冷延鋼板の降伏挙動に及ぼす引張速度の影響*

渡 辺 孝 司**

Effect of Strain Rate on Yield Behavior of Cold Rolled Steel Sheets

by

Takashi WATANABE

(Kurume Institute of Technology, Kurume)

Yield behavior of low-carbon steel sheets (0.07% C) has been examined under the strain rate of 10^{-4} to 10^{-1} /sec at room temperature using an Instron tensile machine. Stress-strain curves have been recorded by using a transient converter (NF, E-5001 : 8 bits $\times$ 1024 words), since the response of a X-Y, T recorder is not sufficient for the measurements under high strain rates. The experimental results by the transient converter show that the upper and lower yield points appear clearly before the crosshead speed reaches to a given value of high strain rate. The transient converter is found most desirable in order to observe the yield behavior under high strain rates. The results also show another break point of the strain rate dependence of yield stress at the strain rate of $\sim 3 \times 10^{-3}$ /sec, which is different from M. J. Manjoir (1944)'s strain rate i.e. $\sim 10^{-1}$ /sec. The strain rate dependences of yield stress, yield point elongation, and tensile strength in the range of high strain rate above $\sim 3 \times 10^{-3}$ /sec are larger than those at lower strain rates. The yield stress is much more sensitive to the strain rate as compared with the tensile strength.

(Received Feb. 15, 1978)

キー・ワード：冷延鋼板，降伏特性，ひずみ速度依存性，引張速度，引張特性

1 緒 言

薄板の引張試験機としてほとんど振り子型のものが使用されているが，低，中速度 ($10^{-4} \sim 10^{-1}$ /sec) の引張試験機として最近，インストロン型引張試験機が広く普及してきた。この試験機のクロスヘッド速度の制御は，同期モータまたは直流サーボモータの駆動方式により速度を一定にしており，クロスヘッド速度は駆動制御方式により若干異なるが $0.005 \sim 1000$ mm/min の範囲である。またこの試験機の荷重検出には動変位の極めて小さく，さらに過渡応答性に優れたロードセル型の荷重検出器が利用されている。

冷間圧延鋼板の種々の引張速度における引張試験特性値の文献は数多くあり，強度と変形特性にひずみ速度依存性があることは周知の事実であるが，それらの文献は引張速度が 50 mm/min 以下のデータが多く，引張速度が 100 mm/min 以上になると上，下降伏点と降伏伸びが低下し，降伏挙動が明確でないという報告⁵⁾⁶⁾もある。一方，理論的にはひずみ速度の大きいほど降伏現象が顕著になると考えるのが一般的であり，降伏現象とひずみ速度との関係について，より詳細な検討

が必要と考えられる。

本研究では冷間圧延鋼板の引張試験をインストロン型引張試験機で実施し，降伏点近傍の応力増加速度およびひずみ速度や試験機速度特性を詳しく計測して，ひずみ速度が $10^{-4} \sim 10^{-1}$ /sec における降伏特性値と引張強さのひずみ速度依存性を実験的に検討した。

2 実験方法

供試材料では市販の冷間圧延鋼板 (SPCC)，板厚 0.7 mm であり，その化学組成と通常の引張条件における機械的性質を Table I, II に示す。試験片はこの素材の板幅方向の中央部から，引張方向が圧延方向に一致するように採取し，Fig. 1 に示す JIS 5号試験片に仕上げた。

引張試験機にはインストロン型万能材料試験機 (新興 TOM-500，定格 500 kg) を使用し，チャック間距離は 100 mm で一定とした。荷重検出にはロードセルと動ひずみ計 (新興 DS6/MTY-A)，また伸び計測には差動トランス式伸び計 (新興 TDE-50-0.5) を用いた。荷重と伸びの記録は低速側では X-Y, T レコーダ (理研電子 D-72BP) を，高速側では逐次比較型波形記憶装置 (NF, E-5001 : 8 bits $\times$ 1024 words) を適用した。クロスヘッド速度 (以下，引張速度という)

* 原稿受理 昭和53年2月15日

** 正会員 久留米工業大学 久留米市上津町

Table I. Chemical composition of material (wt. %).

