

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.10.016

海棠山隧道砂岩变参数蠕变特性研究

张树光, 孙成鑫, 王有涛, 林晓楠

(辽宁工程技术大学 土木与交通学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:采用TAW-2000电液伺服岩石三轴试验仪对海棠山隧道砂岩试样进行了分级加载蠕变试验,基于改进的西原模型建立了描述衰减蠕变与稳定蠕变阶段的变参数蠕变方程,并对蠕变参数的变化规律进行了拟合分析。研究表明,试验曲线与模型计算曲线相吻合,试样在低应力状态下的蠕变过程具有明显的衰减蠕变与稳定蠕变阶段,在高应力状态下出现加速蠕变阶段,但最终变形量小于常规三轴极限应变值。基于试验结果拟合出了不同应力状态下不同时刻的蠕变参数及蠕变参数随应力及时间变化的数学表达式,蠕变参数的变化能较好地反映衰减蠕变阶段与稳定蠕变阶段岩石结构的劣化过程,说明了该蠕变方程能较好地模拟砂岩衰减蠕变与稳定蠕变阶段的蠕变特性。

关键词:隧道工程;蠕变特性;蠕变试验;砂岩;变参数蠕变

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2016)10-0104-07

Study on Variable Parameter Creep Characteristics of Sandstone in Haitangshan Tunnel

ZHANG Shu-guang, SUN Cheng-xin, WANG You-tao, LIN Xiao-nan

(School of Civil and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China)

Abstract: Utilizing the TAW-2000 electro-hydraulic servo rock 3-triaxial test instrument, the step load creep test on sandstone of Fuxin Haitangshan tunnel is carried out. Based on the improved Nishihara creep model, the variable parameter creep equation for describing the decay and steady creep stages is established, and the variation law of creep parameters is fitted and analyzed. The research result indicates that (1) the model calculated curves agrees well with the experimental curves; (2) the sample obviously experiences the decay and steady creep periods under lower stress state, and soon appeared the accelerated creep period under higher stress, but the final deformation is less than the ultimate strain value under conventional triaxial compression test. Based on the experimental result, the creep parameters under different time and stresses are fitted out, then the mathematical expressions about the creep parameters vary with stress and time are fitted out. The variation of creep parameters could better reflect the deterioration process of the rock structure in decay and steady creep stages, which indicating that this creep equation can well simulate the creep characteristics of sandstone in decay and steady creep stages.

Key words: tunnel engineering; creep characteristic; creep test; sandstone; variable parameter creep

0 引言

随着地下工程向深部发展,地下围岩在复杂地应力作用下表现出的随时间大变形、难支护以及失

稳破坏等工程问题日益增多,因此在岩基、边坡、水利工程以及隧道等地下工程领域进行岩石工程流变学的研究具有重要的价值^[1-6]。

为了掌握岩石的流变特性,特别是研究围岩变

收稿日期: 2015-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274109)

作者简介: 张树光(1974-),男,山东广饶人,博士,教授。(zhangshuguang168@163.com)

形失稳的破坏机理, 广大岩土科技人员从试验与理论出发, 做了大量的研究工作: 徐卫亚^[7]等基于绿片岩三轴蠕变试验, 将非线性黏塑性体与五元线性黏塑性模型串联, 建立了河海模型, 并对岩石非线性蠕变与松弛特性进行了研究; 王来贵^[8]等以改进的西原正夫模型为基础, 建立了参数非线性蠕变模型, 并通过局部线性化, 得出了改进西原正夫模型的稳定条件; 崔希海^[9]等通过对红砂岩的单轴蠕变试验, 研究轴向与横向蠕变规律的差异, 提出岩石的长期强度应根据横向稳定蠕变的阈值应力来确定; 薛凯喜、沈明荣^[10]等对红砂岩进行单轴压缩蠕变试验, 提出了确定岩石长期强度的新方法, 预测了岩石在荷载作用下可能破坏的时间。李亚丽^[11]等基于粉砂质泥岩三轴压缩蠕变试验, 分析了蠕变特性, 并引入非线性黏塑性元件建立非线性 Burgers 模型, 对试验曲线进行了辨识。

