

## 海底穿孔発破に起因する水中圧力波の 予測とその実測結果について

佐々 宏一\*・伊藤 一郎\*・奈良平 俊彦\*\*

### 1. 緒 言

近年、本州四国連絡橋の建設や船舶の大型化にともなう要求される港湾や海峡の浚渫工事等のために、海底発破を検討せねばならない場合がしばしばある。このような場合にまず問題となるのは、附近の魚介類や水中構造物に対する水中圧力波の影響である。

海底発破としては、穿孔せずに海底に爆薬を設置して発破するはりつけ発破と、海底に穿孔し、その中に装薬して発破する穿孔発破とがあるが、はりつけ発破は破壊効果が悪いうえに発生する水中圧力波が非常に大きくなるので、特殊な場合を除けばこのような発破は計画すべきではなく、海底穿孔発破を計画すべきである。海底穿孔発破の場合に発生する水中圧力波は爆轟衝撃によって直接水が衝撃されて生成するものではなく、爆轟衝撃によって装薬の周囲の岩盤内に発生した強力な応力波が岩盤と水との境界面に達し、そこで屈折して水中へ出てくる圧力波が海底穿孔発破によって爆源近傍に発生する水中圧力波の主体をなしている。したがって、この水中圧力波は薬量のみならず岩盤の特性や地形、および地質状態、ならびに発破法などによって変化するので、その予測はかなり困難である。しかし、海底穿孔発破を計画する場合には、必ず、計画した発破を実施した場合に発生する水中圧力波の大きさを予測し、その影響等について十分検討し、その対策をたてたのちに発破を実施せねばならない。

本州四国連絡橋公団が児島一抜出ルートに計画している南北備讃瀬戸大橋を建設するためには、その橋脚基礎掘さくのために海底穿孔発破を実施せねばならない。上記のように、海底穿孔発破に起因する水中圧力波の予測はかなり困難な問題であるが、電子計算機を用いて海底穿孔発破のシミュレーションを行えばその予測は可能である。そこで、海底穿孔発破が考慮されている現場で、特定条件のもとで発破を実施した場合

に発生する水中圧力波を予測するためのシミュレーションを実施した。この報告では、上記のシミュレーションの結果、およびそのシミュレーション結果等にもとづいて本州四国連絡橋公団が昭和50年1月から3月にかけて実施した試験発破の際に発生した水中圧力波の実測結果、ならびに、予測値と実測値とを対比した結果を示すことにする。

### 2. 現場の状況と発破条件

海底穿孔発破に起因する水中圧力波の大きさおよびその時間的変化状態を予測し、さらに、それと実測結果とを対比した現場は、備讃瀬戸の中央部にある三子島と呼ばれる3島のうち、二面島と呼ばれている南端の島の東側の海底である。本州四国連絡橋公団はこの場所に南・北備讃瀬戸大橋が共用するアンカー(4A)の基礎を予定している。

試験発破はFig.1に示すように、二面島の東側の海底の所定の場所を海面下5mまで大型グラブ浚渫船を用いて掘削したのち、SEP(自己昇降式作業足場)上に搭載した穿孔機で孔間隔2m、孔長5mの所要数の垂直穿孔を行い、その内部に1孔当り20kgのGX-1ダイナマイトを装填し、斉発させる斉発発破である。試験発破は4条件について実施したが、シミュレーション結果と実測結果とを対比したのは、第1回発破(装薬孔数12孔、斉発薬量20kg×12孔=240kg)と第4回発破(装薬孔数76孔、斉発薬量20kg×76孔=1520kg)である。なお、起爆には第1回発破は導爆線、第4回発破は超音波遠隔起爆薬子を使用した。

### 3. 水中圧力波を予測するためのシミュレーション

発破シミュレーションを行うために用いた計算機プログラムは、米国において地下核爆発にともなう現象のシミュレーション等<sup>1)</sup>に用いられた TENSOR コード<sup>2)</sup>とほぼ同じ考え方のもとに、筆者らが製作した DAYS-2 コードであって、計算方法の概念は、Fig.2に示すように、ある時間( $t=t_0$ )に材料内に存在している応力場をラグランジュ座標系で示された運動方程式を適用し、これを差分近似を用いて解いて  $t=t_0$  時間に対応するモデル内の各点(ラグランジュ

