

電縫鋼管のハイドロフォーミング性におよぼす機械的性質の影響*

川崎製鉄技報
33 (2001) 4, 159-164

Effect of Mechanical Properties on Formability of ERW Tubes in Hydroforming



園部 治
Osamu Sonobe

技術研究所
加工技術開発センター
主任研究員(主席掛長)



橋本 裕二
Yuji Hashimoto

技術研究所
加工技術開発センター
主任研究員(主席掛長)



阿部 英夫
Hideo Abe

技術研究所
加工技術開発センター
長

要旨

チューブハイドロフォーミング (THF) 性と鋼管特性との関係の解明を目的とし、実験および FEM 解析による検討を行った。直管の自由バルジでは、軸押しがない場合には、均一伸び、 n 値の影響が強く、軸押しが強くなるとこれら特性に加えて r 値の影響が強くなる。また、曲げ後の鋼管の THF 性について、曲げによる偏肉厚が THF 性を低下させ、曲げ後鋼管の型バルジ試験においても n 値および r 値の影響が大きいことを明らかにした。また、低歪み造管法である川崎製鉄 CBR ミルによる造管材について THF 性を調査した。CBR 造管材は従来の造管法による鋼管より成形余裕度が大きく、THF に有効であることが分かった。

Synopsis:

In order to clarify the relationship between tube material properties and formability in tube hydroforming (THF), which has been attracting a lot of attention, experiments and FEM simulations were carried out. In the case of no axial-feeding, hydroformability for a free bulging test of straight tubes is greatly affected by uniform elongation (UEL) of the tubes. As the degree of axial-feeding increases, the effect of r -value, in addition to UEL, on the hydroformability increases. High r -value and n -value improve the uneven thickness distribution of pre-bent tubes that deteriorates the hydroformability. On the basis of these results, hydroformability tests of tubes produced by a CBR forming mill in Kawasaki Steel were examined to see if the tubes were suitable for THF and their test results were compared with those for tubes produced by a conventional break down mill. In the case of tubes produced by the CBR mill, an axial-feeding range in loading paths with which hydroforming is conducted in success is larger than that for tubes produced by the conventional mill.

1 緒 言

自動車車体の設計・製造技術と材料の技術分野での大きな関心事は、地球環境問題に対応して有害排出ガス量を低減するための車体軽量化と、乗員の生命を守るための衝突安全性向上である。これら相反する特性を両立させるとい問題を克服する鍵となる技術として、チューブハイドロフォーミング (THF) が脚光を浴びており、欧米では日本に先行して量産技術として採用されつつある。

THF は、狭義には、液圧により金属材料をバルジ加工する技術として古くから知られている¹⁾。またこれに軸力を負荷することにより大幅に加工限界と形状寸法精度が向上することも名古屋工業試験所を中心とした実用化研究で明らかにされた。最近注目されている THF 技術は、このバルジ加工に先立ち、管の曲げ加工、プレスによる潰し加工および縮径加工を併用した複合成形技術であると広義に理解されている^{2,3)}。THF 技術の主な利点は^{4,5)}、(1) 部品統合・

部品数削減とそれにとりまう金型費削減、後工程省略、高い材料歩留りによる原価低減、(2) 閉断面構造による部材強度・剛性の向上、THF の加工硬化による部品強度向上、(3) 接合のためのフランジが不用なこと、適正断面設計などによる軽量化、(4) スプリングバック、溶接ひずみが小さいことによる高い寸法精度である。今後、自動車の排気系、足回り部品を始めとして、ホワイトボディーやパワートレイン系部品にまでの適用拡大が期待されている。

国内においては、日産自動車 (株) がセドリック/グロリアの部品の一部に THF 工法を採用した 1999 年が、日本における THF の歴史に新しいページを開いた年といえる。その後 2 年間で実生産用の THF 機械の新設と THF 採用車種・部品が確実に増えた。しかし THF は、その技術蓄積がまだ少なく、ノウハウに依存しており、技術の体系化も遅れている。

