

DOI: 10.11779/CJGE201508011

# 泥质粉砂岩高围压三轴压缩松弛试验研究

田洪铭<sup>1</sup>, 陈卫忠<sup>1,2</sup>, 肖正龙<sup>1</sup>, 伍国军<sup>1</sup>, 韩光钦<sup>3</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 山东大学岩土结构中心, 山东 济南 250061;  
3. 贵州省公路工程集团有限公司, 贵州 贵阳 550008)

**摘要:** 高应力条件下应力松弛特性是岩石长期力学特性研究的重要方面, 开展了泥质粉砂岩围压为 15~35 MPa 的三轴松弛试验研究。高围压下应力松弛曲线的分析表明, 岩石的应力松弛可以分为衰减松弛和稳定松弛两个阶段。当松弛初始应力水平较低时, 试样主要以衰减松弛为主, 很快趋于稳定, 当松弛初始应力水平接近岩石峰值应力时, 应力松弛明显增大, 并出现明显的稳定松弛阶段。不同围压条件下, 试样松弛曲线对比分析表明, 松弛初始应力水平较低时, 岩石处于黏弹性阶段, 围压对岩石松弛特性的影响相对较小, 随着松弛初始应力水平的增大, 当应力水平接近峰值应力时, 岩石的应力松弛将随围压的增大而减小。基于三轴松弛试验结果的分析, 建立了能够反映泥质粉砂岩三轴松弛特性的西原模型, 并验证了模型的合理性。

**关键词:** 泥质粉砂岩; 高围压; 应力松弛特性; 西原模型

**中图分类号:** TU452      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2015)08-1433-07

**作者简介:** 田洪铭(1985 - ), 男, 博士, 主要从事岩土工程长期稳定性方面的研究工作。E-mail: tianhongming1111@163.com。

## Triaxial stress relaxation properties of argillaceous siltstone under high confining pressure

TIAN Hong-ming<sup>1</sup>, CHEN Wei-zhong<sup>1,2</sup>, XIAO Zheng-long<sup>1</sup>, WU Guo-jun<sup>1</sup>, HAN Guang-qin<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Yanzhou Coal Mining Company Limited, Zoucheng 273500, China; 3. Guizhou Highway Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550008, China)

**Abstract:** The stress relaxation properties of soft rock are an important aspect of its long-term mechanical properties, which are very important to keep soft rock tunnel long-term stability. The triaxial stress relaxation tests on argillaceous siltstone are carried out under confining pressures from 15 to 35 MPa. The relaxation curves can be divided into two stages: the transient relaxation and steady relaxation. When the stress relaxation starts with the initial deviatoric stress, which is much lower than the peak stress of the specimen, the relaxation is mainly composed of transient relaxation. However, when the initial deviatoric stress approaches to the peak stress of the specimen, obvious steady relaxation is observed. The comparisons of relaxation curves obtained from specimens under different confining pressures show that when the initial deviatoric stress is much lower than the peak stress of the specimen, the confining pressure has little effect on the relaxation behaviour of the specimen; and when the initial deviatoric stress approaches to the peak stress of the specimen, the relaxation stress decreases with the increase of the confining pressure. Based on the analysis on the results of triaxial relaxation tests, the Nishihara model is employed to describe the relaxation behaviour of argillaceous siltstone, and the comparisons between numerical and measured relaxation stress indicate the rationality of the Nishihara model.

**Key words:** argillaceous siltstone; high confining pressure; stress relaxation property; Nishihara model

## 0 引 言

岩石的流变特性包括应力松弛和蠕变两个方面<sup>[1]</sup>。深埋软岩隧道施工过程中, 二次衬砌施工后, 由于衬砌刚度较高, 围岩变形受到限制, 暂时趋于稳定。但在高地应力的持续作用下, 围岩承载能力和强

度将随时间持续弱化, 出现明显的应力松弛。围岩应力松弛将导致围岩破碎区的增大和应力集中区向深部

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金项目(51309217); 国家自然科学基金杰出青年基金项目(51225902); 国家自然科学基金面上项目(51379007)

**收稿日期:** 2014-10-16

岩体转移, 从而引起深部岩体产生持续的蠕变变形, 支护结构形变压力也随之增大, 直至支护体系的失效。可以看出, 高应力软岩隧道支护结构的流变破坏是围岩松弛和蠕变效应共同作用的结果, 开展高围压条件下的三轴松弛试验, 研究高应力条件下岩石的松弛特性, 对于高地应力条件下软岩隧道支护设计和长期稳定具有重要意义。

