

(47) 形状記憶合金を用いた静的岩石破碎技術

西松建設(株)	正会員	○稲葉	力
熊本大学工学部	正会員	金子	勝比古
熊本大学工学部		西田	稔
西松建設(株)	正会員	平田	篤夫
(株)トーキン		山内	清

Static Rock Breaking Process Using Shape Memory Alloy

Tsutomu INABA, Nishimatsu Construction Co., Ltd.
Katsuhiko KANEKO, Kumamoto University
Minoru NISHIDA, Kumamoto University
Atsuo HIRATA, Nishimatsu Construction Co., Ltd.
Kiyoshi YAMAUCHI, Tokin Corporation

ABSTRACT

A new kind of static rock breaker has been developed. The developed breaker comprised rods of TiNi shape memory alloy, heating apparatus and a pair of two-layered platens made of steel. The breaking process of rock is as follows. The breaker is inserted into a borehole drilled into a rock mass, and clearance between the breaker and borehole wall is adjusted by sliding the inner platen. After this operation, heating the TiNi elements, they begin to lengthen until finally they recover their original length. During this, recovery force is generated and rock around the borehole is broken.

To examine the performance of the developed breaker, laboratory test using granite and mortar specimens and numerical analysis based on Displacement Discontinuity Method have been performed. From these results, it is confirmed that the present breaker is not lacking in terms of performance. In addition to the performance, this breaker is very compact, and required no accessory equipment other than the heating apparatus. We thus believe that the developed breaker holds great promise as a means of breaking rock and rocklike materials.

1. はじめに

近年、都市再開発を行う上で、無発破破碎工法の要求が高まってきている。そして、このニーズに対応するために、油圧セル、油圧くさび等の液圧式破碎装置、あるいは膨張性破碎剤等が開発されてきている。ここで、液圧式破碎装置と膨張性破碎剤の実績を比較すると、破碎力・破碎時間等の破碎能力の点では前者が、作業性の点では周辺設備の不要な後者が有利となり、互いに施工上一長一短を有していることがわかる¹⁾。

筆者等は、上記の静的破碎工法の現状を踏まえ、新しい原理のもとに簡便かつ高能率な岩石破碎器の開発を試みている^{2), 3)}。すなわち、ここで開発の対象とする破碎器は油圧ジャッキの替わりに形状記憶合金を用い、その回復力を利用して岩石を破碎しようとするものである。ここでは、現在までに試作した破碎器の原理と構造を示すとともに、その破碎能力検証のために実施した室内実験と数値実験の結果について報告する。

2. 破碎器の試作とその性能試験

2. 1 試作器の構造

現在試作している破碎器は、写真1に示す3形式であり、鋼製載荷板間に15mmφ×(23~29)mmの形状記憶合金(TiNi合金)をそれぞれ3, 6, 9本内装したものである。以下では便宜上、これら3形式の破碎器をB3, B6, B9と呼ぶことにする。これらの破碎器は、すべて45mmφのボアホール用に設計され、長さ(B3)10cm, (B6)15cm, (B9)20cmである。B3, B6, B9の基本構造はほぼ同様であるため、一例としてB6の構造を示すと図1のようである。図1に示すように、上下の載荷板はともにテーパ加工された

