

衝撃ねじり実験 I

橋本彰三・青柳友紀・榊枝伸一・鍋島 稔・癸生川 譲

Impacting Torsionnal Experiment I

S.HASHIMOTO, T.AOYAGI, S.SAKAKIEDA, M.NABESHIMA, Y.KEBUKAWA

1. はじめに

材料の衝撃特性が重視され始めたのは、1940年代から1950年代に生じた橋梁や船舶の破壊事故が材料の脆性破壊によるものであることが明らかになってからであるといえる。特に、1954年の冬に静かな港に停泊していた、当時の最新技術を駆使して設計され、新鋼種を使って製造されたタンカーが突然まっぴらに割れた事故の原因が、新鋼種の低温脆性によることを明らかにしたのがシャルピー衝撃試験の結果であるといわれている⁽¹⁾。この低温脆性は、材料の強さに関する特性を測定する最も基本的な試験方法である静的引張試験では検出することのできなかったものである。それ以後、衝撃速度が速くなるにしたがい材料はより脆性になることが一般的に認められるようになり、材料の衝撃特性に関する研究が推進されてきたといえる。そして現在では、材料（金属材料）の脆性的性質の衝撃速度（ひずみ速度）による影響は、図1に示すように材料の結晶構造に依存することが明らかになっている⁽²⁾。

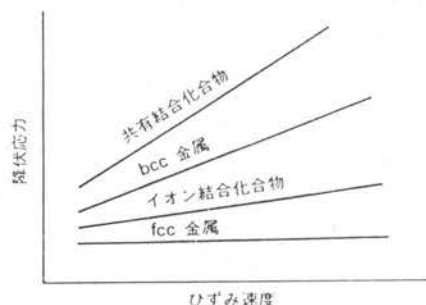


図1 材料強度のひずみ速度依存性

材料の衝撃特性をより本質的に解明するためには、衝撃的変形過程を、材料の結晶構造（ミクロ組織）や、結晶粒組織（メゾ組織）との関連でとらえる必要がある。しかし、この観点から材料特性を研究するには、シャルピー衝撃試験による材料の衝撃特性を調べる方法では不満である。その理由は、シャルピー衝撃試験による結果が試験片の形状により異なること、試験応力状態が組合せ応力状態（引張応力、圧縮応力、せん断応力の組合せ応力状態）であることのために、その

結果が材料の相対的特性しか与えないことにある。もちろん、実用的には非常に有用な方法であり、それ故に多く利用されていることは言を待たない。

材料の衝撃特性を本質的に明らかにする研究のために、単軸応力状態での衝撃試験方法が考案されている。

河田⁽³⁾は単軸応力状態における衝撃試験方法を以下に示すように3つに大別している。

(1) Block to Block 法

フライホール、油圧アクチュエータ等により負荷し、ロードセルにより荷重を測定する方法。

(2) Bar to Bar 法

スプリット・ホプキンソン棒法がこれに属し、細い入力棒を伝播する弾性応力波で負荷し、細い出力棒を伝播する弾性応力波で荷重を測定する方法。

(3) Block to bar 法

フライホール、衝撃ブロック等により負荷し、細い出力棒を伝播する弾性応力波により荷重を測定する方法。

(1)の方法は、衝撃試験の初期に利用された方法であり、現在はほとんど利用されていない。その理由は、ロードセルによる荷重の測定が、試験片に加わる時々刻々の応力を正確に把握できないということにある。

(2)の方法が最も多く利用されている方法であるがおもに衝撃圧縮試験に適用されている。この方法は、時々刻々の応力とひずみを正確に求めることが出来るという点に特徴があるがしかし、試験片の変形が塑性域にはいるとひずみ速度が大きく変わること、従って、弾性域から塑性域の全領域におけるデータを得ることは困難である。この方法は、降伏応力のひずみ速度依存性、塑性変形の初期に於ける微視的挙動の解析に適しており、より学術的研究に利用されている。しかし衝撃引張試験にはあまり適さない。

