

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.09.012

围岩蠕变对运营隧道衬砌安全性的影响

钱文喜¹, 耿大新², 梁国卿³

(1. 江西省公路工程有限公司, 江西 南昌 330006; 2. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013;
3. 江西省天驰高速科技发展有限公司, 江西 南昌 330103)

摘要: 为探究在软弱围岩隧道运营期间围岩蠕变效应对二次衬砌安全性的影响, 以九景高速公路隧道为依托, 以IV级围岩区段二次衬砌支护结构为研究对象, 采用室内试验和数值模拟手段, 首先对该围岩区段泥质粉砂岩在不同应力水平下的单轴蠕变特性进行了室内试验分析, 并采用 Cvisc 模型对蠕变试验数据进行了非线性拟合, 获得了 Cvisc 模型的蠕变参数。然后, 利用 FLAC3D 软件建立了两车道公路隧道三维数值模型, 研究了单考虑围岩蠕变作用和同时考虑隧道埋深对运营隧道衬砌结构安全性的影响。结果表明: 非线性拟合相关性系数在 0.92~0.96 之间, 可认为 Cvisc 模型能够很好地描述泥质粉砂岩的衰减蠕变和稳定蠕变关系; 单考虑围岩蠕变作用, 在同一支护时间, 二次衬砌安全系数较高的位置支护结构承受的围岩压力相对较小, 围岩的蠕变变形量较大, 但过小的支护承载又会导致围岩蠕变变形而增加围岩压力, 进而不利于运营隧道衬砌结构的长期安全; 同时考虑隧道埋深的影响, 二次衬砌支护结构的承载随着隧道埋深的增加而减小, 即围岩自身能够承担较大部分的因蠕变变形而增加的围岩压力, 从而对运营隧道衬砌结构的长期安全有利。

关键词: 隧道工程; 围岩蠕变效应; 数值模拟; 二次衬砌; 安全系数

中图分类号: U459.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2020)09-0090-07

Influence of Surrounding Rock Creep on Safety of Lining of Operating Tunnel

QIAN Wen-xi¹, GENG Da-xin², LIANG Guo-qing³

(1. Jiangxi Provincial Highway Engineering Co., Ltd., Nanchang Jiangxi 330006, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China;
3. Jiangxi Provincial Tianchi High-speed Technology Development Co., Ltd., Nanchang Jiangxi 330103, China)

Abstract: In order to explore the influence of creep effect of surrounding rock on the safety of secondary lining during the operation of soft surrounding rock tunnel, relying on Jiujiang—Jingdezhen expressway tunnel, taking the secondary lining support structure of grade IV surrounding rock section as the research object, the uniaxial creep characteristics of argillaceous siltstone of this surrounding rock section under different stress levels are analyzed by indoor test and numerical simulation at first, and the creep test data are non-linearly fitted by Cvisc model to obtain the creep parameters of Cvisc model. Then, a 3D numerical model of two-lane expressway tunnel is established by using FLAC3D software, and the influences of only considering surrounding rock creep effect and simultaneously considering surrounding rock creep effect and tunnel buried depth on the safety of lining structure of operating tunnel are studied. The result shows that (1) The nonlinear fitting correlation coefficient is between 0.92 and 0.96, so it can be considered that Cvisc model can well describe the relationship between the attenuation creep and the stable creep of argillaceous siltstone. (2) If only considering the creep effect of surrounding rock, during the same supporting time, the

收稿日期: 2019-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768021); 江西省交通运输厅科技项目(2016D0039, 2017D0035)

作者简介: 钱文喜(1991-), 男, 江西信丰人, 硕士研究生。(1678043532@qq.com)

surrounding rock pressure on the supporting structure at the position with high safety factor of the secondary lining is relatively small, and the creep deformation of the surrounding rock is large. However, too small support load will cause the surrounding rock creep deformation and increase the surrounding rock pressure, which is not conducive to the long-term safety of the lining structure of operating tunnel. (3) If considering surrounding rock creep effect and tunnel buried depth simultaneously, the bearing of the secondary lining structure decreases with the increase of the tunnel depth, i. e., the surrounding rock itself can bear a large part of the surrounding rock pressure increased due to creep deformation, which is beneficial to the long-term safety of the lining structure of operating tunnel.

