

水中でのクレータ試験により生ずる クレータにおよぼす水圧の影響について

花崎 紘一* 伊藤 一郎*

本研究においては、水中における岩石爆破の効率に水圧がどのような影響を与えるかについて検討を行なった。すなわち、水中または高压容器内において、3号電気雷管を用いたモルタルブロックのクレータ試験を行ない、一方、爆発ガスに起因してブロック内に発生する静的な応力の解析を有限要素法によって行なった。

その結果、クレータ試験の結果からクレータの形状はブロックの自由面上に加わる圧力の大きさによって異なることがわかった。さらに、有限要素法による応力解析の結果とを比較してみると、爆発ガスに起因してブロック内に発生する引張応力の分布状態が、クレータの形状に大きな影響を与えていることが認められた。

1. 緒言

海底の鉱物資源の開発や、海洋開発にともなう土木工事を行なう場合などでは、海水に接している岩石の爆破作業が必要となってくることが多いと思われる。

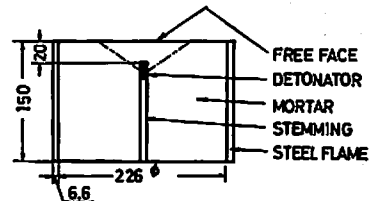
しかしながら、この爆破作業は岩石が自由面で空気と接している場合の爆破条件とは異なるため、とくに水深が深いところでの爆破作業を有利に行なうためには特別の考慮が必要となる¹⁾。

今回は、水深下において一自由面爆破を行なう場合の破壊機構を究明するための一連の基礎的研究のうちで、水圧の大きさが爆破漏斗孔(クレータ)の大きさや形状に与える影響をとり上げ、これについて考察を行なった。すなわち、後述するように、水深170mの井筒の中と、高压容器内でモルタルブロックのクレータ試験を行ない、生成したクレータの形状を測定した。一方、爆発生成ガスによる静的荷重によって生ずるモルタルブロック内の応力状態を有限要素法により解析し、その結果と実験で求められたクレータの形状とを比較し検討を行なった。

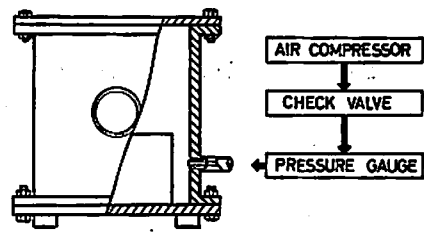
2. 実験方法および装置

2-1 供試体

本実験に用いた供試体は、セメント/砂比が1/2のセメントモルタルを内径229mm、肉厚6mm、高さ150mmの円筒型の鋼鉄枠の中に流し込んで1ヶ月以上養生させたものであり、鋼鉄枠はそのままはずさず



(a)



(b)

Fig. 1 Specimen and high pressure vessel

(a) Specimen

(b) High pressure vessel

に用いた。また実験に際しては、Fig. 1(a)に示すように、モルタルブロックのクレータを生成させる面の反対側から所定の長さだけ表面に垂直に穿孔し、その孔に3号平底電気雷管を挿入して、急結セメントによりタンピングを施した。

2-2 実験方法

2-2-1 井筒内での実験

水深が約170mで有効内径が7mの井筒の中へ、電

昭和46年12月27日受理

* 京都大学工学部資源工學教室 京都市左京区

気雷管を装填した供試体を所定の位置まで水平に沈め、クレータを生成させる面から水面までの距離を測定して確認したのち、電気雷管を起爆させてクレータを生成させる。

なお、井筒の中の水の比重は浅い部分では約1.005、深いところで約1.01であつた。したがつて、電気雷管の爆発時におけるクレータの生成面から水面までの距離を x (m)とすれば、その面に加わる水の圧力 y (kg/cm²)は次の式で表わすことができるとみなしてさしつかえないものと思われる。すなわち、

$$y = 0.1x \dots\dots\dots (1)$$

2-2-2 高压容器内での実験

実験室において、供試体を加圧しながら電気雷管によりクレータを生成させることができるよう、特別に高压容器を試作した。その概念図を Fig. 1(b) に示す。

実験に際しては、電気雷管を装填した供試体を高压容器の中に入れて、そのまま密閉するか、あるいは、供試体上面より高さ10mの位置まで水を容器内に入れてから密閉し、チェックバルブを通じてコンプレッサーから圧縮空気を容器内部に送り込んで、容器の内部を所定の圧力に昇圧する。しかるのち電気雷管を起爆してクレータを生成させる。

