

三次元表面き裂の延性不安定破壊に関する研究*

(第1報, COA 一定条件によるき裂進展解析)

三好俊郎**, 吉田有一郎**, 白鳥正樹***

Study on Tearing Instability for Three Dimensional Surface Crack
(1st Report, Analysis of Stable Crack Growth by COA Criterion)

by Toshiro MIYOSHI, Yuichiro YOSHIDA, and Masaki SHIRATORI

In this paper, the stable crack growth of three dimensional surface crack has been analyzed by the Line Spring Method. The elastic-plastic stiffness of a line spring element is evaluated by the complementary energy of the single edge notched specimen. The COA criterion is used for the crack growth analysis and the change of the surface crack configuration is analyzed with increasing applied stress. The penetration loads are estimated for the various surface crack configurations and are compared with those by the net section stress criterion. The qualitative agreement is obtained between two results. But, for some configurations, the tearing instability arises before the crack penetration and the net section stress criterion becomes invalid for those configurations.

Key Words: Fracture, Surface Crack, Tearing Instability, Crack Opening Angle, Line Spring Method

1. 緒 言

原子力機器を始めとするエネルギー機器では、構造物の健全性に対して高い信頼性が要求される。これらの構造物の多くは、溶接構造を有するためき裂状欠陥が存在することが考えられ、その安全性を評価することは重要な問題である。

原子炉圧力容器、配管などは、高じん性材料が用いられず脆性破壊の可能性は少ないが、異常運転あるいは地震等により過大な負荷がかかり、延性不安定破壊を生ずる可能性について明らかにすることが必要である。高じん性材料の延性不安定破壊の研究は、二次元のき裂材を対象として数多く行われ⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾、き裂の発生あるいは伝ばを律するパラメータとして、 J 積分、ティアリングモジュラス T_{mat} 、き裂開口角 COA、き裂先端開口角 CTOA、塑性仕事係数 T_w などが提唱されている。また、これらの結果に基づき配管の貫通き裂についての研究が行われている。引張り負荷に対する研究として矢川ら⁽⁵⁾による CTOA 条件を用いた三次元

有限要素法による詳細解析、鹿島による CTOA 条件と Key Curve 法を用いた簡易解析⁽⁶⁾、矢川ら⁽⁷⁾および German⁽⁸⁾らによるティアリングモジュラス T_{mat} と全面塑性解を用いた簡易解析がある。曲げ負荷に対する研究としては、Zahoor ら⁽⁹⁾によるティアリングモジュラス T_{mat} を用いた簡易解析がある。これらの報告においては解析結果と実験結果は、良く一致することが示されている。

一方、LBB 設計の概念においては、三次元表面き裂が成長し、貫通するまでの安定性が重要な問題である。これに関する実験的研究は、Kanninen ら⁽¹⁰⁾、坂田ら⁽¹¹⁾、矢川ら⁽¹²⁾によって行われており、実断面応力基準破壊条件の有効性が報告されている。しかし、三次元表面き裂の安定性について詳細な解析を行った研究はない。これに対し著者らは、三次元表面き裂の解析に適した有限要素法(ラインスプリング法)を提唱し、弾完全塑性体の表面き裂の J 積分評価⁽¹³⁾、加工硬化材の表面き裂の J 積分評価とき裂進展解析⁽¹⁴⁾を行い、その有効性を明らかにした。本報告においては文献(14)の手法を発展させ、き裂進展条件として COA 一定条件を用いたき裂進展解析を行い、実断面応力基準破壊条件⁽¹⁰⁾と比較検討した結果について述べる。

* 昭和59年11月29日 第929回講演会において講演、原稿受付 昭和59年5月31日。

** 正員、東京大学工学部(〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)。

*** 正員、横浜国立大学工学部(〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156)。

2. 解析方法

2.1 弾塑性解析 表面き裂材を厚肉シェル要素と2次のラインスプリング要素でモデル化する。シェル要素にも弾塑性変形を考慮している。解析法の詳細については、文献(14)に述べてあるので参照されたい。

2.2 き裂進展解析 本報告では、き裂進展条件として初回のき裂進展に対しては J_{IC} 条件を、以後のき裂進展に対しては COA 一定条件を用いている。以下 COA の定義、評価方法、き裂進展の手順について述べる。

