

DOI: 10.7672/sgjs2025240017

山区隧道穿越煤系地层开挖方法适用性 数值分析^{*}

李怀友¹, 李献民^{1,2}, 孙新海^{1,3}, 汪微^{1,3}(1. 中交一公局集团有限公司, 北京 100024; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院,
湖南 长沙 410083; 3. 重庆中交渝武高速公路有限公司, 重庆 401520)

[摘要] 山区矿产丰富、煤层破碎, 隧道穿越煤系地层施工时, 围岩变形控制困难, 施工扰动易致使隧道拱顶坍塌及支护结构破坏。依托某隧道工程, 开展隧道穿越煤系地层施工力学特性的数值仿真研究, 对比分析了采用全断面开挖法、台阶法和预留核心土法等不同工法在煤系地层隧道施工中其受力变形特征, 并对不同工法的适用性进行了研究。研究结果表明, 3种工法均会产生拱顶沉降, 预留核心土法产生拱顶沉降和水平位移最小分别为-9.06, 2.26mm, 全断面开挖法拱顶沉降和水平位移最大分别为-15.28, 14.88mm。全断面开挖法由于衬砌整体性好, 可有效减小拱顶应力集中, 缓解支护结构的偏心受压程度; 而预留核心土法和台阶法拱顶出现明显应力集中, 支护结构左侧受拉、右侧受压。从整体施工分析, 全断面开挖法在施工初期拱顶沉降迅速增加, 衬砌闭环后趋于稳定; 而台阶法在上台阶开挖时拱顶沉降较大, 处于高风险期。预留核心土法虽开挖步较多, 但可较好地控制煤层围岩变形, 在煤系地层施工中具有较强适用性。

[关键词] 隧道; 煤系地层; 开挖; 数值模拟; 力学特性**[中图分类号]** U455.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 2097-0897(2025)24-0017-06

Adaptability Analysis of Excavation Methods for Mountainous Tunnel Crossing Coal Measure Strata

LI Huaiyou¹, LI Xianmin^{1,2}, SUN Xinhai^{1,3}, WANG Wei^{1,3}(1. CCCC First Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
3. CCCC Chongqing Yuwu Expressway Co., Ltd., Chongqing 401520, China)

Abstract: Mountain areas are rich in mineral resources, and coal seams are fragmented. Constructing tunnels crossing coal measure strata, it is difficult to control the deformation of the surrounding rock. Construction disturbances can easily cause collapse of the tunnel arch and damage to the support structure. Based on a tunnel project, numerical simulation research on the mechanical characteristics of tunnel construction crossing coal measure strata was carried out. Different construction methods such as full-face tunneling method, bench cut method, reserved core soil method were compared and analyzed for their stress and deformation characteristics in tunnel construction crossing coal measure strata. The adaptability of different construction methods was discussed. The research results show that all three construction methods will cause uneven settlement of the arch crown. The minimum settlement of the arch crown caused by the reserved core soil method is -9.06mm, and the minimum horizontal displacement is 2.26mm. The maximum settlement and horizontal displacement of the arch crown caused by full-face tunneling method are -15.28mm and 14.88mm respectively. Due to the good overall integrity of the lining, full-face tunneling method can effectively reduce the stress concentration on the arch crown and alleviate the degree of eccentric compression of the support structure. However, reserved core soil method

^{*} 中交一公局集团科技研发项目(KJYF-2021-B-14, YGJKT-2019-B-04)

[作者简介] 李怀友, 高级工程师, E-mail: 110457838@qq.com

[收稿日期] 2024-09-28

and bench cut method have obvious stress concentration on the arch crown, causing tension on the left side of the support structure and compression on the right side. From the overall construction analysis, full-face tunneling method rapidly increases the settlement of the arch crown in the early stage of construction, and tends to stabilize after the lining is closed loop, while bench cut method has a large settlement of the arch crown during the excavation of the upper platform, which is in a high-risk period. Although reserved core soil method involves more excavation steps, it can effectively control the deformation of coal seam surrounding rock and has strong adaptability in tunnel construction crossing coal measure strata.

