

油圧式岩盤破碎機による岩盤の破碎 に関する基礎的研究

稲田善紀¹・野原浩一²・上原健³・松本喬⁴・岡本將昭⁵・宮村長生⁶

¹フェロー会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-77 松山市文京町3番)

²正会員 工修 四国旅客鉄道株式会社 (〒760 高松市浜ノ町1-10)

³正会員 工修 高知工業高等学校土木科 教諭 (〒780 高知市棧橋通2丁目11-6)

⁴正会員 日産建設株式会社 土木工事本部技術部長 (〒107 東京都港区南青山1丁目2番6号)

⁵正会員 工修 日産建設株式会社 技術本部技術研究所 (〒350-12 埼玉県日高市原宿一本杉746)

⁶株式会社カコー 企画開発部課長 (〒101 東京都千代田区神田西福田町4-1 *マイ・イクスピア*)

近年、住宅地や既設構造物の近くにおいて岩盤を破碎する工事が多くなってきている。振動をきらう場所において動的破碎による工法を採用することは困難であり、また従来の静的な破碎工法は孔周辺に等荷重をかけるためエネルギー的に無駄が生じたり、亀裂の方向制御が困難であるなどの問題点がある。そこで筆者らはこれらの問題を解決する一つの方法として4方向に集中荷重を加圧できる油圧式の岩盤破碎機を試作した。この試作機を用いて、効率的な岩盤破碎を行うための実験および理論解析を行い検討し、考察した結果について述べる。

Key Words : *hydraulic machine, rock, fracture, empty hole, pressed hole, edge*

1. 緒言

近年、交通網の整備のために山間部において道路の付け替え、改良、拡幅工事が増加してきており、時には住宅地や既設構造物に近接した場所にて岩盤を破碎する工事が多くなってきている。岩盤の破碎には従来から火薬や大型機械による破碎などの動的破碎が主流の工法となっているが、これらの工法には振動、騒音、および粉塵等の環境問題を伴うため採用が困難となることも多い。そこでこれらの問題の解決策として、静的破碎剤による工法、液圧チューブ破碎工法および油圧ジャッキ破碎工法等の静的破碎工法が採用され施工が行われている。しかし、これらの工法は孔周辺に等荷重をかけるためエネルギー的に無駄が生じたり、また経済性、耐久性および亀裂の方向制御に問題を含んでいる。

そこで、これらの問題を解決する一つの方法として、筆者らは、4方向同時に集中荷重を加圧できる油圧式の岩盤破碎機を試作した。この方式では集中

荷重をかけるので亀裂の方向制御ができることやエネルギーが軽減できること、また静的破碎剤による工法に比べ施工時間が短縮できることなどの利点を持っている。本研究では、現場においてこの試作機を用いて岩盤の破碎実験を行い、この試作機を使用した場合の効率的な岩盤破碎を行うための検討を行い、考察した。次に、これらの破碎機を用いた場合の破碎のメカニズムを解明するために室内にて別に試作した小型油圧式岩盤破碎器を用い、セメントモルタル供試体にて破碎実験を行った。また亀裂解析法¹⁾²⁾により、2次元モデルにて理論解析を行い実験結果と比較し、考察した。

2. 空孔が破碎効率に及ぼす影響

(1) 現場における破碎実験

本実験では、広島県佐伯郡大柿町の採石場の岩盤を使用した。現場の外観を写真-1に示す。現場の岩質は花崗岩であり、比較的節理の少ない岩盤である。

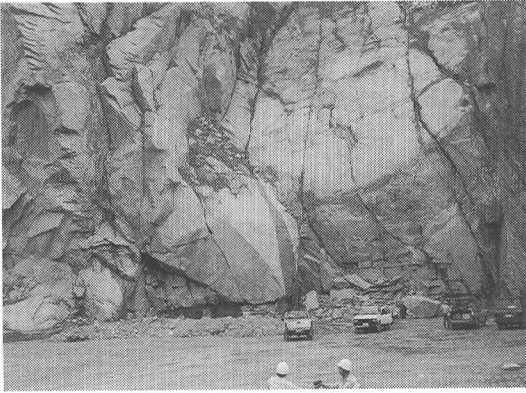


写真-1 現場の外観。

表-1 実験に用いた岩石の物理的性質。

圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング率 (kgf/cm ²)	ポアソン比
1809	64.9	3.98×10^4	0.211

1kgf/cm²=0.098MPa

実験はこの岩盤の水平方向に広がりを持つ1自由面の岩盤を用いて破碎実験を行った。実験に使用した岩盤から採取した岩石について、一軸圧縮試験を行い圧縮強度を求め、同時にヤング率およびポアソン比も求めた。また、圧裂引張試験も行い引張強度を求めた。得られた岩盤の物理的性質を表-1に示す。

実験に使用した油圧式岩盤破碎機（以下、破碎機と称す）の外観、概念図および断面図を写真-2、図-1および図-2に示す。破碎機は、全長 810mm、外径 79mm、重量 33kg（破碎機内部のオイルおよび付属品を含む）である。油圧式岩盤破碎機には1方向につき、直径φ 20mmのピストンを18個配置しており、押し出し専用のピストン、出し戻し併用のピストンの2種類を交互に配置している。これを往復路2つの油圧系統により出し戻しを行う。ピストンのストロークは 10mm で、対角線上に配置された反対側のピストンのストロークと合わせ、全体で 20mm のストロークが得られるようになっている。このピストンの外側に加圧板を装着することにより、4方向同時に集中荷重を加圧することができる。破碎能力は、油圧で 2000kgf/cm²(196MPa)、力に換算して 225tf(2.201 × 10⁶N)を加圧することができる。

