

# 板岩渐进剪切破坏各向异性及其数值模型研究\*

叶海旺<sup>1</sup>, 蔡俊<sup>1,2</sup>, 雷涛<sup>1</sup>, 冉成<sup>1</sup>, 宁卫星<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070; 2. 东南大学 岩土工程研究所, 南京 210096)

**摘要:**层理面是导致岩石试样在变形和力学特性上表现出各向异性的根本原因。为研究层理弱面影响下板岩的渐进破坏模式, 揭示其各向异性的力学机制, 选取贵州东部的层状板岩开展不同加载空间位置关系下的直剪试验。结果显示: 剪切强度各向异性是由其破坏机制控制的, 层理面与剪切面平行时, 属于沿层理面的剪切滑移破坏; 层理面与剪切面垂直且其交线与剪应力方向也垂直时, 属于剪切作用下层理面的张拉和基质体的剪切破坏; 层理面与剪切面垂直而其交线与剪应力方向平行时, 垂直于层理面方向试样在泊松效应作用下产生拉伸破坏, 剪应力方向试样发生基质体的剪切破坏, 此时强度最大。基于层理结构的本构关系, 构建层理体系的材料模型, 并采用数值模拟研究层理结构对板岩破坏模式的影响, 模拟结果与试验结果吻合较好, 进一步解释了层状板岩破坏模式各向异性的产生机制。

**关键词:**板岩; 层理面; 剪切强度; 各向异性; 数值材料模型

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)04-0945-10

## Anisotropic Progressive Shear Failure of Slate and Its Numerical Model

Ye Haiwang<sup>1</sup>, Cai Jun<sup>1,2</sup>, Lei Tao<sup>1</sup>, Ran Cheng<sup>1</sup>, Ning Weixing<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P.R. China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, P.R.China)

**Abstract:** The bedding planes are the fundamental causes of slate anisotropy of deformation and mechanical behaviors. In order to analyze the gradual failure process of the slate with the influence of bedding planes, and to reveal slate anisotropy mechanical mechanism, slate in eastern Guizhou was taken as research object, and shear tests with different spatial location relationship between bedding plane and shear plane were conducted. Results show that the anisotropy of shear strength is mainly resulted from the anisotropy of failure mechanisms. When bedding plane is paralleled to shear surface, sliding shear failure along bedding planes occurs. When the bedding plane is perpendicular to shear surface and intersection line of these two planes is perpendicular to the shear stress, the shear sliding across matrix body together with tensile splitting of weak planes occurs. When the bedding plane is perpendicular to shear surface and intersection line of these two planes is paralleled to the shear stress, with the influence of Poisson's effect, tensile failure occurs in the direction perpendicular to the bedding planes. Shear failure across matrix body on specimens occurs in the shear direction, under this condition, the slate shear strength is the largest. Based on the constitutive relation of the bedding plane texture, a bedding plane system material model was constructed with finite element method, and the effects of bedding plane on the failure mode of slate were simulated. The numerical results have a good agreement with experimental data, which furtherly explains slate anisotropy mechanical mechanism of fracturing failure modes.

**Keywords:** slate; bedding plane; shear strength; anisotropy; numerical material model

\* 收稿日期: 2018-01-17(修改稿)

作者简介: 叶海旺(1971-), 男, 安徽望江人, 博士, 副教授, 主要从事岩土、爆破方面的研究与教学工作。

E-mail: yehaiwang369@hotmail.com

通讯作者: 蔡俊(1990-), 男, 湖北黄冈人, 博士生, 主要从事岩土工程试验与数值计算研究。

E-mail: caijun129@163.com

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2015IVA028); 国家自然科学基金(51274157)

## 0 引言

地壳中的岩体多具有沉积结构,其在沉积过程中往往在不同的方向上具有不同的构造和连接特征,使其在不同方向上的力学性质不同,表现为非均质性和各向异性<sup>[1]</sup>。

层状岩体的各向异性特性是其结构的典型特征,不仅表现在变形和强度上,在受载过程中其破坏机制也存在着较大的差异。层状岩体多由物质经过沉积作用而形成,其沉积过程中由于时空转变的原因导致其组成的矿物结晶颗粒具有不同的大小和组合方式<sup>[2-4]</sup>,也就使得其具有不同层次的结构构造,同时这些结构构造的定向排列也就具有了层理、片理等特征。

实践证明,地下土木工程开挖活动中,岩层的各向异性对处于复杂地质条件和赋存状况的地下工程稳定性有着重要的影响,如在建的白鹤滩水电站<sup>[5-7]</sup>以及乌东德水电站<sup>[8]</sup>等,其节理化的岩体变形破坏特征和机制复杂,必然对节理化的岩体稳定性评价带来巨大的挑战。为此,刘胜利等<sup>[9]</sup>通过试验,研究了绿泥片岩的各向异性特征。Cho等<sup>[10]</sup>对页岩进行不同角度的单轴压缩和巴西劈裂试验,研究了其弹性参数和强度的各向异性。Niandou等<sup>[11]</sup>对 Tournemire 页岩的破裂模式进行探讨,认为其破坏机制主要为层理面的张拉和剪切以及基质体剪切的复合破坏模式。同时,数值模拟作为研究层状介质体的一种有效手段,也取得了一些初步的成果。同样是基于经典的 Cosserat 介质理论,国内的杨春和<sup>[12-13]</sup>将其引入层状盐岩体,建立了 Cosserat 扩展介质本构模型。国外的 Pant 和 Adhikary<sup>[14-17]</sup>建立了平面弹粘塑性有限元计算方法。另外 Tan 等<sup>[18]</sup>结合室内试验和数值模拟的方法对板岩进行巴西劈裂试验,发现微观参数影响了不同层理面角度下试样的破坏模式。

