

形状記憶合金を用いた静的岩盤破碎の研究

Study on Static Rock Breaker Using Shape Memory Alloy

稲葉 力*
Tsutomu Inaba

平田 篤夫**
Atsuo Hirata

石山 宏二***
Koji Ishiyama

要 約

筆者らは、これまで、形状記憶合金を用いた簡易な静的岩盤破碎器の開発を試みてきた。形状記憶合金の回復力を利用して岩石およびコンクリートを破碎しようとするものである。ここでは、破碎器が岩石およびコンクリートを破碎するのに必要な能力を示すと共に、破碎器の構成、性能を設計し示した。

形状記憶合金としては TiNi を用い、1本の合金の直径は15mm、長さが29mmである。1本の回復力は100kNであり、温度が50℃以上で形状を回復する。また、破碎能力検証のために室内実験を実施した他、境界要素法を用いて数値解析を行った。

室内実験は、①30cm四方のコンクリートブロック、花崗岩、②壁を想定した厚さ30cm程度のコンクリート、③三次元的な影響を調べるための約90cm四方のコンクリートブロックについて行った。その結果、合金を6連にセットした破碎器を30cm間隔に入れると、いずれも1～3分間で破碎できた。

数値解析からは、亀裂を進展させるには自由面よりむしろボアホールの方が効果があるという結果が得られた。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 破碎器の構成と性能
- §3. 数値解析による破碎設計法の検討
- §4. コンクリートおよび岩石による実証実験
- §5. おわりに

§1. はじめに

近年、種々の岩石およびコンクリートの静的破碎方法が提案されている。油圧セル、油圧くさび等の液圧式破碎装置を用いる方法、膨張性セメントを用いる方法、膨張性ガスを用いる方法、ワイヤーソーによる方法、スロット式の削孔機を用いた方法、ウォータージェットを用いた方法などである。これらの方法は、一長一短があり、いずれも万能の方法ではない。一般に装置が大がかりであるか、装置が小型であれば能力が劣る傾向がある。

筆者らは、将来の都市土木などでの需要を考え、これまでの静的破碎装置についての考察を基に、簡易に実施できる岩盤破碎器の開発を試みている。すなわち、ここ

*技術研究所 土木技術課副課長
**技術研究所 土木技術課係長
***技術研究所 土木技術課

で開発の対象とする破碎器は油圧ジャッキの代わりに形状記憶合金を用い、その回復力を利用して岩石およびコンクリートを破碎しようとするものである。本報では、破碎器の構成、性能を示すとともに、その破碎能力検証のために実施した室内実験と数値解析の結果について報告する。

§ 2. 破碎器の構成と性能

2-1 破碎器の性能

本破碎器の破碎能力（载荷能力）は圧力源となる形状記憶合金の形状回復特性に依存する。形状記憶特性を発現する材料としては、種々の合金が開発され、すでに、多くの用途に利用されている。しかし、それらはいずれも線材もしくは板材としての使用であり、主として、伸び変形もしくは曲げ変形後の形状回復に伴う回復力を利用した例はほとんどない。したがって、ここではまず、形状記憶合金の中でも強度、耐腐食性の優れた TiNi 合金について、破碎器圧力源としての最適な組成・熱処理条件の決定を試みた。すなわち、組成・熱処理条件を変化させた種々の TiNi 合金ロットを作製し、これらの回復力-回復変形特性を実験的に検討した。

実験に用いた TiNi 合金は、すべて $\phi 15\text{mm} \times 29\text{mm}$ であり、回復力・変形測定および温度管理には MTS 材料試験機、高剛性圧縮試験機および自作の恒温水チェンバーを使用した。形状記憶合金の特性の一例として、Fig.1 に荷重-変形曲線を示す。次に組成、熱処理条件の異なる 4 種類の TiNi 合金の回復力-回復変形特性を示すと Fig.2 のようである。ただし、Ti-XNi()の X は Ni の原子%, () は熱処理条件を示す。Fig.2 より、回復量の増大に伴って回復力は減少するが、その組成・熱処理条件により、回復特性が顕著に異なることがわかる。すなわち、この結果は、使用目的に応じた適性な組成および熱処理条件の選択が重要であることを示している。

破碎器の圧力源としては、回復力、回復変形量が大きく、かつ、変形回復時に回復力が持続するものが望ましい。この観点から考えると、破碎器としての用途には、Ti-50.5Ni (400°C, 1 hr) の合金が最適であると判断することができる。したがって、以下では、TiNi 合金としてはすべてこの合金を使用することとした。

