

ロールフォーミング加工について

On Cold-Roll-Forming Process

木内 学*

Manabu KIUCHI

ロールフォーミング加工は塑性加工法の一つとして板材の成形加工の分野で大きな役割を果たしつつある。これは多数の成形ロールを用いて、板材に漸進的かつ連続的な曲げ加工を施し、さまざまな断面と任意の長さを有する管材・型材・プレート類などを成形する加工法である。加工技術としての歴史が浅いことや成形過程における素材の変形挙動がきわめて複雑であることのために、他の加工法に比較して技術的・学問的研究の面で非常に立ち遅れているのが現状である。ここではこのロールフォーミング加工について実際のな面からその概要を述べ、さまざまな角度からその直面している問題点などをさぐった。

1. はじめに

ロールフォーミング加工とは、ロール成形・Cold-Roll-Forming と呼ばれ、タンデムに並んだ成形ロールの間にフープ材・切板・熱延コイル・冷延コイル等を通し、漸進的かつ連続的に幅方向の曲げ加工を施して、一様な所要断面を有する管材・型材・プレート類などを成形する塑性加工法の一つである。

このロールフォーミングは、塑性加工法としては比較的新しく、技術的な基盤の形成が著しく遅れているのが現状であるが、その生産量は他の塑性加工の分野にも増して着実に増大しつつある。近年、わが国において鉄鋼・非鉄金属の生産設備・技術が共に飛躍的な発展を示し、特に各所にホットストリップミル・コールドストリップミルあるいはフープミル等の大型高性能の鋼板圧延設備等が建設され、品質の秀れた帯板が大量に生産されるようになると共に、これらの帯板を素材として大量に用いるロールフォーミング加工が注目されるようになり、現在設備および技術の面で急速な発展を示しつつある。

材料工業としてのロールフォーミングは、従来、各種パイプ工業・軽量形鋼工業によって代表されてきた。しかしながらC形鋼などの小型の柱材から始ったロールフォーミングの建築構造部材成形への進出は、その後量的ならびに質的發展を遂げ、現在では4尺幅の板からデッキプレート・フロアパネル・ルーフデッキ・キーストンプレート等の屋根材・壁材・床材を直接成形するまでに至り、建築構造物の面を処理する材料にまで広く進出している。その生産量は年々増大しており、これらの建築材の普及が高層建築物の施工期間短縮に貢献し、また精度の高い薄板から成形される品質の良い軽量形鋼・プレート類・パネル等が比較的低価格の耐火建築・プレハブ建築等の実現を促進している。このような意味からロールフォーミングは鉄鋼の建築材への進出の基本的役割を果しているといえる。この他ガス・石油等の輸送用大口

径パイプあるいはガードレール・シートパイ等の成形を通して、プラント工業や土木建築に対しても品質の秀れた多くの部材を提供している。

一方、部品加工工業としてのロールフォーミングは、船舶・航空機・自動車・家庭電化製品・プレハブ住宅等の総合組立工業における有力な部品加工工程を形成している。すなわち船舶・航空機・自動車の薄板構造用部材・床壁面材・複雑なサッシ類・ラジエーターチューブなどをはじめとする多種類の部品、新建材と呼ばれる一連の板製品・型材などが現在多量に生産されている。しかしこの分野におけるロールフォーミングの進出は未だ始まったばかりの段階であり、その発展は今後課題とされた問題である。

一般にロールフォーミング加工の塑性加工法として実際生産の場からみた技術的特色は次のような点にあると考えられる。

(1) 成形速度は現在最高250m/minに達しており、かなりの量産が可能である。したがって均質な同一断面材の大量生産に適した加工法である。

(2) 素材として精度の良い圧延コイルを用いるため形状・寸法の一様な製品を得ることが比較的容易である。

(3) 成形は多数組の成形ロールを用いて漸進的に行なうので単一ロールによる成形量を少なくすることができ、仕上面は美しく、表面塗装を行なった板材の成形も可能である。さらに製品の表面傷が少ないので防錆性が良好である。

(4) 漸進的な曲げ加工を行なうため、プレス加工等に比較して無理が少なく、可能な最小曲げ半径を他の加工法に比して小さくすることができる。

(5) 成形後の製品は成形機と同調する切断機により所要長さに切断できる。また熔接・孔あけ・エンボス加工・曲げ・コイル成形等の補助加工も同時にできる。

ところで、このロールフォーミング加工は、外観上比較的単純な加工法のごとく思われる面もあるが、板材の加工法としてその内容に立ち入ってみた場合、最も複雑

* 東京大学生産技術研究所 第2部

な部類に入るといえる。例えば、成形過程にある素材を全体的にみると、第1スタンド入口では平板状態にあるにもかかわらず最終スタンド出側では複雑な断面を有する製品となっており、その間を多数の成形ロールによって噛み込まれ、きわめて複雑な三次元的曲面を呈している。この曲面のいかんがそのまま素材各部の変形径路の状態を表わしており、その変形径路を経た結果が製品の形状や品質として現われる。この複雑な曲面の形状は多くの成形条件因子により影響を受け、きわめて多様な変化を示し、それらを逐一解明することは容易ではない。さらには曲面の形状を規定する境界条件すなわち成形ロールと素材との間の接触状態さえも明確ではない。また変形の大きさは弾性変形・塑性変形の両方にまたがるものであり、その扱いは非常に面倒である。

したがって、上述のごとき加工技術としてのロールフォーミングの特色を十分活かすためには、成形過程における素材の変形挙動などを含む加工の実質的内容に関する総合的な考察が必要である。しかし、これらの問題に関しては未だ十分な研究がなされておらず、不明な点が多い。従来、実際生産の場におけるその重要性にもかかわらず、他のプレス加工などに比して、ロールフォーミングに関する研究が非常に少なく、技術的学問的基盤の形成が著しく遅れたのも、上記のごとき問題の複雑さによるところが多かったと考えられる。

しかしながら、近年のロールフォーミング加工の生産量の急激な増大に伴い、この加工法に関する基礎的な面からの研究の重要性が改めて認識されるに至り各所で研究が開始されつつある。筆者らも数年来この問題にとり組み、ロールフォーミングに関する技術的諸問題の学問的体系化を目指し一連の研究を行ってきた。その結果の多くはすでに学会等で公表してある。その内容はきわ

めて複雑かつ多岐にわたるため、それをここで紹介することは本稿の目的に必ずしも合致しないと考えられる。

そこで本稿ではこのような研究的な立場を離れ、ロールフォーミング加工の実態についてごく概略的に説明し、かつその問題点を指摘することとする。

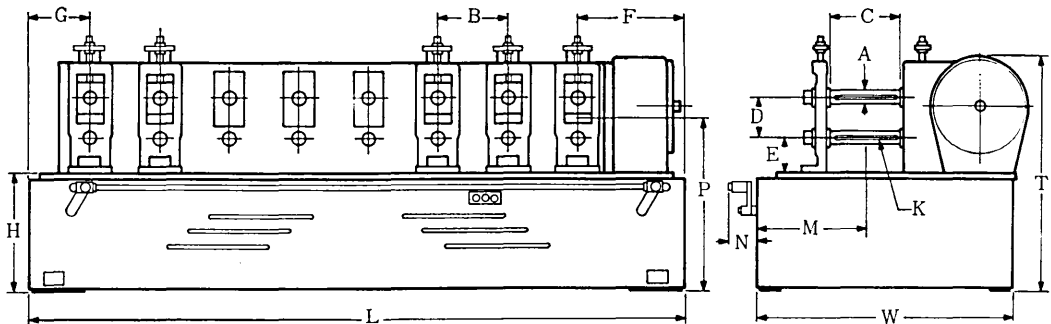
2. 成 形 機

ロールフォーミングは「板を連続的に送りながら所要断面成形のための幅方向曲げ加工を行なう」という本来の目的上、それを実現する設備としては少なくとも次の4点を満足しなくてはならない。

- (1) 素材を連続的に供給する。
- (2) 素材を一定速度で送る。
- (3) 断面を成形するための幅方向の曲げ加工を行なう。
- (4) 製品を一定長さに切断する。

このうち成形機本体としては(2)・(3)の2点が同時に満足されることが要求される。所定の製品を成形するための成形機を設計・製作する立場からみると、(2)項に関しては、主としてモーター馬力(成形エネルギー・機械損失等を含む)の算定、駆動方式の決定、成形ロールの設計、等周速径の決定と実成形成度の推定などに問題があり、(3)項に関しては、所要断面の成形に必要な成形荷重の算定、動力の伝達とロール回転機構、圧下調整機構が問題となり、合わせてロール軸径・ロールスペース(スタンド幅)、スタンド高さ、ロール組替え機構なども考慮されねばならない。この他にも細かい問題が多くあるが、以下成形機本体に関連する主な要因について簡単に説明する(図1参照)。

