

文章编号:1001-5485(2009)12-0071-05

# 含断续软弱夹层岩石流变力学特性研究

蒋昱州<sup>1,2</sup>, 徐卫亚<sup>2</sup>, 朱杰兵<sup>1</sup>, 王瑞红<sup>3</sup>, 杨圣奇<sup>2</sup>

(1. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098; 3. 武汉大学 水利水电学院, 武汉 430072)

**摘要:**岩石流变力学特性是岩石力学研究中的重要课题,与岩石工程长期稳定性有着十分密切的联系。基于大型岩土工程分析软件 FLAC<sup>3D</sup>,采用黏弹塑性流变本构模型,模拟了非贯通断续软弱夹层的不同间距、不同长度及倾角等因素条件下岩石的弹塑性变形与流变变形情况。研究分析了各种因素对岩体弹塑性变形与流变变形的影响以及各影响因素之间多重相关性。结果表明:夹层长度、夹层厚度与夹层间距两两之间都有着较强的相关性;岩桥倾角和夹层倾角与其他影响因素的相关性较弱。夹层长度、夹层间距和夹层厚度对岩石弹塑性变形以及流变变形量影响较大,岩桥倾角和夹层倾角对岩石变形影响不显著。

**关键词:**岩石力学;软弱夹层;流变;多重相关性;偏相关系数

**中图分类号:**TU485 **文献标识码:**A

## 1 概述

流变是岩石非常重要的力学特征,与岩石工程长期稳定性有着十分密切的联系<sup>[1-5]</sup>。岩石是一种复杂的地质材料体,其内部含有各种各样尺度不等的缺陷,如:软弱夹层、节理、裂纹以及断层等。岩体失稳破坏经常是沿着预先存在的软弱夹层或断层处发生的。为了探究各种岩石工程的失稳破坏机制,近几十年来,岩石力学工作者对裂隙岩石力学特性进行了大量的试验、理论和数值研究。这些研究<sup>[6-9]</sup>已经充分表明,岩石内部缺陷的分布对材料强度、变形以及破坏特性有着重要的影响。因此,对含内部初始缺陷岩石流变特性的研究有着极为重要的工程实际意义,是岩石力学研究中的热点和难点问题之一。

由于现场取样以及试样加工等条件的限制,对含软弱夹层、裂纹及节理等真实岩石材料进行室内物理力学试验存在着较大的困难。随着数值计算方法的迅速发展,一些学者利用数值分析软件来对含弱面的岩石进行数值试验分析;但绝大多数进行的是常规数值试验,没有分析岩石的流变效应。韩冰等<sup>[10]</sup>研究了应力状态及加载方式对贯通的软硬互层岩体时间相关性特征的影响。本文基于大型岩土工程分析软件 FLAC<sup>3D</sup>,采用黏弹塑性流变本构模型,分析了非贯通断续软弱夹层的间距、长度及倾角

等因素对岩体弹塑性变形与流变变形的影响;并研究分析了各影响因素之间的多重相关性。

## 2 数值试验模型

### 2.1 数值计算模型及边界条件

含非贯通断续软弱夹层岩石数值试验模型如图1所示,范围取 50 mm × 100 mm,夹层长度为  $a$ ,夹层厚度为  $b$ ,夹层间距  $c$ ,夹层倾角为  $\alpha$ ,两条夹层间的岩桥倾角为  $\beta$ 。数值试验的边界条件采用底面法向约束,两侧面自由,顶端面施加垂直恒定荷载 5 MPa。变形点为 A 处的弹塑性变形及流变变形量。设置数值试验方案如表 1 所示。