Key words: tunnel engineering; creep effect of surrounding rock; numerical simulation; secondary lining; safety factor

0 引言

公路隧道围岩极其复杂的非线性、各向异性和随时间变化的力学属性,决定了围岩与衬砌结构相互作用的复杂性。在软弱围岩隧道运营期间,二次衬砌与围岩可以同时作为承载主体,而围岩蠕变对隧道稳定性及衬砌结构安全性具有重要的影响。因此,许多学者开展了相关研究:刘甲荣等^[1]考虑围岩蠕变效应,分析了不同埋深及偏压条件下衬砌结构表面拉、压应变与损伤值之间的关系;李建军等^[2]基于 Burgers 模型分析了围岩蠕变作用对衬砌结构内力的影响;王迎超等^[3]基于广义 Kelvin 模型分析了不同时机支护下衬砌结构的受力规律;徐国文等^[4]建立锚杆-围岩复合体流变模型分析了围岩蠕变作用对裂损衬砌长期安全性的影响;Guan 等^[5-6]通过对 Ureshino 隧道进行跟踪监测,分析了围岩蠕变与隧道持续变形的关系;王中文等^[7]考虑隧道围岩的蠕变特性,利用初衬变形理论公式分析了隧道初衬最终变形及二次衬砌合理的支护时机;唐葭等^[8]基于 Burgers 模型推导出了考虑围岩蠕变效应的围岩抗力系数公式,进而分析了红砂岩隧道围岩的抗力系数;Fan 等^[9]采用室内模型试验对泥质软岩隧道围岩的蠕变力学行为进行了研究。此外,左昌群等^[10]考虑软弱围岩蠕变特性,分析了不同支护形式下围岩与初期支护结构的相互作用;文献[11-14]对软岩隧道围岩的蠕变特性、蠕变模型及蠕变参数进行了大量研究。

目前,常用的模拟隧道围岩蠕变的元件组合模型有 Kelvin 模型、西原模型、Burgers 模型、Bingham 模型等^[15]。但不同地区、不同类别的岩石力学性状差异较大,需要选择适用的元件组合模型来描述岩石的蠕变特性。本研究以江西九景高速公路隧道为

依托,基于该隧道Ⅳ级围岩区段泥质粉砂岩蠕变试验结果,利用 Cvisc 黏弹塑性模型对其蠕变模型及参数进行辨识,进而分析围岩蠕变效应对运营隧道衬砌结构安全性的影响,以为公路隧道运营期的管理和养护提供参考。

1 工程概况

九景高速公路隧道为双向两车道,隧道净宽 10.25 m,净高 7.425 m,洞身衬砌采用三心圆曲墙式,运营时间已超过 10 a。洞身穿越地层岩性主要为泥盆系细砂岩和志留系粉砂岩,岩体完整性以较完整~较破碎为主。其中,Ⅳ级围岩隧道断面如图 1 所示。

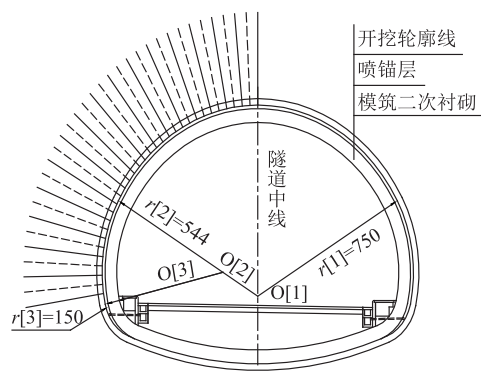


图1 Ⅳ级围岩复合式衬砌

Fig. 1 Composite lining of Grade IV surrounding rock

2 砂岩蠕变模型辨识

2.1 蠕变试验

通过单轴抗压强度试验,获得了 5 组 $\phi 50 \times 100$ mm 圆柱体岩样破坏时最大轴向压力 P_i 和抗压强度 R_{ci} (见表 1), 其中, $i=1, 2, \dots, 5$ 。岩样取自九景高速公路隧道,为泥质粉砂岩,无明显层理,且节理裂隙不发育。