Fig.1 より、破碎器に合金を 6 本セットしたものは(以下 B 6 と称する)、630kN の総荷重を持ち破碎器単位長当たりで 42kN/cm となる。B 3 だとそれぞれ、310kN、31kN/cm、B 9 では 940kN、47kN/cm と高い破碎力を持つことがわかる。また、ストローク率（合金の伸びをボア

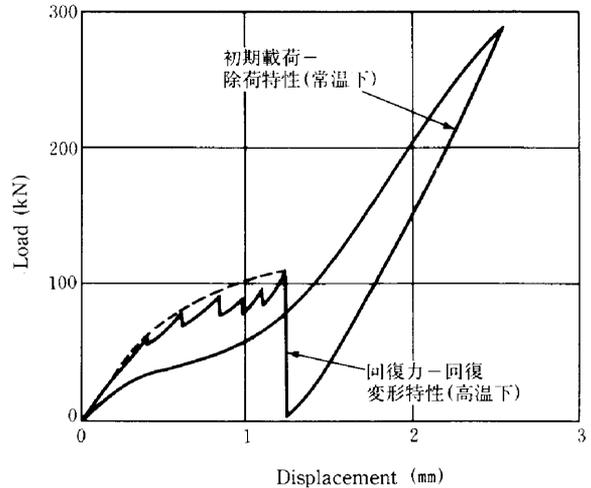


Fig.1 荷重-変位曲線 (Ti-50.5Ni; 400°C, 1hr)

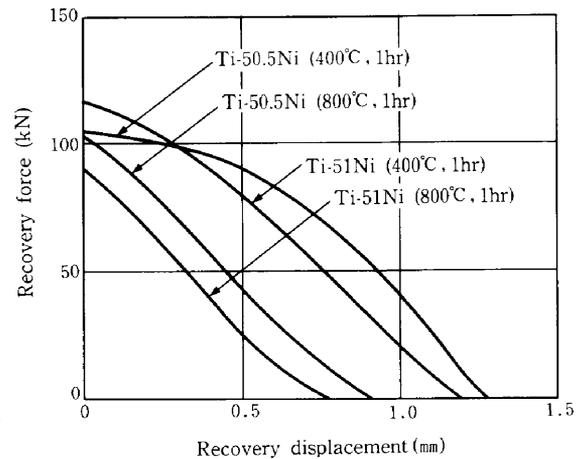


Fig.2 TiNi合金の回復力-回復変形曲線の例

ホール半径で割ったもの)は、2.3~2.8%となるがこれは静的破碎剤の体積膨張率と大差ない。

2-2 破碎器の構成

現在試作している破碎器は、Photo 1 に示す B 6 タイプの他 B 3 と B 9 の 3 形式であり、鋼製載荷板間に $\phi 15\text{mm} \times 29\text{mm}$ の形状記憶合金 (TiNi 合金) をそれぞれ内装したものである。これらの破碎器は、すべて $\phi 45\text{mm}$ のボアホール用に設計され、長さは (B 3) 10cm, (B 6) 15cm, (B 9) 20cm である。B 3, B 6, B 9 の基本構造はほぼ同様であるため、一例として B 6 の構造を示すと Fig.3 のようである。Fig.3 に示すように、上下の載荷板はともにテーパ加工された 2 層の載荷板よりなり、これにより、ボアホール孔壁と破碎器とのクリアランスが調整される。また、Photo 1 には、TiNi 合金加熱用のヒーターとして用いるカートリッジヒーターが 4 本と

