

三维断裂分析软件FRANC3D

贾学明^{1,2}, 王启智^{*1}

(1. 四川大学 土木力学系, 四川 成都 610065; 2. 重庆市交通科研设计院, 重庆 400067)

摘要:介绍了三维断裂分析软件FRANC3D(Fracture Analysis Code in 3 Dimensions),它和立体对象建模器OSM(Object Solid Modeler)以及边界元系统BES(Boundary Element System)一起构成一套完整的断裂分析系统。该软件可以进行复杂裂纹的应力强度因子计算、自适应裂纹扩展,具有友好的图形用户界面和强大的前后处理功能。本文还给出了两个应用该软件的实例,证明分析是成功的。

关键词:断裂;边界元;应力强度因子

中图分类号:O35;O241

文献标识码:A

1 引言

断裂力学分析中的一个重要因素是获取含裂纹构件的应力强度因子,对于一些复杂构形的裂纹结构,它们的断裂力学分析一般只有依赖数值方法进行。相应的一些商业有限元软件如ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, ADINA 等和边界元软件如BEASY, FADD3D 等也都能够进行断裂力学分析。这些软件一方面价格昂贵,另一方面断裂力学分析只是它们功能的一部分,不可能做到深入和全面。

三维断裂分析软件FRANC3D 是美国康奈尔大学断裂工作组(Cornell Fracture Group-CFG)开发的一套具有建模、应力分析、应力强度因子计算、裂纹自动扩展等功能的免费软件。它是基于工作站的一套分析软件,可以在很多桌面和工作站系统下运行,包括 Win98, Win NT/2000/XP, RedHat Linux 7.0, IBM AIX 4.2, Solaris 2.6, HP UNIX 10.2, HP UNIX11.0, Solaris2.6/SunOS 5.5.1 等操作系统。

2 程序功能和特色

断裂分析软件FRANC3D 由三个部分组成:立体对象建模器OSM(Object Solid Modeler),断裂分析器FRANC3D(Fracture Analysis Code in 3 Dimensions)以及边界元系统BES(Boundary Ele-

ment System)。

2.1 立体对象建模器OSM^[1,2]

立体对象建模器OSM(Object Solid Modeler)是用来生成可以由FRANC3D 读入的对象的几何描述。它相当于FRANC3D 的前处理模块,是一个简单的面向对象的几何模型构造器,可以通过菜单和对话框进行操作。它有一个简单而易用的对象描述语言用来存储对象的几何构形,文件扩展名为.mod。和其它的对象建模器一样,它可以生成由点(point)、线(curve)、面(patch)构成的几何模型,支持包括平移(translate)、镜像(mirror)、托扫(sweep)等操作。在视图上,可以进行图形的放缩、旋转、消隐等操作。和其它对象建模器唯一不同的是它的面有方向性,所有面的方向必须指向它所围成体的外法向,这样才构成一个封闭的体。

OSM 还具有转换有限元几何模型的功能,它可以把ANSYS, GEOM3D, SDRC IDEAS 和 NASTRAN 等有限元模型转换可以为OSM 和FRANC3D 读入的模型。这个功能可以减少我们的建模时间,直接把有限元几何模型转换为.mod 即可。

OSM 最终生成的几何模型不包含结构的边界条件和材料参数,它把最终文件写为.dat,这是FRANC3D 可以读入的格式。

2.2 断裂分析器FRANC3D/BES^[3,4]

断裂分析器FRANC3D(图2)是整个系统的核心部分。它具有以下功能:

2.2.1 几何模型完善

对于从OSM 读入的几何模型,FRANC3D 可以对之进行修改,比如增加点、线、面等。同时,

收稿日期:2002-12-31;修改稿收到日期:2003-09-18.

基金项目:国家自然科学基金(19872046)资助项目.

作者简介:贾学明(1974-),男,硕士;

王启智*(1946-),男教授.