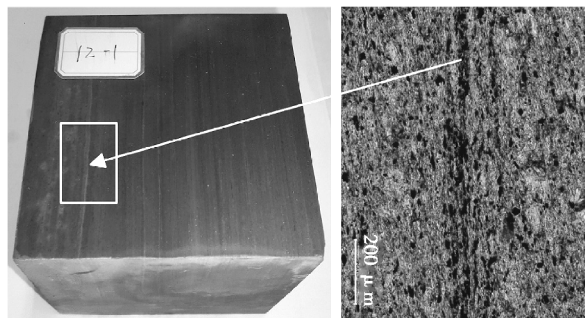
由此可见,以往的研究主要集中在层理面影响下岩石的抗压、拉强度各向异性上,而对其受剪切荷载时的力学性质各向异性以及对该过程的数值材料模拟探讨尚少。因此,对层状岩体这种非均质以及各向异性非常明显的材料展开直剪试验及数值模拟研究,具有很强的理论意义和实践价值。

## 1 剪切试验

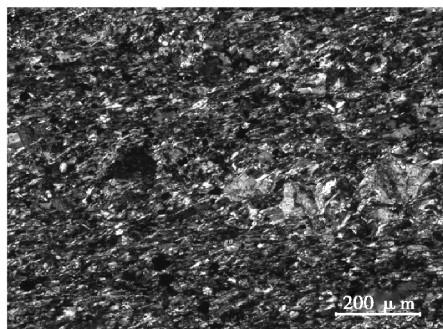
### 1.1 试样材料

试验所选取的岩样位于贵州东部的铜仁地区,

岩样为青白口系红子溪组第一段上部的灰紫色绢云母、粉砂质板岩,层理结构明显,具有明显的沉积岩构造,并且整个层理面是由宏观层理面共同组成,见图1。放大100倍以后的薄片图可以看到层间定向排列,胶结物中的变质矿物和泥质微粒胶结紧密,层理构造明显。偏光显微镜下的结果可分析出,岩石试样中主要含方解石、石英以及云母,其中方解石大小不一,石英及云母粒径约为25 $\mu\text{m}$ 。



(a) 层理结构示意图



(b) 板岩成分显微镜图

图1 板岩结构宏微观图

Fig. 1 Macro-meso images of slate

### 1.2 试验方案

岩石的剪切强度可以通过多种方法进行测试<sup>[19]</sup>,实际中普遍使用的是限制性剪切强度试验。常见的试样主要为棒状和板状试样2种,不同类型的试样也就对应于不同的加载装置和方式。

目前直剪试验多使用的是图2(a)类型的加载方式,该方式施加的正应力和剪应力不受约束,试样制备便捷,系统强大,但同时也存在一些不足。试验过程中发现:剪切盒将试样包裹严密,无法观察加载过程中的渐进破坏模式;剪切盒对试样过于限制,改变岩样层理面与剪切面之间的夹角,试样的破坏模式差别不明显。而图2(b)加载模式下不存在以上问题,正应力和剪应力可通过改变角模的角度来实现,但试样制取相对繁琐,参数选取受限。为对比研究不同加载情况下的剪切破坏模式,综合

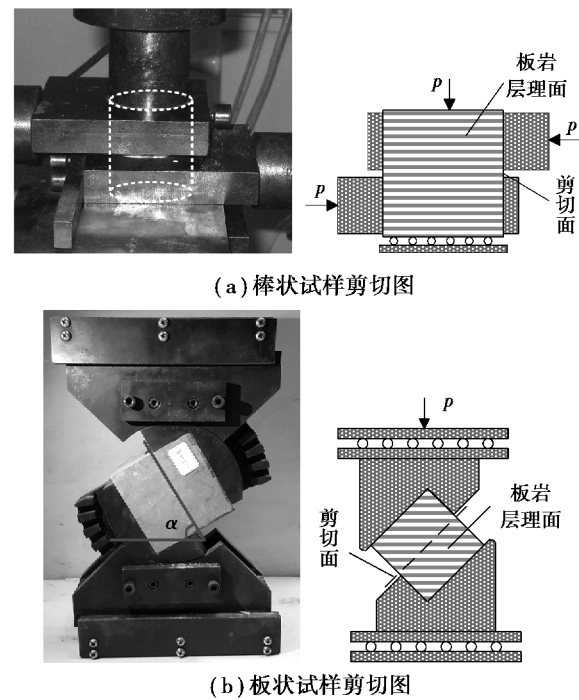


图 2 剪切试验加载方式图

分析两种加载方式,选择图 2(b)所示的角模剪切方式进行加载。

板岩剪切试件参考《GBT 50266—2013 工程岩体试验方法标准》<sup>[20]</sup>进行制备。选取的是 10 cm×10 cm×10 cm 的立方体进行试验。试件上、下表面的平行度控制在 0.5 mm 以内,表面的平整度控制在 0.1 mm 以内。所有试件均保存在室温干燥环境中,如图 3 所示。



图 3 剪切试样图

文献[21-23]指出,岩体强度不仅与岩石本身的性质相关,还与结构面的方向和性质有很大的关系。试验中设计的加载方向分为图 4 中的(a)、(b)、(c)3种。而剪切角度(角模提供的剪应力方向与水平面的夹角,图 2 中角  $\alpha$ )分别选取 20°、30°、40°、50°、60°、70°,每种角度分别选取 3 个试

样进行试验,试验结果选择方法是:排除误差较大的结果,并选择各组的中间值。测试中,根据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)预留剪切缝宽度应为试件剪切方向长度的 5%。

