金属材料の強度と延性*

日本材料学会 X線材料強度部門委員会「塑性と破壊」分科会**

Strength-Ductility Relation of Materials

by

Subcommittee on Deformation and Fracture of Materials

Committee for X-Ray Study on Mechanical Behavior of Materials

An attempt has been made to obtain the relation between strength and ductility parameters in tensile deformation of various metals and alloys used in engineering fields. In the tensile strength (σ_B)-uniform elongation (ϵ_U) diagram, the data were classified into several curves depending on crystal structure and stacking fault energy. Materials with low stacking fault energy such as stainless steel SUS 304 have an excellent σ_B - ϵ_U relation, while hop materials such as zinc and magnesium have low σ_B and σ_U compared with the standard curve obtained for ferrite steels, copper and aluminium. The relation between yield ratio (σ_Y/σ_B) and ϵ_U for all materials investigated in the present study is roughly summarized by a single curve, although the curve does not exactly agree with the theoretical curve generated under the assumption that the stress-strain relation obeys the n -th power law.

(Received Mar. 23, 1978)

キー・ワード：破壊，延性，引張試験

1 緒 言

工業用各種材料のなかで，金属材料が重要な地位を占めていることはいうまでもない。これら金属材料の基本的な機械的特性は，たとえば引張試験によって得られる応力-ひずみ線図によって把握することができ，強度を表す特性値（降伏応力や引張強さ）と延性を表す特性値（均一伸びや破断伸び）とが評価できる。一般的には，強度と延性は一方が優れていれば他方が劣るという関係にあるので，金属材料の用途に応じていずれか一方の特性を重視するのが通例であった。鉄鋼材料を例にとれば，一般構造用圧延鋼材 SS55 などは強度重視型に属し，自動車車体のプレス成形に供する冷間圧延鋼板 SSPE などは延性重視型といえる。

これに対し，強度と延性とが両方とも優れた材料があれば，それは材料の一つの理想形態といえる。最近注目されている自動車車体用の高張力鋼板の場合には，この理想形態に近い材料が必要とされている。すなわち，プレス成形に適した十分な延性と，車体に組立てられてからの堅牢性を保つための十分な強度とが両方

とも重視されている¹⁾。

このような観点から，当分科会では各種金属材料の強度と延性との関係を総合的に把握することを目的とし，昭和49年以来共同研究を進めてきた。その結果をここに報告するが，金属材料のメーカーあるいはユーザーにとって多少とも参考になり，またさらに深い学術研究の端緒ともなれば幸甚である。

2 理 論

引張試験によって得られる公称の応力ひずみ線図を数式で表記することは困難であるが， $\bar{\sigma}$ を真応力， $\bar{\epsilon}$ を真ひずみとして $\bar{\sigma}$ と $\bar{\epsilon}$ の関係を

$$\bar{\sigma} = k \bar{\epsilon}^n \quad (1)$$

で近似することがある。ここで k は比例定数であり， n は加工硬化指数（ n 値）とよばれる。

応力-ひずみ線図の最高荷重点では $\bar{\epsilon} = n$ が成立つので，引張強さ（ σ_B ）と均一伸び（ ϵ_U ）は

$$\sigma_B = k \left(\frac{n}{e} \right)^n \quad (2)$$

$$\epsilon_U = e^n - 1 \quad (3)$$

で与えられる。また降伏応力（ σ_Y ）を 0.2% ひずみでの耐力として

$$\sigma_Y = k (0.002)^n \quad (4)$$

で表せば，(2)，(4)式から k を消去し(3)式を用いて

* 原稿受理 昭和53年3月23日

** 主査 武智 弘 新日本製鉄(株)君津技術研究所

幹事 阿部光延 新日本製鉄(株)基礎研究所

〃 白砂洋志夫 上智大学理工学部

$$\frac{\sigma_Y}{\sigma_B} = \left\{ \frac{0.002 \times e}{\ln(\epsilon_U + 1)} \right\}^{\ln(\epsilon_U + 1)} \tag{5}$$

が得られる．ここで σ_Y/σ_B は降伏比とよばれる．すなわち，降伏比と均一伸びとの関係が，金属の種類（ k や n の値）に関係なく (5) 式で統一的に表示できることになる．

3 実 験

共同研究参加機関を Table I に，また用いた材料の種類，試験片形状寸法などを Table II にまとめた．試験片は JIS の規定を採用したものがほとんどであるが，各研究機関の手持ち試験データの一部分がそのまま提供された場合もあるので，試験片の形状や寸法が統一されているわけではない．

Table I. Investigators of tensile properties.

