

文章编号:1005-0523(2018)02-0001-08

# 盾构隧道橡胶密封垫压缩蠕变试验研究

罗 驰<sup>1,2</sup>, 杨新安<sup>1,2</sup>, 雷震宇<sup>3</sup>

(1.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804;2.同济大学交通运输工程学院,上海 201804;  
3.同济大学铁道与城市轨道交通研究院,上海 201804)

**摘要:**对断面 A、B 两种盾构隧道橡胶密封垫进行了长期恒压作用下的压缩蠕变试验,发现橡胶密封垫压缩的蠕变形变与蠕变时间的对数近似呈线性关系,以此提出预测公式,并根据第一次试验数据拟合得到的预测公式中的参数来预测第二次试验数据,验证预测公式的合理性。通过比较本预测公式、Kelvin 模型以及三参数模型,发现本预测公式能很好地反映橡胶密封垫在恒压下的压缩蠕变行为,是三种模型中反映橡胶密封垫蠕变行为最好的。试验发现,橡胶密封垫压缩蠕变行为受温度影响不明显,蠕变试验较应力松弛试验能更好地反映密封垫的耐久性能。本试验研究结果对研究和预测橡胶材料的长时间力学行为和使用寿命具有较重要的学术意义和实用价值。

**关键词:**盾构隧道;试验;蠕变;橡胶密封垫;耐久性

**中图分类号:**U25

**文献标志码:**A

盾构法隧道采用拼装式衬砌,其衬砌接缝处的防水性能是隧道防水的关键,我国盾构隧道采用的接缝防水材料主要为三元乙丙橡胶(EPDM)密封垫,利用压缩橡胶密封垫产生的压缩应力来防水。隧道设计的使用寿命一般为 50~100 年,为确保盾构隧道在使用期间的结构安全,接缝防水材料的耐久性至关重要<sup>[1-2]</sup>。

橡胶材料耐久性的评价,主要有应力松弛和蠕变。蠕变是在恒定外力下,材料形变随时间而逐渐增大的现象,反映了材料的形变的长期变化。盾构隧道衬砌接缝处存在一定的张开量,在长期运营的隧道中,由于橡胶的老化、蠕变的发生,而导致衬砌接缝处原有张开量的减小,对盾构隧道的线位、曲线半径等均有影响。同时,橡胶的蠕变反映了材料的几何稳定性,对研究和预测橡胶材料的长时间力学行为和使用寿命具有重要的学术意义和实用价值。因此,研究橡胶密封垫的压缩蠕变、预测其长期蠕变量,均有着重要意义。

迄今为止,盾构隧道接缝密封垫耐久性的研究主要集中在密封垫接触应力的松弛老化上,如 SHALABI<sup>[3-4]</sup>对 EPDM 橡胶密封垫进行应力松弛试验得出接触应力与时间的对数近乎线性关系,李咏今<sup>[5-6]</sup>在 Arrhenius 公式和老化性能的动力学经验公式的基础上建立起针对硫化橡胶老化的 P-t-T 三元老化模型,伍振志<sup>[7]</sup>、Shi Chenghua<sup>[8]</sup>和丁杨<sup>[9]</sup>通过热加速老化实验来证实 P-t-T 三元老化模型可以用来描述 EPDM 橡胶密封垫的老化性能。仅有部分研究者对橡胶密封垫进行耐久性的压缩蠕变试验,如陆明<sup>[10-12]</sup>、王鹏<sup>[13]</sup>对橡胶密封垫进行 28 天压缩蠕变试验来验证密封垫的长期防水性能,测得最终密封垫的蠕变量。但由于采用力平衡弹簧来提供恒力,难以测得各时刻橡胶密封垫的蠕变量,无法得到其压缩蠕变曲线,更无法对蠕变曲线进行更详尽的分析,同时,28 天的蠕变试验也时间稍短。

