

予ひずみを与えられた高張力鋼板の高速引張特性

都城工業高等専門学校 機械工学科
助手 高橋明宏
(平成 15 年度研究開発助成 AF-2003004)

キーワード：1000MPa 級高張力鋼板、予ひずみ、スプリット・ホプキンソン棒法試験

1. 研究の目的と背景

コンピューターシミュレーションを使った CAE 解析による製造・設計技術は、従来の実体実験による試行錯誤に頼った技術よりも製品開発の面で高精度化・短納期化を可能にする。塑性加工の分野においてもコンピューターを駆使した量産技術の高度化が盛んである。CAE 解析による製造・設計手法に必要な基礎データは、引張応力-ひずみ特性であり、具体的には、ヤング率・降伏応力・加工硬化係数・引張強さ・破断ひずみ等が必要である。

高速圧延・プレス加工等のような、高速度荷重入力を受ける場合の高効率加工を目指すための CAE 解析に対し、静的な引張応力-ひずみ特性を用いて解析していることが現在問題視されている。鉄系合金はひずみ速度変化により機械的性質が大きく変化する¹⁾とされており、高ひずみ速度下での基礎的な実験データの取得が望まれている。しかも、一般的にプレス加工品は作業工程が単発ではなく、多発プレスにより成形を行う。故に予ひずみを与えられた薄板に繰り返しひずみが導入され、それが最終製品になっている。そのため、予ひずみを有する材料の高速引張特性も CAE 解析の高精度化には必要である。

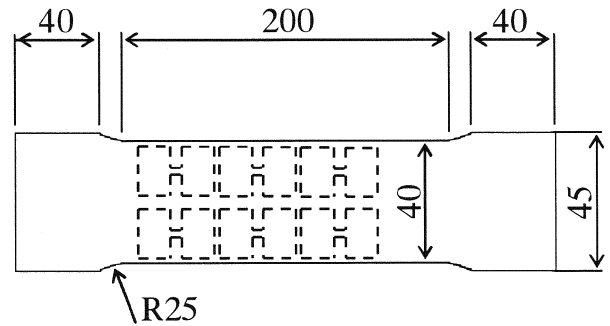
以上より、予ひずみを与えた材料について、高ひずみ速度下での引張応力-ひずみ曲線を取得することが本研究の目的である。高ひずみ速度域における引張試験は、スプリット・ホプキンソン棒法試験が適当であるが、薄板材の実験・解析データが少なく、本研究は薄板引張試験片のデータ収集の観点からも大変重要であると考えられる。

2. 実験方法

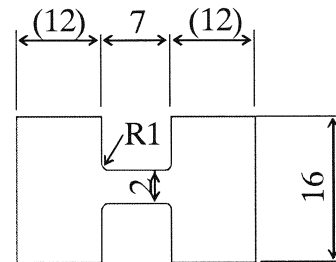
2.1 試験片

供試材は、日本自動車規格の低降伏応力型高張力鋼板 (Dual Phase 鋼) JSC 980Y (板厚 1.8mm) である。表 1 は供試材の化学成分である。図 1 (a) は、予ひずみを与える際に用いた試験片の形状であり、JIS Z2201 法に準拠して作製した。圧延方向に試験片の軸方向を一致させ、ワイヤカット法にて採取した。なお、材料ミクロ組織の形態変化を避けるため、切削加工後に熱処理は実施していないが、試験

片表面付近の切削域周辺と中央部とのマイクロピッカー硬度の変化はほとんど認められなかった。予ひずみを与えた後、スプリット・ホプキンソン棒法試験に供する微小引張試験片を負荷方向が試験片長手方向となるようにワイヤカット法にて採取した。図 1 (b) は、微小引張試験片の形状である。



(a) 予ひずみを付与したときの引張試験片形状



(b) 高速引張試験片形状

図 1. 各引張試験で用いた試験片形状

2.2 試験装置

予ひずみの付与、および準静的引張試験には、インストロン型万能試験装置 (島津製作所製オートグラフ AG-I : 容量 250kN) を用い、伸び計 (島津製作所製 DVE-201) を組み合わせて、ひずみ速度を 2.4×10^{-3} [1/s] とし、室温・大気中にて実施した。

表 1 本供試材の化学組成 (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Mo	Cu	Sn	Ni	Al	Nb
0.13	1.01	2.23	0.006	0.003	0.019	0.037	0.005	0.021	0.003	0.014	0.046	0.003

