軟鋼の引張速度と降伏点その他との関係⁽¹⁾

(昭和 13 年 10 月 14 日 第 10 回満洲地方講演會に於て講演)

正 員 中 川 有 三⁽²⁾

正 員 橋 本 順 一 郎⁽³⁾

摘 要

筆者等の リラクゼーション 試験用 として考案製作した試験機を用ひ、引張速度を 0.35~4.2%/s まで 6 段に変へて軟鋼の引張試験を行ひ、その際 回轉カメラ 上に應力-時間線図を画かしめた。これ等の実験結果より軟鋼の降伏点を始め諸機械的性質と引張速度との関係を考察した。

1. 緒 言

通常、材料の引張強さ、降伏点、伸率といふ様な所謂機械的性質といふのは常溫に於て靜的に試験せられた結果であつてこれに異常溫度、變形速度の大小等の影響が入つてくるとこれ等の結果に変動のあることはよく知られてゐるところであり、又興味のある問題でもある。従てこの方面に関する実験研究は古くから行はれ、発表せられたものも枚挙に遑ないといふ有様である。範圍を縮めて引張試験における引張速度の影響のみを論じたものにも筆者等の知れる狭い範囲内でも相當の數に上つてゐる。例へば P. Ludwik⁽⁴⁾ は、錫に就て金屬を粘性流体と考へて引張速度の影響を求めてゐる。又 E. Meyer⁽⁵⁾ は應力測定器を考案製作し軟鉄線、黃銅線、銅線及び革に就て 0.05~0.25 s の短時間内で引張試験を行ひ、平均の伸率、最大應力、單位体積當りの變形仕事等の結果を靜的試験の結果と比較し大体に於て伸率を除いては靜的試験の場合より幾分増加してゐると發表してゐる。尙その際、降伏点の變化の程度に就ても言及してゐる。John L. M. Morrison⁽⁶⁾ も炭素鋼を用ひて引張時間が 12 h より 1/20 s の廣範圍に亘る実験を行ひ、荷重-伸線図及び荷重-時間線図を得てゐる。その結果より引張速度の影響による引張應力及び伸にかなり大なる変化があることを示してゐる。その他 H. Quinney⁽⁷⁾、圧縮試験ではあるが E. Siebel & A. Pomp⁽⁸⁾ も同様の意図の下に実験を行つてゐる。

従来、この問題を研究するに當つて先づ要求されてゐるのは引張られてゐる材料内に生じた應力を何等かの形で各瞬間毎に正確に吾人に示して呉れる應力測定器の使用である。それも種々な應力測定器が考へられるであらうが、結局、材料内に生じた應力を彈性片の彈性變形に換へてこれを擴大して精密なところまで求めるといふ直接的、機械的測定法が最も危げのない方法であらう。上記の E. Meyer, J.M. Morrison

等何れもこの方法を採用し、測定片（材料内の應力を測る彈性片をこの様に名づけておく）を試験片の軸方向に直結し試験片内の應力を測定片に取りつけた マルテンス鏡式伸張計で読みとる様になつてゐる。筆者等も同様、測定片や鏡式伸張計を使用するが測定片と試験片を直結せず、これ等を並行に配置しててこ仕掛によつて両者にかかる應力を適當に配分せしむる様にした。この点、前記の諸装置と稍趣を異にしてゐる。

次に試験片の材料として軟鋼を扱んだのは軟鋼は比較的粘り強く実験上都合の好い應力-時間線図を得られることと、殊に軟鋼は降伏現象が明瞭にあらはれるからである。鋼、特に軟鋼に於て著しくあらはれる降伏点に関する意義、その機構等に就ての諸説、諸研究は數多く見出されるが、これ等に対する批判は兎も角として鋼の彈性域から塑性域へ移る際生ずる不連続部分、即ち屈場における應力が引張速度に依て如何に変動するかを実際に觀察するのも興味あることと思はれるので、マルテンス鏡式伸張計に光を導入することに依て自動的に應力の時間的变化、換言すれば應力-時間線図を画かせた。普通の マルテンス鏡式伸張計を使用しての靜的精密試験では上降伏点までは精密に求められるが、それから先は急激な伸の増加のため屈場の状態を測定することは不可能である。又、試験機に取付けられた自動記録装置に依て得た記録紙上の線図も大体を察知するにはよいが、やはり正確とは言ひ難い。

