論文

管材の曲げ加工後のハイドロフォーミングの変形挙動

水村 正昭* 栗山 幸久**

Deformation Behavior of Tube during Hydroforming after Bending

Masaaki MIZUMURA* and Yukihiisa KURIYAMA**

(Received on August 31, 2011)

Recently, hydroforming technologies have been applied to complex-shaped auto mobile parts, so that the number of hydroforming parts after bending has increased. In this study, deformation behavior of a tube during hydroforming after bending is investigated. First, a tube is bent by 45 degrees by rotary draw bending. The bent tube is then introduced into a hydroforming die and expanded to a rectangular cross section at a 50% expanding ratio. We use several types of loading paths of internal pressure and axial feeding. Results show that, in the case of a high-initial pressure path, bursting occurs on the intermediate side of the tube during axial feeding. When the internal pressure is decreased to prevent bursting, bursting still occurs on the compression side in the case of high pressure during axial feeding. On the other hand, in the case of low internal pressure during axial feeding, wrinkles form after a maximum pressure increase. Finally, a sample that features no bursting or wrinkles is successfully obtained. It is found that the gap between the bent tube and the hydroforming die on the compression side should be small to prevent bursting or wrinkles from occurring, so that the bending radius before hydroforming should be large.

Key words: tube forming, bending, forming property, bulge forming, expanding, deformation behavior, finite element method, hydroforming, loading behavior.

1. 緒言

管材に内圧と管軸方向の押込み（以後、軸押しと称す）を負荷して成形する加工法は、古くからバルジ加工という呼び名で自転車部品¹⁾や配管継手²⁾に使用されていたが、いずれも素管をT字型に成形するような単純形状であった。しかし、近年では部品統合や軽量化を目的として自動車部品への適用が急速に進み^{3), 4)}、呼び名もハイドロフォーミング（以後、HF と略す）に変わって形状も複雑化している⁵⁾。そのため、管材を直線のまま HF するだけでなく、Fig. 1 に示すように曲げ加工されてから HF される例が増加している。

そこで本論文では、曲げ加工後の HF における変形挙動を検討する。曲げ加工や HF のそれぞれ独立の加工の変形挙動に関しての研究例は多いが、両者の相互的な関連も含めて検討した例は少ない。Hora ら⁶⁾、Lei ら⁷⁾は、曲げ加工と HF による実部品加工を連続解析してその変形挙動を調査している。基礎的な検討例では、佐藤ら⁸⁾、中村ら⁹⁾、Sonobe ら¹⁰⁾、石垣ら¹¹⁾らの研究があるが、いずれも拡管率

は 30%以下と比較的小さいため、曲げ形状特有の HF の課題が現れにくい。そこで本論文では、曲げ加工後の HF の拡管率が 30%以上となる難度の高い加工を対象に検討する。

Fig. 1 General hydroforming processes

Table 1 Sizes and mechanical properties of tube

Outer diameter D_0 /mm	Wall thickness t_0 /mm	Length L_0 /mm	Yield stress σ_y	Tensile strength σ_B	Total elongation ϵ_{el} /%	n value	r value
60.5	2.0	600	255	307	49.7	0.225	1.961

2. 実験および解析方法

2.1 実験方法

素管の寸法は、外径 $D_0=60.5\text{mm}$ 、肉厚 $t_0=2.0\text{mm}$ 、長さ

* 新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 〒293-8511 富津市新富 20-1
Steel Research Center, Nippon Steel Corporation,
20-1 Shintomi, Futtsu 293-8511, Japan.

**新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 同上
Steel Research Center, Nippon Steel Corporation, ibid.
現在：横浜国立大学 安心・安全センター
〒240-8511 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5
Center for Risk Management and Safety Sciences, Yokohama National
University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan.

$L_0=600\text{mm}$, 材質は, n 値や r 値の高い深絞り用の電縫鋼管を使用する. 素管の寸法と機械的特性を Table 1 に示す.