Keywords: tunnels; coal measure strata; excavation; simulation; mechanical properties

0 引言

随着我国高速公路建设的持续发展,路网分布已由东南、中部地区逐渐辐射至西南山区。尽管我国在山区隧道建设方面已取得快速发展,但对于山区复杂地质条件,隧道建设仍面临较大挑战。西南山区矿产丰富,隧道施工过程中常常遇到穿越煤系地层工况,除了揭煤施工存在瓦斯泄漏危险外,破碎煤层和软弱围岩同样给隧道施工安全带来较大风险^[1-3]。因此,选择合理施工方法是控制隧道施工围岩稳定性和实现安全快速穿越煤系地层的重要环节。

为此,国内外学者针对煤系地层、软弱围岩隧道施工及受力性能分析开展了深入研究。乔春江等^[4]依托西藏嘎隆拉公路隧道,针对节理破碎软岩地层,利用有限元软件 ABAQUS 开展了 CD 法、台阶法等施工模拟,研究了不同施工方法在破碎软弱围岩地层开挖时的围岩变形与受力特征。范永慧^[5]针对苍龙山隧道穿越邯郸南部矿区工程,通过有限元软件模拟隧道三台阶临时仰拱法在煤系地层施工过程及其适用性,研究表明,对于浅埋大跨度隧道软弱围岩段,三台阶临时仰拱法可较好控制拱顶沉降,保障隧道围岩稳定性。党红章^[6]针对昆明岗头隧道软弱围岩特点,在传统三台阶法基础上对 CRD 法和双侧壁导坑法进行了优化,并通过数值模拟验证了该工法适用性。普红祥等^[7]以酸草树隧道施工为背景,采用模型试验模拟二台阶法、二台阶预留核心土法、CD 法等不同开挖方法在软岩地层中所引起的变形特征,并选出满足隧道围岩变形控制要求的方法。李现宾等^[8]以特长瓦斯隧道为依托,研究了开挖进尺的不同施工方法对多煤层夹断层围岩变形的影响规律,提出了合理的开挖进尺施工意见。综上所述,虽然有关软弱围岩隧道施工的研究已有大量报道,但针对破碎煤层施工过程中的围岩变形和力学特性仍是有待研究的问题。受地质条件影响,施工方法适用性未形成统一认识。

鉴于此,本文以某隧道穿越煤系地层为背景,采用数值模拟计算与现场监测相结合的方法,对比分析全断面开挖法、台阶法和预留核心土法施工时的围岩变形与力学特性,为公路隧道穿越煤系地层合理施工方法的确定提供科学依据和可靠支撑。

1 工程概况

某隧道按左、右分离式设计,长约 1 200m,属长隧道。本工程为双向 6 车道公路隧道,隧道净宽 15.25m、净高 5.0m,采用三(五)心圆曲边墙形式,如图 1 所示。该项目穿越煤系地层,开展揭煤施工。

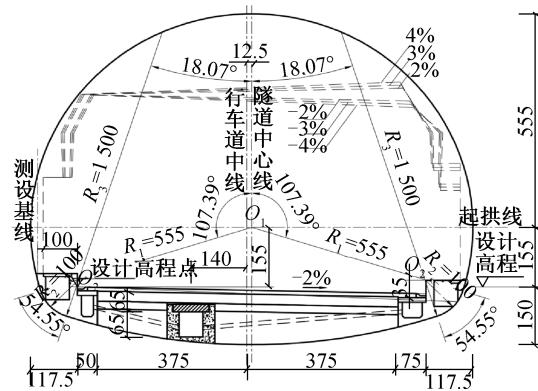


图 1 隧道断面尺寸(单位:cm)

Fig. 1 Tunnel section size (unit: cm)

2 不同工法数值模型建立

该隧道煤层位置不稳定、较为破碎,属于不稳定型煤层,掌子面岩性为粉砂泥岩及砾岩。受隧洞附近岩层破碎、岩性差异影响,开挖方法及支护结构形式的改变均会对围岩应力分布和变形特征产生较大影响,给隧道结构安全带来诸多不确定因素。本文开展针对煤系地层隧道开挖方法适用性研究,分析全断面开挖法、台阶法和预留核心土法开挖条件下的围岩变形和力学特征变化规律。

