岩石発破の研究（第3報）

爆発による固体内歪波の伝播並に衝撃破壊に関する研究*

（昭和31年12月6日　受理）

旭化成工業（株）延岡工場　大川禎三・平山正夫
熊本大学工学部　清田堅吉

要　旨

岩石爆破の基礎実験として，セメントモルタルで一次元，二次元，三次元の大型ブロックを作製し，その打込みの際，電気抵抗線歪計を数個所に埋没して，内部に伝わる歪波を陰極線オッシロスコープ上に増巾出現せしめて写真撮影し，これらの測定結果より衝撃破壊の機構を考察した。この結果を次の内容に分けて記述した。

1. 緒　言
2. 供試体
3. 歪波の測定法
4. ゲージの高周波追随性に関する考察
5. 歪波の伝播並に考察
6. 衝撃破壊機構の考察
7. 岩石爆破計算の一例
8. 総　括

1 緒　言

固体内の爆破による歪の伝播とそれによる破壊は弾性学上古い問題であり，爆破工学や地震探査等における重要な基礎をなすものでありながら現象が複雑なため未だに不明の点が多い。

最近 Rinehart 等[1] が延性金属等の小型試験片に対して爆薬による破壊実験を行つているが，三次元の問題に対して定量的な結論を得るには程遠いものであつて，爆薬を用いて岩石その他の脆性物体を破壊する爆破計画実施上役立つような基礎資料は理論的にも実験的にも未だ不充分であり，殊に，伝播する内部応力を直接測定して破壊機構を考察した爆破実験は殆んどない[2]。

著者等は主として鉱山における岩石の爆破採掘に関する基礎研究として，爆源附近の岩石内部における歪波の形と伝播，減衰及び自由面における反射を調べてその破壊と関連づけるために，爆破供試体としてセメントモルタルの大型ブロックを製作して天然の岩石における不測の欠陥による影響を避け，その打込みの際，電気抵抗線歪計を内部に埋没し，内部に伝わる歪波を陰極線オッシロスコープ上に増巾出現せしめて写真撮影により計測出来るようにし，それらの測定結果より衝撃破壊の機構を考察した。

なほ，実験装置の関係で歪計の位置は爆源至近距離の範囲は避けた。この部分には圧縮による変形破砕が見られるが，破壊の及ぶ範囲を調べるとか，破壊の全貌より破壊機構を考察せんとする場合は，この部分は余り考慮の要はないし，また，この部分は衝撃波の形成とか，塑性変形部もあつて理論との照合が困難であるので，その外側の部分の測定に止めて，その内部は外側の結果から推定する事にした。

2 供　試　体

2・1 形　状

実験を基礎的に行うため，一次元，二次元，三次元の形状として次の寸法のものを作製した。これらの寸法は予備実験により得られた歪波の波長及びモルタル施行上の考慮等より決定した。

1) 一次元　細長角棒 10×10×400 (cm)，(長さはこの他，3m，2m，1m のものも作つた。)

2) 二次元
　a. 平丸板　10×200φ (cm)
　b. 平角板　10×200×200 (cm)

3) 三次元
　a. 円　壔　200φ×200 (cm)

* この報文は長篇のため編集の都合上2回に分載する（編集部）

b．角　塔　200×200×200（cm）

c．直方体　200×200×340（cm），（ミリセコンド爆破研究用）

2・2　供試体の製作

このような基礎実験では供試体は出来るだけ形状は正しく，組織が均一で，その機械的強度が明らかにされるようなものであることが望ましい。このような点に留意して次のように製作した。

2・2・1　場　　所

旭化成延岡工場雷管部の三方土塁に囲まれた旧火薬製造工室の跡開跡でコンクリート床は平坦のまま残っている場所を使用した。海岸の砂地の上に建設されたもので，床はコンクリート3寸，床下は栗石が3寸である。

2・2・2　モルタルの配合・施行及び養生

爆破実験時の供試体の ① 強度 ② 組織の均一性（粗骨材の大きさ）③ 水和熱による内部温度の上昇等に考慮し，予備試験の結果次の要領により供試体を作製した。

（1）示方配合

スランプ	$S=7\sim8$cm
水・セメント比	$W/C=0.49$
中庸熱セメント	550kg
川砂（粗粒度 3.51）	736.6kg
浜砂（粗粒度 2.08）	736.6kg

（備考）川砂を混用したのは供試体の強度をある程度上昇せしめるためであり，3mm 目で篩分した。

（2）施　　行

型枠その他詳細は省略するが，三次元供試体はコンクリート床上に直接打込み，二次元，一次元は地面より少し上に水平に据えた底板の上に作つた。

8才練りのドラムミキサーを用い，所定の配合比に計量した水・セメント・骨材を投入混練りした。施行は昭和30年3月23日及び25日に行つたが両日共曇天で，砂の表面水の変化等には有利であつた。（写真1）

（3）養　　生

打込み後，筵で覆い翌早朝より約 19°C の井戸水を毎時 6ton シャワーで降らせ，爆破実験時まで約70日間養生した。

2・2・3　モルタルの強度

モルタル打込みの施行中，高さ 30cm 毎に強度試料を採取し，上記井戸水の水槽中で養生し，経過日数（材齢）による強度変化を測定した。測定項目は次のものであり，結果は図1，図2に示した。

爆破実験時の静的強度は概ね次のようである。

圧縮強度	550kg/cm²
引張強度係数	35kg/cm²
ポアッソン比	0.24
動弾性係数	$3\cdot2\times10^5$ kg/cm²

（1）圧縮強度

JIS A 1108（1950）のコンクリートの圧縮強度試験法によつた。

（2）引張強度

JIS 1113（1951）のコンクリートの引張強さ係数の測定法によつた。引張強度はこの引張強さ係数と殆んど同じ値である[3]。

（3）動弾性係数

市販のモルタル，コンクリート等の動弾性係数測定器によつた[4]。

（4）静弾性係数

Marten's Extensometer 及び電気抵抗線歪計によ

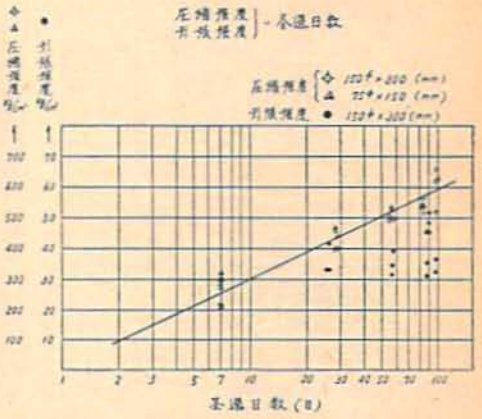


図1　経過日数と圧縮強度及び引張強度

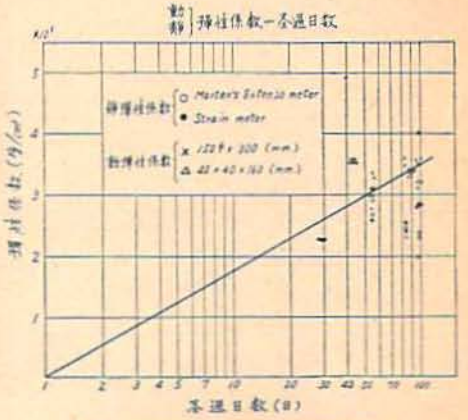


図2　経過日数と静及び動弾性係数

り測定した。

（5） ポアッソン比

電気抵抗線歪計を円筒供試体の表面に貼つて測定したものは約 0.28 であつたが，供試体中央に埋込んだ電気抵抗線歪計で測定したものは約 0.24 であつた。これは歪計の面に直角の圧力を受けた場合を表わすので，本文においては $\nu=0.24$ を用いた。

2・2・4 装 薬 孔

三次元の供試体はモルタル打込みの際，2吋のガス管（外径 61mm）を入れて，これを引抜いて作つた。

二次元の供試体では中央に 1¼吋のガス管（内径 34mm）を埋込んでそのまま使用した。これは大薬量による破壊実験の前に行う小薬量での実験の際に装薬孔が破壊するのを避けるためである。装薬孔の位置は MS 爆破用の直方体以外は，それぞれの中心部が爆心になるようにした。

3 歪波の測定法

3・1 測定回路

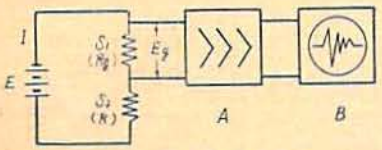


図3 歪波の測定回路
S_1: 測定用ゲージ，抵抗 R_g
S_2: ダミー・ゲージ，抵抗 R
A: 前置増巾器
B: 陰極線オッシロスコープ

図3の回路で測定部の歪により測定用ゲージに抵抗変化を生ずれば，E_g に dE_g なる変化を生じるから，その微小変化を適当に増巾して陰極線オッシロスコープで写真撮影して dE_g を求め，次の（1）式より歪の大きさを算出する。

図3の回路より

$$E_g=\frac{E\cdot R}{R_g+R}$$

$$\therefore\ dE_g=\frac{E\cdot R\cdot R_g}{(R_g+R)^2}\cdot\frac{dR_g}{R_g}$$

これにゲージ・ファクター

$$K=\left(\frac{dR_g}{R_g}\right)\Big/\left(\frac{dL}{L}\right)$$ を入れると

$$\frac{dL}{L}=\frac{R_g+R}{R_g\cdot R}\cdot\frac{dR_g}{I\cdot K}\quad\cdots\cdots(1)$$

著者等の実験においては，E_g の変化を有効に取出すため及び温度補償のため S_2 ゲージは S_1 と同一種類のものを供試体中の S_1 ゲージと出来るだけ同様の条件にして使用した。S_2 ゲージに就ては後述する。(3・7・3)

3・2 電気抵抗線歪計[5]

