

目 次

第1章 総論	1
1-1 緒言	1
1-2 論文の構成	7
第2章 ペナルティ定数法剛塑性 FEM プログラムの開発及び検証	9
2-1 まえがき	9
2-2 プログラムの開発	11
2-2-1 基礎式	11
2-2-2 接触と収束性改良の処理	15
2-2-3 要素再分割処理	19
2-2-4 変形パターン追跡の処理	21
2-2-5 多段鍛造における各段間のデータの引き渡し	22
2-2-6 鍛造荷重の計算方法	23
2-3 プログラムの検証	24
2-3-1 リング圧縮問題への応用	24
2-3-2 実際成形工程への応用及び計算結果と実験結果の比較	33
2-4 まとめ	42
第3章 多段鍛造工程の段数低減への適用	43
3-1 まえがき	43
3-2 1工程成形の可能性に関する検討	45
3-3 2工程成形の検討	49
3-3-1 中間成形品形状の選択	49
3-3-2 合理的な中間成形品形状の決定	53
3-4 実際成形による検討	65
3-5 まとめ	69

氏名(本籍)	孫 智 剛 (中華人民共和国)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第 61 号
学位授与年月日	平成 9 年 3 月 25 日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	剛塑性FEMプログラムの開発と鍛造加工への応用
学位論文審査委員	(主査) 教授 後 藤 學 (副査) 教授 戸 梶 恵 郎 教授 堂 田 邦 明

論文内容の要旨

ニーズの多様化, 高度化に伴って, 塑性加工技術は多種少量生産への対応が必要となり, 従来にも増して工程開発設計にかかる時間の短縮, コストの削減及び工程最適化によるトータル製造コストの低減がますます要求されている. こうした背景から, 熟練者あるいは専門家の過去の知見や技術的ノウハウに立脚したトライアル・アンド・エラー的な工程開発設計手法では対応できなくなり, FEM 数値シミュレーション技術を塑性加工工程設計に有効に導入する研究が切望され, 推進されている. しかし, 複雑な多段冷間鍛造加工の工程設計に関するこの方面の研究はいまだ数少ない. 多段冷間鍛造工程設計に FEM 数値シミュレーションを援用するためには, それに対応できる高機能の解析プログラムが必要である. 一方, 解析方法としては鍛造といったブロック材成形解析において剛塑性 FEM が優勢であるが, 現存の剛塑性 FEM では解の導出の際に解く剛性方程式が非線形となるため, Newton-Raphson 法などによる繰り返し計算が必要であり, 発散の危険が常に付き纏う. したがって, 繰り返し計算を回避した新しい手法の開発がなお必要である. また, 鍛造製品には複雑な 3 次元形状を持つものが多い. よってそれを解析するには 3 次元解析プログラムが必要になる. 本論文では, こうした課題に関して研究を行った.

第 1 章は総論で, 本研究の内容に関する歴史的・社会的背景, 研究の目的及び論文の構成について述べた.

第 2 章ではペナルティ定数法を用いた単純で基本的な剛塑性 FEM コード (SPID) をベースとし, これに素材と工具の間の摩擦を含めた接触問題が, 安定的かつ正確に効率よく計算できるための解の収束性改良処理, 最適工程の考案に必要な不可欠な情報の成形荷重の計算, さらに解析途中と各段階でのリメッシングや材料流動状態の追跡及び種々の便利な情報図形化処理といった機能を組込んで, 複雑な軸対称部品の冷・熱間多段鍛造工程の解析に対応できる数値シミュレーションプログラムを開発した. そして, このプログラムを用いて, リング圧縮及び実際の冷間鍛造 3 工程成形プロセスを解析し, それぞれベンチマークテストの結果と実験結果と比較して, よい一致ないし対応が得られた.

それによって、開発したプログラムは多段鍛造工程の解析、さらにその最適工程の考案に十分に対応できることが分かり、その有効性・信頼性、実用性が確認された。

次に、第3章では前章で開発したペナルティ定数法剛塑性 FEM プログラムを用い、前章でシミュレーションしたある種の製品の3段冷間鍛造工程の段数低減の可能性について検討し、FEM 数値シミュレーションを援用した塑性加工工程設計を試みた。具体的には、まず、1工程成形を解析してその成形の可能性を検討した。しかし、数値シミュレーションの結果により、この方法では局所的に集中した厳しい変形を生じること、また成形荷重とポンチ面圧力が高い上に急激な上昇もするので、高い工具寿命は望めないと思われ、1工程による成形は不可能と判断された。そして、様々なプリフォームを想定した2段成形工程について解析して、それらの結果により2段成形工程の可能性を確認した上で、合理的成形工程を選定した。さらに実際成形によって数値シミュレーションにより選定した工程を考察して、この工程によれば金属流動はスムーズとなり、成形荷重は低くかつ急激な上昇もないこと、及び製品の精度と高い工具寿命を確保できることが確認された。第3章の研究によって、多段鍛造工程設計に関して FEM 数値シミュレーションを援用した工程の最適化と工程数低減の可能性・有効性が示された。

