

(技術資料)

大型鍛鋼スローの鍛造技術

Forging Process for Large Crank Throws



有川剛史*1
Takefumi ARIKAWA



野崎孝彦*1
Takahiko NOZAKI



堀江祥平*2 (博士(工学))
Dr. Shohei HORIE



香川恭徳*3
Yasunori KAGAWA



柿本英樹*4 (博士(工学))
Dr. Hideki KAKIMOTO

A large build-up-type crankshaft, used in diesel engines for low-speed vessels, consists of eccentric parts called "crank throws" and shaft parts called "journals," each part being fabricated separately and then assembled into the crankshaft. Large crank throws are generally formed by a method called fold-forging. Fold-forging has the advantage of being able to press large-sized throws with a relatively small forging load; however, it suffers from low material yield due to large, unwanted cutting stock required for removing overlapping defects generated during the forging process. This study, based on experiments and numerical simulations, aims at developing an improved forging process that can both prevent defects and reduce cost.

まえがき = 低速船用ディーゼルエンジンに使用される大型の組立型クランク軸は、クランクスローと呼ばれる偏心部位とジャーナルと呼ばれる軸部を各々で製造し、これらを組み立てることで最終的に1本のクランク軸となる。大型のクランクスローは、その大きさから型鍛造ではなく、一般的に数百mm以上の板厚がある段付板を折り曲げ加工し、クランクスロー形状に成形する。

この折り曲げ工程中に曲げ内面に表面疵(きず)が発生することがある。表面疵が発生すると製品廃却に至る場合もあるため、必要以上の機械加工代を設けて折り曲げ加工を行っていた。一方で、曲げ加工に関する研究は数多くあるが、その多くが10mm以下の板厚を対象としたものであり^{1)~3)}、10mm以上の板厚に対する曲げ加工中の変形挙動や曲げ内面での表面疵の発生について調査した事例はほとんどない。

そこで、折り曲げ加工中の表面疵の抑制を目指して、折り曲げ工程中の表面疵の発生挙動について調査した。さらに、歩留り向上を目的にクランクスロー成形工程の適正化についても検討し、実機にてその効果を検証した。

1. 大型クランクスローの成形工程とその課題

1.1 大型クランクスローの成形工程

大型鍛鋼クランクスローの成形工程を図1に示す。高温に加熱した鋼塊を鍛造し、T字型の段付板(以下、荒地という)を成形する。その後、折り曲げ工程(曲げ工程-たたみ込み工程)およびウェブ鍛伸工程を経てクランクスロー形状に成形する。なお、T字の段付板状の荒地を成形するのは折り曲げ加工のみで、クランクスローのウェブ部とピン部を成形するためである。

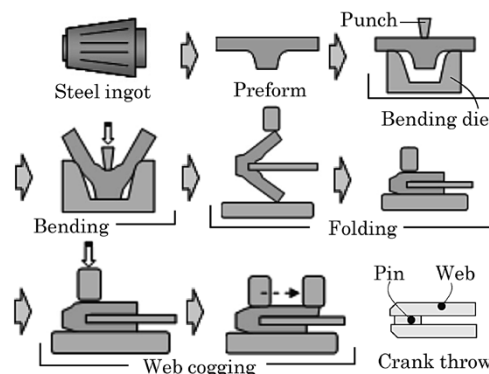


図1 クランクスローの成形工程
Fig. 1 Forming process of crank throw

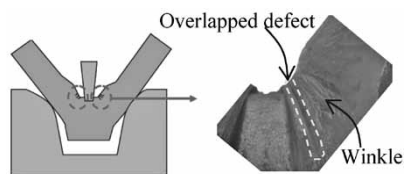


図2 かぶさり疵
Fig. 2 Overlapped defect

1.2 曲げ工程で発生する表面疵

曲げ工程で発生する実際の表面疵とは、図2に示すように曲げ内面側に発生する筋状の疵のことをいう。この表面疵はかぶさり疵と呼ばれ、鍛錬終了まで残存する。疵が深い場合には製品部にまで疵が入り込み、製品廃却に至る場合もある。そのため、かぶさり疵の発生挙動を明らかにし、その抑制方法を検討することが必要である。