目前关于岩石流变问题的研究大多将流变参数视为常数, 而在实际的复杂三维地质条件下, 这些力学参数往往随应力和时间而发生变化^[12-14]。因此, 孙钧院士^[15]提出由试验结果来确定非正常的蠕变参数, 再进行非线性流变本构关系的分析计算。本文拟通过砂岩三轴蠕变试验, 基于改进的西原模型建立变参数蠕变方程, 分析蠕变参数随应力状态与时间的变化规律。

1 三轴蠕变试验

试验试样采自阜盘高速公路海棠山特长隧道的砂岩地层, 试样质地均匀、无明显层理, 完整性与均匀性较好。将试样加工制作成直径 50 mm, 高 100 mm 的圆柱体共 20 块。试样的加工精度严格按照《岩石试验方法标准》(GB50218—94) 进行。在试样的轴向长度方向上, 直径误差不超出 0.3 mm, 两端面的不平行度最大不超过 0.05 mm 且垂直于试样轴线, 最大偏差不超过 0.25°。试件制备完成后, 对外观上有缺陷、差别明显的试件进行剔除并按照上述精度要求筛选, 最后选择 8 个波速相近的岩样作为三轴蠕变用试件。对其中 6 个试件进行常规三轴试验, 测得该种砂岩平均密度为 2.35 g/cm³, 围压 10 MPa 情况下平均抗压强度为 89 MPa, 平均极限应变为 0.348%。围压 15 MPa 情况下平均抗压强度为 114 MPa, 平均极限应变量为 0.355%。

本次蠕变试验利用 TAW-2000 电液伺服岩石三轴试验机, 如图 1 所示, 采用分级加载方式, 分级荷载依次均增加 10 MPa, 加载速率设定为 0.5 MPa/s, 数

据采样间隔为 1 min。



图 1 TAW-2000 电液伺服岩石三轴试验机
Fig. 1 TAW-2000 electro-hydraulic servo rock 3-triaxial test machine

在围压为 10 MPa 情况下, 各级荷载作用下的蠕变均在瞬时变形之后出现, 在 70 MPa 应力作用下出现了衰减蠕变、稳定蠕变与加速蠕变阶段, 持续时间为 3.38 h, 远远小于前 3 级荷载作用时间, 最终的应变量为 0.283%, 小于常规三轴作用下的极限变形量, 在实际工程中应该得以重视。通过计算蠕变曲线前 3 级荷载作用下的蠕变速率可以发现, 第 1 级荷载 (40 MPa) 作用下试样出现了瞬时变形与衰减蠕变阶段, 最终蠕变速率为 0.002%; 第 2 级荷载 (50 MPa) 与第 3 级荷载 (60 MPa) 作用下出现了瞬时变形、衰减蠕变与稳定蠕变阶段, 最终蠕变速率分别为 0.017% 和 0.02%, 试验曲线如图 2 (a) 所示。

围压为 15 MPa 情况下, 在 90 MPa 应力作用下出现了衰减蠕变、稳定蠕变与加速蠕变阶段, 持续时间为 17.28 h, 最终的应变量为 0.299%, 同样小于常规三轴作用下的极限变形量。第 1 级荷载 (50 MPa) 与第 2 级荷载 (60 MPa) 作用下试样出现了瞬时变形与衰减蠕变阶段, 最终蠕变速率均小于 0.001%; 第 3 级荷载 (70 MPa) 与第 4 级荷载 (80 MPa) 作用下出现了瞬时变形、衰减蠕变与稳定蠕变阶段, 最终蠕变速率分别为 0.012% 和 0.018%, 试验曲线如图 2 (b) 所示。

2 变参数蠕变方程

为了更好地描述加速蠕变阶段, 引入文献 [16] 提出的变截面阻尼器组成的非线性黏壶元件, 得到改进的西原体模型 (图 3)。

改进后的西原体模型由虎克体、开尔文体与一个非线性黏塑性体串联而成。 E_1 控制瞬时变形的大小; E_2 控制黏弹性变形的极限值; η_1 控制由衰减蠕变过渡到稳定蠕变的快慢程度; η_2 控制稳定蠕变阶段的变形速率, 只有当外荷载超过长期强度 σ_s 时才

