金属材料の爆発衝撃強度*

今井清一** 萩原 務**

Seiichi Imai and Tsutomu Hagiwara: Strength of Metals Under Explosive Loading.

In order to study the strength of metals under an explosive load, the measuring method with a newly devised apparatus was investigated. The results of the explosive tensile tests on 0.5% carbon steel and 6/4 brass specimens by the apparatus were discussed.

This tensile test apparatus is designed to impart a direct explosive power to a specimen through two pistons. The tensile acceleration was measured by a piezo-electric accelerometer, and the acceleration and stress measured by the load cell were simultaneously recorded by a dual beam synchroscope. From a numerical integration of the acceleration, the strain-rate and elongation were culculated.

The variations in stress, strain, strain-rate and elongation during the explosive tensile tests were examined with a static curve. The results are summarized as follows:

(1) Since the response to an acceleration measurement and its integration are more sensitive and accurate than that to a direct measurement of elongations, present method is considered to be suitable for analyzing the impact elongation of a specimen.

(2) The yield stress, maximum stress and elongation were larger than those obtained by the static test, the details of which were investigated by the stress-acceleration-time cuve and the dynamic stress-strain curve.

(Received May 6, 1964)

I. 緒 言

金属材料の高速衝撃の負荷による強度や、変形の動的特性と、静的試験によるそれらとの相違は、加工上、設計上重要な資料である。車両の軽量高速化、ロケットの製作などに関連して、それら構造材料の高速負荷に対する挙動について、より正確な資料が必要となり、近年これに関する実験研究が測定器の進歩と相まって、各国において急速に進められるようになった⁽¹⁾。

本研究は、各種構造材料、機械材料、装備材料の爆発衝撃の負荷に対する強靱性を評価し、設計上の基礎資料を得る目的で、新たに爆発衝撃引張試験に用いる装置を試作し、またその計測法を究明して、試験片が急速に弾塑性変形して破断に至る間に生ずる現象を検討しようとするものである。この種の実験研究では、衝撃負荷を得るには、重力による落錘式、バネ式、回転円板式、圧縮ガス式、火薬爆発式などが考えられて採用されている⁽²⁾。本実験においては、高速負荷として実用面を考慮して火薬の爆発力を用いた。装置については次節に述べるが、本報告では火薬を使用して行なう高速衝撃試験に適する計測法として加速度計を用いる研究について述べ、それによつて試験片に破断

応力以上の衝撃負荷が加わった時、破断に至る間の伸長加速度と応力-時間変化とを同時観測して、その測定値から試験片の衝撃時の応力-歪曲線を作成し、検討した結果について述べる。

II. 爆発衝撃引張試験装置の概要

本実験に使用した装置の外観を Photo.1 に示し、その構造図を Fig.1 に示してある。爆発室③内で、発火栓⑤

Photo.1 Explosive tensile test equipment.

により火薬①が着火され、生じた爆発力は、2本のピストンロッド⑥および試験片保持機⑩に伝わる。試験⑦は、他端がロードセル⑧に固定され、この爆発衝撃力により急速に前方に伸長し破断する。破断した試験片の一部と、保持機ピストンは一体となつて前方に飛び出し設置された砂中に制動され停止する。飛しよう部の全重量は2.3 kgでランチャーと前方の砂との距離は約1 mである。試験片保持機はその先端に加速度計が設置されていて、そのコードを着けたまま爆発に伴つて急速に移動する。この加速度の

** 防衛庁技術研究本部第1研究所 (1st Institute of Research & Development Head Quator, J. Defence Agency, Tokyo)

* 1963年4月、10月本会東京、名古屋大会に関連発表
(1) N. Davids: Symposium on Stress wave Propagation in Materials Interscience publishers, (1960), N. Y.; P. Shewmon & V. Zackay: Response of Metals to high velocity deformation Interscience Publishers, (1960), N. Y.
(2) 河田, 福井, 清野: 応用物理, 32 (1963); 744.

