

附属書 5A-4 減肉部を有するエルボの p-M 法による評価：内圧及び面内 曲げモーメントが作用する場合（規定）

1. 記号の意味

附属書 5A-4 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 : $\frac{2\{1-(1-\tau)^3\}}{2\{1-(1-\tau)^3\}\cos\psi_b + \{(1-y\tau)^3 - 1\}\sin\theta}$, 参照応力における曲げ応力の増分の係数

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

h : tR/r_m^2 , 曲げ特性値

M_s : $\frac{1}{1 - \frac{a}{t} + \frac{a}{t} \left(\frac{1}{M_t(\lambda_a)} \right)}$, 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

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

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

λ_a : $\frac{1.428c_L}{\sqrt{R_i a}}$, $t=a$ 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

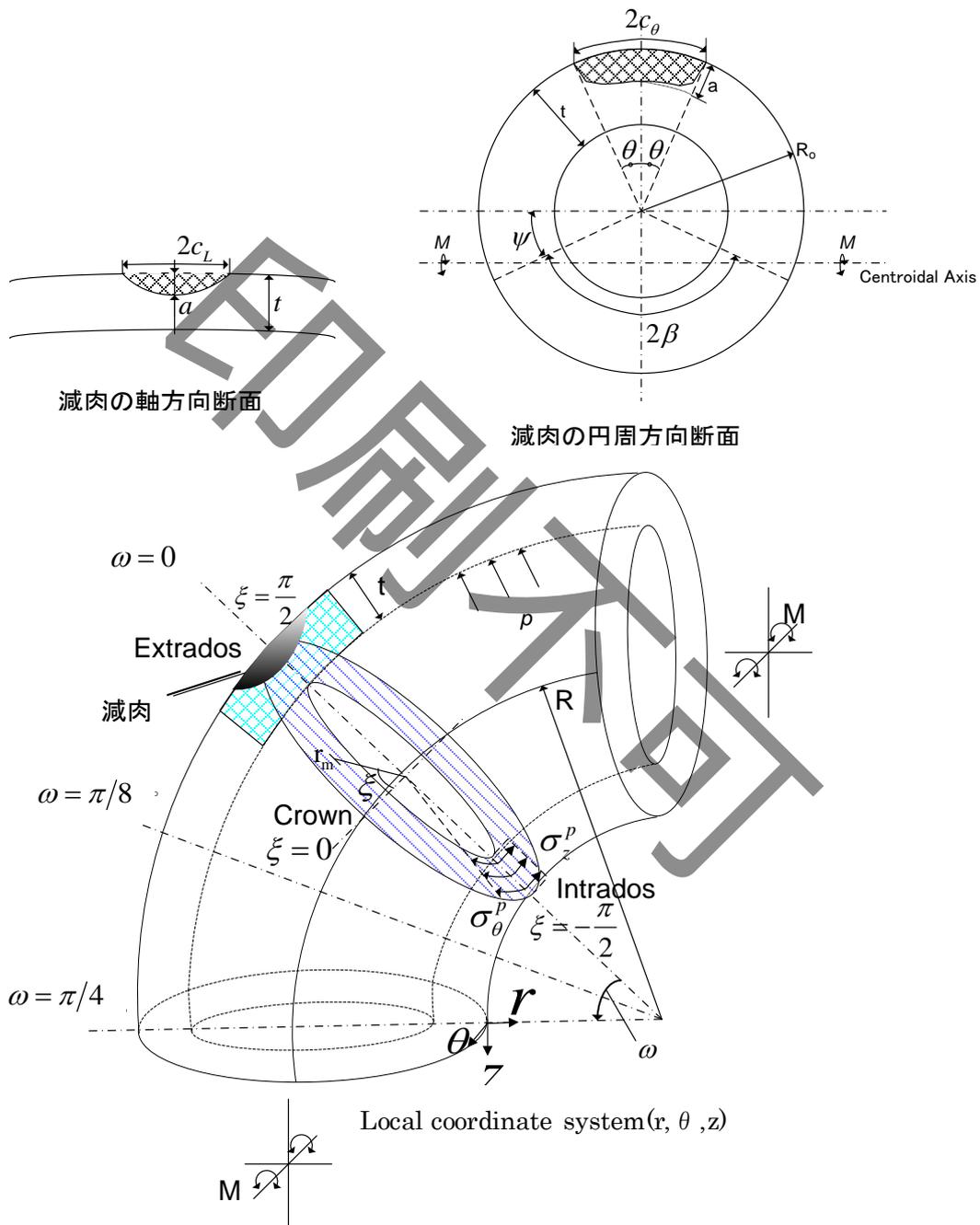
域の角度 (rad)

