

三轴压缩下含夹层盐岩破坏机制

马旭强¹, 施锡林¹, 尹洪武¹, 杨春和^{1,2}, 李银平¹, 马洪岭¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 针对三轴压缩试验中含夹层盐岩特殊的破坏形式和机制开展研究。基于夹层单元的受力平衡和界面剪应力的传递机制, 建立了夹层径向位移的微分方程, 通过求解该微分方程得到了界面剪应力、夹层应力和应变的理论公式, 并采用数值模拟验证了应力公式的准确性, 进而结合多种破坏准则分析了含夹层盐岩的两种破坏形式及其机制。结果表明: 界面剪应力和夹层应力分布不均匀, 其最大值一般分别在边缘和中心位置出现; 对于试样中夹层纵向劈裂, 计算显示夹层存在横向的拉应力或拉应变; 在一些试样界面边缘发现了环状白色裂纹, 这是由于界面边缘剪应力最大, 该处容易发生界面滑移破坏。夹层和界面的破坏会导致含夹层盐岩的密闭性降低, 研究成果可在这一方面提供参考。

关 键 词: 盐岩; 夹层; 界面; 三轴压缩; 破坏机制

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)02-0644-07

Failure mechanisms of salt rock with an interlayer under triaxial compression

MA Xu-qiang¹, SHI Xi-lin¹, YIN Hong-wu¹, YANG Chun-he^{1,2}, LI Yin-ping¹, MA Hong-ling¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources

and Environmental Disaster Control Engineering of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Triaxial compression tests were conducted on salt rock specimens with an interlayer to investigate its failure modes and failure mechanisms. Based on the force balance of an interlayer element and the transfer mechanism of shear stress on the interface, we established a differential equation of the interlayer's radial displacement. The theoretical formulas of shear stress on the interface, and stresses and strains of the interlayer were obtained by solving the differential equation. Numerical simulation was also performed to verify the accuracy of these stress formulas. Moreover, failure modes and failure mechanisms of salt rock with an interlayer are analysed by various failure criteria. It is found that shear stress on the interface and stress of the interlayer are not uniformly distributed, and their maximum values are typically in the edge and the centre. With regards to vertical splitting of the interlayer, calculations suggest that tensile stress or tensile strain in the horizontal direction occurs in the interlayer. A ring-shaped white crack is observed in the edge of the interface of some specimens, which is caused by the maximum shear stress on the interface. Thus, the sliding failure of the interface is prone to happen. The induced failures of the interface and the interlayer lead to a decrease in tightness of salt rock with an interlayer.

Keywords: salt rock; interlayer; interface; triaxial compression; failure mechanisms

1 引 言

由于具有孔隙度低、渗透率小、损伤自恢复和塑性变形能力大等优良特性, 盐岩被认为是石油、天然气地下储备的理想介质。然而, 我国盐岩矿床一般含有众多夹层, 如硬石膏层、泥岩层和钙芒硝

层。在这类含夹层盐岩中建造油气储库, 夹层和界面对储库的密闭性和稳定性有极大影响^[1-2], 因此, 对含夹层盐岩的破坏机制开展研究具有重要的意义。

目前对含夹层盐岩的研究分为力学试验^[3-9]、数值模拟^[10-11]、理论分析^[12-15] 3 个方面。由单轴和三

收稿日期: 2016-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51774266, No. 51404241, No. 41472285)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51774266, 51404241, 41472285).

