

互层状岩体的粘弹性流变模型及数值分析

熊良宵^{1,2}, 杨林德¹

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 以绿片岩和大理岩互层的层状岩体为研究对象, 分别建立单轴轴向压缩荷载垂直和平行于层理时的两种互层状岩体粘弹性流变模型, 采用有限差分程序 FLAC^{3D} 对互层状岩体进行了单轴压缩蠕变试验的数值分析, 将轴向应变的数值解与理论解进行对比, 验证这两种模型的正确性. 在数值分析中考虑大理岩夹层的体积分数、深度、条数和间距等对数值计算结果的影响. 研究结果表明, 轴向应变的数值解与理论解比较接近, 说明提出的两种互层状岩体粘弹性流变模型是正确的. 当进行单轴压缩蠕变试验的数值分析时, 轴向应变理论解与数值解的误差随着大理岩夹层的深度、条数和间距等的改变呈规律性的增加或者减小.

关键词: 互层状岩体; 粘弹性流变模型; FLAC^{3D}; 体积分数; 复合瞬时弹性模量

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Viscoelastic Rheological Model for Interlayered Rock Mass and Its Numerical Analysis

XIONG Liangxiao^{1,2}, YANG Linde¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: A study was made of the interlayered rock mass composed of greenschist and marble; two viscoelastic rheological models were built with axial uniaxial loading orientation perpendicular or parallel to bedding plane. The numerical analysis of uniaxial compression creep test for interlayered rock mass was done by using finite difference program FLAC^{3D}, and these two viscoelastic rheological models were verified by the comparison between theoretical value and numerical value of axial strain. Lots of influencing factors such as the volumetric content, depth, amount and interval of marble interlayer were taken into account in the

numerical analysis. The research results show that the numerical value matches the theoretical value well, therefore, these two viscoelastic rheological models are available and reasonable. The error between the numerical value and theoretical value will increase or decrease regularly with the change of the depth, amount and interval of marble interlayer.

Key words: interlayered rock mass; viscoelastic rheological model; FLAC^{3D}; volumetric content; composite instantaneous elastic modulus

自然界中, 很多岩石具有各向异性的特点, 以呈层状分布的软岩最为明显, 但有些变质岩也具有各向异性的特点, 比如绿片岩. 目前, 有关各向异性岩石的强度破坏准则和弹塑性本构模型的研究成果颇多, 而分析其流变特性时, 一般还是将其当作各向同性的流变介质来分析, 这种做法对某些质地较为均匀的岩体可满足工程要求的精度, 但对另外一些力学性质呈明显各向异性的岩体就不再适用^[1].

基于上述原因, 国内外有些学者开始对各向异性岩石的流变模型进行研究, 如 Zienkiewicz 和 Pande^[2]于 1977 年提出了一个特别简单的多层模型, 将岩体的粘塑性应变率视为各节理组和岩石材料的贡献的总和, 这种方法虽然适合于节理岩体, 但其模型本身也可视为各向异性流变模型, 也适用于层状岩体, 而李永盛等^[3]和张武功^[4]等分别对该模型进行了相应的改进. 张海东等^[5]则将正交各向异性岩体的弹性本构关系和各向同性的流变本构模型结合起来, 对地下洞室层状围岩进行粘弹性塑性有限元分析, 张玉军等^[1]建立的正交各向异性岩体和锚固正交各向异性岩体的粘弹-粘塑性模型也正是

收稿日期: 2009-06-01

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50639090)

作者简介: 熊良宵(1982—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为岩石力学与隧道工程. E-mail: xiongliangxiao@163.com

杨林德(1939—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为隧道与地下工程. E-mail: tjyanglinde@163.com

采用与文献[5]相同的原理.

实际上,需要基于岩石产生各向异性的原因建立相应的各向异性流变模型.如笔者对锦屏二级水电站的绿片岩进行了双轴压缩蠕变试验^[6],而绿片岩因为往往夹带白色大理岩条带,可以将其当作复合材料来考虑其流变特性.

