

報 文

新しい接着強度測定用衝撃ねじり試験機の製作

浜松職業訓練短期大学校 橋本 彰 三

The Production of New Torsional Impact Testing Machine for Measuring the Strength of Adhesives

Shozo Hashimoto

要 約 近年、接着剤を使わない産業界はないといわれるほど接着剤はあらゆる分野で使用されている。その強度の測定方法はいろいろあるが、衝撃強さの測定方法はJISおよびASTMに同じ方法が規定されているのみである。その方法はアイゾットの衝撃試験方法に属する方法であり、吸収エネルギーだけしか求めることができない。しかも他の材料との比較は同じ試験方法によるデータ間の相対評価しかできない。本論文は、衝撃引張試験に使われている、材料特性の絶対評価ができる方法、即ち単軸応力下での材料特性の測定方法を、衝撃ねじり試験に適用しようというものである。その方法によれば、純粋なせん断応力下で接着剤（接着面）の衝撃せん断応力-ひずみ曲線を得ることが出来、従って衝撃せん断強度を測定することができることに特徴がある。しかも吸収エネルギーも求めることができる。

この試験機を設計製作して、種々の接着方法による金属と金属、プラスチックとプラスチック、金属とプラスチック、セラミックスとセラミックス、セラミックスと金属などの接着強度を測定することを目的としている。本論文に報告する設計は、卒業研究による製作という制限下でおこなっているので、性能に多少の不満はあるが初期の目的は達している。

I はじめに

身近なのりをはじめわれわれの生活の中には昔から接着剤が多く使われているが、現在では、産業界で接着剤を使っていないところはないほどあらゆる分野で種々の接着剤が使われているといわれている。しかも近年は高分子化学（合成化学）の発展により接着剤の接着強度は格段に向上しており、構造部材にも接着剤が使われるようになってきている。

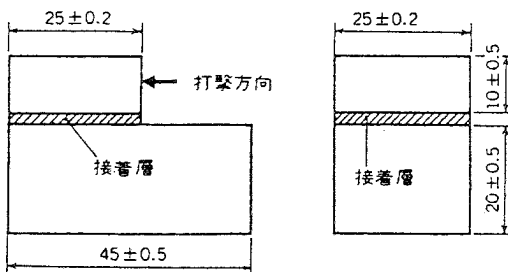


図1 JIS規格による衝撃試験片

接着強度の衝撃試験方法はJIS K 6855およびASTM D 950-72に規定されている⁽¹⁾。この方法はアイゾット衝撃試験機に属する方法であり、衝撃せん断負荷をうけた接着面の破断吸収エネルギーを測定するものである。この試験方法で使う試験片の寸法を図1に示す。

本論文はこの規定とは異なった方式による衝撃接着強度試験機の設計製作について述べる。接着面への負荷は規格と同様にせん断荷重であるが、ねじりにより負荷するところが異なるところである。しかも、規格の方法では破断時の吸収エネルギーしか測定できないが、本方法では、吸収エネルギーと衝撃せん断強度との両特性が測定できるところに大きな特徴がある。

II 衝撃ねじり試験機の歴史的概観

衝撃ねじり試験機は、鉄鋼材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。そしてその種の試験機は、1962年頃ではわが国のほとんどの鉄鋼会社が保有するところとなっているが⁽²⁾、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ようである。

1955年には、軟鋼の高速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⁽³⁾。わが国独自の衝撃ねじり試験機は、作井⁽⁴⁾によって設計製作されたのが初めとみられる。この試験機は、大直径のフライホイールで負荷を加え、荷重の検出にはロードセルを使用している。本論文のなかではこの方法をフライホイール法ということにする（最初に製作された試験機もこれに属する）。その後この試験方法は沢⁽⁵⁾、坪内⁽⁶⁾、工藤⁽⁷⁾等により採用されている。一方、この頃外国ではスプリット・ホプキンソン棒法による衝撃ねじり試験機が登場している⁽⁸⁾。この方法では衝撃力の負荷、荷重の検出共に細い棒を使用する。

材料の衝撃特性を測定するための衝撃試験機は一般的に次のような形式に分類される⁽⁹⁾。

1. Block to Block法（フライホイール法、油圧アクチュエータ法がこれに属する）
2. Bar to Bar法（スプリット・ホプキンソン棒法がこれに属する）
3. Block to Bar法（One Bar法ともいわれ、衝撃引張試験に利用されている⁽¹⁰⁾）

