LBB評価のための配管き裂開口面積*

長谷川 邦夫*¹ 岡本 旦夫*², 横田 博*³, 山本 良夫*⁴
柴田 勝之*⁵, 押部 敏弘*⁶, 松村 一弘*⁷

Crack Opening Area of Pressurized Pipe for Leak Before Break Evaluation

Kunio HASEGAWA, Asao OKAMOTO, Hiroshi YOKOTA,
Yoshio YAMAMOTO, Katsuyuki SHIBATA,
Toshihiro OSHIBE, and Kazuhiro MATSUMURA

The prediction method for analyzing the crack opening area for a pipe is essential for leak-before-break evaluation. Several theoretical approaches are proposed for predicting crack opening areas. One approach is the Tada and Paris formula developed based on linear elastic fracture mechanics. Another approach is the method proposed by German and Kumar who have developed an engineering approach. Round robin analyses for crack opening areas are performed using the above two methods. The pipe analyzed is 6-inch diameter Type 304 stainless steel with a circumferential through-wall crack. The applied load is a bending moment. The crack opening areas calculated by the Tada's method coincided among the four participants. However, the areas using German's method were quite different. It is concluded that the Tada's method is suitable for predicting the crack opening area in the present situation. In addition, material properties used in the calculations of the area are discussed compared with the results of the pipebending experiment.

Key Words: Crack Opening Area, Leak Before Break, Circumferential Crack, Crack Opening Displacement, Stainless Steel, Pipe, Flow Stress

1. 緒 言

圧力配管のLBB(Leak Before Break: 破断前漏えい)に関する研究が活発に行われている。国際的なセミナーが数回開催され、配管の破壊力学とともに、LBBの成立性について討論されてきた。LBBの考え方をプラントに導入しようとする国が多い。

LBBの考え方をプラントに適用するとき、配管の破壊強度解析とともに、き裂からの圧力媒体の漏えい量や媒体の噴出に伴うジェット力を推定する必要がある。この漏えい量は、き裂の開口面積に直接関係し、き裂開口面積の推定はLBB評価において極めて重要である。

き裂開口面積の推定法は、き裂先端の塑性域を考慮したDugdale⁽¹⁾モデルや応力拡大係数^{(2)~(4)}を基にし

た方法、あるいは塑性変形理論を基にした方法⁽⁵⁾の提案がある。

これらの方法で漏えい量やジェット力を算出する場合、境界条件が明確になればどの設計者が計算しても得られる解に大きな相違を生じないような算出法が設計基準に採用されなければならない。

そこで、本報はNRC(米国原子力規制委員会)が提案するTada-Parisの方法⁽⁴⁾と、EPRI(米国電力研究所)が提案するGerman-Kumarの方法⁽⁵⁾について、ラウンドロビン解析を行ったものである。対象とする配管は、周方向に貫通き裂を有する304ステンレス鋼配管である。ラウンドロビン解析と配管の曲げ試験の結果から、き裂開口面積の推定式についてどちらの方法がLBB評価に適しているかを検討した。

