

# On the Accuracy of Impact Torsional Test by means of Simulation

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-02-06 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Chatani, Akiyoshi, Hojo, Akihiro, Takamura, Shuji メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24517/00053168">https://doi.org/10.24517/00053168</a>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



## シミュレーションによる衝撃ねじり試験の測定精度について

茶 谷 明 義\* 放 生 明 広\* 高 村 秀 二\*\*

On the Accuracy of Impact Torsional Test by means of Simulation

by

Akiyoshi CHATANI, Akihiro Hojo and Shuji TAKAMURA

### Abstract

The present paper deals with the simulations of impact torsion and the errors of the measured values are also discussed. A strain rate dependent theory was used for the stress analysis of a short thin cylindrical specimen of SS41. Two impact torsional tests were simulated. One was at high strain rates of the order of  $10^2/\text{sec}$  or more by the Hopkinson pressure bar method. The other was at low strain rates of the order of  $10/\text{sec}$  or less by the usual high speed rotation. In these cases the errors were estimated by comparison of the stress measured and that corresponding to the strain - strain rate relation measured. As a result, it was found that the error decreased as the rise time of the input wave increased at high strain rates, but that it did not so change as the length of the specimen changed. The measured stresses at all conditions adopted had good accuracy within 1% error, after the stress wave traveled back and forth about 4 times in the specimen. At low strain rates, the accuracy of the measured stresses became good as the rise time of the input wave increased and the length of the load cell decreased.

### I. 緒 言

$10^2/\text{s}$  程度以上の高ひずみ速度における材料の応力-ひずみ関係を知るためにホプキンソン棒法が用いられている<sup>1)~5)</sup>。しかしこの方法では試験片を伝ばする応力が何回も往復を繰返して軸方向に均一に分布した後正確な応力-ひずみ関係が測定されることになるから、負荷初期の測定値には誤差が含まれる。このほか引張りや圧縮の場合には横慣性<sup>6)</sup>や試験片端面の拘束<sup>7)</sup>によるものも考えられるが、ねじりの場合にはこれらの影響がないからそれだけ精度のよい測定値が得られることになる。精度上の問題に加え、広範囲のひずみ速度におけるねじりに関する資料が少ないことも原因して、近年衝撃ねじり試験がより望まれるようになった。しかし静的ねじりでない限り応力波の伝ばに基づく測定誤差が多少とも考えられるため、この種の測定精度を明らかにしておく必要がある。

ホプキンソン棒法の測定精度は応力-ひずみ関係がひずみ速度に依存しないとして研究された<sup>8)</sup>が、一般にはひずみ速度依存性を考慮しなければならない。そこでこれを考慮して圧縮では村上ら<sup>9)</sup>、ねじりでは T. Nicholas<sup>10)</sup>が研究を行なった。これらによれば、入射波形の立上り勾配が小さい

\*機械工学第二学科    \*\*本学大学院

ほど測定精度がよくなるとされ、試験片を弾性応力波が3往復程度以上伝ばする時間以後での測定誤差は数%以下になるとと言われている。しかしいずれも降伏点近傍までの測定誤差の傾向をひずみ速度一ひずみ関係に対応させていないため、強度上重要な動的降伏点の測定誤差に関する情報は十分でない。とくにねじりの場合は測定ひずみ速度に対する測定応力と真の応力との差が必ずしも明らかではない。

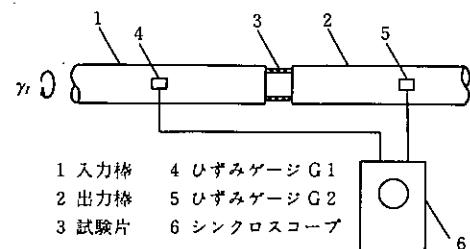
一方、1~10/sの比較的低ひずみ速度の衝撃ねじり試験はおもに回転円板を利用した定高速形のねじり試験として行なわれている<sup>11)</sup>。この場合の応力はロードセルによって測定され、応力測定位置と試験片部で静的な力の釣合いが成立するものと仮定される。しかし前述のように試験片とロードセルを伝ばす応力波のため、同時間において異なる位置での力の釣合いは必ずしも成立しない。そのためこの方法による測定値にも誤差が含まれる可能性があるが、これが検討されたことはない。

そこで本研究では、高ひずみ速度のホブキンソン棒法によるねじり試験と低ひずみ速度の定高速形ねじり試験を対象とし、Malvernの式<sup>12)</sup>に基づくT.Nicholasの方法<sup>10)</sup>を用いてシミュレーションを行なった。そしてシミュレーションによる応力、ひずみ、ひずみ速度の測定値を求め、得られたひずみとひずみ速度に対応する応力の真値を測定値と比較して想定材料SS41に関する測定精度を考察した。

## 2. 衝撃ねじり試験法

### 2.1 高ひずみ速度の場合

ホブキンソン棒法による衝撃ねじり試験法の原理を示したのが第1図である。なおねじりを対象としているため、本論文ではすべてのせん断応力、せん断ひずみ、せん断ひずみ速度をそれぞれ単に応力、ひずみ、ひずみ速度と略称する。入力棒のひずみゲージG1によって図中左方より伝ばする入射ひずみ $\gamma_i$ と薄肉円筒状の試験片部で反射されるひずみ $\gamma_R$ を測定し、入力棒と同径同質の出力棒のひずみゲージG2によって試験片を透過して右方に伝ばするひずみ $\gamma_T$ を測定する。いずれも時間tの関数であるからこれらを $\gamma_i(t)$ ,  $\gamma_R(t)$ ,  $\gamma_T(t)$ とする。試験片長さが十分短かく試験片内の応力が均一に分布するものとすれば、 $\gamma_i(t) + \gamma_R(t) = \gamma_T(t)$ が成立するから、試験片の応力 $\tau$ 、ひずみ $\gamma$ 、ひずみ速度 $\dot{\gamma}(=d\gamma/dt)$ は次式で与えられる<sup>5), 10)</sup>。



