

DOI: 10.7672/sgjs2026020099

基于隧道围岩物性变化的预应力锚固 支护机理研究*

杨朝帅^{1,2,3}, 李达强^{1,2,3}, 韩伟锋⁴

(1. 中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州 511458; 2. 广东省隧道结构智能监控与维护企业重点实验室, 广东 广州 511458; 3. 中铁隧道勘察设计研究院有限公司, 广东 广州 511458; 4. 隧道掘进机及智能运维全国重点实验室, 河南 郑州 450001)

[摘要] 通过建立考虑围压和塑性应变影响的 CSS 本构模型, 分析预应力锚杆锚索与围岩共同承载的支护机理, 并探讨锚固时机、分布密度及预应力对支护效果的影响。研究表明, 洞室开挖后的围岩强度与刚度持续劣化, 需在锚杆锚索不发生破坏的前提下尽早施工锚固体系。锚固时机、分布密度及预应力是影响支护效果的关键因素, 可通过围岩参数劣化程度与锚杆锚索破坏情况确定最优锚固参数。

[关键词] 隧道; 围岩; 预应力; 锚索; 本构模型; 支护

[中图分类号] U45

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)02-0099-07

Supporting Mechanism of Prestressed Anchor Based on Changes of Physical Properties for Surrounding Rock in Tunnel

YANG Chaoshuai^{1,2,3}, LI Daqiang^{1,2,3}, HAN Weifeng⁴

(1. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511458, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Monitoring and Maintenance of Tunnel Structure, Guangzhou, Guangdong 511458, China; 3. China Railway Tunnel Consultants Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511458, China; 4. State Key Laboratory of Tunnel Boring Machine and Intelligent Operations, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: This paper establishes a CSS constitutive model that considers the effects of confining pressure and plastic strain, analyzes the support mechanism of prestressed anchor bolts and surrounding rocks, and explores the effects of anchoring timing, distribution density, and prestress on the support effect. The research results indicate that the strength and stiffness of the surrounding rock continue to deteriorate after excavation of the tunnel, and it is necessary to implement the anchoring system as soon as possible on the premise that the anchor bolts and cables are not damaged. The timing of anchoring, distribution density, and prestress are key factors affecting the support effect, and the optimal anchoring parameters can be determined by the degree of deterioration of surrounding rock parameters and the failure of anchor bolts and cables.

Keywords: tunnels; surrounding rock; prestress; anchor cable; constitutive model; supports

0 引言

地下洞室开挖后因洞周围岩失去支撑将快速变形,需要及时采取措施进行控制,因为以锚杆、锚

索为主体的锚固系统具有灵活性强、成本低、能主动控制围岩变形等优点,在地下工程建设中得到广泛使用^[1-3],但目前国内对锚固体系的机理研究比较滞后,影响锚固体系的科学设计施工。

目前对锚固系统的认知主要包括组合梁理论、压缩拱理论、悬吊理论等^[4-7]。针对隧道锚固机理的解析,主要有以下处理方式:①等效支护力方法,将锚杆锚索的摩阻力、预应力等效为洞壁均布力,

* 国家重点研发计划(2022YFB2302403);中国中铁股份有限公司科技研究开发计划(cz02-专项-02);中铁隧道局集团科技创新计划(隧研合 2022-03)

[作者简介] 杨朝帅,高级工程师,E-mail: 394343652@qq.com

[收稿日期] 2025-07-08

本质是考虑锚固体系的支护作用^[8];②等效加固圈法,将锚杆作用等效为提升围岩参数,本质是加固围岩^[9]。部分学者还对预应力锚杆锚索组合支护进行研究^[10-12]。

现有研究表明,洞室开挖是围岩参数不断劣化的过程,主要受塑性应变和围压影响^[13-16],陈凯^[17]将岩体损伤本构模型应用到无支护隧洞稳定性分析中,付腾飞^[18]建立考虑塑性应变导致围岩损伤(强度下降)的本构模型,并探究不同支护时机下围岩的应力应变场情况。

现有研究主要探究了隧道在无支护条件下的围岩参数劣化情况,缺乏对锚固体系的影响研究,尤其是预应力锚固体系对围岩参数的影响甚少。支护体系通过影响围岩的参数场和应力应变场发挥作用,而参数场与应力应变场又相互影响,如图 1 所示,支护机理需综合考虑围岩本构模型、支护系统、参数场及应力场的相互作用。

