

岩石内における爆破点近傍の波動の伝播及び それに伴う破壊について (I)

吉 川 宗 治

THE PROPAGATION OF WAVES NEAR EXPLOSION AND FRACTURE OF ROCK (I)

by Sōji YOSHIKAWA

Synopsis : The basic character of fracture and plastic deformation processes that will be operative under extremely high, yet very transitory pressure, imposed on rock by explosion is studied experimentally. The mode of propagation of transient disturbance is measured by seismometric pick up and strain gage especially devised for this purpose put within the fracture zone and neighboring plastic zone which would be formed by explosion. Magnetic tape recording system is used partially and play back record are obtained with several ranges of filtering.

The strain wave shapes, that is, the rise time, the pulse width, etc., are shown to be influenced by applied pressure, the distance from the shot point and free surface; moreover, these pulses are composed by component waves different in propagating velocity. The experimental results are discussed referring to the stress strain relation of each rock determined statically by experiment. In the very neighbourhood of shot point two different kinds of waves are detected. One is the elastic wave of relatively higher frequency and the other the plastic wave of lower frequency. With the increase of amount of explosive the propagating velocity of the plastic wave is effected and becomes slower.

1. 緒 言

爆薬を岩石内で爆破した場合、それによつて生じる荷重は非常に衝撃的で、歪力は弾性限界を越えて破壊を起し、永久的な塑性変形を残す。従つて弾性力学で説明できるような歪力—歪関係や、波動方程式の解はそのままでは通用されなくなる。媒質が金属棒や線の場合はこの問題を Karman と Duwez¹⁾ が理論的裏付けと同時に実験的に研究している。また B. F. Howell と Koukonen²⁾ は岩石内の爆破点近傍の波動の減衰を議論する際、従来弾性体に適用されていた減衰式 $E_x = E_0 X^{-P}$ が適用されず、新しい減衰式 $E_x = E_0 X^{-A} e^{-aX}$ が使用されねばならぬことから塑性変形の存在を実験的に証明した。(ここで E_x , E_0 はエネルギー, P , A は常数, X は爆破点からの距離を示す。)

しかし一方弾性論の範囲内で、岩石内の爆破点近傍の波動の伝播に関する理論的及び実験的研究は1942年 Sharpe³⁾ によつて始められて以来、同様な方法で W. I. Duvall⁴⁾, 伊藤⁵⁾ によつてなされている。最近大川⁶⁾ はコンクリートブロック内の爆破点近傍の歪を金属線歪計で測定し、波動の伝播模式は破壊にいたるまで弾性力学の範囲内で説明できると報告している。いずれの場合も Sharpe によつて求められた理論式と測定結果とはかなりよく合致しているが、実験の際測定されたのは爆破によつて惹起される波動の中で比較的高周波数の波である。もし塑性変形や非常に低周波数の波が存在したとしても計器の特性から見逃される可能性

がある。桜井⁷⁾は爆破点近傍の衝撃波の金属内における実験的研究から岩石にも言及して、その速度及び存在範囲について報告している。

一般に爆破によつて惹起される波は、爆薬量が充分多いときは、爆破点近傍で歪力が時間の函数として変化するとき、それに応じて衝撃波や塑性波や弾性波となつて伝播するものと考えられる。しかしこれらの波はほとんど同時に相前後して伝播するから、実験的にそれぞれの波を分析することは非常に困難であろう。しかしこれらの波の相互の間に伝播速度、周波数などの相違があれば、測定された実験結果を適当な方法で分析すれば判別できるはずである。このためには実験の際計器の周波数帯域を広くとつて、きわめて低周波数の波からかなり高周波数の波にいたるまで測定する必要がある。ところが実際問題として一定の振子・増巾器・電流計を組合わせると、それらの総合特性は限定される。この実験ではこれらの欠点を補うため測定の条件をできるだけ一定にして、実験現場では種々の周波数帯域の異なる振動計、歪計を準備して測定した。実験は主として金属鉱山の採鉱現場で行つたが、これを補足するため花崗岩の角柱を使つて爆破歪の精密測定を行つた。この際磁気記録器も使用し、再生時に周波数分析して、上記の野外実験の結果と比較しながら研究した。

爆破による歪力が岩石の破壊強度をこえると、当然これに伴つて破壊が起る。この際の破壊機構についても実験結果にもとづいて最も妥当だと思われるものについて考察を行つた。

実験結果として爆破点近傍では、初動の高周波数の波とこれに続く低周波数の波の二つの波群が測定された。また初動の伝播速度は爆薬量によつて影響され、爆破点近傍では超音波測定器によつて測定されたその岩石の弾性波伝播速度よりも遅く、この伝播速度の遅い範囲は薬量と共に増大することが解つた。

塑性変形は初動よりも時間的に遅れる場合が多く、圧縮波が自由面で反射して生じる張力波によつて主として生成されることが解つた。波動の周波数分析の結果、各成分の波の最大振巾の分布は薬量によつて影響されないが、時間に関しての分布は非常に変化している事実が見出された。

2. 実験装置

測定実験に主として使用した振子は、佐々式Ⅰ型振子で、爆破の際計器は岩石と共に飛出す程度の強大な歪力を受け、またその大きさも測定の場所が非常に限られた範囲内で多くの測点がとれることが望ましいから、できるだけ小型で堅固に設計されている。その模型図は図-1に示す通りである。

