

文章编号: 1000-4750(2005)02-0056-06

# 砌体开裂过程数值模型及其模拟分析

\*王述红, 唐春安, 吴 献

(东北大学材料破坏力学数值实验室, 沈阳 110004)

**摘 要:** 基于损伤力学和脆性理论, 将砌体看成是由块体、砂浆、粘结带组成的三相材料, 考虑砌体组成材料的非均匀性特点, 提出了新的砌体开裂过程数值分析方法, 利用材料破裂过程分析系统(MFPA<sup>2D</sup>), 从细观力学层次上数值模拟了砌体试件在水平剪切荷载作用下从损伤到开裂破坏过程, 模拟结果与试验结果较为吻合。验证了该数值分析方法的正确性和模型的合理性, 同时为砌体开裂破坏预测预报基础理论的研究提供新的分析方法。

**关键词:** 砌体结构; 数值分析; 细观; 开裂过程; 剪切

**中图分类号:** TU528      **文献标识码:** A

## NUMERICAL MODEL AND SIMULATION OF MASONRY FRACTURE PROCESS

\*WANG Shu-hong, TANG Chun-an, WU Xian

(Laboratory for Numerical Test on Material Failure, Northeastern University, Shenyang, 110004, China)

**Abstract:** Based on damage mechanics and theory of masonry structure, a mesoscopic mechanics model of masonry structure is established. In the model, masonry is considered as a composite material consisting of block, mortar and block-mortar interface. The Material Failure Process Analysis (MFPA<sup>2D</sup>) system is used to simulate the fracture process of masonry. Under horizontal shear-compression loading condition, the crack propagation process is simulated with this model. The numerical results are in good agreement with experimental observations. It is found that the shear fracture of masonry is predominantly caused by tensile damage.

**Key words:** masonry structure; numerical stimulation; mesoscopic; fracture process; shear

### 1 引言

现代砌体结构正向高层和抗震方向发展, 对其抗侧能力要求很高, 对于竖向和剪切荷载作用下砌体开裂机理的认识, 确定合理的抗剪强度是至关重要的。近年来, 国内外开展了不少这方面的研究, 国际上对砌体结构中裂缝(群)相互作用及其破裂问

题, 大多集中在结构试验研究阶段, 如 Miha 和 Abrams 对不同荷载下砌体结构的性能进行了实验研究, 并研究了滞回曲线<sup>[1,2]</sup>; Chiou 和 Milad 等人对砌体结构的轴力、弯矩作用下的性能进行了研究<sup>[3,4]</sup>, 提出了一些抗弯、抗剪承载力的计算公式等。国内从 70 年代后期开始进行了一些试验研究, 如中国建筑东北设计研究院、湖南大学、同济大学、

收稿日期: 2003-05-13; 修改日期: 2003-07-27

基金项目: 辽宁省自然科学基金(20021008), 中国博士后科学研究基金(2001-14-30)

作者简介: \*王述红(1969), 男, 江苏泰州人, 副教授, 博士后, 主要从事工程力学研究(E-mail: shuhong.wang@imperial.ac.uk);

唐春安(1958), 男, 湖南黔阳人, 长江学者特聘教授, 博士研究生导师, 从事采矿工程研究

吴 献(1961), 女, 北京市人, 副教授, 从事结构工程研究

哈尔滨建筑大学等<sup>[5]-[8]</sup>，进行了一些试验和机理方面的研究。目前科学工作者正试图寻求一种近似计算法，结合理论、试验及数值模拟来研究砌体结构的性能，力图在细观裂缝发展和宏观力学性能之间架起一座桥梁。数值模拟方法被看成是解决这一问题的有效途径。S. Briccoli Bati、周炳章、曾晓明等人已开展过这方面的研究<sup>[9-11]</sup>。但总体上说，砌体开裂机理研究无论是国外还是国内主要是集中在假设模型的基础上的静力性能分析和利用有限元提出一些简化模型对砌体的性能进行研究，目前有关砌体开裂模式数值模拟的研究，由于所处理破坏问题的复杂性，很难对砌体从变形、开裂过程进行数值模拟，更难以给出有关开裂过程的时空分布图象。

