

海底爆破のシミュレーション

○ 京都大学工学部 正会員 佐々 宏一
京都大学工学部 正会員 花 彦 紘一
京都大学工学部 伊 藤 一 郎

1. 緒 言

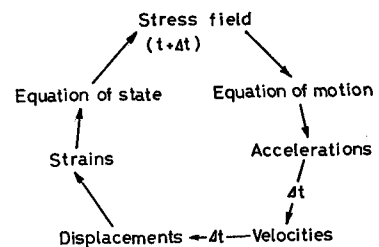
海底で爆破作業を計画する場合にまず問題となるのは爆薬の爆発によって発生する水中衝撃波の大きさである。海底を穿孔せずに単に海底上に爆薬を設置して爆破を行なう海底はりつけ爆破の場合のように、高爆速の爆薬が水中に露出している場合に発生する水中衝撃波の大きさは、今までに実施された理論的および実験的研究の結果から近似的に(1)式で示されることが明らかとなっている。

$$P = K (\sqrt[3]{W}/R)^{1/3} \quad (1)$$

ここに、 P : 水中衝撃波の圧力最高値 (kg/cm^2)、 K : 爆薬の種類によって定まる定数で、通常の高爆速爆薬の場合にはほぼ500である。 W : 薬量 (kg)、 R : 爆源からの距離 (m)。しかし、海底岩盤に穿孔し、その内部に爆薬を充填して起爆する海底穿孔爆破の場合には、爆薬の爆轟によってまず装薬の周囲の岩盤が衝撃され、それによって岩盤内に発生した応力波が岩盤と水との境界面に達し、そこから水中圧力波が発生するという現象となる。したがって、海底穿孔爆破の場合に発生する水中圧力波の大きさは、薬量のみにならず最小抵抗線の長さや岩盤の性質、爆破方法などによって大きく変化する。このように、海底穿孔爆破の場合に発生する水中圧力波の大きさには多くの要素が関係しているのでその予測はむづかしい困難となる。そこで今回はラグランジュ座標系で表示した運動方程式を差分近似を用いて解くことにより材料内の応力状態を求めるという手法を用いて海底穿孔爆破のシミュレーションを実施し、発生する水中圧力波の大きさとその時間的変化状態を算出し、その結果と実験結果とを対比して検討したのでその結果について報告する。

2. 動的応力解析法の概略^{1), 2)}

今回採用した動的応力の解析方法は、G. Maenchen と S. Sack による TENSOR CODE を改良した DAYS-2 CODE であって、その概念は第1図に示すようにある時間 ($t = t_0$)



第1図 応力解析方法説明図

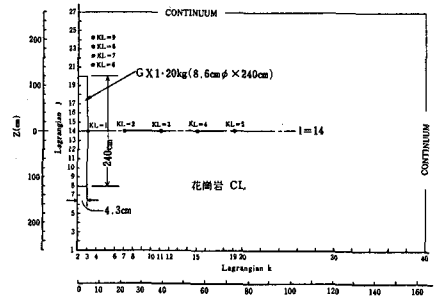
に材料内に存在している応力場にラグランジュ座標系で示される運動方程式を適用し、これを差分近似を用いて解いて $t = t_0$ 時間に対応するモデル内の各点 (ラグランジュ座標の節点) の変位加速度を求め、これを Δt なる微小な時間間隔で2回積分することにより $t = t_0 + \Delta t$ 時間における各節点の変位を求め、ついでラグランジュ座標で囲まれている要素内のひずみとそれを取り囲んでいる4つの節点の変位より求め、そのひずみに材料の状態方程式を適用して $t = t_0 + \Delta t$ 時間に対応する材料内の応力状態を算出するというように、第1図に示したループを材料内の各点について Δt なる時間間隔で回すことによって応力波の伝播にともなう動的応力を算出するという方法である。

