ポリエチレン製造用超高圧圧力容器のLBB条件の検討*

(第2報, 内圧円筒の応力拡大係数とLBB条件)

小林 実**, 田中英彦***
岩館忠雄****, 竹俣裕行****

Study on LBB Criterion of High Pressure Reactors for Polyethylene Production (2nd Report, Stress Intensity Factor of Internal Pressure Cylinder and LBB Criterion)

Minoru KOBAYASHI, Hidehiko TANAKA,
Tadao IWADATE, and Hiroyuki TAKEMATA

To study on the leak before break, namely LBB criterion of high pressure reactors for polyethylene production, the validity of the stress intensity factor formulas proposed by Newman-Raju, Iwadata et al. and Nakazawa et al. were discussed. When Newman-Raju's stress intensity factor formula without considering the back surface magnification factor is used, the condition of $K_I \geq K_{Ic}(J)$ gives a good criterion for LBB condition.

Key Words: Leak Before Break, High Pressure Reactor, Internal Pressure Fatigue Test, Brittle Fracture, Fatigue Crack Growth Rate, Stress Intensity Factor

1. 緒 言

ポリエチレン製造用超高圧圧力容器の安全性を評価するために, 第1報では内圧疲労試験を実施し, 実際に使用されている超高圧圧力容器が, もし疲労き裂が発生, 進展したとしても, 脆性破壊を生じる危険性のないこと, すなわちLBB条件を満足することを確認した。

本報では, 内圧疲労試験で得られた結果をもとに, 超高圧圧力容器の安全性を評価する際に必要な応力拡大係数 K_I について, LBB条件との関係で検討を行い, 工業的なLBB条件のクライテリオンを提案した。さらに, そのLBB条件の妥当性について, 実際の事例を適用して検討を行った。

2. 内圧円筒の応力拡大係数 とその評価

半だ円き裂の応力拡大係数の算出式は, ASME Sec. XI および Newman-Raju⁽¹⁾ により提案されてい

るが, 超高圧圧力容器の場合には, 内圧が作用しているために上記の式をそのまま適用することはできず, 内圧によるくさび効果を考慮する必要がある。またくさび効果を考慮した任意のき裂深さにおける応力拡大係数の表示式は, 岩館ら⁽²⁾, 中沢ら⁽³⁾ などにより提案されている。

Newman-Raju の式に内圧によるくさび効果を取り入れると, 次式のごとくなる。

$$K_I = (\sigma + P) \sqrt{\frac{\pi a}{\phi}} \cdot F \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, σ は周方向応力, P は内圧, a はき裂深さ, ϕ は形状係数 F はき裂深さおよび肉厚などで決まる関数である。

また, 岩館らの内圧によるくさび効果を考慮した式は, 式(2)のごとくである。

$$K_I = M_f \cdot M_b \cdot (\sigma + P) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F(\theta) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$M_f = 1 + 0.12 \left(1 - \frac{a}{2b} \right)^2$$

$$M_b = \left(\frac{2t}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2t} \right)^{1/2}$$

$$F(\theta) = \left[\sin^2 \theta + \left(\frac{a}{b} \right)^2 \cos^2 \theta \right]^{1/4}$$

ここで, M_f は内表面の補正係数, M_b は外表面の補正

* 昭和61年11月26日 第941回講演会において講演, 原稿受付 昭和61年6月18日。

** 旭化成工業(株) (〒711 倉敷市児島塩生字新浜 2767-10)。

*** 正員, 旭化成工業(株) (〒210 川崎市川崎区夜光 1-3-2)。

**** 正員, (株)日本製鋼所 (〒051 室蘭市茶津町4番地)。

係数, $2b$ はき裂長さ, Q は形状係数である。なお, 周方向応力 σ は, き裂深さ a の位置での値を用いるのが一般的であるが, 内圧による内表面近傍の急激な応力こう配の影響を考え, 次式で表される $a/2$ の位置での応力値が用いられている。

$$\sigma = \left[\frac{r_2^2 / (r_1 + a/2)^2 + 1}{(r_2/r_1)^2 - 1} \right] P$$

ここで, r_1 , r_2 は内外半径である。

一方, 中沢らの式は次式で与えられる。

$$K_I = \frac{M_f \cdot M_b}{\Phi} \cdot \frac{W^2 \cdot P}{W^2 - 1} \left[1 + \frac{r_1^2}{(r_1 + a)^2} \right] \sqrt{\pi a} F(\theta) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right) \sin^2 \theta} d\theta$$