本文の初めに紹介した様に材料の引張試験における引張速度の影響に関しては、材料の種類から言つても引張速度の点から見ても、かなり廣汎な範圍に亘つて既に研究され興味ある亦重要な結果が與へられてゐるが、筆者等は如上の理由に依てこの問題を更に取扱ふのも無駄ではないと思ひ、以下各引張速度に依て得た軟鋼の應力-時間線図を呈示しこれに考察を試みた次第である。

2. 実験装置の説明

試験機は本学実験室に於て リラクゼーション 測定用⁽⁹⁾ として設計製作したものを利用し、試験片側の芋虫歯車を電動

(1) Relation of the Stretching Speed to the Yield Point and to the Other Mechanical Properties of Mild Steel.

(2) Yûzô NAKAGAWA, Member. The Ryozyun College of Engineering. 旅順工科大学。

(3) Zyunitirô HASIMOTO, Member. The Ryozyun College of Engineering. 旅順工科大学。

(4) P. Ludwik, Phys. Z., 10, (1909), 411.

(5) E. Meyer, Forsch. a. d. Gebiete d. Ingen., 295, (1927), 62.

(6) John L. M. Morrison, Engr., 158, 4102, (1934), 183.

(7) H. Quinney, Engr., 157, 4081, (1934), 332.

(8) E. Siebel u. A. Pomp, Mitt. a. d. Kais-Wilh.-Inst. f. Eisenf. z. Düsseldorf, 10, (1928), 63.

(9) 橋本順一郎、機械學會誌, 39, 262, (昭 11-8), 454.

機で駆動した。第 1 図は試験機の骨組図で T は軟鋼棒試験片、 M は測定片で直径約 7 mm の予め検定した軟鋼丸棒である。これに マルテンス鏡式伸張計 が標点距離 200 mm で取付けられてゐる。 L はてこの腕の比が 10:1 にとつてある長さ約 1 m の梁で、緒言の所で述べた様に試験片と測定片が てこ仕掛 に依て連結されてゐるので、試験片内の應力の変動は、その 1/10

第 1 図 試験機骨組図

第 2 図 実験装置

だけ測定片に傳はることになり、試験片が破断する程の荷重を受けても測定片内の應力は充分弾性限界以内にある。従て、直結する場合には試験片は針金様の細いものを使用せねばならぬが、この場合は棒状の試験片を用ふことが出来る。最初、重錘 W を動かして荷重を全部測定片に加へ（勿論、荷重は弾性限界以下である）、マルテンス鏡式伸張計 に出入する光線を調節し終つたなら試験片を所要の引張速度で電動機に依て引張る。試験片と測定片内の荷重の総和が一定の荷重、即ち重錘 W に等しいのであるから、試験片内に誘引された引張應力に相應して、測定片内の應力は減少する筈である。この應力減少に相當する測定片の弾性縮を マルテンス鏡 の回轉角に換へて回轉胴上に記録せしめる。又、この てこ仕掛にしたことに依て駆動用電動機又は ベルト 等から発生する振動を緩和するに役立つ都合が好い。第 2 図は実験装置全体図を示す。実験装置は試験片引張装置と試験片内に生じた引張應力を マルテンス鏡式伸張計 と光装置を使用して記録せしめる應力記録装置及び時間記録装置の三つに別けられる。

(1) 試験片引張装置 第 2 図で A_1 は 3 HP, 1500 rev/mn の三相同期電動機で試験が常に一定引張速度で終始する様にこれを採用した。実験中、負荷の変化による回轉数の変動は殆ど見られなかつた。電動機は調車 D_1 , D_2 , D_3 を経て芋虫 S 及び芋虫歯車 R に傳へられる。この芋虫歯車に試験片を 握む下部の チャック がはめこまれ、芋虫歯車の回轉に依て 下部チャック が上下して試験片に引張を與へる。 D_0 は非役車である。引張速度は調車の大小の組合せに

