

## 附属書 5A-3 オーバーラップする複数の減肉部を有する円筒形圧力設備の p-M 法による評価 (規定)

### 1. 記号の意味<sup>[1]</sup>

附属書 5A-3 で用いる記号の意味は、附属書 5A による他、次による。

$$A_{b-m}^{io} : 2\{1-(1-\tau)^3\} \sqrt{\left[ \begin{aligned} &(k_m+1)\{1-(1-\tau)^3\}\cos\psi_{b,m} + \{(1-\tau)^3 - (1-\tau+y_1\tau)^3\}\sin\theta_1\cos\alpha_1 \\ &+ \{(1-y_2\tau)^3 - 1\}\sin\theta_2\cos\alpha_2 - \frac{(k_m-1)}{2}\{1-(1-\tau)^3\}\{\sin(\theta_1+\alpha_1) + \sin(\theta_2+\alpha_2)\} \end{aligned} \right]}$$

複数の減肉としての参照応力における曲げ応力成分係数

$$A_{m-m}^{io} : \pi \sqrt{\left[ \begin{aligned} &(k_m+1)\psi - \left(1 + \frac{p}{\sigma_f}\right) y_1\theta_1 \frac{2-2\tau+y_1\tau}{2-\tau} - y_2\theta_2 \frac{2-y_2\tau}{2-\tau} \\ &+ (k_m-1)\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 - \theta_2 - \theta_s\right) \end{aligned} \right]}, \text{ 複数の減肉として}$$

の参照応力における曲げ応力成分係数

ここに、

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \beta$$

$a_j$ : 減肉の深さ (mm)。ここでは  $j=1$ (減肉 1 (内面減肉)),  $2$ (減肉 2 (外面減肉)) とする (以下同じ)。

$$2c_L^{\max} : \text{Max} \left\{ \frac{\pi}{2} c_{L1}, \frac{\pi}{2} c_{L2}, \frac{\pi}{4} c_{L1} + \frac{\pi}{4} c_{L2} + H^* \right\}, \text{ 最大縦方向長さ (mm)}$$

$2c_{Lj}$ : 縦 (軸) 方向の長さ (mm)

$2c_{\theta j}$ : 円周方向の長さ (mm)

$D_o$ : 円筒の外径 (mm)

$E$ : 材料の縦弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$H^*$ : 軸方向の内面減肉と外面減肉の中心部間の距離 (mm)

$k_m$ :  $\text{Min}\left\{1, 1.74(y_{\text{eff}} - 1)^2 + g(\theta_{\text{tot}})\right\}$ , 曲げモーメントに対する修正係数

ここに、

$$g(\theta_{\text{tot}}) = \sin\left\{1.57\left(\frac{2\theta_{\text{tot}}}{\pi}\right)^2 - 3.43\left(\frac{2\theta_{\text{tot}}}{\pi}\right) + 0.3\right\} + 1$$

$M_{s\_m}$ :  $\frac{1}{1 - (y_1 + y_2) + \frac{y_1}{M_t(a_1)} + \frac{y_2}{M_t(a_2)}}$ , オーバーラップした複数減肉のバルジング効果を

表す係数

$M_t(a_j)$ :  $\sqrt{1 + 0.317\lambda_{a_j}^2}$ , 減肉 1 又は減肉 2 の単独減肉としての軸方向貫通欠陥に対するバル

ジング効果を表す係数

$p$ : 設計圧力又は常用の圧力 (MPa)

$S'$ :  $\frac{0.6Et_m^*}{2R_0\left(1 + 0.004\frac{E}{\sigma_{ys}}\right)}$ , 許容座屈限界 (N/mm<sup>2</sup>)

$t_{lg}$ :  $t - a_1 - a_2$ , オーバーラップした複数減肉のリガメント厚さ (mm)

$$t_m^* = t - \frac{t}{\pi\{1 - (1 - \tau)^4\}} \sum_{j=1}^2 \left[ \left\{1 - (1 - y_j\tau)^4\right\} \left\{ \theta_j + \frac{1}{4}\sin(2\theta_j + 2\alpha_j) + \frac{1}{4}\sin(2\theta_j - 2\alpha_j) \right\} \right],$$

