

文章编号: 1006-4710(2012)01-0072-06

基于巴西圆盘数值试验的砂岩破裂过程分析

侯玲¹, 尹小涛²

(1. 西安理工大学 理学院, 陕西 西安 710054;

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试验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 在 PFC2D 平台下设计了均质、含 0.2 mm 矿物颗粒和含 0.2 mm 孔隙砂岩的数值巴西圆盘试验。在试件左、右、中间、上部和下部设定了 5 个半径为 5 mm 的分析球。分别分析了试件加载过程中的 x 、 y 方向应力值。分析发现矿物颗粒的存在极大地增强了砂岩的力学行为, 内部分析点 x 方向应力均高出其他情况 x 方向应力 1~2 个数量级, y 方向应力则在同一个数量级上增加 1~2 倍。孔隙的存在弱化了砂岩力学行为, x 、 y 方向应力均在同一数量级上减小 1~2 倍。说明外部监测到的应力变化与材料内部应力的变化情况有很大差异, 这是物质约束与边界约束的不同造成的。

关键词: 颗粒流; 砂岩; 矿物颗粒; 孔隙; 应力

中图分类号: O319.56

文献标志码: A

An Analysis of Fracture-Damage Process of Sandstone by Brazilian Disc Numerical Simulation Test

HOU Ling¹, YIN Xiaotao²

(1. Faculty of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Three Brazilian disc numerical simulation samples of sandstone were established by PFC2D, they are homogeneous sample, samples containing dia. 0.2 mm mineral grains and dia. 0.2 mm pore. The 5 analytical circular areas with radius of 5 mm each are set up at the left, right, middle, upper and bottom of the test specimens, and the stress values at the x and y directions are analyzed in the loading process respectively. The analytical results indicate that the existence of mineral grains can greatly enhance the mechanical behaviors of sandstones. The stress in x direction at the inner analytical point is 10~100 times higher than the stress in x direction of other cases, and the stress in y direction increases 1~2 times as much as that in the same order of magnitude. The pore existence can weaken the mechanical behavior of sandstone, and the stresses in x and y directions in the same order of magnitude will decrease by 1~2 times as much. All these indicate that the stress changing monitored externally differs greatly from the internal stress changing in a material. This phenomenon is caused by the differences of material constraints and boundary constraints.

Key words: particle flow; sandstone; mineral particle; pore; stress

一般岩体的天然结构主要包括孔隙、裂隙、节理、层理及各种物相接触面等, 这些天然结构多产生于成岩作用过程、地质动力作用以及各种自然的物理和化学过程, 是漫长地质历史演化过程的产物。

砂岩除具有一般岩体的共性结构外, 还是一种具有独特细观结构的多孔介质材料, 砂岩的细观结构主要表现为晶粒集聚和微孔隙交织分布特征。这些细观结构的存在决定了其宏观物理状态、受力变形情

收稿日期: 2011-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50879069); 水利部公益性行业科研专项基金资助项目(201201053-03); 陕西省黄土力学与工程重点实验室重点科研计划基金资助项目(09JS103)。

作者简介: 侯玲(1962-), 女, 陕西蓝田人, 副教授, 研究方向为有限元数值计算理论。E-mail: houling@xaut.edu.cn。

况以及破坏模式的特点等。因此,认识砂岩的细观结构特征对进一步研究砂岩细观结构对宏观力学行为的影响机制尤显重要。

随着科技的发展对于岩石破坏过程及其影响因素的认识深度不断向宏观和微观两个方向扩展。宏观研究上向更多、更大、更远、更广和更深方向发展,细微观上则向岩石细观结构、矿物颗粒排列、矿物成分对其力学性质的影响方向发展,研究的信息量越来越大。宏观研究上出现了很多物探新方法(TSP^[1]、瞬变电磁^[2-3]、微震监测^[4-6]等),可以帮助人们认识更深更远的地质体的工程尺度结构特征。细微观上出现了诸如显微镜^[7-8]、SEM 扫描电镜^[9]、激光散斑^[10]、CT 扫描等配合物理力学试验的新方法。