昭和52年3月7日受理

\* 京都大学工学部 606 京都市左京区吉田本町

\*\*本州四国連絡橋公団 105 東京都港区芝西久保松山町1第22森ビル

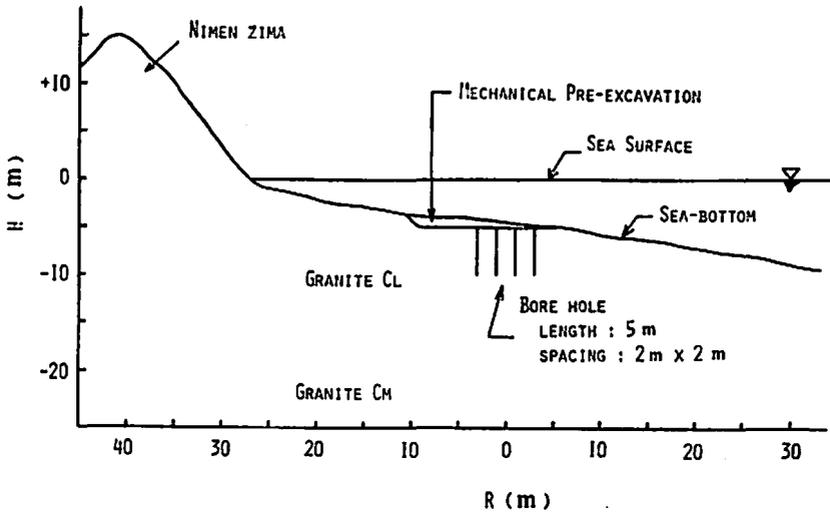


Fig. 1 Profile of the test site

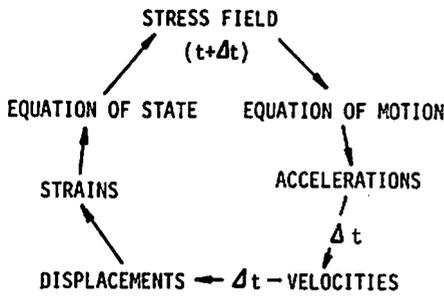


Fig. 2 Feedback loop for stress wave

座標の交点)の変位加速度を求め、これを  $\Delta t$  なる微小な時間増分で2回積分することにより、 $t=t_0+\Delta t$  時間における各点の変位を求め、ついで、ラグランジュ座標で囲まれている要素内のひずみをそれを取り囲んでいる4つの交点の変位より求め、そのひずみに材料の状態方程式を適用して  $t=t_0+\Delta t$  時間に対応する材料内の応力状態を算出するというように、Fig.2に示したループをモデル内の各点について  $\Delta t$  なる時間増分で回すことによって、応力波の伝播ともなる動的応力を算出するという方法である。

さて、爆薬衝撃ともなる現象のシミュレーションを行う場合には、爆源から計算を始めなければならない。この場合、爆薬の爆轟圧が入力データとなるから、爆薬の大きさでラグランジュ座標で区切られる要素の大きさ、および、採用すべき時間増分  $\Delta t$  の値が規定される。一方、DAYS-2 コードを用いて効率よく計算できる要素の数は約3000以下である。上記の2つの制約があるため、今回実施したシミュレーション

は大きさの異なる3種のモデルを使用し、軸対称3次元モデルとして計算を行った。すなわちまず、Fig.3に示すように、大きさが  $4.3\text{cm} \times 20\text{cm}$  の要素を用いた約  $1.6\text{m} \times 5\text{m}$  の大きさのモデルを用いて爆源のごく近傍の応力状態を計算し、その結果を用いて大きいモデルの入力データを作成することにした。Fig.3に示したモデルの爆源の位置に作用させる圧力の大きさは計算によって求め、装薬室の拡大ともなる爆轟ガスの断熱膨張による圧力低下も考慮した。Fig.4はFig.3に示した爆源の位置に入力データとして与えた圧力の変化状態を示したものである。Fig.4に示すように、入力データとして与えた圧力の最高値は  $10^6\text{kg/cm}^2$  であるが、実際にモデルに作用した圧力の最高値は、装薬室の拡大ともなる爆轟生成ガスの膨張のためにこの値よりは低くなっている。

上記のモデルを用いた計算で  $20\text{kg}$  の柱状装薬が花崗岩内で爆発した場合に、そのごく近傍の岩盤内に発生する応力状態が明らかとなったので、つぎに、Fig.5に示すように、 $50\text{cm} \times 50\text{cm}$  の大きさの要素を用いた花崗岩(記号7)と水(記号1)との2層モデルを用いて、 $20\text{kg}$  の柱状GX-1ダイナマイトが爆轟した場合に爆源近傍の岩盤および海水中に発生する応力状態の計算を行った。なお、Fig.5はモデルを構成している要素の特性を記号(数字を含む)で代表させて、それぞれの要素がある位置に印字することによってモデルの状態を示した図である。この図において、モデルの境界にCが印字されている境界は連続境界と考えられる境界であって、この境界では波動は反射せず、境界にある材料がこの境界以遠に無限に続いていると

