

軟弱地盤上のフィルダムにおける
水理破碎に関する研究

西 村 眞 一

①

軟弱地盤上のフィルダムにおける
水理破碎に関する研究

1997

西村真一

目 次

第1章 序論	1
1. 1 緒言	1
1. 2 研究の目的	2
1. 3 既往の研究	4
1.3.1 水理破碎関する調査及び実験的研究	4
1.3.2 土の力学的特性の測定に関する研究	7
1.3.2.1 三軸圧縮試験	6
1.3.2.2 引張強度試験	7
1. 4 本研究の位置づけと研究の方法	8
1. 5 論文の構成	9
第2章 水理破碎の基本概念	11
2. 1 堤体中に生じる破碎面	11
2. 2 亀裂の発生原因	12
2.2.1 アーチ作用による亀裂の発生	12
2.2.2 破壊強度の限界を越えた盛土荷重による破壊	15
2.2.3 築堤過程におけるすべり破壊	16
2.2.4 その他の亀裂の発生原因	17
第3章 研究対象のダムの概要	18
3. 1 概説	18
3. 2 位置と形状	18
3. 3 堤体及び基礎の地質	21
3. 4 ダムの漏水	24
第4章 ダム基礎における水理破碎実験	25
4. 1 概説	25
4. 2 実験を行った場所とオーガー孔の配置	26
4.2.1 実験を行った場所	26
4.2.2 オーガー孔の配置	27
4. 3 注入管の作成及び埋設	28
4.3.1 注入管の作成	28
4.3.2 注入管の埋設方法	29
4. 4 実験装置の概要	30
4.4.1 実験装置の設置	30
4.4.2 装置各部の接続	32

4.4.2.1	塩ビパイプとスタンドパイプの接続	・ ・ ・ 32
4.4.2.2	スタンドパイプ流量計	・ ・ ・ 33
4.4.3	測定前の準備	・ ・ ・ 34
4.4.3.1	スタンドパイプへの液体の供給	・ ・ ・ 34
4.4.3.2	管内のエアー抜き	・ ・ ・ 35
4.5	測定方法と測定値の整理	・ ・ ・ 35
4.5.1	測定方法	・ ・ ・ 35
4.5.2	計測とデータ整理	・ ・ ・ 37
4.6	弾性論による亀裂発生の条件	・ ・ ・ 39
4.7	実験結果	・ ・ ・ 41
4.7.1	注入流量と注入水圧の関係	・ ・ ・ 41
4.7.2	亀裂の発達状況	・ ・ ・ 64
4.8	まとめ	・ ・ ・ 65
第5章 基礎及び築堤材の力学的性質の測定		・ ・ ・ 67
5.1	概説	・ ・ ・ 67
5.2	三軸圧縮試験	・ ・ ・ 69
5.2.1	破壊強度及び弾性係数の測定	・ ・ ・ 69
5.2.2.1	試験機の概要	・ ・ ・ 69
5.2.2.2	試験方法	・ ・ ・ 72
5.2.2.3	測定結果	・ ・ ・ 74
5.2.2.4	三軸圧縮試験における非接触型変位計の効果	・ ・ 79
5.2.2	ポアソン比の測定	・ ・ ・ 80
5.2.2.1	試験機の概要と測定方法	・ ・ ・ 80
5.2.2.2	測定結果	・ ・ ・ 81
5.3	引張強度測定	・ ・ ・ 86
5.3.1	厚肉円筒供試体の作成方法	・ ・ ・ 86
5.3.2	引張試験機の概要	・ ・ ・ 87
5.3.3	測定方法	・ ・ ・ 91
5.3.4	実験結果の解析方法	・ ・ ・ 92
5.3.4.1	円筒の内・外縁の応力	・ ・ ・ 93
5.3.4.2	接線方向のおおよその弾性係数	・ ・ ・ 94
5.3.4.3	弾性係数の補正	・ ・ ・ 94
5.3.5	実験結果	・ ・ 100
5.3.5.1	応力～ひずみ関係とおおよその引張弾性係数	・ 100
5.3.5.2	補正後の引張弾性係数	・ ・ 104
5.3.5.3	不攪乱土と攪乱土の比較	・ ・ 109
5.4	圧縮と引張の比較	・ ・ 112
5.5	まとめ	・ ・ 115

第6章	浸透流による漏水量の算定	116
6.1	概説	116
6.2	室内透水試験	116
6.2.1	試験方法	116
6.2.2	試験結果	116
6.3	浸透解析	117
6.3.1	基礎方程式	117
6.3.2	解析方法	119
6.3.3	解析結果	121
6.4	まとめ	121
第7章	亀裂の発生・発達に関する解析的検討	122
7.1	概説	122
7.2	解析方法	122
7.2.1	基礎方程式	123
7.2.2	解析手法	125
7.2.2.1	非線形解析手法	125
7.2.2.2	築堤解析手法	128
7.2.3	解析条件	129
7.3	解析結果	133
7.4	まとめ	138
第8章	漏水対策とその効果	139
8.1	ブランケットの追加施工	139
8.2	対策工の効果	140
第9章	結論	144
	引用・参考文献	148
	謝辞	152
	付録	

第 1 章 序論

1. 1 緒言

多目的ダム、発電用ダム、治水ダム等はそのほとんどがコンクリートダムであるのに対し、農業用ダムはフィルタイプを主としている。1985年の梅雨前線豪雨により山口県下で多くのため池が被災し決壊したが、それら26カ所の調査によると内部浸食を原因とするものが圧倒的であった¹⁾。また、農業用水の確保のため、老朽化したため池を改修し利用効率を高める等の事業が行われているが、改修の直後の湛水で決壊する等の事故が生じている。これもその原因の多くは内部浸食と考えられている。このようにわが国にある多くのフィルダムで内部浸食による問題を抱えているが、最近の研究^{2), 3)}によるとこの内部浸食の原因がハイドロリック・フラクチャリング（水理破碎）であると推定されている場合が多い。海外においても Hyttejuvet ダム（ノルウェー：高さ90m、1965年完成、1966年漏水）、Balderhead ダム（イギリス：高さ48m、1965年完成、1967年漏水）その他のダムにおいて、湛水後比較的初期に集中的な漏水が生じた。事故調査のためボーリング孔による注水試験を行った結果、水理破碎の発生が確かめられ、フィルダムの遮水ゾーンにおける問題として注目され始めた。その後、アメリカで Telon ダム（高さ93m）が決壊し、その主要因として水理破碎が指摘されて大きく関心をもたれるようになった。

水理破碎に関する過去の研究は実際に事故を生じたダムの調査に基づくものがほとんどであり、その発生原因としては、何らかの原因で生じた堤体中の亀裂（例えば乾燥亀裂）を、貯水による水圧が押し広げることによるものと考えられている。定性的には水理破碎の発生条件は明らかにされつつあるが、定量的にはほとんど明確にされてはいないのが現状である。

一般の住宅地が農村の溜池用ダムの付近にスプロール的に拡大し

ている現在、ダム破壊による被害は大きなものとなるためこの問題の究明は重要である。

1. 2 研究の目的

本研究では実際に水理破碎により漏水を生じたと推定されるフィルダムを対象としてその原因を究明するとともに、水理破碎の発生メカニズムについて検討する。

水理破碎に関する実験的研究には中空厚肉円筒試料を用いた三軸圧縮試験¹⁾や、地盤にピエゾメーターのチップを埋め込み水圧により亀裂を発生させたものがある。しかし、これらの方法では、実際の地盤よりも変形を拘束したり、実験の前に亀裂が生じている可能性があり水理破碎のメカニズムを検討する上で適当ではないと思われる。また、軟弱地盤上にダムを造る際に、水理破碎の危険性を推定する方法は提案されておらず、その危険性を考慮した例はほとんどない。そこで、本研究では以下の2点を目的とする。

- ①水理破碎に関する定性的事実の現場実験による確認
- ②水理破碎発生の推定法の提案

1. 3 既往の研究

フィルタイプのダムは現場付近で入手できる築堤材料を用いていかに経済的で安全なダムを造るかが要点であるが、水資源開発に伴いその条件に適する地点は少なくなっている。農業用ダム（特に堤高15m以下の低ダム、いわゆる溜池のダム）は岩盤まで掘削せず、比較的軟弱な土質の基礎上に築堤することが多く、さらに築堤材も必ずしも良好ではない土を用いざるを得ない場合が多い。そのため、築堤材において水理破碎の原因となる亀裂の生じ始める強度やひずみ等の力学的性質を十分に把握しておく必要がある。

本節では、水理破碎と土の力学的性質の測定に関する研究について述べる。

1.3.1 水理破碎に関する調査及び実験的研究

これまでの研究や事故調査から水理破碎が誘発されやすい条件として、堤体及び基礎中における亀裂の存在と土圧と貯水圧の関係が考えられている。

種々の埋設計器によりフィルダムの挙動を長年にわたって観察してきたPenman²⁾は遮水ゾーン中の水平土圧(ダム軸平行方向の土圧 σ_x とすると $\sigma_x = K_0 \cdot \gamma_w \cdot h$; K_0 は全応力での側方土圧係数)がその深さでの貯水圧($\gamma_w \cdot h$)より低ければ水理破碎が生じる危険性があると述べている。また、長期間にわたり貯水位が低く保たれてきたダムにおいて急激に水位を上げると水理破碎による事故の危険性があるとも報告している。

水理破碎に関する実験的研究としては、水圧により岩盤中に亀裂を生じさせる方法(水圧破碎法)が岩盤力学の分野で既に研究されている。水圧破碎法は油井での採油の回収率を向上させるために、Clarkが1947年に考案したことから始まる。油井のある部分をゴム製のパッカーで閉塞し、その区間に水を加圧注入することにより岩盤に亀裂を生じさせた。このようにして石油を含む岩層に人工的に亀裂を入れることにより、岩層の透水係数が増大し、石油の回収率を増加させることができた。

1950年代にはいり、水理破碎を岩盤応力や地山応力の測定に関連づけて考えるようになり、HubbertとWillis³⁾は線形弾性理論に基づき注入圧と主応力の関係をまとめた。Scheidegger(1962)は、注入圧と主応力との関係式に岩石の引張強度を考慮すべきであるとし、そのことにより岩盤応力は水圧破碎法により測定できるとした。Kehle⁴⁾(1964)は水圧破碎のもとでの円形空洞モデルの解析を行い、パッカーで密閉された有限区間の周辺の応力を決定した。その結果、密閉両端付近では水平破壊が生じるが、両端部から離れると鉛直方

向の破壊しか生じないという結論を導いた。⁷⁾

粘性土の地盤でボーリング孔を利用した現場透水試験を行う場合、大きな水圧をかけると地盤に亀裂が入り透水係数が真の値より大きく評価されることがかなり以前にBjerrum⁸⁾らによって明らかにされている。これは水圧破碎法と同様な現象であり、フィルダムで生じている内部浸食を検討するうえで重要な事項である。弾性論によると孔に水圧を作用させた場合、円周方向に引張力が働き、ある水圧を越えた時に引張亀裂を生じさせる。これが水圧破碎法の原理である。一方、水理破碎による内部浸食は堤体内に生じた亀裂の間に水圧が作用し、亀裂先端部における応力集中による亀裂の発達が原因と考えられる。孔を亀裂の初期の状態と考えた場合、水圧破碎法はダムに生じる水理破碎とほぼ同様な現象とみることができ、水理破碎に関する実験的研究の有力な方法であると思われる。

現場実験としてはBjerrum⁸⁾, Bozozuk⁹⁾等が、ハイドロリック式ピエゾメーターのチップ(図1-1に示す)を地中に押し込み、水圧で亀裂を発生させる方法を用いた。しかし、この方法では押し込む際の方力でチップ周辺の亀裂を生じさせる可能性があるため、水理破碎のメカニズムを詳しく検討する上では問題があると思われる。

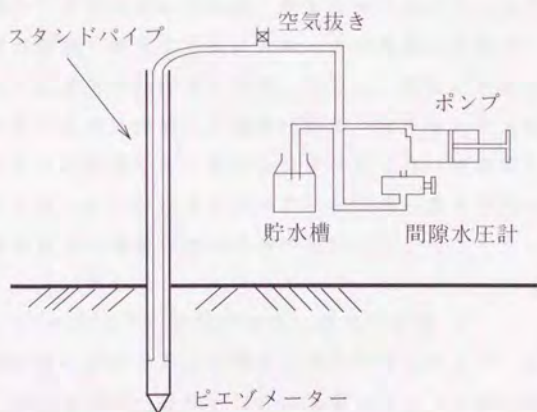


図1-1 ピエゾメーターによる水理破碎試験

Murdoch^{10), 11), 12)}は直方体(10cm×10cm×39cm)の粘土試料に人工的に初期亀裂(幅0.4mm,長さ12mm~72mm)を入れ、水圧を加えることにより、亀裂がどのように発達するかを調べた。Murdochの用いた実験装置(Hydraulic fracturing cell)の概略図を図1-2に示す。

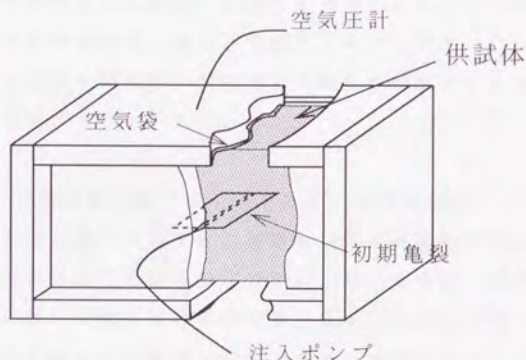


図1-2 Hydraulic fracturing cell

この実験では供試体の上下をゴム製の空気袋ではさむことにより、上下への変位を許している。亀裂は供試体の中央に水平方向に一定の幅で裏側へ貫通する様に入れ、その亀裂に流量が一定の割合になるように液体の加圧注入を行っている。亀裂に液体が注入されるにつれ注入圧力は増加し、亀裂が発達し始めると注入圧力は減少する。この圧力の変化により亀裂の発達する圧力(破壊圧力)の測定を行っている。さらに、人工的に入れる亀裂の長さを変えて実験を行い、亀裂の長さや破壊圧力の関係等も調べている。

1.3.2 土の力学的特性の測定に関する研究

水理破碎の原因となる亀裂の発生を考える上で、破壊に至るまでの土の力学的特性を知ることは重要である。破壊には圧縮破壊と引張破壊が考えられるが、堤体や基礎は築堤により鉛直方向に荷重を

受けるため、応力は圧縮でも水平方向に伸びが生じる部分が考えられる。この伸びが破壊の限界を越えた伸びであれば、鉛直方向の亀裂が生じる可能性がある。このことを考えれば、引張側の破壊強度・破壊ひずみを知ることは、水理破碎の原因となる亀裂の発生の可能性を推定する上で重要な判断基準となる。

本研究で対象としたダムの土はかなり小さいひずみで破壊することが分かっているため、微小ひずみレベルでの測定を行う必要がある。本項では微小ひずみレベルでの三軸圧縮試験とともに、引張試験について述べる。

1.3.2.1 三軸圧縮試験（微小ひずみレベルでの測定）

今回対象とした大谷内ダムの基礎地盤は圧縮破壊ひずみがかなり小さいことが分かっているが、このような土の場合、従来の三軸試験機による測定では以下の様な問題点が考えられる¹³⁾。

①軸荷重を三軸セルの外で測定する場合、載荷ピストンに作用する摩擦力と供試体に作用する荷重の合力を測定することになる。この場合には荷重を過大評価することになるため、弾性係数も過大評価することになる。

②軸ひずみを三軸セル外で測定する場合には、供試体と変位計までの各接続部における隙間を含めて計測する測定誤差（ベディングエラー）が生じ、供試体の実際の変位より大きい値を変位とするため弾性係数は過小評価することになる。

上記の①に対してはロードセルを三軸室内に設置することにより改善されることが国生¹⁴⁾(1980)により示されている。②に対しては供試体中央側面で軸ひずみを測定することが有効であり以下の様な方法が用いられている¹⁵⁾。

1) 供試体側面にストレインゲージを貼る方法

2) 供試体側面の二点間の変位を測定する方法

a) LVDT等電気式直線変位計を用いる方法(Boyce and Brown¹⁶⁾, 1976等)

- b) 光学式直線変位計を用いる方法(仲野¹⁷⁾等, 1990)
 - c) 非接触変位計を用いる方法(緒方・安田¹⁸⁾, 1982、野間・石井¹⁹⁾, 1986等)
 - d) 直線変位を角度変化に変換する方法
(Burland and Symes²⁰⁾, 1982、Jardine et al.²¹⁾, 1984)
 - e) 直線変位を金属片の曲げに変換する方法(Goto et al.²²⁾, 1991)
 - 3) 供試体の表面の局所変位を測定する方法
 - a) ステレオ撮影して求める方法(Desrnes²³⁾, 1984)
 - b) レーザースペックル法で求める方法(Tatsuoka et al.²⁴⁾, 1990)
- 1.3.2.2 引張強度試験

一般的に土は引っ張りに対して弱く、土による構造物の解析や設計においては土の引張強度を無視することは合理的と考えられる。しかし、引張による土の挙動を知ることはアースダムや盛土に生じる亀裂を検討するうえで有効であり、水理破砕の原因究明においても重要である。

引張試験では過去に幾つかの方法が用いられてきた。直接(単軸)引張試験^{25)・26)・27)・28)・29)}、たわみ(梁)試験^{27)・28)・30)}、割裂(ブラジリアン)試験等^{27)・31)・32)}である。これ等の方法により土の引張における特性が研究されてきたが、一般的な結果として土の引張強度は0~数ポンド/平方インチの低い値と言われている³³⁾。

仲野¹⁷⁾等は厚肉円筒試料を用いて泥岩の引張実験を行っている。これは、試料の内側には水圧により、外側には空気圧により圧力を加え、試料が破壊するまで内圧のみを増加させる試験である。この方法は、円筒試料の接線方向(円周に対して)に引張応力が作用することを利用し引張強度の測定を行うものである。本研究で対象としているダムの堤体及び基礎地盤は火山灰ロームであり、岩やコンクリートに比べ大変軟らかく、試料に引張力を直接加えるのは非常に困難である。そのため、火山灰ロームの様な粘性土に対して引張強度を測定する場合、中空厚肉円筒試料を用いた引張試験が有効と考えられる。

1. 4 本研究の位置づけと研究の方法

[水理破碎に関する定性的性質の現場実験による確認について]

これまでの実験では農業用フィルダムが造られる様な現場を対象として実際に水理破碎を発生させた例はなく、過去の調査により定性的に明らかにされている性質は実験的に確かめられていない。そこで、本研究では水圧破碎法の原理に基づき現場水理破碎実験を行い、実際に漏水を生じた農業用ダムの基礎地盤で人工的な水理破碎を発生させた。

この実験では実際に漏水を生じたダムの自然地盤中（堤体の基礎部分）に掘ったオーガー孔を利用し、水圧によって亀裂を発生させた。これにより、亀裂の発生するときの破壊圧力や一度生じた亀裂が再度開く圧力等を定量的に調べるとともに、亀裂の発生状況の観察を行った。なお、この実験では軟弱な土にも適用できる実験装置を開発した。

[水理破碎発生の推定法の提案とその有効性の確認について]

現場実験を行ったダム（基礎及び堤体）を構成する土の力学的特性を考慮し、亀裂の発生条件を定量的に検討した。つまり、どの程度の応力・ひずみ量で破壊による亀裂が基礎及び堤体に発生するかを検討する。そのためには、築堤材（基礎及び堤体）の力学的性質を知る必要があるが、実験現場から採取した試料を用いて三軸試験等の室内試験を微小ひずみレベルでの測定を行い、破壊応力、破壊ひずみ、応力～ひずみ関係、弾性係数、ポアソン比等を求めた。

また、一般に破壊を考える場合、圧縮側の破壊強度・ひずみを判断の基準としており、火山灰ロームの様な軟弱な土に対し引張側の力学的特性を考慮した例はほとんどない。引張試験の方法として岩やコンクリート等の硬い材料では、直接引張試験、たわみ（梁）試験、割裂試験等があるが、供試体にある程度の強度が必要であり軟らかい土には適用できないという問題点がある。そのため、仲野等が泥岩の引張試験に用いた方法を改良し、軟弱な土にも適用できる

引張試験機を作製し、引張側の性質も調べた。以上の実験より、亀裂発生の判断基準となる破壊強度・破壊ひずみを測定した。

また、今回対象としたダムでは試験湛水時に堤体下流側法尻部下の基礎部分で漏水が観察されたが、状況から判断して築堤時に漏水の原因となる亀裂が基礎に発生したものと考えられた。そこで、築堤過程における破壊域の発生状況、貯水時の水圧と土圧の関係等を調べるために有限要素法による築堤解析を行い、力学的性質で得た判断基準との比較を行い、対象としたダムで亀裂の発生している可能性について検討する。さらに、漏水の急増した貯水位と土圧の関係から亀裂が発達する可能性についても検討し、漏水の原因を推定する。また、今回の推定により水理破碎の発生した可能性のある部分には漏水対策として粘土によるブランケットが施工されたが、施工前後での漏水量の比較を行うことにより、今回の推定方法の有効性を確認した。

1. 5 論文の構成

本論文は9章より構成され、現場水理破碎実験、土の力学的特性の測定、亀裂の発生・発達に関する解析の三つに大きく分けられる。

第1章は序論であり本研究の目的と位置づけについて述べる。

第2章は水理破碎の基本概念について述べる。

第3章は研究の対象とした大谷内ダムの概要について述べる。

第4章では現場で行った実験の方法とその結果を述べる。実験で用いた装置は独自に開発したもので、岩盤の破碎で用いられるものに比べ安価で容易なものでありその特徴についても述べる。これにより水理破碎の定性的性質を現場レベルで実験により確認する。

第5章ではダムの基礎及び堤体から採取した試料を用いて破壊強度、弾性係数、破壊ひずみ、ポアソン比等の測定法とその結果について述べる。特に、引張側の強度特性を得るために中空厚肉円筒試料を用いた引張試験を行い、圧縮側の強度特性との比較をする。

また、微小ひずみレベルでの測定を可能にするために非接触型変位

計を用いたがそれらの方法についても述べる。これらの結果から、対象としたダムの基礎及び堤体の物性値を把握することにより水理破碎の発生する応力・ひずみ量等の判断基準を得る。

第6章では漏水の測定が行われている部分に対し浸透解析を行った結果について述べる。浸透解析は有限要素法により行い、ダムの漏水が土粒子間のダルシー流によるものか否かを検討する。

第7章では堤体及び基礎において有限要素法による築堤解析を行った結果について述べる。第5章により得られた力学的特性と解析により得られた応力状態・ひずみ等により堤体及び基礎中に亀裂が生じている可能性について検討する。また、漏水量が急増した時の貯水位圧と水平土圧の比較により亀裂の発達の可能性についても検討し、水理破碎の発生の推定を行う。

第8章では対象としたダムで行われた漏水対策とその結果について述べる。これにより、今回の推定法の有効性を確認する。

第9章では結論について述べる。現場実験（第4章）、室内実験（第5章）、解析（第6・7章）により得られた結果より、大谷内ダムの漏水原因について検討する。また、水理破碎の発生を築堤材の強度、築堤過程の条件等との関係から検討した結果についても述べる。論文の構成図を図1-3に示す。

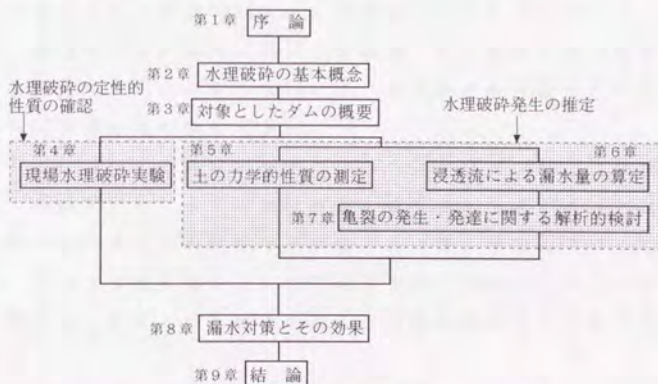


図1-3 論文の構成図

第2章 水理破碎の基本概念

2.1 堤体中に生じる破碎面

日本の場合降雨が多く、築堤過程の土は最適含水比より湿潤側で締め固められるため、過剰間隙水圧が発生する。一般的に過剰間隙水圧はフィルダムで大きな問題点の一つとして考えられているが、築堤直後の土圧を考えた場合、過剰間隙水圧だけ全応力は大きくなるため、過剰間隙水圧の消散後よりも高い貯水圧に耐えることができる。このことは以下の式により説明できる。間隙圧を u 、鉛直土圧を σ_v とすれば、ダム軸方向の側方土圧 σ_a （全応力）とダム軸に直交方向の側方土圧 σ_h （全応力）は次式³⁴⁾で表される（図2-1参照）。

$$\sigma_a = K'_{oa} (\sigma_v - u) + u \quad \dots(2.1)$$

$$\sigma_h = K'_{oh} (\sigma_v - u) + u \quad \dots(2.2)$$

（ K'_{oa} ：ダム軸方向の有効応力に対する側方土圧係数、 K'_{oh} ：ダム軸に直交方向の有効応力に対する側方土圧係数）

(2.1)式と(2.2)式の右辺、 u の項をまとめると以下の様になる。

$$\sigma_a = K'_{oa} \cdot \sigma_v + (1 - K'_{oa}) \cdot u \quad \dots(2.1)'$$

$$\sigma_h = K'_{oh} \cdot \sigma_v + (1 - K'_{oh}) \cdot u \quad \dots(2.2)'$$

一般に側方土圧係数は1より小さく $(1 - K'_{oa})$ 、 $(1 - K'_{oh})$ とも正の値をとり、間隙圧が大きいほど側方土圧も大きくなる。

逆に、降雨の少ない海外において乾燥側で締め固められた堤体の場合、過剰間隙水圧は発生しないため、湿潤側で締め固められた場合に比べ試験湛水時の事故が多い。

また、わが国の古い農業用溜池のうち、遮水ゾーンの上に保護層がなく、長期間にわたって貯水位が低く維持されてきたダムでは、乾燥亀裂や植物根による亀裂などが縦方向に深く発達していることがある。このような状態のダムで貯水位を急に上昇させると、貯水圧が亀裂を押し拡げる水理破碎を起こし内部浸食が発達する可能性がある。

堤体に発生する亀裂面（破砕面）は大きく分けて 図 2-1 に示す三つの面が考えられる。水平破砕面、堤体に対して縦断方向の鉛直破砕面と横断方向の鉛直破砕面である。この内、縦断方向の鉛直破砕面は他の破砕面に比べ水理破砕による堤体の破壊へ与える影響は小さい。

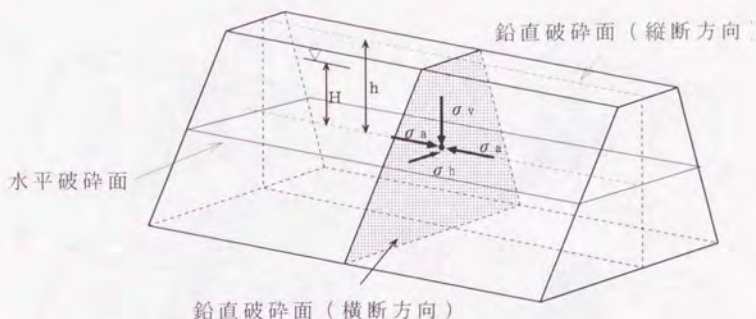


図 2-1 水理破砕により生じる亀裂

貯水面からの水深が H の位置の土圧を考えると、多くの場合鉛直方向の土圧は水平方向の土圧より大きく $\sigma_v > \sigma_s > \sigma_h$ であるから、貯水圧 ($H \cdot \gamma_w$) が鉛直土圧より大きければ、亀裂が発達し破砕面を形成する危険がある。このとき、亀裂が既に生じていることが一つの条件となる。亀裂が水平方向であれば水平破砕面が、鉛直方向であれば鉛直破砕面が発達する。また、 $\sigma_s > H \cdot \gamma_w$ であっても $\sigma_s < H \cdot \gamma_w$ であれば鉛直破砕面が発生する可能性がある。

過圧密された特別な場合を除いて鉛直土圧よりも水平土圧は小さく、水平方向より鉛直方向の亀裂が発達しやすいと言える。また、ダムの漏水の原因となる亀裂は堤体に対し横断する方向と考えられるため、堤体に対し横断方向の鉛直破砕面が水理破砕により引き起こされる可能性が高いと考えられる。

図 2-1 中の亀裂（水平破砕面・横断方向破砕面）は堤体の上流か

ら下流へとを貫通しているが、実際の堤体では初めからこの様な亀裂が生じていることは少ないと思われる。多くの場合、図2-2の①～④の様に上流側の小さな亀裂が下流側へ発達する過程で、堤体に散在する亀裂をつなぎ最終的に堤体を横断する亀裂面が形成されると考えられる。また、これらの現象は基礎地盤についても同様に考えられる。

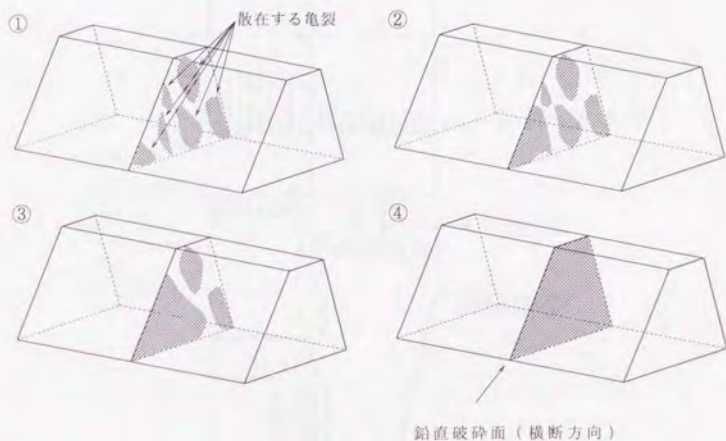


図 2 - 2 水理破碎による亀裂の発達の概念図

2. 2 亀裂の発生原因

2.2.1 アーチ作用による亀裂の発生

Teton ダムの場合その基礎岩盤は溶結凝灰岩が主体であり地表から 20m の間で開口節理が著しく発達していた。貯水位の急速な上昇により、その節理を通して作用する水圧が亀裂を拡げ水理破碎を引き起こしたと考えられている。このように基礎地盤が自然の状態では亀裂を生じやすい要素を含んでいるような場合以外の条件として、堤体中の異物が引き起こすアーチ作用によって土圧が十分に作用しないことが水理破碎の原因となる場合が考えられる。

老朽化溜池の改修の工費節約のために矢板などを用いて底樋を挟む狭い範囲のみを掘削して改修する工法を取ると、埋め戻し土の沈下時に旧堤体部からも上向きにせん断力が作用するためにアーチ作用はさらに著しくなり σ_v をいっそう減少させる(図2-3)。

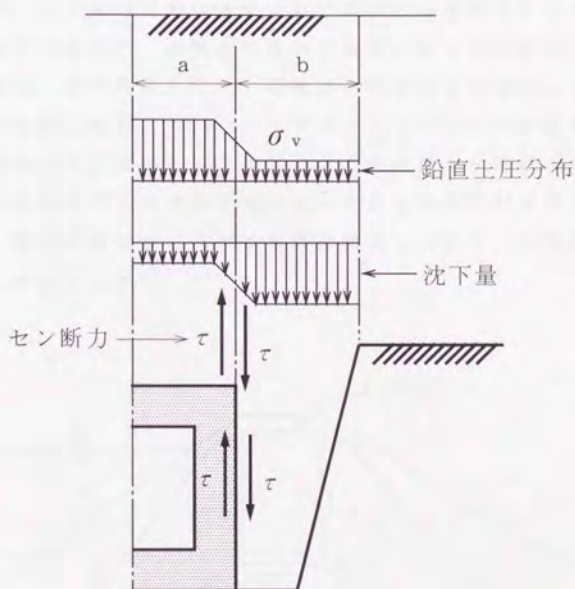


図 2 - 3 アーチ作用による水平土圧の減少

このように、ダム内の剛性の異なる材質間(例えば、コンクリート製放流管と盛土)にはアーチ作用によって鉛直土圧が減少し、その結果として水平方向の土圧も小さくなる。さらに異なる材質の接触部分は隙間ができやすく、亀裂の生じている状態と同様に考えられる。また、放流管の側壁上部付近では放流管上部と側方部の土の沈下量の違いによるせん断亀裂(鉛直方向)の生じる危険もある。つまり、剛性の異なる材質間ではアーチ作用により水平土圧が減少