続いて第4章では、Hillの剛塑性体に対する解の一意性の汎関数から着想して、従来なかった、繰り返し計算が不要な Non-Iterative 剛塑性 (NIRP) FEM を提案した。ただし、本研究では主に従来の弾塑性 FEM において、初期降伏応力を0とする‘擬似’ NIRP により数値例を示した。すなわち、従来からある弾塑性 FEM プログラム GOLDA をベースに、これに改変を加えた。さらに2Dの任意形状鍛造解析ができるように機能アップした。摩擦・接触処理も大幅に改良した。そこで開発したプログラムを、第2章における3段冷間鍛造成形工程と、第3章で決定した2段成形工程の解析に応用し、それらの解析結果の変形パターンと荷重-ストローク曲線を、第2章で開発したペナルティ定数法剛塑性 FEM プログラム (便宜上、PRP と呼ぶ) による計算結果及び実験結果と比較した。その結果により、まず安定かつ効率的な計算が保証されてこの方法の解析能力が確認された。そして、得られた変形パターン及び加工荷重の計算結果は PRP 及び実験による結果と全体的によく一致しないし対応していることが分かり、この方法は十分な解析精度を持っていることが確認された。

第5章では、第2章で開発した2次元プログラムをベースにして、3次元工具形状に対応する接触・摩擦処理方法の導入及びほかの機能の3次元への拡張により、3次元ペナルティ定数法剛塑性 FEM コードを開発した。それを用い、A1100-O, SPCC, A2024-T4 の3種類の材料と異なる摩擦条件に対して、それぞれ角柱平面工具圧縮と角柱への球頭ポンチ押し込みの解析を行った。合わせて圧縮性塑性に関する大矢根の延性破壊条件式と相対密度変化の計算式を組み込み、それによって、破壊及び相対密度変化の傾向を調べた。第5章の研究を通して、まず、摩擦に付随する変形の特徴がよく捉えられ満足できる結果が得られて、考案した摩擦処理方法、開発した3Dコードの有効性が示された。次に、同一様式の加工における破壊は材質と摩擦係数に依存することが明らかとなった。さらに、すべての場合の解析結果において、相対的に密度が最小になる位置は破壊条件式によって予測された最も危険な位置と全体的に一致していることが確認されて、圧縮性降伏関数及び構成式を使わなくても、相対密度の変化から破壊予測が可能であることが示された。

論文審査の結果の要旨

ニーズの多様化、高度化に伴って、塑性加工技術は多種少量生産への対応が必要となり、塑性加工製品の製造コストの低減がますます重要となってきた。こうした背景から、FEM 数値シミュレーション技術を塑性加工の工程設計に有効に導入することが不可欠となり、切望されている。本論文では、これを主目的とした2、3次元剛塑性 FEMプログラムの開発と実加工への応用、及び現存の手法の繰り返し計算を回避した新しい解析手法の開発の研究を行っている。第1章は総論で本研究の内容に関する歴史的・社会的背景、研究の目的及び論文の構成について述べている。第2章では、ペナルティ定数法を用いた単純で基本的な剛塑性 FEMコード (SPID)をベースとし、その機能を大幅に向上させて、複雑な軸対称部品の冷、熱間多段鍛造工程の解析に適用できる2次元数値シミュレーションプログラムを開発している。そして、このプログラムを用いて、リング圧縮及び実際のある種の製品の冷間鍛造3工程成形プロセスを解析し、それぞれベンチマークテストの結果と実験結果と比較して、その有効性・信頼性、実用性を確認している。第3章では、開発したプログラムを用い、前章での3段冷間鍛造工程の段数低減について検討している。数値シミュレーションの結果によって、1工程の成形は不可能と分かり、合理的2段成形工程を決定している。さらに実際成形への適用を通して決定された工程の正確さを確認した。第3章の研究によって、多段鍛造工程設計に関してFEM数値シミュレーションを援用した工程の最適化と工程数低減の可能性・有効性が示されたとしている。第4章では、従来なかった、現存の手法での繰り返し計算が不要な Non-Iterative 剛塑性 (NIRP) FEMを提案している。なお、従来の弾塑性 FEMにおいて初期降伏応力を0とする‘擬似’NIRPを考案し、2次元の任意形状鍛造解析ができるプログラムを開発した。そこで、それを第2章における3段冷間鍛造成形工程と、第3章で決定した2段成形工程の解析に応用してその解析能力と解析精度を確認している。第5章では、第2章で開発した2次元プログラムをベースにして、3次元ペナルティ定数法剛塑性 FEMコードを開発した。それを用い、異なる材料と摩擦条件に対して角柱平面工具圧縮と角柱への球頭ポンチ押し込みの解析を行った。合わせて圧縮性塑性に関する大矢根の延性破壊条件式と相対密度変化の計算式を組込み、それによって破壊及び相対密度変化の傾向を調べている。第5章の研究を通して、まず開発した3Dコードの有効性を確認している。次に同一様式の加工において破壊は材質と摩擦係数に依存すること、及び圧縮性降伏関数及び構成式を使わなくても相対密度の変化から破壊予測が可能であることが分かったとしている。

以上は、審査の結果博士論文として十分な内容であると判定された。