

不同开挖工法对相山隧道围岩稳定性影响研究

温希华

中国铁路上海局集团有限公司, 上海

收稿日期: 2026年1月27日; 录用日期: 2026年2月18日; 发布日期: 2026年2月28日

摘要

本文针对地质条件复杂的相山隧道, 采用三维有限元数值模拟方法, 系统研究了全断面法、台阶法及CD法三种常用开挖工法对围岩应力分布、支护结构受力及围岩稳定性的影响。研究表明: 不同工法下围岩主应力分布均呈对称形态, 对称轴为隧道中心线, 拱腰与拱脚区域为应力集中关键部位; CD法在控制拱顶与拱腰围岩应力方面效果显著, 全断面法则在拱脚处应力集中程度较低; 支护结构分析显示, 断层区域应力响应强烈, 全断面法在断层处应力增幅最大(拱顶53.27%, 拱底30.67%), CD法表现最优。研究结论可为类似地质条件下隧道开挖工法选择、支护设计与施工控制提供理论依据与工程参考。

关键词

隧道工程, 开挖工法, 围岩稳定性, 应力分析, 数值模拟, 支护结构

Study on the Influence of Different Excavation Methods on the Stability of Surrounding Rock in Xiangshan Tunnel

Xihua Wen

China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Shanghai

Received: January 27, 2026; accepted: February 18, 2026; published: February 28, 2026

Abstract

This paper focuses on Xiangshan Tunnel, which is characterized by complex geological conditions. Using three-dimensional finite element numerical simulation, the study systematically investigates the effects of three common excavation methods—full-face method, bench-cut method, and CD method—on the stress distribution of surrounding rock, the mechanical response of the supporting structure, and the stability of the surrounding rock. The results indicate that under different

excavation methods, the principal stress distribution in the surrounding rock exhibits a symmetrical pattern, with the tunnel centerline as the axis of symmetry. The haunch and arch foot regions are identified as key areas of stress concentration. The CD method proves particularly effective in controlling stress at the vault and haunch, while the full-face method results in relatively lower stress concentration at the arch foot. Analysis of the supporting structure reveals a strong stress response in fault zones, with the full-face method showing the highest stress increase in these areas (53.27% at the vault and 30.67% at the invert), whereas the CD method performs the best overall. The findings of this study provide a theoretical basis and practical reference for the selection of excavation methods, the design of support structures, and construction control in tunnels under similar geological conditions.

Keywords

Tunnel Engineering, Excavation Methods, Surrounding Rock Stability, Stress Analysis, Numerical Simulation, Support Structures

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

隧道工程在交通、水利、市政等领域具有重要地位,其施工过程中的围岩稳定性直接关系到工程安全、经济效益与社会影响。在我国隧道工程所面临的诸多问题中,软弱围岩隧道施工问题尤为突出,常由于地质环境等因素造成施工进度、施工安全问题。例如拉萨-林芝公路某隧道在穿越多条断层破碎带时,发生了突水、突泥及塌方等地质灾害[1];贵州某隧道由于洞身位于断层带内,围岩破碎、自稳能力差,出现了大规模涌水与突泥[2]。围岩等级较差的V、VI级围岩隧道发生突水、塌方等事故的案例比比皆是。针对软弱的围岩状态以及复杂的地质情况,采取不同的开挖方法、地质勘测手段及支护方案能有效减少灾害发生的概率,因此,开展含断层软弱围岩开挖稳定性的系统研究具有重要的理论与工程意义。

目前对软弱围岩的研究主要依托室内试验、数值模拟等多种方法[3]-[8]。朱小明[9]运用有限差分软件FLAC3D进行了隧道稳定性分析,通过设置不同断层角度,以应力及位移作为关键评估指标,揭示了断层角度对隧道稳定性具有显著影响,并发现稳定性随倾角减小而恶化。Parter等人为了模拟节理对隧道开挖的影响,设定了无滑移、滑移等四种接触模式,通过模拟断层在岩体中的分布,进行了大量模拟实验,重点关注断裂破碎带对隧道开挖的影响。