C	S ₁	Mn	P	S
0.07	0.01	0.28	0.008	0.015

Table II. Mechanical properties of material.

Lower yield point σ_{SL} (kg/mm ²)	Tensile strength σ_B (kg/mm ²)	Elongation δ (%)
21.6	30.5	46.4

Tension speed: 10(mm/min) at room temperature.

Fig. 1. Dimension of JIS No. 5 sheet steel specimen ($t=0.7$ mm).

は 0.5~500 mm/min (13段) とし、室温 (16~18℃) で実験した。

試験機のカrossヘッド駆動は直流サーボモータ駆動、ワード・レオナード制御方式である。Fig. 2 にはサーボモータ駆動タコ電圧より記録した、Crossヘッド始動直後における高速側Crossヘッド速度特性曲線を示す。また Table III には高速側のカrossヘッド移動速度が設定速度に上昇する時間 t_1 、と定格速度に到達するまでの時間 t_2 の応答時間特性をまとめた。

Fig. 2. Crosshead speed-distance curves just after crosshead was started. (Testing machine: Shinkoh TOM-500, Ward-Leonard controlled DC 200 W servo motor.)

Table III. Response time of crosshead starting.

Set speed v (mm/min)	t_1^* (sec)	t_2^{**} (sec)
100	0.18	0.24
200	0.19	0.33
300	0.20	0.38
500	0.21	0.48

* t_1 : Rise time until target speed.

** t_2 : Rise time until rated speed.

3 結果と考察

3.1 応力-ひずみ線図

本供試材について引張速度を変えた場合の応力-ひずみ線図を Fig. 3 に示す。引張速度が 1~50 mm/min までの上、下降伏点と降伏伸びはひずみ速度依存性を持ち、いずれもひずみ速度増加により増大している。通常、軟鋼は応力を受けると本質的に弾塑性係数に伴うこう配を示しながらほぼ直線的に上降伏点に到達するが、引張速度が 100 と 200 mm/min のペン書レコーダのデータによると見掛けのうえでは上降伏点は減少し、さらに 300 と 500 mm/min になると応力-ひずみのこう配が小さくなっている。これらはいずれもペン書レコーダの追従遅れとみられ、このような場合には降伏特性値の計測ミスを犯しやすいと考えられる。そこで Fig. 3 ではペン書レコーダによる応力-ひずみ線図と波形記憶装置によるそれとを対比してみた。波形記憶装置のデータは、50 mm/min 以下の引張速度ではペン書レコーダと同一の記録を示しており問題はないが、引張速度が 100 mm/min 以上の高速側になるとペン書記録 (Fig. 3 の実線) とは異った曲線 (Fig. 3 の破線) を示しており、応力-ひずみ線図のこう配は低速側と同一で、上、下降伏点と降伏伸びは引張速度上昇に伴い増大し、明らかな速度依存性の存在を示している。また引張速度が 100 mm/min 以上の高速側においても上、下降伏点の存在が確認できる。

Fig. 3. Recorded nominal stress-strain diagrams.

上述のように中速域 ($\sim 10^{-2}$ /sec) 以上のひずみ速度における正確な降伏挙動の把握には、試験機付属のペン書レコーダのような応答速度の遅い記録計は不適である。これに対し応答速度の早い電磁オシロやシンクロスコープ等による記録も考慮されるが、これらは記録幅に限度があり、また精度も充分でないので、降伏挙動を正確に把握するには、応答性と拡大精度に優れた波形記憶装置を適用することが好ましい。

3.2 鋼の降伏挙動とひずみ速度

応力増加速度とひずみ速度の関係についての実験結果を論じるに先立ち、ここでは鋼の降伏挙動とひずみ速度の関係に触れておく。インストロン型引張試験機で引張速度を一定にしたときの鋼の応力-ひずみ線図とそれに対応した変位成分 (試験機と試験片への変位

Fig. 4. Typical partition of displacement between machine and specimen components.

