

板岩流变特性试验与模型辨识

刘学增^{1,2}, 王华牢³, 周敏¹, 苏京伟⁴

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学建筑设计研究院, 上海 200092;
3. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 4. 国核电力规划设计研究院, 北京 100032)

摘要: 针对江西武吉高速公路隧道的 II ~ V 级围岩, 通过分级增量循环加卸载试验、剪切流变试验和双轴压缩流变试验研究围岩的流变特性, 并对模型进行辨识. 试验结果表明 II ~ IV 级围岩具有过渡蠕变和定常蠕变过程, 表现为脆性破坏; V 级围岩则具有过渡蠕变、定常蠕变和加速蠕变过程, 表现为塑性破坏. 通过模型辨识, 采用广义 Kelvin 模型模拟 II ~ IV 级围岩, 采用非线性流变元件 NRC 模型与西原模型的串联模型模拟 V 级围岩, 可较好模拟围岩流变特性; 同时得到与应力水平有关的围岩流变力学参数. 模型辨识的方法可应用于板岩以外的其他岩石.

关键词: 岩石; 流变试验; 模型辨识; 围岩级别

中图分类号:

文献标识码: A

Rheological Tests of Slates and Model Identification of Rocks

LIU Xuezheng^{1,2}, WANG Hualao³, ZHOU Min¹, SU Jingwei⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Architecture Design and Research Institute of Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 4. State Nuclear Electric Power Planning Design and Research Institute, Beijing 100032, China)

Abstract: Circular increment step load and unload test, shear rheological test and two-axes compression test were carried out to study the rheological properties based on II - V grade surrounding rock of Wuji highway tunnels in Jiangxi Province. The test results show that II - IV grade surrounding rocks contain two creep sections, namely transitional creep and stability creep, and the failure behavior of the rocks is brittle fracture. V grade surrounding rock contains three creep sections, namely transitional creep, stability creep and accelerating creep, and the failure behavior of the rock is plastic yield. II - IV grade surrounding rock can be reasonably simulated with generalized Kelvin model through the model identification, while V grade surrounding rock agrees well with the nonlinear model. Rheological parameters related to

stress level were also obtained by model identification. The method of model identification can be applied to other rock beyond slates.

Key words: rock; rheological test; model identification; rock grade

岩石流变是岩土工程围岩变形失稳的重要原因之一. 地下结构在竣工数十年后仍可出现蠕变变形和断裂. 开展岩石流变性研究, 深入了解岩石流变破坏过程的规律, 在岩土工程建设中具有十分重大的意义, 其中最重要的课题就是岩石流变本构关系的研究. 大量学者利用不同的岩石进行了单轴、多轴压缩蠕变试验, 探讨岩石的压缩蠕变特性^[1-4]; 赵永辉、沈明荣、杨圣奇等人讨论了剪切强度随时间的变化规律^[5-7]; 一些学者还对岩石的拉裂破坏做了研究, 李建林通过花岗岩的拉剪流变试验给出了岩石流变破坏曲线及拉剪破坏强度曲线^[8].

但是由于岩石流变特性复杂, 目前还没有一种模型能适用于所有围岩, 一些模型的参数也较难确定^[9], 致使工程计算中的模型和参数选取十分困难, 所以必须结合隧道工程的实际围岩情况, 研究围岩流变本构模型. 对于不同级别的围岩, 其流变特性的差异性研究还较少. 结合江西武吉高速公路隧道, 针对不同级别的围岩, 通过分级增量循环加卸载试验、剪切流变试验和双轴压缩流变试验研究围岩的流变特性, 并对模型进行辨识, 获得围岩流变本构关系及有关流变模型的参数, 为工程计算和岩石流变特性的理论研究提供依据.

1 不同围岩级别的流变试验

1.1 试验岩样

板岩是一种变质岩, 原岩为泥质、粉质或中性凝

灰岩,具有明显的变余结构和板状构造,基本没有重结晶,沿板理方向可以剥成薄片.板岩是区域变质作用得低级产物,温度和均向压力都不高,主要受应力作用的影响.从江西武吉高速公路隧道采集试验岩样,岩样的基本性质如表1所示.流变试验前,在勘察资料和现场试验的基础上,根据《公路隧道设计规

范》(JTG D070—2004)^[10]确定围岩等级,围岩力学参数如表2所示,以此作为蠕变试验的参考值.每个岩样的切割成尺寸均为100×100×100 mm的正方体,岩样端面与侧面的平整度控制在0.000 3 cm范围以内,试样中心线与端面的垂直度误差小于0.5°.

表1 岩石流变试验岩样情况表

Tab.1 Rock samples of rheological test

围岩级别	岩性	岩样取地	岩样编号	围岩主要定性特征	基本质量指标 BQ	工程地质特征
II	弱、微风化花岗岩	上奉隧道	II-1 II-2 II-3	块状结构	431~461	裂隙不发育
III	微风化砂质板岩	何市隧道	III-1 III-2 III-3	岩性较坚硬,岩体呈中厚层结构	372~422	裂隙微发育
IV	弱、微风化砂质板岩	那沙岭隧道	IV-1 IV-2 IV-3	岩性较坚硬,岩体呈中厚层结构	332~382	裂隙微发育
V	弱风化千枚状板岩	石竹坪隧道	V-1 V-2 V-3	岩性软,岩体较破碎	201~251	节理裂隙发育

