

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.024



开放科学(资源服务)标识码OSID:



大断面隧道原位扩挖围岩的力学特征试验研究

马治国¹, 刘磊², 宋稳明², 赵英爱², 代一铭³, 吕祥锋³

(1. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100160; 2. 中电建(广东)中开高速公路有限公司, 广东 江门 529142; 3. 北京科技大学未来城市学院; 河北省地面塌陷机理与防控重点实验室, 北京 100083)

摘要: 大断面公路隧道原位扩挖过程围岩扰动大, 施工风险高, 但对隧道原位扩挖围岩力学特征的研究尚不深入。采用物理模型试验、理论分析和工程实测相结合的研究方法, 研究不同隧道扩挖工法下围岩压力与位移的分布特征, 建立隧道围岩力学模型, 并结合工程实测数据对物理模型试验和理论模型进行有效性验证。隧道扩挖物理模型试验结果表明, 单侧毛洞扩挖法的位移量变化最大, 单侧台阶扩挖法的围岩压力聚集在拱肩, 单侧CD扩挖法的位移量最小且围岩压力分布更均匀; 围岩应力简化模型分析表明, 拱脚的位移量大于拱顶, 围岩的损伤程度越大, 位移量越大; 工程实测结果显示, 模型试验中的围岩压力和位移量的试验值与实测值高度吻合, 位移变化过程也呈现出相同趋势, 当损伤系数 D 为0.2时, 单侧台阶扩挖法和单侧CD扩挖法的模型值能全面反映实测值, 单侧CD扩挖法更有利于围岩的长期稳定。

关键词: 大断面隧道; 原位扩挖; 围岩稳定性; 力学特征; 物理模型试验

中图分类号: U451 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-12

Experimental study on mechanical response characteristics of surrounding rock during in-situ excavation of large-section tunnel

MA Zhiguo¹, LIU Lei², SONG Wenming², ZHAO Yingai², DAI Yiming³, LV Xiangfeng³

(1. PowerChina Roadbridge Group Co., LTD., Beijing 100160, P. R. China; 2. China Power Construction (Guangdong) Zhongkai Expressway Co., LTD., Jiangmen 529142, Guangdong, P. R. China; 3. Future City Institute; Hebei Key Laboratory of Collapse Prevention, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China)

Abstract: The in-situ excavation process of large-section highway tunnels causes significant disturbance to the surrounding rock and poses high construction risks. However, research on the mechanical characteristics of the surrounding rock during in-situ excavation of tunnels is not yet comprehensive. This paper adopts a research method combining physical model tests, theoretical analysis, and engineering measurements to investigate the

收稿日期: 2024-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(52278326); 国家高层次人才计划(SQ2022QB03353); 北京市杰出青年科学基金(JQ21028); 中电建路桥集团有限公司科技项目(LQKY2021-01)

作者简介: 马治国(1976-), 男, 高级工程师, 主要从事桥梁与隧道工程研究, E-mail: lqmazhg@powerchina.cn。
吕祥锋(通信作者), 男, 博士, 教授, E-mail: lvxiangfeng2006@126.com。

Received: 2024-10-27

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52278326); National High-Level Talent Program (No. SQ2022QB03353); Beijing Natural Science Foundation (No. JQ21028); Science and Technology Program of Power China Road Bridge Group Co., LTD (No. LQKY2021-01)

Author brief: MA Zhiguo (1976-), senior engineer, main research interests: bridge and tunnel engineering, E-mail: lqmazhg@powerchina.cn.
LV Xiangfeng (corresponding author), PhD, professor, E-mail: lvxiangfeng2006@126.com.

distribution characteristics of surrounding rock pressure and displacement under different tunnel excavation methods. A mechanical model for the tunnel surrounding rock is established, and the physical model tests and theoretical models are verified using engineering measurement data. The results of the tunnel excavation physical model test show that the displacement variation is the largest in the single-sided borehole excavation method, the surrounding rock pressure accumulates at the arch shoulder in the single-sided step excavation method, and the displacement is the smallest with a more uniform surrounding rock pressure distribution in the single-sided CD excavation method. The simplified model analysis of surrounding rock stress indicates that the displacement at the arch foot is larger than at the crown, and the greater the damage degree of the surrounding rock, the larger the displacement. Field measurements confirm that model test values of rock pressure and displacement align closely with measured values, showing similar displacement trends. When the damage coefficient D is 0.2, the model values for the single-side step excavation and single-side CD excavation methods can fully reflect the measured values, with the single-side CD excavation method being more favorable for the long-term stability of the surrounding rock.

Keywords: large-section tunnel; in-situ excavation; surrounding rock stability; mechanical characteristics; physical model test

近年来,中国公路建设在质量与体量双层面的不断发展,部分已建隧道无法满足当前公路的运输通行需求^[1-2]。随着城市化建设的加快和日益增长的交通需求,隧道扩挖工程成为提升交通基础设施能力和适应城市发展需求的关键措施,其中大断面隧道扩挖工程因其能够显著提高交通通行能力和缓解交通压力,在实际应用中变得越来越普遍^[3-4]。然而,原隧道扩能改建方法不断突破原隧道的断面尺寸极限,隧道扩挖过程中面临的技术挑战也愈加复杂。

大断面开挖往往会引起原有隧道稳定应力场的显著改变以及围岩应力的释放,这可能导致围岩失稳^[5-7],从而导致围岩在开挖过程中出现更明显的沉降和侧移,进而对原有隧道及扩挖新隧道的运营安全造成威胁。这也使得大断面隧道建设工程的安全性和稳定性成为当前研究的热点^[8-9]。Zheng等^[10]针对大断面隧道在软土地基中的施工,提出并应用了一种悬挂式中心横隔板(S-CRD)开挖方法,基于Mindlin弹性方程建立了理论沉降预测模型,成功预测了地面沉降,并发现锚杆间距比预应力和锚杆直径对限制地面沉降更为有效。Sun等^[11]提出采用小导洞分步反扩施工工法,结合现场监测参数进行理论分析,并建立了小导洞推进分步反扩施工工法数值模拟模型,验证了该工法能够有效稳定隧道围岩,降低施工风险并提高生产效率。林从谋等^[12]通过隧道两车道原位扩挖四车道的围岩应力特性研究,提出了强化区域支护优化强化的方法。刘继国等^[13]考虑到超浅埋大断面隧道开挖和运营阶段可能引发的地表沉降,提出了一种将超前支护的管幕与初期支护结构合理组合的方案,形成高刚度的环

向和纵向整体受力体系,从而有效控制了隧道施工和运营期间的地表变形,显著降低了施工风险。众多研究学者认为,隧道原位扩挖改变了原有地层的应力结构,并提出了有效的支护防控方法^[14-17],但是当前关于大断面隧道原位扩挖后的力学特征研究仍鲜有报道。当前关于围岩应力对隧道原位扩挖后的应力分布和形变规律的理论研究和试验探索较为有限,许多设计仍参考新建隧道的技术规范,这导致在隧道原位扩挖项目中出现设计保守、支护失效和资源浪费等问题。