目前岩石流变特性的试验和理论研究主要集中在蠕变方面, 松弛试验尤其是三轴松弛试验的研究相对较少。早期岩石的应力松弛试验研究, 主要以硬岩的岩爆方面为主<sup>[2-4]</sup>, 持续时间较短, 不能反映软岩石的长期力学性能。杨淑碧等<sup>[5]</sup>对侏罗系沙溪庙组砂岩和泥岩进行了单轴松弛试验研究, 表明砂岩和泥岩随时间应力松弛效应明显。邱贤德等<sup>[6]</sup>对盐岩进行过一系列的单轴松弛试验研究。上述松弛试验虽然持续时间较长, 但不能反映复杂应力状态下岩石的应力松弛特性。熊良霄等<sup>[7]</sup>对绿片岩开展了单轴和双轴的应力松弛试验, 研究复杂应力状态下岩石的松弛特性。于怀昌等<sup>[8]</sup>等对粉砂质泥岩进行了围压为 1 MPa 的三轴压缩松弛试验。上述双轴和三轴松弛试验围压相对较小, 不能反映高应力条件下岩石的松弛特性。

本文针对泥质粉砂岩开展了一系列围压大于 15 MPa 的三轴松弛试验研究, 分析了高围压条件下泥质粉砂岩的应力松弛规律。通过对不同围压下泥质粉砂岩松弛特性的分析, 研究了围压对岩石应力松弛特性的影响。并在上述松弛试验研究的基础上建立了能够反映泥质粉砂岩三轴松弛特性的流变模型, 通过对松弛试验曲线的拟合验证了模型的合理性。

## 1 泥质粉砂岩三轴松弛特性试验

### 1.1 试样制备

松弛试验选取某引水隧道的泥质粉砂岩, 试样为 50 mm×100 mm 的圆柱试样, 部分制备试样如图 1 所示。为了减小岩样离散性对试验结果的影响, 试验前, 采用脉冲超声波对穿法对试样进行检测筛选, 选择纵波波速在 3700~4700 m/s 的试样进行试验。



图 1 制备得到的泥质粉砂岩试样

Fig. 1 Argillaceous siltstone specimens for stress relaxation tests

三轴松弛试验开展之前, 首先对该泥质粉砂岩开展了常规三轴试验研究, 以得到该岩石的力学特征, 为松弛试验荷载等级的选取提供依据。常规三轴试验围压分别为 15, 25 和 35 MPa, 试验曲线如图 2 所示。不同围压下岩石的峰值强度如表 1 所示。

表 1 泥质粉砂岩常规三轴试验成果

Table 1 Results of conventional triaxial compression tests on argillaceous siltstone

试样编号	围压/MPa	峰值应力 /MPa
2-7	15	150
2-31-3	25	171
2-31-2	35	192

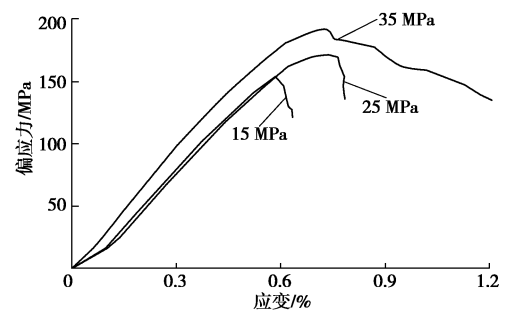


图 2 泥质粉砂岩常规三轴试验结果

Fig. 2 Test results of conventional triaxial compression tests on argillaceous siltstone

### 1.2 松弛试验设备

松弛试验设备要求在较长的时间内保持应变恒定, 对伺服控制器和应变传感器的要求较高。松弛试验采用 TLW-2000 型三轴流变仪如图 3 所示。应力松弛试验过程中, 轴向传感器控制精度在 $\pm 0.001$  mm, 如图 4 所示, 能够满足松弛试验的变形控制要求。此外, 为了消除意外断电和温度变化的影响, 岩石流变试验室进行了隔温改装, 而且为流变仪安装了 UPS 电源。



