軟 鋼 の 降 伏 点⁽¹⁾東 村 隆 雄⁽²⁾

Yield Point of Mild Steel

by Takao TSUKAMURA

The yield point of mild steel under the low stretching speed is unstable and shows yield phenomenon of various types. Under the same stretching speed the yield process in which the stress increases gradually from a low stress value progresses slowly, the yield process which begins with a high stress value terminates instantaneously, and the yield process which begins with medium stress value is medium. Therefore the writer considers the so-called upper and lower yield point as the super-saturated state. Thus the lowest saturated yield point is found from many low stretching tension tests, and the mechanism of yield phenomenon is given. This lowest yield value is nearly 60 % of the usual lower yield point.

1. 緒 言

軟鋼の降伏点および類似の結果は古く Wickstead⁽³⁾, Bach⁽⁴⁾ 以来多くの研究者によって研究論議せられているが、その意義、定め方に関しては意見はいまだ一致せず既往の諸実験を完全に満足するものは存在しないようである。

著者は先に弾性と塑性との限界として比例限度、弾性限度をすべて降伏点のみをとり、金属材料の降伏点には速度を規定しその一定弾性ひずみ速度の引張試験において材料の結晶内のすべり面中に初めてすべりの始まる応力の限度すなわち材料のひずみ速度が増大し始める応力の限度を降伏点とすべきであることを、またこれは鏡式伸計その他により測定し得ることを明らかにした⁽⁵⁾。本報告ではこの観点にしたがって低引張速度実験を行いその結果に基づいて軟鋼の降伏を論ずるものである。

2. 既往の諸研究

軟鋼の降伏点に関する文献を十分に省みることはほとんど不可能なことであるから特に重要な研究について考察を試みる。

降伏点は材料の強度としてまた弾性と塑性との限界として塑性理論上重要な意義をもつものであるが、前節に述べたようにすべりの始まりとすることを根本に置いて考えなければならない。周知のように軟鋼の降伏点には上降伏点と下降伏点とが名付けられている。上降伏点に影響を及ぼすものは荷重適用速度⁽⁶⁾、試験片の形、仕上の程度⁽⁷⁾および軸荷重⁽⁸⁾などでこれらにより相当大きく変化し全く見られない場合も生じてくる。上降伏点は測定の便宜上から実際に使用され JES にも採用されてはいるが、このように材料について一定でないと考えられるため材料の強度その他に対

して不適當であるとされてきた。しかし上降伏点は実際に降伏が開始する点、すなわちすべりが始まる点と言うことにおいて根本的な重要性があることを認めなければならない。一方下降伏点は長く材料について一定であり、上降伏点のように種々の影響によって変化しないものであると考えられてきた⁽⁹⁾。中西教授はこの点に立脚して一連の実験を行い、降伏過程は不均

第 1 図

質であって既に降伏した部分は既に降伏の全過程を終って第 1 図 C の状態にあり、いまだ降伏していない部分は完全に弾性で A の状態にあり両者平均してたとえば P の状態にある。すなわち弾性、塑性两部分が共存していることを明らかにし降伏現象を水の氷の場合と同様に考えて A' は過飽和状態であり、降伏点としては弾性、塑性両状態の共存している σ_y なる応力を取るべきであるとし、この概念にしたがって引張り、曲げ、ねじり各下降伏応力間の関係を明らかにされた⁽¹⁰⁾。

一方 Welter 氏は試験機の中にばねを軟鋼試験片

第 2 図

と直結して引張試験を行い示唆に富む結果を得た⁽¹¹⁾。かかる実験の結果は第 2 図に示すように全く上降伏点を示さずあたかも硬鋼の応力-ひずみ線図のごとき観を与える。

Welter 氏は曲線の形が試験機の弾性に関係するとし、Hard Machine, Soft Machine の名を与え降伏点としては第 2 図の S 点を取り、この点は従来の下降伏と大差ないことを示した。しかし試験機の弾性のために上降伏点がなくなると考えることは、奇異の感を与え