由东北大学开发的用于材料破坏过程分析的 MFPA<sup>2D</sup> 系统，就是基于弹性损伤模型的一个数值模拟工具，从材料的细观结构入手，来研究其破坏规律。该数值模拟方法认为材料的细观非均匀性是造成其宏观非线性的根本原因<sup>[12]</sup>。充分考虑了材料性质的非均匀性，认为材料宏观破坏是细观单元破坏的积累过程。从细观的角度来说，认为构成材料的每一个微元体是均匀、连续的介质，但是这些微元体之间的力学性质(弹模、强度等)可能千差万别，包含缺陷多的微元体间表现出很大的离散性。MFPA<sup>2D</sup>方法采用了 Weibull 分布来描述微元体的力学属性的离散性，用弹性损伤力学进行应力分析。该系统自开发以来，已经成功地应用于岩石和混凝土等准脆性材料断裂过程的研究<sup>[13]-[20]</sup>。关于 MFPA<sup>2D</sup> 理论方面更为详尽的介绍可参见文献[21]。

## 2 模型建立

砌体开裂过程在细观上是非均匀渐进变形诱致破裂的非线性过程，在宏观上是连续被破裂成非连续的多裂缝萌生和扩展问题。砌体力学性质的弱化是由于内部结构在受力作用后不断损伤导致裂纹产生而引起的，实际上是从砌体结构细观结构上找到了其破坏机理。对于砌体结构内部结构弱化的研究，损伤力学是一有效的工具。基于对砌体结构细观结构的认识，假定砌体是由砂浆、块体及其它它们之间的粘结带组成的三相复合材料(如图1所示)，为了考虑各相组分的非均匀性，各组分单元的材料性质按照某个给定的随机分布来赋值。细观单元满足弹脆性的本构关系<sup>[21-23]</sup>。应用弹性有限元法作为

应力分析工具，计算分析对象的应力场和位移场。

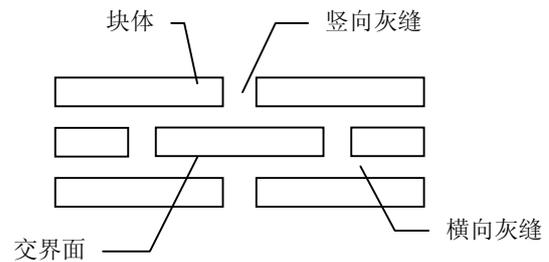


图1 砌体组成模型

Fig.1 The model of masonry

尽管从宏观上讲砌体结构材料可能具有明显的宏观非线性性质，但从细观上讲，局部细观单元体的破裂性质可以假定为弹-脆性行为。细观单元体尺寸取得越小，材料越均匀，这种弹-脆性的性质就越明显。从这种意义上说，假定细观单元体是弹-脆性材料是合理的。在一个统一的变形场中，微破裂不断产生的原因除了载荷不均、形态不够光滑等结构因素形成应力集中之外，更主要的是细观单元体力学性质的不均匀性。可以认为材料的非线性特征与其细观非均匀性有直接联系。

为了描述材料性质的非均匀性，假定组成材料细观单元的力学性质满足 Weibull 分布(当然也可以假设成满足实际构件的其它分布)，该分布可以按照如下分布密度函数来定义：

$$f(u) = \frac{m}{u_0} \left( \frac{u}{u_0} \right)^{m-1} \exp \left( - \frac{u}{u_0} \right)^m \quad (1)$$

这里  $u$  代表满足该分布参数(例如强度、弹性模量等)的数值；而  $u_0$  是一个与所有单元参数平均值有关的参数。 $m$  代表形状参数，定义了 Weibull 分布密度函数的形状，参数  $m$  被称为均质度， $m$  值越大，材料越均匀。在上面的数值试样中，所有单元的参数分布就由一个 Weibull 分布来表达，调整不同的均质度参数  $m$  将生成不同的数值试样。在实际应用中可以指定局部区域材料的性质，以使试样更符合实际的非均匀材料试样。例如砌体结构的数值模拟中，其细观的结构特征特别明显，可以先用一个 Weibull 分布来描述块体材料的非均匀性，进而指定局部区域的单元为砂浆、界面，以取代原来该单元的力学性质。当然，对于砌体结构而言，块体的弹性模量和强度是远远地高于砂浆和界面的，一般按照有关手册选取。砂浆相对较弱，其强度和弹性模量都比块体材料低。在块体材料和砂浆之间有一层代表界面的单元。

