表面き裂を有する配管の延性不安定破壊*
(第 1 報, 表面き裂の進展解析)

三好俊郎**, 吉田 有一郎**, 白鳥正樹***

The Tearing Instability of Pipes with Surface Cracks
(1st Report, Crack Growth Analysis)

by Toshiro MIYOSHI, Yuichiro YOSHIDA, and Masaki SHIRATORI

This paper describes the crack growth analysis of circumferential surface cracks in pipes, by the Line Spring Method. The COA criterion is used for the crack growth analysis; and not only the radial crack growth but also the circumferential crack growth after penetration can be analyzed. The calculation is carried out for two circumferential cracks. One shows the maximum load after the penetration, and the other shows the maximum load before the penetration. Under the load controlled system, the former satisfies Leak-Before-Break while the latter does not.

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

1. 緒 言

配管における安全性評価の一環として, 配管の延性不安定破壊に関する研究が行われている。配管にき裂状欠陥を想定する場合, 安全性の判定基準として Leak-Before-Break (LBB) の考え方がある。LBB では, き裂の貫通時に配管が安定であること, および内部流体の漏えいが検知できることを要求している。したがって, LBB の成否を明らかにするためには, き裂の進展挙動, 貫通時の開口量などを解析する必要がある。

配管の周方向表面き裂の LBB に関する解析および実験は数多く行われているが, LBB を判定する手法としては大きく 2 種類に分けられる。すなわち, J 積分, き裂開口角 COA などの破壊力学的パラメータを用いてき裂進展解析を行う方法と負荷応力をパラメータとして実断面応力基準条件を用いる方法である。前者については, 有限要素法による解析として, 貫通き裂に対する高橋・矢川⁽¹⁾の厚肉シェル要素を用いた解

析, 表面き裂に関しては, ラインスプリング法を用いた著者ら⁽²⁾の解析がある。全面塑性解を用いた解析として, 貫通き裂に対する矢川ら⁽³⁾の解析, German と Kumar⁽⁴⁾の解析がある。後者については, Kanninen ら⁽⁵⁾, 長谷川ら⁽⁶⁾, 矢川ら⁽⁷⁾の研究がある。

実断面応力基準条件は, 簡便で工学的に有用な条件であると考えられるが, 有効性については破壊力学的手法を用いた詳細解析により検証を行う必要がある。著者ら⁽²⁾はラインスプリング法と COA 条件を用い, 平板中の表面き裂の進展解析を行い, 実断面応力基準条件について検討を行った。

本論文においては, 平板におけるき裂進展解析法を配管に適用するとともに, 新たに貫通後の配管周方向へのき裂進展を解析する方法を示した。また, 本手法を用いて配管表面き裂の進展解析を行った結果についても述べる。

2. 解 析 方 法

2.1 配管のラインスプリング法 配管を表面き裂部とシェル部に分け, シェル部には厚肉シェル要素, き裂部には 2 次のラインスプリング要素を用いる。図 1 に配管表面き裂に対するラインスプリング要素を示す。ラインスプリング要素は, 1 節点あたり変

* 昭和 60 年 12 月 5 日 第 935 回講演会において講演, 原稿受付 昭和 60 年 6 月 3 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)。

位 δ と回転 θ の二自由度を有し、等価節点力は軸力 N と曲げモーメント M である。ラインスプリング要素、シェル要素ともに弾塑性変形を考慮している。ラインスプリング要素の剛性の評価にはコンプリメンタリエネルギー法⁽⁸⁾を用いている。

2・2 き裂進展解析 き裂の板厚方向への進展は、文献(9)に示した方法により行う。また、き裂の配管周方向への進展は、以下の手順により行う。

①き裂進展解析は、荷重増分過程と破壊過程よりなる。荷重増分過程では、配管端部に強制変位を一定値ずつ与えて解析を行う。ある荷重増分過程において、き裂深さの最も深いラインスプリング要素に注目する。この要素の端節点におけるき裂開口角 COA とリガメント長さ b が式(1)を満足する時、周方向への破壊過程を行う。

$$\left. \begin{array}{l} \text{COA} \geq \text{COA}_c \\ b \leq da \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 COA_c は限界き裂開口角、 da は1回あたりの板厚方向へのき裂進展量である。破壊過程では、配管端部の強制変位を一定として、端節点を含むラインスプリング要素のシェル側の2節点(中間節点と端節点)を解放し、き裂の周方向への進展を行う。図2では、ラインスプリング要素Aの端節点jにおいて式(1)の条件が満たされたため、中間節点iと端節点jを解放し自由節点にする場合を示している。