第1図 ホブキンソン棒法によるねじり試験の原理

$$\tau = \frac{R^3}{4r_s^2 t_s} G \gamma_T(t) \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{2cr_s}{Rl_s} \int |\gamma_i(t) - \gamma_T(t)| dt \quad (2)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{2cr_s}{Rl_s} |\gamma_i(t) - \gamma_T(t)| \quad (3)$$

ここで $r_s$ ,  $t_s$ ,  $l_s$ はそれぞれ試験片の平均半径、肉厚、長さである。また $R$ ,  $G$ ,  $c$ は入力棒と出力棒の半径、横弾性係数、横波の伝ば速度である。

## 2. 2 低ひずみ速度の場合

回転円板方式などによる定速回転の場合を示したのが第2図で、前と同様な試験片を丸棒のロードセルに固定してある。このような方法によってもホブキンソン棒法と同程度の高ひずみ速度が得られるが、10/s程度までのひずみ速度の測定例が多くまた低速域の回転数によるものもあるため、低ひずみ速度の場合に分類した。試験片の一端に角速度 $\omega$ が与えられ、ロードセルでの測定ひずみ $\gamma_L$ から $\omega$ に対応する試験片の応力が求められる。 $\omega$ はステップ状として取扱われるのが普通であるが、実際の立上り時間を考慮すれば時間 $t$ の関数になり、 $\gamma_L$ も $t$ の関数であるから、これらをそれぞれ $\omega(t)$ ,  $\gamma_L(t)$ とする。試験片とロードセルで静的な力の釣合いが成立するものとすれば、 $d\gamma_L(t)/dt = \dot{\gamma}_L(t)$ として試験片の応力 $\tau$ , ひずみ $\gamma$ , ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ は

$$\tau = \frac{d_{L_1}^3}{32r_s^2 t_s} G_L \gamma_L(t) \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{r_s}{l_s} \left\{ \int \omega(t) dt - \frac{2l_s}{d_{L_1}} \gamma_L(t) \right\} \quad (5)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{r_s}{l_s} \left\{ \omega(t) - \frac{2l_s}{d_{L_1}} \dot{\gamma}_L(t) \right\} \quad (6)$$

となる。ここで $d_{L_1}$ ,  $l_s$ ,  $G_L$ はそれぞれロードセルの直径, 長さ, 横弾性係数である。なお $\omega = \omega_0$ (一定)とし、ロードセルの剛性が十分大きいとして上式(5), (6)の右辺第2項を省略すれば

$$\gamma = \frac{r_s}{l_s} \omega_0 t, \quad \dot{\gamma} = \frac{r_s}{l_s} \omega_0 \quad (7)$$

が得られる。円板などの一定回転数のもとで式(4)による $\tau - t$ 関係が示されれば、その時のひずみとひずみ速度は式(7)によることになる。

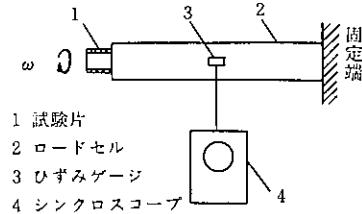
## 3 計算の基礎、方法および条件

### 3. 1 基 础 式

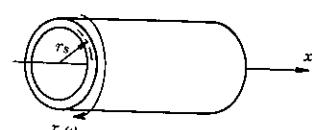
薄肉円筒状の試験片を応力波が伝ばす現象を理論的に考察し、これを前述の試験法による測定値の誤差評価の基礎とする。第3図のように軸方向座標 $x$ の正方向に右にねじるのを正として角速度 $\omega$ と応力 $\tau$ をとり対応するひずみを $\gamma$ とすれば、ひずみ速度依存性を考慮した薄肉円筒(試験片)の一次元衝撃ねじりの基礎式はつぎのようになる。

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = - \rho r_s \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = - r_s \frac{\partial \omega}{\partial x} \quad (9)$$



第2図 定速回転によるねじり試験の原理



第3図 薄肉円筒の衝撃ねじり

$$G_s \frac{\partial \gamma}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial t} + g(\tau, \gamma^p) \quad (10)$$

ここで  $\rho$  と  $G_s$  はそれぞれ密度と横弾性係数であり、 $g$  は  $\tau$  と塑性ひずみ  $\gamma^p$  による関数で塑性ひずみ速度  $\dot{\gamma}^p$  に比例する。式(8)は運動方程式、式(9)は連続の式、式(10)は Malvern の構成方程式<sup>12)</sup>である。関数  $g$  を書き直せば  $g(\tau, \gamma^p) = G_s \cdot \dot{\gamma}^p$  であるから、 $\dot{\gamma}^p$  と  $\gamma^p$  から  $g$  によって  $\tau$  が求まることになる。

### 3. 2 計算方法

基礎式(8)～(10)は連立1階準線形偏微分方程式で双曲形であるから、特性曲線に沿う全微分形に直せばつぎのようになる。

$$d\tau + \rho r_s c_s d\omega + g(\tau, \gamma^p) dt = 0 \quad (dx = +cdt \text{ に沿って}) \quad (11)$$

$$d\tau - \rho r_s c_s d\omega + g(\tau, \gamma^p) dt = 0 \quad (dx = -cdt \text{ に沿って}) \quad (12)$$

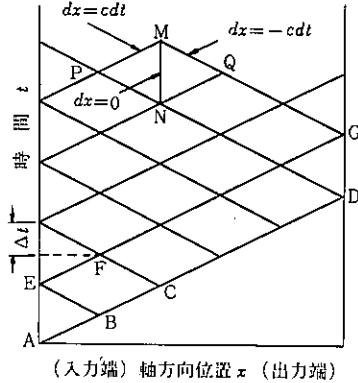
$$d\tau - G_s d\gamma + g(\tau, \gamma^p) dt = 0 \quad (dx = 0 \text{ に沿って}) \quad (13)$$

