

討16

UOE鋼管の成形法に関する研究

日本鋼管 技術研究所 工博 平 忠明 ○三原 聖 石原 利郎
竹原 肇一郎 首藤 和茂

1. はじめに

UOE鋼管は 1951年大径溶接鋼管を能率的に生産するプロセスとして、U.S. steel社において最初に採用されて以来、設備、素材、製造技術の改善、向上により、油、ガスの輸送に用いられる高級ラインパイプ および 構造用鋼管として 質量共に飛躍的に向上した。さらに近年、環海用ラインパイプや 海洋構造物のリグパイプとして 厚肉、高張力化に対する要求が増大しており、これらに対する製造技術の見直しが必要となっている。例えば、既存設備での製造を前提とした場合、従来の技術（O成形時に圧縮を加えO成形後の形状を確保する方式）では、O成形時の所要成形力が増大し、製造が不可能となる。これらの背景のもとに、筆者らは既存設備での製造範囲拡大を計り、より低い成形力にて成形する技術の確立を目的として、C、U、O、E、各成形プロセスの持つ意味を明確にし、各プロセスの成形力、特に、U、O、成形時における成形力を最少にする方法につき検討した。

2. UOE各成形プロセスの目的と相互関連

成形の最終目標は、抜管後の製品形状を良好に保つ事である。成形の各プロセスは、次工程のプロセスと関連し、次工程の為に必要な形状を確保すると共に、その工程での成形荷重を低減させる事が必要となる。例えば、図1に示される如く、U成形はOプレスに挿入可能なU成形を作り出すと共に、O成形後のシームギャップを確保する形状にする必要がある。さらに、U成形荷重を低減させる事が目的となる。O成形の目的は、オ1に、抜管成形時に抜管割れの生じない溶接部突合せ所度（ピーキング）を確保する事、オ2に、抜管作業時にマンドレル挿入可能な真円度を確保する事である。しかし、これらO成形後の形状は、初期のC形状やU形状と大きな関連を持っており、これらの相互関係、位置付けを明確にした上で、所要成形力を低減し得る成形法を検討する必要がある。

3. U成形荷重の検討

ここでは、カイザー方式のU成形を取り上げ、最小荷重にてU成形を行なう工具の条件につき検討した。カイザー形のU成形法とは、図2の添図に見られる如く、Uパンチの押込がある程度進行した後に、

Uパンチがワドルに当り、このワドルを介し、リンク機構にてプレーキ・ローラを作動させ、成形を行なう事を特徴としている。図2に、4"のモデル成形機にて、 $t/D=5\%$ の板を成形した場合の荷重-ストローク線図を示す。図に見られる如く、荷重は2つのピーク

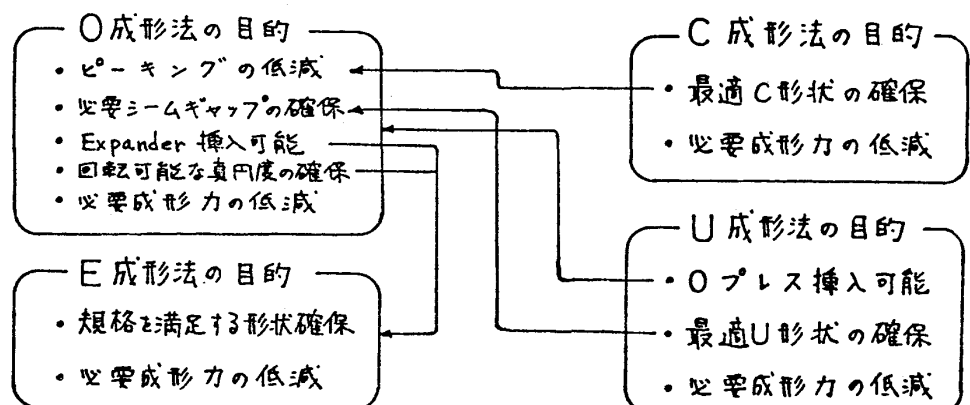


図1 UOE各成形法の相互関係

フを有しており、これがカッター形U成形過程の特徴となっている。最初のピークは、パンチブレイキローラ間で、板に負荷されるモーメントの腕の長さが最小になった時に生じ、2番目のピークは、パンチがサドルに到達した時点にて発生する。

