

DOI: 10.11779/CJGE2016S2014

石英云母片岩加卸荷力学特性及其卸荷本构研究

刘志勇^{1, 2}, 肖明砾^{*1, 2}, 卓 莉^{1, 2}, 谢红强^{1, 2}, 何江达^{1, 2}

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为揭示丹巴水电站英云母片岩在不同应力路径下的力学性质, 针对平行片理组和垂直片理组试件, 利用 MTS 815 岩石试验系统分别进行常规三轴压缩试验和升轴压、降围压卸荷试验, 系统研究石英云母片岩在加、卸荷应力路径下的力学特性。试验结果表明, 常规三轴试验下, 平行组试件变形大于垂直组, 变形表现出明显的各向异性特性; 常规三轴试验下, 垂直组试件破裂面形成时先产生主裂纹, 再与次裂纹贯通、连接, 平行组试件则直接由次裂纹贯通、连接, 两组试件破坏面形成方式不同; 加、卸荷条件下, 峰值强度和残余强度均随围压的增大而增大, 且垂直组高于平行组; 与三轴压缩试验应力应变曲线不同, 卸荷曲线具有明显的跌落段, 试件表现出脆性破坏; 卸荷条件下两组试件的 M-C 强度参数明显低于加载试验。结合石英云母片岩的卸荷特性, 采用强度各向异性系数表征试件卸荷过程中的各向异性软化, 建立横观各向同性岩体的卸荷本构关系, 并对其合理性进行验证。研究表明, 所提出的本构关系与试验结果具有很高的吻合度, 能很好地表征石英云母片岩的卸荷过程。

关键词: 岩石力学; 石英云母片岩; 三轴加、卸荷试验; 本构模型

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S2-0085-07

作者简介: 刘志勇(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩体力学参数及岩土工程数值模拟方面的研究工作。E-mail: 879684111@qq.com。

Loading and unloading characteristics of mica-quartz schist and constitutive model for its unloading

LIU Zhi-yong^{1, 2}, XIAO Ming-li^{*1, 2}, ZHUO Li^{1, 2}, XIE Hong-qiang^{1, 2}, HE Jiang-da^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to illuminate the characteristics of transversely isotropic rock under different stress paths, the triaxial compressive full tests and the triaxial unloading tests, elevating axial compression and reducing confining pressure, are carried out on the mica-quartz schist samples from Danba Hydropower Station, which are divided into parallel group and vertical group. The test results show that, for the loading test, the deformation of parallel group is larger than that of the vertical one, and deformation exhibits anisotropic feature. For the vertical group, when damaging, the samples form main cracks firstly and failure surface is connected with secondary cracks, but for the parallel group, failure surface is connected through secondary cracks directly, illustrating different formation ways of failure surface. With the increasing confining pressure, both the peak strength and the residual strength are enhanced, and those of the vertical group are larger than those of the parallel group. Different from those of the triaxial compressive tests, the stress-strain curves of the triaxial unloading tests have obvious drop sections, and the samples show brittle failure. Moreover, the cohesiveness and friction under loading are prominent over those under unloading. Eventually, based on the unloading characteristics of mica-quartz schist, the anisotropic coefficient is used to represent the anisotropic softening during unloading, and a constitutive model for transversely isotropic rock is established. In addition, the rationality of the constitutive model is verified. The research demonstrates that the results of the proposed constitutive model agree with the test data, and it can satisfactorily reflect the unloading characteristics of mica-quartz schist.

Key words: rock mechanics; mica-quartz schist; triaxial loading and unloading test; constitutive model

0 前 言

加、卸荷条件下岩石表现出的力学性能往往不同^[1], 这些性能对地下洞室的设计和维护有着重要意义, 岩

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”项目)(2015CB057903);
国家自然科学基金项目(51079092)

收稿日期: 2016-05-19

*通讯作者 (E-mail: xiaomingli@scu.edu.cn)

石本构模型是岩石力学研究的核心内容^[2]，尤其是对于一些含有显著层状弱面的岩体而言，其结构面呈平行分布而具有明显的横观各向同性特性^[3]，探明其加、卸荷条件下的力学特性及其本构关系显得尤为重要，如大渡河丹巴水电站引水隧洞 15% 的洞段岩性为石英云母片岩，属于典型的横观各向同性岩体，其力学特性对于该隧洞的设计、施工及运行有着重要意义，有必要对其加、卸荷条件下的力学性质及卸荷本构关系进行深入的研究。