管材の曲げ加工方法には非常に多くの種類があるが¹²⁾, その中でも HF の予加工として最も工業的に多く採用されているのは回転引き曲げ工法である. 当該工法は内外面から複数の金型で拘束されているため小曲げ半径の曲げが可能であり, かつ量産時の形状再現性が高い. そこで今回の検討では回転引き曲げ工法を採用する. 具体的には, 曲げ角度を 45° とし, 曲げ半径 R は $R/D_0=3, 4, 5$ の 3 種類 (以後簡略化のため, それぞれ 3DR, 4DR, 5DR と称す) を試験可能としたが 4 章で後述するように, 曲げ半径は大きい方が成形上は有利となるため本論文では 5DR に統一する. その他の曲げ条件としては, 圧力型速度はロール回転速度と同期させ, 芯金は砲弾と玉 2 個を使用する. またワイパーと芯金には曲げ加工用潤滑油を塗布する.

曲げ加工後の管を Fig. 2 のような曲げ半径 3DR ($60.5 \times 3=181.5\text{mm}$) の HF 金型に装着し, 両管端から軸押し量 δ を負荷しながら内圧 p を負荷する. HF 金型の拡張部断面は長方形とし, 幅 B_e を変化させて拡張率 κ ($=(\text{成形後の周長}-\text{素管周長})/\text{素管周長} \times 100$) は 35%と 50%の 2 種類設定できる. ただし本論文では各種加工不良の影響を調査するため極力難度の高い条件として拡張率 κ は 50%に統一する.

Fig. 2 Hydroforming die shape

潤滑条件は一般防錆油とテフロンシートの 2 種類で試験する. 著者らは今回と同様の長方形断面で全体が直線形状の HF で摩擦係数 μ の影響を以前調査したが, その場合は摩擦係数 μ が低いほど HF の成形可能範囲は拡大した¹³⁾. 今回の曲げ形状の場合も同様の傾向となることを確認しているが, 本報では摩擦係数 μ の影響を調べるのが主目的ではないため詳細は省略する. しかし, 今回の HF は成形難度が高くて同一潤滑条件で各種の成形不良が発生する条件や成形可能な条件を造り分けることができなかったため, 上述の 2 種類の潤滑条件で試験する.

素管の電縫溶接部の周方向位置は, 比較変形が厳しくない想定される曲げ側面中央に固定する. なお, 実際にも当該箇所の特異な変形や割れ等は観察されなかった.

負荷経路に関しては, その影響を調べるため, 各種条件で試験する. Fig. 3 に示すように, 内圧を初期圧力 p_i まで負荷した後, 軸押し量 δ と内圧 p を負荷していき, 最終軸押し量 δ_F まで達した後はコーナー R を成形するため内圧のみ昇圧する. 本来であれば, 軸押し中の内圧は一定の方が

パラメータ数も少なく整理しやすいが¹⁴⁾, 本 HF では後述のように各種の成形不良が発生するため内圧一定では成形が困難であった. 以上の理由から, 本論文では Fig. 3 のような軸押し中の内圧を変化させた負荷経路で HF 試験を行う.

Fig. 3 Loading path for hydroforming tests

2.2 FEM 解析方法

Fig. 4 のモデルに示すように回転引き曲げ工程と HF 工程の連続解析を実施する. FEM のソルバーには PAM-STAMP (動的陽解法) を用い, 要素は素管の状態では約 5mm 角のシェル要素とする. 素管のサイズや材料特性に関しては実験と同一条件である. なお, 前述のように実験では素管の電縫溶接部位置を曲げ側面中央に固定したが, 特異な変形や割れ等が実際には観察されなかったことから, 本解析では特に電縫溶接部はモデル化せず円周方向に均一な肉厚および材料特性とする.

Fig. 4 FEM model of bending and hydroforming

まず素管を回転引き曲げ工法で 5DR の曲げ半径で 45° の曲げ角度で曲げた後, その曲げ管を HF 金型に装着して HF 工程を解析する. その際, 曲げ後の形状・肉厚・ひずみ・応力を HF 工程の解析に反映させる.

