

© 1991 ISIJ

 ///////////////
 論 文
 ///////////////

バタフライ孔型系における山形鋼材圧延の 変形特性解析

辛 平*・木原 諄二*²・相澤 龍彦*²

Deformation Analysis of Angle Steel Rolling in the Butterfly Roll Pass System

Ping XIN, Junji KIHARA and Tatsuhiko AIZAWA

Synopsis:

Butterfly roll pass system in the actual angle steel rolling is evaluated by deformation mode method developed recently for three dimensional rolling deformation analyses. In the deformation mode method, both 2D rigid-plastic FEM evaluating the velocity fields in the cross-section of billet, and the deformation modes modeling the velocity distribution in the rolling direction are coupled based on the energy theorem to deal with 3D steady state deformation in rolling process. Two types of mode functions with unknown parameters are employed to express the velocity distribution in the rolling direction: the power and the cubic interpolations in the cross-sectional area ratio. To be noted, unknown parameters are determined by optimization of plastic energy, independently of each subregion, into which the whole analytical region is divided. Through the present analysis is found that (1) the features in rolling behaviors can be discussed by these calculated metal flow and strain distribution for the splitting, the butterfly and the finishing passes in the whole roll pass system, and (2) the numerically estimated cross-sectional figures after rolling are in fairly good agreement with the experimental measurements in the actual processing.

Key words: section rolling; numerical analysis; angle steel rolling; rigid-plastic FEM; energy theorem; deformation mode method.

1. 緒 言

孔型圧延における材料変形の力学解析は孔型システムの設計および評価に欠かせないが、実際の孔型圧延において観察される変形挙動はあまりに複雑であるため、理論解析はほとんど行われず、変形特性に対する情報は実生産の経験または数少ないモデル実験に依存していた。近年、製品の精度向上およびコスト低下に應えるために圧延プロセスの合理化・最適化がいつそう要求され、三次元変形の理論解析によらなければ解決できない問題が多く現れている。そこで、剛塑性有限要素法 (FEM) を始めとする三次元数値解析方法が開発されてきた^{1)~2)}。三次元 FEM 解析は有力なツールではあるが、形状変化の大きい孔型圧延変形に対して精度よい解を求めるには、計算時間もさることながら、有限要素モデルを適切に制御して解析を進める必要がある^{3)~4)}。他方そのような三次元解析に代わって、圧延プロセスにおける変形特

性を考慮し、基本的には二次元有限要素法を利用した近似解析手法がいくつか提案され、複雑な孔型圧延における三次元変形の解析に有効であり、注目されている^{5)~7)}。

著者らは二次元 FEM により圧延材断面内の速度場を、未知パラメーターを含む解析関数で長手方向の速度成分を表現して三次元変形挙動を解析する変形モード法を提案し、平圧延および孔型圧延の三次元変形を評価してきた^{8)~10)}。この方法は、従来のエネルギー法における問題点、すなわち、複雑な変形状態において体積一定条件および境界の速度条件が完全に満たされないという問題点を解消でき、FEM の利用により、変形プロセスに関する詳細な内部変形情報を予測することができる。また、接触領域・応力分布に関しても、比較的良好な結果が得られている。

バタフライ孔型系は等辺山形材の生産によく利用されている多パスの代表的な孔型システムである。本研究では、L 50 × 50 × 5 山形鋼材の孔型システムを対象とし

平成 2 年 9 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 11 月 7 日受付 (Received Nov. 8, 1990)

* 東京大学工学部 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku, Tokyo 113)

*² 東京大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo)

て、変形モード法により、パスごとにその変形特性を適切に表現する変形モード領域とモード関数を選択し、孔型バイト内の材料流動および相当ひずみの分布を解析する。また、実機の圧延材サンプルの実験結果との比較を通じて、解析の精度を確認する。

2. 解析方法

2.1 定式化

材料を剛塑性体と仮定すると、定常圧延変形の時速度場は次式に示すポテンシャルエネルギー汎関数の停留条件により求められる。

$$\dot{E} = \dot{E}_p + \dot{E}_f + \dot{E}_l + \dot{E}_u \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 \dot{E}_p は塑性ひずみのエネルギー率、 \dot{E}_f はロールと圧延材の接触面にて消耗する摩擦仕事率、 \dot{E}_l は既知外力として作用する前方、後方張力の仕事率である。また、圧延材内部の速度不連続面における剪断摩擦仕事率 \dot{E}_u も加算する。

変形モード法⁵⁾では、圧延材横断面内の速度 $\{V_x, V_y\}$ は有限要素モデルで、圧延方向の速度成分 V_z は未知パラメータを含む解析関数で表す。すなわち、Fig. 1 に示すように、解析対象の三次元圧延材をモード領域 (Subregion) に分割し、各モードごとに、速度場 V_{zi} を

$$V_{zi} = f_i(z; P_1, P_2, \dots, P_N) \dots\dots\dots(2)$$

で与え、圧延方向に関係するひずみ成分を

$$\dot{\epsilon}_z = -\frac{dV_{zi}}{dz} \times \gamma_{xz} = -\frac{1}{2} \frac{\partial V_x}{\partial z} \times \gamma_{yz} = -\frac{1}{2} \frac{\partial V_y}{\partial z} \dots\dots\dots(3)$$

