

# 足羽山産凝灰岩（笏谷石）の強度特性に関する研究

澤 崎 雅 之 ・ 高 橋 義 治

日下部 吉 彦 ・ 伊 藤 一 郎

## Studies on the Mechanical Properties of Welded Tuff (Shakudani Stone) in the Region of Mount Asuwa, Fukui City

Masayuki SAWAZAKI, Yoshiharu TAKAHASHI,  
Yoshihiko KUSAKABE and Ichiro ITO

Welded tuff of Mt. Asuwa is mined for building stone popularly called Shakudaniishi. Uniaxial and triaxial compressive tests and elastic wave test have been carried out to investigate the mechanical properties of the welded tuff.

The uniaxial compressive strength of the rock piece is around  $300 \text{ kgf/cm}^2$  and the modulus of elasticity is about  $1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ . The shearing strength estimated from the results of the triaxial compressive test, range from 90 to  $120 \text{ kgf/cm}^2$ .

### 1. 緒 言

足羽山（標高 116.5m）は福井平野の中部，足羽川の左岸に位置する丘陵で，ここに分布する新第三紀の凝灰岩は笏谷石の名称で石材として多方面の用途に供されている。

笏谷石の採掘の歴史は古く，およそ 1500 年前に遡るといわれているが，その後も幾多の消長を経つつ現在まで続けられてきている。とくに，徳川時代には藩の保護と奨励もあって採石事業は発展し，この石材は足羽川の舟運を利用して三国港に到り，これより北前船によって各地に運ばれその販路は北海道にまで拡がっていたといわれている。現在は，足羽山の北西端で越前石<sup>(株)</sup>，宮崎石材及び若杉石材の 3 社によって採掘が行われている。

このように石材として長い歴史をもつ笏谷石ではあるが，その工学的諸性質については未だ殆んど明らかにされていない。

本研究は一軸及び三軸圧縮試験を主とした室内力学試験の結果から笏谷石の強度特性について検討したものである。

### 2. 試料採取

#### 2. 1 試料採取位置

本研究で用いられた試料は越前石<sup>(株)</sup>において，立坑で現地表から約 50m 下った位置で切り出された 10 数個のブロック（ $22 \times 26 \times 16 \text{ cm}$ ）であり，同社を通じて入手したものである。これらの試

料は伊藤他(1989)<sup>1)</sup>に記載されている地表下28.1mで採取されたF試料とほぼ同質の石英安山岩質溶結凝灰岩である。

## 2. 2 試料の区分・整形及び保存

採取された上記の岩石ブロックから岩石試料用コア抜機によって直径35mmのコアを切り出したが、岩石ブロックにはあまり明瞭ではないが層理が認められるので、その層理面に対して鉛直方向、水平方向及び45°方向に切り出したものをそれぞれV試料、H試料及び45°試料として区分した。

切り出したコアは約75mmの長さに切断し、両端面をその平行度が5/100～10/100mmになるまで研磨して直径35mm、高さ70mmの円柱試料を作製した。

これらの円柱形試料は蒸留水中に浸して保存し、弾性波速度試験、一軸圧縮試験及び三軸圧縮試験などの供試体として用いた。

## 3. 室内力学試験の結果

上記のように準備された試料について、物理的・力学的諸性質及び変形特性を明らかにするために弾性波速度試験、一軸圧縮試験及び三軸圧縮試験を実施した。

### 3. 1 弾性波速度試験

試験は、ランジュバン型振動子(P波用:共振周波数187KHz, S波用:105KHz)を用いて、International Society for Rock Mechanics(略称ISRM)の指針に準拠して実施した。V試料、H試料、45°試料各々3個ずつ、合計9試料について、湿潤状態( $S_r \approx 85\%$ )と乾燥状態(1ヶ月間気乾燥した試料)との2通りの条件の下で、P波速度、S波速度の測定を行い、さらに、これらの測定値を用いて動的ポアソン比、動的弾性係数及び動的せん断弾性係数を求めた。