图 3 TLW-2000 三轴流变仪

Fig. 3 High-confining pressure triaxial rheology testing machine

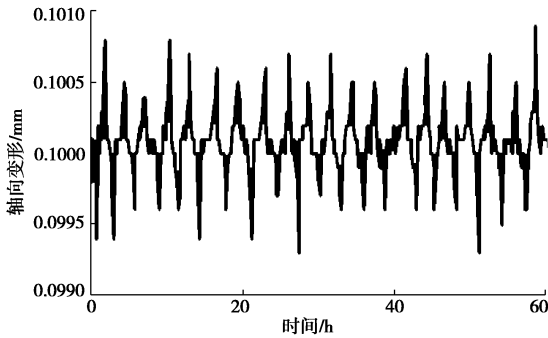


图 4 松弛试验过程中变形控制精度

Fig. 4 Variation of axial deformation with time during stress relaxation process

### 1.3 松弛试验方法

岩石松弛试验过程中, 应变保持不变, 应力将随时间逐渐减小。试验过程中, 岩石的应力衰减即松弛应力, 可以表示为

$$\sigma_r(t) = \sigma_0 - \sigma_1(t) \quad (1)$$

式中,  $\sigma_0$  为松弛开始时的初始应力即松弛初始应力,  $\sigma_1(t)$  为经过时间  $t$  后的剩余应力即松弛剩余应力。

松弛试验采用分级加载方式, 根据现场的实际情况, 进行了围压为 15~35 MPa 的三轴松弛试验。试验过程中, 首先对试样施加围压, 围压加载速率为 0.2 MPa/s。待围压稳定后再施加偏应力, 偏应力采用轴向应变加载方式, 加载速率控制在 0.002 mm/s, 当偏应力达到设定荷载后, 保持应变水平不变, 记录偏应力随时间的变化规律。

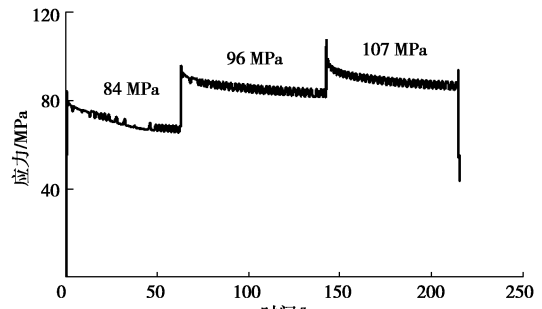
## 2 泥质粉砂岩三轴松弛试验结果

试验得到的高围压下的三轴松弛试验曲线如图 5 所示, 图中  $\sigma_0$  为每级松弛曲线的松弛初始应力。当偏应力达到松弛初始应力  $\sigma_0$  后, 保持试样轴向应变不变, 此时试样的偏应力将随时间不断降低。从不同试样的应力随时间的变化曲线可以看出, 泥质粉砂岩松弛效应明显。

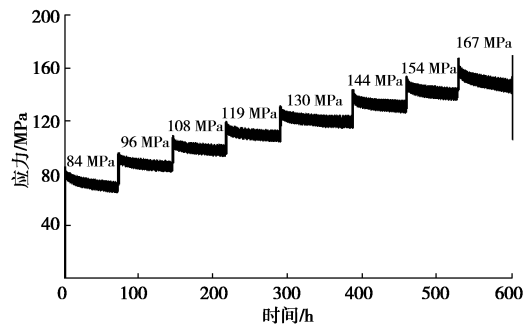
Peng 等<sup>[9]</sup>对脆性岩石的单轴松弛试验研究表明, 当松弛初始应力处于应力-应变曲线的线性阶段时, 岩石不会产生明显的应力松弛。只有当松弛初始应力水平较高时, 才会出现明显的应力松弛, 即岩石存在松弛效应起始点。而泥质粉砂岩的三轴松弛试验表明, 试样在第 1 级松弛过程中就出现了明显的应力降低, 此时初始松弛应力  $\sigma_0$  仅为试样峰值应力的 50%~60%, 因此该泥质粉砂岩没有明显的松弛起始点。

为了进一步分析泥质粉砂岩的松弛特性, 将试样 2~5 在松弛初始应力  $\sigma_0$  为 168 MPa 时的松弛曲线绘制于图 6, 可以看出松弛曲线表现出了周期性波动。