在室内试验方面,李先彬[10]基于超前地质预报与现场地质勘查,对软弱围岩隧道实施了系统监测,通过分析地表沉降、拱顶沉降及水平收敛等数据,总结其变化规律,为类似工程提供了参考。Myung等[11]建立了物理模型,探讨层理倾角、隧道断面尺寸及结构面间距对隧道破坏机制的影响,指出低应力条件下隧道稳定性主要受岩体结构与开挖几何形态的控制,并借助图像分析将隧道周边划分为稳定区、塌陷区与屈服区三个区域。

总的来说,目前对含断层软弱围岩在不同开挖工法下的动态响应机制研究较少。相山隧道穿越区域地质构造复杂,断层发育,围岩条件较差,开挖过程中易引发应力重分布、围岩松弛甚至坍塌等工程问题。选择适宜的开挖工法对控制围岩变形、优化支护结构受力状态至关重要。为此,本文依托相山隧道工程背景,建立三维有限元模型,系统模拟三种开挖工法施工全过程,从围岩应力场与支护应力两个维

度开展对比分析，以揭示不同工法对围岩稳定性的影响机制，为类似工程提供优选方案与加固建议。

2. 模型建立

本文采用 FLAC3D 软件进行数值模拟，以相山隧道工程 DK5+160~DK5+210 段的软弱围岩为研究对象，结合工程地质资料，探讨含断层隧道在动态开挖过程中的稳定性及变形特征。隧道断面采用三心圆拱形式，建模时首先在 Rhino 软件中构建几何模型，借助 Griddle 进行网格划分并导出，随后将网格导入 FLAC3D 中进行计算，最终完成后处理与数据分析工作。

所选隧道段埋深约 40 m，岩层出露明显，岩性复杂，节理较为发育，围岩等级为 V 级。为便于计算，对模型进行了合理简化。依据弹塑性理论，隧道开挖的影响范围一般为洞径的 3~5 倍，因此确定模型尺寸为 70 m (X 向) × 30 m (Y 向) × 40 m (Z 向)，其中 Y 向为隧道掘进方向，X 向为水平方向，Z 向为竖直方向。模型仅考虑自重应力场作用，竖向均布荷载设为 0.4 MPa，侧压力系数取 0.5，故水平应力均为 0.2 MPa。计算模型共计单元 50,699 个，节点 9580 个。结合工程地质勘探资料，设置模型围岩物理力学参数以及断层物理力学参数如表 1 和表 2 所示。

Table 1. Table of parameters of surrounding rock

表 1. 围岩物理力学参数表

围岩等级	密度	体积模量	剪切模量	粘聚力	抗拉强度	内摩擦角
V 级	2000 kg/m ³	1.5 GPa	0.563 GPa	0.1 MPa	0.16 MPa	25°

Table 2. Table of physical and mechanical parameters of faults

表 2. 断层物理力学参数表

名称	法向刚度	切向刚度	粘聚力	抗拉强度	内摩擦角
断层	20 MPa	20 MPa	0.1 MPa	0	15°

3. 数值模拟结果分析

3.1. 模型工况

实际工程中，隧道开挖工法选择要具体依据断面大小，工期，地质条件等一系列条件综合考虑确认。目前应对软弱围岩隧道开挖的方法有台阶法，CRD 法，双侧壁导坑法等。依据相山隧道实际情况，本次模型采用了三种不同工法包括全断面法，台阶法，CD 法进行模拟分析对比。

3.2. 围岩应力场分析

不同工法所受开挖至稳定后在监测处断面 $y = 15$ 处的最大主应力与最小主应力云图如图 1 所示。

通过分析图 1，表 3，表 4 可以得知：

(1) 不同工法的隧道，应力分布的规律是基本相同的，其围岩的最大主应力云图与最小主应力云图均呈现左右对称的状态，并且对称轴为隧道中心轴线。

(2) 三种施工方法下，隧道拱腰及其拱脚处的应力集中现象较为明显，尤其是拱脚处应力最为集中。所以对于初期支护而言，在隧道的拱腰处可能会承受较大的荷载而导致应力集中，所以在实际施工中应该防止拱腰以及拱脚部位的初期支护发生压裂破坏。

