

(20) 溶結凝灰岩の風化の定量的評価に関する研究

Study on quantitative evaluation of weathering of welded tuff

江崎哲郎*・蔣 宇静**・亀田伸裕***・森 信之****・○吉田 良*****・姜 開君*****

Tetsuro ESAKI, Yujing JIANG, Nobuhiro KAMEDA, Nobuyuki MORI, ○Ryo Yoshida, and Kaijun JIANG

The welded tuff has been widely distributed in southern Kyushu and has been widely used as a kind of construction material in stone bridges or shore protections since long age. But as the time past, the construction material gradually lost its original strength due to the weathering, which has raised a problem to us about how to save or maintain the existing historical rock structures.

In this research, the contact stiffness test, and the attrition test and the other kinds of test which have a possibility to evaluate the weathering were carried out with the sample from the blocks of Takeno arch bridge in order to grasp the weathering behavior of the welded tuff. The results show that the blocks have been most seriously weathered within the depth about 2 cm from the surface, this is very similar to the survey on fall depth by weathering from the surface of the historical rock structures with the same age as that of the Takeno arch bridge.

1. はじめに

近年、現存する石造建造物の歴史的な遺産としての価値が評価されるようになり、その維持管理・保存が重要な課題となっている。また、放射性廃棄物の地層処分場のように超長期にわたって供用される岩盤を利用する建造物の安定性についてもその定量的評価や維持管理に関する技術的検討が必要となってきた。しかし、これらの建造物の劣化の主たる原因である風化に関する研究は、地質学的・化学的評価に関するものは数多くなされてきたが、物理や力学と相互に比較できるものは少なく露出表面からの微量な風化度の分布を判別する方法はないのが現状である。

本研究では、歴史的に南九州に石材として多用されている溶結凝灰岩を対象とし、建造物として長年月にわたって使用されてきた石材の表面からの風化深さを知るために、従来からの非破壊試験や新しい力学試験等さまざまな方法による試験を実施しその可能性を検討するとともに、その中から有効な調査方法を提案し定量的な評価を行った。

2. 溶結凝灰岩の概要

南九州に石材産出層として分布する溶結凝灰岩は、約30万年前から50万年前にかけて主に鹿児島湾を軸とする線上で活動した始良・阿多および加久藤火山による火砕砕片によって生成された堆積物である。溶結凝灰岩は一般に材質

が柔らかいことから加工性に富み、産出箇所も多く、また適度な強度があるため、塀や倉庫のほか石橋や護岸の材料として用いられてきた。

室内における原石材の物理・力学試験の結果では、溶結凝灰岩の単位体積重量は 2gf/cm^3 前後と軽く、間隙率は14~32%と非常に大きい、それに比べて圧縮強度は軟質部と硬質部では数倍異なるものの、一般に大きく $115\sim 749\text{kgf/cm}^2$ でコンクリートと同程度を示す¹⁾。

3. 石材としての溶結凝灰岩の風化状況の評価

3. 1 試験の概要

本研究では、溶結凝灰岩の風化の状況を把握するために、平成5年8月6日に集中豪雨で流失した鹿児島市甲突川にかかる五石橋のうち武之橋の小野石硬質部に相当するアーチ部磨石材（原石山から切り出して147年経過）を試験体として用いて、従来から行われてきた非破壊試験としてシュミットロックハンマー反発度試験、針貫入試験、ショアー硬度試験、弾性波速度試験を行い、その後新しい試験方法として接触面剛性試験とすり減り試験を実施し、アーチ部接触面から深さ方向（ここに、深さ方向は表面から石材の奥への方向を指す）への強度分布を検討した。また試験体は磨石材接触面表面から25cmの深さまでの角柱試料棒として採取しており、各試験は接触面から深さ方向

*	正会員	工博	九州大学教授	工学部環境システム工学研究センター
**	正会員	工博	九州大学助教授	工学部環境システム工学研究センター
***	正会員	工博	九州共立大学教授	
****	正会員	理博	九州共立大学講師	
*****	学生会員		九州大学	工学部環境システム工学研究センター

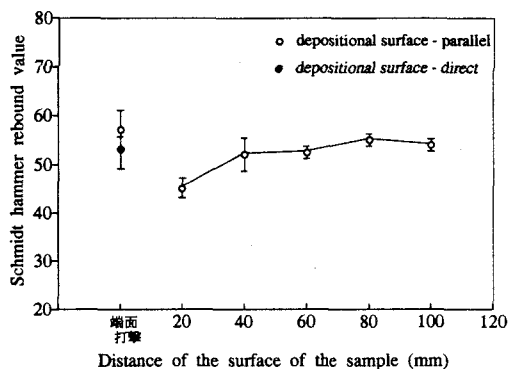


Fig.1 Relationship between Schmidt hammer rebound value and distance of the surface of the sample.

