

三次元表面き裂の延性不安定破壊に関する研究*
(第2報, Leak-Before-Break 条件に関する考察)

三好俊郎**, 吉田有一郎**, 白鳥正樹***

Study on Tearing Instability for Three Dimensional Surface Crack
(2nd Report, Evaluation of Leak-Before-Break)

by Toshiro MIYOSHI, Yuichiro YOSHIDA, and Masaki SHIRATORI

In this paper the evaluation of Leak-Before-Break for plates with a surface crack has been carried out by the Line Spring Method. The COA criterion is used for the crack growth analysis and the load-displacement curves of surface cracked plates under tension are obtained for various crack geometries. The load-displacement curves are classified into two types. One shows the crack penetration after the maximum load, and another shows the crack penetration before the maximum load. Under the load controlled system, the latter satisfies Leak-Before-Break while the former does not. Next, the effect of the initial geometry of surface cracks to Leak-Before-Break is shown by LBB diagram. The tearing instability and Leak-Before-Break of surface cracked plates can be evaluated by this diagram.

Key Words: Fracture, Leak-Before-Break, Tearing Instability, Surface Crack, Crack Opening Angle, Line Spring Method, Finite Element Method

1. 緒 言

原子炉压力容器・配管・ラインパイプなどでは、溶接箇所よりき裂状の欠陥が発生することがある。これらのき裂状欠陥は、疲労により成長し、ある大きさになると非破壊検査により検出される。この場合、き裂状欠陥の安全性を評価し、機器の運転が継続可能かどうかを判断することが必要である。

き裂状欠陥の安全性評価の考え方として LBB 条件 (Leak-Before-Break Criterion) がある。すなわち、破壊 (Break) に先立ちき裂が貫通して内部流体が漏えい (Leak) すれば、これをセンサーで感知し機器の運転を停止し、破壊を未然に防止できるとする考えである。LBB 条件を考える際には現在のき裂形状のみならずき裂が貫通し最終的に破断するまでの状況を明らかにする必要がある。特に原子炉配管のように高じん性材料を用いた構造物の場合、不安定破壊の発生点は系のコンプライアンスの影響を受けることを考慮しなくてはならない。高じん性材料のき裂材 (主として貫通

き裂) における延性不安定破壊については、き裂の安定成長とこれを記述する破壊力学パラメータ、不安定破壊荷重と系のコンプライアンスの関係などについて数多くの研究が行われている。また、実用上重要な三次元表面き裂に対しても J 積分を破壊力学パラメータとする解析が行われている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

表面き裂材の延性不安定破壊を記述する条件の一つに実断面応力基準条件⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾がある。この条件は不安定破壊荷重に対する系のコンプライアンスの影響を考慮できない欠点はあるが、配管の表面き裂などに対しては、工学的に有用な条件であると考えられる。著者らは前報⁽⁷⁾において COA 条件を用い、表面き裂材のき裂進展解析を行った。その結果、表面き裂の貫通荷重の評価に実断面応力基準条件が有効であることを述べた。その際、いくつかのき裂形状については実断面応力基準条件が適用できないことを示した。本論文では前報に引き続き、き裂形状をパラメータとして表面き裂材のき裂進展解析を行い、LBB 条件および実断面応力基準条件について検討した結果を述べる。

2. 解析方法

2.1 ラインスプリング法 解析は厚肉シェルラ
インスプリング法により行う。き裂材を厚肉シェル要

* 昭和60年4月2日 第62期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和59年9月18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)。

素と二次のラインスプリング要素でモデル化する。シェル要素、ラインスプリング要素ともに加工硬化の影響を考慮している。ラインスプリング要素の剛性評価はコンプリメンタリエネルギー法に基づいている。解法については文献⁽⁸⁾を参照されたい。

2.2 き裂進展解析法 き裂進展解析法については前報⁽⁷⁾に詳述したので、ここでは概要を述べることとする。

(1) き裂進展開始条件として J_{Ic} 条件、き裂進展条件としてき裂開口角 COA 条件を用いる。ラインスプリング要素の剛性評価に用いる片側き裂材の変形を図1に示す。図1より COA は式(1)で与えられる。

