

(85) 形状記憶合金を用いた岩盤破砕器の現場適用について

西松建設機技術研究所	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
㈱トーキン仙台研究所		山内 清

Application of silent rock breaker using shape memory alloys for construction site

Tsutomu INABA, Nishimatsu constructin co., LTD.
Katsuhiko KANEKO, Kumamoto University
Minoru NISHIDA, Kumamoto University
Kiyoshi YAMAUCHI, Tokin corporation

Abstract

Since authors invented a silent rock breaker system using shape memory alloys three years ago, the following subjects have been studied.

- ① Characteristics of a shape memory alloy as solid pressure source.
- ② Fundamental properties of a silent rock breaker.
- ③ Breaking ability of the breaker in laboratory.
- ④ Applicability of the breaker system in-situ.
- ⑤ Applicability of a two-way shape memory alloy for the breaker.
- ⑥ Propagation of crack induced by the breaker and effect of shape of specimen to be broken.

As for ① and ②, some papers have been reported so far. Results of ③ have been partly reported related to ⑥. Meanwhile large-scale experiments in laboratory have been conducted connecting with ⑥. At the present study, characteristics of a silent breaker and a constitution of breaker system are introduced, and application test results of the breaker in-situ are reported.

1. はじめに

筆者らは形状記憶合金を用いた岩盤破砕器を考案し、以下の項目について研究してきた。

- ① 破砕力供給源としての形状記憶合金の特性
- ② 岩盤破砕器の基本的特性
- ③ 実験室における岩盤破砕器の能力
- ④ 現場における岩盤破砕器の適用性
- ⑤ 二方向形状記憶合金の岩盤破砕器への適用性
- ⑥ 亀裂の伸展および破砕体の形状に関する研究

①、②についてはこれまでに報告してきた。③についても部分的にこれまでに報告しているが、より大規模な室内実験を⑥と関連させて、現在実施中である。したがって、今回は岩盤破砕器のプロフィールとして、能力・システムを紹介し、④の現場における岩盤破砕器の適用試験を中心に報告する。⑤、⑥については別の機会に報告する。

2. 岩盤破碎器の諸元とシステム構成

岩盤破碎器に用いる形状記憶合金は、原子比でチタンが49.5%、ニッケルが50.5%のTi-Ni合金である。回復力の大きさと形状回復を開始する温度の観点から決定した組成である。破碎器の諸元を図-1に示す。図-1の破碎器は現在多用している、形状記憶合金を6本装着した6連の破碎器である。

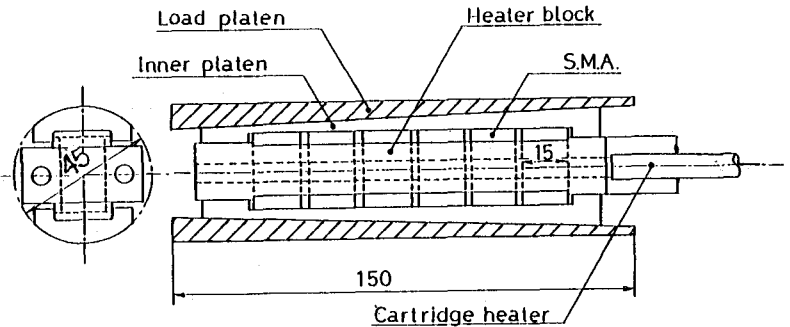


図-1 実験に使用した破碎器の断面（6連）

ロードプレートの長さがそれぞれ10cm、15cm、20cmで合金の装着数が3本（B3）、6本（B6）、9本（B9）の3種類の破碎器を試作したが、破碎力とハンドリングの兼ね合いで6連のものが一番使いやすいようである。破碎器のストローク率と破碎力の関係を図-2に示す。同図に中硬岩、硬岩、超硬岩を破碎する場合の、ストローク率と破碎力の関係を示した。中硬岩、硬岩、超硬岩の応力拡大係数と弾性係数は、中硬岩で0.5MPa $\sqrt{m}$ 、15GPa、硬岩で2MPa $\sqrt{m}$ 、35GPa、超硬岩で3MPa $\sqrt{m}$ 、60GPaとした。岩石を破碎するには、本破碎器の弱点であるストロークは問題ないことが理解できる。この点は、後で述べる現場適用実験でも触れる。