表2 岩样力学参数值

Tab.2 Mechanical parameters of rock samples

围岩级别	单轴抗压强度/MPa	天然密度/(t·m ⁻³)	含水率/%	泊松比μ	摩擦角/°
II	60~75	2.89	0.36	0.15	75
III	50~60	2.95	0.35	0.20	60
IV	35~45	2.86	0.42	0.30	45
V	15~25	2.75	0.51	0.40	36

表3 分级增量循环加卸载试验加载方案

Tab.1 Loading plan of circular increment step load and unload test

岩样编号	加卸载应力/MPa
II-1	10,0,20,10,30,20,40,30,50,40
III-1	10,0,20,10,30,20,40,30,50,40
IV-1	20,0,30,20,40,30,50,40
V-1	20,0,30,20,40

表4 剪切流变试验加载方案

Tab.4 Loading plan of shear rheological test

岩样编号	正应力/MPa	侧应力/MPa
II-2	20.0	20,35,50,60
III-2	15.0	20,30,40,55
IV-2	10.0	20,30,40,50
V-2	7.5	10,20,30,40

1.2 试验加载

试验仪器采用长春试验机研究所生产的岩石双轴流变试验机.在温度为 $20^{\circ} \pm 3^{\circ}$ 的环境下对岩样进行加载.分级增量循环加卸载试验首先施加第一级正应力,直至试样变形稳定;然后卸载并观察滞后效应,当无滞后恢复时施加下一级荷载.试验分3~5级加载,每间隔1 h读取数据一次,变形稳定的标准是位移速率小于 $5 \times 10^{-4} \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$.待岩样即将破坏时应小心加载,以免施加荷载过大使岩样突然破坏.加载方案见表3.

剪切流变试验先对岩样施加恒定的正应力,变形稳定后由低到高分级施加剪应力,获得一组不同剪应力水平下的蠕变曲线.当在某级荷载作用下的剪切位移速率小于 $5 \times 10^{-4} \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,则施加下一级荷载.剪应力分3~5级加载,每间隔3 h读取数据一次,直至岩样破坏.加载方案见表4.

与单轴蠕变试验相比,多轴蠕变试验研究结果较少.为积累宝贵数据,在单轴蠕变试验的基础上还进行岩石的双轴蠕变试验.双轴蠕变加载时按照双向受力同时加载的方式,在固定的时间内保持 $\sigma_1/\sigma_2 = 2$,将 σ_1, σ_2 同时加到规定值,但 σ_1, σ_2 加载速率并不相同.然后保持压力不变,观察双向蠕变现象,待双向位移速率都小于 $5 \times 10^{-4} \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,加下一级荷载,每间隔2 h读取数据一次.岩样II-3, III-3, IV-3共分4个阶段加载,第一阶段正应力 σ_1 为20 MPa,侧应力 σ_2 为10 MPa;第2阶段正应

力 σ_1 为 30 MPa, 侧应力 σ_2 为 15 MPa; 第 3 阶段正应力 σ_1 为 40 MPa, 侧应力 σ_2 为 20 MPa; 第 4 阶段正应力 σ_1 为 50 MPa, 侧应力 σ_2 为 25 MPa.

2 不同级别的围岩流变试验结果

根据试验加载方案, 针对不同的围岩级别, 得到

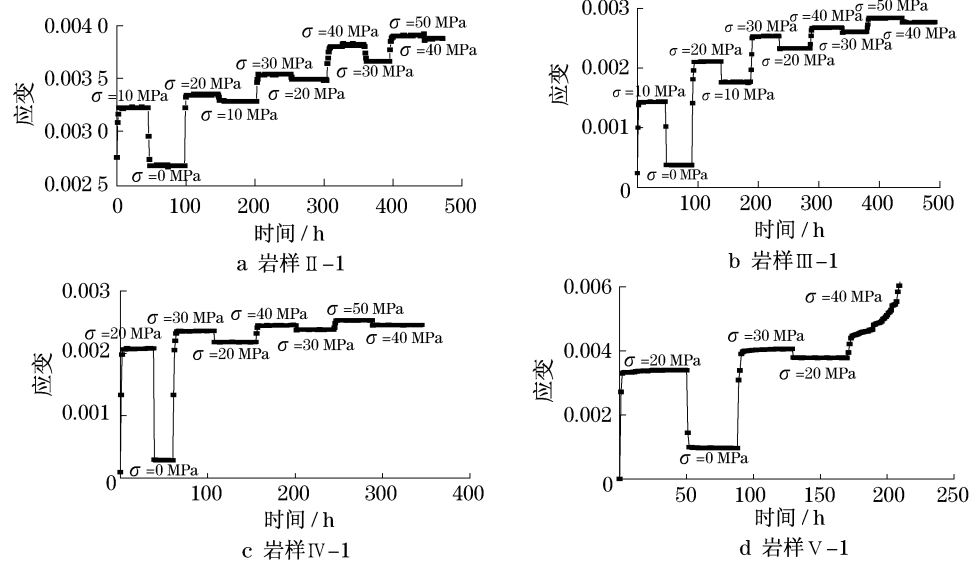


图 1 不同级别围岩分级增量循环加卸载试验曲线

Fig.1 Test curves of circular increment step load and unload test of different rock grades

