

堆積軟岩の透水性および変形・ 強度特性の異方性に関する研究 (I)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1990年3月

北海道大学工学部
基礎地盤工学講座

本技術資料は、個人情報、著作権等に係る当該箇所につき、不開示
または削除としています。

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者にだけ配布するものです。従って、
その取扱には十分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が
必要です。また今回の配

This document is not
party should be made
Development Corporation

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184

茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

電話:029-282-1122(代表)

ファックス :029-282-7980

電子メール:jsserv@jnc.go.jp

re to the third
Nuclear Fuel

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

本資料についての問合せ

〒107 東京都港区赤坂

動力炉・核燃料

技術協力部 技術情報室

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2005

堆積軟岩の透水性

および変形・強度特性の

異方性に関する研究 (I)

土岐 祥介* 三浦 均也*

要 旨

軟岩という言葉が建設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が、近年になって、種々の構造物を建設する際、軟岩の力学的性質が問題となる場合が加速度的に多くなってきている。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、土質工学で対象とする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称している。軟岩はその生成原因によって次のように分類される場合がある。

- ・応力解放などにともない物理・化学的作用により風化し固結度の低下したものの
- ・断層などの破碎作用により固結構造が低下あるいは破壊されたものの
- ・熱的作用により変質し弱く固結したものの
- ・長期の高圧力の下における堆積岩生成の過程にあるが、まだ固結度が充分でないもの

最後の分類に属するものは堆積軟岩と通称されるものであり、本研究では変形・強度特性および透水性を中心にその性質を調べている。

軟岩は岩石工学と土質工学の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。さらに地盤を構成する材料は、クラックの存在や粒子の配列構造等によって、多くの場合、変形・強度特性や透水性が異方的であることはよく知られている。しかし、軟岩におけるそのような異方性を調べ、その特徴や成因を地

質構造などとの関連で報告している例は意外に少ないのが現状である。

本研究は、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特にその異方性について研究しようとしたものである。強い褶曲作用を受けたと思われる地域から採取した試料について種々の室内試験を行い、異方性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。

本報告書は、北海道大学工学部基礎地盤工学講座が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号： 010 D 00045

事業団担当者：川濱 隆司

*：北海道大学工学部基礎地盤工学講座

目 次

1. 本研究の背景、目的および意義	1
2. 試料とその物理的性質	2
2. 1. 試験に用いた試料	2
2. 2. 試料の粒度分布および物理的性質	4
3. 一軸圧縮強さ・変形係数・弾性波速度	7
4. 透水性	9
5. 三軸圧縮試験結果と考察	10
5. 1. 三軸試験の方法	10
5. 2. 試験結果	10
5. 3. 試験結果の考察	16
6. 研究のまとめ	18
あ と が き	21

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して敬遠されてきた。しかし、近年においては、本研究の対象となっているダム建設予定地のように、軟岩地盤の上にダムや長大橋を建設することや、軟岩地帯にトンネルを掘ることが社会的要請により多くなっている。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が、軟岩の性質は多種多様で更なる研究が待ち望まれている。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近年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昨年度より開始した。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、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と思われる。一連の研究の狙いは、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、検討することでもある。

昨年度は、いくつかの地盤から採取した試料について、間隙水圧と有効応力の種々の組合せにおいて、排水および非排水三軸試験を実施した。その目的は、土質力学におけるいくつかの基本原理のうち最大のものである「有効応力の原理」の、軟岩への適用性を検討することであった。その結果、試験を行った全ての試料について、十分な精度で「有効応力の原理」を適用できることが明らかにされ、軟岩の変形・強度特性を排水条件を考慮して統一的に説明できることを示すことができた。

本年度の研究では昨年度の基礎的研究を受けて、軟岩の諸性質についてさらに詳細な検討を加えている。岩石と土を含む地盤を構成する多くの材料は、クラックの存在や粒子の配列構造等によって、変形・強度特性や透水性が異方的となることはよく知られている。通常の岩石についてはクラックの状態を種々の方法で解析し、これにより異方性を説明することが行われている。一方、土ではその粒子が形成する配列構造に着目して種々の異方的な性質を説明することができるようである。しかし、軟岩におけるそのような異方性の成因およびその影響等について総合的に調

べ、地質構造などとの関連で報告している例は意外に少ないのが現状である。

本研究では、ダム建設予定地に当たる褶曲構造を有する地盤より、方向を変えて採取した細粒砂岩（新第三紀鮮新世）の物理的・力学的性質を三軸圧縮試験等によって調査し、その異方性について検討した。試験結果から、本軟岩の変形・強度特性や透水性には顕著な異方性が認められた。このような性質は、地質構造との関連で解釈することが出来、特定の方向からの強い応力履歴や、その条件下での異方的なセメンテーション効果に起因しているものであろうと考えられた。また、褶曲作用による変形・強度特性および透水性の変化についても、その特徴をあきらかにすることができた。

堆積軟岩の場合、地層が長期間に渡って受けた圧力は決して等方的ではないので、変形・強度特性や透水性が本研究で見られたような顕著な異方性を示すことは避けられないと考えられる。今後益々軟岩の力学的性質を精度良く知ることが必要になると考えられるが、本研究テーマである「軟岩の異方性」を明らかにすることはきわめて重要である。本報告では、一連の試験結果を取りまとめるとともに軟岩の変形・強度特性や透水性について考察している。本研究の成果が、軟岩の異方性について試料を蓄積し、新たな知見を加えることになれば本研究の目的は一応達成されると筆者は考えている。

2. 試料とその物理的性質

2.1. 試験に用いた試料

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左岸および右岸の調査横坑から採取した砂岩系の堆積軟岩で、新第三紀鮮新世下部砂岩層に属する無層理塊状の細粒砂岩である。試料採取地の地質断面図は図-1に示すようで、ダム建設地全体に渡って厚い均質な地層がみられるが、大きな褶曲構造を形成している。地質学的検証によると、過去において東西方向から大きな圧縮力を受けた、あるいは左岸において上向きの強い力を受けたことが原因と考えられたが、両方の可能性を否定できない。いずれにしても、このような大きな地質構造の変化により、右岸では地層はほぼ水平であるが左岸では対照的に地層はほぼ直立している状態となっている。本研究では、両地点から採取した試料についてその物理・化学的性質を調べることによって異方性を中心に軟岩の諸性質と地質構造との関係について検討している。

