形状記憶合金を圧力源とした岩石静的破砕器 に関する研究*

金子勝比古¹ 西田 稔²
稲葉 力³ 山内 清⁴

[UDC 624.121.52]

Static Rock Splitter Using Shape Memory Alloy as Pressure Source

by Katsuhiko KANEKO¹, Minoru NISHIDA², Tsutomu INABA² and Kiyoshi YAMAUCHI³

1. Faculty of Engineering, Kumamoto University, Kumamoto 860
2. Technical Research Institute, Nishimatsu Construction Co., Ltd.
3. Metal Division, Tokin Co., Kohriyama

A new kind of static rock splitter has been developed taking advantage of TiNi shape memory alloy which attains a maximum recovery force of about 600 MPa. The splitter consists of compressively prestrained TiNi rods and a pair of two-layered wedge type platens of steel, and requires no accessory equipments other than heating apparatus. To examine the performance of the splitter, theoretical analysis for the crack initiation and laboratory test using rocklike materials have been performed. It is confirmed that the splitter is not lacking in terms of performance. The breaking time is extremely shorter than those of conventional breaking processes.

KEY WORDS: Non-blasting Excavation, Static Rock Splitter, Shape Memory Alloy, TiNi Alloy

1. 緒 言

近年、都市部あるいは重要構造物近傍で岩石・コンクリートの破砕を行う機会が増大し、これに伴って無発破破砕工法の需要が増大してきている。そして、この目的のために種々の岩石静的破砕法が開発されてきているが、その多くはボアホールを利用し、その孔壁に圧縮载荷してボアホール孔壁から亀裂を伸長させ、岩石を破砕する形式のものである。このようなボアホールを利用した岩石静的破砕法としては、油圧セル、油圧くさび等の液圧式破砕装置を用いる方法¹⁾、静的破砕剤（膨張性セメント）を用いる方法²⁾等が開発・実用化されてきている。しかし、いずれの方法も、破砕能力、作業性、安全性等の点で一長一短があることが指摘されている³⁾。すなわち、液圧式破砕装置は破砕能力は高いが、ポンプ、バルブ制御装置等の比較的大きな周辺設備を要するため狭所での使用に適さない。それに対し、静的破砕剤は周辺設備を必要とせず簡便であるが、破砕能力に限界があり、破砕に要する時間も長くなる。これらの問題点は、破砕に使用する圧力源の問題に起因すると考えることもできる。従って、小型で载荷能力・载荷速度が高い圧力源が実用化されれば、上記の問題は解消されるものと思われる。

この点で、機能性材料の一種である形状記憶合金⁴⁾は極めて魅

力的なものである。現在実用化されている形状記憶合金の多くは軽量小型な線材あるいは板材で、合金に引張変形もしくは曲げ変形を与えた後の形状回復が利用されているが、合金が形状回復時に発生する力（回復力）を積極的に利用した例は極めて少ない⁵⁾。しかし、形状記憶合金の中でもTiNi合金の引張変形後の回復応力は最大で600MPaに達することが報告されている⁶⁾。従って、形状記憶合金の回復力を有効に発揮させることができれば、これを圧力源として利用することが可能となる。

筆者らは、上記の観点のもとに、形状記憶合金の圧力源としての利用を提案⁷⁾し、これを用いた岩石静的破砕器の開発を試みている⁸⁾。本論文は、この形状記憶合金を圧力源として利用した岩石静的破砕器開発のための基礎研究の成果を報告するものである。具体的には、まず、形状記憶合金の圧力源としての利用法について考察を加え、これに基づいて、破砕器の载荷様式を決定する。次に、破砕器設計のために、組成・熱処理条件がTiNi形状記憶合金の回復特性に及ぼす影響を実験的に明らかにするとともに、ボアホール孔壁からの亀裂発生条件について検討を加える。これらの結果に基づいて、破砕器を試作し、その実用性を確認する。

2. 形状記憶合金の破砕器圧力源としての利用法

形状記憶合金を圧力源（圧縮力発生装置）として利用する方法としては種々考えられるが、最も単純な形式は図1に示す2通りである。(a)は曲げ変形型の形状回復を利用し、上下の载荷板に圧縮力を伝達するものであり、(b)は圧縮変形後の形状回復（伸び型の形状回復）により圧縮力を発生させるものである。(a)の形式の形状記憶特性を合金に与えることは比較的容易であるが、この形

* 1991年5月7日受付 8月20日受理

1. 正会員 工博 熊本大学助教授 工学部材料開発工学科

2. 工博 熊本大学助教授 工学部材料開発工学科

3. 正会員 西松建設(株)技術研究所

4. (株)トーキン金属材料事業部

キーワード：無発破破砕工法，岩石静的破砕器，形状記憶合金，TiNi合金

Fig. 1 Two concepts of pressure source using shape memory alloy.

