷过程中, 围岩黏聚力、内摩擦角等力学参数的劣化特性。

上述研究从不同角度, 对硬岩、硬脆性岩条件下隧道围岩力学参数的劣化特性展开了系统性探索, 取得了大量有益成果。相比之下, 针对 TBM 施工的深埋软岩隧道围岩参数劣化规律的研究相对较少。鉴于此, 本文依托某深埋软岩引水工程, 基于岩体力学理论, 结合有限元数值模型试验方法, 分析 TBM 动态开挖过程中围岩黏聚力与内摩擦角的劣化特性, 探索深埋软岩隧道围岩参数的动态劣化规律, 以期为同类地质条件下隧道工程设计中的参数选取与支护方案优化等提供参考。

2. 研究方法

岩体力学研究领域普遍认为, 内摩擦角 φ 和黏聚力 c 作为表征岩体抗剪强度的核心参数, 决定了岩体的抗变形能力, 与此同时, 大多数岩体破坏准则中也采用内摩擦角 φ 与黏聚力 c 来量化表示岩体的强度特性。因此, 本文主要考虑隧道开挖对围岩内摩擦角 φ 和黏聚力 c 的影响。作为岩体力学领域广泛应用的强度准则, Hoek-Brown 准则自提出以来经过多次修正, 已形成较为完善的体系, 在解决岩体工程问题方面的理论意义和实用价值已在工程领域得到广泛验证。该准则能够反映岩体固有的非线性破坏特征, 以及结构面和应力状态对强度的影响, 并能解释低应力区、拉应力区和最小主应力对岩石强度的影响。为系统分析 TBM 动态开挖过程中围岩力学参数的劣化特性, 本文选取 Hoek-Brown 准则作为核心分析工具, 旨在通过该准则的理论框架综合探究围岩内摩擦角 φ 与黏聚力 c 的协同变化规律。同时, 本文认为随着工程开挖的持续推进, 在地应力重分布的影响下, 岩体的初始内摩擦角 φ 和初始黏聚力 c 将逐渐演化为劣化强度剩余摩擦角 φ_d 和剩余黏聚力 c_d 。

值得注意的是, Hoek 在提出 Hoek-Brown 准则时, 同步推导了基于准则参数计算岩体抗剪强度参数内摩擦角 φ 和黏聚力 c 的理论公式

$$\varphi' = \sin^{-1} \left[\frac{6\alpha m_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{\alpha-1}}{2(1+\alpha)(2+\alpha) + 6\alpha m_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{\alpha-1}} \right] \quad (1)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2\alpha)s + (1-\alpha)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{\alpha-1}}{(1+\alpha)(2+\alpha) \sqrt{1 + \left(6\alpha m_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{\alpha-1} \right) / ((1+\alpha)(2+\alpha))}} \quad (2)$$

式中, $\sigma_{3n} = \sigma'_{3\max} / \sigma_{ci}$ 。

这一公式为从岩体整体强度反演抗剪强度参数提供了可靠的量化路径, 也为本文将 TBM 动态开挖开挖过程中的岩体内摩擦角 φ 与黏聚力 c 结合起来, 研究围岩动态卸荷过程中的岩体力学参数协同劣化特性奠定了可量化、可验证的计算路径。在此基础上, 本文将引入的公式(1)和(2)作为量化围压变化与围岩参数劣化关联的核心工具。为最大限度还原工程实际中, 围岩应力重分布导致围岩损伤区内岩体力学参数发生劣化, 而岩体力学参数劣化又将进一步反馈于洞室围岩应力分布状态与围岩变形特征, 使应力场的演化规律和演化趋向发生改变, 围岩将按新的规律和新的路径发展演化, 两者动态影响, 最终达到新平衡的这一动态耦合调整的过程。本文依托 FLAC3D 数值试验平台, 使用其内置的 Fish 编程语言构建了参数动态更新算法。具体而言, 首先设置单元指针 $P_Z = \text{zone.head}$ 以定位模型中所有围岩单元, 随后在每一个计算步中, 通过该指针系统逐一遍历并检索每个围岩单元的实时应力状态(包括主应力大小、应力方向等); 紧接着, 结合单元当前的破坏状态(如是否发生剪切破坏或拉伸破坏), 依据公式(1)和(2)计算得到与当前应力状态匹配的剩余摩擦角 φ_d 和剩余黏聚力 c_d , 并将其赋值给对应单元。持续迭代上述过程,

