

砌体墙板状态数值模型及其破坏模式预测

潘 登¹, 张 瑀¹, 赵俭斌²

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 110179 沈阳)

摘 要: 为了更加准确地预测砌体墙板的破坏模式, 本文进一步发展了砌体墙板状态离散级数型细胞自动机模型, 提出了细胞自动机模型中状态值的两种新的计算方法, 一是基于砌体墙板有限元分析的物理细胞自动机模型; 二是基于边界约束对板内区域效应的解析型细胞自动机模型. 然后, 对两个新的状态数值模型与原细胞自动机状态数值模型进行了举例验证. 继而, 提出了相对变异系数的概念, 并将其融入了离散级数型和解析型细胞自动机模型. 通过对相对变异系数适用性的探讨, 给出了基于一块试验墙板、预测另一墙板可能出现的一组破坏模式的初级方法. 与试验记录对比表明, 该方法的预测结果可靠.

关键词: 破坏模式; 状态值; 细胞自动机模型; 相对变异系数

中图分类号: TU365

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)06-0051-07

Numerical state model and failure pattern prediction of masonry wall panels

PAN Deng¹, ZHANG Yu¹, ZHAO Jian-bin²

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, 110179 Shenyang, China)

Abstract: To predict failure pattern of masonry wall panel more precisely, this paper improved the discrete series cellular automata (CA) model of masonry wall panels, and put forward two new methods for calculating state values in the CA model. One was the physical CA model based on the finite element analysis of masonry wall panels, the other is the analytical CA model based on the propagating appearance of boundary effect to zones within masonry wall panels. Both new models were verified by examples. The concept of relative variation coefficient was proposed and applied to the discrete series CA model and the analytical CA model. By discussion of the application range of the relative variation parameter, a fundamental technique was presented to predict a serious possible failure pattern of a new masonry wall panel on the base of only one experimental masonry wall panel. Experimental results verified the validity of the method proposed in this paper.

Key words: failure pattern; state value; cellular automata (CA); relative variation coefficient

一直以来, 如何通过数值模拟得到砌体墙板的破坏模式都是国内外学者重点关心的问题^[1-2]. 现有分析方法由于砌体墙板材料的复合性和离散性, 所采用的本构关系往往与真实情况不符. 为了更加准确地预测新砌体墙板的破坏模式, 文献[3-5]通过对砌体墙板局域性质的研究

提出了刚度/强度修正系数的概念, 并在此基础上定义了类似区域. 文献[6-9]建立了砌体墙板的细胞自动机模型, 实现了预测新砌体墙板破坏模式. 并且, 文献[10]还通过神经网络模型实现了预测砌体墙板破坏荷载. 但是, 在以上工作中实现的预测均是一一对应的. 根据工程经验和试验结果可知, 相同砌体墙板在相同荷载作用下, 在多次试验中可能出现不同的破坏模式, 并且这些不同的破坏模式间可能存在较大差异. 为此, 本文尝试如何通过引入反映相对变异的参数, 赋予墙板离

收稿日期: 2011-08-29.

基金项目: 辽宁省(高校)重点实验室开放基金资助项目(YT-200903); 沈阳科技局资助项目(1081271-9-00-3).

作者简介: 潘 登(1983—), 女, 博士.

通信作者: 潘 登, pdeng@hit.edu.cn.

散型细胞自动机状态数值模型新的内涵. 同时, 探讨了如何建立包含相对变异系数墙板状态解析模型, 以及基于 FEA 的墙板状态物理模型. 通过以上研究, 尝试根据一块试验墙板破坏模式预测几个新砌体墙板可能出现的破坏模式的方法.

1 预测新砌体墙板破坏模式的步骤

基于试验记录直接预测新砌体墙板破坏模式的方法, 步骤见图 1. 其中双线圈出的部分为本文研究内容. 其余各部分, 均采用文献[6-9]的研究结果.