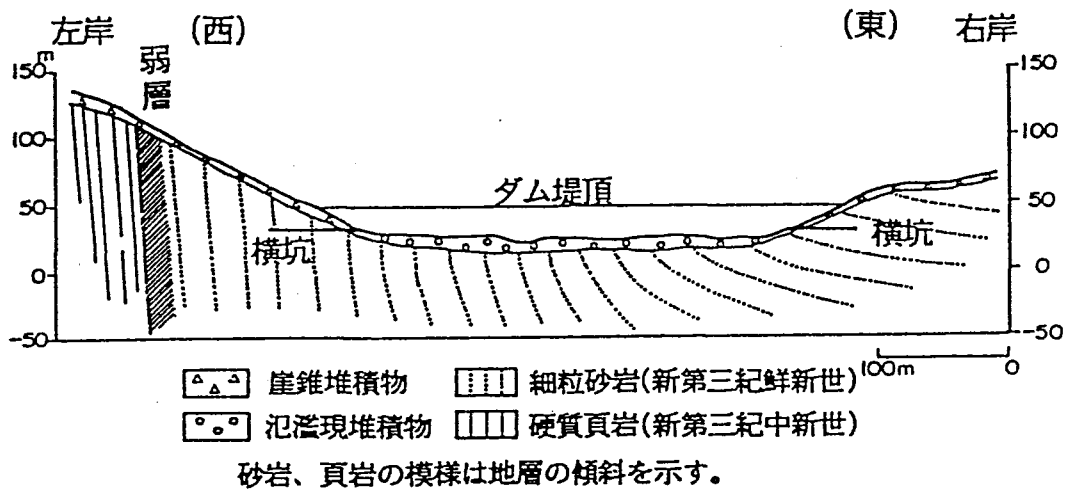


図-1 試料採取地地質断面図

試料の採取はシングルコアカッターを用いて行った。異方的な性質を明らかにするために、右岸では鉛直方向 (Rv)、水平ダム軸方向 (Rh、東西方向)、水平ダム軸直角方向 (Rhp、南北方向) の3方向で試料を採取した。左岸では本年度は鉛直方向 (Lv) のみで採取したが、来年度以降は右岸と同様な方法で試料採取を行う計画がある。RQDは50%前後であった。試料は灰白色で均質で、肉眼で割れ目を見つけることはできなかった。

表-1 軟岩試料の名称

右岸 (R)			左岸 (L)
鉛直方向 (Rv)	水平ダム軸方向 (Rh)	水平ダム軸直角方向 (Rhp)	鉛直方向 (Lv)

地質断面およびボーリングなどによる予備調査の結果、右岸の3方向および左岸鉛直方向で採取した4種類の軟岩試料はほぼ等しい堆積環境で生成したと考えられる。肉眼での視察では4試料は全く類似していて見分けることができなかった。また、顕微鏡による構成鉱物の成分分析を行った結果 (表-2) によると、各成分含有量のばらつきは見られるが、採取地点の離れている左岸だけが他のものと異なっ

ているとは言えない。この調査はそれぞれ一供試体についてしか顕微鏡観察を行っていないので、精度には限界があるが、本研究で用いる4種類の試料は堆積時にはほぼ同じ性質を有していたと考えてよい。したがって、次章以降で明らかにする右岸試料と左岸試料の性質の違いはその後の地質構造の変化に起因すると言えよう。

表-2 構成鉱物量比

	Q	Fel	Mi	R	Max	その他
右岸 R v (鉛直方向)	271	160	16	203	185	165
右岸 R h (ダム軸水平)	176	34	17	169	427	186
右岸 R hp (ダム軸直角)	175	57	24	141	403	184
左岸 L v (鉛直方向)	187	103	34	253	243	180

合計度数 = 1000

Q; 単・複結晶石英 Fel; 斜・カリ長石 Mi; 白・黒雲母
R; 緑色・褐色粘土化粒子 Max; 基質

2.2. 試料の粒度分布および物理的性質

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言える。粒度分布については、三軸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完全に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-2はその結果を示している。

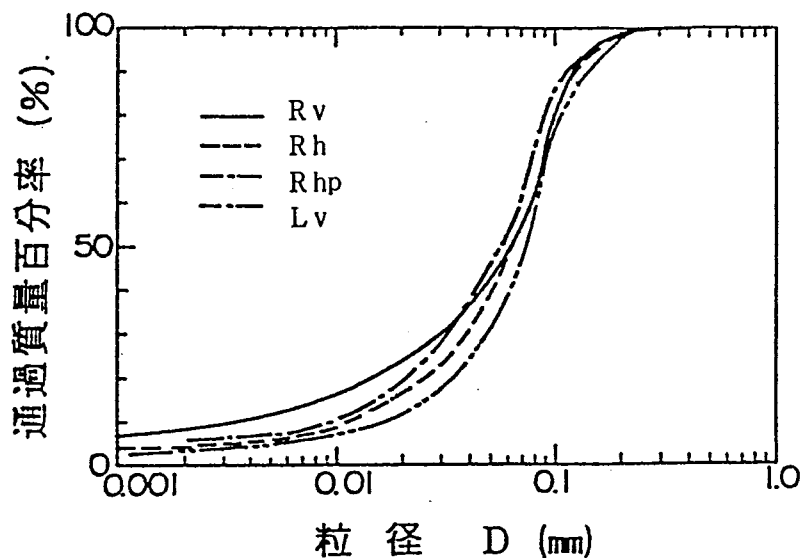


図-2 試料の粒度分布

試験に供した試料全てについて、自然状態での単位体積重量 γ_t と含水比 w_o を測定している。また、各々3試料について供試体作成時の削り屑を用いて比重試験を行い比重 G_s を求めている。これらに基づいて全ての試料の間隙比 e_o と飽和度 S_r_o を算定している。それらの平均値を表-3にまとめている。

表-3 試料の物理的諸量

	R v	R h	R h p	L v
湿潤密度 γ_t (tf/m ³)	1.980	2.018	1.984	2.064
比重 G_s	2.632	2.628	2.603	2.664
含水比 w_o (%)	21.7	22.1	22.8	20.3
間隙比 e_o	0.618	0.590	0.611	0.552
飽和度 S_r_o (%)	92.4	98.4	97.1	99.0

粒度分布と物理的諸量について各試料間で比較してみると次のようである。

(右岸3試料の比較)

右岸3方向ではどれも、粒度分布では砂分(74 μ 以上)が40%、細粒分(74 μ 以下)が60%程度であり、採取方向による粒度分布の違いは認められない。また、含水比、密度等にも顕著な差異が認められないことから採取方向による岩質の相違は本質的でないと言える。

(左岸試料と右岸試料の比較－褶曲作用の影響)

左岸試料の粒度組成は右岸試料に比べ砂分が若干多くなっているがほぼ類似の傾向を示しており、粒度分布の本質的な差は小さいと思われる。ところが物理的諸量についてみると左岸試料は乾燥密度、比重とも最も高い値、間隙比は最小の値を示しており右岸試料とは異なった傾向が認められる。このことから、右岸試料と左岸試料の堆積環境はほぼ同じで、構成鉱物や粒後分布には顕著な差はみられないが、地質構造の変化(褶曲構造の形成)にともなって、左岸部では右岸部よりもより大きな力を受けていたために、岩石の緊密化(圧密)がより進んでいると考えられる。

3. 一軸圧縮強度・変形係数・弾性波速度

各々の試料について供試体 ($h=100\text{mm}$, $d=50\text{mm}$) を5個程度準備し、それらに弾性波速度試験を行い、ついで、一軸圧縮試験を行っている。供試体は成形後24時間真空中で脱気水に浸すことによって飽和化を図っている。弾性波速度試験ではP-波、S-波の速度 V_p ; V_s を測定した。また、一軸圧縮試験では一軸圧縮強度 q_u と弾性理論のヤング率に相当する変形係数 E_u を算出した。図-3 (a, b) には V_p 、 V_s と q_u との関係を示し、また図-4 には E_u と q_u の関係を示している。

