

研究速報

研究速報

厚肉管のフィンパス成形における縁部変形の数値解析

Numerical Analysis of Fin-Pass Forming of Pipes with Heavy Gauge

木内 学*・王 飛舟*

Manabu KIUCHI and Feizhou WANG

1. はじめに

ロールフォーミング加工による電縫管の成形に際して、突き合わせ溶接部となる素板縁部の形状特性・寸法特性が溶接後の製品品質と緊密不可分な関係にあることはよく知られている。しかしながら、素板縁部の変形挙動は非常に複雑であり、特に、厚肉管のロール成形においては、その縁部の変形挙動が溶接部の高品質化を阻害する多くの問題を含んでいる。

筆者らは既に、厚肉管の成形過程のうち、ブレイクダウン成形における素板縁部の変形挙動について一連の近似数値解析を行い、その結果を報告してある¹⁾。ところで、電縫管の成形では、仕上げ成形段階すなわちフィンパス成形域に入ると、製品断面の正確な形成及びそのための形状修正が重要になる。通常、素板縁部の形状・寸法は必ずしも安定ではなく、フィンパス成形の条件により様々に変化する。そして、端面形状の変化や端面近傍の板厚の増加がその後に続く溶接工程に種々の影響を与える。現状では、これらの問題について、未だ十分明らかにされておらず、系統的な知識と情報が欠除している。

本報は、厚肉管のフィンパス成形における素板縁部の変形挙動を対象とし、剛塑性有限要素法で近似的な数値解析を行い、各種成形条件が素板縁部の形状・寸法に与える影響を解明することを目的としている。

2. 解析モデル及び解析条件

本研究では、前報と同じように、縁部の変形を平面ひずみ変形とみなして解析することとし、図1に示すような境界条件を設定した。すなわち、下ロール（下型）が固定されており、フィンロールと上ロール（上型）が同時に下方へ押し込まれてくるものとする。

*東京大学生産技術研究所 第2部

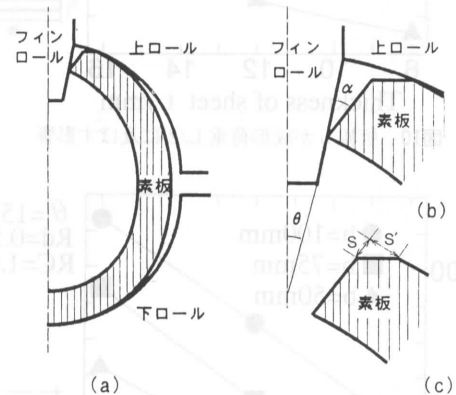


図1 解析モデル

表1 解析条件

材料	SS400 ($\sigma = 309 + 780 \bar{\epsilon} \text{ N/mm}^2$)			
製品直径 D (mm)	100.0			
板厚 t (mm)	8.0	12.0	18.0	25.0
フィン角度(半角) θ	10°	20°	30°	40°
初期接触角度 α	0°	10°	20°	30°
リダクション rd (%)	2.0	4.0	6.0	
S	0.2 * t			
S'	0.3 * t			

解析条件を表1にまとめて示す(図1(b)(c)参照)。素板の厚さ、フィンロールのフィン角度、素板端面とフィンロール面との初期接触角度、断面周長リダクションなどの条件因子について、それぞれ数段階の値を選び、それらを組み合わせた各種成形条件下で解析を行った。一般に、素板はブレイクダウン成形とクラスター成形を経て、縁外角部にはつぶれが残留している。本研究では、そのつぶれの寸法を $S = 0.2t$ 、 $S' = 0.3t$ と仮定する。なお、素材内

部のひずみ履歴を考慮していないことに注意されたい。

3. 解析結果及び考察

溶接前の成形仕上がり時点での素板縁部の変形及びその結果としての形状・寸法は溶接時の諸問題の出発点であると言える。以下、フィンパスにおける素板縁部の変形挙動及び形状・寸法の変化と各条件因子との関係について、解析結果を示しつつ、検討を行う。

3.1 素板縁部の変形挙動

各成形条件下で行った解析の結果から見ると、縁部の変形挙動と最も関係が深い条件因子はフィン角度 θ 及び素板端面とフィンロール面との初期接触角度 α である。図 2 には、 θ と α の変化による素板縁部の変形パターンの相違を示す。図から明らかなように、縁部の変形パターンは θ と α の組み合わせによって大きく異なる。

一般に、ロールから素板に加わる力は、フィンを通して素板端面から円周方向に圧縮する力 F_c と外から素板縁部を半径方向に押さえ込む力 F_r とに分けることができる(図 3 参照)。成分 F_c と F_r の割合を左右するのはフィン角度 θ である。すなわち、 θ が大きい場合には、成分 F_c の割合が大きく、逆に、 θ が小さい場合には、成分 F_r の割合が大きくなる。その結果、 θ が小さい時、素板縁部は安定な状態で曲げ変形を受けるが、 θ が大きくなると、大