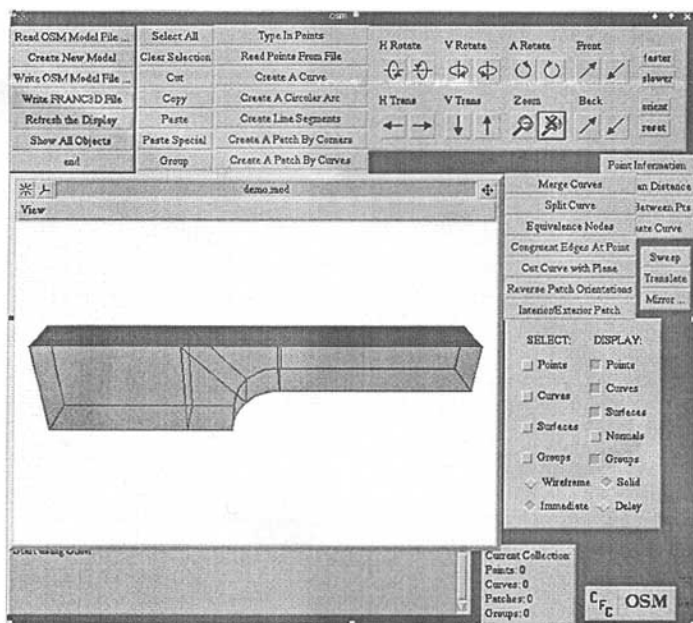


图1 立体对象建模器OSM示意图

Fig. 1 Sketch map of OSM

FRANC3D 可以在模型中加入所需的裂纹。FRANC3D 有很强的模拟裂纹的能力,可以生成多裂纹、非平面裂纹和任意形状的裂纹。这些裂纹可以是表面裂纹、内埋裂纹、交叉裂纹、不同材料交界处的裂纹甚至完全不连续。对于一个裂纹的构形,可以有任意的裂纹前缘。FRANC3D 在生成裂纹时,用户可以通过菜单选择它自带的裂纹库,如椭圆裂纹、圆片裂纹、直裂纹等。也可以通过文件的方式生成自己想要的复杂裂纹。FRANC3D 在模型里施加边界条件和材料常数。FRANC3D 在模型上施加的边界条件可以通过继承的方式传递到网格。

2.2.2 网格划分和求解

施加了边界条件和生成了裂纹以后,剩下的就是划分模型网格了。由于FRANC3D 是一个边界元分析系统,因而只有模型的表面和裂纹需要划分网格,模型的内部并不需要划分。在划分网格之前,先把模型的边线分成若干直线段,由这些小的直线段确定将要划分的单元尺寸。网格划分可以选择四边形或三角形网格,一般的划分可以分为自由划分(automatic mesh)、映射划分(mapped mesh)等。对划分好的网格还可以进行局部重建。一般情况下,裂纹区的网格需要划分的细一些,并保持较好的长宽比(aspect ratio)。

在划分好网格以后,把结果写入 .bes 文件,就可以进行求解了。求解使用边界元系统BES 系统进行。边界元计算是整个分析中最耗时的。随着单元数的增加,求解时间也显著增加。用户可以根据需要选择所需的求解器(QR 分解, Gauss 消元法、迭代法),用户可以根据问题的规模选择使用内存(in core)或者外存(out of core)来计算;甚至可以使用BES 的并行计算程序在多台机器上同时计算。

2.2.3 应力强度因子计算和裂纹自动扩展

FRANC3D 应力强度因子的计算是通过位移相关技术获得的,通过裂纹张开或滑动(opening and sliding)位移计算。对于 I 型裂纹使用裂纹张开位移(COD—Crack Opening Displacement)计算 I 型应力强度因子,对于 II 型裂纹使用裂纹滑动位移(CSD—Crack Sliding Displacement)来计算 II 型应力强度因子,对于 III 型裂纹使用裂纹撕裂位移(CTD—Crack Tearing Displacement)(图3)。应力强度因子可以通过裂纹前缘单元的节点位移得到,也可以通过一个距离裂纹前缘的一个固定值得到,它们得到的结果通常是一致的。前面提到 FRANC3D 可以模拟任意形状的裂纹和多裂纹的结构,它的优点是可以一次性得到一个对象内所有裂纹的因子强度因子值。

