

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	井口 敬之助
論文題目	高強度電縫鋼管のロール成形における変形挙動の解明と工程の最適化に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、エネルギー分野における油井、ガス井の深井戸化、深海化要求と自動車分野における車体軽量化要求に対応して近年需要が高まっている高強度電縫鋼管の製造工程の最適化を目的とし、ロール成形工程での上下ロールによる曲げ成形時の高強度鋼板の変形挙動を実験と有限要素法解析により詳細に調査した結果をまとめたもので、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論で、本研究の背景および従来のロール成形に関する研究をまとめることにより、本研究の意義および重要性を示すとともに、本研究の目的を示している。</p> <p>第2章では、ロールによる高張力鋼板の曲げ成形解析に適した有限要素解析手法を検討している。最初に、板成形過程を最も単純化した、①純曲げ成形、②ハット曲げ成形を対象として、最も一般的な4種類の解法コード(動的陽解法コードLS-DYNA、静的陰解法および動的陰解法コードMSC MARC、静的陽解法コードSTAMP3D)を用いて同一条件下において解析を行った。変形プロセスおよび応力分布に及ぼす有限要素法解法や成形速度の影響を詳細に検討することで、各手法の曲げ変形における解析精度を評価した。その後、各手法を用いて3段のロール成形解析を行い、実験結果と比較した。その結果、ロールによる高張力鋼板の曲げ成形時の板変形挙動は静的陰解法により高精度で予測できることが明らかになった。したがって、次章以降の解析では静的陰解法を用いている。</p> <p>第3章では、最も基本的なロール成形として、サーキュラーベンド方式による粗成形での単円弧曲げについて検討している。ロールとしては、最も一般的な板幅全域を拘束する上下ロール(Type A)を用いた。主に成形時の相当塑性ひずみを調査することで、ロール成形による板の加工硬化と延性低下について評価した。その結果、ロール成形による曲げで生じる相当塑性ひずみは、平面ひずみ曲げのような2次元の曲げ変形に比べて非常に大きく、特に上ロール径が小さいときに、板へのロール形状の転写が原因で顕著になることが明らかとなった。</p> <p>第4章では、第3章において検討したType Aのロールによる曲げ成形でのスプリングバック特性について調査している。上下ロールによる曲げ成形で生じるスプリングバックは、2次元的な平面ひずみ曲げ後に生じるスプリングバックの理論値に比べて非常に小さく、工具曲率同等の曲率が得られることがわかった。この高い形状凍結性は、上下ロールによる曲げの際、ロール直下手前で板と上ロールが接触する際に発生する2軸張出し変形と、ロール直下で上下ロールに板が挟まれる際に生じる板幅方向圧縮変形によって、曲げモーメントが低下するためであることが明らかとなった。</p> <p>第5章では、近年その活用が広まりつつある板端部のみを拘束する上下ロール(Type B)についての検討を行った。高張力鋼板のロール成形において重要となる成形時の相当塑性ひずみ</p>			

とスプリングバックについて、第3章および第4章において Type A のロール形式に関して行ったものと同様の検討を Type B のロールについても行い、Type A の結果と比較した。その結果、Type B では Type A に比べて曲げ成形時の相当塑性ひずみが小さくなることが明らかになった。特にロール径の小さい場合はその差が顕著となった。またロール成形時のスプリングバックについては、Type A と同様 Type B でも工具曲率と同等の高い曲率が得られた。ただし Type B では、Type A と異なりロール成形時に一度オーバーバンドで工具曲率以上に曲げられた後に大きくスプリングバックして結果的に高い曲率となっていることがわかった。

実際の生産ラインでは6~14組のロールを通して成形が行われ、常に次スタンドの拘束が生じることになる。そこで第6章では、成形スタンドを2段として次スタンドの拘束が発生する場合について解析を行っている。また、第6章までの検討で得られた知見を総合して実ラインにおける最適な工程設計について考察している。その結果、1段成形において大きな板反りが生じる Type A では次スタンド拘束の影響が大きく、1段成形よりも相当塑性ひずみがさらに大きくなることが判明した。ただし次スタンド拘束の影響で板幅方向のひずみは均一化されることが明らかとなった。一方スプリングバック特性は、次スタンドの影響を受けないことがわかった。1段成形において板反りの小さい Type B では、次スタンド拘束影響は非常に小さいことがわかった。また、これまでの結果を整理して、高強度電縫鋼管の製造において以下の指針を得た。