2.1 隧道模型建立及参数选取

依据隧道施工范围地质条件,采用 MIDAS GTS NX 分别建立 3 个 30m×100m×62m(长×宽×高)三维数值计算模型,模型取隧道平均埋深为 20m,左、

右隧洞中心线间距 26m, 进尺为 5m, 具体数值计算模型如图 2 所示。

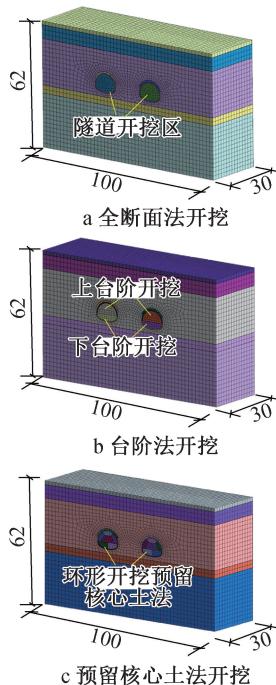


图 2 隧道开挖施工数值计算模型(单位:m)

Fig. 2 Numerical calculation model of tunnel excavation construction (unit: m)

2.2 模型参数选取

本文中围岩体和软弱层均采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型, 该本构采用“混合离散法”模拟围岩和夹层的塑性特性^[9-10]。隧道围岩与衬砌的接触采用 MIDAS 的接触单元模拟, 计算力学参数通过该隧道现场土工试验和经验类比获得。

在计算模型两侧施加水平位移约束, 底部固定设置纵向位移约束以模拟上覆土, 上部设置自由边界; 初始应力场设为自重应力场。采用梁单元模拟初期支护及仰拱支护, 采用桁架单元模拟锚杆, 采用平面应变单元模拟围岩和二次衬砌。依据等效作用, 将钢架的弹性模量折减后赋值给喷射混凝土, 超前小导管在模型计算中以拱顶环形加固圈来

模拟。模型各类材料参数如表 1 所示^[11-12]。

表 1 模型计算参数

Table 1 Model calculation parameters

项目	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
粉砂泥岩	0.04	0.42	2 700	4.90×10^3	46.7
砾岩	0.80	0.32	2 680	5.30×10^3	42.8
煤层	0.41	0.39	1 400	0.34×10^3	—
初期支护	26.00	0.25	2 310	—	—
二次衬砌	31.00	0.20	2 500	—	—
锚杆($\phi 25$)	210.00	0.20	7 800	—	—
小导管	0.24	0.30	2 250	—	—

3 计算结果分析

根据上述有限元模型开展基于不同开挖方式的隧道穿越煤系地层数值仿真研究, 分析全断面开挖法、台阶法及预留核心土法开挖条件下的隧道围岩受力变形情况, 计算结果如下。

3.1 围岩位移变化

3.1.1 坚向位移

根据模拟结果获得不同施工方法下开挖 25m 后隧道围岩竖向位移云图, 如图 3 所示。由图 3 可知, 采用 3 种施工方法均导致隧道产生拱顶沉降, 但拱顶沉降值存在较大差异。最终竖向沉降值表现为全断面开挖法>台阶法>预留核心土法, 最大值达到 -15.28mm, 最小值为 -9.06mm, 二者相差 40.71%。这说明预留核心土法在穿越煤系地层时可较好控制围岩竖向整体变形。受到超前导管支护作用影响, 拱顶沉降最大位移并非出现在掌子面正上方, 而是在开挖后段 5~10m 位置。在现场施工时, 需对掌子面后 10m 进行持续监测, 确保围岩稳定性。

3.1.2 水平位移

隧道不同方法施工 25m 围岩水平位移云图如图 4 所示, 正号为围岩向内收敛, 负号为围岩向外挤压。由图 4 可知, 不同方法开挖产生最大水平位移集中在隧洞外侧, 而隧洞间则产生相对复杂的位移