(3)の方法を最初に実用化したのは河田⁽³⁾である。この方法は、衝撃部の質量が大きいため、衝撃の初期から破断に至るまでひずみ速度を一定に保つことが出

来、全領域における応力～ひずみ曲線が得られる点に特徴があり、より実用的である。衝撃引張試験方法の標準規格を決める有力な候補であると思われる。

2. 衝撃ねじり試験について

2-1. 衝撃ねじり試験の歴史的概観

衝撃ねじり試験機は、鉄鋼材料の熱間高速圧延における変形能を調べるために1945年頃にアメリカで製作されたのが初めのようなのである。その後1962年頃ではわが国のほとんどの鉄鋼会社がこの種の試験機を保有するところとなるが⁽⁴⁾、実用面における実験であり、材料の高速特性の研究用としては不十分であった。1955年には、軟鋼の高速変形条件下での降伏則を調べるための独自の衝撃ねじり試験機を使った実験がイギリスで行われている⁽⁵⁾。わが国独自の衝撃ねじり試験機は、作井⁽⁶⁾によって設計製作されたものが初めてとみられる。この試験機は、大直径のフライホールで負荷を加え、荷重の検出にはロードセルを使用しており、先の河田の分類では(1)の方法に属する。この試験方法はその後、沢⁽⁷⁾、坪内⁽⁸⁾、工藤⁽⁹⁾等により採用されているが、ロードセルによる衝撃荷重の検出が不正確(特に衝撃の初期における値)であることが明らかになって以後、この Block to Block 法は衝撃試験方法から除外されるようになっていく。その荷重検出部分を、正確な荷重検出が可能な出力棒に変換したものが、河田の分類で(3)の Block to Bar 法(One bar 法)である。一方、1970年にスプリット・ホプキンソン棒法(Bar to Bar 法)による衝撃ねじり試験機による研究が発表されている⁽¹⁰⁾。以後衝撃試験はこのスプリット・ホプキンソン棒法を利用したものが主力となり、内容も、衝撃ねじりから衝撃圧縮、引張へと変わり、より学術的になっている。

いずれにしても、この種の衝撃試験機は各研究機関での自作によるものである。その中でも、One Bar 法による衝撃ねじり試験機はほとんど見られない。

2-2. One Bar 法による衝撃ねじり試験機の設計製作

我々が設計製作したOne Bar法による衝撃ねじり試験機を図2に示す。試験機の構成は、フライホール部、衝撃クラッチ部、出力棒の3つに大別できる。出力棒の長さはできるだけ長い方がよい。ここでは、市販の最長のパイプを使っており、約4m長さである。衝撃荷重(トルク)がトルク検出用のひずみゲージを通過してから、出力棒の他端から反射してくるまでの時間が試験時間である。本装置ではその時間は約2.5msである。この時間内に試験片をねじり切る必要がある。この試験機の最大衝撃速度(フライホールの最大回転速度は1650rpm)ではほとんどの材料で試験可能である。むしろ遅い衝撃速度の方に制限がでてくる。

この試験機で最も困難で重要な部分は、衝撃クラッチ部である。この部分の困難さがOne Bar 法の利用度が少ない原因であるとも言える。

本装置用に設計した衝撃クラッチ部を図3に、そのトリガー用回路を図4に示す。トリガー回路のスタートボタンがonの間にトリガー用フォトセンサーに信号が入るとトリガー用電磁石が作用し、クラッチ部のロック金具が解放され、衝撃アームが前に押し出される。回転円盤の衝撃爪が衝撃アームの位置にくる以前に衝撃アームが完全に押し出されるようになっている。

フォトセンサーに信号が入ってから衝撃アームが完全に押し出されるまでの時間を正確に測定しているのので、回転円盤の回転速度に合わせてフォトセンサーの作動位置を決めることが出来る。

試験片のねじり速度(回転速度)の検出も、正確なせん断ひずみとひずみ速度を知る上で重要である。本装置では、試験片をねじる金具にスリットを入れた円板を取り付け、フォトインタラプターにより検出したパルスをトルクの測定と同時にデジタルメモリーに記録し、時々刻々のトルク変化と同期した回転速度の変化を求めることが出来るようになっている。