THF を成功させる要素の一つとして重要と思われるものに、THF に適した鋼管材料を選択することが挙げられる。鋼管材料の機械的性質が THF 性に及ぼす影響について、これまで種々検討されてきており^{6,7)}、この関係を体系的に構築していくことが、今後、THF 工法を自動車部品の加工に本格的に適用する上で、極めて大

* 平成13年8月16日原稿受付

きな助けとなると考えられる。

本論文では、直管および曲げ後の鋼管のハイドロフォーム実験を行い、鋼管の機械的性質が拡張性に及ぼす影響について検討した結果を述べる。

2 実験方法

実験材として、外径 63.5 mm、板厚 1.6~2.3 mm の種々の電縫鋼管を用いた。電縫鋼管の機械的性質は、引張り強度 (TS) が 270~800 MPa、均一伸び (UEL) が 11~28%、 n 値が 0.07~0.22 および r 値が 0.6~2.5 の範囲である。機械的性質は、鋼管から長手方向に切り出した、断面円弧形状のサンプル (JIS 12A) を用いた引張り試験により測定した。また、実験に用いた THF 装置の概略を Fig. 1 に示す。本装置は最大成形内圧が 200 MPa、最大軸押し力が 2 000 kN の能力を有する。

直管の円形断面バルジ試験では、Fig. 2 に示すようにに拡張部長さ L_B と管外径 d_0 の比 (L_B/d_0) が 2.0 の金型を用い、管端を固定する場合を含め、軸押し水準を数段階変更して実験を行い、管端移動量 X_t と破断限界拡張率 LBR (limiting bulging ratio, %) との関係を調べた。なお、拡張率は、鋼管の長手方向中央部の拡張後外径 d_c と、素管の外径 d_0 から、 $(d_c - d_0)/d_0 \times 100$ (%) として算出される。

また、拡張率が 50% および 70% の円形断面型バルジ試験において、成形内圧と軸押しとの負荷経路を変更し成形余裕度の評価試験を行った。なお、軸押しを行う条件では WAX タイプの高粘度潤滑剤を用いた。

Fig. 3 に、曲げ加工後の THF 性を調査するための、金型および金型内に装着した曲げ鋼管の模式図を示す。図に示されるように、曲げ半径 R が管外径 d_0 の約 2 倍 (以下、 $2.0d_0$ 曲げ) および約 2.8 倍 (以下、 $2.8d_0$ 曲げ) に回転引き曲げた鋼管を、図中に示した、円形および矩形の断面を有する 2 種類の金型を用いて成形した。管端を固定して軸押しを行わない条件の LBR_0 、および軸押しを行い、その負荷経路を変更した場合の、成形可能な軸押し量の範囲 (成形余裕度) を調査することで、曲げ加工後鋼管の成形性を検討した。曲げ後鋼管のバルジ試験では、円周方向に均一に拡張しないため、