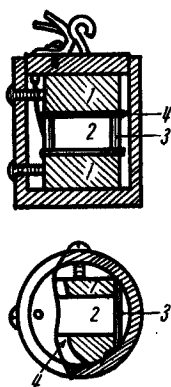


Fig. 1 Schematic representation of pick up

1. Permanent magnet
2. Coil
3. Frame of coil
4. Rubber plate

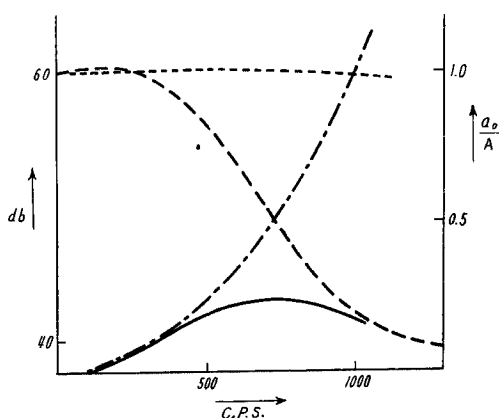


Fig. 2 Frequency response of instruments

- Pick up
- · - · - Amplifier
- - - Galvanometer
- Total response

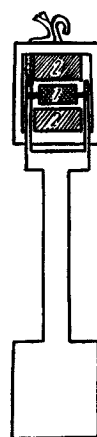


Fig. 3 Schematic representation of strain gage

計器の主要部は爆発の際の強大な圧力による破壊から免れるために分厚い真鍮の円筒で覆われ、岩石が破壊されてそれと共に飛出す際でも壊れないように設計されている。その固有周期は1 000 c.p.s. で、鉄心入りコイルは二枚のゴム板に挟まれ、枠に巻かれたコイルが振子となっていて、ゴムの粘性が制動作用をするようになっている。またこの際使用した電流計の固有周期は1 000 c.p.s. である。実際の測定の際はこの振子と増巾器・電流計を連結して記録するのであるが、増巾器・電流計の周波数特性は振子のそれと共に図-2に示す通りである。また図中にはこれらの総合特性も示している。

次に電磁歪計の模型的な構造は図-3に示す通りである。

図中(1)はコイル、(2)は永久磁石で受感方向は縦である。コイルと真鍮の錘りは同じ材料の棒で連結され、棒の長さは8 cm で、コイルの廻転及び錘りの横振れを防止するため、棒をピストン型にし、溝を造つて廻転しないようにした。

今実際の歪の方向を x 、受感方向を y とし、その角度を β とすると、 y 軸方向の歪計に書かれる歪はその長さを L とすると

$$y = \int_0^L \cos \beta \frac{\delta \xi}{\delta x} dx \quad (\xi \text{ は } x \text{ 方向の変位})$$

実際の記録の上にかかれるのは上記の歪計に電流計を直結したもので、近似的に

$$k \frac{\delta y}{\delta t} = k \frac{\delta}{\delta t} \int_0^L \cos \beta \frac{\delta \xi}{\delta x} dx$$

となる。ここで k は棒と磁石の単位速度に対して惹起される e. m. f. である。爆発の際の歪波の波長は棒の長さに比較して充分長いものと見なすことができるから、被積分区間では一定と考えてよい。従つて歪 y 及び strain rate は次式で与えられる。

$$y = L \cos \beta \frac{\delta \xi}{\delta x}$$

$$k \frac{\delta y}{\delta t} = k L \cos \beta \frac{\delta^2 \xi}{\delta x \cdot \delta t}$$

記録器はこの実験のために特に設計製作したもので、実験現場が坑道内で湿気及び塵埃などのため電流計の鏡の像が非常に不鮮明になるのを防ぐため、外部との遮断に特に留意して密閉できるようにした。また予想される現象の時間的経過が非常に速いため、感光紙として SS フィルムを使用し、フィルムの廻転速度は1秒間1~1.5 m とした。

上記の振動計及び歪計はその周波数特性から解るように比較的 low 周波数の波動については忠実に記録するが、高周波数のものに対しては充分とはいえない。また種々の周波数の波が重畳したとき、非常に複雑になることも予想されて、波動全般の様相を知るためには、低周波数のものと同時に高周波数の波動も測定でき、しかも比較的簡単に周波数分析できるような装置が望ましい。この意味で記録器として磁気録音機を使用し、振動計及び歪計と併用して記録し、再生時に周波数分析を行つた。この場合は電流計は再生時に種々特性の異なつたものが使用できるから比較的周波数帯域は広くなる。

この際使用した磁気記録装置の周波数帯域は50~7 000 c.p.s. で、その block diagram は図-4に示す通りである。

計器は7素子からなり、その内5素子は現象を記録するため

に使用し、1素子は時間及び発破時刻を記録し、1素子は声を録音するようになっている。時間は1 000

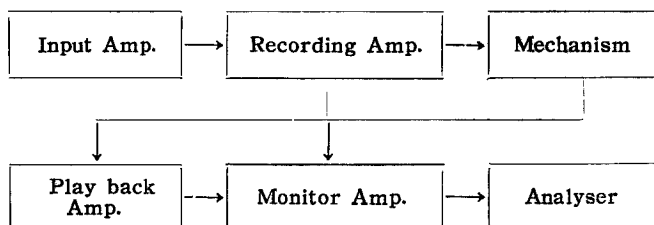


Fig 4. System block diagram

c.p.s. の発振器を入力に入れ、発破の際雷管に巻きつけた線でこれを短絡し、爆破と同時に時間が記録できるようにした。

振動計及び歪計の出力は図-4に示す磁気記録機の録音増巾器で増巾して磁気テープに記録するようになっている。この際録音増巾器と振動計及び歪計だけの周波数特性で、記録される波動に対する周波数特性は定まるから、ほとんど 50~7 000 c.p.s. の波動を記録することができる。記録の際増巾器が飽和しないように、あらかじめ録音原位を調整し、予想される最大振巾がその岩石の静力学的に求めた破壊強度より、3~4割多い程度のもので丁度飽和の限界になるようにした。また薬量の少ないときは、このようにして予想される最大振巾から逆に適当な仮定のもとに求められた減衰式を用いて計算し原位を調整した。もちろんこのような操作は概略の値を評価するだけのもので、定量的に原位を適当に調整することは原理的に不可能なことはない。

測定の際爆発と同時に発生する電磁波が記録の初動の部分と重畳し、noise となることがあるが、これは大川によって指摘されているように、その周波数は 30 K c.p.s. のもので、フィルターによって駆除することができるし、また適当な方法で shield することによって防止することもできる。