加圧板は、ピストンの外側に1方向につき、長さ 260mm のものを2枚ずつ装着している。使用した加圧板の種類は、くさび形加圧板と半円形加圧板の2種類であり、亀裂の希望方向にくさび形加圧板、それに直角な方向に半円形加圧板を装着させる。く

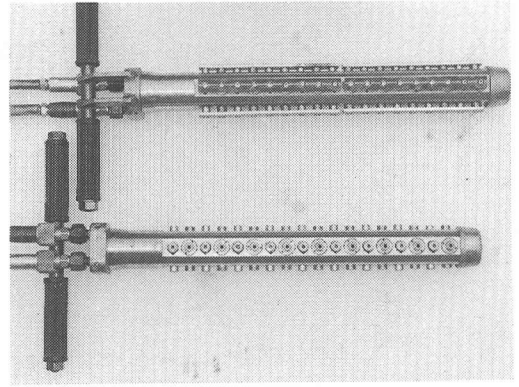


写真-2 油圧式岩盤破碎機の外観。

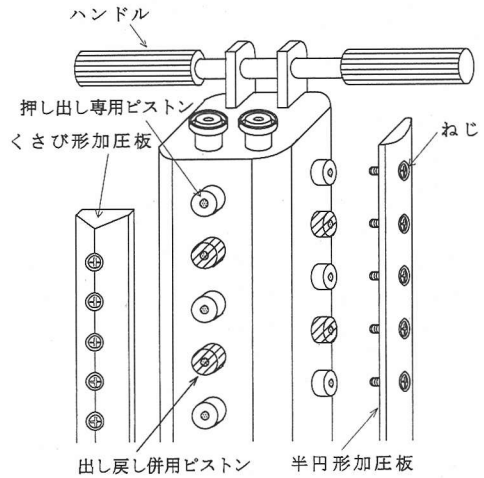


図-1 油圧式岩盤破碎機概念図。

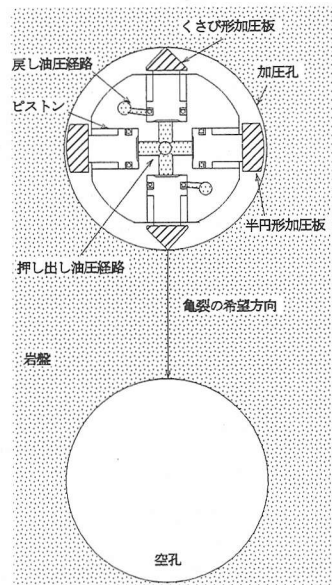


図-2 油圧式岩盤破碎機断面図。

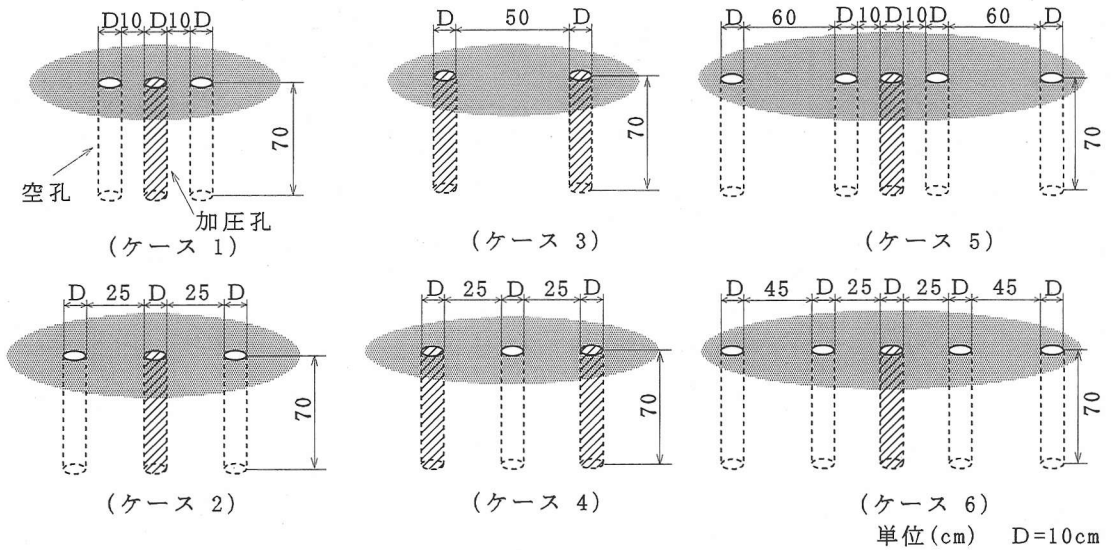


図-3 孔配置の概念図.

さび形加圧板は、くさびの効果を利用し、亀裂を発生させ希望方向に亀裂を進展させる役割を持つ。また、半円形加圧板は、岩盤に食い込まない状態で加圧孔を変形させて孔全体に緊張を与え、くさび形加圧板の効果をより高める役割を持つ。現場では水平な一自由面の岩盤に対して垂直に削孔を行い加圧孔と空孔を設けた。この場合加圧孔は破砕機を挿入し、加圧するための孔であり、空孔は亀裂の誘導、破砕に要する力の軽減を目的としたもので、2つのくさび形加圧板を通る直線上に配置した。実験は以下の6種類について行った。

- ケース 1 加圧孔を1孔、その両側に壁面間距離で10cm離れた位置に1孔ずつ空孔を設けた場合（空孔に囲まれた破砕断面積 1400cm^2 ）
- ケース 2 加圧孔を1孔、その両側に壁面間距離で25cm離れた位置に1孔ずつ空孔を設けた場合（空孔に囲まれた破砕断面積 3500cm^2 ）
- ケース 3 加圧孔を平行に2孔設け、その間の距離を50cmとした場合（加圧孔に囲まれた破砕断面積 3500cm^2 ）
- ケース 4 加圧孔を平行に2孔設け、その間に壁面間距離が25cmになるように空孔を1孔設けた場合（加圧孔に囲まれた破砕断面積 3500cm^2 ）
- ケース 5 加圧孔1孔、その両側に壁面間距離で10cm離れた位置に1孔ずつ空孔を設け、さらにその空孔の外側60cmの位置に1

