ひずみ速度依存性を示す材料における塑性波伝ばの解析[†] (衝撃速度変化の影響)

内 藤 正 鄰* 台 丸 谷 政 志* 浜 田 恒 平**

Propagation of Plastic Waves in a Bar of Material Exhibiting Strain-Rate Effect (On the Effect of Variation of Impact Velocity)

by

Masachika NAITOH, Masashi DAIMARUYA and Kouhei HAMADA
(Muroran Institute of Technology, Muroran)

The present paper is concerned with a problem of longitudinal plastic waves in a bar subjected to tensile impact. The effect of the variation of impact velocity on the propagation plastic waves and the formation of strain plateau in the strain distribution is discussed experimentally and theoretically. Impact tensile tests of copper specimens were carried out by an impact testing apparatus using a falling weight. The plastic strain distribution of the specimen was measured and the time history of plastic waves at various stations along the specimen was observed, together with the variation of impact velocity during impact. Theoretical calculation was performed by using Malvern's strain-rate dependent theory, taking account of the attenuation of impact velocity.

The results obtained are summarized as follows:

(1) The experimental results showed that the strain distribution along the specimen decreased with the increase of the distance from the impact end and no strain plateau at neighborhood of the impact end appeared.

(2) The theoretical results under the condition of decreasing impact velocity predicted also no strain plateau and almost agreed with the experimental results.

(3) The formation of strain plateau may be limited to the case of a constant impact velocity, though it is related to the strain-rate dependent nature of material, the impact velocity and the duration of impact time.

(Received Feb. 17, 1984)

キー・ワード：衝撃塑性学，塑性波，ひずみ速度依存性，一定速度衝撃，衝撃速度変化

1 緒 言

衝撃荷重下における材料の高速変形およびそれに伴う弾塑性波の伝ばに関する研究は，材料の動的特性を知るうえで，また機械や構造物の安全設計上重要な問題である。

著者らの先の報告¹⁾²⁾では，ひずみ速度依存性を示す材料における塑性波伝ばの解析を Malvern のひずみ速度依存性理論に基づいて行い，衝撃端付近のひずみプラト³⁾ーの存在とその出現の条件を明らかにした。本報では，引続いて衝撃速度の変化がひずみ分布，特にひずみプラト⁴⁾ーの形成にどのように影響するかを調べた。

棒状体⁵⁾がその一端に衝撃荷重を受ける際に生ずる弾塑性波の伝ばに関して，理論的⁶⁾には Karman, Malvern, 実験的⁷⁾には Duwez, Clark 以来，多くの研究がなされている。しかし，衝撃持続時間中に衝撃速度が

減速するなど，衝撃速度の変化が塑性波動に及ぼす影響については明らかにされていないようである。

本論文では，試作した落錘型衝撃試験装置を用いて，市販の純銅丸棒に衝撃引張り⁸⁾を加え，試料棒の残留ひずみおよび試料棒に接着した塑性ひずみゲージより各位置における弾塑性波の時間的変動を測定した。また同時に衝撃初速度および衝撃終了時の速度を測定し衝撃速度の変動を調べた。これらの実験結果をひずみ速度依存性理論による計算結果と比較して，ひずみ分布および弾塑性波の伝ば挙動を検討した。その結果，衝撃速度が変動する場合は衝撃端近傍にひずみプラト⁹⁾ーは形成されないなど，一定速度衝撃の場合とはかなり異なることが明らかになった。

2 実 験

2.1 実験装置および実験方法

試作した落錘型衝撃引張試験装置および測定系を Fig. 1 に示す。重さ 10 kg の円筒形状 (高さ 30 cm, 内径 8 cm, 外径 13 cm) の衝撃用錘②を電磁石①よ

† 原稿受理 昭和59年2月17日

* 正 会 員 室蘭工業大学 室蘭市水元町

** 室蘭工業大学 室蘭市水元町

り落下させることによって衝撃を行う。落下した衝撃錘は衝撃板⑦を衝撃し、それらが試料棒先端に取付けられたタップ⑨を介して試料棒⑤に衝撃引張りを加える。衝撃板とストップ⑨の間隔はバalsa材⑩で調整されている。なお、衝撃速度の変化は反射型フォト・センサーを用いて計測した。

衝撃引張りを受けた試験棒の各位置におけるひずみ波の時間的変動を塑性ひずみゲージ⑥（共和電業 KF C-5-C1）で検出し、ブリッジ回路、直流増幅器を経て、デジタルオシロスコープ（Nicolet 2090-1）に出力させ、写真撮影およびX-Yレコーダによって記録した。ひずみゲージは各試験棒につき2箇所に対称的に2枚ずつ接着されており2点同時測定を行った。さらに試験棒には所定の間隔で標点を打ち、残留ひずみ

Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

Fig. 2. Static stress-strain curve for copper. の測定も行ひずみ分布を求めた。

試料棒は市販の純銅丸棒（直径 5 mm）で、450℃で30分加熱後、炉中冷却焼なましを行った。Fig.2 は試料棒の熱処理後の静的応力-ひずみ関係である。

○印は実測値で、図中に示されている式は実験値を近似した塑性曲線を表し実線で示されている。また、Table I は試験棒の材料特性で数値計算に用いた。

Table I. Mechanical properties of specimen.

Young's modulus	$E=1.24 \times 10^4 \text{ kg/mm}$
Mass density	$\rho=9.0 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{s/mm}$
Bar velocity	$c_0=3.712 \times 10^6 \text{ mm/s}$
Yield strain	$\epsilon_y=0.022\%$
Yield stress	$\epsilon_y=2.728 \text{ kg/mm}$

(a) Strain distribution along copper specimen of 1m in length. Impact velocity 13.2 m/sec.

(b) Typical records of strain waves under impact velocity 13.2 m/sec.

Fig. 3. Example of experimental measurements.

2・2 実験結果

衝撃錘の高さを変えて衝撃初速度は 13.2 m/sec および 8.6 m/sec の2種類とした。また、衝撃持続時間を変えるため棒長 1mおよび 2mの2種類について実験を行った。前述のように、試験棒には衝撃板およびタップを介して衝撃引張りが加えられるため、衝撃板等の静止慣性の影響や試料棒の塑性変形による衝撃エネルギーの吸収等があり、衝撃速度の減速が考えられる。衝撃速度の測定の結果、衝撃終了時の速度には多

小ばらつきがあったが、衝撃初速度 $V_0=13.2$ m/sec の場合で、およそ $V_1=11\sim12$ m/sec の範囲であった。

Fig. 3 (a)(b)は長さ 1m の試験棒についての代表的な測定例である。(a)は 2 本の試験棒の残留ひずみ分布を同時に示したものであり、(b)は衝撃端からの各ゲージ位置におけるひずみ波の時間的変動である。衝撃錘を試験装置の最大高さ 8.95 m より落下させた場合で、衝撃初速度 13.2 m/sec、衝撃終了時速度は約 12 m/sec である。Fig. 4 は Fig. 3 (b)を X-Y レコード上でまとめたものである。

Fig. 5 (a)(b)は、長さ 2m の試験棒についての、それぞれ衝撃初速度 $V_0=13.2$ m/sec および 8.6 m/sec の場合のひずみ分布である。○は試験棒上の残留ひずみ、●は各ひずみゲージ位置で測定されたひずみ値をプロットしたものである。

Fig. 3~5 の実験結果において、衝撃端に近いほど

Fig. 4. Time history of strain waves at several positions.

(a) Impact velocity 13.2 m/sec.

(b) Impact velocity 8.6 m/sec.

Fig. 5. Strain distributions along 2m-specimen.

測定値にばらつきがあり、ひずみ値も大きくなっているが、衝撃端近傍ではひずみ値が単純に大きくなっているのか、振動的に分布するため測定値にばらつきがあるのかは本実験からは判断は困難であった。いずれにしても、衝撃端に近いほど大きなひずみとなり、ひずみプラトーの形成は認められなかった。

3 理論解析

3.1 ひずみ速度依存性塑性波動理論

材料のひずみ速度依存性を考慮した一次元塑性波動理論の基礎式は次式で与えられる。¹⁾²⁾⁴⁾

$$\left. \begin{aligned} \text{運動方程式} \quad \frac{\partial \sigma}{\partial x} &= \rho \frac{\partial v}{\partial t} \\ \text{適合方程式} \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= \frac{\partial v}{\partial x} \\ \text{構成方程式} \quad E \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma}{\partial t} + g(\sigma, \varepsilon) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 σ は公称応力、 ε は公称ひずみ、 $v = \partial u / \partial t$ は粒子速度、 ρ は密度、 E は縦弾性係数。なお、 σ 、 ε は引張りを正、 v は x の増す方向を正とする。また、 $g(\sigma, \varepsilon)$ は材料のひずみ速度依存性を表す関数で、便宜的に塑性ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_p$ に E を乗じたものである。⁶⁾