電磁歪計のほかに、歪の測定については金属線歪計も使用した。この際低周波数の歪波は塑性変形も含めて bridge を使用して測定し、高周波数の歪波は直接抵抗変化を電圧変化に変換して磁気記録器で記録した。bridge の両端に 5 000 c.p.s. の交流を作用させ、歪はこの搬送波を整流して金属線歪計の歪による抵抗変化を測定して求めることができる。この方式によると塑性変形も含めて 1 000 c.p.s. にいたるまでの歪の値を測定することができる。

1 000 c.p.s.~7 000 c.p.s. の歪を測定する際の測定装置は図-5に示す通りで、これを磁気記録器に連結して測定できるようになっている。

今測定用 gage に抵抗変化が生じると E_g に dE_g なる変化を生じるから、実際の歪の大きさを算出すると、

$$\frac{dL}{L} = \frac{R_g + R}{R_g \cdot R} \frac{dE_g}{I \cdot K}$$

ここで I は電流、 E は電池の電圧、 K は gage factor である。この場合 $R \gg R_g$ にとつてあるから

$$\frac{dL}{L} \approx \frac{1}{R_g} \frac{dE_g}{I \cdot K}$$

となる。

測定の際はこの dE_g を入力に入れて磁気記録できるようにしてある。この際使用した gage の gage factor は 2 で、金属線を紙にはりつけたものを更に接着剤で岩石にはりつけて測定する。接着面はあらかじめ砥石でみがき、シンナーでふき、gage と岩石の間に不純物がなく密着するようにした。岩石の試料が角柱のように上記の予備装置が充分できる場合は問題はないが、実際の坑道でしかも自由面が一つしかないときは、自由面から穿孔し、その深さがそれぞれ測点の深さになったとき、穴が充分大きくなければこのような操作はできない。そこでこの場合は同質の岩石のボーリングコアを採取し、これに gage をはりつけて穴の最深部に固定装置でこれを固定した。しかしこの場合は圧力歪は固定

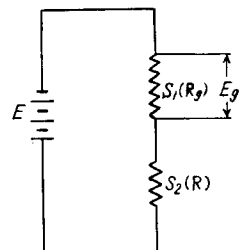


Fig. 5 Measuring system for strain wave of high frequency.

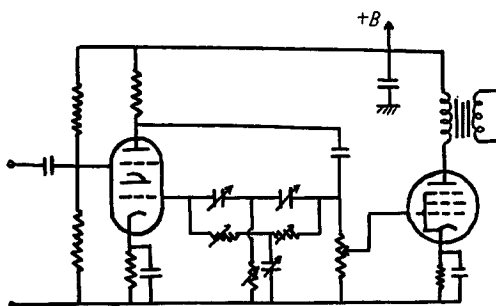


Fig. 6 Schematic diagram of analyser

装置がすべらない限り測定できるが、張力歪に対しては固定装置で初めに与えた初期歪以上のものは測定できない欠点がある。そのため現場実験ではほとんど歪は電磁歪計で測定した。

次に一度磁気記録した記録を周波数分析する際、図-6に示すような解析器によつて解析した。この計器の各周波数に対する特性は図-7のごとくなる。

3. 実験結果

(1) 爆破点近傍の振動

爆破点ごく近傍(20~100 cm)にI型振子を埋め、爆発による振動を測定した。この際爆破孔は自由面とほとんど垂直に穿孔し、振子配置のための孔も同様に穿孔して、その深さは測定しようとする点が孔の最深部になるようにした。爆薬は30%のダイナマイトを使用し、それを1 kg 爆発させた場合の特性は次表に示す通りである。

爆 速 (m/sec)	6 000
爆 発 温 度 (C°)	2 540
ガス比容積 (l/kg)	875
比 重	1.5
爆 発 力 (kg/cm ²)	9 300

このような方法で測定された記録の一例を示すと図-8のごとくなる。

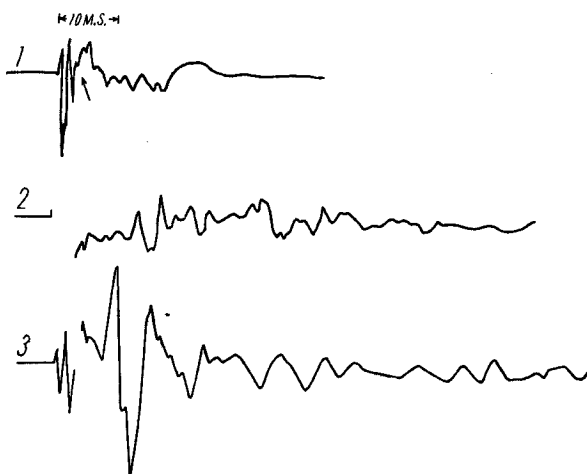


Fig. 8 Oscillogram near explosion (Explosive, 400gr)

異常な位相が現われ、これから後は各振子間に対応する位相を見出すことは困難で、特に爆破後設置点から振子が飛出すときはこの傾向は著しい。

初動の高周波部分及びこれに続く低周波部分の振動継続時間は、上記の規模の測定ではそれぞれ 5~10

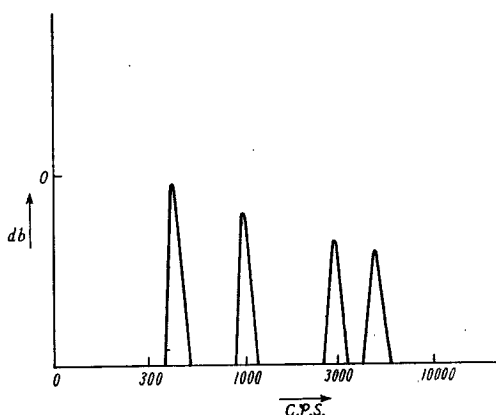


Fig. 7 Frequency response of analyser for each peak frequency

この際の振子及び爆薬の配置は図-9に示す通りである。

記録の上では初動は比較的高周波数(600~1 000 c.p.s.)の波で始まり、次にこれに比較するとやや低い周波数(200~600 c.p.s.)の波が続いて伝播していることが解る。この後