複数減肉を有する円筒の有効肉厚 (mm)

$y_j$ :  $\frac{a_j}{t}$ , 減肉 1 又は減肉 2 の厚さに対する欠陥深さの比

$y_{\text{eff}}$ :  $\frac{1}{\tau} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{\tau}{\theta_{\text{tot}}} \left\{ \theta_1 y_1 (2 - 2\tau + y_1\tau) + \theta_2 y_2 (2 - y_2\tau) \right\}} \right]$ , オーバーラップした複数減肉の相当

有効深さ (mm)

$\alpha_{mj}$ :  $\frac{\pi a_j c_{Lj}}{2t(2c_L^{\text{max}} + k_p t)}$ , 減肉 1 又は減肉 2 の相当欠陥深さ比

ここに、

$$k_p = \text{Min}\left\{2, -154.6y_{\text{tot}}^3 + 456.3y_{\text{tot}}^2 - 450.0y_{\text{tot}} + 148.3 + f(\tau)(1 - y_{\text{tot}})\right\}$$

$$f(\tau) = \frac{(0.78 - 4.15\tau)^2}{\tau}$$

$$y_{\text{tot}} = y_1 + y_2$$

$2\beta$ : オーバーラップした複数減肉に対する圧縮領域の角度 (rad)

$$\lambda_{aj}: \frac{1.428c_{Lj}}{\sqrt{R_1 a_j}}, \text{ 減肉 1 又は減肉 2 の軸方向表面欠陥に対するシェルパラメータ}$$

$$2\theta_1: \frac{(1-\tau)\pi c_{\theta 1}}{(2-2\tau+y_1\tau)R_1}, \text{ 減肉 1 の円周方向角度 (rad)}$$

$$2\theta_2: \frac{\pi c_{\theta 2}}{(2-y_2\tau)R_0}, \text{ 減肉 2 の円周方向角度 (rad)}$$

$2\theta_s$ : 減肉 1 と減肉 2 がオーバーラップしている角度 (rad) (附属書 5A-3 図 2 参照)

$$\theta_s^*: \alpha_1 + \alpha_2, \text{ 内面の減肉及び外面の減肉の各中央の間の角度 (rad)}$$

$2\theta_{\text{tot}}$ :  $\text{Max}\{2\theta_1, 2\theta_2, \alpha_1 + \alpha_2 + \theta_1 + \theta_2\}$ , オーバーラップした減肉の円周方向の総角度 (rad)

$\sigma_{ys}$ : 設計温度における降伏応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{ys}^{\text{min}}$ : 規定最小降伏応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_f$ :  $\text{Min}(\sigma_{ys}^{\text{min}}/1.5, \sigma_{ys}/1.5)$ , 許容応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\tau$ :  $\frac{t}{R_0}$ , 外半径に対する厚さの比

$$\psi_{b,m}: (\psi)_{L=0} = \frac{y_1\theta_1}{(k_m+1)} \left(1 + \frac{p}{\sigma_f}\right) \frac{2-2\tau+y_1\tau}{2-\tau} + \frac{y_2\theta_2(2-y_2\tau)}{(k_m+1)(2-\tau)} - \frac{(k_m-1)}{(k_m+1)} \left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 - \theta_2 - \theta_s\right), \text{ 複数}$$

減肉として曲げ応力のみが作用するときの圧縮領域までの角度 (rad)