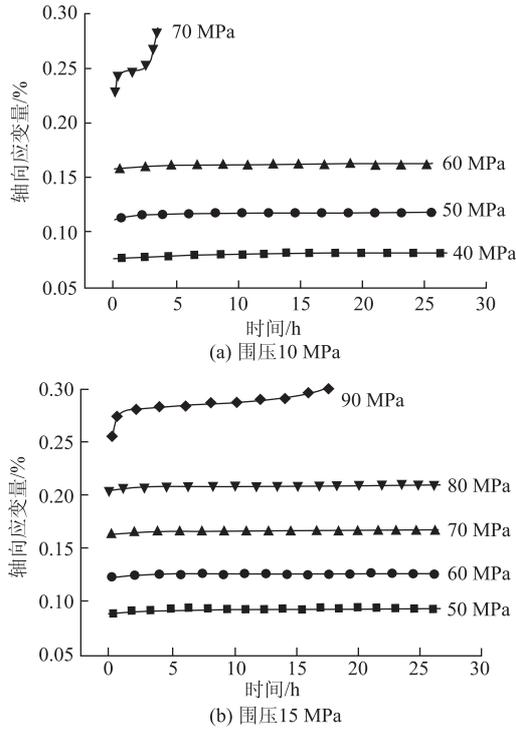


图2 砂岩试样蠕变曲线

Fig. 2 Creep curves of sandstone sample

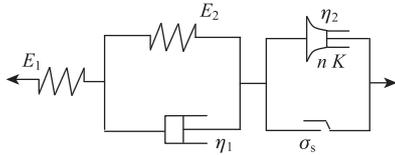


图3 改进的西原体模型

Fig. 3 Modified Nishihara model

起作用。非线性塑性流动部分的本构模型^[16]:

$$\dot{\varepsilon}_3 = \frac{K(\sigma - \sigma_s)}{\eta_2} t^n, \quad (1)$$

式中, $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; K 为加速时机参数; η_2 为黏性系数; t 为加载时间; n 为破坏特征参数, n 取值越大, 蠕变加速度越大。

假定加速蠕变起始时间为 t_c , 对式 (1) 分别在 $[0, t_c]$ 和 $[t_c, \infty]$ 积分得:

$$\varepsilon_3 = \begin{cases} \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2} t, & t \in [0, t_c] \\ \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2 t_c^n} t^{n+1}, & t \in [t_c, \infty) \end{cases}, \quad (2)$$

结合开尔文体的蠕变方程, 依据串联法则得出改进西原体模型的一维蠕变方程如下:

当 $\sigma < \sigma_s$ 时:

$$\frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_1} t\right) \right], \quad (3)$$

式中, E_1 为虎克体的弹性模量; E_2 为开尔文体的弹性模量。

当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_1} t\right) \right] + \begin{cases} \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2} t, & t \in [0, t_c] \\ \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2 t_c^n} t^{n+1}, & t \in [t_c, \infty) \end{cases}. \quad (4)$$

在三维应力状态下, 考虑到球应力仅引起体积应变不引起形状畸变, 偏应力引起形状畸变而不引起体积应变, 且忽略岩石的体积变化, 因此令偏应力 $S = \sigma_1 - \sigma_3$ ^[16], 并带入上述蠕变方程, 得到轴向蠕变方程为:

当 σ_s 时:

$$\varepsilon = \frac{S}{E_1} + \frac{S}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_1} t\right) \right]; \quad (5)$$

当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时:

$$\varepsilon = \frac{S}{E_1} + \frac{S}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_1} t\right) \right] + \begin{cases} \frac{S - \sigma_s}{\eta_2} t, & t \in [0, t_c] \\ \frac{S - \sigma_s}{\eta_2 t_c^n} t^{n+1}, & t \in [t_c, \infty) \end{cases}. \quad (6)$$

在实际工程中, 岩石在复杂地质条件作用下, 其物理力学参数明显随应力以及时间发展而变化, 试验已证实, 弹性模量、强度和黏性等参数通常都会随时间的增长而降低^[15], 因此将蠕变参数表示为应力与时间的函数表达式更为符合岩石材料本质属性, 进而可得到变参数蠕变方程:

当 $\sigma < \sigma_s$ 时:

$$\frac{S}{E_1(S, t)} + \frac{S}{E_2(S, t)} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{E_2(S, t)}{\eta_1(S, t)} t\right] \right\}; \quad (7)$$

