

基于三维数值仿真的相山隧道 软弱围岩变形 规律研究

王英超¹, 高 晗², 王迎超¹, 刘飞虹²

¹中国矿业大学, 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州

²中国铁路上海局集团有限公司, 合肥铁路枢纽工程建设指挥部, 安徽 合肥

收稿日期: 2025年10月1日; 录用日期: 2025年10月21日; 发布日期: 2025年11月3日

摘 要

高速铁路隧道在工程建设中愈发常见。为了研究含有断层的软弱围岩隧道动态开挖下的变形规律, 本文依托相山隧道项目, 借助有限差分软件FLAC3D, 研究了含断层的隧道的动态开挖过程及其围岩的变形规律以及断层对隧道稳定性的影响, 并从地表沉降、围岩位移, 塑性区等方面进行探讨, 深入研究了不同开挖工法对含断层的软弱围岩变形规律影响, 为类似的隧道工程建设和支护提供建议。

关键词

隧道稳定性, 软弱围岩, 断层, 动态开挖

A Study on the Deformation Laws of Weak Surrounding Rock in Xiangshan Tunnel Based on Three-Dimensional Numerical Simulation

Yingchao Wang¹, Han Gao², Yingchao Wang¹, Feihong Liu²

¹State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

²Hefei Railway Hub Project Construction Command Center, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Hefei Anhui

Received: October 1, 2025; accepted: October 21, 2025; published: November 3, 2025

文章引用: 王英超, 高晗, 王迎超, 刘飞虹. 基于三维数值仿真的相山隧道软弱围岩变形规律研究[J]. 土木工程, 2025, 14(11): 2577-2586. DOI: 10.12677/hjce.2025.1411277

Abstract

High-speed railway tunnels are becoming increasingly common in engineering construction. To study the deformation laws of tunnels with weak surrounding rocks containing faults during dynamic excavation, this paper, based on the Xiangshan Tunnel project, uses the finite difference software FLAC3D to investigate the dynamic excavation process of tunnels with faults, the deformation laws of their surrounding rocks, and the influence of faults on tunnel stability. The study explores aspects such as ground surface settlement, surrounding rock displacement, and plastic zones, and deeply examines the impact of different excavation methods on the deformation laws of weak surrounding rocks with faults, providing suggestions for similar tunnel engineering construction and support.

Keywords

Tunnel Stability, Weak Surrounding Rock, Fault, Dynamic Excavation

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

自改革开放以来,我国交通基础设施投资规模持续增长,路网覆盖水平显著提升。至2024年底,全国铁路营业里程已达16.2万公里,其中高速铁路里程达4.8万公里[1]。随着路网不断延伸,隧道工程所面临的地质条件日趋复杂,其中软弱围岩隧道施工问题尤为突出。受施工扰动、地质环境等多重因素影响,该类隧道常出现变形大、稳定性差等问题,导致施工进度延误、工期难以控制,并造成人力资源与材料成本的严重浪费[2]-[5]。例如,拉萨至林芝铁路某隧道在穿越多条断层破碎带时发生突水、突泥和塌方等地质灾害[6];贵州某隧道因处于断层影响带内,围岩破碎、自稳能力差,施工中发生大规模涌水与突泥现象[7]。因此,开展含断层软弱围岩隧道开挖稳定性的系统研究,对保障工程安全、控制施工风险具有重要理论与工程意义。

