

一定応力下における乾湿繰返しを受けた軟岩の強度変形特性

Characterization of strength and deformation behavior of soft rock exposed to alternated dry and wet under constant stresses

楠見 晴重*・松下 千加生**・片江 敏雄***・西田 一彦****

Harushige KUSUMI, Chikao MATSUSHITA, Toshio KATAE and Kazuhiko NISHIDA

The surface of cutting rock slope has exposed to alternate dry and wet conditions for a long time, and they are weathered. We developed direct shear testing apparatus that can expose soft rock specimen to alternate dry and wet conditions under constant shear and normal stress, and are investigated about relationship between deformation properties and the shear behavior of soft rock under dry and wet conditions.

1.はじめに

軟岩で構成される構造物は、建設中はたとえ安定していても、完成後時間が経過してから崩壊を起こすケースが多い。これは、軟岩は他の岩種に比べて風化等の二次的な強度低下を引き起こしやすいためであり、その原因として、降雨や湧水等による湿潤と、日射等による乾燥の繰返し作用によるものがもっとも大きいと推測される。したがって、長期間にわたる軟岩で構成される構造物の安定性について検討する際には、軟岩の乾湿繰返しなどによる風化を考慮に入れた力学特性について検討する必要がある。

従来、軟岩に関しては、クリープ特性やせん断特性などの研究がそれぞれ単独で行われてきた¹⁾⁵⁾。しかし、これらの試験はすべてある一定の含水状態下で行われており、実際の岩盤構造物で問題となっている、乾湿繰返し等を受けることによる岩盤の風化の影響は考慮されていない。

本研究では、一定垂直応力、一定せん断応力を軟岩供試体に負荷させた状態下で乾湿繰返しを行えるせん断試験機を開発し、これまでに軟岩のせん断挙動についてエネルギー的な観点から検討を行ってきた⁶⁾⁷⁾。本論文では、一定せん断応力、および一定垂直応力下で乾湿繰返しを受けた軟岩供試体の乾湿繰返し中の変形特性、および乾湿繰返し後の強度低

* 正会員 工博 関西大学助教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

** 正会員 工修 和歌山県 日高振興局 建設部 (〒644-0011 御坊市湯川町財部 651)

*** 学生会員 関西大学大学院 工学研究科博士前期課程土木工学専攻 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

**** 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

下特性について主として検討を行った。さらに、乾湿繰返し中の変形特性、および乾湿繰返し後の強度低下特性に及ぼす乾湿繰返し回数の影響について検討を行った。

2. 供試体および試験装置

本研究では、栃木県宇都宮市郊外で産出される大谷凝灰岩（大谷石）を供試体として用いた。表-1に大谷石の諸物性値について示す。大谷石の一軸圧縮強度は、湿潤状態では乾燥状態と比較すると、約32%の減少が認められた。さらに吸水率、および有効間隙率は、それぞれ31%、41%と非常に高く、水分の影響を顕著に受ける岩石であることが推測される。

図-1は、本研究で使用したせん断試験機を表している。本試験機は、せん断荷重、垂直荷重を供試体に荷重させた状態で乾湿繰返し試験を行うことが可能である。また、乾湿繰返し試験中において湿潤状態では、せん断箱の外側にある水槽に水を満たすことによって供試体に水を浸透させ、乾燥状態では、いったん水槽から水を排水した後にその周りを金属製の乾燥箱で覆い、ヒーターによって温風を箱の内部に送り込むことによって供試体を乾燥させた。なお、乾燥箱内部は、サーモスタットにより90℃一定に保った。

表-1 大谷石の諸物性値

一軸圧縮強度(乾燥状態)(MPa)	13.78
一軸圧縮強度(湿潤状態)(MPa)	9.39
吸水率(%)	30.72
有効間隙率(%)	41.13
耐スレーキング性指数(%)	94.12