3. シミュレーションの条件と結果

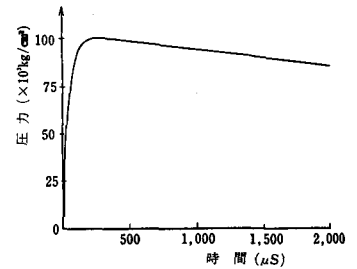
海底爆破のシミュレーションは爆破によって発生する水中圧力波の予測を主目的とし、計算はすべて軸対称モデルについて行なった。シミュレーションを行なった爆破系はつぎのとおりである。すなわち、163本の装薬孔を海底から垂直に5m穿孔し、各孔の内部に密度が $1.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、爆速が $7000 \text{ m}/\text{s}$ の GX-1 ダイナマ

イトを20kg(8.6cmφ×240cm)装填して起爆する総薬量3240kgの斉発掘りおこし爆破とした。なお、爆破地点の岩石は花崗岩を想定した。

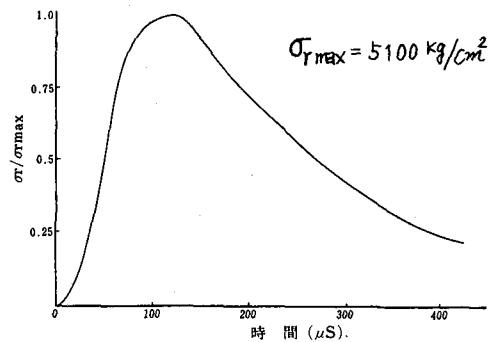
さて、爆破のシミュレーションを行おう場合には、爆発源から計算を始めるなければならない。この場合には爆薬の大きさでラグランジュ座標で区切られる要素の大きさが規定されることになる。DAYS-2 CODEを用いて効率よく計算できる要素の数は1500程度であることを考慮し、まず、第2図に示すような小さなモデルを用いて爆発のごく近傍の状態を計算し、その結果を用いて大きなモデルの入力データを作ることにした。第2図に示したモデルを構成している要素の大きさは4.3cm×20cmである。モデルの爆薬の位置に作用させる爆轟圧の大きさは計算によって求め、装薬室の拡大にともなう爆轟ガスの過熱膨張による圧力低下も考慮した。第3図は第2図に示す爆薬の位置に作用させた爆轟圧を示したものである。得られた結果の1例として、第4図は爆薬の中心から半径方向に55cm離れた位置に作用する半径方向の応力状態を示したものである。このように第2図に示したモデルを用いて20kgの爆薬が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、つぎに第5図に示すような要素の大きさが50cm×50cmの花崗岩(記号7)と水(記号1)との2層モデルを作り応力計算を行なった。この場合の入力データは第5図に記号Pで示してある要素の中央の位置の応力状態と第2図に示したモデルを用いて実施した計算結果より求め、それをその要素の応力とみなして計算を行なった。得られた結果の1例として第6図および第7図は爆薬の中心を切るrθ面内の各点に発生する半径方向の応力 σ_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との関係および爆薬の軸にそって海底面のある各点の軸方向応力 σ_z の最高値ならびに軸方向の変位速度の最高値と爆薬の中心からの距離との関係を示したものである。第6図および第7図より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反射引張波が生成し、そのために境界面の応力が低下するとともに変位速度の最高値が大きくなることかわかる。これらの現象は理論的に裏づけられる結果である。さらに、第8図は主応力の時間的变化状態の1例を示したものである。これまでの計算で20kg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、つぎに第9図に示した大きなモデルを用いて3240kgの爆薬を用いた多孔海底穿孔爆破の場合に発生する水中圧力波の計算を行なった。このモデルを構成している要素の大きさ