②ラインスプリング要素のシェル側の節点を解放する場合

(i) 中間節点iと端節点jに対しラインスプリング要素からシェル要素に作用している軸力および曲げモーメント $(N_i, M_i), (N_j, M_j)$ を求める。

(ii) 節点i, jを含むラインスプリング要素の剛性マトリックスを零とする。さらに、シェル要素の節点i, jに外力として $(-N_i, -M_i), (-N_j, -M_j)$ を与えて解析を行う。

①～②で示した周方向へのき裂進展を板厚方向へのき裂進展と合わせて、表面き裂の進展解析を行う。

図1 配管におけるラインスプリング要素

3. 解析対象

配管として大口径の炭素鋼配管を想定した。配管外径を D 、板厚を t 、長さを L とし、

$$D=800 \text{ mm}, t=47 \text{ mm},$$

$$L=4000 \text{ mm}$$

である。配管中央部内周に表面き裂が存在する。これを図3に示す。構成方程式はスウィフトの式、式(2)で与えた。

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

材料定数を表1に示す。解析した表面き裂の仕様を表2に示す。対称性を利用して全体の1/4を解析した。表2のNo.1のき裂材に対する要素分割を図4に示す。外力として引張りの強制変位を配管端部に一定値ずつ与えて解析を行った。また、1回あたりのき裂進展量(板厚方向)を $da=1 \text{ mm}$ とした。

4. 解析結果

表2のNo.1のき裂材の荷重-変位曲線を図5に示す。図5では、き裂は進展開始後板厚方向に安定に成長し、同時に荷重が上昇する。最大荷重点の直後に板厚方向へのき裂の不安定成長が生じ、荷重が低下して貫通に至る。その後変位の増加に伴い、周方向への安

図2 周方向へのき裂進展

定き裂成長が生ずる。表2のNo.2のき裂材の荷重-変位曲線を図6に示す。図5の場合と同様き裂進展開始後荷重が上昇する。A点において板厚方向へ不安定にき裂が進展し、荷重低下と貫通が生ずる。さらに変位

が増加すると、周方向へのき裂進展とともに荷重が大きく上昇し、貫通前の最大荷重を越える。最も厳しい負荷形態である荷重型の負荷系においては、不安定破壊は最大荷重点で生じる。したがって、荷重形の負荷系においては、表2のNo.1のき裂はLBBが成立せず、No.2のき裂はLBBが成立する。図5, 6から、配管のLBBの成否を明らかにするには、貫通挙動だけでなく、貫通後の挙動についても解析する必要がある。図7は表2のNo.1のき裂材の、き裂進展に伴うき裂の形状変化を示す。負荷変位の増加とともに、き裂は次第に周方向に進展していく。

表1 炭素鋼の材料定数

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

表2 解析した表面き裂

No.	α/π	a_0/t	a_0/c
1	0.5	0.64	0.054
2	0.4	0.8	0.085

図3 配管中の表面き裂

図4 要素分割 (表2のNo.1のき裂材)

図5 荷重-変位曲線

図6 荷重-変位曲線

図7 き裂進展に伴うき裂の形状変化
(表2のNo.1のき裂材)

周方向へのき裂進展解析法を示した。本手法を用いて、配管の周方向表面き裂の進展解析を行った結果、以下

の結論を得た。

(1) 配管の表面き裂には、貫通前に最大荷重点を有するものと、貫通後に最大荷重点を有するものがある。

(2) 荷重型負荷の場合、不安定破壊は最大荷重点で生じる。したがって、配管のLBBについて考えるためには、貫通挙動のみでなく、貫通後の挙動についても考慮する必要がある。

文 献

- (1) 高橋・矢川, 機論, 51-461, A (昭60), 175.
- (2) 三好・ほか2名, 第62期通常総会講演会, No. 84-0361 A, (昭60-4), 80.
- (3) 矢川・ほか2名, 機論, 51-462, A (昭60), 377.
- (4) German, M. D. and Kumar, V., *Trans. ASME, J. Pressure Vessel Technol.*, 105 (1983), 290.
- (5) Kanninen, M. F., ほか5名, *Nucl. Eng. Des.*, 48 (1978), 117.
- (6) Hasegawa, K., ほか3名, *Circumferential Cracks in Pressure Vessels and Piping II, Proc. ASME 4th Nat. Cong. on Pressure Vessel and Piping Technol.*, (1983), 65.
- (7) 矢川・ほか5名, 機論, 50-451, A (昭59), 483.
- (8) 三好・ほか2名, 機論, 51-465, A (昭60), 1393.
- (9) 三好・ほか2名, 機論, 51-461, A (昭60), 171.