

管のブースタベンディングにおける曲げ荷重特性のFEM解析

塑正 *石垣 勝士 (山本水圧)
田島 雅美 (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

管のドローベンドにおける曲げ外周部(背側)の肉厚減少を抑制するため、管軸方向に軸圧縮力を付加しながら曲げを行うブースタベンディングには数十年の歴史がある。ブースタには、背側材料に摩擦による軸圧縮力を加えるサイドブースタと、管後端側から管全体に軸圧縮力を加えるバックブースタがある。従来のFEMによるドローベンドの解析では、曲げ部の肉厚分布や断面形状などが報告されている^{1)~3)}。本報では工具に作用する荷重特性に与えるブースタの影響をFEM解析で検討した結果について紹介する。

2. 工具の構成と作用する荷重 (Fig.1, Fig.2)

素管をマンドレルに差込み、管 Bottom 側をチャック拘束した後、管 Top 側をクランプダイと曲げダイでつかみ、プレッシャダイを所定の力で管に押し付けた後、バックブースタで管に軸圧縮力(バックブースタ推力: F_b)を加えながら、曲げダイを回転させる(曲げトルク: M)。この時、管の前進とともに、プレッシャダイをサイドブースタによって所定速度で軸方向に前進させる(移動量 L_s)。プレッシャダイには管から管軸直角方向の反力(プレッシャダイ反力: P_p)と管軸方向の摩擦力(プレッシャダイ接線力: P_f)が作用する。また、管の曲げ移動にもなるとマンドレルには軸方向の力(マンドレル軸力: 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) 曲げダイ (剛体): 曲げ半径 $R=120\text{mm}$ (曲げ角度 $\theta=90^\circ$)、半円断面溝と管の摩擦係数=0.1
- (2) ワイパダイ (剛体): 長さ 240mm、傾斜角 $\phi=0.5^\circ$ 、半円断面溝と管の摩擦係数=0.1
- (3) プレッシャダイ (剛体): 長さ 450mm、半円断面溝と管の摩擦係数=0.2、サイドブースタによる移動量 L_s を設定

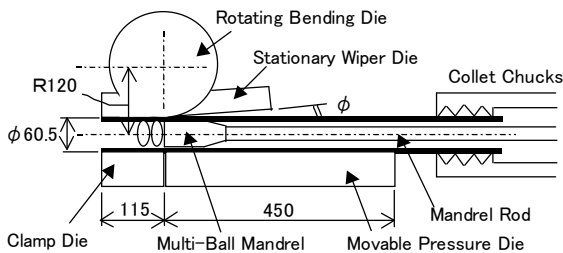


Fig.1 Tooling for booster bending of tube

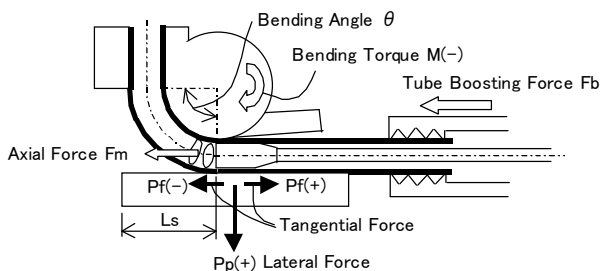


Fig.2 Forces applied to bending tools

- (4) マンドレル (ロッドで軸方向移動拘束): マルチボール型 (玉数=2、外径= $\phi 56.0$)、管との摩擦係数=0.1
- (5) 素管: $\phi 60.5 \times 2t \times 600L$ 鋼管 (STKM11A)。Fig.3 に示す直線硬化型の応力~歪関係を設定 (降伏点 $\sigma_y=354\text{MPa}$ 、ヤング率 $E=206\text{GPa}$ 、塑性係数 $E_t=1.26\text{GPa}$ 、ポアソン比=0.3)。要素分割は周方向 3° ピッチ、軸方向 2mm ピッチ。

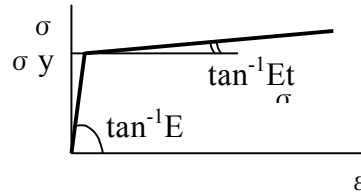


Fig.3 Relationship between stress and strain in uni-axial tension test of tube

4. 解析結果と考察

(1) 曲げトルク (M)