本文以绿片岩和大理岩互层的层状岩体为研究对象,分别提出单轴压缩荷载垂直和平行于层理时的互层状岩体粘弹性流变模型,进行了相应的单轴压缩蠕变试验数值分析,通过对数值解与理论解进行对比来验证这两种模型的正确性,并在数值分析中考虑了大理岩夹层的体积分数、大理岩与绿片岩的瞬时弹性模量比值、夹层的深度和条数等对数值结果的影响.

1 互层状岩体的粘弹性流变模型

1.1 轴向荷载垂直于层理时的粘弹性流变模型

假定在轴向荷载作用下,绿片岩和大理岩的应力分布是均匀的,不考虑层间界面之间的相互影响.根据作者建立的硬岩各向同性六元件粘弹性流变模型^[7],如图1所示,可建立轴向荷载垂直于层间界面时的粘弹性流变模型,如图2所示.

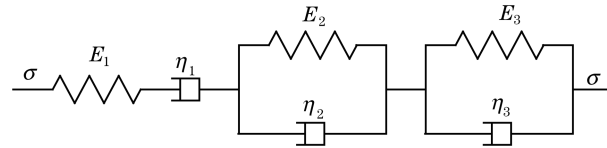


图1 六元件粘弹性流变模型

Fig.1 Six-component viscoelastic rheological model

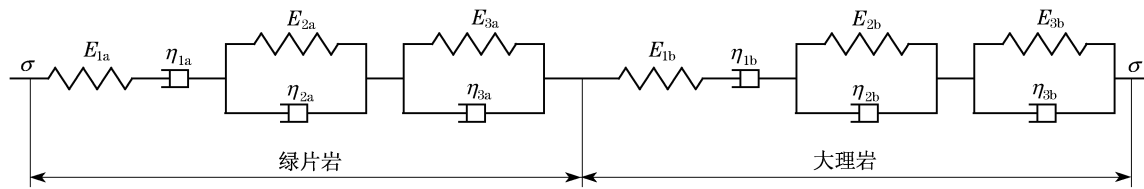


图2 轴向荷载垂直于层理时的粘弹性流变模型

Fig.2 Viscoelastic rheological model with axial loading orientation perpendicular to bedding plane

图1中: E_1 、 E_2 和 E_3 为材料的粘弹性模量; η_1 、 η_2 和 η_3 为材料的粘滞系数.

根据叠加原理,图2所示流变模型在轴向应力 σ 作用下其一维轴向蠕变方程为

$$\epsilon_1(t) = V_a \epsilon_{1a}(t) + V_b \epsilon_{1b}(t) \quad (1)$$

$$V_a + V_b = 1 \quad (2)$$

$$\epsilon_{1a}(t) = \frac{\sigma}{E_{1a}} + \frac{\sigma}{\eta_{1a}} t + \frac{\sigma}{E_{2a}} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_{2a}}{\eta_{2a}} t\right) \right) + \frac{\sigma}{E_{3a}} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_{3a}}{\eta_{3a}} t\right) \right) \quad (3)$$

$$\epsilon_{1b}(t) = \frac{\sigma}{E_{1b}} + \frac{\sigma}{\eta_{1b}} t + \frac{\sigma}{E_{2b}} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_{2b}}{\eta_{2b}} t\right) \right) + \frac{\sigma}{E_{3b}} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_{3b}}{\eta_{3b}} t\right) \right) \quad (4)$$

式(1)–(4)以及图2中: ϵ_1 、 ϵ_{1a} 和 ϵ_{1b} 分别为互层状岩体、绿片岩和大理岩的轴向应变; V_a 和 V_b 分别为代表单元内绿片岩和大理岩所占的体积分数; E_{1a} 为绿片岩的瞬时弹性模量; E_{2a} 和 E_{3a} 为绿片岩的粘弹性模量; η_{1a} 、 η_{2a} 和 η_{3a} 为绿片岩的粘滞系数; E_{1b} 为大理岩的瞬时弹性模量; E_{2b} 和 E_{3b} 为大理岩的粘弹性

模量; η_{1b} 、 η_{2b} 和 η_{3b} 为大理岩的粘滞系数.