ここで  $c_s$  は横波の速度で  $\sqrt{G_s/\rho}$  である。結局  $\tau, \gamma$  は第4図のような特性曲線に沿う積分から求めることになる。例えば図中M点の  $\tau$  と  $\gamma$  を求めるときは、P, N, Q点の既知の値から P→Mに沿って式(11), Q→Mで式(12), N→Mで式(13)を用い、それぞれの式を差分形に直して連立方程式を解けばよい。このときM点の  $g$  の値  $g_M$  は未知であるが、初回にP点での値  $g_P$  に等しいとして計算し、繰返し計算により  $g_M$  を収束させる。すべての計算に  $g_M$  の精度が 0.1% となるまでの繰返し計算を行なった。また試験片の入力端と出力端の境界では特性曲線が不足するが、その代りに境界条件を用いればよい。境界の  $\omega$  は入出力棒あるいはロードセルのものに等しく、 $\tau$  はこれらの棒でのねじりモーメントより決定される。刻み時間  $\Delta t$  は試験片の分割数を  $N$  として  $l_s/(N \cdot c_s)$  となり、高ひずみ速度の場合は  $N=10$ 、低ひずみ速度で  $N=5$  とした。

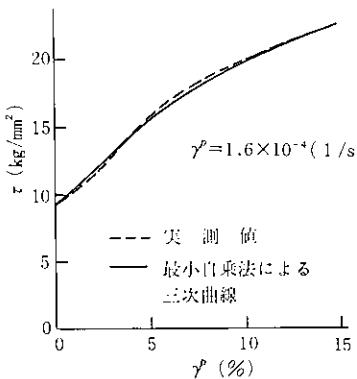
なお、入出力棒あるいはロードセルの応力はすべて弾性応力であるから、これらの丸棒の応力は容易に求められる。

### 3. 3 応力—ひずみ関係の実験式

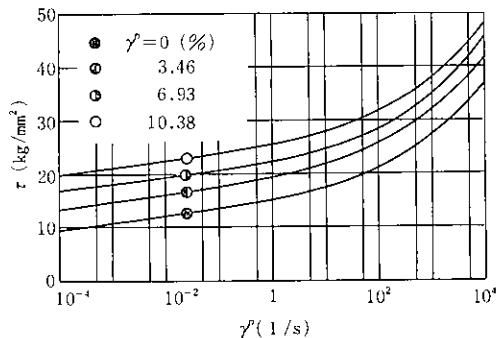
応力—ひずみ関係が顕著なひずみ速度依存性を示すと言われる実用炭素鋼材SS41を用いた。第5図は  $\dot{\gamma}_p = 1.6 \times 10^{-4}/s$  における静的な  $\tau-\gamma^p$  関係を示し、リューダース帯の降伏伸びを消失させたものである。図中実線は点線の実験曲線を3次式で近似したもので、これを  $\tau_s$  とすれば次式で与えられる。



第4図 特性曲線網



第5図 SS41材の静的応力—ひずみ関係



第6図 応力の剛性ひずみ速度依存性

$$\tau_s = 348.1675 \gamma'^3 - 327.1885 \gamma'^2 + 129.3448 \gamma' + 9.423978 \quad (14)$$

式(10)の関数  $g$  には、上式の  $\tau_s$  を用いて clifton<sup>13)</sup>により次式を仮定する。

$$g(\tau, \gamma') = G_s \cdot \gamma' = \frac{A G_s}{\exp \{B(C - \tau + \tau_s)^2\} + D \exp \{E / (\tau - \tau_s + F)\}} \quad (15)$$

ここで  $A, \dots, F$  は材料定数である。これら諸値の決定に際しては著者らが同種材料を用いて得たねじり強さのひずみ速度依存性に関する実験結果<sup>5)</sup>に出来るだけ近くなるように試行錯誤を繰り返えし、かつ式中各項のオーダーをそろえて、 $A = 3.2 \times 10^4 / s$ ,  $B = 0.0255 \text{mm}^4 / \text{kg}^2$ ,  $C = 32.876 \text{kg} / \text{mm}^2$ ,  $D = 71.389$ ,  $E = 224.4 \text{kg} / \text{mm}^2$ ,  $F = 9.424 \text{kg} / \text{mm}^2$ ,  $G_s = 8.1 \times 10^3 \text{kg} / \text{mm}^2$ とした。式(15)によって使用材料の強さの塑性ひずみ速度依存性を示したのが第6図で、強さの増加割合は  $\gamma' > 10^2 / s$  で大きくなっている。

### 3.4 入射波形と実験装置の諸元

3.4.1 高ひずみ速度の場合 一般に入射ひずみ波形  $\gamma_i(t)$  は長方形状に近いものが採用されるが、ここでは一定になるまでの立上り時間を考慮して次式で近似されるものとする。

$$\gamma_i(t) = \gamma_{i0} \left\{ 1 - \exp \left( -\frac{t}{T} \right) \right\} \quad (16)$$

上式で定数  $T$  を小さくすれば立上り時間を短かくすること、したがって勾配を大きくすることになる。計算では  $\gamma_{i0} = 20 \times 10^{-4}$ ,  $T = 0, 10, 60 \mu\text{s}$  とした。以下では低ひずみ速度の場合も含めて  $T = 0$  の場合をステップ入力、 $T \neq 0$  では非ステップ入力と呼ぶことにする。なお入力棒と出力棒はいずれも直徑 25 mm の炭素鋼丸棒である。試験片については  $r_s = 6.65 \text{mm}$ ,  $t_s = 0.7 \text{mm}$ ,  $l_s = 5, 10, 15 \text{mm}$  とした。いずれも著者らがさきに用いた実験装置<sup>5)</sup>の値であり、この場合の入射波形は  $T = 60 \mu\text{s}$  に近いものが得られている。

3.4.2 低ひずみ速度の場合 式(16)と同様に次式を仮定した。

$$\omega(t) = \omega_0 \left\{ 1 - \exp \left( -\frac{t}{T} \right) \right\} \quad (17)$$