これらの方法にはそれぞれ特徴があり、測定すべき特性によってどの方法を採用するかが選択される。

衝撃ねじり試験機に関するいくつかの文献について、この分類法をあてはめて整理したものを表1に示す。

表 1

年代	試験機形式*	試験片材料	試験内容	参考文献番号
1955	F.W	軟鋼	降伏則の歪速度依存性	(3)
1966	F.W	軟鋼	せん断強度の歪速度依存性	(4)
1967	F.W	工具鋼	〃	(5)
1968	F.W	軟鋼	〃	(6)
1969	S.H	Steel, Cu	〃	(8)
1969	F.W	黄銅	温度上昇	(7)
1971	S.H	Al	せん断強度の歪速度依存性	(11)
1973	S.H	Alalloy	〃	(12)
1978	S.H	Cu	〃	(13)
1980	T.A	Cu	〃	(14)
1981	S.H	Steel	歪速度、温度依存性	(15)

1981	T.A	Cu	〃	(16)
1987	F.W	Nialloy	温度上昇	(17)

*S.H：スプリット・ホプキンソン棒法（Bar to Bar）

F.W：フライホイール法（Block to Block）

T.A：油圧アクチュエータ法（Block to Block）

ここではBlock to Bar法によるねじり衝撃実験の例は一つも見あたらない。

III Block to Bar法による衝撃ねじり試験機の設計

本論文では、今までに試みられていないBlock to Bar法（One Bar法）による衝撃ねじり試験機の設計、製作を行う。Block to Bar法はBlock to Block法とBar to Bar法の両長所を生かしたもので、衝撃引張試験においては、この方法による多くの材料に関する動的特性の測定がなされている⁽¹⁰⁾。この方法の最大の長所は、試験片に生じる内力の時間変化を、出力棒からのデータだけから煩雑な処理をすることなく簡便に、比較的正確に求めることができることにある。欠点は試験速度に限界があるということである。即ち、衝撃負荷部分の金具の弾性限界内の衝撃速度が最大衝撃速度になる。引張の場合、ひずみ速度ではほぼ 10^3 (1/s) が限度になっている。

この方法で材料の動的せん断試験を行えば、材料が破断するまでの比較的正確な動的せん断応力～せん断ひずみ曲線を得ることができ、しかも破断に消費される吸収エネルギーも算出することができる。この方法を接着剤の衝撃せん断強度測定に応用しようというわけである。

ここで述べる設計は次のような制約のもとで行った。即ち、半年の卒業研究の期間で製作し、ある程度の実験が行えること、したがってあまり大がかりな装置にはできない、それでも接着剤の衝撃強度測定にかぎれば精度良く測定できるもの、ということである。

そこで、この装置のもっとも難しい部分でありしかも、もっとも重要な部分であるフライホイールおよびクラッチ部を、直接製作せずに済むように、廃自動車のフライホイール部に間に合わせることにした。問題は、このフライホイールのエネルギーが接着剤を動的破断させるのに十分であるかどうかということである。予備的な計算では、金属試験片を破断させるにはやや不十分であるが、一般の接着剤を破断させるには十分であることが認められた。以下本ねじり試験機の設計について述べる。

1 試験片の形状、寸法

まず初めに、前記の文献を参考にして予め試験片形状、

寸法を決め、フライホイールの回転エネルギーがその寸法の試験片を破断させるのに必要なエネルギーより十分大きいことを確認して図2に示す様な寸法に決定した。

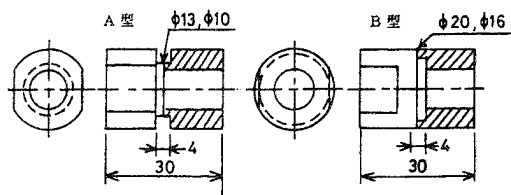


図2 試験片

ここでは一応A形、B形2種類の試験片寸法を準備した。A形は、比較的強度の大きいもの、B形は比較的強度の小さなものに適用する。

2 出力棒の寸法

上記試験片の取り付け金具を考慮して、可能な限りの最小寸法で出力棒(管)の内径、外径を決定した。

内径： $\phi 26\text{mm}$ 、 外径： $\phi 30\text{mm}$

長さはできるだけ長い方がよいが、端面加工の可能性、購入可能寸法、設置空間等を考慮して2mとした。材質は、強度、耐食性の両特性を持つステンレスとした。

3 フライホイール

廃車カーリーナのフライホイールを自動車科(H、2年度からは自動機械科に変更)から頂戴した。その質量 m 、回転慣性モーメント I 、回転エネルギー E_F は下記の通りである。

