論文

外径絞りを伴う曲げ加工における薄肉鋼管の変形機構

園部 治* 橋本 裕二**

鈴木 孝司*** 川井 謙一****

Deformation Mechanism of Thin-Walled Tubes
in Bending Method with Slight Reduction in Diameter

Osamu SONOBE*, Yuji HASHIMOTO**,

Koji SUZUKI*** and Ken-ichi KAWAI ****

(Received on April 3, 2010)

Finite element method (FEM) simulation was carried out to clarify the deformation mechanism of thin-walled tubes in the new bending method PRB (Bending Method with Slight Reduction in Diameter by Push with Pressure Die and Rotation of Bending Die) in comparison with that in conventional rotary draw bending. Through this investigation, the following results are obtained. (1) By checking the focused points both inside and outside the bend, it was found that the plastic deformation was almost completed before the bent area in the case of PRB. (2) On the effect of the tube reduction with the pressure die on the deformation of tubes, circumferential compressive deformation involving longitudinal tensile deformation is enhanced outside the bend. The protrusion of the bending die toward a tube facilitates longitudinal compressive deformation inside the bend. (3) In the case of PRB, the tube material tends to be compressed along the longitudinal direction in a large area as a result of the protrusion of the bending die toward a tube inside the bend. This eases the circumferential compressive stress and restrains wrinkling inside the bend, even though the mandrel and wiper are not used in PRB.

Key words: tube forming, FEM, novel rotary draw bending, hydroforming, deformation mechanism.

1. 緒言

自動車の軽量化, 衝突安全性の向上等のニーズから, チューブハイドロフォーミング(以下, THF)により, 鋼管を適用した閉断面構造部品が実用化されてきた¹⁾. THF により製造される実部品は複雑な曲げ形状を有し, 曲げ加工技術が重要と考えられるが, 軽量化に寄与する薄肉鋼管の曲げ加工に関する研究は少ない.

著者らは前報²⁾で, 管の外径絞りを伴う新しい曲げ加工方法である, PRB 法(Bending Method with Slight Reduction in Diameter by Push with Pressure Die and Rotation of Bending Die, 通称, プッシュロータリ曲げ)について, 肉厚外形比 $t/D = 3.7\%$ の高強度 780 MPa 級薄肉鋼管を対象として, 曲

げ加工実験における, 曲げ加工性や加工後のひずみ分布などを, 検討した. また, FEM シミュレーションによる加工性予測が可能であることを示した.

前報²⁾では, PRB 法について, 回転引き曲げ法と比較した場合の特徴を明らかにした. 外径絞りの効果により, マンドレルやワイパーを用いずに, 曲げ内側のしわ等の抑制が可能であることや, 曲げ内側および外側の肉厚変化が小さい等の曲げ加工性の向上が, PRB 法の主な特徴である.

一方で, 外径絞りをを行うため, 曲げ部断面のへん平や, 曲げ内側への曲げ型の食い込みによる形状変化が見られる. また, 曲げ側面における, セン断変形が大きく, 周方向の分布も異なる. 以上のように, PRB 法は, 回転引き曲げ法とは大きく異なった特徴を有している.

鋼管の曲げ加工を実際の部材に適用する際に, 曲げ内側のしわや曲げ外側の破断等, 加工上の問題が生じる場合がある. 新しい曲げ加工法でも, その変形機構を明確にすることで, これらの問題に対処することが可能になると考えられる. その際, 従来の曲げ加工方法と比較することは, 変形機構を明確にする観点で, 重要である.

既報³⁾では, 490 MPa 級, 肉厚外径比 $t/D = 5.0\%$ の比較的厚肉の鋼管を対象に, FEM シミュレーションによって, 曲げ内側の変形挙動を検討した. PRB 法では, 曲げ内側にお

* JFEスチール(株) 商品技術部 〒475-8611 半田市川崎町 1-1
JFE Steel Corporation, Products Service & Development Sec., 1-1
Kawasaki-cho, Handa 475-8611, Japan.

** JFEスチール(株) スチール研究所 同上

JFE Steel Corporation, Steel Research Laboratory, ibid.