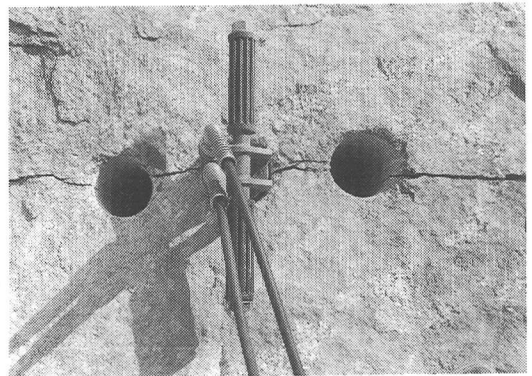


写真-3 実験結果の一例.

- 孔ずつ空孔を設けた場合（外側の空孔に囲まれた破砕断面積 4900cm^2 ）
 - ケース 6 加圧孔1孔、その両側に壁面間距離で25cm離れた位置に1孔ずつ空孔を設け、さらにその空孔の外側45cmの位置に1孔ずつ空孔を設けた場合（外側の空孔に囲まれた破砕断面積 4900cm^2 ）
- この場合のくさび形加圧板の刃先の角度はすべて90度で行った。また、ケース1およびケース5の加圧孔と空孔の距離を10cmとしたのは削孔径と同程度にする目的である。これらの孔配置の概念図を図-3に示す。

ケース3とケース4、ケース5とケース6はそれぞれ、破砕に要する力を比較する際の条件を統一するため、加圧孔と空孔とに挟まれた岩盤の破砕断面積を等しくした。

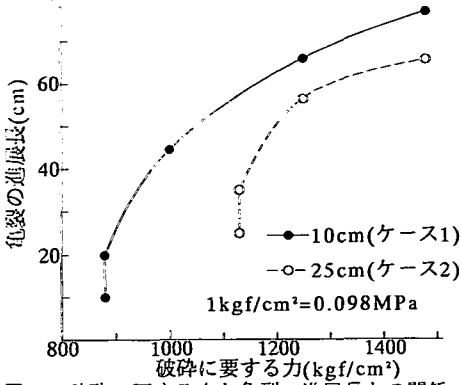


図-4 破碎に要する力と亀裂の進展長との関係
(ケース1とケース2における比較)。

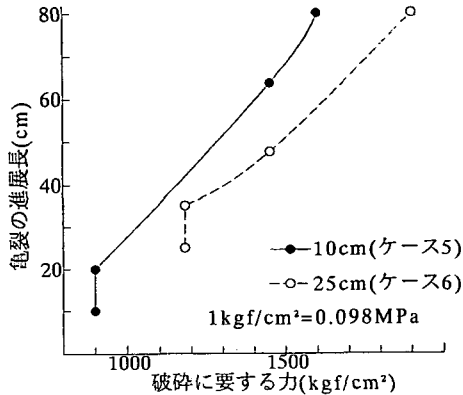


図-5 破碎に要する力と亀裂の進展長との関係
(ケース5とケース6における比較)。

これら6種類の破碎実験を行い、空孔の有無および加圧孔と空孔の距離の違いが破碎に要する力に及ぼす影響について考察した。また、空孔による亀裂の方向制御性についても考察した。

実験結果の一例を写真-3に示す。実験の結果いずれの場合も希望方向に亀裂を発生させることができ破碎機を用いて亀裂の発生および亀裂の方向制御ができることがわかった。

ケース3とケース4とを比較すると、ケース4の破碎に要した力は油圧で 1050kgf/cm^2 とケース3の 1200kgf/cm^2 の約85%であり、破碎に要した力が軽減されていた。この結果、削孔の手間は別として空孔の有無による破碎に要した力を比較すると空孔が破碎に要する力の軽減に有効に作用していることがわかった。これは空孔を設けることによって岩盤に自由面ができ、岩盤が破碎されやすくなったためであると考えられる。

ケース1とケース2の亀裂の進展長と破碎に要する力の関係を図-4に示す。この場合ケース1の方が破碎に要する力がケース2の約75%であり、破碎

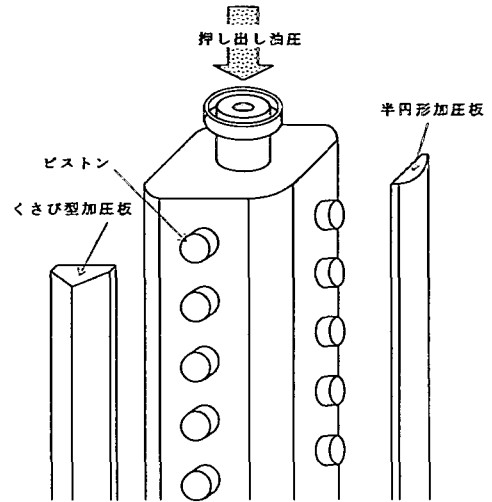


図-6 油圧式岩盤破碎器の概念図。

に要した力が軽減されている。これより空孔と加圧孔の距離は近い方が、破碎に要する力の軽減には、より効果的に作用することがわかった。また別に、ケース5とケース6の場合を比較しても破碎に要する力はケース5の方がケース6より少なく、ケース1、ケース2の場合と同様空孔と加圧孔の距離は、近い方が破碎に要する力の軽減に効果的であることがわかった。この場合の亀裂の進展長と破碎に要する力の関係を図-5に示す。またケース1とケース5、およびケース2とケース6とを比較すると、空孔まで亀裂が進展したときの破碎に要した力にほとんど差はみられず、外側に設けた空孔が破碎に要する力にほとんど影響を及ぼしていないことがわかった。