$$m \approx 15\text{kg}$$

$$I \approx 0.17\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

$$E_F = I\omega^2 / 2 \approx 80 \sim 940\text{N}\cdot\text{m} \quad (=J)$$

ここではフライホイールの回転速度を

$$\omega \approx 300 \sim 1000\text{rpm} \quad (30 \sim 110\text{rad/s})$$

としている。

4 接着剤の破断エネルギー E_A (J)

接着剤のせん断破断強度を一般のプラスチックの最も大きいせん断破断強度の値を用いて計算する。その値を $\tau_b = 100\text{MPa}$

とする。一般のプラスチックの引張強度はだいたいこの値以下である。またせん断強度は引張強度より小さいのでこの値は相当大きめに取っていることになる。試験片は図2のB形とし、接着面全面に一樣のせん断応力 τ (kg/mm^2)が作用すると仮定する。

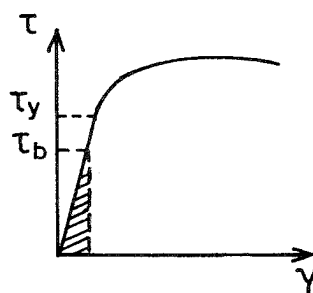


図3 せん断応力～ひずみ曲線

接着面を破断させるのに必要なエネルギーは、被接着材である試験片そのものの材料によって異なる。図3に被接着材料のせん断における応力～ひずみ曲線の概念図を示す。接着剤の破断強度が被接着材料のせん断降伏応力より小さくとると、接着剤を破断させるのに必要なエネルギーは図の斜線を施した面積になり、

$$E_A = \frac{\tau_b^2}{2G_T} V_T$$

となる。ここで各記号は、

G_T : 被接着材料(試験片)のせん断弾性係数

V_T : 試験片の平行部の体積 ($\pi(r_o^2 - r_i^2) \times l$)

r_o : 接着面の外半径 (10mm)

r_i : " 内半径 (8mm)

l : 試験片の平行部の長さ (4mm)

である。

試験片材料として炭素鋼(S45C)とアルミニウムを考えた場合について計算してみると(添え字としてそれぞれST, ALを使う)、それぞれの材料定数を

$$G_{ST} = 82\text{GPa}$$

$$G_{AL} = 26\text{GPa}$$

とすると、

$$(E_A)_{ST} = 0.03 \quad (J)$$

$$(E_A)_{AL} = 0.09 \quad (J)$$

となる。

試験片材料として、接着剤と同じ強度のプラスチックを仮定すると、接着剤の破断エネルギーは試験片そのものを破断させるエネルギーになる。この場合の破断エネルギーは、大きめに取って、 $\tau_b = 100\text{MPa}$ 、 $\gamma_b = 10\%$ の四角の断面積とすれば、

$$E_A = \tau_b \gamma_b V_T = 4.5 \quad (J)$$

となる。

以上の検討から、試験片材料の降伏応力が接着剤の強度より大きければ、接着剤を破断させるのに必要なエネルギーはさほど大きくならないことが分かる。この計算で得た最大エネルギーと、さきに計算したフライホイールの

最小回転エネルギーと比較すると、フライホイールのエネルギーは約18倍となり、ここで予定している実験ではこのフライホイールで十分であることが確認できる。

5 モーターの容量

フライホイールの回転数を10秒間で1000rpmまで上昇させるという条件でモーターの容量を算出すると、

$$\frac{940}{10} = 94\text{J/s} = 94\text{w}$$

となる。フライホイールに付随する部分も考慮し、余裕を見て400Wのモーターを用いることにした。

以上をまとめてだいたいの構成を組み立てたところまでが筆者による設計である。以後の具体的な部分図、組み立て図の製図、製作、性能テスト、実験は、卒業研究のテーマとして卒業研究生が筆者と共にを行った。

