

# 田下凝灰岩应力松弛特性及数值模拟研究\*

张海龙<sup>1</sup>, 宗赵波<sup>2</sup>, 魏燕<sup>1</sup>, 汤杨<sup>3</sup>

(1. 重庆文理学院 建筑工程学院, 重庆 402160; 2. 中国建筑第七工程局有限公司, 郑州 450004; 3. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 岩石应力松弛特性是预测地下工程长期稳定性的重要基础。首先, 对峰前、峰值和峰后区域应变水平下田下凝灰岩进行分别加载应力松弛试验, 研究松弛过程中应力变化规律, 并分析了应力松弛水平随应变水平的变化规律; 其次, 对田下凝灰岩进行分级加载应力松弛试验, 研究分级加载条件下应力的变化规律, 试验结果表明, 分级加载和分别加载应力松弛具有相同的规律, 且峰值处、峰值后的应力松弛特与峰值前的基本相似; 最后, 利用基于弹簧模型的可变模量本构方程对田下凝灰岩应力松弛试验进行数值模拟, 试验结果与计算结果一致性很好, 表明该本构方程可以较好的描述田下凝灰岩的应力松弛特性, 可以预测工程流变破坏寿命。

**关键词:** 田下凝灰岩; 应力松弛; 可变模量本构方程; 数值模拟

中图分类号: O377

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)01-0202-09

## Research on Stress Relaxation Properties and Numerical Simulation of Tuff

Zhang Hailong<sup>1</sup>, Zong Zhaobo<sup>2</sup>, Wei Yan<sup>1</sup>, Tang Yang<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, P.R. China; 2. China Construction Seventh Engineering Division Corp. Ltd., Zhengzhou 450004, P.R. China; 3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R. China)

**Abstract:** Relaxation properties of rocks are important to forecast long-term stability of underground engineering. First, the relaxation tests of Tuff were carried out under strain level in pre-failure region, peak strength and post-failure region by single-stage loading condition, and the law of relaxation was investigated from the testing results. The law of stress level variety with strain level was analyzed. Second, the same relaxation of Tuff was done by multi-stage loading condition. The testing results show that there are the same law of relaxation properties by the two loading condition, and relaxation properties in peak strength, post-failure region of Tuff are almost similar with that in pre-failure region. Finally, the testing results are numerically simulated by the non-linear spring model, coinciding well with experimental results. It shows that the constitutive equation is suitable to describe stress relaxation properties of Tuff, and rheologic failure life of practical engineering may be forecasted by it.

**Keywords:** Tuff; stress relaxation; variable-compliance-type constitutive equation; numerical simulation

\* 收稿日期: 2018-07-26(修改稿)

作者简介: 张海龙(1980-), 男, 甘肃通渭人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程、地下工程等领域的教学与科研工作。

E-mail: hlzhang28@163.com

基金项目: 重庆市教委科学技术项目(KJ1711271, KJQN201801307); 重庆市基础与前沿探索项目(csrrc2018jcyjAX0634)

## 0 引言

岩石流变力学特性是解释和分析地质构造运动及预测地下工程长期稳定性的重要基础,其流变力学特性试验可以为流变模型在边坡工程、核废料处置工程和水利水电工程等的应用提供试验参数<sup>[1]</sup>。蠕变和应力松弛是研究岩石流变力学特性的两个主要方面,国内外对岩石的蠕变特性开展了大量的研究,取得了许多研究成果<sup>[2-3]</sup>。但在实际工程中,如地下洞室、巷道、边坡等,都有可能因岩石应力松弛而导致破坏,且更多的应力松弛是从峰值处后开始的。因此,研究岩石应力松弛特性,对于工程的长期稳定性具有重要的指导意义。

岩石应力松弛试验要求有长时间保持应变恒定的试验机,试验技术难度较大,目前国内外研究成果相对较少。李永盛等<sup>[4]</sup>采用伺服刚性试验机对粉砂岩、大理岩、红砂岩和泥岩4种不同岩性岩石进行了单轴压缩荷载条件下的蠕变和应力松弛试验。结果表明,岩石松弛曲线具有连续型和阶梯型两种典型的变化规律。苏承东等<sup>[5]</sup>对煤样进行了常规单轴压缩试验和分级应力松弛试验,分析了煤样的变形与强度特征,发现采用常规方法得到的力学参数明显高于分级松弛试验值,认为煤样的力学参数具有时效特征。在峰值荷载变形条件下,唐礼忠等<sup>[6]</sup>进行了岩石的应力松弛试验,认为岩石在峰值荷载变形条件下应力松弛曲线呈阶梯式下降特征。于怀昌等<sup>[7]</sup>采用岩石三轴流变伺服仪,在分级加载条件下执行了饱和粉砂质泥岩的三轴压缩应力松弛试验,研究了不同应变水平下岩石的应力松弛速率、径向应变、体积应变及松弛模量随时间的变化规律,并选取了 Burgers 模型描述了粉砂质泥岩的应力松弛特性。杨春和等<sup>[8]</sup>对盐岩进行了不同围压条件下的应力松弛试验,得到了盐岩在不同围压下的应力松弛特性。张泷等<sup>[9]</sup>基于内变量热力学,建立了不同约束条件下岩石的黏弹-黏塑性蠕变和应力松弛本构方程。

