

M12 プレス加工を用いた自動板曲げシステムの開発

壺井 翔太 (指導教員 深沢・柴原・伊藤)

Development of Automated Press Working System for Plate Forming

by Shota Tsuboi

Abstract

In the shipyard, steel plates are bent various forms. The bending process is divided into two processes, namely, press working process and line heating process. Firstly, plates are roughly bent in the press working process. Secondly, complicated shapes are formed in the line heating process. These processes strongly depend on the experience of skilled workers because the bending procedure is very complicated. Therefore, the bending process has some problems that the differences are generated on the final shape or operating process. These problems may affect later process such as block assembling process.

In this study, the following problems are mainly discussed. Firstly, “real press line” is introduced to replace “curvature line”. “Real press line” is marked on the plate to be pressed and its length is the same as the length of press head. By using “real press line”, the quality of press work becomes independent of ability of the worker. So, the development of press method using “real press line” is considered to be useful. In the bending process using “real press line”, precise deformation database is necessary. Then, in this study, the press simulation method based on FEM elastic plastic analysis is developed. The deformation mainly includes four kind of inherent deformation, and is influenced by press area and loading condition. This makes the automation of press work difficult. These inherent deformations which consist of inherent strain, in other words, plastic strain that remained after press working. Hence, in this study, the database of these four kinds of inherent deformations, as described here is created.

And it is also necessary to build a system to make arbitrary shape from flat plate. So, combination of loading condition is chosen from inherent deformation database of press working to form the objective shape. Its precision is verified by using FEM elastic-plastic analysis.

1. 緒 言

船舶は様々な形状の鋼板が組み合わされて作られる。現在の造船業において、船舶の外板は主にプレス加工と呼ばれるプレス曲げであら曲げを行い、その後、ぎょう鉄と呼ばれる熱間加工を用いて複雑な形状を作成する。プレス曲げは短時間で大きな変形が可能であるが細かい加工が困難であるのに対して、焼き曲げは複雑な曲がり形状を作成可能である。これらの工程はいずれも作業者の経験に依存しており、携わる人によって加工時間や仕上がり形状に差が出来る。その為、品質やコストが一定ではなく、場合によっては後工程の作業性や、船の性能に影響を与えと言う問題が生じてしまう可能性がある。

そこで、様々な研究機関において板曲げの自動化手法の研究が行われている。しかし、現在行われている板曲げの研究のほとんどが熱間加工に関する研究であり、プレス加工に関する研究が要求されている。また、熱間加工は強い非線形性を持つ熱変形を用いるため変形メカニズムが複雑で自動化が困難である。他にも熱間加工には環境への負荷、設備の大きさ、加工時間等に課題がある。すなわち、曲げ工程においてプレス加工の割合を増やし、原則プレス加工を用いて鋼板の加工を行い、全行程もしくは最終の仕上げにのみ熱間加工を用いることが曲げ工程の改善になると考える。そこで、本研究では数値シミュレーションを用いた新しい鋼板のプレス加工手法を提案する。

従来、曲げ工程の加工線には曲率線が用いられてきた

が、高効率化および作業者経験への依存から脱却するために現在”リアルプレス線”を曲率線の代替手法として導入する試みがある。この”リアルプレス線”を用いたプレス加工を行うには、荷重、プレス位置、プレスヘッドの形状等の様々な因子に対する変形量を正確に把握し、予測しなければならない。すなわち変形データベースが必要不可欠である。そこで、本研究では有限要素法による弾塑性解析理論を基にプレスシミュレーションメソッドを開発した。プレス加工による変形は主に4つの固有変形成分に分けて考えることができ、それらは荷重領域や荷重条件に支配される。このことは、工程の自動化を困難にする一因となっている。そこで、本研究では上述したプレスシミュレーションメソッドを用いて各パラメータが変形量に及ぼす影響について検討したデータベースを作成する。

さらに、本研究では、プレス加工の自動化を目指し、任意の形状を成形可能なプレス加工システムを提案する。同システムでは、荷重条件やプレス位置を上述したデータベースから決定する手法である。そして、決定した荷重条件を用いてプレス加工を行い、提案手法の有する精度について検証する。

