

MCA 方法在混凝土力学性能研究中的应用 *

宋 毅¹ 黄德武¹ 荣 光² 陈 克²

(1. 沈阳工业学院 2. 南京理工大学)

摘 要 介绍和推导了 MCA 方法的数学模型及理论基础, 在冲头速度为 1 m/s、5 m/s 和 50 m/s 载荷下对 325# 水泥混凝土和 325# 纯水泥试样的变形过程进行模拟实验. 结果表明, 花岗岩骨料对裂纹扩展的遏制作用提高了混凝土的力学性能. 计算出两种试样在不同冲击载荷下的本构关系曲线.

关键词 MCA 方法 混凝土材料 力学性能 模拟

分类号 TU37

文章编号 1005-3093(2002)04-0399-07

APPLICATION OF MCA IN STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE MATERIAL

SONG Yi¹ HUANG Dewu^{1**} RONG Guang² CHEN Ke²

(1. Institute of Mechanical Strength, Shenyang Institute of Technology, Shenyang 110016

2. Nanjing University of Science and Technology)

* Supported by Pre-Research Subject of Weapon Technology 33.6.3.4. Manuscript received Feb 6, 2002; in revised form Apr 22, 2002.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(024)83697050,
E-mail: hdwcmh@sina.com

ABSTRACT The relative theory and mathematical model of Movable Cellular Automata (MCA) method were introduced in this paper. Deformation process of the 325# concrete specimen and the 325# pure cement specimen were also simulated by MCA at three different loading rates, 1 m/s, 5 m/s, 50 m/s. The conclusion has been drawn on the basis of the simulation experiment in which the aggregates were added to enhance the properties of concrete materials as blocking up the propagation of cracks and flows. The response functions of the two specimens at the different loading rates are also obtained.

KEY WORDS MCA method, concrete material, mechanical property, simulation

混凝土因其组成和构造的不同而具有非均质、非线性和各向异性等性质, 使得混凝土的强度和变形状态十分复杂, 影响因素多, 变化幅度大, 性能指标离散度也大. 长期以来我国混凝土结构的力学分析和设计方法, 主要根据试验结果或统计分析后得到的经验公式^[10]. 可移动元胞自动机法 (MCA) 是一种建立在不连续介质力学基础上的离散数值计算方法^[1~9], 不同于有限元法和边界元法^[12]. MCA 方法在细观尺度上将模拟试样离散成由一系列元胞组成的网格, 元胞最小直径为 1 μm , 最小质量为 10^{-11}kg , 并将整个动态模拟过程细分为很多时间微元, 分步求

* 兵器科技预研资助项目 33.6.3.4. 2002 年 2 月 6 日收到初稿; 2002 年 4 月 22 日收到修改稿.
本文联系人: 黄德武, 教授, 沈阳市 110015, 沈阳市南塔街 117 号

解. 因而用 MCA 方法可以直观、真实地研究试样内部破坏机理, 如微孔洞、微裂纹等长大、成核及断裂机理^[11]. 本文使用二维 MCA 冲击压缩试验模拟程序计算和分析了混凝土材料和纯水泥材料在不同速度冲击载荷下的破坏过程, 进而得到相关的重要力学性能指标.

1 实验方法

1.1 元胞运动方程

MCA 方法把被模拟的物体离散成一系列微小单元, 称为可移动元胞 (Movable Cellular Automata). 模拟试样内任意相邻两个元胞组成一个元胞对, 两个元胞间的相互作用力、位置关系以及受载情况决定了该元胞对的动力学特性, 基于元胞对之间的动力学特性建立相应的反应函数. 每个元胞都被相邻的元胞包围, 它周围的元胞又被其他相邻的元胞包围 (图 1). 依此类推, 可以把整个计算模型联系起来, 最后把所有元胞对的反应函数组集成该计算模型的整体反应函数, 以此反应函数为基础的计算模型构成 MCA 方法的力学模型.