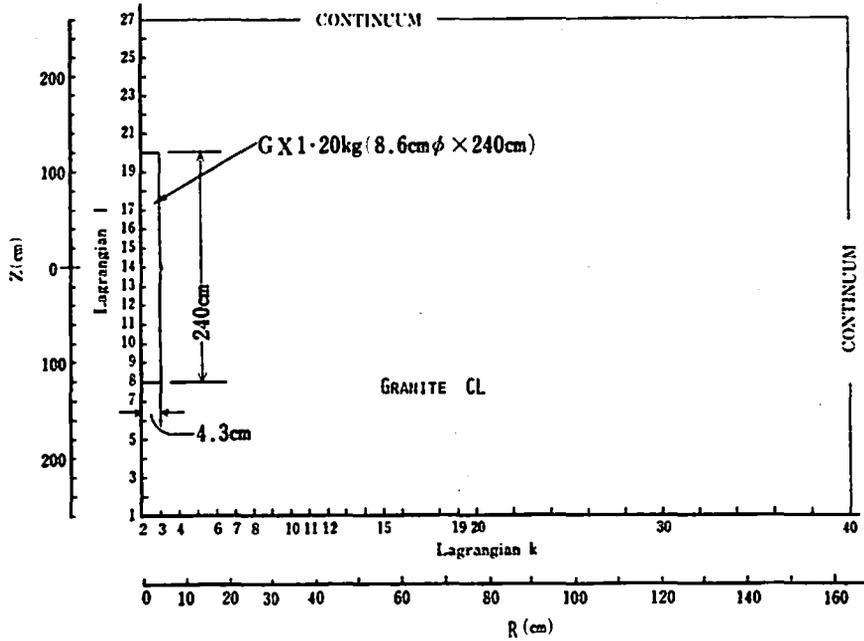


Fig. 3 DAYS-2 model for the computation of stresses around a 20kg cylindrical charge in granite

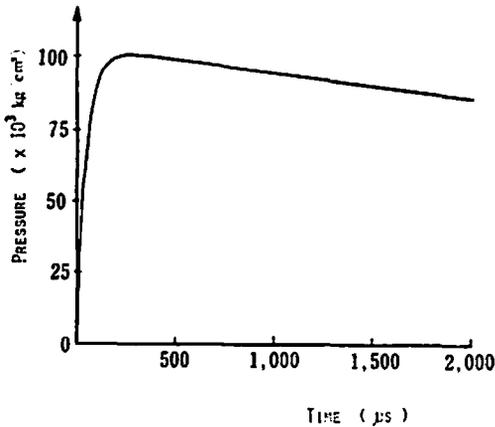


Fig. 4 Detonation pressure used for in-pup data

みなしうる境界であり、Sが印字されている境界は移動境界 (Slide) であって、軸対称問題の軸に沿った境界である。すなわち、この境界上では、横方向への変位は拘束されているが、上下方向には移動が可能である。また、記号Pが印字してある要素はFig. 3に示したモデルを用いて求められた爆源のごく近傍の応力状態が入力される要素である。したがって、Fig. 5に示したモデルによって、海底面から垂直に穿孔された長さ5 mの装薬孔内で20kgの柱状GX-1ダイナマイトが爆轟した場合に、周囲の岩盤内および海水中に

発生する応力状態が計算できる。

得られた結果の一例としてFig. 6およびFig. 7は、爆薬の中心を通る $Z=0$ の平面内に発生する $R$ 方向の応力 $\sigma_r$ の最高値、ならびに、半径方向の変位速度最高値と爆薬中心からの距離( $R$ )との関係、および、爆薬の軸、すなわち、 $Z$ 軸にそって海底面の方向にある各点の $Z$ 方向の応力( $\sigma_z$ )の最高値、ならびに、 $Z$ 方向の変位速度の最高値と爆薬中心からの距離( $Z$ )との関係を示したものである。これらの図より、まず、図に実線で示してある半径方向へ伝播する波動の最高値の伝播ともなり減衰は、爆源近傍では波動が2次元的な円筒面波であるために、距離にはほぼ反比例する関係となっているが、爆源から遠ざかるにつれて3次元的な伝播となるので、減衰指数の値が徐々に大きくなるのがわかる。つぎに、花崗岩と海水との境界面方向へ伝播する波動に関しては、鎖線で示したように、海水の波動インピーダンスが花崗岩のそれよりも小さいために、海底面において反射引張波が生成し、そのために、海底面近傍の岩盤内の圧縮応力最高値は減少し、変位速度の最高値は大きくなるという結果が得られている。なお、これらの現象は理論的にも裏づけられる結果である。

