

コンクリートブロックと水との境界面 における応力波の伝ばんに関する研究

花崎 結一* 伊藤 一郎*

層状の媒質内を伝ばんする応力波の挙動に関する研究は多くの研究者によつてなされている。しかし、岩石と水との境界面における応力波の伝ばんに関する研究はほとんどみあたらない。本論文において、我々は岩石から水へのおよび水から岩石への応力波の伝ばんに関する実験および数値解析を行なつた結果などについて述べる。

すなわち、電気雷管の爆発により発生する応力波の伝ばんについて次のような実験結果を得た。

- 1) コンクリートブロックから水へ応力波が伝ばんする場合は、透過波の振幅は入射波のその約40%に減少する。
- 2) 水からコンクリートブロックへ応力波が伝ばんする場合は、透過波の振幅は入射波のその約160%に増大する。

また、差分方程式を用いたシミュレーションによる数値解析から次のような結果を得た。

すなわち、コンクリートブロックの近くの水中で爆発させる場合、爆源からコンクリートブロックまでの距離が大きいときはコンクリートブロック内に生じる応力はほとんどすべて圧縮応力になるが、爆源からコンクリートブロックまでの距離が小さいときは、これらの応力は圧縮応力または引張応力を示す。

1. 結 言

一般に異なる媒質の境界面を通る応力波の伝ばんに関する研究は、小振幅の場合は音響学^{1),2)}や地震学^{3),4)}の領域において広くなされている。また、爆薬の爆発による振幅の大きな応力波の場合についても、モアレひずみ計を使用し、高速度撮影によつて材質の異なる2種の合成樹脂の境界面を通過する応力波の応力状態を観測した結果が報告されている⁵⁾。

しかし、水中から他の媒質への応力波の伝ばん、また逆に他の媒質から水中への応力波の伝ばんに関する研究はあまり見当たらない。しかしながら、これらに関する現象をよく把握しておくことは、水中での爆破作業とくに構築物の近傍における爆破作業の場合には重要なことであると思われる。

そこで、今回は、上に述べた条件を満たす実験を行ない、その結果について検討を加え、応力波の伝ばんの様相を明らかにしたので、その結果について報告する。

2. モルタルブロックから水中への圧力波の伝ばん

2-1 実験方法

Fig. 1(a) に示すように、モルタルブロックの自由面近くに3号電気雷管を埋めこみ、自由面にクレータが生成するようにした。したがつて、この自由面と電気雷管の先端までの距離、すなわち、最小抵抗線Lの長さを約2 cmから約6 cmの間で変化させて測定を行なつた。このモルタルブロックを Fig. 1(b) に示すように水深約2 mの水中に沈め、自由面から20 cmはなれたところに圧力変換器を設置し、モルタルブロックの爆破の際に水中に投射されてくる圧力波の様相を観測した。

また、Fig. 1(c) に示すように、水中で3号電気雷管を爆発させたときの圧力も測定して内部装薬爆破により水中に投射される圧力波が水中装薬の場合に比べてどの程度小さくなるかを比較するためのデータとした。

2.2 圧力変換器について

この実験に用いた圧力変換器はダイヤフラム式のものであり、水中の圧力に応じてダイヤフラムがひずむことによりダイヤフラムの裏面に貼りつけられた半導

昭和46年10月14日受理

* 京都大学工学部資源工学教室 京都市左京区

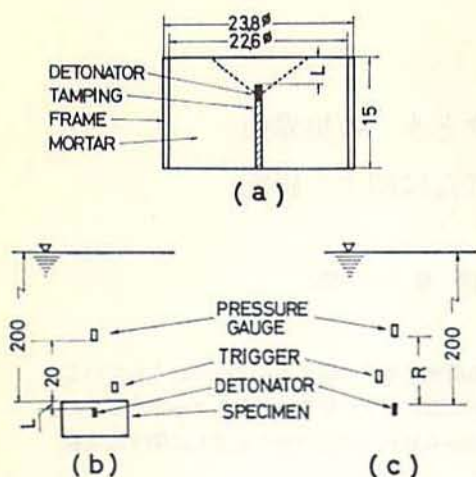


Fig. 1 Explanatory figures of the experiment.
 (a) Mortar block specimen (cm).
 (b) Crater test type (cm).
 (c) Underwater explosion type (cm).