由式(1)–(4)可确定轴向荷载垂直于层理时的复合瞬时弹性模量,其表达式如下:

$$\bar{E}_{\text{串联}} = \frac{E_{1a} E_{1b}}{V_b E_{1a} + V_a E_{1b}} \quad (5)$$

式中: $\bar{E}_{\text{串联}}$ 为轴向荷载垂直于层间界面时互层状岩体的复合瞬时弹性模量.

三轴应力状态下

$$\epsilon_{1a}(t) = \frac{1}{9K_a} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{6G_{1a}} + \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{6\eta_{1a}} t + \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{6G_{2a}} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_{2a}}{\eta_{2a}} t\right) \right] + \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{6G_{3a}} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_{3a}}{\eta_{3a}} t\right) \right] \quad (6)$$

$$\epsilon_{1b}(t) = \frac{1}{9K_b} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{6G_{1b}} + \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{6\eta_{1b}} t + \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{6G_{2b}} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_{2b}}{\eta_{2b}} t\right) \right] + \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{6G_{3b}} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_{3b}}{\eta_{3b}} t\right) \right] \quad (7)$$

且有

$$\left\{ \begin{array}{ll} K_a = \frac{E_{1a}}{3(1-2\mu_a)} & K_b = \frac{E_{1b}}{3(1-2\mu_b)} \\ G_{1a} = \frac{E_{1a}}{2(1+\mu_a)} & G_{1b} = \frac{E_{1b}}{2(1+\mu_b)} \\ G_{2a} = \frac{E_{2a}}{2(1+\mu_a)} & G_{2b} = \frac{E_{2b}}{2(1+\mu_b)} \\ G_{3a} = \frac{E_{3a}}{2(1+\mu_a)} & G_{3b} = \frac{E_{3b}}{2(1+\mu_b)} \end{array} \right. \quad (8)$$

式(6)–(8)中: K_a 为绿片岩的体积模量; G_{1a} 为绿片岩的瞬时弹性剪切模量; G_{2a} 和 G_{3a} 为绿片岩的粘弹性剪切模量; μ_a 为绿片岩的泊松比; K_b 为大理岩的体积模量; G_{1b} 为大理岩的瞬时弹性剪切模量; G_{2b} 和 G_{3b} 为大理岩的粘弹性剪切模量; μ_b 为大理岩的泊松比。

1.2 轴向荷载平行于层理时的粘弹性流变模型

可认为大理岩和绿片岩在受力后具有相同的应变,因此,将大理岩和绿片岩的流变模型并联得到轴向荷载平行于层间界面时的粘弹性流变模型,如图3所示。

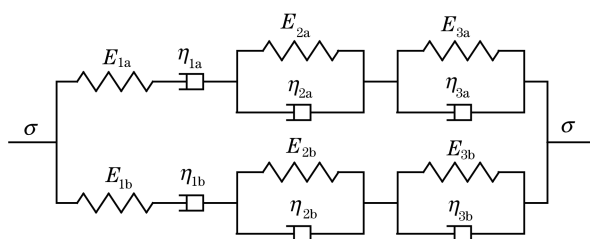


图3 轴向荷载平行于层理时的粘弹性流变模型
Fig.3 Viscoelastic rheological model when axial loading orientation is parallel to bedding plane