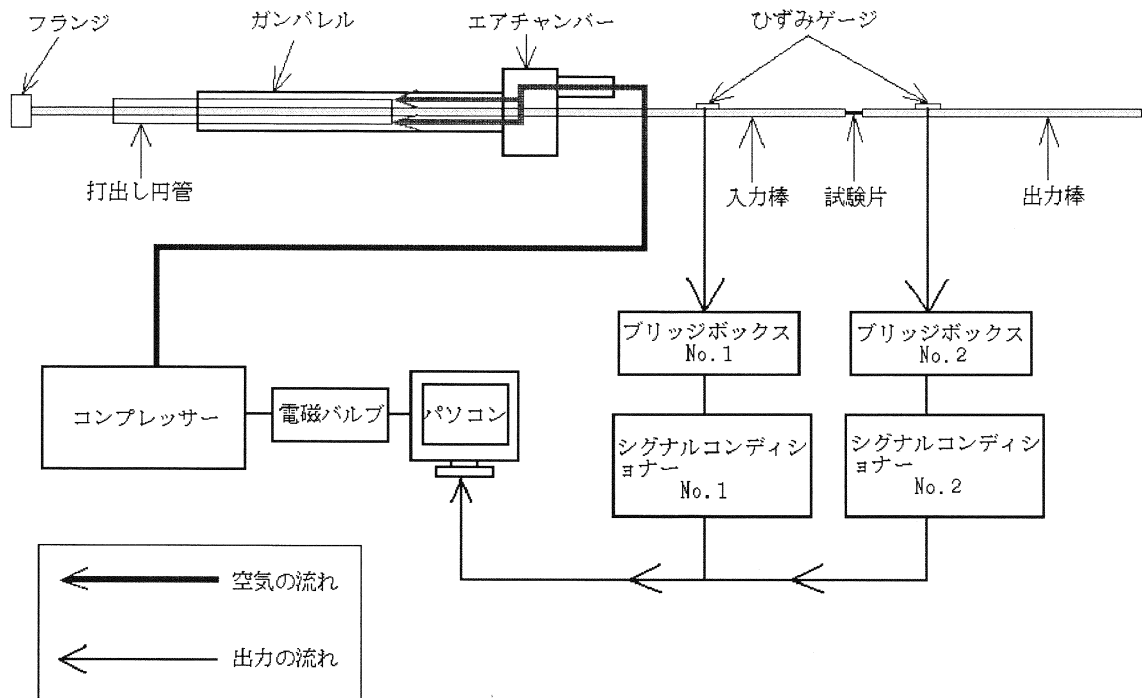


図2. スプリット・ホプキンソン棒法高速引張試験装置

図2は、本研究で用いたスプリット・ホプキンソン棒法高速引張試験装置である。この装置は、ホプキンソン棒（入力棒：SKD61材，長さ4000mm，直径16mm，出力棒：SKD61材，長さ2500mm，直径16mm），エアチャンバー，衝撃円管，負荷ブロックおよび測定系から構成されている。入力棒をまたぐように設置されたエアチャンバー内の圧縮空気を開放することにより衝撃円管を入力棒に沿って打ち出す。打ち出された衝撃円管は負荷ブロックに衝突し，反射引張応力波を入力棒に伝える。入力棒内を通過する引張応力波は試験片を通過し，一部は反射し，一部は透過する。この入射・反射・透過の各パルス在所定の位置に貼付したひずみゲージにより検出する。このように計測した入射・反射・透過パルスを一次元波動伝ば理論より得られた次式に適用することにより，高ひずみ速度域における応力-ひずみ曲線を得ることができる。Eは縦弾性係数である。

$$\varepsilon(t) = -\frac{2C_0}{L_0} \int_0^t \varepsilon_r(t') dt' \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L_0} \varepsilon_r(t) \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{AE}{A_S} \varepsilon_r(t) \quad (3)$$

ここで C_0 は棒内を一次元的に伝ばする縦波音速の速度， L_0 は標点間距離， ε_r は反射波によるひずみ， ε_t は透過波によるひずみ，E は縦弾性係数，A は棒の断面積， A_s は試験片の断面積である。 t' は反射波と透過波の波頭を一致させるために導入した積分変数である。