摩擦条件は, 曲げ工程では潤滑油を塗布したワイパーと芯金との摩擦係数 μ を 0.12 とし, その他の工具との接触部は無潤滑のため摩擦係数 μ を 0.18 とする. HF 工程での潤滑条件は実験と同じく 2 種類とし, 摩擦係数 μ の値は一般防錆油で 0.15, テフロンシートで 0.02 とする. なお, これらの摩擦係数 μ は, それぞれの潤滑条件で平板摺動試験¹⁵⁾を実施し, その結果から得られた値である.

2.3 FEM 解析の精度検証

まずは当該解析の妥当性を評価するため、肉厚分布における実験値と FEM 計算値との比較を行う。Fig. 5 に、成形不良が起きない場合（詳細は後述の 3.5 節参照）の中央断面における肉厚方向ひずみ分布の比較を示す。同図中に曲げ加工後と HF 後のそれぞれにおける比較を示す。なお、横軸 x は曲げ外側からの長さをその時点の周長の半分の値で除した無次元量である。すなわち、 $x=0$ は曲げ外側、 $x=1$ は曲げ内側に相当する。本図より、曲げ加工後、HF 後とも FEM 解析値と実験値は良い一致が得られている。また、一般に、曲げ加工後に曲げ装置から鋼管を取り外すとスプリングバックが生じるが^{16), 17)}、今回使用した材料は強度が高くないため、スプリングバック量は約 1° と小さい。念のためスプリングバックの有無でそれぞれ FEM 解析したが、曲げ加工後および HF 後の肉厚分布に及ぼす影響はほとんどなかった。よって以後はスプリングバックを無視して検討を行う。

Fig. 5 Comparison of wall thickness after bending and hydroforming between experiment and FEM

3. 各種負荷経路における変形挙動

一般に HF の成形可否や不良形態は内圧と軸押し量の負荷経路の影響を大きく受ける¹⁴⁾。そこで本章では、各種負荷経路によって発生する不良形態を調査し、FEM 解析を用いてその発生メカニズムを詳細に考察する。

Fig. 6 Sample after hydroforming test in burst case at intermediate side during initial axial feeding

3.1 軸押し初期に側面部でバーストする場合

まず初期圧力 p_i が高過ぎる場合には、Fig. 6 のように側面部中央で軸押し初期にバーストする。なお、同図では座

屈も発生しているように見えるが、これはバースト後に発生した座屈である。本試験では、バースト発生後は直ちに試験を停止させるが、軸押し中のバーストに関しては試験停止後も若干押ししてしまうため座屈が見かけ上残る。

当該バースト現象に関して FEM のひずみ履歴を用いて詳細に考察する。まず HF 前の曲げ工程で発生するひずみを Fig. 7 に示す。一般に回転引き曲げ工程では、曲げ外側で軸方向引張・周方向圧縮、曲げ内側で軸方向圧縮・周方向引張のひずみが生じる¹⁸⁾。なお、側面のひずみは 0 に近いが引き曲げのため若干曲げ外側と類似のひずみ傾向となる。以後、この曲げ工程後のひずみ最終値から HF におけるひずみ増分が開始される。

Fig. 7 Wall thickness distribution after bending and strain transition during bending process

Fig. 8 に軸押し初期にバーストする例のひずみ経路と変形途中の形状推移を示す。まず曲げ加工後の HF 変形の一般的な傾向を説明する。HF では軸方向に圧縮されながら周方向に拡張されるため、Fig. 8 のひずみ経路上では左上の方向にひずみが進行する。しかし、そのひずみ進行の傾き、すなわちひずみ比 β (=軸方向ひずみ ε_ϕ / 周方向ひずみ ε_θ) は位置によって異なり、曲げの内側ほどひずみ比 β は小さくなる（負の方向に大きくなる）。また、管端からの軸押しは管断面に対して直角に押されるため、曲げの外側と曲げ内側の軸方向のラインにおけるそれぞれの縮み量は同量となる。しかし、曲げ内側の軸方向のラインにおける元の線長は曲げ外側のそれよりも短いため、元の長さに対する縮み量の比で比較すると曲げ内側の方が大きい。しかも円周方向に拡張されるに伴い、曲げ外側の軸方向のラインにおける長さは長くなり、反対に曲げ内側では短くなるため、上記の傾向はより顕著になる。そのため曲げ外側から内側になるに伴って、軸方向圧縮ひずみの絶対値が大きくなり、その結果、ひずみ比 β の値が小さくなる（負の方向に大きくなる）。以上のことから、Fig. 8 のひずみ経路では、曲げ内側では純粋せん断側、側面では平面ひずみ側にひず