空孔を設けて破碎実験を行った場合、いずれの孔配置においても亀裂は空孔に向かって進展していた。ケース1およびケース2の場合において、亀裂が空孔を通過した後は、岩盤の弱面に進展する結果が一部あったことから空孔は亀裂の方向制御に有利であると考えられる。また、ケース5およびケース6の場合において、内側の空孔まで亀裂が進展した後、外側に設けた空孔にも亀裂は進展することから、空孔は亀裂の方向制御に有効であることがわかった。

(2) セメントモルタル供試体を用いた破碎実験

室内実験用に別に試作した油圧式岩盤破碎器の概念図を図-6に示す。油圧式岩盤破碎器は、全長370mm、外径75mm、重量6.5kg(破碎機内部のオイルおよび付属品を含む)で油圧式岩盤破碎機と同様、4方向同時に集中荷重を加圧することができる。また、加圧板においても破碎機と同様の2種類を使用した。油圧式岩盤破碎器の最大の破碎力は、油圧

表-2 セメントモルタル供試体の物理的性質.

(a)まだ固まらないモルタル

気温(°C)	29
湿度(%)	64
水温(°C)	25
練り上がり温度(°C)	29
フロー値(mm)	150

(b)硬化後(28日強度)

圧縮強度(kgf/cm ²)	434
引張強度(kgf/cm ²)	32.8
ヤング率(kgf/cm ²)	2.11×10 ⁵
ポアソン比	0.201

1kgf/cm²=0.098MPa

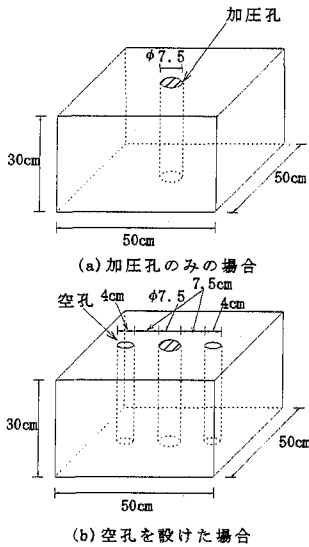


図-7 供試体の概念図.

で 2000kgf/cm²(196MPa), 力に換算して 160tf(1.57 × 10⁶N)を加圧することができる. ピストンは直径 24mm の押し出し専用のものを 1 方向につき 9 個備えており, 1 つの油圧系統で押し出しを行う. ピストンのストロークは 9mm で対角線上に配置された反対方向のピストンのストロークと合わせ, 全体で 18mm である. このピストンの外側に長さ 260mm の加圧板を装着している. なお, 今回の実験においてはくさび形加圧板の角度は 70 度とした.

実験に使用したセメントモルタル供試体の大きさは, 50cm × 50cm × 30cm である. 供試体は, 水: 普通ポルトランドセメント: 砂(海砂)を重量比で, 1: 2: 5 として作製した. 打ち込み 24 時間後に脱型し, 7 日間湿潤養生を行い, その後 20 日間室内で気乾養生させて実験に使用した. また, 供試体作製時に直径 5cm, 高さ 10cm の円柱供試体を同時に作製し, 供試体の圧縮強度, 引張強度, ヤング率

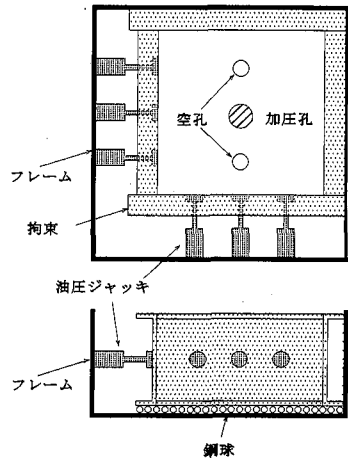


図-8 室内実験の概念図.

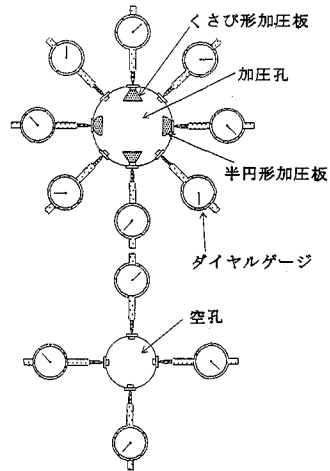


図-9 ダイヤルゲージの設置状況.

およびポアソン比を求めた. 供試体の物理的性質を表-2に示す. 実験に使用した供試体には, 鉄管およびステンレス製の丸棒を供試体底面まで垂直に埋め込みセメントモルタル硬化後引き抜くことにより加圧孔および空孔を設けた. 加圧孔は直径φ 7.5cm,空孔は直径 4cm とした. 供試体は加圧孔のみの場合と空孔を設けた場合の 2 種類を使用した. 供試体中に設けた加圧孔および空孔の孔配置は, 加圧孔は供試体の中央に設け, 加圧孔の両側に壁面間距離で 7.5cm の位置に一孔ずつ空孔を設けた. 実験に用いた供試体の概念図を図-7に示す.

