フレキシブル溝形断面の成形における 各ひずみ成分の挙動

—— フレキシブル冷間ロール成形機械の開発 ——

蔣 昱昊* 小奈 弘** 長町 拓夫***

On Behavior of Strains of Strip in Forming a Flexible Channel Section

—— Development of a Flexible Cold Roll Forming Machine ——

Ihou SHOU*, Hiroshi ONA** and Takuo NAGAMACHI***

(Received on November 17, 2011)

Products formed using a conventional cold-roll forming machine have cross-sectional profiles constrained to a single width along the longitudinal axis. Products with cross-sectional profiles varying in width in the longitudinal direction, namely, flexible cross sections, cannot be formed using a conventional cold-roll forming machine. In recent years, research and development of a flexible cold roll forming machine controlled by a Progressive Logic Controller (PLC) Unit to form products with flexible cross sections has been carried out in Japan and Europe. In 2011, we presented a forming method for several flexible channel sections and shape defects such as swell distortion, and edge buckling occurred during forming with this machine. In this study, the deformation process of strips in forming a flexible channel section with different widths using a four tandem flexible cold roll forming machine has been experimentally investigated from the relationship between the shape of blank sheets and the strain produced during passage through rolls. A flexible channel section is formed from a blank steel sheet of 0.5 mm thickness with the flexible edge lines. Moreover, the distribution of membrane strains and principal strains occurring at the flange and the web part during the forming of the flexible product are measured using a strain gauge. From these measurements, the mechanism of the occurrence of the swell distortion is clarified.

Key words: flexible cold-roll forming machines, progressive logic controller cold roll forming machine, flexible channel section, membrane strains, principal strains, swell distortion.

1. 緒 言

一様な断面形状である長尺の建材, 土木用部材の成形はロールフォーミングで行われている。近年, 本技術は寸法精度の高い製品を高速で成形できることから自動車, 家電用部材の製造に用いられるようになった。このような需要の拡大, 急増に対してロールフォーミングは冷間ロール成形機械の前後装置の自動化, 高速化で対処した。一方, 工業界にあってはコンピュータ, 制御技術の発展に伴い生産

機械, 工作機械類の自動化が急速に進展した。サーボプレスはその一例である。このような技術進歩を背景にロールフォーミングもサーボ制御機構を導入したフレキシブル冷間ロール成形機械の開発研究が 2000 年代初頭に開始された^{1)~5)}。本機械は自由曲線に切断されたブランク材の板縁に沿ってロール成形機械自身が位置・姿勢を制御しながら曲げ成形を行うものである。異形断面の製造は一般的にはプレス機械で行われている。この方法は製品形状ごとに専用の金型を必要とするものである。しかし, 本機械による異形断面の成形はブランク材の形状を検出器で検出して, その信号で機械を移動する方法で行うものである。このため, プレス成形法のように専用の金型が不要である。さらにロール成形法であることから製品長さに制約されないなどの利点を有している。筆者らは自由曲線, 凹凸形状をしたブランク材をレーザ切断で製作し, この板縁を一定幅に折り曲げる成形に成功した。本機械の機構, 制御方法,

* 拓殖大学, 工学部 〒193-0985 東京都八王子市舘町 815-1
Graduate student, Faculty of Engineering Takushoku University,
815-1 Tatemachi, Hachiojishi, 193-0985, Japan.

** 拓殖大学, 工学部 同上
Faculty of Engineering Takushoku University, ibid.

*** 徳島大学, 工学部 〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1
Faculty of Engineering Tokushima University,
2-1 Minamijosanjima-cho, Tokushima, 770-8506, Japan.

並びに製品の形状精度などについては前報で記した通りである⁴⁾。本報はフレキシブル冷間ロール成形機械の動作機構を有する機械で鋼板を成形するとき、ここで生じる鋼板内部のひずみ推移、主ひずみの挙動などを通常の冷間ロール成形機のそれと比較するとともに、形状不良との関係について検証した。

2. フレキシブル成形品のウェブ膨らみ変形

Fig.1 に示す自由曲線板縁材の溝形断面成形品は Fig.2 に示すフレキシブル冷間ロール成形機械で成形されたものである。本断面の成形は鋼板を予め目的の形状にレーザ切断しておき、これを本機械に通すことによってレーザ切断された板縁側を一定幅に曲げ成形したものである。本機械は4 段タンデムの各ロールが板縁から一定の距離とロール軸と板縁線とを直角に維持する両機能、各ロールスタンドが時間差をもって同じ動きをする機能を備えた PLC 制御 (Programmable Logic Controller) による冷間ロール成形機械である。

