論文

ハット断面ビームのスプリングバック対策としての
最適金型見込み

安部 重毅* 日野 隆太郎** 近藤 裕樹*** 吉田 総仁**

Optimum Springback Compensation for Hat-Shaped Beam Forming

Shigeki ABE*, Ryutaro HINO **, Hiroki KONDO *** and Fusahito YOSHIDA **

(Received on January 23, 2008)

A new method of springback compensation for a hat-shaped beam based on finite element (FE) simulation and the optimization technique is presented, in which the objective function to be minimized is the shape error of the press-formed beam after springback and the design variables are the geometrical parameters for defining the die shape. This method starts with rough die compensation based on empirical knowledge and springforward analysis, and then optimization is carried out. To reduce the computation time in optimization, the idea of two-step optimization is presented, where the die cross-sectional shape and longitudinal die curvature are determined separately. In addition, a partial FE model, which is less expensive computationally, is used in die cross-sectional shape optimization, instead of a full FE model. In this paper, we describe the general method of die compensation, the formulation of the optimization problem, details of the numerical technique, and the verification of this method by solving a springback problem for the beam model.

Key words: sheet metal forming, elastic-plastic FEM, springback, process design, optimization.

1. 緒 言

自動車の軽量化に伴い、高張力鋼板の構造部材への適用範囲が拡大している。この高張力鋼板は従来の軟鋼板に比べ、プレス成形時に割れ、しわ、スプリングバックといった不具合が顕著に発生する。特にスプリングバックに起因する開き、反り、ねじれなどの形状不良の対策が生産現場で多大な負担となっている。

筆者らは、ハット断面形状を持つ長尺部品特有のねじれを解消するために、ドロービードの高さを設計変数として扱い、最適化手法により成形シミュレーション上で最適なドロービード形状を決定する方法を提案した¹⁾。提案方法の評価には S レイルモデルを、供試材には 1GPa 級の超高張力鋼板を採用した。提案方法の有効性を確認するために、成形シミュレーション上で決定した最適なドロービードを S レイルの実金型に配置し、実証実験を行ったところ、予想通りねじれを解消できた。このようなアプローチが成功したのは、最適化計算において高精度なスプリングバック解析を可能にする Yoshida-Uemori モデル^{2) 3)}を使用したことによる効果が大い。

この最適化手法は成形条件を変更しつつ成形シミュレーションを何度も繰り返し、効率よく不具合の無い成形条件を決定するものである。ここで問題となるのは、高精度な成形シミュレーションをベースに最適化を行うと、1回あたりの解析時間が長くなり、最適化の総計算時間が膨大になり、現実的な時間範囲内での解析が不可能になる。

日野らは角筒深絞りのブランク形状最適化において、要素サイズが粗く解析時間の短い“簡易モデル”と従来の要素サイズの“詳細モデル”を併用して短時間で最適解を得る方法を提案した。これにより総計算時間を 85%短縮している⁴⁾。ただし、要素サイズが粗いモデルはスプリングバックの解析精度を極端に低下させるため、S レイルのような最適化事例には適用できない。

本報では、対象とする問題の特性に応じて、相関の低い設計変数の分離、適切な部分モデルの導入、経験に基づく見込みなどの導入を行うことで、板成形問題最適化（特にスプリングバック解析を含む計算負荷の高い最適化）を高精度かつ短時間で行う方法を提案し、具体的な成形問題への適用によって、その有効性を示す。対象モデルはハット断面を円弧状に繋げたビーム部品とする。改善したい不具合はスプリングバックによる形状不良とする。ここでは、スプリングバックの見込み分だけ、対象モデルの金型を修正して、形状不良を改善する。この金型はハット状の横断面とこれに直交する円弧状の長手方向断面で定義できる。そこで、各断面の形状寸法を設計変数とし、これを変更しつつ金型形状を最適化する。

この金型形状の最適化に要する総計算時間を次の 2 つの

* 広島県立総合技術研究所 西部工業技術センター 生産技術アカデミー
〒739-0046 広島市鏡山 3-13-26

Academy for Manufacturing Technology, West Region Industrial Research Center,
Hiroshima Prefectural Technology Research Institute
3-13-26 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-0046, Japan.

