804 破断前漏洩(LBB)評価に関する研究 Study on procedure of LBB assessment.

正 鴻巣 眞二 (茨大工), ○ 常山 雄樹 (茨大院)

Shinji KONOSU, Ibaraki Univ., 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi 316-8511
Yuki TSUNEYAMA, Ibaraki Univ., 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi 316-8511

The High Pressure Institute of Japan has been updating Fitness-For-Service (FFS) rule (HPIS-Z101), which is a simplified assessment procedure for evaluating the structural integrity of cracked pressure vessels and piping systems. Now, Z101-Level 1 is being revised and more accurate assessment Level 2 including the evaluation of the leak before break (LBB) will be newly added. In this paper, the LBB procedure, which will be adopted in Z101-Level 2 is discussed. The method of estimating the crack profile when a crack penetrates the wall thickness is proposed.

Key Words: FFS, LBB, Crack growth

1. 結論

日本高圧力技術協会は、一般産業用設備(発電用原子力設備を除く)の圧力機器に発見されたき裂状欠陥の供用適性(FFS)評価を可能にする HPIS Z101 Level 1 を 2001 年に発行した。将来刊行予定である HPIS Z 101 Level 2 は、Level 1 で適用範囲外もしくは供用不適とされた欠陥に対し Level 1 よりも詳細な解析によって欠陥の FFS(Fitness-For-Service)評価を行うことを目的としている。HPIS Z 101 Level 2 には LBB 評価が組み込まれる予定であり、欠陥が致命的な破壊を起こすことなく成長を続け、部材を貫通する場合、漏洩が検出できれば部材が破壊を起こす前に補修などを行うことができる。そこで本研究では、円筒周方向外表面欠陥に対して LBB 評価を行う手法について検討した。

2. LBB 評価手順

破断前漏洩(LBB)とは、内部流体を含む構造物中に欠陥が存在し、それが運転期間中に進展して貫通に至ったとしても、漏洩を検知することにより脆性破壊による致命的な破壊をする以前に適切な対応処置を講じることができるという概念である。従って供用期間中の設備に対して生じたき裂が疲労等により進展したとしても LBB 条件を満たしているならば、漏洩を早期に適正に検出でき漏洩により被害が拡大しないことが保証される場合には、欠陥を引き続き監視することを前提にき裂進展解析を要さずその欠陥は許容される。

2.1 欠陥形状¹⁾

円筒周方向欠陥の場合を考えて、欠陥形状を Fig.1 のような半楕円状欠陥に置換え、欠陥の最深点(D 点)、表面点(S 点)のそれぞれでき裂の進展量を解析することで欠陥全体の進展を推測できると考える。評価するために初期欠陥が満たすべき条件として、初期欠陥深さの肉厚比および初期欠陥アスペクト比は以下である。

$$a_0/t \leq 1/2, a_0/2c_{0,0} \leq 1/2 \quad (1)$$

ここで、 t は肉厚、 a_0 は初期欠陥深さ、 $2c_{0,0}$ は周方向初期欠陥長さ

2.2 想定貫通欠陥長さ

破断前漏洩評価に用いる想定貫通欠陥長さ $\ell_{LBB}(=2c_{0,f})$ は、次式から推測できると仮定する。

$$\ell_{LBB} = f_{LBB} \cdot t \quad (2)$$

ここで、 f_{LBB} は補正係数である。

上式で提案する補正係数 f_{LBB} は、種々の因子(パリス則の指数、初期欠陥寸法、圧力容器の直径比など)に依存すると考えられる。

Fig.1 Flaw dimension

Fig.2 Stress distribution

2.3 応力拡大係数²⁾

円筒周方向貫通欠陥に作用する応力分布 $\sigma(x)$ を Fig.2 のような線形応力分布に置換える。き裂進展解析の際の応力拡大係数は次の式を用いる。

$$K = \left(F_0^4 \sigma_0 + F_1^4 \sigma_1 \cdot \frac{a}{t} + F_2^4 \sigma_2 \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^2 + F_3^4 \sigma_3 \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^3 + F_4^4 \sigma_b \right) \times \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \frac{x}{t} + \sigma_2 \left(\frac{x}{t} \right)^2 + \sigma_3 \left(\frac{x}{t} \right)^3$$

