

卸围压条件下砂岩变形破坏特性试验研究

色麦尔江·麦麦提玉苏普^{1,2},朱珍德^{1,2},倪晓慧³,刘刚^{1,2},何志磊^{1,2}

(1. 河海大学 岩土工程科学研究所,南京 210098;2 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,南京 210098;
3. 绍兴文理学院 土木工程系,浙江 绍兴 312000)

摘要:从可释放弹性应变能角度对岩石卸围压条件下破坏特性进行研究,利用 MTS815 电液压伺服可控制刚性试验机进行保持轴向变形不变的卸围压试验,根据卸围压试验数据,分析了该砂岩卸围压过程中变形、强度、弹性模量及能量变化特征。结果表明:随着围压逐渐降低,岩样发生侧向不断扩容;轴向应力逐渐降低,呈现出非线性特征;弹性模量在初始阶段几乎不变化,越过破坏点之后大幅降低;可释放的弹性应变能在初始阶段增大比较缓慢,当围压降低至一定程度时急剧增大;推导出基于可释放弹性应变能的卸荷岩石的整体破坏准则 U_0^e 。

关键词:岩石力学;卸围压;能量释放;破坏准则

中图分类号:TU452

文献标识码:A

Experimental study on deformation failure of sandstone under unloading confining pressure condition

SEMERJAN Memetyusup^{1,2}, ZHU Zhen-de^{1,2}, NI Xiao-hui³, LIU Gang^{1,2}, HE Zhi-lei^{1,2}

(1. Geotechnical Engineering Research Institute, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 2. Key laboratory for Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China;
3. Department of Civil Engineering, Shaoxing University, Zhejiang Shaoxing 312000, China)

Abstract: Study failure characteristic of rocks under unloading confining pressure conditions from the released elastic strain energy is of great significance. Firstly, unloading confining pressure test maintaining constant axial deformation was carried out by using MTS815 electric hydraulic servo control tester. Secondly, the sandstone deformation, strength, elastic modulus, and energy variation during unloading confining pressure were analyzed by according to unloading confining pressure test data. The results show that with the confining pressure decreases, rock samples occur laterally continuous expansion; modulus of elasticity almost no change in the initial stages and significantly lower after crossed the failure point; axial stress decreases, showing a non-linear characteristic, releasable elastic strain energy increases more slowly in the initial stage, when the confining pressure reduced to a certain extent increases rapidly. Finally, based on the release of elastic strain energy theory deduce the failure criterion of rock unloading confining pressure. The whole failure criterion of loading rock under unloading confining pressure, which was U_0^e , was concluded.

Key words: rock mechanics; unloading of rock mass; energy release; failure criterion

隧道及地下洞室多处在复杂的地质条件下,想要通过应力或应变的大小来解释和判断岩石的破坏有一定的难度。岩石的破坏是能量驱动下的状态失稳过程,在岩石的受力破坏过程中,始终和

外界进行着能量的交换。因此从能量的角度开展对卸围压岩石的力学性能及破坏特征等的研究是一条有效的途径^[1]。目前,国内外许多学者研究岩石卸围压条件下破坏规律,取得了大量的研究

收稿日期:2015-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41272329,51379065);国家自然科学基金青年科学基金项目(51409122);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014B33614)

作者简介:色麦尔江·麦麦提玉苏普(1989-),男,新疆喀什人,硕士,主要从事岩石力学与数值模拟方面的研究工作。

成果。Brown 等^[2]通过等效拉应力理论解释了在宏观压应力场中岩石卸围压的张拉破坏现象;吴刚等^[3-4]采用真三轴试验系统进行了红砂岩和岩体模型试样的卸围压试验,研究了岩石在卸围压条件下的变形与破坏特征,比较了不同卸围压方式下试样的变形及强度特征;谢和平等^[5]通过卸围压试验,研究了岩石变形过程中能量耗散、能量释放与岩石强度丧失和整体破坏的关系,并推导了基于能量耗散的强度丧失准则和基于能量释放的整体破坏准则;朱泽奇等^[6]通过保持轴向应变和保持轴向应力卸围压试验,分析归纳了岩样卸围压破坏过程的能量耗散规律,以及能量与岩样变形、围压之间的关系。

