

文章编号:1671-6833(2014)05-0069-05

# 层状岩体单轴压缩破损特征与数值模拟研究

贾善坡<sup>1,2</sup>, 罗金泽<sup>1</sup>, 吴 渤<sup>3</sup>, 席增强<sup>2</sup>

(1. 长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023; 2. 华北油田勘探开发研究院, 河北 任丘 062552; 3. 中国核工业中原建设有限公司, 北京 100037)

**摘 要:** 针对层状岩体的破损特征开展了一系列的室内模型试验, 分析层状岩体单轴压缩情况下的变形破坏特征, 探讨倾角及夹层变化对岩体强度和破损的影响规律. 室内试验结果表明: 当岩层倾角较小时 ( $\theta < 45^\circ$ ), 岩体破坏主要为岩石先破坏, 后层间错动破坏; 当岩层倾角增大时 ( $45^\circ \leq \theta < 75^\circ$ ), 岩体的破坏以层间的剪切破坏为主, 并伴有劈裂破坏; 当岩层倾角增大到  $90^\circ$  时, 岩体的破坏为沿层间直接破坏, 伴有局部的失稳劈裂. 采用 ABAQUS 软件对上述模型试验进行数值模拟, 数值模拟及理论分析表明: 岩体的压缩强度呈先减小后增大的“U”形分布, 计算结果与室内实验结果具有较好的一致性.

**关键词:** 层状岩体; 室内实验; 破损特征; 倾角; 数值模拟

**中图分类号:** TP3, TU458 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.016

## 0 引言

层状岩体, 由于在形成过程中经历各种地质构造作用, 层状岩体结构与其他岩体有显著的差别, 含有层面、节理等缺陷介质, 不仅力学特性如变形和强度具有各向异性特征, 在破坏机制上也存在着较大的差异, 会给实际工程设计和评价层状岩体是否稳定带来巨大困难<sup>[1]</sup>.

许多学者在层状岩体的损伤特征、剪切破坏特征和相似材料模拟试验等方面开展了详细的理论分析和试验研究<sup>[2-9]</sup>, 取得了很多有效的进展. 其中: 邓荣贵等<sup>[4]</sup>利用模拟试验对层状岩体的变形特性和强度特性进行了研究, 得到了模拟试样的变形模量和强度随试样所含节理数、轴向应力与节理面间的夹角和围压之间的变化关系; 胡波等<sup>[5]</sup>采用模型试验研究节理对岩体强度变形特性的影响, 分别对完整岩块、贯通节理岩体和断续节理岩体进行中型剪切试验; 张桂民等<sup>[7]</sup>探讨倾角、夹层和界面对软硬互层盐岩变形破损的影响规律. 室内试验能够很好地反映采集的岩体样本的力学性质, 但不能完整地反映宏观岩体的性质, 而模型试验用相似材料来模拟自然界中的岩体,

能较好的反映层状岩体的破损特征.

近年来, 由于计算机技术的飞速发展, 数值计算的方法在研究岩体力学领域得到广泛应用<sup>[10-13]</sup>. 黄书岭等<sup>[10]</sup>通过编程语言将建立的本构模型嵌入到 FLAC<sup>3D</sup> 软件中, 实现了一组节理的层状岩体复合材料的非线性数值计算; 何忠明等<sup>[11]</sup>对岩体压缩变形特征进行了数值分析, 并与物理试验进行对比, 两者结果能够很好的吻合. 笔者通过试验研究和理论推导并利用大型有限元软件 ABAQUS 对层状岩体进行了力学和变形特性数值分析, 研究了不同岩层倾角下层状岩体的破坏形态以及强度特征.

## 1 试验条件

笔者进行的层状岩体相似材料研究, 材料及其配比见表 1.

将试验材料制作成  $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 50\text{ mm}$  的试样, 在震捣密实后按  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$  7 个不同角度插入薄铁片用作分层, 后抽出铁片, 静置试样一个月. 实验材料质量配合比见表 1, 其中工况 2 是某层状岩体模拟试验的配比<sup>[14]</sup>.

收稿日期: 2014-02-10; 修订日期: 2014-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41102182); 湖北省自然科学基金资助项目(2011CDB008); 中国石油科技创新基金(2011D-5006-0603); 湖北省建设科技计划项目(2011-119)

作者简介: 贾善坡(1980-), 男, 长江大学副教授, 博士后, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作, E-mail: jiashanporsm@163.com.

表 1 相似材料配合比方案表  
Tab.1 Proportion of similitude material

材料	工况 1	工况 2	工况 3
重晶石粉	100	100	100
石英砂	36.9	27	29
石膏	11.6	10.7	11.6
膨润土	7.8	7.3	15.6

2 试验结果

2.1 试样破损特征分析

对试样进行单轴压缩试验,试样原始状态和破坏后状态对比见图 1,其中红色线标记区域为破坏面走向。

由图 1 可以看出,不同倾角下,层状岩体受压破坏模式不同:倾角为 0°时,岩体发生整体性劈

裂破坏,分层处形成薄弱面,会有裂隙产生,层间交汇处也出现破坏;倾角为 15°时岩体先出现细小裂隙,后扩散至整个试样,层间开始产生错动,分层处开始出现裂隙破坏现象;倾角为 30°时试样层间错动,同时也有贯穿边界处的劈裂破坏;倾角为 45°时试样破坏主要是层间滑移破坏,试样中部分层处首先出现裂隙,试件上下部分产生滑移,继续加载,试样非分层处出现裂隙为劈裂破坏;倾角为 60°时试样边缘处分层剥落,后分层处产生滑移,破坏过程中几乎没有出现劈裂破坏;倾角为 75°时,试样在分层处出现裂隙,继而产生整层滑移破坏;倾角为 90°时,试样边缘分层处出现剥落,试件上部由于侧向失稳而产生横向断裂裂缝。3 组不同工况的试样单轴抗压极限强度与倾角关系见图 2。

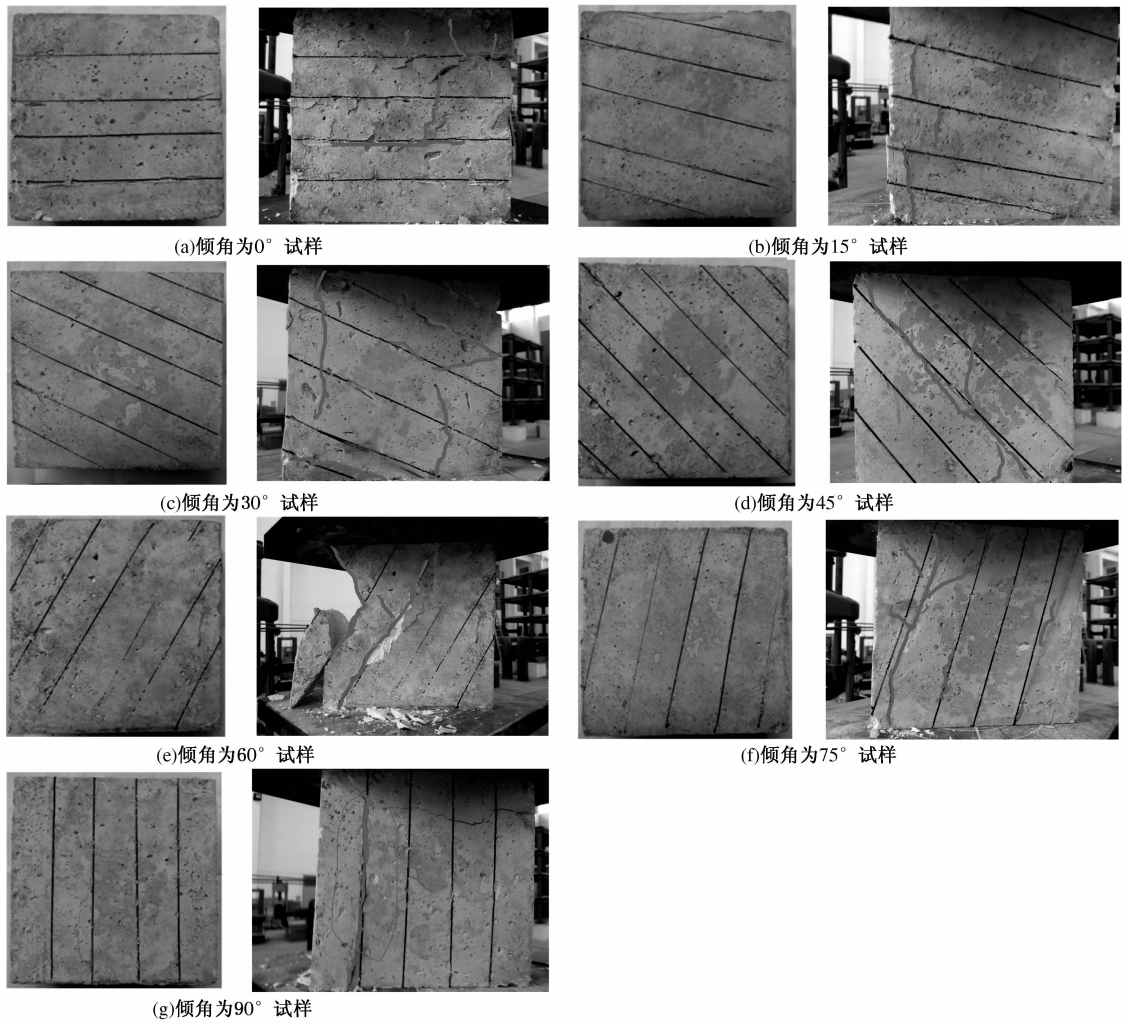


图 1 不同角度试样破坏前后对比  
Fig.1 Destruction of the sample before and after comparison of different angles

由图 2 可知,随着层间角度的增大,试样的承载力出现“U”形波动;对于三组不同工况的试样,第三组配比方案比其他两组配比方案得到的试样强度要高,主要原因是在第三组配比中,石英砂用

量减少,膨润土用量增多,而石英砂在此配比中属于粗骨料,用量减少会提高试样的抗压强度.

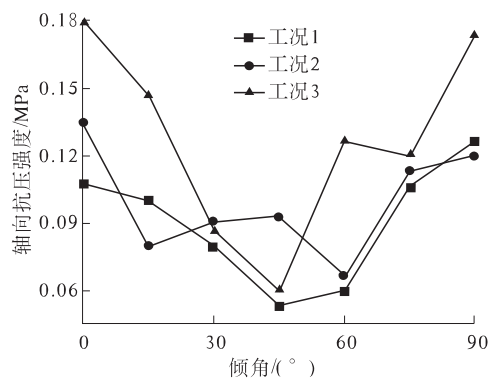


图 2 不同对比组试样单轴抗压强度随倾角变化关系图  
Fig.2 Uniaxial compressive strength with angle changes for different samples

2.2 层状岩体破坏理论分析

对于层状岩体,Jaeger 曾提出关于各向同性岩体抗剪强度参数的经验公式<sup>[15]</sup>

$$s = s_1 - s_2 \cos[2(\alpha - \beta)] (\beta \in [0, \frac{\pi}{2}]), \quad (1)$$

式中: $s$  代表  $\sigma, c, \varphi$  等强度参数; $s_1, s_2$  均为常数,  $\alpha, \beta$  分别为最大主应力  $\sigma_1$  和破坏面与层面的夹角.

Jaeger 准则适合于各向同性层状体. 但本试验岩体存在弱界面, 因此假设剪切破坏发生在界面处, 若  $c_\theta, \varphi_\theta$  分别为弱界面的黏聚力和内摩擦角, 则根据摩尔—库仑准则

$$\begin{cases} \tau = c_\theta + \sigma \tan \varphi_\theta; \\ \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2\theta); \\ \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\theta). \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{倾角 } \theta = \frac{\pi}{2} - \beta, \left( \theta \in \left[ \varphi_\theta, \frac{\pi}{2} \right] \right). \quad (3)$$

化简式(1), 得

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2(c_\theta - \sigma_3 \tan \varphi_\theta)}{(1 - \tan \varphi_\theta \cot \varphi_\theta) \sin(2\theta)}. \quad (4)$$

当  $c_\theta, \varphi_\theta$  为定值时, 对式(4)求极值可得, 当  $\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_\theta}{2}$  时得到极小值

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\min} = \frac{2(c_\theta - \sigma_3 \tan \varphi_\theta)}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi_\theta} - \tan \varphi_\theta}. \quad (5)$$

当界面弱交接即黏聚力  $c_j$  很小, 层状岩体将沿界面剪断破坏, 试件受损, 则有

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2(c_j - \sigma_3 \tan \varphi_j)}{(1 - \tan \varphi_j \cot \varphi_\theta) \sin(2\theta)}, \left( \theta \in \left[ \varphi_j, \frac{\pi}{2} \right] \right).$$

(6)  
式中:  $c_j, \varphi_j$  分别为薄弱界面的黏聚力和内摩擦角.

绘制公式图形, 得到 Jaeger 准则以及沿弱界面破坏的强度曲线图.

取两条曲线的下包络线即可得到层状岩体的强度曲线, 见图 3 中实线部分. 图 3 中的理论曲线与上述实验强度分析中的规律基本一致, 承两边高, 中间低的“U”形分布, 理论较好地解释了实验现象, 也可以证明层状岩体的破坏与强度曲线具有一定的联系, 即破坏主控因素的不同决定了岩体破坏强度不同.

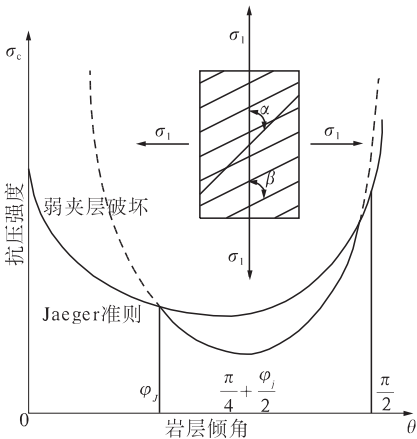


图 3 层状岩体强度曲线  
Fig.3 Strength curves of interbedded rocks

3 有限元模型分析

根据上述试验, 笔者建立含软弱层的层状岩体有限元模型, 模型尺寸为 150 mm × 150 mm, 软弱层厚度 0.2 mm. 采用摩尔—库仑模型来模拟层状岩体力学行为, 材料参数见表 2. 模型底部边界条件为限制水平和竖直方向的位移, 在模型顶部施加位移荷载, 直至运算结束.

表 2 模型材料参数  
Tab.2 Model material parameters

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角/ (°)
岩石	0.2	0.23	0.1	25
薄弱层	0.05	0.25	0.01	25

通过有限元数值分析得到 0°到 90°不同角度的竖向应力分布图和剪应力分布图, 见图 4.

(1) 当倾角为 0°时, 数值模型底脚处竖向应力增长较快, 分层间隙处出现应力分布不均匀, 同时剪应力在底脚处较大, 这与实验过程中底脚处先出现裂纹, 然后分层处出现剥落破坏等现象较吻合.