第一作者简介: 马旭强, 男, 1987 年生, 博士, 主要从事盐穴储气库建造及稳定性分析方面的研究工作。E-mail: maxuqiang@yeah.net

通讯作者: 施锡林, 男, 1983 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事石油天然气地下储备方面的研究工作。E-mail: xslshi@whrsm.ac.cn

轴压缩试验发现, 某些含夹层盐岩的强度和刚度高于纯盐岩, 并且试样中夹层厚度越大该趋势越明显, 还观察到含夹层盐岩破坏形式比较复杂^[3-9]。在数值模拟方面, 王安明^[10]、徐珂^[11]等研究了单轴和三轴压缩下层状岩石试样中应力、位移或应变等的分布特征。在理论分析方面, 层状盐岩的已有本构模型^[12-14]能够考虑夹层体积含量对含夹层盐岩变形参数的影响, 但均以夹层和盐岩的界面黏合良好为前提假设, 并不能分析界面滑动的问题。刘伟等^[15]对含倾斜夹层盐岩体进行单轴压缩和三轴压缩试验, 并采用鲜学福等^[16]的方法推导了夹层和盐岩界面处的黏结约束应力, 但应力推导过程未涉及夹层厚度这一参数。所以, 含夹层盐岩的破坏机制有待进一步研究。

本文对含夹层盐岩试样中夹层的受力和变形开展理论分析, 求得界面剪应力、夹层应力和应变的公式, 进而分析了含夹层盐岩试样的两种破坏形式及其机制。

2 试样中夹层受力和变形分析

2.1 界面和夹层应力的解析解

三轴压缩试验中含夹层盐岩试样的示意图如图1所示。试样为圆柱形, 大部分为盐岩, 中间含一水平夹层, h 为夹层厚度, a 为试样半径, n 为轴向压力, p 为围压。

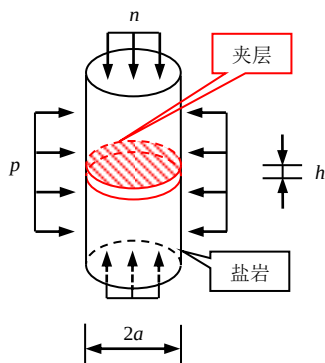


图1 三轴压缩试验中含夹层盐岩示意图
Fig.1 Schematic of salt rock with interlayer under triaxial compression

令坐标系 z 轴与试样轴线重合, xoy 面为水平面。从夹层中取出一微小单元进行应力分析, 如图2所示。图中, dr 为径向距离的微小增量, $d\theta$ 为切向弧度的微小增量, 其高度等于夹层厚度 h ; σ_n 、 τ_n 分别为夹层表面(以下称界面)的正应力和剪应力; σ_r 、 σ_θ 分别为夹层径向应力和切向应力。

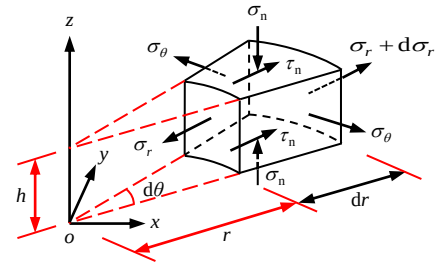


图2 夹层单元的应力
Fig.2 Stresses components of an interlayer element

由夹层单元径向上力的平衡, 得

$$(\sigma_r + d\sigma_r)h(r + dr)d\theta - \sigma_r h r d\theta - 2\sigma_\theta h dr \frac{d\theta}{2} + 2\tau_n \frac{d\theta}{2} [(r + dr)^2 - r^2] = 0 \quad (1)$$

式(1)略去微量并除以 $h r d\theta$, 得到夹层的应力平衡方程为

$$\sigma_r + r \frac{d\sigma_r}{dr} - \sigma_\theta + 2 \frac{r}{h} \tau_n = 0 \quad (2)$$

下面将式(2)中各应力以位移表示。

柱坐标系中胡克定律为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\sigma_z = \sigma_n = -n$; ε_r 、 ε_θ 分别为径向应变和切向应变; E 、 ν 分别为夹层的弹性模量和泊松比。

轴对称情况下, 几何方程为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{du}{dr} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{u}{r} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: u 为夹层的径向位移。

联立式(3)、(4), 得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{du}{dr} + \nu \frac{u}{r} \right) - \frac{\nu}{1-\nu} n \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1-\nu^2} \left(\nu \frac{du}{dr} + \frac{u}{r} \right) - \frac{\nu}{1-\nu} n \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

