

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.04.006

含软弱夹层的层状岩体流变力学特性试验

徐卫亚^{1,2}, 黄 威^{1,2}, 张 涛^{1,2}, 孟庆祥^{1,2}

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 依据工程地质结构制作含软弱夹层的层状岩体试样,采用全自动三轴流变伺服系统进行三轴流变力学试验,研究含软弱夹层的层状岩体的流变变形规律及加速流变特性,依据岩体各级应力水平下的稳态流变速率确定岩体的长期强度,为工程岩体流变数值试验参数辨识提供参考。根据流变试验结果,提出反映不同岩层流变力学性质的层状岩体流变模型,在模型中引入损伤变量,使流变模型可以准确反映多层状岩体在不同应力水平下的损伤流变特性。对提出的非线性损伤流变模型进行参数辨识,拟合曲线与流变试验结果较吻合,验证了非线性损伤流变模型对层状岩体的适用性。

关键词: 岩土力学;层状复合岩体;软弱夹层;流变;长期强度;流变模型;损伤变量

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2020)04-0327-07

Experimental study on rheological properties of layered rock mass with soft interlayers

XU Weiya^{1,2}, HUANG Wei^{1,2}, ZHANG Tao^{1,2}, MENG Qingxiang^{1,2}

(1. *Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;*
2. *Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: The samples of layered rock mass with soft interlayers were made according to the geological structure of a hydropower project, and the triaxial rheological mechanics test was carried out under the action of seepage pressure by the automatic triaxial rheological servo system. The rheological properties and accelerated rheological properties of layered rock mass with soft interlayers are studied in this work. The long-term strength of rock mass is obtained according to the steady rheological rate of rock mass under different stress levels. It can provide reference for parameter identification of engineering rheological numerical tests of rock mass. According to the structural characteristics of layered rock mass with soft interlayers, a rheological model for the layered rock mass is proposed, which can reflect the rheological properties of layered composite rock mass. By introducing damage variables into the model, the rheological model can accurately reflect the rheological deformation characteristics of layered rock mass under different stress levels. Thereafter, the parameters of the proposed nonlinear damage rheological model were identified by the rheological test curve. The fitting curve fits well with the rheological test results, which verifies the applicability of the nonlinear damage rheological model to the layered rock mass.

Key words: rock and soil mechanics; layered composite rock mass; soft interlayers; rheology; long-term strength; rheological model; damage variable

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0407004);国家自然科学基金(51939004)

作者简介: 徐卫亚(1962—),男,教授,博士,主要从事岩土力学与工程研究。E-mail: wyxu@hhu.edu.cn

引用本文: 徐卫亚,黄威,张涛,等. 含软弱夹层的层状岩体流变力学特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):327-333.

XU Weiya, HUANG Wei, ZHANG Tao, et al. Experimental study on rheological properties of layered rock mass with soft interlayers [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(4): 327-333.

在漫长的地质构造运动中,层状岩体中力学性质较弱的岩层或结构面在剪切作用下易成为厚度不一、间距不等的软弱夹层。在荷载及渗流作用下软弱夹层常产生较大变形,成为影响岩体结构稳定的主结构面,对水利水电工程中岩体工程安全有着较大影响。

许多学者在层状岩体的强度特性、变形特性及岩体的流变本构模型等方面进行了研究。Tien 等^[1-2]研究了层状岩体倾角对岩石强度和弹性模量的影响,提出对应的破坏准则。Taliercio 等^[3]对层状岩体的强度准则和破坏机制进行了研究。张桂民等^[4]开展了一系列的模拟试验,研究倾角、夹层厚度及力学性质和界面对软硬互层岩体变形破坏形式的影响。黄书岭等^[5-6]提出了考虑一组节理面及考虑多组节理面的层状岩体本构模型,并与现场试验结果进行对比验证。Fortsakis 等^[7]将层理面模拟为独立单元,将岩体模拟为各向异性材料,研究分析各向同性、各向异性、横观各向同性分析方法的区别。丁秀丽等^[8]对软、硬岩分别进行压缩蠕变试验,对软硬互层岩体的蠕变效应进行了分析。李昂等^[9]引入区域生长算法的图像分割技术获取层状岩体内部细观非均匀信息。徐卫亚等^[10]基于三轴压缩流变试验结果,提出了七元件非线性黏弹塑性流变模型。Wang 等^[11]建立了基于时变损伤脆性岩石非线性蠕变损伤模型,与流变试验数据对比拟合效果优于西原模型。Zhao 等^[12]进行硬岩循环加卸载试验,建立了九元件模型拟合试样的加载、流变、卸载阶段应变曲线。还有许多学者^[13-17]通过试验及数值试验方法对层状岩体的力学性质进行了研究。目前已有的对于层状岩体研究大多为理想条件,岩层的厚度、间距一般为定值,而实际工程中岩体地质条件复杂,需要进一步深化研究。