此时,互层状岩体的轴向应变和应力表达式为

$$\varepsilon_1(t) = \varepsilon_{1a}(t) = \varepsilon_{1b}(t) \quad (9)$$

$$\sigma = V_a \sigma_a + V_b \sigma_b \quad (10)$$

且有

$$\varepsilon_{1a}(t) = \sigma_a J_a(t) \quad (11a)$$

$$\varepsilon_{1b}(t) = \sigma_b J_b(t) \quad (11b)$$

$J_a(t)$ 和 $J_b(t)$ 的表达式分别为

$$J_a(t) = \frac{1}{E_{1a}} + \frac{t}{\eta_{1a}} + \frac{1}{E_{2a}} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_{2a}}{\eta_{2a}} t\right) \right) + \frac{1}{E_{3a}} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_{3a}}{\eta_{3a}} t\right) \right) \quad (12a)$$

$$J_b(t) = \frac{1}{E_{1b}} + \frac{t}{\eta_{1b}} + \frac{1}{E_{2b}} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_{2b}}{\eta_{2b}} t\right) \right) + \frac{1}{E_{3b}} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_{3b}}{\eta_{3b}} t\right) \right) \quad (12b)$$

式(9)–(12)中: σ , σ_a 和 σ_b 分别为互层状岩体、绿片岩和大理岩受到的轴向应力; $J_a(t)$, $J_b(t)$ 分别为绿

片岩和大理岩的蠕变柔度。

由式(9)–(11)可确定轴向荷载平行于层理时的复合瞬时弹性模量为

$$\bar{E}_{\text{并联}} = V_a E_{1a} + V_b E_{1b} \quad (13)$$

2 轴向荷载垂直于层理时的流变数值分析

2.1 数值计算模型

本文计算范围取横向(x 向)50 mm、竖向(z 向)100 mm、纵向(y 向)50 mm,当大理岩夹层的体积分数为20%时的计算模型如图4所示。

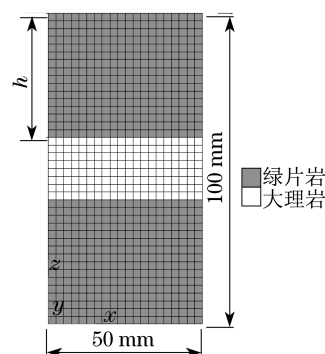


图4 计算模型

Fig.4 Computational model

图4中,模型上表面至大理岩夹层上表面的距离 h 定义为夹层的深度.根据作者对绿片岩单轴压缩蠕变试验曲线的拟合结果^[7]以及文献^[8],可对绿片岩和大理岩的粘弹性参数分别赋值。

绿片岩的粘弹性参数: $K_a = 8 \text{ GPa}$, $G_{1a} = 4.8 \text{ GPa}$, $\eta_{1a} = 10\,000 \text{ GPa} \cdot \text{h}$, $G_{2a} = 200 \text{ GPa}$, $\eta_{2a} = 10 \text{ GPa} \cdot \text{h}$, $G_{3a} = 240 \text{ GPa}$, $\eta_{3a} = 600 \text{ GPa} \cdot \text{h}$ 。

大理岩的粘弹性参数: $K_b = 14 \text{ GPa}$, $G_{1b} = 8.4 \text{ GPa}$, $\eta_{1b} = 20\,000 \text{ GPa} \cdot \text{h}$, $G_{2b} = 400 \text{ GPa}$, $\eta_{2b} = 20 \text{ GPa} \cdot \text{h}$, $G_{3b} = 480 \text{ GPa}$, $\eta_{3b} = 800 \text{ GPa} \cdot \text{h}$ 。

绿片岩和大理岩的泊松比均取为0.25.作者采用二次开发接口程序将六元件粘弹性流变模型嵌入到FLAC^{3D}中^[13],因此,本文采用该本构模型进行计算.在模型上表面分3级施加 $\sigma_c = 10, 20, 30 \text{ MPa}$ 的单轴竖向均布压力。

2.2 数值解与理论解的对比分析

根据式(1)可计算模型受到不同均布压力时的轴向应变理论解,通过数值计算可得到模型上表面中心点的轴向应变数值解.大理岩夹层体积分不同时轴向应变的数值解与理论解的对比结果如图5所示。