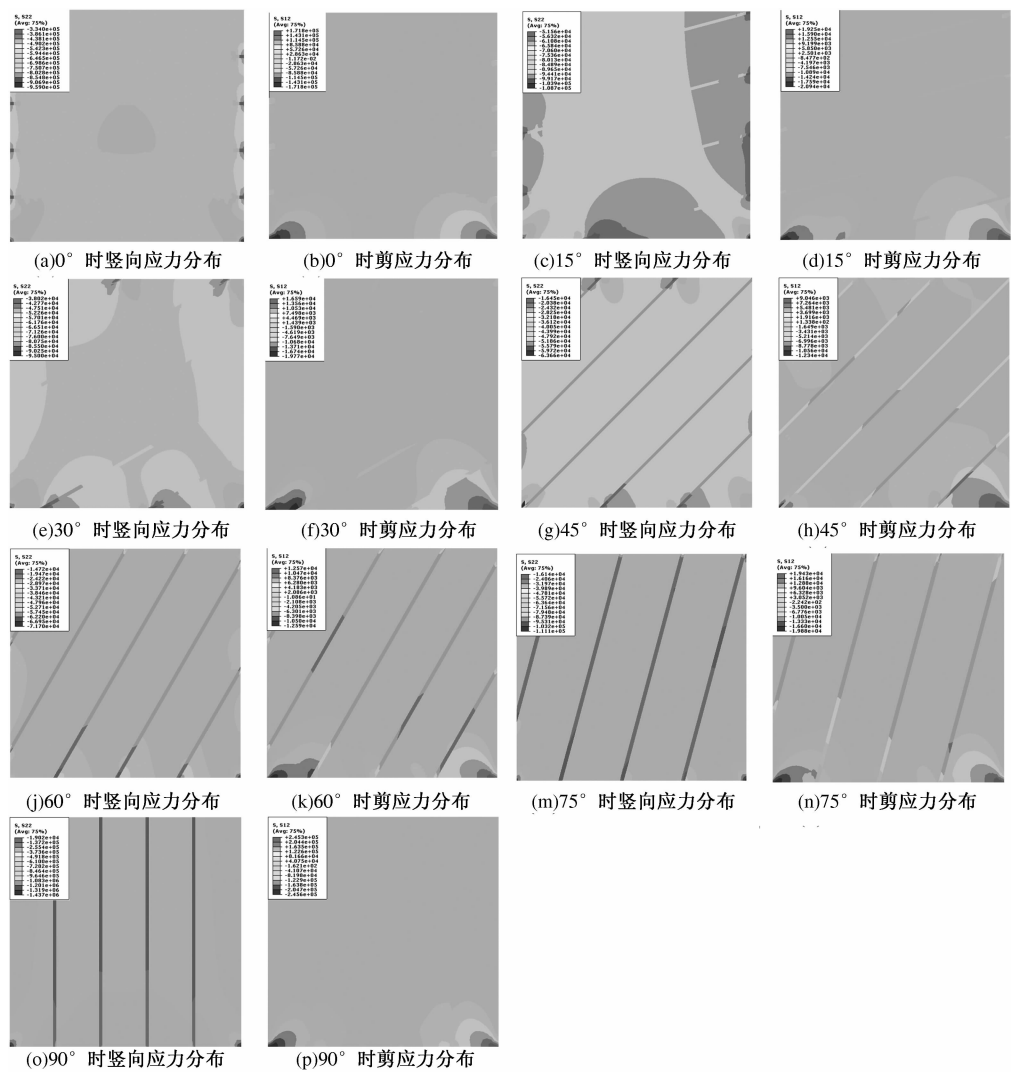


图 4 不同倾角下单轴压缩时竖向应力分布和剪应力分布(单位:Pa)

Fig.4 Vertical stress distribution and shear stress distribution of Uniaxial compression for different angles (Unit:Pa)

(2) 当倾角为 15°时,数值模型底脚处和底部分层边界处应力增长较快,出现应力分布不均匀,剪应力在底脚处较大. 试验过程中 15°试样底脚处先出现裂纹,接着出现竖向劈裂裂纹,试验现象与数值分析较吻合.

(3) 当倾角为 30°时,数值模型应力变化与倾角 15°模型相似. 试验过程中 30°试样层间错动较明显,试验现象与数值分析结果有一定的出入.

(4) 当倾角为 45°时,数值模型底脚出现应力增长较快,顶部和底部分层位置出现明显的应力分布不均匀,剪应力除了在底脚处较大外,在层间软弱层也较大,表明模型会在底脚处和分层处出现破坏. 试验过程中 45°试样底脚还未开始破坏时层间就已经出现较明显错动,记录的压力值也较小,这一实验现象与数值分析结果较吻合.

(5) 当倾角为 60°和 75°时,数值模型应力分布情况与 45°模型相似. 试验过程中 60°和 75°试样出现底脚先破坏,然后分层处滑落剥落,试验现象与数值分析结果较吻合.