No.	Investigators
1	K. Hatanaka (Faculty of Engineering, Yamaguchi University)
2	A. Hijikata, S.Yoshioka and M.Kumasawa (Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corp.)
3	H. Iguchi (Faculty of Engineering, Niigata University)
4	K. Kamachi (Faculty of Engineering, Yamaguchi University)
5	K. Komiya (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp.)
6	K. Matsudo, K.Osawa and M.Sako (Fukuyama Research Laboratory, Technical Research Center, Nippon Kokan K.K.)
7	T. Mori and A.Tanaka (Heavy Apparatus Engineering Laboratory, Tokyo Shibaura Electric Co. Ltd.)
8	K. Mitsunaga (Kyushu Institute of Technology)
9	E. Nakanishi (Engine Laboratory, Komatsu Ltd.)
10	A. Nemoto (Kantoku Precision Casting Works Ltd.)
11	S. Nishijima (National Research Institute for Metals)
12	T. Ohi and Y. Chinone (Tamano Laboratory, Mistui Engineering and Shipbuilding Co. Ltd.)
13	Y. Sakamoto (Faculty of Engineering, Nagasaki University)
14	Y. Shirasuna (Faculty of Science and Technology, Sophia University)
15	H. Takada (Industrial Research Institute of Kanagawa Prefecture)
16	T. Takagi (Railway Technical Research Institute, Japan National Railways)
17	K. Tanaka (Faculty of Engineering, Kyoto University)

Table II に示した材料はすべて通常の引張条件（引張温度：室温，ひずみ速度： $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{sec}^{-1}$ ）で試験されたが，このほかに高温引張りや低温引張り，あるいは材料に水素をチャージしてから引張試験した場合もあり，これらの特殊引張条件を Table III に示す．

引張試験によって得られる機械的特性値のうち，ここでは降伏応力（あるいは0.2%ひずみでの耐力），引張強さ，均一伸び，破断伸び， n 値に注目した．均一伸びは最高荷重点での公称ひずみから評価し，破断伸びは破断後の試験片の突合せによる実測値を用いた．

n 値の評価に当っては，(1)式に基づき $\bar{\sigma}$ と $\bar{\epsilon}$ の両対数プロットで得られる直線のこう配から n 値を求める方法や，2組の $\bar{\sigma}$ と $\bar{\epsilon}$ の値から計算で n 値を求める方法などがよく用いられるが，本報の場合 n 値の評価法は研究機関によって異っている．ひずみ区間によって n 値が変化する場合には，高ひずみ側の値を検討の対象とした．

4 結 果

4・1 測定値の分散

測定者の相違や試験片の形状寸法の相違などにより，測定値にある程度の分散の生ずることは避け難い．

Table II の⑧の場合には，構造用炭素鋼（S15C）を用いて15名の相異なる測定者によって引張試験が行われ，Table IV に示すような測定値の個人差が記録されてた．

このほかに試験片の板厚が厚いほど，また標点距離の短いほど破断伸びが大きくなることなどの，試験片の形状寸法に由来する測定値分散も考慮しなければならない．

したがって，以下に述べる実験結果から得られる知見が概括的なものに限定されるのはやむを得ない．

4・2 均一伸びと n 値

均一伸び（ ϵ_U ）と n 値との関係は(3)式で記述されるが，これが実際の材料でどの程度一般性をもつか調べた．その結果を Fig.1 に示す．多少の分散はあるが，各種材料共通に(3)式の関係がほぼ成立つものと判断できる．Fig.1 における測定点の分散は(3)式の表す曲線の上側に限られているので，これを考慮すれば ϵ_U と n 値との関係が，実際には

$$\epsilon_U \leq e^{n-1} \tag{6}$$

で記述されることになる．このような測定点の特異な分散の理由は明らかでない．

4・3 引張強さと均一伸び

引張強さ（ σ_B ）と均一伸び（ ϵ_U ）は，それぞれ強度と延性を表す代表的な特性値であるが， σ_B と ϵ_U との関係は Fig.2 に示すように材料の種類によっていくつかの群に別けられる．