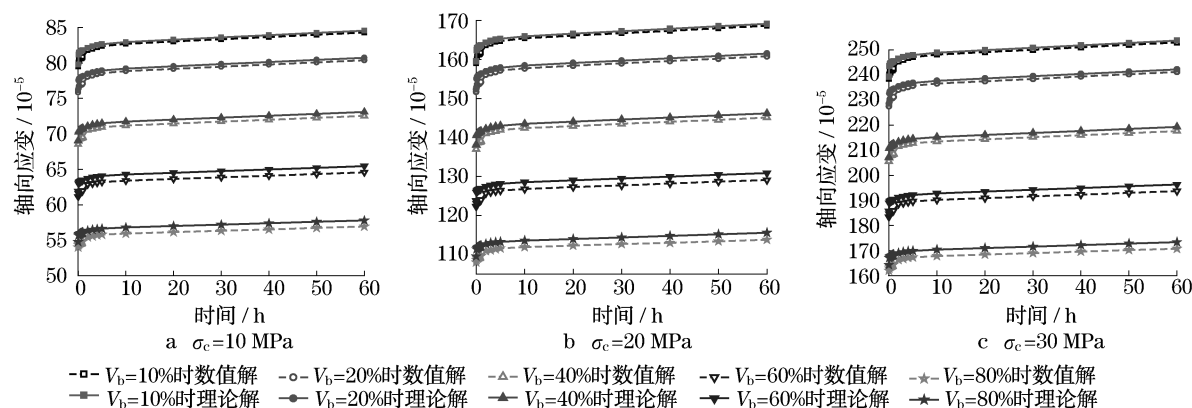


图5 不同应力作用下数值解与理论解的对比

Fig.5 Comparison between numerical value and analytical value under different stresses

由图5可知,当大理岩夹层的体积分数为10%~80%时,数值与理论计算得到轴向蠕变曲线间的吻合程度均比较高,且当大理岩夹层的体积分数为10%时两者之间的吻合程度最高。

2.3 夹层深度的影响

以大理岩夹层的体积分数为20%、竖向压力为20 MPa时的模型为例,讨论大理岩夹层深度对计算结果的影响,计算结果见图6。

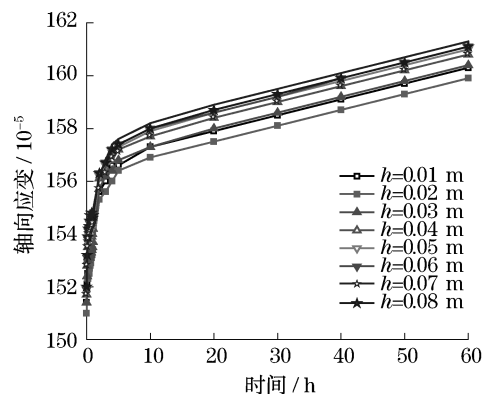


图6 大理岩夹层深度的影响

Fig.6 Influence of depth of marble interlayer

由图6可知,当大理岩夹层的体积分率相同时,随着夹层深度的增加,数值计算得到轴向应变呈增加的趋势,但总体变化量比较小。

2.4 夹层条数的影响

以大理岩夹层的体积分率为40%、竖向压力为20 MPa时的模型为例,讨论大理岩夹层的条数对计算结果的影响。当固定大理岩夹层的体积分率不变,且保持模型上表面至第一条夹层上表面的距离 h 不变,增加夹层条数时,计算得到的结果见图7。