表 1 泥质粉砂岩单轴抗压强度

Tab. 1 Uniaxial compressive strength of argillaceous siltstone

岩样编号	P_t/kN	R_{ci}/MPa
S-1	18.88	9.62
S-2	17.26	8.79
S-3	20.60	10.49
S-4	21.64	11.02
S-5	19.36	9.86
平均值	19.55	9.96

通过 YSR-300 型岩石三轴蠕变试验系统对泥质粉砂岩进行单轴压缩蠕变试验, 获得了岩样在 $0.7R_c$ 、 $0.8R_c$ 、 $0.9R_c$ 应力水平下较能反映其蠕变特性的试验数据曲线 (见图 2)。

2.2 蠕变模型与参数确定

Cvisc 模型由 Kelvin 体、Maxwell 体和塑性体共同构成 (见图 3)。当应力水平较低时, 变形速率逐渐减小进入衰减蠕变阶段, 之后逐渐趋于某一恒定值进入稳定蠕变阶段; 当应力水平等于或超过某一临界应力值 σ_s 后, 逐渐转化为加速蠕变过程。

在一维应力状态下, Cvisc 模型蠕变本构方程为:

(1) 当 $\sigma < \sigma_s$ 时,

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_M} + \frac{t}{\eta_M} + \frac{1}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K} t} \right) \right], \quad (1)$$

(2) 当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时,

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_M} + \frac{t}{\eta_M} + \frac{1}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K} t} \right) \right] + \varepsilon_P, \quad (2)$$

式中, E_K 、 E_M 分别为 Kelvin 体、Maxwell 体的弹性模量; η_K 、 η_M 分别为 Kelvin 体、Maxwell 体的黏性系数; σ_0 为常应力; ε_P 为塑性体应变。

蠕变方程 (1), (2) 属于非线性函数形式, 为求其中的蠕变参数, 可采用最小二乘法中 Boltzmann 法处理试验数据, 即采用线性叠加的间接方法求解^[16]。结果表明, 图 2 中的拟合曲线与试验数据曲线的相关系数 R^2 在 0.92 ~ 0.96 之间, 因此, 可以认为 Cvisc 模型能够描述泥质粉砂岩的衰减蠕变和稳定蠕变关系。根据室内蠕变试验结果, 得到 Cvisc 模型在 $0.7R_c$ 、 $0.8R_c$ 、 $0.9R_c$ 应力水平下的蠕变参数 (见表 2)。