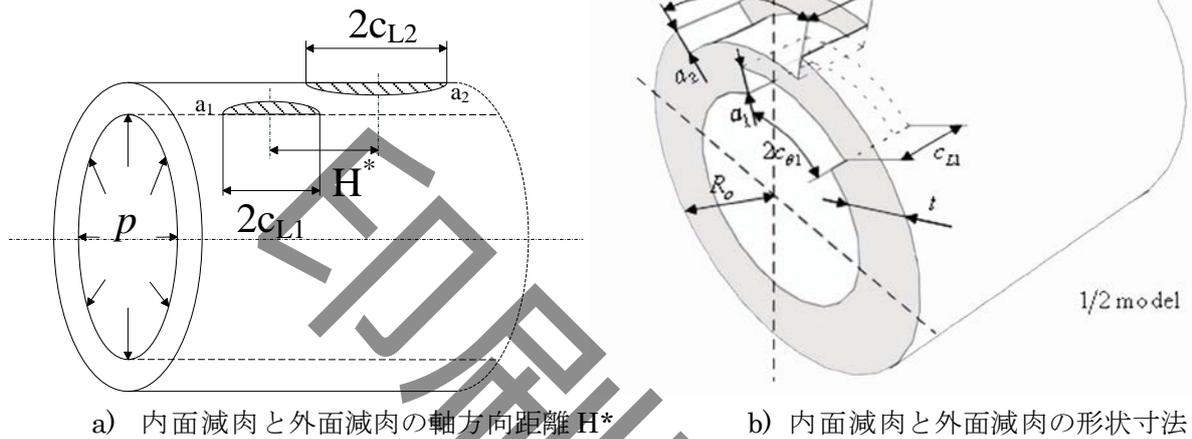
## 2. p-M 線図による評価

以下の各ステップに従い評価を行う。

ステップ 1：評価する部材と減肉部の寸法及び材料特性（材料の降伏応力）を決定する。

ステップ 2：オーバーラップする内面減肉と外面減肉の構成を決定する（附属書 5A-3 図 1 を参照）。

$H^*$  は外面減肉及び内面減肉の軸方向の各中心間の距離を示す。



a) 内面減肉と外面減肉の軸方向距離  $H^*$       b) 内面減肉と外面減肉の形状寸法  
 附属書 5A-3 図 1 オーバーラップする内面減肉と外面減肉を有する円筒形圧力設備<sup>[1]</sup>

ステップ 3：以下の 2 つの適用条件を満たしている場合は、次のステップに進む。

$$t_{lg} \geq 2.5 \text{ mm}$$

$$2\theta_{tot} / \pi \leq 0.6$$

ステップ 4：

オーバーラップする内面減肉と外面減肉を有する円筒形圧力設備の限界圧力  $p_{-m}^L$  を求める。

$$p_{-m}^L = \frac{(1 - \alpha_{-m1} - \alpha_{-m2}) \sigma_f}{\frac{4 - 6\tau + 3\tau^2}{2\tau(2 - \tau)} M_{S_{-m}} + \alpha_{-m1}} \quad (1)$$

ステップ 5：

オーバーラップする内面減肉と外面減肉を有する円筒形圧力設備の地震荷重などの外部限界モーメントは以下の式で表される。

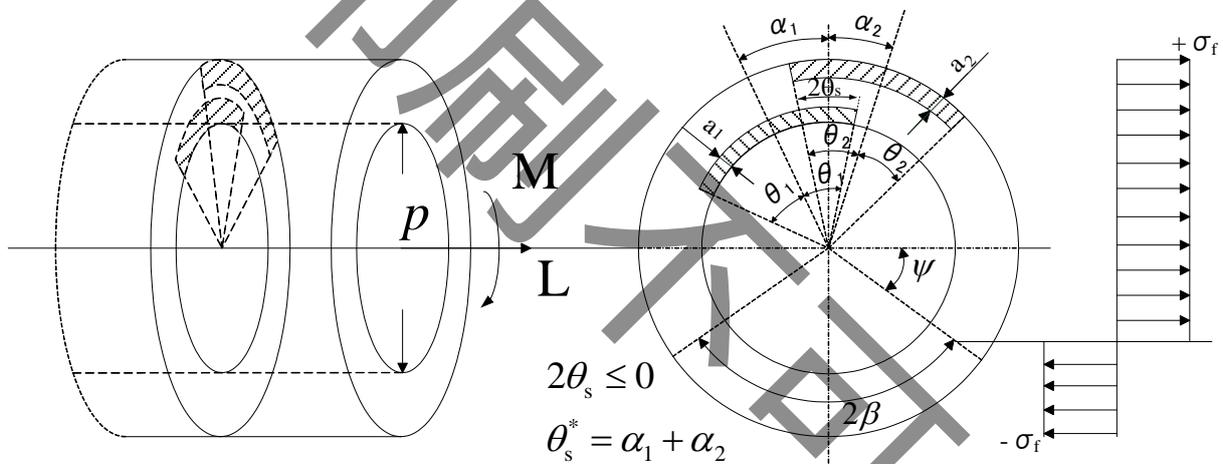
$$M_{-m}^L = \frac{\pi R_o^3 \{1 - (1 - \tau)^4\}}{4 A_{b_m}^{io}} \sigma_f \quad (2)$$

