論文

有限要素解析による不整変形に対する拘束条件の検討

—— 構造用チャンネル材へのリブ成形 第1報 ——

牧山 高大* 寺前 俊哉* 上野 恵尉*

菅野 篤** 谷上 哲也* 村里 有紀*

Research on Constraint Conditions for Undesirable Deformation

by Finite Element Analysis

—— Rib Forming on Structural Channel I ——

Takahiro MAKIYAMA*, Toshiya TERAMAE*, Keii UENO*,

Atsushi KANNO**, Tetsuya YAGAMI* and Yuki MURASATO*

(Received on July 7, 2010)

Structural channels have advantages of low cost and light weight because the geometrical moment of inertia is large despite the light weight. However, the stiffness of the flange in the cross-sectional plane of the channel is small. To increase the stiffness, a reinforcement is welded. Therefore, the authors invented a structural channel with a rib. In this paper, we clarify the effects of constraint conditions on the undesirable deformation of the rib formed on the structural channel by finite element analysis. The process of rib forming is described as follows: (1) a structural channel is set on a die, (2) forming tools hold the web and the flange of the structural channel near the rib is formed, and (3) a punch moves toward the flange opening side from the web side. Warpage occurs because of the in-plane bending of the flange and the drawing of the web; therefore, holding the flange edge is an effective way of decreasing the warpage.

Key words: bending, forming property, reinforcement, solid structure, shear strain, rib, structural channel.

1. 緒言

チャンネル材は重量に対して断面2次モーメントが大きいため、材料費低減や軽量化を目的として、建築物や産業用設備などの構造用部材として広く用いられている。しかし、チャンネル材は横断面開口側が閉じるあるいは開く向きには剛性が低いため、このような向きに力がかかりその力が許容できない場合には、Fig. 1(a)に示すように補強を溶接することが多い。そこで、この溶接工程の省略を目的とし、チャンネル材への補強の代替構造としてFig. 1(b)に示すようなリブを成形し、一体構造とすることで溶接補強部材を省略できる構造を考案した。

薄板からなる構造用部材においては、板材の一部を張出すなどしてリブを成形することで高剛性化を図ることがあ

る¹⁾。また、自動車などでは外側のパネルに必要な最小限の補強を施して強度剛性を持たせるモノコックボディが広く採用されている。チャンネル材への成形については、突き曲げ方式による薄肉チャンネル材の曲げ加工²⁾、均等曲げにおける断面形状の変化に影響を及ぼす因子の明確化³⁾や、引張曲げにおける断面形状の2次変形⁴⁾についてなどの検討がなされているが、チャンネル材そのものにリブを成形する報告はなされていない。

そこで本報告では、Fig. 1(b)に示す構造の成形方法にお

Fig. 1 Structural channels with reinforcement

* (株)日立製作所生産技術研究所 〒244-0817 横浜市戸塚区吉田町 292
Production Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.
292 Yoshida-cho, Totsuka-ku, Yokohama 244-0817, Japan.

** (株)日立製作所都市開発システム社 〒312-8506 ひたちなか市市毛 1070
Urban Planning and Development Systems Company, Hitachi, Ltd.
1070 Ichige, Hitachinaka-shi 312-8506, Japan.

ける基礎的な加工特性を把握するための検討として、チャンネル材の拘束条件が不整形に及ぼす影響を、有限要素解析により明らかにする。

2. 成形方法および成形条件

Fig. 2 にチャンネル材へリブを成形する方法の概略を示す。チャンネル材をダイの上に置いた状態で、パンチをウェブ面側から z 軸方向に押込みリブを成形する。この時、ウェブ押えにてウェブ面外への変形を拘束し、フランジ押えにてフランジ面外への変形を拘束することで、リブ成形部近傍の不整形変形を抑制する。

Fig. 3 に本報告において検討するチャンネル材の横断面と長手方向断面の形状寸法を示す。**Fig. 3(a)**はリブ成形前のチャンネル材の横断面形状である。リブ成形前のチャンネル材は板材を曲げて製作することを想定しているため板厚は一様である。リブ成形後におけるウェブの長手方向断面は、**Fig. 3(b)**に示す形状とした。