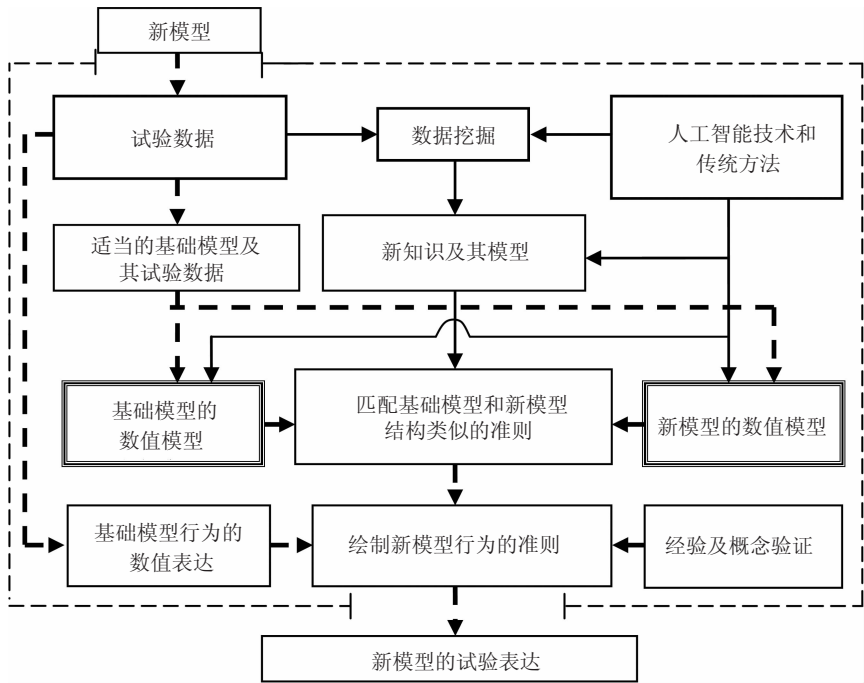


图 1 基于试验结果预测新/未知墙板流程

2 离散级数型细胞自动机模型

建立试验墙板和新的未知墙板构造模式的细胞自动机模型, 步骤有三: 第一步, 要对整个试验墙板或新的未知墙板进行划分, 并使每个网格都对应墙板上一个区域, 成为一个细胞元. 第二步, 在墙板细胞自动机状态数值模型中给每个边界赋值, 作为状态函数的初始值. 进而, 由细胞自动机数值模型计算出每个细胞元的状态值. 第三步, 形成用来表示砌体墙板构造的墙板状态数值模型.

在砌体墙板的细胞自动机模型中, 各个细胞元状态值所表达的墙板状态, 是指砌体墙板中各个区域受到边界条件影响的大小程度, 体现的是构造特征, 因为墙板上类似区域是结构构造特性的体现. 墙板的离散状态模型定量地刻画了边界条件的影响.

文献[3]在前期的研究中给出了如下离散状态函数, 根据该函数, 基础墙板和新的未知墙板上每个细胞元的状态值都由墙板四边约束对该区域的影响共同决定. 为了使墙板的细胞自动机模型对墙板的模拟尽可能精确, 文献[3, 4, 6]证明最适合的参数选择为: 自由边为 0.0, 有约束边为 0.2.