笔者以广州某扩挖隧道工程为依托,通过物理模型试验研究不同隧道扩挖工法下的力学特征,建立大断面隧道原位扩挖力学简化模型,分析隧道施工过程中的位移变化特征,验证理论模型的有效性,并进一步结合现场工程数据,分析大断面三车道扩挖为四车道工程的围岩压力和位移变形,为大断面隧道的原位扩挖工程应用提供理论支撑。

1 隧道原位扩挖模型试验

1.1 工程概况

中山市中开高速大常山隧道在原有大断面隧道基础上进行扩挖施工,将三车道扩挖为四车道,如图1所示。隧道全长为624 m,跨度由18 m增至21.5 m,开挖方量由170 m³扩至250 m³,是中国首个特大断面隧道的原位扩挖工程,隧道原位扩挖断面设计如图2所示。根据现场地勘资料,围岩主要为中风化花岗斑岩、花岗岩,饱和抗压强度不超过61.2 MPa,岩体完整性系数为0.62~0.79,以Ⅲ级和Ⅳ级围岩为主,其中Ⅳ级围岩稳定性较差。因隧道靠近高压电塔,围岩变形控制要求严格,但扩挖

易引起围岩的二次扰动,增大隧道变形量,且监测围岩变形和应力分布难度大,增加施工风险。因此,依托大常山 1#隧道,开展隧道原位扩挖的力学特征研究,以应对这些复杂的工程挑战。



图1 大常山隧道施工现场
Fig.1 Dachangshan tunnel construction site

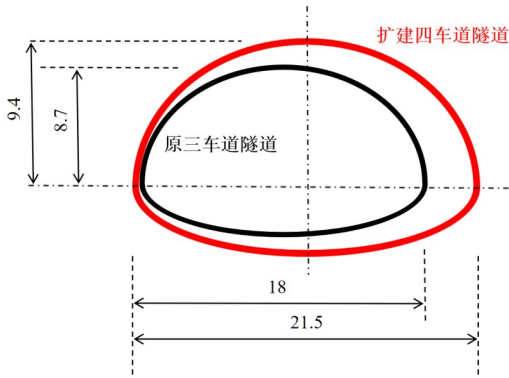


图2 隧道原位扩挖断面设计(单位:m)
Fig.2 In-situ tunnel excavation cross-section design

1.2 模型相似比及相似材料配比

在相似模型试验中,模拟隧道试验模型选择比尺满足 1:60,即将原模型缩小为 1/60,各基本物理量满足比例关系

$$C_L = \frac{l_N}{l_M} = 60 \tag{1}$$

式中: C_L 为几何相似比; l_N 为原型尺寸; l_M 为模型尺寸。

试验模型与原型的重度比满足 1:1,依据相似理论,重度相似比的推导过程为

$$C_\gamma = \frac{\gamma_N}{\gamma_M} = 1 \tag{2}$$

式中: C_γ 为重度相似比; γ_N 为原型重度; γ_M 为模型重度。

在相似模型试验中,所有无量纲物理参数的相似比需保持为 1,因此泊松比、应变和内摩擦角的相似比应满足关系

$$C_\mu = C_\delta = C_\varphi = 1 \tag{3}$$

式中: C_μ 为泊松比相似比; δ 为应变相似比; φ 为内摩擦角相似比。

根据相似定理,黏聚力、应力、强度和弹性模量的相似比可表示为

$$C_c = C_\sigma = C_R = C_E = C_L C_\gamma = 60 \tag{4}$$

式中: C_c 为黏聚力相似比; C_σ 为应力相似比; C_R 为强度相似比; C_E 为弹性模量相似比。

根据相似比计算得出隧道模型围岩相似材料的抗压强度为 1.02 MPa,抗拉强度为 78 kPa。为了得到满足模型试验要求的相似材料,制作 10 组试件来确定力学参数,如图 3 所示。通过对试件进行单轴压缩试验和巴西劈裂试验,第 5 组的相似材料抗压强度实测结果值为 1.06 MPa,抗拉强度实测结果值为 0.08 MPa,均满足实验要求。最终确定的围岩相似材料配比为砂:白水泥:滑石粉:重晶石粉:乳胶:水=1:0.09:0.44:0.22:0.08:0.08。在锚固过程中,预留钻孔的大小和深度会对围岩产生不同程度的初始损伤^[18],并影响围岩的应力分布,从而可能导致试验结果的准确性降低。因此,优先考虑锚杆的几何相似性。铁丝具有良好的延展性和刚度^[19-20],能够有效承受围岩的载荷,因此选择铁丝和铁丝网作为锚杆和锚网的支护构件。衬砌模型材料由石膏、重晶石粉、水泥和水制成,通过单轴压缩实验的方式测定养护后衬砌模型材料的力学参数,如图 4 所示。最终确定满足衬砌模型材料强度的配合比,即石膏:重晶石粉:水泥:水=1:0.09:0.03:1.2,强度为 0.58 MPa。原型与模型力学参数和尺寸参数如表 1 和表 2 所示。

表1 原型与模型力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the prototype and model										
类别	围岩抗压强度/MPa	围岩抗拉强度/MPa	围岩密度 ρ /(g/cm ³)	围岩弹性模量/GPa	围岩黏聚力/MPa	围岩内摩擦角/(°)	围岩泊松比 μ	锚杆抗拉强度/MPa	锚网抗弯强度/MPa	衬砌抗压强度/MPa
原型	61.2	4.7	2 640	15	2.4	31	0.35	400	520	35
模型	1.05	0.08	2 621	0.25	0.04	32.4	0.35	7	9	0.58

1.3 隧道扩挖试验方案与监测方案

为模拟隧道中复杂的应力环境,采用液压加载系统对模型箱内部的应力进行模拟,如图 5 所示。

模型箱的尺寸为长 100 cm、宽 50 cm、高 50 cm,能够在垂直和水平方向实现单向或双向的分级加载。选择里程段落 RK10+439~RK10+489 作为应力

表 2 原型与模型尺寸参数

Table 2 Prototype and model size parameters

类别	原隧道长度/ cm	原隧道高度/ cm	扩挖后隧道长度/ cm	扩挖后隧道高度/ cm	锚杆长度/ mm	锚杆半径/ mm	锚网网格间距/ mm	衬砌厚度/ mm
原型	1 800	870	2 150	940	4 500	0.4	250	500
模型	30	14.5	35.83	15.67	75	22	4.1	8.33