模型中,研究对象被离散为等面积的长方形(或者正方形)单元。该单元也被作为有限元应力分析的四边形等参元。为了使模型能够反映研究对象(例如砌体结构)的细观特征,单元的数目要足够多。但由于现阶段计算机速度的限制,过多的单元数目往往在计算时间上是不允许的。单元的尺寸选择应根据所研究问题的精度、范围和计算条件而定。但对于某一特定模型,单元应足够小,以能够足够精确地反映材料的非均匀性质。因此,对于非均匀性描述而言,要包含与问题有关的最重要信息,但是又不因为过于繁杂而失去可操作性。

此外,由式(1)定义的非均匀性特征实际上包括两方面的内容,其一:不同的 Weibull 分布参数(均质度)往往可以代表不同的非均匀材料;其二:对于相同的 Weibull 分布参数,每一次随机产生的试样,其材料参数的空间分布往往是不同的,这种不同可能要影响试样的宏观破坏形态。

在初始状态,细观单元是弹性体,其力学性质可以完全由其弹性模量和泊松比来表达。随着单元应力的增加,当单元的应力或应变状态将满足某个给定的损伤阈值(准则)时,单元开始损伤。这里选择两个准则,其一是最大拉应变准则,认为当细观单元的最大拉伸主应变达到其给定的极限值时,该单元开始发生拉伸损伤;其二是摩尔库仑准则,认为当细观单元的应力状态满足摩尔库仑准则时,该单元发生剪切损伤。同时,拉伸准则具有优先权,若细观单元满足拉伸准则,则不需要再判断该单元是否满足摩尔库仑准则。只有未满足拉伸准则的单元才判定其是否满足摩尔库仑准则。

本模拟假定损伤变量  $D$  的表达式为:

$$D = \begin{cases} 0 & \varepsilon < \varepsilon_{t0} \\ 1 - \frac{\lambda \varepsilon_{t0}}{\varepsilon} & \varepsilon_{t0} \leq \varepsilon < \varepsilon_{tu} \\ 1 & \varepsilon \geq \varepsilon_{tu} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中  $\lambda$  为单元的残余强度系数,  $\varepsilon_{t0}$  为弹性极限所对应的拉伸应变,该应变叫做拉伸损伤应变阈值。 $\varepsilon_{tu}$  是单元的极限拉伸应变,这里  $\varepsilon_{tu} = \eta \varepsilon_{t0}$  来定义极限应变系数  $\eta$ 。将细观单元损伤分为两种,即拉伸损伤和剪切损伤,前者是由于应变状态达到了最大拉应变准则引起的;而后者是由压应力或者剪应力引起的,其应力状态满足了摩尔库仑准则。另外,需要说明的是,这里单元的本构关系都用弹性损伤力学来表达,当单元在卸载或重新加载时不

发生损伤时,其材料性质(弹性模量)保持不变,全部卸载(具有的应力全部释放)时单元保留残余变形。

当用该数值模型进行材料在砌体外载荷作用下的开裂过程分析时,外部载荷(或位移)是逐步施加的。对于每一步施加的载荷(或位移),用弹性有限元程序进行应力分析,得到所有单元的应力场和节点的位移场。然后,根据损伤阈值准则判断单元是否开始损伤,假如该加载步有单元损伤,则按照以上的弹性本构关系计算损伤变量以及损伤后的弹性模量,需要重新组集弹性矩阵和最终的刚度矩阵,进行在外部载荷不变条件下的重新计算,以反映由于单元损伤及破坏所造成的应力重分布,直到该加载步没有新的单元损伤为止。然后,继续增加外部载荷(或位移)进入下一步的分析,直到加载完毕为止。这样就可以得到整个试样的变形及整个断裂过程。