Fig. 4 に解析モデルを示す。本解析モデルは対称性を考慮した 1/4 モデルであり、リブ成形位置は全長 1000mm の

Fig. 2 Schematic illustration of rib forming on structural channel

Fig. 3 Geometrical dimensions of structural channel

Fig. 4 Finite element model for rib forming

チャンネル材の長手方向中央部に相当する。本報では、ウェブをはさんでパンチと対向するカウンタパンチの他、フランジ先端部の面内方向への変形を拘束するフランジ先端押え、ウェブホルダから x 軸方向外側に離れた位置でウェブを z 軸方向に押込むプッシャを用いた。パンチ形状は **Fig. 3(b)**に示したリブ形状を転写させた台形形状であり、パンチ押込み量 D_p は 30mm である。なお、カウンタパンチは、パンチと等間隔を保ったまま z 軸方向に移動させた。また、フランジ先端押えの肩半径をフランジ先端押え肩半径 R_e とし、リブ成形部近傍におけるフランジ先端押え同士の x 軸方向の間隔をフランジ先端押え間隔 C_e とした。そして、ダイの x 軸方向端部位置を基準としたプッシャ x 軸方向の中心位置をプッシャ押込み位置 L_r とした。

Table 1 に成形条件を示す。検討条件 1 では基本的な加工特性を検討するため、フランジ先端押えおよびプッシャを用いていない。また、検討条件 2 ではフランジ先端押えの影響を検討するため、プッシャは用いず、フランジ先端押え間隔 C_e およびフランジ先端押え肩半径 R_e をパラメータとし、各々 3 水準を取った。そして、検討条件 3 ではプッシャの影響を検討するため、フランジ先端押えを用いた状態でプッシャ位置 L_r とプッシャ押込み量 D_r をパラメータとし、各々 3 水準を取った。なお、パンチストローク S_p とプッシャストローク S_r の関係は **Fig. 5** に示す通りである。

Table 1 Conditions for rib forming

Examination no.	1	2	3
Radius of flange edge holder R_e /mm	-	10, 15, 20	10
Clearance of flange edge holder C_e /mm	-	60, 100, 140	60
Pushing point L_r /mm	-	-	100, 200, 300
Pusher displacement D_r /mm	-	-	1, 3, 5

Fig. 5 Relationship between punch stroke and pusher stroke

Fig. 6 Piecewise linear S-S curve of SS400

数値解析のソルバには汎用有限要素解析ソフト LS-DYNA ver.971 を用いた。動的陽解法によるリブの成形解析を行った後、静的陰解法によるスプリングバック解析を行った。チャンネル材は一般構造用圧延鋼材 SS400 を想定しており、材料モデルは von Mises の降伏関数を用いた Fig. 6 に示す多直線近似の弾塑性体でヤング率 E を 206GPa とし、要素は 8 節点ソリッドとした。なお、リブ成形前のチャンネル材は曲げ部を含め、初期応力および初期ひずみは 0 とした。パンチ、ダイなどの成形工具は剛体とし、要素は 8 節点ソリッドとした。パンチ、カウンタパンチおよびプッシャは z 軸方向に強制変位を与え xy 軸方向の並進と xyz 軸周りの回転を拘束した。そして、その他の成形工具は xyz の並進と回転の 6 自由度を拘束した。チャンネル材と成形工具との摩擦係数は 0.1 と設定した。なお、予備的な実験により、本解析モデルの妥当性を確認した⁵⁾。

3. 結果および考察

3.1 基本的な加工特性

Fig. 7 に検討条件 1 におけるリブ成形前後の形状を重ねて示す。リブ成形により不整形変形である長手方向の反りおよび引込みが発生した。そこで、反り量の評価指標としてリブ成形部を挟んだウェブ面のなす角 θ_w の変化量をウェブ反り量 $\Delta\theta_w (=180^\circ - \theta_w)$ とした。そして、引込み量の評価指標としてリブ成形部中心から x 軸方向に 200mm の位置におけるウェブの x 軸方向引込み量をウェブ引込み量 Δl_w として評価した。

Fig. 8 に検討条件 1 におけるパンチストローク S_p にもなうウェブ反り量 $\Delta\theta_w$ およびウェブ引込み量 Δl_w の変化を示す。 S_p の増加にともない、 $\Delta\theta_w$ および Δl_w は大きくなった。また、 $\Delta\theta_w$ と Δl_w はともに、 $S_p=17\text{mm}$ 付近において変化率が低減した。

