

304 分割ホプキンソン棒衝撃圧縮試験に関する数値的研究

Numerical Analysis of Impact Compression Test by Split Hopkinson Pressure Bar Technique

正〇 山下実(岐阜大工) 正 佐藤裕久(東北学院大工) 正 西村尚哉(岐阜大工) 正 服部敏雄(岐阜大工)

Minoru YAMASHITA, Naoya NISHIMURA and Toshio HATTORI, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu
Yasuhisa SATO Tohoku-gakuin University, 1-13-1 Chuo-ku, Tagajo

Key Words : Split Hopkinson Pressure Bar, Impact Compression, Numerical Simulation

1. 緒言

分割ホプキンソン棒法¹⁾は、高ひずみ速度下の圧縮試験法として最も広く用いられており、同試験法の高精度化^{2,3)}やひずみ速度の制御に関する研究^{4,5)}が行われてきた。

入力棒や出力棒の表面に貼付したひずみゲージで検出した入力波、反射波、透過波の推移から試験片の応力・ひずみ関係、ひずみ速度・ひずみ関係を推定している。しかし、どのように各波の立上り開始時刻を定めるかについては、あいまいさが残っている。

そこで、本研究では分割ホプキンソン棒法による衝撃圧縮試験を動的陽解有限要素法で数値的にシミュレートし、応力波形の立上り開始時刻に関する整理方法が、試験片の応力・ひずみ線図に及ぼす影響をまず検討した。また、実験では、応力波の振動成分の低減のために打撃棒先端に丸みを付けておき、入力棒に徐々に接触させる工夫がしばしば行われる。こうした工夫と得られる応力・ひずみ関係の精度との関連についても、数値シミュレーションで検討した。

2. 分割ホプキンソン棒衝撃圧縮法の概要

入力棒に生じる入射波を σ_i 、反射波を σ_r とし、出力棒に生じる透過波を σ_t とする。試験片端面の圧縮力を f_1 、 f_2 とすれば、

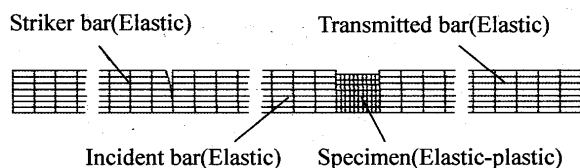


Fig.1 Numerical model of specimen and elastic bars
(The striker bar is round-headed in the figure. Elastic bars are partially drawn due to limitation of space.)

Table 1 Dimensions of elastic bars and specimen

Tool or specimen	Length	Diameter
Striker bar	300 mm	20 mm
Incident bar	1000 mm	20 mm
Transmitted bar	1000 mm	20 mm
Specimen	10 mm	18 mm

Radius of round-headed striker bar: 30, 100 mm

Table 2 Mechanical properties and density assumed for bars and specimen

Striker bar	Elastic	Density	7810 kg/m ³
Incident bar		Young's modulus	210 GPa
Transmitted bar		Poisson's ratio	0.29
Specimen	Elastic plastic	Density	2770 kg/m ³
		Young's modulus	73.1 GPa
		Poisson's ratio	0.34
		Initial yield stress	375 MPa
		Linear hardening modulus	2480 MPa

$$f_1(t) = A_b \{ \sigma_i(t) + \sigma_r(t) \} \quad (1)$$

$$f_2(t) = A_b \sigma_t(t) \quad (2)$$

と書ける。 A_b は入力棒および出力棒の断面積である。試験片の初期断面積を A_0 とすれば、試験片内部の平均的な圧縮公称応力とひずみ速度は以下のように表される。

$$\bar{\sigma}_N = \frac{A_b}{2A_0} \{ \sigma_i(t) + \sigma_r(t) + \sigma_t(t) \} \quad (3)$$

$$\bar{\varepsilon}_N(t) = \frac{C_b}{h_0 E_b} \{ \sigma_i(t) - \sigma_r(t) - \sigma_t(t) \} \quad (4)$$