本文以某实际水电工程坝区岩体工程地质结构模型为依据,设计并制备含软弱夹层的层状岩体,开展模拟实际工程的层状岩体流变力学性质试验研究,研究层状岩体的流变特性及长期强度,建立损伤流变本构模型并与流变试验结果进行对比分析,讨论损伤流变本构模型对含软弱夹层的层状岩体流变规律的适用性,旨在为工程应用中的数值试验提供理论基础及参考。

1 试样制备与试验方案

采用水泥砂浆和白水泥浆作为相似材料分别模拟硬岩和软弱夹层,制作力学性质差异较大的夹层岩体,水泥砂浆和白水泥浆可通过材料配合比实现材料力学性质的改变,使其满足不同岩层力学性质的相似关系。模拟硬岩的水泥砂浆相似材料中水泥、细砂与水的比例为 1 : 0.5 : 0.35,水泥选用 52.5R 普通硅酸盐水泥,细砂粒径小于 1 mm,并加入水泥砂浆质量 0.2% 的减水剂以增加水泥砂浆的和易性,模拟软弱夹层的白水泥浆相似材料中白水泥与水的比例为 1 : 0.4。依据某水电工程的地质结构,确定试样软弱夹层的位置及厚度,软弱夹层倾角为 5°,试样硬岩模具厚度由上至下依次为 22.4 mm、24.3 mm、11.5 mm、23.4 mm、7.3 mm,软弱夹层模具厚度由上至下依次为 4.3 mm、2.3 mm、2.5 mm、2.0 mm。制成的含软弱夹层的层状岩体试样如图 1 所示。硬岩相似材料密度为 2.19 g/cm³,软弱夹层相似材料密度为 2.05 g/cm³。试样的基本物理参数如下:A-5-3 试样高度为 101.7 mm,直径为 49.9 mm,试样密度为 2.17 g/cm³;A-5-7 试样高度为 101.5 mm,直径为 49.8 mm,试样密度为 2.18 g/cm³。

为研究含软弱夹层的层状岩体力学性质,试验在围压为 3 MPa 和 7 MPa、渗压为 2 MPa 的条件下进行,采用分级加载方法,当岩石试样流变速率基本保持不变或流变速率变为零时,即认为岩石试样在本级应力水平达到稳定状态,随后进行下一级应力的加载。



图1 含软弱夹层的层状岩体试样
Fig.1 Layered rock mass samples with soft interlayers

2 试验结果分析

2.1 岩体变形规律

不同围压条件下试样流变试验曲线如图 2 所示。由图中岩体轴向应变-时间曲线可知,随着加载时间的增长,低应力水平条件下流变曲线可分为前期流变和稳态流变两部分,在最后一级应力水平下岩体出现了加速流变现象。在应力水平较低时,试样的变形主要为加载阶段的弹性变形以及前期流变变形,试样内部存在的天然裂隙及孔隙会在加载初期逐渐闭合,裂隙闭合引起的轴向变形随时间增长逐渐减小,试样处于稳定状态;随着

应力水平的增加,试样内部出现新生裂隙并不断扩展、贯通,试样损伤随加载时间的增长逐渐积累,在前期流变及稳态流变阶段后,试样内部积累较大损伤,试样进入加速流变阶段,裂纹加速扩展引起试样破坏。