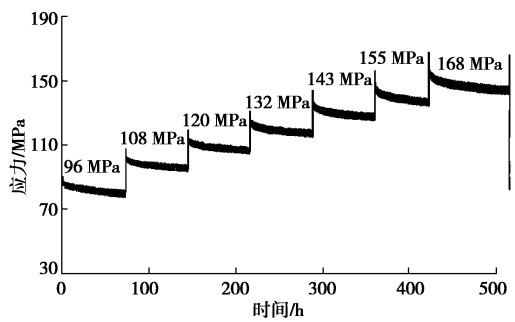
这是由于流变仪轴向应力采用外置传感器测量, 伺服控制过程中压头与三轴室之间的摩擦力所致。曲线波动可以通过曲线平滑来消除, 如图 6 所示。平滑处理后的松弛曲线表现为一条光滑的应力衰减曲线, 这与硬岩在峰值应力下表现出的阶梯状快速松弛曲线存在明显不同。



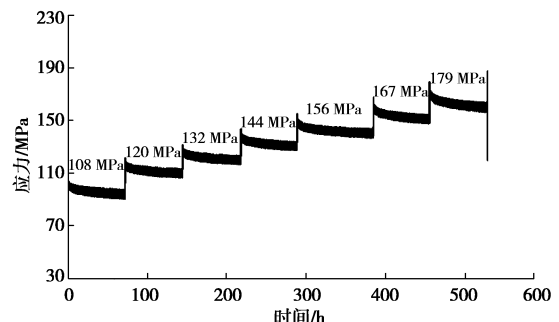
(a) 试样2-6围压15 MPa



(b) 试样2-1围压25 MPa



(c) 试样2-5围压30 MPa



(d) 试样2-8-1围压35 MPa

图 5 三轴应力松弛试验结果

Fig. 5 Stress relaxation results of argillaceous siltstone under different confining pressures

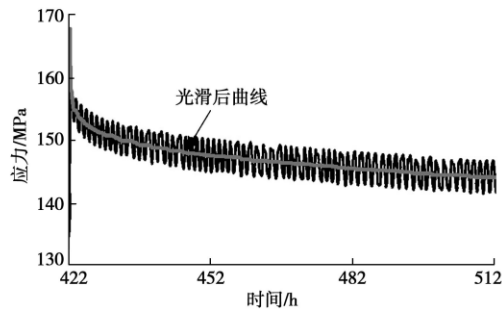


图6 消除摩擦影响后的光滑松弛曲线

Fig. 6 Stress relaxation results of argillaceous siltstone without friction effect

岩石蠕变特性研究表明, 岩石的蠕变应变随应力水平增大而增大, 岩石的应力松弛与松弛初始应力  $\sigma_0$  之间存在相似的规律。以试样 2-1 为例对松弛初始应力  $\sigma_0$  对松弛的影响进行分析。

试样 2-1 在不同初始应力  $\sigma_0$  下的松弛应力  $\sigma_t$  随时间的变化规律如图 7 所示。从图中可以看出, 不同松弛初始应力水平下, 岩石的松弛应力曲线与蠕变曲线相似, 可以分为衰减松弛和稳定松弛两个阶段。衰减松弛阶段, 发生在松弛开始的初始阶段, 该阶段岩石的应力松弛速率随时间迅速降低。稳定松弛阶段, 出现在衰减松弛之后, 此时岩石的应力松弛速率趋于一个很小的值, 进入稳定松弛阶段。由于松弛过程中没有外界能量的补给, 稳定松弛速率将逐渐趋于零。此外, 岩石的松弛应力大小与松弛初始应力水平  $\sigma_0$  密切相关。当松弛初始应力水平较低时, 岩石处于黏弹性阶段, 应力松弛主要以衰减松弛为主, 并很快趋于稳定; 当松弛初始应力水平接近岩石峰值应力时, 松弛应力明显增大, 出现了持续时间较长的稳定松弛阶段。

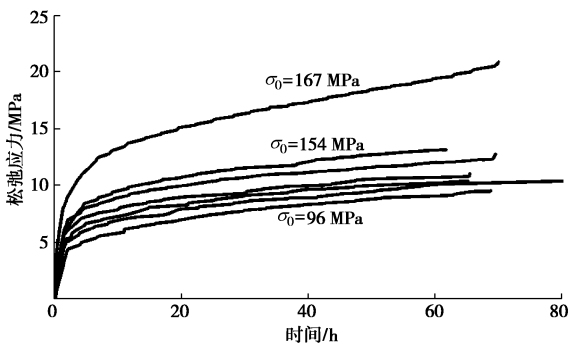


图7 试样 2-1 松弛应力随时间的变化规律

Fig. 7 Variation of relaxation stress with time under different initial deviatoric stress levels for specimen 2-1