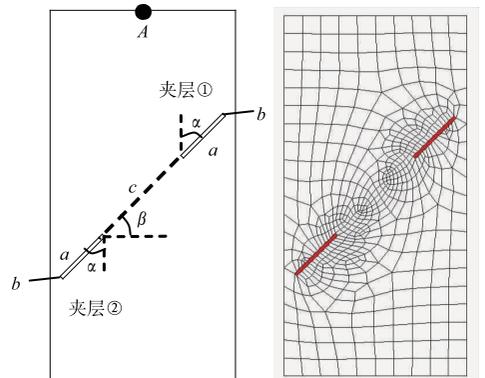


图1 模型几何特征及边界条件

Fig. 1 Model geometry feature and boundary conditions

收稿日期:2008-11-25; 修回日期:2009-01-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40872192,50709008,50979030); 雅砻江联合基金项目(50639090)

作者简介:蒋昱州(1982-),男,广西全州人,博士,主要从事岩石力学与工程方面的研究工作,(电话)027-82926542(电子信箱) jian-gyuzhou5586@163.com。

表1 数值试验方案  
Table 1 Numerical experiment scheme

夹层长度/ mm	夹层厚度/ mm	夹层间距/ mm	岩桥倾角/ (°)	夹层倾角/ (°)
14.4	1.0	30.0	45	0
14.4	1.0	30.0	45	30
14.4	1.0	30.0	45	45
14.4	1.0	30.0	45	60
14.4	1.0	30.0	45	90
4.0	1.0	30.0	45	45
8.0	1.0	30.0	45	45
12.0	1.0	30.0	45	45
16.0	1.0	30.0	45	45
20.4	1.0	30.0	45	45
16.0	0.5	38.8	45	45
16.0	1.0	38.8	45	45
16.0	1.5	38.8	45	45
16.0	2.0	38.8	45	45
16.0	2.5	38.8	45	45
16.0	1.0	10.0	45	45
16.0	1.0	15.0	45	45
16.0	1.0	20.0	45	45
16.0	1.0	25.0	45	45
16.0	1.0	30.0	45	45
12.0	1.0	25.0	0	45
12.0	1.0	25.0	30	45
12.0	1.0	25.0	45	45
12.0	1.0	25.0	60	45
12.0	1.0	25.0	90	45

2.2 材料本构模型及其参数

采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件中的 Cvisc 黏弹塑性流变模型来模拟含断续软弱夹层岩石的流变行为。Cvisc 模型是由 Burgers 流变模型与 Mohr-Coulomb 模型串连组合而成的复合模型,其一维应力状态下的流变模型如图 2 所示。

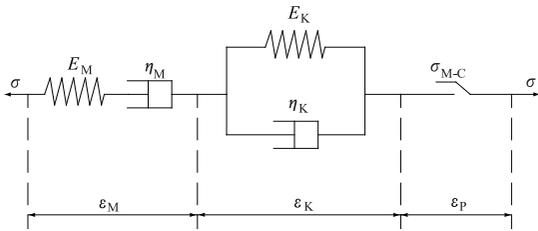


图2 Cvisc 流变模型示意图

Fig. 2 Illustration of Cvisc rheological model

流变模型相应的蠕变方程为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_M} + \left(\frac{\sigma}{\eta_M}\right)t + \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K}t}\right) + \epsilon_p, \quad (1)$$

式中:下角标“M”,“K”分别为 Maxwell 体和 Kelvin 体对应的力学分量, \$\epsilon\_p\$ 为塑性变形; \$E\_M, \eta\_M, E\_K, \eta\_K\$ 分别为 Maxwell 体和 Kelvin 体的弹性模量与黏滞系数。

选取尽可能短的时间间隔 \$\Delta t\$, 假设在此时间间隔内单元应力保持不变, 用应力与应变偏量的增量

形式来表示三维本构方程为<sup>[6,11-12]</sup>

$$\Delta e_{ij} = \frac{\Delta S_{ij}}{2G_M} + \left(\frac{\bar{S}_{ij}}{2\eta_M}\right)\Delta t + \left(\frac{G_K}{\eta_K}\right)\bar{e}_{Kij}\Delta t - \left(\frac{\bar{S}_{ij}}{2\eta_K}\right)\Delta t + \Delta e_{Pij}, \quad (2)$$