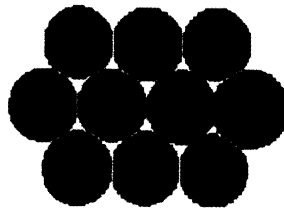


图 1 模拟试样模型

Fig.1 Structure of automata in modeling

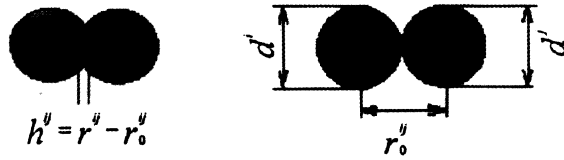


图 2 相邻元胞位置关系

Fig.2 Position states of neighboring automata

为了描述元胞对中两元胞间的位移和运动, 引入一个描述元胞间相互位置关系的参数, 即重叠系数 h^{ij}

$$\begin{cases} h^{ij} = r^{ij} - r_0^{ij} \\ r_0^{ij} = (d^i + d^j)/2 \end{cases} \quad (1)$$

其中 r^{ij} 为元胞对 (i, j) 中两元胞中心距离, $d^{i(j)}$ 为元胞 $i(j)$ 的直径 (图 2).

当 $h^{ij} \leq h_{\max}^{ij}$ 时, 元胞对处于连接状态, 元胞对间存在相互作用力; 当 $h^{ij} > h_{\max}^{ij}$, 元胞对处于断开状态, 其间的作用力可以不计 (图 3). h_{\max}^{ij} 是元胞临界重叠系数, 根据试样的材料力学性能参数确定.

在载荷作用下, 任意元胞对的两元胞的相对直线加速度和角加速度为

$$\begin{cases} \frac{d^2 h^{ij}}{dt^2} = \left(\frac{1}{m^i} + \frac{1}{m^j} \right) p^{ij} + \sum_{k \neq j} C(ij, ik) \psi(\alpha_{ij, ik}) \frac{1}{m^i} p^{ik} + \sum_{l \neq i} C(ij, jl) \psi(\alpha_{ij, jl}) \frac{1}{m^j} p^{jl} \\ \frac{d^2 \theta^{ij}}{dt^2} = \left(\frac{q^{ij}}{J^i} + \frac{q^{ji}}{J^j} \right) \tau^{ij} + \sum_{k \neq j} S(ij, ik) \frac{q^{ik}}{J^i} \tau^{ik} + \sum_{l \neq i} S(ij, jl) \frac{q^{jl}}{J^j} \tau^{jl} \end{cases} \quad (2)$$

其中右端第一项是元胞 i, j 的间法向力和切向力引起的相对直线加速度和角加速度, 第二项是除了 j 元胞外其它邻近元胞对 i 元胞的作用力所产生的加速度在 i, j 方向上的投影, 第三项是除

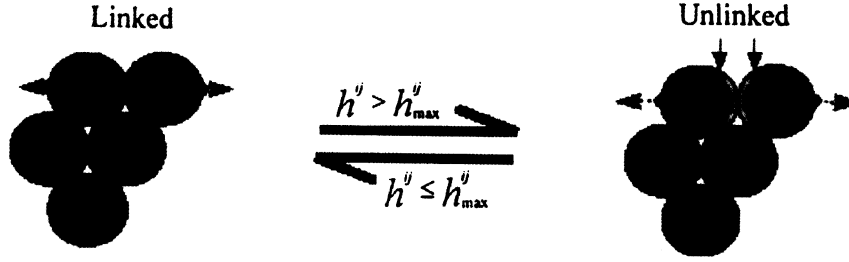


图 3 元胞间两种相互位置状态

Fig.3 Two kinds of realization states between the automata

了 i 元胞外其它邻近元胞对 j 元胞的作用所产生的加速度在 i, j 方向上的投影; $m^{i(j)}$ 为元胞 $i(j)$ 的质量, $p^{ij(ik, jl)}$ 为元胞对法向作用力, $C(ij, ik(jl))$ 为与 h^{ij} 相关的系数, $\psi(\alpha_{ij, ik(jl)})$ 为与 ij, ik 和 jl 等元胞对相互排列角度参数 $\alpha_{ij, ik(jl)}$ 有关的函数, θ^{ij} 为元胞 j 相对于元胞 i 的旋转角, $q^{ij(ji)}$ 为从元胞 $i(j)$ 的中心到元胞 $j(i)$ 的接触点的距离, $J^{i(j)}$ 为元胞 $i(j)$ 的转动惯量, $S(ij, ik(jl))$ 为与元胞对 ij, ik 和 jl 的旋转角 θ 有关的系数, τ^{ij} 为元胞对 i, j 间的切向力. 在 MCA 方法中, 元胞对只有在处于连接状态时, 元胞对之间才存在应力和应变, 元胞对不仅有质心间的相对运动, 元胞接触后各自还有弹塑性变形. 在每个元胞内部为连续介质, 根据弹塑性小变形理论, 建立元胞的局部应力和应变方程