夹层与盐岩之间通过界面传递荷载。界面上剪应力大小与相对位移成正比^[17], 因此, 有

$$\tau_n = k(u_s - u) \quad (6)$$

式中: k 为界面的切向刚度; u_s 为盐岩的径向位移。

三轴压缩时, 纯盐岩试样的应力为 $\sigma_r = \sigma_\theta = -p$ 、 $\sigma_z = -n$ 。由式(3)、(4), 得

$$u_s = \frac{pV_s - p + nV_s}{E_s} r \quad (7)$$

式中: E_s 、 ν_s 分别为盐岩的弹性模量和泊松比。

将式 (5) ~ (7) 代入式 (2), 得

$$r \frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{du}{dr} - \frac{u}{r} + \frac{2(1-\nu^2)k}{Eh} r(u_s - u) = 0 \quad (8)$$

上式乘以 r , 整理为

$$r^2 \frac{d^2 u}{dr^2} + r \frac{du}{dr} - (1 + A^2 r^2) u = -BA^3 r^3 \quad (9)$$

$$\text{式中: } A = \left[\frac{2(1-\nu^2)k}{Eh} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad AB = \frac{pV_s - p + nV_s}{E_s}.$$

令 $\rho = Ar$, 式 (9) 改写为

$$\rho^2 \frac{d^2 u}{d\rho^2} + \rho \frac{du}{d\rho} - (1 + \rho^2) u = -B\rho^3 \quad (10)$$

式 (10) 右侧为 0 时即一阶虚宗量贝塞尔方程^[18]。求得式 (10) 的通解为

$$u = C_1 I_1(\rho) + C_2 K_1(\rho) + B\rho \quad (11)$$

式中: $I_1(\rho)$ 为 1 阶第一类虚宗量贝塞尔函数;

$K_1(\rho)$ 为 1 阶第二类虚宗量贝塞尔函数。

将 $\rho = Ar$ 代入式 (11)。由于试样轴线上 ($r=0$) 的点无径向位移, 而 $K_1(0)$ 为无穷大, 故 $C_2=0$ 。最终夹层的径向位移为

$$u = C_1 I_1(Ar) + AB r \quad (12)$$

将式 (7)、(12) 代入式 (6), 最终界面剪应力为

$$\tau_n = -C_1 k I_1(Ar) \quad (13)$$

由虚宗量贝塞尔函数的性质^[18], 得 u 的导数为

$$\frac{du}{dr} = \frac{C_1 A}{2} [I_0(Ar) + I_2(Ar)] + AB \quad (14)$$

式中: $I_0(r)$ 为 0 阶第一类虚宗量贝塞尔函数; $I_2(r)$ 为 2 阶第一类虚宗量贝塞尔函数。

夹层径向应变和切向应变为

$$\varepsilon_r = \frac{C_1 A}{2} [I_0(Ar) + I_2(Ar)] + AB \quad (15)$$

$$\varepsilon_\theta = C_1 \frac{I_1(Ar)}{r} + AB \quad (16)$$

同时, 求得夹层径向应力和切向应力为

$$\sigma_r = \frac{C_1 A E}{2(1-\nu^2)} [I_0(Ar) + I_2(Ar)] + \frac{C_1 E \nu}{1-\nu^2} \frac{I_1(Ar)}{r} + \frac{E}{1-\nu} AB - \frac{\nu}{1-\nu} n \quad (17)$$

$$\sigma_\theta = \frac{C_1 A E \nu}{2(1-\nu^2)} [I_0(Ar) + I_2(Ar)] + \frac{C_1 E}{1-\nu^2} \frac{I_1(Ar)}{r} + \frac{E}{1-\nu} AB - \frac{\nu}{1-\nu} n \quad (18)$$

由于 $r=a$ 时径向应力 $\sigma_r = -p$, 得系数

$$C_1 = \frac{(1+\nu) \left(\frac{p\nu - p + n\nu}{E} - \frac{p\nu_s - p + n\nu_s}{E_s} \right)}{\frac{A}{2} [I_0(Aa) + I_2(Aa)] + \frac{\nu}{a} I_1(Aa)} \quad (19)$$