体ピエゾ素子に抵抗変化が生じる。この変化を電氣的に計測することにより圧力の大きさを測定することができる。この変換器の特徴は、チタン酸バリウムなどの圧電型変換器とちがって、静的校正を容易に行なうことができ、測定回路が比較的簡単なことである。しかし、変換器の固有振動数はあまり大きくないので、高い周波数の現象についてその絶対値を正確に測定するには適当な補正を施す必要がある。

この実験で用いた変換器の固有振動数は140KHz以上であるが、一方、予備実験から測定すべき現象は約20KHz～50KHz程度であることがわかっており、このようなきびしい条件ではあるが、測定すべき現象の波形はほとんど変化せず一定で、その大きさのみが変化するものと考えられるので、種々の条件下で測定された現象の相対的な関係を検討するには十分であると考えられる。

なお、変換器は、圧力の測定範囲が100kg/cm²までのものと、500kg/cm²までのものの2種類を使用し、条件によって使いわけた。

2.3 実験結果

測定記録の一例を Fig. 2 に示す。Fig. 2(a) は、モルタルブロックを3号電気雷管で爆破したときに水中に伝ばした圧力波をブロックの自由面から20cmのところで測定した記録であり、この図は最小抵抗線が4.5cmのときの一例である。また、Fig. 2(b) は3号電気雷管のみを水中で爆発させたときに水中に伝ばした圧力波を測定した記録であり、この図は、電気雷管と圧力変換器との距離が50cmの場合の一例であ

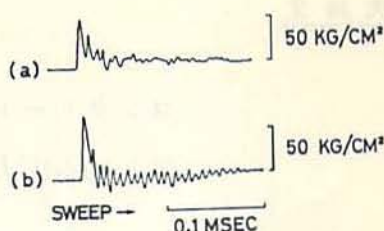


Fig. 2 Examples of records.
 (a) Crater test type ($L=4.5$ cm).
 (b) Underwater explosion type ($R=50$ cm).

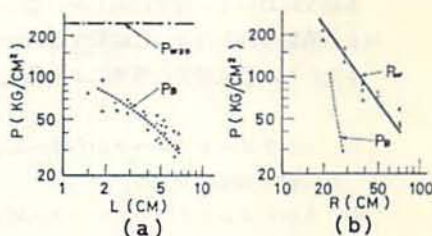


Fig. 3 Curves obtained by the experiment.
 (a) Effect of the length of the least resistance (L) on the peak pressure in the case of the crater test type (P_B).
 (b) Effects of the distance from the pickup to a detonator (R) on the peak pressure in the case of the crater test type (P_B) and on the peak pressure in the case of the underwater explosion type (P_W).

る。これらの記録を整理して得られた結果を Fig. 3 に示す。

Fig. 3(a)に示した点線は、内部装薬爆破の場合に水中に投射された圧力波をブロックから20cmはなれたところで測定した波形について、そのピーク値 P_B と最小抵抗線の長さ L との関係を両対数グラフ上に表わしたものである。なお、同図に示した鎖線は、3号電気雷管を水中で爆発させた場合の爆源から20cmはなれた位置での圧力波のピーク値 P_{W20} を表示したものであり、最小抵抗線が小さくなるにつれて点線の曲線はこの値に限りなく近づかずである。

また、Fig. 3(b) は水中で3号電気雷管を爆発させた場合の爆源からの距離 R とそれらの位置における圧力波のピーク値 P_W との関係を両対数グラフ上に実線で表わし、さらに点線は、内部装薬爆破の場合の爆源からの距離 ($R=L+20$) とそれらの位置での圧力波のピーク値 P_B との関係を示したものである。この図

において同じ R に対する P_B と P_W との値を比較してみると、明らかに P_B は P_W より小さく、最小抵抗線 L が大きくなれば急激にその差が広がっていく傾向にある。このことから、水中に投射される圧力波だけについていえば、同じ薬量であれば内部装薬爆破の方がはるかに他の構造物などに与える影響は少ないということがいえる。

いま、以下に述べる仮定のもとに、Fig. 3 (b) からモルタルブロックの中を伝はんする応力波の減衰率を求め、モルタルブロックと水との境界面に入射する応力波と、水中に透過される圧力波の値と最小抵抗線 L との関係を求めてみる。

仮定 1: 水中を伝はんする圧力波の距離による減衰率は一定であるとする。

仮定 2: モルタルブロック中を伝はんする応力波の距離による減衰率は一定であるとする。

仮定 3: 電気雷管の爆轟時には、それに接している部分の水は高圧になるので音響インピーダンスが大きくなり、モルタルブロックのそれと同じ大きさになるものとする。すなわち、電気雷管の爆轟時にはそれに接している水およびモルタル内には同じ大きさの圧力が伝えられるものとする。

さて、一般に二つの異なる媒質の境界面を球面波が通過する場合 Fig. 4 に示すように O_1 を発生源として進んできた球面波は境界面を通過すると波頭は球面ではなくなり、波面の曲率は場所によつて異なつて、波面上の各々の点はあたかもそれらの点の曲率中心を発生源とする波の如き挙動を示す。いま O_1 から角度 θ_1 の方向へ進んできた波面が境界面を過ぎるとあたかも O_2 を発生源とするかのように角度 θ_2 の方向へ進むものとする、図に示した x と y との関係および θ_1 と θ_2 との関係はつぎのようになる。

$$x \tan \theta_1 = y \tan \theta_2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{C_{L1}}{C_{L2}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 C_{L1} および C_{L2} は媒質 1 および媒質 2 の縦波の伝はん速度である。