ゲージは可及的小型を用い，新興通信工業（株）のペーパー・ゲージ S-21 を主として用い一部は S-11 をも併用した。これらのゲージの諸元は次の通りである。

S-21 ゲージ長 8mm，ゲージ巾 2mm，抵抗 120Ω，ゲージ・ファクター 2.06
S-11 ゲージ長 15mm，ゲージ幅 3.5mm，抵抗 120Ω，ゲージ・ファクター 2.14

著者等の測定した範囲の歪波の速度は約 4,000m/s，波長 30cm 以上であつたから，この寸法のゲージで充分であろう。

ゲージの接着，埋込みに就ては後述する。(3・7)

3・3 前置増巾器

予備実験の結果より図4に示す増巾器を 8台製作し，周波数特性は 10KC 程度まで平坦になるよう考慮した。利得は最高 90db 程度であつた。

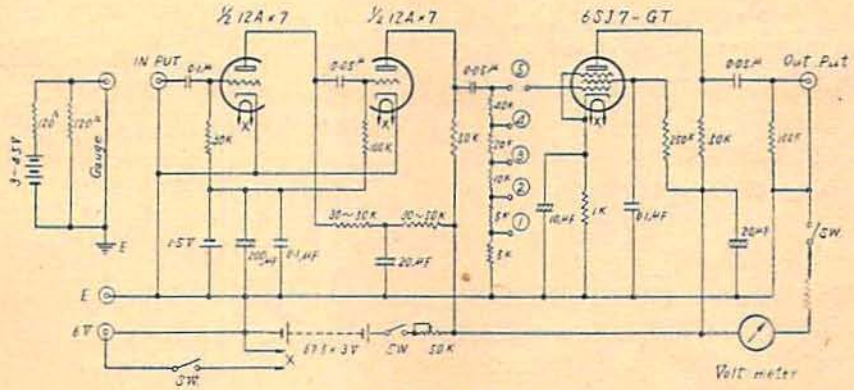
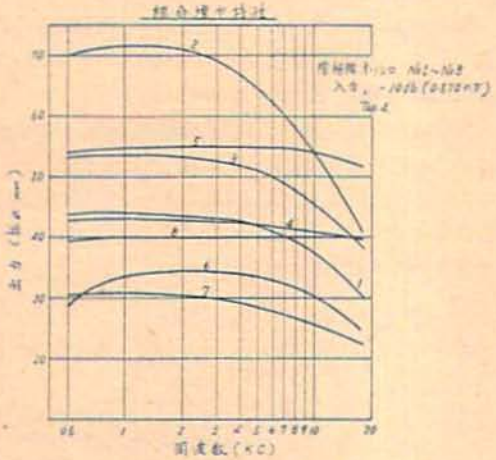


図4 増 巾 器 回 路

3・4　総合増巾度

測定用ゲージの歪による微小電圧変化は前置増巾器で増巾され，更に陰極線オッシロスコープ内蔵の増巾器で増巾される。使用した機器の特性は必ずしも同一でないので，夫々の組合せの総合特性は異なる。実験で使用した8セット夫々の周波数特性は図5に示すようなものであつた。



No.1～8 測定器の総合増巾特性

図5　No. 1～8 測定器の総合増巾特性

3・5　リード線

測定用ゲージより増巾器までのリード線は，通信用遮蔽編組2芯ビニール線（0.75mm², 30/0.18）を用い，リード線の長さは片線 42m に一定した。

3・6　陰極線オッシロスコープ及び単掃引時間軸装置

陰極線オッシロスコープは東芝製 120mm ST 型 1001 B 型 6台，ナショナル製 CT-2-130 型2台，合計8台を東芝製 ST-1121 A 型の単掃引時間軸装置3台で操作した。

測定用機器は実験場と土嚢を距てた工室内に写真2の如くセットした。

3・7　ゲージの準備及び埋込み

3・7・1　接着剤

本実験で最も意を用いた点の一つはゲージの耐水絶縁性の優秀なる接着剤の選択であつた。ゲージはモルタル作製時に埋設し，爾後，散水養生を 2～3 カ月続けるし，且又，三次元供試体の如き大型のものでは，モルタル打込み後24時間程度までは，水和熱による温度上昇がかなりあること（中心部では 70°C 程度になる）を予備実験で実測してあるから，種々予備実験の結果，スイス Ciba 社製の Araldite Casting Resin, Type D を使用することにした。このもので注意深く接着し，その上にこの樹脂を塗布すればアラルダイトのみでも好成績であるが，更に接着硬化後，耐水性シリコン樹脂（著者は Dow Chemical Co, の DC 2103 が手近にあつたのでこれを使用した）を塗布すれば 2～3 カ月水中に放置しても，1,000MΩ 以上の耐水絶縁性を保つことが出来た。（∞に近いものもかなりあつた）

アラルダイトでゲージを接着するときは，両者の湿気を除いた後，室内の湿度に意を用い接着後の硬化は定温乾燥器中で使用書による温度範囲で行うなり，デシケータ中で行うがよい。

3・7・2　埋込み用ゲージの作製及びシールド

供試体と同一組成のモルタル小片を作製して図6に示す如く直角をなす2面にゲージをアラルダイトで貼り，更にゲージの接着を十分ならしめるとともに，このモルタル小片が供試体と緊密に固着するよう図の多くモルタル小片でサンドイッチ状にした。

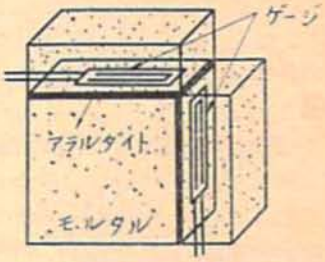


図6　埋込み用ゲージ

写真3は一次元，二次元の供試体に，写真4は三次元のそれに埋込んだものである。なほ埋込みゲージは，夫々写真のBのように 16mesh の金網（亜鉛引鉄線）でシールドし，金網と埋込みゲージの間には埋没時にモルタルを良く詰めこんで供試体との固着を密ならしめた。

シールドを施した理由は予備実験の結果，爆薬の爆発時に発生するノイズ（註）のために，特に爆源に近いゲージの歪波が妨害されることがあるのを認め，シールドすれば実用上妨害を避けられることを確認したからである。なほ又，二次元，三次元の供試体ではモルタル打込みの際，爆源の周囲を円筒形の金網でシールドしてノイズを避けるようにした。写真5はMS爆破用直方体のゲージ埋込み状況を示した。金網は 30φ×90cm.

（註）この現象に就ては別に実験を行つた。例えば土中 1m に埋設した新桐ダイナマイト 112g が爆発

した際，爆破母線で検出されたノイズの電圧は30〜100mV，周波数約30KCのものである。これは爆発の際の，イオンの発生，移動，消滅に関連して発生する電磁波によるものではなかろうか。H. Kolsky も同様な現象を認めている。これに関する実験に就ては別に報告する。

H. Kolsky: Nature **173** 77 (1954).

3・7・3　ダミー・ゲージ

図3の S_2 ゲージは，E_g の変化を有効に取出し，且，温度補償を行うために S_1 と同種のゲージを測定用ゲージと全く同様，即ち写真3のAのようにしたものを供試体打込みの際に 10×10×20cm のモルタル中に埋め，散水養生せるものを用いた。写真6がそれである。

3・7・4　ゲージの埋込み位置及び爆薬位置

爆源より所定の距離において，半径方向とそれに直角な円周方向の歪が測れるように埋込んだ。角棒や平板においても表面波や曲げ応力の影響を避けるためゲージは全部断面の中心部に来るように埋込んだ。

a）細長角棒ではその長さにより 50cm 或は 100cm 間隔に埋込んだ。

b）平丸板・平角板では 30cm・50cm・80cm・110cm（平丸板にはなし）。

c）円壔・角壔では下面より 100cm の爆心を含んだ水平面において 30cm・50cm・80cm・110cm（円壔にはなし），斜め上に 110cm（円壔），140cm（角壔）。

d）ミリセコンド爆破研究用直方体では両孔の爆発による歪波の干渉をみるために，下面より 100cm の水平面において，両孔を結ぶ線上或はこれに直角な方向に数個所埋込んだ。

e）爆薬の位置は細長角棒は端面貼り付け，平丸板・平角板は中央でその装薬孔の直径は 34mm（1½吋のガス管埋込みのまま），角壔・円壔・直方体ではその直径は 65mm 前後，深さは上面より 100cm である。

以上の配置は図7に示した。

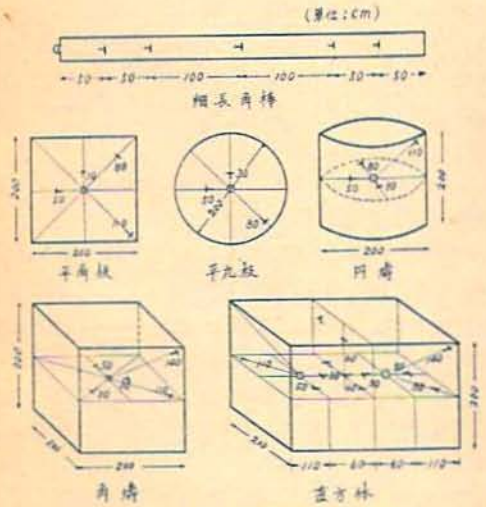


図7　ゲージ及び装薬 ⊙ の位置

3・8　爆薬並に雷管とその発火回路

爆薬は爆速が大きく，その火薬学的性状のよく研究されている単体爆薬として粉状のペントリット（PETN）を用いた。（Δ=0.80〜0.83）

雷管は一定電流値による発火時間が出来るだけ短かく，且，斉一なものを特別に試製して用いた。

雷管の発火回路は雷管爆発後，リード線間の短絡等によるノイズの発生を極力少なくするために図8に示す如きストロボ放電回路を用いた。

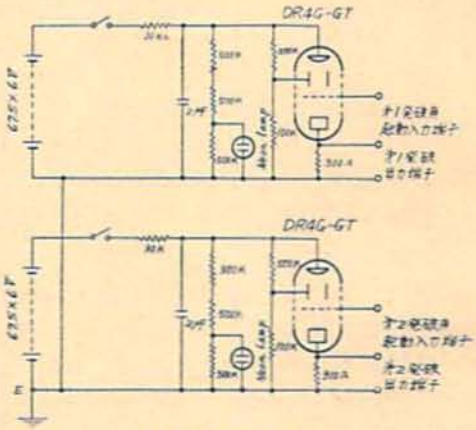


図8　雷管発火回路

4　ゲージの高周波追随性に関する考察

電気抵抗線歪計は動的歪の測定にも使用されたが本実験における程周波数の大きい動的測定に使用された例は極めて少ない。そのためこの実験のようにして使用した際のゲージの高周波追随性に就て次の諸点より考察及び実験を行い著者等の得た20KC以下の歪波では問題はないと考えた。

