

径向让压系统对软岩隧道围岩力学特性影响研究

陈秋雨, 黄璐, 潘虎, 陈杰, 谢强, 李秋铃, 疏梓宸, 张旭皓

Enhancing mechanical characteristics of soft rock tunnel surrounding rock through radial yield pressure system

CHEN Qiuyu, HUANG Lu, PAN Hu, CHEN Jie, XIE Qiang, LI Qiuling, SHU Zichen, and ZHANG Xuhao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307047>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深埋顺层偏压隧道围岩破坏机理及规律研究——以郑万线某隧道为例

A study of the mechanism and regularity of failures in the surrounding rock of a deep buried bias tunnel embedded in geologically bedding strata: taking one tunnel of the Zhengwan line as an example

胡炜, 谭信荣, 蒋尧, 毛坚强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 60–68

冻融循环条件下含软弱夹层隧道围岩力学性质及破坏特征

On mechanical properties and failure characteristics of surrounding rock of tunnel with weak interlayer under freezing–thawing cycles

张立 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 74–80

某铁路隧道底鼓段粉砂质泥岩微宏观物理力学特性研究

A study of the micro–macro–physical and mechanical properties of silty mudstone in the bottom drum section of a railway tunnel

刘超, 袁伟, 路军富, 张钊 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 108–115

斜井盾构掘进时富水围岩变形特性模拟分析

A study of the rich–water ground rock deformation features as shield tunneling along with inclined shaft

马君伟, 王贤能, 林明博 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 126–131

含石量对软质岩土石混合料土力学特性影响研究

A study of the effect of rock content on mechanical properties of soil–soft rock mixture

邵忠瑞, 罗雪贵, 郭娜娜 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 111–111

拓宽方式对软土路基工程特性影响的离心模型试验

Centrifugal test on influence of widening styles on the engineering characteristics of soft soil

叶观宝, 葛敬文, 许言, 张振, 饶烽瑞, 戚得健 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 112–117



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307047

陈秋雨, 黄璐, 潘虎, 等. 径向让压系统对软岩隧道围岩力学特性影响研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 146-156.

CHEN Qiuyu, HUANG Lu, PAN Hu, et al. Enhancing mechanical characteristics of soft rock tunnel surrounding rock through radial yield pressure system[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 146-156.

径向让压系统对软岩隧道围岩力学特性影响研究

陈秋雨¹, 黄璐¹, 潘虎², 陈杰³, 谢强⁴, 李秋铃⁵, 疏梓宸⁵, 张旭皓^{4,6}

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 2. 云南永勐高速公路建设开发有限公司, 云南 临沧 677601; 3. 云南建设基础设施投资股份有限公司, 云南 昆明 650000; 4. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610000; 5. 四川师范大学工学院, 四川 成都 610066; 6. 中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200000)

摘要: 为处理深部软岩隧道存在的大变形问题, 一般采取强支护或支护后进行修复, 但收效甚微。在三维地质力学模型的基础上, 提出以径向让压为核心的主动支护, 先释放围岩应力, 后抵抗围岩变形, 改善挤压型大变形隧道的力学特性, 有效地控制隧道开挖过程中的位移变形。文章以公路隧道典型大变形段为研究对象, 建立三维地质力学模型, 分析径向让压支护对围岩变形和支护承载能力的控制效果。结果表明: 径向让压支护段相对正常支护段能有效控制围岩相对变形, 从锚杆变形看出, 最大拉应变减小了 75.8%, 最大压应变减小了 67.6%; 从围岩与初支接触压力看, 将拱底、拱脚压力降低 80%, 验证了径向让压支护对于围岩塑性区发展和应力释放的有效控制。研究成果可为同类深部软岩隧道围岩控制技术提供数据参考。

关键词: 三维地质模型试验; 软岩隧道; 变形特征; 径向让压; 支护措施

中图分类号: U457

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)04-0146-11

Enhancing mechanical characteristics of soft rock tunnel surrounding rock through radial yield pressure system

CHEN Qiuyu¹, HUANG Lu¹, PAN Hu², CHEN Jie³, XIE Qiang⁴, LI Qiuling⁵,
SHU Zichen⁵, ZHANG Xuhao^{4,6}

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Yunnan Yongmeng Expressway Construction and Development Co. Ltd., Lincang, Yunnan 677601, China; 3. Yunnan Infrastructure Investment Co. Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China; 4. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610000, China; 5. Institute of Technology, Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610066, China; 6. China Railway Construction Corporation, Shanghai 200000, China)

Abstract: This study investigated the efficacy of radial yield support as an active measure to mitigate stress and deformation in deep soft rock tunnels experiencing large deformation. Traditional support methods have shown limited success in addressing this challenge. Leveraging a three-dimensional geomechanical model, this study proposes an active support system centered around radial yield pressure. This system releases stress in the

收稿日期: 2023-07-29; 修订日期: 2024-04-30

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 云南省交通运输厅科技创新及示范项目(2021-94)

第一作者: 陈秋雨(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土与地质灾害方面的研究。E-mail: chen3240028@qq.com

通讯作者: 黄璐(1982—), 女, 博士, 副教授, 主要从事岩土体多场耦合问题研究。E-mail: huanglu600@163.com

surrounding rock before resisting deformation, thereby improving the mechanical properties of the tunnel and effectively controlling displacement and deformation during excavation. Through analysis using the three-dimensional geomechanical model, this study evaluated the control effect of radial yield support on surrounding rock deformation and support bearing capacity, focusing on a typical large deformation section of a highway tunnel. The results demonstrate a significant reduction in relative deformation of the surrounding rock compared to conventional support methods, with a reduction of 75.8% in tensile strain and 67.6% in compressive strain as evidenced by bolt deformation. Additionally, the contact pressure between the surrounding rock and primary support is reduced by 80%, indicating the effective control of radial yield support on plastic zone development and stress release in the surrounding rock. These findings offer valuable insights for the application of similar technologies in controlling surrounding rock in deep soft rock tunnels.