ここで, W は外半径と内半径の比は r_2/r_1 である。

いま, これらの応力拡大係数の算出式の妥当性について検討する。図1は一例として, 破壊靱性の異なる4種類の試験片の内圧疲労試験終了後の破面の状況を

示したものである。いずれの破面にもビーチマークが観察され, 繰返し数に応じた疲労き裂の進展挙動が観察できる。図2はビーチマークから破壊靱性の異なる6種類の内圧円筒試験片の $\theta=90^\circ$ の位置でのき裂深さと繰返し数の関係を示したものである。また図3はき裂深さとアスペクト比の関係である。ここで, 図2の結果をもとに内圧円筒試験片の疲労き裂進展速度 da/dN を求め, 上述の応力拡大係数の妥当性について検討する。図4は内圧疲労試験の疲労き裂進展速度 da/dN を前述の応力拡大係数の解析から求めたそれぞれの ΔK との関係で示し, 前報で示したAS材の0.5T-CT試験片の試験結果と比較したものである。内圧疲労試験の疲労き裂進展速度はいずれもCT試験片の結果とよい一致を示しているが, なかでも岩館らの式は最もよい一致を示している。図5は $K_{Ic} = 144 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ のAS材に加え, $97 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 材および 67

(a) $144 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

(b) $115 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

(c) $97 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

(d) $91 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

図1 内圧疲労試験終了後の破面の状況

MPa $\sqrt{m}$ 材について、岩館らの式の妥当性をみたものである。いずれの材料においても内圧円筒の結果とCT試験の結果は、よい一致を示している。

3. LBB 条件の検討

線形破壊力学の K_{Ic} 破壊の条件に従えば、機械・構造物は内在するき裂の応力拡大係数 K_I が材料の破壊靱性 K_{Ic} に一致もしくはそれ以上になった場合に脆性破壊を起こす。いま、前述の応力拡大係数の算出式を用いて K_I 値を求め、内圧円筒の試験結果と比較し、この K_{Ic} 破壊の条件の妥当性について検討する。

図6は Numan-Raju の式、岩館らの式、中沢らの式から計算される応力拡大係数を、内圧円筒試験片のき裂深さ a と肉厚 t との比の関係で示したものである。岩館らおよび中沢らの式は、外表面の補正係数を考慮しているため K_I 値は $a/t > 0.4$ 付近から急激に上昇し、破壊靱性が高い材料においてもすべて破壊を起こし、LBB 条件を満足しないことを示している。いま、図中に本研究の破壊靱性の異なる6種類の実験点をプロットすると、 $K_{Ic}(J)$ が 67MPa $\sqrt{m}$ および 97 MPa $\sqrt{m}$ の材料は岩館らの式とよい一致を示し、 K_{Ic} 破壊の条件

