

堆積軟岩の強度特性に及ぼす 間隙水圧の影響に関する研究

(昭和63年度委託研究)

平成元年 3月

・研究申請者 動力炉・核燃料開発事業団

・研究代表者 北海道大学工学部土木工学科
基礎地盤工学講座 教授 土岐祥介

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

ま え が き

近年になって、種々の構造物を建設するに当たって、軟岩の力学的性質が問題となる場合が多くなってきた。軟岩という言葉が工学の分野で頻繁に使われるようになったのは比較的新しい。これまで岩石力学で対象としてきたいわゆる硬岩よりは破壊強度、剛性、気密性などの点で劣るが、土質工学で対象としてきた土よりは固結度が高く、強度や安定性の面で優れている、そのようなものを総じて軟岩と呼称している。軟岩は両工学分野の間に位置することから、その物理的および力学的性質は未だ十分に明らかにされていおらず、軟岩性地盤の内部あるいはその上に構造物を建設する場合の調査・設計・施工に至るまでの手法も確立されているとは言えない。

この研究は、以上の点に着目して、堆積軟岩の物理的および力学的性質を筆者らが専門とする土質力学の立場から明らかにしようとしたもので、いくつかの試料について室内試験を行い、間隙水圧の影響を中心にして軟岩の力学的性質を様々な角度から検討している。

堆積軟岩の強度特性に及ぼす間隙水圧の影響に関する研究

1. 本研究の背景、目的および意義

大深度地下空間の有効利用が話題となっている今日においては、生活空間として、石油、天然ガス、電力などの備蓄施設として、あるいは、各種産業廃棄物の長期貯蔵施設として、岩盤性地盤の有効利用についての検討が急がれている。日本の国土に占めるいわゆる軟岩地帯の割合は非常に多いが、これまでは十分な支持力や気密性が期待できない等の理由から不良な地盤であるとされ敬遠されてきた。しかし、近年は、軟岩地盤上にダムや長大橋を建設することや、軟岩地帯においても大規模な掘削をすることが可能になり、本四架橋や青函トンネルに代表されるような成果が急速に蓄積されつつある。したがって、岩盤の中でも特に軟岩の力学的な性質を明らかにし、適切な解析手法を確立することを目標に多くの研究者が種々の角度から検討を始めている。

当研究室はこれまで、専ら砂の変形・強度特性を物性的に明らかにし、砂質地盤の安定性を適切に評価する手法の開発を念頭において研究を進めてきた。しかし、上述の背景の下において軟岩、特に堆積軟岩の力学的性質の研究を本年度より開始した。堆積軟岩は沖積土が長い年月の間に次第に固結度を増したものであり、岩石と土の中間に位置するものと認識しても構わない。その力学的性質は土の力学的性質と類似している部分が少なくない。当研究の狙いは、軟岩と土の力学的性質の類似性あるいは相違点を明らかにするとともに、土質力学において発達してきた各種の評価法や解析手法の岩盤力学への適用を試み、検討することである。

土質力学におけるいくつかの基本原則のうち最大のものは、Terzaghiによって確立された「有効応力の原理」であり、土の変形・強度特性に影響を与えるのは全応力と間隙水圧の差、すなわち、有効応力のみであるとするものである。土質工学および土質工学においてはこの原理は広く認められており、その上に立って物性の調査や解析を進めている。しかし、岩石や不飽和土においては常に有効応力の原理を適用できるわけではなく、いくつかの条件が満たされている場合のみ適用することができるとの報告が数多くある。最近、土質工学会でも機関紙である「土と基礎」(1988)において興味深い議論がなされている。

本研究では、採取した地点や地層が異なる合計4種類の堆積軟岩について三軸圧縮試験を実施した。試験では、供試体を飽和条件で間隙水圧(バックプレッシャー)を与えながら等方圧密し、排水条件あるいは非排水条件で試験を行っている。この際、全応力および有効応力の条件は計画的に設定した拘束圧と間隙水圧の種々の組合せによって決めている。試験で観察された変形・破壊挙動を比較・検討すること

によって、有効応力と間隙水圧の影響を明らかにすることができる。応力条件を変化させた一連のせん断試験の他に、異なるせん断ひずみ速度の下で試験を行うことによって変形・強度特性に及ぼすひずみ速度の影響が有効応力と間隙水圧によってどのように変化するのかを検討している。

岩石力学におけるこの方面の研究はこれまであまり多いとは言えない。また、それらのうちのほとんどのものは間隙水の存在の有無に注意を払い、有効応力の原理において考慮している水圧による物理的な作用よりも、水の化学的な作用による物性の変化を中心に議論を進めている。有効応力の原理が成立するかどうかを適切に議論している2・3の研究（Handinら;1963, 赤井ら;1978, 後藤ら;1982）はそれぞれ結論にたどり着いてはいるが、試験結果はまちまちである。結論が異なる理由のうち最大のものはHandinが指摘しているように岩石の種類によって間隙の大きさ、連続性および透水係数などが著しく異なるということである。

もし、岩石力学においても暗黙のうちに「有効応力の原理」を肯定して種々の議論を進めていくことが可能なら、土質力学と岩石力学の融合は次の段階へと大きく前進することができる。しかし、軟岩と言っても性質は多岐に渡っていて、間隙水圧の影響などは岩石の種類によって大きく変化すると予想できる。したがって、本研究の結果、単純で受け入れられ易い結論が得られなくても、種々の性質を有する岩石についてデータを蓄積し、間隙水圧の影響について統一的に評価することの一助になれば本研究の目的は一応の達成されると筆者らは考えている。

2. 試料とその物理的性質

2.1. 試験に用いた試料

実験に用いた試料は北海道内の2地点において採取された堆積砂岩4種類である。以下ではそれぞれの試料採取地点の地質状態およびそれらの基本的な物理的性質を説明している。

第一の試料は北海道留萌市南幌糠地区における留萌ダム建設予定地の右岸調査横坑から採取した砂岩系の堆積軟岩（RUMOI-Sandstone）で、新第三記鮮新世下部砂岩層に属している。シングルコアカッターを用いて5mの深さまで試料を採取した。RQDは50%前後であった。試料は灰白色で均質、肉眼で割れ目を見つけることはできなかった。したがって、本研究のように同一の試料を数種類の異なった応力条件で試験してその力学挙動の変化を考察しようとする場合、この試料は最適であると思われる。

第二の試料は、3種類の細粒砂岩あるいは中粒砂岩に分類される堆積岩（A, B, C-

Sandstone) である。これらは、幌延町において建設が計画されている貯蔵工学センター建設予定地点における深層ボーリングにより採取されたもので、それぞれ、更別層 (A-Sandstone, 深度183.7-185.0m)、勇知層 (B-Sandstone, 深度502.6-524.0m)、声間層 (C-Sandstone, 深度1006.8-1028.0) から採られた典型的な試料である。B-, C-Sandstoneは比較的均質で有るが、A-Sandstoneは5cm位おきに粘土質の薄い層を含んでいる。

2.2. 試料の物理的性質

これらの試料については、自然状態での単位体積重量 γ_t と含水比 w_o を測定し、比重試験によって求めた比重 G_s と併せて間隙比 e_o と飽和度 S_r を推定している。また、2・3の供試体について一軸圧縮試験を行い一軸圧縮強度 q_u と割線形数 E_{s0} を求めた。さらに、弾性波速度試験によりP-波、S-波の速度 V_p, V_s を測定し、動的なポアソン比 ν_d 、せん断剛性 G_d 、ヤング率 E_d を算出した。これらの物理的諸性質は表-1にまとめている。ただし、()内は推定値である。

表-1 試料の物理的性質

	RUMOI-Sandstone	A - Sandstone	B - Sandstone	C - Sandstone
湿潤密度 γ_t (tf/m ³)	1.98	1.87	2.04	2.055
比重 G_s	2.632	2.632	2.639	2.643
含水比 w_o (%)	22.8	(25.9)	21.0	19.3
間隙比 e_o	0.632	(0.772)	0.565	0.534
飽和度 S_r (%)	94.95	(88.30)	98.09	95.52
一軸強さ q_u (kgf/cm ²)	38.0	2.0	10.2	34.4
割線係数 E_{s0} (kgf/cm ²)	5,050	200	1,255	3,431
弾性波速度 V_p (m/sec)	1,060	1,360	1,860	1,430
弾性波速度 V_s (m/sec)	496	303	252	570
ポアソン比 ν_d	0.36	0.47	0.49	0.41
せん断剛性 G_d (kgf/cm ²)	4,890	1,900	1,340	6,440
ヤング率 E_d (kgf/cm ²)	13,400	5,640	3,990	18,000

2.3. 軟岩試料の粒度分布

本研究で使用した試料のように固結度が比較的小さくてその力学的性質が土質のそれと関連付けて考えられる場合には、岩石を構成している粒子の粒度分布なども岩石の力学的性質を決定する重要な性質の一つであると考えられる。そこで、本研究では、RUMOI-Sandstoneの粒度分布を測定し、その過程で粒度分布の測定方法についても考察してみた。

ボーリング試料から後で述べる三軸試験用の供試体を作成する際、試料の切断および成形はストレートエッジによって行うことができた。試料の固結度はその程度であったが、乾湿を十数回繰り返しても固結を解くことはできなかった。そこで、粒度試験は供試体成形時に出る削り屑と供試体一個相当の土塊を過酸化水素水に約一週間漬け込んで固結を解放したものについて比重浮標を用いた粒度試験を実施した。図-1はその結果を示している。削り屑によった方が全体的に粒径の大きい方に分布が偏っていて、また、不自然な形で大粒径粒子が観察されている。したがって、ストレートエッジで削るだけでは十分に粒子の分散が行われていないと思われ、過酸化水素水のような分散剤を効果的に使用する必要がある。なお、試験の結果 RUMOI-Sandstoneは細粒砂岩と分類できる。

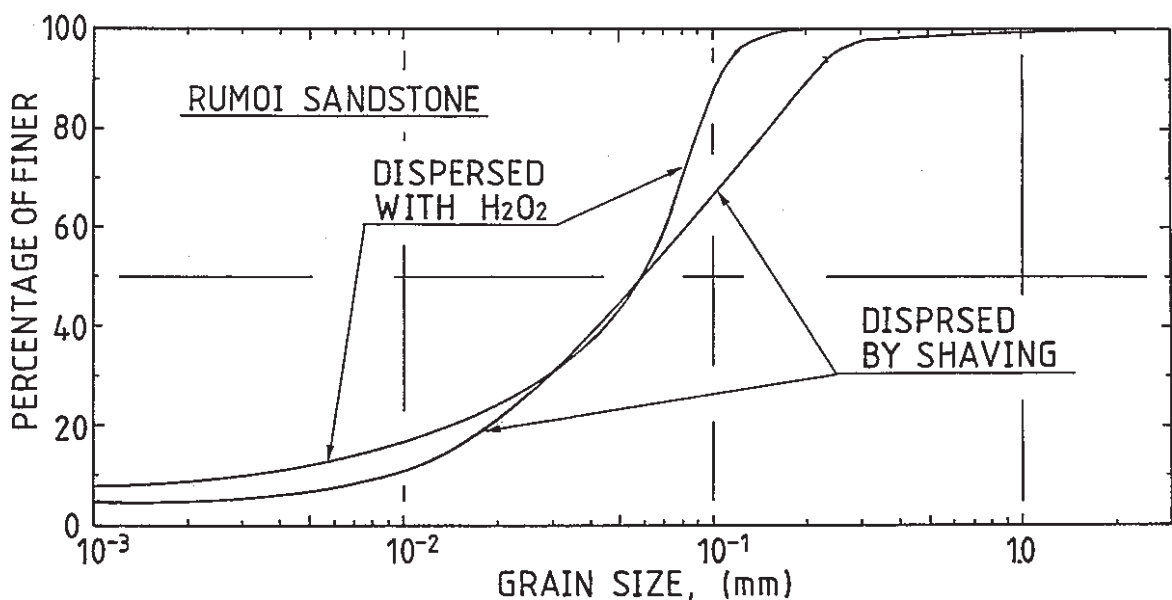


図-1 RUMOI-Sandstoneの粒度分布

3. 三軸試験の方法と試験内容

3.1. 三軸試験の方法

軟岩試料の透水性および変形・強度特性を調べるために本研究では岩石用の中圧三軸圧縮試験機を使用した。圧縮室はステンレス製で、 50kgf/cm^2 までの封圧を掛けることができる。試験した円筒供試体の寸法は直径 5cm 高さ 10cm で、供試体からの間隙水の出入りを容易にするために、脱気水に浸したろ紙で側面を覆っている。ただし、透水性を調べる試験の際にはこのろ紙を使用していない。このときは、供試体側面にシリコンゴムを塗布し、乾かないうちにメンブレンをかぶせた後、三軸セル内で数時間放置してシリコンゴムが固まるのを待ち供試体側面とメンブレン接触部における透水を防いでいる。

どの試料においても透水係数は $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 以上と推定されることから、排水あるいは非排水条件を問わず軸ひずみ速度を $0.1\%/min$ とした。排水試験中には間隙水圧の発生が観測されなかったことから試験条件は満たされていたと考えられる。ただし、一部の試験ケースではひずみ速度の影響を調べるために、ひずみ速度を $0.5 \sim 0.001\%/min$ まで変化させて試験を行っている。

供試体の飽和化を図るために、成形した供試体をビーカーに入れて脱気水を満たし、その後ビーカーを一日以上真空中に放置した。このような処置により試験装置にセットされる直前の供試体の飽和度は、比重、間隙比および単位体積重量から推定して99%程度まで上昇していた。三軸試験ではさらに 2.0kgf/cm^2 以上のバックプレッシャーを与えているので十分な飽和度が得られていたと考えてよい。

3.2. 試験ケース

冒頭に述べたように、本研究の目的は堆積軟岩の変形・強度特性に及ぼす間隙水圧の影響を調べることにある。このような課題に加えて、基本的な課題として有効拘束圧の影響についても十分に検討を加えている。したがって、試験ケースはおおよそ2つのグループに分けられる。

第一のケースでは間隙水圧は等しいが有効拘束圧が異なっている。この一連の試験によって変形・破壊挙動に及ぼす有効拘束圧の影響を調べている。第二のケースでは有効応力条件は等しいが間隙水圧を広範囲に変化させている。これらの試験結果を比較・検討することにより、間隙水圧の相違による堆積軟岩の強度及び変形挙動の変化を知ることができる。

砂質土および軟岩の変形挙動が変形速度に依存していることは広く知られていることであり、ひずみ速度の影響が有効拘束圧および間隙水圧の大きさによってどのように変化するかについても検討を加えている。

試験ケースは表-2,3に示した通りである。本研究で使用した試料の中ではRUMOI-Sandstoneだけが十分に有ることから、試験はRUMOI-Sandstoneを中心に行っている。したがって、試験ケースが最も多くなっている。また、非排水試験を行い非排水変形・破壊挙動を検討すること、および、ひずみ速度の影響について検討することはRUMOI-Sandstoneについての試験結果に基づいて行っている。間隙水圧係数Bおよび透水係数の拘束圧依存性についてもRUMOI-Sandstoneにおいて検討している。

表-2 RUMOI-Sandstoneについての試験ケース

		間 隙 水 圧 u					
		2	5	15	25	35	40
有 効 応 力 σ'	5	◎	○	○	◎	○	◎
	15	○	○				
	25	◎	○				
	35	○	○				
	40	◎	○				

(単位kgf/cm²)

○ 排水試験、 ◎ 排水および非排水試験

表-3 A,B,C-Sandstoneについての試験ケース

		間隙水圧 u		
		5	20	40
有 効 応 力 σ'	5	○	○	○
	20	○		
	40	○		

(単位kgf/cm²)

○ 排水試験

4. 試験結果と考察

4.1. 透水係数の拘束圧依存性

透水係数は三軸試験機にセットされた供試体について変水位試験を行って測定した。その結果は図-2に示すようである。有効拘束圧の増加とともに供試体の間隙比が減少し、粒子間の間隙は狭くなるので透水係数は試験結果が示すように減少するのであろう。有効拘束圧と透水係数との間には図示のように両対数紙上で直線的な関係にあるとすることができる。

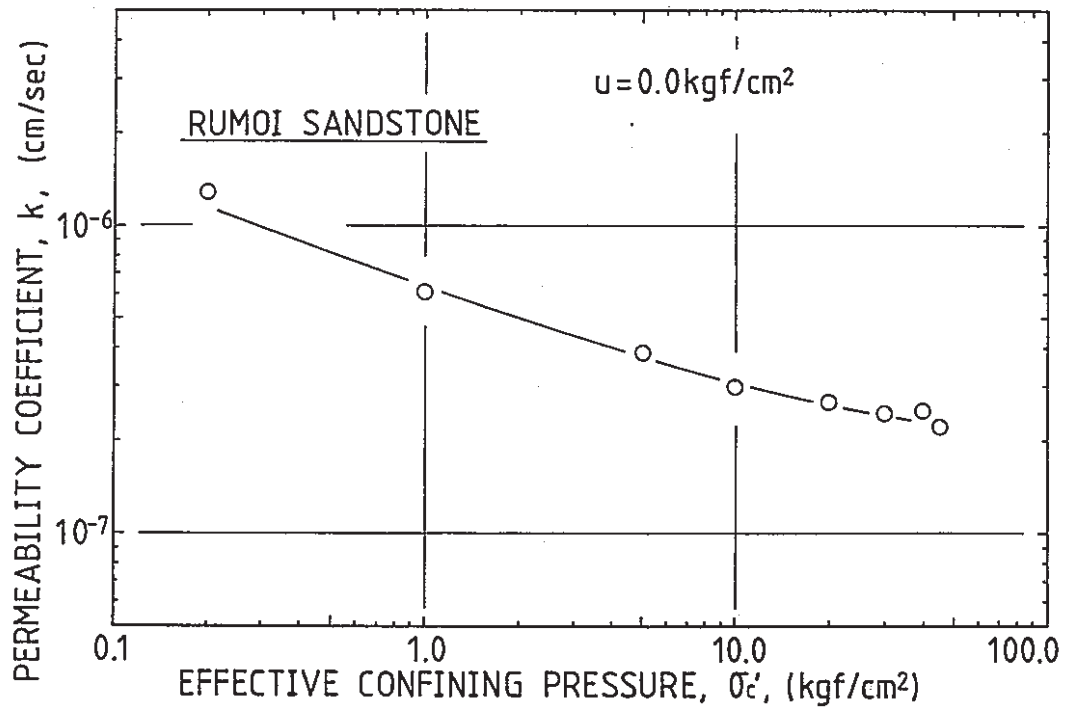


図-2 透水係数の有効拘束圧依存性

4.2. 間隙水圧係数の拘束圧依存性

通常、砂質土の飽和度は非排水条件で等方圧密した時に得られる間隙水圧係数 B によって推定することができる。しかし、岩石の場合はその骨格に対して水に匹敵する程度の体積収縮剛性が期待できるので、例え完全に飽和度しいても B 値が 1.0 にならないと予想される。

本研究では、軟岩の B 値に関して基礎的な検討を加えるために RUMOI-Sandstone について試験を行った。まず、バックプレッシャーを 2.0 または 5.0 kgf/cm²、有効拘束圧 5.0 kgf/cm² とし、その後非排水のまま拘束圧を 5.0 kgf/cm² 増加して、間隙水圧から B 値を算出する。次の段階ではまず排水経路を解放して間隙水圧を元の値に戻し、それから再度非排水条件として拘束圧を増加させている。以上のような手順によって有効拘束圧が 5.0~40.0 kgf/cm² の範囲にあるときの間隙水圧係数を求めた。結果は図-3 に示すようである。

2つの試験結果は有効拘束圧の増加とともに B 値が減少することを示している。これは、砂質土の場合と同様に軟岩の体積変化と有効拘束圧の関係は非線形で、拘束圧の増加にともない体積収縮に対する剛性が増加することによると考えられる。図-3によると B 値の減少傾向は著しく、バックプレッシャーが 2.0 kgf/cm² の場合には 0.3 程度、5.0 kgf/cm² の場合は 0.7 程度まで減少している。間隙水圧が高いほど残留している気体が間隙水にとけ込み飽和度は次第に高くなり B 値は増加するという傾向が一般に存在するが、試験結果はこのような傾向を顕著に示していると思われる。

