ねじり衝撃下における波頭の減衰特性†

谷 村 眞 治* 吉 井 宏** 石 川 皓 一***

Attenuation of Leading Wave Front under Torsional Impact

by

Shinji TANIMURA

(College of Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai)

Hiroshi YOSHII

(Hirakata Plant, Nippon Seisen Co., Ltd., Hirakata)

and Kouichi ISHIKAWA

(Osaka Municipal Technical Research Institute, Osaka)

In this paper, an experimental method to detect an attenuation phenomenon at the leading wave front under torsional impact is presented. The relation between the attenuation phenomenon and the parameters of a constitutive equation for elastic/viscoplastic media was discussed theoretically. Incremental torsional impacts were applied to commercial pure aluminum tubes which had been given pre-stress and pre-strain, and the leading wave front was detected in the range of larger pre-strain. The parameters of the constitutive equation were obtained using the attenuation curve of the leading wave front. The experimental method proposed in this paper may be an effective method to investigate the strain rate dependency of the yield point of mild steel.

(Received July 4, 1983)

キー・ワード：材料試験，ねじり衝撃，衝撃波頭，減衰，構成式

1 緒 言

衝撃荷重下における材料の動的特性を調べる実験方法として、従来から、棒状試験片に対する縦衝撃実験が行われているが、近年、薄肉円管にねじり衝撃を作用させる実験や軸力-ねじり組合せ衝撃を作用させる実験が行われている。円管にねじり衝撃を作用させる実験法は、縦衝撃実験法のように横方向慣性力の影響を無視するという近似がなく、横波の伝ば速度が円管の径に対して一定で、またせん断変形であるために実験結果と構成式との対応が比較的単純になるという利点がある。縦衝撃実験およびねじり衝撃実験のどちらの場合も、スプリット・ホプキンソン棒法による実験が主である。ところで、構成式の具体形を決定するための一つの実験方法として、衝撃波頭の減衰特性を調べる実験法が考えられる。これには、筆者らの知る範囲では、Taylor¹⁾によって行われた板と板との高速縦衝撃のもとでの Hugoniot 弾性波の減衰に関する報告があるのみで、ねじり衝撃下における衝撃波頭の減

衰実験は、まだ行われていないようである。

そこで、本論文では、前ひずみを与えた薄肉円管の一端にねじり衝撃を作用させて、ねじり衝撃下における衝撃波頭の減衰特性を測定する実験法を提示している。また、実際に急激な立ち上りの増分衝撃を作用させる実験を行い、アルミニウムに対する弾性/粘塑性体構成式の各パラメータ値を求めている。

2 理 論

2・1 構成式と衝撃波頭との関係

薄肉円管にねじり衝撃を作用させた場合の弾性/粘塑性体構成式を次式のような Malvern 型構成式で表す。

$$G \frac{\partial(2\gamma)}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial t} + g(\tau, 2\gamma^p) \quad (1)$$

ここで、 τ はせん断応力、 γ はせん断ひずみ（テンソルの定義）、 γ^p はせん断ひずみの非弾性成分、 G は横弾性係数および t は時間である。

$t=0$ で薄肉円管の一端 $x=0$ にねじり衝撃を負荷するとき、 $x=c_2 t$ に沿って伝ばする衝撃波頭 (leading wave front) においては次の関係が成立する。

$$2d\tau = -gdt \quad (2)$$

この波頭の通過時における跳躍条件 $4\tau = G \cdot (2d\gamma)$

† 原稿受理 昭和58年7月4日

* 正 会 員 大阪府立大学工学部 堺市百舌鳥梅町

** 日本精線(株)枚方工場 枚方市池之宮

*** 正 会 員 大阪市立工業研究所 大阪市城東区森之宮

Fig. 1. Deformation paths for preloading, partial unloading and incremental impulsive loading.