実験時には, ベンチカット等において自由面からかなり離れた岩盤内部における破碎を想定し, 鉛直方向の自由面を拘束板と油圧ジャッキにより全て拘束した. この際, 油圧ジャッキでの加圧による残留ひずみを生じさせないように一定圧力 (0.4kgf/cm², 0.04MPa) で拘束した. また, これらの拘束を行う

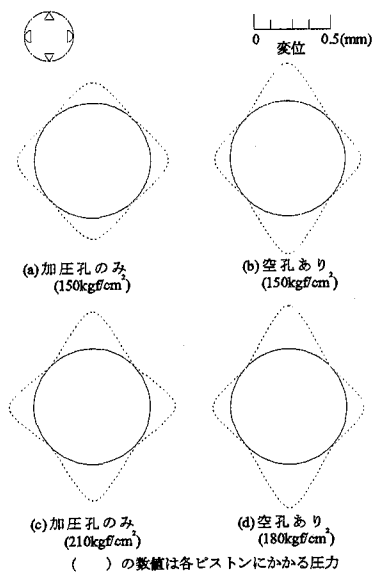


図-10 加圧孔の変形図（空孔の有無の場合）。

際および実験中に、供試体と底面の摩擦によって供試体の挙動に影響を及ぼさないように、底面に直径1cmの鋼球を敷き詰めた。実験装置の概念図を図-8に示す。

加圧孔と空孔の変形を調べるために、加圧孔においては、くさび形加圧板と半円形加圧板の上部の供試体表面との間に影響を及ぼさないようにステンレス製の変位棒を取り付け、また加圧板と45度をなす方向には孔壁に変位棒を貼付し、合計8方向において1/1000mmまで測定できるダイヤルゲージにより変位を測定した。また空孔においては亀裂の希望方向およびそれに直角な方向の合計4方向において測定した。ダイヤルゲージを供試体に設置した状況を図-9に示す。ダイヤルゲージは、供試体を破砕する際の供試体自体の変位の影響を受けないように、供試体から離れた別の位置に固定点を設けた。

また、供試体表面の挙動を調べるために、加圧孔と空孔の周辺にはひずみゲージを貼付し測定を行った。ひずみゲージは加圧孔周辺部分では加圧孔の壁面から10mm、25mmおよび40mmの位置に貼付し、空孔の周辺では、空孔の壁面から5mm離れた位置に貼付し、加圧孔と空孔を結ぶ直線上には空孔から加圧孔側に20mm離れた位置にも貼付した。この際、ダイヤルゲージの場合と同様に加圧孔の周辺では8方向、空孔の周辺では4方向に貼付した。加圧孔のみの供試体において実験を行う場合にも、空孔を設けた場合と供試体表面に貼付するひずみゲージの位置を等しくし、同位置でのひずみを測定することにより両者を比較できるようにした。

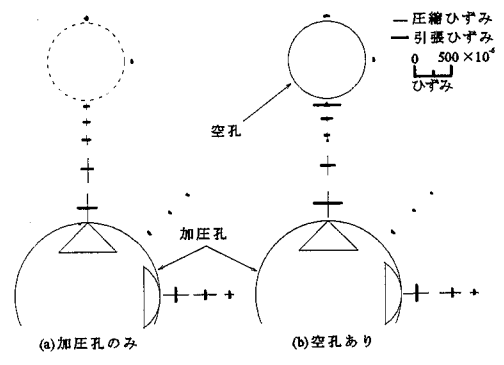


図-11 供試体表面のひずみ（空孔の有無の場合）。

実験の結果、破砕に要した力を比較すると、空孔を設けた場合の破砕に要する力は加圧孔のみの場合の約85%であり、破砕に要した力が軽減されている。この結果、室内実験においても空孔が破砕に要する力を軽減できることがわかった。

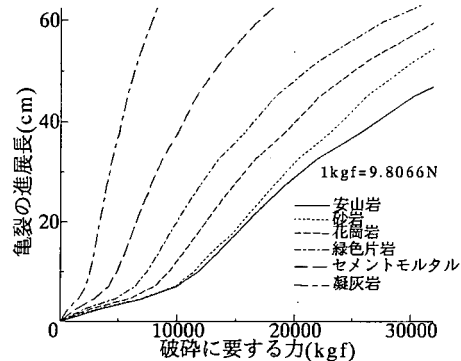
加圧孔に設置したダイヤルゲージにより得られた加圧孔の変形状態を測定した結果、加圧板と45度をなす方向にはほとんど変形はみられなかった。得られた結果を図-10に示す。加圧孔のみの場合と空孔を設けた場合の加圧孔の変形状態を比較すると半円形加圧板に加圧される方向ではどちらも同程度の変形であった。しかし、くさび形加圧板に加圧される方向では空孔を設けた場合の方が加圧孔のみの場合に比べて約1.5倍と大きく変形していた。これは空孔を設けることにより自由面ができたため、変位しやすくなりくさび形加圧板がより有効に働き、破砕に要する力の軽減に結びついているものと考えられる。

次に、ひずみゲージにより測定した供試体表面のひずみを図-11に示す。この結果より、いずれの場合においても加圧孔の半径方向には圧縮ひずみが生じ、接線方向には引張ひずみが生じていることがわかる。これにより、加圧孔の接線方向に引張が生じて亀裂が発生し、進展していくものと考えられる。加圧孔のみの場合のひずみは供試体周辺の変位が固定されており自由面を想定しているため、加圧孔から離れるに従ってひずみ量は減少している。半円形加圧板に加圧される方向においては、ダイヤルゲージにより測定した加圧孔の変形と同様、両者にほとんど違いはみられなかった。しかし、くさび形加圧板に加圧される方向においては、空孔を設けた場合は加圧孔のみの場合に比べて空孔の周辺および加圧孔の近くで加圧孔の半径方向の圧縮ひずみが小さく、加圧孔の接線方向では引張ひずみが大きくなっ

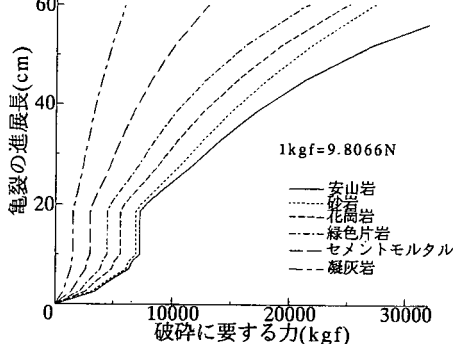
表-3 解析に用いた岩石の物理的性質.