目前，一些学者对石英云母片岩的力学性质进行了研究，单治钢等^[4]、周火明等^[5]揭示了石英云母片岩在复杂应力状态下的力学特性，肖明砾等^[6]、刘怀忠等^[7]研究了石英云母片岩的三轴蠕变特性及流变本构关系，这些研究对于石英云母片岩在卸荷条件下的力学性质及不同应力路径下的力学差异研究较少。在本构关系方面，M. C. Weng^[8]提出了基于各向异性软化的本构关系，李宏哲等^[2]基于文献[8]的本构关系对大理岩卸荷特性进行了描述，但其各向异性软化系数的取值是依据试算确定，导致该值与实际物理意义之间的关系不明确。

基于此，利用 MTS 815 岩石试验系统分别对丹巴水电站石英云母片岩平行组和垂直组试件进行常规三轴压缩试验和升轴压、降围压卸荷方式下的卸荷试验，系统研究不同应力路径下石英云母片岩的力学特性及其各向异性特性。采用各向异性系数表征试件卸荷过程中的各向异性软化特征，建立石英云母片岩的卸荷本构模型，并对该本构模型进行验证，为类似的工程研究提供参考。

1 石英云母片岩室内试验

1.1 试验设备及试验对象

本次试验在四川大学 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统上进行，该系统加载与测量均由计算机程序控制自动完成，整个加载过程速率控制稳定、精确。系统最大围压可达到 140 MPa，轴向、横向变形采用引伸计测量，其量程分别为 -2.5~5.0, -2.5~8.0 mm。

石英云母片岩岩样取自丹巴水电站试验洞，外观为灰—灰黑色，有闪光的矿物质，呈薄层状，具有显著的片理构造，属于典型的横观各向同性岩体，试件见图 1。按照试验规程^[9]，取得的现场岩芯经保鲜膜包裹并放入隔振箱后运输至试验室，采用岩石切割机和岩石取芯机对取回的岩样进行切割与钻芯加工制样。考虑到片理对岩石强度和变形的影响，钻样按试件轴线方向平行于片理方向与垂直于片理方向，分别

制作直径为 50 mm、高 100 mm 的标准试件。



(a) 平行于片理方向 (b) 垂直于片理方向

图 1 石英云母片岩典型试样

Fig. 1 Typical samples of mica-quartz schist

1.2 试验方法

为研究不同应力路径下石英云母片岩的力学特性，分别以石英云母片岩平行片理组（以下简称平行组）和垂直片理组（以下简称垂直组）进行三轴压缩试验和三轴卸荷试验，试验设计如表 1。

表 1 试验设计方案

Table 1 Test schemes

| 与层理 关系 | 加载 | | 卸载 | |
|-----------|--------|----------|--------|----------|
| | 编号 | 初始围压/MPa | 编号 | 初始围压/MPa |
| 垂直组 | V22 | 5 | V37 | 30 |
| | V60 | 10 | V33 | 40 |
| | V41 | 20 | V6-1 | 50 |
| | V33 | 40 | V28 | 60 |
| 平行组 | P28 | 5 | P100 | 30 |
| | P156-1 | 10 | P100-1 | 40 |
| | P156-2 | 20 | P5 | 50 |
| | P156-3 | 40 | PX | 60 |

卸荷试验采用升轴压、降围压的卸荷方式，具体试验过程分为 4 个阶段：①与常规三轴试验相同，首先对试样施加静水压力，使得 $\sigma_1 = \sigma_3$ 至目标值；②稳定 σ_3 ，逐步增高 σ_1 至试件破坏前的某一应力状态，其 σ_1 的应力水平大致在比例极限附近；③ σ_1 以 10 MPa/min 的速率缓慢升高，同时 σ_3 以 3 MPa/min 的速率缓慢降低；④试件一旦破坏后即停止卸围压 σ_3 ，并使之保持恒定，同时继续以变形控制加载，直到应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 不随应变的增加而降低时结束试验。