2.2.1 COA の定義 進展するき裂の先端形状のモデルを図1に示す。ここに δ_0 は初回のき裂進展時のき裂先端開口変位、 δ_i は $a=a_0$ における開口変位、また Δa はき裂進展量である。図1より COA は式(1)で与えられる。

$$COA = \frac{\delta_i - \delta_0}{\Delta a} \dots\dots\dots(1)$$

2.2.2 COA の評価 まず初回のき裂進展時のき裂先端開口変位 δ_0 は、図2に示すように、ラインスプリング要素(片側き裂材)の板幅中央におけるき裂開口変位 δ_c 、回転 θ_c 、き裂深さ a_0 、板幅 t により、式(2)で与えられる。

$$\delta_0 = \delta_c + \left(\frac{t}{2} - a_0\right)\theta_c \dots\dots\dots(2)$$

次に、き裂進展開始後の COA について考える。き裂進展解析は増分過程と破壊過程よりなる。 δ_c および θ_c と表面き裂材の荷重点変位 Δ_T の関係を図3に示す。増分過程は図3の A→B に対応する。この場合、式(1)の δ_i は式(3)で与えられる〔図4(a)参照〕。

$$\delta_i = \delta_c + \left(\frac{t}{2} - a_0\right)\theta_c \dots\dots\dots(3)$$

式(1)~(3)によって求められる COA が限界値 COA_c 以上となる場合、破壊過程を行う。これは図3の B→C に対応し、荷重点変位 Δ_T 一定としてき裂が da 進展し、 δ_c 、 θ_c が $d\delta_c$ 、 $d\theta_c$ 増加する。き裂進展後の δ_i は式(4)で与えられる〔図4(b)参照〕。この場合、 $d\delta_c$ 、 $d\theta_c$ はコンプライメンタリエネルギー法⁽¹⁴⁾により評価する。COA は式(1)、(2)、(4)より与えられる。

$$\delta_i = (\delta_c + d\delta_c) + \left(\frac{t}{2} - a_0\right)(\theta_c + d\theta_c) \dots\dots\dots(4)$$

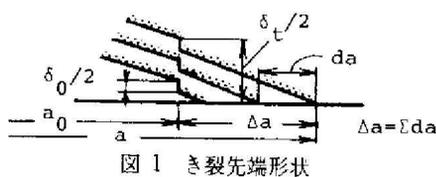


図1 き裂先端形状

COA 一定条件によるき裂進展解析の手順は次のように行う。ただし、表面き裂は半だ円形の長軸の長さを一定とし、深さ方向(短軸方向)にのみ進展するものとする。

(1) 負荷は変位形とし増分解析を行ってラインスプリング要素の COA を算出する。

(2) COA が限界値 COA_c を越えたラインスプリング要素の端節点(図5の $i=3$)については $da=1$ mm、両隣の間節点については、き裂進展量が線形に分布するように $da=0.5$ mm として破壊過程を行う。

(3) き裂進展が所定の量に達するまで(1)、(2)を繰り返す。

本手法の特徴は、き裂前縁のすべての点において破壊条件を満足しつき裂が進展することにより、変位増分とき裂進展量を十分小さくすることによって精度

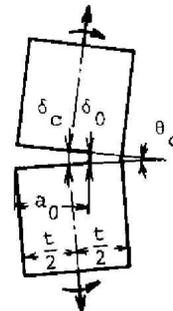


図2 ラインスプリング要素(片側き裂材)の δ_0

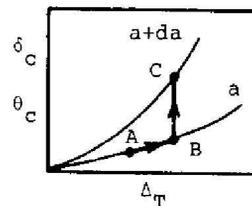


図3 増分過程(A→B)と破壊過程(B→C)

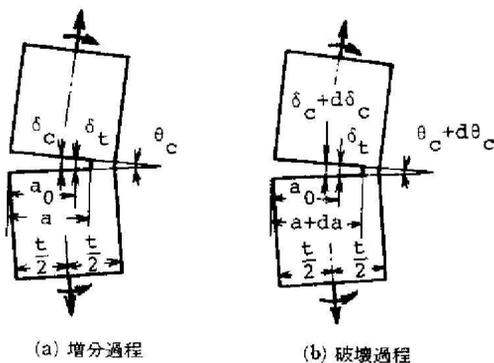


図4 ラインスプリング要素(片側き裂材)の δ_i

の良い解が得られる。

3. 解析対象

表面き裂材の材料としては、原子炉圧力容器鋼 A533B を想定した。材料定数を表1に示す。構成方程式はスウィフトの式、式(5)で与えた。ただし、 ϵ_r は降伏ひずみを表す。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= \frac{\sigma}{E} & (\sigma \leq \sigma_Y) \\ \epsilon &= \frac{\sigma}{E} + \alpha \epsilon_r \left\{ \left(\frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^n - 1 \right\} & (\sigma \geq \sigma_Y) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