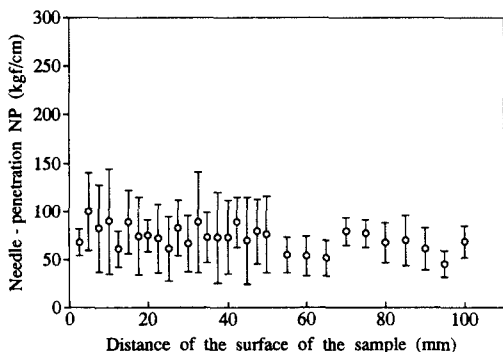


Fig.2 Relationship between Needle - penetration NP and distance of the surface of the sample.

にそれぞれ行われた。また、熱赤外線カメラによる温度変化測定を実施し風化が石材内部に与える影響を考察した。

3. 2 従来からの非破壊試験

(a) シュミットロックハンマー反発度試験

本試験器は通常のコンクリート用シュミットハンマーの先端部に直径2cmの異形チップを付けたもので、シュミットハンマーで反発しにくい軟岩領域でも反発するように工夫した。Fig.1にその試験結果を示す。同図によると、2cm以降右上がりの傾向を示している。また、試料表面の値については堆積面がその打撃方向と直交する試験体の末端を打撃して求めたもので、この値が大きくなるのはその表面が接触面のままで研磨状態も悪く、試験に際してハンマー先端がきちんと当たらなかったのが原因の一つであろうと考える。

(b) 針貫入試験

本試験はボケット型針貫入試験器を用いて行った。針は $\phi=0.84\text{mm}$ の本綿針を用いた。試験対象点に硬質な安山岩等の礫があったり、逆に軟質な軽石礫が存在している場合はその値を除外した。さらにデータの整理に際しては、針の貫入量が数mmであるため、数mmの貫入に要する荷重を1cm貫入に要する荷重に換算した。Fig.2にその試験結果を示す。同図より、針貫入量試験では風化の影響は分か

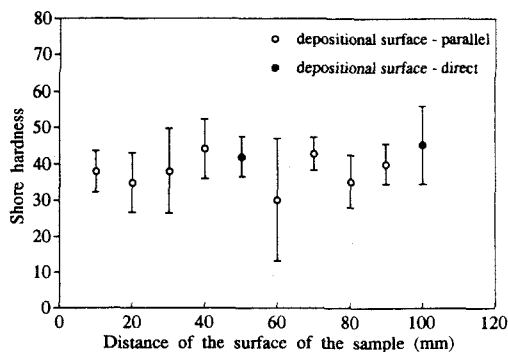


Fig.3 Relationship between Shore hardness and distance of the surface of the sample.

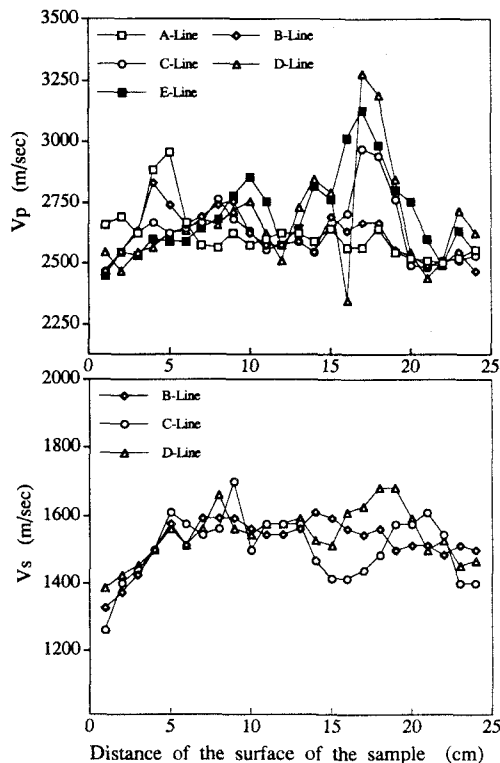


Fig.4 Relationship between wave velocity and distance of the surface of the sample with A~E Line.