4・1　ゲージ回路の周波数特性によるもの

ゲージ回路にはリード線間，アース間の静電気容量があるから，これを考慮せねばならない。著者等の用いたゲージ回路は図9の通りで R_A のゲージ端子に生ずる電圧変化 dE_g は次の（1）式で表わされること

$$dE_g=\frac{R_A\cdot R_V}{R_A+R_V}\cdot I\cdot K\cdot\frac{dL}{L}\quad\ldots\ldots(1)$$

は前述した。（1）式はまた次のように表わされる。

$$dE_g = R \cdot I_g \cdot \sin \omega t \quad \cdots\cdots(2)$$

ここに $R = \dfrac{R_A \cdot R_V}{R_A + R_V}$, $I_g \sin \omega t$

$$= I \cdot K \cdot \frac{dL}{L}$$

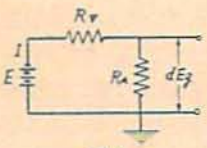


図9

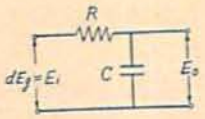


図10

即ち内部抵抗Rを持つた回路とみなすことが出来る。いま，この回路にCなる容量を接続したとすれば図10の如き積分回路を形成する。

この回路に就ては（3）式が得られ，この一般解は（4）式である[6]。

$$\frac{dE_0}{dt} + \frac{1}{CR} \cdot E_0 = \frac{1}{CR} \cdot Ei \quad \cdots\cdots(3)$$

$$E_0 = \Gamma e^{-t/CR} + \frac{1}{CR} \cdot e^{-t/CR} \int e^{t/CR} Ei \, dt \quad \cdots\cdots(4)$$

いま，入力電圧 E_i は $E_i = E_m \sin \omega t$ で表わされるから（4）式に代入して

$$E_0 = \Gamma e^{-1/CR} + \frac{E_m}{CR} \frac{1}{\sqrt{1 - \dfrac{1}{(\omega CR)^2}}} \cdot \frac{1}{\omega} \sin(\omega t - \delta) \quad \cdots\cdots(5)$$

ここに　$\delta = \tan^{-1} \omega CR$

ここにおいて，ωCR が相当大きい場合は定常状態では

$$E_0 \fallingdotseq \frac{E_m}{CR} \cdot \frac{1}{\omega} \sin(\omega t - 90°)$$

$$= \frac{1}{CR} \int E_i \, dt \quad \cdots\cdots(6)$$

となり増巾器えの入力がゲージ出力電圧を積分したものとなる。逆に ωCR が小さいときは

$$\sqrt{1 - \frac{1}{(\omega CR)^2}} \fallingdotseq \frac{1}{\omega CR}, \quad \delta = 0$$

となり

$$E_0 \fallingdotseq E_m \sin \omega t = E_i$$

即ち入力は出力と同じとなる。

ωCR の大きさは $\sqrt{1 - \dfrac{1}{(\omega CR)^2}} \fallingdotseq \dfrac{1}{\omega CR}$ という条件で

ωCR	$\frac{1}{\omega CR}$	$\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega CR)^2}}$
1.00	1	1.41
0.50	2	2.23
0.10	10	10.05
0.05	20	20.05

従つて $\omega CR \fallingdotseq 0.1$ 以下ならば 0.5% の精度で再現可能である。

∴　上限周波数fは

$$\omega CR = 2\pi f CR \leqq 0.1$$

$$\therefore \quad f \leqq \frac{0.1}{2\pi CR}$$

著者等の実験条件では

$$R = 60\,\Omega, \quad C = 100 \times 10^{-12}\,F$$

$$\therefore \quad f \leqq 2.7 \times 10^3\,KC$$

このfの値よりすれば著者等の実験結果では 20KC 以下であつたから問題はない。

4・2　ゲージの長さと歪波の伝播速度によるもの

長さlなる線を速さvなる歪波が通過する時間 $t = l/v$

（1）　ゲージ S-21 では $l = 8$mm, $v = 4{,}000$m/s（実測結果）

$$\therefore \quad t = 8\text{mm}/4{,}000\text{m/s} = 2 \times 10^{-6}\,\text{sec}$$

$$\therefore \quad f = \frac{1}{2 \times 10^{-6}} = 5 \times 10^2\,KC$$

信頼しうる波形を得たるために測定可能な最高周波数をその $1/10$ とみても $f_a = 50$KC となる。

（2）　ゲージ S-11 では $l = 15$mm,（1）と同様にして $f_a = 25.6$KC,

（1），（2）の結果よりみても，著者等の実験範囲では問題はない。

4・3　接着部によるもの

ゲージは前述のようにアラルダイト樹脂で接着してあるから，アラルダイト樹脂の物性による影響を考えてみた。即ち図11の如く接着部をアラルダイト樹脂の

長柱と考えてゲージの伸縮に関する縦振動数を調べてみた。

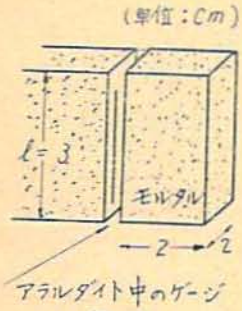


図 11

使用したアラルダイト樹脂のヤング率及び密度は次の如くである。(カタログによる)

ヤング率　$E=3.5\sim2.5\times10^{-4}\mathrm{kg/cm^2}$

密　　度　$\rho=1.2\mathrm{g/cm^3}$

従つて縦波の伝播速度は 5,400～4,500m/s，平均 5,000m/s とする。

$$\therefore\ t_n=\frac{2l}{v}=\frac{2\times3}{100}\ \mathrm{m/5000m/s}$$

$$=1.2\times10^{-5}\mathrm{sec}$$

$$\therefore\ f_n=1/t_n=83.4KC$$

従つて共振を避けても 40KC 位迄は問題はない。

4・4　埋込みゲージの周波数追随性の実験

更にゲージを前述の埋込用ゲージの形（写真2）でモルタル中に埋込んで，これに外部より既知周波数の弾性波を加えた場合のゲージの追随性をみるための図12如き方法で次の実験を行つた。

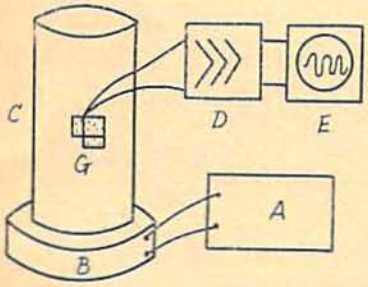


図12　ゲージの周波数追随性実験装置

A: 発　振　器
B: 振　動　子
C: モルタル試験片
D: 増　巾　器
E: 陰極線オッシロスコープ
G: ストレン・ゲージ

ゲージは形状 150φ×300mm（固有振動数約 6.5KC）のモルタル中に埋込み水中養生したものを，コンクリート等の動弾性係数測定器[4]の振動子上に置き，振動子に発振器より各周波数の強制振動を加え，その波形をモルタル中のゲージでピックアップして陰極線オッシロスコープで撮影した。著者等の行つた爆破実験での歪波の周波数は 3～10KC の程度であるので 1～10 KC の各 1KC 毎の振動に就ての実験結果の波形を写真7に示した。

この実験の範囲では各周波数の波形は相似形であり，波形の追随性は一応問題とする程のことはなかろう。強制振動は装置の都合上 10KC が最高であつたのでこれ以上は行はなかつた。

5　歪波の伝播並に考察

5・1　歪　波　形

5・1・1　一次元供試体（細長角棒）

細長角棒を木枠より取り出し，コンクリート床上に砂を敷いた上に水平において実験した。

（1）細長角棒の端面の中央に6号雷管を貼りつけて発火せしめたときに得られた歪波の一例を図13に示した。これは長さ 265cm の角棒で爆源より 100cm のゲージの長さの方向の歪波（ε_r）である。

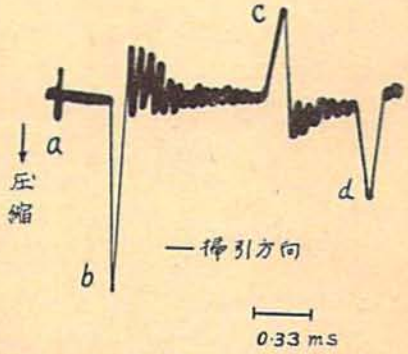


図13　細長角棒（長さ 265cm），6号雷管，爆源より 100cm での歪波（ε_r）

a: 爆発時のノイズ
b: 歪波（ε_r）
c: 反　射　波
d: 再反射波

（2）長さ 400cm の細長角棒で6号雷管で得られた各距離での歪波を写真8に示した。Aは長さの方向の歪波（ε_r），Bはそれに直角な円周方向の歪波（ε_θ）である。ε_r と ε_θ とは位相は反対であることが明瞭に見られる。

（3）歪波の再現性

（2）の角棒に就て雷管1個による実験を3回繰返し各回で得られた歪波形は，雷管自体の爆発の様相も必ずしも同一ではないが，写真8のものと殆んど同一であつた。

（4）ペントリット 5g

写真8に示した 400cm の細長角棒Iで，ペントリット 5g の場合の歪波を写真9に示した。この場合は末端より 15cm のところで切断が起つた。（写真21のI）そのためか反射波の揺は乱れている。