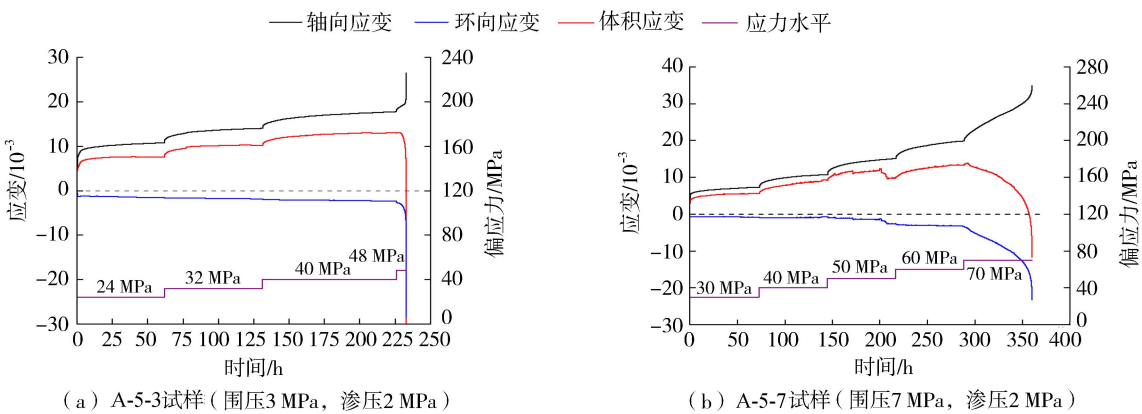


图2 含软弱夹层的层状岩体试样流变试验曲线

Fig.2 Rheological testing curves of layered rock mass samples with soft interlayers

表 1 结果表明:

a. A-5-3 试样在前三级应力水平下轴向流变应变增量变化甚微,稳态流变速率分别为 $0.011\times 10^{-3}\text{h}^{-1}$ 、 $0.013\times 10^{-3}\text{h}^{-1}$ 、 $0.014\times 10^{-3}\text{h}^{-1}$,稳态流变速率随应力水平升高而逐渐增大,当应力水平升至 48 MPa 时,稳态流变速率升高至 $0.200\times 10^{-3}\text{h}^{-1}$,试样轴向应变达到 8.15×10^{-3} ,随着加载时间的增加,试样进入加速流变状态,进而发展为破坏。

b. A-5-7 试样在应力水平为 30 MPa 条件下,稳态流变速率较低,岩体处于相对稳定状态;而在应力水平为 60 MPa 条件下,稳态流变速率有较大提升,此时岩体尚处于相对稳态流变状态;在 70 MPa 应力水平下,岩体轴向应变高达 14.74×10^{-3} ,轴向应变变量超过前四级应力水平轴向应变量的总和,稳态流变速率也达到了 $0.140\times 10^{-3}\text{h}^{-1}$,在加载 54.43 h 后,岩体进入加速流变状态,试样发生破坏。

表 1 层状岩体不同应力水平下流变应变变量与稳态流变速率					
Table 1 Strain and steady rheological rate of layered rock mass at different stresses					
试样 编号	应力水平/ MPa	轴向应变/ 10^{-3}	环向应变/ 10^{-3}	体积应变/ 10^{-3}	稳态流变 速率/ (10^{-3}h^{-1})
A-5-3	24	3.06	-0.32	7.55	0.011
	32	2.66	-0.24	10.22	0.013
	40	3.22	-0.38	13.01	0.014
	48	8.15	-25.78	-30.39	0.200
A-5-7	30	2.49	-0.10	2.29	0.010
	40	2.95	-0.20	2.55	0.014
	50	4.02	-1.48	1.06	0.019
	60	4.69	-0.59	3.51	0.022
	70	14.74	-19.96	-25.18	0.140