在以上的研究成果基础上,本文通过保持轴向应变卸围压试验对岩样卸荷过程中力学响应及能量释放规律进行了研究,并从能量的角度推导出岩石的卸围压破坏准则。

1 试验研究方案

1.1 岩样及试验仪器

本试验选取浙江某隧道砂岩制取标准岩样。岩样呈灰白色,矿物成份主要由石英和长石组成。岩样通过钻取岩芯、切割及打磨三道工序统一加工直径为 50 mm,高为 100 mm 的标准圆柱形岩样。所有岩样取自同一地区,岩样制备尺寸精度符合国际岩石力学试验标准要求。为消除岩样宏观上明显的差异性,所有岩样制取完毕后,观察岩样外观,筛选出外形完整,表面无明显节理及裂纹等岩样。

本次试验采用 MTS815.04 电液伺服可控制刚性试验机,主要技术参数包括:试验框架整体刚度 11.0×10^9 N/m,最大轴向力 4 600 kN,最大轴向拉力 2 300 kN,最大围压 140 MPa。

1.2 试验步骤

试验轴向加载采用应变控制方式,加载速率为 0.1 mm/min;卸围压采用应力控制方式,速率为 0.02 MPa/s。试验步骤为:

- (1) 按静水压力条件逐渐施加轴压和围压 ($\sigma_1 = \sigma_3$) 至预定值(分别为 5、10、15 MPa);
- (2) 保持围压 σ_3 不变,逐渐增加轴向应力 σ_1

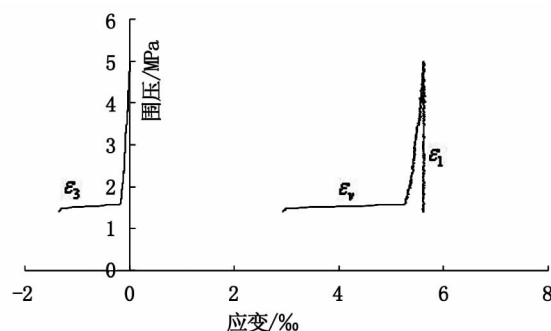
至岩样峰值强度的 80%;

- (3) 保持轴向变形不变,逐渐降低围压 σ_3 直至岩样破坏。

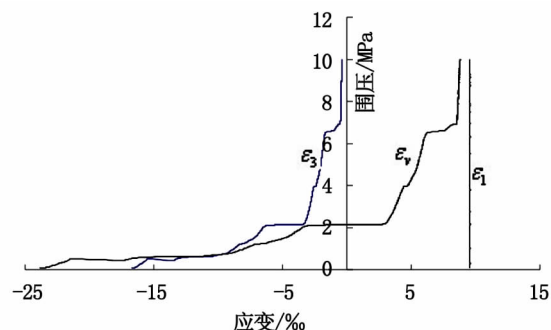
2 试验结果与分析

2.1 卸荷砂岩变形特征

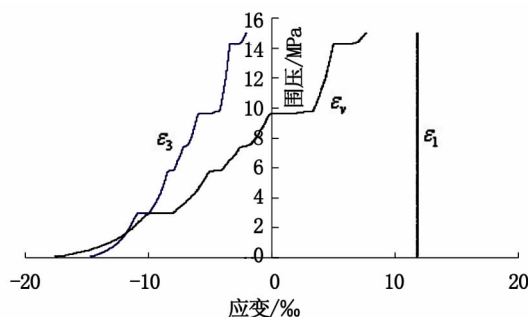
该卸围压试验轴向应变分别保持在 0.005 6、0.009 5 和 0.011 8,试验过程中轴向应力 σ_1 几乎不发生变化。为了研究砂岩卸围压过程中体积变化情况,引入体积应变 $\square_v = \square V/V_0 = \square_1 + \square_2 + \square_3$ ^[7],砂岩体积应变($\square_v$)的变化规律与侧向应变($\square_3$)的变化规律基本相同。不同初始围压下岩样卸荷全过程围压-应变曲线如图 1 所示。



