知能型万能試験機による降伏点が不明瞭な S45C の降伏点の測定*

今 村 仙 治^{*1}Measurements of Yield Point of Unknown Yield Point Material
S45C Using an Intelligent Universal Test MachineSenji IMAMURA^{*2}^{*2} College of Engineering, Nihon University,
1 Nakagawara Tamura-machi, Koriyama-shi, Fukushima, 963-8642 Japan

It is very important to accurately evaluate the mechanical properties of industrial materials accurately. Knowing those properties, one can produce mechanical and structural designs that are both safe and economical. This paper describes a newly developed control method for an intelligent universal test machine that can measure stress, strain, and time and give those measurement results. This report describes the main results obtained from this study. This study obtained the transition point between elasticity and plasticity of an unknown yield point material. Visualization of the material deformation behavior demonstrated the possibility material of properties measurement.

Key Words: Testing Machine, Testing Control Method, Yield Point, Strain Stabilization Time, Three Dimensional Coordinate, Elasticity, Plasticity, Deformation Behavior

1. 結 言

機械的性質は機械や構造物の設計・製作の指針となるため重要である。機械的性質を評価する方法としては応力とひずみの関係が一般的に用いられている。引張試験機としてはレバータイプやアムスラータイプ、インストロンタイプ⁽¹⁾等がある。この中でインストロンタイプは精度のよい制御が可能な試験機である。

図 1 に上記の試験機によって得られた結果の一例を示す。縦軸は応力 σ 、横軸はひずみ ϵ を示す。試験に際しては種々の制御が行われるが、その結果を表す方法としては図 1 の表示に従うのが一般的である。ねじり試験や曲げ試験の場合も同様に図 1 のように 2 次元的に表示される。また、引張速度に関しては通常は一定の速度で試験片に負荷される。変形は引張速度に依存するが変形を制御して試験する場合もある。

工業材料の機械的性質の一つである降伏点は、ある材料では降伏点が明瞭に現れたり、またある材料では不明瞭であったりする^{(2),(3)}。降伏点が不明瞭な材料の降伏点を求めることが出来れば、機械の設計において重要な基準となり、安全性および経済性に貢献できる。

降伏点および材料の機械的性質を測定するために標題のような制御方式を開発した。図 2 に新しい制御方式によって得られた結果を表す座標を示す。X 軸は応力 σ 、Y 軸はひずみ ϵ 、Z 軸は時刻 t である。図中の曲線 0 A は 3 次元で表示されたものである。本報では新しく開発した応力とひずみと時刻が同時に計測できる知

Fig.1. Stress σ - strain ϵ curve

* 原稿受付 2004 年 6 月 17 日。

^{*1} 正員, 日本大学工学部 (〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原 1)。

E-mail: imamura@mech.ce.nihon-u.ac.jp

 Fig.2 Stress σ -strain ε -time t curve

能型万能試験機の制御法とその測定結果について述べる。測定結果では非線形材料の 1 本の試験片より得られたデータとそのデータの解析によって得られた降伏点および変形挙動の可視化について述べる。

2. 知能型万能試験機の概要

2.1 知能型万能試験機の制御法

本試験機の荷重およびひずみ計測制御システムを図 3 に示す。試験片に小荷重 W_{st} を一定時間負荷するためロードセルからの信号をパーソナルコンピュータを介してサーボモータ M に送られ、次の信号が入力されるまで一定の荷重が保たれる。試験片は小荷重 W_{st} が負荷されると変形する。一定の荷重が作用されているので時間の経過とともに、荷重と変形はつりあうことになる。つりあいは試験片に貼付した strain gauge により検出され、静ひずみ計 (data logger TDS-303) によりパーソナルコンピュータに入力され判断後、次の小荷重 W_{st} が負荷される。

図 4 に荷重 W と時刻 t および引張速度 V との関係の概念図を示す。点 A_{n-1} から所定の荷重 (点 B_n) まで引張速度 V_1 で引張り、所定の荷重 (点 B_n) に達したら点 A_n まで引張速度 V_2 で引張る。荷重一定の状態でひずみの値が静止状態になったら、次の所定の荷重 (点 B_{n+1}) になるまで引張る。 t_e は点 A_{n-1} と点 B_n との間の時間、