*** JFE テクノリサーチ(株) 京浜分析・材料事業部 〒210-0855 川崎市
川崎区南渡田町 1-1

JFE Techno-Research Corporation, Material Technology Division, 1-1
Minamiwatarida-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki 210-0855, Japan.

**** 横浜国立大学大学院工学研究院 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台
79-5
Yokohama National University, Faculty of Engineering, 79-5 Tokiwadai,
Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan.

いて、素管の降伏時点付近で、周方向圧縮応力の緩和が外径絞りの効果として見られる。その結果、回転引き曲げ法のマンドレルおよびワイパーありの場合と、近い応力状態を達成し、しわの発生が抑制されていると考えられた。

本論文では、前報²⁾に続いて肉厚外径比 $t/D = 3.7\%$ の 780 MPa 級薄肉鋼管を対象とし、FEM シミュレーションにより、PRB 法の変形機構を検討した。曲げ内側だけでなく、曲げ外側の変形やせん断変形の周方向分布についても、従来の回転引き曲げ法の変形機構の検討とあわせて、両者を比較した。その結果を、以下に報告する。

2. FEM シミュレーション

2.1 FEM シミュレーション条件

Table 1 に適用した電縫鋼管の機械的性質を、Table 2 に曲げ加工条件を示す。JIS12A 号の管軸方向(ϕ 方向)引張試験で測定した応力-ひずみ曲線から作成したテーブルデータを適用した。 r 値は、 ϕ 方向、管周方向(θ 方向)および 45° 方向(D 方向)を測定し、Hill の二次異方性降伏関数に適用した。PRB 法および回転引き曲げ加工ともに、管の中心軸曲げ半径比 $R/D = 2.0$ であり、曲げ角度は 90° 、プレッシャダイの管軸方向送り量は管の中心軸弧長とした。

シミュレーション条件を Table 3 に、また、モデルの概要を Fig. 1 に示す。解析には、LS-Dyna Ver.971 を用いた。

工具と鋼管の間の摩擦係数は 0.10 を基準とした。回転引き曲げの場合、鋼管とマンドレルおよびワイパーとの間は、潤滑条件を考慮して、0.06 と低めの値を設定した。前報²⁾で示したように、FEM シミュレーションと実験は良く一致しており、変形機構の検討に適用可能である。

2.2 曲げ後鋼管の位置座標定義および変形の注目点

Fig. 2 に、曲げ後および曲げ途中の管の位置座標の定義を示す。曲げの側面視における長手方向(ϕ)と、長手方向各部における断面の周方向(θ)を図のように定義する。

Table 1 Mechanical properties of tube

Tube size $\phi 70.0\text{mm}$ $\times t 2.6\text{mm}$	YS/MPa	TS/MPa	EL/%	r -value		
				r_ϕ	r_θ	r_D
	757	803	17.0	0.51	1.47	0.67

Table 2 Conditions of bending

Bending angle / $^\circ$ & radius / mm	90 & $R=140(R/D=2.0)$
Axial force with booster / kN (for rotary draw bending)	98
Force along radial direction with pressure die / kN (for PR bending)	98, 118, 147
Pressure die motion along tangential direction of bending	Synchronized to rotation of bending die at 140mm of die radius
Lubricant(for rotary draw bending)	Molybdenum disulfide (for tube-mandrel & wiper)
Mandrel diameter / mm (for rotary draw bending)	63.4 (Clearance 1.4mm)

Table 3 Conditions of FEM simulation

FEM solver	LS-Dyna(Ver.971)
Element type	Shell(Belytschko-Wong-Chiang)
Mesh size of tube / mm (before bending)	3.43 (Longitudinal direction) 3.31 (Circumferential direction)
Number of integration points	7 (Thickness), 1 (In-plane)
Friction coefficient	0.06: Tube - mandrel & wiper (for rotary draw bending) 0.10: Others

Fig. 2(a)に示すように、鋼管の長手方向に関しては、曲げ角度にかかわらず、曲げ終点側(Bending end)を 0° とし、曲げ始点側(Clamping end)に曲げ加工中の正の角度 ϕ をとった周方向に関しては、曲げ外側、側面および内側と定義し、それぞれ素管における 0 、 90 および 180° とした。