(1) モーター馬力: ロールフォーミングにより所定の断面を成形する場合、各スタンドあるいは成形機全体の



GENERAL DIMENSIONS*

| | | |
|---|--|-----------------|
| A | Spindle diameter |3, 3½ or 4 |
| B | Center distance between spindles |18 |
| C | Standard roll space |16 |
| | (Wider roll space to order) | |
| D | Upper spindle adjustment |8 to 11 |
| E | Top of base to center of lower spindle | 8 |
| F | End of base to center of 1st spindle |18½ |

| | | |
|---|---------------------------------------|------------|
| G | End of base to center of last spindle |22½ |
| H | Hight of base |24 |
| K | Spindle key size |¾ sq. |
| M | Edge of base to center of roll space |22¾ |
| N | Clutch lever extension |6¾ |
| P | Floor to pass line |36 |
| T | Over-all machine hight |52 |
| W | Width of base |59 |

図1 実際の小型ロール成形機の例

成形ロールを駆動するのに必要とされるモーター馬力を算定する有効な手法は現在の段階では明らかにされていない。これはロールフォーミングの成形過程における素材の変形挙動がきわめて複雑であるため、各スタンドにおいて成形ロールが素材に加える幅方向曲げ加工に必要な成形荷重そのものを適確に算定する手法が確立されていないこと他に、成形荷重と成形トルクの対応関係がロールプロフィールその他の成形条件により支配されることなどのため、おのおの場合について成形ロールを駆動するのに必要とされるエネルギーを一般的に求めることがきわめて困難であるためである。モーター馬力あるいは成形トルクを正しく算定するためには、まず、ロールと素材間の接触圧力分布および素材の実成形速度について正確に把握することが先決であるが、この問題に関しては未だ十分に解明されているとはいえない。

(2) スタンド構造: ロール軸の支持方式からスタンド構造を大別すれば、片持構造と両持構造の2方式に分けられる。前者は成形機の作業側が開放されているのでロール組替えその他の作業が容易な反面、軸のたわみやふれまわりが生じ易く、ロールフォーミングとしては致命的な上下ロール間のクリアランス不同や相対的な芯のズレなどのトラブルが生じ易い。したがってこの方式は比較的成形荷重の小さい薄物の小型断面の成形に適している。一方後者は逆に作業が多少の困難さを伴うが、スタンドの剛性を大きくすることができるため、比較的成形荷重の大きい厚物の断面や大型・広幅の断面の成形に適している。

成形ロール組替え方式によりスタンド構造を分類すれば、閉型構造と頭部開閉構造の2方式に分けられる。前者ではロール組替え作業を作業側から水平に行ない、後者ではスタンド頭部を開放して垂直方向から行なう。

さらに圧下方式により分類すると定荷重方式と定クリアランス方式に分類される。前者は成形時の圧下荷重(成形荷重)をバネまたは油圧等を用いて一定に保

つ方式であり、後者は成形時の上下ロール間のクリアランスを一定に保つように上下ロールショックを固定する方式である。この場合も前者は薄物の小型あるいは広幅断面の成形に、後者は厚物断面の成形に用いられる。

(3) 駆動方式: 駆動方式は上下軸強制駆動方式と上または下ロール軸のみを駆動し、他はアイドルロールとして用いる方式がある。上下軸強制駆動方式の場合はさらにドッグル型アイドルギアを用いる方式と、各スタンドに対応するドライブハウジングをつけ上下ロールを別々にユニバーサルジョイントを介して駆動する方式と(図2,3参照)がある。ロールフォーミングでは上下ロールに働くトルクは等しくないのが普通であり、場合によって負のトルクが働くことも珍しくない。このため目的とする成形に最も適切な駆動方式を選択することは難しい問題である。

(4) ロール軸径: 成形過程においては圧下条件・パスライン・素材材質・板厚・板幅・成形量などによって決定される成形荷重(ロール分離力)が上下の成形ロールに作用する。したがってこの成形荷重に耐え、かつその際生じるたわみが成形に本質的な影響を与えない範囲に留

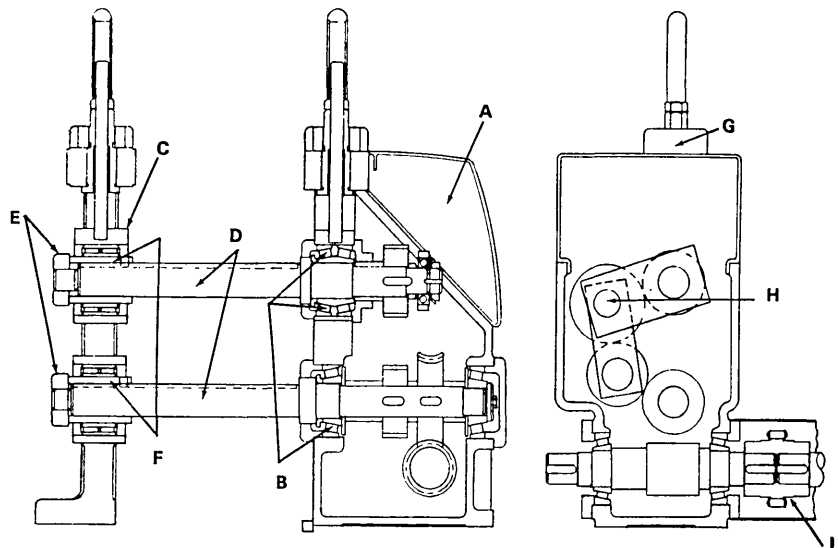


図2 駆動方式説明図(1) ドッグル型アイドルギア使用

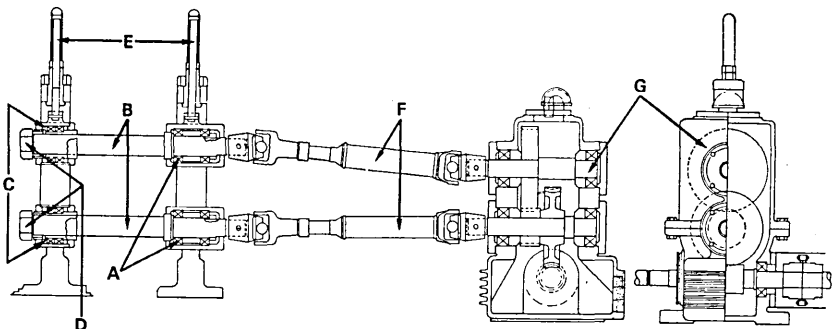


図3 駆動方式説明図(2) ドライブハウジング・ユニバーサルジョイント使用

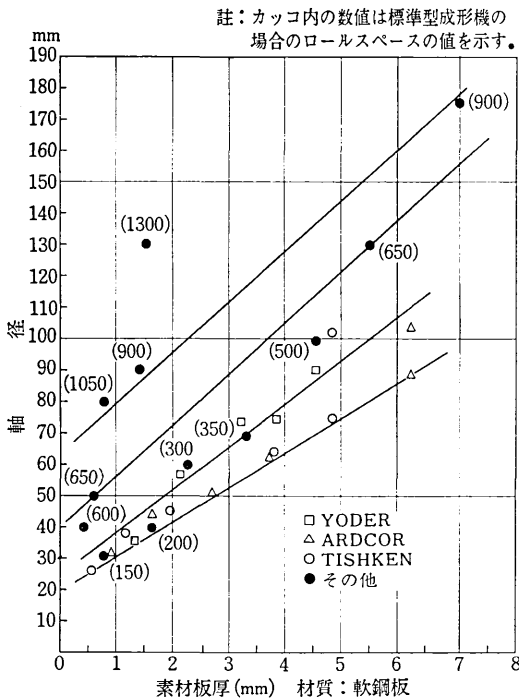


図4 ロール軸径使用例

まるだけの強度と剛性がロール軸に要求される。しかしながら成形時に成形ロールに加わる荷重を正しく算出する手法が確立されていないので、ロール軸径の決定も経験的に行なわれているのが現状である。図4には現在成形機メーカーとして代表的な数社の使用しているロール軸径を素材板厚に対してプロットした結果を示す。

(5) ロールスペース(スタンド幅)：ロールスペースは各スタンドで成形される断面の展開幅の最小値または最大値によって規定されるが、多くの場合成形断面の展開幅より 30~50 mm 広くとる。

(6) スタンド高さ：スタンド高さは成形断面の深さ成形ロールの外径および成形時のパスラインの調整量により規定されるが、成形時の基準パスラインは床上 800~850 mm にとるのが普通であり、これにロール外径・パスライン調整量およびスタンドの所要強度・剛性さらにロール組替え作業の難易を考慮して決定される。

