

文章编号: 1000-7598 (2012) 11-3257-06

含预制节理岩体卸荷条件下力学特性试验研究

王瑞红¹, 李建林¹, 蒋昱州², 王 宇¹

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010)

摘 要: 节理对卸荷条件下岩体的力学性质有重要影响。通过含 2 条不同间距预制断续节理岩体的三轴卸荷破坏试验, 研究了节理岩体在卸荷应力条件下的应力-应变特征、强度、变形特征、破坏规律及节理间距对岩体力学性质的影响。研究表明: 相比于完整岩体, 节理岩体卸荷破坏时从峰值强度跌落至残余强度过程中轴向应变较大, 为完整岩体的 3~4 倍, 岩体破坏时极限强度明显低于完整岩体, 脆性特征不如完整岩体明显; 节理岩体卸荷破坏时, 变形模量有较大幅度的降低, 其降低程度是同条件下完整岩体的 6~7 倍, 节理间距越大, 变形模量降低程度越大; 与含预制节理岩样三轴加载试验结果相比, 节理岩体卸荷条件下破坏程度更为强烈, 除剪切破裂面外, 沿最大主应力方向分布的不同级别的张性裂隙非常发育, 预制节理的间距对岩体破坏形态影响不大。

关 键 词: 预制节理; 卸荷; 力学特性; 试验研究

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Experimental research on mechanical property of rock mass with prefabricated joints under unloading condition

WANG Rui-hong¹, LI Jian-lin¹, JIANG Yu-zhou², WANG Yu¹

(1. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Joints have a great influence on mechanical properties of rock under unloading condition. The stress-strain characteristics and the influences of rock mass strength, deformation characteristics, failure law, joint spacing and depth on the mechanical properties of rock mass are analyzed, based on the triaxial unloading destruction experiment of the rock mass with two prefabricated intermittent joints with different spaces. The results show as follows: Comparing to the completed rock mass, the axial strain of the jointed rock during the process of falling from the peak strength to residual strength in unloading failure is 3-4 times larger than the completed rock mass; and the ultimate strength is significantly lower than the completed rock mass; also the brittle feature is not obvious as the completed rock mass. During unloading failure, the deformation modulus of the jointed rock mass reduces significantly, which the reducing degree is 6-7 times larger than the completed rock mass; and the deformation modulus decreases faster with the increase of joint spacing. Comparing to the triaxial loading experiment results of the rock mass with prefabricated joints, the damage degree of the jointed rock mass under unloading condition is more intense; in addition to the shear fracture plane, the tensile cracks of different classes distributed along the direction of maximum principal stress are well developed; and the space of prefabricated joints has little effect on the rock mass failure mode.

Key words: prefabricated joints; unloading; mechanical property; experimental research

1 引 言

工程岩体大都经受了多次地质构造运动的扰动, 其中含有多种多样不同级别的节理及软弱面, 弱化了岩体的强度。含有节理的岩体和完整岩石有截然不同的性质。特别是在卸荷条件下, 岩体和岩

石的力学性质区别更大。卸荷作用使得岩体中原有的裂隙扩张、贯穿, 甚至生成新的裂隙, 岩体连通性增强, 渗透性增加, 抗拉强度急剧降低, 岩体质量迅速劣化。而工程中遇到的岩体均为含有不同级别裂隙的节理岩体, 因此, 必须研究含节理岩体的力学性态, 才能比较真实地反映工程岩体的实际力

收稿日期: 2012-08-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51109120, No. 51009083); 湖北省教育厅项目(No. Q20101201); 宜昌市科学技术研究与开发项目(No. A2012-302-04, No. A2012-302-03)。

第一作者简介: 王瑞红, 女, 1981 年生, 博士, 副教授, 主要从事边坡岩体开挖卸荷力学特性方面的研究工作。E-mail: 43604258@qq.com