当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时:

$$\varepsilon = \frac{S}{E_1(S, t)} + \frac{S}{E_2(S, t)} \left\{ 1 - \exp\left[\frac{E_2(S, t)}{\eta_1(S, t)}\right] \right\} + \begin{cases} \frac{(S - \sigma_s)t}{\eta_2(S, t)}, & t \in [0, t_c] \\ \frac{(S - \sigma_s)t^{n+1}}{\eta_2(S, t)t^n}, & t \in [t_c, \infty) \end{cases}. \quad (8)$$

3 蠕变参数

3.1 蠕变参数确定

当 $t \rightarrow 0$ 时, 瞬时弹性应变为 $\varepsilon_0 = S/E_1$, 通过试

验曲线的起始弹性应变值确定各级应力状态下的 E_1 。在恒定的应力作用下, 蠕变参数只与时间 t 有关系。

针对围压为 10 MPa 情况下的试验曲线, 在前 3 级荷载作用下取 $t=0, 2, 5, 10, 15, 20, 25$ h, 在第 4 级荷载作用下取 $t=0, 1, 2, 3$ h, 认为在各时刻附近的 30 min 区间内蠕变参数没有变化。针对此区间内试验数据, 运用 origin 软件基于最小二乘法原理, 根据各应力水平, 分别利用式(5)或式(6)求出各个蠕变参数的数值, 围压为 10 MPa 时不同轴向应力状态下的蠕变参数计算结果见表 1~表 4。

表 1 $\sigma_z=40$ MPa 时的蠕变参数 ($\sigma_3=10$ MPa)

Tab.1 Creep parameters when $\sigma_z=40$ MPa ($\sigma_3=10$ MPa)

t/h	E_1/GPa	E_2/GPa	$\eta_1/$ (GPa·h)	微应变/ $\mu\varepsilon$	
				试验值	计算值
0	39.9	—	—	752	752
2	39.9	791.88	974.46	782	782.3
5	39.9	603.32	1 570.15	794	794.3
10	39.9	498.19	2 324.78	805	805
15	39.9	472.64	2 703.23	810.8	810.7
20	39.9	461.17	2 932.78	814.1	814.1
25	39.9	449.28	3 283.38	816.4	816.5

表 2 $\sigma_z=50$ MPa 时的蠕变参数 ($\sigma_3=10$ MPa)

Tab.2 Creep parameters when $\sigma_z=50$ MPa ($\sigma_3=10$ MPa)

t/h	$E_1/$ GPa	$E_2/$ GPa	$\eta_1/$ (GPa·h)	$\eta_2/$ (GPa·h)	微应变/ $\mu\varepsilon$	
					试验值	计算值
0	35.4	—	—	—	1 129.9	1 129.9
2	35.4	1 105.6	1 288.9	78 635.7	1 159	1 159.2
5	35.4	1 019.7	1 672.7	75 045.8	1 170.4	1 170.3
10	35.4	938.2	2 205.1	71 451.2	1 179	1 179
15	35.4	780.7	2 827.2	67 121.5	1 182.5	1 182.5
20	35.4	761.1	3 543.3	64 074.0	1 183.8	1 183.8
25	35.4	760.3	3 799.5	60 684.9	1 184.8	1 184.9

表 3 $\sigma_z=60$ MPa 时的蠕变参数 ($\sigma_3=10$ MPa)

Tab.3 Creep parameters when $\sigma_z=60$ MPa ($\sigma_3=10$ MPa)

t/h	$E_1/$ GPa	$E_2/$ GPa	$\eta_1/$ (GPa·h)	$\eta_2/$ (GPa·h)	微应变/ $\mu\varepsilon$	
					试验值	计算值
0	32.0	—	—	—	1 562.5	1 562.5
2	32.0	1 718.7	1 253.6	86 435.1	1 593.8	1 593.7
5	32.0	1 552.1	1 856.4	79 547.3	1 604.7	1 604.4
10	32.0	1 328.7	2 544.2	72 277.4	1 613.0	1 612.8
15	32.0	1 149.6	3 314.3	67 102.3	1 616.0	1 616.0
20	32.0	918.5	4 161.5	65 213.6	1 620.3	1 621.2
25	32.0	833.9	4 783.2	63 588.7	1 621.4	1 621.4

表 4 $\sigma_z=70$ MPa 时的蠕变参数 ($t_c=2.6$ h, $n=10$)