虽然国内外对岩石应力松弛特性开展了一些研究<sup>[10-13]</sup>,但岩石峰值后区域的应力松弛特性相关成果很少,讨论峰值处及峰后的应力松弛特性非常必要。田下凝灰岩属于Ⅰ类岩石<sup>[11]</sup>,其峰后应力缓慢下降,峰后曲线斜率为负<sup>[14]</sup>,从而峰值处和峰值后区域应力松弛试验能得到较好的控制,对比

分析研究峰前、峰值和峰后区域应变水平下的应力松弛特性具有重要的意义。本文运用自主研发的能实现应力归还控制的岩石力学试验系统,对分别和分级加载方式下的田下凝灰岩应力松弛特性进行了研究,分析阐述了田下凝灰岩峰值前、峰值处和峰值后区域应力随时间的变化规律,用可变模量本构方程对试验结果进行了描述。

## 1 试验方法

### 1.1 岩样采集及试件制备

本文以田下凝灰岩为研究对象,其产于日本栃木县宇都宫市大谷镇,分布在大谷凝灰岩的下部岩层,其特点是几乎无黑色斑点、不容易变色,含有由玻璃质碎屑形成的蓝色矿物,还可观察到被认为是由于熔结作用形成的流纹构造。它含有一定的方解石,故其局部质地较为坚硬,孔隙率为20%~30%,属多孔隙岩石。田下凝灰岩采用湿式加工法,沿垂直层理面方向钻取直径25 mm的试样,采用意大利 control 公司生产的岩芯修修剪切割机进行试样两端切割,采用 control 公司生产的岩芯磨平机进行端面研磨,制作为 $\phi 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的圆柱体试件,整个试样制作过程严格按照国际岩石力学学会(ISRM)建议方法进行,端面平整度控制在0.01 mm内,以满足应力松弛试验的要求,加工好的岩石试样如图1所示。



图1 田下凝灰岩试件

Fig. 1 Specimens of Tage tuff

### 1.2 试验设备及试验方法

田下凝灰岩应力松弛试验在重庆大学完成,试验设备为自主研发的能实现应力归还控制的岩石力学试验系统,如图2所示。该试验系统可实现应力速率控制、应变速率控制和应力归还法控制。本

次试验采用应变速率控制,加载速率为  $1 \times 10^{-5}/s$ ,采用差动式位移传感器(LVDT)测试试样的轴向位移。应力松弛试验采用多个试样分别以加载和单一试样分级加载(以下简称分别加载和分级加载)两种方式进行。试验中,应变水平分别为峰前 50%、80%(峰前)、100%(峰值处)和 120%(峰后)四个水平。分别加载和分级加载试验中每一级松弛时间均为 40 000 s,分级加载在同一时间上由低到高逐级加载。

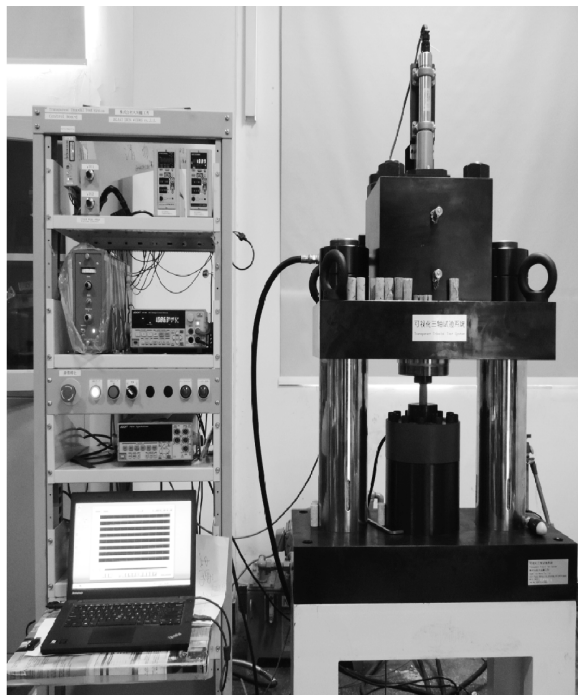


图 2 岩石力学试验系统

Fig. 2 Testing system of rock mechanics

## 2 田下凝灰岩试验及结果分析

### 2.1 岩样采集及试件制备

田下凝灰岩强度试验按常规试验方法进行同一速率的单轴压缩试验,以确定田下凝灰岩的单轴压缩强度及其峰值破坏点处的轴向应变值(以下简称峰值应变)。应力松弛试验中的应变水平即按该峰值应变的比例进行取值。为了减小试样测试数据的离散性,在试验之前进行筛选,首先将表观上有明显缺陷的岩石试件剔除,再根据其密度大小进行筛选。强度试验的试件为 4 个,全应力-应变试验曲线如图 3 所示,并求出其峰值破坏点处应变的平均值作为本次试验的标准。表 1 给出了各岩石试样的密度、杨氏模量、单轴压缩强度及峰值应变。

