繊維補強鋼製円筒殻の座屈性状

豊橋技術科学大学	学生会員	○柳田	将之
司	正会員	山田	聖志
同		Krishna Kumar B	hetwal

1. 目的

貯蔵容器のような円筒状構造物は、腐食を防ぐために防食 材を用いるが、本研究では、耐腐食性に加え構造材としても 期待できる繊維補強高分子(Fiber Reinforced Polymer)により、 鋼製円筒殻を補強した場合について、座屈検討を行う.軸圧 縮を受ける円筒殻は初期不整による座屈耐力の低下が大きい ことで知られる.本研究では、線形座屈解析、RS 解析¹⁾、幾 何学的非線形解析を平行して実施し、繊維補強鋼製円筒殻へ の適用性を明らかにするとともに、座屈性状と補強効果を明 らかにする.なお、本解析では鋼と FRP は剛に接着されてい ると考え、界面でのシアラグは考慮していない.

2. 座屈解析法

図1に、軸圧縮荷重*P*を受ける長さ *L*,半径*R*,殻厚*t*の円筒殻を考える. 境界条件は、変位で表される式(1)を用 いる.



$$w = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\partial u}{\partial x} = v = 0 \text{ at } x = 0, L \quad (1)$$

線形座屈解析では,変位関数は式(2)を用いる.

$$u = u_{i,j} \cos(iy/R) \cos(j\pi x/L)$$

$$v = v_{i,j} \sin(iy/R) \sin(j\pi x/L)$$

$$w = w_{i,j} \cos(iy/R) \sin(j\pi x/L)$$
(2)

歪変位関係式は DMV 型,構成則は式(3)を用いる.

$$\begin{pmatrix} n_{x} \\ n_{y} \\ n_{xy} \\ m_{x} \\ m_{y} \\ m_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{y} \\ \varepsilon_{zxy} \\ \kappa_{x} \\ \kappa_{y} \\ 2\kappa_{xy} \end{bmatrix}$$
(3)

ここに、 ϵ_{x} , ϵ_{y} , ϵ_{xy} は面内歪, m_{x} , m_{y} は合応力としての曲げモ ーメント, m_{xy} は捩りモーメント, κ_{x} , κ_{y} , κ_{xy} は曲げ歪であり, A_{ij} , B_{ij} , D_{ij} (ij=1,2,6)は, それぞれ面内, 面内と曲げ, 曲げの 剛性である. 座屈前平衡状態は $n_{x}^{E} = -P/2\pi R$, $n_{y}^{E} = n_{xy}^{E} = 0$ と する. 式(4)の解として, 線形座屈値 P_{c} が得られる.

$$\delta \left[U_{2mm} + 2U_{2mb} + U_{2bb} + P_c \left\{ \partial \left(V_{2m}^x + V_{2m}^y \right) / \partial P \right\} \right] = 0 \quad (4)$$

ここに、 U_{2mm} , U_{2bb} , U_{2mb} , V_{2m}^{x} , V_{2m}^{y} は、それぞれ面内、曲げ、 面内と曲げ、線形化された軸方向及び周方向面内歪エネルギ 成分である。

非線形座屈解析では、式(2)の線形和とした変位関数を採用し、初期不整は $w^{0} = w^{0}_{b,l} \cos(by/R) \sin(\pi x/L)$ とした^{1),2)}.

3. 解析モデル

補強材の繊維方向は1軸と定義し,繊 維配向角θを図1の殻座標系 x 軸から y 軸に向かって, x 軸と1 軸のなす角度と 定義する.補強材の材料定数は,複合則 に半経験的パラメータξを導入した式(5) の Halpin-Tsai-Equation³⁾により求める.





$$E_{1} = E_{F}V_{F} + E_{P}V_{P}, \quad E_{2} = \frac{1 + \xi\eta_{2}V_{F}}{1 - \eta_{2}V_{F}}, \quad G_{12} = \frac{1 + \xi\eta_{12}V_{F}}{1 - \eta_{12}V_{F}},$$

$$\mu_{12} = \mu_{F}V_{F} + \mu_{P}V_{P}, \quad \mu_{21} = E_{2}\mu_{12}/E_{1}$$

$$\eta_{2} = \frac{E_{F}/E_{P} - 1}{E_{F}/E_{P} + \xi}, \quad \eta_{12} = \frac{G_{F}/G_{P} - 1}{G_{F}/G_{P} + \xi}$$
(5)