(1)式および(2)式から次の関係が得られる。

$$y = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_1}} x \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $n = C_{L1}/C_{L2}$ $\dots\dots\dots (4)$

したがつて、 O_1 から境界面に垂直に進む波、すなわち $\theta_1 = 0$ の方向へ進む波については、境界面通過後のあたかも発生源であるとなしうる点の y の値を y_0 とすると、 y_0 はつぎのようになる。

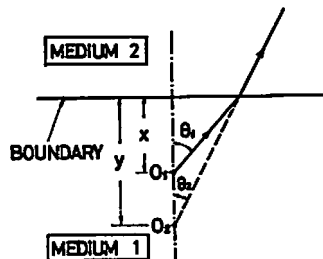


Fig. 4 Explanatory figure of the wave propagation around the boundary in a layered medium.

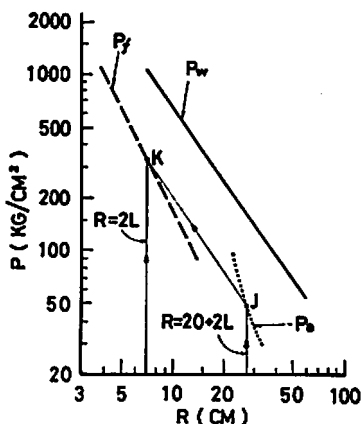


Fig. 5 Effects of the distance from the pickup to a detonator (R) on the corrected peak pressure at the pickup (P_B) and the peak pressure in water at the boundary (P_j) in the case of the crater test type, and on the peak pressure at the pickup in the case of the underwater explosion type (P_W).

$$y_0 = \lim_{\theta_1 \rightarrow 0} y = nx \quad \dots\dots\dots (5)$$

いま、媒質 1 をモルタルブロック、媒質 2 を水とすれば、 $C_{L2} \approx 1,500$ m/sec. および $C_{L1} \approx 3,000$ m/sec. であるから(4)式より $n \approx 2$ となる。したがつて、(5)式より $x=L$ とすれば

$$y_0 = 2L \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。すなわち、最小抵抗線 L の場合について、自由面から 20cm 離れた位置で測定したピーク圧はあたかも水中にある爆源からの距離 R が $20+2L$ の位置のピーク圧を測定したこととなる。したがつてこの値から水の減衰率を考慮して爆源からの距離 $R=2L$ のところでのピーク圧、すなわち、モルタルブロックの自由面上で水中に伝はんされるピーク圧を推定することができる。すなわち、Fig. 5 の点線で示した曲線 P_B

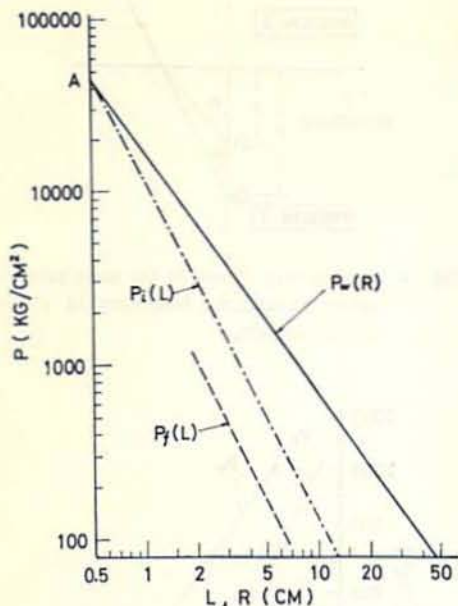


Fig. 6 Effects of the length of the least resistance (L) on the peak pressure in water at the boundary (P_f) and the peak compressive stress in the mortar at the boundary (P_i) in the case of the crater test type, and the effect of the distance from the pickup to a detonator (R) on the peak pressure at the pickup in the case of the underwater explosion type (P_w).

は上に述べたことを考慮して、ピーク圧の測定値と仮想爆源からの距離 ($R=20+2L$) との関係を表わしたものであるが、この曲線と、この場合の水の減衰率すなわち同図の爆源からの距離とピーク圧の関係を表わした実線 P_w の勾配からモルタルブロックの自由面上で水中に伝ばんされるピーク圧すなわち透過波のピーク圧 P_f を推定できる。いま、最小抵抗線が L の場合についてその方法を説明すると、Fig. 5 の点線で表わした曲線 P_B と $R=20+2L$ なる直線との交点 J から実線 P_w と平行な直線を引き、その直線と、 $R=2L$ なる直線とが交わる点 K の圧力値が求める値 P_f である。このようにして求めた圧力値と最小抵抗線 L との関係を表わす Fig. 5 の破線 P_f を表わす。したがって、この破線の勾配はモルタルブロック中を伝ばんする応力波の減衰率を表わしていることになる。この図からその値は約 1.9 であることがわかる。