みが進展する。一方、曲げ外側では軸方向圧縮ひずみが小さいため塑性変形が進みにくく、そのため円周方向の拡張もほとんど進行しない。さらに、曲げ工程のひずみ進展方向と HF 工程のひずみ進展方向とを比べると、曲げ内側では同一方向、曲げ外側では反対方向になることも上記のような傾向となる原因の一つである。

Fig. 8 Deformation and strain transition during hydroforming process in burst case at intermediate side during initial axial feeding

また、上述のように HF 工程では、ほとんど全ての箇所ひずみが、軸方向ひずみ $\varepsilon_\phi < 0$ 、周方向ひずみ $\varepsilon_\theta > 0$ の範囲、すなわち第 2 象限に存在する。一般に、薄板材の破断を Hill のくびれ条件等の塑性不安定から考える場合、第 2 象限ではまず板幅方向に拡散くびれが発現し、次いで板厚方向に局部くびれが起きる。しかし本試験体のような形状では周囲の拘束があるため拡散くびれでは破断に至らず局部くびれが起きる際に破断する¹⁹⁾。なお、第 2 象限における Hill の局部くびれ限界は -1 の勾配となり、すなわち肉厚ひずみが一定であることを意味する。そこで直線形状の HF で検討した場合と同様に限界減肉率 τ をもってバーストすると仮定する²⁰⁾。具体的には、本材料の実績値より τ が 0.4、肉厚ひずみに換算して -0.51 に達した時にバーストすると仮定する (Fig. 8 のひずみ経路の図中の一点鎖線)。

上記が本 HF の一般的な傾向であるが、次に、軸押し初期にバーストする本例の傾向に関して考察する。本例では、初期圧力 p_I が高いために各部のひずみ進展が一気に進む。しかし、上述のように曲げ内側では純粋せん断に近い方向にひずみが進展するためバーストしにくい。それに対し、側面部では平面ひずみ方向にひずみが進展するため、当該箇所が最も早く成形限界に達する。なお、この時点で曲げ

外側は、まだ金型に接触していない (Fig. 8 の d)。すなわち、まだ周方向に伸びている最中のため、側面部のひずみが停止しないでバーストに至ると考えられる。

3.2 軸押し中期に曲げ内側でバーストする場合

前節の軸押し初期のバーストを防ぐために、初期圧力 p_I を低く抑えて成形しても、その後の圧力が高いと軸押し途中でバーストする。しかし、軸押し初期のバーストの場合が側面部でバーストするのに対し、この軸押し中期に発生するバーストは、Fig. 9 のように曲げ内側で発生する。なお、本例でも若干座屈しているように見えるが、これは前節と同様の理由である。

Fig. 9 Sample after hydroforming test in burst case at compression side during large axial feeding

Fig. 10 Deformation and strain transition during hydroforming process in burst case at compression side during large axial feeding

本バーストに関しても前節と同様に FEM のひずみ経路を用いて詳細な考察を行う。Fig. 10 に FEM 結果を示す。前節の場合と同様に軸押しとともに拡張されるが、前節の場合よりも肉厚が低いのに周方向の拡張量は少ない。一方、本 HF では両端からの軸押し方向はお互いが同一の向