式中: \$e\_{ij}, \Delta e\_{ij}, S\_{ij}, \Delta S\_{ij}\$ 分别为应变偏量, 应变偏量增量, 应力偏量, 应力偏量增量; 上标“-”表示该变量在时间间隔 \$\Delta t\$ 内的平均值; \$G\_M, \eta\_M, G\_K, \eta\_K\$ 分别为 Maxwell 体和 Kelvin 体的剪切模量与粘性剪切系数; 其塑性部分为

$$\Delta e_{Pij} = \Delta\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} - \frac{1}{3}\Delta e_{pv}\delta_{ij}, \quad (3)$$

式中 \$g\$ 为塑性势函数。当采用相关联流动准则时, 塑性势函数可取为塑性屈服函数, 且塑性体积应变偏量增量为

$$\Delta e_{pv} = \Delta\lambda \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{11}} + \frac{\partial g}{\partial \sigma_{22}} + \frac{\partial g}{\partial \sigma_{33}}\right). \quad (4)$$

塑性准则采用 Mohr-Coulomb 剪切破坏和拉破坏相结合的复合准则, 其 Mohr-Coulomb 准则的屈服函数分别为如下方程:

剪切屈服破坏,

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N\varphi + 2C \sqrt{N\varphi}; \quad (5)$$

张拉屈服破坏,

$$f^t = \sigma^t - \sigma_3. \quad (6)$$

式中: \$C\$ 为材料的粘聚力; \$\varphi\$ 为内摩擦角; \$\sigma^t\$ 为抗拉强度; \$N\varphi = (1 + \sin\varphi)(1 - \sin\varphi)\$; \$\sigma\_1, \sigma\_3\$ 分别为最大主应力和最小主应力。

岩石基本参数取值如表 2 所示; Cvisc 黏弹塑性流变模型相应的力学参数如表 3 所示。其中 \$E\_K, \eta\_K\$ 分别为 Kelvin 体上的黏弹性模量和黏滞系数; \$E\_M, \eta\_M\$ 分别为 Maxwell 体上的弹性模量和黏滞系数。

表2 岩石基本参数

Table 2 Basic parameters of rock mass

岩石类型	重度/ (kN · m <sup>-3</sup> )	弹模 \$E\$/ GPa	泊松比 \$\mu\$	粘聚力 \$C\$/MPa	内摩擦 角/(°)	抗拉强 度/MPa
岩石	26.8	20	0.22	2	55	2
软弱夹层	24	1	0.35	0.5	30	0.2

表3 岩石流变力学参数

Table 3 Rheological parameters of rock mass

岩石类型	\$E_M\$/ GPa	\$\eta_M\$/ (GPa · d)	\$E_K\$/ GPa	\$\eta_K\$/ (GPa · d)
岩石	20	7600	90	230
软弱夹层	1	300	5	26

3 结果分析

3.1 夹层倾角对岩石变形的影响

保持其他条件不变, 夹层的倾角分别取 0°,

30°, 45°, 60°, 90°时, 含非贯通断续软弱夹层岩石流变 30 d 的流变曲线如图 3 所示。夹层的倾角为 0° 时, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.358 \times 10^{-2}$  mm, 流变 30 d 后的流变变形量为  $0.230 \times 10^{-2}$  mm; 夹层的倾角为 30° 时, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.416 \times 10^{-2}$  mm, 流变 30 d 后的流变变形量为  $0.241 \times 10^{-2}$  mm; 夹层的倾角为 45° 时, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.422 \times 10^{-2}$  mm, 流变 30 d 后的流变变形量为  $0.254 \times 10^{-2}$  mm; 夹层的倾角为 60° 时, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.407 \times 10^{-2}$  mm, 流变 30 d 后的流变变形量为  $0.260 \times 10^{-2}$  mm; 夹层的倾角为 90° 时, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.390 \times 10^{-2}$  mm, 流变 30 d 后的流变变形量为  $0.240 \times 10^{-2}$  mm。如图 4 所示, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形随夹层倾角的增大, 呈现先增大后减小的趋势, 规律与三次多项式曲线吻合较好, 其中夹层倾角为 45° 时变形最大。流变 30 d 后的流变变形量随夹层倾角的增大, 亦呈现先增大后减小的趋势, 亦符合三次多项式曲线规律, 其中夹层倾角为 60° 时变形最大。

