

文章编号: 1000-7598(2010)12-3964-07

层状盐岩蠕变变形相互作用研究

王安明¹, 李小根¹, 杨春和², 黄志全¹

(1. 华北水利水电学院, 郑州 450011; 2. 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, 武汉 430071)

摘要: 考虑泥岩夹层和盐岩的弹性性质和稳态蠕变性质, 通过数值试验方法计算层状复合盐岩体在单轴和低围压三轴荷载作用下蠕变变形过程中力学相互作用和变形时效规律, 分析泥岩夹层和盐岩层因蠕变率不匹配对层状盐岩蠕变的影响, 初步讨论了层状复合岩体的复合材料研究方法。结果表明, 层状盐岩中泥岩夹层与盐岩因弹性参数不匹配产生的初始应力集中在蠕变过程中发生松弛, 因泥岩夹层与盐岩层蠕变率不匹配导致两者之间应力重分布, 泥岩夹层对盐岩层的蠕变有明显抑制作用。这些分析体现了层状盐岩蠕变过程的非线性性质, 为建立层状盐岩体合理本构模型奠定了基础。

关键词: 层状盐岩; 蠕变率不匹配; 应力重分布; 数值试验方法

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

Study of interaction between creep deformation of bedded salt rock

WANG An-ming¹, LI Xiao-gen¹, YANG Chun-he², HUANG Zhi-quan¹

(1. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Considering elasticity and steady-state creep of mudstone and salt rock, numerical experiment approaches are employed to study mechanics and time-dependent law of bedded salt rock under uniaxial and low confining pressure triaxial loadings; the effect of creep rate mismatch between salt rock and mudstone on the creep of bedded salt rock is analyzed. Finally, composite material research methods of laminated composite are preliminary discussed. It is shown that the initial concentrated stresses induced by elastic parameters mismatch are relaxed in the process of creep; stress redistribution induced by creep rate mismatch between salt rock and mudstone is exhibited; interlayer(mudstone) with relatively small steady creep rate obviously influences the creep of bedded salt rock. These analyses reflect the nonlinear creep behavior of bedded salt rock, so as to lay the basis for establishing constitutive law in the future.

Key words: bedded salt rock; creep rate mismatch; stress redistribution; numerical experiment approaches

1 引言

与国外大量存在的“盐丘型”储层条件不同, 我国盐岩层分布存在着盐岩层数多、单层厚度薄、盐岩体中一般含有众多夹层(如泥岩层等)的独有特点, 其一般为盐岩中含有不同厚度水平泥岩夹层和盐岩层交替出现的互层盐岩体, 这也常常称之为层状盐岩体^[1]。与普通的各层力学性质相同的层状岩体^[2]相比, 这种互层盐岩体主要存在层状不均匀岩性问题和不同岩层之间差异变形问题^[3-4]。前期试验研究结果^[1]表明, 层状盐岩界面连接完整, 不是一个弱面。在此情况下, 一方面, 由于盐岩层和

泥岩夹层有不同的弹性参数, 从而受力时因弹性参数不匹配产生应力集中问题和差异变形问题, 在前期笔者已经对此进行了研究^[5]; 另一方面, 盐岩层、泥岩层都具有较为明显的蠕变力学特性^[1], 但在蠕变过程中由于蠕变速率的差异使得两相之间产生相互作用, 应力在两者之间连续不断传递, 从而在两相之间进行应力重分配, 最终使得层状盐岩的蠕变呈现明显的非线性性质^[6]。可以看出, 当泥岩和盐岩都蠕变时, 层状盐岩力学和变形机制变得异常复杂。

当前, 研究者们对层状盐岩开展了大量的试验研究和理论分析^[1, 6-11], 这些试验和理论研究方法主要解决宏观破损特征和复合体等效刚度复合效应

收稿日期: 2009-04-23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(No. 2009CB724602); 国家自然科学基金项目(No. 51004049); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目; 河南省教育厅2010年度自然科学研究计划项目(No. 2010A480002); 华北水利水电学院高层次人才基金项目。

第一作者简介: 王安明, 男, 1975年生, 博士, 副教授, 主要从事层状盐岩力学特性和地下工程稳定性等方面的工作。E-mail: wam992001@163.com

问题,初步分析了泥岩夹层对盐岩力学特性的影响。一些专家学者非常关心的层状盐岩差异变形问题,特别是因蠕变率不匹配引起的差异变形问题^[3-5, 11],并没有进行深入的研究。