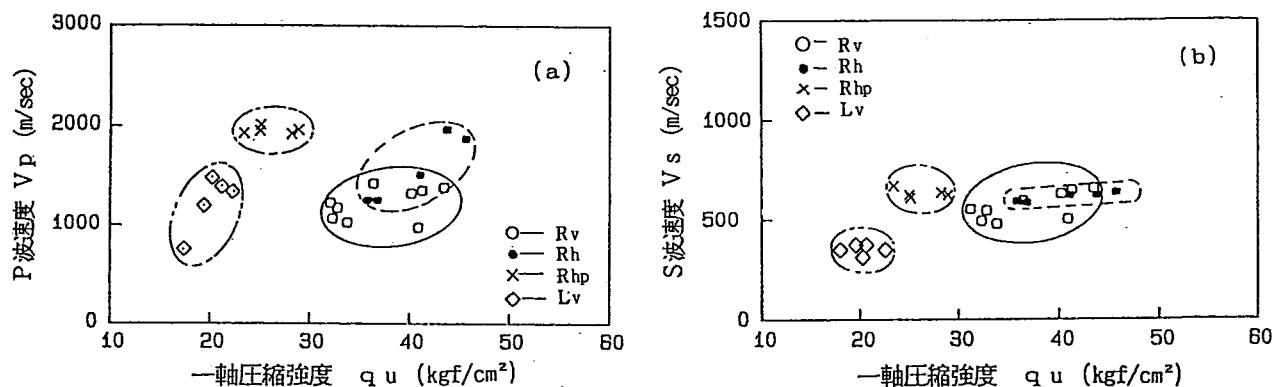


図-3 (a) P波速度 V_p ~ 一軸圧縮強度 q_u 関係、
(b) S波速度 V_s ~ 一軸圧縮強度 q_u 関係

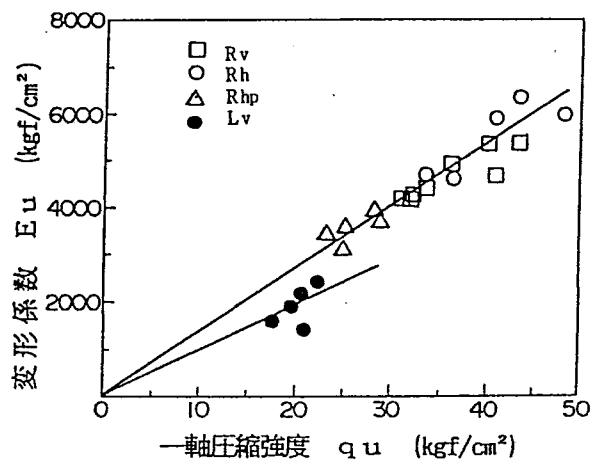


図-4 変形係数 E_u ~ 一軸強度 q_u の関係

これらの試験結果について考察してみると以下のようなことが分かる。

(右岸3試料の比較－異方性)

一軸圧縮強度 q_u については R_h, R_v, R_{hp} の順に大きく、 R_{hp} では R_h の 60% 程度の強度しか示さなかった。このように、 q_u は同一地点においても試料の採取方向によって大きく異なり、強度には顕著な異方性が認められることが分かる。変形係数 E_u にも q_u と同様な顕著な異方性が見られるが、右岸試料相互の間では図-4 に示すように E_u と q_u は良好な比例関係にある。したがって、試料が強度や変形係数において強い異方性を示す場合でも、異方性の影響は両者において同程度の強さで現われると言える。

一般に、P波（圧縮波）速度には供試体の飽和度が大きく影響するが、S波（せん断波）速度は供試体の土粒子骨格構造を反映するために、せん断変形特性を知る指標とされている。そこで、S波速度 V_s について比較してみると右岸の3試料では顕著な差が認められずほぼ同一の値を示す傾向が読み取れる。したがって、弾性波速度は試料の物理的性質の異方性とは関係がなく、供試体の平均的な性質によって決定されると考えられる。言い換えると、なんらかの手段により地盤の弾性波速度を測定しても試料の異方的な力学的性質を知ることはできないということになる。

R_h 方向の圧縮に対して試料が最も固く、強度も対応して大きいことは、地質構造との関連において説明できそうである。地層が堆積して形成された後、現在のように固結して軟岩になる長期の過程において、地層は顕著なかなり異方的応力状態にあったと思われる。すなわち、ダム軸方向から大きな圧縮力を受けていたために、その方向での強度や剛性が増大したのであろう。このことから、図-1に示した褶曲構造はダム軸方向からの非常に大きな圧縮力によってでき上がったのではないかと想像できる。

(左岸試料と右岸試料の比較－褶曲作用の影響)

左岸の試料 L_v は一軸圧縮強度 q_u 、変形係数 E_u 、S波速度 V_s 、ともに右岸試料のどれよりも小さな値を示している。前節で説明したように、物理的諸性質の比較によって、 L_v は密度が大きく、間隙比が小さいと特徴付けることができるので、 q_u 、 E_u 、 V_s は右岸のものよりも大きくなると期待されたが、結果は全くの逆であった。

この理由は地質構造との関連において以下のように説明できないであろうか。左岸は確かに右岸よりも大きな拘束圧を受けていたので、それが原因で密度が増加したであろう。ただし、その後、左岸は地層が直立するほどの変動を受けたために内部には無数の微小クラックが形成されたのではないだろうか。このことが強度や剛性、弾性波速度を減少させた原因と想像できる。

4. 透水性

前記の一軸圧縮試験および弾性波試験と同様な方法で4種類の試料各々について供試体 ($h=50\text{mm}$, $d=50\text{mm}$) を準備し、透水試験を実施している。透水性の拘束圧依存性を調べる目的のために、試験は三軸試験用の圧力セル内で種々の拘束圧の下で行っている。供試体側面とメンブレン接触部における透水を防ぐ目的で、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って実験を開始している。

$2.0\sim 40.0\text{kgf/cm}^2$ の範囲で段階的に変化する等方応力の下で透水係数を測定した。測定方法は変水位法で、一回の測定にほぼ24時間かけている。試験結果は拘束圧の変化に対して、図-5に示している。どの試料についての試験でも、拘束圧が 5.0kgf/cm^2 までは透水性は急激に低下しているが、それ以上の圧力ではほぼ一定値となっている。

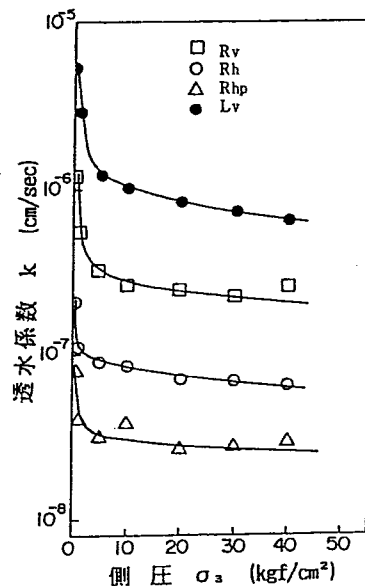


図-5 拘束圧に対する透水係数の変化

(右岸3試料の比較-異方性)