き合う方向ではなく、 45° の角度を持っているため、拡張部中央を折り曲げようとするモーメントが作用する。そのため曲げ外側では早期に金型に押し付けられ、それ以降は拡張されずにひずみ進展は停止する。また、初期から金型と接触している側面部でも、曲げ外側と内側の両方で周方向に膨らんでいる最中は周方向に変形するが、曲げ外側の膨らみが停止してしまうと金型との摩擦抵抗が勝り、ほとんど変形が進まなくなる。一方、曲げ内側における金型との隙間は拡大されるため、それ以降は曲げ内側だけに拡張が集中し、ある瞬間に一気に隙間が閉じる（この瞬間を、以後、隙間閉塞時と称す）。そのため周方向ひずみが急激に増大するため、それまでせん断方向に進んでいた曲げ内側のひずみが、平面ひずみ側に傾く（ひずみ比 β が増加する）。よって、曲げ内側のひずみが成形限界線に達し、当該箇所でもバーストする。以上のようなメカニズムにより、Fig. 9 の実験結果のような曲げ内側のバーストが発生する。

3.3 昇圧中に曲げ内側でバーストする場合

前節の軸押し中期のバーストを防止するためには、軸押し中の圧力をさらに下げることがある。しかし、軸押し中の圧力を下げ過ぎると、軸押し完了時の断面のコーナーRが大きくなるため最終昇圧時にバーストしやすくなる¹⁴⁾。

本 HF の例では、前節で述べたように曲げ内側の方が後から拡張されるため、昇圧時にバーストする場合も曲げ内側のコーナー近傍でバーストする (Fig. 11)。

Fig. 11 Sample after hydroforming test in burst case at compression side during final pressure rising

本例は前節の軸押し中期のバーストと同様の変形過程およびひずみ経路を辿る。すなわち、早期に曲げ外側で金型接触するため曲げ外側と側面のひずみ進展は停止し、その後は曲げ内側に拡張が集中する。最終的には軸押し終了後の昇圧過程で曲げ内側が隙間閉塞してバーストに至る。詳細な変形過程やひずみ経路は省略する。

3.4 曲げ内側でしわが残存する場合

前節までが本 HF におけるバースト形態の例であるが、次に、しわの形態に関して述べる。しわが残存した例を Fig. 12 に示す。本 HF では、曲げ内側のバースト例で説明したように、軸押し初期に曲げ内側の隙間が拡大するため、当該箇所からしわが発生しやすい。特に、軸押し中の内圧が低いと曲げ内側の隙間が大きくなるため、しわも発生しやすい。

Fig. 13 に、しわが発生する例のひずみ経路を示す。曲げ外側が先に金型に接触し、曲げ内側の隙間が拡大する b の時点までは、前節・前々節の曲げ内側でバーストする場合とほぼ同じひずみ経路を示す。しかし本例では、軸押し中の内圧が低いため拡張の進行速度が遅くなり隙間閉塞時のタイミングが遅れ、軸押し量 40mm (d の時点) でも隙間が空いたままとなっている。その分、軸押し量が過多に

なり、それ以降も隙間が塞がることはなく、ひずみも周方向には進行しないで軸方向圧縮ひずみのみ進展する (e の時点)。さらに最終内圧を上げても、当該しわは解消されず、曲げ中央部に残存する (f の時点)。

Fig. 12 Sample after hydroforming test in wrinkle case at compression side after maximum pressure rising

Fig. 13 Deformation and strain transition during hydroforming process in wrinkle case at compression side after maximum pressure rising

3.5 成形不良のない場合

最後に、バーストやしわがなく良好な形状に成形された成功例を Fig. 14 に示す。本例では、最終的に 150MPa まで昇圧しており、曲げ内側のコーナーR もシャープに形成されている。

FEM によるひずみ履歴の結果を Fig. 15 に示す。本例は、前節のひずみ経路にかなり近く、軸押し 30mm までは同一のひずみ経路である。しかし、前節の例では、曲げ内側の

ひずみが軸方向圧縮方向に進展したためしわとなるが、本例では軸押し 30mm 以降の圧力を高めに設定したため、引き続き純粋せん断に近い方向にひずみが進展する。そして隙間閉塞時にもひずみ比 β の傾きがほとんど変化しないで同一のひずみ方向に進展する。