Keywords: three-dimensional geological model test; soft rock tunnel; deformation characteristics; radial yield pressure; support measures

随着浅部地下空间资源的枯竭,对深部地下空间进行资源开发已成为世界各国的常态^[1-2]。中国西南地区,广泛分布着以泥岩、破碎板岩等为代表性的岩层^[3],由于这类地层本身强度低、易软化,在高地应力作用下,围岩的物理力学性质发生显著变化^[4],导致隧道施工过程中出现强流变、大变形特征^[5],属于典型挤压型软岩大变形问题。因此,研究深埋软岩高地应力隧道应力分布特征及变形规律具有重要的工程意义。

目前,针对挤压型软岩大变形问题的研究主要采用理论分析^[6]、现场监测^[7]、数值模拟^[8]以及模型试验^[9]等4种方法。理论分析、数值模拟假设较多,现场监测成本高、耗时长,对于高地应力深埋软岩隧道,地质力学模型试验在研究深埋软岩高地应力隧道应力分布特征及变形规律具有独特的优势^[10]。徐前卫等^[9]研究两相受力状态下锚杆对围岩变形破坏规律的影响,得出锚杆有助于提高拱顶岩体极限承载能力;Zhang等^[11]研究了深埋地下复合体的变形破坏机制,阐明了相邻开挖之间的相互作用,但没有考虑支护结构对围岩变形的影响。现有研究部分采用平面模型试验系统,不符合深部构造应力环境。

为了克服现有传统复合刚性衬砌在深部软岩隧道中支护效果并不理想的缺陷,相关学者利用新奥法理论^[12]研究让压支护作用下隧道围岩的变形与受力状态。让压支护可分为径向让压和环向让压^[13],其中径向让压又可分为径向让压层泡沫混凝土和径向让压锚杆^[14]。径向让压层泡沫混凝土沿隧道轴线安装泡沫混凝土层,通过其自身的径向变形实现支护结构的缓冲保护。径向让压层泡沫混凝土相对于径向让压锚杆和环向让压具有更大的承载能力,能有效分散围岩载荷并降低应力集中。目前关于径向让压层泡沫混凝土的研究大多局限于理论分析^[15]、数值模拟^[16]和

现场试验^[17]。通过既有研究可以发现,针对深部软岩隧道开挖过程中的围岩力学特征研究大多聚焦于无支护或刚性支护,而鲜有针对深部软岩隧道径向让压层支护特性的研究。

本文以V级围岩隧道为工程背景,进行深部软岩隧道径向让压支护特征研究的三维地质力学模型试验,通过压缩试验确定模型试验的径向让压材料,研制与实际泡沫混凝土层相匹配的径向让压层。在模型试验过程中,通过现场施工顺序进行隧道的开挖和支护,研究深部软岩隧道的围岩变形特征,探讨正常支护段与径向让压支护段的围岩变形特征和初期支护受力特点。

1 地质力学模型试验方案

1.1 模拟对象

试验模拟对象为典型V级围岩,隧道埋深在300 m,隧道支护结构为钢拱架、锚杆、钢筋网和喷射混凝土。正常支护段为钢锚网喷支护,径向让压支护段在正常支护段的基础上,对围岩与喷射混凝土层间加入泡沫混凝土。

1.2 模型试验系统

自制三维应力模拟试验装置,进行三维高地应力场地质力学模型试验。试验装置主要由以下部分组成:反力架系统、三维加载系统和自动数据采集系统,如图1所示。反力框架系统尺寸为长2 450 mm,宽1 220 mm,高2 060 mm,其内部设置导向框架,防止加载板在模型边缘相遇^[18],模型内部容积的最大尺寸为长1 750 mm、宽520 mm、高1 360 mm。三维加载系统包含14条独立加载油路,实现模型上、下、侧边界上的三维加载。自动采集系统由多点位移采集系统、静态电阻应变测试系统和压力盒组成。



(a) 模型箱和反力架系统



(b) 数据采集器

图 1 真三轴高地应力地下工程模拟试验装置

Fig. 1 True triaxial high in-situ stress underground engineering simulation test apparatus

1.3 相似原则

根据相似理论,定义原型(P)与模型(M)之间物理量的比例作为相似尺度(C_i),其中参数*i*可表示长度(L)、单位重量(γ)、位移(δ)、弹性模量(E)、应力(σ)、应变(ε)、泊松比(μ)和内摩擦角(θ)。 δ_p 、 δ_M 、 L_p 和 L_M 分别表示原型位移、模型位移、原型尺寸和模型尺寸,相似关系推导如表 1 所示^[19-20]。

表 1 相似关系
Table 1 Similarities

名称介绍	相似关系	相似比
相似尺度	$C_i = \delta_p / \delta_M = L_p / L_M$	50
相似位移	$C_\delta = C_L \cdot C_E$	50
相似应力	$C_\sigma = C_E \cdot C_\varepsilon$	50
相似应变	$C_\varepsilon = C_\theta = C_\mu$	1

根据原型隧道横截面尺寸(210 mm×250 mm)和开挖破坏区域确定模型边界,确定几何相似尺度为 $C_L = 50$ 。模型总体尺寸(1 750 mm×520 mm×1 360 mm)是隧道尺寸的 6 倍以上,边界效应引起的误差满足工程要求^[21]。原型尺寸为 87.5 m×26.0 m×68.0 m,模型尺寸为 1.75 m×0.52 m×1.36 m,如图 2 所示。根据几何相似尺度减小隧道模型的尺寸,模型隧道宽度为 250 mm,上台阶高度为 125 mm,下台阶高度为 85 mm。原型界面应力值为 $\sigma_{p1} = 7.20$ MPa, $\sigma_{p2} = 5.04$ MPa, $\sigma_{p3} = 3.60$ MPa,对应的模型表面平均应力分别为: $\sigma_{M1} = 0.144 0$ MPa,

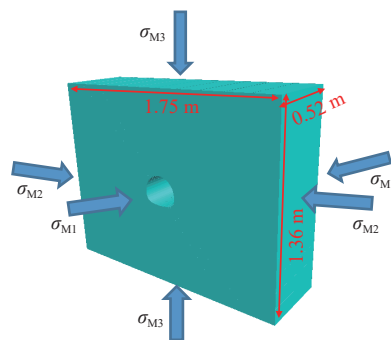


图 2 模型模拟尺寸

Fig. 2 model simulation size.

