

観音下産凝灰岩（日華石）の強度特性に関する研究

澤 崎 雅 之*・国 元 猛**・日下部 吉 彦*

Studies on the Mechanical Properties of Rhyolitic Tuff (Nikka Stone) in Kanagaso District, Komatsu City, Ishikawa Prefecture

Masayuki SAWAZAKI・Takesi KUNIMOTO・Yoshihiko KUSAKABE

Pyroclastic rocks which are extensively distributed in Southwestern Kaga, are quarried at several places and sold as building stone. Miocene rhyolitic tuff quarried at Kanagaso district, Komatsu City is also one of these building stones and called Nikkaseki.

Uniaxial and triaxial compressive tests and various physical tests have been carried out to investigate the mechanical properties of the rhyolitic tuff.

The uniaxial compressive strength of the rock pieces is around $100\text{--}150\text{Kg/cm}^2$ and the modulus of elasticity is about $0.3\text{--}0.5 \times 10^5 \text{ Kg/cm}^2$. The variations in uniaxial compressive strength and residual strain reveal that Nikkaseki retain the anisotropy.

1. 緒 言

小松市を中心とする加賀南西部に広域を占めて分布する新第三期中新世の流紋岩質火山岩類は火砕岩類（流紋岩質角礫凝灰岩、軽石凝灰岩など）と流紋岩溶岩とに大別されるが、そのうち前者は小松市観音下地区、同滝ヶ原地区などで石材として採掘されている。

観音下地区での採掘は大正初期、すなわち1910年代前半に地元や近隣の村落の注文に応じて家屋建築用の土台石を切り出したのに始まっている。これらの石材は地元では観音下石と呼ばれ、知名度の高い石材であったが、昭和30年（1955年）ごろからは日華石の名称で販売されるようになって現在に至っている。日華石は近代建築の外装材、内装材に広く用いられ、なかでも門柱、門塀、倉などに使用されることが多い。

このように石材として広く利用されているにもかかわらず、その工学的諸性質については未だ殆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日華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

*建設工学科 土木工学専攻 **元大学院生

本研究で用いられた試料は小松市観音下町の観音下石材（株）の露天採掘切羽から切り出された日華石の数個のブロック(30X30X90cm)であり、同社を通じて直方体試料(15X15X30cm)に加工して入手したものである。その際、直方体試料のどの面が現位置で上下面であったかを識別出来るように配慮した。これらの試料は淡黄～淡黄褐色を呈する流紋岩質凝灰岩である。

2. 2 日華石の組織と鉱物組成

日華石は顕微鏡下では斑状組織を呈する。斑晶は石英と斜長石であり、石英は破片状をなすものが多い。石基は火山ガラスを主とする。火山ガラスには軽石や軽石質繊維状のものも認められる。

日華石のようなグリーンタフ地域の火山砕屑岩類は熱水溶液による熱水変質作用を被り、そのなかの長石や火山ガラスの一部が沸石化していることが多い。

X線粉末回折法により沸石の同定を試みた結果、日華石からはモルデン沸石と斜プチロル沸石とが検出され、また、電子顕微鏡にても上記の沸石の結晶が認められた。（写真－1 参照）



写真－1 日華石の電子顕微鏡写真（×2000）
繊維状結晶がモルデン沸石、ブロック状のものが斜プチロル沸石の結晶

2. 3 試料の区分・整形及び保存

前述の直方体試料から、岩石試料用コア抜機によって直径50mmのコアを切り出した。その際、現位置での鉛直軸方向に切り出した試料をV試料、鉛直軸に垂直な方向に切り出した試料をH試料として、試料採取の方向性を区別した。

切り出したコアは約105mm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50mm、高さ100mmの円柱試料を作製した。

これらの円柱試料は、気乾燥状態と蒸留水中水浸状態の二通りに分けて保存し、以下の力学的試験の供試体とした。

尚、今回用いた試料の物理的諸量を表－1に示す。吸水率、有効間隙率については、72時間以上静水中に放置した場合と、真空脱気を行った場合のデータを併記してある。

表－1 試料の物理的諸量

真比重		2.32
見かけ比重	強制湿潤	1.74
	強制乾燥	1.32
乾燥密度 (g/cm ³)		1.25
間隙率 (%)		45.7
吸水率 (%)	72hr水浸	27.3
	真空脱気	32.0
有効間隙率 (%)	72hr水浸	36.1
	真空脱気	42.1