なお、高压容器に水を入れて加圧した場合と、水を入れずに圧縮空気のみで加圧した場合との二つの条件を設けたのは次の理由による。すなわち、供試体の自由面が空気で覆われている場合と、水で覆われている場合の両者の実験結果を比較して、その差異が結果にどのように影響をおよぼすかを考察するためであるが、この場合の影響としては、主として次のようなものが考えられる。

(1) 電気雷管の起爆により、供試体内を伝はんする応力波が自由面で反射する際、反射係数(入射応力波の振幅と反射応力波の振幅との比)の違いにより、反射後、供試体内に伝わる反射波の大きさが異なることにより、それが応力状態に与える影響、および、

(2) 供試体にクレータが生じた際に、このクレータ部分のモルタルを爆発生成ガスが押しつける際にしなければならない仕事の量に与える影響。

これらの影響は、(1),(2)のいずれにもとづくものであつても、自由面が水で覆われている場合の方が、空気で覆われている場合よりも、クレータの体積を小さくする方向に働くという形で現われてくるものと予想される。

2-3 データ処理について

2-2 で述べた方法によつて行なつた実験により得られたクレータの形状を機械的に求めるように、Fig.

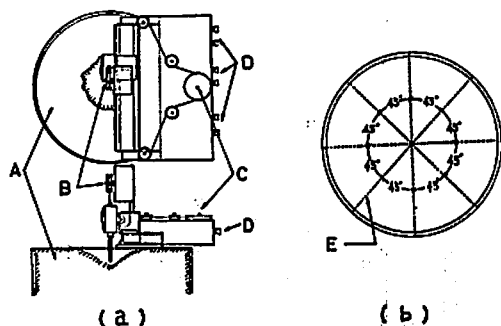


Fig. 2 Section tracer and specimen showing the lines for trace

- (a) Section tracer A: Specimen, B and C: Shafts of variable resistors, D: Terminals
(b) Specimen E: Lines for trace

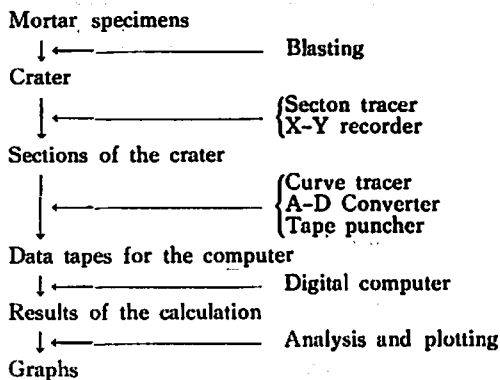


Fig. 3 Block diagram for data processing

2(a) に示すような断面形状読取装置を試作し、Fig. 2(b) に示すように、1 供試体につき45° 間隔の四つの断面についての断面図を描いた。なお、この断面形状読取装置は二つの可変抵抗器と電源回路および、機械機構部分からなつており、そのうちの一つの可変抵抗器は、ダイヤルゲージによる上下方向の距離(深さ)を、もう一つの可変抵抗器はダイヤルゲージをとりつけた台を水平方向に移動させることにより生じた距離(半径)をそれぞれ抵抗変化としてとらえるものであり、この抵抗変化を電圧変化にかえてXYレコーダのX方向およびY方向の入力とすれば、クレータの断面を描かせることができる。