由图7可知,若由1条夹层增加为2条夹层,轴向应变有所减小,但当数量由2条增加到更多时,夹

层条数的增加对数值解没有太大影响。

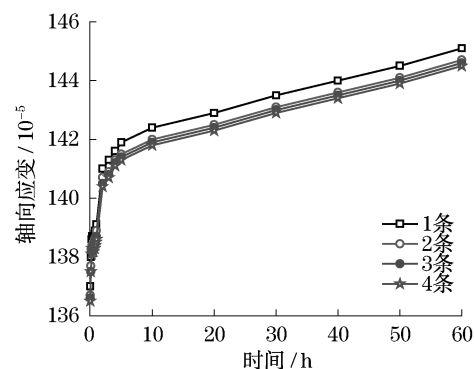


图7 轴向荷载垂直于层理时夹层条数的影响

Fig.7 Influence of interlayer amount when axial loading orientation is perpendicular to bedding plane

2.5 夹层间距的影响

以包含2条体积分率为10%的大理岩夹层来计算分析夹层间距对计算结果的影响。在分析时,保证第1条夹层上表面与模型上表面的距离不变,而依次改变两条大理岩夹层之间的间距,竖向压力为20 MPa时,计算结果如图8所示。

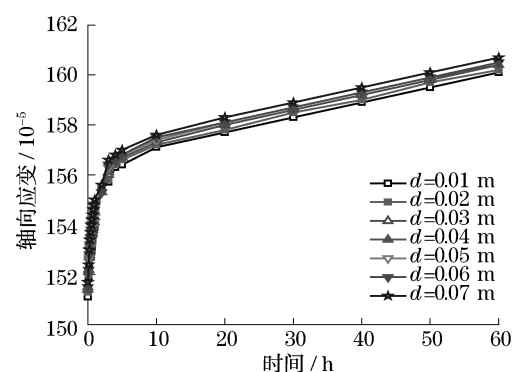


图8 夹层间距的影响

Fig.8 Influence of interlayer interval

由图8可知,当固定大理岩夹层的体积分数和条数不变而增加夹层的间距时,数值计算得到的轴向应变随着间距的增加而增加,但总体变化量比较小。

3 轴向荷载平行于层理时的流变数值分析

3.1 数值计算模型

当轴向荷载平行于层理时,为了能使两种岩石材料在轴向荷载作用下具有相同的轴向应变,则需要在试件上表面添加压板。本文将压板的弹性模量取为大理岩弹性模量的50倍,压板的厚度取为5 mm,在压板上施加20 MPa的竖向压力。

绿片岩和大理岩的粘弹性参数与2.1节中给出的参数一致,大理岩夹层体积分数为20%,40%,60%和80%时的计算模型如图9所示。本文分别跟踪绿片岩和大理岩层上表面中心点轴向应变随时间的变化规律,图9中实心圆点即为计算时设置的追踪点。

3.2 数值解与理论解的对比分析

根据式(9)可计算得到模型受到不同均布压力

时的轴向应变理论解。大理岩夹层的体积分数为20%,40%,60%和80%时, A_1 点、 B 点和 A_2 点轴向应变的数值解与理论解之间的对比结果见图10。

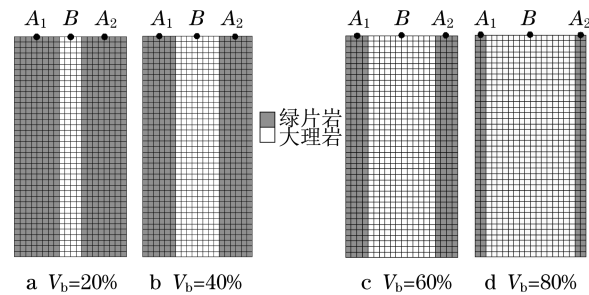


图9 不同大理岩夹层体积分数时的计算模型

Fig.9 Numerical model with different volumetric contents of marble interlayers

由图10可知,当大理岩夹层的体积分数为20%,40%,60%和80%时,数值与理论计算得到轴向蠕变曲线间的吻合程度均比较好,且当大理岩夹层的体积分数为80%时两者之间的吻合程度最高,这说明图4所示的理论模型是正确可行的。