2 试验结果与分析

2.1 石英云母片的加载力学特性

图 2 给出了两组试件的三轴压缩全过程曲线，从变形上看，石英云母片岩具有明显屈服特征，且屈服

后立即进入软化阶段, 属于典型的软化型材料。在相同围压条件下, 平行组试件峰值应力处对应的轴向应变较垂直组大, 石英云母片岩变形特性表现出明显的各向异性特性。以围压为 20 MPa 为例, 垂直组试件峰值应力处对应的轴向应变约为 0.005, 平行组对应的轴向应变约为 0.009, 明显大于垂直组试件, 这主要的原因是平行组试件片理面产生较大的挠度, 表现出轴向弹性模量较小^[7]。

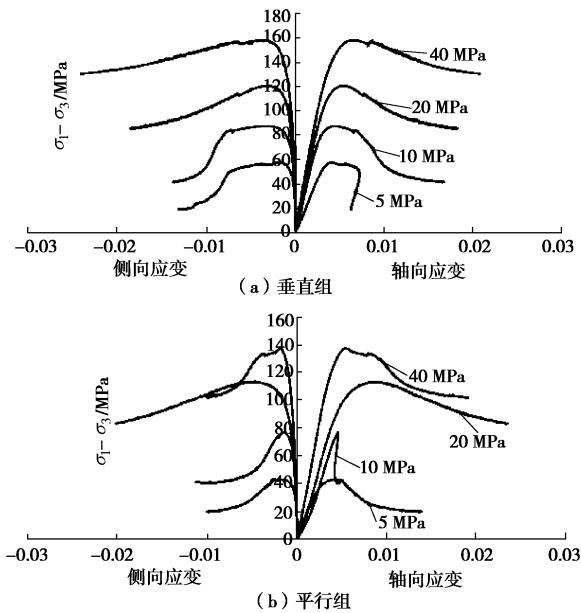


图 2 石英云母片岩三轴压缩曲线

Fig. 2 Triaxial compression curves of mica-quartz schist

从破坏方式上看, 两组试件试样破坏时表现出延性破坏, 当轴向应力达到峰值时, 试件不会突然破坏, 而是轴向应力随着应变的增大缓慢降低, 试件出现扩容现象, 最后轴向应力随着应变的增大而不再变化。

图 2 表明, 两组试件在峰值应力以后应力应变曲线均存在轻微的波动现象, 这种波动说明试件内部局部发生破坏, 波动越剧烈说明破坏越剧烈。当加载方向与片理方向垂直时, 应力应变曲线存在明显的波动点(波动最为剧烈的点), 表明此时试件内部发生了较为剧烈的破坏, 试件出现破坏主裂纹, 在波动点以后, 应力应变曲线存在轻微的波动, 这说明试件内部产生了新的次裂纹, 这些新的次裂纹与主裂纹连接、贯通, 最后导致试件整体破坏, 使得试件具有典型的破坏面; 加载方向与片理方向平行时, 应力应变曲线仍然存在轻微的波动但不存在明显的波动点, 这说明试件破坏过程不会先产生主裂纹, 而是产生无数的次裂纹, 这些次裂纹直接贯通、连接, 最终导致试件破坏, 平行组与垂直组试件的破坏方式具有明显的不同。

图 3 给出了两组试件破坏图, 从图中可以发现,

平行组试件(图 3 (a))属于典型的剪切破坏; 垂直组试件(图 3 (b))亦发生剪切破坏, 存在典型剪切面, 且剪切面呈锯齿状, 并且有略微剪胀效应。这与上述破坏模式分析是相吻合的。

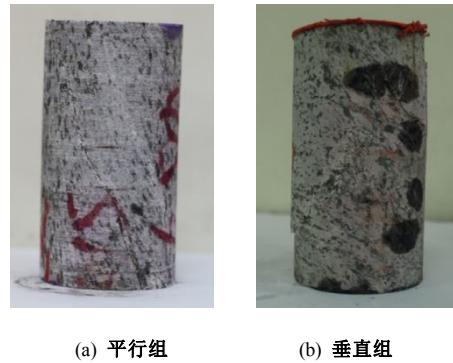


图 3 三轴压缩试验典型破坏图对比

Fig. 3 Comparison of failure patterns of two groups of samples

从强度上看, 表 2 给出了平行组和垂直组试件的三轴试验结果。从表 2 可以看出: 无论平行组还是垂直组, 峰值强度和残余强度均随围压的增大而增大; 在相同围压下, 垂直组的峰值强度与残余强度均比平行组大, 这说明石英云母片岩强度具有明显的各向异性特性。