Yang 等以岩石样本作为研究对象,用离散元-颗粒流方法(以下简称 PFC 方法)研究了细观参数与宏观力学特性的关系。刘宁等用 PFC 方法研究了大理岩破裂的时间效应。国内外大量的研究倾向于对岩石样本细观参数所引起宏观响应的研究,也有大量研究用其来模拟各类问题的破损机理。

尽管对岩石破裂过程及其影响因素的研究取得了诸多成果,但由于受到观测手段和研究方法的限制,目前还不能对岩石内部裂纹及其演化过程造成的应力变形特征进行无损实时监测,常用的也仅是破坏现象和破坏试件监测。很难将破裂试件、破坏过程与研究者关心的物理力学性质和力学量发生联系。这方面往往需要借助数值试验的方法来探索。

1 研究思路和研究方法

数值试验和岩石的物理力学试验不同,它可以通过数值模拟手段施加各类复杂边界条件,可以将各力学参数孤立出来,分别研究矿物颗粒和孔隙等天然结构对砂岩破坏过程和力学行为的影响,可以消除端部效应及其他一些试验系统误差,可以消除物理力学实验时的随机误差和各因素的交互影响,也可以分析研究试件内部不同部位的力学响应。因此,数值试验可以作为实物试验的补充,有利配合物理力学实验,是人们借用数值仿真手段研究岩石力学性质的一个重要补充方法。

本研究选用以离散元为基础的颗粒流二维计算软件 PFC 作为数值试验平台。颗粒流数值试验方法在计算过程中作假设为:①颗粒单元为刚性体,在计算过程中不变形;②颗粒之间为点点接触或点面接触,接触范围很小;③接触特性为柔性接触,即在接触点处存在一定的“重叠”量,“重叠”量的大小与

接触力有关;④接触处有法向刚度和切向摩擦力;⑤颗粒单元为球形。变形是由颗粒的相对移动引起的。在颗粒流计算模型中除了存在代表材料的球形颗粒外,还包括限定颗粒存在范围的边界。颗粒和边界之间通过相互接触部位的重叠产生的弹性力发生作用,颗粒的移动均满足运动方程,边界不满足运动方程。

2 砂岩巴西圆盘数值试验的计算条件

设计了均匀、含 0.002 mm 矿物颗粒、含 0.002 mm 孔隙等 3 类砂岩巴西圆盘数值试验。目的是在相同计算条件下实现不同影响因素的对比研究,有效减小了其他随机影响因素造成的试验误差。

砂岩巴西圆盘数值试验的试件中,颗粒间的接触本构为平行粘结模型,主要计算参数为: $\gamma = 2.63 \text{ g/cm}^3$, $pb_kn = 8.1 \text{ GPa}$, $pb_ks = 8.1 \text{ GPa}$, $pb_nstren = 1.43 \text{ MPa}$, $pb_sstren = 1.43 \text{ MPa}$ 和摩擦系数 0.68。矿物颗粒的输入参数在此基础上提高 10 倍。试件直径 50 mm,粒径 0.1 mm,均值试样砂岩依据干密度确定的颗粒数 48 128 个;含矿物颗粒试件的矿物颗粒半径 0.2 mm,矿物颗粒数 12 032 个;含孔隙试件的孔隙尺寸 0.2 mm,孔隙数 1 203 个,数量是矿物颗粒的 1/10。矿物颗粒通过 clump 团簇生成,可以破裂。孔隙、裂隙通过 range 删除形成。可以在相同的计算条件下实现不同影响因素的对比研究,具体数值模型见图 1,其中分析球坐标按编号分别为 $meas\ id = 1, x = 10 \text{ mm}, y = 0.0 \text{ mm}$; $meas\ id = 2, x = 0.0 \text{ mm}, y = 0.0 \text{ mm}$; $meas\ id = 3, x = -10 \text{ mm}, y = 0.0 \text{ mm}$; $meas\ id = 4, x = 0.0 \text{ mm}, y = 10 \text{ mm}$; $meas\ id = 5, x = 0.0 \text{ mm}, y = -10 \text{ mm}$,半径均为 5 mm。