サドル高さを変えた場合(図2参照), パンチがサドルに当る以前の成形過程に差はない(P_1 の値に変わりはない)が, サドル高さが高い程, リンクの作動開始角が早く, リンク作動時のピーク荷重 P_2 は高くなる。また, ギャップ g の影響を見るため, 前と同様4のモデル機にて実験を行なった。その結果を図3に示すが, ギャップが大きくなり程, 初期のピーク荷重 P_1 は低くなる。それ故, 成形荷重を低減させるためには, サドル高さを低くし, ギャップを大きく取れば良いが, 成形後の所収中が小さくなり, Oプレスへの挿入が不可能となる。

従って, 所収中 W の限界を満足しつつ, 最小の荷重で成形が可能となる最適な製造条件が存在する。これを理論的に検討するため, 曲げの単純理論を用い, 索材がUボンスから離れるまでの曲げのみを考慮して解析した。図4に, 力の釣合を示す図と, 得られた計算式を示す。 φ と ψ をパラメータとして得られた計算結果を図2に, 実線にて合点示す。計算値は, 実験値とかなり良い一致を示している。一方, 除荷後の所収中 W は, 索材のスプリングバックも考慮し, 次式で示され, 次式により得られた値は, 実験値と良い一致をみる事が確認されている。

$$W = 2\{(R_1' - R_2') \sin(\varphi) + R_2' \sin(\varphi + \psi') + l \cos(\varphi + \psi')\}$$

なお, W は各マススプリングバック後の値を示す。

図5に, 除荷後の所収中も含め, 計算結果を示す。図には, 基本工具条件としてギャップとサドル高さを縦, 横軸に取り, P_1, P_2, W の等高線を記入している。この図より, 製造可能範囲は, P_1, P_2 が設備の最大許容荷重を越えず, 所収中がOプレスに挿入可能な三角形BCDの内部である。なお, 荷重が最少となる点は, $P_1 = P_2$ が成立するA点である。また, Uボンスが単一円弧と複円筒の場合, ボンス中が同じならば, 複円筒において製造可能領域が右方にずれると共に, 製造可能範囲も狭くなっている。

他の工具条件として, リンク長さ, ブレイキローラ径(R_d)の荷重に与える影響を計算により求めたが, リンク長さはボンスがサドルに当って以後影響が生ずるものであり, P_2 の大きさに関連する。長さ a (図4参照)が大きくなり程, リンク作動時の角度 δ が小さくなり, P_2 は減少する傾向となる。また, R_d が大きき場合, 共通接線の長さが長くなり, P_1, P_2 共に減少させる効果を持っている。