および $dt = dx/c_2$ を用いると、式(2)は次のようになる。

$$\frac{d(2\gamma)}{dx} = -\frac{g}{2Gc_2} \quad (3)$$

ここで、 $c_2 = \sqrt{G/\rho}$ および ρ は密度である。

Fig. 1 に示すように、準静的ねじりにより前負荷 τ_{pr} 、前ひずみ $2\gamma_{pr}$ を与えた状態 (図中の A 点) において、急激な立ち上りのねじり増分衝撃を负荷させたとき、衝撃波頭の応力点が図中の C 点に達したとする。このとき衝撃波頭における関係式は、式(3)中の g を $g = g(\tau, 2\gamma_{pr}) = g(G(2\gamma - 2\gamma_{pr}), 2\gamma_{pr})$ とおくことにより次式のようになる。

$$\frac{d(2\gamma)}{dx} = -\frac{g(G(2\gamma - 2\gamma_{pr}), 2\gamma_{pr})}{2Gc_2} \quad (4)$$

2.2 構成式的具体形と実験法との関係

本論文では構成式的具体形として、筆者らの一人が提案した^{3,4)} 広ひずみ速度域に適用し得る弾性/粘塑性体構成式を用いることにすると、薄肉円管のねじりの場合には、それは次式の形となる。

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{2G} + \eta^*(\gamma^p) \exp \left[\frac{-D(\gamma^p, T)}{\tau - \tau^*(\gamma^p, T)} \right] \quad (5)$$

ここで、 $\eta^*(\gamma^p)$ は振動数パラメータ、 $D(\gamma^p, T)$ はひずみ速度依存性をあらわすパラメータ、 $\tau^*(\gamma^p, T)$ は加工硬化に基づく“back stress”、 G は横弾性係数として T は絶対温度である。

式(5)の構成式形に対して、式(4)はある一定温度下において次式のようになる。

$$\frac{d(2\gamma)}{dx} = -\frac{\eta^*(\gamma_{pr}^p)}{c_2} \exp \left[\frac{-D(\gamma_{pr}^p)}{G(2\gamma - 2\gamma_{pr}) - \tau^*(\gamma_{pr}^p)} \right] \quad (6)$$

準静的ねじりによって前ひずみ $2\gamma_{pr}^p$ (工学的ひずみ) が与えられた材料状態に対する τ^* は、静的応力-ひずみ線図上のそのひずみに対応する応力であらわされるものとして、

$$\tau^*(\gamma_{pr}^p) = G(2\gamma_{pr} - 2\gamma_{pr}^p) \quad (7)$$

と仮定すると、式(6)は次式のようになる。

$$\frac{d(2\gamma)}{dx} = -\frac{\eta^*(\gamma_{pr}^p)}{c_2} \exp \left[\frac{-D(\gamma_{pr}^p)}{G(2\gamma - 2\gamma_{pr})} \right] \quad (8)$$

ここで

$$\frac{\eta^*(\gamma_{pr}^p)}{c_2} \equiv A \quad (9)$$

$$\frac{D(\gamma_{pr}^p)}{G} \equiv B \quad (10)$$

とおくと、式(8)は次のようになる。

$$\frac{d(2\gamma)}{dx} = -A \exp \left(-\frac{B}{2\gamma - 2\gamma_{pr}} \right) \quad (11)$$

式(11)の両辺の対数を取って変形すると

$$\frac{1}{2\gamma - 2\gamma_{pr}} = -\frac{1}{B} \ln \left[-\frac{d(2\gamma)}{dx} \right] + \frac{\ln A}{B} \quad (12)$$

となり $1/(2\gamma - 2\gamma_{pr})$ と $\ln \{-d(2\gamma)/dx\}$ は直線関係となることわかる。

したがって、まず前ひずみ $2\gamma_{pr}$ を与えた薄肉円管に急激な立ち上りのねじり衝撃を负荷して、衝撃波頭の減衰曲線を求める。つぎに、この曲線をもとに $1/(2\gamma - 2\gamma_{pr})$ と $\ln \{-d(2\gamma)/dx\}$ との関係を求める。もし、これら両者が直線関係であるならば、式(12)からわかるようにこの直線のこう配およびこの直線が横軸と交差する切辺の値から、式(11)の係数 A および B の値を決定することができる。