1.3 たたみ込み不良に伴う表面疵および非対称曲がり

たたみ込み不良の事例を図3に示す。前工程の曲げ形状が不適切な場合、板材は中板挿入部から変形せず、

*1 鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 技術開発部 *2 鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 鍛圧部 *3 鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 鍛圧部 (現 業務管理部)
*4 技術開発本部 材料研究所

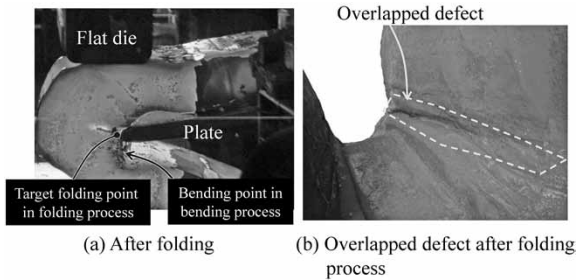


図3 たたみ込み工程での非対称曲がり
Fig. 3 Asymmetric deformation in folding process

曲げ加工時の曲がり点から変形する。このような変形が生じると、曲げ工程と同様にかぶさり疵が発生する。また、たたみ込み後の上下の長さが非対称になるため、製品寸法を確保するには必要以上の機械加工代を設けなければならない。かぶさり疵の発生および非対称曲がりを防止するためには、曲げ形状の適正化も必要になる。

2. 曲げ工程でのかぶさり疵の発生挙動

2.1 小型実験

曲げ工程での荒地の変形挙動およびかぶさり疵の発生挙動を確認するため、小型実験を行った。実験材形状および曲げ金型の形状を図4に示す。実験材を1,250℃に加熱し、1時間保持した後に曲げ加工を行った。実験材にはS45Cを用いた。曲げ加工後は、実験材を室温まで冷却した後、幅方向中央で切断した。

小型実験での変形挙動を図5(a)に示す。荒地の板厚変化部が曲がり点となって変形する様子が確認された。この変形挙動は実工程の変形挙動と同様であった。小型実験においても実工程の変形挙動が再現できるといえる。一方で、図5(b)に示すように、実工程で発生するようなかぶさり疵は再現されなかった。変形挙動は実工程と同様であることから、小型実験と実工程で違いのある荒地に注目し、実工程で成形された荒地の調査を行った。

2.2 実工程で製造した荒地の調査

小型実験ではかぶさり疵を再現できなかった。その原因を検討するため、実際の荒地の成形工程および荒地形状を調査した。荒地の成形方法を図6に示す。まず、鋼塊をブロック状に成形する。その後、両端を平金敷で压下し、逐次鍛造することでT字型の荒地を成形する。

実際の荒地を図7に示す。全体的な形状は小型実験と大きな差異がないが、荒地表面に注目すると板厚変化部の表面に15 mm程度の段差が形成されていることが分かる。この表面段差は、逐次鍛造した際に形成されたと考えられる。表面段差の形成位置は曲げ加工での曲がり点周辺にあり、かぶさり疵の発生にこの表面段差（以下、初期欠陥という）が影響を及ぼしたと推察される。

2.3 かぶさり疵の再現実験

荒地表面の初期欠陥がかぶさり疵の発生に及ぼす影響を確認するため、改めて小型実験を行った。実験材形状を図8に示す。初期欠陥位置の影響も確認するため、2水準の初期欠陥位置（0 mm、10 mm）を有する実験材（No.1、No.2）を用意した。初期欠陥深さは1 mmと

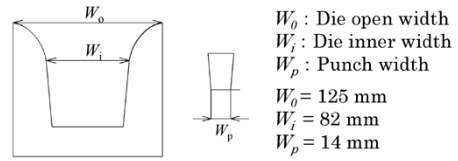
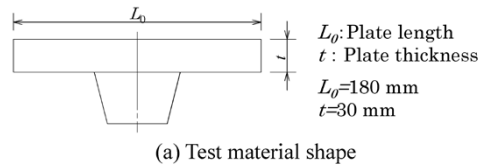