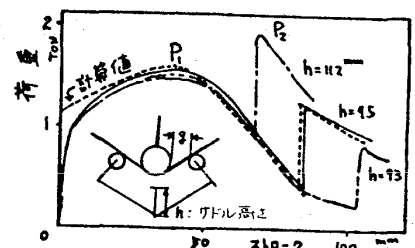


図2 サドル高さの影響

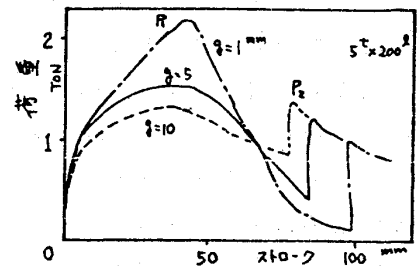


図3 ギャップの影響

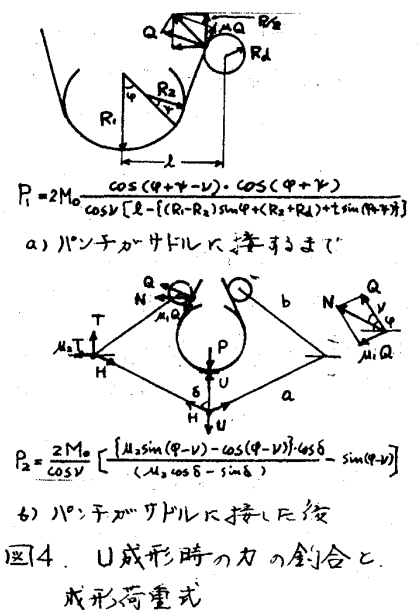


図4 U成形時の力の釣合と成形荷重式

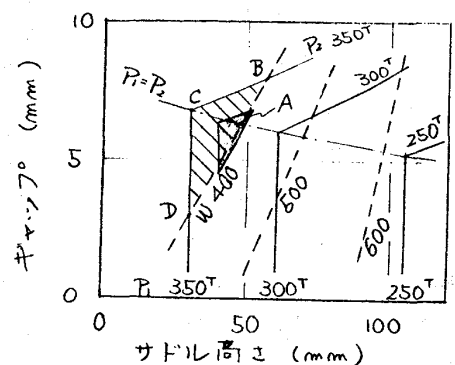


図5 最適製造領域 斜線部単円筒, 黒い部分 複円筒

4. U形状のO成形後の形状に与える影響

図6に、6°モデル実験により得られたU成形後の曲率分布、および、O成形後の曲率分布を示す。U成形条件は、単円筒の場合 $R_u = 0.9R_0$ で、複円筒の場合 $R_{u1} = 0.9R_0$ 、 $\theta_1 = 55^\circ$ 、 $R_{u2} = 0.65R_0$ 、 $\theta_2 = 50^\circ$ である。単円筒の場合、ボンチ径比が $0.9R_0$ で、U成形後は目的の径となっており、O成形後の形状も変化が小さい。一方、複円筒で特徴的な事は、曲げ半径の小さい部分がO成形時に曲げ戻されており、成形後のスプリングバックで シームギャップを閉じる方向に作用する事である。O成形後のそれは、単円筒で約5.5mmであったのに対し、複円筒の場合約3mmであった。また、他のボンチ径比を持つ単円筒を用い成形した場合、O成形後のシームギャップは、 $0.7R_0$ 、 $0.8R_0$ で約2.5mm となり、Uボンチ形状はシームギャップと深い関係を持っている事が解る。

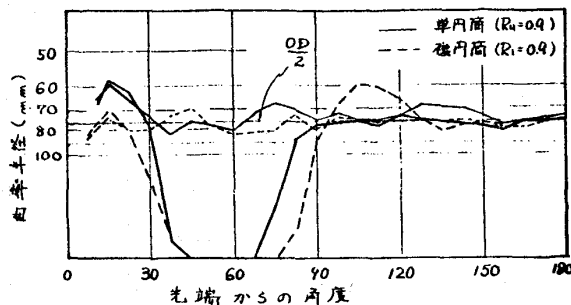


図6 U成形、O成形後の曲率半径分布

5. C成形の検討

C成形の検討事項は、望むC形状を確保する事と、C形状がO成形荷重およびO成形後の形状に与える影響を知る事である。図7に、24°モデルを用い 38.1mm厚の板をダイス半径が $0.95R_0$ の工具により、成形荷重を変えてC成形した場合のC成形後形状と、これらもO成形した後の形状を比較して示す。図に見られる如く、C成形荷重の上昇と共に、曲げが板端方向に拡大して、先端の曲げられていない部分(曲げ不可能長さ)が減少していく事がわかる。また、O成形時には、板中央方向より端部に向い成形が進行するが、0.4%圧縮においても成形が端部まで到達してならず、先端付近は多少の曲げが加わるものの、C成形形状が大略元の通り残る。これらの事実より推論すると、C成形はO成形後の板端部形状を決めるものであり、端部の安全角、ピーキングの値を左右する主要な因子となると考えられる。図8に、C成形荷重がO成形後のピーキングに与える影響を示す。C成形荷重が高く、曲げ不可能長さが小さい程ピーキングが小さくなる。同様の傾向は、C曲げ半径を変化させた場合にも見られる。ただし、C曲げ半径の小さい場合、同一の成形荷重ではC曲げ半径の大きい場合と曲げ不可能長に差はないが、ピーキングの値は小さくなる(図8参照)。他方、Cウリンパ長さを長くした場合も成形不可能長さはあまり変わらないが、O成形後のピーキングは減少する。