表面き裂材の板幅を W 、長さを L 、板厚を t とする。表面き裂は半だ円形で、き裂長さを $2c$ 、深さを a_0 とする。解析は3種類のき裂材、すなわち、

$$\begin{aligned} a_0/c=0.2, \quad a_0/t=0.4, \quad 2c/W=0.2 \\ a_0/c=0.05, \quad a_0/t=0.4, \quad 2c/W=0.8 \\ a_0/c=0.1, \quad a_0/t=0.8, \quad 2c/W=0.8 \\ t=50 \text{ mm}, \quad W=L=1000 \text{ mm} \end{aligned}$$

について行った。 $a_0/c=0.2, a_0/t=0.4$ のき裂材についての要素分割を図6に示す。対称性より全体の1/4を解析した。変位増分は、き裂材上端に、各々、0.04mm ($a_0/c=0.2$)、0.03mm ($a_0/c=0.05$)、0.02mm ($a_0/c=0.1$) ずつ与え、解析はき裂が貫通するまで行った。

4. 解析結果

図7にき裂進展形状の一例($a_0/c=0.2, a_0/t=0.4$)を示す。き裂は滑らかに進展している。図8に荷重-変位曲線を示す。ここで Δ_T は、試験片の伸びを示す。図中○印はき裂進展開始を、×印は貫通を示す。図8では

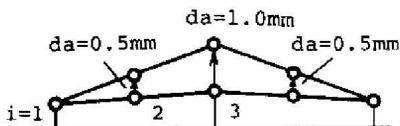


図5 ラインスプリング要素のき裂進展モデル (節点3が進展する場合)

$a_0/c=0.2$ と $a_0/c=0.1$ の場合は、表面き裂が貫通する以前に荷重低下はない。しかし、 $a_0/c=0.05$ については、貫通以前に最大荷重点が現われ、荷重低下が生ずる。すなわち荷重形の負荷をうける場合は、貫通以前に不安定破壊が生ずる。変位形の負荷を受ける場合でも、系のコンプライアンスが十分大きければ不安定破壊を生ずる可能性がある。

表面き裂の貫通および不安定破壊を律する条件として実断面応力基準破壊条件⁽¹⁰⁾がある。この条件を検討するため図8の結果および著者らが行った二次元中央き裂材(CCP材)の結果⁽³⁾をあわせて図9に示す。横軸は、初期き裂面積(A_0)と試験片断面積(A)の比を示す。図中○印は、表面き裂材の貫通時負荷応力と初期き裂面積の関係、△印は、中央き裂材のき裂進展開始時負荷応力と初期き裂面積の関係を表す。▲印は中央き裂材の最大負荷応力とその時のき裂面積の関係を示す。○印は、ほぼ1本の直線上にのっている。これは、表面き裂の貫通時の実断面応力がほぼ一定であることを示している。▲印もほぼ1本の直線上にのっており、最大荷重点(荷重形では不安定点)の実断面応力がほぼ一定であることを示している。図8の結果は、SUS304鋼について Kanninen が得た結果⁽¹⁰⁾と良く対応している。

Kanninen は、荷重形負荷の場合の LBB 成立条件を次の様に与えている。すなわち、ある初期表面き裂面

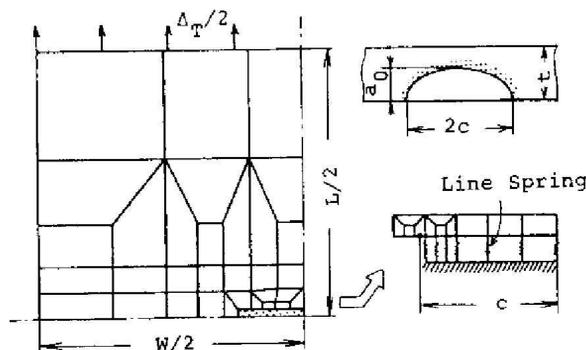


図6 表面き裂材の要素分割 ($a_0/c=0.2, a_0/t=0.4$ の場合)