つぎに、このモルタルブロック中を伝ばんする応力波の減衰率を用いて、自由面でのモルタルブロック側の入射波のピーク圧 P_i を推定してみる。この考察の

最初に述べたように、水中の場合もモルタルブロックの場合も電気雷管の壁面ではその圧力値は等しいものと仮定している。いま、電気雷管の壁面を $R=0.5\text{cm}$ とすれば、Fig. 6 に示すように水中での爆源からの距離 R とピーク圧との関係を表わす実線 $P_w(R)$ と $R=0.5$ なる直線の交点 A から電気雷管の壁面でのピーク圧は約 45,000 気圧であるものと推測される。したがって、モルタルブロック内においても、 $L=0.5\text{cm}$ においては同じ圧力が伝えられると考えているから爆源からの距離 L とピーク圧との関係を表わすグラフは、この A 点を通り勾配がモルタルの減衰率と等しい直線によって表わされることになる。Fig. 6 の鎖線 $P_i(L)$ はこの直線を表わしており、とりもなおさずこの直線は最小抵抗線 L と自由面への入射波のピーク圧 P_i の関係を表わすことになる。

また、同図の破線 $P_f(L)$ は Fig. 5 を参照して境界面から水へ透過される圧力波のピーク値 P_f と最小抵抗線 L との関係を表わしたものである。この図より P_f と P_i の比の値を求めてみると約 0.36 となる。

一方、音響理論によれば、密度が ρ_1 、応力波の伝ばん速度が C_1 である媒質 1 から、密度が ρ_2 、応力波の伝ばん速度が C_2 である媒質 2 へ応力波が直角に入射するとき、媒質 2 へ透過してゆく応力波の圧力 P_f と入射応力波の圧力 P_i との関係は

$$P_f = \frac{2\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} P_i \quad \dots\dots\dots (7)$$

で与えられることが知られている。そこでいま、モルタルブロックを媒質 1 に水を媒質 2 と考え、それぞれの媒質の密度およびそれらの媒質中での応力波の伝ばん速度をそれぞれ $\rho_1=2\text{g/cm}^3$ 、 $C_1=3,000\text{m/s}$ 、 $\rho_2=1\text{g/cm}^3$ 、 $C_2=1,500\text{m/s}$ として、上記の(7)式により P_f/P_i の値を求めてみると、0.4 となる。このように、実験結果から得られた P_f/P_i の値と音響理論から算出したその値とはほぼ等しい。

したがって、内部装薬爆破の場合は、自由面に入射する応力波と、水中に透過される圧力波の関係は、ほぼ音響理論を満す関係にあることが実験的に確かめられ、すでに述べた仮定にあまり大きな誤りがないものと思われる。

3. 水中からコンクリートブロックへの圧力波の伝ばん

3-1 実験方法

水中に打設したコンクリートブロックの近くの水中で、各種の爆薬を爆発させ、その際に伝ばんされる圧力波をコンクリートブロックの壁面近傍の水中で測定するとともに、さらにコンクリートブロック内に透過

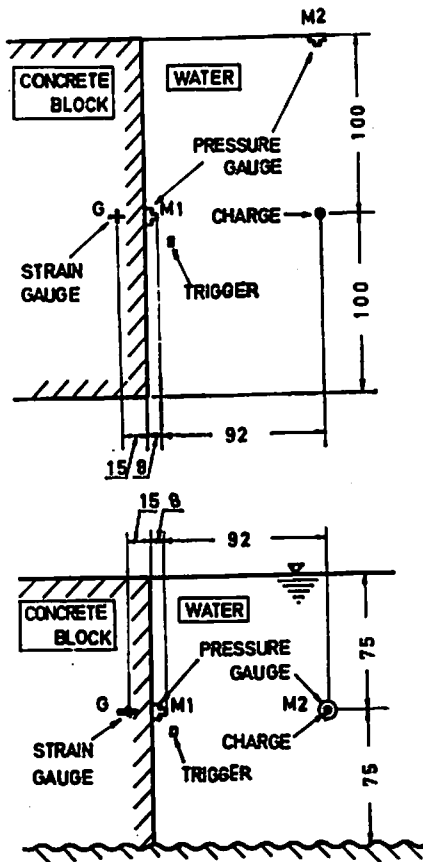


Fig. 7 Plan and elevation of the measuring site (cm).

した応力波によるひずみ波形をコンクリートブロックに埋設したひずみゲージによって測定した。すなわち、Fig. 7に示すように、コンクリート壁面から1mはなれたところに爆源をおき、コンクリート壁面のごく近くに圧力変換器 M_1 を設置して、この場所における圧力 P_1 を測定した。

また、爆源から1mはなれた壁面の影響のないと考えられるところにも圧力変換器 M_2 を設置して、この場所での圧力 P_2 を測定して P_1 との比較に供した。

さらに、コンクリート内のひずみを測定するためにコンクリートブロックの壁面の近くに壁面と平行に適当な深さの円孔をあけ、その中に、2つの円柱状のモルタルコアの間に2方向型ひずみゲージ(クロスゲージ)をさみ込んで接着剤でかためた埋込み型ひずみゲージを挿入し、モルタルを流し込んで固定させた。