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、力学的諸性質及び変形特性を明らかにするために一軸圧縮試験、三軸圧縮試験を実施した。

3. 1 一軸圧縮試験

一ヶ月以上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。供試体のひずみは前報¹⁾と同様の方法で測定した。試験の载荷方法は、軸ひずみ速度0.04mm/minの

ひずみ制御で実施し、載荷形式は単調載荷形式と繰り返し載荷形式の二種類とした。繰り返し載荷形式は図-1に示されるような応力履歴で載荷した。

その際、圧縮応力を 20kgf/cm^2 刻みで増加させ、破壊するまで載荷除荷を繰り返した。本試験に用いた供試体数は、単調載荷形式ではV及びH試料とも各9個、繰り返し載荷形式では、V試料5個、H試料10個である。

図-2は、単調載荷形式によって求められたV及びH試料の一軸圧縮強度の頻度分布図である。一軸圧縮強度の平均値は、H試料が 106kgf/cm^2 、V試料が 148kgf/cm^2 であり、H試料では $100\text{--}110\text{kgf/cm}^2$ に集中しているが、V試料では広範囲に分布しているのがわかる。

表-2及び3はV及びH試料の弾性係数とポアソン比を示したものである。円周方向弾性係数やポアソン比は、H試料に比較してV試料の方が広範囲に分布していることがわかる。

図-3は繰り返し載荷形式によって求められた応力と軸ひずみ、円周方向ひずみ及び体積ひずみ曲線の代表的なものである。破壊時の強度に相違があるが、V試料に比較してH試料の方が除荷時の残留ひずみが大きくなっていることがわかる。

3. 2 三軸圧縮試験

三軸圧縮試験に用いた供試体は、あらかじめH及びV試料の区別を行ったうえで、乾燥試料と湿潤試料との二種類とした。乾燥試料は、一軸圧縮試験と同様に気乾状態で重量変化を示さなく

