

粘弾性材料の衝撃試験法の開発

舞鶴工業高等専門学校 機械工学科

助教 玉男木隆之

(平成 20 年度奨励研究開発助成 AF-2008035)

キーワード：粘弾性，応力波，衝撃

1. 研究の目的と背景

高分子材料や複合材料は，軽量性や耐振性，耐腐食性などの特徴を有し，身近な日用品から機械部品に至るまで，幅広く利用されている．これらの材料は，粘弾性挙動（変形が時間に著しく依存）を示すことが知られている．

粘弾性材料の衝撃特性を評価する手法には，現状として粘弾性 SHB 法が広く用いられている^{1)~3)}．しかし，用いる材料によっては，特性評価精度が低くなる場合が存在するため⁴⁾，衝撃特性を精密に評価する手法としては未だ確立されていない．

本研究では，これまでの手法では評価することが困難であった粘弾性材料について，衝撃特性を評価する手法を新しく提案し，その精度を検討する．

2. 粘弾性棒中を伝わる 1 次元縦波

一次元波動伝ば理論に基づけば，均質で細く一様な粘弾性棒内を伝ばする縦波 $\bar{\varepsilon}(x, \omega)$ は，周波数領域において次のように表現される．

$$\bar{\varepsilon}(x, \omega) = \bar{\varepsilon}(0, \omega) \cdot \exp\{-(\alpha + ik)x\} \quad (1)$$

ここで， x ， ω および i は，それぞれ軸方向の座標，角周波数および虚数単位である．式(1)により，任意の点におけるひずみ波が計算できる．また，減衰係数 α と波数 k も ω に関する関数であり，複素コンプライアンス $J^*(\omega)$ と次の関係がある．

$$\left. \begin{aligned} k^2 - \alpha^2 &= \rho \omega^2 J_1^*(\omega) \\ 2\alpha k &= \rho \omega^2 J_2^*(\omega) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ρ は，材料の密度を表す．材料の特性を表す複素コンプライアンスは，ひずみと応力の比で定義され，以下のように計算される．

$$J^*(\omega) = J_1^*(\omega) - iJ_2^*(\omega) = \frac{\bar{\varepsilon}(x, \omega)}{\bar{\sigma}(x, \omega)} \quad (3)$$

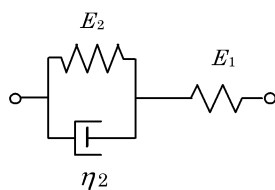


図 1 3 要素固体モデル

本研究では，材料を図 1 に示すような 3 要素固体モデルに近似した．この場合の複素コンプライアンスの実数部 $J_1^*(\omega)$ および虚数部 $J_2^*(\omega)$ は，次のようになる．

$$\left. \begin{aligned} J_1^*(\omega) &= \frac{1}{E_1} + \frac{E_2}{E_2^2 + (\omega\eta_2)^2} \\ J_2^*(\omega) &= \frac{\omega\eta_2}{E_2^2 + (\omega\eta_2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

3. 境界面におけるひずみ波の反射・透過

図 2 のように，細く一様な弾性棒 I と II が境界で接しており，棒 I の中を軸方向に対して垂直に入射波 ε_i が入射する場合を考える⁵⁾．入射波 ε_i が境界面に到達するとその一部は反射波 ε_r として反射し，一部は透過波 ε_t として棒 II に透過する．棒 I，棒 II の断面積，縦弾性係数，密度，伝ば速度，粒子速度を A_n ， E_n ， ρ_n ， c_n ， v_n ($n = I, II$) とする．棒 I 中のひずみ ε_i と粒子速度 v_i は入射波と反射波を合わせたものより

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_i &= \varepsilon_i + \varepsilon_r \\ v_i &= c_i(\varepsilon_r - \varepsilon_i) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

と書くことができる．また棒 II 中のひずみ ε_{II} と粒子速度 v_{II} は透過波による成分のみであり

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{II} &= \varepsilon_t \\ v_{II} &= c_{II}\varepsilon_t \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

と書ける．棒の境界面での力のつり合いと粒子速度の連続の条件より次のことが成り立つ．

$$\left. \begin{aligned} A_I \varepsilon_i E_I &= A_{II} \varepsilon_{II} E_{II} \\ v_i &= v_{II} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(5)~(7)から反射波，透過波は入射波を用いて表すことができ，フーリエ変換を施せば，周波数領域における粘弾