2. き裂開口面積の推定

Tadaらの提案によるき裂開口面積は次式によって表される。すなわち、周方向に貫通き裂を有する配管が曲げモーメントを受けたときのき裂開口面積 S_o は

$$S_o = \frac{\sigma_b}{E} (\pi R^2) I_b(\theta) \dots\dots\dots (1)$$

である。ここで、 σ_b は曲げによる公称応力、 E はヤング率、 R は配管平均半径、 $I_b(\theta)$ は無次元関数で、

* 平成元年3月18日 東北支部第24期総会講演会において講演、原稿受付 昭和63年6月27日。

*¹ 正員、(株)日立製作所機械研究所(〒317 日立市幸町3-1-1)。

*² 石川島播磨重工業(株)(〒235 横浜市磯子区新中原1)。

*³ 正員、三菱原子力工業(株)(〒105 東京都港区芝公園2-4-1)。

*⁴ 正員、(株)東芝(〒235 横浜市磯子区新杉田町8)。

*⁵ 正員、日本原子力研究所(〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方)。

*⁶ 関西電力(株)(〒530 大阪市北区中之島3-3-22)。

*⁷ 東京電力(株)(〒100 東京都千代田区内幸町1-1-3)。

$$I_b(\theta) = 2\theta^2 \left\{ 1 + \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^{3/2} \left[8.2 - 12.7 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + 19.3 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 \right] + \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^3 \left[20.4 - 68 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + 165.2 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 - 187.2 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^3 + 146.7 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^4 \right] \right\} \quad (0 < \theta < 100^\circ) \quad (2)$$

である**1. ここで、 θ はき裂角度の1/2である。き裂先端の塑性域を考慮する場合は、 θ のかわりに次式に示す θ_{ef} を用いる**2.

$$\theta_{ef} = \theta + \frac{K}{2\pi R \sigma_y} \quad (3)$$

ここで、 σ_y は参照降伏応力、 K は曲げによる応力拡大係数である。式(1)、(2)は配管半径 R と配管肉厚 t の比が $R/t \approx 10$ のときに適用される。

German らの方法は、き裂開口変位 δ を算出するものであり、 δ からき裂開口面積が求められる。この δ は、Ramberg-Osgood 形で表される応力 σ とひずみ ε の関係を用い、全ひずみ理論により算出される。Ramberg-Osgood 形で表される σ と ε の関係を次式に示す。

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} = \frac{\sigma}{\sigma_y} + a \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^n \quad \sigma_y = E \varepsilon_y \quad (4)$$

ここで、 σ_y は参照降伏応力、 ε_y は参照降伏ひずみ、 a は材料定数、 n は加工硬化係数である。

周方向に貫通き裂を有する配管が曲げモーメント M を受けたときの、配管のき裂開口変位 δ は、

$$\delta = f_2 \left(a_e, \frac{R}{t} \right) \frac{M}{E} + a \varepsilon_y a h_2 \left(\frac{\theta}{\pi}, n, \frac{R}{t} \right) \left(\frac{M}{M_0} \right)^n \quad (5)$$

として与えられる。ここで、 a はき裂の半長で、 $a = \theta R$ 、 a_e は Irwin の小規模降伏修正項を含む有効き裂長さ、 t は配管肉厚、 f_2 関数および h_2 関数は、おのの弾性解および全面塑性解から得られるもので、文献(5)に表で示されている。また、 M_0 は曲げを受けるき裂配管の塑性崩壊荷重で、

$$M_0 = 4 \sigma_0 R^2 t \left(\cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \right) \quad (6)$$

で表される。ここで、 σ_0 は流動応力である。

式(5)によって δ が求められると、き裂開口形状をだ円と仮定して、き裂開口面積 S は、

$$S = \frac{\pi a \delta}{2} \quad (7)$$

となる。

3. ラウンドロビン解析

3.1 解析条件 ラウンドロビン解析のための配管は呼径 6 B (外径 165 mm) の 304 ステンレス鋼配管である。き裂は周方向の貫通き裂で、 $2\theta = 90^\circ$ のき裂である。荷重は内圧を考慮しない純曲げモーメントである。解析条件を表1に示す。ラウンドロビン解析に参加した研究機関は4機関で、これを表2に示す。

周方向の貫通き裂を有する 304 ステンレス鋼配管の四点曲げ試験が日本原子力研究所で「配管信頼性実証試験」として実施された⁽⁶⁾。6 B ステンレス鋼配管の室温における曲げ試験の例を図1に示す。ここで、き裂開口変位 δ が求められており、この δ と解析結果との比較検討を行った。

解析ケースは3ケースで、これを表3に示す。ケース I は Tada らの方法である。材料定数は実験から得られたヤング率と降伏応力を用いた。ここで、Tada らの方法は式(1)で示すように、直接き裂開口面積が