る。第3図破線のような曲線となるならば理解されることであるが得られるものは実線のごときものでこれはむしろ、ばねによる試験片に及ぼす引張速度の影響(同じ試験機引

第 3 図

張速度でもばねがあれば試験片に加わる引張速度は小となる)と考えるのが妥当であろう。もちろん曲線がなめらかなのはばねの影響として容易に理解されることである。

しかしながらいわゆる下降伏点を採用すると言う理論は次のような根本的疑点をひき起す。すなわち、弾性状態と塑性状態とが共存する場合といまだ降伏部分の一つもない全部弾性の状態にある場合とでは条件が異なっている。一部分が降伏すればまだ降伏しない部分との境界に応力の集中を生じ、降伏した部分が一つもない場合よりも低い応力で降伏が起るのではないか。更に引用される氷点は水が氷ってゆく温度であり、 τ_y もまた同様に降伏が進行してゆく応力であって両者とも直ちにその始まりであるとは言われない。注意すべきことは氷の場合は氷は氷点以上の温度では氷らないが軟鋼の場合は τ_y 以下の応力で降伏が始まらないと言う確かな証拠はない。これらは後にひずみ速度の影響、その他の実験によって明らかになるであろう。

これら下降伏点が一一定であると言う考え方に対し、Elam 氏は数種の試験速度で引張試験を行い上昇伏点はもちろん下降伏点もまた試験の速度によって変化することを示した⁽¹²⁾。その結果は上昇伏点よりもかえって下降伏点の方が大きい変動を示している。

以上の諸研究はいずれもなぜ軟鋼および一部の金属のみに著明な降伏現象が生ずるかと言う問題については何らの解決も与えられない。黒田氏は金属組織学的、顕微鏡的に降伏発生機構を研究せられた⁽¹³⁾。その結果降伏点踊り場には材料において必ず Lüders しまの発生を伴い、境界組織が完全な焼なまし状態においてのみ発生することが確かめられ、したがって軟鋼は境界組織と地鉄とからなるいわゆる蜂窩組織で形成せられており、この均一組織がある時始めて降伏点踊り場が発生することになる。また荷重降下は上昇伏点において地鉄よりもろい境界組織が先に切れ、過大な荷重が蜂窩組織全体から地鉄に一時にかかるために現われる過渡現象であるとされた。しかしながら地鉄に過大な荷重が一時かかるとしてもそれに相当するひずみは急激に生ずるであろうが荷重が降下することは早急には理解し難い。

かくしていかにして上昇伏点においてたとえば引張試験で引張りを続けながら、しかも突然の荷重降下が

起り得るか、いわゆる抵抗の低下とはいかなることかと言うこと、および降伏点がひずみ速度によって低下し得る限度を明らかにする必要がある、これにはまずひずみ速度と外作用との関係を考察し低ひずみ速度実験を行わねばならない。

3. 試験片の応力およびひずみと外部作用率との関係

降伏現象を明らかにするにはまず試験片に生ずる応力およびひずみと試験片に作用する外部作用率との関係を明確にしておく必要がある。降伏現象の形は荷重装置によって異なり、荷重の降下がないおもり式荷重方法ではいわゆる上下降伏点は現われない⁽¹⁴⁾。したがってここでは非おもり式荷重方法について取り扱うことにする。簡単のために引張試験について考えるならば非おもり式(連続的)荷重方法では試験片の応力増加率 $\dot{\sigma}$ 、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ および外作用率(ここでは外引張率) $\dot{\epsilon}_m$ の間に次の関係がある。

$$\dot{\sigma} = C_0 \cdot (\dot{\epsilon}_m - \dot{\epsilon}) \quad (1)$$

ここに C_0 は $\dot{\epsilon}_m$ が一定な弾性範囲で $\dot{\sigma}$ 、 $\dot{\epsilon}$ が一定な荷重装置に対しては弾性、塑性を通じて常に装置について一定な定数である。(1)式は弾性および塑性を通じて成立し外作用率と試験片のひずみ速度との差が荷重を指示するわけで、たとえば引張試験において外引張速度と試験片の変形速度とは異なり、材料が独自の応力-ひずみ曲線を持つ以上こうむった作用に必ず材料のひずみ速度は各材料について独自のものであることが理解される。