$$\begin{cases} L_{ij} = 1 - L_{\bar{j}}; L_{ij} = L_{i,j-1} + \eta(1 - L_{i,j-1}), \\ (i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N) \\ R_{ij} = 1 - R_{\bar{j}}; R_{ij} = R_{i,j+1} + \eta(1 - R_{i,j+1}), \\ (i = 1, 2, \dots, M; j = N, N-1, \dots, 2, 1) \\ B_{ij} = 1 - B_{\bar{j}}; B_{ij} = B_{i-1,j} + \eta(1 - B_{i-1,j}), \\ (i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N) \\ T_{ij} = 1 - T_{\bar{j}}; T_{ij} = T_{i+1,j} + \eta(1 - T_{i+1,j}), \\ (i = M, M-1, \dots, 2, 1; j = 1, 2, \dots, N) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $L_{i,0}, R_{i,N+1}, B_{M+1,j}, T_{0,j}$ 为状态函数左、右、下、上边界初始值; i, j 为区域的位置序号; M, N 为网格的总行数和总列数; η 为基础墙板的传递系数; η' 为新的未知墙板的传递系数; $L_{ij}, R_{ij}, B_{ij}, T_{ij}$ 分别为细胞自动机中各个区域 (i, j) 由 4 个边界决定的状态值.

然后, 区域 (i, j) 的状态值可通过式 (2) 得到.

$$S_{ij} = (L_{ij} + R_{i,j+1} + B_{i+1,j} + T_{i+1,j+1})/4, \\ (i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

3 相对变异系数的引入和应用

3.1 相对变异系数的引入

在上述细胞自动机模型中, 基础墙板与新的未知

知墙板的状态值都由式(1)和式(2)确定. 这意味着在该细胞自动机模型中假定新/未知墙板与基础墙板的材料传递边界对墙板内部区域的能力完全相同. 然而, 由于砌体墙板由两种材料构成, 为不均匀的各向异性材料, 所以即使新/未知墙板与基础墙板使用相同的材料并具有相同的构造, 墙板对边界影响的传递效果也不完全相同. 为了力求更加准确的描述新/未知墙板传递边界影响的能力相对于基础板的不同或变异, 在传递函数中引入相对变异系数 α . 则新 / 未知墙板的各细胞元状态值可仍由式(1) 和式(2) 确定, 但式(1) 中的传递系数 η 要换成 η' .

$$\eta' = \alpha \eta ,$$

(3)

式中 α 为新/未知墙板对基础墙板的相对变异系数.

3.2 相对变异系数的应用

通过式(1) ~ (3), 可以分别求得基础墙板和 新/未知墙板内各区域的状态值, 进而通过 Zhou^[10] 提出的匹配准则寻找新/未知墙板各个区域在基础墙板内与其对应的类似区域, 从而得到新/未知墙板的破坏模式.

当式(3) 中相对变异系数 α 取值发生变化, 新 / 未知墙板各区域的状态值随之改变. 状态值是匹配基础墙板与新 / 未知墙板间类似区域的基础, 故而 α 取值的变化必然导致类似区域发生变化, 也就是预测的新 / 未知墙板的破坏模式会随着相对变

异系数 α 的改变而改变. 因此, 令 α 在一定区间内取不同值, 可以初步得到一系列新 / 未知墙板可能出现的破坏模式. 选取规格为 3 m × 6 m 和 2.5 m × 5 m 的砌体墙板破坏模式为基础墙板, 分别预测尺寸为 2.5 m × 5 m, 2.5 m × 3.75 m 和 2.5 m × 2.5 m 的新 / 未知墙板破坏模式. 按式(4) 和式(5) 计算相对变异系数 α , 并代入新 / 未知墙板的细胞自动机模型, 通过图 1 步骤, 分别计算出对应每个 α 值的新 / 未知墙板破坏模式. 为了研究相对变异系数 α 合理取值范围, 采用归纳法, 并以 Lawrence^[11] 进行的面外横向荷载作用下砌体墙板试验结果为依据. 该试验中, 砌体墙板主要分为 4 种规格: 3 m × 6 m, 2.5 m × 5 m, 2.5 m × 3.75 m 和 2.5 m × 2.5 m.

对预测所得新/未知墙板破坏模式进行经验与概念判断. 遵循以下原则: (1) 预测所得破坏模式要形成清晰的破坏裂纹; (2) 破坏模式的中心区域或四角不能出现大面积的破坏区域; (3) 破坏模式要符合力学及经验分析. 计算表明, 相对变异系数 α 的合理取值集中在一个连续的区间内. 将所得 α 值的边界在表 1 列出.