これまでの計算で20kgの円柱状のGX-1ダイナマイトが爆轟した場合に周囲の花崗岩内に発生する応力状態が明らかとなったので、4A地点から東方向の

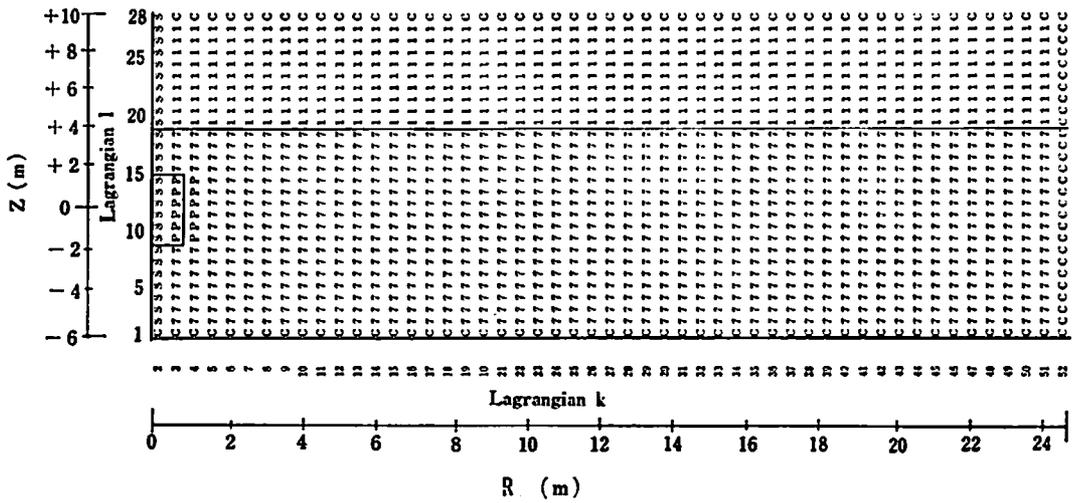


Fig. 5 DAYS-2 model zoning for the computation of stresses near the submarine blasting

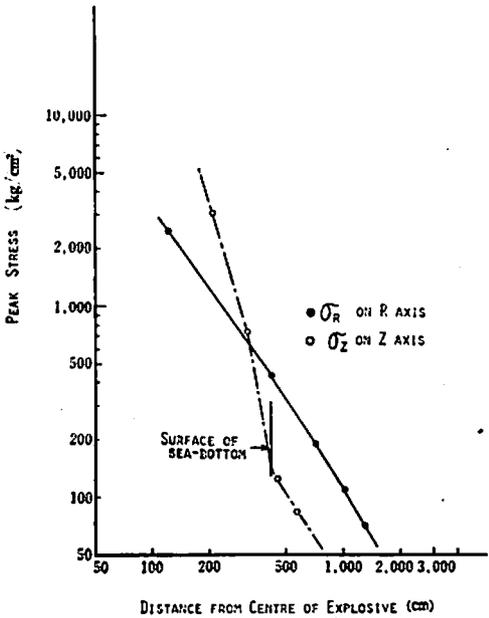


Fig. 6 Computed peak stress vs. distance

断面をモデル化したシミュレーションモデルを作成し、これを用いて4 A地点で第2節に示したような発破を行った場合のシミュレーションを実施した。Fig. 8はそのシミュレーションモデルを示したものであって、この図も Fig. 5と同様、モデルを構成している材料の特性を記号で代表させてそれぞれの要素がある位置に印字することによって、モデルの状態を示した図である。Fig. 8に示した記号と要素の特性との関係は

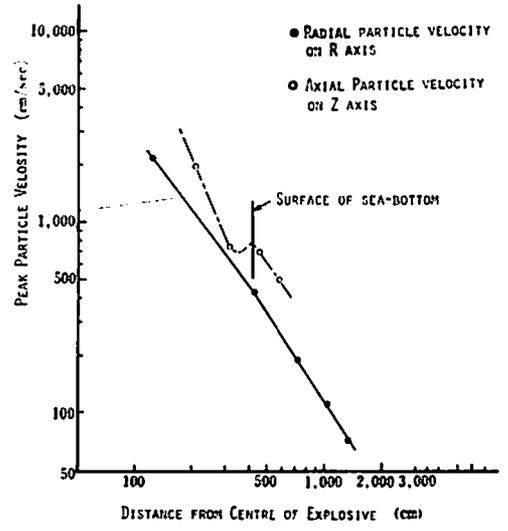


Fig. 7 Computed peak particle velocity vs. distance

Table 1に示してある。なお、境界の記号C,Sは Fig. 5の場合と同様であるが、Fig. 8の上端の境界に印字してある記号Fは、この境界が自由面であることを示している。このモデルは4 A地点から東方向の断面をモデル化したものであるから、このモデルを用いて求められる水中圧力波は4 A地点から東方向へ伝播する水中圧力波とみなすことができる。なお、このモデルは軸対称3次元モデルである。シミュレーションは4 A地点で薬量が240kg, 1440kg, および3240kgの斉発発破を実施した場合について行った。この場合、

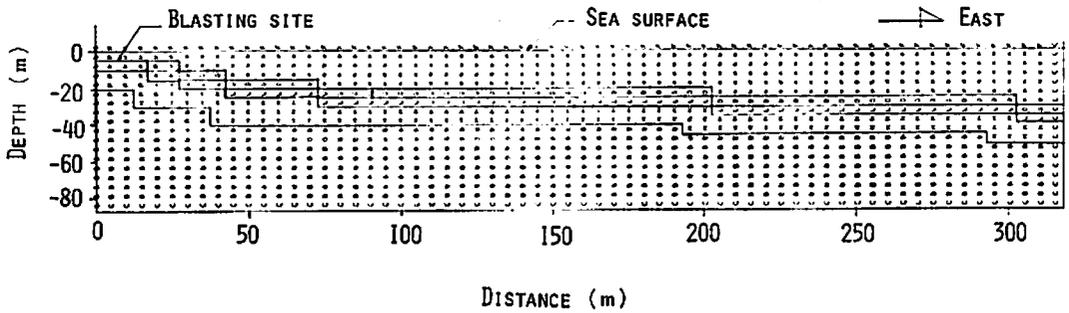


Fig. 8 DAYS-2 model zoning for the computation of pressure wave in sea water caused by submarine blasting

