

XFEMによるクラッド付きCT試験片の 応力拡大係数評価

Evaluation of stress intensity factor of a CT test specimen with cladding by XFEM

李炎龍¹⁾, 長嶋利夫²⁾

Yanlong Li and Toshio Nagashima

1) 修 (工) 上智大学大学院 (〒102-8554, 東京都千代田区紀尾井町7-1, E-mail: liyanlong@eagle.sophia.ac.jp)

2) 博 (工) 上智大学理工学部 (〒102-8554, 東京都千代田区紀尾井町7-1)

To evaluate structural integrity of structures with dissimilar material interfaces such as clad steel, it is important to calculate the stress intensity factors at the crack tip. In this paper, a three-dimensional level set XFEM enriched with only Heaviside step function is applied to stationary crack analysis of a CT test specimen with cladding used for fatigue crack growth test. The stress intensity factor is evaluated directly from the J -integral without mode separation by M -integral. The distribution of stress intensity factor along the crack front obtained by XFEM is compared with that by FEM.

Key Words : XFEM, Stress intensity factor, CT test specimen, Transverse isotropic material

1. はじめに

原子炉圧力容器においては, 材料の耐食性, 防錆性を向上させるため, 腐食に強い材料をクラッドとして表面に接合して使われる. 本研究では, 異種材界面を有するクラッド鋼材のき裂進展挙動を再現できる数値シミュレーション手法を構築することを目的としている. 本稿では, クラッド付きCT試験片の疲労き裂進展試験[1]を対象として, 3次元レベルセットXFEM[2]による停留き裂解析を実施し, き裂前縁における応力拡大係数の分布を評価した結果を示す.

2. 解析手法

(1) 3次元レベルセットXFEMによる J 積分の評価

本稿に用いる3次元XFEMは, き裂形状をレベルセット関数により陰的に表し, 8節点六面体連続体要素の形状関数に, ヘビサイド関数だけ拡充する.

3次元き裂について, き裂の進展方向はき裂面に含まれてき裂前縁に垂直な方向とする. 物体力および熱荷重を考慮しない場合, き裂前縁における任意の評価点近傍の微小区間 L の区間平均 J_{ave} を, き裂進展方向が \hat{x}_1 となるように局所座標系 \hat{x}_i ($i=1, 2, 3$) に対する領域積分で次式のように表す[3].

$$J_{ave} = \frac{\iiint_V \left(\tilde{\sigma}_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \hat{x}_1} \frac{\partial q}{\partial \hat{x}_j} - w \frac{\partial q}{\partial \hat{x}_1} \right) dV}{\int_L q dL} \quad (1)$$

$$w = \int_0^{\tilde{\varepsilon}_{ij}} \tilde{\sigma}_{ij} d\tilde{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \tilde{\sigma}_{ij} \tilde{\varepsilon}_{ij} \quad (2)$$

ここに, w はエネルギー密度, V は積分領域, $\tilde{\sigma}_{ij}$, $\tilde{\varepsilon}_{ij}$, \tilde{u}_i はそ

れぞれ局所座標系における応力, ひずみと変位, q は評価点で1, V の表面で0をとるような重み関数である.

本稿では, 直方体形状の積分領域を用い, それに対応する重み関数 q は次式により表される.

$$q(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3) = \left(1 - \frac{|2\hat{x}_1|}{L_1} \right) \left(1 - \frac{|2\hat{x}_2|}{L_2} \right) \left(1 - \frac{|2\hat{x}_3|}{L_3} \right) \quad (3)$$

ここに, L_1, L_2, L_3 は $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$ 方向のその直方体の一辺の長さである.

(2) 横等方性材料の応力拡大係数評価

異方性材料の応力拡大係数評価では, 複素数の漸近解を利用した M 積分を用いずにモード分離する方法を利用する. Fig.1に示すように, 異方性材料中のき裂先端での局所座標系 $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$ において, J 積分と応力拡大係数ベクトル \mathbf{K} の間に, 次式のような関係がある.

$$J = \frac{1}{4} \mathbf{K}^T \mathbf{E} \mathbf{K}, \quad \mathbf{K} = \begin{Bmatrix} K_{II} \\ K_I \\ K_{III} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{E} = 2\mathbf{L}^{-1} \quad (4)$$

ここに, \mathbf{L} はBarnett-Lotheテンソルの一つである.

\mathbf{L} は次式に示すような積分により求める.

$$\mathbf{L} = -\frac{1}{\pi} \int_0^\pi (\mathbf{R}(\theta) \mathbf{T}^{-1}(\theta) \mathbf{R}^T(\theta) - \mathbf{Q}(\theta)) d\theta \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}(\theta) &= \tilde{\mathbf{Q}} \cos^2 \theta + (\tilde{\mathbf{R}} + \tilde{\mathbf{R}}^T) \sin \theta \cos \theta + \tilde{\mathbf{T}} \sin^2 \theta \\ \mathbf{R}(\theta) &= \tilde{\mathbf{R}} \cos^2 \theta + (\tilde{\mathbf{T}} - \tilde{\mathbf{Q}}) \sin \theta \cos \theta - \tilde{\mathbf{R}}^T \sin^2 \theta \\ \mathbf{T}(\theta) &= \tilde{\mathbf{T}} \cos^2 \theta - (\tilde{\mathbf{R}} + \tilde{\mathbf{R}}^T) \sin \theta \cos \theta + \tilde{\mathbf{Q}} \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (6)$$

ここに, $\tilde{\mathbf{Q}}, \tilde{\mathbf{R}}$ と $\tilde{\mathbf{T}}$ は次式に示すような局所座標系における弾性剛性の成分 \tilde{C}_{ijkl} をもつ3行3列のマトリクスである.