なお、ひずみゲージの方向は、クロスゲージの一つはゲージ位置の G と M_1 を結ぶ方向のひずみ ϵ_s を、もう一つは、それと垂直で水平方向のひずみ ϵ_r を測定できるように埋設した。

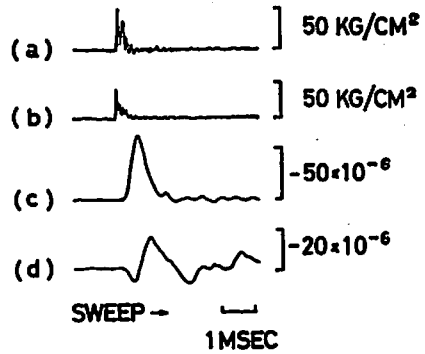


Fig. 8 Examples of records (smokeless powder ... 40gr).

- (a) Pressure (P_1).
- (b) Pressure (P_2).
- (c) Strain (ϵ_s).
- (d) Strain (ϵ_r).

3-2 実験結果および考察

Fig. 8に得られた記録の一例を示す。これは、データレコーダの再生出力を電磁オシログラフにより記録したものであり、図の上から順に P_1 、 P_2 、 ϵ_s 、および ϵ_r の記録を示すものである。この図から壁面近くの圧力波形すなわち P_1 にはピークが二つあるが、最初のピークは入射波のものであり、第2のピークは反射波によるものである。したがって、入射波と反射波の関係を調べるには、これらのピーク値を比較すればよいことになるが、第2のピーク値は入射波に重畳しているし、ピークの先端もかなり鈍っているので、正確には比較しにくい。そこで、入射波と同じ波形を示すものと考えられる M_2 の圧力変換器で測定した圧力波形と、 M_1 で測定した圧力波形の力積を比較することにした。なお、一般に圧力波形 $p(t)$ の単位面積当りの力積 I はつぎのように表わされる。

$$I = \int_0^{\infty} p(t) dt \quad \dots\dots\dots (8)$$

さて、Fig. 9は M_1 および M_2 で測定した圧力波形の力積 I_1 および I_2 の関係を表わしたものであり、Fig. 10は、 M_1 で測定した圧力波形の最初のピーク圧力 P_{1max} すなわち、コンクリート壁への入射波のピーク圧力と、 M_2 で測定した圧力波形のピーク圧力 P_{2max} との関係を表わしたものである。これらの図から明らかなように、 P_{1max} と P_{2max} はほぼ等しいと考えられるので、 M_2 で測定された圧力波形は、コンクリート壁へ入射する圧力波形を示すものと考えられることができる。また、 M_1 で測定された圧力波形の力積 I_1 は、入射波の力積 I_i と反射波の力積 I_r との和であり、これは透過波の力積 I_f に等しい。したがって、

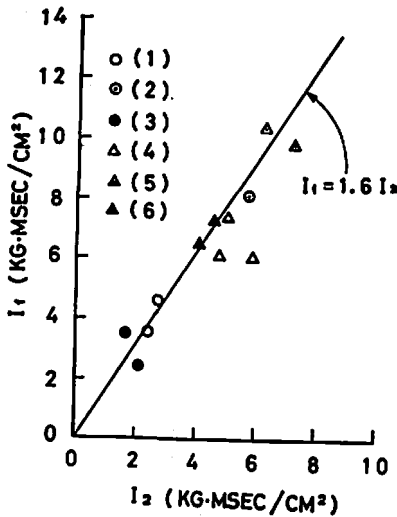


Fig. 9 Relation between the impulse at $M_1(I_1)$ and the impulse at $M_2(I_2)$.
 (1) Kiri dynamite ... 10 gr.
 (2) Kiri dynamite ... 40 gr.
 (3) PETN ... 7 gr.
 (4) Black powder ... 40 gr.
 (5) SLB ... 40 gr.
 (6) Smokeless powder ... 40 gr.

Fig. 9 は入射波の力積と、透過波の力積の関係を示しているものと考えることができる。

さて、一般に音響インピーダンスが R_1 なる媒質 1 から音響インピーダンスが R_2 なる媒質 2 へ圧力波が境界面に垂直に伝ばんしてゆくとき、入射波の力積を I_i とすれば、反射波の力積 I_r および透過波の力積 I_t はつぎのように表わされる。

$$I_r = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} I_i \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$I_t = I_r + I_i = \frac{2R_2}{R_2 + R_1} I_i \quad \dots\dots (10)$$

いま、如式において水を媒質 1、コンクリートブロックを媒質 2 と考え、それぞれの媒質の密度およびそれらの媒質中での応力波または圧力波の伝ばん速度の値には前述の値を用いることにすれば、 $R_1/R_2 = 0.25$ となるから

$$I_t = 1.6 I_i \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。この関係を示したのが Fig. 9 における実線である。この図から、実験で得られた入射波と透過波の関係は、音響理論から得られたそれらの関係とほぼ一致することがわかる。したがって、水中爆発による圧力波の反射および透過などの現象は、ここで述べた実験による圧力の大きさのレベルでは、音響理論を満