(7) スタンド間距離：スタンド間距離は単に各スタンドのロールプロフィールや成形量配分からのみ定めることはできない。通常スタンド間距離が大きい程成形がゆるやかに進み好ましいように思われるが、スタンド間で素材にスプリングバックを起こすに十分な自由度を与えることは明らかに好ましい状態ではなく、上流側スタンドの成形ロールを通過した素材にスプリングバックする余裕を与えず下流側スタンドの成形ロールへ送り込むことが望ましい。しかし実際にはロール径やハウジングの寸法などによりスタンド間距離の最小値は限定され、またスタンド間距離がせばまる程、スタンド相互間の素材の

変形径路や成形荷重に対する影響の度合いが強まり、その結果、パスラインやロールクリアランスあるいは圧下荷重の設定等の作業条件のいかに製品形状や成形荷重・成形トルクに大きな影響を与えるようになる。したがってスタンド間距離の決定に際しては素材の通板性・成形の難易・作業の安定性などをうまく調和させるよう考慮しなくてはならない。

(8) スタンド数：所定の製品断面を成形するのに必要なスタンド数を決定することは、ロールフォーミングに関する諸問題のうち最も基本的かつ重要なものである。これは1組の成形ロールを用いて可能な成形の限界が何によって規定され、その量がどのくらいあるかによって定まってくる問題であるが、一般にその成形限界は成形過程における素材の変形挙動・変形履歴・素材材質・成形しようとする断面の性状、その他によって影響を受けるため、一般的にそれを解明する手法は未だ明らかではない。従来、長手方向にみた成形断面の立上り角が一定限界内に入るようにスタンド数およびスタンド間距離を定める方法が採られてきたが、この物理的意味ははなはだあいまいである。一般にスタンド間距離が大きい程、スタンド数を減らすことが可能であると考えられているが、ロール直前にきてから急激な変形を起こすという素材の変形挙動から考えて、この考え方にも限度がある。ただし、スタンド間に用いるサイドロール・ガイド・シューなどを増すことによりスタンド数を減らすことは可能である。

(9) 圧下調整機構：実際の成形作業を行なう段階では、圧下調整は最も重要な問題の一つである。既述のように圧下調整の方式には定荷重方式と定クリアランス方式の2種がある。前者では成形内容に応じて圧下荷重を調節し、また各成形段階に応じ加える圧下荷重を適当に配分する必要がある、後者では適切なロールクリアランスを維持しなくてはならない。現在の段階ではこれらの問題を自由に処理できる成形機および技術体系はまったく無く、現場作業者の経験と勘に頼っている状態である。

以上、現在稼働中の成形機の構造を性能についての大略を項目別に述べた。これらについて論ずべき点は未だ多々あり、さらにこの他にも成形機的设计・製造・操作などに関する多くの問題があるが、それらの点については別に論じることとする。

従来、成形機に関しては米国の二、三のメーカーの仕様がほとんどそのままの形でわが国に導入され、技術的な面からの検討が何等なされなまま実際生産の場に供されてきた。その意味で現在稼働中の成形機の中には技術的にかなり問題を含んでいるものも多く、基本的な面からの再検討が必要と考えられるものが少なくない。しかしながら近年我国においては、一部ではあるがきわめて積極的な新技術の開発が行なわれており、高速高性能

な成形機も現に稼動している。

3. 素 材

ロールフォーミングに用いられる素材は、量的にみれば熱延・冷延鋼板が主体を占め、製品によって銅・黄銅・アルミ・ステンレスその他特殊材料等が用いられる。通常圧延材は成形される製品断面の展開幅に対応する所定の幅に載断し、コイル状のままあるいは所定の長さに切断した切板として成形機に供給される。

素材の機械的特性なかでも加工硬化特性や降伏強度などは、成形過程において素材に生じる歪や応力の分布形態およびそれらの推移、あるいはローラー素材間の接触状態・成形荷重・成形トルク・さらに製品形状や製品内部の残留歪・残留応力の分布等に大きな影響を与える。したがって素材材質の相違によっては成形条件や作業内容をまったく変える必要も生じる。その意味でロールフォーミングにおいては素材の機械的特性は、ロールプロフィールの設計その他すべての問題に先立って検討すべき問題でもある。ここではロールフォーミングに用いられる素材のうち主なものについてその材質と特性を簡単に説明する。

(1) 軟鋼：ロールフォーミングに用いられる軟鋼の多くは 0.2% C 以下のものであり、降伏点が低く伸びも大きく成形は比較的容易である。含有炭素量が多くなるにしたがい成形は次第に困難になるが、0.6% C 程度の材料でも完全に焼鈍した一様微細なパーライト組織であれば成形は可能である。P や S などの不純物や非金属介在物は素材の成形性を低下させる。ただしここでいう成形性の概念は必ずしも明確なものではなく、一般的に製品形状のコントロールの難易・ワレや破断あるいはシワ・波・座屈等の発生しにくさを考える場合の漠然とした概念として用いているにすぎない。軟鋼板を用いる製品はあらゆる分野にわたっており、形状・寸法の大小もさまざまであるが、各種管類・軽量形鋼・プレート類・シートパイル・ガードレールその他土木・建築用部材などが主体である。成形速度は 30~60 m/min が普通であるが、現在最高 250 m/min に達している。

(2) 銅・黄銅：ロールフォーミングの素材として軟鋼について一般に用いられており、成形は比較的容易で製品は小型断面が多い。代表的な例として自動車用ラジエーターチューブや通信ケーブル用被覆管がある。ただしこの材質の場合には(板幅/板厚)の比が大きなものを成形するケースが多く、その場合成形断面の剛性の不足から成形過程において座屈が生じ易く、特別の配慮が必要となる。また同じ銅・黄銅材であっても、O-材と H-材では加工硬化特性が著しく異なるため、成形過程における変形挙動が大きく異なることに注意せねばならない。

(3) ステンレス Cr 鋼 (Cr: 11.5~13.5%, C: 0.2% 以下), Ni-Cr 鋼 (Cr: 17~19%, Ni: 8~10%, C: 0.2% 以下), 高 Cr 鋼 (Cr: 14~18%, C: 0.2% 以下): これらの材質は特殊なパイプ類・サッシ類などに成形されるケースが多いが、これらを用いる他の加工の場合と同様成形は非常に困難である。したがって成形可能な断面形状の複雑さにも限度がある。成形速度は 8~25 m/min の比較的低速領域にとどめ摩擦による熱発生および表面傷の発生を防ぐ必要がある。

(4) Al および Al-合金: 銅・黄銅材と並んで比較的よく用いられる。成形は比較的容易であるが、この場合も製品の(板幅/板厚)比が大きな場合が多いため、成形断面の長手方向曲げ剛性が小さく、板厚 0.5 mm 以下では成形断面の形状の保持が困難となることが多い。ただしジュラルミンは成形困難であり、成形前または途中で熱処理が必要である。

(5) Ni および Ni-合金: これはステンレスより成形性がさらに悪く、成形の目的も特殊なものに限定される。成形が可能な断面形状も比較的簡単なものに限られ、素材板厚も高々 2.0 mm 程度と考えられる。成形速度はステンレスの場合よりもさらに低く抑える必要がある。

(6) Mg および Mg-合金: 冷間成形においては歪硬化が急激に進み、ワレが発生し易いので成形前または途中で加熱してやる必要がある。

(7) Zn および Zn-合金: 銅・黄銅と同じく小型断面の製品に広く用いられ、成形は比較的容易である。

以上ロールフォーミングに用いられる素材について簡単に述べたが、これらの素材はそれぞれ材質固有の特性の他に、その熱的処理のいかんによっても機械的特性ひいては成形過程における変形挙動が著しく異ってくるのが普通である。一般に、成形過程における変形挙動や製品形状の面からみると、素材の機械的特性のうち、加工硬化特性が最も重要な役割を果し、加工硬化の少ない素材では長手方向のそりや捩れは発生しにくいが断面の形状がきまりにくく、逆に加工硬化の大きい素材では断面の成形は比較的容易であるが長手方向の形状不整が起こり易い傾向がある。したがってこれらの点を十分考慮したうえでロール設計および成形工程の決定を行ない、所要の成形断面に適合する成形条件を定める必要がある。

4. 成 形 断 面

現在実際生産の場において成形されている製品の断面形状はきわめて多種多様であり、寸法もさまざまであるが、それらを寸法の面から分類すると次のようになる。

(1) 極薄板小物断面: これは板厚が 0.8 mm 以下 0.1 mm 程度までの素材を用いて成形される製品であり、自動車用ラジエーターチューブなどの極細管、特殊チャンネル

ル材やサッシ類あるいはブラインド用素片等に代表される断面である。これらの断面の場合、素材の(板幅/板厚)比が比較的大きく、また板厚の絶対値が小であることから、素材の変形挙動が不安定になりがちであり、弾性回復量の割合も大きく、その意味で所定の断面を正確に成形することが非常に困難であることが多い。