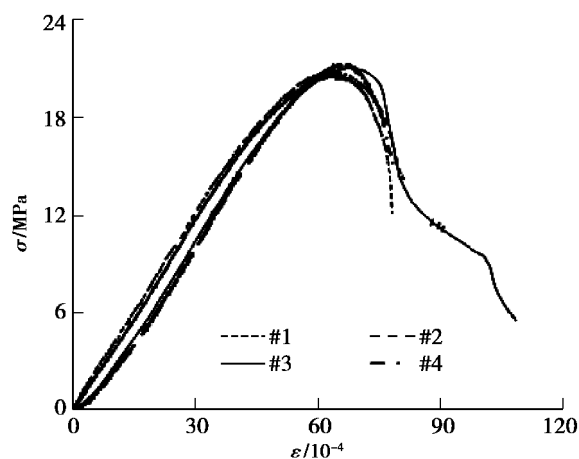


图 3 田下凝灰岩全应力-应变曲线图

Fig. 3 Stress-strain curves of Tuge tuff

### 2.2 田下凝灰岩应力松弛试验

#### 2.2.1 应力松弛试验中应变-时间曲线

应力松弛试验要求试验设备能够长时间保持应变恒定,但保持应变的绝对恒定是很难的,伺服试验机油压泵的波动及应变传感器的敏感度导致应变会在一个稳定的范围内波动。图 4 是田下凝灰岩应力松弛整个试验过程中的应变-时间曲线,其中应变位移波动范围在 0.000 2 mm 以内,从而保证了应力松弛试验的可靠性。

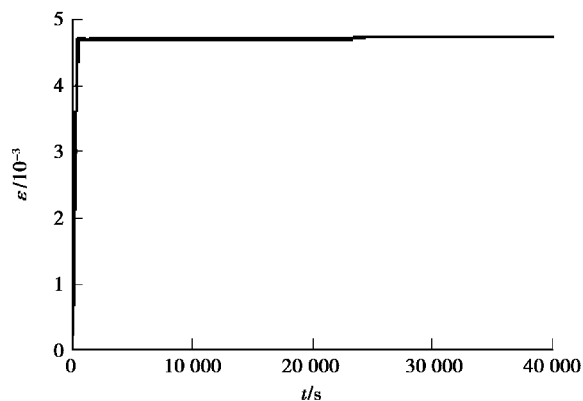


图 4 应变-时间曲线(田下凝灰岩应力松弛)

Fig. 4 Strain-time curve (Stress relaxation of Tuge tuff)

表 1 强度试验参数值

Table 1 Parameter values in strength test

编 号	T-CS-1	T-CS-2	T-CS-3	T-CS-4	均 值
$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	1.767	1.792	1.765	1.787	1.778
$E/GPa$	4.991	4.984	4.136	4.134	4.561
$\sigma_c/GPa$	23.143	23.550	24.346	23.016	23.514
$\varepsilon_c/10^{-3}$	6.221	6.789	7.166	7.409	6.896

2.2.2 分别加载应力松弛

本文中取应变水平分别为 50%、80%、峰值处(100%)和 120% 进行应力松弛试验,试验时间为 40 000 s。试验过程中,应力降随时间变化曲线如图 5 所示。从图中可以看出,应变水平为峰值处(100%)和 120%(峰后)的应力松弛曲线处于 50%(峰前)和 80%(峰前)之间,在初始阶段存在一个较大的应力突降过程。应变水平为 120% 时应力松弛量明显大于 50% 和 80%。这是因为试件达到峰值强度后发生破坏,试件内部裂隙急速发育,导致应力急速降低,且加载到 120% 时,试件存在明显的破坏断面。为了方便观察应力松弛初始阶段,纵轴向左移动了一部分,如图 6 所示。从曲线形态上看,不同应变水平下田下凝灰岩的应力松弛曲线非常相似。由于田下凝灰岩内部颗粒组成比较均一,因此随着时间变化,应力变化轨迹为连续的曲线,应变水平为 120% 时,在应力松弛后期出现了

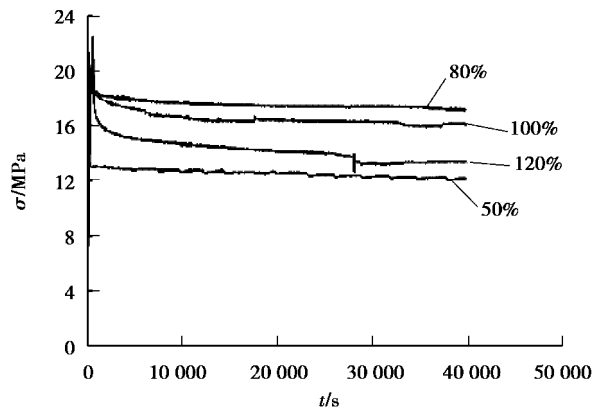


图 5 不同应变水平下应力降-时间曲线 (分别加载)

Fig. 5 Stress drop-time curves at different strain level (Single-stage loading)

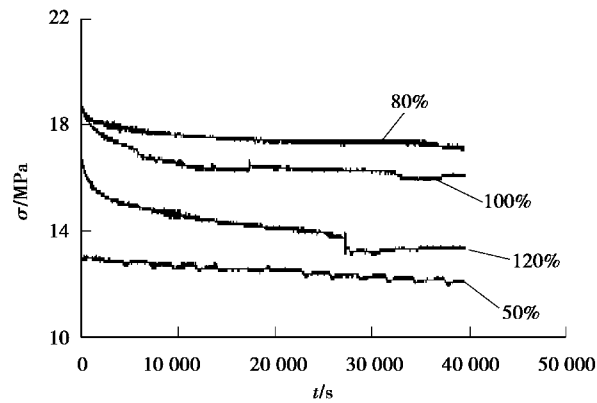


图 6 不同应变水平下应力降-时间曲线 (分别加载)