Table 1 Material properties of SM490 (Base metal) and Type308 (Cladding).

Material	Young's modulus [MPa]	Poisson' ratio	*Paris C	Paris m
SM490 (Isotropic)	E=210,980	v=0.28	2.56×10^{-16}	3.98
Type308 (Transverse isotropic)	$E_1=E_2=182.52,$ $E_3=121.25$	$v_{12}=0.166,$ $v_{13}=v_{23}=0.515$	2.60×10^{-16}	4.09

*Unit of ΔK : $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$

$$\tilde{Q}_{ij} = \tilde{C}_{i1j1}, \quad \tilde{R}_{ij} = \tilde{C}_{i1j2}, \quad \tilde{T}_{ij} = \tilde{C}_{i2j2}, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (7)$$

本稿で扱うCT試験片の負荷形態は純粋モードIであり、 $K_{II}=0, K_{III}=0$ となるので、式 (4) から導出される次式を用いてJ積分から直接 K_I を評価する。

$$K_I = 2\sqrt{J/E_{22}} \quad (8)$$

3. 数値解析結果

Fig.2に示すような5mmクラッド層を有するCT試験片[1]を解析対象とする。試験片の母材(SM490)を等方性材料として扱い、クラッド(Type308)については巨視的試験で多数の柱状結晶粒が観察されたので横等方性材料として扱う[1]。それぞれの材料物性をTable 1に示す。実験で得られた最初のビーチマーク形状を解き裂前縁形状とする。12.6kNの荷重を与えた場合の停留き裂解析を、3次元XFEMを用いて実施し、比較のため通常のFEM解析も実施する。

FEM解析では商用有限要素解析ソフトウェアAbaqusを、XFEM解析では開発した内製コードNLXFEM3Dstruct[2]を用いて実施する。また、J積分評価に関して、XFEMとFEMは共に領域積分法を用いる。応力拡大係数評価に関しては、FEMは異種材中のき裂の漸近解によるM積分法を用いる。

有限要素モデルについて、CT試験片の上下対称性を考慮して、1/2領域をモデル化する。XFEM解析モデルにおいて、き裂面における要素の大きさについて、き裂進展方向および試験片の厚さ方向の辺の長さを0.2mmとする。FEM解析モデルでは、き裂前縁に整合する要素の分割が必要となり、き裂面における要素の大きさについて、き裂進展方向の長さを0.2mmとする。

解析結果として得られるき裂前縁における応力拡大係数 K_I の分布をFig.3に示す。XFEMの結果とFEMはよく整合する。FEMの結果を基準とした場合、両者の差が約2%となっている。

4. おわりに

本稿では、ヘビサイド関数だけを拡充した3次元レベルセットXFEMを用いて、クラッド付きCT試験片を対象とした停留き裂解析を実施した。結果として得られるき裂前縁における応力拡大係数 K_I の分布は、M積分を用いたFEMとほぼ整合した結果が得られることを確認した。

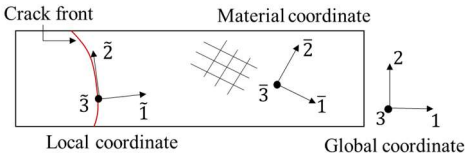


Fig.1 Coordinate systems utilized in the present analysis.

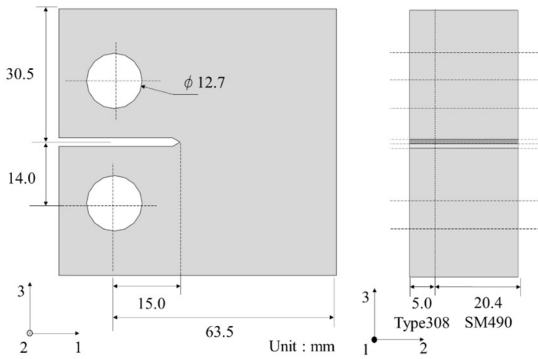


Fig.2 CT test specimen with cladding

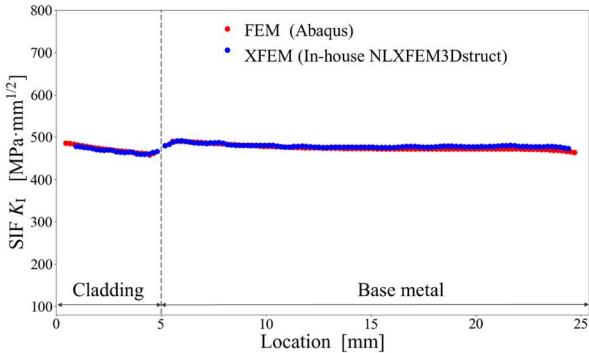


Fig.3 Distribution of K_I along the crack front of CT test specimen with cladding.

参考文献

[1] M. Nagai et al.: XFEM Analysis of Non-uniform Fatigue Crack Growth Crossing Interface in Cladded Plate, *26th SMiRT*, 2022.

[2] T. Nagashima: Three-dimensional crack analyses under thermal stress field by XFEM using only the Heaviside step function, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 7, No. 4, pp. 20-00098, 2020.

[3] 永井ら: 三次元異方性異種材界面き裂の応力拡大係数解析, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol. 72, No. 724, pp. 1992–1999, 2006.