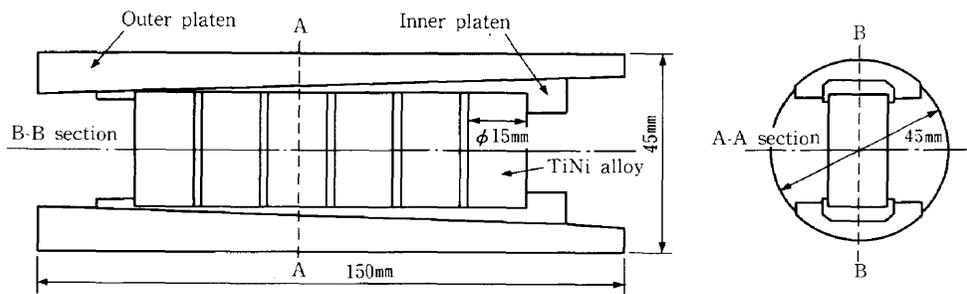


Fig.3 破碎器の構造

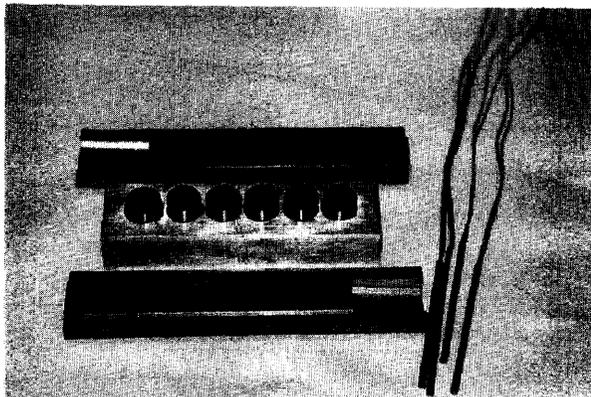


Photo 1 破碎器 (B 6)

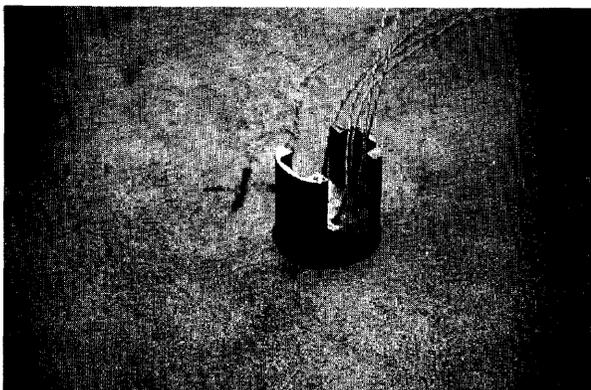


Photo 2 装着状況

ヒーターを保持するヒーターブロックが見られる。ヒーターは4本に限らない。

実使用時の手順は次のようである。まず、与圧縮により圧縮変形を与えた TiNi 合金を内装した破碎器をボアホール孔内に挿入し、外側載荷板を固定した状態で内側載荷板を押し込み孔壁に破碎器を密着させる。なお、破碎器の装着状況は Photo 2 に示すようである。その後、TiNi 合金を加熱すると、合金は形状回復による伸び変形を生じる。これにより、ボアホール孔壁は一軸載荷され、孔壁から載荷軸と直角な方向にき裂が伸長する。

§ 3 . 数値解析による破碎設計法の検討

3-1 き裂初生条件

まず、半径 R のボアホール孔壁でき裂が初生する荷重 P^s を求める。弾性体に対する相似率に基づくと、円孔周囲弾性体中の任意点における接線方向応力 $\sigma_\theta(r, \theta)$ は分布荷重 p 、載荷角 β 、との関係により次式で与えられる。

$$\sigma_\theta(r, \theta) = \frac{2\beta}{\pi} \cdot p \cdot \xi(r, \theta) \quad (1)$$

ただし、 $\xi(r, \theta)$ は、 r および θ に関する関数であり、接線方向無次元応力を示すものである。孔壁のき裂初生が特性距離破壊基準に従うものと仮定し、 $\beta = \pi/4$ として、 $\sigma_\theta(R + \eta, \pi/2) = St$ とおけば、き裂初生に要する荷重が求められる。

$$P^s = St \cdot R \cdot F^s(\eta) \quad (2)$$

ただし、関数 $F^s(\eta)$ は β と η/R のみに依存する無次元パラメーターであり、次式で示される。

$$F^s(\eta) = \frac{\pi \cdot \sin\beta}{\beta \cdot \xi(R + \eta, \pi/2)} \quad (3)$$

η は特性距離であり、破壊靱性値と引張り強度で与えられる。 $\eta/R = 0, 0.25, 0.5$ の場合、 F^s は 1.41, 2.36, 3.67 となる。

3-2 き裂伸長過程の解析

次に、ボアホール孔壁からのき裂の伸長過程とそれに伴うボアホール孔壁の変形状態を検討する。ここでは、2次元変位くい違い法 (DDM) を用いて、円孔内壁の一軸載荷に伴うき裂の伸長過程をシミュレートした。

紙面の都合からここでは、2孔同時載荷と自由面を有する単一孔載荷についてのみ記す。解析モデルは Fig.4 に示すように、(a) は2孔同時載荷、(b) は自由面を有する単一孔載荷を想定している。また、(a)、(b) 両者のモデルともに円孔壁面およびき裂を変位くい違い要素で表現し、要素分割数は (a) 200~600、(b) 150~450 と