学行为, 节理岩体在卸荷条件下的力学性能、破坏机制及力学参数的研究具有非常重要的工程意义。

关于节理及结构面对岩体力学性质的影响, 国内外已有许多学者通过岩体试验、模型试验、数值分析得到了有价值的成果^[1-10]。Yang^[11]、Nasseri等^[12]通过试验发现, 含节理岩体有3种不同的破坏形式, 岩体按照何种方式破坏主要取决于页岩层理面和最大主应力夹角及围压大小。杨圣奇^[13]研究了含断续预制裂纹粗晶大理岩在不同围压下强度和变形特性。李建林等^[14]结合三峡工程永久船闸高边坡岩体, 利用真三轴试验设备研究了不同几何比尺、含不同倾角节理(8°、36°、52°、82°、90°)结构面岩体的加、卸荷力学特性。研究表明, 卸荷条件下, 结构面方向对岩体力学性质有很大影响。李宏哲^[15]通过三轴压缩试验, 研究了含天然贯穿节理大理岩试件在不同围压下的破坏特征, 试验发现, 试件有穿切节理面和沿节理面滑移两种破坏形式, 节理面与最大主应力夹角大小对破坏方式有重要影响, 而围压对破坏方式影响不明显。王飞等^[16]通过岩体三轴模拟试验对节理岩体在卸荷应力状态下的破坏特征进行了研究, 得到了卸荷速率、节理的倾角及参数对卸荷岩体强度的影响。

已有文献研究表明, 节理岩体的力学性质主要受到岩体中所含节理、裂隙的方向、长度、充填物材料、闭合程度、连通率等的显著影响。对于含贯通节理的裂隙岩体在卸荷状态下的力学特性目前已有了一定的研究, 但对于含有断续节理的岩体, 由于其力学性态的复杂性, 在卸荷状态下的力学机制仍有值得进一步探索的必要。本文将通过含2条不同间距预制断续节理岩体的卸荷三轴试验, 研究含有预制节理岩体在卸荷应力条件下的应力-应变特征、强度、变形特征、破坏规律及节理间距对岩体力学性质的影响。

2 试验方案

2.1 试件制备

试验所用岩块为四川红砂岩, 质地均匀细密, 无风化现象, 无可见节理, 总体连续性、完整性很好, 为新鲜岩体, 水平层理明显, 钻样方向均垂直于节理。岩样按50 mm×100 mm(直径×高度)圆柱体进行制备。典型岩样如图1所示。

2.2 试验方案

试验在中国科学院武汉岩土力学研究所研制的RMT-150C型岩石力学刚性伺服试验机上进行, 具体试验方案如下:

① 按静水压力条件逐步施加(加载速率为0.05 MPa/s) $\sigma_1 = \sigma_3$ 至10 MPa; ② 稳定 σ_3 , 逐步增高 σ_1 (加载速率为0.5 kN/s) 至预定荷载; ③ 保持 σ_1 恒定, 以0.05 MPa/s的速率逐步降低 σ_3 至岩样破坏。

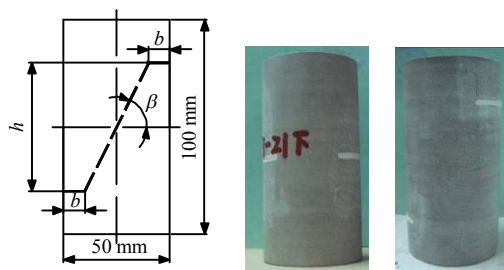


图1 典型岩样示意图

Fig.1 Sketches of typical rock samples

3 试验结果分析

3.1 应力-应变和分析

图2为含断续节理岩体在初始围压10 MPa下的典型卸荷破坏应力-应变曲线。从图中可以看出, 相比于完整岩样, 节理岩样加载压密段变形更大; 逐渐卸除围压时, ε_1 不断增大, 岩体有较明显的轴向塑性流动阶段; 从峰后曲线来看, 节理岩样卸荷破坏时从峰值强度跌落至残余强度过程中轴向应变较大, 为完整岩体的3~4倍, 说明由于节理岩体在荷载不断增大的过程中, 预制节理面附近由于应力集中首先产生裂纹, 裂纹不断扩展贯通, 最终导致岩体破坏, 使得岩体在破坏时不如完整岩体那样剧烈和突然。相比而言, 节理岩体破坏时脆性特征不如完整岩体明显, 破坏发出比较沉闷的响声。由于卸荷破坏时采用应力控制, 岩样破坏后轴压立即下跌至残余强度。试验结果见表1。

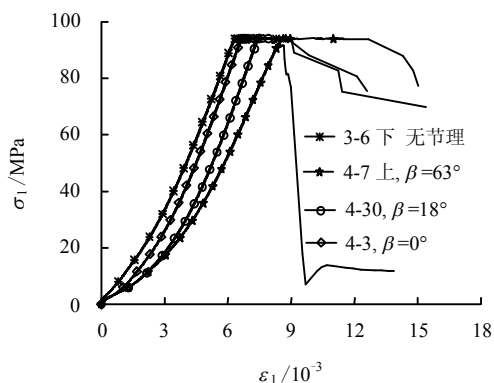


图2 卸荷破坏应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves under unloading failure