このようにして得られた断面図を図形読取装置およびAD変換器により処理することによつて電子計算機で直接処理できる紙テープを作成することができる。

Fig. 3は、以上に述べたようなこの実験におけるデータ処理の流れ図を示したものである。

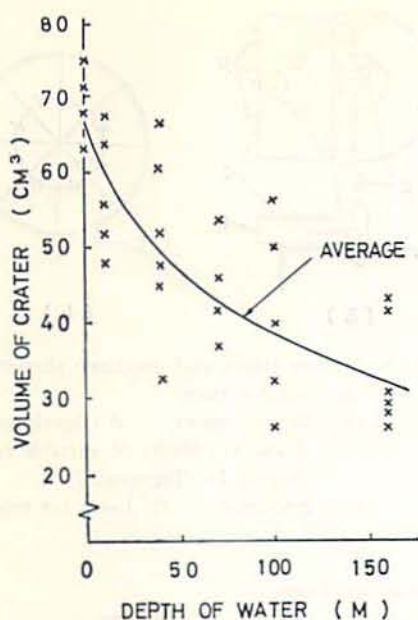


Fig. 4 Relation between the volume of crater and the depth of water. (Field test)

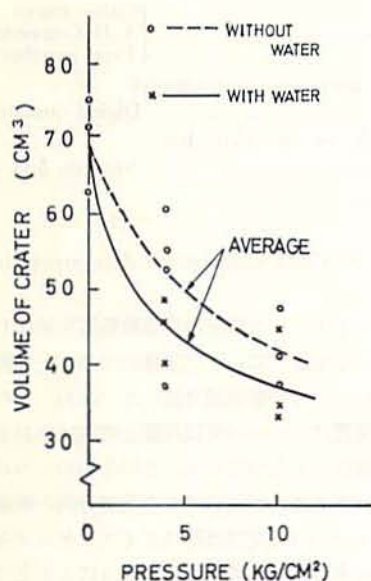


Fig. 5 Relation between the volume of crater and the pressure in the vessel. (Laboratory test)

3. 実験結果および考察

Fig. 4は、2-2-1で述べた井筒内での実験から得られたクレータの体積と水深との関係をFig. 3で示した手順を用いてプロットしたものである。この実験結果には、同一条件で行なつた実験においてもかなりのば

らつきが認められる。その原因はいろいろ考えられるが、供試体作成時において最小抵抗線に±1.0mm程度の誤差が生じていることや、モルタルの不均質さ、あるいはまた、実験時における水深の測定の誤差などが主な原因と考えられ、これらによる影響が実験結果に現われたものと思われる。しかし、Fig. 4から明らかなように、水深が大きくなるにつれてクレータの体積が小さくなってゆく傾向ははっきり認められる。

つぎに、Fig. 5は2-2-2で述べたように、実験室において高压容器を用いて供試体を加圧した状態で実験を行なつた場合のクレータの体積と高压容器内の圧力との関係をFig. 3に示した手順を用いてプロットしたものであり、実線で示した曲線は高压容器内に水を入れて行なつた実験で得られた結果の平均値を表わし、破線で表わした曲線は高压容器内に水を入れないで行なつた実験で得られた結果の平均値を表わしている。

さて、(1)式から明らかなように、たとえば5kg/cm²および10kg/cm²の圧力は、2-2-1で述べた実験に用いた井筒における水面下50mおよび100mでの水压に相当することを考慮して、Fig. 4とFig. 5に示した三本の曲線を比較してみると、つぎのようなことがわかる。

すなわち、全般に供試体表面に加わる圧力が大きくなるにつれてクレータの体積が小さくなってゆく傾向が認められる。

また、Fig. 5に示すように、供試体表面に加わる圧力の大きさが同じであつても、供試体表面が水と接している場合と、空気と接している場合とではクレータの体積にちがいが認められ、後者の場合の方が大きいことがわかる。このことから、Fig. 4に示したように、水深が大きくなるにつれてクレータの体積が小さくなるという理由が、単に供試体内に水深に応じた水压による初期応力が存在しているからというだけではなく、爆破の際に発生する応力波などの動的な要因にもとづくクレータの生成機構に対して、クレータの生成される面(自由面)上の水の存在がかなり影響を与えていることも一つの理由となるものと考えられることができる。