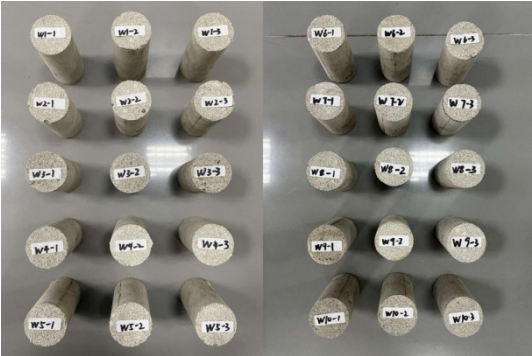


图 3 围岩相似材料试样

Fig.3 Specimens of surrounding rock similar material



(a) 试件养护



(b) 单轴压缩试验

图 4 衬砌相似材料配合比的确定

Fig.4 Determination of the mix ratio for lining similar materials

环境的模拟区域,其中隧道埋深介于 30 m 至 34 m 之间。综合考虑地质条件及施工安全性,最终选取埋深 34 m 进行研究。侧压系数选取为 1,水平和垂直加载梯度为 2.5 kN,每次加载完成后将稳压保持

20 min,以确保应力和变形能够达到平衡状态。预定压力保持恒定,避免应力波动或分布不均。

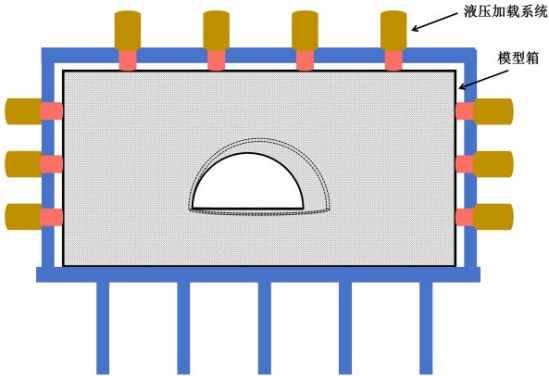


图 5 配有液压加载系统的模型箱

Fig.5 Model box equipped with a hydraulic loading system

根据模型参数铺设模型,将预制隧道实体模型放入模型箱体预埋处,分层、压实填埋围岩相似材料,在预埋位置铺设压力盒、位移传感器,抽出隧道实体模型。监测断面位于隧道跨中,布设 4 个位移传感器和 5 个应力传感器,监测断面的模型试验监测方案如图 6 所示。

1.4 隧道扩挖工法设定

根据依托工程的施工流程,隧道模型采用单侧台阶扩挖法和单侧 CD 扩挖法。虽然毛洞扩挖在实际工程中较少使用,但毛洞扩挖实验可有效分析围岩在单侧毛洞条件下的应力分布与变形特征,揭示围岩自稳能力和极限承载情况,并为支护优化提供理论依据^[21-23],进一步提高支护设计的合理性和施工安全性。因此,试验选用 3 种扩挖工法,分别是单侧毛洞台阶扩挖法、单侧台阶扩挖法和单侧 CD 扩挖法。隧道扩挖工序示意图如图 7 所示。

单侧台阶扩挖法工序:①开挖上台阶土体并进行初期支护;②开挖左下台阶土体并进行初期支护;③开挖右下台阶土体并进行初期支护,如图 7(a)所示。

单侧 CD 扩挖法工序:①开挖左上导洞上土体并进行初期支护;②开挖左下导洞土体并进行初期支护;③开挖右上导洞土体并进行初期支护;④开挖右下导洞土体并进行初期支护,如图 7(b)所示。

根据相似比的换算,单侧台阶扩挖法进行开挖时,每一开挖步的开挖进尺为 2.5 cm,共计开挖 60

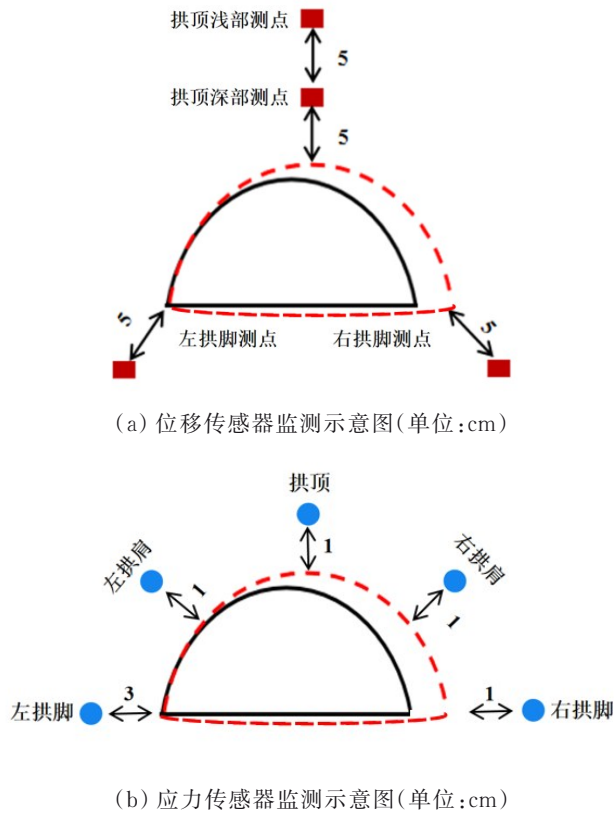


图6 模型试验监测方案

Fig.6 Monitoring scheme of the model test

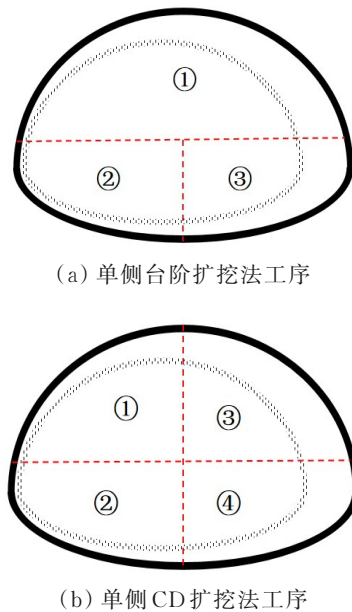


图7 隧道扩挖工序示意图

Fig.7 Tunnel excavation sequence diagram

个开挖步序。根据依托工程的施工步骤,单侧CD扩挖法进行开挖时,相似模型中每一开挖步的开挖进尺为2.5 cm,共计开挖80个开挖步序。图8为隧道扩挖后的不同工况示意图,在试验中单侧台阶扩挖法和单侧CD扩挖法在进行扩挖时同时进行初期支护,待全部扩挖完成后再进行二次衬砌支护。



(a) 隧道扩挖后毛洞工况



(b) 隧道扩挖后支护工况

图8 隧道扩挖后的不同工况示意图

Fig. 8 Diagram of different conditions after tunnel excavation

2 隧道扩挖围岩力学特征

2.1 隧道扩挖变形发育

单侧毛洞扩挖法的裂缝发育演变过程如图9所示。隧道扩挖至中部时,此时隧道内壁微裂隙发育,如图9(a)所示。随着扩挖的进行,上部岩体进一步变形挤压,造成隧道洞口附近局部交叉裂纹进一步扩展,如图9(b)所示。隧道扩挖完毕后,此时裂缝进一步扩展,隧道内壁形成明显的宏观内壁破坏,如图9(c)所示。这说明隧道扩挖侧拱肩的压应力释放较大,其内部几乎为围岩重力,未承载覆岩压力,覆岩压力向周边部位转移,这些部位的应力集中现象加剧,进一步影响隧道周边围岩的稳定性。

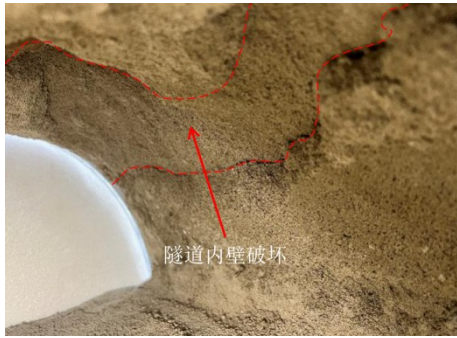
图10为不同隧道扩挖工法下位移变化曲线。由图10可以看出,3种扩挖工法下的位移变化相似。由图10(a)可知,单侧毛洞扩挖法的拱顶深部位移量最大,为0.54 mm。由于缺乏支护支撑,单侧毛洞扩挖法的位移量明显高于其他两种工法。图10(b)为单侧台阶扩挖法位移变化曲线,最大位移量出现在右拱脚,为0.17 mm。可以看出,右拱脚位移大于左拱脚,这主要是因为单侧台阶扩挖法中,非扩挖侧围岩更早得到支护,相对稳定性更高,然而扩挖侧因开挖体积较大且支护滞后,围岩需承受更多侧向应力,导致右拱脚位移增大。单侧CD扩挖法位移变化曲线如图10(c)所示,左拱脚位移



(a) 微裂隙发育



(b) 交叉裂纹扩展



(c) 宏观内壁破坏

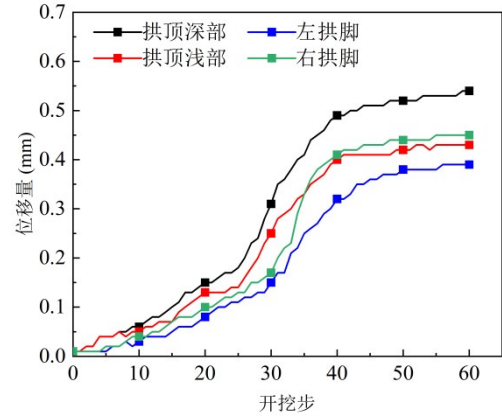
图9 单侧毛洞扩挖法的裂缝发育演变过程

Fig.9 The crack development and evolution process of the single-sided pilot tunnel excavation method

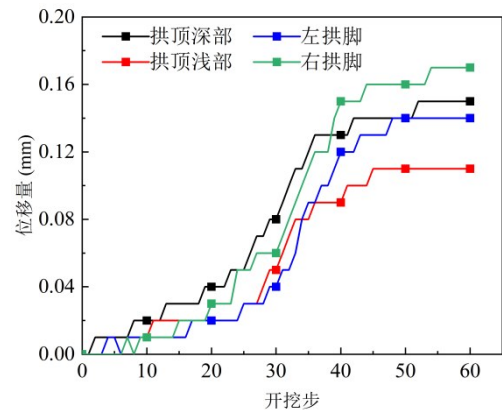
量最大,为0.13 mm。相较于单侧台阶扩挖法,拱顶位移量更少,这是因为拱顶开挖的面积较小,应力释放更为均匀,避免了在大面积开挖时围岩带来的应力集中。还可以看出右拱脚的位移量小于左拱脚,这是因为扩挖至扩挖侧时,围岩应力已部分释放,应力重分布更为均衡,变形程度减少。

2.2 扩挖隧道围岩压力分布特征分析

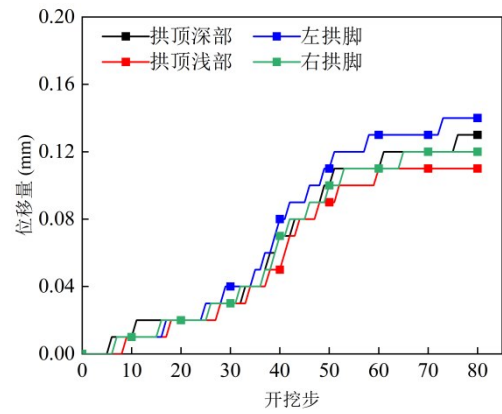
图11为不同隧道扩挖工法下围岩压力的分布特征。由图11可以看出,单侧毛洞扩挖法的围岩压力最小值出现在拱顶,最大值则出现在拱脚。这是因为拱顶处的应力通过拱圈效应将部分荷载传递至两侧拱肩和拱脚,而拱脚由于变形空间有限,围岩压力容易在该区域积聚并集中。单侧台阶扩挖法的围岩压力分布在各个区域之间存在一定的差



(a) 单侧毛洞扩挖法位移变化曲线



(b) 单侧台阶扩挖法位移变化曲线



(c) 单侧CD扩挖法位移变化曲线

图10 不同隧道扩挖工法下位移变化曲线

Fig.10 Displacement variation curves under different tunnel excavation methods

异,其中拱肩区域的围岩压力显著高于拱顶和拱脚,表明在单侧台阶扩挖法施工过程中,围岩压力倾向于向拱肩区域集中。单侧CD扩挖法的围岩压力分布与单侧台阶扩挖法相比,单侧CD扩挖法的围岩压力分布更加均匀。这是因为单侧CD扩挖法通过将开挖区域划分为多个导洞,逐步进行开挖和支护,使围岩应力释放更平缓,避免单侧大面积开挖引起的应力集中现象,从而减少围岩局部压力积聚。

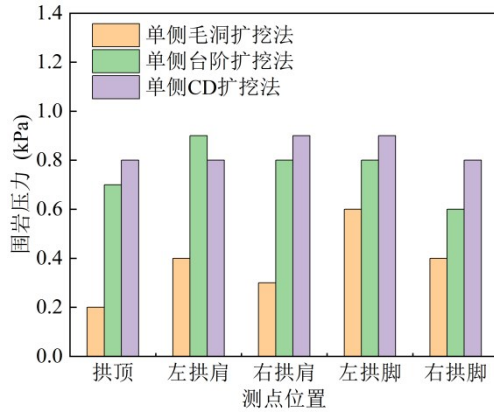


图 11 不同隧道扩挖工法下围岩压力的分布特征

Fig.11 Distribution characteristics of rock pressure under different tunnel excavation methods

3 隧道原位扩挖力学简化模型

3.1 隧道围岩应力简化模型

隧道扩挖作业等同于在原隧道中创造一个新的自由面,如图 12 所示,邻近围岩应力产生的弹性变形能向自由面方向转移,在自由面较远处形成高应力区(图 12 中区域 II),并在距自由面较近处形成低应力区(图 12 中区域 I)。高应力区的挤压赋能作用将使低应力区产生损伤,并解锁该区域的应力平衡条件,使低应力区外围岩受集中应力 σ_m 影响,而高应力区外受围岩应力 σ_0 影响。

$$\sigma_0 = \frac{2c^2(\sigma_h + \sigma_v)(c^2 - a^2) + (\sigma_h - \sigma_v)(4c^4 + 3a^4 - a^2c^2)\cos 2\theta}{4c^4} \quad (6)$$

式中: a 为隧道形心距隧道表面的距离; b 为低应力区半径; c 为高应力区半径。

在隧道初始开挖后,周围的塑性区已经形成^[24],因此低应力区和高应力区围岩的弹性模量和泊松比分别用 E_1, ν_1 和 E_2, ν_2 来表示。当塑性区的边界形成后,扩挖对其进一步扩展的影响相对有限^[25]。然而,扩挖仍然会对塑性区围岩的力学性能产生一定影响,因此引入损伤系数 D 描述 E_1, E_2 的关系,如式 (7) 所示。

$$E_1 = (1 - D)E_2 \quad (7)$$

在围岩应力 σ_0 作用下,高应力区的位移 u^{II} 可以表示为

$$u^{\text{I I}} = \frac{(1 - \nu_2)(b^2\sigma_m - c^2\sigma_0)}{E_2(c^2 - b^2)}r + \frac{b^2c^2(1 + \nu_2)(\sigma_m - \sigma_0)}{E_2(c^2 - b^2)r} \quad (8)$$

$$\sigma_m = \frac{\frac{\delta}{b} + \frac{2c^2\sigma_0}{E_2(c^2 - b^2)}}{\left(\frac{(1 - \nu_1) - (1 - D)(1 - \nu_2)}{(1 - D)E_2}\right) + 2\left(\frac{a^2}{E_2(1 - D)(b^2 - a^2)} + \frac{c^2}{E_2(c^2 - b^2)}\right)} \quad (11)$$

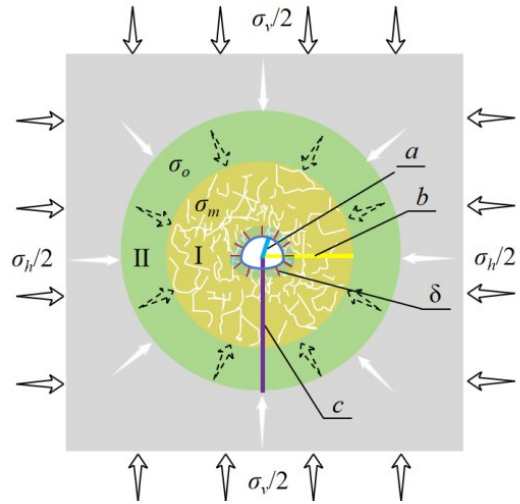


图 12 隧道围岩力学模型

Fig.12 Mechanical model of tunnel surrounding rock

令压应力为正、拉应力为负。如图 12 所示,建立坐标系可得隧道围岩力学模型,边界条件可表示为

$$\left. \begin{aligned} r = a: \sigma_r = 0, \tau_{r\theta} = 0 \\ r = R_b: \sigma_x = \frac{\sigma_h}{2}, \sigma_y = \frac{\sigma_v}{2}, \tau_{xy} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: σ_v 为围岩所受的垂直应力; σ_h 为围岩所受的垂直应力; r 为围岩中任一点距隧道形心的距离。

在极坐标系中构造辅助函数,围岩应力 σ_0 可表示为

图 13 展示了隧道扩挖施工过程中锚杆支护措施的效果。如图 13(a)所示,在无支护的情况下,围岩会发生较大的位移,甚至可能导致局部失稳。在隧道扩挖过程中,为了有效控制隧道的大变形,扩挖完成后会进行锚杆支护,锚杆可以改善锚杆周围围岩的力学性能,形成一个加固结构,并形成能量过渡区,如图 13(b)所示。能量过渡区的位移边界条件可以表示为

$$(u^{\text{I I}})_{r=c} = (u^{\text{I}})_{r=b} + \delta \quad (9)$$

式中: δ 为围岩支护区的体内位移。

低应力区的位移 u^{I} 可表达为

$$u^{\text{I}} = \frac{b^2\sigma_m(1 - \nu_1)}{E_2(1 - D)(b^2 - a^2)}r + \frac{a^2b^2\sigma_m(1 + \nu_1)}{E_2(1 - D)(b^2 - a^2)r} \quad (10)$$

围岩所受的集中应力 σ_m 可以表示为

将式(7)代入式(4)可以得到隧道自由面的位移 u_z

$$u_z = \frac{2ab^2\left(\frac{\delta}{b} + \frac{2c^2\sigma_0}{E_2(c^2 - b^2)}\right)}{(1-D)(b^2 - a^2)\left(\left(\frac{(1-\nu_1)-(1-D)(1-\nu_2)}{(1-D)}\right) + 2\left(\frac{a^2}{(1-D)(b^2 - a^2)} + \frac{c^2}{(c^2 - b^2)}\right)\right)} \quad (12)$$

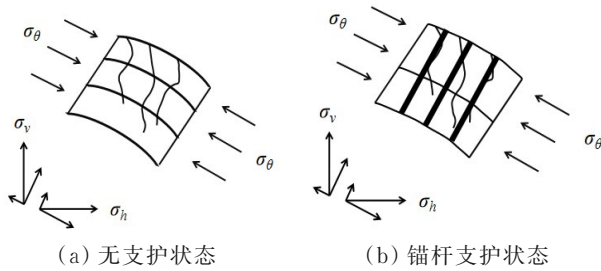


图 13 隧道施工过程中锚杆支护效果分析
Fig.13 Analysis of rock bolt support effect in tunnel construction process

3.2 理论模型计算结果验证

因为花岗岩强度较高,所以通常损伤系数 D 较小, D 分别取 0.1、0.2 和 0.3 来进行计算。台阶法扩挖和 CD 法扩挖围岩支护区的体内位移 δ_1 和 δ_2 根据依托工程实际测量的平均值得出,另外根据相关研究^[26-32],确定隧道理论模型参数取值,如表 3 所示。不同隧道扩挖工法下拱顶和拱脚的位移特征如图 14 所示。由图 14 可以发现,随着损伤系数的增大,隧道结构中的拱顶和拱脚的位移量都会显著增加。这是因为损伤系数反映了围岩扩挖后的损伤程度,损伤系数越大,围岩的强度和稳定性下降越严重,从而导致拱顶和拱脚的位移量的增加。同时可以观察到,CD 法施工造成的位移量明显小于台阶法施工,这进一步表明 CD 法施工在控制围岩变形方面更具优势。还可以发现,拱脚的位移量通常比拱顶的位移量要大。因此,在隧道扩挖施工过程中,拱脚的支护和监测尤为重要,支护设计时应优先考虑拱脚的支护结构。