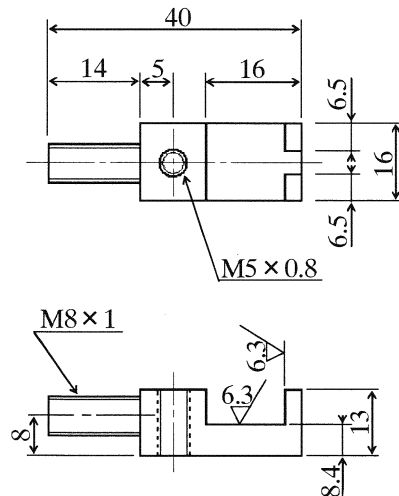


図3. 高速引張試験に用いるアタッチメント治具

2.3 高速引張試験法

供試材である高張力鋼薄板引張試験片は入出力棒の端面に取り付けるが，平板形状であるため，図3に示すようなアタッチメント治具を用いて取り付けられた。アタッチメ

ント治具と入出力棒の間、およびネジ部には、端面の摩擦をできるだけ軽減させ完全に密着させるために潤滑剤(ダウコーニング社製モリコート G-n ペースト)を付着させた。高圧タンク内の圧縮空気を作動弁によりエアチャンバーを通じて瞬時に開放することにより、銃身内の衝撃円管を入力棒の外周に沿って発射させる。この衝撃円管は入力棒の左端の負荷ブロック(フランジ)端面に衝突して圧縮応力波を発生させるが、一方の負荷ブロック他端面の自由端でただちに引張応力波に反転される。この引張応力波は入力棒内を一定の縦弾性波速度で左から右へと伝ばし、入力棒と試験片、および試験片界面で衝撃インピーダンスの違いにより一部は反射するが、残りは試験片内を通過し、内部で反射・透過を繰り返しながら出力棒へ通過する。図4に示すように、弾性棒中における応力波の伝ばの様子から入出力棒のひずみゲージ No.1 により入射(引張)ひずみパルス ϵ_i と、反射(圧縮)ひずみパルス ϵ_r が測定され、出力棒上のひずみゲージ No.2 により透過(引張)ひずみパルス ϵ_t が測定される。入射・反射・透過波は、応力波が干渉することなく測定できるように、試験片取付面より、1200mm(No.1)および 300mm(No.2)の位置に曲げひずみの影響を除去できるように上下面に貼付した2枚のひずみゲージにより検出した。ブリッジ回路の抵抗は120Ωで、直列に組んで240Ωの抵抗とした。計測データはデジタルオシロスコープにサンプリングタイム0.1μsecで取り込んだ。以上のような高速引張試験は準静的試験同様、室温・大気中にて実施された。

本装置で得られる高速引張試験のオシロスコープの波形の一部を図4に示す。

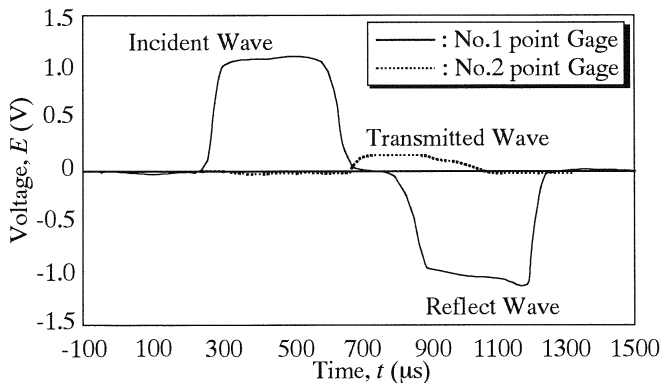


図4. 高速引張試験によるオシロスコープ波形

2.4 予ひずみの付与

本供試材の破断ひずみは31%程度で、均一ひずみレベルは15%であったため、予ひずみ量として0%、3%および10%の3段階を選定した。また、A社で製造された同材質の自動車用バンパーインナー補強部材(板厚1.2mm)を入手し、曲げ加工が施されている部位の平均曲率半径

R_{ave} を実測し、以下の式を適用し ϵ_{ave} を算出した。

$$\epsilon_{ave} = \frac{2R_{ave}}{t} \quad (4)$$

その結果、湾曲部位の板厚が変化していないとして ϵ_{ave} は15%生じていると推測され、予ひずみレベルの設定がプレス製品の正味の予ひずみレベルの範囲内に設定されていることを意味する。

3. 実験結果および考察

3.1 予ひずみ材の準静的および高速引張試験

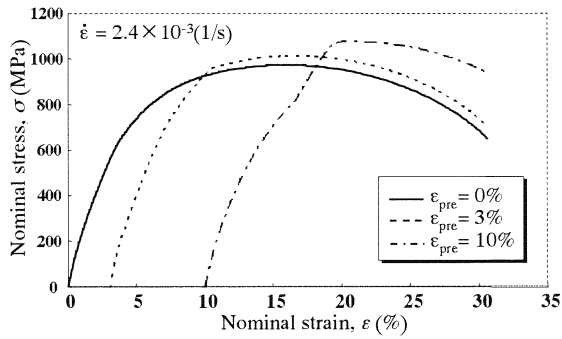
本研究で用いた引張試験装置から得られた応力-ひずみ曲線を以下に示す。同様に、高速引張試験装置から得られたオシロスコープ波形の入射波・反射波・透過波を一次元波動伝ば理論(式(1)~(3))に基づきデータ処理することにより、応力-ひずみ曲線を求めた。