Fig. 9 に検討条件 1 における成形工具の反力 - パンチストローク線図を示す。ここで、1 つ目の添え字は工具名 (p: パンチ, w: ウェブ押え, f: フランジ押え)、2 つ目の添え字は分力の方向を表しており、絶対値を取り評価した。 z 軸方向パンチ反力 F_{pz} はパンチストローク $S_p=10\text{mm}$ 付近まで増加し、その後 $S_p=20\text{mm}$ 付近までなだらかに減少するが、その後は再び増加した。 y 軸方向フランジ押え反力 F_{fy} は $S_p=5\text{mm}$ 付近まで増加した後は、ほぼ一様であった。 z 軸方向ウェブ押え反力 F_{wz} は $S_p=10\text{mm}$ 付近まで増加した後はほぼ一定となるが、 $S_p=17\text{mm}$ 付近から減少した。また、これとは逆に x 軸方向ウェブ押え反力 F_{wx} は、 $S_p=17\text{mm}$ 付近から増加した。

Fig. 8 においてパンチストローク S_p にもなうウェブ反り量 $\Delta\theta_w$ の絶対値が大きくなったのは、主にフランジ面内の曲げと、ウェブの引込みによるものであると考える。リブ成形部 x 軸方向近傍における zx 面内の変形拘束が、ウェブはダイとウェブ押えの上下 2 方向であるのに対し、フランジはウェブ押えの上側 1 方向であり、下側がフリーである。そのため、パンチ押込み部を中心として、フランジが面内方向に曲がる。さらに、パンチ押込みによるウェブ x 軸方向の張力によりウェブ側が引込まれるため、チャンネル材全体としての反りが増幅される。このため、ウェブ押えによるウェブ面外への変形拘束と、フランジ押えによ

Fig. 7 Comparison between before and after rib forming on examination no.1

Fig. 8 Change of warpage angle of web and web drawing length with punch stroke on examination no.1

Fig. 9 Reaction force - punch stroke curve with variation of forming tools and direction on examination no.1

るフランジ面外への変形拘束のみでは長手方向に反りが発生する。

Fig. 8 においてウェブ引込み量 Δl_w の変化率が $S_p=17\text{mm}$ 付近で小さくなったのは、ウェブ反り量 $\Delta\theta_w$ の絶対値が大きくなることによって、ウェブ押えとダイの間に引込まれる際の抵抗が急激に大きくなるためと考える。このことは、 $S_p=17\text{mm}$ 付近から x 軸方向ウェブ反力が増大することからも確認できる。また、 Δl_w に対応して $\Delta\theta_w$ の変化率が小さくなっていることは、前述のウェブの引込みが反りの要因の 1 つであることを裏付けている。

3.2 フランジ先端押えの影響

Fig. 10 に検討条件 2 におけるフランジ先端押え肩半径 R_e を変えた場合のフランジ先端押え間隔 C_e がウェブ反り量 $\Delta\theta_w$ に及ぼす影響を示す。いずれの R_e においても、 C_e が小さくなるに従い、 $\Delta\theta_w$ が 0° に近くなった。また、 R_e が小さくなるに従い、 $\Delta\theta_w=0^\circ$ に近くなった。

Fig. 11 に検討条件 2 におけるフランジ先端押え肩半径 R_e を変えた場合のフランジ先端押え間隔 C_e がウェブ引込み量 Δl_w に及ぼす影響を示す。 $C_e=100, 140\text{mm}$ では、 R_e およ

Fig. 10 Effects of clearance of flange edge holder on warpage angle of web with variation of radius of flange edge holder

Fig. 11 Effects of clearance of flange edge holder on web drawing length with variation of radius of flange edge holder

Fig. 12 Reaction force - punch stroke curve with variation of forming tools and direction on examination no.2

び C_e の影響はほとんどなかった。それに対し, $C_e=60\text{mm}$ では ΔL_w が低減し, また, R_e が小さくなるに従い ΔL_w が低減した。

Fig. 12 に検討条件 2 におけるフランジ先端押え肩半径 $R_e=15\text{mm}$, フランジ先端押え間隔 $C_e=100\text{mm}$ における成形工具の反力 - パンチストローク線図を示す。なお, 添え字は Fig. 9 と同様である (e: フランジ先端押え)。フランジ先端押えを用いた場合では, z 軸方向パンチ反力 F_{pz} の落ち込みがなくなるとともに, y 軸方向フランジ押え反力 F_{fy} がパンチストローク $S_p=12\text{mm}$ 付近から増加した。また, z 軸方向ウェブ押え反力 F_{wz} は $S_p=10\text{mm}$ 付近まで, z 軸方向フランジ先端押え反力 F_{ez} は $S_p=5\text{mm}$ 付近まで増加した後, ほぼ一定となった。