2. プレス加工による任意形状の成形

2.1 プレス加工の手順と変遷

プレス加工とは鋼板をプレス機材にセットし予め引いておいたプレス線またはローラー線と呼ばれる線にプレ

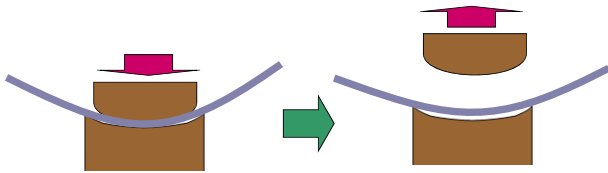


Fig.1 Illustration of press working

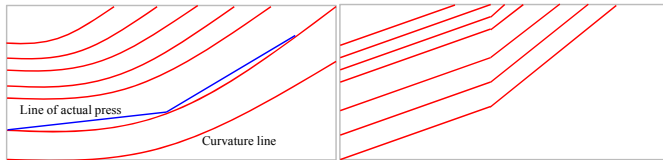
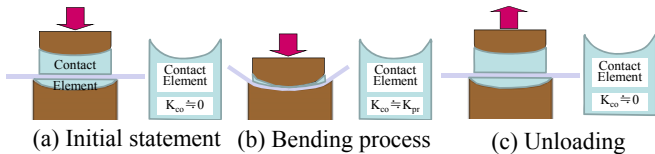


Fig.2 Curvature line.

Fig.3 Real press line.



(a) Initial statement (b) Bending process (c) Unloading

Fig.4 Contact element.

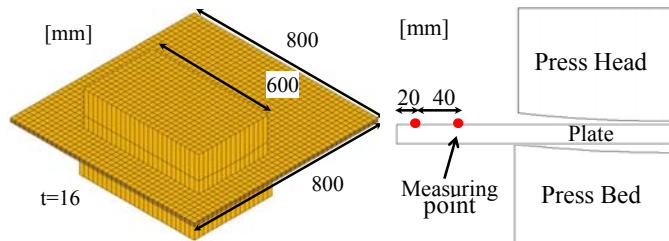


Fig.5. FE mesh division for press simulation.

Fig.6 Cross section of press model.

ス機の刃を当てて、荷重をかけて曲げ変形を行う工法である。Fig.1 にプレス加工の様子を二次元的に表した図を示す。

従来、プレス線は Fig.2 に示すように曲率線を展開した線を用いて作成され、プレスはそれに沿って行われてきた。しかし、曲率線は曲線であるのに対して、プレスヘッドは直線であるため、目的形状と施工形状の差が大きいという問題点がある

上述した”リアルプレス線”は Fig.3 に示すように加工線の長さがプレスヘッドと同じため目的形状とのずれが小さい。その結果、工程数の減少になると考えられている。このリアルプレス線を用いたプレス加工を行うことによって成形形状を一定にできると考える。

3. プレスシミュレーションメソッド

本研究では、有限要素法を用いた弾塑性解析手法を基にプレスシミュレーションメソッドを構築した

プレス加工ではプレスを行いプレスヘッドが鋼板から離れた際に示すような弾性回復によるスプリングバックが発生する。本研究ではこのスプリングバックも考慮するためにプレスヘッドを下降させて鋼板に接触させ、プレス加工終了後プレスヘッドを上昇させるプレス成形の 1 サイクルをシミュレーションモデルとする。そのために、Fig.4 に示すようにプレス機と鋼板の間に接触要素をプレス機と、鋼板の間に接触要素を配置する。

この接触要素の挙動を Fig.4 に示すプレスモデルの上

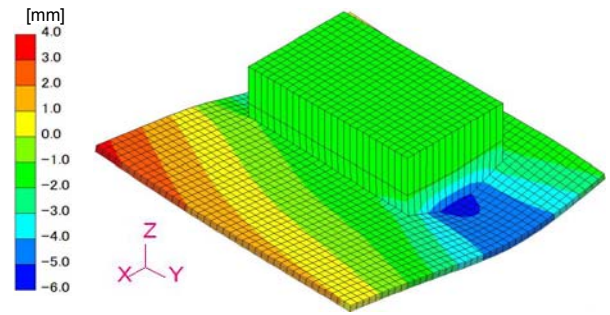


Fig.7 Distribution of displacement in z-direction of 3D press model obtained by press simulation.