この実験方法における大きな問題点は、Fig. 1 の C 点に対応するような衝撃波頭が検出されるかどうかである。このためには、十分に急激な立ち上りのねじり衝撃を作用させることが必要となる。衝撃波頭は衝撃端のごく近傍で急激に減衰し、その後は徐々に減衰するので、ひずみ速度依存性の顕著でない材料 (たとえばアルミニウムで前ひずみの小さい状態) に対しては、その検出が困難になると予測される。一方、鉄の降伏点のひずみ速度依存性 (スプリット・ホプキンソン棒法ではその測定精度がしばしば問題になる) などに対しては、本実験法は一つの有効な手段になると考えられる。

3 実験

3.1 実験装置および試料

本研究で用いた試験機は前報と同じ引張り-ねじり組合せ衝撃試験機である。試料円管は市販の純度 99.6% のアルミニウム引抜管で、380℃ で 2 時間の焼なましを施したものである。

弾性棒である入力棒と試料円管とを熱硬化性接着剤 (Scotch Weld 2214) を用いて接合し、試料円管には Fig. 2 に示すような位置に、衝撃波頭の減衰状態を測定するための直角 2 軸型ひずみゲージ (KFC-1-D16-11) を軸方向に対して 45° 傾けて接着した。これら 2 方向のひずみゲージを、ホイートストンブリッジの相隣る 2 辺に接続することによって、若干の軸方向ひずみが混在してもその成分は差し引き 0 となるようにし、せん断ひずみのみの波形を検出した。また、入力棒のクランプ位置 および衝撃トルク検出用ひずみゲージ

Fig. 2. Strain gage positions.

G_s の接着位置は Fig. 2 に示すとおりである。

3・2 実験方法

引張り-ねじり組合せ 衝撃試験機に 入力棒および試料円管をセットし、所定の位置で入力棒をクランプした後トルクを蓄積した。つぎに、準静的ねじりによって試料円管を Fig. 1 の A 点までねじり、前ひずみ $2\gamma_{pr}$ を与えた。その後、実験をしやすくするため、また波形の解析をしやすくするために、ただちに前負荷の一部を除荷して、Fig. 1 の B 点まで下げた状態のところへねじりの増分衝撃を作用させた。そのときの各ひずみゲージからの出力波形をオシロスコープで観測し写真に記録した。なお、試料円管にねじり衝撃を負荷する方法は前報とほぼ同じである。

本実験では温度は室温で一定とし、前ひずみ状態として約 0.5%，約 5%，約 8% および約 14% の 4 とおりを設定した。

4 実験結果および考察

Fig. 2 の入力棒に接着したひずみゲージ G_s で測定した応力波形の一例を Fig. 3 に示す。クランプ解放による除荷波と試料端面からの反射波とが G_s に到達する時間差 $29 \mu\text{sec}$ に対応して、応力波は 2 段状になっている。この応力波形から、衝撃トルクの立ち上がり時間は約 $20 \mu\text{sec}$ であることがわかる。

前ひずみ約 0.5% のときにひずみゲージ G1～G6 で検出された波形の一例を Fig. 4 に示す。ひずみ波形の立ち上がり初期に波形の乱れが認められるが、これはクランプ解放時の応力波形の乱れが、薄肉円管試料の

Fig. 3. An oscillogram of stress pulse in the input bar obtained by releasing the torque.