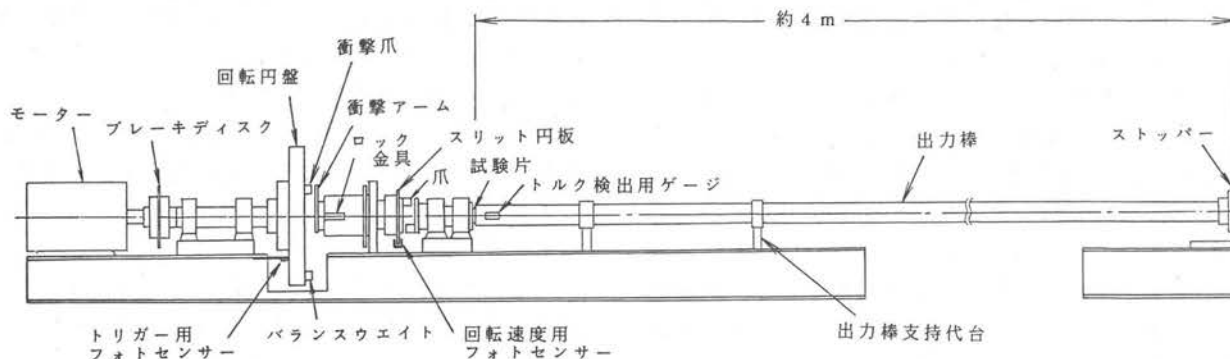


図2 衝撃ねじり試験機

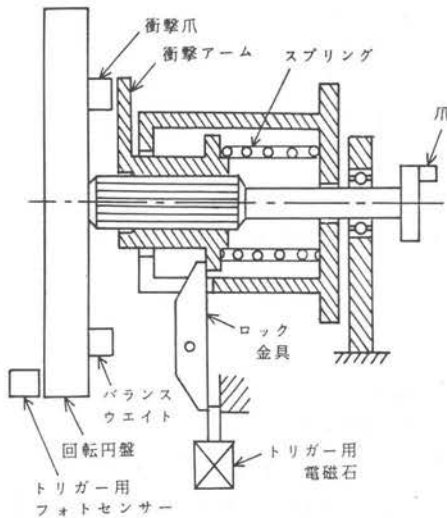


図3 衝撃クラッチ部

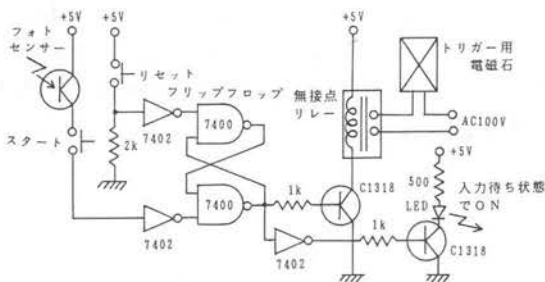


図4 トリガー用回路

試験片をねじる荷重即ちトルクは、出力棒（外径30mm、内径26mmのステンレス円管）に貼付けた、ゲージ長さ2mmの半導体ひずみゲージからの出力をデジタルメモリーに記録させることにより検出できる。

この半導体ひずみゲージは、試験片取り付け端から約100mmの位置の外周4カ所に、軸から45°傾いた方向（最大引張応力の方向）に貼付けている。一枚が120Ωの抵抗のゲージを4枚直列に接続しているので全体で480Ωとなる。ひずみゲージ用のブリッジ回路を図5に示す。半導体ひずみゲージはゲ

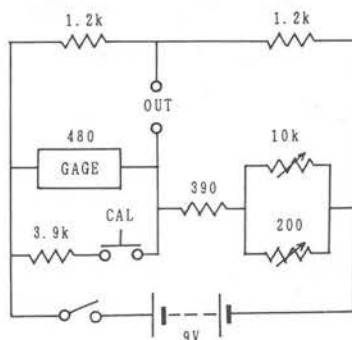


図5 ブリッジ回路

ジファクターが約100と大きい感度をもっているため、出力の直線性を得るために普通のゲージファクター2.0のひずみゲージ用ブリッジ回路とは多少異なる抵抗配置となっている。また感度が大きいので増幅器が