Table 1 Characteristics of the materials in the model shown in Fig. 8

Symbol	Material	Density g/cm <sup>3</sup>	Young's Modulus kg/cm <sup>2</sup>	Poisson's ratio	P-wave velocity m/s	S-wave velocity m/s
B	Granite B	2.65	5.0×10 <sup>8</sup>	0.25	4710	2720
H	Granite CH	2.60	3.5×10 <sup>8</sup>	0.33	4420	2330
L	Granite CL	2.48	2.2×10 <sup>8</sup>	0.36	3820	1790
D	Granite D	2.50	1.3×10 <sup>8</sup>	0.40	3300	1350
W	Sea water	1.0	—	0.50	1500	0

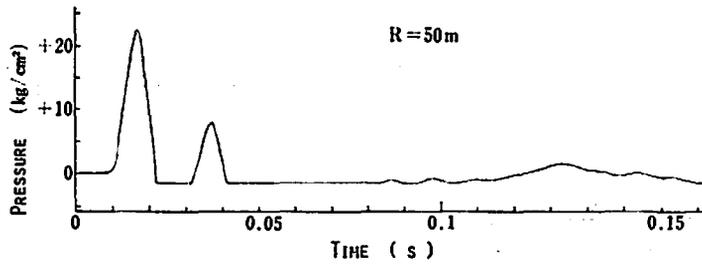
Fig. 8 のモデルに記号 P で示した要素に与える入力データは、斉発薬量と Fig. 5 に示したモデルを用いて求めた 1 孔に装填された 20kg の爆薬が爆轟した場合に発生する爆源近傍の応力状態の計算結果とを用いて求めた。すなわち、薬量が 240kg, 1440kg, 3240kg の場合の装薬孔数は、それぞれ、12本、72本、および 162 本で 1 孔当りの薬量は 20kg であるから、いずれの装薬が爆轟した場合も Fig. 6 に示したような応力状態が発生すると考え、さらに、各孔の点火のばらつきもある程度考慮して、記号 P で示した要素に与える入力データを算出した。

得られた結果の一例として、Fig. 9 (a), (b) は 1440 kg の斉発発破を実施した場合に、爆源から 50m および 200m の地点で海面下 7.5m の位置に発生する水中圧力波の計算結果を示したものである。Fig. 9 より、海底穿孔発破の場合に発生する水中圧力波は発破地点近傍では第 1 波の圧力最高値が最も大きくパルス的であるが、爆源より遠ざかると第 2 波の方が大きくなるとともに、振動的な波形になるという計算結果が得られたことがわかる。このような波形の変化は海底穿孔発破に起因する水中圧力波は、岩盤内から海水中へ屈折して出てきた波動であるということと、岩盤内の方が海水中よりも波動の伝播速度が速く、かつ、波動の伝播にともなう減衰が大きいこと、などから理解

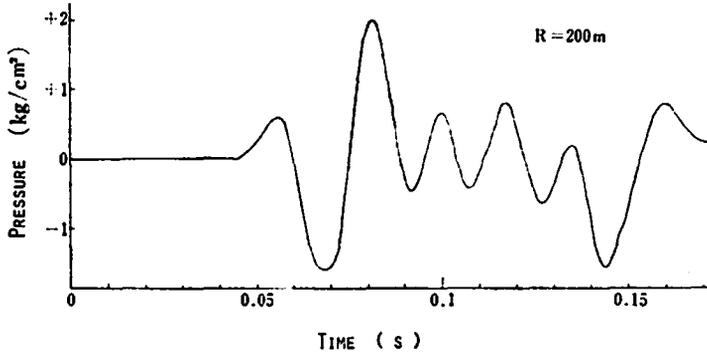
することができる。さらに、Fig. 9 の圧力軸は海面下 7.5m の位置の静水圧、したがって、絶対圧力では大気圧 ( $\cong 1\text{kg/cm}^2$ ) + 水圧 ( $0.75\text{kg/cm}^2$ ) で  $1.75\text{kg/cm}^2$  を  $0\text{kg/cm}^2$  として示してある。したがって、 $-1.75\text{kg/cm}^2$  が絶対圧力で  $0\text{kg/cm}^2$ 、すなわち、真空状態を示している。このことを念頭において Fig. 9 (a) の  $R=50\text{m}$  の位置の圧力の時間的変化状態をみると、第 1 波と第 2 波の間、および第 2 波到達後ほぼ 0.05 秒の間は圧力が  $-1.75\text{kg/cm}^2$  となっていることがわかる。このことは、シミュレーションではこの地点にキャビテーションが発生するという結果となっていることを意味している。