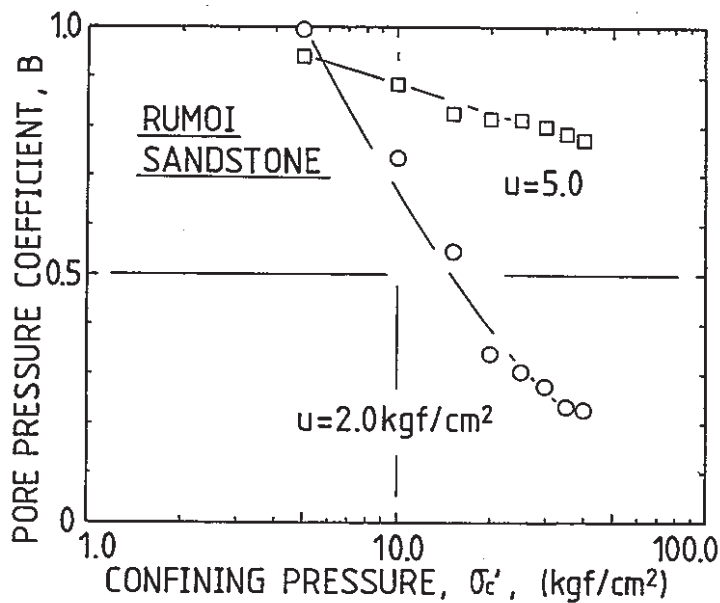


図-3 間隙水圧係数 B の有効拘束圧依存性

4.3. 変形・強度特性の有効拘束圧依存性

図-4(a)~(d)および図-5(a)~(d)にはRUMOI-Sandstoneについて間隙水圧を2.0および5.0kgf/cm²とし、有効拘束圧を5.0~40.0kgf/cm²まで変化させたときの応力-ひずみ関係およびピーク時と残留強度発揮時のモールの応力円を示している。また、図-6(a),(b)、図-7(a),(b)、図-8(a),(b)にはA-,B-,C-Sandstoneについての異なった有効拘束圧の下で観察された応力-ひずみ関係を示している。便宜上、軸ひずみ $\varepsilon_a=10.0\%$ の時に発揮されている強度を残留強度と見なしている。

図示のように、有効拘束圧の増加にともない等しい軸ひずみにおける偏差応力は増加し、体積変化は圧縮側へ変化している。拘束圧が低いときにはピーク強度が発揮された後強度が低下するいわゆるひずみ軟化が明瞭に観察されるが、拘束圧の増加とともにこのひずみ軟化現象は観察されなくなっている。すなわち、有効拘束圧の増加にともない変形挙動は延性的になり、体積収縮傾向が発揮されることが全ての試料について見られる。さらに、A-,B-,C-Sandstoneについての結果を比較すると、試料の採取深度が深く、原位置で最も高い土被り圧を受けていたC-Sandstoneにおいて体積の膨張傾向とひずみ軟化傾向が顕著である。

図-4(c),(d)および図-5(c),(d)はRUMOI-Sandstoneについて破壊強度をモールの応力図上で示している。これによるとピーク強度の包絡線は残留強度のものに比べて上側に凸であり、明瞭な粘着成分を有しているようである。一方、残留強度に関するものは、粘着成分を持たず原点を通過する直線で近似できそうである。

図-9(a),(b),(c)はRUMOI-Sandstoneについてピーク強度 q_p 、残留強度 q_r 、剛性を示す割線係数 E_{50} 、破壊時の軸ひずみ $\varepsilon_{a,p}$ と有効拘束圧の関係を示している。破壊強度についてはさきに述べた通りである。剛性は有効拘束圧とともに増加することが分かるが、有効拘束圧が10倍に増加しても E_{50} の増加は高々1.3倍程度である。また、有効拘束圧の増加にともない、変形は延性的になるので $\varepsilon_{a,p}$ は増加傾向を示している。

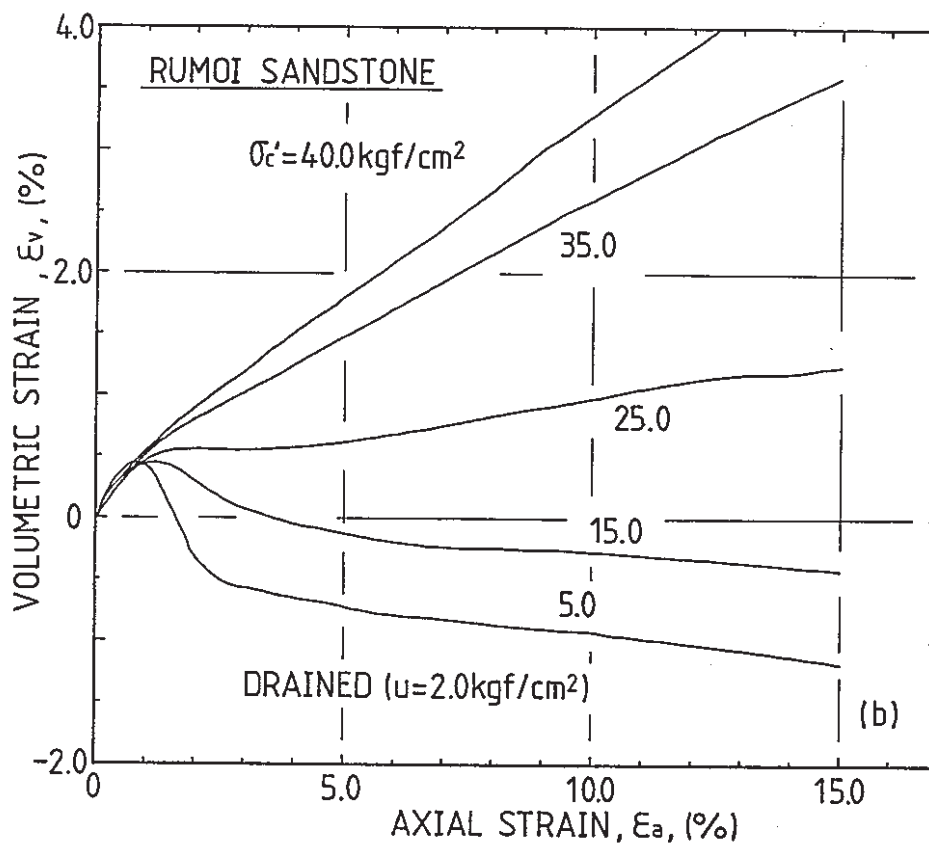
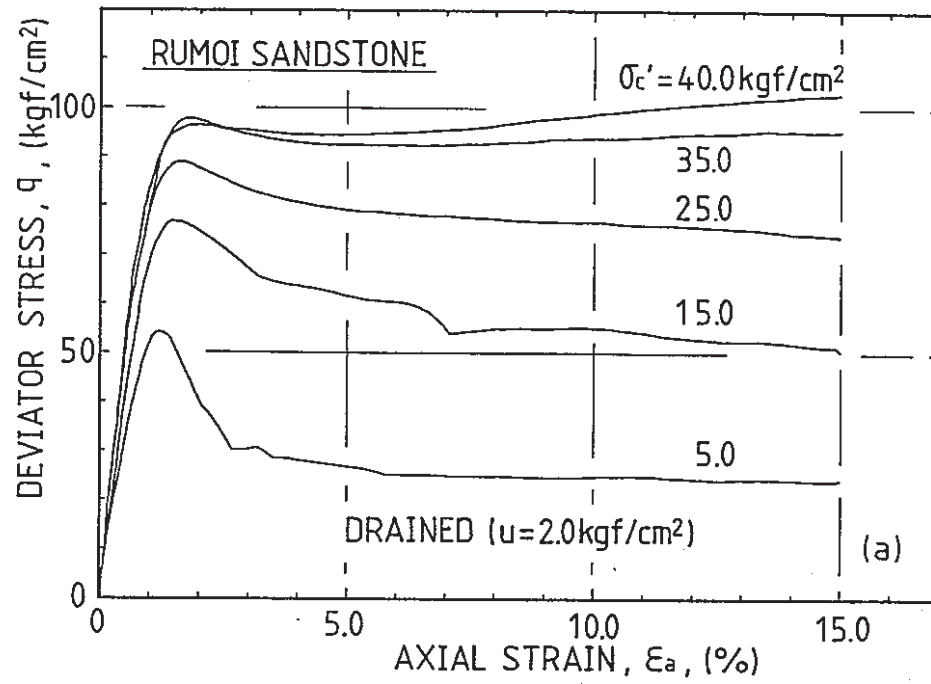


図-4(a),(b) 変形・破壊挙動の有効拘束圧依存性
(RUMOI-Sandstone, $u = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$)

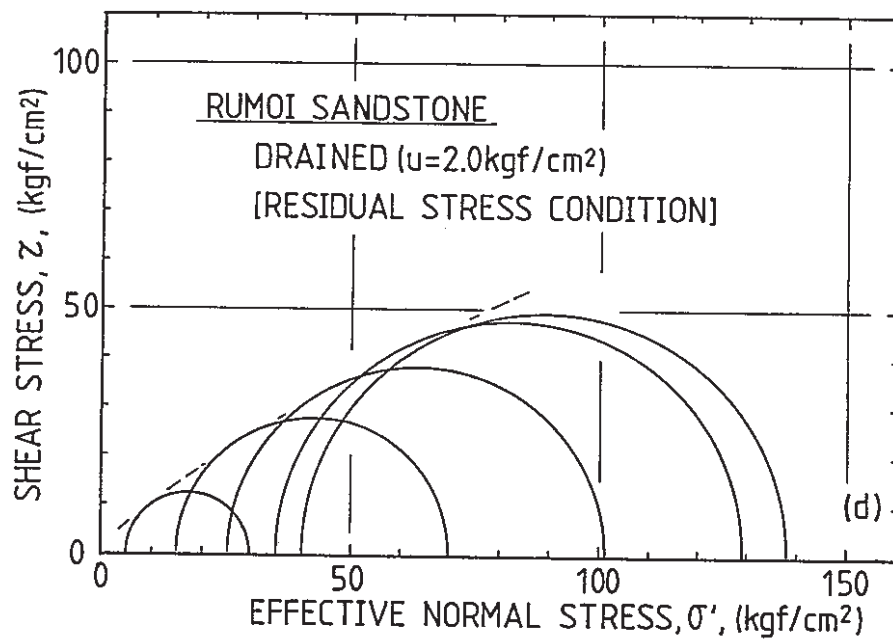
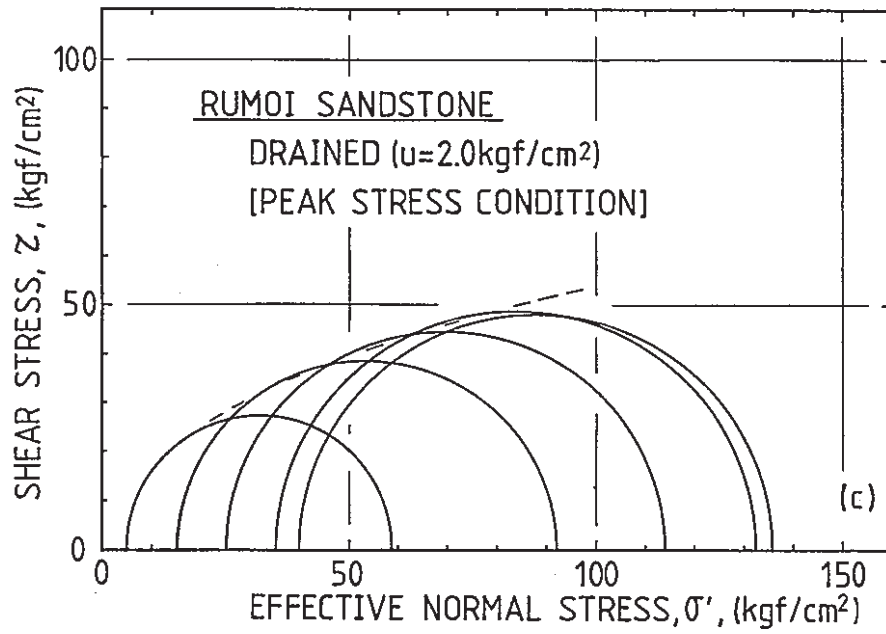


図-4(c),(d) 変形・破壊挙動の有効拘束圧依存性
(RUMOI-Sandstone, $u=2.0\text{kgf/cm}^2$)

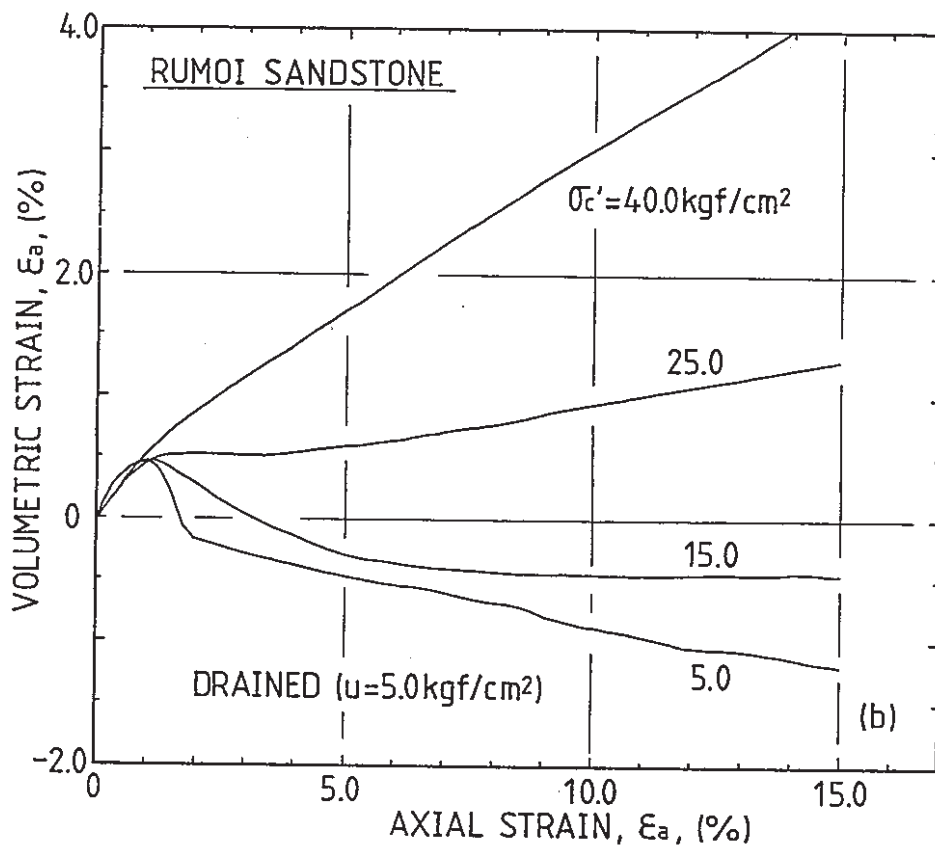
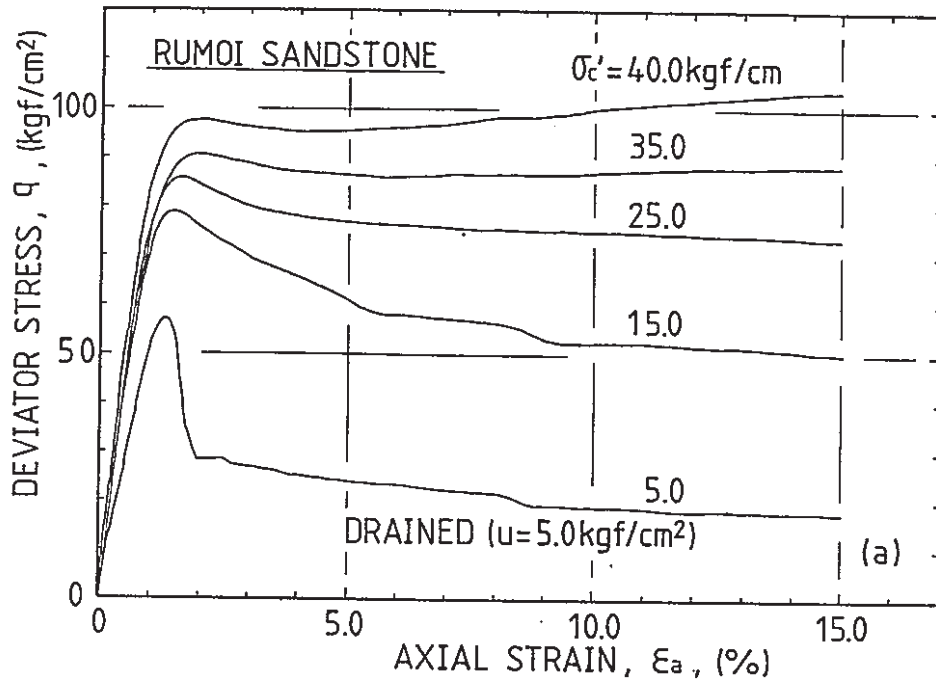


図-5(a),(b) 変形・破壊挙動の有効拘束圧依存性
(RUMOI-Sandstone, $u=5.0 \text{ kgf/cm}^2$)

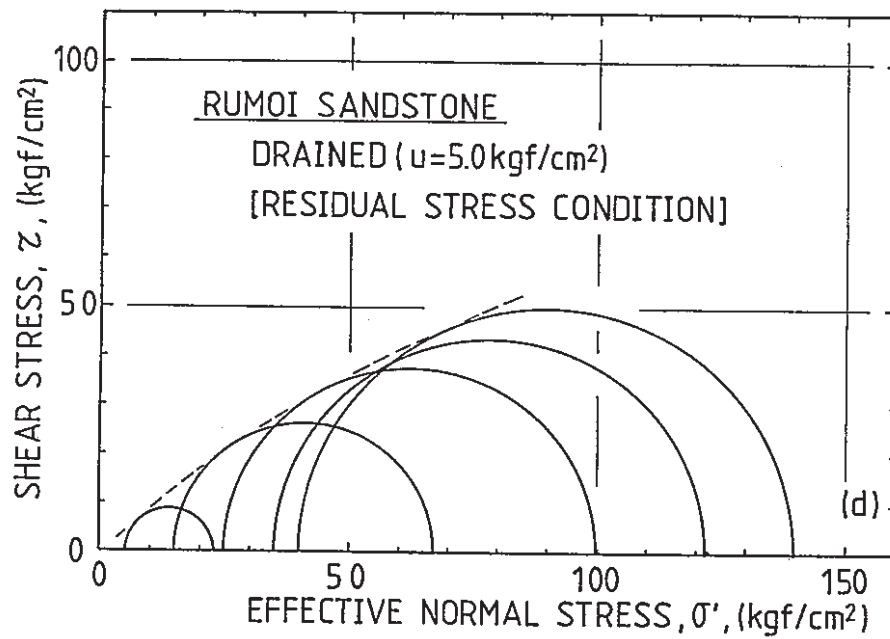
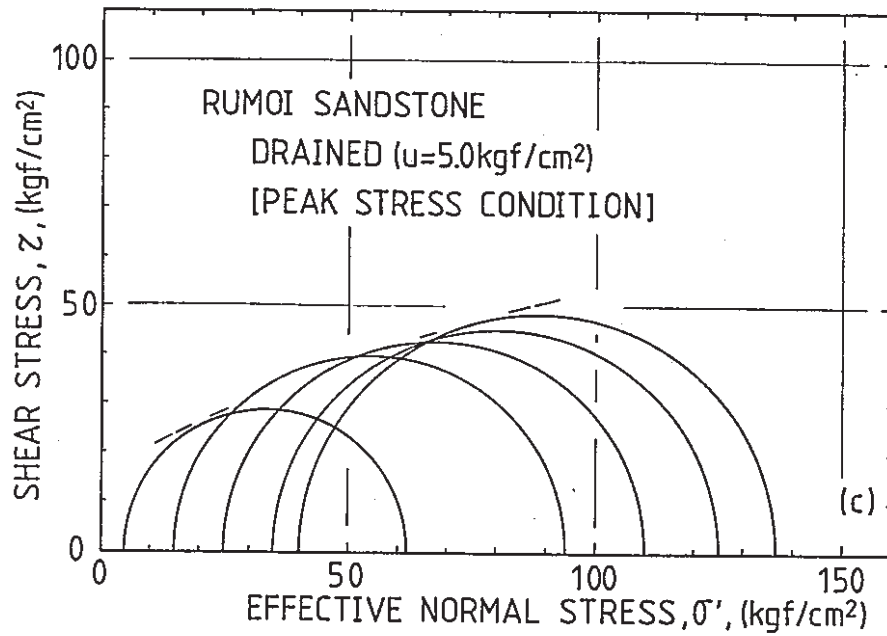


図-5(c),(d) 変形・破壊挙動の有効拘束圧依存性
(RUMOI-Sandstone, $u=5.0\text{kgf/cm}^2$)