Fig.3 Illustration of load and strain control system

Fig.4 The conceptual scheme of control method of testing equipment

t_h は点 B_n と点 A_n との間の時間、 Δt は点 A_{n-1} と点 A_n との間の時間をそれぞれ示す。点 A_{n-1} から点 A_n までの制御が 1 サイクルであり、このような制御を最大荷重まで繰返すことにより材料の機械的性質を正確に測定できる。特徴としては試験片のひずみにより制御を行うことと微小荷重区間において変形が静止するまでの時間の測定および引張速度を 2 段階で行えることである。

2.2 知能型万能試験機の試験条件

図 5 に知能型万能試験機のフローチャートを示す。制御はパーソナルコンピュータにより行われる。荷重制御部 (①~③) とひずみ検出部 (④~⑨) で構成されている。小さな荷重を段階的に試験片に負荷する機構となっており、ひずみは試験片に貼付した strain gauge により検出され、さらにひずみの変化量がある範囲内に達しなければ (⑧)、いつまでも所定荷重が負荷され続ける。荷重が負荷され初めてから、ひずみの安定確認時間 (⑥) を含め荷重更新指令までの時間を測定し逐次データを保存する。この操作を最大荷重まで行う。駆動モータはパルス制御を行うことにより $0.1 \mu m$ の精度で引張試験を行える。

本試験機の試験のためのパラメータの説明を行う。

1. Start load (N) —— 試験開始時の荷重設定。
2. Stop load (N) —— 試験終了時の荷重設定。
3. Step stress σ_{st} (MPa) —— 階段応力の設定。
4. Loading speed V_1 (mm/min) —— 上昇負荷速度の設定。
5. Load on time t_m (s) —— 設定の荷重に達した時からひずみ測定開始までの時間設定。
6. Reducing speed V_2 (mm/min) —— 減速速度の設定。
7. Load hold time t_h (s) —— ひずみが所定の値に達したかどうかを計測する時間インターバルの設定。
8. Strain stable rate $\varepsilon_{st}(\mu)$ —— ひずみが安定

Fig.5 Flow chart showing a control method of tensile testing machine

したと判断するときのひずみの変化量の設定。

9. Load near σ_{ne} (MPa) — 設定応力の手前から減速速度を開始するときの応力設定。 $\beta = \sigma_{ne} / \sigma_{st}$

3. 実験結果及び考察

3.1 試験片

直径が 20 mm の S45C 素材を用いて丸棒の試験片を作製した。試験片の寸法は全長が 180 mm で平行部の長さは 35 mm，平行部の外径は 10.00 mm でつかみ部の外径は 15 mm とした。平行部の仕上げは 1200 # の耐水紙を用いて仕上げた。ひずみの検出は平行部中央に於いて 90 度間隔に 4 枚貼った strain gauge (YFLA-2) により行った。

3.2 試験条件

表 1 に試験条件を示す。各項目の試験条件が異なりと材料の変形挙動が異なるために、ここでは『弾性—塑性遷移点』(造語)が明瞭に現れ、しかも塑性領域において弾性挙動を示すことがなく完全に弾性挙動と塑性挙動が分離するときの試験条件で試験を行った。弾性—

Table 1 Experimental conditions

①	②	③	④
Step stress σ_{st} MPa	Elevation tensile speed V_1 mm/min	Reducing tensile speed V_2 mm/min	Load on time t_m s
3.0	0.05	0.02	1
⑤	⑥	⑦	
Load hold time t_h s	Strain stable rate $\epsilon_{st} \times 10^{-6}$	Load near σ_{ne} MPa	β %
10	3	0	0

塑性遷移点についてはあとで述べる。

3.3 応力と時刻の関係

はじめに応力 σ と時刻 t の関係について説明する。応力と時刻の関係は図 2 において三次元で示された曲線 OA を $\sigma-t$ 座標平面に正投影したものとなる。

表 2 には計測された data を示す。2 列目の Sign は荷重の設定値(In)と決定値(Out)を示す。奇数行(In)で示した data は設定荷重 W_{st} における状態のものであり、偶数行(Out)で示した data は設定荷重においてひずみが安定したときの状態での決定された data を示す。3 列目の Time s は測定開始からの通算時刻(s)。4 列目の σ MPa は応力。5 列目からの $\epsilon_1 \sim \epsilon_4$ は試験片の軸方向のひずみと平均値 $\epsilon_{AV} (\times 10^{-6})$ を表す。

Table 2 Measured data by intelligent universal test machine

No.	Sign	Time s	σ MPa	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_{AV}
1	In	32	10.1	14	11	19	8	13
2	Out	55	13.0	31	25	40	18	28
3	In	66	16.1	30	25	39	17	44
4	Out	88	19.1	45	40	60	29	59
5	In	98	22.1	46	40	60	29	75
6	Out	119	25.1	61	54	76	42	90
7	In	129	28.1	61	55	76	42	104
8	Out	149	31.1	78	69	92	57	120
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.

表 3 に応力と時刻の関係の解析例を示す。t-In は設定値の時刻、t-Out は決定値の時刻を示す。 Δt は t-In の時刻の前後の差であり、図 4 において t_{An-1} から t_{An} までに要した時間である。一例として No.3 の行の

Table 3 Analytical results of the relation between stress σ and time t

No.	t-In s	t-Out s	t_{es}	t_{hs}	Δt s	Weight N	σ MPa
1	32	55	23	10	33	794	10.1
3	66	88	23	11	34	1020	13.0
5	98	119	22	10	32	1265	16.1
7	129	149	21	10	31	1500	19.1
9	159	179	20	10	30	1736	22.1
11	189	209	20	10	30	1971	25.1
13	219	238	20	10	30	2206	28.1
15	248	267	19	10	29	2442	31.1
17	277	295	19	10	29	2677	34.1
19	305	323	18	10	28	2913	37.1
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.

$\Delta t=34$ の値は 66 と 32 の差を示している。No.1 の行の Δt 値だけは t_e と t_h の和である。

t_e は t_{Out} の時刻と t_{In} の時刻の差であり、図 4 の $t_{\text{An}-1}$ から t_{Bn} までの時間である。一例として No.3 の行の $t_e=23$ の値は No.1 の行の 55 と 32 との差を示し、No.1 の行の t_e だけは No.3 行の $t_e=23$ と同一の値とした。 t_h は図 4 において t_{Bn} から t_{An} までの時間である。弾性領域では $t_h=10$ s で応力とひずみは静的なつりあいとなるが、塑性領域に入ると $t_h=10$ s では変形は止まらず、静的なつりあいとなるためには 10 の整数倍の時間を要する。

図 6 に応力 σ と時刻 t の関係を示す。横軸は応力 σ 、縦軸は時刻 t である。応力 σ —時刻 t 曲線において A 点まではほぼ直線的に挙動しているが、A 点以後は非線形となっている。

図 7 に表 3 で示した解析結果の $\sigma-t$ と $\sigma-\Delta t$ 、 $\sigma-t_e$ (○印)、 $\sigma-t_h$ の関係を両対数軸平面上に示す。 $\sigma-\Delta t$ 曲線と $\sigma-t_h$ 曲線は A 点までは安定して挙動している。この領域は弾性領域であると見なすことができる。A 点になると大きな変化が見られ、それ以後は激しく不安定な挙動を示している。

Fig.6 Relation between stress σ and time t

Fig.7 Relation between stress σ and time t

図 8 に図 7 の A 点付近を拡大したものを示す。この図では $\sigma-t$ および $\sigma-th$ 曲線のみを示す。 $\sigma-th$ 曲線において A 点までは 10 s で一定で安定した挙動を示しているが、A 点に到達すると急激な変化が生じている。材料の降伏は結晶のずれにより起こり、材料を一樣な速度で引っ張ったとき、降伏点の明瞭な材料はある応力に達するとすべり変形により降伏が開始し、材料は急激に伸びる降伏点や下降降伏点が見れる。この現象を計測するときにはひずみゲージを試験片のどの位置に貼っても検出される。

降伏点不明瞭な材料は一樣な速度で引っ張った場合、結晶のずれの量が少ないために変形量の変化として検出できない。このために小さな荷重を加えてはひずみの静止するのを待ち、静止したら次の小荷重を加えるという動作を行った。このような動作を行った結果、降伏する前と降伏した後のひずみが静止するまでの時間が極端に変化することが現れた。このときひずみゲージは試験片のどの位置に貼ってあってもひずみが静止したかどうかを検出できる。A 点まではひずみが静止するまで時間が 10 s 一定で挙動していることから弾性領域であることが分かる。A 点以後の応力ではひずみの静止まで約 150 s の時間を要した。A 点以後は応力の上昇とともにひずみの静止までの時間が 50 s から 500 s を要している。このようにひずみが安定するまでに多くの時間を要しているということは、弾性以上の変形量が材料中に生じていることを示している。このような現象から判断すると A 点以後は塑性領域であることを示している。また、図 10 中の応力 σ —ひずみ ϵ 曲線の A 点を境としたひずみの急激な上昇からも A 点以後は塑性領域であることが分かる。

S45C 素材は引張速度一定の引張試験においては降伏点を明瞭に計測出来ないが、本試験方法を用いると明瞭な降伏点が計測出来る。ここでは試験方法が通常の

Fig.8 Relation between stress σ and time t expanded near point A

引張試験と異なるので、これまでの降伏点という名称を用いることは出来ない。これまでの降伏点と区別するためにこの弾性と塑性との境界を示す A 点を『弾性－塑性遷移点, Elasticity－Plasticity transition point, 通称 E-P point』と呼ぶことにする。ここで用いた S45C 素材の E-P point は $\sigma_{ep}=487$ MPa であった。

3.4 応力とひずみの関係

$\sigma - \varepsilon$ 座標平面に正投影したときの応力 σ とひずみ ε の関係について述べる。表 4 に応力とひずみの関係の解析例を示す。 $\varepsilon - \ln$ は設定値におけるひずみ, $\varepsilon - \text{Out}$ は決定値におけるひずみを示す。ひずみ ε の単位は 10^{-6} である。 $\Delta \varepsilon$ は $\varepsilon - \ln$ のひずみの前後の差である。一例として No.3 の行の $\Delta \varepsilon=15$ の値は 28 と 13 の差である。No.1 の行の $\Delta \varepsilon=17$ だけは 16 と 1 の和とした。 εe は $\varepsilon - \text{Out}$ のひずみと $\varepsilon - \ln$ のひずみの差である。No.3 の行の $\varepsilon e=16$ の値は No.1 の行の 29 と 13 との差である。No.1 の行の $\varepsilon e=16$ だけは No.3 行の $\varepsilon e=16$ と同一の値を用いた。 εh は図 4 おいて時間 t_h のときのひずみである。ひずみの値の計算は 1×10^{-7} の値において四捨五入とした。

図 9 に応力 σ とひずみ ε の関係を示す。横軸は応力 σ , 縦軸はひずみ ε である。 $\sigma - \varepsilon$ 曲線 OB において C 点付近まではほぼ直線的に挙動しているが C 点付近以

Table 4 Analytical results of the relation between stress σ and strain ε

No	Weight N	σ MPa	$\varepsilon - \ln$	$\varepsilon - \text{Out}$	εe	εh	$\Delta \varepsilon$
1	794	10.1	13	29	16	1	17
3	1020	13.0	28	44	16	-1	15
5	1265	16.1	44	58	16	0	16
7	1500	19.1	59	74	15	0	15
9	1736	22.1	75	89	16	1	16
11	1971	25.1	90	104	15	1	15
13	2206	28.1	104	120	15	-1	14
15	2442	31.1	120	136	16	0	16
17	2677	34.1	136	151	16	0	16
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.

Fig.9 Relation between stress σ and strain ε

後は非線形挙動を示している。E-P point は見つけ難い。

表 4 で示された関係を図 10 に $\sigma - \Delta \varepsilon$ 曲線, $\sigma - \varepsilon e$ 曲線 (○印), $\sigma - \varepsilon h$ 曲線をまとめて示す。A 点までひずみは小幅な動きで比較的安定した挙動を示している。A 点で大きなひずみの変化を示しているが、この点で大きな変形が起こったためである。A 点が E-P point にあたると考えられる。A 点以後は $\sigma - \Delta \varepsilon$ 曲線と $\sigma - \varepsilon h$ 曲線は変動の激しい状態となる。この領域は塑性領域である。反対に $\sigma - \varepsilon e$ 曲線は変動が小幅に推移している。

図 11 に表 4 を元に A 点 (E-P point) までを拡大した $\sigma - \varepsilon h$ 曲線を示す。ひずみ εh は上昇速度 $V_1=0.05$ mm/min から $V_2=0.02$ mm/min の速度に減少されたことによって、応力 σ が下降する。この応力の下降に伴いひずみ εh も下降する。引張速度が減速されることにより応力が下降するのは弾性という性質によるものと見なすことができる。つまり材料の弾性による復元力によって引き起こされるひずみなので、ひずみ εh の弾性領域でのひずみ εr のことを『復元ひずみ, Reducibility strain』と呼ぶことにする。試験条件によっては復元ひずみ εr が見られないこともある。復

Fig.10 Relation between stress σ and strain ε

Fig.11 Relation between stress σ and reducibility strain εr

元ひずみ ϵ_r を適切に引き起こす試験条件は材料の固有の機械的性質を示すため重要である。

3.5 ひずみと時刻の関係

$\epsilon - t$ 座標平面における $\epsilon - t$ の関係について述べる。時刻 t は階段応力 σ_{st} を負荷したときひずみ ϵ の値が静止したときの時刻であり、図 12 にひずみ ϵ と時刻 t との関係を示す。A 点までは弾性領域であり非線形挙動をしている。A 点以後は塑性領域であるがほぼ線形挙動を示している。

図 13 は図 12 で得られた結果を応力とひずみの解析方法と同様な方法で解析を行い、その結果を両対数の目盛で示したものである。 $\epsilon - t$ 曲線および $\epsilon - \Delta t$ 曲線、 $\epsilon - t_e$ 曲線(○印)、 $\epsilon - t_h$ 曲線をそれぞれ示す。各曲線とも A 点までは安定した挙動をしているので、この領域が弾性領域であると考えられる。A 点以後は不安定な挙動を示しており、この領域は塑性領域であると見なすことができる。すなわち A 点は E-P point である。

図 13 の A 点近傍を拡大したものが図 14 である。この図では $\epsilon - t$ 曲線と $\epsilon - t_h$ 曲線を示す。 $\epsilon - t_h$ 曲線において A 点まではほぼ $t=10$ s で推移しているが、A

Fig.12 Relation between strain ϵ and time t

Fig.13 Relation between strain ϵ and time t

Fig.14 Relation between strain ϵ and time t expanded near point A

点で急激に変化しひずみが安定するまで 30 s から 800 s の時間を要している。このように $\epsilon - t_h$ 曲線からも弾性と塑性の境界が明瞭に測定できる。

3.6 1秒ごとの応力とひずみの関係

本試験機では表 2 で示された測定値のほかにも 1 秒ごとの data も得られる。このときの data を表 5 に示す。Time は時刻(s), Weight N は荷重(N), σ は応力(MPa), $\epsilon_1 \sim \epsilon_4$ は計測されたひずみ, ϵ_{Av} はひずみの平均値であり初期応力分 8 MPa のひずみ量を加算している。ひずみの単位は 10^{-6} である。

表 5 の data を用いて応力 σ とひずみ ϵ の平均値 ϵ_{Av} との関係を示したのが図 15 である。横軸は応力 σ , 縦軸はひずみ ϵ を示している。1 秒毎の応力 σ - ひずみ ϵ 曲線は C 点付近までは直線的な挙動を示し、C 点付近以後は非線形挙動を示している。しかし E-P point は明瞭ではない。

図 16 は応力が 475~505 MPa までの間を拡大した応力とひずみの変形挙動を示す。A 点までの応力とひずみの変形挙動はのこぎり刃状をしている。このように引張速度を 2 段階に変化させることにより材料の弾性挙動が明瞭に観察できる。A 点以後になると応力とひずみの挙動は階段状の挙動に変わる。これは塑性挙動であることを示している。A 点が E-P point である。

3.7 1秒ごとの応力と時刻の関係

Table 5 Measured data by intelligent universal test machine in every second

Time s	Weight N	σ MPa	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_{Av}
0	628	8.0	2	2	2	2	42
1	637	8.1	3	3	4	3	43
2	647	8.2	4	4	5	3	44
3	657	8.4	4	4	6	3	44
4	677	8.6	5	5	8	4	46
5	686	8.7	6	5	8	4	46
6	686	8.7	7	7	9	4	47
7	706	9.0	7	6	11	4	47
8	716	9.1	8	6	11	5	48
9	726	9.2	8	7	12	6	48
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-

Fig.15 Relation between stress σ and strain ε in every second

Fig.16 Relation between stress σ and strain ε in every second expanded near point A

図 17 に 1 秒ごとの応力 σ と時刻 t の関係を示す。A 点までは線形挙動が見られ、A 点以後は非線形となっていることが見分けられる。A 点が E-P point であると見なされる。

図 18 に応力 σ が 475~500 MPa までの間を拡大した応力と時刻の変形挙動を示す。のこぎり刃状の挙動と階段状の挙動つまり弾性と塑性が明瞭に見分けられる。A 点が E-P point である。

3.8 1 秒ごとのひずみと時刻の関係

図 19 に 1 秒ごとのひずみ ε と時刻 t の関係を示す。A 点までは非線形挙動であり、A 点以後はほぼ線形挙動を示していることが見分けられる。A 点が E-P point である。

図 20 にひずみ ε が 3000~3250 $\times 10^{-6}$ までの間を拡大したひずみ ε と時刻 t の変形挙動を示す。弾性挙動と塑性挙動の違いが明瞭に見分けられる。A 点が E-P point である。

4. 結 言

Fig.17 Relation between stress σ and time t in every second

Fig.18 Relation between stress σ and time t in every second expanded near point A

Fig.19 Relation between strain ε and time t in every second

Fig.20 Relation between strain ε and time t in every second expanded near point A

新しく開発した知能型万能試験機の概要および弾性と塑性の遷移点(E-P Point)について

1. 応力 σ と時刻 t の関係
2. 応力 σ とひずみ ε の関係
3. ひずみ ε と時刻 t の関係

として3次元変形挙動を2次元変形挙動より明らかにした。いずれの関係でも降伏点不明瞭な材料は当然ながら、降伏点不明瞭な S45C の E-P point を明確に測定することができた。

本試験機の特徴は冒頭で述べたように、引張試験に時間のファクターを取り入れることにより3次元計測を行えることで、これまで測定出来なかった材料の基本的な機械的性質を測定することが可能となったことである。

謝 辞

本論文に述べた新しい試験方法は、(株)島津製作所の

理解を得て同社分析計測事業部との共同研究に至り、新しい測定方法から得られた新たな現象の解析についても議論に加わって戴き貴重なご意見を戴いた。共同研究に尽力戴いた山本靖則試験機ビジネスユニット総括マネージャーはじめ川崎健史氏、中井光一氏他同社の関係各位に深く感謝の意を表します。研究に対して的確な助言を戴いた元日本大学工学部岡部 進教授、同佐藤光正助教授、試験材料を提供してくれた(株)加藤螺子製作所に心から感謝の意を表します。

文 献

- (1) H.Hindman and G.S.Burr, The Instron Tensile Tester, *Trans. ASME*, **71** (1949),789-796.
- (2) ISO, ISO Standards Handbook 31,(1988),137-148.
- (3) ASTM, Annual Book of ASTM Standards Vol. 03.01, E-8,(1993),130-149.