図5(a)は、0%、3%および10%予ひずみ材の準静的引張試験後の応力-ひずみ曲線である。本供試材の加工硬化挙動は、予ひずみレベルの増加とともに降伏点の若干の増加が認められるが、塑性域の変形抵抗挙動のほとんどで一致していた。同図(b)および(c)は、0%、3%および10%予ひずみ材の高速引張試験後の応力-ひずみ曲線である。準静的引張試験結果と同様な挙動を示しているが、ひずみ速度 $7.2 \times 10^3 [1/s]$ の結果は、これよりも低速なひずみ速度に比較して応力-ひずみ曲線の形状が大幅に異なっていることが認められた。この要員として、低および高ひずみ速度ごとに使用した試験機が異なるため、試験機コンプライナンスなどの装置特性によるものと考えられる。

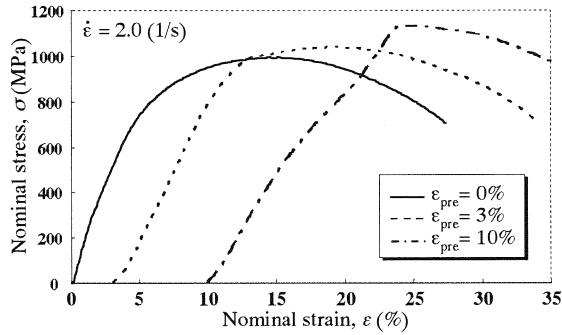
図6(a)は、0%予ひずみ材の応力-ひずみ応答に及ぼすひずみ速度の影響を示したものである。前述したように、弾性域でのコンプライナンス特性に有意差が確認されたが、最高強度の絶対値に注目してみると、ほとんど有意差は認められなかった。延性について、ひずみ速度 $2.4 \times 10^3 [1/s]$ での破断ひずみは31%であったが、ひずみ速度 $7.2 \times 10^3 [1/s]$ のそれは約19%減じていることが認められた。図6(b)は、10%予ひずみ材の応力-ひずみ応答に及ぼすひずみ速度の影響を示したものである。強度の変化が若干認められるものの、高ひずみ速度になるほど破断ひずみの低減が認められる傾向は、0%予ひずみ材と同様であった。

図7は、準静的および高速引張試験によって得られた結果をまとめたものであり、すなわち強度のひずみ速度依存性を示したものである。3%および10%予ひずみ材において、正のひずみ速度依存性が認められた。

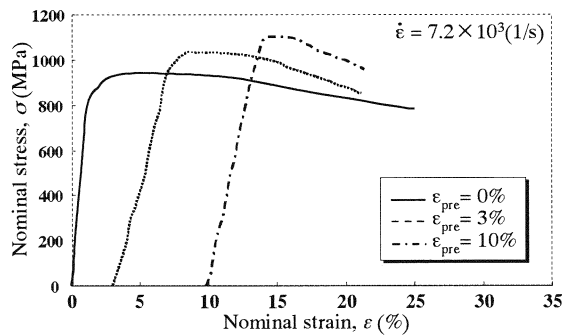
プレス部材の衝撃CAB解析を行うためには、高ひずみ速度域における構成式が必要となる。そこで、多くの汎用FEM解析の標準コードに採用されているCowper-Symondsの構成式⁽²⁾について検討した。Cowper-Symondsの式は動



(a) 2.4×10^{-3} [1/s]での試験結果



(b) 2.0 [1/s]での試験結果



(c) 7.2×10^3 [1/s]での試験結果

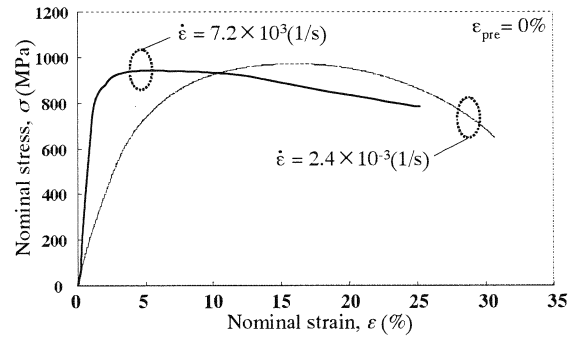
図5. 各ひずみ速度での応力-ひずみ曲線

的降伏応力 σ_d と準静的降伏応力 σ_s の関係を示したものであり、 σ_d を最高強度とし、最高強度における関係式として置き換えれば最高強度のひずみ速度変化を意味する関係式と考えることができる。