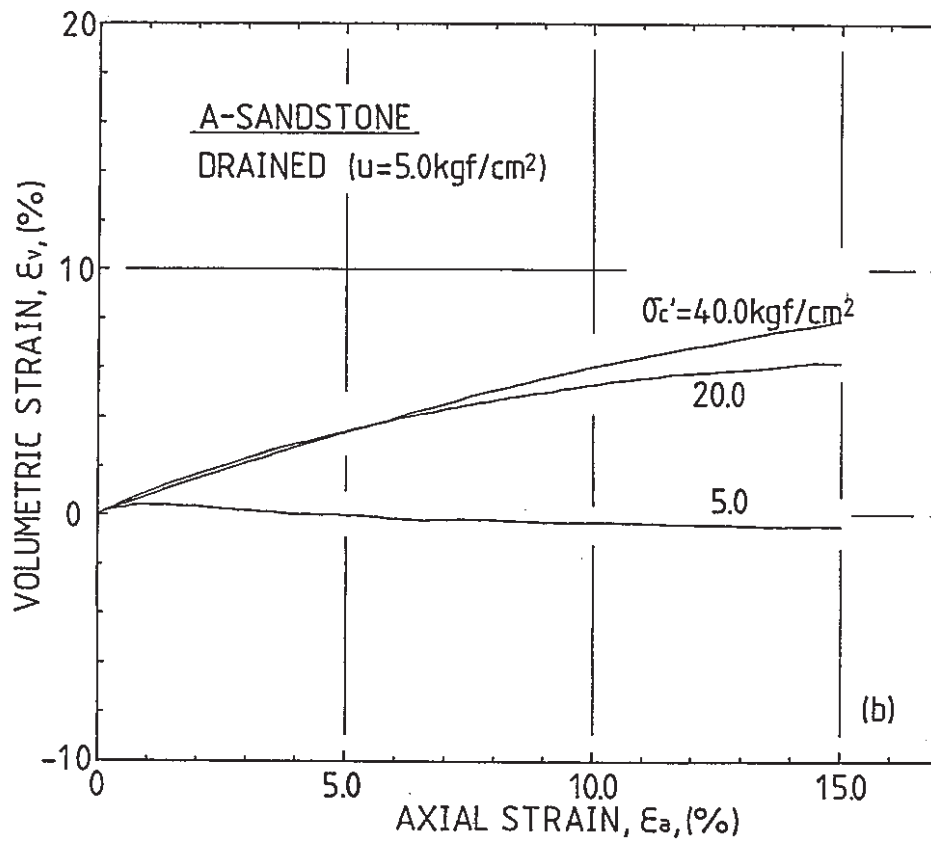
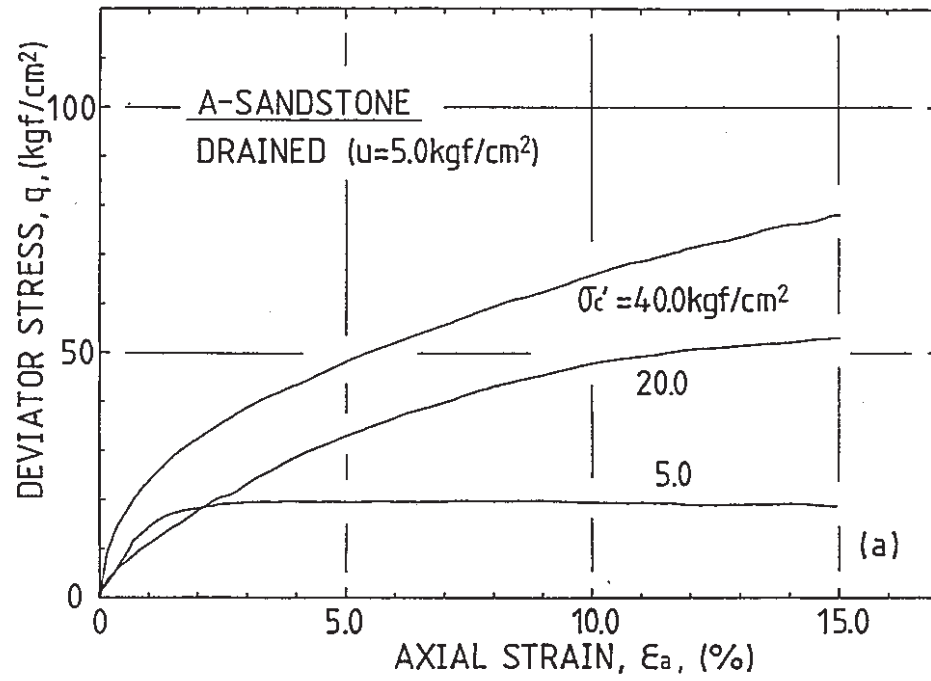


図-6(a),(b) 変形・破壊挙動の有効拘束圧依存性
(A-Sandstone, $u=5.0$ kgf/cm²)

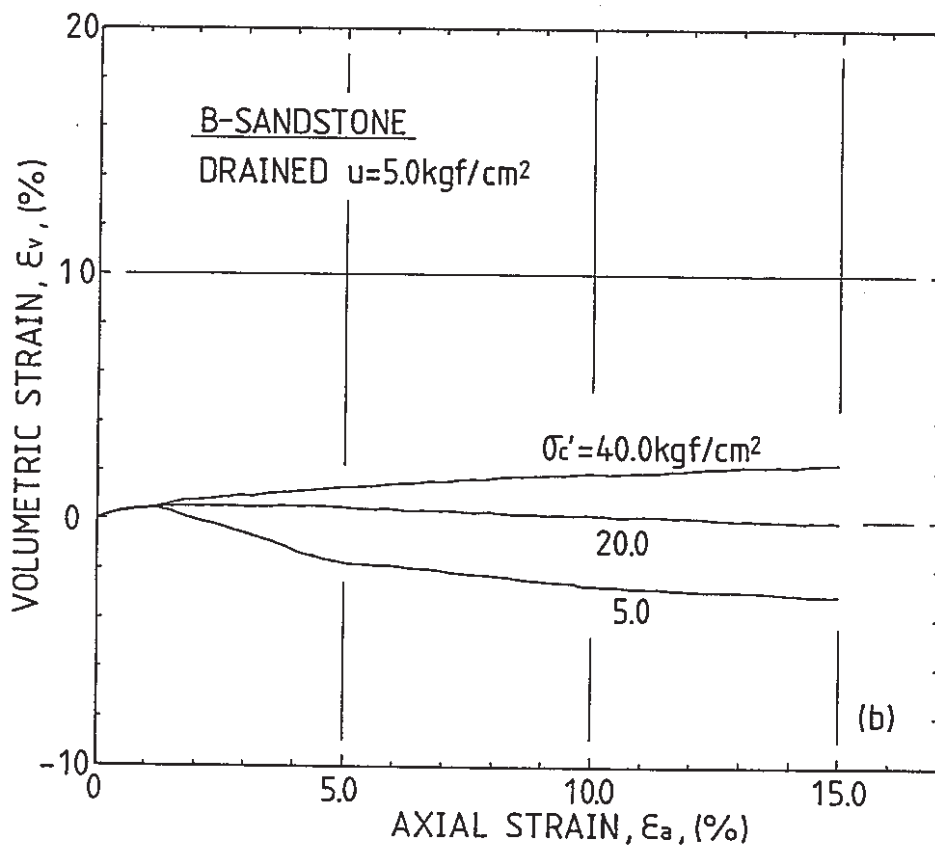
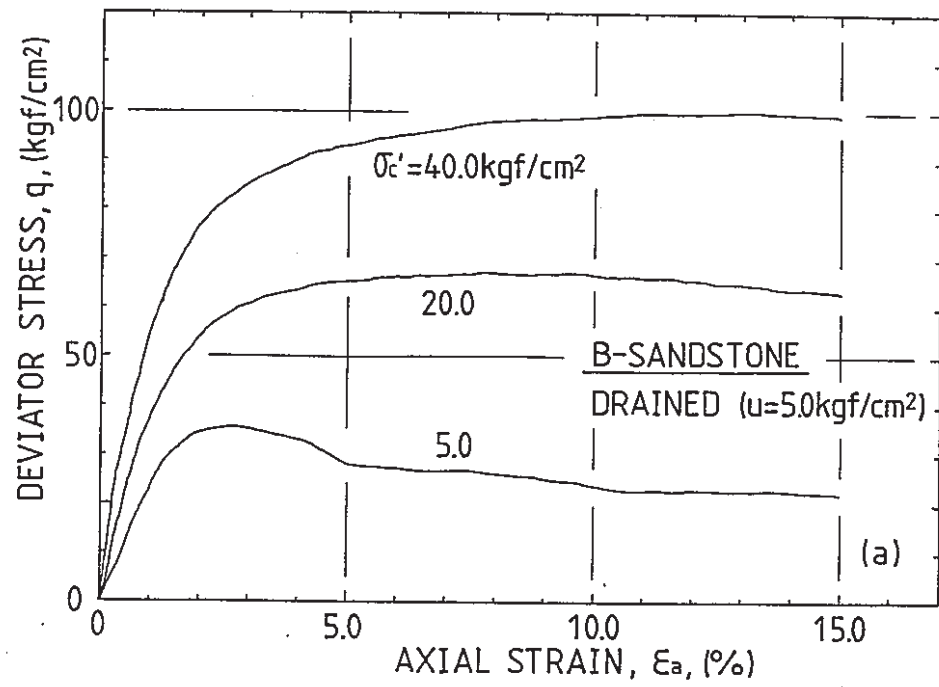


図-7(a),(b) 変形・破壊挙動の有効拘束圧依存性
(B-Sandstone, $u=5.0$ kgf/cm²)

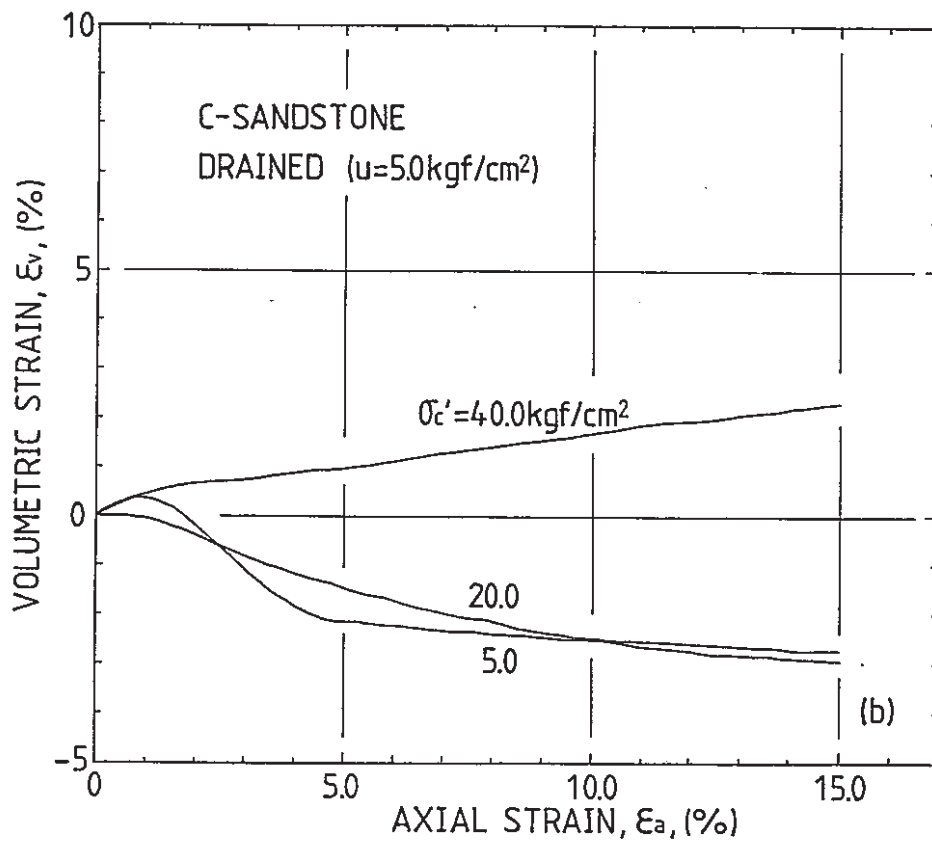
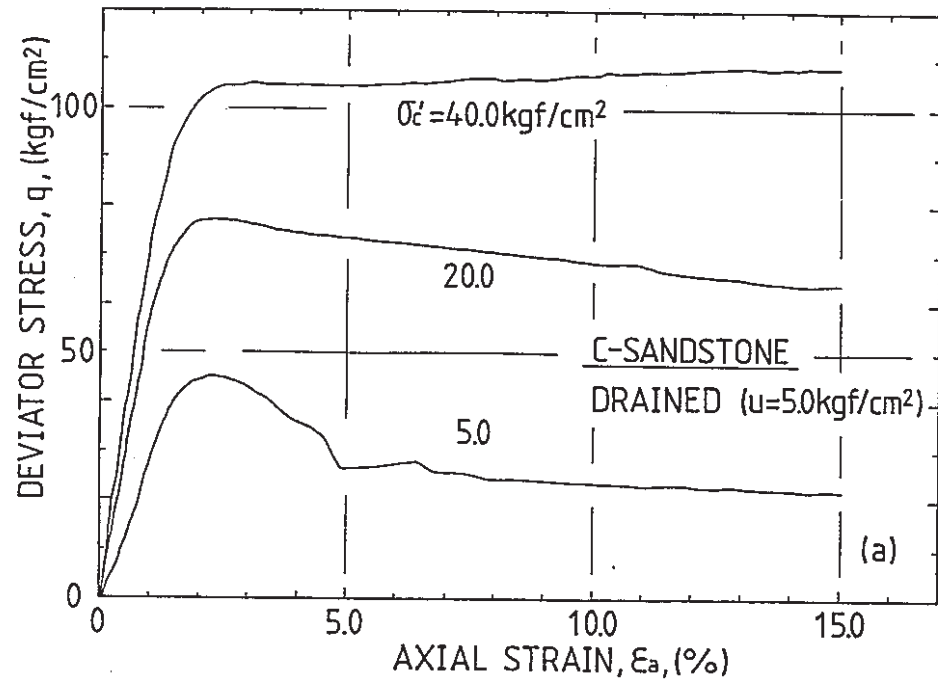


図-8(a),(b) 変形・破壊挙動の有効拘束圧依存性
(C-Sandstone, $u=5.0$ kgf/cm²)

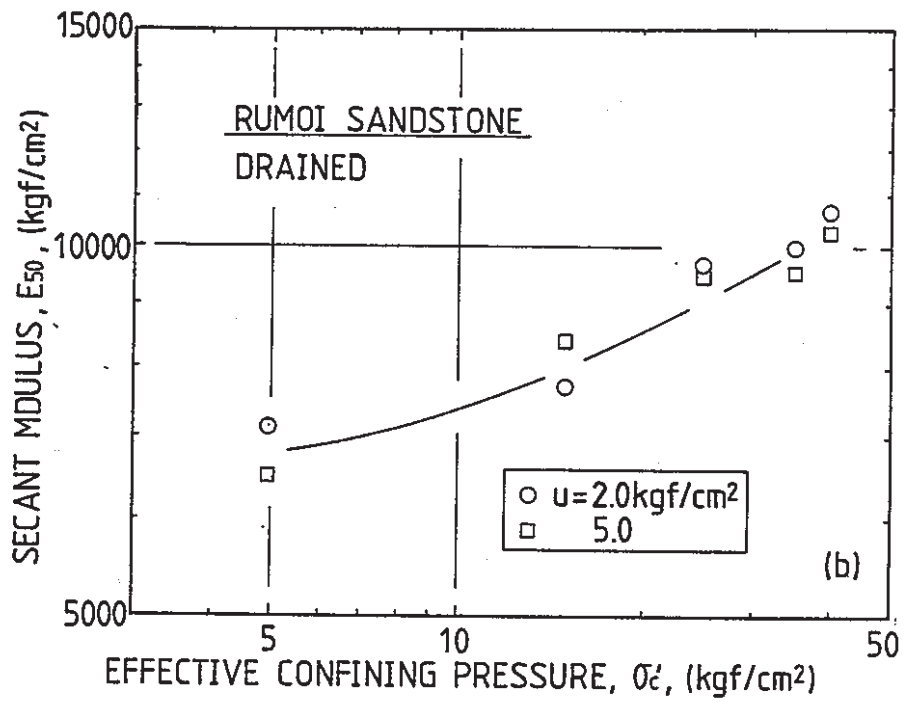
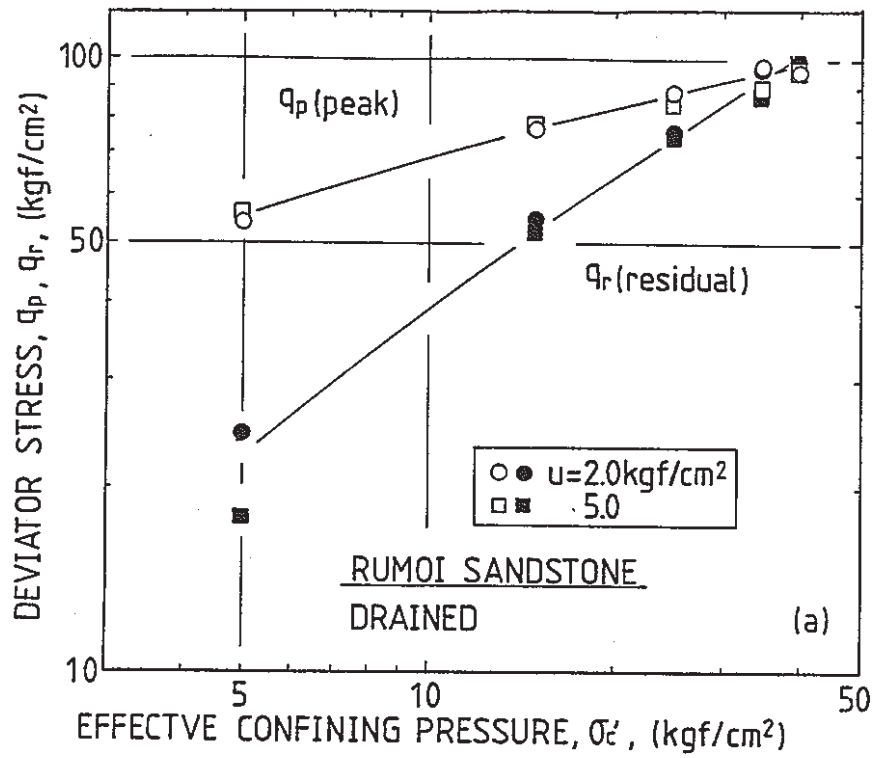


図-9(a),(b) 強度、剛性、破壊時変形量の有効拘束圧依存性
(RUMOI-Sandstone)

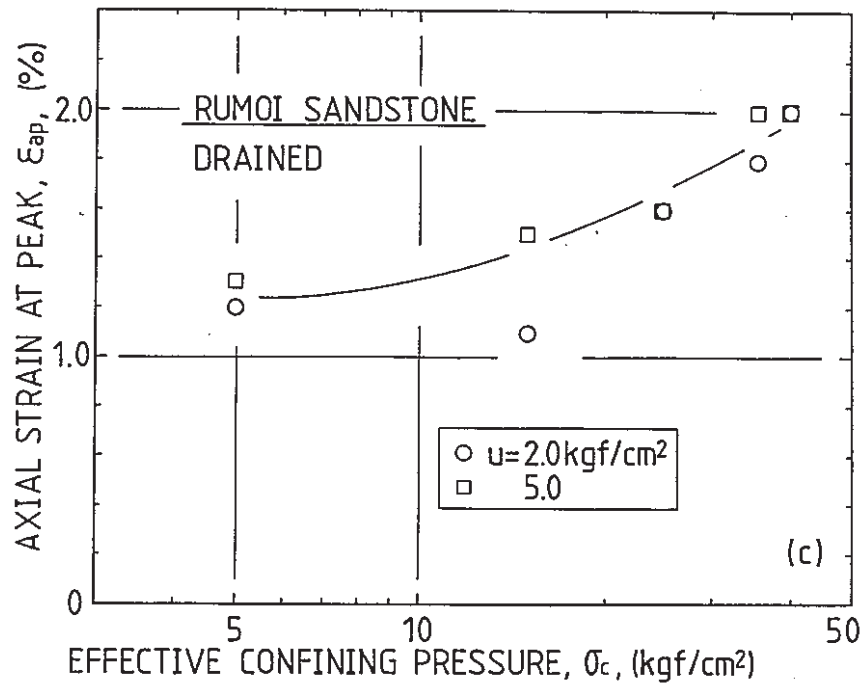


図-9(c) 強度、剛性、破壊時変形量の有効拘束圧依存性
(RUMOI-Sandstone)

4.4. 変形・強度特性の間隙水圧依存性

変形・破壊挙動に及ぼす間隙水圧の影響を調べるために有効応力条件を等しくして間隙水圧の値のみを変化させて行った試験で得られた応力-ひずみ関係を 図-10~13に示している。図-10(a),(b)はRUMOI-Sandstone、図-11,12,13(a),(b)は A-, B-, C-Sandstoneについての試験結果である。

RUMOI-Sandstoneについての試験の結果が示す特徴を説明すると以下のようである。試験で得られたいくつかの挙動は間隙水圧の大きさの違いによらず類似しており、前節で説明した拘束圧の影響に比べて間隙水圧の影響は小さく、無視しても構わないように思われる。ただし、図-14(a),(b),(c),(d)に示すように強度、剛性、破壊時の変形量および最大体積ひずみと間隙水圧の関係をプロットすると、ピーク強度は間隙水圧の増大によって事実上変化しないと認められる。一方、残留強度は間隙水圧の増加にともないわずかに増加傾向を示している。したがって、間隙水圧が増加するに従って次第にひずみ軟化現象は見られなくなり、挙動は延性的になっているように見える。 E_{50} の間隙水圧による変化を見ると、B-SandstoneとRUMOI-Sandstoneでは増加傾向が、A-, C-Sandstoneでは減少傾向が認められている。一方、破壊時のひずみ ϵ_{max} は、B-, C-Sandstoneでやや低下傾向が見られ、この傾向は、B-Sandstoneの E_{50} の増加傾向とは対応している。しかし、RUMOI-Sandstoneの ϵ_{max} のわずかな増加傾向あるいは、A-Sandstoneの不明確な傾向は、それらの砂岩の E_{50} の変化傾向とは一致していない。また、図-14(d)に示す最大体積ひずみ ϵ_{vol} は $u=20\text{kgf/cm}^2$ 付近で極大値を示す傾向がみられるが、 ϵ_{vol} に及ぼす間隙水圧の影響は明かではない。