6 試験機の外観

図4に試験機の組立図を示す。試験機は大きく分けて、モーター、フライホイール、クラッチ部、出力棒、架台から構成されている。

モーターの回転数およびその回転数に達するまでの時間はコントローラーにより予め設定できる。

クラッチ部には自動車のクラッチ部をそのまま利用する予定であったが、実際に組み立ててみると、その作動に要する力が予想以上に大きく、また回転の伝達を瞬間的にするのが比較的困難であることが分かり、急速、回転伝達部分のみを図5に示すように変更した。この方法では使用可能な最高回転速度に限界があるが、本実験の回転速度では使用可能であった。

出力棒には、瞬間的なねじり力を測定するために、試

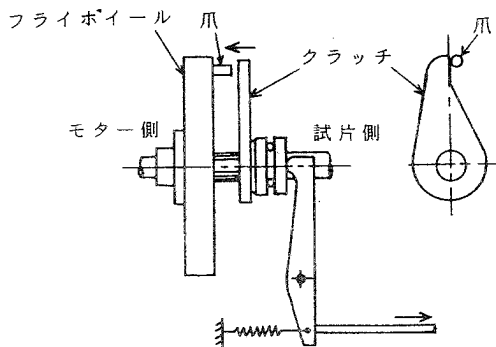


図5 改造クラッチ部

験片取り付け部分の端面から60mmの位置にひずみゲージを貼付けた。使用したひずみゲージは、ゲージ長さ2mmの半導体ゲージであり、円周の4カ所に出力棒の軸に対して45° 度方向で貼付け、直列に結線して図6に示すブリッジ回路に接続する。

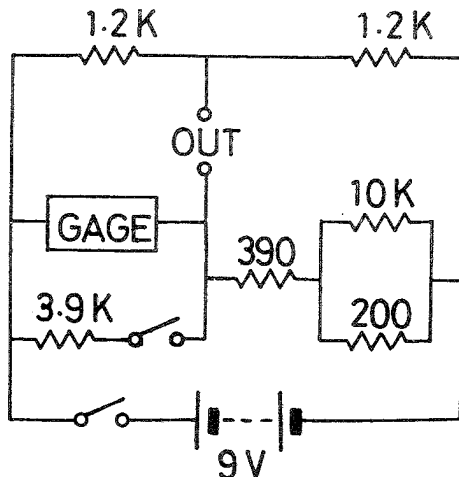


図6 トルク検出用ブリッジ回路

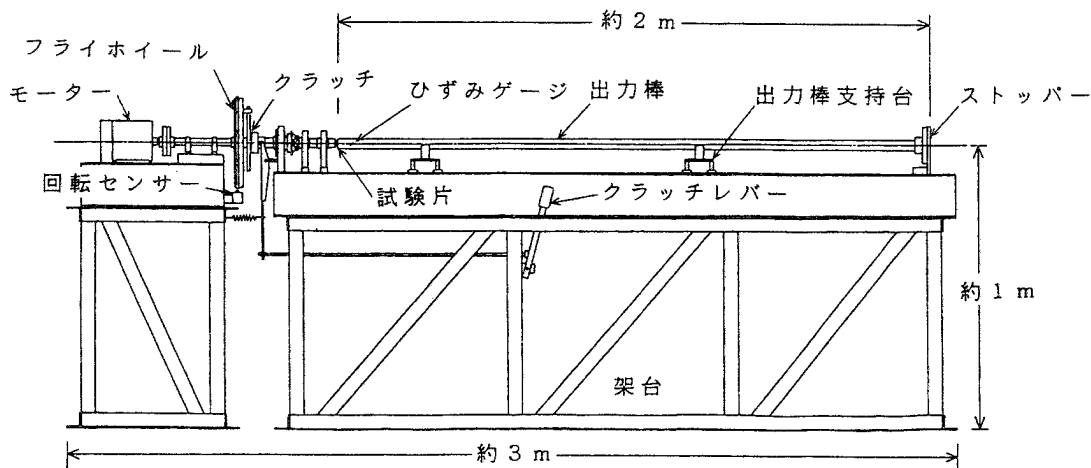


図4 衝撃ねじり試験機の組立図

試験片のセットは、負荷側、出力棒側に取り付けられた試験片の切り欠き部としっかり合った孔をもつ金具への差し込みによりおこなわれる。出力棒は軸方向に移動できるようになっている。