（5）ペントリット 10g

同じくペントリット 10g の歪波を写真10に示した。この場合は末尾は2個所切断した。（写真21のIV）

（6）ペントリット 30g

別の角棒（10×10×160cm）でペントリット 30g で得られた歪波を写真11に示した。このときは末尾は2個所切断した。

5・1・2　二次元供試体（平丸板・平角板）

二次元供試体は枠の横板を外したのみで，水平に地面より少し離しておかれた底板の上のままで実験した。

A　平　丸　板

（1）中央の孔にペントリット 3g を入れ，砂で填塞した。このとき得られた歪波の1例を図14に示した。これは爆心より 30cm の半径方向の歪波（ε_r）である。

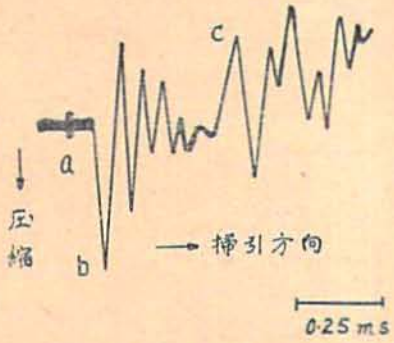


図14　平丸板，ペントリット 3g，
爆源より 30cm での歪波（ε_r）
a：爆発時のノイズ
b：歪　波（ε_r）
c：反　射　波

この際，各距離で得られた歪波を写真12に示した。

（2）ペントリット 50g

ペントリット 50g を入れ砂で填塞した歪波を写真13に示した。この場合は供試体は写真25のように破壊した。

B　平　角　板

（1）ペントリット 3g を中央の孔に入れ砂で填塞した。各距離で得られた歪波を写真14に示した。

（2）ペントリット 30g

填塞は砂で行つた。歪波は写真15に示した。供試体は写真24のように破壊した。

5・1・3　三次元供試体（円壔・角壔・直方体）

三次元供試体では少薬量（5，10，20g）の場合は填塞なしで爆発せしめ，破壊実験の場合のみ砂で填塞した。

A　円　　壔

（1）ペントリット 5g で得られた歪波の一例（50cm，半径方向 ε_r）を図15に示した。

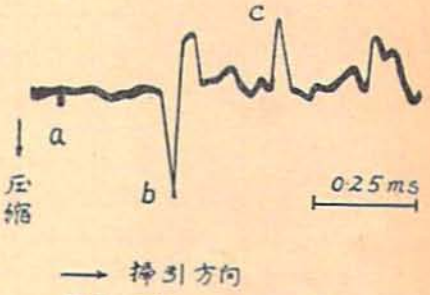


図15　円壔，ペントリット 5g，
爆源より 50cm での歪波（ε_r）
a：爆発時のノイズ
b：歪　波（ε_r）
c：反　射　波

また，ペントリット 5g で各距離で得られた歪波を写真16に示した。

（2）ペントリット 100g

この場合は砂で填塞した。歪波は写真17に示した。供試体は写真30　の如く破壊した。

B　角　　壔

（1）ペントリット 10g のときの歪波は写真18に示した。

（2）ペントリット 70g

砂で填塞した。歪波は写真19に示した。供試体は写真26の如く破壊した。

C　直　方　体

直方体ではミリセコンド爆破の際の歪波の干渉を測定した。MS 爆破に就ては続報にて別個に取扱つてあるのでここでは得られた歪波のみを示す。写真20は各孔夫々ペントリット 80g，段間隔 5ms の2段 MS 爆破の際の歪波でその下側にゲージの位置を示した。写

真の左側の歪波は掃引速度を遅くして両方の爆発による歪波を捕捉したものである。右側のものは掃引速度を速くしたもので，Ⅰとあるは第1段のスキッチインと共に掃引させたもので，第1段によるそのゲージでの歪波を示し，Ⅱとあるは第2段のスキッチインと同時に掃引させたもので，そのゲージ位置における第1段の爆発による残存歪波と第2段による歪波が記録されている。

これらの歪波の写真よりみて 5ms 間隔の MS 爆破でも，歪波の大きな重畳は認められない。

5・2　歪波の伝播速度・周波数・波長

歪波の伝播速度は上述の歪波の写真にて爆発によるノイズより各ゲージまでの到達所要時間を測定して算出した。

周波数は得られた歪波が定常振動でないのが多いので，最初の歪波の半周波の幅を2倍したものより求めた。

波長は $v=f\cdot\lambda$ より計算した。但し v：歪波の伝播速度，f：周波数，λ：波長。

5・2・1　一次元供試体

（1）　歪波の伝播速度

細長角棒に就ての走時曲線の例を図16に示した。進行波のみならず反射波に就ても測定した。

測定は破壊を伴わはない雷管及び破壊を伴つたペントリット 5～20g に亘つて行つてあるが，図の如く進行波も反射波も略々直線上にある。

細長角棒に就て得られた歪波の速度は v=3,800～4,000m/s である。

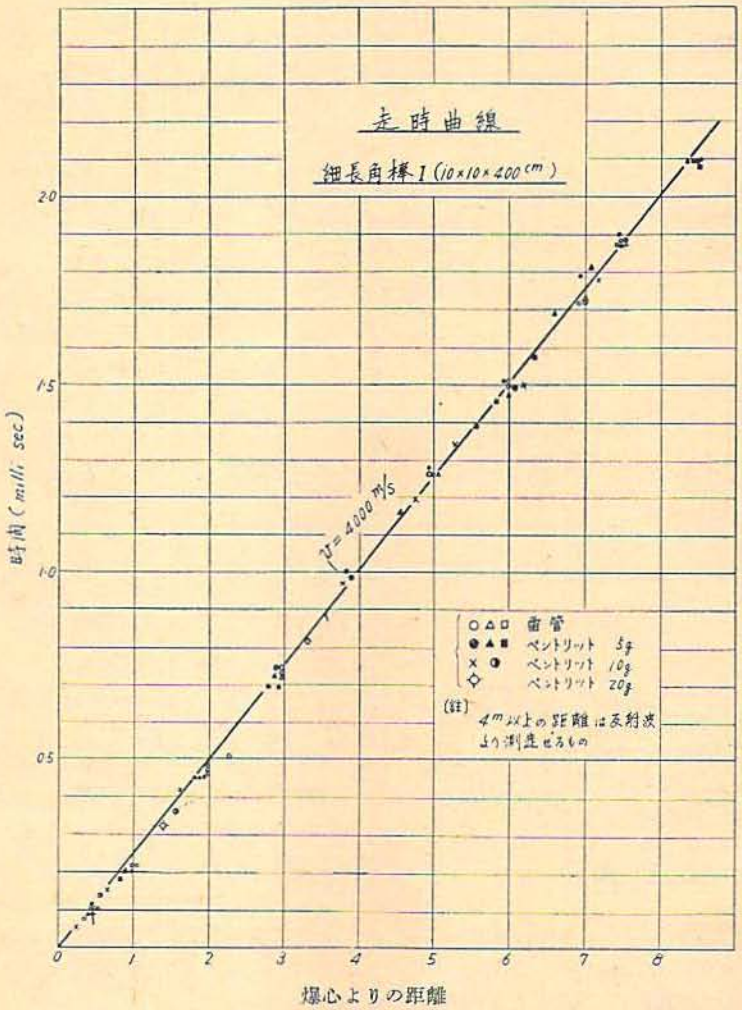


図16　細長角棒の走時曲線（1）

（2） 歪波の周波数・速度・波長

細長角棒 I に就て雷管，ペントリット 5g・10g での歪波の周波数・速度・波長を図17に示した。また，細長角棒での周波数 f の距離 r による減衰を $f=f_0(1/r)^{n_1}$ とすれば，実験範囲（$r=23\sim700$cm）では $n_1\fallingdotseq0.22$ である。

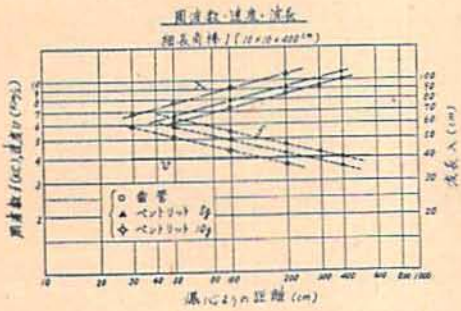


図17 細長角棒における歪波の速度，周波数，波長

5・2・2 二次元供試体

平丸板及び平角板に就ての歪波の速度・周波数・波長を図18に示した。また $f=f_0\,(1/r)^{n_2}$ とすれば $n_2\fallingdotseq0.23$ である。

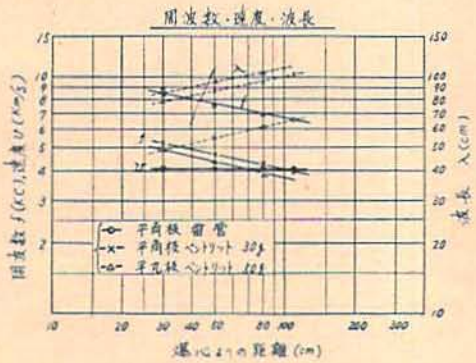


図18 平丸板・平角板における歪波の速度・周波数・波長

5・2・3 三次元供試体

（1） 角壔・円壔に就ての歪波の速度・周波数・波長を図19に示した。$f=f_0\,(1/r)^{n_3}$ とすれば $n_3\fallingdotseq0.27$ である。

（2） 装薬量と周波数

三次元供試体における装薬量 W と歪波の周波数 f との関係を図20に示した。$f=C\,(1/W)^{n_0}$ とすれば実験範囲（$W=5\sim100$g）では $n_0\fallingdotseq0.29$ である。

