

不同开挖方式下挤压性围岩隧道 变形演化规律研究

吴楠

(广西科技大学 土木建筑工程学院, 广西 柳州 545005)

摘要: 高地应力环境下,隧道开挖面易发生显著的挤压性围岩大变形,容易诱发隧道塌方、结构压溃、仰拱隆起等安全事故,合理的开挖方式对于确保隧道施工安全至关重要。为探究挤压性围岩隧道合理的开挖方式,采用室内三轴试验研究挤压性围岩的力学本构关系,并通过数值模拟和现场实测对比分析三种开挖方式下挤压性围岩隧道的变形规律。结果表明:挤压性围岩的力学特性与其所受围压密切相关,不同围压条件下,力学参数差异较大。单次开挖断面越小,对围岩的扰动范围越小,也能够有效降低围岩应力重分布的程度。弧形导坑三台阶七步流水开挖方法既可有效控制隧道变形,又能提升开挖效率,为最佳开挖方式。

关键词: 挤压性围岩;室内试验;大变形;数值模拟;现场实测

中图分类号: U451.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)02-0184-07

Deformation Evolution Law of Squeezing Surrounding Rock Tunnel Under Different Excavation Methods

WU Nan

(School of Civil Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545005, China)

Abstract: Under high ground stress environment, the tunnel excavation face is prone to significant large deformation of squeezing surrounding rock, which is easy to induce safety accidents such as tunnel collapse, structural crushing and inverted arch uplift. Reasonable excavation methods are crucial for ensuring the safety of tunnel construction. In order to explore the reasonable excavation method of squeezing surrounding rock tunnel, the mechanical constitutive relationship of squeezing surrounding rock is investigated by indoor triaxial test, and the deformation law of squeezing surrounding rock tunnel under three opening modes is analyzed by numerical simulation and field measurement. The results show that the mechanical properties of the squeezed surrounding rock are closely related to the confining pressure. Under different confining pressure conditions, the mechanical parameters are quite different. The smaller the single excavation section is, the smaller the disturbance range of surrounding rock is, and the degree of stress redistribution of surrounding rock can be effectively reduced. The three-bench seven-step flow excavation method of the arc guide pit can not only effectively control the tunnel deformation, but also improve the excavation efficiency, which is the best excavation method.

Keywords: squeezing rocks; laboratory test; large deformation; numerical simulation; field test

随着经济与科学技术的快速发展,我国隧道工程的建设突飞猛进。隧道工程的规模和难度也在不断增加,尤其是在西部山区等地质复杂、地应力高的地区,隧道建设面临的技术挑战日益突出。隧道建

设的长、大、深、难等特点,使得隧道在修建和运营中需要应对许多复杂的工程技术难题,其中高地应力软岩引起的隧道挤压性大变形问题尤为突出^[1]。现有研究表明,隧道在高地应力和软弱岩体的共同作用

下,容易诱发围岩挤压性大变形,不仅会影响隧道的安全性和使用寿命,还会增加施工难度和成本^[2-5]。

因此,深入研究挤压性大变形的发生条件、变形预测、支护措施和开挖方法等,对隧道工程的安全高效施工具有重要意义。为了有效控制和预测挤压大变形,研究者们进行了大量的理论分析、数值模拟、现场监测等多方面的探索。Manasa 等^[6]通过数值模拟分析了三种不同断面形状的挤压性围岩隧道在不同原岩应力和岩体特性下的力学行为。Ketan 等^[7]通过室内试验研究了挤压性围岩隧道开挖过程中瞬时应力释放率对岩石损伤和变形的影响规律。Arora 等^[8]基于隧道参数、围岩力学特性,提出了一种能够预测挤压性围岩隧道挤压程度的理论方法。杨斌等^[9]通过数值模拟研究了单、双线铁路隧道不同变形等级条件下较为合理的断面形式。开挖方法对于隧道的扰动程度会产生很大的影响^[10-14],针对不同开挖方法诸多学者对其进行了研究。李坤^[15]利用数值模拟研究了三导洞法和中导洞法施工阶段地层的变形规律、特点及成因。韩亚兵^[16]通过现场实测分析了 CRD 法、双侧壁法、预留核心土开挖法等软岩隧道施工中的应用效果。李兴安^[17]利用数值模拟研究了 CD 法和三台阶七步开挖法下松散围岩隧道的变形特征。孙引浩^[18]通过数值模拟研究了大跨度变截面隧道不同施工方法对隧道稳定性的影响规律。文旭卿等^[19]针对大断面隧道,采用数值模拟的方法研究了三台阶七步开挖法和 CD 法对拱顶变形与地表沉降的影响规律。温江涛^[20]通过数值模拟研究了 V 级围岩浅埋隧道中,CRD 工法和三台阶法两种施工方法的隧道变形规律及地表沉降规律。