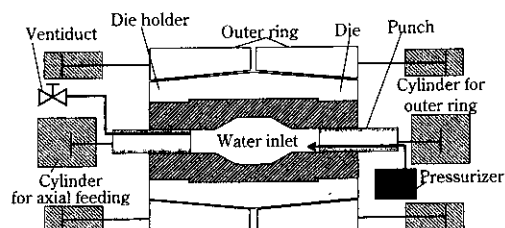


Fig. 1 Schematic diagram of tube hydroforming test machine

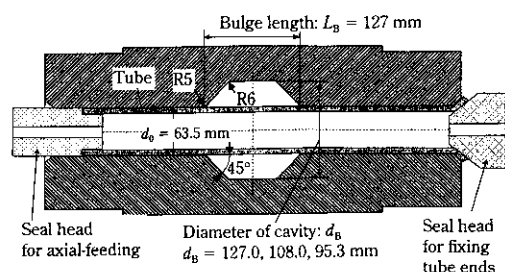


Fig. 2 Die geometry for bulge test of straight tubes

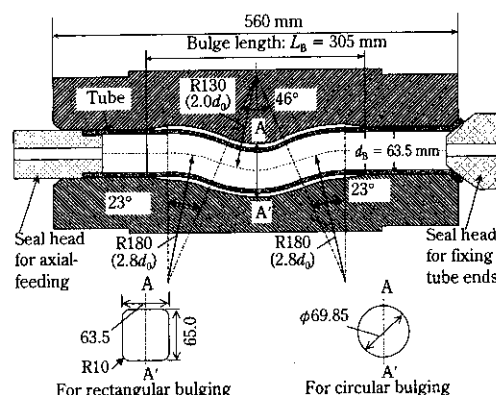


Fig. 3 Die geometry for bulge test of pre-bent tubes

拡張率は管外径ではなく、拡張前後の管周長から算出した。

3 実験結果および考察

3.1 直管の自由バルジ加工性

管端移動量 X_t と破断限界拡張率 LBR との関係を Fig. 4 に示す。 X_t の増加にともない LBR は直線的に増加し、 X_t のある値以上では、LBR は飽和するか減少する。これは、成形途中で過度な挫屈モード変形となってしまうが発生し、中央部分に有効な軸力が付加できなくなるためである。

$X_t = 0$ における LBR (管端固定条件における拡張率) を LBR_0 、飽和あるいは最大の LBR を LBR_{max} とそれぞれ定義し、これらと UEL および r 値との関係を調べた結果を Fig. 5 に示す。機械的性質は相互に関連を有するので、要因を明確に分離して分析することは難しいが、 LBR_0 には材料の UEL との相関がわずかに強く表れ r 値との相関はやや小さく、一方、 LBR_{max} には、UEL に加えて r 値との相関が認められた。

実験結果について LBR_0 および LBR_{max} と UEL および r 値との関係を次式によって回帰した。

$$LBR = a \cdot \frac{UEL}{UEL_{max}} + b \cdot \frac{r}{r_{max}} + c \dots \dots \dots (1)$$

(1) 式の係数を Table 1 に示す。ここで、 a 、 b 、 c は回帰係数で、 a は UEL、 b は r 値の影響係数となる。また、UEL および r 値は、それらの影響を同じ水準で論じるため、実験に用いた材料の中で、それぞれの最大値、 $UEL_{max} = 26\%$ および $r_{max} = 2.45$ で規格化している。

Table 1 において、UEL の LBR_0 と LBR_{max} に対する影響係数を比

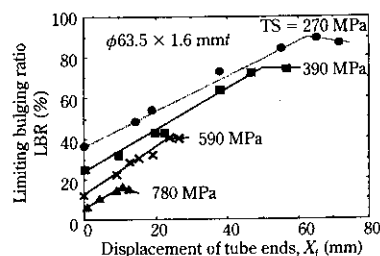


Fig. 4 Relation between displacement of tube ends, X_t and limiting bulging ratio, LBR

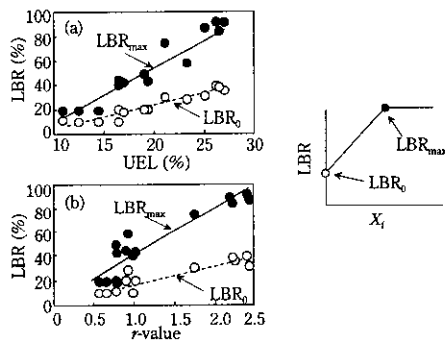


Fig. 5 Effect of tube mechanical properties ((a) UEL and (b) r -value) on LBR_0 and LBR_{max}

Table 1 Values of parameters regressed by Eq. (1)

Parameters in Eq. (1)	Influence coefficient of UEL, a	Influence coefficient of r -value, b	c	Correlation coefficient
LBR_0	39.5	9.73	-11.2	0.955
LBR_{max}	83.7	39.7	-25.7	0.981

較すると、 $a = 39.5 \rightarrow 83.7$ と 2.1 倍の増加に対して、 r 値の影響係数は $b = 9.73 \rightarrow 39.7$ と 4.1 倍の増加を示し、軸押しが強く働く条件下においては、UEL の影響に加えて r 値の影響が強くなることがわかる。