右岸3種類の透水性を比較すると、 R_v 、 R_{hp} 、 R_h の順に透水性は大きい。通常の土質材料の場合には透水性が等方的である場合はむしろ希で、粒子の配列構造や成層状態に起因して一般に水平方向の方が鉛直方向に比べて大きな透水性を示すことが知られている。右岸試料においても透水性は図示のように顕著な異方性を示すようであるが、この傾向は土質材料に於て認められるものとは異なっている。このような透水係数の異方性が生じるのは異方的な拘束圧の下で獲得したセメンテーションの効果によると思われるが、今年度の研究の範囲ではその他の物理的性質や強

度・変形特性、弾性波伝達特性との関連で明解な説明を示すことはできなかった。

(左岸試料と右岸試料の比較－褶曲作用の影響)

図-5に示すように、左岸試料Lvは3種類の右岸試料のいずれよりも大きな透水性を示している。先に示したように、Lvの物理的性質における特徴は密度が大きく間隙比が小さいことであった。また、細粒分含有量についても他の試料に比べて差異は見られなかった。よって、試験結果とは逆に透水性が最も低いのではないかとの予測が得られていた。

一軸圧縮強度や弾性波速度と地質構造との関連において説明したように、右岸と比較して大きな褶曲作用を受けた左岸の試料は内部には無数の微小なクラックが形成されてるために、透水係数が顕著に低下したのではないかと推定できる。

5. 三軸圧縮試験結果と結果

5.1. 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 までの封圧を負荷することができる。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。

どの試料においても透水係数は $1.0 \times 10^{-7}\text{cm/sec}$ 程度であるため、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。

供試体の飽和度を高めるために、一軸圧縮試験や弾性波測定試験、透水試験と同様な方法で供試体の飽和化を図った。その結果、試験前の供試体では飽和度は99%程度まで上昇していた。三軸試験ではさらに $\sigma_u = 5.0\text{kgf/cm}^2$ 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。

5.2. 試験結果

試験はすべて排水条件で行い、有効拘束圧は $\sigma_3 = 5.0 \sim 90.0\text{kgf/cm}^2$ の範囲で段階的に変化させた。ただし、RhpとLvについては $\sigma_3 = 5.0 \sim 40.0\text{kgf/cm}^2$ の範囲でしか試験を行っていない。試験結果は図-6～9に示した通りである。

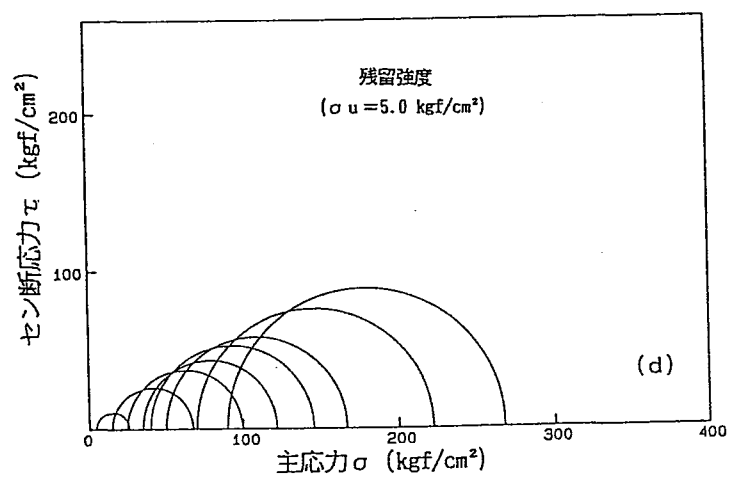
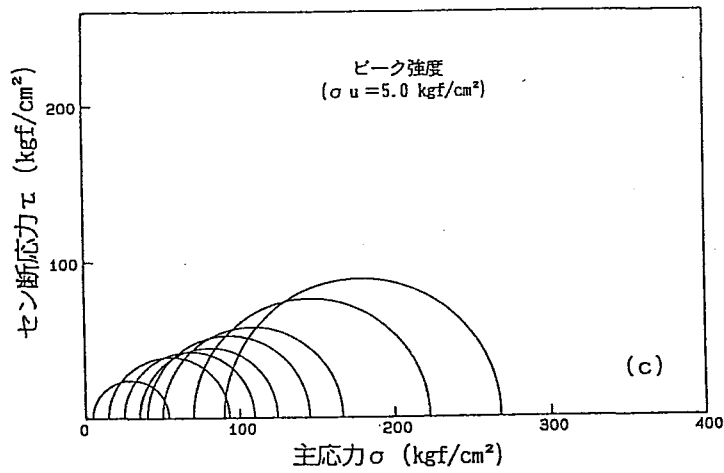
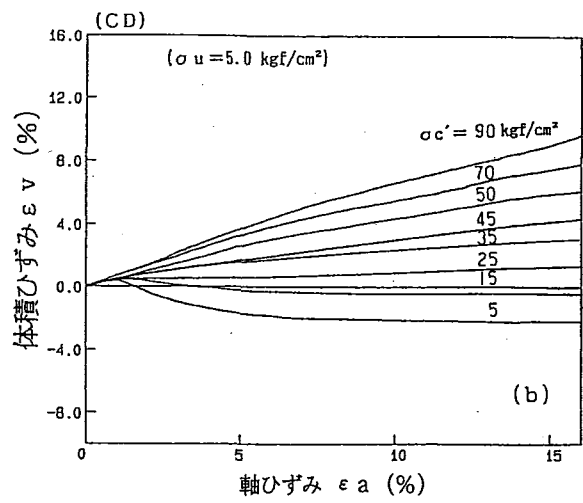
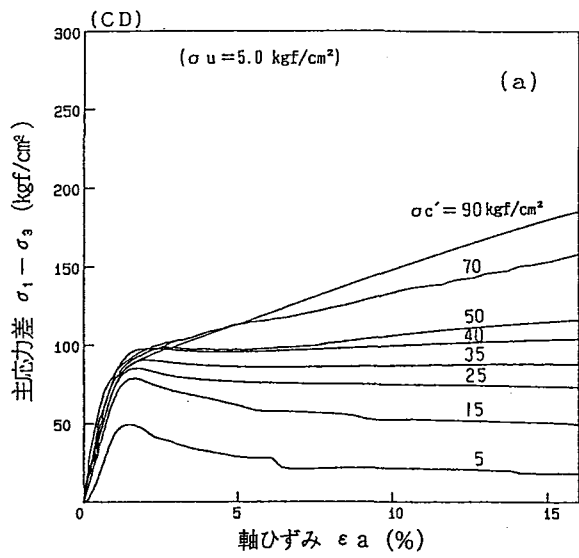