(2) 広幅断面: デッキプレートその他の各種プレート類やさまざまな名称で呼ばれている屋根材・床材・壁面材・非常に複雑なサッシ類などがこの部類に含まれる。用いられる素材の板厚は比較的小さいものが多く通常 2 mm 以下である。素材幅は最大 1,200 mm 程度までの成形が行なわれている。この種の断面は成形工程の設計が難しく、コーナー部の曲げ半径・成形量配分・中央への寄せ量の配分などに関して特別の配慮が必要である。また成形過程において、波の発生やワレなどの問題が起り易い。

(3) 軽量形鋼断面: 素材板厚 0.8~5.0 mm, 板幅は大略 400 mm 以下で、現在最も多量に生産されている品種であり、歴史的にみてもロールフォーミングの代表的製品である。断面の形状は C 形鋼をはじめとしてきわめて多種におよんでいる。しかし断面形状そのものは比較的簡単なものが多く、また他の断面形状の場合に比較して経験的なものであるにせよ技術的な面で蓄積もある程度進んでいるので、成形ロールの設計や成形工程の計画は比較的容易である。

(4) 大型断面: 素材板厚 4 mm 以上板幅 400 mm 以上の成形断面を概略大型断面と呼び、大型の形材やシートパイルなど土木建築用部材として用いられるものが多い。この種の成形断面の場合には成形荷重・成形トルクも相当大きくなるため、これらに関するできるだけ正確な評価と成形機やロールに対する強度あるいは剛性の面での十分な配慮が必要である。また素材板厚が大きいため曲げ部における肉べり等の問題が生じる。

(5) 各種管断面: 寸法的には軽量形鋼断面から大形断面にまたがっているが、他の多くの断面が開断面であるのに対し、溶接工程を経て閉断面となるという意味から管断面はそれだけを他と分けて考えることができる。小形の管断面のうちには溶接後サイジングロールにより角パイプとし、建築構造物の柱材として用いるものも多い。また薄肉大口径パイプはロールフォーミングによって成形される断面のうち最も大きなものの部類に入る。

(6) 被覆断面: これは自動車用マフラーチューブなどにみられる特殊な断面で、断面の内側を安価な軟鋼で、外側はステンレスその他の高価な金属や断熱材等の特殊材で被覆するもの、またはその逆の場合などがあり、成形工程などに特別の配慮が必要である。

以上成形断面をその寸法の面から幾つかに分類して示したが、図 5 にはロールフォーミングにより成形される

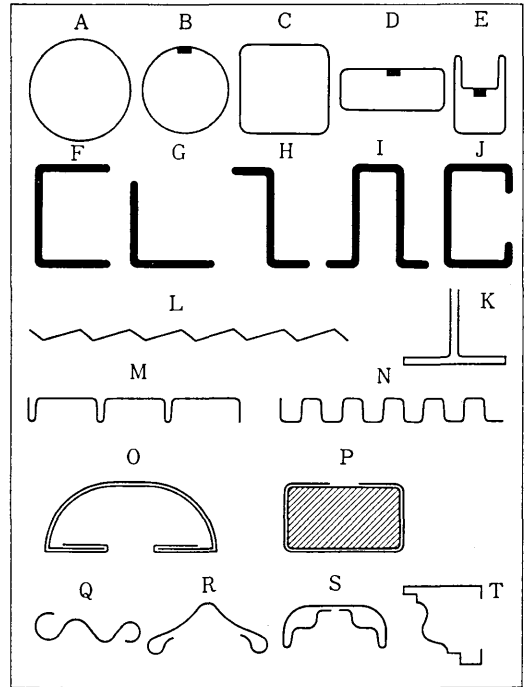
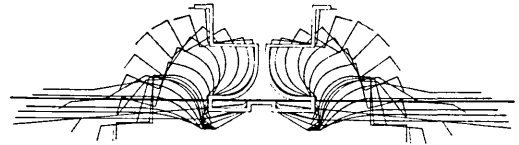


図 5 成形断面形状の例



“Flower” Drawing Showing Stainless Steel Form Requiring 20 Progressive Roll Passes.

図 6 ロールフラワーの例

代表的な断面形状を示す。A~Eは管類はF~Jは軽量形鋼、L~Nはプレート類、O・Pは被覆断面、Q~Tはシートパイルその他特殊断面である。

5. 成形ロール

ロールフォーミングの加工プロセスを規定する最も重要な要素は各スタンドに組み込まれる成形ロールのプロファイルである。従来、このロールプロファイル(各スタンドのロールプロファイルを同一紙上に重ね合わせた図をロールフラワーと呼ぶ、図 6 にその 1 例を示す)の設計はまったく経験的手法に基づいて行なわれてきた。その方法とは、所定の製品断面の形状を針金や帯板を利用してつくり、この断面を漸次はぐして平面にまでもっていく過程を分析し幾つかの段階に分け、スタンド数・スタンド間距離・パスラインその他の与えられた制約条件のもとで経験を基にして検討を加え、各スタンドにおけるロールプロファイル大略を定め、これを実際のロールにうつしとる。次にこれらのロールを用い実際に素材を通して成形を行なう過程で試行錯誤を繰り返しつつ次第にロール

形状を修正して所定の製品断面形状が得られるまでこれを続けるというものである。

各スタンドのロールプロフィールまたはそのシーケンスとしてのロールフラワーは、成形過程における素材の変形挙動・歪径路あるいは素材内部の応力状態およびその推移などを支配する要素であるから、その設計の良否は製品の品質・成形の限界・成形作業の安定性などを大きく左右する。またたとえ外観上の製品形状および寸法は所定の目標どりのものが成形できるとしても、そこに至る成形工程あるいはそれを實現するロールプロフィールは無数にありうるので、問題はいかにしてその中から最適なものを見出すかにある。ただしここでいう最適という概念の評価基準は必ずしも一定のものである必要はなく、製品の残留応力をできるだけ緩和すること、スタンド数をできるだけ減らすこと、素材各部の変形をできるだけなめらかにすることなどもその一つである。しかしながらこの問題はきわめて高度かつ複雑な内容を有しており容易に解を見出すことはできない。そこでここではロールプロフィールの設計を行なう場合に実際の設計技術の面からみた検討事項のみを列挙する。

(1) 成形断面の要素分析：所定の製品断面に対応して次の事項すなわち、種々の曲げ方式の所定断面の成形への適用の可能性、成形順序と各スタンドへの成形量配分の最適化、成形断面の細部形状と対応するロール形状および成形手法、ロールフラワーと設計等周速径配分、設計等周速径とロール-素材間の接触状況の適合、製品精度とロール精度、成形断面展開幅と素材幅の評価、成形荷重・成形トルクの推定、などに関して検討する必要がある。

(2) 成形機の要素分析：スタンド構造・強度・剛性、スタンド数、許容最大および最小ロール径、成形時のロール操作方法、ロール組替え方法、スタンド間距離とその可変量、パスラインの可変量とその調整方法、ロール圧下方法とその調整幅、駆動方法などがロールプロフィールの設計に際して成形機と関連して検討せねばならぬ事項である。

(3) 成形ロールの要素分析：専用汎用ロールの別、分割ロールと一体ロールの選択、素材材質に対応するロール材質の適・不適、生産量とロール寿命、駆動ロールとアイドラーロールの別、垂直ロールと水平ロールの使いわけなど成形ロールそのものに関連する問題点もある。

成形ロールの設計に際して、所与の目的を最大限に達成するためには、上述の各事項に関して総合的に検討を行ない、相助長する因子は積極的にこれを満足するように努め、相反する因子はその調和を図るように努めなくてはならないが、現段階ではこれら因子が素材の変形挙動に与える単独効果・複合効果の多くが未だ明らかにされていないので、この問題に関しても今後の研究に期待

