

論文の内容の要旨

氏名：上 浦 友 洋

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：薄鋼板材における破壊のひずみ速度依存性に関する研究

地球環境への負荷低減のため、二酸化炭素の排出量規制が強化されている。それに伴い、自動車の燃費向上が大きな課題になっている。燃費は車両の重量に影響されることが知られており、軽量化が重要な設計課題となっている。一般的な乗用車の総重量において、シート重量の占める割合は、約4%である。ボディー等の大型部品においては従来から引張強さが980MPaを超える超高張力鋼板等の適用が進んでおり、現在では更なる軽量化を行うため、重量比率の低いシート部材にも980MPa級の超高張力鋼板が採用されている。一般的な自動車用シートは、鉄鋼製の板材やパイプで構成されたシートフレームにシートスライドアジャスタやリクライニングアジャスタといった機能部品が取り付けられている。超高張力鋼板は薄板化による軽量化効果を得るために、フレームやスライドアジャスターに採用されている。自動車用シートに使用されている鋼板に対する製品機能からの要求として、保安基準では、静的試験で評価するように定められているが、動的強度試験はその代替評価として適応することが認められている。そのため車両衝突による高速変形時の材料強度は、静的な材料強度を上回っている必要がある。自動車メーカーでは安全性を重視して破裂および破損を許容しないことが一般的であるため、超高張力鋼板を使用する製品では延性の不足による材料破損が課題となっている。部品製造からの要求としては、シートを構成する部品の多くはプレス加工により製造される。プレス機はその機構により加工速度が異なり、被加工材に発生するひずみ速度の変化も大きい。超高張力鋼板において発生する成形不良は従来鋼と比較して、大きな差異はない。大きな引張強度を有するために降伏応力も上昇しており、成形後離型時の弾性回復量（スプリングバック）もその絶対値が増加している。そのためスプリングバックによる寸法不良が大きな課題となっている。加えて超高張力鋼板は一般材と比較して延性に乏しい。引張変形時の板厚減少が小さいため脆性破壊のようにも見えるが、延性破壊が生じることが確認されている。成形品に破断が生じていると、設計通りの性能を満足することができなくなる。

そこで、本研究では、シートフレームの部材として適用されている高張力鋼板を対象として、引張時のひずみ速度と延性との関係を明らかにすることを主目的とした。また、得られた材料特性の結果を活用して、ひずみ速度が高速と低速における有限要素法（以下 FEM）による評価解析を行い、解析精度向上のための課題を述べる。

自動車の衝突時のシートフレームは、高ひずみ速度で変形する。また、高強度な材料であっても塑性変形による発熱が、材料の延性に影響を少なからず与えることが考えられる。そこで、まず、高ひずみ速度での引張試験におけるひずみ、荷重と温度が精度良く計測可能な方法について検討した。温度計測は、応答速度が速い非接触の温度計を適用したが、計測のサンプリング時間を短くする必要があり、そのために、計測領域は、狭くなることから、通常の高速引張試験に用いられる試験片より計測領域を狭くし、引張時の変形部の伸びを抑制して、試験片の計測領域の移動を極力少なくした。新たに設計した小型試験片により、従来試験片よりも同様伸び、全伸びを広範囲で計測することが可能となった。DICを用いたひずみの測定においては、単眼カメラで十分な測定精度を得られることを検証した。実験結果としては、引張変形中の材料の温度は、ひずみ速度が 9.5 s^{-1} 以下の変形においては、破断の直前を除き、局所伸び進行中は400K以下であった。この温度では熱エネルギーによるn値（加工硬化係数）の増加は発生せず、温度上昇による軟化のみが生じていると考えられる。破断部には低ひずみ部との温度の差に起因する応力集中が生じるため、ひずみ速度が上昇するほどに早期に破断に至ったと考えられる。ひずみ速度が 60 s^{-1} では局所伸びの進行中に、材料の温度が473Kを超えている。そのため、温度上昇によるn値の増加が生じ、ひずみの集中が緩和されることで局所伸びが向上したと考えられる。ひずみ速度が 1260 s^{-1} に達すると、引張強さの発生前に広範囲で材料の温度が上昇することで、温度起因の応力低下と加工硬化の増加、並びに速度の増加による加工硬化の増加により同様伸び、局所伸び共に向上したと考えられる。また、局所伸びの発生が最大応力の発生と同時に生じ