直至模型整体应力场达到新的平衡状态，至此一个完整的开挖循环结束。

为了分析隧道开挖过程中围岩参数随掌子面推进的演化过程，在模型中部设置了一个固定监测断面，如图 1 所示。

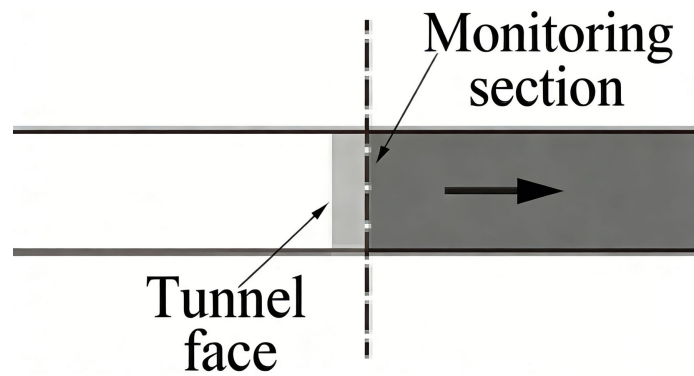


Figure 1. Schematic diagram of monitoring cross-section positions
图 1. 监测断面位置示意图

3. 模型建立与参数选取

本研究依托某大型深埋软岩引水隧道为背景，隧道埋深约 500 m，使用 TBM 动态连续开挖。隧道埋深区实测地应力 $\sigma_H = 18.5 \text{ MPa}$ ， $\sigma_h = 15.77 \text{ MPa}$ ， $\sigma_V = 15.82 \text{ MPa}$ 。物探资料显示隧道围岩为 IV 级，岩性主要为软质砂岩。为更好地消除数值试验模型边界效应的影响，模型水平方向(X 轴)与重力方向(Z 轴)尺寸设置为 100 m，开挖方向(Y 轴)尺寸取 90 m。TBM 开挖断面直径为 5.7 m，每一进尺开挖步进为 2 m。管片材料为 C50 预制混凝土，管片壁后注浆固结体强度为 C15。分析模型如图 2 所示，各结构间空间关系如图 3 所示，各结构计算参数见表 1。