$$\begin{cases} \sigma_{\alpha} = \varphi \varepsilon_{\alpha} + (1 - \frac{\varphi}{K}) \sigma_e \\ \tau_{\alpha\beta} = \frac{\varphi}{2} \gamma_{\alpha\beta} \end{cases} \quad (3)$$

本文只考虑平面应力和应变状态, 故 $\alpha, \beta = x, y$; $\sigma_{\alpha}(\varepsilon_{\alpha})$ 是应力 (应变) 张量的对角元分量, $\sigma_e = (\sigma_x + \sigma_y)/2$, $\tau_{\alpha\beta}$ 为剪切分量, K 为体积弹性模量, 在各向同性弹性范围内, $K = E/(1-2\mu)$, φ 为乘子, 其值为

$$\varphi = \frac{2}{3} \frac{d\sigma_{\text{int}}(\varepsilon_{\text{int}})}{d\varepsilon_{\text{int}}} \quad (4)$$

此式是 φ 的通式, 在弹塑性范围内适用; 在弹性范围内 $\varphi = E/(1 + \mu)$. 等效应力 σ_{int} 和等效应变 ε_{int} 为

$$\begin{cases} \sigma_{\text{int}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \\ \varepsilon_{\text{int}} = \frac{4}{3} \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 - \varepsilon_x \varepsilon_y + 3\gamma_{xy}^2} \end{cases} \quad (5)$$

元胞对之间的应变和切应变为

$$\begin{cases} e^{ij} = \frac{h^{ij}}{r_0^{ij}} = \frac{2(q^{ij} + q^{ji}) - (d^i + d^j)}{d^i + d^j} \\ (\Delta \varepsilon^{i(j)} + \Delta \varepsilon^{j(i)}) \frac{(d^i + d^j)}{2} = V_y^{ij} \cdot \Delta t \\ d^i \Delta \gamma^{i(j)} + d^j \Delta \gamma^{j(i)} = 2V_s^{ij} \cdot \Delta t \\ V_s^{ij} = \omega_{\text{ef}}^{ij} r^{ij} - \omega^i q^{ij} - \omega^j q^{ji} \end{cases} \quad (6)$$

其中: e^{ij} 为元胞对间的应变, Δt 为时间步长, $\Delta \varepsilon^{i(j)}$ 和 $\Delta \varepsilon^{j(i)}$ 为在 Δt 内的应变增量, V_y^{ij} 为元胞对相对速度的法向分量, $\Delta \gamma^{i(j)}$ 和 $\Delta \gamma^{j(i)}$ 分别为 Δt 内的剪应变增量, V_s^{ij} 为元胞 j 相

对元胞 i 的切向速度, 其中 $\omega_{\text{ef}}^{ij} = V_x^{ij}/\gamma^{ij}$ 为元胞 j 绕元胞 i 的质心转动角速度, ω^i 和 ω^j 分别为元胞 i, j 的角速度. 元胞对之间的法向力和切向力为

$$\begin{cases} f_{\text{np}}^{ij} = \sigma^{ij} \cdot S^{ij} \\ f_{\text{tp}}^{ij} = \tau^{ij} \cdot S^{ij} \end{cases} \quad (7)$$

其中 f_{np}^{ij} 为元胞对间的法向力, f_{tp}^{ij} 为元胞对间的切向力, σ^{ij} 为元胞对间的正应力, τ^{ij} 为元胞对间的剪应力, S^{ij} 为元胞对间的接触面积.