本文用数值试验方法对层状盐岩的蠕变变形相互作用进行研究, 分析在单轴压缩和低围压三轴压缩试样中盐岩和夹层蠕变率不匹配引起的差异变形问题, 进而研究泥岩夹层对盐岩蠕变力学特性的影响。

2 有限元模型和计算方案

为了深入研究层状盐岩蠕变应力-应变分布, 用 ABAQUS 有限元方法对层状盐岩进行分析, 笔者建立了单轴和三轴两种计算方案的分析模型, 在两种分析模型中取盐岩弹性模量 $E = 5.15 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.31$; 泥岩夹层 $E = 21.78 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.23$ 。忽略两种岩石的初始蠕变, 其稳态蠕变本构均遵守 Norton 本构模型^[1], 方程的形式为: $\dot{\epsilon}_{\text{cr}} = A_0 \sigma^{-n}$, $\dot{\epsilon}_{\text{cr}}$ 为蠕变应变率, A_0 、 n 为材料参数, 盐岩 $A_0 = 1.12 \times 10^{-8}$, $n = 3.8$; 泥岩 $A_0 = 5.0 \times 10^{-10}$, $n = 4.35$, 蠕变时间为 1 a 。

(1) 单轴加载计算方案

建立中间一层为泥岩,其上下均为同厚度盐岩层的层状盐岩模型(如图 1(a)所示),模型竖向厚度和水平厚度均为 10 m。为了进行对比分析,计算过程中保持层状盐岩模型竖向总厚度 10 m 不变,改变泥岩夹层的厚度,则有:①夹层厚度为 0.1 m,两侧盐岩层厚度为 4.95 m, $\alpha = 0.01$;②夹层厚度为 0.5 m,两侧盐岩层厚度为 4.75 m, $\alpha = 0.05$;③夹层厚度为 1 m,两侧盐岩层厚度为 4.50 m, $\alpha = 0.11$;④夹层厚度为 1.5 m,两侧盐岩层厚度为 4.25 m, $\alpha = 0.176$;⑤夹层厚度为 2 m,两侧盐岩层厚度为 4.0 m, $\alpha = 0.25$ 。在其顶面施加单轴压缩荷载 10 MPa,加载后均保持荷载不变,使其开始蠕变,假定层状盐岩中的界面黏结完好,没有发生滑移或嵌入,采用对称边界条件,在模型对称面上施加法向约束,在模型底边施加竖向约束,其水平方向自由变形。为了更加细致地模拟界面处的细观应力和应变,将界面附近的网格划分得密一些,根据模型特点,将其简化为二维平面应变模型,选取层状盐岩界面上应力集中比较明显的 A 、 B 点^[5]和路径 1,对计算结果进行分析,其中 A 、 B 点分别位于图 1(a)所示模型夹层与盐岩层的上界面靠近对称中心处和右侧边界处,路径 1 为此节点所在的界面。图 1(a)给出了其中夹层厚度为 1 m,两侧盐岩层厚度均为 4.5 m

$\alpha=0.11$ 的层状盐岩有限元模型、网格划分、加载及其边界条件。

(2) 三轴加载计算方案

对两种模型进行三轴加载,第1种模型如图1(a)所示;第2种模型如图1(b)所示,其中间一层为盐岩层,其上下均为同厚度的泥岩夹层,计算过程中保持盐岩层厚度为6 m不变,设计两侧夹层厚度依次为0.1、1、2、3 m,选取两个路径进行分析(水平路径位于盐岩层的中间,而竖向路径位于右侧边界处),研究当两侧泥岩夹层厚度变化时其中盐岩层的蠕变规律。这两类模型加载时均施加围压5 MPa,轴压20 MPa,然后保持荷载不变并开始蠕变,其余的模型材料性质、网格、边界条件等均与单轴加载方案一致。

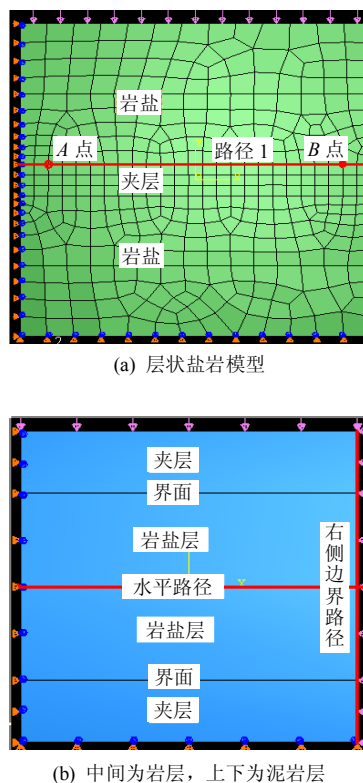


图1 层状盐岩有限元模型、网格划分、加载及其边界条件
Fig.1 Finite element model, mesh cuttings, loading, boundary conditions of bedded salt rock