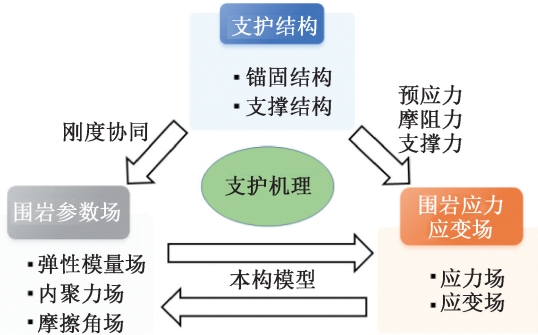


图 1 支护机理

Fig. 1 Supporting mechanism

为此,本文建立考虑围压和塑性应变影响的围岩本构模型,并应用于锚固体系机理分析中,得到考虑围岩物性变化的锚固支护机理,同时讨论影响锚固效果的因素。

1 围岩物性变化规律与锚固体系的影响

1.1 围岩参数模型

已有研究表明了围岩物理力学参数(弹性模量、黏聚力、内摩擦角)随围岩和塑性应变的动态变化规律^[19-23],据此建立考虑围压和应变影响的劣化模型 CSS (confine and strain softening model),如式(1)~(3)所示,CSS模型的物性参数依赖应力应变,反映围岩参数的动态变化特点。

$$E_r = e_1 \cdot e^{-\frac{\sigma_3}{e_2}} + e_3 \cdot \varepsilon_t^p + e_4 \quad (1)$$

$$c_r = c_1 \cdot e^{-\frac{\sigma_3}{c_2}} + c_3 \cdot \sigma_3 + c_4 \quad (2)$$

$$\varphi_r = \varphi_1 \cdot e^{-\frac{\sigma_3}{\varphi_2}} + \varphi_3 \cdot \sigma_3 + \varphi_4 \quad (3)$$

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = c \cdot \cos\varphi + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\sin\varphi \quad (4)$$

式中: E_r, c_r, φ_r 分别为围岩的弹性模量、内聚力、内摩擦角; $\sigma_3, \varepsilon_t^p$ 分别为围岩围压和塑性剪应变; $e_1 \sim e_4, c_1 \sim c_4, \varphi_1 \sim \varphi_4$ 均为通过室内三轴压缩试验确定的待定参数。

CSS本构模型参数取值方法如下:首先进行不同围压条件($\sigma_3 = 0, \sigma'_3, \sigma''_3, \sigma'''_3$)的三轴压缩试验,记录应力应变曲线,如图 2 所示,将峰值强度点分别记录为 p_0, p_1, p_2, p_3 ,将 p_0, p_1 点的应力数据($\sigma_{1-p_0}, \sigma_{3-p_0}$),($\sigma_{1-p_1}, \sigma_{3-p_1}$)代入莫尔-库仑强度准则(见式(4)),得到围压 σ'_3 时的黏聚力和内摩擦角(c_{p_1}, φ_{p_1}),同理利用(p_0, p_2),(p_0, p_3),(p_0, p_4)应力数据得到(c_{p_2}, φ_{p_2}),(c_{p_3}, φ_{p_3}),(c_{p_4}, φ_{p_4}),将 $c_{p_1} \sim c_{p_4}$ 和 $\varphi_{p_1} \sim \varphi_{p_4}$ 分别代入式(2)、式(3)求得待定参数 $c_1 \sim c_4, \varphi_1 \sim \varphi_4$,利用 p_1, p_2, p_3 得到围压分别为 $\sigma'_3, \sigma''_3, \sigma'''_3$ 时的弹性模量 E_1, E_2, E_3 ,并且在 p_4 点进行卸载再加载,得到塑性应变 ε_p 时的损伤弹性模量 E_4 ,将 $E_1 \sim E_4$ 代入式(2)即得到待定参数 $e_1 \sim e_4$ 。

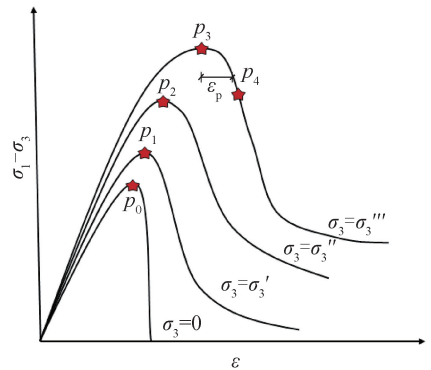


图 2 不同围压下的岩石应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of rocks under different confining pressures

1.2 锚固体系对围岩物性的影响

隧道开挖后,围岩变形经历初始、加速、缓慢、稳定阶段,及时施工支护体系可有效降低围岩总变形量。根据 CSS 模型,洞室开挖后围岩参数劣化经历 2 个阶段:①第 1 次是隧洞开挖后围压迅速降低,围岩裂隙扩展,导致围岩参数大幅度劣化;②第 2 次是达到塑性变形后裂隙扩张,导致围岩参数再次大幅度劣化。锚固体系通过提升围压和约束变形减缓参数劣化。施工时需平衡围岩承载力与锚杆强度,避免过早支护导致锚杆失效。