$\sigma_{M2} = 0.100 8$ MPa, $\sigma_{M3} = 0.072 0$ MPa。

1.4 相似材料

1.4.1 围岩相似材料

考虑制造方法和试验要求,本次试验选用自行研制的重晶石粉-膨润土-二氧化硅胶结材料作为围岩相似材料。膨润土(Be)、重晶石粉(Ba)和二氧化硅(S)用作聚集体,聚集体与酒精和松香溶液(R&A)混合,酒精蒸发,松香作为粘合剂^[22]。制作直径为 50 mm、高度为 100 mm 的圆柱形样品进行单轴压缩试验。当 $m(\text{Be}) : m(\text{Ba}) : m(\text{S}) : m(\text{R\&A}) = 0.2 : 0.28 : 0.48 : 0.04$ (m 为质量),酒精与松香的溶液浓度为 4% 时,制备的材料满足模型试验要求。围岩相似材料参数见表 2。

表 2 围岩相似材料的物理力学参数
Table 2 Measured physical and mechanical parameters of analogue materials of surrounding rock

V 级围岩	峰值强度/kPa	内聚力/kPa	摩擦角/(°)	弹性模量/MPa
原型	8 400	1 760.00	36.40	1 200.00
相似材料	167	35.36	36.43	23.48

1.4.2 初期支护的相似材料

隧道原型采用钢锚网喷射混凝土支护,锚杆抗拉强度 1 125 MPa,等效刚度 210 kPa·m²。根据模型试验的相似尺度、锚杆力学的抗拉强度和刚度等效原理^[23],采用截面尺寸为 2.55 mm×2.3 mm 的 PE 方棒作为锚杆的相似材料。根据模型试验的相似尺度、钢拱架的弹性模量和抗弯刚度等效原理^[24],采用厚 0.8 mm,宽 3 mm 的铝条作为钢拱架的相似材料。根据模型试验的相似尺度、钢筋网的抗拉强度和刚度等效原理,采用 20 目尼龙网作为钢筋网的相似材料,采用快凝石膏和水模拟隧道喷射混凝土支护^[25],初期支护相似材料参数见表 3,初期支护见图 3。

1.4.3 让压层的相似材料

泡沫混凝土因高压缩性和轻质性被证明作为软

表 3 相似材料力学参数

Table 3 Mechanical parameters of similar material

相似材料类别	弹性模量 /MPa	抗拉强度 /MPa	单向抗压强度/MPa	极限应变 /%
锚杆	716.87	17.34	—	6.50
钢拱架	70 000.00	126.00	—	—
钢筋网	2 400.00	—	—	13.38
衬砌	28.10	—	0.951	—

注: —表示该参数未进行测量。



图 3 初期支护

Fig. 3 Initial support

岩隧道的吸能材料是可行的^[26-27]。根据模型试验的相似尺度、泡沫混凝土让压层的弹性模量等效原理和压缩特性,采用 3 mm 厚的 EVA 泡沫作为泡沫混凝土让压层的相似材料。并通过准静态横向压缩实验,确定让压层相似材料与原型参数^[28]见表 4,径向让压层相似材料见图 4。

1.5 地质力学模型构建

1.5.1 模型试验准备

地质力学模型填筑时,为保证模型的整体性,采用分层填筑,每层厚度 50 mm,逐层压实、整平^[29]。为



图 4 径向让压层的相似材料

Fig. 4 Radial lamination of similar material

表 4 径向让压层相似材料和原型的力学参数

Table 4 Mechanical parameters of similar material and prototype of radial yielding layer

径向让压层	弹性模量/MPa	可压缩量/mm
相似材料	4	2
原型	200	100

消除分层施工出现的模型围岩不均匀分层现象,用钢刷将填充物表面磨粗,并将表面整平。在模型表面和加载板之间铺设 2 层聚四氟乙烯板,并在 2 层聚四氟乙烯板内部涂上凡士林油以减少摩擦^[30]。当模型制作到设计高度时,根据测试方案嵌入传感器,如图 5 所示。

1.5.2 试验监测方案

隧道内分 3 段布置传感器,第 I、II、III 段距离开挖进口分别为 17 cm(正常支护段)、26 cm、35 cm(径向让压支护段)。在第 I、III 段相同位置布置了压力



图 5 物理模型建立的一般步骤

Fig. 5 General procedure of building physical model

传感器、锚杆应变计;沿着拱顶、拱肩、拱腰、拱脚、拱底在初期支护与围岩洞壁之间布置压力盒;沿着拱顶、拱肩、拱腰、边墙在锚杆上布置应变片。在

第 II 段左侧和顶部的围岩内部和顶部分别布置 6 个位移传感器,监测不同深度的围岩内部变形,如图 6 所示。

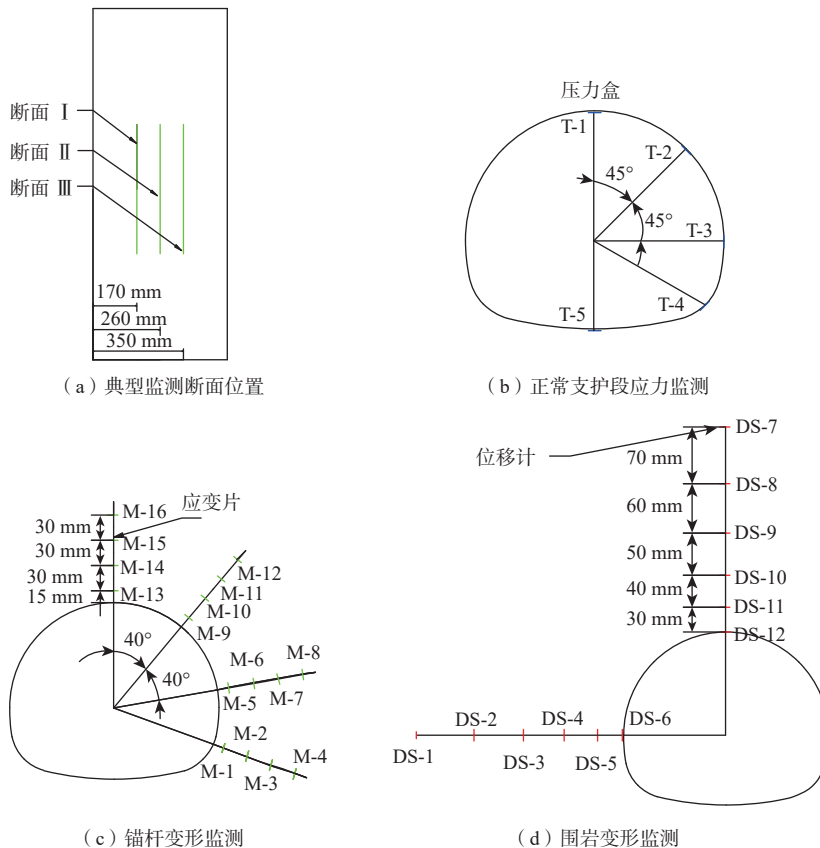


图 6 监测点布置

Fig. 6 Layout of the monitoring points

1.6 模型加载与开挖

地质力学模型试验遵循“先加载后开挖”的原则,在模型表面分 6 次逐级施加三维应力^[31]。每个加载步骤的应力保持时间为 10 min,模型表面最终的三维应力如图 2 所示。第 6 次加载后,伺服加载系统稳定