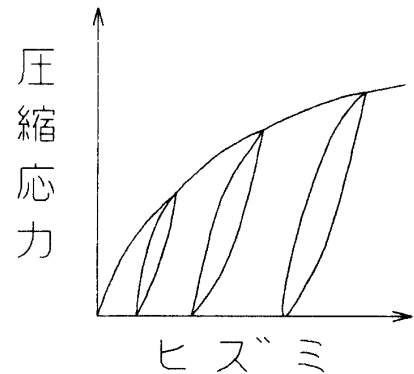


図-1 繰り返し一軸圧縮試験の応力履歴の概略図

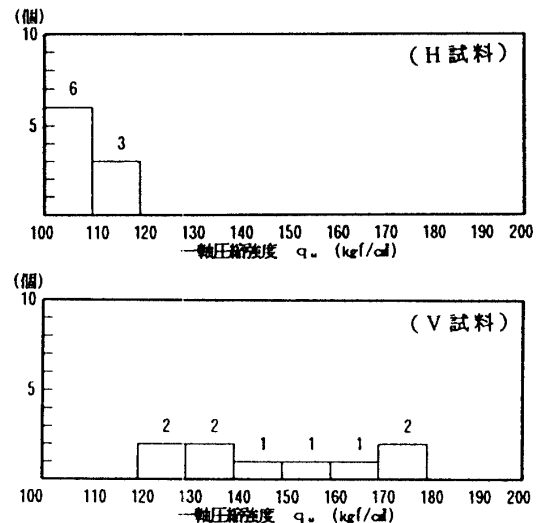


図-2 一軸圧縮強度の頻度分布図

表-2 H試料の弾性係数とポアソン比

No.	軸方向弾性係数			円周方向弾性係数			ポアソン比		
	$\times 10^5 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$			$\times 10^5 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$					
	接線	平均	割線	接線	平均	割線	接線	平均	割線
H-1	0.31	0.31	0.34	0.93	0.94	1.61	0.333	0.330	0.293
H-2	0.28	0.28	0.31	1.07	1.08	1.54	0.261	0.260	0.201
H-3	0.27	0.27	0.31	1.10	1.08	1.67	0.245	0.250	0.186
H-4	0.31	0.30	0.34	1.02	1.04	1.53	0.304	0.288	0.222
H-5	0.24	0.25	0.30	0.78	0.80	1.07	0.308	0.313	0.280
H-6	0.24	0.25	0.30	0.78	0.74	1.33	0.308	0.338	0.226
H-7	0.40	0.40	0.44	1.63	1.60	2.05	0.245	0.250	0.215
H-8	0.25	0.25	0.33	0.78	0.81	1.49	0.321	0.309	0.221
H-9	0.32	0.32	0.38	1.50	1.52	2.21	0.213	0.211	0.172
平均	0.32	0.32	0.36	1.11	1.11	1.65	0.294	0.296	0.230

表-3 V試料の弾性係数とポアソン比

No.	軸方向弾性係数			円周方向弾性係数			ポアソン比		
	$\times 10^5 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$			$\times 10^5 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$					
	接線	平均	割線	接線	平均	割線	接線	平均	割線
V-1	0.43	0.44	0.39	1.36	1.35	1.54	0.316	0.326	0.253
V-2	0.44	0.44	0.38	1.45	1.44	1.88	0.303	0.306	0.202
V-3	0.60	0.59	0.51	3.69	3.68	3.81	0.163	0.160	0.134
V-4	0.57	0.57	0.50	5.69	5.69	6.61	0.100	0.100	0.076
V-5	0.52	0.51	0.46	1.81	1.81	2.13	0.287	0.283	0.216
V-6	0.55	0.55	0.48	1.86	1.86	2.19	0.296	0.296	0.219
V-7	0.44	0.44	0.41	1.75	1.73	2.10	0.251	0.254	0.195
V-8	0.50	0.50	0.46	1.47	1.46	1.64	0.340	0.342	0.280
V-9	0.43	0.43	0.40	1.72	1.70	1.77	0.250	0.253	0.226
平均	0.50	0.49	0.44	2.30	2.29	2.60	0.252	0.253	0.197