3 单轴压缩下层状盐岩蠕变过程分析

3.1 因蠕变率不匹配导致应力重分布问题

(1) 在 A 点附近

图 2、3 给出了蠕变变形过程中不同夹层含量时界面处 A 点两侧盐岩层和泥岩夹层中的应力演化过程。从图 2 来看, 蠕变开始前, 为了达到力学平衡, 在 A 点泥岩夹层中均分布着较大的拉应力集中 (以受拉为正), 并且夹层厚度越小的地方, 其集中的拉

应力也越大,这是作为蠕变开始前的初始应力,蠕变初始时间阶段,集中的拉应力迅速减小,蠕变1 a后,应力仍持续发生松弛,在夹层厚度越小时,其夹层中的应力松弛变得越容易。当夹层含量 $\alpha = 0.01$ 时,蠕变1 a后夹层中的应力从10.3 MPa降低到0.76 MPa,而相比较而言,在泥岩夹层厚度比 $\alpha = 0.176$,夹层中的应力仅仅从4.9 MPa降低到-0.02 MPa,在夹层含量大处,其最终松弛后的应力依然比较大,而夹层厚度为2 m的模型,其夹层中的拉应力变成了压应力,其余模型夹层中仍然为拉应力。

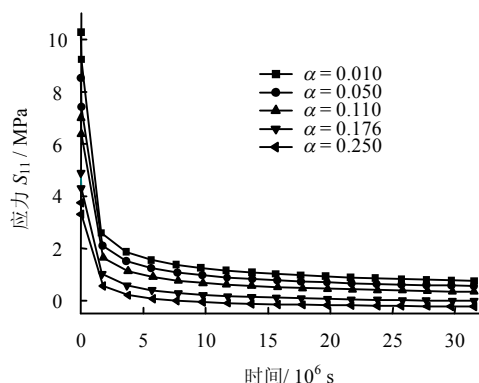


图2 不同 α 时界面处A节点夹层中的拉应力变化
Fig.2 Tensile stress evolution of node A in the interlayer for different values of α

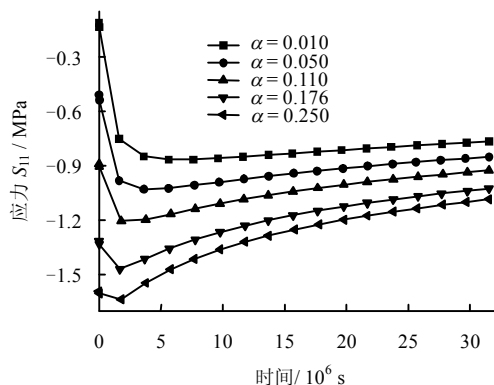


图3 不同 α 时界面处A节点盐岩层中压应力变化
Fig.3 Compressive stress evolution of node A in the interlayer for different values of α

从图3来看,蠕变开始前5个模型中界面处A点盐岩层一侧均为压应力。蠕变1 a后,夹层厚度较小的模型,其中盐岩层的应力增加。当夹层厚度为0.1 m时,夹层中的应力从0.11 MPa增加到0.77 MPa;但夹层厚度较大的模型,其中的盐岩层的应力有所减小。在夹层厚度为1.5 m时,夹层中的应力仅仅从1.59 MPa降低到1.08 MPa。结合对图2的分析可知,在泥岩夹层中观察到应力松弛,

应力传递到盐岩层中,应力发生了重分布。

(2) 在B点附近

图4给出了蠕变变形过程中不同夹层含量时层状盐岩界面处B点盐岩一侧剪应力演化过程。由图4可知,蠕变开始前,在界面上B点盐岩一侧分布着较大的剪应力集中^[5],在夹层厚度较大处其剪应力集中也都比较大,这作为蠕变开始前的初始剪应力。蠕变开始阶段,这个集中的剪应力下降较快,蠕变1 a后,剪应力也在持续发生松弛,剪应力越大时其中的应力松弛也越大。比如,当夹层厚度为1 m时,界面剪应力从1.37 MPa降低到0.17 MPa;而在夹层厚度为0.1 m时,剪应力从0.27 MPa降低到0.04 MPa,蠕变之前初始剪应力比较大处,其松弛后残余剪应力也依然比较大。