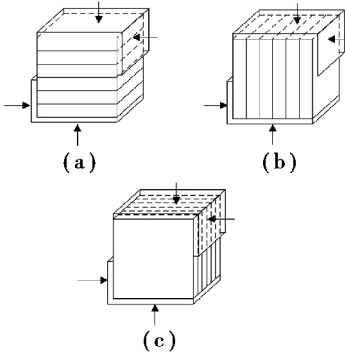


图 4 剪切加载方案示意图

Fig. 4 Design of loading modes for shear tests

1.3 试验结果

表 1 为岩样的剪切试验结果,表中的(a)、(b)、(c)分别对应图 4 中的 3 种加载方式。

表 1 板岩剪切试验结果

Table 1 Results of shear tests for slate

加载模式		试样编号	$\tau/\text{MPa}$	$\sigma/\text{MPa}$
加载方向	剪切角 /(°)			
(a)	20	L26-1	17.097	46.964
	30	L4-2	12.066	20.899
	40	L12-1	9.809	11.691
	50	L4-1	10.668	8.952
	60	L20-2	7.511	4.337
	70	L18-1	7.468	2.719
(b)	20	L18-2	19.784	54.355
	30	L24-1	14.380	24.908
	40	L12-4	14.287	17.026
	50	L32-1	13.408	11.250
	60	L16-1	11.708	6.760
	70	L17-2	11.362	4.135
(c)	20	L16-3	21.211	58.276
	30	L31-2	33.621	58.234
	40	L12-2	31.839	37.944
	50	L20-1	36.694	30.790
	60	L32-2	58.362	33.695
	70	L32-3	55.212	20.096

## 2 剪切试验结果分析

### 2.1 破坏模式分析

试样在剪切过程中,图4(a)、(b)、(c)3种加载方式下,由于层理面受力情况的不同,岩样也就出现了不同的破坏形式。如图4(a)情况下,试样达到加载极限时,瞬时发生沿层理面的滑移破坏,试验结束迅速,剪切位置没有出现大量的散体和碎块,剪切面很完整;岩体的破坏主要为层理面的胶结层在剪应力的作用下发生剪切破坏,整个加载过程中,试样没有出现很明显的前期破坏特征。而在图4(b)加载情况下,加载初期试样首先在剪应力加载面的对侧出现沿层理面的微裂隙张开,分析为试样在该区域沿层理面的垂直方向产生拉伸应变,进而发生拉伸破坏,而后在剪切面处,沿剪应力加载方向出现贯穿性裂纹,进而将岩样剪断。试验完成后的剪切位置留存大量的岩石碎块,碎块呈层状剥落形态,破坏模式为垂直于层里面的张拉和沿加载方向的基质体复合破坏。

在图4(c)加载过程中,试样首先在未受限制的两侧出现沿层理面的破裂,分析为泊松效应的原因,在正应力和剪应力的作用下产生与层理面垂直的横向拉伸应变,张开性的裂纹沿层理面扩展,发生层理的离析,发展到一定程度后,试样沿剪应力方向在基质体中沿剪切面形成贯穿性的剪切破坏,如图5(c)右图。试验完成后在剪切位置留存较多片状岩块,为岩样沿层理面破裂后的产物,由于剪切摩擦作用,剪切台上留存较多岩屑。

图4(c)加载情况下的剪切过程与常见的剪切试验不同,可以认为试样的前期破裂过程属于一种压破坏,从层理面与加载方向平行时的单轴压缩破坏模式对比(图7)中看出,2种情况下试样均是沿着轴向(层理面方向)的多个劈裂面拉伸破坏,且此时的峰值应力要大于其余2种情况。各种剪切破坏模式如图5,其概化图如图6。

在 $\tau \sim \sigma$ 坐标系上绘制出不同剪切角度下的正应力和剪切应力的破坏应力点,并用最小二乘法原理对各剪切破坏点进行线性拟合(如图8),该拟合线的倾角即为内摩擦角 $\varphi$ ,拟合线在纵坐标上的截距即为黏聚力 $c$ 。图8中,(a)加载情况下 $\varphi$ 和 $c$ 分别为 $11.96^\circ$ 和 $7.394 \text{ MPa}$ , (b)加载情况下 $\varphi$ 和 $c$ 分别为 $9.18^\circ$ 和 $10.965 \text{ MPa}$ 。而对于(c),试验的数据无法拟合出合理的摩尔库伦曲线,主要原因是,其前期破坏过程属于一种压破坏。而对于(a)、(b)情况,试样是在剪应力直接作用下产生层