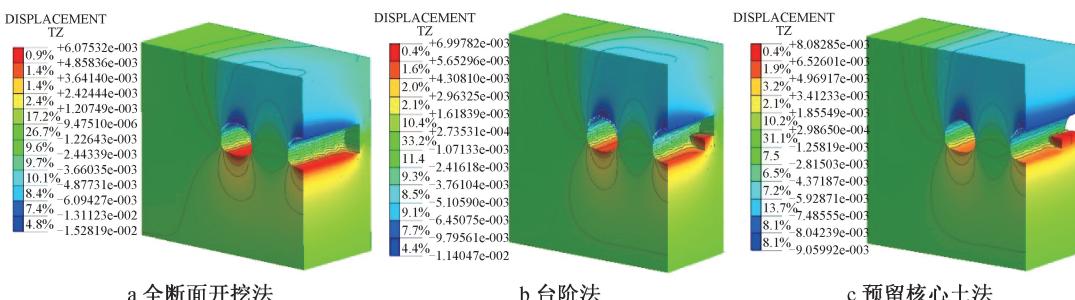


图 3 隧道不同方法施工 25m 围岩纵向位移云图(单位:m)

Fig. 3 Vertical displacement of 25m surrounding rock in tunnel construction by different methods (unit: m)

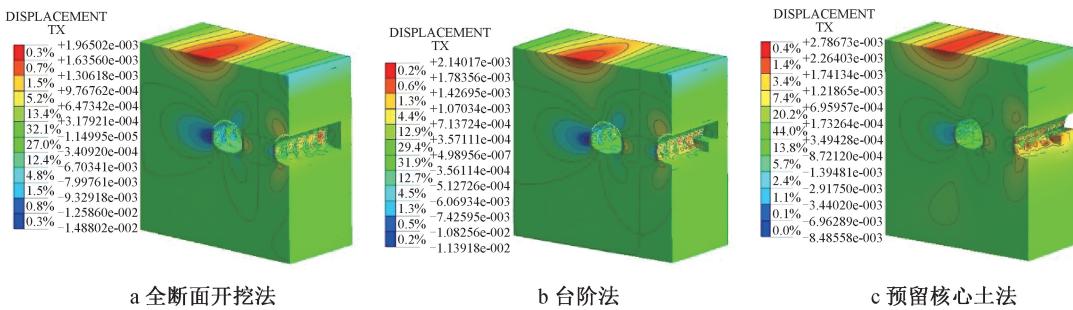


图 4 隧道不同方法施工 25m 围岩水平位移云图 (单位:m)

Fig. 4 Horizontal displacement of 25m surrounding rock in tunnel construction by different methods (unit: m)

叠加。全断面开挖法施工产生的水平位移最大,最大达到-14.88mm,表明侧壁存在向外扩张趋势,这可能是较大拱顶压力向下传递的结果导致。最终水平位移值表现为全断面开挖法>台阶法>预留核心土法。双线隧道中间部分存在水平位移叠加,当右线开挖时,靠近左线的侧壁表现为向内挤压趋势,在预留核心土法工况中达到最大值2.26mm。

3.2 围岩应力变化

隧道不同方法施工 25m 围岩总应力云图如图 5 所示,其中正号表示压应力,负号表示拉应力。由图 5 可知,由于隧洞开挖,隧洞拱顶上层岩土受压,自上而下产生压应力,在拱顶处出现最大压应力,预留核心土法、全断面开挖法最大压应力分别为 0.17,0.12MPa。这是由于全断面开挖法为一次施工成型,衬砌成环整体性较好,有效减小了拱顶的应力集中;而预留核心土法采用分阶段分步开挖,

对围岩扰动次数较多,在拱顶易形成应力集中。隧洞的侧壁衬砌受到上部压应力影响,产生拉应力变化。不同施工方法下,左侧拱腰处压应力分别达到 0.62,0.48,0.49MPa。全断面开挖法中两隧洞间存在拉应力贯通区域,而其他方法在隧道中间叠加影响较小。

