

海底無自由面発破による破壊状況のシミュレーション

佐々宏一*

海底にある厚さ約 20m の堆積層を貫いて穿孔し、その下の岩盤を無自由面状態で発破するという海底穿孔無自由面発破は今まで実施されたことのない全く新しい特殊な発破である。そこで、この発破の設計を行うための資料を得るために、この発破によって発生する破壊の機相とき裂が生成する範囲を求めるシミュレーションを実施した。

この報告はそのシミュレーションの結果を示すとともに、この種のシミュレーションが破砕効果の予測に際して有効であることを示したものである。

1. 緒言

本州四国連絡橋公団が児島一坂出ルートで現在建設中の南北備讃瀬戸大橋の橋脚基礎掘削には、海底穿孔発破が採用された。このうちで最も坂出寄りのロープアンカー基礎である 7A 地点においては、過去に例を見ない海底オーバーバーデン発破という特殊な無自由面発破が計画され、実施された。この発破は無自由面発破という過去に経験したことのない特殊な発破であったために、計画段階において、このような発破を行った場合にはどのような破壊が発生するのか、ということ、及び、どのような穿孔配置でどの程度の薬量を用いれば発破完了後実施されるグラブ浚渫作業が能率よく実施できるかに関する予測が、どうしても必要となった。そこで、電子計算機を用いて発破によって発生する破壊現象のシミュレーションを実施し、破壊状況を検討したのでその結果を示すことにする。

2. 計算方法

シミュレーションのために用いた計算プログラムは、波動現象を解析するために作成した DAYS-2 コードである。このプログラムは、不均質媒体内の波動現象のみならず、波動の伝播によって発生する破壊現象も計算できるように作られている。DAYS-2 コードを用いて行った波動現象のシミュレーション結果はすでに多数発表しており、それらによってシミュレーション結果と理論解や実測結果とがかなり良く一致していることを確認している。^{1)~6)}

DAYS-2 コードの計算方式は Tensor コード⁷⁾⁸⁾ とほぼ同じ考え方であるから計算方式の詳細は文献を参照していただくことにし、ここではその計算手順を以下

に順を追って簡単に説明する。

i) 計算モデルの作成

シミュレーションを行おうとする場所の断面図を作成し、それをラグランジュ座標 (k, l) を用いて 4 辺形断面の要素に分割し、それぞれの要素にその要素がある位置の材料の特性を与える。

ii) 波動による粒子の変位の計算

ある時間 $(t=t_0)$ にモデル内に存在している応力場に運動方程式を適用し、それを差分近似を用いて $t=t_0$ 時間に要素の節点、すなわち、ラグランジュ座標の交点に発生する変位加速度を求める。次いで、微小な時間増分 dt の間はその加速度が維持されるとみなし、変位加速度を時間で 2 回積分することによって時間を進め、 t_0+dt 時間におけるすべての節点の変位を求める。

iii) 応力とそれによる破壊の計算

ii) で求められた節点変位を用いてすべての要素のひずみを計算し、それにそれぞれの要素の材料の状態方程式を適用して応力を算出し、この応力より主応力 $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ の大きさとその方向を求める。

今回の解析では直応力 σ とせん断応力 τ との $\sigma-\tau$ 平面において、動的 1 軸引張強度 (S_t) を示す点を通り、材料内の応力状態が動的 1 軸圧縮強度 (S_c) となったときの応力円、すなわち、中心が $\sigma = S_c/2$, $\tau = 0$ で半径が $S_c/2$ の応力円に接する放物線を破壊の限界線とした。したがって、各要素について求められた主応力のうちの最大及び最小主応力から得られる応力円がこの破壊の限界線内にあれば、求められた応力が t_0+dt 時間にモデル内に発生した応力となる。しかし、要素内に発生した主応力から求めた応力円が破壊の限界線を越えている要素がある場合には、その要素は破壊したとみなし、次のような修正を行う。いま仮りに主応力 σ_3 が動的 1 軸引張強度以上になった

昭和 58 年 12 月 16 日 受理

*京都大学工学部資源工学教室

〒606 京都市左京区吉田本町

TEL 075-751-2111 内線 5406

とすると、 σ_3 の作用方向に直交するき裂が発生したと考え、まず σ_3 の作用方向のその要素の引張強度及び σ_3 の値を零とし、それに応じて他の主応力を次式を用いて修正する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1' &= \sigma_1 - \lambda \sigma_3 / (\lambda + 2\mu) \\ \sigma_2' &= \sigma_2 - \lambda \sigma_3 / (\lambda + 2\mu) \\ \sigma_3' &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 σ_1' 、 σ_2' 、 σ_3' は修正された主応力であり、 λ 、 μ はラーメの定数である。このようにして、引張き裂の発生を計算に導入する。