架台は床にアンカーボルトで固定した。

IV 試験機の性能テスト

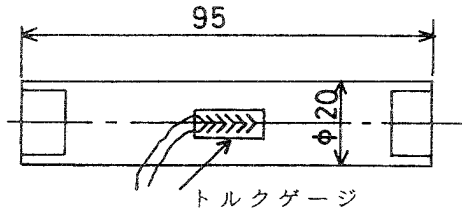


図7 トルク検定用治具

図7に示すようなトルク検定用治具を製作し、それを予め静岡県機械技術指導所のねじり試験機により検定しておいた。その治具を用いて出力棒のひずみゲージからの出力とトルク関係を検定した。検定は静的に行っているが、それをそのまま動の場合に適用する。

試験時の回転速度を知るために、フライホイールの外周に加工されている歯車を利用することにし、磁気センサーを設置した(図4参照)。

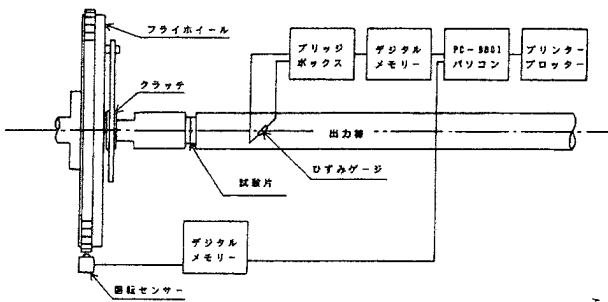


図8 測定装置のブロック図

測定装置のブロック図を図8に示す。回転速度測定用磁気センサーからの出力(sin状波形)と、試験片のトルク-時間関係測定用ひずみゲージからの出力を同時にデジタルメモリに記憶させる。それをパソコンに取り込み処理して所定のデータを得る。

図9にデジタルメモリで記憶したデータを直接レコーダに出力した曲線の一例を示す。またこのデータをパソコンに取り込み処理した結果を図10に示す。図9のピーク間の時間から出力棒を伝播するせん断波の速度を算出すると、

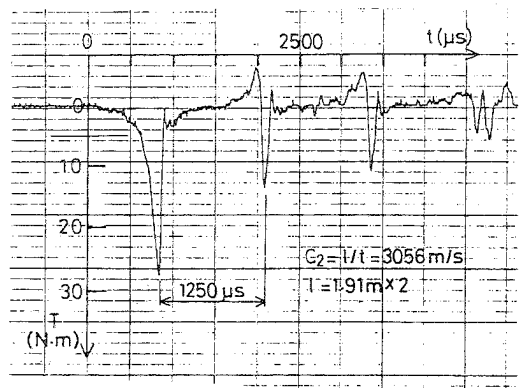


図9 試験片 DBE-5 の記憶データ
試験速度：60.2rad/s、試験片：黄銅
接着剤：エポキシ系

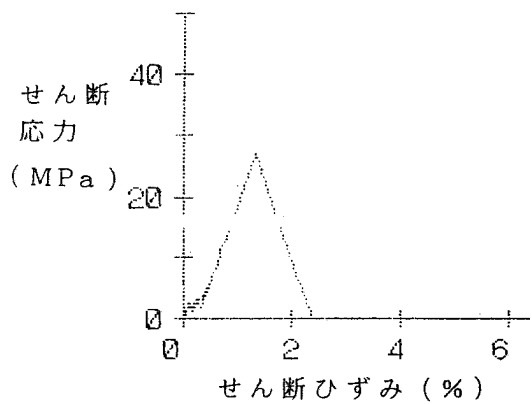


図10 データの換算結果

$$t=1250\mu s, \quad C_2 = \frac{21}{t} = 3056\text{m/s}$$

となる。この式中の $l (=1.91\text{m})$ は出力棒の長さ(試験片取り付け部端面から固定端まで)である。

この値から出力棒(ステンレススチール)のせん断弾性係数を算出してみると、

$$C_2 = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad \rho = 7910\text{kg/m}^3, \quad \text{より } G=73.9\text{GPa}$$

となる。一方物理定数表からの値は

$$G=75.7\text{GPa}$$

であり、両者はほぼよい一致を得ている。

V 実験方法および実験結果

1 試験片の準備

具体的な接着剤の衝撃実験は2種類の接着剤と4種類の試験片材料について行うことにした。

○接着剤：

- エポキシ系接着剤 (市販の 1 0 時間硬化型)
- シアノアクリレート系接着剤 (共和製ゲージ用 CC-15A 瞬間接着剤)