c. 在低应力水平下岩体的环向应变率较低,A-5-3 试样在前三级应力水平下环向流变应变变量分别为 -0.32×10^{-3} 、 -0.24×10^{-3} 、 -0.10×10^{-3} 和 -0.38×10^{-3} 。A-5-7 试样在 30 MPa 及 40 MPa 应力水平下环向应变仅为 -0.10×10^{-3} 和 -0.20×10^{-3} ;在 50 MPa 应力水平后期环向变形显著增大,原因可能是含软弱夹层的层状岩体不同部位力学性质存在差异,软弱夹层部分开裂引起体积膨胀。

d. 试样体积应变可以反映岩石在流变过程中裂隙的扩展情况,A-5-3 试样在加速流变前均表现为体积应变增大,即试样体积收缩,表明试样在较低应力水平下尚未产生大量裂隙,而 A-5-7 试样在 50 MPa 应力水平下体积应变突变,试样出现了一定程度的膨胀,原因可能是此时软弱夹层岩石中力学性质较薄弱的部位在应力作用下产生了较大裂隙,随后体积应变趋于平稳。

2.2 岩体加速流变特性

岩石流变变形过程可分为前期流变、稳态流变及加速流变 3 个阶段^[18]。当应力水平显著高于岩石长期强度时,岩石内部裂隙扩展、贯通较快,岩石会迅速进入加速流变阶段,此时稳态流变阶段持续时间较短,甚至可能由前期流变直接发展至加速流变。

A-5-3 试样在 48 MPa 应力加载 5 h 后就进入加速流变阶段,稳态流变阶段仅持续 4.75 h,加速流变 1.83 h 后试样就发生破坏。A-5-7 试样经过约 14 h 的初期流变,流变速率降低为 $0.140\times 10^{-3}\text{h}^{-1}$,在 70 MPa 应力加载 60 h 后试样进入加速流变状态,流变速率逐渐提高,加速流变阶段达到 12 h 后试样破坏。含软弱夹层的

层状岩体试样与普通岩块试样的加速流变特征存在明显差异,在加速流变发生之前试样已经发生较大的轴向应变,原因是软弱夹层相较于岩块会更早发生较大变形。

2.3 岩体长期强度

初期流变阶段,岩体轴向应变速率逐渐降低。在稳态流变阶段,岩体应变速率基本保持不变,随着加载时间的增长,岩体变形如果收敛,则岩体不会发生流变破坏,若岩体变形突然加速增长则岩石进入加速流变状态,并最终发展为流变破坏。岩体由稳态流变转向加速流变的临界应力水平就是岩体的长期强度。

采用稳态流变速率法,首先对稳态流变速率及应力水平进行无量纲化处理,以应力水平为 0、稳态流变速率为 0 作为坐标轴起始点,以最高应力水平及其对应的稳态流变速率作为 1,根据应力水平与稳态流变速率的关系作拟合曲线,将拟合曲线斜率为 1 的点对应的应力作为岩体的长期强度^[19]。

经过无量纲化方法处理后的稳态流变速率与应力水平满足指数关系:

$$\tilde{\varepsilon} = a e^{b\tilde{\sigma}}$$

(1)

式中: $\tilde{\varepsilon}$ ——无量纲化处理后的稳态流变速率; a 、 b ——拟合参数; $\tilde{\sigma}$ ——无量纲化处理后的应力水平。

以斜率为 1 对应的点作为函数曲线临界点,将临界点对应的应力水平作为岩石试样的长期强度 σ_{∞} 。对应的无量纲值 $\tilde{\sigma}_{\infty}$,随后可得到长期强度 σ_{∞} 。

$$\tilde{\varepsilon}' = a b e^{b\tilde{\sigma}_{\infty}} = 1$$

(2)

$$\tilde{\sigma}_{\infty} = \frac{-\ln(ab)}{b}$$

(3)

$$\sigma_{\infty} = \tilde{\sigma}_{\infty} \sigma_{\max}$$

(4)

式中: $\sigma_{\max}$ ——最后一级应力水平。

层状岩体稳态流变速率与应力水平的关系及指数拟合曲线见图 3,拟合得到的 A-5-3 试样拟合参数 a 、 b 分别为 2.30×10^{-7} 和 15.3,长期强度为 39.4 MPa;A-5-7 试样拟合参数 a 、 b 分别为 1.90×10^{-5} 和 10.9,长期强度为 54.5 MPa。

