

# モルタル棒中を伝播する応力波とそれによる 破壊について

工 藤 洋 三\*・中 川 浩 二\*

Stress wave propagation and fracture of cement mortar bar

Yōzō KUDŌ and Kōji NAKAGAWA

## Abstract

This paper concerns the longitudinal wave propagation in cement mortar bar and its fracture. In the study, the Hopkinson's bar technique was employed. Impact loading at one end of the cement mortar bar was given by using the air gun. The stress wave picked up by the wire strain gage was recorded on the synchroscope.

At first the propagation and reflection of stress wave in the cement mortar bar without fracture was studied. Then, the speed of projectile from the air gun was increased in order to produce the fracture. Specimens of four cases of cross areas were used.

The mechanism of stress wave propagation and fracture of cement mortar bar were made clear. These are the relations between the speed of the projectile and the stress level, fracture point of the bar.

## 1. はじめに

近年の産業の発達にともない、土木工学の分野においても構造物はますます巨大化、複雑化し、同時にそれらが受ける条件もますます苛酷なものとなりつつある。それにともない、電子計算機の発達とともに有限要素法等をはじめとする構造解析法が近年著しい発展をとげ、今日では精度、経済性の問題こそあれ、ほとんどあらゆる構造物の解析が可能となってきたとも言えるほどである。

一方これらの構造物に用いられる構造材料については、必ずしもその物性研究が構造解析法の発達ほどには十分でないようである。とくに土木構造物に不可欠の材料であるコンクリート等岩質材料は、その内部構造の複雑さや同じ材料が2度作り得ないという制約もあって、材料の力学的挙動の不明確さはいまだ多くの点で未解決といえよう。とはいえ、コンクリートの力学的挙動に関する研究は古くから多くの研究者によって多数の優れた研究がなされてきており、準静的挙動および持続、繰り返し荷重下における挙動については、

今日しかるべき設計法に利用されるだけのものが得られ実際の用に供されてきている。特に静的問題についてはこのために標準的な試験法も定められている。しかしこれらと比較してコンクリートの動的挙動に関する標準的な試験法はみられず、また動的挙動に関する研究そのものもあまり多くみられないのが現状である。

土木あるいはそれに関連した構造物が衝撃的な荷重を受ける例は数多く考えられる。老朽構造物を発破を用いて効率よくしかも周囲への影響を小さく解体する方法や、建築物のガス爆発の問題、あるいは化学装置構造物の爆発事故等の問題に対する防災面からの問題の解決は今日の緊急課題といえる。また重要構造物への運動物体の衝突といった問題も重要といえよう。

これらの状況を考えるとき、応力波を受けるコンクリート等岩質材料の挙動を明らかにすることは非常に意味のあることと考えられる。そこで本研究では、この問題に関する基礎的資料を得ることを目的とし、縦衝撃を受けるモルタル棒中を伝播する応力波の性質とそれにとまなうモルタル棒の破壊を検討した。すなわち、弾道的に支持されたモルタル丸棒の一端に空気銃から発射される銃弾により圧縮衝撃荷重を加え、伝播する応力波をモルタル棒の表面に貼られた電気抵抗線

\* 土木工学科

ひずみゲージにより測定した。さらに供試体が反射波によって切断される位置とそれともなう応力波の変化を観測し、応力波の伝播状況をはじめとするモルタル棒の動的特性について検討した。

## 2. 従来の研究

### 2.1. 理論的研究<sup>1)</sup>

有限長さの棒中を伝わる縦波の伝播問題の厳密解は現在まで得られていない。これは側面の境界条件と端面の境界条件を同時に満足する解析的な解を得ることが困難なためである。

Pochhammer (1876) は無限長さの丸棒中を伝播する調和波を考え、振動数方程式を解くことによって三次元厳密解が得られるとした。Pochhammer の振動数方程式は、その後 Field (1931), Bancroft (1941), Czerlinsky (1942), Mindlin (1946), Davies (1948) らによって解かれ、無限長さの丸棒を伝播する縦波の性格が明らかにされた。ポアソン比が0.29の場合について得られた結果を Fig. 1 に示す<sup>1)</sup>。ここに  $C_p$ ,  $C_0$ ,  $a$ ,

