

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.12.009

准脆性材料断裂模拟方法研究

燕秀发^{1,2}, 钱七虎¹, 赵跃堂¹, 周寅智¹

(1. 陆军工程大学 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007; 2. 解放军 91550 部队, 辽宁 大连 116023)

摘 要: 针对岩石、混凝土类准脆性材料的断裂过程模拟, 发展了基于黏聚裂纹模型的虚节点扩展有限元法, 并给出了该法的数值原理和控制方程。通过三点弯曲梁拉伸断裂、单边缺口试件 I-II 复合型断裂和 Nooru-Mohammed 试验多裂纹断裂等典型算例, 并与已有解或试验结果对比, 表明该法适合于模拟准脆性材料由张开型裂纹支配的断裂过程。相对于节点分离有限元法, 该法无需预设开裂路径; 相对于塑性损伤有限元法, 该法能够可靠模拟多裂纹曲线扩展; 相对于标准扩展有限元法, 该法无需引入裂尖单元, 避免了应力强度因子的计算; 相对于高阶富集扩展有限元法, 该法具有良好的适用性, 便于得到收敛的计算结果。此外, 基于单元的位移场描述使其更易于嵌入常用有限元软件, 从而利用后者良好的非线性计算功能求解复杂问题。

关 键 词: 扩展有限元法; 虚节点; 黏聚裂纹模型; 准脆性材料; 裂纹扩展

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 12-3462-07

A method for simulating fracture in quasi-brittle materials

YAN Xiu-fa^{1,2}, QIAN Qi-hu¹, ZHAO Yue-tang¹, ZHOU Yin-zhi¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing, Jiangsu 210007, China; 2. PLA 91550 Unit, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract: Based on the cohesive crack model, a virtual node extended finite element method (XFEM) was developed to simulate the fracturing process of quasi-brittle materials, such as rock and concrete. Numerical principles and governing equations of this method were also proposed. Typical numerical examples were presented, including tension fracture of the three-point bending beam, I-II mixed mode fracture of a single edge notched specimen and fracture of multiple cracks in the Nooru-Mohammed experiment. Moreover, these results were compared with existing solutions or experimental results. It is found that this method is suitable to simulate fracturing process of quasi-brittle materials dominated by opening-mode cracks. Pre-assignment of crack-growth paths is not necessary for the proposed method, in comparison with the node-separation finite element method (FEM). Contrary to the plastic-damage FEM, this method also can reliably simulate the propagation of multiple cracks. Meanwhile, it is not necessary to introduce crack-tip elements and calculate stress intensity factors in comparison with the normal XFEM. Lastly, it is particularly applicable to the acquirement of convergent computational results by contrast with the XFEM with higher-order enriched elements. Moreover, the developed method can be easily embedded into conventional finite element software to solve complex problems by applying powerful nonlinear computational functions of the latter for its displacement description based on elements.

Keywords: extended finite element method (XFEM); virtual node; cohesive crack model; quasi-brittle materials; crack propagation

1 引 言

断裂是岩石、混凝土等准脆性材料的主要破坏形式, 数值模拟是揭示其断裂机制的重要手段。常

规有限元法求解裂纹类强间断问题仍存在一定的局限性, 如裂尖区域单元局部细化、裂纹面与单元边界一致以及随裂纹扩展进行的网格重构等, 给断裂过程模拟带来极大的困难。

收稿日期: 2015-12-16

基金项目: 中国博士后科学基金特别资助项目 (No.201003768); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金 (No.51321064); 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室开放课题资助项目 (No.DPMEIKF201308)。

This work was supported by the China Postdoctoral Science Foundation (201003768), the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (51321064) and the Fund of the State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact (Army Engineering University of PLA) (DPMEIKF201308).

第一作者简介: 燕秀发, 男, 1972 年生, 博士后, 主要从事防护工程数值仿真方面的工作。E-mail: yxfrp2010@163.com

扩展有限元法^[1]的提出, 显著发展了裂纹扩展模拟技术。该法通过在位移模式中加入跳跃函数和裂纹渐近位移场函数, 实现了网格剖分与裂纹构形的相互独立, 避免了裂纹扩展过程中的网格重构, 从而克服了常规有限元法的局限性, 受到了广泛关注。然而该法仍处于完善之中, 如基于节点影响域的自由度富集判断方法存在缺陷, 对单元类型的支持还不够丰富以及难以模拟多裂纹扩展等问题。与上述标准扩展有限元法基于单位分解的特殊函数插值方法不同, Hansbo 等^[2]采用等参元的位移插值模式, 提出了虚节点扩展有限元法的思想, Song 等^[3]进一步发展了该法的断裂力学计算形式。Pan 等^[4]应用虚节点扩展有限元法模拟了混凝土拱坝的开裂过程, 结合试验并对比其他方法评估了计算结果。但这种仅针对特别实例进行的研究缺乏代表性, 虚节点扩展有限元法仍需要深入的数值试验来确定其模拟准脆性材料断裂的适用性。