3.3 支护结构受力分析

隧道不同方法施工 25m 支护结构弯矩云图如图 6 所示。由图 6 可知,由于拱顶沉降较大和上层土体压力,全断面开挖法在掌子面附近支护结构出现较大弯矩,最大弯矩达到 21.54kN · m。远离掌子面的支护结构弯矩趋于稳定状态,这是因为全断面开挖法施工后支护一体成型,减小了支护结构的偏心受压程度。台阶法和预留核心土法在开挖后,由于分阶段部分开挖,围岩的不均匀变形引起支护结构的应力不均,明显出现隧道左侧锚杆受拉、右

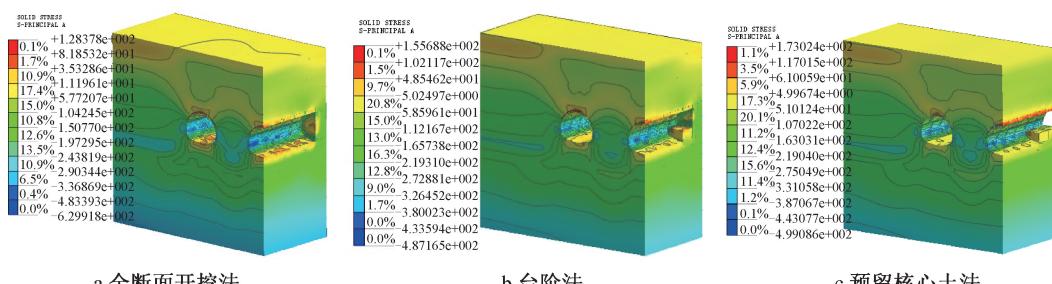


图 5 隧道不同方法施工 25m 围岩总应力云图 (单位:kPa)

Fig. 5 Total stress of 25m surrounding rock in tunnel construction by different methods (unit: kPa)

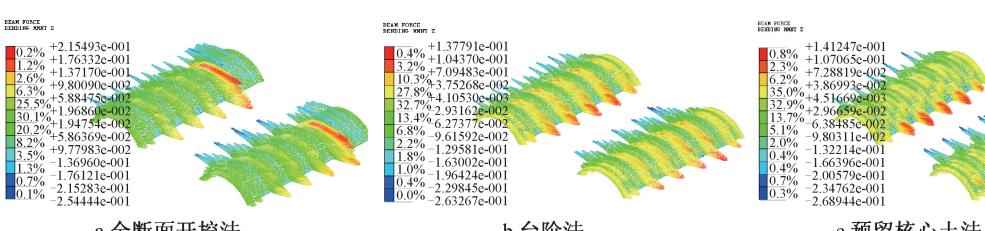


图 6 隧道不同方法施工 25m 支护结构弯矩云图 (单位:kN · m)

Fig. 6 Bending moment of 25m supporting structure in tunnel construction by different methods (unit: kN · m)

侧受压特点。二者掌子面最大弯矩分别为 13.77, 14.12 kN·m。

4 隧道开挖方法适用性分析

隧道在 K90+750 处采用预留核心土法进行现场施工,为验证模型计算的可靠性,提取数值模拟计算值与现场实测拱顶沉降值进行对比分析,如图 7 所示。

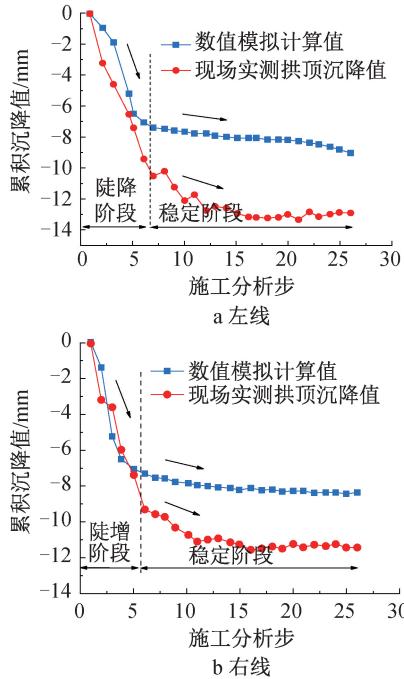


图 7 隧道在 K90+750 处左、右线拱顶沉降对比

Fig. 7 Comparison of arch crown settlement between left and right lines of tunnel at K90+750