收稿日期:2017-11-23

基金项目:国

作者简介:罗驰(1991—),男,博士研究生,研究方向为隧道工程、城市地下工程。

在橡胶的蠕变模型方面,目前常采用 Kelvin 模型、Burgers 模型和标准线性固体模型等。林松<sup>[14]</sup>通过 Kelvin 模型和 Burgers 模型对丁基橡胶材料蠕变曲线进行预测,表明其蠕变行为具有非线性应力依赖性;裘泽明<sup>[15-16]</sup>考虑高聚物结构单元应具有长短不同的多个推迟时间,对多个 Kelvin 模型以串联形式拟合,并得出四参数模型拟合能与实验值吻合良好。

本文改进了压缩蠕变试验,对两种断面橡胶密封垫各进行 28 d 和 48 d 的两次蠕变试验,分析其蠕变曲线并总结出预测公式,并与 Kelvin 模型、三参数模型等橡胶蠕变模型的预测效果进行对比。

## 1 压缩蠕变试验与结果分析

### 1.1 试验目的

本文试验拟通过橡胶密封垫的压缩蠕变试验,测量密封垫在长期恒压作用下压缩蠕变量,并分析影响橡胶密封垫蠕变的因素及蠕变的变化规律。

### 1.2 试验材料及装置

本试验采用的防水密封垫为两种,均为盾构隧道常用类型的橡胶密封垫,断面 A 为谢斯菲尔德型多孔三元乙丙橡胶密封垫,断面 B 为遇水膨胀橡胶与三元乙丙复合橡胶密封垫,如图 1 所示。两种断面的设计水压均为 1.3 MPa,高 24 mm、宽 46 mm,完全压缩至凹槽内的压缩量为 12 mm。实际盾构隧道中接缝防水采用将 2 条密封垫对向压缩来防水,考虑到对称性及节省试验材料,本试验拟取长度为 200 mm 的单条密封垫作为试件。

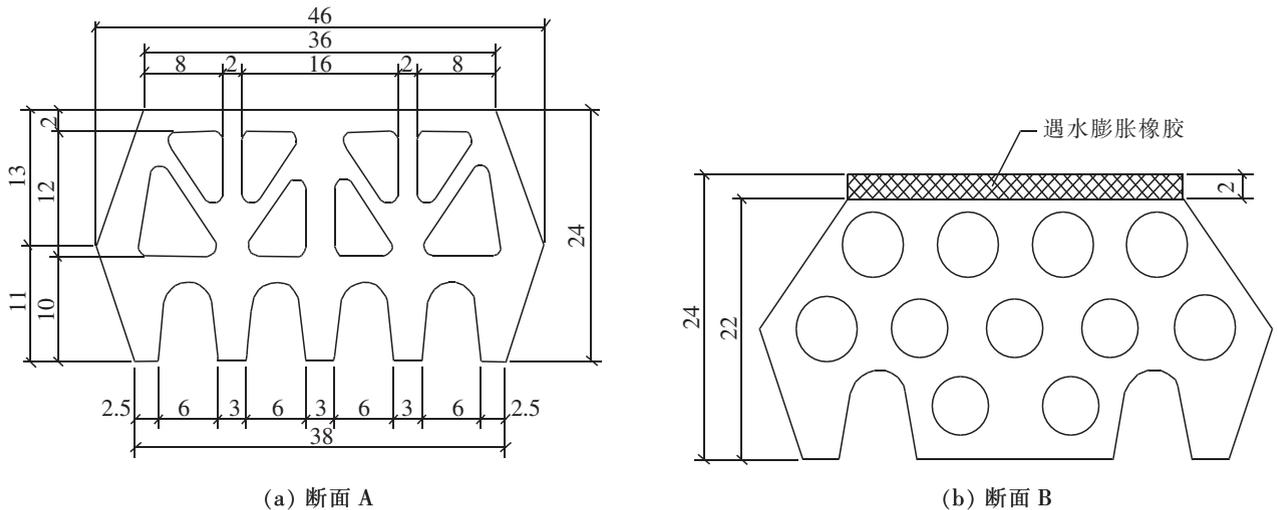


图 1 橡胶密封垫断面尺寸图(mm)

Fig.1 Sectional dimension of rubber gasket(mm)