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

ここで δ_0 は初回のき裂進展時のき裂先端開口変位、 δ_t は $a = a_0$ の位置でのき裂開口変位、 Δa はき裂進展量である。 δ_t 、 δ_0 は片側き裂材の板幅中央で定義される変位 δ_c と回転 θ_c によって表される。

(2) 負荷として引張負荷を考え、表面き裂は板厚方向にのみ進展するものとし、板幅方向への進展は考えない。

(3) き裂進展解析は荷重増分過程と破壊過程よりなる。荷重増分過程は表面き裂材端部に強制変位 Δ_T を一定値ずつ与えて行う[図2(a)]。荷重増分過程で

COA が限界値 COA_c を超えたラインスプリング要素(片側き裂材)については Δ_T を一定として破壊過程を行う[図2(b)]。この時、ラインスプリング要素の δ_c 、 θ_c の増分 $d\delta_c$ 、 $d\theta_c$ は、コンプリメンタリエネルギー法により評価する。き裂進展量は、ラインスプリング要素の端節点では単位量(この場合 1.0 mm)、端節点の両隣の間節点では単位量の半分(この場合 0.5 mm)とする。

3. 解析対象

表1に示す14種類の表面き裂材の解析を行った。ただし、き裂材の板幅を W 、長さを L 、板厚を t とする。表面き裂は半楕円形とし、き裂長さを $2c$ 、き裂深さを a_0 とする。 $W=L=1000$ mm、 $t=50$ mm である。表1中、 A_c は初期き裂面積、 A はき裂材の断面積を示す。図3に No.4 のき裂材の要素分割を示す。対称性を利用して全体の1/4を解析した。材料として原子炉圧力容器鋼 A533B を想定した。材料定数を表2に示す。構成方程式はスウィフトの式、式(2)を用いた。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= \frac{\sigma}{E} & \sigma &\leq \sigma_r \\ \epsilon &= \frac{\sigma}{E} + \alpha \epsilon_r \left\{ \left(\frac{\sigma}{\sigma_r} \right)^n - 1 \right\} & \sigma &\geq \sigma_r \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

負荷は強制変位としてき裂材端部に増分的に与えた。その値は、0.02 mm (表1の No.11)、0.03 mm (No.3~10, 12~14)、0.04 mm (No.1, 2) とした。

4. 解析結果

4.1 荷重-変位曲線 荷重-変位曲線を図4に示す。ここに Δ_T はき裂材の伸び、 P は荷重を表す。●印

表1 表面き裂材の形状

No.	$2c/W$	a_0/t	a_0/c	A_c/A (%)
1	0.2	0.4	0.2	6.3
2	0.4	0.32	0.08	10.1
3	0.5	0.26	0.052	10.2
4	0.5	0.64	0.128	25.1
5	0.6	0.22	0.037	10.4
6	0.6	0.5	0.083	23.6
7	0.7	0.45	0.064	24.7
8	0.7	0.7	0.1	38.5
9	0.8	0.4	0.05	25.1
10	0.8	0.6	0.075	37.7
11	0.8	0.8	0.1	50.3
12	0.9	0.52	0.058	36.8
13	0.9	0.7	0.078	49.5
14	0.94	0.68	0.072	50.2

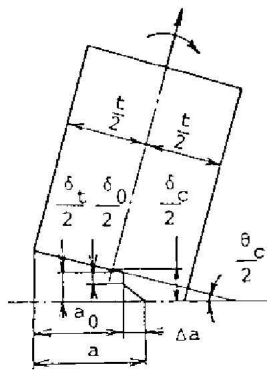


図1 片側き裂材の変形

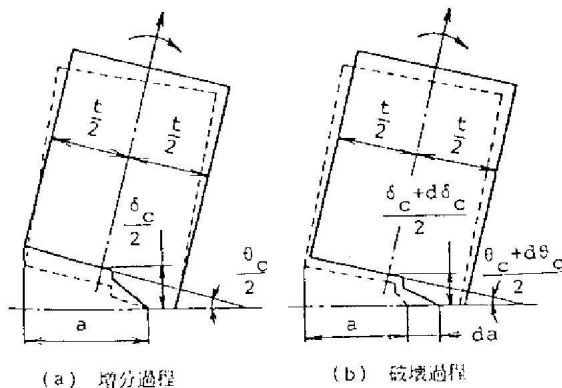


図2 増分過程と破壊過程

は最大荷重点を、×印は表面き裂の貫通点を示す。図4中、No. 1, 2, 4, 8, 10, 11, 13, 14の表面き裂では荷重が単調に増加して貫通に至る。これに対しNo. 3, 5, 6, 7, 9, 12の表面き裂では貫通以前に最大荷重点が生ずる。また、初期き裂面積のほぼ等しいき裂(No. 2, 3, 5; No. 4, 6, 7, 9; No. 8, 10, 12; No. 11, 13, 14)はほぼ等しい荷重-変位曲線を有することがわかる。