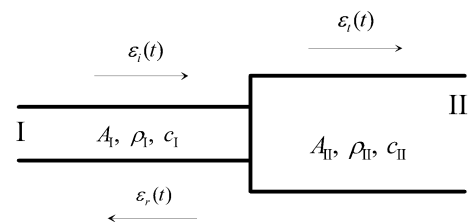


図 2 境界面におけるひずみ波の反射，透過

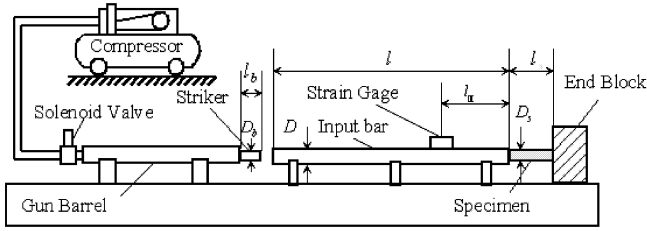


図3 固定端反射を利用した間接法の実験装置概略図

表1 試料, 応力棒およびストライカの形状とゲージ位置

Specimen		Input bar			Striker bar	
Diameter	Length	Diameter	Length	l_m	Diameter	Length
15.0	40.0	20.0	1000	300	15.0	100

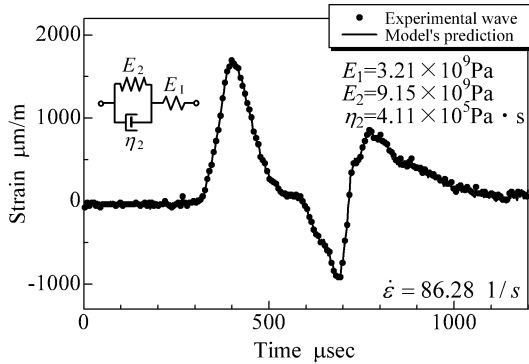


図5 固定端反射を利用した間接法によるポリプロピレン材の測定波形と同定波形

性体における反射波, 透過波を求める式となる.

$$\bar{\varepsilon}_r = \frac{A_{II}\rho_{II}c_{II} - A_I\rho_Ic_I}{A_I\rho_Ic_I + A_{II}\rho_{II}c_{II}} \bar{\varepsilon}_i \quad (8)$$

$$\bar{\varepsilon}_t = \frac{2A_I\rho_Ic_I}{A_I\rho_Ic_I + A_{II}\rho_{II}c_{II}} \cdot \frac{c_I}{c_{II}} \bar{\varepsilon}_i \quad (9)$$

ここで, A , ρ は, 棒の断面積および密度を示す. また, c は, ω に関する関数で, 伝ば速度を表す. 添字の I, II は, 弾性棒 I, II にそれぞれ対応している. 式(8)および(9)の右辺の係数を反射率, 透過率と定義し, これ以降, それぞれを R , T と表現するものとする.

4. 固定端反射を利用した間接法

4.1 測定原理および解析方法

図3に固定端反射を利用した間接法の実験装置概略図を示す. この手法では, 粘弾性 SHB 法で問題点の一つとなっていた試料両端面での荷重のつりあいを考える必要がないため, 粘弾性 SHB 法に比べて適用する試料の幅が大きく広がると考えられる. 衝撃端から十分離れた場所にひずみゲージを貼り付けた入力棒と End Block で試料を