第2図 爆薬のごく近傍の応力状態を計算するために用いたモデル

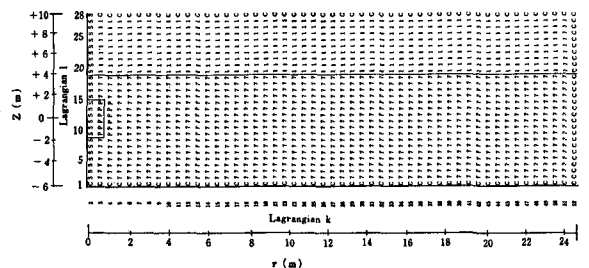


第3図 入力データとして与えた爆轟圧



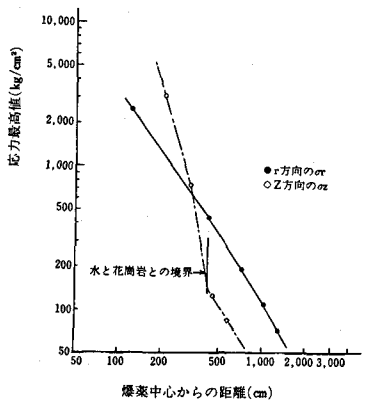
第4図 爆薬の中心から半径方向に55cm離れた点に作用する半径方向の応力

のそれよりも小さいために反射引張波が生成し、そのために境界面の応力が低下するとともに変位速度の最高値が大きくなることかわかる。これらの現象は理論的に裏づけられる結果である。さらに、第8図は主応力の時間的变化状態の1例を示したものである。これまでの計算で20kg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、つぎに第9図に示した大きなモデルを用いて3240kgの爆薬を用いた多孔海底穿孔爆破の場合に発生する水中圧力波の計算を行なった。このモデルを構成している要素の大きさ

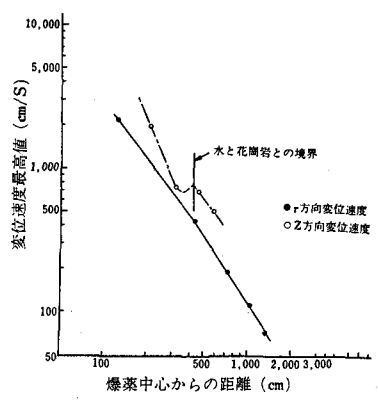


第5図 20kgの爆薬が爆発した場合に爆源近傍に発生する応力状態を計算した2層モデル

は $r < 80\text{ m}$ の範囲は $5\text{ m} \times 6.4\text{ m}$, $r > 80\text{ m}$ の範囲では $5\text{ m} \times 14\text{ m}$ である。第9図はそれぞれの要素の特性と記号(数字)で表わしてモデルの状態を示した図であるが、 $r < 80\text{ m}$ の範囲では実際より半径方向に引きのぼしたようになっている。したがって r 方向の距離のスケールに注意してモデルを見る必要がある。つぎに、モデルに P なる記号で示してある要素に加える圧力の大きさは

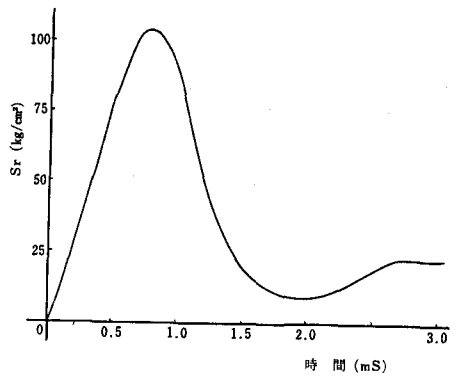


第6図 応力最高値と爆発中心からの距離との関係



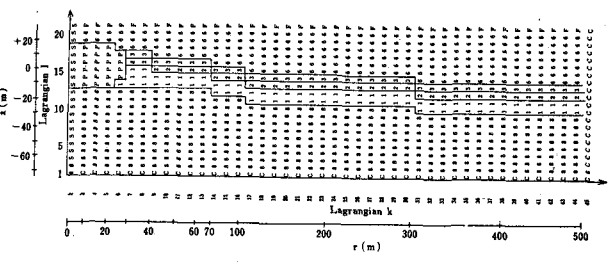
第7図 変位速度最高値と爆発中心からの距離との関係

つぎのようにして決定した。すなわち、163本の装薬孔に装填されているいずれの装薬が爆発した場合も第5図に示したモデルを用いて計算した第6図および第8図に示したような応力場が装薬の周囲に発生すると考え、各孔の爆轟に起因する応力場を適当に仮定のもとに合成して第9図に記号 P で示した要素の中央に発生する応力を求め、それをその要素の入力データとした。得られた結果の1例として第10図は爆発中心から 51 m および 224 m 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り、第11図は水中圧力波の圧力最高値と爆発中心からの距離との関係を示したものである。第10図より海底穿孔爆破の場合に発生する水中圧力波は爆発地点近傍では第1波の圧力最高値が最も大きく衝撃波的な波動であるが、距離が遠くなるにつれて第1波は