2.2 夹层应力和应变的最大值

夹层变形破坏多表现为弹脆性, 求解夹层应力和应变的最大值对其破坏分析将有所帮助。

式 (15) ~ (18) 中涉及虚宗量贝塞尔函数, 此类函数均为 r 的增函数, 如图 3 所示。

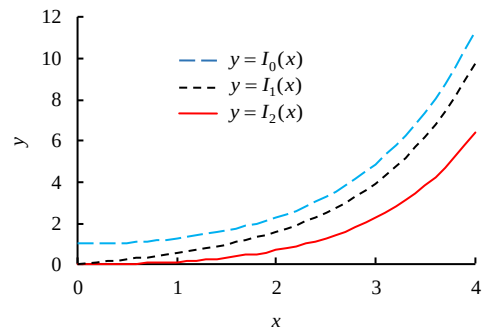


图3 虚宗量贝塞尔函数

Fig.3 Bessel function of imaginary argument

式 (16) ~ (18) 还包含 $I_1(Ar)/r$ 这一项, 其导数如下

$$\frac{d[I_1(Ar)/r]}{dr} = A \frac{I_2(Ar)}{r} \quad (20)$$

式 (20) 大于 0, 故 $I_1(Ar)/r$ 也是增函数。

另外, 考虑系数 C_1 的正负。分析式 (19), C_1 的正负仅与其分子中第 2 项有关, 即

$$\frac{p\nu - p + n\nu}{E} - \frac{p\nu_s - p + n\nu_s}{E_s} < 0 \quad (21)$$

式 (21) 成立时, $C_1 < 0$; 反之, $C_1 > 0$ 。

若式 (21) 成立, $C_1 < 0$, 夹层应力和应变随 r 增大而减小, 最大值在 $r=0$ 处出现, 其公式分别为

$$(\sigma_r)_{r=0} = (\sigma_\theta)_{r=0} = \frac{E}{1-\nu} \frac{AC_1 + 2AB}{2} - \frac{\nu}{1-\nu} n \quad (22)$$

$$(\varepsilon_r)_{r=0} = (\varepsilon_\theta)_{r=0} = \frac{C_1 A}{2} + AB \quad (23)$$

若式(21)不成立, 夹层应力和应变的最大值在 $r=a$ 处出现。

2.3 数值验证

为验证本文所得应力公式的准确性, 进行含夹层盐岩三轴压缩的数值模拟, 并将应力的理论值与模拟值进行对比。

试样半径 $a=0.05$ m, 夹层厚度 $h=0.01$ m。取竖向剖面的 $1/2$, 采用 FLAC^{2D} 软件在轴对称模式下计算, 数值模型如图4所示。试样轴线约束水平位移, 底端约束竖向位移。轴向压力 $n=30$ MPa, 围压 $p=5$ MPa。计算中采用的参数见表1。

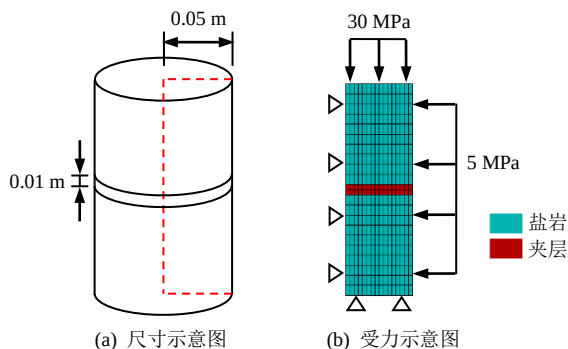


图4 数值模型
Fig.4 Numerical model

表1 计算参数表

Table 1 Calculating parameters

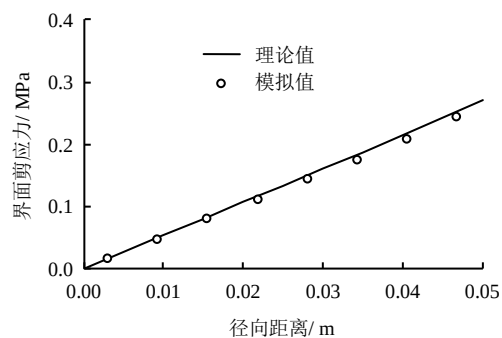
E / GPa	ν	E_s / GPa	ν_s	k / (GPa/m)
21.78	0.232	5.15	0.312	5.5