本文发展了基于黏聚裂纹模型的虚节点扩展有限元法, 结合典型算例, 通过与节点分离有限元法、塑性损伤有限元法和标准扩展有限元法以及高阶富集元法的模拟结果相互对比, 评估了该法模拟准脆性材料断裂过程的适用性, 并给出了改善计算收敛性的数值技巧。在已有研究^[5]对商业有限元软件扩展有限元法功能模块的可靠性和实用性提出质疑的背景下, 本文工作具有特殊的意义。

2 基于黏聚裂纹模型的虚节点扩展有限元法

2.1 虚节点扩展有限元法

假定裂纹沿单元逐一扩展, 裂纹尖总是终止在单元边界上, 如图 1 所示, 虚节点扩展有限元法的数值原理是, 在真实单元各节点上设置相应的虚拟节点, 单元一旦开裂, 则该单元上的虚拟节点即被激活, 真实单元分解成为两个重叠的虚拟单元 1 和 2, 每个虚拟单元由真实节点和虚拟节点构成, 则裂纹单元的位移场可以看作系数为 Heaviside 阶跃函数的两虚拟单元的加权叠加

$$u(X) = \sum_{I \in S_1} u_I^1 N_I(X) H(-\Phi) + \sum_{J \in S_2} u_J^2 N_J(X) H(\Phi) \quad (1)$$

式中: $N_I(X)$ 和 $N_J(X)$ 为常规有限元形函数; I, J 分别表示虚拟单元 1、2 的节点编号; Φ 为符号距离函数, 如图中所示, 在裂纹面上 $\Phi = 0$, 在裂纹一侧为正, 另一侧为负; $H(x)$ 为 Heaviside 阶跃函数: 当 $x > 0$ 时, $H(x) = 1$, 当 $x \leq 0$ 时, $H(x) = 0$; S_1, S_2

分别为虚拟单元 1 和 2 的节点集合; 当 $\Phi < 0$, $u_I^1 = u_I$, $u_J^2 = u_J + a_J$; 当 $\Phi > 0$, $u_I^1 = u_I - a_I$ 和 $u_J^2 = u_J$; 其中 u_I 和 u_J 为常规有限元节点自由度, a_I 和 a_J 为引入 Heaviside 函数产生的附加自由度。由虚拟单元在裂纹面上的位移差可得裂纹两侧的位移跳跃为

$$[u] = \sum_{I \in S_1} u_I^1 N_I(X) - \sum_{J \in S_2} u_J^2 N_J(X) \Big|_{\Phi(X)=0} \quad (2)$$

裂纹法向张开和切向滑动位移分别为

$$\delta_n = n[u], \quad \delta_t = \|[u] - n\delta_n\| \quad (3)$$

式中: n 为裂纹面的单位外法线方向矢量。

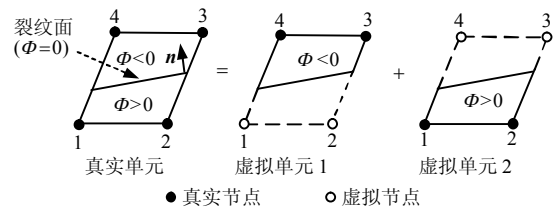


图 1 裂纹单元分解示意图

Fig.1 Decomposition of a cracked element

岩石、混凝土类准脆性材料的断裂过程应用黏聚裂纹模型描述, 考虑求解区域 Ω , Γ_t 和 Γ_c 分别为该区域的 Neumann 边界与裂纹面, 并记 ρ 为密度, σ 为应力, b 为体力, t 为 Neumann 边界作用力, τ 为裂纹面黏聚力, 则对于准静态问题, 由动量定理等效积分的弱形式可得

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \delta u}{\partial X} : \sigma d\Omega = \int_{\Omega} \delta u \cdot \rho b d\Omega + \int_{\Gamma_t} \delta u \cdot t d\Gamma_t + \int_{\Gamma_c} \delta[u] \cdot \tau d\Gamma_c \quad (4)$$