曲げ加工中、曲げの ϕ が $0 \sim 90^\circ$ 領域以前の、ほぼ直管となる領域では長手方向を x 方向、曲げ角度 0° 位置を 0mm とし、曲げ角度 0° 以前の位置を負の x 座標値とした。PRB 法および回転引き曲げ法それぞれで、Fig. 3 に示すように、特定の点を注目点(Focused point, FP)として、FP1~FP4 と設定した。FP1 と FP2 はしわ発生なしの場合に、曲げ後に約 45° となる位置である。FP3 と FP4 はしわ発生なしとありの条件において、曲げ前の素管でほぼ同じ位置となる点であり、しわの発生点に相当する。

3. FEM シミュレーションによる変形挙動

3.1 曲げ外側(FP1)のひずみおよび応力履歴

PRB 法および回転引き曲げ法に対し、正常に曲げが完了した場合について、注目点 FP1 における曲げ加工中の相当塑性ひずみ、ひずみ成分および応力履歴を Fig. 4 に示す。各方向のひずみ成分、管長手 ε_ϕ 、管周 ε_θ および肉厚 ε_t は弾性変形を含んだ値である。また、Fig. 4 中に示した(1)~(5)は、FP1 の変形が進行する途中における、着目時点を示す。

回転引き曲げ法の場合、曲げ角度 0° の位置(Fig. 2(a)参照)に到達する前から徐々に塑性変形が進み、 0° 位置を越えた曲げ領域でも大きく変形が進展する。相当塑性ひずみの増加の傾きが大きい過程とやや停滞気味の過程があり、ひずみ成分も同様の傾向となる(Fig. 4(a), (b))。これは、変形がマンドレルのボールに大きく影響を受けるため⁴⁾、ボールを通過する際に、Fig. 4(c)の(4)および(5)の時点に見られるように、周方向応力が圧縮から引張りに大きく変化し、変形が大きく進む。

一方 PRB 法の場合、 0° 位置をわずかに超えて曲げ領域に入った時点(Fig. 4(a)の時点(3))で相当塑性ひずみがほぼ飽和し、曲げ領域ではそのひずみを保持し続ける。プレッシャダイで外径を絞る効果により、回転引き曲げ法に比べ

Fig. 1 Models of FEM simulation

Fig. 2 Definition of coordinates in bent tube

て周方向圧縮ひずみが大きく、その分、長手方向伸びひずみが大きくなり、減肉が小さくなる(Fig. 4(b)). マンドレルを用いないため、曲げ領域における周方向応力の変化は小さく、周方向は圧縮応力のまま、曲げ加工が進展する(Fig. 4(c)).

Fig. 5 に、PRB 法の FEM シミュレーションにおける、注目点 FP1 の、Fig. 4 中に示した(1)~(3)の時点に対応する、曲げ加工中の鋼管上の位置を示す。Fig. 5 の曲げ型と鋼管の形状から判断して、Fig. 5 の(1)付近で管の外径絞りが始まり、(3)付近でほぼ完了する。

Fig. 4(a)と Fig. 5 で、相当塑性ひずみの履歴と、FP1 の状態とを対比させる。Fig. 4(a)で塑性変形が開始する時点(1)は、Fig. 5 では管の外径絞りが始まる時点と一致し、塑性ひずみがほぼ飽和する(3)では、外径絞りが完了することがわかる。これらより、曲げ外側の変形は、 0° 以上の曲げの領域に入る前に、外径絞りによってもたらされると考えられる。

PRB 法では外径絞りにより、曲げの中立軸位置から曲げ外側への距離が小さくなる。これは一般的には、減肉抑制

Fig. 3 Schematic explanation of focused point (FP means focused point)

Fig. 4 Comparison of strain and stress histories at FP1 in outside of bend in PRB with 148 kN of pressure die force and rotary draw bending with the mandrel and wiper (RDB)

Fig. 5 Position of FP1 during its plastic strain is increasing in PRB (The numbers (1)~(3) correspond to those in Fig. 4)