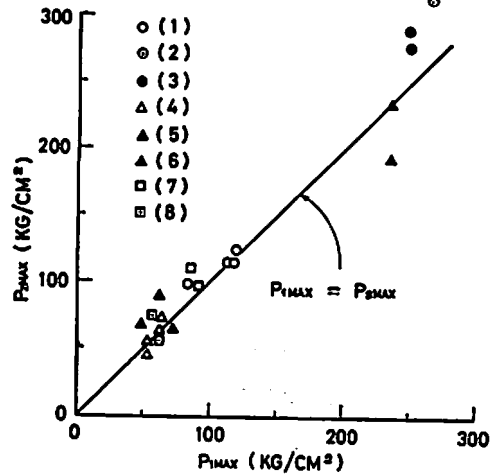


Fig. 10 Relation between the maximum pressure at $M_1(P_{1\max})$ and the maximum pressure at $M_2(P_{2\max})$.
 (1) Kiri dynamite ... 10 gr.
 (2) Kiri dynamite ... 40 gr.
 (3) PETN ... 7 gr.
 (4) Black powder ... 40 gr.
 (5) SLB ... 40 gr.
 (6) Smokeless powder ... 40 gr.
 (7) No. 3 detonator.
 (8) No. 3 detonator covered with a vinyl hood.

たすということが実験的に認められたことになる。つぎにひずみ記録について考察してみよう。

Fig. 8(c), (d) に示したのは無煙火薬 40gr を水中で爆発させた場合のひずみ記録であるが、この一例をみれば明らかのように、ひずみ波形は水中での圧力波形より、かなり滑らかになっており、持続時間も長く記録されているが、これは、測定機器の電気的あるいは機械的な周波数特性によるものと思われる。このことは、ペンスリットの場合のように水中でのピーク圧力は大きいにもかかわらず、ひずみは小さく記録されていることから察せられる。すなわち、ペンスリットの場合は、Fig. 10 に示すように、圧力 P_{\max} はきわめて大きいにもかかわらず、Fig. 9 に示すように力積 I はきわめて小さい。このことは、測定された圧力の持続時間が極端に短かかったことを物語っており、圧力波形には高い周波数成分を多く含んでいると考えられるが、ひずみ計がこのような高い周波数成分に対しては追従しえなかつたことによるものと考えられる。したがって、ひずみ記録についての定量的な考察はこの場合、あまり重要な意味をもたないことになる。そ

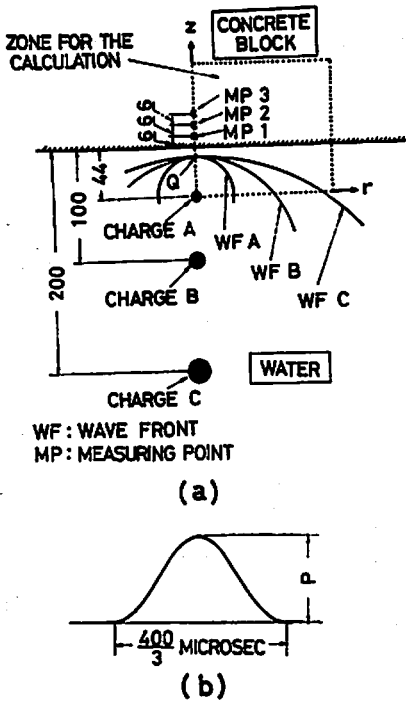


Fig. 11 Explanatory figures for the calculations.
 (a) Plans of the concrete block and the charge (cm).
 (b) Profile of the pressure wave.

ここでひずみ測定点Gでのひずみ記録を考慮して、数値解析によるシミュレーションを行ないひずみと応力の関係が、とくに爆源からの距離の大小によつてどのように異なるかを検討してみる。

すなわち、Fig. 11 (a)に示すように、コンクリートブロック壁面からそれぞれ異なる距離だけ離れた水中に爆源A, B, Cを考える。また、それぞれの爆源から伝ばんされた波の波頭が同図に示すQ点(壁面から6 cm のところ)に到達した時点での波頭の形状の一部をそれぞれWF A, WF B, WF Cで表わす。すなわち、WF Aの場合はコンクリートブロックにかなり小さい曲率の波面で入射するが、WF Cの場合は平面波に近い形状で入射する。

さて、Q点の周辺では水中の圧力状態およびコンクリートブロック中の応力状態は爆薬を通りコンクリートブロックの壁面に垂直な線を軸とする軸対称であると考えられるので、同図において点線で囲まれた部分について応力解析を行なえば充分である。なお、 r および z の方向は同図に示すとおりである。したがつて、軸対称波動方程式を点線でごこまれた部分について差分形式で表現し、数値計算により解けば任意の時