主要试验装置有 WG-1-B 型三联固结仪、压缩槽、压板和百分表,如图 2 所示。三联固结仪的下部施加砝码,以提供恒载对橡胶密封垫进行压缩。压缩槽和压板用来模拟盾构隧道混凝土衬砌管片,在压板前、后两端各安装一百分表,以两者平均值来计算橡胶密封垫的压缩量和长期蠕变量。

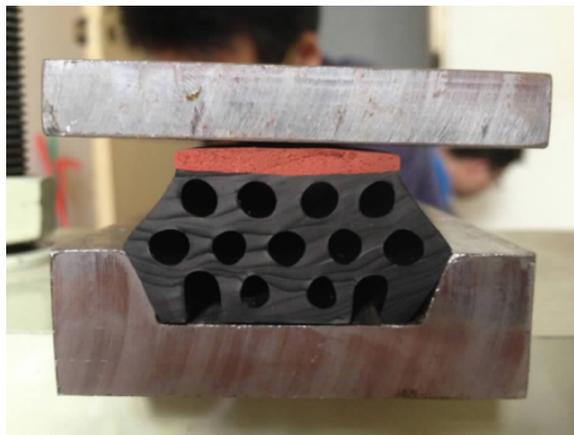
### 1.3 试验步骤

本试验对两种橡胶密封垫断面各进行两次压缩蠕变试验,每次试验对断面 A、B 同时进行试验,第一次试验时间为 28 d,第二次试验时间为 48 d。为防止试验后橡胶密封垫的残余应变的影响,两次试验采用的橡胶密封垫为同批次的两条密封垫。根据设计要求,蠕变试验应选取半张开时的压缩量为蠕变试验时密封垫压缩量,即 6 mm 压缩量。根据橡胶密封垫压缩变形试验得到的压缩量与荷载关系曲线,两密封垫在 6mm 压缩量时的加载值大致为 12 kN/m 左右。

准备试验时,先加载至 10 kN/m,再时刻观察百分表读数,根据百分表读数逐渐增加荷载,使密封垫压缩



(a) 试验装置整体



(b) 压板与压缩槽

图 2 压缩蠕变试验装置

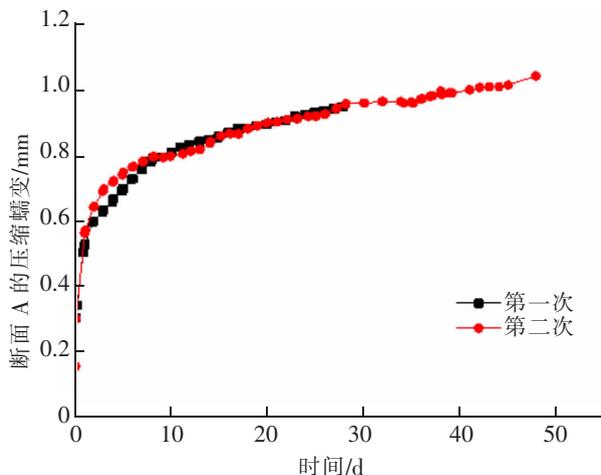
Fig.2 Device for compression creep test

量尽量在 6 mm 附近。由于橡胶的非线性特征,加载曲线与卸载曲线并不重合,因此只能逐步加载。试验步骤如下:

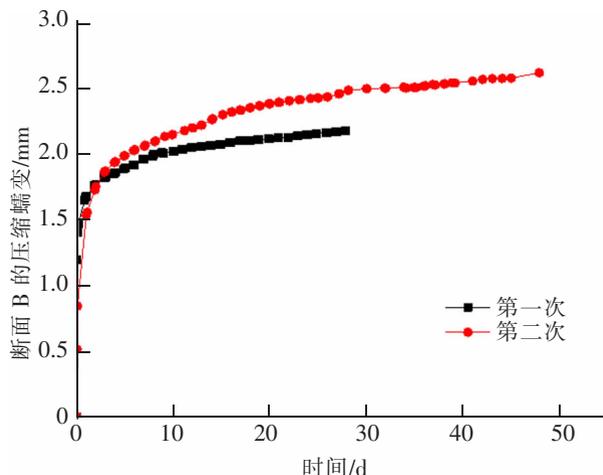
① 将橡胶密封垫条形试件安装在压缩槽内,安装好盖板并置于三联固结仪上,移动盖板及压缩槽的位置以保证固结仪的荷载施加于盖板中心,安装好百分表,记录未压缩前的百分表读数;② 逐步安放砝码来施加荷载,使百分表上计算得出的密封垫压缩量接近 6 mm,再记录百分表的初始读数、室温及读数时间;③ 每日记录百分表读数、室温及读数时间。