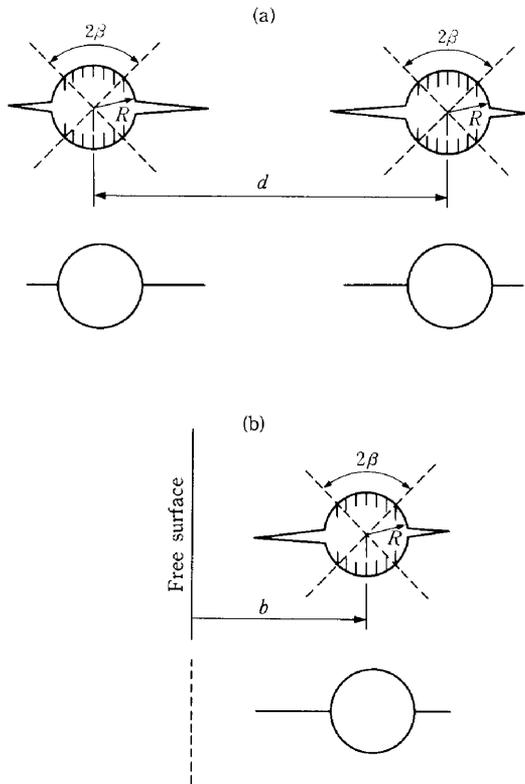


Fig.4 解析モデル

した。外力条件としては、破碎器載荷板に相当する領域 ($\beta = \pi/4$) に表面力を分布させた。(a) のモデルでは、円孔両側のき裂の応力拡大係数を比較して、応力拡大係数が大きな方のき裂のみを伸長させるという逐次計算を行った。また、(b) のモデルでは、(a) の場合と同じように、円孔両側のき裂の応力拡大係数を比較して、応力拡大係数が大きな方のき裂のみを伸長させるという逐次計算を行った。なお、応力拡大係数はき裂先端要素の開口変位量から算定し、ポアホール孔径の変化は載荷板頂部の変形量 u_0 で表現することとした。

単一孔載荷の場合、き裂先端の応力拡大係数 K_I および孔径変化率 u_0/R と単位奥行き当りの荷重 P の関係は、無次元き裂長さ c/R を用いて(4)式と書ける。

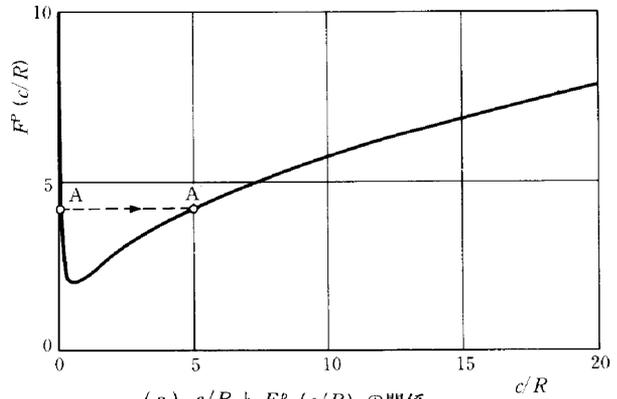
$$K_I = \frac{P}{\sqrt{R}} / F^p(c/R) \quad (4)$$

$$\frac{u_0}{R} = \frac{P}{ER} \cdot M^p(c/R) \quad (5)$$

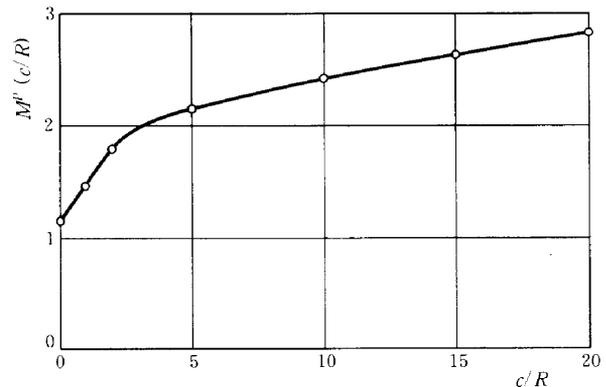
ただし、 E は岩盤のヤング率である。

き裂伸長条件は、 $K_I \geq K_{Ic}$ (破裂靱性値) であるから、き裂長さ c^p まで伸長させるために要する荷重 P^p および u_0/R は(4)および(5)に $K_I = K_{Ic}$ を代入することにより次式で与えられる。