測定と同時に試験片の応力をロードセルで検知し二つの出力を二要素シンクロスコープ上に同時記録する。本実験で

Fig. 1 Structural diagram of equipment

- ① Base plate ② Explosive chamber wall ③ Explosive chamber ④ Explosive chamber cover ⑤ Explosive igniter ⑥ Piston rod ⑦ Specimen ⑧ Load cell ⑨ Launcher ⑩ Flying head (Specimen holder) ⑪ Explosive

は加速度計を2個設置して二つの出力記録を比較し、次節に述べる較正とともに爆発に伴う高衝撃による加速度計の感度に変化のない事を確認する一方法とした。使用した動歪測定装置はテクトロ社製で、測定周波数域 DC~6 KC 立上り時間 $60 \mu\text{S}$ 、シンクロスコープは岩崎通信機製 (昭和 38.6) で、周波数特性 DC~15 MC のものを使用した。

III. 計測要素について

1. 加速度計

試験片保持機の前面に水平方向に加速度計を設置して軸方向の伸びの加速度を測定した。保持機はランチャーによって正確に伸び方向に直線的に移動するように作製されており、すり合せは完全にしているので、上下左右のふれはない。また2本のピストンによって、回転運動は起らないので、保持機先頭の軸方向の加速度の変化がそのまま計測されるものと考えられる。加速度計は、チタン酸ジルコニウム鉛を圧電素子とした振動式加速度計で全重量 27 g、高さ 1.8 cm、直径 1.4 cm の円筒形で、下部はネジとなっていて、直接保持機に固定される。その出力は必要に応じて 10 KC 以上をカットする濾波器を使用した。

この加速度計について、Fig. 2 に示される等価回路が考えられる。圧電素子の電気容量を C_0 、導線の分布容量を C_1 、前置装置の入力抵抗を R とすれば、この加速度計に加速度 α が与えられた場合電圧変化の関係は次式で与えら

れる⁽³⁾。

R を流れる電流を i とすれば

Fig. 2 Equivalent circuit of piezoelectric accelerometer.

$$E = iR = \frac{Q - \int i dt}{C} \quad C = C_0 + C_1 \quad (1)$$

$$Q = \bar{d}M\alpha$$

Q は電気量、 M は加速度計内の重錘の重量、 $\bar{d}$ は圧電常数である。

(1) 式より i を消去すれば

$$dE/dt + E/CR = 1/C \cdot dQ/dt = \bar{d}M/C \cdot d\alpha/dt \quad (2)$$

ここで、 R が充分大であれば、左辺の第2項は省略されて $dE/dt \approx \bar{d}M/C \cdot d\alpha/dt$ 、したがって $E \approx \bar{d}M/C \cdot \alpha$ となり E は α に比例することが知られる。本装置では $C = 800 \sim 1000 \mu\text{F}$ で $R = 100 \text{ M}\Omega$ にとっており、測定対象 0.2 KC の現象は、充分正確に加速度を測定できるものと考えられる。また振動測定の上から考えれば、加速度計の重錘圧電素子および試験片保持機は一種の水平動振子を形成し、減加速度の力は、圧電素子の弾性により与えられるので、この加速度計が完全に保持機の加速度を測定するためには、この形成された振子の振動数は、測定される爆発衝撃の振動数に比しきわめて高くなければならない。本実験に使用した加速度計の計算上の振動数は $4.7 \times 10^5/\text{sec}$ で、 10^2 の振動周期の測定には、機械的にも理想的加速度計となる。しかし実際には保持機自身の固有周期が影響して $5 \times 10^4/\text{sec}$ 程度となるが、それでも充分よい性能を有する。加速度計により得られた写真記録を、コンパレータで精読 (10^{-2}mm) し積分して、保持機頭部の速度すなわち試験片の歪速度を得、2回積分を行なつて変位すなわち歪量を決定した。