4・2 き裂進展形状 図5には解析結果の中から代表的な3種類の表面き裂について、き裂進展に伴う形状変化を示す。図5(a)と同様の進展形状を示すのは表1のNo.5であり、図5(c)と同様の進展形状を示すのはNo.11, 14である。残りは図5(b)と同様の進展形状を示す。

図5(a)は浅くて偏平なき裂に対する進展形状で、き裂中央部が選択的に進展し貫通する。

図5(b)は解析例において最も多く見られた進展形

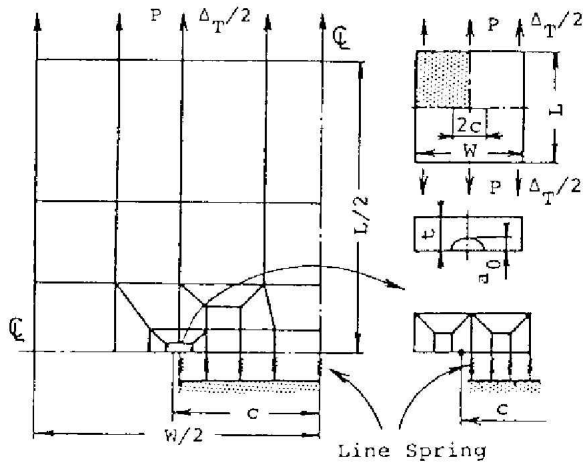


図3 表面き裂の要素分割 (No.4の場合)

状で、き裂はほぼ半楕円形状を保って進展し、き裂中央部が貫通する。

図5(c)は長くて深いき裂の進展形状で、き裂前縁全体にわたりき裂が進展し、中央部以外(矢印)で貫通が生じている。

5. LBB 条件に関する考察

5・1 LBB 成立条件 坂田ら⁶⁾は高じん性材料である SUS 304 鋼の表面き裂材の引張試験を行っている。坂田らの用いた試験片は板幅 $W=100$ mm, 長さ $L=600$ mm, 板厚 $t=5.5$ mm, き裂長さ $2c=30$ mm (矩形表面き裂, $2c/W=0.3$) であり、き裂深さ a をパラメータとして実験を行っている。彼らの実験で示されたき裂材の荷重-変位曲線の概略図を図6に示す。図6中×印は表面き裂の貫通点を示し、●印は最大荷重点を示す。貫通後荷重がさらに上昇して最大荷重点に至るものを Type A1 とし、貫通直後に最大荷重点を有するものを Type A2 とする。この二つをまとめて Type A とする。Type A は貫通後に最大荷重点を有する。