さらに、Fig. 4に示した曲線とFig. 5の実線で示した曲線とはかなりよく似ているが、それでも少しの差が認められる。その理由は、2-2-2で述べた実験では供試体のすぐ近傍に高压容器の壁面が存在し、しかも水の層の厚みは10cm程度であるが、2-2-1で述べた井筒内での実験では、供試体からかなりはなれたところ(約3.5m)に壁面があり、水の層はもちろんFig. 4の横軸に示すとりの厚みをもつなどの条件の相違によるものと考えられる。この原因を解明すること

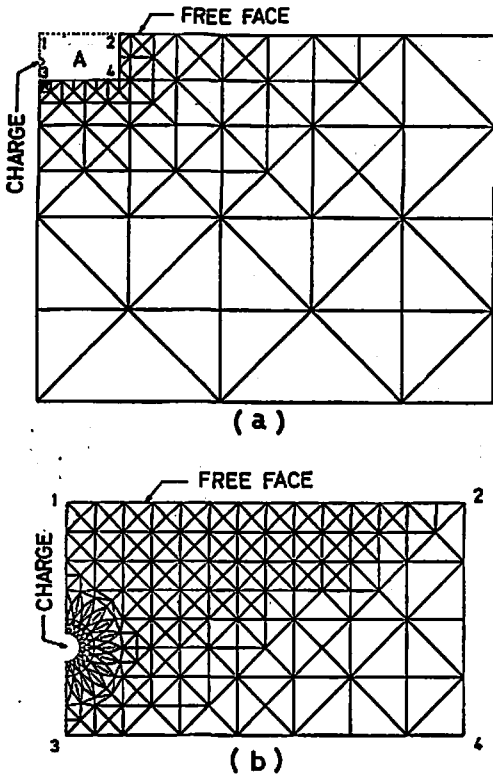


Fig. 6 Meshes for finite element method
 (a) Complete meshes
 (b) Detailed meshes for the part A
 in Fig. 6 (a)

は、水中における岩石爆破の破壊機構の究明や、他の構造物へ与える影響などの解析に役立つものと思われるが、これらについては今後の研究に委ねたい。

4. 有限要素法による静的応力解析

4-1 計算方法

一般に、爆破に起因する岩石内の応力解析は動的および静的の両面からの解析を必要とするが、ここでは一つの試みとして、有限要素法⁹⁾による静的な応力解析を行なった。すなわち、装薬孔壁面および自由面に種々の圧力を加えた場合に岩石内に生ずる応力を数値計算により求めた。したがって、今回は装薬孔内において爆発生成ガスの圧力が一定の大きさに保持されており、かつ岩石が破壊しないと仮定した場合の応力解析を行なったことになる。このような応力解析の結果から水圧の大きさの相違により岩石内に生ずる応力状態がどのような影響を受けるかについて定性的な傾向をつかみうるものと思われる。

さて、今回の応力解析は Fig. 6 に示すような要素分割をしたモデルについて行なった。一般に球状装薬に

よる一自由面爆破の解析では、装薬孔中心より自由面を下した垂線を軸とする軸対称問題として取り扱うことができるので、その軸を通る断面の片側だけについて応力解析を行なえば充分である。なお、有限要素法により数値解析を行なうにあたっては、多元連立方程式の解をガウスザイデル法により求める方式を採用した。一つの条件についての応力状態を求めるのに要した計算時間 (CPU タイム) は FACOM-230-60 型電子計算機を使用して約 100 秒であった。また、ぼう大な量の計算結果の一部は、FACOM 270-30 型電子計算機のブラウン管表示装置を用いて図形表示し、データ整理の能率向上化を計った。

4.2 解析結果および考察

応力解析は、装薬孔壁面にはすべて 50,000 という大きさの一定圧力 (P_1) を加え、自由面上に作用させる圧力 (P_2) の値を 1~50 の間で変化させた条件について行なった。その結果の一部を Fig. 7~Fig. 10 に示す。それぞれの図において、(a) 図は岩石内に生ずる応力の等最大主応力線を示した図であり、(b) 図は最大主応力が作用する面の接線を線分で索わしたもので、いかえれば引張による亀裂の生じる可能性のある方向を索わしたものである。