3 数值模拟与结果分析

3.1 模型建立

以 IV 级围岩公路隧道衬砌结构为研究对象, 利用 FLAC3D 建立两车道公路隧道三维数值模型, 如图 4

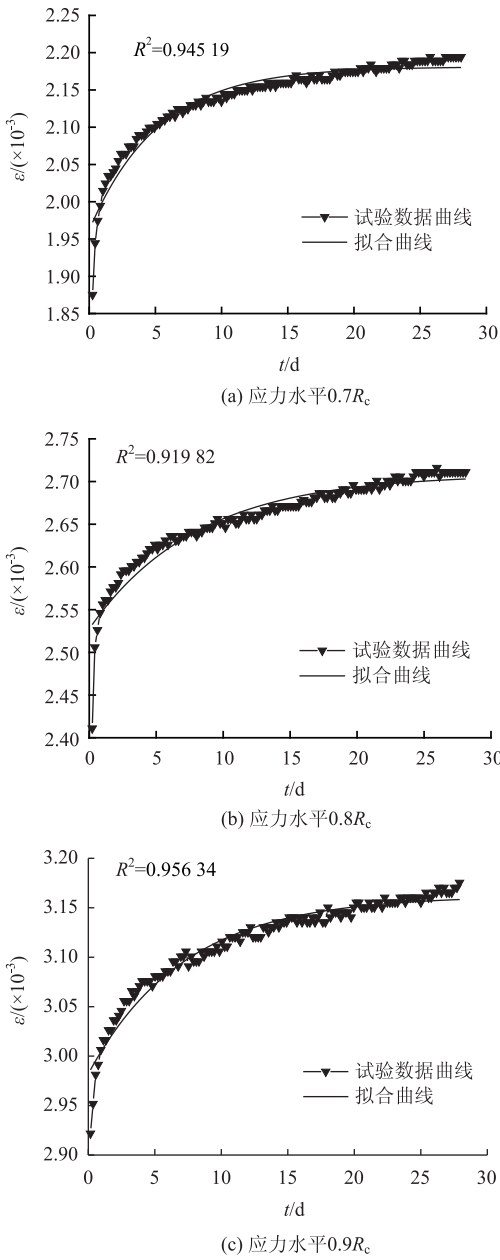


图 2 不同应力水平下的非线性拟合结果

Fig. 2 Nonlinear fitting results at different stress levels

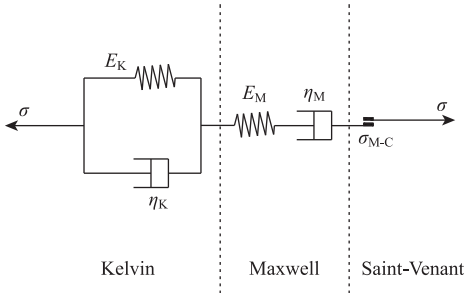


图 3 Cvisc 模型

Fig. 3 Cvisc model

表2 Cvisc模型参数

Tab. 2 Parameters of Cvisc model

应力水平	E_k/GPa	$\eta_k/(\text{GPa} \cdot \text{d})$	E_M/GPa	$\eta_M/(\text{GPa} \cdot \text{d})$
$0.7R_c$	139	26	3.6	7.8×10^4
$0.8R_c$	143	35	3.9	5.3×10^4
$0.9R_c$	120	31	4.6	3.5×10^4

所示。隧道模型左、右侧均距离隧道中心线 50 m (约 4 倍隧道开挖跨度), 洞周拱顶以上取 24 m, 仰拱以下取 36 m, 纵向取 60 m。围岩采用实体单元模拟, 本构模型采用 Mohr - Coulomb 模型, 初始地应力场仅考虑重力作用。此时, 边界条件采用位移约束, 即左右两侧采用水平位移约束, 顶部自由无约束, 底部采用竖向位移约束。

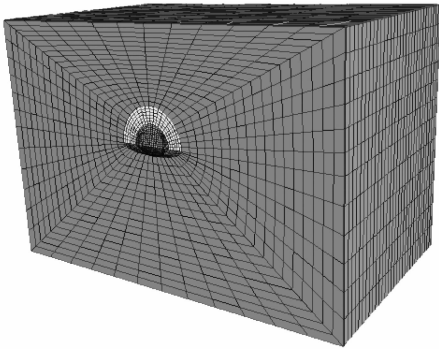


图4 三维隧道数值模型

Fig. 4 3D tunnel numerical model

在隧道施工期间, 假定围岩在开挖条件下的变形完全为弹性或同时含有塑性变形。因此, Cvisc 模型中用以描述围岩时效变形的黏性元件不发生作用, 围岩变形仅由模型中的弹性或塑性元件来体现, 故此时蠕变方程 (1)、(2) 中的 $t=0$ 。于是, 通过命令 (SET CREEP OFF) 来屏蔽蠕变模型的时效作用, 即仅对围岩进行静力计算分析。其中, IV 级围岩的物理力学参数见表 3。

表3 围岩物理力学参数

Tab. 3 Physical and mechanical parameters of surrounding rock

重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	变形模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
22	4.22	0.35	0.5	36

通过提高洞周围岩变形模量、黏聚力等指标的方法来模拟锚杆加固区的力学行为, 加固区厚度取 4 m, IV 级围岩锚杆加固区域的物理力学参数见表 4。

假定围岩与初期支护分担 60% 释放荷载, 二次衬砌分担 40% 释放荷载。于是, 在施加衬砌前, 对隧道周围围岩进行某一比例卸荷, 即选定应力释放

表4 锚杆加固区围岩物理力学参数

Tab. 4 Physical and mechanical parameters of surrounding rock in anchor reinforcement area

重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	变形模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
22	6.22	0.35	0.6	36

率 $\lambda=0.6$ 。采用实体单元模拟喷混凝土层, 本构模型采用线弹性模型; 二次衬砌采用衬砌结构单元 (Liner) 模拟, 初期支护的物理力学参数见表 5。

表5 初期支护物理力学参数

Tab. 5 Physical and mechanical parameters of initial support

支护结构	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	厚度/cm
喷混凝土	22	23	0.2	20
二次衬砌	24	28	0.2	40

