

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

## 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<sup>1</sup>,黄 璐<sup>1</sup>,潘 虎<sup>2</sup>,陈 杰<sup>3</sup>,谢 强<sup>4</sup>,李秋铃<sup>5</sup>,疏梓宸<sup>5</sup>,张旭皓<sup>4,6</sup> (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 Qiuyu<sup>1</sup>, HUANG Lu<sup>1</sup>, PAN Hu<sup>2</sup>, CHEN Jie<sup>3</sup>, XIE Qiang<sup>4</sup>, LI Qiuling<sup>5</sup>, SHU Zichen<sup>5</sup>, ZHANG Xuhao<sup>4,6</sup>

(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.swdzgcdz.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(1982一),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 threedimensional 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<sup>[1-2]</sup>。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<sup>[3]</sup>,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<sup>[4]</sup>,导致隧 道施工过程中出现强流变、大变形特征<sup>[5]</sup>,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<sup>[6]</sup>、现场监测<sup>[7]</sup>、数值模拟<sup>[8]</sup>以及模型试 验<sup>[9]</sup>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<sup>[10]</sup>。徐前卫 等<sup>[9]</sup>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<sup>[11]</sup>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<sup>[12]</sup>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<sup>[13]</sup>,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<sup>[14]</sup>。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<sup>[15]</sup>、数值模拟<sup>[16]</sup>和 现场试验<sup>[17]</sup>。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300m,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2450mm,宽 1220mm,高2060mm,其内部设置导向框架,防止加 载板在模型边缘相遇<sup>[18]</sup>,模型内部容积的最大尺寸为 长1750mm、宽520mm、高1360mm。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



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( $\gamma$ )、位移( $\delta$ )、弹性模量(E)、应力 ( $\sigma$ )、应变( $\varepsilon$ )、泊松比( $\mu$ )和内摩擦角( $\theta$ )。 $\delta_P$ 、 $\delta_M$ 、 $L_P$ 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<sup>[19-20]</sup>。

表 1 相似关系 Table 1 Similarities

名称介绍	相似关系	相似比
相似尺度	$C_i = \delta_{\rm P} / \delta_{\rm M} = L_{\rm P} / L_{\rm M}$	50
相似位移	$C_{\delta} = C_L \cdot C_{\varepsilon}$	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<sup>[21]</sup>。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,



 $\sigma_{\rm M2} = 0.100 \ 8 \ \text{MPa}, \ \sigma_{\rm M3} = 0.072 \ 0 \ \text{MPa}_{\circ}$ 

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金石粉-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<sup>[22]</sup>。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*(Be):*m*(Ba):*m*(S):*m*(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1125 MPa,等效刚度210 kPa·m<sup>2</sup>。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<sup>[23]</sup>, 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<sup>[24]</sup>,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<sup>[25]</sup>,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	Mechanie	cal parameter	s of similar m	aterial	
相似材料	弹性模量	抗拉强度	单向抗压	极限应变	
类别	/MPa	/MPa	强度/MPa	/%	
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:一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<sup>[26-27]</sup>。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<sup>[28]</sup>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<sup>[29]</sup>。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<sup>[30]</sup>。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。



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<sup>[31]</sup>。每个加载步 骤的应力保持时间为10min,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<sup>[10]</sup>,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。



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。



1) 補助开花定位 (6) 映射花t 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2.85mm;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0.13mm,在隧道贯通后,变 形量为0.38mm。

## 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。



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3.22mm。第二大沉降发生在DS-9, 为2.91mm。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。



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"急剧释放一缓慢调整一趋于稳定",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 με,锚杆拱腰浅部压应变最 大,最大值为 353 με。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 με,最大压应变在边墙浅部,最大值为 114.2 με。 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



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



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 με,最小应变为拉应变,其值 为 21.5 με, 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<sup>[32]</sup>,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。



(a) 正常支护 (b) 径向让压支护 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)

-1.21

## 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)]
- 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 truetriaxial 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-threedimensional 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.
- 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.

编辑:刘真真