検討条件 2 におけるフランジ先端押え肩半径 R_e を変えた場合のフランジ先端押え間隔 C_e が成形工具の最大反力に及ぼす影響を次に記す。最大 z 軸方向パンチ反力 F_{pzmax} , 最大 y 軸方向フランジ押え反力 F_{fymax} とともに, C_e が小さくなるに従い大きくなり, R_e が小さくなるに従い大きくなった。また, 最大 z 軸方向ウェブ押え反力 F_{wzmax} は C_e が小さくなるに従い小さくなり, 最大 z 軸方向フランジ先端押

Fig. 13 Distribution of shear strain on flange in zx plane

Fig. 14 Effects of clearance of flange edge holder on maximum shear strain in zx plane with variation of radius of flange edge holder

え反力 F_{ezmax} は C_e が小さくなるに従い大きくなったが, いずれも R_e の影響はほとんど受けなかった。

Fig. 13 に検討条件 2 におけるリブ成形部近傍におけるフランジ面内のせん断ひずみ γ_{zx} の分布, Fig. 14 に検討条件 2 におけるフランジ先端押え肩半径 R_e を変えた場合のフランジ先端押え間隔 C_e がフランジ面内の最大せん断ひずみ γ_{zxmax} に及ぼす影響を示す。リブ成形部の斜辺部下側に於いて大きな γ_{zx} が発生した。そして, C_e が小さくなるに従い, γ_{zxmax} が大きくなった。また, R_e が小さくなるに従い, γ_{zxmax} が大きくなった。

Fig. 10 に示した結果となったのは, リブ成形部近傍におけるフランジ面内の変形が, Fig. 13, 14 に示したように主に曲げからせん断に変わったためと考える。フランジ先端押えを用いることで, リブ成形部 x 軸方向近傍における zx 面内の変形を 2 方向から拘束することができる。さらに, C_e を小さくすることで, パンチおよびウェブ押えとフランジ先端押えによって発生するモーメントの向きから, zx 面内の変形を拘束する領域が広くなる。このため, C_e が小さくなると最大 z 軸方向パンチ反力 F_{pzmax} および最大 z 軸方向フランジ先端押え反力 F_{ezmax} は大きくなるが, 最大 z 軸方向ウェブ押え反力 F_{wzmax} は小さくなる。ただし, C_e が小さすぎるとリブ成形部直下のフランジにおいても z 軸方向の変形が拘束され, 成形できなくなるので C_e を適切な寸法とする必要がある。また, $C_e=100, 140\text{mm}$ では, C_e が小さくなるに従い $\Delta\theta_w$ が小さくなったにもかかわらず, ウェブ引込み量 ΔL_w はほぼ一定であった。これは, 必ずしもフランジの曲げによってウェブの引込みが発生するわけではないことを示している。

3.3 プッシャの影響

Fig. 15 に検討条件 3 におけるプッシャ押込み量 D_r を変えた場合のプッシャ位置 L_r がウェブ反り量 $\Delta\theta_w$ に及ぼす影響を示す。 $D_r=1\text{mm}$ では位置 L_r が小さくなくても $\Delta\theta_w$ はほ

Fig. 15 Effects of pushing point on warpage angle of web with variation of pusher displacement

Fig. 16 Effects of pushing point on web drawing length with variation of pusher displacement

Fig. 17 Effects of pushing point on maximum opening ratio of flange edge with variation of pusher displacement

とんど影響受けなかった。 $D_r=3, 5\text{mm}$ では、 L_r が小さくなるに従い $\Delta\theta_w$ は小さくなった。そして、 D_r, L_r の組合せによっては $\Delta\theta_w$ が 0° より小さくなった。また、 D_r が大きくなるに従い $\Delta\theta_w$ は小さくなった。

Fig. 16 に検討条件 3 におけるプッシャ押込み量 D_r を変えた場合のプッシャ位置 L_r がウェブ引込み量 Δl_w に及ぼす影響を示す。 $D_r=1\text{mm}$ では L_r が小さくなくても Δl_w はほとんど影響を受けなかった。 $D_r=3, 5\text{mm}$ では、 L_r が小さくなるに従い Δl_w は小さくなった。また、 D_r が大きくなるに従い Δl_w は小さくなった。