Fig.1 のサンプルに見られるように板縁の曲線が急激であるもの、曲線うねりの大きい形状のものにはウェブ部分に膨らみ状の変形(図中の丸印部分)が観察される。この膨らみ変形の発生については、前報では縮みフランジと伸びフランジを仮定してフランジ板縁で $\pm 14.3\%$ の対数理論ひずみが生じるためであること、有限要素解析では凹部分で約 $2\sim 3.3\%$ 、凸部分で約 3.5% のひずみが生じるためであること(有限要素解析はウェブ部に生じる膨らみ変形を考慮したために値が少ない)などをその理由に記した。本実験ではこれらの考察の妥当性を検証するためにフランジ中央部分($25/2=12.5\text{mm}$ の位置)、およびフランジ折曲げ線からウェブ側に 15mm 内側の位置のブランク材表裏に3方向ロゼットゲージを貼付して成形時の長手方向表面、膜ひずみ、および主ひずみを求めウェブに生じる膨らみ変形の発生原因を調べた。

(a) Examples of various flexible channel products

(b) A flexible channel product with convex and concave shape

Fig.1 Samples formed by the flexible cold roll forming machine

Fig.2 The 4 tandem flexible cold roll forming machine used to form the flexible channel section

3. 実験および測定方法

実験方法は前報の通りであるので詳細は避け簡単に記すと次のようである。4 段タンデムフレキシブル冷間ロール成形機の各段間のピッチは 500mm であり、各段に組み込まれたロールは曲げ角度が 20° , 40° , 60° および 80° である。

Fig.3 は実験に用いたブランク材の形状、および4 段成形

Fig.3 Shape and dimension of blank sheet (upper), Cross section of final shape (lower, scale up)

Fig.4 Gages from No.1 to No. 8 are pasted at the center of flange and at the location of 15mm inside from the bend corner and a gage A is pasted parallel to the edge of blank sheet

Fig.5 Relation between motions of each roll stand and the shape of blank sheet

終了後の製品断面形状である。Fig.4 はロゼットゲージの形状と貼付位置を示している。フランジ部にはフランジ幅(25mm)の中央に、ウェブ部には折曲げ線から断面内側 15mm の(1)から(8)の各位置の表裏に貼付した。ロゼットゲージの A を板縁に平行に貼付している。A のひずみゲージで測定されたひずみを長手方向ひずみと定義した。このため、(1)と(5)の位置の長手方向ひずみはブランク材の進行方向と一致しているが、これ以外の位置のゲージによる長手方向ひずみはブランク材の進行方向と一致していない。

Fig.5 はブランク材が矢印方向に直進するときの各ロールスタンドの動き状況を示す概略図である。Fig.5 の(A), (E) 部分はブランク材の進行方向とロール折り曲げ線が平行である通常のロール成形である。しかし(B), (C), (D)および(F), (G), (H)はブランク材の進行方向とロール折り曲げ線は平行でない。さらに、(B)と(H)は図示のように反時計まわりの回転を、(D)と(F)は時計まわりの回転を伴いながらの成形である。このようにロール軸を板縁に直角に保ちながら板幅方向への移動と方向転換を伴うロール成形におけるひずみ分布の公開データの例はない。本報は Fig.4 に示す 8 か所のひずみ推移の測定を行ったが(1)と(5)はほぼ同じであり、(6)~(8)は (1)~(4)と似ているため(1)~(4)のみを記した。

4. 測定結果

4.1 長手方向表面ひずみ、膜ひずみ

Fig.6 はFig.4 の(1)から(4)の各位置におけるフランジ部、およびウェブ部のロール直下近傍における長手方向表面ひずみ、および長手方向膜ひずみの推移を示している。

(1) 直線板縁部分の成形 Fig.6 の(1)はロールスタンドが板幅方向移動、方向転換の動きを伴わない、いわゆる従来の冷間ロール成形機械と同じ成形に相当する部分である。ここで測定された各ひずみの挙動は鈴木⁶⁾、小門ら⁷⁾の測定結果とほぼ同様の傾向を示している。なお、曲げ角度が少ない 20° 成形では Fig.7 に示すように、フランジではロール入り口近傍で曲げ・曲げ戻しの変形工程を、ウェブは丸みを帯びた形状の形成と消滅の工程をとって鋼板は成形されるが、曲げ角度が 40° 以上の場合にはこのような工程を経ないで直線的に鋼板はロールに侵入することが観察された。Fig.6 のロール直下のひずみ推移が曲げ角度によって異なるのは上記のロール入り口近傍の変形現象をひずみがそのまま表したものである。

