324 3次元亀裂進展シミュレーションの自動化

Automation of a 3D Crack Propagation Simulation

○ 尾崎 弘明 (東洋大学大学院) 室谷 浩平 (東洋大学)
松原 仁 (日本原子力研究開発機構) 正 矢川 元基 (東洋大学)

Hiroaki OSAKI, Toyo University
Kohei MUROTANI, Toyo University
Hitoshi MATSUBARA, Japan Atomic Energy Agency
Genki YAGAWA, Toyo University

This paper describes the 3D complicated crack propagation analysis using the Free Mesh Method(FMM). The computational fracture mechanics involves frequent re-meshing as the crack propagates. In order to show the effectiveness of the FMM in crack propagation analysis, we study the 3D Complicated crack propagation problems with the FMM. Comparing with 2D analysis result, the 3D effect on crack propagation is studied.

Key Words: Finite Element Method(FEM), Free Mesh Method(FMM), 3D Crack Propagation, 3D Complicated Crack, Fracture Mechanics

1. はじめに

近年のコンピュータおよび解析技術の進歩によって、従来は実験でしか求められなかった物理現象の解明に計算機上の数値解析手法が利用されるようになってきている。

また、実構造物においては構造物や機械類の大型化あるいは過酷な使用条件等が強いられるようになり、鋭い亀裂状の欠陥が大型構造物や機械類において発見される。また、欠陥検査技術の進歩により、数多くの微小欠陥が検出される。これらの欠陥が強度上安全であるか否かを推定する手段として高性能計算機を用いたコンピュータ・シミュレーション技術がある。これは、近年発展し続けている電子計算機の高性能化により、3次元実構造物の解析などの複雑な物理現象を解明することができる。

最近では、実際に即した形状をモデル化した超大規模解析も日常的に行われるようになり、解析対象も2次元問題から3次元空間の大規模を対象とするものへと発展している^[1]。

有限要素法は、工学分野で幅広く使用されている数値解析手法である。本手法は、複雑形状への高い適応性などの多くの優れた特徴を持っているが、メッシュ生成に多大な労力を要するのが欠点である^[2]。この問題を解決する方法としてメッシュレス法がある。これは、有限要素法で必要とされる節点と要素情報のうち、節点情報のみを用いる手法である。メッシュレス法の一つにフリーメッシュ法がある^[3]。フリーメッシュ法では、有限要素法の形状関数を用い、解析のプロセスの中で一時的に局所要素剛性行列を作成する。その後、中心節点毎に全体剛性行列へ局所要素剛性行列を足し合わせるプロセスを踏む。したがって、解析者はメッシュ生成を意識することなく解析を進めることができ、有限要素法と等価な解を得ることができる。

以上から、フリーメッシュ法は破壊力学への適応性も高いと考えられる。破壊力学では、亀裂が進展するとともに亀裂先端付近のリメッシングが頻繁に要求されるからであ

る^[4]。しかしながら、現在までに任意に進展する3次元亀裂解析は未だなされていない。そこで本論文では、フリーメッシュ法が亀裂問題において有効であることを示す。解析モデルとしては、2次元試験片モデルと3次元試験片モデルを用いた。

2. 亀裂進展法

2.1 亀裂進展方法

ここでは、本論文で今回用いた亀裂進展法について述べる。対象とするモデルは、Fig.1に示す形状の亀裂を有する2次元試験片モデルと、Fig.2に示す形状亀裂を有する3次元試験片モデルである。3次元試験片モデルの亀裂形状はFig.3に示した。