に効果があると考えられる。さらに、PRB 法の曲げ外側の ε_ϕ は回転引き曲げ法によるものより大きく、 ε_θ は小さい。従って外径絞りは、中立軸から曲げ外側までの距離を小さくするだけではなく、周方向材料縮みを助長し、曲げ領域に素材を供給することにより、減肉抑制効果を高めていると理解される。

3.2 曲げ内側(FP2)のひずみおよび応力履歴

Fig. 6 に注目点 FP2 の、ひずみおよび応力履歴を示す。図中に示した(1)~(6)は、Fig. 4 の場合と同様、FP2 の変形が進行する途中の、着目時点を示す。

回転引き曲げ法の場合、曲げ内側において曲げ領域の手前から変形が徐々に進むのは曲げ外側と同様である。曲げ外側に比較してより手前で大きく変形が進み、曲げ領域での変形の進展は小さい。材料がマンドレルのボールを通過する際に周方向応力が変動し、それに応じて長手方向および肉厚方向ひずみの変化が大きくなる⁴⁾(Fig. 6(a), (c)の(5)および(6))ことも曲げ外側と同様である。

PRB 法においては、曲げ外側の場合よりさらに手前で相当塑性ひずみがほぼ飽和している(Fig. 6(a)). 塑性変形が始まる時点では、Fig. 6(c)の(1)~(2)に示すように、周方向の圧縮応力が一旦緩和され、引張応力の状態となる。その後再び圧縮応力となり、周方向応力が最小となる時点で、相当

Fig. 6 Comparison of strain and stress histories at FP2 in inside of bend in PRB with 148 kN of pressure die force and rotary draw bending with the mandrel and wiper (RDB)

塑性ひずみがほぼ最大値に近づいて飽和し始め、再び緩和された時点で塑性変形がほぼ終了している(Fig. 6(a)の(4)).

Fig. 7 に, Fig. 6 の(1)~(4)の時点に対応する注目点 FP2 の位置を示す. 塑性ひずみが増大し始める(1)~(2)は, 素管が曲げ型に接触する前の過程に相当する. (3)~(4)の塑性ひずみの増大がほぼ飽和に達する過程では, (3)の時点で注目点 FP2 はまだ曲げ型に接触していないが, 外径絞りが始まり, その後曲げ型に完全に接触するようになる.

応力との対比では, (2)~(4)の過程で曲げ型に近づくにつれて, 長手方向および周方向の圧縮応力が共に増大して塑性変形が大きく進み, (4)から 0° 位置までの間に, 塑性変形がほぼ最大に達する. 変形が大きくなる(2)~(4)間の過程では, 周方向圧縮応力の増大が大きい. これが変形に強く影響を与えていると考えられ, 周方向の伸びが比較的小さくなり, その分, 長手方向の縮み変形に大きく現れる.

3.3 曲げ中の管断面における材料位置の変化

Fig. 8 に曲げ前後の管断面の節点位置の変化を, Fig. 9 に

Fig. 7 Position of a focused point (FP2) in inside of bend during plastic strain is increasing in PRB (The numbers (1)~(4) correspond to those in Fig. 6)

Fig. 8 Cross sectional node positions before and after bending

Fig. 9 Distribution of circumferential strain (ϵ_θ) along circumferential direction

ϵ_θ の周方向分布を示す. 曲げ前の状態はプレッシャダイによる荷重負荷の前である. 節点は管の肉厚中心に位置する.

回転引き曲げ法の場合, 曲げ内側では周方向に伸び変形し, 曲げ外側までの間で徐々に縮み変形に転じていることが, Fig. 9 からわかる. また Fig. 8(a)に示すように, ほぼ全域でわずかずつ, 曲げ前後の断面の節点位置にずれが見られる.

一方 PRB 法の場合には, 曲げ内側では, 周方向のわずかな伸び変形が見られるが, 曲げ側面付近では逆に圧縮変形が強くなり(Fig. 9), 曲げ前後の節点位置のずれが小さくなっている(Fig. 8(b)). また, 曲げ外側付近では外径絞りにより節点が Fig. 8(b)中の矢印で示すように, 管中心軸方向に移動し, 周方向の圧縮変形はより大きくなる.