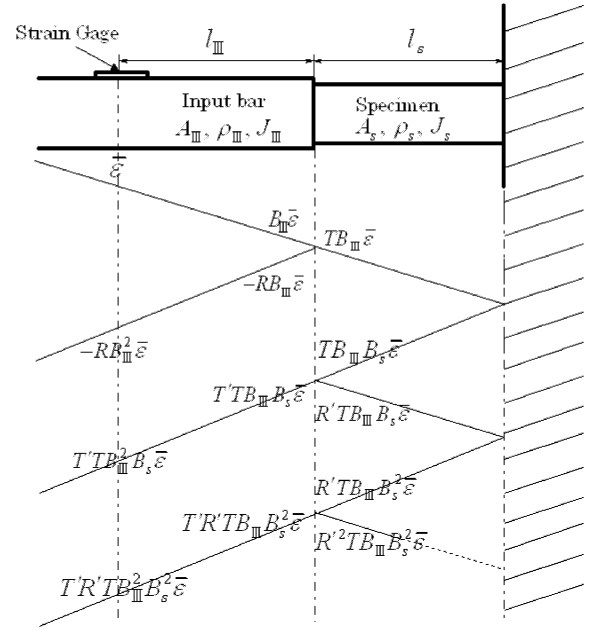


図4 一次元波動伝ば理論に基づいた固定端反射を利用した間接法のひずみ波の伝ば

はさみ, エアーコンプレッサで加圧したストライカによって入力棒の一端に衝撃を加え, ひずみ波を測定する. 図4に示すように, ひずみゲージから入力棒と試料の境界面までの距離を l_m , 試料長さを l_s としたとき, l_m および試料内の1往復分 $2l_s$ をひずみ波が伝ばする際のそれぞれの減衰, 分散を表す項 B_m , B_s は式(1)を用いて次のように表される.

$$\left. \begin{aligned} B_m &= e^{-(\alpha_m + ik_m)l_m} \\ B_s &= e^{-(\alpha_s + ik_s)2l_s} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

また, 式(8)および(9)より, ひずみ波が入力棒から試料に伝ばしたときの反射率と透過率をそれぞれ R , T , 試料から入力棒に伝ばしたときの反射率と透過率をそれぞれ R' , T' とする. ひずみゲージで最初に測定される圧縮波をフーリエ変換したものを $\bar{\varepsilon}$ とすれば, 入力棒と試料の境界面まで伝ばした周波数領域のひずみは $B_m \bar{\varepsilon}$, 一部は反射して $-RB_m \bar{\varepsilon}$, 残りは透過して $TB_m \bar{\varepsilon}$ となる. 反射した $-RB_m \bar{\varepsilon}$ は, ひずみゲージまで伝ばし, $-RB_m^2 \bar{\varepsilon}$ が観測される. 固定端において, ひずみ波が試料の右端で完全に反射すると考えれば, 透過した $TB_m \bar{\varepsilon}$ は試料内を往復して再び入力棒と試料の境界面へ $TB_m B_s \bar{\varepsilon}$ が到達する. このように反射と透過の計算を行っていけば, 十分時間が経った後にゲージで測定されるひずみ波 $\bar{\varepsilon}_{gauge}$ を予測することができ, 以下の式で表すことができる.

$$\bar{\varepsilon}_{gauge}(\omega) = \bar{\varepsilon}(\omega) - RB_m^2 \bar{\varepsilon}(\omega) + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ B_m^2 B_s T' R^{m-1} \right\} \bar{\varepsilon}(\omega) \quad (11)$$

$\bar{\varepsilon}_{gauge}$ を逆フーリエ変換すれば, 時間領域のひずみ波 $\varepsilon_{gauge}(t)$ となる. 初期波形 $\varepsilon(t)$ が実験によって測定できれ

ば、これを初期条件として式(11)によってひずみゲージでの波形が予測でき、試料の粘弾性定数が決定できる。

4・2 実験

入力棒には、一般的に粘弾性縦衝撃実験で広く用いられることの多いアクリル (PMMA) 材を用いる。試料には、一例としてポリプロピレン (PP) 材を用いた。実験に使用した入力棒、試料およびストライカの寸法とゲージ位置を表1に示す。

図5に実験波形および予測波形を示す。同定したモデルの各値および試料ひずみ速度の最大値も同時に図中に示している。それぞれの実験におけるストライカ速度はいずれも約20m/sであった。4.1節の測定原理で述べたように、ひずみ波が反射と透過を繰り返して伝ばしていく様子が確認できる。予測波形について、3要素固体モデルに近似して同定を行った結果、実験波形と予測波形が良好な一致を示しており、本実験によってPP材の特性が評価できていることが確認できる。

5. 固定端反射を利用した間接法の精度の検証

著者が既に報告している自由端反射を考慮した直接法⁶⁾を用いて、4章で決定した材料の特性の評価精度を検証する。

5・1 実験

図6に自由端反射を考慮した直接法の実験装置概略図を示す。試料には、4章と同じPP材を用いる。長さ200mm、直径20mmの試料上に衝撃端から30mmの位置に1箇所ひずみゲージを貼り付けている。ストライカには、試料と同質の材料を用い、長さ20mm、直径15mmである。エアコンプレッサにより加圧された圧縮空気でストライカを発射し、試料の一端に衝撃を与え、試料の表面に生じるひずみ波 $\epsilon_1(t)$ を測定する。ひずみゲージでは、まず圧縮波が測定され、右端で反射して引張り波となり、伝ばして再びゲージで測定され、次に左端で反射して圧縮波となり、伝ばしてまたゲージで測定され、というように繰り返される。