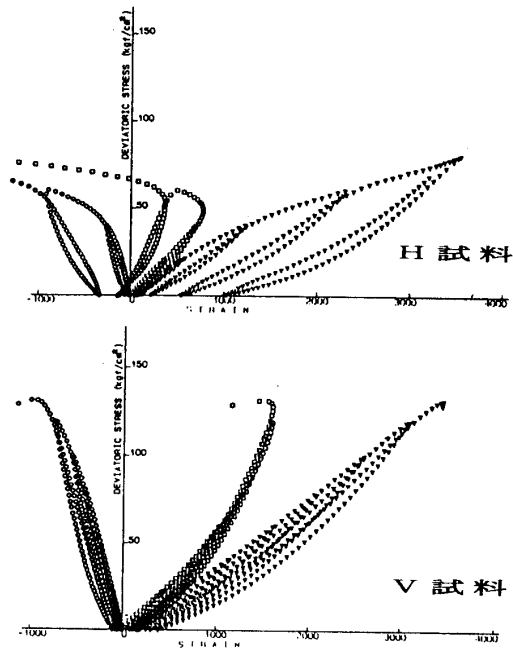


図-3 繰り返し載荷試験による応力～ひずみ曲線

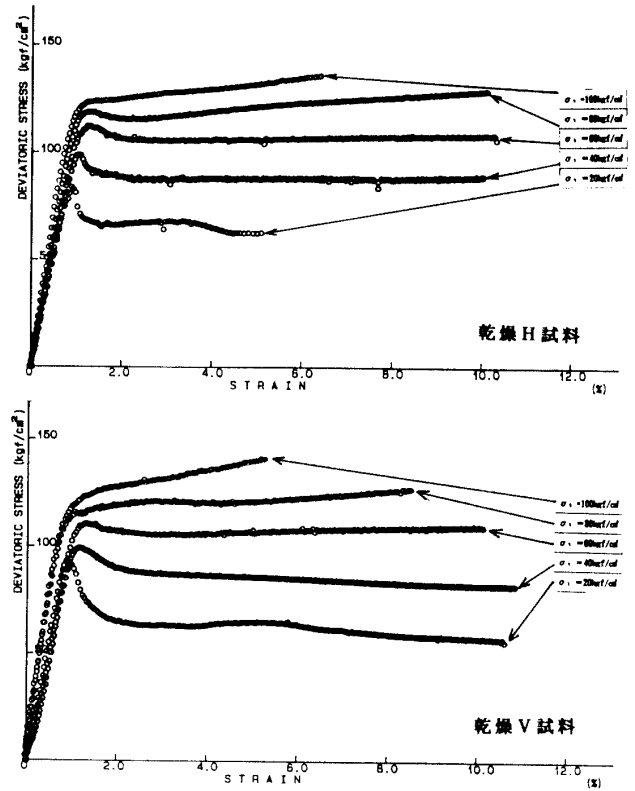


図-4 SST による軸差応力～軸ひずみ関係

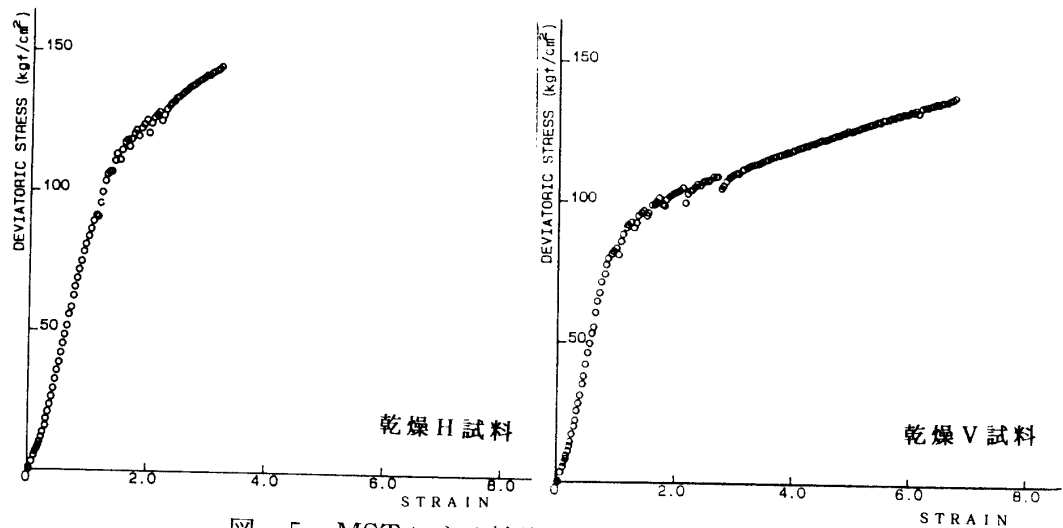


図-5 MST による軸差応力～軸ひずみ関係

なった供試体を用いた。一方、湿潤試料は蒸留水に水浸し、一日5時間の真空脱気を2週間継続させた試料を用いた。以下の試験において供試体のひずみは、三軸圧縮室の载荷ピストンの貫入量をひずみゲージ式ダイヤルゲージで測定し、それを軸ひずみとした。

乾燥試料については、H及びV試料に対して単段式三軸圧縮試験（以下SSTと略記する）と多段階三軸圧縮試験²⁾（以下MSTと略記する）を行った。SSTの拘束圧は20, 40, 60, 80, 100

kgf/cm² の 5 種類に設定した。また MST は、初期拘束圧を 20kgf/cm² に設定し、その後 20 kgf/cm² 刻みで拘束圧を上昇させて破壊するまで試験を行った。図-4、5 に H 及び V 試料の SST, MST の軸差応力～軸ひずみ曲線を示す。図-4 より、H 及び V 試料ともに、拘束圧 20, 40, 60 kgf/cm² では軸ひずみが約 1 % 位で最大強度を示し、その後軸ひずみの増大とともに残留強度を示している。しかし、拘束圧が 80, 100 kgf/cm² では、若干のピークを示すものがあるものの、軸ひずみ約 1 % 以降では、ひずみ硬化の様相を呈している。