不要であり、それ故に半導体ひずみゲージは衝撃関係の測定に最適であるといえる。

3. 実験と結果

3-1. 試験片および材料

衝撃ねじり実験の測定系の概念図を図6に示す。使用した試験片の形状寸法を図7に示す。ひずみ速度依存性を得るために静的ねじり試験も行ったが、その場合も衝撃と同じ形状寸法の試験片を使用した。

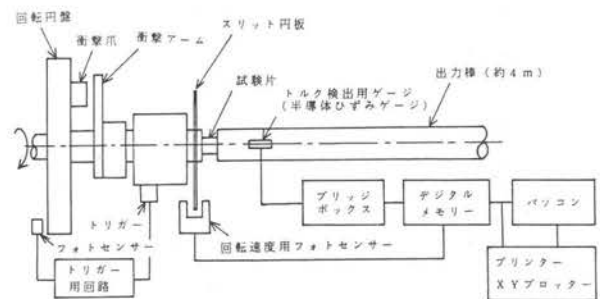


図6 衝撃ねじり実験の測定系のブロック図

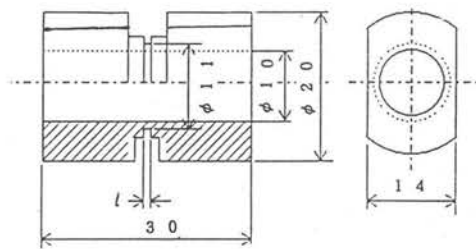


図7 ねじり試験片の形状寸法

材料の衝撃特性を把握するためには、ミクロ的組織から、マクロ的組織、性質にいたるまでの関連を明確に捉える必要がある。そのためには、結晶構造による分類、結晶粒組織による分類、脆い材料から延性材料にいたる分類、合金組織による分類、応力状態による分類を系統的に組み合わせた実験が必要となる。

本実験では、手始めとして、材料の脆さと延性で分類し、そのひずみ速度依存性を引張応力の条件下とせん断応力の条件下との関連で捉えることを目的として、しかも、入手可能な材料として次のような市販の材料を選んだ。脆い材料から順に延性が大きくなることを見込んで、FC25、SK3、BRASS、S25C、SU S304の5種類の材料で実験を計画した。現在まだ全部の材料に付いて実験が完了した訳ではないが、今までに得られた結果を報告するものである。

3-2. 実験

衝撃ねじり, 静的ねじり, 衝撃引張, 静的引張の4種の実験を行った. 試験片番号と実験の種類を表1に示す. まだ実験を行っていない試験片には未と記入してある.

表1 試験片番号と実験内容

材料の種類	試験No	ねじり試験		試験No	ねじり試験	
		静的	動的		静的	動的
BRASS	BRASS-1	○		BRASS-1		○
	BRASS-2	○		BRASS-2		○
	BRASS-3	○		BRASS-3		○
	BRASS-4			BRASS-4	○	
	BRASS-5		○	BRASS-5	○	
	BRASS-6		○	BRASS-6	○	
	BRASS-7		○			
	BRASS-8		○			
S25C	S25C-1	○		S25C-1		○
	S25C-2	○		S25C-2		○
	S25C-3	○		S25C-3		○
	S25C-4	○		S25C-4	○	
	S25C-5		○	S25C-5	○	
	S25C-6		×	S25C-6	○	
	S25C-7		○			
	S25C-8		○			
SUS304	SUS304-1	○		SUS304-1		○
	SUS304-2	×		SUS304-2		○
	SUS304-3	○		SUS304-3		○
	SUS304-4	○		SUS304-4	未	
	SUS304-5		×	SUS304-5	未	
	SUS304-6		未	SUS304-6	未	
	SUS304-7		未			
	SUS304-8		未			
FC25	FC25-1	○		FC25-1		○
	FC25-2	○		FC25-2		○
	FC25-3	○		FC25-3		○
	FC25-4	×		FC25-4	○	
	FC25-5		未	FC25-5	○	
	FC25-6		未	FC25-6	○	
	FC25-7		未			
	FC25-8		未			
SK3	SK3-1	○		SK-1		○
	SK-2	○		SK-2		×
	SK-3	○		SK-3		○
	SK-4			SK-4	未	
	SK-5		○	SK-5	未	
	SK-6		○	SK-6	未	
	SK-7		×			
	SK-8		未			

衝撃ねじり実験は我々が設計製作した本装置を用いて行ない, 静的引張実験は本校の機械工学科の電気式万能試験機を用いて行った. 静的ねじり実験は東京大学工学部航空学科塩谷実験室の試験機を借用して行った. また, 衝撃引張実験は, 東京理科大学基礎工学科河田研究室の, One Bar 法の衝撃引張試験機を借用して行った.