表-1 V, H及び45°各試料の動的な弾性係数

試料区分	P波速度		S波速度		動的ポアソン比		動的弾性係数		動的せん断弾性係数	
	km/s		km/s				$\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$		$\times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$	
	湿潤	乾燥	湿潤	乾燥	湿潤	乾燥	湿潤	乾燥	湿潤	乾燥
V 試 料	2.96	2.86	1.33	1.40	0.37	0.34	0.970	1.040	3.540	3.880
H 試 料	3.09	3.15	1.49	1.44	0.34	0.37	1.224	1.105	4.567	3.704
45° 試料	2.95	3.05	1.46	1.43	0.34	0.36	1.120	1.090	4.180	4.010

### 3. 2 一軸圧縮試験

水浸した後1ヶ月間気乾燥して、重量変化を示さなくなった供試体を用い、一軸圧縮試験を実施した。供試体のひずみは、側面中央部の左右対称の位置にクロス型ひずみゲージを貼付して測定し、軸ひずみ、円周方向ひずみ及び体積ひずみを求めた。本試験に用いた供試体数は、V試料、H試料及び45°試料それぞれ14, 16及び16個である。試験の載荷方法は、軸ひずみ速度0.04mm/minのひずみ制御で実施した。図-1は、H, V及び45°各試料の一軸圧縮強度の頻度分布を

示したものである。  
一軸圧縮強度の平均値はH試料が332kgf/cm<sup>2</sup>と最も大きく、次いでV試料の308kgf/cm<sup>2</sup>、45°試料の291kgf/cm<sup>2</sup>の順となっている。

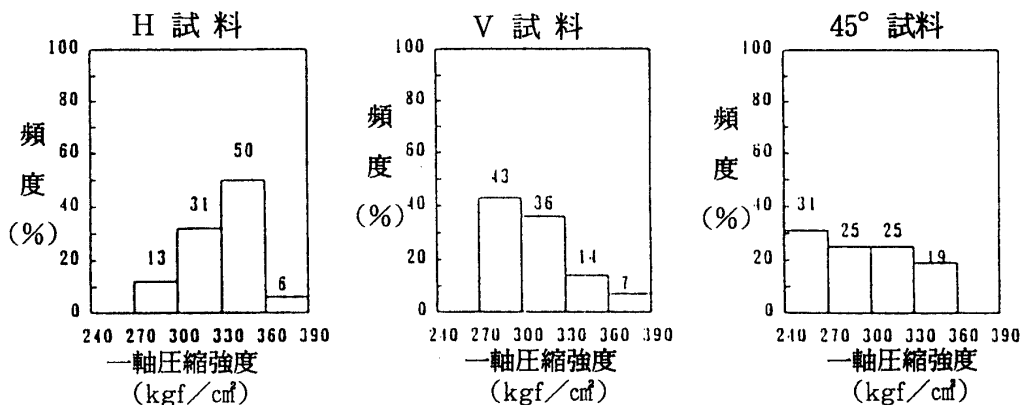


図-1 一軸圧縮強度頻度分布図

さらに、計測された応力～ひずみ線図に基づいて、軸方向弾性係数を求めた。その際、ISRM指針に基づいて接線、平均及び割線の三種類の弾性係数を求め、各々について頻度分布図を作製した。図-2は、軸方向弾性係数の頻度分布を、H試料とV試料について求めたものである。

### 3. 3 三軸圧縮試験

供試体は一軸圧縮試験の場合と同様に1ヶ月間気乾燥した試料を用い、試料中央部の左右対象位置にクロス型ひずみゲージを貼付した。尚、試料ペダスタルに特殊な加工を施して、三軸室内からひずみゲージのリード線を外部に導いた。試験装置は通常の三軸圧縮試験

