

関西大学大学院 学生員○梅津基義 日本工営（株） 正会員 古西和夫
 関西大学工学部 正会員 堂垣正博

1. まえがき

鋼製円筒は初期たわみや残留応力などの初期不整に対して極めて敏感で、その座屈強度が著しく低下する場合がある。ここでは、初期たわみと残留応力を考慮し、圧縮や曲げが作用する鋼製円筒の終局強度を明らかにする。

2. 鋼製円筒の弾塑性有限変位解析のための基礎式

解析対象の鋼製円筒は、Fig.1に示すような両端に圧縮と曲げが作用し変位拘束された長さ a 、半径 R 、肉厚 t の比較的短い部材である。それはSM400材（降伏点応力 $\sigma_y=235\text{MPa}$ 、Young率 $E=206\text{GPa}$ 、Poisson比 $\nu=0.3$ ）で製作され、その応力-ひずみ関係に完全弾塑性性を仮定した。製作時に不可避免的に生じる初期たわみとして、円周方向に一様分布、母線方向に正弦波分布のつぎの波形を仮定した。

$$w_0(x) = -w_{0\max} \cos \frac{n\pi x}{\lambda} \tag{1}$$

また、Chen-Rossの溶接による残留応力を仮定した。

鋼製円筒の基礎式は、以下の条件にもとに、薄いシェルに対するWashizuの非線形弾性論を弾塑性場に拡張して誘導する。すなわち、①Kirchhoff-Loveの平面保持の仮定。②弾塑性状態での断面力がLinあるいはMassonnetの弾塑性論に従って定義される。③部材の降伏はvon Misesの等価応力で判定し、降伏後の応力-ひずみ関係にZieglerの移動硬化則が準用できる。

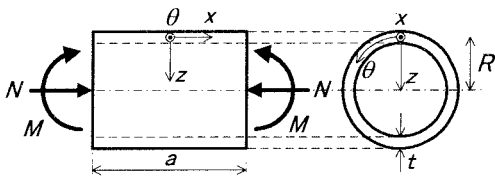


Fig.1 解析対象の鋼製円筒

3. 数値解析法

誘導した力のつり合い式は変位 u, v, w を未知数とした3元連立の非線形偏微分方程式である。これ

と境界条件式に差分法を適用し、多元連立非線形代数方程式へ変換した後、増分法と修正Newton-Raphson法による混合法で非線形解を求める。

4. 数値解析結果

径長比が等しく、径厚比の異なる鋼製円筒を対象に、圧縮、曲げあるいはその組合せ荷重が作用する場合の終局強度を明らかにする。ただし、初期たわみの半波数 n は、径厚比ごとに最小座屈強度を与える波数、すなわちTimoshenkoの古典座屈理論に基づいて算出される

$$n_{cr} = 0.58 \frac{a}{\sqrt{Rt}} \tag{2}$$

の値とした。ちなみに、左右対称な鋼製円筒の1/2部材を解析するため、式(2)での計算値に最も近い偶数 n の値を初期たわみモードに採用した。

1) 鋼製円筒の終局圧縮強度 径長比 $R/a=0.3$ の鋼製円筒に対し、終局圧縮強度を求めた。ただし、初期たわみには、実測値の平均値に相当する $w_{0\max}=0.0025\lambda$ 、ECCSの強度式に用いられ、下限値相当の $w_{0\max}=0.01\lambda$ を仮定した。

Fig.2に終局圧縮強度曲線を示す。図中、縦軸は全強で無次元化した終局圧縮強度、横軸は径厚比パラメータ $R_t=\{3(1-\nu^2)\}^{1/2}(\sigma_y/E)(R/t)$ である。同図には、現行道路橋示方書（JSHB）のSM400材に対する強度式¹⁾、ECCSの強度式、鋼構造物設計指針（DCSS）とAISCの強度式も示した。また、宇佐美・青木ら²⁾、Gao-Usamiら、Rizal-Nara³⁾の強度式も図示した。さらに、名古屋大学とLehigh Univ.で行われた実験結果も示す。

図から明らかなように、平均値相当の初期たわみによる本解は、宇佐美・青木らの実験式とかなりよい一致を示す。また、下限値相当の初期たわみを仮定した本解は、Gao-UsamiらやECCS、AISI、DCSSの設計式によく一致している。一方、Rizal-Naraの強度式は、いずれの大きさの初期たわみでも本解やその他の曲線と比較して、低めの値を与える。

本解を分析し、平均値に相当する終局強度の近似算定式

$$\frac{N_{ult}}{N_p} = \alpha_c (1 - 0.46 R_t) \quad (3)$$

を提案する。ここに、 α_c は初期たわみに関する強度の低減係数で、初期たわみが平均値を越える場合、

$R/t < 90$ のとき：

$$\alpha_c = 1 + \left\{ 0.0012 \left(\frac{R}{t} \right)^2 - 0.21 \frac{R}{t} - 5.06 \right\} \left(\frac{w_{0max}}{\lambda} - 0.0025 \right)$$