表 1 ラウンドロビン解析条件

Material		Type 304 stainless steel
Pipe	Diameter	165mm (6-inch)
	Thickness	10.8mm
Crack	Geometry Angle	Circumferential through-wall crack $2\theta = 90^\circ$
Load		Pure bending without internal pressure

表 2 ラウンドロビン参加の研究機関

- Hitachi Ltd.
- Ishikawajima Harima Heavy Industries, Co., Ltd.
- Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.
- Japan Atomic Energy Research Institute

図 1 配管の四点曲げ試験方法

**1 文献(4)で、 $I_b(\theta)$ の式は式(2)のように表されていない。式(2)は Tada より直接得たもので、Tada の推奨するものである。

**2 文献(4)では、式(3)は反復法で θ_{ef} を求めるように記載されている。しかし、反復法を用いると θ_{ef} は容易に発散するため、反復法を用いないことを Tada も認めている。

得られる。そこで、この方法で求められるき裂開口面積を、逆に、式(7)を用いて δ の形におきかえ、実験により得られた δ と比較した。

ケースIIはGermanらの方法である。各参加機関が保有するプログラムが同じ結果を与えるかどうかをチェックするために行った。計算に必要な材料定数の数値は、表3に示すように、 E と σ_y はケースIの材料定数を用い、 α と n は任意の整数値を仮定して δ を求めた。

ケースIIIは本報告の主眼とする解析である。参加機関に304ステンレス鋼の室温における公称 σ - ϵ 曲線を送付した。用いた σ - ϵ 曲線を図2に示す。図2(a)の曲線は、図2(b)の曲線のひずみの小さい領域を拡大したもので、図2(a)、(b)は同じ曲線である。ひずみの表示範囲の異なる二つの曲線を基に、各研究機関で独立に材料定数を定め、 δ を求めることとした。

3.2 解析結果 Tadaらの方法により求めたケースIのき裂開口変位 δ と曲げ応力 σ_b の関係を図3に示す。 δ は前述したように、式(7)を用いて S から

δ に換算したものである。計算による δ は実験による δ より大きいが、参加した四つの研究機関の δ はほぼ同一である。

ケースIIの解析結果を図4に示す。参加機関で計算された δ は同一であることから、おのおのが所有するプログラムに差異のないことがわかった。なお、材料定数の α と n は仮定した値であるが、計算で得られた δ は実験値と近い値になっている。

ケースIIIで、図2の σ - ϵ 曲線を基づいて各研究機関

(a) 小ひずみ領域の σ - ϵ 曲線

(b) 大ひずみ領域の σ - ϵ 曲線

図2 304ステンレス鋼の σ - ϵ 曲線

表3 ラウンドロビン解析ケース

Test case	Scheme	Material constants (Room Temperature)
Case I	Tada & Paris (NUREG CR3464)	fixed $E=194,000$ MPa $\sigma_y=243$ MPa
Case II	German & Kumar (EPRI NP3607)	fixed $E=194,000$ MPa $\sigma_y=243$ MPa $\alpha=1.0$ $n=5.0$
Case III	German & Kumar (EPRI NP3607)	determine from σ - ϵ curve of Fig.2 (a) and (b)

σ_y =yield stress, E =Young's Modulus

図3 解析ケースIのき裂開口変位

図4 解析ケースIIのき裂開口変位

図5 解析ケースIIIのき裂開口変位

が定めた材料定数を表4に示す。機関A, Bは低ひずみおよび高ひずみ領域の σ - ϵ 曲線のおおのから材料定数を求めた。機関Cは、低・高ひずみ領域の σ - ϵ 曲線を考慮しながら、 $\alpha=1.0, 2.0$ の2ケースについて δ を求めた。機関Dは高ひずみ領域の σ - ϵ 曲線のみ用い、これを真 σ - ϵ 曲線にした場合と公称 σ - ϵ 曲線にした場合の材料定数を求めて δ を算出した。なお、当然のことながら、各研究機関で求めた表4の α や n の値を σ - ϵ 曲線で図示すると、これらの曲線は図2の実験で得られた σ - ϵ 曲線をよく表している。