$$P^p = K_{Ic} \sqrt{R} \cdot F^p(c^p/R) \quad (6)$$



(a) c/R と $F^p(c/R)$ の関係



(b) c/R と $M^p(c/R)$ の関係

Fig.5 単一孔載荷における無次元き裂長 c/R と関数 $F^p(c/R)$, $M^p(c/R)$ との関係

$$u_0/R = P^p/ER \cdot M^p(c^p/R) \quad (7)$$

なお、Fig.5 (a), (b) により、 $F^p(c^p/R)$, $M^p(c^p/R)$ を示す。Fig.5 (a) によると、 c/R の値の増大に伴って $F(c/R)$ の値が減少することがわかる。これは円孔き裂問題特有の傾向であり、円孔壁面からのき裂の初生には潜在き裂の存在が関与していることを示している。すなわち、Fig.5 (a) において潜在き裂長さに相当する A 点で(6), (7)式が満足され初生き裂が生成すると、き裂は A 点では留まらず A' 点まで一気に伸長することを示している。さらに、この間のき裂伸長の運動エネルギーを考慮すると少なくとも A' 点以上の長さまで、き裂は伸長すると考えることができる。このき裂の初生に伴う急激なき裂の伸長は §4 に示す岩石実験で確認されている。ここでは、き裂初生後のき裂の静的伸長過程のみを問題対象とし、 $c/R > 0.4$ の領域について(6), (7)式を適用することとする。

次に Fig.4 (a) に示す 2 孔同時載荷の解析結果として、各種の d/R について、内側き裂生成のき裂長さ c と応力拡大係数の関係を Fig.6 に示す。応力拡大係数の値は極小値を示し、その後 c/R の増大に伴って急激に増

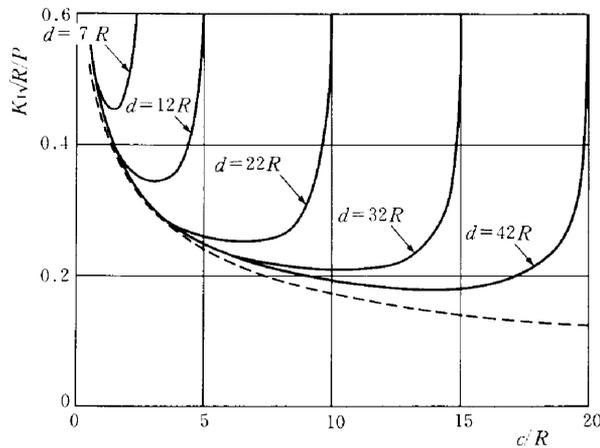


Fig.6 二孔同時载荷における内側き裂の応力拡大係数

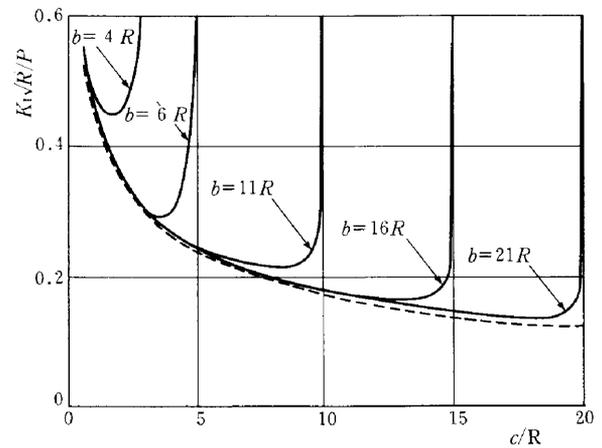
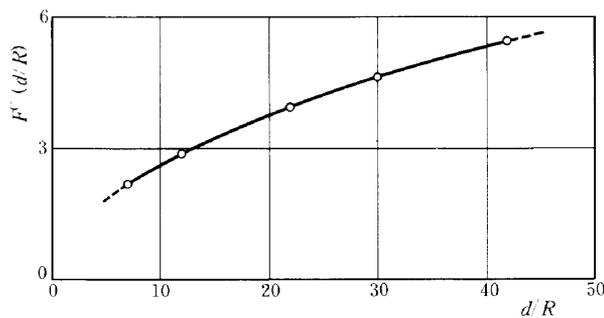
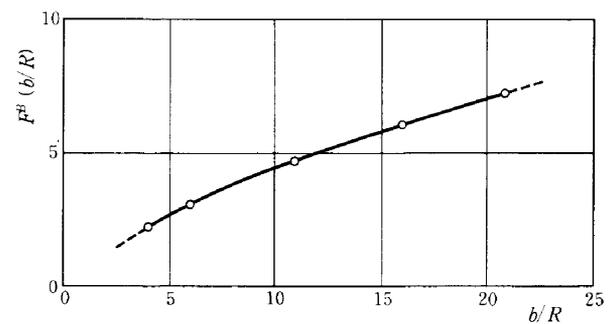