5・3 歪の大きさの距離による減衰

写真撮影した歪波の最高値より dE_g を求め，3・1

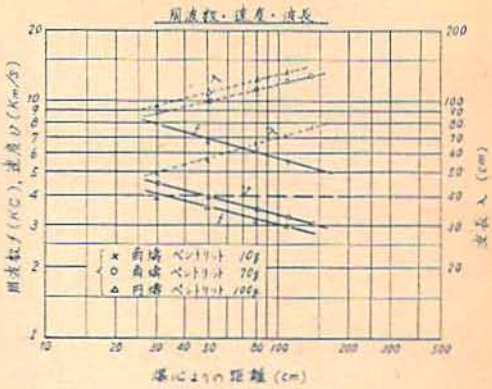


図19 角壔・円壔における歪波の速度・周波数・波長

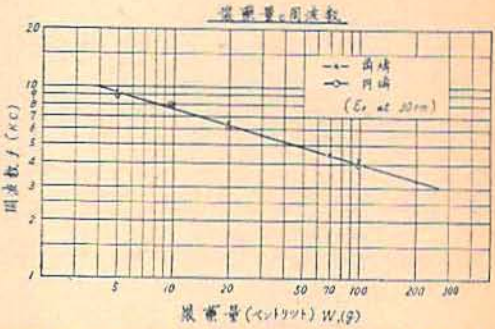


図20 三次元供試体における装薬量と歪波の周波数

の（1）式に代入して最大歪を算出する。

5・3・1 一次元供試体

細長角棒において，雷管よりペントリット 30g までの薬量で得られた歪の距離による減衰の例を図21，22に示した。ペントリット 5g 以上ではその都度，爆源附近及び末尾は破壊するが，爆源附近を平に修正して引続いて爆破実験を行う。そのように1つの細長角棒で数回行つたものを夫々の図に示した。各細長角棒の破壊の状況は後出の図32に示しておいた。

なほ例えば図21において雷管のみの場合 400cm 以上の距離での歪は反射波より求めたものであり，又，ペントリット 5g の際図の 5g ε_r の線の右下に短かい線で 5g ε_r とあるのは切断を伴つたときの反射波の歪である。このものの値より，破壊に消費された応力の推定も出来る。

（1） $\varepsilon_r=\varepsilon_0\,(1/r)^n$ として ε を求めると実験範囲（$r=20\sim700$cm）では，概ね $n=0.5\sim0.6$ である。

（2） $\varepsilon_\theta/\varepsilon_r$ は実験によつてバラツイているが概ね 0.3～0.4 である。

5・3・2 二次元供試体

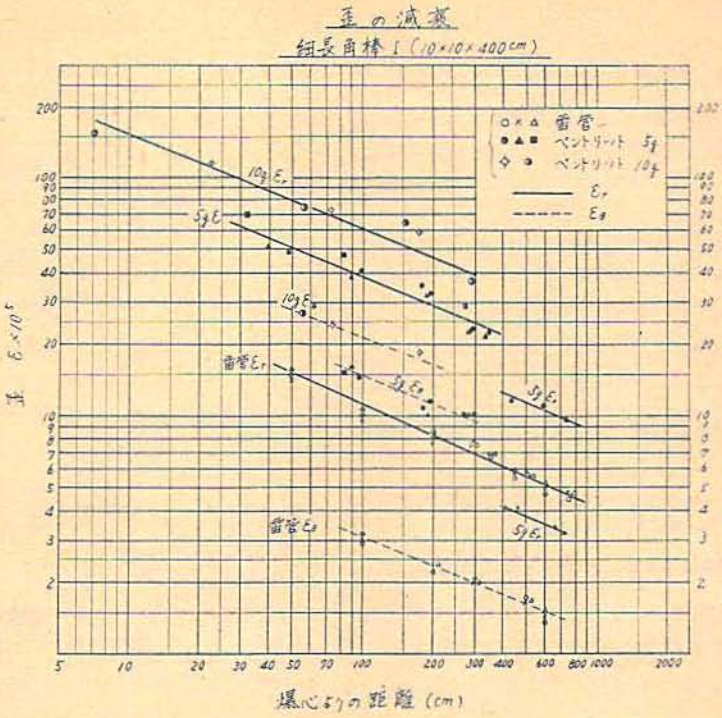


図21　細長角棒における距離と歪（1）

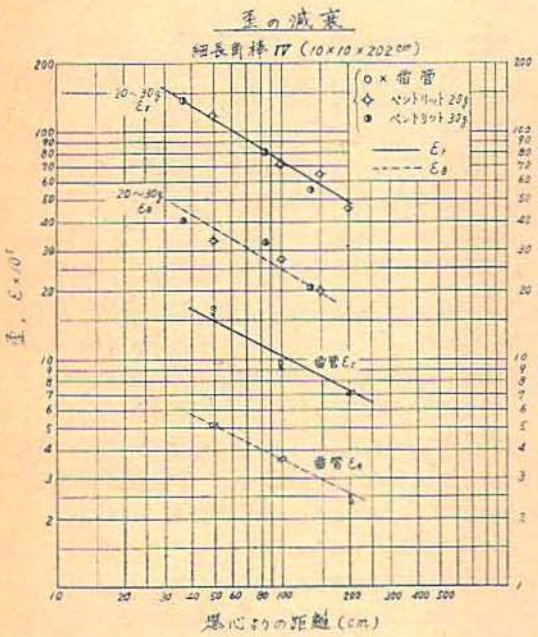


図22　細長角棒における距離と歪（2）

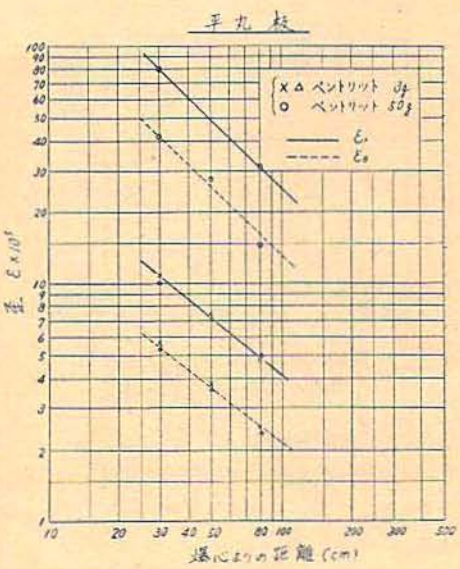


図23　平丸板における距離と歪

平丸板・平角板での歪と距離の関係を夫々図23，24に示した。

（1）　$\varepsilon_r=\varepsilon_0(1/r)^n$ とすれば ε は実験範囲（r=30～110cm）では概ね n=0.8～1.0 である。

（2）　$\varepsilon_\theta/\varepsilon_r$ は概ね 0.4～0.6 である。

（3）　平丸板では反射波は収斂波となるので，反射

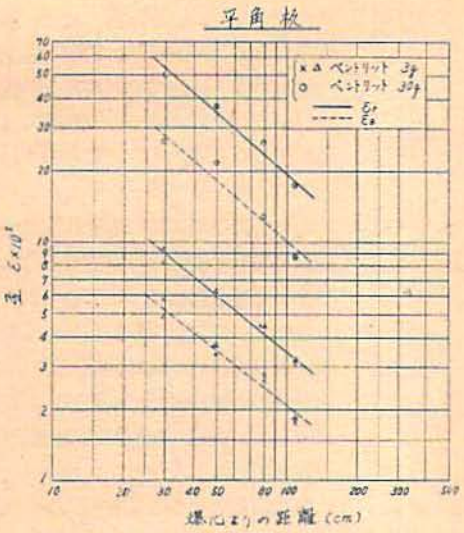


図24　平角板における距離と歪

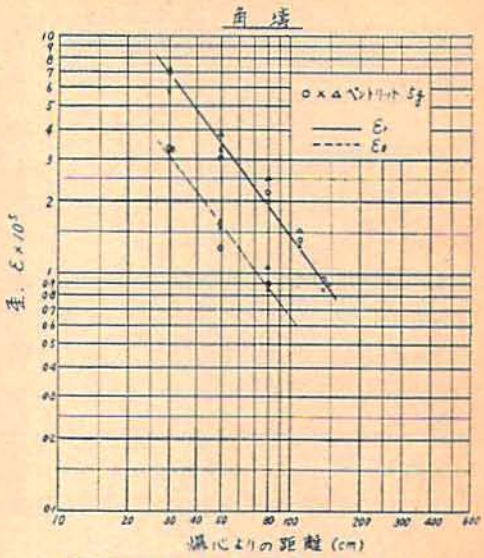


図25　角壔における距離と歪（1）

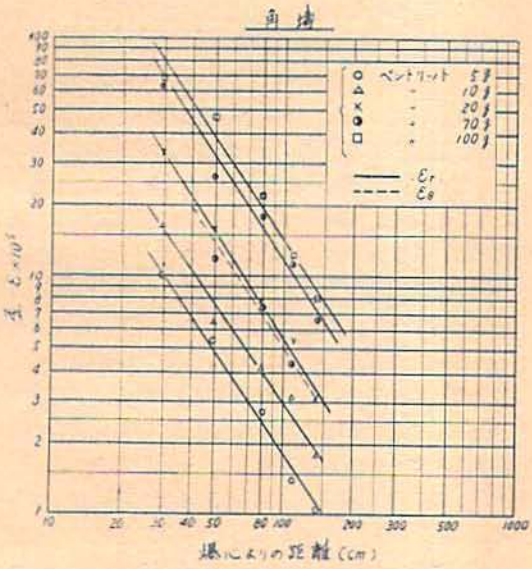


図26　角壔における距離と歪（2）

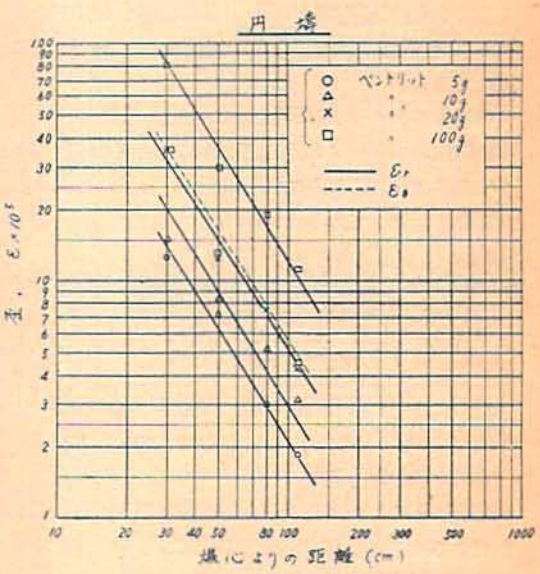


図27　円壔における距離と歪

波を距離の延長上に取るのは不適当なのでとらなかつた。

5・3・3　三次元試験体

（1）　角壔でペンリリット 5g のときの歪の距離による減衰を図25に示した。

（2）　同じく又，ペントリット 5, 10, 20, 70, 100g の際に得られたものを図26に示した。角壔はペントリット 70g で細い亀裂が入つたが四方には倒れなかつたので更に 100g を装塡して爆破した。