ひずみ波形に敏感に現れたものと考えられる。しかし、このような乱れは、Fig. 1 の A 点以下の除荷域内にとどまっていて、衝撃波頭の検出には影響しないと考えられる。

つぎに衝撃波頭の求め方について述べる。観測されたひずみ波形を模式的に描くと、おおよそ Fig. 5 の挿入図に示すような形をしている。矢印で示した位置をそれぞれ O, P, Q, R および S とする。O 点は立ち上がり開始点であって弾性域内である。また、P および Q の各点もそれぞれ弾性域内の点である。O 点は

Fig. 5. Relation between time and distance from the impact end at each point on the schematic oscillogram.

Fig. 4. An oscillogram of strain by the incremental torsional impact ($\tau_{pr} = 1.34 \text{ kgf/mm}^2$, $2\gamma_{pr} = 0.54\%$).

弾性波速度で伝ばしているの、Fig. 5 に描いた直線 $x=c_2t$ 上に乗っている。いま、O 点と P 点との時間差を、G1～G6 のひずみゲージで検出された各波形ごとに読み取った。これらの値を、各波形の測定点ごとに、直線 $x=c_2t$ を基準にしてプロットすると Fig. 5 の●印のようになり、これらの点はほぼ直線上に乗った。また、この直線は直線 $x=c_2t$ とほぼ平行であった。同様に、O 点と Q、R および S の各点との時間差を読み取り、測定点ごとにプロットした。その結果は、Fig. 5 中に示されているように Q 点および R 点はそれぞれほぼ直線上に乗り、これらの直線は $x=c_2t$ とほぼ平行になっていた。しかし、S 点は $x=c_2t$ に平行な直線上に乗らなかった。すなわち、P、Q および R の各点は弾性波速度で伝ばしているが、S 点の伝ば速度は弾性波速度より遅いことがわかる。したがって、各波形の R 点に対応する点は、弾性波速度で伝ばする点の上限を示していて、この点を衝撃波頭とみなすことができる。

したがって、薄肉円管試料の各測定点で観測された

Fig. 6. Attenuation curve of leading wave front.

Fig. 7. Attenuation curve of leading wave front.

Fig. 8. Attenuation curve of leading wave front.

Fig. 9. Attenuation curve of leading wave front.

ひずみ波形から、Fig. 2 に示したように、衝撃波頭に対応するひずみ $2\gamma-2\gamma_B$ の値を読み取り、 $2\gamma-2\gamma_{pr}$ の値で整理した結果を前ひずみごとに Fig. 6～9 に示す。これらの図から、衝撃波頭は衝撃端の近傍で急激に減衰することがわかる。

Fig. 6～9 の衝撃波頭の減衰曲線から $2\gamma-2\gamma_{pr}$ の値および接線の傾き ($-d(2\gamma)/dx$) の値を求めた。その結果から $1/(2\gamma-2\gamma_{pr})$ および $-d(2\gamma)/dx$ の値をそれぞれ片対数グラフ上にプロットすると、Fig. 10 に示すようになる。図より各前ひずみの結果に対して、直線的な関係になっていることがわかる。したがって、Fig. 10 の各直線の傾きおよびこれらの直線が横軸と交差する切辺の値から、式(1)の係数 A および B の値を求めると、Table I に示すような値が得られた。また、Table I には、式(9)および(10)から計算して求めた η^* 、

Table I. The obtained values of parameters.

Strain		Coefficients of Eq. (11)		Parameters		
$\bar{\epsilon}p = \frac{2}{\sqrt{3}} \gamma p_{pr}$	$2\sqrt{I^{(2)}} \epsilon p = 2\gamma p_{pr}$	A (1/mm)	B	$\eta^* (=c_2 \times A)$ (kgf/mm ²)	D (=G×B) (kgf/mm ²)	$\tau^* (= \tau_{pr})$ (kgf/mm ²)
0.003	0.005	1.90×10^{-4}	4.94×10^{-4}	5.72×10^2	1.24	1.29
0.029	0.05	3.75×10^{-4}	8.37×10^{-4}	1.13×10^3	2.09	3.05
0.046	0.08	8.30×10^{-4}	1.28×10^{-3}	2.50×10^3	3.20	3.72
0.081	0.14	1.41×10^{-3}	1.50×10^{-3}	4.24×10^3	3.75	5.37

$$c_2 = 3.01 \times 10^3 \text{ m/sec}, G = 2500 \text{ kgf/mm}^2$$

Table II. The values of parameters (reprinting from Ref. 4).