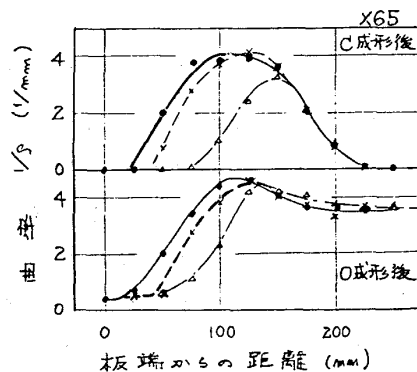


図7 Cプレス後およびOプレス後の板端近傍形状。・x△は、Cプレス荷重 .76, .51, .25 Ton/mm² $R_c = 0.95R$, $l_c = 200$, $E = 0.4\%$

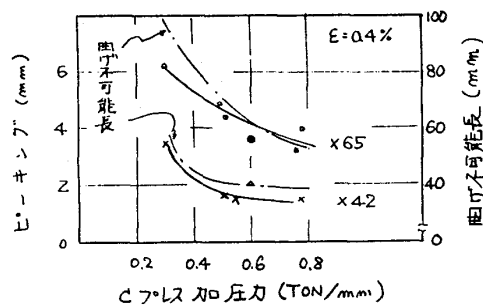


図8 Cプレス加圧力と、曲げ不可能長およびO後ピーキングの関係
 ・x $R_c = 0.95R_0$ $l_c = 200$
 ・ $R_c = 0.95R_0$ $l_c = 300$ X65 } ピーキング値
 △ $R_c = 0.7R_0$ $l_c = 200$ X65 }

6. ビーキングと拔管割れについて

0成形後、ビーキングが著しく大きい場合、拔管工程において、内面溶接止端部に大きな曲げ歪が集中するため、止端部割れ等の問題と起す事がある。これを避けるため、ビーキングを小さく押える必要がある。この限界を検討するため実験機から広巾曲げ試験片を製作して裏曲げ試験を行う。内面溶接止端部の、許容角度変化量の検討を行なった。図9に結果を示す。許容角度変化量は、初期の突合せ角度、材質にかかわらずほぼ 0° であり、それ以上の角度変化を受ける場合、止端部割れ発生の可能性がある。また、ビーキングと突合せ角度の間には、各サイズにより直線的な関係があり、これらより、最大許容ビーキングの値が推測出来る。幾何学的関係より求めた場合、拔管後のビーキング値を零にするためには、板端部を直線と見た、ビーキング測定スパンを100mmとした時、 24° では約1.5mmの許容ビーキング値となる。