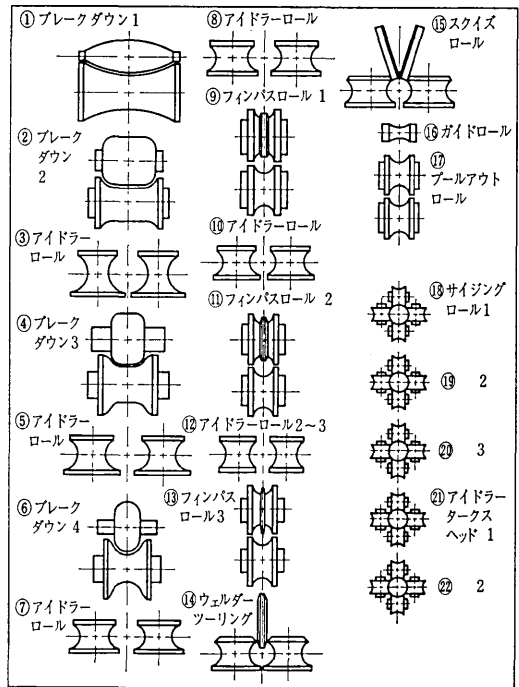


図 7 電縫管成形用ロールの 1 例

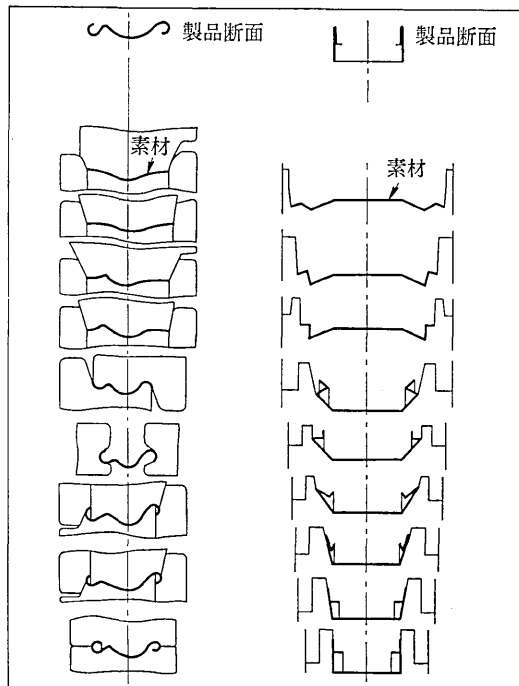


図 8 成形ロールプロフィールの例

される点が多い。現在使用されている成形用ロールのうち代表的な例として図 7 に電縫管成形用ロールの概略図を示し、さらに図 8 には特殊断面の成形ロールプロフィールを示す。

次に成形ロールの材質とその特性について簡単に説明する。まず成形ロールとしては次のような特性が要求さ

表 1 各種材質とその用途

| 材 質 | 硬 度 SH | 引張り 強 さ | 抗折力 | 用 途 |
|----------|-----------|--------------------------|-----|------------------|
| 炭素工具鋼 | 40~80 | kg/mm ² 60 | | 主としてスパー サー |
| 軸 受 鋼 | 75~85 | 250 | 260 | 一般ロール |
| 冷間ダイス鋼 | 80~85 | 250 | 290 | 一般ロール |
| Mo 系高速度鋼 | 80~90 | 300 | 450 | 成形上靱性を要 するロール |
| V系高速度鋼 | 85~91 | | | 耐摩耗性を要す るロール |

れる。(1): 硬度が高く靱性が大きい。(2): 耐摩耗性が大きい。(3): 衝撃に強く表面剥離を起こさない。(4): 焼付が少ない。(5): 焼入れ深度が大きく内部硬度の低下が少ない。(6): ロール寿命が長く生産性が良い。(7): 寸法精度が良く仕上面が美麗である。これらの特質をすべて満足することは通常困難であるが、一般に採用されている材質とその用途の概略を表 1 に示す。

一般に高炭素工具鋼・軸受鋼は芯部まで焼入れ硬化させることが難しく、改削を数回繰り返すと硬度が低下し使用不能となる。これに対し高クロムダイス鋼は自硬性が強いので中心部まで硬化させることが可能であり、片肉 10 mm 以上の改削を行なっても硬度の低下はきわめて少ない。高速度鋼は焼戻し後の硬度が大きく、高温硬度も高い。耐摩耗性に関してはダイス鋼は軸受鋼に比較して秀れており、高速度鋼は高度の耐摩耗性と機械的強度に秀れている。特に V系高速度鋼は耐摩耗性の面で他の材質に比較して著しく秀れている。同時にまた高速度鋼は靱性も高く、特に Mo 系は最高を示し、この材質はフィンロールその他成形上割れ易く靱性を要するロールに適する。またダイス鋼は抗折荷重・たわみ共に軸受鋼よりも大である。

上述のような諸材質の特性を十分検討したうえでロール材質の選定を行なう必要があるが、ロールスパーサー以外はダイス鋼以上の鋼種を用い、特に摩耗の顕著なフィンロール・第 1 スタンドブレイクダウンロール・サイジングロール・溝入れロール・鋭角ロール・リップロール・メッキ板ロールなどは高速度鋼の使用が好ましい。

しかしながら、一般に成形ロールは、プレス加工におけるダイス同様、かなり高価なものとなり、そのための経費節減は、生産コストの低減化のためにも、真剣にとりくまれねばならぬ問題である。そのためにはまずロールと素材間の接触状況あるいは接触圧力分布の形態などに関して十分検討し、ロールの摩耗をできるだけ抑制するために、プロフィール上の高接触圧力が発生する領域が実際の等周速径上にくるようにロール径の決定には十分注意すること、ロールを分割ロールにして必要な部分にのみ高級な材質を用いること、できるだけアイドルロールを多用して不必要なロールと素材間の迂りを除去すること、広幅断面の成形ロールなどでは当該するス

ンドで本当に成形加工を行なわんとする部分を除いて出来るだけロールを抜きとることなどの点に関して従来以上に積極的に検討する必要がある。

6. 成形工程

所定の断面の製品を得るために素材をどのような順序で成形するかという問題は、ロールプロフィールまたはロールフラワーの設計の問題と同義であり、ロールフォーミングの最も基本的な問題である。ロールフラワーの設計を行なうに際して検討を加えなければならない問題点や因子については前節において指摘したが、ここではこれらの問題点のいくつかについて総合的見地から考察してみる。

(1) スタンド数

与えられたスタンド数のもとでのパススケジュール(ロールフラワー)または、スタンド数は所定の成形断面の断面深さ・曲げ部の数・形状の複雑さ・幅方向の寄せ量・素材の機械的特性などの因子と、スタンド間距離・ロール径・サイドロールやガイドの有無などの条件因子とのかね合いから決定される。従来、成形断面の深さの増加の割合すなわち平板から製品断面までの素材の立上りの傾角が 1°30' 以内となるように抑え、その範囲内でスタンド数とスタンド間距離の組合わせを考えるという方法が一部に採用されてきた。この考えは n スタンドから $n+1$ スタンドに至る成形過程において素材の変形量が成形方向への素材の移動距離に比例するとの仮定に基づいている。ところが実際の成形過程においては素材の変形が比例的に起こるとはならず、 n スタンドを出た素材は $n+1$ スタンドのロール直前にきて急激な変形を起こすのが普通である。またその際の素材の各部の変形径路はパスラインその他の条件因子により大きく異なる。したがって、この考え方はごく限られた場合には適用できても、その一般性に著しく欠けるところがある。

所定の断面を成形するのに必要な最小限のスタンド数を決定するという事は、別の見方をすれば、与えられた素材に関して 1 スタンド当たりの可能な成形の限界を評価することと同じである。この成形限界を求めるためには、一般に一連のプロフィールを有する成形ロールが組み込まれた n スタンドから $n+1$ スタンドに至る成形過程において、素材が示す変形挙動すなわち素材内部に発生する歪や応力の分布形態やその推移を正確に把握し、かつまたその変形挙動がパスライン・ロールクリアランス・素材寸法・素材材質などの諸々の因子によってどのような影響を受けるかをすべて明らかにすることが必要である。理想的にはこうして得られる素材の変形挙動に関する正確な知識のうえに必要なスタンド数あるいはパススケジュールが決定されねばならない。しかしな

がら現実にはこの問題を解明するのに有効な手法は未だ明らかではなく、実験的なデータの集積や経験に頼って処理しているのが現状である。

(2) パスライン

パスラインとは各スタンドのロールプロファイルの対応する一点、例えばプロフィール上の中央点あるいはプロフィールの図心など、を結んで得られる空間的曲線をいう。換言すればパスラインを定めるとは各スタンドの成形ロールを空間的にどのように配置するかを決定することに等しい。このパスラインのいかんは成形過程における素材の変形挙動にきわめて大きな影響を与え、その結果、製品形状・成形荷重・成形トルクあるいは製品の残留応力などはパスラインの変化に伴って大幅に変化する。

この問題に関しても基本的な見地から考察すると、究極的には成形の各段階における素材の変形挙動の問題に帰着し、成形過程における素材の変形形態を解明することなしにスパラインについて論じることはできない。

ロールプロフィールとスタンド数が決定された後では、パスラインと圧下調整のいかんが素材の変形過程を支配する。したがって実際作業の場においてはこの二つの点が最も重要な問題となる。