計算では  $\omega_0 = 5, 25 \text{ rad/s}$ ,  $T = 0, 125 \mu\text{s}$  を用い, ロードセルは前項に同じ炭素鋼丸棒で長さ  $l_s = 30, 60 \text{ mm}$  を選んだ。またロードセルでのひずみ測定位置はいずれも軸方向の中央とした。

### 3. 5 計算手順とシミュレーション

以上の諸式と諸条件のもとで電子計算機によって試験片の  $\tau$ ,  $\gamma$ ,  $\dot{\gamma}$  を計算し, 各試験のシミュレーションを行なった。その計算のためのフローチャートを高ひずみ速度の場合について示したのが第7図である。低ひずみ速度の場合も, 試験片の入力端における計算が簡単になることとロードセル固定端からの反射波による計算が加わることなどの相違はあるが, ほぼ同様である。

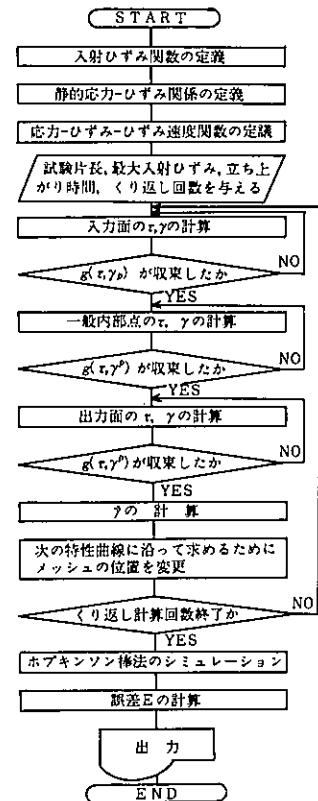
まず初期設定を行なった後, 第4図のA~D各点の初期波頭に沿って計算し, つぎにこれら1列めの値をもとに2列めE~F各点の計算を進め, 順次試験片内部の  $\tau$ ,  $\gamma$ ,  $\dot{\gamma}$  を求める。さらに, 高ひずみ速度の場合は式(1)~(3)によってシミュレーションによる測定値を求める。この場合, 応力波が試験片の出力端に到達した時間を0として入力端での状態は出力端での時間より  $l_s/c_s$  だけ前のものを採用した。このようにしたのは実際の波形解析に採用される方法だからである。低ひずみ速度の場合は, 式(4)~(6)によるシミュレーションを行ない, 応力波がロードセルのひずみ測定位置に到達した時間を0として試験片入力端での状態は  $(l_s + l_L/2)/c_s$  だけ前のものを採用した。おわりにこれらのシミュレーションによる測定値について後述の式(18)~(20)による誤差の評価を行なう。

### 3. 6 測定誤差の評価

3. 6. 1 高ひずみ速度の場合 後述の例にも示すように試験片内で応力状態は異なるが, シミュレーションによる測定値  $\dot{\gamma}$  と  $\gamma$  の値をその試験での真値としてこれらを式(15)に代入し, 応力の真値  $\tau_t$  を求める。ただしこの場合式(1)による  $\tau$  から  $\dot{\gamma}$  と  $\gamma$  の弾性成分  $\dot{\gamma}^e$  と  $\gamma^e$  を求め,  $\dot{\gamma}^p = \dot{\gamma} - \dot{\gamma}^e$ ,  $\gamma^p = \gamma - \gamma^e$  による塑性成分  $\dot{\gamma}^p$  と  $\gamma^p$  を用いた。このような  $\tau_t$  により誤差  $E_\tau$  をつぎのように定義する。

$$E_\tau = \frac{\tau - \tau_t}{\tau} \quad (18)$$

3. 6. 2 低ひずみ速度の場合 高ひずみ速度の場合と異なり, 結果は  $\tau - t$ ,  $\gamma - t$  などの関係で表示されることが多い。これらの  $\tau$ ,  $\gamma$  などはその時間における真値ではないから, これらを真値と比較する必要がある。しかし試験片内部で応力状態が異なると考えられるため, これらの真値を厳密には定義できない。そこでホブキンソン棒法の場合にならい, 試験片両端間の角速度差から得られるひずみ速度  $\dot{\gamma}$ , ひずみ  $\gamma'$  および出力端での応力  $\tau'$  が真値に近いと考え, これらを真値とみなした。そこで同一時間における測定値  $\tau$ ,  $\dot{\gamma}$ ,  $\gamma$  の誤差をそれぞれつぎのように定義する。すなわち



第7図 フローチャート

$$E_{\tau} = \frac{\tau - \tau'}{\tau}, \quad E_{\dot{\gamma}} = \frac{\dot{\gamma} - \dot{\gamma}'}{\dot{\gamma}}, \quad E_{\gamma} = \frac{\gamma - \gamma'}{\gamma} \quad (19)$$

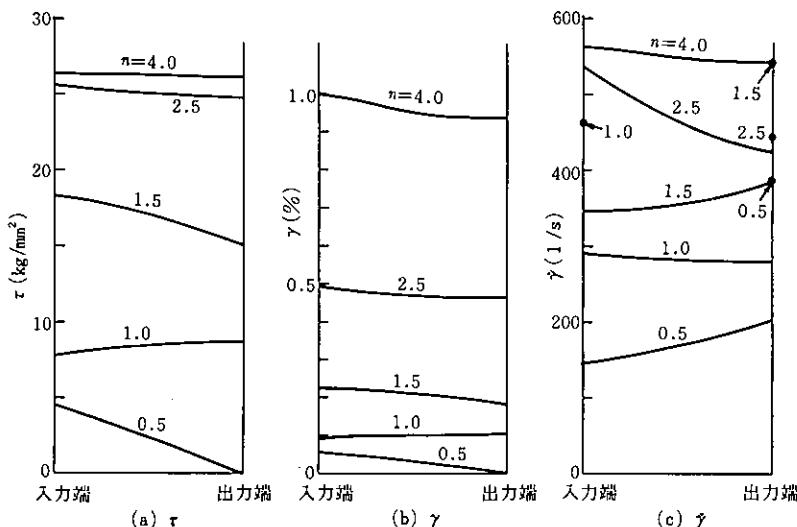
つぎに測定値  $\dot{\gamma}$  と  $\gamma$  に対する  $\tau$  の誤差  $E_{\tau}$  を式 (18) と同様に定義したのが次式である。

$$E_{\tau} = \frac{\tau - \tau_t}{\tau} \quad (20)$$

#### 4 計算結果と考察

##### 4. 1 試験片内の $\tau$ , $\gamma$ , $\dot{\gamma}$

第8図は高ひずみ速度で非ステップ入力  $T = 10 \mu s$  の場合の1例について試験片内の  $\tau$ ,  $\gamma$ ,  $\dot{\gamma}$  を示し,  $n$  は入力端に応力波が入射した瞬間から測定して弾性応力波が試験片を往復する回数  $c_s t / 2l_s$  である。