量の配分)を Fig. 4 に示す。引張試験の際に試験機も荷重検出器を含めて弾性変形をするので、試験片が弾性的に変形している間は、与えられたクロスヘッド変位の一部分は荷重検出器と試験機のフレーム等の機械変位 (δ_m) として消費され、残りの部分が試験片変位 (δ_s) として作用する。また上昇伏点までを弾性域と考えれば、上昇伏点までは応力増加速度 $\dot{\sigma}$ と試験片のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を一定にして試験を行ったことになり、両者の関係は(1)式のように表すことができる。ただし、 E は試験片の縦弾性係数である。

$$\dot{\sigma} = E \cdot \dot{\epsilon} \quad (1)$$

つぎに non-inertia type のインストロン型引張試験機による降伏挙動を Fig. 5 に示す機構で考えてみる。試験片のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は弾性限度まで $\dot{\epsilon}_e$ の弾性ひずみ速度で変形するが、弾性限度を過ぎた瞬間、試験片平行部の両端からリュースダース帯が発生し、塑性変形が始まる。そのときの試験片の平均ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は(2)式に示すように塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_p$ と弾性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_e$ 。

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_p + \dot{\epsilon}_e \quad (2)$$

との和で与えられるが、塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_p$ が弾性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_e$ に比べて十数倍と著しく大きく、またロードセルの荷重検出棒のひずみ速度 $\dot{\epsilon}_K$ よりも著しく大きくなるために、ロードセルの荷重検出棒がゆるんで荷重降下現象が生じる。これが上昇伏点であって、すなわち上昇伏点は試験片ひずみ速度がある瞬間 (転位の著しい増殖が開始された時点)、引張速度より急激に大きくなるために生ずる荷重降下現象といえる。つぎに上昇伏点を過ぎて応力増加速度 $\dot{\sigma}$ が $\dot{\sigma} < 0$ 、すなわち、試験片ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ と引張速度 $\dot{\epsilon}_T$ の関係が $\dot{\epsilon} > \dot{\epsilon}_T$ の間は応力降下が生じ、 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_T$ となったときには $\dot{\sigma} = 0$ となり応力はほぼ一定値を示し、降伏応力が

Fig. 5. Schematic illustration of an Instron type tensile testing machine.

一定となる。これが下降伏点である。よって上昇伏点は試験機型式と荷重検出機構の有効ばね常数によっても支配される応力値であり、不安定な現象といえる。

3・3 応力増加速度およびひずみ速度成分特性

本供試材の弾性域における応力増加速度と引張速度との関係を Fig. 6 に両対数目盛で示す。なお引張速度が 50 mm/min 以上のデータは、波形記憶装置より得たものである。弾性域での応力増加速度は当然のことであるが、引張速度に比例して直線的に上昇していることが理解できる。ただし、引張速度が 200 から 500 mm/min にかけて応力増加速度が回帰直線から、わずかにずれて小さくなっている。これは 3・4 節で述べるように試験機の引張速度が定格速度に到達してなかったことと対応している。よって設定速度が 500 mm/min の応力増加速度は Fig. 6 のプロット値を水平に移動し回帰直線と交わった引張速度に換算すれば、実際には引張速度が約 400 mm/min のそれに相当することが解る。

Fig. 6. Logarithmic plot of stress rate vs. crosshead speed in elastic region.

本実験におけるひずみ速度成分特性を Fig. 7 に両対数目盛で示す。引張速度が 50 mm/min 以上のデータは波形記憶装置より得たものである。Fig. 7 の $\dot{\epsilon}_e$ 、 $\dot{\epsilon}_p$ と $\dot{\epsilon}_T$ はそれぞれ試験片標点間の実測ひずみ速度で、ここで $\dot{\epsilon}_e$ は弾性域ひずみ速度、 $\dot{\epsilon}_p$ は降伏域の平均ひずみ速度、ならびに $\dot{\epsilon}_p$ は加工硬化域の初期ひずみ速度を表している。