図2 き裂深さと繰返し数の関係

図3 き裂深さとアスペクト比の関係

を満足しているようにみえる。しかし、 $K_{Ic}(J)$ が 91 MPa $\sqrt{m}$ および 115 MPa $\sqrt{m}$ の材料は明らかに K_{Ic} 破壊の条件を満足しておらず、かなり深くまでき裂が進展し、破壊を起こしている。また、 $K_{Ic}(J)$ が約 120MPa $\sqrt{m}$ 以上の材料ではいずれも破壊に至っておらず、LBB 条件を満足している。このことは疲労き裂が深くなり外表面に近づくにつれ、平面ひずみの度合いが減少し、平面応力条件、すなわち K_{Ic} 破壊の条件に従い破壊を起こすことを示している。したがって、厳密な意味での検討にはならないが、第1報の図1に示した供試材の J_{Ic} 試験の結果をもとに、 K_{Ic} 値を求め、図中に破壊靱性 K_{Ic} の範囲を示した。この結果をみると、外表面近傍ではなお大幅に異なっており、 K_{Ic} 破壊の条件のみでは説明できないことがわかる。ここで、試験片は内圧円筒の肉厚寸法にほぼ等しい 0.5 T-CT 試験片を使用しているが、き裂寸法が $a/t = 0.8$ あるいは

図4 き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数 ΔK との関係

図5 内圧円筒試験結果と CT 試験結果の比較 (岩館らの式)

図6 破壊時の a/t と $K_{Ic}(f)$ の関係
および LBB 条件の検討

は0.9としだいに深くなるにつれ、あるところから脆性破壊は起こらず、せん断形の破壊に移行することが考えられる。すなわち、塑性拘束の影響を考慮し LBB 条件を検討する必要がある。また図中の実験点のばらつきをみると、材料の破壊靱性のばらつきの問題も寄与していることは明らかである。

ここで、図中の点線は岩館らおよび中沢らの式の外表面の補正係数を考慮しない式を示したものである。図6から本研究の実験点は、Newman-Rajuの式の外表面の補正係数を考慮しない式を用いることにより、工業的には十分に LBB 条件の判定が可能であることを示している。すなわち、応力拡大係数 K_I の表示式としては岩館らの式が推奨されるが、LBB 条件の判定にあたっては、本研究で使用了材料の強度ならびに圧力容器の寸法の範囲においては、外表面の補正係数を考慮しない Newman-Raju の式が推奨される。

4. 事例の検討

実際に破壊した事故例およびリークした事故例を用いて、前述の LBB 条件について検討する。図7は使用圧力約200 MPa、使用温度20~40°C、外径260 mm、内径90 mmの超高压圧力容器が、稼働開始後14年経過した後に、脆性破壊を起こした事故例についての検討結果である⁽⁴⁾。脆性破壊を起こした部位は、 $K_{Ic} = 103 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ と低靱性であり、疲労き裂は $a/t = 0.64$ まで進展していた。図7をみると、 $K_{Ic} = 103 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の材料では、 a/t が0.64付近になると、前述の LBB 条件によって破壊が起こることを示している。

図7 超高压圧力容器の脆性破壊した例

図8 超高压圧力容器のリークした例

図8は約240 MPaの圧力で使用されていた外径72 mm、内径25 mmの超高压圧力容器が、疲労き裂の進展拡大によってリークした事例である。ここで、材料の K_{Ic} は $111 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であった。この場合、LBB 条件を満足しており、実際と計算結果がよく一致することが確認された。

5. 結 言

本研究では、内圧疲労試験で得られた結果をもとに、超高压圧力容器の安全性を評価する上で重要な LBB 条件について検討し、以下の知見を得た。

(1) 内圧円筒についての Newman-Raju の式、岩館らの式および中沢らの式を用いた応力拡大係数の有効性について、き裂進展速度との関係から検討した結果、岩館らの式が最もよい精度を有することがわかった。

(2) 実プラントの安全性を評価する上で重要な

LBB条件を検討した結果, 工業的にはNewman-Rajuの外表面の補正係数を考慮しない式を用いることによって, $K_I \geq K_{Ic}$ の条件で, LBBの条件の判定が可能であることがわかった。

文 献

- (1) Newman, J. C. Jr., and Raju, I. S., NASA Tech. Paper, 1578 (1979); Eng. Frac. Mech., 15 (1981), 185.
 - (2) 岩館・ほか3名, '圧力技術', 23-5 (昭60), 245.
 - (3) 中沢・ほか2名, '圧力技術', 17-5 (昭54), 255.
 - (4) 高橋・ほか2名, '圧力技術', 19-1 (昭56), 16.
-