湿潤試料については、H 及び V 試料に対して SST のみを実施した。拘束圧は 20, 40, 60, 80, 100, 120 kgf/cm² の 6 種類に設定し、背圧を 5 kgf/cm² 与えた状態（以下 BP=5 と記す）及び背圧を与えない状態（以下 BP=0 と記す）の二通りの方法で、土質試験の CU 試験に準じた実験を行った。

図-6～8 に H 試料に関する BP=5 の場合の結果を示す。図-6 は全応力表示による軸差応力～軸ひずみ曲線、図-7 は間隙水圧～軸ひずみ曲線、図-8 は有効応力表示による軸差応力～軸ひずみ曲線を示している。図-6、図-8 の軸差応力～軸ひずみ曲線は、軸ひずみ約 1 % で最大強度を示し、その後、残留強度状態になっていることがわかる。また、図-7 の間隙水圧～軸ひずみ曲線は低拘束圧領域ではピーク後減少しているが、高拘束圧領域では、軸ひずみが約 2 % まで増加傾向にあり、その後、ほとんど変化していないことがわかる。以上の傾向は、H 試料の BP=0 の場合や、V 試料に関する BP=5 及び BP=0 の場合についても同様であった。

4. 試験結果の考察

4. 1 物理的性質について

表-1 に示される物理的諸量から判断すると、本凝灰岩は、きわめて多孔質であることがわかる。また、吸水率、有効間隙率に関して、静水中に 72 時間以上水浸させた場合と、真空脱気操作を行った場合では両者に 5～6 % の相違がみられる。このことから、本凝灰岩は、水浸しただけでは外気に開いた空隙に気泡が残留しているが、真空脱気を行うことによって、開いた空隙がほぼ飽和状態になることがわかる。

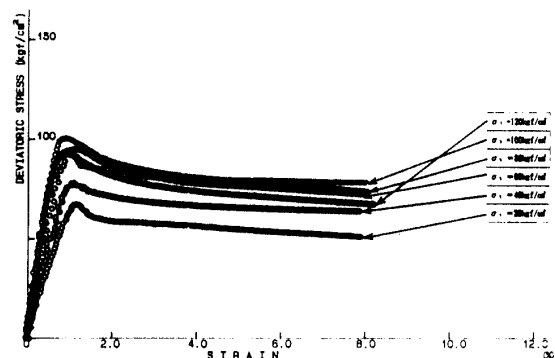


図-6 全応力表示による軸差応力～軸ひずみ曲線
湿潤 H 試料 (BP=5)

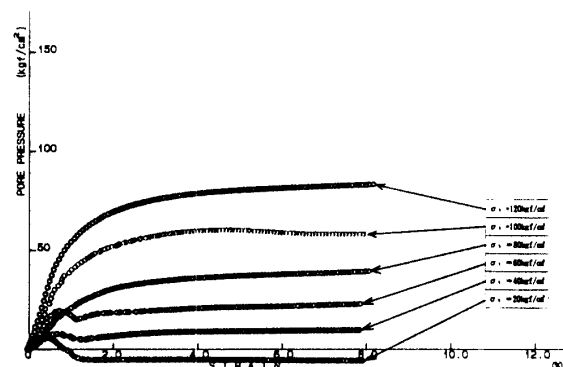


図-7 間隙水圧～軸ひずみ曲線
湿潤 H 試料 (BP=5)

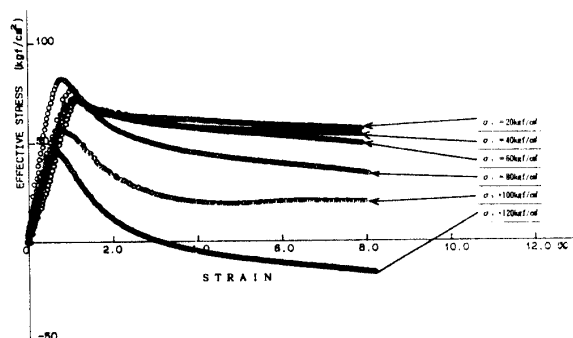


図-8 有効応力表示による軸差応力～軸ひずみ曲線
湿潤 H 試料 (BP=5)

図-9、10は、H試料に関する一軸圧縮強度 (q_u) と有効間隙率 (n_e) 及び吸水率との関係を、既往のデータ³⁾にプロットしたものであるが、本凝灰岩は、これまでに報告された第三紀の堆積岩・火山砕屑岩が示す範囲内に位置していることが確認できる。