根据变分原理, 可得离散方程为

$$\sum_{e=1}^2 \int_{\Omega_e} B^T \sigma_e H((-1)^e \Phi) d\Omega_e - \sum_{e=1}^2 \left[\int_{\Omega_e} \rho N^T b \cdot H((-1)^e \Phi) d\Omega_e + \int_{\Gamma_t^e} N^T t H((-1)^e \Phi) d\Gamma_t^e + \sum_{e=1}^2 (-1)^e \int_{\Gamma_c^e} N^T \tau d\Gamma_c^e \right] = 0 \quad (5)$$

式中: e 为虚拟单元编号; N 和 B 分别为形函数矩阵与应变矩阵。

2.2 黏聚裂纹模型

黏聚裂纹模型^[6]准脆性材料断裂过程中裂纹面上的黏聚力 $\tau = \{\tau_n, \tau_t\}$ 可应用如图 2 所示的双线性本构关系计算, 假设起裂前材料的初始刚度为 K_0 , 当最大主应力超过材料的拉伸强度 τ_0 时材料基体开始起裂, 裂纹扩展方向与最大主应力方向垂直。

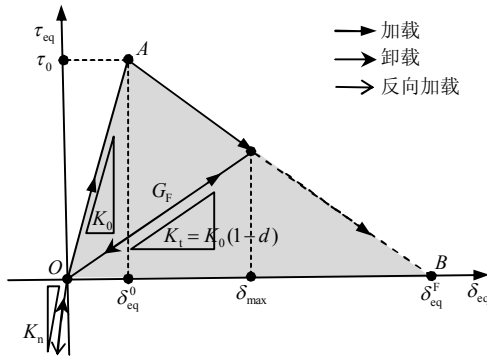


图2 黏聚裂纹双线性本构关系

Fig.2 Bilinear traction-separation law for cohesive cracks

定义裂纹面等效开度为

$$\delta_{eq} = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_t^2} \quad (6)$$

由起裂准则有裂纹初始开度:

$$\delta_{eq}^0 = \frac{\tau_0}{K_0} \quad (7)$$

随着 \$\delta_{eq}\$ 增加, 材料基体逐渐相互分离, 当裂纹张开消耗的能量达到材料的断裂能 \$G_F\$, 即图2中三角形 \$OAB\$ 包围区域面积时, 基体完全断裂分离, 此时裂纹临界开度为

$$\delta_{eq}^F = \frac{2G_F}{\tau_0} \quad (8)$$

材料完全断裂后, 为避免(反向加载)裂纹闭合时裂纹面相互嵌入引入罚刚度 \$K_n\$。

注意到加载过程中的卸载-再加载情形, 令 \$\delta_{max} = \text{MAX}(\delta_{eq})\$ 为起裂后裂纹的最大开度, 与其对应的材料刚度为 \$K_t\$, 定义损伤变量为

$$d = \frac{K_0 - K_t}{K_0} = \frac{\delta_{eq}^F (\delta_{max} - \delta_{eq}^0)}{\delta_{max} (\delta_{eq}^F - \delta_{eq}^0)} \quad (9)$$

由 \$K_t = (1-d)K_0\$ 进一步可得裂纹面等效黏聚力为

$$\tau_{eq} = (1-d)K_0\delta_{eq} \quad (10)$$

对于势函数:

$$\Psi(\delta_n, \delta_t) = \int_0^{\delta_{eq}} \tau_{eq} d\delta \quad (11)$$

则有裂纹面法向和切向黏聚力为

$$\left. \begin{aligned} \tau_n &= \frac{\partial \Psi(\delta_n, \delta_t)}{\partial \delta_n} = \frac{\delta_n}{\delta_{eq}} \tau_{eq} \\ \tau_t &= \frac{\partial \Psi(\delta_n, \delta_t)}{\partial \delta_t} = \frac{\delta_t}{\delta_{eq}} \tau_{eq} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

3 数值算例

3.1 三点弯曲梁的拉伸断裂

如图3所示的混凝土三点弯曲梁问题, 梁高度 \$T = 0.15\$ m, 长度 \$L = 4T\$, 宽度 \$B = T\$, 位移加载, 加载区域宽度 \$l = 0.01\$ m。材料参数为弹性模量 \$E = 36.5\$ GPa, 泊松比 \$\nu = 0.1\$, 拉伸强度 \$\tau_0 = 3.19\$ MPa, 断裂能 \$G_F = 50\$ N/m。考虑平面应变情况, 应用弧长法求解。数值模拟得到的梁断裂变形以及与已有结果对比无量纲化后的加载区域 \$P\$ (载荷)-\$D\$ (位移) 曲线分别如图4、5所示。由图4可见, 本文方法得到的裂纹扩展途径完全反映了问题的拉伸断裂特点, 与裂纹实际扩展途径基本一致。对比图5所示的节点分离有限元法解^[7]以及图6所示的标准扩展有限元法解(图中 \$r\$ 为以裂尖为中心的富集区域半径)^[8], 本文解与这两种方法的计算结果都符合得非常好。