Malvern はこの関数が過剰応力 (over-stress) $\xi = \sigma - f(\varepsilon)$ に比例すると仮定した。

$$E \dot{\varepsilon}_p = g(\sigma, \varepsilon) = K \cdot \xi \quad (2)$$

ここで、 K はひずみ速度依存性を表す材料定数、 $f(\varepsilon)$ は静的応力-ひずみ関係である。なお、関数 $g(\sigma, \varepsilon)$ の選び方に関しては、若杉、後藤らによって詳しく検討されている。基礎式は双曲型の偏微分方程式を構成し、特性曲線法によって数値的に解が求められる。特性曲線法および計算方法に関しては前報の通りでここでは省略する。

3.2 衝撃速度変化の影響

棒の衝撃端 ($x=0$) における境界条件が、Fig. 6 の (1) および (2) の 2 種類の衝撃速度で与えられる場合を考える。どちらもランプ状立上り時間 t_0 を有し衝撃時間を t_1 、衝撃終了時間を t_2 とする。衝撃速度 (1) は衝撃持続時間 ($t_1 - t_0$) 中は一定速度 V_0 に保持され、(2) は直線的に V_1 まで減速すると仮定する。ここでは (1) の場合を一定速度衝撃と呼ぶことにする。なお、衝撃速度の立上り時間、衝撃持続時間および除荷のスロー

Fig. 6. Two kinds of impact velocity profile.

ブ等に関する波動への影響は林らによって報告されている。

数値計算においては, Fig. 2 および Table I の数値を用い, 初期条件を $\sigma = \varepsilon = v = 0$ とした. また, 衝撃速度の条件に関しては, 長さ 1m 試験棒の場合, $t_0 = 50 \mu\text{sec}$, $t_1 = 500 \mu\text{sec}$, $t_2 = 600 \mu\text{sec}$ とし, 2m 試験棒の場合には $t_0 = 50 \mu\text{sec}$, $t_1 = 1200 \mu\text{sec}$, $t_2 = 1300 \mu\text{sec}$ とした.

Fig. 7 (a)(b)は, 長さ 1m の試験棒に関して, $K = 10^6 \text{ sec}^{-1}$ および 10^7 sec^{-1} と仮定した場合の衝撃終了時 ($t_2 = 600 \mu\text{sec}$) におけるひずみ分布で, 衝撃速度変化の影響を示したものである. いずれも衝撃初速度は

(a) $K = 10^6 \text{ sec}^{-1}$

(b) $K = 10^7 \text{ sec}^{-1}$

Fig. 7. Theoretical strain distributions for copper specimens subjected to impact velocities of different profiles.

(a) Constant-velocity impact.

(b) Decreasing-velocity impact.

Fig. 8. Theoretical time histories of strain waves.

$V_0 = 13.2 \text{ m/sec}$ で, 実線は Fig. 6 の (1) に対応する一定速度衝撃の場合であり, 破線および一点鎖線は Fig. 6 の (2) に対応する衝撃速度が減少する場合で, それぞれ $V_1 = 10 \text{ m/sec}$ および 6.6 m/sec である.

衝撃速度の条件の違いにより衝撃端付近のひずみ分布に大きな差異が生じ, 一定速度衝撃の場合のみに衝撃端近傍にひずみプラトーが形成されることがわかる.

Fig. 8 (a)(b)は, 長さ 2m の試験棒に関して $K = 10^6 \text{ sec}^{-1}$ とした場合の各位置におけるひずみ波の時間的変動を示したものである. 衝撃初速度は $V_0 = 13.2 \text{ m/sec}$ で, Fig. 8 (a)は一定速度衝撃, Fig. 8 (b)は衝撃速度が減速する ($V_1 = 11 \text{ m/sec}$) 場合である. (a)の一定速度衝撃の場合は衝撃が終了する時間内に $x = 20 \text{ cm}$ の位置付近までひずみプラトー領域が広がるのに対し, (b)の衝撃速度が減速する場合には衝撃時間が長くなってもひずみプラトーが形成されないことがわかる.

以上の理論結果より衝撃速度の変化が塑性波動およびひずみ分布, 特にひずみプラトーの形成に大きく影響することがわかる.

4 実験結果と理論結果の比較

実験結果と衝撃速度の測定結果に基づいて得られた解析結果の比較を行う.

Fig. 9 は, Fig. 4 のひずみ波の時間的変動に対応す

Fig. 9. Theoretical time history of strain waves corresponding to experimental ones shown in Fig. 4.

Fig. 10. Comparison of the experimental and theoretical strain distributions in 1 m-specimen under impact velocity 13.2 m/sec.