表1 A533B鋼の材料定数

Young's Modulus	E	206GPa
Poisson's Ratio	ν	0.3
Yield Stress	σ_Y	431MPa
n		9
α		1.67
J_{Ic}		0.2MJ/m ²
COA_c		0.22rad

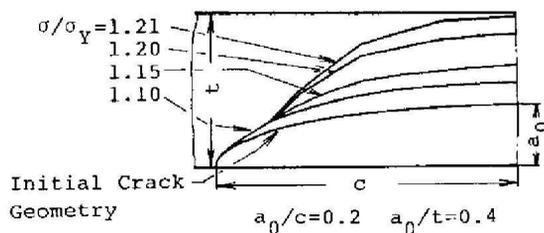


図7 き裂進展形状

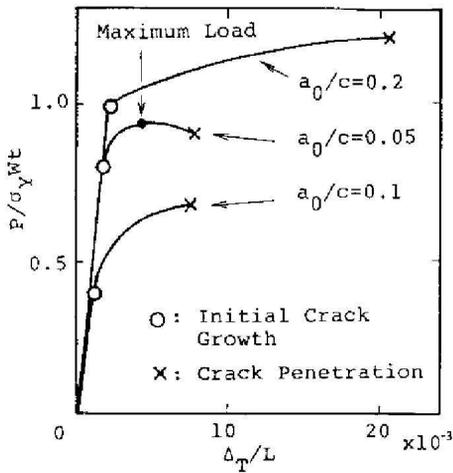


図8 荷重-変位曲線

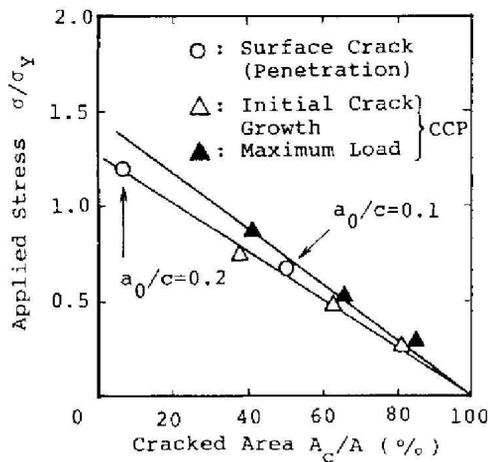


図9 実断面応力基準破壊条件

積に対する貫通時負荷荷重 P_L と、等しいき裂長さを有する中央き裂材の最大負荷荷重 P_B について、 $P_L < P_B$ ならば LBB は成立する。しかしながら、図8の $a_0/c=0.05$ については、貫通以前に不安定化する可能