で近似する。ここで、未知パラメータ $P_j (1 \leq j \leq N)$ は独立変数である。 V_x, V_y は圧延材の各点で連続であるが、 V_z は式(1)において \dot{E}_u を考慮することにより、モード間での連続性を変分的に緩和させる。したがって、汎関数(1)の停留条件より、二次元 FEM の節点速度 $\{V_x, V_y\}$ と P_j が同時に決定される。なお、定常変形

状態では、モード領域にかかわらず、 V_z の入側、出側速度 (V_f, V_b) を一様にする必要がある。

2.2 変形モード関数式

変形モード法では、対象とする圧延方式における圧延条件および変形特性を力学的推測または実験情報により判断し、その変形をよく表すことのできるような変形モードすなわち変形モード領域とモード関数を設定することにより、解析精度の改善および解析手順の単純化を行う。ここで、 i 番目の変形モード領域の断面積比 (任意断面積 A /入側断面積 A_0) λ を、その物理的意味を考慮した次の二つの単調減少関数系を用いて表す。

(i)べき乗関数の場合

$$\lambda_i = \lambda_{1i} + (1 - \lambda_{1i}) (z/L_d)^{ni} \dots\dots\dots(4)$$

ここで λ_1 は λ の出側 ($Z=0$) での値とする。この式は入側 ($Z=L_d; L_d$ は接触弧長) で 1 になり、出側で λ_1 になる条件を満足し、 λ_1 及び指数 n が未知パラメータとなる。指数 n は、 λ が出側に向かって λ_1 に漸近するため、 $n \geq 1$ が物理的条件となる。また、 λ_1 が一定の場合、伸び変形の圧延方向分布は n が大きいほど入側で大きく、逆に n 値は 1 に近いほど出側で大きくなるという特性を表現する。

(ii)三次式で表す場合

断面積比の変化 (一次微分) が入側で連続である、最も簡単な多項式表現は以下に示す三次式である。

$$\lambda_i = \lambda_{1i} + 3(1 - \lambda_{1i}) (z/L_d)^2 - 2(1 - \lambda_{1i}) (z/L_d)^3 \dots\dots\dots(5)$$

この式の特徴として、断面積比の変化率は出入側とも零に漸近するが、接触弧長の中心付近は大きくなる。

上記の断面積比 λ_i から V_{zi} は以下の式で表現される。

$$V_{zi} = V_b/\lambda_i = V_f \lambda_1/\lambda_i \dots\dots\dots(6)$$

なお、モード領域分割・関数系に関しては、文献⁵⁾¹¹⁾において平圧延を対象にして感度評価を含めた議論しており、1)物理的に不適切なモード関数を用いると、どのようなモード分割をしてもエネルギー最小化が不可能、すなわち解を与えない、2)べき乗型のモード関数を複数モード領域に用いることにより、実験で得られた幅広がり-圧下率曲線をより良好に再現できる、3)同じモード数であれば分割の仕方に λ_1, n は大きく依存しない、ことを確認している。

3. 実験条件および結果

実験¹²⁾は Fig. 2 に示す 6 パスからなるバタフライ孔型系の熱間圧延ラインを用いる。入側素材となる粗圧された材料は、温度が 1100°C 前後で、断面は長円形、両軸長はそれぞれ約 73 mm, 35 mm である。孔型系は

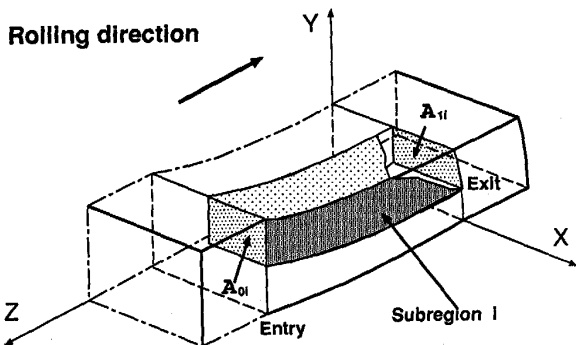


Fig. 1. A schematical representation of deformation mode model.

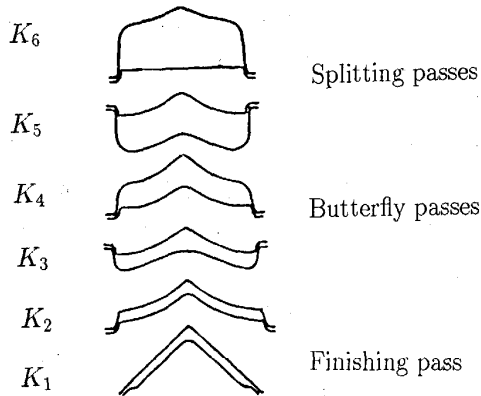


Fig. 2. Butterfly roll pass system for angle steel rolling.