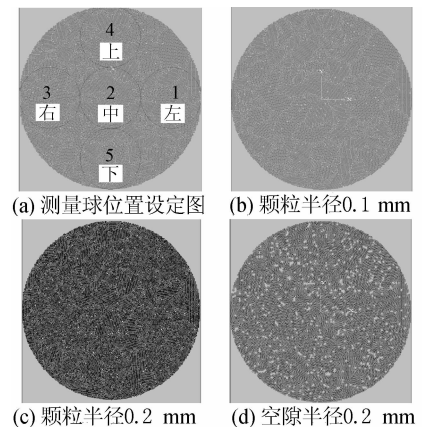


图 1 砂岩数值计算模型

Fig. 1 Numerical sample of Sandstone

离散元数值试验仿真模拟巴西圆盘试验的加载过程,采用右侧加载,左侧约束,控制位移步长逐级

加载,应变速率保持为 0.000 1,根据以上说明编写程序实现数值试验的计算过程。

3 砂岩巴西圆盘数值试验结果分析

3.1 不同砂岩破坏形态的分析

下面利用 PFC2D 数值计算平台,模拟砂岩的巴西圆盘试验受力条件,进行均质砂岩试样、含矿物颗粒砂岩试样、含孔隙砂岩试样的受力特性和破坏形态分析。

图 2 为三种试样加载计算的破坏形态,其中深色为加载后微裂纹发育结果,浅灰色为圆盘试件。

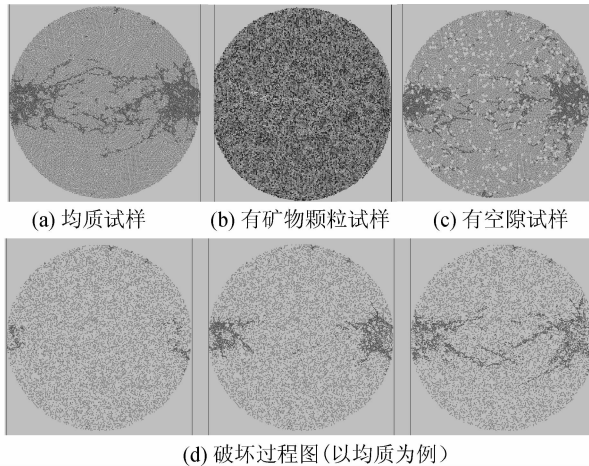


图 2 数值试验计算的破坏形态

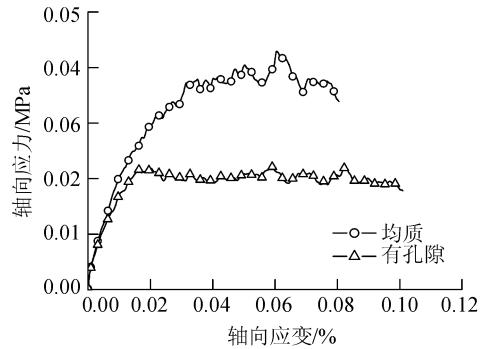
Fig. 2 Fracture morphology of numerical specimens

由图 2(a)可见,均质砂岩裂纹沿两侧加载端水平向扩展,其中靠近加载端的微裂纹密集,则受力最为集中,最先被压坏。从图 2(b)可知,有矿物颗粒的试样其破裂面在中部明显为一条线状贯通裂纹,微裂纹绕矿物颗粒团簇发育,矿物颗粒对于裂纹有阻裂作用,矿物颗粒的强度高于基质部分,因此该试样的试验强度要高于均质砂岩试样的试验结果。由于两侧加载,有约束,所以裂纹向纵向张开。这也就说明材料中矿物颗粒的大小、位置和连接好坏均会间接影响材料的力学行为。图 2(c)显示由于孔隙的存在改变了均质砂岩的裂纹扩展模式,中间裂纹扩展的集中性相对于均质砂岩裂纹变得发散。这说明孔隙的存在会弱化和部分改变材料的力学行为。图 2(d)展示了均质试样巴西圆盘试验的破坏过程。