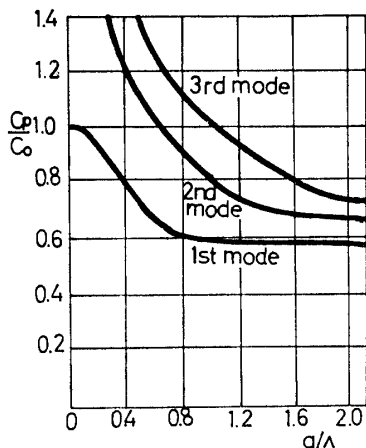


Fig. 1 Dispersion diagram of longitudinal motion for a circular elastic bar for Poisson's ratio 0.29<sup>1)</sup>

$\lambda$  はそれぞれ縦波の速度、初等解による縦波の速度、断面の半径および伝達波の波長である。これによれば、棒断面の径が波長に比べて小さい場合は初等解で近似できるが、同程度かそれ以上になれば縦波の伝播速度は初等解によって得られるものよりかなり小さくなることが示されている。したがって、多くの周波数成分を含む一般的な応力波が棒中を伝わる場合には、それぞれの成分で波速が変わるため分散現象を生ずることになる。

### 2.2. 実験的研究

固体内を伝わる応力波についての実験的研究が行われるようになったのは比較的新しく、J. Hopkinson (1872) が落錘による衝撃を鋼線に加えて応力波による強度測定を行なったのが一般には最初であるとされている。B. Hopkinson (1914) は弾道的に支持された金属丸棒の軸方向に圧縮衝撃を加える実験装置いわゆる Hopkinson bar を考案し、圧力-時間関係を明らかにした<sup>5)</sup>。

R. M. Davies (1949) は Hopkinson bar を電気的方法で計測し、自由端における変位の連続的な観測を行なった。その後、エレクトロニクス計測機器の発達とひずみゲージの開発によりこの分野における研究も飛躍的に進んでいる。

縦衝撃を受ける岩質材料の動的挙動については Goldsmith らの研究<sup>2), 3)</sup> がある。彼らは、玄武岩、閃緑岩などの火成岩やセメントペースト、コンクリートの丸棒にひずみゲージをとりつけ、空気銃によって縦衝撃を加えることにより、その動的挙動を研究している。また、日野は入力方法として爆薬を用い、種々の岩石、コンクリートの応力波による破壊を検討している<sup>4)</sup>。

## 3. 供試体、実験装置および実験方法

無限長さの丸棒の解を有限長さの丸棒に適用する場合応力波の伝播は両端面の影響を受けることになるが、多くの実験により棒の長さ比べて断面の径が小さい場合は、打撃端付近を除いて適用可能だとされている<sup>1)</sup>。

Pochhammer の振動数方程式の解による分散効果を考慮すると初等解との差を1%にとどめる  $a/\lambda$  の限界値は0.1程度である。ここで応力波の支配的な周波数成分が入射波の継続時間にほぼ等しいと考えて上述の  $a/\lambda$  の限界値を与える  $a$  の値を求めた。本実験で測定される最小継続時間  $50 \mu\text{sec}$ 、波速  $4,400 \text{ m/sec}$  を用いると  $a$  の値は  $2.2 \text{ cm}$  となる。実験で使用する断面の最大半径は  $1.25 \text{ cm}$  であるから、実験による誤差などを考慮すれば、初等解で十分満足されると考えられる。