4. 降 伏 現 象

前節の係にしたがって降伏現象は次のように解釈することができる。

上昇伏点で突然応力が降下することは $\dot{\sigma} < 0$ と言うことであり(1)式より $\dot{\epsilon} > \dot{\epsilon}_m$ 、すなわち上昇伏点で材料の変形速度が外引張速度よりも大きくなったと言うことである。

下降伏点で応力一定を保つことは $\dot{\sigma} = 0$ 、(1)式より $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_m$ 、すなわち下降伏点では材料の変形速度と外引張速度とが等しくなるということである。

一般材料の降伏および一般塑性範囲を考えると応力漸増の形であるから $\dot{\sigma} > 0$ 、 $\dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_m$ で材料変形速度は外引張速度より小さくかつ常に変化している。したがって上昇伏点は応力過飽和の状態と考えられ、過飽和状態が破れてきわめて急激な変形を起しその変形速度が外引張速度より大きいために荷重記録装置がゆるんで荷重が降下することになる。下降伏点の変形速度も一般塑性範囲に比較して大きく変形速度は外引張速度に等しい。外部の引張りにしたがって材料は変形し荷

重記録装置はそのままに止まり荷重は一定に止まることになる。これは下降伏点もまた過飽和状態と考えるべきであることを暗示するものであろう。

先に述べたように上下降伏点は外引張速度の大小によって上下し低引張速度では上降伏点は現われない場合があるが、実際に すべり が生じ始める点を押えてゆくならば上降伏点はその実験条件における降伏点と言ふべきであって上降伏点の現われない場合もそのすべり が生じ始める点がその場合の条件に応ずる降伏点(条件に応ずる上降伏点)と考えるべきである。材料強度としての降伏点はこの意味の降伏点の最も小さい値を採用すべきであって、これは非常な低外引張速度実験から求めなければならない。

5. 低 引 張 速 度 実 験

前節に述べたような すべり の生じ始める最も低い応力を見出すために低引張速度の実験を行った。

(i) 実験装置 実験装置は第4図に示すように湯浅教授の考案された装置⁽¹⁵⁾に若干付け加えたもので右端はねじ、減速装置を通じて直流モータにより引張られる。ばね は引張速度を減ずるために附けたものでその寸法は次のごとくである。

直径	$d=16\text{ mm}$
コイルの平均半径	$r=95\text{ mm}$
有効巻数	$n=10$

第4図

(ii) 測定法 荷重は弾性棒の変形により、伸びは試験片に直接取り付け付けた伸計により測定した。降伏点は先に述べたように一定引張速度試験において試験片の変形速度の増加する時の応力ととり、ひずみ速度は降伏するまでの時間をストップウォッチで測定して平均値を算出した。

(iii) 試験片 試験片材料は炭素含有量0.2および0.3%の炭素鋼、その寸法は

直径	$d=4.5\text{ mm}$
測定長さ	$l=50\text{ mm}$

である。

(iv) 実験結果 第5図曲線(1)は通常より少し

低い速度程度のばねを用いない引張試験の結果で試験片の直径が小さいため明瞭な上降伏点は現われなかった。ひずみ速度(弾性範囲)は $28.9 \times 10^{-5} \text{ \%}/\text{sec}$ である。曲線(2)は約 $7 \times 10^{-5} \text{ \%}/\text{sec}$ のひずみ速度(弾性範囲)のものでほぼ水平であるがやや応力漸増の形

第5図 炭素鋼 (C: 0.2%)

である。第6図はひずみ速度(弾性範囲)約 $4 \times 10^{-5} \text{ \%}/\text{sec}$ のもの。この速度では二つの形のものが現われ一つは第5図曲線(2)と同型であるが一つは少し異なっており Welter 氏の実験に見られるような硬鋼の普通試験に現われる形である。なお降伏進行中のひずみ速度は後者の方が小さい。

第6図 炭素鋼 (C: 0.2%)

第7図はひずみ速度(弾性範囲)約 $3 \times 10^{-5} \text{ \%}/\text{sec}$ のもの。ここでは前の二つの形の他に降伏点が異常に上昇するものが現われた。図には第5図に示した形のは示してない。降伏点がきわめて高い場合の降伏進行中のひずみ速度はきわめて早くほとんど瞬時的に全降伏過程を終った。