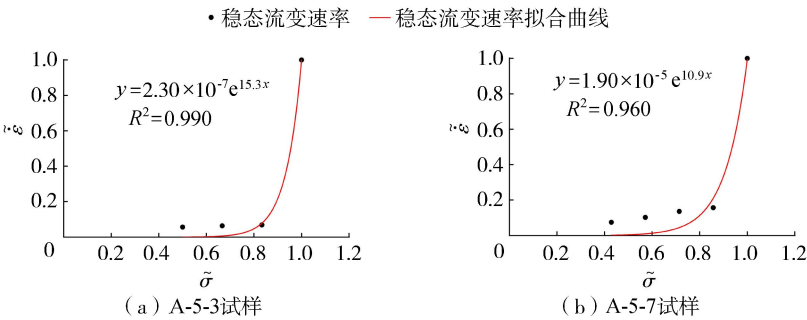


图 3 层状岩体稳态流变速率与应力水平的关系

Fig.3 Relation between steady rheological strain rate and stress of layered rock mass

3 多层状岩体非线性损伤流变模型

含软弱夹层的层状岩体由力学性质差异较大的 2 种材料组成,在应力加载过程中,岩体轴向变形为 2 种材料变形之和。在 Maxwell 体的基础上串联 2 个 Kelvin 体 KH、KS 作为流变模型,对含软弱夹层的层状岩体流变曲线进行辨识。流变模型可以描述初期流变和稳态流变时的岩石变形特性,无法描述加速流变阶段。为此,在上述模型基础上进一步引入统计损伤变量,假定岩体在应力水平高于长期强度后损伤量服从加载时间 t 的 Weibull 分布^[20],其中比例参数 λ 取 1,则损伤量的概率密度函数为

$$f(t) = n t^{n-1} e^{-t^n}$$

(5)

式中: t ——加载时间; n ——Weibull 分布参数。

t 时间后岩体内部的损伤变量 D 为

$$D = \int_0^t f(x) dx = 1 - e^{-t^n}$$

(6)

当应力水平小于岩体长期强度 σ_∞ 时,塑性元件不发生变形,因此损伤元件对岩体流变变形没有影响,此时的状态方程如下:

$$\begin{cases} \sigma_M = E_M \varepsilon_{M1} \\ \sigma_M = \eta_M \dot{\varepsilon}_{M2} \\ \sigma_{KH} = E_{KH} \varepsilon_{KH} + \eta_{KH} \dot{\varepsilon}_{KH} \\ \sigma_{KS} = E_{KS} \varepsilon_{KS} + \eta_{KS} \dot{\varepsilon}_{KS} \\ \sigma = \sigma_M = \sigma_{K1} = \sigma_{K2} \\ \varepsilon_M = \varepsilon_{M1} + \varepsilon_{M2} \\ \varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_{KH} + \varepsilon_{KS} \end{cases} \quad (7)$$

式中: σ_M 、 E_M 、 η_M 、 ε_{KH} ——Maxwell 体的应力、瞬时弹性模量、黏滞系数和应变; ε_{M1} 、 ε_{M1} ——Maxwell 体弹性元件和黏性元件的应变; σ_{KH} 、 E_{KH} 、 η_{KH} 、 ε_{KH} ——反映硬岩变形特征的 Kelvin 体的应力、黏弹性模量、黏滞系数和应变; σ_{KS} 、 E_{KS} 、 η_{KS} 、 ε_{KS} ——反映软弱夹层变形特征的 Kelvin 体的应力、黏弹性模量、黏滞系数和应变; σ ——偏应力; ε ——岩体轴向应变。