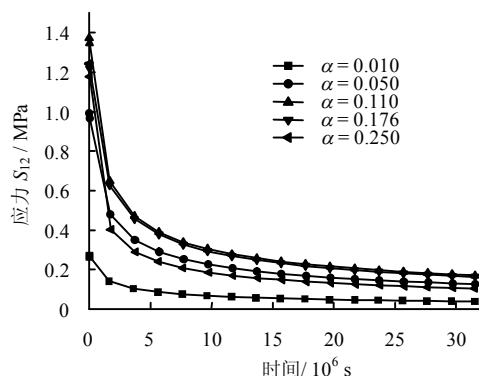


图4 不同泥岩夹层与盐岩层厚度比 α 时界面处B节点盐岩层一侧的剪应力变化
Fig.4 Shear stress evolution of node B in the salt rock along the interface for different values of α

(3) 在层状盐岩界面路径1上

为了研究层状盐岩蠕变过程中其界面处应力和应变的演化过程,现选取前文的第③类模型(夹层厚度为1 m)的计算结果进行分析,图5~8给出了蠕变变形过程中不同夹层含量时层状盐岩界面路径1上应力和应变的演化过程。从图5来看,在10 MPa单轴压力下蠕变前后沿路径1泥岩夹层中的拉应力 S_{11} 均松弛很大,在右侧界面处拉应力变成了蠕变之后的压应力(负值);而从图6来看,蠕变之前这个位置盐岩层中的压应力较界面其他位置均大很多,集中较明显,蠕变之后全界面盐岩层一侧的压应力变得基本一致。

图7给出10 MPa单轴压力下蠕变前后沿路径1界面处盐岩层一侧剪应力 S_{12} 变化。由图可知,蠕变开始前在层状盐岩内部界面剪应力均很小,而在右侧边缘界面处剪应力集中很明显;蠕变之后,原来剪应力集中很明显的右侧边缘界面处剪应力松弛

很大, 全界面剪应力几乎等于 0。

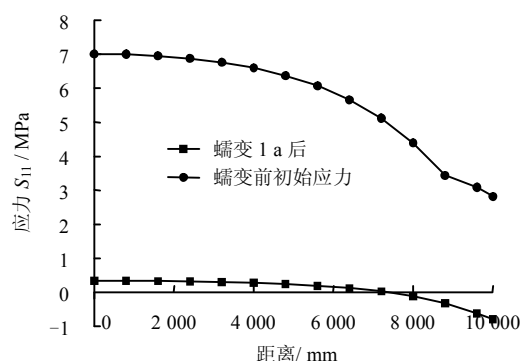


图 5 10 MPa 单轴压力下沿路径 1 蠕变前后泥岩夹层中的拉应力 S_{11} 变化

Fig.5 Tensile stress S_{11} evolution in the interlayer for path 1 under uniaxial loading of 10 MPa before and after creep

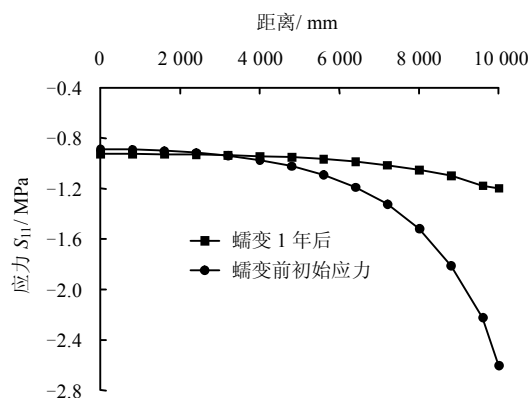


图 6 10 MPa 单轴压力下沿路径 1 蠕变前后盐岩层中的压应力 S_{11} 变化

Fig.6 Compressive stress S_{11} evolution in the salt rock for path 1 under uniaxial loading of 10 MPa before and after creep

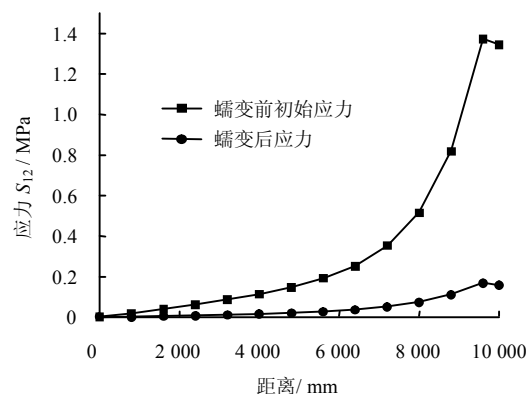


图 7 10 MPa 单轴压力下蠕变前后沿路径 1 盐岩层一侧的剪应力 S_{12} 变化

Fig.7 Shear stress S_{12} evolution for path 1 in the salt rock under uniaxial loading of 10 MPa before and after creep

