

管のドローブンドにおける変形および荷重特性へのマンドレル形状の影響

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

管のドローブンドでは、厚肉管あるいは超長尺管の場合を除き、扁平化と挫屈抑制のために管内にマンドレルが挿入される。マンドレルの形状としてはプラグ、フォーム、マルチボールなどが代表的で、管の t/D (肉厚外径比)、 R/D (曲げ R 外径比) による選定基準が提示されている¹⁾。本報では、曲げ変形および曲げ荷重特性に与えるマンドレル形状の影響を FEM 解析で検討した。

2. 工具の動きと作用する力 (Fig.1)

素管 Top 側をクランプし、プレッシャダイを管に押し付け、曲げダイを回転 (90°) させると同時にプレッシャダイを一定速度で前進 (曲げ終了までの移動量: L_s)。プレッシャダイには材料からの法線方向反力 (P_p) と摩擦による接線力 (P_f) が作用し、管の曲げ移動にもなって、マンドレルには軸力 (F_m) が作用する。

3. FEM 解析条件 (解析ソフト LS-DYNA、シェル要素)

- (1) 素管 ($\phi 60.5 \times 2t$): 特性、要素分割は前報²⁾と同一。
- (2) 曲げダイ ($R120=2DR$)、ワイパダイ、プレッシャダイ: 寸法および管外面との摩擦係数は前報²⁾と同一。
- (3) マンドレル (外径 $\phi 56$ 一定): Fig.2 に示す半球プラグマンドレル、フォームマンドレル、ボールマンドレル (1~3 玉) の 3 種類。管との摩擦係数 μ_m を 0.1~0.3 の範囲で変化させた。セット位置は、フォーム、ボールは Fig.2 の A 点を Fig.1 の Tangent point (T.P.) に一致させ、プラグは A 点を T.P. より距離 S だけ前方にオフセットさせた (S 変化)。

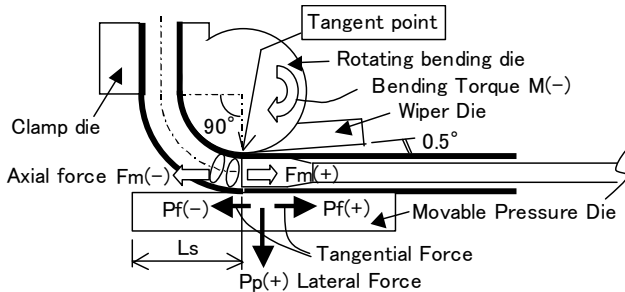


Fig.1 Tooling for draw bending and forces applied to bending tools.

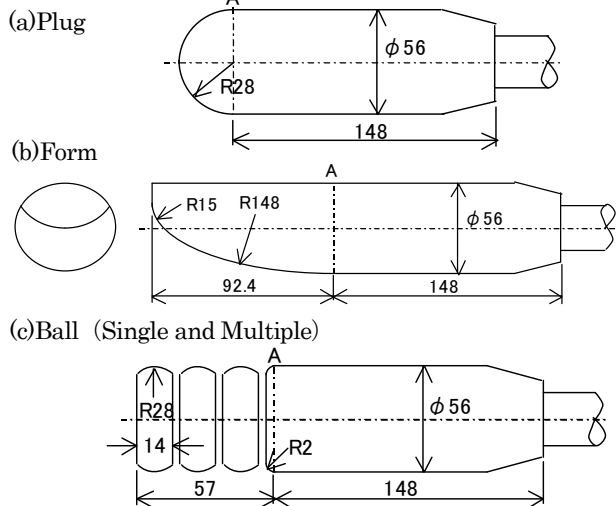


Fig.2 Three types of mandrels

4. 解析結果と考察

(1) 曲げ変形特性:

(a) 扁平率; Fig.3 は曲げ品中央 45° 断面の扁平率をマンドレル別に示す。プラグではオフセット量 S の増加によって扁平率が改善される。ただし、半球頭部と管の接触域が狭いので、 S をクランプダイとの干渉限 (約 13mm) まで増加させても扁平改善には限界がある。管との周方向接触域が広いボールでは玉数増加によって極めて小さい扁平率に抑制できる。フォームの扁平率はボールの 1 玉と 2 玉の中間レベルである。

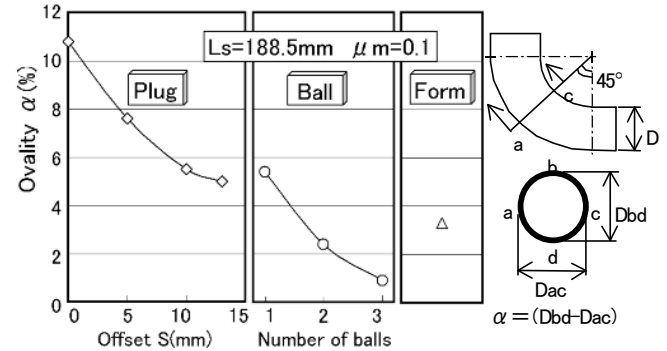


Fig.3 Effects of types of mandrel to ovality of 45° cross section of bent portion of tube