现有研究大多采用数值仿真软件中自有的本构模型,不能完全适应复杂地质条件问题,本文依托国内某挤压性围岩公路隧道,拟通过室内三轴试验研究隧址区围岩的力学特性,开发适应挤压性围岩隧道的本构关系,并利用数值模拟和现场实测研究三种施工方法下隧道的变形与支护结构的受力规律,以期对挤压性围岩隧道施工提供参考。

1 隧道地层岩性特征

本文以国内某单洞双线隧道为背景,该隧道穿越以恒山山脉为主干的构造侵蚀、剥蚀基岩山区地貌,主山脊走向为北东南向西。隧道围岩岩性复杂多变,据物探结果,IV、V 级围岩节理裂隙发育,大多呈散体状结构。正洞 V 级围岩除浅埋黄土夹漂石段

外,均为大型断层破碎带,充填大量断层角砾、断层泥、碎裂岩,遇水易软化。

隧道埋深大于 400 m 的地段约占 60%,埋深大于 500 m 的地段约占 30%。钻孔采用水压致裂法地应力实测结果显示:隧道埋深位置最大水平主应力在 15.0 MPa~15.3 MPa 之间,取 15.15 MPa;最小水平主应力在 8.0 MPa~12.0 MPa 之间,取 10.0 MPa;垂直主应力(中间主应力)在 10.2 MPa~12.5 MPa 之间,取 12.35 MPa。经过坐标变换后,求得垂直隧道走向的水平构造应力为 12.75 MPa,平行隧道走向的水平构造应力为 14.25 MPa,自重应力 12.5 MPa,即垂直隧道走向的最大地应力为 12.75 MPa。岩石单轴抗压强度 25 MPa,可得强度应力比为 1.96,小于 2,依据法国隧协、日本应用地质协会、前苏联顿巴斯矿区标准,判定为高地应力挤压性围岩;依据我国《工程岩体分级标准》(GB50218)判定为极高地应力挤压性围岩。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

隧址区围岩岩性主要为片麻岩,岩样取自 V 级围岩区间,通过将采集回的岩样剖切、钻孔取芯、打磨等工序最终得到所需试样。试样加工标准参照《工程岩体试验方法标准》和《水利水电工程岩石试验规程》中的相关规定进行,将钻孔岩心加工成尺寸为直径 50 mm、高度 100 mm 的标准圆柱形试件,并打磨试样,将试样端面尺寸误差均控制在 0.5% 以内,同时要保证试件的两端面平行度、平整度以及圆柱面的光滑度均满足试验要求,试样选取颗粒度均匀及杂质成分分布均匀的试样进行试验。

2.2 试验方法

试验设备采用岩石力学试验系统进行三轴加载试验,以评估岩样在不同工况下的力学行为,三轴压缩试验工况见表 1。试验流程包括每次初步进行两个样本的测试,如果两次试验结果的离散性较大,则会补充一组额外试验。为确保准确的变形测量,使用引伸计对试验过程中岩样的轴向和环向变形进行监测。采用分阶段的加载方法进行岩样测试,以仔细观察其不同应力状态下的破坏行为及后续反应。具体加载过程包括两部分:首先,以 0.1 MPa/s 的速率施加静水压力至目标值,保持围压不变,然后以 0.02 mm/s 的位移速率施加轴向荷载,直到岩样发生破坏。破坏发生后,围压仍保持不变,并继续以 0.02 mm/s 的速率施加轴向荷载,直至轴向应力不