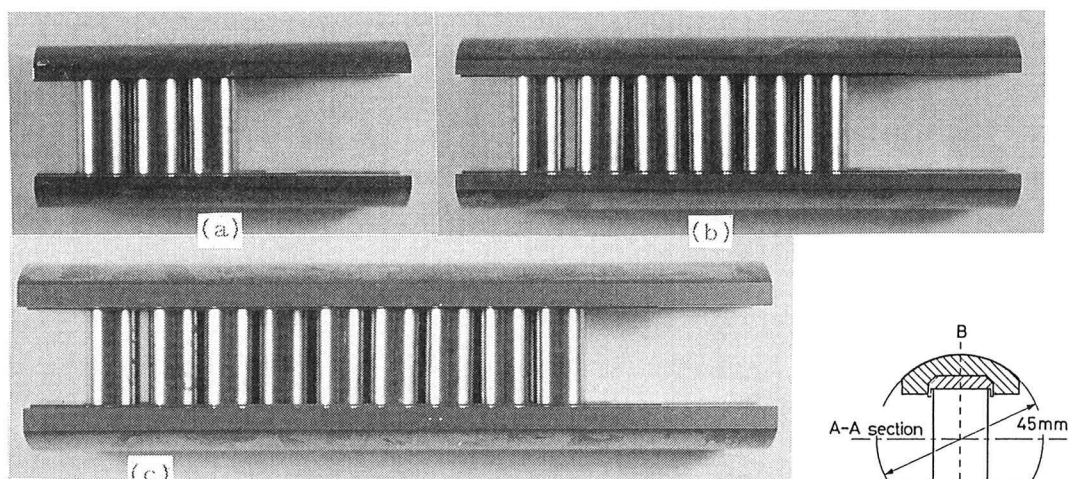


写真1 試作破砕器

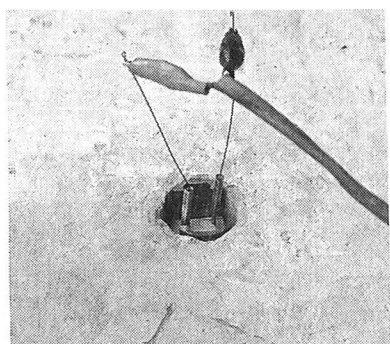


写真2 破砕器の装着状況

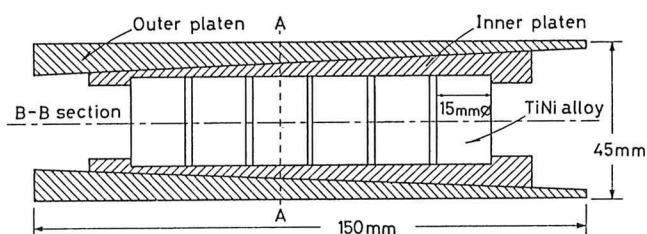


図1 B6破砕器の構造

2層の载荷板よりなり、これにより、ボアホール孔壁と破砕器とのクリアランスが調整される。また、図では省略したが、TiNi合金加熱用のヒーターとしてはシーズヒーターもしくはブロックヒーターを使用する。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合金を内装した破砕器をボアホール孔内に挿入し、外側载荷板を固定した状態で内側载荷板を押し込み孔壁に破砕器を密着させる。なお、破砕器の装着状況は写真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圧縮载荷され、孔壁から载荷軸と直角な方向にき裂が伸長する。

2.2 TiNi合金の形状回復特性

本破砕器の破砕能力(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よる形状の変化が利用されている。すなわち、ここで目的とするようなブロック状の合金に対して圧縮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、破砕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^{4)・5)}。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15mmφ×29mmであり、回復力・変形測定および温度管理にはMTS材料試験機および自作の恒温水チャムバーを使用した。実験結果の一例として、組成、熱処理条件の異なる

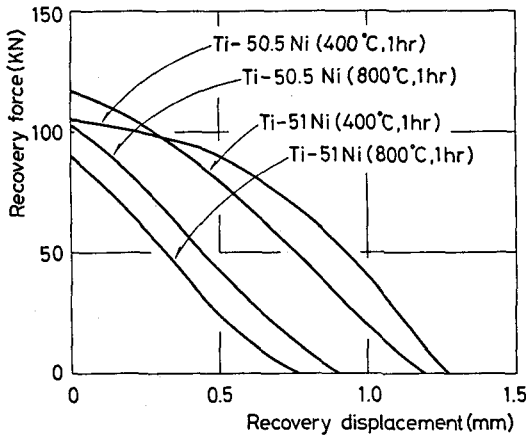


図2 TiNi合金の回復力-回復変形曲線の一例

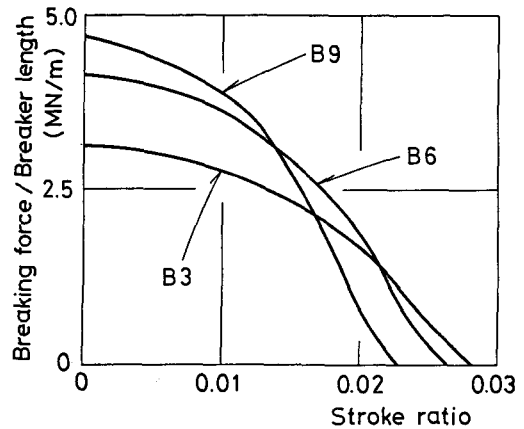


図3 試作破砕器の破砕力-ストローク率特性

4種類のTiNi合金の回復力-回復変形特性を示すと図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。図2より、回復変形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。

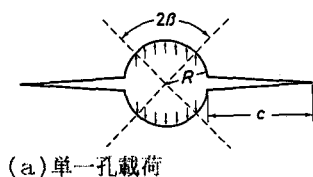
ここで、破砕器の圧力源としては、回復力、回復変形量が大きく、かつ、変形回復時に回復力が持続するものが望ましい。この観点から考えると、破砕器の用途には、Ti-50.5Ni (400°C, 1hr)の合金が最適であると判断することができる。したがって、以下では、すべてTiNi合金としてはこの合金を使用することとした。この最適条件のTiNi合金の回復特性の結果から、B3、B6、B9の各破砕器の破砕力とストローク率との関係を求めると図3となる。ただし、ストローク率は(回復変形量/破砕器直径)であり、後述する孔径変化率と対応する量である。図3より、最大破砕力は破砕器単位長当たりで3~5 (t/cm)、総荷重としてはそれぞれ(B3)31t、(B6)63t、(B9)94tとなり、いずれも極めて高い荷重能力を有することがわかる。また、ストローク率は、2.3~2.8%となるがこれは静的破砕剤の体積膨張率と大差ない。特に、2層の載荷板の調整により、ボアホール孔壁と破砕器が完全に密着した状態で使用されることを考えれば、ストロークの点でも破砕器の要件は十分に満足されていると考えられる。