### 3.1 供試体

供試体の製作ならびに試験のための準備は次のとおりである。

- 1) 型枠は塩化ビニル円管を長さ方向に切断し、さらに元の形に組み立てたものである。型枠寸法は内

- 径が13, 16, 20, 25mmの4種類(以下それぞれ Case 1, Case 2, Case 3, Case 4 とする)を用い長さは全て約60cmとする。
- 2) 材料には普通ポルトランドセメントと豊浦標準砂を用い、配合は重量比で水:セメント:砂=1:2:4である。練り混ぜは手練りを行ない、打設は振動台上で加振しながら上部より少量ずつモルタル注入を行なう。
  - 3) 約20°Cの室内で6日間保存した後脱型し、さらに約20°Cの水中にて20日間養生する。
  - 4) 試験日前日に供試体を水中から取り出し、コンクリートカッターを用いて50cmの長さとなるように両端を切断整形する。
  - 5) 1日間空気中養生の後、所定の位置に長さ5mmの電気抵抗線ひずみゲージ(以下ひずみゲージ)を貼りつけ試験に供した。なお、試験時材令は28日である。

### 3.2 実験装置および方法

#### 1) 静的材料定数の測定

モルタル棒と同配合で直径50mm、高さ100mmの円柱供試体の圧縮および割裂試験を行なった。試験機は島津製作所製万能試験機を用いた。圧縮および割裂試験ともに供試体は3個ずつとし、圧縮試験時にはひずみゲージを用いて静弾性係数およびポアソン比を計測した。これらの値は0.5t~3.0tの間の値として求めた。数値はすべて平均値を採用した。

#### 2) Hopkinson bar

Hopkinson bar 実験装置の模式図を Fig. 2 に示す。実験におけるシンクロスコープ掃引用およびフラッシュ発光用のトリガー回路は次の通りである。すなわち、

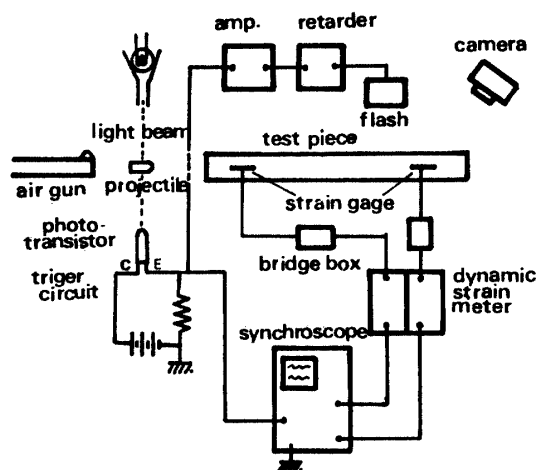


Fig. 2 Experimental arrangement used for investigating the longitudinal impact on a rod

供試体衝撃端のわずか前方に弾丸の飛行経路を横切って光源とフォトトランジスタを設置する。弾丸がフォトトランジスタ直前を横切りモルタル棒の衝撃端に到達する際に光源からの光線をさえぎることによる光量の変化を電流変化としてとり出してトリガーとしている。なお、フラッシュ発光に際しては発光時間が約1μsecである。上記回路からの信号を増幅し、リターダーで3~5msec遅延してトリガーとした。

測定に使用した動歪測定器は、Shinco 4007-F型でDC~50kHzの範囲内で±1dBで測定可能である。ポンプ銃はシャープ製ポンプ式空気銃(5.5mm用)で、ポンプの圧縮回数により Table 1 に示すような平均的弾丸速度の変化を得ることが可能である。なお、弾丸

Table 1 Velocity of a projective due to the compression times of pump

compression times of pump	velocity (m/sec)
1	86
2	118
3	138
4	147
5	162

の速度測定には2対のフォトトランジスタと光線を用い、弾丸がこの間を通過する時間をシンクロスコープにより測定した。その他の機器は下に示す通りである。  
 シンクロスコープ 岩崎通信社製 S S -6050型  
 リターダー 管原研究所製 リターダー R F -103 G  
 フラッシュ 管原研究所製 マイクロフラッシュ MF -502- u 1