为了定量分析, 将松弛 72 h 后的松弛应力  $\sigma_t$  随初始松弛应力  $\sigma_0$  的变化规律绘制于图 8, 从图中可以看出松弛应力  $\sigma_t$  随松弛初始应力  $\sigma_0$  的增大而不断增

大。曲线拟合表明, 指数函数可以很好地反映松弛应力随初始应力  $\sigma_0$  的变化规律。

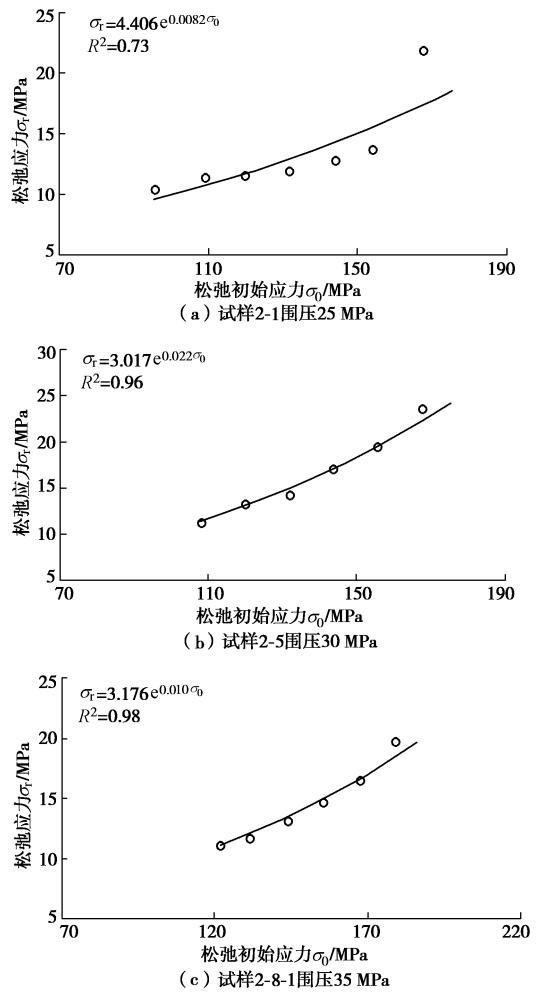


图8 松弛应力随初始应力的变化规律

Fig. 8 Variation of relaxation stress with initial deviatoric stress

Zhang 等<sup>[10]</sup>研究表明, 岩石的蠕变特性与围压密切相关, 随着围压的增大岩石的蠕变明显减小, 但是目前关于围压对岩石松弛特性的研究还相对较少。

将松弛试验研究中不同围压下的三轴松弛试验结果绘制于同一时间坐标系中如图 9 所示。从图中可以看出, 当松弛初始应力水平较低时, 岩石处于黏弹性阶段, 不同试样, 在同一松弛初始应力下的松弛曲线受围压的影响较小, 松弛应力并没有随围压的增大而出现明显的降低。但是, 随着松弛初始应力的不断增大, 低围压下的试样首先达到峰值应力, 岩石的松弛应力明显大于同一松弛初始应力水平下的高围压试样。如: 试样 2-6 (围压 15 MPa) 的初始松弛应力  $\sigma_0$  为 108 MPa 时, 其松弛应力明显大于同一初始松弛应力水平下的试样 2-1 (围压 25 MPa) 和 2-5 (围压 30 MPa); 试样 2-1 和 2-5 在初始松弛应力  $\sigma_0$  为 167 MPa 时, 其应力松弛明显大于围压为 35 MPa 的试样 2-8-1。