#### 1.4 试验结果与分析

图 3 为测得的压缩蠕变量  $c$  随老化时间  $t$  的变化关系曲线,图 4 为测得的温度变化曲线。从图中可以观察到压缩蠕变曲线有如下规律:① 在橡胶蠕变初期,其压缩蠕变较快。随后,其蠕变速率随时间逐渐递减并呈收敛趋势;② 断面 A 两次压缩蠕变试验得到的蠕变曲线很接近,而两次试验温度差异较大,可推测橡胶密封垫蠕变受环境温度变化的影响不明显。



(a) 断面 A



(b) 断面 B

图 3 压缩蠕变量与时间关系曲线

Fig.3 Relationship curve of compression creep deformation and time

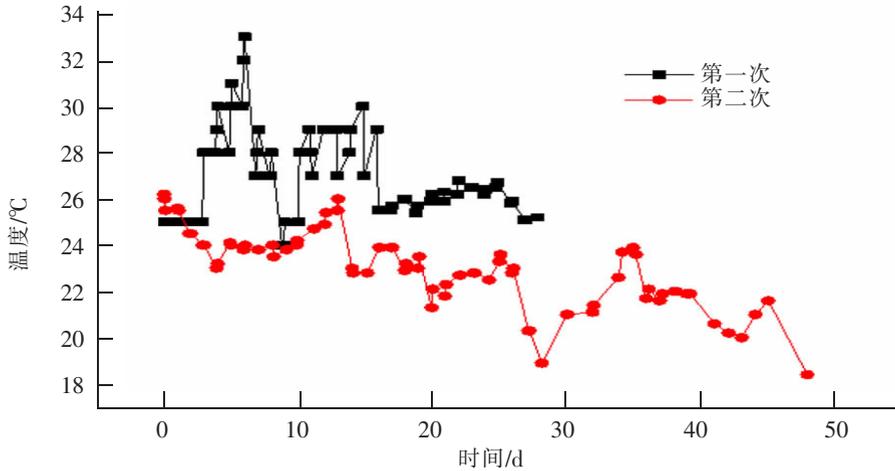


图4 温度变化曲线

Fig.4 Curves of temperature variation

相比橡胶密封垫的应力松弛老化试验,压缩蠕变试验得到的压缩蠕变量曲线受环境温度变化影响很小,量值较为稳定。在温度变化不大时,压缩蠕变曲线可不考虑温度的影响。因此,相比橡胶密封垫的应力松弛,蠕变能较为方便地反映出橡胶密封垫的耐久性能,并比较出不同密封垫的耐久性的优劣。

压缩蠕变试验数据汇总如表1所示。结合表1,可推测导致图3(b)中断面B两次压缩蠕变试验偏差较大可能原因在于:在长时间试验中,加载位置可能出现不完全对中而导致偏载,从而引起密封垫倾斜。

表1 压缩蠕变试验数据

Tab.1 Data of compression creep test

	第一次试验		第二次试验	
	断面 A	断面 B	断面 A	断面 B
初始高度/mm	24.00	24.00	24.00	24.00
初始压缩量/mm	6.32	5.43	6.57	5.83
加载值/(kN/m)	12.00	11.23	14.24	14.24
压缩时间/d	28	28	48	48
蠕变总量/mm	0.95	2.18	1.04	2.62