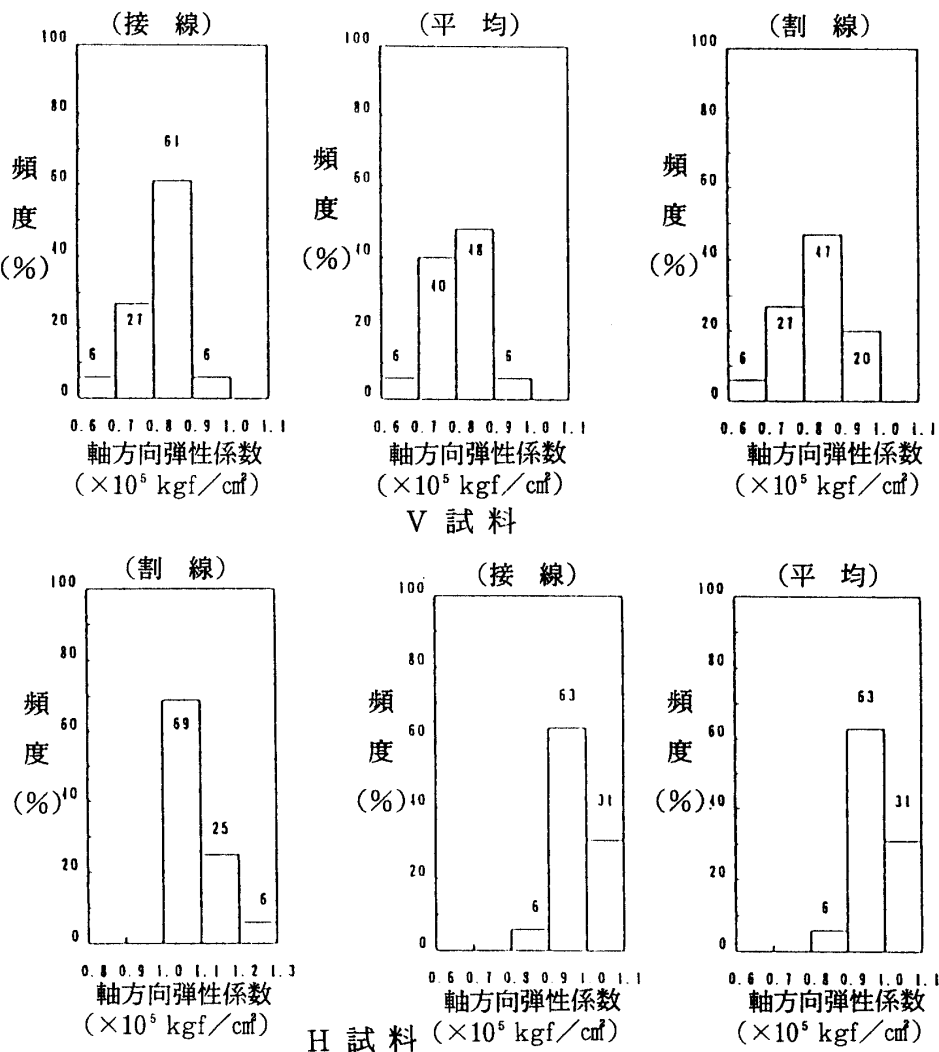


図-2 軸方向弾性係数頻度分布図

機（中容量型）であり、拘束圧容量は100kgf/cm<sup>2</sup>である。さらに、試験の載荷方法は、軸ひずみ速度0.02mm/minのひずみ制御で実施した。

試験は単段式三軸圧縮試験（Single-stage Triaxial Test, 以下SSTと記す）と、多段階三軸圧縮試験（Multiple-stage Triaxial Test, 以下MSTと記す）の二通りの方法で行った。SSTの場合、拘束圧は30, 50, 70, 90 kgf/cm<sup>2</sup>の4種類とした。MSTを行う場合、拘束圧を変化させ

るタイミングが重要であるが、本研究では軸方向のひずみ速度を終始一定に保ちながら、Kovari<sup>2)</sup>の方法に従って実施した。すなわち、リアルタイムでコンピュータのディスプレイにグラフ化される応力～ひずみ線図を注視しつつ、同時に出力される軸差応力の変化量が $0.1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以下になった時点で、ただちに次の拘束圧に上昇させた。