性があり、Kanninen の考え方では扱うことができない。どのような形状のき裂に対してこの状況が生ずるかについては次報にて報告する。

5. 結 言

弾塑性状態における表面き裂材のき裂進展解析を COA 一定条件を用いて行い、以下の結論を得た。

(1) 表面き裂材の貫通時実断面応力は、ほぼ一定となる。これは Kanninen らの実験結果と良く対応している。

(2) しかし、表面き裂の形状によっては、貫通以前に最大荷重点が現われ、Kanninen の LBB 成立条件は有効でない場合がある。

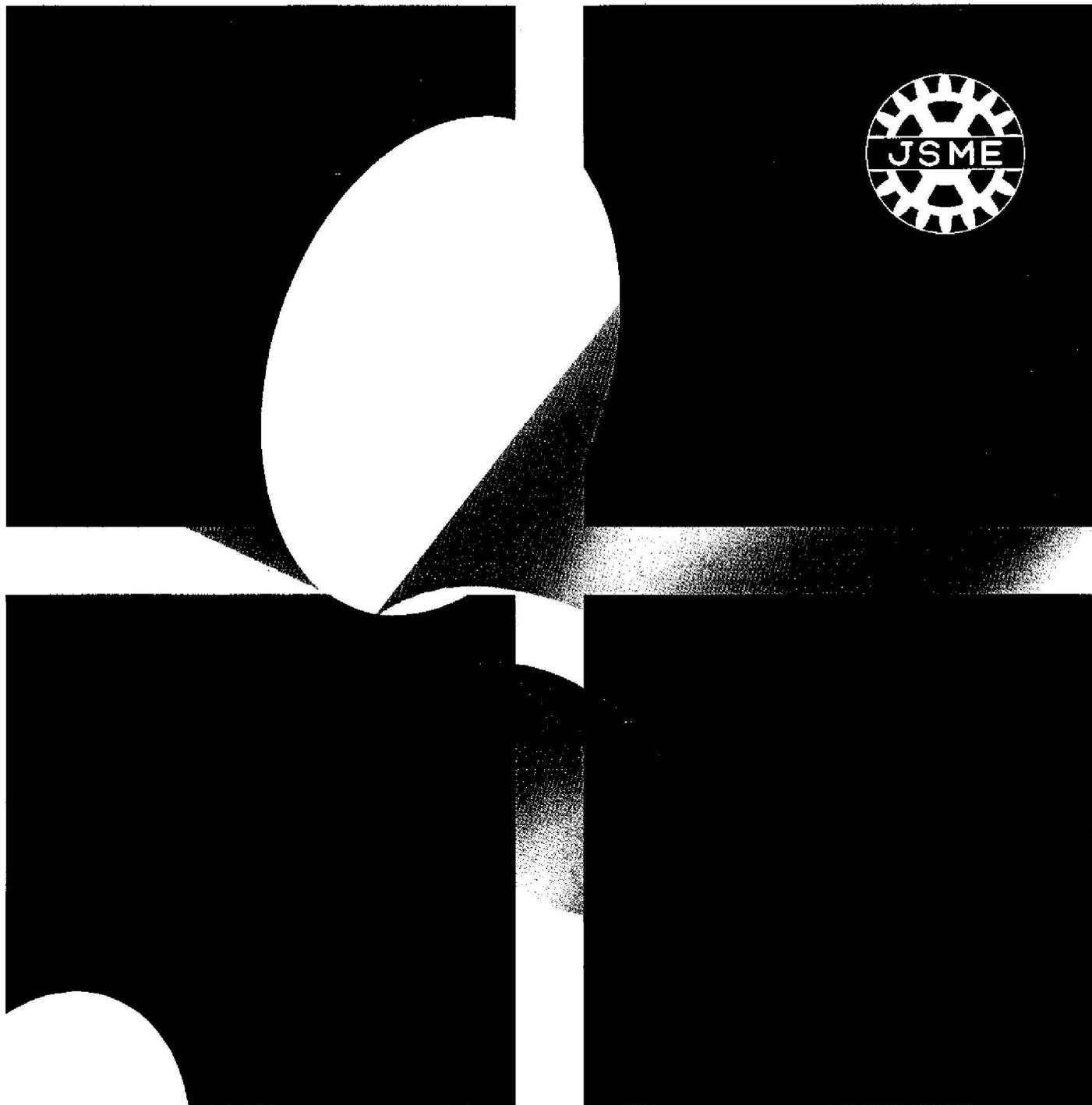
文 献

- (1) Shih, C.F., ほか2名, *ASTM STP* 668 (1979), 65.
- (2) 高橋・矢川, 機論, 49-448, A (昭58), 1548.
- (3) 三好・ほか2名, 機論, 50-453, A (昭59), 904.
- (4) 坂・ほか3名, 機論, 47-424, A (昭56), 1301.
- (5) Yagawa, G., ほか6名, *7th SMIRT Conf., G/F 4/1** (1983).
- (6) 鹿島, 機講論, No. 830-2 (昭58-3), 38.
- (7) 矢川・ほか2名, 機講論, No.840-1 (昭59-3), 206.
- (8) German, M.D. and Kumar, V., *Trans. ASME, Ser. J.*, 105-4 (1983), 290.
- (9) Zahoor, A. and Kanninen, M.F., *Trans. ASME, Ser. J.*, 103-4 (1981), 352.
- (10) Kanninen, M.F., ほか5名, *Nuclear Engineering and Design*, 48 (1978), 117.
- (11) Sakata, S., ほか3名, *Fracture Mechanics of Ductile and Tough Materials and its Applications to Energy Related Structures*, (1981), 79, Martinus Nijhoff Publishers.
- (12) 矢川・ほか5名, 機論, 50-451, A (昭59), 483.
- (13) 三好・ほか2名, 機論, 48-433, A (昭57), 1128.
- (14) 三好・ほか2名, 機講論, No.840-1 (昭59-3), 182.

昭和60年1月

第461号 A編

日本機械学会論文集



**TRANSACTIONS OF
THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS**

January, 1985

日本機械学会