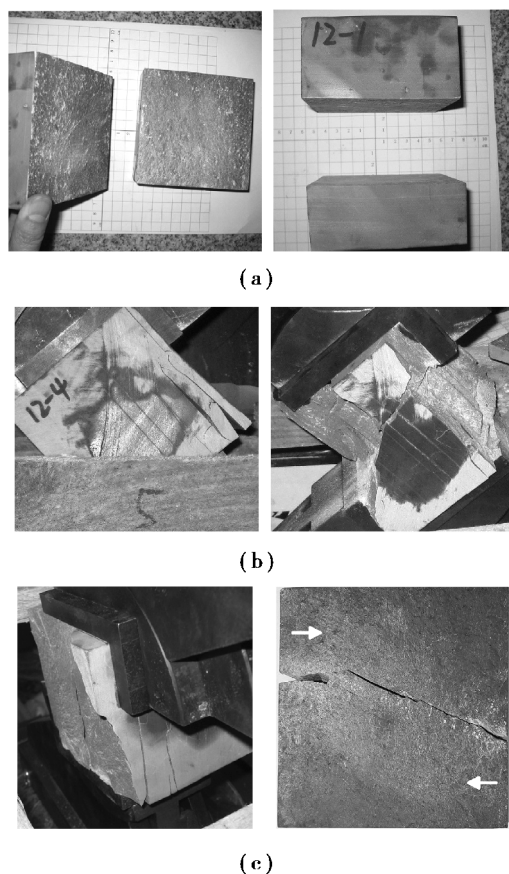


图5 试样剪切破坏效果图

Fig. 5 Failure pattern of slate with different loading modes in shear tests

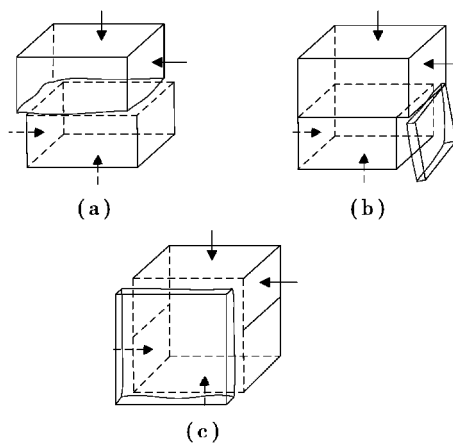


图6 剪切破坏模式概化图

Fig. 6 Sketches of failed specimens in different loading modes  
理面的剪切或是张拉破坏,这是本质的区别。

### 2.2 渐进破坏过程分析

通过观察试样在剪切过程中的破坏模式,由于(a)情况下试样没有明显的前期破坏特征,所以主要对(b)、(c)进行分析,选取的观察部位如图9深色部分,其渐进破坏过程如图10。



图 7 压缩破坏模式对比

Fig. 7 Comparison of compression failure pattern

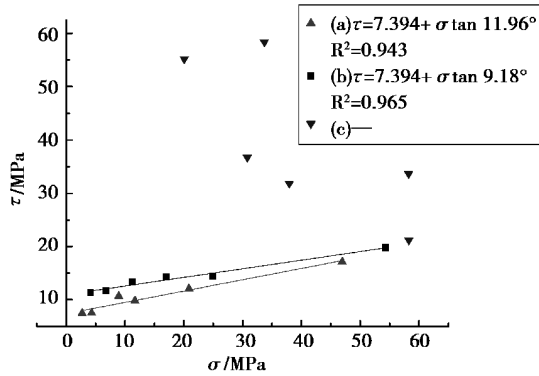


图 8 摩尔库伦曲线拟合

Fig. 8 Mohr-Coulomb curves of shear strength of slate with different loading modes

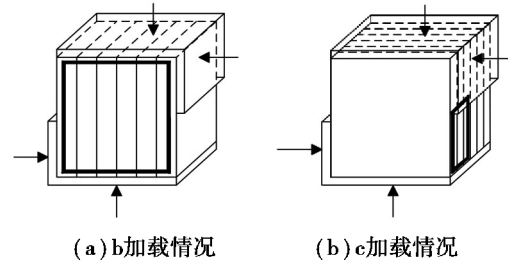
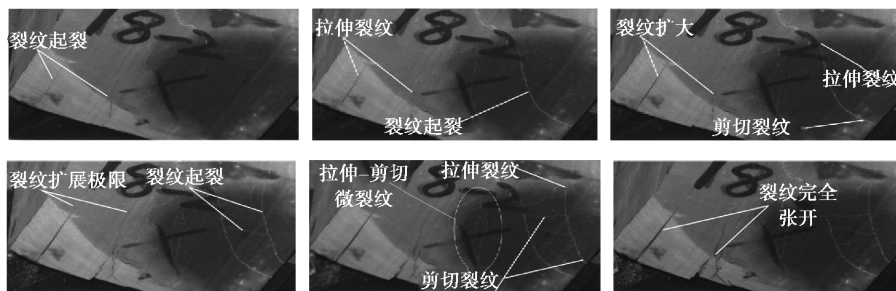


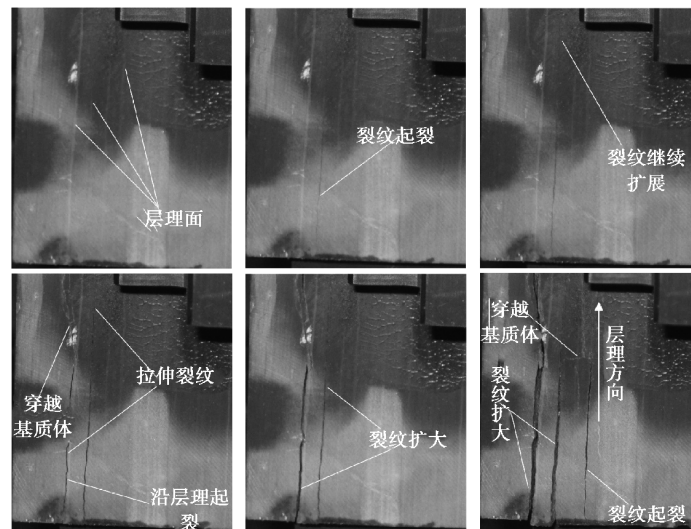
图 9 渐进破坏区域示意图

Fig. 9 Progressive failure zone

如图 10(a) 中所示, b 加载过程中, 试样首先是在边侧发生沿层理面的张拉破坏, 接着由试样右侧中部至中间上部形成一条贯穿试样基质体的裂纹。该过程裂纹并未直接沿剪切面方向扩展, 而是偏向试样中上部(层理面方向), 这主要是由于层理弱面的诱导, 该过程为剪切及拉伸的复合破坏模式。随着加载的继续, 下部的层理面继续张开, 裂纹扩展至试样中部后扩展停止, 分析为层理面在剪应力作用下形成错动张开, 而该方向剪应力只作用于试样下部, 所以未见其继续扩展。右上部在同样的作用机理下, 形成类似的剪切拉伸破坏以及贯穿性的剪切裂纹。随着加载的继续, 试样最终被剪断。