次にせん断応力による破壊については、中間主応力の大きさは破壊に関係しないと考え、最大主応力の値と最小主応力の値とで定まる応力円の半径 (R_s) を求め、この値と、この応力円の中心を中心とし、破壊の限界線に接する円の半径 (R_f) とを比較し、もし、 $R_s < R_f$ ならば破壊しないから、応力を修正せずにそのまま計算を続け、 $R_s \geq R_f$ となる要素があった場合には、その要素はせん断破壊したものとみなし、応力円の中心はそのままにしておき、 $R_s = R_f$ となるように偏差応力を修正するとともに、その要素のすべての方向の引張強度を零とし、さらにその要素のヤング率及びポアソン比を破壊した材料のそれらに変更する。このようにして修正された応力を $t_0 + \Delta t$ 時間に要素内に発生した応力とみなし、計算を続ける。

以上のように、Fig. 1 に示した時間ループを Δt なる時間増分でモデル内のすべての点について廻すことによって、時間を進め、材料の破壊を考慮した波動現象のシミュレーションを行うというのが、このプログラムの計算方式である。

3. 爆薬のごく近傍に発生する応力の計算

爆発にともなう現象のシミュレーションを行う場合には、爆轟圧を最初の入力データとせねばならない。したがって、要素の材料が爆薬であり、その要素に爆

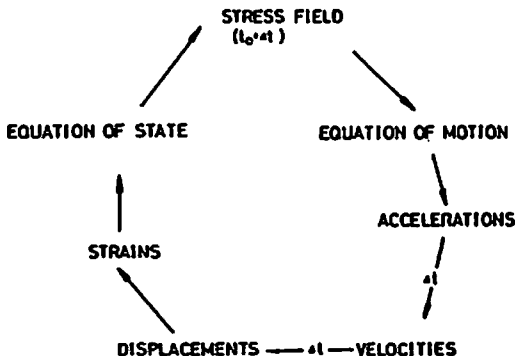


Fig. 1 Feedback loop for stress wave

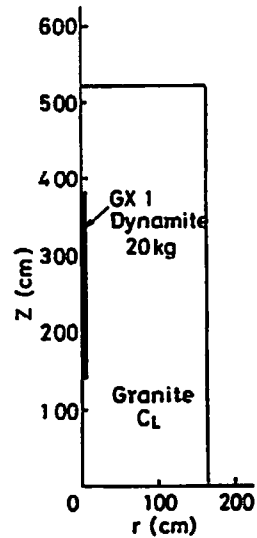


Fig. 2 Axially symmetric DAYS-2 model for the computation of stresses around a 20 kg cylindrical charge in granite

轟圧力をデータとして入力する要素が必要となる。故に、要素の大きさは爆薬の大きさと規定される。このような小さな要素を用いて破壊状況のシミュレーションを行うための $10\text{m} \times 10\text{m}$ 程度の大きさのモデルを作ろうと思えば、要素数が非常に多くなり、計算が不可能になる。そこでまず、爆薬の大きさとその大きさが決まる小さな要素を用いた小さなモデルを用いて、爆薬のごく近傍の応力状態を計算し、その結果を大きな要素を用いた大きなモデルの入力データとするというように、順次モデルを大きくすることによって計算する範囲を広げて行く必要がある。このような手法を Rezoning と呼んでいる。本州四国連絡橋公団が計画した海底穿孔発破に使用する爆薬は GX-1 ダイナマイトで、薬包の形状は直径 8cm 程度、長さ 2m ~ 5m 程度の円柱である。そこでまず、Fig. 2 に示すように、円柱状爆薬の軸を回転軸とする軸対称モデルを考えた。モデルを構成する要素の半径方向の長さは爆薬の半径で規定されるので 4.3cm とし、軸方向の長さを 20cm とした。したがって、要素の断面の大きさは $4.3\text{cm} \times 20\text{cm}$ である。半径方向の要素の数を 38、軸方向の要素の数を 26 とした。したがって、Fig. 2 に示すように、爆薬近傍の応力状態を計算するために用いたモデルの大きさは半径方向に 163.4cm、軸方向に 520cm である。このモデルの外周の境界条件は、外周で出来るだけ波動が反射しないように考慮した。Fig. 2 に GX-1 と記した位置の要素を爆薬とみなし、この範囲内の要素に、Fig. 3 で示したような波形で圧力最高値が 10 万気圧の