5・2 実験結果および精度の検証

図7に自由端反射を考慮した直接法を用いたPP材の実験結果および解析結果を示す。同時に試料のひずみ速度も

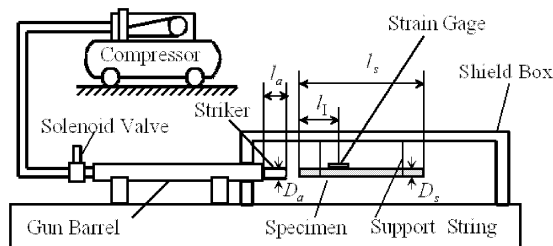


図6 自由端反射を考慮した直接法の実験装置概略図

表記している。なお、ストライカ速度は約6m/sであった。4章と同様に、同定する際に用いたモデルは3要素固体モデルである。実験波形より、自由端反射によって、圧縮波と引張り波が入れ替わってはいるが、ひずみ波が減衰、分散しながら伝ばしていく様子がわかる。また、予測波形について、実験値とよく一致していることが確認できる。

4章の手法によって決定された特性値(図5)と比べてみると、 E_1 、 E_2 、 η_2 3つともほぼ一致している。従って、4章で提案した固定端反射を利用した間接法によって決定された衝撃特性は、精度が高いとされる直接法の特性と同等の評価精度を持つといえる。

6. 結言

本研究では、新しく固定端反射を利用した間接法を提案し、これまでの手法では特性評価が難しかった材料に適用して実験、解析を行い、その精度を検討した。以下に得られた結果を示す。

- 1) 1次元波動伝ば理論を用いて、境界面での反射、透過を数値計算で求め、試料の特性評価として適用できる手法を確立した。
- 2) 試料の一例としてポリプロピレン材を用い、提案した間接法によって衝撃特性を評価した。3要素固体モデルによって精度良く評価できることがわかった。
- 3) 自由端反射を考慮した直接法を用いて、同様にポリプロピレン材の衝撃特性を評価し、提案した間接法による特性値とほぼ同等の精度が得られることが確認できた。

謝辞

本研究を実施するにあたり、財団法人天田金属加工機械技術振興財団の研究助成のご支援を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Sogabe, Y., Yokoyama, T., Yokoyama, T., Nakano, M. and Kishida, K., A Split Hopkinson Bar Method for Testing Materials with Low Characteristic Impedance,

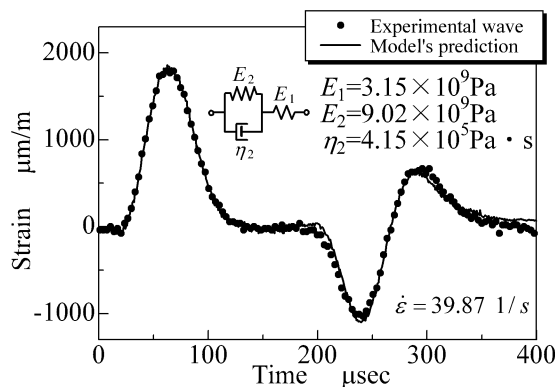


図7 自由端反射を考慮した直接法によるポリプロピレン材の測定波形と同定波形

Dynamic Fracture, Failure and Deformation, PVP-Vol. 300, The 1995 Joint ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference, Honolulu, (1995), pp.137-143.

2) Bacon, C., An Experimental Method for Considering Dispersion and Attenuation in a Viscoelastic Hopkinson Bar, *Experimental Mechanics*, Vol.38, No.4, (1998), pp.242-249.

3) Salisbury, C.P. and Cronin, D.S., Mechanical Properties of Ballistic Gelatin at High Deformation Rates, *Experimental Mechanics*, Vol.49, No.6, (2009), pp.829-840.

4) Tamaogi, T. and Sogabe, Y., Accuracy of Viscoelastic Split Hopkinson Pressure Bar Method Using PMMA Bars (in Japanese), *Journal of JSEM*, Vol.6, No.4 (2006), pp.446-451.

5) Hayashi, T. and Tanaka, K., *Impact Engineering* (in Japanese), (1988), pp.11-12, Nikkan Kougyo Shinbunsha.

6) Tamaogi, T. and Sogabe, Y., Evaluation of Dynamic Properties for Low Impedance Materials (in Japanese), *Journal of JSEM*, Vol.7, No.1 (2007), pp.56-61.