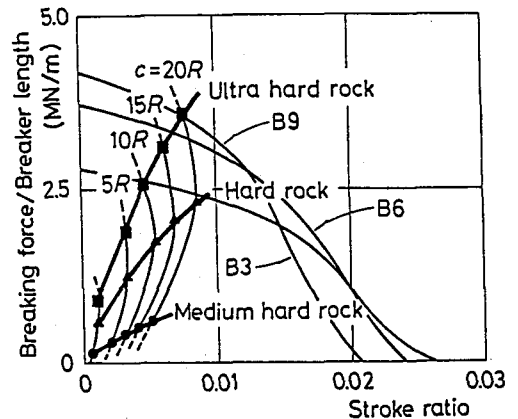


図-2 破碎力とストローク率の関係

現在用いている合金は直径15mm、圧縮前の長さが29mmのものである。合金の大きさはボアホールの直径を45~50mmとしたことから決まっているが、破碎対象物に合わせて合金を設計することは可能である。ただし、直径15mmでも予圧縮に約30tfの力を加えているので、予圧縮の方で制限を受けると考えられる。ロードプレートとインナープレートにテーバーを付けてあるので、使用時の破碎器の直径は44mmから50mmまで変化させられる。したがって、あとでも述べるが削孔の径はその範囲に合わせる。

合金の回復は、ヒーターブロックに差し込んだ2本のカートリッジヒーターでヒーターブロックの温度を上げて間接的に合金の温度を上げる方法をとっている。カートリッジヒーターはハンドリングと熱量を考えて、単相200V、400W、直径6.3mm、長さ150mmのものを用いている。

破碎器のシステムとしては、上記に述べた破碎器とヒータ以外には電源ユニット、工数分の合金と予圧縮器がある。本破碎器の利点は小口の破碎にあることを考えれば、予圧縮器は現場には不要と考えられるので、現場に持ち込むのは破碎器と電源ユニットと用いる合金だけである。非常にコンパクトなシステム構成となっている。電源ユニットは一台で破碎器10個分、ヒータ20本をつなぐことができる。電源ユニットにはタイマーが備えてあり、合金の温度が上がり過ぎないようにしている。別のタイプの破碎器では、ヒータブロックに温度センサーを付けて、電源ユニットの方で温度をコントロールできるようになっている。システムの構成を表-1に示す。

現状でも本破碎システムには改良の必要な点があるが、その内の一部は使い方で解消できると考えられる。なんらかの理由で破碎できなかった場合の装置の回収、より効率的な破碎を考え、ボアホールの奥に破碎器

を設置するために、写真－１の新型の破砕器を製作した。この装置は、設置の方法と回収について工夫している。

3. 現場適用実験の結果

本破砕器の特徴を活かせる現場を中心に現場での適用実験を行ってきた。主なものを表－２に示す。先に述べたように現在用いている破砕器の直径は挿入時でφ45mmで、テーパーの作用でφ50mmまで拡張できる。室内実験ではφ47mmのコアービットで削孔したが、現場実験ではφ46mm、φ48mmのレッグドリルまたはジャックハンマーを用いた。以下、順に施工例の説明をする。

①花崗岩の転石の破砕

この例は、福島県のダム現場近傍の転石を対象に行ったものである。一般的に転石の大きさは千差万別であり、小は直径50cm程度のもから、大は直径2mを超えるものである。転石は大きくなると細長くなる傾向があり、油圧ブレーカで細い部分を叩くと比較的割れ易いといわれる。ブレーカで比較的割ずらいのが中程度の大きさの転石といえる。また、割方にしても処分方法によって異なる。運搬できる程度に破砕する場合、廃棄場の基準にあわせるために小割する場合、作業場所から運搬可能にする場合などで異なる。