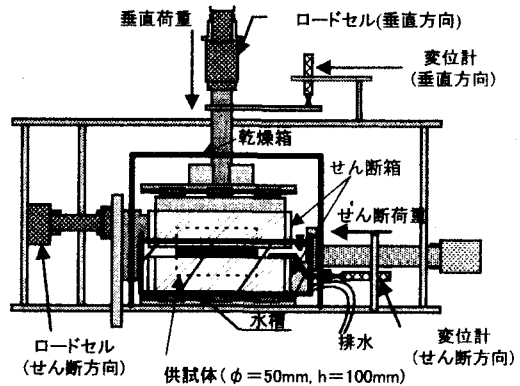


図-1 一面せん断試験機

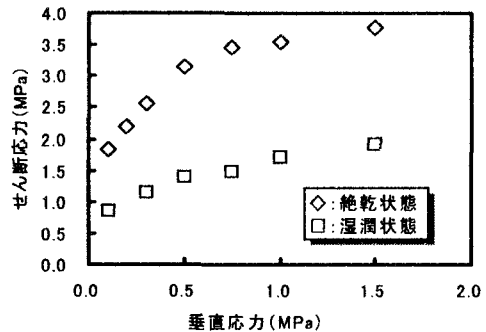


図-2 乾湿繰返しを受けていない供試体の強度特性

3. 供試体の強度特性

図-2は、乾湿繰返しを受けていない大谷石供試体の強度特性について表している。この図から、絶乾状態にある供試体のせん断強度は、垂直応力の増加に伴って曲線的な増加を示すのに対し、湿潤状態下にある供試体のせん断強度は、垂直応力の増加に伴って乾燥状態に比べると直線的な傾向が高くなっている。また本研究において、乾湿繰返し中に供試体に与える一定せん断応力の大きさは、この湿潤状態の破壊包絡線を基準とする。したがって湿潤状態下の大谷石の破壊包絡線は直線に近似させた。また、せん断強度は湿潤状態では絶乾状態と比較し、約27%~64%の低下がみられた。

4.実験方法

本実験では、絶乾状態にした供試体をせん断箱にセットし、供試体に 11 通りの応力条件下でせん断応力、垂直応力を载荷させる。また、初めに载荷した応力は乾湿試験終了まで一定とする。载荷条件は、垂直応力を固定し、せん断応力を変化させた場合と、応力比 (α) を固定し、垂直応力を変化させた場合の 2 通り設定した。これらの载荷条件を設定することによって、供試体の乾湿繰返し中の変形特性、および乾湿繰返し後の強度低下特性に及ぼすせん断応力、および垂直応力の影響について検討を行った。ここで、応力比とは、図-3 に示すように乾湿の履歴を受けていない供試体の湿潤状態下におけるせん断強度 (τ_{FW}) を 1.0 とした時の、乾湿繰返し中に载荷する一定せん断応力 (τ_c) の比を示している。以降では、乾湿繰返し中に载荷されるせん断応力は応力比 (α) を用いて示す。

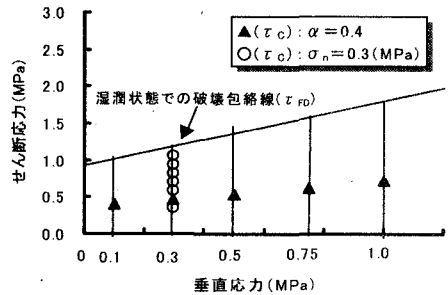


図-3 応力载荷条件

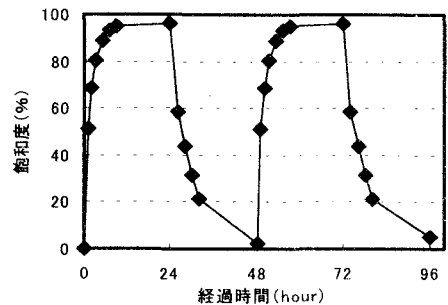


図-4 飽和度の経時変化 ($\sigma_n=0.3\text{MPa}$)