Tab.4 Creep parameters when $\sigma_z=70$ MPa ($t_c=2.6$ h, $n=10$)

t/h	$E_1/$ GPa	$E_2/$ GPa	$\eta_1/$ (GPa·h)	$\eta_2/$ (GPa·h)	微应变/ $\mu\varepsilon$	
					试验值	计算值
0	29.0	—	—	—	2 068	2 068
1	29.0	188.10	3.18	865.72	2 418.9	2 418.8
2	29.0	176.31	8.64	1 502.37	2 444.3	2 444.8
3	29.0	152.28	12.72	5 347.47	2 526.7	2 526.6

限于篇幅围压为 15 MPa 时蠕变参数的计算值不再一一列出。围压为 10 MPa 和 15 MPa 时模型的计算结果与试验结果对比分别见图 4, 二者均具有良好的吻合性。

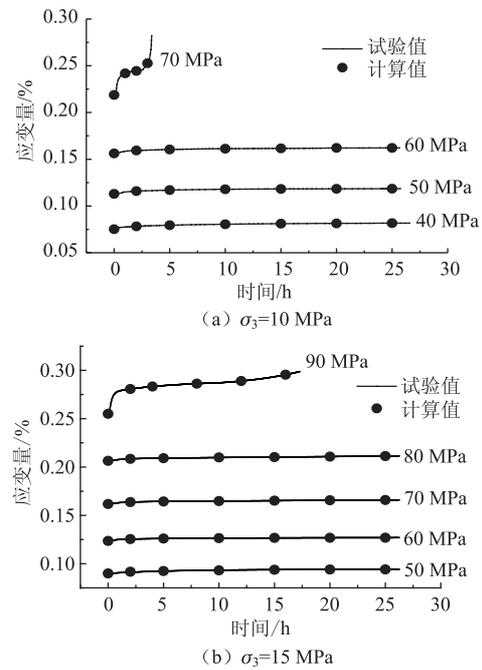


图 4 试验结果与计算值对比

Fig. 4 Contrast of experimental result with calculated values

在围压为 10 MPa 情况下, 前 3 级荷载作用下 E_2 值随时间增长逐渐降低, 说明试件内部损伤逐渐加剧, 但在相同时刻的 E_2 值随应力水平增加而增加, 在相同荷载作用下 η_1 随时间逐渐增加, 这表明蠕变速率随时间逐渐减小, 在相同时刻 η_1 值随应力水平增加而增加。在相同荷载作用下 η_2 值随时间逐渐减小, 且相邻时刻之间的差值也越来越小表明稳定蠕变阶段的蠕变速率越来越稳定, 趋近于一个稳定值, 在相同时刻, η_2 随应力水平变化不大。在第 4 级荷载作用下, E_2, η_1, η_2 均远远小于前 3 级荷载作用下的数值, 这是由于出现加速蠕变阶段, 且形变对于时间与应力因素比较敏感引起的, E_2 随时间逐渐减小且变化不大, η_1, η_2 随时间逐渐增加。

在围压为 15 MPa 情况下, 砂岩试样的蠕变参数随围压增大均有不同程度的增大, 各参数随应力水平及时间的变化趋势与 10 MPa 情况下相一致。

3.2 蠕变参数变化规律

根据上面求得的蠕变参数, $E_2/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 、 $\eta_1/$

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 $\eta_2/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 随时间的变化特点, 针对围压为 10 MPa、应力水平为 40 MPa 和 60 MPa, 以及围压为 15 MPa、应力水平为 60 MPa 和 80 MPa 两种情况, 采用 origin 软件对蠕变参数的变化两种情况进行拟合, 计算结果分别见图 5 和图 6。