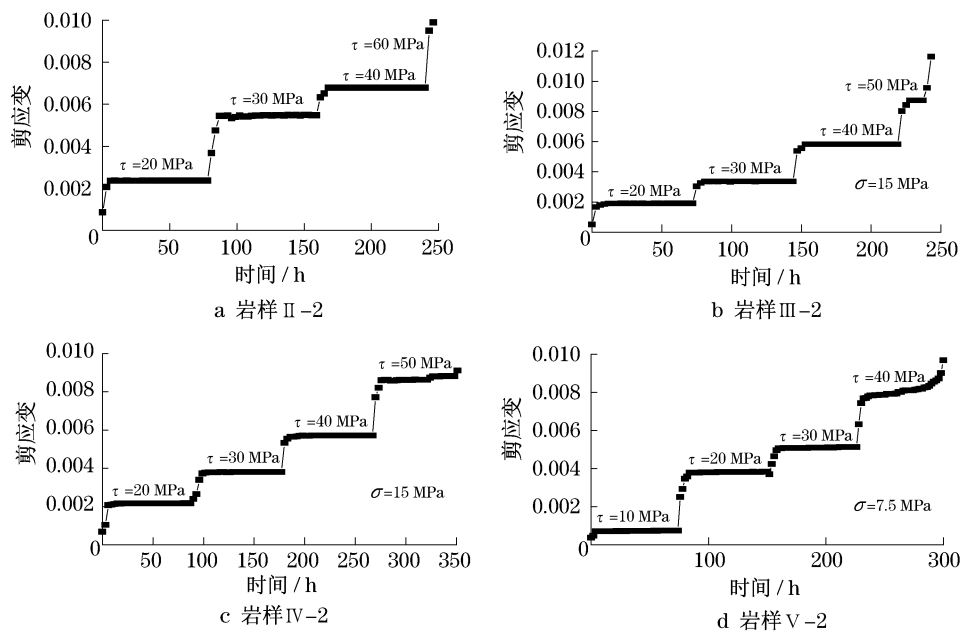


图 2 不同级别围岩剪切流变试验曲线

Fig.2 Test curves of shear rheological test of different rock grades

2.3 双轴压缩流变试验

II ~ V 级围岩双轴压缩流变试验结果曲线如图

分级增量循环加卸载试验、剪切流变试验及双轴压缩流变试验的蠕变曲线.

2.1 分级增量循环加卸载试验

II ~ V 级围岩分级增量循环加卸载试验结果曲线如图 1 所示.

2.2 剪切流变试验

II ~ V 级围岩剪切流变试验结果曲线如图 2 所示.

3 所示.

由图 1~3 可知, II~IV 级围岩均具有瞬弹性和黏弹

性共存的特性,而V级围岩具有瞬弹性、粘弹性、粘塑性共存特性.Ⅱ~Ⅳ级围岩经历快速蠕变率衰减过程后进入变形稳定阶段,当施加的应力达到其极限荷载时,岩样会突然破坏,表现为变形较小的脆性破坏.而V级

围岩岩样在应力水平较高的情况下,除出现较为明显的过渡蠕变和定常蠕变外,还有明显的加速蠕变过程,破坏形式则表现为韧性破坏.

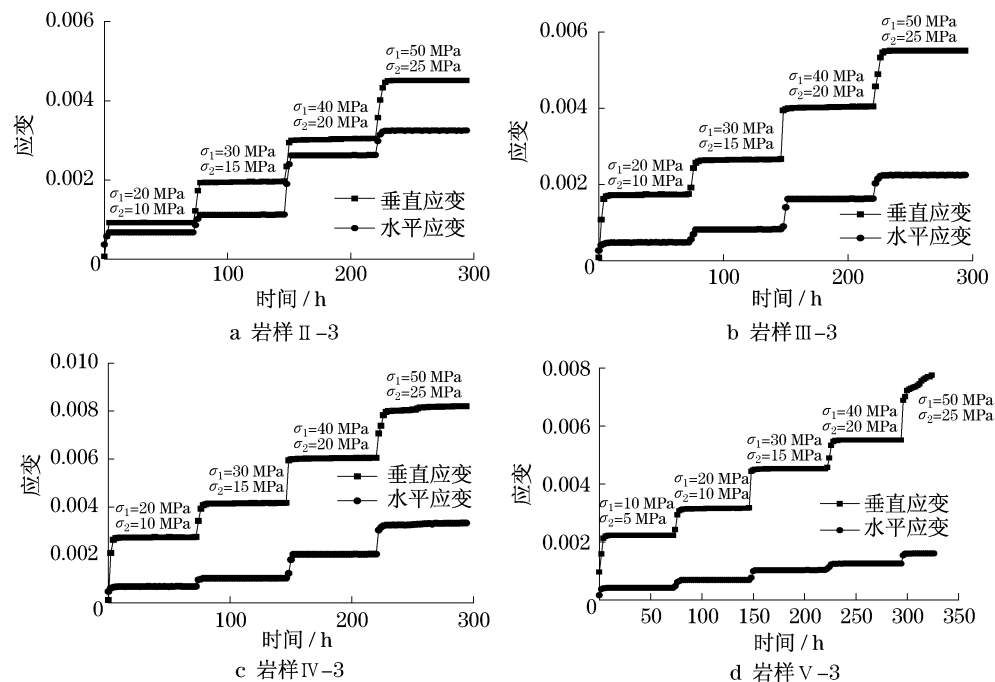


图3 不同级别围岩双轴压缩流变试验结果

Fig. 3 Test curves of two-axes compression rheological test of different rock grades

3 不同级别的围岩流变模型辨识

3.1 分级增量循环加卸载试验

3.1.1 Ⅱ~Ⅳ级围岩

根据Ⅱ~Ⅳ级围岩变形特点,采用广义 Kelvin 模型^[11]对分级增量循环加卸载试验曲线进行拟合,广义 Kelvin 模型元件如图4所示.其中: E_1 为瞬时弹性模量; E_2 为黏弹性弹性模量; η 为黏滞系数.