以上のように、機械的性質の THF 性におよぼす影響は軸押し条件によって変化する。

3.2 円形断面型バルジ試験での成形余裕度評価

実生産においては、THF の制御精度および製造チャンスによって成形条件の変動があるので、鋼管としては、成形内圧と軸押しの関係である loading path (LP) において、ある程度の成形可能な幅(余裕)があることが好ましい。鋼管の成形余裕度の評価法として、適切な LP に対してこれを変化させ、破断もしわも生じない LP の範囲 Δp もしくは ΔX_i の大小で、THF 性を評価する方法が考えられる⁸⁾。板材のプレス成形における成形余裕度テスト(しわ抑え力 BHF を変化させ良品のとれる範囲 ΔBHF を求める手法、FAT: forming allowance test)に類似した手法であり、量産での条件変動に対する成形余裕度を評価する考え方に基いている。

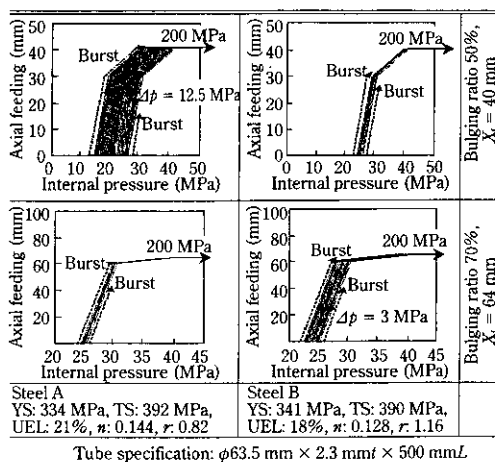


Fig. 6 Example of FAT (forming allowance test) results in hydro-forming

JIS STKM13A 相当材の、同一強度の 2 種類の材料 Steel A および Steel B の鋼管を用いて、成形余裕度 Δp を比較した結果を Fig. 6 に示す。

軸押し量と拡張率を変化させた 2 つの条件で成形余裕度 Δp を評価した場合、材料の優劣が逆転することがわかる。軸押しが弱い条件では UEL, n 値が大きい Steel A、軸押しが強く拡張率が大きな条件では r 値が大きい Steel B の鋼管の THF 性が優れている。この結果は、THF における変形の特徴を適確に判断して、支配する主要な機械的性質とプロセスパラメータの正確な認識が重要なこと、言い変えると、鋼管材料の優劣も、それぞれの材料で LP を最適化してから判断すべきであることの必要性を示唆している。

3.3 軸押し込みにおける r 値の影響

—FEA による検討—

軸押しが強い条件での自由バルジ試験において、 r 値が高くなる と拡張性が高くなる結果が得られたが、有限要素法解析(以下、FEA)によってメカニズムを検証した。

3.3.1 解析条件

解析には Fig. 2 に示す拡張率 100% の円形断面の金型を用いた。Table 2 に解析条件を、Fig. 7 に本解析に用いた LP を示す。

解析対象としては、TS が 480 MPa の JIS STKM13B 相当材の機械的性質を有する鋼管を用いた。本材は元々の r 値が 0.94 であるが、 r 値の効果を把握するために、YS や S-S カーブの特性はそのままだ、 r 値のみを 0.47, 0.94, 1.88 と変更した。

3.3.2 解析結果

Fig. 7 の LP を用いた成形の FEA における、成形時形状の結果の一例として、成形内圧 28.7 MPa 時点の形状を Fig. 8 に示す。成形途中に管長手方向中央部の両側で、外径が大きくなるしわが発生しており、同一成形内圧におけるしわの大きさは、 r 値が大きくなるとわずかに小さくなっている。Fig. 9 に示すように、拡張部中央としわの頂点との距離をしわの振幅 A 、振幅 A の 1/2 の値、 $A/2$ の高さにおけるしわの幅を λ として、 $v = A/\lambda$ をしわの大きさと定義して定量化し、成形内圧に対する v の推移を調査した。 r 値が v に及ぼす影響を Fig. 10 に示す。 v は r 値が小さいほど大きく、最大値を比較すると、 r 値が 0.47 の場合は r 値が 1.88 の場合の 2 倍以上大

Table 2 Conditions of FEA and properties of tubes

Tube material	JIS STKM13B (TS: 480 MPa)
r -value	0.47, 0.94, 1.88
n -value	0.21
Tube size	$\phi 63.5 \times 2.0 t$
Element type	Shell
Element numbers	Tube: 2900 Die: 300 Punch: 100 Total: 2890
Code	LS-Dyna3D Ver. 950