なお、斉発薬量が 240kg および 3240kg の場合に発生する水中圧力波は、圧力波形が振動的となる爆源からの距離や、キャビテーションが発生すると推定される範囲は変わるが、波形的な特徴および傾向は Fig. 9 に示した結果と同じである。

次に、Fig. 10 は斉発薬量が 1440kg の場合について、海面下 7.5m の位置に発生する水中圧力波の最高値と発破中心からの距離との関係を図示したものである。図より、海底穿孔発破に起因する水中圧力波の最高値の伝播にともなう減衰は、爆源からほぼ 300m の範囲内ではほぼ  $R^{-1.8}$  となっていることがわかる。この  $-1.8$  という減衰指数の大きさは、水中爆発の場合



(a)



(b)

Fig. 9 Computed pressure waves at 50m (a) and 200m (b) for blasting of 1440kg GX-1 dynamite

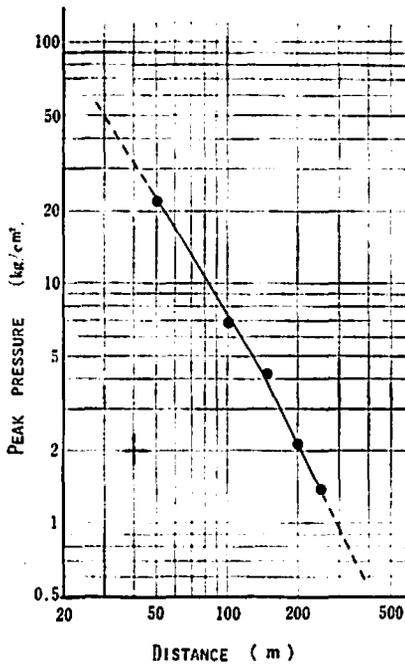


Fig. 10 Peak pressure of pressure wave at 7.5m below sea surface vs. distance for blasting of 1440kg GX-1 dynamite

の  $-1.13$  より大きく、モデルを構成している岩盤内の波動の減衰指数より小さくなっている。このことは、水中圧力波の伝播経路を考えれば理解しうる。

Fig.11 は斉発薬量と圧力最高値との関係を図示したものである。図より、海底穿孔発破に起因する水中圧

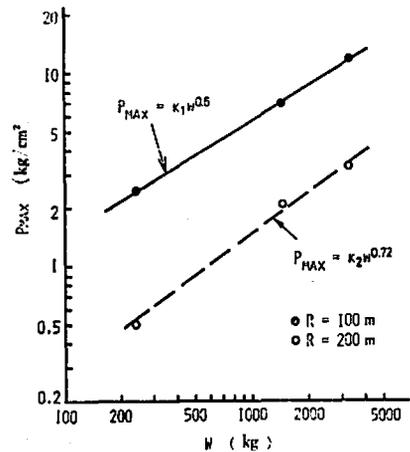


Fig. 11 Peak pressure of pressure wave vs. weight of explosive which is detonated simultaneously

力波の圧力最高値は、斉発薬量のほぼ2/3乗に比例するという計算結果が得られたことがわかる。

#### 4. 水中圧力波の実測結果およびそれとシミュレーション結果との対比

本州四国連絡橋公団は4 A地点で実施した4回の試験発破に起因する水中圧力波を13個所で測定した。使用した圧力ピックアップは Kulite 社製 HKMS-375 である。測定に際しては、これを前置増幅器とともに容器内に組み込み、測定点に設置した。なお、圧力計からの出力信号はデータレコーダを用いて記録した。得られた測定記録の一例として、Fig. 9 (a), (b) と対比できるように、斉発薬量が 1520kg の第4回発破によって発生した水中圧力波を発破地点から東方向に50m および 200mの地点で海面下5mの位置で測定した記録を Fig. 12 (a), (b) に示す。Fig. 9 (a), (b) は斉発薬量が 1440kg の発破の場合に、東方向に50m および 200mの位置で、海面下7.5mの位置の水中圧力波の計算結果であるから、第4回発破の方が、薬量がほぼ6%多く、測点の深さが2.5m 違うが、この程度の差はほとんど影響ない。したがって、Fig. 9 (a), (b) と Fig. 12 (a), (b) とは対比して検討しうる。

まず、爆源から 50m の位置の圧力波形を対比してみると、両者ともパルスのな波形をしており、第1パルスのパルス幅も両者ともほぼ 10ms で一致してい

る。さらに、第1パルス到達後に発生する負圧の継続時間も両者ともほぼ 0.1 秒でよく一致している。しかし、実測結果にはシミュレーション結果に現われている第2波は記録されていない。しかし、全体的にみればかなりよく一致しているとみなしうる。次に、200m地点の波形をみてみると、両者ともパルスのではなく振動的な圧力変化をするという全体的な傾向は一致しているが、波形の細部には差がある。このような差はモデルが軸対象モデルであるということや、海底の形状や地質状況の差違、および、計算には爆生成ガスの噴出による影響が考慮されていないこと、などを考えれば当然の結果である。