近年来,国内外学者通过室内试验、数值模拟等多种手段,围绕软弱围岩隧道变形机理与稳定性控制开展了广泛研究[8]-[13]。梁宸等[14]采用 UDEC 软件模拟开挖扰动下裂隙围岩的塌方演化过程,揭示了该类围岩的失稳机制。刘辉等[15]从断层间距角度分析其对隧道稳定性的影响,发现断层间距越小,围岩稳定性越差。陈鉴光等[16]基于 MIDAS 软件对比不同开挖工法下围岩应力场、位移场及支护结构响应,指出减少单次开挖扰动可有效控制隧道变形与支护结构受力。此外,不少学者通过物理模型试验,从节理产状、隧道尺寸等因素研究软弱围岩变形规律[17]-[19]。Myung 等[20]通过三轴试验与离散元模拟,研究不同节理倾角条件下岩体破坏与节理面滑移特征,发现随倾角减小岩体损伤区域逐渐扩大。Nader 等[21]通过物理模型研究层理倾角、隧道断面尺寸及结构面间距对破坏机制的影响,指出低应力条件下隧道稳定性受岩体结构与开挖几何参数控制显著。Liang 等[22]通过模型试验分析初期支护的实际受力性能,表明断层产状、围岩级别与埋深对隧道稳定性具有重要影响。

综上所述,现有研究多集中于一般地质条件,对含断层软弱围岩在动态开挖过程中的响应机制研究较少。本文以相山隧道为工程背景,基于 FLAC 3D 有限差分软件,建立含断层隧道三维数值模型,深入

研究动态开挖过程中围岩位移演化与塑性区分布规律,对比不同开挖工法对围岩稳定性的影响,为相关工程支护提供参考。

2. 工程概况

2.1. 地形与地貌

相山隧道位于相山山脉西北部,穿越区中心高程为 342.8 m,属剥蚀丘陵地貌。山体总体呈北北东走向,地势略有起伏,相对高差 30 m~144 m。区域基岩以碳酸盐岩夹碎屑岩为主,构造形态多为单斜地形。沿线岩溶地貌发育,可见溶沟、石芽等典型形态。地表基岩出露较好,主要岩性为寒武系中薄层白云质灰岩与泥质粉砂岩。第四系覆盖层主要分布于山体东侧斜坡及隧道出口丘谷地带,洞身段覆盖层极薄,可忽略不计,下伏基岩岩性复杂,以寒武系岩层为主体。

2.2. 地质条件

地质调绘与钻探结果表明,隧址区不良地质现象主要包括岩溶、人工采空区、危岩落石及断层破碎带。其中,桩号 DK6+123-DK6+230 段为岩溶强发育段,洞身围岩裂隙发育强烈、溶蚀现象显著,对隧道施工安全构成显著风险,易引发洞顶塌落、涌水、涌泥及支护结构悬空等灾害。

隧道围岩等级以IV、V级为主,长度分别为 450 m 和 686 m,其余为III级围岩。整体洞身稳定性一般。沿线穿越 5 处断层破碎带及褶皱构造,进口段因历史采石活动导致山体受损,造成 DK4+950-DK5+160 段形成浅埋隧道条件;出口段岩溶中等至强烈发育,地表冲沟发育,其下伏存在大型溶洞。相山断层为区域主干逆断层,断距 10 m~20 m,挤压带岩体破碎,西侧褶皱发育强烈。隧址范围内识别出背斜与向斜各 2 处。施工中需加强岩溶探查、实时稳定性监测与超前地质预报。

2.3. 水文条件

(1) 地表水

隧址区邻近萧滩新河,河床高程约 35 m,低于隧道底板高程(60 m),因此近期内地表水对隧道工程无直接影响。然而,隧道主体附近分布有一处落水洞,在雨季可能成为地表水优势下渗通道,对围岩产生潜蚀作用。

(2) 地下水

地下水类型以基岩裂隙水为主,主要接受大气降水补给。由于隧道位于第四系覆盖的平原区,土层渗透性良好,补给量较大,导致地下水径流交替强烈,对隧道开挖过程中的涌水风险具有显著影响。