2 预应力锚杆锚索协同承载理论

2.1 锚杆作用机理

锚杆安装并张拉完成后,锚头、锚固段的预应

力和摩阻力挤压围岩,以 α 角向围岩进行扩散,形成1个锥形压缩区,叠加形成组合拱,如图3所示,其中 L_{bf} 为锚杆自由段长度, α 为压力扩散角, c_{arch} 为组合拱黏聚力, S_{b1} 为锚杆环向间距, b 为锚垫板尺寸, d_b 为组合拱厚度 $\left(d_b = L_{bf} - 0.5 \frac{r + L_{bf}}{r + \tan\alpha} S_{b1} - 0.5 \frac{S_{b1} - b}{\tan\alpha}\right)$ 。在压缩区内,由于锚杆预应力、摩阻力提升最小主应力 σ_3 ,从而提升了围岩强度。

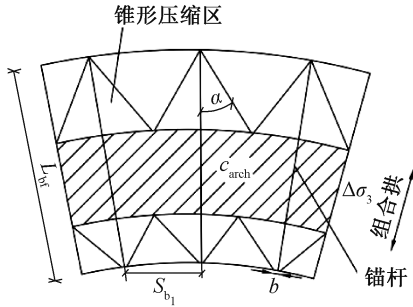


图3 组合拱示意

Fig. 3 Composite arch

组合拱黏聚力 c_{arch} 与内摩擦角 φ_{arch} 计算如下:

$$c_{arch} = c_1 \cdot e^{-\frac{\varepsilon_1^p}{c_2}} + c_3 \cdot \left\{ \sigma_3 + \frac{1}{2} \left[\frac{F_1}{S_{b1} S_{z1}} + \frac{F_1 r^2}{S_{b1} S_{z1} (1+r)^2} \right] \right\} + c_4 + \frac{c_{bolt} A_{bolt}}{S_{b1} S_{z1}} \quad (5)$$

$$\varphi_{arch} = \varphi_1 \cdot e^{-\frac{\varepsilon_1^p}{\varphi_2}} + \varphi_3 \cdot \left\{ \sigma_3 + \frac{1}{2} \left[\frac{F_1}{S_{b1} S_{z1}} + \frac{F_1 r^2}{S_{b1} S_{z1} (1+r)^2} \right] \right\} + \varphi_4 + \frac{\varphi_{bolt} A_{bolt}}{S_{b1} S_{z1}} \quad (6)$$

式中: c_1, c_2, c_3, c_4 为围岩内聚力演化参数,用于描述围压强化效应及应变软化效应对围岩等效内聚力的影响,其取值由室内三轴压缩试验结果拟合获得; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ 为围岩内摩擦角演化参数,用于描述围压约束作用下岩体抗剪特性增强及塑性变形累积过程中摩擦特性的退化行为,其取值由不同围压条件下的强度包络线拟合确定; e 为自然常数; ε_1^p 为塑性剪应变; F_1 为锚杆作用力; r 为洞室半径; S_{z1} 为锚杆纵向间距; c_{bolt} 为锚杆-围岩界面的等效黏结强度; A_{bolt} 为锚杆-围岩界面面积; φ_{bolt} 为锚杆-围岩界面等效摩擦角。

组合拱的弹性模量 E_{arch} 计算如下:

$$E_{arch} = e_1 \cdot e^{-\frac{\varepsilon_2}{e_2}} + \dots$$

$$e_3 \cdot \varepsilon_1^p + e_4 + \frac{E_{bolt} A_{bolt}}{S_{b1} S_{z1}} \quad (7)$$

式中: e_1, e_2, e_3, e_4 为围岩内摩擦角演化参数,用于刻画围压对岩体刚度提升及塑性变形发展过程中刚度劣化的综合影响,其数值通过加载-卸载试验曲线拟合确定; E_{bolt} 为锚杆(锚索)等效轴向弹性模量。

由此可知,锚杆支护强化围岩本身的物性,围岩还能组成组合拱结构,有效提升组合拱的强度、刚度。

2.2 锚索作用机理

锚索具有超长的支护强度和较大的变形能力,可将锚杆与浅层围岩组成组合拱与深层围岩联动,如图4所示。

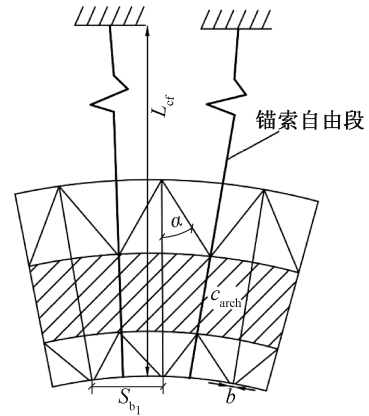


图4 预应力锚索作用

Fig. 4 Function of prestressed anchor cable

承载力由钢绞线拉力、灌浆体黏结力及围岩黏结力共同决定,计算如下:

$$F_{ct} = n f_{py} A_s \quad (8)$$

$$F_{sg} = n \pi d_s \tau_s L_{ca} \quad (9)$$

$$F_{rg} = \pi d_g \tau_r L_{ca} \quad (10)$$

$$F_{s_2} = k_c \Delta u_r = \frac{n E A_s}{L_{cf}} \Delta u_r \quad (11)$$

$$F_2 = F_{p_2} + F_{s_2} < \min(F_{ct}, F_{sg}, F_{rg}) \quad (12)$$

式中: F_{ct} 为锚索承载力; n 为钢绞线数量; f_{py} 为钢绞线抗拉强度设计值; A_s 为钢绞线截面积; F_{sg} 为锚索与灌浆体黏结力; d_s 为钢绞线直径; τ_s 为单位面积钢绞线与灌浆体黏结力; L_{ca} 为锚固段长度; F_{rg} 为围岩与灌浆体的黏结力; d_g 为灌浆体外直径; τ_r 为单位面积围岩与灌浆体的黏结强度; F_{s_2} 为锚索预应力; k_c 为锚索轴向刚度; Δu_r 为锚索拉伸长度; E 为钢材弹性模量; L_{cf} 为锚索长度; F_{p_2} 为锚索变形反力。

3 锚固体系作用效果影响分析

3.1 算例介绍

围岩本构模型为CSS模型,其物性参数变动如

式(1)~式(3)所示,屈服准则采用莫尔-库仑准则。通过锚杆锚索两端施加压力同时折减锚杆锚索本身拉伸强度的方式,实现锚杆拉力转化成对围岩的压力,同时通过围岩与锚杆锚索界面设置摩擦系数施加摩擦阻力,当锚杆锚索轴力超过锚杆锚索自身拉拔强度后去除两端压力,并设定锚杆围岩接触面光滑,以模拟锚杆失效工况。

模型尺寸为 80m × 80m, 中心开挖洞室半径 7.5m, 在模型四周边界施加 20MPa 的围岩压力模拟围岩围压, 算例数值模型如图 5 所示, 锚杆与锚索参数如表 1 所示。

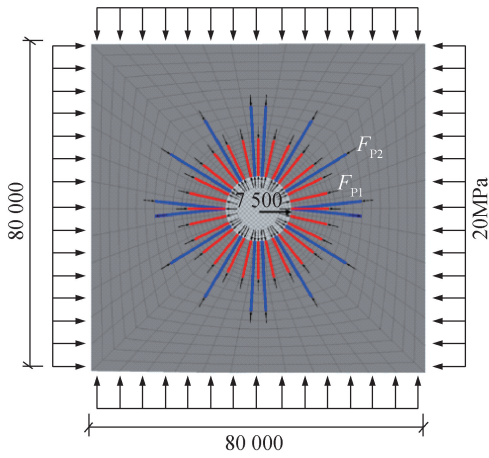


图 5 算例数值模型

Fig. 5 Numerical model of example

表 1 锚杆与锚索参数

Table 1 Parameters of anchor bolt and anchor cable

项目	拉拔强度 F/kN	直径(含灌浆体)/mm	界面摩擦系数 f
锚杆	200	50	0.57
锚索	450	120	0.57

围岩黏聚力 $c = c_1 \cdot e^{-\frac{\sigma_1^p}{c_2}} + c_3 \cdot \sigma_3 + c_4$, 内摩擦角 $\varphi = \varphi_1 \cdot e^{-\frac{\sigma_1^p}{\varphi_2}} + \varphi_3 \cdot \sigma_3 + \varphi_4$, 弹性模量 $E = e_1 \cdot e^{-\frac{\sigma_3}{e_2}} + e_3 \cdot \sigma_1^p + e_4$, 泊松比 $\mu = 0.25$ 。 $c_1 = 1.8, c_2 = 5.2 \times 10^{-4}, c_3 = 0.047, c_4 = 2.3, \varphi_1 = 9.4, \varphi_2 = 5.03 \times 10^{-4}, \varphi_3 = 0.23, \varphi_4 = 14.2, e_1 = -9\ 333, e_2 = 19.3, e_3 = -2.91 \times 10^6, e_4 = 36\ 000$ 。

3.2 锚固时机的影响

将无支护的围岩最终变形称为 u_∞ , u/u_∞ 作为支护时机时的指标, 通过算例计算得到不同支护时机围岩劣化程度, 如图 6 所示。由图 6 可知, $u/u_\infty = 0.1$ 时, 由于支护过早, 锚杆失效后不能阻止围岩变形和参数劣化, 当变形发挥到 30% 时, 施工锚固体取得最佳效果, 证明存在充分发挥围岩承载力与锚

杆强度的平衡点。由于实际工程中围岩性质、锚杆类型、灌浆体质量等千差万别, 建议以锚杆轴力作为控制指标, 将锚杆施工后最终轴力略小于锚杆设计强度时作为最佳锚固时机。