夹层与盐岩单元交界处设置接触面单元, 从中读取界面剪应力。夹层径向应力和切向应力从其网格单元中读取。相关应力公式依次为式(13)、(17)、(18)。两种方法的计算结果如图5所示。

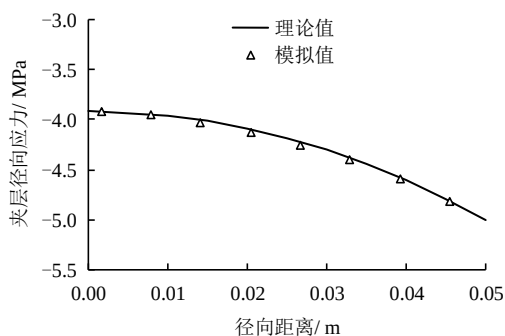
图5中, 各应力的理论值与模拟值基本一致, 说明相关应力公式具有较好的准确性。并且, 图中具体表现了界面和夹层应力分布的特点。

3 含夹层盐岩的破坏形式和机制

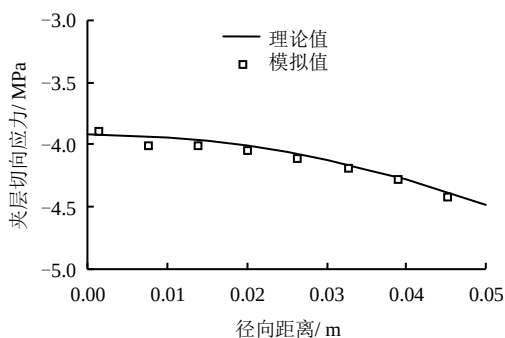
本文研究团队前期对含夹层盐岩试样开展了大量系统的单轴压缩和三轴压缩试验^[3-7], 由试验发现含夹层盐岩的破坏形式主要有以下两种: ①夹层纵