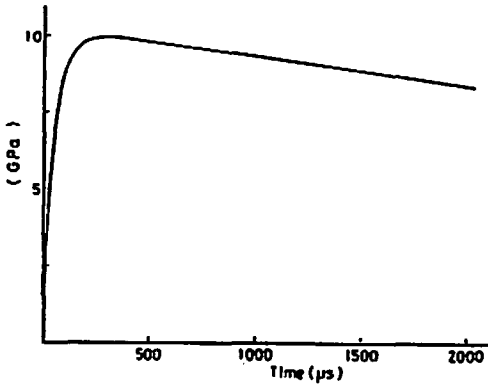


Fig. 3 Detonation pressure used for in-pu-t data

ガス圧を爆轟圧として入力し、波動をモデル内に送り込んだ。しかし、実際の計算結果をみると、圧力によって装薬室の壁面が変位し、それによって装薬室の体積が増加するためにガスが断熱膨張し、Fig. 4に示すような圧力が装薬室壁面に作用していた。このモデルの材料はC₄級の花崗岩とした。その特性は次の通りである。密度：2.6g/cm³、ヤング率：2.0×10⁴ MPa、ポアソン比：0.33、縦波伝播速度：3340m/s、横波伝播速度：1,680m/s、材料試験によって求めた静的1軸圧縮強度：33MPa、静的1軸引張強度：2.7 MPa。計算に必要な動的強度の値としては、動的強度を静的強度の3倍とみなすと DAYS-2コードによる計算結果と実測結果とがよく一致するという研究