2. 加速度計の較正

較正に当つて加速度計自体の特性も重要であるが、シンクロスコープなどの附属装置を含めた測定系としての特性を求めることが必要であると考え、実験に使用する計測装置をそのまま較正実験し、実験期間中も数回較正実験を行なつてその直線性および爆発による高衝撃で特性に変化のないことを確めた。本実験では $10^2 \sim 10^3 \text{ g}$ (重力加速度) の高衝撃が予想されるが、この値を包含するような較正装置を作製することは困難であるから、それより低い加速度の

砂止め式落下衝撃試験機によつて校正し⁽⁴⁾、その値を適用することとした。すなわち落下台に加速度計を設置して落

120×10×0.4 mm のバネ板を片持梁とし試験片保持機が爆発により前方に移動する際その一部が片持梁先端にふ

Table 1 Chemical composition and heat treatment of specimens.

	Chemical composition (%)					Heat-treatment
Specimen (1) Steel	C	Si	Mn	P	S	850°C, 30 min, air cooling
	0.54	0.29	0.80	0.027	0.027	
Specimen (2) Brass	Cu	Pb	Fe	Sn	Zn	450°C, 30 min, air cooling
	59.72	2.02	0.25	0.36	bal

Fig. 3 Dimension of test piece.

下させ衝撃波形を記録し、自由落下の関係式より感度常数を決定した。

3. 片持梁による変位の測定およびロードセル

れ撓みを与えるようにし、それが先端の変位に比例することから予め撓み量-変位曲線を静的に測定しておき、その曲線を使用して撓み量より直接伸びを決定出来る。この装置で予備爆発実験を行ない、加速度と片持梁の歪を同時記録し、2回積分して求めた変位値と、直接観測される歪値による伸び量を比較した。それによれば (1) 試験片の伸び開始の状況観察には加速度測定の方が感度が高い。(2) 伸びを急速に増大し始める部分で両者の差が大となるが、これは片持梁が飛しよう部保持器と接触する点の不安定な移動に原因すると考えられる。(3) 伸び値 1.5 mm より以後は両者の値は比較的良好に一致する。などのことが判つた。

Photo. 2 Explosive stress and acceleration time records.

(I) Stress (II) Acceleration

(a) Specimen (1) .0.54% Carbon steel (b) Specimen (2) . 6/4 Brass

(4) C. Harris & C. Crede: Shock and Vibration Hand Book, (1961), 18-29 McGraw-Hill N. Y.

これらの理由から伸びの測定には本実験の場合片持梁より加速度記録を使用する方がよいと考え、以下の測定では、

伸び測定は加速度曲線の積分によることとした。

試験片の一端を Fig.1 ⑧に示されるロードセルで保持し

を確認した。

IV. 実験結果と考察

1. 供試材料

本実験に使用した試料は中炭素鋼および黄銅でその化学組成と熱処理について Table 1 に示し、試験片の寸法を Fig.3 に示す。

2. 加速度応力の同時観測

SS 火薬を用いて行なつた実験記録を Photo.2(a)(b)に示し、これを図化したものを Fig.4(a)(b)に示した。炭素鋼についてつぎのことが観察される、すなわち応力時間変化を見ると上降伏点および下降伏点が観察される。加速度は上降伏点と同時に急速に増加し、加工硬化開始点付近で極大となりそれより急速に減少する。この場合応力最高時にその値は負となり、保持器の慣性が爆発力に加わり試験片は伸長する。速度は下降伏部中央より急速に増大し応力最高部で減少し始める。伸びは下降伏部の末端時より急速に増大して破断に至る。黄銅についてはつぎのことが観察される。すなわち応力-時間変化を見ると、弾性域と塑性域と思われる中間に一つの折曲点が現われ、図示のごとくⅠ，Ⅱ，Ⅲの3段階に分れて最高応力に達する。加速度は炭素

Fig.4 Explosive acceleration and its integrations, stress-time curve.

爆発による応力を測定した^{(5)~(7)}。ロードセルはCr-Mo鋼製で静的引張り試験に使用して感度を校正するとともにその結果から軸方向の力に対し充分直線の感度であること

(5) 作井, 中村, 布村: 鉄と鋼, 47 (1961), 802.