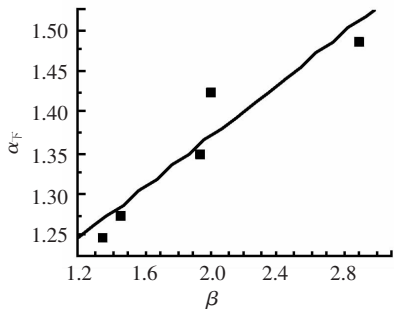
整理变异系数 α 上、下边界与基础墙板与新 / 未知墙板面积比值间的对应关系, 所得数据见表 2. 以变异系数 α 的上下边界为自变量, 以基础墙板与新 / 未知墙板面积比 β 为因变量. 在坐标系描出各点, 可见二者间近似服从线性规律, 见图 2.

表 1 相对变异系数 α 的边界

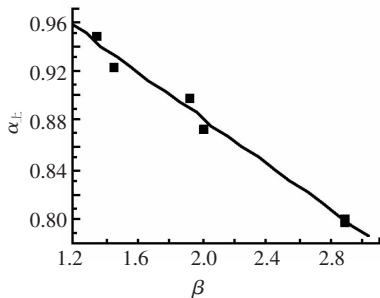
基础墙编号	新/未知墙板尺寸 $a \times b / m \times m$					
	2.5 × 2.5		2.5 × 3.75		5 × 2.5	
	α 上边界	α 下边界	α 上边界	α 下边界	α 上边界	α 下边界
Test22	1.40	0.85	1.25	0.95	—	—
Test23	1.45	0.90	1.25	0.95	—	—
Test24	1.45	0.90	1.20	0.95	—	—
Test25 A	1.40	0.90	1.25	0.95	—	—
Test6	1.50	0.75	1.35	0.90	1.25	0.95
Test8	1.50	0.75	1.40	0.85	1.30	0.95
Test9	1.45	0.80	1.40	0.90	1.30	0.95
Test10	1.50	0.75	1.30	0.90	1.25	0.90
Test29 A	1.50	0.80	1.35	0.90	1.30	0.90
Test30	1.50	0.80	1.45	0.90	1.25	0.95
Test31 A	1.50	0.90	1.30	0.95	1.30	0.90
Test36	1.40	0.85	1.30	0.90	1.25	0.90

表 2 相对变异系数 α 的边界与墙板尺寸比值间的关系

墙板面积比值	α 上边界均值	α 下边界均值
1.333	1.2500	0.950
1.440	1.2750	0.925
1.920	1.3500	0.900
2.000	1.4250	0.875
2.880	1.4875	0.800



(a) 下边界线性回归结果



(b) 上边界线性回归结果

图 2 相对变异系数 α 的边界与墙板尺寸的线性关系

下边界回归方程:

$$\alpha_{\text{下}} = 1.07 - 0.10\beta, \tag{4}$$

上边界回归方程:

$$\alpha_{\text{上}} = 1.07 + 0.15\beta. \tag{5}$$

由于文中采用的试验样本厚度均相同,因而不考虑厚度对相对变异系数区间产生的影响. Zhou^[3]的工作已经证实该细胞自动机模型只适用于基础板尺寸大于新/未知墙板尺寸的情况,故而 $\beta > 1$.

根据式(1)可知,当 $\alpha > 1$ 时,新/未知墙板传递边界效应的能力强于基础墙板;而当 $\alpha < 1$ 时,新/未知墙板传递边界效应的能力弱于基础墙板. 由于 $\beta > 1$,即新/未知墙板尺寸均小于基础墙板,故 $|\alpha_{\text{上}} - 1| > |\alpha_{\text{下}} - 1|$.

上边界与下边界的相对变异系数呈相反关系表明作为基础墙板的试验墙板与破坏模式未知的新墙板尺寸相差越大, α 取值区间也越大.