マンドレル有と無の場合のバックブースタ推力 F_b と 90° 曲げ時点の曲げトルク M の関係を Fig.4 に示す。図中で $M(-)$ は曲げダイに必要な回転トルクを、 $M(+)$ は管曲げに過剰な回転トルクを意味する。曲げに必要なトルクは $F_b=0$ の場合に最大で、 F_b の増加とともに $M(-)$ から $M(+)$ に転ずる。すなわち、バックブースタには曲げに必要なトルクを軽減する機能がある。また、 $F_b=0$ ではマンドレル無より有の方が $M(-)$ の絶対値が大きく、かつ $M=0$ となる F_b の値が大きいの。マンドレル無より有の方が $M(-)$ の絶対値が大きくなる要因は、マンドレルと管内面の摩擦抵抗、曲げ部断面の扁平化抑制などである。Fig.5 は F_b と扁平率の関係を示し、マンドレル有無による扁平率の差は $F_b=0$ で最も大きい。

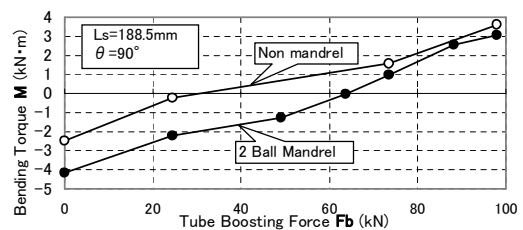


Fig.4 Relationship between tube boosting force and bending torque

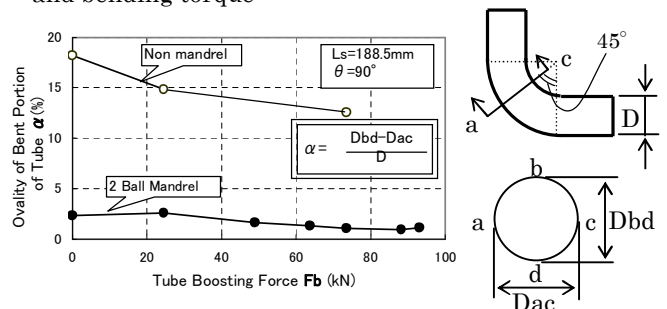


Fig.5 Relationship between tube boosting force and ovality of bent portion of tube

(2) プレッシャダイ反力 (Pp)

プレッシャダイには管によって曲げダイスから離反させる管軸直交方向の反力が作用する。Fig. 6 はバックブースタ推力 Fb と 90° 曲げ時点のプレッシャダイ反力 Pp の関係を示し、Fb の増加とともに Pp は増加する。

(3) プレッシャダイ接線力 (Pf)

バックブースタ推力 Fb=0 でのプレッシャダイ移動量 Ls と 90° 曲げ時点のプレッシャダイ接線力 Pf の関係を Fig. 7 に示す。Pf はプレッシャダイが前進する管から受ける摩擦力で、Pf(-)、Pf(+) はそれぞれ前方向き、後方向きの力を意味する (Fig. 2 参照)。Fig. 7 より、Pf=0 となるプレッシャダイ移動量 (Ls*: プレッシャダイ同期移動量) は約 180mm で、曲げダイス回転円弧長さ Rθ (= 188.5mm) よりもやや小さい。Fb=0 での 90° 曲げ後の軸方向歪分布 (計算) を Fig. 8 に示す。背側の歪は腹側の歪の絶対値よりもやや大きく、素管中立部の歪も (+) であることから、明らかに引張曲げである。これは曲げ領域への管の移動速度が曲げダイス外周の回転速度より小さいことを意味し、Ls* < Rθ となることが理解できる。

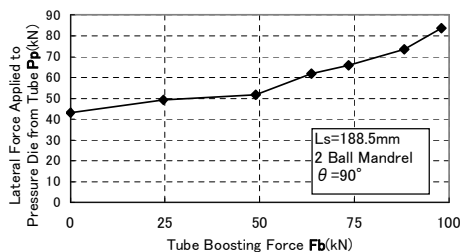


Fig. 6 Relationship between tube boosting force and lateral force applied to pressure die from tube