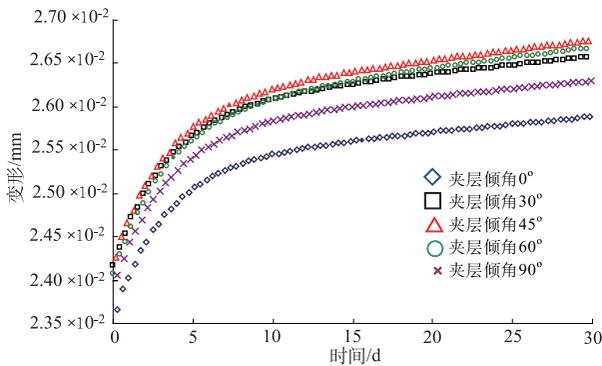


图 3 不同夹层条件下的岩石流变曲线

Fig. 3 Creep curves under different intercalation conditions

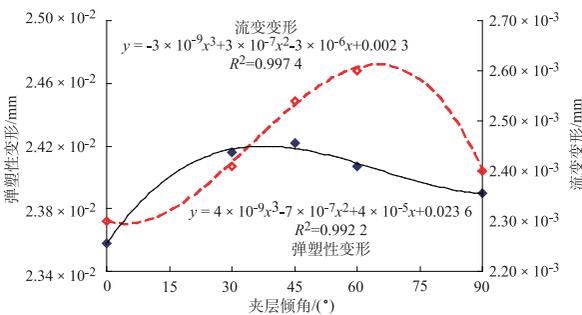


图 4 弹塑性、流变变形与夹层倾角关系

Fig. 4 Correlation between deformation and intercalation angle

### 3.2 夹层长度对岩石变形的影响

保持其他条件不变, 夹层的长度分别取 4, 8, 12, 16, 20.4 mm 时, 含非贯通断续软弱夹层岩石流

变 30 d 的流变变形如图 5 所示。夹层的长度为 4 mm 时, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.353 \times 10^{-2}$  mm, 流变 30 d 后的流变变形量为  $0.231 \times 10^{-2}$  mm; 夹层的长度为 8 mm 时, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.366 \times 10^{-2}$  mm, 流变 30 d 后的流变变形量为  $0.236 \times 10^{-2}$  mm; 夹层的长度为 12 mm 时, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.413 \times 10^{-2}$  mm, 流变 30 d 后的流变变形量为  $0.254 \times 10^{-2}$  mm; 夹层的长度为 16 mm 时, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.438 \times 10^{-2}$  mm, 流变 30 d 后的流变变形量为  $0.261 \times 10^{-2}$  mm; 夹层的长度为 20.4 mm 时, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.888 \times 10^{-2}$  mm, 流变 30 d 后的流变变形量为  $0.305 \times 10^{-2}$  mm。如图 5 所示, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形与流变 30 d 后的流变变形量均随夹层长度的增大而增大, 且近似呈现线性关系; 其中夹层长度在 16 mm 至 20.4 mm 之间时, 变形增加量变化较为显著。

