

附属書 5A-1 直胴部の単一の減肉の p-M 法による評価（規定）

1. 記号の意味^[1-5]

附属書 5A-1 で用いる記号の意味は、附属書 5A による他、次による。

$$A_{b_i} : \frac{2\{1-(1-\tau)^3\}}{2\{1-(1-\tau)^3\}\cos\psi_{b_i} + \{(1-\tau)^3 - (1-\tau+y\tau)^3\}\sin\theta_i}, \text{ 円周方向内面欠陥の参照応力に}$$

おける曲げ応力成分係数

$$A_{m_i} : \frac{1}{\frac{2\psi_{m_i}}{\pi} - \frac{y\theta_i}{\pi} \left(1 + \frac{p}{\sigma_f}\right) \frac{2-2\tau+y\tau}{2-\tau}}, \text{ 円周方向内面欠陥の参照応力における引張り応力成分}$$

係数

$$A_{b_o} : \frac{2\{1-(1-\tau)^3\}}{2\{1-(1-\tau)^3\}\cos\psi_{b_o} + \{(1-y\tau)^3 - 1\}\sin\theta_o}, \text{ 円周方向外面欠陥の参照応力における曲}$$

げ応力成分係数

$$A_{m_o} : \frac{1}{\frac{2\psi_{m_o}}{\pi} - \frac{y\theta_o(2-y\tau)}{\pi(2-\tau)}}, \text{ 円周方向外面欠陥の参照応力における引張り応力成分係数}$$

$$a_{\text{eff}} : \frac{\pi a c_L}{(\pi c_L + 2k_p t)}, \text{ 半楕円状欠陥を近傍の健全部を含めて矩形型欠陥に置き換えたときの相当}$$

欠陥深さ (mm)

ここで、

$$k_p = \min \left\{ 2, -154.6y^3 + 456.3y^2 - 450.0y + 148.3 + f(\tau)(1-y) \right\}$$

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

とする。

E : 材料の縦弾性係数 (N/mm²)

$$g : 1 - 20 \left(\frac{a}{2c_L} \right)^{0.75} \alpha^3, \text{ 軸方向欠陥に対する曲げ応力への修正係数}$$

M_r^{cutoff} : S/σ_f , 座屈による限界曲げモーメントと許容応力の比

$$M_s: \frac{1}{1-y+\frac{y}{M_t}}, \text{ 軸方向表面欠陥に対するバルジング効果を表す係数}$$

$$M_t: \sqrt{1+0.317\lambda_a^2}, \text{ 軸方向貫通欠陥に対するバルジング効果を表す係数}$$

p : 設計圧力又は常用の圧力 (MPa)

R_o : 外半径 (mm)

$$S': \frac{0.6Et^*}{2R_o \left(1+0.004 \frac{E}{\sigma_{ys}}\right)}, \text{ 許容座屈限界 (N/mm}^2\text{)、ただし } t^* \text{ として内表面欠陥のときには } t_{-i}^*$$

を、外表面欠陥のときには t_{+o}^* を、それぞれ用いる。

$$t_{-i}^*: \left[1 - \frac{\sin \theta_{-i} \cos \theta_{-i} + \theta_{-i}}{\pi} \left\{ 1 + \frac{(1-\tau+y\tau)^4 - 1}{1-(1-\tau)^4} \right\} \right] t, \text{ 円周方向内表面欠陥を有する円筒の有効肉}$$

厚 (mm)

$$t_{+o}^*: \left[1 - \frac{\sin \theta_{+o} \cos \theta_{+o} + \theta_{+o}}{\pi} \frac{1-(1-y\tau)^4}{1-(1-\tau)^4} \right] t, \text{ 円周方向外表面欠陥を有する円筒の有効肉厚}$$

(mm)

$$y: \frac{a}{t}, \text{ 欠陥深さ比}$$

$$\alpha: \frac{a_{\text{eff}}}{t}, \text{ 相当欠陥深さ比}$$

$$\lambda_a: \frac{1.428c_L}{\sqrt{R_1 a}}, \text{ 軸方向表面欠陥に対するシェルパラメータ}$$

$$2\theta_{-i}: \frac{(1-\tau)\pi c_0}{(2-2\tau+y\tau)R_i}, \text{ 円周方向内表面欠陥角度 (rad)}$$

$$2\theta_{+o}: \frac{\pi c_0}{(2-y\tau)R_o}, \text{ 円周方向外表面欠陥角度 (rad)}$$

σ_{ys} : 設計温度における降伏応力 (N/mm²)