通过式(3)~(5),在 Zhou^[3]提出的离散细胞自动机模型中引入相对变异系数的概念,并对其合理取值范围进行探讨. 下面以 Test6^[11]为基础墙板,通过改变新/未知墙板细胞自动机模型中

相对变异系数 α 的值,得到一系列新/未知墙板可能出现的破坏模式,并将预测所得破坏模式与试验中取得的破坏模式进行对比,见表 3. 本文涉及试验数据墙板,均由实心砌体和砂浆共同组成. 表 3、4 中墙板实际破坏裂纹大部分是沿砂浆缝隙展开,但本文研究重点在于墙板裂纹的整体趋势,因而没有强调裂纹的细部特征.

表 3 离散级数型 CA 模型所得破坏模式的变异

α	破坏模式	试验破坏模式 ^[11]
1.00		
1.10		
1.25		
1.40		

表 4 解析型 CA 模型所得破坏模式的变异

α	破坏模式	试验破坏模式 ^[11]
1.10		
1.15		
1.20		

4 解析型细胞自动机模型

尽管 Zhou^[3]提出的离散型细胞自动机模型取得良好的预测效果,但该模型存在如下缺点:(1)认为边界效应对砌体墙板内区域的影响是相互独立的;(2)区域状态值的计算依赖于墙板细胞自动机模型网格数.

为了克服以上缺点,提出针对四边约束砌体墙板的解析型细胞自动机模型,传递函数为

$$S_{ij} = 0.2 - 0.2\alpha \left(1 - \frac{2|x|}{a}\right) \left(1 - \frac{2|y|}{b}\right). \tag{6}$$

式中: S_{ij} 为区域的状态值; x, y 分别为区域中心的坐标值; a, b 分别为墙板边长; α 为相对变异系数.

该函数具有如下优点:(1) 函数为连续函数,可计算出墙板上任意一点的构造状态数值,避免了对区域网格划分的依赖;(2) 反映了相邻边界间的相互作用.

表 4 给出了利用解析型细胞自动机模型,以

Test6^[11]为基础墙板,通过改变相对变异系数所得的一系列新/未知墙板可能出现的破坏模式与试验所得破坏模式的对比。

对解析型细胞自动机模型的相对变异系数 α 取值范围进行研究,得出结论与式(4)、(5)基本相同,证实了 α 是一个能够初步反映墙板构造情况的量,取值范围只与基础墙板及新/未知墙板有关,与细胞自动机模型的状态函数无关。

表 3、4 列出预测结果和试验破坏模式表明:

1) 表 3、4 列出的 4 个试验试件与基础墙板材料、厚度、边界条件均相同。但它们的破坏模式存在明显区别,体现了砌体墙板明显的变异性。因而,在墙板的细胞自动机模型中引入能够刻画砌体墙板变异性的参数十分必要。

2) α 的变化能够引起预测所得的新/未知墙板的破坏模式发生明显变化,且预测结果与试验结果吻合良好,初步表明 α 的引入能够反映砌体墙板传递边界约束效应的变化,使得细胞自动机模型能够描述新/未知墙板可能出现的多个工作性能,从而拓展了基础墙板的试验信息的应用,并初步实现了墙板破坏模式变异性的预测。

5 基于 FEA 的物理型细胞自动机模型

5.1 基本思想

建立该模型的主要思想:首先假定基础墙板与新/未知墙板为理想线弹性下的匀质材料墙板,并建立墙板的 FEA 分析模型,得到各单元节点在实际工作荷载作用下的位移值。根据式(7)、(8)计算基础墙板与新/未知墙板上各个区域的状态值。并根据状态值进行类似区域的匹配,得到新/未知墙板的破坏模式。