(a) 界面剪应力



(b) 夹层径向应力



(c) 夹层切向应力

图5 各应力的理论值和模拟值对比

Fig.5 Stresses calculated by the theory and numerical simulation

向劈裂, 带动盐岩层的张拉破坏, 界面仍为黏合状态; ②盐岩显著扩容, 界面滑移破坏。下面分别介绍两种破坏形式并分析其机制。

(1) 夹层纵向劈裂

含夹层盐岩试样在单轴压缩试验后产生拉裂缝, 见图6, 拉裂纹产生于夹层并延伸到盐岩层。某些低围压的三轴压缩试验中也出现这种破坏。

通过声发射定位可以清晰地显示单轴压缩下含泥盐岩的破损过程^[7], 见图7。该试样中下部含泥较多(黑灰色), 声发射点首先出现于该处、并且主要分布在这一层。

文献[4, 14]分析夹层首先破坏的原因: 含夹层盐岩受垂直于层面的法向压缩荷载时, 由于层间位

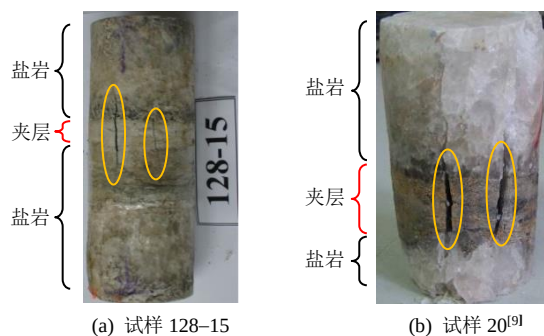


图6 夹层纵向劈裂
Fig.6 Vertical splitting of the interlayer

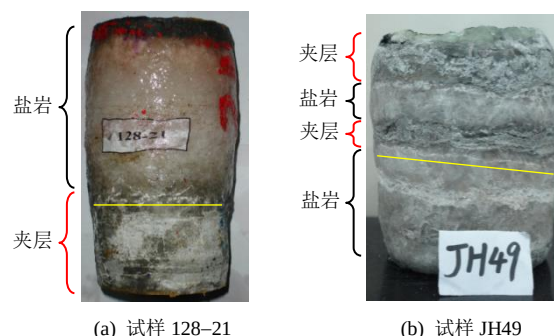
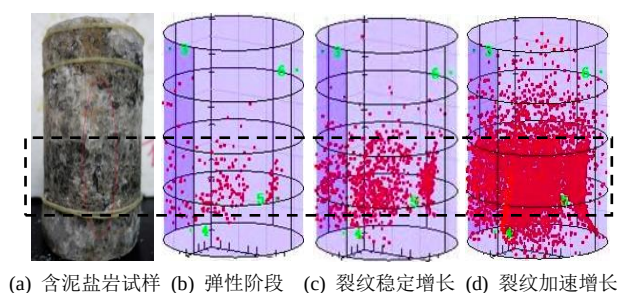


图8 界面滑移破坏
Fig.8 Sliding failure of the interface



(a) 含泥盐岩试样 (b) 弹性阶段 (c) 裂纹稳定增长 (d) 裂纹加速增长

图7 含泥盐岩单轴压缩过程中声发射点定位图^[7]
Fig.7 Location of acoustic emission data during uniaxial loading of mud salt rock^[7]

移协调, 等效地在刚度较大 (侧向变形能力较小) 的夹层中施加附加横向拉应力, 而在刚度较小 (侧向变形能力较大) 的盐岩中施加附加横向压缩应力。

式 (21) 即是对夹层和盐岩侧向变形能力的比较。图 5 中夹层径向应力、切向应力与围压 5 MPa 相比, 显示夹层受到附加横向拉应力。除拉应力外, 也可能是拉应变引起夹层劈裂, 故综合考虑

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &\geq \sigma_t \\ \varepsilon_1 &\geq \varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

式中: σ_1 为最大主应力; σ_t 为抗拉强度; ε_1 为最大主应变; ε_t 为极限拉应变。

图 6 试样 128-15 的半径 $a = 4.1$ cm, 夹层厚度 $h = 1.8$ cm, 围压 $p = 0$, 最大轴向压力 $n = 23.29$ MPa, 弹性模量等参数见表 1, 夹层抗拉强度为 2.20 MPa, 极限拉应变为 1.01×10^{-4} 。由于式 (21) 成立, 按式 (22)、(23) 计算夹层应力和应变的最大值, 得 $\sigma_1 = 0.48$ MPa、 $\varepsilon_1 = 2.65 \times 10^{-4}$ 。所以, 试样 128-15 夹层纵向劈裂由拉应变引起的可能性较大。

(2) 界面滑移破坏

三轴压缩试验中一些试样的盐岩层显著扩容, 界面边缘最终发生滑移破坏, 在该处发现环状白色裂纹, 见图 8 线段位置。

相比, 图 6 中试样的界面未出现以上现象。

采用摩尔-库仑准则分析界面滑移破坏的发生, 其公式为

$$\tau_n \geq c_n + n \tan \varphi_n \quad (25)$$

式中: c_n 、 φ_n 为界面的黏聚力和内摩擦角。

由于夹层水平, 界面正应力 n 是均匀的。而界面剪应力 τ_n 在 $r = a$ 处最大。所以, 界面边缘首先滑移破坏。

图 8 试样中盐岩已有较大塑性变形, 由式 (13) 计算的界面剪应力偏小。图 6 试样 128-15 塑性变形不大, 计算界面剪应力最大为 0.260 MPa, 由于剪应力值很小, 其界面未发生滑移破坏。