## 2 预测公式的提出及拟合

### 2.1 预测公式的提出

在利用试验数据来寻求合适的密封垫蠕变模型的过程中,为规避试验中不同初始压缩量引起密封垫蠕变初始时高度不同的影响,以蠕变形变  $\varepsilon_c$  (即当前蠕变量  $c$  与蠕变初始时压缩橡胶的高度  $h_0$  之比) 为纵坐标较为合理,其与时间的关系曲线与图3相似,不再赘述。

对蠕变形变与时间的关系曲线中的横坐标时间取对数后,得到图5所示曲线。图中,两橡胶密封垫断面的  $\varepsilon_c - \ln(t)$  曲线均非常接近线性,说明蠕变形变与时间的对数很可能呈线性关系,故提出如下预测公式来描述蠕变形变与时间的关系:

$$\varepsilon(t) = A \ln(t) + B \quad (1)$$

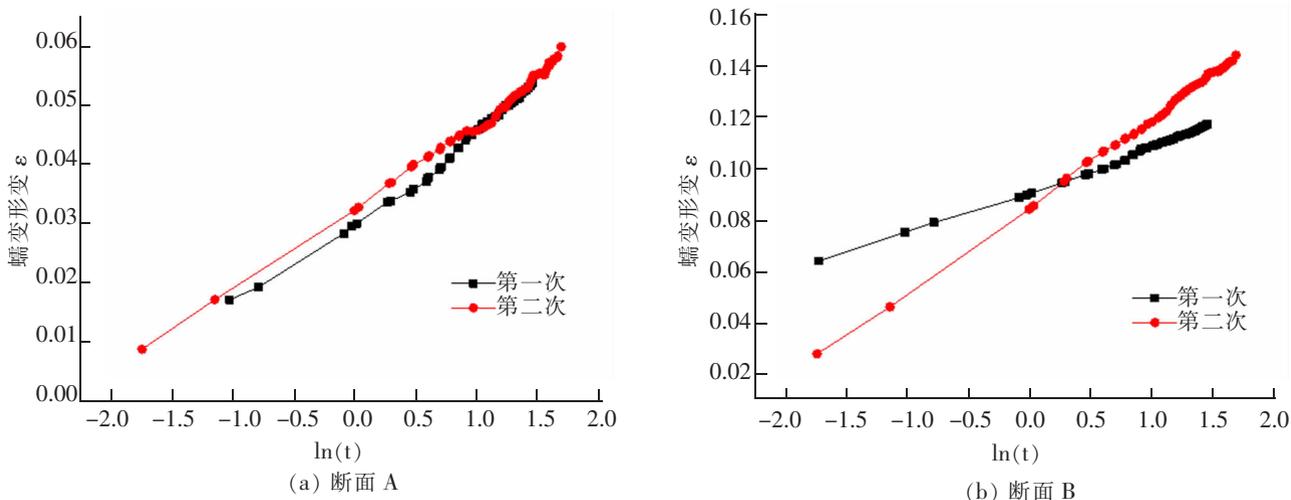


图 5  $\epsilon_t-\ln(t)$  曲线  
Fig.5 Curves of  $\epsilon_t$  vs  $\ln(t)$

2.2 预测公式的拟合与验证

由于断面 B 压缩蠕变两次试验数据受其他因素干扰而存在较大偏差,故采用断面 A 的试验数据对预测公式进行拟合与验证。

根据断面 A 第一次试验 28 天数据,在 matlab 上用上述预测公式对数据进行拟合,得到拟合参数  $A=0.0067, B=0.0303$ ,拟合结果如图 6 所示,拟合优度(反映模型拟合值与原数据的相似情况,越接近 1 拟合越好)为 0.9782。再利用上述参数预测第二次试验 48 d 的数据结果,预测结果如图 7 所示,预测优度(反映模型预测值与原数据的相似情况)为 0.9659。