式では形状回復特性が合金部材の曲げ剛性に関係するため、大きな回復力を発生させることは困難であると予想される。実際、予備実験として、(a)の形式のTiNi合金を作成し、その回復力を調べたが、この形式で岩石を破碎する程の力を生じさせることは困難であることが確かめられた⁹⁾。従って、可能性のある形式は(b)のみとなるが、形状記憶合金に圧縮変形を与えた後の形状回復を利用した例はなく、また、その回復特性に関する実験報告例も極めて少ない。しかしながら、形状記憶合金は圧縮変形後も引張変形後と同様なメカニズムにより形状回復特性を示すことが理論的に明らかにされている¹⁰⁾。従って、これらの報告例に基づく、(b)の形式の形状記憶合金は固体圧力源としての利用の可能性を有すると考えることができる。

次に、現在実用化されているボアホールを利用した岩石静的破碎器の荷重様式は図2に示す4形式に分類される。(a)は静水圧荷重であり、水圧式破碎や静的破碎剤等を用いる場合に対応する。(b)は一軸荷重でありボアホールジャッキ型の油圧セルや油圧くさび等¹⁾に対応する。さらに、(c)および(d)は硬質ゴムスリーブ型の油圧セル等¹¹⁾¹²⁾に見られる形式である。ここで、(a)以外はすべて荷重板を介してボアホール孔壁に圧縮荷重を行う形式であるため、固体圧力源が使用可能である。従って、形状記憶合金を圧力源とする破碎器の荷重様式としては(b)~(d)の3形式が考えられるが、構造上最も簡単なものは(b)の形式である。そこで、以下では、(b)の一軸圧縮型の破碎器に問題を限定し、形状記憶合金を圧力源とした破碎器の開発を試みる。なお、形状記憶合金を破碎器圧力源として用いる場合の問題点は、(1)圧力源として最適な合金組成および処理条件が現状では未解明であること、(2)形状記憶合金はストロークに限界がある固体圧力源であるため、油圧系のものとは異なり、ボアホール孔壁への荷重力が孔壁の変形量に依存すること、の2つの点である。そこで、まず、3.および4.において、これらの問題に対して基礎的検討を加えることにする。

3. TiNi 形状記憶合金の回復特性

3.1 試料および実験方法

Fig. 2 Classification of static rock splitters with respect to their loading modes against borehole wall.

Table 1 Alloy compositions and heat treatment conditions of TiNi alloys.

Heat treatment	Alloy composition		
Solution treatment (800°C × 1h, W.Q.)	Ti-50.0Ni	Ti-50.5Ni	Ti-51.0Ni
Thermomechanical treatment (400°C × 1h, W.Q.)	Ti-50.0Ni	Ti-50.5Ni	Ti-51.0Ni
Aging treatment (800°C × 1h - 400°C × 1h, W.Q.)	—	Ti-50.5Ni	Ti-51.0Ni

実験に用いた形状記憶合金試料の組成・熱処理条件は表1に示すようである。形状記憶合金としては、現在実用化されているものの中で最も優れた回復特性が期待され、かつ、強度・耐腐食性の高いTiNi合金を選択し、Ti-50Ni、Ti-50.5NiおよびTi-51Niの3種類の合金を選定した⁴⁾。なお、組成式中の数字はNiの原子パーセントを示している。熱処理方法としては、各組成について形状記憶特性を有効に発現させると考えられている溶体化処理(800°C, W.Q.)、加工熱処理(400°C, W.Q.)および溶体化(800°C)後の時効処理(400°C, W.Q.)の3通りの方法⁴⁾を採用した。なお、活弧内は、TiNi合金の場合のこれら熱処理の温度を示し、W.Q.は水焼入れを示している。これらの熱処理により、試料は原寸法の形状を記憶することになる。一般に、これらの熱処理を行った合金はそれぞれ溶体化処理材、加工熱処理材および時効材と呼ばれる。また、幾つかの試料について、熱処理時間を変化させた実験を行ったが、明瞭な回復特性の改善は認められなかったため、ここでは、すべて、熱処理時間1時間の試料のみを記している。試料はすべて15mmφ×29mmの円柱試料である。