表 1 卸荷破坏试验结果

Table 1 Test results of unloading failure			
岩样编号	$\beta / (^{\circ})$	破坏围压/MPa	围压卸荷量/MPa
4-7 上	63	5.474	4.526
4-30	18	2.785	7.215
3-23 上	18	2.130	7.870
4-3	0	4.490	5.510
3-6 下		0.153	9.847

3.2 变形特征分析

3.2.1 变形模量变化规律

图 3 为围压卸荷过程中岩样的变形模量变化曲线。从图中可以看出,卸荷过程中岩体变形模量随围压降低而逐渐减小。在卸荷初期阶段,变形模量变化并不明显,变化幅度也较小,在应力差约为屈服强度时,曲线出现明显的拐点,岩样破坏后近似直线降低。与完整岩样相比,节理岩体屈服后变形模量急剧降低的趋势更加明显。

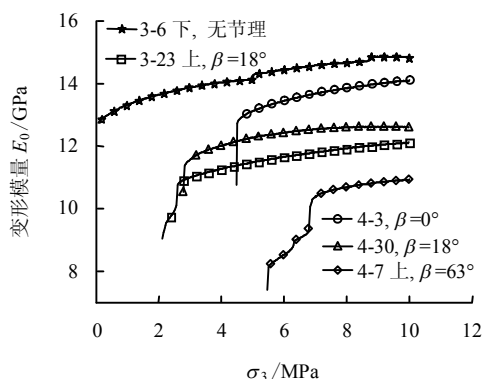


图 3 卸荷过程中变形模量变化曲线

Fig.3 Change curves of deformation modulus during unloading process

表 2 卸荷破坏模量变化特征

Table 2 Modulus variation characteristics of unloading failure

岩样编号	弹性模量 /GPa	变形模量 /GPa	卸荷后变形模量 /GPa	变形模量减小量 /%
4-7 上	15.302	10.804	7.407	52
4-30	18.234	12.688	10.528	42
3-23 上	15.486	12.004	9.051	42
4-3	18.689	13.795	10.752	42
3-6 下	17.522	13.571	12.700	7

注: 岩样的弹性模量 E_e 按《水利水电工程岩石试验规程》(S264—2001) 取应力-应变曲线中直线段的平均斜率; 岩样的变形模量 E_0 取值为岩样峰值强度一半处对应的应力与应变的比值。

由图 3 及表 2 可以看出,节理岩体卸荷破坏时,变形模量有较大幅度的降低,其降低程度是同条件下完整岩体的 6~7 倍;节理间距较小时,岩体变形

模量减小量很接近,均为 42%,节理间距较大时,岩体变形模量减小量较大,为 52%,可见节理间距越大,变形模量降低程度越大;变形模量随围压的变化规律和完整岩体类似,都可以分为 3 个阶段,每个阶段中变形模量和围压关系接近线性。在卸荷初期,即卸荷量在 30%以内时,变形模量降低量为 1%~5%;当卸荷量达到 30%~80%左右时,变形模量降低量为 6%~14%;当卸荷量达到总卸荷量的 80%~100%左右时,变形模量有较大幅度降低,降低量为 42%~52%。可见节理岩体接近屈服后,变形模量有大幅度的降低,岩体质量劣化程度比完整岩体更大。

3.2.2 岩体变形特征分析

表 3 列出了节理岩体卸荷破坏过程中各岩样的变形特征。从表中可以看出,相比完整岩样,节理间距较小节理岩样卸荷过程中发生的变形及峰值变形和完整岩样接近,而节理间距较大时岩样变形明显大于完整岩样;节理岩样屈服-峰值应变差值明显大于完整岩样,说明节理岩样屈服后,变形的发展要快于完整岩样,屈服后更容易破坏;从完整岩样和节理岩样破坏后达到残余强度之间发生的变形来看,含节理岩样的脆性特征不如完整岩样明显,岩样达到残余强度前发生的变形明显大于完整岩样。

表 3 卸荷破坏变形特征分析

Table 3 Analysis of the variation characteristics under unloading failure

岩样编号	卸荷过程应变 / 10^{-3}	屈服应变 / 10^{-3}	峰值应变 / 10^{-3}	残余应变 / 10^{-3}
4-7 上	4.147	6.269	12.674	15.025
4-30	1.575	5.402	8.992	15.391
3-23 上	2.693	5.849	10.383	16.255
4-3	2.174	4.938	8.772	12.602
3-6 下	1.755	6.535	8.053	9.688