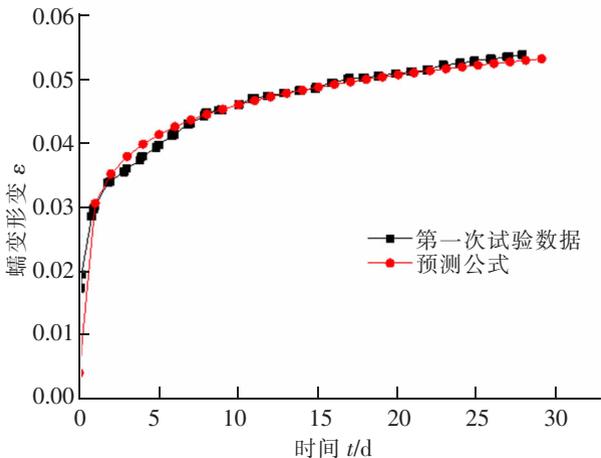


图 6 预测公式拟合结果

Fig.6 Fitting results of the predictor formula

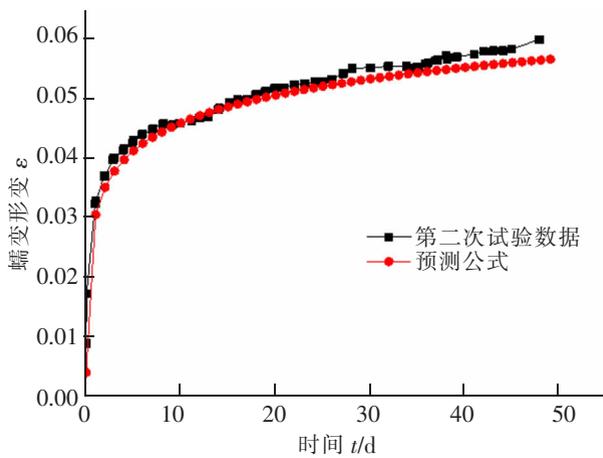


图 7 预测公式预测结果

Fig.7 Estimated results of the predictor formula

预测公式拟合曲线及预测曲线分别与两次试验数据吻合,且拟合优度及预测优度均大于 0.9,说明本文提出的预测公式能很好地反映并预测橡胶密封垫在恒压下的压缩蠕变行为。

3 本文预测公式与其他蠕变模型比较

3.1 Kelvin 模型

Kelvin 模型是经典的蠕变模型,由一个理想弹簧和一个理想粘壶并联而成,该模型的蠕变表达式为<sup>[15]</sup>

$$\epsilon(t) = \epsilon(\infty)(1 - e^{-t/\tau}) \tag{2}$$

式中,  $\epsilon(\infty)$ 、 $\tau$  分别表示橡胶蠕变的高弹形变量及推迟时间。当  $t = \tau$  时,  $\epsilon = \epsilon(\infty)(1 - e^{-1}) \approx 0.632 \epsilon(\infty)$ 。对于本

试验,可估算推迟时间  $\tau$  为 2.5 d。

### 3.2 三参数模型

由于高聚物结构单元的多重性及其运动的复杂性,力学松弛过程往往不只一个推迟时间,而是一个分布很宽连续谱,可以采用多元件组合模型来拟合。三参数模型是将 3 个 Kelvin 蠕变模型的运动单元进行串联组合,其蠕变表达式为<sup>[10]</sup>

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^3 \varepsilon(\infty)_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (3)$$

式中,  $\varepsilon(\infty)_i$ ,  $\tau_i$  分别表示第  $i$  个 Kelvin 蠕变模型单元的高弹形变量及推迟时间。单一的 Kelvin 模型求出的推迟时间,反映各运动单元推迟时间的平均值,即平均推迟时间  $\tau_0$  近似等于  $\tau$ ,本试验即 2.5 d。并且,将  $\tau_i$  在平均推迟时间  $\tau_0$  附近按对数坐标分别取  $0.1 \tau_0, \tau_0, 10 \tau_0$ 。

### 3.3 模型比较

根据第一次试验数据进行拟合得到 Kelvin 模型和三参数模型中的各个参数,再利用拟合参数预测第二次试验结果并进行对比,尤其是对比第二次试验中 28 d 至 48 d 结果。不同模型拟合及预测结果的比较如图 8、图 9 所示,不同模型的拟合参数、拟合优度及预测优度见表 2。