再降低。

表 1 不同围压条件下岩样常规三轴压缩试验工况

工况序号	岩样岩性	围压/MPa
1	片麻岩	0
2		5
3		10
4		20
5		30

2.3 试验结果与分析

隧道不同围压岩样三轴压缩试验全应力-应变曲线如图 1 所示,从图 1 可以看出,不同围压条件下,岩样的力学特性差异较大。总结得到不同围压围岩力学参数,数据汇总见表 2。

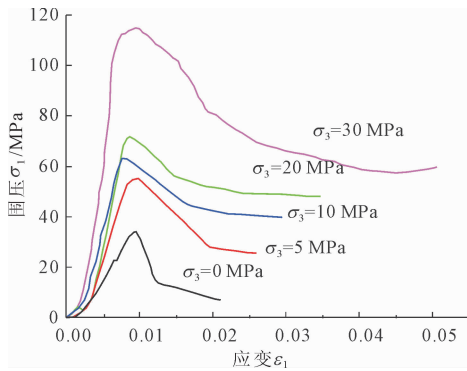


图 1 不同围压下岩样三轴压缩试验全应力-应变曲线

表 2 不同围压条件下岩样常规三轴试验参数表

工况序号	围压 /MPa	峰值应力 /MPa	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ	黏聚力 c /MPa	摩擦角 φ /($^{\circ}$)
1	0	63.1	10.27	0.34	11.00	52.8
2	5	92.0	11.55	0.36	17.95	37.3
3	10	105.0	12.53	0.34	23.20	28.8
4	20	130.7	14.34	0.32	30.25	21.5
5	30	150.0	16.34	0.33	38.70	15.7

基于表 2 中力学参数与围岩压力等数据,对弹性模量、泊松比等参数随围压的变化规律进行拟合,可得以下参数的计算公式。

(1) 弹性模量:不同围压条利用 Origin 软件对隧道岩样三轴压缩试验计算的弹性模量与围岩压力的数据进行非线性拟合,并建立了岩样弹性模量随围压变化的计算表达式为:

$$E = A_E(\sigma_3 + 1)^{B_E} \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量,MPa; A_E 、 B_E 为力学模型中待定系数,与岩性有关; σ_3 为围压,MPa。

(2) 泊松比:对岩样三轴压缩试验计算的泊松

比与围岩压力试验数据进行拟合,围压因素对板岩泊松比敏感性较差,随围压增加,岩样泊松比变化不存在明显变化,计算时把泊松比当作常数,取试验数据均值 0.35 即可。

(3) 黏聚力:利用围压及各围压对应的弹性阶段峰值应力绘制莫尔圆,利用麦夸特法(Levenberg Marquardt)方法进行数据拟合,得到非线性的摩尔-库仑破坏包络线,选取典型围压对应的瞬时摩擦角及瞬时黏聚力进行进一步拟合。不同岩性条件下围压与黏聚力变化曲线结果,根据拟合结果,得出了岩样瞬时黏聚力随围压变化计算表达式为:

$$c = A_c(\sigma_3 + 1)^{B_c} \quad (2)$$

式中: A_c 、 B_c 为力学模型中待定参数,与岩性有关, A_c 取 8.89, B_c 取 0.42。

(4) 摩擦角:通过上文的岩样三轴压缩试验计算得到的摩擦角与围岩压力的两组数据,利用 Origin 软件进行拟合得到非线性方程,得到瞬时摩擦角随围压变化计算表达式为:

$$\varphi = A_\varphi - B_\varphi \ln(\sigma_3 + C_\varphi) \quad (3)$$

式中: A_φ 、 B_φ 、 C_φ 为力学模型中待定参数,与板岩岩性有关。

参数选取如表 3 所示。

表 3 岩样摩擦角随围压变化力学模型待定参数取值

板岩岩性	A_φ	B_φ	C_φ
片麻岩(天然含水率)	56.98	12.31	0

以摩尔-库仑本构模型为基础,通过 FISH 语言在 FLAC3D 中实现本构模型的二次开发,以便后续计算的准确性。

3 数值模拟

3.1 计算模型及参数

为减小模型边界效应,各边界距隧道轴线距离按 5 倍洞径考虑,模型尺寸均为 100 m × 100 m × 90 m。三种施工方法的模型、台阶参数和施工顺序如图 2 所示。侧面和底部边界采用位移边界条件,顶部则采用应力边界条件以模拟隧道的埋深情况。支护结构参数如表 4 所示。