らなかった。

(c) ショアー硬度試験

本試験はショアー硬度試験器を用いたが、岩石のはねかえり硬度試験は一般にShoreのはねかえり硬さ試験器を用いて行われ、はねかえり高さ15cmを100とするが、今回もその基準で値を決定した。Fig.3にその試験結果を示す。同図によるとショアー硬度の深度分布に顕著な変化する点が見られない。この理由としては風化によるショアー硬度低下域は測定区間の1~10cm間には存在せず、深度1cmより浅い部分に存在する可能性も考えられる。

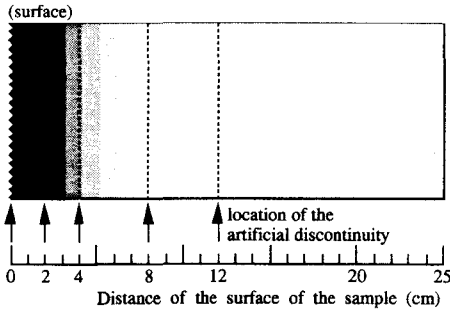


Fig.5 Location of the artificial discontinuity on test sample.

(d) 弾性波速度試験

Fig.4に試験結果を示すが、上図はP波速度測定結果を、下図はS波速度測定結果を示す。測定ではP波速度においては100kHz、S波速度においては33kHzの設定で試験体の各面に発振子と受振子をあて深さ方向に1cm毎に数列に変化を調べた。同図によると各LineでのばらつきはS波速度の方が抑えられているとはいえ大きく、深さ方向への風化の兆候が認められるように思える。ばらつきについてはおそらく岩石内の鉱物や地層の堆積時の影響が大きく出ているものと考えられ、両図に共通して16,17cm辺りが著しく高い値を示しているのもそのためであろう。またS波速度の方がばらつきが小さい理由としては、間隙の多い岩ではP波速度は含水状態によって変化するが、S波速度はほとんど影響されないという性質によるものではないだろうか。

3. 3 新しい力学試験

(a) 試験方法

接触面剛性試験は、採取した試料棒から120×100×80 (mm) の試験体を切り出す。すなわち各試験体高さの中央位置をアーチの接触表面、及び表面より2,4,8,12cmの深さに一致させるように試験体を作成する。接触面剛性試験は、0cm (接触表面) ではよりかみ合いの良い二つの接触面同士を合わせて、また2,4,8,12cmの深さに人工的な不連続面を入れて行った (Fig.5)。人工的な不連続面の作成方法は、文献3) に述べるとおりである。試験方法については、強制乾燥させた試験体に垂直剛性試験として、垂直荷重10MPaを0.1~0.5MPaごとに载荷し、その後除荷する。その後、一定の垂直応力0.5MPaを载荷しながら最大変位20mmのせん断を行う。そのあと、垂直荷重を除荷する。同じ試験体を用いて、さらに1,2,5,10MPaの垂直荷重下において同様のせん断剛性試験を行う。

ドーリー式すり減り試験は、試験体として直径25mmの円柱を試料棒よりボーリングビットを用いて採取する。研磨剤として標準砂を用い、試験体を周長2mの円形テーブル上で、12.5Nの垂直荷重下で100回転させて、そのサイクルごとのすり減り量の変化を調べる。その際重量は、電子天秤 (最小読みとり精度10mg) ではかり、長さ (試験

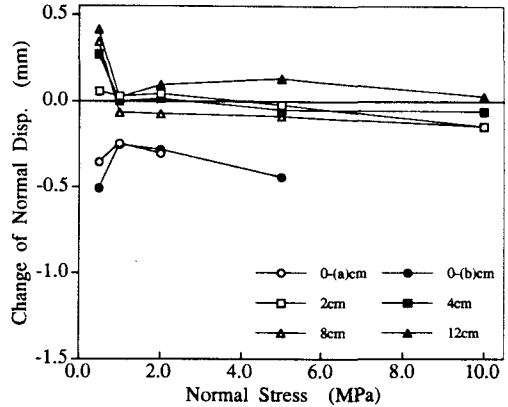


Fig.6 Change of normal displacement before and after shearing under different normal stress.