し、水圧により材質間の隙間をさらに拡げ水理破碎へと発達させる可能性がある。

コアの薄いゾーン型のダムの場合、コアの法面勾配が直立に近ければ、コアとその両側にある築堤材料との間にアーチ作用が生じやすくなる。これは、コアとその両側の材質（剛性）の違いによるものである。コア材は一般に強度が弱く両側の築堤材よりも大きく沈下するはずであるが、接触部で両側の築堤材からせん断応力（摩擦力）を受け、その結果として、鉛直方向の土圧は自重からせん断応力を引いた値となる。図2-4に示すようにコアの形状が急変する場合、急変部より上部はアーチ作用により圧縮沈下が妨げられるが、下部は上部ほどアーチ作用を受けないため圧縮沈下が進行する。その結果、形状の急変部では水平亀裂が発生しやすく、水平の破断面を誘発しやすくなる^{(34), (35)}。

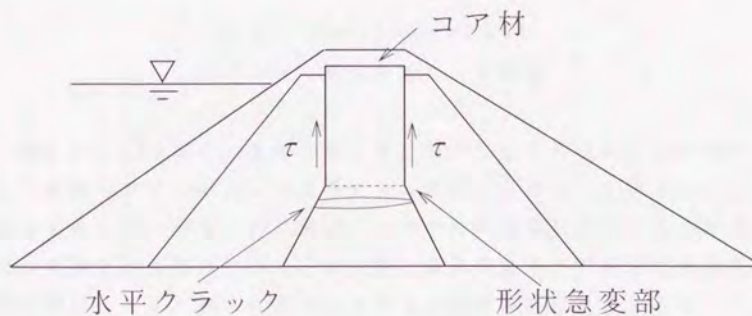
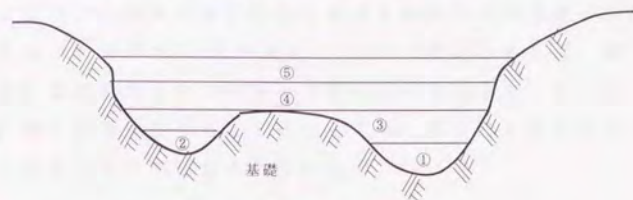


図2-4 コアの薄いゾーン型ダムにおけるアーチ作用

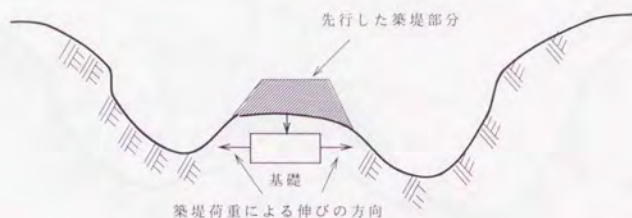
2.2.2 破壊強度の限界を越えた盛土荷重による破壊

フィルダムの築堤材は現場付近で採取できるものを使用するため、強度が十分ではなく築堤材として必ずしも良好と言えない場合がある。このような築堤材を用いると築堤による盛土直下部分で限界を

越えた荷重を受け破壊し亀裂を生じる危険がある。



a) 低い部分から築堤を行った場合



b) 先行して築堤された部分がある場合

図 2-5 築堤荷重による破壊

図 2-5 の a) の場合、基礎に対し層に付けられた番号順に低い部分から築堤されているため基礎部中央の隆起した部分にも側方からの拘束を受ける。一方、b) の場合、基礎中央の隆起した部分が他に先行して盛土がなされている。この時、盛土の直下では側方に対する拘束が弱いため、側方に変位しやすく、a) の様に拘束のあるに比べて小さい荷重で破壊する危険がある。この破壊により、生じた亀裂は築堤が完了した時点では閉じることがあっても、急速貯水による貯水圧が亀裂面に作用している土圧を上回れば再び開き、水理破碎に発達する可能性がある。

2.2.3 築堤過程におけるすべり破壊

先行して築堤がなされた場合、荷重による圧縮破壊の他に斜面が形成されることによる滑り面の発達と考えられる。図 2-6 の場合、

盛土部分の両側で図中の様な滑り面が考えられ、安全率が1.0を下回るようであれば滑り面は完全に形成され斜面は崩壊する危険がある。また、安全率が1.0より大きくても1.2程度であれば、滑り面の形成される可能性のある部分から塑性域が発達すると言われている。実際に滑り破壊が生じることはなくとも、部分的に塑性状態になり亀裂の発生する可能性が考えられる。

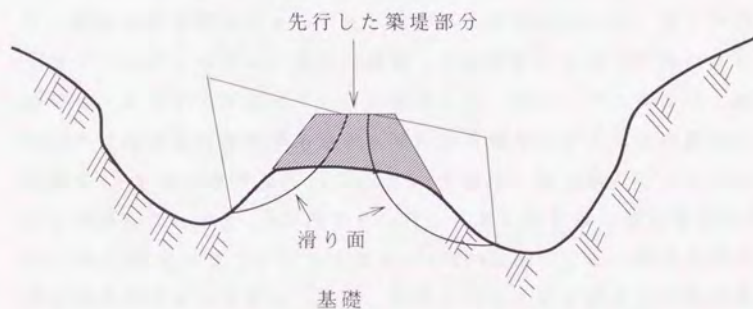


図 2 - 6 先行した築堤による滑り面の発達

2.2.4 その他の亀裂の発生原因

長期間貯水の無いままに放置されていたことによる乾燥亀裂、植物の根の発達による間隙も水理破碎を引き起こす原因となる可能性がある。この様な条件で生じた亀裂を急速貯水による水圧はパイプフロー的な流れによって急激に伝播し、水平土圧よりも高い場合には亀裂を押し広げ水理破碎へと発達する可能性が考えられる。

第3章 研究対象のダムの概要

3.1 概説

本研究では新潟県の大谷内ダムを対象とした。選定の理由としては、実際に漏水を起こしていること、完全には事業が終了しておらず現場実験に対し協力的であった事などである。

大谷内ダムは昭和56年度に着工し57年度より堤体工事に着手したが、築堤材料が周辺に分布する「高含水比火山灰ローム」でかつ均一型アースダムのため、数々の調査・設計変更により9年間の月日を要し、ようやく平成元年11月に完成した。なお、ダム本体は、昭和28年に国営水沢津南開拓建設事業により築造された大谷内溜池に、堤高5.0～8.0m上乘せして23.2mとし、有効貯水量を40万 m^3 から120万 m^3 に増量した。また、9年間の長い月日を要した原因は設計変更の他に、図3-2に示すようにダムの堤防が1780mと長いこと、豪雪地帯のため冬季は工事ができないこと、特殊土壌のため圧密させて強度を増加させながら時間をかけて築堤したことが挙げられる。

- ダムとしては、①旧堤への嵩上げであること
②築堤材が高含水比火山灰ロームであること
③グラウト工事が全く行われていないこと

等の特徴がある。

3.2 位置と形状

大谷内ダムは新潟県信濃川中流右岸部（東経138°42'、北緯36°58'）の段丘斜面に位置する。（図3-1）ダム付近には4～7kmの幅で河岸段丘面が発達している。ダムサイトはこの斜面の標高約650mにあり、周辺は起伏に富んだ傾斜面が波状に分布しその高低差は20～30mである。またダムサイト東側には釜川によって形成された大きな崖部がある。（全長1780m、平成元年3月完成）の基礎地盤である。ダムの平面図を図3-2に実験現場付近の横断面図を図3-3に示す。



図 3 - 1 大谷内ダム の 位置

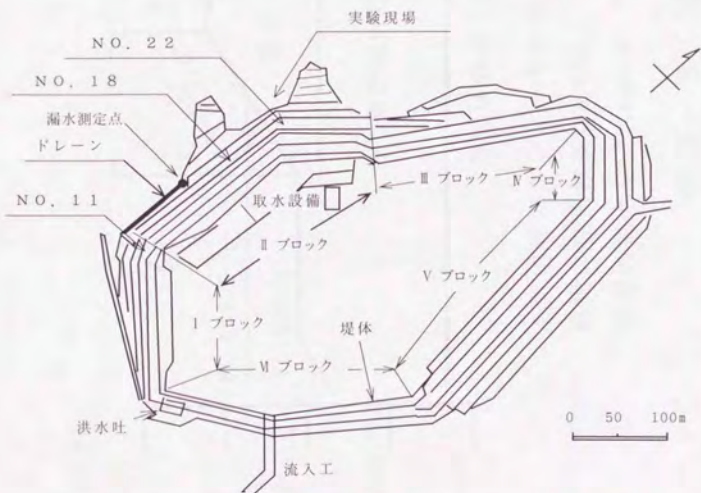


図 3 - 2 大谷内ダム 平面図

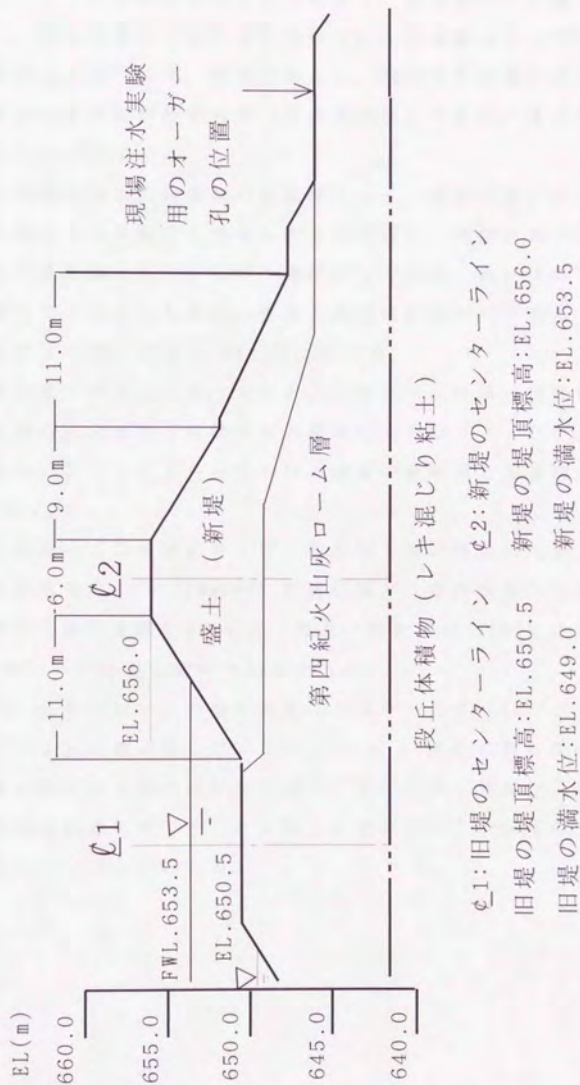


図 3 - 3 堤体横断面図

3. 3 堤体及び基礎の地質

ダムサイトの地質は主として上位より、第四紀ローム層（火山灰質土）、段丘堆積物（レキ混じり粘土）、魚沼層となっている。

魚沼層は玉石、レキ、砂を主体とし、凝灰岩の薄層を挟んだ第三紀鮮新世～第四紀鮮新世の層（河成堆積物）であり、その層厚は700m以上といわれている。

段丘堆積物は火山砕屑物の生成後久しく、初期の火山灰ロームと同時かあるいは先駆けて堆積したものであり、淘汰の良いレキを含んだ粘土を主体としているが、場所によっては砂、砂レキもしくは凝灰質粘土であることもある。苗場山麓では断続的に分布し、当ダムサイト付近では、層厚5～8mとなっている。

苗場山麓一帯を広く覆っている火山灰ロームは茶～黄褐色を呈す未固結層の火山灰で、乾燥すると非常に大きなクラックが生じる性質がある。ブロックⅠ～Ⅲにおける堤体の縦断面の地質図を（図3-4）に示す。

火山灰ロームの地盤にオーガー孔を掘る際に得られた土（不攪乱での湿潤密度 ρ_w ：1.29Mg/m³）の液性限界、塑性限界、自然含水比、土粒子の比重等を図3-5に示す。なお、飽和度は100%に近い（95～98%程度）ものの完全飽和ではなかった。

また、火山灰ロームの透水係数はかなり小さく（ 10^{-5} ～ 10^{-6} cm/s、グリセリン水溶液に対してはさらに1/10）、それに対し現場水理破碎実験の液体注入速度はかなり速い。そのため、液体注入による土中の水分移動は無視でき、含水比の変化による土の強度の変化は考慮しなくてよいと思われる。

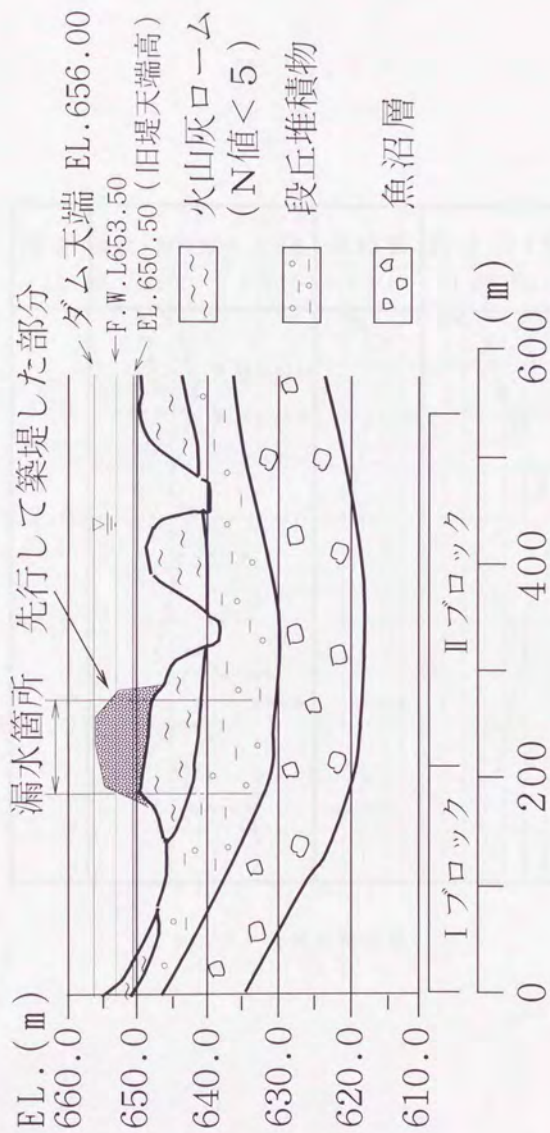


図3-4 堤体及び基礎における地質

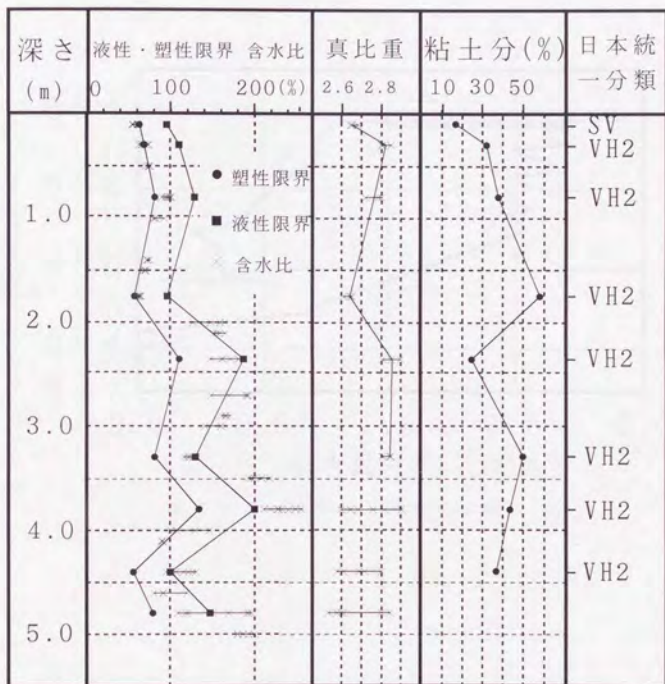


図 3 - 5 土質試験結果

3. 5 ダムの漏水

大谷内ダムの完成後（平成四年）試験湛水を行ったところ、貯水位がEL.653.5m）以上になると漏水量が著しく増加した。図3-2のIIブロックの漏水測定点での漏水量（流量）と貯水位の関係図 3-6に示す³⁶⁾。

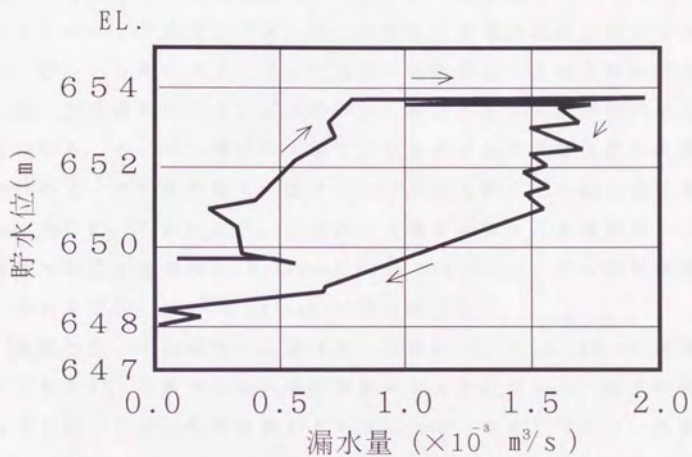


図3-6 貯水位と漏水の関係

第4章 ダム基礎における水理破碎実験

4. 1 概説

Murdoch¹⁰⁾ は水理破碎を室内実験で人工的に発生させ亀裂の発達状況を詳細に観察したが、室内実験では拘束等の再現性で問題が考えられる。また、現場実験でも Bjerrum⁸⁾, Bozozuk⁹⁾ らの行った、ハイドロリック式ピエゾメーターのチップを地中に押し込む方式では、押し込む際の力で、チップ周辺の亀裂を生じさせる危険があるため、水理破碎のメカニズムを詳しく検討する上では問題があると思われる。そこで、今回の実験では大谷内ダムの基礎地盤に直径約10cmのオーガー孔を掘り、塩ビパイプの注入管を差し込み液体を加圧注入した。これにより、圧力と注入量の関係から水理破碎による亀裂が生じる破壊水圧 P_b (break down pressure)、注入量がほぼ零になる水圧 P_s (shut-in pressure) 等を調べた。

基礎地盤の火山灰ローム層は透水係数 $k=10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/s の難透水性であるが、実験中に注入液が孔壁から土中にダルシー流で浸透するのを防ぐため、粘性係数が水のほぼ10倍となるグリセリン水溶液(グリセリン：水=6：4)を注入液として用いた。一般に用いられるダルシーの透水係数 k は

$$k = k_0 \frac{\gamma_w}{\mu}$$

k_0 : 粒状体の構造のみで決まる透水係数

γ_w : 液体の単位体積重量

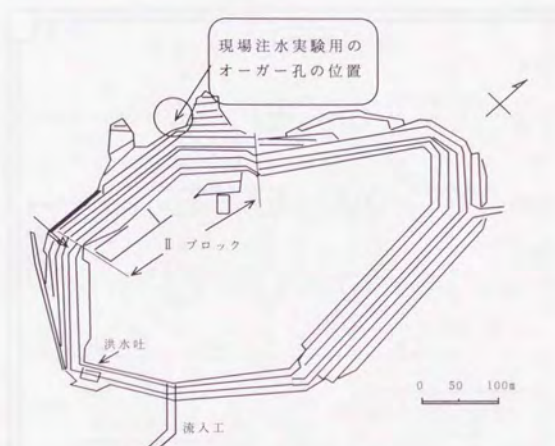
μ : 液体の粘性係数

で表され、浸透する液体の粘性係数に逆比例する。この式によると、グリセリン水溶液の火山灰ロームに対する透水係数は $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/s となり実験中のダルシー流はほとんど考慮しなくて良くなり解析的検討もやり易くなる。グリセリン水溶液の粘度測定に関しては付録に記載する。

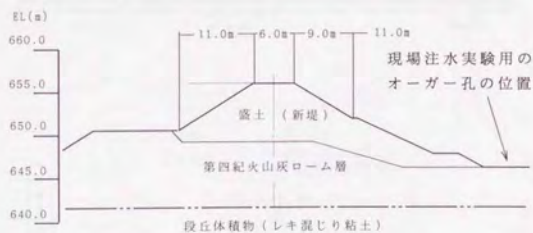
4. 2 実験を行った場所とオーガー孔の配置

4.2.1 実験を行った場所

実験は電源や水道などの設置条件を考慮して図4-1(a)の No.22付近で行った。現場実験を行った位置とその地点での堤体横断面による位置を図4-1(b)に示す。



(a) 大谷内ダム概要図



(b) 堤体横断面図 (No. 22 付近)

図 4 - 1 現場実験を行った位置

4.2.2 オーガー孔の配置

実験は1992年と1993年の二回現場で行った。1992年は深さ1.5m(2本)、2.5m(3本)、4m(3本)、5.1m(1本)、5.5m(3本)の計12本の孔を掘った(図4-2)。1993年は1.5m(2本)、3.5m(1本)、5.1m(1本)の計4本の孔を掘った(図4-3)。

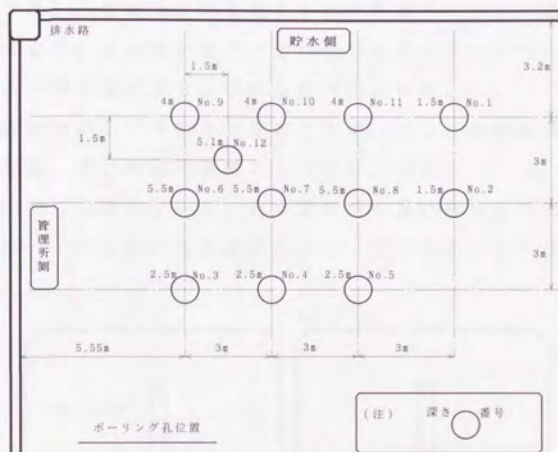


図4-2 オーガー孔の配置(1992年)

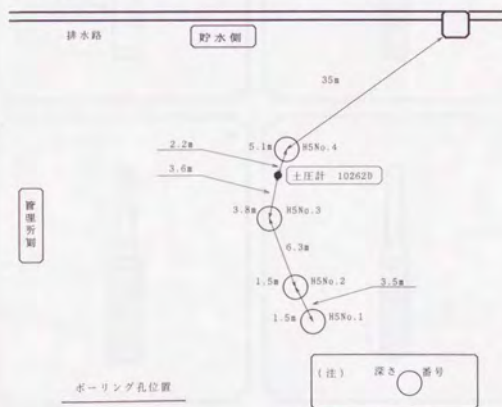


図4-3 オーガー孔の配置(1993年)

4. 3 注入管の作成及び埋設

4.3.1 注入管の作成方法

- 1) 注入管は内径50mm、長さ50cmの塩ビ管を注入部とし径違いつなぎにより内径40mmの管を接続し底をキャップで閉じる。パイプの接着にはビニールボンドを用いた（図4-4-①）。
- 2) 管の下部50cmの範囲に直径数ミリの穴を数多く空け、底を閉じることにより、注入液が管の下部50cmの範囲でオーガー孔壁を水平方向へ一様に加圧するようにした（図4-4-②）。
- 3) 注入管の穴が土で目詰まりを起こさず、かつ孔壁が崩壊しないように金網、すだれ等で保護する（図4-4-③）。
- 4) 注入液が注入管とオーガー孔の隙間から漏れないように管の下部から50cm上の位置に吸水膨張性ゴム（ナイスシール）を巻く（図4-4-④）。

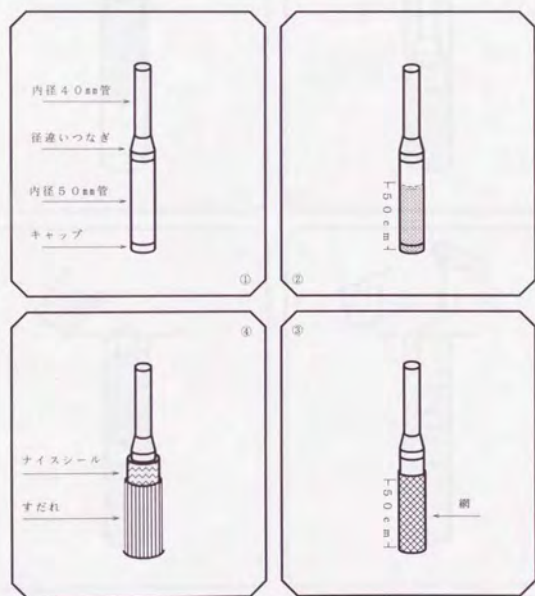


図4-4 注入管の作成方法

4.3.2 注入管の埋設方法

- 1) 注入管をオーガー孔に挿入する (図4-5-①)。
- 2) ナイスシールを膨張させるため水を入れる (地下水が存在する場合は入れない)。(注)ナイスシールが完全に膨張するまで3~4時間要する (図4-5-②)。
- 3) ナイスシールを完全に膨張させた後、管と孔の隙間を埋めるためにベントナイトペレットを突き棒で突きながら入れる (図4-5-③)。
- 4) セメントミルクを管と孔の隙間に注入する (図4-5-④)。

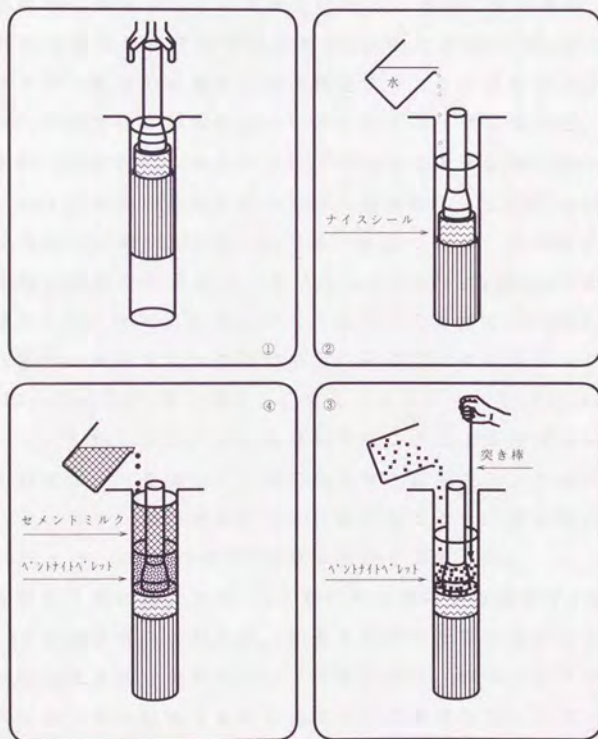


図 4 - 5 注入管の埋設方法

4. 4 実験装置の概要

4.4.1 実験装置の設置

加圧型水理破碎発生装置(図 4-6)は加圧された注入液を注入管に伝え、オーガー孔壁に水理破碎によるクラックを発生させるものである。水理破碎の確認はスタンドパイプ流量計の注入液の変化量を観測することにより行った。クラックが生じた場合、その間隙に多くの注入液が流れ、亀裂の生じる前よりも流量が増えると考えられるからである。

水理破碎が発生すると注入流量は圧力の増加に従い増加するが、注入量の急増を起こすまでの流量は1分間にほぼ0~数 cm^3 であり、流量計でその程度の流量を正確に測定することは困難であった。そのため、単純でかつ精度の高いスタンドパイプを用いた。

注入部への加圧はスタンドパイプの水位を上昇させて行うが、スタンドパイプは約1mの高さであり水を満水にしたとしても地表面からの圧力増分は約10kPa(0.1 kgf/cm^2)程度である。それ以上の加圧を行う場合には N_2 ガスポンベを使用し、98kPa(1 kgf/cm^2)まで加圧を可能にした。ただ、 N_2 ガスポンベはフル充填時で15000kPa(150 kgf/cm^2)あり、実験で用いるには非常に高圧なためレギュレーターにより800kPa(8 kgf/cm^2)まで減圧し、更にフルスケール98kPa(1 kgf/cm^2)のメーターを持つ圧力パネルを使用することにより精度を高めた。

注入液はホースを通して土中の注入管へ加圧注入されるが、これによりオーガー孔が受ける圧力を正確に知るため、注入管の底からほぼ25cm上(注入域の中央)に間隙水圧計を設置した。

注入管の上端にはユニオン(二本の管を接続する継ぎ手)を取り付けた。この継ぎ手の上部には、間隙水圧計の配線を通すことのできる水密性のエア抜き付きキャップを取り付け、側方にはスタンドパイプから注入液を送水するためのホースを接続した。レコーダーには間隙水圧計と空気圧計により得られた値を記録した。実験装置の接続状況を図 4-6に示す。

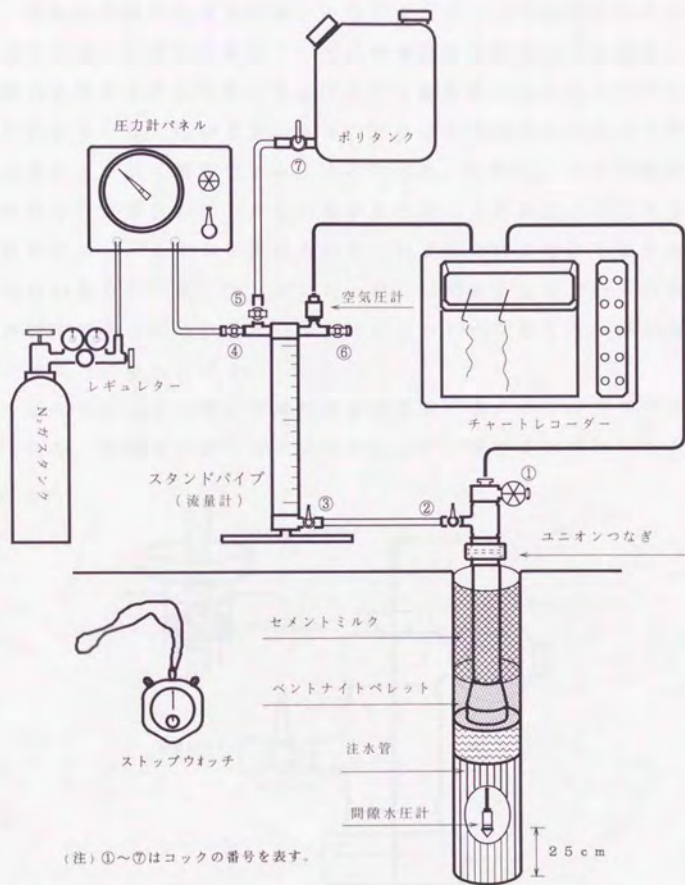


図 4 - 6 実験装置の設置状況

4.4.2 装置各部の接続

4.4.2.1 塩ビパイプとスタンドパイプの接続

本実験装置の大きな特徴の一つは塩ビパイプと流量計との接続部分にある。12本もの塩ビパイプに実験装置を容易につなぎ変え、実験の効率を上げるために塩ビパイプと流量計の接続はユニオン(図4-7)を用いた。これを使用することにより間隙水圧計のコードが絡まることもなく接続できるようになった。しかし、ネジを締めるだけではつなぎ目の部分からの漏水を完全に止めることができないため止水シールをネジを締める向きとは反対方向に巻いて加圧水が漏れないようにした。ユニオンの上部には間隙水圧計コードの長さを調節するネジがありポーリング孔底から25cm位置に水圧測定部が置けるようになっている。

①コックは注入管と流量計間を水溶液で満たすためのエア抜きであり、実験開始前にはそこの間のエア抜きを必ず行った。

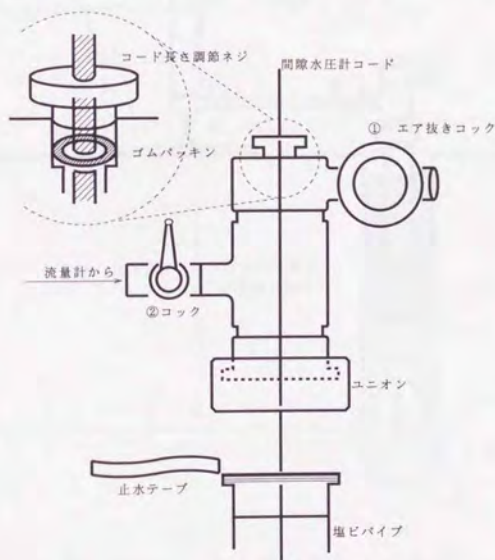


図4-7 注入管と流量計の接続

4.4.2.2 スタンドパイプ流量計

スタンドパイプの容量は $1,000\text{cm}^3$ で、連続して実験を行うには容量が少ないため、ポリタンクに水溶液を貯え必要に応じて⑤、⑦コックを開けてスタンドパイプに供給した。その際にはまず、エア抜き（⑥コック）を開け、④コックは水溶液がレギュレーターに流れこまないように閉じた。スタンドパイプには空気圧計が取り付けられ、測定値は間隙水圧の値と共にチャートレコーダーに記録される。