図4 実験材形状と曲げ金型の形状
Fig. 4 Shapes of test specimen and bending die

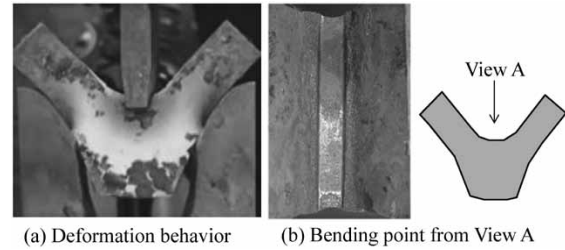


図5 小型実験での変形挙動
Fig. 5 Deformation behavior of bending process in small size test

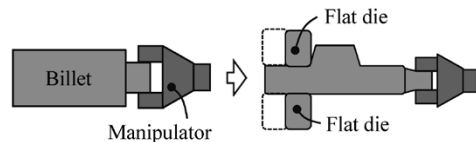


図6 荒地の成形方法
Fig. 6 Forming process of preform

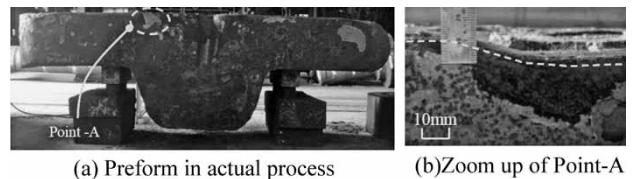


図7 実際の荒地
Fig. 7 Photos of actual preform

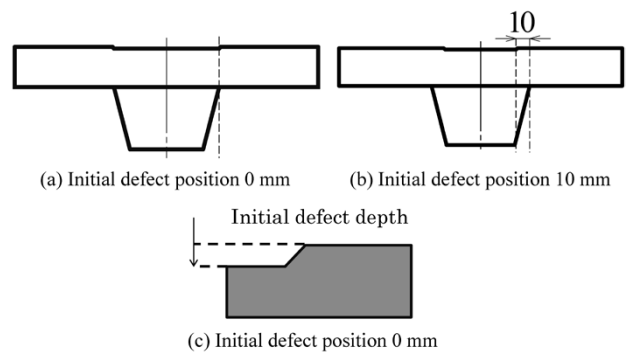


図8 実験材形状
Fig. 8 Shapes of test specimens

した。実験方法は2.1節と同様とした。曲げ加工後は試験材を幅中央で切断し、切断面を研磨して初期欠陥があった部位でのかぶさり疵発生の有無を確認した。

曲げ加工後の実験材の切断面写真を図9に示す。各試験材において、初期欠陥位置にかぶさり疵が発生していることが確認できる。初期欠陥を起点に疵周辺の肉が盛り上がり、欠陥部が内部に巻き込まれるような変形が見られる。曲げ加工前後の疵深さを図10に示す。縦軸は

曲げ加工前の初期欠陥深さ、および加工後のかぶさり疵深さを示している。初期欠陥位置によってかぶさり疵深さが異なることが分かる。また、かぶさり疵の深さが初期欠陥深さよりも伸長していることが分かる。この結果は、曲げ加工によって初期欠陥がかぶさり疵になるだけでなく、かぶさり後に板厚方向に疵が伸長することを示している。

2.4 かぶさり疵伸長のメカニズム

小型実験の結果、荒地表面の初期欠陥部がかぶさり疵となるだけでなく、疵が板厚方向に伸長することも確認された。そこで、かぶさり疵が板厚方向へ伸長するメカニズムについて検討するため、数値シミュレーションを行った。荒地表面の解析モデルは平滑とし、その他の解析条件は小型実験と同様とした。なお、数値シミュレーションソフトには汎用有限要素解析ソフトFORGE (TRANSVALOR製)を使用した。

実験材No.1およびNo.2における初期欠陥部に相当する位置での曲げストロークとひずみの関係を図11に示す。ここで、 ε_c は曲げ方向ひずみを、 ε_t は板厚方向ひずみを示す。板表面では、曲げ加工に伴って曲げ方向に圧縮ひずみが発生している。一方で、板厚方向には伸びひずみが発生している。この板厚方向の伸びひずみに伴