なお、 $M_{-m}^L$  は中立軸を以下の式が成り立つようにしたとき、最も小さな値となる（附属書

5A-3 図 2 参照）。

$$\alpha_1 = \arctan \left[ \frac{\sin \theta_s^*}{\frac{y_1 \sin \theta_1}{y_2 \sin \theta_2} + \cos \theta_s^*} \right], \text{ 中立軸と減肉 1 の中央との角度 (rad)} \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \theta_s^* - \alpha_1, \text{ 中立軸と減肉 2 の中央との角度 (rad)} \quad (4)$$



附属書5A-3図2 軸力と曲げモーメントが作用する外面減肉と内面減肉<sup>[1]</sup>

ステップ 6 :

- ①  $p$ - $M$ 線図の縦座標として内圧/限界圧力比  $p_r$  を求める。

$$p_r = p / p^L \quad (5)$$

$$p^L = p_{-m}^L$$

- ②  $p$ - $M$ 線図の横座標として作用モーメント/限界モーメント比  $M_r$  を求める。

$$M_r = |M| / M^L \quad (6)$$

$$M^L = M_{-m}^L$$

ステップ 7 :

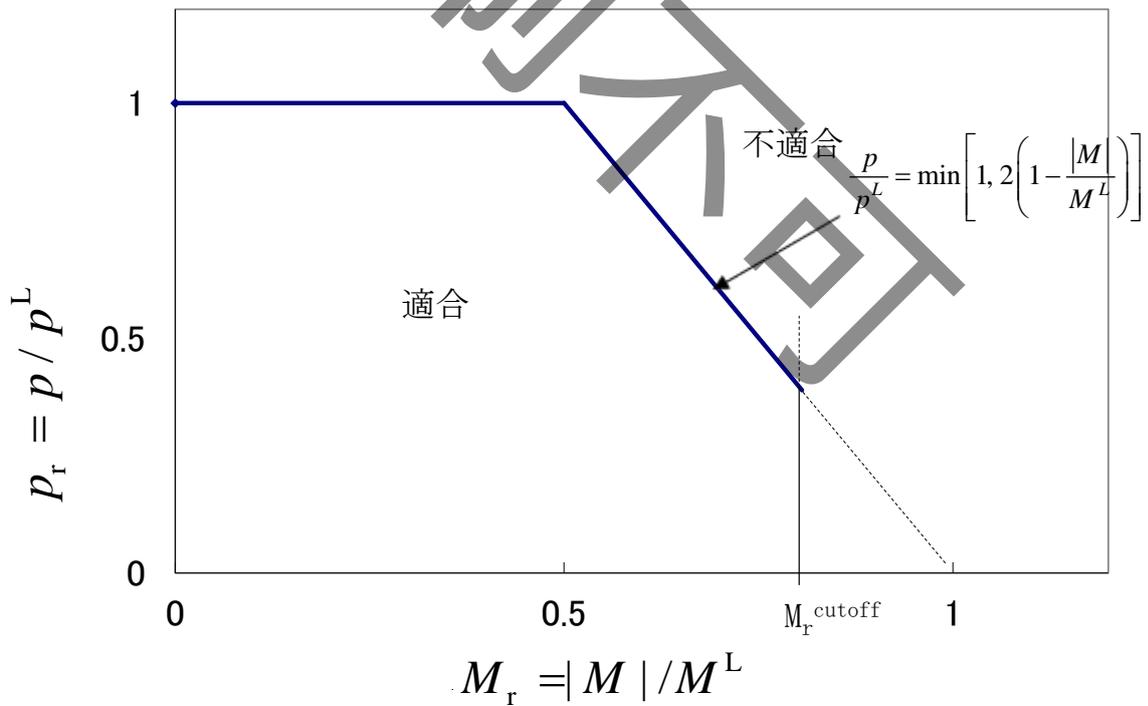
座屈限界モーメント  $M_r^{\text{cutoff}}$  を求め、1 未満の場合には p-M 線図の横座標の上限とする。