垂直応力を一定にし、せん断応力を変化さ

せる試験では、0.3MPa の垂直応力下でせん断応力を、応力比 (α) = 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 の 7 通り設定した。なお、これら設定した垂直応力、応力比の値については、具体的な岩盤構造物を想定して決めておらず、軟岩の乾湿繰返し挙動に与える応力条件を明らかにするために決めたものである。これらの応力状態下で、乾湿繰返しを 2 サイクル行った。さらに、応力比 (α) = 0.4、0.6 のせん断応力下では、5 サイクルの乾湿繰返しを行い、乾湿繰返し回数の影響について検討を行った。また、応力比を一定にし、垂直応力を変化させる試験では、垂直応力を 0.1、0.3、0.5、0.75、1.0MPa の 5 通り設定し、それぞれの垂直応力下において、応力比 0.4 に相当するせん断応力を供試体に载荷し、乾湿繰返しを 2 サイクル行った。乾湿繰返し試験終了後は、乾湿繰返し試験中に破壊しなかった供試体に対し、引き続き 0.1mm/min の変位制御のせん断試験を行い、供試体を破壊させ、乾湿繰返しに伴う強度低下特性について検討を行った。また、乾湿繰返し試験に先立ち、せん断試験機を使用して乾燥・吸水試験を行った。図-4 は、乾燥・吸水試験によって得られた乾燥過程、および湿潤過程における供試体の飽和度と経過時間の関係について、垂直応力が 0.3MPa のときのものを表している。この図から、供試体の飽和度は含水状態が乾燥から湿潤、または湿潤から乾燥に移行した直後に急激な増加、減少傾向がみられ、24 時間の湿潤過程ではほぼ飽和状態となり、24 時間の乾燥過程で、ほぼ絶乾状態に至ることが認められた。この結果から、乾湿繰返し試験では乾燥時間を 24 時間、湿潤時間を 24 時間とし、これを 1 サイクルとした。

5.乾湿繰返し中のせん断変形特性

(1) せん断変形特性に及ぼすせん断応力の影響

図-5は、垂直応力 0.3MPa の条件下で 2 サイクルの乾湿繰返しを行った供試体の乾湿繰返し中のせん断変位比 (u/u_{AP}) の経時変化について応力比別に表している。ここで示すせん断変位は、乾湿繰返し中に計測されるせん断変位 (u) を、乾湿繰返し後において、供試体が乾燥状態で破壊したときのせん断変位 (u_{AP}) によって正規化したものである。また、図中の W は湿潤状態、D は乾燥状態を表している。この図から、乾湿繰返し中の供試体のせん断変位は、乾燥状態から湿潤状態、湿潤状態から乾燥状態に移行した直後に、それぞれ急激な増加、減少傾向が認められた。また、供試体のせん断変位は、時間の経過とともに増加傾向を示し、応力比 0.6 以上のせん断応力下では、その傾向は顕著に認められた。特に応力比 0.7 以上のせん断応力下では、乾湿繰返し中の湿潤状態で供試体は破壊に至り、破壊までの時間は応力比が高いほど短くなる傾向が認められた。図-6、図-7 は、図-5 における乾湿 1 サイクル目および、2 サイクル目の湿潤状態における供試体のせん断変位比をそれぞれ表したものである。図-6 から、1 サイクル目の湿潤状態では、供試体のせん断変位比は応力比の増加に伴って指数関数的な増加を示し、応力比が高いほどその影響はせん断変位比に顕著に現れることが認められた。しかし、図-7 に示すように 2 サイクル目の湿潤状態においては、せん断変位比はある応力を境に全く異なった挙動を示した。つまり、応力比 0.5 以下のせん断応力下では 1 サイクル目と 2 サイクル目のせん断変位比にあまり大きな変化はみられないが、応力比 0.6 以上のせん断応力下では、1 サイクル目に比べ 2 サイクル目のせん断変位比は大きな増加を示し、応力比の増加に伴ってその傾向は顕著に現れた。

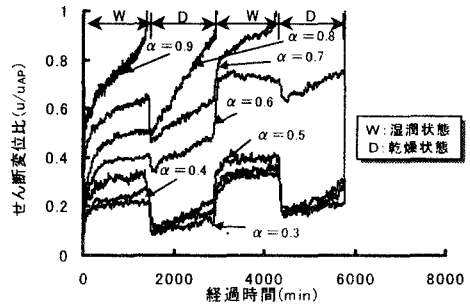


図-5 せん断変位比の経時変化 ($\sigma_n = 0.3\text{MPa}$)

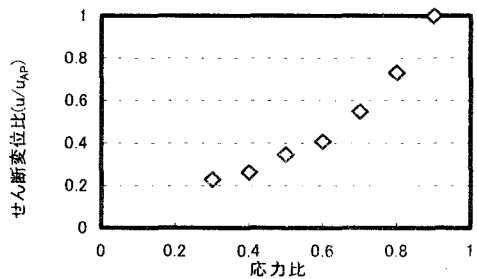


図-6 応力比とせん断変位比の関係
(1 サイクル湿潤状態)