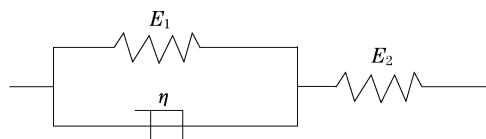


图4 广义 Kelvin 模型

Fig. 4 Generalized Kelvin model

应力-应变-时间关系式为

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} (e^{-E_2 \cdot t / \eta}) \quad (1)$$

式中:当 $t = 0$ 时, $\epsilon^e = \sigma / E_1$, ϵ^e 为瞬时应变值;当

$t \rightarrow \infty$ 时, $\epsilon_\infty = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2}$.

通过不同应力水平下的模型辨识,得到Ⅱ~Ⅳ级围岩岩样的蠕变参数,如表5所示.利用模型拟合参数计算得到的应变值与试验实测值做残差平方和^[12],以考虑模型拟合的精度,即

表5 广义 Kelvin 模型拟合参数

Tab. 5 Fitting parameters of generalized Kelvin model

岩样编号	正应力/MPa	E_1 /MPa	E_2 /MPa	η_1 /(MPa·h)	残差平方和
Ⅱ-1	10	1.0×10^4	4.4×10^3	2.9×10^3	1.14×10^{-6}
	20	6.2×10^3	1.6×10^5	1.1×10^5	2.50×10^{-9}
	30	8.7×10^3	3.7×10^5	4.3×10^5	4.80×10^{-9}
	40	1.1×10^4	2.3×10^5	5.0×10^5	3.40×10^{-9}
	50	1.3×10^4	6.1×10^5	4.6×10^5	3.00×10^{-8}
Ⅲ-1	10	4.3×10^4	8.3×10^3	7.2×10^3	1.06×10^{-8}
	20	1.4×10^4	2.9×10^4	3.3×10^4	8.86×10^{-9}
	30	1.5×10^4	5.2×10^4	5.7×10^4	1.24×10^{-7}
	40	1.7×10^4	1.4×10^5	4.3×10^4	8.70×10^{-8}
	50	1.9×10^4	2.8×10^5	6.4×10^5	4.37×10^{-8}
Ⅳ-1	20	2.6×10^4	1.5×10^4	1.8×10^4	9.14×10^{-8}
	30	2.2×10^4	2.9×10^4	2.6×10^4	4.07×10^{-6}
	40	1.7×10^4	3.1×10^5	2.3×10^5	5.41×10^{-8}
	50	2.1×10^4	4.2×10^5	5.1×10^5	3.91×10^{-8}

$$Q = \sum_{k=1}^n [\epsilon_k - \epsilon_k(E, \eta)]^2 \quad (2)$$

式中: ϵ_k 为应变实测值; $\epsilon_k(E, \eta)$ 为拟合参数代入模型计算得到的应变值; k 为试验应变值记录次数.

图5为岩样 II-1, III-1 和 IV-1 分级增量循环加卸载试验曲线与广义 Kelvin 模型流变曲线的比较, 吻合可见较好.

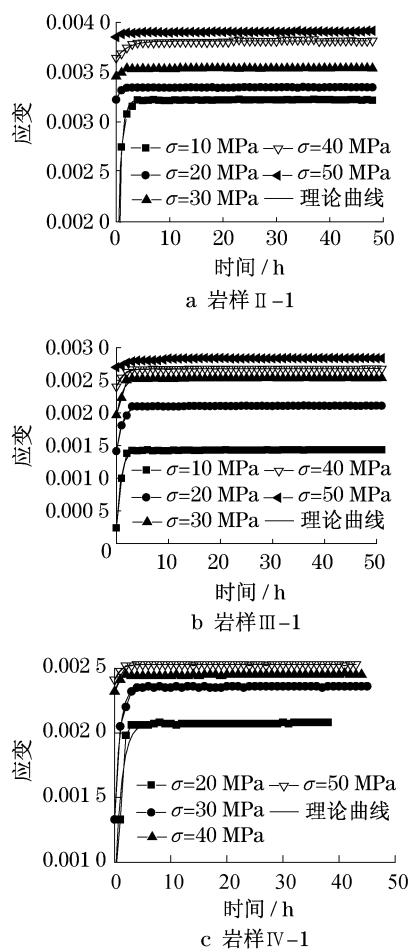


图5 分级增量循环加卸载试验结果与广义 Kelvin 模型的对比

Fig.5 Comparison of circular increment step load and unload test result and generalized Kelvin modal

3.1.2 V级围岩

岩石流变过程往往是弹性、黏性、塑性、黏弹性和黏塑性等多种变形共存的一个复杂过程, 因而需要采用多种元件(线性和非线性元件)的复合来对其进行模拟. 针对V级围岩的试验曲线, 采用非线性流变元件 NRC 模型与西原模型串联起来模拟其流变特性^[7], 模型如图6所示.