30 min^[10],模型内部形成与原位应力场一致的初始应力场。所有加载应力均保持不变,逐步进行隧道开挖支护。隧道断面采用专用工具开挖,开挖过程分为 26 个程序,支护过程分为 26 个程序,如图 7 所示。

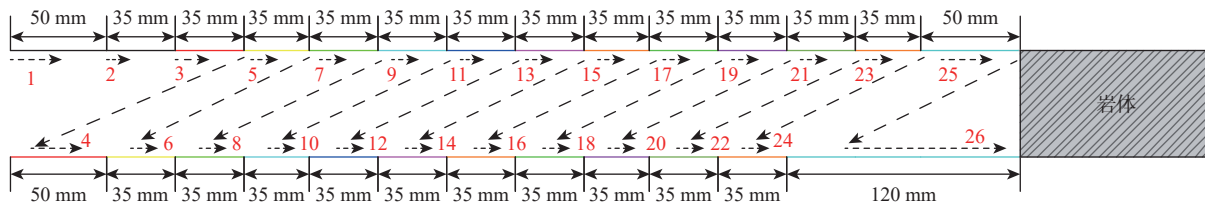


图 7 隧道开挖工序

Fig. 7 Procedure of tunnel excavation

隧道第一道和最后一道开挖工序范围为 50 mm,其余开挖工序范围为 35 mm,总开挖工序范围为 520 mm。每进行一道开挖工序,紧接着进行一道支护工序,每个支护施作范围与对应的开挖范围相同,总

支护工序范围为 520 mm。钢拱架、锚杆、钢筋网预埋进模型箱,正常支护段与径向让压支护段分别安装锚杆应变片、围岩与初支压力盒。

在模型隧道开挖过程中,采用专用工具开挖隧

道,并根据埋设标志和隧道轮廓模具修整隧道轮廓,如图 8(a)所示。采用模型锚杆、钢筋网和金属网模拟钢锚网的原型支护,采用快凝石膏和水模拟喷射混凝土的支护,如图 8 所示。

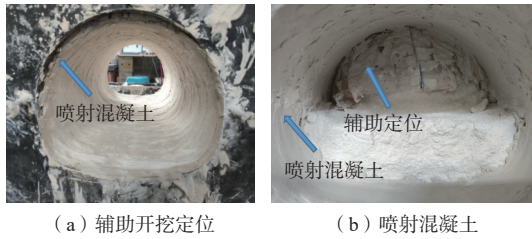


图 8 开挖支护过程

Fig. 8 Excavation support process

2 试验结果

试验开展了深部围岩变形特征研究和对比,分析了正常支护段和径向让压支护段的锚杆受力变形特性和围岩与初支接触力学特征。

2.1 围岩变形规律

2.1.1 隧道表面围岩变形演化过程

在隧道洞壁表面设置监测点,记录拱顶、左拱腰的变形(负值表示沉降)。隧道表面最终收敛尺寸关系为拱顶 > 左拱腰,如图 9 所示。

(1)在 0—10 开挖步内,拱顶首先发生变形。平均变形速率约为 0.187 mm/开挖步,拱顶沉降超过 1.87 mm,由于未开挖到监测断面,预埋的钢拱架、锚杆等初期支护对围岩起到支撑约束作用,拱腰的变形非常小。

(2)在 10—15 开挖步内,上台阶开挖面超过左拱腰位移计监测断面,出现左拱腰变形迅速增加,超过 0.25 mm。

(3)在 15—26 开挖步内,拱顶变形稳步增加,增速逐渐放缓,在隧道贯通后,变形量为 2.85 mm;拱腰在下台阶开挖到监测断面前变形很小,在开挖到监测断面时,变形陡增,增加量为 0.13 mm,在隧道贯通后,变形量为 0.38 mm。

2.1.2 深部围岩变形规律

隧道表面的收敛特征不能充分反映围岩内部的变形规律,通过在隧道断面不同深度的埋设位移传感器,测量不同深度的围岩变形。位移传感器的埋设位置如图 6(b)所示。拱顶位置 6 个位移传感器 DS-1—DS-6、左拱腰位置 6 个位移传感器 DS-7—DS-12 与隧道表面的距离分别为 0, 30, 70, 120, 180, 250 mm,围岩深部变形特征如图 10 所示,图中黑色虚线先后表示上下台阶开挖。

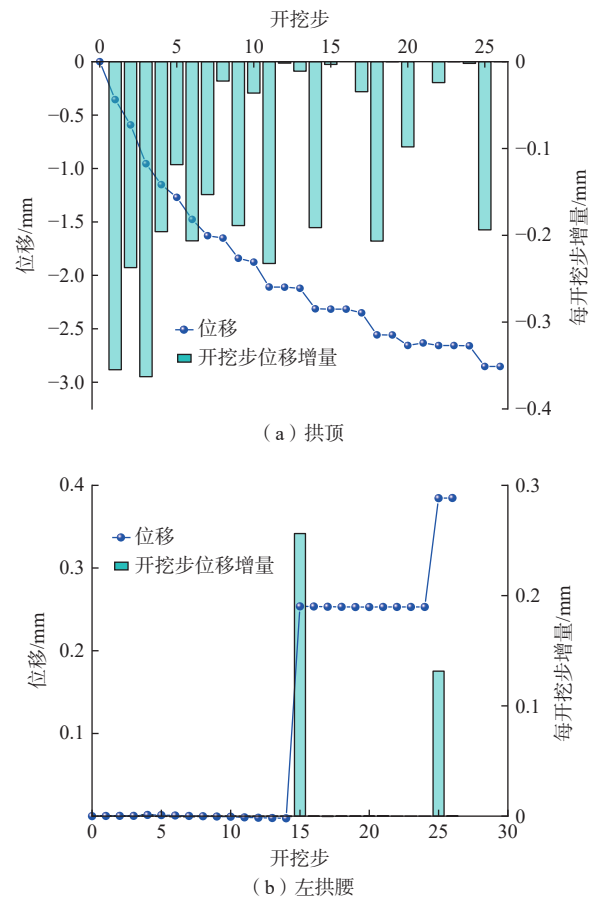


图 9 隧道表面的变形收敛规律

Fig. 9 Deformation convergence law of the roadway surface

根据隧道区域的变形情况可知,上下台阶开挖至监测断面,将变形分为 3 个阶段。拱顶前 2 个阶段变形明显,而第 3 阶段的沉降量变化小,在 20 开挖步以后变形趋于稳定。DS-12 在整个施工过程中沉降最大,最终沉降达 3.22 mm。第二大沉降发生在 DS-9,为 2.91 mm。结果表明,测点沉降量从大到小依次为 DS-12、DS-9、DS-7、DS-11、DS-10、DS-8,围岩中部位移较大,距临空面一定深度产生了松动圈层。