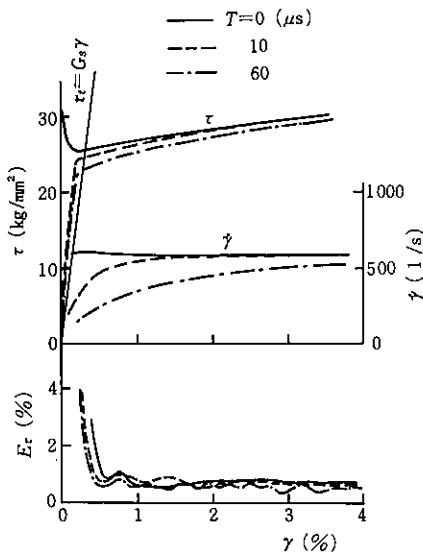
第8図 試験片内部の  $\tau$ ,  $\gamma$ ,  $\dot{\gamma}$  ( $\gamma_0 = 20 \times 10^{-4}$ ,  $T = 10 \mu s$ ,  $l_s = 10 \text{ mm}$  の場合)

$\tau$ ,  $\gamma$ ,  $\dot{\gamma}$  はともに  $n$  すなわち時間によって変化し,  $n$  が小さいときこれらは明らかに軸方向に不均一となっているが,  $n=4$  になればいずれもほぼ均一になることがわかる。 $n$  が小さいとき  $\dot{\gamma}$  が境界で不連続に大きな値になるのは弾性波が時間的に不連続に到達するためである。

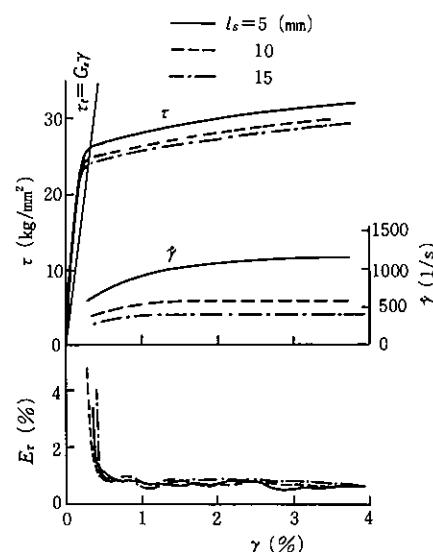
ホブキンソン棒法ではこのような試験片内での応力状態の不均一を無視することになるため, 負荷初期ではかなりの誤差が含まれることになるが, これが入射波形やその他の条件で異なるのは勿論である。また応力が完全に均一になることは応力波の伝ば現象を考慮する限り厳密にはあり得ないことになるが, この例でほぼ均一となる  $n=4$  の場合を時間に換算すれば  $12.5 \mu s$  となり, ひずみは約 1 % となる。それ故この程度のひずみ以上あるいは時間以後で精度良好と言えよう。なお村上ら<sup>9)</sup>は圧縮の場合について  $n \geq 3$  を精度良好の目安としている。

##### 4. 2 高ひずみ速度の場合のシミュレーションと測定誤差

第9, 10図はそれぞれ試験片長さ  $l_s$  が一定 (10mm) で  $T$  を変えた場合, 入射波形が一定の非



第9図  $T$ を変えた場合の  
シミュレーションによる結果  
( $\gamma_{10}=20 \times 10^{-4}$ ,  $l_s=10\text{mm}$ の場合)



第10図  $l_s$ を変えた場合の  
シミュレーションによる結果  
( $\gamma_{10}=20 \times 10^{-4}$ ,  $T=10\mu\text{s}$ の場合)

ステップ入力 ( $T=10\mu\text{s}$ ) で  $l_s$  を変えた場合の結果である。図中  $\tau_t=G_s\gamma$  は弾性域での  $\gamma$  に対する応力の真値  $\tau_t$  を示したものである。まず全体的傾向としては、 $T$  を大とすれば  $\gamma$  が小のところで  $\dot{\gamma}$  も小となるため  $\tau$  も小さく、 $l_s$  を大とすれば  $\gamma$  の全域にわたって  $\dot{\gamma}$  が小となるため同様に  $\tau$  も小さくなる。つぎに  $T=0$  を除くいずれの場合も弾性域と考えられる領域の  $\tau-\gamma$  関係の勾配は  $G_s$  より大きく、 $T$  が小さいほうがより大きい。 $T=0$  の場合に  $\gamma=0$  で  $\tau$  が不連続的に生じて立上り勾配は無限大となり、その後  $\tau$  は急減して増加する。これは、試験片の出力端に不連続的に応力波が到達した瞬間、この位置での塑性ひずみ速度が不連続的に急増した後急減するためと考えられるが、入射波形の大きさ  $\gamma_{10}$  にも関係するものであろう。図中  $\tau$  は出力端におけるものであるが、 $\dot{\gamma}$  と  $\gamma$  は試験片両端間の平均的な値で出力端におけるものではないから、 $T=0$  のステップ入力の場合にはこの種測定法による結果として  $\gamma=0$  で  $\tau$  が生ずることとなる。なお第10図の結果から見て立上り勾配に及ぼす  $l_s$  の影響は明らかではない。