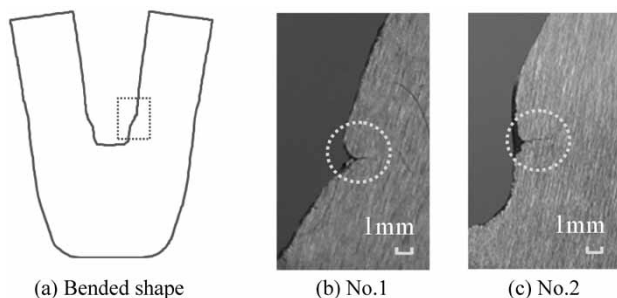


図9 実験材の切断面
Fig.9 Cross sectional views of test specimen

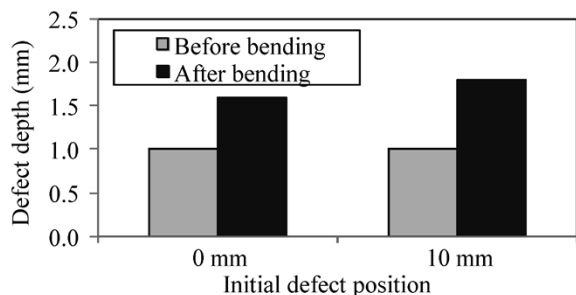


図10 曲げ加工前後のかぶさり疵深さ
Fig.10 Depth of overlapped defects before and after bending

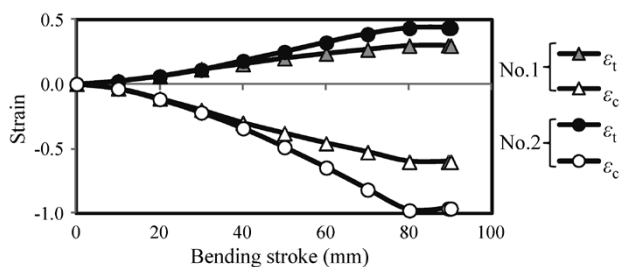


図11 曲げストロークとひずみの関係
Fig.11 Relationship between bending stroke and strains
(ε_t : thickness direction strain, ε_c : bending direction strain)

て、かぶさり疵が伸長したと考えられる。また、初期欠陥位置0 mmに対して10 mm位置の伸びひずみ量が大きく、このひずみ量の違いによって、最終的に10 mm位置でのかぶさり疵深さが伸長したと考えられる。

ここで、板厚方向の引張ひずみの発生メカニズムについては以下のように考えることができる。曲げ方向ひずみを ε_c 、板厚方向ひずみを ε_t 、板幅方向ひずみを ε_w とすると、体積一定則により一般的に式(1)が成り立つ。

$$\varepsilon_c + \varepsilon_t + \varepsilon_w = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

さらに、幅の広い板の曲げ変形では、板縁に近い部分を除くとほぼ平面ひずみ状態と考えられる⁴⁾ため、曲がり起点部では式(2)の関係が成立する。

$$\varepsilon_c + \varepsilon_t = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

曲げ方向ひずみは圧縮ひずみとなるため、板厚方向に伸びひずみが発生すると考えられる。2.1節で示したように荒地表面が無欠陥の場合、かぶさり疵の発生は抑制できる。そのため、曲げ工程でのかぶさり疵抑制には曲げ加工前の初期欠陥除去が必須になると考えられる。

3. 曲げ工程の適正化

3.1 曲げ形状適正化のコンセプト

かぶさり疵を防止するためには、荒地表面の初期欠陥を曲げ加工前に除去することが必須であることが分かった。しかしながら、曲げ形状が不適切な場合には、1.3節で示したように、たたみ込み工程で変形不良が生じ、非対称曲がりが発生する。そこで、たたみ込み工程で適切な変形を実現するため、曲げ工程の適正化を検討した。

たたみ込み工程の形状不良は、曲げ工程終了時の曲がり起点とたたみ込み工程で曲げたいポイントが乖離(かいり)していることに起因する。つまり、適正な曲げ形状とは、2箇所曲げ起点が存在するようなU字型の形状ではなく、曲げ起点が1箇所であるV字型の形状に変形させることであると考えた。ここで、曲げ形状適正化のコンセプトを図12に示す。V曲げを実現するには、曲げ部をなるべくポンチ片部に近づけた方がよい。そのため、「金型とポンチが形成するクリアランス($W_i - W_p$)」と「板厚(t)」とが同一になることがV字変形を実現する条件になると考えた。そこで、V曲げ加工条件を式(3)のように設定した。

$$\alpha = 2t / (W_i - W_p) \geq 1.0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