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。

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-4図 1 を参照)。



附属書 5A-4 図 1 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 (Extrados に減肉がある場合) □

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。

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

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 及び m_z について附属書 5A-4 表 2 の Max の値を採用することとし、それぞれ 0.8 とする。

$$\begin{aligned}
 M_{-c}^L &= \text{Min} \left\{ M_{\theta z_c}^L, M_{zr_c}^L (= M_{\theta z_c}^L), M_{r\theta}^L \right\} \\
 &= \text{Min} \left\{ \frac{1}{A_b^o} \frac{\pi r_m^2 t}{m_z h^{-2/3}} \sigma_f, \frac{1}{q'''} \frac{(1-\alpha)^2}{g} \frac{\pi r_m^2 t}{m_\theta h^{-2/3}} \sigma_f \right\}
 \end{aligned} \tag{2}$$

ここで q''' の値は附属書 5A-4 表 1 により求める。

附属書 5A-4 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、 $\sigma_b = \frac{m_\theta h^{-2/3}}{\pi r_m^2 t} M$ 、 $\sigma_m = \frac{2R+r_m \sin \xi}{2(R+r_m \sin \xi)} \frac{r_m p}{t}$ である。

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。

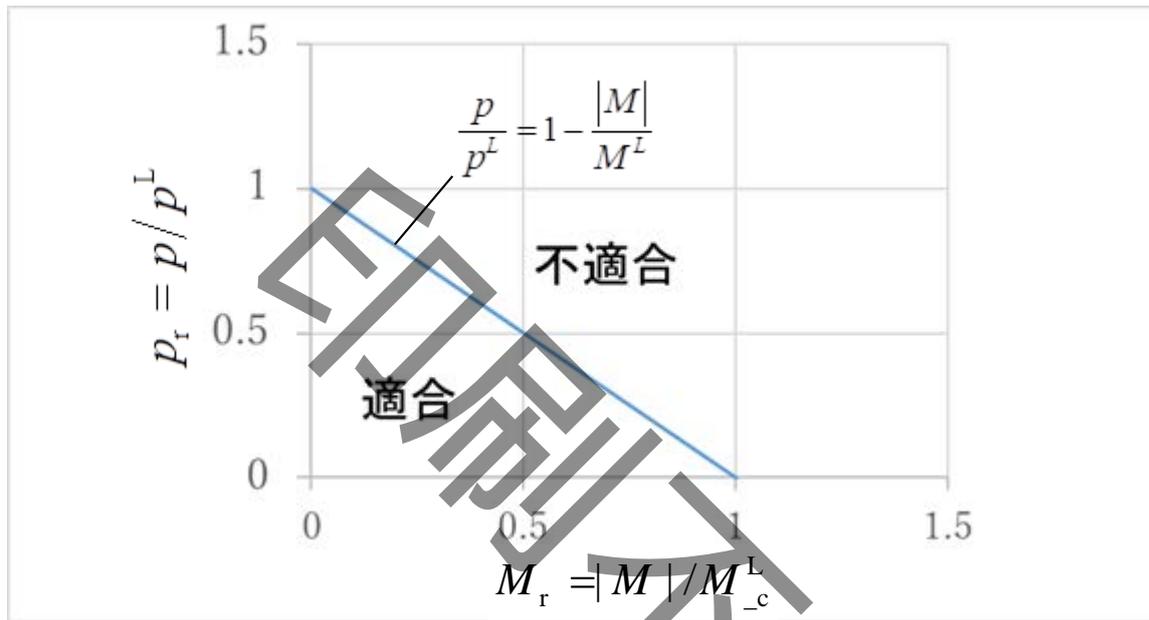
$$p_r = p / p^L$$

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。

$$M_r = |M| / M_{-c}^L$$

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-4 図 2 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。

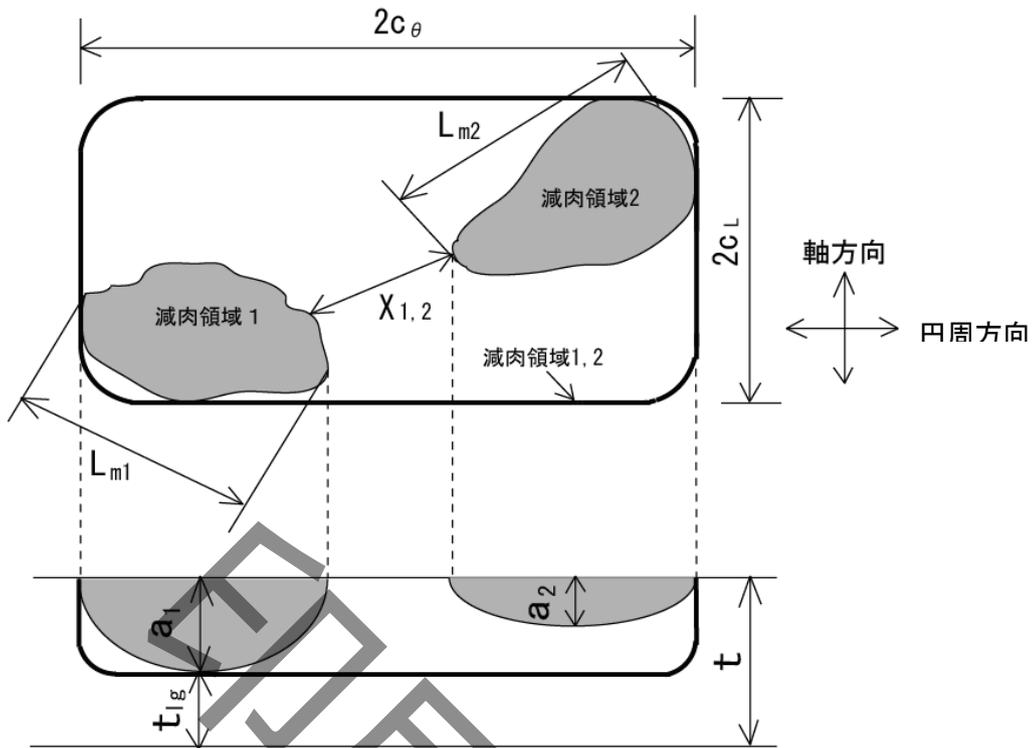


附属書 5A-4 図 2 減肉を有するエルボに内圧と外部面内曲げモーメントが作用する場合の p-M 線図 [1]

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-4 図 3 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-4 図 3 複数近接欠陥の取り扱い

4. より詳細な検討を行う場合の評価方法^[1]

内圧及び面内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、Intrados 近傍又は Extrados 近傍を除いた部位と、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。