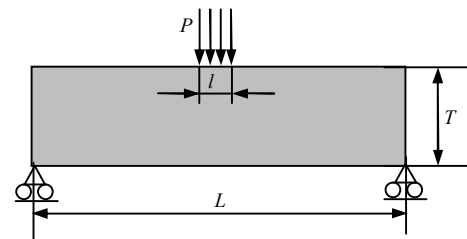


图3 三点弯曲混凝土梁

Fig.3 Three-point bending concrete beam

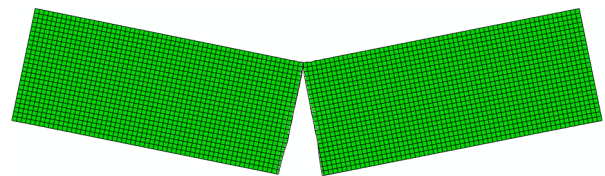


图4 三点弯曲梁的断裂变形

Fig.4 Fracture deformation of three-point bending beam

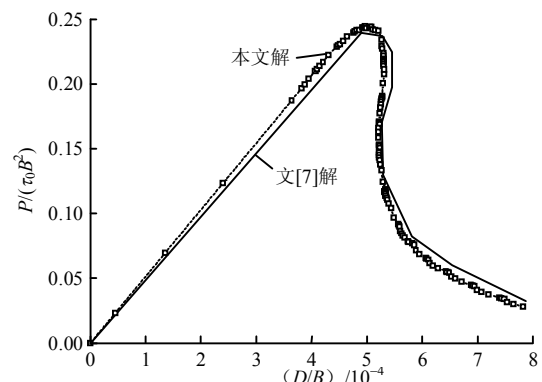
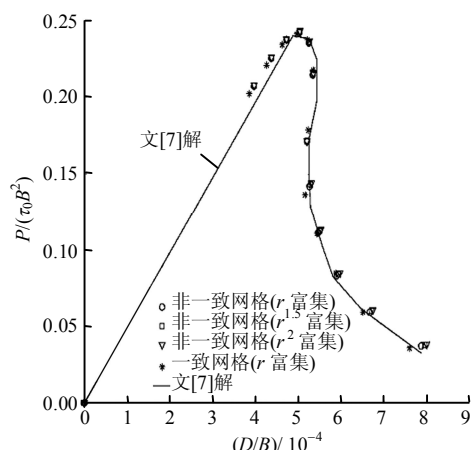


图5 \$P\$ (载荷)-\$D\$ (位移)无量纲曲线

Fig.5 Curves of non-dimensional \$P\$ (Load)-\$D\$ (Displacement)

图 6 P - D 无量纲曲线文献[8]解Fig.6 Curves of non-dimensional P - D given by Ref. [8]

3.2 单边缺口试件 (SEN) I-II 复合型断裂

如图 7 所示为预制偏置裂纹的三点弯曲试件, 裂纹长度 $H = 19$ mm, 试件长度 $L = 230$ mm, 高度 $T = 75$ mm, 宽度 $B = 25$ mm, 支撑跨距 $2S = 205$ mm, 偏置裂纹位置为 χS , 其中 χ 为偏置系数。材料参数为弹性模量 $E = 31.37$ GPa, 泊松比 $\nu = 0.2$, 拉伸强度 $\tau_0 = 4.4$ MPa, 断裂能为 $G_F = 0.17$ N/mm。令 $\chi = 0.25$, 计算结果如图 8、9 所示。为便于与已知解^[9] (加载位移约为 0.1 mm) 对比, 图 9 中同时给出了标定在未变形网格上的相同加载位移时的裂纹扩展路径。由图 8 试件加载至濒临折断时 (加载位移约 0.145 mm) 的变形可见, 本文解明确反映了问题的 I-II 复合型断裂性质以及 I-II 复合型断裂逐渐向 I 型断裂转变的断裂特点。如图 9 中与已知解加载点 P - D 响应曲线及裂纹扩展路径的对比表明: 本文解的裂纹扩展方向与文献[9]解基本一致, 裂纹扩展路径范围相差很小 (本例中裂纹扩展区域单元的横向和纵向尺寸为 1.4375 mm \times 1 mm), 且 P - D 响应曲线具有相同的数值趋势和较小的误差。

