

锦屏水电站大理岩加卸荷本构模型研究

李宏哲^{1, 2, 3}, 夏才初^{1, 2}, 肖维民^{1, 2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 北京中交桥宇科技有限公司, 北京 100176)

摘要: 以锦屏水电站深埋引水隧洞开挖稳定分析为背景, 开展大理岩加卸荷变形特性试验, 发现无论加载还是卸荷破坏, 大理岩试件破坏前都经历显著的体积膨胀过程。从描述岩石体积变形规律的角度出发, 在对 Weng 模型改进的基础上, 建立锦屏大理岩加、卸荷本构模型。研究结果表明: 模型计算结果与试验结果具有较好的一致性, 能较好地描述大理岩加、卸荷体积变形特征。模型可以考虑岩石加卸荷强度特性的差异, 能够描述从轴向压缩状态开始卸荷的情况, 具有较为广泛的适用性。

关键词: 岩石力学; 大理岩; 卸荷试验; 体积变形; 本构模型

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)07 - 1489 - 07

RESEARCH ON CONSTITUTIVE MODEL OF MARBLE OF JINPING HYDROPOWER STATION UNDER LOADING AND UNLOADING CONDITIONS

LI Hongzhe^{1, 2, 3}, XIA Caichu^{1, 2}, XIAO Weimin^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Beijing Zhongjiao Qiaoyu Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: A series of loading and unloading tests of marble from deep-buried diversion tunnel of Jinping hydropower station are carried out, which reveal that marble specimens have remarkable volumetric dilatancy before failure in both loading and unloading conditions. To describe the law of volumetric deformation of marble in the tests, a new constitutive model is presented based on modifying Weng's model^[13] of rock mass. Comparison between theoretical and test results indicated that the proposed model can describe the characteristics of marble volumetric deformation well. This model can consider the discrepancy of rock strength under loading and unloading conditions; and it can be used to describe unloading process from uniaxial compression stage; the proposed model is of high applicability.

Key words: rock mechanics; marble; unloading tests; volumetric deformation; constitutive model

1 引言

岩石本构模型是岩石力学研究的核心内容。国

内外学者提出多种形式的岩石本构模型, 如弹性 - 线性软化 - 残余塑性模型、弹性 - 脆性跌落 - 残余塑性模型、临界状态模型以及损伤本构模型等。然而, 上述模型均是建立在岩石加载变形基础上, 用

收稿日期: 2010 - 02 - 25; **修回日期:** 2010 - 03 - 30

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(50579088, 50639090)

作者简介: 李宏哲(1978 -), 男, 博士, 2000年毕业于石家庄铁道学院交通土建专业, 现任工程师, 主要从隧道及地下工程检测评估、设计咨询等方面的研究工作。E-mail: HongzheLi19@163.com

来描述岩石在加载条件下的应力 - 应变关系。

近年来, 工程开挖引起的岩体卸荷力学问题越来越突出, 如三峡船闸的深切开挖^[1~3]、锦屏一级水电站深拉裂缝的发现^[4], 引起了更多的学者对工程岩体卸荷力学响应的研究。

吴刚等^[5]认为岩石卸荷破坏是损伤累积、发展和演化、导致材料性能劣化的过程, 采用损伤力学手段建立了岩体卸荷本构关系。赵明阶等^[6]将岩石视为包含有随机分布、无充填的椭球形微裂纹的各向同性体, 基于压剪裂纹模型, 建立了岩石三轴卸荷本构模型。周小平等^[7]采用细观损伤力学方法, 探讨了岩石在围压卸荷条件下的全过程应力 - 应变关系, 给出了围压卸荷过程中岩石本构关系。黄达^[8]根据三峡花岗岩卸荷试验所得典型应力 - 应变曲线, 利用弹塑性理论在应变空间建立了岩石卸荷屈服过程的本构方程。

上述岩石卸荷本构模型主要以描述卸荷条件下的轴向变形特征为主。大量岩石卸荷试验^[9~11]表明, 扩容是岩石卸荷的重要特征之一。因此, 有必要从卸荷条件下岩石体积变形规律入手建立本构模型, 揭示岩石卸荷变形的重要特征。

本文开展了锦屏水电站大理岩加卸荷变形特性试验, 分析了加卸荷试验条件下大理岩的体积变形特征。从描述岩石体积变形规律的角度出发, 建立大理岩加、卸荷本构模型, 为锦屏水电站岩体卸荷变形分析提供理论基础。

2 大理岩加卸荷变形特性试验

2.1 试验条件

试样选用大理岩(T_2Y^5), 从锦屏二级水电站辅助洞开挖现场获取, 取样里程约为 BK13+231。试验前加工成直径 50 mm, 高度 100 mm 的圆柱体试件, 试件精度满足岩石力学试验要求。试验是对自然风干的试件进行。

试验在 MTS 815.02 电液伺服岩石力学三轴试验机上进行。采用位移传感器获得试件轴向位移和环向位移, 转化得到试件轴向应变和环向应变。

2.2 试验方案

加卸荷试验应力路径如图 1 所示。本文设计如下 2 种试验方案。

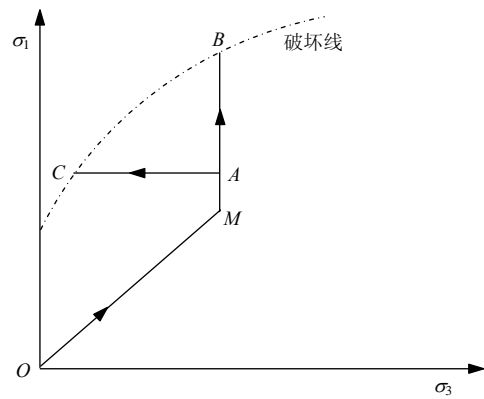


图 1 大理岩加卸荷试验应力路径

Fig.1 Stress paths of marble in loading and unloading tests

(1) 方案 I: 加载试验(线段 OMB)

试验过程为: (1) 首先, 同步施加 σ_1, σ_3 至设定围压值(点 M); (2) 然后, 保持 σ_3 恒定, 继续增大 σ_1 直至试件破坏(点 B); (3) 试件破坏后效应的测试。

加载试验共选用 4 个试件, 编号依次为 1-1, 1-2, 1-3 和 1-4, 加载过程中设定的围压依次为 10, 20, 30 和 40 MPa。

(2) 方案 II: 卸荷试验(线段 OMAC)

试验过程为: ① 首先, 同步施加 σ_1, σ_3 至设定围压值(点 M); ② 保持 σ_3 恒定, 继续增大 σ_1 至试件卸荷起始点(点 A)应力水平; ③ 保持 σ_1 恒定, 以一定的速率逐渐减小 σ_3 直至试件卸荷破坏(点 C); ④ 试件破坏后效应的测试。

卸荷试验共选用 3 个试件, 编号依次为 2-1, 2-2 和 2-3。试件卸荷起始点应力条件见表 1。设计的试件卸荷起始点轴向应力均大于试件单轴抗压强度, 以保证试件能够卸荷破坏。

表 1 试件卸荷起始点应力条件

Table 1 Stress conditions of initial unloading state of specimens in unloading tests MPa

试件编号	σ_1	σ_3
2-1	160.6	40.0
2-2	160.2	40.0
2-3	165.7	40.0

3 大理岩加卸荷体积变形规律

锦屏水电站大理岩加、卸荷试验全过程应力 - 应变曲线特征可参照李宏哲等^[12]的研究, 限于篇幅, 这里不再赘述。

试件轴向应变 ε_1 和环向应变 ε_c 可直接量测, 体积应变 ε_v 为

$$\varepsilon_v = \Delta V / V = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_c \quad (1)$$

锦屏大理岩在加、卸载试验条件下的体积应变规律如图 2(a)所示。

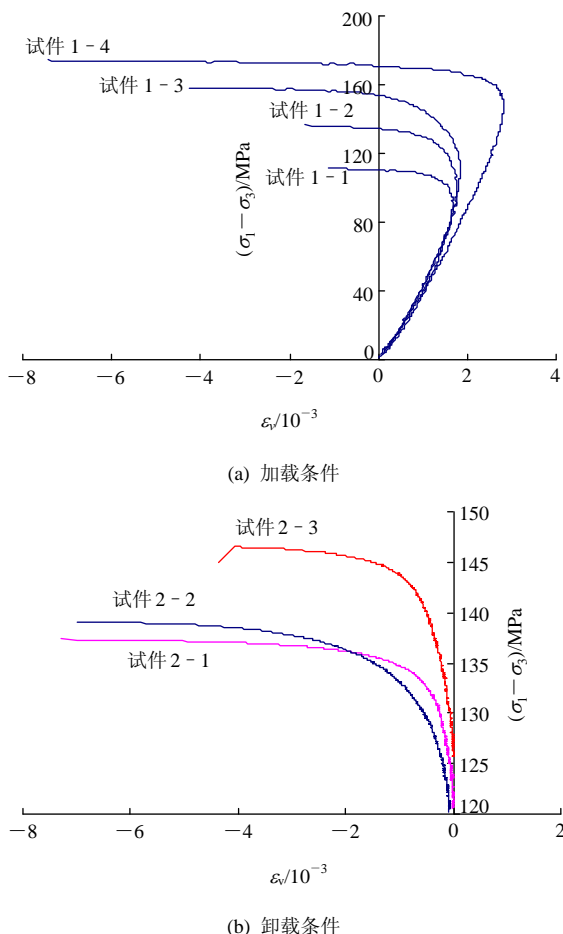


图 2 大理岩加、卸荷试验条件下的体积应变
Fig.2 Volumetric deformations of marble specimens during triaxial loading and unloading stage

由图 2(a)可见, 加载条件下, 随着围压不同, 试件体积变形曲线表现出一定的相似性。具体为:
(1) 试件都经历了体积由压缩到膨胀的渐变过程;
(2) 试件破坏前均表现出显著的体积膨胀特征。

从图 1 应力路径可见, 卸荷试验中, OMA 段为卸荷前的加载阶段, AB 段为卸荷阶段。为了突出分析试件卸荷阶段的变形特征, 可以将加载阶段试件变形扣除, 即假定卸荷阶段的变形从 0 开始。得到大理岩在卸荷阶段的体积应变特征如图 2(b)所示。

由图 2(b)可见, 尽管试件卸荷时的应力水平存在差异, 试件应力 - 应变曲线高低不同, 但体积变

形曲线总体上具有大致相同的变化规律: (1) 试件从卸荷开始都表现出体积膨胀; (2) 试件破坏前表现出显著的体积膨胀特征。

综合以上可知, 无论是加载还是卸荷破坏, 大理岩试件破坏前都经历了显著的体积膨胀过程。其中: 加载条件下, 试件经历了体积压缩 → 体积不变 → 体积膨胀的过程; 而卸荷试验条件下, 试件从卸荷开始就表现出体积膨胀, 并直到试件破坏。

4 大理岩加卸荷本构模型的建立

4.1 M. C. Weng 等^[13]提出的岩石非线性模型

M. C. Weng 等^[13]提出用一种各向异性非线性模型描述砂岩的变形特征, 模型可以反映砂岩在破坏前表现出的显著的体积膨胀特征。模型假设:

- (1) 偏应力作用下, 岩石会出现各向异性软化, 且软化方向与最大主应力方向一致。
- (2) 岩石剪切模量弱化规律为

$$\left. \begin{aligned} G &= G_{\max} \left[1 - \left(\frac{\sqrt{J_2}}{\sqrt{J_{2f}}} \right)^2 \right] \\ G' &= G_{\max} \left[1 - \left(e \frac{\sqrt{J_2}}{\sqrt{J_{2f}}} \right)^2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: G 为平行于最大主应力方向的剪切模量; G' 为垂直于最大主应力方向的剪切模量; J_2 为偏应力第 2 不变量, $\sqrt{J_{2f}}$ 为与岩石破坏强度相对应的 $\sqrt{J_2}$ 值; e 为反映岩石变形参数弱化的各向异性特征的参数; G_{\max} 为与最大静水压力相对应的岩石剪切模量, 其计算公式为

$$G_{\max} = \frac{3K(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

式中: K 为岩石体积模量, ν 为泊松比。

在上述假设的基础上, M. C. Weng 等^[13]给出的岩石应力 - 应变关系表达式为

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta\varepsilon_1 \\ \Delta\varepsilon_2 \\ \Delta\varepsilon_3 \end{aligned} \right\} = \frac{1}{E} \cdot \left[\begin{array}{ccc} 1 & -\frac{E-2G}{2G} & -\frac{E-2G}{2G} \\ -\frac{E-2G}{2G} & 1 & -\frac{E-2G'}{2G'} \\ -\frac{E-2G}{2G} & -\frac{E-2G'}{2G'} & 1 \end{array} \right] \left\{ \begin{aligned} \Delta\sigma_1 \\ \Delta\sigma_2 \\ \Delta\sigma_3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: E 为岩石弹性模量。

M. C. Weng 等^[13]根据式(4)和弹性理论, 推导出岩石体积应变计算公式为

$$\Delta\varepsilon_v = \frac{1}{3E} \left(9 - \frac{2E}{G} - \frac{E}{G'} \right) \Delta I_1 + \frac{G - G'}{3GG'} \sqrt{\frac{2}{3}} \Delta J_2 \quad (5)$$

式中: I_1 为应力第一不变量。

4.2 大理岩加卸荷本构模型

结合锦屏大理岩变形特性试验结果, 在对 Weng 模型改进的基础上, 建立大理岩加卸荷本构模型, 并给出模型参数确定方法。

为了便于三轴试验结果整理, 采用 p, q 两个应力不变量代替应力不变量 I_1, J_2 。

结合锦屏大理岩变形特性, 做如下几点假设:

(1) 静水压力作用下, 大理岩为各向同性的线弹性材料。

(2) 偏应力作用会引起岩石变形模量各向异性软化, 且软化方向与最大主应力方向一致, 但平行于最大主应力方向和垂直于最大主应力方向的剪切模量弱化程度不同。

(3) 加载条件下 G 的弱化规律为

$$G = G_{\max} \left[1 - \left(R \frac{q}{q_{\max}} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中: R 为接近且小于 1 的常数, q_{\max} 为试件峰值强度对应的 q 值。

加载条件下 G' 的弱化规律为

$$G' = G_{\max} \left[1 - \left(eR \frac{q}{q_{\max}} \right)^2 \right] \quad (0 \leq e \leq 1) \quad (7)$$

(4) 卸荷条件下 G 弱化规律为

$$G = G_{\max} \left[1 - \left(R \frac{q - q_0}{q_{\max} - q_0} \right)^2 \right] \quad (8)$$

式中: q_0 为卸荷起始点的 q 值。

卸荷条件下 G' 的弱化规律为

$$G' = G_{\max} \left[1 - \left(eR \frac{q - q_0}{q_{\max} - q_0} \right)^2 \right] \quad (9)$$

(5) 岩石加、卸荷破坏各自服从 Mohr-Coulomb 强度准则, c_1, φ_1 为加载抗剪强度参数; c_2, φ_2 为

卸荷抗剪强度参数。

结合以上假设条件, 模型共包含 8 个参数: $K, \nu, c_1, \varphi_1, c_2, \varphi_2, R, e$ 。其中, K 可通过静水压缩试验获得。 ν 可通过单轴压缩试验获得。 c_1, φ_1 为岩石加载条件下黏聚力和内摩擦角, 可通过常规三轴试验获得。 c_2, φ_2 为岩石卸荷条件下黏聚力和内摩擦角, 可通过卸围压三轴试验获得。 e 为 0~1 的常数, e 越小, 各向异性特征越显著, 可根据偏应力作用下岩石试件的体积变形曲线拟合得到。 R 为接近且小于 1 的常数。可以通过偏应力作用下岩石试件体积变形曲线拟合得到。

结合大理岩试验结果, 简要给出参数 e, R 的确定方法如下:

(1) 先确定参数 e 值

假设 $R = 1$, 通过改变参数 e 拟合加载试验条件下的试件体积变形曲线。图 3 为对试件 1-4 体积变形曲线的拟合结果。显然, 参数 $e = 0.97$ 时, 拟合曲线与试验曲线最为接近, 拟合效果最好。

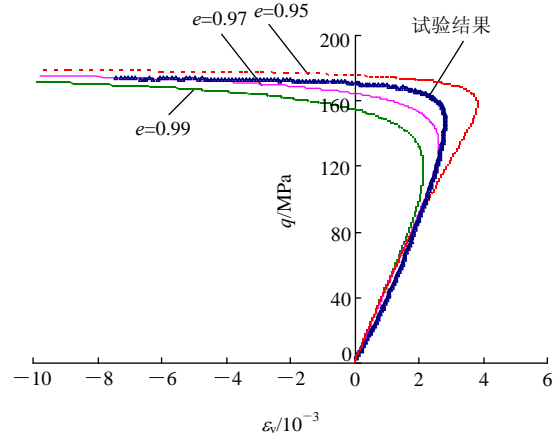


图 3 试件 1-4 体积应变曲线的拟合结果

Fig.3 Fitting results of volume strain curves for specimen 1-4

(2) 参数 e 值确定后, 分析参数 R 对模型预测结果的影响

图 4 为参数 R 对模型计算结果的影响分析。由图 4 可知, $R = 1.00$ 时, 模型计算试件破坏是体积应变值较试验结果明显偏大。随着 R 取值的逐渐减小, 模型计算的峰值体积应变值不断越小, 逐渐接近试验结果。选取与试验曲线峰值体积应变值最为接近的曲线, 得到参数 $R = 0.96$ 。

最终, 得到大理岩加、卸荷模型计算参数见表 2。

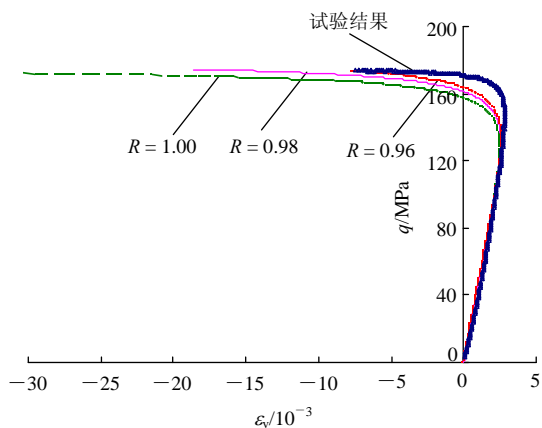


图 4 参数 R 对模型计算结果的影响

Fig.4 Effect of parameter R on calculating results

表 2 模型计算参数

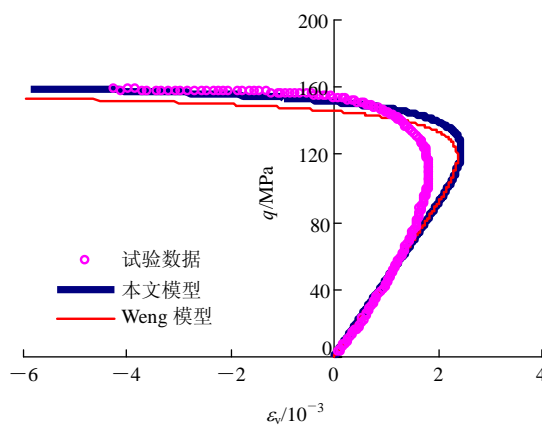
Table 2 Parameters of marble specimen in modelling

K/MPa	ν	c_1/MPa	$\varphi_1/(\text{^\circ})$	c_2/MPa	$\varphi_2/(\text{^\circ})$	e	R
20 115	0.26	26.80	27.10	22.90	33.40	0.97	0.96

5 与试验结果比较

图 5 给出了本文模型、Weng 模型计算结果与大理岩加载试验曲线的比较结果。从图 5 可以看出，Weng 模型计算的岩石峰值体积应变值较试验结果偏大很多，而改进后的模型则较好的克服了这一问题，且改进后模型的计算结果与试验曲线更接近。可见，改进后的模型可较好地描述大理岩在加载试验条件下的体积变形特征。

由式(2)可知，Weng 假设的变形模量弱化规律仅适用于从静水压力状态开始的单调应力路径，不能描述从轴向压缩状态开始的卸荷情况，因而并不能直接用于大理岩卸荷试验结果分析。另外，Weng



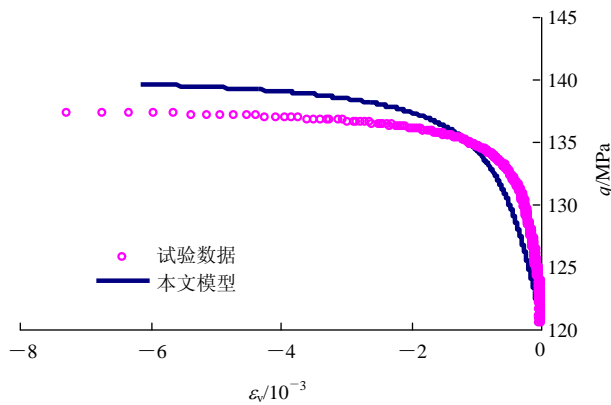
(b) 试件 1 - 3

图 5 加载试验结果与模型拟合结果比较

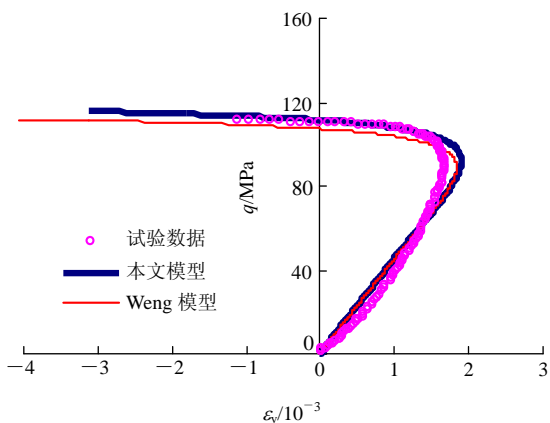
Fig.5 Comparison of model fitting and loading tests

模型没有区分不同应力路径下岩石的强度准则，即认为不同应力路径下岩石强度准则完全相同，这与我们开展的锦屏大理岩加、卸荷强度特性试验结果并不一致^[13]。

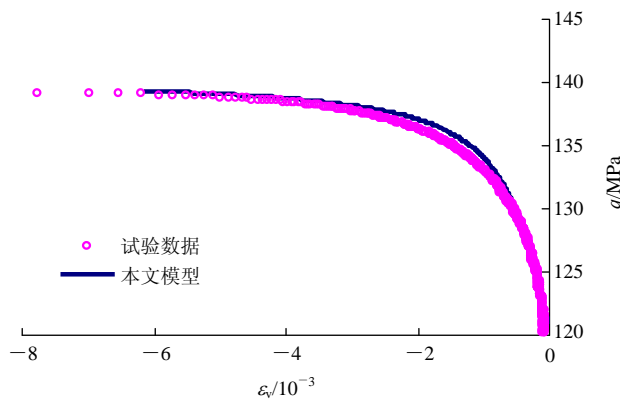
图 6 给出了卸荷阶段试验结果与模型计算结果的比较。总体来说，改进后的模型较好地描述了大理岩卸荷阶段的体积变形特征。



(a) 试件 2 - 1



(a) 试件 1 - 1



(b) 试件 2 - 2

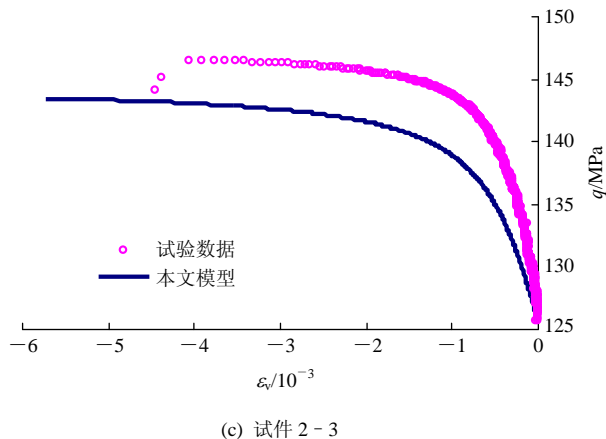


图6 卸荷阶段试验结果与模型拟合结果

Fig.6 Comparison of model fitting and unloading tests

显然，与 Weng 模型相比较，改进后模型的优点体现在以下几方面：

(1) 加、卸荷应力路径下岩石可以采用不同的强度准则，并分别通过加载或卸荷试验确定强度参数，模型可以考虑岩石加、卸荷强度特性的差异；

(2) 分别假设了加载和卸荷条件下变形模量的弱化规律，模型不仅可以描述从静水压力状态开始卸荷的路径，而且能够描述从轴向压缩状态开始卸荷的路径；

(3) 变形模量弱化规律中引入了系数 R ，克服了 Weng 模型得到的岩石破坏时体积应变值较试验结果明显偏大的不足。

6 结 论

本文开展了大理岩加卸荷变形特性试验，建立了大理岩加卸荷本构模型，主要得到如下结论：

(1) 锦屏大理岩在加、卸荷破坏前都表现出显著的体积膨胀特征。加载条件下试件经历了体积压缩→体积不变→体积膨胀的过程；卸荷条件下，试件从卸荷开始就出现体积膨胀。

(2) 从描述大理岩体积变形特征的角度出发，在对 M. C. Weng 等^[13]提出的岩石非线性模型改进的基础上，建立了锦屏大理岩加、卸荷本构模型，给出了模型参数确定方法。模型计算结果与试验结果具有较好的一致性，所建立的模型可以较好地描述大理岩在加、卸荷条件下的体积变形特征。

(3) 所建立的模型可以考虑岩石加卸荷强度特性的差异。模型不仅能够描述从静水压力状态开始

卸荷的路径，还可以用来描述从轴向压缩状态开始卸荷时试件的体积变形特征，具有更广泛的适用性。

致谢 相关试验得到了同济大学龚志明老师和中国矿业大学李玉寿老师的大力支持和帮助，在此深表感谢。

参考文献(References):

- [1] 黄润秋, 林 峰, 陈德基, 等. 岩质高边坡卸荷带形成及其工程性状研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 227 - 232.(HUANG Runqiu, LIN Feng, CHEN Deji, et al. Formation mechanism of unloading fracture zone of high slopes and its engineering behaviors[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(3): 227 - 232.(in Chinese))
- [2] 盛 谦. 深挖岩质边坡开挖扰动区与工程岩体力学性状研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2002. (SHENG Qian. Excavation disturbed zone of deep cutting rock slopes and mechanics behavior of engineering rock mass[Ph. D. Thesis] [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2002.(in Chinese))
- [3] 周火明, 盛 谦, 李维树, 等. 三峡船闸边坡卸荷扰动区范围及岩体力学性质弱化程度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1 078 - 1 081.(ZHOU Huoming, SHENG Qian, LI Weishu, et al. Excavation-disturbed zone and weaken degree of mechanical properties for rockmass of TGP shiplock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1 078 - 1 081.(in Chinese))
- [4] QI S W, WU F Q, YAN F Z, et al. Mechanism of deep cracks in the left bank slope of Jinping first stage hydropower station[J]. Engineering Geology, 2004, 73(1 - 2): 129 - 144.
- [5] 吴 刚, 孙 钧, 吴中如. 复杂应力状态下完整岩体卸荷破坏的损伤力学分析[J]. 河海大学学报, 1997, 25(3): 44 - 49.(WU Gang, SUN Jun, WU Zhongru. Damage mechanical analysis of unloading failure of intact rock mass under complex stress state[J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(3): 44 - 49.(in Chinese))
- [6] 赵明阶, 许锡宾, 徐 蓉. 岩石在三轴加、卸荷过程中的一种本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 626 - 631.(ZHAO Mingjie, XU Xibin, XU Rong. Constitutive model of rock under triaxial loading and unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 626 - 631.(in Chinese))
- [7] 周小平, 哈秋龄, 张永兴, 等. 峰前围压卸荷条件下岩石的应力-应变全过程分析和变形局部化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3 236 - 3 245.(ZHOU Xiaoping, HA Qiuling, ZHANG

- Yongxing, et al. Analysis of localization of deformation and complete stress-strain relation for mesoscopic heterogeneous brittle rock materials when axial stress is held constant while confinement is reduced[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3 236 - 3 245.(in Chinese))
- [8] 黄 达. 大型地下洞室开挖围岩卸荷变形机制及其稳定性研究[博士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2007.(HUANG Da. Study on unloading deformation mechanism and stability of excavating surrounding rock mass of large underground caverns[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.(in Chinese))
- [9] 李天斌, 王兰生. 卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 321 - 327.(LI Tianbin, WANG Lansheng. The laboratory study on deformation and destruction characteristics on basalt under stress relief condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(4): 321 - 327.(in Chinese))
- [10] 陶履彬, 夏才初, 陆益鸣. 三峡工程花岗岩卸荷全过程特性的试验研究[J]. 同济大学学报, 1998, 26(3): 330 - 334.(TAO Lubin, XIA Caichu, LU Yiming. Experimental studies on the total course behavior of unloading of granite on Three Gorges project of the Yangtze River[J]. Journal of Tongji University, 1998, 26(3): 330 - 334.(in Chinese))
- [11] 沈军辉, 王兰生, 王青海, 等. 卸荷岩体的变形破裂特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2 028 - 2 031.(SHEN Junhui, WANG Lansheng, WANG Qinghai, et al. Deformation and fracture features of unloaded rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(12): 2 028 - 2 031.(in Chinese))
- [12] 李宏哲, 夏才初, 闫子舰, 等. 锦屏水电站大理岩在高应力条件下的卸荷力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2 104 - 2 109.(LI Hongzhe, XIA Caichu, YAN Zijian, et al. Study of marble unloading mechanical properties of Jinping hydropower station under high geostress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2 104 - 2 109.(in Chinese))
- [13] 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.

本刊 2010 年第 5 期被 EI 收录论文(27 篇, 收录率为 100%)题录

No.	论 文 题 目	作 者 名	页 码
1	单轴应力 - 温度作用下煤中吸附瓦斯解吸特征	何满潮, 王春光, 李德建, 等	865 - 872
2	崩滑灾害临界位移演化的指数律	秦四清, 王媛媛, 马 平	873 - 880
3	巴西圆盘劈裂试验中拉伸模量的解析算法	官凤强, 李夕兵, ZHAO J	881 - 891
4	600 °C 内高温状态花岗岩遇水冷却后力学特性试验研究	邵保平, 赵阳升	892 - 898
5	型煤与原煤全应力 - 应变过程渗流特性对比研究	曹树刚, 李 勇, 郭 平, 等	899 - 906
6	含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置的研制及应用	许 江, 彭守建, 尹光志, 等	907 - 914
7	锦屏一级水电站左岸边坡微震监测系统及其工程应用	徐奴文, 唐春安, 沙 椿, 等	915 - 925
8	新型耗能减震滚石棚洞作用机制研究	何思明, 吴 永	926 - 932
9	肖家桥滑坡堵江机制及灾害链效应研究	徐文杰, 陈祖煜, 何秉顺, 等	933 - 942
10	砂砾土液化的剪切波速判别方法	曹振中, 袁晓铭	943 - 951
11	锦屏一级水电站左岸高边坡工程整体稳定性的模型试验研究	刘 立, 陈 睿, 乔高乾	952 - 959
12	坝基硬岩蠕变特性试验及其蠕变全过程中的渗流规律	王如宾, 徐卫亚, 王 伟, 等	960 - 969
13	岩石剪胀角模型与验证	赵星光, 蔡 明, 蔡美峰	970 - 981
14	大型地下洞室三维弹塑性损伤动力有限元分析	张志国, 肖 明, 张雨霆, 等	982 - 989
15	破裂砂岩蠕变试验研究	郭臣业, 鲜学福, 姜永东, 等	990 - 995
16	基于不同初值的微震源定位方法	林 峰, 李庶林, 薛云亮, 等	996 - 1002
17	饱水砂岩动态强度的 SHPB 试验研究	王 斌, 李夕兵, 尹士兵, 等	1003 - 1009
18	基于小波变换时频能量分析技术的岩石声发射信号时延估计	康玉梅, 朱万成, 白 泉, 等	1010 - 1016
19	顶板岩层破断诱发矿震的频谱特征	陆菜平, 窦林名, 郭晓强, 等	1017 - 1022
20	三峡库区千将坪滑坡地质力学模型试验研究	肖诗荣, 刘德富, 姜福兴, 等	1023 - 1030
21	圆形巷道围岩应变软化弹性分析	张 强, 王水林, 葛修润	1031 - 1035
22	循环荷载下岩石阻尼参数测试的试验研究	刘建锋, 徐 进, 李青松, 等	1036 - 1041
23	基坑被动区加固的位移控制效果及参数分析	郑俊杰, 章荣军, 丁烈云, 等	1042 - 1051
24	荆门膨胀土土 - 水特征曲线特征参数分析与非饱和抗剪强度预测	周葆春, 孔令伟, 陈 伟, 等	1052 - 1059
25	海堤荷载下海积软土沉降的现场测试和数值模拟	姜 民, 边学成, 吴建国, 等	1060 - 1067
26	饱和及非饱和粉土中扩底桩极限上拔承载力大尺寸模型试验研究	陈仁朋, 张革强, 孔令刚, 等	1068 - 1074
27	拓宽黄土路基湿化破坏机制模型试验研究	翁效林, 李林涛, 张留俊	1075 - 1080

(摘自“EI 中国”)