考虑到喷混凝土层与二次衬砌之间防水层的影响, 单元界面接触参数选取见表 6。

表6 单元界面接触参数

Tab. 6 Contact parameters of unit interface

法向刚度/GPa	剪切刚度/GPa	抗拉强度/MPa	黏结强度/MPa	摩擦角/(°)
6.0	0.4	0.02	0.05	15

在隧道运营期间, 假定围岩总变形由开挖导致的弹塑性变形和蠕变变形共同构成。因此, Cvisc 模型中用以描述围岩时效变形的黏性元件开始发生作用。于是, 基于静力计算分析结果, 通过命令 (SET CREEP ON) 来开启蠕变模型的时效作用, 即对围岩进行蠕变计算分析。其中, Cvisc 模型所需的 Mohr-Coulomb 强度参数见表 7。对泥质粉砂岩在 $0.7R_c$, $0.8R_c$, $0.9R_c$ 应力水平下的蠕变参数进行平均值计算, 得到围岩蠕变参数。

表7 围岩蠕变参数

Tab. 7 Creep parameters of surrounding rock

G^k/GPa	$\eta^k/(\text{GPa} \cdot \text{d})$	G^M/GPa	$\eta^M/(\text{GPa} \cdot \text{d})$
134	31	4.0	5.5×10^4

Cvisc 模型的最大蠕变时间步长为:

$$\Delta t_{\max}^{\text{cr}} = \min\left(\frac{\eta^k}{G^k}, \frac{\eta^M}{G^M}\right). \quad (3)$$

为了使计算模型更好地收敛, 设置蠕变计算时间步长为 2.5×10^{-3} , 最大蠕变时间步长为 5.0×10^{-3} , 最小蠕变时间步长为 5.0×10^{-4} 。将蠕变计算总历时定为 3 650 d (即蠕变计算的总历时为 10 a)^[17]。

3.2 结果分析

我国《公路隧道设计规范》^[18] (JTG3370.1—2018) 规定, 公路隧道支护结构需满足验算的安全

系数要求。规范规定混凝土偏心受压构件的抗压和抗拉强度验算需满足式(4)和式(5)。

$$K_e N \leq \varphi \alpha R_a b h, \quad (4)$$

$$K_l N \leq \varphi \frac{1.75 R_l b h}{\frac{6e_0}{h} - 1}, \quad (5)$$

式中, K_e , K_l 为偏心受压构件的抗压、抗拉安全系数; N 为轴向力; φ 为构件纵向弯曲系数, 对于隧道衬砌可取 $\varphi = 1$; α 为轴向力的偏心影响系数, 可按《公路隧道设计规范》采用; R_a , R_l 为混凝土的抗压、抗拉极限强度; b 为截面宽度, 对于隧道衬砌可取 $b = 1$; h 为截面厚度; e_0 为轴向力偏心距, $e_0 = \frac{M}{N}$, M 为弯矩; N 为轴向力。

在隧道运营 10 a 过程中, 单考虑围岩蠕变作用, 将数值模拟的计算结果代入式(4)和式(5)得到二次衬砌拱顶、拱肩和拱腰位置安全系数随时间的变化曲线(见图5)。从图中可以看出, 随着二次衬砌服役时间的增加, 拱顶、拱肩和拱腰位置安全系数总体呈逐渐减小的趋势, 其中拱顶处安全系数降低最为显著, 表明围岩蠕变变形压力随着时间逐渐增加。

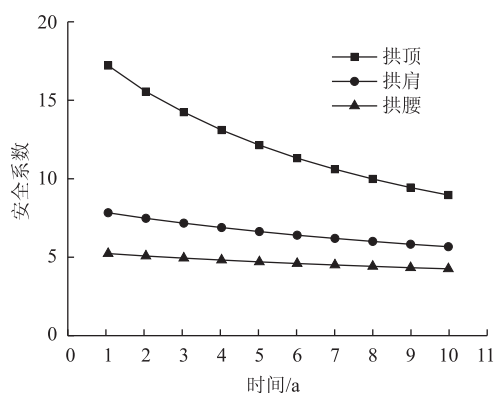


图5 衬砌结构安全系数随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of lining structural safety factor varying with time