Material	Strain		Parameters			Reference
	ϵ or ϵp	$2\sqrt{I^{(2)}} \epsilon p$	η^* (1/sec)	D (kgf/mm ²)	τ^* (kgf/mm ²)	
Aluminum 1100-o	$\epsilon p = 0.029$	0.05	10^6	7.38	3.25	Lindholm (1968)
	$\epsilon p = 0.058$	0.1	10^6	13.5	3.70	
	$\epsilon p = 0.099$	0.172	10^6	15.1	4.38	
Aluminum	$\epsilon = 0.01$	0.016	2×10^4	2.76	4.35	Hauser <i>et al.</i> (1961)
	$\epsilon = 0.04$	0.033	2×10^4	4.35	4.63	
	$\epsilon = 0.16$	0.274	2×10^4	8.86	4.78

Fig. 10. Relation between $1/(2\gamma - 2\gamma_{pr})$ and $-d(2\gamma)/dx$.

D および τ^* の値を示してある。ただし、 c_2 および G の値として、それぞれ $3.01 \times 10^3 \text{ m/sec}$, 2500 kgf/mm^2 を用いた。

一方、アルミニウムに対する Lindholm の実験結果⁸⁾ および Hauser らの実験結果⁴⁾ から、筆者らの一人が計算して求めた式(5)の各パラメータ値を Table II に示す。Table I と Table II とを比較すると、本実験法で求められた η^* と D の値はかなり小さくなっている。しかしながら、Table I はひずみ速度が $14 \text{ sec}^{-1} \sim 150 \text{ sec}^{-1}$ の範囲の実験結果を、また、Table II は $10^{-3} \text{ sec}^{-1} \sim 10^3 \text{ sec}^{-1}$ あるいは $10^6 \text{ sec}^{-1} \sim 10^4 \text{ sec}^{-1}$ の範囲の実験結果を近似できるような、パラメータ値の一つの組合せを示しているにすぎない。

本実験法によってより高ひずみ速度域をも近似でき

るようなパラメータ値を決定するためには、より速いねじり衝撃下における実験を行うことも一つの方法であろう。

5 結 言

本論文では、薄肉円管試料に準静的ねじりによって所定の前ひずみを与え、これにねじり衝撃を负荷して衝撃波頭の減衰特性を測定する実験法を提示した。そして、市販の純アルミニウム薄肉円管の一端に、急激な立ち上りのねじり衝撃を负荷する実験を行った。得られた結果を要約すると次のようになる。

(1) 波頭の検出が困難であると予想されたアルミニウムに対しても、前ひずみ量が大きくなると顕著な波頭が認められた。また、衝撃波頭は衝撃端の近傍で急激に減衰することがわかった。

(2) 波頭の減衰曲線から、一般化構成式のパラメータ値を決定した。得られた各パラメータの値は、本実験で得られたひずみ速度の範囲内での実験結果を近似できる一つの組合せにすぎない。本実験法によって、より高ひずみ速度域をも近似できるようなパラメータ値を決定するためには、より速いねじり衝撃下における実験を行う必要がある。