表 2 加载条件下的 M-C 参数

Table 2 Strength parameters of marble based on Mohr-Coulomb criterion

| 编号 | 围压 /MPa | 峰值强度参数 | | 残余强度参数 | |
|--------|------------|--------------|----------------|------------------|--------------|
| | | 峰值强 度/MPa | c/MPa | $\varphi/^\circ$ | 残余强 度/MPa |
| V22 | 5 | 63.00 | | | 24.63 |
| V60 | 10 | 97.83 | 14.39 | 35.11 | 51.92 |
| V41 | 20 | 140.70 | | | 105.94 |
| V33 | 40 | 198.18 | | | 170.71 |
| P28 | 5 | 48.57 | | | 25.52 |
| P156-1 | 10 | 87.69 | 12.40 | 33.76 | 51.62 |
| P156-2 | 20 | 133.94 | | | 98.96 |
| P156-3 | 40 | 178.09 | | | 142.43 |

为研究垂直组与平行组试件强度的各向异性程度, 定义强度各向异性系数 m , 其表达式为

$$m = \frac{F_p - c_p}{\sigma_{3p}} \left/ \frac{F_v - c_v}{\sigma_{3v}} \right. \quad (1)$$

式中 F_p , F_v 分别为平行组和垂直组试件的峰值强度; c_p , c_v 分别为平行组和垂直组试件的黏结力; σ_{3p} , σ_{3v} 分别为平行组和垂直组试件破坏时对应的围压。

由于不用围压下各向异性系数的值可能不同, 采用强度各向异性系数统计平均值表征垂直组和平行组的各向异性特性。试验统计结果表明, 在本次试验中,

石英云母片岩的各向异性系数为 0.86。

2.2 石英云母片的三轴卸荷特性

图 4 给出了典型卸荷应力-应变曲线, 从图中可以发现, 两组试件的卸荷曲线均可以分为以下阶段: ①弹性阶段 (AB), 试验处于升轴压卸围压阶段, 应力-应变曲线接近直线, 表明试件处于弹性变形阶段; ②屈服阶段 (BC), 试验仍然处于升轴压卸围压阶段, 但应力-应变曲线表现出明显的非线性, 试件逐渐屈服; ③流动阶段 (CD), 此时试验轴压和围压均保持不变, 试件在此阶段产生较大的变形; ④脆性跌落阶段 (DE), 在该阶段保持围压不变, 轴压降低, 轴向应变缓慢增大; ⑤残余强度阶段 (EF), 偏应力不变, 轴向应变迅速增大, 试件完全破坏, 但由于围压效应, 试件仍然具有一定的承载力。

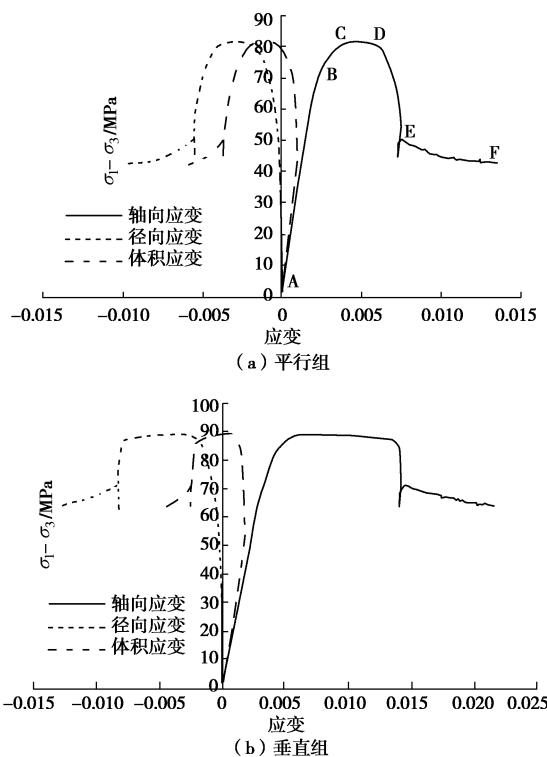


图 4 卸荷方案 1 下典型应力-应变曲线 (围压: 30 MPa)