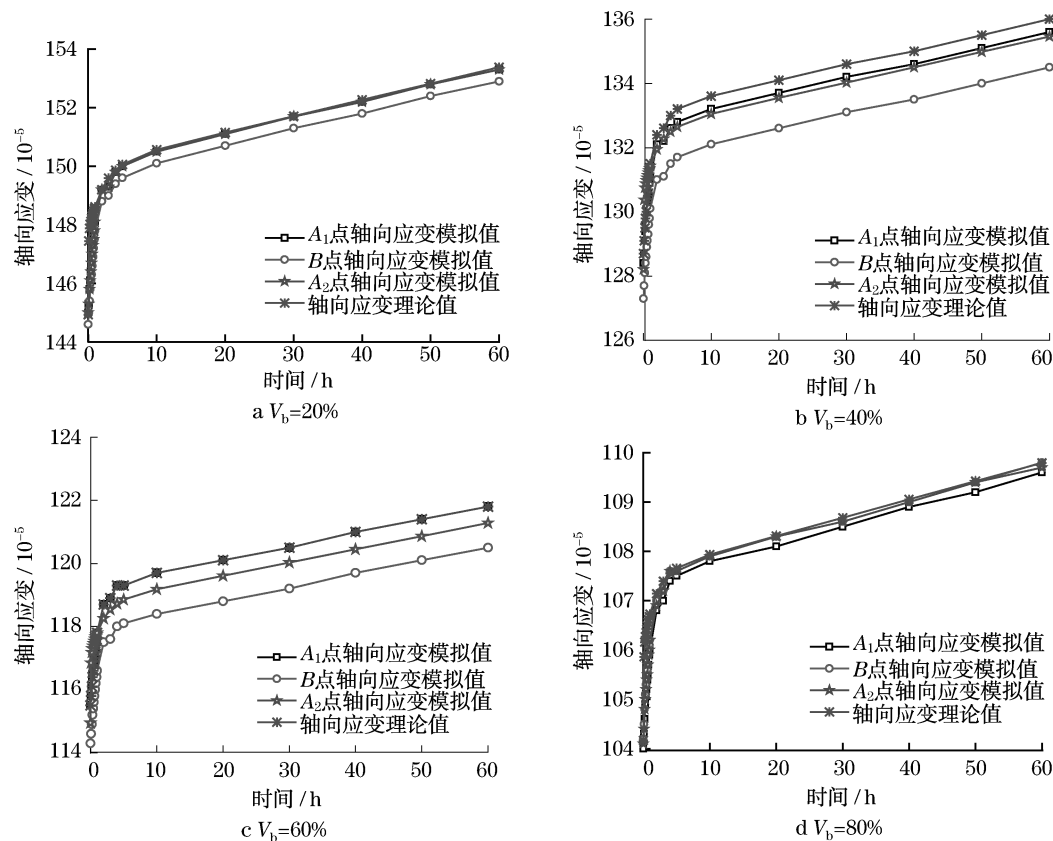


图10 不同大理岩夹层体积分数时数值解与理论解的对比

Fig.10 Contrast between numerical and analytical results with different volumetric contents of marbles

3.3 夹层条数的影响

以大理岩夹层的体积分数为40%为例,讨论大理岩夹层数量对计算结果的影响,计算模型如图11所示,计算得到的结果见图12.