2.4 下限界破壊靱性の推定³⁾

材料の破壊靱性を推定するためにインデックス・アプローチ法³⁾を用いて次式により破壊靱性の下限値(K_{min})を推定する。

$$K_{IC} [MPa\sqrt{m}] = 36.5 + 3.084 \exp[0.036(T - T_{ref} + 56)] \quad (4)$$

ここで T は評価温度、 T_{ref} は参照温度であり、炭素鋼に対しては 20.3J の CVN を与える試験温度である

2.5 LBB 条件

想定貫通欠陥長さ ℓ_{LBB} に対する応力拡大係数 $K^{(3)}$ を算出し、式(6)が成り立てば LBB 条件を満たすと考えられる。

$$K = (M_m \sigma_m + M_b \sigma_b) \sqrt{\pi c} \quad (5)$$

$$K < K_{res} \quad (6) \quad (\text{LBB 条件})$$

3. 補正係数 f_{LBB} に及ぼす各種因子の検討

破断前漏洩(LBB)を定量的に評価するためには応力状態やパリス則の指数に応じた補正係数 f_{LBB} を定量化する必要がある。そこで肉厚 t や初期欠陥深さ比 a_0/t 、初期欠陥アスペクト比 $a_0/2c_{\theta,0}$ と補正係数 f_{LBB} との関係を数値解析により調べた。ただし、き裂面に一様な応力が繰返し作用する場合のみを考えた。

3.1 肉厚 t の影響

肉厚 t の補正係数 f_{LBB} への依存性を Fig.3 に示す。肉厚 t の f_{LBB} への依存性はほとんど認められない。従って、これ以降の検討の際には、 $t=40[\text{mm}]$ を用いることとした。

3.2 初期欠陥深さ比 a_0/t の影響

初期欠陥深さ比 a_0/t の f_{LBB} への依存性を Fig.4 に示す。疲労進展則であるパリス則の指数の代表的な値 n として $n=3.0$ を用い、 $t=40[\text{mm}]$ 、 $a_0/2c_{\theta,0}=1/6$ として解析した。Fig.4 から初期欠陥深さ比 a_0/t の f_{LBB} への依存性は $D/t > 20$ ではほとんど認められず $f_{LBB}=3.8 \sim 4.2$ であった。

3.3 初期欠陥アスペクト比 $a_0/2c_{\theta,0}$ の影響

初期欠陥アスペクト比 $a_0/2c_{\theta,0}$ の f_{LBB} への依存性を Fig.5 に示す。解析には $n=3.0$ 、 $t=40[\text{mm}]$ 、 $a_0/t=1/40$ の値を用いたが、Fig.5 から初期欠陥アスペクト比 $a_0/2c_{\theta,0}$ の f_{LBB} への依存性はほとんど認められなかった。

以上の結果から、初期欠陥寸法が $a_0/t \leq 1/2$ 、 $a_0/2c_{\theta,0} \leq 1/2$ を満たし、パリス則の指数が $n=3.0, 5.1, 8.16$ のときには、補正係数はそれぞれ以下の値で与えられることがわかった。

$n=3.0$ $f_{LBB}=3.8 \sim 4.2$ 、 $n=5.1$ $f_{LBB}=4.0 \sim 4.5$ 、 $n=8.16$ $f_{LBB}=4.0 \sim 4.8$

従って、安全サイドに考える場合には、

$n=3.0$ $f_{LBB}=4.2$ 、 $n=5.1$ $f_{LBB}=4.5$ 、 $n=8.16$ $f_{LBB}=4.8$

と考えればよい。

4. 結論

設備に生じたき裂状欠陥に対しての破断前漏洩(LBB)評価の手法を提案した。評価で用いる補正係数 f_{LBB} は初期欠陥寸法や直径比にほとんど依存しないことが明らかとなった。

初期欠陥が $a_0/t \leq 1/2$ 、 $a_0/2c_{\theta,0} \leq 1/2$ の条件にあり、肉厚方向に対して一様な応力の変動によって疲労でき裂進展する場合には、パリス則の指数に応じて補正係数 f_{LBB} を変えれば良いことが明らかになった。これにより、供用期間中に検出された欠陥が LBB 条件を満たすかどうかの検討が簡便にできる。

5. 参考文献

- 1) HPIS Z101 Level 1 2001/日本高圧力技術協会
- 2) Chapuliot, S., "Formulaire de K_I pour les tubes comportant un défaut de surface semi-elliptique longitudinal ou circonferentiel, interne ou externe," Rapport CEA-R-5900, (2000).
- 3) HPIS Z101 Level 2/日本高圧力技術協会 刊行予定

Fig.3 Effect of D/t on f_{LBB} with parameter of thickness

Fig.4 Effect of D/t on f_{LBB} with parameter of the ratio of initial flaw depth to thickness

Fig.5 Effect of D/t on f_{LBB} with parameter of the ratio of initial flaw depth to initial flaw length

Fig.6 Effect of D/t on f_{LBB} with the index number of Paris principle and parameter of the ratio of initial flaw depth to thickness