ここで, PRB 法の変形挙動について考える. プレッシャダイの負荷により, 管が曲げ半径方向に押し付けられる際, 曲げ内側が曲げ金型に到達する前の部位では, 工具による支持が無い場合, 管全体が曲げ中心方向に押し込まれる. その後, 曲げ角度 0° 位置に達するまでの間, 0° 位置の手前で, Fig. 7 の(1)~(4)に見られるように, 曲げ型によって管が押し戻される. これにより, Fig. 2(a)中に示した A の部位のように, 管の曲げ内側へ曲げ型が食い込んだような形状となる.

以上のような変形挙動の中, 曲げ内側が曲げ型により押し戻される際に, 曲げ外側には, 外径絞りによって周方向に大きな縮み変形が入り, 長手方向に伸びが生じる. 曲げ内側では, 管が曲げ型に接触する前後の負荷によって長手方向に縮み, 周方向にも若干伸びる. 曲げ型との拘束が強くなると周方向伸びはある程度制限されるため, 曲げ外側に比べてより手前から長手方向縮みが入り始め, 塑性変形も, より曲げ領域の手前で飽和すると推定される.

以上より PRB 法では, 曲げ外側と内側で, プレッシャダイによる外径絞りの効果が別々に現れ, 外径絞りの直接の効果は曲げ外側の変形に影響を及ぼし, 一方, 曲げ内側の変形は, 曲げ型の曲げ内側への食い込みの影響が強いと考えられる. 特に曲げ内側について, PRB 法が回転引き曲げ法に比べて増肉が小さいのは, 曲げ領域の手前から長手方向の縮み変形が入るため, 曲げ内側の長い領域で, 長手方向の縮み変形を分担することが大きいと考えられる.

3.4 曲げ内側のしわの発生

管の曲げ加工において, 曲げ内側のしわは, 圧縮力によって生じる, 塑性不安定現象であると定性的に理解されている⁵⁾が, 詳細な変形機構についての報告は少ない. Li ら⁶⁾は, 回転引き曲げ法の曲げ内側において, FEM シミュレーションにより調査した結果を報告している. 管周および長手方向の, 二軸圧縮応力の管長手方向分布における最大値を, 曲げ角度との関係で調査し, 両者の差が小さいとしわ発生の可能性が高くなると結論付けている. しかし, 分布の最大値を調査する手法では, 局所的に生じるしわの周辺の応力状態が, 完全に明確にはならない. そこで, 前節までと同様に, 注目点における応力状態を追跡する手法を採用し, しわ発生との関連を調査する.

PRB 法および回転引き曲げ法に関して, 曲げ内側の長手方向および周方向の応力経路を Fig. 10 に示す. それぞれに対し, しわ発生ありの場合と無しの場合の応力経路を示し,

応力経路の表示については、しわが発生した場合における、しわが生じ始める曲げ角度付近で表示を打ち切った。また、応力状態と素管の曲げ内側の降伏開始時点との関係を参照するため、素管の降伏曲線を Fig. 10 中に重ねて示す。

しわ発生ありの場合となしの場合で、ほぼ同じ長手方向位置となる注目点 FP3 と FP4 の応力経路を調査した。また回転引き曲げ法でしわ発生無しの場合、FP2 の応力経路も加えて調査した。

3.2 節で述べたように、PRB 法および回転引き曲げ法ともに、曲げ加工の塑性変形が進むにつれて、FP3 および FP4 では長手方向および周方向の圧縮応力が共に強くなるのがわかる。

初めに、回転引き曲げ法に関して述べる。Fig. 10(a)に示すように、FP3(しわ発生なし)および FP4(しわ発生あり)は、降伏曲線を超え塑性変形が始まる少し後まではほぼ同じ応力経路をたどる。その後、最終的にしわが発生する FP4 で、長手方向応力で約 770 MPa 付近から周方向圧縮応力が強くなり、[周方向/長手方向]の圧縮応力比が大きくなる。一方、最後までしわの発生がない FP3 では、マンドレルとワイパーによって、しわの発生が抑制されるよう矯正を受けながら変形が進む。その結果、[周方向/長手方向]の圧縮応力比は、しわ発生の場合よりわずかに小さくなっている。また FP2(しわ発生なし、FP3 より曲げ後方に位置する)を見ると、周方向圧縮応力が 0 MPa 付近まで緩和される時点 (Fig. 10(a)中の(*))がある。曲げの先端側より後方になるほど、長手方向の圧縮ひずみの蓄積が大きくなるため、マンドレルとワイパーによってしわが抑制される際に、応力状態が急激に変化する状況になっているためと考えられる。