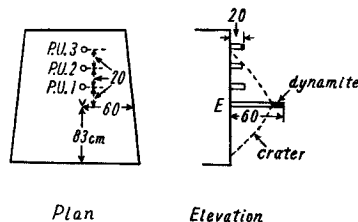


Fig. 9 Distributive positions of pick up and explosive

M.S., 10~15 M.S. であるが、これは後で述べるように、岩質・爆薬量によつてかなり変化する。

爆破点近傍で同じ振子配置で薬量を 50 gr, 220 gr, 450 gr と次々に変えて初動の走時曲線を描くと図-10のごとくなる。

図から解るように爆破点に近づくに従つて初動の伝播速度が遅くなり、薬量が増大するこの伝播速度の遅い範囲も増大している。しかしこの測定では各振子間の距離が短く、このため伝播速度算出の際に誤差がかなり生じる可能性がある。測定の精度を増すためには爆破の規模が大きく、振子間隔を相当大きく取つても速度異常が認められるような実験をする必要がある。そこで1954年5月1日爆破グループの釜石における大爆破の実施の機会に参加して測定を行つた。この実験に使用した計器は佐々式C型振子及びこれに附属した記録器である。この爆破は石灰岩の露頭に多くの爆破孔が掘られ、ダイナマイトはそれぞれの爆破孔に挿入して爆破された。地震計は直接地表に出ている岩石の上に置き、爆破点近傍の振動を測定した。この際の薬量は 0.1 ton で、得られた走時曲線は図-11に示す通りである。

この実験現場の石灰岩の超音波測定器による弾性波伝播速度は 4 km/sec である。また一方爆破グループが爆破点から 1 km 離れた測定点と爆破時間から算出した弾性波の速度は 4.5 km/sec である。

初動に続く低周波数の波、すなわち図-8の矢印を示した波は爆破孔の入口すなわち図-9のE点の部分で最も早く現われ、その伝播速度は初動に比較して非常に遅く 80~200 m/sec で薬量・岩質によつて異なる。

爆薬量が充分多く、爆発によつて生じる歪力が岩石の動的破壊強度以上になると、破壊の結果振動計が岩石と共に設置点から外に飛出す。その結果各振子の間に対応する位相が消失する。記録から判断するとこの事実が時間的に最も早く現われるのは、この第2次の低周波数の波と同様に爆破孔の入口において

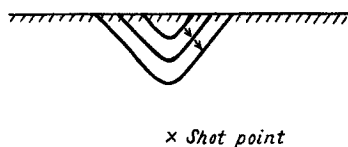


Fig. 12 Equi-wavefront curves of the secondary phase

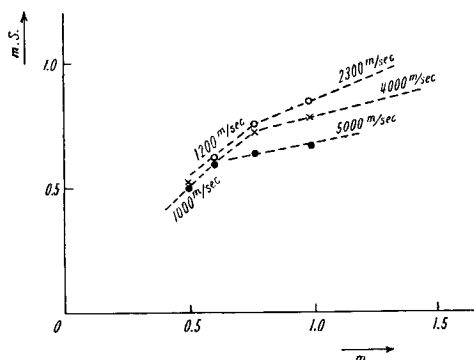


Fig. 10 Travel-time curve of initial shock near explosion, when quantities of dynamite are varied

●; 55 gr, ×; 220 gr, ○; 450 gr

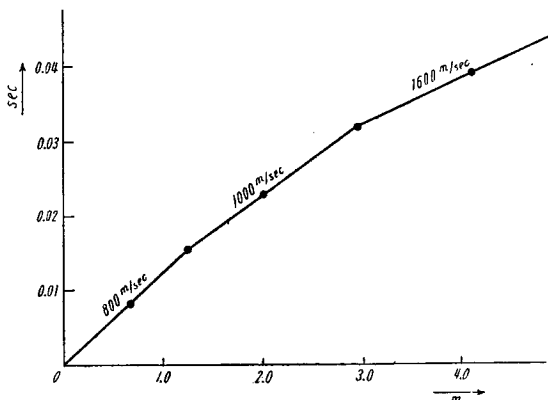


Fig. 11 Travel-time curve near explosion on the occasion of Kamaishi Explosion

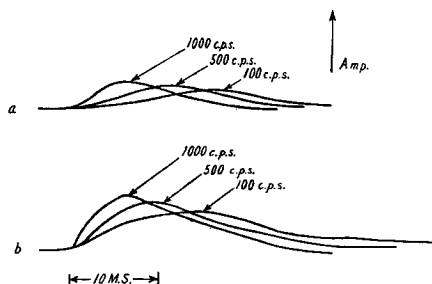


Fig. 13 Distribution of component wave as to time
(a) Explosive, 100 gr (b) Explosive, 300 gr

であり、図示すると図-12 のようになる。

次に薬量を変えたとき、振動を構成する各成分の周波数の波がどのように変化するかを実験的に検討して見よう。このためI型振子と磁気記録器を直結し、再生時に 100 c.p.s., 500 c.p.s., 1000 c.p.s. の波について分析して見ると図-13 のごとくなる。図に示されたのは爆破点からの距離はいずれも 50 cm で、薬量は (a) の場合は 100 gr, (b) の場合は 300 gr である。(a), (b) を比較して見ると、振動の初期においてはいずれの場合も高周波数の波が卓越している。そして低周波数の波はこれに続いていることが解る。しかし薬量が増大すると低周波数の波が振動の初期部分に収斂している。また 1000 c.p.s. の波はほとんど弾性波の伝播速度に近く 4 km/sec であるのに反して、500 c.p.s. の波はこれに比較して遅く 600 m/sec であることも注目される事実である。

第2次波の伝播速度が薬量、岩質などによつて影響されることはさきに述べたが、今岩質の目安として岩石の破壊効果を取つて表にすると次表のごとくなる。

発破孔の深さ (cm)	薬量 (gr)	破壊された岩石の円 錐状の軸の長さ (cm)	第2次波の伝播速度 (m/sec)	t_1 (M.S.)	t_2 (M.S.)
60	400	36	170	5.6	11.0
60	400	28	130	12.0	12.0
80	600	50	130	11.0	9.0
60	400	27	110	10.0	—
80	600	19	90	12.5	12.5