A群はフェライト系鉄鋼材料を中心にして銅，アルミニウムなどを含むもので，Table II に示した材料の多くがこれに属する．これに対し，B群はオーステナイト系鉄鋼材料であるステンレス SUS304 や高マンガン鋼の一部で構成されており，A群に比べて強度も延性もともに優れた材料群を表している．

C群（2相ステンレス，高マンガン鋼の一部）やD群（黄銅）は，A群とB群の中間的存在である．E群は強度も延性も両方とも劣るような材料群で，亜鉛やマグネシウム，あるいは未焼なましの銅やアルミニウムH材がこれに属する．

Table II. Material and specimen size for tensile test under the usual condition
(room temperature strain rate: 10^{-4} – 10^{-3} sec $^{-1}$).

No.	Material	Specimen size (mm) [gauge length]×[section]	Symbol in Figs. 1–4
①	Cold-rolled steel sheet (various grades)	50×25×0.7–1.2	○
②	Cold-rolled steel sheet (SPC 1)	50×12.5×0.8–1.0	○
③	High-strength cold-rolled steel sheet (various grades)	50×25×0.7–1.2	○
④	Mild steel	50×6–8φ	○
⑤	Mild steel (CK 42)	50×12.5×0.8–1.0	○
⑥	Mild steel (CK 51)	50×12.5×0.8–1.0	○
⑦	Rolled steel for general structure	50×14φ	○
⑧	Carbon steel for structure purposes (S 15 C)	50×14φ	○
⑨	Carbon steel for structure purposes (S 35 C)	50×9φ	○
⑩	Carbon steel for structure purposes (S 45 C)	50×12.5φ	○
⑪	Rolled steel for general structure (SS 41, heat-treated)	50×12.5×1.0	○
⑫	Carbon steel (SAE 1035)	50×12.5×0.8–1.0	○
⑬	Carbon steel (SAE 1070)	50×12.5×0.8–1.0	○
⑭	Stainless steel (SUS 340)	50×25×0.8	○
⑮	Alloy steel (3.5%Ni, for dynamo shaft)	50×14φ	○
⑯	Alloy steel (12%Cr)	50×12×3	○
⑰	Chromium-molybdenum steel (SCM 3, various tempering conditions)	40×8φ	○
⑱	Chromium-molybdenum steel (SCM 3)	50×12.5×0.8–1.0	○
⑲	Carbon tool steel (SK 7)	50×12.5×0.8–1.0	○
⑳	Stainless steel (SUS 304)	50×12.5×0.8–1.0	▼
㉑	Stainless steel (heat-treated)	50×12.5×0.8	▼
㉒	Alloy steel (A 286, 25%Ni)	50×12×3	▼
㉓	Dual-phase stainless steel	50×12.5×1.5	▼
㉔	High-manganese steel (13%Mn)	50×10φ	※
㉕	Spheroidal graphite cast iron	50×7φ	●
㉖	Stainless cast steel	25×7φ	●
㉗	Copper (annealed)	50×14φ	□
㉘	Copper	50×12.5×0.8–1.0	□
㉙	Copper (purity 99.94%)	50×12φ	□
㉚	Copper (before annealing, purity 99.94%)	50×14φ	□
㉛	Aluminium (commercial grade, purity 98.86%)	50×25×0.8	△
㉜	Aluminium base alloy	50×20×1	△
㉝	Aluminium (grade H)	50×12.5×0.8–1.0	△
㉞	Brass	50×12.5×0.8–1.0	□
㉟	Brass (α)	40×10φ	□
㊱	Brass (6–4)	50×25×0.8	□
㊲	Brass (6–4)	50×12.5×1	□
㊳	Titanium	50×25×0.8	●
㊴	Magnesium	50×4×2	⊗
㊵	Magnesium base alloy (Mg–5%Al)	50×4×2	⊗
㊶	Zinc (commercial grade)	50×25×1	⊗
㊷	German silver	50×12.5×0.8–1.0	◇
㊸	Intermetallic compound (50%Ti–49%Ni)	50×10φ	⊕