このような負荷初期の  $\gamma$  が小さい領域での誤差の原因は前に述べたように応力波の伝ば現象を無視したことによるものである。しかしある時間が経過すれば図示のように  $E_\tau < 1\%$  となり、このような領域の  $\gamma$  に対して測定誤差は实际上問題とならないであろう。

$\gamma$  が小さいときの  $E_\tau$  は大きいため図の外にはみ出るが、仮に精度良好となる目安に  $E_\tau=2.1\%$  となる時間  $t_0$  と対応するひずみ速度  $\dot{\gamma}_0$  およびひずみ  $\gamma_0$  を示せば、第1, 2表のようになる。入射波形を変えた場合の第1表の結果では、 $T$  が大きいすなわち立上り時間が長いものほど精度良好となる時間  $t_0$  も長いが、対応する  $\gamma_0$  と  $\dot{\gamma}_0$  は小さくなる傾向がある。試験片長さ  $l_s$  をえた場合の第2表では、 $l_s$  と  $t_0$  の大小はほぼ対応し、また  $l_s$  が小さければ精度良好となるときの  $\gamma_0$  は大きいが、対応する  $\dot{\gamma}_0$  の傾向は必ずしも明らかではない。これらの結果を前述の  $n$  に対応させれば、 $E_\tau=2\%$  の場合  $n=(c_s t_0 / 2 l_s) + 0.5 \approx 3.5$ ,  $E_\tau=1\%$  で  $n \approx 3.9$  となり、いずれも  $n=4$  とすれば精度良好となることが

表1 測定精度良好となる条件 ( $l_s=10\text{mm}$ の場合)

	$E_r = 2\text{ (%)}$			$E_r = 1\text{ (%)}$		
	$T(\mu\text{s})$			$T(\mu\text{s})$		
	0	10	60	0	10	60
$t_0(\mu\text{s})$	<9.47	12.57	28.24	9.48	14.74	31.6
$\gamma_0(\%)$	0.50	0.32	0.30	0.59	0.41	0.37
$\dot{\gamma}_0(1/\text{s})$	603	416	192	603	450	214

表2 測定精度良好となる条件 ( $T=10\mu\text{s}$ の場合)

	$E_r = 2\text{ (%)}$			$E_r = 1\text{ (%)}$		
	$l_s(\text{mm})$			$l_s(\text{mm})$		
	5	10	15	5	10	15
$t_0(\mu\text{s})$	9.46	12.57	18.88	10.72	14.74	18.91
$\gamma_0(\%)$	0.38	0.32	0.41	0.47	0.41	0.41
$\dot{\gamma}_0(1/\text{s})$	683	416	334	743	450	338

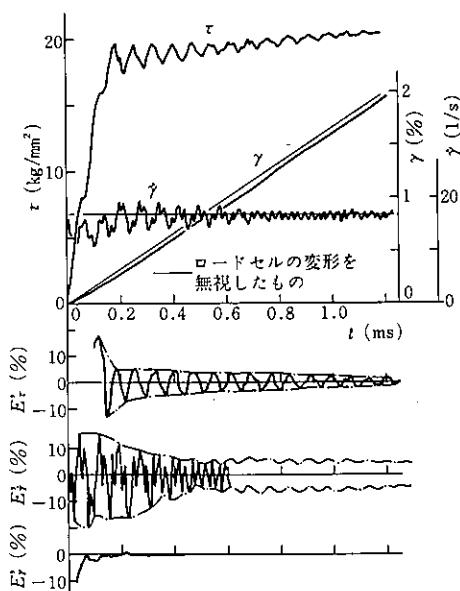
確認できる。

なお、ホプキンソン棒法による負荷のみの  $\tau-\gamma$  関係からは材料の降伏点を直接決定できない。しかし明瞭な降伏点を示さない材料についてよく行なわれるよう、除荷の勾配が  $G_s$  に等しく残留ひずみが 0.2%となるときの耐力を降伏点と見なせば、この値は真値よりわずかに大きいが、 $E_r < 2\%$ となり、このように降伏点を決定したとしても含まれる誤差はきわめて小さいことになる。

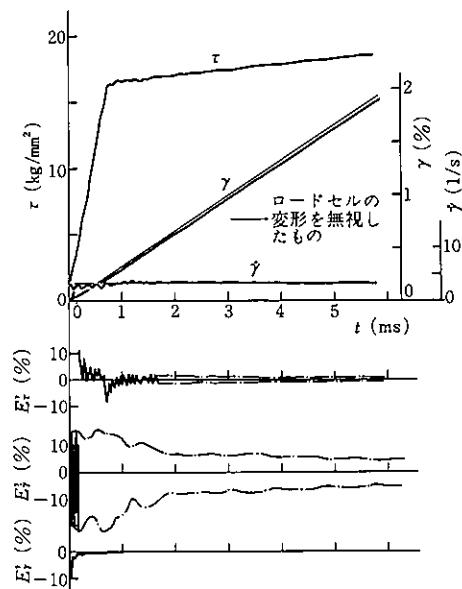
#### 4.3 低ひずみ速度の場合のシミュレーションと測定誤差

第11, 12図はステップ入力の大きさ  $\omega_0$  をそれぞれ 25, 5 rad/s にした場合であり、第13, 14図は非ステップ入力でロードセル長さ  $l_s$  を 60, 30 mm にしたときのものである。

まず第11図の  $\tau-t$  関係ではかなり大きな山と谷が周期的に現われているが、この周期はロードセ



第11図 シミュレーションによる結果  
( $\omega_0=25\text{rad/s}$ ,  $T=0$ ,  $l_s=60\text{mm}$ の場合)