对拱腰而言,第 1 个阶段 DS-3、DS-4 变形随时间增加明显,第 2 个阶段 DS-1、DS-2、DS-5、DS-6 变形随时间增加明显,第 3 个阶段增幅明显放缓。DS-5 在整个施工过程中变形最大,最终变形达 0.45 mm。结果表明,拱腰变形明显小于拱顶变形,拱顶受围岩扰动更严重,预留下台阶可以有效地保护周围土体免受大规模开挖的扰动。

2.2 锚杆受力变形特征

2.2.1 开挖支护过程中的锚杆变形特征

对隧道开挖过程中的正常支护段与径向让压支护段锚杆轴向应变分布进行了监测,如图 11 所示。

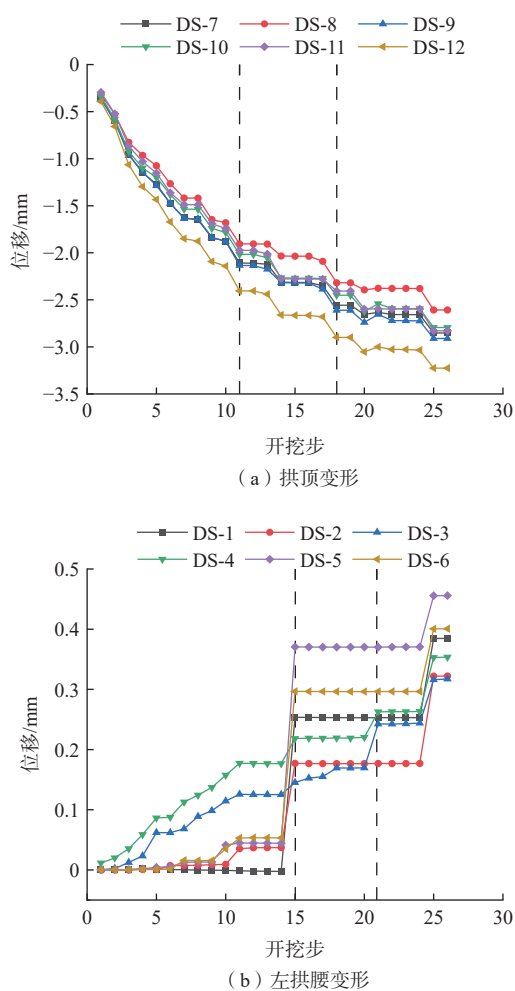


图 10 隧道不同深度处围岩变形情况

Fig. 10 Deformation of the surrounding rock of the roadway at different depths

图 11 中, 负值表示压应变, 正值表示拉应变。

从图 11 可以看出, 所有部位在开挖后 0.45 倍洞径内存在应变突然变化的现象。该过程描述了开挖后围岩应力突然释放, 锚杆吸收围岩能量, 随围岩协调变形, 与围岩共同进入稳定状态。进一步观察可以看出, 不同支护状态下, 锚杆应变变化趋势基本一致, 基本呈“急剧释放—缓慢调整—趋于稳定”, 但径向让压支护段锚杆应变变化量明显小于正常支护段。从同一支护状态来看, 隧道同一部位的不同节点锚杆应变变量存在一定差异性, 变化规律基本一致; 隧道不同部位的锚杆应变受围岩变形的影响程度存在明显差异性, 表现为拱顶应变>拱腰应变>拱肩应变>边墙应变。从不同支护状态来看, 隧道同一部位的锚杆, 径向让压支护段锚杆应变明显小于正常支护段。

2.2.2 隧道贯通后锚杆变形特征

隧道贯通后, 对正常支护段与径向让压支护段锚

杆的轴向应变分布进行分析, 如图 12 所示。

从图 12(a)可以看出, 正常支护段拱顶锚杆拉应变最大, 最大值为 430.1 $\mu\epsilon$, 锚杆拱腰浅部压应变最大, 最大值为 353 $\mu\epsilon$ 。从图 12(b)可以看出, 径向让压支护段锚杆在拱肩浅部出现最大拉应变, 最大值为 103.7 $\mu\epsilon$, 最大压应变在边墙浅部, 最大值为 114.2 $\mu\epsilon$ 。相比之下, 径向让压支护段锚杆最大拉、压应变明显小于正常支护段。试验结果表明, 正常支护段拱顶范围内锚杆应变大于拱腰的应变, 承受的拉应力最大, 不利于承载能力的发挥, 而径向让压支护将锚杆变形大幅度减小, 最大应变位置由拱顶变为拱肩, 使得拱顶围岩相对变形减小, 保证了围岩的完整性, 减少了围岩的塌落风险, 改善了围岩的应力分布状态, 更有利于支护结构承载能力的发挥。

2.3 围岩与初支接触压力分析

2.3.1 开挖支护过程中的围岩与初支接触压力分析

对隧道开挖过程中的正常支护段与径向让压支护段围岩与初支接触压力进行了监测, 如图 13 所示。

图 13(a)、图 13(b)分别为正常支护段的 T-1、T-2、T-4、T-5 测点和径向让压支护段的 T-6—T-10 测点。T-3 土压力盒在施工工程中已损坏, 因此图中没有给出它的土压力值。隧道开挖到相应断面上台阶后, 对拱顶、拱肩、拱腰进行支护, 产生初始支护压力, 下台阶开挖到相应断面后, 对拱脚、拱底进行支护, 产生初始支护压力。

从图 13(a)可以看出, 正常支护段拱顶、拱肩在开挖支护后, 压力呈现先增大后减小的规律, 变化幅值在 20 kPa 以内。拱脚在开挖支护后, 0.6 倍洞径前迅速增大至 70 kPa, 后续开挖支护对其影响很小。从图 13(b)可以看出, 径向让压支护段各部位径向压力基本变化规律同正常支护段一致, 但变化幅值在 10 kPa 左右, 隧道开挖过程中, 径向让压支护段的围岩与初支接触压力明显小于正常支护段。

2.3.2 稳定后围岩与初支接触压力分析

隧道贯通后, 对正常支护段与径向让压支护段的围岩与初支接触压力进行分析, 如图 14 所示。

从图 14(b)可以看出, 在施工完成后, 正常支护段 T-4 测点和径向让压支护段 T-7 测点土压力最大。这表明, 同一断面, 正常支护段拱脚处压力大, 而径向让压支护段拱肩处压力大。从不同支护状态来看, 径向让压支护显著影响围岩与初支接触压力的大小和分布状态, 使得径向让压支护段压力分布更为均匀。拱顶和拱肩所受压力小, 变化并不显著。拱底压力由