3. 数值模拟

3.1. 模型建立

为深入研究含断层隧道在动态施工过程中的稳定性与围岩变形机理,本研究选取相山隧道典型软弱围岩段(桩号 DK5+160~DK5+210)作为研究对象,采用 FLAC 3D 数值分析软件建立三维计算模型。该段隧道埋深约 40 m,岩性复杂,节理发育,围岩等级为 V 级。模型尺寸设定为 70 m (X) × 30 m (Y) × 40 m (Z),其中 Y 方向为隧道掘进方向, X 方向为水平向, Z 方向为竖向。模型共计生成 50699 个单元与 9580 个网格节点。根据工程地应力场特征,模型侧压力系数取为 0.5。边界条件设置如下:模型底部约束 X、Y、Z 三个方向的位移;模型四周边界施加法向位移约束;模型顶部为自由表面,模拟实际地表条件。模型计算示意图与三维网格划分如图 1、图 2 所示。

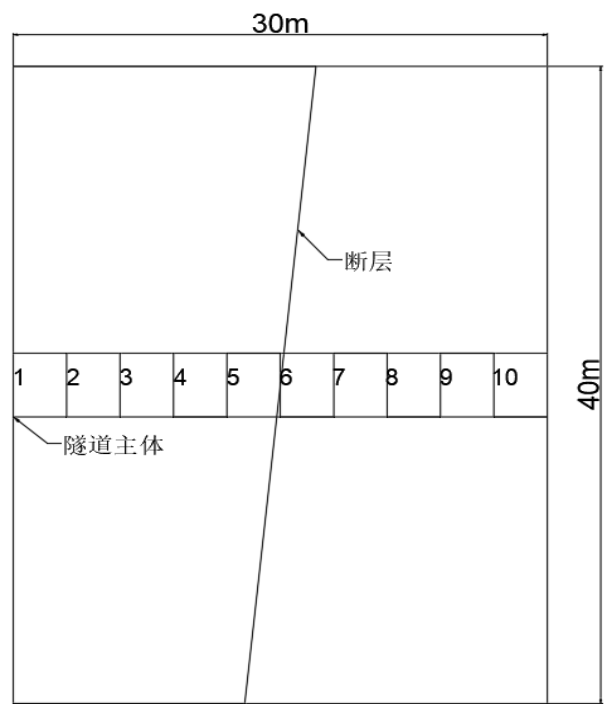


Figure 1. Diagram of calculation model
图 1. 模型计算示意图

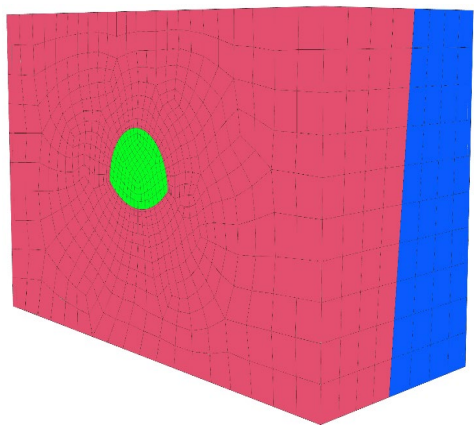


Figure 2. 3D calculation model diagram
图 2. 三维计算模型图

在该模型中，岩土体采取 Mohr-Coulomb 本构模型，采用 shell 壳单元命令模拟临时支护钢拱架以及隧道的初期锚喷支护，并将支护施工中的钢网混凝土等统一并入到壳体单元 shell 中，二次衬砌采用线弹性本构模型。岩土体及其衬砌结构物理力学参数如表 1 所示。

Table 1. Physical and mechanical parameters of materials
表 1. 材料物理力学参数

名称	密度	体积模量	剪切模量	粘聚力	内摩擦角
V 级围岩	2000 kg/m ³	1.5 GPa	0.563 GPa	0.1 MPa	25°

续表

断层	法向刚度	切向刚度	粘聚力	抗拉强度	内摩擦角
	20 MPa	20 MPa	0.1 MPa	0	15°
名称	密度	体积模量	剪切模量	弹性模量	泊松比
初次支护	2300 kg/m ³	11.7 GPa	8.75 GPa	21 GPa	0.2
衬砌	2600 kg/m ³	17.5 GPa	13.1 GPa	31.5 GPa	0.2