割込みパス (K_6, K_5), バタフライパス ($K_4 \sim K_2$) および仕上げパス (K_1) からなる。製品寸法は $L50 \times 50 \times 5$ である。

実験では圧延前後の圧延材サンプルをとり、その形状を計測した。Fig. 3 に代表的な圧延材断面形状を示す。断面積は圧延材の単位長さ重量から換算し、その他の寸法はノギスで測定し、熱寸補正を実施した。なお、実圧延においては、左右の対称が完全には保たれないため、

ロール設定状態は Fig. 3 に示す圧延材の右脚の寸法により推定した。

4. 変形特性の評価

解析対象は、対称性を考慮してその 1/2 をモデルとし、入側の圧延材状態およびロールの間隙は Fig. 3 に示す実験のサンプルの測定データにより決定した。加工硬化および温度影響を無視し、ロールと圧延材との界面に作用する剪断摩擦係数 m を一定 ($m=0.5$) とし、ロールの回転角速度は $\omega=0.01$ rad/s とした。なお、未知パラメーター λ_1 はモード領域共通とし、変形モード領域の分割については圧下の不均一分布により、三領域モードとした。

4.1 割込みパス

割込みパス K_6, K_5 はそれぞれ圧延材の上部、下部の割込変形を施し、山形材の初期形状および材料の均等配分の役割を果たす。Fig. 4 に K_6 パスの孔型及び圧延材の寸法を示す。

変形モードについては、この孔型における幅方向の圧下率の不均一分布を考慮し、Fig. 5 に示すように断面を M_1, M_2 と M_3 の三つの領域に分割する。ロールは最初

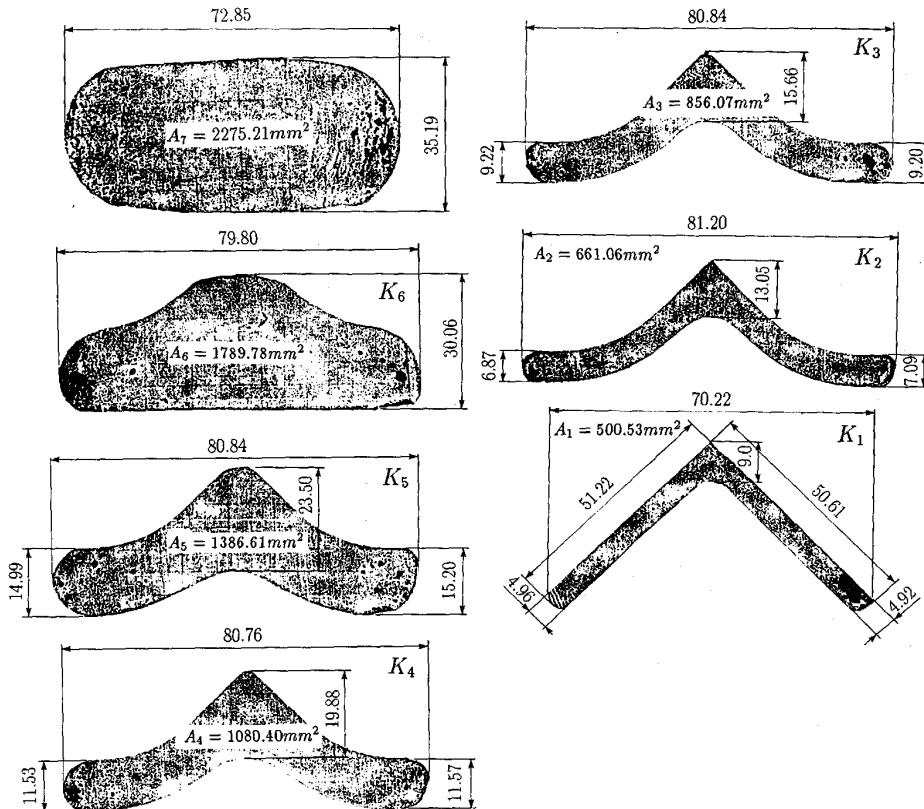


Fig. 3. Cross-sections after rolling with roll pass system shown in Fig. 2 obtained from the actual hot-rolling process.