図-3～5にSSTによる実験結果の一例の応力～ひずみ線図を示す。図-3は拘束圧 $70\text{kgf}/\text{cm}^2$ におけるV試料、図-4は拘束圧 $50\text{kgf}/\text{cm}^2$ におけるH試料、図-5は拘束圧 $30\text{kgf}/\text{cm}^2$ における $45^\circ$ 試料に対する各々の応力～ひずみ線図である。尚、図-3～5の各々における三本の応力～ひずみ線は、右側に位置するものから順番に、軸ひずみ、体積ひずみ及び円周方向ひずみの変化を表わしている。全試料における応力～ひずみ関係は、図-3、4に示されるように、ピーク強度後急激に応力低下し、脆性破壊の様相を呈するものと、図-5の軸ひずみ、円周方向ひずみにみられるように、ピーク強度到達後、ひずみのみが増加し、延性破壊の様相を呈するタイプとが観察されたが、拘束圧の大きさ、あるいは試料の採取方向との相関性は見い出せなかった。

次に図-6～8にMSTによる実験結果の応力～ひずみ線図を示す。図-6はV試料、図-7はH試料、図-8は $45^\circ$ 試料に対する各々の応力～ひずみ線図である。図-6～8の各々における三本の応力～ひずみ線は、図-3～5と同様に右側から順番に、軸ひずみ、体積ひずみ、円周方向ひずみの変化を表わしている。いずれの場合も、拘束圧上昇時には、ひずみが不連続になっているとともに、拘束圧上昇後、軸ひずみ、体積ひずみは増加し、円周方向ひずみは減少していることがわかる。

表-2は、H、V及び $45^\circ$ の各試料について計測したSSTの破壊時の最大軸差応力の値と、MSTの各ピーク強度での軸差応力の値とをまとめたものである。表-2中の $45^\circ$ 試料について描いたモールの応力円を図-9(a)、(b)に示したが、(a)はSST、(b)はMSTの結果によるものである。H試料、V試料についても同様にモールの応力円を描き、モール・クーロンの破壊基準に従って強度定数（内部摩擦角とせん断強度）を求めたが、その結果は表-3に示す通りである。

#### 4. 試験結果の考察

##### 4. 1 異方性について

表-1に示されるP波速度、S波速度を比較すると、いずれもH試料の方がV試料よりも大きく、湿潤状態ではP波速度は4%、S波速度は12%、乾燥状態ではP波速度は10%、S波速度は約3%、それぞれ速くなっている。また、図-1に示される一軸圧縮強度の頻度分布図より、H試料では、 $330\text{kgf}/\text{cm}^2 \sim 360\text{kgf}/\text{cm}^2$ の範囲に最頻値が存在するのに対して、V試料では $270\text{kgf}/\text{cm}^2 \sim 300\text{kgf}/\text{cm}^2$ の範囲に最頻値が存在している。さらに、全試料の一軸圧縮強度の平均値は、V試料で $308\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、H試料では $332\text{kgf}/\text{cm}^2$ である。次に、図-2に示される軸方向弾性係数の頻度分布図をV試料とH試料について比較すると、接線・平均・割線のいずれの弾性係数とも、V試料よりH試料の方が、最頻値が大きくなっている。

以上から、弾性波速度、一軸圧縮強度、弾性係数に関して、V試料とH試料とを比較した場合、

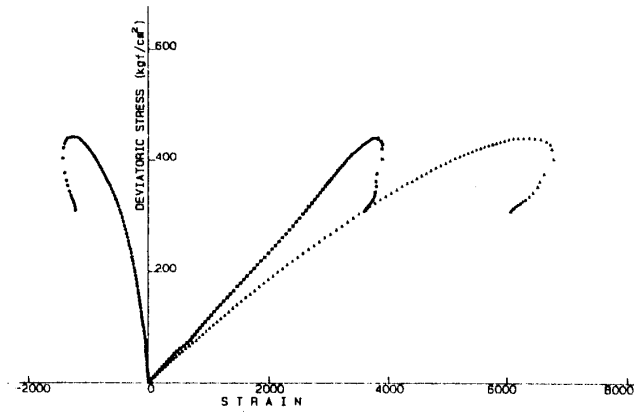


図-3 SSTによる応力～ひずみ線図  
(V試料・拘束圧70kgf/cm²)