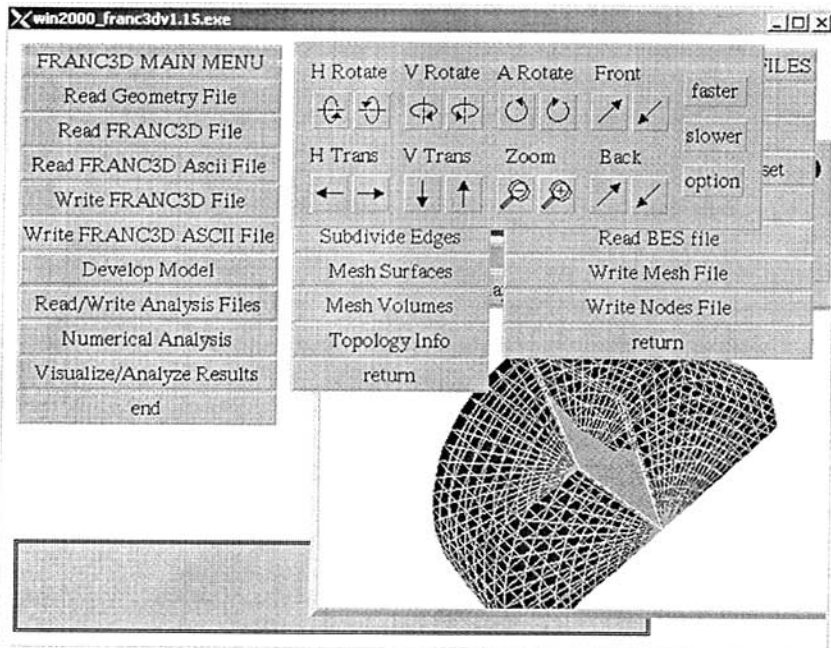


图 2 断裂分析器 FRANC3D 图形用户界面 (图中分析的是 CCNBD 试样)

Fig. 2 User's graphics interface for FRANC3D (the example shown is a CCNBD specimen)

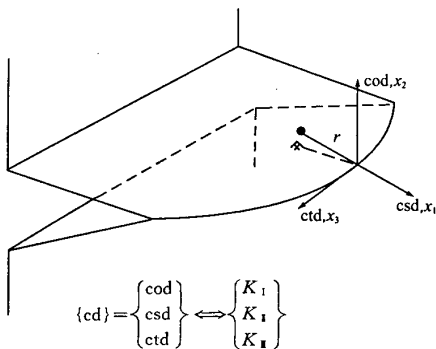
图 3 离裂纹前缘相距 r 的一点位移和裂纹前缘的应力强度因子直接相关

Fig. 3 Crack displacements calculated at a measured distance from the crack front are related to stress intensity factors at the crack front

FRANC3D 的最大特色是能够模拟裂纹的自动扩展。众所周知,三维断裂力学的复合型断裂(I型, II型, III型)的判据到现在还不成熟。复合型断裂的研究还普遍停留在二维水平(I型和II型混合)。由此产生了一系列理论,如最大周向应力理论,最大应变能释放率理论,应变能密度因子理论或S准则^[5]。FRANC3D使用以上断裂判据确定裂纹的扩展方向,而裂纹的最大扩展尺寸则由用户自己确定。裂纹前缘被离散成许多点,使用二维平面

应变方程确定这些点的扩展方向,它们的扩展尺寸则由各点相对应力强度因子的大小和用户确定的最大扩展尺寸共同决定。这些扩展后的点连线后重新组成新的裂纹面。用户可以重新分析扩展后裂纹前缘的应力强度因子分布情况。FRANC3D还有一个优点就是,在裂纹扩展后,只需对很小的一部分区域重新划分网格,这大大减少了网格划分时间。