σ_{ys}^{min} : 規定最小降伏応力 (N/mm²)

σ_f : $\text{Min}(\sigma_{ys}^{\text{min}}/1.5, \sigma_{ys}/1.5)$, 許容応力 (N/mm²)

τ : $\frac{t}{R_o}$, 外半径に対する厚さの比

$$\psi_{b,i} : \begin{cases} \theta_{-i} - \frac{\pi}{2} & : \psi_{b,i} < \theta_{-i} - \frac{\pi}{2} \\ \frac{y\theta_{-i}}{2} \left(1 + \frac{p}{\sigma_f}\right) \frac{2-2\tau+y\tau}{2-\tau} : \psi_{b,i} \geq \theta_{-i} - \frac{\pi}{2} \end{cases}, \text{円周方向内表面欠陥を有する円筒にお}$$

ける曲げ応力のみが作用するときの圧縮領域までの角度 (rad)

$$\psi_{m,i} : \begin{cases} \theta_{-i} - \frac{\pi}{2} & : \psi_{m,i} < \theta_{-i} - \frac{\pi}{2} \\ \arccos \left[\frac{(1-\tau+y\tau)^3 - (1-\tau)^3}{2\{1-(1-\tau)^3\}} \sin \theta_{-i} \right] : \psi_{m,i} \geq \theta_{-i} - \frac{\pi}{2} \end{cases}, \text{円周方向内表面欠陥を有する円}$$

筒における引張り応力のみ作用するときの圧縮領域までの角度 (rad)

$$\psi_{b,o} : \begin{cases} \theta_{-o} - \frac{\pi}{2} & : \psi_{b,o} < \theta_{-o} - \frac{\pi}{2} \\ \frac{y\theta_{-o}(2-y\tau)}{2(2-\tau)} : \psi_{b,o} \geq \theta_{-o} - \frac{\pi}{2} \end{cases}, \text{円周方向外表面欠陥を有する円筒における曲げ応力}$$

のみが作用するときの圧縮領域までの角度 (rad)

$$\psi_{m,o} : \begin{cases} \theta_{-o} - \frac{\pi}{2} & : \psi_{m,o} < \theta_{-o} - \frac{\pi}{2} \\ \arccos \left[\frac{1-(1-y\tau)^3}{2\{1-(1-\tau)^3\}} \sin \theta_{-o} \right] : \psi_{m,o} \geq \theta_{-o} - \frac{\pi}{2} \end{cases}, \text{円周方向外表面欠陥を有する円筒にお}$$

ける引張り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

ここでは内表面減肉の評価（内面の減肉であって減肉に内圧の作用がある場合）を示す。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：内圧のみ作用する場合の限界圧力 p_i^L を求める。

$$p_{\cdot i}^L = \frac{(1-\alpha)\sigma_f}{\frac{4-6\tau+3\tau^2}{2\tau(2-\tau)} M_s + \alpha} \quad (1)$$

ステップ 3 : 曲げモーメントのみが作用する場合の限界曲げモーメント $M_{\cdot i}^L$ を求める。

$$M_{\cdot i}^L = \frac{\pi R_o^3 \{1-(1-\tau)^4\}}{4(A_{b\cdot i})_{p=0}} \sigma_f \quad (2)$$

ステップ 4 :