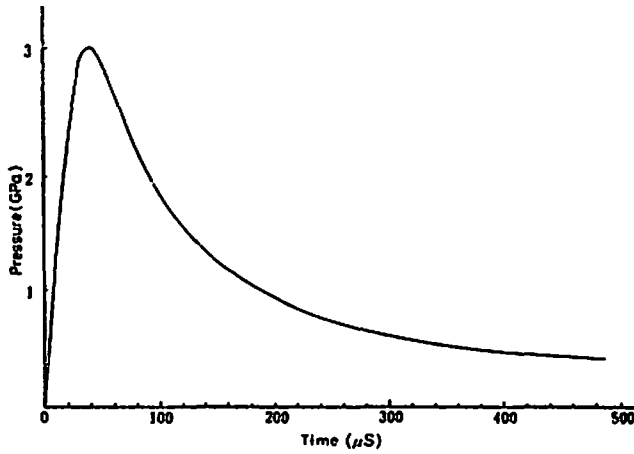


Fig. 4 Pressure acting on the surface of the charge hole

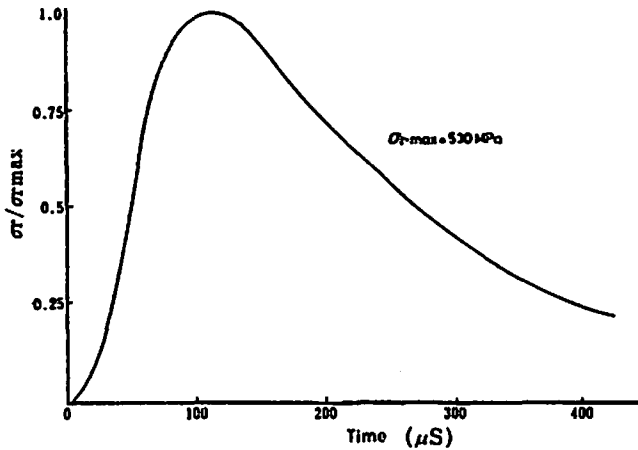


Fig. 5 Radial stress at $r=55$ cm, $z=260$ cm

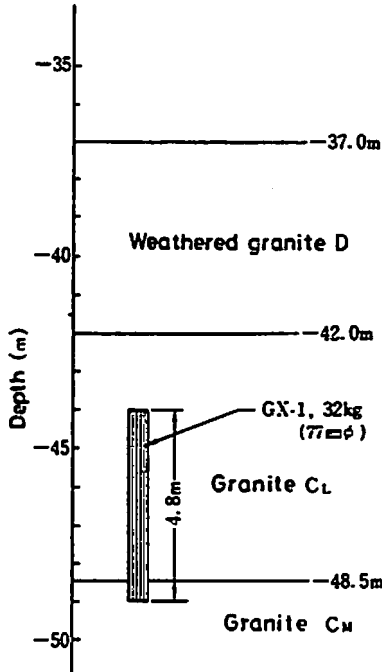


Fig. 6 Profile of a single charge

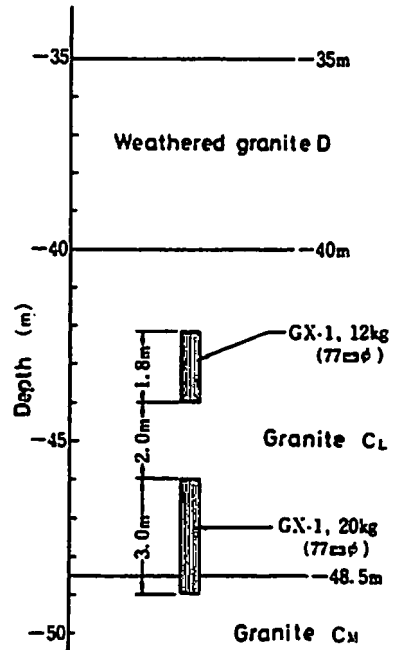


Fig. 7 Profile of the deck charge

結果があるので⁹⁾、動的1軸圧縮強度:100MPa、動的1軸引張強度:6MPaを採用した。得られた結果の1例として、爆薬の中心から半径方向(r 方向)に55cm離れた位置に発生する半径方向の応力 σ_r をFig.5に示す。このように、Fig.2に示したモデルを用いて、20kgの円柱状装薬の爆轟によって、そのごく近傍に発生する応力状態が明らかとなったので、この結果を破壊の様相のシミュレーションを行うためのより大きなモデルの入力データとして使用し、破壊の様相を求めるためのシミュレーションを実施した。

注: C_M , C_L , D というのは岩石の風化変質の程度を变わす分類記号であって、 C_M はやや風化しているもの、 C_L はかなり風化を受けているもの、 D は著しく風化を受け、しばしば砂状および粘土状を呈する部分があるものである。

4. 破壊状況のシミュレーションモデルと計算結果
海底穿孔無自由面発破が計画され実施された7A地区は、水深が約15mでその下に厚さ約20mの砂と粘土の互層からなる堆積層があり、さらにその下に花崗岩があるという地質構造となっている。したがって、海面下約35mの位置から花崗岩となるが、その上部5mほどはかなり風化したD級の花崗岩であり、その下6mほどが C_L 級、その下が C_M 級というように、下部に行くにしたがって良好な花崗岩となっている。ア

ンカー基礎底面としては、海面下50mの位置の C_M 級の花崗岩が選定された。この基礎底面となる岩盤面を出すためには発破を用いなければならないが、そのために計画され実施された発破は、あらかじめ上部の堆積層をグラブ浚渫船を用いて掘き、岩盤を出してから穿孔し、発破するという通常用いられている海底1自由面発破ではなく、オーバーバーデン発破と名付けられている特殊な発破である。この発破は堆積層を掘きせずその上にSEP(自己昇降式作業足場)を設置し、堆積層及び風化花崗岩をつらぬいて、その下にある発破によって破砕する岩盤を穿孔し、その岩盤部分に装薬して発破するという発破である。この場合には装薬と海底面までの長さが約30mもあるので、全く自由面が無いとみなしうる無自由面発破となる。なお、グラブ浚渫船による掘き、全発破が終了した後、堆積層、風化花崗岩、発破によってき裂が入り掘きやすくなった C_L または C_M 級の花崗岩という順に行われる。このような、無自由面発破を行った場合に発生する破壊状況を予測するためのシミュレーションは、多くの条件について行ったが、今回はFig.6とFig.7に示したように、合計32kgのGX-1ダイナマイトを1個の装薬として起爆した場合と2個のデッキチャージとした場合について、破壊の様相を対比した結果を示すことにする。Fig.8及びFig.9は、Fig.6及びFig.7に示した条件の発破シミュレーションを