1.2 元胞强度破坏准则

当

$$\begin{cases} \sigma_{\text{int}}^{i(j)} \geq K^{ij} \sigma_b^i \\ \sigma_{\text{int}}^{j(i)} \geq K^{ij} \sigma_b^j \end{cases} \quad (8)$$

时, 相邻元胞被拉开到一定距离, 元胞键发生断裂; 相邻元胞被强烈挤压, 元胞键也发生断裂. σ_b 为材料的强度极限, K^{ij} 为有效的内聚力系数. K^{ij} 值的大小与材料间的粘结结构、元胞尺寸等因素有关, 如果元胞对中两个元胞的材料相同, 则 $K^{ij} = 1$.

1.3 建立实验模型

用二维 MCA 冲击压缩试验模拟程序完成建模和计算. 模拟压缩试验模型由冲头, 试样和支撑体构成, 其中冲头和支撑体是硬度和强度较高的材料, 在压缩试验中的变形可以忽略不计. 试验材料为 325# 水泥和骨料两种, 骨料的主要成分为花岗岩, 最大粒径为 2 cm, 材料的力学性能列于表 1. 用以上两种材料分别制成试样模型: 一种是 325# 纯水泥试样, 另一种是由 325# 水泥掺骨料制成混凝土试样, 骨料的密度为 0.4 g/cm^3 . 模拟试样的尺寸均为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, 元胞单元的大小为 0.2 cm (图 4). 试验时冲头分别以 1 m/s 、 5 m/s 和 50 m/s 的恒定速度向下冲压试样, 直至试样完全破坏.

MCA 程序将整个冲压过程分割成微小的时间单元, 并记录试样每一步的应力场、速度场以及裂纹的分布状态等数据. 冲头速度为 $v=5 \text{ m/s}$ 时, 试样整个冲压过程的时间约为 $3.0 \times 10^{-3} \text{ s}$, 取单步计算步长为 $3.0 \times 10^{-8} \text{ s}$, 记录步长为 $3.0 \times 10^{-8} \times 200 \text{ s}$.

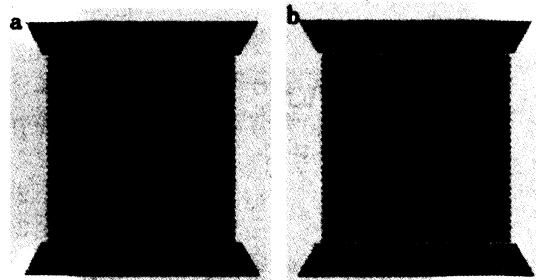


图 4 325# 纯水泥试样和 325# 混凝土试样
Fig.4 Specimen of 325# pure cement (a) and the specimen of 325# concrete (b)

表 1 325# 纯水泥和骨料的力学性能参数

Table 1 Mechanical parameters of 325# pure cement and aggregate

Material	Poisson ratio	Density g/cm ³	Young modulus GPa	Proportional limit MPa	Yield point MPa	Ultimate stress MPa
325# pure cement	0.25	2	20	110	115	120
aggregate	0.2	2.6	50	230	240	250

2 结果与讨论

当冲头向下冲压时,对于纯水泥试样,首先在边角处产生与轴线倾斜角度约为 $\pm 60^\circ$ 的损伤带,损伤带周围的元胞键断裂(图 5a),而在混凝土试样中,由于强度较高的骨料分担和缓冲了部分冲击载荷,损伤都分散在试样上层的骨料周围,没有形成类似于纯水泥试样中的条状损伤带(图 6a).冲头继续下压,纯水泥试样中的损伤带在压应力和剪应力作用下迅速扩展、断裂,形成主裂纹.同时,由于水泥元胞在单轴受压载荷作用下,压应力首先达到应力极限,上下两层元胞间的键连接随之破坏,试样内部出现层裂结构(图 5b).在混凝土试样中,由于骨料形状的不规则性和分布的不均匀性,一方面在骨料周围造成应力集中,形成局部损伤带和微裂纹;一方