ただし、Eは縦弾性定数、Gはせん断弾性定数、 μ はポアソン 比、Vは体積含有率であり、添字のPは樹脂、Fは繊維を表 す.本研究では E_2 、 G_{12} を求めるときは文献 3 を参考にそれ ぞれξ=2、 ξ =1+40 V_F^{10} とした、鋼材(添字 S)を含めた材料定数 を次式に示す。

$$E_{\rm s} = 205 \text{GPa} , \ \mu_{\rm s} = 0.3 E_{\rm F} = 72 \text{GPa} , \ \mu_{\rm F} = 0.22, \ V_{\rm F} = 0.5 E_{\rm p} = 3.5 \text{GPa} , \ \mu_{\rm p} = 0.34, \ V_{\rm p} = 0.5$$
(6)

1-2 座標系の構成則から,円筒殻座標へ座標変換し,古典積 層理論を用いることで,式(3)が得られる. FRP tr/2

鋼の厚さ *ts*=4mm の円筒殻を図 4 のような両面から補強する場合を考える. *t* は補強厚さで,それぞれの解析では 0,1,2,4mm を対象とする.形状は,文献 4



から,長径比 L/R=0.512,径厚比 R/ts =405 とする.

4. 座屈性状と補強効果

図 5,7 に $t_{f=4}$ mm, $\theta = 0^{\circ}$ と $t_{f=0}$ mm の座屈荷重スペクトルを示す. 〇△□などは、それぞれの正規化初期不整振幅 $w_{b,1}^{0}/t_{s}$ に対す る非線形座屈値 P_{m}^{N} である. 図 5 から、 P_{m}^{N} の下限は RS 値 P_{m}^{*}

キーワード 円筒殻,座屈, Reduced Stiffness 法, Fiber Reinforced Polymer 連絡先 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1 豊橋技術科学大学 Tel.0432-44-6849

によく一致しており、繊維補強円筒殻においても P_{cm}^{*} は座屈 下限を評価できると言える.図 6,8 に t_{f} =4mm, θ =0°と t_{f} =0mm の荷重変位曲線と増分変位モードを示す. $w_{b,1}^{0}/t_{s}$ =1.00 では、 既往の研究⁴⁾と同様に初期不整振幅が大きい殻では、軸方向 に 1 波のモードが卓越することが確認できる.一方、初期不 整振幅が比較的小さい $w_{b,1}^{0}/t_{s}$ =0.05 では、増分変位モードが 異なる.図9 に $w_{b,1}^{0}/t_{s}$ =0.05 の増分変位モードと軸方向波形 を示す.1) t_{f} =0mm と 3) t_{f} =4mm, θ =45°の増分変位モードがよく 一致することがわかる.面内と曲げ剛性に着目すると θ =45° の円筒殻では、軸方向及び周方向の弾性定数が同じ($A_{11}=A_{22}$, $D_{11}=D_{22}$)擬似等方性の性質を有するためと考えられる. 2) θ =0°では、1,3 波の増分変位モードが卓越している. θ =45° と比較し、軸方向剛性が高いためである.

図 10 の破線で表示した P_{su}は、補強なしの場合の 400N(降

伏応力 235MPa)級の鋼製円筒殻の全断面軸降伏荷重である. 本解析モデルの場合,補強厚さを大きくとっても,初期不整 による影響を考慮すると,弾性座屈が先行する可能性がある ことがわかる.尚,弾性座屈と塑性崩壊の相乗作用への RS 法の応用については文献 5 が参考になるが,積層殻について は今後の検討課題である。最後に,図11の結果のうち,特に RS 解析結果に注目すると,本研究で対象としたモデルでは θ=90°が最適な補強方法であると言える.

参考文献

- 1) Yamada, S. and Croll J. G. A. : J. Applied Mech., ASME, Vol.63, pp.299-309, 1999
- 2) Arbocz, J. and Babcock, C. D. : *J. Applied Mech.*, ASME, pp.28-38, Vol.36, 1969
- Jones, R. M. : Mechanics of Composite Materials, Taylor & Francis, 1998
- 山田聖志,松本健太郎,松本幸大:構造工学論文集,AIJ,Vol.54B, 2008
- Croll, G.J.A.: Lower bound elasto-plastic buckling of cylinders, *Proc.* Instn Civil Engrs, Part 2, Vol.71, pp.235-261, 1981.