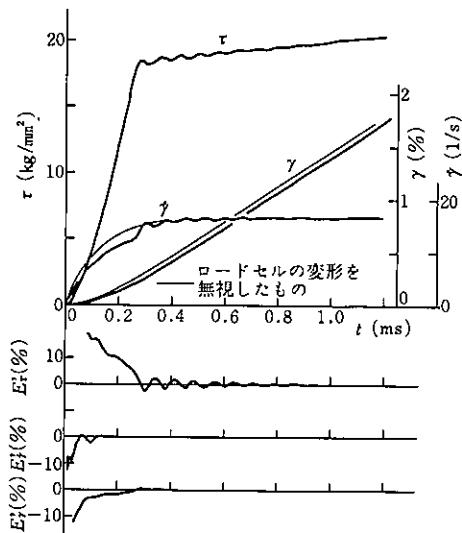
第12図 シミュレーションによる結果  
( $\omega_0=5\text{rad/s}$ ,  $T=0$ ,  $l_s=60\text{mm}$ の場合)

ルの第1次の固有振動数の周期 75.8  $\mu\text{s}$  にほとんど一致している。ステップ入力のためにロードセルの固定端で反射された応力波が時間的には不連続に試験片に入射するためであろう。対応する  $\dot{\gamma}-t$

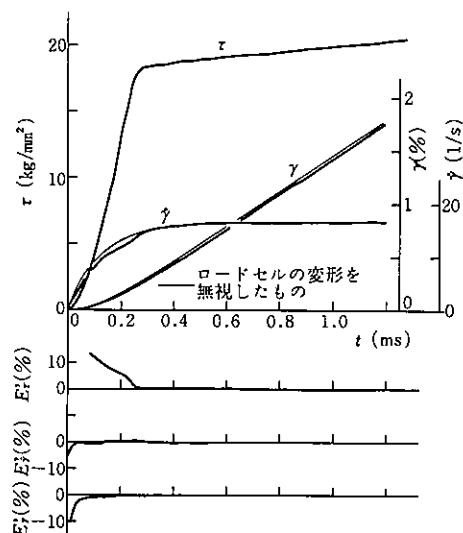
関係にも同様な現象が見られるが、 $\gamma-t$  関係では  $\tau$  や  $\dot{\gamma}$  ほど明瞭ではなくなめらかな変動となっている。図中の細線はロードセルの変形を無視した式(7)による  $\dot{\gamma}$  と  $\gamma$  を示したもので、測定値と比較すれば、ロードセルの変形を無視した分だけ測定値の  $\gamma$  は小さく、同様に短時間のところでは  $\dot{\gamma}$  の振動の中心もやや小さくなっていることがわかる。しかし負荷初期を除けばこれらの差はきわめて小さく、後述の非ステップ入力の場合でも同様である。つぎに  $E'_\tau$  と  $E'_\gamma$  はかなりの時間が経過してもほぼ 0を中心として振動している。見易くするために振動のほぼ山と谷を結ぶ位置を1点鎖線で示してあるが、これは次図でも同様である。また  $E'_\gamma$  は負荷初期を除ききわめて小さい。もちろんこれらの誤差は評価のための近似値であるが、前述のように  $n=4$  で十分な精度が得られることから推定して十分正確なものと考えられる。 $E'_\tau-t$  関係では  $t>0.2\text{ms}$  の場合に  $E'_\tau=0$  となる点に相当する  $\tau$  の点を取りこれをなめらかに結んで得られる曲線は  $\tau$  の山と谷の中心を通る曲線にほとんど一致する。対応する  $\gamma$  は約 0.2%以上であるが、このように一定ひずみ以上の範囲では図のような振動があったとしても、この中心をなめらかに結んで得られる曲線は実用上十分正確なものとなるであろう。

第12図は  $\omega_0$  が小さく 5 rad/s の場合で、全体的な傾向は前図の場合にほぼ類似するが、 $\dot{\gamma}$  が小さいために  $\tau$  も小さく、 $\tau-t$  関係に大きな振動は見られない。各誤差の傾向を前図と比較すれば、 $E'_\tau$  と  $E'_\gamma$  には  $\omega_0$  の大小による相違はあまりないが、 $E'_\tau$  の傾向がやや異なりほぼ降伏点に達したと考えられる時間で再び大きい変動がこの場合に見られる。また両図の場合とも弾性域と考えられる時間内の  $E'_\tau$  と  $E'_\gamma$  は同様に振動し、その最大値は 10~20%であるから、ステップ入力に対する弾性域での  $\tau$  と  $\dot{\gamma}$  には 10~20%の誤差が考えられることになる。塑性域と考えられるほど  $\gamma>0.2\%$  ではいずれの誤差も  $\gamma$  が大すなわち時間の経過とともに小さくなる傾向にあり、とくに  $E'_\tau$  と  $E'_\gamma$  はきわめて小さくなる。

第13図によれば、非ステップ入力の場合の  $\tau$  と  $\dot{\gamma}$  に大きな振動はなく、 $\gamma$  の変動もなめらかである。これらの誤差は弾性域と考えられる時間内では 10%を越えることもあるが、塑性域と考えられる



第13図 シミュレーションによる結果  
( $\omega_0=25\text{rad/s}$ ,  $T=125\mu\text{s}$ ,  $l_u=60\text{mm}$ の場合)



第14図 シミュレーションによる結果  
( $\omega_0=25\text{rad/s}$ ,  $T=125\mu\text{s}$ ,  $l_u=30\text{mm}$ の場合)

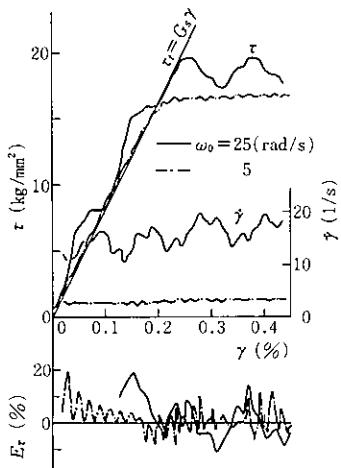
時間以後すなわちほぼ  $\gamma > 0.2\%$  ではきわめて小さくなる。

第14図は第13図の場合で  $l_1$  を小さく  $1/2$  としたときの結果で、両図はほとんど同様な傾向を示しているが、 $l_1$  を小さくすれば誤差もやや小さくなることが認められる。これは、ロードセルが短かければ同一時間に対して応力波の往復回数が多くなり、それだけ試験片とロードセルの応力が均一に近づくためと考えられる。