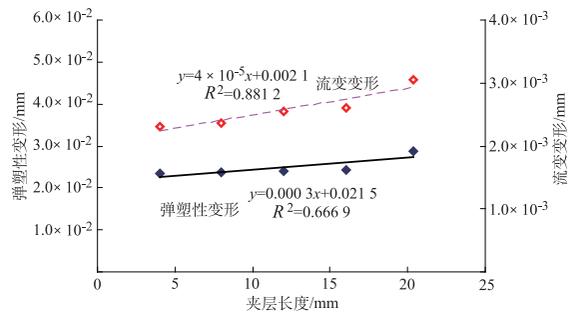


图 5 弹塑性、流变变形与夹层长度关系

Fig. 5 Correlation between deformation and intercalation length

### 3.3 夹层厚度对岩石变形的影响

保持其他条件不变, 夹层的厚度分别取 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 mm 时, 含非贯通断续软弱夹层岩石流变 30 d 的流变变形如图 6 所示。夹层的厚度为 0.5 mm 时, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.587 \times 10^{-2}$  mm, 流变 30 d 后的流变变形量为  $0.267 \times 10^{-2}$  mm; 夹层的厚度为 1 mm 时, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.661 \times 10^{-2}$  mm, 流变 30 d 后的流变变形量为  $0.273 \times 10^{-2}$  mm; 夹层的厚度为 1.5 mm 时, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.637 \times 10^{-2}$  mm, 流变 30 d 后的流变变形量为  $0.302 \times 10^{-2}$  mm; 夹层的厚度为 2 mm 时, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.694 \times 10^{-2}$  mm, 流变 30 d 后的流变变形量为  $0.297 \times 10^{-2}$  mm; 夹层的厚度为 2.5 mm 时, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.712 \times 10^{-2}$  mm, 流变 30 d 后的流变变形量为  $0.309 \times 10^{-2}$  mm。如图 6 所示, 含软弱夹层岩石的弹塑性变形与流变 30 d 后的流变变形量均随夹层厚度的增大而增大, 且近似呈

现线性关系。其中夹层厚度在 2 mm 至 2.5 mm 之间时,变形增加量变化较为明显。

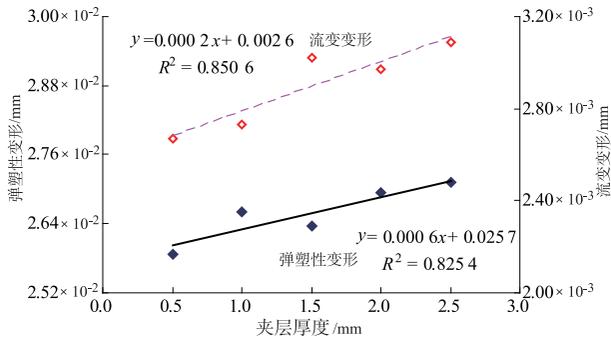


图6 弹塑性、流变变形与夹层厚度关系图

Fig. 6 Correlation between deformation and intercalation thickness

### 3.4 夹层间距对岩石变形的影响

保持其他条件不变,夹层的间距分别取 10, 15, 20, 25, 30 mm 时,含非贯通断续软弱夹层岩石流变 30 d 的流变变形如图 7 所示。夹层的间距为 10 mm 时,含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.452 \times 10^{-2}$  mm,流变 30 d 后的流变变形量为  $0.257 \times 10^{-2}$  mm; 夹层的间距为 15 mm 时,含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.458 \times 10^{-2}$  mm,流变 30d 后的流变变形量为  $0.263 \times 10^{-2}$  mm; 夹层的间距为 20 mm 时,含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.438 \times 10^{-2}$  mm,流变 30 d 后的流变变形量为  $0.257 \times 10^{-2}$  mm; 夹层的间距为 25 mm 时,含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.471 \times 10^{-2}$  mm,流变 30 d 后的流变变形量为  $0.269 \times 10^{-2}$  mm; 夹层的间距为 30 mm 时,含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.438 \times 10^{-2}$  mm,流变 30 d 后的流变变形量为  $0.261 \times 10^{-2}$  mm。如图 7 所示,含软弱夹层岩石的弹塑性变形与流变 30 d 后的流变变形量随夹层间距的增大而增大,变形增加量变化规律性较为不明显。

