

大理岩三轴压缩破坏的能量特征分析

刘天为¹, 何江达², 徐文杰¹

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 岩石材料的变形和破坏与能量的变化密切相关。利用刚性伺服系统对大理岩岩样进行了系列三轴压缩试验, 基于试验结果, 对大理岩在加载过程中各阶段能量变化的具体数值进行了计算和整理, 研究了能量变化在加载破坏各阶段分别与围压、应力、应变的内在联系。结果表明, 初始围压的增大能够相当程度上提高岩样的破坏应变能。在既定围压下, 岩样在弹性变形阶段的能量变化与偏应力和应变均成正线性关系。随着初始围压的增大, 岩样所吸收的能量随偏应力变化的增长速率降低, 随应变变化的增长速率加快。在三轴压缩过程中, 岩样在弹性变形阶段所吸收的能量占总能量的比重较小, 绝大部分能量耗散于岩样的屈服变形阶段; 并且随着初始围压的增大, 屈服变形阶段所吸收的能量占总能量的比重提高。

关键词: 岩石力学; 大理岩; 三轴压缩破坏; 能量分析; 破坏应变能

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2013)02 - 0395 - 06

作者简介: 刘天为(1990 -), 男, 北京人, 硕士, 从事岩石力学与工程方面的研究。E-mail: liutianwei900325@163.com。

Energy properties of failure of marble samples under triaxial compression

LIU Tian-wei¹, HE Jiang-da², XU Wen-jie¹

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 10084, China; 2. School of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The deformation and failure of rock are closely relative to energy change. Experiments are carried out to investigate marble samples under triaxial compression by means of the servo-controlled testing machine. Based on the experimental results, the energy numerical variable is calculated and interpreted, and the internal relations among energy numerical variable, confining pressure, stress and strain are studied and compared. The results show that the failure strain energy of marble samples increases to a considerable extent as the confining pressure increases. The energy change has a positive linear relation with the stress and strain respectively of marble samples under vested confining pressure. With the increase of the confining pressure, the slope of energy change-deviatoric stress curve reduces, and the slope of energy change-strain curve accelerates. In the triaxial compression process, the amount of energy change at the elastic deformation stage takes a small proportion of the total energy change. Most of the energy dissipates at the yield deformation stage. At the same time, the amount of energy change at the yield deformation stage takes a greater proportion in the total energy change as the confining pressure increases.

Key words: rock mechanics; marble; triaxial compression failure; energy analysis; failure strain energy

0 引 言

随着工程技术的不断提高与国民经济的发展需要, 在复杂地质情况下的岩土体中进行工程建设成为必要。复杂地质情况下的岩土体常赋存于高应力深部岩体中, 其力学变形特性因通常具有非线性、延塑性、不均匀性等特点而较为复杂。有鉴于此, 应针对复杂地质情况下的岩土体进行系统性试验并针对其结果开展不同角度的对比分析^[1-9]。

可将大理岩岩样的三轴压缩破坏过程看为能量不断耗散与释放的过程。在此过程中, 岩样吸收外部输入的能量用于颗粒骨架的弹性变形、微缺陷的发育与

裂隙的扩展与滑移等。目前已有部分学者针对岩样在加载破坏过程中的能量耗散与释放进行了试验研究并取得一定进展。如谢和平等^[10-12]研究了岩样在变形破坏过程中能量变化与整体破坏的内在联系。尤明庆等^[13-14]研究了岩样在屈服破坏过程中的能量与环向变形, 岩样能量变化与围压之间的关系。杨圣奇等^[15-16]研究了岩样的断裂能与围压变化的关系。但针对岩样在三轴压缩破坏过程中各阶段的能量变化与应力应变之间的内在联系尚不够清楚。

有鉴于此, 本文通过数学物理分析方法求解出岩样在三轴压缩破坏各阶段能量变化的具体数值, 揭示了其能量变化在加载破坏各阶段分别与围压、应力、应变的内在联系, 阐述了其能量耗散与释放和变形破坏之间的关系。