に M_3 領域と接触し、圧下につれ M_2 , M_1 と接触していくため、式(4)を変形モード関数とし、指数 n を定

数とした。圧下率の大きい領域 M_3 では $n=2$ とし、 M_2 , M_1 領域では圧下率が順次小さくなり n をそれぞれ 1.5, 1.0 と取る。解析結果としては、圧延材の減面率 λ_1 は 0.74 になる。

Fig. 6 に、典型的な断面での変形状態、速度場および

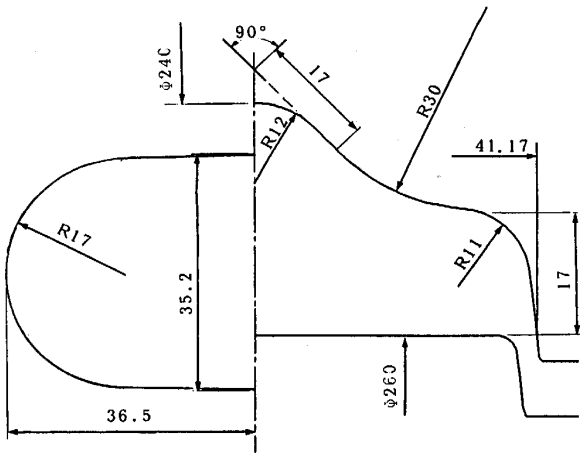


Fig. 4. Geometry of the caliber in splitting pass K_6 (right side) and cross-section of billet at entry (left side).

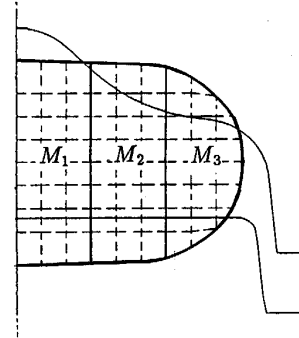
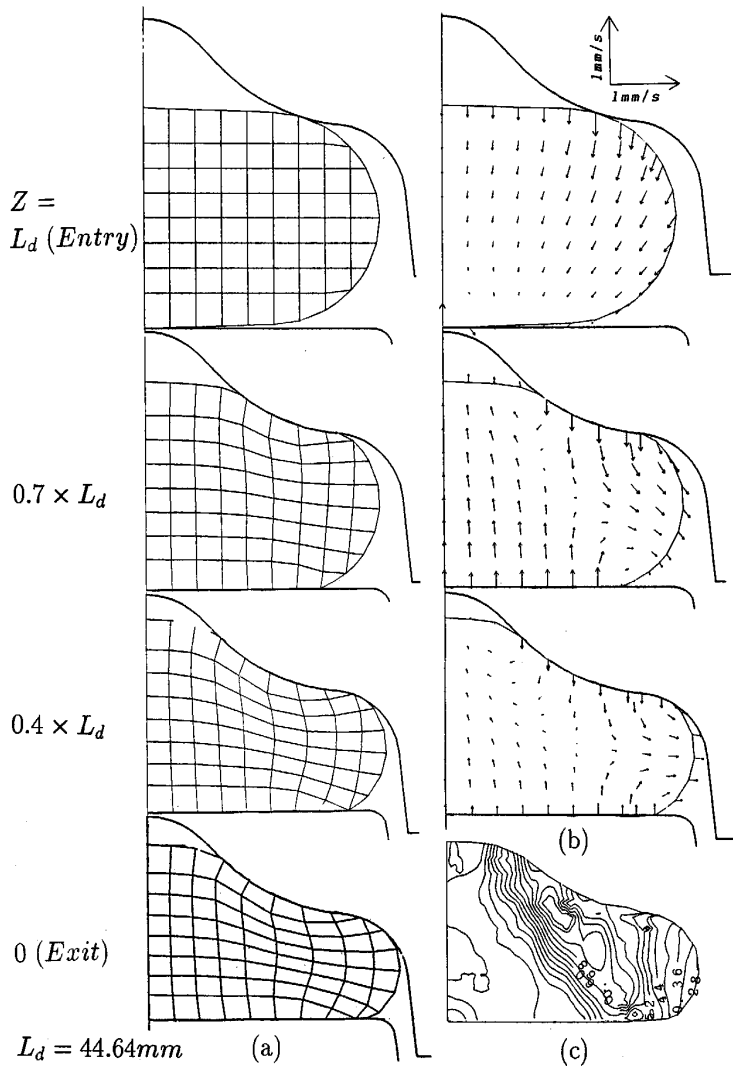


Fig. 5. Patterns of FEM mesh (with dash line) and deformation mode subregions (with solid line) employed for splitting pass K_6 analysis.



(a) Grid distortion in the different cross-sections, (b) metal flow patterns in the different cross-sections and (c) effective strain distribution after rolling in this pass.

Fig. 6. A calculated appearance of the deformation rolling in splitting pass K_6 .