ここで、 C_b および E_b はそれぞれ入力棒と出力棒の弾性波伝播速度および縦弾性係数で、 h_0 は試験片の初期高さである。なお、 $f_1(t) \approx f_2(t)$ を仮定する場合、公称応力とひずみ速度は以下のようにになる。

$$\bar{\sigma}_N \approx \frac{A_b}{A_0} \sigma_t(t) \quad (5)$$

$$\bar{\varepsilon}_N(t) \approx -\frac{2C_b}{h_0 E_b} \sigma_r(t) \quad (6)$$

3. 計算条件

数値計算には、動的陽解有限要素法コード DYN3D(公開版)を使用した⁶⁾。形状の対称性を考慮して1/4領域を八節点六面体要素でモデル化した。Fig.1に試験片とその近傍の弾性棒の要素分割を示す。また、Table 1に各棒と試験片寸法を示す。Table 2に示すように、各棒はいずれも鉄鋼材料相当の線形弾性材料を仮定した。一方、試験片はアルミニウム合金 A2024-T3 相当とし別途実験で得られている弾-線形硬化特性に合わせ、ひずみ速度依存性は考慮しない。

打撃棒の節点に初期速度 20 m/s を与えた。摩擦は無視した。棒の中央位置の要素の軸方向応力を用いて応力波形を描いた。

4. 計算結果および考察

4.1 応力波形の立上り開始時刻に関する整理方法

まず、打撃棒の端面を平坦とした時の各弾性棒に生じた応力波履歴を Fig.2 に示す。入力波および反射波の前半部分に顕著な振動成分が現れ、透過波もやや振動成分を含んでいる。

試験片両端面に作用する圧縮力について、 $f_1(t) \approx f_2(t)$ が成立すると見なして、応力波の立上り時刻を応力の閾値で定める整理法について検討した。閾値は、0.01, 1, 10, 50 MPa とした。応力の閾値を 0.01 MPa とした場合、弾性変形をうまく表せなかった。Fig.3 に応力の閾値を 10, 50 MPa として整理した場合を示すが、10 MPa の時、負荷時の弾性変形と除荷時の挙動を比較的良好に表せていると言える。

なお、いずれの場合においても、ひずみが 0.015 以上の領域で塑性曲線はほぼ同じであったが、加工硬化の勾配については与

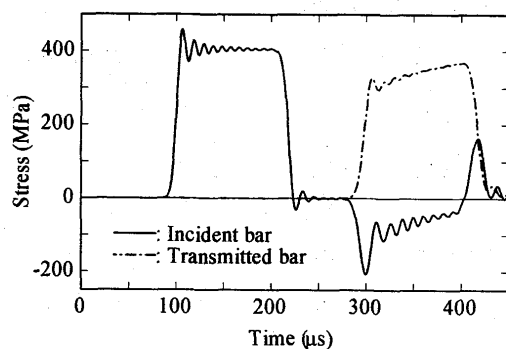
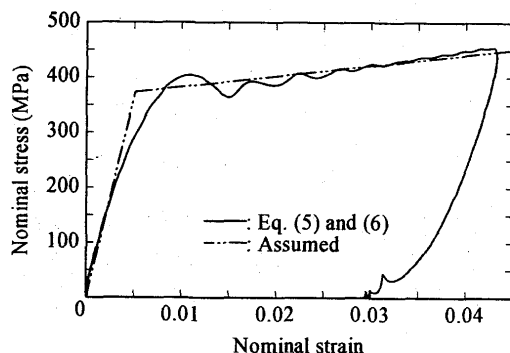
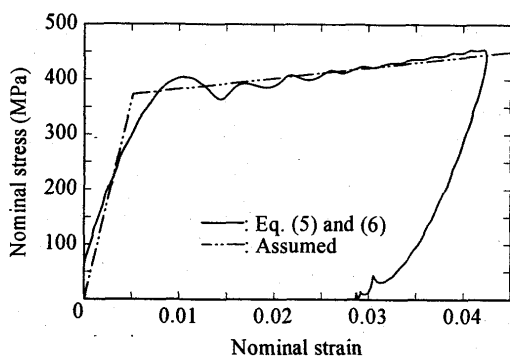


Fig. 2 Stress wave histories in the elastic bars



(a) Threshold value: 10 MPa



(b) Threshold value: 50 MPa

Fig. 3 Nominal stress vs. nominal strain curve obtained with eqs. (5) and (6) and the assumed property of specimen