3.2. 开挖方法与监测点布设

隧道开挖工法的选择需综合考量断面尺寸、工程地质条件、环境控制要求及工期等因素。对于软弱围岩隧道，为控制围岩变形并确保施工安全，常采用台阶法、CD 法、CRD 法及双侧壁导坑法等分部开挖工法。本研究基于相山隧道工程实际地质条件与设计断面，为系统比较不同施工工法对围岩稳定性的控制效果，在数值模型中分别对全断面法、台阶法及 CD 法三种工法进行了模拟计算。各工法的数值模拟实施步骤如图 3 所示：

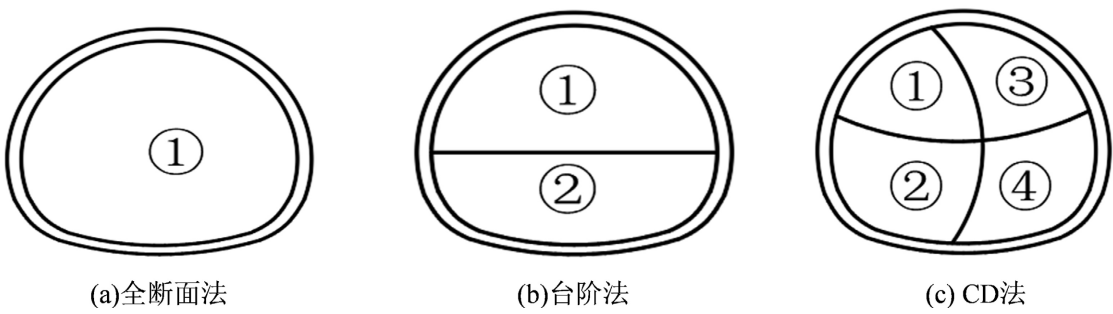


Figure 3. Excavation simulation diagram of different construction methods
图 3. 不同工法开挖模拟图

监测点示意图如图 4 所示：

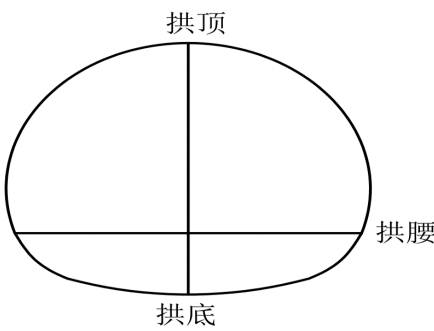


Figure 4. Diagram of monitoring point location
图 4. 监测点位置示意图

3.3. 模拟结果

3.3.1. 地表沉降

图 5 展示了随开挖进程的地表沉降曲线。从图中可以看出，地表沉降随开挖推进呈现典型的三阶段

变化规律：先行缓慢增长阶段、开挖通过时的急剧增大阶段以及后续趋于稳定的阶段。全断面法、台阶法、CD法对应的最终地表沉降值分别为 11.69 mm、10.54 mm 和 10.97 mm，差异并不显著。这表明在不同开挖工法对控制地表沉降的效果影响有限，这可能是因为地表监测点距隧道开挖区域有一定距离，使得不同工法引起的沉降差异被一定程度地抵消。从控制地表沉降的效果来看，全断面法引起的沉降最大，CD 法次之，台阶法最优。

