

氏名(本籍・生年月日) 坂本 潤嗣 (長野県 昭和52年7月14日)
学位の種類 博士(工学)
学位記番号 甲 第631号
学位授与の日付 平成27年3月20日
学位授与の要件 信州大学学位規程 第5条第1項該当
学位論文題目 圧子押し込み実験と有限要素法解析を用いた
逆解析に基づく材料定数同定に関する研究
論文審査委員 主査 教授 中村 正行 助教 藤井 雅留太
教授 田中 清
教授 大上 俊之
教授 佐々木 敏彦 (金沢大学)

論文内容の要旨

本研究は、金属プレス加工などの塑性加工の分野での実用を想定し、マイクロ～ミリオーダーの平均的な力学特性を簡便に取得可能な手法として、ロックウェル試験機を拡張した圧子押し込み実験、有限要素法解析および応答曲面法に基づいた材料定数値の同定手法を提案する。金属プレス加工は、寸法安定性が高く、切削加工に比べて生産性が高いため、高機能素材への対応、コスト削減のための部品一体化など、今後ますます多様な材料に対する複雑化した加工が要求される。このため、加工現場において金属材料の材料定数を簡便且つ迅速に取得する方法が必要とされている。

引張・圧縮試験は最も一般的で、広く工業界で認知されている材料強度試験であるが、試験片のネッキング、バルジ変形の問題や、寸法制約の問題から、大きなひずみが発生する塑性域や微小領域の特性値の取得は困難である。一方、圧子を用いた押し込み試験は、引張・圧縮試験に比べて簡便性があり、迅速に試験が可能で、わずかな量の試験片で微小領域や脆性材料にも対応できる。特にナノインデンテーション法に代表される計装化押し込み試験法は、圧子押し込み時の押し込み荷重-変位曲線($P-h$ 曲線)の履歴から、硬さ以外の材料特性を得ることが可能であり、降伏応力や応力-ひずみ特性を推定する手法なども提案されている。しかし、これらの研究は、ナノスケールの微細組織と力学特性の関係に注目しており、局所的な特性を取得する手法として有効であるが、プレス加工の実態に即したミリ～マイクロオーダーのスケールに対応できない。

本論文では、一般に普及しているロックウェル硬さ試験機を用いた簡易な方法で、ミリ～マイクロオーダーの平均的な金属材料の材料定数を精度良く同定するための条件や手法について示し、その汎用性と妥当性を実験に基づいて検証している。

第一に、圧子押し込み実験において、適用スケールにおいて精度良く $P-h$ 曲線を取得するための実験条件を明らかにした。円錐圧子よりも球圧子を使用する妥当性を示し、実験装置側の弾性変形を取得した。また、材料の表面粗さ、接触面の摩擦について、実

験結果与える影響を検証・考察し、表面粗さと実験結果のばらつきに相関があることを示した。

第二に、圧子押し込み実験を忠実に模擬した、適切なFE解析条件を決定した。本問題を2次元軸対称モデルに置き換え、機械側の弾性変形をバネ要素で代替し、FEモデルを簡略化しながら、解析精度を確保できるメッシュ分割条件を検討し、1回のFE解析に必要な計算時間を最小限に抑えた。

第三に、実験とFE解析により得た $P-h$ 曲線が一致する材料定数値を求める最適化問題において、任意の押し込み深さにおける実験値とFE解析値の荷重誤差を最小化するための評価関数 W を残差二乗和で定義した。そして、2次多項式による応答曲面近似により、評価関数 W を最も満足する材料定数値を同定した。応答曲面は、材料定数値を一般的な金属のとり得る範囲に制限し、D最適計画に基づく組み合わせから実験計画を作成した。

以上の結果から、一般的にプレス加工に利用される、鉄鋼材料S45C、ステンレス鋼SUS304、純アルミA1070、無酸素銅C1020において、実験値に概ね一致する $P-h$ 曲線を再現でき、それぞれの材料定数を同定できた。特に弾性特性は、いずれも引張試験で求めた値に対し、10%程度の誤差範囲で同定できた。塑性特性はいずれも引張試験より同定した値よりも高い値が同定されたが、SUS304、A1070は、圧縮試験の結果に近い特性を示した。また、従来手法は荷重除荷曲線より弾性特性を同定するのに対し、本手法は荷重負荷曲線のみを用いて弾塑性特性を同定できた。

そして最後に、プレス加工工程設計への本手法の適用による実用性を検証した。実際にプレス加工で使用する初期段階で不要となった端材（自動車構造用熱間圧延鋼板SAPH440 JIS相当品）の押し込み実験から取得した $P-h$ 曲線とFE解析の荷重負荷行程は、ほぼ一致し、同定結果は引張試験より求めた真応力-真ひずみ特性と1%程度の誤差で一致した。また、同定した材料定数値を用いたプレス加工FE解析と実際の円筒絞り加工形状を比較した結果、最も板厚が増加する外周部においては、誤差が最大7.8%であったが、底面の板厚や、成形高さはよく一致した。さらに、加工硬化則は、Ludwikの式で同定した結果、単純な n 乗硬化則の結果よりも、 $P-h$ 曲線および加工形状誤差が改善した。以上、同定した材料定数値で実用上十分な精度でプレス加工工程の解析が行えた。

本研究では、一般に普及しているロックウェル硬さ試験機を用いた簡易な方法で材料定数を同定する手法を提案し、その汎用性と実用性を示すことができた。本手法により加工現場においてプレス加工の工程ごとの材料特性を取得できれば、FE解析に反映させることで、FEモデルの精度向上による加工予測精度の向上が期待できる。今後は、金属材料以外への手法の適用や、同定精度向上に関して多目的最適化手法の導入などの発展的な研究が期待される。