

# 混凝土三点弯曲试件破坏过程的数值模拟<sup>1)</sup>

朱万成<sup>\*\*\*</sup> 唐春安<sup>\*\*</sup> 齐安文<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>(中国科学院力学研究所 LNM, 北京 100080)

<sup>\*\*</sup>(东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 沈阳 110006)

**摘要** 根据混凝土试件三点弯曲试验的物理模型, 用 MFPA 数值模拟软件分别对砂浆和混凝土的三点弯曲试件的破坏全过程进行模拟, 给出两个试件的载荷与加载点位移关系曲线, 并进行了对比分析。

**关键词** 三点弯曲试件, 非均匀性, 破坏过程, 数值模拟

## 1 引言

在测量混凝土断裂韧度的试验中, 由于三点弯曲试件实验简便, 所以使用最多。试验中常常量测试件的载荷-加载点位移曲线 ( $P-\Delta$  曲线)、载荷-缝端开口位移曲线 ( $P-COD$  曲线) 和载荷声发射曲线, 根据这些数据计算应力强度因子, 并且可以直接观察到破坏过程。本文用数值模拟再现混凝土三点弯曲试件裂纹扩展直至最终破坏的全过程。

现在的许多数值模拟工作仍然停留在宏观尺度研究混凝土的破坏, 忽略混凝土结构的多相特征和加载过程中微裂缝萌生和扩展而造成的结构变化, 把混凝土看成一种均匀的连续介质<sup>[2]</sup>。有限元和边界元等数值方法已经用于断裂力学应力强度因子的求解<sup>[1]</sup>, 但并未能模拟试件的破坏过程及其特征。一些学者认为应该从混凝土材料的细观性质入手, 基于对细观结构和细观本构关系的认识, 将随机分析等理论与计算力学相结合来预测材料的宏观性质和本构关系, 这是混凝土力学的一个重要发展趋势<sup>[3]</sup>。本文应用的材料破坏过程分析系统 MFPA<sup>2D</sup> 正是在这种思想的指引下研制和开发的。

MFPA<sup>2D</sup> 是由东北大学岩石破裂与失稳中心开发的用于材料破坏全过程分析的软件系统, 该系统从混凝土的细观特征角度入手, 对其变形和破坏规律进行了数值模拟。本软件系统考虑了混凝土材料性质的非均匀性, 认为混凝土材料宏观破坏是细观单元破坏的积累过程。关于 MFPA<sup>2D</sup> 理论方面更为详尽的介绍参见文献 [4]、[5]。

## 2 数值模拟模型和模拟结果分析

数值模拟中选用的混凝土试件尺寸为 350 mm ×

75 mm (长 × 高), 把混凝土视为砂浆基质和骨料构成的两相复合材料, 简化成平面应力问题来研究。每种材料的力学参数都在给定其平均值和均质的条件下由程序进行随机赋值。预制裂纹长为  $a_0 = 20$  mm, 试件的高为  $W = 75$  mm, 跨度为  $S = 350$  mm, 相对缝深  $a_0/W = 0.27$ , 在跨度中间作用有集中载荷  $P$ 。粗骨料的最大粒径约 20 mm, 其表现分布如图 2 所示 (Step-1)。试件被划分成  $350 \times 75 = 26250$  个四边形单元, 采用位移控制的分步加载。砂浆试件具有与混凝土试件相同的几何尺寸和加载条件, 在材料力学参数选择上与混凝土试件的基质砂浆相同。