FRANC3D还可以使用应力强度因子历史和材料常数预测疲劳裂纹寿命。

3 算例及应用

3.1 无限大体内埋椭圆片状裂纹的扩展分析

考虑一个椭圆片状裂纹的情形。椭圆短半轴 $a = 0.05$, 长半轴 $c = 0.1$, 置于一个边长 $b = 2$ 的正方体中心, 受垂直于裂纹面的远场均匀拉应力 $\sigma = 1.0$ 的作用。由于裂纹尺寸相对于模型尺寸较小, 可用无限大体内埋椭圆裂纹公式来计算其无量纲应力强度因子^[5]

$$\frac{K_I^\infty}{\sigma \sqrt{\pi a}} = \frac{1}{E(\kappa)} \left[\sin^2 \theta + \left(\frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 \theta \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

式中 θ 为决定裂纹前缘点位置的方位角, $E(\kappa)$ 为第二类椭圆积分

$$E(\kappa)=\int_0^{\pi/2}\sqrt{1-\kappa^2\sin^2\theta}d\theta,\quad \kappa^2=\frac{c^2-a^2}{c^2}\quad (2)$$

对于给定的 a 和 c 值, $E(\kappa)=1.211096$ 。

初始我们在椭圆的各轴上划分 3 个节点,在裂纹前缘划分 12 个节点见图 4,然后再改进网格进行计算。使用 FRANC3D 的线性单元计算椭圆裂纹短半轴上的无量纲应力强度因子为计算值为 0.8074,理论值为 0.8258,误差为 -2.23%,长轴端点处应力强度因子为 0.5702,理论值为 0.5839,误差为 -2.35%,这分别为计算中的最大和最小值。可见 FRANC3D 果然具有很高的精度。

下面通过 FRANC3D 对椭圆裂纹进行裂纹扩展分析,设每次扩展的最大尺寸为 0.02,每次扩展后,我们再计算新生成的裂纹的应力强度因子值,再继续扩展。扩展 7 次后的裂纹形状见图 5,其中的每一条闭合的曲线就是扩展后的裂纹前缘。我们发现,椭圆裂纹在扩展后,裂纹变为一个近似的圆形裂纹。这是符合裂纹扩展规律的,在应力强度因子

大的点裂纹的扩展速度相应的也要大。最终的扩展趋势是裂纹各点的应力强度因子相等。对于无限大体内埋裂纹,只有圆形裂纹的各点应力强度因子相等。

3.2 CCNBD 试样的应力强度因子计算

人字型切槽巴西圆盘试样 CCNBD (Cracked Chevron Notched Brazilian Disc) 是国际岩石力学学会 1995 年推荐的新型岩石断裂韧度测试试样^[6]。该试样具有三维的复杂形状,获取该试样的准确的应力强度因子值对于断裂韧度测试非常重要^[7]。文献[7]用分片合成法得到标准试样的最小无量纲应力强度因子值为 0.955,文献[8]新近给出了用国际上著名的有限元商业软件 ANSYS 的标定值为 0.943。本文使用 FRANC3D 计算得到的最小无量纲应力强度因子值为 0.946,可见它们之间符合的很好。图 2 显示了 CCNBD 试样的几何模型。它的裂纹前缘很复杂,是由两个圆弧形和一条直线连成的,如图 6 所示。我们可以通过图形的形式直接显示 CCNBD 试样的无量纲应力强度因子,如图 7 所示。