ここでは, 衝撃ねじり実験におけるせん断応力とせん断ひずみの算出について述べる.

実験で直接得られるデータは, トルクの時間変化 $T(t)(N \cdot m)$ と回転速度の時間変化 $\omega(t)(rad/s)$ である. また, 既知の値は, 試験片の

平均半径 $r_m(m)$

断面積 $A_m(m^2)$

長さ $l_m(m)$

出力棒の

平均半径 $R_p(m)$

断面積 $A_p(m^2)$

せん断弾性係数 $G_p(Pa)$

出力棒中のせん断弾性応力波の伝播速度 $C_2(m/s)$ である.

せん断応力 $\tau(t)$ は

$$\tau(t) = \frac{T(t)}{A_m r_m} \quad (1)$$

で求めることが出来る.

せん断ひずみ $\gamma(t)$ を求める式は次のようにして導き出すことが出来る. 図8で θ は試験片をねじる角度(ラジアン)であり, θ_p は試験片をねじるトルクにより出力棒がねじられる角度である. それらを式上ではそれぞれ $\theta(t), \theta_p(t)$ で表す. 試験片をねじり始めてから時間 $t(s)$ 後の状態を考える. ただし, 試験片の長さ l は非常に短いので, せん断波が試験片を伝播する時間は無視する.

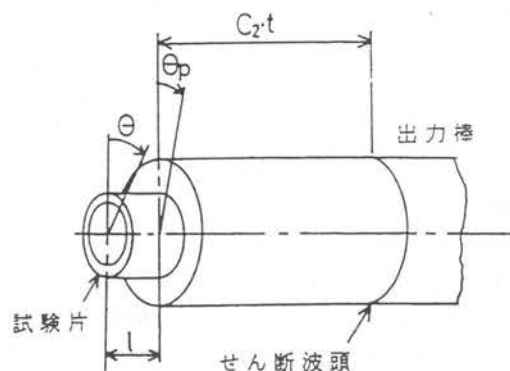


図8 試験片と出力棒のねじり角度関係

その時刻における試験片のせん断ひずみは

$$\gamma(t) = \frac{r_m(\theta(t) - \theta_p(t))}{l} \quad (2)$$

である. ここで試験片のねじり角度は

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt \quad (3)$$

で算出できる. 出力棒のねじり角度は次のようにして求めることが出来る. 時刻 t において出力棒は $C_2 t$ の長さだけねじられている. この間のせん断ひずみの合計分だけ出力棒がねじられているわけであるから, その間の平均せん断ひずみを $\gamma_p(t)$ とおくと

$$\gamma_p(t) = \frac{R_p \theta_p(t)}{C_2 t} \quad (4)$$

である。一方同じせん断ひずみを，出力棒のせん断応力 $\tau_p(t)$ で表すと

$$\gamma_p(t) = \frac{1}{C_2 t} \int_0^t \frac{\tau_p(t)}{G_p} C_2 dt \quad (5)$$

となる。この (4)，(5) 式から

$$\tau_p(t) = \frac{T(t)}{A_p R_p}$$

であることを考慮すると

$$\theta_p(t) = \frac{C_2}{A_p R_p^2 G_p} \int_0^t T(t) dt \quad (6)$$

となる。(3)，(6) 式を (2) 式に代入することにより

$$\gamma(t) = \frac{r_m}{1} \left\{ \int_0^t w(t) dt - \frac{C_2}{A_p R_p^2 G_p} \int_0^t T(t) dt \right\} \quad (7)$$