Fig. 6 Stress drop-time curves of different strain level of Tage tuff (single-stage loading)

局部应力突降现象,这可能是由于试件处于破坏阶段,岩石内部裂纹的扩展和发育所导致。在应力松弛过程中,松弛曲线存在周期性波动,这是由于轴向伺服加载系统中油缸油压的波动引起的曲线波动变化。从图中可得到应力松弛可以分为三个阶段:快速松弛阶段、减速松弛阶段、稳定阶段<sup>[15]</sup>。当加载到一定应变水平后,保持应变不变,最初阶段应力随时间变化急速降低,持续时间约为 20~30 min。该阶段应力松弛量约占总应力松弛量的 70%~80%,称该阶段为快速松弛阶段。随着时间的增加,应力逐渐减小,但应力减小的速率逐渐降低,该阶段为减速松弛阶段。最后,应力逐渐趋于一个稳定值,不再随时间增加而减小,该阶段称为稳定松弛阶段。将不同应变水平下试样的初始应力、剩余应力、剩余应力比、应力松弛量及应力松弛水平(应力降/初始应力)列于表 2。

表 2 分别加载下不同应变水平下应力松弛参数

Table 2 Relaxation parameter value at different strain levels (Single-stage loading)

应变水平/%	初始应力/MPa	剩余应力/MPa	应力降/MPa	剩余应力比/%	应力松弛水平/%
50	13.54	12.17	1.37	0.90	0.101
80	19.62	17.11	2.51	0.87	0.128
100	21.27	16.16	5.11	0.76	0.240
120	18.05	13.33	4.72	0.74	0.261

表 2 数据表明,在到达峰值强度之前,随着应变水平的增加,应力降逐渐增加、应力松弛水平逐渐增加、剩余应力比逐渐减小。应变水平为 120% 时,初始应力与 80% 时相差不多,但应力松弛量较 80% 大。这是因为应变水平为 120% 时试件已经破坏,出现了宏观破裂面,破裂面本身的强度比完整岩石的强度和抵抗载荷的能力低,且破坏点后区域裂纹扩展和新裂隙发育很明显,这些作用导致应力松弛量大。因应变水平包含破坏点以后的区域,采用应力降和初始应力来分析应力降与应变水平关系并不能得到很好的规律,为进一步分析应力松弛随应变水平的变化规律,表 2 做出应力松弛水平随应变水平变化规律并进行曲线拟合,如图 7 所示。随着应变水平的增加,应力松弛水平也逐渐增加。曲线拟合表明,采用指数形式可以较好地反映应力



松弛水平随应变水平的变化规律。这一结论与田洪铭<sup>[16]</sup>在高围压三轴压缩松弛试验得到的规律相一致。

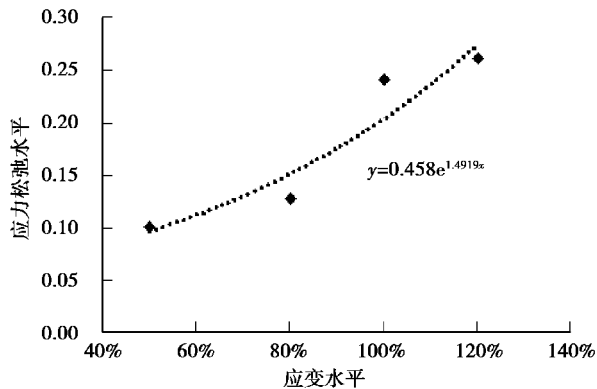


图 7 应力松弛水平随应变水平的变化规律

Fig. 7 Variation of relaxation stress level with strain level

### 2.2.3 分级加载应力松弛

分级加载应力松弛试验和分别加载相同,应变水平分别为 50%、80%、100% 和 120%。每一级加载时间均为 40 000 s,试验总时间约为 45 h,应力随时间变化曲线如图 8 所示。在峰值处的应力松弛试验是很难控制的,主要原因是:在试验过程中,很难精确地达到峰值处,在预设为峰值处的松弛试验,有些是在峰值应变前开始了松弛试验,有些是在峰值应变后(即应力下降阶段)开始应力松弛试验。这主要是因为不同试件之间峰值强度的差异造成的,也符合实际试验现象。

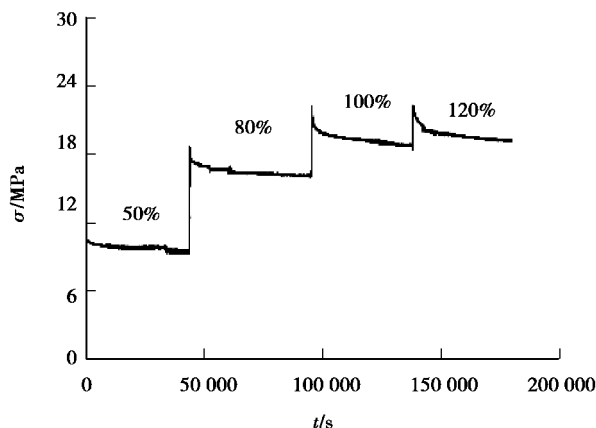


图 8 不同应变水平下应力降-时间曲线(分级加载)