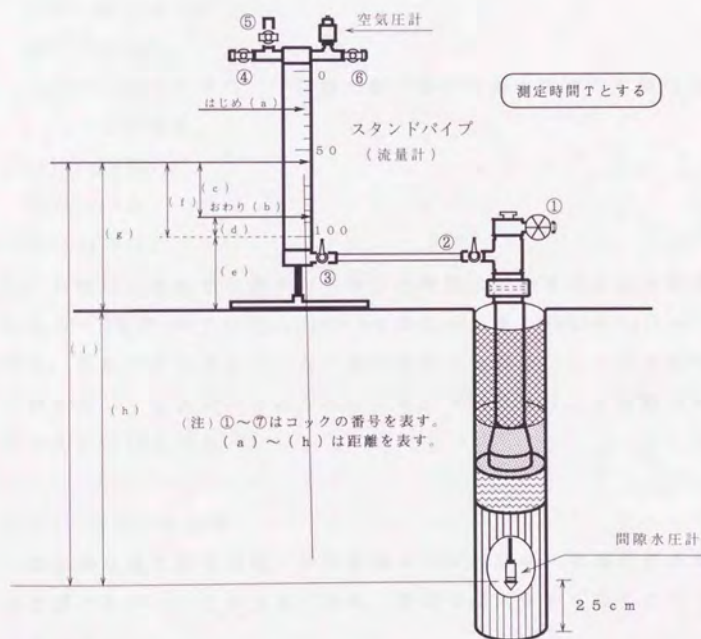


図 4-8 スタンドパイプと注入管

ボーリング孔中の注入部中心に間隙水圧計があり直接孔壁に作用した圧力を得ることができるが、確認のためスタンドパイプとN₂ボンプの接続部に空気圧計を取り付け計算によって注入部の圧力を求めた。これを間隙水圧計の値と比較することにより間隙水圧計のチェックを行った。

スタンドパイプは上から0~100cmで目盛りされており、目盛り1mm当たり1cm³である。計算による圧力は始めと終わりの読みの中間の位置から間隙水圧計の位置までの水柱高さ(cm単位)を最初に算出し圧力に換算の後、空気圧計の値に加える。(以下の(a)~(h)は図4-8のものである。)

$$(c) = ((a) + (b)) / 2$$

$$(d) = 100 - (b)$$

(e) = 10 : スタンドパイプ目盛り最下部から地表までの距離は10cmである。

$$(f) = (c) + (d)$$

$$(g) = (e) + (f)$$

$$(i) = (g) + (h)$$

(i) は始めと終わりの読みの中間から間隙水圧計までの水柱高さにあたる。(単位cm)よって、 $(i) \times (\text{水溶液の比重}) / 1000 [\text{kgf/cm}^2]$ により、空気圧がかかっていない場合の圧力を得る。これに空気圧計の値を足して注入部中心の水圧になる。(グリセリン水溶液の比重はおよそ1.15である。)

4.4.3 測定前の準備

加圧型水理破碎試験機で測定を始めるにあたり、管内の空気を完全に抜くということは重要である。空気の混入を防ぐために以下の方法を用いた。

4.4.3.1 スタンドパイプへの液体の供給

1) 注水管内のエア抜きをする場合③コックは開けたままにする。

実験中は②、③どちらか一方のコックの操作で流量の測定を行う

ため、どちらか一方は開けたままでよい。

- 2) エアー抜きコック⑥を開けて④コックは供給の際に液体が圧力バネルの方に流れ込まないように閉じる。
- 3) ⑧コックを開けスタンドパイプに液体を送る。(⑥コックは N_2 ガスによる加圧を行わない場合には開けておく)

4.4.3.2 管内のエアー抜き

- 1) エアー抜きコック①と②、③コックを開けスタンドパイプ中の液体を注入管に供給する。(されない場合は⑥コックが閉じていないかチェックする) スタンドパイプへの液体の供給は先に述べた手順で随時行う。
- 2) ①コックから液体があふれてくることを確認した後、①、②、③コックを閉じる。

4.5 測定方法と測定値の整理

4.5.1 測定方法

今回の実験では加圧された注入液によりオーガー孔壁に水理破砕による亀裂を発生させることが目的であるが、この現象の確認は注入流量の変化を測定することにより行った。亀裂が生じたのであれば亀裂の間を注入液が流れ、亀裂の生じる前よりも流量が増えると考えられるからである。

加圧は空気圧計で1kPa程度から行ったが、間隙水圧計には注入管中の水柱分の圧力が加わるため実際の注入域での加圧は各注入管の長さにより異なった値から始めている。また、圧力は流量の変化を見ながら1~5kPaの範囲で増加させた。流量に急激な変化が見られた後もある程度増圧させ、その増加の傾向を調べた後に増圧と同様の割合で減圧を行った。

流量の測定はスタンドパイプに貯えられた注入液の消費量と加圧時間により求めるが、同一圧力による測定を三回行いその平均をその圧力による注入流量とした。実験の方法を流れ図として図4-9に示す。

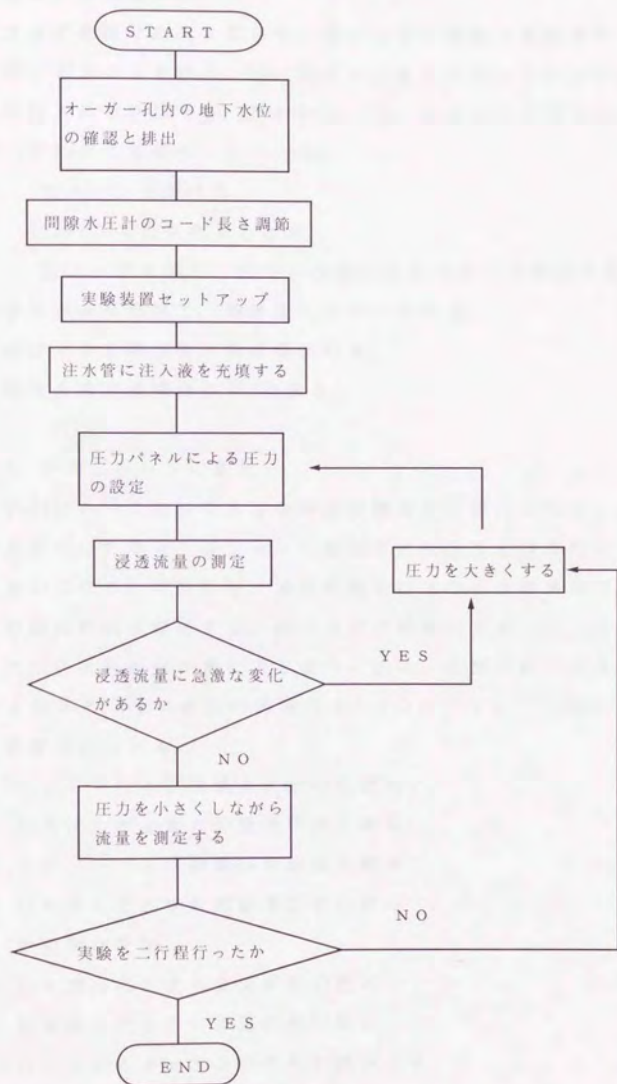


図 4 - 9 実験方法の流れ図

【試験機の測定操作】

- ②コックを開けたままにして、③コックの開閉で実験を行う場合
- 1) ③、④コックを閉じ、⑤、⑥コックを開けて、スタンドパイプに注入液を供給する。終われば、⑤、⑥コックを閉じる。
- 2) (i) N_2 ガスを使用しないとき
⑥コックを開ける
(ii) N_2 ガスを使用するとき
⑥コックを閉じ、④コック開け任意の圧力を設定する。
- 3) ③コックを開けて、時計をスタートさせる。
- 4) ③コックを閉じて、時計を止める。
- 5) 測定を続ける場合は(1)に戻る。

4.5.2 計測とデータの整理

図4-10において加圧型水理破碎試験機の基本操作は②コックを開けたままにした場合、③コックの開閉だけを行うというたいへん単純なものになる。すなわち、測定の開始は③コックの開放であり同時に時間の計測を開始する。終了までの時間はスタンドパイプに貯えられた注入液の減少量により適当に決め、計測の終了と共に③コックを閉じる。その操作の過程で次の7つのデータ（図4-10の括弧付き番号）をとる。

- 1) スタンドパイプ流量計の始めの読み
 - 2) 1)を読んだときの間隙水圧計の読み
 - 3) スタンドパイプ流量計の最後の読み
 - 4) 1)を読んだときの間隙水圧計の読み
 - 5) その間の時間
 - 6) 1)を読んだときの空気圧計の読み
 - 7) 3)を読んだときの空気圧計の読み
- 6、7)は2)と4)のチェックのために読みとる。

流量－水圧データ集の番号①～⑥で流量を計算し、⑦～⑨で注入部中心の水圧を計算している。

- ① 始点：スタンドパイプ最初の読み [cm]
- ② 終点：スタンドパイプ最終の読み [cm]
- ③ ② - ① によりスタンドパイプの液体が何 cm 流下したかを算出
- ④ ③ × 10 でスタンドパイプ中を流下した体積 [cm³] を算出しそれを 10⁶ で割って [m³] に換算している。
- ⑤ 時間：測定時間 [sec]
- ⑥ ④ / ⑤ で流量 [m³/s] の算出
- ⑦ 初期水圧：間隙水圧計最初の読み [kPa]
- ⑧ 終期水圧：間隙水圧計最後の読み [kPa]
- ⑨ ⑦ と ⑧ の平均を水圧とする。

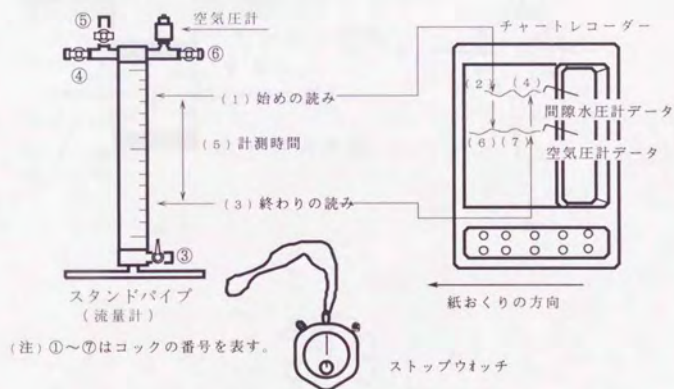


図 4 - 1 0 計測するデータ

4. 6 弾性論による亀裂発生条件

水平方向に σ_1 、 σ_2 ($\sigma_1 \geq \sigma_2$)が、また鉛直方向に σ_2 の主応力が作用している地盤中のボーリング孔について考える。(このとき、孔壁に既存の亀裂は無く、不透水性で地盤の変形特性は等方的に生じ、破壊直前まで弾性体と考えることができるものとする。)

パッカーをセットした後、ボーリング孔中の水圧 P を上昇させると、地盤中には水平方向(図4-11(a))と鉛直方向(図4-11(b))の二つの型の亀裂が発生する可能性がある。³⁷⁾

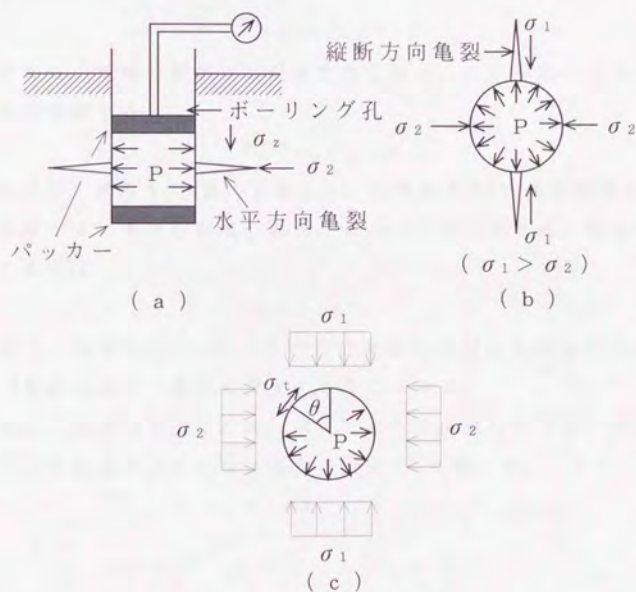


図4-11 ボーリング孔に生じる亀裂

(1) 水平方向の亀裂を考える場合：土の引張り強度を T_0 とすると、

$$P > \sigma_2 + T_0$$

のときに亀裂が発生する。特に地層が水平に成層している場合にこのような現象が考えられる。

(2) 鉛直方向の亀裂を考える場合：ボーリング孔壁面上の接線方向応力 σ_1 (圧縮応力を正) とするとき、主応力 σ_1 の方向から、角 θ だけ傾いた面上 (図4-11(c)) では、弾性理論³⁸⁾により、

$$\sigma_1 = (\sigma_1 + \sigma_2 - P) - 2(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta$$

となる。

そして、 σ_1 の値は $\theta = 0^\circ$ のときに最小で

$$\sigma_1 = 3\sigma_2 - \sigma_1 - P$$

となる。さらに、

$$P > 3\sigma_2 - \sigma_1$$

のとき σ_1 は負の値を示し引張応力となる。この場合、土の引張強度 T_0 を考慮すると、

$$P > 3\sigma_2 - \sigma_1 + T_0$$

であれば、縦断方向 (最大主応力 σ_1 の作用方向) に亀裂が発生する。

水平土圧に異方性が無い場合、 $\sigma_1 = \sigma_2$ であるため、亀裂の発生する条件は

$$P > 2\sigma_1 + T_0$$

となり、水平土圧 σ_1 の2倍に引張強度 T_0 を加えた値よりも高い水圧 P をかけると、亀裂が発生することになる。

また、亀裂が発生した後、水圧 (または流量) を下げ、流量がほぼ0になる点の水圧 P_0 はほぼ水平土圧 σ_1 に等しい。

$$\sigma_1 = P_0$$

4. 7 実験結果

4.7.1 注入水圧と注入流量の関係

注入流量と注入水圧の関係を図4-12～4-24に示す（注入管番号の③とH5-3は目詰まりのため測定不能となった）。a), b)はそれぞれ一度目、二度目の各過程のデータをプロットしたものでc)は両者をプロットしたものである。

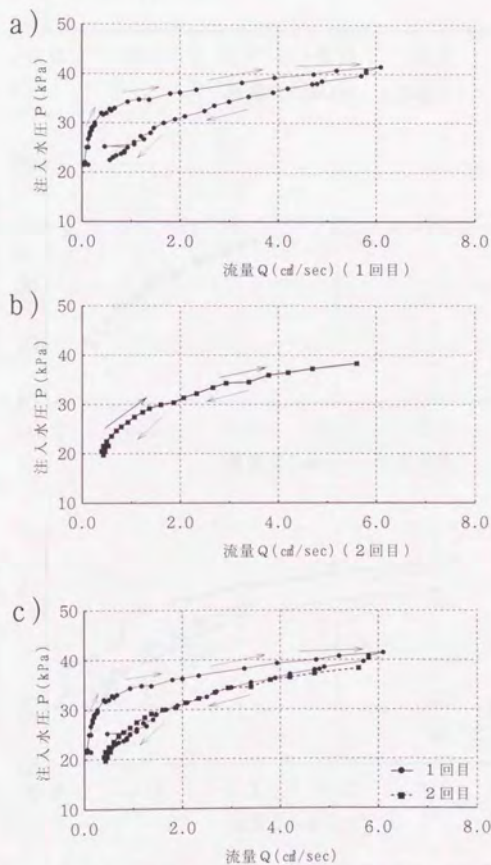


図4-12 深さ1.5mの場合の水圧と注入流量の関係
(注入管番号①：地下水位は地表面より1.38m)

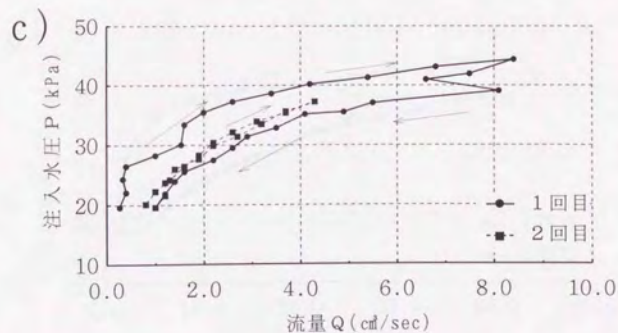
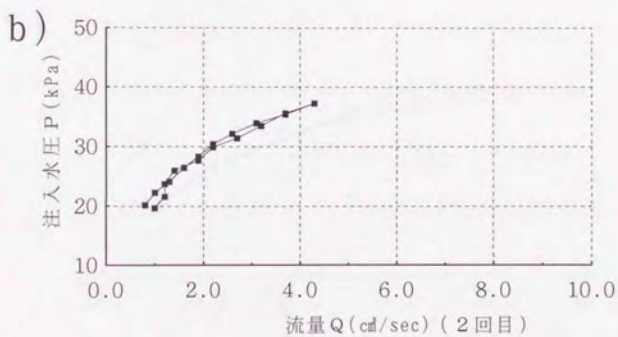
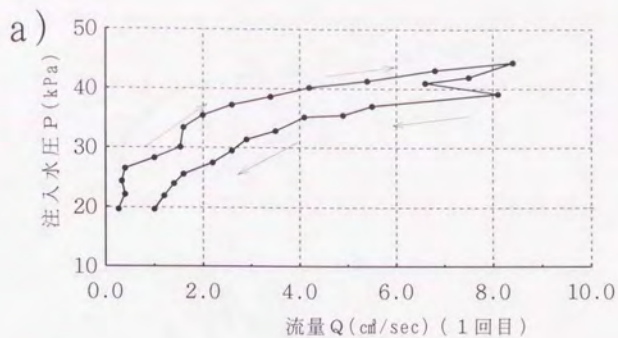


図 4 - 1 3 深さ 1.5m の場合の水圧と注入流量の関係
(注入管番号②: 地下水は存在せず)

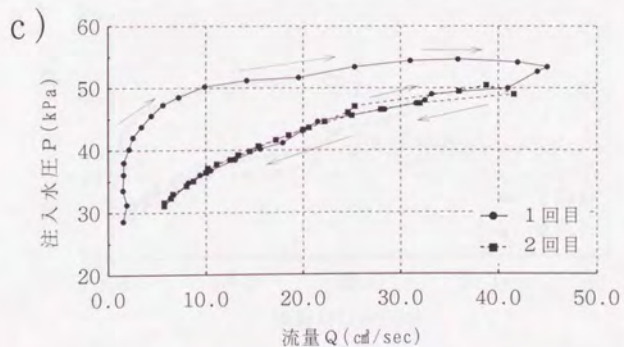
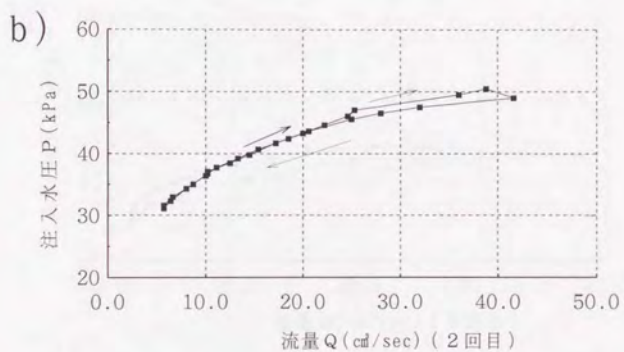
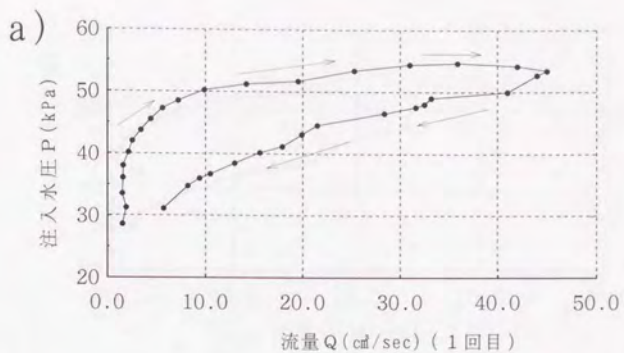


図4-14 深さ2.5mの場合の水圧と注入流量の関係
(注入管番号④：地下水は存在せず*)

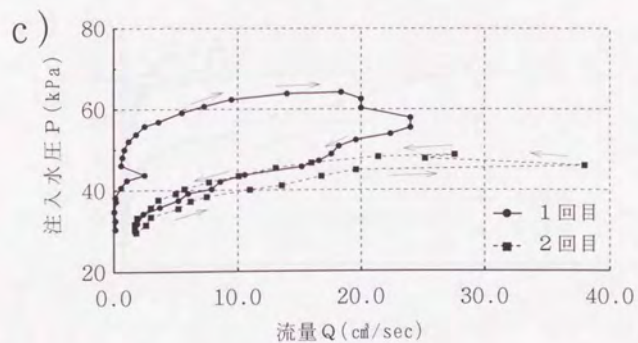
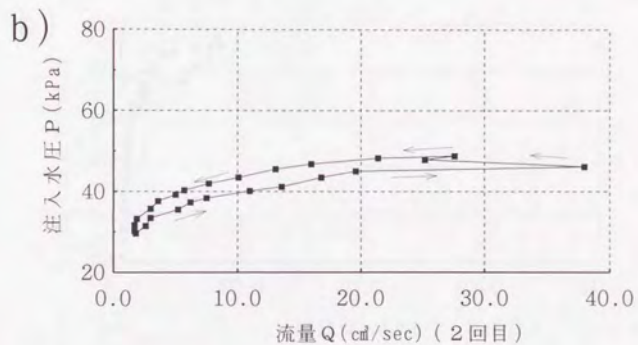
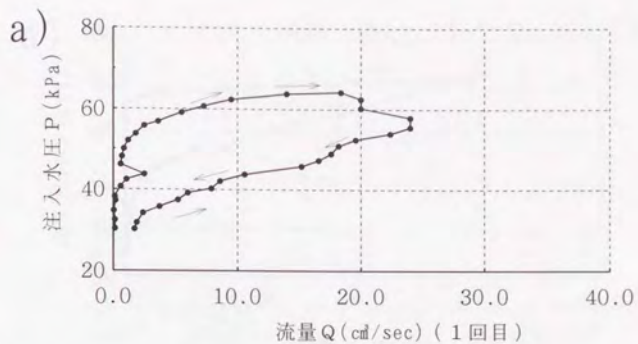


図 4-15 深さ 2.5m の場合の水圧と注入流量の関係
(注入管番号⑤: 地下水位は地表より 2.06m)

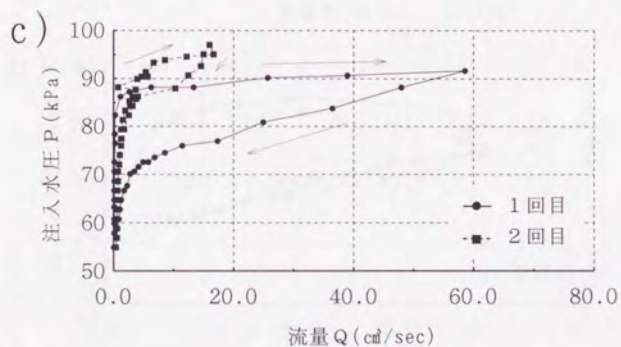
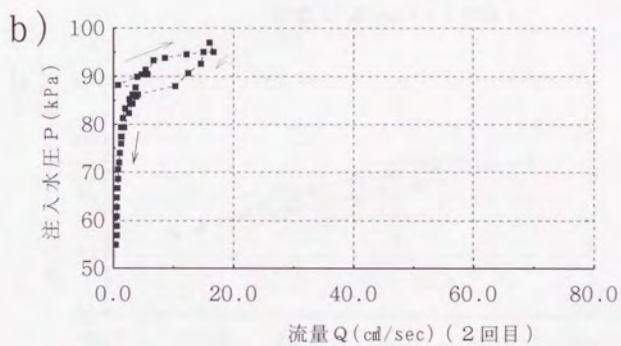
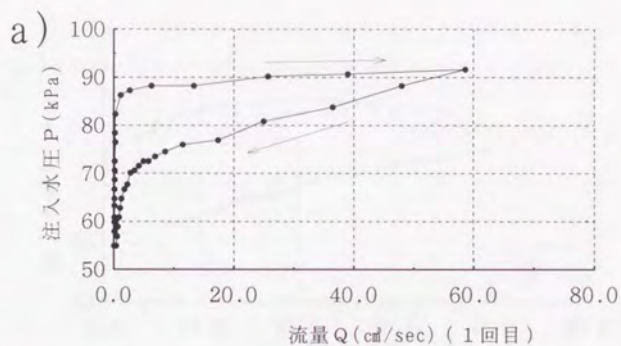


図 4 - 1 6 深さ 5.5m の場合の水圧と注入流量の関係
(注入管番号⑥: 地下水位は地表面より 4.27m)

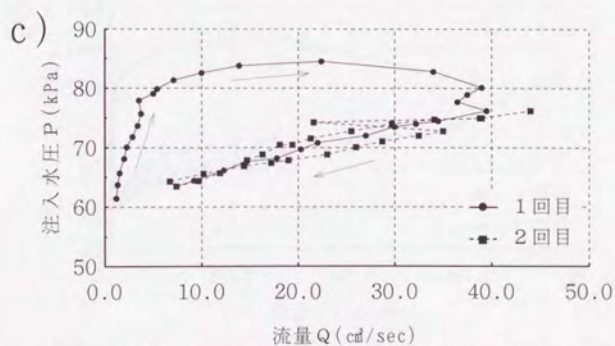
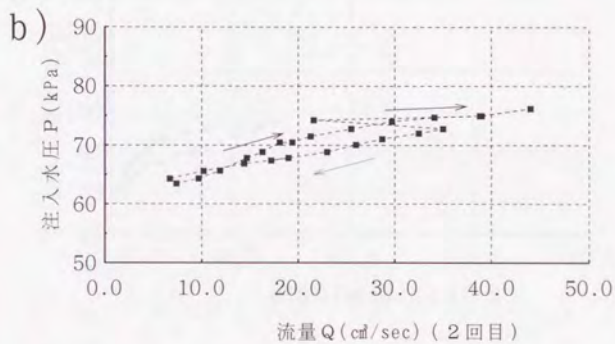
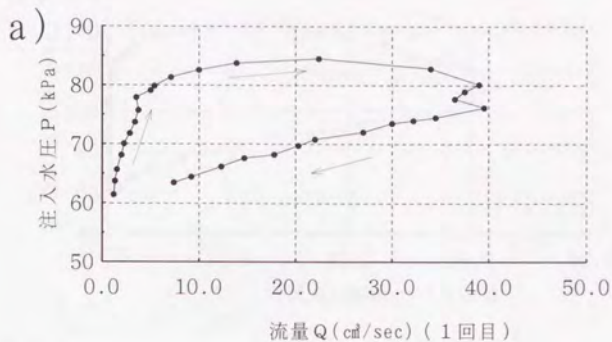


図 4 - 1 7 深さ 5.5m の場合の水圧と注入流量の関係
(注入管番号⑦: 地下水位は地表面より 4.39m)

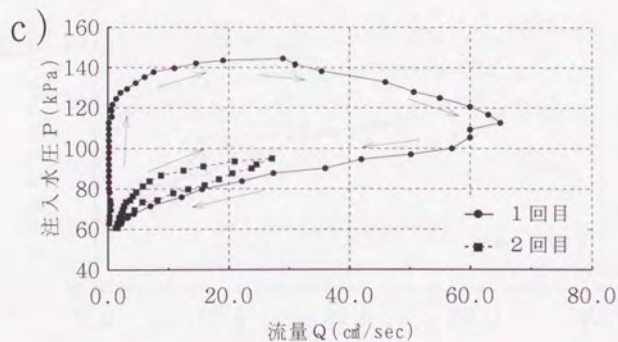
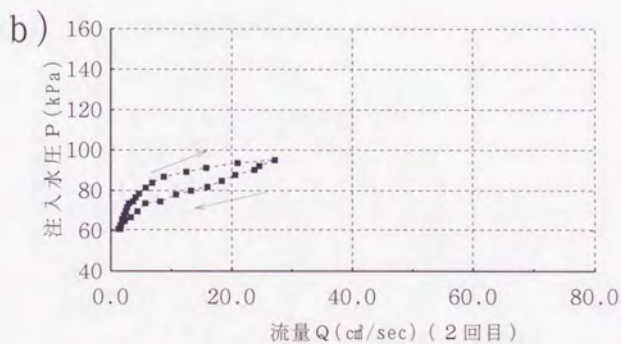
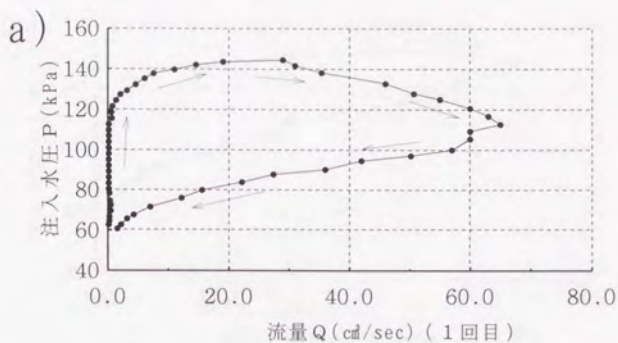


図 4 - 1 8 深さ 5.5m の場合の水圧と注入流量の関係
(注入管番号⑧ : 地下水位は地表面より 4.40m)

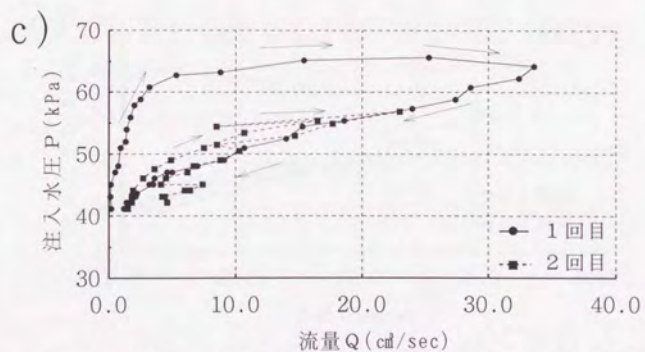
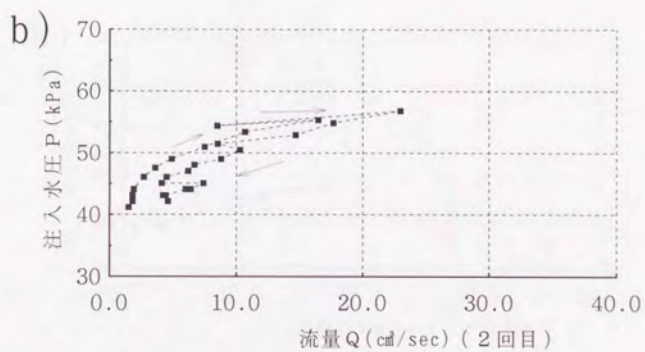
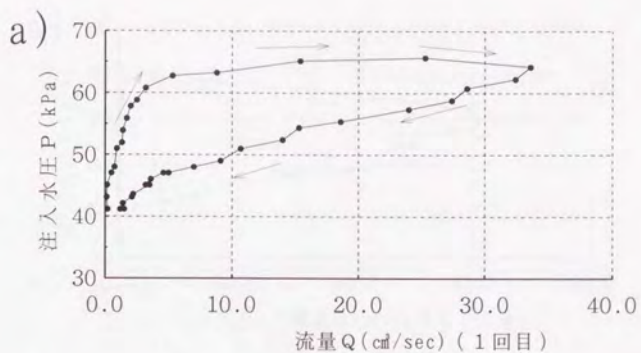


図 4 - 1 9 深さ 4.0m の場合の水圧と注入流量の関係
(注入管番号 ⑨ : 地下水位は地表面より 3.17m)

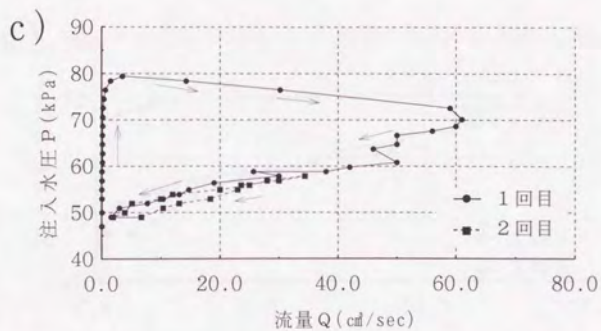
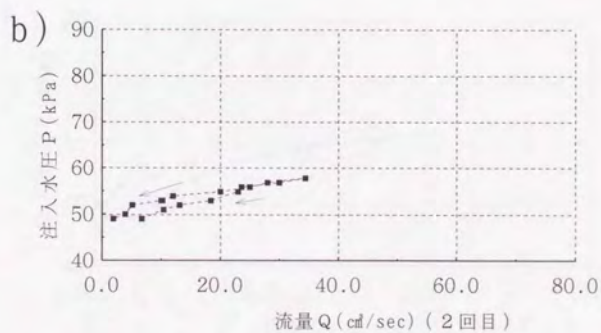
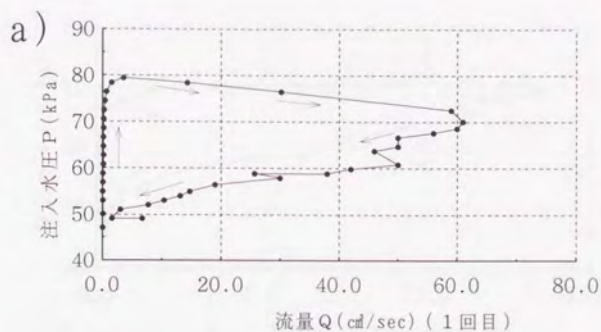