σ - ϵ 曲線を用いたケースIIIの解析結果を図5に示す。Germanらの方法によって求めた δ は各研究機関で極めて異なることが明らかとなった。

3.3 評価用のき裂開口面積 Tadaらの提案によるき裂開口面積の推定式は簡便で、材料定数も σ_y と E のみである。このことから、どの研究機関で計算しても同じき裂開口面積が得られることが明らかとなった。

一方、Germanらの方法によるき裂開口面積は、実験で得られた同一の σ - ϵ 曲線を基に計算したところ、参加機関で極めて異なる結果となった。この原因は次のように考えられる。

材料特性の σ - ϵ 曲線をRamberg-Osgood形で表示するときのひずみ範囲が明らかでない。例えば、参加機関Dのように、 δ に影響を及ぼすひずみ範囲は大変形領域であるとして、Ramberg-Osgood則をひずみの大きい σ - ϵ 曲線側に合せるようにした。適合させるひずみ範囲を明確にする必要がある。

また、Ramberg-Osgood形で表示した n から f_2 と h_2 関数の値が文献(5)から与えられる。この表はき裂長さ、配管口径、板厚の個々のケースについて有限要素法で求めたもので、 $\alpha=1, 2, 3, 5, 7$ の整数について f_2 と h_2 の値が与えられる。ここで、 n が小数点付きの場合、 f_2 および h_2 を新たに有限要素法で求めればよい。しかし、多大の計算時間を要するので、内挿あるいは

は外挿し f_2 および h_2 を求めている。このとき、内挿および外挿法が各研究機関によって異なった。例えば、比例配分で求めたり、 f_2 と h_2 を n の関数として、あるいは f_2 と h_2 の逆数を n の関数として、任意の n に対して f_2 と h_2 を定める方法をとっている。

上記したように、Germanらの方法によるき裂開口面積の推定法は、与えられた σ - ϵ 曲線を基に定数を定める点に課題がある。

LBB評価のためのき裂開口面積の推定法として設計基準などで用いる場合、 α と n の値、 f_2 と h_2 関数などの設定方法を定めれば、各研究機関で同じ解が得られるであろう。しかしながら、304ステンレス鋼一つに対しても α と n の値に多数の値が数値解析に用いられており、どの値に固定すべきかはさらに今後の研究が必要である。

したがって、用いるき裂開口面積の算出法は、Germanらの方法よりもTadaらの方法のほうが適するといえる。

4. LBB評価に用いるき裂開口面積

LBB評価に用いるき裂開口面積は、上述の結果により、Tadaらの方法を用いることとした。ここで、図3に示したように、参照降伏応力として実験から得られた304ステンレス鋼の0.2%耐力の値を用いたところ、 δ の計算値は実験値より極めて大きい値となった。そこで、参照降伏応力として何を用いるか、実験と対比して検討する。

実験は前述の「配管信頼性実証試験」の一環として日本原子力研究所で実施された実験データを参考とした⁽⁶⁾。供試材は呼称6Bスケジュール80相当の304ステンレス鋼の配管である。試験は、図1に示すように、室温において内圧のない状態で四点曲げ負荷である。き裂は周方向の貫通き裂で、き裂中央部の δ をクリップゲージで計測した。ここで、用いた δ の実験データは延性き裂の成長を生じる前の δ である。6B配管の曲げ試験におけるき裂角度は $2\theta=60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ および 150° である。供試体の機械的性質を表5に示す。