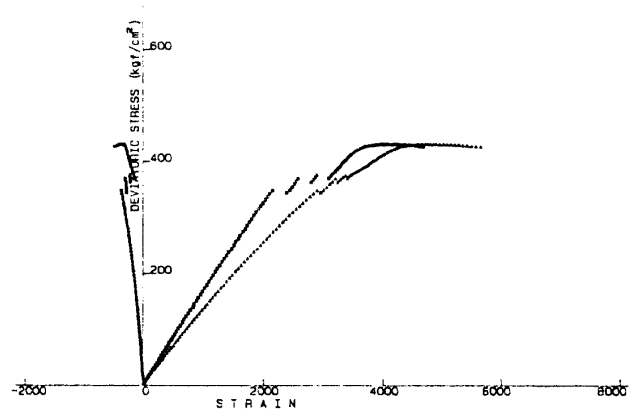


図-6 MSTによる応力～ひずみ線図  
(V試料)

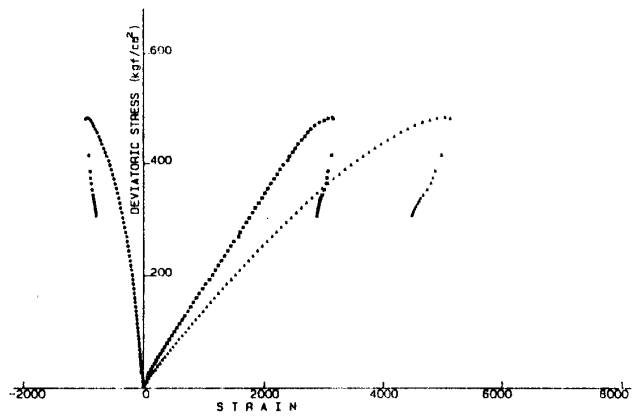


図-4 SSTによる応力～ひずみ線図  
(H試料・拘束圧50kgf/cm²)

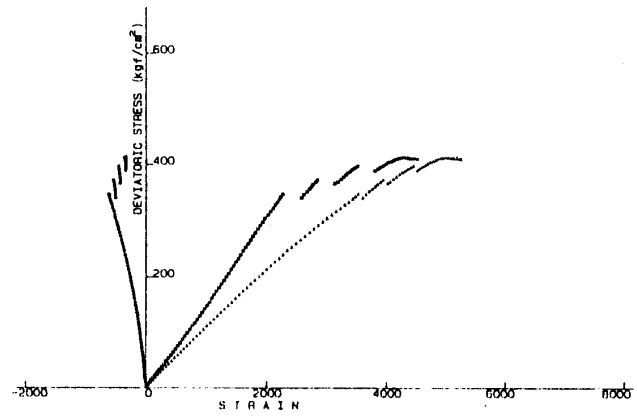


図-7 MSTによる応力～ひずみ線図  
(H試料)

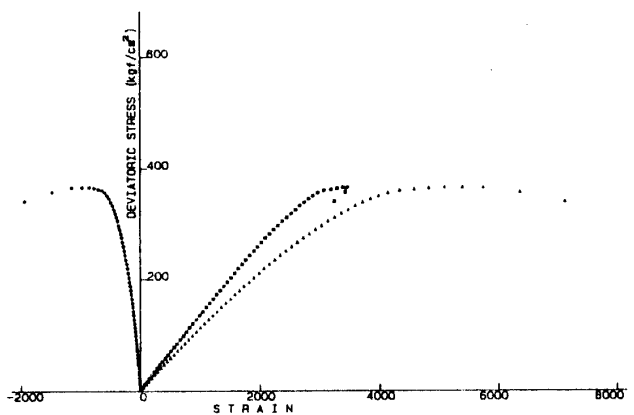


図-5 SSTによる応力～ひずみ線図  
(45° 試料・拘束圧30kgf/cm²)