(a) b 加载模式下的渐进破坏



(b) c 加载模式下的渐进破坏

图 10 b, c 加载情况下的渐进破坏模式图

Fig. 10 Progressive failure pattern of b and c loading modes

如图10(b)所示,c情况下,试样首先在下部沿层理面形成张开性的微裂隙,进而在拉伸应变作用下裂纹进一步向上扩展。扩展至中部时,由于初始微裂隙的原因,裂纹穿越岩石基质体向外侧发展。加载继续,裂纹继续增多,最后在试样的边侧形成沿多个层理面的离析破坏以及贯穿基质体的裂纹。整个过程中,层理优先从外侧起裂,并向中间扩展,破坏后的各块体整体较规整。

综上所述可以看出,弱化的层理面是板岩各向异性的根本原因。试样在不同的受载过程中,初期的破裂过程均是受层理面弱化的导向,随着加载的继续,试样会发生沿层理面和基质体的复合破坏。

### 3 层状结构材料模型构建

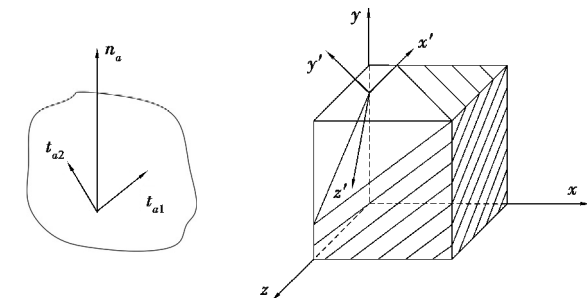
本研究中的层状板岩,岩层中存在着分布度很高的平行节理,并且各节理层之间的层面间距很小,简化考虑,可以认为是一种特殊的连续介质。

#### 3.1 层状结构的应力应变

假设在岩体中任一点的应力状态为

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \circ$$

参考 Zienkiewicz 的结果<sup>[24]</sup>,岩体中某一层理面 $\alpha$ 的方位由垂直于该层理面的法向量 $n_a$ 以及层理面上两个相互正交的单位向量 $t_{a\alpha}$ , $\alpha=[1,2]$ 共同表示,如图11(a)所示。



(a) 层理面向量示意图 (b) 局部坐标系示意图

图11 层理面坐标系转换示意图

Fig. 11 Coordinate systems used for transformation

law of a layered rock mass

如图11(b)所示,设某一层理面的法向矢量为 $n_a = [l, m, n]^T$ , $l, m, n$ 为法向矢量的3个方向余

弦,同理 $t_{a\alpha} = [l_{a\alpha}, m_{a\alpha}, n_{a\alpha}]^T$ ,这2个向量相互正交,作为该层理面的方位的局部坐标系。所以作用于某一层理面上的压应力和剪应力为:

$$\begin{cases} p_a = n_a \cdot \sigma \cdot n_a \\ \tau_{a\alpha} = n_a \cdot \sigma \cdot t_{a\alpha} \end{cases} \quad (1)$$

同时定义剪应力为:

$$\tau_a = \sqrt{\tau_{a\alpha} \tau_{a\alpha}} \quad (2)$$

局部应变为垂直于层理面的应变:

$$\varepsilon_{an} = n_a \cdot \varepsilon \cdot n_a \quad (3)$$

层理面上 $\alpha(\alpha=1,2)$ 方向上的剪应变为:

$$\gamma_{a\alpha} = n_a \cdot \varepsilon \cdot t_{a\alpha} + t_{a\alpha} \cdot \varepsilon \cdot n_a \quad (4)$$

式中: $\varepsilon$ 为应变张量。

层理面体系的应变可分为弹性和塑性两部分,其中塑性部分可认为各层理面的线性叠加。假定采用线性的应变率分解,即为:

$$d\varepsilon = d\varepsilon^{el} + d\varepsilon^{pl} \quad (5)$$

式中: $d\varepsilon$ 是整体的应变率; $d\varepsilon^{el}$ 是弹性部分的应变率; $d\varepsilon^{pl}$ 是塑性部分的应变率。假定有几个体系的塑性弹性应变与应力大小有关,根据胡克定律:

$$\varepsilon^e = D^{-1} \sigma \quad (6)$$

式中: $D$ 是弹性常数的刚度矩阵。

$$d\varepsilon^{pl} = \sum_i d\varepsilon_i^{pl} \quad (7)$$

#### 3.2 层理面的张开状态

参考文献[24],当垂直于层理面的应力试图变为拉伸时,并且超过了层理面的张开能力,那么材料在垂直于节理面的方向上将只有应变。以应力和应变为基础,分别定义层理的张开和闭合。当层理面张开时,即:

$$p_a \leq 0 \quad (8)$$

这种情况下,层理面将变为各向异性弹性,此时满足:

$$\varepsilon_{an(ps)}^{el} \leq \varepsilon_{an}^{el} \quad (9)$$

式中: $\varepsilon_{an}^{el}$ 为横跨层理的法向弹性应变分量; $\varepsilon_{an(ps)}^{el}$ 则是根据平面应力假设计算出的横跨层理的法向弹性应变。

$$\varepsilon_{an(ps)}^{el} = -\frac{\nu}{E}(\sigma_{a1} + \sigma_{a2}) \quad (10)$$