2.の評価においては、簡易にするため、エルボ上の減肉の位置とは関係なく、安全側の解を与える塑性崩壊限界の式と係数を用いている。

ここでは、より正確な評価を行うための評価式を示す。

$$\frac{p}{p^L} = 1 - \frac{|M|}{M_{-c}^L} : \text{Intrados 近傍又は Extrados 近傍以外の部位}$$

$$\frac{p}{p^L} = 1 - \frac{|M|}{M_{-ie}^L} : \text{Intrados 近傍又は Extrados 近傍}$$

ここで、

p^L : Plane(θz)、Plane(zr) 及び Plane($r\theta$)に関する塑性崩壊圧力の中で最小値であり、次

式により与えられる:

$$p^L = \text{Min}(p_{\theta z}^L, p_{zr}^L, p_{r\theta}^L)$$

$$= \text{Min}\left(\frac{1-\alpha}{M_s} \frac{2(R+r_m \sin \xi)}{R} \frac{t}{r_m} \sigma_f, \frac{2}{A_m^o} \frac{t}{r_m} \sigma_f, \frac{1-\alpha}{M_s} \frac{2(R+r_m \sin \xi)}{2R+r_m \sin \xi} \frac{t}{r_m} \sigma_f\right) \quad (3)$$

M_{-c}^L : Intrados の近傍又は Extrados の近傍以外の部位での, Plane(θz), Plane(zr) 及び Plane($r\theta$) に関する塑性崩壊曲げモーメントの中で最小値であり, 次式により与えられる:

$$M_{-c}^L = \text{Min}\{M_{\theta z-c}^L, M_{zr-c}^L (= M_{\theta z-c}^L), M_{r\theta}^L\}$$

$$= \text{Min}\left\{\frac{1}{A_b^o} \frac{\pi r_m^2 t}{m_z h^{-2/3}} \sigma_f, \frac{1}{q'''} \frac{(1-\alpha)^2}{g} \frac{\pi r_m^2 t}{m_\theta h^{-2/3}} \sigma_f\right\} \quad (4)$$

M_{-ie}^L : Intrados の近傍及び Extrados の近傍での, Plane(θz), Plane(zr) 及び Plane($r\theta$) に関する塑性崩壊曲げモーメントの中で最小値であり, 次式により与えられる:

$$M_{-ie}^L = \text{Min}\{M_{\theta z-ie}^L, M_{zr-ie}^L, M_{r\theta}^L\}$$

$$= \text{Min}\left\{\frac{1}{q'A_b^o} \frac{\pi r_m^2 t}{m_z h^{-2/3}} \sigma_f, \frac{1}{q''A_b^o} \frac{\pi r_m^2 t}{m_z h^{-2/3}} \sigma_f, \frac{1}{q'''} \frac{(1-\alpha)^2}{g} \frac{\pi r_m^2 t}{m_\theta h^{-2/3}} \sigma_f\right\} \quad (5)$$