後藤ら(1982)は砂岩、凝灰岩、大理石について同様な研究を行っている。砂岩、凝灰岩については変形・強度特性に及ぼす間隙水圧の影響については、間隙水圧の増加にともなう残留強度の増大や剛性の低下を報告している。しかし、大理石については間隙水圧の影響は大きく、強度の増加の他に、砂岩や凝灰岩とは逆に剛性の増大と体積の収縮傾向の増大を指摘している。後藤らはこのように間隙水圧の影響をまとめているが、結論としては間隙水圧の影響は微少で無視することができ、実用的には有効応力の原理を適用できるとしている。

一方、この研究についての先駆的な研究を行ったHandin(1963)は種々の岩石について同様な研究を行い間隙水圧の影響について報告しているが、硬岩に属すると思われる砂岩については後藤らとは逆に、間隙水圧の増加にともなう強度の低下、剛性の増大、体積の収縮傾向の増大を報告している。

以上述べてきたように、岩石の中においてもその性状により間隙水圧の影響の仕方はまちまちであり、今後も種々の岩石についての試験結果がまたれるところである。今回4種類の砂岩について実施した一連の試験結果を総合的に考察して、現時

点では次のように推定できる。

- 1) 堆積砂岩や、凝灰岩のように間隙の占める割合が大きくその連続性がある場合は、間隙水圧は土質材料と同様に定義通りの意味での間隙水圧として作用し、有効応力の原理はおおよそ満足されるだろう。ただし、間隙水圧の上昇により延性的な性質が発現してくる。
- 2) いわゆる硬岩に属する場合のように構造が緻密で間隙の連続性が良くない場合には室内試験で与える間隙水圧は内部の間隙に伝わらずむしろ拘束圧として外側から作用して、強度や剛性を高めるかも知れず、1)と全く逆の結果になる可能性を含んでいる。

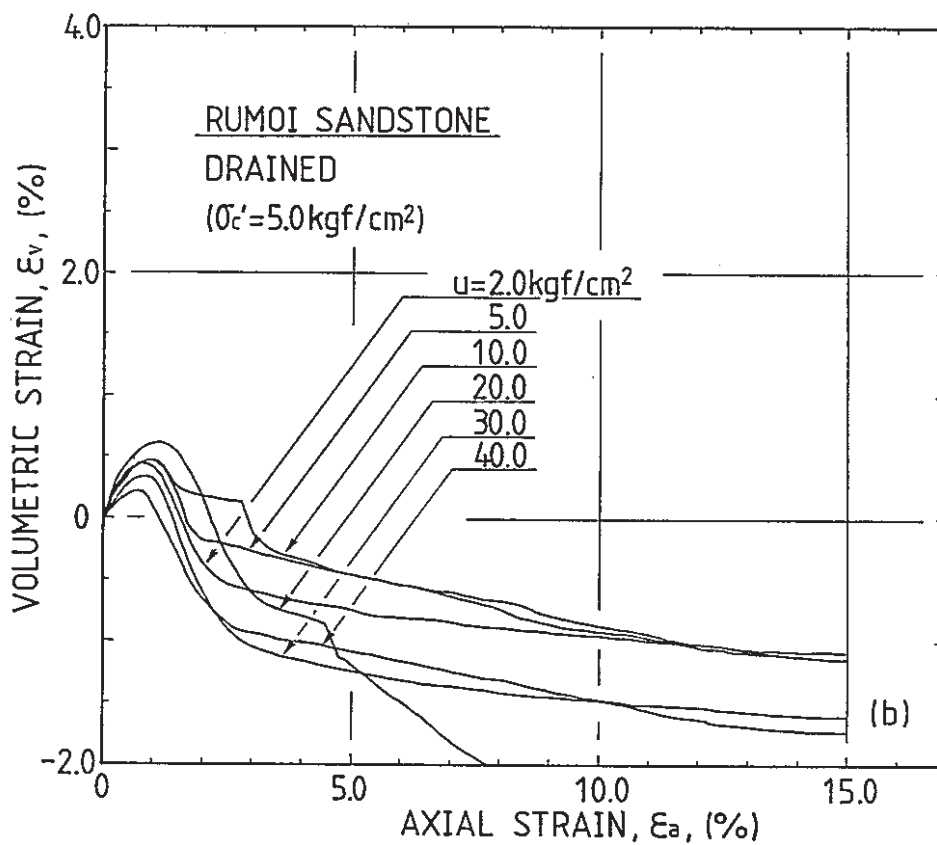
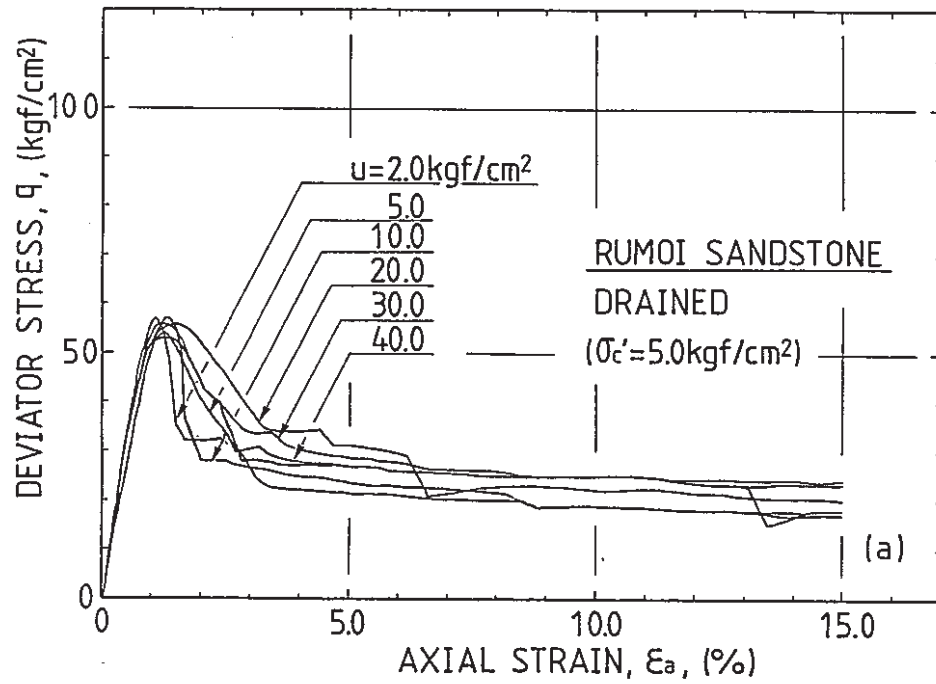


図-10(a),(b) 変形・破壊挙動の間隙水圧依存性
(RUMOI-Sandstone, $\sigma'_0 = 5.0$ kgf/cm²)

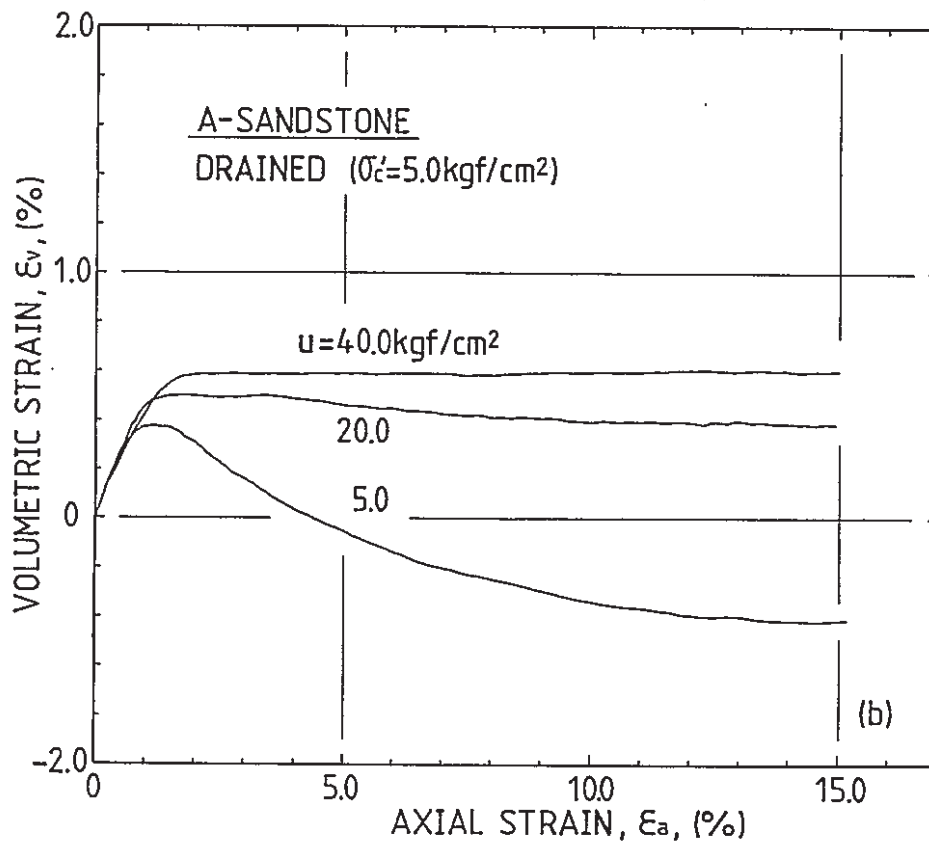
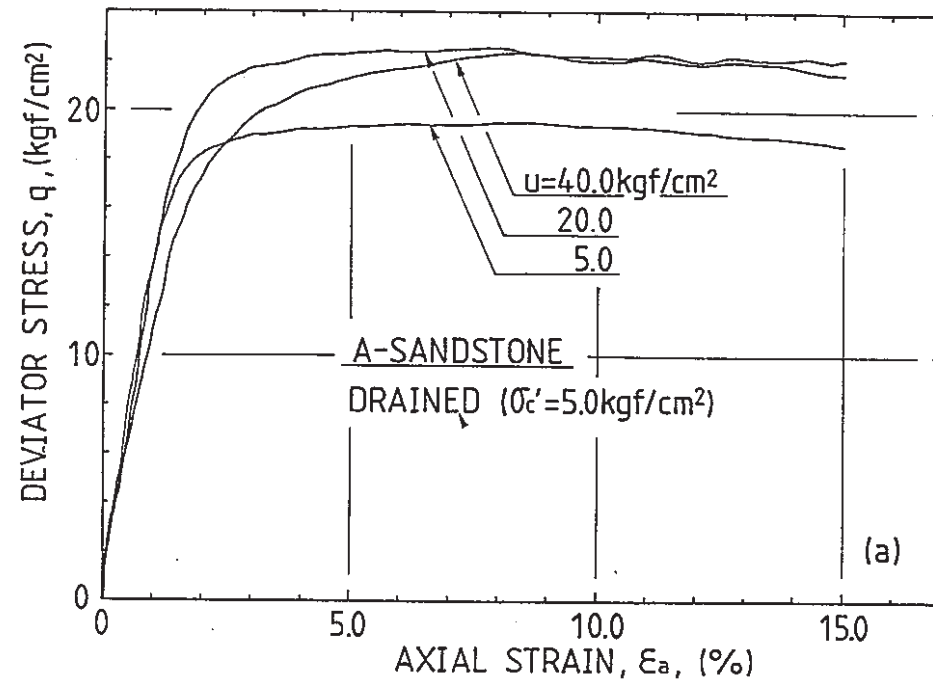


図-11(a), (b) 変形・破壊挙動の間隙水圧依存性
(A-Sandstone, $\sigma'_c = 5.0$ kgf/cm²)

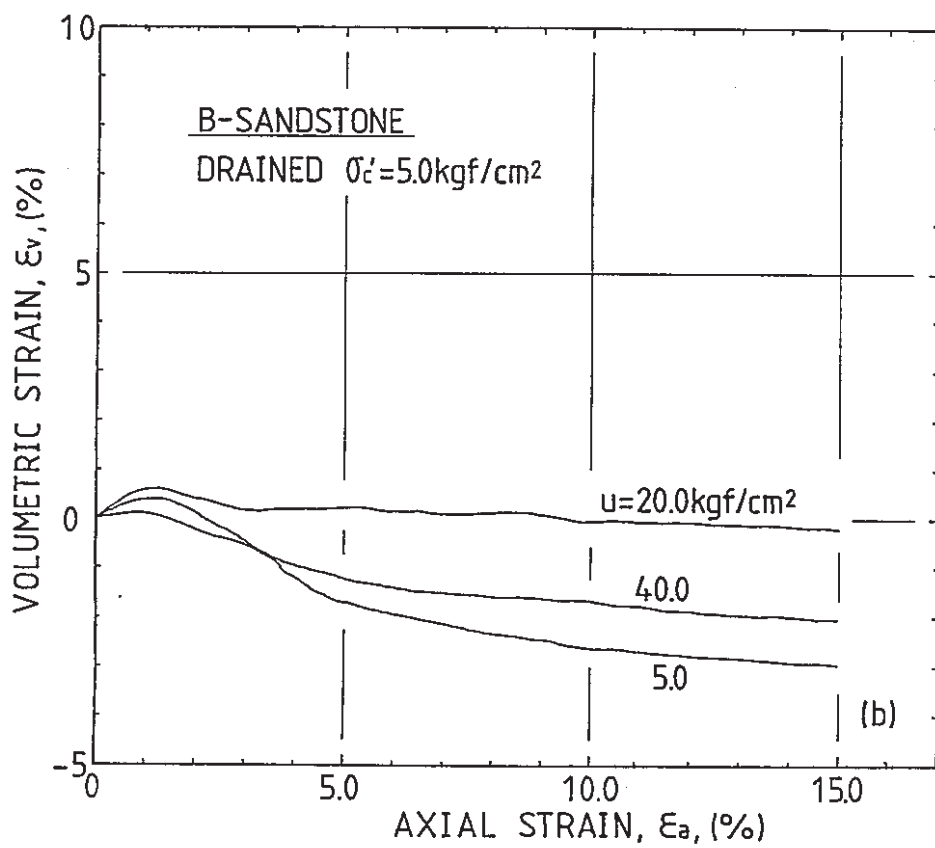
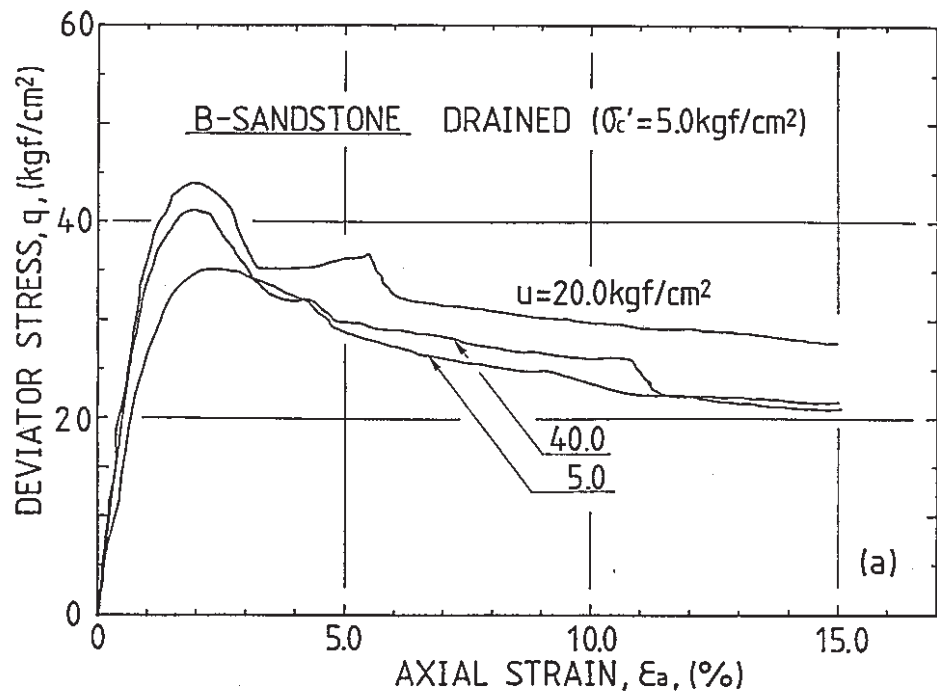


図-12(a),(b) 変形・破壊挙動の間隙水圧依存性
(B-Sandstone, $\sigma'_e=5.0\text{kgf/cm}^2$)

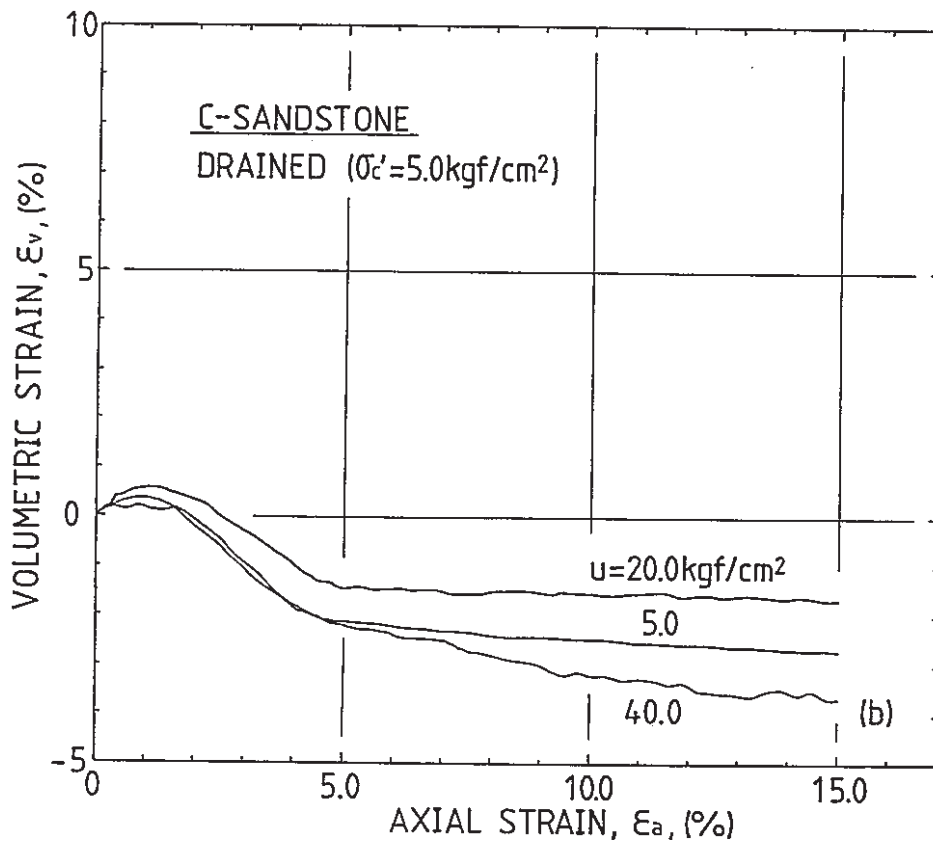
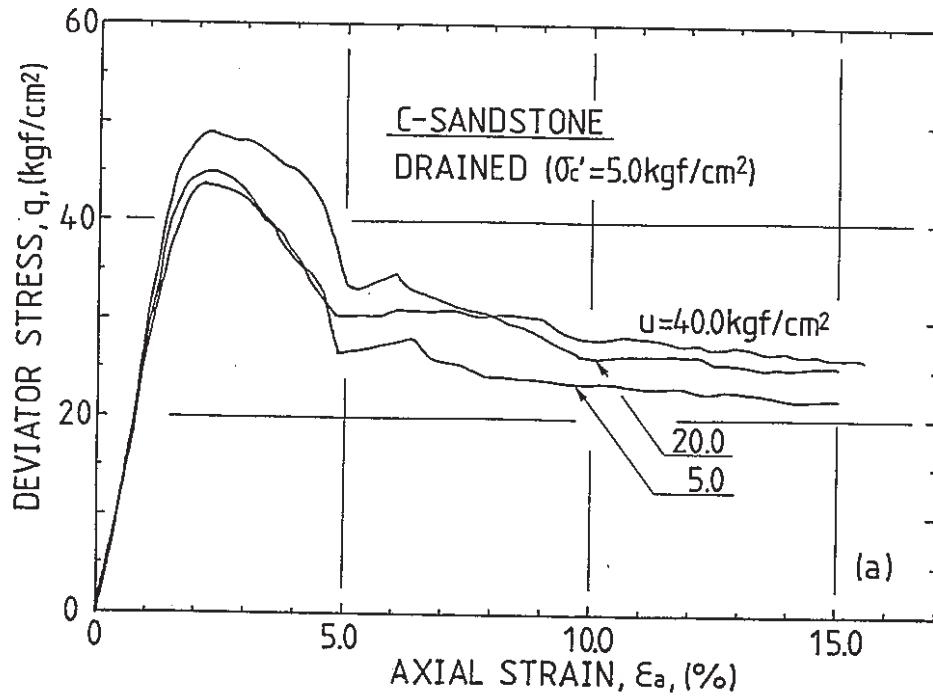


図-13(a),(b) 変形・破壊挙動の間隙水圧依存性
(C-Sandstone, $\sigma'_e = 5.0 \text{ kgf/cm}^2$)