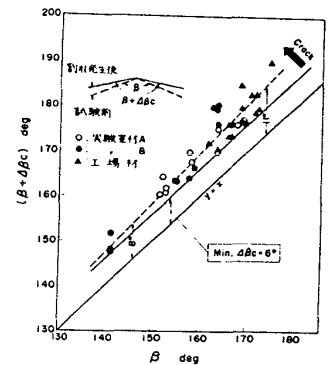


図9 突合せ角度——許容角度変化量

7. 0成形における最適CU工具条件の検討

以上、CUE工程における問題点を0成形後の形状と関連させながら検討したが、最終的に0成形上大きな問題となるものは、(1) 0成形後のビーキング (2) 0成形後のシームギャップ (3) 0成形時の荷重 と考えられる。低荷重の0成形で、ビーキングを低く押え、かつ、シームギャップを確保するための最適な前工程の条件を検討するためには、これら3つの因子に与えるCU条件等の影響を定量的に表す必要がある。そこで、 4° 、 6° のモデル実験を行う。CU条件等のビーキング、荷重、シームギャップに与える影響を重回帰により実験式として求めた。種々の条件が、各因子に与える影響を、ここでは線形として取扱った。この近似に問題はあるが、取扱ったサイズレンジ、工具条件の範囲が狭いため、一次近似としての取扱いには十分であると考えるが今後実験範囲を拡大し、さらに良い近似式を検討する必要がある。

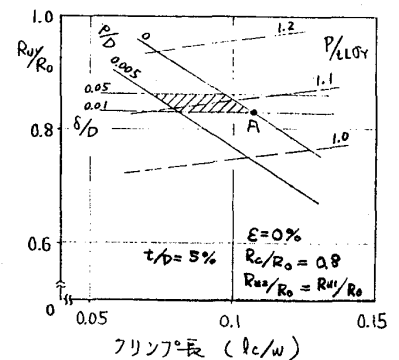


図10 0成形可能範囲

試験条件は、降伏応力が $30 \text{ kg/mm}^2 \sim 35 \text{ kg/mm}^2$ の板を用い、

$$R_c/R_0 = 0.6 \sim 1.0 \quad l_c/w = 0.06 \sim 0.16 \quad R_{u1}/R_0 = 0.6 \sim 1.0$$

$$R_{u2}/R_0 = 0, 0.4, 0.7 \quad t/D = 4 \sim 8\% \quad \epsilon = 0 \sim 0.4\%$$

である。ビーキング (P/D)、荷重 (P/LD)、シームギャップ (δ/D) の回帰式を以下に示す。

$$P/D \times 10^4 = 0.157\epsilon + 27.5 R_c/R_0 - 202 l_c/w - 630 R_{u1}/R_0 + 1.86 R_{u2}/R_0 + 5.56 t/D + 22.33 \quad \dots (1)$$

$$P/LD = 0.507\epsilon + 0.464 R_c/R_0 - 0.694 l_c/w + 0.161 R_{u1}/R_0 + 0.794 R_{u2}/R_0 - 0.146 t/D + 0.716 \quad \dots (2)$$

$$\delta/D \times 10^2 = -5.23\epsilon + 2.34 R_c/R_0 + 7.31 l_c/w + 137 R_{u1}/R_0 + 1.29 R_{u2}/R_0 - 11.3 t/D - 60.28 \quad \dots (3)$$

(1),(2),(3)式より成形可能範囲を求めた。例えば、制限条件として $P/D = 0 \sim 0.005$, $\delta/D = 0.01 \sim 0.05$ とした場合の結果を図10に示す。縦軸にリボン底部の曲率半径と製品半径で除いた値を、横軸にC成形フリンプ長と板厚で除いた値を取った場合、成形可能範囲は斜線で示される部分であり、A点における荷重最小の条件となる。図11に、C曲げ半径を $0.8R_0$ と $0.9R_0$ とした場合の成形可能範囲を示す。図より曲げ半径の小さい方がフリンプ長を短かく出来ると共に、最小荷重を低く押える事が可能となる。

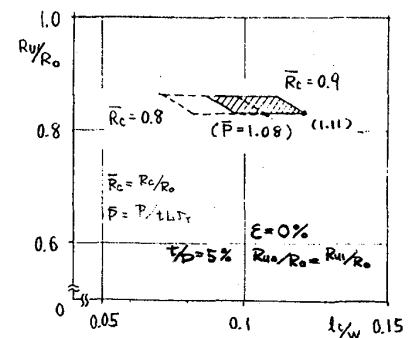


図11 C曲げ半径の影響