PRB 法に関しては、Fig. 10(b)に示すように、FP3 および FP4 共に、一旦、長手方向および周方向の圧縮応力が強くなった後、周方向圧縮応力の緩和が見られる。しわが発生した荷重条件(プレッシャダイ荷重 98kN)の場合は、FP4 の

周方向の圧縮応力緩和が、発生なしの場合の FP3 と比較して少ない。FP3 では周方向応力が引張応力になっているが (Fig. 10(b)中の(*1)), FP4 では 0 MPa (Fig. 10(b)中の(*2)) 付近までである。PRB 法においてしわが抑制されている場合、回転引き曲げ法の FP2 で生じている変形状況 (Fig. 10(a)中の(*))を、外径絞りの際に極端に生じさせている状態と推定される。また、荷重が小さく、しわの発生する条件の場合、周方向圧縮応力の緩和が不十分であったと考えられる。

曲げ内側において、長手方向に生じる圧縮応力に対して、周方向の圧縮応力が緩和されれば、周方向に伸びやすくなり、しわの発生は抑制される傾向になると考えられる。定性的議論にとどまるが、これが、周方向圧縮応力の緩和の、しわの抑制との間の相関と理解される。

PRB 法および回転引き曲げ法において、しわが発生する際の注目点 FP4 の状況を Fig. 11 に示す。注目点に隣接する部位が曲げ内側に張り出している。これが注目点におけるしわ発生の起点となっており、PRB 法と回転引き曲げ法で同様な形状であるとわかる。いずれも曲げ領域に入る手前で起点が生じており、しわの防止には、曲げ領域に入る前に適切な変形状や応力状態を作ることが重要である。

既報³⁾では、外径 $\phi 63.5\text{mm}$ ×肉厚 $t 3.2\text{mm}$ ($t/D=5\%$)と、本研究の場合より比較的厚肉の鋼管に対して、PRB 法は回転引き曲げ法のマンドレルおよびワイパーありの場合と同様の応力状態を達成して、曲げ内側のしわを防止していると推定した。本研究の結果から、定量的には若干異なるが、定性的には薄肉の条件でも、周方向圧縮応力が緩和されるという観点で、同様の応力状態が成立していると言える。また、PRB 法における周方向変形の発生しやすさについても言及しているが、本研究で用いた薄肉鋼管の場合には、周方向の変形に加え、長手方向の変形が曲げ領域の外を含む長い領域に及んでいる効果が、特に大きいと推定される。

しわ発生点に注目し、注目点の応力経路を追跡して変形機構を調査した本研究で得られた結果は、Li らの結果⁶⁾を裏付けている。曲げ内側において、長手方向の圧縮変形は不可避免的に発生するため、周方向の圧縮応力をいかに緩和するかが、重要と考えられる。

しわ発生の無い条件における、圧縮応力の緩和の値に、両曲げ加工法間で差があるのは、マンドレル、ワイパーによる機械的な拘束の有無によると推定される。さらに、周方向の圧縮応力の状態、あるいは[周方向/長手方向]の応力比は、しわ発生有無の条件に関する表れ方の一つに過ぎず、

Fig. 10 Stress paths at focused points

Fig. 11 Initiation of wrinkling in PRB and rotary draw bending without the mandrel and wiper

Fig. 12 Comparison of projected mesh line calculated by FEM simulation and ideal deformation line assumed not to occur shear deformation

また定性的な傾向にとどまっている．これらに関する詳細かつ定量的な検討は，今後の課題となる．

3.5 周方向のせん断ひずみ分布

前報²⁾に示したように，PRB 法の場合，回転引き曲げ法に比べてせん断変形が大きく，せん断ひずみの管周方向分布も異なる．Fig. 12 に PRB 法および回転引き曲げ法の，FEM シミュレーションにおける要素の線を適当な間隔で，曲げ回転軸に垂直な面(x - y 面と規定)に投影した線(以下，要素線)と，せん断変形が生じないと仮定した場合の理想線(以下，理想線)を重ねて示す．理想線は鋼管の中心軸において要素線と一致させている．以下，要素線を理想線に対して比較する．