- 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。

$$p_r = p / p_{\cdot i}^L \quad (3)$$

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

$$M_r = |M| / M_{\cdot i}^L \quad (4)$$

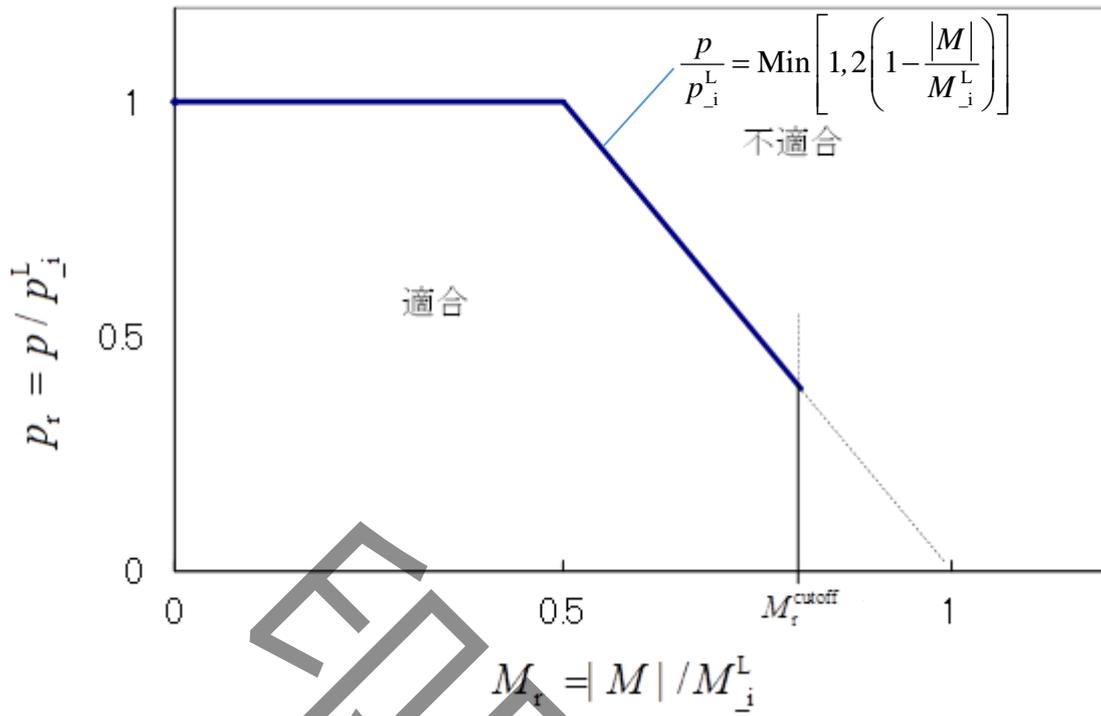
ステップ 5 : 座屈限界モーメント M_r^{cutoff} を求める。

M_r^{cutoff} は座屈による限界曲げモーメントと許容応力の比で下式により表される。

$$M_r^{\text{cutoff}} = \frac{0.6Et_{\cdot i}^*}{2R_o \left(1 + 0.004 \frac{E}{\sigma_{ys}}\right)} \sigma_f \quad (5)$$

ステップ 6 : 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-1 図 1** の 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のとする。



附属書 5A-1 図 1 p-M 線図 [1,2,4]

ここで、 $\frac{c_L}{t} \geq \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{\pi}{2 \arccos\left(\frac{\sin \theta_i}{2}\right) - \theta_i} - 1 \right\}$ (6)

を満たすときは、上記図式を用いる。なお、それ以外の場合には次式により評価する。

$$\frac{p}{\sigma_f} = \min \left[\frac{p_i^L}{\sigma_f}, \frac{\tau(2-\tau)}{(1-\tau)^2 A_{m,i}} \left(1 - \frac{|M|}{M_i^L} \right) \right] \quad (7)$$

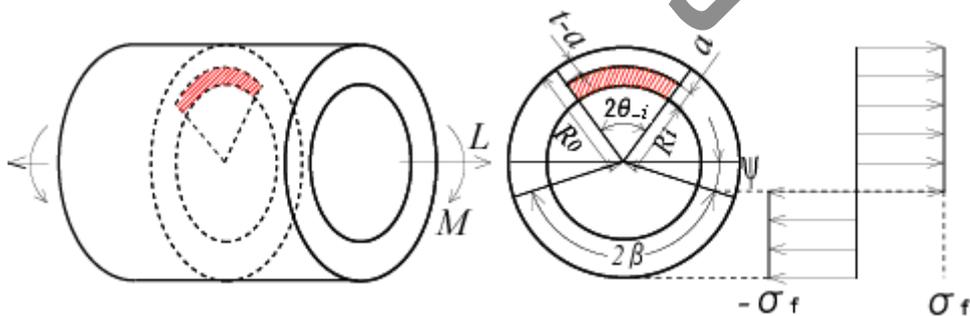
3. 外表面減肉の評価

外表面減肉を評価する場合には、2.における各評価式において添え字“*i*”が付されているパラメータをそれぞれ附属書 5A-1 表 1 に従い、“*o*”が付されているパラメータに置き換える。