Fig. 8 Stress drop-time curve at different strain level of Tage tuff (multi-stage loading)

从图 8 可以看出,峰值处的应力松弛并未达到真实的破坏点,即此试验中峰值处应力松弛初始应力为 22.20 MPa,在经历了 40 000 s 松弛时间后,继续施加荷载,应力和应变都继续增加,在应力达到

22.8 MPa(真实破坏强度)时,应力急剧下降,在峰后 120%应变水平下(应力为 22.01 MPa)停止加载,保持应变不变,执行峰后 120%应变水平下的应力松弛试验。从而峰值处的应力松弛是在峰前 97.4%(22.2 MPa/22.8 MPa)真实破坏点处开始的。本文近似地认为是 100%应变水平下的应力松弛试验。分级加载应力松弛试验由于持续试验时间长,裂纹发育较为明显,对试件的有一定的损伤作用,再加上不同试件本身性质的离散性,故分级加载松弛试验得到的结果与分别加载有一定的差异,但表现出的变化规律基本相似。在图 8 中,为对比分析 4 个应变水平下应力下降的情况,从 4 个应力松弛启动点开始,把 4 个应变水平下的应力松弛曲线进行分离(即把图 8 中 80%、100%、120%应变水平下的应力松弛曲线沿时间轴向左移动到  $t=0$  时刻处),如图 9 所示。120%应变水平下(启动点应力为 22.01 MPa)的应力松弛量小于 100%(启动点应力为 22.20 MPa)应变水平下的应力松弛量,和图 6 所述一样,试件达到峰值强度后发生破坏,试件内部裂隙急速发育,出现局部应力突降现象,导致应力急速降低。刚开始阶段,120%应变水平下应力降速率要大于 50%、80%和 100%应变水平下的应力降速率,达到稳定阶段后,4 个应变水平下的应力降分别为 1.38 MPa、2.47 MPa、3.40 MPa 和 2.90 MPa。

分级加载下田下凝灰岩应力松弛变化规律同分别加载试验结果基本相似,整个松弛过程也可分为快速松弛、减速松弛、稳定三个阶段。

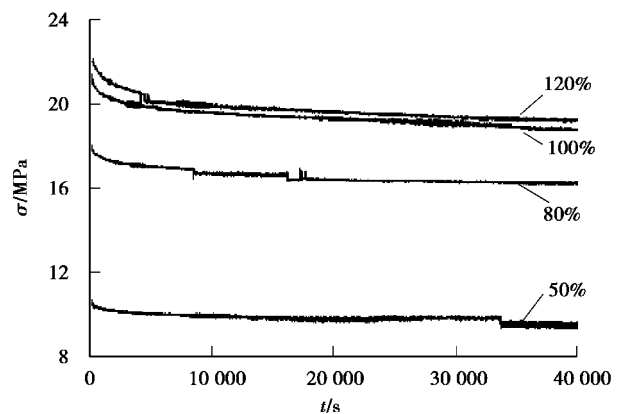


图 9 不同应变水平下应力降-时间曲线(分级加载)

Fig. 9 Stress drop-time curves at different strain level (multi-stage loading)

各级应变水平下试样的初始应力、剩余应力比、应力降及应力松弛水平(应力降/初始应力)列

于表3。

表3 分级加载下不同应变水平下应力松弛参数

应变水平/%	初始应力/MPa	剩余应力/MPa	剩余应力比/%	应力降/MPa	松弛水平/%
50	11.02	9.64	0.87	1.38	0.125
80	18.67	16.20	0.87	2.47	0.132
100	22.20	18.80	0.85	3.40	0.153
120	22.01	19.11	0.87	2.90	0.132

表2和表3(图6和图9)对比发现,分别加载与分级加载应力松弛规律性基本一致。在峰值前区域,应力降逐渐增加,应力松弛水平逐渐增加,剩余应力比逐渐减小。应变水平为120%时,分别加载与分级加载时初始应力分别为18.05 MPa和22.01 MPa,剩余应力分别为13.33 MPa和19.11 MPa,应力降分别为4.72 MPa和2.90 MPa,应力松弛水平分别为0.261和0.132。在破坏点以后的应力松弛参数大概相似,但还需要大量的试验来进行验证,作为未来研究课题。

分级加载应力松弛水平随应变水平变化规律如图10所示。分级加载应力松弛水平随应变水平的变化规律也可采用指数形式进行拟合,其规律与分别加载表现出相同的规律性,表现出随着应变水平的增加,应力松弛水平也逐渐增加。分别加载应力松弛所需试件数量较多,试验时间较长,从而后续研究中可考虑通过分级加载条件下应力松弛特性来近似分析分别加载条件下应力松弛特性。

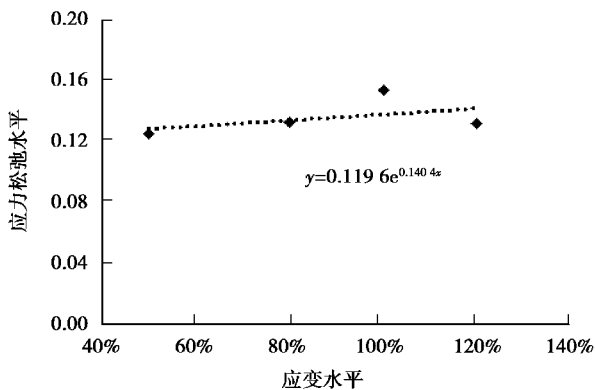


图10 应力松弛水平随应变水平的变化规律(分级加载)