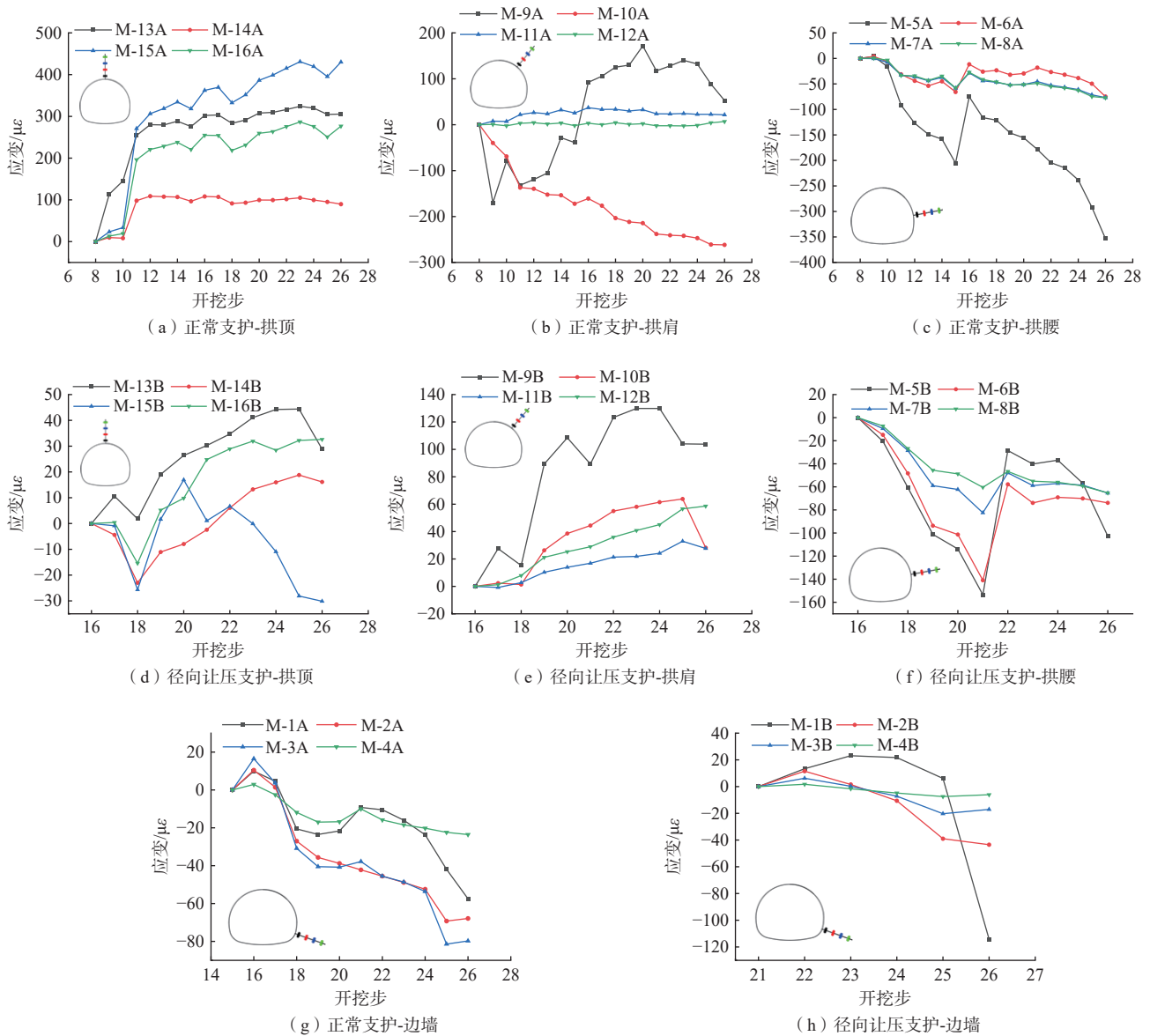


图 11 开挖支护过程中各位置锚杆应变曲线图

Fig. 11 Strain curve of anchor bolt at each position during excavation and support process

正常支护段的 11.57 kPa 下降到径向让压支护段的 -1.21 kPa, 压力绝对值变化率为 89%(定义为压力绝对值的变化值与原始压力之比×100%)。同样, 拱脚压力从正常支护段的 -70.29 kPa 下降到径向让压支护段的 1.75 kPa, 压力绝对值变化率为 97%, 说明径向让压支护能够大幅度降低围岩与初支接触压力, 改善初期支护的受力状态, 提高支护结构安全性, 减少支护和维护成本。

3 分析与讨论

为了探究正常支护段和径向让压支护段对围岩变形和支护承载能力的控制效果, 根据试验结果进行分析与讨论。

试验中锚杆弹性模量(E)约为 716 MPa, 据此计算得到正常支护段锚杆最大拉应力为 0.308 MPa、最大压应力为 0.253 MPa; 在径向让压支护段, 锚杆最大拉应力为 0.074 MPa、最大压应力为 0.081 MPa。因此, 与正常支护段相比, 锚杆轴向最大拉应力降低了 75.8%, 最大压应力降低了 67.6%(定义为正常支护段应力与径向让压支护段应力之差值比正常支护段应力×100%), 说明实施径向让压支护可以有效缓解围岩相对变形, 降低围岩局部应力集中, 改善支护结构受力状态, 提高支护结构使用寿命, 降低支护和维护成本。

径向让压支护段相对正常支护段锚杆轴向应变分布出现极大改变, 反映其对围岩变形和支护结构承载能力的不同影响。正常支护段锚杆最大拉应变不

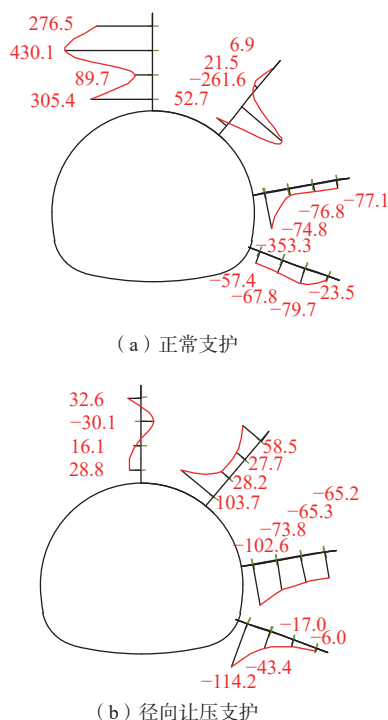


图 12 锚杆轴向应变图 (单位: $\mu\epsilon$)
Fig. 12 Bolt axial strain diagram (unit: $\mu\epsilon$)