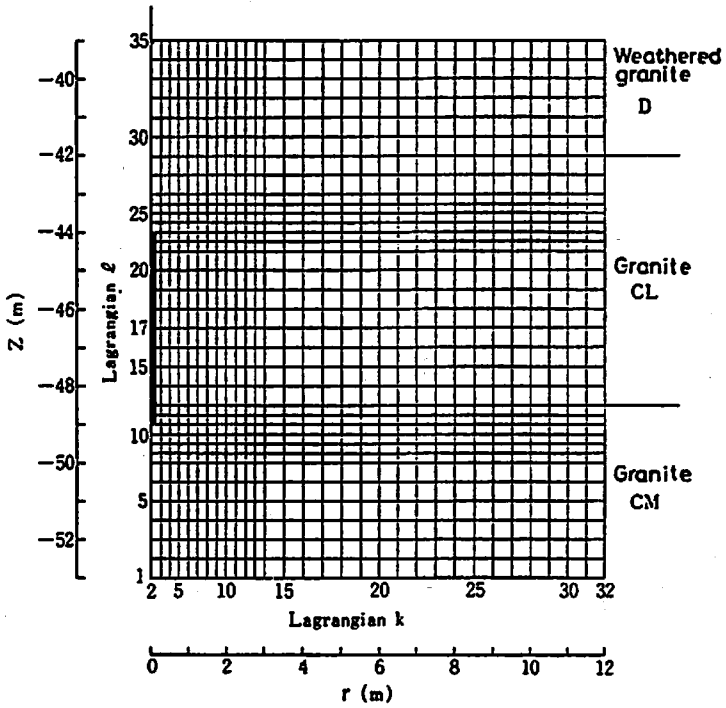


Fig. 8 DAYS-2 Model for the single charge

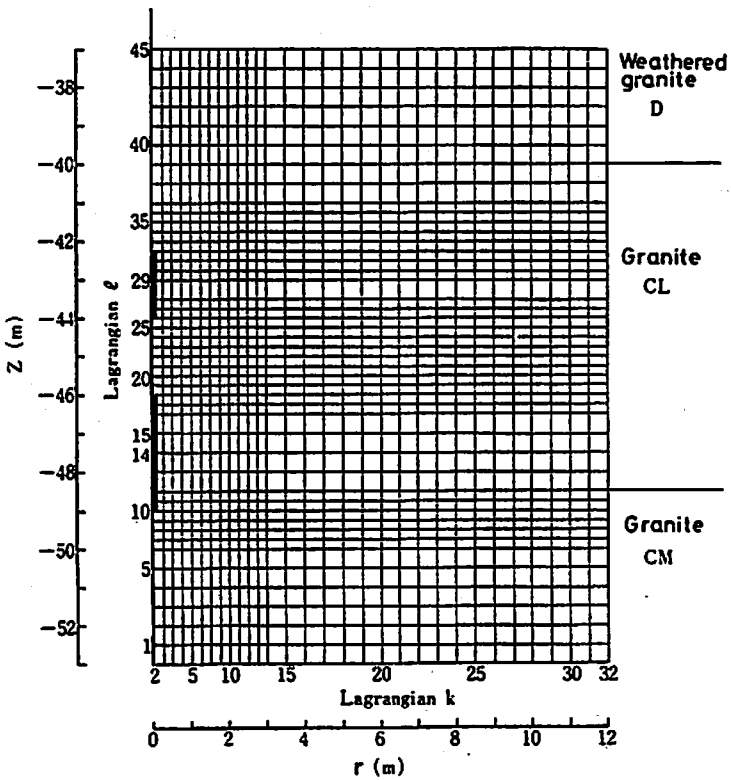


Fig. 9 DAYS-2 Model for the deck charge

Table 1 Characteristics of rocks

Rocks	Density (g/cm ³)	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	P-Wave Velocity (m/s)	S-Wave Velocity (m/s)	Uniaxial Compressive strength (MPa)	Uniaxial Tensile strength (MPa)
Granite C _M	2.7	2.5 × 10 ⁴	0.33	3500	1870	70	6
Granite C _L	2.6	2.0 × 10 ⁴	0.33	3340	1680	33	2.7
Weathered granite D	2.5	1.0 × 10 ⁴	0.35	2510	1210	13	1.7