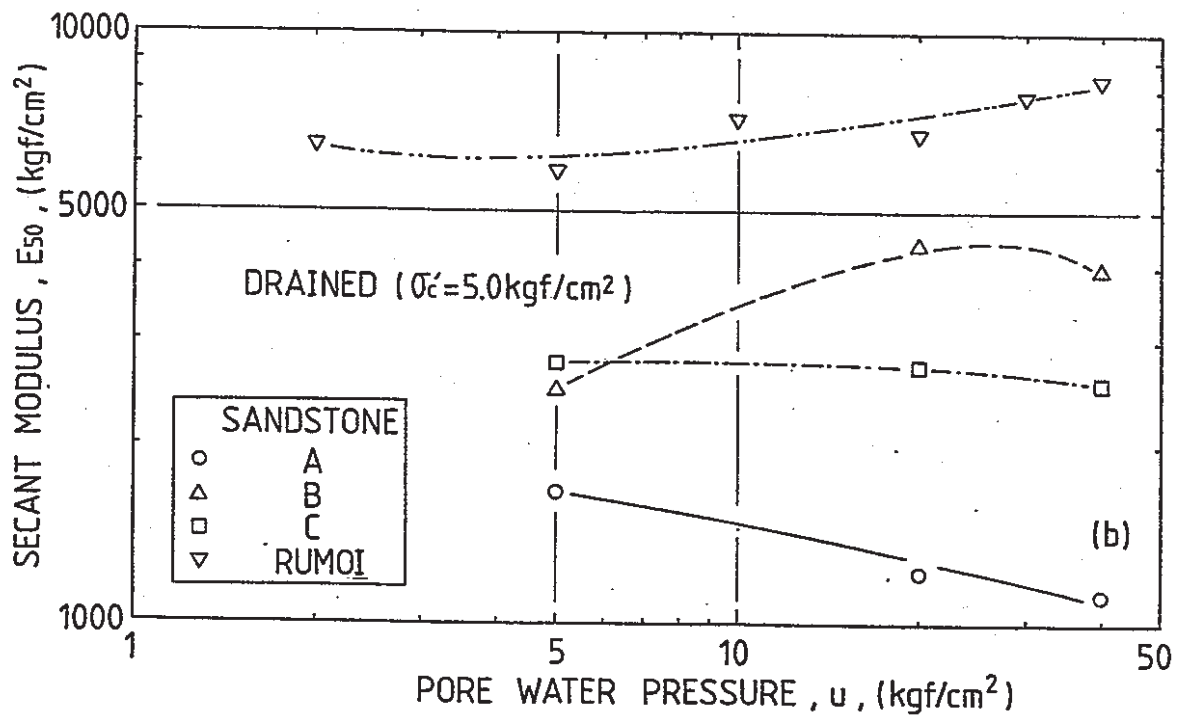
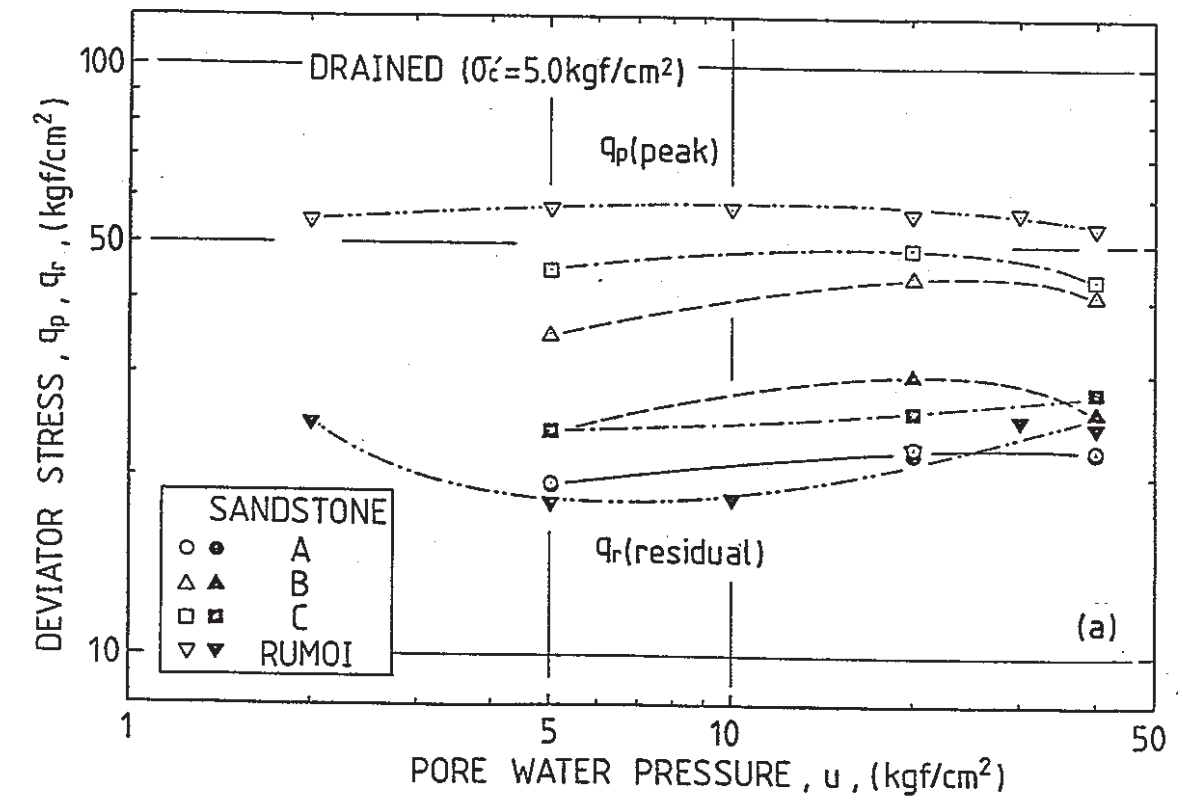


図-14(a),(b) 強度、剛性、破壊時変形量の間隙水圧依存性
(RUMOI-Sandstone)

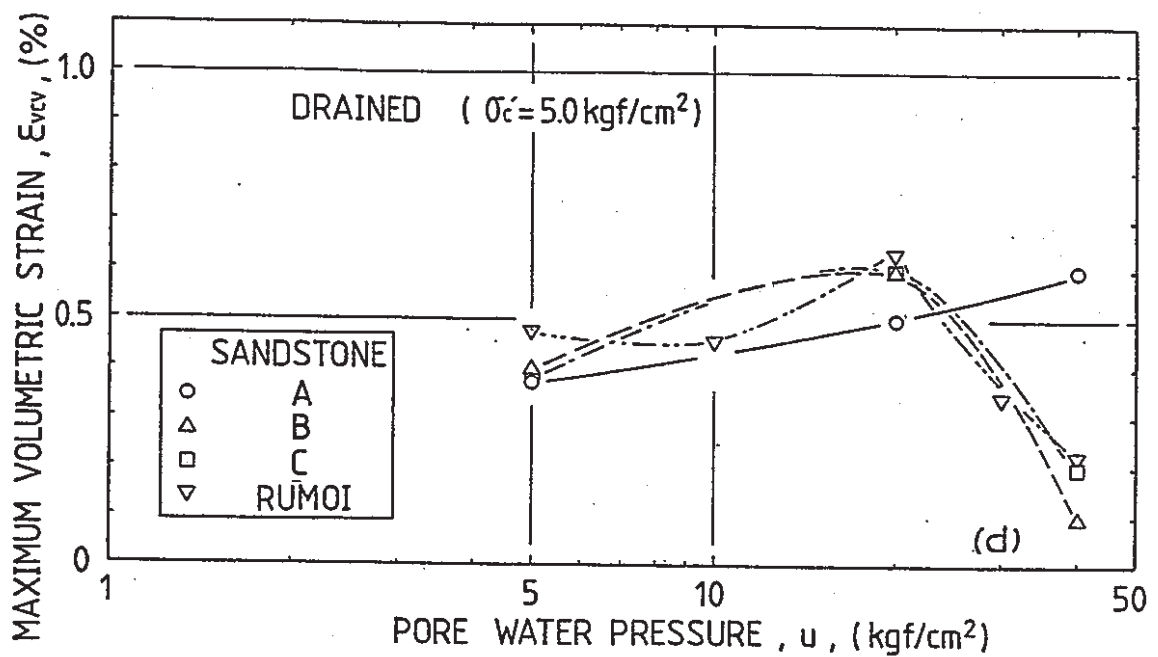
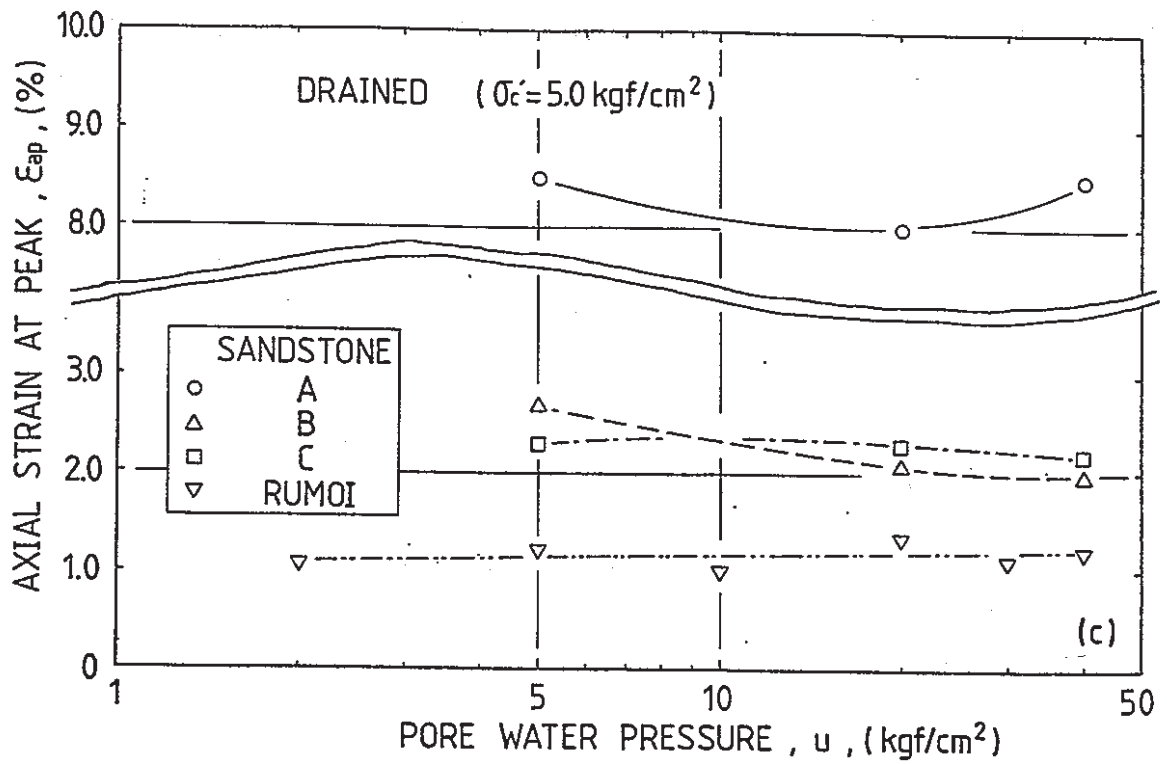


図-14(c),(d) 強度、剛性、破壊時変形量の間隙水圧依存性
 (RUMOI-Sandstone)

4.5. 変形・強度特性の変形速度依存性

RUMOI-Sandstoneについて2・3の有効拘束圧と間隙水圧の組合せの下において、ひずみ速度0.5~0.001%/minで試験した結果得られた応力-ひずみ関係を図-15,16,17(a),(b)に示している。全ての試験ケースについて言えることは、ひずみ速度が大きいほど発揮される偏差応力が大きく、また、体積変化には膨張傾向が発現されてくることである。この傾向は、土質材料についても観察される典型的な傾向である。

変形速度の相違による変形・破壊挙動の変化を考えると、透水係数が十分に大きくないために間隙水の出入りが完全に行われなことが原因で生じるかも知れない、間隙水圧の影響を考慮しなければならない。そこで、観察された実際の変形挙動(図15,16,17(a),(b))について詳細に調べてみる。まず、体積変化挙動については、変形速度が増加すると体積の膨張傾向が顕著になっていることから、変形速度が早い場合には供試体からの排水が十分に行われず、供試体内部に正の間隙水圧が発生するのではないかと想像できる。仮にそうであるとすると、正の間隙水圧の発生により、有効拘束圧は減少し4.3.で明らかにされたように強度および剛性の低下をもたらすと考えられる。しかし、図15,16,17(a)が示すように実際の挙動では、変形速度の増大とともに強度と剛性は大きくなっている。したがって、変形速度の相違による変形・破壊挙動の変化は、透水性の悪さが原因で蓄積する間隙水圧の観点からは説明できない。結論として、軟岩試料が有する時間依存的な(粘性的な)性質が支配的であると言える。

興味深いのは、ひずみ軟化現象がひずみ速度の低下により次第に見られなくなることである。砂質土や軟岩におけるひずみ軟化現象は粒子の再配列や粒子間固結の破壊などによると考えられるが、本研究が示すようにそのような現象には粘性的な効果も大きくて無視できないことがわかった。

図-18には破壊強度、剛性、破壊時変形量とせん断ひずみ速度の関係を示している。図示のように、ひずみ速度の増大にともない破壊強度と剛性は増大している。また、破壊時の変形量も若干増大することが分かる。このようなひずみ速度の影響は有効拘束圧や間隙水圧の大きさに依存して変化することが予想されるが、本試験結果から判断すると、応力-ひずみ関係に及ぼすひずみ速度の影響は、採用した応力条件の範囲では有効拘束圧や間隙水圧に依存せず、ほぼ同程度で応力条件にはあまり依存しないと言えよう。

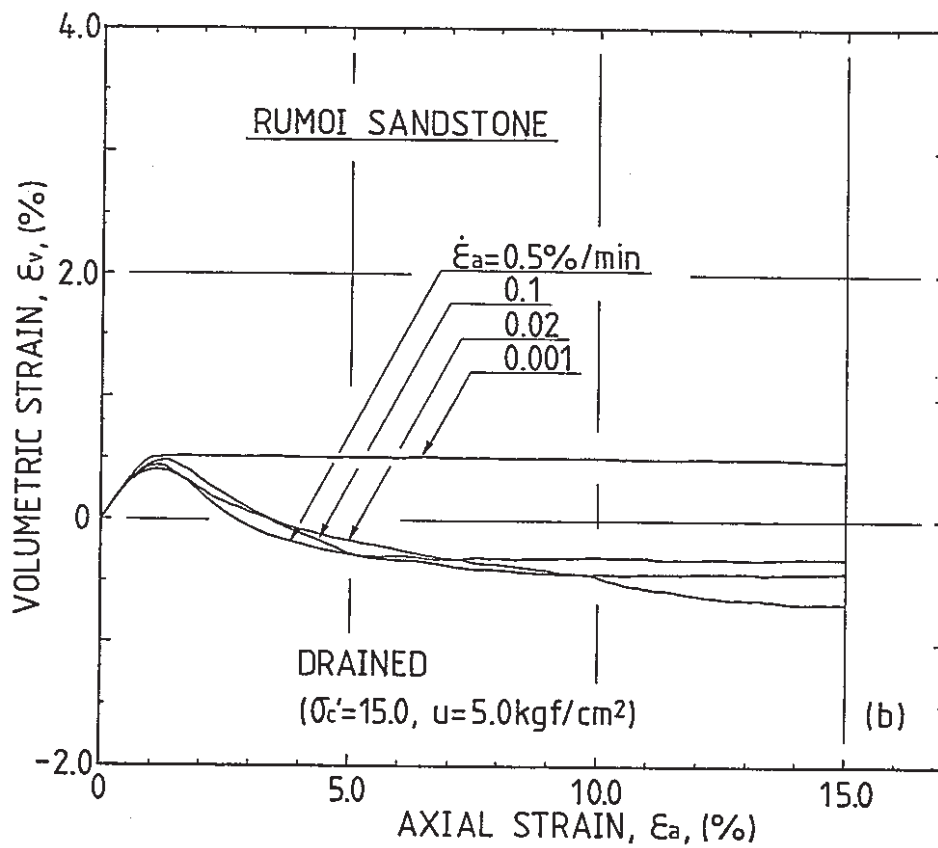
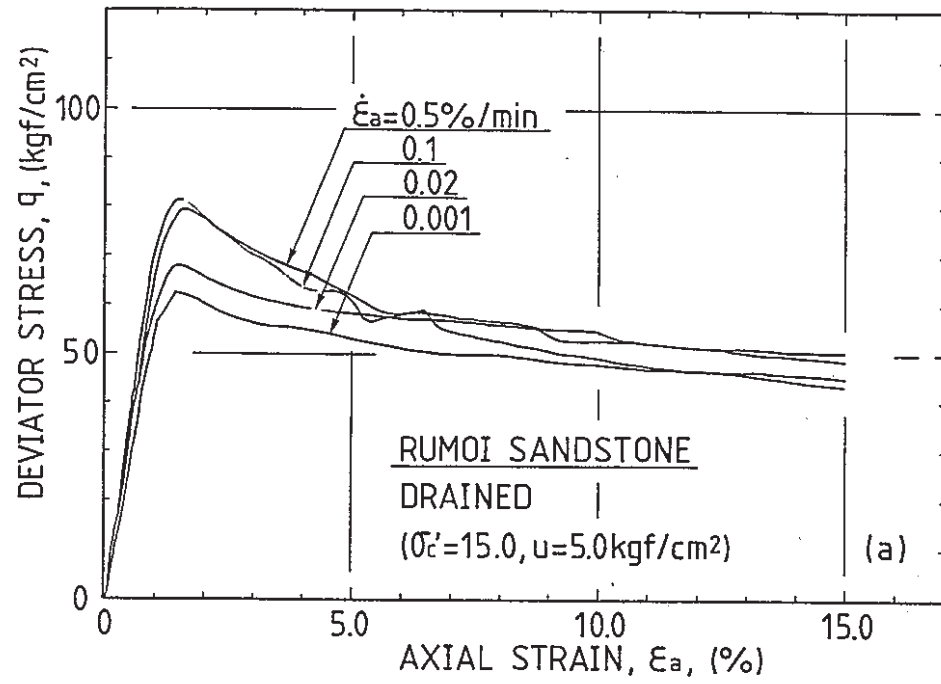


図-15(a),(b) 変形・破壊挙動のひずみ速度依存性
(RUMOI-Sandstone, $\sigma'_c = 15.0, u = 5.0 \text{ kgf/cm}^2$)

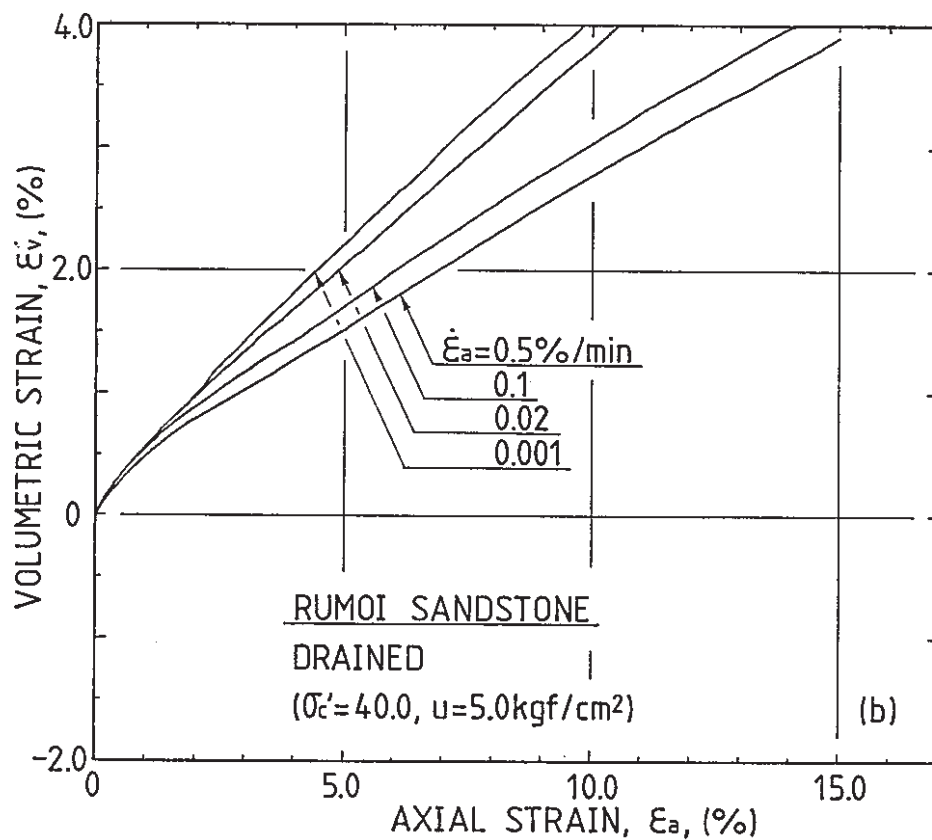
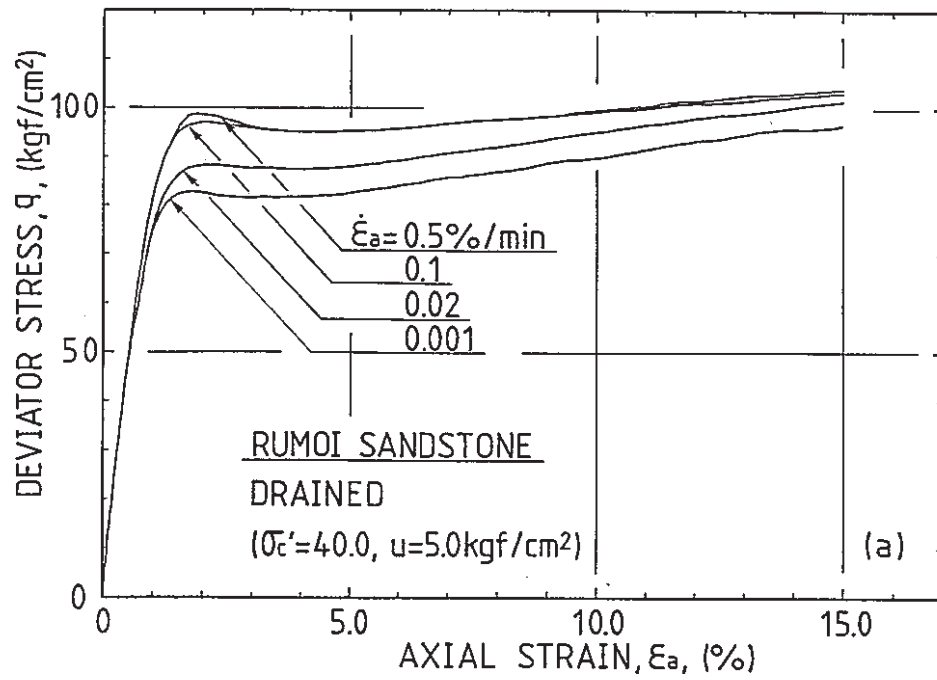