引張試験の際に、まず試験片は弾性域ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_e$ で上降伏点に達する。Fig. 6, 7 から与えられた v の値についてそれぞれ $\dot{\sigma}$ と $\dot{\epsilon}_e$ を求め、(1)式を用い縦弾性係数を求めると E の値は $2.10 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ となり、上降伏点までは応力増加速度とひずみ速度の比を一定にして試験を実施したことになる。つぎに弾性域ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_e$ から降伏域ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_y$ に移るときには、両者の速度比 ($\dot{\epsilon}_y/\dot{\epsilon}_e$) は12.6になり、このような急激なひずみ速度の増大が前述したように上降伏点に対応する。降伏域の標点間ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_y$ は引張速度 $\dot{\epsilon}_T$ と同一速度となり、降伏伸びを伴いながら応力のほとんど変化しないひずみ区間（下降伏点）を生ずる。降伏終了後は加工硬化域ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_p$ によって変化し、残りのひずみ速度成分はロードセルのひずみ成分と一部、フレームの機械的ひずみ成分に消費される。Fig. 7 において実測した $\dot{\epsilon}_e$, $\dot{\epsilon}_y$ と $\dot{\epsilon}_p$ は、引張速度が200~500 mm/min にかけて回帰直線よりわずかに小さくなっている。これは Fig. 6 の $\dot{\sigma}$ の場合と同様の現象であり、引張速度が定格速度に到達してなかったことに起因している。

Fig. 7. Characteristics of strain rate partition on a log scale

3・4 上降伏点到達時間と試験機の過渡応答性

上降伏点到達時間と引張速度応答特性の関係を Fig. 8 と 9 に示す。図中の t_y は上降伏点到達時間の実測値を示し、 t_y' は弾性域応力増加速度と上降伏点の値より求めた計算値で、チャックの滑りやくい込み時間を無視した正味到達時間である。実測値 t_y は、引張速度が200~500 mm/min の範囲 (Fig. 8 のAの部分) で回帰直線からはずれている。これを Fig. 9 に拡大して示すが、この現象は Table III に示した引張速度応答時間を考慮することによって理解できる。すなわち

Fig. 8. Rise time until upper yield point and response of crosshead.

Fig. 9. Enlarged detail of A in Fig. 8.

Fig. 9 において引張速度が目標速度に到達する時間 t_1 と定格速度に到達する時間 t_2 を考慮すると、設定速度が500 mm/min の上降伏点到達時間の実測値 t_y は引張速度上昇域にあり、この測定点を回帰直線に向って水平に移動すると引張速度が約400 mm/min で回帰直線と交わる。したがって引張速度を500 mm/min に設定したときの上下降伏点の値は、約400 mm/min の引張速度上昇域で引張った応力値に相当する。この事実は Fig. 6 の応力増加速度特性および Fig. 7 の弾性域試験片ひずみ速度において、引張速度500 mm/min での実測値 $\dot{\sigma}$, $\dot{\epsilon}$ が両者とも回帰直線からずれて低い値を示しており、測定点を回帰直線に向って水平に移動すると両者とも約400 mm/min の引張速度に相当する値を示すことと対応している。また引張速度が300と200 mm/min における上下降伏点到達は速度制御域に発生しており、安定速度域ではない。よって安定速度域で上下降伏点に到達可能な速度の限界は、引張速度100 mm/min 以下である。以上の考察に基づけば Fig. 6 と Fig. 7 の両者において、高速側引張速度(200, 300, 500 mm/min)での実測値 $\dot{\sigma}$, $\dot{\epsilon}$ が回帰直線から、はずれて低い値を示していることが理解できる。

ここで記録計の応答時間を考慮すると、通常、インストロン型試験機にはペン書式自動平衡型 X-Y レコーダが付属しており、3・1 節で述べたようにペンの追従性が問題となってくる。例えば、荷重記録 (X) 軸のペン追従性をフルスケールにつき約 1 sec とすれば、Fig. 9 に示したように引張速度 100 mm/min の場合の本供試材の上降伏到達時間は 0.6 sec であり、追従不可能となる。