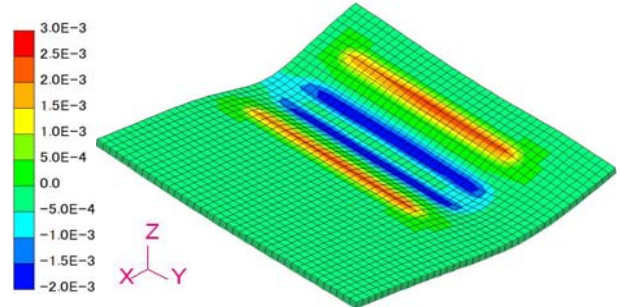
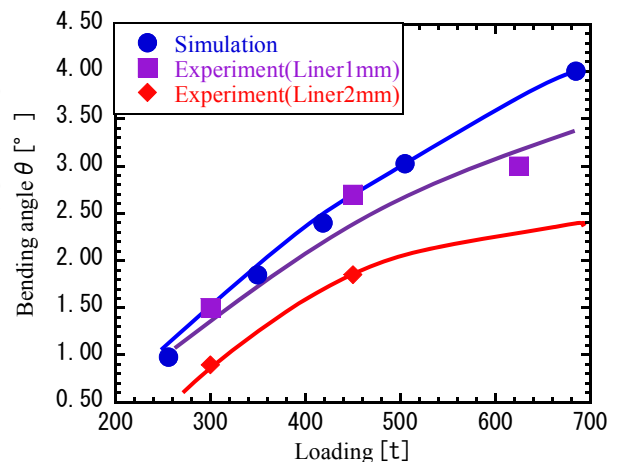
Fig.8 Distribution of plastic strain(ϵ_p^x) in x-direction of steel plate obtained by press simulation.

Fig.9 Comparison of angular distortion between simulation and experiment.

側の接触要素の一つを例に用いて説明する。Fig.4(a)プレス開始時を示している。プレスヘッドが鋼板に接触するまでは、接触要素の剛性 K_{co} は非常に小さく、プレスヘッドは上下方向の反力を受けることなく下降していく。次に Fig.4(b)に示すようにプレスヘッドが鋼板に接触すると、接触要素の剛性 K_{co} は非常に大きな剛性 K_{pr} となり、反力が発生する。Fig.4(c)はプレス加工による曲げ過程を示している。この曲げ過程が行われている間接触要素剛性 K_{co} は K_{pr} を維持し続け、曲げ加工が行われる。そして、Fig.4(d)に示すようにプレスが終わり、プレスヘッドの上昇が始まると、 K_{co} は再度非常に小さな剛性を持つようにする。

4. 提案手法の妥当性検証

前章で説明したプレスシミュレーションメソッドの性能の妥当性検証を行う。妥当性検証に際して、実際に製造現場で用いられているプレス機によって加工された鋼

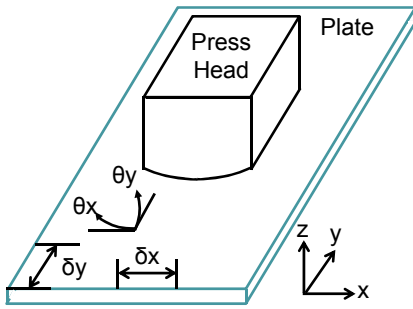


Fig.10 Definition of inherent deformation.

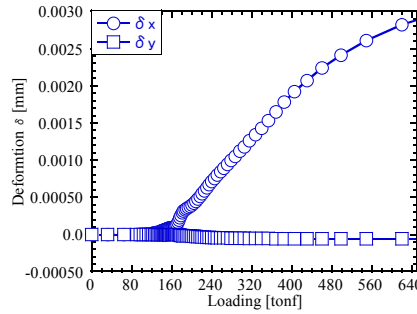


Fig.11 In-plane inherent deformation database.