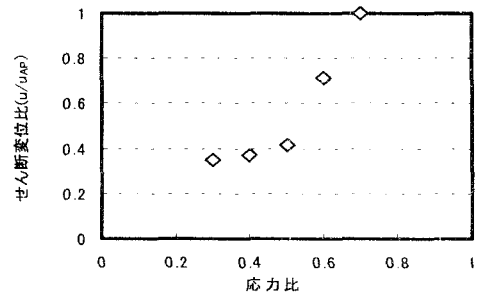


図-7 応力比とせん断変位比の関係
(2 サイクル湿潤状態)

(2) せん断変形特性に及ぼす乾湿繰返し回数の影響

図-8は、垂直応力 0.3MPa における応力比 0.4、および応力比 0.6 のせん断応力下で 5 サイクルの乾湿繰返しを受けた供試体の乾湿繰返し中のせん断変位 (u/u_{AP}) の経時変化について表している。この図から、乾湿繰返し回数の増加に伴ってそれぞれの応力比条件下にあるせん断変位は全く異なった挙動を示した。すなわち、応力比 0.6 のせん断応力下に

ある供試体のせん断変位は、乾湿繰返しに伴って増加・減少を繰返しながら、時間の経過に伴って直線的な増加傾向を示し、5 サイクル目の湿潤状態で破壊したのに対し、応力比 0.4 のせん断応力下にある供試体のせん断変位は、時間の経過に伴った増加傾向は顕著にみられなかった。これは急激な乾湿繰返しによって供試体の強度が落ちたために、実際载荷した応力が限界応力を超えたためである。図-9 は、垂直応力 0.3MPa のときの乾湿繰返し中のせん断変位の変化量 (Δu) をピークせん断強度時のせん断変位 (u_{AP}) で正規化した値 ($\Delta u / u_{AP}$) と乾湿繰返し回数との関係について表したものである。乾湿繰返し中における供試体のせん断変位の変加量は、乾湿 1 サイクル目から 2 サイクル目にかけては、全体的に減少傾向がみられた。3 サイクル目以降は、応力比 0.4 のせん断に応力下では、せん断変位の増加量はさらに減少し、0 に近い数値を示すが、応力比 0.6 のせん断応力下では、乾湿繰返し回数の増加に伴って直線的な増加を示している。

6. 乾湿繰返し後の強度低下特性

図-10 は、無载荷状態、および一定応力下で 2 サイクルの乾湿繰返しを受けた供試体の強度低下率について表している。ここで強度低下率とは、式-①によって示される。つまり、乾湿繰返し前の供試体のせん断強度 (τ_{FD}) に対して、乾湿繰返し中に減少した強度の割合を百分率で表したものである。

$$\text{強度低下率(A)} : (1 - \tau_{AP} / \tau_{FD}) \times 100(\%) \quad \dots \text{①}$$

τ_{AP} : 乾湿繰返し後の乾燥状態における供試体のせん断強度

τ_{FD} : 乾湿繰返し前の乾燥状態における供試体のせん断強度

この図から、2 サイクルの乾湿繰返しを受けた供試体の強度低下率は、約 18% から 48% と比較的大きな値を示している。また、応力比 0.4 以上のせん断応力下では、垂直応力を受けているにもかかわらず、無载荷状態下にある供試体よりも大きな強度低下率を示している。このことから、垂直応力を受けた供試体についても大きなせん断応力を载荷することによって大きな強度低下を示すことが認められた。図-11 は、垂直応力 0.3MPa、応力比

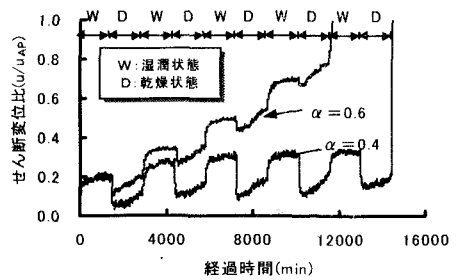


図-8 せん断変位比の経時変化
(5 サイクル、 $\sigma_n = 0.3\text{MPa}$)