さて、Fig. 7~Fig. 10 の (a) 図をそれぞれ比較すると、自由面上に加わる圧力が大きくなるにつれて最大主応力が正 (すなわち引張応力) となる領域が小さくなってゆくことがわかる。このことは一般に岩石のように圧縮強度に比べて引張強度の小さい材料では引張破壊が生じやすいことを考慮すれば、自由面上に加わる圧力が大きくなればなるほど破壊する領域が小さくなることを示しており、実験の結果とよく合致している。

つぎに、Fig. 7~Fig. 10 の (b) 図について検討すれば、最大主応力の作用する面を順次滑らかに結んでできる多くの曲線のうちのある特定の曲線は、実験で得られたクレータの断面を示す曲線の形とよく似た形を示していることがわかる。また、自由面上に加わる圧力が大きくなるにつれて、自由面近傍の点において最大主応力の作用する面の自由面となす角度が大きくなってゆくことがわかる。Fig. 11 は、実験により生じたクレータの断面を模式的に索わしたものであるが、自由面上の圧力が小さいときは、クレータの断面は、朝顔型のように自由面と小さい角度で交わっているが、自由面上の圧力が大きいときは、クレータの断面がおわん型のようになり、その断面は自由面とかなり大きな角度で交わっていることがわかる。このように、自由面上に作用する圧力の大小に応じてクレータ断面の形が変る現象は、上に述べた応力解析の結果に

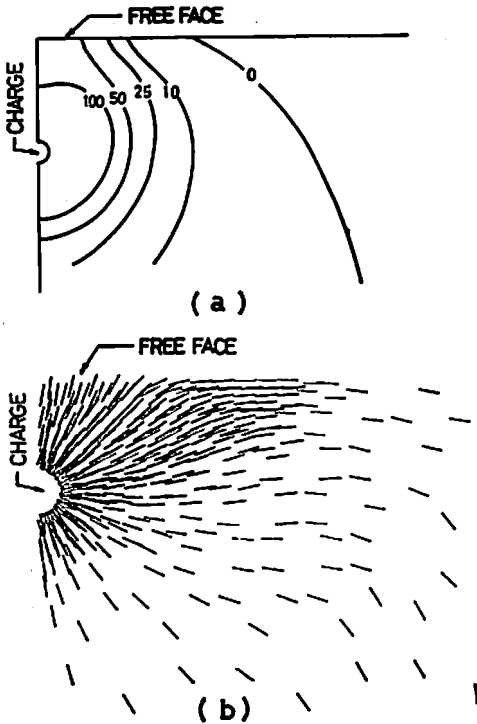


Fig. 7 Results showing the stress analysis for the condition;
 P_1 (charge pressure) = 50,000 and
 P_2 (pressure on the free face) = 1
 (a) Contours of the maximum principal stress
 (b) Planes against which the maximum principal stress acts

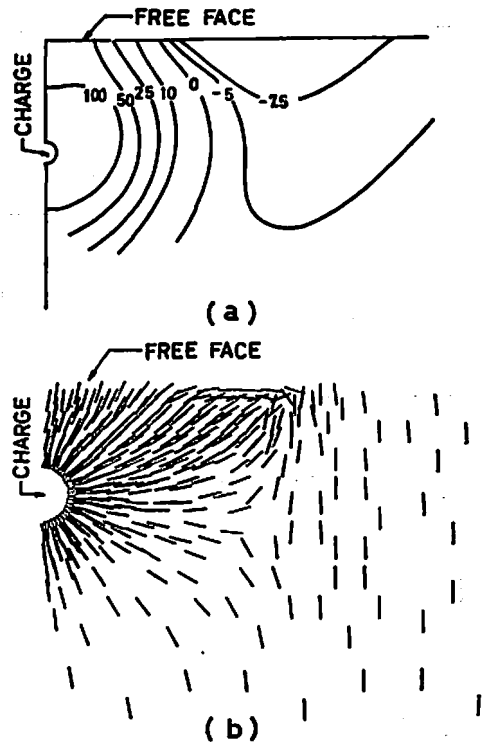


Fig. 8 Results showing the stress analysis for the condition;
 $P_1=50,000$ and $P_2=10$
 (a) Contours of the maximum principal stress
 (b) Planes against which the maximum principal stress acts