（3）　円壔におけるペントリット 5, 10, 20, 100g の際に得られた歪を図27に示した。

（4）　$\varepsilon_r=\varepsilon_0(1/r)^n$ とすればは n 実験範囲（r=30～140cm）では n=1.5～1.7 である。

（5）　$\varepsilon_\theta/\varepsilon_r$ は概ね 0.4～0.5 である。

（6）　装薬量と歪

三次元供試体に就て装薬量と歪の関係を図28に示した。$\varepsilon_r=O\cdot W^n$ とすれば実験範囲（W=5～100g）では n≒2/3 となる。

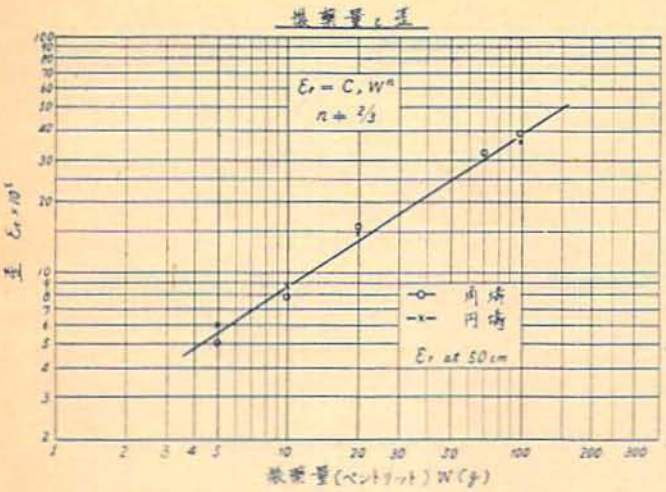


図28　三次元供試体における装薬量と歪

5・4　歪波の伝播に関する考察

5・4・1　歪波の伝播速度

この実験で得られた歪波の速度は概ね 4,000±200 m/s であつた。但し爆心よりの距離は 20cm 以上に就てである。

供試体のモルタルに就て別に測定した動的ヤング率，密度，ポアッソン比は実験時において大略次のようであるから，これらの値を用いて，縦波の速度を次式により計算してみると，

$$E=3.2\times10^5\mathrm{kg/cm^2},\ \rho=2.28\mathrm{g/cm^3},\ \nu=0.24$$

$$v=\sqrt{\frac{E}{\rho}\ \frac{1-\nu}{(1+\nu)\ (1-2\nu)}}=4020\mathrm{m/s}$$

となり測定した歪波の速度は供試体の音速に等しいと考えてよい。

（1）衝　撃　波

爆源に極く近い部分においては衝撃波を形成しているであろうが，固体内衝撃波に就ては理論も実験も極めて乏しく不明の点が多い。

桜井[7]は数種の固体に就て爆源に極く近い所の衝撃波を測定しているが，減衰が急速であり，10cm 内外で音速に近づくことを報じ，花崗岩に就ては 32mm の距離で 7,800m/s を得ている。音速はその種類にもよるが 4,900〜5,000m 程度である。（爆薬は TNT，d=0.95，300g）日野[8]は花崗岩に就て Rankine-Hugoniot 式より40% Gelex 爆薬を用いた際の衝撃波速度を計算し，換算距離（r/a）=2 附近で略々音速に近づくことを報じている。

固体の中を伝わる圧縮波が衝撃波を形成しうるか否かは，固体の特性と衝撃の強さによるものであるが，岩石爆破の場合，通常使用される 100g〜数kg 程度の爆薬では爆源の極く近傍では衝撃波を形成しても，それは 20〜30cm の距離では音速に近づくと考えてよいであろう。

（2）塑　性　波

弾性限界を超えて破壊を伴うような衝撃の場合に塑性波の存在することが鋼等の延性金属に就ては認められているが[9]，この実験では細長角棒に就ての反射波を含めた走時曲線（図16），破壊を伴つた際の波形（写真 9，10）等よりして，測定した範囲には塑性波の存在は認められなかつた。

合成樹脂のような可塑物においてさえも，爆薬による急激な衝撃破壊では破壊された部分の近傍でさえ静的変形のときに見られるような残留歪が全く認められなかつたと報じられている[10]。

5・4・2　歪　波　形

（1）一次元の細長角棒において，雷管，ペントリット 5g 程度の歪波は大きな圧縮に続いて周波数の高い減衰振動があるが（図13・写真 8）薬量が多くなると，だんだん高周波の部分はなくなり歪波は非振動的なものとなる。（写真 10，11）これは爆源部及び反射部における破壊によつて，弾性エネルギーの一部を失うためと考えられる。

（2）二次元供試体では，ペントリット 3g では減衰振動的な歪波が得られている。（図 14，写真 12・14）しかし薬量の多い時は非振動的の波である。（写真13・15）薬量の多いときは，爆源部附近に破損を生じて弾性エネルギーの一部を失うことが一因であろう。

（3）三次元供試体では小薬量でも非振動的である。（図 15，写真 16〜17）これは一次元等比にし減衰が早いことと，爆源附近では一部破損を生じていることによると思はれる。

（4）爆破に伴う歪波形の考察

Sharpe[11] はポアッソン比 σ=0.25，密度 ρ の等方等質の無限に拡がつた岩盤中に半径 a の球状装薬孔を考え，その内面に

$$\left.\begin{aligned} P_i&=P_0e^{-at},\ t\geq0\\ P_i&=0,\qquad t<0\end{aligned}\right\}$$

の形で示される爆轟圧が作用したとき，爆心より r の距離にある任意の点における変位ポテンシャル Φ を弾

性理論より求めている。

$$\Phi=\frac{aP_0/\rho r}{\left(\frac{\omega}{\sqrt{2}}-\alpha\right)^2+\omega^2}\left[-e^{-\alpha\tau}+e^{-\omega\tau/\sqrt{2}}\left\{\left(\frac{1}{\sqrt{2}}-\frac{\alpha}{\omega}\right)\cdot\sin\omega\tau+\cos\omega\tau\right\}\right]\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

ここに ω, τ は夫々，角振動数及び時間であり，c は岩盤内の弾性縦波の伝播速度を示す。

$$\omega=2\sqrt{2}\ c/3a$$

$$\tau=t-(r-a)/c$$

$$c=\{3\mu/\rho\}^{1/2}$$

（1）式より変位 $u=\partial\Phi/\partial r$, 歪 $\varepsilon=\partial u/\partial r$ を求めることが出来る。上述5・4・1の歪波の伝播速度で述べた通り，著者等の供試体では波の速度は弾性縦波のそれであるから Sharpe の理論が適用出来るであろう。

Duvall[12] や伊藤[13] は Sharpe の理論を用いて爆破の際の爆轟圧の時間的変化と爆破に伴う歪の波形との関係に就ても理論的に検討している。ここでは伊藤教授の計算結果を示す。

計算式は省略するが図29に示す爆轟圧の波形①，③の際に爆源より r の点で得られた歪波形（ε_r）は図30及び図31である。著者等の実験ではこの2つの爆轟波形が妥当と考えられるので他は省略する。

もし爆轟生成ガスの膨脹による圧力が衝動圧と対比し得る程度のものであるならば $P_t=P_0(1-e^{-\alpha t})$ の形（西村・太原[3] の計算もこれによる）とならねばならぬが，この実験で得られた歪波形より見て $P_t=P_0$

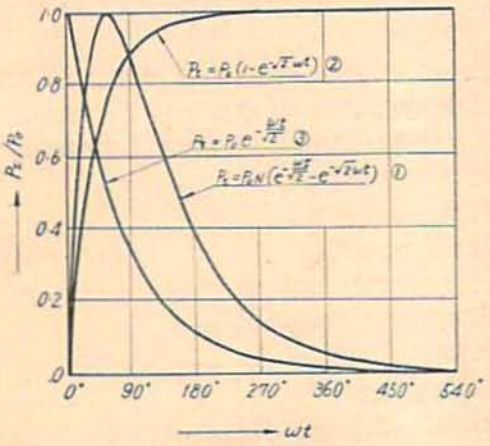


図29　爆轟圧の波形

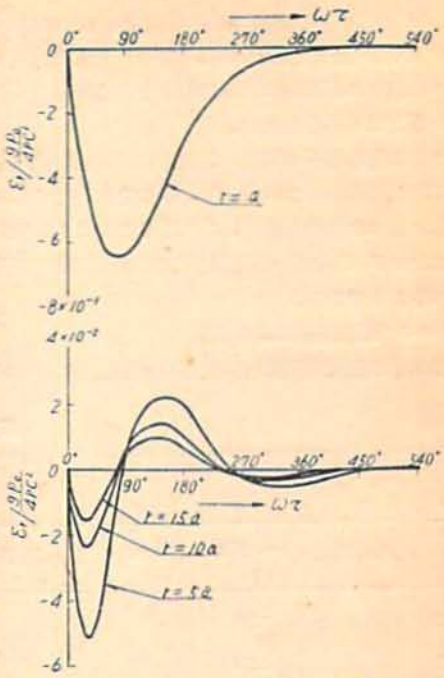


図30　$P_t=P_0N(e^{-\omega t/\sqrt{2}}-e^{-\sqrt{2}/\omega t})$ に対する歪波形

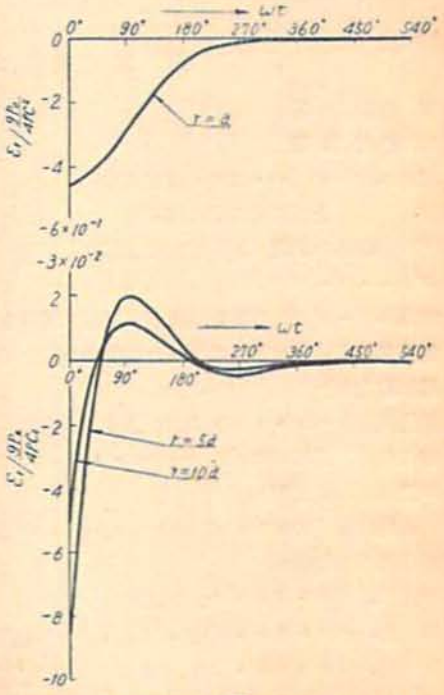


図31　$P_t=P_0e^{-\omega t/\sqrt{2}}$ に対する歪波形

$N(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t})$ の形或は又，小薬量の場合は $P_t=P_0 e^{-\alpha t}$ の方が適当と思われる。これより見て爆轟生成ガスの後ガスが破壊に直接の寄与をなす程大きく続いているとは考えられない。