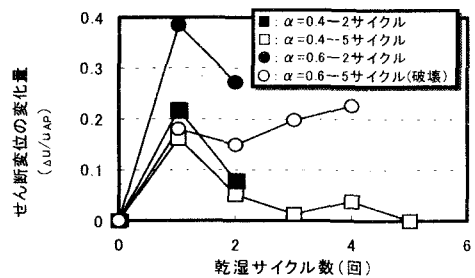


図-9 乾湿サイクル数とせん断変位の変化量
($\sigma_n = 0.3\text{MPa}$)

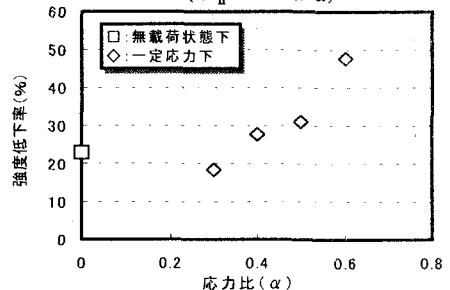


図-10 応力比と強度低下率の関係
($\sigma_n = 0.3\text{MPa}$)

0.4 の条件下で乾湿繰返しを受けた供試体の強度低下率と乾湿繰返し回数について表している。この図から、供試体の強度低下率は、乾湿繰返し回数の増加に伴って増加傾向を示すが、5 サイクルの乾湿繰返しを行った供試体は、2 サイクルの乾湿繰返しを行った供試体に比べると、強度低下率の増加は顕著に現れなかった。これから、応力比 0.4 以下の低い応力比条件下では、乾湿繰返し回数の増加は供試体の強度低下に大きな影響を与えない結果が得られた。しかしこの点については、さらに検討する必要がある。

7.破壊包絡線

図-12 は、応力比 0.4 のせん断応力下で乾湿繰返しを受けた供試体と、乾湿繰返しを受けていない供試体の強度特性と垂直応力の関係を Mohr-Coulomb の破壊基準式によって近似したものである。一般に軟岩の破壊包絡線は、曲線近似で表される⁸⁾が、この図から、乾湿繰返しを受けていない供試体のせん断強度は、垂直応力 0.5MPa を境とする 2 本の破壊包絡線によって近似できることがわかった。乾湿繰返しを受けた供試体のせん断強度は、垂直応力の増加に伴って直線的な増加傾向を示した。また、乾湿前は軟岩の結合力が破壊されていない場合の強度特性、乾湿後は結合力が破壊されて、土に近い強度特性を示している。図-13 は、応力比 0.4 のせん断応力下で乾湿繰返しを受けた供試体の強度低下率と垂直応力の関係について表したものである。この図から、応力比 0.4 のせん断応力下で乾湿繰返しを受けた供試体の強度低下率は、約 5~35%であった。また強度低下率は、0.5MPa の垂直応力下で最も高い値を示している。これは、図-12 に示したように、乾湿繰返しを受けた軟岩と受けない軟岩の破壊包絡線の形状が異なることに起因している。すなわち乾湿繰返しを受けない軟岩の破壊包絡線は 2 本の直線からなり、その遷移点垂直応力が 0.5MPa のときである。そして、これらの勾配 (ϕ) は、垂直応力が高くなるほど小さくなっている。これは 0.5MPa より大きい垂直応力下では、軟岩内の結合力が垂直応力によって破壊されていることに起因していると考えられる。これに対して、乾湿繰返しを受けた軟岩の破壊包絡線は、1 本の直線となっていることから、乾湿繰返しを受けたことによって結合力が失われたものと考えられる。したがってこの結果より、乾湿繰返しを受けた

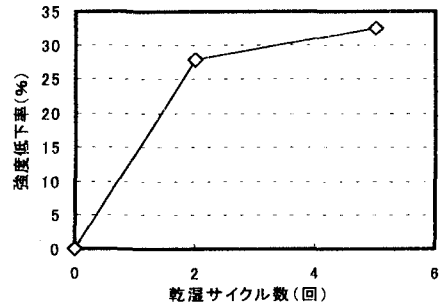


図-11 乾湿サイクル数と強度低下率の関係 ($\sigma_n=0.3\text{MPa}$ 、 $\alpha=0.4$)