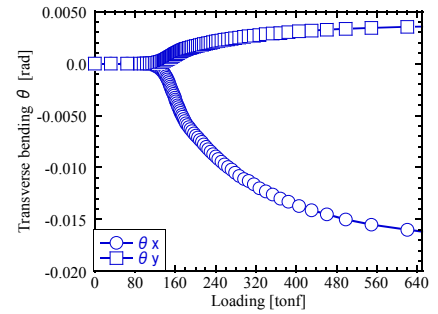


Fig.12 Out-of-plane inherent deformation database.

板の端部の曲がり角と提案手法を用いて成形した鋼板の端部の曲がり角を比較した。

実験では、曲がり角計測のための二点を設定し、その二点の三次元座標をプレス前とプレス後で柴原研究室において開発された三次元画像計測手法¹⁾を用いて計測し、算出する。

次に、提案手法で用いたモデル及びプレスヘッド、およびプレスベッドの形状を Fig.5, Fig.6 に示す。提案手法での角度の計測点は鋼板のエッジから 20 mm、2 点の計測点間の距離は 40 mm に設定した Fig.6 の点は曲がり角の計測に設定した点を示す。このモデルは鋼板の幅 800 mm、長さ 800 mm、厚さ 16 mm でプレスヘッドの幅 150 mm、長さ 600 mm、曲率 1450R、プレスベッドの幅 160 mm、長さ 600 mm、曲率 1500R である。

Fig.7 はプレスシミュレーションのプレス過程で得られた z 方向変位である。また、Fig.8 はプレス終了後の鋼板の x 方向塑性ひずみ分布である。Fig.9 に横軸を荷重、縦軸を曲がり角に設定した計測結果を示す。ここで、製造現場では過変形を抑制するためにライナーなしのプレス加工はほとんど行われないため、実験による結果 1mm および 2 mm の厚さのライナーを用いた際の結果を示す。Fig.7 において、実験ではプレス加工の際にライナーを用いているためにシミュレーション結果よりも小さな値になったと考える。この結果より提案手法のプレス加工の評価に対して有用であると考えられる。

5. 固有変形データベースの作成

プレスで目的形状を成形するには目的形状を作成するために必要なプレス条件を選定する必要がある。プレス条件の選定は固有変形量から行うことが最適であると考えられる。そこで本章では、前章までに述べたプレスシミュレーションメソッドを用いてプレス加工を行った際に発生する固有変形のデータベースを作成する。固有変形のデータベース作成の際に用いたプレスモデルには前章と同じモデルを用いた。

5.1 固有変形の定義

プレスヘッドの幅方向を x、長手方向を y とすると、4 成分の固有変形である横変形 δ_x 、縦変形 δ_y 、横曲り θ_x 、縦曲り θ_y は塑性ひずみ ϵ_x 、 ϵ_y を用いて次のように定義する。また、Fig.10 にプレスモデルを用いて 4 成分の定義を示す。

$$\begin{aligned}\delta_x^i &= \int \epsilon_x^i dydz / h \\ \delta_y^i &= \int \epsilon_y^i dydz / h \\ \theta_x^i &= \int \epsilon_x^i (z - h/2) / (h^3 / 12) dydz \\ \theta_y^i &= \int \epsilon_y^i (z - h/2) / (h^3 / 12) dydz\end{aligned}\quad (1)$$

5.2 固有変形データベース

本節では前節で定義した固有変形をまとめる。横軸にプレス加工における最大荷重、縦軸に各変形量を設定した固有変形データベースを Fig.11, Fig.12 に示す。Fig.11 は面内変形である横変形 δ_x 、縦変形 δ_y の結果、Fig.12 は面外変形である横曲り θ_x 、縦曲り θ_y の結果である。固有変形は FEM 弾塑性解析を行い、式(2)から鋼板に残留する塑性ひずみ ϵ_x 、 ϵ_y のプレスヘッドの長手方向に垂直な断面上の積分値として、各荷重量における固有変形量を求める。