1 试验方案

本次试验在 MTS815 刚性伺服系统上进行, 试验中所用岩样为典型大理岩, 取自锦屏二级水电站引水隧洞的 A 线辅助洞。试验岩样为直径 50 mm, 高度 100 mm 的标准圆柱体, 其制备及试验程序均按相关规程及标准进行。

本次试验在岩样的弹性变形阶段采用应力控制方法, 在屈服变形阶段采用位移控制方法。三轴压缩试验首先按静水压力条件施加围压至预定值, 预定值分别为 0, 5, 10, 20, 30, 40 MPa; 围压施加完毕后以 2 kN/s 的速度施加轴向荷载直至试样进入屈服变形阶段; 然后以 0.1 mm/min 的速度进行环向位移控制直至试样破坏 (失去承载能力)。在轴向加载的过程中, 系统自动记录施加的荷载值、轴向和环向变形量, 同时记录各级应力下的轴向和侧向变形。

2 大理岩三轴压缩破坏的能量特征

大理岩岩样的抗压强度随初始围压的加大而提高, 在上述试验条件下, 其试验结果如表 1 所示, 应力应变关系曲线如图 1 示。

表 1 大理岩三轴压缩试验结果

Table 1 Triaxial compressive test results of marble samples

编号	侧向应力 s_3/MPa	偏应力 $(s_1-s_3)/\text{MPa}$	轴向应力 s_1/MPa
#1	0	82.31	82.31
#2	5	141.12	146.12
#3	10	177.21	187.21
#4	20	226.34	246.34
#5	30	260.78	290.78
#6	40	291.74	331.74

从能量角度出发, 岩石的加载变形破坏过程的实质为能量耗散与能量释放的综合过程。在试验系统中, 外部输入的能量大部分被岩样吸收, 相当小的部分耗散于热能。在输入能量的初始阶段, 绝大部分能量用于孔隙的压密与颗粒骨架的弹性变形, 该过程即为应力应变曲线的线弹性变形阶段; 随着能量的进一步输入并逐渐超过岩样通过弹性变形所能吸收的极限后, 能量主要用于微缺陷发育、裂隙滑移和导致材料性质劣化等岩石损伤方面, 并导致强度下降, 该过程在应力应变关系曲线图中反映为屈服变形阶段; 随着能量

的继续输入, 岩石损伤不断加强, 承载能力进一步下降, 当能量积累到岩石破坏所需要的耗散能时, 裂隙在部分区域发生贯通进而形成宏观裂缝, 能量突然释放导致岩样破坏, 该过程在图 1 中反映为岩样失去承载能力。

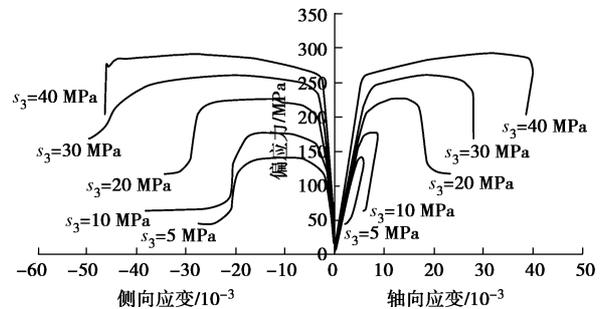


图 1 大理岩的应力应变曲线

Fig. 1 Deviatoric stress-strain curves of marble samples under different confining pressures