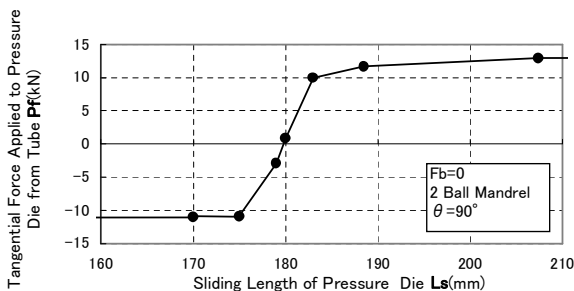


Fig. 7 Relationship between sliding length of pressure die and tangential force applied to pressure die from tube

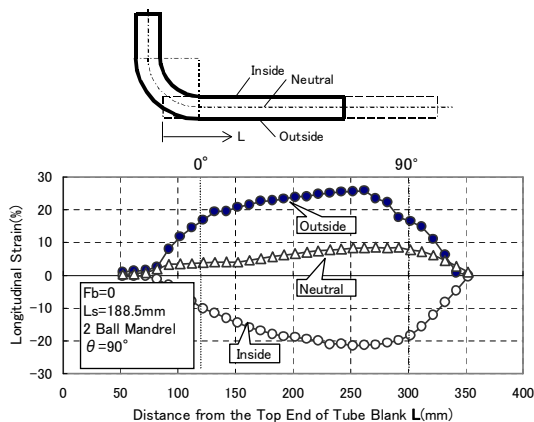


Fig. 8 Distribution of longitudinal strain along the axis of bent tube

Fig. 9 に、Ls=188.5 (>Ls*) と Ls=170 (<Ls*) の場合

のバックブースタ推力 Fb とプレッシャダイ接線力 Pf の関係を示す。Ls > Ls* の場合、Fb=0 では Pf > 0 で、Fb の増加とともに Pf は正から負に変化する。Ls < Ls* の場合は、Fb=0 では Pf < 0 で、Fb の増加とともに Pf の絶対値が漸増する傾向にある。これらの挙動は、Fb の増加によって管の移動速度がプレッシャダイの移動速度と比較して相対的に速くなることによるものと思われる。

Fig. 9 Relationship between tube boosting force and tangential force applied to pressure die from tube

(4) マンドレル軸力 (Fm)

今回の解析条件ではマンドレルに引張の軸力が作用する。Fig. 10 はバックブースタ推力 Fb とマンドレル軸力 Fm の関係を示し、Fb の増加とともに Fm が減少する。Fb の増加にともなう曲げ部の真円度の向上 (Fig. 5) によってマンドレルに作用する面圧が低下することが原因と思われる。

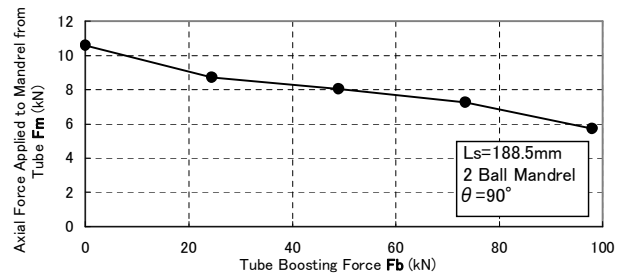


Fig. 10 Relationship between tube boosting force and axial force applied to mandrel from tube

5. 結言

管のブースタベンディングにおける曲げ荷重特性の FEM 解析を行い、以下の結果を得た。

- (1) バックブースタ推力増加により曲げダイスの回転に必要なトルク (曲げトルク) は減少する。
- (2) バックブースタ推力増加により、プレッシャダイ反力 (曲げダイスから離反させる力) は増加する。
- (3) プレッシャダイ接線力 (管からの摩擦力) の向きはプレッシャダイ移動量によって変化する。バックブースタ推力 0 の場合、接線力 0 となるプレッシャダイ移動量は曲げダイス回転円弧長さよりもやや小さい。
- (4) バックブースタ推力増加により、マンドレルに作用する引張力は減少する。

参考文献

- 1) 大浦ほか：平 14 塑加速講論 (2002)、411
- 2) 浜口ほか：CAMP-ISIJ Vol. 16 (2003)、1166
- 3) 高橋ほか：CAMP-ISIJ Vol. 16 (2003)、1170