ここで t_1 は高周波数の波の振動継続時間

t_2 は低周波数の波の振動継続時間

上記の表から見ると破壊効果の悪い岩石すなわち爆破円錐穴の小さいほど、第2次波の伝播速度は遅くなっている。

次にこのような二つの爆破を重ね合せた場合どのようなかを検討して見よう。この際の振動様式は図-14 に示す通りである。

第1段目の振動様式は上記のものと大差はないが、第2段目の振動様式は単発破の場合とはかなり異なる。第2段目の爆破の初動は低周波数の波で始まり、高周波数の波が消失している。従つて岩石が第1段目の爆破で破壊されず、第2段目の爆破で破壊される場合は、第2段目の発破時間から測定すると、各振子間に伝播する波の位相が消失する時間は高周波数の波の振動継続時間だけ短縮されることになる。

(2) 爆破点近傍の歪

(a) 電磁歪計による測定

振動測定の場合と同様な方法で、振動計の代りに前記の電磁歪計を設置し、爆破点近傍の歪が爆破による圧力によつて時間及び空間的にどのように変化するかを実験的に確かめた。図-15 は計器及び爆薬の装填位置を示すもので、図中斜線を施した面で自由面に接している。

図-16~18 は振子配置を図-15 のごとくして、同様な条件で求めた歪計の記録である。

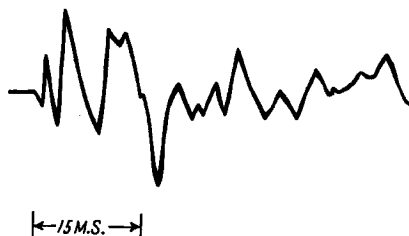


Fig. 14 Superposition of two explosion, 60 cm from first explosion and 40 cm from second explosion, time difference is 15 M.S.

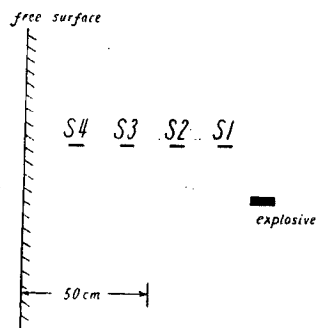


Fig. 15 Distributive positions of strain gage and shot point

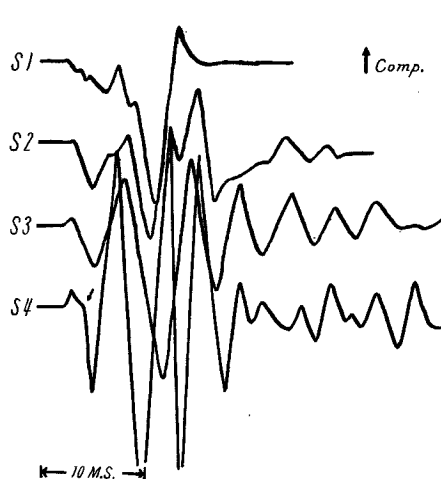


Fig. 16 Oscillogram recorded by the strain gage (Explosive, 50 gr)

この際破壊が起つたのは図-18のS₂, S₃, S₄の部分の岩石のみである。爆破によつて与えられる歪の中で、塑性変形を伴うものは、実験が同じ場所で繰返されると次々と後の実験結果に影響を及ぼすから、薬量の少ないものから逐次増加して実験を行った。

図から解るように、初動から約5 M.S.遅れて表面から顕著な張力変形が矢印で示したように伝播している。今初動とこの張力変形を第2次波としてそれぞれの薬量と伝播速度の関係を表にすると次のようになる。

爆薬量 (gr)	初動の 伝播速度 (m/sec)	第2次波の 伝播速度 (m/sec)
50	1500	270
150	1100	180
300	900	—

上の表では薬量が増加すると初動も第2次波も伝播速度が遅くなっている。この実験を行った際の岩石は、前の振動測定の場合と同様石英粗面岩で、超音波測定器による弾性波の伝播速度は約4 km/secである。

図-16~18で明かなように、一般に歪は爆破点に近づくに従つて非周期的で、距離が増大するに従つて非周期的な性質から次第に振動的な性質を持つようになっており、火薬量が増大するに従つて非周期的にな

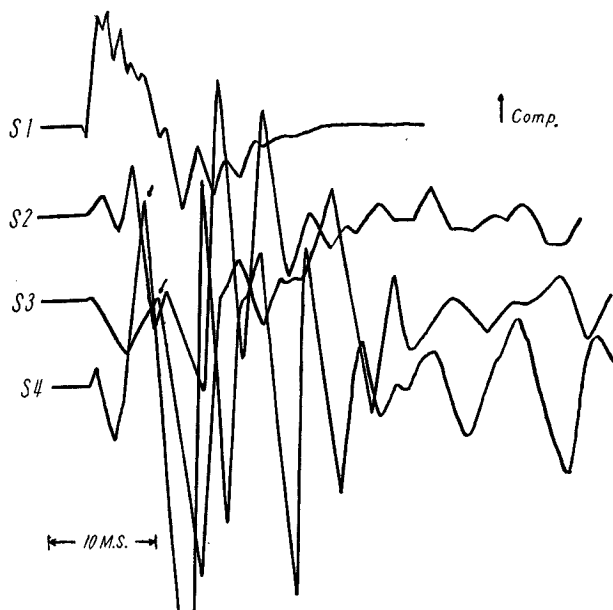


Fig. 17 Oscillogram recorded by the strain gage (Explosive, 150 gr)