(3) 对于不同工法而言，对于拱顶和拱腰处的压应力而言，全断面法大于台阶法大于 CD 法。但是对于拱脚而言，CD 法的压应力最大。

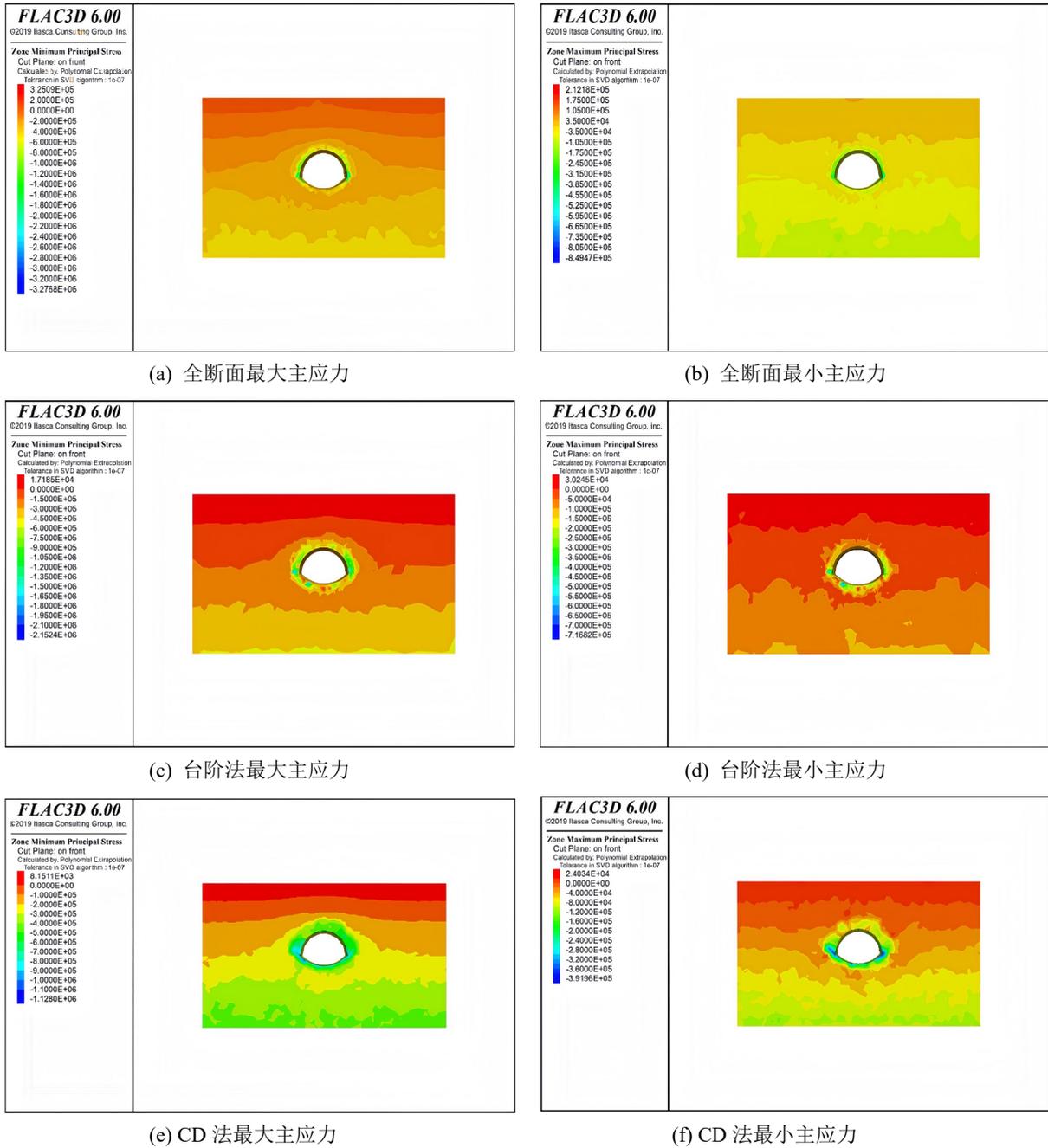


Figure 1. Main stress cloud map of surrounding rock size
图 1. 围岩大小主应力云图

Table 3. Maximum compressive stress table for surrounding rock (unit: MPa)
表 3. 围岩最大压应力表(单位: MPa)

开挖方式	拱顶	增大幅度	拱腰	增大幅度	拱脚	增大幅度
全断面	-0.57	54.05%	-1.08	9.09%	-0.93	/
台阶法	-0.54	45.95%	-1.06	7.07%	-1.7	82.79%
CD 法	-0.37	/	-0.99	/	-2.09	124.73%