行うために用いたモデルの、大きさと要素分割の状況を示したものである。さらに、このモデルを構成している花崗岩 D , C_L , C_M の諸特性を Table 1 に示す。なお、Table 1 に示してある強度はコアを用いて行った材料試験による静的強度である。したがって、計算に際しては、先に示したように、この値の3倍を動的強度として用いた。計算に際しては、モデルの上面にその上にある堆積層と海水の重さに対応する静圧を加え、爆薬の位置にある要素とそれに隣接している要素には、前節で示した小さなモデルを用いて計算した装薬近傍の応力状態より求めたその要素の重心の位置の応力を、入力データとして与え、これを初期条件として計算を行った。得られた結果として、Fig. 8 に示したモデルを用いて行ったシミュレーション結果を Fig. 10 及び Fig. 11 に、Fig. 9 に示したモデルを用いて行ったシミュレーション結果を Fig. 12 及び Fig. 13 に示す。Fig. 11 及び Fig. 13 に示した結果は、爆薬の軸を z 軸とする r, θ, z 座標において、き裂面に立てた法線の方向が θ 方向 $\pm 45^\circ$ の範囲内、したがって、 z 軸に直交する $r\theta$ 面上で爆源を中心とする放射状き裂が発生する可能性のある範囲を図示したものである。Fig. 10 及び Fig. 12 においては、き裂面に立てた法線の方向が r 方向 $\pm 45^\circ$ の範囲内にあるき裂が発生する可能性のある範囲が、実線で、示してある。このき裂は、図に示したような θ 軸に直交する rz 面上ではき裂の方向と z 軸とのなす角が 45° 以下である方向に発達するき裂である。したがって、上下方向にクレーターを形成しようとするき裂でその頂角が 90° 以下のき裂もこれに含まれる。また、破線で示してある範囲はき裂面に立てた法線の方向が z 方向 $\pm 45^\circ$ の範囲内にあるき裂が発生する可能性がある範囲である。このき裂は図のような rz 面上では水平方向 $\pm 45^\circ$ の方向に発達するき裂となる。

以上に示したシミュレーション結果より、 θ 方向に作用する引張応力、いわゆる Hoop stress によって、爆薬の軸を中心として放射状に発生するき裂が最も長くなり、Fig. 11 に示した集中装薬の場合には、このき裂のうちの最も長いものの先端は装薬の中央部付近で装薬孔軸からほぼ 5m の位置まで達する可能性があること、及び、Fig. 13 に示した分散装薬の場合にはこの放射状き裂の最も長いものの先端の位置はほぼ 4m となり、装薬長が短くなるにつれて、このき裂の長さも短くなることわかる。

次に、Fig. 10 と Fig. 11 及び Fig. 12 と Fig. 13 とを重ね合わせてみることによって、3方向にき裂が入る範囲、すなわち、岩盤がグラフによって掘さくしやすくなる範囲を調べる事が出来る。この3

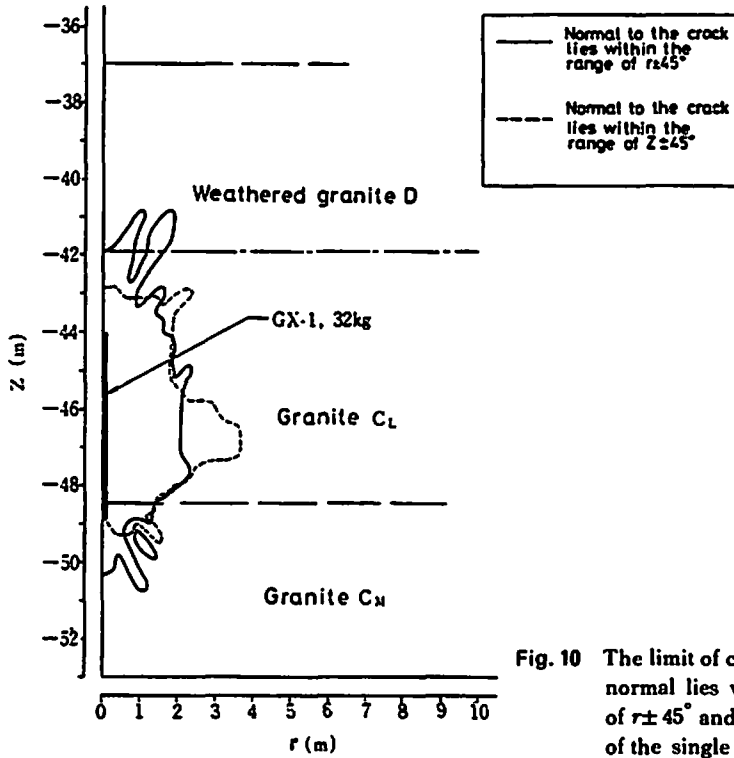


Fig. 10 The limit of cracking to which normal lies within the ranges of $r \pm 45^\circ$ and $z \pm 45^\circ$ for the case of the single charge