2.3 岩石実験

試作した破砕器の破砕能力を検定するために花崗岩供試体およびモルタル供試体を用いた破砕実験を行った。供試体寸法は花崗岩は50×500×500 (mm)であり、モルタルは(I)50×400×400 (mm)、(II)100×400×400 (mm)の3種を用意し、ともに供試体中央部に破砕器挿入用の45mmφのボアホールを穿孔した。また、別に実施した材料試験の結果によると花崗岩の引張強度およびヤング率は8MPa、29GPaであり、モルタルのそれらは2.5MPa、15GPaであった。破砕器としては、供試体寸法を考え、すべて最も小型なB3を使用した。また、加熱用ヒーターとしてはシーズヒーターを用い、供給電力を300~400VAに調整した。いずれの実験ともに、孔壁より載荷軸に直交する方向にき裂が生じた後、瞬時に供試体が破断した。なお、ヒーター通電後供試体が破断に至るまでの時間は、花崗岩19s、モルタル(I)12s、モルタル(II)35sであった。

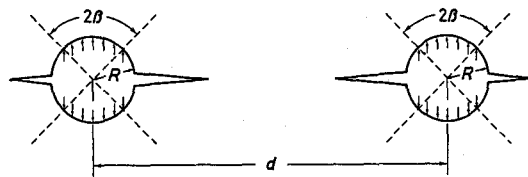
3. 数値実験による破砕能力の検討

開発した破砕器は形状記憶合金を固体圧力源として利用するため、流体圧力源を利用する形式の破砕器と異なり、破砕能力が岩盤の強度のみならず、剛性にも依存する。したがって、本破砕器の性能向上とその静的破砕への適用を計るためには、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の把握が重要である。そこで、ここでは、2次元変位くい違い法(DDDM)により、円孔内壁の一軸荷重に伴うき裂の伸長過程をシミュレートし、本破砕器の破砕能力を検討する。



(a) 単一孔載荷

図4 解析モデル



(b) 二孔同時載荷

解析モデルは図4に示す2通りであり、(a)は単一孔載荷、(b)は2孔同時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)100~300、(b)200~600とした。外力条件としては、破砕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、孔壁両側のき裂長を互いに等しくし、その長さを種々変化させて解析を行った。また、(b)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。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。

図4(a)の単一孔載荷の場合、き裂先端の応力拡大係数 K_I および孔径変化率 u_0/R と単位奥行当たりの荷重 P の関係は、無次元き裂長さ c/R を用いて(1)式と書ける。

$$K_I = P / \sqrt{R} F^P(c/R), \quad u_0/R = P/ER \cdot M^P(c/R) \quad (1)$$

ただし、 E は岩盤のヤング率であり、 $F^P(c/R)$ 、 $M^P(c/R)$ はDDM解析の結果から図5(a)、(b)と与えられる。したがって、き裂長さ c^P まで伸長させるために要する荷重 P^P および孔径変化率 u_0^P/R は(1)式に $K_I = K_{Ic}$ (破壊靱性値)を代入することにより次式で与えられる。

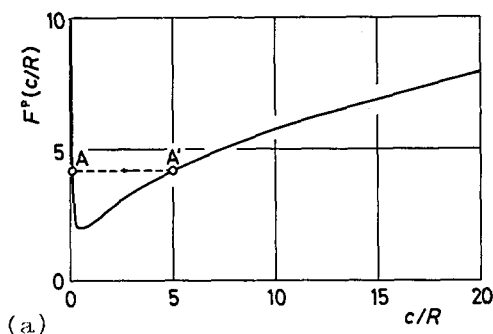
$$P^P = K_{Ic} \sqrt{R} \cdot F^P(c^P/R), \quad u_0^P/R = P^P/ER \cdot M^P(c^P/R) \quad (2)$$

なお、図5(a)より、 $c/R < 0.4$ では 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、図5(a)において潜在き裂長さに相当するA点で(2)式が満足され初生き裂が生成すると、き裂はA点で留まらず少なくともA'点まで一気に伸長することを示している。このき裂の初生とそれに伴う急激なき裂の伸長は2.3に示した岩石実験で確認されている。したがって、き裂初生後のき裂の静的伸長過程を問題対象とする場合には、 $c/R > 0.4$ の領域について(2)式を適用すればよいことになる。