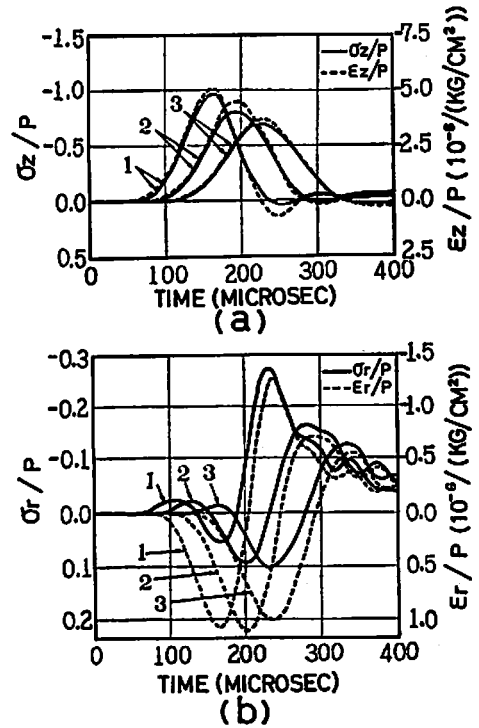


Fig. 12 Profiles of stress and strain waves at MP₁, MP₂ and MP₃ (CHARGE A).
 (a) σ_z and ϵ_z .
 (b) σ_r and ϵ_r .

刻における応力状態が求められる。

いま、計算の便宜上、外力に関する境界条件を図に示す各波頭面すなわち、WF A, WF B, WF Cに与え、かつ、それぞれの場合についてすべて同じ大きさの圧力および波形を境界条件として与える。したがつて、それぞれの爆源では薬量の異なる爆薬が爆発していることになる。なお、境界条件の圧力波形を Fig. 11(b)に示す。また、計算に使用した物理定数は、コンクリートブロックでは、密度 2 gr/cm^3 、縦波の伝ばん速度 $3,000 \text{ m/sec}$ 、横波の伝ばん速度 $1,900 \text{ m/sec}$ を、また水では密度 1 gr/cm^3 、圧力波の伝ばん速度 $1,500 \text{ m/sec}$ を用いた。

さて、Fig. 12 ~ Fig. 14に計算結果の一例を示す。これらの図は爆源がそれぞれA, B, Cの位置にある場合のものであり、またそれぞれの図において(a)図は z 方向の応力(σ_z)およびひずみ(ϵ_z)の時間的変化を、(b)図は r 方向の応力(σ_r)およびひずみ(ϵ_r)の時間的変化を示したものである。なお、横軸の時間は圧力波が壁面に到達してからの経過時間をとつている。また、数字1, 2, 3で印されたそれぞれの曲線は、Fig. 11(a)に示したMP₁, MP₂, MP₃の点での応力

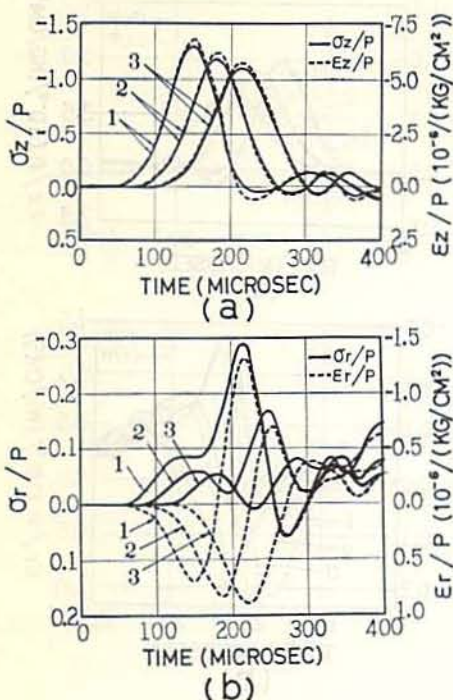


Fig. 13 Profiles of stress and strain waves at MP₁, MP₂ and MP₃ (CHARGE B).
 (a) σ_z and ϵ_z .
 (b) σ_r and ϵ_r .

およびひずみの変化を表わしている。

さて、Fig. 12 ~ Fig. 14 から次のようなことがわかる。すなわち、境界条件を与える面がWF A, WFB, WFC いずれの場合であっても、 z 方向の応力波形とひずみ波形は同じような形状を示しており、コンクリートブロックに入射した圧力波の波形とよく似た形状をしている。しかしながら、 r 方向の応力波形とひずみ波形は異つた様相を示しており、その傾向は境界条件を与える面がCの場合が最も著しい。すなわち、Fig. 14(b) に示すようにひずみ波形としてはかなり大きな引張ひずみを示しているにもかかわらず応力波形では逆に圧縮応力を示している。