图 8、9 给出 10 MPa 单轴压力下沿路径 1 蠕变 CE_{11} 分布。由图 8 可以看出, 在层状盐岩的全部界面处, 夹层和盐岩层的蠕变 CE_{11} 都较大, 但盐岩层

的蠕变 CE_{11} 均大于泥岩夹层的蠕变 CE_{11} ; 而从图 9 可以看出, 右侧边缘界面处盐岩层蠕变 CE_{12} 远大于其夹层中蠕变, 而在层状盐岩界面中间区域, 蠕变 CE_{12} 基本为 0, 在右侧边界界面处发生一定的蠕变变形, 其中以剪切变形为主。

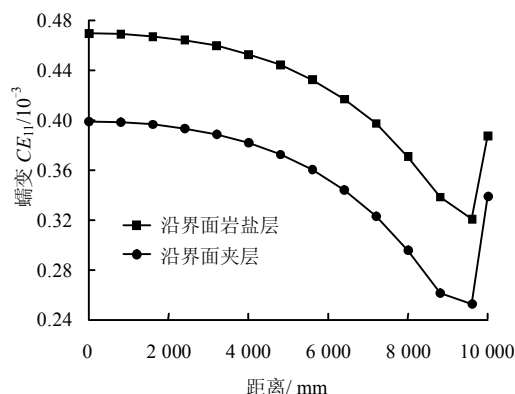


图 8 10 MPa 单轴压力下沿路径 1 盐岩层以及泥岩夹层蠕变 CE_{11} 的变化

Fig.8 Creep strain CE_{11} evolution in the interlayer and salt rock for path 1 under uniaxial loading of 10 MPa

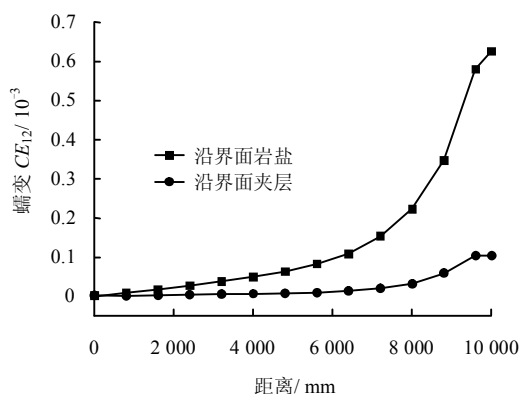


图 9 10 MPa 单轴压力下沿路径 1 盐岩层以及泥岩夹层蠕变 CE_{12} 变化

Fig.9 Creep strain CE_{12} evolution in the interlayer and salt rock for path 1 under uniaxial loading of 10 MPa

3.2 因应力重分布对层状盐岩蠕变效应的影响

应力重分布对层状盐岩的蠕变变形也有着直接影响, 这一点能够从图 10 给出的蠕变 CE_{22} 累积图中看出, 当泥岩夹层变得越来越厚时, 在层状盐岩中会产生越少的蠕变应变积累, 单从图 2、3 给出的界面处 A 点的应力变化过程可以看出, 夹层厚度小时, 夹层应力松弛大, 此时盐岩层应力增加; 而夹层厚度大时, 夹层应力松弛较小, 但盐岩层应力松弛快。尽管泥岩夹层厚度要比盐岩层小很多, 但含有更厚泥岩夹层层状盐岩的蠕变要比含有更薄泥岩夹层层状盐岩的蠕变来得小, 先前的蠕变试验研究表明^[1], 这个蠕变过程依赖于盐岩层的蠕变变形。

而不是泥岩夹层的蠕变变形, 显然夹层含量对层状盐岩蠕变的影响也说明泥岩的稳态蠕变率比盐岩的稳态蠕变率低很多。

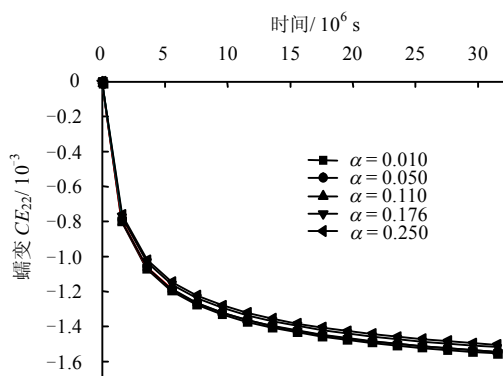


图 10 不同泥岩夹层与盐岩层厚度比 α 时层状盐岩蠕变 CE_{22} 变化

Fig.10 Creep strain CE_{22} evolution in the bedded salt rock for different values of α

