

# 結合力モデルを用いたFEMによる C(T)試験片のJ-R曲線評価

J-R curve evaluation of C(T) test specimens by FEM using CZM

李炎龍<sup>1)</sup>, 長嶋利夫<sup>2)</sup>

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)

In this study, elastic-plastic FEM using cohesive zone model with trapezoidal traction-separation law is applied to the ductile crack propagation problem of three different sizes of low-alloy steel C(T) specimens. Crack extension is assessed using damage variables of interface elements, and J-R curve is evaluated by performing several of stationary crack analyses based on the relationship between crack extension and displacement obtained from the crack propagation analysis result. The analysis results are compared with experiment and discussed.

**Key Words :** FEM, Ductile fracture, Cohesive zone model, J-integral, Elastic-plastic analysis

## 1. はじめに

鋼構造の強度信頼性評価の一環として実施される材料の破壊靱性評価において、一般的にき裂成長開始時のJ積分を弾塑性破壊靱性値 $J_{IC}$ とし、C(T)試験片を用いて実験的に求められている。しかしながら、大きさが異なる試験片を用いた場合、 $J_{IC}$ の測定値およびき裂抵抗曲線(J-R曲線)における寸法依存性が報告されており[1], 寸法効果の影響を考慮した評価手法が必要となる。一方、計算破壊力学では、結合力モデルを用いたFEMによって材料非線形性を考慮した延性き裂進展解析が実施可能となっている。本研究では、結合力モデルを用いた延性き裂進展シミュレーション手法を開発し、妥当性を検証することを目的とする。本稿では、異なる寸法を有する三種類の低合金鋼製C(T)試験片を対象として、台形状の表面力一相対変位関係を有する結合力モデルを導入したインターフェース要素を用いて二次元平面ひずみ弾塑性解析を実施し、荷重と荷重線変位との関係およびJ-R曲線の評価した結果を示す。

## 2. 解析手法

### (1) 結合力モデル

弾塑性体のき裂進展挙動を模擬するため、Tvergaardらが提案したFig.1に示すような台形状の表面力一相対変位関係を有する結合力モデルを用いる。 $T_0$ は損傷の発生に対応するき裂面の引張強度、 $k$ はペナルティ剛性、 $\alpha$ は結合力低下が開始する相対変位を決める係数、 $u_F$ は損傷が進展するときの相対変位である。表面力の仕事である $\Gamma$ が破壊エネルギー $\Gamma_0$ に達したときにき裂が進展すると仮定する。このような関係則は、軟化開始の前に表面力が一定値を維持し、き裂先端の塑性鈍化を伴って散逸し

たエネルギーが大幅に増加することを適切に表現できる。き裂面における変位の不連続性を表すため、Fig.2に示すような4節点インターフェース要素をき裂面に挿入する。インターフェース要素において損傷変数 $d$ を計算し、この値が1に達したときき裂が進展すると見なす[3]。

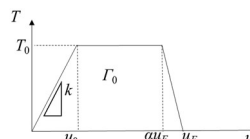


Fig. 1 Trapezoidal traction-separation law.

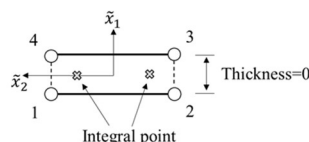


Fig.2 Two-dimensional four-node interface element.

### (2) J-R曲線評価手法

き裂進展解析によって、き裂進展量と荷重線変位との関係を求め、それに基づいて様々なき裂長さを有する複数の有限要素モデルを作成する。それらのモデルに対して強制変位を加えて停留き裂解析を実施し、領域積分法によってき裂先端のJ積分を求める。停留き裂解析を実施する場合、き裂を進展させないため、結合力モデルを導入しない。これらの停留き裂解析の結果によって、J-R曲線が評価可能となる。

## 3. 数値解析

### (1) 解析対象と材料物性[1]

寸法が異なる三種類の圧力容器用低合金鋼 SQV2A 製のC(T)試験片(1T-C(T), 0.5T-C(T), Mini-C(T))を対象として

二次元平面ひずみ要素を用いた弾塑性き裂進展解析を実施する。材料のヤング率、ポアソン比と降伏応力をそれぞれ  $1.86 \times 10^6 \text{ MPa}$ ,  $0.3$ ,  $468.2 \text{ MPa}$  とし、各寸法の試験片の破壊靱性値  $J_{IC}$  を ASTM 1820 規格に基づくコンプライアンス法で測定された暫定値  $J_Q$  として Table 1 に示す。

Table 1 Fracture toughness obtained by compliance method.

