

塑正 *石垣 勝士 (山本水圧)
金田 直人 (山本水圧)

坂口 尚良 (山本水圧)
塑正 小嶋 正康 (山本水圧)

1. 緒言

ハイドロフォームで製造される自動車構造部材には薄肉鋼管が多く使用され、曲げ工程で背側扁平化と腹側挫屈が生じ易い。扁平化はハイドロ工程での拡管破断を誘い、挫屈はハイドロ工程で消去しにくい。ドローブンドでの扁平化と挫屈に対しては、R/D と t/D の組み合わせ毎にマンドレルの選択やワイパダイの要否判断が経験則で行われてきた¹⁾。著者らは FEM 解析による従来の経験則の定量化を進めており、扁平化へのバックブースタ推力とマンドレル形式の影響を明らかにしてきた^{2,3)}。ここでは、扁平化への他の曲げ条件の影響と挫屈現象の FEM 解析結果を報告する。

2. 工具セッティングと作用する力 (Fig.1)

Top 部をクランプした素管にプレッシャダイを当接し、曲げダイの回転 (90°) とともにプレッシャダイを前進させる (移動量 Ls)。プレッシャダイには垂直反力 (Pp) と管との摩擦による接線力 (Pf) が作用する。

3. FEM 解析条件 (解析ソフト LS-DYNA、シェル要素)

- (1) 曲げダイ : 曲げ R=120、管との摩擦係数 $\mu = 0.1$
- (2) ワイパダイ : 傾斜角 ϕ (heel angle) 変化、 $\mu = 0.1$
- (3) プレッシャダイ : $\mu = 0.2$ 、材料直管部保持条件は (a) 管軸との距離一定 or (b) 押し付け力 Fp 一定で、Fp の記載が無いデータ (Fig.7 以外) は条件 (a) での結果である。
- (4) バックブースタ : 無し
- (5) マンドレル : マルチボール型 (形状は前報³⁾ 参照)、マンドレル隙間 ΔD (マンドレル外径と管内径の差) を変化、 $\mu = 0.1$
- (6) 素管 : 外径 $\phi 60.5$ 、肉厚 $t=1.6 \sim 2.4$ ($t/D=0.026 \sim 0.04$)、長さ 600。Fig.2 に示す直線硬化の応力~歪関係を設定 (Fig.9&10 を除き、 $\sigma_y=354\text{MPa}$ 、 $E_t=1.26\text{GPa}$ 。ヤング率 $E=206\text{GPa}$ 一定、ポアソン比=0.3 一定)。要素分割は周方向 3° ピッチ、軸方向 2mm ピッチ。

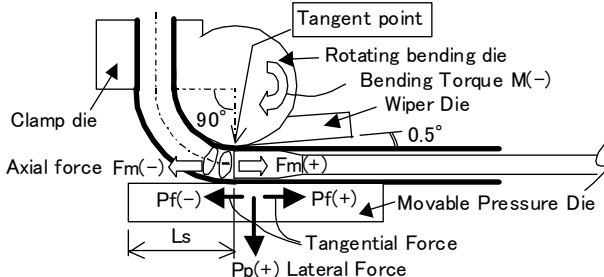


Fig.1 Tooling for draw bending and forces applied to bending tools.

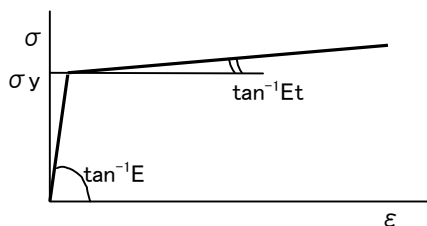


Fig.2 Relationship between stress and strain in uni-axial tension test of tube

4. 解析結果と考察

(1) 扁平率 :

(a) 曲げ角 θ の影響 ; Fig.3 は、t/D 別に 90° 曲げ過程での曲げ角 θ と扁平率 ($\theta/2$ 断面での値) の関係を示す。 θ が 30~40° を超えると急激に扁平化が進行し、その傾向は t/D が小さいほど顕著である。

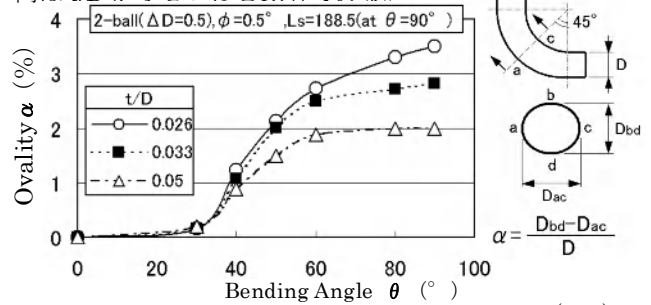


Fig.3 Variation on ovality of central cross section ($\theta/2$) with increase of bending angle θ