图 1 给出了两种试件模拟全过程的加载点位移-载荷曲线。对于混凝土试件, 所承受的峰值荷载  $P_{max}$

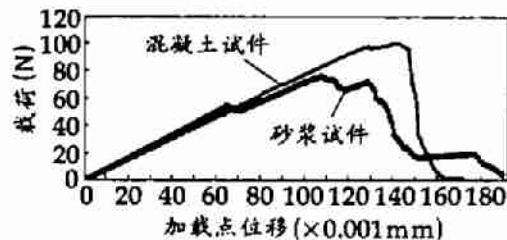


图 1 混凝土和砂浆试件的加载点位移-载荷关系曲线

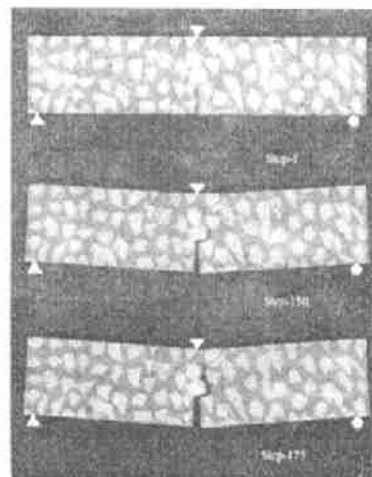


图 2 混凝土试件破坏过程弹模图

1) 国家杰出青年科学基金及中国科学院力学所非线性连续介质力学开放实验室开放基金资助。

本文于 1998-11-06 收到。

为 102.0 N, 当试件的载荷达到  $0.51 P_{\max}$  时, 曲线开始出现非线性, 砂浆试件的峰值荷载  $P_{\max}$  为 72.4 N, 砂浆试件的峰值强度和初始弹模都低于混凝土试件。

从图 2 可以看出混凝土试件中预制裂纹的扩展过程, 当裂纹扩展 5 mm 时, 正前方表面处刚好有一直径约为 20 mm 的骨料, 由于骨料的强度较高, 使得裂纹的扩展受到了遏止, 裂纹开始偏离中心线绕行骨料发展。随着荷载继续增加, 裂纹保持一段稳定扩展后, 整个试件完全断裂。

图 3 和图 4 为混凝土试件的主应力图, 从图 3 可以看出, 该试件受载后, 裂纹尖端拉应力集中, 随着裂纹的扩展, 拉应力集中也转移到新的裂纹尖端; 而压应力在加载点和两个支撑点集中。这说明拉应力是促使裂纹扩展的因素, 产生的裂纹为拉裂纹。从砂浆试件的最小主应力图 (图 5) 中也可以发现类似的规律。

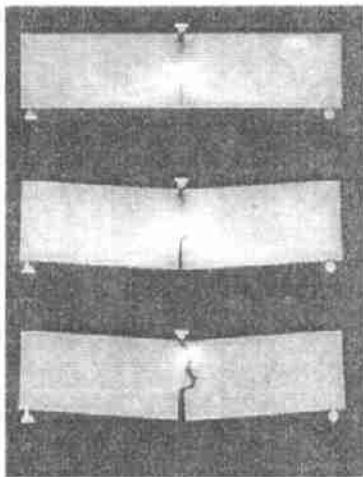


图 3 混凝土试件破坏过程最小主应力图

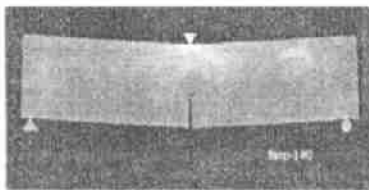


图 4 混凝土试件最大主应力图 (第 140 步)

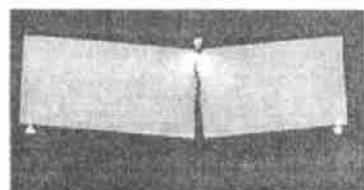


图 5 砂浆试件最小主应力图 (第 180 步)

在均匀材料中, 裂纹扩展的轨迹比较平直<sup>[6]</sup>。为了考虑砂浆本身材料性质的非均匀性, 砂浆材料的均质度取值较小 (均质度越小, 材料性质越不均匀)。对材料参数进行随机赋值后, 各单元的参数有强有弱, 裂纹在强度较弱的单元中形成。这样一来, 裂纹不可避免地出现一些曲折, 如图 5 所示。

试验已经证明砂浆的  $K_{IC}$  低于混凝土, 集料的粒径、形状、强度和含量均对混凝土的  $K_{IC}$  有影响<sup>[7]</sup>。由于一般混凝土的集料的强度高于砂浆基质, 裂缝多绕集料而行, 因而增加了裂缝扩展所需的能量。所以集料有止裂的作用, 使得混凝土的强度和韧性都有所提高。本文的数值模拟结果也证实了这一结论。

### 3 结 语

本文应用 MFPA<sup>2D</sup> 方法从混凝土的细观尺度入手, 考虑组成材料的非均匀性, 再现了三点弯曲试件变形破坏的全过程, 得到了与试验相一致的结论。这对于用数值模拟方法研究非均匀材料中的断裂力学问题提供了一种简单易行的途径。另外需要说明的是, 本文的数值模拟是把三维实验问题简化成二维平面应力问题, 因而, 模拟出的峰值荷载与试验数值不具备可比性, 有关这方面的问题, 有待于更深入的研究。