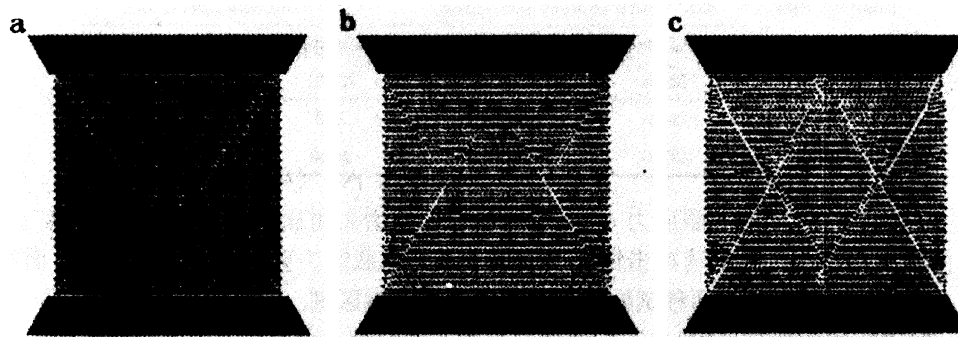


图 5 325# 纯水泥试样断裂过程 ($v=5$ m/s)

Fig.5 Fracture process of 325# pure cement specimen at different step (a) Step No.=20, (b) Step No.=30, (c) Step No.=60

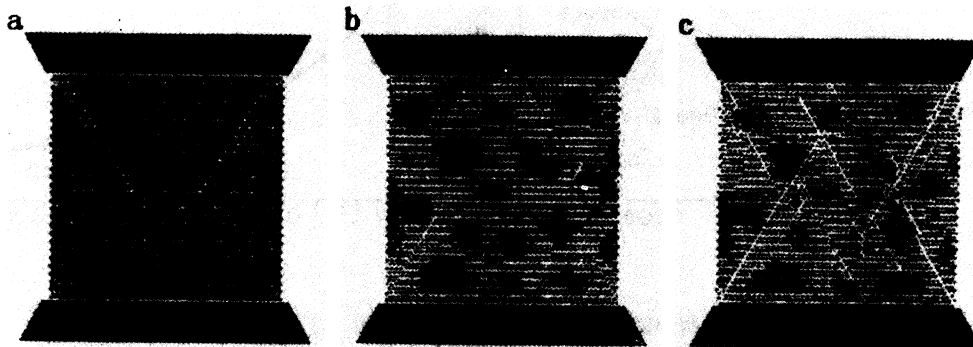


图 6 325# 混凝土试样断裂过程 ($v=5$ m/s)

Fig.6 Fracture process of 325# concrete specimen at different step (connect state: there is line between automata, disconnect state: there is no line between automata) (a) Step No.=15, (b) Step No.=25, (c) Step No.=45

面缓冲和分散冲击载荷, 阻碍试样内部裂纹的扩展. 混凝土试样由于受压内部也出现层裂结构(图 6b). 纯水泥试样在冲头进一步作用下, 应变继续增大, 主裂纹扩展贯穿整个试样. 试样最后破坏形态为正倒相连的三角锥形碎块(图 5c). 混凝土试样在冲头继续作用下, 随着局部损伤带和微裂纹的扩展而发生碎裂(图 6c). 在混凝土试样中始终没有形成贯穿整个试样的大裂纹. 裂纹在扩展过程中, 常常由于受到骨料的遏止而停止扩展或改变方向, 因此混凝土试样中出现多条短而曲折的裂纹. 这就增加了使裂纹扩展所需的能量, 提高了混凝土试样的承载能力. 可见在不同加载速率下, 添加适当配比的骨料对改善混凝土材料的性能有很大帮助.

表 2 两种试样在不同速度下的屈服应力 (σ_b) 和屈服应变 (ϵ_b)
Table 2 σ_b and ϵ_b of the two specimens at different loading rates

Loading rate m/s	325# pure cement specimen		325# concrete specimen	
	Yield stress MPa	Yield strain	Yield stress MPa	Yield strain
1	140	0.0072	180	0.0072
50	2500	0.0003	2500	0.0072

由表 2 可知相同试样的屈服应力 σ_b 随着冲击速度的增大而显著增加, 而屈服应变 ϵ_b 随着冲击速度的增大而减小. 在低速冲击情况下混凝土试样承载能力要比纯水泥试样强, 而在承受较高速度冲击载荷的情况下, 两种试样的承载能力没有太大区别, 其本构关系曲线几乎吻合(图 7). 因此, 对于承受静载或低速冲击载荷的建筑物, 可以通过添加适当比例的骨料增强物来提高结构的承载能力和耐用度, 而对于经常受高速冲击载荷的建筑物可以只采用纯水泥结构. 本文的计算结果与实际工程的结果一致.