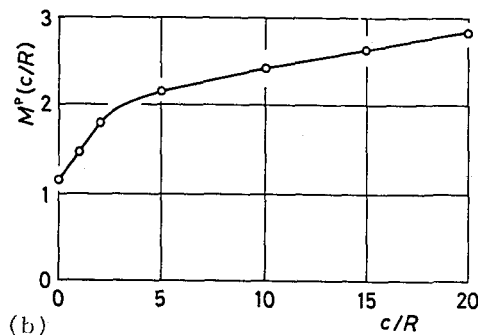
次に、図4(b)に示す2孔同時載荷の解析結果の一例として $d/R = 7$ の場合の内側き裂のき裂長さ c と応力拡大係数の関係を示すと図6となる。図6より、応力拡大係数の値は極小値を示し、その後 c/R の増大に伴って急激に増大(発散)することがわかる。この応力拡大係数の発散はき裂相互の干渉によるき裂の急激な伸長を示している。したがって、応力拡大係数が極小値となるき裂長さまでき裂を伸長させれば2孔間のき裂が連結されることになる。したがって、2孔間のき裂連結条件は(3)式と書ける。

$$P^c = K_{Ic} \sqrt{R} \cdot F^c(d/R), \quad u_0^c/R = P^c/ER \cdot M^c(d/R) \quad (3)$$

ただし、 $F^c(d/R)$ 、 $M^c(d/R)$ は図7に示すようである。



(a)



(b)

図5 単一孔載荷における無次元き裂長さ c/R と関数 $F^P(c/R)$ 、 $M^P(c/R)$ との関係

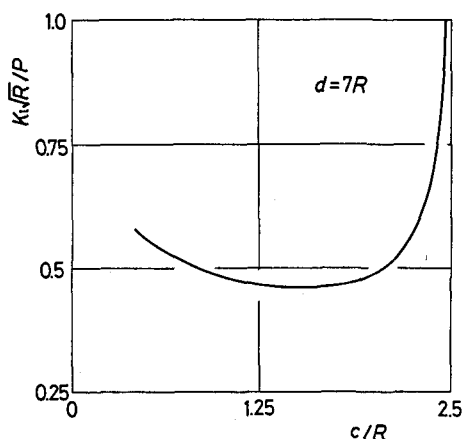


図6 二孔同時載荷($d/R=7$)における内側き裂の応力拡大係数

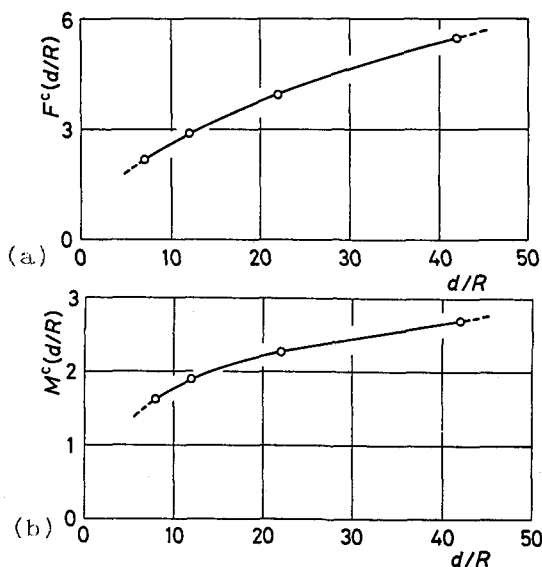


図7 二孔同時載荷における孔間隔比 d/R と関数 $F^c(c/R)$, $M^c(c/R)$ との関係

したがって、破砕対象とする材料に対して、(2)式、(3)式の荷重-孔径変化率特性と図3の破砕器の荷重-ストローク率特性とを比較すれば、本破砕器適用の可否が判断される。すなわち、具体例を示せば次のようである。今、厚さ20cmのコンクリート壁の破砕にB9破砕器を適用し、孔間隔1mで2孔同時載荷を行った場合を想定する。コンクリートの K_{Ic} および E をそれぞれ $1\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、 20 GPa と見積ると、この場合、孔間のき裂を連結させるために要する荷重およびストローク率は、(3)式より、 0.83 MN/m および 0.5% となる。図3に示したB9破砕器特性はこの値を大きく上回り、試作破砕器により孔間のき裂は連結されることがわかる。

4. おわりに

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

謝 辞

実験・解析において、熊本大学大学院 浜田 元君外、同大学学生諸氏の協力を得た。記して謝意を表する。

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石破砕器の開発，第10回西日本岩盤工学シンポジウム論文集，1989
- (3) K. Kaneko and M. Nisida: Static Rock Breaker using Shape Memory Alloy, Science & Technology in Japan, Vol. 8, No. 31, 1989
- (4) M. Nisida, 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砕器，第105回日本金属学会講演概要集，1989