在图 1 应力应变关系曲线中, 随着初始围压的增大, 岩样的线弹性变形阶段能够维持到更高水平, 其屈服变形阶段所能承受的变形量也愈大, 岩样具有更大的抵抗破坏的能力。如围压分别为 0, 5, 10, 20, 30, 40 MPa 时, 岩样的抗压强度分别为 82.31, 146.12, 187.21, 246.34, 290.78, 331.74 MPa。初始围压的增长对岩样抵抗破坏能力的提高可从如下能量角度来进行分析: ①施加围压的过程可视为能量的输入过程, 初始围压愈大即外部输入的能量愈大, 该部分能量主要用于岩样内部微缺陷的闭合并增大其密实程度从而使线弹性变形阶段延续到较高水平并提高岩样抵抗破坏的能力; ②岩样在屈服变形阶段需要侧向膨胀向液压油做功, 初始围压愈大, 发生相同的侧向位移做功愈多。围压对岩样的变形具有约束作用, 限制着岩样内部裂隙的扩展及发育, 岩样的刚度得到提高从而增强了抵抗破坏的能力。

3 能量变化的数值分析

3.1 能量特征公式

大理岩岩样的三轴压缩过程的实质为能量变化的过程。在围压施加完毕后, 其能量变化 W 主要分为 2 个部分: 轴向荷载对岩样做功 W_1 与岩样的侧向变形对液压油做功 W_2 。上述各部分能量的公式如下:

$$W_1 = \int F_1 du_1 = AL \int \sigma_1 d\varepsilon_1 \quad (1)$$

$$W_2 = \int F_3 du_3 = 2AL \int \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (2)$$

$$W = W_1 + W_2 = AL \int \sigma_1 d\varepsilon_1 + 2AL \int \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (3)$$

表2 大理岩岩样三轴压缩的能量分析

Table 2 Energy analysis of marble samples under triaxial compression

编号	侧向应力 s_3/MPa	弹性阶段	峰值应力时	破坏时	屈服阶段	破坏时单位应变 能/ $(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})$
		所吸收能量/J	所吸收能量/J	所吸收能量/J	所吸收能量/J	
#1	5	47.23	78.35	86.96	39.73	0.44
#2	10	63.54	162.85	171.68	108.14	0.87
#3	20	86.57	332.56	490.22	403.65	2.50
#4	30	127.23	690.49	971.86	844.63	4.95
#5	40	132.42	1311.94	1647.02	1514.60	8.39

式中 F_1 , F_3 分别代表轴向荷载与侧向荷载; u_1 , u_3 分别代表轴向和侧向位移; A , L 分别为岩样的横截面积与轴向长度; σ_1 , σ_3 分别代表轴向应力与围压; ε_1 , ε_3 分别代表轴向应变与侧向应变。

需要说明的是, 由于现有的岩石力学试验仪器无法系统地测量沿轴向不同点处的侧向变形, 并且当岩样内部产生剪切滑移时, 侧向变形沿轴向是不均匀的, 因此需要对侧向变形进行某种估算。通过对试验后的岩样沿轴向不同点处的侧向变形进行测量、计算变形破坏过程中泊松比 ν 的变化并参阅相关文献^[13], 最终假定岩样的平均侧向变形为试验测得的岩样中部数值的一半。

3.2 能量数值特征与应力的关系

通过上述的能量特征公式对岩样在三轴压缩破坏过程的不同阶段进行能量变化计算, 可得出大理岩岩样三轴压缩的能量分析如表2示, 各向能量变化与偏应力的关系曲线如图2示, 总能量变化与偏应力的关系曲线如图3示。

采用能量特征分析方法, 对大理岩岩样在三轴压缩破坏过程中不同阶段的能量变化进行计算, 从表2的能量数值分析可得出:

(1) 从能量耗散与释放的角度, 可将岩样在加载过程中的变形与破坏看做岩样不断吸收外部能量的过程。初始围压的增大能够相当程度上提高岩样吸收能量的能力, 即提高岩样抵抗变形破坏的能力。如表2所示, #1岩样的初始围压为5 MPa, 其破坏时吸收的总能量为86.96 J, 破坏时单位应变能为0.44 MJ/m^3 ; #5岩样的初始围压为40 MPa, 其破坏时吸收的总能量达到了1514.60 J, 破坏时单位应变能为8.39 MJ/m^3 。