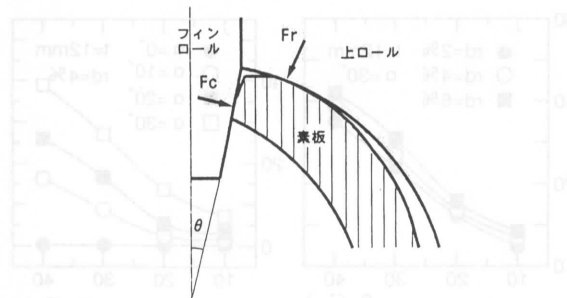


図 3 素板縁部に加わる力

きな周方向の圧縮力が存在するため、縁部に局部的なすえ込み変形が発生しやすい。しかしながら、図 2 から分かるように、このような傾向は絶対ではなく、縁部の変形は α からの影響も強く受ける。すなわち、 α が大きい時、素板端面とフィンロール面との間に生じる接触は進行しにくく、フィンロール面からの圧縮力は集中的に素板縁内角部に加わり、縁部の局部的な変形を助長する。特に、 θ も大きい場合は、素板縁内角部にパルジング及びフォールディングが発生し、次項で述べる縁部の板厚変化に大きな影響を与える。

更に、 α が大きい場合、縁部の外層部は表面からの拘束を受けないため、フィン付根のロールキャビティへ向かって流動し、縁外角部と上ロール面との接触が発生しやすくなり、当初より素板縁外角部に存在するつぶれの形状と寸法を大きく変化させ、形状を改善する効果がある。

他方、 α が小さい時、素板端面とフィンロール面との接触面積は急速に広がり、フィン角度 θ が大きくても局部的な変形が発生しにくい。その上、縁部の外層部は厳しい拘束を受け、ほとんど動けない状態になる。その結果、縁外角部のつぶれの形状と寸法の変化は僅かである。

3.2 素板縁部の形状と寸法の変化

本項では、上述の検討に基づいて、素板縁部の形状・寸法の変化と各条件因子との関係を具体的に示す。

図 4 は溶接面となる素板端面側におけるつぶれ寸法 S の減少率とフィン角度 θ との関係を示す。図から明らかなように、 θ の増加に伴う S の減少率は初期接触角度 α によって異なる。特に、 $\alpha = 0^\circ$ 時、 S の減少率は零に近づく(図 4 (b) 参照)。このような α の影響は図 5 により明確に示されている。一般に、 α が零になると、他の条件因子によらず、 S の減少率は僅かである。他方、 S の減少率は α の増加と共に増える傾向を示す。 θ と α の他に、板厚も S の減少率に大きな影響を与える。容易に理解できるように、素板が厚くなるに応じてロールからの押し込み力が増えていく。このことは縁部の局部的な変形を促進し、 S の

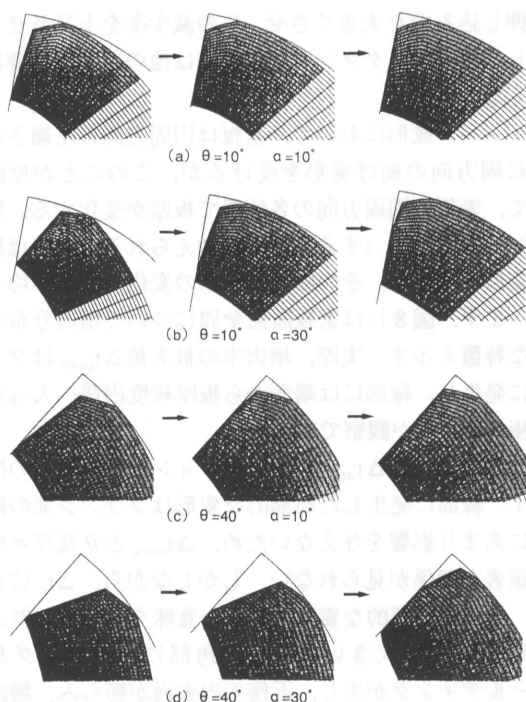


図 2 素板縁部の変形挙動 (rd = 4%, t = 25 mm)

