

文章编号:1006 - 7329(2002)04 - 0035 - 05

# 砌体 RVE 均质过程的有限元分析

王达谔, 武建华

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**均质化是以连续介质力学为基础的砌体结构数值分析中最重要的一步,形成可以等效砌体组成材料的砌体代表性体积单元(Representative Volume Element,简称 RVE)又是均质化过程中的关键步骤。RVE 是通过分别考虑砌块和砂浆的材料特性和相互作用建立起来的力学模型,本文采用有限元分析程序 ANSYS 对 RVE 进行模拟,分析了它在几种不同的加载条件下的应力应变关系,计算了它的等效弹性模量和泊松比,阐明了有限元法可以被用于砌体均质化过程。

**关键词:**砌体; 代表性体积单元(RVE); 均质化; 有限元

**中图分类号:**TU311

**文献标识码:**A

砌体是一种二相复合材料,常常由砌块和砂浆组成。从复合材料力学发展起来的砌体均质化方法把砌体视为周期性复合连续体,并将其组成材料的所有几何和本构信息都融入到一个代表性体积单元中,最后通过使用周期介质均质化理论和有限元方法得出砌体的整体力学性质<sup>[1]</sup>,该方法是一种有效的研究工具并且也是对昂贵耗时的实验研究的一种可行性替代。

砌体 RVE 是均质化过程中使用的主要力学模型,本文选取了 120 mm 厚墙中的一个砌体单元作为砌体 RVE 研究对象,用有限元软件 ANSYS 求取了它的数种力学性质。

## 1 RVE

RVE 应具有如下一些性质:(1)包括所有组成砌体的材料;(2)可以按照周期性和连续分布的规律组成完整的结构。这里按照文献[1]中述及的 RVE 同其参照系的关系,选取了如图 1 所示的砌体 RVE 单元,其组成材料砌块和砂浆都被理想化为各向同性材料,有各自的材料属性,表 1 列出了本文采用的弹性常数和强度指标,屈服准则采用 Drucker - Prager 模型。

表 1 砌块和砂浆的弹性常数及强度指标

	弹性模量 (MPa)	泊松比	单轴抗压强度 (MPa)	单轴抗拉强度 (MPa)
砌块	11e3	0.2	10	0.5
砂浆	2.2e3	0.2	5	0.5

文献[2]中指出如果不考虑位移突变的前提下,当在代表性体积单元上施加一整体均匀应力场或变形场时,平均应力和平均应变分别为:

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV \tag{1}$$

$$\bar{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \epsilon_{ij} dV \tag{2}$$

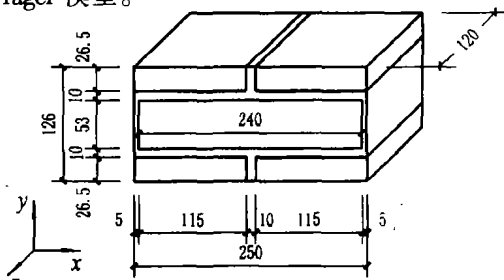


图 1 RVE 的选取方法和尺寸

\* 收稿日期:2002 - 06 - 12

作者简介:王达谔(1977 - ),男,重庆江津人,硕士生,主要从事工程力学研究。

其中  $V$  是 RVE 的体积;  $\sigma_{ij}$  和  $\varepsilon_{ij}$  分别是应力和应变的各个分量。基于这一点, 本文采用了在 RVE 上施加不同约束和荷载组合的模拟方法, 再由 (1) 和 (2) 求取平均应力和平均应变, 但是这样做容易导致 RVE 产生非均匀应力场, 为此, 本文采用累叠 RVE 的方法来避免非均匀应力场对有限元模拟结果的影响, 同时这样也保证了累叠后 RVE 的应变相容条件。RVE 累叠的方法参见图 2。

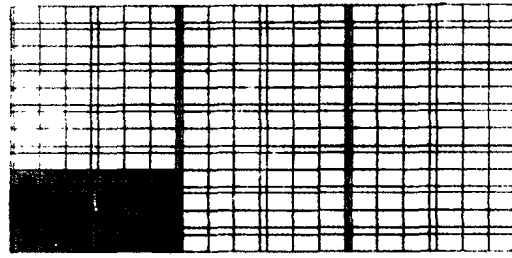


图 2 RVE 单元在  $x, y$  向上的累叠 ( $3 \times 3$  RVE)

## 2 有限元模拟的内容

RVE 的网格划分方法参见图 3, 图中约定了下文中使用的各个面的名称。对砌体 RVE 本文主要做了以下一些工作: (1)  $x$  向和  $y$  向单轴抗压和抗拉模拟; (2)  $x$  向和  $y$  向的单轴剪压复合模拟; (3) 等效弹性模量和泊松比的求取; (4) 累叠 RVE 对消除约束和施力形式引起有限元模拟偏差的效果。对应上面的各 FE 模拟试验, 下面分别说明一下 RVE 的约束和施荷方式: 对试验 1 中的  $x$  向 ( $y$  向) 模拟采用在 RVE 的右侧面 (顶面) 施以法向均布荷载, 并在其对面约束结点的  $x$  向 ( $y$  向) 位移; 对试验 2 中的  $x$  向 ( $y$  向) 模拟采用在 RVE 的右侧面 (顶面) 施以法向均布压力和沿  $-y$  向 ( $+x$  向) 的切向均布荷载, 并在其对面约束  $x$  向和  $y$  向的结点位移; 对试验 3 采用类似试验 1 的约束和施力方式, 但是将施加均布力改为施加微小的位移, 以保证砌体 RVE 处在弹性受力阶段; 对试验 4 采用与试验 1 和 2 相应的约束和施力方式。

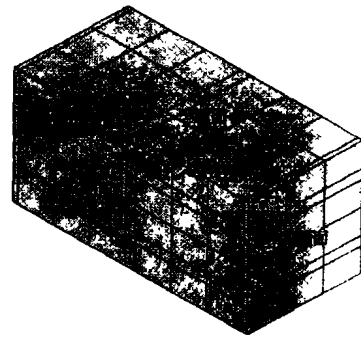


图 3 RVE 的有限元模型

## 3 RVE 的有限元模拟结果

为简化起见, 本文只列出上述各模拟结果中的部分结果。并且, 如果没有特别指出, 则不同方向上相同类型的模拟试验 (比如  $x$  向单轴抗压和  $y$  向单轴抗压) 所得的结果就有相似之处。具体对每一模拟结果的分析请参见文献 [4]。

### 3.1 单向抗压和抗拉

抗压关系 (见图 4) 同实际砌体试件抗压试验结果相比 (图 5) 较为相似<sup>[3]</sup>, RVE 单轴抗压强度介于砌块和砂浆的极限承载力之间, 这是比较合理的。RVE 单轴抗拉时应力应变关系都近似弹性, 只在接近破坏时产生微小塑性应变, 破坏时总应变很小, 这也同实际类似。

表 2 RVE 的单轴强度及其对应应变

方向	抗压强度 (MPa)	受压破坏时应变	抗拉强度 (MPa)	受拉破坏时应变
$x$ 向	8.987	$3.45 \times 10^{-3}$	0.244	$2.52 \times 10^{-5}$
$y$ 向	8.977	$2.55 \times 10^{-3}$	0.225	$3.33 \times 10^{-5}$

### 3.2 单向剪压复合模拟

RVE 的单向剪压复合极限承载力曲线如图 6 所示, 原重庆建筑大学也曾经做过一系列砌体试件单向剪压复合受力的试验, 得到的承载力曲线如图 7。图 6 和图 7 的相似性说明了 ANSYS 模拟砌体剪压复合受力的正确性。

$y$  向在不同法向力与切向力比值时的第 1 和第 3 主应力 - 主应变关系曲线如图 8 和图 9。由

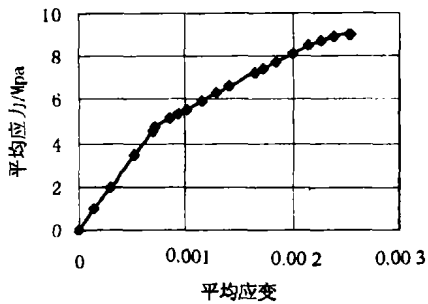


图4 y向单轴受压应力应变曲线(绝对值)

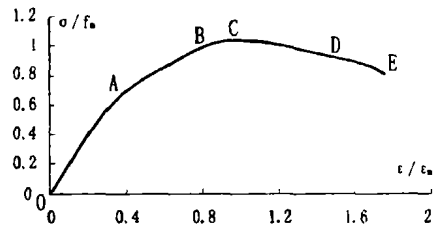


图5 四川省建研院测得的砌体单向受压 σ-ε 全曲线

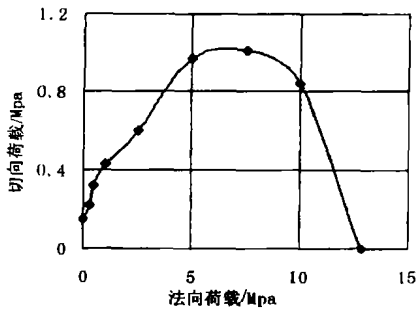


图6 y向剪压复合极限承载力

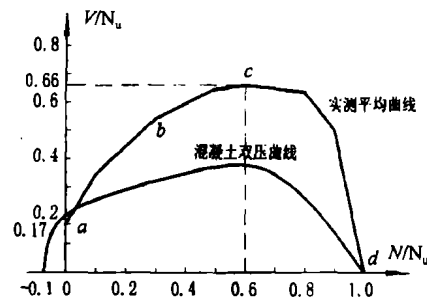


图7 原重庆建筑大学测得的砌体单向剪压复合承载力曲线

图可见在主应力为一拉一压的情况下,虽然以受拉破坏为主,但一向的抗拉强度(图8中几条曲线的最高点)却不一定随着另一向压应力的增长而下降,说明砌体一向的抗拉强度不仅同两主应力的比值相关,还同它们与砌体薄弱面的夹角有关<sup>[5]</sup>,反映了砌体具有明显非均质的材料性质。

### 3.3 等效弹性模量和泊松比

在进行单轴拉压模拟时,注意到当 RVE 处于弹性阶段时,不论是受压还是受拉,其初始切线刚度的值都相等,它们的大小分别为  $E_x = 8.55 \text{ GPa}$ 、 $E_y = 6.77 \text{ GPa}$ 、 $E_z = 9.22 \text{ GPa}$ 。三向弹性模量的不同恰当地反映了在弹性阶段砌体 RVE 受力的各向异性性质。

表3中, $\nu$ 的第一下标代表施荷的方向,第二下标代表引起变形的方向。可以验证等效泊松比和上面的初始弹性模量基本上满足正交各向异性材料的以下关系:

$$\nu_{xy}E_y = \nu_{yx}E_x, \nu_{xz}E_z = \nu_{zx}E_x, E_xE_y = \nu_{yz}E_z \quad (3)$$

这反映出砌体 RVE 具有正交各向异性性质。

表3 RVE 的等效泊松比

方向	$\nu_{xy}$	$\nu_{xz}$
x 方向	0.177	0.185
y 方向	$\nu_{yz}$	$\nu_{zx}$
	0.141	0.47
z 方向	$\nu_{zx}$	$\nu_{yz}$
	0.200	0.200

### 3.4 累叠 RVE 试验

按图3的方法这里进行了  $2 \times 2$ RVE 和  $3 \times 3$ RVE 单向受压、单向剪压复合的有限元模拟。得到

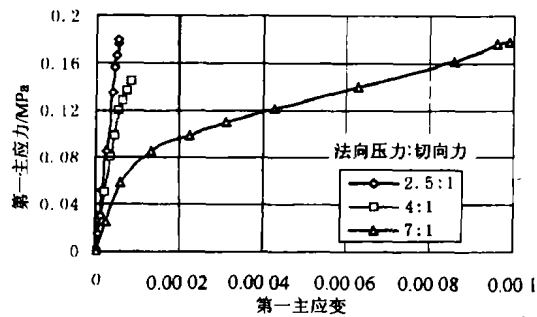
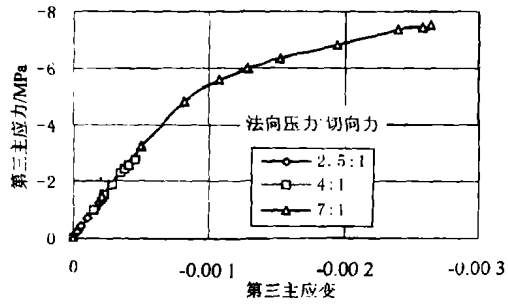


图8 y向剪压复合  $\sigma_1 - \epsilon_1$  关系图

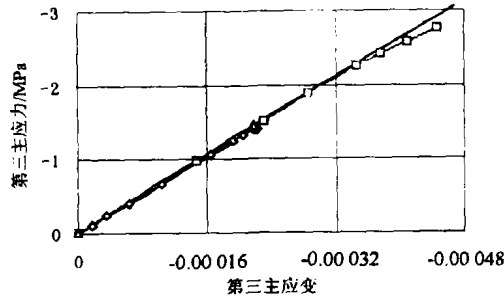
的单向抗压强度值列于表4中,图10和图11给出了不同RVE累叠形式下得到的剪压复合极限承载力图。

表4表明虽然随RVE的增多,抗压强度不断减小,但是减小的幅度却逐渐趋缓,因此由约束和施力形式引起RVE内应力分布的不均匀,可以通过圣维南原理来减小<sup>[1]</sup>,从而使有限元模拟得到的RVE等效强度参数更趋合理。

由于在做单RVE的单向剪压复合模拟时,不得不在施荷面的对面结点上施加与切向力方向相同的约束,所以导致了单RVE的剪压复合强度偏高,这类似于混凝土抗压强度测试时,试验机具对混凝土试块的“环箍效应”。但是随着RVE不断的累叠,图10和图11均反映出这一效应的影响明显地减小( $y$ 向差别较大是由于 $3 \times 3$ RVE试验的收敛准则取得较为粗略),因而再一次证实了累叠RVE可以部分消除约束和施荷方式引起的RVE内部应力分布的不均。



(a)原图



(b)原点附近的放大图

图9  $y$ 向剪压复合 $\sigma_3 - \epsilon_3$ 关系图

表4 不同RVE累叠形式对单轴抗压强度的影响(MPa)

方向	单RVE	$2 \times 2$ RVE	$3 \times 3$ RVE
$x$ 向	8.99	8.57	8.48
$y$ 向	8.91	8.76	8.53

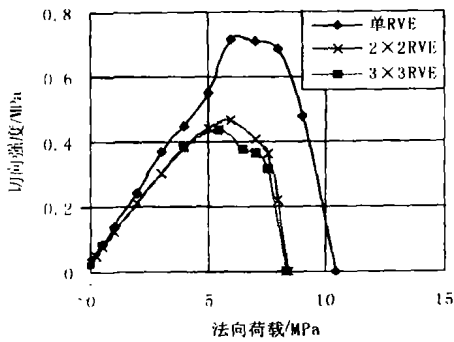


图10 不同累叠形式对RVE  $x$ 轴单向剪压复合强度的影响

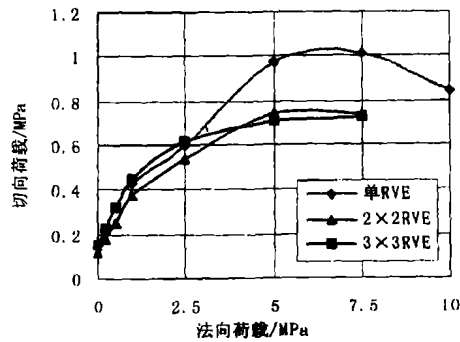


图11 不同累叠形式对RVE  $y$ 轴单向剪压复合强度的影响

### 4 结论

综上所述,砌体RVE具有以下一些性质:(1)砌体RVE有明显的各向异性材料性质,有力地证实了即使复合材料的组成材料是均质材料,通常情况下,复合材料的混合效应也会使得其材料性质变为各向异性材料。(2)砌体RVE具有同实际类似的较高抗压强度和较低的抗拉、抗剪强度。(3)砌体RVE的强度不单受到其内部主应力大小的影响,还受到主应力同薄弱层(砂浆灰缝)夹角的影响。

由此可见,砌体RVE可以反映砌体的多数力学性质,将它视为对砌体的均质化替代再应用于

整体结构是可行的。同时,以上有限元模拟试验同实际较为吻合的事实,也意味着有限元法可以被应用在砌体均质化过程中。在从组成材料到代表性体积单元的等效过程中,只要采取适当的施荷方式和约束形式,有限元法就能够得到砌体 RVE 比较合理的等效参数。

### 参考文献:

- [1] Anthoine, A. . Derivation of the In - plane Elastic Characteristics of Masonry through Homogenization theory[J]. International Journal of Solids and Structures, 1995, (32): 137 - 163.
- [2] Guowei Ma, Hong Hao, Member, ASCE, and Youg Lu. Homogenization of Masonry Using Numerical Simulations[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(5): 421 - 431.
- [3] 杨伟军,施楚贤. 砌体受压应力应变关系全曲线的研究[A]. 99' 全国砌体结构学术会议论文集[C]. 杭州, 1999.
- [4] 王达诠. 应用 RVE 均质化方法的砌体非线性分析[D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2002.
- [5] M. Dhanasekar, A. W. Page, P. W. Kleeman. The Failure of Brick Masonry under Biaxial Stresses[A]. Proc. Instr. Civ. Engrs. [C], 1985, 79, June, Part 2, 295 - 313.

## Finite Element Analysis of Masonry RVE Homogenization Procedure

WANG Da - quan, WU Jian - hua

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** Homogenization is one of the most important steps in the numerical analysis of masonry structure, where the continuum is used. A masonry representative volume element (RVE) is formed as the equivalent element of masonry components and it is the most important step in homogenization procedure. The RVE is modeled with consideration of the material properties of mortar and brick as well as their interaction separately. In this paper the masonry RVE is simulated with the finite element software ANSYS. The stress - strain relationships of RVE subjected to different types of loading conditions are presented. The equivalent elastic modulus and Poisson's ratio are calculated and the feasibility of finite element method used in the procedure of masonry homogenization is demonstrated.

**Keywords:** masonry; representative volume element (RVE); homogenization; finite element