ていることを実験で確認することができた。また、塑性変形が生じている間の温度上昇は最大応力の発生以降に生じ、破断の直前に急速に上昇することがわかった。FEM で破断を予測する場合は、変形中の温度上昇による応力変化および局所伸びの変化を考慮することにより、精度の良い解析結果が得られると考えられる。

提案した小型引張試験片を適用した高速引張試験により、温度が上昇し、その影響で材料の延性が変化することが確認できたので、ひずみ速度による延性の違いをFEMで再現できるかを評価すると共に、延性に影響を与える要因を検討した。解析には、動的陽解法のソフトを使用し、シェル要素とソリッド要素にて検討を行った。加工硬化特性のひずみ速度依存性および温度依存性を導入したFEM解析により、ひずみ速度による軟化挙動の違いを明らかにすることが出来た。最大応力の発生以降から破断に至るまでの応力低下機構はひずみ速度により異なる。ひずみ速度が 0.001 s^{-1} では温度の影響は少なく、最大応力発生以降の応力低下はボイドの成長および合体機構が支配している。ひずみ速度が 0.1 s^{-1} では温度上昇による材料軟化の影響が支配的である。ひずみ速度が 9.5 s^{-1} ではひずみ速度上昇による加工硬化の増加と、加工発熱による軟化が同程度に作用している。ひずみ速度が 60 s^{-1} では加工硬化の増加よりも、温度上昇による材料軟化が優位となっている。ひずみ速度が 1260 s^{-1} の大幅な延性向上はFEMでは再現できなかったが、動的再結晶による応力均衡が生じ延性が大幅に向上する。FEM計算においてシェル要素を用いた場合、平面ひずみを仮定できる要素サイズでは局所くびれによる応力集中を再現することができなかった。ソリッド要素を用いる場合は、メッシュサイズが小さいほど計算精度は向上する。ボイドの生成による体積の変化を考慮しない場合は、破断前の応力低下を再現することはできないことが分かった。以上より、変形速度に応じた高張力鋼板の延性予測には、ひずみ速度による加工硬化の変化と、温度上昇による材料軟化の両方を考慮することが必要であると考えられる。

上述より、変形速度に応じた高張力鋼板の延性には、ひずみ速度による加工硬化の変化と、温度上昇による材料軟化の両方が作用していることが明らかとなったので、次に、FEM解析により、材料延性の速度依存性の再現性を検討した。延性破壊の条件式は、多く提案されているが、延性破壊は、応力三軸度の影響を強く受けると言われているので、材料内の応力三軸度で破壊が評価可能な、Mohr-Coulomb の条件式を採用した。実験との比較をするために、引張試験で平面ひずみ状態を再現可能な試験片にて検討を行った。解析結果より、加工硬化のひずみ速度依存性、材料軟化の温度依存性および破断限界の温度依存性を考慮した計算を行うことにより、ひずみ速度毎に異なる応力の低下機構を再現することが可能となった。従来から実施されてきた、応力のひずみ速度依存性のみを考慮した計算では、破壊までの予測精度向上は困難なことが分かった。

上述までに構築してきた手法の自動車部品の衝突解析および成形解析への適用における課題を検討するために、導出したMohr-Coulombの破壊限界を用いて自動車シート製品の破断予測解析を実施した。シェル要素を使用する場合、最大応力発生後の断面積減少を計算できる要素モデルを使用する必要性が示唆された。ソリッド要素を使用したプレス成形解析の結果から、Mohr-Coulomb 則では破壊限界曲面の追従性が不足していることが明らかとなった。車両開発で使用するためには多様な応力状態で破壊限界ひずみを測定した上で、最適な破壊曲面を決定することが必要になると考えられる。

本研究により、破壊までの延性が変化するメカニズムが明らかになった一方で、破壊限界の予測には課題が残っている。Mohr-Coulomb 則に変わる破壊限界曲面を検討する必要性が示唆された。多軸応力状態での破壊限界調査のため、多数の実機試験が必要になる。簡便な試験による実験方法を模索していく必要がある。さらなる精度向上のために、破断直前の体積減少を引き起こすボイドの発生、成長ならびに、それらの温度依存性を再現したFEM解析手法の開発が期待される。本研究において確認された動的再結晶と思われる応力緩和現象の解明は、近年取り上げられることの多いホットスタンピングによる成形解析にも必須であると考えられる。