図 4-20 深さ 4.0m の場合の水圧と注入流量の関係
(注入管番号⑩: 地下水位は地表より 2.99m)

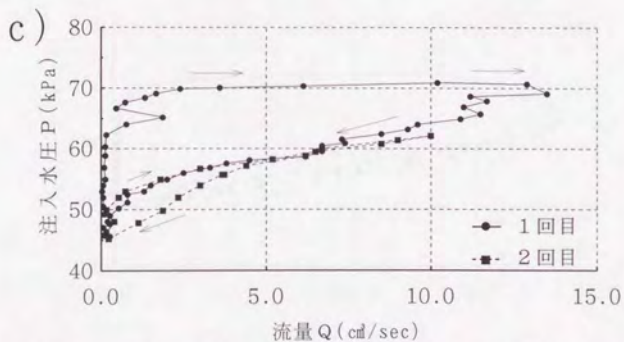
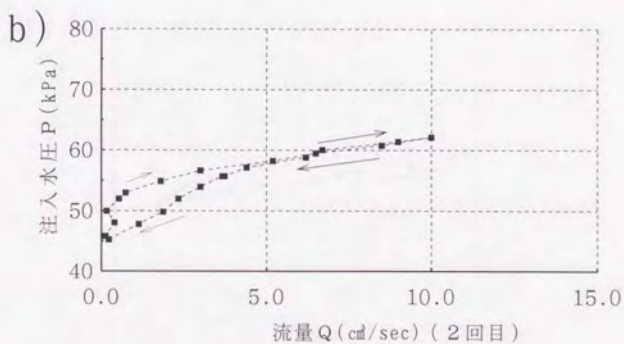
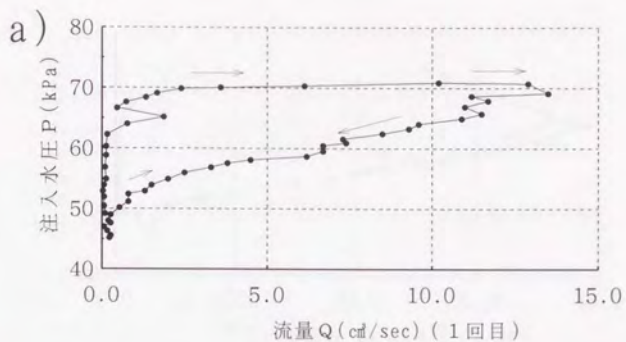


図 4-21 深さ 4.0m の場合の水圧と注入流量の関係
(注入管番号 ① : 地下水位は地表面より 2.81m)

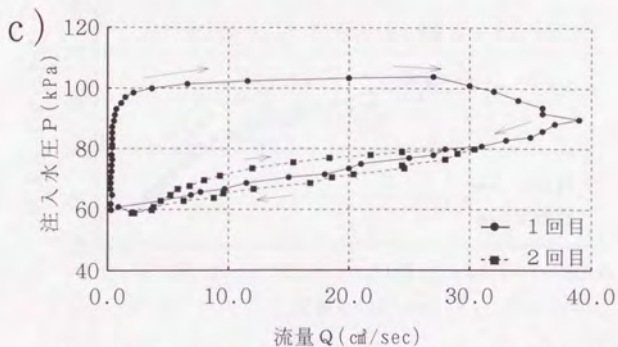
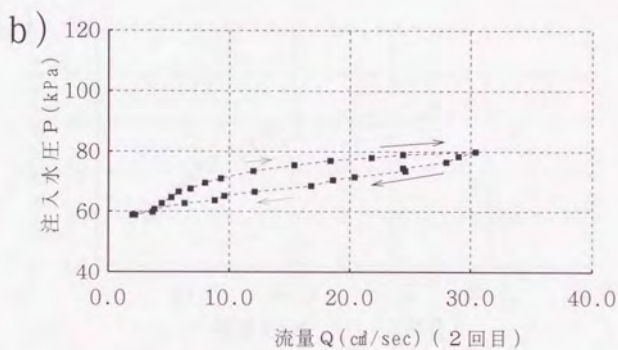
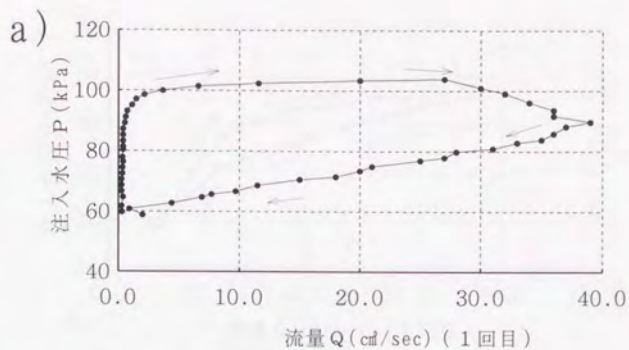


図 4-22 深さ 5.1m の場合の水圧と注入流量の関係
(注入管番号②: 地下水位は地表面より 3.70m)

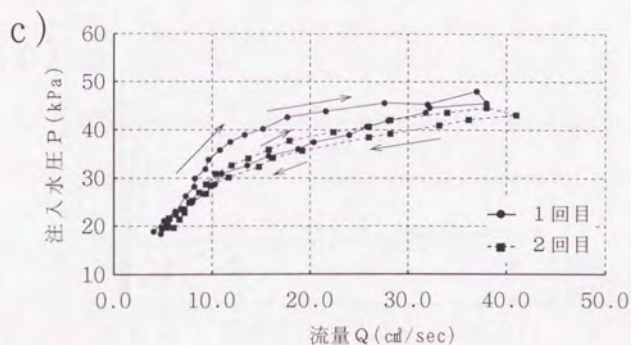
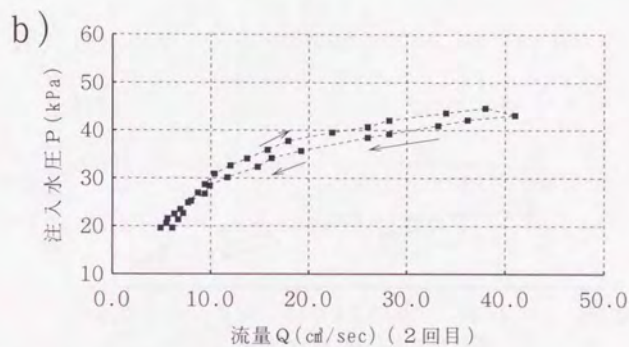
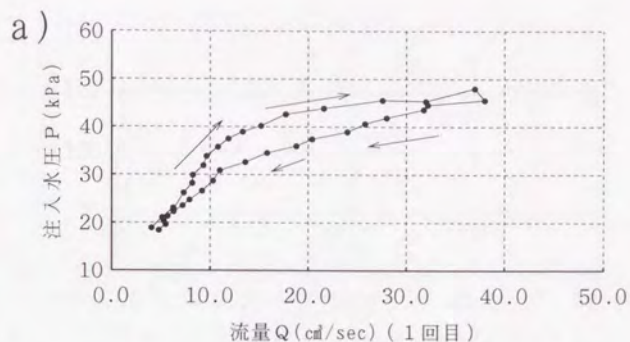


図 4-23 深さ 1.5m の場合の水圧と注入流量の関係
(注入管番号 H5-1: 地下水位は地表面より 1.06m)

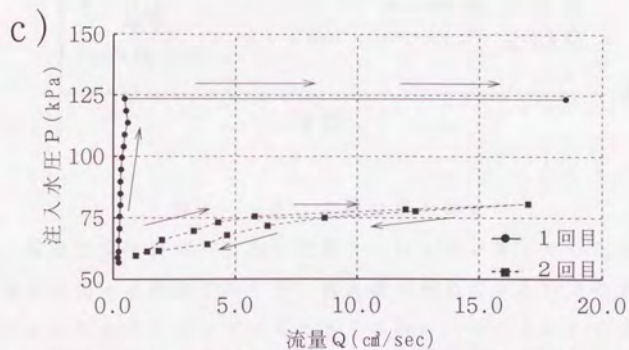
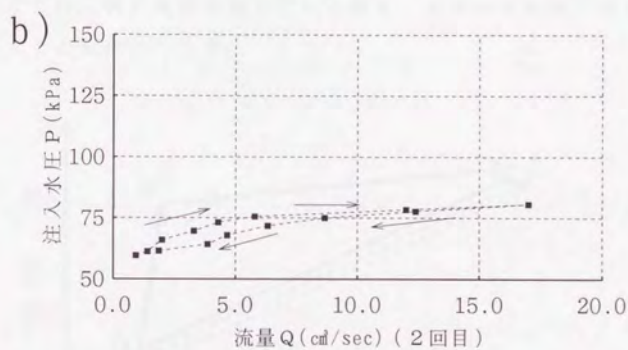
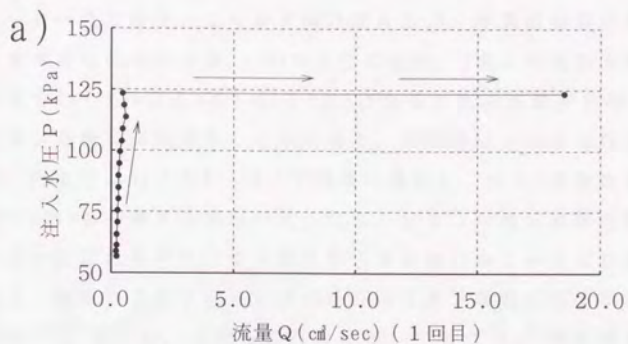


図 4-24 深さ 5.1m の場合の水圧と注入流量の関係
(注入管番号 H5-4: 地下水位は地表面より 2.57m)

オーガー孔の深さにより示す値は異なるが、各実験結果に共通の傾向を模式的に示すと図4-25のようになる。1回目の増圧過程ではある圧力 $P_B (=P_b)$ 以上(図4-25のB点)になると注入流量が急増し、C点に達した後に減圧するとA点に戻る。再び増圧・加圧を行った場合は、 P_B より低い圧力 $P_A (=P_a)$ で流量は増加し、ほぼ1回目の減圧経路(A-C間)を往復する傾向が見られる。つまり、増圧過程のB点でオーガー孔に亀裂が生じその間を注入液が流れることにより流量が急増し、減圧により土圧と水圧が釣り合う点で亀裂が閉じると考えられる³⁹⁾。さらに、二回目の行程において圧力 P_A で流量増加していることは、既に亀裂が生じている場合、水平土圧程度で再び亀裂が開くことを示している。

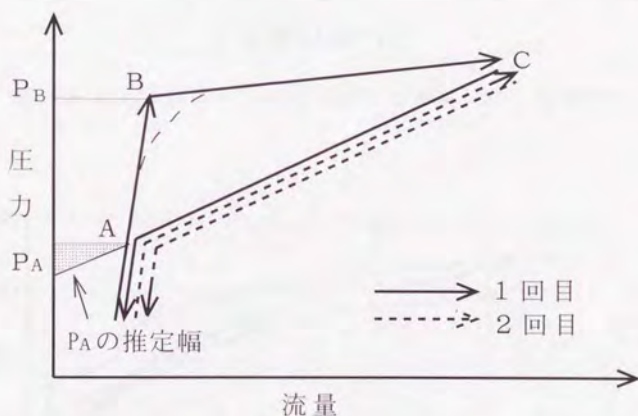


図4-25 実験結果の模式図

なお、実際には亀裂が一度生じた場合、注入圧が無くなった状態でも亀裂は完全には閉じておらず、流入量の極めて少ない点の水圧は既に土圧より小さくなっていると考えられる。そのため P_A の値は減圧過程で流量の比較的多い部分を幅でとらえ縦軸と交わる範囲とした(各実験結果での P_A の推定幅を図4-26~4-38に示す)。

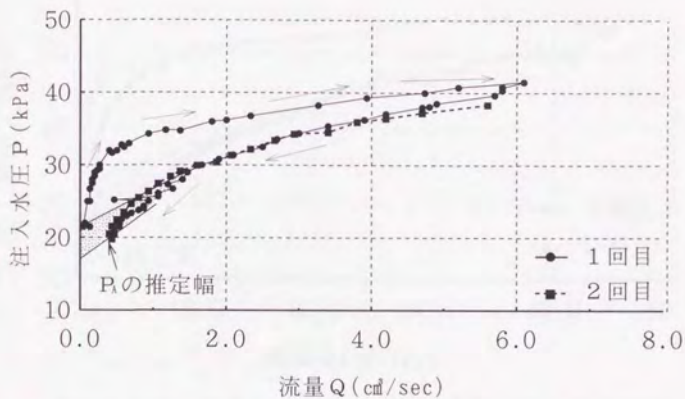


図 4 - 2 6 深さ 1.5m の場合の P_A 推定幅 (注入管番号①)

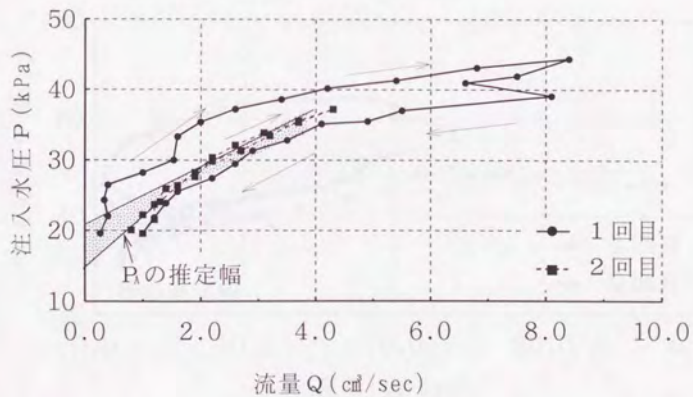


図 4 - 2 7 深さ 1.5m の場合の P_A 推定幅 (注入管番号②)

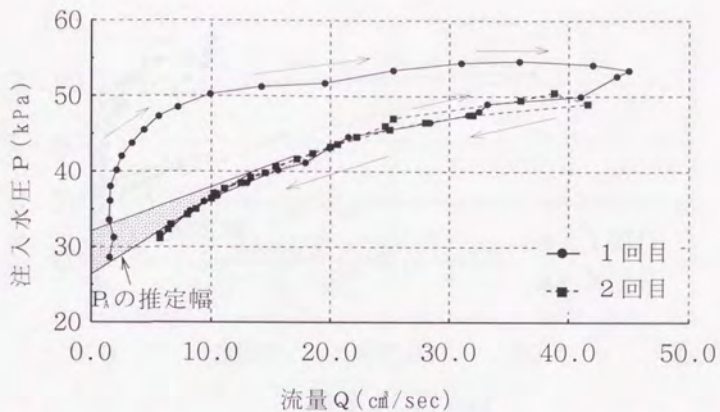


図 4 - 2 8 深さ 2.5m の場合の P_A 推定幅 (注入管番号④)

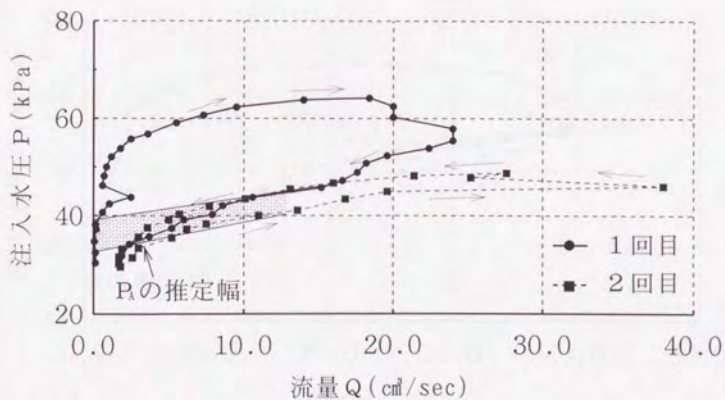


図 4 - 2 9 深さ 2.5m の場合の P_A 推定幅 (注入管番号⑤)

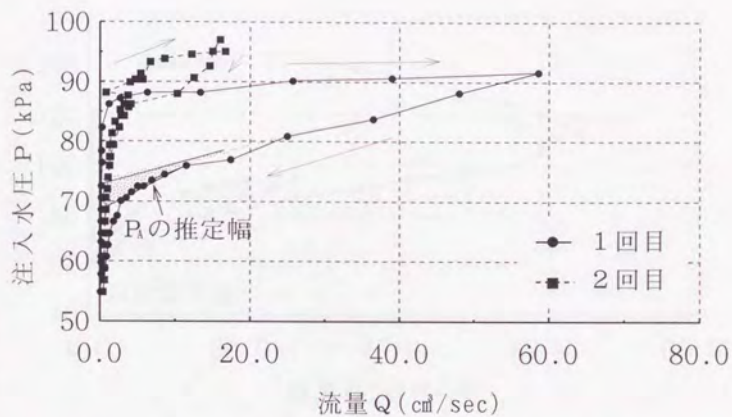


図 4 - 3 0 深さ 5.5m の場合の P_A 推定幅 (注入管番号⑥)

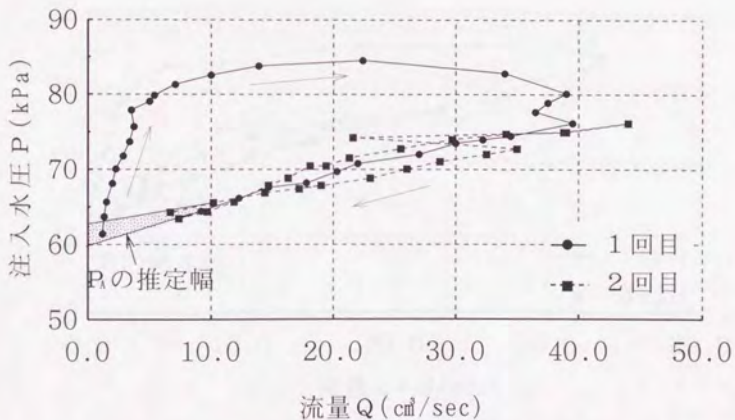


図 4 - 3 1 深さ 5.5m の場合の P_A 推定幅 (注入管番号⑦)

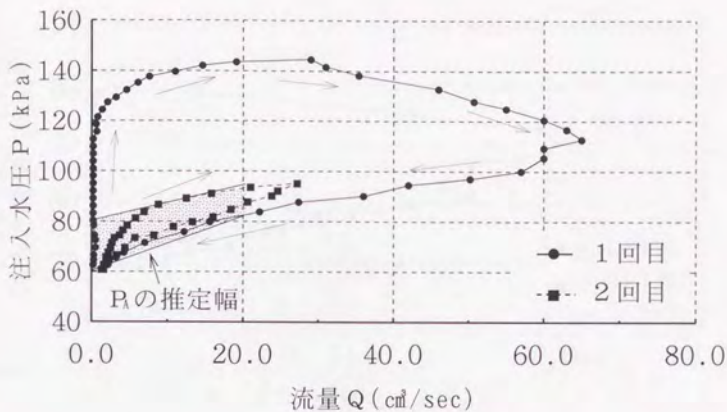


図 4 - 3 2 深さ 5.5m の場合の P_A 推定幅 (注入管番号 ⑧)

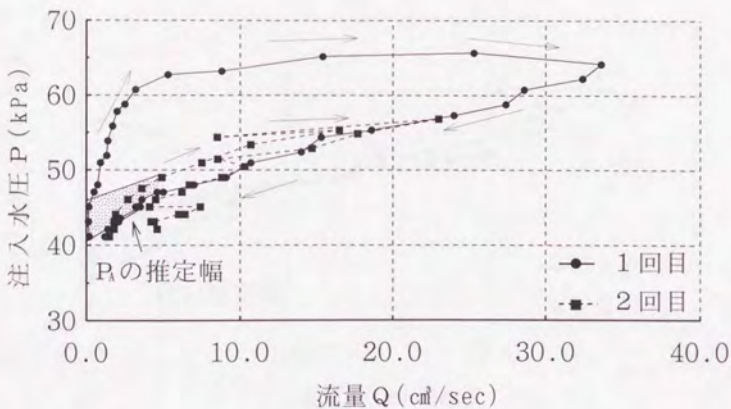


図 4 - 3 3 深さ 4.0m の場合の P_A 推定幅 (注入管番号 ⑨)

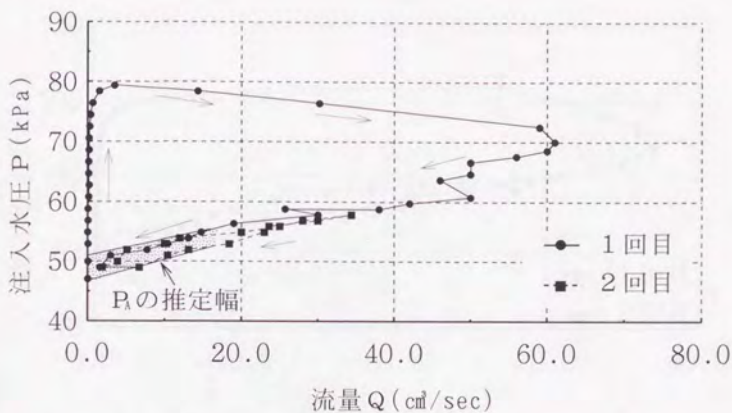


図 4 - 3 4 深さ 4.0m の場合の P_A 推定幅 (注入管番号 ⑩)

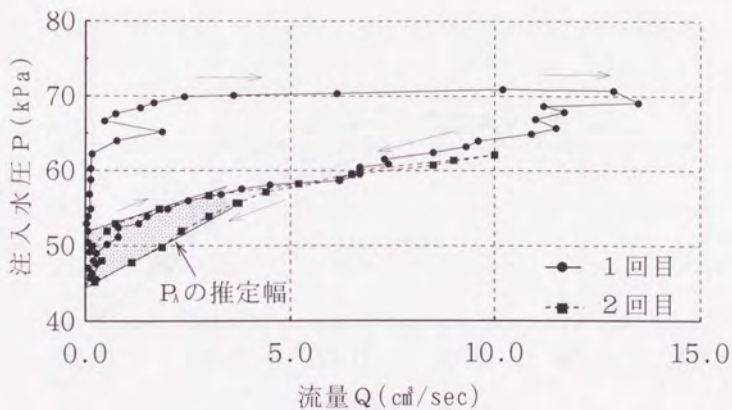


図 4 - 3 5 深さ 4.0m の場合の P_A 推定幅 (注入管番号 ⑪)

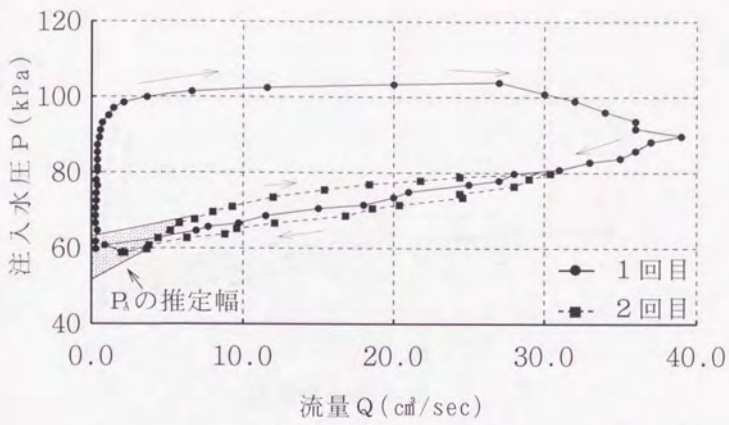


図 4 - 3 6 深さ 5.1m の場合の P_A 推定幅 (注入管番号②)

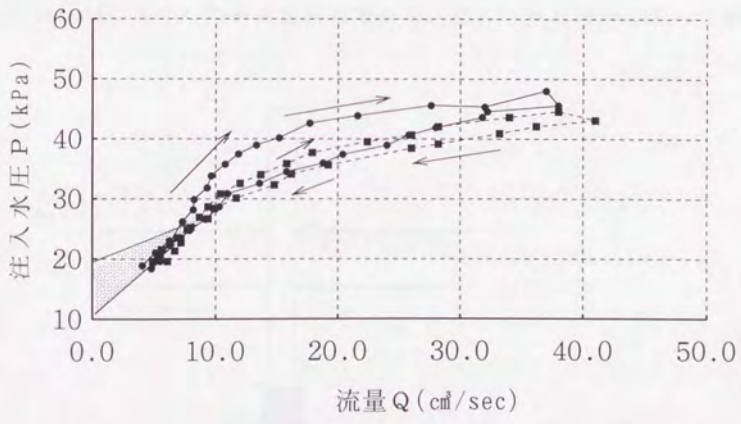


図 4 - 3 7 深さ 1.5m の場合の P_A 推定幅 (注入管番号 H5-1)

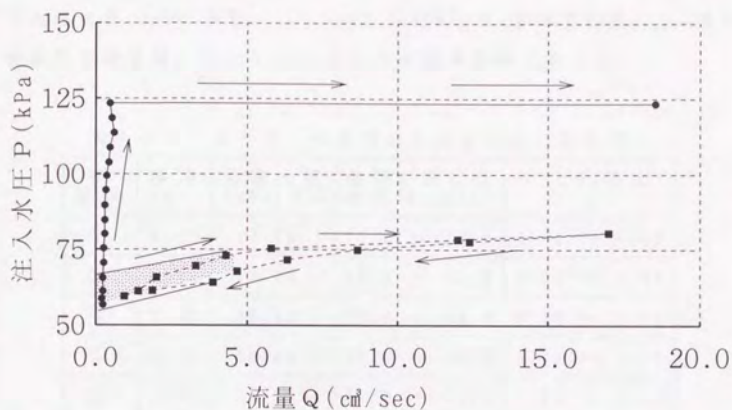


図 4 - 3 8 深さ 5.1m の場合の P_A 推定幅 (注入管番号 H5-4)

鉛直土圧 σ_v (全応力) を単位体積重量 γ_s (or γ_{sat}) と深さ h の積とし、オーガー孔の底から 0.25m (注入管の注水区間の中央: 概要図を図 4-39 に示す) の鉛直土圧を求めた。また、減圧過程において流

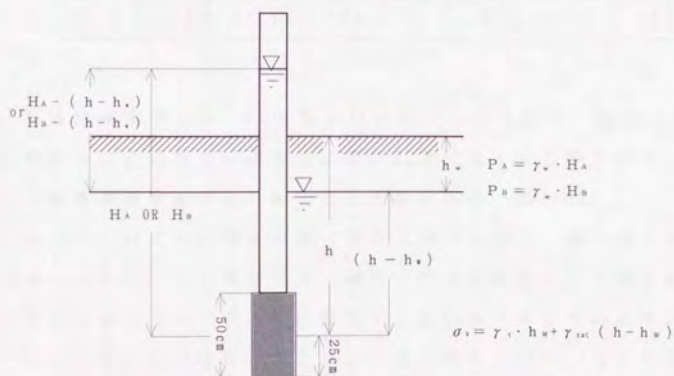


図 4 - 3 9 地下水圧と注入圧の関係

量のほとんど無くなる点の水圧 $P_0 (=P_A)$ は、ほぼ水平土圧 σ_h (全応力)と等しいと考えられる^{39), 40)}。各注入管における σ_v 、 P_0 及びその比を表4-1に示す。 $(\gamma_s = 12.6 \text{ kN/m}^3, h_w$ は地下水位、 γ_w は水の単位体積重量、 H_0 と H_A は注入圧の水頭換算値である)。

表4-1 オーガー孔側壁の土圧と水圧(全応力)

管番号	深さ(m)	鉛直土圧(kPa) σ_v	亀裂が閉じた水圧 P_0 (kPa)	σ_v と P_0 の比
①	1.25	15.75	17.0 ~ 22.0	1.08 ~ 1.40
②	1.25	15.75	15.0 ~ 21.0	0.95 ~ 1.33
④	2.25	28.35	26.0 ~ 33.0	0.92 ~ 1.16
⑤	2.25	28.35	32.0 ~ 40.0	1.13 ~ 1.41
⑥	5.25	66.15	68.0 ~ 74.0	1.03 ~ 1.19
⑦	5.25	66.15	60.0 ~ 63.0	0.91 ~ 0.95
⑧	5.25	66.15	60.0 ~ 80.0	0.91 ~ 1.21
⑨	3.75	47.25	42.0 ~ 46.0	0.89 ~ 0.97
⑩	3.75	47.25	46.0 ~ 52.0	0.97 ~ 1.10
⑪	3.75	47.25	44.0 ~ 52.0	0.93 ~ 1.10
⑫	4.85	61.11	52.0 ~ 54.0	0.85 ~ 0.88
H5-1	1.25	15.75	10.0 ~ 20.0	0.64 ~ 1.27
H5-4	4.85	61.11	60.0 ~ 70.0	0.98 ~ 1.23

P_0 はほぼ水平土圧 σ_h と等しいと考えられるため、鉛直土圧 σ_v との比を是全応力での側方土圧係数 K_0 と見なすことができる。それらの値を各実験結果より幅でとらえ図示する(図4-40)。

σ_h/σ_v は比較的深さが浅い場合は幅が大きく、深い場合は小さくなっている。浅い場合では、深さに比べ注入管の注入域が長いいためその上端と下端で注入圧に無視できない差が生じているものと思われる。図4-40では孔の深さにより差はあるものの1前後の値をとっていることより、全応力での側方土圧係数 $K_0=0$ と推定される。こ

れは火山灰ローム層が過圧密されていることから妥当な値⁴¹⁾と考えられる。

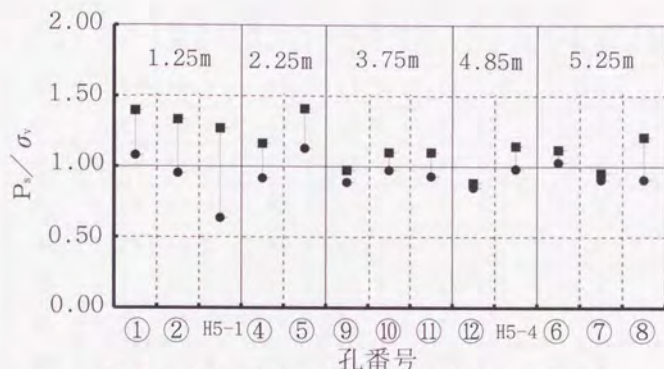


図4-40 亀裂の閉じた圧力と鉛直土圧の比

また、亀裂の生じた圧力 P_b と亀裂の閉じた圧力 P_c を幅で推定し、その平均値の差を求めた値を表4-2に示す。4.6で弾性論による亀裂発生式の式によると亀裂の発生する圧力は不透水の場合、水平土圧の二倍に引張強度を加えた値になるはずである。

表5-2(第5章5.3.5.3)に基礎地盤(不攪乱土)の引張強度を測定した結果を示しているが、それによると引張強度は15~20kPaの値をとっている。オーガー孔が深いほど P_{bm} と P_{sm} の差(P_{bm} 、 P_{sm} はそれぞれ P_b 、 P_c の平均値)は大きくなる傾向を示しているが、比較的浅い範囲ではその差は引張強度程度である。

第五章の厚肉円筒を用いた引張強度の測定では側圧を加えながらの実験を行っている。これによると応力は圧縮であるが引張破壊を生じていることが分かっている。つまり、引張破壊は応力ではなく伸びひずみにより左右され、これと同様な現象が現場実験でも生じていると考えられる。そのため、拘束が小さく、伸びひずみの生じやすい、浅いオーガー孔では水平土圧に引張強度を加えた程度の圧

力で亀裂が生じたものと思われる。一方、拘束の大きい深いオーガー一孔では破壊にそれ以上の圧力を要していると考えられる。

表 4-2 破壊圧力と亀裂が閉じた圧力の差

管 番 号	深 さ (m)	亀裂が開いた 水圧 P_b (kPa)	亀裂が閉じた 水圧 P_c (kPa)	$P_{b,m} - P_{c,m}$ (kPa) (各平均値の差)
①	1.25	30.0 ~ 35.0	17.0 ~ 22.0	13.0
②	1.25	28.0 ~ 33.0	15.0 ~ 21.0	12.5
④	2.25	45.0 ~ 50.0	26.0 ~ 33.0	18.0
⑤	2.25	55.0 ~ 60.0	32.0 ~ 40.0	21.5
⑥	5.25	85.0 ~ 87.0	68.0 ~ 74.0	15.0
⑦	5.25	78.0 ~ 82.0	60.0 ~ 63.0	18.5
⑧	5.25	130.0 ~ 140.0	60.0 ~ 80.0	65.0
⑨	3.75	60.0 ~ 63.0	42.0 ~ 46.0	17.5
⑩	3.75	78.0 ~ 80.0	46.0 ~ 52.0	30.0
⑪	3.75	67.0 ~ 70.0	44.0 ~ 52.0	20.5
⑫	4.85	95.0 ~ 100.0	52.0 ~ 54.0	44.5
H5-1	1.25	38.0 ~ 42.0	10.0 ~ 20.0	25.0
H5-4	4.85	124.0 ~ 124.0	60.0 ~ 70.0	59.0

($P_{b,m}$ 、 $P_{c,m}$ はそれぞれ P_b 、 P_c の平均値とする。)

また、今回の実験結果において、流量の変化は図 4-25の様な明確な折れ線ではなく曲線的であった。これは、火山灰ローム層の応力~ひずみ関係が破壊点近くで非線形性を示すこと、オーガー孔の側壁が必ずしも均一な強度を持たないため、強度の小さい部分から順に亀裂が生じたこと等によるものと考えられる。

いずれにしろ、どの試験結果においても水圧を大きくしていくことにより、注入流量の増加率が大きく変化する点が存在することが確認できた。土の中では、ダルシー流と亀裂の間のパイプフロー的な流れが考えられるが、今回の実験では、流量の変化後では亀裂の間の流れが支配的になっていたと思われる。

4.7.2 亀裂の発達状況

実験により、亀裂が発生したことを確認するためにメチレンブルーを混ぜた注入液を用いて深さ1.5mの場合について実験を行った。

実験後の注入管下部の周囲の土を掘削しメチレンブルーにより着色された亀裂を観察した結果、注入管最下部より15cm程度上での亀裂の発達状況は図4-41の様になっていた。

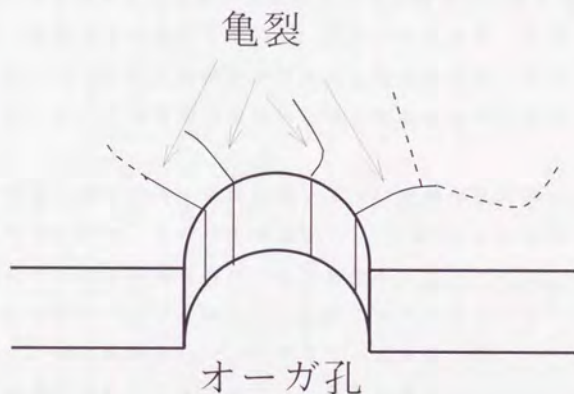


図4-41 亀裂の発達状況

亀裂はオーガ孔の円周に対し直角方向へ発達しその後複雑に分岐していたが、円周の直角方向に亀裂が発生していたことは円周に沿った引張応力によって引張亀裂が生じたことを示している。このことにより、今回用いた実験装置で引張亀裂による水理破碎の発生が確認できた。また、難透水性の粘性土中に液体を注入したときに生じる水理破碎がせん断破壊によって生じるとするMorgenstern⁴¹⁾、Yanagisawa⁴²⁾らの考え方では今回の実験結果は説明できなかった。なお、メチレンブルーで着色された部分はこれらの縦亀裂とオーガ孔壁表面のみであり、孔から地盤中へのダルシー流による着色は見られなかった。

4. 8 まとめ

1. オーガーで掘削できるような軟弱な地盤で、オーガーボーリング孔を利用した安価で簡便な水理破碎試験装置を開発した。
2. オーガー孔に液体を加圧注入した場合、ある破壊圧力 P_0 が必ず存在し、これより大きな圧力を加えると地盤に亀裂が生じる。さらに、注入液はこの亀裂に沿ってパイプフロー的に流れるため、加圧が破壊圧を越えた点で注入流量は急増する。

実験により発生した亀裂は引張応力による縦方向引張亀裂であり、オーガー孔の円周に直交していた。このことにより、今回の実験のようなボーリング孔に液体を加圧注入したときに生じる亀裂を、モール・クーロンの破壊規準を用いるセン断破壊説では説明できなかった。

3. 破壊水圧に達した後、水圧を徐々に下げ流量がほぼ零になる点の水圧 P_0 を求めれば、これは水平土圧 σ_h （全応力）とほぼ等しく、この方法により水平方向の初期土圧を求めることができる。今回実験を行った大谷内ダムの火山灰ローム層では水平土圧と鉛直土圧はほぼ等しく、側土圧係数 $K_0 \approx 1$ であることが分かった。

4. 一度破壊圧力 P_0 以上まで加圧して亀裂を発生させたボーリング孔に、再度加圧注水すると P_0 より低い圧力 P_1 で注入量が急増する。つまり、一度発生した亀裂は水平土圧程度の水圧で再び開くと考えられる。このことは、地盤の強度に比して過大な盛土あるいは大地震等の原因で、堤体や基礎にセン断または引張等による亀裂が生じていた場合、貯水圧が亀裂部分の土圧より大きければ亀裂を押し広げ内部侵食を促進する可能性があることを示唆している。

5. 貯水圧が水平土圧を上回ると水理破碎の危険性があるという定性的性質を農業用フィルダムの基礎地盤において確認した。

第5章 基礎及び築堤材の力学的性質の測定

5. 1 概説

オーガー孔を利用した現場実験では、弾性論による破壊圧力よりも小さな圧力で亀裂が発生している場合が多く、特に比較的深くないオーガー孔でその傾向がみられた。このことにより破壊の条件としては応力以外の諸量（ひずみ等）に左右されている可能性がある。そのことを検討するうえでも、水理破碎発生メカニズムを明確にするうえで土の強度特性を知ることは重要である。そこで本章では、破壊強度、破壊ひずみを圧縮のみではなく引張側を含めた測定を行い亀裂の発生に関与する応力、ひずみ量の測定を行う。さらに、第7章で大谷内ダムの築堤解析を有限要素法を用いて行った結果について述べるが、解析で用いる弾性（変形）係数、ポアソン比等についても求める。

また、本調査地点において盛土（攪乱土）部では漏水が生じていないことがボーリングによる地下水位調査で明確にされており、水理破碎は発生していないと考えられる。そこで締固め土（攪乱土）においても同様に実験を行い不攪乱土と強度特性を比較し水理破碎との関連性を検討する。

5.1.1 供試体に用いた試料の特性

今回用いた試料は現場実験を行った大谷内ダムの基礎から採取した第四紀火山灰ローム層である。粘土は圧密が進めば強度は増加するが、圧密による粘着力 C_u の増加割合は一般的に C_u/P' （ P' :圧密圧力）なる圧密増加割合で表される。Skempton⁽⁴⁾によると正規圧密粘土の場合、その粘土の塑性指数 I_p と C_u/P' の間に直線関係（図5-1中の式）があるとしている。大谷内ダムの基礎において深さ0.89m～1.10mから採取した土（ $I_p=50, \gamma_s=16\text{kN/m}^3$ ）が正規圧密粘土であれば $C_u/P'=0.11+0.0037 \times 50=0.295$ となるはずである。この不攪乱土で三軸圧縮試験を行った結果、粘着力 C_u は40～70kPaとなった。

また、深さ1.1mの場合、地下水は無かったため鉛直有効土圧は $\sigma_v' = 16 \times 1.1 = 17.6 \text{ kPa}$ となるが、現場実験の結果よりこの土では側方土圧係数 $K_0 = 1$ とみなしてよいため $\sigma_v' = P'$ となる。従って $C_u/P' = 2.3 \sim 4.0$ となるが、この値は正規圧密粘土の場合よりかなり大きく大谷内ダムの基礎地盤が過圧密を受けていることを示している。

また、三軸圧縮試験を行った際、側圧が30kPa以下では明確にセン断面を示したのに対し、側圧が50kPa以上では明確なセン断面が見られなかった。このことより今回用いた不攪乱土試料は30~50kPaの間で過圧密を受けていたものと考えられる。

なお、供試体は三軸圧縮・引張試験とも基礎の試掘溝より採取した直方体試料(一辺が20~40cm)を成形して用いた。三軸圧縮試験で用いた試料の含水比は不攪乱土で0.9784、攪乱土で0.9778である。また、引張試験では、一つの直方体試料より一つしか中空厚肉円筒試料を作成できないため三軸圧縮試験に比べ含水比のばらつきがあり、不攪乱土で0.97~1.02、攪乱土で0.90~1.18程度であった。

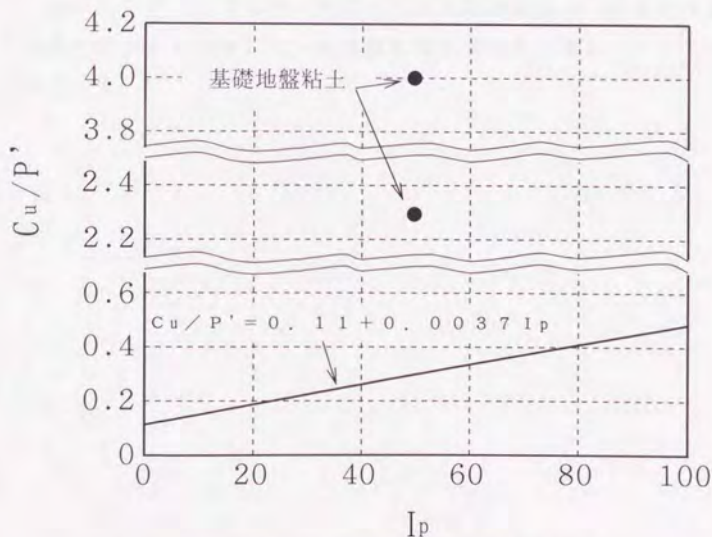


図5-1 圧密増加割合と塑性指数との関係

5. 2 三軸圧縮試験

今回用いた試料を採取した大谷内ダムの基礎地盤（不攪乱土）は圧縮破壊ひずみがかなり小さいことが分かっているため、微小ひずみレベルでの圧縮側の強度特性をより正確に測定するための試験を行った。

5.2.1 破壊強度及び弾性係数の測定

5.2.2.1 試験機の概要

鉛直方向の変位に関しては、非接触型磁気変位計及びそのターゲットをリングに装着し、リングをバネ付きネジで供試体の上下端それぞれ 1/4 の位置に固定した。なお、変位計は鉛直方向で 180 度となる位置に二組設置し、計測結果としてはその平均を用いた。今回用いた三軸室の概要図を図 5-2 に示す。

また、攪乱土は攪乱土に比べ破壊ひずみがかなり大きくなり、図 5-2 に示す装置では破壊に至るまでに計測が不可能になる。そのため、多少ベッディングエラーを含むことになるが図 5-3 の様に非接触型磁気変位計を設置した。非接触型磁気変位計の性能については付録に示す。

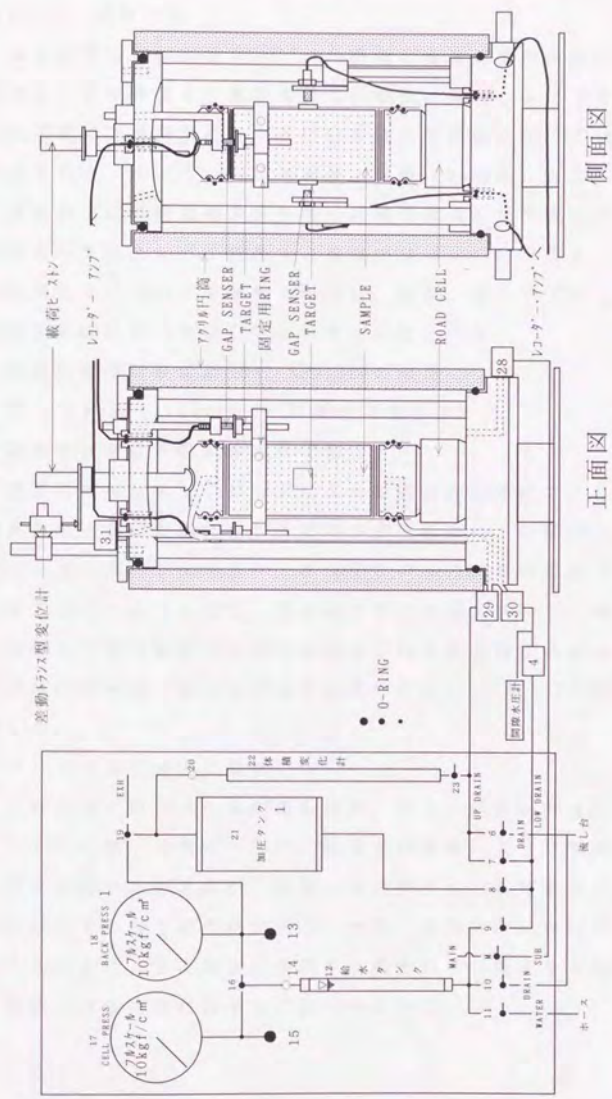


図5-3 三軸試験機概要図(攪乱土用)

5.2.2.2 試験方法

基礎地盤は透水係数が 10^{-6} cm/s程度の難透水性火山灰ロームであるため、築堤直後まで基礎地盤での排水は無いと仮定できる。そのため基礎は築堤荷重により非圧密非排水で荷重を受けている状態と考えられる。よって、非圧密非排水試験(UU試験)を行った。

本試験では基礎地盤を乱さない状態で採取した不攪乱土と、基礎地盤を一度攪乱し、不攪乱土と密度がほぼ同じになるように締め固めた攪乱土についての試験も行った。なお、微小ひずみレベルでの測定を正確に行うため以下に示す方法をとった。

1) 非接触型磁気変位計(GAP SENSOR)の使用

微小ひずみ(1.0×10^{-4})が測定可能となった。

2) 鉛直方向変位を供試体本体で測定

従来の荷重ピストンロッドによる鉛直方向の変位のとりかたでは、鉛直荷重をかけた際に生じる初期の変位の中に、供試体とポーラスストーン、ポーラスストーンとベDESTALの間等の誤差(ベディングエラー)を含んだり、供試体とポーラスストーンの摩擦により供試体上下端の鉛直方向変位が拘束される等の問題点があるため、供試体の中央部(測定区間は供試体の中央1/2、図5-2を参照)で測定した。

3) ロードセルを室内に設置

三軸室外にロードセルがある場合、ロッドが鉛直荷重によって沈下していく際、荷重の一部が三軸室との摩擦により打ち消され、ロードセルによる測定値が、実際に供試体に加わる荷重よりも過大な値を示してしまうおそれがある。今回、三軸室内にロードセルを設置することにより供試体に作用する荷重のみの測定を可能にした。

試験の方法を流れ図として図5-4に示す。

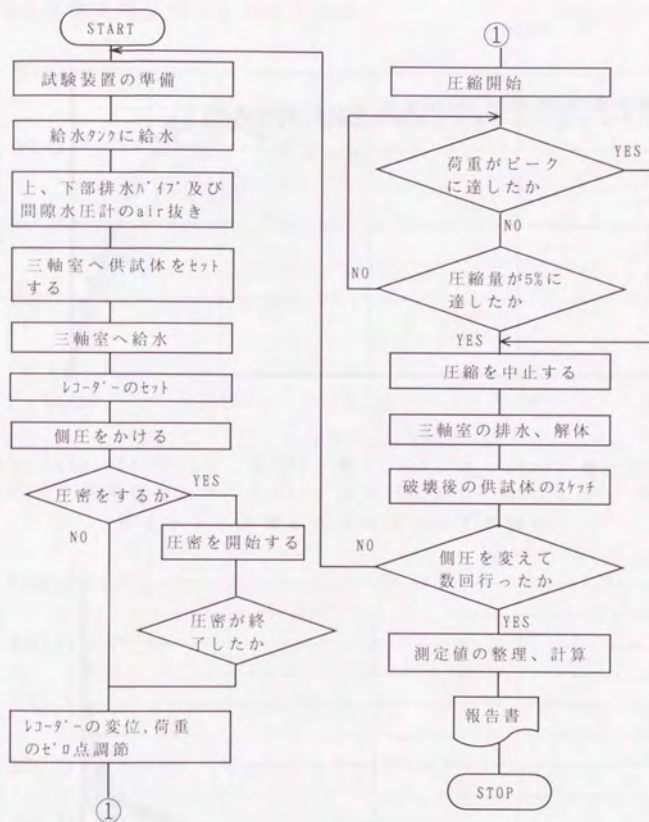
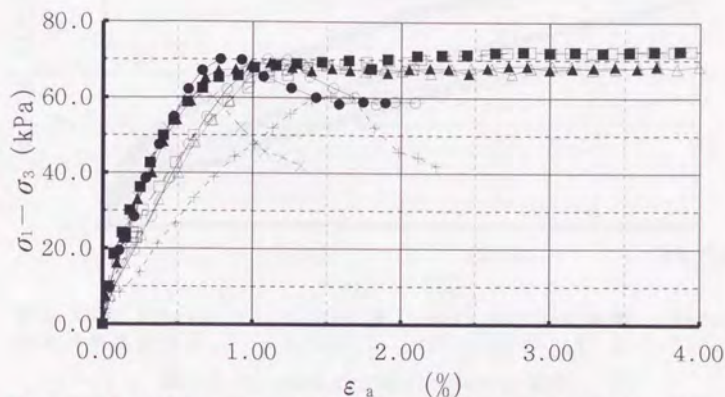


図 5 - 4 三軸圧縮試験の流れ図

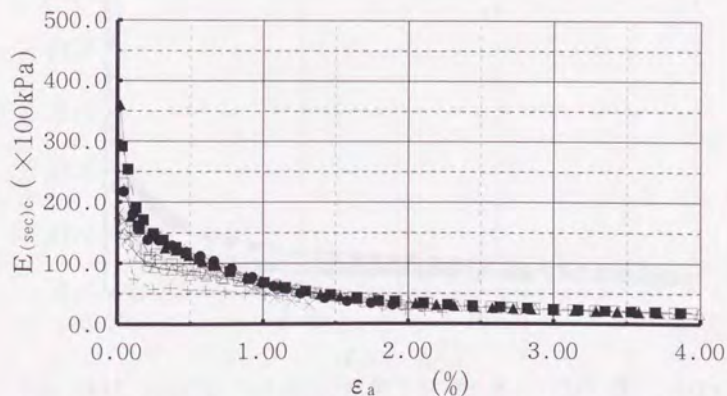
5.2.2.3 測定結果

試験結果を応力～ひずみ、弾性係数～ひずみ関係で示す。図5-5～図5-6は不攪乱土、図5-7～図5-8は攪乱土、図5-9～図5-10は不攪乱土と攪乱土を比較したものである。



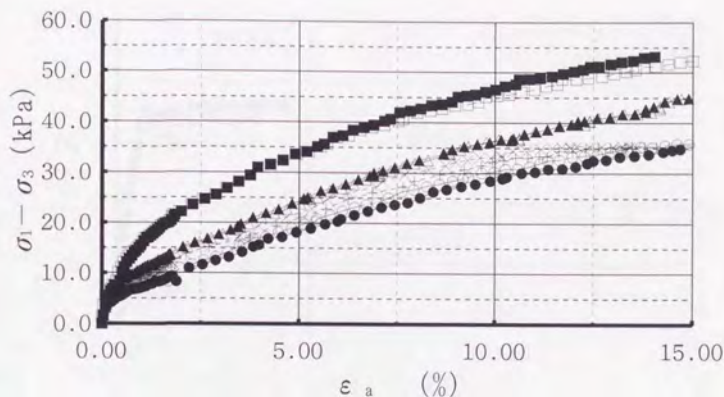
側圧 (GAP SENSOR) × : 0.0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa
 側圧 (外部変位計) + : 0.0kPa ○ : 30kPa △ : 50kPa □ : 70kPa

図5-5 不攪乱土の応力～ひずみ関係



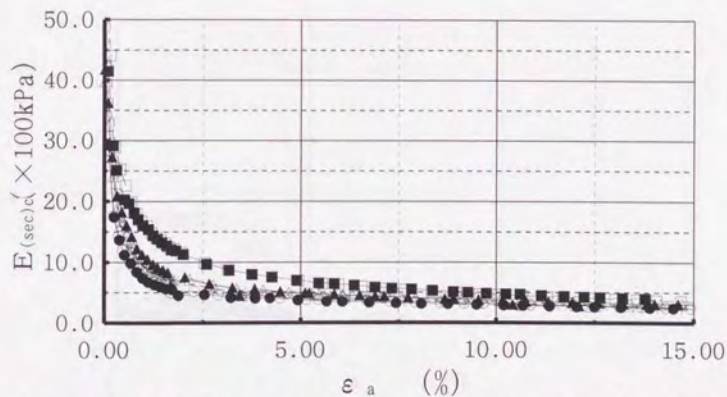
側圧 (GAP SENSOR) × : 0.0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa
 側圧 (外部変位計) + : 0.0kPa ○ : 30kPa △ : 50kPa □ : 70kPa

図5-6 不攪乱土の弾性(変形)係数～ひずみ関係



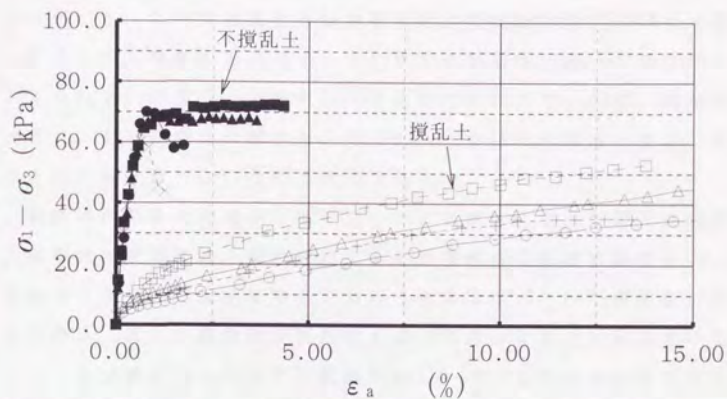
側圧 (GAP SENSOR) × : 0.0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa
 側圧 (外部変位計) + : 0.0kPa ○ : 30kPa △ : 50kPa □ : 70kPa

図 5-7 攪乱土の応力～ひずみ関係



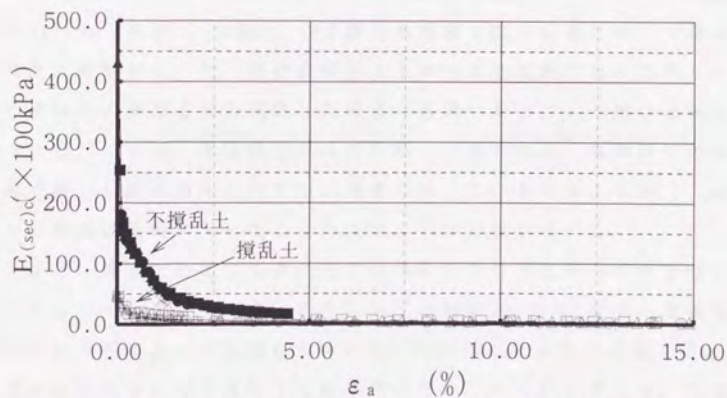
側圧 (GAP SENSOR) × : 0.0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa
 側圧 (外部変位計) + : 0.0kPa ○ : 30kPa △ : 50kPa □ : 70kPa

図 5-8 攪乱土の弾性(変形)係数～ひずみ関係



側圧 (不攪乱土) × : 0.0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa
 側圧 (攪乱土) + : 0.0kPa ○ : 30kPa △ : 50kPa □ : 70kPa

図 5-9 攪乱土と不攪乱土の比較 (応力～ひずみ関係)



側圧 (不攪乱土) × : 0.0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa
 側圧 (攪乱土) + : 0.0kPa ○ : 30kPa △ : 50kPa □ : 70kPa

図 5-10 攪乱土と不攪乱土の比較 (弾性係数～ひずみ関係)

不攪乱土の場合、側圧の違いによる応力～ひずみ曲線の違いはほとんど見られないが、攪乱土では側圧を上げると最大応力も大きくになっている。これは攪乱土を締め固めた土では飽和度が100%には達しておらず、空隙が側圧によって圧縮され供試体が硬化するためと考えられる。不攪乱土で拘束圧による硬化が起きないのは、飽和度が高く、かつ空隙を圧縮する圧力(拘束圧)を試料の構造で支え、空ゲキの圧縮を許さないためと考えられる。

供試体が粘性土の場合、練り返しによる攪乱によって最大強度が大きく変化するため、練り返しによる強度減少の程度を鋭敏比 S_{10} をもって表す。正規圧密粘土における鋭敏比は5～10が標準値とされており、著しく過圧密された粘土は1に近くなるといわれている¹¹⁾。本試験に用いた試料は鋭敏比が1.3～2.0となり過圧密を受けていると考えられる。また、不攪乱土では側圧が0.0kPa～0.3×100kPaではセン断面が発生するが、側圧が0.5, 0.7×100kPaの場合ではセン断面が見られない。したがって、この付近の圧力が先行圧密荷重とす過圧密になっていると考えられる。

$\phi=50\text{mm}$ の試料ではセン断面が水平面に対し約70°に入り、直径 $\phi=115\text{mm}$ (高さ $h=143\text{mm}$) の寸胴型供試体では圧縮面に対してほぼ鉛直に亀裂が入った。円柱形試料上下端と載荷盤及びベDESTALとの接触面の摩擦を極力排除した場合、亀裂が鉛直に入る場合があるといわれている。本試料は火山灰性粘土であるため、堆積時に熱収縮を起こし鉛直方向に何らかの構造を持っていると考えられ、これも縦方向に亀裂が入ったことの原因の一つと推定される。

また、攪乱土に比べ不攪乱土では亀裂の生じるひずみがかなり小さくなっている。そこで、新たにひずみ鋭敏比 $S_{11} = (\text{攪乱土の破壊ひずみ} / \text{不攪乱土の破壊ひずみ}) (= \epsilon_{d1} / \epsilon_{d1})$ なる値を定義する。この値が大きいほど攪乱土には亀裂が発生しにくいと言える。この値を強度の鋭敏比とともに表5-1に示す。

表 5-1 不攪乱土と攪乱土の強度及び破壊ひずみ

側 圧 (kPa)	最大応力 (kPa)		破壊ひずみ (%)		強度鋭敏比 $S_{1\sigma}$	ひずみ鋭敏比 $S_{1\epsilon}$
	不攪乱	攪 乱	不攪乱	攪 乱		
0.0	63	37	0.70	15.0	1.7	21.4
30	72	36	0.78	15.0	2.0	19.2
50	68	47	0.77	15.0	1.4	19.5
70	69	55	0.82	15.0	1.3	18.3

縦軸に圧縮の割線弾性係数 $E_{(sec)c}$ 、横軸に偏差応力を最大圧縮強度で除した値 $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ をとり両者の関係を不攪乱土について整理したものを図5-11に示す。これは、圧縮側の割線弾性係数 $E_{(sec)c}$ の偏差応力に対する依存性を表している。大谷内ダムではかさ上げの盛土荷重によって旧堤（基礎地盤）に生じる応力はほとんど最大強度に近い状態にある。そのため横軸は0.7~1.0の範囲と考えて良く、その場合の割線弾性係数 $E_{(sec)c}$ は約10,000kPaであることが図より分かる。

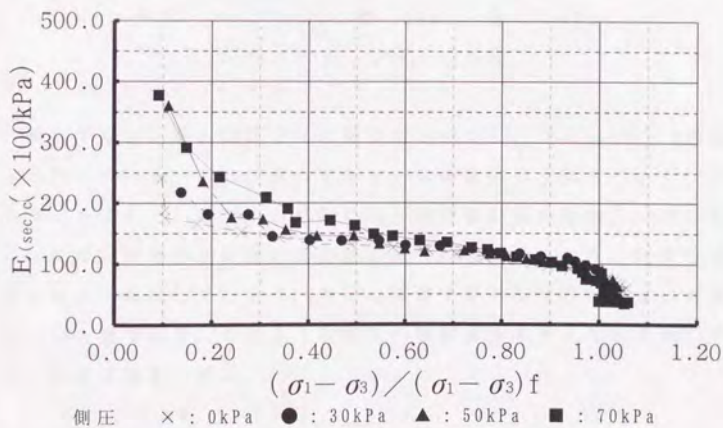


図 5-11 割線弾性係数と $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ の関係

5.2.2.4 三軸圧縮試験における非接触型磁気変位計の効果

供試体の中央 1/2 での変位測定より算出される軸ひずみを ε_{a1} 従来の試験法の载荷ピストンロッドの変位による測定により算出される値を ε_{a2} とする。縦軸にひずみ比として $\varepsilon_{a2}/\varepsilon_{a1}$ 、横軸に ε_{a2} をとり比較したものが図 5-12 (直径 $\phi=50\text{mm}$ 、高さ $H=100\text{mm}$ の三本の供試体での結果を示す) である。

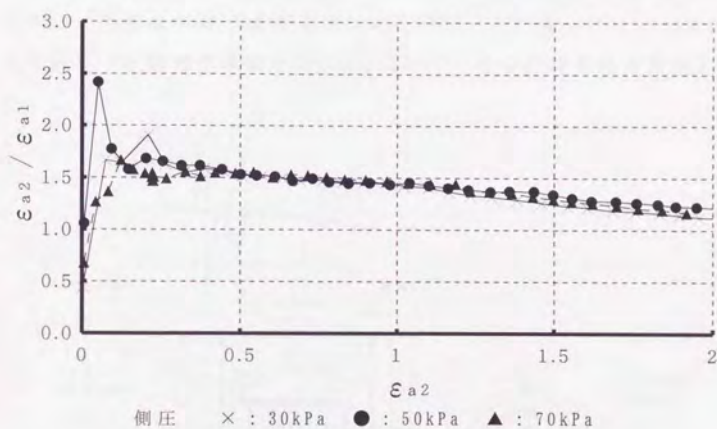


図 5-12 ひずみの比較

軸ひずみ ε_{a1} が 0.5% 以下では軸ひずみの比 ($\varepsilon_{a2}/\varepsilon_{a1}$) が 1.5 倍以上となっている。これは軸ひずみ ε_{a2} に供試体上下端のベッディングエラーを含んでいるためと思われる。測定値が真の値の 1.5 倍以上になれば、割線弾性係数は真の値の約 0.66 倍以下になり、従来の方法では過小評価してしまう。今回の試験で用いた試料は破壊ひずみが 1.0% 未満であり、このような試料の強度特性を考える上で軸ひずみの計測は重要である。

5.2.2 ポアソン比の測定

従来の体積変化より平均的な側方変位を求める方法ではなく、非接触型磁気変位計により直接側方変位の測定を行った。

5.2.2.1 試験機の概要と測定方法

従来の直径 ϕ と高さ H の比が1:2の細長い円柱試料では圧縮時に僅かながら曲がり横方向の変形量が正しく計測できないため、この試験では1:1.2程度(高さ $H=11\text{cm}$,直径 $\phi=13\text{cm}$)の寸胴型の円柱試料を用いた。側方変位の測定では、ターゲットを供試体の中央に 120° おき三ヶ所に接着剤で直接(ゴムスリーブ上に)張り付け、3方向で測定し(試験機の概要を図5-13に示す)その平均を側方変位とした。

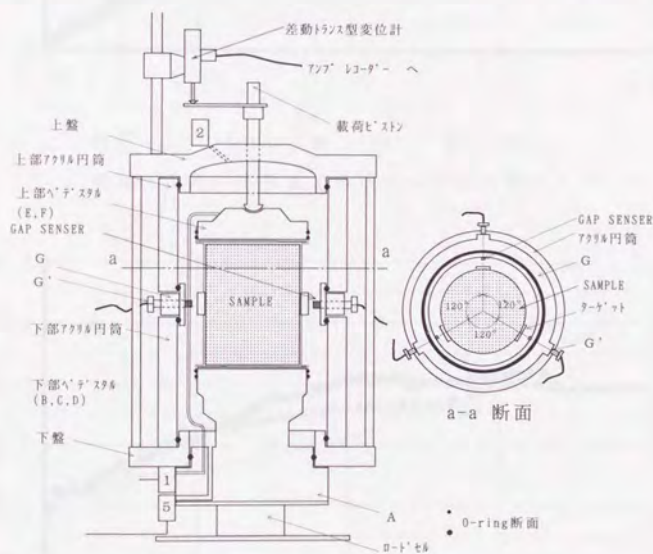


図5-13 側方変位測定用三軸室の概要図

5.2.2.2 試験結果

側圧は0.3, 0.5, 0.7×100kPaと変化させたが、応力～ひずみ関係とともにポアソン比～ひずみ関係で表し、不攪乱土についての結果を図5-14～図5-15に、攪乱土についての結果を図5-16～図5-17に示す。