隧道运营 10 a 后, 二次衬砌轴力、弯矩、安全系数的分布, 见图6~图8。从图中可以看出, 衬砌结构最大轴力出现在边墙位置, 为 2 700 kN, 并沿拱顶和拱底位置环向减小, 最小轴力出现在拱底位置, 为 757 kN; 最大正弯矩出现在拱脚位置附近, 为 312 kN·m, 最大负弯矩出现在拱底位置, 为 40.9 kN·m; 安全系数最小值出现在边墙位置, 为 2.9, 最大安全系数出现在仰拱底位置, 为 72.3。这表明, 在同一支护时间, 二次衬砌支护结构承载较

小的位置(即安全系数较高的位置), 围岩的蠕变变形量较大, 因而支护结构承受的围岩压力相对较小, 但过小的支护承载又会导致围岩蠕变变形而增加围岩压力, 进而不利于衬砌结构的长期安全。

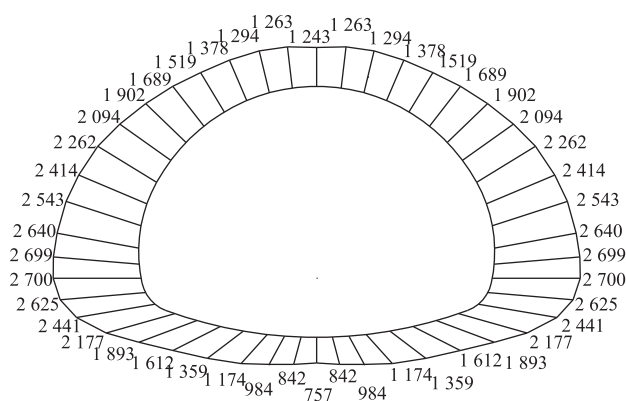


图6 衬砌结构轴力(单位: kN)

Fig. 6 Axial force of lining structure (unit: kN)

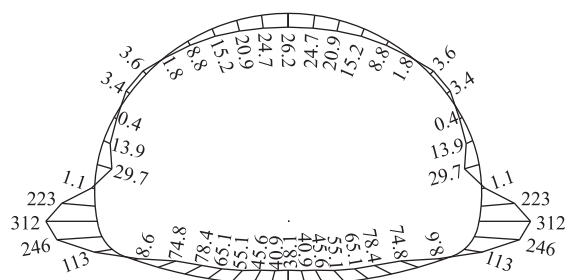


图7 衬砌结构弯矩(单位: kN·m)

Fig. 7 Moment of lining structure (unit: kN·m)

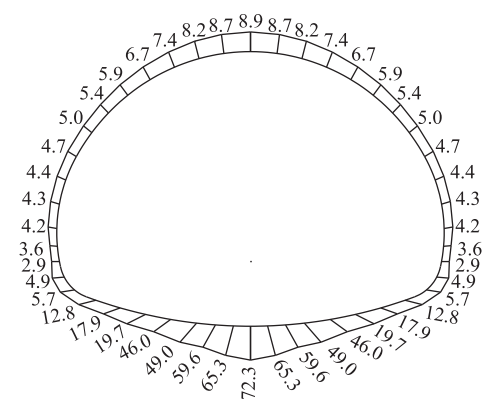


图8 衬砌结构安全系数

Fig. 8 Safety factor of lining structure

3.3 隧道埋深的影响分析

在隧道运营 10 a 过程中, 考虑围岩蠕变作用, 在 11.7 m (h_q), 23.4 m ($2h_q$), 35.1 m ($3h_q$), 46.8 m ($4h_q$) 的隧道埋深下, 将数值模拟的计算结果代入式(4)和式(5)得到二次衬砌拱顶、拱肩、拱腰位置的安全系数随其服役时间的变化曲线

(见图9)。从图中可以看出,在围岩蠕变变形压力作用下,随着隧道埋深的增加,衬砌结构拱顶、拱肩、拱腰位置在同一服役年限的安全系数逐渐增大,其中拱顶位置的增长幅度最大。这表明,在同一支护时间,二次衬砌支护结构的承载随着隧道埋深的增加而减小,即围岩自身承担了较大部分的因蠕变变形而增加的围岩压力,从而对二次衬砌的长期安全有利。