が得られる。結局 (1) 式と (7) 式から，動的せん断応力～せん断ひずみ曲線を得ることが出来る。

3-4. 実験結果

衝撃ねじりと衝撃引張で得られた応力ひずみ線図の一例を図9に示す。また今までに得られた引張強さとせん断強さ（応力ひずみ線図での最大応力）をひずみ速度との関係で示した結果を図10に示す。ここで示す強さは数本のデータの平均値である。衝撃ねじりの応力ひずみ線図に関しては，せん断ひずみの算出にまだ不完全な部分があるために，そのデータから最大せん断ひずみと吸収エネルギーについての満足できるデータを得ることは出来ていない。

図10で見られるように，強さのひずみ速度依存性は，ねじり実験よりも引張実験による方がより明確に現れている。

破面についてSEM写真の撮影を行っているが，まだ全部の試験片について行われているわけではない。いままでに得られたデータの中から，静的と動的との比較，引張とねじりとの比較が可能な試験片についてその写真を図11，図12に示す。

△: FC25 ○: S25C □: SK3
▽: SUS304 ☆: BRASS

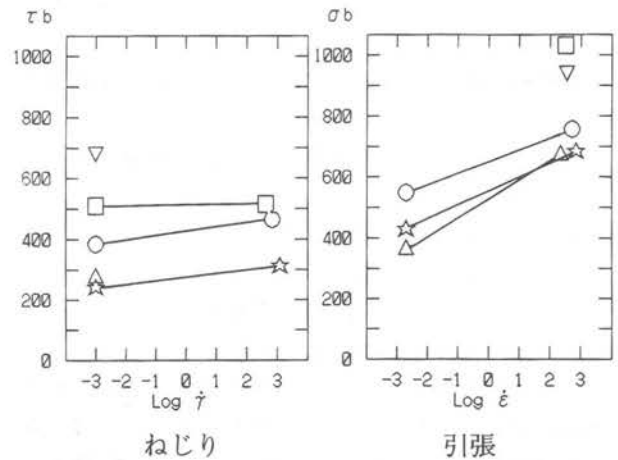


図10 材料の強さのひずみ速度依存性

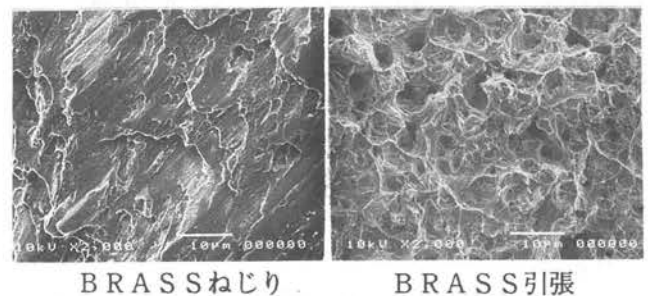
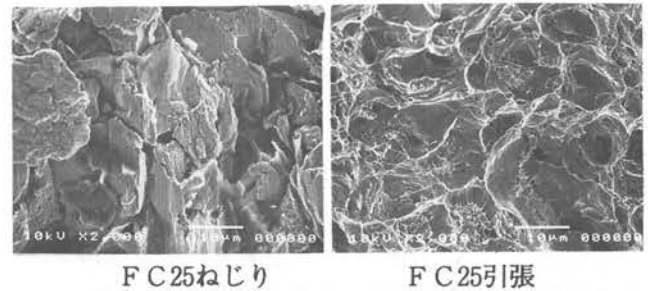