(2) 岩样在三轴压缩破坏的过程中, 弹性阶段所吸收的能量占总能量的比重较小, 绝大部分能量耗散于岩样的屈服变形阶段, 且屈服变形阶段所吸收的能量占总能量的比重随初始围压的增大而提高。#1~#5五组岩样中, 其弹性阶段所吸收的能量占总能量的比重分别为54.31%, 37.01%, 17.66%, 13.09%与8.04%; 其屈服变形阶段所吸收的能量占总能量的比重分别为45.69%, 62.99%, 82.34%, 86.91%与91.96%。岩样

在弹性阶段所吸收的能量愈多, 其屈服阶段与破坏时所能承受的能量愈大。

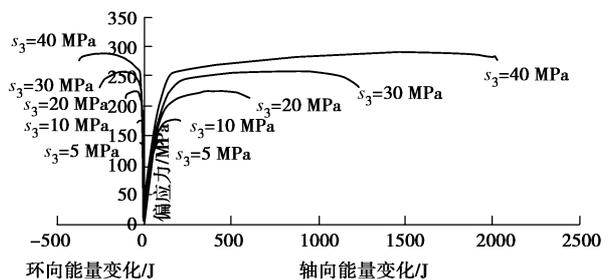


图2 大理岩的偏应力与各向能量变化的关系曲线

Fig. 2 Relation curves between deviatoric stress and directional energy of marble samples

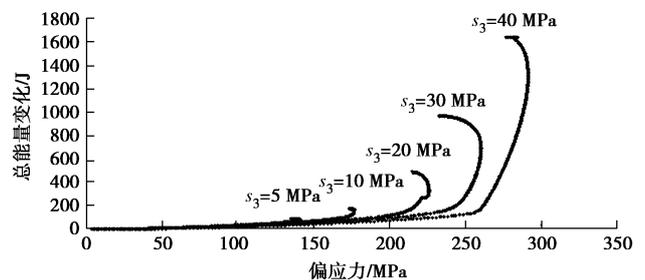


图3 大理岩岩样的偏应力与总能量变化的关系曲线

Fig. 3 Relation curves between deviatoric stress and total energy of marble samples

从能量耗散与释放的角度, 针对图2与图3中大理岩岩样的偏应力与能量变化的关系曲线进行分析, 可以得出如下结论:

(1) 岩样在三轴压缩变形破坏的过程中, 会发生轴向变形、侧向变形与体积膨胀, 岩样在不同方向上能量变化的性质不同且存在较大差异。在轴向上, 岩样通过轴向荷载使其沿轴向压缩从而吸收能量; 在环向上, 岩样因体积膨胀产生侧向变形对液压油做功从而释放能量。

(2) 在三轴压缩变形破坏过程中, 岩样通过轴向荷载使其沿轴向压缩所获得的能量大于其侧向变形对液压油的做功, 岩样的总能量变化为正。从物理力学角度分析, 吸收与释放的能量主要转化为结构骨架的弹性变形, 孔隙的启闭, 裂隙的滑移与塑性变形等方

面。

(3) 在三轴压缩过程中, 随着轴向荷载的不断的增加, 岩样所吸收的能量持续增长。初始围压愈高, 能量 - 偏应力关系曲线的斜率愈小, 能量随偏应力增长的速度愈慢, 岩样在相同偏应力下所吸收的能量愈少。