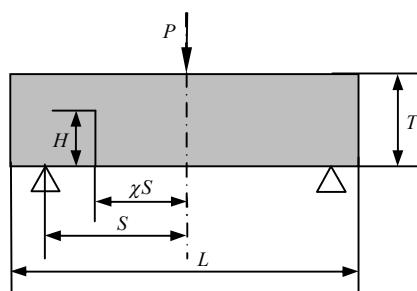


图 7 I-II 复合型断裂三点弯曲试验

Fig.7 Three-point bending test on I-II mixed mode fracture

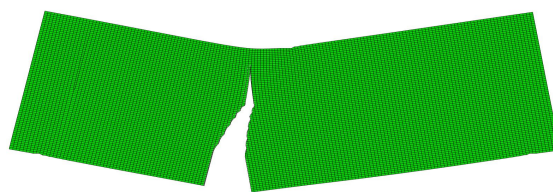
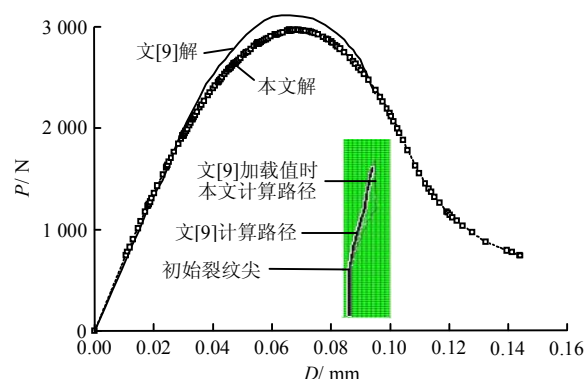


图 8 试件断裂变形

Fig.8 Specimen fracture deformation

图 9 $\chi = 0.25$ 时 P - D 曲线和裂纹扩展路径Fig.9 P - D curves and crack-growth paths for $\chi = 0.25$

3.3 多裂纹曲线断裂

著名的 Nooru-Mohammed 试验^[10]可以作为检验准脆性材料断裂模拟方法是否有效的基准之一。该试验如图 10 所示, 预制双边中心缺口水泥砂浆试样通过固定其上的 L 形钢架水平和垂直加载。水泥砂浆试样尺寸为 200 mm \times 200 mm \times 50 mm, 各边中心缺口尺寸为 25 mm \times 5 mm。先施加水平方向剪力 F_s 至指定值, 然后保持 F_s 恒定, 再垂直方向位移加载 (U_n), 加载过程中与 U_n 对应的载荷为 F_n 。试样材料参数为弹性模量 $E = 30$ GPa, 泊松比 $\nu = 0.2$, 拉伸强度 $\tau_0 = 3.0$ MPa, 断裂能 $G_F = 110$ N/m。当 $F_s = 10$ kN 时, 计算结果如图 11 和图 12 所示。