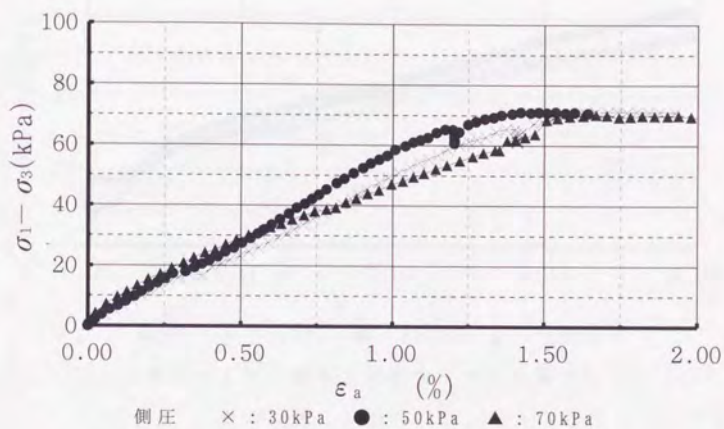


図5-14 不攪乱土の応力～ひずみ関係

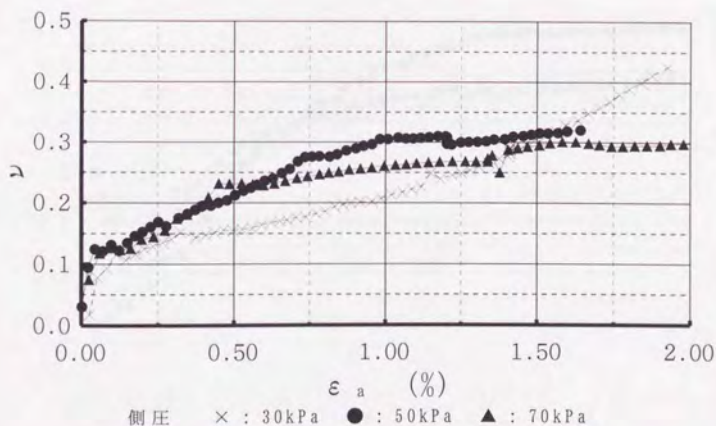
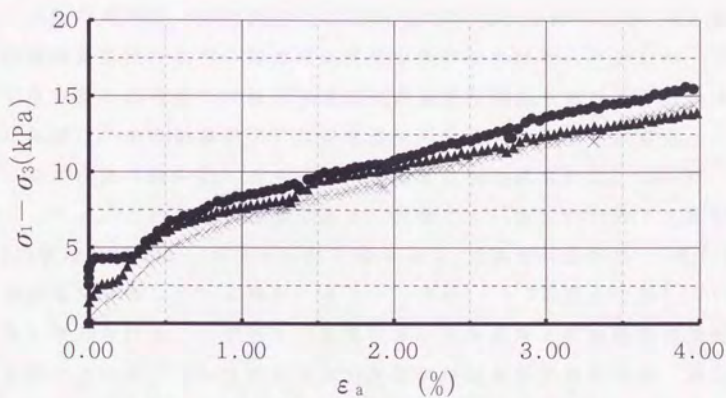
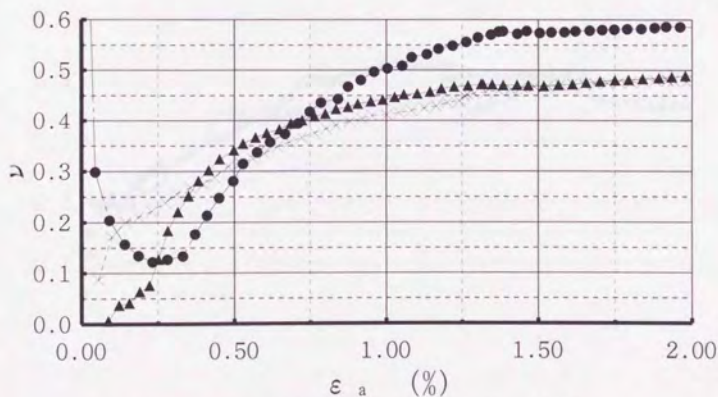


図5-15 不攪乱土のポアソン比～ひずみ比関係



側圧 × : 30kPa ● : 50kPa ▲ : 70kPa

図 5 - 1 6 攪乱土の応力～ひずみ関係



側圧 × : 30kPa ● : 50kPa ▲ : 70kPa

図 5 - 1 7 攪乱土のポアソン比～ひずみ比関係

ポアソン比は常に一定の値を示すのではなく、軸ひずみの変化に従い変化する。測定初期の範囲を除けばひずみの増加に従い、ポアソン比も増加している。

今回のポアソン比の測定では三軸室の都合上、側方変位のみ非接触型磁気変位計を用い軸方向は外部変位計を用いた。そのため、ひずみが微小な範囲では軸方向変位に器械誤差を含み軸ひずみを過大に測定し、その結果ポアソン比を過小に評価する可能性がある。

ひずみ比（図5-12）より ε_{a2} （外部変位計で測定）が0.5%の時、 ε_{a2} は ε_{a1} の約1.5倍程度である。同様に ε_{a2} が1.0%の時 ε_{a1} は約1.4倍程度である。ポアソン比 ν は $\varepsilon_r/\varepsilon_a$ で表されるため ε_a を1.5倍に過大評価している場合、ポアソン比は $1/1.5$ に過小評価していると考えられる。ひずみ比の測定で用いた供試体と非接触型磁気変位計によるポアソン比測定で用いた供試体は直径が異なるが、高さはほぼ同じであるため、器械誤差が同様に生じると仮定した場合、軸ひずみの測定誤差は同程度と考えられる。この仮定に従いポアソン比を補正すると、図5-15のポアソン比～軸ひずみ（外部変位計による測定）は図5-18の様になる。

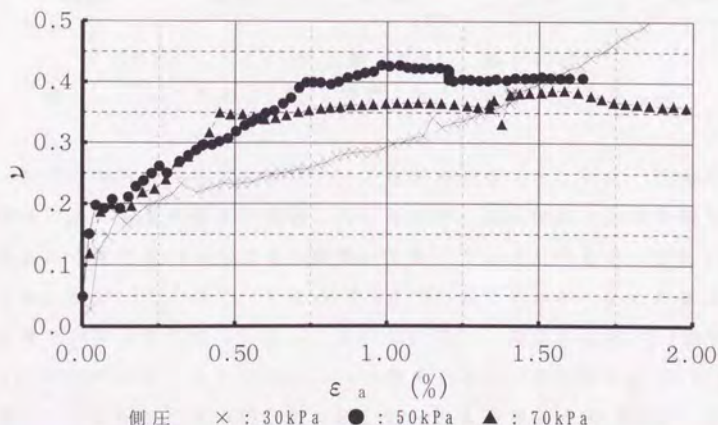


図5-18 補正後のポアソン比～ひずみ比関係

不攪乱土の場合、軸ひずみが1.0%（外部変位計で測定）前後で破壊に至っており、この範囲までのポアソン比は平均して0.3、大きくても0.4程度と考えられる。

また、ある荷重 σ_1 から σ_2 に増加した時のひずみの増分 $(\Delta\varepsilon)$ は $\Delta\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$ である。軸ひずみの増分を $\Delta\varepsilon_a$ 、側方ひずみの増分を $\Delta\varepsilon_r$ とすると、荷重が σ_1 から σ_2 に変化する間の平均的なポアソン比は $-\Delta\varepsilon_r / \Delta\varepsilon_a$ と表せる。この様に不攪乱土についてポアソン比を求めた結果を図5-19に示す。

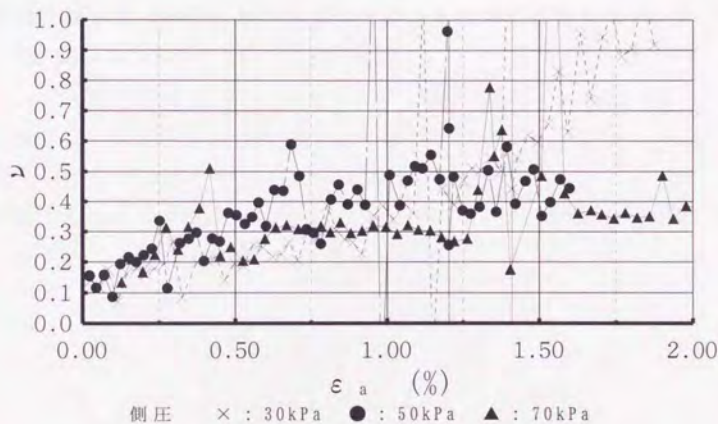


図5-19 ポアソン比（ひずみ増分の比）～ひずみ関係

ひずみの増分の比としてポアソン比を求めることにより、初期の段階で生じる器械誤差を累積しなくなるが、微小区間での測定値であるため測定値のばらつきの影響が大きくなる欠点もある（このことは、図5-19で、ポアソン比は0.5までの値であるが、0.5を越えた値が計算上得られていることより分かる）。軸ひずみが0.25%から1.0%までのポアソン比は0.2~0.4程度であり、変動幅は0.2~0.4程度と大きいものの平均的な値は図5-18の場合と同様に0.3前後と考えられる。

なお、この試験で得られたポアソン比は有限要素法による解析においてパラメータの一つとして用いるが、最大圧縮強度の七～八割程度（ひずみが0.8%前後）の場合、ポアソン比は0.35程度であるためポアソン比として0.3と0.35の二通りを用いる。

攪乱土においても同様に補正が考えられるが、軸方向の非接触型磁気変位計は三軸室上部で固定され、ターゲットのみが供試体に設置されているため、不攪乱土の場合より軸ひずみに大きな器械誤差を含んでいると考えられる。なお、ポアソン比は築堤解析の際に必要となるが、今回はダムの基礎（不攪乱土）を主な対象としているため、攪乱土（盛土）におけるポアソン比の補正は行わない。

5. 3 引張強度測定

堅い岩などの引張強度は圧縮強度の十数分の一であることが知られているが、火山灰ロームの様な粘土を用いた引張強度と伸びひずみの測定はこれまでほとんど行われていない。しかし、亀裂がどのように発生し発達するかを検討するうえで引張強度と限界伸びひずみを知ることは重要である。そこで、火山灰ロームの中空厚肉円筒試料を用いる引張試験機を作成し、引張強度、限界伸びひずみ等の測定を行う。

5.3.1 厚肉円筒供試体の作成方法

大型のトリマーとマイターボックスを使用し試料を円柱（底面の直径=115mm、高さ=143mm）に成形する。

その後図5-20に示す成形器に設置し、成形器の上部に開けた穴を通してストレートエッジで少しずつ掘り下げていく。穴が底まで貫通したらワイヤーソーにより穴を徐々に広げていく。穴の内径が約65mmになるとナイフで内部を仕上げる。（ワイヤーソーではワイヤーのたるみがあるため厚みが不均一になる。）

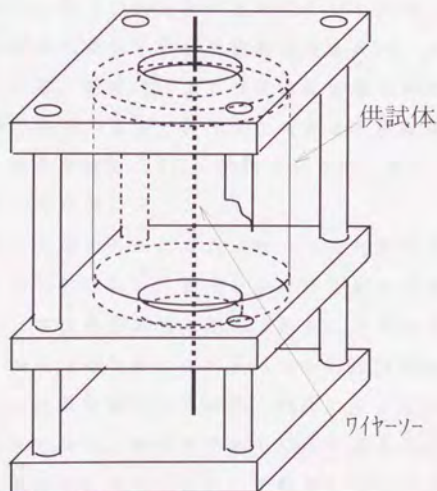


図5-20 厚肉円筒供試体成形器

5.3.2 引張試験機の概要

泥岩の試料を用いた引張弾性係数、限界伸びひずみ等の測定を仲野¹⁷⁾は行っているが、今回用いた試験機はその測定で用いたものを更に改良したものである。測定では中空厚肉円筒試料を用い、内側から水圧を加え、その時の試料の直径方向のひずみと水圧の関係から引張弾性係数等を求めている。

仲野の測定では供試体の直径の増加を円環状の側ひずみ計（側圧をかける場合）、クリップ型側ひずみ計（側圧をかけない場合）及び光センサーにより測定しているが、今回は非接触型磁気変位計（GAP SENSOR）を用いて測定を行った。

用いた試験機の概要図を図5-21示す。この試験機の主な改良点は供試体の上部及び下部にあるベDESTALと非接触型磁気変位計の設置部分である。

通常の三軸圧縮試験では圧密、セン断時の排水を下部ベDESTAL部分から行うが、今回はこの部分から試料の内側への加圧に用いた。

また三軸圧縮試験において、側方変位は体積変化から求めることが多いが、今回の試験では加圧室の上部アクリル円筒と下部アクリル円筒の間に非接触型磁気変位計の設置部分を設け、直接側方変位の測定を行っている。変位計による測定は測定個所が多ければより精度の高い結果が得られるが、変位計の大きさと供試体のセッティングのやり安さ等を考慮し、120°間隔で三ヶ所（図5-21の a-a 断面参照）に変位計を設置した。

円筒型供試体は内側と外側にゴムスリーブを密着させてあり、直接加圧水と接することはない。側圧をかけない場合は供試体の内空部のみに充水し、供試体が破壊するまで徐々に圧力を加える。側圧かける場合は、側圧（空気圧）と内圧（水圧）を同時に少しずつ一定の設定値まで上げ側圧は一定に保ち、内圧のみを供試体が破壊するまで徐々に増加させる。側圧は空気圧により加えるが、これは内圧の増加による供試体の変形（膨張）を拘束しないためである。側圧を水圧をとした場合、供試体の変形に伴う排水（側圧を加えてい

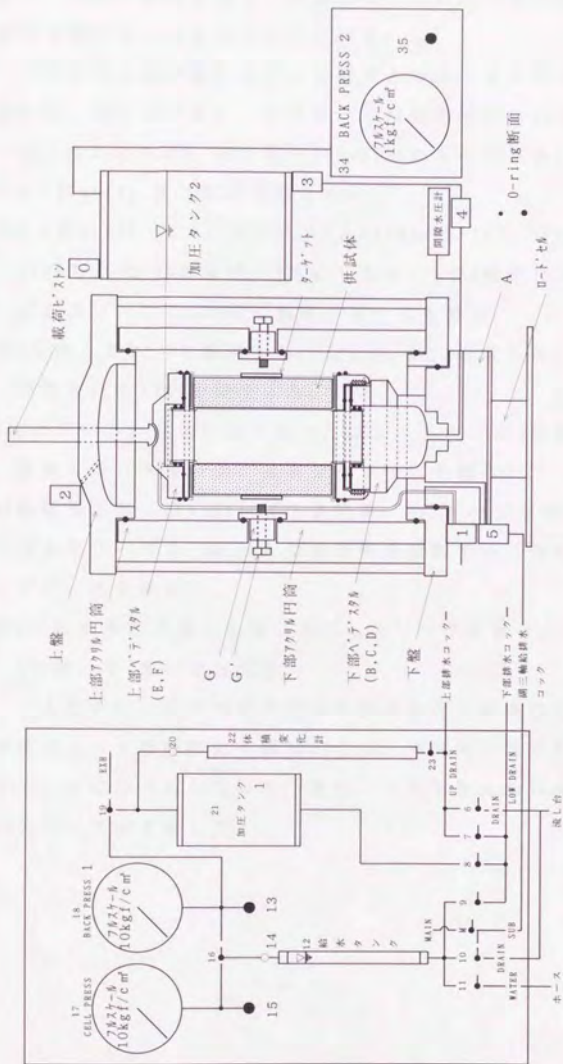


図5-21 引張試験機概要図

る水) に対し抵抗が強く、圧縮率の小さい水では実際の地盤よりも変形を許さない危険性が考えられる。

今回用いた試験機における特徴である上・下ベDESTALそれぞれ図5-22、図5-23に示し、供試体との接続方法について説明する。

(以下のB, C, D, Eは 図5-21~図5-23中のものである)

- 1) B (図5-21) を下盤に接続させる。
- 2) C (図5-22) にゴムスリーブ ($\phi=65\text{mm}$, $h=250$, $t=0.2$ or $\phi=65\text{mm}$, $h=280$, $t=0.2$) を掛け、2重にした輪ゴMで2箇所をとめる。この際、ゴムスリーブとCの間に真空グリースを塗る。
- 3) Cを挟んでBとDを接続する。(BとC、CとDの間には、真空グリースを塗ったO-ringを挟ませる。)
- 4) Dにドーナツ状に切り取ったゴムスリーブを2枚挟んで供試体を設置する(各々の間には真空グリースを塗る)。
- 5) 供試体上部(図5-23)に下部同様、Eにドーナツ状に切り取ったゴムスリーブを2枚挟んで供試体を設置する(各々の間には真空グリースを塗る)。
- 6) Eに供試体の下部から通したゴムスリーブを掛け、2重にした輪ゴMを用いて2箇所をとめる。

上記の4)、5)はベDESTALと供試体との摩擦抵抗を軽減させ、供試体上・下部の拘束を緩やかにし、供試体の変形を均等に生じさせるために行うものである。また、側圧を加えない場合は外側のゴムスリーブは省略した。

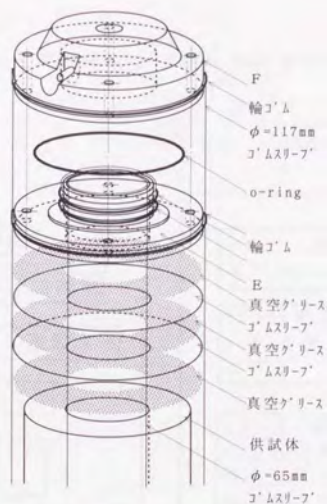


図 5 - 2 2 上部ベDESTALと供試体の接続状況

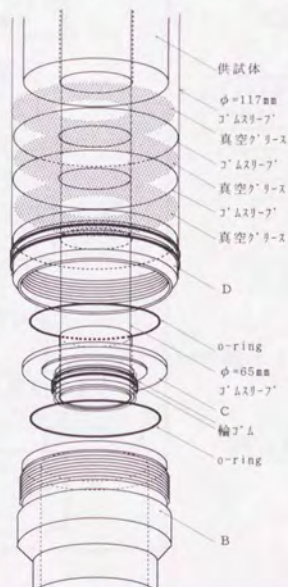


図 5 - 2 3 下部ベDESTALと供試体の接続状況

5.3.3 測定方法

引張試験の方法を流れ図として図5-24に示す。

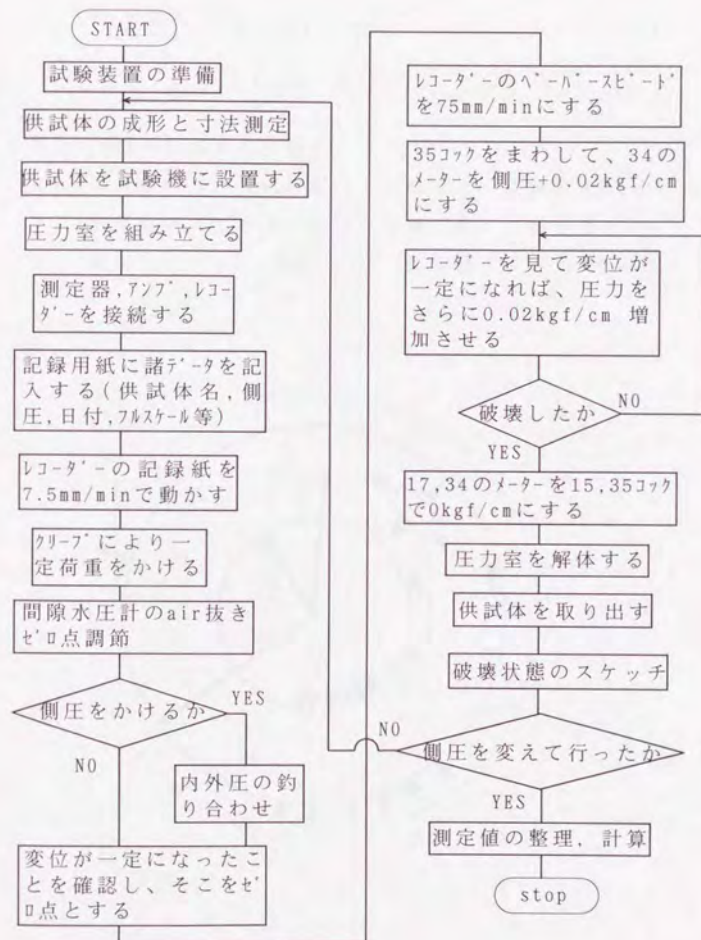


図5-24 引張試験の流れ図

5.3.4 実験結果の解析方法

微小なひずみの範囲では応力とひずみの関係はほぼ直線であり、弾性体として考えられる。そのため、伸びひずみ及び引張応力を求めるために弾性体の厚肉円筒（図5-25）に関する基本公式を用いた。

$$\sigma_r = \frac{p_i \cdot b^2 - p_o \cdot c^2}{c^2 - b^2} + \frac{p_i - p_o}{c^2 - b^2} \cdot \frac{c^2 \cdot b^2}{r^2} \quad \dots (5.1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_i \cdot b^2 - p_o \cdot c^2}{c^2 - b^2} - \frac{p_i - p_o}{c^2 - b^2} \cdot \frac{c^2 \cdot b^2}{r^2} \quad \dots (5.2)$$

ただし、図5-7に示すように

σ_θ : 接線方向 (θ 方向) 応力 (圧縮で負、引張で正)

σ_r : 半径方向 (r 方向) 応力 (圧縮で負、引張で正)

p_o : 側圧 p_i : 内圧 c : 外半径 b : 内半径

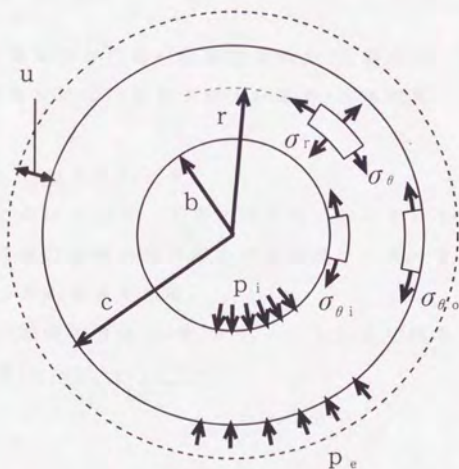


図 5 - 2 5 厚肉円筒横断面図

5.3.4.1 円筒の内・外縁の応力

1) 側圧 $p_o = 0$ のとき

$$\sigma_{\theta} = \frac{p_i \cdot b^2}{c^2 - b^2} + \frac{p_i \cdot c^2 \cdot b^2}{r^2(c^2 - b^2)} \quad \dots (5.3)$$

$$\sigma_r = \frac{p_i \cdot b^2}{c^2 - b^2} - \frac{p_i \cdot c^2 \cdot b^2}{r^2(c^2 - b^2)} \quad \dots (5.4)$$

円筒試料の外縁の応力は $r=c$ を (5.3) 式, (5.4) 式に代入して、

$$\sigma_{\theta o} = \frac{2 \cdot p_i \cdot b^2}{c^2 - b^2} \quad \dots (5.5)$$

$$\sigma_{r o} = 0 \quad \dots (5.6)$$

$\sigma_{\theta o}$: 円筒試料の外縁の接線方向応力 (圧縮で負、引張で正)

$\sigma_{r o}$: 円筒試料の外縁の半径方向応力 (圧縮で負、引張で正)

円筒試料の内縁の応力は、 $r=b$ を (5.3) 式, (5.4) 式に代入して

$$\sigma_{\theta i} = \frac{b^2 + c^2}{c^2 - b^2} \cdot p_i \quad \dots (5.7)$$

$$\sigma_{r i} = -p_i \quad \dots (5.8)$$

$\sigma_{\theta i}$: 円筒試料の内縁の接線方向応力 (圧縮で負、引張で正)

$\sigma_{r i}$: 円筒試料の内縁の半径方向応力 (圧縮で負、引張で正) となる。

2) 側圧 $p_o \neq 0$ のとき

内圧と側圧をバランスさせ円筒内に生じている応力をゼロ点とし、円筒の外縁の接線方向の応力増分は側圧 p_o を一定に保ち、内圧のみを増加させる場合である。

円筒外縁の応力は $r=c$ を (5.1) 式, (5.2) 式に代入して、

$$\sigma_{\theta o} = \frac{2 \cdot p_i \cdot b^2 - p_o \cdot (b^2 + c^2)}{c^2 - b^2} \quad \dots (5.9)$$

$$\sigma_{r o} = -p_o \quad \dots (5.10)$$

円筒内縁の応力は $r=b$ を (5.1) 式, (5.2) 式に代入して、

$$\sigma_{\theta i} = \frac{p_i \cdot (b^2 + c^2) - 2 \cdot p_o \cdot c^2}{c^2 - b^2} \quad \dots (5.11)$$

$$\sigma_{r i} = -p_i \quad \dots (5.12)$$

5.3.4.2 接線方向のおおよその弾性係数

内圧と側圧をバランス ($p_i = p_e$) させているときの応力をゼロとし、それから内圧を Δp だけ増加させた場合の応力の増分をそれぞれ $\Delta\sigma_{\theta\theta}$, $\Delta\sigma_{r\theta}$, $\Delta\sigma_{\theta r}$, $\Delta\sigma_{rr}$ とすると、 $\Delta\epsilon = \epsilon(p_i + \Delta p, p_e) - \epsilon(p_i, p_e)$ であるから外縁においては (5.5) 式, (5.6) 式及び (5.9) 式, (5.10) 式より

$$\Delta\sigma_{\theta\theta} = \frac{2 \cdot b^2 \cdot \Delta p}{c^2 - b^2} \quad \dots (5.13)$$

$$\Delta\sigma_{r\theta} = 0 \quad \dots (5.14)$$

また、内縁においては (5.7) 式, (5.8) 式及び (5.11) 式, (5.12) 式より

$$\Delta\sigma_{\theta\theta} = \frac{b^2 + c^2}{c^2 - b^2} \cdot \Delta p \quad \dots (5.15)$$

$$\Delta\sigma_{r\theta} = -\Delta p \quad \dots (5.16)$$

となる。

円筒試料外縁の接線方向の円周方向ひずみ (伸びひずみ) $\Delta\epsilon_{\theta\theta}$ は、試料の外半径 c と半径方向の変位 u (非接触型磁気変位計で測定) により次式のようになる。

$$\Delta\epsilon_{\theta\theta} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (c + u) - 2 \cdot \pi \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot c} = \frac{u}{c} \quad \dots (5.17)$$

となる。

この場合接線方向の引張に対するおおよその弾性係数 $E'_{\theta\theta}$ を円筒外縁について求めると (5.13) 式と (5.17) 式により次式のようになる。

$$E'_{\theta\theta} = \frac{\Delta\sigma_{\theta\theta}}{\Delta\epsilon_{\theta\theta}} = \frac{\frac{2 \cdot \Delta p \cdot b^2}{c^2 - b^2}}{\frac{u}{c}} = \frac{2 \cdot b^2 \cdot c}{u \cdot (c^2 - b^2)} \cdot \Delta p \quad \dots (5.18)$$

5.3.4.3 弾性係数の補正

内圧をかけることにより、円筒試料が内側から圧縮されその直径は拡大するが、同時に内圧が上部ペDESTAL を上方に押し上げるため鉛直方向応力は減少し、その結果として厚肉円筒試料の直径は縮小する。従って、以下に示すようにこれらの影響を考慮して接線方向ひずみを求めなければならない (補正を行う座標系を図 5-26 にその場合のひずみと応力の関係を (5.19) 式 ~ (5.21) 式に示す)。

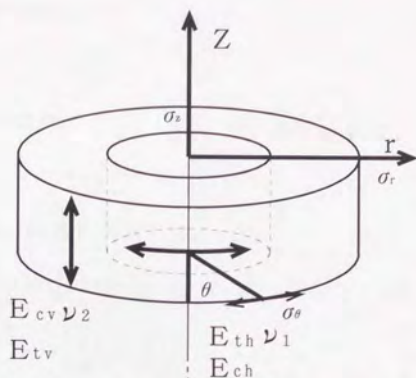


図 5-26 弾性係数の補正を考える座標系

$$\epsilon_r = \frac{\sigma_r}{E_{ch}} - \nu_2 \cdot \frac{\sigma_z}{E_{cv}} - \nu_1 \cdot \frac{\sigma_\theta}{E_{th}} \quad \dots (5.19)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E_{th}} - \nu_2 \cdot \frac{\sigma_z}{E_{cv}} - \nu_1 \cdot \frac{\sigma_r}{E_{ch}} \quad \dots (5.20)$$

$$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_{cv}} - \nu_2 \cdot \frac{\sigma_r}{E_{ch}} - \nu_1 \cdot \frac{\sigma_\theta}{E_{th}} \quad \dots (5.21)$$

ϵ_r : 円筒試料の半径方向のひずみ

ϵ_θ : 円筒試料の接線方向のひずみ

ϵ_z : 円筒試料の鉛直方向のひずみ

ν_1 : 成層面に平行方向のひずみが同方向及ぼすポアソン比

ν_2 : 成層面に鉛直方向のひずみが同方向及ぼすポアソン比

E_{ch} : 成層面に平行方向に圧縮したときの弾性係数

E_{th} : 成層面に平行方向に引っ張ったときの弾性係数

E_{cv} : 成層面に鉛直方向に圧縮したときの弾性係数

E_{tv} : 成層面に鉛直方向に引っ張ったときの弾性係数

σ_r : 半径方向応力

σ_θ : 接線方向応力

σ_z : 鉛直方向 (Z 方向) 応力

(各応力・ひずみとも引張で正、圧縮で負とする)

(5.21)式を変形すると、

$$\frac{\sigma_z}{E_{z,v}} = \varepsilon_z + \nu_2 \frac{\sigma_r}{E_{z,v}} + \nu_2 \frac{\sigma_\theta}{E_{z,v}}$$

この両辺に ν_2 をかけて

$$\nu_2 \cdot \frac{\sigma_z}{E_{z,v}} = \nu_2 \cdot \left(\varepsilon_z + \nu_2 \frac{\sigma_r}{E_{z,v}} + \nu_2 \frac{\sigma_\theta}{E_{z,v}} \right) \quad \dots (5.22)$$

(5.22)式を(5.20)式に代入して、

$$\begin{aligned} \varepsilon_\theta &= \frac{\sigma_\theta}{E_{\theta,h}} - \nu_2 \left(\varepsilon_z + \nu_2 \frac{\sigma_r}{E_{z,v}} + \nu_2 \frac{\sigma_\theta}{E_{z,v}} \right) - \nu_1 \frac{\sigma_r}{E_{\theta,h}} \\ &= \left(\frac{1}{E_{\theta,h}} - \frac{\nu_2^2}{E_{z,v}} \right) \cdot \sigma_\theta - \left(\frac{\nu_2^2}{E_{z,v}} + \frac{\nu_1}{E_{\theta,h}} \right) \cdot \sigma_r - \nu_2 \cdot \varepsilon_z \quad \dots (5.23) \end{aligned}$$

円筒の外周では $\varepsilon_\theta = \varepsilon_{\theta o}$ 、 $\sigma_\theta = \sigma_{\theta o}$ 、 $\sigma_r = \sigma_{r o}$ であるが、内圧と側圧をバランスさせてから、内圧を Δp だけ増加させた場合の $\varepsilon_{\theta o}$ の増分 $\Delta \varepsilon_{\theta o}$ は(5.23)式より

$$\Delta \varepsilon_{\theta o} = \left(\frac{1}{E_{\theta,h}} - \frac{\nu_2^2}{E_{z,v}} \right) \cdot \Delta \sigma_{\theta o} - \left(\frac{\nu_2^2}{E_{z,v}} + \frac{\nu_1}{E_{\theta,h}} \right) \cdot \Delta \sigma_{r o} - \nu_2 \cdot \Delta \varepsilon_z$$

となるが、(5.14)式より $\Delta \sigma_{r o} = 0$ であるから

$$\Delta \varepsilon_{\theta o} = \left(\frac{1}{E_{\theta,h}} - \frac{\nu_2^2}{E_{z,v}} \right) \cdot \Delta \sigma_{\theta o} - \nu_2 \cdot \Delta \varepsilon_z \quad \dots (5.24)$$

となる。また、(5.21)式より $\Delta \varepsilon_z$ は

$$\Delta \varepsilon_z = \frac{\Delta \sigma_z}{E_{z,v}} - \nu_2 \cdot \frac{\Delta \sigma_r}{E_{z,v}} - \nu_2 \cdot \frac{\Delta \sigma_\theta}{E_{z,v}}$$

これに、円筒の外周では $\Delta \sigma_{r o} = 0$ であるから

$$\Delta \varepsilon_z = \frac{\Delta \sigma_z}{E_{z,v}} - \nu_2 \frac{\Delta \sigma_{\theta o}}{E_{z,v}} \quad \dots (5.25)$$

となる。

図5-27に示す様に、内圧により供試体とベDESTALの間から水が漏れないように一定の荷重 P_v を供試体に加えた場合、供試体の鉛直応力 σ_z は

$$\sigma_z = \frac{\pi \cdot b^2 \cdot p_i - P_v}{\pi \cdot (c^2 - b^2)} \quad \dots (5.26)$$

となる。

今回の実験では P_v は70~100N(約7.0~10.0kgf)とした。内圧と側圧差は最大10kPa(約0.1kgf/cm²、約1N/cm²)程度であり、それが上部ベDESTALを持ち上げる力は $33N(=\pi \cdot 6.5^2/4 \cdot 1)$ となり、内圧の増加により上部ベDESTALが試料と離されることはない。

また、供試体の外径・内径はそれぞれ約11.5cm、6.5cmであるから、供試体の横断面積は約70.7cm²となり、試料に加わる鉛直応力は10.0~14.0kPa(0.1~0.14kgf/cm²)になる。これに対し、試料の圧縮強度は不攪乱土で約70kPa、攪乱土で約40kPaである。強度の小さい攪乱土の場合、ピストンロッドの荷重のは低めに設定し、荷重は強度に1/4以下になるようにしたため、荷重による試料の破壊は考えなくてよい。