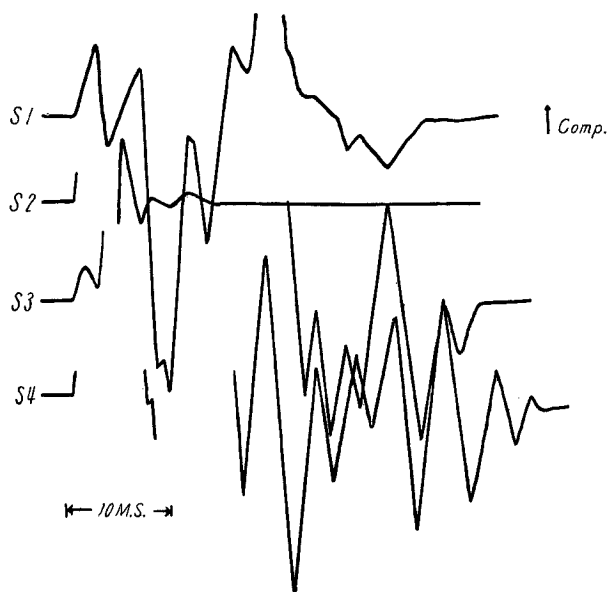


Fig. 18 Oscillogram recorded by the strain gage (Explosive, 300 gr)

る範囲は拡大され、歪の時間的経過が緩慢になっているのを記録から読取ることができる。これらの結果の一部は W. I. Duvall の実験結果でもすでに求められた実験事実であるが、彼の場合は自由面のない場合の歪の測定であつた。従つてこの実験で求められた自由面から伝播している低周波数の張力変形は測定されていない。また歪波は弾性限界内で伝播していると報告されているが、この実験結果では弾性波に比較して非常に伝播速度の遅い歪波が初動の部分から伝播し、第2次波に関しては、その伝播速度が更に遅くなっているのは著しい相違点である。

次に振動の場合と同様に、歪波の重ね合せについて実験的に考察して見よう。前記の実験結果から明らかのように、初動に続く高周波数の部分と、これと明らかに区別される低周波数の部分と二つに分けて考えると、爆破歪を重ね合わせる場合次の3通りの方法がある。

- (a) 初段の高周波部分と2段の高周波部分を重ね合わせる。
- (b) 初段の低周波部分と2段の高周波部分を重ね合わせる。
- (c) 初段の低周波部分がほとんど終つてから、2段の高周波部分を重ね合わせる。

実際の爆破の際、これらの波動の高周波部分及び低周波部分の振動継続時間は、すでに述べたように岩質、薬量などによつてかなり異なってくる。この実験を行つた岐阜県の神岡鉱山の採鉱現場では、母岩が安山岩、薬量100 gr の場合、高周波数の波が継続する時間は、爆破点からの距離が1 m の点で約 5 M.S. である。そこで初段と2段の時差を 4.2 M.S., 15.7 M.S., 40.8 M.S. に取つて二つの爆破歪を重ね合せた。この際の爆破孔及び計器の配置は図-19 に示す通りで、得られた記録は図-20~22 に示す通りである。

図-20~22から解るように時差が 40.8 M.S. のように大になると、二つの歪はそれぞれ独立に測定されるの

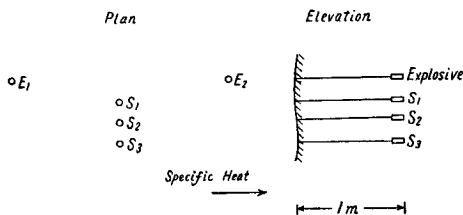


Fig. 19 Distributive positions of strain gage and explosive

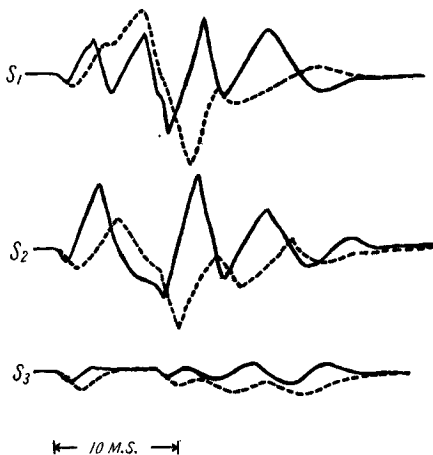


Fig. 21 Time difference, 4.2 M.S.

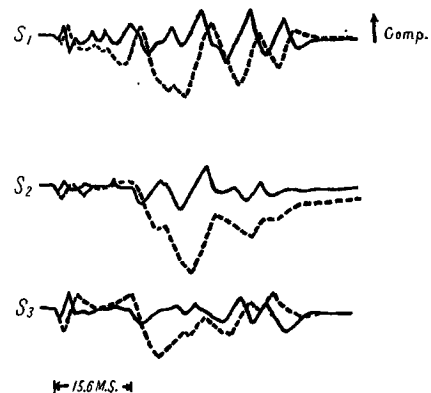


Fig. 20 Superposition of two explosion; time difference, 15.6 M.S.

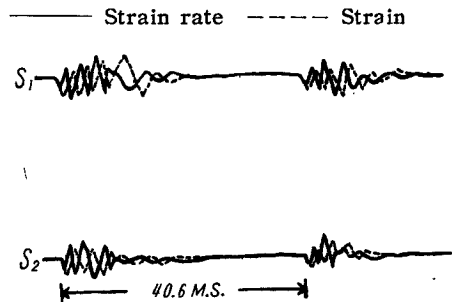


Fig. 22 Time difference, 40.8 M.S.

みで、重ね合せによる効果は現われてこない。この中で特に著しい変化が認められるのは時差が 15.7 M.S. のときで、2 段の歪は初段のものと比較して著しい張力変形が認められ、かつまた非振動的な性質を持っている。第 1 の場合のように時差が 4.2 M.S. で短い場合は、比較的重ね合せによる異常は少ない。

この測定結果から直ちに波動の伝播速度を求めるためには、測点の数、及び歪計相互間の距離が充分でなく、精密な数値を求めることはできない。しかし定性的にいえば、初段の初動の伝播速度はほとんど弾性波のそれに近いが、2 段の伝播速度は初段に比較して遅い場合も認められ、重ね合せの時差の如何によつて多少の変動は認められるようである。

（b）抵抗線歪計による測定

野外実験の際は、電磁歪計を用いて比較的容易に爆破歪を測定することができたが、このようにして求められた歪はどうしても歪計及び電流計の周波数特性によつて制限され、塑性変形や、比較的高周波数の歪も総合的に測定し、爆破歪全般について研究するためには更に精密な測定をせねばならぬ。このため花崗岩角柱の同質・同形・同大のものを数本準備し、これに金属線歪計をはりつけて爆破歪を測定した。