4 不同隧道扩挖工法的工程实例

在隧道扩挖施工过程中,为了确保施工的安全性和有效性,进行了针对不同施工方法的微芯随钻及监测,获得围岩应力及变形分布特征,施工现场

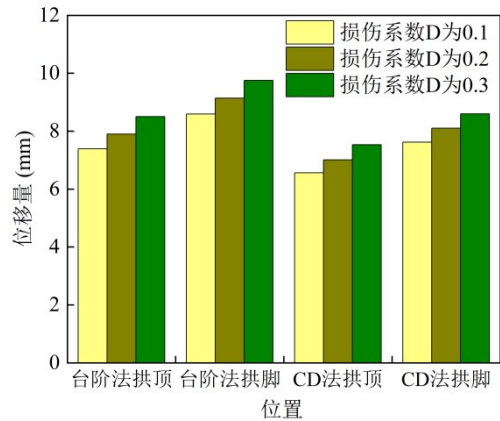


图 14 不同隧道扩挖工法下拱顶和拱脚的位移特征
Fig.14 Displacement characteristics of the crown and invert under different tunnel excavation methods

如图 15 所示。对 RK10+458 段和 RK10+476 段分别进行监测,分析单侧 CD 扩挖法和单侧台阶扩挖法对围岩力学特征的影响。不同隧道扩挖工法的位移变化过程如图 16 所示。从图 16(a)可以看出,单侧台阶扩挖法存在明显的位移急剧变化段。其中,第①段的位移变化速率最为明显,这是由于上台阶开挖引起的。另外,第②段时拱脚的位移变化速率显著上升,这是因为左下台阶的扩挖造成了拱脚附近的围岩变形。在图 16(b)中,单侧 CD 扩挖法的位移变化特征显示出同样的变化趋势。第①段左上导洞的开挖导致拱顶的位移变化速率显著增加,第②段左下导洞的开挖进一步增加了位移量,第④段右下导洞的开挖对拱脚的位移量影响也明显增大。与图 10 的试验结果相比,物理模型与实际位移变形过程呈现出高度相似的趋势,都经历了超前变形、扩挖变形以及变形收敛的阶段。还可以发现,两种工法均能保证隧道扩挖施工的安全性,但是单侧 CD 扩挖法的拱顶和拱脚总位移值更小,考虑到长期稳定性,单侧 CD 扩挖法为最优方案。

经过相似比换算后,单侧台阶扩挖法中拱顶、左拱肩、右拱肩、左拱脚和右拱脚的围岩压力试验

表 3 理论模型参数取值表

Table 3 Theoretical model parameter value

隧道形心距隧道表面的距离 a/m	低应力区半径 b/m	高应力区半径 c/m	高应力区围岩的弹性模量 E_2/GPa	低应力区围岩的泊松比 ν_1	高应力区围岩的泊松比 ν_2	围岩所受的垂直应力 σ_v/MPa	围岩所受的垂直应力 σ_h/MPa	台阶法扩挖围岩支护区的体内位移 δ_1/mm	CD法扩挖围岩支护区的体内位移 δ_2/mm
9.4~10.25	12	18	15	0.35	0.35	0.9	0.9	0.4	0.2



(a) 单侧台阶扩挖法中的左拱脚支护施工



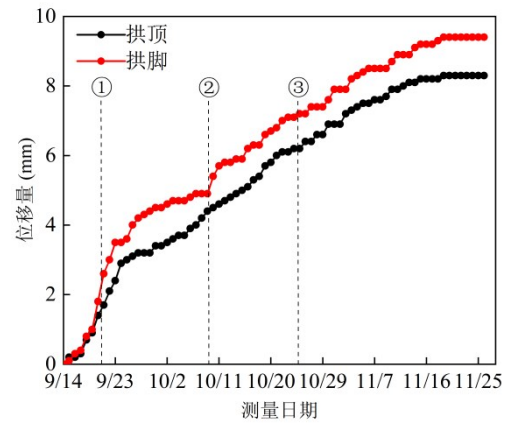
(b) 单侧 CD 扩挖法中的右导洞开挖施工

图 15 隧道扩挖施工中不同扩挖工法现场图

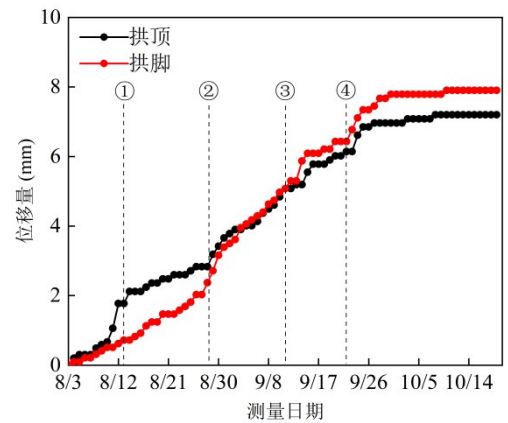
Fig.15 Field images of different excavation methods in tunnel construction

值分别为 42、54、48、48、36 kPa,而单侧 CD 扩挖法下拱顶、左拱肩、右拱肩、左拱脚和右拱脚的围岩压力试验值依次为 48、48、54、54、48 kPa。图 17 为不同隧道扩挖工法下的围岩压力实测值。从图 17(a)可以发现,拱顶、右拱肩、左拱脚和右拱脚的实测值和试验值非常接近,该区域的围岩压力状态得到了很好地模拟。另外右拱肩的试验值略低于实测值,这可能与实际施工中支护措施的作用有关。从图 17(b)可以看出,右拱肩、左拱脚和右拱脚的实测值和试验值差异较小,但是拱顶和左拱肩略有差异,这可能是模型试验扩挖过程中出现了应力集中的现象。总体来看,实际围岩压力与模型试验的围岩压力表现出较高的相似性,这表明模型试验能够有效反映实际扩挖施工中的力学行为。

不同隧道扩挖工法下实测值、模型值和试验值的沉降量如图 18 所示。由图 18 可以发现,拱顶的模型值、拱顶深部的试验值表现出高度一致,拱脚的理论模型值、右拱脚的试验值与拱脚实测值更为接近。此外,单侧台阶扩挖法和单侧 CD 扩挖法的实测值大多位于损伤系数 D 为 0.2~0.3 的理论值之间。这表明当损伤系数 D 为 0.2 时,模型能够较准确地反映实测值,对围岩力学行为和变形特征的描述更为精准。从图 18(a)中可以看出,单侧台阶扩挖法和单侧 CD 扩挖法中的拱顶深部试验值与实



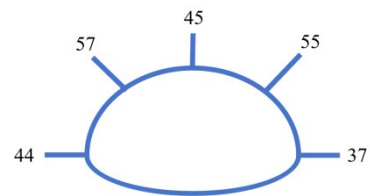
(a) 单侧台阶扩挖法的位移变化过程



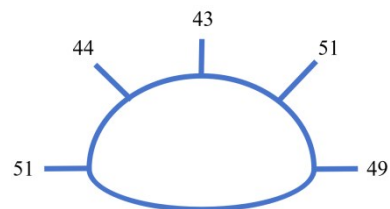
(b) 单侧 CD 扩挖法的位移变化过程

图 16 不同隧道扩挖工法的位移变化过程

Fig.16 Displacement variation process under different tunnel excavation methods



(a) 单侧台阶扩挖法的围岩压力实测值(单位:kPa)