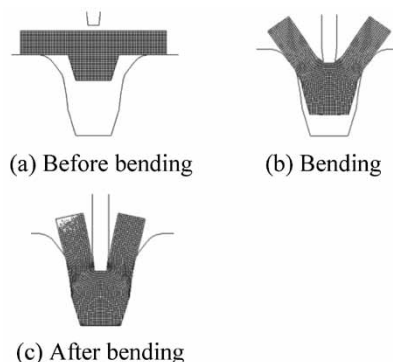


図12 V曲げ加工のコンセプト
Fig.12 Concept of V-bending process

3.2 V曲げ加工条件の検証

V曲げ加工条件の妥当性を検証するため、小型実験を行った。なお、本実験では板厚 t のみを変化させた。また、実操業に近い条件とするため、2.1節で実施した実験の4倍の大きさの実験材および金型を用いて実験を行った。なお、実験材の表面は平滑なままとした。実験材を1,250℃に加熱して1時間保持した後に曲げ加工を行った。実験終了後、実験材を室温まで冷却させた後、幅方向中央で切断し、曲げ起点とポンチ肩部までの距離 L を測定した。

パラメータ α と L との関係を図13に示す。パラメータ α が1.00に近づくに伴って L が0に近づくことが分かる。 $\alpha = 1.00$ のときの曲げ変形の様子を図14に示す。曲げ加工開始と同時にポンチ肩部から離れた位置で曲がり始めることが分かる。ポンチの押し込み量が大きくなるに伴い、金型とポンチ間のクリアランスが小さくなるため、曲がりながら曲げ起点がポンチに接触し、V字形状を形成している。 $\alpha = 0.85$ および $\alpha = 1.00$ のときの曲げ加工形状を図15に示す。 $\alpha = 0.85$ の場合は曲げ起点が左右

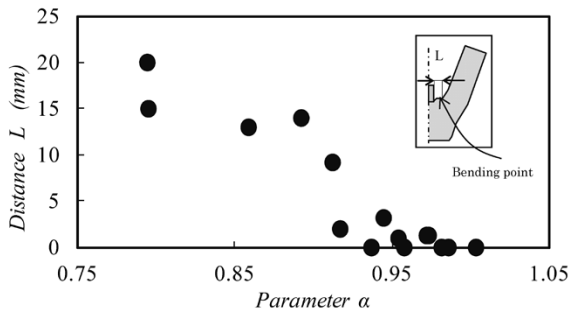


図13 パラメータ α とポンチ肩部から曲げ起点までの距離
Fig.13 Relation between the parameter α and the distance of bending point from the tap-die pressing

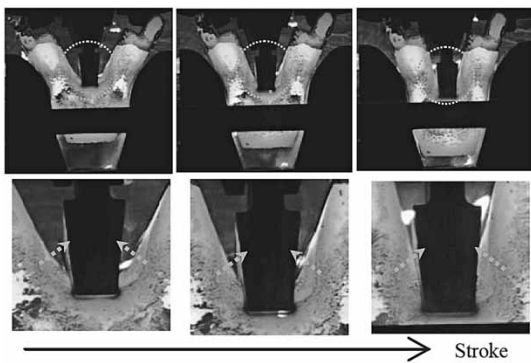


図14 $\alpha = 1.00$ のときの曲げ変形の様子
Fig.14 Condition of bending deformation ($\alpha = 1.00$)

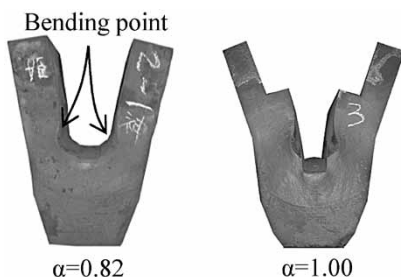


図15 曲げ加工形状
Fig.15 Bending shape

両方に存在している。一方で、 $\alpha = 1.00$ ではV字状に変形している。本結果は、V曲げ加工条件が適正であることを示唆している。また、V曲げの実現により、たたみ込み工程での非対称曲がりが防止できると考えられる。

4. クランクスローの成形形状予測

4.1 変形形状予測のコンセプト

2章および3章において、かぶさり疵の抑制およびたたみ込み工程での非対称曲がりの抑制について検討した。一方で、成形工程での歩留りを向上させるためには、荒地形状から成形終了時の形状を予測し、適正な荒地寸法を決定する必要がある。