なお、本研究ではアルミニウムのみを対象に実験を行ったが、鉄の降伏点のひずみ速度依存性に関する研究などに対して、本実験法は一つの有効な手段になると考えられる。

参 考 文 献

- 1) J.W. Taylor and M.H. Rice, J. Appl. Phys., **34**, 364 (1963).
- 2) L.E. Malvern, Quart. Appl. Math., **8**, 405 (1951).
- 3) S. Tanimura, Int. J. Engng. Sci., **17-9**, 997 (1979).
- 4) 谷村眞治, 井垣 久, 材料, **29**, 137 (1980).
- 5) 西山卯二郎, 谷村眞治, 日本機械学会論文集, **36**, 1247 (1970).
- 6) 谷村眞治, 井垣 久, 真島秀和, 多田正幸, 日本機械学会論文集, **44**, 497 (1978).
- 7) U.S. Lindholm, "Mechanical Behavior of Materials under Dynamic Loads", p. 77 (1968) Springer-Verlag.
- 8) F.E. Hauser, J.A. Simmons and J.E. Dorn, "Response of Metals to High Velocity Deformation", p. 63 (1961) Interscience Pub..

書 評

“Optical Properties of Glass”

I. Fanderlik (著)

(1983年, Elsevier 発刊, 320ページ, 160×240 mm, Dfl. 190.00)

著者の I. Fanderlik はチェコスロバキアのフラデツークラーロベールの国立ガラス研究所の研究者であるが, 評者にとってはフォトクロミックガラスの論文の著者として記憶にある. 本書はチェコ語で書かれた同題の書物の英訳で, エルゼビア出版社の Glass Science and Technology シリーズの第5集として出版された.

新しいガラスのなかには従来のガラスと異なる電気的特性や機械的特性を有するために注目されているものがある. しかし, ガラスにとって実用上最も重要な特性は透明性を基礎とする光学的特性である. 他の材料では得られない光学的特性を有するためにガラスは光学材料の中心となっている.

本書はこのようなガラスの光学の性質を総合的に取り扱った最初の成書である. 第1章～第4章には光の発生, 光の一般的特性およびガラスと光の相互作用について基礎的事項が述べられている. 具体的には, 電子のエネルギー順位, 遷移の量子論, 放射線の波動特性, 人間の眼のスペクトル感度, 放射線源, 発光源, レーザ, ガラスによる光の反射, 屈折と分散, 屈折率, 吸収, 散乱, 偏光, 複屈折, 干渉などである. これらの章で読者は光に関係する現象一般とガラスの光学の性質についての基礎を学び, 第5章以下の準備とすることができる.

第5章～第7章は実用材料となるガラスの光学の特性を詳しく解説している. 第5章では工業的に生産されているガラスの光学の性質による分類というタイトルの下で, 無色のガラス, 着色ガラス, 乳白ガラス, テレビブラウン管用ガラスについて記してある. 前二者の節には, レンズなどのいわゆる光学ガラス, フィルターガラス, 着色容器ガラスのような技術材料のほかに, 照明用ガラス, 模造宝石などのアクセサリ的なガラスについても記されている.

第6章にはガラスの光学の性質の特殊な応用と題して感光ガラス, 感光多色ガラス, フォトクロミックガラス, ソーラリゼーション, 耐放射線ガラス, 発光ガラス, ガラスビーズなど比較的新しい話題が並んでいる.

第7章にはコーティング膜によるガラスの改質というガラス工業およびガラスを利用する電子工業にとって大切な問題が記されている. 内容は膜と光の相互作用, 反射膜, 反射防止膜, 吸収膜, 膜の作成法 (スパッタリング, 蒸着, ゲル法, 電解法, スプレー法, イオン交換, 焼付け, スクリーンプリンティング, エッチング), 光学工業における膜の応用, 膜の光学特性の測定などである.

以上のように本書はガラスの光学の性質の関与する広範囲の問題および広い意味での光学ガラスの基礎科学と技術の両面について記した本格的な, 優れた科学技術書である. 本書はガラスの研究者および技術者はもとより, ガラスの光学の性質に関係ある他の分野, たとえば建築, 照明, 電子工学, 光学機器の研究者, 技術者にとって参考書あるいはハンドブックとしてお役に立つ書物である.

なお, 本書のチェコ語の原書の出版年は1979年であり比較的最近の新しい事実が記載されていることを記しておきたい.

(京都大学化学研究所 作花済夫)