において、自由面上に加えた圧力の大きさに応じて最大主応力の作用する面の自由面となす角度が変化してくる傾向と一致しており、この両者の現象に密接な関係があるように考えられる。

以上のことから、静的に解析した応力分布状態が生ずるクレータの形状と少なからず関係があるように思われる。しかしながら、一般に動的な応力分布状態（応力波の伝ばんによる応力分布状態）は静的なそれとは異なり、とくに、過渡期における両者の応力分布状態の差異はいちじるしいと考えられる上に、さらに、岩石にいったん亀裂が生じたのちの応力分布状態は、Fig. 7~Fig. 10 に示したものと異なってくることを考慮すると、上に述べたクレータ断面の形が自由面上に作用する圧力の大きさに応じて変化する理由を、静的な応力解析結果のみと関係づけて説明するだけでは充分ではない。しかし、つぎのような考え方をとれば、Fig. 7~Fig. 10 に示した静的応力解析の結果と実験により得られたクレータの断面の形との関係を

ある程度説明することができるのではないかと考えられる。

すなわち、(1) 爆薬の爆轟により発生する超高圧と超高熱のために装薬孔壁が圧潰され孔壁がむげられると同時に応力波が伝ばんされる。この応力波は岩石の引張強度を越える応力を伝ばんすると考えられるが波長が短いため、岩石内には大きな亀裂を放射状に発達させるまでには至らず、この段階では単に亀裂の核ともいうべき岩石内の欠陥が増殖される³⁾。

(2) 一方、拡大された装薬孔内に爆轟生成ガスが充満するが、その圧力の立ち上り時間が非常に短かいので瞬間的に一定値の最高圧に達し、したがって、一瞬の間は岩石内部での応力状態は Fig. 7~Fig. 10 に示す静的な応力状態と酷似したものとなるが、このような応力状態に達すると、すでに応力波の伝ばんにもなつて増殖されて数多く分布している亀裂の核が Fig. 7~Fig. 10 の (b) 図に示した線分の方に添つてさらに発達して閉亀裂を生成するものと考えられる。

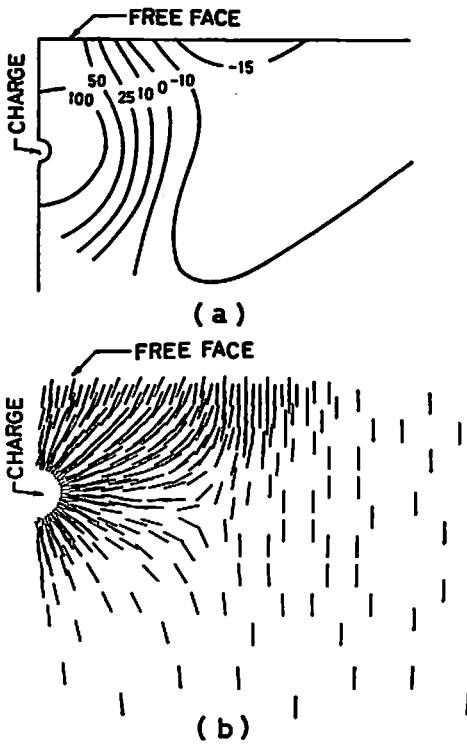


Fig. 9 Results showing the stress analysis for the condition;
 $P_1=50,000$ and $P_2=25$
 (a) Contours of the maximum principal stress
 (b) Planes against which the maximum principal stress acts