Fig.1 Crack in a 2D body

Fig.2 Complicated Crack in a 3D body

Fig.3 Crack Geometry

本研究では、まず2次元試験片モデルの亀裂進展解析を行う。また、3次元試験片モデルの任意形状亀裂を面内亀裂進展に限定した解析を行う。ここで、面内亀裂進展とは、亀裂の進展方向が Fig.2 に示す任意形状型亀裂面上のみに進展し、面外方向には進展しないものと仮定したものである。概念図を Fig.4 に示す。Fig.4 に示した亀裂前縁の個々の節点の亀裂進展量は変位法によって求めたK値から算出した亀裂進展量である。亀裂前縁の個々の節点の亀裂進展量は変位法によって求められ、式(1)により表される。

$$da = c \times K^{2.0} \times dt \quad (1)$$

ただし、 da は亀裂進展量(mm)、 c は亀裂進展量予想式におけるパラメータ、 K は応力拡大係数($MPa \sqrt{m}$)、 dt は亀裂進展量予想式における時間増分を表す。なお、 z 方向の亀裂進展量は無視している。

Fig.4 Incremental Crack Propagation

2.2 任意形状亀裂メッシュ作成方法

本研究では、任意形状亀裂メッシュ作成方法として、B-スプライン曲線を使用し、形状亀裂メッシュ作成を行った。B-スプライン曲線は、幾つかの制御点を定義する事で、滑らかな自由曲線を描く事ができる^[5]。

ここで、本研究で用いた亀裂前縁の個々の節点座標からB-スプライン曲線を使用し、任意形状亀裂メッシュ作成方法概念図を Fig.5 から Fig.6 に示す。

Fig.5 Spline Curve Fitting(1)

Fig.6 Spline Curve Fitting(2)

Fig.5 にて亀裂前縁個々の節点から B-スプライン曲線を使用し、亀裂前縁の曲線を描く。次に、亀裂前縁個々の節点座標から亀裂内部の節点を作成し、亀裂先端の節点からパッチメッシュを作成した図である。これを Fig.6 に示す。

3. 数値解析例

数値解析例として Fig.1 に示す形状の亀裂を有する2次元試験片モデルの引張解析と曲げ解析を行う。また、Fig.2 に示す任意形状亀裂を有する3次元試験片モデルの引張解析と曲げ解析を行う。試験片材料は表-1に示す。

3次元試験片モデルの初期任意形状亀裂 y 軸は5.0(mm)、初期任意形状亀裂 x 軸は6.0(mm)と仮定している。引張解析を行った結果は発表の際に行う。

E(Young's modulus)	200(GPa)
ν (Poisson's ratio)	0.3

Table.1 Material Value

4. まとめ

本論文では、フリーメッシュ法が亀裂問題において有効であることを示すために、解析モデルとして、まず2次元試験片モデル、さらに3次元試験片モデルを用いた。まず、Fig.1 に示す形状の亀裂を有する2次元試験片モデルの亀裂進展シミュレーションを行い、2次元亀裂問題を3次元亀裂問題へと拡張し、任意形状亀裂を有する3次元試験片モデルの亀裂進展シミュレーションを行った。今後は、任意形状亀裂3次元面外亀裂進展問題へと発展させる予定である。

5. あとがき

フリーメッシュ法を用いて構造解析を行う際、従来の有限要素法と同様に変位場とひずみ、応力場を同一で仮定する。よって、ひずみ、応力場は変位に対して精度が一次落ちてしまう。そこで、矢川らにより提案されている変分法の一つである、Hellinger-Reissner の原理に基づくフリーメッシュ法を導入する。この手法は Enriched Free Mesh Method^[6]と呼ばれ、変位とひずみ、応力を独立した異なる領域で仮定することで、高精度な解を得ることができるのである。このEFMMを亀裂進展解析に導入することにより、より高精度な解析を行うことが可能と考えられる。

参考文献

- [1] 矢川元基:破壊力学 理論・解析から工学的応用まで、培風館(1988)
- [2] 鷲津久一郎、宮本博、山田嘉昭、山本善之、川井忠彦 共編、有限要素法ハンドブック I 基礎編、培風館(1981)
- [3] G. Yagawa and T. Yamada: Free Mesh Method: A New Meshless Finite Element Method, Comp. Mech, 18, pp 383-386 (1996)
- [4] 小林英男:破壊力学、共立出版(1993)
- [5] 杉原厚吉:グラフィックスの数理、共立出版(1995)
- [6] G. Yagawa: Enriched element method and its applications to solid mechanics: EPMESC X: 2006