表 4 计算采用的材料物理力学参数

项目	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 /MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	泊松比	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa
C25 喷射混凝土	22.0	1.75	60	0.2	23.95	18.0

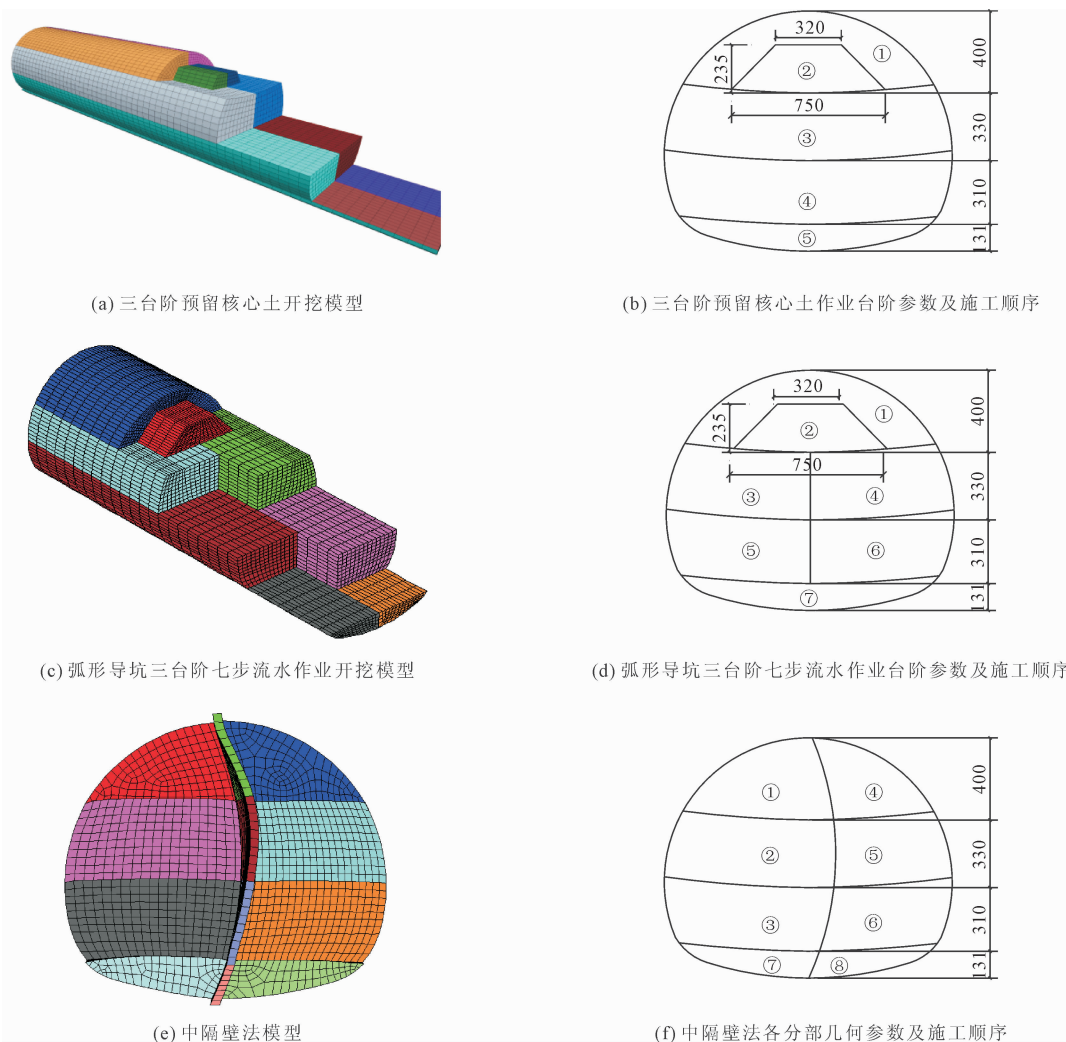


图 2 数值模型及台阶参数(单位:cm)

