

氏名（本籍）	村田 真伸（愛知県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第532号
学位授与日付	平成30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	有限要素法逆解析を用いた切欠付丸棒引張試験における大ひずみ域の流動応力同定 (Flow stress identification in large strain range using FEM inverse analysis on notched round bar tensile test)
学位論文審査委員	(主査) 教授 山下 実 (副査) 教授 王 志剛 准教授 吉田 佳典

論文内容の要旨

冷間鍛造はわが国の自動車産業を支える重要な基盤技術である。冷間鍛造は成形後の表面性状や寸法精度に優れ、部品によっては切削等の仕上げ工程を必要としないネットシェイプ成形可能となるなどメリットが大きい。その反面、冷間鍛造は加工に必要な荷重が相当に大きく、材料の延性不足に伴う割れ（延性破壊）が発生するなどの問題点もある。このような問題に起因する工程不具合の解決のために、近年では工程設計に有限要素法（FEM）をベースとしたCAE技術を利用するケースが急増しており、業界を支える中小企業においてもCAEソフトウェアの導入が進んでいる。

上記の背景を踏まえ、当該論文では、冷間鍛造におけるCAEの予測精度向上を目的として、破壊までの大ひずみ域の流動応力曲線を簡便かつ高精度に同定する手法の開発に取り組んでいる。具体的には、切欠付丸棒に対して画像解析を用いた引張試験を行い、測定される平均引張応力に対してFEMと最適化手法により応力補正を行うことで、くびれ発生以降の大ひずみ域の流動応力を同定する方法を提案している。従来の応力補正法であるBridgman法に比べて、流動応力の同定精度が12～16%程度改善することを、数値実験を通じて示している。また、流動応力曲線を同定した結果得られる応力とひずみの履歴情報の用いることで、各種の延性破壊予測モデルのパラメータも同定できることを示している。さらに、切欠引張試験に加え3点曲げ試験も行うことで、指数関数型の延性破壊予測モデルのパラメータを決定し、円柱材の端面拘束圧縮試験による検証実験を通じて、この破壊予測モデルの妥当性を検証している。

以下では、当該論文の各章を要約する。

第1章は序論であり、既存の引張試験に基づく流動応力曲線の同定技術および延性破壊のメカニズムや各種の延性破壊予測モデルを概観するとともに、当該論文の目的および位置づけについて説明している。

第2章は、切欠付丸棒引張試験を対象に、くびれ発生後の平均引張応力を流動応力に補正する新しい応力補正方法を提案している。FEMを利用した数値実験による検証では、提案する応力補正法を用いることで、4種類の初期切欠半径によらず、あらかじめ設定した加工硬化挙動が異なる2種類の参照流動応力曲線を精度良く再現できることを示している。その一方、従来の応力補正法であるBridgman法では、参照応力曲線を過大に評価してしまうことを指摘している。実際の材料であるSS400を用いた検証では、提案手法を用いて応力補正を行った場合、数値実験の結果と同様、応力補正後の流動応力は初期切欠半径に関わらずおおむね1本に重なり、最大で相当ひずみで1.0を超える範囲までの流動応力を同定することができている。さらに、Bridgman法により得られる流動応力が、提案手法で同定した流動応力よりも過大に評価されることも確認しており、数値実験の傾向を実験的にも確かめている。

第3章は、3種類の金属材料（SS400, S45C, A5056-H34）を対象に、4種の初期切欠丸棒引張試験に対して提案する応力補正法を適用して流動応力曲線および2種類の延性破壊条件式の限界ダメージ値を同定している。応力補正後の流動応力曲線は、SS400ではSwift則にほぼ一致し、A5056-H34ではVoce則に近く、またS45CについてはSwift則とVoce則の中間の結果であったことを示している。これらの結果より、流動応力を硬化則に依存せず直接的に同定することができることを実証している。また、流動応力曲線を同定した結果得られる応力とひずみの履歴情報を利用して、くびれ断面中心におけるCockcroft and LathamモデルおよびAyadaモデルの限界ダメージ値と応力三軸度との関係を同定している。さらに

S45C に対しては、従来法である Bridgman 法でも同様の評価を行っているが、得られる限界ダメージ値および応力三軸度の結果は、提案手法によって得られる結果と大きく乖離することも指摘している。その理由として、Bridgman 法では FEM の応力およびひずみの状態を精度良く再現できないことが原因であると考察している。

第 4 章では、炭素鋼 S45C を対象に冷間鍛造の初期工程で多用される据込みの割れ予測に取り組んでいる。初期切欠半径を変えた 4 種の切欠付丸棒引張試験に加え、据込み割れで発生する応力三軸度範囲を補完する目的で、厚みと幅の比率を変えた 3 種の 3 点曲げ試験も実施している。切欠付丸棒引張および 3 点曲げの両試験結果から、指数関数型の延性破壊予測モデルのパラメータを決定し、端面拘束圧縮試験の限界圧縮率の予測を試みている。応力三軸度が負の領域（圧縮応力場）では、ポイドは成長しないとの仮定を置くことによって、端面拘束圧縮試験の FEM 解析において、応力三軸度が正の場合にのみ累積する相当ひずみを新しく定義することで、実験の限界圧縮率の結果をおおむね予測することができたと主張している。

第 5 章は総括であり、当該論文で得られた成果についてまとめている。

論文審査結果の要旨

当該論文で提案している流動応力同定法は、初等解法をベースとした古典的応力補正法である Bridgman 法の考え方を踏襲するものである。Bridgman 法が抱える精度面での課題を、FEM と最適化手法を用いた逆解析的手法を用いて改善している点に当該論文の新規性が見受けられる。また、数値実験を通じて Bridgman 法との精度比較を行っている点は、同定精度の改善効果を定量化しているという意味で評価できる。さらに、引張試験の結果から各種の延性破壊パラメータが同定できることを示しており、提案手法の利用範囲の拡大も期待できる。最終的には、鍛造の初期工程で多用される据え込み工程を模した円柱の端面圧縮試験の検証実験を通じて、決定した延性破壊モデルの実用性も検証しており、提案手法の実用化に関しても期待できる。

最終試験結果の要旨

学位審査委員会は、提出論文の基礎となる査読付きの発表論文 3 報の内容を確認し、平成 30 年 2 月 14 日に開催された学位論文公聴会における論文提出者との質疑応答と口頭試問等に基づき審査し、最終試験結果を合格と判定した。

発表論文（論文名、著者、掲載誌名、巻号、ページ）

1. 切欠付丸棒引張試験による変形抵抗同定のための応力補正法の検討, 村田真伸, 西脇武志, 吉田佳典, 塑性と加工, 57-669 (2016) 977-982.
2. Identification of Ductile Fracture Parameter with Stress Correction Method Using Notched Round-Bar Tensile Test, Masanobu Murata, Yoshinori Yoshida, Takeshi Nishiwaki, Procedia Engineering, 207 (2017) 2060–2065.
3. 曲げ試験と切欠付丸棒引張試験を用いた冷間据込み加工の表面割れ予測, 村田真伸, 吉田佳典, 西脇武志, 塑性と加工, 59-686 (2018) (掲載決定) .