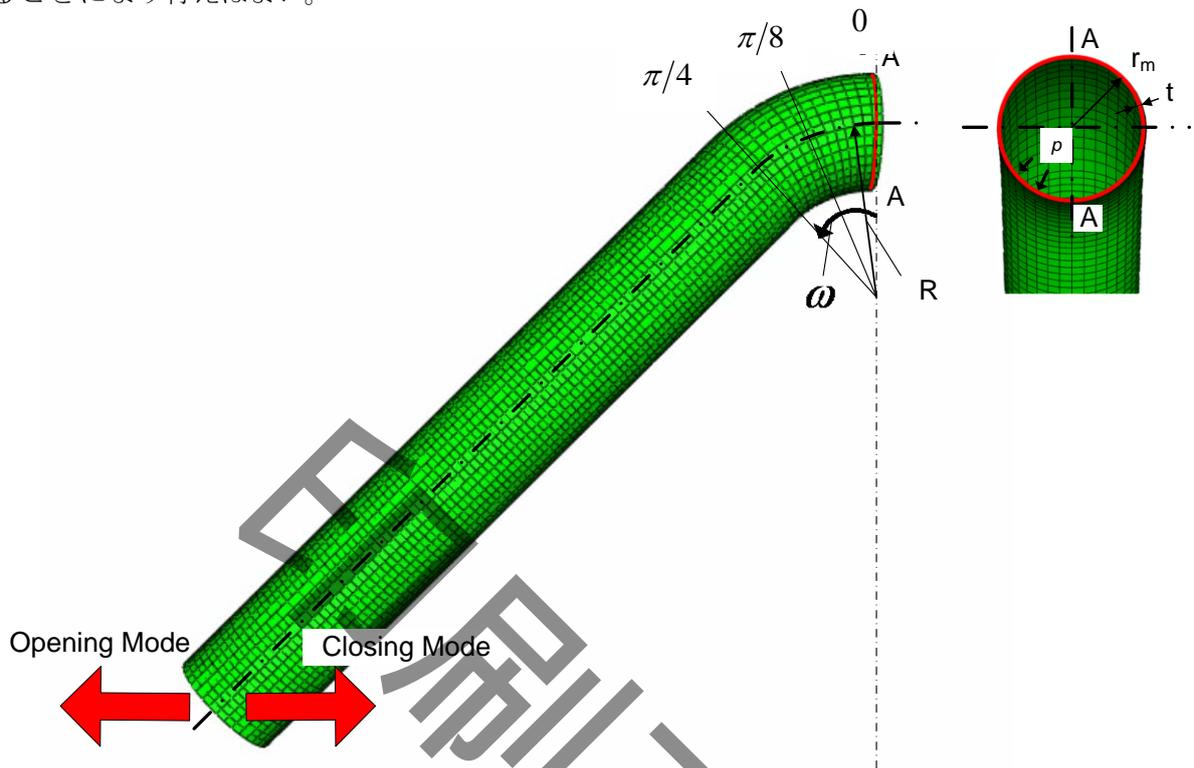
q' は附属書 5A-4 表 1 において $q''' = q'$ として $g\sigma_b / M_s\sigma_m(1-\alpha)$ を σ_b / σ_m に置き換えることにより求める。

q'' は附属書 5A-4 表 1 において $q''' = q''$ として $g\sigma_b / M_s\sigma_m(1-\alpha)$ を $A_b^o\sigma_b / A_m^o\sigma_m$ に置き換えることにより求める。

応力集中係数の係数 m_θ 又は m_z は, エルボに作用する曲げモーメントのモードにより (附属書 5A-4 図 4 参照), また評価する部位によって異なるため, 附属書 5A-4 表 2 から適切な値を求める。

なお, 圧力設備のエルボの特徴として, 評価を行う減肉部の位置によっては, その減肉の位置が最も塑性崩壊し易い箇所であるとは限らないため, エルボの減肉部の評価に加えて, 減肉のない部位についても評価を行う必要がある。例としては, もし評価する減肉部が Intrados に存在するときには, 減肉のない Crown についても評価を行う必要がある。減肉のない部位を評価するにあ

っては、 p^L 、 M_{-c}^L 又は M_{-ic}^L の式において A_m^0 、 A_b^0 、 M_s 、 $(1-\alpha)$ 及び g をそれぞれ1にすることにより行えばよい。



附属書 5A-4 図 4 エルボに作用する外部面内曲げモーメントの作用する方向とエルボの変形モード Ⅲ

附属書 5A-4 表 2 エルボに作用する外部面内曲げモーメントと変形モードによる応力集中係数の係数の値^[1]

a) Closing Mode

Location	m_{θ}	m_z
Extrados	0.4	0.15
Crown	0.8	0.4
Intrados	0.6	0.4
Max (between crown and extrados/intrados)	0.8	0.8

b) Opening Mode

Location	m_{θ}	m_z
Extrados	0.4	0.2
Crown	0.7	0.4
Intrados	0.5	0.5
Max (between crown and extrados/intrados)	0.75	0.75

< 参考文献 >

- [1] Oyamada, K., Konosu, S. and Ohno, T., 2012, "Development of a plastic collapse assessment procedure in the p-M diagram method for pipe bends with a local thin area under combined internal pressure and external in-plane bending moment," Nuclear Engineering Design, 247, pp.42-57.