4. 2 異方性について

図-2に示される一軸圧縮強度の頻度分布図から、H試料の一軸圧縮強度は100 ~ 120 kgf/cm^2 の範囲に分布しており、その平均値は106 kgf/cm^2 であるのに対して、V試料では、120 ~ 180 kgf/cm^2 の広範囲に分布して、その平均値は148 kgf/cm^2 であり、顕著な相違が生じている。

さらに、図-3に示されるような繰り返し载荷試験による応力~ひずみ曲線に基づいて、各载荷応力と残留軸ひずみ及び残留円周ひずみとの関係をプロットしたのが図-11である。

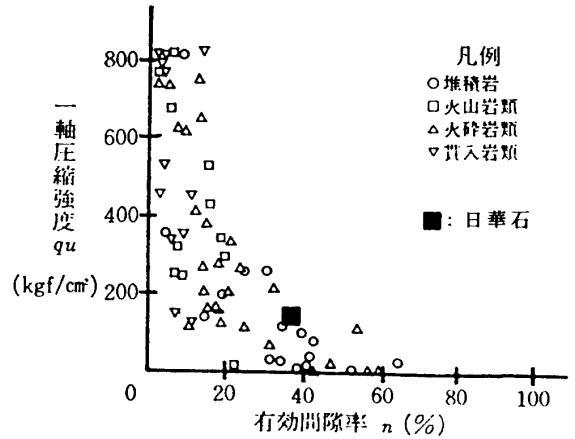


図-9 一軸圧縮強度と有効間隙率の関係

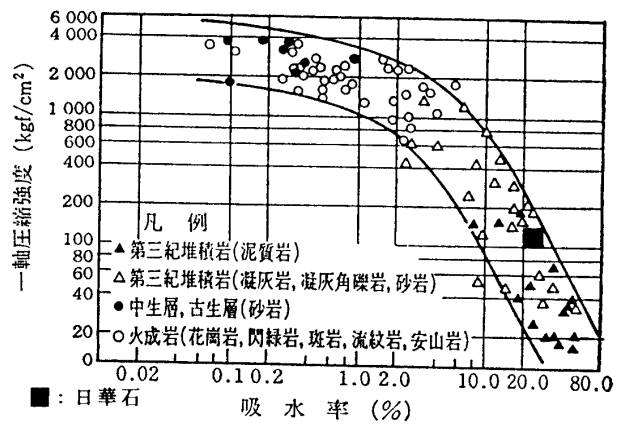


図-10 一軸圧縮強度と吸水率の関係

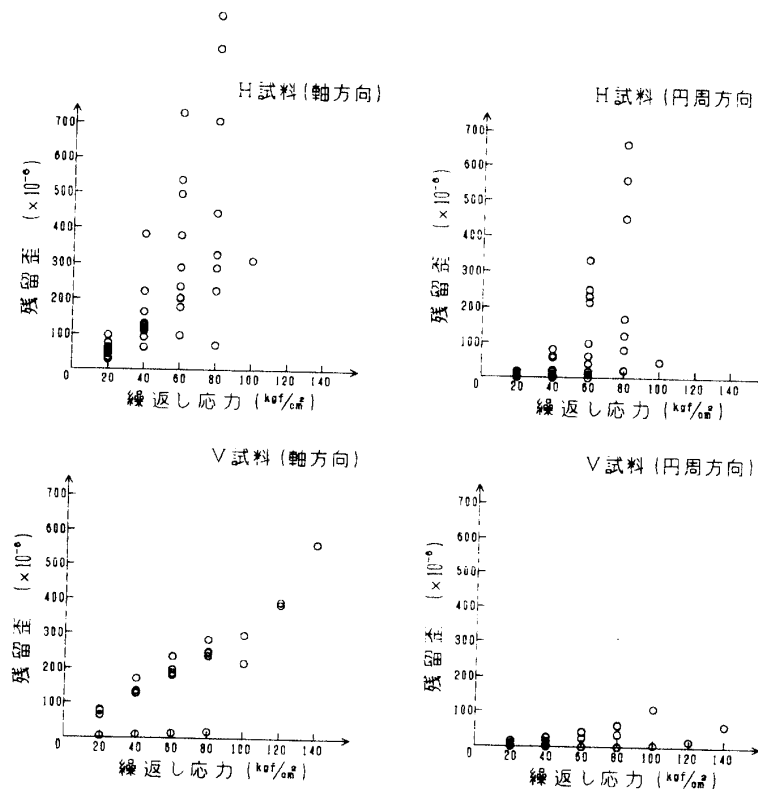


図-11 繰り返し応力と残留ひずみの関係

図-11より、V試料に比較してH試料の方が、各載荷応力毎における残留ひずみにバラツキが生じていることがわかる。しかし、平均的な傾向として、H試料はV試料に比較して、残留軸ひずみで約2倍、残留円周ひずみで約3倍の相違が生じている。

このように、一軸圧縮強度や繰返し載荷試験による残留ひずみの観点から、本凝灰岩は異方性を有していることが指摘できる。

4. 3 強度特性について

乾燥試料に対する一軸圧縮強度の平均値は、H試料では106 kgf/cm²、V試料では148 kgf/cm² となっていることは既に述べた通りである。一方、表-2及び3より、弾性係数の値は軸方向の場合、H及びV試料でそれぞれ 0.3×10^5 及び $0.4 \sim 0.5 \times 10^5$ kgf/cm² で、円周方向の場合、H及びV試料でそれぞれ $1.1 \sim 1.6 \times 10^5$ 及び $2.3 \sim 2.6 \times 10^5$ kgf/cm² となっている。

乾燥試料に対する三軸圧縮試験の結果は、図-4及び5に示す通りであるが、それらの結果にモール・クーロンの破壊規準を適用して、内部

摩擦角（ ϕ ）、せん断強度（ τ ）を求めたものを 表-4 SST及びMSTより求まる強度定数

表-4に示した。V試料では ϕ 、 τ ともにSST結果の方が、MST結果より大きくなっており、H試料では τ の値について若干MST結果の方が大きくなっているものの、 ϕ についてはSST結果の方が大きくなっている。このことより、MST及びSSTは、ほぼ