(6) 当倾角为 90°时,数值模型应力分布与 0°模型相似,不同的是 90°模型层间应力分布不均匀,容易产生层间拉裂破坏. 试验过程中 90°试样底脚还未开始破坏时层间已经裂开,实验现象与数值分析结果较吻合.

综合试验结果、数值分析结果以及理论结果可得到图 5 所示曲线,三者在一定程度上有着相同的关系,强度曲线随倾角的增大呈“U”形分布,结果表明,不同倾角下的层状岩体破坏主控因素的不同,是导致破坏模式不同以及强度曲线“U”形变化的根本原因.

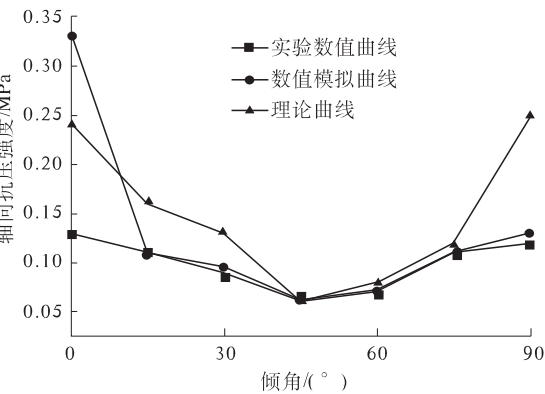


图 5 试验结果、理论分析及数值分析对比

Fig.5 Comparison of experimental results, theoretical analysis and numerical analysis

4 结论

(1)层状岩体的破损模式与岩层倾角有很大关系,当岩层倾角较小时,岩体破坏主要为岩石先破坏,后层间错动破坏,破坏模式与单一岩体破坏相似。

(2)当倾角增大时,以层间的剪切破坏为主,并伴有一般的劈裂破坏;当角度继续增大到 90°时,岩体的破坏会比较直接,沿层间直接破坏,并伴有伴有局部的失稳劈裂。

(3)数值模拟结果与室内实验具有较好的一致性,软件模拟的破坏位置与破坏状态与室内实验的实际情况能较好的对应,说明本文用参数缩小数倍的薄弱夹层来模拟层间的接触部位是可行的。

参考文献:

[1] 苏志敏,江春雷, Ghafoori M. 页岩强度准则的一种模式[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 311 - 314.  
[2] TIEN Y M, KUO M C. A failure criterion for transversely isotropic rocks[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2001, 38(3): 399 - 412.  
[3] 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 - 142.  
[4] 邓荣贵,付小敏. 层状岩体力学特性模拟实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(6): 721 - 729.  
[5] 胡波,张楠,刘顺桂,等. 节理对岩体强度变形特性影响的模型实验[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2009, 40(4): 1133 - 1138.  
[6] TIEN Y M, TSAO P F. Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rock[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2000, 37(6): 1001 - 1012.  
[7] 张桂民,李银平,杨长来,等. 软硬互层盐岩变形破坏物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1813 - 1820.  
[8] TIEN Y M, KUO M C, JUANG C H. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2006, 43(8): 1163 - 1181.  
[9] 陈新,廖志红,李德建. 节理倾角及连通率对岩体强度、变形影响的单轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 781 - 789.  
[10] 黄书岭,丁爱丽,邹爱清,等. 层状岩体多节理本构模型与试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1628 - 1635.  
[11] 何忠明,彭振威,曹平,等. 层状岩体单轴压缩室内试验分析与数值模拟[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2010, 41(5): 1906 - 1912.  
[12] 陈沙,岳中琦,谭国焕. 基于真实细观结构的岩土工程材料三维数值分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1951 - 1958.  
[13] 周文,朱自强,柳群义,等. 复杂节理面剪切强度和变形特征的数值分析[J]. 中南大学学报, 2009, 40(6): 1700 - 1704.  
[14] 戴永浩,陈卫忠. 一种软岩相似材料及制备方法[P]: 中国. CN101614629. 2009 - 12 - 30.  
[15] JAEGER J C. Shear failure of anisotropic rock[J]. Geological Magazine, 1960, 97(1): 65 - 72.

(下转第 91 页)