Fig. 11. Comparison of the experimental and theoretical strain distributions in 2 m-specimen under impact velocity 13.2 m/sec.

る理論結果である。ただし、計算条件は $K=10^6 \text{sec}^{-1}$, $V_0=13.2 \text{ m/sec}$, $V_1=12 \text{ m/sec}$ 。両図を比較すれば、それらの傾向はよく一致しているが、衝撃端近傍で実験値がかなり大きくなっている。

Fig. 10 は、Fig. 3 (a) の長さ 1 m 試験棒のひずみ分布に関する実験結果と理論結果との比較である。実線が理論値で、 $K=10^6 \text{sec}^{-1}$ の仮定および衝撃速度 $V_0=13.2 \text{ m/sec}$, $V_1=12 \text{ m/sec}$ の条件より得られた結果である。破線で囲まれた帯状の部分は実験値の範囲で、理論曲線は実験値の範囲に入っている。

Fig. 11 は、Fig. 5 (a) の長さ 2 m 試験棒についての実験値と理論値の比較である。実線で示した理論曲線は $K=10^6 \text{sec}^{-1}$, $V_0=13.2 \text{ m/sec}$, $V_1=11 \text{ m/sec}$ の計算条件より得られた結果で、破線で囲まれた帯状部分は実験値の範囲である。

Fig. 10, 11 ともに、実験値はほぼ理論値に一致するが、前述のように衝撃端近傍については測定値の幅が大きく、一次元ひずみ速度依存性理論で実験結果をよく説明し得るかどうかは今後の検討課題と思われる。

衝撃端付近で測定値にばらつきが大きいことやひずみ値が大きくなる原因には、測定誤差以外に実験条件と理論モデルの相違、二次元的なラジアル・モーショ

ンの影響⁸⁾⁹⁾、構成方程式の相違等⁷⁾¹⁰⁾¹¹⁾が考えられる。

5 結 言

試作した落錘型衝撃試験装置を用いて純銅丸棒の衝撃引張実験を行い、試験棒上の残留ひずみおよび各位におけるひずみ波の時間的変動を測定した。また衝撃速度の変化を調べ、ひずみ速度依存性塑性波動理論に基づいて塑性波の伝ば挙動を解析し、実験結果との比較を行った。得られた結果を要約すれば次の通りである。

- (1) 実験結果は衝撃端に近い程ひずみが大きくなり、ひずみプラトーは認められなかった。
- (2) 衝撃速度は衝撃持続時間中に減速し、衝撃初速度 $V_0=13.2 \text{ m/sec}$ の場合で、 $V_1=11\sim 12 \text{ m/sec}$ まで減速した。
- (3) 上記の衝撃速度の条件下における理論解析の結果はほぼ実験結果に一致した。
- (4) 衝撃端近傍にひずみプラトーが形成されるのは一定速度衝撃の場合のみで、衝撃速度が減少する場合はひずみプラトーが形成されないことが理論的にも確認された。

なお、衝撃端近傍のひずみプラトーの出現には、著者が先に明らかにしたように材料のひずみ速度依存性の大きさ、衝撃速度および衝撃時間が関係するが、以上のように衝撃速度の変化も大きく影響する。したがって、ひずみプラトーの実験的検証には試料棒自身が一定速度をもつ試料棒の落下衝突方式が有利と考えられ、現在検討中である。

最後に、本研究に協力して頂いた山本哲夫君(東芝)、小野山肇君(北海道電力)に感謝の意を表する。

(昭和57年5月24日 日本材料学会第31期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 内藤正鄰, 台丸谷政志, 岸本 亘, 材料, **31**, 1068 (1982).
- 2) M. Daimaruya and M. Naitoh, J. Appl. Mech., **50**, 678 (1983).
- 3) Th. von Karman and P. Duwez, J. Appl. Phys., **21**, 987 (1950).
- 4) L. E. Malvern, J. Appl. Mech., **18**, 203 (1951).
- 5) P. E. Duwez and D. S. Clark, Proc. Am. Soc. Test. Materials, **47**, 502 (1947).
- 6) 若杉昇八, 後藤善弘, 材料, **28**, 517 (1979).
- 7) 林 卓夫, 他 3 名, 塑性と加工, **14**, 259 (1973).
- 8) G. P. DeVault, J. Mech. Phys. Solids, **13**, 55 (1965).
- 9) 西山卯二郎, 谷村真治, 日本機械学会論文集, **33**, 182 (1967).
- 10) 千田豊満, 日本機械学会論文集, **46**, 1143 (1980).
- 11) 谷村真治, 井垣 久, 材料, **29**, 31 (1980).