4 三轴荷载下层状盐岩蠕变分析

4.1 对第 1 种模型的分析

研究表明, 当三轴加载状态下, 围压比轴压小很多时, 层状盐岩内部的应力分布与单轴压缩时比较一致^[5], 而蠕变过程中其内部的应力演化过程也与前文单轴压缩时比较类似, 下面给出 2 个比较典型的应力演化过程图。

图 11、12 给出了三轴加载时蠕变过程中层状盐岩界面路径 1 上应力演化过程, 从图 11 可以看出, 在蠕变之前层状盐岩内部界面夹层一侧多为拉应力, 而在其右侧界面处夹层一侧为压应力; 蠕变 1 a 后, 内部拉应力变成了压应力 (负值), 右侧界面处压应力有所松弛, 且从图中可以看出, 蠕变之后全界面夹层的压应力大小基本一致。

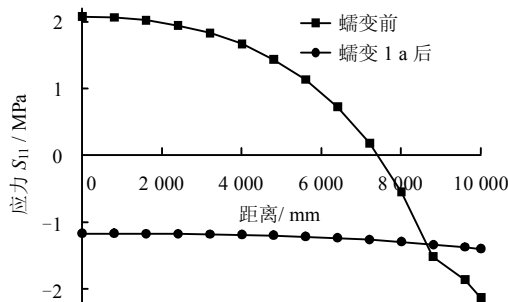


图 11 三轴荷载下沿路径 1 蠕变前后泥岩夹层中的拉应力 S_{11} 变化 (围压为 5 MPa, 轴压为 20 MPa)

Fig.11 Tensile stress S_{11} evolution in the interlayer for path 1 under triaxial loading before and after creep (confining pressure 5 MPa, partial pressure 20 MPa)

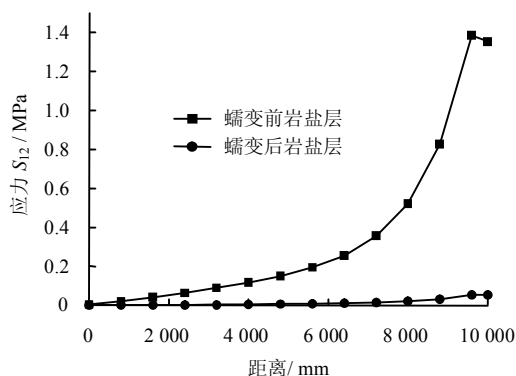


图 12 三轴荷载下沿路径 1 蠕变前后界面处盐岩层一侧剪应力 S_{12} 变化 (围压为 5 MPa, 轴压为 20 MPa)

Fig.12 Shear stress S_{12} evolution along the interface in the salt rock for path 1 under triaxial loading before and after creep (confining pressure 5 MPa, partial pressure 20 MPa)

而从图 12 来看, 蠕变开始前在层状盐岩内部界面盐岩层一侧剪应力均较小, 而在右侧边缘界面处盐岩层一侧剪应力集中明显; 蠕变之后, 这些剪应力集中明显处剪应力松弛很大, 全界面盐岩层一侧剪应力几乎等于 0, 这个与单轴加载时变化规律基本一致。

4.2 对三轴加载第 2 种模型的分析

为了研究低围压时因蠕变率不匹配而导致的泥岩夹层对盐岩蠕变的影响, 本文进行了如图 1(b) 的三轴压缩计算, 图 13、14 给出了在三轴压缩荷载下不同夹层厚度时沿盐岩层中间的水平路径和层状盐岩右边界的竖向路径蠕变 1 a 后的蠕变大小图。由图 13 可以看出, 在盐岩层两边夹层厚度为 0.1 m 时, 在内部和右侧边界处盐岩层的蠕变大小 CE_{11} 基本一致, 但当盐岩层两侧夹层厚度越来越大时, 其内部的蠕变 CE_{11} 要明显小于右侧边界处的蠕变 CE_{11} ,