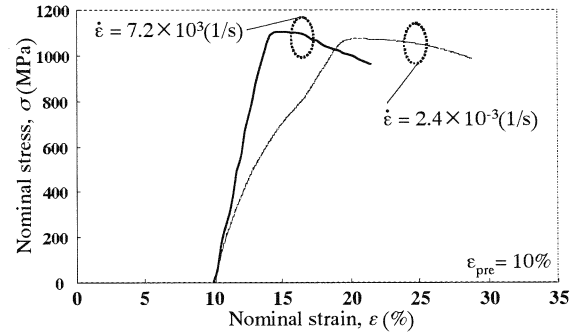
$$\frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/P} \quad (5)$$

ここで、DおよびPは材料定数であり、次のようにして決定した。まず式(5)を両対数に変換・整理すると次式が得られる。

$$\log_{10} \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_s} - 1 \right) = \frac{1}{P} \log_{10} \dot{\epsilon} - \frac{1}{P} \log_{10} D \quad (6)$$



(a) 0%予ひずみ材



(b) 10%予ひずみ材

図6. 0%および10%予ひずみ材の応力-ひずみ曲線に及ぼすひずみ速度の影響

そこで、本研究にて得られた各ひずみ速度における最高強度を式(6)に代入し、最小二乗法により、高張力鋼に関するPを求めた。なお、0%予ひずみ材は正のひずみ速度依存性を示していないため、式(6)を当てはめることはできない。そこで、3%および10%予ひずみ材についてのみPを算出した。その結果、3%予ひずみ材で $P = 34.1$ 、10%予ひずみ材で $P = 19.8$ であった。Pの値が低いほど最高強度のひずみ速度依存性が大きいことを意味

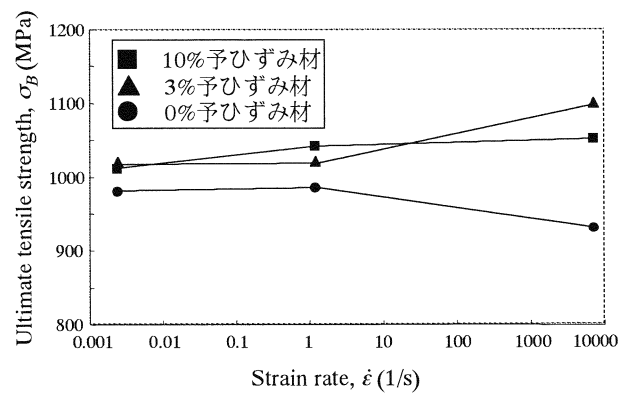


図7. 高張力鋼板の強度のひずみ速度依存性

している。軟鋼に対して、 $P = 5^{(3)}$ であることが知られており、高張力強度のPはその4分の1程度であり、強度のひずみ速度依存性がほとんど認められないことがわかった。本供試材であるDP鋼は軟質なフェライト相と硬質なマルテンサイト相で構成された複相組織鋼板⁽⁴⁾である。

フェライト相は bcc 結晶構造であり,強度のひずみ速度感受性が高いため,軟鋼はP値が高い.本供試材の詳細なマイクロ組織観察は行っていないが,マルテンサイト組織の分布性状によって今回のようなP値が認められたものと考えており,組織観察などにより以上の結果の要因となったマイクロ組織的因子等を突き止めていく計画である.

4. 結言

1000MPa 級高張力鋼板に予ひずみを付与し,高速引張試験を行った.結言を以下にまとめると,

1)試験機のコンプライアンス特性が異なるために,準静的引張試験と高速引張試験で得られた応力-ひずみ曲線の相違が確認された.

2)予ひずみレベルに関わらず,強度において,正のひずみ速度依存性が確認された.

3)ひずみ速度感受性を表す指数を算出した結果,本研究で用いた高張力鋼板は軟鋼に比べ,4分の1程度のひずみ速度感受性を示すことが認められた.

5. 参考文献

(1)林卓夫・田中吉之助:衝撃工学(1988),日刊工業新聞社.

(2)G.R.Cowper and P.S.Symonds: Brown University Division of Applied Mech. Report No.28(1952).

(3)上西研・関根務・丸市毅・大崎修平:日本機械学会論文集A編70-690,(2004),90-272.

(4)高橋学:ふえらむ,7-11,(2002),34-41.

6. 謝辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成(AF-2003004)によって行われました.ここに付記し,財団および関係各位に深く感謝の意を表します.