図-6 (a-d) R v 試料の三軸試験結果

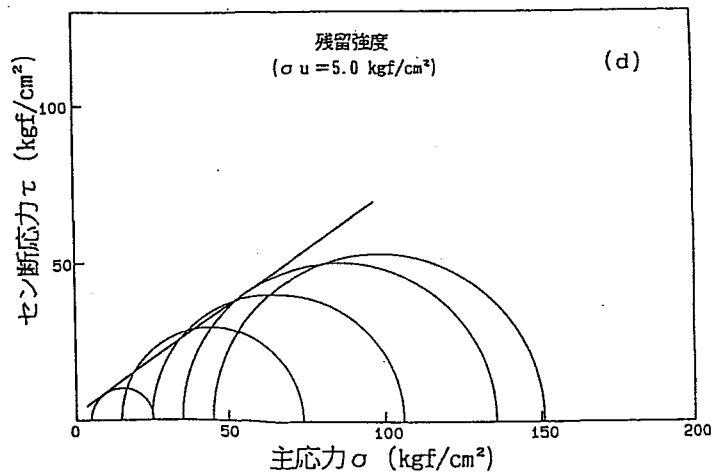
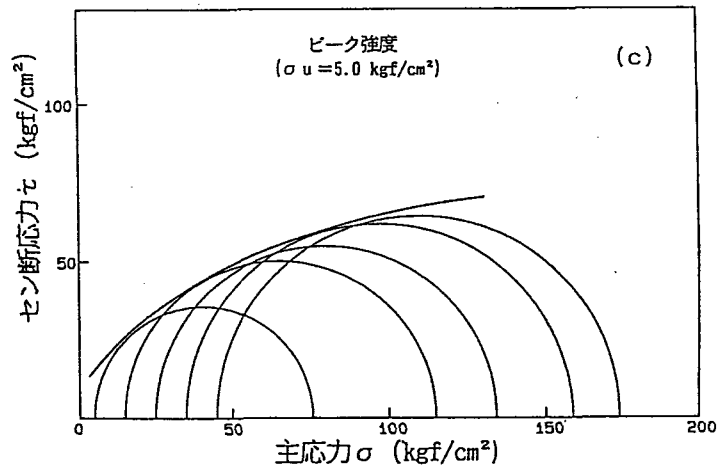
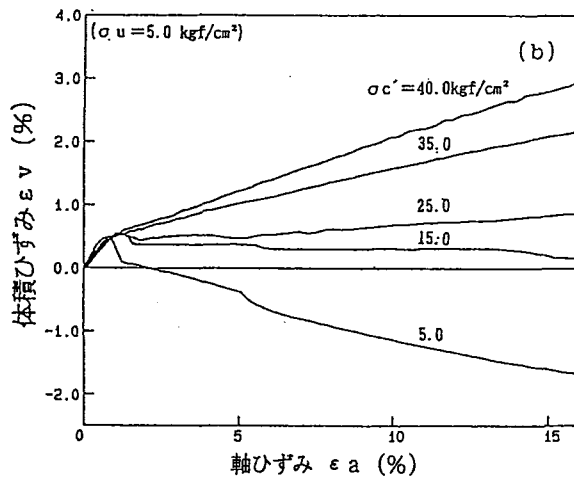
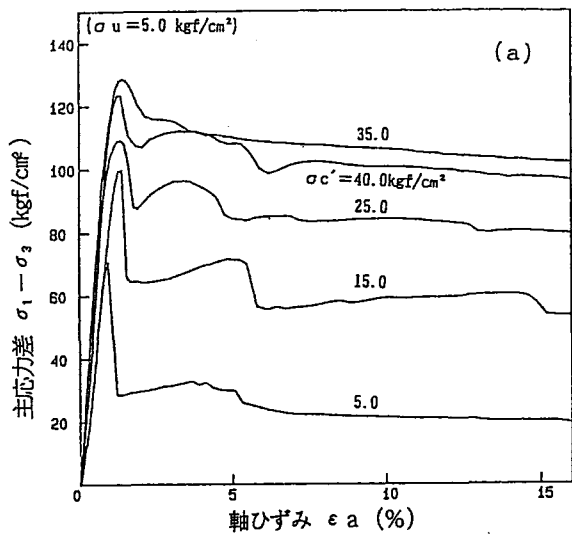


図 - 7 (a-d) R hp 試料の三軸試験結果

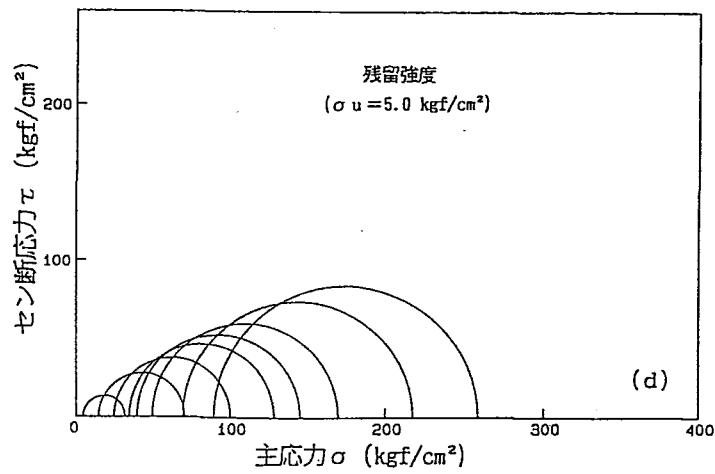
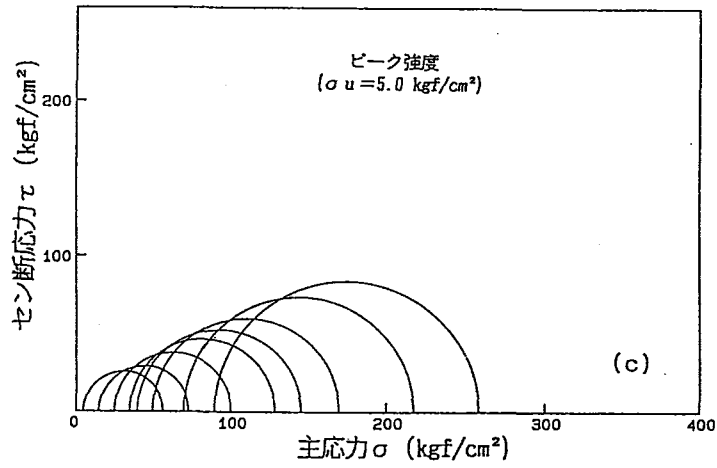
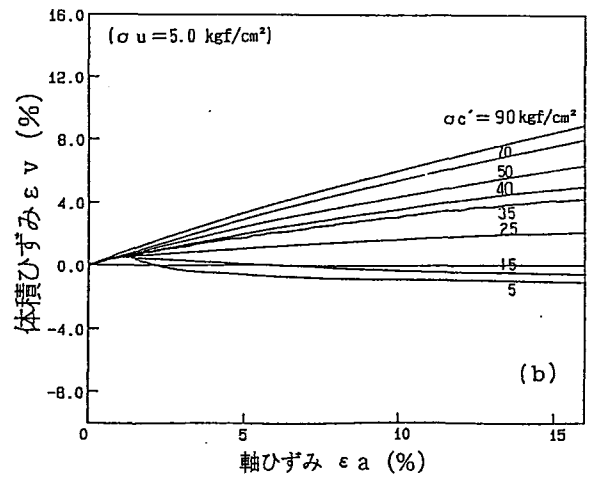
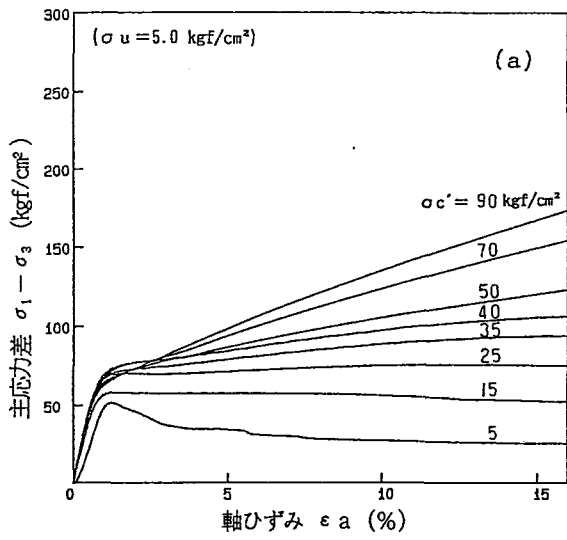