第8図 爆発の中心から半径方向に 10.5 m の位置にほぼ半径方向に作用する主応力

小さくなり第2波の方が卓越して振動的な変化をする圧力波とすることがわかる。このことは、第1波の伝播経路を考慮することによって理解できる。すなわち、第1波は伝播速度が速く、かつ、伝播にともなう減衰も大きい海底岩盤内を縦波として伝わり、海底から水中へ屈折して出てきた圧力波とみることができるところである。また、第11図より海底穿孔爆破の場合に発生する水中圧力波の伝播にともなう減衰($r^{-1.6}$)は海中につらした爆薬が爆発した場合に発生する水中圧力波の減衰($r^{-1.3}$)より大きいこと、およびほぼ1ヶ発破にくらべて穿孔発破の圧力最高値は、 $r = 50\text{ m}$ の位置でほぼ $1/10$, $r = 200\text{ m}$ の位置でほぼ $1/20$ に減衰していることがわかる。



第9図 水中圧力波の計算に用いたモデル

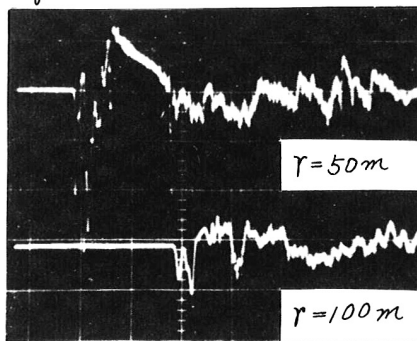
第1表 第9図に示したモデルを構成している要素の特性

名 称	記 号	密 度 ρ / cd	ヤング率 Kg / cd	ポアソン 比	P波速度 m / sec	S波速度 m / sec	動的 Kg / cd 圧 縮 引 張	静的 Kg / cd 圧 縮 引 張
花 崗 岩 CH	1	2.60	450000	0.25	4510	2600	2100 200	700 67
花 崗 岩 CL	2	2.48	240000	0.36	3990	1870	800 50	270 17
風化花崗岩 D	3	2.30	130000	0.40	3450	1410	400 30	130 10
花 崗 岩 B	8	2.65	560000	0.25	4990	2880	3000 300	1000 100
海 水	6	1.0	0.137754	0.4999	1500	0.0	1.0×10^{20} 0.0	3.3×10^{19} 0.0

4. 計算結果と実測結果との対比

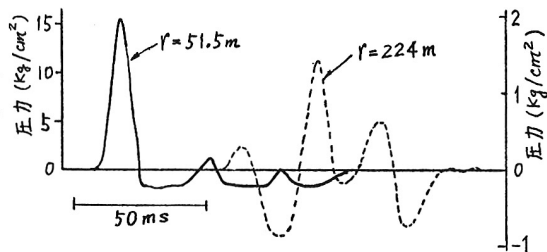
海底穿孔爆破の際に発生する水中圧力波の実測結果としては、本州四国連絡橋公団が昭和47年に愛媛県大三島等々羅沖で実施した実験結果がある^{3), 4)}。この実験の場合の装薬孔も垂直孔で孔長は5~6mである。爆破は装薬量を16 kgから130 kgまで変化させ全部で11回実施されている。得られた結果の1例として第12図は装薬量が16 kgの爆破の場合

に爆源から50mおよび100mの位置で測定した水中圧力波のオシログラムを示したものであり、第13図は装薬量の違いを除去するために横軸に換算距離($R/\sqrt{W}$)をとって水中圧力波の圧力最高値と距離との関係を示したものである。第10図、第12図および第13図より、電子計算機を用いて算出した海底穿孔爆破に起因する水中圧力