Fig.12 (a)の回転引き曲げ法については，曲げ外側では曲げ始点付近および曲げ終点付近で伸びがやや大きく，曲げ内側では曲げ始点付近ではほぼ一致し，曲げ終点付近では縮み変形が小さく，長手方向間隔が大きくなり，曲げ終点の外までその影響が及んでいる⁴⁾．

一方，Fig.12(b)の PRB 法については，曲げ内・外側ともに，曲げ始点において要素線と理想線は一致している．曲げ外側では長手方向間隔が全体的に小さくなっており，逆に曲げ内側で全体的に大きくなっている．その結果， $0 \sim 90^\circ$ の曲げ範囲において，曲げ外側には素材が相対的に多くなり，曲げ内側では素材が少なくなる．これらの変形は，3.3 節で示した断面における変形と関連しており， 90° 曲げ

を $0 \sim 90^\circ$ の曲げ領域への素材の供給過程と考えた場合，曲げ外側では絞りにより素材の供給が進み，曲げ内側では曲げ型の食い込み(Fig. 2(a)および Fig. 12(b)の A 部参照)により素材の供給が遅れて生じる．その結果，曲げ内側と外側で曲げ部への材料流入量の差が生じ，曲げ側面のせん断ひずみが大きくなっていると考えられる．

PRB 法は回転引き曲げ法とは異なって，積極的な外径絞りにより，曲げ外側周方向の強い圧縮変形や，曲げ内側への曲げ金型の食い込み変形等の，複合的な変形を生じさせることで，曲げ加工性を高めており，それらの影響により，せん断変形の現れ方に違いが生じると考えられる．

4. 結 言

外径絞りを伴う曲げ加工法(PRB 法)における高強度薄肉鋼管の変形機構について，回転引き曲げ法との比較から FEM シミュレーションによって検討し，以下の結果を得た．

(1) 回転引き曲げ法が，曲げに入る前から曲げの領域にまたがって塑性変形が進展するのに対し，PRB 法は周長絞りの効果で，管が曲げ領域に入る前に，塑性変形がほぼ終了する．

(2) PRB 法において，プレッシャダイによる周長絞りの効果は，曲げ外側と内側で異なる形として現れる．曲げ外側ではプレッシャダイでの周長絞りの影響を直接受け，長手方向伸び変形が大きくなり，曲げ内側では金型の食い込みの影響で，曲げ領域に入る前に長手方向圧縮変形が生じる．

(3) PRB 法において，しわの発生が抑制される場合には，塑性変形が始まる付近で，曲げ内側への金型の食い込みの影響から管周方向圧縮応力が緩和される状態が見られる．

(4) PRB 法は，外径絞りにより曲げ外側の周方向圧縮や，曲げ内側への曲げ金型の食い込み等の，複合的な変形により曲げ加工性を高めている．またこれらの影響により，回転引き曲げ法に比べて，せん断変形が大きくなり周方向のせん断ひずみ分布が異なる等の差が生じる．

参 考 文 献

- 1) Fuchizawa, S.: Proc. TUBEHYDRO2007 Conf. (2007), 1-10.
- 2) 園部治・橋本裕二・鈴木孝司・上野行一・岡田正雄・川井謙一: 塑性と加工, **52**-605(2011), 715-719.
- 3) Sonobe, O., Hashimoto, Y., Suzuki, K., Sato, A., Ueno, Y. & Okada, M.: Proc. 9th ICTP Conf. (2008), 86-91.
- 4) 園部治・橋本裕二・鈴木孝司・坂田敬・川井謙一: 塑性と加工, **51**-589(2010), 121-125.
- 5) 高橋和仁・村田眞: 軽金属, **54** (2006), 283-289.
- 6) Li, H., Yang, H., Zhan, M., Sun, Z. & Gu, R.: Int. J. Mach. Tools Manuf., **47** (2007), 1164-1175.