### 参 考 文 献

- 1 王铎. 断裂力学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989. 3~5
- 2 于晓中, 居襄. 混凝土的强度和破坏. 水利学报, 1983(2)
- 3 黄克智, 徐秉业. 固体力学发展趋势. 北京: 北京理工大学出版社, 1995
- 4 唐春安. 岩石破裂过程声发射的数值模拟研究. 岩石力学与工程学报, 1997, 16: 368~378
- 5 Tang C A. Numerical simulation of rock failure and associated seismicity. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1997, 34: 249~262
- 6 Tang C A, Kou S, Lindqvist P A. Numerical simulation of loading in homogeneous rocks. *Int J of Rock Mech Min Sci*, 1998 (7)
- 7 蔡保瑞, 王良元, 张松年, 李义军. 混凝土断裂特性的试验研究及计算分析. 水利学报, 1988 (8): 61~67

## NUMERICAL SIMULATION ON THE FAILURE PROCESS OF THREE-POINT BENDING SPECIMEN OF CONCRETE

(下转第 41 页)

动、文 [3] 解的误差函数最大绝对值分别为： $8.5(10^{-3}), 3.6(10^{-1}), 3.6(10^{-2})$ ，可见，在摄动参数  $\varepsilon \equiv 1$  的强非线性情况下，本文解也比文 [3] 解的精度高一个量阶。因一阶摄动解的误差较大，不便比较，故图 2(a) 中没有画出，从图 2(b) 可见，一阶摄动解与高精度解之间会出现较大的相位差。

当  $\varepsilon \equiv 2, \alpha \equiv 1$  时，本文、一阶摄动、文 [3] 解的误差函数最大绝对值分别为： $3.4(10^{-2}), 1.6, 1.0(10^{-1})$ 。文 [3] 认为其解在  $0 < \varepsilon < +\infty$  的区域内，最大误差

小于 5.6%，显然，这一结论欠考虑。由误差函数最大绝对值的结果可以断定，解的误差也会随着摄动参数的增大，逐渐增加。

3 结 论

本文给出非线性 Duffing 方程的高精度近似解，即使在小参数  $\varepsilon = 1$  的强非线性情况下，方程的误差函数在整个解域小于 1%，为非线性振动的工程应用提供了进一步的理论分析依据。

参 考 文 献

- 1 陈予恕编著. 非线性振动. 天津: 天津科学技术出版社, 1983
- 2 朱昌明. 用加权残数法解具有小参数摄动的 Duffing 方程. 力学与实践, 1996, 18(6)
- 3 何吉欢. 变分迭代算法: 一种新的非线性分析方法. 上海力学, 1998, 19(3)

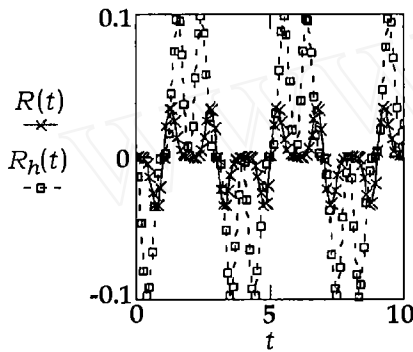
HIGHER ACCURACY SOLUTION OF NONLINEAR DUFFING EQUATION

LIN Jianguo

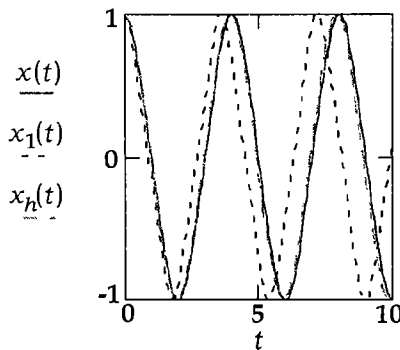
(Institute of Marine Environment Dalian Maritime University, Dalian 116024, China)

**Abstract** A higher accuracy solution of nonlinear Duffing equation has been obtained by the parameter iteration method in this paper. The maximum value of the error function is under 1% in case of strong nonlinearity  $\varepsilon = 1$ .

**Key words** parameter iteration method, nonlinear, duffing equation, higher accuracy solution



(a)



(b)

图 3

(上接第 56 页)

ZHU Wancheng<sup>\*,\*\*</sup> TANG Chun'an<sup>\*\*</sup>  
 QI Anwen<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>(LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>\*\*</sup>(CRISR, Northeastern University, Shenyang 110006, China)

**Abstract** MFPA<sup>2D</sup> Code is used to simulate the

whole failure process of three-point bending specimens of concrete and mortar respectively based on the physical model of three-point bending test of concrete. The load-displacement curve at the loading point of the two specimens is presented and analyzed by comparison.

**Key words** three-point bending specimen, heterogeneity, failure process, numerical simulation