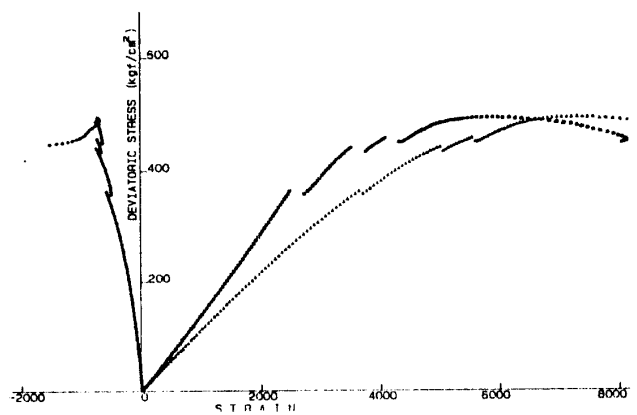


図-8 MSTによる応力～ひずみ線図  
(45° 試料)

ある程度の異方性が指摘できる。

しかし、一軸圧縮試験において、層理や片理のような平行した不連続面が発達した岩石の圧縮強度は、一般に、加圧方向がこれらの不連続面に直角な場合の方が平行な場合よりも大きくなるのに、足羽山産凝灰岩ではそれとは逆の結果を生じている。これは、本凝灰岩が溶結凝灰岩であって、2-2項で述べたように層理は認められるものの、これらの層理は碎屑性堆積岩中のものや結晶片岩の片理とは異なり、加圧の際に不連続面として機能していないためではないかと思われる。あるいは、本研究で使用した供試

体の直径が35mmであるのに対して、それに含まれている岩片には径10mm~15mm程度のものもあって、「供試体の直径は岩石の最大結晶寸法の少なくとも10倍が必要である」というISRMの一軸圧縮試験に関する指針からみて、供試体の直径が小さすぎたことによるのかもしれない。