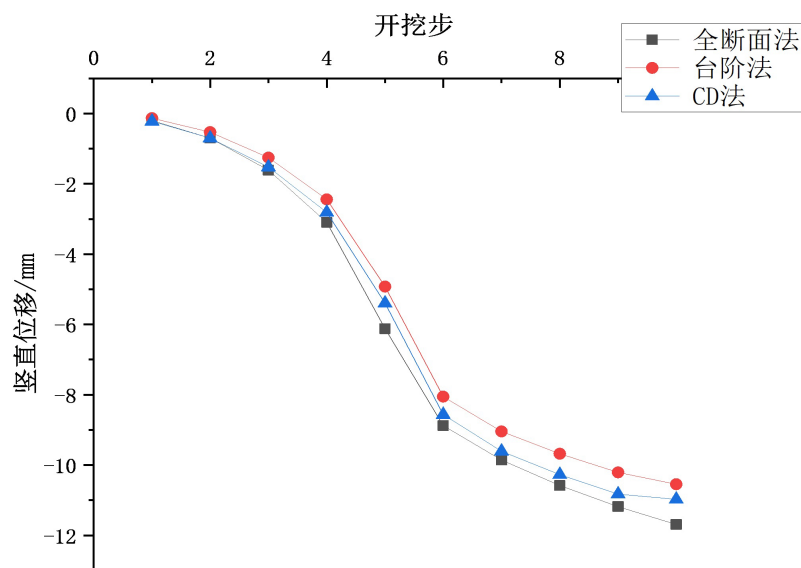


Figure 5. Surface subsidence map
图 5. 地表沉降图

3.3.2. 拱顶与拱底变形

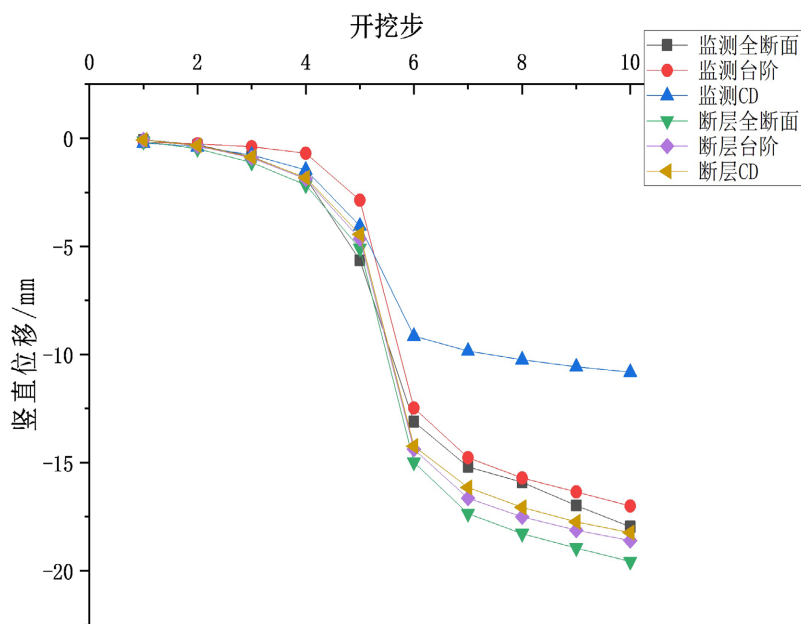


Figure 6. Settlement map of the arch at the fault and monitoring points
图 6. 断层处与监测点拱顶沉降图

图 6 与图 7 分别表示断层区与一般区域监测点的起伏曲线。不同工法下的断层区与一般区段的位移变化趋势基本一致。全断面法、台阶法与 CD 法施工下，断层区相较于一般区段的拱顶沉降值分别增大了 1.6 mm、1.6 mm 和 7.42 mm，仰拱隆起值分别增大了 2.71 mm、1.5 mm 和 1.77 mm。结果表明，受断层破碎带的软弱及易变形特性影响，该区段围岩的位移响应明显大于其他区段。此外，在断层影响区内，三种工法对控制竖向位移的效果差异相对较小，说明相较于施工工法选择，断层自身的不良工程地质特性对隧道稳定性的影响更为显著。综合对比位移结果与工程可行性，台阶法在控制隧道周边围岩变形方面表现相对较优。