	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング率 (× 10 ⁴ kgf/cm ²)	ポアソン比
安山岩	1483	82.0	0.407	0.260
砂岩	981	75.4	0.256	0.147
花崗岩	1210	62.0	0.547	0.220
緑色片岩	826	50.0	0.753	0.247
セメントモルタル	433	33.2	0.157	0.207
凝灰岩	233	16.7	0.347	0.125

1kgf/cm² = 0.098MPa



(a) 加圧孔のみの場合



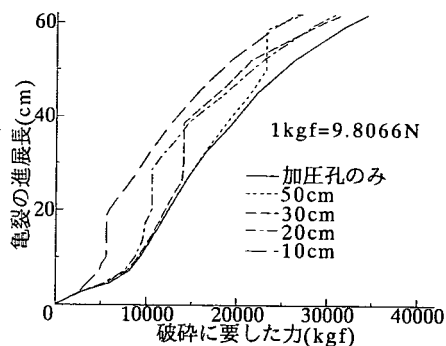
(b) 加圧孔と空孔の距離が10cmの場合

図-12 2種類の孔配置における破砕に要する力と亀裂の進展長との関係.

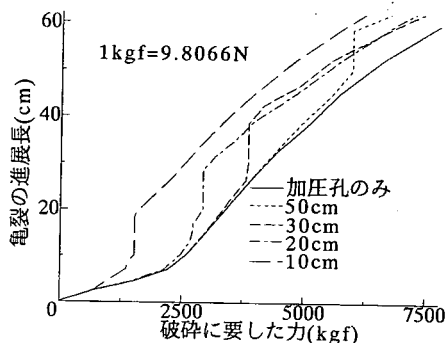
ている。これは、空孔を設けることによってくさび形加圧板に加圧される半径方向では圧縮ひずみが小さくなり、接線方向ではくさび形加圧板がより変位し引張ひずみが大きくなったものと考えられる。これらの結果より、空孔を設けた場合にはくさび形加圧板がより効果的に働き、これが破砕に要する力の軽減に大きく貢献しているものと考えられる。

(3) 2次元モデルにおける亀裂解析法による解析

加圧孔と空孔との距離が破砕に要する力に及ぼす影響について有限要素法を応用した亀裂解析法¹⁾を用いて解析を行った。亀裂解析法は要素内に生じ



(a) 花崗岩



(b) 凝灰岩

図-13 5種類の孔配置における破砕に要する力と亀裂の進展長との関係.

た応力がその要素の引張強度を超えるとその要素自体が破壊すると考える従来の解析方法とは異なり、隣接要素間に破壊が起こり亀裂が生じるものと仮定し、要素自体は弾性体としてふるまうものとする手法である。破壊判定はMohrの破壊包絡線説^{3,4)}に従うものとし、加圧方法は現場および室内実験と同様4方向同時に加圧する場合を想定した。また、解析モデルは2次元モデルを対象とし、加圧孔と固定点の距離は試行錯誤の結果、固定点の影響の現れない500cmの位置に設けた。この場合、加圧孔のみの場合と加圧孔からそれぞれ10cm, 20cm, 30cmおよび50cmの間隔で空孔を設けた場合について解析を行った。対象とした岩盤は安山岩、花崗岩、砂岩、緑色片岩、セメントモルタルおよび角礫凝灰岩の6種類である。これらの岩石の物理的性質を別の実験により求めたものを取りまとめて表-3に示す。

加圧孔と空孔の距離を変えて解析を行った結果より得られた亀裂の進展長と破砕に要する力との関係を図-12(a), (b)に示す。これより加圧孔のみの場合、加圧の初期では破砕に要する力が大きく必要であるが、一旦亀裂が発生すると少量の力で進展し、加圧孔から遠ざかると力が及びにくくなるので破砕に要する力が大きくなるのがわかる。次に空孔を設け

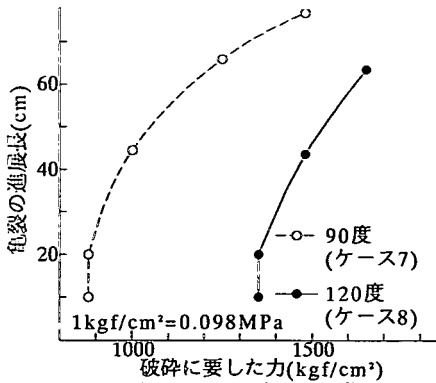


図-14 破砕に要する力と亀裂の進展長との関係
(ケース7とケース8における比較)

た場合、加圧孔のみの場合に比べて亀裂の進展長が空孔の手前の時に破砕に要する力が減少し、亀裂が空孔を通過した後では力が大きく必要となることがわかる。これは空孔を設けることにより自由面があるため変位しやすく、空孔の手前で破砕に要する力が減少するものと考えられる。また、亀裂が空孔を通過した後では空孔があるために力が伝わりにくく、破砕に要する力が大きくなるものと考えられる。しかし空孔を設けた場合、亀裂が空孔を通過した後、破砕に要する力が大きくなるものの、全体としては破砕に要する力が軽減されており、空孔によって破砕に要する力が軽減されていることがわかった。また、空孔が 10cm の時には亀裂が進展する際、空孔側からも亀裂が入ることがわかった。これは、くさび形加圧板によって空孔が加圧孔と空孔を結ぶ方向から加圧され、空孔が変形することによって空孔の加圧孔に一番近い部分に引張応力が発生し、亀裂が発生するものと考えられる。

