

I - A 94

一定軸力下で繰返し曲げを受ける鋼製円筒の強度特性

（株）大林組 正会員 瀧 裕行* （株）銭高組 正会員 和久雅也**
 関西大学工学部 正会員 堂垣正博*** 関西大学工学部 フェロー 三上市藏****

1. まえがき 記憶に新しい兵庫県南部地震では、円筒シェルからなる鋼製橋脚に局部的な座屈が生じた。この種の局部座屈は死荷重に相当する圧縮力に加え、地震時の強烈な繰返し曲げが作用して生じたと考えられる。ここでは、一定軸力の下にある鋼製円筒に繰返し曲げが作用する場合の幾何学的・材料的非線形挙動を差分法で解析し、短い鋼製円筒シェルの曲げ挙動を明らかにする。

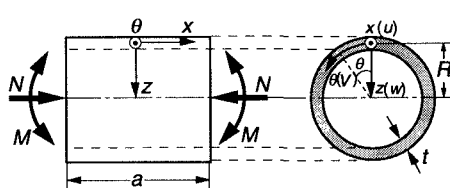


図-1 一定軸力下で繰返し曲げを受ける鋼製円筒

2. 理論式 図-1に示す長さa, 半径R, 肉厚tの短い鋼製円筒シェルが一定軸力Nの下に繰返しの曲げモーメントMを受ける場合の変形挙動を明らかにする。解析にあたり、次の仮定を設ける。①Kirchhoff-Loveの仮定。②部材はひずみ硬化する弾塑性体で、応力とひずみはbi-linearな関係にある。③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の移動硬化則を準用する。

(1) 力のつり合い式：弾塑性状態における円筒シェルのx, θ , z方向の力のつり合い式をポテンシャル・エネルギー停留の原理によって誘導すれば、

$$N_x^e u_{,xx} + N_x^e (1+u_{,x}) + N_{\theta}^e u_{,\theta\theta} / R^2 + N_{\theta}^e u_{,\theta} / R^2 + 2N_{x\theta}^e u_{,x\theta} / R + N_{x\theta}^e u_{,\theta} / R + N_{x\theta}^e (1+u_{,x}) / R - \{N_x^p u_{,xx} + N_x^p (1+u_{,x}) + N_{\theta}^p u_{,\theta\theta} / R^2 + N_{\theta}^p u_{,\theta} / R^2 + 2N_{x\theta}^p u_{,x\theta} / R + N_{x\theta}^p u_{,\theta} / R + N_{x\theta}^p (1+u_{,x}) / R\} = 0 \quad (1)$$

$$N_x^e v_{,xx} + N_x^e v_{,x} + N_{\theta}^e (v_{,\theta\theta} - 2\bar{w}_{,\theta} - v) / R^2 + N_{\theta}^e (R + v_{,\theta} - \bar{w} + w_0) / R^2 + 2N_{x\theta}^e (v_{,x\theta} - \bar{w}_{,x}) / R + N_{x\theta}^e (R + v_{,\theta} - \bar{w} + w_0) / R + N_{x\theta}^e v_{,x} / R - 2M_{x\theta}^e / R - M_{\theta}^e / R^2 - \{N_x^p v_{,xx} + N_x^p v_{,x} + N_{\theta}^p (v_{,\theta\theta} - 2\bar{w}_{,\theta} - v) / R^2 + N_{\theta}^p (R + v_{,\theta} - \bar{w} + w_0) / R^2 + 2N_{x\theta}^p (v_{,x\theta} - \bar{w}_{,x}) / R + N_{x\theta}^p (R + v_{,\theta} - \bar{w} + w_0) / R - 2M_{x\theta}^p / R - M_{\theta}^p / R^2\} = 0 \quad (2)$$