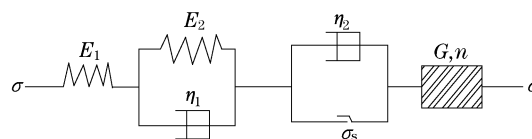


图6 岩石非线性粘弹塑性流变模型

Fig.6 Nonlinear viscoelastic-plastic rheological modal

该非线性剪切流变模型的蠕变方程分为如下两种情况:

- ① 当 $\sigma \leq \sigma_s$ 时, 流变模型为广义 Kelvin 模型;
- ② 当 $\sigma > \sigma_s$ 时,

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} (1 - e^{-E_2 \cdot t / \eta_1}) + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2} t + \frac{\sigma}{G} \left(1 - e^{-\left(\frac{H(t-t_2)}{t_c - t_2}\right)^n} \right) \quad (3)$$

其中,

$$H(t - t_2) = \begin{cases} 0 & (t \leq t_2) \\ t - t_2 & (t > t_2) \end{cases} \quad (4)$$

式中: ϵ 为岩石总的剪切应变; t 为经过的时间; t_2 为从流变向加速流变过渡的起始时刻; t_c 为流变破坏时间; G 与 n 均为 NCR 模型中的流变参数; η_1 和 η_2 均为黏滞系数, 表示流变阶段趋向稳定的快慢程度, 数值越小则趋向稳定的时间就越短; σ_s 为摩阻力(屈服应力); σ 为应力.

对 V-1 的流变力学模型辨识得到 V 级围岩岩样蠕变参数及残差平方和, 如表 6. 图 7 为流变试验曲线与理论模型的比较, 吻合较好.

表6 粘弹塑性模型拟合参数

Tab.6 Fitting parameters of viscoelastic-plastic model

σ /MPa	时间	E_1 /MPa	η_1 /(MPa·h)	E_2 /MPa	η_2 /(MPa·h)	G /MPa	n	残差平方和
20	—	7.3×10^3	3.1×10^4	1.5×10^4	—	—	—	1.98×10^{-5}
30	—	9.8×10^3	3.0×10^4	4.5×10^4	—	—	—	3.74×10^{-6}
40	$t \leq t_2$	1.0×10^4	7.9×10^4	9.8×10^4	6.2×10^5	—	—	2.90×10^{-5}
	$t > t_2$	1.1×10^4	3.0×10^4	6.1×10^4	3.2×10^5	1.2×10^4	18	

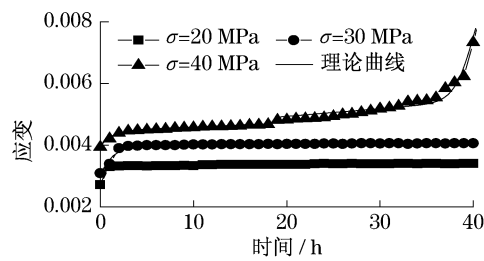


图7 岩样V-1 分级增量循环加卸载试验结果与理论曲线的对比

Fig.7 Comparison of circular increment step load and unload test result of rock sample V-1 and theoretical modal

3.2 剪切流变试验

3.2.1 II~IV级围岩

经过分析剪切流变试验曲线的特点,选用广义 Kelvin 模型对其进行拟合分析.对岩石试样的流变力学模型进行辨识得到岩石试样蠕变参数及残差平方和,如表 7 所示.将岩样 II-2, III-2 和 IV-2 的流变试验曲线与广义 Kelvin 模型的流变曲线进行比较,如图 8,可见吻合较好.

3.2.2 V级围岩

分析V级岩样的变形特点,剪应力为 10, 20 和 30 MPa 时选用广义 Kelvin 模型拟合;剪应力为 40 MPa 时采用能反映加速蠕变的模型对其进行拟合.对 V-2 的流变力学模型进行辨识得到岩石试样蠕变参数及残差平方和,如表 8.图 9 为岩样 V-2 剪切流变试验曲线与模型曲线的比较,吻合可见较好.

表 7 广义 Kelvin 模型拟合参数

Tab.7 Fitting parameters of generalized Kelvin model

岩样编号	正应力/MPa	E_1 /MPa	E_2 /MPa	η_1 /(MPa·h)	残差平方和
II-2	20	2.3×10^4	1.3×10^4	2.4×10^4	4.20×10^{-8}
	35	8.2×10^3	1.7×10^4	4.5×10^4	1.98×10^{-5}
	50	7.9×10^3	1.0×10^5	3.5×10^5	6.46×10^{-8}
III-2	20	3.9×10^4	1.4×10^4	2.6×10^4	4.38×10^{-8}
	30	9.9×10^3	9.1×10^4	2.1×10^5	2.11×10^{-9}
	40	7.4×10^3	8.6×10^4	2.9×10^5	5.92×10^{-8}
IV-2	20	3.4×10^4	1.2×10^4	5.2×10^4	4.16×10^{-7}
	30	1.3×10^4	1.9×10^4	9.8×10^4	3.20×10^{-7}
	40	7.5×10^3	1.1×10^5	4.1×10^5	5.58×10^{-9}