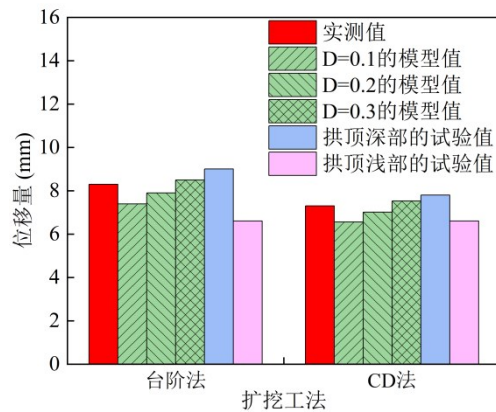
(b) 单侧 CD 扩挖法的围岩压力实测值(单位:kPa)

图 17 不同隧道扩挖工法下的围岩压力实测值

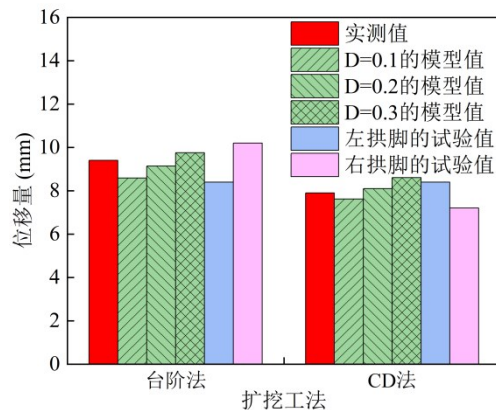
Fig.17 Measured rock pressure values under different tunnel excavation methods

测值结果更贴近。从图 18(b)中可以看出,单侧台阶扩挖法中右拱脚的试验值与实测值结果更相似,单侧 CD 扩挖法中左拱脚的试验值与实测值结果更

相近。这也能说明不同扩挖工法对围岩的扰动影响是显著的,考虑具体的扩挖施工工法及其对围岩的潜在影响,是确保施工安全和结构稳定的重要因素。还可以看出,单侧台阶扩挖法中拱顶深部的试验值与实测值结果相差为 8.43%,右拱脚的试验值与实测值结果相差为 8.51%,单侧 CD 扩挖法中拱顶深部的试验值与实测值结果相差为 6.85%,右拱脚的试验值与实测值结果相差为 9.72%。



(a) 拱顶总位移量的对比分析



(b) 拱脚总位移量的对比分析

图 18 不同隧道扩挖工法下总位移量的对比分析

Fig.18 Comparative analysis of total displacement under different tunnel excavation methods

5 结论

1)物理模型试验研究表明,单侧毛洞扩挖法的位移量变化最大,拱顶位移量达到 0.54 mm,围岩压力集中于拱脚,扩挖过程中隧道内壁出现微裂隙并最终导致内壁破坏;单侧台阶扩挖法的最大位移量出现在右拱脚,达到 0.17 mm,围岩压力主要集中在拱顶和拱肩;单侧 CD 扩挖法的位移量最小,右拱脚仅为 0.13 mm,围岩压力分布更为均匀。

2)通过隧道围岩应力简化模型得出,围岩的损伤程度直接决定了隧道的位移量,损伤系数越大,位移量越大;相较于单侧台阶扩挖法,单侧 CD 扩挖

法施工造成的位移量更小;拱脚的位移量大于拱顶,设计时应优先考虑拱脚的支护结构。

3)模型试验中的围岩压力和位移量的试验值与实测值高度吻合,位移变化过程呈现出相同的趋势。当损伤系数 D 为 0.2 时,两种扩挖工法下的模型值能够全面反映实测值;通过实测值的对比,单侧 CD 扩挖法对隧道围岩变形的控制效果更好,进一步验证了其在复杂隧道施工中的优势。

参考文献

- [1] 黄阜, 陈晶晶, 王勇涛, 等. 基于极限分析理论的复合地层中双模盾构开挖面稳定性研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(6): 89-99.
HUANG F, CHEN J J, WANG Y T, et al. Study on the stability of double-mode shield excavation face in composite strata based on limit analysis theorem [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(6): 89-99. (in Chinese)
- [2] 高干, 刘元雪, 周结中, 等. 地下空间扩建型式研究[J]. 现代隧道技术, 2010, 47(6): 1-9.
GAO G, LIU Y X, ZHOU J Z, et al. Study on underground space enlargement options [J]. Modern Tunnelling Technology, 2010, 47(6): 1-9. (in Chinese)
- [3] DONG J C, WANG X, BAI Q, et al. Influence of underground excavation expansion on surrounding rock characteristics at intersection of ventilation shaft and tunnel: A case study [J]. Buildings, 2023, 13(2): 388.
- [4] SUN S Q, JIANG Z B, LI L P, et al. Model test and numerical verification of surrounding rock stability of super-large-span and variable-section tunnels [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2024, 153: 106020.
- [5] 李相征. 江底大粒径卵石层大埋深地铁联络通道冻结法施工冻结数值分析[J]. 建筑科技, 2019, 3(3): 60-64.
LI X Z. Freezing numerical analysis for subway connecting passage freezing method construction in deep big-diameter cobble layer under river [J]. Building Technology, 2019, 3(3): 60-64. (in Chinese)
- [6] 刘文博, 陈璐, 胡俊, 等. 多排冻结管斜型排布温度场发展规律数值分析[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2020, 38(3): 290-299.
LIU W B, CHEN L, HU J, et al. Numerical analysis of temperature field development in inclined layout of multi-row frozen pipes [J]. Natural Science Journal of Hainan University, 2020, 38(3): 290-299. (in Chinese)
- [7] 陈湘生, 曾仕琪, 韩文龙, 等. 机器学习方法在盾构隧道工程中的应用研究现状与展望[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1): 1-13.
CHEN X S, ZENG S Q, HAN W L, et al. Review and prospect of machine learning method in shield tunnel