(a) 初始围压为 5 MPa



(b) 初始围压为 10 MPa



(c) 初始围压为 15 MPa

图1 不同初始围压下卸围压全程围压-应变曲线

Fig.1 Confining pressure and strain curve under different initial confining pressure

从图1可知,在卸围压初始阶段,岩样发生侧向扩容($\square_3$ 为负值),而且随着围压的不断降低,岩样的侧向扩容现象进一步加剧。对于卸荷初始围压为5 MPa的岩样,在卸围压初期,侧向变形随着围压的降低呈线性增大趋势;当围压降至3.41 MPa时,岩样的侧向变形出现小幅激增,此时岩样中的微裂纹在可释放弹性应变能的驱动下开始起裂扩展,当围压卸载至1.45 MPa时,岩样的侧向变形突然增大,此时岩样发生破坏;对于初始围压为10 MPa的岩样,当围压降低至6.31 MPa时,岩样的侧向变形出现小幅突增,岩样中的微裂纹开始起裂扩展,随后侧向变形随着围压的降低继续线性增大,当围压进一步卸载至2.23 MPa时,岩样发生急剧的侧向扩容,岩样最终破坏;对于初始围压为15 MPa的岩样,在卸围压初期,岩样已经产生较大的侧向变形,当围压卸载至14.29 MPa时岩样中的微裂纹便发生破裂扩展,当围压降低至9.80 MPa时岩样即发生崩溃式破坏。由于卸围压过程中岩样的轴向应变保持不变,岩样体积应变($\square_v$)的变化规律与侧向应变($\square_3$)的变化规律基本相同。随着围压的降低,岩样破坏时也表现出明显的体积扩容现象,体积应变由正值很快转变为负值。初始围压越大,体积扩容现象越明显。

2.2 卸荷砂岩强度特征

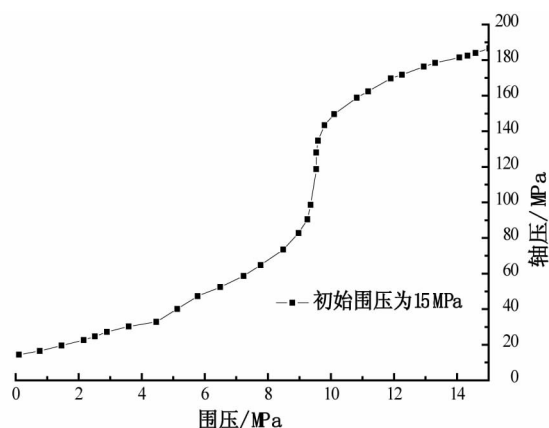
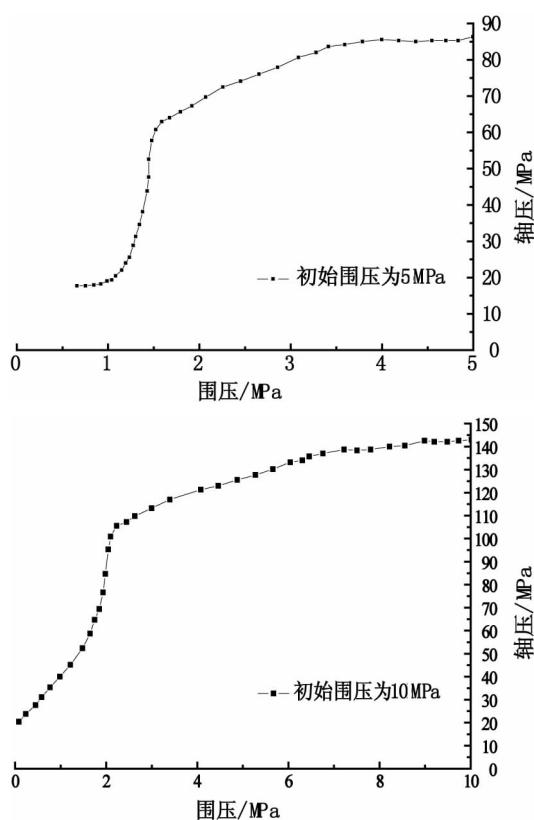


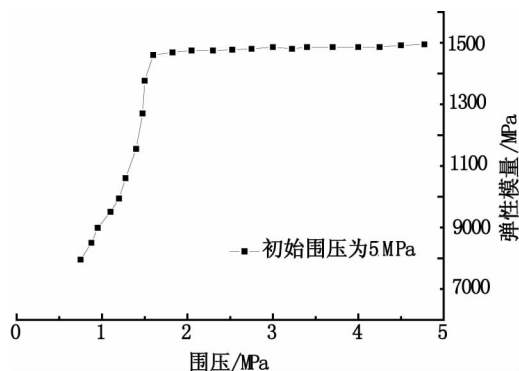
图2 不同初始围压下轴向应力 σ_1 与围压 σ_3 的关系曲线

Fig. 2 Axial stress and confining pressure curve under different initial confining pressure

由图2可知,对于卸荷初始围压分别为5、10、15 MPa的岩样,轴向应力分别为86.38、142.9、186.63 MPa,当围压降低至1.45、2.23、9.80 MPa时,轴向应力突然大幅降低。由此可知,不同的围压条件下,随着围压的降低,轴向应力不断降低。在卸围压初期,轴向应力 σ_1 随围压 σ_3 大致呈线性降低趋势,当围压降低到一定程度时,轴向应力急剧降低,此时岩样侧向变形突然增大,发生脆性崩溃式破坏。在砂岩破坏时其内部等效侧向应力为拉应力,裂纹一旦扩展即在拉应力作用下张开而且进一步扩展,裂纹的张开导致了破裂面之间没有摩擦阻力,因此砂岩在卸荷条件下更容易发生破坏。

2.3 弹性模量变化特征

卸围压至1.45、2.23、9.80 MPa时,砂岩弹性模量几乎不随围压的降低而变化,仅在该围压即破坏点之前较小范围内发生小幅降低。当围压越过破坏点进一步降低时,砂岩弹性模量发生急剧降低,体现出明显的脆性破坏特征,如图3所示。



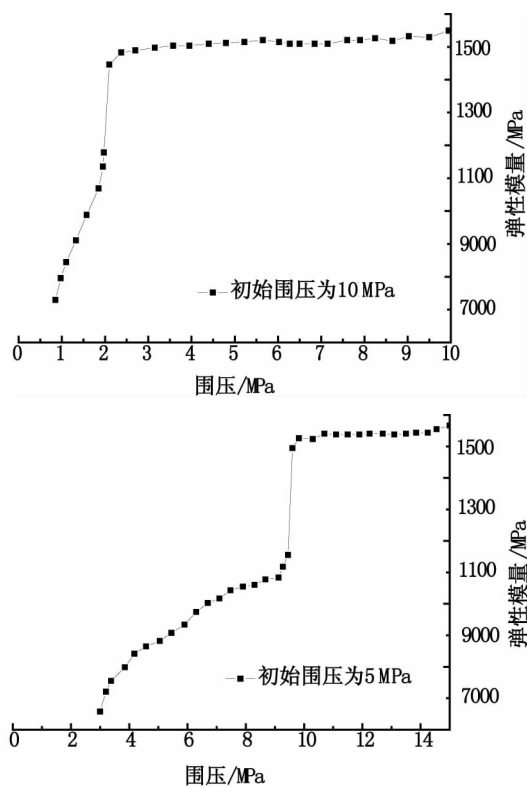
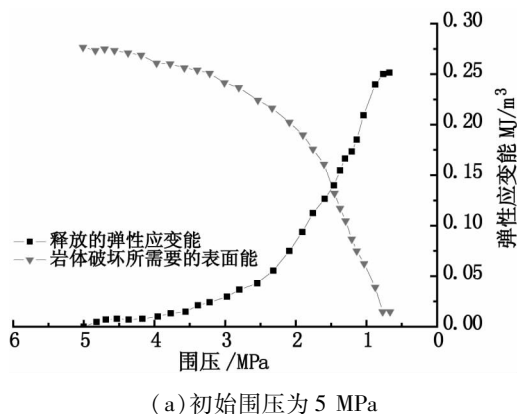


图3 卸荷弹性模量与围压的关系

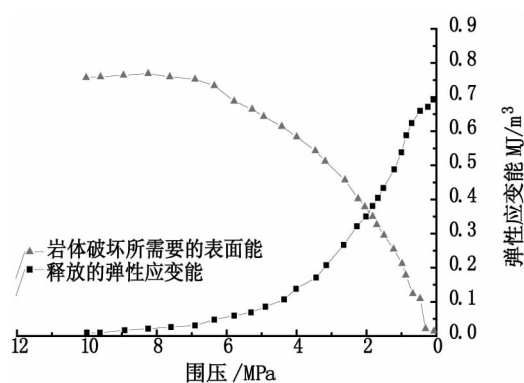
Fig. 3 The relationship between unloading elastic modulus and confining pressure

2.4 卸荷砂岩能量特征

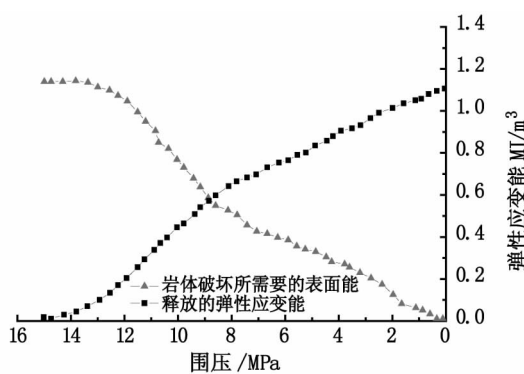
砂岩在卸围压过程中,前期存储的弹性应变能逐渐释放出来,促使其内部微裂纹的起裂、扩展直至贯通。随着围压的降低,当砂岩所释放的弹性应变能积累至砂岩破坏所需要的表面能时,砂岩将会发生突然破坏(即图4中曲线交点处)。根据试验数据做出不同围压下岩样所释放的弹性应变能与在某一应力状态下岩样破坏所需要的表面能关系曲线,如图4所示:



(a) 初始围压为 5 MPa



(b) 初始围压为 10 MPa



(c) 初始围压为 15 MPa

图4 不同围压下岩样所释放的弹性应变能与破坏所需表面能关系曲线

Fig. 4 Released elastic strain energy and the surface energy curve under different confining pressure

由图4可知,随着围压的降低,岩样所释放出的弹性应变能不断增大,在卸围压初始阶段岩样中微裂纹没有明显起裂扩展,所释放的弹性应变能增大比较缓慢,当围压降低至一定程度时,由于岩样中微裂纹开始发育扩展,释放的弹性应变能急剧增大,曲线斜率也迅速增大。当岩样完全破坏时,前期存储的弹性应变能完全释放出来,对于初始围压为 5、10、15 MPa 的岩样,其初始应力状态下的弹性应变能分别为 0.252 42、0.699 50、1.071 83 MJ/m³。砂岩破坏时所需要的表面能随着围压的减小而逐渐降低,当砂岩裂纹起裂后,砂岩破坏时所需要的表面能以较快的速度减小,当所需的表面能小于砂岩释放出的弹性应变能时,砂岩即发生破坏。

3 岩石卸荷破坏准则

3.1 卸荷破坏准则的建立

在加载过程中,外界对岩石做功输入能量 U , 该能量一部分因岩石内损伤演化和塑性变形而耗

散掉,称为耗散能 U^d ;一部分存储在岩石内部,称为可释放弹性应变能 U^e ,当卸围压时该部分能量释放出来。上述各能量满足关系式:

$$U = U^d + U^e \quad (1)$$

在假三轴试验条件下各部分能量可以表示为^[6]:

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + 2 \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (2)$$

$$U^e = \frac{1}{2\bar{E}} [\sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\bar{\mu}\sigma_3(2\sigma_1 + \sigma_3)] \quad (3)$$

式中: $\bar{E}$ 、 $\bar{\mu}$ 分别为轴向卸载弹性模量与泊松比平均值。

在岩石卸围压过程中,其内部微裂纹扩展、汇聚所需要的表面能可以通过损伤力学理论计算^[8],如下式所示:

$$Y = \frac{U^e}{1-D} \quad (4)$$

如图5所示,在卸围压过程中,岩石在卸围压开始前初始应力状态下的可释放弹性应变能 U_0^e (方格部分面积)变为卸荷岩石破坏时的可释放弹性应变能 U^e (横线部分面积);梯形方格部分面积为岩石卸荷过程中释放出来的弹性应变能 ΔU^e 。

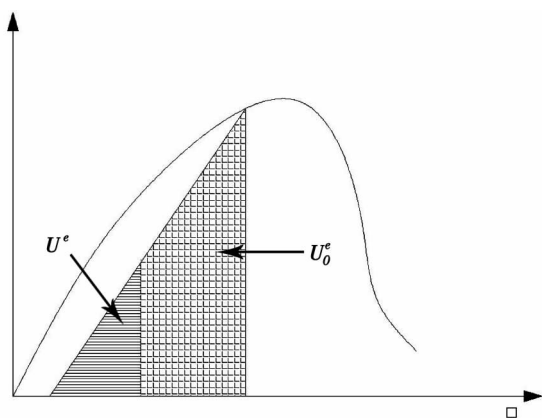


图5 岩石卸荷应力-应变曲线

Fig.5 Unloading stress-strain curve of rock mass

基于可释放弹性应变能思想,卸围压岩石的整体破坏准则可以描述为:岩石的卸荷破坏为可释放弹性应变能 U^e 驱动下的状态失稳过程,岩石在初始应力状态下时允许存储一定的弹性应变能,随着围压降低,岩石允许存储的弹性应变能逐渐减小,当岩石从初始应力状态卸荷到某一应力状态所释放的弹性应变能 ΔU^e 足以提供岩石在该应力状态下裂纹扩展贯通所需要的表面能时岩石即发生破坏。于是有:

$$\Delta U = U_0^e - U^e = Y \quad (5)$$

将损伤耗能率代入上式化简得:

$$U_0^e = U^e (1 + \frac{1}{1-D}) \quad (6)$$

根据应变等效原理 $D = 1 - \frac{\bar{E}}{E_0}$,代入(6)式有:

$$U_0^e = U^e (1 + \frac{E_0}{\bar{E}}) \quad (7)$$

式(7)为所推出的基于可释放弹性应变能的卸荷岩石的整体破坏准则,当岩石初始应力状态下的弹性应变能 U_0^e ,卸围压至某一应力状态下的弹性应变能 U^e ,加载阶段岩石的切线弹性模量 E ,及卸围压阶段岩石的有效弹性模量 $\bar{E}$ 满足上式关系时,岩石即发生卸荷破坏。该破坏准则验证了卸荷岩石破坏时大小主应力间的非线性关系。

3.2 卸荷破坏准则的验证

当 $\sigma_1 - \sigma_3$ 加载至预定值再卸载时,卸载曲线并不是沿着原来的加载曲线(如图5),而卸载曲线低于加载曲线。加载曲线下的面积是外荷所做的功 U ,卸载曲线下的面积是所释放的弹性应变能 U^e ,加载曲线与卸载曲线之间的面积为耗散能 U^d ,外荷所做的总功减去岩样的弹性应变能即为耗散掉的能量。根据试验获得数据计算出岩样卸荷初始点和破坏点处的弹性应变能,如表1所示。

表1 岩样在卸荷初始点及破坏点处的弹性应变能

Tab.1 Samples at initial point of unloading and at damage point elastic strain energy

初始围压 /MPa	U_0^e /MJ · m ⁻³	U^e /MJ · m ⁻³	$1 - \bar{E}/E$	是否满足 式(7)
5	0.252 42	0.123 44	2.041 96	是
10	0.699 50	0.341 45	2.035 87	是
15	1.071 83	0.530 88	2.018 12	是