図11 静的破断面のSEM写真

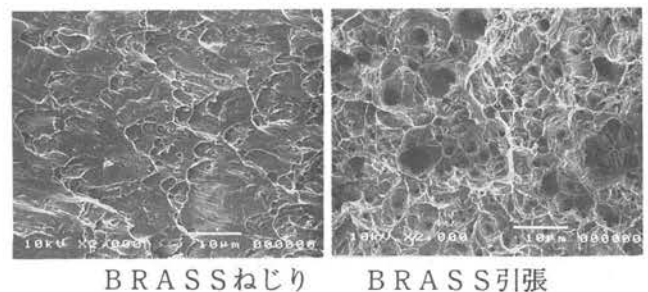


図12 動的破断面のSEM写真

4. 考察

ひずみ速度依存性は，引張とねじりとの間では，先に述べたように引張の方がより大きく現れる。この違

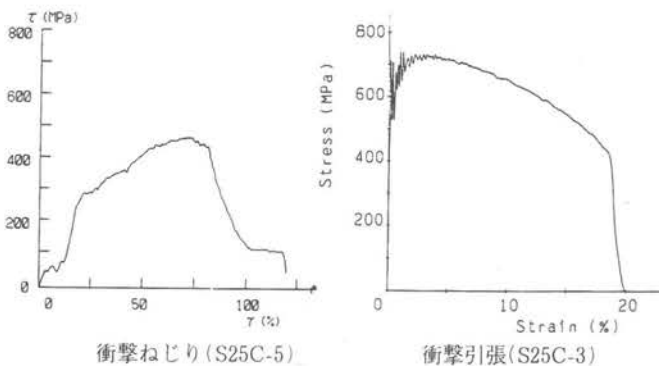


図9 動的応力ひずみ線図の例

いは破断面にも顕著に現れている。延性材料、脆性材料共に、静的と動的とで破面の形状には大きな差は認められないが、引張とねじりではどちらも大きな差が認められる。

延性材料の場合、引張破面は深いディンプル破面を呈し大きな変形が生じていることを示すが、ねじり破面は浅いディンプル破面を呈し、変形が拘束されるために変形が小さくなっていることを示している。ねじりの場合にひずみ速度依存性が小さくなっている理由がこのことにあると推測される。

試験した材料の中で最も脆性な材料であるFC25の場合、引張では、ここには動的破面を示していないが、動的と静的との破面にほとんど差が認められず、何れも劈開破面を示していた。ところが、ねじりでは、静的破面だけしか得られていないが、引張の劈開破面とは大きく違っており、粒界破壊であることが推測される。即ち、脆性材料では、引張と、ねじりでは破壊の形式が全く異なっていると言える。おそらく動的の場合も同様な結果が得られるものと思われる。

5. 結 論

せん断応力の条件下における材料の衝撃特性を測定するために、One bar 法による衝撃ねじり実験装置を設計製作し、予備実験、装置の改良を積み重ね、データを取得出来るところまでこぎ着けた。本格的な実験に入る手始めとして、材料を金属に限定し、延性材料から脆性材料までの5種類の材料について実験を計画し、今の所以下のような結果が得られた。

- (1) 材料のひずみ速度依存性は、ねじり実感による結果よりも引張実験による結果の法がより明確に現れる。
- (2) その理由として、破断面の観察から推測されることであるが、ねじりの場合破断までの変形量が引張に較べて小さいことが上げられる。
- (3) 延性材料の場合、引張とねじり、静的と動的の何れの場合も、延性破面特有のディンプル破面を呈している。ただその深さに違いがあることと、ねじりの場合には変形の流れの方向が見られるところに違いが認められるのみである。
- (4) 脆性材料の場合、引張とねじりで破面に大きな違いが認められた。即ち、引張の場合は劈開破面を示すが、ねじりの場合は粒界破壊が主力である。

即ち、両者で破壊の形式が大きく異なる。

以上のことが明らかになったが、まだ未実験の試験片を含めて実験を継続し、内容をより深めて行くことを

今後の課題としたい。

6. 参考文献

- (1) S.T.ロルフ, J.M.バームソン共著, 横堀武夫 監訳 構造物における破壊と疲労の防止 (培風館), 第1章
- (2) C.R.パレット 他共著, 岡村弘之 他共訳, 材料科学2 (培風館), 第6章
- (3) 河田幸三 他, 日本航空宇宙学会誌 20,219(1972),23-37
- (4) 井上勝郎, 鉄と鋼, 48,5(1962),52-62
- (5) N.G.Calvert, Proc.Inst. Mech. Engr., 169, 44(1955),903-911
- (6) 作井誠太 他, 塑性と加工, 7,63(1966), 167-174
- (7) 澤 繁樹 他, 塑性と加工, 8,79(1967),423-431
- (8) 坪内昌生 他, 塑性と加工, 9,88(1968), 332-344
- (9) 工藤英明 他, 日本機械学会論文集, 第3部, 35,27(1969),1957-1964
- (10) J.D.Campbel et al, J.Mech.Phys.Solids, 18(1970),43-63

(受理年月日 1996年9月30日)