Table III. Material and specimen size for tensile test under special conditions.

No.	Material	Specimen size (mm) [gauge length]×[section]	Tensile condition
㉞	Carbon steel for structure purposes (S 45 C)	50×9φ	High temperature (R.T., –500°C)
㊴	Carbon steel for structure purposes (S 45 C)	50×12.5×1.2	Low temperature (R.T., –78°C)
㊵	Rolled steel for general structure (SS 41)	50×12.5×0.8	Low temperature (R.T., –78°C)
㊷	Carbon steel for structure purposes (S 45 C)	50×12.5×1.2	After hydrogen charging, at R.T.
㊸	Rolled steel for general structure (SS 41)	50×12.5×0.8	After hydrogen charging, at R.T.

Table IV. Individual variation in tensile test of the same material (material ⑧ in Table II).

Observer No.	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Uniform elongation (%)	Total elongation (%)	Work-hardening exponent (<i>n</i> value)	Yield ratio
1	26.0	43.3	29.5	46.4	0.278	0.60
2	26.0	43.3	30.5	49.2	0.276	0.60
3	26.6	43.8	27.6	43.4	0.259	0.61
4	26.9	44.0	25.7	45.9	0.242	0.61
5	29.2	43.2	26.4	43.8	0.258	0.68
6	25.9	43.5	28.0	43.2	0.259	0.60
7	27.6	43.3	28.2	46.0	0.280	0.64
8	26.6	42.2	27.8	44.8	0.278	0.63
9	26.6	43.7	26.0	44.8	0.254	0.61
10	26.9	43.6	26.1	45.4	0.265	0.62
11	26.1	43.4	28.6	45.6	0.270	0.60
12	26.5	43.9	26.3	44.0	0.236	0.60
13	26.9	43.3	26.2	44.6	0.245	0.62
14	27.6	43.7	27.6	43.4	0.245	0.63
15	26.8	43.2	25.1	44.9	0.259	0.62
Average	26.81	43.43	27.31	45.03	0.260	0.617
Standard deviation	0.84	0.43	1.51	1.53	0.014	0.021

Fig. 1. The relationship between uniform elongation ϵ_U and work-hardening exponent n (Symbols in the figure are listed in Table II).

降伏応力 (σ_Y) は材料の熱履歴や引張試験前のスキャンパスの程度などによって敏感に変動するので、 σ_Y と ϵ_U の関係をプロットした結果では Fig. 2 におけるような群の分類はできなかった。

4・4 降伏比と均一伸び

降伏比 (σ_Y/σ_B) と均一伸び (ϵ_U) との関係を Fig. 3 に示す。両者の関係は、一部の分散の大きい測定点を除けば、図中の実線の曲線で代表できる。一方(5)式から得られる σ_Y/σ_B と ϵ_U との関係を鎖線の曲線で表示したが、実測の結果と(5)式とは多少相違するもの

Fig. 2. The relationship between uniform elongation ϵ_U and tensile strength σ_B (Symbols in the figure are listed in Table II).

の、Table II に示した各種材料のほとんどについて強度と延性の関係を総括して(5)式のような形で表記することは可能とみられる。

4・5 降伏比と破断伸び

Fig. 4 は降伏比 (σ_Y/σ_B) と破断伸び (ϵ_T) との関係をまとめたものであるが、測定点の分散はかなり大きい。強いて相関を示せば、 σ_Y/σ_B と ϵ_T の関係は直線的といえる。

4・6 高温引張り

Fig. 3. The relationship between uniform elongation ε_U and yield ratio σ_Y/σ_B (Symbols in the figure are listed in Table II).