(b) プレッシャダイ移動量 (Ls) の影響 ; Fig.4 は、t/D 別に 90° 曲げでの Ls と扁平率 (45° 断面) の関係を示す。

扁平率は曲げ円弧長 ($\pi R/2=188.5\text{mm}$) より僅かに小さい $L_s=180\text{mm}$ 付近で階段状に変化している。この L_s の値は前報²⁾ で示したプレッシャダイ同期移動量 (L_s^*) と一致しており、 $L_s < L_s^*$ ($P_f < 0$) の状態から $L_s > L_s^*$ ($P_f > 0$) の状態に移行させることによって管にプレッシャダイから作用する摩擦力が背側への軸方向圧縮力として作用し、扁平が改善される。ただし、バックブースタ増加とともに扁平が改善される²⁾ のに対し、サイドブースタによる扁平改善に関しては、曲げ円弧長以上の L_s であれば扁平率の変化は極めて小さい。

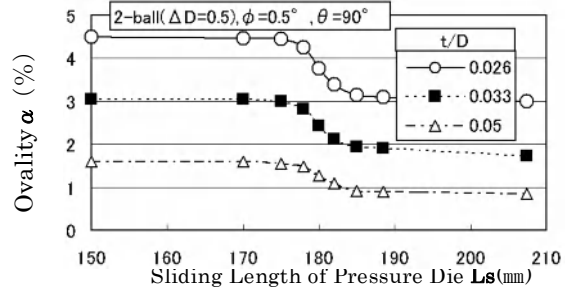


Fig.4 Effect of sliding length of pressure die L_s on ovality of 45° cross section of bent portion

(c) マンドレル隙間 (ΔD) の影響 ; Fig.5 は t/D 別に ΔD と扁平率の関係を示す。t/D が小さいほど、 ΔD 減少による扁平改善効果が相対的に現れにくくなる傾向がある。

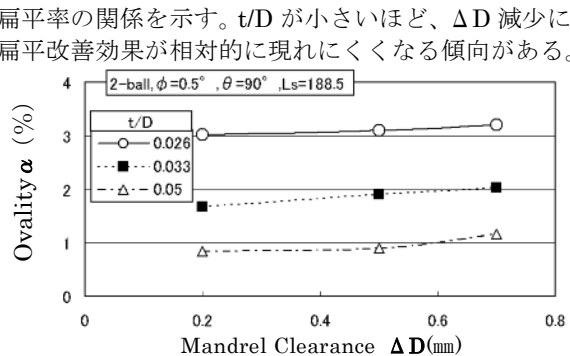
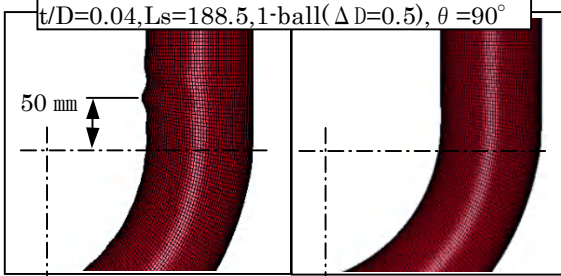


Fig.5 Effects of mandrel clearance ΔD and t/D on ovality of 45° cross section of bent portion

(2) 挫屈 :

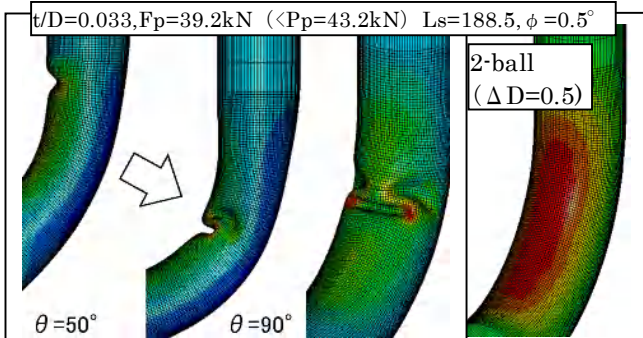
(a) ワイパダイの挫屈抑制効果; Fig. 6(a)はワイパダイ無し(マンドレル有り)での90° 曲げ状況を示し、Tangent point (TP)から50mm程度離れた腹側直線部で管外面側に凸のしわが生じている。ワイパダイ($\phi=0.5^\circ$)を用いた場合は、Fig. 6(b)に示すように挫屈は見られず、ワイパダイの挫屈抑制効果は解析においても明瞭である。



(a) Without wiper die (b) With wiper die ($\phi=0.5^\circ$)

Fig.6 Effect of wiper-die to prevent tube from buckling

(b) マンドレルの挫屈抑制効果 ; Fig.7(a)は、マンドレル無し(ワイパダイ有)、プレッシャダイ押し付け力 $F_p <$ 垂直反力 P_p の条件での挫屈過程を示す。曲げ初期に TP 手前の腹側直線部に生じた管内面側に凸のしわが、曲げの進行とともに曲げ部に移動し、複雑形状の挫屈に成長している。Fig.7(b)は同条件でマンドレルを使用した場合の一例を示し、挫屈は生じていない。なお、 $F_p > P_p$ の条件では、マンドレル無しでも挫屈は見られなかった。