推定一軸圧縮強度1200kgf/cm²で表－２のNo. 1に示す大きさの転石にクローラードリルで削孔した。転石1個につき地面と鉛直または水平に間隔25cmで削孔した。各孔は貫通孔であった。クローラードリルで削孔する場合、削孔時間は作業のクリティカルパスにならない。200Vの電源ユニットで通電後、いずれも約5分で亀裂が削孔面に沿って入った。通電後破砕まで比較的時間がかったのは、当日非常に気温が下がっていたにも拘らず温度センサーのセットをいつもどおりにしていたことが原因と考えられた。破砕後ブレーカで軽く叩くと転石は、分割された。転石に削孔した状況を写真－２に示す。

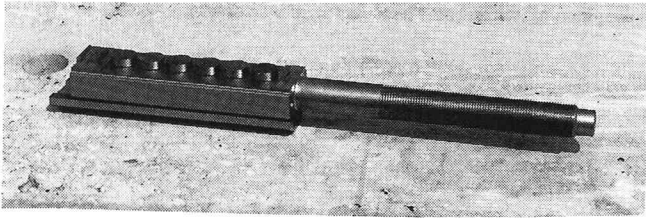
②安山岩の転石の破砕

ゴルフ場に出現した安山岩の転石を破砕した。ひとつは平面で50cm×100cm程度の大きさで、中央に鉛直に2孔40cm程削孔した。削孔はレッグハンマで行った。この転石は下部が地面にかなり深く根をはっていた。ヒーターの電源を入れて後、4分ほどで突然「ビシッ」と音がして削孔面に沿って亀裂が入り、30cm程伸展して削孔面に直角の潜在亀裂面にぶつかり、その後は、潜在亀裂に亀裂が進んだ。終了後、バールをこじ入れると簡単に分離した。破砕状況を写真－３に示す。

もうひとつ破砕例は、地面に埋まっている最大断面が100cm×100cm程度の断面であった。断面が60cm×60cm程度の位置に地面に平行に2孔深さ30cm削孔した。電源を入れて4分経っても変化がなかったが、5分後突然「ボンッ」という大きな音がして、転石の上部がわずかに浮いて分離し下部とずれた。岩の目に詳しい人によると、このときの載荷方向は目ではない方向を向いていたとのことであった。

表－１ システムの諸元

装 置 名	諸 元
破 砕 器	6連の場合、ロードブラテンの長さ15cm ヒーターブロック込み で1.2kg
ヒ ー タ ー	単相200V、400W 長さ15cm、直径6.3mm 防水加工のケーブル付
電 源 ユ ニ ッ ト	縦200mm×横250mm×高 さ100mm、重量3kg ヒーター10組接続可 200V、40A
圧 縮 器 (通常は必要ない)	電気制御の油圧圧縮器 最大圧縮力50tf 電源3相200V、0.4kW 変位制御、応力制御可 二重の安全装置付き



写真－１ 改良型の破砕器

表－２ 現場適用実験例

番号	破砕対象	寸 法(mm) (幅×高×奥行)	推定強度(一軸 kgf/cm ²)
1	花崗岩の転石	2500×1200×1200	1200kgf/cm ²
2	安山岩の転石	1000×500×1000	800kgf/cm ²
3	砂 岩の転石	1600×600×1200	600～800 //
4	花崗岩の坑道側壁		1500kgf/cm ²
5	無筋コンクリート基礎	3600×1200×1200	300kgf/cm ²
6	R C 壁	厚さ150の壁	200kgf/cm ²
7	R C 壁	厚さ200の壁	200kgf/cm ²

レッグハンマでは孔荒れがひどいと思われたが、実際には孔口以外は壁面はきれいであった。転石などの場合、表面が曲面なのでどうしてもビットが滑り、そのために孔口が曲がり易い。仕上がり径は、ビットでもコアドリルでも使用するビットまたはカッターの外径の1mm増し程度である。