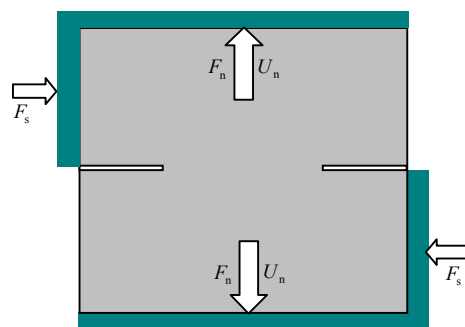


图 10 Nooru-Mohammed 试验示意图

Fig.10 Sketch of Nooru-Mohammed experiment

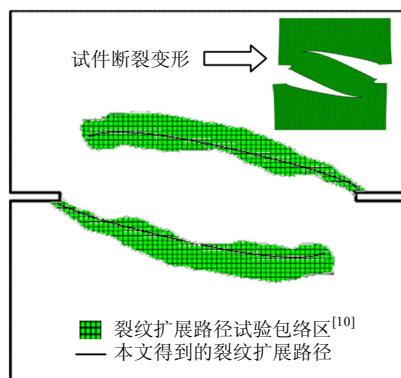


图 11 裂纹扩展路径和试件断裂变形
Fig.11 Crack-growth paths and specimen fracture deformation

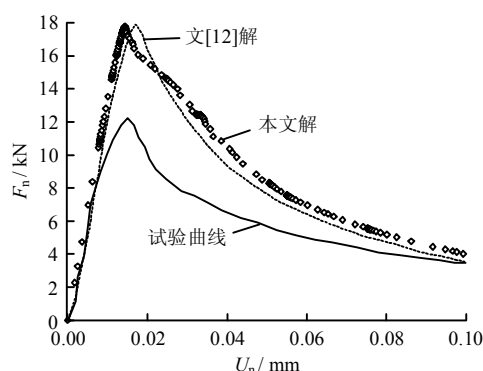


图 12 F_n-U_n 曲线
Fig.12 F_n-U_n curves

如图 11 所示,本文方法得到的裂纹扩展路径完全位于试验包络区内,不但与包络区的伸展方向一致,而且与包络区轮廓线有相似的几何形状。图 11 中同时给出了试件的断裂变形图,对比图 13 所示^[11]的裂纹近于平直扩展且交汇的塑性损伤有限元法预测结果,本文得到的裂纹扩展路径充分体现了试验特有的多裂纹并发,最大主应力方向偏转裂纹弯曲扩展的特点。如图 12 所示,本文方法得到的 F_n (载荷) - U_n (位移) 曲线与文献[12]应用指数型黏聚本

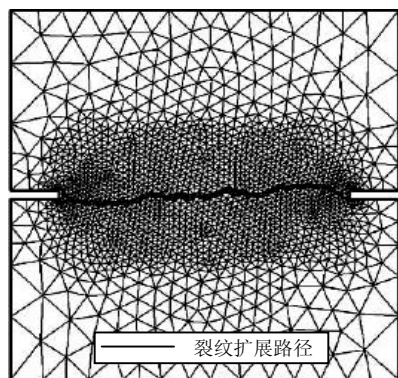


图 13 裂纹扩展路径的塑性损伤有限元法解^[11]
Fig.13 Crack-growth paths obtained by the plastic-damage finite method^[11]

构关系曲线的扩展有限元法解符合得较好,然而相对试验曲线虽然变化趋势相同,但存在数值误差。事实上,数值误差产生的原因是原试验给出的拉伸强度和断裂能参数并非直接来自于实测,而是被高估的推测值。因此,综合前面得到裂纹扩展路径结果,此处对 Nooru-Mohammed 试验的模拟是可靠的。

4 讨论

4.1 与标准扩展有限元法的比较

3.1 节问题的标准扩展有限元法解^[8]如图 6 所示,但与本文算法相比,文献[8]中的方法要复杂得多。该法的复杂性首先在于,为计及裂纹扩展过程中裂尖位于单元内部的情况,相应引入了裂尖单元,并以裂纹尖端位移渐近解作为裂尖单元位移场的特定富集函数,但为了消除裂尖位置对计算精度的影响,不得不对以裂尖为中心半径 r 区域内的节点都应用富集函数,但 r 的取值目前仍具有经验性的特点;其次裂纹扩展方向应用线弹性断裂力学的最大周向应力准则确定,即

$$\theta = 2\arctan \frac{1}{4} \left[\frac{K_I}{K_{II}} \pm \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}} \right)^2 + 8} \right] \quad (13)$$

式中: K_I 和 K_{II} 为 I 型和 II 型应力强度因子。

由 2.1、2.2 节可见,虚节点扩展有限元法事实上是标准扩展有限元法的简化:通过假设裂纹沿单元逐一扩展,裂尖终止在单元边上,无需引入裂尖单元,相应也克服了富集区域半径选择的经验性;黏聚裂纹模型的应用,移去了裂纹尖端应力奇异性,避免了应力强度因子的计算;令裂纹开裂方向与最大主应力方向垂直,实际上是对最大周向应力断裂准则的简化,降低了问题的复杂性,有利于提高计算效率。本文算例表明,当单元尺寸足够精细时,上述处理方法对分析结果影响不大,仍能得到裂纹正确和光滑的扩展路径。

4.2 与高阶富集元法的比较

由 3.2 节问题的 I-II 复合型断裂特点,分析图 9 所示的裂纹扩展路径能够发现,文献[9]解应当比本文解更接近试验结果,这是因为该文算法应用了高阶富集函数,其富集单元的位移模式为

$$\begin{aligned} u(X) = & \sum_{i \in I} u_i N_i(X) + \sum_{j \in J} N_j(X) H(X) [u_{0j} + \\ & u_{1j} \left(\frac{x-x_j}{h_j} \right)^2 + u_{2j} \left(\frac{y-y_j}{h_j} \right)^2 + \\ & u_{3j} \left(\frac{x-x_j}{h_j} \right) \left(\frac{y-y_j}{h_j} \right)] \end{aligned} \quad (14)$$