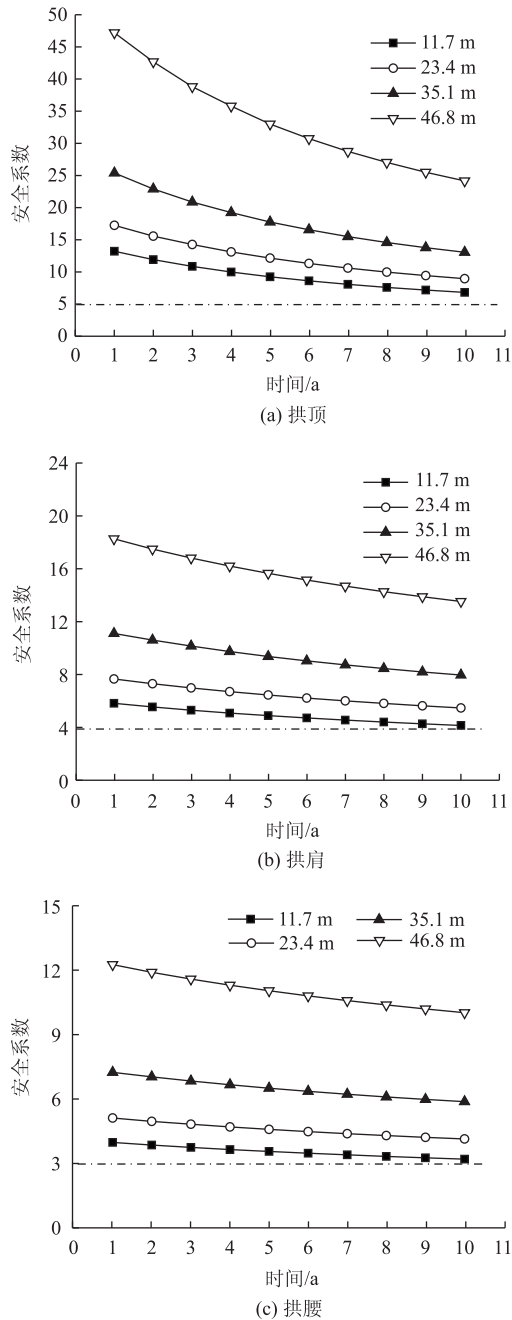


图9 不同埋深下衬砌安全系数随时间变化曲线

Fig. 9 Curves of lining safety factor varying with time under different depths

4 结论

以九景高速公路隧道为背景,利用有限差分软件FLAC 3D建立了两车道公路隧道三维数值模型,考虑了围岩蠕变作用,对IV级围岩公路隧道在10 a运营期间衬砌结构的安全性进行了分析,得出以下结论:

(1) 通过对泥质粉砂岩进行单轴压缩蠕变试验,并对试验数据曲线进行非线性拟合。结果表明,其相关系数 R^2 在0.92~0.96之间,可认为Cvisc模型能够很好地描述泥质粉砂岩的衰减蠕变和稳定蠕变关系。

(2) 单考虑围岩蠕变作用,在同一支护时间,二次衬砌安全系数较高的位置,支护结构承受的围岩压力相对较小,围岩的蠕变变形量较大,但过小的支护承载又会导致围岩蠕变变形而增加围岩压力,进而不利于运营隧道衬砌结构的长期安全。

(3) 同时考虑隧道埋深的影响,在同一支护时间,二次衬砌支护结构的承载随着隧道埋深的增加而减小,即围岩能够承担较大部分的因蠕变变形而增加的围岩压力,从而对运营隧道衬砌结构的长期安全有利。

参考文献:

References:

- [1] 刘甲荣,郭洪,高智珺,等.考虑围岩蠕变和衬砌损伤的隧道结构变形时空效应研究[J].公路,2014(4): 239-243.
LIU Jia-rong, GUO Hong, GAO Zhi-jun, et al. Study on Time-space Effect of Tunnel Structure Deformation Considering Creep of Surrounding Rock and Lining Damage [J]. Highway, 2014 (4): 239-243.
- [2] 李建军,张志强.岩石蠕变对隧道二次衬砌结构影响的研究[J].现代隧道技术,2011,48(6): 58-64, 81.
LI Jian-jun, ZHANG Zhi-qiang. Study of the Influence of Rock Creep on the Structure of a Tunnel's Secondary Lining [J]. Modern Tunneling Technology, 2011, 48 (6): 58-64, 81.
- [3] 王迎超,尚岳全,孙红月,等.复合式衬砌在围岩蠕变过程中的受力规律研究[J].水文地质工程地质,2010,37(2): 49-54.
WANG Ying-chao, SHANG Yue-quan, SUN Hong-yue, et al. Study on Mechanical Rules of Double-lining in Creeping Surrounding Rock [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37 (2): 49-54.

