

附属書 5A-5 減肉部を有するエルボの p-M 法による評価：内圧及び面外 曲げモーメントが作用する場合（規定）

1. 記号の意味^[1]

附属書 5A-5 で用いる記号の意味は、附属書 5A による他、次による。

$$A_b^o: \frac{2\{1-(1-\tau)^3\}}{2\{1-(1-\tau)^3\}\cos\psi_b + \{(1-y\tau)^3 - 1\}\sin\theta}, \text{ 参照応力における曲げ応力の増分の係数}$$

$$A_m^o: \frac{1}{\frac{2\psi_m}{\pi} - \frac{y\theta(2-y\tau)}{\pi(2-\tau)}}, \text{ 参照応力における膜応力の増分の係数}$$

$$h: tR/r_m^2, \text{ 曲げ特性値}$$

$M_{_o}$: 面外曲げモーメント (N・mm)

$$M_s: \frac{1}{1 - \frac{a}{t} + \frac{a}{t} \left(\frac{1}{M_t(\lambda_a)} \right)}, \text{ 表面欠陥に関するバルジング効果を表す係数}$$

$M_t(\lambda_a)$: $t = a$ として計算された貫通欠陥に関するバルジング効果を表す係数であって、

$M_t(\lambda)$ を $\lambda = \lambda_a$ として計算した値

$$M_t(\lambda): \sqrt{1 + 0.317\lambda^2}, \text{ 貫通欠陥に関するバルジング効果を表す係数}$$

m_{θ_o} : 面外曲げモーメントに関する円周方向応力集中係数の係数

m_{z_o} : 面外曲げモーメントに関する軸方向応力集中係数の係数

P : 設計圧力又は常用の圧力 (MPa)

R : Crown (クラウン) における曲げ半径 (mm)

R_o : エルボの円筒の外半径 (mm)

R_1 : エルボの円筒の内半径 (mm)

r_m : エルボの円筒の平均半径 (mm)

y : a/t , 板厚に対する減肉深さの比

α : $\frac{\pi a c_L}{t(\pi c_L + 4t)}$, 相当欠陥深さ比

λ : $\frac{1.818 c_L}{\sqrt{R_1 t}}$, 貫通欠陥に関するシェルパラメータ

λ_a : $\frac{1.428 c_L}{\sqrt{R_1 a}}$, $t=a$ として計算された表面欠陥に関するシェルパラメータ

ω : エルボ中央部からの角度 (rad)

θ : $\pi c_0 / \{2R_o(2 - y\tau)\}$, 外面減肉の円周方向の拡がりの角度の1/2 (rad)

τ : t/R_o , エルボの円筒断面における外半径と厚さの比

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

ξ : エルボの管断面におけるクラウンからの角度 (rad)

ψ_b : $\frac{y\theta(2 - y\tau)}{2(2 - \tau)}$, 軸力が0のときの曲げ応力に対する圧縮領域の角度 (rad)

ψ_m : $\arccos \left[\frac{1 - (1 - y\tau)^3}{2\{1 - (1 - \tau)^3\}} \sin \theta \right]$, 曲げモーメントが0のときの膜応力に対する圧縮領