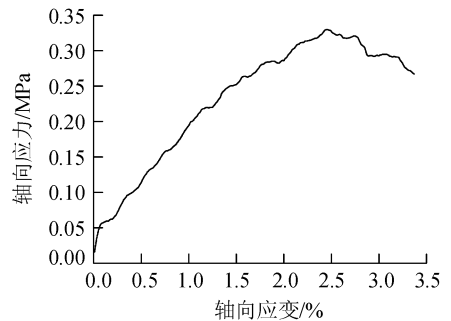
3.2 对整体应力-应变曲线的影响

研究发现,砂岩的细观结构不同,其力学参数和应力应变过程也不同,矿物颗粒、孔隙等细观结构的差异均会部分影响砂岩的力学行为,并影响其破坏形态的差异。为此,在上述数值试验加载计算过程

中,将试件的整体应力应变曲线进行了整理,结果见图 3。



(a) 均质和有孔隙试件



(b) 有矿物颗粒试件

图 3 砂岩的整体应力应变曲线

Fig. 3 Macro-stress-strain curve of sandstone

从图 3 可知,在三条计算到的试件整体应力应变曲线中,有矿物颗粒试样的强度和模量最高,有孔隙试样的强度和模量最低,均质试样的强度和模量居中,与理论分析的结果一致。均质试样、有矿物颗粒的试样和有孔隙的试样的峰值强度分别为 0.043 MPa、0.330 MPa 和 0.022 MPa,峰值强度对应的割线模量分别为 13.5 MPa、71.2 MPa 和 3.77 MPa。说明矿物颗粒的存在使得砂岩的力学性能有明显提高,具体表现在峰值强度和变形模量的提高上,而孔隙的存在则极大地弱化了砂岩的力学性能,表现为峰值强度的降低和变形模量的减小。同时,这些宏观力学表现远小于微观力学指标,说明颗粒的物质组成和胶结性能也会极大地决定材料的宏观力学性能。

3.3 试件破坏过程中的应力变化规律研究

为了研究矿物颗粒、孔隙这些自然因素对砂岩强度特性的影响规律,在以上数值试验过程中对各计算点 x 、 y 方向的应力进行了分析整理。其中,各试件不同位置处 x 方向的应力变化见图 4, y 方向的应力变化见图 5。具体各分析点的坐标和位置详见图 1(a)。