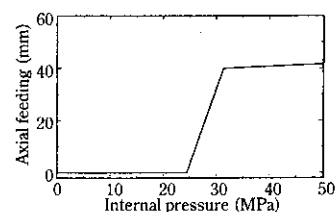


Fig. 7 Loading path used in FEA

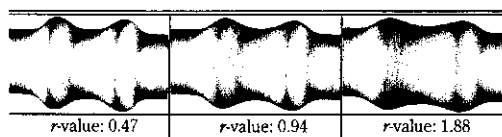


Fig. 8 Hydroformed tube shape at 28.7 MPa of internal pressure as results of FEA

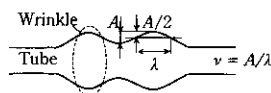


Fig. 9 Definition of amplitude A , width λ and degree ν of wrinkle

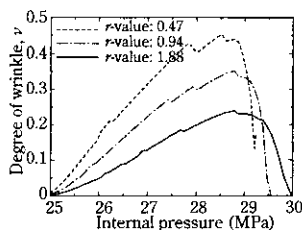


Fig. 10 Relation between internal pressure and degree of wrinkle (ν) as results of FEA in case of changing r -value from 0.47 to 1.84

きくなっている。

この現象のメカニズムを、初等解析を用いて検討する。 r 値を考慮した場合の、パイプの長手方向 ϕ および円周方向 θ の Levy-Mises 応力 (σ) - 歪 (ϵ) 関係式、および板厚方向の応力 $\sigma_z = 0$ を仮定した場合の相当応力 σ_{eq} 、相当歪 ϵ_{eq} の定義式はそれぞれ以下の式のようにになる。

$$\epsilon_\phi = \frac{3}{2} \cdot \frac{(r+1)\sigma_\phi - r\sigma_\theta}{r+2} \cdot \frac{\epsilon_{eq}}{\sigma_{eq}} \quad (2)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{3}{2} \cdot \frac{(r+1)\sigma_\theta - r\sigma_\phi}{r+2} \cdot \frac{\epsilon_{eq}}{\sigma_{eq}} \quad (3)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{(r+1)\sigma_\phi^2 - 2r\sigma_\phi\sigma_\theta + (r+1)\sigma_\theta^2}{r+2}} \quad (4)$$

$$\epsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{r+2}{2r+1} \{ (r+1)\epsilon_\phi^2 + 2r\epsilon_\phi\epsilon_\theta + (r+1)\epsilon_\theta^2 \}} \quad (5)$$

これらの関係式を用い、解析に用いた JIS STKM13B 鋼管の S-S カーブを適用した条件下で降伏曲線、 $\sigma_\theta - \sigma_\phi$ の関係を求めると、Fig. 11 に示す結果となる。

FEA 結果から拡管初期における応力状態を調べると、Fig. 11 中

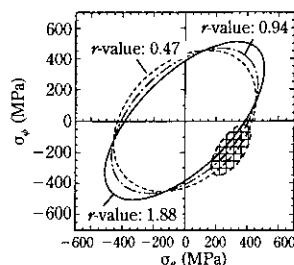


Fig. 11 Yield curve in case of changing r -value from 0.47 to 1.88 based on JIS STKM13B tubes

の網掛けの領域となる。この応力状態において、同一の軸方向応力 σ_ϕ に対して、 r 値が高い材料は低い円周方向応力 σ_θ で膨張変形が進行し、挫屈モード変形が抑制される。その結果、強い軸押しを行った際にも、発生するしわの大きさが小さくなり、軸押しが効果的に拡管部に働いて、拡管性が高くなるものと推定される。

3.4 曲げ加工後の自由バルジ加工性

曲げ後鋼管を、Fig. 3 に示す円形断面の金型を使用して、軸押しを行わない管端固定条件で自由バルジさせた。この場合の、LBR₀ と鋼管の n 値および r 値との関係を Fig. 12 に示す。直管の自由バルジと同様に、UEL と相関の高い機械的性質である n 値と LBR₀ との相関が高く、 r 値との相関は低いことがわかる。