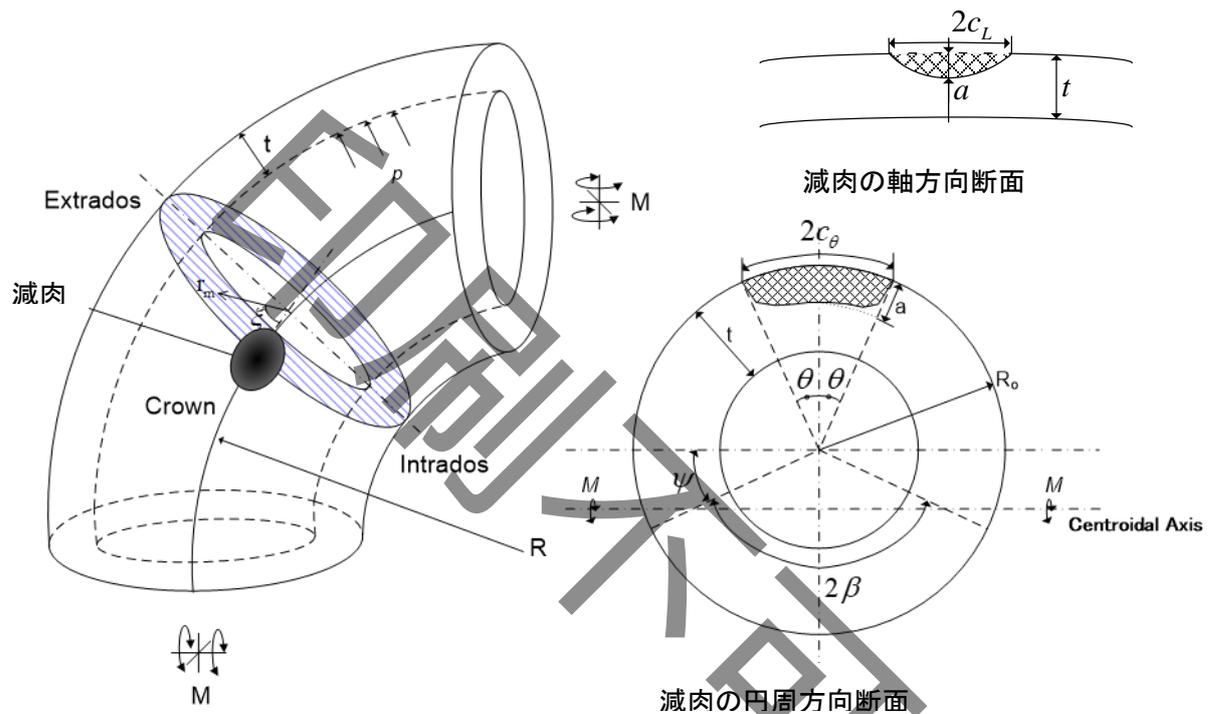
域の角度 (rad)

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。なお、この評価はCrown（附属書5A-5図1を参照）に減肉があるときに適用可能である。

ステップ1：評価する部材の材料特性（材料の降伏応力）を決定する。

ステップ2：評価するエルボと減肉部の寸法を決定する（附属書5A-5図1を参照）。



附属書 5A-5 図 1 面外曲げモーメントが作用するエルボの部位の名称及び座標系並びに減肉部の形状寸法¹⁾

ステップ3：減肉部を有するエルボの限界圧力 p^L を求める。

$$\begin{aligned}
 p^L &= \text{Min}(p_{\theta z}^L, p_{zr}^L, p_{r\theta}^L) \\
 &= \text{Min}\left(\frac{1-\alpha}{M_s} \frac{2t}{r_m} \sigma_f, \frac{2}{A_m^o} \frac{t}{r_m} \sigma_f, \frac{1-\alpha}{M_s} \frac{t}{r_m} \sigma_f\right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

ステップ4：減肉部を有するエルボの限界曲げモーメント M_c^L を求める。ここでは、応力集中係

数の係数 m_{θ_o} 及び m_{z_o} について表 2 の値を採用することとし、それぞれ 0.8 とする。

$$M_{-c}^L = \text{Min} \left\{ M_{\theta_c}^L, M_{z_c}^L (= M_{\theta_c}^L), M_{r\theta}^L \right\}$$

$$= \text{Min} \left\{ \frac{1}{A_b^o} \frac{\pi r_m^2 t}{m_{z_o} h^{-2/3}} \sigma_f, \frac{1}{q} \frac{(1-\alpha)^2}{g} \frac{\pi r_m^2 t}{m_{\theta_o} h^{-2/3}} \sigma_f \right\} \quad (2)$$

ここで q の値は**附属書 5A-5 表 1** により求める。

附属書 5A-5 表 1 変換係数 q の値^[1]

