

氏 名	林 千 博
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 4 年 9 月 9 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 36 年 3 月 東北大学工学部機械工学科卒業
学 位 論 文 題 目	マンドレルミルに関する塑性論的研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 阿部 博之 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 林 一夫 東北大学教授 加藤 正名 東北大学教授 池田 圭介

論 文 内 容 要 旨

1 基本となる塑性論

マンドレルミル工程における現場操業上の諸問題を解決するため世界に先駆けて塑性理論を展開し、これらの現象を塑性論的に解明するとともに、現場操業上の trouble を解決して実操業の know how を構築することに成功した。基本的考え方としては、管内面がマンドレルバーに接触しているか否かにより、孔型を溝底側とフランジ側に 2 分し、溝底側は外圧と内圧と軸方向圧縮の下で変形する管の問題とし、フランジ側は外圧と軸方向引張りの下で変形する管の問題として塑性方程式を導き、溝底側とフランジ側の適合条件で両者を結合し、任意の孔型の overfill, underfill を判定する計算方法を導いた。すなわち、溝底側、フランジ側のそれぞれについて独立に volume constancy の条件、応力-歪関係式、Von-Mises の降伏条件式、半径方向の釣合い方程式、半径方向の平均応力の近似式を導き、特に式の陽関数化をはかるために岡本の形状変化係数を導入し、更に、溝底側とフランジ側のバランスを保つために軸方向の伸び、円周方向の幅拡がりや幅狭まり、円周方向応力および軸方向応力の適合条件を導いて、結局、16 元連立方程式を解いて管材料の overfill, underfill を判定することが可能となる。この方法によれば、溝底側およびフランジ側の 3 方向の応力のレベルを定量的に算出出来るので、フランジ側の軸方向の tension のレベルを管理することによりネッキング（内面蛇腹）や穴あきに対処することが可能となり、また、溝底側の軸方向の compression のレベルを管理することによってバックリング（両面蛇腹）に対処することが可能となった。

この塑性理論はマンドレルミル操業の基本的特性を解明する理論であり、立体幾何学と結合して

孔型設計理論に発展し、管内面の中立点、管外面の中立線の解析と結合して各スタンドのロール回転数の設定理論が展開し、更に、過渡現象の圧延理論となってスタマック（腹ぶくれ）の現象が解明され、その対策としてスタマックコントロールの具体的方法が提示され、更にはリテインドマンドレルミルの開発に至るのである。のみならず、マンドレルミルの塑性論は更にロールハウジングの弾性変形を考慮することにより油圧圧下制御の圧延理論に発展し、AGCすなわち自動肉厚一定制御、伸ばし長さ制御そして次工程のストレッチレデューサのクロップエンドコントロールと結合したマンドレルミルの管端薄肉化制御システムの開発、実操業化に大きく貢献することになる。

2 孔型設計理論

マンドレルミルによる管の延伸圧延の変形を記述するための塑性論の基礎が示されたが、この理論はロール孔型の立体幾何学と結合してマンドレルミルの孔型設計理論が展開する。

まず、従来の孔型設計法について説明すれば、従来の孔型設計はすべて現場操業の経験から試行錯誤を繰り返して決定されて来たものであるが、その作図法はフランジ側の円周方向対数歪 ϕ_θ' および半径方向対数歪 ϕ_r' をゼロとする作図法により肉厚分離点を見出す孔型設計が行われて来た。これはフランジ側の軸方向対数歪 ϕ_z' がゼロなる場合に限りて成立する作図法であり、管材材料が延伸される以上、塑性論的に絶対にあり得ない作図をしていることになる。

さて、 $\phi_r' = 0$ 、 $\phi_\theta' = \phi_z' = \text{const}$ の条件で作図すれば、これは塑性論的にあり得るプロフィールを与えることが出来る。ここで、 $\phi_r' = 0$ としたのはフランジ側の軸方向のtensionのレベルが余り高くならないように配慮したからであるが、同時に作図を容易にするためでもある。孔型設計は塑性論的に矛盾なくなされるべきであり、そのために合計で3重の収斂計算が繰り返される。すなわち、孔型設計の第1の条件は溝底側とフランジ側の円周方向幅拡がり ϕ_θ および幅狭まり ϕ_θ' の適合条件であり、これを満足せしめるために1重の収斂計算が繰り返される。第2の条件は溝底側とフランジ側の軸方向の伸び、 ϕ_z および ϕ_z' のバランスであり、これを満足せしめるために2重の収斂計算が繰り返される。第3の条件はスタンド間の張力あるいは圧縮力をゼロとすること、すなわち、 $f = 0$ とすることであり、これを満足せしめるために3重の収斂計算が繰り返される。 $f = 0$ としたのはスタンド間に張力や圧縮力がなくてもフランジ側の軸方向内部応力 σ_z' ($\sigma_z' > 0$)や溝底側の軸方向内部応力 σ_z ($\sigma_z < 0$)はかなり高くなっており、これに更にスタンド間張力あるいは圧縮力が重畳すれば、フランジ側の軸方向の内部応力 σ_z' あるいは溝底側の軸方向の内部応力 σ_z の絶対値が上昇し、フランジ側の内面蛇腹（内面波打ち）、穴あきあるいは溝底側のバックリング（両面蛇腹）の発生を誘発しやすいからであった。