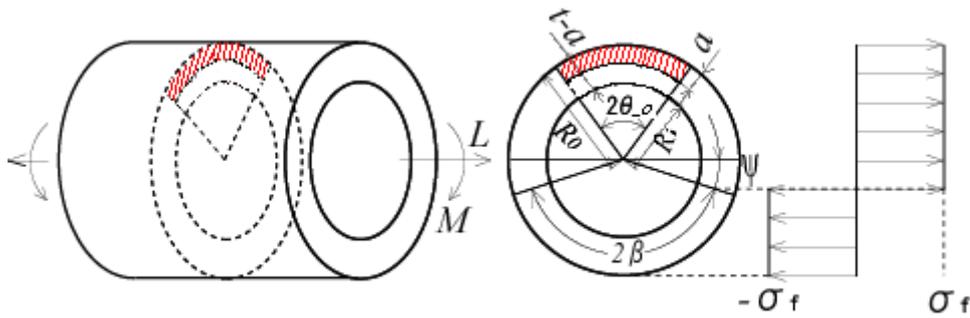
附属書 5A-1 表 1 外表面減肉と内表面減肉評価で使われるパラメータ [1, 2, 4]

	外表面減肉	内表面減肉
p^L	$p_{-o}^L = \frac{2\tau(2-\tau)}{4-6\tau+3\tau^2} \frac{1-\alpha}{M_s} \sigma_f$	$p_{-i}^L = \frac{(1-\alpha)\sigma_f}{\frac{4-6\tau+3\tau^2}{2\tau(2-\tau)} M_s + \alpha} = \frac{(1-\alpha)\sigma_f p_{-o}^L}{(1-\alpha)\sigma_f + \alpha p_{-o}^L}$
M^L	$M_{-o}^L = \frac{\pi R_o^3 \{1-(1-\tau)^4\}}{4A_{b_{-o}}} \sigma_f$	$M_{-i}^L = \frac{\pi R_o^3 \{1-(1-\tau)^4\}}{4(A_{b_{-i}})_{p=0}} \sigma_f \cong M_{-o}^L$
A_b	$A_{b_{-o}} = 2\{1-(1-\tau)^3\} \times [2\{1-(1-\tau)^3\} \cos \psi_{b_{-o}} + \{(1-y\tau)^3 - 1\} \sin \theta]^{-1}$	$A_{b_{-i}} = 2\{1-(1-\tau)^3\} \times [2\{1-(1-\tau)^3\} \cos \psi_{b_{-i}} + \{(1-\tau)^3 - (1-\tau+y\tau)^3\} \sin \theta]^{-1}$
A_m	$A_{m_{-o}} = \frac{\pi}{2\psi_{m_{-o}} - y\theta} \frac{2-y\tau}{2-\tau}$	$A_{m_{-i}} = \frac{\pi}{2\psi_{m_{-i}} - y\theta} \frac{2-2\tau+y\tau}{2-\tau}$
ψ_b	$\psi_{b_{-o}} = \frac{y\theta(2-y\tau)}{2(2-\tau)}$	$\psi_{b_{-i}} = \frac{y\theta}{2} \left(1 + \frac{p}{\sigma_f}\right) \frac{2-2\tau+y\tau}{2-\tau}$
ψ_m	$\psi_{m_{-o}} = \arccos\left[\frac{1-(1-y\tau)^3}{2\{1-(1-\tau)^3\}} \sin \theta_o\right]; \psi_{m_{-o}} \geq \theta_o - \frac{\pi}{2}$	$\psi_{m_{-i}} = \arccos\left[\frac{(1-\tau+y\tau)^3 - (1-\tau)^3}{2\{1-(1-\tau)^3\}} \sin \theta_o\right]; \psi_{m_{-i}} \geq \theta_i - \frac{\pi}{2}$
θ	$\theta_{-o} = \frac{\pi c\theta}{2(2-y\tau)R_o}$	$\theta_{-i} = \frac{(1-\tau)\pi c\theta}{2(2-2\tau+y\tau)R_i} = \frac{(1-\tau)(2-y\tau)}{(2-2\tau+y\tau)} \frac{R_o}{R_i} \theta_{-o}$
t^*	$t_{-o}^* = \left[1 - \frac{\sin \theta \cos \theta + \theta}{\pi} \frac{1-(1-y\tau)^4}{1-(1-\tau)^4}\right] t$	$t_{-i}^* = \left[1 - \frac{\sin \theta \cos \theta + \theta}{\pi} \left\{1 + \frac{(1-\tau+y\tau)^4 - 1}{1-(1-\tau)^4}\right\}\right] t$