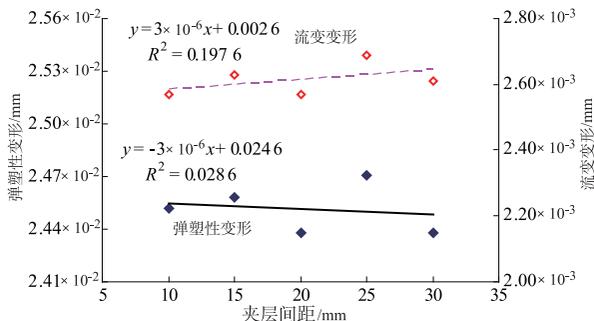


图7 弹塑性、流变变形与夹层间距关系图

Fig. 7 Correlation between deformation and intercalation distance

### 3.5 岩桥倾角对岩石变形的影响

保持其他条件不变,岩桥倾角分别取 0°, 30°, 45°, 60°, 90°时,含非贯通断续软弱夹层岩石流变 30 d 的流变变形如图 8 所示。

岩桥的倾角为 0°时,含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.396 \times 10^{-2}$  mm,流变 30 d 后的流变变形量为  $0.244 \times 10^{-2}$  mm; 岩桥的倾角为 30°时,含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.412 \times 10^{-2}$  mm,流变 30 d 后的流变变形量为  $0.253 \times 10^{-2}$  mm; 岩桥的倾角为 45°时,含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.403 \times 10^{-2}$  mm,流变 30 d 后的流变变形量为  $0.254 \times 10^{-2}$  mm; 岩桥的倾角为 60°时,含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.393 \times 10^{-2}$  mm,流变 30 d 后的流变变形量为  $0.246 \times 10^{-2}$  mm; 岩桥的倾角为 90°时,含软弱夹层岩石的弹塑性变形为  $2.385 \times 10^{-2}$  mm,流变 30 d 后的流变变形量为  $0.240 \times 10^{-2}$  mm。如图 8 所示,含软弱夹层岩石的弹塑性变形与流变 30 d 后的流变变形量随岩桥倾角的增大而增大,变形增加量变化趋势符合三次多项式规律。

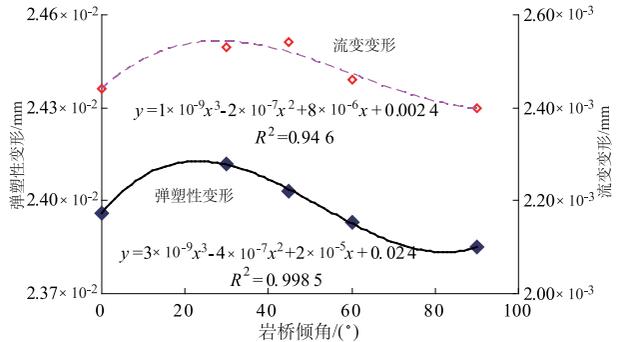


图8 弹塑性、流变变形与岩桥倾角关系图

Fig. 8 Correlation between deformation and rock bridge inclination

### 3.6 影响因素之间多重相关性分析

影响含非贯通断续软弱夹层岩石变形的物理学参数有很多,参数之间相互交叉影响,互为因果,存在较为严重的多重相关性。由于各参数中重叠信息的交叉影响,使得同一因素对某个因变量的解释效应需要在几个变量中分摊,而这些变量中又包含其他方面的因素,在这种情况下,对变量与因变量进行回归并解释每个变量回归系数的意义就显得十分困难。如何定量地描述具有多重相关性参数之间的相关性,较好地解决多影响因素且小试验样本的情况,成为了一个非常值得研究的问题。仅研究 2 个变量之间的相关程度时,简单相关系数就可以度量;但需要考察多个变量之间的相关性时,简单的相关系数常具有虚假性,因为简单相关系数只考虑了 2 个变量之间的相互作用,并没有考虑到其他变量对这 2 个变量的影响。在这种多重相关性存在的条件下,偏相关系数能够更加准确、真实地反映各变量之