変形は、曲げ後鋼管の中で最も変形強度 ($t \cdot \sigma_y$, ただし t : 板厚、 σ_y : 降伏応力) の低い部分に集中して、変形の隣接部への伝播は小さい。このため LBR₀ は曲げによる予変形を与えない場合に比べて極端に低下する。破断位置は $2.8d_0$ 曲げ中立軸近傍 (曲げサイド部) であり、 $2.0d_0$ 曲げの周辺ではほとんど拡管しなかった。

そこで、 $2.0d_0$ 曲げの周辺部における拡管率を調査するために、 $2.8d_0$ 曲げ近傍の領域の変形を拘束して、 $2.0d_0$ 曲げ部分で拡管・破断させた。この場合は、 $2.8d_0$ 曲げの場合より曲げ R が小さく、曲げ後鋼管の偏肉と機械的性質の不均一度が大いいため、LBR₀ はさらに小さくなる。Fig. 13 に曲げ後および自由バルジ後の $2.0d_0$ 曲げの、管長手方向中央部位置における、管周方向の肉厚歪み分布および硬度分布の結果を示す。図に示されるように、曲げサイド部において、曲げ後の肉厚変化は少なく、硬度は曲げ内側および外側より低い。一方で自由バルジ後では、サイド部で減肉が大きくなって

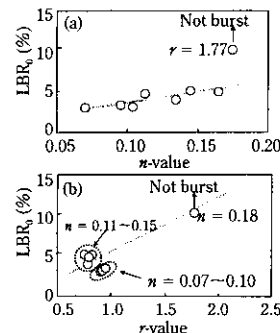


Fig. 12 Effect of n -value and r -value on LBR₀ of pre-bent tubes

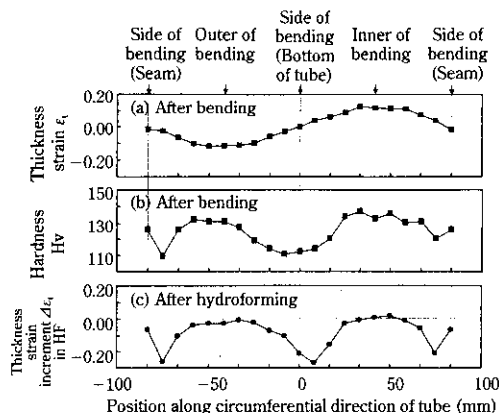
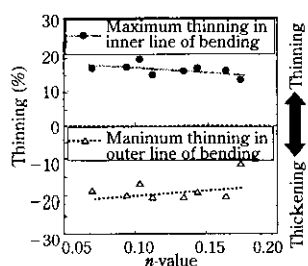
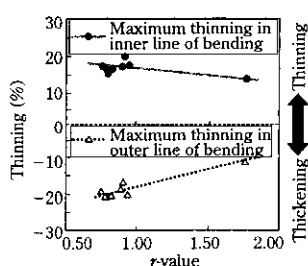


Fig. 13 Thickness and hardness distributions along circumferential direction in center of $2.0d_0$ bending portion of a tube after pre-bending and hydroforming

Fig. 14 Effect of n -value on thinning of tubes in pre-bendingFig. 15 Effect of r -value on thinning of tubes in pre-bending

いる。溶接シーム部はハイドロフォーム後においても、肉厚変化はないが、シーム部の両脇において、大きな減肉が見られる。

本実験においては、シーム脇 10 mm 位置において破断しており、曲げ後の肉厚変化の少ないサイド部のうち、最も弱い部分において破断が発生するものと推定される。

THF 性を大きく低下させる要因である、曲げによる偏肉（減肉・増肉）について、Fig. 14 および 15 に示すように、 n 値および r 値の影響が認められる。 n 値および r 値が高い材料ほど、曲げ後に、曲げ外側の減肉、曲げ内側の増肉が小さくなっており、特に n 値との相関が高い。