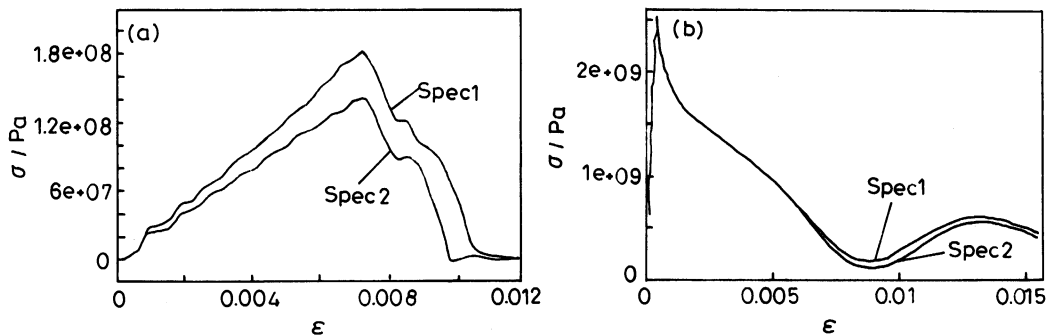


图 7 两种试样在不同冲击速度下的应力 - 应变曲线

Fig.7 Stress - Strain curve at different impact velocity (a) 1 m/s; (b) 50 m/s. Spec1 - 325# concrete specimen, Spec2 - 325# pure cement specimen

3 结 论

在混凝土中, 花岗岩骨料对裂纹扩展的遏止作用使混凝土破坏所需的能量增加. 在低速冲击情况下混凝土的承载能力比纯水泥高, 而在高速冲击情况下, 两种材料的承载能力基本相同.

同一材料的屈服应力 σ_b 随着冲击载荷速度的增大而显著增加, 而屈服应变 ε_b 随着冲击载荷速度的增大而减小.

参 考 文 献

- 1 GUO Zhenhai (过镇海), *The Strength and Deformation Properties of Concrete*(混凝土的强度和变形 (实验基础和本构关系)) (Beijing, Tsinghua University Press, 1997) p.156
- 2 S.G.Psakhie, S.Yu.Korostelev, A.Yu.Smolina, A.I.Dmitriev, E.V.Shilko, *Phys. Mesomech.*, **10**(1), 1157(1998)
- 3 S.G.Psakhie, D.D.Moiseyenko, A.I.Dmitriev, E.V.Shilko, *Pis, ma v Zhurn. Tekhn.Fiz.*, **24**(4), 71(1998)
- 4 S.G.Psakhie, Ya.Horie, S.Yu.Korostelev, A.Yu.Smolina, A.I.Dmitriev, *Rus. Phys. J.*, **38**(11), 1157(1995)
- 5 V.E.Panin, *Rus. Phys. J.*, **38**(11), 1105(1995)
- 6 V.E.Panin, *Phys. Mesomech.*, **1**(1), 5(1998)
- 7 V.E.Panin, *Phys. Mesomech.*, **2**(6), 5(1999)
- 8 J.S.Epstein, S.M.Graham, K.E. Perry, W.G.Reuter, *J. Appl. Mech.*, **62**(4), 997(1995)
- 9 N.L.Savchenko, T.Yu.Sablina, T.M.Poletika, A.S.Artish, S.N.Kulkov, *Poroshk. Metallurg.*, **1**(2), 26(1994)
- 10 N.L.Savchenko, T.Yu.Sablina, S.N.Kulkov, *Izv.Vyssh. Uch. Zav., Fiz.*, **8**, 89(1994)
- 11 HUANG Dewu (黄德武), *The Utility of Finite Element Analysis*(实用有限元) (Beijing, Engineering Industry Press, 1992) p.105
- 12 YIN Shuangzeng (尹双增), *The Theory and Application of Fracture and Damage* (断裂、损伤理论及应用) (Beijing, Tsinghua University Press, 1992) p.237