Table 4. Major and minor principal stress of surrounding rock (unit: MPa)
表 4. 围岩大小主应力表(单位: MPa)

不同工法	全断面	台阶法	CD 法
最大主应力	-1.13	-2.15	-3.28
最小主应力	0.024	0.03	0.21

Table 5. Maximum compressive stress table for supporting structure (unit: MPa)
表 5. 支护结构各部位最大压应力表(单位: MPa)

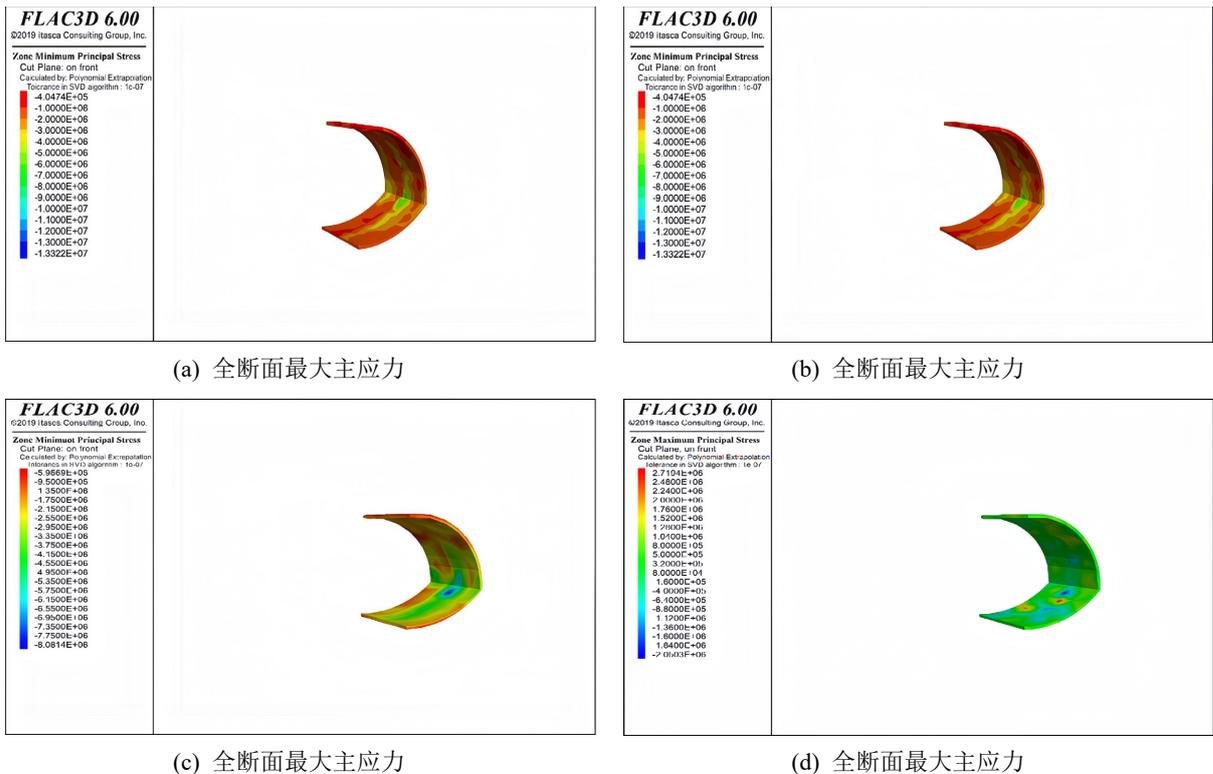
不同工法	监测处拱顶	断层处拱顶	增大幅度	监测处拱底	断层处拱底	增大幅度	拱腰
全断面	-1.07	-1.64	53.27%	-2.38	-3.11	30.67%	-6.41
台阶法	-1.29	-1.55	20.16%	-1.86	-2.12	13.98%	-5.59
CD 法	-0.56	-0.63	12.50%	-1.74	-2.02	16.09%	-4.66

Table 6. Major and minor principal stress of supporting structure (unit: MPa)
表 6. 支护结构大小主应力表(单位: MPa)