$90 \leq R/t < 200$ のとき：

$$\alpha_c = 1 - \left(0.129 \frac{R}{t} + 2.63 \right) \left(\frac{w_{0max}}{\lambda} - 0.0025 \right) \quad (4)$$

である。平均値相当の初期たわみを用いた場合、本提案式と実験値との変動係数は0.055であった。

2) 鋼製円筒の終局曲げ強度 径長比が $R/a=0.5$ の鋼製円筒を対象に、終局曲げ強度を求めた。ただし、初期たわみに $w_{0max}=0.0025\lambda$ を仮定した。

Fig.3に終局曲げ強度曲線を示す。図中、縦軸は全塑性モーメントで無次元化した終局曲げ強度、横軸は径厚比パラメータである。図中には、道路橋示方書のSM400材に対する強度式¹⁾、ECCS、DCSS、AISCの強度式を示す。図から明らかなように、道路橋示方書とDCSSの強度式は、 $R_t < 0.15$ の範囲で本解よりも若干高めの強度を与える。一方、AISCとECCSの強度式は、本解に比較し、かなり低めの値を与える。ECCSの強度式は、圧縮の場合と同様、初期たわみの最大値を $w_{0max}=0.01a$ として強度の低減を行っているため、初期たわみの大きさから下限値相当の曲げ強度を与えるものと思われる。

3) 鋼製円筒の終局圧縮・曲げ強度の関連曲線 径長比が $R/a=0.3$ の鋼製円筒を対象に、圧縮と曲げの終局強度関連曲線を求めれば、Fig.4を得る。ただし、初期たわみに $w_{0max}=0.0025\lambda$ を仮定した。図中、横軸は純曲げの終局強度で無次元化した組合せ荷重下での曲げモーメント、縦軸は純圧縮の終局強度で無次元化した組合せ荷重下での圧縮力を示す。また、同図には線形強度相関式も描いた。

図から明らかなように、主として曲げの作用が卓越する領域で、圧縮の作用による強度の低下が若干なくなる。鋼製円筒における圧縮・曲げの強度相関関係を線形関係で近似できることがわかる。

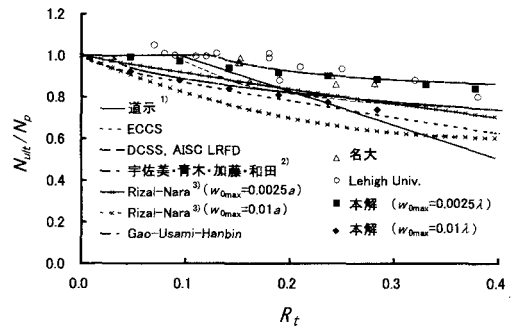


Fig.2 鋼製円筒の終局圧縮強度

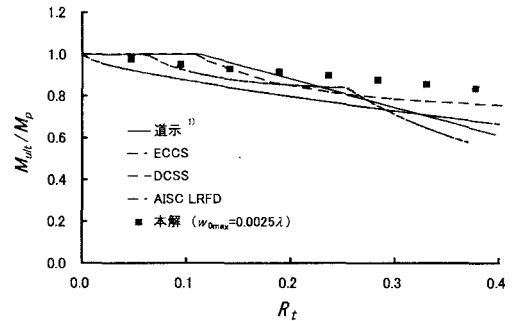


Fig.3 鋼製円筒の終局曲げ強度

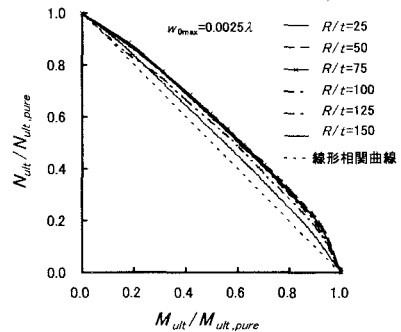


Fig.4 組合せ荷重を受ける鋼製円筒の強度相関

5. あとがき

幾何学的・材料的非線形理論に基づいて、圧縮、曲げおよびその組合せを受ける鋼製円筒の弾塑性有限変位解析を行い、終局圧縮強度、終局曲げ強度、終局圧縮・曲げ強度相関を明らかにした。

参考文献 1) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説・共通編・鋼橋編，丸善，1996-12. 2) 宇佐美・青木ら：鋼管柱の圧縮および曲げ耐荷力実験，土木学会論文集，No.416/I-13，pp.255-264，1990-4. 3) Rizal, F. and Nara, S. : Ultimate strength of axially compressed short cylindrical steel shells with initial deflection, Journal of Structural Engineering, JSCE, Vol.42A, pp.189-196, 1996-3.