(b) 周長減少; Fig.4 に 45° 断面の扁平率と周長減少率の関係を示す。マンドレルによらず相関が認められ、扁平の抑制により曲げ部の周長減少を小さくすることができる。

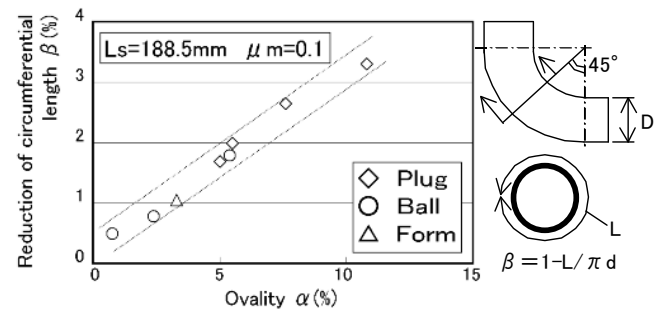


Fig.4 Correlation between ovality and reduction of circumferential length of 45° cross section of bent portion

(c) 肉厚歪; Fig.5 は 45° 断面での背側、腹側の肉厚歪をマンドレル別に示す。プラグではオフセット量 S の増加とともに背側減肉が進む一方、腹側増肉への S の影響は小さい。ボールでは玉数増加とともに背側減肉と腹側増肉が徐々に増加する。フォームでの背側減肉、腹側増肉は 1 玉ボールマンドレルとほぼ同等である。

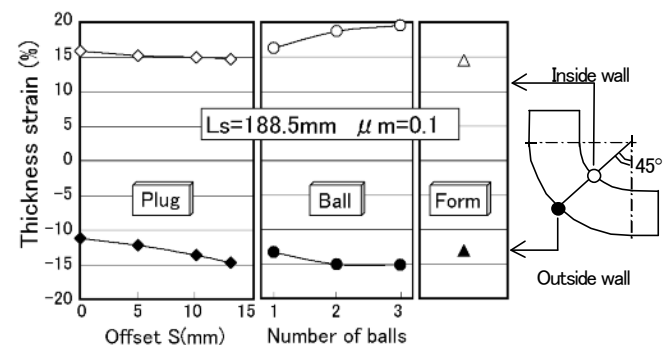


Fig.5 Variation of thickness strain of inside and outside of 45° cross section of bent portion with types of mandrels

(2) 曲げ荷重特性:

(a) 曲げトルク (M) ; Fig.6 はマンドレルの形状と摩擦係数 μm によるトルク M (90° 曲げ時点) の変化を示す。プラグでは S の増加とともに M が増加する。また、S の増加とともに M への μm の影響が強まる。ボールでは玉数の増加とともに M が増加し、M への μm の影響はプラグよりも顕著である。M への μm の影響はフォームが最も敏感に現れる。マンドレルと管の接触面積がプラグ、ボールより大きいことが関係していると思われる。

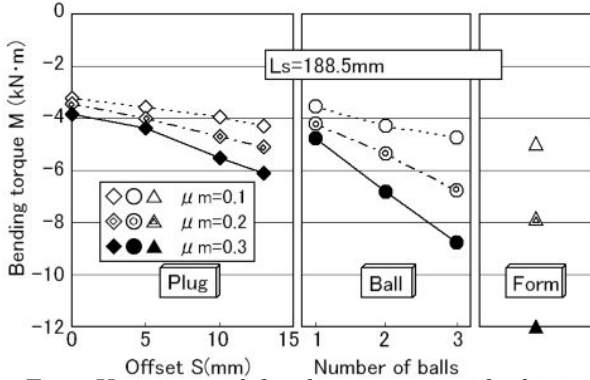


Fig.6 Variations of bending torque with frictional coefficient of mandrel for various types of mandrels

(b) プレッシュダイ反力 (Pp) ; μm とプレッシュダイ反力 Pp (90° 曲げ時点) の関係を Fig.7 に示す。プラグでは S の増加とともに Pp は増加する。Pp への μm の影響は小さい。ボールでも Pp への μm の影響は小さい。フォームでは μm の増加とともに Pp が増加する。同一 μm での Pp はフォームが最大で、ボールはプラグよりやや小さい。

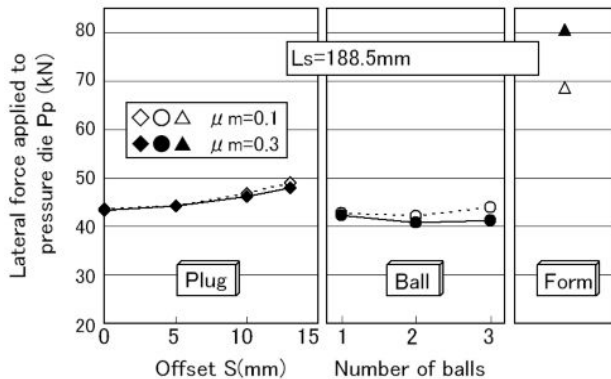


Fig.7 Variations of lateral force Pp applied to pressure die from tube with frictional coefficient of mandrel for various types of mandrels