これに対し本論文で行った解析では Type A (表1

表2 A 533 B 鋼の材料定数

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

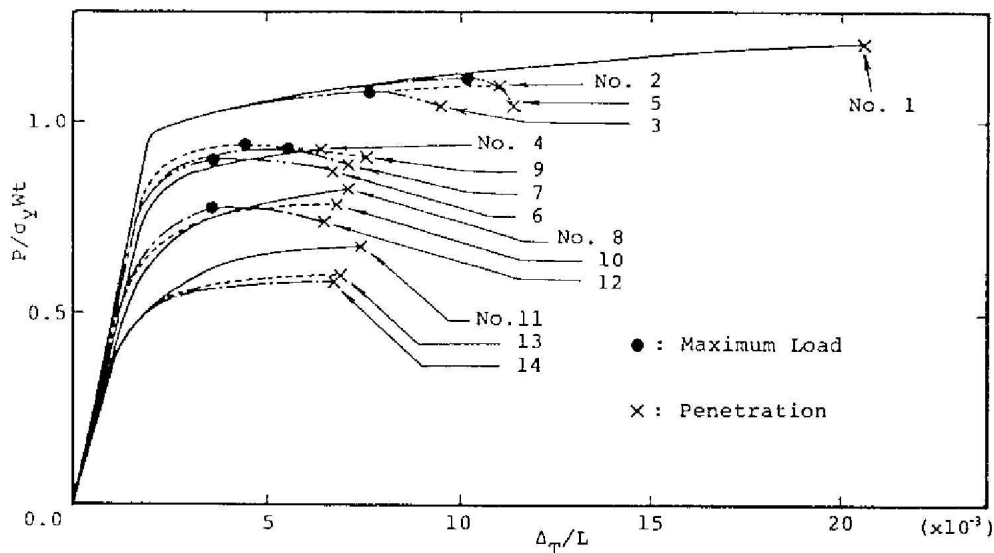


図4 荷重-変位曲線

の No. 1, 2, 4, 8, 10, 11, 13, 14) のほかに, 最大荷重点の後に貫通を生ずる場合 (表 1 の No. 3, 5, 6, 7, 9, 12) が得られた. これを Type B とし, 荷重-変位曲線の概略図を図 7 に示す.

次に荷重形負荷の場合の LBB 成立条件を考える. 不安定破壊は系のコンプライアンスの影響を受けるが, 不安定破壊が最も発生しやすいのはコンプライアンスが無制限大すなわち荷重形負荷の場合である. したがって, 荷重形負荷の場合の LBB 成立条件が最も安全側の LBB 成立条件である. 荷重形負荷の場合, 最大荷重点の直後に不安定破壊が生ずる. したがって LBB 成立条件は貫通後に最大荷重点を有することである. Type A1 は貫通後に最大荷重点を有し LBB は成立する. Type A2 も基本的には Type A1 と同じであり LBB が成立するが, 荷重のマージンが小さく, 安全性は Type A1 より低い. Type B は貫通前に最大荷重点を有し不安定破壊を生ずるため LBB は成立しない.

ここで Type A を LBB 成立, Type B を LBB 不成立と呼ぶ. 同一の材料・負荷形態・板厚の表面き裂材の場合, LBB の成立・不成立は初期き裂形状に依存すると考えられる. そこで 4 章の解析結果より, LBB の成立・不成立と初期き裂形状の関係を図 8 に示す. 図 8 では, 貫通前に最大荷重点を有するき裂 (LBB 不成立)

を ●印で示し, 貫通後に最大荷重点を有するき裂 (LBB 成立) を ○印で示す. 縦軸にはき裂長さ $2c$ と板幅 W の比をとり, 横軸には初期き裂面積 A_c とき裂材断面積 A の比をとる. 一点鎖線は中央き裂材 (CCP) を示し, 点線は与えられた $2c/W$ の値に対し $a_0=1$ となる貫通表面き裂を示す. 通常の表面き裂は点線の左側に存在する. 二点鎖線は片側き裂材 (SEN) を示す. LBB の成立するき裂と成立しないき裂の境界を実線で示す. 図 8 より, $2c/W$ が大で A_c/A が小さいき裂, すなわち浅くて長いき裂が LBB の成立しないき裂であることがわかる. 図 8 中斜線部は, Kanninen らの条件¹⁴⁾を用いて求められる LBB 成立範囲を示している. これについては 5.2 節で述べる.

5.2 実断面応力基準条件の検討 図 9 には, 表面き裂材および中央き裂材の, 荷重応力とき裂面積の関係を示す. 貫通前に最大荷重点を有する表面き裂 (LBB 不成立) に対しては, 最大荷重点の荷重応力と初期き裂面積の関係を ●印で示す. 貫通後に最大荷重点を有する表面き裂 (LBB 成立) に対しては, 貫通時の荷重応力と初期き裂面積の関係を ○印で示す. また著者ら¹⁹⁾による二次元中央き裂材 (CCP) のき裂進展開始時の荷重応力と初期き裂面積の関係を △印で示し, 最大荷重点の荷重応力とそのときき裂面積の関係を ▲印で示す. 図 9 から, ○, △, ●印がほぼ一つの直線に