そこで、荒地形状から成形終了時のクランクスロー形状、具体的には成形終了時の長さ L_f の予測式を構築した。クランクスロー長さ予測のコンセプトを図16に示す。変形形状予測は2ステップで行う。まず、荒地から折り曲げ加工終了時の長さ L_b を予測する。ここで、曲げ加工終了時の長さ L_b とたたみ込み後の長さは同等であるという仮定をおいた。つぎに、ウェブ鍛伸工程での伸び量 ΔL を予測し、クランクスローの最終長さ $L_f = L_b + \Delta L$ を予測することにした。

4.2 折り曲げ形状予測およびウェブ伸び量の予測

折り曲げ加工前後の形状変化を予測するため、数値シミュレーションを行った。解析により曲げ加工前後の形状変化データを採取し、曲げ工程での形状変化を予測する実験式を作成した。図17に示す形状変化に基づいた折り曲げ形状の予測式を式(4)に示す。

$$L_b = H_1 + R \cos \theta \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 R は曲げの展開半径を示し、板厚 t と曲げ加工終了時の長さ L_b から逆算して決定する。 θ は曲げ加工後の開き角度を示している。また、 H_1 は荒地の段高さを示し、製品のピン寸法と板厚 t との兼ね合いから決定す

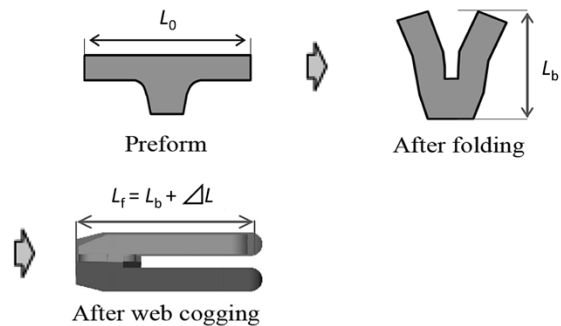


図16 クランクスローの長さ予測のコンセプト
Fig.16 Concept of deformation prediction of crank throw length

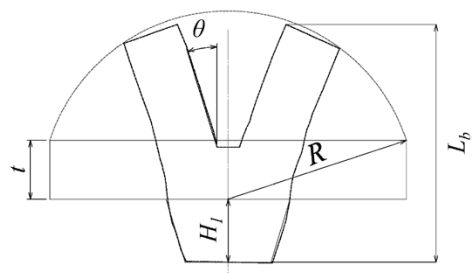


図17 曲げ加工後の形状変化
Fig.17 Deformed shape after bending

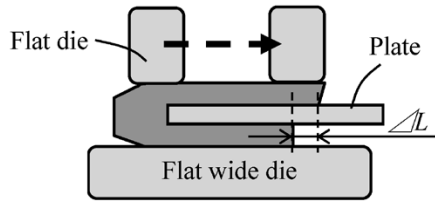


図18 伸び量の定義

Fig.18 Definition of amount of elongation in web cogging process

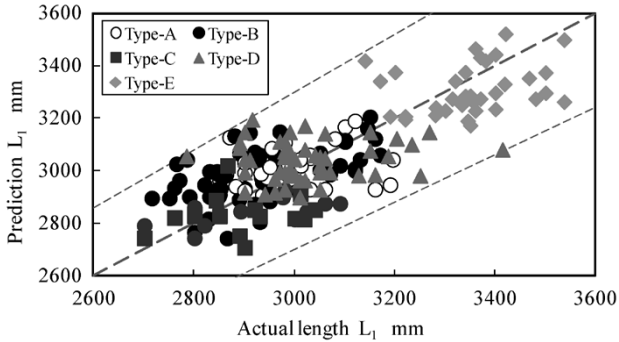


図19 ウェブ長さ L_f の予測値と実績値の比較

Fig.19 Comparison between predicted and measured web length L_f

る。なお、板厚 t は、あらかじめ決まっている曲げ金型寸法およびポンチ寸法から3.1節に示した $\alpha=1.00$ の条件をもとに決定する。

ウェブ鍛伸の鍛造形態および予測する伸び量を図18に示す。曲げ形状予測の場合と同様に、数値シミュレーションによって予測式を構築した。伸び量 ΔL の予測式を式(5)に示す。

$$\Delta L = \frac{(L_b - H_f) \times \Delta t}{(t - \Delta t)} \times \beta \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで Δt は圧下量を示している。また、伸び量の予測精度を向上するため、幅方向のメタルフローを考慮して、変形解析結果より求めた補正係数 $\beta=0.67$ を用いた。