研究 速 報

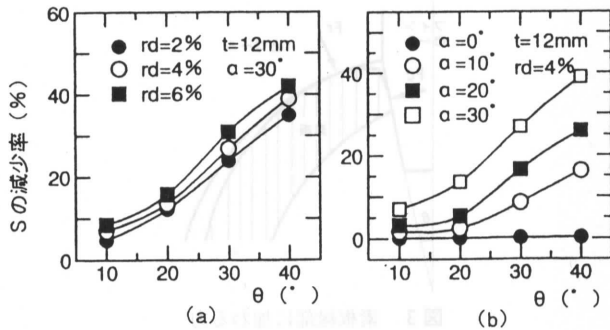
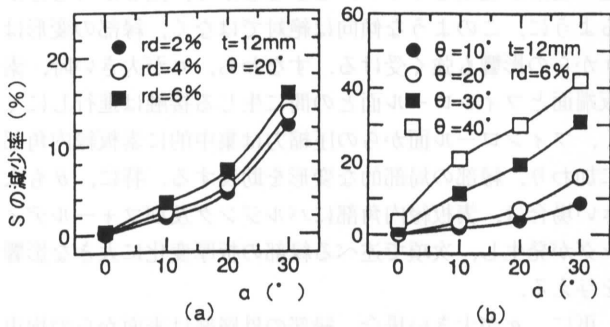
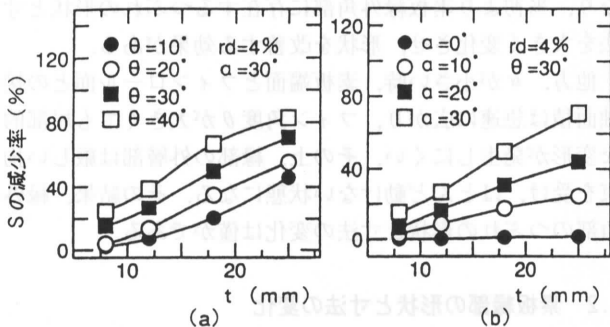
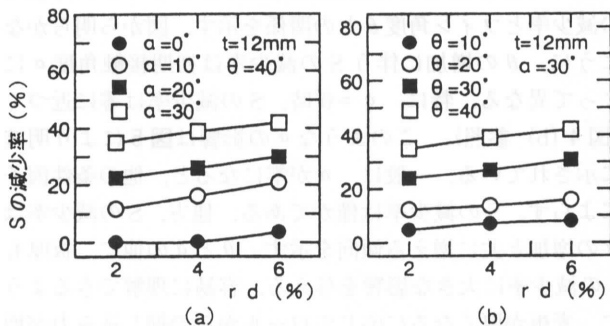
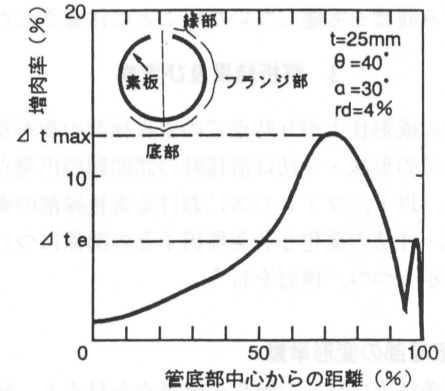
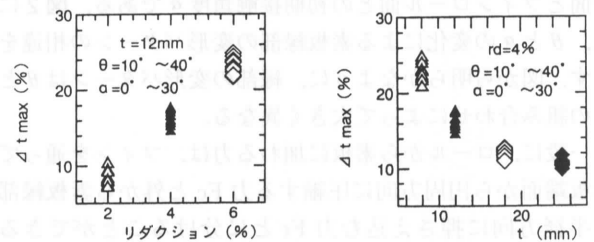
図4 Sの減少率とフィン角度 θ との関係図5 Sの減少率と初期接触角度 α との関係図6 Sの減少率と板厚 t との関係図7 Sの減少率とリダクション Rd との関係