** 広島大学大学院工学研究科 〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1
Department of Mechanical System Engineering, Hiroshima University
1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8527, Japan.

*** (株)ワイテック 〒736-0003 広島県安芸郡海田町曾田 3-74

Y-tec Corporation, 3-74 Soda, Kaika-cho, Aki-gun, Hiroshima, 736-0003, Japan.

手法によって短縮する。最初の手法は最適化の前準備段階で形状不良をできるだけ改善しておくことである。これにより最適化実施時の解析回数を削減できる。2番目の手法は、相関の低い設計変数を2つに分離し、それぞれ別の最適化計算で決定し、総解析回数を削減することである。ここでは“金型の横断面形状の最適化”と“金型の長手方向の断面形状の最適化”の2つの最適化を行う。横断面形状の最適化では、解析範囲をモデルの一部に限定する“部分モデル”を採用し、さらなる総計算時間の短縮を図る。これらの手法を用いることにより、極めて短い時間で全体の80%以上のエリアで目標形状との差異が0.5mm以内の成形を可能にする金型形状を決定できた。

2. ハット断面ビームに生じる形状不良

ハット断面ビームはハット断面が上向き円弧に沿って繋がっている円弧長さ900mmの長尺プレス部品であり、フォーム成形で加工する。Fig.1にその形状寸法を示し、以後この形状を目標形状と呼ぶ。この部品のハット状の横断面に垂直な方向をX方向、円弧状の長手方向断面に垂直な方向をY方向、プレス成形の反対方向をZ方向とする。

ハット断面ビームの加工で使用するブランクはTable 1のような機械的性質を持つ板厚1.2mmの1GPa級の超高張力鋼板とし、成形前形状は900mm×168mmとする。このブランクを横断面中央側で220kNの力でパッドとパンチに挟みつつ、パンチをZ方向に下ろして加工する。

この加工を成形シミュレーションにより解析する。ハット断面ビームは原点を通る横断面、長手方向断面で対称であるため、解析対象エリアを1/4に限定する(Fig.2(a)参照)。この1/4のエリアを成形する金型モデルを1/4全体モデルと呼ぶ。このモデルの1回あたりの解析時間は、約1.5時間である。成形シミュレーションはPAM-STAMP(ESI社)、その材料モデルにはYoshida-Uemoriモデルを使用した。

目標形状どおりの金型モデルModel-0を作成し、成形シミュレーションにてフォーム成形、スプリングバックの順で解析を行った。Fig.2(b)左図にModel-0の1/4全体モデルを、右図にスプリングバック解析後の解析結果を示す。

Fig.3は横断面と長手方向断面で目標形状と解析結果を比較した図である。スプリングバックにより横断面では、たて壁が外側に11.8度開き、長手方向断面では端部が9.4mm

Fig.1 Hat-shaped beam model (target shape)

Table 1 Mechanical properties of blank sheet

Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation /%	<i>n</i> -value	<i>r</i> -value
683	1094	15.8	0.124	0.80

戻り、形状不良となる。本研究の目的は、この形状不良を改善することである。改善手段として金型形状にスプリングバックの弾性回復分の見込み修正を加える。つまり、スプリングバック後に目標形状と一致するように弾性回復の変形量分だけフォーム成形中に余分に変形させる。Model-0へ見込み分の形状修正を加えた金型形状を最適化手法で決定する。

3. 大まかな金型見込み形状の決定

見込みを全く入れない金型形状Model-0を用いて成形シミュレーションを行うと、Fig.3のように目標形状と解析結果との間に大きな形状差がでる。この形状差が大きいほど、金型形状の大規模な修正が不可欠となり、それに伴い最適化計算における解析結果を目標形状に合わせこむための解析回数が増加する。

そこで、最適化の前準備段階で“スプリングフォワード解析”や“形状不良の改善方案”といった後述する方法にて、大まかな金型見込み形状を決定する、これを用いて目標形状に解析結果を近づけることができるため、最適化計算実施時の解析回数を削減できる。