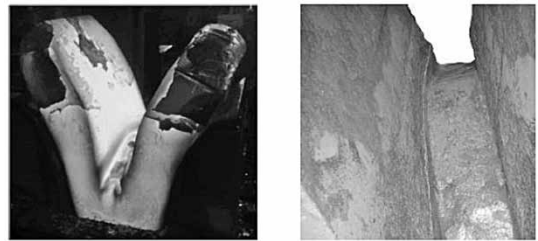
4.3 形状予測式の妥当性の確認

形状予測式の妥当性を確認するため、実工程で計測した成形終了後のクランクロー長さと予測式より求めた予測値 ($L_f = L_0 + \Delta L$) の比較を行った。比較結果を図19に示す。グラフには、成形終了時の長さの異なる5型式のデータを掲載している。どの型式においても予測値と実績値との差異は5%以内に収まっていることから、今回定義した形状予測式により成形終了時のクランクロー長さを適切に予測することが可能になったといえる。

5. 実工程への適用

これまでの検討結果を実際の工程設計に適用した。まず、曲げ加工前に荒地表面の初期欠陥をガス溶削などにより除去した。つぎに、曲げ加工条件はV曲げを実現できる $\alpha=1.00$ とした。また、形状予測式を使用して荒地の形状設計を行った。

実工程での曲げ成形後の外観および曲げ内面部の拡大写真を図20に示す。V曲げの実現とともに、曲げ内面のかぶさり疵が防止できていることが確認できる。また、たたみ込み工程の様子を図21に示す。V曲げの実現に伴



(a) Bending shape (b) Inner surface

図20 実機での曲げ成形の外観
Fig.20 Appearance of actual bending

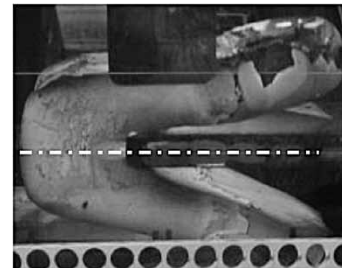


図21 実機でのたたみ込み工程
Fig.21 Folding process

い、たたみ込み工程での曲げ起点が中板挿入部となり、非対称曲がり防止できている。これらの結果、板厚および長さの機械加工代が適正化できるようになり、歩留りが向上した。

むすび=大型鍛鋼クランクローの成形工程における表面疵の抑制および歩留り向上を目的に、折り曲げ成形時の表面疵の発生挙動の明確化および成形工程の適正化について検討した。得られた結果を以下に示す。

- ・小型実験により、荒地表面の初期欠陥がかぶさり疵となることが分かった。また、曲げストロークに伴って、かぶさり疵が板厚方向に伸長することが分かった。
- ・数値シミュレーションの結果、曲げ加工中の曲がり点周辺で板厚方向に伸びひずみが発生することが確認された。本結果は、曲げ加工中にかぶさり疵が発生した場合、板厚方向に疵が伸長することを示している。
- ・小型実験より、板厚とポンチおよび曲げ金型のクリアランスを適正に選択することによってV曲げを実現できることを確認した。
- ・歩留り向上のため、荒地寸法から成形終了時のクランクロー長さを予測する形状予測式を構築した。実製品のクランクロー長さと予測値を比較した結果、±5%の精度で長さを予測できるようになった。
- ・実製品の工程設計にV曲げ条件および形状予測式を適用し、かぶさり疵および非対称曲がりを防止できることを確認した。また、成形後の機械加工代を適正化でき歩留りが向上した。

参考文献

- 1) 小川秀夫ほか. 塑性と加工. 1999, Vol.40, No.459, p.48-52.
- 2) 小川秀夫ほか. 塑性と加工. 2002, Vol.43, No.493, p.65-69.
- 3) 小川秀夫ほか. 職業能力開発大学校紀要. 2007, 36-A, p.71-74.
- 4) 鈴木 弘. 塑性加工. 1980, p.240-241.