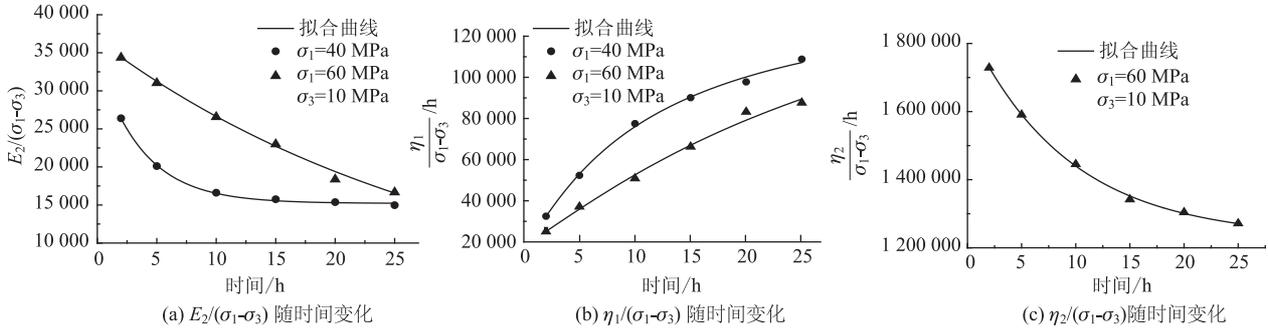


图5 $\sigma_3 = 10$ MPa 时蠕变参数拟合曲线与实验值对比

Fig. 5 Contrast of fitting curves of creep parameters with experiment values when $\sigma_3 = 10$ MPa

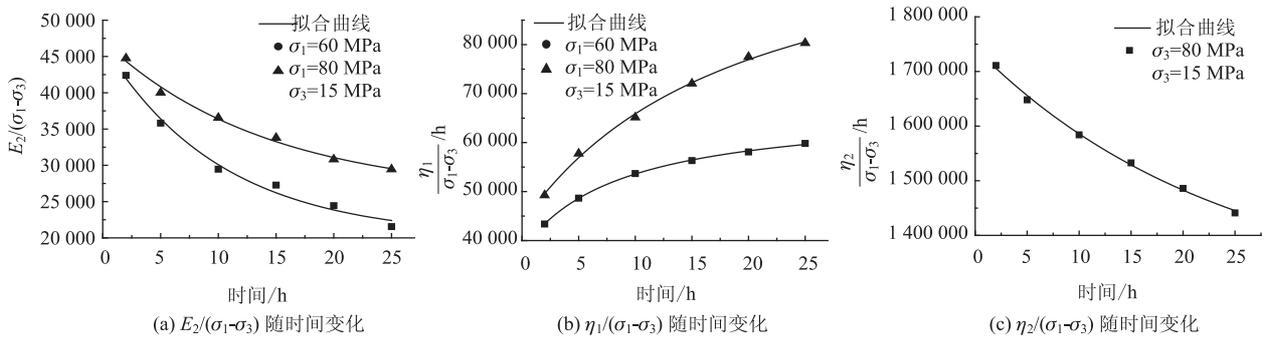


图6 $\sigma_3 = 15$ MPa 时蠕变参数拟合曲线与实验值对比

Fig. 6 Contrast of fitting curves of creep parameters with experiment values when $\sigma_3 = 15$ MPa

由图 4 和图 5 得到蠕变参数 E_2 、 η_1 以及 η_2 与应力及时间的关系表达式为:

$$E_2(S, t) = (\sigma_1 - \sigma_3) \left[a_1 + b_1 \exp\left(-\frac{t}{c_1}\right) \right], \tag{9}$$

$$\eta_1(S, t) = (\sigma_1 - \sigma_3) \exp\left[a_2 + b_2 / (c_2 + t) \right], \tag{10}$$

$$\eta_2(S, t) = (\sigma_1 - \sigma_3) \left[a_3 + b_3 \exp\left(-\frac{t}{c_3}\right) \right], \tag{11}$$

式中, $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ 均为试验数据拟合参数, 依据本文试验得到的参数拟合结果见表 5。将 $E_2(S, t)$ 、 $\eta_1(S, t)$ 以及 $\eta_2(S, t)$ 代入蠕变方程式 (7) 与式 (8) 就可得到砂岩的变参数蠕变方程。

表 5 拟合参数的计算结果

Tab. 5 Calculation result of fitting parameters

σ_3 /MPa	σ_1 /MPa	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	c_1	c_2	c_3
10	40	15 213.6	11.9	—	19 013.1	-9.6	—	3.75	4.3	—
10	60	663.6	12.2	1.23E6	36 021.6	-29.4	6.21E6	30.59	12.3	9.23
15	60	25 896.7	11.6	—	21 241.8	-10.89	—	14.17	11.96	—
15	80	20 102.2	11.1	1.28E6	26 617.6	-3.71	4.58E5	10.20	6.53	23.90