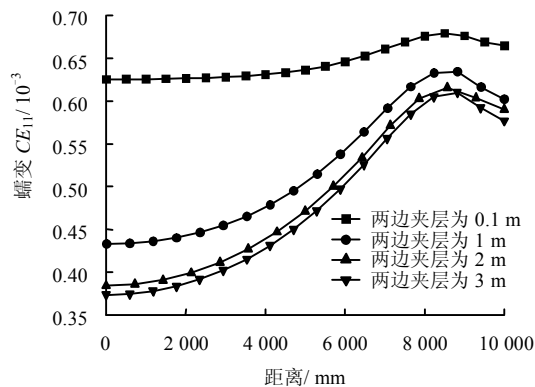


图 13 两边夹层厚度不同时沿盐岩层中间水平路径蠕变 CE_{11} 的变化 (围压为 5 MPa, 轴压为 20 MPa)

Fig.13 Creep strain CE_{11} evolution in the middle of salt rock for horizontal path for different interlayer thicknesses (confining pressure 5 MPa, partial pressure 20 MPa)

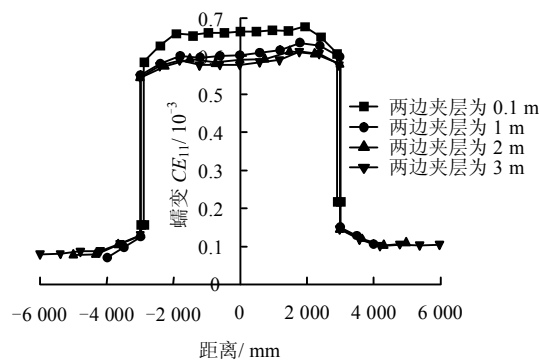


图 14 两边夹层厚度不同时沿层状盐岩右侧边界路径蠕变 CE_{11} 的变化 (围压为 5 MPa, 轴压为 20 MPa)

Fig.14 Creep strain CE_{11} evolution at the border of bedded salt rock for vertical path for different interlayer thicknesses (confining pressure 5 MPa, partial pressure 20 MPa)

并且盐岩层两侧夹层厚度越大时, 沿整个水平路径盐岩层的蠕变就越小; 而从图 14 可以看出, 沿右侧边界处盐岩层的蠕变要明显大于其两侧夹层的蠕变, 并且当盐岩层两侧夹层厚度越小时, 此盐岩层的蠕变就越大, 可见夹层对盐岩层的蠕变起明显抑制作用。

5 讨 论

层状盐岩中盐岩与泥岩夹层之间的相互作用问题, 其实质是两相或多相复合之间的相互作用问题, 这一问题在复合材料学科中是一个热点问题^[12-13]。但对于岩土工程复合体, 特别是层状复合岩体, 当前多半关心的是其宏观力学特性, 对于两相之间的力学相互作用, 特别是蠕变力学相互作用, 很少有涉及, 本文取出复合体从细观上进行分析, 其思路和复合材料细观力学有限元方法^[13]是一致的。从力学机制上来看, 夹层对盐岩层的“增强和蠕变抑制作用”与纤维对基体的“增强和蠕变抑制作用”也是一致的。

6 结 论

(1) 单轴压缩时, 界面处 A 点拉应力集中较大, 蠕变后缓慢发生松弛; 在夹层厚度越小时, 其应力松弛越大, 而全界面上泥岩夹层中的拉应力 S_{11} 蠕变后基本消失。在 A 点盐岩层一侧的压应力蠕变后有所增加, 应力发生了重分布, 界面右侧处压应力集中较大的盐岩层一侧蠕变后压应力松弛较大, 松弛后全界面盐岩层一侧的压应力变得基本一致; 在界面右侧边缘处剪应力集中较大的 B 点, 蠕变 1 a 后, 剪应力发生松弛, 夹层厚度

越大, 剪应力松弛也越大, 松弛后全界面剪应力基本消失; 层状盐岩界面的内部区域蠕变主应变 CE_{11} 较大, 而剪切蠕变 CE_{12} 很小, 而在其右侧边界界面处, 发生一定的蠕变变形, 其中以剪切变形为主。

(2) 当泥岩夹层越厚时, 在层状盐岩中积累的蠕变会越小, 其蠕变过程主要依赖于盐岩层的蠕变变形, 而不是泥岩夹层的蠕变变形。

(3) 在低围压三轴加载时, 蠕变之前界面内部夹层一侧多为拉应力, 而在其右侧边界处夹层一侧多为压应力。蠕变后, 在内部的拉应力由正变成了负值, 右侧界面附近集中的压应力发生松弛, 最后全界面夹层中均为压应力且变得基本一致; 在右侧边缘界面处剪应力集中很明显的地方, 蠕变后剪应力松弛严重, 全部界面处的剪应力几乎等于 0, 这与单轴加载时变化规律基本一致。