- construction [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(1): 1-13. (in Chinese)
- [8] 王睿, 张煜, 黄晓东, 等. 基于松动圈理论的软岩大变形隧道锚杆支护优化研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(4): 74-82.
- WANG R, ZHANG Y, HUANG X D, et al. Optimization of bolt support for soft rock large deformation tunnel based on the theory of loose circle [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(4): 74-82. (in Chinese)
- [9] ZHU T, LIU Y M. Evaluating construction parameters of HB and CD methods for super large section tunnel: a case study [J]. Scientific Reports, 2023, 13: 15812.
- [10] ZHENG G, WANG R K, LEI H Y, et al. A novel sequential excavation method for constructing large-cross-section tunnels in soft ground: Practice and theory [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 128: 104626.
- [11] SUN B L, TANG X R, HE Y Y, et al. Small pilot tunnel advance and step reverse expansion in super-large-section tunnel excavation [J]. Shock and Vibration, 2021, 2021(1): 8613551.
- [12] 林从谋, 张在晨, 郑强, 等. 小净距隧道原位二扩四CD工法软弱围岩稳定性及支护参数研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(7): 124-132.
- LIN C M, ZHANG Z C, ZHENG Q, et al. Study on the soft surrounding rocks stability and supporting parameters of two-to-fourlane tunnel of small clear-distance by CD method [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7): 124-132. (in Chinese)
- [13] 刘继国, 程勇, 郭小红, 等. 复杂条件下超浅埋双层叠合大断面隧道下穿敏感建筑设计[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 174-179, 185.
- LIU J G, CHENG Y, GUO X H, et al. Design for a super-shallow large-section double-level tunnel in complex conditions underneath sensitive buildings [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5): 174-179, 185. (in Chinese)
- [14] 张建辉, 黄忠凯, 刘祥勇, 等. 基于矢量地震动强度参数的隧道结构易损性分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(5): 57-66.
- ZHANG J H, HUANG Z K, LIU X Y, et al. Fragility analysis of tunnel structures based on the vector-valued intensity measures [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(5): 57-66. (in Chinese)
- [15] OCAK I. A new approach for estimating the transverse surface settlement curve for twin tunnels in shallow and soft soils [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72 (7): 2357-2367.
- [16] 夏梦然. 小净距隧道围岩稳定性的影响因素[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 73-80.
- XIA M R. Influence factors of surrounding rock stability of neighborhood tunnel [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(5): 73-80. (in Chinese)
- [17] 代聪, 何川, 刘川昆, 等. 开挖工法对高地应力场软岩隧道围岩稳定性影响的模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(4): 141-149.
- DAI C, HE C, LIU C K, et al. Model test study on influence of excavation methods on stability of surrounding rocks of the soft rock tunnel in high geostress field [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(4): 141-149. (in Chinese)
- [18] 陈雷. CFRP 环向约束砂岩三轴加载及流变过程作用机制研究 [D]. 辽宁 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- CHEN L. Study on triaxial loading and rheological mechanism of CFRP toroidal constrained sandstone [D]. Fuxin, Liaoning: Liaoning Technical University, 2022. (in Chinese)
- [19] LI K H, CHENG Y, YIN Z Y, et al. Size effects in a transversely isotropic rock under Brazilian tests: Laboratory testing [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(6): 2623-2642.
- [20] 靖洪文, 赵振龙, 吴疆宇. 基于多源信息表征的深部巷道围岩结构灾变演化机理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 163-176.
- JING H W, ZHAO Z L, WU J Y. Disaster evolution mechanism of surrounding rock structure of deep roadway based on multi-source information representation [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 163-176. (in Chinese)
- [21] 孟庆彬, 王杰, 韩立军, 等. 极弱胶结岩石物理力学特性及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊 1): 19-29.
- MENG Q B, WANG J, HAN L J, et al. Physical and mechanical properties and constitutive model of very weakly cemented rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(Sup 1): 19-29. (in Chinese)
- [22] 沈新普, 王建学, MrozZenon. 正交各向异性损伤材料的 Mohr-Coulomb 条件[J]. 煤炭学报, 2003, 28(1): 26-30.
- SHENX P, WANGJ X, MROZZ. Mohr- Coulomb criteria associated with materials of orthotropic damage [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(1): 26-30. (in Chinese)
- [23] 徐磊, 任青文, 杜小凯, 等. 层状岩体各向异性弹塑性模型及其数值实现[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6 (4): 763-769.
- XU L, REN Q W, DU X K, et al. An anisotropic elastoplastic constitutive model for layered rock masses and its implementation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(4): 763-769. (in Chinese)

- [24] 胡鹏, 宋浪, 张红义. 白马隧道软岩大变形机理及长锚杆变形控制效果评价[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(增刊 2): 239-246.
- HU P, SONG L, ZHANG H Y. Large-deformation mechanism of soft rocks and evaluation of deformation control effect in Baima tunnel using long anchor bolts [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(Sup 2): 239-246. (in Chinese)
- [25] 黄成年, 吴逸飞, 许煜林, 等. 隧道原位扩建施工力学与围岩松动圈演变规律: 以广西贺州—巴马高速公路廷心隧道原位扩建工程为例[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(24): 10520-10527.
- HUANG C N, WU Y F, XU Y L, et al. Construction mechanics and evolution of surrounding rock loose circle of in situ tunnel expansion: Taking the in situ expansion project of Tingxin Tunnel on Hezhou: Bama expressway in Guangxi as an example [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(24): 10520-10527. (in Chinese)
- [26] 赵景阳. 盾构隧道垂直下穿既有管线的扰动效应研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- ZHAO J Y. Study on the disturbance effects of shield tunnel passing through existing pipeline vertically [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [27] 刘长明, 张红, 晏祥智, 等. 隧道围岩的黏弹塑蠕变模型及参数劣化分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(6): 2341-2347, 2691.
- LIU C M, ZHANG H, YAN X Z, et al. Viscoelastic-plastic creep model and parameter deterioration analysis of tunnel surrounding rock [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(6): 2341-2347, 2691. (in Chinese)
- [28] 贾伟, 李尧, 郭张龙, 等. 洛川隧道围岩变形规律模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(增刊 1): 164-169.
- JIA W, LI Y, GUO Z L, et al. Model tests on soil deformation of surrounding soil of Luochuan tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46 (Sup 1): 164-169. (in Chinese)
- [29] 吴鹏, 陈健, 崔岚, 等. 复合式衬砌隧道模型试验及其承载特性研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(增刊 1): 102-106.
- WU P, CHEN J, CUI L, et al. Model tests and bearing characteristics of composite lining of tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(Sup 1): 102-106. (in Chinese)
- [30] 刘学增, 李振, 杨芝璐, 等. 隧道衬砌裂缝特征对承载力的影响分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(7): 37-45.
- LIU X Z, LI Z, YANG Z L, et al. Analysis of the influence of tunnel lining cracks on bearing capacity [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(7): 37-45. (in Chinese)
- [31] 荣巍, 苏旭林, 赵楚军, 等. 穿越不良地质带隧道结构响应规律模型实验平台设计[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(7): 119-127.
- RONG W, SU X L, ZHAO C J, et al. Design of an experimental platform for investigating the structural response law of tunnel models crossing unfavorable geological zones [J]. Experimental Technology and Management, 2024, 41(7): 119-127. (in Chinese)
- [32] 全小娟, 赵亚峰, 熊凌浩, 等. 公路隧道衬砌空洞病害力学行为模型试验研究[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(4): 75-83.
- QUAN X J, ZHAO Y F, XIONG L H, et al. Experimental study on mechanical behavior model of highway tunnel lining cavity diseases [J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(4): 75-83. (in Chinese)

(编辑 XXX)