(2) 凹形状部分の成形 Fig.6 (2)はブランク材の形状が凹状である部分のフランジとウェブ

Fig.6 Transition of the longitudinal and membrane strains measured in passing through tandem rolls in case of forming of the blank sheet $\theta=10^\circ$ (Heavy line: Surface strain of inside, Thin line: Surface strain of outside, Dotted line: Membrane strain). Each number of (1) to (4) is coincident with the part number shown in Fig.4

の各ひずみ推移である。フランジは図示のように Fig.6(1)と比較して異常に大きなひずみ推移が測定された。このようなひずみ推移をとる理由は次のように考えられる。Fig.8の左側図の(I+II)は凹部分を80°に曲げ起したフランジ曲げ後の略図である。凹形状のブランク材を曲げ起こし成形すると、いわゆる伸びフランジ成形による伸びひずみが生じる(これをIとする)。また、通常の平板をロール成形すると Fig.6(1)のようなひずみを生じる(これをIIとする)。結局、凹形状部分のロール成形はIとIIとのひずみが重畳されて現れると考える。Fig.8の右側上図は凹状の先端側板縁a-a線は折り曲げ線部分b-bより短いためにa-a線とb-bの間の鋼板は伸ばされる、いわゆる、伸びフランジ成形による伸びひずみを概略図で示したものである。右側下図はフランジの伸びによってウェブ部分に伸びが生じることを示す概略図である。測定値のウェブ部の微少の引張り残留膜ひずみはフランジ部の伸びひずみが測定地点のゲージ位置(折り曲げ線から15mm)にまで影響しているためと考えられる。なお、前報⁴⁾の理論対数ひずみの値は+8.6% ($=86 \times 10^{-3}$)、FEM解析結果の値は(0.02~0.03)であり、測定値の(0.04~0.05%)と大きくかけ離れている。理論対数ひずみについては凹部分の伸びフランジ成形によるひずみと通常のロール成形によるひずみが厳密に分類した変形モードの検証がなされていなかったこと、および、長手方向ひずみは材料の進行方向と一致していないことが理由と考えられる。またFEM解析結果については座標の取り方(実験では板縁の方向を進行方向としているのに対して、FEMシミュレーションは材料の進む方向を進行方向としているために実験とシミュレーションで誤差が生じる)が理由と考えられる。現在実験と解析値の差が生じる原因を解明中である。

Fig.7 Schematic diagram of distortion of flange and web occurring near the entrance part of roll

(3) 板縁傾斜部分の成形 Fig.6(3)はブランク材の傾斜部分を成形したときのフランジ、ウェブ部分のひずみ推移である。(3)の長手方向ひずみは板縁(折り曲げ線)と平行である方向のひずみを長手方向ひずみとしているため材料の進行方向のひずみではない。しかし、フランジ部分では通常のロール成形である Fig.6(1)に長手方向ひずみと似た傾向のひずみ推移を示している。傾斜角度(10°)を考慮して補正すればさらに一致するものと考えられる。ウェブ部のひずみ推移の変動は(1)の場合より大きい。この理由はロールが板縁側に移動しながらの成形であることが(1)と異なる点であることを考慮すれば理解できる。

(4) 凸形状部分の成形 Fig.6(4)は凸形状部分のブランク材を曲げ起こす、いわゆる縮みフランジ成形に相当する部分

のひずみ測定結果である。Fig.9左側図に示すように、ブランク材の凸形状部分に働く縮みフランジ成形による圧縮ひずみ(これをIIIとする)と通常のロール成形で生じるひずみの成分(これをIVとする)とが重畳されたためと考える。また、右側上図は凸形状ブランク材が圧縮を生じる概略図を、下側図はフランジの圧縮がウェブ部分に影響して圧縮ひずみを生じる概略図をしめしている。なお、80°ロール成形後の残留圧縮膜ひずみはフランジで -0.4×10^{-3} 、ウェブで -0.25×10^{-3} と計測された。フランジとウェブを金切りハサミで切り離すとウェブの膨らみ変形は消滅した。これは膨らみ変形は弾性座屈であることを示すものである。

Fig.8 Schematic diagram of strain occurring at convex part. The strain includes both strain caused in normal roll forming and strain caused in convex part forming

Fig.9 Schematic diagram of strain occurring at concave part. The strain consists of strain caused in normal roll forming and compression strain caused in concave part forming