(a) Without mandrel (b) With mandrel

Fig.7 Effect of mandrel to prevent tube from buckling

(c) ワイパダイ傾斜角(ϕ)およびマンドレル隙間(ΔD)の影響 ; ワイパダイは、曲げ時の材料移動に伴う摩擦荷重を軽減するため、管軸に対し僅かな傾斜をもたせてセットされる。また、マンドレルは、挿入作業性から管と隙間を有するように製作される。Fig.8 はワイパダイ傾斜角 ϕ および隙間 ΔD の組み合わせと90° 曲げでの挫屈の有無を示し、 ϕ と ΔD が大きい条件で挫屈し易い。

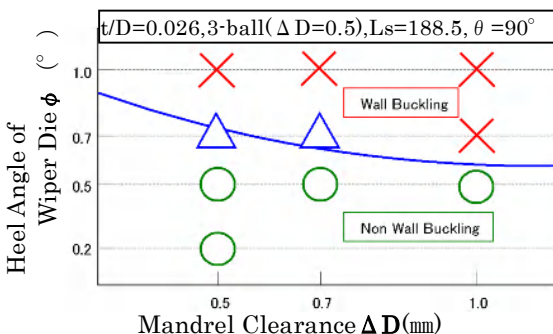


Fig.8 Effects of heel angle(ϕ) of wiper die and clearance (ΔD) between mandrel and tube on wall buckling

(d) 挫屈危険部の応力状態と挫屈への材料特性の影響 ;

Fig.9は、2水準の σ_y (E_t は同一)の材料について、腹側直線部の軸方向応力(σ_c)の分布を計算した結果である。 $|\sigma_c|$ はTPから離れるにつれて減少するが、いずれの材料でも σ_y を超えるレベルの圧縮応力が管径と同程度の長さの領域にわたって分布している。これより、薄肉管では、ワイパダイあるいはマンドレルでの拘束が不十分な条件で腹側直線部挫屈を生ずることが理解できる。Fig.10は、挫屈に対する σ_y 、 E_t の影響をワイパダイ無しの条件で調査した結果である。これより、Fig.2の直線加工硬化を仮定した場合には、 σ_y が小さいほど、また、 E_t が大きいほど挫屈しにくい傾向があると言える。

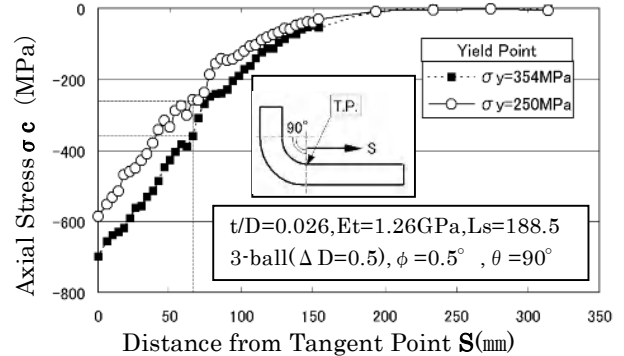


Fig.9 Distribution of axial stress from tangent point toward the end of tube

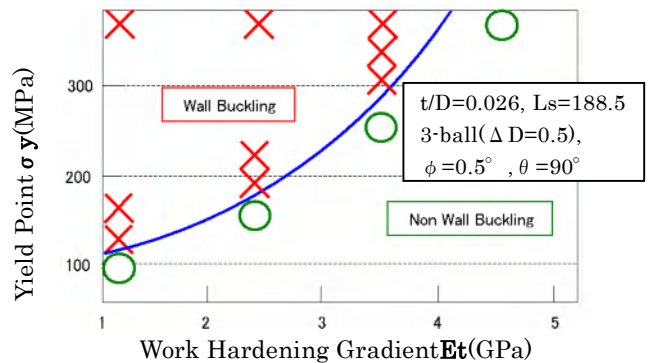


Fig.10 Effects of σ_y and E_t of tube on wall buckling during draw bending without wiper-die

5. 結言

薄肉管のドローバンドでの扁平化および挫屈現象のFEM解析を行い、以下の結果を得た。

- (1) 扁平化 ;
 - ①プレッシャダイ移動量 (L_s) \geq 曲げ円弧長 の条件で扁平が改善される。
 - ②マンドレルと管の隙間(ΔD)減少による扁平改善効果は t/D が小さいほど弱まる。
- (2) 挫屈 ;
 - ①挫屈は Tangent point 手前の腹側直線部で発生し、ワイパダイの設置、マンドレルおよびプレッシャダイ押し付け力(F_p)の選定が挫屈防止に重要である。
 - ②ワイパダイ傾斜角(ϕ)と ΔD が小さいほど挫屈しにくい。
 - ③直線加工硬化 (Fig.2) を仮定すれば、 σ_y が小さいほど、また、 E_t が大きいほど挫屈しにくい。

【参考文献】

- 1) R.K.Springborn et.al: Cold Bending and Forming Tube and other Sections, ASTM E (1966), p59
- 2)石垣他: 57回塑加連講論(2006), p361
- 3)石垣他:H19年度塑性加工春期講論(2007),p373