$$N_x^e \bar{w}_{,xx} + N_x^e \bar{w}_{,x} + N_{\theta}^e (R + 2v_{,\theta} + \bar{w}_{,\theta\theta} - \bar{w} + w_0) / R^2 + N_{\theta}^e (\bar{w}_{,\theta} + v) / R^2 + 2N_{x\theta}^e (v_{,x} + \bar{w}_{,x\theta}) / R + N_{x\theta}^e (\bar{w}_{,\theta} + v) / R + N_{x\theta}^e \bar{w}_{,x} / R + M_{x\theta}^e / R + 2M_{\theta}^e / R^2 - \{N_x^p \bar{w}_{,xx} + N_x^p \bar{w}_{,x} + N_{\theta}^p (R + 2v_{,\theta} + \bar{w}_{,\theta\theta} - \bar{w} + w_0) / R^2 + N_{\theta}^p (\bar{w}_{,\theta} + v) / R^2 + 2N_{x\theta}^p (v_{,x} + \bar{w}_{,x\theta}) / R + N_{x\theta}^p (\bar{w}_{,\theta} + v) / R + M_{x\theta}^p / R + 2M_{\theta}^p / R^2\} = 0 \quad (3)$$

を得る。ここに、u, vはそれぞれx, θ 方向の変位、 $\bar{w}$ はz方向の全たわみで、初期たわみ w_0 と荷重によるたわみwの和である。N_x, N_θはそれぞれx, θ 方向の膜力、N_{xθ}は膜せん断力である。M_x, M_θはそれぞれx, θ 方向の曲げモーメント、M_{xθ}はねじりモーメントである。上添字eとpのついた断面力はそれぞれ弾塑性域にある円筒シェルの全断面弾性のままに仮定して求められる断面力と、弾性断面力を修正し真の断面力を得るための仮想断面力である。仮想断面力は、弾性応力で計算されるvon Misesの等価応力が降伏点応力を超える場合、その超過量を肉厚方向に数値積分して求められる。なお、コンマに続く下添字はそれに関する偏微分を表す。

(2) 境界条件式：両端が固定され、一定軸力の下に繰返しの曲げを受ける円筒シェルの場合、その面内変形に関する境界条件は、

$$u + u_0 = -(R \cos \theta) \phi, \quad v = 0 \quad (4)$$

$$\Sigma \sigma_{\theta} \Delta A = -N \quad (5)$$

で与えられる。ここに、 ϕ は曲げモーメントMに等価な図心軸まわりの強制断面回転角、 u_0 は圧縮力Nに等価な強制圧縮変位で、式(5)を満足する値である。また、 σ_{θ} は端部での母線方向の応力、 ΔA はその応力が働く

キーワード：終局強度、鋼製円筒、繰返し曲げ、幾何学的・材料的非線形、差分法

* 〒101-8533	東京都千代田区神田司町2-3	TEL03-3292-1111	
** 〒550-0005	大阪市西区西本町2-2-11	TEL06-531-6431	FAX06-538-7900
*** 〒564-8680	吹田市山手町3-3-35	TEL06-368-0882	FAX06-368-0882
**** 〒564-8680	吹田市山手町3-3-35	TEL06-368-0940	FAX06-368-0940

微小な断面積， θ は，図-1に示すように，円筒の上縁から円周方向に測った角度である。

面外変形に関する境界条件は，次のようである。

$$\bar{w} - w_0 = 0, \quad \bar{w}_{,x} - w_{0,x} = 0 \quad (6)$$

3. 数値解法 力のつり合い式(1)～(3)と境界条件式(4)～(6)を変位 $u, v, \bar{w}$ と増分変位 $\Delta u, \Delta v, \Delta \bar{w}$ によって表示し，それらに差分法を適用すれば，多元連立の非線形代数方程式を得る．これを増分法と修正Newton-Raphson法を併用した混合法で解けば，短い円筒シェルの非線形解を求めることができる．なお，数値解析の結果が広範な鋼製円筒シェルに適用できるように，諸式を無次元化した。

4. 数値解析結果とその考察 円筒シェルは母線および円周方向にともに対称に変形するものと仮定し，母線および円周方向にそれぞれ1/2の領域を解析する．広範なパラメトリック解析の前に，差分分割数や肉厚方向の層数と解との関係を調べた結果，母線方向に20分割，円周方向に18分割，肉厚方向に20分割すれば，精度のよい解の得られることが分かった．なお，解析に用いた鋼種はSM400材で，降伏点応力 $\sigma_p=2,400\text{kgf/cm}^2$ ，ヤング率 $E=2.1 \times 10^6\text{kgf/cm}^2$ ，ポアソン比 $\nu=0.3$ とした．また，様々な載荷パターンが考えられるが，ここでは図-2に示すような定変位振幅(破線)と漸増変動変位振幅(実線)の2種類の繰り返し曲げを取り扱う。