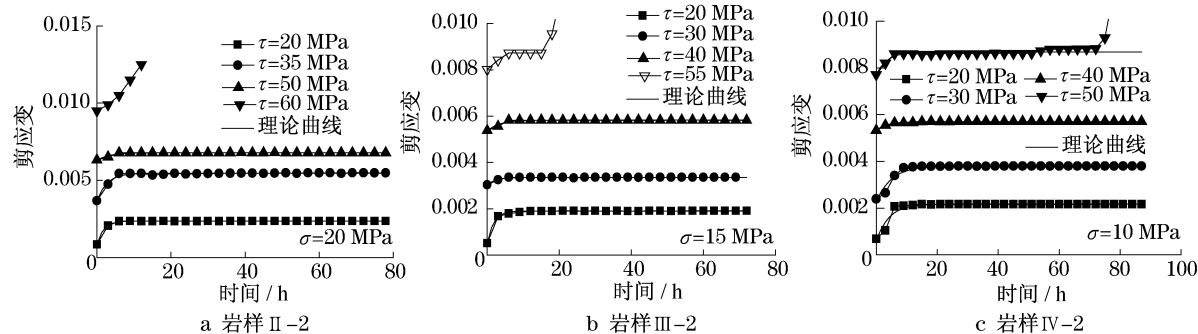


图 8 剪切流变试验结果与广义 Kelvin 模型的对比

Fig.8 Comparison of shear rheological test and generalized Kelvin modal

表 8 粘弹塑性模型拟合参数

Tab.8 Fitting parameters of viscoelastic-plastic model

σ /MPa	时间	E_1 /MPa	η_1 /(MPa·h)	E_2 /MPa	η_2 /(MPa·h)	G /MPa	n	残差平方和
10	—	2.9×10^4	7.3×10^4	2.6×10^4	—	—	—	1.58×10^{-8}
20	—	8.1×10^3	5.0×10^4	1.5×10^4	—	—	—	4.71×10^{-8}
30	—	8.2×10^3	2.1×10^4	6.7×10^4	—	—	—	3.43×10^{-5}
40	$t \leq t_2$	6.3×10^3	7.9×10^4	9.8×10^4	6.2×10^5	—	—	2.90×10^{-5}
	$t > t_2$	6.2×10^3	5.4×10^4	6.8×10^4	3.4×10^5	6.8×10^3	30	

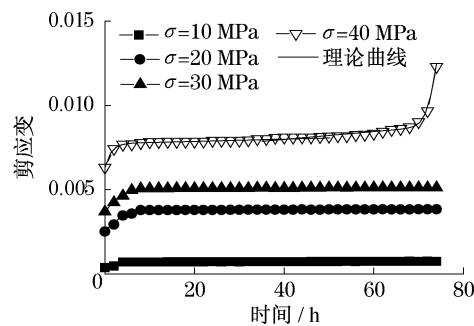


图9 岩样V-2剪切流变试验结果与理论曲线的对比

Fig.9 Comparison of shear rheological test of rock sample V-2 and theoretical modal

3.3 双轴压缩流变试验

3.3.1 II~IV级围岩

选用广义 Kelvin 模型对 σ_1 和 σ_2 方向的蠕变

曲线进行拟合分析. 对岩石试样的流变力学模型进行辨识得到岩石试样蠕变参数及残差平方和如表 9 所示. II - IV 级围岩双轴压缩流变试验曲线与广义 Kelvin 模型的流变曲线的比较如图 10, 误差较小.

3.3.2 V级围岩

分析 V 级围岩岩样变形特点, 前 3 个加载阶段所得的蠕变曲线选用广义 Kelvin 模型拟合; 当 $\sigma_1 = 50 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 25 \text{ MPa}$ 时, 轴向(σ_1 方向)出现明显的加速蠕变, 采用反映加速蠕变的粘弹塑性模型对其进行拟合分析. 对 V 级围岩岩样的流变力学模型进行辨识得到试样的蠕变参数及残差平方和, 如表 10 所示. 图 11 为岩样 V-3 双轴压缩流变试验曲线与模型曲线的比较, 拟合可见较好.

表9 广义 Kelvin 模型拟合参数

Tab.9 Fitting parameters of generalized Kelvin model

岩样编号	σ_1/MPa	σ_2/MPa	方向	E_1/MPa	E_2/MPa	$\eta_1 (\text{MPa} \cdot \text{h})$	残差平方和
II-3	20	10	σ_1	1.1×10^5	2.7×10^4	5.2×10^4	2.86×10^{-8}
			σ_2	2.7×10^4	3.2×10^4	5.1×10^4	1.50×10^{-9}
	30	15	σ_1	2.4×10^4	4.3×10^4	6.8×10^4	1.95×10^{-6}
			σ_2	1.8×10^4	5.7×10^4	1.0×10^4	2.94×10^{-8}
	40	20	σ_1	1.7×10^4	5.8×10^4	5.9×10^4	1.29×10^{-8}
			σ_2	1.1×10^4	2.7×10^4	4.2×10^4	1.60×10^{-7}
50	25	σ_1	1.4×10^4	5.2×10^4	1.3×10^5	2.29×10^{-8}	
		σ_2	8.4×10^3	9.3×10^4	1.8×10^5	9.38×10^{-10}	
III-3	20	10	σ_1	2.4×10^4	2.2×10^4	6.5×10^4	6.81×10^{-8}
			σ_2	3.7×10^4	4.8×10^4	1.0×10^5	9.42×10^{-10}
	30	15	σ_1	1.6×10^4	4.1×10^4	7.2×10^4	2.90×10^{-6}
			σ_2	2.7×10^4	5.6×10^4	1.1×10^5	2.44×10^{-9}
	40	20	σ_1	1.1×10^4	1.4×10^5	1.8×10^5	4.41×10^{-7}
			σ_2	2.3×10^4	2.7×10^4	4.0×10^4	1.03×10^{-8}
50	25	σ_1	1.2×10^4	5.1×10^4	1.4×10^5	4.97×10^{-6}	
		σ_2	1.2×10^4	1.1×10^5	2.5×10^5	1.47×10^{-7}	
IV-3	20	10	σ_1	1.7×10^4	1.3×10^4	2.5×10^4	2.97×10^{-8}
			σ_2	2.1×10^4	4.9×10^4	9.9×10^4	7.54×10^{-10}
	30	15	σ_1	8.8×10^3	4.1×10^4	7.2×10^4	2.24×10^{-6}
			σ_2	1.7×10^4	9.4×10^4	9.6×10^4	1.55×10^{-8}
	40	20	σ_1	7.2×10^3	8.2×10^4	7.6×10^4	1.43×10^{-8}
			σ_2	1.5×10^4	2.6×10^4	4.1×10^4	2.28×10^{-7}
50	25	σ_1	7.0×10^3	4.7×10^4	2.0×10^5	3.22×10^{-7}	
		σ_2	8.2×10^3	9.7×10^4	3.5×10^5	3.96×10^{-8}	