由此可知,在穿越煤层时,数值模拟计算结果与现场实测结果在施工过程中均可分为拱顶沉降陡增、稳定 2 个阶段。在施工初期,二者由于掌子面分步开挖使得拱顶沉降陡增,随着支护结构施作,拱顶沉降趋于稳定。计算结果与实测结果在数值上存在一定偏差,实测结果在陡增阶段吻合较好,但实测阶段左、右线比计算结果分别大 3.87, 3.07 mm。这是模拟计算的围岩参数与实际岩层物理力学参数仍存在一定差异所致,但二者结果均反映出相同的拱顶沉降变化趋势,验证了计算结果的可靠性。

根据模拟结果绘制 3 种方法施工拱顶沉降曲线,如图 8 所示。由图 8 可知,3 种方法中预留核心土法由于分步开挖步骤多、围岩应力释放次数多等因素,沉降最小,仅为 7.83 mm。台阶法则在上部台阶开挖后,拱顶沉降迅速增加,随后变形减缓,达到 11.07 mm,说明围岩变形主要集中在对煤系岩层上台阶开挖中,安全风险也处于较高阶段。全断面开

挖法施工由于采用整体开挖,在开始阶段拱顶沉降增长迅速,直到开挖完毕且初期支护封闭成环,围岩才趋于稳定,所产生的沉降值最大为 15.57 mm,该方法在破碎煤层施工中需全程加强施工监测,避免开挖阶段围岩变形过大。

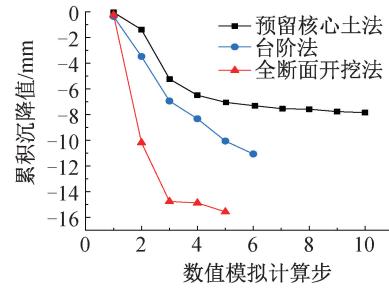


图 8 不同方法施工隧道拱顶沉降对比

Fig. 8 Comparison of arch crown settlement by different methods

5 结语

以某高速公路隧道为依托,通过有限元数值模拟方法研究 3 种不同开挖方法下隧道穿越煤系地层的力学特性,并结合现场数值模拟验证了计算模型的可靠性,总结了 3 种方法在煤系地层施工的适用性,其主要结论如下。

1) 3 种方法均会导致隧道产生拱顶沉降变形,预留核心土法在穿越煤系地层时可较好控制围岩变形,产生拱顶沉降最小,仅为 7.83 mm;全断面开挖法尽管开挖步少,但拱顶沉降值最大,为 15.57 mm。

2) 全断面开挖法由于衬砌一体成型,竖向压力向下传递,产生的水平位移最大达到 14.88 mm,而预留核心土法所产生的水平位移最小。双线隧道间会出现水平位移叠加,预留核心土法靠近左线侧壁水平位移最大为 2.26 mm。

3) 隧道开挖时,拱顶出现围岩变形传递出的压力,全断面开挖法衬砌整体性好,可有效减小拱顶应力集中,缓解支护结构偏心受压程度。预留核心土法由于施工步较多,拱顶应力集中明显,支护结构左侧受拉、右侧受压,在施工中应注意围岩破碎等情况。

4) 全断面开挖法在施工初期拱顶沉降迅速增加,初次衬砌闭合后趋于稳定,对于破碎煤层需全程加强监测;台阶法则在上台阶开挖时围岩变形增大,处于较高风险阶段;预留核心土法尽管开挖步多,但可较好控制破碎煤层围岩变形,在煤系地层施工中具有较好适用性。

参考文献:

[1] 马永辉. 山区高速公路隧道的瓦斯预测方法及施工技术[J].