図-16(a),(b) 変形・破壊挙動のひずみ速度依存性
(RUMOI-Sandstone, $\sigma'_c = 40.0, u = 5.0 \text{ kgf/cm}^2$)

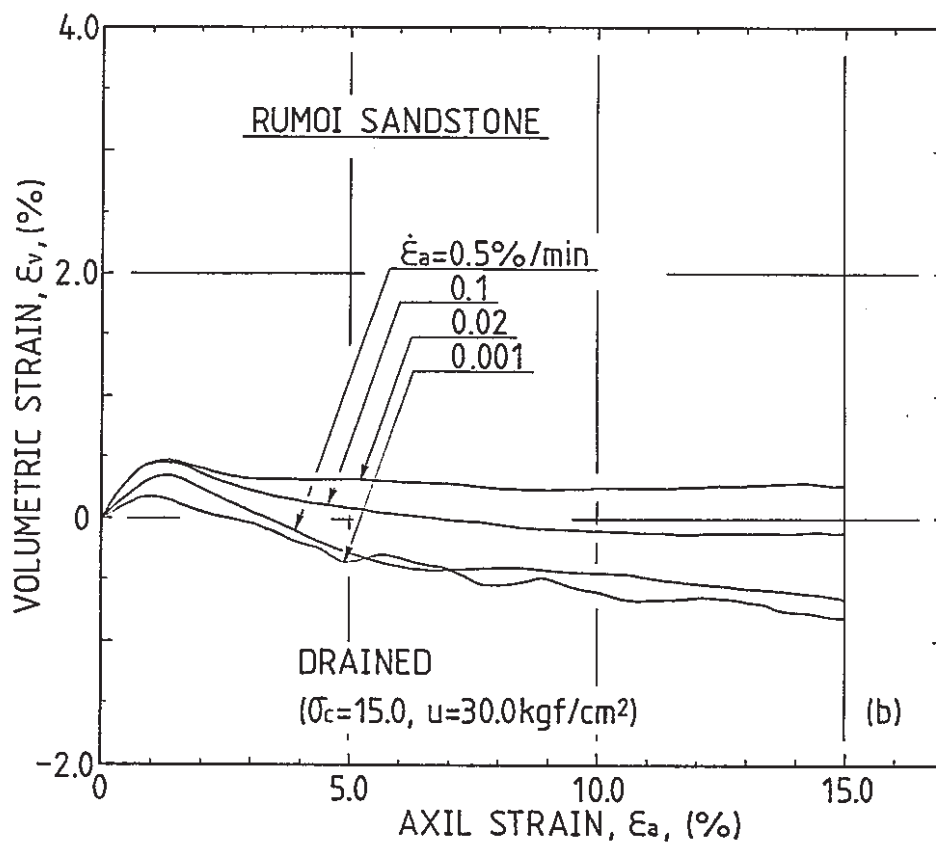
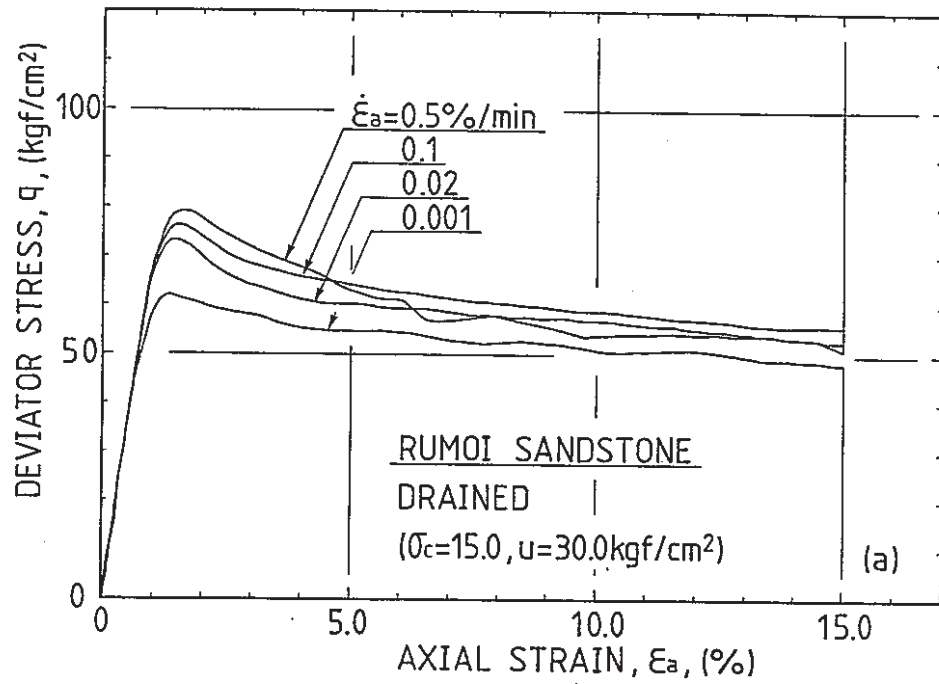


図-17(a),(b) 変形・破壊挙動のひずみ速度依存性
(RUMOI-Sandstone, $\sigma_c=15.0, u=30.0\text{kgf/cm}^2$)

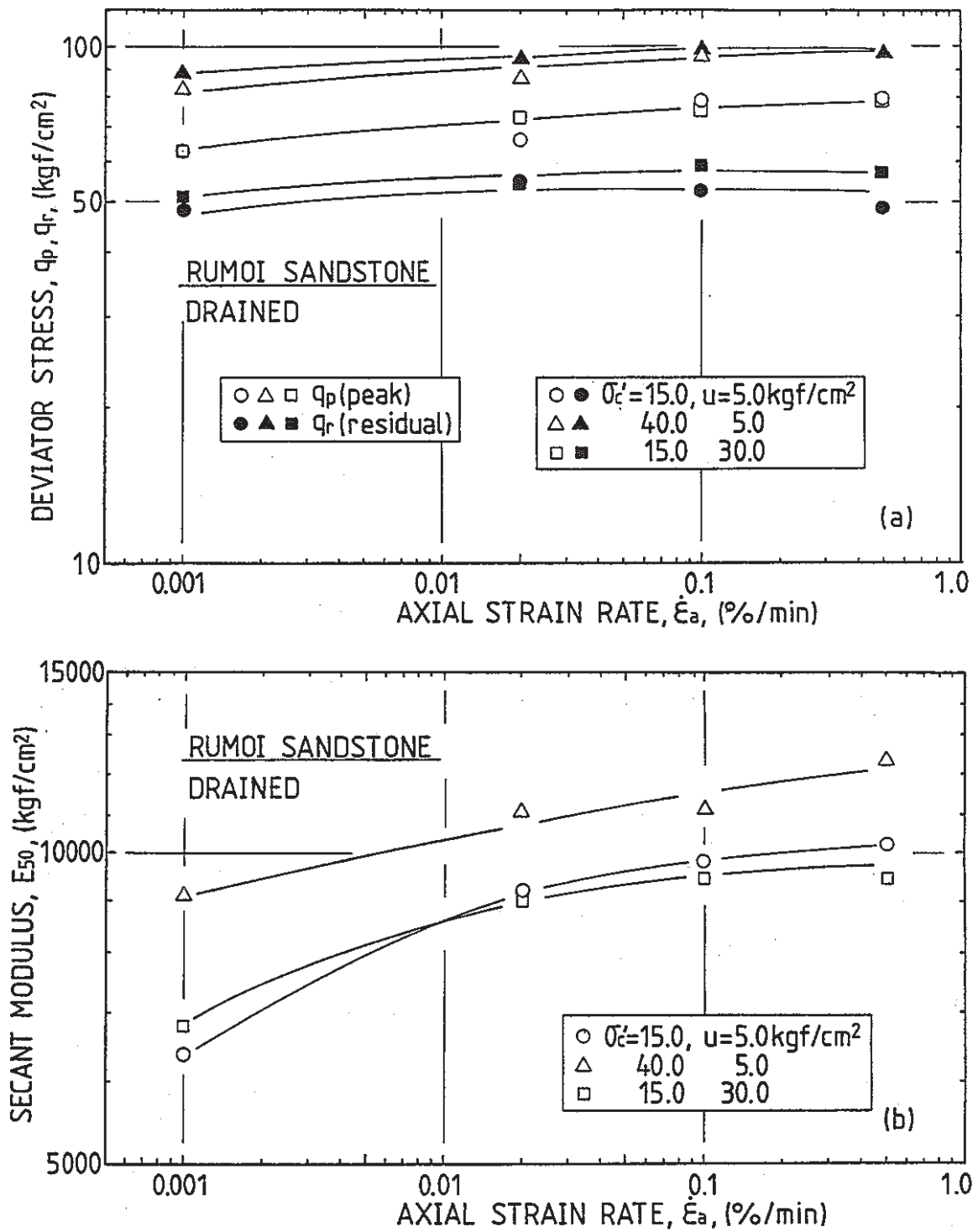


図-18(a),(b) 強度、剛性、破壊時変形量のひずみ速度依存性 (RUMOI-Sandstone)

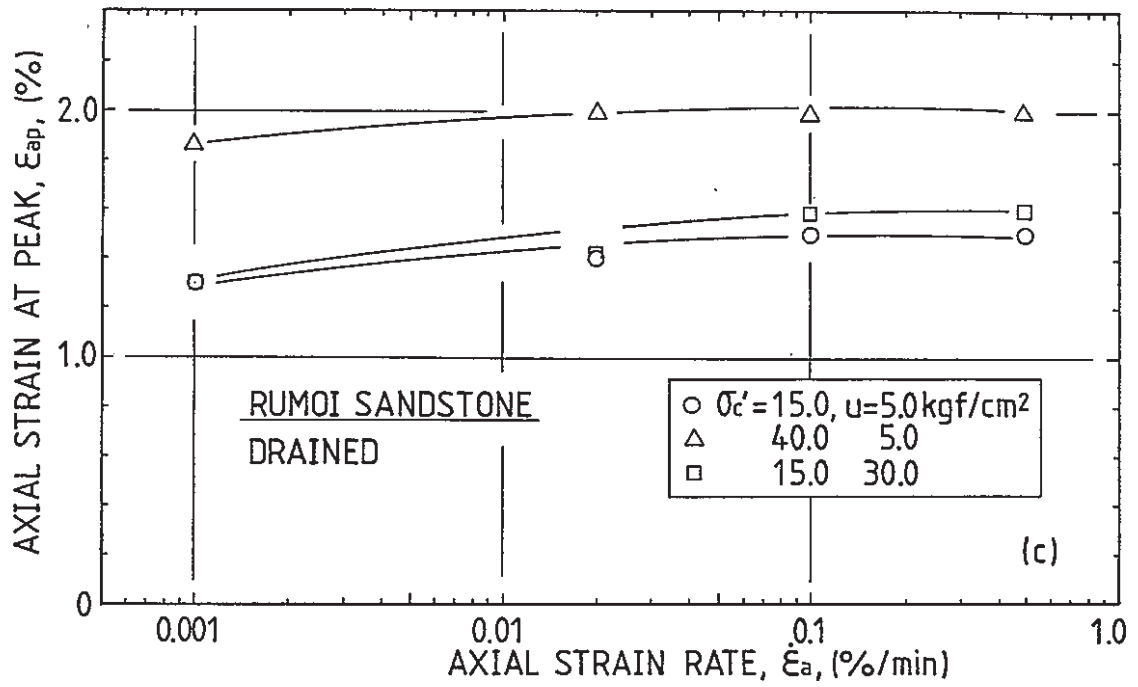


図-18(c) 強度、剛性、破壊時変形量のひずみ速度依存性
(RUMOI-Sandstone)

4.6. 非排水条件における変形・強度特性の有効拘束圧および間隙水圧に対する依存性

図-19, 20(a), (b)はRUMOI-Sandstoneについて行った非排水試験の結果を示している。図-19(a), (b)は間隙水圧は等しいが有効拘束圧が異なるケースを、図-20(a), (b)は有効拘束圧は等しいが間隙水圧が異なるケースを比較して示している。

まず、有効拘束圧の影響は排水条件の場合と同様に著しく、有効拘束圧の増大は強度および剛性を増加させ、ひずみ軟化挙動を抑制して変形性状を延性的にしている。したがって、排水および非排水条件によらず有効拘束圧の影響は同じように変形・破壊挙動に表れると言える。また、排水条件における正の体積変化（収縮）は非排水条件における正の間隙水圧に対応していると思われるが、予想されるように有効拘束圧の増大に伴って間隙水圧発生量も増大している。

次に、間隙水圧の影響である。図20(a), (b)が示すように試験結果はバラついているが、間隙水圧が極端に小さい $u=2.0\text{kgf/cm}^2$ のケースと他を対比してみると、有効応力条件が等しくても間隙水圧が高いほど、強度特に残留強度が高くなり、変形挙動は延性的になっている。また、間隙水圧の発生量は小さくなっている。したがって、排水試験で観察された変形・強度特性に及ぼす間隙水圧の影響は非排水試験でも同様に発現することが確かめられた。

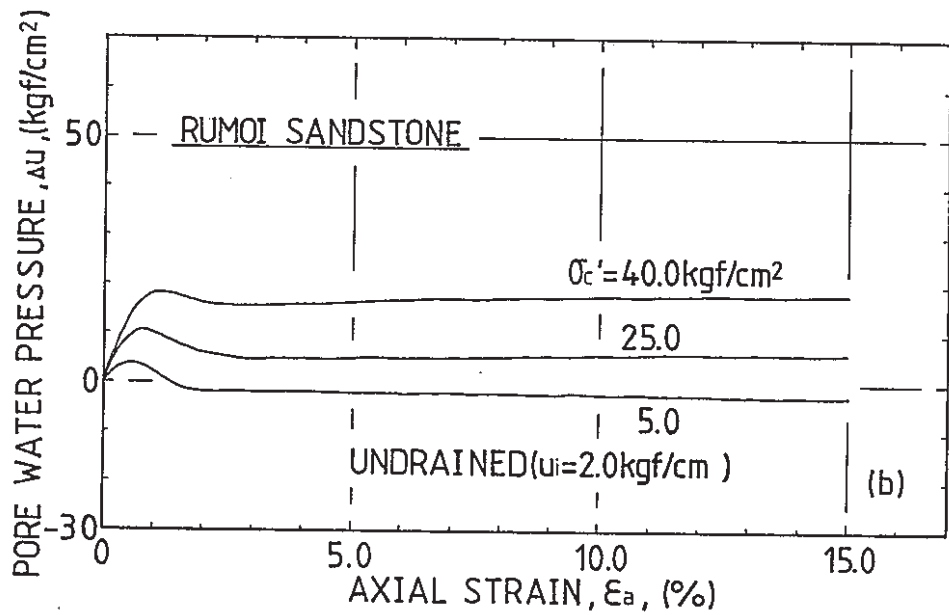
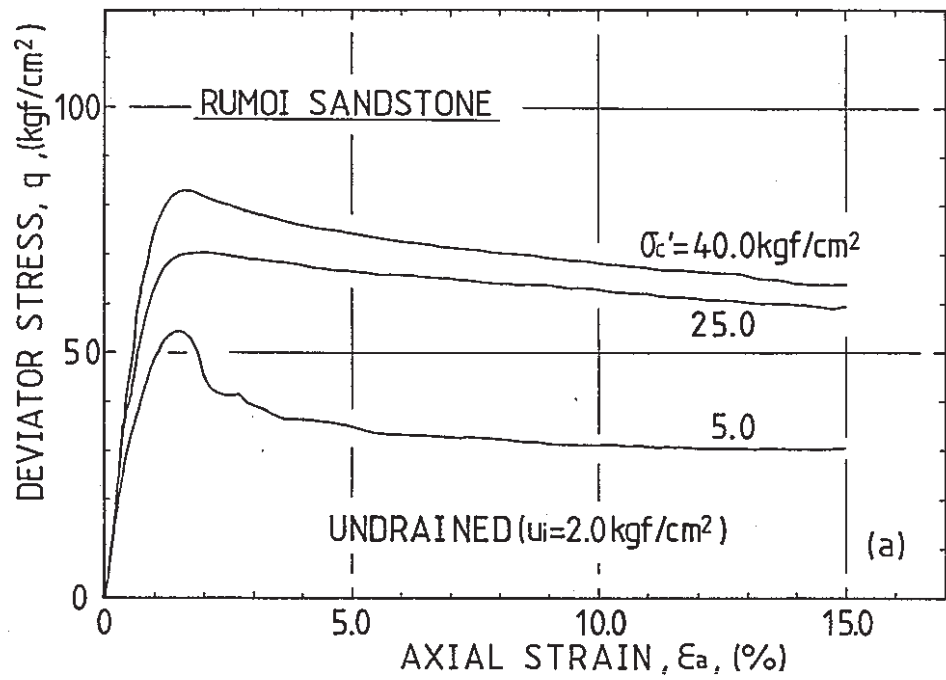


図-19(a),(b) 非排水変形・破壊挙動の有効拘束圧依存性
(RUMOI-Sandstone, $u = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$)

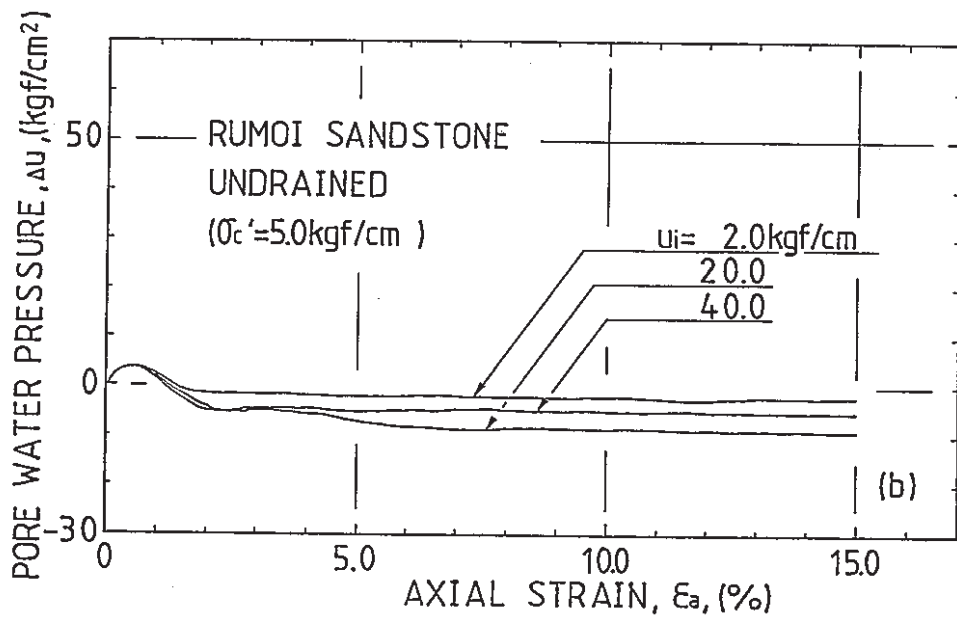
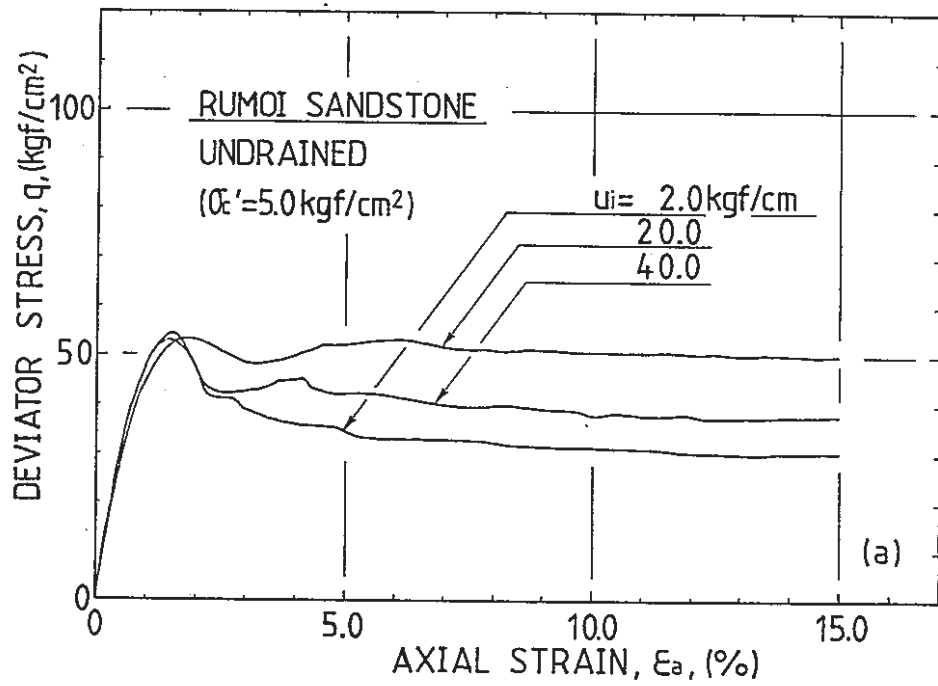