综上所述, 当松弛初始应力水平较低时, 岩石处

于黏弹性阶段, 围压对岩石松弛特性的影响相对较小; 随着松弛初始应力水平的增大, 当试样接近峰值应力时, 岩石的应力松弛将随围压的增大而减小。

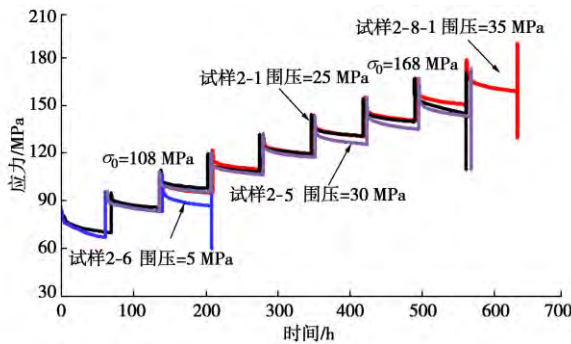


图 9 围压对松弛规律的影响

Fig. 9 Comparison of stress relaxation under different confining pressures

### 3 泥质粉砂岩松弛模型建立

#### 3.1 松弛模型选取

元件模型常被用于反映岩土材料的松弛特性, 其中 Burgers 模型和西原模型应用最为广泛<sup>[11-16]</sup>。本次泥质粉砂岩三轴松弛试验结果表明, 当初始松弛应力水平较低时, 岩石处于黏弹性阶段, 岩石以衰减松弛为主; 当初始松弛应力水平较高时, 特别是当应力接近岩石峰值应力时, 岩石的松弛应力明显增大, 在衰减松弛结束后, 还会出现较为明显的稳定松弛阶段, 因此采用西原模型来反映该泥质粉砂岩应力松弛规律。

西原模型的元件组合见图 10, 图中  $G_K$ ,  $G_H$  为剪切模量;  $H_1$ ,  $H_2$  为三维黏滞系数,  $\sigma_s$  为开关应力, 当应力水平低于该值时, 黏壶  $H_2$  不能激活, 岩石的应力松弛以衰减松弛为主。

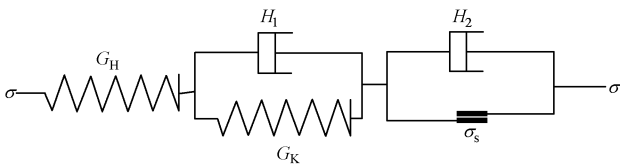


图 10 西原模型

Fig. 10 Nishihara model

假设岩石的应力松弛特性主要由偏应力  $s_{ij}$  引起, 不考虑球应力的影响, 则三维状态下的松弛方程可以表示为<sup>[1]</sup>

$$\text{当 } \sigma < \sigma_s \text{ 时,} \quad s_{ij} = 2G_1(t)(e_{ij})_0, \quad (2)$$

式中,

$$G_1(t) = G_H \exp\left(\frac{-(G_K + G_H)t}{H_1}\right) + \frac{G_K G_H}{G_K + G_H} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-(G_K + G_H)t}{H_1}\right) \right];$$

当  $\sigma \geq \sigma_s$  时,

$$s_{ij} = 2G_2(t)(e_{ij})_0 + \sigma_s/p_2 \cdot \left[ p_2 + \frac{p_2}{\sqrt{p_1^2 - 4p_2}} \left( \frac{\exp(-\alpha t)}{\alpha} - \frac{\exp(-\beta t)}{\beta} \right) \right]. \quad (3)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} G_2(t) &= \frac{G_H}{(\alpha - \beta)} \left[ \left( -\frac{G_K}{H_2} + \alpha \right) \exp(-\alpha t) + \left( \frac{G_K}{H_2} - \beta \right) \exp(-\beta t) \right], \\ \alpha &= \frac{1}{2p_2} (p_1 + \sqrt{p_1^2 - 4p_2}), \\ \beta &= \frac{1}{2p_2} (p_1 - \sqrt{p_1^2 - 4p_2}), \\ p_1 &= \frac{H_1}{G_H} + \frac{H_1 + H_2}{G_K}, \\ p_2 &= \frac{H_1 H_2}{G_H G_K}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由式 (2)、(3) 可以看出, 随着时间的增大, 西原模型可以反映出非完全衰减性的应力松弛曲线: 当应力水平小于  $\sigma_s$  时, 岩石的松弛应力最终趋于  $(2G_K G_H / G_K + G_H) e_{ij}$ , 当应力水平高于  $\sigma_s$  时, 岩石的松弛应力最终趋于  $\sigma_s$ 。

#### 3.2 参数取值

为了得到试样的松弛参数, 采用最小二乘法对试验数据进行拟合<sup>[13]</sup>。首先对黏弹性阶段的松弛曲线分别进行拟合, 拟合得到的不同松弛初始应力水平下的  $G_K$ ,  $G_H$  和  $H_1$ 。以不同松弛初始应力水平下的  $G_K$ ,  $G_H$  和  $H_1$  的平均值为已知量, 对试样最后一级松弛曲线进行拟合, 可以得到泥质粉砂岩的开关应力  $\sigma_s$  及  $H_2$ 。拟合得到的泥质粉砂岩的松弛参数如表 2 所示。