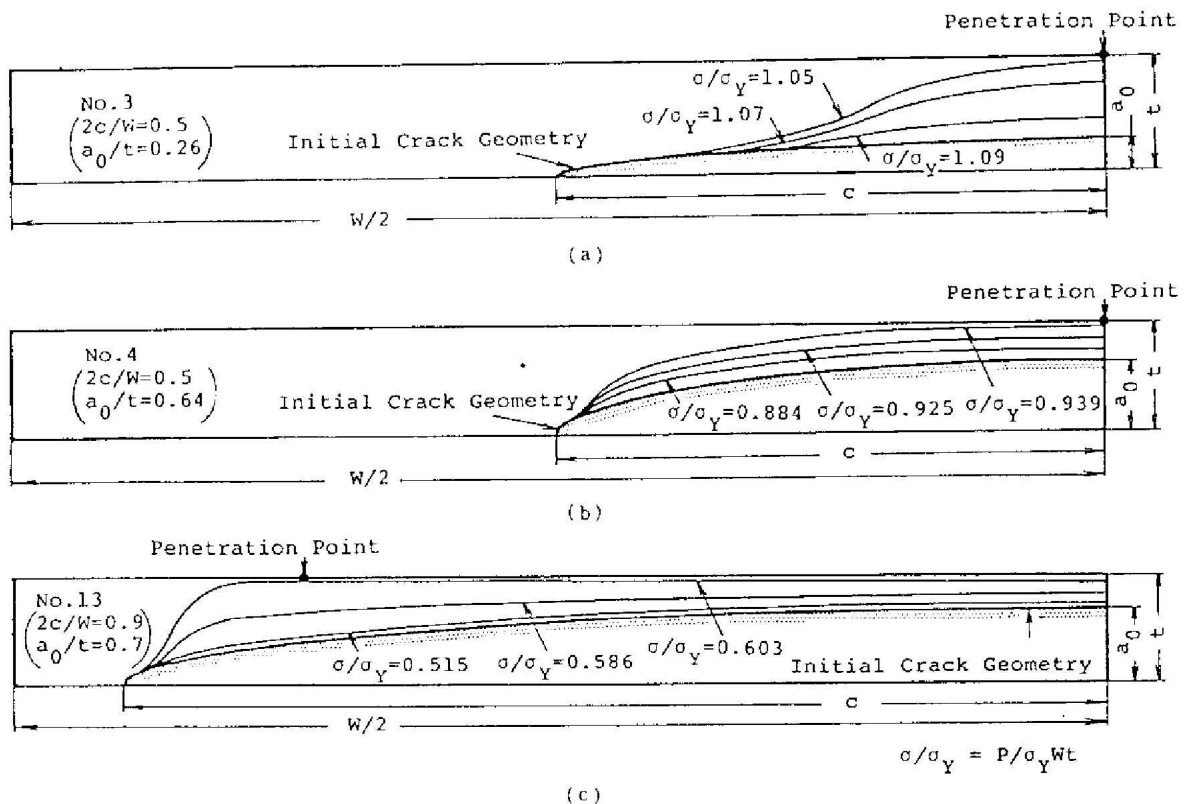


図 5 き裂進展形状

乗ることがわかる。これは表面き裂の貫通時および最大荷重時の実断面応力がほぼ一定値であることを示している。また図9中▲印もほぼ一つの直線に乗っており、中央き裂材の最大荷重時の実断面応力もほぼ一定値をとることを示している。以上の結果は SUS 304 鋼について Kanninen ら¹⁹⁾が行った実験の結果とよく対応している。Kanninen らはさらに、表面き裂が貫通し中央き裂材になった後の、中央き裂材としての最大荷重時の負荷応力と、その時のき裂面積の関係が一つの直線に乗ることを示している。

Kanninen らは表面き裂材の荷重-変位曲線として図6の Type A のみを考えており、表面き裂貫通時の実断面応力がほぼ一定値であることを示している。しかし、図7の Type B については言及していない。これに対し、本論文においては図8から LBB の成立・不成立が判定でき、さらに図9を利用して、LBB 成立