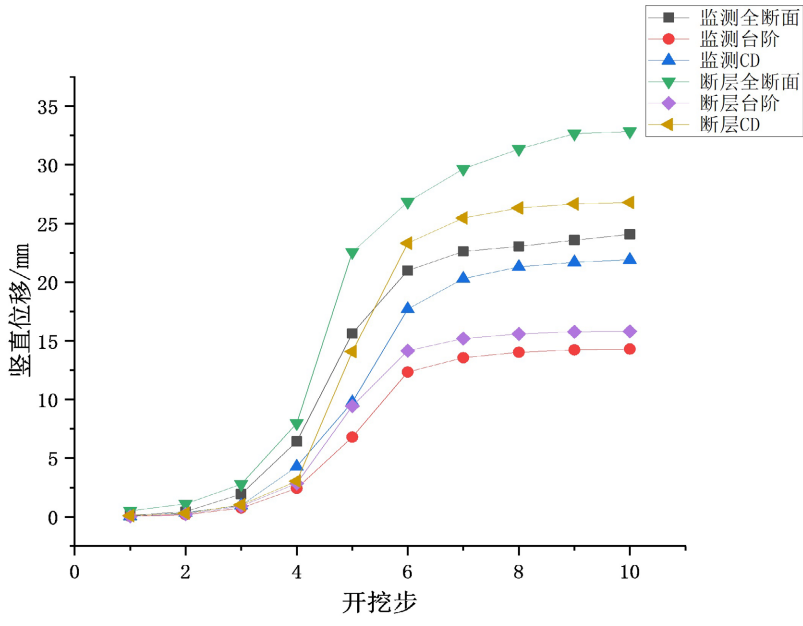
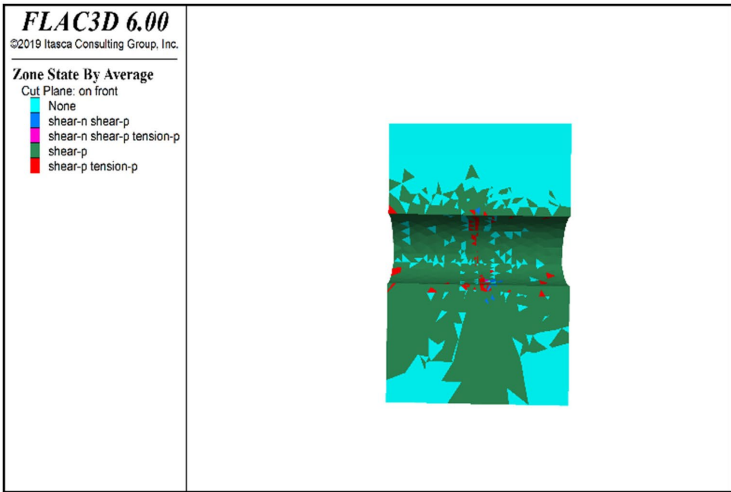


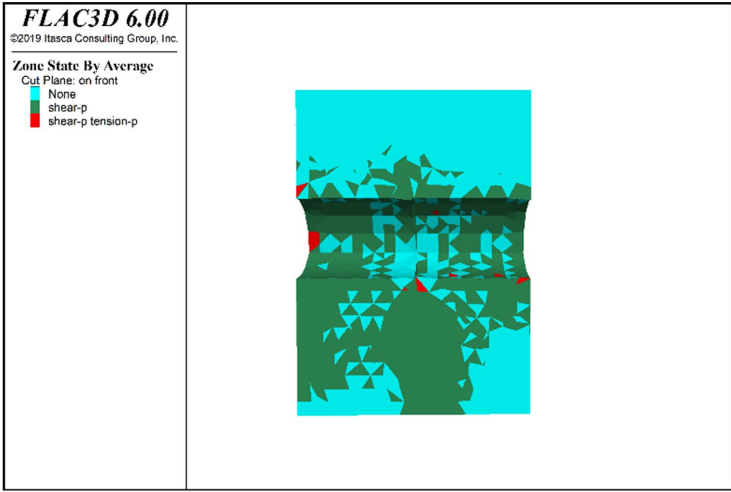
Figure 7. Map of uplift at the arch bottom of faults and monitoring points
图 7. 断层处与监测点拱底隆起图