间的相关关系。基于数值模拟结果用偏相关系数定量地分析了夹层间距、夹层长度、夹层厚度、夹层倾角等因素与弹塑性变形和流变变形的多重相关性。

含非贯通断续软弱夹层岩石变形的数值试验结果如表 4 所示。夹层间距、夹层长度、夹层厚度、夹层倾角等因素与弹塑性变形和流变变形的偏相关系数如表 5 和表 6 所示。影响含非贯通断续软弱夹层岩石变形的诸多物理力学参数之间相互交叉影响,互相依存,有着较为严重的多重相关性,采用偏相关系数能够较为准确真实地定量描述它们之间的这种相关性。夹层长度、夹层厚度与夹层间距两两之间都有着较强的相关性;岩桥倾角和夹层倾角与其它影响因素的相关性不强。夹层长度对岩石弹塑性变形影响最大,其次是夹层间距,再者为夹层厚度;岩桥倾角和夹层倾角对岩石弹塑性变形影响不明显。夹层长度对岩石流变变形量影响最大,其次则是夹层间距,再者为夹层厚度;岩桥倾角和夹层倾角对岩石流变变形量影响相对较弱,但比弹塑性变形时影响要大。

表 4 数值试验结果

Table 4 Numerical experiment results

夹层长度/mm	夹层厚度/mm	夹层间距/mm	岩桥倾角/(°)	夹层倾角/(°)	弹塑性变形/mm	流变变形/mm
14.4	1.0	30.0	45	0	$2.358 \times 10^{-2}$	$2.300 \times 10^{-3}$
14.4	1.0	30.0	45	30	$2.416 \times 10^{-2}$	$2.410 \times 10^{-3}$
14.4	1.0	30.0	45	45	$2.422 \times 10^{-2}$	$2.540 \times 10^{-3}$
14.4	1.0	30.0	45	60	$2.407 \times 10^{-2}$	$2.600 \times 10^{-3}$
14.4	1.0	30.0	45	90	$2.390 \times 10^{-2}$	$2.400 \times 10^{-3}$
4.0	1.0	30.0	45	45	$2.353 \times 10^{-2}$	$2.310 \times 10^{-3}$
8.0	1.0	30.0	45	45	$2.366 \times 10^{-2}$	$2.360 \times 10^{-3}$
12.0	1.0	30.0	45	45	$2.413 \times 10^{-2}$	$2.540 \times 10^{-3}$
16.0	1.0	30.0	45	45	$2.438 \times 10^{-2}$	$2.610 \times 10^{-3}$
20.4	1.0	30.0	45	45	$2.888 \times 10^{-2}$	$3.050 \times 10^{-3}$
16.0	0.5	38.8	45	45	$2.587 \times 10^{-2}$	$2.670 \times 10^{-3}$
16.0	1.0	38.8	45	45	$2.661 \times 10^{-2}$	$2.730 \times 10^{-3}$
16.0	1.5	38.8	45	45	$2.637 \times 10^{-2}$	$3.020 \times 10^{-3}$
16.0	2.0	38.8	45	45	$2.694 \times 10^{-2}$	$3.150 \times 10^{-3}$
16.0	2.5	38.8	45	45	$2.712 \times 10^{-2}$	$2.910 \times 10^{-3}$
16.0	1.0	10.0	45	45	$2.452 \times 10^{-2}$	$2.570 \times 10^{-3}$
16.0	1.0	15.0	45	45	$2.458 \times 10^{-2}$	$2.630 \times 10^{-3}$
16.0	1.0	20.0	45	45	$2.438 \times 10^{-2}$	$2.570 \times 10^{-3}$
16.0	1.0	25.0	45	45	$2.471 \times 10^{-2}$	$2.690 \times 10^{-3}$
16.0	1.0	30.0	45	45	$2.438 \times 10^{-2}$	$2.610 \times 10^{-3}$
12.0	1.0	25.0	0	45	$2.396 \times 10^{-2}$	$2.440 \times 10^{-3}$
12.0	1.0	25.0	30	45	$2.412 \times 10^{-2}$	$2.530 \times 10^{-3}$
12.0	1.0	25.0	45	45	$2.403 \times 10^{-2}$	$2.540 \times 10^{-3}$
12.0	1.0	25.0	60	45	$2.393 \times 10^{-2}$	$2.460 \times 10^{-3}$
12.0	1.0	25.0	90	45	$2.385 \times 10^{-2}$	$2.400 \times 10^{-3}$