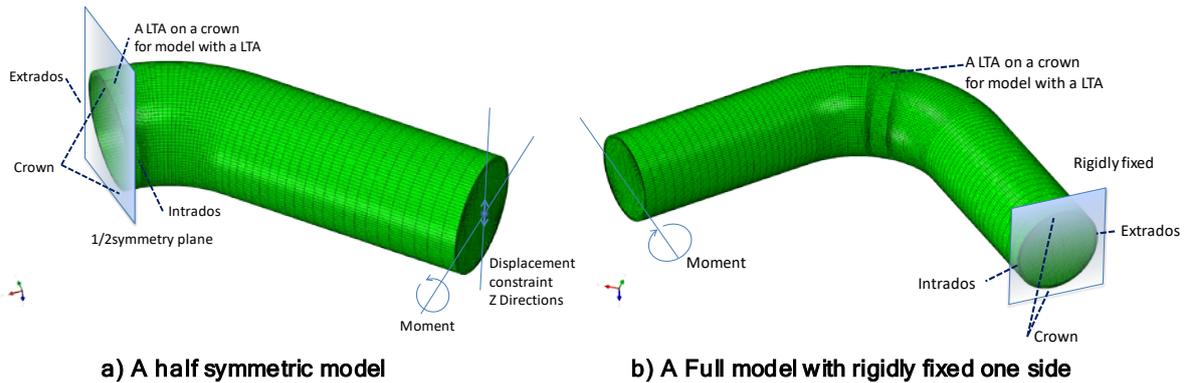
Ratio of local bending stress component to membrane stress component	Value of q
$0 \leq g\sigma_b / \{M_s \sigma_m (1-\alpha)\} \leq 4$	0.5
$4 < g\sigma_b / \{M_s \sigma_m (1-\alpha)\} \leq 6$	0.55
$6 < g\sigma_b / \{M_s \sigma_m (1-\alpha)\} \leq 13$	0.6
$13 < g\sigma_b / \{M_s \sigma_m (1-\alpha)\} \leq 24$	0.63
$24 < g\sigma_b / \{M_s \sigma_m (1-\alpha)\}$	2/3

ここで、 $\sigma_b = \frac{m_{\theta_o} h^{-2/3}}{\pi r_m^2 t} M_{-o}$ 、 $\sigma_m = \frac{r_m}{t} p$ である。

附属書 5A-5 表 2 応力集中係数の係数 m_{θ_o} 及び m_{z_o} ^[1]

$h(= tR / r_m^2) = 0.26$	m_{θ_o}	m_{z_o}
1/2 symmetric condition	1.7	1.6
a side rigidly fixed condition	0.9	0.9

注) 境界条件については**附属書 5A-5 図 2** を参照。



附属書 5A-5 図 2 面外曲げモーメントが作用する減肉を有するエルボの境界条件^[1]

ステップ 5 :

- 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。

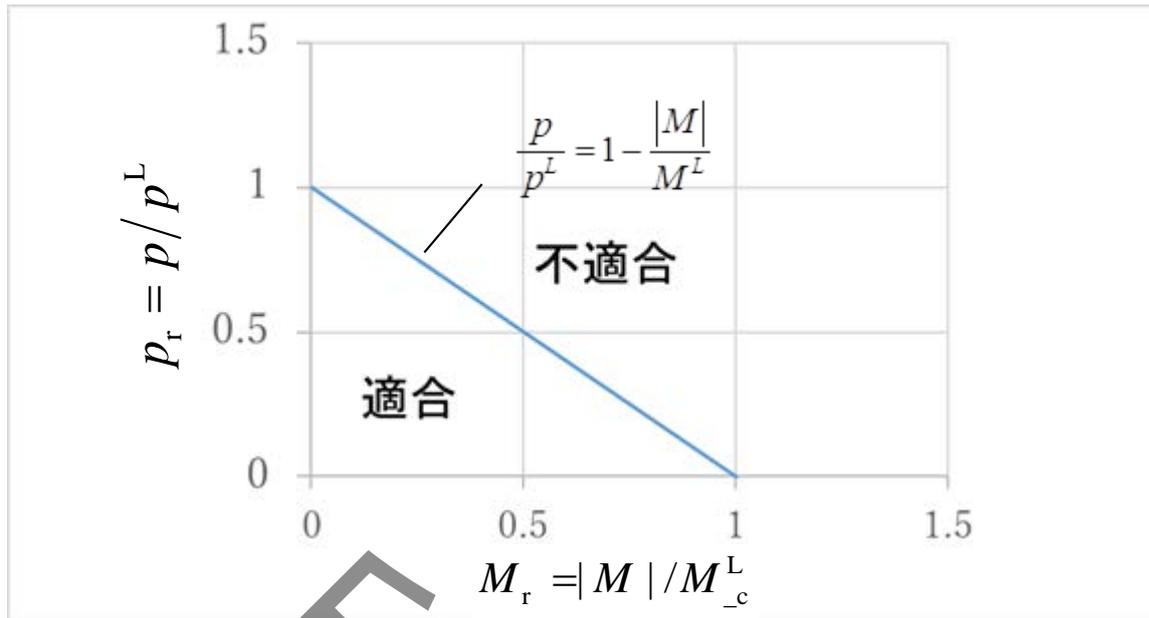
$$p_r = p / p^L \quad (3)$$

- 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。

$$M_r = |M| / M_c^L \quad (4)$$

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-5 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のとする。