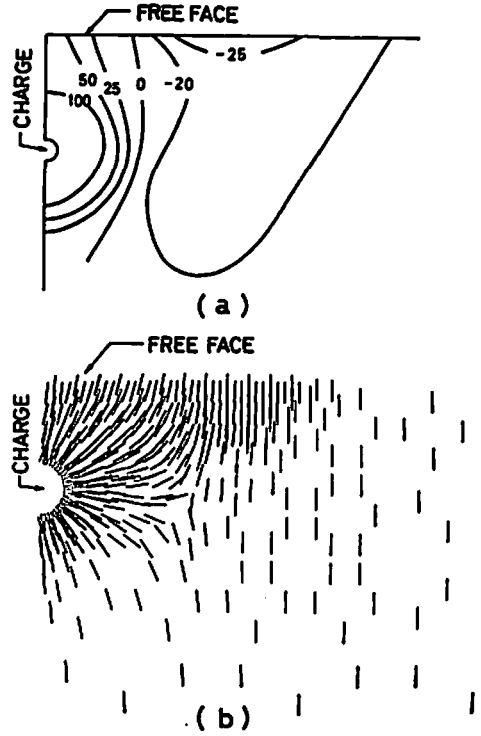


Fig. 10 Results showing the stress analysis for the condition;
 $P_1=50,000$ and $P_2=50$
 (a) Contours of the maximum principal stress
 (b) Planes against which the maximum principal stress acts

(3) 時間的にはややおくれで、その後拡大された装薬孔壁面から開亀裂が発達してゆくが、そのような亀裂はすでに発生している閉亀裂を単に結んでゆくような状態で発達するものと考えられる。

以上のような考え方をすれば、亀裂の方向は Fig. 7 ~ Fig. 10 の (b) 図に示した線分を順次なめらかに結んでできる曲線で示される方向をとることになり、そのようにして求められる亀裂線のある特定のものがクレータの断面を決定すると考えることができる。

また、高压容器を用いた実験の結果を説明したところで述べたように、自由面上に同じ圧力が加わっていても、水を介して加圧した場合と、空気のみで加圧した場合に得られたクレータの形状が異なるのは、上に述べた事柄のうちで (1) および (3) の段階での様相が異なってくるのがその理由の一つとして考えられるように思われる。すなわち、(1) の段階では自由面において応力波が反射する際の反射率が異なるために亀裂の核の分布状態が異なるため、また (3) の段階では

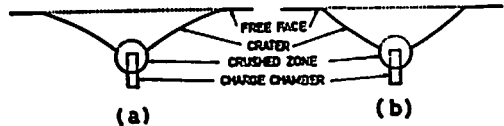


Fig. 11 Profiles of craters produced in the experiments
 (a) In the case where low pressure acts on the free face
 (b) In the case where high pressure acts on the free face

亀裂の発達には岩石の移動を伴うから、自由面上にある媒質の質量がその移動に対して大きな影響を与えることになり、自由面上にある媒質が水である場合と空気である場合とではその影響の度合いが異なるための二点を考慮すれば、その結果として現われる亀裂の発生状態も異なってくるものと考えられる。

5. 結 言

今回は、水中における岩石の一自由面爆破において

は、水深が深くなるにつれてクレータの体積が小さくなる傾向にあるということが実験的に確かめられたことを報告した。また、実際に生成されたクレータの形状の変化を有限要素法による静的応力解析で得られた結果を用いて説明することを試みた。

終りに、本研究の一部である井筒内でのクレータ試験を行なうにあたり、その実験場を提供して下さった日鉄鉱業株式会社有明炭鉱開発事務所ならびにその実

験に御協力を頂いた同所の山口勉氏、および当時京都大学大学院生であつた赤川正俊、同学生であつた北川正男の諸氏に対し謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 山口, 井上, 伊藤: 日本鉱業会誌, 85, 237, (1969)
- 2) 伊藤, 佐々, 谷本: 工業火薬, 32, 13, (1971)
- 3) 勝山, 佐々, 伊藤: 日本鉱業会誌, 87, 470, (1971)

Considerations on the Results of Underwater Crater Test

by K. Hanasaki and I. Ito

In this study we examined the effects of the water pressure on the efficiency of the underwater rock blasting. That is, we carried out a series of crater tests for mortar blocks in the water or in a high pressure vessel with the No.3 detonator, and in addition we calculated the stresses induced statically in the mortar block by the high pressure gas of explosion, using the well-known finite element method.

We found from the experimental data that the shape of the crater produced changes with the pressure acted on the free face of the block. And then, comparing the experimental results with the calculated ones, it was recognized that the distribution of the tensile stresses induced in the block by the explosion gas has influence upon the shape of the crater.

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