$$M_r^{\text{Cutoff}} = S' / \sigma_f \quad (7)$$

ステップ 8 :

p-M 線図により  $(M_r, p_r)$  を評価する。

$(M_r, p_r)$  が、附属書 5A-3 図 3 に示す p-M 線図の適合領域にプロットされた場合、その減肉は合格したもものとする。



附属書 5A-3 図 3 p-M 線図 [1]

### 3. より詳細な検討を行う場合の評価方法 [1]

2. の評価においては、内圧により発生する曲げ応力及び外部軸力により発生する軸方向応力が、

附属書 5A-31

著作権法により無断での複製、転載等は禁止されております。

一般的には十分小さいことを踏まえて、それぞれ0とみなして、評価を与えている。

ここでは、そういった発生応力が無視できない場合に適用するための評価方法を示す。

内圧と曲げモーメントを同時に受ける場合において、塑性崩壊条件を決める参照応力は、円周方向参照応力  $\sigma_{\text{ref},\theta}$  と軸方向参照応力  $\sigma_{\text{ref},z}$  の大きい方で与えられる。

$$\sigma_{\text{ref}} = \max\{\sigma_{\text{ref},\theta}, \sigma_{\text{ref},z}\} \quad (8)$$

よって、

$$\sigma_{\text{ref}} \leq \sigma_f$$

かつ

$$\sigma_{\text{ref},z} \leq S' \quad (\text{ただし、} \sigma_{\text{ref},z} \text{ の計算において、} p=0 \text{ とし、} L \geq 0 \text{ のときは} L=0 \text{ とおく})$$

を満たすとき、その減肉は合格とする。

オーバーラップする内面減肉と外面減肉を有する円筒形圧力設備の軸方向欠陥評価（内圧に対する評価）のための円周方向参照応力は以下の式で表される。

$$\sigma_{\text{ref},\theta} = \frac{\frac{1}{3}\sigma_b^* + M_{S,m}\sigma_\theta \frac{p}{\sigma_f} \alpha_{m1} + \sqrt{\left(\frac{1}{3}\sigma_b^* + M_{S,m}\sigma_\theta \frac{p}{\sigma_f} \alpha_{m1}\right)^2 + \left\{(1-\alpha_{m1}-\alpha_{m2})^2 - \frac{p^2}{\sigma_f^2} \alpha_{m1}^2\right\} M_{S,m}^2 \sigma_\theta^2}}{(1-\alpha_{m1}-\alpha_{m2})^2 - \frac{p^2}{\sigma_f^2} \alpha_{m1}^2} \quad (9)$$

ここに、

$$\sigma_b^* \approx p/2$$

$$\sigma_\theta = \frac{4-6\tau+3\tau^2}{2\tau(2-\tau)} p$$

オーバーラップする内面減肉と外面減肉を有する円筒形圧力設備の円周方向欠陥評価（内圧  $p$ 、軸力  $L$  及び外部曲げモーメント  $M$  が同時に作用する場合の評価）のための軸方向参照応力は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ref},z} &= \sigma_{\text{ref}}^m + \sigma_{\text{ref}}^b = A_{m,m}^{\text{io}} \sigma_m + A_{b,m}^{\text{io}} \sigma_b \\ &= A_{m,m}^{\text{io}} \frac{4-6\tau+3\tau^2}{4\tau(2-\tau)} p + \left| \frac{A_{m,m}^{\text{io}}}{\pi R_o^2 \tau (2-\tau)} L + \frac{4A_{b,m}^{\text{io}}}{\pi R_o^2 \{1-(1-\tau)^4\}} M \right| \end{aligned} \quad (10)$$

<参考文献>

[1] Konosu, S., and Miyata, H, 2011, “Assessment of Overlapped Internal and External Volumetric Flaws in p-M Diagram”, ASME J. Pressure Vessel Technol. 133, p. 031208

印刷不可