(4) 在施加轴向荷载的初始阶段, 岩样的能量变化随轴压的增大呈近似线性增长且增速缓慢, 当轴向应力超过线弹性阶段的极值时, 能量急剧增加且增速在峰值应力处达到最大。通过计算岩样在三轴压缩过程中泊松比与弹性模量的变化并将其与应力应变关系曲线和能量变化公式进行系统分析。表明在加载的初始阶段, 岩样的能量变化在物理力学方面主要转换为结构骨架的弹性变形, 此时泊松比与变形模量趋于稳定, 此阶段在应力应变关系曲线中反应为线弹性变形阶段; 当轴向应力超过线弹性变形阶段的峰值时, 岩样的泊松比与变形模量发生陡然突变, 岩样所吸收的能量主要转化为孔隙的开启, 微缺陷的发育与裂隙的滑移和扩展, 此阶段在应力应变关系曲线中反应为塑性变形破坏阶段。

3.3 能量数值特征与应变的关系

岩石是不同矿物的组合体, 因其内部含有裂隙、孔隙等微缺陷, 属于非均质、线弹性与延塑性并存, 各向异性的复杂材料。岩样吸收能量的过程可通过岩样的各向变形得到宏观体现, 岩样的各向变形也可通过能量的耗散与释放方法得到解释。

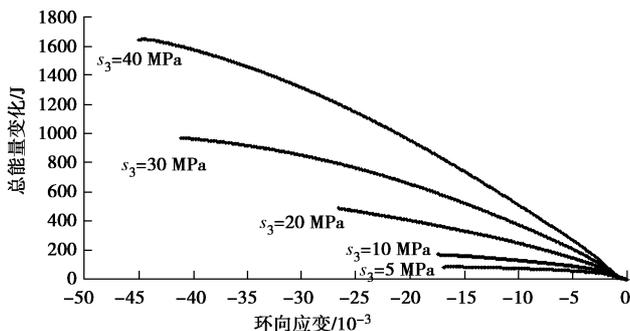


图4 大理岩岩样的环向应变与总能量变化的关系曲线

Fig. 4 Relation curves between lateral strain and total energy change of marble samples

图4,5反映了大理岩岩样在三轴压缩变形破坏过程中应变与总能量变化的内在联系。通过对其进行对比分析可知:

在三轴加载过程中, 随着岩样应变的增加, 岩样所吸收的能量持续增长。初始围压愈高, 能量 - 应变关系曲线的斜率愈大, 能量随应变的增长速度愈快。岩样的能量增长与轴向应变和侧向应变的增长在总体上呈近似线性关系, 但在加载后期, 关系曲线的斜率

降低, 呈较为平滑的上凸曲线, 能量的增速下降。

$$u = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad (4)$$

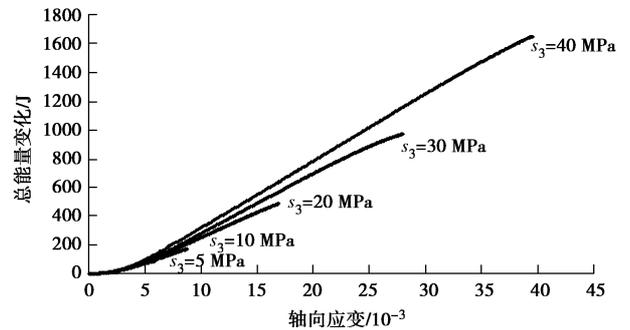


图5 大理岩岩样的轴向应变与总能量变化的关系曲线

Fig. 5 Relation curves between axial strain and total energy change of marble samples

图6为通过式(4)求得的大理岩岩样在三轴压缩破坏过程中割线泊松比随偏应力变化的关系曲线。考虑到在试验过程中, 系统在短时间内采集大量数据可能存在较大误差, 采用切线泊松比对结果的准确性影响较大, 故本文采用割线泊松比。

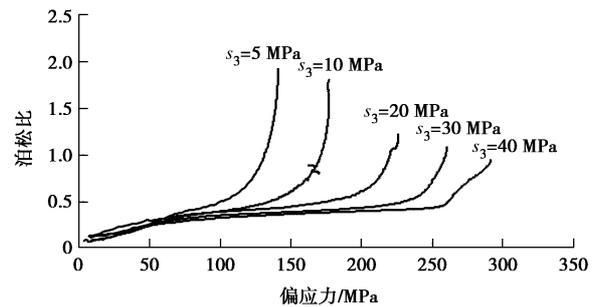


图6 三轴压缩过程中泊松比随偏应力变化的关系曲线

Fig. 6 Relation curves between Poisson's ratio and deviatoric stress under different confining pressures

从图6中可看出, 随着初始围压的增大, 岩样在三轴压缩过程中的泊松比不断减小。在既定的初始围压下, 泊松比随加载过程的进行而不断增大, 其在加载初期的增速较为平缓, 在屈服变形阶段的增速陡然加大。这表明在加载后期, 岩样的变形主要以横向变形为主, 并产生体积扩容对液压油大量做功。这就解释了能量 - 变形关系曲线为何在加载后期斜率减小, 能量增速降低这一变化规律。

4 结 论

(1) 初始围压的增大能够相当程度上提高岩样吸收能量的能力, 即提高岩样抵抗破坏的能力。此特性是通过增大岩样的刚度与密实度, 限制微缺陷的发育与扩展, 增大其侧向变形所需耗散的能量来实现的。

(2) 初始围压愈高, 能量 - 偏应力关系曲线的斜率愈小, 能量随偏应力变化的增长速度愈慢, 岩样在相同偏应力下所吸收的能量愈少; 初始围压愈高, 能量 - 应变关系曲线的斜率愈大, 能量随应变变化的增长速度愈快, 岩样在相同变形量下所吸收的能量愈多。

(3) 岩样在三轴压缩破坏的过程中, 其在弹性阶段所吸收的能量占总能量的比重较小, 绝大部分能量耗散于岩样的屈服变形阶段, 且屈服变形阶段所吸收的能量占总能量的比重随初始围压的增大而提高。岩样在弹性阶段所吸收的能量愈多, 其在屈服阶段与破坏时所能承受的能量愈大。

(4) 在施加轴向荷载的初始阶段, 岩样的能量变化随轴压的增大呈近似线性增长且增速稳定缓慢, 当轴向应力超过线弹性阶段的极值时, 能量急剧增加且增速在峰值应力处达到最大。

(5) 岩样的能量增长与轴向应变和侧向应变的增长在总体上呈近似线性关系, 但在加载后期, 关系曲线的斜率降低, 呈较为平滑的上凸曲线, 能量的增速下降。

参考文献:

- [1] 钱七虎. 深部地下工程空间开发中的关键科学问题[C]// 钱七虎院士论文选集——深部地下空间开发中的基础研究关键技术问题.[S.l.]: [s. n.], 2007: 549 - 568. (QIAN Qi-hu. The key problems of deep underground space development[C]// Selections from Academician QIAN Qihu's Theses-the key Technical Problems of Base Research in Deep Underground Space Development. [S.l.]: [s. n.], 2007: 549 - 568. (in Chinese))
- [2] 王明洋, 周泽平, 钱七虎. 深部岩体的构造和变形与破坏问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(3): 448 - 455. (WANG Ming-yang, ZHOU Ze-ping, QIAN Qi-hu. Tectonic, deformation and failure problems of deep rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(3): 448 - 455. (in Chinese))
- [3] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(16): 2803 - 2813. (HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(16): 2803 - 2813. (in Chinese))
- [4] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展, 2005, **35**(1): 91 - 99. (ZHOU Hong-wei, XIE He-ping, ZUO Jian-ping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths[J]. Advances in Mechanics, 2005, **35**(1): 91 - 99. (in Chinese))
- [5] 王明洋, 戚承志, 钱七虎. 深部岩体块系介质变形与运动特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(16): 2825 - 2830. (WANG Ming-yang, QI Cheng-zhi, QIAN Qi-hu. Study on deformation and motion characteristics of blocks in deep rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(16): 2825 - 2830. (in Chinese))
- [6] 王贤能, 黄润秋. 岩石卸荷破坏特征与岩爆效应[J]. 山地研究, 1998, **16**(4): 281 - 285. (WANG Xian-neng, HUANG Run-qiu. Analysis of deformation and fracture features of rock under unloading condition and their effect on rock burst[J]. Mountain Research, 1998, **16**(4): 281 - 285. (in Chinese))
- [7] 高玉春, 徐进, 何鹏. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(3): 456 - 460. (GAO Yu-chun, XU Jin, HE Peng. Study on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(3): 456 - 460. (in Chinese))
- [8] JOSÉ A Sanchidrian, PABLO Segarra, LINA M López. Energy components in rock blasting [J]. Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, **44**(1): 130 - 147.
- [9] 陈卫忠, 刘豆豆, 杨建平. 大理岩卸围压幂函数型 Mohr 强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(11): 2214 - 2220. (CHEN Wei-zhong, LIU Dou-dou, YANG Jian-ping. Power function based Mohr strength criterion for marble with unloading confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(11): 2214 - 2220. (in Chinese))
- [10] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(21): 3565 - 3570. (XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(21): 3565 - 3570. (in Chinese))
- [11] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(17): 3003 - 3010. (XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(17): 3003 - 3010. (in Chinese))
- [12] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探

[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2604 - 2608. (XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang, et al. On energy analysis of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2604 - 2608. (in Chinese))

[13] 尤明庆, 华安增. 岩石试样破坏过程的能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 778 - 781. (YOU Ming-qing, HUA An-zeng. Energy analysis of failure process of rock specimens[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 778 - 781. (in Chinese))

[14] 尤明庆. 岩石的力学性质[M]. 北京: 地质出版社, 2007. (YOU Ming-qing. Mechanical properties of rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007. (in Chinese))

[15] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 岩样单轴压缩变形破坏与能量特征研究[J]. 固体力学学报, 2006, 27(2): 213 - 216. (YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, SU Cheng-dong. Study on deformation failure and energy properties of rock specimen in uniaxial compression[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2006, 27(2): 213 - 216. (in Chinese))

[16] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 大理岩三轴压缩变形破坏与能量特征研究[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 136 - 141. (YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, SU Cheng-dong. Study on deformation failure and energy properties of marble specimen under triaxial compression[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1): 136 - 141. (in Chinese))

勘 误

《岩土工程学报》2013年第1期发表的题为“堆载预压径竖向固结等体积应变解答”(作者雷国辉等)的论文, 由于疏忽, 部分内容有误, 作如下更正:

原文式(10)

$$m_{v3} = m_{v1} \frac{1+v'}{3(1-v')} \tag{10}$$

错误, 更正为

$$m_{v3} = m_{v1} \frac{3(1-v')}{1+v'} \tag{10}$$

原文图3错误, 更正为

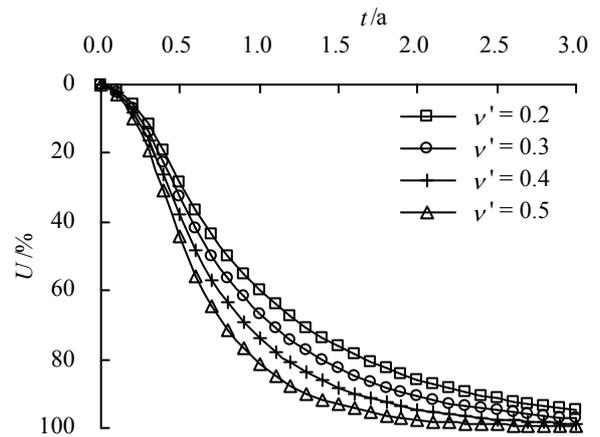


图3 泊松比效应对固结的影响

Fig. 3 Effect of Poisson's ratio on consolidation

特此更正, 并向读者致歉。

(本刊编辑部)