式中: $E$ 为材料的弹性模量; $\nu$ 为泊松比; $\sigma_{a1}, \sigma_{a2}$ 为层理面上的径向应力。

### 3.3 层理面的滑移状态

层状岩体的破坏形式多为剪切破坏,所以其塑性通过各层理面的滑移进行激活,滑动破坏面的定义为:

$$f_a = \tau_a - \sigma_a \tan \varphi_a - c_a = 0 \quad (11)$$

式中: $\varphi_a$  为层理体系  $a$  的内摩擦角; $c_a$  为层理体系  $a$  的粘聚力,如图 12 所示; $\tau_a$  为层理面上的剪应力; $\sigma_a$  是作用在层理面上的法向压应力。当  $f_a < 0$  时,层理体系  $a$  不发生滑动。当  $f_a = 0$  时,层理体系滑动。此时的塑性应变为:

$$\begin{cases} d\gamma_{a\alpha}^{pl} = d\bar{\varepsilon}_a^{pl} \frac{\tau_{a\alpha}}{\tau_a} \cos \psi_a \\ d\varepsilon_{an}^{pl} = d\bar{\varepsilon}_a^{pl} \sin \psi_a \end{cases} \quad (12)$$

式中: $d\gamma_{a\alpha}^{pl}$  为层理面上  $\alpha$  ( $\alpha = [1, 2]$  分别为层理面上相互垂直的两个方向) 方向的塑性剪切应变率; $d\bar{\varepsilon}_a^{pl}$  为塑性应变率的大小; $\tau_{a\alpha}$  为层理面上的剪切应力分量; $\psi_a$  为层理体系的剪胀角; $d\varepsilon_{an}^{pl}$  为层理面法向塑性应变。

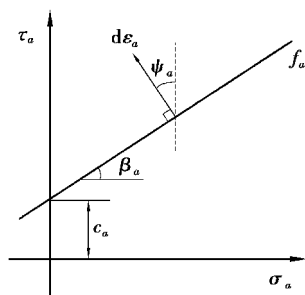


图 12 层理面系统材料模型

Fig. 12 Joint system material model

## 4 数值模拟对比

### 4.1 模型建立

鉴于层状岩石试样在不同的剪切加载过程中出现的不同的破坏形式,基于第 3 节中构建的层状结构材料模型,运用数值模拟的方法定性验证分析材料模型在不同剪切受载过程中的力学响应情况。计算过程中,控制数值试验的单因素变化,数值剪切试验与室内试验相同,模型尺寸选取为  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),对模型上半部分的顶部和单侧施加正应力和剪切应力,下半部分的底

部和对应边侧采用固定边界条件,模型如图 13。单元选择为三维实体单元 C3D8R。

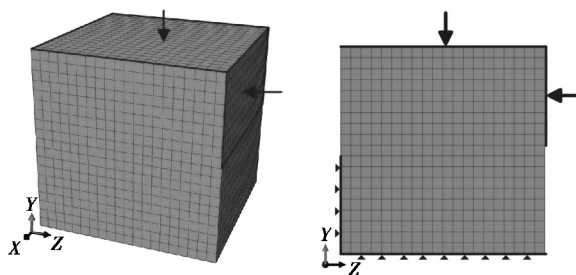


图 13 数值模型图

Fig. 13 Numerical model

对模型施加正应力和剪应力时,为保证计算的收敛性,数值选为 18 MPa 和 1.5 MPa (加载方向如图 13), $c$ 、 $\varphi$  值分别选取为室内试验中沿层理面发生剪切破坏的一组 (即 a 加载情况): 7.394 MPa 和  $11.96^\circ$ ,详见表 2。数值试验中通过坐标定义 (图 11(b)) 的方法,改变层理面的角度分别与  $xOz$ 、 $xOy$  和  $yOz$  平面平行,使之分别对应于剪切室内试验中的 (a)、(b)、(c) 3 种情况。

表 2 模型物理力学参数

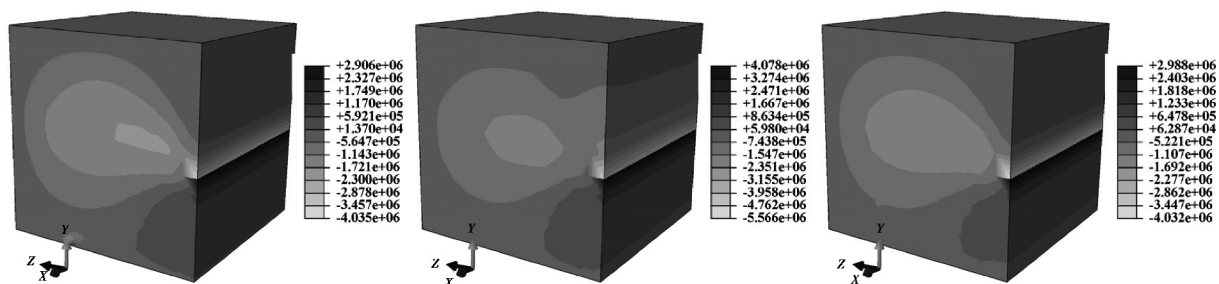
Table 2 Physico-mechanical parameters of model

材料	容重 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	弹性 模量 /GPa	黏聚力 /MPa	内摩 擦角 /( $^\circ$ )
岩样	2 771	0.27	60	7.394	11.96