実験に際して供試体は糸で両端5cmのところをつり下げて行なっている。

### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 材料定数の測定

圧縮強度および引張強度試験によって得られた静的な材料定数を Table 2 に示す。また後述するようにして得られたひずみ波形から波速および動弾性定数を求めた。すなわち1mの棒内を応力波が往復するに要する時間から波速を求め、さらにこれを  $\sqrt{E_D/\rho}$  とおいて動弾性定数を求める。ここに  $E_D$  および  $\rho$  はそれぞれ動弾性定数、密度である。供試体3コについて測定しその平均値をとると、波速4,430m/sec、動弾性定数

457,000 kg/cm<sup>2</sup> となる。この値は静弾性定数と比べてかなり大きくなっている。

Table 2 Material constants of cement Mortar

Static Young's modulus	353,000 kg/cm <sup>2</sup>
Poisson's ratio	0.23
density	2.18 g/cm <sup>3</sup>
compressive strength	570 kg/cm <sup>2</sup>
tensile strength	36 kg/cm <sup>2</sup>

4.2 Hopkinson bar

4.2.1 非破壊時の応力波の伝播について

供試体が破壊しない場合の一般的な応力波の伝播を Fig. 3 に示す。図中 A では衝撃端からの圧縮波が、B では自由端で反射した引張波が到達しており、以下 C、D と同様の変化を繰り返す。入射波の背面には高周波の変動が続いているが、これは断面の横方向の振動によるものと思われる。この高周波成分は波動の伝播に伴って急速に消滅しているのがみられ、パルス前面の立上りの勾配もゆるやかになっている。これはモルタル中を伝播する応力波の減衰が高周波成分に対して特に著しいためであると考えられよう。

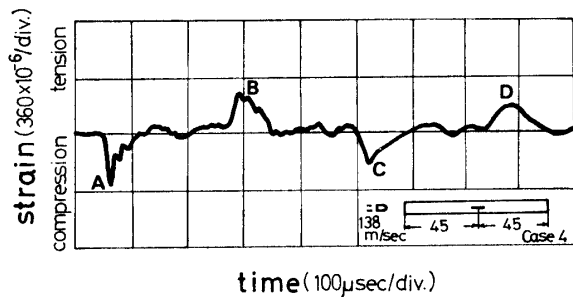


Fig. 3 Stress wave propagation in the specimen without failure

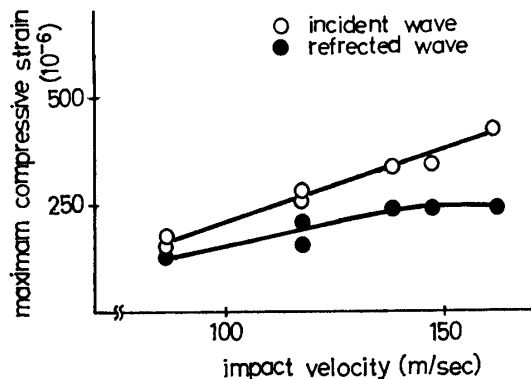


Fig. 4 Maximum compressive strains of incident and reflected waves with the various impact velocities

Fig. 4 に衝撃速度に対する入射波と反射波の最大振幅の比較を示す。これによると、入射波の振幅は弾丸の速度の増加に対してほぼ線形に増加していくのが認められる。また反射波については弾丸速度の増大とともに入射波に対する振幅が小さくなっているのがみられる。これは入射波の測定点から反射波の測定点に致るまでの伝播過程において減衰が生じ、その減衰が大振幅に対するものほど大きいためであると解釈されよう。

5.2.2 断面積の異なる供試体への入射波形

Fig. 5 に衝撃速度の変化による各 Case の入射波形を示す。断面が小さく、かつ衝撃速度が大きくなるにしたがってパルス背面における高周波成分が不明瞭になっている。これは増幅器が入射波に対して断面の寸