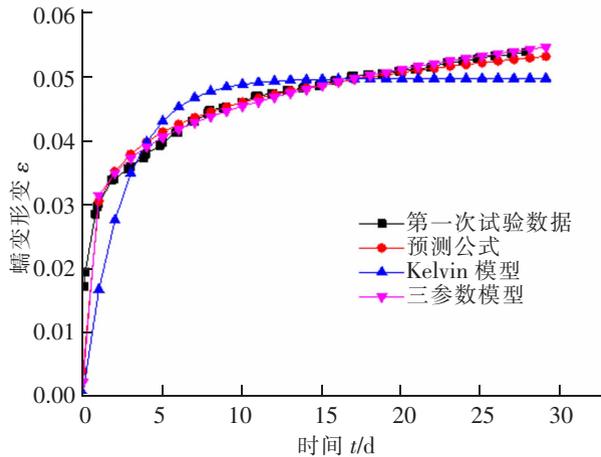


图 8 不同模型拟合结果比较

Fig.8 Comparison of model fitting results

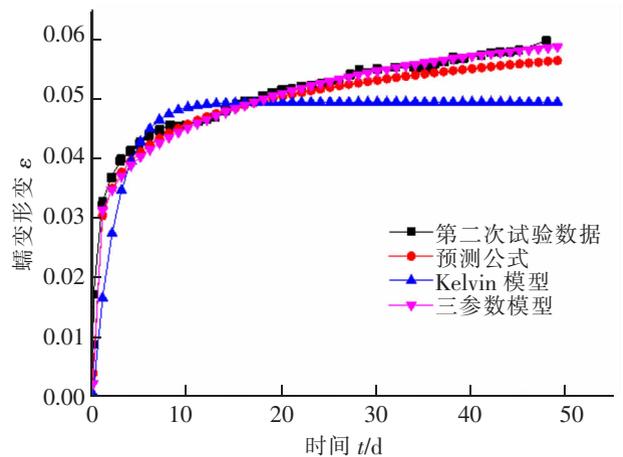


图 9 不同模型预测结果比较

Fig.9 Comparison of model estimated results

从图上曲线以及  $R^2$ 、 $R^2_{\text{预}}$  可以看出:① 三参数模型的拟合及预测曲线与试验数据接近,而 Kelvin 模型与原数据差距较大;② 三参数模型的拟合优度大于 0.9,拟合效果较好,而 Kelvin 模型的拟合效果不佳。这说明,三参数模型和预测公式均能较好地反映橡胶密封垫在恒压下的压缩蠕变行为。

将三参数模型与本文提出的预测公式对比,预测公式的  $R^2$  和  $R^2_{\text{预}}$  均较大,说明预测公式整体的拟合以及预测效果比三参数模型更好。但需要注意的是,该预测公式未涉及蠕变机理,因此本文提出的计算橡胶密封垫蠕变的预测公式的适用性及机理,仍有待进一步研究。

表 2 不同蠕变模型拟合参数

Tab.2 Fitting parameters of creep models

	预测公式	Kelvin 模型	三参数模型
拟合参数	$A=0.006\ 7$		$\varepsilon(\infty)_1=0.027\ 6$
		$\varepsilon(\infty)=0.049\ 5$	$\varepsilon(\infty)_2=0.009\ 4$
	$B=0.030\ 3$		$\varepsilon(\infty)_3=0.025\ 4$
$R^2$	0.978 2	0.890 3	0.965 1
$R^2_{\text{预}}$	0.965 9	0.884 9	0.963 9

## 4 结论

本文对断面 A、B 两种盾构隧道橡胶密封垫进行了长期恒压作用下的压缩蠕变试验,第一次试验压缩蠕变进行了 28 d,第二次试验进行了 48 d。根据试验结果,发现蠕变形变与时间的对数近似呈线性关系,由此提出了预测公式,并与其他模型进行比较,得出以下几点结论:

- 1) 橡胶密封垫的蠕变形变与时间的对数近似呈线性关系,提出的预测公式能很好地反映橡胶密封垫在恒压下的压缩蠕变行为。
- 2) 在本文预测公式、Kelvin 模型及三参数模型中,预测公式来拟合及预测橡胶密封垫的蠕变数据的效果最优,其次是三参数模型,Kelvin 模型较差。
- 3) 橡胶密封垫压缩蠕变行为受温度影响不明显,蠕变试验较应力松弛试验能更好地反映密封垫的耐久性能。

## 参考文献:

- [1] 朱祖熹. 当今国内外盾构隧道防水技术比较谈[J]. 地下工程与隧道, 2002(1): 14-20.
- [2] 薛绍祖. 地下建筑工程防水技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 222-309.
- [3] SHALABI, FAISAL I. Behavior of Gasketed Segmental Concrete Tunnel Lining[D]. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, 2001.
- [4] FAISAL SHALABI, EDWARD CORDING, STANLEY PAUL. SEALANT BEHAVIOR OF GASKETED-SEGMENTAL CONCRETE TUNNEL LINING[C]. 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 2007: 25-28.
- [5] 李咏今. 硫化胶热老化性能变化的数学模型[J]. 合成橡胶工业, 1985(1): 38-41.
- [6] 李咏今. 橡胶老化性能变化或寿命预测的计算方法[J]. 合成橡胶工业, 1989, 12(3): 205-209.
- [7] 伍振志, 杨林德, 季倩倩, 等. 越江盾构隧道防水密封垫应力松弛试验研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(5): 539-543.
- [8] SHI CHENGHUA, CAO CHENGYONG, LEI MINGFENG, et al. Time-dependent performance and constitutive model of EPDM rubber gasket used for tunnel segment joints[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 490-498.
- [9] 丁杨, 孟伟, 邓文武. 盾构管片橡胶密封垫断面形式设计及耐久性研究[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(4): 45-49.
- [10] 陆明, 雷震宇, 张勇, 等. 上海长江隧道衬砌接缝和连接通道的防水试验研究[J]. 地下工程与隧道[J], 2008(4): 12-16.
- [11] 陆明. 外滩隧道中盾构隧道衬砌接缝密封垫防水试验[J]. 中国市政工程, 2010(S1): 135-137.
- [12] 陆明, 曹伟飏, 朱祖熹. 超大直径盾构隧道防水设计技术综述[J]. 中国建筑防水, 2008(4): 17-21.
- [13] 王鹏. 盾构密封垫材质选型试验研究[J]. 中国建筑防水, 2007(8): 8-11.
- [14] 林松, 高庆, 李映辉, 等. 丁基橡胶粘弹性材料的非线性蠕变行为[J]. 机械工程材料, 2007, 07: 35-37.
- [15] 裘怿明. 环氧化天然橡胶高弹形变运动方程的探讨[J]. 合成橡胶工业, 1994, 17(3): 167-169.
- [16] 裘怿明, 吴其晔, 杨清芝. 环氧化天然橡胶蠕变曲线的一种拟合方法[J]. 橡胶工业, 1994, 41(6): 324-328.

# Experimental Study on Compression Creep Test for Rubber Gasket of Shield Tunnel

Luo Chi<sup>1,2</sup>, Yang Xinan<sup>1,2</sup>, Lei Zhenyu<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Through long-term compression creep tests on two kinds of rubber waterproof gasket for the shield tunnel of Section A and Section B under the constant pressure, it is found that the relationship between creep deformation of gasket and logarithm of time is almost linear and a predictor formula was put forward. The parameters in the predictor formula fitted by the first creep test data were used to forecast the second test data and the rationality of the predictor formula was validated. Through the comparison among the prediction formula, Kelvin model, and the three parameters model, it was found that the predictor formula can effectively reflect the compression creep behavior of rubber gasket under constant pressure and is the best one to reflect the creep behavior among the three models. The research results show that the temperature has less impact on the compression creep behavior of the rubber gasket, which indicates that creep tests can better reflect the durability of the waterproof pad than that of stress relaxation tests. Besides, the results may be of practical value for the study and prediction of long-time mechanical behavior and service life of rubber materials.

**Key words:** shield tunnel; test; creep; rubber gasket; durability