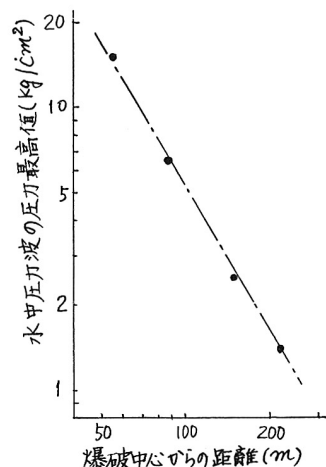


V: 2 kg/div H: 10ms/div

第12図 水中圧力波の実測結果



第10図 計算された圧力波の時間的变化状態



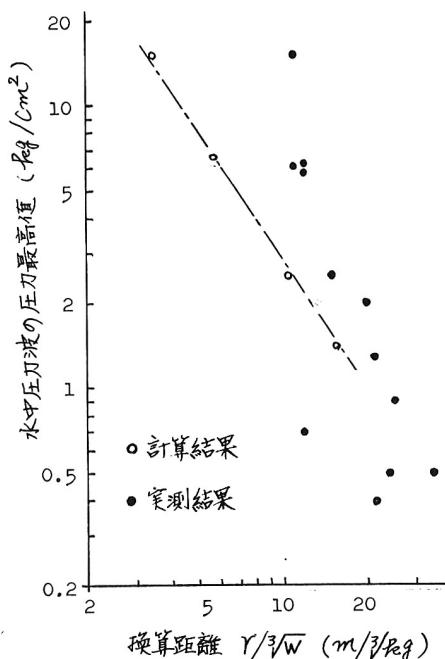
第11図 圧力最高値(計算値)と距離との関係

5. 結 言

今回は DAYS-2 CODE を用いて海底穿孔爆破に起因する水中圧力波の大きさおよびその時間的变化状態を計算した結果を示し、さらに類似の条件で実施された海底穿孔爆破の際に実測された水中圧力波の実測値と計算値とを対比し、両者がかなり良く一致していることを示した。なお、この研究の一部は本州四国連絡橋公団より委託を受けた安全工学協会の研究に参加して実施したものであることを付記しておく。

参 考 文 献

- 1) G. Maerchen and S. Sack: The Tensor Code, Methods in Computational Physics, Vol. 3, p. 181~210, Academic Press, 1964.
- 2) 佐々木一: 電子計算機を用いる動的応力の解析方法 (Tensor Code) について, 水産会誌, 17巻, 7号, 312~318頁, 昭和47年7月.
- 3) 水中爆破による衝撃圧等調査報告書, 安全工学協会, 昭和47年7月.
- 4) 大垣正勝, 小栗正昭, 小川輝繁: 海底爆破による水中音の測定, 日本音響学会講演論文集, 477頁, 昭和47年6月.



第13図 計算結果と実測結果との対比

NUMERICAL SIMULATION OF SUBMARINE BLASTING

Koichi SASSA, Koichi HANASAKI and Ichiro ITO
(Faculty of Engineering, Kyoto University)

In planning a submarine blasting, it is important to predict the magnitude of a pressure wave in water caused by blasting in order to discuss the effects of blasting on marine life and coastal constructions. Therefore in this study, numerical simulation of submarine internal multiple hole blasting was performed to compute the pressure wave in water by using DAYS-2 code which involves the finite difference approximation to the momentum equations.

The blasting conditions for the simulation are as follows: The length of charge hole that is equal to the burden is 5 m, and the explosive in a hole is a 20 kg cartridge of GX-1 dynamite of 8.6 cm ϕ x 240 cm. The number of holes is 162, therefore, total amount of explosive is 3240 kg. Granite is adopted for the rock in the site.

At first, the stress condition caused by an explosion of a single charge was computed, and then, the stress condition near the assumed crater boundary produced by the explosion of 3240 kg was calculated by synthesizing the stress field caused by each explosive. Finally, this stress condition was used for the in-put data of the large model which is used for the computation of the pressure wave in water.

The results obtained are itemized below.

- 1) Attenuation of the pressure wave caused by a submarine internal blasting is greater than that caused by under water explosion.
- 2) Magnitude of the pressure wave caused by a submarine internal blasting is about 1/10~1/20 of that caused by under water explosion of same amount of explosive.
- 3) Magnitude and wave shape of the pressure wave obtained by this numerical simulation agree with the experimental results obtained in the field trials.