图 4 为卸荷过程中轴向变形随围压的变化规律。可以看出,卸荷过程中,岩体轴向变形的增加和变形模量的降低有相似的规律。随着围压不断下降,岩体变形不断增加,在开始卸荷阶段增加较慢,当卸荷量达到一定值后,曲线出现明显的拐点,变形突然增大,相比于完整岩体卸荷破坏,节理岩体的拐点更加明显,说明节理岩体屈服后很快就达到破坏强度而产生较大变形。

3.3 强度特征分析

图 5 显示了岩体 β 角与破坏围压之间的关系。从图 2~5 可以看出,含节理岩体的极限强度明显低于完整岩体,也就是说,节理岩体的破坏围压要高

于完整岩体。图中空心点表示相同应力条件下完整岩样卸荷破坏时的破坏围压,其值接近 0 MPa,而含节理岩体最低破坏围压为 2.130 MPa (岩样号为 3-23 上),最高破坏围压为 5.474 MPa (岩样号为 4-7 上)。说明含节理岩体卸围压时更加容易破坏。节理间距和岩体强度之间没有明显的规律,说明卸荷破坏对节理岩体的影响因素是极为复杂的。

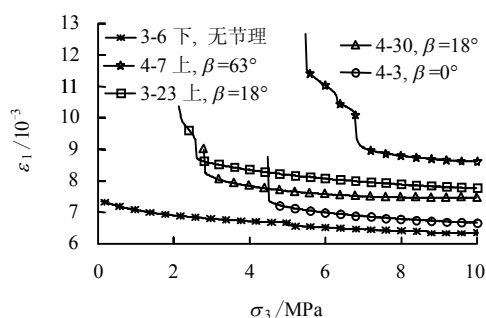


图 4 卸围压时围压-应变变形曲线

Fig.4 Confining pressure-strain deformation curves under unloading confining pressure

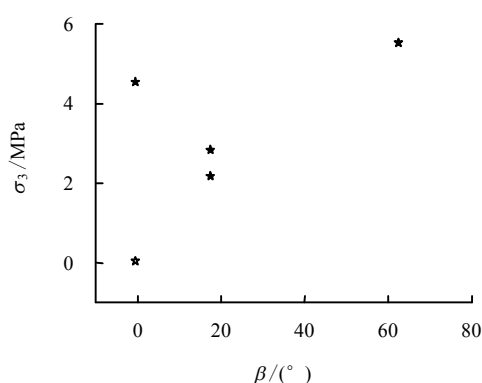


图 5 β -破坏围压关系

Fig.5 Relationship between β and confining pressure

3.4 破坏特征分析

图 6 展示了含预制断续节理砂岩三轴卸荷典型破坏形式。图中 h 为两条预制节理间距。

从图可以看出,岩体卸荷破坏时表现出沿卸荷方向强烈扩容破坏特征,岩体产生明显的侧向膨胀,侧面中部向外鼓出呈鼓状,预制节理间距较小时,特别是预制节理分布在岩样中部时 ($h=10$ mm 和 $h=0$ mm),鼓状特征更加明显 (如图 6(b)、6(c)所示);与含预制节理岩样三轴加载试验结果相比^[17],节理岩体卸荷条件下破坏程度更为强烈,除剪切破裂面外,沿最大主应力方向分布的不同级别的张性裂隙非常发育,岩体破碎程度高,从三轴室取出时已破碎为很多块,破碎后表面有部分卸荷剥落的张性碎落片,破坏面之间含有许多岩粉及碎裂岩块;

由于加载时预制节理端部产生应力集中,岩体首先从预制裂末端部开始发生破坏,产生沿着垂直预制节理方向扩展的裂纹,沿着最大主应力方向向上及向下扩展,这一点与加载破坏特征相似,但卸荷破坏时还伴随有众多贯穿预制节理的张性破裂面。预制节理的间距对岩体破坏形态影响不大。与完整岩体卸荷破坏特征不同的是,预制节理岩体卸荷破坏时,很少产生平行于卸荷方向的环向拉裂面,而这正是完整岩体卸荷破坏的显著特征,其原因可能是由于预制节理方向亦平行于卸荷方向,并且节理处强度最低,破坏时首先从节理面处破坏,而其他地方强度较高,不会形成环向裂纹。