当应力水平高于岩体长期强度后,塑性元件变形趋于无穷大,此时流变模型受损伤元件影响,对应的状态方程如下:

$$\begin{cases} \sigma_M = E_M \varepsilon_{M1} = \eta_M \dot{\varepsilon}_{M2} \\ \sigma_{KH} = E_{KH} \varepsilon_{KH} + \eta_{KH} \dot{\varepsilon}_{KH} \\ \sigma_{KS} = E_{KS} \varepsilon_{KS} + \eta_{KS} \dot{\varepsilon}_{KS} \\ \sigma_D - \sigma_\infty = E_D \varepsilon_D \\ \varepsilon_D = \frac{\sigma_D - \sigma_\infty}{(1 - D) E_D} = \frac{\sigma_D - \sigma_\infty}{E_D} e^{t^n} \\ \sigma = \sigma_M = \sigma_{KH} = \sigma_{KS} = \sigma_D \\ \varepsilon_M = \varepsilon_{M1} + \varepsilon_{M2} \\ \varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_{KH} + \varepsilon_{KS} + \varepsilon_D \end{cases} \quad (8)$$

式中: σ_D ——非线性损伤体应力; E_D ——损伤元件损伤为 0 时的弹性模量; ε_D ——非线性损伤体的应变。

根据式(7)和式(8),可得到岩体损伤流变方程:

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_M} + \left(\frac{\sigma}{\eta_M}\right)t + \frac{\sigma}{E_{KH}} \left(1 - e^{-\frac{E_{KH}}{\eta_{KH}}t}\right) + \frac{\sigma}{E_{KS}} \left(1 - e^{-\frac{E_{KS}}{\eta_{KS}}t}\right) & \sigma < \sigma_\infty \\ \frac{\sigma}{E_M} + \left(\frac{\sigma}{\eta_M}\right)t + \frac{\sigma}{E_{KH}} \left(1 - e^{-\frac{E_{KH}}{\eta_{KH}}t}\right) + \frac{\sigma}{E_{KS}} \left(1 - e^{-\frac{E_{KS}}{\eta_{KS}}t}\right) + \frac{\sigma - \sigma_\infty}{E_D} e^{t^n} & \sigma \geq \sigma_\infty \end{cases} \quad (9)$$

层状岩体损伤流变模型如图 4 所示。采用非线性损伤流变模型对不同应力水平条件下岩石试样流变曲线进行参数辨识,拟合得到含软弱夹层的层状岩体流变模型参数如表 2 所示。

含软弱夹层的层状岩体损伤流变模型拟合曲线与流变试验结果对比见图 5。从图 5 中可以看出损伤流变模型与实际试验数据拟合效果较理想,所有应力水平下的拟合相关系数均大于 0.99,表明本文提出的流变模型可准确描述初期流变、稳态流变及加速流变的轴向应变变形特征。

表 2 中: E_M 可以反映岩体在加载时的瞬时轴向应变,参数辨识结果具有很好的一致性,随着应力水平的升高,试样 E_M 持续降低,且高围压条件下试样 E_M 比低围压条件下有显著提升; η_M 可以反映岩体的稳态流变速率,随着应力水平的增加,试样黏滞系数逐渐降低,稳态流变速率有所提升; E_{K1} 、 η_{K1} 、 E_{K2} 和 η_{K2} 可以反映