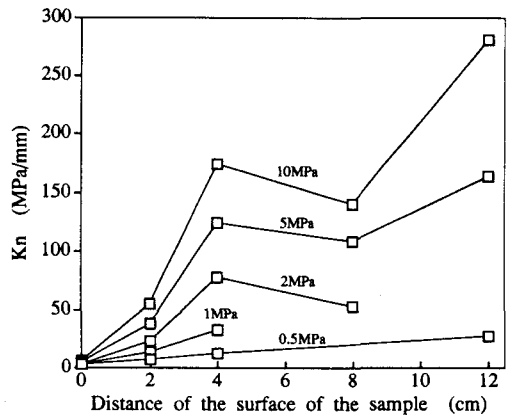


Fig.7 Normal stiffness at different depth from the surface of test sample under different normal stress.

体高) は、あらかじめ決めておいた位置 (3カ所) を電子ノギスを用いてはかった。研磨剤として用いる標準砂の落下量は、100回転につき40g、円形のテーブルの回転速度は28rpmである。

(b) 表面剛性試験の結果と考察

接触面剛性試験はアーチ接触面表面 (0cm) 及び表面より2,4,8,12cmの深さにおいて行った。以下に、それぞれの試験体の名前をこれらの深さで表現する。そのうち0cmでは試験を2回行っており、0-(a) cmと0-(b) cmと示す。

Fig.6にせん断前後の垂直変位の変化量を各垂直応力について調べた結果を示す。プラスは乗り上げて磨耗しない、マイナスはすり減って磨耗することを示す。0cmではすべての応力レベルに対してすり減りの方向に変位している。それに対して、2cm以深では低い垂直応力下では乗り上げの方向に変位している。この結果から明らかに0cmは2cm以深より強度が顕著に低いことが分かった。そして2cm以深の0.5MPa時の垂直変位の変化量の急激な増加はせん断開始後に上下面の凹凸の密着に続き、凹凸がその滑り面に沿って乗り上げを開始した結果であり、その際にせん断方向に大きな応力を出す。また、2,4cmでは、すり減りを起

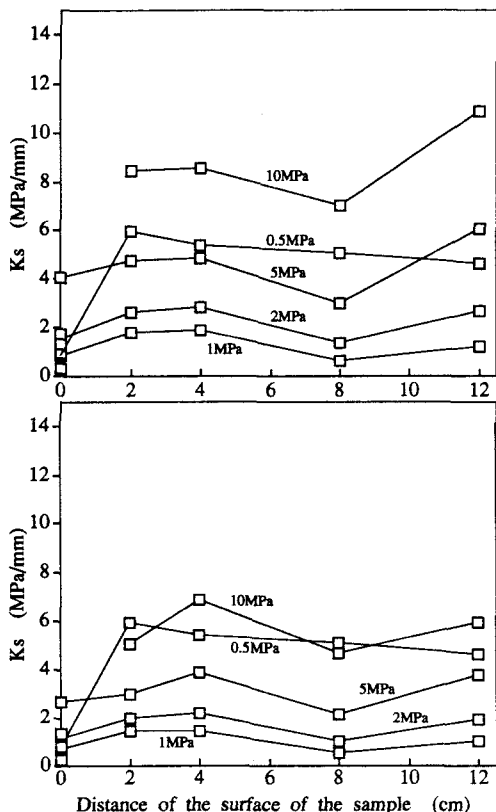


Fig.8 Shear stiffness at different depth from the surface of test sample under different normal stress.

こすのに必要な垂直応力が3MPa以上となる。

つぎに K_n (垂直剛性) と K_s (せん断剛性) は不連続面の垂直方向、あるいはせん断方向への変位の起こしにくさを評価する指標として重要な意味を持つ。今回は、局所接線係数法によって評価することにした。垂直剛性係数を求める際、垂直応力-垂直変位曲線を回帰して近似式を出し、その一次微分にその点の座標を代入して接線の傾きとして算出した。 K_s に関してはピークが現れる場合にはピークまでを、ピークを示さず残留せん断応力に達する場合はせん断変位2mmまでのデータを用いてその曲線を回帰し、0点と残留せん断応力の1/2の点においてその接線の傾きを求めた。