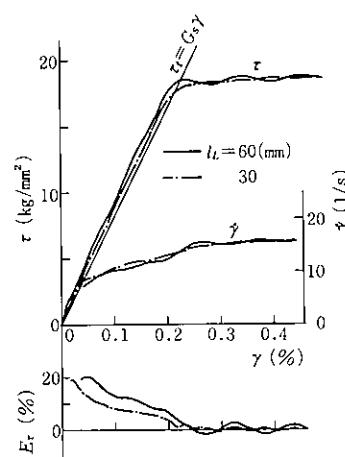
なお非ステップ入力の場合とステップ入力の場合を比較して、とくに  $E'_\tau$  の傾向が著しく相違し、前者の場合の振動がきわめて少ないので、前者のほうが時間的に不連続に伝ばする弾性波の影響が小さいためと考えられる。

つぎに、測定値の  $\tau$  と  $\dot{\gamma}$  には誤差が考えられるが、高ひずみ速度の場合と同様に  $\dot{\gamma}-\gamma$  関係に対応する応力の測定値  $\tau$  の誤差  $E_\tau$  に関する結果を示したのが以下の2図である。

第15図はステップ入力の場合の結果をまとめたもので、 $\omega_0=25\text{rad/s}$  では  $\tau$  と  $\dot{\gamma}$  の振動が見られ、 $E_\tau$  も最大 20% 程度で振動している。これは  $\dot{\gamma}$  の振動に対応して  $\gamma$  も振動することによるものである。また  $\omega_0=5\text{rad/s}$  では  $E_\tau$  はいくぶん小さいように思われるが、ロードセルの固有振動数に対応して振動する傾向は同様である。なお弾性域と考えられる  $\tau-\gamma$  関係の勾配を直線で近似したとすれば、これらはいずれも真の勾配  $G_s$  より大きく、 $\omega_0$  の大きいほうが大きいことになる。



第15図  $\tau-\gamma$  関係とその誤差  
( $T=0$ ,  $l_1=60\text{mm}$  の場合)



第16図  $\tau-\gamma$  関係とその誤差  
( $\omega_0=25\text{rad/s}$ ,  $T=125\mu\text{s}$  の場合)

これらに対して非ステップ入力の第16図の結果では、 $\tau-\gamma$  関係にはほとんど振動はなく、 $\tau$  と  $\dot{\gamma}$  ともになめらかな変動である。弾性域の  $\tau-\gamma$  関係の勾配を前と同様に真値と比較すれば、測定値のほうが大きくなることはステップ入力の場合と同様である。これはホプキンソン棒法の場合と同じ理由によるもので、応力波の伝ば現象を無視したことによる。また除荷の勾配が  $G_s$  に等しいとして耐力を求めればこの値の誤差は 2% 以下となる。なお全体的に見てロードセルが短いほうの誤差はより小さいことが明らかで、この理由は第14図の場合と同様である。

## 5 結 言

本研究ではひずみ速度がほぼ  $5 \sim 10^3/\text{s}$  における衝撃ねじり試験の簡単なモデルについて SS 41

材を想定したシミュレーションを行ない、短かい薄肉円筒状試験片の測定応力一ひずみ関係とその誤差の検討を行なった。そのおもな結果をまとめればつきのようになる。

- i) ホブキンソン棒法によって高ひずみ速度のねじりを受ける試験片の応力、ひずみ、ひずみ速度は負荷初期で軸方向にきわめて不均一であるが、これらは短時間内にほとんど均一となる。
- ii) ホブキンソン棒法による負荷初期での測定誤差は入射波形の立上り勾配と試験片長さによって異なり、前者によるものがきわめて大きいが、試験片内での弾性応力波の往復回数がほぼ4程度の時間以後すべての場合に2%以下の誤差となる。
- iii) 定速回転による比較的低ひずみ速度のねじりの場合には、測定誤差は入射波形の大きさと立上り勾配およびロードセル長さに左右されるが、波形の大きさが大きくステップ入力とすればほぼ0を中心としてロードセルの固有振動数による周期で時間的に大きく変動する。立上り勾配が小さい非ステップ入力の場合は微小ひずみの弾性域で10%以上の誤差があるが、塑性域での誤差はきわめて小さく、しかもロードセル長さを短かくするほうが全ひずみ領域において誤差は小さくなる。またロードセルの剛性が十分大きく非ステップ入力とすれば、ロードセルの変形を無視して入射波形のみによつても実用上十分な精度でひずみとひずみ速度を推定することができる。

なお、このような結果は材料特性や装置諸元によって多少異なるであろうが、本手法を適用すれば他の材料やより広範囲のひずみ速度の場合についても測定精度をより詳細に検討することができる。

おわりに、ご指導をいただいた米谷茂教授とご協力をいただいた田上繁技官に謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) H. Kolsky, proc. Phys. Soc., Sec. B, 62(1949), 676.
- 2) 田中ほか3名、機械学会論文集, 38-309(昭47), 955.
- 3) 放生・茶谷、金沢大学工学部紀要, 7-2(昭48), 137.
- 4) 茶谷、機械の研究, 23-12(昭46), 1625.
- 5) 放生・茶谷、機械学会講演論文集, No. 747-2(昭49), 13.
- 6) E. D. H. Davies & S. C. Hunter, J. Mech. Phys. Solids, 11(1963), 155.
- 7) V. S. Lindholm & L. M. Yeakley, Exp. Mech., 8-1(1968), 1.
- 8) 田中・安達、航空学会誌, 21(昭48), 230.
- 9) 村上・室田・神馬、機械学会論文集, 39-318(昭48), 556.
- 10) T. Nicholas, J. Appl. Mech., 40(1973), 277.
- 11) 作井・中村・津村、材料, 15(昭41), 247.
- 12) L. Malvern, J. Appl. Mech., 18(1951), 203.
- 13) R. J. Clifton & J. C. C. Hsu, J. Mech. Phys. Solids, 22(1974), 233.