次に圧力最高値について検討する。シミュレーションを実施したのは薬量が 240kg, 1440kg および 3240kg の斉発発破であり、実際に実施した試験発破の薬量は 240kg, 480kg, 720kg および 1520kg である。したがってここでは、両者の薬量が等しい 240kg の発破と、薬量がほぼ等しい 1520kg の発破の際に発生した水中圧力波の圧力最高値の実測結果を示し、それとシミュレーションの結果とを対比することにする。まず、Fig. 13 は薬量が 240kg の第1回発破によって爆源の東側に発生した水中圧力波の圧力最高値の実測結果と、それと同じ条件で実施したシミュレーションの結果とを対比したものである。この図より、実測結果はややばらついているが、発破の実施に先だって

Fig. 12 Pressure wave oscillograms at 50m (a) and 200m (b) for the blasting of 1520kg GX-1 dynamite

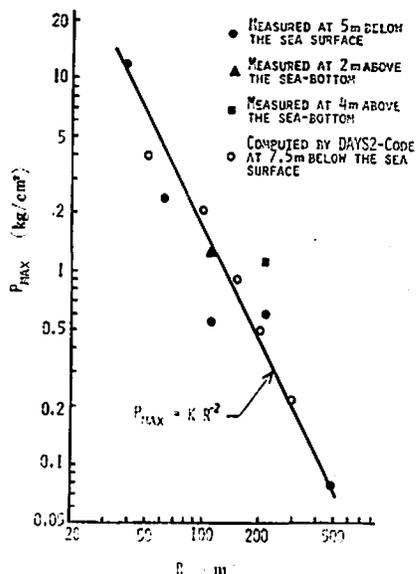
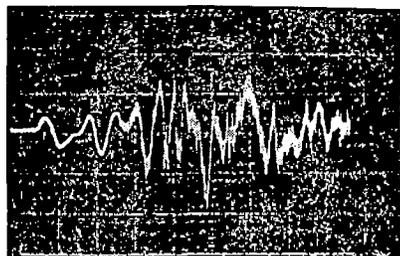
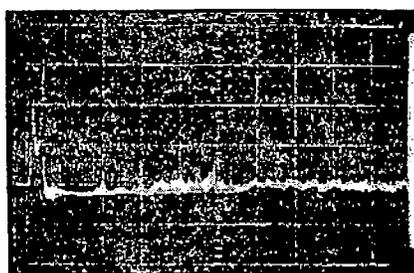


Fig. 13 Comparison of computed peak pressure and attenuation of pressure wave against measured ones for the blasting of 240kg GX-1 dynamite

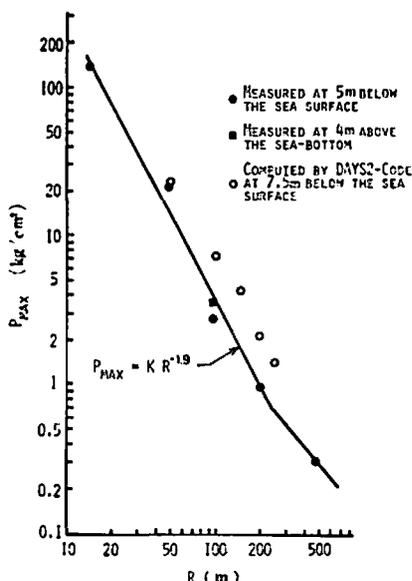


Fig. 14 Comparison of computed peak pressure and attenuation of pressure wave against measured ones for the blasting of 1520kg GX-1 dynamite

実施したシミュレーションによって得られた計算値は圧力最高値のみならず、圧力最高値と発破中心からの距離との関係についても適確に予測していたことがわかる。さらに、Fig. 14 は、薬量が 1520kg の第 4 回発破の際に得られた実測結果、および、薬量が 1440 kg の場合について実施したシミュレーションの結果を圧力最高値は薬量のほぼ 2/3 乗に比例するという Fig. 11 に示した結果を用いて補正して、薬量が 1520 kg の場合の圧力最高値を求めた結果を示したものである。この図より、予測値は爆源から 50m の位置では、ほぼ一致しているが、100~250m の位置では予測値は実測値のほぼ 2 倍となっている。この差は、1 孔に装填された装薬の爆轟に起因する爆源近傍の応力状態の計算結果より多孔斉発破の際の爆源近傍の応力状態を算出する際の仮定と、第 4 回発破の際の各孔内

の装薬の斉発性との差に起因するものと考えられることができる。さらに、Fig. 13 および Fig. 14 より、4 A 地点で海底穿孔発破を実施した場合に東方向に発生する水中圧力波の圧力最高値は、爆源からほぼ 200m の範囲内では距離のほぼ 2 乗に逆比例して減衰することがわかる。この減衰指数の値もシミュレーション結果とよく一致している。