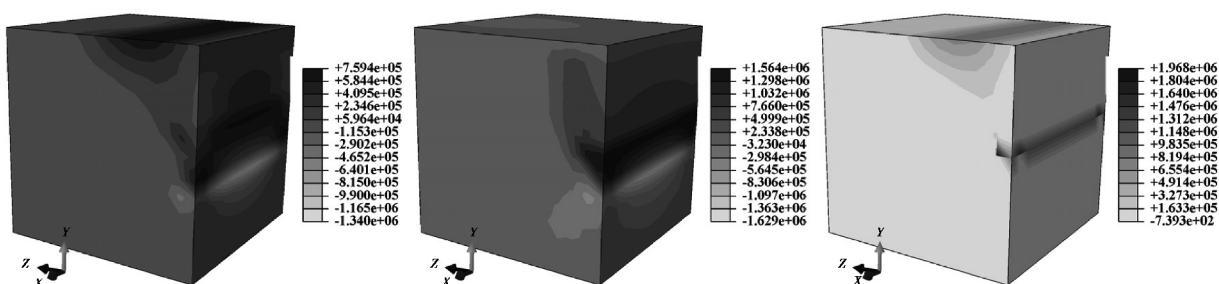
### 4.2 讨论

图 12 计算结果如图 14 所示,各模型结果从左至右分别对应图 4 中的 a、b、c 加载情况。分析模型在加载情况下的剪应力、最大主应力、真实应变及其矢量。

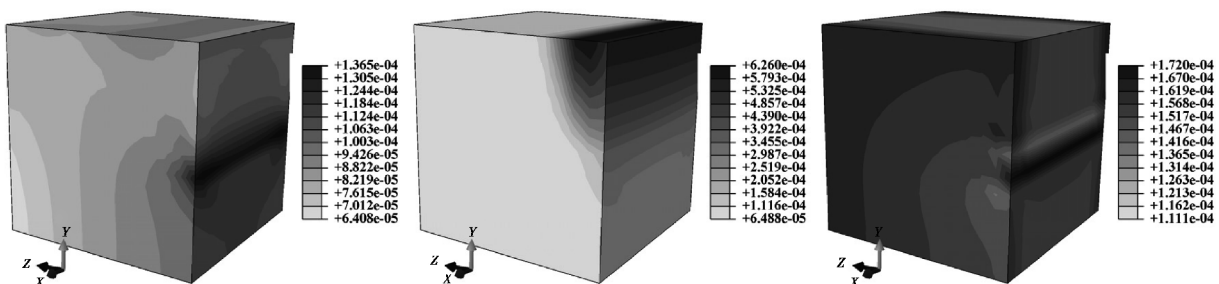
图 14 中可以明显看到,模型的应力应变情况随层理面的改变发生变化。选取与  $y$  轴垂直的平面上沿  $z$  方向的剪应力进行对比,各模型剪应力分布情况差别不大,均在限制边界的界限处产生较大的应力集中 (正负号表示应力方向),可见在该区域,剪应力集中情况明显,且方向相反,符合室内试验中各情况下最终均发生剪切破坏这一事实。



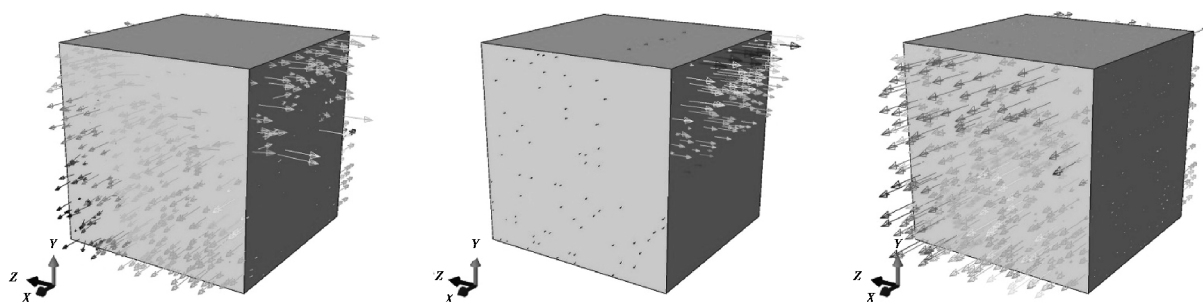
(a) 剪应力对比



(b) 最大主应力对比



(c) 真实应变对比



(d) 真实应变矢量对比

图 14 数值模拟试验结果图

Fig. 14 Numerical simulation results

对比最大主应力,应力云图中拉应力为正,各模型的拉应力集中区域分布情况相差不大,在模型侧边出现了较强的应力集中,表现为拉应力,所以会出现拉伸破坏。由之前分析可知,试样多是由于拉伸应变导致的拉破坏,对比各种情况下的真实应变云图。图 14(c)中,a 情况下的应变主要分布在试样的中部,与加载剪应力方向平行,且在加载和边界限制交界处出现较强的应变集中。结合图 14(d)中的应变矢量,a 应变矢量(浅色部分)主要在模型的中部,所以将优先从试样中部沿剪应力方向发生破坏。b 情况的应变主要集中在模型的上边角,这与室内试验的剪切破坏发生的位置基本一致。再结合应变矢量,其方向与剪切面( $xOz$ )平行,所以模型会优先沿剪应力方向在上部边角处发生拉伸破坏。从 c 情况的应变可以看到,在模型的两边侧有明显集中,且主要集中在外侧。从应变矢量图中可以更加清楚地看出,应变向两边侧扩展明显,在其拉伸作用下,试样将优先从外侧开始发生拉伸破坏。通过以上对比发现,该数值模型可以较好地解释室内试验中各破坏模式下的破坏机理。

## 5 结论

(1)根据层理面结构的宏细观分析,该板岩层理结构分明,岩样矿物结构排列规整,层间胶结物中大的矿物颗粒较少,主要是泥质微粒,且变质矿物和泥质微粒胶结紧密。

(2)通过变换层理面与剪切面之间的空间位置关系,运用角模剪切试验的方法发现:在层理弱面的影响下,试样在渐进破坏过程中会出现不同的破坏模式,主要分为沿层理面的剪切滑移破坏、沿层理面的张拉及基质体剪切破坏以及泊松效应作用下的层理面张拉以及基质体的剪切破坏这 3 种。相比于前 2 种,第 3 种情况是在泊松效应作用下产生横向拉伸应变,导致层理面张开,且该过程属于压破坏,所以强度最大。