圧延後の相当ひずみ分布を示す。最初にロールは圧延材の端に、下ロールは圧延材の中心部に接触するため、曲げ変形が生じることがわかる。ただし、実際の圧延では圧延材と下ロールとはほぼ全面接触するためこの曲げ変形は軽減され、また圧延材の下ロールでの左右移動により対称割込みが促進される。解析結果では、下ロールとの接触面が広がりながら、上ロールの頂点部への流れも優位となり、上ロールの接触面積が増大し、材料の頂点

部への流れが制限され、幅広がりには上ロールの側壁に接触するまで中心的な変形になり、最終的に、上ロールの側壁に拘束される。頂上部での未充填状態は実験結果とも良好に一致した。

K_5 パスについては、入側圧延材断面と孔型の形状を Fig. 7 に示す。Fig. 8 に初期断面での FEM メッシュおよび変形モード領域のパターンを示す。モード領域分割数は 3 とし、 M_1 、 M_2 には式(4)のべき乗関数を、端部の M_3 領域には、入側で上ロールのみ接触し、伸び変形が小さくなるため、式(5)の三次多項式を適用した。

変形モードの未知パラメーターとして $\lambda_1 = 0.74$ 、 n_1

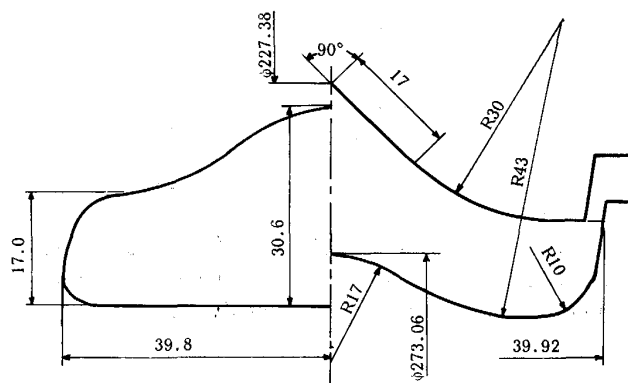


Fig. 7. Geometry of the caliber in splitting pass K_5 (right side) and cross-section of bar at entry (left side).

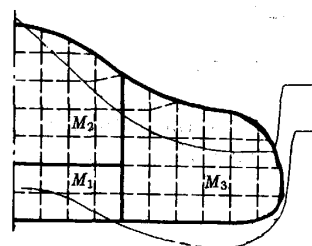
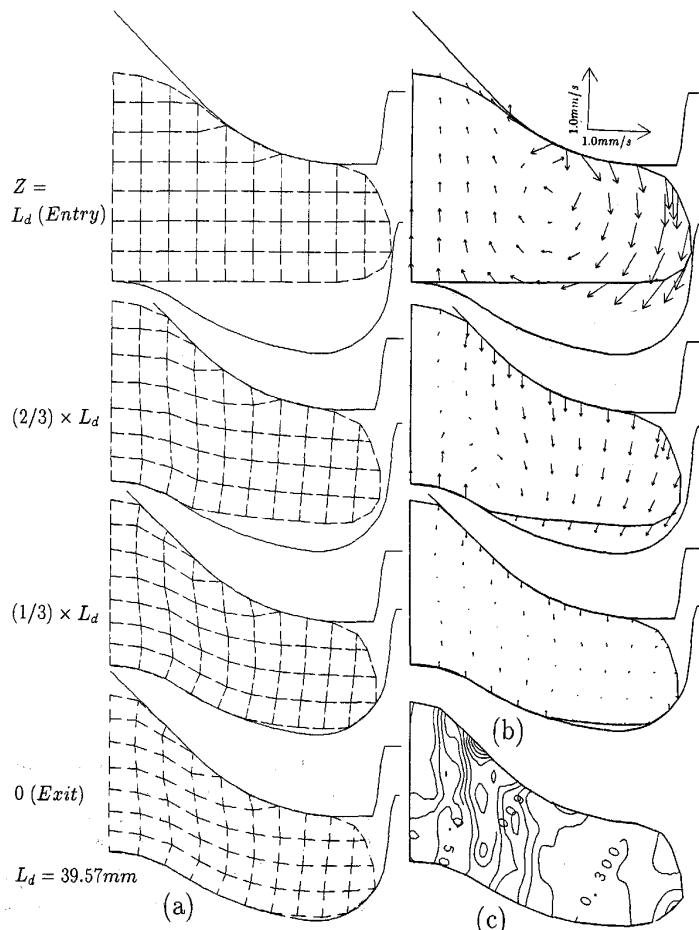


Fig. 8. Patterns of FEM mesh (with dash line) and deformation mode subregions (with solid line) employed for splitting pass K_5 analysis.



(a) Grid distortion in the different billet cross-sections, (b) metal flow patterns in the different cross-sections and (c) effective strain distribution after rolling in this pass.
Fig. 9. A calculated appearance of the deformation rolling in splitting pass K_5 .

$= 1.4$, $n_2 = 1.3$ を得た. Fig. 9 に, 典型的な断面での変形状態, 速度場および圧延後の相当ひずみ分布を示す. 入側では圧延材と下ロールとの幅の差が小さく, 上ロールと圧延材との接触面積も大きいため, 割込変形を安定的に行い, 偏心を避けた設計であると考えられる. これは二パスで割込みを行う長所となる. 大きな曲げ変形により, 絶対値は小さくなるため, 幅広がりも許容される. K_5 パスでは, 端部と下ロールとが接触するのは出側近傍であり, 頂上部の未充填の程度は実験結果とよく一致する.