以上の試料を用いて圧縮変形を与えた後の加熱に伴う形状回復特性について実験的検討を行った。実験にはMTS材料試験機(最大容量50t)を用い、試験機ストロークを制御信号とした。荷重・変形測定には試験機内蔵のロードセルおよび変位計を用いた。また、試料の温度管理のために恒温水槽(温度制御範囲0~90°C)を自作し、これをMTS試験機に組み込んだ。実験では、まず、恒温水槽内に初期温度に設定し、その中に試料をセットした。そして、試料軸方向に2.5mmの圧縮変形(圧縮歪み8.6%)が生ずるまで荷重した後除荷を行い、荷重がほぼ0となった時点で軸方向変形を拘束した。この状態で恒温水槽内の温度を90°Cまで上昇させ、これにより、試料を加熱して回復力を発生させた。そして、温度を90°Cに保持した状態で、回復力が完全に発現したことを確認した後、試験機ストロークの手動操作により徐々に軸方向変形を回復させた。初期温度は0°Cから70°Cまで10°Cごとの8段階を設定したが、幾つかの試料については30~40°Cまでの4~5段階で実験を終了している。

3.2 回復力-回復変形特性

実験結果の一例として、Ti-51Ni加工熱処理材の初期温度0°Cにおける荷重-変形曲線を図3に示す。図中、単矢印を付した実線は初期圧縮における荷重・除荷曲線を示し、複矢印を付した実線は加熱に伴う回復力の発生および回復力-回復変形挙動を示している。図より、初期圧縮荷重により1mm程度の残留変形が生ずるが、加熱に伴う形状回復により、この残留変形が回復することがわかる。そこで、実験を行ったすべての試料について、最大回復力および最大回復変形量と初期温度との関係をまとめると図4および図5のようになる。ただし、最大回復力は軸変形拘束状態における回復力の最大値、最大回復変形量は荷重零における回

Fig. 3 An example of load-displacement and recovery force-recovery displacement curves of Ti-51Ni alloy with thermomechanical treatment. Single arrowed lines: initial loading and unloading curves; double arrowed lines: shape recovery behavior.

復変形量である。これらの図より、合金組成・熱処理条件により回復特性が顕著に異なるが、すべて、初期温度の上昇に伴って、最大回復力および最大回復変形量が低下することがわかる。また、図4より、Ti-51Ni 時効処理材の最大回復力は低温下で極めて大きな値（応力で約800MPa）を示すが、初期温度の上昇に伴って急激に低下すること、Ti-50.5Ni 加工熱処理材の最大回復力は初期温度0～30℃の範囲内ではほぼ一定の高い値（応力で約600MPa）を示すことなどがわかる。また、図5より、回復変形量はTi-50.5Ni の加工熱処理材および時効処理材が中でも大きな値（歪みで4～4.5%）を示していることがわかる。そこで、Ti-50.5Ni の加工熱処理材および時効処理材とTi-51Niの時効処理材の回復力-回復変形曲線を示すと図6のようである。ただし、図には初期温度が0、10、20、30℃の場合を示している。ここで、形状記憶合金を圧力源として利用するためには、回復力および回復変形量が大きく、かつ、回復変形に伴って回復力が持続する、すなわち、载荷剛性が低いことが必要である。また、作業性をも考慮すると、初期圧縮载荷が常温で実施できるものが望ましいことになる。従って、使用環境が10℃以下に限定されるのであれば、Ti-51Niの時効処理材はその回復力の高さから極めて有力なものとなり、また、ほぼ一定の回復力を保持することが要求される場合には、Ti-50.5Niの時効処理材がその载荷剛性の低さから有力なものとなるが、上記の要件すべてを勘案すると、今回の実験の範囲内ではTi-50.5Niの加工熱処理材が破砕器圧力源として最適であると判断される。なお、上述したように、TiNi 合金は通常の油圧系で発生し得る圧力に比較して極めて高い回復応力を示すが、回復歪み量が比較的

Fig. 4 Relationship between initial deformation temperature and the maximum recovery force of TiNi alloys. S.T.: solution treatment; T.T.: thermomechanical treatment; A.T.: aging treatment.