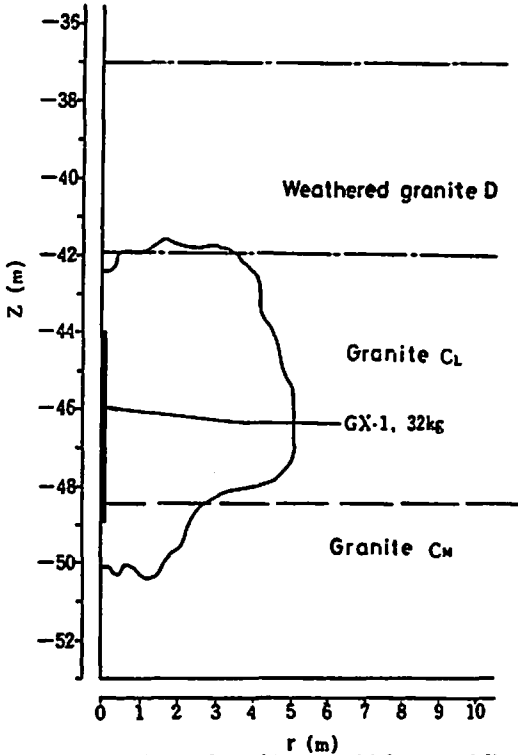


Fig. 11 The limit of cracking to which normal lies within the range of $\theta \pm 45^\circ$ for the case of the single charge

方向にき裂が入る可能性のある範囲は、 r 方向では集中装薬の場合には約2m、分散装薬の場合には、1.5~2mの範囲であることがわかる。さらに、装薬の下端から下方に関しては、3方向にき裂が入る範囲は50cm程度であること、及び爆薬の上下両端から、いわゆるろと状のクラックが発生していることがわかる。

また、Fig. 12より、デッキチャージとした場合には、各装薬の中間の位置では水平方向のき裂はあまり発生しないことがわかる。

5. 発破実績

本州四国連絡橋公団は、このシミュレーション結果などを参考にして、発破設計を行った。

すなわち、3方向にき裂が入る範囲が、薬量が20kgの場合には、Fig. 7のデッキチャージの下側の装薬による破壊状況から1.5~2m程度と考えられることから装薬孔間隔を2mとした。また、装薬より下方には装薬下端より50cm程度の範囲に3方向のき裂が発生するという今回の結果などを考慮して、装薬孔の下端を最終仕上げ面である海面下50mの面よりも50cm上の位置、すなわち、海面下49.5mの位置とした。なお、1孔当りの装薬量は、CL級の花崗岩層の厚い位置では30kg、他の位置では20kgとした。

上記のような条件の無自由面発破が実施され、発破

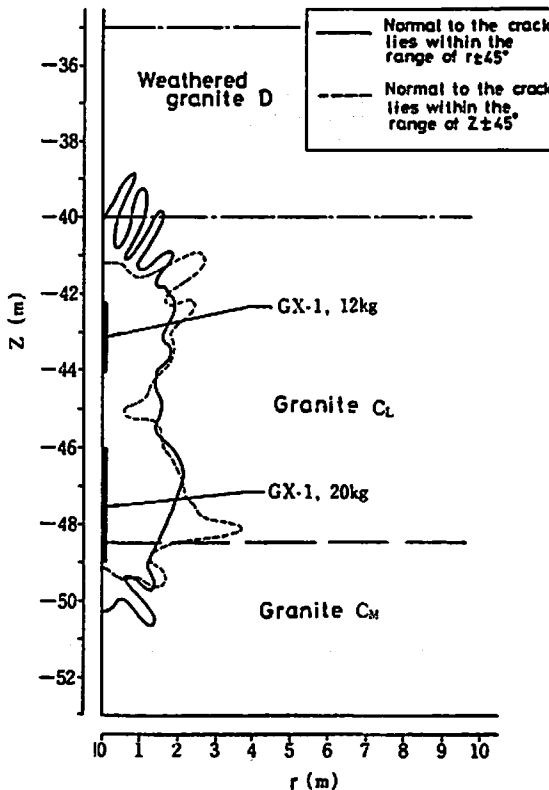


Fig. 12 The limit of cracking to which normal lies within the ranges of $r \pm 45^\circ$ and $z \pm 45^\circ$ for the case of the deck charge

完了後、上部の堆積層から順次グラブを用いて掘さくされた。その結果、上記の無自由面発破によって花崗岩が良好に破碎されていたことが確認されるとともに、能率良く掘さくが完了し、海面下50mの最終仕上げ面は良好な岩盤面となった。