図 - 8 (a-d) R h 試料の三軸試験結果

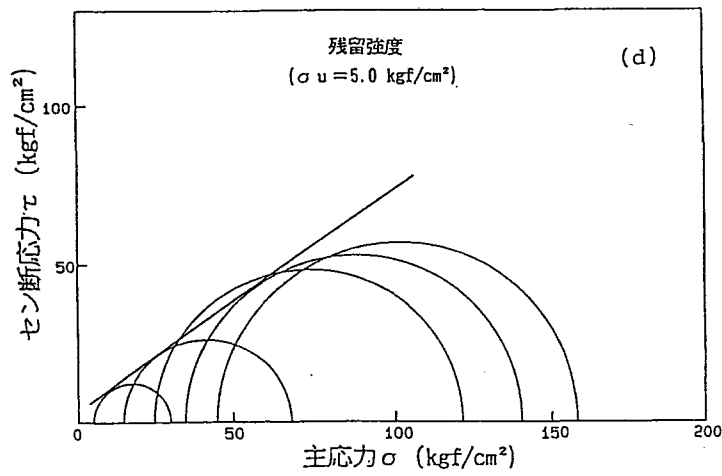
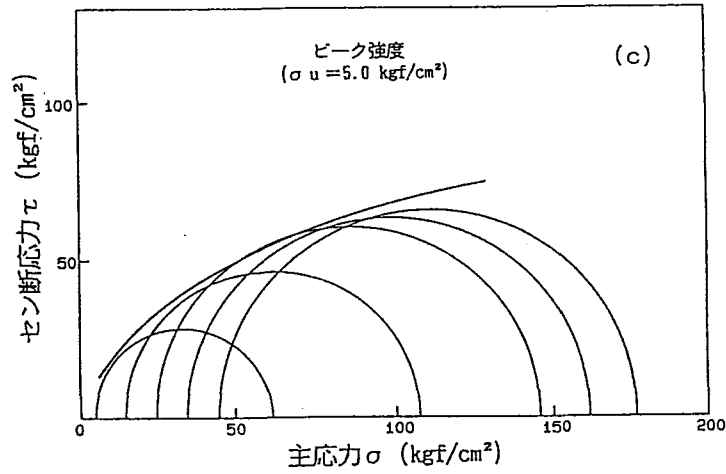
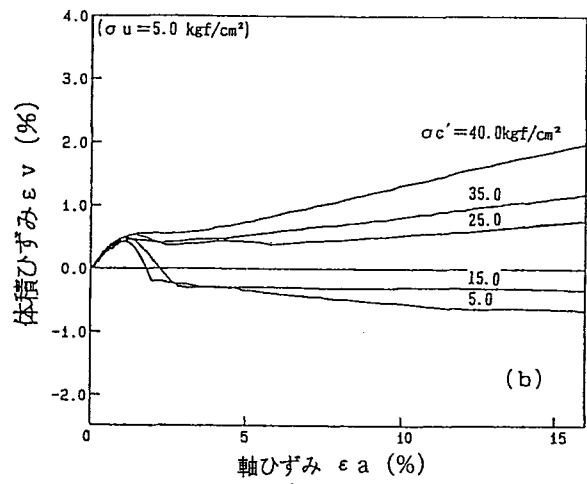
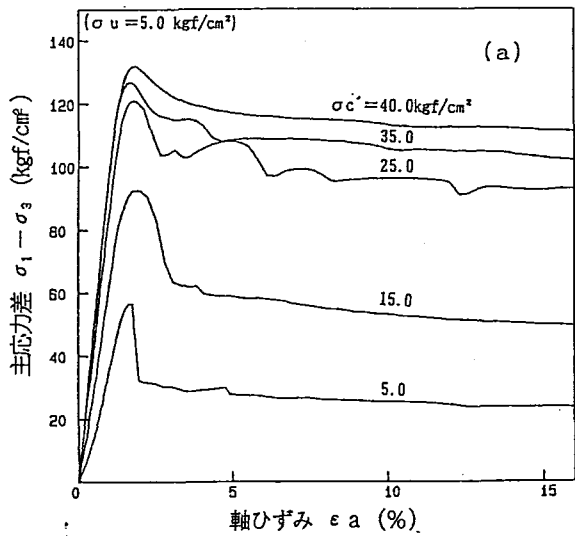


図 - 9 (a-d) L v 試料の三軸試験結果

また、ピーク強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_p$ 、残留強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ 、初期接線係数 E 、破壊時軸ひずみ ε_{af} を図 10 ~ 図 13 に示している。