Fig.7に初期垂直剛性試験時の各垂直応力荷重時の K_n を各深さに沿ってプロットしたものを示す。縦軸は垂直剛性を示すが、垂直応力の荷重時にはインタクト部分の変位も含まれているため接触面の垂直剛性を求めるにはインタクトの部分の変位を差し引く処理を行った。同図より、全体として表面から深さ方向に向かって4cmまでは急増し、4cm以降は増加の度合は低くなる。すなわち、表面から2cmまでは剛性が顕著に低下したことが分かる。

Fig.8に各垂直応力荷重時の K_s を各深さに沿ってプロットしたものを示す。上図はせん断応力初期上昇時の接線係

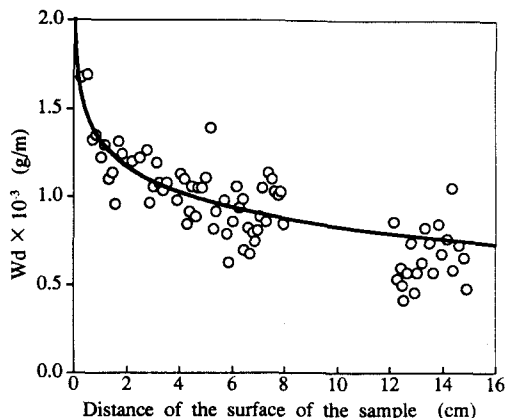


Fig.9 Wd value at different depth from the surface of test sample.

数、下図は残留せん断応力の1/2の点での接線係数である。両図に共通したことは、0.5MPa時の K_s が2cm以深でひときわ大きくなっていることである。これは試験最初のせん断を0.5MPaで行っており、せん断初期にピーク応力が生じることに起因している。8cmでやや低い値を取ることを除けば、やはり深さに伴う K_s 値の増加傾向が認められる。(c) すり減り試験の結果と考察

すり減り試験では、すり減りテーブルの移動量1m当たりのすり減り量 W_d (g/m) を測った。測定に当たっては、試験体の材質が均一でないで、特に硬い鉱物 (黒曜石など) の混入による著しい低下点を除去する必要があり、実験時の混入記録を考慮して補正を行った。Fig.9には、白丸が試験結果を、また、曲線はすり減り量の散布の近似曲線を示す。これによると、 W_d は表面近くでは著しく大きく深くなると急激に減少してある一定値に収束する傾向にあるが、深さ15cmまでの試験においては、わずかではあるがすり減り量の減少が認められる。この結果、すり減り易さが風化と関連があると考えれば、明らかに表面より深さ2cm程度は、風化が著しく進んでいると考えられる。

3. 4 熱赤外線カメラによる温度変化測定

風化部は、無数の微少なクラックがあると考えられ健全な部分と比べて密度や比熱、熱伝導率などが変化しているに違いない。その違いは、加熱や冷却をした際の温度変化の差異となって現れるので、時間を追って温度分布の変化を計測できる熱赤外線カメラを使えば、風化の程度や深さが分かるのではないと思われる。この方向に沿った実験は、すでに凝灰岩の特性調査によって行われたが、石材をむき出しのまま実験しており、風化部の凸凹からの放熱の影響を考慮していない。ここでは、観測面以外をすべて断熱材で囲み放熱の影響をなくした上で実験を行った。

Fig.10~12に日光で加熱した場合の温度変化の観測結果を示す。Fig.10は加熱を始めてから5分後における温度分布の状況であり、左端が接触面となっている。Fig.11はFig.10中のa~c、x~z、a' ~c' Lineの温度を平均しその時間変化を描いたものである。同図より、境界の影響によ

(surface)

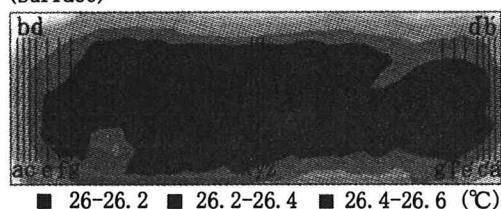


Fig.10 The distribution of Temperature after 5 minute warming.

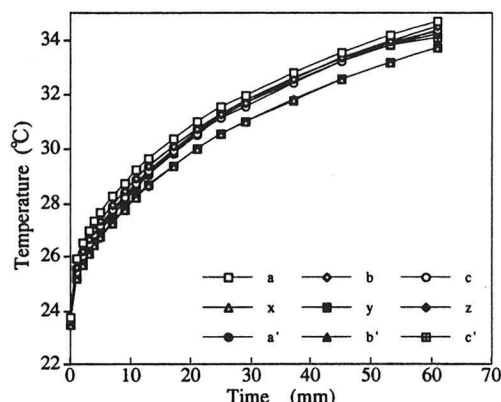


Fig.11 The average time-dependent Temperature in section a~c, x~z, a'~c'.Line.