## 5. 結 言

南北備設瀬戸大橋の 4 A 橋脚基礎部で実施された海底穿孔発破に起因する水中圧力波の大きさ、および、その時間的変化状態を、発破の実施に先だて、爆発にともなう現象のシミュレーションを行う電子計算機プログラムである DAYS2-コードを用いて予測した。その後、4 A 地点で試験発破が実施され、水中圧力波の測定が行われた。

この報告では、シミュレーションの方法、条件、および結果を示すとともに、シミュレーション結果と実測結果とを対比して検討した。その結果、シミュレーション結果はかなり適確に実際に発生する水中圧力波を予測していたことが明らかとなった。この成果は今後の海底穿孔発破の計画に際して有益な資料になるものと考えられる。最後に、この予測計算の実施に際して援助を受けた本州四国連絡橋公団第 2 建設局坂出工事事務所の杉田秀夫所長をはじめ所員各位に感謝する次第である。

## 文 献

- 1) J. T. Cherry : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 4, 1, pp.1~22 (1967)
- 2) J. T. Cherry and W. R. Hurdlow : Geophysics, 31, 1, pp.33~49 (1966)
- 3) G. Maenchen and S. Sack : "Methods in Computational Physics, vol.3" pp.181~210, Academic Press, (1964)
- 4) 佐々宏一 : 水曜会誌, 17, 7, 312~318頁, (1972)
- 5) 佐々宏一 : 伊藤一郎 : 工業火薬協会誌, 32, 6, 300~304頁, (1971)

## Numerical simulation of pressure wave caused by submarine blasting and comparison of those against field trials

Koichi Sassa\*, Ichiro Ito\* and Toshihiko Narahira\*\*

In planning a submarine blasting, one must predict the magnitude of a pressure wave in water caused by blasting, and discuss the effects of that on marine lives,

ships and coastal constructions. Then, numerical simulation of submarine internal multiple hole blastings which were planned by Honshu-Shikoku Bridge Authority had been performed to predict the pressure wave. Computer program used for this simulation was a DAYS-2 Code which involves the finite difference approximation to the momentum equations. Main results of this simulation are itemized below.

- 1) The peak pressure of the pressure wave caused by the submarine blasting of 1440kg GX-1 dynamite is  $2.1\text{kg/cm}^2$  at the point of 200m from the blasting site.
- 2) Peak pressure attenuates in inverse proportion to about 2nd power of the distance up to the distance of about 300m.
- 3) Peak pressure increases in proportion to about  $2/3$  power of the charge weight.

Reference to the result of this numerical simulation, Honshu-Shikoku Bridge Authority conducted submarine blasting in 1975, and the pressure waves were measured at several points.

This paper also shows the results of the measurement and the comparison of measured pressure wave against computed one. As the results, it was confirmed that the peak pressure of pressure wave, its attenuation with distance and the characteristic of wave shape coincide pretty well with each other.

(\*Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshida Sakyo-ku, Kyoto, Japan.

\*\*Honshu-Shikoku Bridge Authority, Shiba Nishikubo Shiroyama-cho, Minato-ku, Tokyo, Japan.)

## ニュース

### 二万キロワットの出力に達したソ連の電磁流体発電設備

モスクワ近郊のソ連科学アカデミー高温研究所内に1971年に半工業化試験用の MHD (電磁流体) 発電設備 "U25" が作られ、76年初めに2万キロワットの設計出力に達した。酸素を富化した空気を熱風炉 (径 8.5m, 高さは15階建てのビル程) で  $1,200^\circ\text{C}$  に熱し、燃焼室に入る。その容積は約2.5立方メートル、重さ16トン。ここに熱風と燃料、それに少量のイオン化促進物質が送り込まれ、プラズマの温度は  $2,500\sim 2,600^\circ\text{C}$  に達する。このプラズマの流れが毎秒  $850\sim 1,000$ メートルという音速に近い速度で MHD 発電機のチャンネルに突進し、ここで熱エネルギーが直接に電気エネルギーに変換される。この直流を取り出して交流に変換し、需要者に送る。残高温ガスは在来の火力発電所の蒸気発生機に利用する。米因との協力も進み "U25" のため米因で特に開発された超電導磁石システムがソ連に送られる予定。日経産業 52.1.28 (黒田)

### オーストリア国 WIFI 発破技術研究会

オーストリアの経済振興協会 (WIFI) では、毎年、リンツ市において、爆破技術に関する研究会を開催いたします。本年も次のように開催が予定されています。近くにお出かけの向きは、参加されるとよろしいと存じます。

#### SPRENGTECHNIK 1977

1977年11月16日 (木) より18日 (金)

オーストリア国リンツ市 WIFI において  
WIFI は Wirtschafts Förderung Institute の略。

なお連絡先は

Mr. Karl Inselsbacher,  
Spreng Technik am WIFI,  
A-4024, Linz, Wienerstraße 105,  
Austria