ここで、2次元モデルを対象とした亀裂解析法による解析結果は破砕に要する力において現場における実験結果とは異なっている。これは、ひとつには解析においては岩盤が均質材料で弾性体と仮定しているためと考えられる。また、実験における亀裂の進展長は深度方向の亀裂は観察できないため、目で確認できる岩盤表面のみについての結果であるが、現実の問題としては岩盤表面は自由面であり荷が軽く進展しやすいため、この差が結果の違いとなって現れたものと考えられる。

また、花崗岩と凝灰岩における破砕に要する力と亀裂の進展長との関係を図-13(a), (b)に示す。いずれの岩種においても同じ様な傾向が見られ、加圧孔と空孔の距離は 10cm が最も破砕に要する力を軽減できることがわかった。このことから破砕機を使用して岩盤を破砕する際、空孔は、加圧孔に近いほ

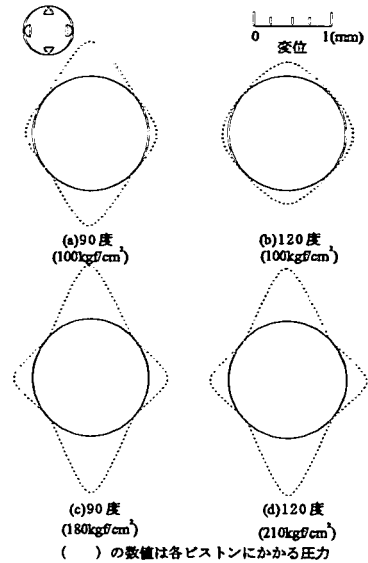


図-15 加圧孔の変形図 (刃先の角度が異なる場合)。

どより効率的であることがわかった。しかし、現場において破砕を行う際には、加圧孔と空孔の距離を削孔径以上に近づけて施工するのは困難であった。このことから、加圧孔と空孔の距離は近い方がより破砕に有利であるが、実際の施工の際には削孔機械の作業性を考慮して孔間隔を決定する必要があるものと考えられる。

3. 刃先の角度が破砕効率に及ぼす影響

(1) 現場における破砕実験

くさび形加圧板の刃先の角度の差異が破砕効率に及ぼす影響について調べるため現場において、以下2種類の破砕実験を行った。

ケース7 加圧孔を1孔、その両側に壁面間距離で 10cm 離れた位置に1孔ずつ空孔を設けた場合。ただし、くさび形加圧板の角度は 90度とした。

ケース8 孔配置はケース7の場合と同様にくさび形加圧板の角度を 120度とした場合

この場合の亀裂の進展長と破砕に要する力の関係を図-14に示す。ケース7とケース8とを比較するとケース7が破砕に要する力がケース8の約 75% であった。これより、くさび形加圧板の角度が 120度よりも 90度の方が破砕に有効に働いていることがわかった。また亀裂の発生直後、油圧式岩盤破砕機をセットしたまま加圧孔の内部を観察すると、半円形加圧板は岩盤に食い込んでおらず、くさび形加

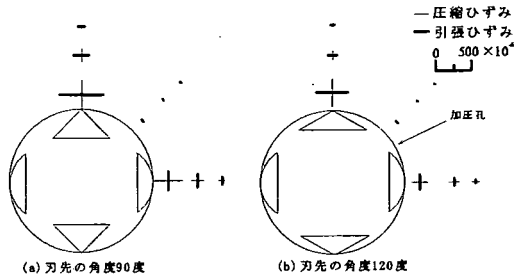


図-16 供試体表面のひずみ（刃先の角度が異なる場合）。

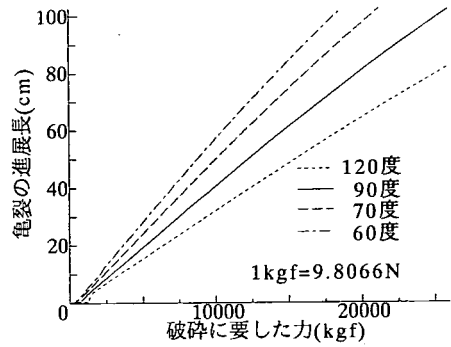
圧板の角度が 90 度の方が 120 度よりも鋭く岩盤に食い込んでいた。この際、くさび形加圧板の 120 度の方はほとんど変形が見られなかったが、90 度の方は先端が少し変形し、破碎を行うごとにその鋭さが減少していた。これにより今回使用した材質は S45C であるが、実用性を考慮するとより耐久度の増した材質を選定する必要があるものと考えられる。

(2) セメントモルタルを用いた破碎実験

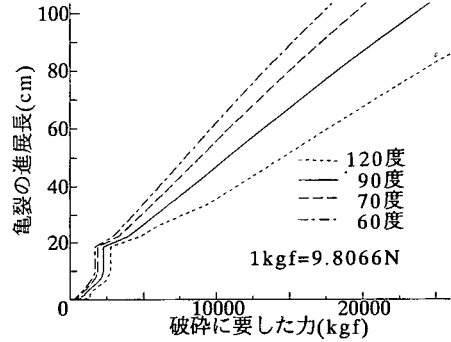
ここでは、くさび形加圧板の刃先の角度が異なる場合の破碎のメカニズムを調べるため、室内においてセメントモルタル供試体を対象とした破碎実験を行った。供試体は図-7の加圧孔のみの場合を用い、くさび形加圧板の角度は 90 度と 120 度の 2 種類で実験を行った。加圧孔の変形を調べるために、くさび形加圧板と半円形加圧板の上部の供試体表面との間に影響を及ぼさないようにステンレス製の変位棒を取り付け、また加圧板と 45 度をなす方向には孔壁に変位棒を貼付し、合計 8 方向においてダイヤルゲージにより変位を測定した。また、供試体表面の挙動を調べるために、加圧孔の周辺にひずみゲージを貼付し測定を行った。ひずみゲージは加圧孔の周辺に、加圧孔の壁面から 10mm、25mm および 40mm の位置に貼付した。この際、ダイヤルゲージの場合と同様に加圧孔の周辺 8 方向に貼付した。