4.2 バタフライパス

$K_4 \sim K_2$ の三つのバタフライパスでは, 圧延材と孔型とが相似の断面形状を持つため, 均一な圧下を受け, 伸

び変形も大きくなる. ここで, K_4 を例としてその変形状態の解析結果を示す.

K_4 パスの入側圧延材断面と孔型の形状を Fig. 10 に示す. 解析において, Fig. 11 に示す FEM メッシュおよび変形モード領域を用い, 三つの領域ともに式(4)の変形モード関数を適用した. 解析により, K_4 では $\lambda_1 = 0.78$, 各領域での指数は $n_1 = 1.7$, $n_2 = 1.6$, $n_3 = 1.6$ になった. その後のパス K_3 , K_2 においても指数 n がほぼ一定 $n = 1.6$ をとることから, 伸び変形は均一になることがわかる.

変形過程は Fig. 12 に示すように, 最初に小さな局所接触によりわずかな変形集中が起こるが, すぐに圧延材と上下ロールとの接触面積が拡大する. 幅広がりはいたい接触弧長の中心部で大きく生じる. 圧延後の相当ひ

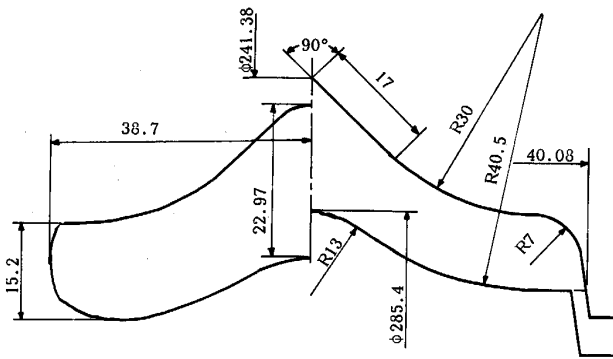


Fig. 10. Geometry of the caliber in butterfly pass K_4 (right side) and cross-section of bar at entry (left side).

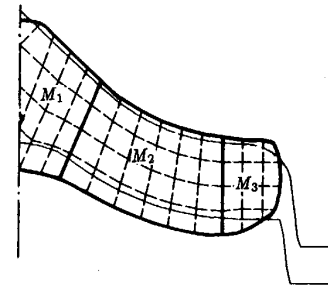
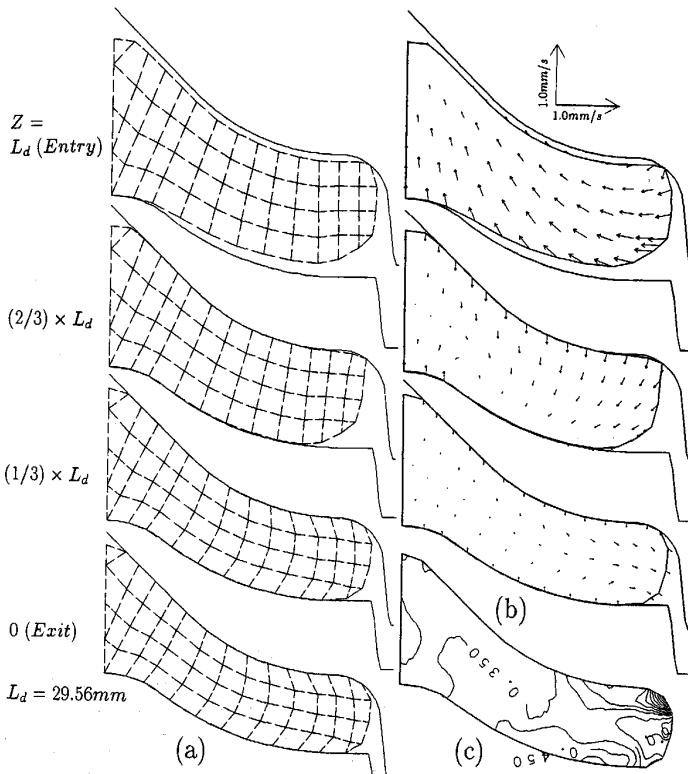


Fig. 11. Patterns of FEM mesh (with dash line) and deformation mode subregions (with solid line) employed for butterfly pass K_4 analysis.



(a) Grid distortion in the different cross-sections, (b) metal flow patterns in the different cross-sections and (c) effective strain distribution after rolling in this pass. Fig. 12. A calculated appearance of the deformation rolling in butterfly pass K_4 .

ずみ分布から端部局所の変形集中領域以外はひずみ勾配が小さいこともわかる。

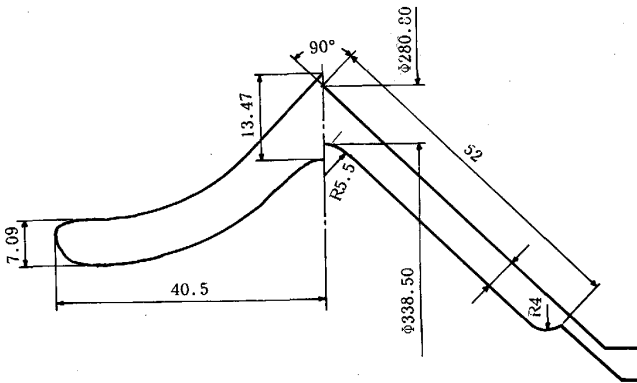


Fig. 13. Geometry of the caliber in finishing pass K_1 (right side) and cross-section of bar at entry (left side).