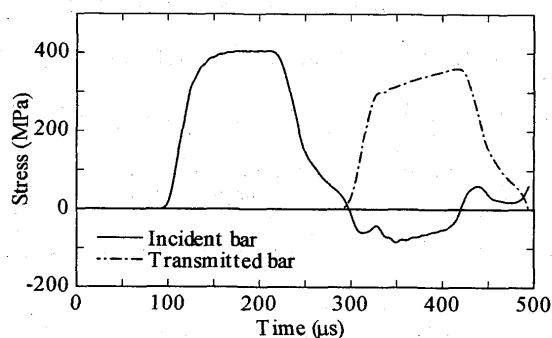
えた特性よりもやや大きく現れた。これは、試験片の慣性効果によるひずみ分布の不均一性に起因するものと考えられる。

4.2 打撃棒先端丸み半径の影響

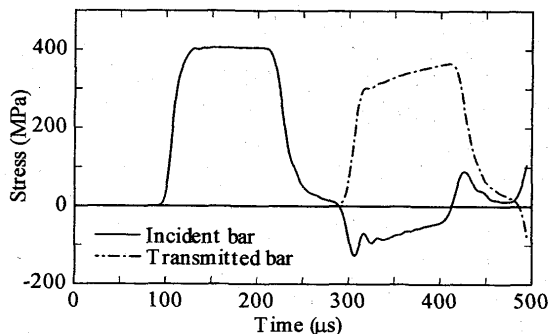
Fig. 4 に打撃棒の先端丸み半径を 30, 100 mm とした場合について、弾性棒内の応力波履歴を示す。先端丸み半径を 30 mm とした場合、半径 100 mm のものより応力パルスの立上りが緩やかになった。入力波については、振動成分は両条件ともほとんど抑制された。反射波の振動成分は丸み半径が小さい方がその程度は小さかったものの、両条件とも現れた。

得られた公称応力・公称ひずみ線図を Fig. 5 に示す。この場合、式(3)、(4)を用いた。各応力波の立上り時刻は前述のとおり定めた。丸み半径を 30 mm とした場合の方が、弾性域とひずみが小さい領域で、試験片に与えた応力・ひずみ特性に近かった。これは、反射波における立上り時のオーバーシュートが抑えられたことによるものと考えられる。

実験において先端に丸みを付けた打撃棒を使用した場合、打撃棒と入力棒の端に塑性変形を生じる可能性があり、こうしたことも計算に考慮して実験条件の最適化を検討する必要がある。



(a) Radius of hemispherical head of striker bar: 30 mm



(b) Radius of hemispherical head of striker bar: 100 mm

Fig. 4 Stress wave histories in the elastic bars where the head of the striker bar is rounded

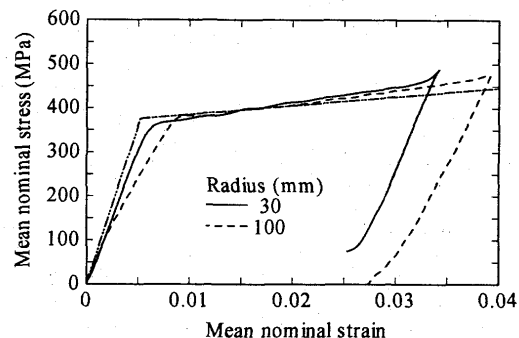


Fig. 5 Nominal stress vs. nominal strain curves for two radii of hemispherical head of striker bar

5. 結言

分割ホプキンソン棒法による衝撃圧縮試験を数値的にシミュレートし、応力波形の立上り開始時刻に関する整理方法および打撃棒先端の丸み半径が、得られる応力・ひずみ線図に及ぼす影響を検討した。降伏応力の数%程度で立上り開始時刻を定めた時、良好な応力・ひずみ線図が描けた。また、打撃棒先端の丸み半径については、反射波のオーバーシュートを抑えるように設定すると、得られる応力・ひずみ関係の精度が向上することを数値計算で示すことができた。

参考文献

- 1) Kolsky, H.: Proc. Phys. Soc., B62, 676(1949).
- 2) Hauser, F.E. et al.: Response of Metals to High-Velocity Deformation, 93(1961), Interscience Publisher.
- 3) 山田嘉昭他: 塑性と加工, 84, 55(1968).
- 4) 佐藤裕久他: 塑性と加工: 254, 252(1982).
- 5) 佐藤裕久他: 塑性と加工: 270, 744(1983).
- 6) Hallquist, J.O.: DYNA3D Theoretical manual, (1989).