- [4] 徐国文, 何川, 汪耀, 等. 流变荷载作用下隧道裂损二次衬砌结构安全性能研究 [J]. 土木工程学报, 2016, 49 (12): 114 - 123.
XU Guo-wen, HE Chuan, WANG Yao, et al. Study on the Safety Performance of Cracked Secondary Lining under Action of Rheological Load [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49 (12): 114 - 123.
- [5] GUAN Z C, JIANG Y J, TANABASHI Y. Rheological Parameter Estimation for the Prediction of Long-term Deformations in Conventional Tunnelling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24 (3): 250 - 259.
- [6] GUAN Z C, JIANG Y J, TANABASHI Y, et al. A New Rheological Model and Its Application in Mountain Tunnelling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23 (3): 292 - 299.
- [7] 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 (增1): 3241 - 3246.
WANG Zhong-wen, FANG Jian-qin, XIA Cai-chu, 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.
- [8] 唐葭, 邓宗伟, 蒋建清. 考虑蠕变影响的隧道围岩抗力系数计算方法 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45 (4): 1281 - 1287.
TANG Jia, DENG Zong-wei, JIANG Jian-qing. Calculation on Rock Resistant Coefficient of Tunnel Considering Creep Effect [J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2014, 45 (4): 1281 - 1287.
- [9] FAN Q Y, LU J Y, ZHU Z. Experimental Study on Creep of Surrounding Rock Mass in Argillaceous Soft Rock Tunnel [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 193 - 194: 826 - 830.
- [10] 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 Chang-qun, YI Yi, SUN Jin-shan, 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.
- [11] 左清军, 吴立, 李波, 等. 富水泥质板岩隧道围岩蠕变力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (10): 2047 - 2056.
ZUO Qing-jun, WU Li, LI Bo, et al. Creeping Properties of Water-rich Argillaceous Slate Surrounding Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (10): 2047 - 2056.
- [12] 韩立军, 王延宁, 蒋斌松, 等. 泥质砂岩蠕变特性与锚固控制效应试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (1): 65 - 72, 77.
HAN Li-jun, WANG Yan-ning, JIANG Bin-song, et al. Experiment Study of Argillaceous Sandstone Creep Characteristics and Anchoring Control Effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (1): 65 - 72, 77.
- [13] LIU Q, CHEN X G, CHEN Y, et al. Development and Application of Shale Rock-similar Material with Creep Property [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 20 (5): 1637 - 1652.
- [14] 张树光, 孙成鑫, 王有涛, 等. 海棠山隧道砂岩变参数蠕变特性研究 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (10): 104 - 110.
ZHANG Shu-guang, SUN Cheng-xin, WANG You-tao, et al. Study on Variable Parameter Creep Characteristics of Sandstone in Haitangshan Tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (10): 104 - 110.
- [15] 康永刚, 张秀娥. 岩石蠕变的非定常分数伯格斯模型 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (11): 3237 - 3241, 3248.
KANG Yong-gang, ZHANG Xiu-e. Nonstationary Parameter Fractional Burgers Model of Rock Creep [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (11): 3237 - 3241, 3248.
- [16] 王金铭. 数值分析 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2010.
WANG Jin-ming. Numerical Analysis [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2010.
- [17] 钱文喜. 砂岩蠕变对隧道稳定性及衬砌裂损的影响研究 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2018.
QIAN Wen-xi. Study on Influence of Sandstone Creep on Tunnel Stability and Lining Cracking [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2018.
- [18] JTG 3370.1—2018, 公路隧道设计规范 [S].
JTG 3370.1—2018, Specifications for Design of Highway Tunnels [S].