Tadaらの式で示される参照降伏応力として、表5に示す σ_y , σ_u と、流動応力 σ_0 の値を用いて求めたき

表4 各研究機関で定めた材料定数

Organization	σ - ϵ curve used	α	n	σ_y MPa	E GPa	ϵ_y	Remarks
A	A-1 Fig.2 (a)	2.270	10.218	243	194	0.00124	Engineering σ - ϵ
	A-2 Fig.2 (b)	1.173	7.874	243	194	0.00124	"
B	B-1 Fig.2 (a)	0.0036	9.046	110	219.5	0.0005	"
	B-2 Fig.2 (b)	0.7193	5.995	176	194	0.0009	"
C	C-1 Figs.2	1.0	7.0	243	194	0.00124	"
	C-2 (a) & (b)	2.0	7.0	243	194	0.00124	"
D	D-1 Fig.2 (b)	6.10	4.33	243	194	0.00125	True σ - ϵ curve
	D-2 Fig.2 (b)	5.16	5.42	243	194	0.00125	Engineering σ - ϵ

σ_y =yield stress, E =Young's Modulus, ϵ_y =yield strain

表5 供試体の機械的性質

0.2% Yield stress, σ_y MPa	Ultimate tensile stress, σ_u MPa	Elongation %	Reduction of area %
243	619	68.7	52.1

裂開口面積 S と実験による S との比較を図 6 に示す。ここで、実験から得られた δ は式 (7) により S とし、 σ_0 は σ_y と σ_u の和の 1/2 とした。図 6 は $2\theta=90^\circ$ の配管である。参照降伏応力に σ_y を用いて求めた S が最も大きく、 σ_u を用いた S が小さい。実験値に近い S は参照降伏応力に σ_0 を用いた場合である。この傾向は他のき裂角度を有する配管でも同様であった。

配管のき裂開口面積を求める場合、用いる材料定数が定まっていれば普遍的なき裂開口面積を与えることになり、他鋼種、他温度などとの比較が容易である。また、設計基準において漏えい量やジェット力の評価を規定する場合、材料定数が与えられていれば設計への反映が容易である。

そこで、通商産業省告示第 501 号の技術基準⁽⁷⁾で規定される降伏応力と引張強さをを用いてき裂開口面積の計算値と実験値を検討する。告示で示される 304 ステンレス鋼の室温における σ_y は 206 MPa、 σ_u は 519 MPa である。ここで、告示の値から算出される流動応力を σ_s とする。流動応力は $\sigma_s=(\sigma_y+\sigma_u)/2$ とし、363

MPa とした。

告示の値から σ_s を求め、この σ_s から求めたき裂開口面積 S を図 7 に示す。図 7 は $2\theta=60^\circ$ と 90° の配管である。また、図 8 は $2\theta=120^\circ$ と 150° の配管である。告示による σ_s から求めたき裂開口面積は $2\theta=120^\circ$ を除いて実験値より若干小さい値となった。

種々なき裂角度を有する母材配管の、き裂開口面積の計算値 S_{cal} に対する実験値 S_{exp} の比を図 9 に示す。

計算で求められるき裂開口面積が実験値より小であれば、推定される漏えい量は実際の漏えい量より小となり、漏えい検知の観点からは保守的評価となる。配管からの漏えいは、一般に定常運転状態で考えるのが妥当である。

配管は設計応力強さを基に構造設計される場合が多い。304 ステンレス鋼では室温における設計応力強さは 137 MPa、300°C では 115 MPa である。また、スケール 80 の配管は、一般に、80 atm {7.84 MPa} 以下の圧力に用いられる。この内圧や自重などを考慮すると軸力としては 60 MPa 程度の応力が実際の配管に定常的に作用しているとみなしてよい。すなわち、漏えい時の応力は低応力側で評価される。