Fig. 5 Relationship between initial deformation temperature and the maximum recovery displacement of TiNi alloys. S.T.: solution treatment; T.T.: thermomechanical treatment; A.T.: aging treatment.

小さい点が問題である。従って、TiNi合金は载荷される側の剛性が高い場合には強力な圧力源となるが、剛性が低い場合にはその能力を発揮することができない点に注意を要する。

4. ポアホール周囲岩盤の応力解析

4・1 解析モデルおよび解析条件

図7(a)に示すような孔壁一軸载荷時のポアホール周囲岩盤内の応力状態および変形状態を分析し、孔壁から亀裂を発生させるための载荷力と変形量の関係を明らかにする。なお、この様な問題

Fig. 6 Recovery force-recovery displacement curves of TiNi alloys and effect of the initial deformation temperature on the recovery behavior.

(a) Conceptual view of the splitter. (b) Analytical model.

Fig. 7 Modeling of the static rock splitter using shape memory alloy.

は、載荷板を剛体と仮定して、Y方向に一定の強制変位を与える問題に置き換えるのが現実的であると考えられるが、この境界条件のもとで解析解を得ることは難解である。そこで、問題の簡略化のため、図7(a)の問題を、図7(b)に示すような、半径Rのボアホール内で中心角 2β の範囲に等分布荷重 p が作用する2次元平面歪み問題に置き換えることにした。この問題に対する弾性解はAiryの応力関数¹³⁾を用いて解くことができる⁹⁾。また、このようなボアホール孔壁からの亀裂の発生条件は上記の弾性解に特性距離破壊基準¹⁴⁾を適用することにより評価されることが知られている¹⁵⁾。そこで、以下では、この考えの元に亀裂発生に要する荷重、変形量と載荷角との関係を検討する。

4・2 亀裂発生条件

岩石静的破壊では、ボアホール孔壁から半径方向に引張亀裂を発生・伸長させる。この引張亀裂の発生はボアホール孔壁近傍の接線方向応力の集中と密接に関係する。ここで、ボアホール周囲岩盤中の接線方向応力 $\sigma_\theta(r, \theta)$ は次式と書ける。

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

ただし、 $\xi(r, \theta)$ は載荷角 β に依存した無次元接線方向応力で、弾性解から定められ、 $\beta = \pi/2$ で $\xi(R, \pi/2) = 2$ となる。計算結果の一例として、 $\beta = \pi/4$ の場合の $\xi(r, \theta)$ の分布を示すと図8のようである。図より、接線方向応力は載荷板上部の孔壁近傍では圧縮となるが、それ以外の領域では引張となり、最大引張応力が載荷板端部の孔壁上に生じていることがわかる。そこで、この引張応力の分布傾向を調べるために、 $\beta = \pi/6, \pi/3, \pi/2$ のそれぞれの場合について、 $\xi(r, \theta)$ と r との関係を θ をパラメータとし

Fig. 8 Contour map of tangential stress in rock mass around the borehole in the case of $\beta = \pi/4$. Numbers indicate the value of non-dimensional stress $\xi(r, \theta)$ defined by eq.(1).

Fig. 9 Distributions of tensile stress.

て示すと図9となる。図9より、いずれの場合も、載荷板端部の孔壁上に最大引張応力が生ずることがわかる。ここで、特性距離破壊基準に従うと、応力集中点から材料固有のある距離 η （特性距離）離れた点の応力が強度に達した時点で破壊が生ずることになる。また、特性距離 η は破壊靱性値 K_{IC} と引張強度 S_t を用いて(2)式で与えられる¹⁵⁾。

$$\eta = 1/2\pi \cdot (K_{IC}/S_t)^2 \quad (2)$$

(2)式に報告されている岩石の破壊靱性値と引張強度¹⁶⁾¹⁷⁾を代入し、特性距離 η の値を見積ると大略1.5~8mm程度となる。従って、ボアホール直径が後述するように45mm程度であれば $\eta/R = 0.07 \sim 0.36$ となるため、図9では $r/R = 1.07 \sim 1.36$ の範囲のみが問題となる。従って、この試算に基づくと、多くの場合、引張亀裂は $\theta = \pi/2$ の方向に発生すると考えることができる。また、 β の値がより小さくなると、載荷板端部の孔壁上に引張亀裂が発生する可能性とともに、載荷板上の孔壁周囲に圧縮破壊が生ずる可能性も増大する。従って、以下では主として $\beta = \pi/6 \sim \pi/2$ の範囲を検討の対象とし、孔壁からの亀裂発生は $\theta = \pm \pi/2$ の方向のみを考えることにする。