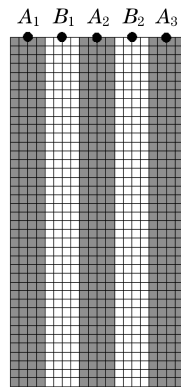


图11 计算模型

Fig.11 Numerical model

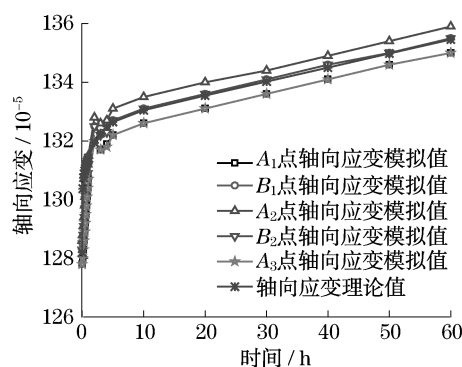


图12 轴向荷载平行于层理时夹层条数的影响

Fig.12 Influence of interlayer amount when axial loading orientation is parallel to bedding plane

对比图10与图12可知,当固定大理岩夹层的体积分数为40%时,绿片岩和大理岩层上表面的轴向应变之间的差距明显减小,说明随着大理岩夹层条数的增多,应变分布更加均匀.

4 结论

(1) 当进行轴向荷载垂直和平行于层理时的单轴压缩蠕变试验数值分析时,轴向应变的数值与理论解比较接近,说明提出的两种互层状岩体粘弹性流变模型是正确的.

(2) 当进行轴向荷载垂直于层理时的单轴压缩蠕变试验数值分析时,当固定大理岩夹层的体积分数不变时,随着夹层深度的增加,数值计算得到的轴向应变呈增加的趋势;当固定大理岩夹层的体积分

数不变而增加夹层条数时,数值计算得到的轴向应变呈减小的趋势;当固定大理岩夹层的体积分数和条数不变而增加夹层的间距时,数值计算得到的轴向应变呈增加的趋势.

(3) 当进行轴向荷载平行于层理时的单轴压缩蠕变试验数值分析时,固定大理岩夹层的体积分数不变时,随着夹层条数的增多,轴向应变分布更加均匀.

参考文献:

- [1] 张玉军,刘谊平.正交各向异性岩体中地下洞室稳定的粘弹-粘塑性三维有限元分析[J].岩土力学,2002,23(3):278.
ZHANG Yujun, LIU Yiping. 3D viscoelastic-visco plastic FEM analysis for stability of underground opening in orthotropic rockmass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(3): 278.
- [2] Zienkiewicz O C, Pande G N. Time-dependent multilaminate model of rocks—a numerical study of deformation and failure of rock mass [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1977(1): 219.
- [3] 李永盛,孙钧.多组节理岩体洞室的蠕变特性及其粘弹塑性效应[J].同济大学学报:自然科学版,1986,14(3):281.
LI Yongsheng, SUN Jun. The rheological characteristics of tunnel opening in multi-laminate joint rock mass and its viscous elasto-plastic effects[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1986, 14(3): 281.
- [4] 张武功.节理岩体多层弹粘塑性模型的隐式积分算法[J].岩土工程学报,1990,12(6):42.
ZHANG Wugong. Implicit time integration of elasto-viscoplastic multilaminate model for jointed rocks [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(6): 42.
- [5] 张海东,李宁.地下洞室层状围岩粘弹塑性有限元分析及计算程序[J].西安理工大学学报,1985(4):34.
ZHANG Haidong, LI Ning. A visco-plastic finite element analysis of underground opening in the layered rock and its program[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1985(4): 34.
- [6] 熊良宵,杨林德,张尧,等.锦屏二级水电站绿片岩的双轴压缩蠕变试验特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增2):3928.
XIONG Liangxiao, YANG Linde, ZHANG Yao, et al. Experimental study on creep behaviors of greenschist specimen under biaxial compression from Jinping-2 hydropower station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (Supp. 2): 3928.
- [7] 熊良宵.深部层状岩体的流变特性试验及本构模型[D].上海:同济大学土木工程学院,2009.
XIONG Liangxiao. Experimental study on deep layered rock mass and its constitutive model [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2009.
- [8] 徐卫亚,杨圣奇,褚卫江.岩石非线性粘弹塑性流变模型(河海模型)及其应用[J].岩石力学与工程学报,2006,25(3):433.
XU Weiya, YANG Shengqi, CHU Weijiang. 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.