Fig. 14 Sample after hydroforming test in successful case without both burst and wrinkle

Fig. 15 Deformation and strain transition during hydroforming process in successful case without both burst and wrinkle

以上の結果から、曲げ後の HF では、曲げ内側のひずみを常に純粋せん断状態を維持するような条件を選択することでバーストやしわを防止した成形が可能になる。今回の例では 50% の大きな拡張率でも成形を実現できた。

4. 曲げ加工時の形状の影響

次に曲げ工程における適正な形状に関して述べる。従来の常識的な予想では曲げ加工時に薄肉となる曲げ外側¹⁷⁾で最もバーストしやすい⁹⁾と考えられるが、前章の一連の検討のように、軸押し負荷によって曲げ部も大きく拡張する HF の場合は曲げ内側でバーストする例が多い。また、しわが発生しやすいのも曲げ内側である。従って、曲げを

含む難度の高い HF では曲げ内側の隙間を小さくすることが好ましいため、曲げ形状としては、HF 金型に入る範囲内で極力曲げ半径を大きく設定する方が有利である。

5. 結 言

曲げ加工後の HF の変形挙動を実験と FEM の両面から検討した結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 初期圧力が高過ぎる場合には軸押し初期で側面部でバーストするが、それ以外の場合は曲げ内側でバーストやしわ等の成形不良が発生する。
- (2) 上記の曲げ内側の成形不良を防止するためには曲げ内側のひずみが常に純粋せん断状態を維持させることが有効である。その状態を実現できれば曲げ部の拡張率が 50% でも成形可能である。
- (3) HF 前の曲げ形状に関しては、曲げ内側の隙間を小さくすることが好ましいため曲げ半径は大きい方がよい。

参 考 文 献

- 1) 高木六弥：塑性と加工，**12**-120 (1971)，59-66.
- 2) 淵澤定克：塑性と加工，**30**-339 (1989)，473-480.
- 3) Potter, L.: IBEC'96, (1996), 102-108.
- 4) 那須興太郎：塑性と加工，**46**-531 (2005)，321-325.
- 5) 栗山幸久：塑性と加工，**45**-524 (2004)，715-720.
- 6) Hora, P., Skrikerud, M. & Longchang, T.: Hydroforming 1999, (1999), 407-424.
- 7) Lei, L., Kim, J. & Kang, B.: Int. J. Mech. Sci., **44**, (2002), 1411-1428.
- 8) 佐藤浩一・伊藤耿一：塑性と加工，**44**-515 (2003)，1189-1193.
- 9) 中村友彦・張華・佐藤浩一・伊藤耿一・新田淳：第 54 回塑性加工連合講演会講演論文集，(2003)，343-344.
- 10) Sonobe, O., Hashimoto, Y., Iguchi, T. & Abe, H.: IBEC2003, (2003), 59-64.
- 11) 石垣勝士・坂口尚良・金田直人・小嶋正康：第 61 回塑性加工連合講演会講演論文集，(2010)，447-448.
- 12) 淵澤定克・真鍋健一・一之瀬和夫・遠藤順一・落合和泉・高田信宏・中村正信：日本塑性加工学会編チューブフォーミング，(1990)，37-44，コロナ社.
- 13) 水村正昭・栗山幸久：塑性と加工，**45**-525 (2004)，817-821.
- 14) 水村正昭・栗山幸久：塑性と加工，**44**-508 (2003)，524-529.
- 15) 薄鋼板成形技術研究会：プレス成形難易ハンドブック第 3 版，(2007)，442-447，日刊工業新聞社.
- 16) 谷口友啓・桑原利彦・高橋進：平成 16 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2004)，295-296.
- 17) Schroeder, M.: Hydroforming 1999, (1999), 335-351.
- 18) 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.
- 19) 後藤學：塑性学，(1982)，103-110，コロナ社.
- 20) 水村正昭・栗山幸久：塑性と加工，**45**-516 (2004)，60-64.