Fig. 4 Stress-strain curves of unloading tests (confining pressure of 30 MPa)

从图 4 还可以发现, 随着偏应力的增大, 轴向应变曲线变缓, 体积应变逐渐开始偏离线性, 当体积应变达到最大值后逐渐减小最后为负值, 表明在卸荷试验过程中试件出现扩容现象, 参照文献[10], 将最大压缩体应变定义为初始扩容点, 则对应的偏应力定义为扩容偏应力, 从图 5 可以看出, 两组试件的扩容偏应力并不相同, 在围压为 30 MPa 时, 平行组试件为 45 MPa, 垂直组试件为 50 MPa, 这也说明了垂直组强度较平行组强度高, 石英云母片岩在卸载条件下具

有显著的各向异性特性。

从强度上看, 表 3 给出了石英云母片岩的卸荷试验结果, 从表中可以看出, 即使在初始围压相同条件下, 试件破坏时垂直组与平行组对应的围压与偏应力并不相同, 这说明卸荷条件下石英云母片岩具有明显的各向异性特性, 仍然采用各向异性系数进行描述, 基于试验结果可以发现, 在降围压、升轴压条件下, 石英云母片岩的各向异性指数为 0.82。

表 3 卸荷试验结果

Table 3 Results of unloading tests

| 与层理面关系 | 初始围压/MPa | 试件编号 | 破坏围压/MPa | 破坏轴压/MPa | 最大偏应力/MPa | 残余偏应力/MPa |
|--------|----------|--------|----------|----------|-----------|-----------|
| 平行 | 30 | V37 | 16.99 | 106.07 | 89.08 | 63.73 |
| | 40 | V33 | 18.00 | 127.31 | 109.31 | 76.41 |
| | 50 | V6-1 | 37.27 | 183.06 | 145.78 | 106.85 |
| | 60 | V28 | 38.09 | 202.64 | 164.56 | 113.54 |
| 垂直 | 30 | P100 | 16.66 | 98.19 | 81.53 | 42.94 |
| | 40 | P100-1 | 25.02 | 134.02 | 109.00 | 72.34 |
| | 50 | P5 | 35.89 | 164.83 | 128.94 | 96.35 |
| | 60 | PX | 45.87 | 191.06 | 145.19 | 145.19 |

无论是平行组还是垂直组试件, 破坏时对应的最大偏应力与残余偏应力均随着破坏围压的升高而升高, 这主要是围压限制的试件的侧向变形, 使得试件的承载力增强。

2.3 加、卸载条件下石英云母片岩力学差异

对比加、卸载条件下石英云母片岩三轴压缩应力-应变曲线可以发现, 卸载条件下, 石英云母片岩存在明显的屈服, 屈服后试件不会立即进入软化阶段, 而是产生了较大的变形, 显著区别与加载条件下试件屈服后立即进入软化阶段的特性。

利用表 3 中的试验结果, 可得到两组试件峰值强度对应的 M-C 强度参数, 垂直组与平行组试件黏结力分别为 6.15 MPa 和 7.12 MPa, 为加载应力路径下对应强度参数的 43% 与 57%, 其摩擦角分别为 29.61° 及 28.28°, 为加载应力路径下对应强度参数的 85% 和 84%, 明显小于三轴压缩试验对应的强度参数, 这主要是因为不同的应力路径下岩石的变形破坏机理各不相同, 三轴加载条件下试件破坏模式为压剪破坏; 而在卸载条件下, 轴压逐渐增大、围压减小, 侧向约束作用减小, 试件破坏模式为张剪破坏, 使得强度参数明显降低。

此外, 对比加、卸荷应力应变全过程曲线, 也可以发现两种应力路径下试件的破坏形式不相同, 在卸荷应力路径下, 应力应变曲线具有明显的跌落段, 表明试件发生脆性破坏, 这主要的原因卸围压、升轴压

的过程给试件提供了更多的能量, 裂纹扩展得更迅速, 试件宏观破坏更快^[11]。

3 卸荷本构模型及验证

3.1 卸荷本构模型

为描述卸荷应力-应变关系, 本文参照 M. C. Weng 等^[8]提出的非线性本构模型, 做如下假定: ①在偏应力作用下, 试件出现各向异性的软化, 软化方向与大主应力方向一致, 不同方向上的软化程度与各向异性系数相关; ②在软化过程中, 试件的泊松比不变; ③试件满足广义胡克定律。