### 3 数值分析

本次数值分析主要考虑砌体墙水平剪切荷载作用下的开裂过程。数值模型如图 2 所示,该砌体墙的实验模型参照 Raijmakers 和 Vermeltfoort 的实验<sup>[27]</sup>,墙体总共 18 层,顶层及底层分别用混凝土加固,剪切试件采用尺寸为 1000mm×990mm 的方形砌体试件模型,划分为 200×198 个单元,并将块体作为基质单元,在此基础上给出砂浆和界面的单元的力学参数,对于边界可按空单元处理(参见文献[21])。把砌体视为砂浆、块体及两者粘结带构成

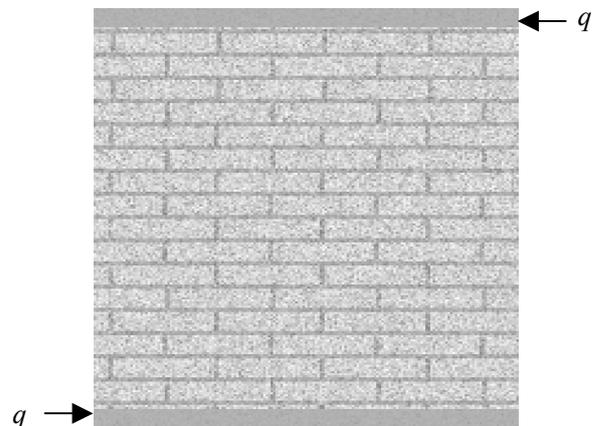


图 2 砌体在水平剪切荷载作用下计算模型

Fig.2 The computing model of masonry under level shear loading

的三相复合材料,采用平面应力模型。其中砂浆和块体的计算所用参数参照相关文献[27],考虑砌体结构试件中裂缝扩展路径的影响,这里砂浆的强度较低。粘结带的弹性模量和强度比较弱,参照混凝土与水泥浆的粘结强度选取。每种材料的力学参数都在给定其平均值和均质度的条件下由程序进行随机赋值。整个加载过程采用位移控制的分步加载方式,即通过在试件左右两侧施加水平位移实现加载,每步加载位移量为 $\Delta s=0.02\text{mm}$ 。试件的力学性质参数见表1。

表1 砌体数值模拟力学参数

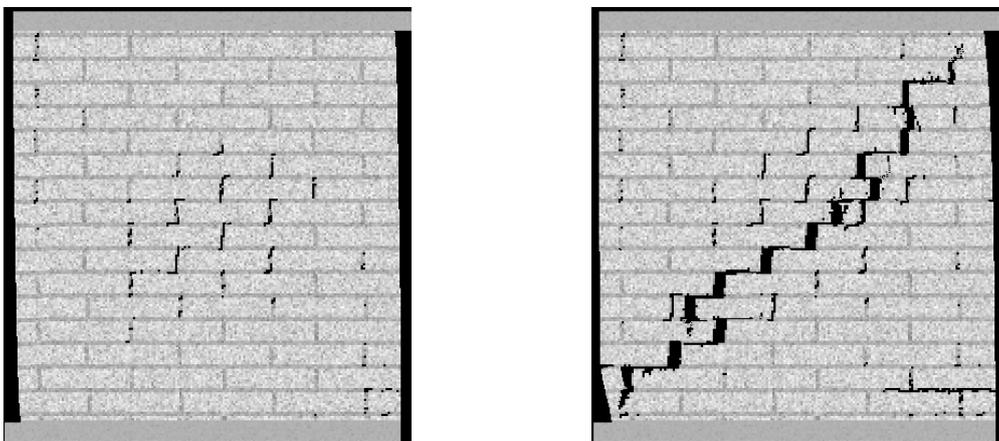
Table 1 Parameters of masonry structure

力学参数及载荷控制方式	块体参数值	水平砂浆参数值	竖直砂浆参数值
均质度系数 $m$	5	3	3
弹性模量均值 $E / \text{MPa}$	16700	2000	2000
破坏阈值均值 $\sigma_0 / \text{MPa}$	60	12.5	5
泊松比均值 $\mu$	0.15	0.25	0.25
加载方式	水平剪切位移加载		