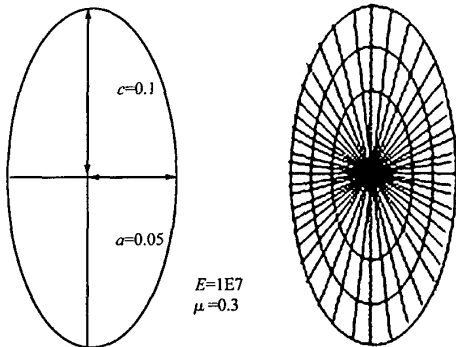


图 4 椭圆裂纹尺寸定义和网格
Fig. 4 Geometrical size and the mesh of the elliptical crack

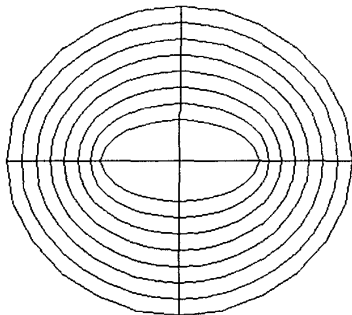


图 5 裂纹经过 7 次扩展后的形状
Fig. 5 The shape of the elliptical crack after seven times propagation

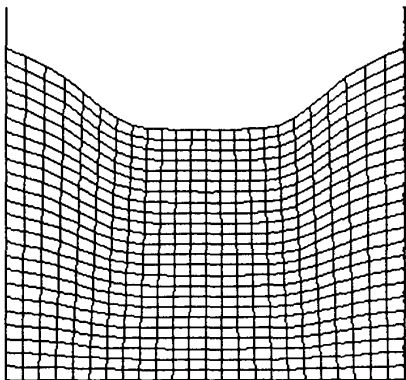


图 6 CCNBD 裂纹和网格
Fig. 6 CCNBD crack configuration and the mesh

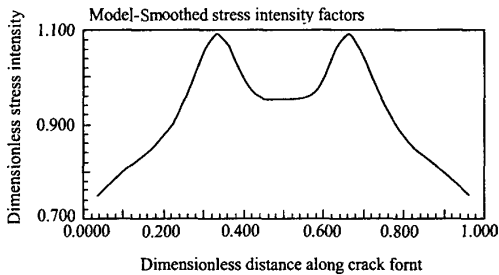


图 7 CCNBD 标准试样的无量纲应力强度因子值
Fig. 7 Distribution of dimensionless stress intensity factor for standard CCNBD specimen

参考文献(References):

- [1] OSM Menu and Dialog Reference[EB]. <http://www.cfg.cornell.edu/>, 2003.
- [2] OSM FEM To OSM Translator Reference[EB]. <http://www.cfg.cornell.edu/>, 2003.
- [3] FRANC3D Concepts/Users Guide [EB]. <http://www.cfg.cornell.edu/>, 2003.
- [4] Franc3D Menu & Dialog Reference[EB]. <http://www.cfg.cornell.edu/>, 2003.
- [5] 李志安. 压力容器断裂理论与缺陷评定[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1994. (Li Zhian. *Fracture Theory and Defect Assessment for Pressured Vessels* [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1994. (in Chinese))
- [6] ISRM Testing Commission. Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens [J]. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 1995, **32**:57-64.
- [7] Wang Q Z. Stress intensity factors of ISRM suggested CCNBD specimen used for mode-I fracture toughness determination[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1998, **35**:977-982.
- [8] 贾学明, 王启智. 标定 ISRM 岩石断裂初度新型试样 CCNBD 的应力强度因子[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(8):1227-1233. (Jia Xueming, Wang Qizhi. Calibration of the stress intensity factor for the new type of fracture toughness specimen CCNBD suggested by ISRM [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, **22**(8):1227-1233. (in Chinese))

Three dimensional fracture analysis software FRANC3D

Jia Xueming^{1,2}, Wang Qizhi^{*1}

(1. Dept. of Civil Eng. & Applied Mechanics, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Chongqing Communications Research & Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: A three dimensional fracture analysis software called FRANC3D (FRacture ANalysis Code in 3 Dimensions) is introduced. FRANC3D combined with OSM (object solid modeler) and BES (Boundary Element System) all together compose a full set fracture analysis system, which have the capabilities for modeling arbitrary shaped cracks, simulating the crack growth, etc. It has a powerful pre- and postprocessor, and a flexible user's graphics interface. At last, two samples are given to prove the correctness and ability of the FRANC3D.

Key words: fracture; border element; stress intensity factor