(a) 3D-shape of hat-shaped beam

(b) 1/4 full model of tools and formed part shape after springback

Fig.2 1/4 full model for FE simulation

(a) Shape error at cross section

(b) Shape error at longitudinal section

Fig.3 Target shape and FE simulation result using Model-0 (no die compensation)

3.1 スプリングフォワード解析による主要寸法の決定

金型見込み形状を 1 回の解析で算出する手法としてスプリングフォワード計算がある。これは目標形状どおりの金型を用いてフォーム成形解析を行い、その後ブランクが持つ内部応力の符号を反転させ、その状態からスプリングバック解析を行うものである。これは PAM-STAMP 2G の保有機能である。Fig.4 は横断面と長手方向断面におけるスプリングフォワードの解析結果形状であり、この結果形状に沿う金型形状が見込みを入れた金型形状となる。この金型形状を用いてフォーム成形解析を行い、かつ目標形状どおりの金型形状で成形した場合と類似した内部応力をブランクに分布できたとする。その場合、スプリングバック後の解析結果が目標形状にほぼ一致する。

しかし、スプリングフォワード解析による金型見込みにも問題がある。Fig.4(a)下図のようにたて壁が内側に入り込むアンダーカットが生じる場合には、金型形状として成立しない。ここでは、スプリングフォワード解析より得られるダイフェイスの傾斜角 $A1$ 、たて壁の傾き角 $A2$ 、長手方向の曲率半径 $R1$ を大まかな金型見込みの主要寸法として採用する。

3.2 形状不良の改善方案

見込みの導入だけでは超高張力鋼板の壁反り対策は不十分である。ここでは金型に、たて壁に反り方向と逆向きの曲率による見込みを入れる、たて壁の開きを改善するため

Fig.4 Die compensation based on springforward analysis

にパンチ底 R の寸法を小さくする、成形途中のブランクの曲げ角を小さくするという 3 点の改良を金型形状に加えた (Fig.5 参照)。

以上のように決定した金型モデルを Model-1 とし、これを Fig.5 右図に示す。金型 Model-1 で成形した解析結果と目標形状を並べた図を Fig.6 に示す。これより、見込みを全く入れない金型 Model-0 を用いた解析結果に比べ、目標形状との差異が大幅に減少しており、大まかな見込みが十分な効果を挙げていると言える。しかし、Model-1 の金型形状だけでは目標形状に重なっておらず、まだ十分とはいえない。そこで、さらに金型見込み形状の最適化を行う。

4. 最適な金型形状の決定

成形シミュレーションを用いた最適化には、総計算時間が長いという問題がある。最適化の総計算時間は 1 回あたりの解析時間に最適化計算における解析回数をかけ合わせた時間となる。解析時間はブランクの要素サイズが細かく、かつ構成要素数が多いほど長い。また、最適解に至るまでの解析回数は設計変数の数が多いほど増える。

本報では金型見込み形状の最適化に要する総計算時間を短縮するために、相関の低い設計変数を分離して別々に最適化する。さらに可能であれば最適化で使用する成形シミュレーションのモデルを部分モデルで代替し、1 回あたりの解析時間を短縮する。

最適化の対象となる金型形状は横断面と長手方向断面に分けることができるため、各断面ごとの形状寸法をお互いに相関の低い設計変数とし、別々に最適化を行う。最初に部分モデルを用いてハット形状の金型横断面を最適化する。次に最適な金型横断面を反映させた 1/4 全体モデルを用いて円弧状の金型の長手方向断面を最適化する。得られる最適金型形状は、最適な金型横断面を長手方向の最適金型断面の形状に沿わせて押し出した形状とする。

Fig.5 Further die compensation based on empirical knowledge

Fig.6 Target shape and FE simulation result using Model-0 and Model-1 (rough die compensation based on empirical knowledge and springforward analysis) at cross section