图3a-3b给出了试件模拟过程的裂缝的扩展与相互作用贯通的应力分布特征。对于砌体构件,随着水平载荷的增加,试件首先在中间开始出现微破裂,此后,伴随着试件的变形,微破裂就不断沿着对角线产生,直到试件失稳破裂。从图3中可以看出,随着载荷的增加,砌体呈现出拉剪破坏。由于砂浆的强度明显低于砖的强度,破坏首先是沿着垂直缝隙拉坏,进而是沿水平缝隙剪坏,破坏模式基本沿对角线方向分布,数值模拟再现了该构件破坏的全过程。另外,还可看出,该试件受载后,裂缝

尖端拉应力集中,随着裂缝的扩展,拉应力集中也转移到新的裂缝尖端。这说明拉应力是促使裂缝扩展的因素,产生的裂缝为拉裂缝。由于砌体材料性质的非均匀性,裂缝的扩展也完全受这种非均匀性控制,裂缝多沿着砂浆和粘结带中扩展,所以裂缝扩展路径呈现曲折性。

需要说明的是,当从细观尺度出发研究砌体结构的开裂过程时,其最重要的特点是可以而且必须考虑砌体所具有的细观非均匀性。因此,在细观尺度的研究中,必然打破以往模型中材料的均匀性假设,使其更符合实际。在数值模拟中考虑非均匀性后,就可以发现其中应力分布的非均匀性,进而就可以研究开裂的局部化以及裂缝的萌生和扩展,乃至整个开裂过程。本次模拟中,假定裂缝分散在整个单元,单元的力学性质仍然是均匀和各向同性的。另外,达到损伤阈值的单元仍然具有一定的刚度和承载力。对于损伤的单元,只有其最大主拉应变达到了给定的极限应变 $\varepsilon_{tu}$ 时,则认为该单元完全是损伤断裂,并将单元的弹性模量赋一个小数(1.0E-05),此时在后处理图上该单元以黑色显示为裂缝。在本次的数值模型中,拉伸损伤是导致裂缝萌生和扩展的直接原因。剪切损伤也会导致单元力学性质的弱化,不直接产生裂缝,但是剪切损伤同样可以导致损伤单元周围的应力重分布,从而诱发新的应力集中,促使周围单元发生拉伸损伤,形成裂缝。从图3中可以看出,砌体墙在水平载荷作用下,沿着对角线出现裂缝,裂缝的扩展也是沿着对角线上砂浆中开展的,其裂缝的开展过程与实验结果<sup>[27]</sup>(如图4)具有一致性。

图3 水平剪切载荷作用下开裂过程(MFPA<sup>2D</sup>数值试验结果)Fig.3 The cracking process of masonry under level shear loading(The result of MFPA<sup>2D</sup> numerical simulation)

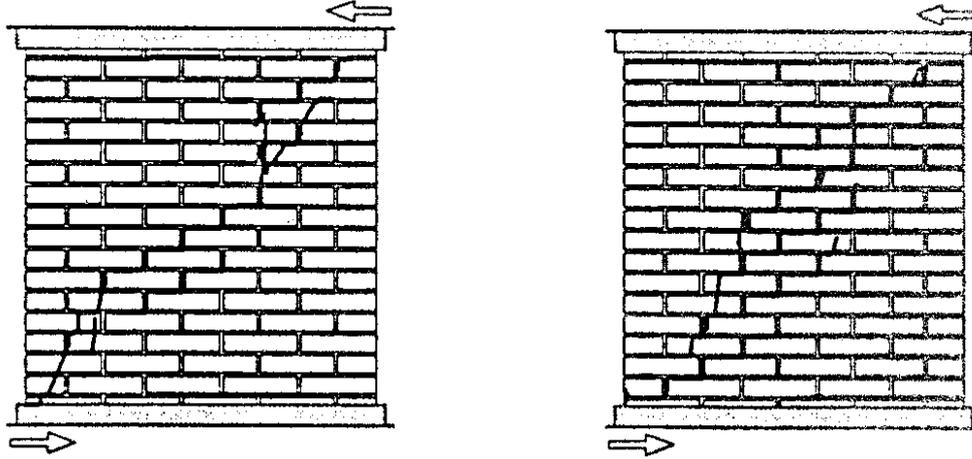


图4 水平剪切载荷作用下开裂过程(物理实验结果)<sup>[22]</sup>

Fig.4 The cracking process of Masonry under level shear loading(The result of physical experiment)