		$\phi(^{\circ})$	$\tau(\text{kgf/cm}^2)$
V試料	SST	8.0	38.3
	MST	6.2	36.7
H試料	SST	12.7	36.7
	MST	6.5	43.3

同様の結果を生じていることから、本凝灰岩に対して、MSTの適用は可能であると考えられる。

湿潤試料に対するCU試験の結果は図-6、7及び8にその一例を示してあるが、BP=0で全応力表示のH試料についてのみモール・クーロンの破壊規準が適用可能であるが、これ以外の場合については、適用し難い。また、有効応力の原理の適用も困難であると考えられる。

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、観音下凝灰岩（日華石）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) 本凝灰岩の吸水率は32(%)、有効間隙率は42(%)であり、一軸圧縮強度は概略100～150 kgf/cm²、弾性係数は $0.3 \sim 0.5 \times 10^5$ kgf/cm² である。
- (2) 一軸圧縮強度や繰返し載荷試験による残留ひずみの変化より、本凝灰岩は異方性を有していることがわかった。
- (3) 本研究における室内実験の結果から見る限りでは、湿潤試料に対して有効応力の原理、あるいはモール・クーロンの破壊規準を適用することは難しいと考えられる。

謝 辞

本研究で用いた試料の採取に際しては、観音下石材（株）に多大の便宜を図っていただいた。

ここに記して深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 澤崎雅之, 高橋義彦, 日下部吉彦, 伊藤一郎: 足羽山産凝灰岩(笏谷石)の強度特性に関する研究, 福井工業大学研究紀要, 第22号, pp.185-192, 1992年.
- 2) Kovari, K. & A. Tisa: Multiple failure state and strain controlled triaxial test, Rock Mechanics, Vol. 7 No. 1, pp. 17-33, 1975.
- 3) 桑原啓三: 岩石の圧縮強度とせん断強度による分類の試み, 応用地質特別号, 応用地質学会 p. 28, 1984.
- 4) 土質工学会編: 岩の調査と試験, p. 381, 1989.

(平成4年12月16日受理)