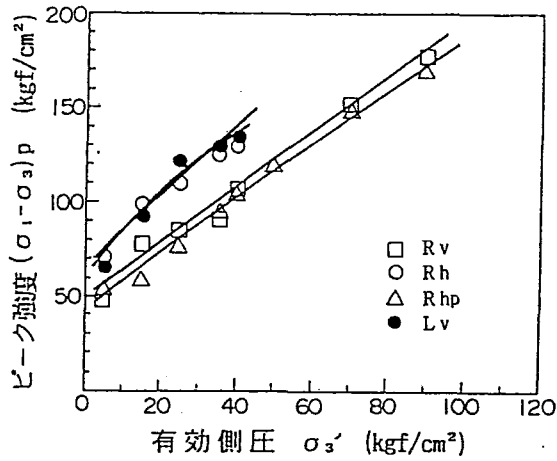


図 - 1 0

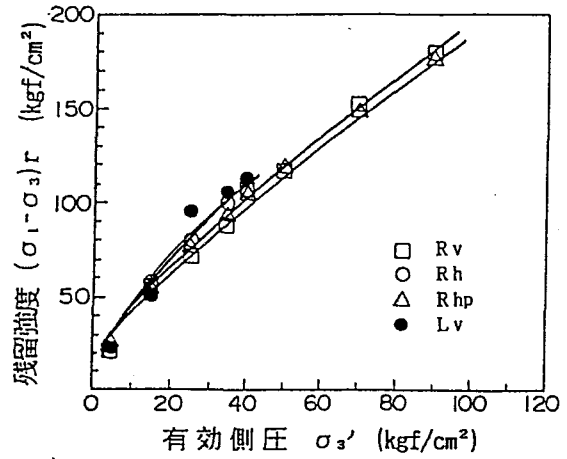


図 - 1 1

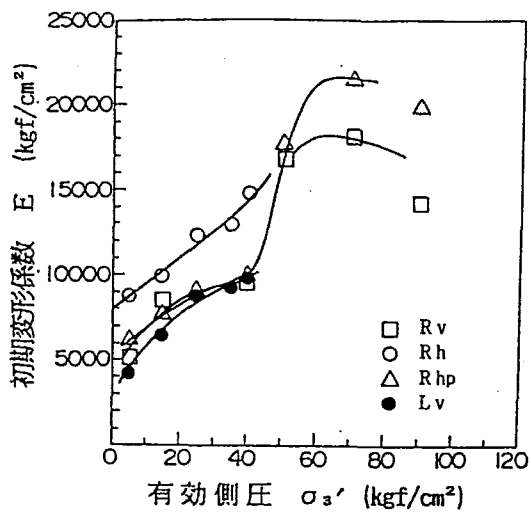


図 - 1 2

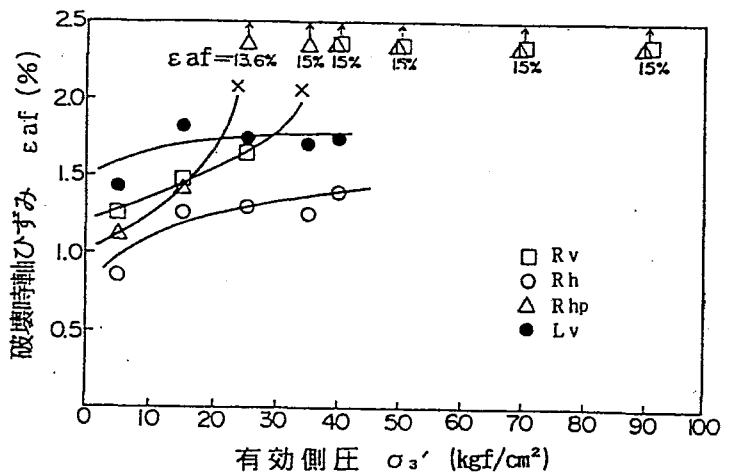


図 - 1 3

図 - 1 0 有効拘束圧 σ_3 ~ ピーク強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_p$ 関係

図 - 1 1 有効拘束圧 σ_3 ~ 残留強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ 関係

図 - 1 2 有効拘束圧 σ_3 ~ 初期接線係数 E 関係

図 - 1 3 有効拘束圧 σ_3 ~ 破壊時軸ひずみ ε_{af}

5.3. 試験結果の考察

以下では、試験結果について考察を行い、強度・変形特性の異方性および褶曲作用による強度・変形特性の変化について以下のような検討を行っている。

(右岸3試料の比較-異方性)

右岸部の3試料(Rv、Rh、Rhp)の変形・強度特性の特徴を列挙すると以下のようである。

1. ピーク強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_p$ は有効側圧 σ_3 の増加とともに増加し、その大きさはRh、Rv、Rhpの順となっている。これは、前述した q_u 、 E_u の関係と一致している(図-10)。
2. 一方、残留強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ には、試料間の相違は認められない(図-11)。
3. 初期変形係数Eは、拘束圧 σ_3 が大きい程大きい傾向にあるが、その増加傾向は σ_3 の増加に伴ない変形挙動が(ひずみ軟化~ひずみ硬化へ、脆性~延性へ)変化するため一様ではない。そのため、 $\sigma_3 = 90 \text{ kgf/cm}^2$ で、Eの低下も見られる(図-12)。
4. 破壊時の軸ひずみ ϵ_{af} は、 σ_3 とともに緩やかに増加するが、変形挙動がひずみ軟化からひずみ硬化へ転ずる付近の σ_3 より急増する。各試料で比較すると、 ϵ_{af} はRhp、Rv、Rhの順に大きくなっている。 ϵ_{af} が急増しはじめる点の σ_3 は、ひずみ硬化現象のはじまりでもあり、これ以降 $(\sigma_1 - \sigma_3)_p$ と $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ が等しくなる(図-13)。
5. この時の σ_3 は試料が以前に受けた最大応力に依存するとの報告もある。これに着目すると試料が以前に受けた最大応力は異方的であることになり、Rhp、Rv、Rhの順に大きくなっていることから、これは $(\sigma_1 - \sigma_3)_p$ の傾向と一致していることになる。

以上から、三軸圧縮条件においても右岸試料の変形・強度特性は顕著な異方性を示すことが分かった。また、その傾向は一軸圧縮試験で観察された挙動と良く整合している。すなわち、地質構造から推定されるようにダム軸方向から強い圧力を受けたことによるセメンテーション効果によって、その方向での圧縮変形を受けた場合に剛性は大きく強度は高くなるようである。

(左岸試料と右岸試料の比較－褶曲作用の影響)

左岸試料 L_v の結果を右岸試料と比較して位置付けると次のようになる。

1. $(\sigma_1 - \sigma_3)_p$ は、 R_{hp} とほぼ同等で全試料の中で最も大きな値を示している。これは一軸圧縮試験で観察された強度と変形係数での左岸試料と右岸試料の対比とは反対の結果となっている。(図-10)

2. $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ では、右岸試料との間に顕著な差は見られない(図-11)。

3. E は拘束圧 $\sigma_3 \leq 25 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲で右岸試料よりも小さな値を示すが、それ以上の σ_3 では R_{hp} 、 R_v と同程度の値を示している。この傾向は $(\sigma_1 - \sigma_3)_p$ での傾向と逆になっている。すなわち、変形初期においては右岸試料よりも剛性が小さいが、拘束圧が高くなると他の試料の場合よりも大きな割合で剛性が大きくなっているようである(図-12)。

4. ϵ_{af} は、 $\sigma_3 \leq 25 \text{ kgf/cm}^2$ では最も大きな値を示すが、それ以上の σ_3 のもとでは R_{hp} 、 R_v の方が大きな値を示す。また、 L_v は R_h と同様 $\sigma_3 = 40 \text{ kgf/cm}^2$ でも、 ϵ_{af} が急増するに至らず、変形挙動がひずみ硬化型に転じていないことがわかる。

以上の左岸試料と右岸試料の変形・強度特性の比較から、いくつかの興味深い事実が明かとなった。一軸圧縮試験の剛性と強度および三軸試験の拘束圧の低い範囲での変形初期の剛性はいずれも左岸試料の方が右岸試料よりも小さく、弾性波速度や透水性の比較もこの傾向を支持するものであった。これらは、先に説明したように大きな褶曲作用によって導入されであろう微少なクラックの存在による影響を予想させるものである。一方、本節で説明したように、三軸試験を行った拘束圧の範囲では左岸試料の方が右岸試料よりも明らかに破壊強度が大きかった。この理由については、拘束圧が増大するとクラックの存在による欠陥が閉じ、褶曲を受ける以前のより安定な構造が再現できるために過去に受けた応力履歴の影響が顕在化した考えると、このような相反する傾向をよく説明できるようである。