①鋼管の延性改善の観点から、できるだけ大きな上ロール径とするほうが良い。また Type B のロールを用いることが望ましい。ただし、周方向の均一性が重視される場合は Type A の活用が望ましい。②生産性の観点からは板反りの少ない Type B の方が先端通板性に優れるため好ましい。③スプリングバックを考慮した工具設計の必要性は低い。

第7章は結論であり、第1章から第6章までについて要約した後、結論を述べている。また今後の展望として、高強度電縫鋼管の最適な工程設計の完成には、本研究で取り扱った粗成形以後の中流域および仕上げ成形、さらには溶接後の定型工程と矯正工程についての検討も重要であり、本研究を発展させていく必要性を指摘している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

油井管、ラインパイプおよび自動車用部品に広く使用されている電縫鋼管においては、従来よりも高強度かつ高延性が要求されるようになっている。高張力鋼板を用いたロール成形においてこれらの要求を満たす鋼管を製造するためには、主に以下の3つの問題を解決する必要がある。

- 1) 鋼板のロール成形時に、幅端部の伸びが幅中央部の伸びに比べて大きいことに起因して発生するエッジバックリング
- 2) 成形工程で発生する過度なひずみによる管の延性低下
- 3) 鋼板を曲げ成形する際のスプリングバック

本論文ではこれらを解決するために、ロール成形中の板の3次元変形挙動が有限要素シミュレーションと実験によって詳細に調べられている。まず、この分野での適用が進んでいなかった弾塑性有限要素シミュレーションについて、計算手法の選定から始め、静的陰解法が最適であることを見出した。つぎにその手法を用いて、成形工程の最初に位置しており、成形量の多い粗成形での上下ロールを用いた曲げ成形について詳細な変形解析を行った。ロール形式としては従来最も一般的に用いられている板幅全域を上下ロールで挟むもの (Type A) に加え、近年その活用が広まりつつある板幅端部のみを挟むもの (Type B) を採用した。その結果、これまで不明であったロール直下近傍における板材の3次元変形挙動を、ロール形式、ロール径、材料強度などの異なる種々の成形条件について解明し、また、モデル実験によって検証した。得られた主な成果は以下のとおりである。

ロール成形では単純な2次元曲げよりも相当塑性ひずみは大きくなる。またそれは上ロール径が小さい場合に顕著である。これは主に板への上ロール形状の転写による3次元変形が原因であり、Type Aの方が板と上ロールの密着は大きいため、Type Bよりも相当塑性ひずみが大きくなる。しかしながら Type A では幅方向のひずみ分布は Type B よりも均一になる。また Type A については上述したように上ロールとの密着が大きいため、成形時に板反りが大きく先端通板性が低い。スプリングバックを含むロール成形後の板曲率については、ロール形式によらず工具曲率同等の曲率が得られる。

以上から高強度電縫鋼管の製造に適したロール成形工程の設計指針として以下を得た。  
①加工ひずみを抑制し、高延性の鋼管を得るためには、上ロール径はできるだけ大きな径とし、ロール形式は Type B を用いることが望ましい。ただし、周方向の均一性が重視される場合には Type A のほうが優れている。  
②生産性の観点からは板反りの少ない Type B の方が先端通板性に優れるため好ましい。  
③スプリングバックを考慮した工具設計の必要性は低い。

本論文で得られた成果は、より後段の仕上げ成形および溶接後の定型工程や矯正工程に関する検討への応用に生かされ、今後の研究において製造プロセス全体の設計指針を示すことができる可能性があり、さらなる発展が期待されている。

よって、本論文は博士 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 24 年 8 月 3 日実施した論文内容とそれに関する試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日：            年        月        日以降