○試験片材料:

- 炭素鋼 (S45C)
- アルミニウム
- 黄銅
- ベークライト

これらの材料, 接着剤は特に厳選した訳ではなく身近にあるものを選んだものである。試験片形状, 寸法は図 2 の B 型とした。

試験片の接着においては, 接着面の脱脂と軸の合わせに特に注意を払った。接着面は#300のエメリペーパーで磨き, アセトンで脱脂した後, テフロン製ガイドを用いて接着し, シアノアクリレート系接着剤の場合は 1 時間の間ウエイトを載せた状態で室温硬化させ, エポキシ系接着剤の場合, 1 2 時間以上ウエイトを載せた状態で室温硬化させ, その後両者ともウエイト無し状態で, 3 0 °C の電気炉中において 2 0 時間後硬化させた。

2 静的実験

衝撃実験を行う前に, 比較のために, さきに述べた静岡県機械技術指導所のねじり試験機を用いて静的実験を行った。ひずみ速度は約 7×10^{-4} (1/s) である。この実験では最大トルク T_s のみを測定し, 静的せん断強さ τ_s を次式から求めた。

$$\tau_s = \frac{T_s}{A \cdot r_m} \text{ (Pa)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

A : 接着面の面積 (m²)

r_m : 接着面の平均半径 (m)

3 衝撃実験

衝撃実験で得られるデータは, 衝撃速度測定用回転速度データと出力棒に貼ったひずみゲージからの出力の時間変化 (電圧の時間変化 V (t)) である。

出力棒の検定で得られる値は, ブリッジボックスから出力するキャリブレーション用電圧 (ひずみゲージのある一定変化に相当する電圧) に対するトルク値 T_{cal} である。この値を使って, 実験における測定値 V (t) からトルク T (t) への換算を行い (2 式), それからせん断応力への換算を行う (3 式)。

$$T (t) = T_{cal} \times V (t) \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\tau (t) = \frac{T (t)}{A \cdot r_m} \text{ (Pa)} \quad \dots\dots\dots(3)$$

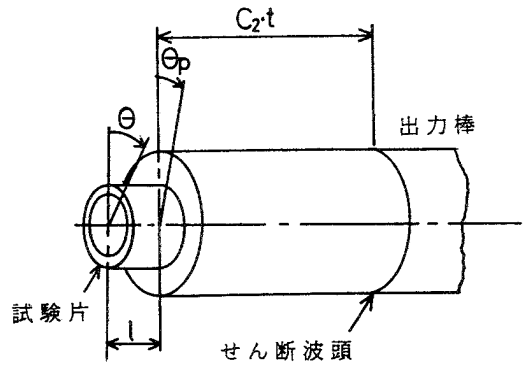


図11 せん断ひずみ算出用説明図

せん断ひずみ $\gamma (t)$ は以下のようにして求める (図 1 1 参照)。回転速度用データから求めた回転速度 (10 サイクルの平均値) を ω rad/s (一定) とする。

試験片の負荷側ねじり角度を $\theta (t) (= \omega \cdot t)$ rad とし, 出力側ねじり角度を $\theta_p (t)$ rad とすると,

$$\gamma (t) = \frac{r_m (\theta (t) - \theta_p (t))}{l} \quad \dots\dots\dots(4)$$

となる。ここで l は試験片の平行部長さであり, 接着部は試験片と一体になって変形すると仮定している。

$\theta_p (t)$ は以下のようにして求めることができる。出力棒に生じるせん断ひずみを $\gamma_p (t)$ とすると

$$\gamma_p (t) = \frac{R_p \cdot \theta_p (t)}{C_p \cdot t} = \int_0^t \frac{\tau_p (t)}{G_p} dt \quad \dots\dots\dots(5)$$

となる。ここで $\tau_p (t)$, G_p , R_p はそれぞれ出力棒のせん断応力, せん断弾性係数, 断面の平均半径である。

$\tau_p (t)$ は

$$\tau_p (t) = \frac{T (t)}{R_p \cdot A_p} \quad \dots\dots\dots(6)$$

であるから, (5), (6) 式から

$$\theta_p (t) = \frac{C_p \cdot t}{R_p \cdot A_p \cdot G_p} \int_0^t T (t) dt \quad \dots\dots\dots(7)$$