3.5 曲げ加工後の型バルジ加工性

曲げ加工後の型バルジ成形性におよぼす材料の機械的性質の影響を調査するため、さまざまな鋼種の曲げ後鋼管を、Fig. 3 に示す矩

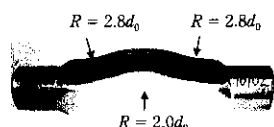
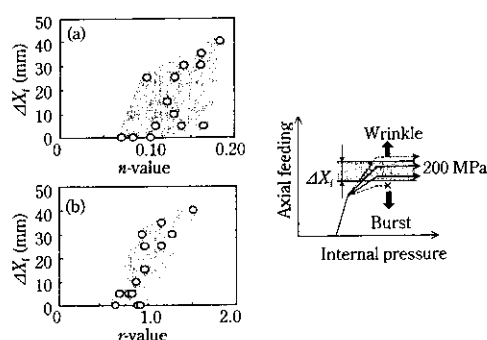


Fig. 16 An example of successfully hydroformed parts

Fig. 17 Effects of (a) n -value and (b) r -value on hydroforming allowance range ΔX_t in loading paths of pre-bent tubes with rectangular die

形断面金型を用いて、軸押しを行いながら型バルジ成形した。各鋼種に対して軸押し水準を変更して、型バルジ試験を行い、しわおよび破断とも発生せず成形できた場合の軸押し量の範囲を、適正軸押し量の幅 ΔX_t と定義した。成形した部材の一例を Fig. 16 に、この ΔX_t におよぼす n 値および r 値の影響を表した結果を Fig. 17(a) および (b) に示す。図に示されるように、 n 値および r 値のいずれについても、その値が大きい材料ほど ΔX_t が大きく成形余裕度が高いが、 r 値との相関の方がより強い。 n 値および r 値とも大きい材料ほど曲げ部の偏肉（曲げ外側の減肉、内側の増肉）が小さいため、これら機械的性質が型バルジにおいても、曲げ後の THF 性に重要であると考えられる。

4 THF 性に優れた鋼管—CBR造管法—

THF に主として用いられる機械構造用炭素鋼の電縫鋼管（JIS 規格 STKM）の製造工程では、冷間加工により、母材の薄鋼板に対して材料降伏強度が上昇し、引張り強さは余り変化せず、伸びが小さくなる。

THF 性に有効な機械的性質である n 値、UEL を向上させるために、冷間加工ひずみをできるだけ小さく抑えてロール成形する、いわゆる低歪み造管法⁹⁻¹¹⁾が有効である。当社で開発された chance-free bulge roll (CBR) 造管法もその代表の 1 つである¹⁰⁾。CBR 造管法ではケージロール方式を採用し、そのロールフラワーに特徴があり、高速造管で高い溶接部品質を実現している。加えて、円周方向の冷間ひずみと、長手方向の繰返し曲げ変形による累積ひずみを極限に小さく抑えることができ、従来の BD（ブレイクダウン）ミルに比べ、素材薄鋼板の、優れた機械的性質の劣化を小さくすることができる。

2 種類の母材 (Steels C, D) を準備し、それぞれを CBR ミルおよび BD ミルで合計 4 種類の電縫鋼管を造管し、実験に供した。これら 4 種類の電縫鋼管を 3.4 節および 3.5 節と同じ曲げ加工した後、Fig. 3 に示す、拡管部が矩形断面形状である金型において、軸押しを行いながら THF した。軸押し量を変更して、成形余裕度 ΔX_t を評価した結果を Fig. 18 に示す。

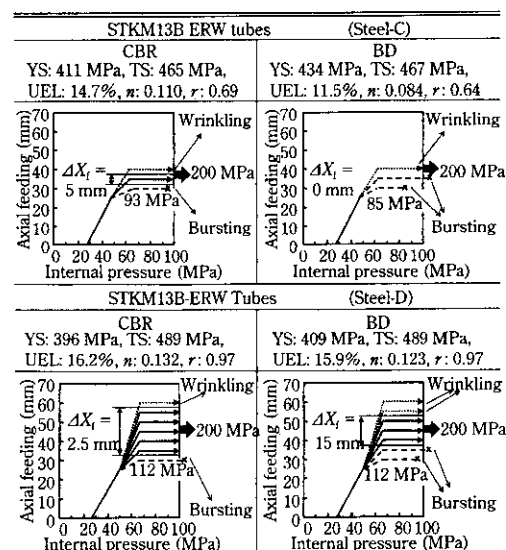


Fig. 18 Comparison between tubes produced by CBR mill and BD mill in result of forming allowance tests in THF of pre-bent tubes