また、Fig. 12(b) では、応力波形とひずみ波形はかなりよく似た傾向を示しているが、応力波の到達直後、応力は圧縮応力であるにもかかわらず、ひずみは引張ひずみを示している。これらの傾向はポアソン比の値に左右されることはもちろんここで示した図からわかるように、爆源からの距離によつても異なる。したがつて、 z 方向、すなわち、応力波の進行方向の応力値は、実験による z 方向のひずみ記録からかなり正確に推測できるが、 r 方向すなわち、応力波の進行方

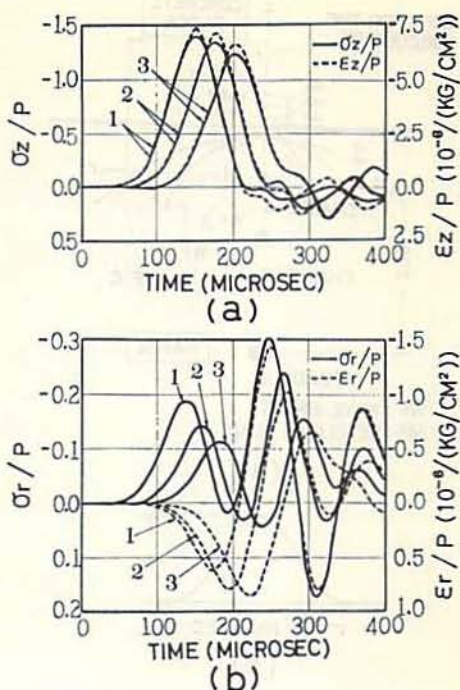


Fig. 14 Profiles of stress and strain waves at MP₁, MP₂ and MP₃ (CHARGE C).
 (a) σ_z and ϵ_z .
 (b) σ_r and ϵ_r .

向と垂直な方向の応力値は実験で得られた r 方向のひずみ記録からは一概に推測することはできないものと思われる。たとえば、Fig. 8(d) に示した r 方向のひずみ記録は Fig. 13(b) の破線 2 の曲線に相当するが、この場合の応力波形は実線 2 の曲線に示すように、ほとんど圧縮応力のみで引張応力が生じていないことがわかる。

4. 結 言

以上に述べた実験結果および考察から次のようなことが明らかになった。

すなわち、水とモルタルブロックなどの境界面での圧力波の伝ばんに関する現象は、ほぼ音響理論で説明されるような様相を示すことが実験的に確かめられた。

したがつて、水中における岩石の内部装薬爆破では、水中に投射される圧力波はかなり軽減されて、他の構造物に与える影響も少なくなることが考えられる。

また、水中から圧力波が他の媒質に入射する場合は、逆に圧力の上昇が見られ、媒質内の波の進行方向

の応力は入射波の波形とほぼ同じであるが、それと直角な方向の応力は、ポアソン比の影響のほかに、さらに爆源からの距離の大小によっても圧縮応力になったり引張応力になったりし、その値の大きさも変わる。したがって、爆源から近いところでは、もともと圧力の大きいところへ、さらに上述のような原因により引張応力が生じる可能性もあるので、引張強度の小さい材質でつくられた構造物の近くでの水中爆破作業は、特に慎重に実施されなければならない。

おわりに、本研究に述べた実験を実施するにあたり多大の御協力を頂いた日本化薬株式会社姫路工場ならびに前田建設株式会社に感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 斉藤玄三雄 ; 「音響工学入門」 オーム社書店, p. 29 (1966)
- 2) Cooper 他, J. Acoust. Soc. of Amer., 42, p. 1064 (1967)
- 3) 本多弘吉 ; 「地震波動」 岩波書店, p. 76 (1954)
- 4) Muskat ; Geophysics, 5, p. 149 (1940)
- 5) Riley ; Geophysics, 31, p. 881 (1966)
- 6) Daniel ; Proc. of Soc. for Experimental stress analysis, Vol. 28, No. 1, p. 210 (1971)
- 7) たとえば
Maenchen ; "Methods in Computational Physics", Academic Press, Vol. 3, p. 181 (1963)

Study on the Stress Wave Propagation through the Boundary between the Concrete Block and Water

by K. Hanasaki and I. Ito

Studies on the behavior of the stress wave in a layered medium have been carried out by many scientists. But we find few studies on the stress wave propagating from a rock into water or from water into the rock.

In this paper, we describe the results of the experimental and the numerical researches on the above problem.

In summary, in the case of an explosion of a detonator, the experimental results obtained are as follows;

- (1) In the case of wave propagation from a concrete block into water, the magnitude of the wave is reduced to about 40 percent of that of the incident wave after passing the boundary.
- (2) In the case of wave propagation from water into the concrete block, the magnitude of the wave increases to 160 percent of that of the incident wave after passing the boundary.

By means of the numerical simulation using the finite differential equation method, we have also obtained the following result;

In the case of underwater explosion near the concrete block, when the distance from the charge to the concrete block is large, all stresses of any directions induced in the concrete block are compressive ones, and when the distance is small, these stresses can be developed as tensile one or as compressive one.

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan)