

文章编号:1673-9469(2026)01-0045-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.01.007

## 考虑泥岩蠕变特性的富水隧洞施工控制研究

孙星亮<sup>1</sup>, 刘博宇<sup>1</sup>, 张岳峰<sup>2</sup>, 韩佳伟<sup>3</sup>

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 华北理工大学 建筑工程学院, 河北 唐山 063000;  
3. 张家口市下花园区住建局, 河北 张家口 075300)

**摘要:** 为探究在围岩蠕变作用下采用不同支护参数和施工方法对隧洞稳定性的影响, 以新疆输水隧洞工程为背景, 对现场取得的土样开展了三轴蠕变试验, 用 CVISC 模型对试验结果进行泥岩蠕变参数拟合; 利用 FLAC 3D 软件基于实际工况建立数值模型, 优化支护参数; 开展施工控制后的变形监测, 验证数值模拟结果的有效性。结果表明: (1) 泥岩变形包括施加荷载时产生的瞬时变形和随时间变化的蠕变变形, 其中以蠕变变形为主; (2) 泥岩蠕变参数拟合度较高, 泥岩蠕变特性可通过 CVISC 模型表征; (3) 模拟发现钢拱架布设间距为 50 cm, C25 混凝土喷层厚度为 25 cm, 锁脚锚杆打设长度为 4.5 m, 角度为 60° 时, 能有效减小隧道变形, 充分发挥支护结构作用; (4) 现场优化施工后的监测数据验证了数值模拟结果的可靠性, 证明该施工控制措施下隧洞是稳定的。

**关键词:** 软弱泥岩; 三轴蠕变试验; 蠕变参数识别; 支护参数优化; 现场监测; 时间效应

中图分类号: U451.5

文献标识码: A

## Study on Construction Control of Water-Rich Tunnels Based on the Creep Characteristics of Mudstone

SUN Xingliang<sup>1</sup>, LIU Boyu<sup>1</sup>, ZHANG Yuefeng<sup>2</sup>, HAN Jiawei<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;  
2. School of Civil Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063000, China;  
3. Housing and Construction Bureau of Xihuayuan District, Zhangjiakou, Hebei 075300, China)

**Abstract:** To investigate the influence of different supporting parameters and construction methods on the stability of tunnels under the action of surrounding rock creep, a triaxial creep experiment was carried out on soil samples obtained from the site of the Xinjiang water conveyance tunnel project, and the mudstone creep parameters were fitted using the CVISC model. FLAC 3D software was used to build a numerical model based on actual working conditions to optimize supporting parameters. Deformation monitoring after construction control was carried out to verify the validity of the numerical simulation results. The results show that: (1) Mudstone deformation includes instantaneous deformation and creep deformation over time, among which creep deformation is the dominant deformation. (2) Mudstone creep parameters exhibit a high degree of fitting accuracy, and the creep characteristics of mudstone can be characterized by the CVISC model. (3) When the spacing of steel arch frame is 50 cm, the thickness of C25 shotcrete is 25 cm, the length of lock bolt is 4.5 m, and the angle is 60°, tunnel deformation can be effectively reduced and the supporting structure can be fully utilized. (4) The monitoring data after optimizing the construction method on site verified the reliability of the numerical simulation results, proving that the tunnel was stable under the construction control measures and no supporting structure failure occurred.

**Key words:** weak mudstone; triaxial creep experiment; creep parameter identification; supporting parameter optimization; on-site monitoring; time effect

收稿日期: 2024-02-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52308272)

第一作者: 孙星亮(1970—), 男, 河南郟县人, 博士, 教授, 现从事隧道及地下工程新技术及稳定性理论研究。

随着我国水利工程的发展,大量高压富水泥岩隧洞工程不断增加。隧洞所处地层易引发围岩大变形,给工程建设带来极大的危险和不稳定性。岩石的蠕变特性是岩土工程中发生变形进而引起不稳定的重要因素,在高地应力岩体中开挖隧道极易扰动处于塑性状态下的土体,同时由于运维技术的局限性,围岩产生的大变形对隧道支护结构造成结构断裂破坏,使支护结构局部失效且难以修复。近年来,众多学者开展了岩石蠕变特性研究,深入了解了岩石流变变形及其破坏规律,揭示了地下结构与地质条件更为内在的联系。黄小兰等<sup>[1]</sup>通过岩石蠕变试验,研究了泥岩的蠕变变形值与含水状态的关系。Maranini等<sup>[2]</sup>研究了灰岩在高应力和极低混杂应力下的变形特征。谌文武等<sup>[3]</sup>基于单轴压缩蠕变试验,探究了泥岩蠕变特性。崔希海等<sup>[4]</sup>研究了岩石横向和轴向蠕变规律的差异性,在试验结果的基础上分析如何准确确定岩石的长期强度。范庆忠等<sup>[5-6]</sup>分析研究了不同围压条件下蠕变参数的变化规律。张泽林等<sup>[7]</sup>通过开展三轴蠕变试验,从不同加载方式和不同含水率两方面对泥岩的蠕变特征、影响因素进行探讨,得出更贴近实际工况的蠕变模型。汪耀<sup>[8]</sup>认为软岩在考虑时间效应下的持续变形既不属于弹塑性理论范畴,也不属于弹性理论范畴,并分析了软岩蠕变机理和成因。徐剑波<sup>[9]</sup>得出了衬砌结构与围岩间接触应力随时间的变化关系式。

上述研究多数是对岩石的蠕变性质进行分析,并未提出围岩蠕变灾害的处理措施。对于软弱岩体易引起隧道安全问题,部分学者开展了相关研究。宋仪等<sup>[10]</sup>研究了中条山隧道泥岩段隧道衬砌内力随时间的变化规律及不同埋深对隧道结构长期内力的影响。武亚遵等<sup>[11]</sup>探讨了不同开挖方法对围岩的稳定性影响和隧道变形分布特征。左昌群等<sup>[12]</sup>探究了不同支护参数对支护结构变形规律和软弱围岩受力特征的影响,提出了合理的支护参数。王中文等<sup>[13]</sup>通过分析理论公式,并结合现场数据拟合确定了衬砌合理支护时机。

综上,大多数研究普遍采用室内蠕变试验与数值模拟相结合的方式开展,对于结果是否与实际工程相符合欠缺考虑。基于此,本文依托新疆某输水隧洞工程,基于泥岩蠕变特性,利用数值模拟探究了支护参数优化前后围岩的受力特征及变形规律,并结合现场监测数据,验证数值模拟结果的合理性。

## 1 工程背景

本文以新疆某输水隧洞为工程背景。该隧洞有2300 m处于富水软弱泥岩地层中,隧洞设计洞径为6.7 m,断面开挖高度为6.7 m,隧洞泥岩段埋深约为172~300 m。Z1#斜井工区为交通支洞,旁边山顶有泉水出露,围岩级别主要为V级,地层岩性以第三系泥岩、砂质泥岩为主,部分呈松散砂状、土状,并具有弱—中等膨胀性。地下水发育,围岩软弱,具备大变形条件。工程区位于地下水位以下,接受地下水下渗补给,并具有一定的承压性,水压监测结果表明,承压水头最高可达287.1 m。隧洞周边泥岩蠕变灾害严重,隧洞变形较大,支护参数不足,部分衬砌发生开裂剥落,型钢拱架变形(图1)。

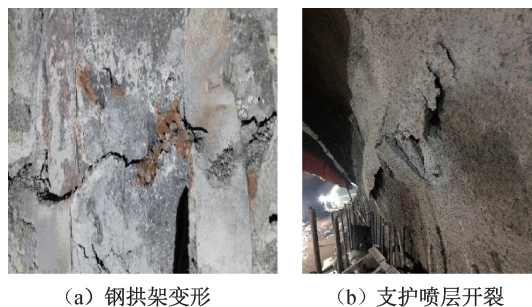


图1 隧洞支护病害

Fig. 1 Tunnel support diseases

## 2 泥岩蠕变参数识别

### 2.1 三轴蠕变试验方案

本文采用分级加载方式,开展了泥岩三轴蠕变试验,即每施加一级荷载直到试件变形达到稳定,再施加下一级荷载。这种方式可排除不同试件之间存在的差异性,通过记录轴向应变、径向应变、时间等数据,绘制应变-时间曲线,分析蠕变特性。

取隧洞埋深为0、200、300 m时的围压,根据表1中三轴试验所得抗压强度来确定分级荷载。分别对泥岩试件进行围压为0、4、6 MPa的三轴试验,对每一个试件在同种围压下施加三级荷载,每级荷载分别取表1中抗压强度的25%、50%、100%施加,具体施加荷载见表2。

### 2.2 三轴蠕变试验过程

(1) 安装试件:加工试件上下端面,使其满足平整度及与轴线垂直度的要求后,置入试验机开展试验,置入过程中保证试件与仪器在同一轴线上。

表 1 三轴抗压强度

Tab. 1 Triaxial compressive strength

试件编号	围压 /MPa	直径 /mm	高度 /mm	抗压强度 /MPa
D-1	0	44	100	13.5
D-2	4	45	99	20.3
D-3	6	45	99	26.7

表 2 三轴蠕变试验分级加载表 (单位:MPa)

Tab. 2 Graded loading stress levels for triaxial

试件编号	围压	creep tests (unit: MPa)		
		第一级荷载	第二级荷载	第三级荷载
E-1	0	3.5	7	14
E-2	4	5.0	10	20
E-3	6	6.0	12	24

(2) 试运行:施加轴向应力对试件进行预加载。

(3) 施加围压:施加至所需围压,待围压稳定不变后,开始记录时间。每次施加轴向荷载至试件变形稳定,再施加下一级荷载。依次重复工作,直至试样发生破坏,结束试验,试验仪器见图 2。



图 2 三轴蠕变试验仪

Fig. 2 Triaxial creep test instrument

### 2.3 三轴蠕变试验结果

基于岩石三轴压缩蠕变试验,得到 3 组泥岩试样在不同围压、不同荷载下的破坏情况及变形规律,如图 3 所示。

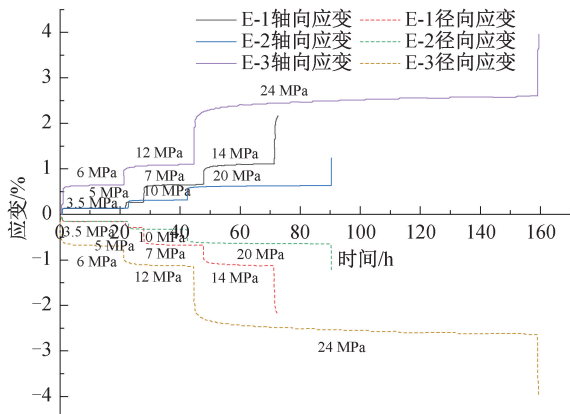


图 3 三轴蠕变试验曲线

Fig. 3 Triaxial creep test curve

分析图 3 可知,3 组试验呈现出相同的规律。每次施加荷载的瞬间,试件产生弹性变形,荷载不变,伴随时间的推移产生蠕变变形。轴向施加荷载较小时,蠕变速率随时间的推移呈减小的趋势,最后速率趋于 0,试件不再产生变形。当轴向施加荷载较大时,试件蠕变速率增大,泥岩会在短时间内发生大变形。试验表明:试件蠕变速率和应变随着应力的增大而增大,直至试件发生破坏为止;应变与时间呈台阶式上升关系;分级加载试验中试件变形分为瞬时弹性变形和蠕变变形,弹性变形由胡克定律确定,蠕变变形由材料蠕变模型确定。

### 2.4 蠕变模型与蠕变参数识别

通过试验结果可知,在施加荷载瞬间,泥岩会产生瞬时变形,此时可以将其视为弹性变形,通过蠕变模型中的弹性元件表示。在施加荷载一定时间后,试件产生与时间相关的减速蠕变变形和稳定蠕变变形,模型中的黏性元件符合这种变形特征。当荷载超过试件极限强度时,应力趋于稳定,不再随应变的增加而变化,此时进入加速蠕变阶段,这一阶段可视为塑性变形。

CVISC 模型由黏弹性蠕变体和黏塑性变体串联构成,能通过黏塑性变形和黏弹性变形有效描述泥岩蠕变特性,故用该模型解释泥岩蠕变曲线。CVISC 模型相比其他模型对模拟泥岩蠕变效果更好。该模型具有黏弹塑性和弹塑性两种性质,施加荷载时,既可以表现瞬时弹性应变,也可表现伴随时间推移的黏性变形;卸除荷载时,能够显示瞬时恢复弹性变形和弹性后效特征。图 4 为 CVISC 模型的示意图,其本构模型关系如式(1)所述。

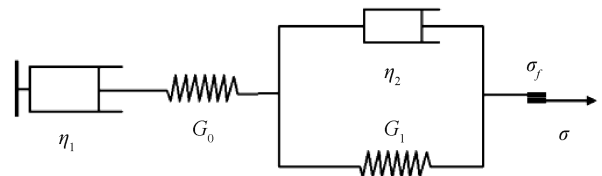


图 4 CVISC 模型

Fig. 4 CVISC model

$$\varepsilon_1(t) = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{3G_0} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_2}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{3} \left[ \frac{t}{\eta_2} + \frac{1}{G_1} \left( 1 - e^{-\frac{G_1}{\eta_2} t} \right) \right] \quad (1)$$

式中,  $K$  为岩土材料的体积模量, Pa;  $G_0$ 、 $G_1$  为麦克斯韦与开尔文剪切模量, Pa;  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  为麦克斯韦与开尔文黏性系数, Pa · h;  $\sigma$  为岩土体应力, Pa;  $\sigma_f$

表示岩土体材料的屈服强度, Pa。

为利用蠕变试验结果得到式(1)中的参数, 将式(1)改为式(2)形式, 其中  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为待定参数。

$$\varepsilon(t) = A + Bt - Ce^{Dt} \quad (2)$$

且有:

$$G_0 = \frac{3K(\sigma_1 - \sigma_2)}{9AK - (\sigma_1 + 2\sigma_2)}, G_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{3C},$$

$$\eta_1 = -\frac{G_1}{D}, \eta_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{3B} \quad (3)$$

基于图4蠕变本构模型, 利用数据分析软件 MATLAB 分析蠕变试验曲线, 得到式(2)中的  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  四个初始蠕变参数, 再通过最小二乘法对初始蠕变数据进行非线性曲线拟合。以试件 E-2 为例, 通过上式可以确定蠕变参数, 得到蠕变试验的模型参数, 见表3。通过表3中参数和式(2)得到试件 E-2 分级应力下的 CVISC 模型参数, 见表4。不同应力下的轴向蠕变拟合曲线与试验曲线对比图, 见图5。最终经过优化得到该泥岩的蠕变参数: 麦克斯韦剪切模量  $G_0 = 8.9 \times 10^7$  Pa, 麦克斯韦黏滞系数  $\eta_1 = 2.7 \times 10^{14}$  Pa·h, 开尔文剪切模量  $G_1 = 7.4 \times 10^8$  Pa, 开尔文黏滞系数  $\eta_2 = 7.9 \times 10^{13}$  Pa·h。

表3 式(2)参数回归结果

Tab. 3 Regression results of equation (2) parameters						
试件编号	围压 /MPa	荷载 /MPa	A	B	C	D
E-2	4	5	0.145	$2.89 \times 10^{-9}$	0.020	-1.601
		10	0.316	$2.66 \times 10^{-4}$	0.027	-0.542
		20	0.625	$3.52 \times 10^{-4}$	0.040	-0.206

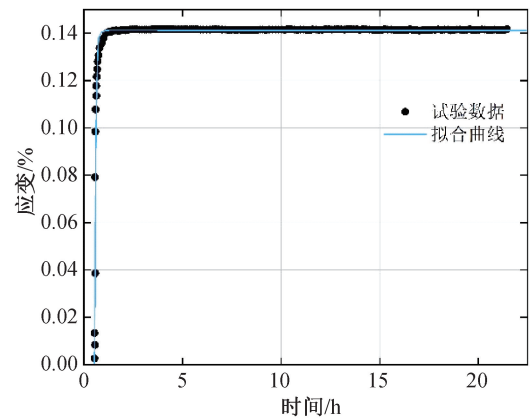
表4 不同荷载下蠕变模型参数

Tab. 4 Parameters of creep model under different stresses				
加载应力 /MPa	麦克斯韦剪切模量 $G_0$ /Pa	麦克斯韦黏滞系数 $\eta_1$ /(Pa·h)	开尔文剪切模量 $G_1$ /Pa	开尔文黏滞系数 $\eta_2$ /(Pa·h)
5	$7.7 \times 10^7$	$1.4 \times 10^{14}$	$1.6 \times 10^8$	$1.2 \times 10^{13}$
10	$8.6 \times 10^7$	$1.6 \times 10^{14}$	$7.4 \times 10^8$	$7.5 \times 10^{13}$
20	$10.6 \times 10^7$	$5.1 \times 10^{14}$	$13.3 \times 10^8$	$15.0 \times 10^{13}$

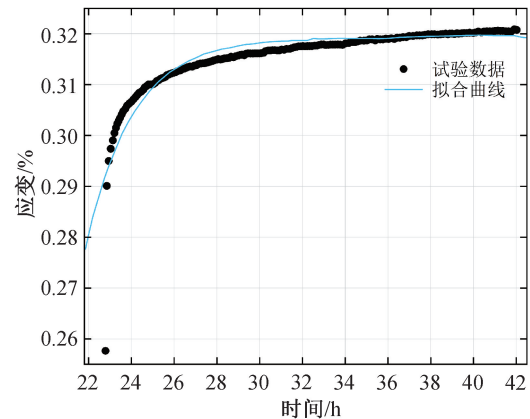
### 3 隧洞支护参数优化设计

#### 3.1 计算模型

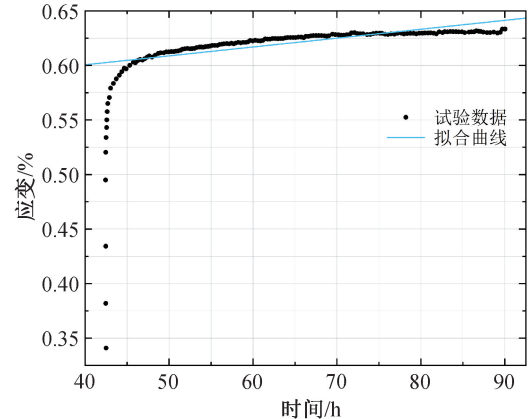
为模拟泥岩过大变形问题, 利用有限差分软件 FLAC3D, 根据该工程隧洞的埋深和地质情况, 建立三维数值模型, 见图6。为模拟隧洞施工全过程, 参考实际工况设置相关支护参数。根据圣维



(a) 5 MPa应力下拟合曲线



(b) 10 MPa应力下拟合曲线



(c) 20 MPa应力下拟合曲线

图5 泥岩蠕变数据与拟合曲线对比

Fig. 5 Comparison of mudstone creep data and fitting curves

南理论考虑模型边界效应, 模型左右和上下边界取值皆选取距离隧洞中心4倍洞径, 建模时  $y$  向为掘进方向, 取值为80 m, 则该模型尺寸为  $75 \text{ m} \times 80 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ , 监测点位于隧洞中部断面处。隧洞埋深为267 m, 因此模型顶部应力边界需施加均布荷载5.6 MPa, 其余表面均施加法向位移约束。通过对比不同支护条件下的隧道支护变形和受力特性, 选取最优支护方案。

为分析不同围岩支护参数对隧洞围岩稳定性的影响规律, 在隧洞开挖过程中采用摩尔-库伦模

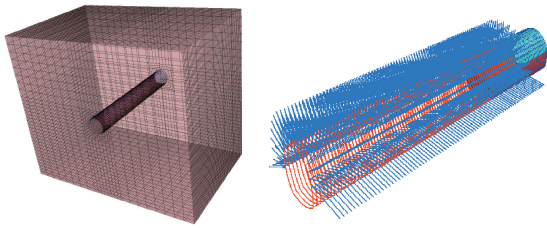


图 6 三维数值模型图

Fig. 6 3D numerical model

型对围岩进行力学计算。为了更准确探究围岩开挖后的长期蠕变行为,需将围岩作为黏弹性和黏塑性的组合元件,采用 CVISC 模型进行模拟,并将室内试验测得的围岩参数作为本次数值模拟参数。具体围岩参数如下,初始容重为  $21.68 \text{ kN/m}^3$ ,弹性模量为  $1.22 \text{ GPa}$ ,泊松比为  $0.2$ ,内摩擦角为  $21.8^\circ$ ,黏聚力为  $4.41 \text{ MPa}$ 。

### 3.2 不同支护参数稳定性分析

#### 3.2.1 锁脚锚杆长度对隧洞变形影响

在其他支护参数不变的情况下,分析不同锁脚锚杆长度对隧道稳定性的影响。所取锚杆直径为  $20 \text{ mm}$ ,材质为 Q235B 钢材,抗拉强度为  $380 \text{ MPa}$ ,锚杆长度分别取  $0, 3, 4.5, 6 \text{ m}$ 。通过模拟得出不同锁脚锚杆长度下隧洞的位移值,见图 7,锚杆最大拉力值见图 8。

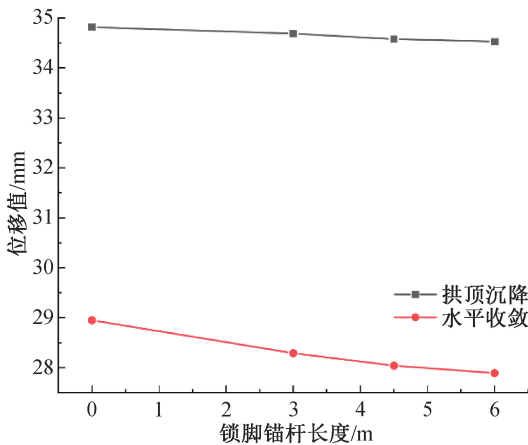


图 7 不同锁脚锚杆长度时围岩位移最大值

Fig. 7 Variation of the maximum surrounding rock displacement with the length of locking bolts

由图 8 可知,锁脚锚杆从  $0 \text{ m}$  增至  $3, 4.5, 6 \text{ m}$  时,拱顶沉降位移值分别降低了  $0.37\%$ 、 $0.31\%$ 、 $0.14\%$ ,水平位移值分别降低了  $2.27\%$ 、 $0.88\%$ 、 $0.53\%$ ,锁脚锚杆所受最大拉力值分别增加了  $60$ 、 $120$ 、 $160 \text{ MPa}$ ;锁脚锚杆长度从  $3 \text{ m}$  增至  $4.5 \text{ m}$  时,最大拉应力值增幅为  $50\%$ ;锁脚锚杆长度从  $4.5 \text{ m}$

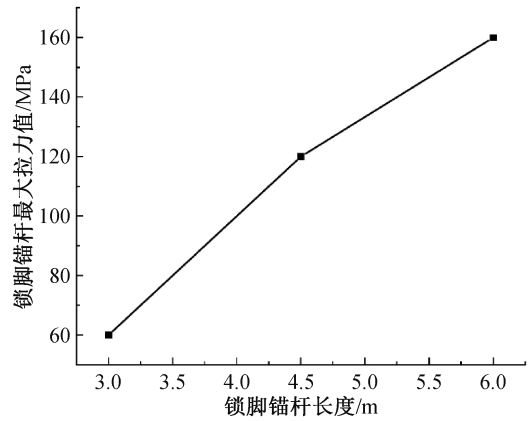


图 8 不同锁脚锚杆长度时锚杆最大拉力值

Fig. 8 Variation of the maximum tensile force with the length of locking bolts

增至  $6 \text{ m}$  时,最大拉应力值增幅为  $33\%$ ,锚杆受拉充分,受力显著增加,同时可以抑制拱顶沉降,减小水平收敛位移。

图 7 中随锚杆长度增加,拱顶沉降变化较小,水平收敛也仅减小  $1.12 \text{ mm}$ ,锚杆长度变化对隧道变形影响较小。

#### 3.2.2 喷层厚度对隧洞变形影响

在其他支护参数不变的情况下,分析不同喷层厚度对隧道稳定性的影响,分别取喷层厚度  $15, 20, 25, 30 \text{ mm}$  进行计算。通过模拟得出不同喷层厚度下隧道的位移值,见图 9。

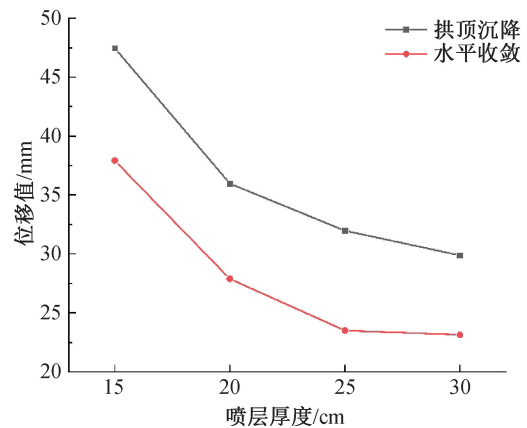


图 9 不同喷层厚度时的隧道位移最大值

Fig. 9 Variation of the maximum displacement of the tunnel with the thickness of the shotcrete layer

由图 9 可知,初支喷层厚度为  $15, 20, 25, 30 \text{ cm}$  时,对应拱顶沉降分别为  $47.45, 35.97, 31.97, 29.87 \text{ mm}$ ,减幅为  $24.2\%$ 、 $11.2\%$ 、 $6.6\%$ 。水平收敛为  $37.91, 27.88, 23.50, 23.13 \text{ mm}$  时,减幅为  $26.4\%$ 、 $15.7\%$ 、 $1.57\%$ 。可见随着喷层厚度的增加,拱顶沉降和水平收敛呈减小趋势,且减幅

逐渐减小;喷层厚度为 25 cm 和 30 cm 时,位移值差距较小,为贴合实际工况且考虑施工成本,可选取 25 cm 作为喷层厚度。

### 3.2.3 锁脚锚杆打设角度对隧洞变形影响

在其他支护参数不变的情况下,分析不同锁脚锚杆打设角度对隧道稳定性的影响,所取锚杆直径为 20 mm,材质为 Q235B 钢材,抗拉强度为 380 MPa,锚杆打设角度分别为 15°、30°、45°、60°。通过模拟得出不同锁脚锚杆打设角度下隧道的位移值,见图 10,最大拉力值见图 11。

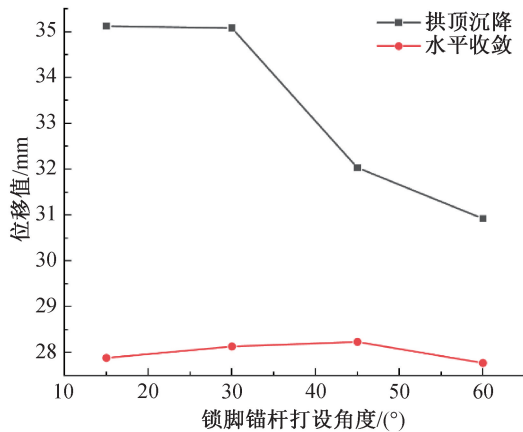


图 10 不同锁脚锚杆打设角度时隧道位移最大值  
Fig. 10 Variation of the maximum displacement of the tunnel with the angle of locking bolts

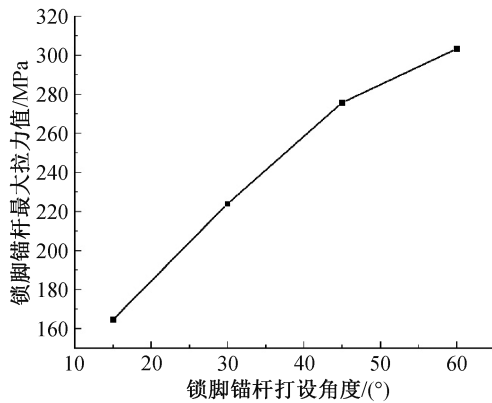


图 11 不同锁脚锚杆打设角度时锚杆最大拉力值  
Fig. 11 Variation of the maximum tensile force with the angle of locking bolts

根据模拟结果分析可知,锁脚锚杆打设角度为 15°、30°、45°、60°时,拱顶沉降呈减小趋势,减幅分别为 0.14%、8.69%、3.46%;水平位移先增后减,当角度为 60°时,水平收敛最小;锁脚锚杆所受最大拉力值分别为 164.5、224.0、275.7、303.2 MPa,增幅分别为 36%、23.1%、10%。可见锁脚锚杆打设角度为 60°时,可充分发挥锁脚锚杆作用,且未

达到锚杆抗拉强度 380 MPa,同时拱顶沉降和水平收敛最小。

### 3.3 支护参数优化前后长期稳定性对比

通过单因素法对支护结构进行稳定性分析。对比了不同长度锁脚锚杆、不同喷层厚度、不同打设锁脚锚杆角度时隧洞的变形规律及力学特征,得到了有效的支护参数,见表 5。

表 5 围岩与支护结构设计计算参数表

Tab. 5 Calculation parameters for the design of surrounding rock and supporting structure

	锁脚锚杆打设角度/(°)	锁脚锚杆长度 m	喷层厚度/cm
优化前	15	6.0	20
优化后	60	4.5	25

### 3.4 支护优化后长期稳定性分析

#### 3.4.1 隧洞变形

选取表 5 中优化后的支护参数,系统锚杆长度为 3.5 m,钢架间距为 50 cm,在进行数值模拟时考虑蠕变效应,通过计算得到隧洞蠕变 3、6、9 个月时围岩位移特征,隧洞变形随时间的变化见图 12。

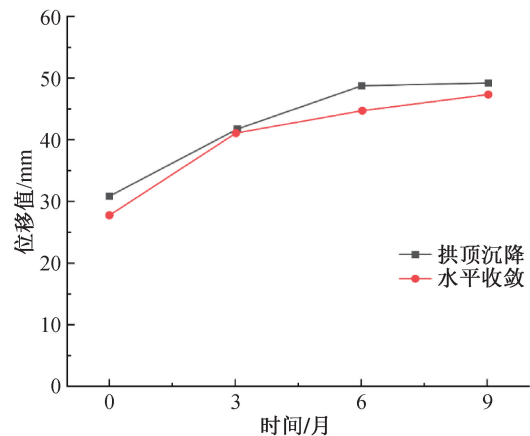
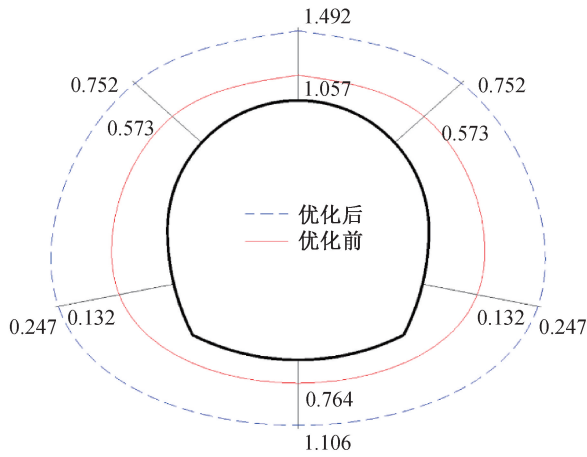


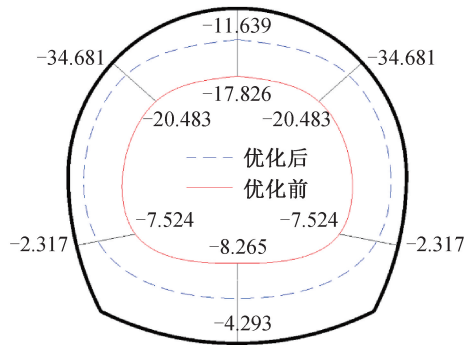
图 12 优化后围岩位移-时间变化曲线  
Fig. 12 Variation curves of surrounding rock displacement with time after scheme optimization

由图 12 可知,在蠕变作用下,围岩位移随着时间的推进而增大。隧洞开挖后拱顶瞬时变形为 31.59 mm;支护经历 6 个月时,位移增加至 48.75 mm,增幅为 54.32%;支护经历 6 个月到 9 个月时,位移增长趋于 0,可视为拱顶达到稳定状态。水平收敛在 9 个月时,从 27.71 mm 增加至 47.34 mm,增幅为 70.82%,并且呈现缓慢的增长趋势,需要对隧洞变形较大部位进行加固处理。说明考虑蠕变作用下的计算结果更加合理。

### 3.4.2 初支喷层应力



(a) 初支喷层最大主应力图



(b) 初支喷层最小主应力图

图 13 初支喷层应力分布图(单位:MPa)

Fig. 13 Stress distribution of initial shotcrete layer (unit: MPa)

由图 13 可知,参数优化后支护结构承受最大拉应力由 1.05 MPa 增至 1.49 MPa,增幅为 44%,拱顶处变化率最大,拉应力增加较为显著。最大压应力由 34.68 MPa 降至 20.48 MPa,减幅为 40.9%,最大压应力发生在拱肩处,应力呈轴对称分布。分析数据发现,支护参数优化后,支护结构充分受力,最大拉应力 1.49 MPa 和最大压应力 20.48 MPa 均符合设计要求,且应力分布规律基本一致,优化后支护强度合理。

### 3.4.3 初支钢架应力

分析图 14 可知,钢拱架结构受力呈对称分布,优化前后最大轴力出现在拱顶处,分别为 428.71 MPa 和 300.25 MPa,减幅为 24.38%,钢拱架均匀受力,不同位置处内力变化率基本不变,优化后未达到屈服强度,符合实际受力规律。

## 4 现场监控量测分析

通过对泥岩段进行监测分析,探究参数优化后支护方案产生的效果,监测断面里程为 K4+

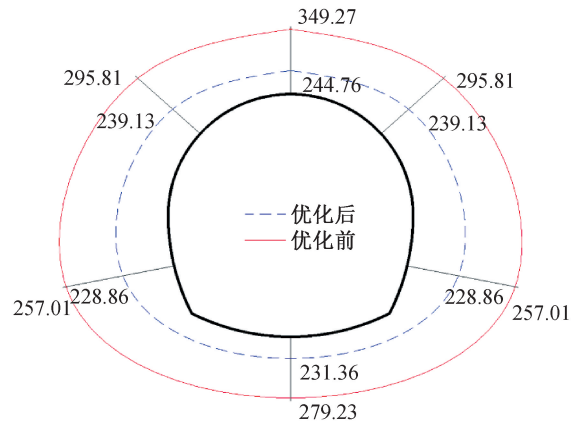


图 14 钢拱架轴向受力云图(单位:MPa)

Fig. 14 Axial force contour map of steel arch frame (unit: MPa)

254,监测周期为每天一次。主要监测隧洞拱顶沉降、断面水平收敛、钢拱架应力,测点编号为 M1—M7。分别对拱顶及两侧拱腰、拱肩、拱脚进行监测。埋设传感器后,开始监测钢拱架不同位置的应力变化,钢拱架应力变化特征如图 15 所示。

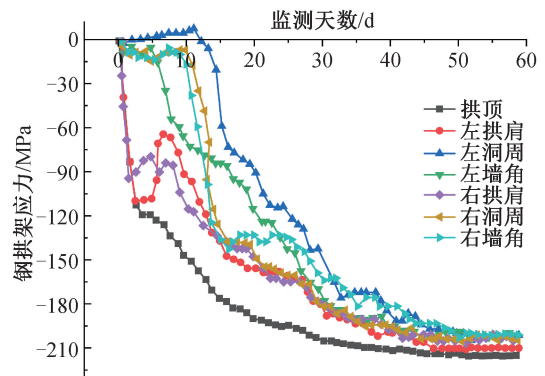


图 15 钢拱架应力随时间变化图

Fig. 15 Variation of steel arch frame stress with time

由图 15 可知,伴随隧洞开挖,钢拱架受力逐渐趋于稳定,当应力增长率趋于 0 时,应力值达到峰值应力,对应初期支护也趋于稳定。分析应力监测结果可知,钢拱架所受最大压应力为 216.4 MPa,达到了屈服强度的 67%,出现在拱顶处,与数值模拟规律基本一致。最大压应力为 8.5 MPa,出现在左洞周处。可见应力分布规律和增长规律与数值模拟基本一致。由此说明钢拱架作为初期支护的重要组件,显著增加了隧洞的稳定性。

隧道拱顶沉降及断面水平收敛随时间变化曲线见图 16。

分析图 16 可知,现场实测的结果和规律与数值模拟的基本相似。开挖初期,围岩地应力释放对支护结构产生压力导致支护变形。随着时间的

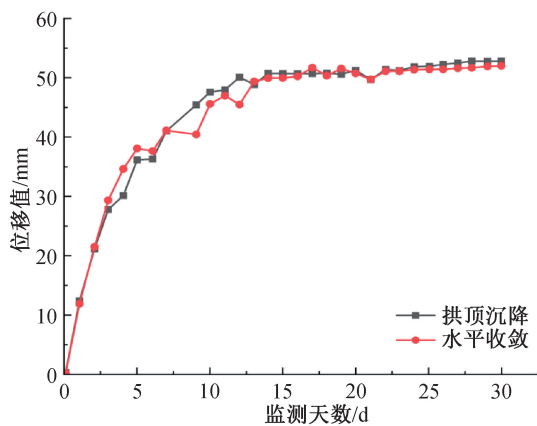


图 16 围岩位移-时间变化曲线

Fig. 16 Variation curves of surrounding rock displacement with time

推移,拱顶沉降和洞周相对水平收敛逐渐增大,最终沉降值在监测 19 d 后稳定在 53 mm,变形速率低于 0.15 mm/d,洞周相对水平收敛值在监测 21 d 后稳定在 52 mm,变形速率低于 0.2 mm/d。可认为,隧洞支护结构趋于基本稳定状态。

## 5 结论

以新疆某输水隧洞工程为背景,对现场取出的土体开展三轴蠕变试验,利用 CVISIC 模型进行拟合得出软弱泥岩的蠕变参数,结合 FLAC3D 软件建立数值模型,探究了围岩蠕变作用下隧洞采用不同支护参数和施工方法对隧洞稳定性的影响,主要结论如下。

1)通过三轴蠕变试验发现,泥岩变形分为施加荷载时产生的瞬时变形和随时间变化产生的蠕变变形,其中蠕变变形显著。泥岩的蠕变过程可分为初始蠕变阶段、等速蠕变阶段、加速蠕变阶段。通过 MATLAB 软件对泥岩蠕变参数进行非线性拟合,得到了描述泥岩蠕变特性的 CVISIC 模型参数。

2)在考虑时间对隧洞变形影响的情况下,分析发现钢拱架布设间距为 50 cm,C25 混凝土喷层厚度为 25 cm,锁脚锚杆打设长度为 4.5 m,打设角度为 60°时,能有效降低拱顶沉降和水平收敛、减小支护结构受压,维持隧洞稳定性。

3)方案优化后隧道施工中的监控量测结果表明,支护受力在材料应力的安全范围之内,拱顶下沉最大也仅有 53 mm,说明在该施工控制措施下隧洞是稳定的。

### 参考文献:

[1] 黄小兰,杨春和,刘建军,等. 不同含水情况下的泥岩

蠕变试验及其对油田套损影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3477-3482.

HUANG X L, YANG C H, LIU J J, et al. Experimental study on mudstone's creep behavior under different water contents and its effect on casing damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (S2):3477-3482.

[2] MARANINI E, BRIGNOLI M. Creep behaviour of a weak rock: experimental characterization [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36 (1):127-138.

[3] 湛文武,原鹏博,刘小伟. 分级加载条件下红层软岩蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28 (S1):3076-3081.

CHEN W W, YUAN P B, LIU X W. Study on creep properties of red-bed soft rock under step load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (S1):3076-3081.

[4] 崔希海,付志亮. 岩石流变特性及长期强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(5):1021-1024.

CUI X H, FU Z L. Experimental study on rheology properties and long-term strength of rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (5): 1021-1024.

[5] 范庆忠,李才,高延法. 软岩三轴蠕变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(7):1381-1385.

FAN Q Z, LI C, GAO Y F. Experimental study on creep properties of soft rock under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (7): 1381-1385.

[6] 范庆忠,高延法,崔希海,等. 软岩非线性蠕变模型研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(4):505-509.

FAN Q Z, GAO Y F, CUI X H, et al. Study on nonlinear creep model of soft rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (4): 505-509.

[7] 张泽林,吴树仁,王涛,等. 甘肃天水泥岩剪切蠕变行为及其模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38 (S2):3603-3617.

ZHANG Z L, WU S R, WANG T, et al. Study on shear creep behavior and model of mudstone in Tianshui, Gansu Province [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38 (S2): 3603-3617.

[8] 汪耀. 高地应力下围岩蠕变对隧道结构长期安全性的影响分析[D]. 成都:西南交通大学,2017.

WANG Y. Analysis on the long-term safety of tunnel structure with high ground stress considering surrounding rock creep [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[9] 徐剑波. 武当群片岩隧道围岩蠕变特性及其对衬砌裂

- 损影响研究[D]. 武汉:中国地质大学,2018.
- XU J B. Study on the creep characteristics of the surrounding rock of Wudang schist tunnel and its influence on the lining cracking[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [10] 宋仪,乔春生,朱举. 蠕变地层深埋隧道结构长期受力状态研究[J]. 现代隧道技术,2020,57(S1):343-350.
- SONG Y, QIAO C S, ZHU J. Study on long-term stress state of tunnel structure in creep stratum [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1):343-350.
- [11] 武亚遵,田方正,林云,等. 基于强度折减法的软弱泥岩隧道围岩稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2018,29(5):65-71.
- WU Y Z, TIAN F Z, LIN Y, et al. Analysis on the tunnel surrounding rock stability of weak mudstone based on strength reduction method[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(5):65-71.
- [12] 左昌群,易毅,孙金山,等. 考虑岩体蠕变特性的片岩大变形隧道初期支护力学效应[J]. 公路交通科技,2014,31(5):102-108.
- ZUO C Q, YI Y, SUN J S, et al. Mechanical effect of primary support for large deformation tunnel in schist layer considering creep behavior of rock mass[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(5):102-108.
- [13] 王中文,方建勤,夏才初,等. 考虑围岩蠕变特性的隧道二衬合理支护时机确定方法[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(S1):3241-3246.
- WANG Z W, FANG J Q, XIA C C, et al. Determination method of supporting time for secondary lining in tunnel considering rock creep behaviors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1):3241-3246.
- (责任编辑 王利君)
- 
- (上接第44页)
- [12] 崔邯龙,付志东,吴鸿飞,等. 路面基层矿渣粉稳定全固废混合料力学性能试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2025,42(3):60-66+74.
- CUI H L, FU Z D, WU H F, et al. Experimental study on mechanical properties of pavement base with all solid waste mixture stabilized by mineral powder[J]. Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition), 2025, 42(3):60-66+74.
- [13] 杨广庆. 土工布发展现状及趋势展望[J]. 纺织导报,2017(5):19-20+22+24+25.
- YANG G Q. Development status quo and outlook of geotextiles[J]. China Textile Leader, 2017(5):19-20+22+24+25.
- [14] 赵俊豪,封严,李洪振,等. 聚丙烯非织造土工布研究进展及应用[J]. 化工新型材料,2024,52(10):248-252.
- ZHAO J H, FENG Y, LI H Z, et al. Research progress and application of polypropylene nonwoven geotextile [J]. New Chemical Materials, 2024, 52(10):248-252.
- [15] 张国雨. 土工合成材料的性能及在地基加固中的应用[J]. 造纸装备及材料,2022,51(12):90-92.
- ZHANG G Y. Performance of geosynthetics and its application in foundation reinforcement[J]. Papermaking Equipment & Materials, 2022, 51(12):90-92.
- [16] 胡振琪,王萍,张明亮,等. 土工布阻隔煤矸石中重金属迁移实验研究[J]. 环境工程学报,2008(4):536-541.
- HU Z Q, WANG P, ZHANG M L, et al. A column test for preventing heavy metal pollution from coal gangue with geotextiles[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008(4):536-541.
- [17] 唐佳伟,张锁,刘兆峰,等. 吸附法去除矿井水中 F<sup>-</sup> 研究进展[J]. 煤炭科学技术,2023,51(5):269-283.
- TANG J W, ZHANG S, LIU Z F, et al. Research progress in the removal of fluoride ions from mine water by adsorption method [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5):269-283.
- [18] 杨颖,李磊,孙振亚,等. 活性炭表面官能团的氧化改性及其吸附机理的研究[J]. 科学技术与工程,2012,12(24):6132-6138+6147.
- YANG Y, LI L, SUN Z Y, et al. The research on the surface oxidation modification of activated carbon and its adsorption mechanisms of organic matter and heavy metal ions[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(24):6132-6138+6147.
- [19] DONG L H, LIU W J, JIANG R F, et al. Study on the adsorption mechanism of activated carbon removing low concentrations of heavy metals [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(17):7812-7822.
- (责任编辑 王利君)