表 5 偏相关系数表 I

Table 5 Partial correlation coefficients for mechanical parameters I

偏相关系数	夹层长度	夹层厚度	夹层间距	岩桥倾角	夹层倾角	弹塑性变形
夹层长度	-1	-0.154 3	-0.326 7	0.020 9	-0.035	0.701 4
夹层厚度	-0.154 3	-1	0.138 6	0.010 7	-0.017 8	0.357 7
夹层间距	-0.326 7	0.138 6	-1	0.014 3	-0.023 8	0.478
岩桥倾角	0.020 9	0.010 7	0.014 3	-1	0.001 5	-0.029 8
夹层倾角	-0.035 0	-0.017 8	-0.023 8	0.001 5	-1	0.049 9
弹塑性变形	0.701 4	0.357 7	0.478 0	-0.029 8	0.049 9	-1

表 6 偏相关系数表 II

Table 6 Partial correlation coefficients for mechanical parameters II

偏相关系数	夹层长度	夹层厚度	夹层间距	岩桥倾角	夹层倾角	流变变形
夹层长度	-1	-0.325 4	-0.256 7	0.052 4	-0.133 3	0.730 3
夹层厚度	-0.325 4	-1	0.088 8	0.040 1	-0.101 9	0.558 2
夹层间距	-0.256 7	0.088 8	-1	0.026 1	-0.066 4	0.363 5
岩桥倾角	0.052 4	0.040 1	0.026 1	-1	0.013 1	-0.071 8
夹层倾角	-0.133 3	-0.101 9	-0.066 4	0.013 1	-1	0.182 6
流变变形	0.730 3	0.558 2	0.363 5	-0.071 8	0.182 6	-1

## 4 结 论

(1) 基于大型岩土工程分析软件 FLAC<sup>3D</sup>, 采用黏弹塑性流变本构模型, 模拟了非贯通断续软弱夹层的不同间距、不同长度及倾角等因素条件下岩石的弹塑性变形与流变变形情况。

(2) 研究分析了各种因素对岩体弹塑性变形与流变变形的影响以及各影响因素之间多重相关性。各物理力学参数之间相互交叉影响, 存在较为严重的多重相关性, 偏相关系数能更为合理、准确地反映出影响参数之间的相互关系, 可以作为衡量多重相关性的定量尺度。

(3) 分析可以得出: 夹层长度、夹层厚度与夹层间距两两之间都有着较强的相关性; 岩桥倾角和夹层倾角与其他影响因素的相关性不强。夹层长度对岩石弹塑性变形影响最大, 其次是夹层间距, 再者为夹层厚度; 岩桥倾角和夹层倾角对岩石弹塑性变形影响不明显。夹层长度对岩石流变变形量影响最大, 其次则是夹层间距, 再者为夹层厚度; 岩桥倾角和夹层倾角对岩石流变变形量影响相对较弱, 但比弹塑性变形时影响要大。

### 参考文献:

[1] 孙 钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.