式中: u_i 为常规有限元节点自由度; I 为单元常规节点集合; J 为单元富集节点集合; i, j 为节点编号; $u_k (k=0 \sim 3)$ 为富集节点附加自由度; h_j 为与节点相关的特征长度^[9]。

由式 (14) 可见, 二次多项式被引入节点富集函数, 而本文应用的节点富集函数仅是保留其 u_{0j} 项的低阶情况。从理论上讲, 高阶富集元的应用能够改进计算精度, 但对于本例——存在极值临界点, 具有急速跳过 (snap-through) 特征的高度非线性问题, 除增加了计算量外, 还可能引起收敛困难。由图 9 的 P - D 曲线可见, 本文方法的加载量达 0.145 mm, 此时试件接近折断, 结构濒临完全失稳, 而文献[9]仅加载至约 0.1 mm, 远小于本文算例加载量。结构越接近完全失稳, 问题的非线性响应越强烈, 因此, 不排除该文算法之后遭遇收敛困难的可能。对于高度非线性问题, 数值模拟的首要任务是得到收敛的计算结果, 其次是提高解的精度。可见, 本文方法具有良好的适用性, 便于得到收敛的计算结果。

4.3 改善计算收敛性的方法

岩石、混凝土类不稳定材料的断裂过程模拟是伴随着损伤软化与刚度衰减的高度非线性问题, 如何获得收敛的数值结果是始终需要关注的问题。由数值原理可见, 不同于一般扩展有限元法基于节点影响域的位移场描述, 虚节点扩展有限元法同常规有限元法一样对位移场的描述都是基于单元的, 因此, 更易于嵌入常用有限元软件, 从而利用其良好的非线性功能求解复杂问题, 如选择 Newton 法或弧长法求解非线性方程组以及引入黏性正则化。如图 14 所示, 当求解具有急速跳回 (snap-back) 特点的问题 3.1 时, Newton 法因迭代发散导致求解过程中断, 改用弧长法后收敛困难被克服, 得到了与已知解符合得较好的数值结果。然而, 若令问题 3.2 中 $\chi = 0.5$, 则如图 15 所示, 按 Duvaut-Lions 正则化原理^[13]引入黏性 (黏性系数 $c = 0.0001$) 后才获得收敛解。分析此时出现收敛困难的原因, 首先是虚节点扩展有限元法建立在单元水平上的裂纹扩展模式使结构表现出过高的脆性响应, 合理引入黏性可以起到抵减作用; 其次, 对比图 15 和图 9 得到的裂纹扩展路径和 P - D 曲线能够发现, $\chi = 0.5$ 时问题本身具有更显著的剪切断裂特点和较弱的拉伸断裂性质, 进而反映出虚节点扩展有限元法更适合模拟其中张开型成分较大的断裂模式的数值特性。

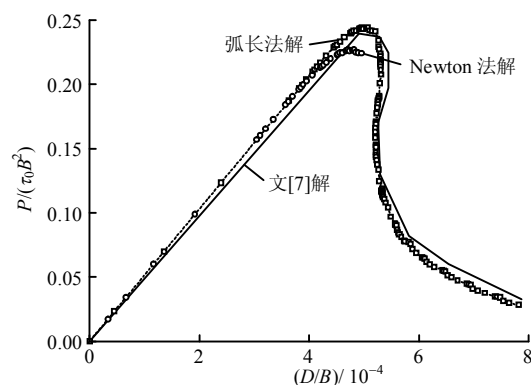


图 14 Newton 法和弧长法的解

Fig.14 Solutions by Newton method and arc-length method

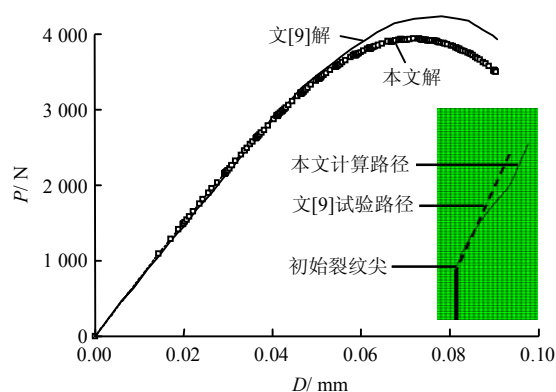


图 15 P - D 曲线和裂纹扩展路径 ($\chi = 0.5$, $c = 0.0001$)

Fig.15 P - D curves and crack-growth paths ($\chi = 0.5$, $c = 0.0001$)