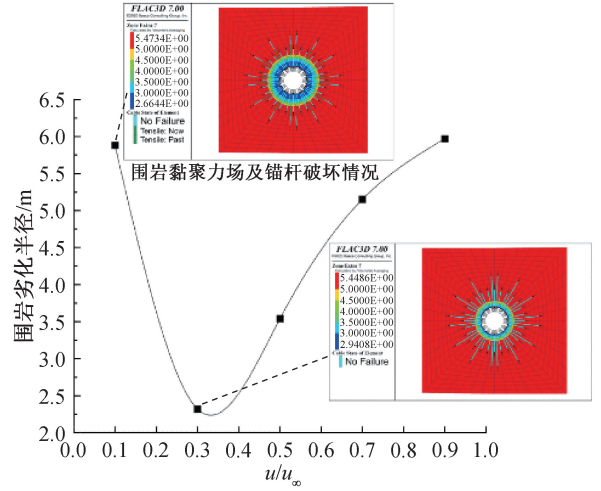


图 6 支护时机曲线

Fig. 6 Curve of supporting opportunity

3.3 锚杆与锚索分布的影响

在算例中, 将支护时机固定在变形发展到 30% 时, 且锚索间距固定为锚杆的 2 倍, 得到锚杆和锚索分布对围岩劣化程度的影响曲线, 如图 7 所示。由图 7 可知, 间距 > 1.5m 后的成拱能力变差, 同时伴随着锚杆和锚索减少, 单根锚杆、锚索承受的轴力增加, 锚杆、锚索脱锚导致锚固体系失效, 围岩劣化程度与无支护情况类似。

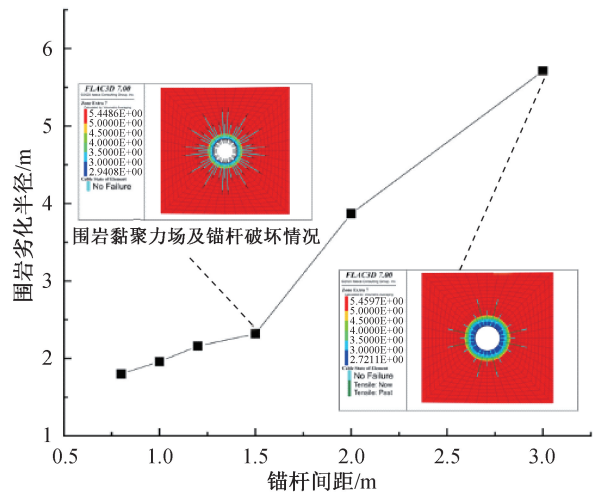


图 7 锚杆、锚索间距对围岩劣化程度的影响曲线

Fig. 7 The influence curve of spacing between anchor rods and anchor cables on the deterioration degree of surrounding rock

3.4 主动支护力与被动支护力分配的影响

主动支护力指预先施加的预应力, 被动支护力

是围岩变形后锚杆、锚索因变形产生的反力。在本算例中,将支护时机固定为变形发展到 30%时,锚杆间距固定为 1.5m、锚索间距固定为 3m,假设主动支护力为 F_p ,锚杆、锚索强度为 $[F]$,不同主动支护力占比对围岩劣化程度的影响,如图 8 所示。由图 8 可知,适当提高主动支护力与强度的比值,可有效降低围岩物性参数的劣化,但当主动支护力达到整体强度 90%时,剩余 10%强度无法应对围岩变形,围岩劣化程度重新增加。

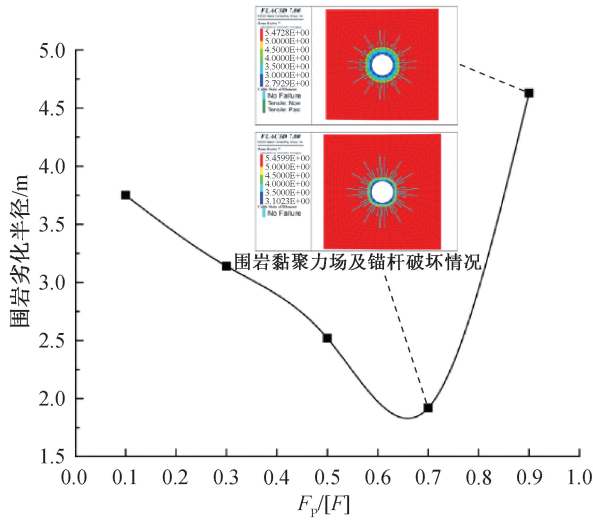


图 8 不同主动支护力占比对围岩劣化程度的影响曲线

Fig. 8 The influence curve of different proportion of active support force on the deterioration degree of surrounding rock

3.5 现场试验与监测

渭武高速公路工程木寨岭隧道穿越漳河与洮河的分水岭木寨岭,横跨漳县、岷县。隧道采用分离式设计,全长约 15.2km,主洞高 13.61m、宽 17.55m,隧道主要为炭质板岩,隧址区地应力以南北向的持续挤压应力为主,测孔最大主应力 12.14~21.32MPa,最大主应力为水平方向。由于隧道地处高地应力区且炭质板岩力学强度较低,隧道开挖过程中遭遇严重的软岩大变形灾害,最大收敛变形量达 1 000mm,出现钢拱架压弯、衬砌开裂等现象,因此将原设计 4.5,5m 间隔布置的长短锚杆替换为 10,5m 间隔布置的长短锚索,并施加预应力。预应力锚索支护如图 9 所示。为研究采用预应力锚索支护对隧道围岩应力场、位移场的影响,在先行洞提前钻设水平孔,并埋设多点应力、位移计,用于观察隧道开挖和锚索支护对围岩的影响,同时监测隧道拱顶沉降和水平收敛,如图 10 所示。

隧道变形曲线如图 11 所示。由图 11 可知,隧道水平收敛位移值偏大,靠近水平侧的左拱顶、右

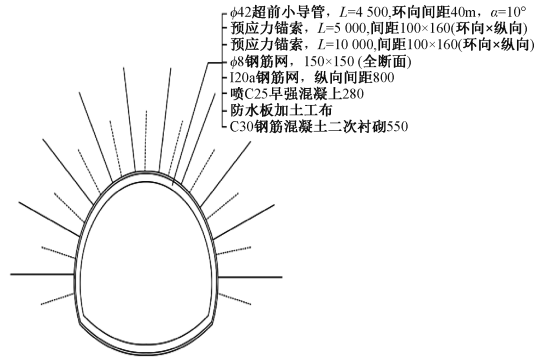


图 9 隧道预应力锚索支护

Fig. 9 Prestressed anchor cable support for tunnel

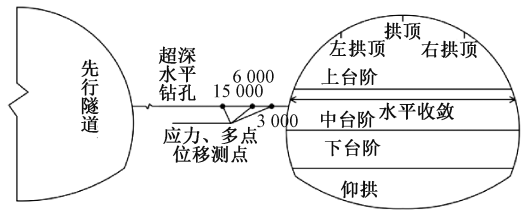


图 10 隧道监测设计

Fig. 10 Monitoring design for tunnel

拱顶位移值比拱顶位移值大,说明隧道受水平挤压影响明显,而采用预应力锚索支护可有效抑制隧道围岩变形。

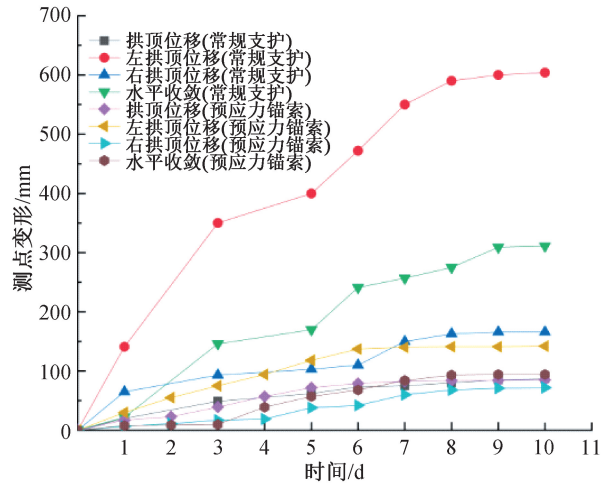


图 11 隧道不同部位变形曲线

Fig. 11 Deformation curves of different parts of tunnel

采用预应力支护措施后,不同深处的围岩位移值如图 12 所示。由图 12 可知,隧道开挖后,深度 3,6m 处的围岩位移值急剧增加,越靠近洞壁位移值越大,而采用预应力锚索支护后,由于锚索张拉回缩,对围岩施加主动支护力,围岩位移值短暂减小,随后继续随时间增加而增加,锚索预应力为 450kN 时的围岩位移值最小,说明预应力为 450kN 时对围岩约束效果更明显,当预应力为 650kN 时,尽管前