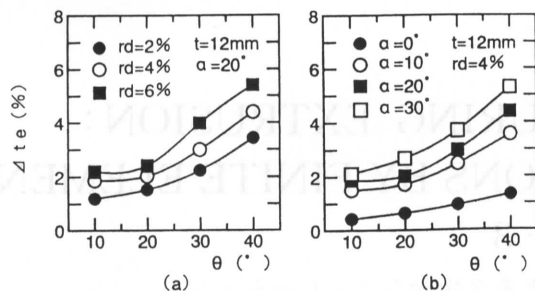
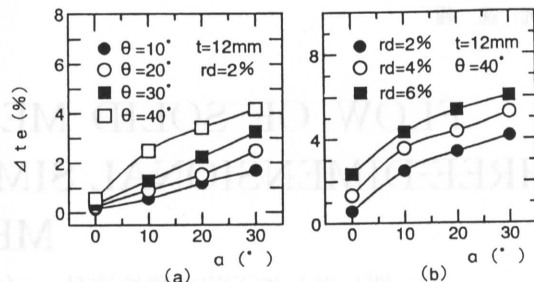
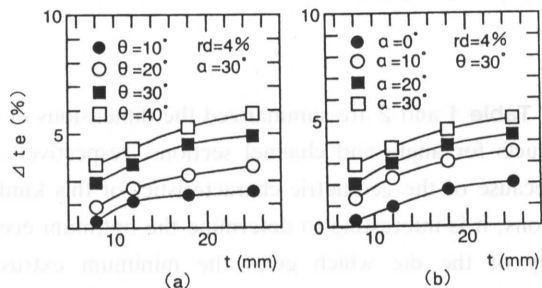
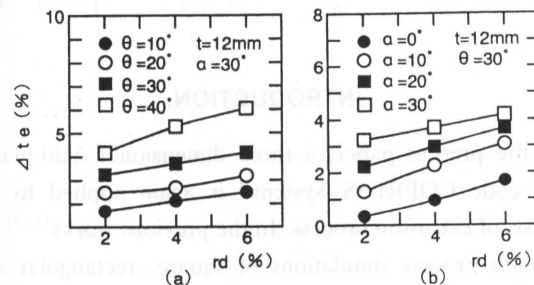
図8 素板増肉率の分布

図9 素板増肉率の最大値 Δt_{\max} とリダクションとの関係
図10 素板増肉率の最大値 Δt_{\max} と板厚 t との関係

減少率を増やす結果となる (図6参照). 図7には, 成形断面周長のリダクションとSの減少率との関係を示す. 板厚の影響と同じように, リダクションの増加もロールからの押し込み力を大きくさせ, Sの減少率を上昇させる. しかしながら, リダクションの影響は他の因子の影響ほど大きくない.

フィンパス成形において, 素板は円周方向に圧縮され, 同時に周方向の曲げ変形を受けるが, このことが原因となって, 素板の円周方向の各位置で板厚が変化する. 特に, フィンにより圧縮 (すえ込み) が加えられる縁部には局部的な変形が発生し, その部分の板厚の変化はより不均一になる. まず, 図8には素板断面全周について増肉分布の一般的な特徴を示す. 実際, 増肉率の最大値 Δt_{\max} はフランジ部に発生し, 縁部には端面から板厚程度内側へ入った領域に極大値 Δt_e が観察できる.

図9と図10には Δt_{\max} とリダクション及び板厚との関係を示す. 縁部に発生した局部的な変形はフランジ部の曲げ変形にあまり影響を与えないため, Δt_{\max} と θ 及び α の間には顕著な関係が見られない. しかしながら, Δt_e にとっては, 縁部の局部的な変形は重要な意味を有しており, θ と α の値が共に大きい時, 縁内角部にバルジング及びフォールディングが生じ, 近傍の内表面が膨らみ, 増肉を著しく発生させる. 逆に, θ と α の組み合わせがこのよう

図11 縁部増肉率の極大値 Δt_e とフィン角度 θ との関係図12 縁部増肉率の極大値 Δt_e と初期接触角度 α との関係図13 縁部増肉率の極大値 Δt_e と板厚 t との関係図14 縁部増肉率の極大値 Δt_e とリダクション Rd との関係

な変形を誘起しない場合には、縁部に局所的な増肉が発生するのではなく、全周的な増肉となる。上述の関係は図11と図12に示してある。図13には、 Δt_e が板厚の増加につれて大きくなることを示す。図から、板厚が大きくなるに伴って Δt_e の増加の割合が小さくなることもわかる。リダクションの影響については、図14に示すように、 Δt_e を大きくさせる原因の一つであるが、他の因子の影響比べて、その影響の割合は小さい。

4. ま と め

本報では、厚肉管のフィンパス成形における素板縁部の変形挙動について近似的な数値解析を行い、この段階で生じる縁部の形状・寸法の変化と各種成形条件との関係を検討し、次のような結果を得た。

縁部の変形挙動を支配する主たる要因はフィン角度及び

素板端面とフィンロール面との初期接触角度である。具体的には、大きいフィン角度且つ大きい初期接触角度は縁部の局所的な変形を誘起しそれ以前に発生したダレ・つぶれに対して縁部板厚の回復及びつぶれの修正に有効である。ただし素板端面とフィンロール面との完全接触は困難になり、端面性状を悪化させる恐れもある。一方、小さいフィン角度と小さい初期接触角度は縁部の曲げ変形を促進し、縁部の曲げ変形状を改善するのに有効である。

(1995年6月21日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内 学・王 飛舟：平6春塑加講論，(1994)，189。
- 2) 木内 学・新谷 賢・江藤文夫・高田橋俊夫：塑性と加工，27-301 (1986)，275。
- 3) 木内 学・新谷 賢・江藤文夫・高田橋俊夫：塑性と加工，27-303 (1986)，283。