(a) $h=60$ mm



(b) $h=10$ mm



(c) $h=0$ mm

图 6 岩样三轴卸荷破坏特征

Fig.6 Triaxial failure characteristics of rock samples

4 结 论

(1) 相比完整岩体,节理岩体卸荷破坏时从峰值强度跌落至残余强度过程中轴向应变较大,为完整岩体的 3~4 倍。岩体在破坏时不像完整岩体那样剧烈和突然,极限强度明显低于完整岩体,脆性特征不如完整岩体明显。

(2) 节理岩体卸荷破坏时,变形模量有较大幅度的降低,其降低程度是同条件下完整岩体的 6~7 倍;节理间距越大,变形模量降低程度越大;变形模量随围压的变化规律与完整岩体类似,都可以分为 3 个阶段,每个阶段中变形模量和围压关系接近线性。

(3) 与含预制节理岩样三轴加载试验结果相比, 节理岩体卸荷条件下破坏程度更为强烈, 除剪切破裂面外, 沿最大主应力方向分布的不同级别的张性裂隙非常发育, 岩体破碎程度高, 破碎后表面有部分卸荷剥落的张性碎落片, 破坏面之间含有许多岩粉及碎裂岩块; 预制节理的间距对岩体破坏形态影响不大。

参 考 文 献

- [1] 王元汉, 苗雨, 李银平. 预制裂纹岩石压剪试验数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3113—3116.
WANG Yuan-han, MIAO Yu, LI Yin-ping. Numerical simulation of the experiment on rock with preexisted cracks under compression and shearing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(18): 3113—3116.
- [2] 黄凯珠, 林鹏, 唐春安, 等. 双轴加载下断续预置裂纹贯通机制的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 808—816.
HUANG Kai-zhu, LIN Peng, TANG Chun-an, et al. Mechanisms of crack coalescence of pre-existing flaws under biaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(6): 808—816.
- [3] 张平, 李宁, 贺若兰, 等. 动载下两条断续预制裂隙贯通机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1210—1217.
ZHANG Ping, LI Ning, HE Ruo-lan, et al. Mechanism of fracture coalescence between two pre-existing flaws under dynamic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(6): 1210—1217.
- [4] 李银平, 杨春和. 裂纹几何特征对压剪复合断裂的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 462—466.
LI Yin-ping, YANG Chun-he. Influence of geometric characteristics of pre-existing cracks on mixed mode fractures under compression-shear loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(3): 462—466.
- [5] 林鹏, 黄凯珠, 王仁坤, 等. 不同角度单裂纹缺陷试样的裂纹扩展与破坏行为[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5652—5657.
LIN Peng, HUANG Kai-zhu, WANG Ren-kun, et al. Crack growth mechanism and failure behavior of specimen containing single flaw with different angles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp. 2): 5652—5657.
- [6] WANG Rui-hong, LI Jian-lin, GUO Jing, et al. Experimental study of mechanical properties of rock mass containing intermittent joints of prefabricated[J]. **Advanced Materials Research**, 2011, 163—167: 2468—2472.
- [7] CAI M, KAISER P K, TASAKA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(5): 833—847.
- [8] 李术才, 朱维申. 复杂应力状态下断续节理岩体断裂损伤机制研究及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 142—146.
LI Shu-cai, ZHU Wei-shen. Fracture damage mechanism of discontinuous jointed rock mass under the state of complex stress and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(2): 142—146.
- [9] EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B, et al. The effect of neighbouring cracks on elliptical crack initiation and propagation in uniaxial and triaxial stress fields[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 1998, 59(2): 103—115.
- [10] 王士民, 刘丰军, 叶飞, 等. 含预制裂纹脆性岩石破坏数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊 1): 235—238.
WANG Shi-min, LIU Feng-jun, YE Fei, et al. The numerical simulation to model failure of brittle rock with prefab crack[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(Supp.1): 235—238.
- [11] YANG Z F, CHEN J M, HUANG T H. Effect of joint sets on the strength and deformation of rock mass models[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1998, 35(1): 75—84.
- [12] NASSERI M H, RAO K S, RAMAMURTHY T. Failure mechanism in schistose rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(3/4): 219e1—219e15.
- [13] 杨圣奇, 温森, 李良权. 不同围压下断续预制裂纹粗晶大理岩变形和强度特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1572—1587.
YANG Sheng-qi, WEN Sen, LI Liang-quan. Experimental study of deformation and strength properties of coarse marble with discontinuous pre-existing cracks under