さきに著者等が一次元，二次元，三次元の供試体に就て得た歪波形をこれら図30，31のそれと比べてみると似かよつたものも多い。これらのことより，定量的ではないが Sharpe の理論がこの実験において適用されるようである。

5・4・3　歪の距離による減衰

著者等の三次元供試体に就ての実験範囲（r=30～140cm）では $\varepsilon=\varepsilon_0(1/r)^n$ としたときの n=1.5－1.7であつた。

伊藤[4] が Sharpe の理論を用いて，例えば弾性縦波の速度が 5000m/s の場合，$\varepsilon_r=\varepsilon_{r\max}\left(\frac{a}{r}\right)^n$ が成立するとして計算した n の値は表1の通りである。

Duvall[12] は計算式よりは平均値として爆源附近では n=1.5 を報じ，実験よりは n=1.6～2.5 を得ている。これらの点に就ても Shape の理論が著者等の実験とは比較的よく合致している。（以下次号）

表　1

$\frac{r}{a}$	n の値		
	$P_t=P_0N(e^{-\omega t/\sqrt{2}}-e^{\sqrt{2}/\omega t})$*	$P_t=P_0N(e^{-\omega t/10\sqrt{2}}-e^{-\omega t/\sqrt{2}})$*	$P_t=P_0N(e^{-\omega t/100\sqrt{2}}-e^{-\omega t/\sqrt{2}}$
2	1.94	2.66	2,80
3	1.74	2.32	2.41
5	1.54	2.00	2.07
10	1.43	1.80	1.84
15	1.38	1.70	1.72

（註）＊等は爆轟波形である。

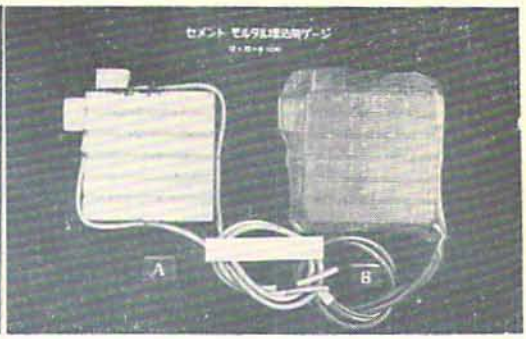
写　真　目　次（次号の分も纏めて掲載した）

1. 実　験　場
2. 測定用機器
3. 埋込みゲージ（一・二次元供試体用）
4. 同　　上（三次元供試体用）
5. ゲージ埋込み状況（MS 爆破用直方体）
6. ダミー・ゲージ
7. 埋込みゲージの周波数数追随性（写真は横向き）
8. 細長角棒Ⅰ（10×10×400cm）・雷管での歪波（写真は横向き）
9. 細長角棒Ⅰペントリット 5g の歪波（末尾破断）
10. 細長角棒Ⅰ（10×10×276cm）ペントリット 10g の歪波（末尾破断）
11. 細長角棒Ⅳ（10×10×160cm）ペントリット 30g の歪波（末尾破断）
12. 平丸板，ペントリット 3g の歪波
13. 同　上，ペントリット 50g の歪波（供試体破壊）
14. 平角板，ペントリット 3g の歪波
15. 同　上，ペントリット 30g の歪波（供試体破壊）
16. 円塔，ペントリット 5g の歪波
17. 同上，ペントリット 100g の歪波（供試体破壊）
18. 角塔，ペントリット 10g の歪波
19. 同上，ペントリット 70g の歪波（供試体破壊）
20. 直方体 MS 爆破（5ms，各孔ペントリット 80g）の歪波
21. 細長角棒Ⅰ（10×10×400cm）の末尾の破断状況
22. 細長角棒Ⅱ（10×10×400cm）の末尾の破断状況
23. 細長角棒の爆源附近の破壊状況（写真は横向き）
24. 平角板の破壊状況
25. 平丸板の破壊状況
26. 角塔の破壊状況
27. 同上（下部）（写真は横向き）
28. 角塔（Ⅱ）の破壊状況
29. 同　　上
30. 円塔の破壊状況
31. 同上（写真は横向き）
32. 爆　源　部　分