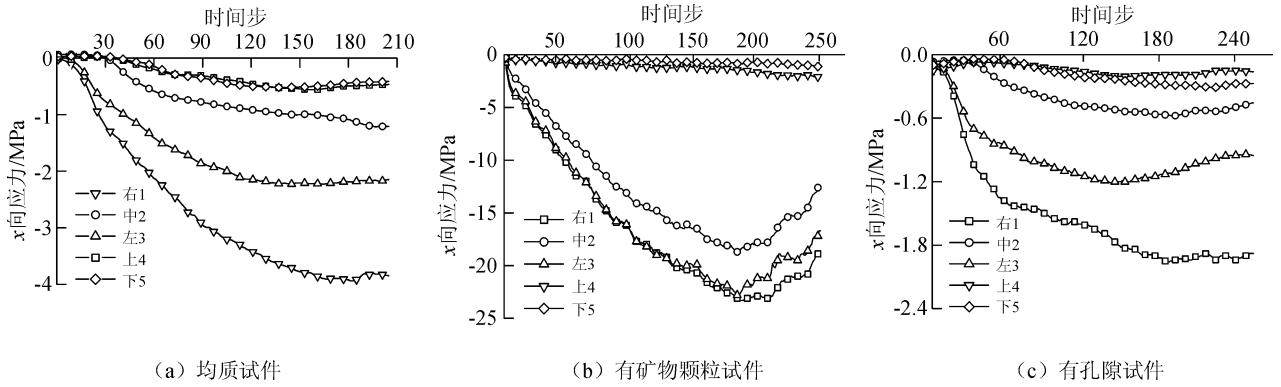


图4 5个分析点 x 方向的应力变化曲线
 Fig.4 Stress curve at five point in x direction

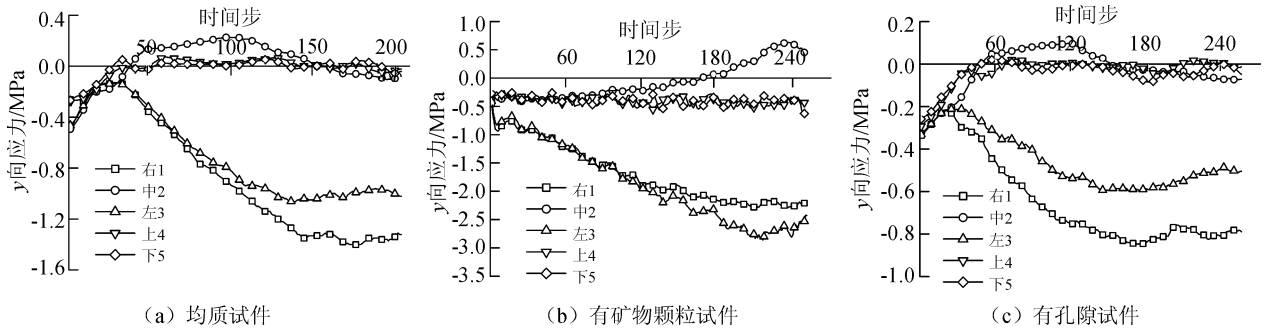


图5 5个分析点 y 方向的应力变化曲线
 Fig.5 Stress curve at five point in y direction

从图4(a)各分析点 x 方向应力变化曲线可以看出,各分析点 x 方向应力加载曲线均为负值,且分析点的值大于宏观曲线值,说明试件加载过程中 x 方向始终处于受压状态,这与试件的加载方式有关;右侧分析点1的 x 方向应力值 > 分析点3 > 分析点2 > 分析点4、5的应力值,其中上下分析点的应力值基本接近,这也符合各分析点位置与其应力响应,两侧的分析值大于中间,上下分析点远离加载端,且边界自由,所以力学响应最小。由于有矿物颗粒试样的破裂面基本在中部为一条线状贯通裂纹,因此从图4(b)可知,虽然该试样也表现为右侧分析点1的 x 方向应力值 > 分析点3 > 分析点2 > 分析点4、5的应力值,但其中1、2、3点 x 方向的应力值相差不大,远大于点4、5的应力值,分析值比均质试样大一个数量级,说明矿物颗粒的增强作用十分明显。图4(c)整体规律与图4(a)类似,只是分析点的 x 方向应力值比均质的情况小几乎一倍,4、5点的分析曲线有所分离,说明孔隙的存在弱化了砂岩的力学性质。

从图5(a)各分析点 y 方向应力加载曲线可以看出,在均质的情况下右侧分析点1的 y 方向应力值 > 分析点3 > 分析点2 > 分析点4、5的 y 方向应力值,各曲线均有个上凸段,说明在加载过程中 y 方