3.3.3. 围岩塑性区

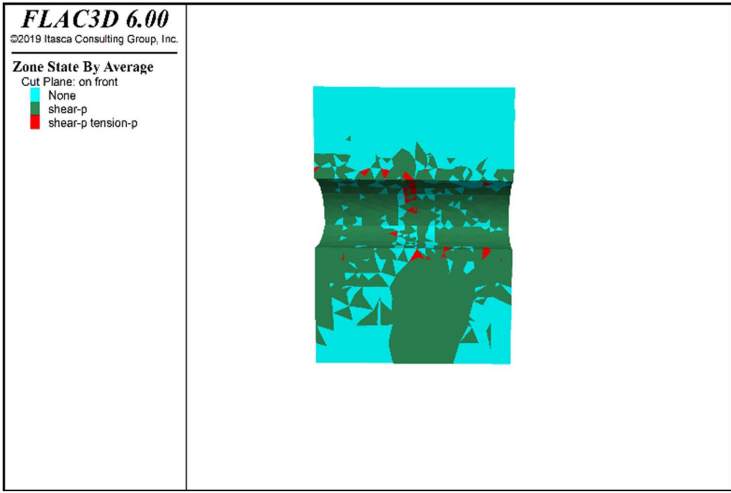
不同开挖工法对应的围岩塑性区分布如图 8 所示。通过对比分析可知，相较于全断面法，台阶法与 CD 法采用分步开挖方式，有效减小了对围岩的瞬时扰动，使塑性区得以逐步、可控地发展。在整个开挖过程中，台阶法所引发的塑性区范围最小，表现出更优的围岩稳定性控制效果。在断层影响区段，三种工法下隧道洞周均出现了显著的塑性区发育。如图 8(a)~(c)所示，洞室拱顶、拱肩及仰拱部位均出现拉伸破坏区，且开挖面前后方一定范围内也分布有规模不等的塑性区。其中，全断面法施工时塑性区分布范围最大，表明其对断层带围岩的扰动最为显著。结果表明，在穿越断层破碎带时，必须采取一系列的支护措施，并且优先选用分步数目较多、扰动较小的开挖工法，如台阶法、CD 法等，以有效保障施工期隧道的长期稳定性。



(a) 全断面



(b) 台阶法



(c) CD法

Figure 8. Longitudinal cross-section of plastic zone in different construction methods
图 8. 不同工法塑性区截面图

4. 结论

本文依托相山隧道工程实例,基于有限差分原理,采用FLAC3D软件建立了含断层软弱围岩隧道的三维数值模型,系统研究了全断面法、台阶法及CD法三种开挖工法在动态施工过程中对地表沉降、围岩位移及塑性区分布的影响规律,主要结论如下:

(1) 地表沉降位移随开挖进程呈现三阶段变化规律:未达到掌子面前的线性位移,掌子面附近的挤出位移,掌子面开挖后的后方位移。这三者对于不同工法的变化规律均相同:先行位移缓慢增加,挤出位移急速增大,后方位移缓慢增加至稳定。不同工法下的变化规律一致,表明开挖卸荷是围岩响应的内在机制。

(2) 在控制拱顶沉降方面,CD法因其中隔墙的临时支撑作用及分步开挖方式,限制了围岩松动范围,效果较好;在控制底板隆起方面,除台阶法外,其余工法隆起量均大于沉降量,表明底板更易发生回弹变形,施工中需高度重视并采取抑拱措施,防止底鼓破坏。

(3) 断层带附近围岩位移及塑性区范围显著大于一般区段,拱顶、边墙及仰拱均出现不同程度拉伸破坏。全断面法扰动最大,塑性区发育最广;台阶法分步开挖控制效果最优,塑性区范围相对最小。因此穿越断层时应采取加强支护、实时监测等针对性措施,防范局部失稳。