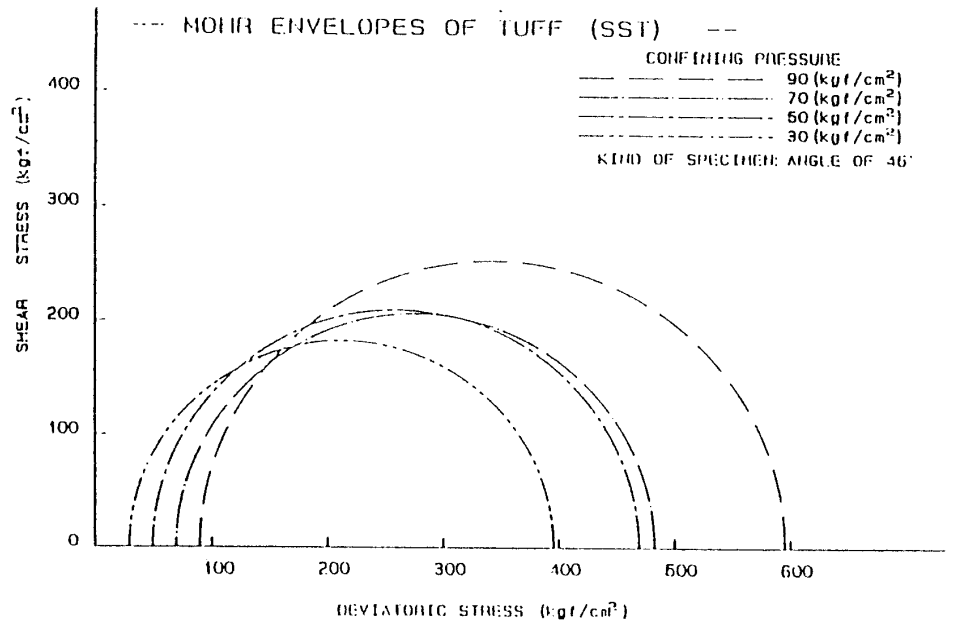


図-9(a) 45° 試料におけるSST試験結果によるモールの応力円

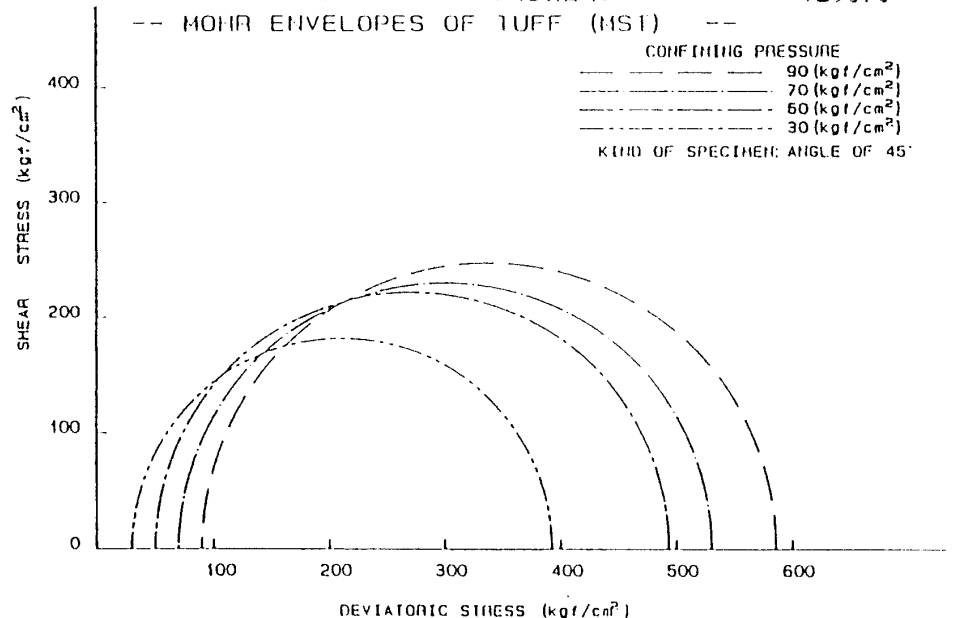


図-9(b) 45° 試料におけるMST試験結果によるモールの応力円

表-2 SSTの破壊時の最大軸差応力と  
MSTの各ピーク強度での軸差応力

試料	拘束圧 kgf/cm <sup>2</sup>	SST 軸差応力 kgf/cm <sup>2</sup>	MST 軸差応力 kgf/cm <sup>2</sup>
V	30	382.13	351.00
	50	379.23	371.70
	70	445.12	380.53
	90	447.31	433.23
H	30	395.75	352.10
	50	485.73	380.03
	70	485.68	397.06
	90	472.67	440.90
45°	30	356.54	337.99
	50	419.39	365.27
	70	412.61	377.80
	90	505.15	413.45

#### 4. 2 強度特性について

一軸圧縮試験の結果から、試料採取方向の相異なるによる圧縮強度の平均値の大小関係は、H試料>V試料>45°試料の順になっており、全体では、概略300kgf/cm<sup>2</sup>前後の一軸圧縮強度をもっていることがわかった。

また、三軸圧縮試験の結果に、モール・クーロンの破壊基準を適用して求めた強度定数は、表-3に示されているが、SST・MSTともに内部摩擦角の大小関係は、45°試料

>H試料>V試料であり、せん断強度については、V試料>H試料>45°試料の順になっている。尚、今回のMSTにおける拘束圧変化のタイミングは、図-6～8の応力～ひずみ線図からも推察されるように、ほぼ妥当なものであることがわかった。

さらに、図-10は縦軸に、表-3に示されたV、H及び45°各試料のせん断強度を、横軸に一軸圧縮強度の平均値をプロットしたものである。図-10より、一軸圧縮強度に対するせん断強度の割合は、およそ、V試料では約40%、H及び45°の各試料では約30%であることがわかる。

#### 5. 結 語

本研究では一軸及び三軸圧縮試験を主とした室内力学試験の結果に基づいて、足羽山産凝灰岩（笏谷石）の強度特性について検討したが、得られた成果を要約すれば次の通りである。