向应力有反号现象,由初期的受压转化为受拉应力状态,其中上、中、下分析点曲线上凸明显,且分析点的值有很大一部分都在正值区即拉应力区,仅在最后变为负值说明受到压力,上凸程度分析点2 > 分析点4、5 > 分析点3 > 分析点1,这也符合巴西圆盘试验的破坏特征,中间点的拉应力最明显。从图5(b)可知,分析点1、3的值一直向下增加,即压力增加,分析点4、5则近于水平变化即应力变化不明显,分析点2则往上一直保持增加趋势,即由初始时的压应力转化为拉应力。在 y 方向拉应力的作用下,试件以水平中心线为分界破裂为两块,分别向下和往上传移,这与巴西圆盘试验的破坏形态也相符合。图5(c)整体规律与图5(a)类似,只是分析点的值比均质的情况小几乎一倍。

对比 x 和 y 方向应力值可知,三个试件 y 方向应力的增幅和极限值均较同时刻 x 方向应力的对应值小,这从一个侧面说明材料的抗压强度远大于其抗拉强度。

3.4 微观结构对计算结果影响的对比研究

要想研究矿物颗粒、孔隙等微观结构对混凝土破坏过程的影响机理,仅分析单个试件中的应力变化规律是不够的。还需对比分析试件微观结构差异对计算结果的影响。为此,以下对比分析均质试件、