一般にある定められたパスラインに沿う成形過程において、素材はロールフォーミング本来の目的である断面成形のための幅方向曲げ歪の他に、局部的に長手方向・幅方向の伸び歪・圧縮歪あるいは長手方向の曲げ歪を受け、しかもこの歪の方向はたえず変化するのが普通である。特に素材の中央部や縁部ではこの伸び歪や圧縮歪の値が大きく、歪の方向が逆転する際には座屈やワレなどを発生し易く、この座屈やワレの発生限界がロールフォーミングにおける成形限界を規定する一つの指標ともなっている。しかしながら、現段階では与えられたパスラインのもとでの成形の各段階における素材の変形挙動を正確に把握することができる統一的な理論はない。この問題の難しさは、すでに指摘したとおり、成形過程にある素材が複雑な三次元的曲面を呈していること、変形が弾塑性境界の近傍において起こっており弾性変形・塑性変形いずれも無視できないこと、曲げ理論・膜理論を同時に考慮しなくてはならないこと、さらに変形の境界条件すなわち成形ロールによる素材の拘束状態が明確でないということにある。したがってこの問題に関してもその解明が今後に残された課題である。

(3) 成形順序

所定の製品断面を成形する場合に、具体的に断面のどの部分からどのような順序で成形を行なうかという問題に対してはさまざまな考え方があり得る。例えば円弧断面の成形の場合には edge bending 法・center bending 法あるいは circular bending 法などがある。また角曲げの場合にも曲げ半径のとり方や曲げ中心の与え方にはさ

まざまな方式がある。これらの手法を目的に応じてどのように使いわけるといふ点に関しては未だ不明の点が多い。一般には成形の順序として、素材の中央部から成形するのが好ましいという考え方があるが、これとても先に縁部を成形して縁部の長手方向曲げ剛性が增大すると、パスラインに沿う素材の通板性が悪化し、これを無理に成形ロール間に押し込むと素材やロールの破損あるいは屈折などを生じ易いという理由に基づくものであって、場合によっては縁部を最初に成形して曲げ剛性を高め、座屈に対する抵抗力を強化するという考え方も成立する。したがってこの問題に関しても他の場合と同様、素材の変形挙動に対する総合的な考察のうえに立って検討されなければならない。

成形順序として従来採用されてきた手法を大別すると次の4方式がある(図9参照)。

(1) 素材の中央部から両端に向かって順次曲げ加工を行なう方式：円管の成形の場合の center bending 法に相当する。この場合、素材は中央から製品半径に曲げられていき、素材の縁はインポリュート曲線の軌跡を描く。広幅の素材を成形する場合には、素材を中央に寄せる加工と所定の断面形状に曲げる加工を行なわなくてはならないが、一般には素材中央部から中央へ寄せる加工と所定断面への形決めを順次行なう手法が採られている。薄板の広幅断面物(波板・角波板)でこの方法をよく採用しており、特に小波成形の場合には、2山分の素

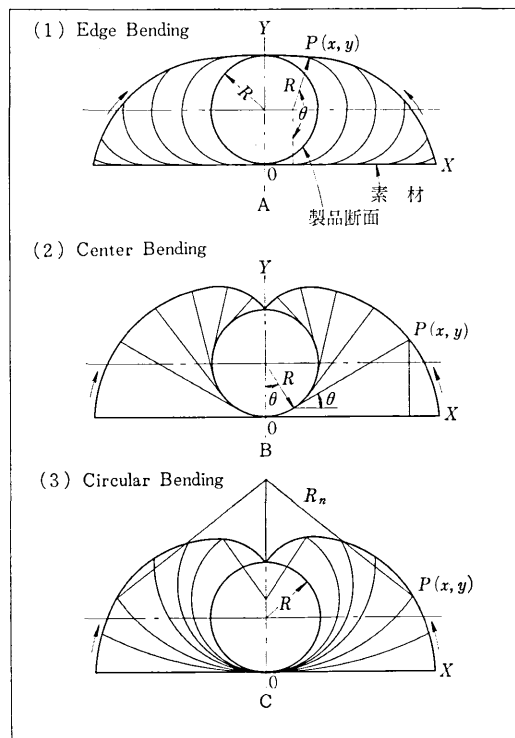


図9 円管の成形工程の3方式

材を寄せて正弦曲線状にしておき次に一度に2山を成形する方法もある。

(2) 素材両端から中央部に向けて順次成形を行っていく方式：円管の成形の場合の edge bending 法に相当する。この場合素材は両端から所定の曲げ半径に曲げられ、縁の描く軌跡はサイクロイド曲線となる。この方式は素材縁部に座屈が生じ易いような場合に縁部を先に成形することによりその部分の剛性を強めておくという意味がある。

(3) 素材各部の成形を同時に平行的に行なう方式：幅方向の曲げ加工と中央への寄せとを特に区別しないでこれらの両加工を素材全体にわたって同時的に行なうもので、円管の場合の circular bending に相当する。このとき素材各部を同一半径で曲げていく single radius 方式と、各部分を異なる半径に曲げていく double radius 方式とに分けて考えることもできる。

(4) 広幅断面の山の成形や断面の一部の成形の場合、素材の幅方向の寄りをなくすまでは曲げ部を大きな円弧状または正弦曲線状にしておき、ほぼ所定の断面幅に近づけておいてからその部分を最終形状にしていく方式：この方法は曲げ部に発生する幅方向の伸びを防ぐための手段であって、素材の中央への寄せ量をやや多めにとっておき、曲げ部に幅方向の張力よりはむしろ圧縮力が加わる状態にして成形を行なうという考え方が基づいている。

以上、全体的にみた成形順序の4種の基本方式について述べたが、実際の成形の場合にはこれらのうちの特定の方式に統一されることは少なく、場合に応じてこれらを混合して用いることが多い。

また角曲げの場合にも曲げ部の成形方式には何と云うかある。それらのうち代表的なものを挙げると次のようになる。ただしこれらはいずれもロールフラワーの変化を紙上で示したものである。

(1) 曲げ半径の中心を固定し、曲げ半径も一定とし曲げ弧上を増していく方式

(2) 曲げ半径の中心を上下に移動して曲げ弧長を一定に保ち、曲げ角の増加と共に曲げ半径を小さくしていく方式

(3) 曲げ部に発生する幅方向の伸び量（推定値）を左右に振り分けるため、曲げ中心を水平に移動する。曲げ半径は一定に保ち曲げ角に応じて曲げ弧長を増していく方式

(4) 曲げ部に発生する幅方向の伸び量を左右に振り分けるため、伸び量（推定値）に応じて曲げ中心を上下に移動させる。また曲げ角に応じた曲げ弧長の増加に応じて曲げ半径を小さくしていく方式

このように、細部の成形順序または方式に関してさまざまな可能性があり、それらをどのように選択して適

用するかは、全体的にみた素材の変形挙動についての十分な検討のうえに行なわれなければならない。

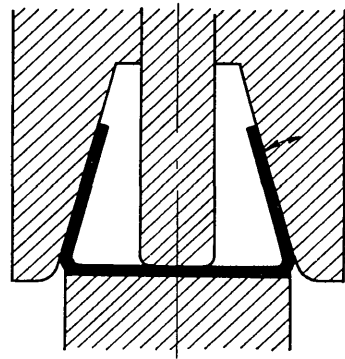
(4) 成形量配分

タンデム成形の場合、各スタンドに対しそこで素材に加えられる成形量をどのように配分するかという点については多くの問題がある。通常成形量は各スタンドに均等に配分するのがよいと考えられているが、従来考えられてきた成形量という概念は非常にあいまいなものであり、厳密な定義があるわけではない。現段階では素材の立上量や曲げ角あるいは中央への寄せ量などのみかけの変形量を表わす概念として便宜的に考えられているにすぎない。したがって、この問題についても成形の各段階における素材の変形径路や歪状態に関する総合的な解明が行なわれ、その上立って素材の変形量を適確に把握すること、および各スタンドへの変形量すなわち成形量の配分が全体の成形過程に対していかなる影響を与えるものであるかを検討する必要がある。

(5) スプリングバック

成形後の製品は成形ロールによる拘束から解放されると同時にスプリングバックを起こす。従来スプリングバックを防止する方法は幾つか考えられており、成形ロールによる圧下力を高める方法、アイドラールロールやサイ

(1) オーバーバンドによる方法



(2) ショルダーストップ・曲部圧下による方法

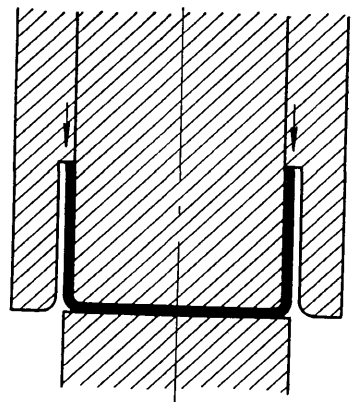


図10 スプリングバックの除去法説明図

ドロールを用いてオーバーバンドを加えて後に形状を整える方法などが行なわれている (図 10 参照). ただし前者は製品の表面キズや部分的な肉べりの発生原因ともなるため, あまり好ましい方法ではない. 後者は製品内部の残留応力分布の緩和にも効果があり, 製品の切断口の形状のゆがみなども除くことが可能である. しかしながら成形過程における素材の変形はきわめて複雑であるため, 成形後のスプリングバック量や残留応力分布を正確に求めることは極めて困難であり, 従来この問題に関する解析手法は明らかにされていない. したがってこの点も今後に残された大きな研究課題の一つである.