よって降伏挙動を正確に把握するには、試験機の引張速度応答特性と (上) 降伏点到達時間との関連性を考慮するとともに、応答性を考慮した記録計の選択が重要である。

3・5 降伏特性値に及ぼす応力増加速度とひずみ速度の影響

低炭素鋼の降伏応力におけるひずみ速度依存性の過去の研究について述べてみる。Manjoin は 10^{-6} ~ 10^2 /sec のひずみ速度範囲で室温の引張試験を行って約 10^{-1} /sec のひずみ速度を境として下降伏点のひずみ速度依存性の程度が異なることを見いだしている。その後、Morrison や大森らも Manjoin の結果と類似の報告をしている。また Morrison は約 10^{-1} /sec 以下における降伏応力のひずみ速度依存性が炭素含有量に無関係であることを実証している。Manjoin らの研究結果は広範囲にひずみ速度を変えているのに、測定点が少いので約 10^{-1} /sec 以下のひずみ速度では、単一のひずみ速度依存性を示しているかのように見られるが、この境界ひずみ速度 (約 10^{-1} /sec) 以下でのひずみ速度を細かく変えた詳細な検討がされていない。これに対し、本実験では次に述べるように約 10^{-1} /sec 以下のひずみ速度においても、降伏点のひずみ速度依存性の傾向が変わるような境界ひずみ速度の存在することを見いだした。

上降伏点に及ぼす弾性域のひずみ速度と応力増加速度の影響を Fig. 10 に示す。上降伏点のひずみ速度依存性は、試験片のひずみ速度が約 2.4×10^{-4} /sec あるいは応力増加速度が約 $5 \text{ kg/mm}^2 \cdot \text{sec}$ を折れ点として異なった速度依存性を示し、高速側の方が低速側より、その依存性は著しく大きい。高引張速度 (200, 300,

Fig. 10. Effects of strain rate and stress rate on upper yield point.

500 mm/min) の上降伏点のデータは、3・3 および 3・4 節で述べたように引張速度不安定域のデータであるから、Fig. 6, 7 または Fig. 9 と同様に真の速度に換算して Fig. 10 にプロットすると、ここでも回帰直線に合致することが確かめられる。

下降伏点と降伏伸びに及ぼす降伏域のひずみ速度の影響を Fig. 11 に示す。下降伏点と降伏伸びのひずみ速度依存性は、試験片のひずみ速度が約 3×10^{-3} /sec を折れ点として上降伏点と同様に異なる二種のひずみ速度依存性を示し、この境界速度より高速側の方が低速側よりひずみ速度依存性は大きい。また同様に、高引張速度側 (300 と 500 mm/min) の下降伏点のデータは、速度不安定域のデータであるから回帰直線よりわずかにずれている。これも Fig. 7 より補正し、補正值としてプロットすると回帰直線に合致することが確かめられる。

Fig. 11. Effects of strain rate and crosshead speed on lower yield point and yield point elongation.

3・6 降伏特性値と引張強さに及ぼす引張速度の影響

Fig. 12 は降伏特性値と引張強さの引張速度依存性をまとめたものである。Fig. 12 に示すように降伏特性値と引張強さは、引張速度 10 mm/min を境にして速度依存性の傾向が変わっている。この境界速度は上降伏点については約 2.4×10^{-4} /sec のひずみ速度に、また下降伏点と降伏伸びについては約 3×10^{-3} /sec のひずみ速度に対応している。

Fig. 12. Effects of crosshead speed on yield behavior and tensile strength.

引張速度が 10 mm/min 付近より高速側になると、上、下降伏点の差が明瞭に現れるようになり、速度依存性は上降伏点の方が下降伏点より大きい。引張強さの速度依存性は、引張速度 10 mm/min 付近を折れ点としてわずかにこう配が変わるが、降伏応力の速度依存性に比べてその依存性は著しく小さい。降伏伸びの速度依存性は下降伏点の速度依存性とはほぼ同様の傾向を示している。降伏比の速度依存性も引張速度 10 mm/min 以上の高速側で大きい。これは当然、下降伏応力の速度依存性が引張強さのそれよりもはるかに大きいことに起因している。