となる。ここで A_p は出力棒の断面積である。したがって

$$\gamma (t) = \frac{r_m}{l} (\omega \cdot t - \frac{C_p \cdot t}{R_p \cdot A_p \cdot G_p} \int_0^t T (t) dt) \quad \dots\dots\dots(8)$$

となる。この式は試験片そのものの動的せん断ひずみを算出する式であり, 接着剤が破断するまでは接着面は試験片と一体であること, 即ち試験片と同じ変形をしていると仮定している。

一方, 別の観点から接着剤の動的せん断ひずみを算出することも考えてみた。この場合, 接着剤のせん断弾性係数 G が分かっているものと仮定する。そうすれば次式で求めることができる。

$$\gamma (t) = \frac{1}{G} \int_0^t |d\tau| = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^n |\tau_i - \tau_{i-1}| \quad \dots\dots\dots(9)$$

図10はこの(9)式をつかって整理した結果である。今回の実験ではすべて(9)式を使って、動的せん断応力-せん断ひずみ曲線を得た。この結果から最大せん断応力について整理し、その静的と動的の違いを考察した。破断エネルギーは、今回の実験ではプログラムの不備により算出することはできなかった。

表2 実験結果

試験片	静的		動的	
	平均 MPa	標準偏差 MPa	平均 MPa	標準偏差 MPa
SC	26.3	3.5	31.9	5.2
SE	29.6	4.6	38.3	11.3
AC	23.4	4.8	16.4	2.7
AE	34.7	1.7	37.9	9.4
BC	30.7	11.8	34.8	3.1
BE	23.4	3.9	30.1	3.7
PC	25.4	4.6	—	—
PE	31.0	3.7	—	—

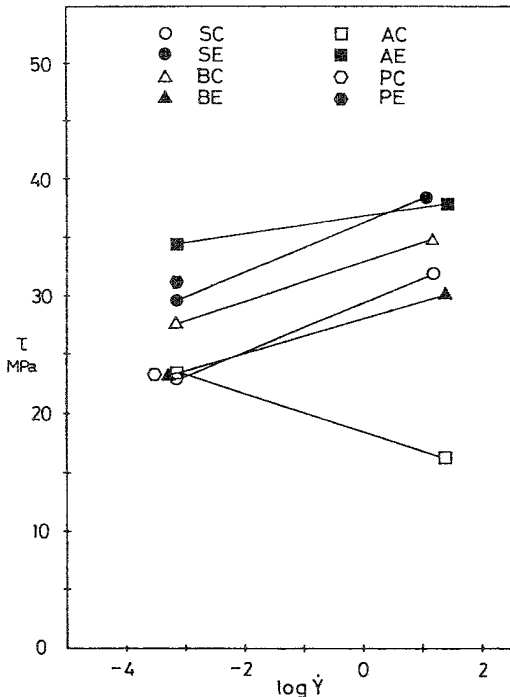


図12 接着強度のせん断ひずみ速度依存性

実験結果の平均値と標準偏差を表2に示す。この表中の試験片の記号は、最初の英字が試験片材料を示し、次の英字が接着剤を示す。S：炭素鋼，A：アルミニウム，B：黄銅，P：ベークライト，E：エポキシ系接着剤，C：シアノアクリレート系接着剤である。

これらの結果をひずみ速度依存性であらわしたものが図12である。

VI 考察

本実験でプラスチック（ベークライト）の試験片を用いた場合は、接着面が破断するまでの試験片のねじれ角が大きく、したがってそれまでの時間が長くなり、出力棒の固定端から反射波が戻ってきて正しいせん断応力-せん断ひずみ関係を測定することができなかった。出力棒の長さを4m以上にするか、あるいは試験速度を早くするかの方策が必要であるが、この装置の回転速度は1000rpmが限度であるので、出力棒の長さを長くする必要はある。

今回行った接着剤の衝撃強度の測定値には大きなばらつきがみられた。特に小さな測定値は省いている。測定値がばらついた原因は接着の不完全さにある。接着面間への小さな異物の侵入、接着面の密着の不十分さが考えられる。接着の際の繊細な注意が重要である。

測定結果からシアノアクリレート系接着剤はアルミニウム系材料には不向きであること、特に衝撃負荷に弱いことが明確にみられるが、全体的に動的強度が静的強度よりも大きいことがみられる。