(6) 素材幅とロールプロフィールまたは製品断面の展開幅

成形過程において素材は幅方向の曲げ加工を受けるが, その際曲げ部には幅方向に伸び歪が生じる傾向がある. したがって各スタンドの成形ロールのプロフィール展開幅と素材幅とを等しくすると, 成形過程において素材寸法とロール寸法が適合しなくなり, ロールや成形機に重大な損傷を起こす可能性がある. 一般に素材の板厚が比較的厚い場合や幅方向の曲げ部の数が多い場合などは, 製品の展開幅は素材幅より相当量大きいのが普通である. ゆえにこの曲げに伴う幅方向の伸び量を正しく評価して素材幅を決定しなければ製品の断面寸法を正確に規定することはできない. 曲げに伴う伸びは, 通常の単純曲げその他の加工の場合にも起こるものであるが, ロールフォーミングの場合には特有の変形形態のもとに曲げ加工が行なわれるため, 幅方向の伸び量の推定がそれだけ難しい問題となる.

(7) ロール素材間のすべり

ロールフォーミングにおいてはその加工法上の避けられない現象として, プロフィール各部における上下ロール径の相違に基因するロールと素材間の相対すべりの問題がある. この相対すべりは製品の表面傷の発生やロール寿命の低下などの原因となるものであり, その影響をできるだけ少なくすることが望ましい. このため, ロールプロフィールに対して上下 (凹, 凸) ロールの等周速径, あるいはロール周速と素材速度が一致する点の径を適当に選んでプロフィール上の相対速度差をできるだけ少なくすること, 曲げ部など大きな接触圧力が発生すると考えられる領域をできるだけ等周速径の近傍にもってくること, あるいはプロフィール全体からみて相対すべり量や接触圧力が上下ロールで等周速径を境にしてそれぞれバランスすることなどの考慮がなされている. しかしながらこれらの要求は常に全スタンド同時に満足されるとは限らず, そのような場合にはこれらの要求をいかに調整して調和を図るかが非常に難しい問題となる. さらに設計段階では実際の成形過程におけるこの等周速径の値を正確に知ることができないことが問題を一層複雑にしている.

この問題に対する他の対応策としてはアイドラーロールの使用がある. アイドラーロールの使用法としては当該スタンドの成形ロールのうち凹ロールまたは凸ロールのみをアイドラーロールとする場合と, 凹ロール・凸ロール共に無駆動とする場合がある. このアイドラーロールを用いる場合には, 成形ロールに噛み込まれた素材の変形形態・成形ロールが素材に加える拘束の形態と強さ, さらにこれらがパスライン・ロールクリアランス・ロール径・プロフィールの特性・素材寸法などによってどのように変化するかという問題を十分検討しなくてはならない.

7. 附属設備

一般にロールフォーミング加工を行なう場合, 成形機本体の他に各種の加工設備・補助設備が必要となる. 以下その主なものについて簡単に説明する.

(1) スリッター: 圧延加工によって得られる広幅のコイルから所要の板幅を有する素材を得るためには精度の高いスリッターが必要である. 一般にはロータリーガングスリッターが用いられ, 巻戻しドラム・スリッター・スクラップドラム・巻き取りドラムからなり, レベラーを併用する場合もある. スリッターの性能は刃のいかんによるが, 刃の材質としては高炭素高クロム鋼・タンゲステン鋼などを適当に熱処理して用いている.

(2) 入口ガイド・スタンド間ガイド・シュー (図 11 参照), これらは成形機の入口あるいはスタンド間につけ, 素材

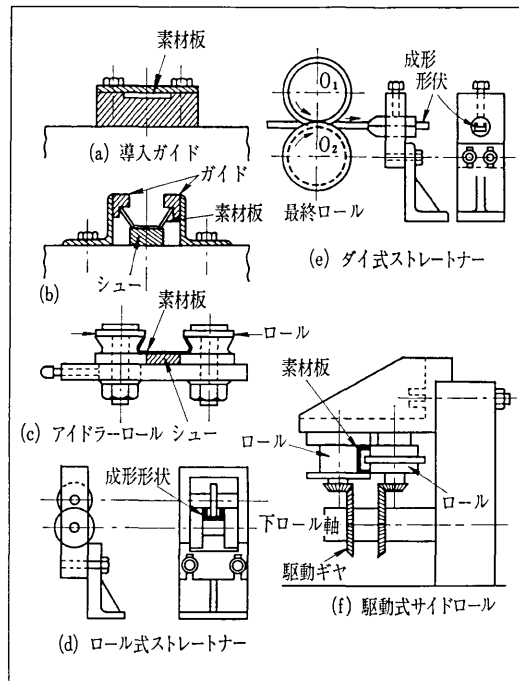


図 11 ガイド, シュー, アイドラーロール, ストレートナー, サイドロールの例

の通板性を促進し、成形過程にある素材のわん曲・振れを防止して無理のない成形を行なわせようとするものである。用いられる材質は青銅・半硬鋼・鋳鉄あるいは硬質クロムメッキを施したものが多く、素材表面に傷をつけないように注意が払われている。

(3) **アイドラール**：無駆動で主ロール間におき、断面成形のための曲げ加工のみを行ない、送り加工はしない。主成形ロールをアイドラールとして用いるのとは別であり、一般には垂直ロールが多く用いられ、90°以上の角曲げの成形に有効である。

(4) **ストレートナー**：成形機の最終スタンドの直後に設置し、製品の長手方向のわん曲や振れを矯正して形状を整え真直にするために用いる。これは最終ロールの出側にできるだけ近づけ、最終ロールとの相対的な位置・方向を変えて調整を行ないその効果が大きくできるようにする。ロール式・タイ式・ガイド式等があり、場合によっては1パスのみでなく2パス以上を直列に用いることにより矯正効果を高めることができる。

(5) **切断機**：製品は通常真直にとり出すのでこれを、所定の長さに切断する必要がある。このために用いる切断機には、鋸式とシャー式とがある。鋸式は切断口にゆがみを生じさせることなく切断できるので、管状断面の切断に有効であるが切断速度が遅いため、成形速度そのものが制限を受ける。フライングシャー式では切断機の刃の形状が問題であり、切断口のゆがみを生じ易い。一般には切断口の形状悪化を緩和するために刃のエッジが断面の対角線方向へ移動するようにくふうされたものが多い。いずれの場合も低速成形の範囲内では比較的問題が少ないが、成形および切断が高速化すると共に、切断精度や切断時の衝撃などに関して問題が多い。

(6) **溶接機**：電縫管の成形の場合、その成形速度および製品の品質、特に溶接部の良否は大体において溶接装置の性能により決定される。溶接法としては、低周波抵抗溶接法・高周波抵抗溶接波・高周波誘導溶接法・アーク溶接法などがあり、おのおのの特質を考慮して使い分ける。

この他、素材を連続的に成形機へ供給するための設備として、アンコイラー・レベラー・ダンパー・素材の溶接設備などがあり、出側の設備としては、製品を停止させ結束するロッパー・け出し装置・コンバイラーなどがある。また製品の切断長さを検出するための装置として、メジャリングロールや光電管を用いた計測装置などが採用されている。

8. 結 言

本稿においては塑性加工の分野で大きな役割を果たしつつあるロールフォーミング加工に関して、主として実際的な面からその概略を述べ、同時にそれが内包してい

るさまざまな問題点について考察した。しかし何分にもこの加工法が余りに膨大な内容を含んでいるため、それらのすべてをここに述べることはできず、説明が表面的となり、問題の掘り下げが不十分に終らざるを得なかった。事実、本稿で述べたロールフォーミングの実態をふまえたうえで一般的な問題点の整理、成形過程における素材の変形挙動の特質に関する具体的説明とその物理的意味、従来の研究成果とその結果の整理など論ずべき多くの点が残されている。個々の問題に関してはまた別の機会に論じたいと考えているが、興味のある読者は下記の参考文献を参照されたい。

なお本稿の執筆に際しては下記の参考文献中、特に加藤¹¹⁾・馬場¹²⁾・橋本¹⁷⁾氏らのものを参照したことを付記し謝意を表したい。(1971年9月6日受理)