- 中国公路,2020(13):84-85.
- MA Y H. Gas prediction method and construction technology of expressway tunnel in mountainous area [J]. China highway, 2020(13):84-85.
- [2] 符亚鹏,姚志刚,方勇,等.隧道开挖对下伏水平薄煤层采空区地层的扰动及衬砌受荷特征[J].岩土力学,2016,37(S1):117-125.
- FU Y P, YAO Z G, FANG Y, et al. Soil disturbance caused by tunnel excavation and lining loading characteristics in underlying horizontal thin coal mined-out area[J]. Rock and soil mechanics, 2016,37 (S1) :117-125.
- [3] 宋双全.高应力软岩隧道衬砌结构探讨[J].湖南交通科技,2018,44(3):182-185.
- SONG S Q. Discussion on lining structure of high stress and soft rock tunnel[J]. Hunan communication science and technology, 2018,44(3):182-185.
- [4] 乔春江,陈卫忠,王辉,等.浅埋破碎地层隧道施工方法研究[J].岩土力学,2011,32(S2):455-462,468.
- QIAO C J, CHEN W Z, WANG H, et al. Study on construction method of shallow-buried tunnel in broken stratum[J]. Rock and soil mechanics,2011,32 (S2) :455-462,468.
- [5] 范永慧.三台阶临时仰拱中柱工法在浅埋大跨隧道围岩施工中的应用及效果分析[J].湖南交通科技,2023,49(4):158-163.
- FAN Y H. Application and effect analysis of three step temporary inverted arch middle column construction method in surrounding rock construction of shallow buried large span tunnel[J]. Hunan communication science and technology, 2023,49(4):158-163.
- [6] 党红章.岗头隧道大跨软弱围岩台阶法施工技术[J].公路交通技术,2012,28(1):91-93,98.
- DANG H Z. Construction techniques of benching tunnelling method for large-span weak wall rocks in Gangtou Tunnel [J].
- [7] 普红祥,郭德平,姚超凡,等.软岩地层变截面铁路隧道开挖方法适应性试验研究[J].现代隧道技术,2023,60 (S1):104-111.
- PU H X, GUO D P, YAO C F, et al. Experimental study on adaptability of excavation method of variable cross-section railway tunnel in soft rock stratum [J]. Modern tunnelling technology, 2023,60 (S1) :104-111.
- [8] 李现宾,王磊.多煤层夹断层影响下隧道开挖进尺分析[J].现代隧道技术,2019,56 (S2) :355-361.
- LI X B, WANG L. Analysis of tunnel excavation footage under the influence of multiple coal seams with faults [J]. Modern tunnelling technology, 2019,56 (S2) :355-361.
- [9] ZHAO W S, GAO H, CHEN W Z, et al. Experimental study on similar materials for tunnel lining concrete in geomechanical model tests[J]. Engineering failure analysis, 2023,152:107456.
- [10] XIAO J Z, DAI F C, WEI Y Q, et al. Comparative analysis of excavation schemes for a tunnel constructed through loose deposits [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2016, 30(4) :04015061.
- [11] WU K, SHAO Z S, QIN S, et al. A critical review on the performance of yielding supports in squeezing tunnels [J]. Tunnelling and underground space technology, 2021, 115:103815.
- [12] 康宝祥,宋战平,张庆贺,等.倾斜煤系地层大断面客专隧道大变形原因分析及处置[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(2):89-99.
- KANG B X, SONG Z P, ZHANG Q H, et al. Causal analysis and disposal on large deformation of large section passenger dedicated line tunnel in inclined coal strata [J]. Journal of civil and environmental engineering, 2024,46(2):89-99.

(上接第 16 页)

- [18] 赵秀绍,魏度强,于万友,等.小曲线半径盾构隧道上穿既有隧道影响分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(4):1216-1224.
- ZHAO X S, WEI D Q, YU W Y, et al. Impact analysis of small curve radius shield tunnel crossing existing tunnel [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021, 17 (4) : 1216-1224.
- [19] 王轲.盾构小净距上跨运营地铁(既有线)区间关键技术研究[J].工程技术研究,2023,8(11):211-213.
- WANG K. Research on key technologies for shield overcrossing

operating subway(existing line) sections with small clear distance [J]. Engineering and technological research, 2023, 8 (11) : 211-213.

- [20] 北京城建设计发展集团股份有限公司,广州地铁设计研究院有限公司.盾构隧道工程设计标准:GB/T 51438—2021[S].北京:中国建筑工业出版社,2021.
Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., Guangzhou Metro Design Institute Co., Ltd. Standard for design of shield tunnel engineering: GB/T 51438—2021 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.