③砂岩の転石の破碎（ケーソン中）

ケーソン沈下在先立ち、掘削工事に伴い出現する転石の破碎実験を行った。砂岩で推定一軸圧縮強度 $600\sim 800\text{kgf/cm}^2$ 程度と考えられた。断面で $120\text{cm}\times 60\text{cm}$ の上面にジャツハンマーを用いて25cm間隔で5孔削孔した。電源を入れてから2分半で鈍い音と共に亀裂が入った。深さ30cmの孔（使用ビット径は $\phi 46$ ）を開けるのに要する時間は各約3分間であった。孔壁は非常に滑らかでロードブラテンは面接触になっていたと考えられた。破碎状況を写真-4に示す。

④花崗岩の坑道側壁

土被り約200mの坑道側壁で破碎実験を行った。岩種は花崗岩で一軸圧縮試験の結果によると 1500kgf/cm^2 程度の値であった。当サイトでは過去に膨張性セメントを用いた静的な破碎が試みられた例があるが、亀裂の発生は全く認められなかったと報告されている。坑道側壁に斜めに交差する断層に直交する形で削孔した。側壁表面での断層から横に25cm間隔で4列、縦に25cm間隔で4列削孔した。削孔深さは位置によって異なる。レッグハンマーで削孔したが、孔壁付近での孔曲がりひどく破碎器を押し込むのに苦労した。電源を入れた後、2～3分たって孔口付近で亀裂が発生したが、大きく亀裂が発生することはない。この原因は、三次元効果（奥行き）による拘束の大きさと孔曲がりによって荷重が入口付近にしかかからなかったためと考えられた（点載荷）。

⑤無筋コンクリートの基礎

井桁基礎の地上に出ている部分を長さ約360cmにわたって、奥行き120cmの内、前側30cmに亀裂を入れる実験を行った。削孔状況を図-5に示す。電源を入れてから4分で前面と平行に亀裂が入ったが、亀裂の開口幅は狭かった。これは井桁の両側の拘束が強いためと考えられた。

⑥RC壁（厚さ150mm）

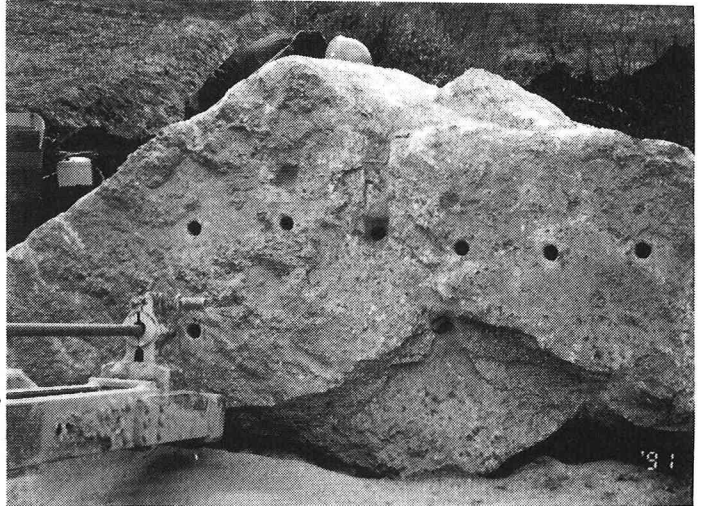


写真-2 花崗岩の転石の破碎（①、削孔状況）

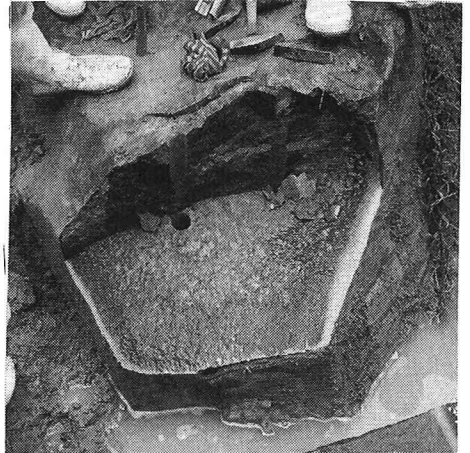


写真-3 安山岩の転石の破碎状況（②）



写真-4 砂岩の転石の破碎状況（③）

ホテルの営業を続けながら、途中階の一階分のフロアを改築することになった。壁厚150mmで鉄筋はダブルで入っていると考えられた。ボーリングマシンで300mm間隔に削孔し、破碎器は一孔おきにセットした。電源を入れてから3分間で亀裂が入った。鉄筋は、大径のボーリングをしてニブラで切断した。