1

2

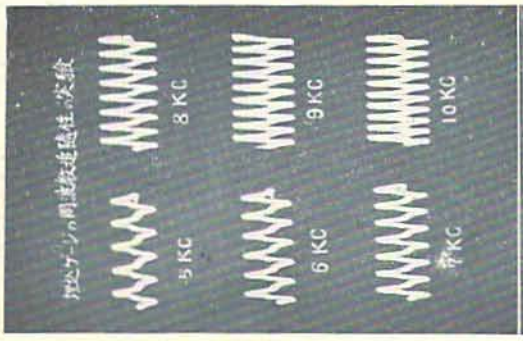
3



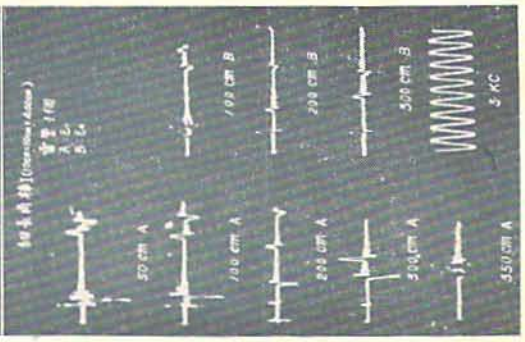
4

5

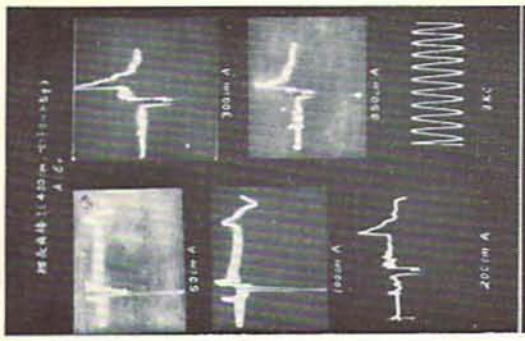
6



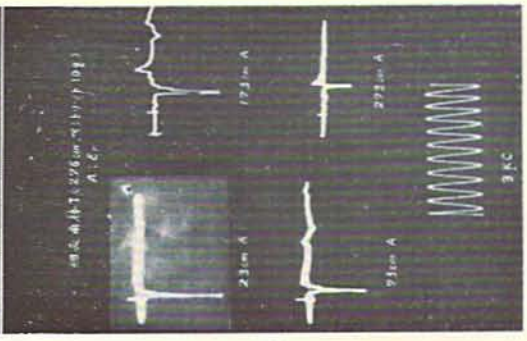
7　（写真は横向き）



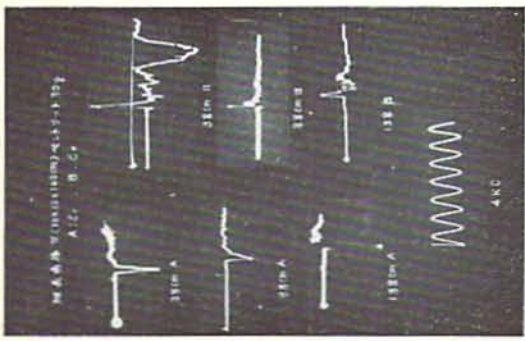
8　（写真は横向き）



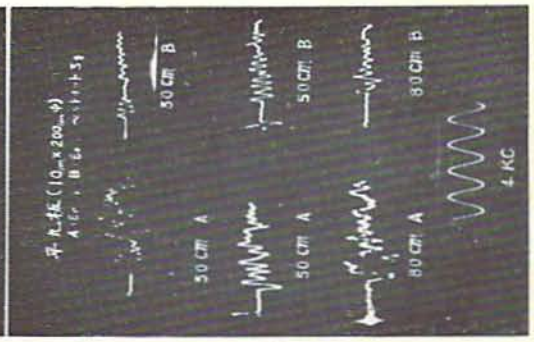
9



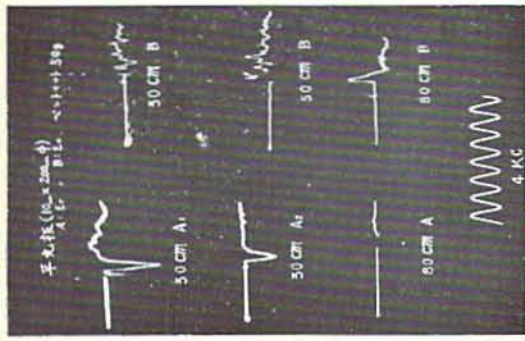
10



11

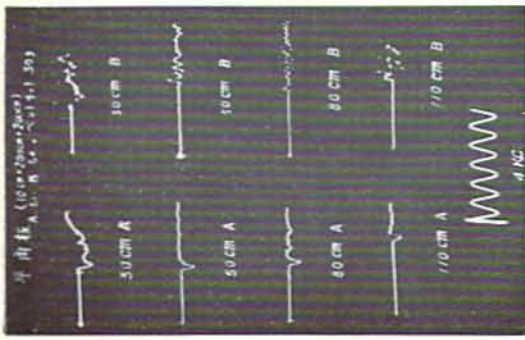


12

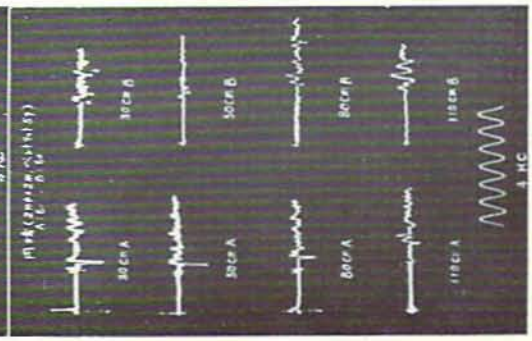


13

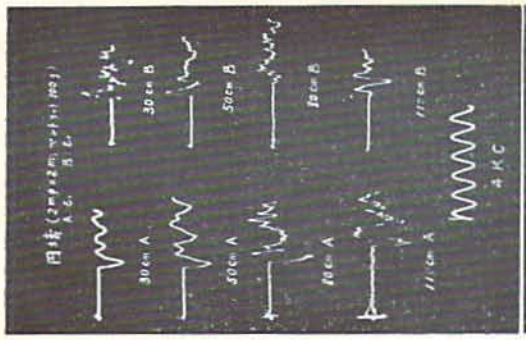
14



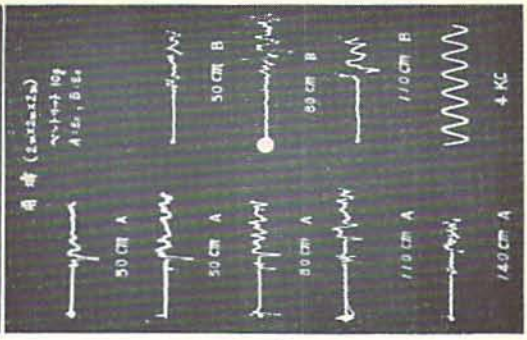
15



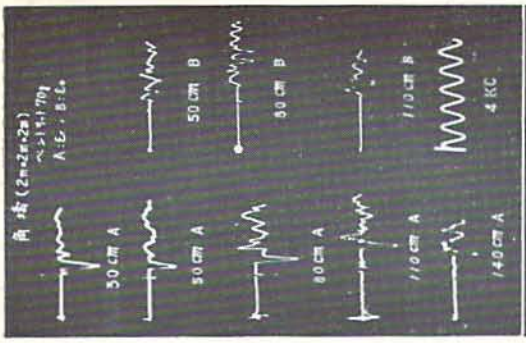
16



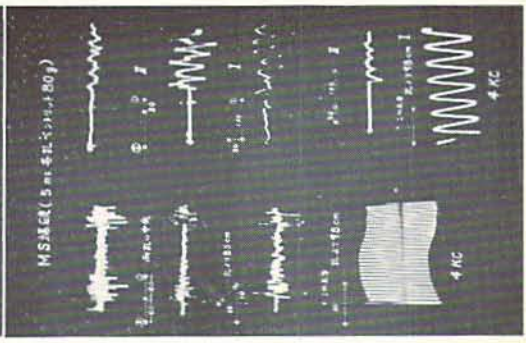
17



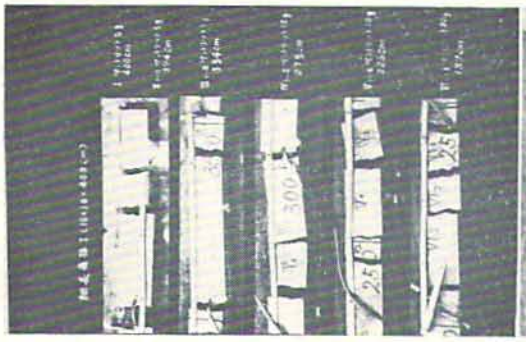
18



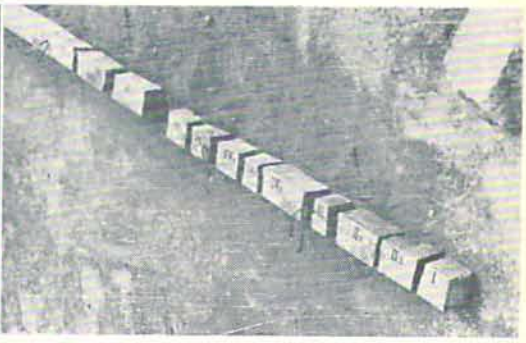
19



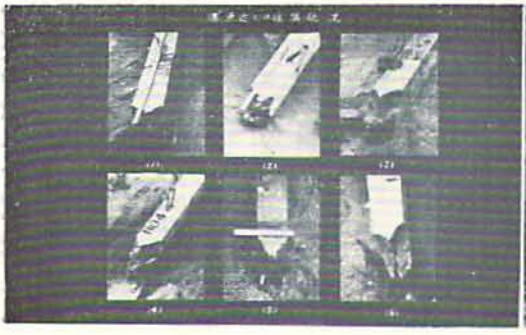
20



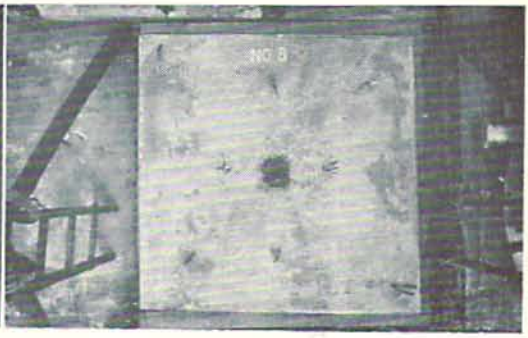
21



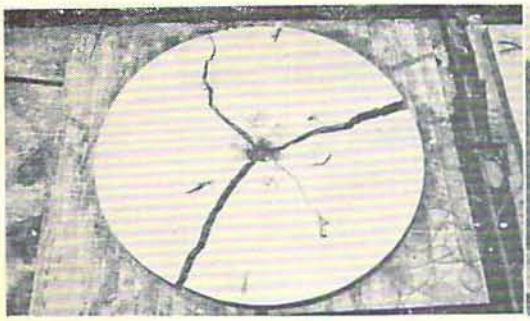
22



23



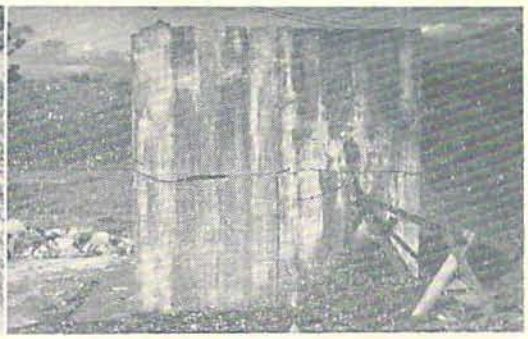
24



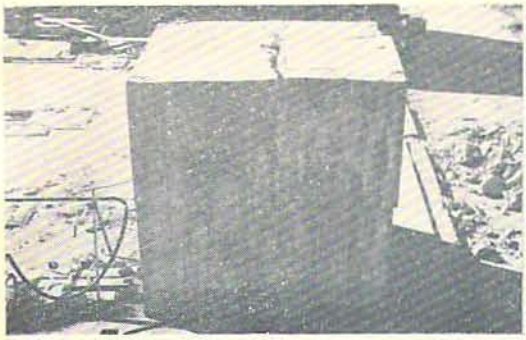
25

26

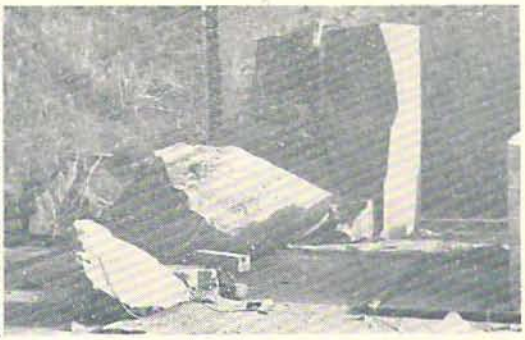
27 （写真は横向き）



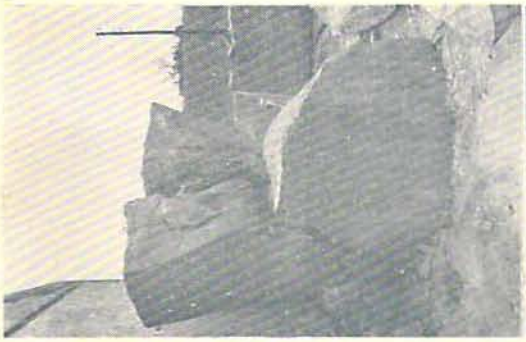
28



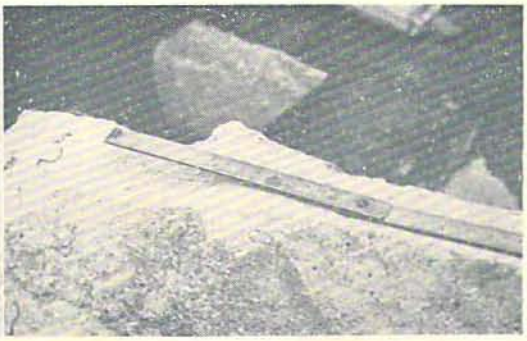
29



30



31 （写真は横向き）



32