均匀分布在拱顶, 最大压应变出现在拱腰浅部, 拱腰处锚杆轴向应变浅部大, 其余较小。拱肩处最大应变为压应变, 其值为 $261.2 \mu\epsilon$, 最小应变为拉应变, 其值为 $21.5 \mu\epsilon$, 分布极不均匀。正常支护段不同部位锚杆受力关系由大到小依次为拱顶、拱腰、拱肩、边墙。径向让压支护段最大拉应变在拱肩处, 分布不均匀。最大压应变在边墙处, 均匀减小, 拱顶、拱腰处应变分布较为均匀, 且相对正常支护段应变出现大幅度减小。隧道不同部位锚杆受力关系由大到小依次为边墙、拱肩、拱腰、拱顶。说明径向让压支护通过对围岩能量的吸收和耗散来主动重新分配应力, 能够有效减小围岩相对变形, 分散围岩施加的载荷、最大限度降低围岩应力集中, 改善围岩受力状态, 减小松动圈范围, 促进围岩稳定, 降低局部失效的风险。

由锚杆应变分布可知, 正常支护段锚固区围岩相对变形大, 导致岩块间距大^[32], 锚杆受力大。与正常支护段相比, 径向让压支护段锚固区围岩完整性好, 从而产生更小的变形, 锚固区仍能提供足够的锚固力。由于正常支护段锚固区围岩相对变形显著, 支护结构受到的径向压力明显大于径向让压支护段。从不同支护状态来看, 正常支护段拱脚、拱底处支护结构所受径向压力大, 同一部位, 径向让压层刚度降低、充分发挥让压效果。所以, 实施径向让压支护后, 围岩与初支接触压力明显降低。

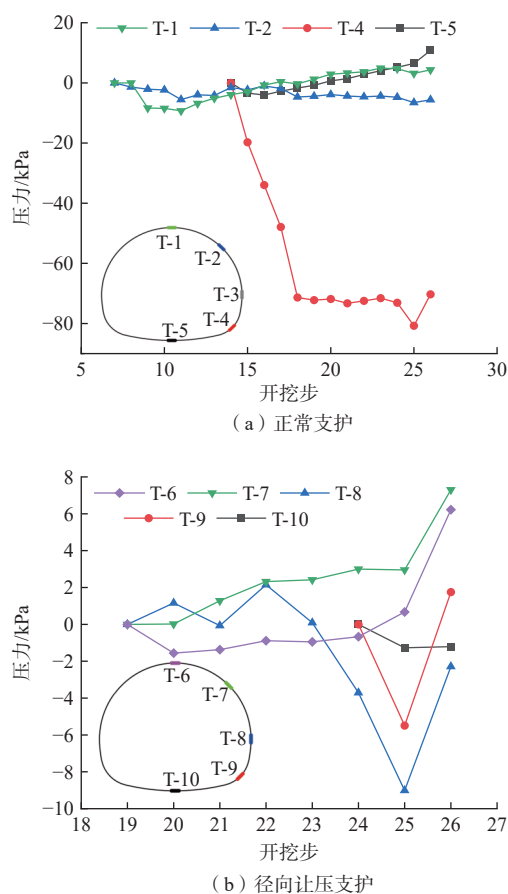


图 13 围岩与初支接触径向压力图
Fig. 13 Radial stress between surrounding rock and primary branch

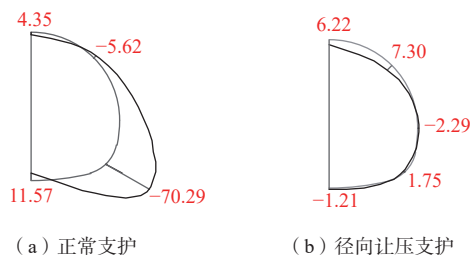


图 14 围岩与初支接触径向应力图 (单位: kPa)
Fig. 14 Radial stress between surrounding rock and primary branch (unit: kPa)

4 结论

(1) 制作了一整套三维地质力学试验模型, 为开展结构支护与围岩变形间的定性关系研究提供了试验平台。在深部高地应力软岩隧道中, 钢锚喷网支护可提供局部阻力, 限制围岩变形。开挖及整体支护完成的过程中, 隧道变形演化过程为拱顶沉降大于拱腰变形。

(2) 径向让压支护段相对正常支护段围岩相对变形小, 极大改变了锚杆应变的分布状态, 将其变得更加均匀, 保证了围岩的完整性。从应力分布看, 正常

支护段隧道不同部位锚杆受力关系由大到小依次为拱顶、拱腰、拱肩、拱脚。径向让压支护段锚杆受力关系由大到小依次为拱脚、拱肩、拱腰、拱顶。从最大应力看,锚杆轴向最大拉应力减小 75.8%,最大压应力减小 67.6%。

(3) 径向让压支护使得围岩与初支接触压力分布得更加均匀,减小应力集中。压力较大时,让压层刚度降低,拱底、拱脚压力降低 80%。该研究可为同类深部软岩隧道围岩破坏过程及控制技术提供参考。

在本试验中为准确采集锚杆监测数据,保证监测元件的完整性,对锚杆进行了提前预埋,而在实际工程中,锚杆布置发生在相应断面的隧道开挖之后,二者数据有一定差异。

参考文献 (References) :