実験の結果、120 度の場合と 90 度の場合の破碎に要した力を比較すると、90 度の場合の破碎に要する力は 120 度の場合の約 85 % と軽減されていた。この結果、室内実験においても刃先の角度が 90 度の方が破碎に要する力を軽減できることがわかった。

加圧孔に設置したダイヤルゲージにより得られた加圧孔の変形状態を図-15に示す。これより、半円形加圧板に加圧される方向においてはほぼ同程度の変形であることがわかる。しかし、くさび形加圧板に加圧される方向においては、90 度の方が 120 度よりも約 1.5 倍大きく変形している。これは、くさび形加圧板の角度が 90 度の方が 120 度よりも鋭角である



(a) 加圧孔のみの場合（花崗岩）



(b) 加圧孔と空孔の距離が10cmの場合（花崗岩）

図-17 4 種類のくさび形加圧板の刃先の角度における破碎に要する力と亀裂の進展長との関係。

ために加圧孔により食い込みやすいためであると考えられる。

次にひずみゲージにより測定した供試体表面のひずみを図-16に示す。これより、くさび形加圧板に加圧される方向において 90 度の方が 120 度の場合に比べ、圧縮ひずみ引張ひずみともに大きく生じていることがわかる。これは、くさび形加圧板の角度が 90 度の方が 120 度よりも鋭角であるために加圧孔により食い込みやすいためであると考えられる。これにより、90 度の方が加圧孔により食い込み、引張ひずみを大きくし、破碎しやすい状況になっていることがわかる。

(3) 2次元モデルにおける亀裂解析法による解析

2. (3) で述べた解析法を用い、くさび形加圧板の刃先の角度の差異が岩盤の破碎に要する力および亀裂の進展長に及ぼす影響について 2 次元モデルにて解析を行い考察した。解析ではくさび形加圧板の刃先の角度を 60 度、70 度、90 度および 120 度とした場合について、加圧孔のみの場合と加圧孔と空孔の距離が 10cm の 2 種類の孔配置を想定して解析した。解析結果より得られた破碎に要する力と亀裂の進展長との関係を図-17(a), (b) に示す。これより、

いずれの孔配置においても、くさび形加圧板の刃先の角度が鋭角になるにしたがって破砕に要する力は少なくてすむことがわかった。

今回の実験および解析結果より、くさび形加圧板の角度は鋭角なものがよいと考えられる。しかし、あまりに鋭角であると加圧板の先端の摩耗が激しくなるので、加圧板の強度や耐久性を考慮して刃先の角度を選定する必要があるものと考えられる。

4. 結 言

本研究では、試作した油圧式岩盤破砕機および小型油圧式岩盤破砕器を用いてこの機器を使用した場合の効率的な岩盤破砕を行うための現場実験、室内実験、および理論解析を行った。これらより得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 現場および室内実験から得られた結果より、空孔が破砕に要する力を軽減でき、さらに亀裂の方向制御に有効であることがわかった。

(2) 室内実験から得られた結果より、空孔を設けた際には加圧孔のくさび形加圧板に加圧される部分の変形は加圧孔のみの場合の1.5倍程度と大きくなっていることがわかった。また、供試体表面のひずみを測定した結果、空孔を設けた場合には、加圧孔の近くや空孔の周辺で半径方向の圧縮ひずみが小さ

く、接線方向の引張ひずみが大きくなっていることがわかった。

(3) 現場実験および解析から得られた結果より、加圧孔と空孔の距離は近い方が破砕に有利であることがわかった。また実際の施工時には削孔の作業性および効率的な破砕の両面から適切な加圧孔と空孔の距離を決定する必要があるものと考えられる。

(4) 現場実験、室内実験および解析から得られた結果より、くさび形加圧板の刃先の角度は鋭角な方が破砕に要する力を軽減でき、より有利であることがわかった。しかし、施工時には加圧板の耐久性および強度等を考慮して刃先の角度を選定する必要があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 稲田善紀, 谷口浩二: 液化天然ガスの地下岩盤内空洞貯蔵による空洞周辺の塑性領域: 日本鉱業会誌, Vol.103, No.1192, pp.365-372, 1987.
- 2) 稲田善紀: 地下の空間利用, pp.118-119, 森北出版, 1989.
- 3) 稲田善紀, 北村聖一, 岡田明浩: LNG の地下岩盤内空洞貯蔵における空洞の安定性の検討, 土木学会論文報告集, No.343, pp.35-44, 1984.
- 4) 前掲 2) pp.112-114.

(1996. 12. 3 受付)

CONSIDERATIONS IN FRACTURE OF ROCK MASS BY USING TRIAL HYDRAULIC ROCK FRACTURE MACHINE

Yoshinori INADA, Koichi NOHARA, Takeshi UEHARA,
Takashi MATSUMOTO, Masaaki OKAMOTO and Nagao MIYAMURA

The authors made a hydraulic rock fracture machine on a trial basis. In this paper, the results of field test, laboratory test and theoretical analysis were described. That is, to obtain an effective fracture, it was found that a combination with empty holes and pressed hole, distance between pressed hole and empty holes, angle of edge were important factors.