このようにして収斂計算を3重に繰り返しながらインプットデータを少しずつ修正し、孔型設計を塑性論的に矛盾することなく実行する設計プログラムが開発され、実操業に適用された。インプットデータとしては各スタンドの孔型の楕円率 α のほか3つの孔型寸法諸元が選ばれ、これら4つのインプットデータを同時に少しずつ修正して行く。インプットデータとして楕円率 α を選んだのは孔型のイメージを把み易くするためであるが、同時に前後の孔型の関係、特にサイドリリーフ η の関係を一定の水準に維持するためでもある。塑性理論といえども孔型設計には設計者の意図すると

ころや設計者の個性，就中，設計者の芸術的センスが十分反映されるべきであり，このような観点から孔型の楕円率 α をインプットデータに加えたのである。3重の収斂計算に際しては4つのインプットデータが同時に少しずつ修正されるので，孔型の特性値は設計者のはじめの意図と大きく隔たることが避けられるようになっている。

3 ロール回転数の設定理論

さて，管内面とマンドレルバーの摩擦の現象に着目し，摩擦力の軸方向の釣合い方程式を解いて管内面の中立点の位置を求め，次に管外面とロールとの摩擦の現象を考え，摩擦力の軸方向の釣合い方程式を解いて管外面の中立線がロール出口面を横切る点を見出し，その位置の working dia. から各スタンドのロール回転数を塑性理論的に設定する方法を開発し，実操業に適用した。

通常の孔型の場合，管が全スタンドに噛み込まれている定常状態における管内面とマンドレルバーとの間の中立点は第2スタンドの出口付近か，第3スタンドの入口付近に存在する。今，仮に管内面とマンドレルバーの中立点が第2スタンドの丁度出口位置か，あるいは第3スタンドの丁度入口位置に存在するものとすれば，第1～第2スタンドと第3～第8スタンドの管内面の摩擦力は互いにその方向を異にし，第1～第2スタンドでは backward slip，第3～第8スタンドでは forward slip となり，それにバランスする必要上，管外面では第1～第2スタンドでは forward slip 領域が backward slip 領域より大きく，第3～第8スタンドでは backward slip 領域が forward slip 領域より大きな面積を占める。全般的な傾向として管外面の中立線がロール出口面を横切る点は第1～第2スタンドでは接触面積の外側に，第3～第8スタンドでは接触面積の内側に来るので第1～第2スタンドの working dia. は大きくなり，第3～第8スタンドの working dia. は小さくなる。その結果として，マンドレルミルのロール回転数曲線は第2スタンドと第3スタンドの間で大きく変曲し，S字型の分布となる。すなわち，フルフロートマンドレルミルでは第2スタンドまでと第3スタンド以降でスピードコーン（ロール回転数曲線）はステップ状に与えられるべきであり，このような分布で与えられないとフランジ側で内面蛇腹（内面波打ち），甚だしくは穴あきなどのトラブルを惹起したり，あるいは溝底側でバックリングして両面蛇腹（両面波打ち）などのトラブルを惹起する。

4 過渡現象の圧延理論

噛み込み，尻抜けの過渡状態において，管内面とマンドレルバーとの間の中立点の位置の変動から，管外面とロールとの間の中立線の位置の変動を追跡し，フルフロートマンドレルミルにおけるスタック現象を塑性理論で説明するとともに，スタックコントロールの具体的方法としてロール回転数のダイナミック制御法を提示した。また，最近主流となりつつあるリテイインドマンドレルミルの操業上の利点について理論的に説明した。

すなわち，噛み込みの過渡状態においては，管内面とマンドレルバーとの間の中立点は第1スタンドの中央位置から第2スタンドの出口近傍位置までの狭い範囲で移動し，尻抜けの過渡状態ではじめて第3スタンドに移動し，それ以降，順次，第4，第5，…と下流側のスタンドに移動して行

く。管内面の中立点が時々刻々と移動して行くと管内面とロールとの間の中立線も刻々と変動して行くことになる。噛み込みの過渡状態においては第1および第2スタンドの管外面の中立線は接触面積の外側に向かって、working dia. を増大する方向に移動するが、第3スタンド以降の下流側のスタンドの中立線の位置は不動であり、戻抜けの過渡状態に至ってはじめて第3スタンド以降の中立線は接触面積の外側に向かって、working dia. を増大する方向に移動しはじめるが、戻抜けの過渡状態においても下流側のスタンドの中立線の位置は不動である。このことは下流側のスタンドの管材料速度が不変なのに上流側のスタンドの管材料速度が加速されることを意味し、スタンド間に圧縮力を発生し、これによって管材料の外径、肉厚が膨らんでストマック現象が現れることになる。