- different confining pressures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(8): 1572—1587.
- [14] 李建林, 王乐华. 节理岩体卸荷非线性力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 1968—1975.
LI Jian-lin, WANG Le-hua. Study of unloading nonlinear mechanical characteristics of jointed rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(10): 1968—1975.
- [15] 李宏哲, 夏才初, 王晓东, 等. 含节理大理岩变形和强度特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2118—2123.
LI Hong-zhe, XIA Cai-chu, WANG Xiao-dong, et al. Experimental study of deformation and strength properties of jointed marble specimens[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2118—2123.
- [16] 王飞, 杜建坡, 李秀芬. 节理岩体卸荷强度特性的试验研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(3): 104—108.
WANG Fei, DU Jian-po, LI Xiu-fen. Experimental study of strength behavior of jointed rock mass under the unloading state[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 2008, 19(3): 104—108.
- [17] 李建林, 王瑞红, 蒋昱州, 等. 砂岩三轴卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2034—2041.
LI Jian-lin, WANG Rui-hong, JIANG Yu-zhou, et al. Experimental study of sandstone mechanical properties by unloading triaxial tests[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(10): 2034—2041.

(接第 3250 页)

《岩土力学》2012 年第 7 期被 EI 收录论文 (47 篇, 收录率 100%)

序号	论文题名	作者	页码
23	软弱夹层对深水采油管柱地震反应的影响	朱幸科, 王立忠, 国 振, 等	2067—2075
24	一种新的岩石非线性黏弹塑性流变模型	宋勇军, 雷胜友, 韩铁林	2076—2080
25	隧道纵向整体抗震分析的近似方法	张斌伟, 严松宏, 杨永东	2081—2088
26	淮南矿区深部地应力场特征研究	刘泉声, 刘恺德	2089—2096
27	南海西部海域难钻地层特征及破碎机制研究	邓金根, 朱海燕, 谢玉洪, 等	2097—2102
28	盾构隧道施工引起的土体初始超孔隙水压力分布研究	魏新江, 陈伟军, 魏 纲, 等	2103—2109
29	汶川地震紫坪铺面板堆石坝地震波输入研究	孔宪京, 周 扬, 邹德高, 等	2110—2116
30	偏心受压厚壁圆筒支护结构的应力分析	胡春林, 徐 娟, 肖 聪	2117—2121
31	缺资料地区泥石流预警雨量阈值研究	潘华利, 欧国强, 黄江成, 等	2122—2126
32	地下岩体洞室群地震响应的加、卸载响应比分析	杨继华, 盛 谦, 朱泽奇, 等	2127—2132
33	考虑空间效应的地下洞室爆破开挖松动区参数场位反分析	刘会波, 肖 明, 张志国, 等	2133—2141
34	阳坡里隧道纵穿滑坡体段变形破坏机制与加固效应研究	王永刚, 丁文其, 唐学军	2142—2148
35	水压致裂应力测量数据分析——对瞬时关闭压力 p_s 的常用判读方法讨论	丰成君, 陈群策, 吴满路, 等	2149—2159
36	一种基于安全因子判据的坝肩裂隙岩体动力抗滑稳定分析方法	张景奎, 张燎军, 朱颖儒, 等	2160—2166
37	PSI 和 CRI 联合算法用于苏通大桥基础沉降监测	张宁宁, 陈志坚, 陈元俊, 等	2167—2173
38	岩体黏弹性蠕变计算的高阶数值流形法研究	刘 建, 陈 隼	2174—2180
39	偶应力对层状岩体结构面边界层效应的影响	张敦福, 王相玉, 朱家明, 等	2181—2188
40	横向扩展液化土中单桩-土系统的非线性分析	杨 晓, 何光辉	2189—2195
41	基于自由面上环路对应节理无限切割的关键块体搜索	石 露, 李小春, 白 冰	2196—2202
42	扩底抗拔桩桩端阻力的群桩效应研究	王 浩	2203—2208
43	主动侧向受荷桩周土的影像观测与数值模拟	曾庆有	2209—2214
44	孔隙水压力及炸药埋深对堤坝爆炸效应的影响分析	张智超, 陈育民, 刘汉龙, 等	2214—2220
45	岩石矿物细胞元随机性参数赋值方法研究	罗 荣, 曾亚武	2221—2228
46	软弱围岩隧道洞口段失稳机制分析与处置技术	刘小军, 张永兴, 高世军, 等	2229—2234
47	帷幕灌浆扩散半径及数值模拟的研究	韩 磊, 陈建生, 陈 亮	2235—2240