以上の考察に基づくと、亀裂発生条件は引張強度 S_t と特性距離 η を用いて(3)式となる。

$$\sigma_\theta(R + \eta, \pi/2) = S_t \quad (3)$$

ここで、孔軸方向の単位長さ当たりの載荷重 P は(4)式で与えられる。

$$P = 2R p \sin \beta \quad (4)$$

従って、(1), (3), (4)式より、亀裂発生に要する単位長さ当たりの荷重 P^* は(5)式で与えられることになる。

$$P^* = S_t \cdot R \cdot F(\eta/R) \quad (5)$$

ただし、 $F(\eta/R)$ は無次元関数であり、(6)式となる。

$$F(\eta/R) = \pi \sin \beta / \beta \xi(R + \eta, \pi/2) \quad (6)$$

また、関数 $F(\eta/R)$ の値を β をパラメータとして表わすと図10となる。従って、図10と(5)式により亀裂発生の荷重条件が与えられることになる。

Fig. 10 Effects of loading angle β on the value of function $F(\eta/R)$. η and R are the characteristic distance and borehole diameter, respectively.

 Fig. 11 Relationship between constant M and loading angle β .

次に、亀裂発生時の孔壁の変形について考える。いま、ポアホールの変形が $\theta=0$ における孔壁の半径方向変位 u_0 で代表されるものと仮定し、荷重に伴う孔径の変化率を u_0/R で与えることにする。孔径変化率 u_0/R と P との関係は岩盤のヤング率 E を用いて(7)式と書ける。

$$u_0/R = MP/ER \quad (7)$$

ただし、 E/M は岩盤の剛性に対応し、 M は岩盤のポアソン比 ν と荷重角 β により定まる定数となる。一例として $\nu=0.25$ の場合の M と β との関係を示すと図11のようである。図より、 β の値の減少に伴って岩盤の剛性は低下するが、 $\beta=\pi/4 \sim \pi/2$ の範囲では岩盤剛性はさほど変化しないことがわかる。(7)式で、 $P=P^*$ とおくと、亀裂発生時の孔径変化率 $(u_0/R)^*$ が求められる。従って、(5)式、(7)式と図11により、亀裂発生の変形条件が与えられることになる。

以上の結果を破碎器設計の観点で捉えると、 $F(\eta/R)$ および M の値が小さい構造が破碎器として望ましいことになる。この点では $\beta=\pi/2$ が最適条件となる。しかし、一方、荷重角が大きな場合には、図7(a)からもわかるように、荷重板間に装着できる形状記憶合金の長さが短くなり、これにより破碎器のストロークが減少する。すなわち、前述したように、圧力源となるTiNi合金は極めて高い回復応力を発生するが、回復歪み量は比較的小さいものであるため、破碎器のストロークを確保するには合金長さを長くする必要がある。従って、ここで目的とする破碎器のためには許容できる範囲内で荷重角を小さくする必要がある。このような条件と M の値が $\beta=\pi/4 \sim \pi/2$ の範囲でさほど変化しないことを考慮し、以下では、 $\beta=\pi/4$ の条件で破碎器を設計・試作することとした。

5. 破碎器の試作および性能の確認

3.および4.に示した基礎検討の結果を基にして、形状記憶合金を圧力源とした岩石静的破碎器を設計・試作した。設計にあたっては、上記の基準とともに、破碎器直径を通常の穿孔機で容易に穿孔できるポアホール径に適合させること、および、ポアホール孔壁の荒れや孔軸の偏心に対処するため、孔径に対して $\pm 5 \sim 10$

Fig. 12 External views of trial products.

Fig. 13 Schematic illustration of trial product B6.