4.1 金型の横断面形状の最適化

ハット断面ビームの金型横断面はハット形状であるため、長手方向断面に比べて複雑である。そのため解析結果を目標形状に精度よく合わせこむには、形状を決定する設計変数を多く用意する必要があるが、それに伴い解析回数が大幅に増加することが懸念される。ここでは、最適化の総計算時間を短縮するため、設計変数を3個にしぼり、さらに1回の解析時間が4分弱の部分モデルの採用を検討した。

Fig.7(a)に示すように部分モデルは中央の横断面付近の金型モデルを切り取り、これに幅10mmのブランクを配置したものである。前節の金型 Model-1 を切り出した部分モデルと1/4全体モデルをそれぞれ用いて成形シミュレーションを行った。各々の解析結果を並べた図を Fig.7(b)に示す。中央横断面における解析結果の形状誤差は最大0.55mmと少なく、補正を加えれば部分モデルを最適化計算に使用できると判断した。

本節では目標断面形状に解析結果が一致する最適な金型横断面形状を、部分モデルを用いて決定する。本最適化問題は次のように要約できる。

最適化問題設定

最小化すべき目的関数 $f(x)$

中央横断面における目標形状との差異

3個の設計変数 $x = x_1, x_2, x_3$ で決定

設計変数 x_1, x_2, x_3

x_1 : ダイフェイス角. 範囲は $12.0\text{deg} \leq x_1 \leq 16.0\text{deg}$

x_2 : 成形高さ. 範囲は $28.0\text{mm} \leq x_2 \leq 32.0\text{mm}$

x_3 : パンチ幅. 範囲は $42.7\text{mm} \leq x_3 \leq 46.7\text{mm}$

制約条件

$g_1(x)$: フランジ角の差異. これを0.5度以下にする

$g_2(x)$: フランジ端部位置の差異. これを0.5mm以下にする

$g_3(x)$: 形状差異の最大値. これを0.45mm以下にする

金型横断面形状を決定する設計変数は Fig.8 のように金型のダイフェイス角 x_1 , 成形高さ x_2 , パンチ幅 x_3 の3項目とし、モーフィングにより形状変更をさせる。目的関数は複数の箇所で解析結果と目標形状との差異を計算し、その差異の総和とする。最適化ではこの目的関数の値を最小化する。制約条件は目標形状に対する相対的なフランジ角、フランジ端部位置、差異の最大値の3項目とし、それぞれを規定値以下に抑えることとする。また目的関数や制約関数を計算する時には、比較基準となる目標断面形状に1/4全体モデルと部分モデルの形状誤差分の補正を一律に加える。

最適化計算では、初期金型形状として3章で決定した金型 Model-1 を使用し、最適化エンジンには逐次応答曲面法を用いた Hyper Opt (Altair Engineering 社) を使用した。

最適化計算は37回(最適解は20回目)で完了した。

Fig.9(a)に最適金型横断面とそれを用いた解析結果を示す。解析結果が目標形状によく一致していることがわかる。目的関数、制約関数の結果を Table 2 に示す。

4.2 金型の長手方向の断面形状の最適化

次に金型横断面と直交する長手方向の金型断面形状を決定する。金型横断面の最適化ではX方向の製品断面が全て同じであるため、部分モデルを使用した。Y方向の製品

断面にはこれが当てはまらない。本節では最適な金型横断面を反映させた1/4全体モデルの長手方向断面をモーフィングにより形状変更しつつ、最適な金型長手方向断面形状を決定する。本最適化問題は次のように要約できる。

最適化問題設定

最小化すべき目的関数 $f(x)$

長手方向の中央断面における目標形状との差異

1個の設計変数 x で決定

設計変数 x :

x : 曲率半径. 範囲は $2200\text{mm} \leq x \leq 2500\text{mm}$

制約条件:

$g(x)$: 形状差異の最大値. これを0.5mm以下にする

長手方向の金型断面の最適化では、目標形状の曲率が一定であるため、設計変数は金型形状の曲率半径だけとする。目的関数は長手方向断面における解析結果と目標形状との

(a) Partial model and FE simulation result after springback

(b) Comparison of FE simulation between partial model and 1/4 full model for springback analysis