プッシャを用いた場合の成形工具の反力は、 Fig. 12 に示したプッシャを用いていない場合の反力とほぼ同じであった。また、プッシャ押込み量 D_r およびプッシャ押込み位置 L_r を変えても、 z 軸方向パンチ反力 F_{pz} 、 y 軸方向フランジ押え反力 F_{fy} 、 z 軸方向ウェブ押え反力 F_{wz} および z 軸方向フランジ先端押え反力はほとんど変わらなかった。なお、最大 z 軸方向プッシャ反力 F_{rzmax} は $5\sim 50\text{kN}$ 程度であった。

Fig. 17 に検討条件 3 におけるプッシャ押込み量 D_r を変えた場合のプッシャ位置 L_r が最大フランジ先端開口率 Δw_{max} に及ぼす影響を示す。ここでフランジ先端開口率とは、リブ成形部中心位置から x 軸方向に 200 から 500mm

の範囲におけるフランジ先端開口率 $\Delta w_e = (w_e - w_{e0}) / w_{e0}$ (w_{e0} : 初期フランジ先端幅、 w_e : リブ成形後フランジ先端幅) である。 Δw_{max} が生じた位置は、どの条件においても L_r 近傍であった。 $D_r=1\text{mm}$ では L_r によらず Δw_{max} がほぼ 0 であった。 $D_r=3, 5\text{mm}$ では、 $L_r=100\text{mm}$ での Δw_{max} が一番大きく、次いで $L_r=300\text{mm}$ での Δw_{max} が大きく、 $L_r=200\text{mm}$ での Δw_{max} が一番小さかった。また、 D_r が小さくなるに従い Δw_{max} は小さくなった。

Fig. 15 に示す結果となったのは、プッシャを押込むことでリブ成形時に生じる反りとは逆方向に曲げモーメントを付加し、フランジ面内の曲げを付与するとともに、ウェブの引込みを抑制するためである。しかし、チャンネル材に対して縮みフランジ方向に曲げを付与することで、横断面内におけるウェブに反りが生じ、さらに、縮みフランジ曲げ曲率が大きくなると、ウェブ曲率が大きくなる³⁾。つまり、 L_r が小さいか D_r が大きい場合、縮みフランジ曲げ曲率が大きくなるため、最大ウェブ先端開口率 Δw_{max} が大きくなる。これに対し、 $L_r=300\text{mm}$ では Δw_{max} が $L_r=200\text{mm}$ より大きくなっており、前述の説明と矛盾しているように見える。これは、 $L_r=300\text{mm}$ がチャンネル材長手方向端部であり、フランジ先端開口方向の剛性が低いため、ダイの x 軸方向端部からの距離の影響より、チャンネル材端部からの距離の影響が大きくなるためであると考えられる。

4. 結 言

チャンネル材へリブ成形における基礎的な加工特性を把握するための検討として、チャンネル材の拘束条件が不整形変形に及ぼす影響について、有限要素解析を用いて明らかにした。得られた結果を以下に示す。

- 1) 本成形方法では、リブ成形部近傍にけるウェブおよびフランジ面外への変形拘束だけでは、長手方向の反りが発生する。また、これはフランジ面内の曲げと、ウェブの引込みに起因する。
- 2) フランジ先端押えを用いることで、フランジ面内の変形を曲げからせん断が支配的な変形とし、長手方向の反りを低減できる。
- 3) プッシャを用いることで、長手方向の反りを調整できる。また、フランジ先端開口率を低減するためには、プッシャによる曲げ曲率を小さくする必要がある一方で、フランジ長手方向端部から遠ざける必要がある。

参 考 文 献

- 1) 落合和泉：薄板構造物の加工，(1998)，11-15，日刊工業新聞社。
- 2) 落合和泉・篠原博・福山裕幸：塑性と加工，**10**-103(1969)，591-597。
- 3) 上田雅信・上野恵尉・小林勝：塑性と加工，**24**-272(1983)，954-959。
- 4) 上田雅信・上野恵尉・小林勝：塑性と加工，**25**-284(1984)，793-798。
- 5) 牧山高大・寺前俊哉・上野恵尉・菅野篤・島田勝博：平成 20 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2008)，267-268。