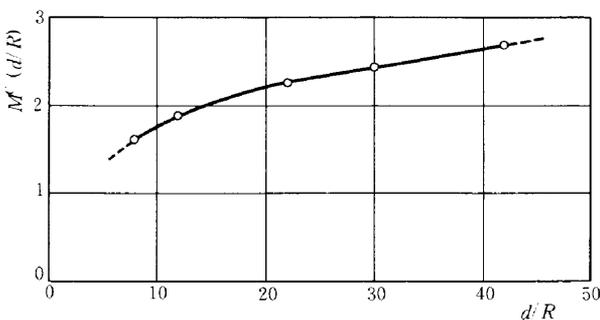
Fig.8 自由面を有する単一孔载荷における内側き裂の応力拡大係数



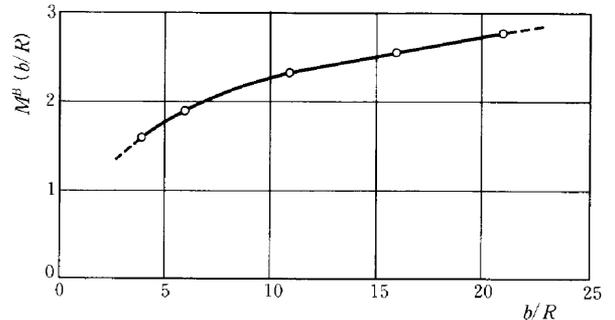
(a) 孔間隔 d/R と関数 $F^c(d/R)$ との関係



(a) 孔間隔 b/R と関数 $F^b(b/R)$ との関係



(b) 孔間隔 d/R と関数 $M^c(d/R)$ との関係



(b) 孔間隔 b/R と関数 $M^b(b/R)$ との関係

Fig.7 二孔同時载荷における孔間隔 d/R と関数 $F^c(d/R)$, $M^c(d/R)$ との関係

Fig.9 自由面を有する単一孔载荷における孔間隔 b/R と関数 $F^b(b/R)$, $M^b(b/R)$ との関係

大 (発散) することがわかる。

この応力拡大係数の発散はき裂相互の干渉によるき裂の急激な伸長を示している。したがって、応力拡大係数が極小値となるき裂長さまでき裂を伸長させれば、2孔間のき裂が連結されることになる。したがって、2孔間のき裂連結条件は(8)、(9)式と書ける。

$$P^c = K_{Ic} \sqrt{R} \cdot F^c(d/R) \quad (8)$$

$$u_0/R = P^c/ER \cdot M^c(d/R) \quad (9)$$

ただし、 $F^c(d/R)$, $M^c(d/R)$ は Fig.7 に示すよ

うである。

次に Fig.4 (b) に示す自由面を持つ単一孔载荷の解析結果として、応力拡大係数 K_I とき裂長との関係を Fig.8 に示す。 $c/R \leq (0.5 \sim 0.6) b/R$ では、き裂と自由面の相互の力学的干渉が無視できることを意味するとともに、 $c/R \geq (0.5 \sim 0.6) b/R$ の条件下でのみ自由面を有する単一孔载荷の効果が発揮されることを意味する。

Table 1 実証実験結果のまとめ

実験	供試体材料	供試体 (No.)	供試体 寸法 (cm)	孔数	破砕器 (合金本数)	破砕器 載荷力 (kN/m)	予想破砕荷重	
							P^S (kN·m)	P^B/P^C (kN/m)
A	コンクリート 1	A-1	30×30×10	1	B 3(3)	3000	140	250
		A-2	50×50×10	1	B 6(6)	6000	140	350
		A-3	50×50×10	1	B 6(3)	3000	140	350
B	コンクリート 1	B-1	30×30×30	1	B 3(3)	1000	140	250
		B-2	50×50×50	1	B 6(6)	1200	140	350
		B-3	50×30×30	1	B6(3)×2	2000	140	250
C	花崗岩	C-2	30×30×30	1	B 6(3)	1000	570	990
D	コンクリート 2 (高強度)	D-1	95×95×74	2×4	B6(3)×8	630	310	810(500)
		D-2	95×95×37	2	B 6(6)	810	310	810(500)
		D-3	95×37×37	1	B 6(3)	810	310	250

(注) b は孔の中心から自由面までの距離, d は孔間の距離である.