の場合は貫通荷重を、LBB 不成立の場合は最大荷重を評価することが可能である。

次に図8の斜線部について考える。Kanninen らは、LBB 成立条件を以下のように与えている。すなわち、表面き裂の貫通時の実断面応力 σ_L と初期き裂面積 A_c より貫通時の荷重 P_L を求める。次に貫通き裂 (表面き裂貫通後の中央き裂) の最大荷重時における実断面応力 σ_B より、表面き裂と等しいき裂長さを有する貫通き裂の最大荷重 P_B を求める。 $P_L < P_B$ ならば LBB は成立すると考える。すなわち、Kanninen らの条件は式(3)のように表される。

$$\sigma_L(A - A_c) < \sigma_B(A - 2ct) \dots\dots\dots(3)$$

$A = Wt$ を用いると、式(4)が得られる。

$$\frac{2c}{W} < \left(1 - \frac{\sigma_L}{\sigma_B}\right) + \frac{\sigma_L}{\sigma_B} \frac{A_c}{A} \dots\dots\dots(4)$$

図9で求められる σ_L, σ_B の値を用いて式(4)で表さ

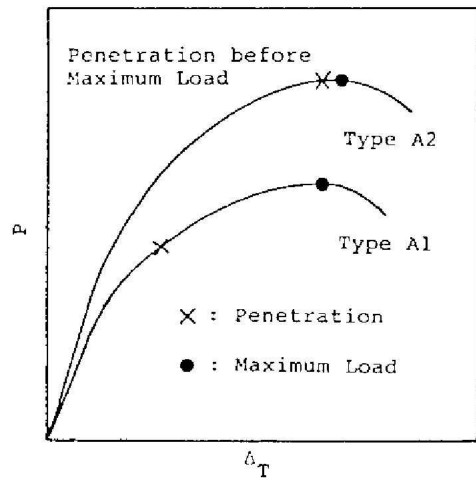


図6 荷重-変位曲線 (Type A)

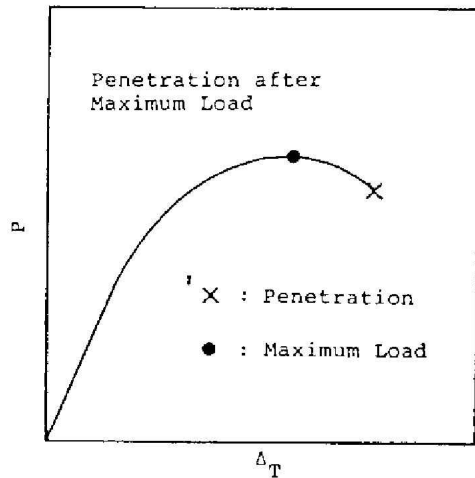


図7 荷重-変位曲線 (Type B)

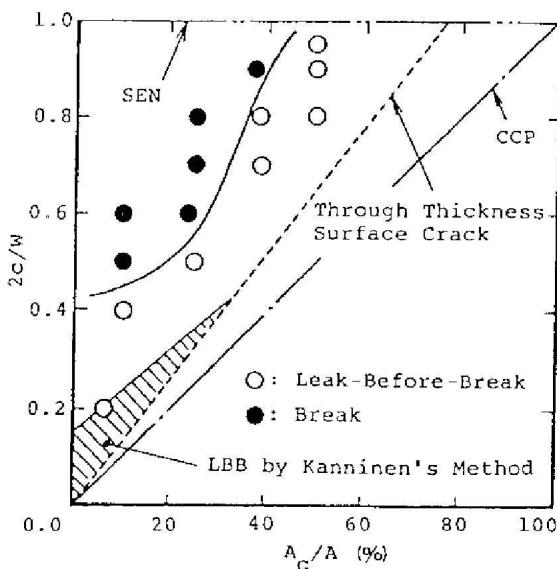


図8 LBB 判定図

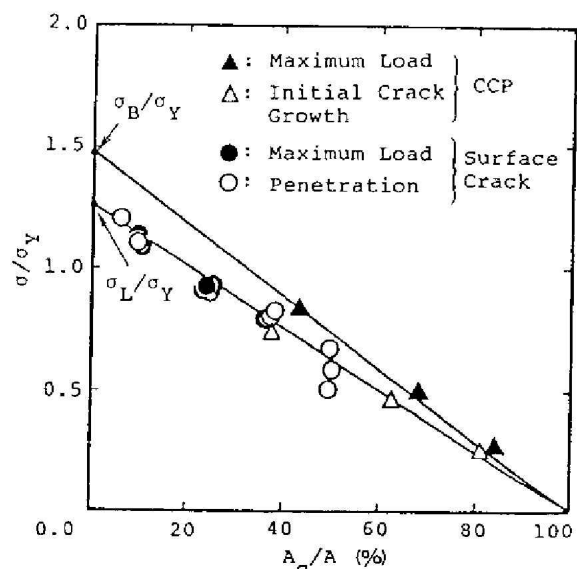


図9 実断面応力基準条件

れる範囲を示したのが図8の斜線部である。著者らが詳細解析により求めたLBB成立範囲に比較して、Kanninenらの条件より求まるLBB成立範囲は小さいことがわかる。