## 4 结语

本文考虑材料的非均匀性特点,建立砌体结构开裂数值模型,应用材料破裂过程数值分析(MFPA<sup>2D</sup>)方法,从细观力学层次上,模拟了砌体结构试件在水平载荷从损伤到开裂破坏的全过程,并进行了数值分析,得到如下结论:

(1) 在引入统计分布描述砌体结构材料的非均匀性后,构建砌体结构单元简单的力学模型,利用该模型模拟砌体结构试件在剪切载荷下的开裂过程,其结果与实验结果具有较好的相似性,很好地反映砌体结构的宏观力学行为,该模型和模拟方法的提出给砌体开裂力学机理和裂纹扩展问题的研究带来了新的契机。

(2) 应用 MFPA<sup>2D</sup> 系统能够模拟砌体结构裂纹的开展、贯通直至破坏的全过程,清晰反映出物理实验不易获取的应力场、位移场和损伤演化过程在破裂过程中的调整、迁移以及相互作用。

### 参考文献:

[1] T Miha, C Nigel, S S Shivas. Seismic behavior of masonry walls: experimental simulation [J]. J. Struct. Engrg. ASCE, 1996, 122(9): 1040-1047.  
 [2] D P Abrams, T J Paulson. Modeling earthquake reponse of masonry building structures [J]. ACI Structural Journal, July-August, 1991, 113: 475-485.  
 [3] Y J Chiou, J C Tzeng, Y W Liou. Experimental and analytical study of masonry infilled frames [J]. Journal of Structural Engineering, June 1999, 125: 1109-1125.  
 [4] M A Milad, S N Sinha. Stress-strain characteristics of brick masonry under uniaxial cyclic loading [J]. Journal of Structural Engineering, June, 1999, 125: 600-604.

[5] 施楚贤, 谢小军. 砌体结构小型空心砌块砌体受力性能[J]. 建筑结构, 1999, (3): 13-16.  
 Shi Chuxian, Xie Xiaojun. Performance of small-size hollow concrete blocks under loading [J]. Building Structures, 1999, (3): 13-16. (in Chinese)  
 [6] 苑振芳. 混凝土结构砌块建筑发展现状及展望[J]. 墙体革新与建筑节能, 1999, (4): 25-29.  
 Yuan Zhenfang. Concrete block buildings: now and future [J]. Walling Material Innovation and Energy Conservation of Buildings, 1999, (4): 25-29. (in Chinese)  
 [7] 肖小松. 砌体结构的力学性质及数值模拟[D]. 上海: 同济大学, 1995.  
 Xiao Xiaosong. Properties and numerical models of masonry structures [D]. Shanghai: Tongji University, 1995. (in Chinese)  
 [8] 唐岱新, 马晓儒. 多层砌块房屋的变形裂缝成因与防治[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2000, (1): 6-11.  
 Tang Daixin, Ma Xiaoru. The cause and control of cracking in multi-story masonry buildings [J]. Building Blocks and Blocks Building, 2000, (1): 6-11. (in Chinese)  
 [9] S Briccoli Bati, G Ranocchiai, L Rovero. A micromechanical model for linear homogenization of brick masonry [J]. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, January-February, 1999, 32: 22-30.  
 [10] 周炳章, 郑伟, 关启勋. 小型砌体结构空心砌块六层模型房屋抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(4): 13-21.  
 Zhou Bingzhang, Zheng Wei, Guan Qixun. Experimental study of aseismic behavior of six-story masonry building with small-size hollow concrete blocks [J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(4): 13-21. (in Chinese)  
 [11] 曾晓明, 杨伟军, 施楚贤. 砌体受压本构关系模型的研究[J]. 四川建筑科学研究, 2001, (3): 8-10.  
 Zeng Xiaoming, Yang Weijun, Shi Chuxian. Study of