6. 研究のまとめ

本研究では、ダム建設予定地に当たる著しい褶曲がみられる地層の左右両岩の2地点から採取した軟岩試料について種々の試験を行い、物理的性質および力学的性質を調べた。

ダムサイト右岸では直交する3方向で試料を採取し、左岸では鉛直方向のみから採取した。地質調査、肉眼による視察、顕微鏡による鉱物組成の分析、粒度分布等から検討するとこれらの4種類の試料は均質な細粒砂岩で本質的な差が認められないことが確かめられた。したがって、右岸の3試料の性質を比較・検討することによって、変形・強度特性の異方性を知ることができた。また、左岸で採取した試料の物理的性質と力学的性質との比較を行うことによって、地層の褶曲となって現われた地質構造の変化の影響を明らかにすることができた。

種々の物理的性質および力学的性質の対照を表-4に示している。表-4に於て、数値はそれぞれの値の最も大きなものに1を、また最も小さなものに4を付けてある。なお現在の段階では確定的でないものについては、()内に今後の試験によって変わり得る順位を示した。以下では、軟岩の変形・強度特性の異方性およびその褶曲による変化のそれぞれについて取りまとめている。

(右岸3試料の比較-異方性)

1. 一軸圧縮試験における強度、変形係数、三軸圧縮試験による拘束圧を受けた状態での変形係数と強度特性には顕著な異方性が認められ、水平ダム軸方向で最も剛性が大きく強度が高く、その他は鉛直方向、水平ダム軸直角方向の順であることが分かった。

2. 一軸圧縮試験で求められた変形係数と強度の間には良い比例関係が存在していた。よって、これらにおける異方性の程度は同程度であるといえる。

3. 弾性波速度試験を各々の試料について実施したが、弾性波速度、特にせん断波速度には差は認められなかった。したがって、弾性波速度から変形・強度特性の異方性を推定することは難しいように思われる。

4. 透水性にも異方性が認められたが、変形・強度特性や地質構造との関係からは説明することができなかった。

5. 前述の1.で説明した変形・強度特性に見られる一貫した異方的な性質は、対象とした地層がダム軸方向から長期にわたって大きな圧縮力を受けていたために、セメンテーションの効果がこのように異方的に現われたと考えるとうまく説明でき

る。三軸試験で観察された変形挙動がひずみ軟化から硬化へ変化するときの拘束圧が原位置で受けていた既往最大応力状態と相関があるとすると、この点からも上記の考えが支持される。

6. したがって、右岸から左岸にかけて見られる大きな褶曲は、ダム軸方向での圧縮力に起因すると考えられる。

（左岸試料と右岸試料の比較－褶曲作用の影響）

1. 物理的諸性質から判断すると、左岸の試料は右岸の試料よりも密度が大きく間隙比が小さいとその特徴を説明できる。したがって、同じような堆積環境で生成した後、左岸では右岸よりも大きな力を受けていたのではないかと推定できる。

2. 左岸試料についての一軸圧縮試験における強度、変形係数および弾性波速度と右岸試料のそれらとの間には顕著な差が認められ、左岸試料の方が剛性は小さく強度は低いとの傾向が得られた。

3. 密度が大きく間隙比が小さいことは剛性が大きく強度は高いことを期待させるが、一軸圧縮試験によって逆の傾向が示されたことになる。地質断面図では、右岸では地層はおおよそ水平であるが、左岸では大きな褶曲作用によって地層がほぼ直立している。したがって、左岸の試料は右岸試料よりも大きな褶曲作用を受けたことになり、それによって、内部には微少なクラックが発生したのであろう。このように考えると、剛性と強度の低下および弾性波速度の低下が説明できる。

4. 透水試験の結果、左岸試料の透水性は右岸試料のどれよりも大きいことが明らかとなった。このことから、左岸試料は微少なクラック多数含んでいるという推測が支持される。

5. 三軸圧縮条件では、左岸供試体のピーク強度は右岸試料のそれよりも大きく、また、拘束圧の大きな領域では変形係数も左岸試料が右岸試料よりも大きいことが示された。この傾向は一軸圧縮試験や弾性波速度試験、透水試験から得られた傾向と逆になっている。

6. 拘束圧が増大するとクラックの存在による欠陥が閉じ、褶曲を受ける以前のより安定な構造が再現できるために過去に受けた応力履歴の影響が顕在化したために2.および5.で説明した相異なる傾向を説明できる。

表-4(a) 種々の特性値の比較 (基礎的性質)

	e	k	qu	$E u / q u$	Vs
右岸 R v (鉛直方向)	1	2 (1)	2 (2)	1	1
右岸 R h (ダム軸水平)	1	3 (2)	1 (1)	1	1
右岸 R hp (ダム軸直角)	1	4 (3)	3 (3)	1	1
左岸 L v (鉛直方向)	4	1	4	4	4

表-4(b) 種々の特性値の比較 (三軸応力状態)

	$(\sigma 1 - \sigma 3) p$	$(\sigma 1 - \sigma 3) r$	E	$\epsilon a f$	σy
右岸 R v (鉛直方向)	3 (2)	3 (2)	2 (2)	3 (2)	3 (2)
右岸 R h (ダム軸水平)	1 (1)	1 (1)	1 (1)	4 (3)	1 (1)
右岸 R hp (ダム軸直角)	4 (3)	4 (3)	3 (3)	2 (1)	4 (3)
左岸 L v (鉛直方向)	1	1	4	1	1

あ と が き

この研究では、軟岩の透水性および変形・強度特性の異方性を中心課題に、軟岩の力学的性質に関する基礎的研究を行ったものである。試料を採取したダム建設予定地は地層断面から知られるように大きな褶曲構造が見られ、地質構造の影響が非常に大きく現われていると思われる。研究を行った上で幸運であったのは右岸と左岸に跨る地層は非常に均質で良質な軟岩であったので、本研究の目的を達成するためには最適の試料となったことである。

本年度は、右岸の3試料と左岸の1試料について調べたが、来年度以降は中央部にある鉛直調査坑も含めてより広い範囲から試料を採取する予定である。また、試料採取方向も3方向に限定せずそれらの中間の方向で行うことを予定している。これにより、透水性および変形・強度特性における異方性の本質に迫ることができると期待している。透水性の測定方法についてはさらに検討が必要であると感じている。現在は三軸試験装置を転用しているが、原位置の問題に即した試験方法を取り入れてさらに研究を進める必要がある。

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の研究は開始したばかりで日が浅く、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。しかし、本年度の研究では所期の目的を一応達することが出来たと考えており、来年度以降の研究についても本研究の成果を十分にふまえて推進していく予定である。

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、砂岩試料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建設事務所、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。

添 付 資 料