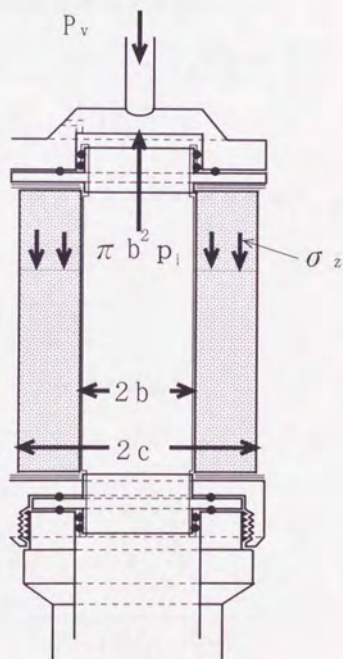


図 5-27 鉛直荷重により試料に加わる応力

内圧 p_i を $(p_i + \Delta p)$ へと増加させることによる鉛直方向応力の増分 $\Delta \sigma_z$ は $(\sigma_z(p_i + \Delta p) - \sigma_z(p_i))$ であるから (5.26) 式より

$$\Delta \sigma_z = \frac{b^2 \cdot \Delta p}{c^2 - b^2} \quad \dots (5.27)$$

となるが、(5.13) 式との比較により

$$\Delta \sigma_z = \frac{\Delta \sigma_{\theta\theta}}{2} \quad \dots (5.28)$$

これを (5.25) 式に代入すると

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_z &= \frac{\Delta \sigma_{\theta\theta}}{2 \cdot E_{cv}} - \nu_2 \frac{\Delta \sigma_{\theta\theta}}{E_{cv}} \\ &= \left(\frac{1}{2 \cdot E_{cv}} - \frac{\nu_2}{E_{cv}} \right) \cdot \Delta \sigma_{\theta\theta} \quad \dots (5.29) \end{aligned}$$

(5.29) 式を (5.24) 式に代入すると

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{\theta\theta} &= \left(\frac{1}{E_{th}} - \frac{\nu_2^2}{E_{cv}} \right) \cdot \Delta \sigma_{\theta\theta} - \nu_2 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot E_{cv}} - \frac{\nu_2}{E_{cv}} \right) \cdot \Delta \sigma_{\theta\theta} \\ &= \left(\frac{1}{E_{th}} - \frac{\nu_2}{2 \cdot E_{cv}} \right) \cdot \Delta \sigma_{\theta\theta} \quad \dots (5.30) \end{aligned}$$

接線方向の引張に側のおおよその弾性係数 E'_{th} は $\frac{\Delta \sigma_{\theta\theta}}{\Delta \varepsilon_{\theta\theta}}$ であるから、(5.30) 式より

$$E'_{th} = \frac{\Delta \sigma_{\theta\theta}}{\Delta \varepsilon_{\theta\theta}} = \frac{1}{\frac{1}{E_{th}} - \frac{\nu_2}{2 \cdot E_{cv}}} \quad \dots (5.31)$$

これを變形し E'_{th} についてまとめる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_{th}} - \frac{\nu_2}{2 \cdot E_{cv}} &= \frac{1}{E'_{th}} \\ \frac{1}{E_{th}} &= \frac{1}{E'_{th}} + \frac{\nu_2}{2 \cdot E_{cv}} = \frac{2 \cdot E_{cv} + \nu_2 \cdot E'_{th}}{2 \cdot E_{cv} \cdot E'_{th}} \\ E'_{th} &= \frac{2 \cdot E_{cv} \cdot E'_{th}}{2 \cdot E_{cv} + \nu_2 \cdot E'_{th}} = \frac{1}{1 + \frac{\nu_2}{2} \cdot \frac{E'_{th}}{E_{cv}}} \cdot E'_{th} \quad \dots (5.32) \end{aligned}$$

(5.32)式により引張側の弾性係数 E_{th} を求める。この式によると引張側の弾性係数を求める場合、圧縮弾性係数 E_{cv} が必要になる。今回の引張試験でピストンロッドに100N加えた場合の鉛直応力は約14.0kPa(圧縮)であり、内圧を加えることによる鉛直応力の減少量は最大約5kPa(=33N/70.7cm² × 10⁴Pa)までであるから、鉛直応力は約9~14kPaとなる。また、ピストンロッドへの荷重が70Nの場合には約5~10kPaの鉛直応力で、その比は0.1~0.2になる。このことと、三軸圧縮試験の結果(図5-11)から引張試験時の試料の圧縮の弾性係数は不攪乱土では約20,000~40,000kPaとなる。本試験はUU試験であり、側圧の違いによる弾性係数の変化は小さいと考えられるため、 E_{th} の算出には平均的な値である30,000kPaを E_{cv} として用いた。同様に考えると攪乱土では圧縮の弾性係数は約2,000~4,000kPaとなるため、 E_{cv} は3,000kPaとした。ポアソン比 ν_2 は測定の結果0.2~0.4となったため平均の0.3を用いた。

円筒の内周では $\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\theta 1}$ 、 $\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta 1}$ 、 $\sigma_r = \sigma_{r 1}$ であるが、内圧と側圧をバランスさせてから、内圧を Δp だけ増加させた場合の $\varepsilon_{\theta 1}$ の増分 $\Delta \varepsilon_{\theta 1}$ は(5.23)式より

$$\Delta \varepsilon_{\theta 1} = \left(\frac{1}{E_{th}} - \frac{\nu_2^2}{E_{iv}} \right) \cdot \Delta \sigma_{\theta 1} - \left(\frac{\nu_2^2}{E_{iv}} + \frac{\nu_1}{E_{th}} \right) \cdot \Delta \sigma_r - \nu_2 \cdot \Delta \varepsilon_r$$

これに(5.29)式を代入すると

$$\Delta \varepsilon_{\theta 1} = \left(\frac{1}{E_{th}} - \frac{\nu_2^2}{E_{iv}} \right) \cdot \Delta \sigma_{\theta 1} - \left(\frac{\nu_2^2}{E_{iv}} + \frac{\nu_1}{E_{th}} \right) \cdot \Delta \sigma_r - \nu_2 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot E_{cv}} - \frac{\nu_2}{E_{iv}} \right) \cdot \sigma_{\theta} \quad \dots (5.33)$$

今回の実験で試料として用いた火山灰ローム層では異方性はないとすれば、 $E_{th} = E_{iv} (= E_t)$ 、 $E_{cb} = E_{cv} (= E_c)$ 、 $\nu_1 = \nu_2 (= \nu)$ とおけ、これを(5.33)式に代入すると

$$\Delta \varepsilon_{\theta 1} = \frac{1 - \nu^2}{E_t} \cdot \Delta \sigma_{\theta 1} - \frac{\nu^2 + \nu}{E_c} \cdot \Delta \sigma_r - \left(\frac{\nu}{2 \cdot E_c} - \frac{\nu^2}{E_t} \right) \cdot \Delta \sigma_{\theta} \quad \dots (5.34)$$

となる。

5.3.5 実験結果

側圧を加え内圧とバランスさせた場合(5.9)式,(5.11)式により接線方向の全応力は圧縮となる。しかし、今回用いた試料の飽和度はほぼ100%であり、側圧と内圧をバランスさせた場合の圧縮力をほとんど間隙水圧で支えることになる。これにより内圧の増加分のみが引張強度の測定に関与していると考えられる。このことは、今回の実験で得られた中空厚肉円筒の破壊挙動が側圧に関係なく同様な破壊ひずみで破壊を起こしていることから分かる。

亀裂の発生箇所は 180° 相対するものではなく、 $120^\circ \sim 150^\circ$ のものが多かった(図5-28)が、亀裂が一カ所しか生じない供試体もあった。これは供試体の強度が必ずしも均一ではないためと考えられる。

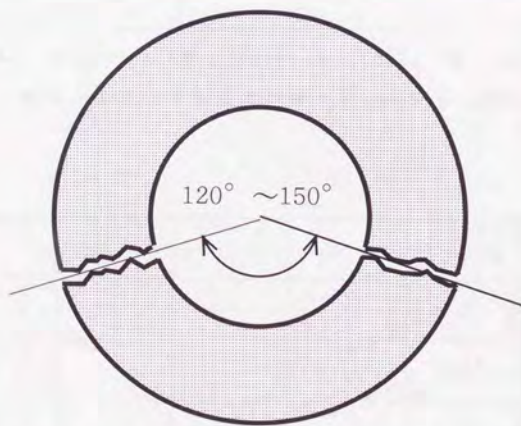


図5-28 引張破壊を起こした供試体

5.3.5.1 応力～ひずみ関係とおおよその引張弾性係数

大谷内ダム基礎地盤から採取した試料について引張実験を行った結果のうち外周の応力($\sigma_{\theta\theta}$)～ひずみ($\epsilon_{\theta\theta}$)関係、おおよその引張弾性係数($E'_{\theta\theta}$)～ひずみ($\epsilon_{\theta\theta}$)関係で示す。図5-29～5-30は不攪乱試料、図5-31～5-32は攪乱試料を用いたものである。また、各実験結果とも側圧を0, 30, 50, 70kPaとした場合について示す。

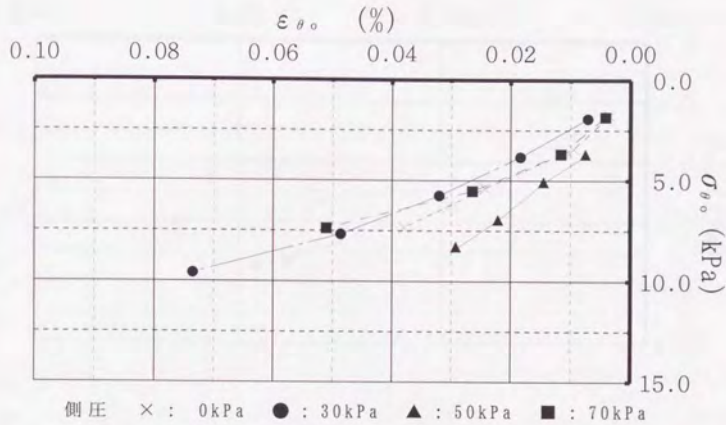


図 5 - 2 9 不攪乱土における $\sigma_{vo} \sim \epsilon_{vo}$ の関係

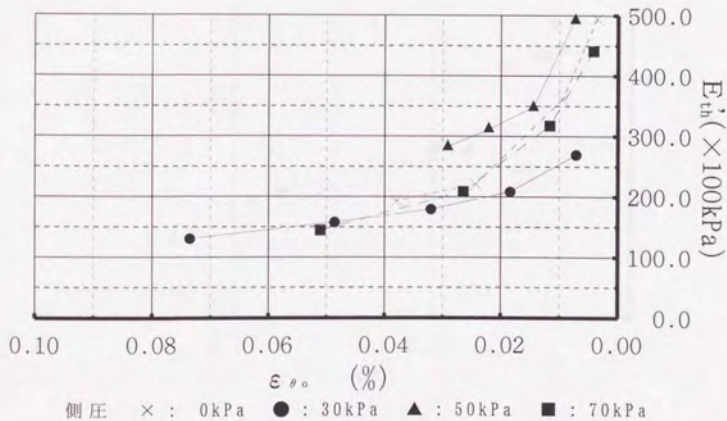
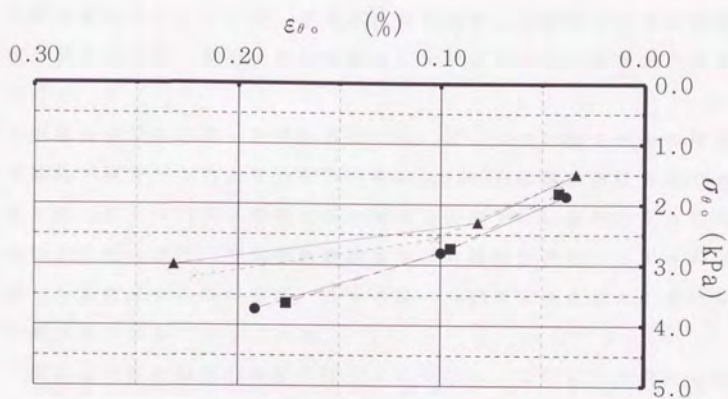
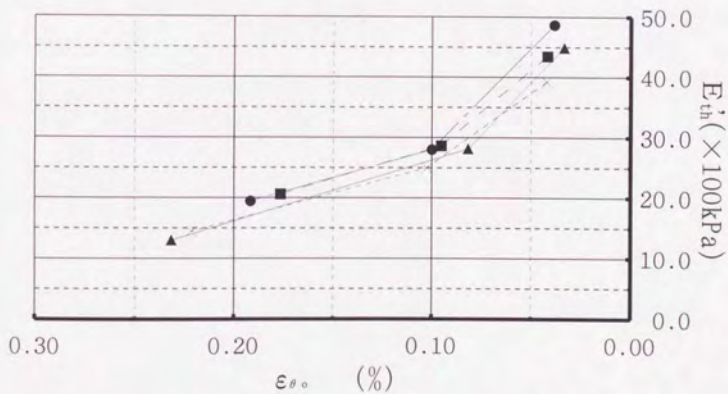


図 5 - 3 0 不攪乱土における $E_{vh} \sim \epsilon_{vo}$ の関係



側圧 × : 0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa

図 5 - 3 1 攪乱土における $\sigma_{\theta\theta} \sim \varepsilon_{\theta\theta}$ の関係



側圧 × : 0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa

図 5 - 3 2 攪乱土における $E'_{\theta\theta} \sim \varepsilon_{\theta\theta}$ の関係

応力($\sigma_{\theta\theta}$)～ひずみ($\varepsilon_{\theta\theta}$)関係、おおよその引張弾性係数(E'_{11})～ひずみ($\varepsilon_{\theta\theta}$)関係とも、不攪乱土に比べ攪乱土で側圧に関係なく同様な傾向を示している。不攪乱試料は採取した場所により多少条件が異なるため、攪乱土の実験結果に比べばらつきが大きいと考えられる。

不攪乱土での応力～ひずみ関係では、ばらつきはあるもののほぼ直線的である。おおよその引張弾性係数(E'_{11})は割線弾性係数であるため、応力～ひずみ関係が原点を通る直線でない限りひずみの増加により変化する。今回の実験結果では割線弾性係数はひずみの増加とともに減少しているが、ひずみが0.02%の前後を越えたあたりで減少率は小さくなっている。

攪乱土では各側圧の測定点は三点と少ない。これは、不攪乱土に比べ強度が弱く、内圧と側圧の差が4～6kPa程度で破壊されることと、圧力計の精度の関係上、一回の圧力操作で1～2kPa程度の制御しかできないためである。しかし、測定結果は側圧に関係なくほぼ同様な結果を示している。特に、おおよその引張弾性係数(E'_{11})～ひずみ($\varepsilon_{\theta\theta}$)関係はかなりの一致が見られる。

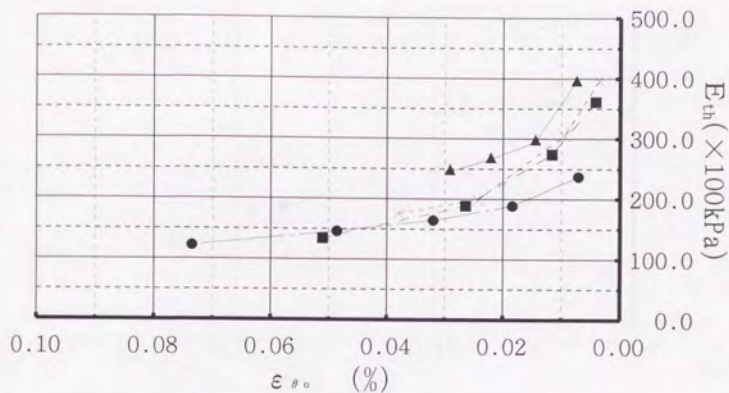
5.3.5.2 補正後の引張弾性係数

補正後の引張弾性係数(E_{1n})～ひずみ($\epsilon_{\theta\theta}$)関係と内周の接線方向ひずみ($\epsilon_{\theta 1}$)～応力($\sigma_{\theta 1}$)関係を不攪乱土については図5-33～図5-34、攪乱土については図5-35～図5-36に示す。なお、引張弾性係数は(5.32)式、内部ひずみは(5.34)式より求めているが、三軸圧縮試験結果よりポアソン比は0.3、圧縮の弾性係数は不攪乱土で300kPa、攪乱土で30kPaを用いている。これらについても、不攪乱土より攪乱土で側圧によるばらつきが少なくなっている。

応力～ひずみ関係で内周と外周の比較をしたものを不攪乱土については図5-37に、攪乱土については図5-38に示す。同様に、おおよそに引張弾性係数(E'_{1n})と補正後の引張弾性係数(E_{1n})を比較したものを不攪乱土については図5-39に、攪乱土については図5-40に示す。

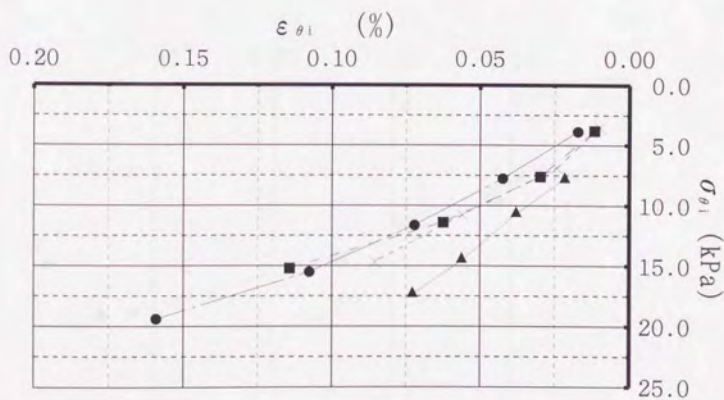
(5.13)式と(5.15)式により、内圧が増加したときの外周の接線方向応力($\sigma_{\theta\theta}$)及び内周の接線方向応力($\sigma_{\theta 1}$)が求まるが、今回用いた厚肉円筒試料の内径が約6.5cm、外径が約11.5cmであるため内圧の増加による $\sigma_{\theta\theta}$ の増分は $\sigma_{\theta 1}$ の増分のほぼ二倍になる。そのため、不攪乱土、攪乱土とも、内周のひずみの範囲が外周のひずみの範囲のほぼ二倍になっている。

補正後の引張弾性係数はおおよそその引張弾性係数に比べ小さくなっているが、ひずみとの関係は同様な傾向を示し、ひずみの増加に伴い減少している。



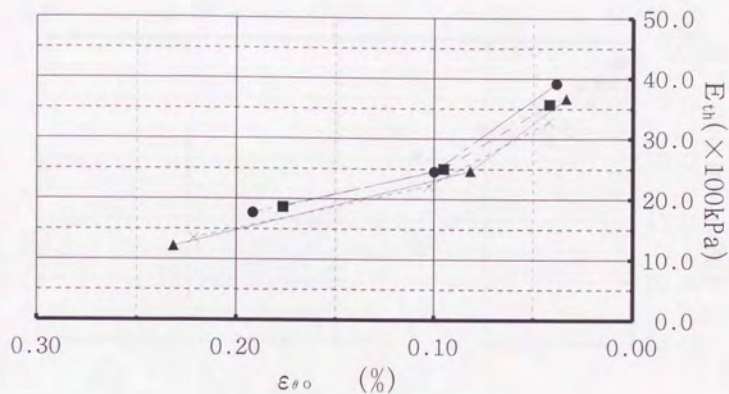
側圧 (× : 0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa)

図 5-33 不攪乱土における $E_{vh} \sim \epsilon_{\theta o}$ の関係



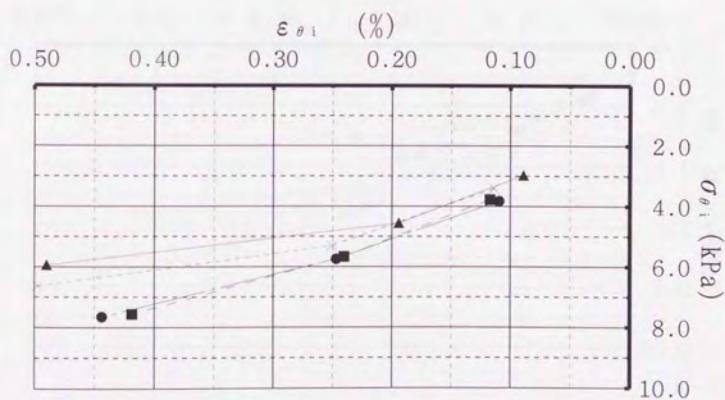
側圧 × : 0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa

図 5-34 不攪乱土における $\sigma_{\theta i} \sim \epsilon_{\theta i}$ の関係



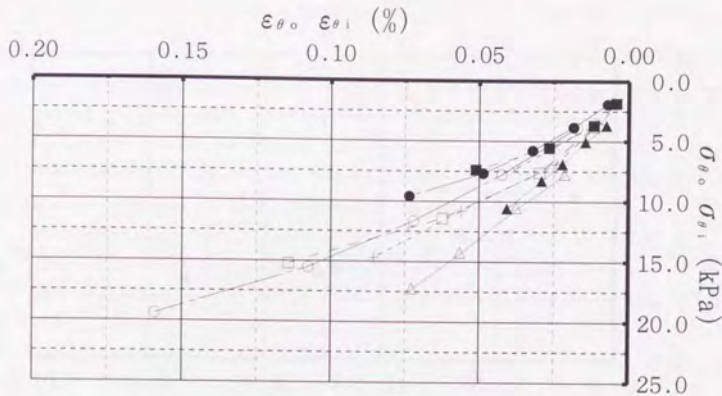
側圧 × : 0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa

図 5 - 3 5 攪乱土における $E_{th} \sim \epsilon_{\theta o}$ の関係

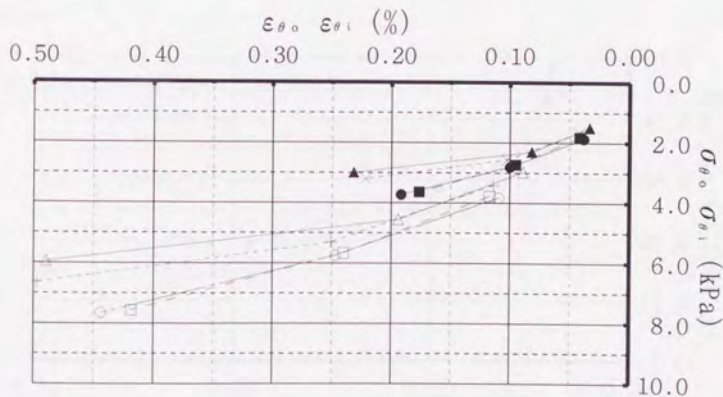


側圧 × : 0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa

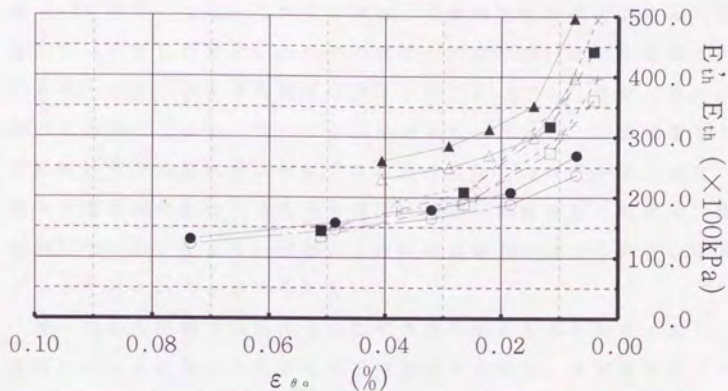
図 5 - 3 6 攪乱土における $\sigma_{\theta i} \sim \epsilon_{\theta i}$ の関係



側圧 ($\epsilon_{\theta o} \sim \sigma_{\theta o}$) \times : 0.0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa
 側圧 ($\epsilon_{\theta i} \sim \sigma_{\theta i}$) $+$: 0.0kPa ○ : 30kPa △ : 50kPa □ : 70kPa
 図 5 - 3 7 内周と外周の応力～ひずみ関係の比較 (不攪乱土)

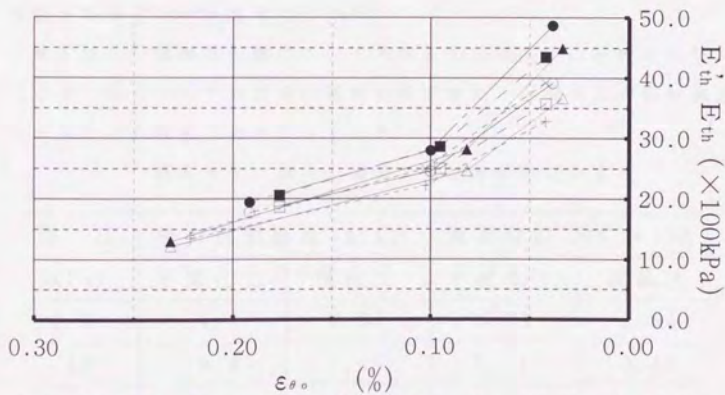


側圧 ($\epsilon_{\theta o} \sim \sigma_{\theta o}$) \times : 0.0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa
 側圧 ($\epsilon_{\theta i} \sim \sigma_{\theta i}$) $+$: 0.0kPa ○ : 30kPa △ : 50kPa □ : 70kPa
 図 5 - 3 8 内周と外周の応力～ひずみ関係の比較 (攪乱土)



側圧 (E'_{vh}) × : 0.0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa
 側圧 (E_{vh}) + : 0.0kPa ○ : 30kPa △ : 50kPa □ : 70kPa

図 5-39 不攪乱土における E'_{vh} と E_{vh} の比較



側圧 (E'_{vh}) × : 0.0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa
 側圧 (E_{vh}) + : 0.0kPa ○ : 30kPa △ : 50kPa □ : 70kPa

図 5-40 攪乱土における E'_{vh} と E_{vh} の比較

5.3.5.3 不攪乱土と攪乱土の比較

不攪乱土・攪乱土それぞれの最大引張強度及び限界伸びひずみを表5-2に示す。なお、これらの値は、非接触型磁気変位計により測定している変位が急激に増加する直前の内周における応力とひずみである。また、最大引張強度は内圧と側圧をバランスさせた後の内圧のみの増分である。そのため側圧が加わった場合、引張破壊を生じた時の厚肉円筒試料に作用する応力は圧縮となっている。また、最大引張強度の値は不攪乱土も攪乱土も側圧に関係無く同程度の値を示していることより、引張による破壊は応力ではなく伸びひずみにより左右されると考えられる。

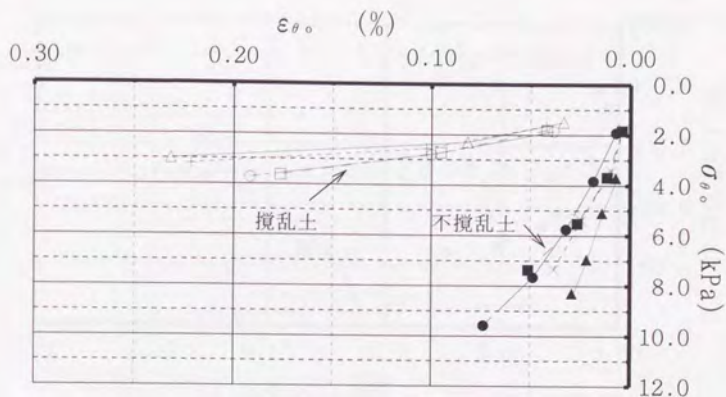
同一の応力状態では攪乱土のひずみは不攪乱土より大きくなり、破壊ひずみもはるかに大きくなる傾向が見られた。最大強度については不攪乱土が攪乱土に比べ大きく二倍以上の値となっている。これは、一般に攪乱土は不攪乱土に比べ圧縮破壊強度は小さくなり、破壊ひずみは大きくなることと同様な結果である。

不攪乱土と攪乱土の応力～ひずみ関係を、外周については図5-41に内周については図5-42に示すが、いずれの場合も同一の応力では攪乱土のひずみが大きくでている。

補正後の引張弾性係数について不攪乱土と攪乱土の比較を図5-23に示す。応力～ひずみ関係の傾向が示す様に、不攪乱土の値が攪乱土の値よりも数倍大きくなっている。

表5-2 最大引張強度及び限界伸びひずみ

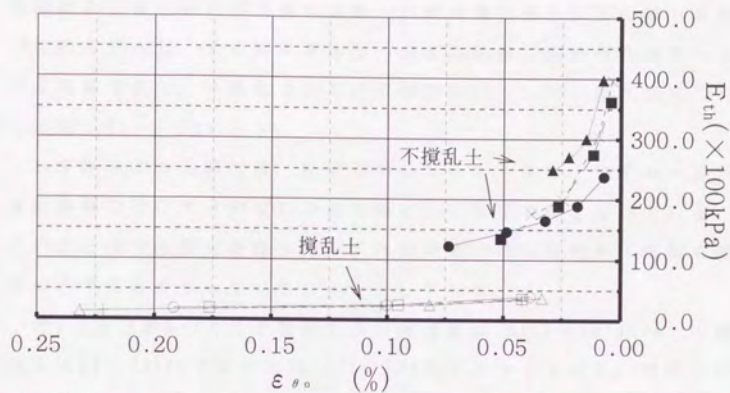
側 圧 (kPa)	最大引張強度 (kPa)		限界伸びひずみ (%)	
	不攪乱土	攪乱土	不攪乱土	攪乱土
0.0	14.7	6.64	0.09	0.50
30	19.4	7.65	0.16	0.44
50	17.1	5.94	0.08	0.49
70	15.2	7.55	0.11	0.42



側圧（不攪乱土）×：0.0kPa ●：30kPa ▲：50kPa ■：70kPa
 側圧（攪乱土）+：0.0kPa ○：30kPa △：50kPa □：70kPa
 図5-41 不攪乱土と攪乱土の比較（外周の応力～ひずみ関係）



側圧（不攪乱土）×：0.0kPa ●：30kPa ▲：50kPa ■：70kPa
 側圧（攪乱土）+：0.0kPa ○：30kPa △：50kPa □：70kPa
 図5-42 不攪乱土と攪乱土の比較（内周の応力～ひずみ関係）



側圧（不攪乱土）×：0.0kPa ●：30kPa ▲：50kPa ■：70kPa
 側圧（攪乱土）+：0.0kPa ○：30kPa △：50kPa □：70kPa

図 5-43 不攪乱土と攪乱土の比較（弾性係数～ひずみ関係）

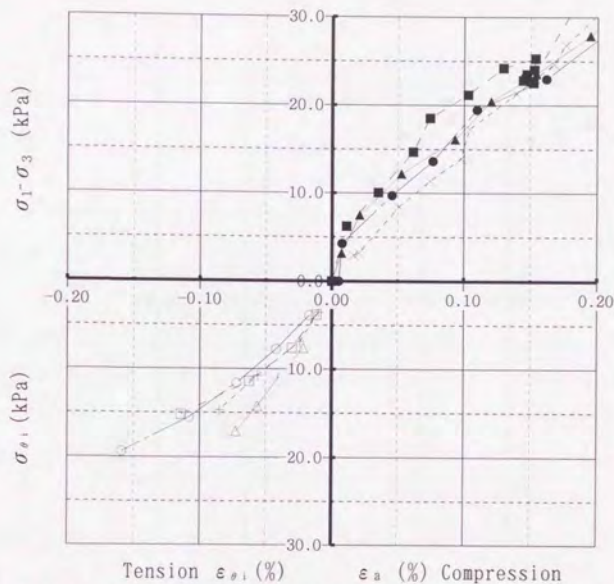
5. 4 圧縮と引張の比較

三軸圧縮試験より得られた圧縮側の応力・ひずみ量を正、中空引張試験より得られた引張側の応力・ひずみ量を負として圧縮と引張の比較を行った。その結果を応力～ひずみ関係、割線弾性係数～ひずみ関係で表し、不攪乱土については図5-29～5-30、攪乱土については図5-31～5-32に示す。

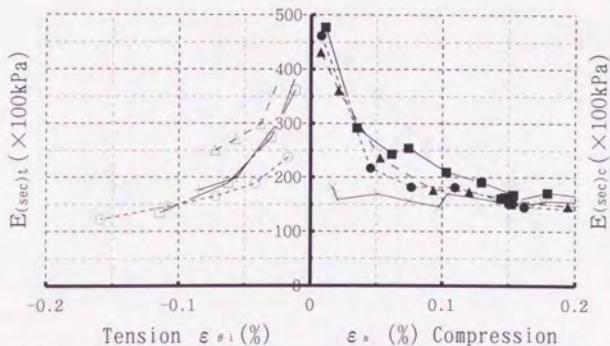
ひずみ～応力曲線では、原点を中心として、また、ひずみ～弾性係数曲線ではひずみがゼロの点を軸としてほぼ対称となっている。このことは今回測定を行ったひずみの範囲では引張側も圧縮側も同様の力学性質をもっていることを示している。