期对围岩约束更显著,但随着围岩变形继续发展,其约束效果明显降低,可能是锚索与围岩出现脱锚现象,侧面印证主动支护力、被动支护力分配对围岩变形的影响效果。

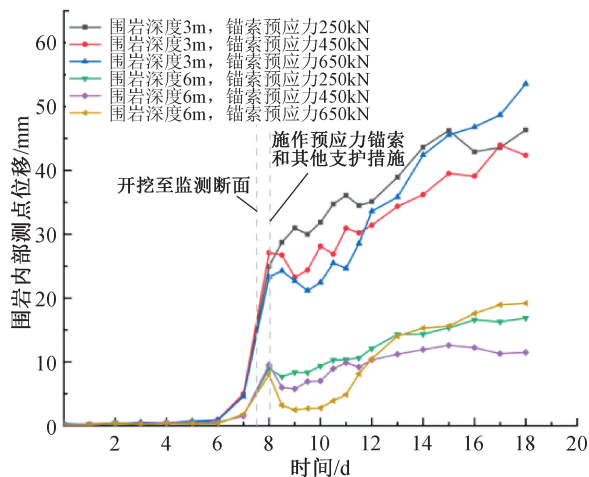


图 12 不同深度处围岩位移值

Fig. 12 Displacement values of surrounding rock at different depths

4 结语

1) 岩体物理力学参数随围压、塑性应变而改变,隧道开挖改变了围岩应力应变场,从而导致岩体物理力学参数改变,而围岩参数场又影响围岩应力应变场。

2) 锚固体系的最优设计需综合考虑锚固时机、分布密度及支护力分配的影响。在设计算例中,围岩变形发展至 30% 时实施锚固体系效果最佳,既能有效阻止围岩强度与刚度分化,又可避免锚杆与锚索因过早承载而发生破坏。当锚杆间距 $\leq 1.5\text{m}$ 时,可平衡经济性与成拱能力,间距过大会导致锚固失效。主动支护力占比 70% 时,围岩约束效果最优, > 90% 时锚杆可能因剩余强度不足而断裂。

3) 木寨岭隧道的监控量测及围岩深处的位移监测结果表明,以预应力锚索为核心的主动支护体系相比传统支护体系,围岩变形更小,支护效果更明显,施加预应力大小对围岩变形影响显著,施加 450kN 预应力对围岩变形约束最显著,施加 650kN 预应力会导致锚索脱锚,从而导致支护效果下降。

参考文献:

[1] 彭振华,李俊彦,刘乾灵,等. 扩建洞库施工巷道开挖对相邻运营洞库影响分析 [J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(24): 55-59.
PENG Z H, LI J Y, LIU Q L, et al. Analysis of impact of excavation of construction roadways for expansion of caverns on adjacent operational caverns [J]. Construction technology, 2023, 52(24): 55-59.

[2] 赵勇,刘大刚. 特殊地质条件下隧道工程高性能支护体系 [J]. 中国铁路,2020(12):20-34.
ZHAO Y, LIU D G. High-performance support system for tunnel engineering under special geological conditions [J]. China railway, 2020(12):20-34.

[3] 陈子全,寇昊,杨文波,等. 我国西南部山区隧道施工期支护结构力学行为特征案例分析 [J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(6):800-812.
CHEN Z Q, KOU H, YANG W B, et al. Cases analysis of mechanical behavior characteristics of tunnel supporting structure in mountainous areas in southwest China [J]. Tunnel construction, 2020, 40(6):800-812.

[4] 于庆增,张啸,宁向可. 煤矿巷道 TBM 适应性技术研究及应用 [J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(19):139-144.
YU Q Z, ZHANG X, NING X K. Research and application of TBM adaptive technology in coal mine roadways [J]. Construction technology, 2023, 52(19):139-144.

[5] 唐德密,邓乃夫,李庆文. 基于机器视觉算法的隧道岩体质量智能评估方法 [J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(20):42-50.
TANG D M, DENG N F, LI Q W. Intelligent assessment method for tunnel rock mass quality based on machine vision algorithms [J]. Construction technology, 2024, 53(20):42-50.

[6] HUANG Z P, BROCH E, LU M. Cavern roof stability-mechanism of arching and stabilization by rock bolting [J]. Tunnelling and underground space technology, 2002, 17(3):249-261.

[7] NIE W, GUO W, MA S Q, et al. Numerical modelling of fully grouted rockbolts subjected to shear load [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2020, 53(5):2493-2503.

[8] FAHIMIFAR A, RANJBARNIA M. Analytical approach for the design of active grouted rockbolts in tunnel stability based on convergence-confinement method [J]. Tunnelling and underground space technology, 2009, 24(4):363-375.

[9] OSGOURI R R, ORESTE P. Elasto-plastic analytical model for the design of grouted bolts in a Hoek-Brown medium [J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 2010, 34(16):1651-1686.

[10] 罗基伟,张顶立,房倩,等. 超大跨度隧道预应力锚杆-锚索协同支护机理 [J]. 中国铁道科学, 2020, 41(5):71-82.
LUO J W, ZHANG D L, FANG Q, et al. Combined support mechanism of pretensioned rock bolt and anchor cable for super-large-span tunnel [J]. China railway science, 2020, 41(5):71-82.

[11] 孙振宇,张顶立,房倩. 隧道锚固系统的协同作用及设计方法 [J]. 工程力学, 2019, 36(5):53-66, 75.
SUN Z Y, ZHANG D L, FANG Q. The synergistic effect and design method of tunnel anchorage system [J]. Engineering mechanics, 2019, 36(5):53-66, 75.