6. 結 言

き裂形状をパラメータとし、COA条件を用いてラインスプリング法により表面き裂のき裂進展解析を行った。き裂進展に伴うき裂形状変化、荷重形負荷の場合のLBB成立条件および、突断面応力基準条件について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 表面き裂材の荷重-変位曲線は、初期き裂面積が等しければ、ほぼ等しい。
- (2) 表面き裂材の荷重-変位曲線は、
 - (i) 貫通後に最大荷重点を有するもの (Type A)
 - (ii) 貫通前に最大荷重点を有するもの (Type B)
 の2種類に分かれる。この場合、荷重形負荷においては、(i)についてはLBBは成立し、(ii)についてはLBBは成立しない。
- (3) LBB判定図(図8)を用いてLBBの成立・不成立が判定できる。さらに突断面応力基準条件(図

9)を用いて、LBBが成立する場合は貫通荷重を、LBBが成立しない場合は最大荷重を評価することができる。本論文で示したLBB成立範囲に比較して、Kanninenらの方法より求まるLBB成立範囲は小さい。

文 献

- (1) Pan, J., *Proc. ASME 1984 Pressure Vessel Piping Conf.*, 84-PVP-110 (1984).
- (2) Zahoor, A. and Norris, D. M., *Circumferential Cracks in Pressure Vessels and Piping-Vol. II, Proc. ASME 4th Nat. Cong. Pressure Vessel Piping Technol.* (1983), 279.
- (3) Schmitt, W., *Computational Fracture Mechanics-Non-linear and 3-D Problems, Proc. ASME 1984 Pressure Vessel Piping Conf.* (1984), 119.
- (4) Kanninen, M. F., ほか5名, *Nucl. Eng. Des.*, 48 (1978), 117.
- (5) 矢川・ほか5名, *機論*, 50-451, A (昭59), 483.
- (6) 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.
- (7) 三好・ほか2名, *機論*, 51-451, A (昭60), 171.
- (8) 三好・ほか2名, *機論*, No. 840-1 (昭59-3), 182.
- (9) 三好・ほか2名, *機論*, 50-453, A (昭59), 904.

討 論

〔質問〕 矢川 元基・植田 浩義

(東京大学工学部)

表面き裂が板厚方向へ貫通する際の安定性は、LBB成立のための一つの重要な因子であると考えられ、この問題について詳細な解析が行われたことに対し、敬意を表する。

(1) 貫通前に最大荷重を有するケース(図7)において、確かに板厚方向の進展は一時不安定化するが、貫通後の板幅方向への進展が安定的であれば、き裂材の破断以前にリークが生ずることが予想される。貴論文ではこのケースをLBB不成立として整理しておられるが、以上のような理由から、これがただちに実配管のLBB不成立に結びつくものではないと思われるがいかかがか。

(2) 図5(c)のような板幅方向のリガメントがかなり小さい場合、板厚方向よりも板幅方向への進展が先行する可能性があり、これを実配管の周方向表面き裂にあてはめれば、き裂が全周表面き裂へと成長することに対応し、極めて危険である。しかしながら、貴論文では、板厚方向の進展のみを仮定されているため

このような想定に基づくLBBの不成立性については判断されていない。したがって図5(c)のような初期き裂形状に対するLBB評価を貴解析法により行うことは必ずしも適当ではないと考えられるがいかかがか。