3.2 围岩变形比较

三种开挖方法隧道围岩变形曲线如图 3—图 5 所示。

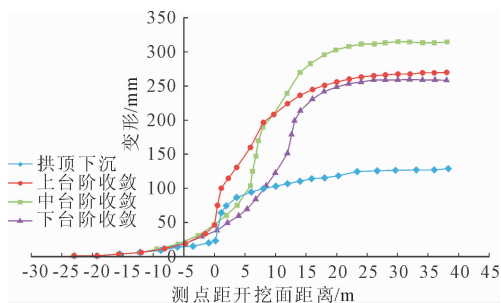


图 3 三台阶预留核心土开挖围岩变形曲线

对于拱顶沉降量,三台阶预留核心土法引起的下沉最大,达到 127 mm;其次是弧形导坑三台阶七步流水开挖法,下沉为 108 mm;最后是中隔壁法,下沉最小,为 9 mm。对于水平收敛变形:三台阶预留

核心土开挖法引起的水平收敛变形最大,达到 316 mm;弧形导坑三台阶七步流水开挖法次之,水平收敛变形为 288 mm;而中隔壁法引起的水平收敛变形最小,为 254 mm。中隔壁法是三者中变形最为平稳的,说明中隔壁法通过设置中隔壁,可以有效地分割隧道的开挖面,从而控制地压对隧道开挖的影响,减少围岩的挤压作用。

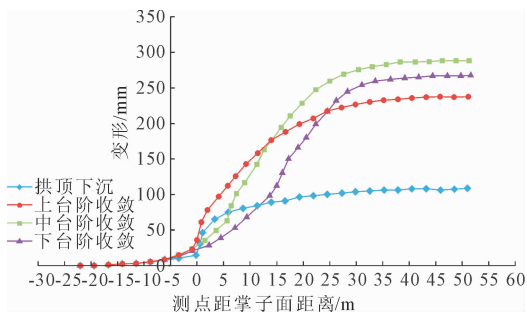


图 4 弧形导坑三台阶七步流水作业法开挖围岩变形曲线

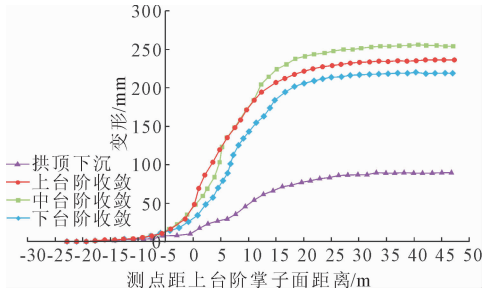


图 5 中隔壁法开挖围岩变形曲线

3.3 支护结构受力比较

三种开挖方法的支护结构应力分别如图 6—图 8 所示。在三种不同的开挖方法中,衬砌主要承受了压力。中隔壁法的最小主应力是最大的,达到了 29.5 MPa;弧形导坑三台阶七步流水开挖法的最小主应力次之,为 26.0 MPa;而三台阶预留核心土法的最小主应力相对较低,为 25.5 MPa,后 2 种方法衬砌受力更加均匀;最大主应力分布状态为:中隔壁法最大主应力为拉应力,大小为 0.8 MPa,弧形导坑三台阶七步流水作业法和三台阶预留核心土开挖法最大主应力为压应力,大小分别为:1.4 MPa 和 1.8 MPa。对比三种开挖方法,在考虑围岩变形情况、施工便利和开挖效率等因素后,采用弧形导坑三台阶七步流水法进行开挖,是较为合适的选择。