[12] SINHA S, WALTON G. Investigation of pillar damage mechanisms and rock-support interaction using Bonded Block Models [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2021, 138:104652.

[13] 王延宁,张强,李子仪,等. 考虑弹塑性耦合效应的应变软化

- 模型[J]. 煤炭学报, 2020, 45(12): 4037-4051.
- WANG Y N, ZHANG Q, LI Z Y, et al. Strain softening model considering elastic-plastic coupling effect [J]. Journal of China coal society, 2020, 45(12): 4037-4051.
- [14] 王渭明, 赵增辉, 王磊. 考虑刚度和强度劣化时弱胶结软岩巷道围岩的弹塑性损伤分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5): 679-685.
- WANG W M, ZHAO Z H, WANG L. Elastic-plastic damage analysis for weakly consolidated surrounding rock regarding stiffness and strength cracking [J]. Journal of mining & safety engineering, 2013, 30(5): 679-685.
- [15] 张帅, 王俊杰, 张海龙, 等. 考虑刚度与强度劣化的洞室围岩弹塑性分析[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1): 101-109.
- ZHANG S, WANG J J, ZHANG H L, et al. Elastoplastic analysis of surrounding rock of caverns considering deterioration of stiffness and strength [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2024, 46(1): 101-109.
- [16] 陆银龙, 王连国, 杨峰, 等. 软弱岩石峰后应变软化力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 640-648.
- LU Y L, WANG L G, YANG F, et al. Post-peak strain softening mechanical properties of weak rock [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2010, 29(3): 640-648.
- [17] 陈凯. 岩石损伤本构模型的建立及其在围岩稳定性计算中的应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- CHEN K. The establishment of rock damage constitutive model and the application in the calculation of surrounding rock stability [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [18] 付腾飞. 基于非线性损伤的巷道开挖面附近围岩变形及支护研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- FU T F. Surrounding rock control and support research near roadway excavation face based on nonlinear damage [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2017.
- [19] 周辉, 杨凡杰, 张传庆, 等. 考虑围压效应的大理岩弹塑性耦合力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2389-2399.
- ZHOU H, YANG F J, ZHANG C Q, et al. An elastoplastic coupling mechanical model for marble considering confining pressure effect [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2012, 31(12): 2389-2399.
- [20] 赖勇. 围压对杨氏模量的影响分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(2): 246-249, 278.
- LAI Y. Effect analysis of confining pressure on Young's modulus [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2009, 28(2): 246-249, 278.
- [21] 尤明庆. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 53-60.
- YOU M Q. Effect of confining pressure on the Young's modulus of rock specimen [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2003, 22(1): 53-60.
- [22] 李斌. 高围压条件下岩石破坏特征及强度准则研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.
- LI B. Study on rock failure characteristics and rock strength criteria under high confining pressure [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.
- [23] 刘泉声, 刘恺德, 朱杰兵, 等. 高应力下原煤三轴压缩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 24-34.
- LIU Q S, LIU K D, ZHU J B, et al. Study of mechanical properties of raw coal under high stress with triaxial compression [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2014, 33(1): 24-34.

(上接第 98 页)

- [4] 王国豪, 王雁冰, 谢平, 等. 基于数码电子雷管的岩巷中深孔-孔内分段爆破破岩机制及应用[J]. 工程科学学报, 2023, 45(11): 1820-1832.
- WANG G H, WANG Y B, XIE P, et al. Rock breaking mechanism and the application of medium-deep hole-in-hole segmented blasting in rock roadway using digital electronic detonators [J]. Chinese journal of engineering, 2023, 45(11): 1820-1832.
- [5] DING J J, YANG J H, YE Z W, et al. Numerical study on rock blasting assisted by in situ stress redistribution [J]. Tunnelling and underground space technology, 2024, 153: 106022.
- [6] LING T L, LI S L, LIU D S, et al. Blasting damage of tunnel rock mass based on cumulative effect [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2023, 56(3): 1679-1695.
- [7] HALLQUIST J. LS-DYNA keyword user's manual volume II R8.0 [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2015.
- [8] 管晓明, 张良, 王利民, 等. 隧道近距下穿管线的爆破振动特征及安全标准[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(11): 2870-2885.
- GUAN X M, ZHANG L, WANG L M, et al. Blasting vibration characteristics and safety standard of pipeline passed down by tunnel in short distance [J]. Journal of Central South University (science and technology), 2019, 50(11): 2870-2885.
- [9] SAADATMAND HASHEMI A, KATSABANIS P. The effect of stress wave interaction and delay timing on blast-induced rock damage and fragmentation [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2020, 53(5): 2327-2346.
- [10] 胡英国, 卢文波, 陈明, 等. 不同开挖方式下岩石高边坡损伤演化过程比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1176-1184.
- HU Y G, LU W B, CHEN M, et al. Comparison of damage evolution process of high rock slope excavated by different methods [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(6): 1176-1184.