5 结 论

(1) 针对岩石、混凝土类准脆性材料的断裂过程模拟, 发展了基于黏聚裂纹模型的虚节点扩展有限元法, 给出了存在和不存在初始裂纹、单一拉伸型断裂和 I-II 复合型断裂、单裂纹断裂和多裂纹断裂、平直扩展裂纹和弯曲扩展裂纹等涵盖该类材料主要断裂形式的典型算例。与已有解或试验结果的对比表明, 该法适合于模拟准脆性材料由张开型裂纹支配的断裂过程。

(2) 本文方法与其他断裂模拟方法的比较表明, 相对于节点分离有限元法, 该法不需预设开裂路径; 相对于塑性损伤有限元法, 该法能够正确模拟多裂纹曲线扩展; 相对于标准扩展有限元法, 该法无需引入裂尖单元, 避免了应力强度因子的计算; 相对于高阶富集扩展有限元法, 该法具有良好的适用性, 便于得到收敛的计算结果。此外, 基于单元的位移场描述使其更易于嵌入常用有限元软件, 从而利用后者良好的非线性计算功能求解复杂问题。

(3) 此处的计算经验表明, 岩石、混凝土类不

稳定材料的断裂过程模拟是伴随着损伤软化和刚度衰减的高度非线性问题,首要的是得到收敛的计算结果,因此,隐含在本文算例细节中的提高收敛性的数值技巧同样需要给予关注。

参考文献

- [1] MOËS N, DOLBOW J, BELYTSCHKO T. A finite element method for crack growth without remeshing[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1999, 46(1): 131—150.
- [2] HANSBO A, HANSBO P. A finite element method for the simulation of strong and weak discontinuities in solid mechanics[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2004, 193(33—35): 3523—3540.
- [3] SONG J H, AREIAS P M A, BELYTSCHKO T. A method for dynamic crack and shear band propagation with phantom nodes[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2006, 67(6): 868—893.
- [4] PAN J W, ZHANG C H, XU Y J, et al. Comparative study of the different procedures for seismic cracking analysis of concrete dams[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2011, 31(10): 1594—1606.
- [5] GIGLIOTTI L. Assessment of the applicability of XFEM in Abaqus for modeling crack growth in rubber[D]. Sweden Stockholm: Royal Institute of Technology, 2012.
- [6] HILLERBORG A, MODÉER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. **Cement and Concrete Research**, 1976, 6(6): 773—782.
- [7] CARPINTERI A, COLOMBO G. Numerical analysis of catastrophic softening behavior (snap-back instability)[J]. **Computers and Structures**, 1989, 31(4): 607—636.
- [8] MOËS N, BELYTSCHKO T. Extended finite element method for cohesive crack growth[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2002, 69(7): 813—833.
- [9] STEFANO M, UMBERTO P. Extended finite element method for quasi-brittle fracture[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2003, 58(1): 103—126.
- [10] NOORU-MOHAMED M B. Mixed-mode fracture of concrete: An experimental approach[Ph. D. Thesis D]. Netherlands: Delft University of Technology, 1992.
- [11] FEIST C, HOFSTETTER G. An embedded strong discontinuity model for cracking of plain concrete[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2006, 195(61—63): 7115—7138.
- [12] XU Y, YUAN H. Applications of normal stress dominated cohesive zone models for mixed-mode crack simulation based on extended finite element methods[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2011, 78(5): 544—558.
- [13] HIBBITT, KARLSSON & SORESENSEN Inc. ABAQUS /Standard User's Manual[M]. Pawtucket Rhode Island: HKS Co., 2010.

《岩土力学》入选“第四届中国精品科技期刊”

2017 年 10 月 31 日,“中国科技论文统计结果发布会”在北京国际会议中心举行。会议发布了“中国科技论文整体情况”、“中国卓越论文统计报告”、“2017 年版中国科技期刊引证报告(核心版)”、“2016 年中国百种杰出学术期刊”、“第四届中国精品科技期刊”等相关内容。《岩土力学》再次入选“中国精品科技期刊”,这是继《岩土力学》2011 年入选“第二届中国精品科技期刊”后第 2 次入选。每届中国精品期刊入选数量 300 种。入选“中国精品科技期刊”也即入选了“中国精品科技期刊顶尖论文(F5000)”项目来源期刊,此次《岩土力学》有 22 篇入选 F5000。

另外,根据最新发布的“2017 年版中国科技期刊引证报告(核心版)”数据,《岩土力学》的影响因子为 1.275、总被引频次为 8 304,继续处于力学学科和土木工程学科第 2 位。