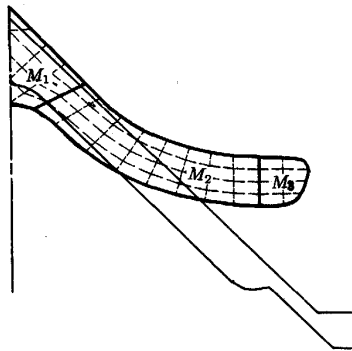
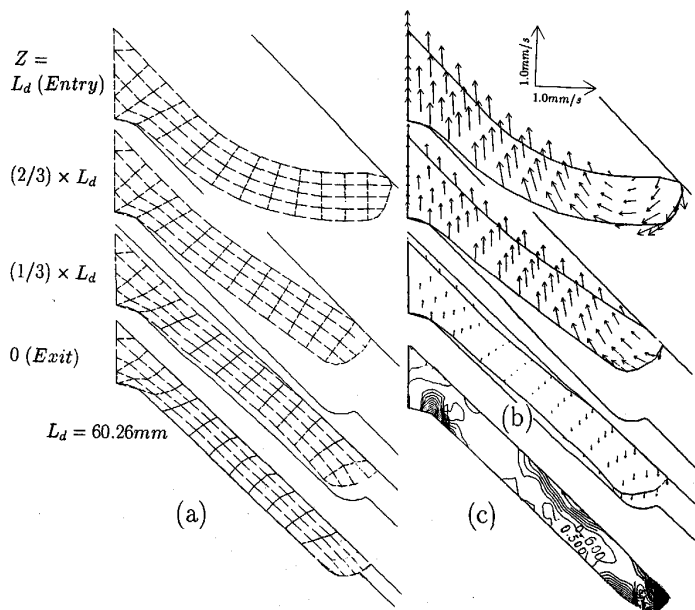


Fig. 14. Patterns of FEM mesh (with dash line) and deformation mode subregions (with solid line) employed for finishing pass K_1 analysis.



(a) Grid distortion in the different cross-sections, (b) metal flow patterns in the different cross-sections and (c) effective strain distribution after rolling in this pass.

Fig. 15. A calculated appearance of the deformation rolling in finishing pass K_1 .

4.3 仕上げパス

仕上げパス K_1 の入側圧延材断面と孔型の形状を Fig. 13 に示す。Fig. 14 に示す FEM メッシュおよび変形モード領域を用い、圧延材の円弧部の M_2 領域のみに式 (5) の変形モードを適用した。解析結果として $\lambda_1 = 0.71$, $n_1 = 1.4$, $n_3 = 1.3$ を得た。

Fig. 15 には典型的な断面での変形状態、速度場および圧延後の相当ひずみ分布を示す。このパスでは曲げ変形が大きくなるが、特に上ロールの端部だけが圧延材と接触し、圧延材の円弧部は曲げと引張変形を受け細くなることがわかった。また、上ロールと圧延材との接触面積も小さい。これが実際の上ロールの局所摩耗の要因となることが推測される。

4.4 考察

変形モード法による圧延変形解析においては、各圧延パスの変形特性に関する物理的考察および感度解析からモード領域の分割および各モード領域の関数系を定め、未知パラメーターを、全体変形の汎関数 (1) の最適化によって決定する。上述の解析では、 $K_5 \sim K_1$ パスの解析で式 (4), (5) の関数系を変形モード領域ごとに選別した。特に K_1 , K_5 パスに曲げ変形が大きい領域は式 (5) の三次多項式の変形モードが適している。

Fig. 16 および Table 1 の各パスの解析結果と実験結果を示す。実験結果として、全パスの出口のサンプルは同じ圧延材からとることが実験操作上の制限でできなかったが、出入側断面積比の実験値をこのサンプルの断面積から算出した。解析では、入側断面形状をパスごとに実験データに基づき設定した。解析により得た出側の断面形状は実験のサンプルとほとんど一致することがわ

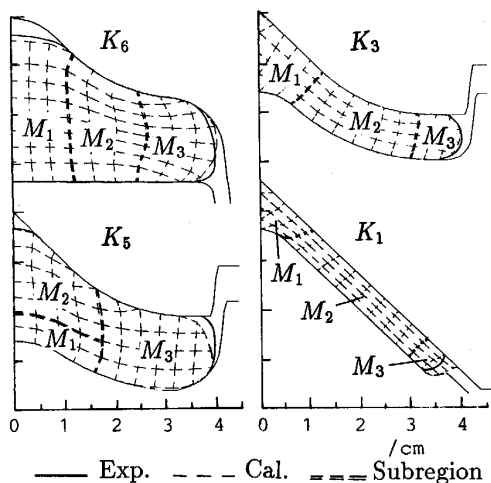


Fig. 16. Cross-sectional shapes after rolling in the typical rolling steel angle passes obtained both by experiment in the actual rolling process and by calculation with the deformation mode method.