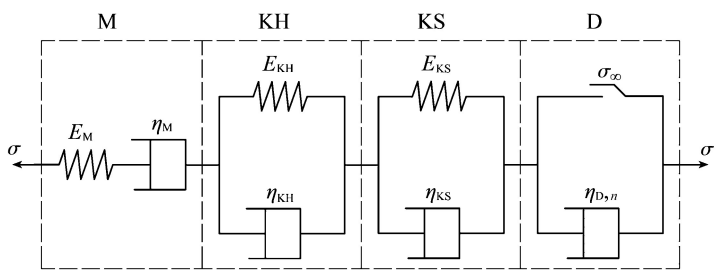


图 4 层状岩体损伤流变模型

Fig.4 Damage rheological model for the layered rock mass

层状岩体中硬岩和软弱夹层初期流变阶段的轴向变形量及初级流变的持续时间; E_D 和 n 则反映了岩体加速流变阶段变形量及持续时间。

表 2 试样流变模型参数
Table 2 Rheological model parameters of samples

试样编号	应力水平/MPa	E_M /GPa	$\eta_M/(GPa \cdot h)$	E_{KH} /GPa	$\eta_{KH}/(GPa \cdot h)$	E_{KS} /GPa	$\eta_{KS}/(GPa \cdot h)$
A-5-3	24	3.89	6 580.04	19.74	170.97	9.38	8.48
	32	2.85	8 306.88	71.29	44.29	19.57	236.14
	40	2.73	7 439.01	346.60	1 477.24	23.92	316.13
	48	2.71	93 497.04	87.01	1.41	14.88	186.79
A-5-7	30	5.51	13 327.98	7 538.89	28 780.33	30.75	290.83
	40	4.91	14 308.84	527.57	1 660.96	25.32	377.37
	50	4.32	9 762.64	7 716.92	24 158.03	25.29	295.68
	60	3.78	7 443.75	545.30	32 168.63	32.84	339.28
	70	3.47	490.55	1 749.27	4.56	55.99	216.41

注:A-5-3 试样在 48 MPa 应力水平条件下 E_D 为 2.71×10^7 GPa, n 为 1.42;A-5-7 试样在 70 MPa 应力水平条件下 E_D 为 3.66×10^7 GPa, n 为 1.16。

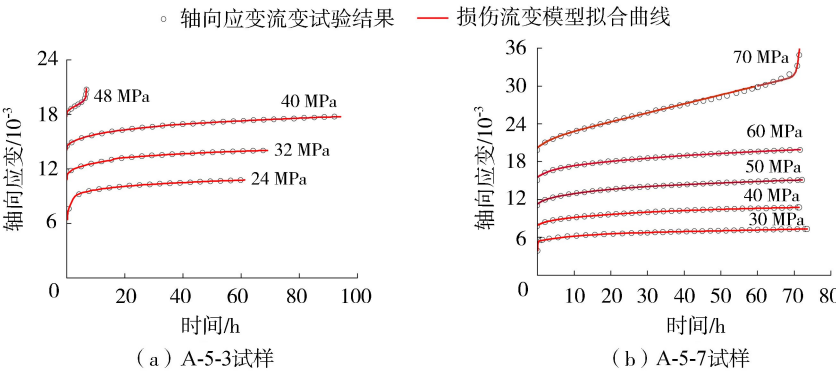


图 5 损伤流变模型拟合曲线与试验结果对比

Fig. 5 Comparison between fitting curves of damage rheological model and experimental curves

4 结 论

- a. 在应力水平较低时,含软弱夹层岩体的流变应变量较小,稳态流变速率低,岩体在加载后处于稳定状态;如果应力水平高于岩体的长期强度,试样内部出现新生裂隙并不断扩展、贯通,试样损伤随加载时间的增长逐渐积累,试样进入加速流变阶段并发生破坏。
- b. 流变试验中岩体的稳态流变速率与应力水平呈指数关系,对岩体稳态流变速率-应力水平数据进行指数拟合。拟合曲线斜率为 1 的点对应的应力水平可作为岩体长期强度的预估值。含软弱夹层的层状岩体试样在围压为 3 MPa、渗压 2 MPa 条件下长期强度为 39.4 MPa,在围压为 7 MPa、渗压 2 MPa 条件下长期强度为 54.5 MPa。
- c. 根据含软弱夹层的多层状岩体流变试验结果,建立层状岩体流变力学模型,引入非线性损伤元件以模拟岩体加速流变阶段。采用流变试验结果对流变模型进行参数辨识,结果表明,建立的非线性损伤流变模型可描述多层状复合岩体的流变力学特性。

参考文献:

[1] TIEN Yongming, TSAO P F. Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(6):1001-1012.

[2] TIEN Yongming, KUO Mingchuan. A failure criterion for transversely isotropic rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(3):399-412.

[3] TALIERCIO A, LANDRIANI G S. A failure condition for layered rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1988, 25(5):299-305.