由分级循环加卸载试验、剪切流变试验和双轴压缩试验结果可知, 每一级应力水平下获得的岩石流变力学模型是相同的, 因此 II~IV 级围岩可用广

义 Kelvin 模型模拟, V 级围岩则用反映加速蠕变的粘弹塑性模型模拟. 由于篇幅有限, 本文只求得与应力水平有关的流变模型参数, 对于整体模型参数有

待进一步研究.

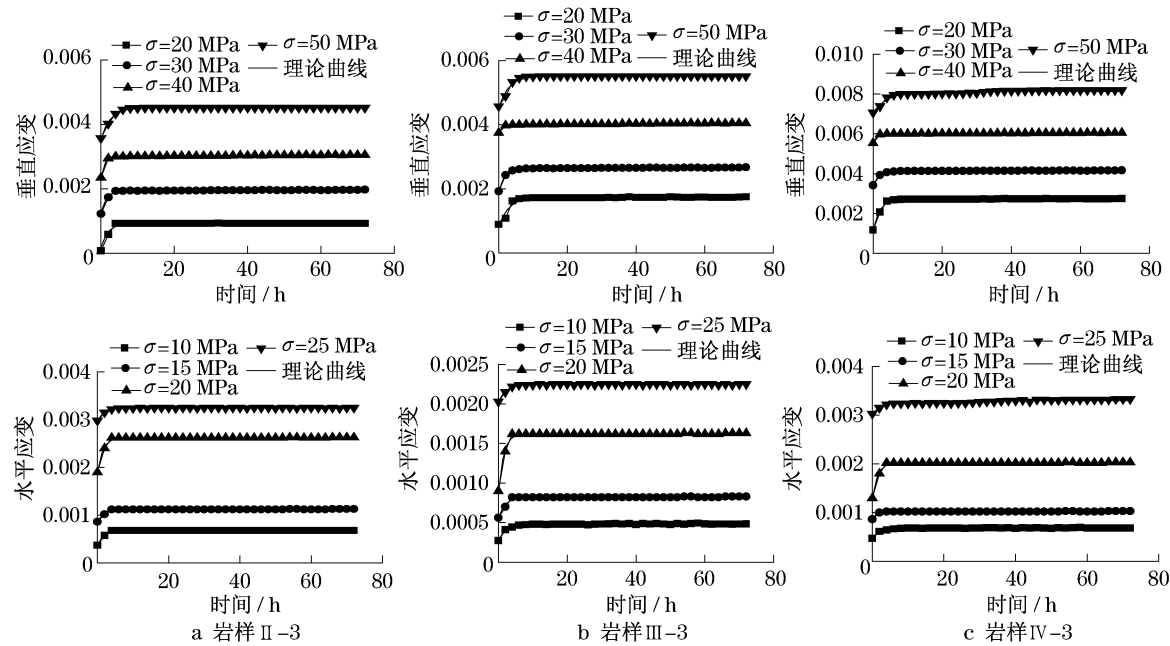


图 10 双轴压缩流变试验结果与广义 Kelvin 模型的对比

Fig.10 Comparison of two-axes compression rheological test and generalized Kelvin modal

表 10 粘弹塑性模型拟合参数
Tab.10 Fitting parameters of viscoelastic-plastic model

σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	方向	E_1 /MPa	E_2 /MPa	η_1 /(MPa·h)	η_2 /(MPa·h)	残差平方和
10	5	σ_1	1.1×10^4	7.7×10^3	1.7×10^4	—	4.05×10^{-8}
		σ_2	3.2×10^4	2.0×10^4	2.3×10^4	—	6.31×10^{-11}
20	10	σ_1	8.2×10^3	2.8×10^4	4.8×10^4	—	4.51×10^{-9}
		σ_2	2.1×10^4	4.7×10^4	9.3×10^4	—	1.89×10^{-9}
30	15	σ_1	7.4×10^3	6.3×10^4	5.1×10^4	—	6.60×10^{-9}
		σ_2	1.9×10^4	5.8×10^4	5.6×10^4	—	2.61×10^{-8}
40	20	σ_1	8.7×10^3	4.5×10^4	1.4×10^5	—	6.88×10^{-8}
		σ_2	1.9×10^4	1.1×10^5	3.1×10^5	—	9.94×10^{-9}
50	25	σ_1	7.3×10^3	2.1×10^5	4.5×10^5	7.7×10^5	1.32×10^{-6}
		σ_2	3.3×10^4	7.4×10^5	8.0×10^5	—	8.39×10^{-6}