有矿物颗粒试件和有孔隙试件 x 、 y 方向的应力变化规律,见图6,图7。

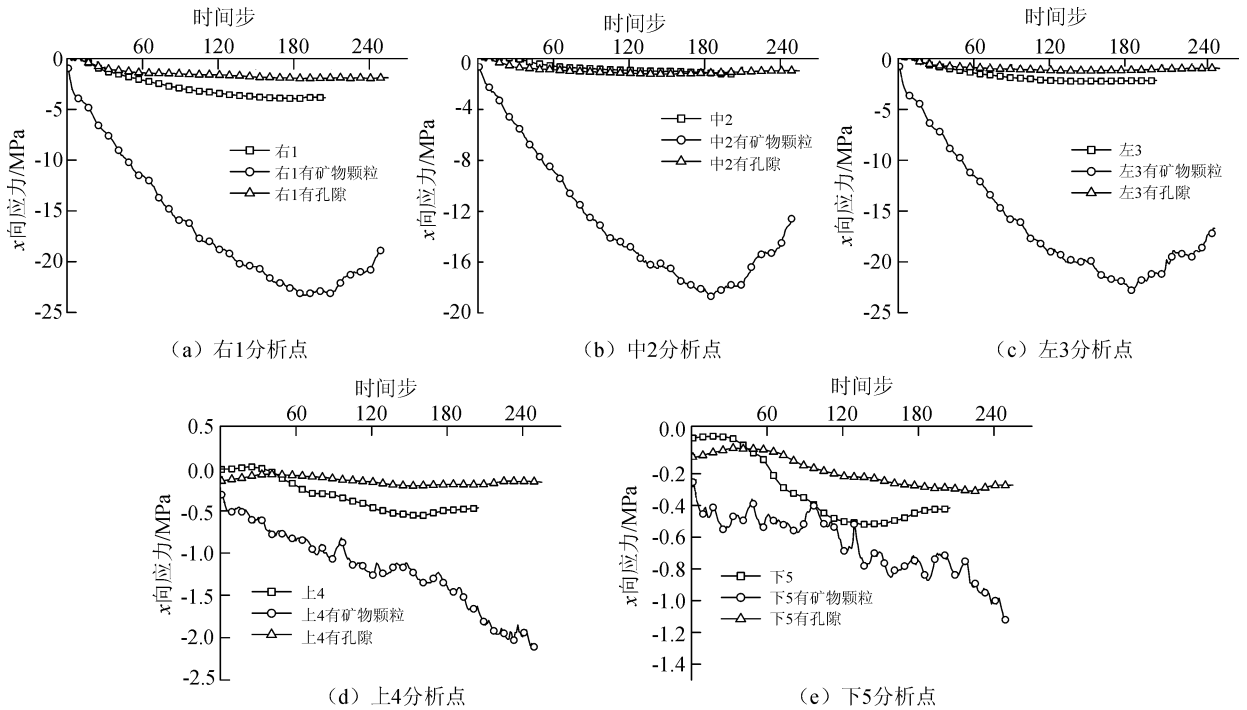


图6 x 方向应力变化曲线

Fig. 6 Evolutional curve of stress in x direction

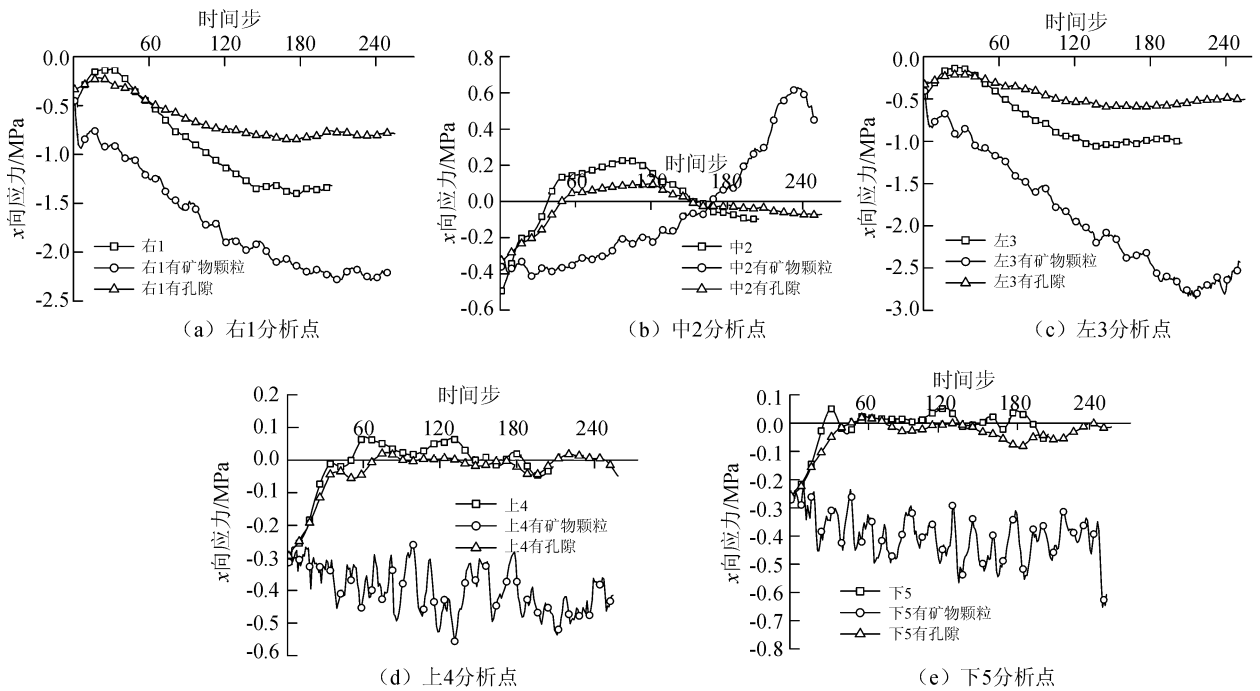


图7 y 方向应力变化曲线

Fig. 7 Evolutional curve of stress in y direction

图6(a)~(e)为均质试件、有矿物颗粒试件和有孔隙试件各分析点 x 方向应力变化对比曲线。可以看出,不同分析点测到的结构因素造成的 x 方向应力变化规律类似,都是有矿物颗粒试件的应力极限值 > 均质 > 有孔隙试件的应力极限值,其中图6

(a)~(c)揭示的矿物颗粒存在造成分析点1、2、3水平位置的 x 方向应力均比其他因素造成的应力分析点的值大一个数量级,图中表现为曲线间距很大。图6(d)~(e)揭示的上下分析点规律与上述类似,但是数值相差较小。