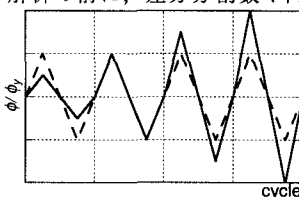


図-2 繰り返し荷重の載荷方法

両端に一定の軸力 $N/N_p^*=0.2$ と2種類の強制的な断面回転角が作用する径厚比が $R/t=25, 50, 75$ の円筒シェルの弾塑性有限変位挙動を明らかにすれば，その端部における断面回転角 ϕ と曲げモーメント M との関係が図-3と図-4のように得られる．ここに，径長比は $R/a=1$ ，ひずみ硬化域での接線係数は $E_p=0.01E$ で初期不整は無視した．図中，縦軸は全塑性モーメント M_p^* で無次元化された作用曲げモーメント M を，横軸は降伏時の回転角 ϕ で無次元化された強制回転角 ϕ を示す。

定変位振幅の場合(図-3)，径厚比が $R/t=25$ と50の円筒シェルの挙動に明確な差異は認められず，ひずみ硬化の影響により強度は上昇し，優れた強度特性を有している．一方，径厚比が $R/t=75$ の円筒シェルの場合，繰り返し曲げのサイクルが2回目以降，断面内の塑性域が増え，耐力の低下が顕著となる。

変動変位振幅の場合も(図-4)，径厚比が $R/t=25$ と50の円筒シェルは，両者の挙動に明確な差異は認められず，強制回転角 ϕ が降伏回転角 ϕ_p の3倍を超えても曲げ強度の低下は認められない．一方，径厚比が $R/t=75$ の円筒シェルの場合，繰り返し曲げのサイクルが1回目や2回目でも断面内の塑性域が増える傾向にある．さらに，3サイクル目になれば， $3\phi/\phi_p$ に到達する以前から耐力の低下が顕著となる。

なお，本研究には文部省科学研究費補助金(基盤研究(c)(2)，08650563，代表者：三上市藏)の補助を受けた。

参考文献 池内・西村：軸圧縮力と繰り返し曲げを受ける鋼管短柱の変形能，平成9年度関西支部年次学術講演会講演概要，土木学会，I-80，1997-5。

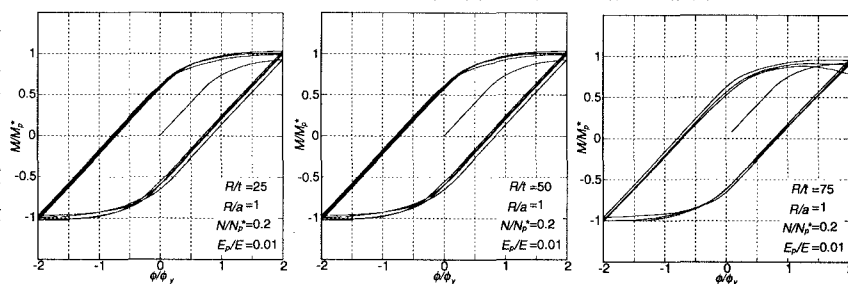


図-3 端部における断面回転角と曲げモーメントの関係（定変位振幅）

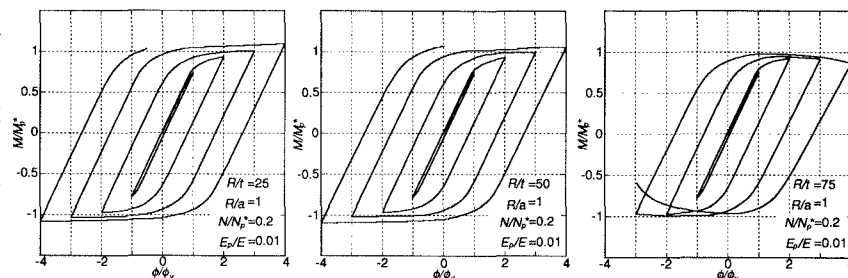


図-4 端部における断面回転角と曲げモーメントの関係（変動変位振幅）