%程度のクリアランスの調整が可能であること、の2つの要件を考慮した。

試作した破碎器は、図12に示す3形式であり、鋼製荷重板間に円柱形の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、これら3形式の破碎器をそれぞれB3、B6およびB9と呼ぶことにする。これらの破碎器は、すべて、45mm ϕ のポアホール用に設計され、荷重板中心角度 2β は90度、破碎器長さは、(B3)10cm、(B6)15cm、(B9)20cmである。使用されているTiNi合金はTi-50.5Ni加工熱処理材であり、直径はすべて15mm、長さは、(B3)29mm、(B6)27mm、(B9)23mmである。B3、B6およびB9の基本構造は同様であるため、一例として、B6の構造を示すと図13のようである。図に示すように、上下の荷重板はテーパ加工された2層の荷重板よりなり、これにより、破碎器とポアホール孔壁とのクリアランスが調整される。図には省略したが、TiNi合金周囲には合金加熱用のシーツヒータもしくはブロックヒータが装着される。実使用時の手順は次のようである。まず、初期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ポアホール内に挿入し、次に、内側荷重板を押し込んで孔壁に破碎器を密着させる。その後、ヒータに通電し、TiNi合金を加熱すると、合金は形状回復により回復力を発生する。これにより、孔壁から荷重軸と直交する方向に亀裂が伸長する。破碎終了後はTiNi合金を取り出し、再び、初期圧縮を与えれば、繰り返し使用ができる。

図6に示したTi-50.5Ni加工熱処理材の初期温度0℃の回復力-回復変形曲線と上記の設計値をもとにして、試作した破碎器の荷重能力を予測すると図14のようになる。ただし、単位破碎力

Fig. 14 Relationship between unit breaking force and stroke ratio of trial products. Unit breaking force and stroke ratio are defined as the ratio of total breaking force to breaker length and the ratio of stroke to breaker diameter, respectively.

Fig. 15 Mortar specimen broken by the trial product B3.
Specimen size: 40 × 40 × 33 cm; breaking time: 128s.

破砕器総荷重を破砕器長さで除したものであり、ストローク率は破砕器のストロークを破砕器直径で除したものである。すなわち、単位破砕力およびストローク率は破砕器性能として定義された量であるが、破砕器が孔壁と密着した状態にあれば、これらは、前述の単位長さ当たりの荷重 P および孔径変化率 u_0/R に対応する。図14より、単位破砕力は最大で3~5 MN/m (3~5 t/cm), 最大総荷重はそれぞれ(B3) 0.31MN, (B6) 0.63MN, (B9) 0.95MN となり、いずれも極めて高い载荷能力を有することがわかる。また、ストローク率は2~3%となり、この値は液圧式のものに比較して小さいことは否めない。

次に、4に示した亀裂発生条件に基づいて、本破砕器の破砕能力について検討する。いま、一例として、中硬岩および超硬岩の破砕を想定し、それらの物性値を(中硬岩) $S_t = 2 \text{ MPa}$, $K_{IC} = 0.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $E = 10 \text{ GPa}$, (超硬岩) $S_t = 20 \text{ MPa}$, $K_{IC} = 3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $E = 40 \text{ GPa}$ と仮定する。これらの物性値を用いて、亀裂発生に要する単位破砕力およびストローク率を求めると、それぞれ、(中硬岩) 0.14 MN/m, 0.06%, (超硬岩) 0.81 MN/m, 0.09% となる。これらの値と図14とを比較すると、破砕器の能力は亀裂発生基準をはるかに上まわっていることがわかる。この結果は、破砕器と同程度の厚さの岩石であれば、すべて容易に亀裂が生ずることを示している。ここで、試作した破砕器は亀裂発生に対しては過剰な能力を有していることになるが、この過剰分は発生した亀裂の伸長に費やされるであろう。また、亀裂発生条件は2次元問題として解析を行ったが、現実には、破砕対象とする岩石の厚さが破砕器長さより大きくなる場合が一般的であると考えられる。すなわち、試作破砕器の有する能力はこれら一般の問題に対処するために必要なものであると考えられる。

そこで、これらの問題を確認するために、室内実験を実施した。用いた試料は、モルタル(40 cm × 40 cm × 33 cm)、コンクリート(30 cm × 30 cm × 30 cm)および花崗岩(30 cm × 30 cm × 30 cm)であり、それぞれ試料中央に45 mmφのボアホールを穿孔して、破砕器をセットした。なお、これら岩質材料の圧裂引張強度およびヤング率は、それぞれ、モルタル 2.5 MPa, 15 GPa, コンクリート 4 MPa, 25 GPa, 花崗岩 10 MPa, 35 GPa であった。破砕器としては、B3 および B6 を使用したが、すべての試料ともに完全に破断した。実験結果の一例として、B3破砕器によるモルタル試料の破断状況を図15に示す。TiNi合金の加熱にはシーズヒータ(300VA)を用いたが、破砕時間は、すべてヒータ通電後3分以内であり、B6による破砕時間はB3による破砕時間の略2/3であった。なお、破砕時間は加熱の効率に関係するため、加熱装置の熱効率を高めれば、より短縮されるものと考えられる(ちなみに、熱湯を直接ボアホール内の破砕器にかけて合金を加熱した場合には10秒以内で試料は破