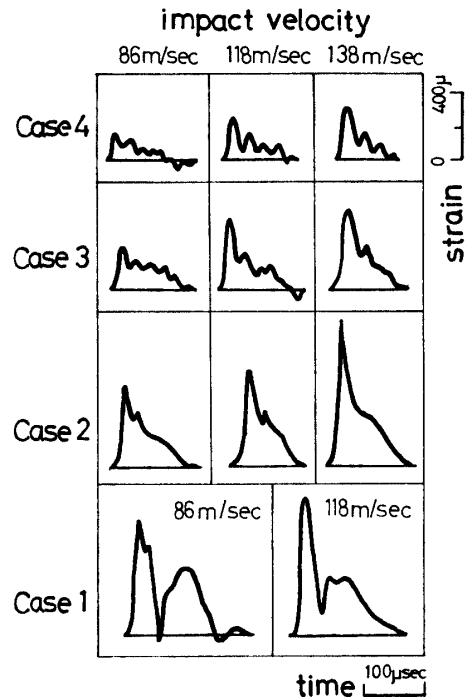


Fig. 5 Sketches of typical strain-time curves with various impact velocities and cross sections

法に関連した周波数を遮断するローパスフィルターの役割をするのではないかとと思われるが、衝撃端におけるクラックの影響なども考えられさらに細かい検討が必要である。

一般にクラックの伝播速度は慣性効果などにより応力波の伝播速度より小さいとされており<sup>5)</sup>、このことは、Fig. 6 に示す衝撃速度と最大圧縮ひずみの関係が線形に近いことから推測できる。Goldsmith らは弾丸の速度を増加させても供試体打撃端近くの破壊が生じるため、必ずしも入射波の振幅は増加せず、打撃端

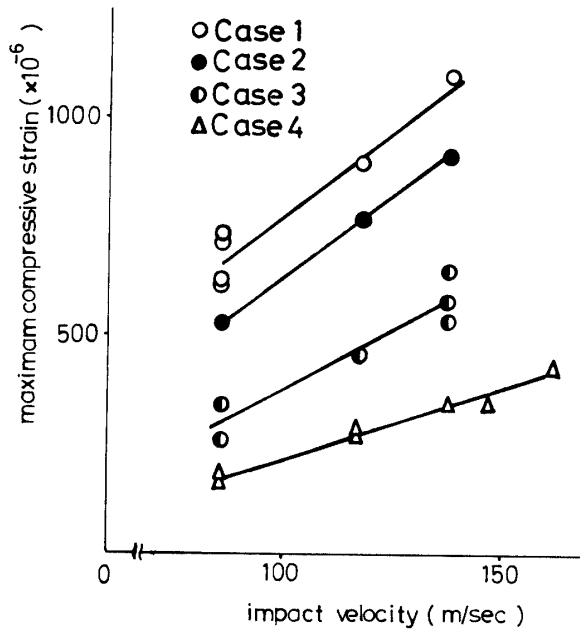


Fig. 6 The relation between maximum compressive strain and impact velocities with various cross sections

にキャップをつけることにより改善されると述べている<sup>3)</sup>が、本研究の範囲ではそのような傾向は現われていない。

4.3. モルタル丸棒の破壊

弾丸がトリガー回路のフォトランジスタ直前を通過してから5 msec 後の供試体の状況を Photo. 1 に示

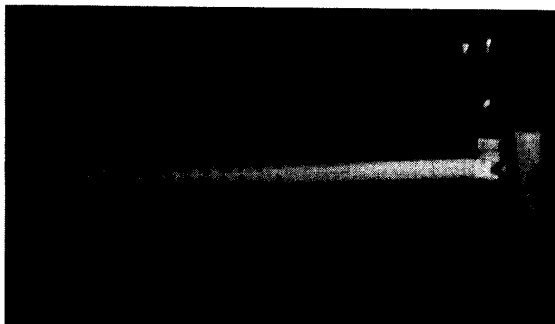


Photo. 1 General view just after the impact of a cement motor rod

す。自由端における反射のため引張波となった応力波のため、供試体が切断される状況が容易に認められる。

供試体が引張波により切断される場合の典型的なひずみの変化を Fig. 7 に示す。ここでは自由端より 9.8 cm および 10.7 cm の 2ヶ所で破断が生じている。このような破断が生じた瞬間にはいうまでもなく、破断に必要なまでのひずみ状態が破断点に生じていたとい