6. FEM 弾性解析による目的固有ひずみの算出

本章では、平板を目的形状に変形させるために必要な、平板に与えるべき固有ひずみ分布を求める。プレス加工は主に曲げ変形を用いて加工を行う。そこで、本研究では固有ひずみ分布の中の曲率分布を求めた。この固有ひずみを目的曲率分布と呼ぶ。目的曲率分布は目的形状を平面へ強制変形させる FEM 弾性解析により、その際に発生した曲率の正負を逆にしたもの、目的曲率分布として取り扱う。

6.1 目的曲率分布の算出方法

まず任意の曲面を節点座標で定義し、FEM 弾性解析により各節点の z 座標 (板厚方向) がすべてゼロとなるような強制変位を与えて計算を行い、曲面を初期形状 (平板) へと強制変形する。このとき、各要素において x、y 軸方向垂直弾性ひずみ ϵ_x 、 ϵ_y 及び xy せん断弾性ひずみ γ_{xy} を求める。さらに、中立面からの距離を z とする任意の点の ϵ_x 、 ϵ_y 、 γ_{xy} は固有ひずみの面内成分 ϵ_x^* 、 ϵ_y^* 、 γ_{xy}^* 及び面外成分 κ_x^* (x 軸方向の曲げ曲率)、 κ_y^* (y 軸方向の曲げ曲率)、 κ_{xy}^* (捩率) を用いて下式のように表される。

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \epsilon_x^* - z\kappa_x^* \\ \epsilon_y &= \epsilon_y^* - z\kappa_y^* \\ \gamma_{xy} &= \gamma_{xy}^* - z\kappa_{xy}^*\end{aligned}\quad (2)$$

各要素上下面のガウス点において求められるこれらの

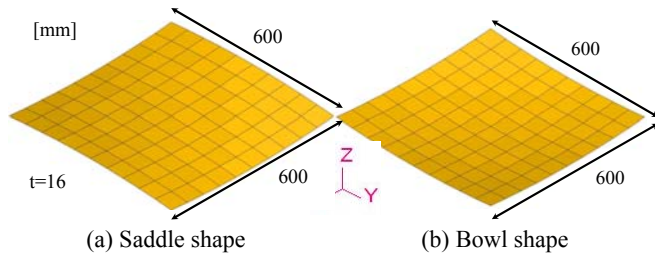


Fig.13 Objective shape in this study.

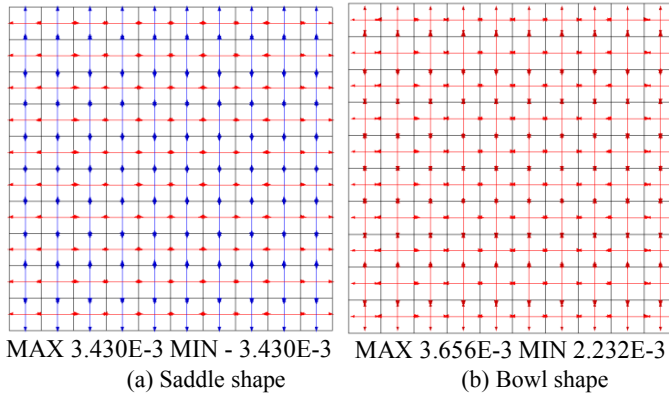


Fig.14 Principal curvature computed by FEM

値の和および差をとり、その平均値を求めることにより、曲面を平板へ展開した際に発生する各要素における曲げの固有ひずみを求める。さらに全要素に対してこの計算を行い、板全体に亘る目的固有ひずみ分布を求める

6.2 任意形状に対する目的固有ひずみの算出

Fig.13(a), (b)に示す 3 種の鋼板を模擬したモデルについて強制変形計算を行い、固有ひずみ分布を算出した。解析には 4 節点アイソパラメトリックシェル要素を用い、要素数を 100、節点数を 121、板厚を 16mm とした。さらに各節点座標の定義域を $-300\text{mm} \leq x \leq 300\text{mm}$ 、 $-300\text{mm} \leq y \leq 300\text{mm}$ として z 座標を、(a)鞍型、(b)碗型、それぞれに関して式 (3)、(4) で定義した。また、中央の節点座標は (0,0,0) とした。

$$z = (x^2 - y^2) / (5.0 \times 10^3) \quad (3)$$

$$z = (x^2 + y^2) / (5.0 \times 10^3) \quad (4)$$

Fig.13 で示した解析対象について、強制変形計算を行った結果から求められる主曲率分布を Fig.14 に示す。主曲率分布に関しては 3 種ともに、各要素において一様な分布をとることがわかる。