(c) プレッシュダイ接線力 (Pf) ; Fig.8 にマンドレル形状別にプレッシュダイ移動量 Ls と Pf の関係を示す。プラグでは S の増加とともに Pf=0 となる同期移動量 Ls*²⁾ が僅かに大きくなる傾向があり、扁平率の減少と関連している。Ls* から十分離れた Ls での Pf の飽和値 (|Pf|_{max}) は S によらずほぼ同一である。ボールでは Pf への玉数の影響は見られず、|Pf|_{max} はプラグと同レベルである。フォームでは μm が小さいほど Ls* が大きく、|Pf|_{max} はプラグ、ボールより大きい。

(d) マンドレル軸力 (Fm) ; 摩擦係数 μm と 90° 曲げ時点のマンドレル軸力 Fm の関係をマンドレル別に Fig.9 に示す。Fig.1 に示すように、Fm<0 は引張、Fm>0 は圧縮である。プラグでは Fm は引張で、オフセット量 S および μm の増加とともに引張力が増加する。ボールでも Fm は引張で、玉数および μm の増加とともに引張力が増加する。Fm への μm の影響はプラグより大きい。フォームでは、 μm が小さい場合 (0.1)

には Fm はわずかに圧縮で、 μm の増加とともに引張に転ずる。 μm による Fm の差違はプラグ、ボールより大きい。

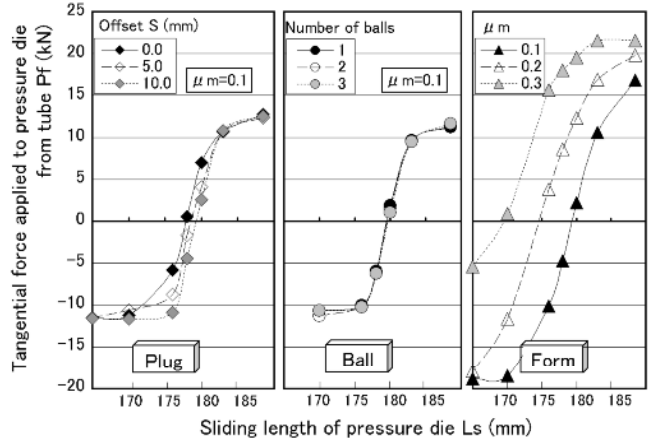


Fig.8 Variations of tangential force applied to pressure die from tube with sliding length of pressure die during draw bending for various types of mandrels

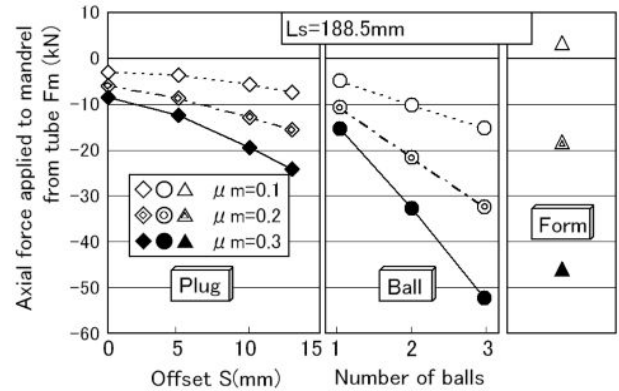


Fig.9 Variations of axial force applied to mandrel from tube with frictional coefficient of mandrel for various types of mandrels

5. 結言

管のドロワーバンドでの変形と荷重特性に与えるマンドレル形状の影響を FEM 解析で検討し、以下の結果を得た。

(1) 変形特性 ;

- ① 扁平率はプラグオフセット量 S の増加、ボール玉数増加によって減少する。フォームの扁平率はボールの 1 玉と 2 玉の中間レベルである。
- ② 曲げ部断面の周長減少率と扁平率には相関がある。
- ③ 背側減肉はプラグ S 増加、ボール玉数増加によって進む。フォームの増減肉はボールの 1 玉と同程度である。

(2) 荷重特性 ;

- ① 曲げトルク M はプラグの S 増加、ボールの玉数増加、マンドレル摩擦係数 μm の増加とともに大きくなる。特にフォームで μm の影響が大きい。
- ② プレッシュダイ反力 Pp はプラグの S 増加とともに漸増する。Pp へのボール玉数の影響は小さい。フォームの Pp はプラグ、ボールよりはるかに大きく、 μm の増加とともに大きくなる。
- ③ マンドレル軸力 Fm はプラグ、ボールでは引張で、S および玉数、 μm の増加とともに引張力が大きくなる。フォームでは μm 小で圧縮、 μm 大で引張となり、 μm による Fm の差違はプラグ、ボールより大きい。

参考文献

- 1) 例えば R.K.Springborn : Cold bending and forming tube and other sections, ASTM (1966), p57
- 2) 石垣他 : 第 57 回塑加連講論(2006), p361