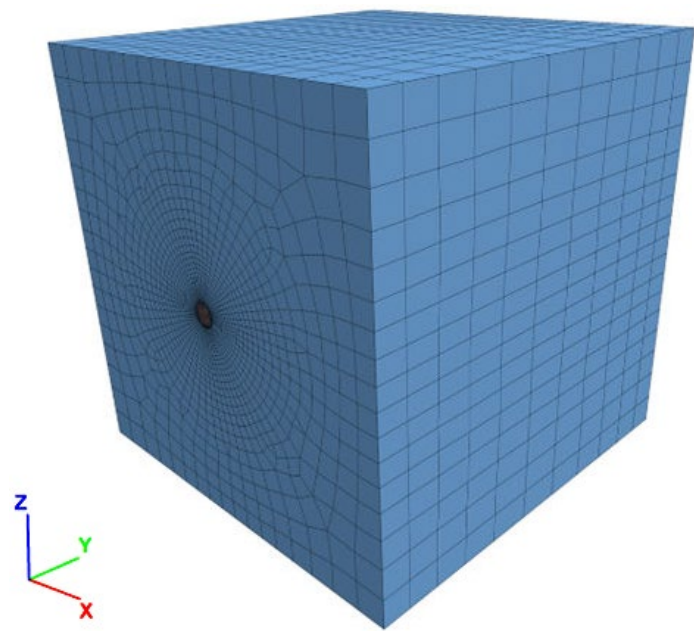


Figure 2. Analysis model
图 2. 分析模型

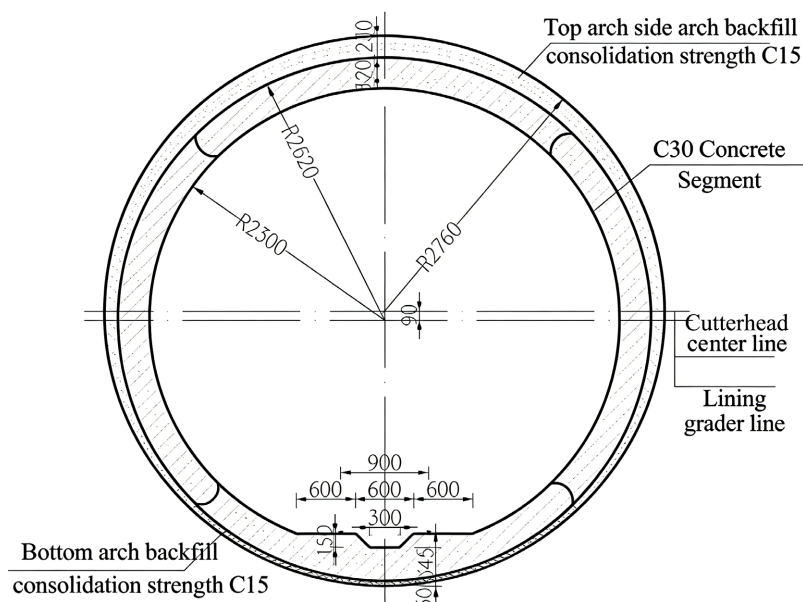


Figure 3. Support structure cross-section
图 3. 支护断面图

Table 1. Calculation parameter selection
表 1. 计算参数选取

材料	γ (kN/m ²)	E (GPa)	μ	c_0 (MPa)	φ_0 (°)
围岩	26.9	2.2	0.27	1.15	39.6
管片	24.2	34.5	0.20		
注浆材料	23.6	22.0	0.33		

4. 结果分析

当隧道掌子面位于监测断面位置时，围岩内摩擦角在距离隧道壁 0~0.8 m 范围内从最大值 51.4°降至最小值 33.4°，并在距离隧道壁 0.8~1.5 m 范围内逐渐增大至围岩初始内摩擦角 φ_0 (图 4)。同时观察到，在距离隧道壁 0.5~1.2 m 范围内，围岩内摩擦角等值线呈现不规则团块状分布，表明该区域存在厚度约为 0.8 m 的破裂带。

当支护结构施工完成且围岩内摩擦角 φ 变化稳定后，监测断面区域岩体内摩擦角 φ 在距离隧道壁 0~1.4 m 范围内从最大值 45°降至最小值 32.4°，并在距离隧道壁 1.4~2.3 m 范围内逐渐增大至初始内摩擦角 φ_0 (图 5)。在距离洞壁 1.1~1.5 m 范围内，围岩内摩擦角 φ 等值线呈现不规则团块状分布，表明围岩中仍存在层状破裂带，但其厚度由前一阶段的 0.7 m 减小至 0.4 m。

当隧道掌子面位于监测断面时，距离隧道壁 0~1.2 m 范围内的围岩黏聚力 c 较开挖前出现了一定程度的降低(图 6)，在隧道壁处达到最小值 0.218 MPa。随着深度增加，黏聚力 c 逐渐增大，最终达到初始黏聚力 c_0 。黏聚力等值线在围岩损伤区边界呈不规则分布，标明受开挖影响，围岩内部发生了规则破裂。

当隧道支护完成且黏聚力 c 变化稳定后，黏聚力 c 的劣化范围增大至距离隧道壁 2.3 m 处。黏聚力 c 的最小值仍出现在隧道壁处，从 0.218 MPa 增大至 0.351 MPa(图 7)。与开挖时相比，黏聚力分布等值线更加均匀，呈现与隧道断面形状一致的圈层状分布。