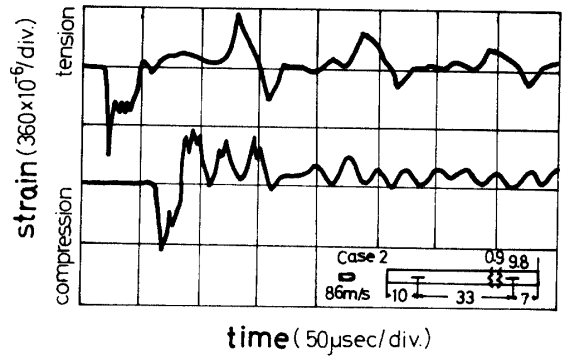


Fig. 7 Stresswaves in fractured specimen

うことである。換言すれば、引張波の一部は破断の瞬間に破断面に達していなかった部分は破断面で反射され、自由端を含む側に存在することになる。その結果それぞれの波は分離された供試体のそれぞれの部分で振動を繰り返す。この状態における両者の周期をみれば、それぞれの供試体長さに比例することが認められるであろう。また Fig. 8 にみられるような波形も観測された。Case 2 について破断後の供試体を Photo. 2 に示す。

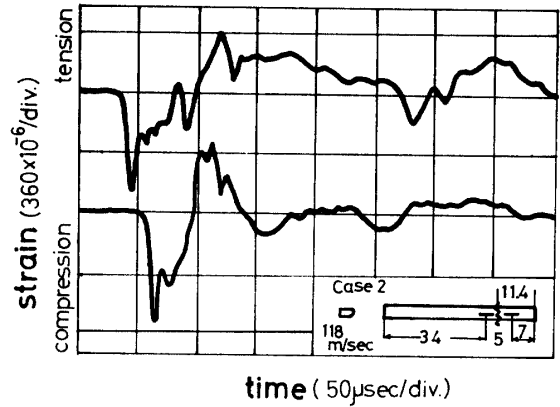


Fig. 8 Stresswaves in fractured specimen

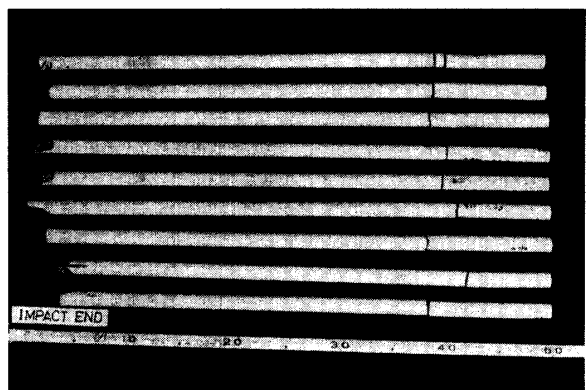


Photo. 2 Fractured Specimens

供試体の破壊は入射波と反射波の重ね合せの結果としての応力波の引張成分が材料の最大引張応力を越えることによって生じると考えられる。いま Table 3 に示されたように入射波の平均長さ30 cm (約70 μsec)、立ち上り長さ3.5 cm (約8 μsec) とし減衰などはないと仮定すると、自由端より約13 cm のところで最大引張が生じることになる。得られた結果は少なくとも Case 1 および Case 2 についてはこの状況をよく説明している。また Case 3 については破断位置がこの範囲から外れているものもみられるが、これは Case 3 の場合最大引張応力が必ずしも供試体の破断に十分でなく、自由端からある程度離れた位置であってもまた断面中に弱い位置があるとそこで破断する可能性があるためと解釈される。