高温引張り (Table III, ④) における引張温度と機械的特性値との関係を Fig. 5 に示す。 σ_Y/σ_B が極小となる条件下 (250℃引張り) で ε_U が極大となること、250℃以上の高温引張りでは σ_Y/σ_B の増大と ε_U の減少とが対応していることなど Fig. 3 (室温引張り) と類似の傾向を示している。

室温引張りの場合に比べての特性的な差異は、青熱ぜい性の生ずるような温度の引張りで現れる。すなわち、Fig. 5 の 150℃引張りでは ε_U が極小になっているにもかかわらず、 σ_Y/σ_B が極大を示すわけではなく、 n 値も大きい。これは、動的ひずみ時効で n 値が増大しているのに、応力-ひずみ線図に現れるセレーンションと関連した不均一変形が ε_U を低下させるためと考えられる。³⁾ したがって、青熱ぜい性の生ずるような場合の強度と延性との関係は、(5)式あるいは Fig. 3 の

Fig. 4. The relationship between total elongation ε_T and yield ratio σ_Y/σ_B (Symbols in the figure are listed in Table II).

ような形で他の場合とともに統一的に整理することはできない。

4・7 低温引張り

低温引張り (Table III, ⑤, ⑥) における σ_B と ε_U との関係を、室温引張りの場合と対比させて Fig. 6 に示す。引張温度が-78℃の場合も室温の場合も、概括的には一つの曲線Xで σ_B と ε_U との関係が集約できる。この曲線Xは Fig. 2 の曲線Aに相当するものである。

4・8 水素チャージ後の引張り

鋼板に水素チャージしたあとの室温引張り (Table III, ⑦, ⑧) における σ_B と ε_U との関係は、Fig. 6 の曲線Yで表される。鋼材においては、水素含有量の増加によって強度と延性が両方とも低下するといわれているが、⁴⁾ この傾向は Fig. 6 の曲線XとYの比較に

Fig. 5. The variation of mechanical properties with the change of tensile-testing temperature (Material in ④ Table III).

Fig. 6. The relationship between uniform elongation ϵ_U and tensile strength σ_B for steels tested at low temperature and tested at room temperature after hydrogen charging (Materials ⑤ in Table III).

よっても裏づけられる。このような水素の影響は、たとえば水素が先在クラックに集まり、その表面エネルギーを下げることに由来すると考えられる。

5 考 察

5・1 金属の種類と強度-延性の関係

σ_B と ϵ_U との関係をまとめた Fig. 2 において、フェライト系鉄鋼材料、銅、アルミニウムなどによって得られるA群を基準とするならば、B群に属するオーステナイト系ステンレスなどでは、より高い σ_B と ϵ_U が同時に得られることになる。このようなA群とB群との差異は、おそらく積層欠陥エネルギーの値に関連しているものと考えられる。代表的な金属の積層欠陥エネルギーの値を要約して Table V に示す。一般に多くのすべり系を有する材料では、転位の交切などにより加工硬化が進行するが、鉄やアルミニウムのように積層欠陥エネルギーの大きい場合には交差すべりが頻発するため、加工硬化の程度は比較的小さい。これに対してオーステナイト系ステンレスのように積層欠陥エネ

Table V. Stacking fault energy of typical metals and alloys⁶⁾.

Material	Stacking fault energy (erg/cm ²)
Iron	950
Aluminium	200
Copper	60-80
α -brass	30
Stainless steel	20

ルギの小さい場合には、交差すべりが抑制され、加工硬化の程度が比較的高く、その結果ネッキングの発生が遅れるため σ_B も ϵ_U もともに大きな値を示すものとみられる。

Fig. 2 のE群の材料は、A群に比べて σ_B も ϵ_U も小さい。このうち加工したままの材料 (Table II, ③③) は、その加工のひずみと引張試験でのひずみとを加算して考えれば、Fig. 2 の上ではA群を代表する曲線の右端に位置すべきものとして理解できる。