4 结论

本文通过逐级加载砂岩三轴蠕变试验, 描述了

砂岩蠕变变形的特性, 建立了改进的西原体模型, 并在此基础上探讨了考虑应力与时间因素的蠕变参数非线性特性, 得到了以下结论:

(1) 砂岩试样低应力水平下的蠕变有衰减蠕变与稳定蠕变阶段, 而高应力水平作用下出现加速蠕变阶段且蠕变速率较快, 蠕变破坏时的变形量小于常规作用下的极限变形量, 在实际工程中应该得到重视。

(2) 基于改进的西原模型建立了砂岩试样的变参数砂岩蠕变方程, 描述衰减蠕变与稳定蠕变阶段是可行的, 经非线性拟合得到了蠕变参数随应力和时间变化的关系式。

(3) 控制瞬时变形的 E_1 随应力水平的增加而减小, 体现了逐级加载对岩石造成的损伤; 控制黏弹性变形极限值的 E_2 随时间逐渐降低, 随应力水平的增长而增加。

(4) 控制由衰减蠕变过渡到稳定蠕变的快慢程度的 η_1 随时间和应力水平增加而变大; 在低应力水平下控制稳定蠕变阶段的变形速率的 η_2 随时间逐渐减小, 在高应力水平下 η_2 随时间逐渐增加, 但随应力水平的变化不大, 蠕变参数的变化在一定程度上反映岩石结构发生劣化。

参考文献:

References:

- [1] 袁海平. 诱导条件下节理岩体流变断裂理论与应用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2006.
YUAN Hai-ping. Study on Rheologic Fracture of Jointed Rock Mass under Inducing Condition and Its Engineering Application [D]. Changsha: Central South University, 2006.
- [2] 丁秀丽, 付敬, 刘建, 等. 软硬互层边坡岩体的蠕变特性研究及稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (19): 12-20.
DING Xiu-li, FU Jing, LIU Jian, et al. Study on Creep Behavior of Alternately Distributed Soft and Hard Rock Layers and Slope Stability Analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (19): 12-20.
- [3] 王更峰, 张永兴, 熊晓晖, 等. 深埋大变形隧道炭质板岩蠕变特性试验 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (9): 95-102.
WANG Geng-feng, ZHANG Yong-xing, XIONG Xiao-hui, et al. Experiment of Creep Characteristics of Carbonaceous Slate of Deep-buried Tunnel with Large Deformation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (9): 95-102.
- [4] 伍国军, 陈卫忠, 贾善坡. 大型地下洞室围岩体蠕变参数位移反分析研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (增2): 4043-4049.
WU Guo-jun, CHEN Wei-zhong, JIA Shan-po. Displacement Back Analysis of Creep Parameters of Engineering Rock Mass in Large-scale Underground Chambers [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (S2): 4043-4049.
- [5] 任月龙, 才庆祥, 张永华, 等. 岩体蠕变对露天矿边坡稳定性的影响 [J]. 金属矿山, 2014 (5): 1-4.
REN Yue-long, CAI Qing-xiang, ZHANG Yong-hua, et al. Influence of Rock Mass Creep on Slope Stability in Surface Mine [J]. Metal Mine, 2014 (5): 1-4.
- [6] 吕志涛, 张生, 邓怡虎, 等. 围岩蠕变对隧道下穿建筑物施工变形的影响 [J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10 (6): 1380-1386.
LÜ Zhi-tao, ZHANG Sheng, DENG Yi-hu, et al. Influence of Surrounding Rock Creep on the Construction Deformation of Tunnel Undercrossing Buildings [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10 (6): 1380-1386.
- [7] 徐卫亚, 杨圣奇, 褚卫江. 岩石非线性黏弹塑性流变模型 (河海模型) 及其应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (3): 433-447.
XU Wei-ya, YANG Sheng-qi, CHU Wei-jiang. Nonlinear Viscoelasto-plastic Rheological Model (Hohai Model) of Rock and Its Engineering Application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (3): 433-447.
- [8] 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 Xi-hai, FU Zhi-liang. Experimental Study on Rheology Properties and Long-term Strength of Rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (5): 1021-1024.
- [9] 王来贵, 何峰, 刘向峰, 等. 岩石试件非线性蠕变模型及其稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (10): 1640-1642.
WANG Lai-gui, HE Feng, LIU Xiang-feng, et al. Non-linear Creep Model and Stability Analysis of Rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (10): 1640-1642.
- [10] 沈明荣, 谌洪菊. 红砂岩长期强度特性的试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (11): 3301-3305.
SHEN Ming-rong, CHEN Hong-ju. Testing Study of Long-term Strength Characteristics of Red Sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (11): 3301-3305.
- [11] 李亚丽, 于怀昌, 刘汉东. 三轴压缩下粉砂质泥岩蠕