図 6 式 (3) の参照降伏応力に実験で得られた σ_y 、 σ_u 、 σ_0 の値を代入して求めたき裂開口面積

図 8 告示の値を用いて求めたき裂開口面積

図 7 告示の値を用いて求めたき裂開口面積

図 9 計算と実験によるき裂開口面積の比

そこで、図9の S_{exp}/S_{cal} を低応力側でみると、ほぼ、 $S_{exp} \geq S_{cal}$ となっている。告示の値を基にした流動応力を用いて計算すれば、ほぼ実験値と等しいか、あるいは、漏えい検知の観点からは全体的に保守的評価を与える傾向にある。

一方、圧力媒体の噴出によるジェット力を推定するときは、実際のジェット力より計算で求められるジェット力のほうが大でないと非安全側の評価になる。すなわち、漏えい検知の場合と逆に、き裂開口面積は $S_{exp} \leq S_{cal}$ である必要がある。また、ジェット力の評価を必要とするときは、何らかの過大な荷重が作用してき裂が大きく開口する場合を想定するのが一般的である。したがって、負荷応力範囲は配管破断に至る前までの高応力側が対象となる。

さらに、き裂が大きく負荷応力の高いときは、ジェット力の評価よりも配管破断の想定が必要となろう。ここで、図9の $2\theta=150^\circ$ の配管は、 σ_b が140 MPa近傍で、 S_{exp}/S_{cal} が急激に増大の傾向にある。この応力状態では、き裂断面の正味応力は流動応力に近づき、配管はむしろ破断に近い状態である。そこで、この $2\theta=150^\circ$ の σ_b が140 MPa以上を除くと、図9より S_{exp}/S_{cal} は約1.5以内にある。

そこで、ジェット力評価に用いるき裂開口面積は、告示を基にした流動応力を用い、Tadaらの式から得られる値に1.5を乗じた値とすれば、 $2\theta=120^\circ$ 以下のき裂配管に対し安全側の評価となる。

5. 結 言

漏えいを考慮する配管の応力状態は、塑性変形を十分生じている領域まで含まれる。開口するき裂の先端も塑性変形を生じていよう。き裂開口面積を推定するにあたっては、弾性解を基にしたTadaらの方法より

全面塑性解を取り入れたGermanらの方法のほうが現象的にはより実際に近い。しかしながら、ラウンドロビン解析を実施し、配管曲げ試験との対比を行った結果、以下のことが明らかとなった。

(1) Germanらの方法によるき裂開口面積は、数式化した σ - ϵ 曲線の定数の違いから参加した研究機関の間で異なる結果となった。

(2) Tadaらの方法によるき裂開口面積のラウンドロビン解析の結果は参加研究機関の間で一致した。LBB評価のための設計基準として採用するき裂開口面積は、現時点ではTadaらの方法が適している。

(3) Tadaらの式を用いてき裂開口面積を求めるとき、材料定数は、通商産業省告示第501号に規定される降伏応力と引張強さの値を基にした流動応力を用いると安全側評価となる。

(4) 圧力媒体の漏えい量を推定するときはTadaらの式によって算出されるき裂開口面積の値をそのまま用いる。しかし、圧力媒体の噴出によるジェット力の評価をするときは、Tadaらの式によって算出されるき裂開口面積に1.5を乗じた値を用いるのが妥当である。

最後に、本研究に有益なご教示をいただいた、飯田國廣東大名誉教授、朝日泰英東大教授、宮園昭八郎日本原子力研究所室長に謝意を表する。

文 献

- (1) Ranganath, S., EPRI NP-2472-SY, 1 (1982).
- (2) Wüthrich, C., *Eng. Fract. Mech.*, 18-5 (1983), 1049.
- (3) Ehlers, R., *Eng. Fract. Mech.*, 25-1 (1986), 63.
- (4) Tada, H., ほか1名, NUREG CR-3464 (1983).
- (5) German, D. M., ほか5名, EPRI NP-3607, (1984).
- (6) Shibata, K., ほか5名, JAERI-M, 86-078 (1986).
- (7) 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準 (1980通商産業省告示第501号).