断している)。以上の結果から、試作した破砕器は、実用上十分な破砕能力を有し、破砕時間も極めて短時間であることが確認されたものとする。

6. 結 言

本論文では、TiNi形状記憶合金の圧力源としての利用法を提案するとともに、これを利用した岩石静的破砕器の開発の試みを紹介した。本研究で得られた結果をまとめると次のようである。

(1) 種々の組成・熱処理条件のTiNi合金について、圧縮変形後の回復力-回復変形特性を実験的に検討し、本実験の範囲内では、Ti-50.5Ni加工熱処理材が常温下における圧力源として最適であることを明らかにした。特に、その回復応力は最大で600MPaに達することを示した。

(2) ボアホール孔壁に一軸圧縮载荷を行う場合の、亀裂発生条件と载荷角との関係について考察を加え、この結果をもとにして、TiNi合金を圧力源とした岩石静的破砕器を設計・試作した。試作器は最大単位破砕力3~5 t/cm, 最大ストローク率2~3%となり、超硬岩破砕も可能な十分な破砕能力を有することを示した。

(3) 岩質材料を用いた破砕実験により、試作した破砕器の能力を実験的に確認した。特に、すべての供試体ともに破断に要した時間は数分以内であった。

以上示したように、ここで開発した破砕器は、従来法に比較して、小型でかつ強力なものであるという利点を有しているが、実用化のためには今後さらなる改良が望まれる。なお、本研究ではTiNi合金の一方方向形状回復特性を利用したが、可逆形状記憶特性の発現法とその利用が今後の課題である。

謝辞 本研究にご協力頂いた熊本大学大学院浜田元君(現(株)奥村組)ならびに西松建設(株)技術研究所および(株)トーキン金属事業部の関係者各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 例えば、本田裕夫・萩森健治・古川浩平・中川浩二：土木学会論文集, 379/VI-6, 247~256, (1987)
- 2) 例えば、Fukuda, K., Kumasaka, H., Ohara, V. and Ishijima, Y.: Proc. Int. Cong. ISRM, Montreal (Canada), 1, 625~628, (1987)
- 3) 中川浩二：橋梁, 2, 42~46, (1987)
- 4) 例えば、舟久保康康編：形状記憶合金, 産業図書, (1984)
- 5) 例えば、大阪科学技術センター：形状記憶合金とその使い方, 日刊工業新聞社, (1987)
- 6) Jackson, C. M., Wagner, H. J. and Wasilewski, R. J.: NA-SASP 5110, (1972)
- 7) Kaneko, K. and Nishida, M.: Science & Technology in Japan, 8, 31, 52~54, (1989)
- 8) Nishida, M., Kaneko, K., Inaba, T., Hirata, A. and Yamauchi, K.: Proc. 6th Int. Conf. Martensitic Transformations, 2, 711~716, (1989)
- 9) 金子勝比古・西田 稔・稲葉 力・山内 清：平成元年度資源・素材学会春季大会講演要旨集, 239~240, (1989)
- 10) Otsuka, K. and Wayman, C. M.: Reviews on the deformation behavior of materials, 2 (2), Freund Publ. House, (1977)
- 11) 和久昭正・門田俊一・大倉吉雅・野間達也・村山秀幸：第20回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, 116~120, (1988)
- 12) 野間達也・門田俊一・村山秀幸・上田志夫・近藤三樹夫・立浪敬造：第8回岩の力学国内シンポジウム論文集, 181~186, (1990)
- 13) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N.: Theory of elasticity (3rd edition), McGraw-Hill, (1970)
- 14) Nuismer, R. J. and Whitney, J. M.: ASTM STP, 117~142, (1975)
- 15) 伊藤高敏・林 一夫・阿部博之：資源・素材学会誌, 106 [3], 115~119, (1990)
- 16) 日本機械学会編：岩石破壊力学とその応用, コロナ社, (1989)
- 17) Rossmann, H. P.: Rock fracture mechanics, Springer-Verlag, (1983)