综合施工安全、变形控制、工期与经济效益,建议在类似含断层软弱围岩隧道工程中优先选用台阶法施工。

基金项目

中国铁路上海局集团有限公司科研项目(2024141, 2024140), 中铁十六局集团有限公司科技计划项目(K2023-6B)。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2024年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2025-04/28/content_7078128.htm, 2025-04-28.
- [2] 沈孟龙, 杨华清, 茶增云, 孙丹伟. 景海高速公路全-强风化花岗岩隧道塌方机理分析与处置[J]. 勘察科学技术, 2021(5): 21-25.
- [3] 张学文. 桃树坪隧道穿越富水粉细砂地层塌方处治施工技术[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(2): 308-315.
- [4] 罗治国, 张智健, 李勇森, 梁斌. 富水软弱围岩隧道塌方机理及治理措施[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 59-64, 7-8.
- [5] 郑仕跃, 周权峰, 张仁坤, 冯安治. 岩溶隧道突水灾害形成机制及风险评估研究进展[J]. 四川水泥, 2021(10): 313-314.
- [6] 邢军, 董小波, 贺晓宁. 断层破碎带内隧道施工围岩稳定性分析[J]. 灾害学, 2018, 33(S1): 164-168.
- [7] 穆兰, 胡宇庭. 隧道穿越富水断层围岩稳定性流固耦合研究[J]. 公路工程, 2017, 42(4): 108-113.
- [8] 罗虎. 炭质板岩软弱围岩隧道挤压变形规律及处理措施分析[J]. 价值工程, 2024, 43(8): 38-40.
- [9] 王永. 软弱围岩隧道变形规律及控制措施研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2023.
- [10] 程晓峰. 软弱围岩条件下CRD法隧道三维变形规律研究[J]. 上海公路, 2020(4): 53-55, 150.
- [11] 邢宇祺. 浅埋软弱围岩暗挖隧道超前变形规律及控制模型试验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [12] 樊万里. 软弱围岩隧道变形规律与施工要点分析[J]. 中国高新技术企业, 2016(27): 115-117.
- [13] 朱小明, 刘明. 断层角度对隧道纵向稳定性影响的数值模拟[J]. 徐州建筑技术学院学报, 2007(4): 17-19.
- [14] 梁宸, 张亚鹏, 曲龙, 刘泾堂, 杜耀辉. 裂隙围岩隧道塌方规律的数值模拟研究[J]. 土木工程, 2022, 11(3): 453-458.
- [15] 刘辉, 宋宏伟, 唐德康, 等. 断层间距对隧道纵向稳定性的影响[J]. 黑龙江科技学院学报, 2008(6): 447-450.

-
- [16] 陈鉴光, 张运良, 曹伟. 对软弱围岩隧道施工方法及施工工艺措施的探讨[J]. 公路工程, 2011, 36(4): 139-142.
 - [17] 武伯弢, 朱合华, 徐前卫, 等. IV级软弱围岩相似材料的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 109-116.
 - [18] 夏彬伟, 胡科, 卢义玉, 等. 深埋隧道层状岩体破坏过程特征模型试验[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 107-114.
 - [19] 陈浩, 任伟中, 李丹, 等. 深隧道围岩稳定性的数值模拟与模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 615-620.
 - [20] Sagong, M., Park, D., Yoo, J. and Lee, J.S. (2011) Experimental and Numerical Analyses of an Opening in a Jointed Rock Mass under Biaxial Compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **48**, 1055-1067. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.09.001>
 - [21] Moussaei, N., Sharifzadeh, M., Sahriar, K. and Khosravi, M.H. (2019) A New Classification of Failure Mechanisms at Tunnels in Stratified Rock Masses through Physical and Numerical Modeling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **91**, Article ID: 103017. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103017>
 - [22] Xiao, L., Xu, Z., Xiao, H., Zhang, Z., Wang, G. and Xu, Y. (2019) Electro-Mechanical Transient Modeling of MMC Based Multi-Terminal HVDC System with DC Faults Considered. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **113**, 1002-1013. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.06.003>