り周辺部ほど温度が高く、中央部に行くに従って低くなっているのが分かる。そこで、境界の影響を排除するために接触面側のa~gから健全部のa'~g'の温度を差し引いて相対的な温度を求め、さらに初期における温度分布の偏りを無くすようにt=0の値を引いたものがFig.12である。同図より、接触面の方が相対的に温度上昇が速いという傾向が見られ、またその深度は約1~1.5cmになった。

4. 崩落深度による風化状況の調査

溶結凝灰岩からなる石材の耐久性を把握するために、鹿児島市内における築造年代が明確な史跡に使用されている石材の崩落深度調査を行った。その調査結果を崩落深度と築造後経過年数をもとにFig.13に示す。同図によると崩落深度d/築造後経過年数yを風化速度と定義すると、最大は鶴丸城社の約0.29mm/yearで、逆に桂庵墓では0.02mm/yearと小さくなっている。鶴丸城社の石垣の場合はその背面に地下水位が存在しているが、このような特殊な環境下では風化速度が大きくなると考えられる。よって、鹿児島市一帯の溶結凝灰岩からなる石材の一般的な風化速度は0.2mm/year程度の値を示すものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、溶結凝灰岩からなる石材の風化の状況を定量的に評価するためにさまざまな試験を実施し、深さ方向への風化の分布の検討を試みた。

その結果、Kn,Ks,Wd値は風化を示す指標として有効であると判断でき、それらの値によると顕著に風化された深

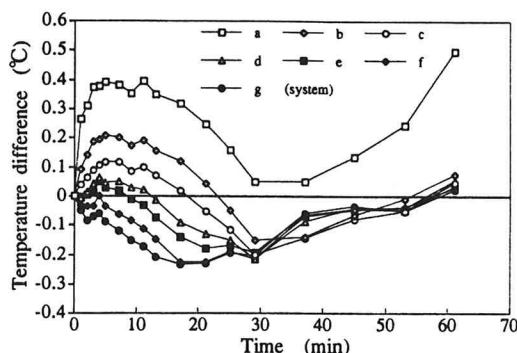


Fig.12 The time-dependent Temperature difference in section system-a~system-g.

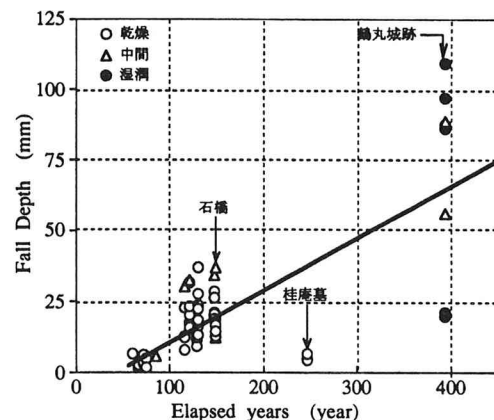


Fig.13 Fall depth of rock structures built at different ages in Kagoshima Kenn.

度は表面より約2cmまでであった。さらに、この石が約150年経過していることを踏まえると、Fig.13に示す風化速度結果とも良く一致していた。

今後の課題としては、今回の試験データをもとに化学的な風化評価も加えた総合的な風化指標を確立することである。さらに、そのデータをもとにアーチ橋をモデル化し解析を行うことにより、長期耐久性と保存管理の面についても研究を積み重ねていく所存である。

6. 参考文献

- 1) 土木学会 (1995): 建設資材としての凝灰岩の特性についての基礎調査報告書
- 2) 田中 莊一 (1990): 超音波速度試験, 岩の調査と試験, 土質工学会, pp.388-395
- 3) Esaki,T.et.al (1995): Effects of preceding shear history on shear-flow coupling properties of rock joints, International Conference MJFR- 2, Vienna, pp501-506

謝辞

本研究の一部は文献1)の調査委員会活動の中で行われたものである。本研究を遂行するに当たり、試料を提供していただいた鹿児島県土木部、諸氏に感謝します。また、実験には(株)応用地質の榎木孝利ならびに鈴木清高両氏に協力していただいた。記して感謝いたします。