(6) 山下, 田中, 岸本: 応用物理, 32 (1963), 751.

(7) D.Clark & P.Duwez: J.App.Mech., 15 (1948), 243.

Fig.5 Explosive and static stress-strain diagram.

鋼の場合より上昇の勾配はややゆるやかではあるが、弾性域と思われる第1段階の終りより急速に増大し、第3段階

の中央で最高となり次第に減少する。速度は第Ⅱ段階の中央より、伸びは第Ⅲ段階の始めより急速に増大して破断に至る。加速度の増減については応力の他に爆発力の大きさに依存すると考えられるのでこの点について行なつた実験の結果は続報に述べる予定である。

3. 爆発衝撃時の応力-歪曲線の作成

Fig. 4 の同一時刻における応力を縦軸に変位すなわち歪を横軸にとり図化すれば衝撃時の応力-歪曲線が作成できる。結果を Fig. 5(a) (b) に示す。この試験片の静的特性を知るためオルゼン式万能試験機を使用し、荷重の測定は爆発実験に使用したロードセルおよび測定器により伸びは差動型伸長計によつて測定するとともに試験機に附属した自記々録を参考として応力-歪の測定を行なつた。引張り所要時間は約 50 sec でこの実験におけるロードセルの出力記録を Photo. 3 (a) (b) に示す。静的衝撃両試験ともに標

Photo. 3 Static tensile test records.
(a) Specimen (1). (b) Specimen (2).

点距離は平行部の長さ 30 mm とした。静的試験の結果は Fig. 5(a) (b) に併示してある。

Fig. 5 (a) 炭素鋼では動的曲線は爆発負荷により静的曲線より降伏強度、最高応力、伸びを増大している状況が明らかである。同図 (b) 黄銅についても同様な傾向にあるが、耐力、最高応力の増加は炭素鋼に比べて少ない。これらの結果を Table 2 に示す。Photo. 4 に試験片破断部の状況を示す。

V. 結 言

本研究は金属材料に急速に破壊応力以上の負荷の加わつ

Table 2 Results of tensile test by static and explosive method.

Specimen		Steel	Brass
Weight of ss powder (g)		6.25	5
Yield strength (kg/mm²)	Static	47 (Upper) 46 (Lower)	24 (abt. 0.2% El.)
	Explosive	63 (Upper) 58 (Lower)	27 (abt. 0.3% El.)
Maximum strength (kg/mm²)	Static	78	38
	Explosive	84	45
Elongation (%)	Static	13.7	24.3
	Explosive I* " II	19.3 19.4	35.0 35.1
Reduction in area (%)	Static	41.2	43.8
	Explosive	46.2	60.1
Ultimate strain rate S ⁻¹		70	140

* (I) Obtained by measuring the length of ruptured test pieces.

(II) Obtained by integrating acceleration-time curves.

Photo. 4 Ruptured specimens.
(a) Specimen (1), 0.54% Carbon steel
(b) Specimen (2), 6/4 Brass

た場合の材料の挙動を解明するため、実験装置計測法を研究し、中炭素鋼ならびに黄銅を試験片として行なつた実験結果を要約すればつぎのとおりである。

(1) 爆発衝撃時の試験片先端の伸長加速度を測定することはその変化の状況がよくわかり、またその積分値は直接伸びを測定することより高い精度で伸長測定が出来、応力との同時観測により爆発時の応力-歪曲線を作成出来る。

(2) 試験片は衝撃試験の結果静的試験に比し降伏応力、

耐力、最大応力、伸びを増加したが、その詳細を応力・加速度・時間曲線および応力-歪曲線により検討出来た。

本研究は工学博士中城忠彦部長の御指導により行なわれたものであります。終始御懇切な御指導を賜つた電気通信大学田中 栄教授、東海大学内田祐祐教授、東北大学金研田中英八郎教授、和泉 修助教授ならびに金属第2研究室長相田貞蔵博士に深甚なる謝意を表します。また金材技研上田輝之氏第5部計算室に厚く御礼申し上げます。