- constitution relationship model for compressive masonry [J]. *Building Science Research of Sichun*, 2001, (3): 8-10. (in Chinese)
- [12] C A Tang. Numerical simulation on progressive failure leading to collapse and associated seismicity [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 1997, 34 (2): 249-261.
- [13] 刘光廷, 王宗敏. 用随机骨料模型数值模拟混凝土材料的断裂[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1996, 36(1): 84-89.
- G T Liu, Z M Wang. Numerical simulation study of fracture of concrete materials using random aggregate model [J]. *Journal of Tsinghua University (Sci & Tech)*, 1996, 36(1): 84-89. (in Chinese)
- [14] C A Tang, L G Tham, P K K Lee, etc. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression( I 、 II)[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2000, 37: 571-583.
- [15] C A Tang, P K Kaiser. Numerical simulation of cumulative damage and seismic energy release during brittle rock failure-Part I: Fundamentals [J]. *Int. J. Rock Mech. Min*, FEB, 1998, 35(2): 113-121.
- [16] P K Kaiser, C A Tang. Numerical simulation of damage accumulation and seismic energy release during brittle rock failure-Part II: Rib pillar collapse [J]. *Int. J. Rock Mech. Min* FEB, 1998, 35(2): 123-134.
- [17] C A Tang, H Liu, P K K Lee, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression-Part I: Effect of heterogeneity [J]. *Int. J. Rock Mech. Min*, 2000, 37(4): 555-569.
- [18] C A Tang, L G Tham, P K K Lee, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression - Part II: Constraint, slenderness and size effect [J]. *Int. J. Rock Mech. Min*, 2000, 37(4): 571-583.
- [19] W C Zhu; C A Tang. Numerical simulation on shear fracture process of concrete using mesoscopic mechanical model [J]. *Construction And Building Materials*, 2002, V16, N8(DEC): P453-463.
- [20] Y J Chiou, J C Tzeng, S C Hwang. Discontinuous deformation analysis for reinforced concrete frames infilled with masonry walls [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 1998, 6(2): 201-215.
- [21] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 科学出版社, 2003.
- Tang Chunan, Wang Shuhong, Fu Yufang. Numerical test of rock failure [M]. Science Press, 2003. (in Chinese)
- [22] 朱万成, 唐春安, 赵文, 滕景光. 混凝土试样在静态载荷作用下断裂过程的数值模拟研究[J]. *工程力学*, 2002, 19(6): 148-153.
- Zhu Wangcheng, Tang Chunan, Zhao Wen, Teng Jingguang. Numerical simulation on the fracture process of concrete specimen under static loading [J]. *Engineering Mechanics*, 2002, 19(6): 148-153. (in Chinese)
- [23] 王述红. 砌体开裂过程细观模型及其数值试验[R]. 东北大学博士后出站报告, 2003.
- Wang Shuhong. Constitutive model and numerical test of cracking process of masonry structures (Post-doctor Report) [R]. Shenyang: Northeastern University, 2003. (in Chinese)
- [24] S H Wang, C A Tang, W C Zhu, K Zhang. Numerical test of fracture characteristics of concrete-brick blocks material failure subjected to biaxial loading [J]. *Key Engineering Materials*, 2002, 243-244: 363-368.
- [25] 王述红, 唐春安, 吴献, 朱万成. 砌体结构开裂过程细观损伤数值模型及其分析方法[J]. *建筑结构学报*, 2002, 24(2): 64-69.
- Wang Shuhong, Tang Chunan, Wu Xian, Zhu Wancheng. Constitutive damage model and numerical methods for cracking process of masonry structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2002, 24(2): 64-69. (in Chinese)
- [26] 王述红, 唐春安, 吴献, 赵轶超. 砌体构件裂缝开展相互作用与贯通数值分析[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2002, 23(11): 1108-1111.
- Wang Shuhong, Tang Chunan, Wu Xian, Zhao Yichao. Numerical analysis of crack formation, reciprocity and coalescence of masonry structures [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2002, 23(11): 1108-1111. (in Chinese)
- [27] T M J Rajmakers, A T Vermeltfoort. Deformation controlled mesoshear tests on masonry piers [C]. Report B-92-1156, TNO-BOUW/TU Eindhoven, Building and Construction Research, The Netherlands, 1992. (in Dutch)