- [1] 董英,张茂省,李宁,等. 城市地下空间开发利用的地质安全评价内容与方法 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 161 - 168. [DONG Ying, ZHANG Maosheng, LI Ning, et al. Methods and contents of geological safety evaluation for urban underground space development and utilization[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 161 - 168. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 张永双,郭长宝,李向全,等. 川藏铁路廊道关键水工环地质问题: 现状与发展方向 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 1 - 12. [ZHANG Yongshuang, GUO Changbao, LI Xiangquan, et al. Key problems on hydro-engineering-environmental geology along the Sichuan-Tibet Railway corridor: Current status and development direction[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 1 - 12. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 何箫,侯圣山,孟宪森,等. 川西康定—新都桥段菠茨沟组板岩蠕变特性及损伤模型 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 107 - 116. [HE Xiao, HOU Shengshan, MENG Xiansen, et al. Creep characteristics and nonlinear creep damage model of Bocigou Formation slate in Kangding-Xinduqiao section of West Sichuan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 107 - 116. (in Chinese with English abstract)]
- [4] YANG Shengqi, CHEN Miao, FANG Gang, et al. Physical experiment and numerical modelling of tunnel excavation in slanted upper-soft and lower-hard strata[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 82: 248 - 264.
- [5] CHEN Ziquan, HE Chuan, XU Guowen, et al. A case study on the asymmetric deformation characteristics and mechanical behavior of deep-buried tunnel in Phyllite[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52: 4527 - 4545.
- [6] CLEJA-ȚIGOIU S, ȚIGOIU V. Rheological model for rock-type materials under large deformations[J]. *Mechanics Research Communications*, 2021, 114: 103559.
- [7] DAI Feng, LI Biao, XU Nuwen, et al. Microseismic early warning of surrounding rock mass deformation in the underground powerhouse of the Houziyan hydropower station, China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 62: 64 - 74.
- [8] LI Guang, MA Fengshan, GUO Jie, et al. Study on deformation failure mechanism and support technology of deep soft rock roadway[J]. *Engineering Geology*, 2020, 264: 105262.
- [9] 徐前卫,程盼盼,朱合华,等. 深埋隧道软弱围岩渐进性破坏及其锚固效应试验与模拟 [J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(4): 617 - 625. [XU Qianwei, CHENG Panpan, ZHU Hehua, et al. Experimental and numerical studies on progressive failure characteristics of weak surrounding rock mass of tunnel and its anchoring effect[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(4): 617 - 625. (in Chinese with English abstract)]
- [10] LI Yuanhai, TANG Xiaojie, YANG Shuo, et al. Evolution of the broken rock zone in the mixed ground tunnel based on the DSCM[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 84: 248 - 258.
- [11] ZHANG Qiangyong, ZHANG Yue, DUAN Kang, et al. Large-scale geo-mechanical model tests for the stability assessment of deep underground complex under true-triaxial stress[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 83: 577 - 591.
- [12] GUO Zhibiao, YANG Xiaojie, BAI Yunpeng, et al. A study of support strategies in deep soft rock: The horsehead crossing roadway in Daqiang Coal Mine[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2012, 22(5): 665-667.
- [13] 董标,杨进京,殷洪波,等. 隧道钢拱节点让压性能分析 [J]. *隧道建设(中英文)*, 2021, 41(9): 1524 - 1529. [DONG Biao, YANG Jinjing, YIN Hongbo, et al. Yielding performance of tunnel steel arch joints[J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(9): 1524 - 1529. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 杨栋,王全成,姜昭群. 高强大变形屈服锚索承载特性室内试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(3): 79 - 86. [YANG Dong, WANG Quancheng, JIANG Zhaoqun. Laboratory test on the mechanical behavior of high-strength and large-deformation yield

- anchor cable[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 79 – 86. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 董建华, 徐斌, 吴晓磊. 高地应力软岩隧道分级让压支护结构的力学特性分析 [J]. *中国公路学报*, 2024, 37(3): 342 – 355. [DONG Jianhua, XU Bin, WU Xiaolei. Analysis of mechanical properties of graded yielding support structure for high ground stress soft rock tunnel[J]. *Chinese Journal of Highway*, 2024, 37(3): 342 – 355. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 刘星辰. 挤压大变形隧道泡沫混凝土让压支护结构研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021. [LIU Xingchen. Study on the stress yielding support structure with foamed concrete in extrusion large deformation tunnel[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 刘旭斌, 申翔宇, 闵新皓. 基于超前地质预报的大型岩溶隧道处理技术 [J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(增刊 1): 881 – 891. [LIU Xubin, SHEN Xiangyu, MIN Xinhao. Large-scale karst tunnel treatment technology based on advance geological prediction[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(Sup 1): 881 – 891. (in Chinese with English abstract)]
- [18] CHEN Xuguang, ZHANG Qiangyong, LI Shucai, et al. Geo-mechanical model testing for stability of underground gas storage in halite during the operational period[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(7): 2795 – 2809.
- [19] LI Yuanhai, ZHANG Qi, LIN Zhibin, et al. Spatiotemporal evolution rule of rocks fracture surrounding gob-side roadway with model experiments [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*. 26(5), 895 – 902.
- [20] ZHU Guoqiang, FENG Xiating, ZHOU Yangyi, et al. Physical model experimental study on spalling failure around a tunnel in synthetic marble[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(2): 909 – 926.
- [21] LI Zhongkui, LIU Hui, DAI Rong, et al. Application of numerical analysis principles and key technology for high fidelity simulation to 3-D physical model tests for underground Caverns[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, 20(4): 390 – 399.
- [22] ZHU Weishen, LI Yong, LI Shucai, et al. Quasi-three-dimensional physical model tests on a cavern complex under high in situ stresses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(2): 199 – 209.
- [23] LI Shucai, WANG Qi, WANG Hongtao, et al. Model test study on surrounding rock deformation and failure mechanisms of deep roadways with thick top coal[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 47: 52 – 63.
- [24] JIANG Bei, XIN Zhongxin, ZHANG Xiufeng, et al. Mechanical properties and influence mechanism of confined concrete arches in high-stress tunnels[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(7): 829 – 841.
- [25] LEI Mingfeng, PENG Limin, SHI Chenghua. Model test to investigate the failure mechanisms and lining stress characteristics of shallow buried tunnels under unsymmetrical loading[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 46: 64 – 75.
- [26] ZHANG Chaoxuan, TAN Xianjun, TIAN Hongming, et al. Lateral compression and energy absorption of foamed concrete-filled polyethylene circular pipe as yielding layer for high geo-stress soft rock tunnels[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(5): 1087 – 1096.
- [27] XIN C L, WANG Z Z, YU J. The evaluation on shock absorption performance of buffer layer around the cross section of tunnel lining[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 131: 106032.
- [28] GUAN Leilei, CHEN Yonggui, YE Weimin, et al. Foamed concrete utilizing excavated soil and fly ash for urban underground space backfilling: Physical properties, mechanical properties, and microstructure[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 134: 104995.
- [29] HUANG Feng, WU Chuangzhou, JANG Boan, et al. Instability mechanism of shallow tunnel in soft rock subjected to surcharge loads[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 99: 103350.
- [30] ZHANG Qiangyong, LIU Chuancheng, DUAN Kang, et al. True three-dimensional geomechanical model tests for stability analysis of surrounding rock during the excavation of a deep underground laboratory[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(2): 517 – 537.
- [31] CHEON D S, JEON S, PARK C, et al. Characterization of brittle failure using physical model experiments under polyaxial stress conditions[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(1): 152 – 160.
- [32] YANG Shengqi, CHEN Miao, JING Hongwen, et al. A case study on large deformation failure mechanism of deep soft rock roadway in Xin'an coal mine, China[J]. *Engineering Geology*, 2017, 217: 89 – 101.