E群に含まれる六方晶系金属 (マグネシウム、亜鉛) では、すべり系の数が少く転位の交切の頻度が小さいため加工硬化の程度が小さいと考えられ、ネッキングの発生が早まるので σ_B が低いにもかかわらず ϵ_U が小さくなるものとみられる。

このように、Fig. 2 において材料別に分類された σ_B と ϵ_U との関係は、主として材料の加工硬化挙動の特徴と関連づけることができる。

5・2 加工硬化と強度-延性の関係

延性を代表する ϵ_U は、(3)式に示したように、加工硬化の程度を表す n 値と直接に関連するし、強度を代表する二つの特性値 σ_Y と σ_B の比である σ_Y/σ_B もまた加工硬化の程度を表すパラメータとなり得る。したがって、加工硬化現象を媒介にして、 σ_Y/σ_B と ϵ_U との間には、たとえば(5)式のような各種材料を総合した統一的関係の存在が期待できる。Fig. 3 は、その一つの実例となる。すなわち、室温引張りでは加工硬化挙動が、強度と延性との関係をきめているともいえる。低温引張り (Fig. 6 の曲線X) の場合も同様である。これに対して、材料の変形に加工硬化以外の現象が関与する際には例外的な場合が生ずる。たとえば、青熱ぜい性の生ずるような温度での変形 (Fig. 5 の 150°C 引張り) や水素チャージ後の室温引張り (Fig. 6 の曲線Y) がこれに相当する。

6 結 言

多くの種類の金属材料についての引張試験のデータを整理した結果、強度と延性の関係について次のような知見を得た。

(1) 引張強さと均一伸びの関係は、材料の加工硬化挙動によって異なる。加工硬化の程度の大きい材料では引張強さも均一伸びもともに大きく、加工硬化の程度の小さい材料では全く逆の傾向を示す (Fig. 2)。

(2) 材料の変形に加工硬化以外の現象が関与しなければ、降伏比と均一伸びとの関係は各種材料を総合して、ある一つの曲線でほぼ近似できる (Fig. 3)。降伏比と破断伸びとの関係も同様である (Fig. 4)。

なお、本共同研究の参加者は下記のとおりである。

・井口 宏 (新潟大学工学部)

・大井利継、茅根美治 (三井造船(株)玉野研究所)

- 蒲地 一義 (山口大学工学部)
- 小宮 邦彦 (新日本製鉄(株)君津技術研究所)
- 坂本 芳一 (長崎大学工学部)
- 白砂洋志夫 (上智大学理工学部)
- 高木 享 (鉄道技術研究所)
- 高田 浩義 (神奈川県工業試験所)
- 田中 啓介 (京都大学工学部)
- 中西 英介 ((株)小松製作所川崎工場)
- 西島 敏 (金属材料技術研究所)
- 幡中 憲治 (山口大学工学部)
- 土方明躬, 吉岡純夫, 熊沢道夫
(三菱電機(株)中央研究所)
- 松藤和雄, 大沢紘一, 酒匂雅隆
(日本鋼管(株)技術研究所 福山研究所)

- 光永 公一 (九州工業大学工学部)
- 森 忠夫, 田中明弘 (東芝電機(株)技術研究所)
- 根本 明 (関東特殊製鋼)

参 考 文 献

- 1) Dinda, S., and A. S. Kasper, SAE report 770209 (1977).
- 2) 日本鉄鋼協会標準化委員会データシート部会 伸び値と試験片寸法効果分科会, 鉄と鋼, **56**, 1136 (1970).
- 3) Brindley, B. J., Acta Met., **18**, 325 (1970).
- 4) 日本学術振興会製鋼第19委員会, “鉄鋼と合金元素(上)”, p. 433 (1971) 誠文堂新光社
- 5) 日本金属学会, “新版転位論”, p. 200 (1971) 丸善
- 6) 鈴木秀次, “転位論入門”, p. 161; p. 198 (1967) アグネ; 幸田成康, “金属物理学序論”, p. 193 (1964) コロナ社