図からわかるように、Steel C の電縫鋼管では、CBR ミルの場合が $\Delta X_t = 5 \text{ mm}$ の成形余裕度があるのに対し、BD ミルの場合は成形可能範囲が存在しなかった。また、Steel D の電縫鋼管の場合は、CBR ミルの場合が $\Delta X_t = 25 \text{ mm}$ の成形余裕度に対し、BD ミルの場合は $\Delta X_t = 15 \text{ mm}$ の成形余裕度と、CBR ミルで造管した電縫鋼管の優位性が見られた。

5 結 言

THF 性と鋼管特性との関係について調べた結果以下のことがわかった。

- (1) 直管の円形断面自由バルジにおいて、管端固定条件では UEL の影響が強く、軸押しが強くなると、加えて r 値の影響

が大きくなる。

- (2) 曲げ後鋼管の、管端固定条件での自由バルジにおいては、曲げによって偏肉が生じるため THF 性が大きく低下する。
- (3) 曲げ後鋼管の、軸押し条件での型バルジにおいては、 n 値および r 値の THF 性におよぼす影響が大きく、特に r 値との相関がより強い。
- (4) 当社の低ひずみ造管法による CBR ミルで造管した電縫鋼管は、従来の BD ミルで造管したものより THF 性に優れる。

今後ますます厳格化する、自動車部品への軽量化と衝突安全性の要求に対して、THF 技術の適用は大きな位置を占めているといえる。本報で鋼管材料の機械的性質と THF 性との関係を紹介したが、その知見を基に、THF 性に優れた鋼管を開発・提供するとともに、成形技術の開発・改善を通じ、THF 技術の適用拡大に貢献したい。

参 考 文 献

- 1) 小倉 隆, 上田照守:「段付中空軸のバルジ加工」, 名古屋工業技術試験所報告, 7(1958)
- 2) 真鍋健一:「管材の液圧成形技術—過去・現在・未来—」, 塑性と加工, 39(1998)453, 999-1004
- 3) 淵澤定克:「チューブハイドロフォーミング—研究と技術の最新動向—」, 塑性と加工, 41(2000)478, 1075-1081
- 4) 清水雄二:「チューブハイドロフォーミング成形法」, 79 回塑性加工講座 (日本塑性加工学会), (2000)7, 181-191
- 5) D. Schmoeckel, C. Hielscher, and M. Prier: "Developments and Perspectives of Internal High-pressure Forming of Hollow Sections", Proc. 6th ICTP, (1999), 1171-1182
- 6) K. Suzuki, K. Uwai, S. Toyoda, Q. Yu, M. Shiratori, and T. Mori: "Deformation Behavior and Formability of ERW Tube in Hydroforming", Int. Joint Symp. Osaka (JSTP), (2000), 238-243
- 7) 鈴木孝司, 上井清史, 豊田俊介, 大村雅紀, 三原 豊:「自由バルジ加工の実用的試験方法と張出し特性に関する検討 (電縫鋼管の自由バルジ変形特性に関する研究 第 1 報)」, 平成 10 年塑性加工春季講演会論文集, (1998), 73-74
- 8) 水村正昭, 栗山幸久:「ハイドロフォーミングにおける素管の成形余裕度評価試験方法の検討」, 第 51 回塑性加工連合講演会論文集, (2000), 351-352
- 9) 森部憲二:「ステンレス溶接鋼管の製造技術と二次加工性」, 塑性と加工, 39(1998)453, 1024-1028
- 10) 豊岡高明, 橋本裕二, 小林邦彦, 板谷 進, 井手 勉, 西田保夫:「電縫鋼管のチャンスフリー張り出しロール成形法の開発」, 川崎製鉄技報, 22(1990)4, 236-244
- 11) F. Wang: "Innovative ERW Tube Forming Technology—FF-X Mill", Int. Joint Symp. Osaka (JSTP), (2000), 13-20