不同工法	全断面	台阶法	CD 法
最大主应力	-13.3	-8.08	-9.90
最小主应力	6.79	3.07	4.01

3.3. 支护应力分析

分别模拟三种工法，施作二次衬砌后大小主应力图，结果如图 2 所示。



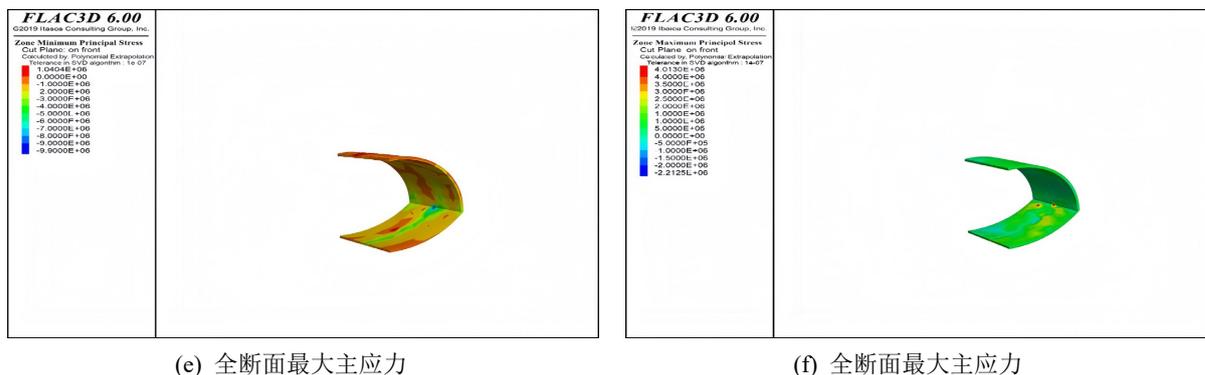


Figure 2. Main stress cloud map of support structure size
图 2. 支护结构大小主应力云图

结合上述的图 2 与表 5, 表 6 可知道:

(1) 三种不同的施工方法, 均在拱脚处出现了应力集中的现象, 并且是全断面大于 CD 法大于台阶法, 在施工时, 应该对此处采取加固措施。

(2) 对于断层处拱顶或者拱底而言, 其衬砌所受的应力均比监测处的应力值大, 并且拱底所受的应力均大于拱顶。并且采用全断面法施工的应力增大幅度最大, 说明对含有断层处的隧道采用全面法施工最为不利, 极易容易发生灾害, 台阶法次之, CD 法最好。

4. 结论

本研究依托相山隧道工程案例, 采用 FLAC 3D 进行数值分析, 通过系统对比全断面法、台阶法及 CD 法三种开挖工法在围岩应力与支护受力方面的差异, 揭示了不同工法对围岩稳定性的影响机制, 主要结论如下:

(1) 不同开挖工法下围岩主应力分布均呈对称性, 拱腰与拱脚为应力集中关键部位, 施工中应加强监测与支护。

(2) CD 法在控制拱顶与拱腰围岩应力方面效果最优, 但拱脚处应力集中显著, 需采取针对性加固措施。

(3) 综合围岩与支护应力响应, 建议在类似相山隧道的地质条件下优先选用 CD 法, 并结合台阶法优化施工步骤, 重点加强拱脚与断层区域的支护设计。

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] 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.
- [2] 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.
- [3] 史芳, 薛晓辉. 铁路隧道软弱围岩破坏模式离散元分析[J]. 国防交通工程与技术, 2014, 12(2): 46-50.
- [4] 许建武, 文熠, 黄赞华. 基于有限差分法软弱围岩偏压隧道动态开挖数值分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011, 7(4): 196-201.
- [5] 张志强, 关宝树. 软弱围岩隧道在高地应力条件下的变形规律研究[J]. 岩土工程学报, 2000(6): 696-700.
- [6] 关宝树. 软弱围岩隧道变形及其控制技术[J]. 隧道建设, 2011, 31(1): 1-17.

- [7] 郑大伟. 浅埋软弱围岩公路隧道施工技术[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(24): 49-51.
- [8] 唐颖. 公路隧道软弱围岩施工方法的探讨[J]. 现代隧道技术, 2007(4): 67-72.
- [9] 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.
- [10] 李先彬, 舒志乐. 大断面软岩隧道施工监测分析与应用[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2019, 38(3): 12-18.
- [11] 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>