Fig. 10 The variation of relaxation stress level with strain level (multi-stage loading)

### 3 田下凝灰岩应力松弛数值模拟

#### 3.1 可变模量本构方程

选择非线性 Spring 模型(如图11所示)对田下凝灰岩应力松弛试验进行数值模拟<sup>[17]</sup>。图中, $\sigma$ 、 $\varepsilon$ 为弹簧所受到的应力和应变。此处定义了一个不同于杨氏模量 $E$ 的可变模量 $\lambda$ ,其初值为弹簧弹性系数的倒数。其出发点主要有两个:一是通常所说的杨氏模量 $E$ ,在压缩试验的应力-应变曲线上,一般应用于破坏强度点以前的区域。为了便于论及破坏强度点以后的岩石特性,故在本构方程式中采用了广义意义上的模量 $\lambda$ ,简称模量(Compliance);二是在数式的解析过程中,用 $\lambda$ 来表示后有较多的方便之处。

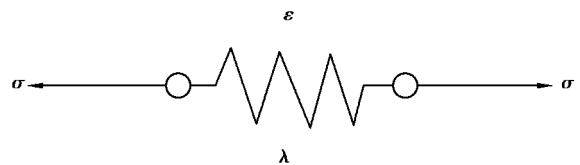


图11 非线性 Spring 模型

Fig. 11 Non-linear Spring model

可变模量本构方程如下:

$$\varepsilon = \lambda \cdot \sigma \quad (1)$$

$$d\lambda/dt = a(\lambda)^m(\sigma)^n \quad (2)$$

式中: $t$ 表示时间; $\sigma$ 表示应力; $\varepsilon$ 表示应变; $a$ 、 $m$ 、 $n$ 表示系数。

#### 3.2 应力松弛条件下本构方程解析解

在应力松弛中,由式(1)和式(2)求得应力松弛解析解如式(3)所示,在应变水平 $\varepsilon_1$ 下,其随着时间的增加应力逐渐减小。

$$\sigma = \left[ -a(m-n-1)\varepsilon_1^{m-1}t\left(\frac{\varepsilon_1}{\lambda_1}\right)^{(m-n-1)} \right] \frac{1}{m-n-1} \quad (3)$$

式(3)用来对田下凝灰岩应力松弛进行数值模拟。

#### 3.3 数值计算的参数

$\lambda_1$ :为模量 $\lambda$ 的初始值,即全应力-应变曲线50%峰值处切线模量的倒数值。

$m$ :由全应力-应变峰后曲线的斜率得到。

$a$ :控制可变模量 $\lambda$ 增加速率的参数, $a$ 越大, $\lambda$ 增加速率越大。 $a$ 在应力松弛实验中通过试差法进行确定。

$n$ :表示强度的荷载速率依存性系数,可根据

交替荷载速率试验得到,如式(4)所示。其中  $c_1$ 、 $c_2$  表示高低不同荷载速率,  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  表示对应的峰值强度<sup>[18-21]</sup>。

$$\sigma_2/\sigma_1 = (c_2/c_1) \frac{1}{n+1} \quad (4)$$

### 3.4 田下凝灰岩数值计算结果

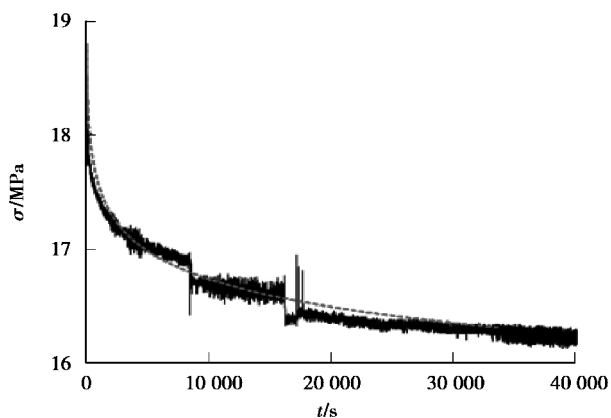
根据 3.4 参数计算方法,田下凝灰岩应力松弛数值计算参数值如表 4 所示。

表 4 应力松弛试验计算参数值

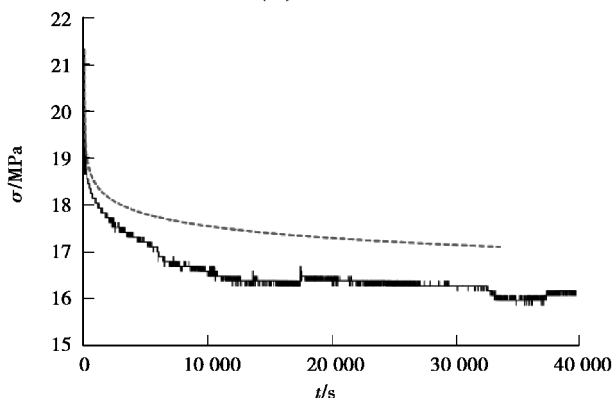
Table 4 Calculated parameter values of Tage tuff