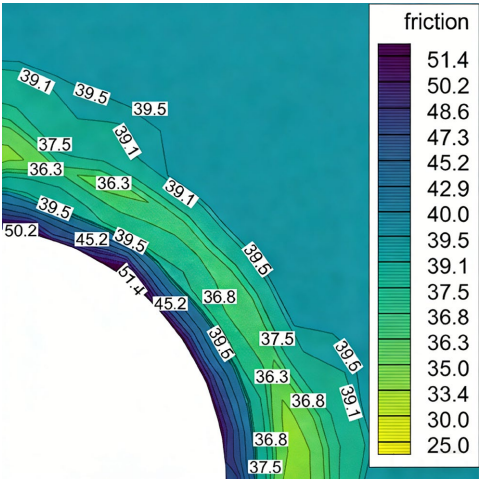


Figure 4. Contour map of ϕ values at monitoring sections during excavation
图 4. 开挖期间监测面 ϕ 等值线图

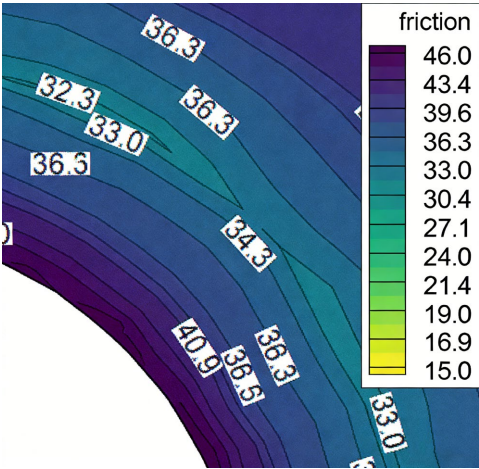


Figure 5. Contour map of ϕ values at monitoring sections after stabilization
图 5. 稳定后监测面 ϕ 等值线图

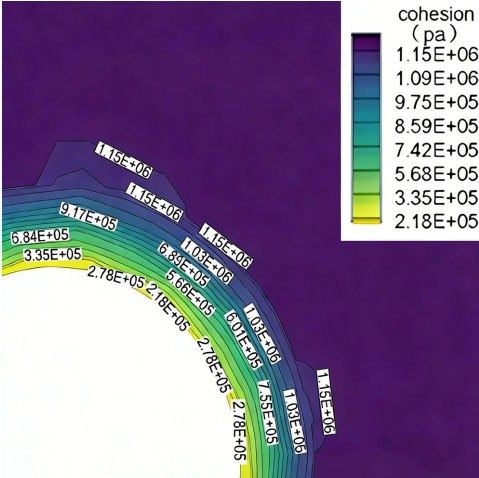


Figure 6. Contour map of c values at monitoring sections during excavation
图 6. 开挖期间监测面 c 等值线图

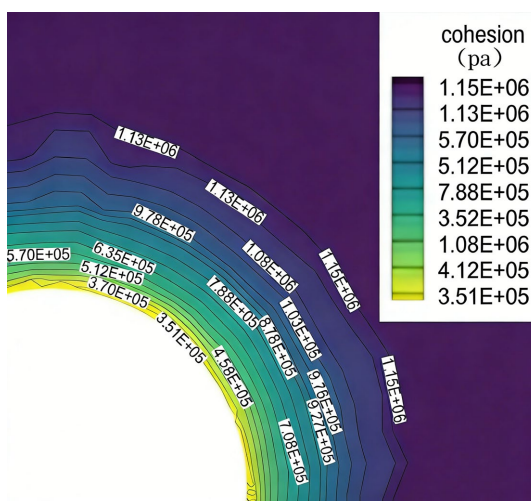


Figure 7. Contour map of c values at monitoring sections after stabilization
图 7. 稳定后监测面 c 等值线图

天然应力状态下, 岩体内任一点均处于三向应力平衡状态, 岩体与其赋存的应力环境相适应。开挖相当于在围岩内部形成一个空腔, 在洞壁处形成一个凌空自由面, 使局部围岩状态将从三维应力状态转变为二维应力状态。洞壁附近的围岩最先发生应力重分布, 具体表现为径向应力 σ_r 减小而环向应力 σ_θ 增大。宏观上表现为, 垂直于洞壁法向原本在天然地应力作用下紧密闭合的结构面, 受卸荷影响而逐渐张开, 反之平行于洞壁方向原本张开的结构面, 则在围岩内部环向应力的作用下而被压合。同时, 结构面力学状态的改变又会反作用于地应力重分布, 改变地应力的演化路径, 这一过程随着开挖的进行, 在围岩内部周而复始、持续循环直至达到新的平面。这一过程在增大围岩内部的有效摩擦力的同时降低了围岩完整性。宏观上表现为围岩摩擦角由 φ_0 增大至 φ_e , 而黏聚力则由 c_0 减小至 c_e 。