表 2 泥质粉砂岩松弛参数

Table 2 Fitting results of stress relaxation tests on argillaceous siltstone

试样	$G_H$ /(10 <sup>4</sup> MPa)	$G_K$ /(10 <sup>4</sup> MPa)	$H_1$ /(10 <sup>6</sup> MPa·h)	$H_2$ /(10 <sup>5</sup> MPa·h)	$\sigma_s$ /MPa
试样 2-6	1.26	6.5	1.68	18.0	86
试样 2-1	1.28	19.0	3.24	5.49	122
试样 2-5	1.48	25.7	6.58	1.03	137
试样 2-8-1	1.75	33.9	7.79	1.28	143

不同围压下试样的拟合结果与试验结果的对比如

图 11 所示,可以看出岩石的松弛特性的拟合值与试验结果较为接近,说明西原模型可以很好地反映该泥质粉砂岩的三轴松弛特性。

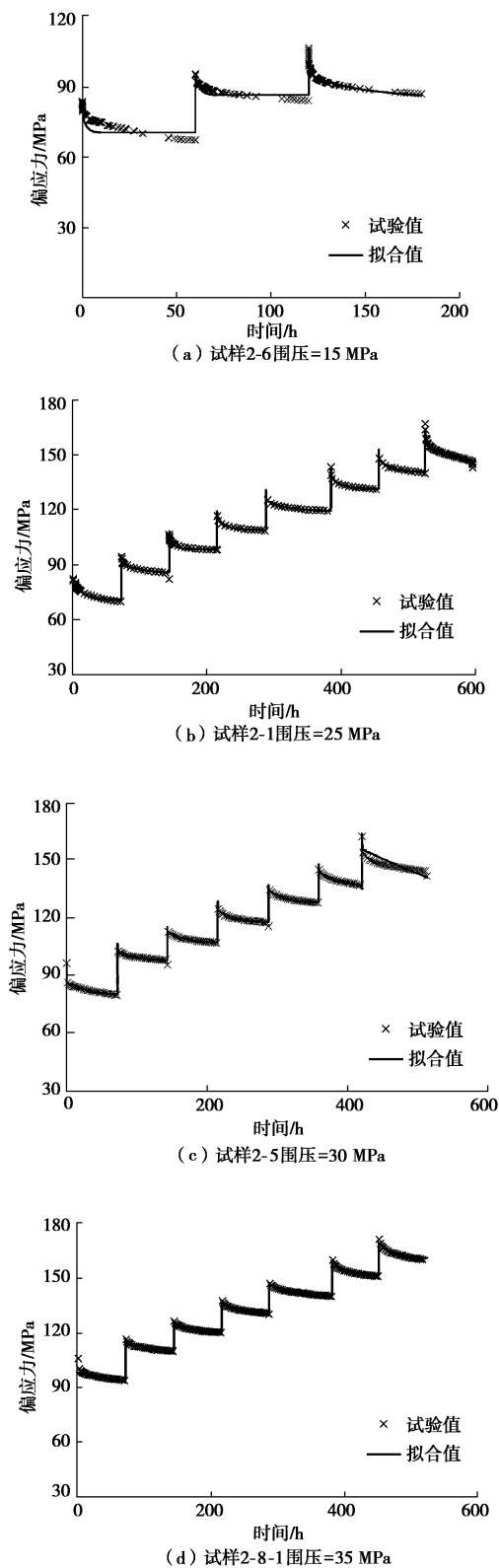


图 11 松弛试验拟合结果与试验结果的对比

Fig. 11 Comparison of stress relaxation between numerical and measured results

## 4 结 论

(1) 松弛曲线的分析表明,应力松弛可以分为衰减松弛和稳定松弛两个阶段,当松弛初始应力水平较低时,试样以衰减松弛为主,很快趋于稳定;当松弛试验初始应力水平接近峰值应力时,岩石松弛应力明显增大,并出现明显的稳定松弛阶段,松弛应力与松弛初始应力水平之间满足指数函数关系。

(2) 不同围压三轴松弛试验结果的对比分析表明,松弛初始应力水平较低时,岩石处于黏弹性阶段,围压对岩石松弛特性的影响相对较小;随着松弛初始应力水平的增大,当试样接近其峰值强度时,岩石的应力松弛将随围压的增大而减小。