添字 $_{-i}$: 内表面欠陥に対するパラメータ, 添字 $_{-o}$: 外表面欠陥に対するパラメータ



附属書 5A-1 図 2 内表面減肉の円周方向評価 [4]



附属書 5A-1 図 3 外表面減肉の円周方向評価^[1, 2]

4. より詳細な検討を行う場合の評価方法^[1, 2, 4]

2.及び 3.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、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。

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

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。

以下に、内面の減肉を評価する場合の参照応力解と外面の減肉を評価するための参照応力解をそれぞれ示す。

a) 内面の減肉であって減肉に内圧の作用がある場合

$$\sigma_{\text{ref},\theta} = \frac{\frac{1}{3}g\sigma_b + \alpha \frac{p}{\sigma_f} M_s \sigma_\theta + \sqrt{\left(\frac{1}{3}g\sigma_b + \alpha \frac{p}{\sigma_f} M_s \sigma_\theta\right)^2 + \left\{(1-\alpha)^2 - \alpha^2 \frac{p^2}{\sigma_f^2}\right\} M_s^2 \sigma_\theta^2}}{(1-\alpha)^2 - \alpha^2 \frac{p^2}{\sigma_f^2}} \quad (9)$$

$$\text{ただし、} \sigma_\theta = \frac{4-6\tau+3\tau^2}{2\tau(2-\tau)} p, \quad \sigma_b = \frac{1}{2} p$$

$$\sigma_{\text{ref},z} = A_{m,i} \frac{(1-\tau)^2}{\tau(2-\tau)} p + \left| \frac{A_{m,i}}{\pi R_o^2 \tau(2-\tau)} L + \frac{4A_{b,i}}{\pi R_o^3 \{1-(1-\tau)^4\}} M \right| \quad (10)$$

ただし、 $\psi_{m,i} \geq \psi_{b,i}$

L :外部軸力 (N)

その他の記号については**附属書 5A-1 表 1**を参照のこと。

b) 外面の減肉の場合

$$\sigma_{\text{ref},\theta} = \frac{\frac{1}{3} g \sigma_b + \sqrt{\left(\frac{1}{3} g \sigma_b\right)^2 + (1-\alpha)^2 M_s^2 \sigma_0^2}}{(1-\alpha)^2} \quad (11)$$

ただし、 $\sigma_0 = \frac{4-6\tau+3\tau^2}{2\tau(2-\tau)} p$ 、 $\sigma_b = \frac{1}{2} p$

$$\sigma_{\text{ref},z} = A_{m,o} \frac{(1-\tau)^2}{\tau(2-\tau)} p + \left| \frac{A_{m,o}}{\pi R_o^2 \tau(2-\tau)} L + \frac{4A_{b,o}}{\pi R_o^3 \{1-(1-\tau)^4\}} M \right| \quad (12)$$

ただし、 $\psi_{m,o} \geq \psi_{b,o}$

L :外部軸力 (N)

その他の記号については**附属書 5A-1 表 1**を参照のこと。

<参考文献>

- [1] Konosu, S., and Mukaimachi, N., 2008, “Plastic Collapse Assessment Procedure for Vessel With Local Thin Area Simultaneously Subjected to Internal Pressure and External Bending Moment”, ASME JPVT Vol.130, pp. 011207
- [2] Konosu, S., Kano, M., Mukaimachi, N., Komura, H., and Takada, H., 2009, “Plastic Collapse Load for Vessel With External Flaw Simultaneously Subjected to Internal Pressure and External Bending Moment—Experimental and FEA Results,” ASME J. Pressure Vessel Technol., 131, p. 021206.
- [3] Mukaimachi, N., and Konosu, S., 2009, “Plastic Collapse Assessment Procedure for Vessels With Deep Local Thin Area Subjected to Internal Pressure,” Nucl. Eng. Des., 239, pp. 1171–1179.
- [4] Konosu, S., and Oyamada, K., 2007, “Development of Simplified Plastic Collapse Assessment Procedure for Vessel With Internal Surface Flaw,” ASME PVP2007-26437.

- [5] K. Oyamada, S. Konosu, H. Miyata and T. Ohno, 2010, “Proposal of acceptance criterion for plastic collapse assessment rule on local metal loss”, Strength, Fracture and Complexity, Vol. 6, pp.115-127.

印刷不可