隧道支护完毕后, 支护结构会向围岩施加支护抗力, 增大围岩内部的径向应力 σ_r , 从而进一步改变围岩应力的演化路径。在支护抗力的作用下, 围岩内部在地应力重分布影响下已经张开的结构面会再次闭合, 而原本具备张开趋势的结构面则会在支护抗力与围岩应力的共同作用下被再次紧密压实。这一过程在限制围岩内部有效摩擦的同时, 显著提高了围岩的完整性。而随着围岩完整性的提高, 其内摩擦角未有效发挥作用, 其强度主要由岩体间的黏聚力承担。因此, 与未支护状态相比, 支护后围岩的物理力学性质发生了明显改变, 即围岩的内摩擦角由 φ_e 衰减为 φ_d , 而黏聚力则由 c_e 增大为 c_d 。不仅如此, 由于支护结构的存在, 围岩内部的变形受到了有效限制, 这使得原本可能不断扩展的层状破裂带的厚度逐渐减小。经过一段时间的调整, 围岩最终会达到一种新的平衡状态, 从而保障隧道结构的稳定性。

5. 结论

基于数值计算方法, 研究了深埋软岩隧道围岩参数劣化规律。主要结论如下:

- (1) 围岩参数劣化是一个连续动态过程。在该引水隧道中, 隧道开挖完成后, 围岩的岩体参数劣化区范围为开挖直径的 0.5 倍。
- (2) 空间上, 隧道开挖后, 随着与洞壁距离的增加, 围岩内摩擦角 φ 首先逐渐减小, 在距离隧道壁一定距离处达到最小值, 之后再逐渐增大至初始内摩擦角。而黏聚力 c 则在洞壁附近取到最小值, 并随着与洞壁距离的增加而逐渐增大, 最终恢复至初始黏聚力。
- (3) 隧道支护完成后, 支护提供的变形抗力会使围岩损伤区内因开挖卸荷而部分张开的微裂纹再次闭合, 这在提高围岩完整性的同时一定程度上降低了深埋软岩内有效摩擦力的发挥。因此, 隧道支护

完毕后,深埋软岩损伤区内岩体的内摩擦角 φ 相比未支护状态下出现一定程度的降低,而黏聚力 c 则表现出一定程度的增大趋势。

参考文献

- [1] 周家文, 徐卫亚, 李明卫, 等. 岩石应变软化模型在深埋隧洞数值分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1116-1127.
- [2] 王延宁, 张强, 李子仪, 等. 考虑弹塑性耦合效应的应变软化模型[J]. 煤炭学报, 2020, 45(12): 4307-4051.
- [3] 张帅, 王俊杰, 张海龙, 等. 考虑刚度与强度劣化的洞室围岩弹塑性分析[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1):101-109.
- [4] 孟庆彬, 韩立军, 乔卫国, 等. 应变软化与扩容特性极弱胶结围岩弹塑性分析[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(4): 760-767.
- [5] 杨朝帅, 李达强. 深埋洞室围岩参数劣化的试验与数值模拟研究[J]. 岩土工程技术, 2025, 39(2): 216-224.
- [6] 刘学伟, 刘云豪, 刘滨, 等. 考虑分区劣化的围岩力学参数精细化反演机器学习模型研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(11): 2305-2315.
- [7] 周火明, 盛谦, 李维树, 等. 三峡船闸边坡卸荷扰动区范围及岩体力学性质弱化程度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(7): 1078-1081.
- [8] 胡建华, 雷涛, 罗先伟, 等. 矿山采动卸荷岩体力学参数劣化规律研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1123-1128.
- [9] 李文婷, 李树忱, 冯现大, 等. 基于莫尔-库仑准则的岩石峰后应变软化力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1460-1466.
- [10] 江权, 冯夏庭, 陈国庆. 考虑高地应力下围岩劣化的硬岩本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(1): 144-152.