⑦RC壁（厚さ180mm）

社宅の取り壊しの機会を利用してRC壁の破碎実験を行った。一軸圧縮強度は200～400kgf/cm²程度と考えられた。削孔間隔は20cmから55cmまで変化させたが、壁全体に亀裂を貫通させるには間隔30cmまでが適当と考えられた。転石の場合には一気に破碎に至るが、RC壁の場合には最初に亀裂が一瞬の間に入り、その後しばらく亀裂が伸展する状況が窺えた。同じ孔に破碎器を繰返し使用すると亀裂を拡げることができた。亀裂の発生状況を写真-6に示す。

4. まとめ

これまで破碎を試みた転石は岩種を問わず破碎が可能であり、ジャッツハンマーでの削孔と組み合わせると実用的であった。転石の場合は瞬間的に破碎された。破碎時間は対象物の強度と削孔間隔によって決まると考えられる。無筋コンクリートの場合は、亀裂を入れることはできるが周囲の拘束効果が亀裂の伸展に大きく影響する。破碎器を同時に多数使用して、部分々々を一度に確実に破碎する必要がある。鉄筋コンクリートは本来、本破碎器のような静的破碎器には不向きであり、他工法との併用が必要である。筆者らはウォータージェットとの併用を考え、実験を検討している。亀裂伸展のメカニズム、拘束効果については実験・解析を進めており次の機会に報告する予定である。

参考文献

- 1) 稲葉力、金子勝比古、西田稔、平田篤夫、石山宏二、山内清：形状記憶合金を用いた静的岩盤破碎の研究、第8回岩の力学国内シンポジウム論文集、1990

- 2) M.Nshida, 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

- 3) T.Inaba, M.Nishida, K.Kaneko and K.Yamauchi: Static rock breaker using shape memory alloy, 8th International Congress on Rock Mechanics in Aachen, 1991

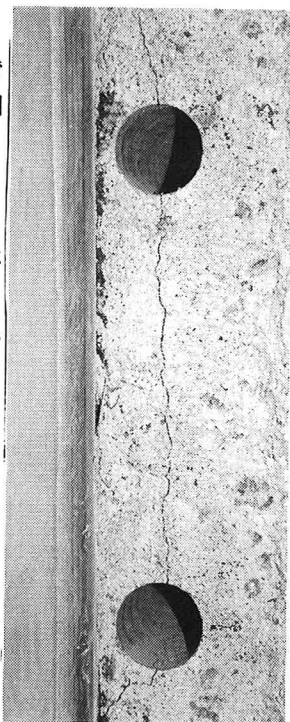


写真-6 亀裂の発生状況 (⑦)

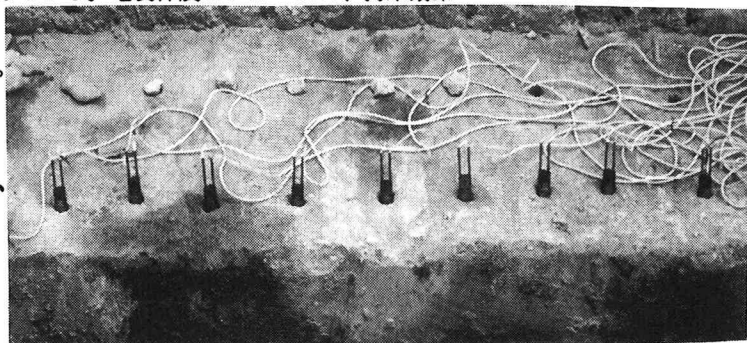


写真-5 無筋コンクリート基礎の破碎 (実験状況)