以上の実験事実をまとめると、上、下降伏点、引張強さおよび降伏伸びは、室温で引張速度が 0.5~500 mm/min の範囲で変動した場合、10 mm/min の引張速度を境界にして速度依存性の傾向が異なる。また、この境界の低、高速側とも強度特性 σ は $\sigma = A + B \log \dot{\epsilon}$ (A, B は定数) および降伏伸び δ_y は $\delta_y = A' + B' \log \dot{\epsilon}$ (A', B' は定数) に従うひずみ速度依存性を示す。このひずみ速度依存性は引張強さについてよりも上、下降伏点および降伏伸びの降伏特性値について顕著であり、降伏応力については上降伏点の方が下降伏点よりもその影響は大きい。また Manjoin が見いだした下降伏点のひずみ速度依存性の境界速度は約 $10^{-1}/\text{sec}$ であり、これ以下では単一のひずみ速度依存性を示すものとみられていたが、 $10^{-4} \sim 10^{-1}/\text{sec}$ のひずみ速度範囲を詳細に調べた本実験では、約 $3 \times 10^{-3}/\text{sec}$ を境界として下降伏点などのひずみ速度依存性の傾向が異なることを新たに見いだした。

4 結 言

冷延鋼板の室温での低、中速域 ($10^{-4} \sim 10^{-1}/\text{sec}$) 引張りにおける降伏挙動、降伏特性値と引張強さのひずみ速度依存性をインストロン型試験機を用いて詳細に検討した結果、下記の事実が明らかとなった。

(1) 降伏挙動を正確に把握するには、試験機の引張速度応答特性と降伏点到達時間との関連性を考慮するとともに、応答性を考慮した記録計の選択が重要であ

る。

引張速度が 100 mm/min 以上の高速側においても上、下降伏点は存在し、逐次比較型波形記憶装置を用いれば、これらが明瞭に検出測定できる。

(2) Manjoin の境界ひずみ速度 ($\sim 10^{-1}/\text{sec}$) とは、別の境界ひずみ速度を見いだした。すなわち、上、下降伏点、引張強さと降伏伸びは、引張速度が 10 mm/min (ひずみ速度が約 $3 \times 10^{-3}/\text{sec}$) 付近を境界として異なる二種のひずみ速度依存性を示し、この境界の低、高速側とも強度特性 σ は $\sigma = A + B \log \dot{\epsilon}$ (A, B は定数、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度) および降伏伸び δ_y は $\delta_y = A' + B' \log \dot{\epsilon}$ (A', B' は定数) に従う。ただし、低速側と高速側で定数の値が異なる。

(3) ひずみ速度依存性は引張強さにおけるよりも上、下降伏点と降伏伸びの降伏特性値において顕著であり、降伏応力については上降伏点のほうが下降伏点よりもその依存性は大きい。

終りに、本研究に際し始終、ご指導とご提言をしていただき、さらに貴重な文献と資料をご提供いただいた久留米高専教授岩元兼敏博士、および始終、激励を賜った元本学教授長友俊一先生に対し深甚の謝意を表します。

(昭和52年11月22日 第28回塑性加工連合講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 吉田清太, 第9回塑性加工シンポジウム前刷集, 13 (1964).
- 2) 花井 諭, 塑性と加工, **6**, 641 (1965).
- 3) 宮内邦雄, 福井伸二, 第16回塑加連前刷集, 121 (1965).
- 4) Fischer, F., Metal, **10**, 419 (1965).
- 5) 薄鋼板成形技術研究会第2期報告書, 123 (1966).
- 6) 岩元兼敏, 日本鋼構造協会誌, **5**, 29 (1965).
- 7) Manjoin, M. J., J. Appl. Mech., **11**, A-211 (1944).
- 8) Morrison, J. L. M., Engineer, **158**, 183 (1934).
- 9) 大森正信, 吉永芳豊, 武井英雄, 日本金属学会誌, **29**, 1087 (1965).
- 10) 大森正信, 吉永芳豊, 塑性と加工, **8**, 297 (1967).