4 界面切向刚度的讨论

式 (13)、(17)、(18) 等应力公式中包含界面切向刚度 k , 说明界面切向刚度与应力分布有关, 因此它也将影响含夹层盐岩的破坏。但是界面切向刚度的取值有以下问题值得探讨。

由结构面直剪试验可得到剪切变形曲线, 通常取“弹性区”剪切变形曲线的斜率为切向刚度。表 1 界面切向刚度 k 取 5.5 GPa/m, 是根据文献[19]界面直剪试验的剪切变形曲线, 按以上方法求得。

但即便在“弹性区”, 结构面的剪切变形也不可能完全恢复^[20]。由于两个剪切盒之间含 10 mm 砂层^[19], 该厚度上盐岩和夹层也会变形 (特别是盐岩容易变形), 故总位移大于界面上相对位移, 见图 9。然而, 界面切向刚度的计算与界面上相对位移有关, 所以 $k > 5.5$ GPa/m。

而当 $k = 26.5$ GPa/m, 试样 128-15 夹层拉应力等于抗拉强度。所以, 这类含夹层盐岩界面切向刚度为 5.5~26.5 GPa/m。这可为盐穴储库数值模拟时参数取值提供参考。

另外, 界面直剪试验可考虑缩小两个剪切盒的间距, 以减小总位移和界面上相对位移的差异。

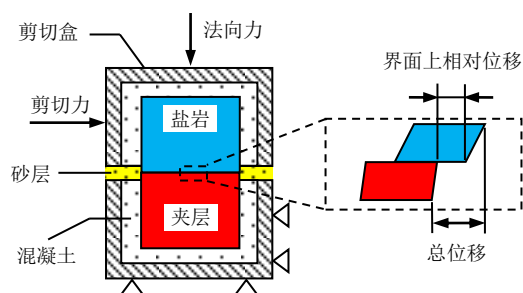


图9 直剪试验中总位移和界面上相对位移的差异
Fig.9 Difference of total displacement and relative displacement on interface in direct shear test

5 结 论

(1) 对三轴压缩下含夹层盐岩试样中夹层的受力和变形进行理论分析, 求得界面剪应力、夹层应力和应变的公式。发现界面剪应力和夹层应力分布不均匀, 界面剪应力的最大值在边缘处, 夹层径向应力和夹层切向应力的最大值一般在中心位置。

(2) 三轴压缩试验中含夹层盐岩第1种破坏形式是夹层纵向劈裂, 带动盐岩层的张拉破坏, 界面仍为黏合状态。计算显示夹层存在横向的拉应力或拉应变。

(3) 三轴压缩试验中含夹层盐岩第2种破坏形式是盐岩显著扩容, 界面滑移破坏。由于夹层水平, 界面正应力是均匀的, 而界面边缘剪应力最大, 所以界面边缘处首先滑移破坏。并且, 该处界面滑移破坏会产生环状白色裂纹。