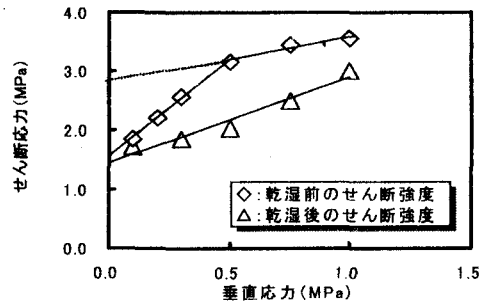


図-12 破壊包絡線 ($\alpha=0.4$)

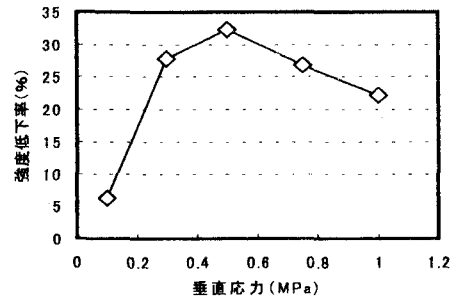


図-13 垂直応力と強度低下率の関係 ($\alpha=0.4$)

軟岩の強度低下率は、図-13 に示したように、垂直応力 0.5MPa で最大となったものと考えられ、これは軟岩で構成された構造物の長期安定を考慮する際に寄与できるものと考えられる。これによって乾湿繰返し中の変形挙動と応力の関係が明らかとなり、また一定の応力を受けている軟岩が乾湿繰返しを受けた後の強度低下の特性についても解明することができた。

8.まとめ

本研究では、軟岩の乾湿繰返し中の変形特性および、乾湿繰返し後のせん断強度変形特性について検討を行ったものである。これらのことをまとめると次の2点になる。①垂直応力を一定としたとき、乾湿繰返し中の変形挙動は、応力比が 0.6 より大きくなると、せん断変位が時間とともに増加する。応力比が 0.7 以上になると、乾湿繰返し回数が 2 回未満で供試体は破壊に至った。②応力比を一定としたとき、乾湿繰返しを受けた軟岩の強度低下率は、垂直応力が 0.5MPa のとき最大となり、これは上述した破壊包絡線の形状によるものであることが認められた。

また、本研究の乾湿繰返しの条件は、実際の自然界よりも非常に過酷な条件下で行っていることから、数十年かかって乾湿繰返しを受けた軟岩の劣化を数日で再現させていることになる。軟岩を対象とした構造物を永久構造物として設計するためには、劣化をも考慮した設計法の確立が望まれるが、本研究の成果はそのような設計法に寄与できるものと期待される。

9.参考文献

- 1) 赤井浩一，足立紀尚，西 好一：堆積軟岩（多孔質凝灰岩）の弾・塑性挙動，土木学会論文報告集，第 271 号，pp.83-95，1978.
- 2) 横山幸満，今泉繁良，上野勝利，水沼孝恵：大谷地区空洞陥没のメカニズム，土木学会論文集，No.568，Ⅲ-39，pp.113-123，1997.
- 3) 赤井浩一，足立紀尚，西 好一：堆積軟岩（多孔質凝灰岩）の時間依存性と構成式，土木学会論文報告集，第 282 号，pp.75-87，1979.
- 4) 山下 秀，杉本文男，山内 優，川辺金光：大谷石のクリープ特性とクリープ課程について，資源と素材，Vol.110，pp.875-882，1994.
- 5) 大久保誠介，秋 哲淵：気乾状態と湿潤状態での田下凝灰岩ならびに大谷凝灰岩の一軸圧縮クリープ，材料，Vol.43，No.490，pp.819-825，1994.
- 6) 楠見晴重，峰 之久，松下千加生，西田一彦：一定せん断応力を受ける軟岩の乾湿繰返し下におけるせん断挙動，第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，土木学会，pp.37-42，1998.
- 7) H.Kusumi, K.Nishida, C.Matsushita and K.Teraoka :Shear behavior of soft rock exposed to alternated dry and wet under constant stresses ,Proc.the 2nd International Symposium on Hard Soils – Soft Rocks,pp.253-258,1998.
- 8) 土質工学編：土質基礎工学ライブラリー-30 堆積軟岩の工学的性質とその応用，土質工学会，pp.69-116，1987.