(4) 在低围压三轴荷载下, 处于两个夹层之间的盐岩层, 其内部的蠕变 CE_{11} 要小于右侧边界处, 并且两侧夹层厚度越大时, 这个蠕变就越小, 而在右侧边界处盐岩层的蠕变要明显大于其两侧夹层的蠕变。当两侧夹层厚度越大时, 此盐岩层的蠕变就越小, 夹层对盐岩层的蠕变起明显抑制作用。

参 考 文 献

- [1] 刘江. 层状盐岩力学特性试验研究及理论分析[硕士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.
- [2] 张玉军, 刘谊平. 层状岩体的三维弹塑性有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1615-1619.
ZHANG Yu-jun, LIU Yi-ping. 3D elasto-plastic FEM analysis on layered rockmass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(11): 1615-1619.
- [3] GUANGJIE Y, SHEN R, TIAN Z, et al. Review of underground gas storage in the bedded salt deposit in China[C]//SPE Gas Technology Symposium, Calgary, Alberta. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers, 2006.
- [4] BRUNO M S. Geomechanical analysis and design considerations for thin-bedded salt caverns[R]. Arcadia: [s. n.], 2005.
- [5] 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, LI Yin-ping, et al. Numerical experiment study of deformation and mechanical properties of layered salt rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2173-2178.

- [6] 邵保平, 赵阳升, 赵金昌, 等. 层状盐岩温度应力耦合作用蠕变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 90—96.
XI Bao-ping, ZHAO Yang-shen, ZHAO Jin-chang, et al. Study on coupled thermo-mechanical creep properties of bedded rock salt[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(1): 90—96.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 梁卫国, 杨春和, 赵阳升. 层状盐岩储气库物理力学特性与极限运行压力[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 22—27.
LIANG Wei-guo, YANG Chun-he, ZHAO Yang-sheng. Physico-mechanical properties and limit operation pressure of gas deposit in bedded salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(1): 22—27.
- [12] LIMARGA A M, WILKINSON D S. Modeling the interaction between creep deformation and scale growth process[J]. **Acta Materialia**, 2007, 55: 189—201.
- [13] 方岱宁, 周储伟. 有限元计算细观力学对复合材料力学行为的数值分析[J]. 力学进展, 1998, 28(2): 173—188.
FANG Dai-ning, ZHOU Chu-wei. Numerical analysis of the mechanics behavior of composites by finite element micromechanics method[J]. **Advances in Mechanics**, 1998, 28(2): 173—188.

上接第 3963 页

- [3] 孙超, 薄景山, 齐文浩, 等. 地下结构抗震研究现状及展望[J]. 世界地震工程, 2009, 25(2): 94—99.
SUN Chao, BO Jing-shan, QI Wen-hao, et al. Status and prospect of seismic research on underground structures[J]. **World Earthquake Engineering**, 2009, 25(2): 94—99.
- [4] LIU Hua-bei, SONG Er-xiang. Working mechanism of cutoff walls in reducing uplift of large underground structures induced by soil liquefaction[J]. **Computers and Geotechnics**, 2006, 33(4/5): 209—221.
- [5] LI Wei-hua, ZHOU Qiao-fang. The seismic response analysis of the subway station in saturated soft soil[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)**, 2009, 16(Supp. 1): 128—134.
- [6] 王子辉. 饱和两相土与单相土互层场地中地铁车站地震反应分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [7] 廖振鹏. 工程波动理论导引[M]. 北京: 北京科学出版, 2005, 24(23): 4226—4232.
- [8] 赵成刚, 王进廷, 史培新, 等. 流体饱和 2 相多孔介质动力反应分析的显式有限元法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 178—182.
ZHAO Cheng-gang, WANG Jin-ting, SHI Pei-xin, et al. Dynamic analysis of fluid-saturated porous media by using explicit finite element method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(2): 178—182.
- [9] 李伟华, 赵成刚. 含软夹层的层状沉积河谷场地的地震动力响应分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 45—51.
LI Wei-hua, ZHAO Cheng-gang. Analysis of seismic dynamic response of layered alluvial valleys with soft interlayer[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(1): 45—51.
- [10] 李小军. 非线性场地地震反应分析方法的研究[D]. 哈尔滨: 国家地震局工程力学研究所, 1993.