参 考 文 献

- [1] BRUNO M, DOREMANN L, HAN G, et al. 3D Geomechanical analysis of multiple caverns in bedded salt[C]//Solution Mining Research Institute 2005 Fall Meeting. Nancy, France: [s.n.], 2005: 2—5.
- [2] 黄小兰, 杨春和, 李银平. 蠕变作用下层状盐岩界面剪切应力变化规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 547—551.
HUANG Xiao-lan, YANG Chun-he, LI Yin-ping. Interface shear stress distribution of bedded salt rock considering rheology effect[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(3): 547—551.
- [3] LIANG W, YANG C, ZHAO Y, et al. Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2007, 44: 400—411.
- [4] 李银平, 刘江, 杨春和. 泥岩夹层对盐岩变形和破坏特征的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2461—2466.
LI Yin-ping, LIU Jiang, YANG Chun-he. Influence of mudstone interlayer on deformation and failure characteristics of salt rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(12): 2461—2466.
- [5] 杨春和, 李银平, 屈丹安, 等. 层状盐岩力学特性研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(4): 484—494.
YANG Chun-he, LI Yin-ping, QU Dan-an, et al. Advances in researches of the mechanical behaviors of bedded salt rocks[J]. *Advances in Mechanics*, 2008, 38(4): 484—494.
- [6] 姚院峰, 杨春和, 纪文栋, 等. 两种不同沉积类型界面盐岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 265—272.
YAO Yuan-feng, YANG Chun-he, JI Wen-dong, et al. Experimental study of mechanical property of two types of sedimentary salt rock with interface[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(2): 265—272.
- [7] 李浩然, 杨春和, 刘玉刚, 等. 单轴荷载作用下盐岩声波与声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2107—2116.
LI Hao-ran, YANG Chun-he, LIU Yu-gang, et al. Experimental study of ultrasonic velocity and acoustic emission properties of salt rock under uniaxial compression load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(10): 2107—2116.
- [8] 徐杨梦迪, 刘建锋, 徐慧宁, 等. 含杂质盐岩加载全过程的渗透试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊1): 402—408.
XU-YANG Meng-di, LIU Jian-feng, XU Hui-ning, et al. Experimental study of permeability of salt rock with impurities in whole process of loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(Supp.1): 402—408.
- [9] 唐明明, 王芝银, 丁国生. 淮安盐岩及含泥质夹层盐岩应变全过程试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 2712—2719.
TANG Ming-ming, WANG Zhi-yin, DING Guo-sheng. Experimental study of full process of strain of rock salt and salt-mudstone interlayer in huai'an salt mine[J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.1): 2712—2719.
- [10] 王安明, 杨春和, 黄诚, 等. 层状盐岩力学和变形特性数值试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2173—2178.
WANG An-ming, YANG Chun-he, HUANG Cheng, et al. Numerical experiment study of deformation and mechanical properties of layered salt rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2173—2178.
- [11] 徐珂, 戴俊生, 付晓龙, 等. 基于有限元法的层状岩体破裂规律探讨[J]. 地质力学学报, 2015, 21(3): 330—340.
XU Ke, DAI Jun-sheng, FU Xiao-long, et al. Discussion on the fracture of layered rock mass based on the finite element method[J]. **Journal of Geomechanics**, 2015, 21(3): 330—340.
- [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 Chun-he, LI Yin-ping. The expanded cosserat medium constitutive model for laminated salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(23): 4226—4232.
- [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 Yin-ping, YANG Chun-he. The three-dimensional expanded Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(4): 509—513.
- [14] 曹林卫, 彭向和, 任中俊, 等. 三轴压缩下层状盐岩体细观损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2304—2311.
CAO Lin-wei, PENG Xiang-he, REN Zhong-jun, et al. Mesoscopic damage constitutive model of bedded salt rock mass under triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(11): 2304—2311.
- [15] 刘伟, 李银平, 尹栋梁, 等. 含倾斜夹层盐岩体变形与破损特征分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 645—652.
LIU Wei, LI Yin-ping, YIN Dong-liang, et al. Analysis of deformation and fracture characteristics of salt rock with tilted interlayer[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(3): 645—652.
- [16] 鲜学福, 谭学术. 层状岩体破坏机制[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
XIAN Xue-fu, TAN Xue-shu. Failure mechanism of stratified rock mass[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1989.
- [17] 王明恕, 何修仁, 郑雨天. 全长锚固锚杆的力学模型及其应用[J]. 金属矿山, 1983, (4): 24—29.
WANG Ming-shu, HE Xiu-ren, ZHENG Yu-tian. The mechanics model and application of fully grouted rockbolt[J]. **Metal Mine**, 1983, (4): 24—29.
- [18] 梁昆淼. 数学物理方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 287—293.
LIANG Kun-miao. Method of mathematical physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 287—293.
- [19] 李银平, 蒋卫东, 刘江, 等. 湖北云应盐矿深部层状盐岩直剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1768—1771.
LI Yin-ping, JIANG Wei-dong, LIU Jiang, et al. Direct shear test for layered salt rocks of Yunying salt mine in Hubei province[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1768—1771.
- [20] 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: 91—92.
CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU Dong-yan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 91—92.