より 6 段の速度変化を得た⁽¹⁰⁾。相當速い引張速度の時 も引張装置全体としては割合に靜かに運轉することが出来た。

(2) 應力記録装置 第 2 図で E は アーク燈 でこれを

第 3 図 試験片

第 4 図 試験片 (写真図)

光源とする。これを出た光線は水平に置かれた黄銅製の細隙 O_1 を通過

し、焦点距離の大きい凸レンズ B_1 を経て反射鏡 M_0 に入る。それより反射されて マルテンス鏡の一つ M_1 , 反射鏡 M_3 , M_4 及び マルテンス鏡 M_2 を通り垂直に置かれた黄銅製の細隙 O_2 を通過し回轉胴 D の上に到る。結局 B_1 , M_0 , M_3 及び M_4 等を適當に

第 5 図 引張應力-歪線図 (靜的)

微動させて レンズ B_1 の焦点距離を調節し O_1 の明瞭な像を回轉胴上に結ばせる。 O_2 の垂直の細隙を通過させるので回轉胴上では小さな光点となる。この光点が測定片に取附けた マルテンス鏡 の回轉に應じて上下移動をし、試験片内の應力の変化を回轉胴の上に書く。マルテンス鏡は図で見られる様に互に背中合せに向けてあるので普通の マルテンス鏡式伸張計 で読みとる左右の読みの和が直ちに図上に記録されることになる。この際、光てこの倍率は鏡 M_1 より回轉胴までの距離及び M_1 , M_2 , M_3 及び M_4 の四つの鏡が マルテンス伸張計 の菱形ナイフエッジの軸となす角度を 実測しておけば求められる⁽¹¹⁾。 M_3 及び M_4 の反射鏡は何れもよく磨かれた表面反射鏡である。次に回轉胴 D はその上に ロール・フィルム を巻きつけて暗箱中に納められてゐる。回轉胴の駆動は 1500 rev/mn, 1/8 HP の誘動電動機 A_2 で行ひ、 K_1 及び K_2 の軸を経て減速される。減速の程度は回轉胴上に記録される應力-時間線図の時間軸方向の長短に依て、換言すれば試験片の引張速度の大小に應じて変へねばならぬ。この装置に於ては回轉胴の回轉数は 2.3 rev/mn 及び 5.5 rev/mn の 2 種になつてゐる。

(3) 時間記録装置 試験片内に生じた應力の変化を記録すると同時に引張時間も記録せねばならぬ。その方法はタイム・マーカー Z を用ひて E とは別に 500 燭光の タングステン・アークランプ C を光源とした光を 1/10 s 毎に断続して フィルム 上に印した。引張速度が遅い時は引張つて

(10) 本文 3. 試験片及び引張速度の項参照。

(11) 本文 4. 光て

この倍率の補正の項参照。

る間に回轉胴が 2~3 回轉して時間記録点が重なつて判明し難くなるので適当な方法を講じてこれを避けた。図で B_2 及び B_3 は凸レンズ、 O_3 は細孔でこの像を回轉胴上に結ばせる。 M_5 は反射鏡である。

尚、図中黒幕 F は C 及び E の光源から発散した光を遮蔽するためである。

3. 試験片及び引張速度

試験片の材料としては上述せる様に炭素含有量 0.25% の炭素鋼(軟鋼)を選んだ。その形状、寸法は第 3 図及び第 4 図写真図に示す。試験片は中央部 50 mm の所を直径 4 mm に細くした。これは上述の試験機の容量と材料の最大引張應力とを考慮に入れて、この試験機で試験し得る範囲にしたためである。この細首の部分とその両側の太首の部分とは直径が相當異なるので、前者が破断しても後者はなほ弾性限界以下にある程で、従て細首の部分に就てのみ考へればよい。又頭部の首のところは球面座にはまり、試験片がまつすぐ引張られる様にした。握みの方法如何によつて軟鋼の上下降伏点に変化することは知られてゐる所である⁽¹²⁾。