また多くの供試体は衝撃端において Photo. 3 にみられるような破壊を生じている。これは衝撃端において弾丸の衝撃は集中荷重となるためこのような形の破壊が生じるものである。

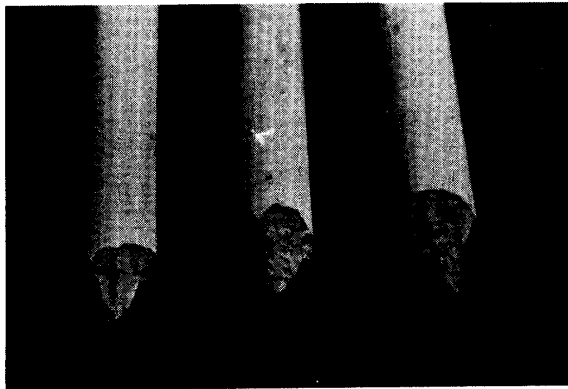


Photo. 3 Typical view of impact ends

さらにあらかじめ破断を生じるであろうと思われる位置に見当をつけ、その前後にひずみゲージをはり、得られるひずみ値から破壊時のひずみの状況を検討してみた。Fig. 9 にこうして得られた最大ひずみと衝撃速度との関係を示す。この図より破断面を通過する

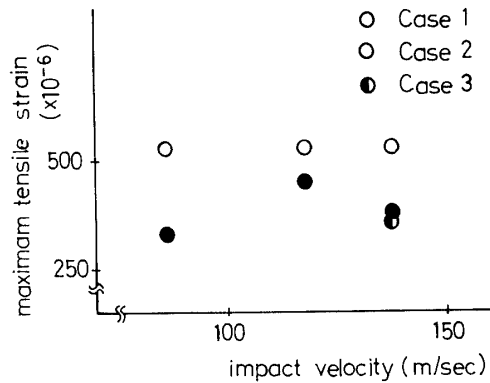


Fig. 9 Maximum tensile strains just after the fractured plane with various impact velocities and cross sections

引張ひずみは衝撃速度には関係しないと考えられる。また断面の半径により引張ひずみに一定の傾向があるようにも考えられるがこの点については検討の余地があろう。

5. 結 言

以上のような実験的研究により応力波を受けるモルタル棒の挙動がかなり明らかになった。その主たるものを列記するとつぎの通りである。

- 1) モルタル棒中を伝播する応力波の高周波成分は急速に減衰するが、その他の成分については顕著な分散、減衰は示さないと考えられる。
- 2) 他の動的な問題と同様にモルタル棒の動弾性係数も静弾性係数より大きな値になる。
- 3) 縦衝撃によるモルタル棒への入射波と棒の破断する位置の間に一定の関係が得られた。
- 4) 本実験では、打撃端におけるクラックの生成の有無にかかわらず衝撃速度と衝撃による最大圧縮ひずみとの間に線形の関係が得られた。

Table 3 Pulse duration, rising time and fracture point with various cross sections of a bar

case	pulse duration (μsec)	pulse length (cm)	rising time (μsec)	fracture point (cm)
1	60~80	30~35	7~9	7.8~12.6
2	60~70	25~35	7~9	5.4~11.8
3	50~80	25~40	7~9	9.1~16.3
4	50~70	25~30	7~9	

**References**

- 1) H. Kolsky; "Stress Waves in Solids", Dover Publishers, N.Y., (1964), pp. 54-95.
- 2) W. Goldsmith, M. Polivka and T. Yang; Exp. Mech. **23**, pp. 65-79.
- 3) W. Goldsmith, V.H. Kenner and T.E. Ricketts; ASCE, ST 7, (1968), pp. 1803-1827.
- 4) K. Hino; "Theory and Practice of Blasting", Nippon Kayaku Co. Ltd., (1959), pp. 11-60.
- 5) H. Kolsky and D. Rader; in "Fracture II"; H. Liebowitz (Ed.), Academic Press, (1968), pp. 533-569.

(昭和 51 年 4 月 15 日 受理)