[4] 张桂民, 李银平, 杨长来,等. 软硬互层盐岩变形破坏物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9):1813-

1820. (ZHANG Guimin, LI Yiping, YANG Changlai, et al. Physical simulation of deformation and failure mechanism of soft and hard interbedded salt rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9):1813-1820. (in Chinese))
- [5] 黄书岭, 徐劲松, 丁秀丽, 等. 考虑结构面特性的层状岩体复合材料模型与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4):743-756. (HUANG Shuling, XU Jinsong, DING Xiuli, et al. Study of layered rock mass composite model based on characteristics of structural plane and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4):743-756. (in Chinese))
- [6] 黄书岭, 丁秀丽, 邬爱清, 等. 层状岩体多节理本构模型与试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8):1627-1635. (HUANG Shuling, DING Xiuli, WU Aiqing, et al. Study of multi-joint constitutive model of layered rockmass and experimental verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8):1627-1635. (in Chinese))
- [7] FORTSAKIS P, NIKAS K, MARINOS V, et al. Anisotropic behaviour of stratified rock masses in tunnelling[J]. Engineering Geology, 2012, 141/142:74-83.
- [8] 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):3410-3418. (DING Xiuli, FU Jing, LIU Jian, et al. Study on creep behavior of alternatively distributed soft and hard rock layers and slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19):3410-3418. (in Chinese))
- [9] 李昂, 邵国建, 范华林, 等. 基于细观层次的软硬互层状复合岩体力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊1):3042-3049. (LI Ang, SHAO Guojian, FAN Hualin, et al. Investigation of mechanical properties of soft and hard interbedded composite rock mass based on meso-level heterogeneity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup1):3042-3049. (in Chinese))
- [10] 徐卫亚, 杨圣奇, 谢守益, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(II):模型分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(5):693-698. (XU Weiya, YANG Shengqi, XIE Shouyi, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen (II): model analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5):693-698. (in Chinese))
- [11] WANG Rubin, XU Weiya, WANG Wei, et al. A nonlinear creep damage model for brittle rocks based on time-dependent damage[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2013, 17(Sup1):111-125.
- [12] ZHAO Yanlin, WANG Yixian, WANG Weijun, et al. Modeling of non-linear rheological behavior of hard rock using triaxial rheological experiment[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 93:66-75.
- [13] 左建平, 谢和平, 孟冰冰, 等. 煤岩组合体分级加卸载特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5):1287-1296. (ZUO Jianping, XIE Heping, MENG Bingbing, et al. Experimental research on loading-unloading behavior of coal-rock combination bodies at different stress levels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5):1287-1296. (in Chinese))
- [14] 李昂, 邵国建, 苏静波, 等. 软硬互层状岩体的室内单轴压缩试验及数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(6):67-72. (LI Ang, SHAO Guojian, SU Jingbo, et al. Uniaxial compression test and numerical simulation for alternatively soft and hard interbedded rock mass[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(6):67-72. (in Chinese))
- [15] 鲁海峰, 姚多喜, 胡友彪, 等. 基于FLAC3D多裂隙模型的层状岩质边坡破坏特征及稳定性[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(4):36-41. (LU Haifeng, YAO Duoxi, HU Youbiao, et al. Analysis of failure characteristics and stability of layered rock slope based on multi-fracture model of FLAC3D[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(4):36-41. (in Chinese))
- [16] 杨仁树, 李炜煜, 方士正, 等. 层状复合岩体冲击动力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(9):1747-1757. (YANG Renshu, LI Weiyu, FANG Shizheng, et al. Experimental study on impact dynamic characteristics of layered composite rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9):1747-1757. (in Chinese))
- [17] 周辉, 宋明, 张传庆, 等. 水平层状复合岩体变形破坏特征的围压效应研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2):465-473. (ZHOU Hui, SONG Ming, ZHANG Chuanqing, et al. Effect of confining pressure on mechanical properties of horizontal layered composite rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2):465-473. (in Chinese))
- [18] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1993:91-92.
- [19] 顾锦健. 地下洞室群围岩流变力学试验及长期稳定性研究:以乌东德水电站为例[D]. 南京:河海大学, 2013.
- [20] 蒋昱州, 徐卫亚, 王瑞红. 角闪斜长片麻岩流变力学特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1):339-345. (JIANG Yuzhou, XU Weiya, WANG Ruihong. Investigation on rheological mechanical properties of hornblende plagioclase gneiss[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup1):339-345. (in Chinese))