フルフロートマンドレルミルにおけるストマック現象は、噛み込み、戻抜けの過渡状態においても常状態と同一の管材料速度が得られるように working dia. の増加分だけロール回転数を低下せしめるダイナミックな回転数制御を行えばこれを抑制することが可能である。

また、リテインドマンドレルミルではマンドレルバーをその背後から保持して、マンドレルバーの速度が管材料の速度より常に遅くなるようにリテイニング出来るので、噛み込み、戻抜けの過渡状態を通じて管内面の摩擦力の方向を常に forward slip の状態に保つことが可能であり、その結果、管外面とロールとの間の中立線の位置も噛み込み、戻抜けの過渡状態を通じて不動となり、ストマック現象は発生する筈がない。

5 油圧圧下制御の圧延理論

マンドレルミルの塑性論は更に圧下制御、特に油圧圧下制御の圧延理論に発展し、AGCすなわち自動肉厚一定制御、伸ばし長さ制御、そしてストレッチレデューサのクロップエンドコントロールと結合した管端薄肉化制御システムの開発、実操業化に貢献することになる。さて、何らかの原因によってロール開度 C が C' に変化してミル剛性曲線が平行移動し、塑性曲線との交点の x 座標が t から t' に変化する時、ロール開度 C' を元の C に戻すことによって肉厚を元の t に戻したり、あるいはまた、何らかの原因によって素材肉厚 t_0 が t_0' に変化して塑性曲線が移動したり、圧延条件が変化して塑性曲線の形状が変化し、塑性曲線とミル剛性曲線の交点の x 座標が t から t' に変化する時、ロール開度 C を C' に変化させ、塑性曲線と元の t で交わるようにミル剛性曲線を平行移動するのがAGCすなわち自動肉厚一定制御の原理であり、この制御によってホローシェル1本内の肉厚分布を均一化する。また、特にビレット単重のばらつきや循環使用されるマンドレルバーの摩耗特性により、圧延前の素材肉厚 t_0 が大きく変動し、塑性曲線が大きく移動する時、最終製品の寸法公差の範囲内でホローシェル1本毎に目標肉厚 t の絶対値を設定し直し、ロール開度 C を C' に変化させ、塑性曲線と t で交わるようにミル剛性曲線を平行移動するのが伸ばし長さ制御の原理であり、この制御によって切断時の相取り本数を確保する。これはホローシェル1本毎の肉厚制御であり、ホローシェルの1本内ではAGCを行うべきことは当然である。最期に、上述のような種々の要因の有無に関係なく、ホローシェルの両管端近傍に限って積極的に圧下を加え、両管端近傍をテーパ状に薄肉化することによって、次工程のストレッチレデューサにおける管端厚肉化現

象を相殺するのがマンドレルミルの管端薄肉化制御であり、中央部の肉厚 t に対して両管端部では肉厚 t' が得られるようにミル剛性曲線を平行移動する。

マンドレルミルの油圧圧下システムの開発はいずれも世界最初であり、これらの油圧圧下制御システムの実操業化により、製品の品質は顕著に改善され、圧延歩留りは飛躍的に向上した。

審査結果の要旨

継目無鋼管の製造における最も近代的な製造方法にマンドレルミル工程があり、主として肉厚を減じて中空鋼管に延伸圧延する工程である。しかしマンドレルミルの操業は、従来経験によるところが多く、しばしば種々のトラブルを併発し、操業上の信頼性に欠けるところがあった。

著者は、系統的な塑性理論の展開を図り、それによって、マンドレルミルの操業上の問題点を一挙に解決することに成功し、また塑性理論による製造工程の計算機制御を実現している。本論文はその学術的内容と研究成果をとりまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、マンドレルミル工程における基本変形特性を解析する全ひずみ塑性理論について述べている。これは世界に先駆けた展開である。

第3章はマンドレルミルの孔型設計理論である。前章の塑性理論を立体幾何学と結合し、孔型設計に理論的基礎を与えている。

第4章はロール回転数の設定理論である。回転数設定はマンドレルミル工程の良否にかかわる重要な課題であり、塑性理論の展開によって回転数を定める手法をはじめて明らかにしている。

第5章は過渡現象の圧延理論である。管の噛み込み、尻抜けの過渡現象を解析して、その制御法を塑性理論的に展開している。

第6章は油圧下制御の圧延理論である。前章までの成果をさらに発展させ、肉厚一定制御、伸ばし長さ制御、管端薄肉化制御などを塑性論に基づく計算機システムとして実現している。

第7章は結論であり、諸々の成果を統括している。

以上要するに本論文は、継目無鋼管製造のマンドレルミル工程を塑性理論を展開することにより明らかにして、その成果を工程の操業に適用し、製品品質の著しい向上を可能にしたもので、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。