以下、これらの正負を逆にしたものを目的主曲率分布と呼ぶ。

7. 提案手法の妥当性検証

7.1 荷重条件選定方法

展開形状において、目的主曲率分布を一定の領域ごとに積分を行い、目的形状を成形するのに必要な固有変形量を算出する。次に、作成したデータベースから目的固有変形量を満たす荷重条件の組み合わせを選定する。

7.2 荷重条件を用いた解析

本章では 5 章で求めた固有変形データベースと 6 章で

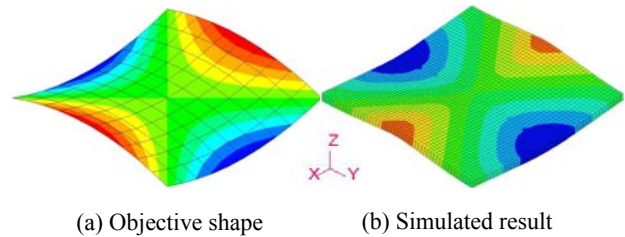


Fig.15 Distribution of in z-direction of saddle shape.

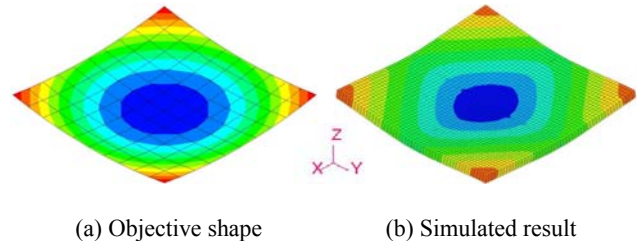


Fig.16 Distribution of in z-direction of bowl shape.

求めた目的主曲率分布を用いて荷重条件を選定し、Fig.12 に示した 3 パターンの形状を作成し、提案手法の妥当性の検証を行う。

Fig.15 に鞍型の目的形状および提案手法を用いて成形した鋼板の z 方向の変位分布図、Fig.16 に碗型の目的形状および提案手法を用いて成形した鋼板の z 方向の変位分布図を示す。両図より提案手法を用いて成形した鋼板の z 方向変位分布は目的形状の z 方向変位分布と定性的に一致していることを確認した。

8. 結言

本研究では、プレス加工による曲げ変形のデータベースの作成および、自動化を目指した。その為に FEM 弾塑性解析をもとにプレスシミュレーションメソッドを構築し、様々な荷重条件におけるデータベースを作成した。また、プレス加工によって任意形状を成形するための荷重条件選定方法を提案した。さらに、提案した荷重条件を用いてシミュレーションを用いて成形を行い妥当性を検証し、目的形状を成形するための荷重条件を決定した。

以下に結言として本論文をまとめる。

- (1) プレス加工によって生じる固有変形 4 成分の固有変形量のデータベースを作成した。
- (2) FEM 弾塑性解析を用いて平板から任意形状を成形するために必要な、目的主曲率分布を算出した。
- (3) 平板から任意形状を成形するために必要な、目的固有変形量を目的主曲率分布から求め、それを近似するような荷重条件選定方法を考案し、固有変形データベースから選定した。
- (4) FEM 弾塑性解析を用いて提案手法の妥当性検証を行った結果、主軸に垂直または平行なプレスのみで成形した碗型および鞍型は目的形状と定性的に一致した変位分布を得ることができた。

参考文献

- 1) 柴原正和, 河村恵里, 生島一樹, 伊藤真介, 望月正人, 正岡孝治: ステレオ画像法による三次元溶接変形計測法の開発, 溶接学会論文集 pp108-115 28 号, 2010