Fig.7 Partial model of hat-shaped beam forming

Fig.8 Definitions of objective function $f(x)$, constraints $g(x)$ and design variables $x = x_1, x_2, x_3$ for optimization

差異を複数の点で抽出し、その総和とする。最適化ではこの目的関数の値を最小化する。制約条件は長手方向断面における差異の最大値を規定値以下に抑えることとする。

最適化計算は設計変数が 1 個であるため、わずか 8 回で完了した。Fig.9(b)に示すように最適金型長手方向断面を使用した解析結果は目標形状とよく一致している。目的関数、制約関数の結果を Table 3 に示す。

4.3 最適化結果と最適化の総計算時間

見込みを入れない場合の金型 (Model-0)、3 章の大まかな見込みを入れた金型 (Model-1)、4 章の最適化をした金型 (Model-2) をそれぞれ使用した解析結果と目標形状との形状差を比較した。目標形状との差異の最大値は Model-0 が 9.41mm, Model-1 が 1.88mm に対し Model-2 が 1.29mm と順に改善していることがわかる。

解析結果と目標形状との差異のコンター図を Fig.10(a)に、差異の程度と全面積に占める割合の関係を表すグラフを Fig.10(b)に示す。色が濃いエリアが多いほど目標形状との差異が大きく、薄いほど差異が少ないことを示す。Model-0 では 0.5mm 以内の差異の面積が全体の 21%であったのに対し、Model-1 では 65%, Model-2 では 80%以上となり、最適化の効果が伺える。

金型形状の最適化の総計算時間は、全部で 868 分であった。その内訳は横断面の最適化が 148 分 (4 分/回×37 回) で全体の 17.1%、長手方向断面の最適化が 720 分 (90 分/回×8 回) で全体の 82.9%であった。仮に最適化の計算を 2 回に分けない場合を想定すると、解析回数は少なくとも 45 回 (37 回+8 回) で部分モデルが使えないため、4,050 分 (45 回×90 分) 以上の計算時間がかかる。この手法を用いることで約 1/5 に総計算時間を短縮できたといえる。

5. 結 言

最適化計算前に大まかな見込みを入れる、最適化計算を 2 段階に分ける、さらに部分モデルを使用することによりハット断面ビームのスプリングバックを見込んだ最適金型形状を短時間で決定できた事例を報告した。

本報で示した方法論 (問題特性に応じた設計変数の分離、部分モデルの利用、従来の知見の反映) はビーム部品のフォーム成形に限らず、種々の成形条件最適化問題に対して有効であると考えられる。

本研究は、広島県産業科学技術研究所のプロジェクト「自動車軽量化を目的とした難成形材の半凝固・塑性加工の開発とその最適プロセス設計の研究」のもとで行われたことを付記し、参画メンバーの皆様に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 安部重毅・吉田総仁・日野隆太郎: 塑性と加工, **48**-562 (2007), 68-72.
- 2) Yoshida, F. & Uemori, T.: Int. J. Plasticity, **18** (2002), 661-686.
- 3) Yoshida, F. & Uemori, T.: Int. J. Mech. Sci., **45** (2003), 1687-1702.
- 4) Hino, R., Yoshida, F. & Toropov, V. V.: Arch. Appl. Mech., **75** (2006), 679-691.

Fig.9 Target shape and FE simulation result using Model-2 (accurate die compensation using optimization technique)

Table 2 Result of optimization for cross section of the beam

	$f(x)$	$g_1(x)$	$g_2(x)$	$g_3(x)$	x_1	x_2	x_3
Initial design	17.7	1.69	1.034	1.086	13.9	29	43.5
Optimum design	8.80	0.464	0.028	0.442	15.2	31.3	43.1

Table 3 Result of optimization for longitudinal direction of the beam

	$f(x)$	$g(x)$	x
Initial design	26.9	0.797	2320
Optimum design	15.9	0.334	2352

(a) Contours of shape errors between target shape and FE simulation result

Fig.10 Shape errors at three stages of optimization (Model-0, -1 and -2)