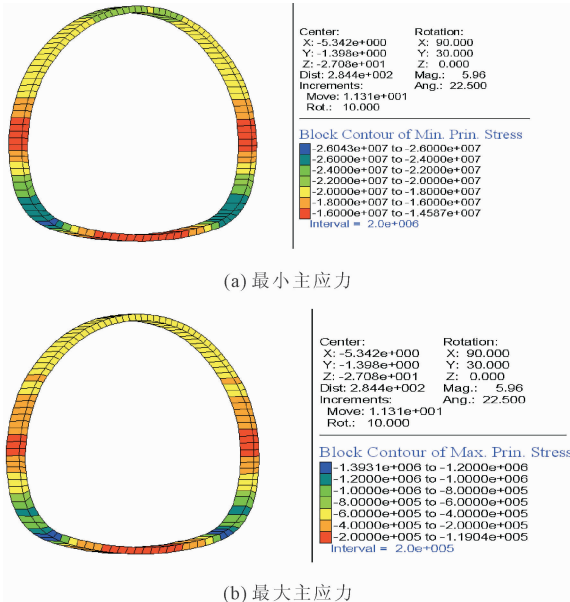
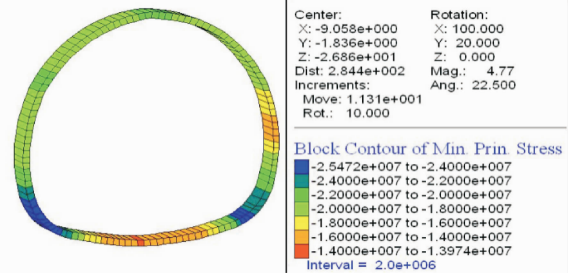


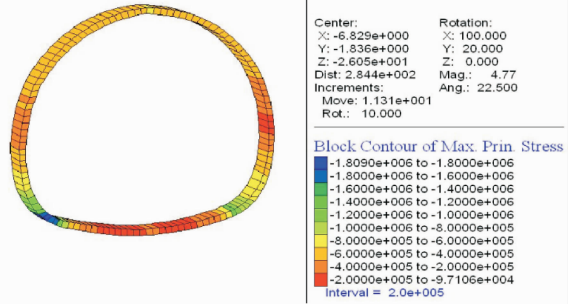
图 6 弧形导坑三台阶七步流水作业支护结构应力(单位:Pa)

4 现场实测隧道变形

隧道变形监测包括拱顶下沉测量及洞周净空收



(a) 最小主应力



(b) 最大主应力

图 7 三台阶预留核心土开挖支护结构应力(单位:Pa)

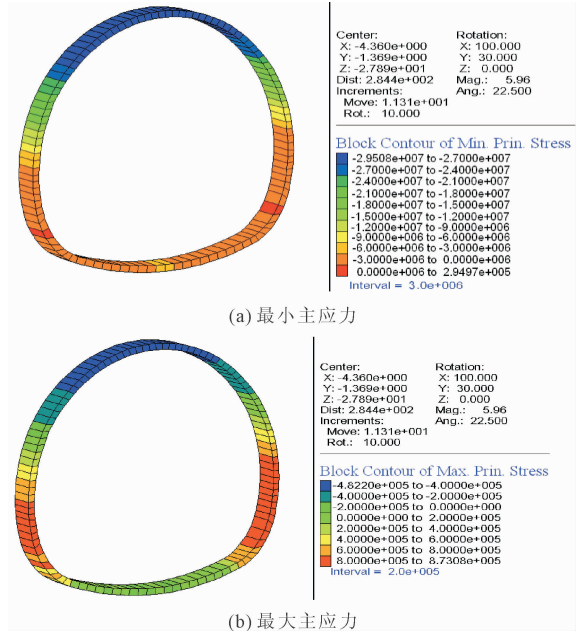


图 8 中隔壁法支护结构应力(单位:Pa)

敛测量两部分内容,围岩变形监测点布置如图 9 所示,三种开挖方法变形监测结果如图 10—图 12 所示。对于拱顶沉降量,三台阶预留核心土法引起的拱顶下沉最大,达到 242 mm;其次是弧形导坑三台阶七步流水开挖法,下沉为 238 mm;最后是中隔壁法,下沉最小,为 168 mm。对于水平收敛变形:三台阶预留核心土引起的水平收敛变形最大,达到 161 mm;弧形导坑三台阶七步流水开挖法次之,水平收