在 FEA 模型中,材料的非线性和变异性都在基础墙板的破坏模式中得到体现,因此映射所得的新/未知墙板破坏模式也体现了材料的非线性和变异性。所以,在 FEA 模型中,只考虑墙板的边界条件和荷载工况,不考虑材料的非线性和变异性。

$$N = D/d_{\max}, \tag{7}$$

式中: D 为有限元分析所得节点位移矩阵; $d_{\max}$ 为 D 中绝对值最大的元素; N 为无量纲化节点位移矩阵。

$$S_{ij} = (N_{ij} + N_{i,j+1} + N_{i+1,j} + N_{i+1,j+1})/4, \\ (i = 1, 2, \cdots, M + 1; j = 1, 2, \cdots, N + 1) \tag{8}$$

式中 S_{ij} 为区域状态值。

下面给出实例,验证基于 FEA 的物理型细胞自动机模型的效果。

5.2 砌体墙板的 ANSYS 模型

Lawrence^[11]进行的砌体墙板试验的作用荷载均为面外横向均布荷载,变形主要发生在 z 方向, x 、 y 方向的变形可以忽略,因而选用 SHELL181 单元进行建模。定义材料本构关系为理想线弹性,取弹性模量 $E = 1.7 \times 10^9 \text{ N/m}^2$,泊松比 $\nu = 0.2$ 。单元尺寸为 $125 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ 。面外均布荷载按照砌体墙板的实际破坏荷载取值。通过 Ansys 分析,得到横向荷载作用下的 z 向变形等高线图,以尺寸为 $3 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 的四边约束墙板为例,见图 3。

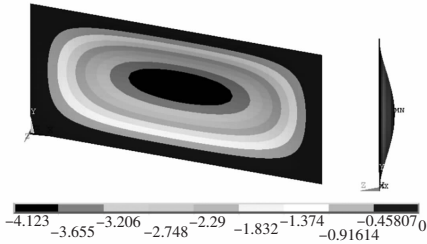


图 3 砌体墙板的 FEA 模型分析结果

5.3 基于 FEA 的物理模型应用范围及效果

建立所有基础墙板及新/未知墙板的 FEA 模型,将分析结果根据式(7)和式(8)进行处理,得到基础墙板和新/未知墙板中各个区域的状态值。下面举例说明该方法的适用范围与效果,见表 5。

表 5 基于 FEA 的物理模型适用范围

适用范围	基础墙板破坏模式	新/未知墙板破坏模式	试验墙板破坏模式 ^[11]
Size ^b >Size ^a 边界一致			
Size ^b >Size ^a 边界一致			
Size ^b >Size ^a 边界不同			
Size ^b <Size ^a 边界不同			

注: Size^b 为基础墙板尺寸,Size^a 为新/未知墙板尺寸。

离散级数细胞自动机模型和解析型细胞自动机模型之所以能够预测砌体墙板的变异,是由于这两种细胞自动机模型通过相对变异系数的引入,通过墙板破坏模式投射/匹配,直接将变异性体现在投射结果中。从而实现了在未知墙板模型中体现材料性质变异对类似区域匹配的影响。结果表明,这样所表达的变异性与试验结果十分接近,与现有变异描述方法相比,本文似乎体现了更多的变异性。

而本文在建立砌体墙板的 FEA 模型过程中,采用了整体模型,有关材料性质的量均取实验值,因而基于 FEA 的物理型 CA 模型不能预测砌体墙板变异.如何在砌体墙板的 FEA 模型中反映材料性质变异,使得基于 FEA 的物理型 CA 模型具备预测砌体墙板变异有待进一步探讨.

6 3 种模型比较

通过表 5 计算结果可知,本文提出基于 FEA 的物理型细胞自动机模型适用范围大于离散型细胞自动机模型和解析型细胞自动机模型.图 4 对比了两种细胞自动机模型和基于 FEA 的物理型细胞自动机模型计算所得状态值.当砌体墙板网格划分相同时,基于 FEA 物理细胞自动机模型的状态值取值区间为 $[0,1]$,远大于两个细胞自动机模型的取值区间 $[0.8,1]$.这就使得不同区域的状态区分更加明显,从而导致了更加宽泛的适用范围.同时,通过图4曲线可知,离散型细胞自

动机模型当网格数 $N > 15$ 时,状态值曲线趋于平缓,近似为一条直线.这就限制了采用离散型细胞自动机模型时砌体墙板的网格划分数目.而解析型细胞自动机模型的相邻网格状态值曲线大体呈线性,相邻网格状态值区分始终较为明显.因而,解析型细胞自动机模型能够得到较离散型细胞自动机模型更为细腻预测结果.

表 6 对 3 种细胞自动机模型的特点进行了比较,在应用过程中可根据具体情况进行选择.

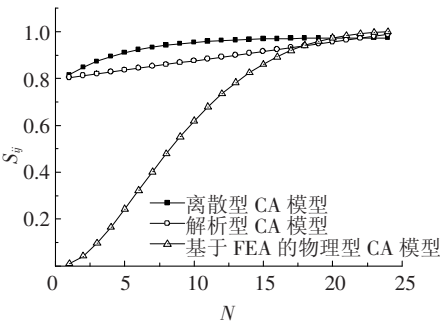


图 4 3 种模型的状态值比较

表 6 3 种模型的性能比较

模型类型	适用范围	物理意义	能否预测砌体墙板变异	预测结果网格划分
离散级数 CA 模型	$Size^b > Size^a$, 边界一致	未考虑边界之间的相互作用	能	较粗
解析型 CA 模型	$Size^b > Size^a$, 边界一致	考虑相邻边界间的相互作用	能	细腻
基于 FEA 的物理型 CA 模型	$Size^b > Size^a$, 边界一致 $Size^b > Size^a$, 边界不同 $Size^b < Size^a$, 边界不同	考虑边界及荷载的共同作用	不能	细腻

注: $Size^b$ 为基础墙板尺寸, $Size^a$ 为新/未知墙板尺寸.

7 结 论

- 1) 相对变异系数 α 能够初步刻画新/未知墙板相对于基础墙板的构造变异情况,并且它的取值范围取决于基础墙板与新/未知墙板的尺寸比.
- 2) 引进的相对变异系数 α 的离散型细胞自动机模型和解析型细胞自动机模型能够初步根据一块试验墙板的破坏模式得到一系列新/未知墙板可能出现的破坏模式,从目前算例看,预测的破坏模式与试验情况较为吻合.
- 3) 提出的基于 FEA 的物理型细胞自动机模型也能取得合理的预测效果,说明利用有限元分析结果表征结构区域的状态值是可行的,这个模型的应用尚需进一步探讨.
- 4) 细胞自动机网格与有限元分析网格的本质差别在于,有限元分析模型通过单元的应力应

变关系建立线性方程组,并对线性方程组进行求解,因而有限元分析模型中的单元为应力应变的载体;而细胞自动机模型通过类似区域匹配求解,单元是结构或构件区域构造属性的载体.细胞自动机模型的网格数目由试算对比进行选择.目前研究表明,在现有网格划分基础进一步加密并不影响预测结果的收敛.

致 谢:

感谢周广春老师对论文的指导、建议和修改.

参考文献:

[1] CHONG V L. The behavior of laterally loaded masonry panels with openings[D]. Plymouth, U K:University of Plymouth, 1993: 156 – 163.

[2] 熊一. 用 CA 及 ANN 预测注芯混凝土砌块墙体单轴受压破坏模式[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

- [3] ZHOU G C. Application of stiffness/strength corrector and cellular automata in predicting response of laterally loaded masonry panels[D]. Plymouth, U K:University of Plymouth, UK. 2002.
- [4] YAFIQ M Y, ZHOU G C, EASTERBROOK D. Analysis of brickwork wall panels subjected to lateral loading using correctors[J]. Journal of Masonry International, 2003, 16(2): 75–82.
- [5] 谢玲燕,余志鹏,周广春. 修正值和类似区域在砌体墙板中的应用[J]. 低温建筑技术,2006, 111: 50–52.
- [6] ZHOU G C, RAFIQ Y M, BUGMANN G, *et al.* Cellular automata model for predicting the failure pattern of laterally loaded masonry wall panels [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2006, 20(6): 400–409.
- [7] 周广春,谢玲燕,余志鹏. 预测面外荷载下砌体墙板破坏模式的 CA 模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(10): 1518–1519.
- [8] 潘登. 砌体结构智能技术实验环境的探讨[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [9] ZHANG Y, ZHOU G C, XIONG Y, *et al.* Techniques for predicting cracking pattern of masonry wallet using artificial neural networks and cellular automata [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2010, 24(2): 161–172.
- [10] ZHOU G C, PAN D, XU X, *et al.* Innovative ANN technique for predicting failure/cracking load of masonry wall panel under lateral load[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2010, 24(4): 377–387.
- [11] LAWRENCE S J. Design of masonry panels for lateral loading[R]. Chatswood, NSW, Experimental Building Station, 1980.

(编辑 赵丽莹)

(上接第19页)

2) 相对于间歇曝气,连续曝气情况下 PAC/UF 去除 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的效率分别平均提高 4% 和 5%;连续曝气会使出水颗粒数略微增加;在 PAC 投加量为 20 mg/L 的情况下,曝气方式对 P_{TM} 影响很大,间歇曝气时 P_{TM} 增长明显快于连续曝气时.而在 PAC 投加量为 40 mg/L 的情况下,曝气方式对 P_{TM} 变化几乎没有影响.0.8 L/min 曝气量情况下 P_{TM} 增长明显比 0.40 L/min 曝气量情况下缓慢,增加曝气量也可以减缓膜污染.

3) 与连续曝气相比,间歇曝气可以节约能耗 0.221 kW·h/m³,节约成本约 0.11 元/m³.综合考虑 PAC/UF 工艺膜污染、除污染效能和运行成本,对于 PAC/UF 工艺,间歇曝气更合适.

参考文献:

- [1] 李圭白,杨艳玲. 第三代城市饮用水净化工艺 超滤为核心技术的组合工艺[J]. 给水排水, 2007, 33(4): 1.
- [2] LIN C F, LIU S H, HAO O J. Effect of functional groups of humic substances on UF performance [J]. Water Research, 2001, 35: 2395–2402.
- [3] KONIECZNY K, KLOMFAS G. Using activated carbon to improve natural water treatment by porous membranes [J]. Desalination, 2002, 147: 109–116.
- [4] HUANG H, SCHWAB K, JACANGELO J G. Pretreatment for low pressure membranes in water treatment: a review [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(9): 3011–3019.
- [5] CAMPINAS M, ROSA M J. Assessing PAC contribution to the NOM fouling control in PAC/UF systems [J]. Water Research, 2010, 44(5): 1636–1644.
- [6] WICAKSANA F, FANE A G, CHEN V. Fiber movement induced by bubbling using submerged hollow fiber membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2006, 271(1/2): 186–195.
- [7] JUDD S, JUDD C. The MBR book[M]. Elsevier: [s. n.], 2006: 69–71.
- [8] 杨忆新,刘文君,尹艳敏. 超滤/粉末活性炭组合工艺深度处理黄河源水[J]. 中国给水排水, 2010, 26(15): 48–53.
- [9] 范茂军,高乃云,黄鑫,等. PAC/超滤组合工艺处理常规工艺出水的中试研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(17): 84–86.
- [10] 李永红,张伟,张晓健,等. PAC 及颗粒物对超滤膜有机物污染的影响[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(9): 1392–1395.

(编辑 刘 彤)