Table 1. Cross-sectional area and area ratio λ_1 of bar obtained both by experiment and analysis.

| Roll pass | Cross-sectional Area (mm ²) | | λ_1 | |
|-----------|-----------------------------------------|-------------------|-------------|------|
| | Exp. (Exit) | Ana. (Entry/Exit) | Exp. | Ana. |
| K_6 | Entry : 2 275.21 | 2 250.39/1 665.29 | 0.787 | 0.74 |
| K_5 | 1 789.78 | 1 683.85/1 246.05 | 0.775 | 0.74 |
| K_4 | 1 080.40 | 1 315.41/1 026.02 | 0.779 | 0.78 |
| K_3 | 856.07 | 1 033.91/806.45 | 0.792 | 0.78 |
| K_2 | 661.06 | 846.32/643.20 | 0.772 | 0.76 |
| K_1 | 500.53 | 662.76/470.56 | 0.757 | 0.71 |

かる。さらに変形モードの未知パラメーター λ_1 を実測値と比較してみると、 $K_4 \sim K_2$ ではわずか 1% 前後の誤差であるが、 K_6 、 K_5 と K_1 では 5% 以下で、やや大きい。これは、上記の実験誤差のほかに、解析条件としてサンプル圧延材の非対称性を考慮していないこと、ロールすきまの設定状態を正確に推定できないことによるものと思われる。特に、その影響は K_6 、 K_5 の解析において大きくなるが、 K_4 パスから入口での圧延材形状は脚厚から直接に測定できるため、小さくなる。また、 K_1 パスでは熱間圧延の温度不均一分布および摩擦係数の変化が与える圧延材への影響を無視できないことを示している。

解析により、本解析の対象とするバタフライ系の孔型システムは 2 パスによる割込みが安定な左右対称変形に有利である。なお、孔型設計において予想した材料の充満率が初期パスで達成できていないが、これに対しては、

ロール溝を浅く調整することにより、ロール強度を向上させ、圧下率の向上および充満の実現が可能であると考えられる。

計算は東京大学大型計算機センターの M-680H で行って、1 パスの解析の所用 CPU 時間は約 5 min である。

5. 結 言

変形モード法を実際のバタフライ孔型系の山形鋼材圧延における変形特性の解析に適用した。解析において、熱間圧延の温度および加工硬化の影響を無視したにもかかわらず、実験の断面形状と良好に一致する解析結果が得られた。変形条件により、変形モードがべき乗関数および三次多項式の関数を選択するが、特に大きな曲げ変形を受ける領域（例えば、 K_5 の端部と K_1 の円弧段）には三次多項式の変形モードが適している。また、大きな曲げ変形を伴うパスにおいては、べき乗関数の指数 n が小さくなり、入側付近の伸び変形が小さくなる。 K_6 、 K_5 の 2 パスによる割込変形は被圧延材料の変形の対称性を保つのに有効となるが、孔型バイト内の充満特性を考慮して現孔型の幾何学パラメーターを最適化する必要がある。バタフライパスにおいて、伸び変形がほとんど均一分布になる。仕上げパス K_1 において、脚部が曲げと引張りを受け、脚厚の縮みが起こる可能性がある。

熱間圧延における圧延材の温度分布による変形抵抗変化、摩擦条件の影響に関しても今後研究を行いたい。

文 献

- 1) 森謙一郎, 小坂田宏造: 第 39 回塑性加工連合講演論文集 (1988), p. 609
- 2) 加藤和典: 塑性と加工, **24** (1983), p. 1014
- 3) 相澤龍彦: 構造工学における数値解析シンポジウム論文集, **14** (1990), p. 25
- 4) 相澤龍彦, 木原諄二: 第 41 回塑性加工連合講演論文集 (1990), p. 603
- 5) 辛 平, 木原諄二, 相澤龍彦: 塑性と加工, **31** (1990), p. 372
- 6) 小森和武, 加藤和典: 同上, p. 357
- 7) 柳本 潤, 木内 学: 同上, p. 384
- 8) 辛 平, 木原諄二, 相澤龍彦, 種田幸一: 昭和 62 年春季塑性加工講演論文集 (1987), p. 139
- 9) 辛 平, 木原諄二, 相澤龍彦: 塑性と加工, **30** (1989), p. 1180
- 10) 辛 平, 木原諄二, 相澤龍彦: 第 40 回塑性加工連合講演論文集 (1989), p. 405
- 11) 辛 平, 木原諄二, 相澤龍彦: 第 41 回塑性加工連合講演論文集論 (1990), p. 363
- 12) 蘇 逢西, 辛 平ら: 北京鋼鉄学院学報, **1** (1986), p. 63