第7図 炭素鋼 (C: 0.2%)

すべての形を通じて降伏点の上昇したものほど降伏進行中のひずみ速度は大きくかつ降伏長さも長い。第5, 6, 7図を通じて降伏終了後の応力-ひずみ曲線はある点でだいたい一致している。これは普通の試験で断面積の不そろいが均一になる点である。

第8図は一度降伏せしめた後荷重を下し再び同速度で引張りを行った一例で一度降伏せしめた後も最初の時と同様な結果を示し、全く同じ材料、同じ引張速度

でも前に高降伏点を得たものが次に低降伏点を得、また逆の結果および同じ値のものも現われた。これは降伏部分と弾性部分の境界がほとんど降伏に影響を及ぼさないことを示している。

第 8 図

6. 実験結果の考察

低引張速度試験の著しい結果は低速になるほど降伏点は不安定で種々の形の降伏現象が現われることである。降伏現象は降伏点が高いものほど徐々に現われ高いものはほとんど瞬間的に過程を終了する。この場合ばねが存在するために荷重はほとんど低下しないようになっているが、もしばねがなければその瞬間的な高降伏ひずみ速度のために荷重は降下し著しい上降伏点を示すであろう。実際第7図(2), (3)の曲線はばねの存在にもかかわらず少量の荷重降下を生じている。第9図, 第10図は2種の炭素鋼の降伏応力-ひ

第 9 図 炭素鋼 (C: 0.2%)

第 10 図 炭素鋼 (C: 0.3%)

ずみ速度線図であって○, △および□はそれぞれ緩徐に降伏したもの(過飽和降伏), 中程度のもの(中程度過飽和降伏) および急激に降伏したもの(高過飽和降伏)である。これらの降伏点はいずれもその場合の降伏点であることに変わりはないが飽和降伏した降伏点は最も安定である。したがって材料強度としての降伏点は最も安定な飽和降伏点の降伏応力-ひずみ速度線図においてひずみ速度0の極限降伏応力を採用すれば最も安全であろう。この値は本実験では通常の下降伏点のほぼ6割である。

7. 降 伏 の 機 構

実験の結果によれば軟鋼の降伏は一般金属と同じく

応力漸増の形で現われるのが本来であって、その他の場合は上降伏点が現われず水平部分のみを生ずる場合といえども過飽和の状態であると考えられる。したがって軟鋼の降伏機構は次のように考えることができる。

材料の各成分結晶は種々の方向に向き互に境界組織ですべりが生ずるのをけん制し合っている。安定な形の降伏(飽和降伏)では応力がある値に達すると最もすべり易い弱点からすべりが生じ徐々にその境界から拡大するであろう。ゆえにこの間では $\dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_m$, $\dot{\sigma} > 0$ の關係にあり応力は漸増である。降伏した部分は第1図Cの状態にあっても $\dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_m$ さえあれば、すなわちすべりの伝ばする速度が外引張速度より小であれば応力は漸増であり、これが本来の降伏現象であると考えられる。かくして応力が次第に増加すればその過飽和度の増加にしたがってひずみ速度は増大し遂に $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_m$ に達し $\dot{\sigma} = 0$ すなわち応力一定の状態に達する。この状態に達すればひずみ速度も応力も一定となり降伏が終了するまで同状態に維持されるであろう。もし過飽和状態から降伏が始まれば一時に多量のすべりが生じ $\dot{\epsilon} > \dot{\epsilon}_m$ すなわち $\dot{\sigma} < 0$ で応力は降下し、したがってその過飽和度の減少に伴って $\dot{\epsilon}$ は減少し遂には $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_m$ となり降伏が終了するまでこの状態が保たれるであろう。同じく過飽和であってもその程度が低く $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_m$ で降伏が始まれば降伏終了までこの状態に保たれるはずである。衝撃あるいはそれに近いような高引張速度実験において生ずる過飽和状態ではその過飽和度に応じて $\dot{\epsilon}$ が大であってもなお $\dot{\epsilon}_m$ が非常に大きいいため $\dot{\epsilon}_m$ と $\dot{\epsilon}$ は接近して応力降下は生じ難いであろう。したがって外引張速度