6. 結 言

海底無自由面発破という全く新しい発破を行った場合に発生するき裂の様相とその生成範囲を予測するためのシミュレーションを、波動現象のシミュレーションプログラムである DAYS-2 コードを用いて行った。その結果、3方向にき裂が発生し、岩盤が掘さくしやすい状態になる範囲は、薬量が30kgのときは装薬軸から約2m、20kgのときはほぼ1.5~2mの範囲であること、及び装薬下端から下方向には50cm程度であることなどを予測することができた。

これらの結果などを参考にして穿孔パターン及び薬量が決定され、発破が実施された。発破完了後の掘さく実績や最終仕上げ底面の観察結果は、このシミュレーション結果が妥当であることを示していた。

これら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。

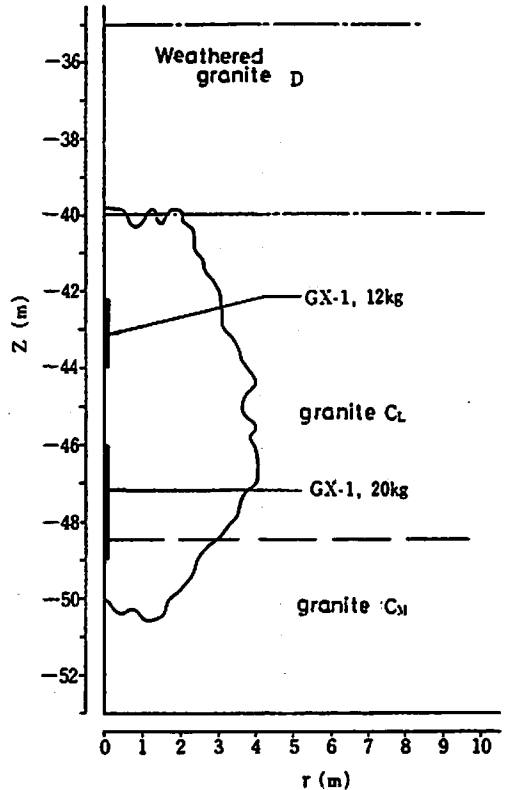


Fig. 13 The limit of cracking to which normal lies within the range of $\theta \pm 45^\circ$ for the case of the deck charge

最後に、この予測計算は本州四国連絡橋公団第2建設局より財団法人総合安全工学研究所が委託を受けて実施した調査研究の一部として行ったものであり、この報告に示したいくつかのデータは本州四国連絡橋公団より提供を受けたものである。当時の第2建設局坂出工事事務所 所長 杉田秀夫氏はじめ所員各位に深謝する次第である。

文 献

- 1) 佐々宏一、伊藤一郎：材料、21, 221, 123~129頁、(1972)
- 2) 佐々宏一、伊藤一郎、伊藤勝久：工業火薬協会誌、34, 1, 30~40頁、(1973)
- 3) K. Sassa and I. Ito: Advances in Rock Mechanics (Proc. of 3rd ISRM Congress), 2B, pp.1501~1505, (1974)
- 4) 佐々宏一、伊藤一郎、奈良平俊彦：工業火薬協会誌、38, 2, 91~99頁、(1977)
- 5) 佐々宏一、伊藤一郎、長坂進：工業火薬協会誌、38, 3, 137~143頁(1983)
- 6) 佐々宏一：水曜誌、20, 1, 74~78頁、(1983)
- 7) G. Maenchen and S. Sack: Methods in Com-

Numerical Simulation of Fracturing Produced by Submarine Overburden Blasting

by Koichi Sassa*

Honshu-Shikoku Bridge Authority planned a submarine overburden blasting which deemed to be a blasting with no free face. This type of blasting was an extremely special one and was the first trial in Japan.

Therefore, the design of this blasting by the conventional method was very difficult for the sake of its speciality.

Then, numerical simulation of fracturing produced by this blasting was performed to discuss the drilling pattern and the amount of explosive required. The computer program used for this simulation was a Days-2 Code which involved the finite difference approximation to the momentum equations.

As the results, the pattern of fracturing and the limit of cracking were computed. Referring to this results, Honshu-Shikoku Bridge Authority designed and performed the submarine overburden blasting.

After completion of this blasting, the diluvial layer and the underlying granite which was fractured by this blasting were dredged up by a grub in order.

The results of the dredging show that the results of this numerical simulation are reasonable.

(*Department of Mineral Science and Technology, Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan)