破断エネルギーの算出、プラスチック試験片による実験等は今後の課題である。

VII 結論

製作した衝撃ねじり試験機は、卒業研究による製作という制限下でおこなっているので、性能に多少の不満はあるが初期の目的は達している。予定した所定の能力を持っていることが確認され、非ゴム系の構造用接着剤の衝撃強度測定に十分使用できることが明らかになった。

ただし、接着剤と同程度の強度を持つ試験片（プラスチック）でのテストには出力棒の長さに不足があることが分かった。しかしこの点は改善可能である。今回は吸収エネルギーの測定は行わなかったが、それは可能であり、せん断強度、吸収エネルギーの同時測定は今後の課題としたい。またフライホイールを大きくし、しかも衝撃速度を早くすることにより、このタイプの試験機で試験片そのものの衝撃せん断応力-ひずみ曲線が得られ、衝撃せん断強度および吸収エネルギーの測定が可能であることも強調したい。

最後に、静的試験において、ねじり試験機を快く使用させて下さった静岡県機械技術指導所の磯部氏に深く感謝の意を表します。また最も加工困難な部分の放電加工

に協力下さった機械系の岡教官および、本装置の製図から製作、実験までを行った平成2年度の自動車科卒業研究生の、内田和利、寺沢隆、若森哲也の3君の皆さんに感謝の意を表します。

VIII 参考文献

- (1) 山口章三郎 監修”接着”朝倉書店
- (2) 井上勝郎”熱間変形抵抗・圧延圧力・変形能の最近の研究について”鉄と鋼, 48, 5 (1962) 52-62
- (3) N.G.Calvert ”Experiments on the Effect of Rate of Testing on the Criterion of Failure of Certain Mild Steels when Subject to Dynamic Torsion and Static Tensile Stresses” Proc. Inst.Mech.Engr., 169, 44 (1955) 903-911
- (4) 作井誠太 他”試作した大形衝撃ねじり試験機による鋼の変形抵抗と変形能の測定”塑性と加工, 7, 63 (1966-4) 167-174
- (5) 澤 繁樹 他”工具鋼の静的および衝撃ねじり応力下の挙動”塑性と加工, 8, 79 (1967-8) 423-431
- (6) 坪内昌生 他”軟鋼の高温高速ねじりにおける等温せん断応力-ひずみ曲線”塑性と加工, 9, 88 (1968-5) 332-344
- (7) 工藤英明 他”黄銅管の高速ねじりにおける温度の不均一上昇にもとづくひずみ集中の解析”日本機械学会論文集(第3部 35, 277 (昭44-9) 1957-1964
- (8) J.D.Campbell et al. ”The Behaviour of Materials Subjected to Dynamic Incremental Shear Loading” J.Mech.Phys.Solids, 18 (1970) 43-63
- (9) 河田幸三 他”固体の高速変形力学について”日本航空宇宙学会誌 20, 219 (1972-4) 23-37
- (10) 河田幸三 他 ”航空宇宙材料の高速引張りによる特性測定”日本航空宇宙学会第12期年会講演会講演集 (1981/4) 54
- (11) J.Duffy et al. ”On the Use of a Torsional Split-Hopkinson Bar to Study Rate Effect in 1100-0 Aluminum” J.Appl.Mech., 38 (1971/3) 83-91
- (12) T.Nicholas et al. ”An Analysis of the Split-Hopkinson Bar Technique for Strain-Rate-Dependent Material Behaviour” J.Appl.Mech., 40 (1973/3) 277-282
- (13) J.Lipkin et al. ”The Effect of Strain-Rate Variations on the Flow Stress of OFHC copper” J.Mech.Phys.Solids 26 (1978) 251-268
- (14) U.S.Lindholm et al. ”Large Strain, High Strain Rate Testing of Copper” Trans. ASME ser.H 102 (1980/10) 376-381
- (15) A.S.M.Eleiche ”Strain-rate History and Temperature Effects on the Torsional-shear Behaviour of a Mild Steel” Exp.Mech., 21 (1981/8) 285-294
- (16) G.R.Johnson ”Dynamic Analysis of a Torsion Test Specimen Including Heat Conduction and Plastic Flow” J.Eng.Mate.and Tech., 103 (1981/7) 201-206
- (17) R.L.Woodward et al. ”Direct Measurement of Temperature in High Speed Torsion Tests” J.Eng.Mate.and Tech., 109 (1987/4) 140-145