第 11 図

に従う降伏の形は第11図のようになるであろう。かくして問題はいかにして弾性のまま過飽和状態が生じ得るかと言うことである。これは現在では説明することは不可能であって完全な分子論の発展に待たねばならない。ただ衝撃試験のような高速試験ではたといすべりが生じてもそのすべりの速度よりも外引張速度が極端に大きければすべりが生じていても外見上弾性的に見える可能性がある。

8. 結 論

軟鋼の降伏は低ひずみ速度において不安定であって種々の形の降伏現象を示し、低応力から応力漸増の形で降伏するものは降伏ひずみ速度は緩慢であり、高応力から応力水平部を示して降伏するものでは高速であり、また非常な高応力から降伏するものではほとんど

瞬間的に降伏過程を終了する。ゆえに軟鋼の降伏は本来一般金属と同じく応力漸増の形で現われるものであり、いわゆる下降伏応力も過飽和応力と考えるのが妥当である。過飽和性は以前に降伏せしめることに影響されないゆえ結局過飽和状態は高ひずみ速度および低温の場合に現われ、低ひずみ速度および高温の場合に生じ難いことがわかる。常温以下では降伏応力はひずみ速度と $\log - \log$ の関係にあり、ひずみ速度は温度に等価である⁽¹⁶⁾。高温の場合は種々の影響を生じて等価になることはないであろうが、ある程度の温度では推察が可能であろう。軟鋼では 20°C に相当するひずみ速度は約 $20 \times 10^{-4} \text{ (sec}^{-1}\text{)}$ であり、この程度では常温ではほとんど常に過飽和を生じて応力水平部を生ずるものであるから、常温あるいはそれ以下でこの程度以上のひずみ速度で荷重をこうむる材料はいわゆる下降伏点をとって安全である。しかしこの時の条件における降伏点は上降伏点であってその生じない場合に下降伏点でなければならない。緩慢な応力増大および比較的高温をこうむる材料の場合はひずみ速度 0 に相当する極限降伏応力をとることによって材料は安全であると考えられる。塑性流動間では材料は破損の連続と考えられるゆえ破損の条件は流動の応力-ひずみ関係を可能にするものでなければならない。これらについては別に考察するつもりである。

終りに終始御援助、御注意を賜わった東京大学湯浅亀一教授、ならびに種々有益なる御助言をいただいた

東京大学中西不二夫教授に対してあつく感謝の意を表する。

注：一

- (1) 昭和24年4月5日 第26期定時總會講演會において講演、
原稿受付 昭和26年6月12日。
- (2) 正員，東京大學工學部。
- (3) J. H. Wickstead, Inst. Mech. Engr., Proc., p. 26 (1886).
- (4) C. Bach, V.D.I., Z., Bd. 48, Nr. 28, S. 1040~1043 (1904).
- (5) 東村，機械學會論文集，17 卷 61 号，100—102 ページ (昭 26)。
- (6) たとえば H. Quinney, Engr., Vol. 161, p. 669~673 (1936)
- (7) 同上。
- (8) I. G. Docherty, & F. W. Throne, Engg., Vol. 132, p. 295~297 (1931).
黒田，理化學研究所彙報，17 輯 12 號，p. 985~1097 (昭 13)。
- (9) たとえば Kühnel, V.D.I., Z., Bd. 72, Nr. 35, S. 1226~1232 (1928).
- (10) 中西，たとえば機械の研究，1 卷 1~5 號，17~20, 55~58, 99~102, 151~155, 203~206 ページ (昭 24—1~5)。
- (11) G. Welter, & S. Gockowski, Metallurgia, Vol. 20, No. 118, p. 143~148 (1939).
- (12) C. F. Elam, Roy. Soc. London, Proc., Ser. A, Vol. 165, p. 568~592 (1938).
- (13) 黒田，前掲。
- (14) W. Späth, Physik der mechanischen Werkstoffprüfung, Julius Springer, 1938.
- (15) 湯浅，機械學會誌，33 卷 157 號，255—272 ページ (昭 5—5)。
- (16) C. Zener, Appl. Phys., J., Vol. 15, No. 1, p. 22~32, (1944).