- (1) 一軸圧縮試験の結果より、概略300kgf/cm<sup>2</sup>前後の圧縮強度で、 $1 \times 10^5$ kgf/cm<sup>2</sup>程度の弾性係数をもっている。
- (2) 弾性波速度試験と一軸圧縮試験の結果より、本凝灰岩は、ある程度の異方性をもっていることがわかった。
- (3) 三軸圧縮試験より求められるせん断強度は、一軸圧縮強度の30～40%である。

表-3 SSTとMSTによるモールの  
応力円から求めた内部摩擦角( $\phi$ )  
とせん断強度( $\tau$ )

試 料	試験種類	$\phi$	$\tau$
		(°)	(kgf/cm <sup>2</sup> )
V	SST	21.8	123.3
	MST	14.6	130.0
H	SST	29.9	95.0
	MST	25.5	96.7
45°	SST	33.3	76.2
	MST	31.3	80.9

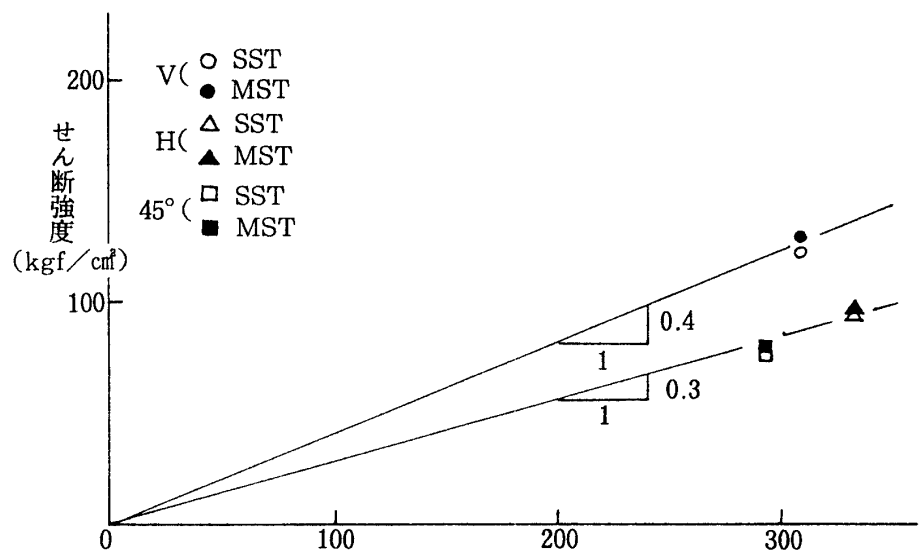


図-10 せん断強度と一軸圧縮強度との関係

## 謝 辞

本研究で用いた試料の採取に際しては、越前石株式会社種々の便宜を図っていただいた。試料の調製や各種の力学試験では、大学院生の国元 猛・浦島智之両君の協力を得た。ここに記して深甚の謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 伊藤一郎, 港種雄, 澤崎雅之, 永全立樹: 足羽山産凝灰岩の風化に関する研究(第1報) — 風化の過程に関する研究 —, 福井工業大学研究紀要, 第19号, 1989年9月, pp. 253~265.
- 2) Kovari, K. & A. Tisa: Multiple failure state and strain controlled triaxial test, Rock Mechanics, Vol. 7, No. 1, pp. 17~33, 1975.
- 3) 赤井浩一, 大西有三, 李徳河: 多段階三軸試験とその飽和軟岩への適用について, 土木学会論文報告集, 第311号, 1981年7月, pp. 93~102.
- 4) 伊藤一郎, 澤崎雅之, 港種雄, 永全立樹: 足羽山産凝灰岩の風化に関する研究(第2報) — 諸特性に及ぼす風化の影響 —, 福井工業大学研究紀要, 第20号, 1990年7月, pp. 211~220.
- 5) 高橋義治: 足羽山産凝灰岩の強度特性に関する研究, 福井工業大学修士論文, 1991年2月.

(平成3年10月25日受理)