图7(a)~(e)为均质试件、有矿物颗粒试件和有孔隙试件各分析点 y 方向应力变化对比曲线。可以看出,左右分析点1、3的规律类似,矿物颗粒的存在均造成 y 方向压应力一直增加,均质和孔隙的情况则是先正向增加,再负向增加,图中初始段有个突起。图7(b)揭示矿物颗粒造成中间点 y 向应力一直正向增加,均质和孔隙的情况则是先增后减,这说明有矿物颗粒的试件破坏明显贯通,一分为二,分别往纵向运动。图7(d)~(e)上下分析点4、5的 y 方向应力变化规律类似,有矿物的情况波动剧烈,整体负向增加。均质和有孔隙的情况是先增加,然后在0轴附近波动。

4 结论

本研究表明:

1) 矿物颗粒的存在一般会增强岩土材料的力学行为、孔隙的存在会弱化力学性能,包括变形模量和强度等;

2) 材料的宏观表现与其内部破坏过程伴随的局部应力变化存在很大不同,从力的角度讲,外部应力比内部应力往往小1~2个数量级。一般是因为边界约束与物质内部约束的不同造成的。

本研究的数值试验解决了不同影响因素的相互干扰问题,在严格相同模型下研究不同影响因素对测试结果的影响,有效避免了物理试验随机误差的影响。同时克服了当前测试技术无法无损监测材料内部微观观应力变化的不足,可用于材料微观观破坏机制研究。不足之处在于这些微观观力学信息无法得到检验,试验的正确性只能通过宏观试验现象和结果来检验。

参考文献:

- [1] 何发亮,李苍松,陈成宗. 隧道地质超前预报[M]. 成都:西南交通大学出版社,2006.
- [2] 吕志强,雷宛,肖宏跃,等. 瞬变电磁法在隧道超前预报中的应用[J]. 勘察科学技术,2010,(6):57-59.
Lü Zhiqiang, Lei Wan, Xiao Hongyue, et al. Application of TEM for advanced prediction in tunnel[J]. Site Investigation Science and Technology, 2010,(6):57-59.
- [3] 牛之链. 时间域电磁测深法原理[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1992.
- [4] 姜福兴,叶根喜,王存文,等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(9):1922-1938.

- Jiang Fuxing, Ye Genxi, Wang Cunwen, et al. Application of high-precisin microseismic monitoring technique to water intrush monitoring in coal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (9): 1922-1938.
- [5] 徐奴文,唐春安,沙椿,等. 锦屏一级水电站左岸边坡微震监测系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(5):915-925.
Xu Nuwen, Tang Chunan, Sha Chun, et al. Microseismic monitoring system establishment and its engineering applications to left bank slope of JINPING I hydropower station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(5):915-925.
- [6] 刘超,唐春安,李连崇,等. 基于背景应力场与微震活动性的注浆帷幕突水危险性评价[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(2):366-372.
Liu Chao, Tang Chunan, Li Lianchong, et al. Analysis of probability of water intrush from grout curtain based on background stress field and microseismicity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(2): 366-372.
- [7] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学,1987,(12):1309-1316.
Lei Xiangyi. The pore type and collapsible features of Chinese loess [J]. Science in China, 1987, (12): 1309-1316.
- [8] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学,1980,(12):1203-1208.
Gao guorui. The microstructure classification and collapsible features of loess[J]. Science in China, 1980, (12): 1203-1208.
- [9] 杨圣奇,吕朝辉,渠涛. 含单个孔洞大理岩裂纹扩展微观试验和模拟[J]. 中国矿业大学学报,2009,38(6):774-781.
Yang Shengqi, Lü Chaohui, Qu Tao. Investigations of crack expansion in marble having a single pre-existing hole: experiment and simulations [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(6):774-781.
- [10] 邱建军,张红艳,骆卫华,等. 像面散斑平均尺寸对激光散斑成像的影响[J]. 光学学报,2009,29(7):1863-1867.
Qiu Jianjun, Zhang Hongyan, Luo Weihua, et al. Impact of averaged image speckle size on laser speckle imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7):1863-1867.

(责任编辑 李虹燕)