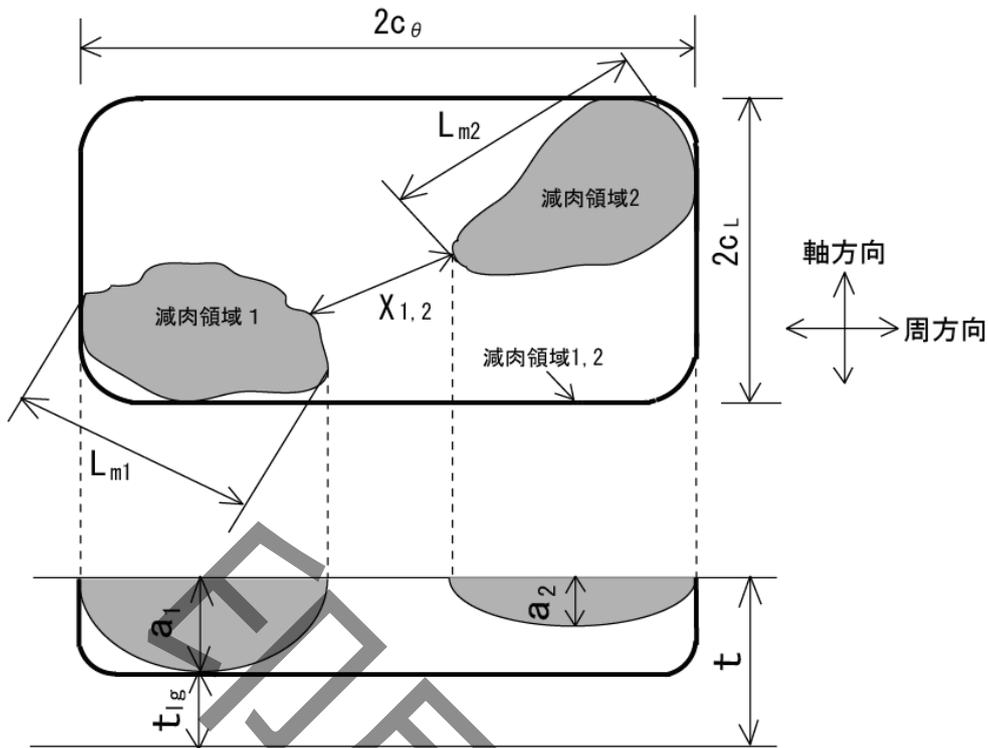


附属書 5A-5 図 3 減肉を有するエルボに内圧と外部面外曲げモーメントが作用する場合の p-M 線図^[1]

3. 近接する複数減肉に対する取り扱い

近接する複数減肉が存在する場合には、減肉の最大長さとそれら減肉の最小距離を測定して、次式の条件を満たすときは附属書5A-5図4に示すようにその複数減肉を合体した単一減肉として扱う。次式を満たさない場合にはそれぞれの減肉を別個に評価する。

$$X_{1,2} \leq L_{\text{mavg}} = \frac{L_{m1} + L_{m2}}{2}$$



附属書 5A-5 図 4 複数近接欠陥の取り扱い

4. Crown 以外に減肉がある場合^[1]

内圧及び面外曲げモーメントが作用する減肉を有するエルボの参照応力は、Crown 近傍、Intrados 近傍又は Extrados 近傍の部位により異なり、塑性崩壊限界を正確に算定するためには、それぞれの場合にトレスカの降伏条件により、Plane (θz)、Plane (zr) 及び Plane ($r\theta$) のそれぞれの面について検討する必要がある。しかしながら、実際には内圧は限界圧力に対してそれほど大きくないことが一般的であるため、面外曲げモーメントが作用する場合には Crown に減肉があるとして評価することは安全側となる。

<参考文献>

[1] Oyamada, K., Konosu, S. and Ohno, T. “Plastic collapse assessment procedure in p-M Diagram method for pipe bends with a local thin area under combined pressure and out-of-plane bending moment”, ASME PVP2012-78207