Specimen	Fracture toughness ( $J_Q$ ) [kJ/m <sup>2</sup> ]
1T-C(T)	619.4
0.5T-C(T)	513.3
Mini-C(T)	379.5

(2) 解析モデル

試験片の対称性を考慮して 1/2 領域をモデル化する。Fig.3 の 1T-C(T)試験片の有限要素モデル例に示すように、き裂進展解析に用いられる有限要素モデルはき裂面に一層のインターフェース要素を挿入する。停留き裂解析ではソリッド要素のみを用いる。ピン負荷箇所を 1/4 領域だけモデルし、集中荷重による過大変形を防ぐため、この領域を剛体で近似する。き裂線近傍の 4 節点四辺形ソリッド要素およびき裂線におけるインターフェース要素の寸法について、三種類の試験片は同じようにき裂進展方向の一辺の長さを  $0.05 \text{ mm}$  とする。結合力モデルのパラメータについて、破壊エネルギー  $\Gamma_0$  を各寸法の試験片のそれぞれの  $J_Q$  とし、引張強度  $T_0$  を丸棒の引張試験によって求められた破断時の真応力  $1350.8 \text{ MPa}$ 、ペナルティ剛性  $k$  とパラメータ  $\alpha$  をそれぞれ  $1.0 \times 10^8 \text{ N/mm}^3$ ,  $0.75$  とする。

(3) 解析結果

き裂進展解析の結果として得られた荷重線変位と荷重との関係をFig.4に示す。損傷の進展を開始する前の非線形荷重およびき裂の進展による荷重の低下を再現できて、実験と概ね整合する。前述したように、き裂進展解析から得られたき裂進展量と荷重線変位との関係を用い、一連の停留き裂解析から評価された  $J$ - $R$  曲線をFig.5に示す。いずれの試験片においての解析は、き裂の進展に伴って  $J$  積分が増加するき裂抵抗曲線を与える。1T-C(T)試験片において、実験値と概ね整合する曲線が得られる。 $J$ - $R$  曲線と縦軸の交点を破壊靱性値として各試験片の解析結果をまとめて見ると、異なる破壊エネルギー  $\Gamma_0$  によって破壊靱性は変化し、実験のような  $J_{IC}$  ( $J_Q$ ) の寸法依存性を再現できたと考える。ただし、実験値と比べて、解析では破壊靱性値を過大評価となる傾向を示す。一方、 $J$ - $R$  曲線の勾配は  $\Gamma_0$  に依存しないことを示しており、曲線の形状が引張強度  $T_0$  によって支配される可能性がある。

4. おわりに

本稿では、結合力モデルを用いたFEM解析によって異なる寸法を有するC(T)試験片の  $J$ - $R$  曲線を評価した。今後は、破壊靱性値の過大評価を解決するため、妥当な破壊

エネルギー  $\Gamma_0$  の設定方法を検討する。また、き裂面の引張強度  $T_0$  はき裂先端の応力三軸度に依存することが指摘され[3]、これを考慮した結合力モデルの導入を試みる。

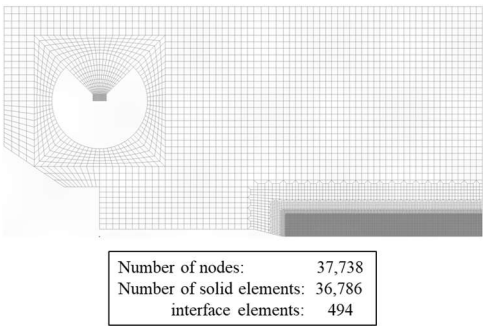


Fig. 3 Finite element model of 1T-C(T) specimen (half model).

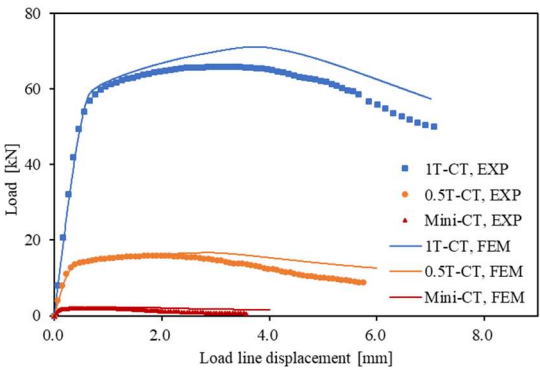


Fig.4 Relationships between load-line displacement and load obtained by crack propagation analysis.

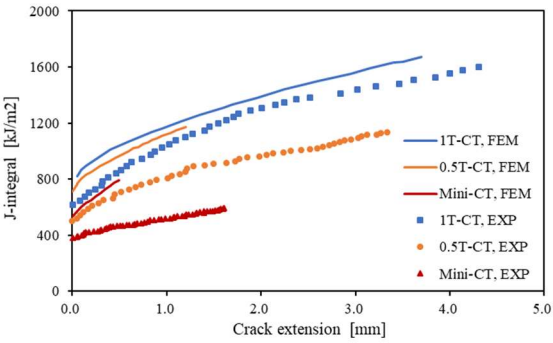


Fig.5  $J$ - $R$  curves obtained by a series of stationary crack analyses using crack propagation analysis results.

参考文献

[1] 信耕ら, ミニチュアC(T)試験片を用いた上部棚破壊靱性の評価—塑性拘束の評価および寸法効果補正手法の提案, 電力中央研究所報告Q20006 (2021).

[2] V. Tvergaard and J. W. Hutchinson, The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids, J. Mech. Phys. Solids, 1992.

[3] 李, 長嶋, 結合力モデルを用いたFEMによるCT試験片の延性き裂進展解析, 第36回計算力学講演会論文集, 23-24, 2023.

[4] A. Banerjee and R. Manivasagam, Triaxiality dependent cohesive zone model, Eng. Fract. Mech., 2009.