参 数	$a$	$m$	$n$	$\lambda_1$	$\sigma/\text{MPa}$
取值	6	-4	42	1	23.5

表 4 中  $\sigma$  为田下凝灰岩单轴压缩强度,本文对分别加载和分级加载应力试验中应变水平为 80%、峰值处的应力松弛试验曲线进行数值模拟,如图 12 所示。



(a) 80%应变水平



(b) 峰值应变水平

图 12 田下凝灰岩应力松弛计算结果 (分别加载)

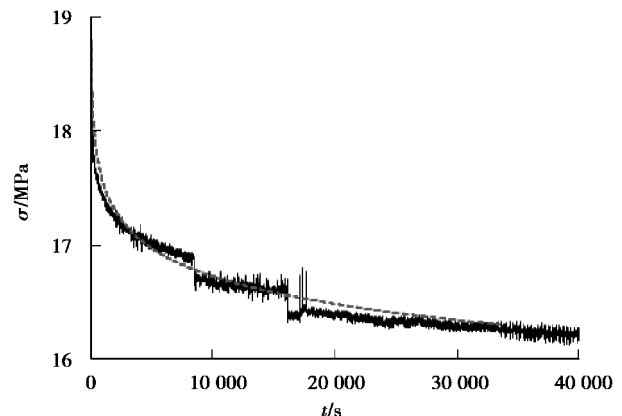
Fig. 12 Calculated results of relaxation for Tage tuff (single-stage loading)

### 3.4.1 分别加载

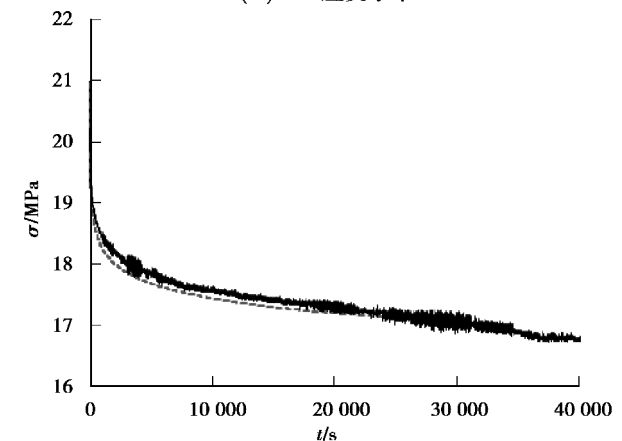
图 12(a) 为分别加载 80% 应变水平下应力松弛试验曲线和计算曲线。由试验曲线可以看出,松弛过程中应力出现了两次轻微突降,这是由于试件内部裂隙扩张,能量释放导致应力降低,但整体计算结果和试验结果一致性很好。图 12(b) 为分别加载峰值应变水平下应力松弛试验曲线和计算曲线。松弛初始阶段,计算结果和试验结果下降都比较快,并且一致性较好,但在 5 000 s 后,计算结果明显大于试验结果。

### 3.4.2 分级加载

图 13(a) 为分级加载 80% 应变水平下应力松弛试验曲线和计算曲线,同图 12(a) 相同,其计算结果和试验结果一致性很好。图 13(b) 为分级加载峰值应变水平下应力松弛试验曲线和计算曲线。松弛全阶段,计算结果和试验结果一致性很好,下降都比较快,并且一致性较好,但在 5 000 s 后,计算结果明显大于试验结果。



(a) 80%应变水平



(b) 峰值应变水平

图 13 田下凝灰岩应力松弛计算结果 (分级加载)

Fig. 13 Calculated results of relaxation for Tage tuff (multi-stage loading)

## 4 讨论

### 4.1 峰值处应力松弛试验

由于伺服试验机长期稳定性和试件的差异性等原因,在以往的研究中峰值处应力松弛试验是非常难实现的,并且要求试验者对应力松弛试验操作非常熟练。本文应力松弛试验采用自主研发的岩石力学试验系统,该系统用 KYOWA 的 CDV-900A 荷载放大器来采集应力数据。首先重复执行田下凝灰岩强度试验,得到田下凝灰岩破坏强度的平均值,再执行峰值处的应力松弛试验,当试件加载到强度破坏点附近时,仔细观察荷载放大器显示的应力值,当应力上升后急剧下降,那么立即控制住试验机,执行峰值处应力松弛试验,即峰值处的应力松弛试验启动点总在真实峰值处后。对于实际上还未达到真实的峰值处,由于试件内部缺陷等原因导致荷载放大器显示在峰值处前应力下降的情况,试验者往往认为已经达到真实的峰值处从而执行应力松弛试验,需要结合破坏强度试验综合考虑峰值处应力松弛启动点。

### 4.2 可变模量本构方程

本文使用基于弹簧模型的可变模量本构方程,对分别加载时 80% 应变水平下和分级加载时 80% 应变水平和峰值处应力松弛能够很好地进行模拟,且数值计算时参数少。但对分级加载时峰值处应力松弛的计算结果不好,计算结果大于试验结果。其原因既有试件的问题,也有计算模型的问题,还需要在未来研究中继续通过大量的应力松弛试验来验证。

## 5 结论

(1) 对分别和分级加载方式进行的应力松弛试验进行了描述,研究发现:随着应变水平的增加,应力松弛水平也逐渐增加,尽管分别加载和分级加载应力松弛试验结果有一定的差异,但应力松弛的整体规律基本相似。

(2) 对不同区域启动点的应力松弛特性进行了讨论,得到在峰值处、峰值后的应力松弛特与峰值前的基本相似,表明可以用峰前区域的应力松弛特性来研究峰值处和峰值后区域的应力松弛特性。

(3) 通过基于弹簧模型的可变模量本构方程对田下凝灰岩不同区域启动点的应力松弛试验进行了数值模拟,试验结果和计算结果一致性较好,将来在进行事前评估地下建筑物的长期稳定性时,

可以用此模型来预测工程流变破坏寿命等。

### 参考文献(References)

- [1] 杨圣奇. 裂隙岩石力学特性研究及时间效应分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (Yang Shengqi. Mechanical properties and time effect analysis of fractured rocks [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [2] 王军保, 刘新荣, 王铁行. 灰质泥岩蠕变特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(4): 770-775. (Wang Junbao, Liu Xinrong, Wang Tiehang. Experimental study on creep property of lime mudstone [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(4): 770-775. (in Chinese))
- [3] 宋勇军, 雷胜友, 邹翀, 等. 干燥与饱水状态下炭质板岩蠕变特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 619-625. (Song Yongjun, Lei Shengyou, Zou Chong, et al. Study on creep characteristics of carbonaceous slates under dry and saturated states [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 619-625. (in Chinese))
- [4] 李永盛. 单轴压缩条件下四种岩石的蠕变和松弛试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(1): 39-47. (Li Yongsheng. Creep and relaxation of four kinds of rocks under uniaxial compression tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(1): 39-47. (in Chinese))
- [5] 苏承东, 陈晓祥, 袁瑞甫. 单轴压缩分级松弛作用下煤样变形与强度特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1135-1141. (Su Chengdong, Chen Xiaoxiang, Yuan Ruifu. Analysis of deformation and strength characteristics of coal samples under uniaxial compression of stepped relaxation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1135-1141. (in Chinese))
- [6] 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 Lizhong, Pan Changliang. 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))
- [7] 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 Huaichang, Zhou Min, Liu Handong, 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))
- [8] 杨春和, 殷建华, Daemen J J K. 盐岩应力松弛效应的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 262-265. (Yang Chunhe, Yin Jianhua, Daemen J J K. Investigation on stress relaxation of salt rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(3): 262-265. (in Chinese))
  - [9] 张泷, 刘耀儒, 杨强. 基于内变量热力学的岩石蠕变与应力松弛研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 755-762. (Zhang Long, Liu Yaoru, Yang Qiang. Creep and relaxation of rock mass based on thermodynamics with internal state variables [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 755-762. (in Chinese))
  - [10] Okubo S, Fukui K. An analytical investigation of a variable-compliance-type constitutive equation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2006, 39(3): 233-253.
  - [11] Wawersik W, Fairhurst C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1970, 7(5), 561-575.
  - [12] 陈云娟, 朱维申, 王知深, 等. 裂隙岩体表征单元体的确定及工程应用[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(1): 25-29. (Chen Yunjuan, Zhu Weishen, Wang Zhishen, et al. Determination of representative elementary volume of fractured rock mass and its engineering application [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(1): 25-29. (in Chinese))
  - [13] 张骞, 李术才, 李利平, 等. 岩石三轴压缩峰后曲线与抗剪强度参数关系探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 642-646. (Zhang Qian, Li Shucai, Li Liping, et al. Discussion on relationship between post-peak curves and shear strength parameters of rock subjected to triaxial compression [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 642-646. (in Chinese))
  - [14] 张海龙, 许江, 大久保诚介, 等. 基于应力归还控制的岩石荷载速率依存性研究[J]. 岩石力学与工程, 2017, 36(1): 93-106. (Zhang Hailong, Xu Jiang, Okubo S, et al. Research on loading-rate dependence of rocks by stress-feedback controlling method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 93-106. (in Chinese))
  - [15] 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): 60-70. (Yu Huaichang, Li Yali, Liu Handong, et al. 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): 60-70. (in Chinese))
  - [16] 田洪铭, 陈卫忠, 肖正龙, 等. 泥质粉砂岩高围压三轴压缩松弛试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1433-1439. (Tian Hongming, Chen Weizhong, Xiao Zhenglong. Analysis of triaxial stress relaxation properties of argillaceous siltstone under high confining pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1433-1439. (in Chinese))
  - [17] 金丰年, 钱七虎. 隧洞开挖的三维有限元计算[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 193-200. (Jin Fengnian, Qian Qihu. Simulation of three-dimension of tunnel excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(3): 193-200. (in Chinese))
  - [18] 雷鸣, 羽柴公博, 福井胜则, 等. 压密试验中破碎岩石压密特性的本构方程及数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1258-1265. (Lei Ming, Hashiba K, Fukui K, et al. Constitutive equation and numerical simulation analysis for broken rock behaviors in compaction test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1258-1265. (in Chinese))
  - [19] Okubo S, Fukui K. Brief note on a set of constants in a variable-compliance-type constitutive equation [J]. Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan, 1997, 113: 561-564. (in Japanese)
  - [20] Okubo S, Fukui K, Gao X. Rheological behaviour and model for porous rocks under air-dried and water-saturated conditions [J]. The Open Civil Engineering Journal, 2008, 2(1): 88-98.
  - [21] Okubo S, Fukui K. Applicability of the variable-compliance-type constitutive equation to rock breakage by excavation machinery [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(1): 29-37.