- 变本构模型研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (7): 2035-2040, 2047.
- LI Ya-li, YU Huai-chang, LIU Han-dong. Study of Creep Constitutive Model of Silty Mudstone under Triaxial Compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (7): 2035-2040, 2047.
- [12] 阎岩, 王思敬, 王恩志. 基于西原模型的变参数蠕变方程 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (10): 3025-3035.
- YAN Yan, WANG Si-jing, WANG En-zhi. Creep Equation of Variable Parameters Based on Nishihara Model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (10): 3025-3035.
- [13] 张强勇, 杨文东, 张建国, 等. 变参数蠕变损伤本构模型及其工程应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (4): 732-739.
- ZHANG Qiang-yong, YANG Wen-dong, ZHANG Jianguo, et al. Variable Parameters-based Creep Damage Constitutive Model and Its Engineering Application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (4): 732-739.
- [14] 孔令伟, 何利军, 张先伟. 湛江黏土的蠕变模型与变参数塑性元件 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (8): 2241-2246.
- KONG Ling-wei, HE Li-jun, ZHANG Xian-wei. Creep Model of Zhanjiang Clay and Plastic Components with Variable Parameters [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (8): 2241-2246.
- [15] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (6): 1081-1106.
- SUN Jun. Rock Rheological Mechanics and Its Advance in Engineering Applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (6): 1081-1106.
- [16] 周长冰, 万志军, 张源, 等. 高温三轴应力下气煤蠕变特征及本构模型 [J]. 煤炭学报, 2012, 37 (12): 2020-2025.
- ZHOU Chang-bing, WAN Zhi-jun, ZHANG Yuan, et al. Creep Characteristics and Constitutive Model of Gas Coal Mass Under High Temperature and Triaxial Stress [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37 (12): 2020-2025.

(上接第103页)

- ZHOU Xu-hong, LIU Jie-peng, ZHANG Su-mei. Behavior of Circular Tubed Reinforced Concrete Stub Columns under Axial Compression [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (11): 53-59.
- [10] 程昌绪. 外包钢筋混凝土加固柱正截面承载力理论分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2003.
- CHENG Chang-xu. Theoretical Analysis of Load Capacity of Reinforced Concrete Columns Strengthened with Reinforced Concrete Cover [D]. Changsha: Hunan University, 2003.
- [11] 王元丰, 朱海斌, 韩冰. 钢管混凝土受弯构件徐变的设计计算公式 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (4): 105-107.
- WANG Yuan-feng, ZHU Hai-bin, HAN Bing. Design Method for Creep of Flexural Concrete Filled Steel Tubular Members [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (4): 105-107.
- [12] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究 [D]. 福州: 福州大学, 2005.
- LIU Wei. Research on Mechanism of Concrete-filled Steel Tubes Subjected to Local Compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.
- [13] 周志祥. 高等钢筋混凝土结构 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002: 26-28.
- ZHOU Zhi-xiang. Advanced Reinforced Concrete Structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2002: 26-28.
- [14] 韩林海, 冯九斌. 混凝土的本构关系模型及其在钢管混凝土数值分析中的应用 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1995, 28 (5): 26-31.
- HAI Lin-hai, FENG Jiu-bin. Constitutive Relations of Concrete and Its Applications in the Integral Analysis of Concrete Filled Steel Tube [J]. Journal of Harbin University of Architecture and Engineering, 1995, 28 (5): 26-31.
- [15] 尧国皇. 钢管混凝土构件在复杂受力状态下的工作机理研究 [D]. 福州: 福州大学, 2006.
- YAO Guo-huang. Research on Behaviour of Concrete-filled Steel Tubes Subjected to Complicated Loading States [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.