長さ 180 cm、断面積 $20 \times 25 \text{ cm}^2$ の花崗岩角柱の表面に金属線歪計を固定した。ダイナマイトは角柱の一端で爆破させた。薬量は 15 gr から 60 gr まで種々変えてそれに対応する歪を測定した。0~1000 c.p.s. の周波数の歪波に対しては前述の bridge 方式により、1000 c.p.s. 以上の周波数の波に対しては図-5 に示す方法で磁気記録機で録音テープに録音し、再生時に図-6 に示す解析器を使用して周波数分析をした。各歪計の配置は写真-1 に示す通りで、この際 bridge 方式で低周波数の歪波について測定した結果は写真-2~3 に示す通りである。

図から解るように薬量が少ないときは重複反射による振動が明瞭に出ており、薬量が増加すると当然の結果として圧力歪が増大し、



Photo. 1 Distributive positions of strain gages

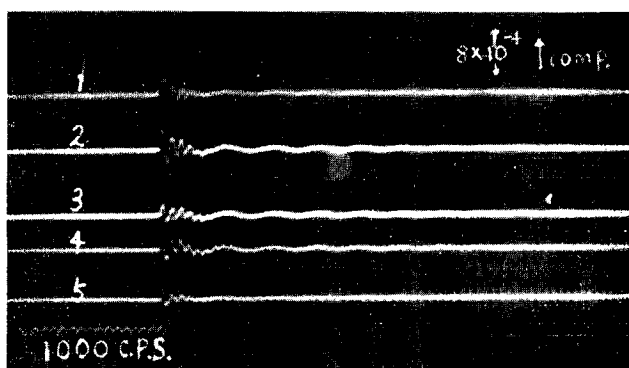


Photo. 2 Strains near explosion measured by wire strain gages (Explosive, 15gr)

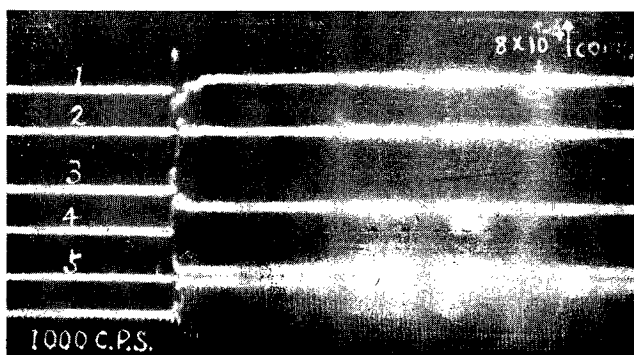


Photo. 3 Strains near explosion measured by wire strain gages (Explosive, 45gr)

他端から反射した張力歪も認められ、塑性歪を伴っているのを読取ることができる。またその伝播速度が非常に遅く、塑性変形の時間的経過も非常に緩慢である。

薬量が 15 gr の際の初動の走時曲線からその伝播速度を求めると 3 920 m/sec で、これは花崗岩の弾性波伝播速度に近い。これに比較して他端から反射して塑性変形を伴い破壊を起している波の伝播速度は写真-2 より求めると、非常に遅く約 120 m/sec である。

薬量が 45 gr に増加すると写真-1 に示す位置で破壊が起きているが、写真-3 から解るように、始め爆発によつて生じた圧力波が他端で反射し、張力波となつてこれが岩石の破壊強度に達したとき破壊がなされているようである。もち論写真-3 から解るように、装薬点に近い点では圧縮歪が永久歪となつて残つており、破壊結果からも爆薬に密着した箇所では、岩石が直接圧縮を受けて細かく破壊されている。

同質・同形・同大の花崗岩で 1 000 c.p.s. 以上の波に重点をおいて測定した結果について述べよう。先に述べた磁気記録機で録音し、再生時に周波数分析を行つた結果を図-23~24 のようになる。薬量はそれぞれ 30 gr, 45 gr で T_1 , T_2 はそれぞれ爆破点から 30 cm, 90 cm 離れた測定点を示す。

図は各成分の波の最大振幅の分布について求められたもので、時間的な分布には関係はない。

図-23 と図-24 を比較すると、最大振幅を与える周波数の

波及び各成分の周波数の波の分布はほとんど似ており、図-24 では薬量の増加に相当する歪の増加が認められるだけで、この範囲の周波数の領域では、薬量の増加に相当する最大振幅を与える各成分の周波数の分布はほとんど影響されていない。 T_1 , T_2 を比較するといずれの場合も最大振幅を与える周波数の近傍では減衰は少ないが、低周波部分及び高周波部分ではかなり減衰していることが解る。

このような周波数の分布がどのような原因によるかは明らかでないが、粘弾性体⁹⁾ による波動の減衰による影響も考えられる。しかし花崗岩の場合は松島⁹⁾ によつて静力学的に求められたごとく、その緩和時間は 7~8 秒であるから、粘性の影響のみではこの結果は説明できない。

4. 結果に対する考察及び破壊機構

爆破点近傍の振動の測定結果から、初動に続く高周波数の波動と、これよりやや遅れて伝播する低周波数の波動が測定された。また爆破歪の測定では、爆発による圧縮歪とこれが自由面で反射されて生じる張力歪を測定することができた。爆破点ごく近傍では衝撃波が存在するかも知れぬが、この実験では測定されていない。振動と歪と対比すると、振動の高周波数の波