図-20(a),(b) 非排水変形・破壊挙動の間隙水圧依存性
(RUMOI-Sandstone, $\sigma'_c = 5.0 \text{ kgf/cm}^2$)

5. 研究のまとめ

4種類の堆積軟岩試料について三軸圧縮試験をいくつかの試験条件の下で行いその変形・破壊挙動を調べた。その結果から得られた、変形・強度特性に及ぼす有効拘束圧、間隙水圧、ひずみ速度および排水条件の影響は以下のようにまとめられる。

5.1. 変形・強度特性に及ぼす有効拘束圧の影響

1. 有効拘束圧が増加すると、同じ軸ひずみが生じていても発揮されている偏差応力は大きく、体積ひずみ量は大きくなる、という一般的な傾向がある。破壊強度と同様に、せん断変形に対する剛性(E_{50})も増大する。
2. 有効拘束圧の影響はピーク強度よりも残留強度において大きい。また、モールの応力図上で比較すると、残留強度は原点を通る直線で表せるが、ピーク強度は粘着力を有する曲線によって表示される。
3. 本研究で試験した堆積軟岩試料は一般に変形の進行にともない、偏差応力は一旦ピークに達するが、その後急激に減少するというひずみ軟化特性を示す。このようなひずみ軟化特性は有効拘束圧の低いものほど著しく、ある有効拘束圧以上では見られなくなる。
4. 採取深度の深い試料ほどひずみ軟化現象は明瞭で、広範囲な有効拘束圧の下で見られる。ひずみ軟化現象は試料の固結度あるいは試料の加圧密比に相当する量に依存していると考えられる。
5. 以上のような有効拘束圧依存性は、非排水条件における変形・強度特性についても同様に認められる。

5.2. 変形・強度特性の間隙水圧依存性

1. 有効拘束圧が等しくても、間隙水圧の大きさに依存して変形・破壊挙動は変化する。ただし、変化の程度は有効拘束圧の変化によるものよりも小さく、試験結果のばらつき等を考慮すると実務上は間隙水圧の影響を無視して、土に対する有効応力の原理をほぼそのまま適用しても良いように考えられる。
2. 間隙水圧の影響による変形・破壊挙動の変化は岩石によって異なっている。すなわち、間隙水圧の影響は岩石の物性、特に内部間隙の性質に依存していると考えられるが、他の研究者による報告も少なく、一般的な傾向を引き出すにはいたらなかった。
3. 本研究で対象とした試料においては、間隙水圧の増大にともない残留強度はわずかに増加する傾向があり、また、ひずみ軟化傾向は小さくなるようである。

4. 間隙水圧の変化による、割線係数 E_{se} によって表されるせん断変形に対する剛性の変化傾向は一定ではなく、試料によって異なっている。また、体積の変化傾向も一定ではなく、本研究によって明確な結論を得るには至らなかった。
5. 岩石内部の間隙の連続性や固結の程度により、力学特性に及ぼす間隙水圧の影響は著しく異なることは他の研究者によっても指摘されているところである。現時点においては間隙の大きさだけでなく連続性についての定量的な評価法の確立など、検討しなければならない問題も多く、試料の物性と間隙水圧の影響を関連付けて十分に議論することはできなかった。
6. 以上説明したような変形・破壊挙動の間隙水圧依存性は非排水条件における変形・破壊挙動においても同様に観察された。

5.3. 変形・強度特性の変形速度依存性

1. 本研究で用いた軟岩の変形・破壊挙動は、変形速度によりかなり大きく変化することが観察された。変形速度が大きいほど発揮される強度は大きく、体積変化挙動には強い膨張傾向が発現されるという、砂質土でも見られるような変形速度依存性を示している。
2. 一般に堆積軟岩試料ではひずみ硬化及びひずみ軟化現象が見られるが、変形速度が小さくなるにつれてひずみ軟化傾向は見られなくなり、変形挙動は延性的になる。ひずみ軟化現象の主要因は粒子間の固結構造の破壊と見られるが、変形速度依存性が大きく粘性的な効果を見逃すことが明らかになった。
3. 岩石の変形・強度特性は有効拘束圧や間隙水圧の影響を受けることから、変形速度の影響も応力条件によって異なると予想できるが、本研究の範囲内では応力条件によらず変形速度の影響の程度はほぼ等しいと見ることができる。

参 考 文 献

- (3) 赤井浩一, 足立紀尚, 西好一 (1978): "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, No.271, pp.83-96.
- (2) 後藤龍彦, 佐藤干城, 深井哲, 入江正幸 (1982): "2, 3の本邦岩石に対する間隙水圧効果: 風圧下における岩石の力学的性質に関する実験的研究," 日本工業会誌, Vol.98, No.1131, pp.717-755.
- (3) Handin, J.W., Hager, R.V., Friedman, Jr.M. and Feather, J.W. (1963): "Experimental Deformation of Sedimentary Rocks under Confining Pressure: Pore Pressure Tests," Bulletin American Associate of Petroleum Geology, Vol.47, pp.717-755.
- (4) 小特集「有効応力の原理」 (1988): 土と基礎, Vol.36, No.6, pp.5-70.

あとがき

この研究は、軟岩の力学的性質に関する基礎的研究を行ったもので、土質工学の分野において土の力学特性を支配する最も基本的な法則とされている有効応力理論が、軟岩にどのように適用され得るかを実験的に検討している。軟岩に関する国内外の研究は、これまで種々の観点から進められて来ているが、当研究室においては軟岩についてはこの研究が最初のものであるため、内容的にはまだ満足すべきものとなっておらず、問題点も残されているが、所期の目的は一応達することが出来たと考えている。

この研究の実施にあたり、研究テーマ、試料の採取ならびに研究費の面で種々御高配を頂いた、動力炉・核燃料開発事業団の関係各位に深甚の謝意を表すものであります。また、留萌砂岩の採取および室内試験の実施に多大の御協力を下さった北海道開発局留萌開発建設部留萌ダム調査事業所、ならびに応用地質株式会社札幌支社に、同じく心から感謝の意を表すものであります。最後に、試験の実施と結果の整理には本学土木工学科4年目学生 林 宏君に負うところが大きかったことを記して、その尽力と貢献に報いたい。

添 付 資 料

軟岩の力学特性に及ぼす間隙水圧の影響

北海道大学工学部 正会員 ○土岐 祥介
 北海道大学工学部 正会員 三浦 均也
 応用地質札幌支店 持田 文宏
 北大工学部学生 林 宏

まえがき 土質力学の分野では有効応力原理が満足されるものとして、試験結果の解釈や種々の解析が行われているが、固結が進んだ軟岩に属する試料では有効応力原理が必ずしも適用できるとは限らないという報告が見られ^{1,2)}、最近「土と基礎」においても有効応力原理に関して興味深い議論がなされている³⁾。本研究では、砂岩系の堆積軟岩について種々の有効応力と間隙水圧の組合せと異なったせん断変形速度の下で排水三軸圧縮試験を行って変形・破壊挙動を比較し、その拘束圧依存性や間隙水圧依存性について検討している。

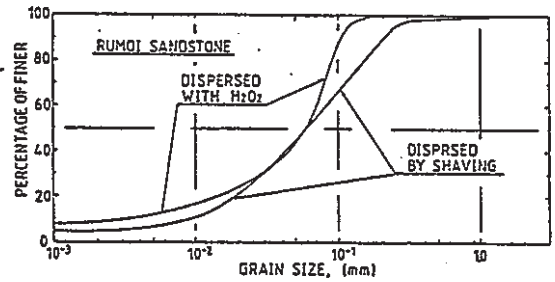


Fig. 1

1. 試料および試験方法 使用したのは、北海道留萌市南幌様地区におけるダム建設予定地の右岸調査横坑から採取した堆積軟岩で、新第三紀鮮新世下部砂岩層に属している。採取はソグノカッターを用いて行い、RQDは50%前後であった。試料は灰白色で割れ目の無い極めて均質な試料で、一軸圧縮強さは3回の平均が38kgf/cm²と測定された。

Table 1

湿潤密度 γ_t	1.98tf/cm ³
比重 G_s	2.632
含水比 w_o	22.8%
間隙比 e_o	0.63
飽和度 S_r	95.25%

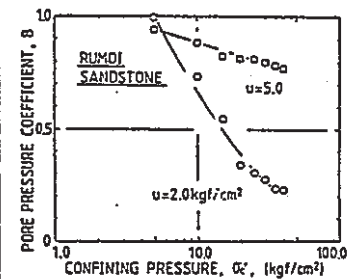


Fig. 2

供試体の側面をストリートエッジで成形するときに出る試料および供試体一個相当の大きさの試料塊を過酸化水素水に約一週間浸し土粒子の固結を解放した試料について行った粒度試験の結果を図1に示す。割り屑の方は大粒径粒子が不自然な形でいくつか観測されている。分散剤を効果的に使用する必要が認められる。粒度曲線より試料は細粒砂岩に分類される。その他の物理的性質や自然状態の性質は表1に示す通りである。

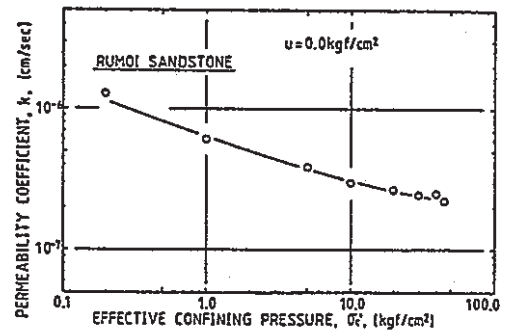


Fig. 3

本研究で用いたのは通常の三軸圧縮試験装置で、直径5cm、高さ10cmの供試体を50kgf/cm²以下の拘束圧の下で載荷できる。トリマ-とストリートエッジで成形した供試体をど-か-中の脱気水に沈め、真空中に12時間以上放置して飽和化を図った。図2に圧密過程において5.0kgf/cm²間隔で測定した間隙水圧係数Bと有効拘束圧との関係を示す。有効拘束圧の増加にともないB値は減少するものの、初期においては高い値が得られたことから、十分に高い飽和度が達成されていたと思われる。

三軸圧縮試験では供試体側面に紙を巻いてからメッシュをかぶせて試験装置にセットした。しかし、透水試験においてはシリコンオイルを側面に塗ってからメッシュをかぶせて側面からの漏水を防いでいる。透水試験は間隙水圧を大気圧に等しく、拘束圧を変えながら変水位方式で行った。結果を図3に示す。比較的透水性が良いことから軸ひず

The Influence of Pore Water Pressure on Mechanical Properties of Soft Rocks: Shosuke TOKI, Kinya MIURA (Faculty of Engineering, Hokkaido University), Humikiro MOCHIDA (Sapporo Branch, Ohyo Chishitsu Co., Ltd.), Hiromu HAYASHI (Undergraduate Student, Hokkaido University)

み速度0.1%/min
の下で試験を行
った。ただし、
ひずみ速度の影
響を調べるため
に、ひずみ速度
を広い範囲で変
化させた試験も
一部実施してい
る。

三軸圧縮試験
は有効拘束圧
(2.0~40.0kgf/
cm²)と間隙水圧
(2.0~40.0kgf/
cm²)の種々の組
合せの下で行っ
た。

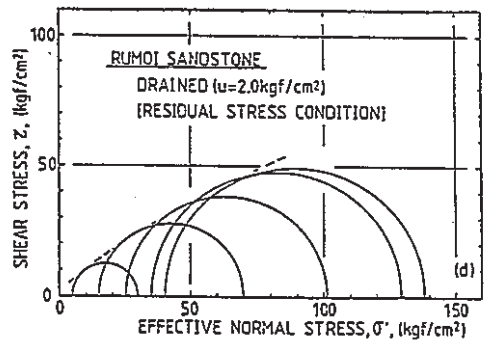
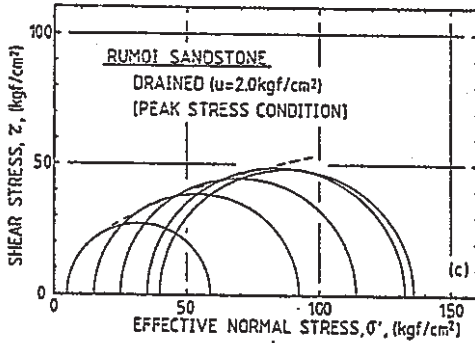
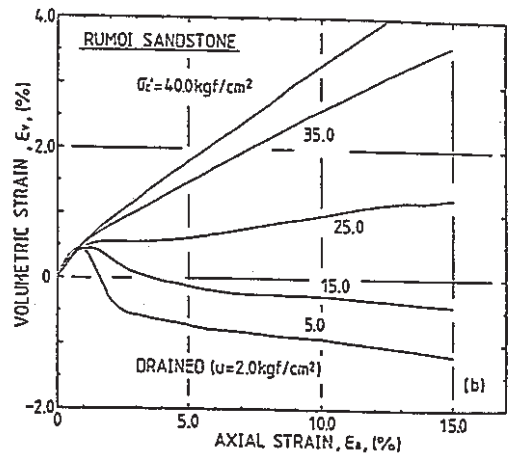
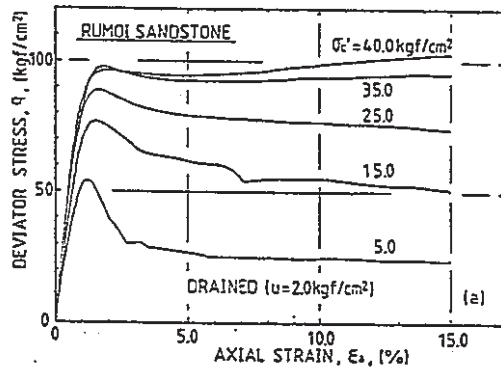


Fig. 4(a-d)

2. 試験結果の考察 2.1. 有効拘束圧の影響 図4(a)

~(d)には、間隙水圧は2.0kgf/cm²のケースについて、有効拘束圧が異なる試験結果のせん断変形- σ' - τ 関係および σ' - τ 時と残留強度時(軸ひずみ10%)のMohrの応力円を示している。また、図5(a)~(c)には σ' - τ 強度、残留強度、 E_{sa} 、破壊時の軸ひずみと有効拘束圧の関係を示している。図5(a)が示すように拘束が大きい程 σ' - τ 強度と残留強度の差は小さくなり、 σ' - τ 時の軸ひずみも増大することから拘束圧が大きい程変形性状は延性的になるとい一般的な傾向が認められる。また、体積ひずみは拘束圧の増大にともない収縮傾向が著しくなる。

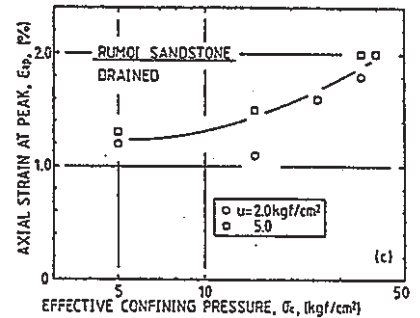
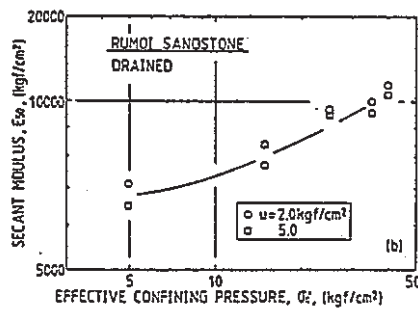
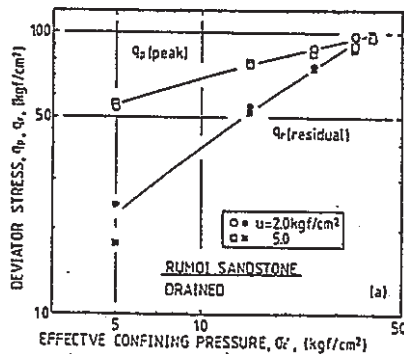


Fig. 5(a-c)

2.2. 間隙水圧の影響 有効拘束圧は5.0kgf/cm²と等しいが、間隙水圧を2.0~40.0kgf/cm²と広範囲に変化した場合のせん断変形- σ' - τ 関係を図6(a),(b)に示す。有効応力が同じである場合には、前節でみられたような顕著な差はなく、間隙水圧の影響はそれ程大きなものではないと思われる。図7(a)~(c)は強度、 E_{sa} 、 σ' - τ 強度時の軸ひずみに及ぼす間隙水圧の影響を示している。図7(a)においては σ' - τ 強度は間隙水圧の大きさによって変化しないが、残留強度は間隙水圧の増加にともない若干増加する傾向が認められる。一方、図7(b),(c)を観察すると間隙水圧の上昇は初期の接線係数 E_{sa} を減少させ、破壊時の変形を大きくする傾向がある。以上をまとめると、間隙水圧が変化しても σ' - τ 強度は変わらないが、変形に対する剛性は低下することが認められる。

これまでに、岩石の変形-強度特性に及ぼす間隙水圧の影響について調べた研究がわずかながら見られる。後

藤ら²⁾は砂岩、凝灰岩、大理石について同様な研究を行い砂岩、凝灰岩については有効応力の原理はほぼ成り立つが間隙水圧が大きい程変形は延性的になり剛性は低下するという本研究の結果と類似の傾向を報告している。しかし、大理石は他の岩石に比べて間隙の連続性が悪いために、全応力で整理

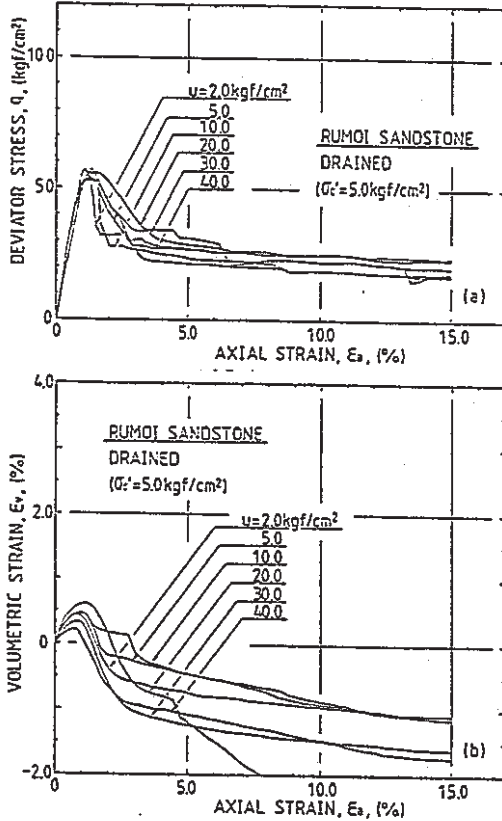


Fig. 6(a-b)

した方が実用であるとしている。一方、この研究についての先駆的な研究を行ったHandin¹⁾は種々の岩石について同様な研究を行い間隙水圧の影響について報告しているが、砂岩については本研究や後藤ら²⁾とは逆の結果を報告している。