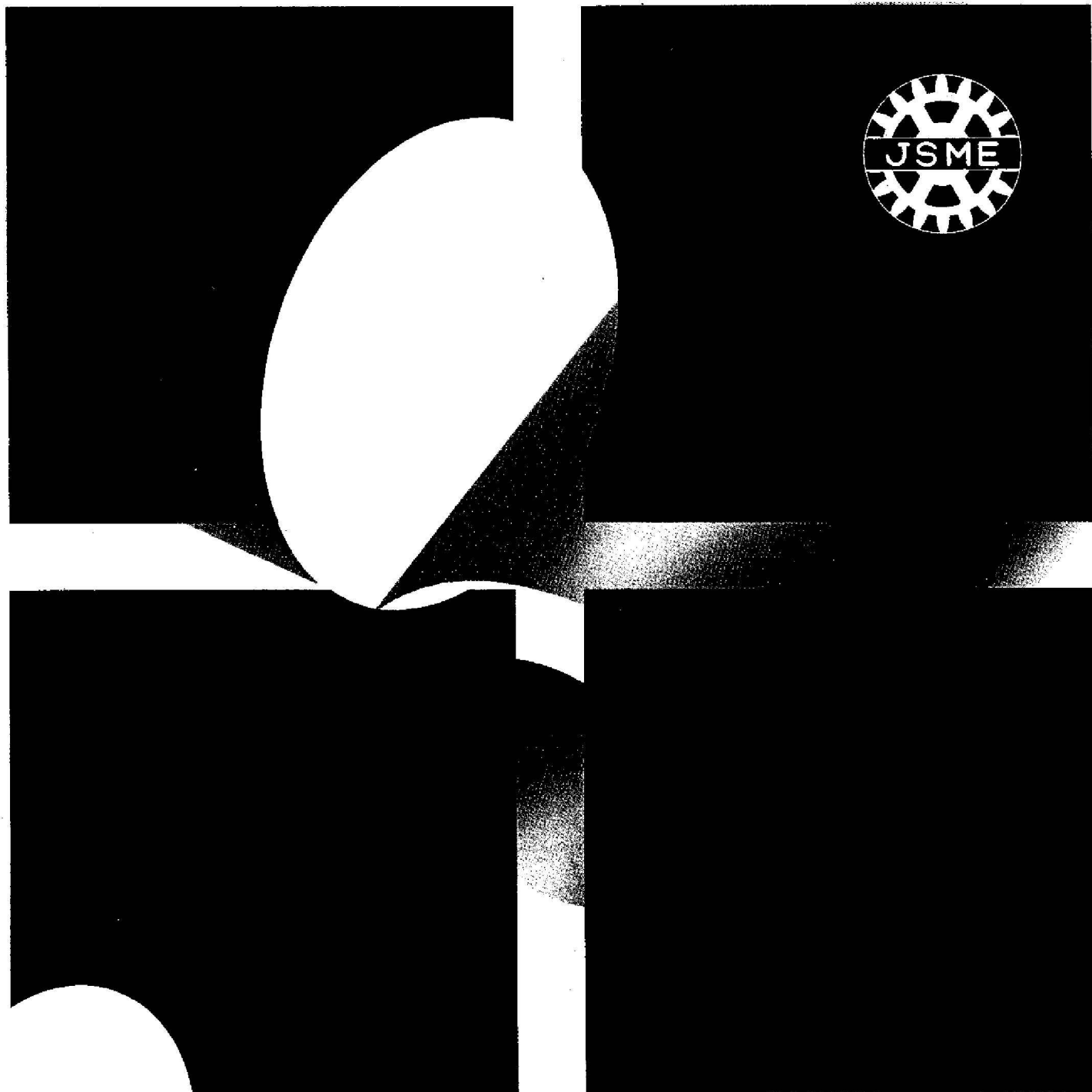
〔回答〕 (1) 本論文においては貫通前に最大荷重を有するケースをLBB不成立として、図8に示すように整理している。板厚方向に一時不安定化するが、貫通後再び板幅方向に安定化するのではないかの質問であるが、突断面応力基準条件による板幅方向の安定成長域が図8の斜線部であることを考えるとそのようなことは考えられない。

(2) 本論文においては、き裂の進展を板厚方向のみに限定している。しかしながら、計算の過程において表面き裂端部における破壊条件の満足・不満足($J \geq J_{Ic}$ か否か)についてはモニタしている。表1に示したすべてのケースに対し、表面き裂端部で $J < J_{Ic}$ であった。このことより引張負荷の場合は、板幅方向のき裂進展は、ほとんどないと考えられる。なお、これに関しては三次元有限要素法などにより今後検討したく考えている。

昭和60年7月

第467号 A編

日本機械学会論文集



**TRANSACTIONS OF
THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS**
July, 1985

日本機械学会