P^S , P^B (P^C)はそれぞれき裂初生荷重, き裂伸長荷重である.

いずれの場合も, 応力拡大係数の値は極小値を示し, その後 c/R の増大にともなって急激に増大 (発散) することがわかる. この応力拡大係数の発散は自由面とき裂の干渉によるき裂の急激な伸長を示している. したがって, 応力拡大係数が極小値となるき裂長さまでき裂を伸長させれば, 自由面と円孔から生ずるき裂が連結されることになる. したがって, 2孔間のき裂連結条件は(10), (11)式と書ける.

$$P^B = K_{Ic} \sqrt{R} \cdot F^B (b/R) \quad (10)$$

$$u_0/R = P^B/ER \cdot M^B (b/R) \quad (11)$$

ただし, $F^B (b/R)$, $M^B (b/R)$ は Fig.9 に示すようである.

§ 4. コンクリートおよび岩石による実証実験

試作した破砕器の破砕能力の検定と §3 に示した破砕設計式の適用性の検討を目的としてコンクリート・岩石の破砕実験を行った.

供試体としては, 通常配合のコンクリート (コンクリート 1), 高強度コンクリート (コンクリート 2) と花崗岩を用い, コンクリートは Table 1 に示すような, さまざまな寸法のものを用意した.

実験としては次の 4 通りを行った.

実験 A は薄壁破砕を想定したもので破砕器の長さが供試体の厚さに等しいか, もしくはそれ以下の場合である. したがってボアホール全長にわたって破砕器が設置されるため, 2次元性が満足される.

実験 B は供試体の厚さが破砕器の長さ以上の場合であり, 厚さ方向の 3次元効果の検討を目的としている. なお, この場合の載荷重は破砕器全荷重をボアホール孔長で除したもので与えている.

実験 C は硬岩の破砕を想定し, 花崗岩を供試体とした. 実験 D は大塊の小割を想定したものであり, 供試体 No. D-1, 2, 3 の順に徐々に小割を進めていった. 供試体には主として中央部に破砕器挿入用の $\phi 45$ mm のボアホールを穿孔した. なお実験 D では, 複数のボアホールを穿孔した.

別に実施した材料試験の結果によると, 供試体の圧縮強度, 引張強度, ヤング率はそれぞれ, コンクリート 1 で 30MPa, 2.5MPa, 15GPa, コンクリート 2 で 50MPa, 4MPa, 25GPa, 花崗岩で 120MPa, 10MPa, 35GPa であった. また, 破壊靱性値 K_{Ic} および特性距離 η はコンクリート 1 で $0.5\text{MPa}\sqrt{m}$, 6.4mm, コンクリート 2 で $1.0\text{MPa}\sqrt{m}$, 10mm, 花崗岩で $2.0\text{MPa}\sqrt{m}$, 6.4mm とした.

これらの物性値をもとにした, き裂初生荷重 P^S , き裂伸長・連結荷重 P^B , P^C の計算結果を Table 1 に示す.

破砕器としては, 主として B 6 を使用したが, 合金は 3 本使用したものと 6 本使用したものがある. 合金の使用本数および最大載荷力は表中に示すとおりである. 加熱用ヒーターとしては, アルミ製のヒーター用ブロックとカートリッジヒーター (188mm, $\phi 3$ mm, 100V, 110W) を用いた. したがって, 加熱速度は全ての実験を通してほぼ等しいものと考えられる.

いずれの実験も, Photo 3 に示すように $\theta = \pi/4$ の位置でき裂が生じた後, 孔壁より載荷軸に直交する方向にき裂が瞬間的に走った. いずれもき裂が肉眼で確認できると同時に “ポン” と音がして, 瞬時に供試体が破断した.