(3)基于对试样层理的结构分析,构建其材料模型,运用有限元进行模拟研究。结果显示,材料模型能较好地反映室内试验中岩样受载破坏特征及力学机制,进一步证实了层状板岩破坏时各项异性的破坏特征。

## 参考文献(References)

- [1] 雷冬,王克峰,汤晓波,等.非均质岩体压缩破坏的数字图像相关研究[J].地下空间与工程学报,2011,7(6):1158-1162. (Lei Dong, Wang Kefeng, Tang Xiaobo, et al. Digital Image Correlation Study on Damage of Heterogeneous Rock under Compression Loading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(6): 1158-1162. (in Chinese))
- [2] 王倩,王鹏,项德贵,等.页岩力学参数各向异性研究[J].天然气工业,2012,32(12):62-65. (Wang Qian, Wang Peng, Xiang Degui, et al. Anisotropic property of mechanical parameters of shales[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(12): 62-65. (in Chinese))
- [3] 王炳军,肖洪天,孙凌志,等.层状岩体各向异性对裂纹断裂特性影响研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(S2):1755-1761. (Wang Bingjun, Xiao Hongtian, Sun Lingzhi, et al. Effect of the Anisotropy of the Layered Rock Mass on the Fracture Behaviours of Its Embedded Cracks[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(S2): 1755-1761. (in Chinese))
- [4] Johnston J E, Christensen N I. Seismic anisotropy of shales [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1995, 100(B4): 5991-6003.
- [5] 朱珍德,秦天昊,王士宏,等.基于 Cosserat 理论的柱状节理岩体各向异性本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增2):4068-4076. (Zhu Zhende, Qin Tianhao, Wang Shihong, et al. Study of anisotropic constitutive model of columnar [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (Supp.2): 4068-4076. (in Chinese))
- [6] 钟世英,徐卫亚.基于微结构张量理论的柱状节理岩体各向异性强度分析[J].岩土力学,2011,32(10):3081-3084. (Zhong Shiyong, Xu Weiya. Anisotropic failure criterion incorporating microstructure tensor for rock mass with columnar joints [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3081-3084. (in Chinese))
- [7] 郝宪杰,冯夏庭,李邵军,等.柱状节理玄武岩隧洞破坏模式及其力学机制模拟[J].岩土力学,2015,36(3):837-846. (Hao Xianjie, Feng Xiating, Li Shaojun, et al. Failure mode of columnar jointed basalt tunnel and its mechanism simulation [J]. Rock and Soil

- Mechanics, 2015, 36(3): 837-846. (in Chinese))
- [8] 熊诗湖, 钟作武, 唐爱松, 等. 乌东德层状岩体卸荷力学特性原位真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增2): 3724-3731. (Xiong Shihu, Zhong Zuowu, Tang Aisong, et al. Study of mechanical properties of Wudongde layered rockmass under unloading conditions by in-situ true triaxial tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Supp.2): 3724-3731. (in Chinese))
- [9] 刘胜利, 陈香雄, 余飞, 等. 绿泥石片岩各向异性特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3616-3623. (Liu Shengli, Chen Shanxiong, Yu Fei, et al. Anisotropic properties study of chlorite schist [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3616-3623. (in Chinese))
- [10] Cho J W, Kim H, Jeon S, et al. Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 50(1): 158-169.
- [11] Niandou H, Shao J F, Henry J P, et al. Laboratory investigation of the mechanical behaviour of Tournemire shale [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(1): 3-16.
- [12] 杨春和, 李银平. 互层盐岩体的 Cosserat 介质扩展本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4226-4232. (Yang Chunhe, Li Yinping. Expanded Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4226-4232. (in Chinese))
- [13] 李银平, 杨春和. 层状盐岩体的三维 Cosserat 介质扩展本构模型[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 509-513. (Li Yinping, Yang Chunhe. Three-dimensional expanded Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(4): 509-513. (in Chinese))
- [14] Adhikary D P, Dyskin A V. A cosserat continuum model for layered materials [J]. Computers and Geotechnics, 1997, 20(1): 15-45.
- [15] Adhikary D P, Dyskin A V, Jewell R J. Numerical modeling of the flexural deformation of foliated rock slopes [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1996, 33(6): 595-606.
- [16] Pant S R, Adhikary D P. Implicit and explicit modelling of flexural buckling of foliated rock slopes [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1999, 32(2): 157-164.
- [17] Adhikary D P, Dyskin A V. Modeling the deformation of underground excavations in layered rock masses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3-4): 714.
- [18] Tan X, Konietzky H, Frühwirth T, et al. Brazilian tests on transversely isotropic rocks: laboratory testing and numerical simulations [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(4): 1341-1451.
- [19] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. (Cai Meifeng, He Manchao, Liu Dongyan. Rock mechanics and engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体试验方法标准 (GB/T 50266-2013) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. Standard for test methods of engineering rock mass (GB/T 50266-2013) [S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese))
- [21] Tarasov B G, Randolph M F. Frictionless shear at great depth and other paradoxes of hard rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(3): 316-328.
- [22] Tang C A, Tham L G, Wang S H, et al. A numerical study of the influence of heterogeneity on the strength characterization of rock under uniaxial tension [J]. Mechanics of Materials, 2007, 39(4): 326-339.
- [23] Cai M, Kaiser P K, Tasaka Y, et al. Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2007, 44(2): 247-265.
- [24] Zienkiewicz O C, Pande G N. Time dependent multilaminate model of rocks—a numerical study of deformation and failure of rock masses [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1977, 1: 219-247.