由表1可知,岩样在卸荷初始点与破坏点的弹性应变能满足公式(7)的要求,因此本文所推导的卸荷岩石破坏准则对于岩石的卸荷研究有一定的应用价值。

4 结论

1)在卸围压初始阶段砂岩发生侧向扩容,随着围压的不断降低,砂岩的侧向扩容现象进一步加剧,其体积应变很快由正值转变为负值,即发生体积扩容,且初始围压越大,体积扩容现象越明显。砂岩破坏时的轴向应力随着围压增大而增大,呈现出非线性特征。随着围压的降低,弹性模量在卸荷初始阶段几乎不随围压变化,但在越过破坏点之后就会大幅降低。(下转第30页)

- [5] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Void growth model and stress modified critical strain model to predict ductile fracture in structural steels [J]. Journal of Structure Engineering, 2006, 132(2): 1907 – 1918.
- [6] 茹继平. 梁腹板开圆孔节点及钢框架抗震性能的实验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
- (上接第 13 页) [6] 张勇, 孔令伟, 李雄威. 循环荷载下饱和软粘土的动骨干曲线模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1700 – 1701.
- [7] 汪明元, 单治钢, 王亚军, 等. 应变控制下舟山岱山海相软土动弹性模量及阻尼比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1506 – 1509.
- [8] 袁晓铭, 孙锐, 孙静, 等. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程震动, 2000, 20(4): 133 – 139.
- [9] 吴世明, 周建, 杨挺. 土动力学理论与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [10] HARDIN B O, DRNEVICHV P. Shear modulus and damping in soils: design equation and curves[J]. Journal of Soil Mechanic sand Foundation Division, ASCE, 1972, 98(7): 603 – 624.
- [11] HARDIN B O, DRNEVICHV P. Shear modulus and damping in soils: design equation and curves[J]. Journal of Soil Mechanic sand Foundation Division, ASCE, 1972, 98(7): 667 – 692.
- [12] DARENDELI M B. Development of a new family of normalized moduli reduction and material damping curves [D]. Austin: University of Texas at Austin, 2001.
- [13] HARDIN B O, KALINSKI M E. Estimating the shear modulus of gravelly soil [J]. Journal of Rheology, 1966, 10(1): 253 – 273.
- [14] 周建, 龚晓南, 李剑强. 循环荷载作用下饱和软粘土特性试验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(11): 43 – 47.
- [15] 王军, 陈张林, 蔡袁强, 等. 考虑软化特性的软粘土动应力 – 应变关系研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(1): 24 – 25.
- (责任编辑 王利君)
- (上接第 18 页)
- 2) 初始围压越大砂岩最终的弹性应变能越大。在卸围压初始阶段由于砂岩中微裂纹没有明显起裂扩展, 砂岩所释放的弹性应变能增大比较缓慢, 当围压降低至一定程度时裂纹扩展并相互贯通, 砂岩所释放的弹性应变能急剧增大, 最终砂岩所积累的弹性应变能超过在某应力状态下砂岩破坏所需要的表面能即发生破坏。
- 3) 从能量的角度出发, 利用可释放弹性应变能原理推导了砂岩的卸荷破坏准则, 该破坏准则考虑了初始应力状态对砂岩卸荷破坏的影响, 并利用试验数据进行了验证。
- 参考文献:**
- [1] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1729 – 1740.
- [2] BROWN E T, H T D. The failure of linear brittle materials under effective tensile stress [J]. Felsmechanik, 1967(1): 229 – 241.
- [3] 吴刚. 工程岩体卸荷破坏机制研究的现状及展望[J]. 工程地质学报, 2001, 2(9): 174 – 181.
- [4] 吴刚. 岩体在加、卸荷条件下破坏效应的对比分析[J]. 岩土力学, 1997, 2(4): 13 – 16.
- [5] 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, 17(24): 3003 – 3010.
- [6] 朱泽奇, 盛谦, 肖培伟, 等. 岩石卸围压破坏过程的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(21): 2675 – 2681.
- [7] 刘维国, 单钰铭, 傅荣华. 岩石扩容过程中的体积应变与超声横波速度[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2006, 33(4): 360 – 364.
- [8] 彭瑞东. 基于能量耗散及能量释放的岩石损伤与强度研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2005.
- (责任编辑 王利君)