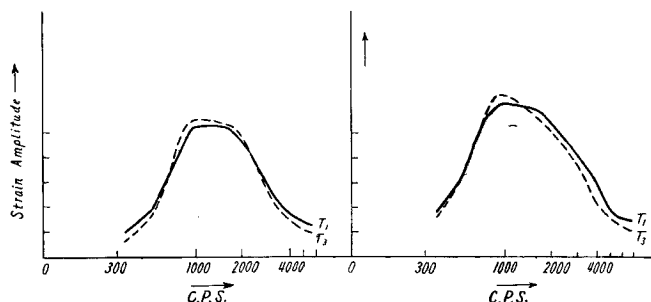


Fig. 23 Distribution of strain amplitude; explosive, 30 gr

Fig. 24 Distribution of strain amplitude; explosive, 45 gr

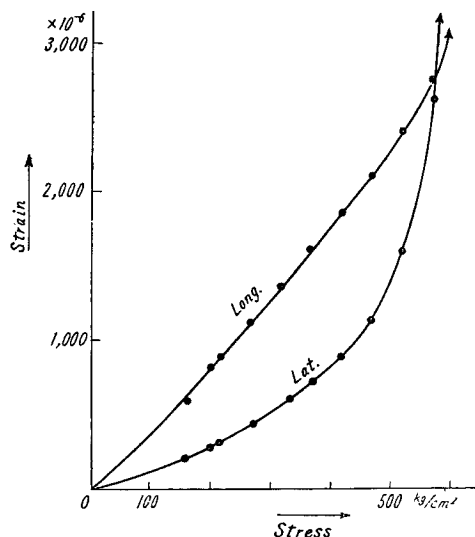


Fig. 25 Stress-strain relation of liparite

は圧縮歪に相当し、やや低周波数の波は張力歪に相当する。今実験に最も多く使用された石英粗面岩の静力学的に求めた歪力-歪関係は図-25に示す通りである。

また花崗岩については松島によつて数多くの測定結果が与えられている。図-25から解るように歪力が弾性限界を越えると、歪力の増加に伴う歪の増加率は大きくなる。弾性限界を越えた歪の伝播速度は $v = \sqrt{\frac{d\sigma}{d\varepsilon} / \rho}$ で与えられるから、薬量が増大し、従つて歪力が増加して弾性限界を越えると伝播速度は遅くなる。塑性歪の異常に遅い伝播速度は、このような原因によるものと考えられる。

歪及び振動の周波数分析の結果から解るように、薬量が増大すると比較的高周波部分を構成する各成分の最大振幅の分布は影響されないが、各成分の波の時間的分布が異なり、周波数の低い波が振動の初期部分にまで現われ、初期の伝播速度に影響するものと考えられる。歪力が増大すると初動の周期が大になるのもこのような原因によるものと考えられる。爆破による岩石の破壊機構に関する理論はいろいろの人によつて提唱され、それぞれの様相における破壊現象を説明している。しかし総合的な破壊全般について完全なものはない。一般に物質の破壊という問題は確率過程として理解されているから、一般理論を求めることは困難なことかも知れない。しかし爆破のように荷重が非常に瞬間的でまた強大なときは応力集中が起り、比較的組織に鈍感な現象として解釈され、また実際問題として入射する圧力波と自由面で反射した張力波の干渉によつて応力集中が起る。実際の実験結果からも、自由面の形状・薬量・爆破点の位置などに関する諸条件がほぼ一定のときは、爆破後の岩石の破壊された幾何学的形状は一定している。

この実験結果では、最も多く起つていると推定される破壊は、Hopkinson 効果¹⁰⁾、すなわち入射波が自由面で反射して形成される張力波によるものであると考えられる。一般に岩石の破壊強度は圧縮に対するものと張力に対するものでは非常に異なり、伊藤と寺田の実験結果¹¹⁾によると次表の通りである。

岩 石		引張強度 (kg/cm ²)	圧縮強度 (kg/cm ²)	このため圧縮歪に対しては弾性限界内で伝播しても、それが張力歪になった場合破壊強度を越え、破壊されるものと考えられる。もち論爆薬と密着している箇所の岩石が直接圧縮により破壊されるのは前に述べた通りであるが、破壊される岩石の総量に比較すると微小部分に過ぎない。
花 崗 岩	1	59	735	
	2	60	503	
	3	60	588	
砂 岩	1	71	1350	爆破点近傍の振動模式が岩質が同じで、同一場所で測定するときは薬量に関係なくほとんど定まつた形のものとなることは、地震の際、同一観測所で同一地域の地震を観測したときほとんど相似の地震計記録が得られること ¹²⁾ と考え合せると、振動源から発射される弾性波が一定の成分の周波数の波動から構成されていることにほかならない。これは実験の際の周波数分析
	2	67	966	
	3	101	1350	
大 理 石 (粗粒)	1	46	366	
	2	44	222	
大 理 石 (細粒)	1	35	734	
	2	36	512	
	3	46	690	

の結果求められた事実とよく合致している。

終りに御指導を受けた佐々先生に御礼申上げる。またこの実験が生野・神岡・紀州各鉱山の御厚意によつて実験現場が与えられたことに謝意を表するとともに、実験の一部は文部省試験研究費によつてなされたことに御礼申上げる。

参 考 文 献

- 1) Karman and Duwez: The Propagation of Plastic Deformation in Solid, Jour. of Applied Physics, Vol. 21, 1950, p.987.
- 2) B. F. Howell Jr., and E. K. Koukonen: Attenuation of Seismic Waves near Explosion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 44, No. 3, p.481.

- 3) Joseph A. Sharpe: The Production of Elastic Waves by Explosion Pressures; 1. Theory and Empirical Observation, Geophysics, VII, No. 3, 1942, pp. 144~154.
- 4) W. I. Duvall: Strain-wave Shapes in Rock near Explosion, Geophysics, Vol. XVIII, 1953, No. 2, p. 310.
- 5) 伊藤一郎: 水曜会誌 12巻10号, 昭和30年6月.
- 6) 大川禎三: 応用物理 25巻 p. 492.
- 7) 桜井武尚: 応用物理 25巻8号, 9号.
- 8) Kolsky: Stress Wave in Solid.
- 9) 松島昭吾: 地震 8巻4号, p. 178.
- 10) John S. Rinehart: Jour. of Applied Physics, Vol 22, 1951, p. 555.
- 11) 伊藤一郎・寺田孚: 水曜会誌 13巻2号, p. 95.
- 12) 吉川宗治: 地震 7巻1号, p. 21.