4.2 主ひずみ

凹凸形状のブランク材板縁を一定幅に曲げ成形するためにロールスタンド自身が板幅方向移動と方向転換とを伴うサーボ制御のロール成形方法にあってはブランク材にどのようなひずみを生じるかを長手方向ひずみ分布で調べた。しかし、ロール成形中のブランク材の変形過程をよりの確に把握するためにフランジ部とウェブ部の断面内側の主ひずみ推移(最大主ひずみ、最小主ひずみ、およびそれらの方向)を3方向の膜ひずみから調べた。ブランク材の傾斜角度 θ は $\theta=10^\circ$ について求めた。Fig.10の(1)から(4)はFig.4の(1)から(4)の各位置における最大・最小主ひずみの大きさ、方向をロール直下からの距離とともに示したものである。なお、Fig.4に示すAゲージから主ひずみの方向までの角度をひずみ角度として示している。図中、矢印が互いに反対方

Fig.10 Distribution of principal strain produced at straight edge part (1), at concave part (2), at slope part (3), and at convex part (4)

向を向いているものは引張りの、その逆のものは圧縮の主ひずみであり、一対の主ひずみは互いに直交している。Fig.10の(1)はロールスタンドが移動や方向転換をしない、いわゆる通常のロール成形の場合である。フランジ部の結果はロール通過の前後で主ひずみの方向が変化すること、引張りのひずみが支配的であることがわかる。これに対してウェブ部の変化は少ない。本結果は従来の研究⁷⁾と同様である。(2),(3),(4)はつぎの挙動をとっている。ロールスタンドが向きを変えながら板縁側に移動する(2)の成形では、フランジについてはロール直下前の引張り・圧縮主ひ

ずみはロール通過後に引張りの主ひずみが支配的となる。ウェブ部はロール通過前後で引張りの主ひずみが働いている。(2)はロールの方向転換と板縁方向への移動の2動作を伴う成形部分であるためにひずみ分布も複雑になったと考えられる。(3)はロールが板縁方向に移動しながらの成形であるため(2)のような方向転換の動きを伴わない部分の成形である。フランジの主ひずみはロールの通過の前後で引張りひずみが支配的であり、その方向は板縁と平行である。(4)はブランク材形状が凸状である部分をスタンドの方向転換と幅方向移動の動きを伴う部分のロール成形である。このため、この部分のひずみ分布は(2)と似た複雑な様相を呈している。

5. 結 言

フレキシブル冷間ロール成形機械によって凹凸板縁をもつブランク材の板縁を一定幅に曲げる成形を行った。前報では本機械で成形された製品のウェブ部に生じる膨らみ状の変形の生成を対数ひずみ、FEM解析で考察したが本報はこの検証の妥当性を確認するためにひずみゲージによって測定した。得られた事項は次のようである。

1) 凹凸形状をもつフレキシブルブランク材の板縁のフランジ曲げ起し成形で生じる長手方向表面ひずみ、膜ひずみのロール直下直前、直後での分布形態は通常の冷間ロール成形のそれと全く異なる分布であることをロゼットゲージによる測定で明らかにした。

2) 前報の理論対数ひずみ、FEM解析によるひずみと本ひずみゲージによる測定結果の間には大きな差を生じた。これはフレキシブル冷間ロール成形機械によって生じるひずみ発生形態が従来の冷間ロール成形と大きく異なることによると考えられる。本測定は今後のFEM解析に有力な資料になると考える。

3) 直線部分、凹凸状部分の板縁成形で生じる主ひずみ状況をひずみ測定によって明らかにした。

謝 辞

本研究の実施にあたり研究助成をされた株式会社 山陽精機、ならびに実験の補助を務めた本学学生に対して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Groche,P., von Breitenbach,G., Jockel,M. & Zettler,A. : Proc. 4th ICIT2003, (2003), 121-126.
- 2) Ona,H., Shou,I., Nagamachi,T. & Hoshi,K. : Proc. ICTP 2008, (2008), 2021-2025.
- 3) Ona,H., Shou,I., Nagamachi,T. & Hoshi,K. : Metal Forming, (2010), 182-185.
- 4) 小奈弘・蔣昱昊・長町拓夫・星清政 : 塑性と加工, **51**-594(2010), 669-673.
- 5) 小奈弘 : 軽量形鋼成形技術, (2005), コロナ社.
- 6) 鈴木弘・木内学・中島聡・赤堀明夫 : 塑性と加工, **10**-97, (1969), 102-115.
- 7) 小門純一・小野田義富 : 塑性と加工, **13**-132, (1972), 21-32.