Table 1 より, 実験 A では破砕器載荷重は破砕荷重を大きく上回り, 破砕器長さ程度の薄壁であれば容易に

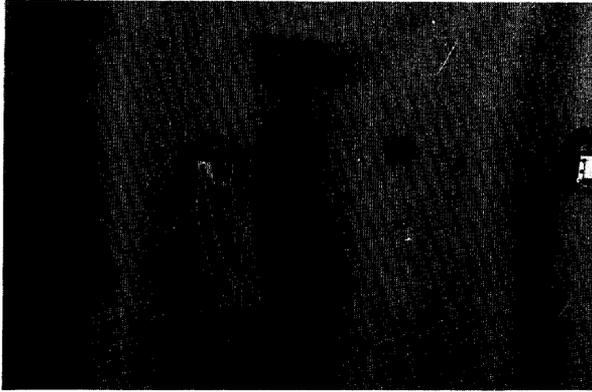


Photo 3 き裂の伸長状況

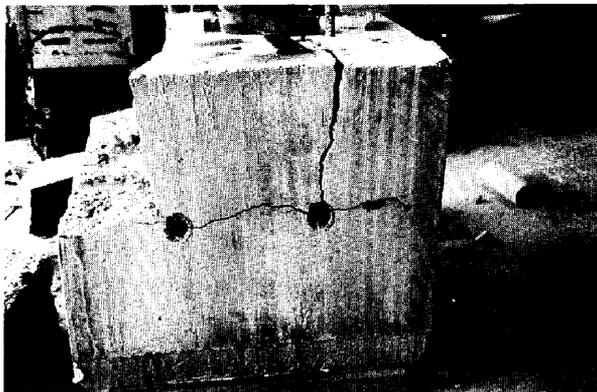


Photo 4 高強度コンクリートの破碎状況

破碎が可能であることがわかる。実験の結果によると、いずれの場合も破碎時間は1分以内であり、合金が完全回復する以前に破碎が完了していることが確かめられた。

また、実験 B では B-2 を除けば供試体は完全に破断された。B-2 の場合には、き裂は下部の一部に達しなかったが、これは、ボアホール長50cmの内、片側の上部10cm程度に破碎器をセットしたためであると考えられる。したがって、ある程度厚さがある場合には破碎器を奥部に挿入する必要があると考えられる。

実験 C では、載荷重と破碎荷重がほぼ等しいが、供試体は完全に破断した。特にき裂は瞬時に伸長し、強度、脆性の高い岩石ではき裂初生時の動的き裂伸長効果が顕著であると判断された。

実験 D は大塊の小割サイクルではあるが、D-1、D-2 では供試体寸法が大きいため1孔では理論上破碎は不可能であると判断された。そこで、破碎荷重の設計式に基づいて、複数孔を穿孔し、複数の同時載荷を行った。

例えば、D-1 では供試体の周囲4面に孔間隔35cmで各2孔ずつ、いずれも同一平面内になるようにボアホールを穿孔した。この場合の孔間隔と孔径との比の値は、

7.8となり、これは静的破碎剤における設計値にほぼ等しい。全ての実験ともに、想定破断面に沿って破断したが、破碎時間は最も条件の厳しい D-1 で約3分であり、D-2、D-3 では1分以内であった。従って穿孔時間を別にすると、破碎器のセットから破碎までの実所要時間は、小割の全サイクルで10分程度となり極めて迅速な破碎が可能であることが確かめられた。

実際の小割においては、ヒーター通電時間に時差を設ければ段階的破碎を1回の作業で実施することができると考えられる。

§5. おわりに

形状記憶合金を利用した岩石破碎器の原理・構造を示し、その破碎能力について実験的検討を行った。その結果、試作した破碎器はきわめて高い破碎能力を有し、実施工に充分適用可能であることが確認された。また、本破碎器は加熱電源以外の周辺設備が不要であり、さらに、小型で操作もきわめて簡単であるという特徴を有するため、幅広い利用が期待できる。なお、本破碎器は、今後、実用化に向けてさらに改良を加える予定である。

参考文献

- 1) 中川 浩二：発破を用いない最近の岩盤掘削法，橋梁，No.2，1987.
- 2) 稲葉 力，石山宏二，金子勝比古，西田 稔，山内清：形状記憶合金を用いた岩盤破碎器の開発，第10回西日本岩盤シンポジウム論文集，1989.
- 3) K.Kaneko and M.Nishida：Static Rock Breaker using Shape Memory Alloy, Science & Technology in Japan, Vol 8, No.31, 1989.
- 4) M.Nishida, K.Kaneko, T.Inaba, A.Hirata and K.Yamauchi：Static Rock Breaker using TiNi Shape Memory Alloy, Proc. of Int. Conf. on Martensitic Transformations, in press.
- 5) 浜田 元，金子勝比古，西田 稔：形状記憶合金を用いた岩石破碎器，第105回日本金属学会講演会概要集，1989.
- 6) 稲葉 力，金子勝比古，西田 稔，平田篤夫，山内清：形状記憶合金を用いた静的岩石破碎技術，土木学会 第21回岩盤力学に関するシンポジウム論文集，1990.