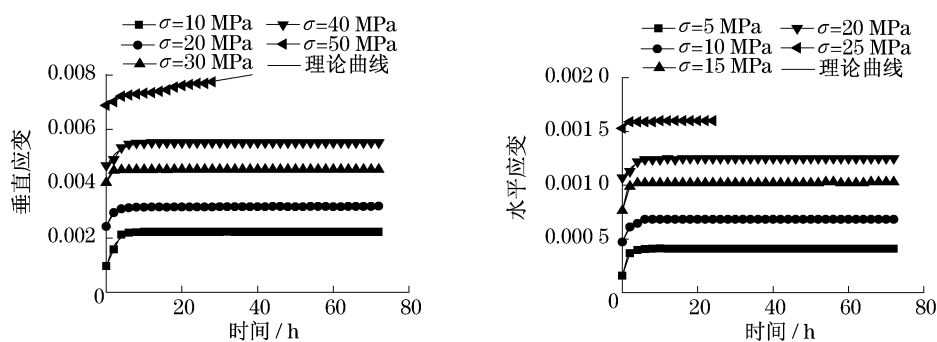


图 11 岩样 V-3 双轴压缩流变试验结果与理论曲线的对比

Fig.11 Comparison of two-axes compression rheological test of rock sample V-3 and theoretical modal

4 结论

通过不同级别围岩岩样的分级增量循环加卸载试验、剪切流变试验以及双轴压缩流变试验,分析试验结果并对模型进行辨识,得到以下结论:

(1) II~IV级围岩具有瞬弹性、黏弹性共存特性,而V级围岩具有瞬弹性、黏弹性、黏塑性共存特性,且应力水平越高,瞬时应变越大。

(2) II~IV级围岩具有过渡蠕变和定常蠕变两个阶段,破坏形式表现为脆性破坏。V级具有过渡蠕变、定常蠕变和加速蠕变三个阶段,破坏形式表现为韧性破坏。但是V级围岩加速蠕变的发生具有一定的应力阈值,应力水平较低时,岩石加速蠕变并不会发生。例如,对于岩样V-1当加载水平达到 $\sigma = 40$ MPa时才有加速蠕变的过程;应力水平低于40 MPa时,岩样只具有过渡蠕变和定常蠕变两个阶段。

(3) 通过不同级别围岩的流变力学模型辨识,采用广义Kelvin模型模拟II~IV级围岩,采用非线性流变元件NRC模型与西原模型的串联模型模拟V级围岩,可以较好地模拟围岩的流变特性。模型辨识得到了与应力水平相关的流变力学参数。将试验结果与模型曲线进行了对比,吻合较好。

(4) 岩石流变模型是根据试验中岩石的流变特性所选取的;模型参数则是利用试验中获得的应力、应变和时间代入选取的模型中而计算求得。这种模型辨识的方法并不依赖于岩石本身的性质,因此可应用于板岩以外的其他岩石的流变模型及参数的选取。

参考文献:

- [1] Okubo S, Nishimatsu Y, Fukui K. Complete creep curves under uniaxial compression[J]. International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1991, 28(1): 77.
- [2] 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.
LI Yongsheng. Creep and relaxation of 4 kinds of rock under uniaxial compression tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(1): 39.
- [3] Fujii Y, Kiyama T, Ishijima Y, et al. Circumferential strain behavior during creep tests of brittle rocks[J]. International Journal Rock Mechanics Mining Sciences, 1999, 36(3): 323.
- [4] 刘光廷, 胡昱, 陈凤岐, 等. 软岩多轴流变特性及其对拱坝的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1237.
LIU Guangting, HU Yu, CHEN Fengqi, et al. Rheological property of soft rock under multiaxial compression and its effect on design of arch dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1237.
- [5] 赵永辉. 明珠线二期地下铁道工程交叠隧道管片应力监测研究[R]. 上海: 同济大学地下与建筑工程系, 2003.
ZHAO Yonghui. Stress supervision study on shield tunnel lining of Shanghai Metro III line [R]. Shanghai: Tongji University, Department of Geotechnical Engineering, 2003.
- [6] 沈明荣, 朱根桥. 规则齿形结构面的蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 223.
SHEN Mingrong, ZHU Genqiao. Testing study on creep characteristic of regularly dentate discontinuity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 223.
- [7] 杨圣奇, 徐卫亚, 杨松林. 龙滩水电站泥板岩剪切流变力学特性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 895.
YANG Shengqi, XU Weiya, YANG Songlin. Investigation on shear rheological mechanical properties of shale in Longtan Hydropower Project [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 895.
- [8] 李建林. 岩石拉剪流变特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 299.
LI Jianlin. A test study on tension-shear creep of rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 299.
- [9] 孙均, 汪炳鉴. 地下结构有限元法解析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1988.
SUN Jun, WANG Bingjian. Finite element method analysis of underground engineering [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1988.
- [10] 重庆交通科研设计院. 公路隧道设计规范(JTG D070—2004) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Chongqing Jiaotong Research and Design Institute. JTG D070—2004 Code for design of road tunnel [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [11] 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, 24(5): 498.
XIA Caichu, SUN Jun. Distinction of rheological model and determination of parameters on creep tests [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1996, 24(5): 498.
- [12] 陈晓斌, 张家生, 封志鹏. 红砂岩粗粒土流变工程特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 601.
CHEN Xiaobin, ZHANG Jiasheng, FENG Zhipeng. Experimental study on rheological engineering of coarsely granular red sandstone soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 601.