(3) 西原模型的拟合值与松弛试验值的对比分析表明,西原模型可以很好地反映该泥质粉砂岩的三轴松弛特性。

## 参考文献:

- [1] 孙 钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (SUN Jun. Geotechnical material rheological and its engineering application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))
- [2] 冯 涛, 王文星, 潘长良. 岩石应力松弛试验及两类岩爆研究[J]. 湘潭矿业学院学报, 2000, 15(1): 27 - 31. (FENG Tao, WANG Wen-xing, PAN Chang-liang. Stress relaxation tests of rock and research on two types of rockbursts[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2000, 15(1): 27 - 31. (in Chinese))
- [3] 唐礼忠, 潘长良. 岩石在峰值荷载变形条件下的松弛试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 940 - 942. (TANG Li-zhong, PAN Chang-liang. Experiment study on properties of stress relaxation of rock under deformation at peak load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6): 940 - 942. (in Chinese))
- [4] 唐礼忠, 潘长良, 谢学斌. 深埋硬岩矿床岩爆控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1067 - 1071. (TANG Li-zhong, PAN Chang-liang, XIE Xue-bin. Study on rockburst control in deep-seated hard ore deposit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1067 - 1071. (in Chinese))
- [5] 杨淑碧, 徐 进, 董孝璧. 红层地区砂泥岩互层状斜坡岩性研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(2): 12 - 24. (YANG Shu-bin, XU Jin, DONG Xiao-bi. Rheological feature of slope composed of alternating beds of sandstone and mudstone iarea[J]. Journal of Geological Hazards and

- Environment Press, 1996, 7(2): 12 - 24. (in Chinese))
- [6] 邱贤德, 庄乾城. 岩盐流变特性的研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1995, 18(4): 96 - 103. (QIU Xian-de, ZHUANG Qian-chen. Research on the rheology behavior of rock salt[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science), 1995, 18(4): 96 - 103. (in Chinese))
- [7] 熊良霄, 杨林德, 张尧. 绿片岩多轴受压应力松弛试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1158 - 1165. (XIONG Liang-xiao, YANG Lin-de, ZHANG Yao. Stress relaxation tests on green schist speimens under multi-axial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(8): 1158 - 1165. (in Chinese))
- [8] 于怀昌, 周敏, 刘汉东, 等. 粉砂质泥岩三轴压缩应力松弛特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 803 - 811. (YU Huai-chang, ZHOU Min, LIU Han-dong, et al. Experimental investigation on stress relaxation properties of silty mudstone under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 803 - 811. (in Chinese))
- [9] PENG S, PODNIEKS E R. Relaxation and the behavior of failed rock[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1972, 9: 699 - 712.
- [10] ZHANG Z L, XU W Y. Triaxial creep tests of rock from the compressive zone of dam foundation in Xiangjiaba Hydropower Station[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46: 1103 - 1114.
- [11] 于怀昌, 李亚丽, 刘汉东. 粉砂质泥岩常规力学、蠕变以及应力松弛特性的对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 60 - 69. (YU Huai-chang, LI Ya-li, LIU Han-dong. Comparative study of conventional mechanical, creep and stress relaxation properties of silty mudstone under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 60 - 69. (in Chinese))
- [12] 田洪铭, 陈卫忠, 赵武胜, 等. 宜-巴高速公路泥质红砂岩三轴应力松弛特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 981 - 986. (TIAN Hong-ming, CHEN Wei-zhong, ZHAO Wu-sheng. Analysis of triaxial stress relaxation properties of red silty mudstone of Yichang-Badong highway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 981 - 986. (in Chinese))
- [13] 夏才初, 孙钧. 蠕变试验中流变模型辨识及参数确定[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1996, 21(5): 498 - 503. (XIA Cai-chu, SUN Jun. Distinction of rheological model and determination of parameters on creep tests[J]. Journal of Tongji University (Nature Science), 1996, 21(5): 498 - 503. (in Chinese))
- [14] 王志俭, 殷坤龙, 简文星, 等. 万州安乐寺滑坡滑带土松弛试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 931 - 937. (WANG Zhi-jian, YIN Kun-long, JIAN Wen-xing, et al. Experimental research on stress relaxation of slip zone soils for Anlesi landslide in Wanzhou city[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 931 - 937. (in Chinese))
- [15] 李军世. 黏土蠕变-应力松弛耦合效应的数值探讨[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 294 - 297. (LI Jun-shi. Numerical discussion on coupled effects of creep and stress relaxation of clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(3): 294 - 297. (in Chinese))