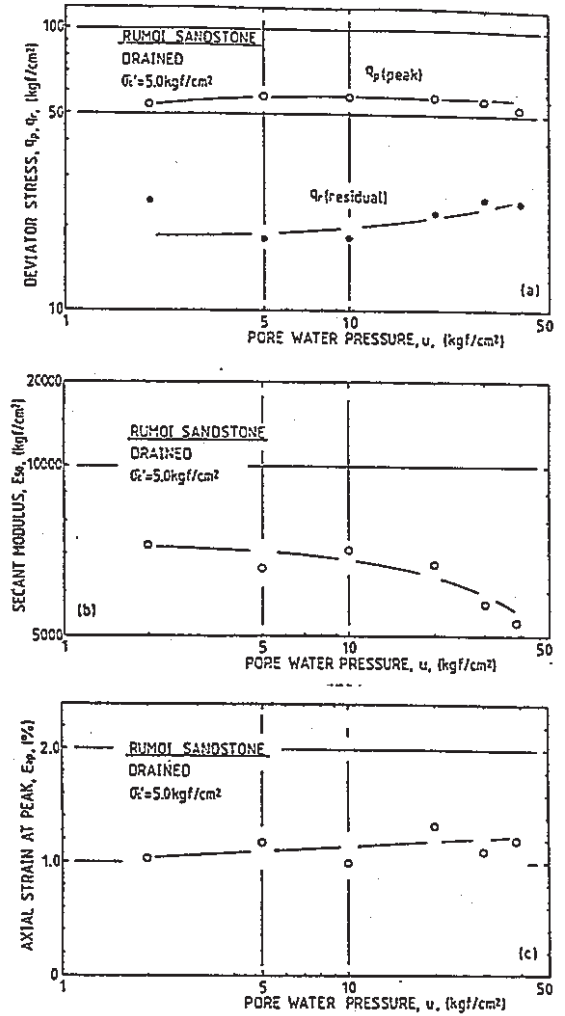


Fig. 7(a-c)

以上のように、岩石の中においてもその性状により間隙水圧の影響の仕方はまちまちであり、今後も種々の岩石についての試験結果がまたれるところである。ただし、現時点では次のように推定できる。1) 堆積砂岩や、凝灰岩のように間隙の占める割合が大きくその連続性がある場合は、間隙水圧は土質材料と同様に定義通りの意味での間隙水圧として作用し、有効応力の原理はおおよそ満足される。ただし、間隙水圧の上昇により延性的な性質が発現してくる。2) いわゆる硬岩に属する場合のように構造が緻密で間隙の連続性が良くない場合には室内試験で与える間隙水圧は内部の間隙に伝わらずむしろ拘束圧として外側から作用して、強度や剛性を高めるかも知れず、1)と全く逆の結果になる可能性を含んでいる。

2.3. ひずみ速度の影響 軟岩の変形-強度特性に及ぼすひずみ速度の影響

ひずみ速度の影響を明らかにするために、有効拘束圧と間隙水圧の組合せが異なる3種類の応力条件でひずみ速度を0.001~0.5%/minの間で変化

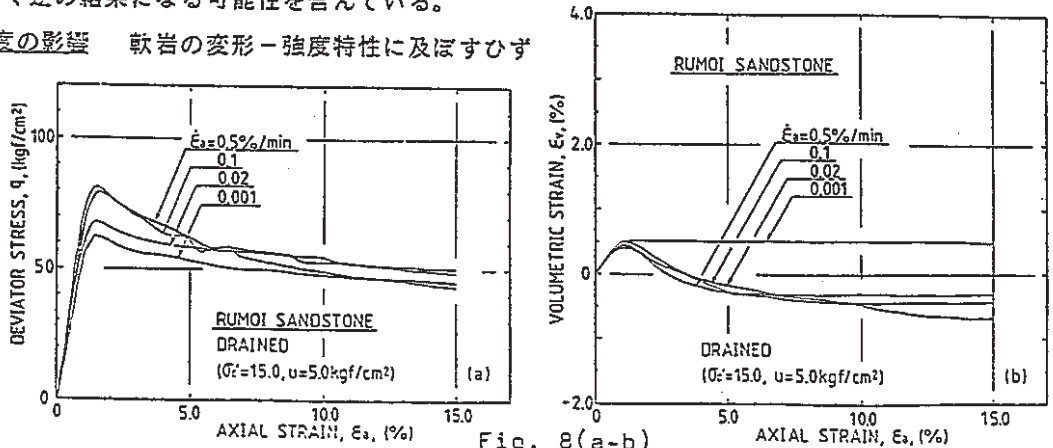


Fig. 8(a-b)

させて三軸圧縮試験を行った。その結果の一例を図8(a),(b),9(a),(b),10(a),(b)に示している。図示のように、ひずみ速度によって軟岩の挙動は大きく変

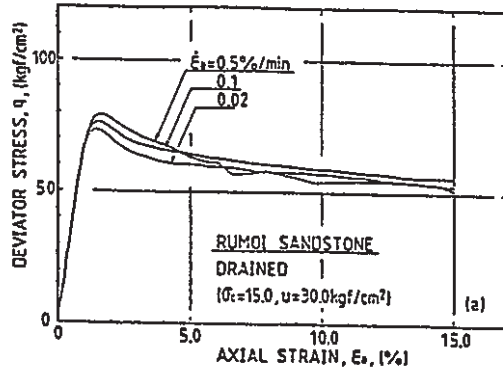
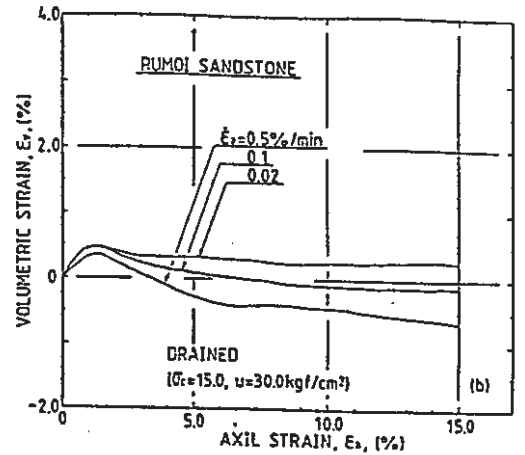


Fig. 9(a-b)



化することが伺われる。ピーク強度、残留強度、 E_{s2} 、ピーク時の軸ひずみ量とひずみ速度との関係を整理したのが図11(a)~(c)である。ひずみ速度が大きくな

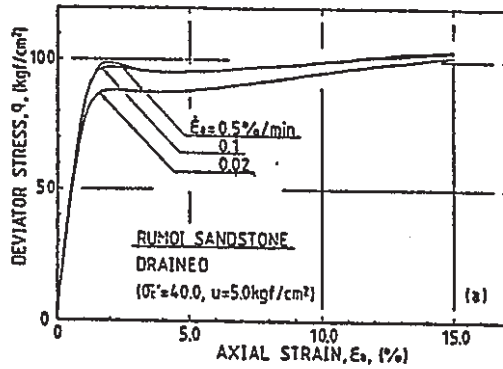
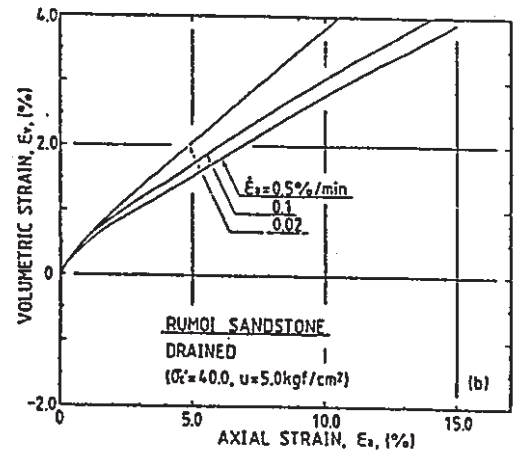


Fig. 10(a-b)



るとピーク強度、残留強度、初期のせん断剛性は増大する。また、体積の変化傾向は膨張側へ変化するが、3組の応力条件すべてにおいて一般的に言えることである。

ひずみ速度の影響の程度が有効拘束圧や間隙水圧の大きさによってどのように変化するかという問題は興味のある問題であり、本研究の目的のひとつはこの点にある。現在実験がまだ進行中でありひずみ速度が0.001%/minのケースのデータが不足しているために、はっきりしたことを言える段階ではないが、本研究の応力範囲では有効拘束圧や間隙水圧の相違によらず同程度のひずみ速度の影響があると言えよう。

あとがき 本研究の機会を与えて下さり、試料の採取と試験の実施に協力して頂いた北海道開発局留萌ダム建設事務所に記して感謝の意を表します。

【参考文献】 1)Handinら(1963):Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, Vol.47, No.5, pp.717-755. 2)後藤ら(1982):日本鉱業会誌, Vol.98, No.1131,

pp.393-398.
3)「小特集 -有効応力の原理」(1988):土と基礎, Vol.36, No.6, pp.5-70.

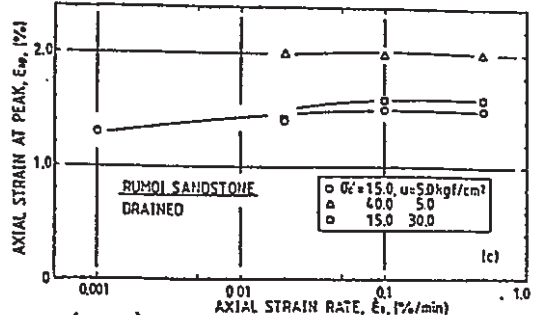
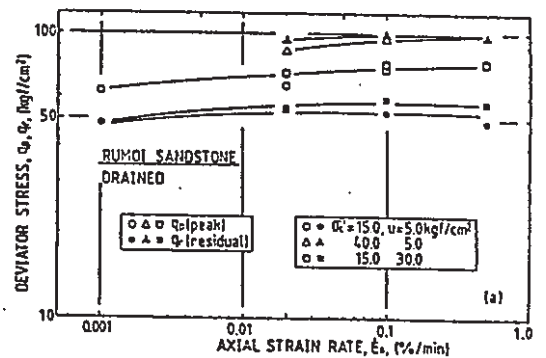
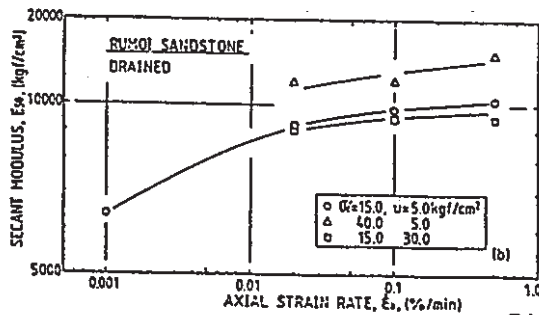


Fig. 11(a-c)

堆積軟岩の変形・強度特性に及ぼす間隙水圧の影響

北大工学部 正会員 土岐 祥介
 北大工学部 正会員 三浦 均也
 応用地質(株) 正会員 持田 文弘
 北大工学部 林 宏

1. まえがき

土質力学の分野において、土の強度特性は有効応力に支配されることが広く認められている。しかし、透水性、間隙の連続性、あるいは構成粒子の固結度等が土質材料と著しく異なる軟岩では、有効応力の原理が必ずしもそのまま適用できないとされており、この問題の解明は水位の変動にともなう軟岩基盤の力学特性の変化や、室内試験の結果を適切に評価する上で重要な課題と考えられる。本報告は、この問題に係わる基礎的な実験を行ったもので、先の報告¹⁾の続報である。

2. 試料および試験方法

試料: 試験に用いた4種の試料の物理的性質を表-1に示す。A砂岩には約5cm毎に粘土質の薄い層が存在しているがB, CおよびD砂岩¹⁾は比較的均質である。

試験方法: 使用した三軸圧縮試験機は最大拘束圧50kgf/cm²で、供試体寸法は直径5cm高さ10cmである。供試体から間隙水の出入りを容易にするため、周囲にドレーンペーパーをまいた。また試料の透水係数が何れも 1×10^{-7} cm/sec以上であったことから、 $\dot{\epsilon} = 0.1\%/min$ とした。一連の排水試験において間隙水圧の発生が認められなかったことから、排水条件は満足されていたと判断した。以下、A, B, CおよびD砂岩について間隙水圧(バックプレッシャー)uを5~40kgf/cm²に変え、有効拘束圧を $\sigma'_c = 5$ kgf/cm²の一定として行った試験結果を中心に述べる。

3. 試験結果

拘束圧の影響: 軟岩の応力~変形挙動が土と同様、有効拘束圧 σ'_c に大きく依存していることは広く認められており、図-1(a), (b)に示すように、拘束圧が大きいほどその破壊強度は高く、体積変化は収縮の傾向が強くなるほかに、低い拘束圧の下でみられるひずみ軟化に代わり、ひずみ硬化挙動が顕著になる。軸ひずみ $\epsilon_a = 10\%$ において発揮される軸差応力 q_r とピーク強度 q_p 。(ピークを生じない場合は $\epsilon_a = 10\%$ における q_r)との比をプロットしたのが図-2で、横軸には過圧密比に対応する、供試体の採取深度あるいは推定既往最大深度Zと γ_w の積と、 σ'_c の比がとってある。 $\gamma_w \cdot Z / \sigma'_c \approx 4$ を境に、応力~ひずみ曲線にひずみ硬化の挙動が現れている。

間隙水圧の大きさの影響: 間隙水圧を変え、 σ'_c を一定値としたD砂岩のCD試験結果から、強度・変形特性に及ぼす間隙水圧の大きさの影響を報告した前報¹⁾の図中に、A, BおよびC砂岩についての試験結果を追加したのが図-3, 4, 5である。図-3に示すように、

Table 1

試料名	A砂岩	B砂岩	C砂岩	D砂岩
G_s	2.63	2.64	2.64	2.63
e	0.772	0.565	0.535	0.632
γ_s (tf/m ³)	1.87	2.04	2.06	1.98
q_w (kgf/cm ²)	2.0	10.2	34.4	38.0
V ₀ (m/sec)	1.360	1.860	1.430	1.060
採取時深度 (m)	180	500	1,000	30

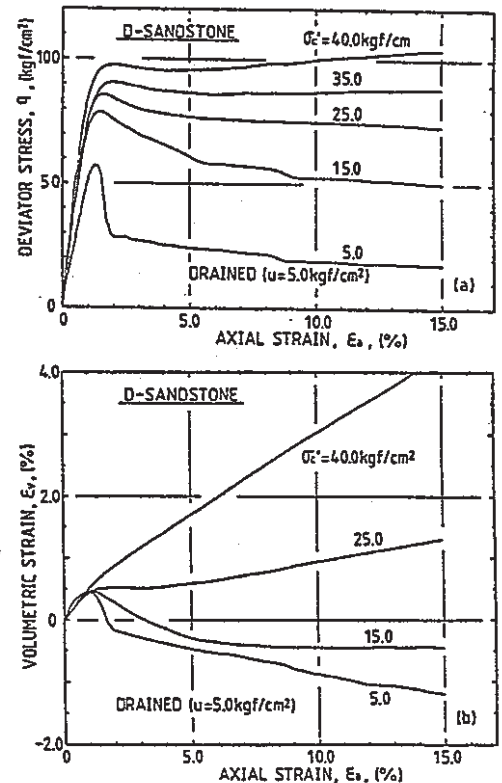


Fig. 1(a), (b)

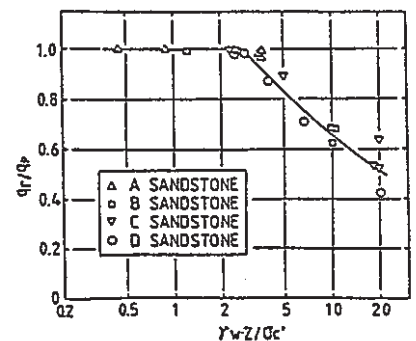


Fig. 2

q_p は u の増加とともにわずかに増加している傾向がみられるが、 q_0 ではその傾向は弱い。図-4に示す最大体積圧縮ひずみ $\varepsilon_{v,ov}$ は、 $u = 20 \text{ kgf/cm}^2$ で極大値を示す傾向にあるが、 $\varepsilon_{v,ov}$ に及ぼす u の影響は不明確である。ピーク強度が発揮される ε_{sp} を図-5に示す。 u の増加によって ε_{sp} は、B, C 砂岩では若干低下、D砂岩では若干増加の傾向があるが、 u の影響は小さいと言える。 E_{so} は図-6に示すようにB砂岩では u とともに増加し、 ε_{sp} が u とともに減少する傾向と対応しているが他の砂岩では、 E_{so} と ε_{sp} の変化の傾向が必ずしも対応していない。

4. むすび

岩石の力学特性に及ぼす間隙水の影響については、種々の研究が行われているが、吸水による岩質の変化による影響の面からみた研究を除くと、岩石の透水性と間隙の連続性に間隙水圧の影響を結び付けたものが多い。Heard(1960)²⁾らは石灰岩について、間隙水圧が増すと脆性が増すことを、またRobinson(1959)³⁾は、強度に及ぼす間隙水圧の影響は砂岩では土の場合と同じように表れるが、石灰岩では砂岩の場合におけるような強度と有効応力の関係が成り立たないとしている。またHandin(1963)⁴⁾は硬岩に属する砂岩では間隙水圧の増加とともに強度と剛性が增大するのに対し、後藤ら(1982)⁵⁾は石灰岩については同じく間隙水圧の影響が大きく、強度と剛性が増加する一方、砂岩、凝灰岩では強度の変化はないが、残留強度と剛性の低下を指摘している。今後、透水性や圧密時間、ひずみ速度などの試験条件との関係をさらに吟味する必要があると言えよう。

本実験では、間隙水圧の増加にともない残留強度がやや増加する傾向と、いくつかの試料では剛性と破壊ひずみにわずかの影響が認められたが、今回用いられた砂岩においては、土と同じように有効応力の原理がほぼ成り立つと考えられた。

5. 謝辞 この研究の実施にあたり試料の採取をはじめ、種々便宜を与えて頂いた北海道開発局留萌開発建設部留萌ダム調査事務所に紙上をかりて御礼申し上げます。

参考文献

- 1)土岐・三浦・持田・林(1987・6):軟岩力学特性に及ぼす～,第24回土質工学研究発表会
- 2)Serafim,J.L.(1968):Influence of Interstitial Water~,Rock Mechanics in Engineering Practice (ed.Stagg et al.) John Wiley.
- 3)Robinson,L.H.(1959):The effect of pore and~,Proc.3rd Symp.Rock Mech.,Golden Colo.,pp.177-199.
- 4)Handin,J.W., Hager,R.V., Friedman,Jr.M. and Feather,J.W. (1963):Experimental Deformation of~: Pore Pressure Tests, Bulletin American Association of Petroleum Geology,Vol.47,pp.717-755.
- 5)後藤・佐藤・深井・入江(1982):2, 3の本邦岩石に対する～:風圧下における岩石の力学的性質に関する実験的研究,日本工業会誌,Vol.98, No.1131,pp.717-755.

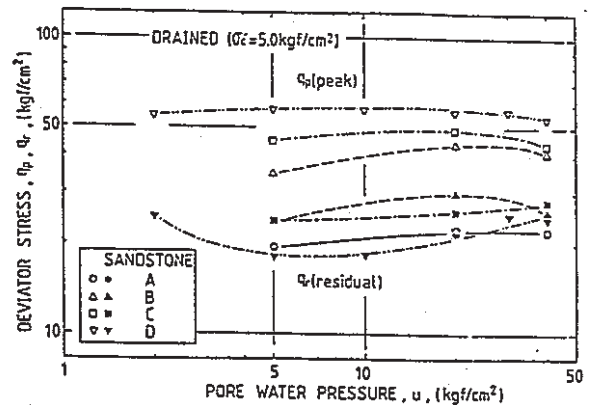


Fig. 3

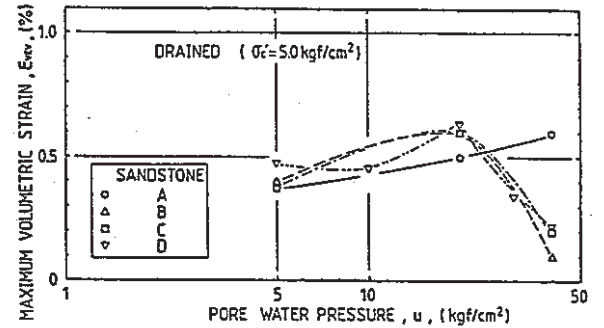


Fig. 4

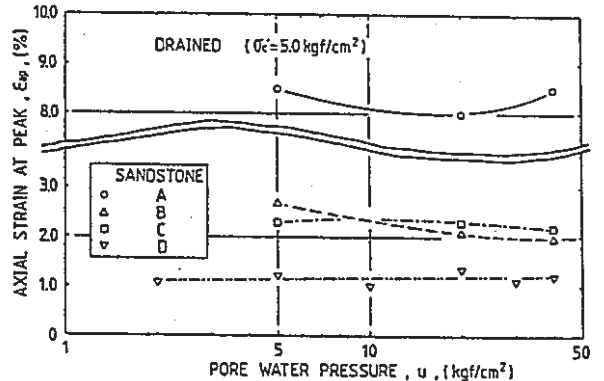


Fig. 5

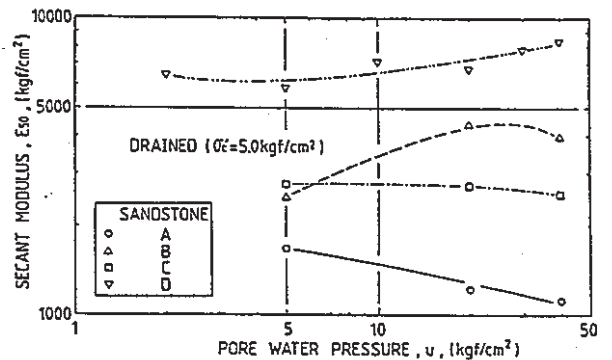


Fig. 6