敛变形为 141 mm;而中隔壁法引起的水平收敛变形最小,为 79 mm,即中隔壁法对围岩变形的控制效果最好,此外从监测结果中可以看出,中隔壁法的围岩变形趋势较其他两种方法更为平稳,监测结果与数值模拟的规律基本一致。

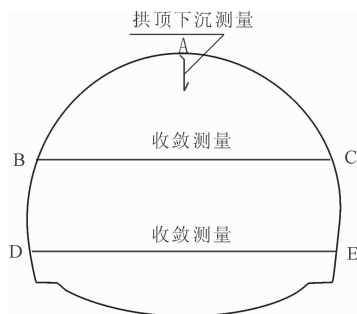


图 9 测点布置

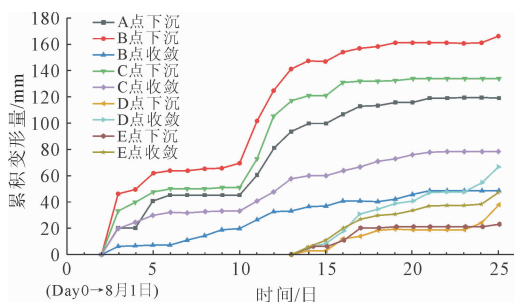


图 10 三台阶预留核心土开挖围岩变形

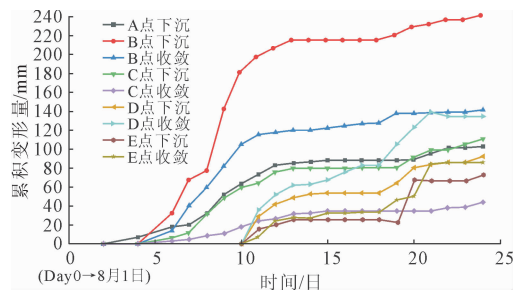


图 11 弧形导坑三台阶七步流水作业开挖围岩变形

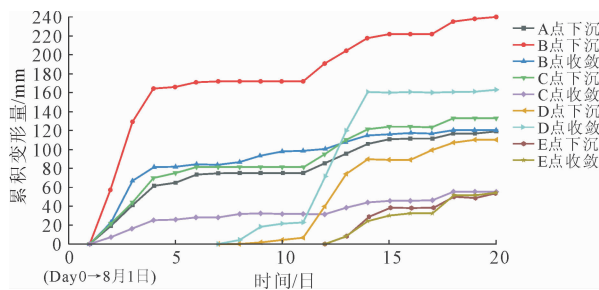


图 12 中隔壁法开挖围岩变形

5 结 论

通过室内三轴试验对隧址区围岩的力学特性进

行研究,得到了片麻岩力学参数随围压的变化的数学模型,并以此建立了适应挤压性围岩隧道的本构关系。通过数值模拟与现场实测,对比了三台阶预留核心土开挖法、弧形导坑三台阶七步流水作业法和中隔壁法施工对挤压围岩隧道变形及支护结构受力的影响规律,结论如下:

(1) 挤压性围岩的力学特性与其所处的应力状态密切相关,在不同的应力条件下,其力学行为表现出显著的差异性。因此,在进行挤压性围岩的数值模拟与分析时,必须充分考虑围压对其力学响应的影响,以确保模型能够准确反映围岩在实际工程中的变形与破坏特征。

(2) 在挤压性围岩隧道施工中,选择合适的开挖方法是确保工程安全和提高施工效率的关键因素。在三种开挖方法中,单次开挖断面越小,对围岩的扰动范围和深度越小。这种方式有助于减少围岩应力的重新分布,从而降低对围岩的影响。

(3) 在三种开挖方法中,中隔壁法对隧道的变形控制效果最好,弧形导坑三台阶七步流水作业法的支护结构受力状态更好,考虑到施工阶段围岩变形、支护受力规律和施工效率等因素,推荐采用弧形导坑三台阶七步流水开挖方法。

参考文献:

- [1] 谈利军,张佑钧,刘志春,等. 基于变形分级的挤压性围岩隧道超前导洞设计研究[J]. 金属矿山, 2024(12):181-189.
- [2] 杨 斌,刘天赐,刘志春,等. 基于变形分级的挤压性围岩铁路隧道断面形状优化设计[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(S1):344-355.
- [3] 李 雷,朱 超,刘志春,等. 基于变形稳定时间统计的挤压性围岩隧道二次衬砌施作时机研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(1):17-26.
- [4] 王正龙. 挤压性软岩隧道大变形灾害及控制措施研究[J]. 建筑技术开发, 2023, 50(7):109-113.
- [5] 王 峰,张洋语,陶家清,等. 大跨软岩隧道边墙开槽半步 CD 法施工参数研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 50(7):109-113.
- [6] Manasa H, Maji B V. A numerical study on the effect of different tunnel shapes in squeezing rocks [J]. Indian Geotechnical Journal, 2023, 54(4):1174-1186.
- [7] Ketan A, Marte G, Ahmadreza H. New physical model to study tunnels in squeezing clay-rich rocks [J]. Geotechnical Testing Journal, 2021, 44(4):1055-1078.
- [8] Arora K, Gutierrez M, Hedayat A, et al. Tunnels in squeezing clay-rich rocks [J]. Underground Space,

2020,6(4):432-445.

- [9] 杨 斌,刘天赐,刘志春,等. 基于变形分级的挤压性围岩铁路隧道断面形状优化设计[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(S1):344-355.
- [10] 王正龙. 挤压性软岩隧道大变形灾害及控制措施研究[J]. 建筑技术开发,2023,50(7):109-113.
- [11] 唐绍武,郭新新,于家武,等. 悬臂掘进机法在挤压性围岩隧道中的适应性研究——以木寨岭公路隧道为例[J]. 隧道建设(中英文),2024,44(1):163-171.
- [12] 张建峰. 挤压性围岩隧道大变形机理及控制技术[J]. 铁道建筑技术,2024(3):124-127.
- [13] 李元海,赵万勇,朱茂国,等. 软弱缓倾层状岩层隧道围岩结构变形与失稳机制试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2024,41(6):1148-1157.
- [14] 周 阳. 长锚杆/锚索改善深埋大跨度隧道初支结构受力试验研究[J]. 岩土工程学报,2024,46(4):853-863.
- [15] 李 坤. 山区偏压连拱隧道开挖方法适应性数值分析研究[J]. 山西建筑,2025,51(1):168-172.
- [16] 韩亚兵. 软岩大变形隧道施工技术研究[J]. 工程建设与设计,2024(7):249-251.
- [17] 李兴全. 基于泥质砂岩地层条件下隧道开挖方法的可行性分析[J]. 交通世界,2024(16):157-159.
- [18] 孙引浩. 大跨度变截面隧道施工工法数值模拟分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(1):77-83.
- [19] 文旭卿,徐 松,徐长节,等. 超大断面隧道施工方法模拟与工序分析[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(S2):426-434.
- [20] 温江涛. 高速铁路双线隧道进洞段及洞口浅埋段施工方法研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(1):77-83.

(上接第 183 页)

- [13] 房忠栋,杨为民,王 旌,等. 深埋隧道前方承压溶洞隔水岩体最小安全厚度研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2805-2816.
- [14] Parise M, Lollino P. A preliminary analysis of failure mechanisms in karst and man-made underground caves in Southern Italy [J]. *Geomorphology*, 2011, 134(1-2):132-143.
- [15] 王 旭,刘东升,宋强辉,等. 基于极限平衡法的边坡稳定性可靠度分析[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(3):839-844.
- [16] 王新忠,薛小刚,李宁利,等. 基于极限平衡法的机场高填方边坡稳定性分析研究[J]. 河北工业大学学报,2014,43(4):89-93,118.
- [17] 高 健,张义同,乔金丽. 渗透力对隧道开挖面稳定性影响分析[J]. 岩土工程学报,2009,31(10):1547-1553.
- [18] Xu Zhenhao, Huang Xin, Li Shucai, et al. A new slice-based method for calculating the minimum safe thickness for a filled-type karst cave [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020,79:1097-1111.