次に引張速度を極端におそくした場合を静的引張試験とも観られるからこの試験遂行上、静的引張試験は是非試みておかねばならぬことである。最初 マルテンス鏡式伸張計を用ひて精密試験を行ひ、その結果この材料の縦弾性係数 E は $2.07 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ になつた。更に普通試験⁽¹³⁾を行つた結果が第 5 図である。これより静的試験における上降伏点、下降伏点及び最大引張應力の値として夫々 $\sigma_{s0} = 2790 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{su} = 2680 \text{ kg/cm}^2$ 及び $\sigma_B = 4350 \text{ kg/cm}^2$ を得た。又静的精密握り試験も試み、この材料の横弾性係数を求めたところ $G = 8.4 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ となつた。

引張速度に就ては実験装置の説明の時に述べた様に引張の動力源は 3 HP, 1500 rev/min の同期電動機で、その性質上多少の負荷の変化如何に関らず常に一定引張速度で試験することが出来た。速度の高低は総て大小の調車を組合せて、即ち第 2 図の D_1 , D_2 の調車を色々取換へて第 1 表に示す 6 種の引張速度を得た。表中、第 2 列、引張速度 %/s は試験片の標点距離を細首の平行部分 40 mm としての値である。又破断までの時間は伸率を 30% として計算したものである。

(12) F. Körber u. A. Pomp, Mitt. a. d. Kais-Wilth.-Inst. f. Eisenf. z. Düsseldorf, 16, (1934), 179. (13) Commercial test.

昭和 14 年 2 月]

4. 光てこの倍率の補正

本試験に於ては試験片内の應力の大きさを マルテンス鏡式伸張計の鏡の回轉に換へて光てこを用ひ擴大して回轉胴上のフィルムに画かしたもので、従て得られた写真図より必要な應力-時間線図を求めるには先づ使用した光てこの倍率を知らねばならぬ。然るに光てこの倍率もマルテンス鏡式伸張計の鏡及び反射鏡がマルテンス鏡を保持してゐる菱形ナイフ・エッジの軸と平行に近いならば第 2 図で鏡 M_1 から光線の路に沿ふて回轉胴までの距離と菱形ナイフ・エッジの対角線の距離が分れば直ちに見出し得るが、光の調節の関係上どうしても M_1 , M_2 , M_3 及び M_4 の四つの鏡は菱形軸と平行といふわけにゆかず或る角度をなしてゐるのでこの影響を考へて倍率計算に補正を施さねばならぬ。

今、第 6 図に於て M_1 , M_2 がマルテンス伸張計の両方の鏡で菱形ナイフ・エッジの軸となす角が θ_1 , θ_2 である。 M_3 , M_4 は反射鏡で軸方向となす角を夫々 φ_1 , φ_2 とする。図で実線で画いてあるのが実際に進んだ光線の路で M_1 , M_2 の鏡を夫々 M_3 , M_4 の反射鏡を対称軸として、対称の位置にとると反射鏡の影響を入れたマルテンス鏡装置の光線の路が出る。図の破線で示したのがこれである。光線の方向は何れも矢印で示してある。次に M_2 のマルテンス鏡を出た光線は菱形軸に直角でなく θ_b だけ傾いてゐる。又、光源を出た光が最初のマルテンス鏡 M_1 に入る時、菱形軸となす角を θ_a とする。

実験に際して、測定の結果

$$\theta_1 = 12^\circ, \theta_2 = 17^\circ, \varphi_1 = 10^\circ$$

$$\varphi_2 = 19^\circ, \theta_b = 12^\circ, \theta_a = 83^\circ$$

であつた。 M_1 , M_2 の仮定の位置間を通る光線の距離、換言すれば $M_1M_3M_4M_2$ の距離を a , M_2 から回轉胴までの距離を L_1 とすると何れも実測の結果

$$a = 108.5 \text{ cm}, L_1 = 453.5 \text{ cm}$$

を得た。

今、光てこの倍率を n とすると

$$\begin{aligned} n &= (x_1 + x_2) / \lambda \\ &= [a \cos \theta_a \tan \{2\alpha_1 \cos (\theta_1 - 2\varphi_1)\} + L_1 \cos \theta_b \cos (\theta_2 - 2\varphi_2) \times \tan \{2(\alpha_1 + \alpha_2) \cos (\theta_2 - 2\varphi_2)\}] \\ &\quad / (1/2)(d_1 \sin \alpha_1 + d_2 \sin \alpha_2) \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

で與へられる。式中、 x_1 及び x_2 は、各のマルテンス鏡に依て得られる光の上下の動きで、本実験では $x_1 + x_2$ の和が一度に出る様になつてゐる。 λ は測定片の標点距離間の変形量、 d_1 及び d_2 は菱形ナイフ・エッジの対角線の距離、 α_1 及

第 6 図 光てこ装置

第 1 表 引張速度

速度 番号	引張速度 %/s	破断まで の時間 s	使用した調車			
			電動機直 結の調車 の直径 mm	非役車 D_0 の 直径 mm	調車 D_1 の直径 mm	調車 D_2 の直径 mm
I	4.20	7.1	126	225	225	277
II	3.40	8.8	126	225	225	225
III	2.60	11.5	126	225	225	172
IV	1.80	16.7	126	225	225	118
V	1.00	30.0	126	225	225	66
VI	0.35	85.7	62	330	330	66

び α_2 は各の マル
テンズ鏡 のその軸
のまはりの微小な回
轉角である。又 θ_a
は図から分る様に
 $\theta_a = \theta_x + 2\theta_1 + \theta_2$
 $- 2(\varphi_1 + \varphi_2) - \pi/2$

で與へられる。

(1) 式で

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha, \quad d_1 = d_2 = d' = 0.4102 \text{ cm}$$

とし、又 α は微小であるから

$$\tan \alpha \approx \sin \alpha \approx \alpha$$

とすると、結局

$$n = \{2a \cos \theta_a \cos (\theta_1 - 2\varphi_1) + 4L_1 \cos \theta_0 \cos^2 (\theta_2 - 2\varphi_2)\} / d' \quad \dots\dots\dots(1)'$$

となる。(1)' 式に上記の数値を代入すべ

$$n = 4248 \quad \dots\dots\dots(1)''$$

が補正された倍率となる。

従て、写真図より試験片内に生じた應力を求めるには次の式に拠る。

即ち

$$\sigma = (h/4248l) E A r \times (4/\pi d^2) \text{ kg/cm}^2 \quad \dots\dots(2)$$

(2) 式中、 σ は試験片内に生じた應力 kg/cm^2 、 l は測定片に マルテンズ 伸張計 をとりつけた時の標点距離で 200 mm、 E は測定片の材料 (軟鋼) の縦弾性係数で $2.08 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、 A は測定片の断面積で 0.383 cm^2 、 r は試験機にてこの腕の比で 10、 d は試験片の直径 cm、 h は写真図に現はれた曲線を基線より測つた高さを mm で表はしたものである。

(2) 式に各既知の数値を代入すると

$$\sigma = 74.913 h / d^2 \text{ kg/cm}^2 \quad \dots\dots(2)'$$

となる。應力への換算にはこの (2)' 式を用いた。又、 h は読取望遠鏡で 1/100 mm まで正確に読みとつた。

第 7 図 應力-時間線図 (写真図)

第 8 図 應力-時間線図

第 9 図 應力-時間線図

第 10 図 應力-時間線図

第 11 図 應力-時間線図

第 12 図 應力-時間線図

5. 実験結果とその考察

以上述べた実験装置、実験方法に依て回轉胴上のフィルムに得られた写真

図の一例を示せば第 7 図の様である (引張速度 1.8 %/s の場合)。図の左下基準線に一個所突起のあるのは、試験片の頭部がチャックの球面座と最初に接触した有様を示してゐる。続いて引張力の加はるにつれ、直線部分の弾性域を示し上昇伏点にて降伏し、踊場を経て再び塑性域に入つて應力を増し最大引張強さを通過して破断してゐる状態が時間の経過と共に如何に変化してゐるかがこの図に依て一目で分る。図の上部にある点の連続はタイム・マーカーにより 1/10 s 毎に断続された時間記録である。又、絶えずこまかい振動が伴つてゐるのが見られるが、これは第 2 図の調車 D_1 と電動機の

第 13 図 応力-時間線図

調車間のベルト及び D_2 , D_3 調車間のベルトの重ね目が原因をなして試験機全体を振動させてゐるためである。電動機の高回転数、ベルトの長さより計算すれば前者の場合は振動の週期が約 0.1 s, 後者の場合は 0.28 s となつた。

この 2 本のベルトによる振動が不規則に入り交つて図に現はれてゐる。

これらの写真図より 4. に述べた (2)' 式を用ひ、具体的な応力の値に換算し、新たに 応力-時間線図を 4.2 %/s より 0.35 %/s に至る 6 種の引張速度に対して求めると第 8~13 図のようになる。図の一部に挿入してある図は踊場の部分を拡大してその有様を明瞭ならしめたものである。これらは何れも一つの引張速度に対し試験片を数本宛実験した平均の結果である。

又、図中、大小の差はあるが何れも上降伏点直後に応力の変動を示す曲線とは無関係な振動が見られる。この振動は大体 0.3 s 程度で終り、週期は 7×10^{-2} s 位になつてゐる。今測定片の一端に最初の材料の滑りによる荷重の変化を衝撃的に軸方向に加へた場合の測定片の自由振動の週期を計算してみると 4×10^{-3} s となり、実際の値とかなり異なる様であるが、これは測定片が梁、荷重でこ及び試験片等のため拘束されてゐるからで、當然これらの振動は材料が上降伏点に達し一部分が滑つたために起つた測定片の縦振動であることは明らかである。試験片内の応力測定用として弾性片を使用する本実験装置としては、この振動を伴ふのは止むを得ぬことで振動中は試験片内の応力の変化を観察することが出来ない。併し割合に短時間内にこの振動は消滅するので差支へない。只引張速度が大きくなつてくると第 8, 9 図等に見る様に踊場全体をこの振動が蔽ふことになるのでこの点から言つて、

昭和 14 年 2 月]

第 14 図

第 15 図 n_1 , n_2 及び n_3 の値 第 16 図 t_1 及び t_2 の変化

この装置もある引張速度までに使用が制限されることになる。

次に、以上得られた実験結果より引張速度の影響に就て考察を試みると次の様である。

(1) 上降伏点、下伏点及び最大応力の値

上降伏点、下降伏点及び最大応力の値が、引張速度に依て如何に変化するかを調べたのが第 14 図である。何れも引張速度が 2 %/s

辺より値が高くなつてゐる。これは前掲の Morrison⁽¹⁴⁾ の実験結果とよく一致してゐる。図中、下降伏点の値は踊場における平均の値を採用した。又、上降伏点と下降伏点との比 n_1 , 最大応力と下降伏点との比 n_2 及び最大応力と破断応力との比 n_3 の引張速度に対する変化を調べたのが第 15 図である。この引張速度の範囲ではこれらの比は大体変化のないことが分る。

(2) 踊場を通過する時間及び破断までの時間 踊場を通過する時間 t_1 及び破断までの時間 t_2 を引張速度に対して求めると第 16 図のようになる。各実測値は殆ど

$$t_1 \cdot v = 0.024 \dots \text{踊場}, \quad t_2 \cdot v = 0.24 \dots \text{破断} \dots (3)$$

の直角双曲線の上に来る。 v は引張速度 %/s である。このことは試験片の伸率はこの範囲では殆ど引張速度に無関係なることを示してゐる。又、最大応力に至る時間と踊場を通過する時間との比及び破断までの時間と最大応力に至る時間との比は引張速度に関係なくその値が前者で約 5.4, 後者で 1.4 を與へてゐる。これによつても大体、各試験が一樣なる

¹⁴⁾ 脚註 (3) 参照。

引張速度で遂行されたことが解る。

3. 硬化率の変化 材料は変形するに従ひ硬化してゆくことはよく知られてゐることで、材料の引張試験の際、この硬化の程度と引張速度とは如何なる関係にあるかを実験結果から求めてみた。

従来、材料の硬化率の標準としては次の表はし方をしてゐる⁽¹⁵⁾。即ち、硬化率を H とすると

$$H = d\sigma'/dq \dots\dots\dots(4)$$

ここで σ' は真応力、 q は試験片の断面縮率を示す。これに対し筆者等は次の様な考へから別に材料の硬化率を定めてみた。即ち材料の硬化するのは材料に永久変形を生ずるからで引張試験の際には永久引張歪のため硬化して次の引張の段階における引張応力を高めると考へられる。従て硬化率を

$$H = d\sigma'/d\varepsilon_p \dots\dots\dots(5)$$

とした。ここに σ' は真応力、 ε_p は永久引張歪である。(4) 式と (5) 式は結局は同じ意味のものかも知れぬが、(4) 式の q を実験中に求めるといふことは非常に困難であるのに対し、(5) 式の ε_p の値は応力-歪線図或は応力-時間線図が求められてゐれば線図上から直ちに永久引張歪 ε_p を求められるといふ点で都合が好い。これは塑性範囲にある材料の応力を次第に除去すると、その時の応力-歪曲線は、殆ど弾性範囲内のそれに平行になることが実験で分つてゐるからである。

今、実験結果より各引張速度における真応力と永久歪の関係を求めれば第 17 図の様になる。第 17 図の曲線を

$$\sigma' = C\varepsilon_p^m / (1 + m\varepsilon_p) \dots\dots\dots(6)$$

とおく。 C 及び m は常数である。

従て (5) 式の H は

$$H = d\sigma'/d\varepsilon_p = C/(1 + m\varepsilon_p)^2 \dots\dots\dots(5)'$$

次に C と m の値が引張速度 v に依て如何に変化するかを求めてみると次式の様になる。

$$\left. \begin{aligned} C/E &= 0.125 + 1.214(v/V)^{2.261} \\ m &= 40.9 - 24.642(v/V)^{0.677} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

(7) 式で E は使用した材料の縦弾性係数で $2.07 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、 V は単位時間内に試験片が破断し終る速度、即ち 30%/s に採つた。(7) 式を図示すると第 18 図になる。(7) 式を更に (5)' 式に代入すると

$$H = E \{ 0.125 + 1.214(v/V)^{2.261} \} \div [1 + \{ 40.9 - 24.642(v/V)^{0.677} \} \varepsilon_p]^2 \dots\dots(5)''$$

となる。故に (5)'' 式が硬化率を永久歪及び引張速度で表はした式になる。(5)'' 式を図示すれば第 19 図になる。この図に依て引張速度の大小に依て材料の硬化率が変化する有様をよく知ることが出来る。

(4) 塑性域における應力の値 材料が降伏点を過ぎて塑性変形に移つた時の應力 σ は一般に次の様に與へてよい。即ち

$$\sigma = E\varepsilon_e + \mu v \dots\dots\dots(8)$$

ここで ε_e は弾性歪、 E は縦弾性係数で $E\varepsilon_e$ は弾性歪による應力である。 μ は粘性抵抗に關係する係数で、引張速度及び塑性歪に依て変るものと考へられる。 v は引張速度を示し、 μv は粘性抵抗による應力を與へてゐる。 $E\varepsilon_e$ 及び μv は別個に測定することは出来ず、両方の和 σ が應力-時間線図に依て與へられてゐるわけである。又、 $E\varepsilon_e$ は同一量の塑性歪を生じたところでは引張速度の如何に関らず一定であると考へられる。

今、一定の塑性歪の生じてゐる時、 μ と引張速度の関係を最も簡単な場合をとり

$$\mu = \mu_0 + kv \dots\dots\dots(9)$$

とする。

引張速度が v_1 から v_2 になつた時、(8) 式に相當する應力が σ_1 から σ_2 に變つたとすると

$$\sigma_1 = E\varepsilon_{e1} + (\mu_0 + kv_1)v_1,$$

$$\sigma_2 = E\varepsilon_{e2} + (\mu_0 + kv_2)v_2$$

となる。上述により塑性歪の一定なところでは

$$E\varepsilon_{e1} = E\varepsilon_{e2}$$

となるから

$$(\sigma_1 - \sigma_2)/(v_1 - v_2) = \mu_0 + k(v_1 + v_2) \dots\dots\dots(9)'$$

となる。上式の $(\sigma_1 - \sigma_2)/(v_1 - v_2)$ と $(v_1 + v_2)$ の関係を実験結果から各塑性歪に就て求めれば第 20 図になる。同図より分る様に (9)' 式、換言すれば (9) 式の μ を引張速度の一次式に置いたことは実験結果からみて適當と思はれる。

次に μ_0 及び k の塑性歪 ε_p との関係を求めてみると第 21 図になる。図よりこれらも亦、塑性歪の一次式で表はせるから

$$\mu_0 = k_1 + k_2\varepsilon_p, \quad k = k_3 + k_4\varepsilon_p \dots\dots\dots(10)$$

とする。故に (8) 式は

$$\sigma = E\varepsilon_e + \{k_1 + k_2\varepsilon_p + (k_3 + k_4\varepsilon_p)v\}v \dots\dots(8)'$$

(15) G. Sachs, Mechanische Technologie der Metalle, 29, (1925).

となる。

k_1, k_2, k_3 及び k_4 の数値を実験結果から求めると

$$\begin{aligned} k_1 &= -22.49, & k_2 &= 758.5 \\ k_3 &= 16.12, & k_4 &= -99.46 \end{aligned}$$

となつた。故に (8)' 式は

$$\sigma = E\epsilon_e + \{758.5\epsilon_p - 22.49 + (16.12 - 99.46\epsilon_p)v\}v \dots (8)''$$

この (8)'' 式が塑性域に於て、引張速度を考慮に入れた場合の應力の式である。

(8)'' 式は塑性変形を始める所、軟鋼で言へば降伏現象が終つたところから成立するのであるから塑性歪 ϵ_p も踊場の終る時の値以上の範囲でなければならぬ。踊場を通過し終つた時の塑性歪は第 16 図又は (3) 式より分る様に引張速度に無関係に大体 0.024 となつてゐる。この値に相當する μ_0 及び k の値を第 21 図より求めてみると

$$\mu_0 = -4, \quad k = 14$$

となるが、 μ_0 が負となることはなく、これは実験の誤差によるので最小値をとり

$$\mu_0 = 0, \quad k = 13$$

とすると、これが第 20 図から求めた下降伏点における μ_0 と k の値

$$\mu_0 = 0, \quad k = 19$$

と大体一致してゐるので (8)'' 式は $\epsilon_p \geq 0.024$ 、即ち踊場の終つたところ以上であてはまる式であることが解る。尚、第 20 図と第 21 図の k の値が多少異なるのも実験の誤差及び下降伏点の値を平均値を採用したによると思はれる。

一般に (8)'' 式、或は第 21 図から塑性域における應力の引張速度による影響は塑性歪の小さい間は v^2 に関係し、塑性歪が大きくなると v に関係してくることが解る。

6. 結 言

以上述べたことにより次のことが結論として得られる。

(1) 引張速度 4%/s 位まではてこ仕掛による本実験装置にて充分引張應力-時間線図を求め得る。特に、これに依て軟鋼に特有の踊場附近を観察することが出来る。更に試験片の細首の部分の長さを現在のより短くしてゆくに依てもつと大きい衝撃に近い引張速度の試験も可能であり、引続いて実験を行ふ予定である。

(2) 0.35~4.2%/s の 6 種の引張速度の実験より得た結果から、軟鋼の最大應力、上降伏点及び下降伏点の値は引張速度の増加に従ひ稍高まる傾向がある。

(3) 踊場を通過する時間及び試験片破断までの時間は引張速度との積が引張速度の如何に関せず一定である。換言すれば材料の伸は殆ど引張速度の影響を受けぬことを示してゐる。

(4) 硬化率も引張速度に應じて高まることが解つた。

(5) 塑性域における引張速度の影響を考慮に入れた應力式を実験結果より求めたところ、その影響は塑性歪の小なる間は速度の自乗に、塑性歪が大となるに従ひ速度の一次に比例する様である。

第 19 図 硬化率の変化

第 20 図

第 21 図

μ_0, k と永久歪の関係

終りに本研究の実験費の一部は財団法人菱刈学術研究奨励資金の援助による。又、本実験遂行に當つては土屋利三、東條衛、前田保弘、本田金次郎諸氏が助力された。記して感謝の意を表す。

(昭和 13 年 11 月 7 日受付)