参 考 文 献

- 1) R. T. Angel: Production Design Technique for Cold Roll-Forming. Machine Design. Dec. 1956, p. 106.
- 2) E. Griffin: Cold Roll-Forming and Manipulation of Light-Gauge Section. J. of The Institute of Metal vol. 84, 1955-56, p. 181.
- 3) V. I. Davydov, Yu. K. Puzyrevsky: Forces Operating During Cold Roll-Forming. Stal' Rolling and Tube Manufacture Supplement. 1959, p. 95.
- 4) Yu. A. Mednikov: Length of the uniform transition zone and relative expansion of the edge of strip when forming into tubes. Stal' April 1963, p. 300.
- 5) G. Sacks: Principles and Methods of Sheet-Metal Fabricating. Trans. ASM. 37, 1946, 449, 1951, 494.
- 6) D. A. Johnston: Tool Engineers Handbook. 1949, 989.
- 7) C. J. Nocar: Steel Partition Gain Acceptance. Sept. 1950.
- 8) E. J. Vanderploeg: Roll-Forming. Simple Method for Designing Rolls. Oct. 1953.
- 9) E. J. Vanderploeg: Cold Roll-Forming. Iron and Steel Engineer. Oct. 1955, p. 76.
- 10) E. J. Vanderploeg: Roll-Forming. Machine Design Sept. 1963, p. 114.
- 11) 加藤健三: 冷間成形圧延法 (I), (II).
- 12) 馬場善謙: 薄肉電縫管のフォーミング作業について. 住友金属, Vol. 15, No. 2, Apr. 1963, p. 19.
- 13) 原田芳: 鋼管製造技術の最近の進歩. 鉄と鋼, 1963, 第11号, p. 72.
- 14) 益田以下5名: ロールフォーミングに関する基礎的關係 J. of the J. S. M. E. Vol. 67, No. 542, p. 58.
- 15) 益田以下5名: ロールフォーミングの変形過程について 塑性と加工, Vol. 5, No. 43, 1964-8. p. 519.
- 16) 益田以下5名: ロールフォーミングの変形過程について 塑性と加工, Vol. 6, No. 54, 1965-7.
- 17) 橋本善利, 紀田兼昭: 冷間成形ロールの製作法. プレス技術, 第2巻, 第7号, p. 81.
- 18) 渡辺英世: ロール成形加工とその製品. プレス技術, 第2巻, 第7号, p. 5.
- 19) 加藤健三: パイプ成形加工. プレス技術, 第2巻, 第7号, p. 29.
- 20) 寺井新太郎: 成形ロール設計法, プレス技術, 第2巻, 第7号, p. 13.
- 21) 出水賢三: 軽量鋼成形加工. プレス技術, 第2巻, 第

- 7号, p. 43.
- 22) 鈴木, 木内ほか: 第 19 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1968) 437.
- 23) 鈴木, 木内ほか: 第 19 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1968) 441.
- 24) 鈴木, 木内ほか: 第 19 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1968) 445.
- 25) 鈴木, 木内ほか: 第 19 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1968) 449.
- 26) 鈴木, 木内ほか: 第 18 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1967) 313.
- 27) D. I. Starchenko & M. I. Chelovan: *STAL in English*, 2 (1968) 139.
- 28) I. S. Trishevskii & V. V. Kalepanda et al.: *STAL in English*, 1 (1968) 39.
- 29) I. S. Trishevskii & V. V. Kalepanda et al.: *STAL in English*, 8 (1968) 661.
- 30) I. S. Trishevskii & V. V. Kalepanda et al.: *STAL in English*, 8 (1968) 664.
- 31) 木内: 第 18 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1967) 305.
- 32) 木内: 第 18 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1967) 309.
- 33) 木内: 第 19 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1968) 433.
- 34) 山川, 山下, 松島: 機械学会講演論文集, No. 205(1969-4) 280.
- 35) 小門, 小野田, 石倉, 杉田, 広野, 井上: 鉄鋼協会第78回講演概要集(鉄と鋼), 55-11 (1969-9).
- 36) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 第 20 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1969-11) 289.
- 37) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 第 20 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1969-11) 293.
- 38) 鈴木, 木内, 中島, 雪竹: 第 20 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1969-11) 297.
- 39) 鈴木, 木内, 木村: 第 20 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1969-11) 301.
- 40) 鈴木, 木内, 中島, 赤堀: 塑性と加工, 10-97 (1969-2) 102.
- 41) 鈴木, 木内, 中島, 赤堀, 雪竹, 柴田: 塑性と加工, 10-98 (1969-3) 157.
- 42) 鈴木, 木内, 中島, 赤堀: 塑性と加工, 10-102(1969-7) 494.
- 43) 鈴木, 木内, 中島, 赤堀: 塑性と加工, 10-102(1969-7) 502.
- 44) 木内: 塑性と加工, 10-104 (1969-9) 635.
- 45) 木内: 塑性と加工, 10-104 (1969-9) 646.
- 46) 鈴木, 木内, 木村: 第 20 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1969-11) 281.
- 47) 木内: 第 20 回塑性加工連合講演会講演論文集(1969-11) 285.
- 48) 塚本, 中山: プレス技術, 7-12 (1969) 44.
- 49) V. M. Shvarts, N. G. Lenvitskii, S. P. Belousov & E. P. Korobkin: *Stal in English* (1969-6) 580.
- 50) A. Smart: *Sheet Metal Industries* (June, 1968) 415.
- 51) F. C. Porter & G. K. Walden: *Sheet Metal Industries* (August, 1969) 415.
- 52) 鈴木, 木内, 中島, 赤堀: 円弧形断面の成形に関する変形機構と製品形状 (ロールフォーミングに関する実験的研究), 日本機械学会誌, 73-614 (1970), 355.
- 53) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 円弧形断面タンデム成形の変形径路の分類 (ロールフォーミングに関する実験的研究・第6報), 塑性と加工, 11-110 (1970), 315.
- 54) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 円弧形断面タンデム成形の接触圧力分布 (ロールフォーミングに関する実験的研究・第5報), 塑性と加工, 11-110 (1970), 202.
- 55) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 円弧形断面タンデム成形の成形荷重に関する検討 (ロールフォーミングに関する実験的研究・第9報), 昭45年春期塑性加工講演会講演論文集 (1970), 13.
- 56) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 円弧形断面タンデム成形の成形荷重に関する検討 (1) (ロールフォーミングに関する実験的研究・第7報), 塑性と加工, 11-119 (1970), 913.
- 57) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 台形断面タンデム成形の接触圧力分布 (ロールフォーミングに関する実験的研究・第10報), 昭45年春期塑性加工講演会講演論文集 (1970) 19.
- 58) 鈴木, 木内, 中島, 高田: V形および他の基本断面のタンデム成形の幅方向接触圧力分布 (ロールフォーミングに関する実験的研究・第11報), 第21回塑性加工連合講演会講演論文集 (1970), 75.
- 59) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: V形台形断面タンデム成形の変形径路の分類 (ロールフォーミングに関する実験的研究・第12報), 第21回塑性加工連合講演会講演論文集 (1970), 79.
- 60) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: V形台形断面タンデム成形の成形荷重に関する検討 (ロールフォーミングに関する実験的研究・第13報), 第21回塑性加工連合講演会講演論文集 (1970), 83.
- 61) 加藤, 斎藤, 藤田: ロール成形における長手方向のそり変形について, 第21回塑性加工連合講演会講演論文集 (1970), 87.
- 62) 鈴木, 木内, 木村: 変形曲面形状および歪履歴が製品形状に与える影響 (円弧と直線の複合断面形状の場合) (広幅断面ロール成形に関する実験的研究・第2報), 昭45年春期塑性加工講演会講演論文集 (1970), 1.
- 63) 小門, 小野田: 薄板の溝つけ成形時の成形条件と成形荷重との関係 (薄板のロール成形の実験的研究-II), 日本鉄鋼協会第79回講演概要集(鉄と鋼), 56-4(1970), 202.
- 64) 小門, 小野田: 薄板の溝つけ成形時の成形条件と成形トルクの関係 (薄板のロール成形の実験的研究-III), 日本鉄鋼協会第79回講演概要集(鉄と鋼), 56-4(1970), 204.
- 65) 木内: スタンド間の変形曲面形状と付加的歪成分の分布 (ロールフォーミングに関する解析的研究・第6報), 昭45年春期塑性加工講演会講演論文集 (1970), 7.
- 66) 鈴木, 木内, 木村: 成形過程におけるひずみ径路と付加的ひずみ成分の影響 (ロールフォーミングに関する解析的研究・第3報), 塑性と加工, 11-112 (1970), 343.
- 67) Trishevskii, I. S., Klepanda, V. V. & Dakhnovskii, E. S. New technology for the production of curved sections with corrugations, separated by straight-line portions, *Stal Engl.*, March (1970), 228.
- 68) Trishevskii, I. S., Gritsuk, N. F., Klepanda, V. V., Gunin, I. V., Kulak, Yu. E., Dakhnovskii, E. S., Khizhnyakov, Ya. V., Medvedev, V. S. & Pogonin, A. A.: New technology for the production of thin-walled rolled sections, *Stal Engl.*, July (1970), 543.
- 69) 深田, 秋田, 鈴木: 軽量形鋼高速成形設備, 日本機械学会誌, 73-616 (1970), 632.