基于上述假定, 考虑到石英云母片岩属于横观各向同性岩体, 采用各向异性系数来表征岩体的各向异性的软化, 同时参考文献[2, 8]对软化规律的描述方式, 石英云母片岩软化满足下式:

$$E_1 = E_1^{\max} \left[1 - \left(n \frac{\sqrt{J_2} - \sqrt{J_2^0}}{\sqrt{J_2^{\max}} - \sqrt{J_2^0}} \right) \right], \quad (2a)$$

$$E_3 = E_3^{\max} \left[1 - \left(mn \frac{\sqrt{J_2} - \sqrt{J_2^0}}{\sqrt{J_2^{\max}} - \sqrt{J_2^0}} \right) \right]. \quad (2b)$$

如图 5, 垂直组试件满足式 $E_2 = E_3$, 平行组试件满足式 $E_1 = E_2$, 上式中, E_1 , E_2 , E_3 分别为第一主应力、第二主应力及第三主应力方向上的弹性模量, E_1^{\max} , E_3^{\max} 为天然岩体在第一主应力及第三主应力上的弹模, 由三轴试验确定, J_2 为应力偏量的第二不变量, J_2^0 为卸荷开始时应力偏量的第二不变量, J_2^{\max} 峰值应力时对应的 J_2 , n 为曲线修正系数, 由拟合试算得到^[10], m 为强度各向异性系数, 由三轴卸荷试验确定。

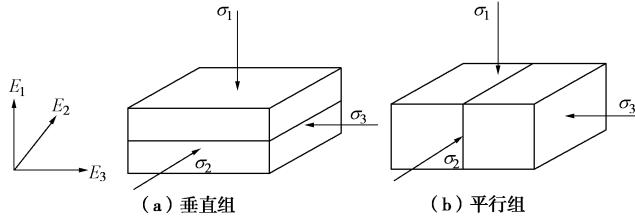


图 5 加载方向与弹性摸量的关系

Fig. 5 Relationship between loading direction and elastic modulus

各向异性应力-应变满足式(3), 对于室内三轴试验, 其第一主应变为式(4)。

$$\{\Delta\epsilon\} = [C]\{\Delta\sigma\}, \quad (3)$$

$$\Delta\epsilon_1 = \frac{\Delta\sigma_1}{E_1} - \frac{\Delta\sigma_2}{E_2} \mu_{12} - \frac{\Delta\sigma_3}{E_3} \mu_{13}. \quad (4)$$

上式中, $[\Delta\epsilon]$ 与 $[\Delta\sigma]$ 为应变增量矩阵和应力增量矩阵, $[C]$ 为柔度矩阵, $\Delta\sigma_i$ ($i=1, 2, 3$) 分别为弹性主轴上的应变增量和应力增量, μ_{ij} ($j=2, 3$) 为

泊松比, 对于垂直组试件, 则有 $\mu_{12} = \mu_{13}$, 对于平行组试件, $\mu_{12} \neq \mu_{13}$, 由三轴试验确定。

将式(2a)和式(2b)代入式(4), 则可以得到垂直组本构关系式(5)和平行组试件的本构关系式(6):

$$\Delta\epsilon_1 = \frac{\Delta\sigma_1}{E_1^{\max} \left[1 - \left(n \frac{\sqrt{J_2} - \sqrt{J_2^0}}{\sqrt{J_2^{\max}} - \sqrt{J_2^0}} \right) \right]} - \frac{2\Delta\sigma_3 u_{13}}{E_3^{\max} \left[1 - \left(mn \frac{\sqrt{J_2} - \sqrt{J_2^0}}{\sqrt{J_2^{\max}} - \sqrt{J_2^0}} \right) \right]}, \quad (5)$$

$$\Delta\epsilon_1 = \frac{(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3 u_{12})}{E_1^{\max} \left[1 - \left(n \frac{\sqrt{J_2} - \sqrt{J_2^0}}{\sqrt{J_2^{\max}} - \sqrt{J_2^0}} \right) \right]} - \frac{\Delta\sigma_3 u_{13}}{E_3^{\max} \left[1 - \left(mn \frac{\sqrt{J_2} - \sqrt{J_2^0}}{\sqrt{J_2^{\max}} - \sqrt{J_2^0}} \right) \right]}. \quad (6)$$

式(5)及式(6)即为横观各向同性材料的本构关系。

3.2 卸荷本构模型的验证

结合上式本构关系, 对石英云母片岩的室内试验结果进行拟合, 结果如图 6, 相应的参数如表 4。图 6

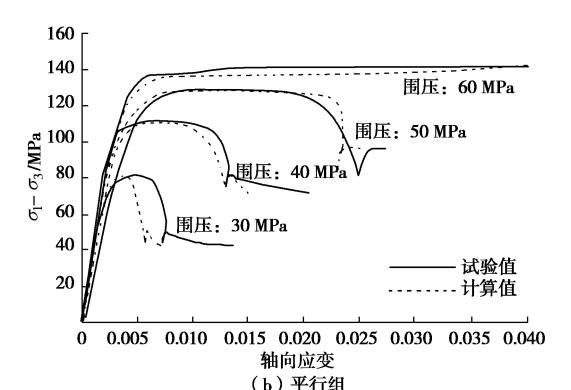
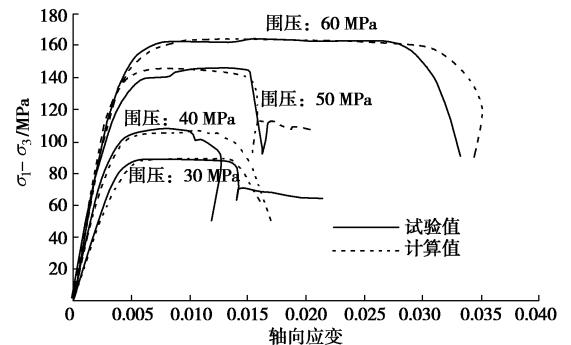


图 6 卸荷过程试验结果与模型结果

Fig. 6 Comparison between test results and fitted values of model

表 4 模型计算参数

Table 4 Parameters of rock samples

| 组别 | 围压 /MPa | E_1^{\max} /GPa | E_3^{\max} /GPa | μ_{12} / μ_{13} | m | n | R^2 |
|----|------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------|------|-------|
| 平行 | 30 | 35 | 38 | 0.26/0.25 | 0.82 | 1.0 | 0.93 |
| | 40 | 40 | 43 | 0.26/0.22 | 0.82 | 0.99 | 0.97 |
| | 50 | 29 | 33 | 0.24/0.21 | 0.82 | 0.85 | 0.99 |
| | 60 | 41 | 45 | 0.22/0.18 | 0.82 | 0.80 | 0.91 |
| 垂直 | 30 | 23 | 19 | 0.25/0.25 | 1.21 | 0.99 | 0.95 |
| | 40 | 31 | 27 | 0.22/0.22 | 1.21 | 0.99 | 0.95 |
| | 50 | 42 | 39 | 0.21/0.21 | 1.21 | 0.81 | 0.95 |
| | 60 | 44 | 40 | 0.18/0.18 | 1.21 | 0.70 | 0.95 |

表明, 模型计算值与试验结果具有很高的吻合度(相关性系数均在 0.9 以上), 表明本文所提的卸荷模型能很好地表征石英云母片岩卸荷过程。

4 结 论

(1) 三轴压缩试验下, 平行组试件变形较垂直组试件大, 石英云母片岩变形特性表现出明显的各向异性特性。

(2) 三轴压缩试验下, 两组试件峰后应力应变曲线均轻微波动, 且垂直组试件存在明显的波动点而平行组则不存在。说明垂直组试件内部破坏时先形成主裂纹, 再与次裂纹贯通、连接, 存在典型的剪切破坏面; 平行组试件则直接由次裂纹贯通、连接、破坏。试件破坏具有典型的各向异性特性。

(3) 加、卸荷应力路径下石英云母片岩峰值偏应力及残余偏应力随着围压的升高而升高, 且垂直组强度明显高于平行组, 表现出明显各向异性特性。在加载条件下强度各向异性系数为 0.86; 卸荷条件下强度各向异性系数为 0.82。

(4) 石英云母片岩垂直组和平行组在卸荷条件下的黏结力分别为加载条件的 43% 与 57%, 内摩擦角为 85% 和 84%, 应力路径对石英云母片岩 M-C 强度参数有着重要的影响。

(5) 加、卸荷应力路径下石英云母片岩表现出的力学性能不同。加载应力路径下其应力应变曲线在峰值偏应力后立即进入软化阶段, 试件表现出延性破坏; 卸荷应力路径下, 应力应变曲线经过了较大的变形后进入跌落段, 试件表现出脆性破坏。

(6) 本文所提的卸荷条件下石英云母片岩本构模型与试验结果具有很高的吻合度, 能很好地表征石英云母片岩的卸荷过程。

参考文献:

- [1] 韩昌瑞, 白世伟, 张 波. 正交各向异性岩体孔径变形法的二维地应力分析方法改进[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2249 - 2253. (HAN Chang-rui, BAI Shi-wei, ZHANG Bo. Amending a method of 2-D geostatic stress measurement for orthotropic rockmass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2249 - 2253. (in Chinese))
- [2] 李宏哲, 夏才初, 肖维民. 锦屏水电站大理岩加卸荷本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1489 - 1485. (LI Hong-zhe, XIA Cai-chu, XIAO Wei-min. Research on constitutive model of marble of Jinping Hydropower Station under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 34(12): 1626 - 1631. (in Chinese))
- [3] 裴建良, 刘建峰, 徐 进. 层状大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2496 - 2502. (PEI Jian-liang, LIU Jian-feng, XU Jin. Experimental study of mechanical properties of layered marble under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2496 - 2502. (in Chinese))
- [4] 单治钢, 陈国庆, 周春宏. 等. 丹巴水电站石英云母片岩力学特性及岩体质量分类[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2070 - 2078. (SHAN Zhi-gang, CHEN Guo-qing, ZHOU Chun-hong, et al. Mechanical properties and rock mass quality classification of quartz mica schist for Danba Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 2070 - 2078. (in Chinese))
- [5] 周火明, 单治钢, 张宜虎. 等. 复杂应力状态石英云母片岩强度参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 2601 - 2606. (ZHOU Huo-ming, SHAN Zhi-gang, ZHANG Yi-hu, et al. Strength parameters of quartz-mica schist under complex stress state[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 2601 - 2606. (in Chinese))
- [6] 肖明砾, 卓 莉, 谢红强. 等. 三轴压缩蠕变试验下石英云母片岩各向异性蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 32(增刊 2): 73 - 80. (XIAO Ming-li, ZHUO Li, XIE Hong-qiang, et al. Anisotropic rheological properties of quartz-mica schist under triaxial compression creep test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 32(S2): 73 - 80. (in Chinese))
- [7] 刘怀忠, 谢红强, 何江达. 等. 石英云母片岩各向异性蠕变特性试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(4): 656 -

662. (LIU Huai-zhong, XIE Hong-qiang, HE Jiang-da, et al. Experimental investigation on anisotropic creep characteristics of quartz mica schist[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2015, **50**(4): 656 – 662. (in Chinese))
- [8] WENG M C, JENG F S, HSIEH Y M, et al. A simple model for stress-induced anisotropic softening of weak sandstones[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, **45**(2): 155 – 166.
- [9] 水利部水利水电规划设计总院. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute. SL264—2001 Specifications for testes in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001. (in Chinese))
- [10] 黄伟, 沈明荣, 张清照. 高围压下岩石卸荷的扩容性质及其本构模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(增刊 2): 3475 – 3481. (HUANG Wei, SHEN Ming-rong, ZHANG Qing-zhao. Study of unloading dilatancy property of rock and its constitutive model under high confining pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(S2): 3475 – 3481. (in Chinese))
- [11] 赵国彦, 戴兵, 董陆军, 等. 不同应力路径下岩石三轴卸荷力学特性与强度准则研究[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(11): 3121 – 3127. (ZHAO Guo-yan, DAI Bing, DONG Long-jun, et al. Experimental research on mechanical characteristics and strength criterion of rock of triaxial unloading tests under different stress paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(11): 3121 – 3127. (in Chinese))

(责任编辑 明经平)