表5-1及び表5-2より不攪乱土の引張強度は14.7～19.4kPa、圧縮強度は63～72kPaでその比は1/5～1/4程度となっている。攪乱土の引張強度は5.9～7.6kPa、圧縮強度は36～55kPaでその比は1/7～1/5となる。また、不攪乱土の引張の破壊ひずみ $\epsilon_{\text{引}}$ は0.08～0.16%であり、一方、圧縮の破壊ひずみ $\epsilon_{\text{圧}}$ は0.70～0.82%でその比は1/5～1/8である。攪乱土の引張の破壊ひずみ $\epsilon_{\text{引}}$ は約0.5%であり、圧縮の破壊ひずみ $\epsilon_{\text{圧}}$ はおよそ15.0%、でその比は1/30である。コンクリートや岩石等の場合、一般に最大引張応力は最大圧縮応力の1/10～1/13、引張の破壊ひずみは圧縮破壊ひずみのおよそ1/10～1/20といわれている。これらと比較すると、不攪乱土の場合両者ともかなり大きいことがわかる。

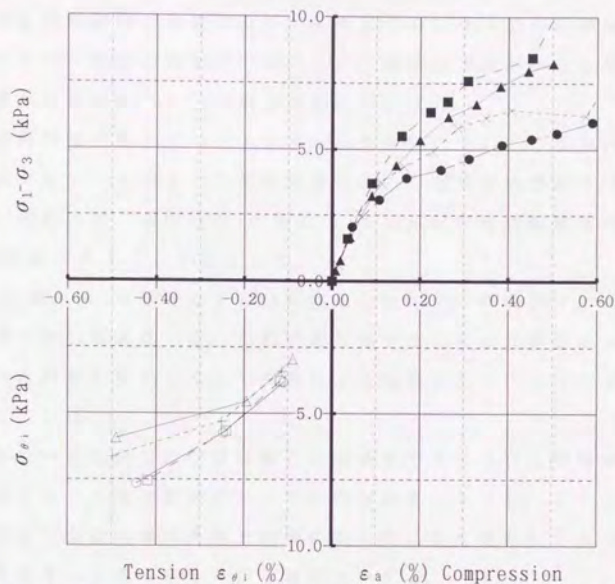
攪乱土の場合、圧縮試験の結果、最大応力・破壊ひずみが試料のひずみ硬化のため、明確に求められないのに対し、中空引張試験では、明確な破壊が生じる。これは、三軸圧縮試験が、セン断により破壊を起こすのに対し、中空引張試験は引っ張りによって破壊を起こすためと考えられる。



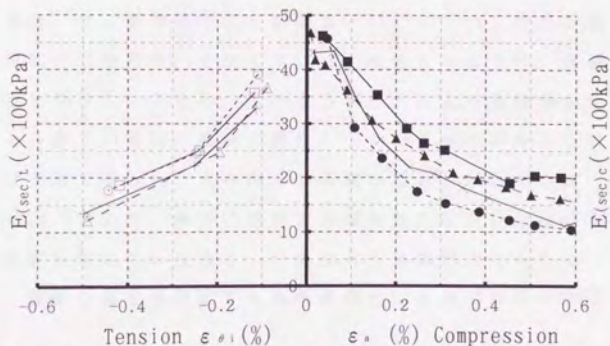
側圧 (圧縮) × : 0.0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa
 側圧 (引張) + : 0.0kPa ○ : 30kPa △ : 50kPa □ : 70kPa
 図 5 - 2 9 不攪乱土の引張と圧縮の比較 (応力～ひずみ関係)



側圧 (圧縮) × : 0.0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa
 側圧 (引張) + : 0.0kPa ○ : 30kPa △ : 50kPa □ : 70kPa
 図 5 - 3 0 不攪乱土の圧縮と引張の比較 (弾性係数～ひずみ関係)



側圧 (圧縮) × : 0.0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa
 側圧 (引張) + : 0.0kPa ○ : 30kPa △ : 50kPa □ : 70kPa
 図 5 - 3 1 攪乱土の引張と圧縮の比較 (応力～ひずみ関係)



側圧 (圧縮) × : 0.0kPa ● : 30kPa ▲ : 50kPa ■ : 70kPa
 側圧 (引張) + : 0.0kPa ○ : 30kPa △ : 50kPa □ : 70kPa
 図 5 - 3 2 攪乱土の圧縮と引張の比較 (弾性係数～ひずみ関係)

5. 5 まとめ

- 1) 三軸圧縮試験機の改良により、微小ひずみレベルでの圧縮側及び引張の力学的性質の測定を可能にした。破壊ひずみが小さな場合、特に微小ひずみレベルでの測定は重要である。
- 2) 非接触型変位計を用いた中空厚肉円筒試料についての引張試験により火山灰ロームのような軟弱な粘性土の引張強度の測定を可能にした。その結果、基礎部分(不攪乱土)の引張強度は圧縮強度の $1/5 \sim 1/4$ 程度であることが分かった。
- 3) 盛土(攪乱土)の破壊ひずみは不攪乱土に比べ、引張側で5~8倍、圧縮側で約30倍となった。これは繰り返すことにより脆性から延性材料へと顕著に変化し圧縮や引張による亀裂が生じにくくなることを示している。
- 4) 今回用いた試料では引張試験と圧縮試験で求められる割線弾性係数はひずみの小さな範囲において同様な結果となった。このことは圧縮側と引張側の弾性係数を同様に扱えることを意味しており、有限要素法等による解析上有益な結果といえる。
- 5) 大谷内ダムでは盛土により基礎地盤には単純計算して46~77kPaの応力が作用すると考えられるが、不攪乱土の圧縮強度は約63~72kPaしかなく、この盛土荷重による応力は、盛土直下の基礎地盤を考えた場合、セン断亀裂が入り始めるといわれている限界荷重(最大圧縮強度の七割程度)を超えている。前述したように、基礎地盤は過圧密を受けているため、このような応力により基礎地盤中には、破壊により多くの箇所へ亀裂が発生している可能性が考えられる。
- 6) 今回の実験で得られた大谷内ダム基礎の限界伸びひずみは $\epsilon_{0.1} = 0.08 \sim 0.16\%$ であり、築堤の過程で基礎地盤内に生じる伸びひずみはその範囲を越えている場合、引張による亀裂が考えられる。これにより、亀裂の発生を推定する判断基準となる伸びひずみが得られた。

第6章 浸透流による漏水量の算定

6. 1 概説

大谷内ダムでは試験湛水時に堤体下流側法尻部下の基礎部分で多くの漏水（漏水の急増は貯水位がEL.653.5m以上）が観察されているが、この漏水が浸透流（土粒子間の微視的な流れ）によるものであるか否かを検討するために有限要素法による浸透解析を行う。次に、解析により得られた結果と現場の漏水測定点で計測した実測値との比較を行い漏水の原因となる流れについて検討する。

6. 2 室内透水試験

解析に必要な透水係数は現場で採取した基礎及び盛土の試料を用いて定水位透水試験により求めた。

6.2.1 試験方法

実際の堤体内部では土は深さに応じて異なる応力を受け必ずしも同一条件ではないと考えられた。そこで、その状態を再現する意味でも、また水頭差による変化を確かめる上で三軸試験機により側圧をかけながらの定水位透水試験を行った。この試験ではバックプレッシャーにより水頭差をつくり、一定時間内に上部排水口から排水される水量より流量を求めた。水頭差は1.00~5.00mの間を0.50mおきに、側圧4.9~196.0kPaの間で行った。

供試体にはバックホーにより基礎地盤に掘った試験溝より一辺が20~40cmの直方体試料を採取し、鉛直・水平の方向を確認したのち直径5cm、高さ10cm程度の円柱に成形したものをを用いた。なお、試料の飽和度は95%前後であり完全には飽和していなかった。

6.2.2 試験結果

透水試験の結果を表6-1に示す。盛土、基礎ともその透水係数は方向性、側圧、水位に関係なく試料によりばらつきをみせ、異方性も確認できなかった。通常フィルダムの不透水性ゾーンにはその透

水係数が 10^{-6} (cm/s)以下のものがものが用いられることを考慮すると、基礎の値は比較的大きいと思われる。

表 6-1 透水試験結果

	盛 土	基 礎
透水係数	2.0×10^{-8}	1.77×10^{-5}
(cm/s)	4.1×10^{-6}	8.6×10^{-6}

6. 3 浸透解析

6.3.1 基礎方程式

ダルシーの法則に従い堤体中（鉛直の二次元(x-y)断面で考える）に浸透流が生じていると仮定すると、堤体中の任意の点(x,y)の浸透流速(v_x, v_y)は次式で表される。

$$v_x = -k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \quad v_y = -k_y \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \quad \dots (6.1)$$

k_x : x方向の透水係数、 k_y : y方向の透水係数、H: 水頭
浸透流を仮定している堤体中に湧水（又は吸い込み）が無いならば連続の式より

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad \dots (6.2)$$

(6.1)式を(6.2)式に代入すると、次式の良く知られた支配方程式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0 \quad \dots (6.3)$$

この式にガラーキン法を適用すると

$$\int_V [N]^T \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right) \cdot dV = 0 \quad \dots (6.4)$$

[N]は基底関数、Vは積分領域（三次元）である。ここで、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \cdot (k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x}) \right) = \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \cdot k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + [N]^T \cdot \frac{\partial}{\partial x} (k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x}) \quad \dots (6.5)$$

であるから、

$$[N]^T \cdot \frac{\partial}{\partial x} (k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x}) = \frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \cdot (k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x}) \right) - \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \cdot k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \quad \dots (6.6)$$

となり、

$$\int_V [N]^T \cdot \frac{\partial}{\partial x} (k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x}) dV = \int_V \frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \cdot (k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x}) \right) dV - \int_V \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \cdot k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x} dV \quad \dots (6.7)$$

となる。ガウスの積分定理を右辺第一項に適用すると

$$\int_V \frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \cdot k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right) dV = \int_S [N]^T \cdot k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \cdot l_x \cdot dS \quad \dots (6.8)$$

同様に

$$\int_V \frac{\partial}{\partial y} \left([N]^T \cdot k_y \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \right) dV = \int_S [N]^T \cdot k_y \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \cdot l_y \cdot dS \quad \dots (6.9)$$

となるから(6.4)式は

$$\int_S [N]^T \cdot (k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x} l_x + k_y \cdot \frac{\partial H}{\partial y} l_y) dS - \int_V \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \cdot k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \cdot k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \right) dV = 0 \quad \dots (6.10)$$

と変形できる。ここで、今回の解析は二次元であるため(6.10)式の体積積分を面積分、面積分を線積分へと置き換えることができるため $dV = t \cdot dA$ (体積積分から面積分) および $dS = t \cdot dL$ (面積分から線積分) と書ける。なお、 t は要素の厚さであるが以後 t とする。(6.10)

式の面積分は境界の流速 $\frac{\partial H}{\partial n}$ で書き表せる。ここに、 n は表面で外向きの法線を示す。すると、(6.10)式は次式となる。

$$\int_L [N]^T \cdot k \cdot \frac{\partial H}{\partial n} dL - \int_A \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \cdot k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \cdot k_y \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \right) dA = 0 \quad \dots (6.11)$$

(6.11)式の第一項の k は境界面での透水係数であり、 k_x と k_y により表される。

解析は(6.11)式に基づき、要素には一次のアイソパラメトリック要素を用いた。

6.3.2 解析方法

室内透水試験により得られた透水係数を用いて、堤体基礎における浸透量を二次元の有限要素法により求めた。解析の範囲は第Ⅱブロック(第3章の図3-2参照)であり、No.11~14の地点を通る4つの鉛直断面(図6-1)を用い、各断面間の距離より断面幅(No.11、No.14は30m、No.12、No.13は20mとした)を考慮して最終的な第Ⅱブロックの漏水量とした。

基礎に比べ盛土の透水係数が小さいこと、盛土中のオープンピエゾメーターに全く水位が認められなかったことにより解析を単純化し、図6-1のメッシュで示す基礎部分のみに浸透流が生じているものとした。境界条件として、上流側は貯水位EL.=653.5mの場合を想定したポテンシャルを与え、下流側は漏水測定点でポテンシャルをゼロとした。この法先ドレーン施工区間(長さ100m)における各断面の位置は図6-2に示す。また、基礎の透水係数は実験結果より僅かに大きい値を用い 2.0×10^{-5} cm/sとした。

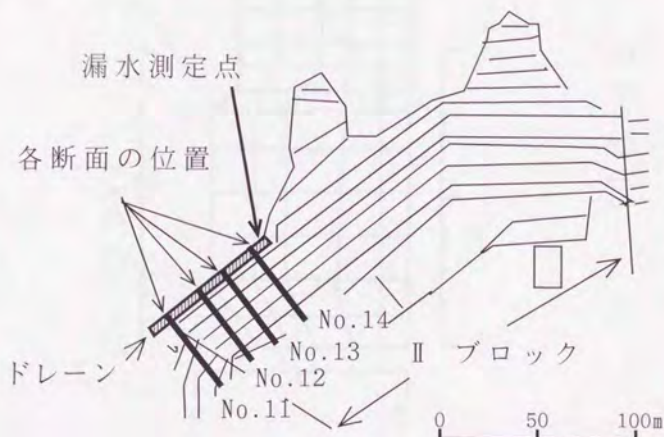


図6-1 解析に用いた断面の位置

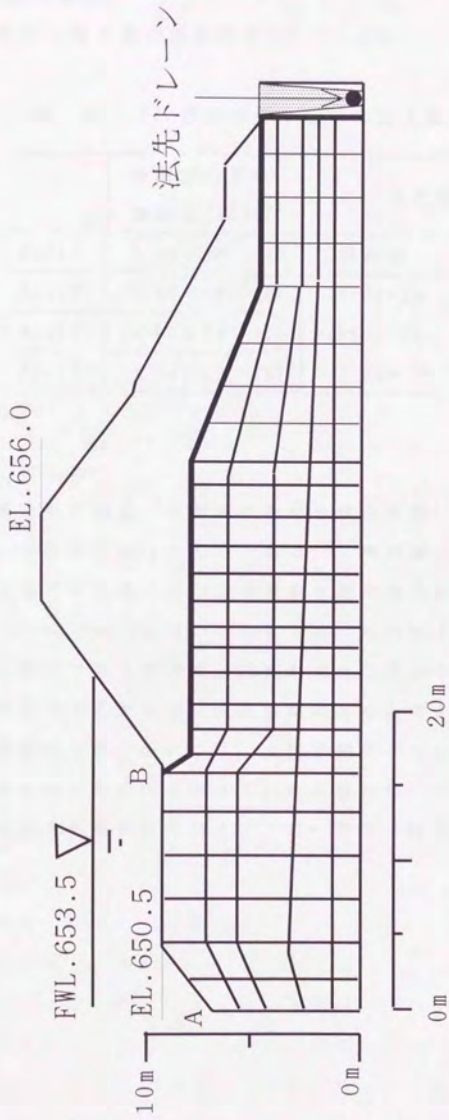


図 6 - 2 浸透解析メッシュ図

6.3.3 解析結果

解析結果と漏水量の実測値を表6-2に示す。

表 6 - 2 浸透解析の結果と漏水量の実測値

	各断面の単位 幅流量 (m^3/s)	漏水量 (m^3/s)	
		解析値	実測値
No.11	3.09×10^{-7} (A)	解析値	実測値
No.12	2.67×10^{-7} (B)	(A+D) · 30	1.67×10^{-5}
No.13	4.80×10^{-7} (C)	+ (B+C) · 20	
No.14	3.03×10^{-7} (D)	= 3.32×10^{-5}	

6.4 まとめ

漏水量の解析値は、各断面における浸透流量（単位幅）に断面幅を乗じ、その和をとったものであるが、解析値と実測値では2オーダーのひらきがある。仮に透水係数を測定値の中で最も大きな値である $2.3 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ を用いたとしても、解析による漏水量は $3.6 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ 程度であり実測値とはまだ大きな差がある。この原因は、解析の前提であるダルシー流の仮定にあると考えられる。つまり、実際の基礎中の水の流れには、土粒子間のダルシー流以外の流れが存在し漏水の主な原因となっていると思われ、その原因としては基礎中に存在する亀裂間のパイプフロー的な（巨視的な）流れが考えられる。

第7章 亀裂の発生・発達に関する解析的検討

7. 1 概説

現場実験ではオーガー孔を水圧で破壊させることにより亀裂を生じさせ、水理破碎へと発達させることができた。しかし、実際のダムで作用する水圧の作用方向は堤体の表面が均一な平面であればそれに対し垂直であり、実験と同様な現象は考えにくく、水理破碎の発生したダムでは、何らかの原因で生じていた亀裂が拡大・発達したものと推定される。

大谷内ダムの漏水は堤体及び基礎中の浸透流では説明できないことが浸透解析により明らかになり、堤体中に亀裂間の巨視的な流れが考えられる。また、大谷内ダムでは試験湛水時に堤体下流側法尻部下の基礎部分で漏水が観察されたため、築堤時に漏水の原因となる亀裂が基礎に発生したものと考えられた。そこで本章では、築堤過程における破壊域の発生状況、貯水時の水圧と土圧の関係等を調べるために有限要素法による築堤解析を行い、基礎及び堤体材料の力学的性質の測定で得た判断基準との比較により水理破碎発生の推定を行うとともに漏水原因についても検討する。

7. 2 解析方法

大谷内ダムでは試験湛水時に貯水位が EL. 653.5m 付近で漏水量が急増したことより、築堤過程において基礎に生じた亀裂が原因となり水理破碎へと発達したものと推定される。また、盛土は練り返えされており、基礎に比べ破壊されるまでのひずみが大きくなることが三軸試験により確かめられているため、亀裂は盛土より基礎に生じやすいと考えられる。さらに、築堤は図7-3に示すように一部先行して施工されており、この区間の基礎部分に破壊の限界を越えた荷重が作用し、亀裂の発生した可能性が考えられた。このことを考慮して有限要素法による非線形築堤解析を行った。

7.2.1 基礎方程式

基礎方程式は応力とひずみを関係づけるフックの法則とひずみ～変位関係式より導かれる。

フックの法則は一般に

$$\{\sigma\}=[D]\{\varepsilon\}-[D]\{\varepsilon_0\} \quad \dots(7.1)$$

で表される。なお $\{\sigma\}$:応力成分、 $[D]$:弾性定数、 $\{\varepsilon\}$:ひずみ成分、 $\{\varepsilon_0\}$:初期ひずみ成分を表すマトリクスである。要素内の変位成分、形状関数、接点変位を表すマトリクスをそれぞれ $\{u\}$ 、 $[N]$ 、 $\{U\}$ とすると、これらの関係は一般に

$$\{u\}=[N]\{U\} \quad \dots(7.2)$$

で表される。

ひずみ～変位の関係式は

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \end{aligned} \quad \dots(7.3)$$

であり、 u, v, w は x, y, z 軸方向の変位成分である。この式によりひずみベクトル $\{\varepsilon\}$ は接点変位 $\{U\}$ により表され、その関係の一般式は

$$\{\varepsilon\}=[B]\{U\} \quad \dots(7.4)$$

である。ここで、 $[B]$ は $[N]$ を適切に微分して導かれる。

一つの要素のひずみエネルギー Λ は次のように書ける。

$$\Lambda = \int_V \frac{1}{2} (\{U\}^T [B]^T [D] [B] \{U\} - 2 \{U\}^T [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} + \{\varepsilon_0\}^T [D] \{\varepsilon_0\}) dV \quad \dots(7.5)$$

作用荷重の仕事としては、集中荷重のなす仕事 W_c 、外表面に作用する応力成分のなす仕事 W_s 、及び物体力のなす仕事 W_b がある。

接点力を $\{P\}$ とすると W_c は次のマトリクス積である。

$$W_c = \{U\}^T \{P\} = \{P\}^T \{U\} \quad \dots(7.6)$$

表面に作用する分布荷重のなす仕事は

$$W_s = \int_S (u \cdot p_x + v \cdot p_y + w \cdot p_z) dS \quad \dots(7.7)$$

ここで、 u, v, w は変位成分 p_x, p_y, p_z は x, y, z 軸方向に平行な応力成分

である。変位成分は接点変位で表される (7.2) 式) ことより (7.7) 式は $\{p\}^T = [p_x \ p_y \ p_z]$ とすると

$$W_p = \int_s \{U\}^T [N]^T \{p\} dS \quad \dots (7.8)$$

となる。

物体力 x, y, z 軸方向の物体力をそれぞれ f_x, f_y, f_z とする。

$$W_v = \int_v (u \cdot f_x + v \cdot f_y + w \cdot f_z) dV \quad \dots (7.9)$$

となるが W_p と同様に接点変位で表すことができ、 $\{f\}^T = [f_x \ f_y \ f_z]$ と書くと

$$W_v = \int_v \{U\}^T [N]^T \{f\} dV \quad \dots (7.10)$$

と書き直せる。

全ポテンシャルエネルギー Π は各要素のポテンシャルエネルギーの和で表され、(7.5), (7.6), (7.8), (7.10) 式を組み合わせることにより次式ようになる。

$$\Pi = \sum_{e=1}^E [\Lambda^{(e)} - W_e^{(e)} - W_p^{(e)} - W_v^{(e)}] \quad \dots (7.11)$$

Π を最小にするため (7.11) 式を $\{U\}$ で微分し 0 と置くと、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi}{\partial \{U\}} = \sum_{e=1}^E \left[\int_v ([B]^T [D] [B]) dV \{U\} - \int_v [B]^T [D] \{\epsilon_0\} dV \right. \\ \left. - \int_v [N]^T \{f\} dV - \int_s [N]^T \{p\} dS \right] - \{P\} = 0 \quad \dots (7.12) \end{aligned}$$

となる。ここで剛性マトリクス $[K]$ 、及び全体外力ベクトル $\{F\}$ を以下のように定義する。

$$[K] = \sum_{e=1}^E \left[\int_v [B]^T [D] [B] dV \right] (e) \quad \dots (7.13)$$

$$\{F\} = \sum_{e=1}^E \left[- \int_v [B]^T [D] \{\epsilon_0\} dV - \int_v [N]^T \{f\} dV - \int_s [N]^T \{p\} dS - \{P\} \right] (e) \quad \dots (7.14)$$

全体剛性マトリクス、外力ベクトル、変位ベクトルの関係式は

$$[K]\{U\}=\{F\} \quad \dots(7.15)$$

となる⁴⁶⁾。

7.2.2 解析手法

7.2.2.1 非線形解析手法

土・岩盤などの材料は著しい非線形性を示す。この非線形性に寄与する要因は種々存在するが、それらの内特に水圧的応力（三軸試験では側圧）が応力～ひずみ関係に大きく影響している。

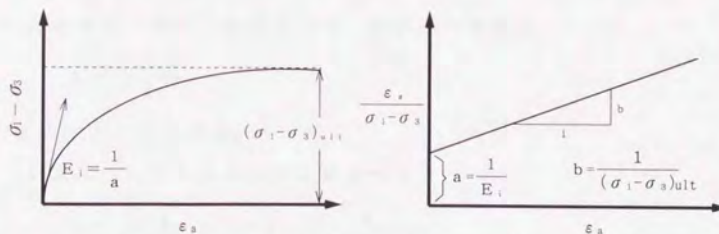
土などの応力～ひずみ関係は、Kondner⁴⁶⁾が提案しているように双曲線（(7.16)式）でよく近似できる（図7-1(a)）。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_s}{a + b \cdot \varepsilon_s} \quad \dots(7.16)$$

(7.16)式を次のように変形することにより、直線関係（図7-1(b)）が得られる。

$$\frac{\varepsilon_s}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b \cdot \varepsilon_s \quad \dots(7.17)$$

実験結果より得た値を用いて(7.15)式の左辺を従属変数、 ε_s を独立変数として回帰を行うことによりa, bの値を求めることができる。



a) 応力～ひずみ関係の双曲線表示

b) $\frac{\varepsilon_s}{\sigma_1 - \sigma_3}$ と ε_s の関係

図7-1 応力～ひずみ関係の双曲線近似

双曲線の漸近線の値 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ と実験により求められる破壊時の主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_t$ の関係は次式ようになる。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_t = R_t (\sigma_1 - \sigma_3)_{s1}, \quad \dots (7.18)$$

ここに R_t は破壊比と呼ばれ双曲線近似の度合いを表す。この値は一般に1より小さい値であるが、1に近いほど応力～ひずみ関係が双曲線により近似されていることを示している。

土などの材料において、応力～ひずみ関係は、側圧の影響を受け、この場合接線弾性係数 (tangent modulus) の初期値 (ひずみがゼロに近づいた際の接線弾性係数) は、次式のように表せることが実験的に明らかにされている^{47), 48)}。

$$E_t = K \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad \dots (7.19)$$

ここに、 K , n : 実験から決められる定数

p_a : 大気圧

σ_3 : 側圧

圧縮強度と側圧の関係は、モール・クーロンの破壊規準から、次式のように表すことができる。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_t = \frac{2c \cdot \cos \phi + 2\sigma_3 \cdot \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad \dots (7.20)$$

ここに、 c : 粘着力

ϕ : 内部摩擦角

σ_3 の値を一定にした条件では、接線弾性係数を

$$E_t = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon}$$

と表すことができる。

(1)式について上式のように微分を行うと、

$$E_t = \frac{d}{d\varepsilon_s} \left(\frac{\varepsilon_s}{a + b \cdot \varepsilon_s} \right) = \frac{a}{(a + b \cdot \varepsilon_s)^2}$$

が得られ、この式に

$$a = \frac{1}{E_t}, \quad b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{s1}} = \frac{R_t}{(\sigma_1 - \sigma_3)_t}$$

を代入することにより次式を得る。

$$E_1 = \frac{\frac{1}{E_1}}{\left[\frac{1}{E_1} + \frac{R_1 \cdot \varepsilon_a}{(\sigma_1 - \sigma_3)_1} \right]^2} \quad \dots (7.21)$$

(7.21)式にはひずみが含まれているが、土のような材料からなる構造物の解析では、一般にひずみより応力を用いた方が便利であるから(7.16)式より ε_a をもとめ(7.21)式に代入してひずみを消去すると次式で表される。

$$E_1 = \left[1 - \frac{R_1(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos \phi + 2\sigma_3 \cdot \sin \phi} \right]^2 \cdot K \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad \dots (7.22)$$

ポアソン比も同様に非線形に変化するため、三軸試験における体積変化から接線ポアソン比を求める必要がある。

体積ひずみを ε_v 、軸方向ひずみを ε_a とすれば、半径方向ひずみ ε_r は、 $\varepsilon_r = (\varepsilon_v - \varepsilon_a) / 2$ として求められる。

ε_r と ε_a との間の関係は、双曲線近似により(7.23)式のように表される。

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_r}{f + D \cdot \varepsilon_r}$$

これを變形して

$$\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a} = f + D \cdot \varepsilon_r \quad \dots (7.23)$$

ここで f は $\varepsilon_a = 0$ のときの初期ポアソン比 ν_1 である。

接線ポアソン比 ν_1 は

$$\nu_1 = - \frac{d\varepsilon_r}{d\varepsilon_a}$$

また、これを變形して、

$$\frac{1}{\nu_1} = - \frac{d\varepsilon_a}{d\varepsilon_r} \quad \dots (7.24)$$

(7.23)式より、 $\varepsilon_a = \varepsilon_r / (f + D \cdot \varepsilon_r)$ であるから

$$\frac{1}{\nu_1} = - \frac{d\varepsilon_a}{d\varepsilon_r} = - \frac{f}{(f + D \cdot \varepsilon_r)^2} \quad \dots (7.25)$$

(7.23), (7.25)式より

$$v_1 = -\frac{(f+D \cdot \epsilon_s)^2}{f} = -\frac{f}{(1-D \cdot \epsilon_s)^2}$$

$$= \frac{G-F \cdot \log(\sigma_3/P_s)}{\left[1 - \frac{D(\sigma_1-\sigma_3)}{K \cdot P_s \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_s} \right)^n \left[1 - \frac{R_1(\sigma_1-\sigma_3)(1-\sin\phi)}{2\cos\phi+2\sigma_3\sin\phi} \right]} \right]^2} \quad \dots (7.26)$$

(7.22), (7.26)式は Duncan^{(42), (50), (51)}等により求められたものである。

7.2.2.2 築堤解析手法

フィルダムのように順次築造されていく構造物については、築堤の過程を考慮した解析を行う必要があることが理論的に明らかにされている⁽⁵²⁾。

築堤過程を考慮せず、構造物が形状的に完成したとみなし、その後重力が瞬間的に作用したとする解析を行った場合、変位はダムの頂部で最大となる。築堤過程を荷重増分的に追って解析すると、変位は堤頂と基礎の中間部付近で最大となり、頂部、底部では小さくなる。この様な変形のパターンは築堤過程を考慮しない場合とは著しく異なっている。フィルダムにおける変位の測定結果も堤頂と基礎の中間部で最大となっている。従って、変位・応力を解析で正確に得ようとする場合には、築堤過程を考慮する必要がある。

実際のフィルダムの築造において積み上げられる層数は莫大なものであるが、築堤解析においてはできるだけ少ない層数でシミュレートしたい。このためには、Clough, Woodward⁽⁵³⁾が提案している方法を採用する。この方法は、新しく積み上げられる層の弾性係数に1より非常に小さい数字を乗じ、新しく積まれる層と前に積まれた層との間に生じるせん断力を減らすものである。また、同時に新しく積まれた層の頂部における変位は除去するようにする。この方法はほとんど無限に近い層の積み上げを、有限の層数でシミュレートする場合に極めて有効である。

7.2.3 解析条件

難透水性粘土質火山灰ローム層の築堤直後の状態は非圧密非排水(UU)状態と仮定してよい。従って、基礎地盤を含む築堤解析は非圧密非排水(UU)条件下で行った三軸試験の結果を用いて行う。ただし、解析の範囲は基礎部分では深さ方向に20m程度の幅があるため、基礎の上部と下部では圧密の程度が異なる。従って、密度が多少異なることが考えられ、上部と下部で同一深さの試料によるUU試験の結果を適用するのは不相当と思われる。そこで、上部で掘削した試掘溝から採取した試料に対し下方深部でのより大きな拘束圧条件下での状態を再現するために、側圧をいくつか変え圧密非排水(CU)試験を行いその結果を用いて解析を行った(これは、基礎深部における不攪乱土試料は採取できないためである)。

CU試験の結果から、各深部の自然状態での地盤強度を得るために以下の方法をとった。解析の過程で基礎の初期土圧を求めた後に、各要素の最小主応力とCU試験による破壊規準線から、その最小主応力での最大強度を求めその1/2を粘着力とした。図7-2に示すように、ある要素の初期水平土圧が σ_{3-1} の場合、破壊規準線は一定値 C_1 となり、以後のその要素では築堤による計算において粘着力 $=C_1$ 、 $\phi=0$ を用いる。この計算は築堤解析のプログラム内で行うため、データの入力ではCU試験により求めた C と ϕ を用いる。

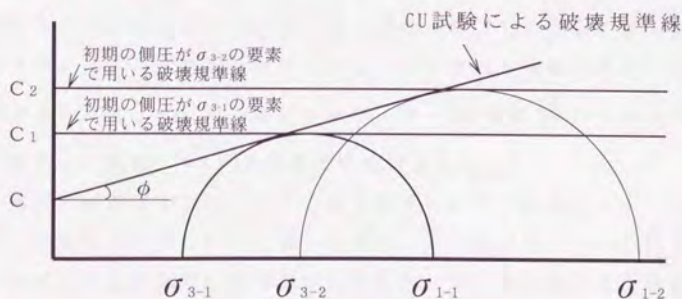


図7-2 初期土圧に対応する破壊規準線の算定

弾性係数に関するパラメーターを求めた結果を表7-1に示す。今回の漏水原因は基礎にあると考えられたため、計算を簡略して盛土に関しては弾性係数を一定として E_{s0} を使い、これにより盛土における n, R_f は 0 とした。ポアソン比については試験結果のばらつきが大きく Duncan 等の提案した式の非線形性の仮定に従わないため一定とし、三軸試験の結果より 0.3 と 0.35 の二通りを考えた。また、初期土圧係数 K_0 は現場実験により得られた値 1.0 を使い、基礎の材質は入手できる試料の関係により火山灰ローム層のみと仮定した。

表 7-1 築堤解析に用いたパラメーター

	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (度)	単位体積重量 (kN/m ³)
基礎	2.5	14.0	12.6
盛土	2.0	0.0	15.5

	K	n	R_f	G	F	D
基礎	378.44	0.387	0.92	0.3		
盛土	30.00			0.3		

水理破碎に関する亀裂の発達は堤体を横断する方向であるから、亀裂に作用する水圧に抵抗する土圧は堤体の縦断方向の水平応力と考えられる。従って、かさ上げ部の新堤（盛土）の中心を通る縦断面を用いた二次元解析を行うこととし、平面応力状態を仮定した。境界条件は図 7-3 に示す区間の両サイド（AC 及び BD）の水平方向を固定し、底部（CD）の鉛直方向を固定した。

解析の範囲は I ブロックの一部と II ブロックの範囲とした。築堤は一部先行されて行われた部分があり、その過程を図 7-3 に示す。層に付された番号順に築堤が行われたが、①、③の層は他の層に先行して築堤された。解析に用いたメッシュ図を図 7-4 に示す。

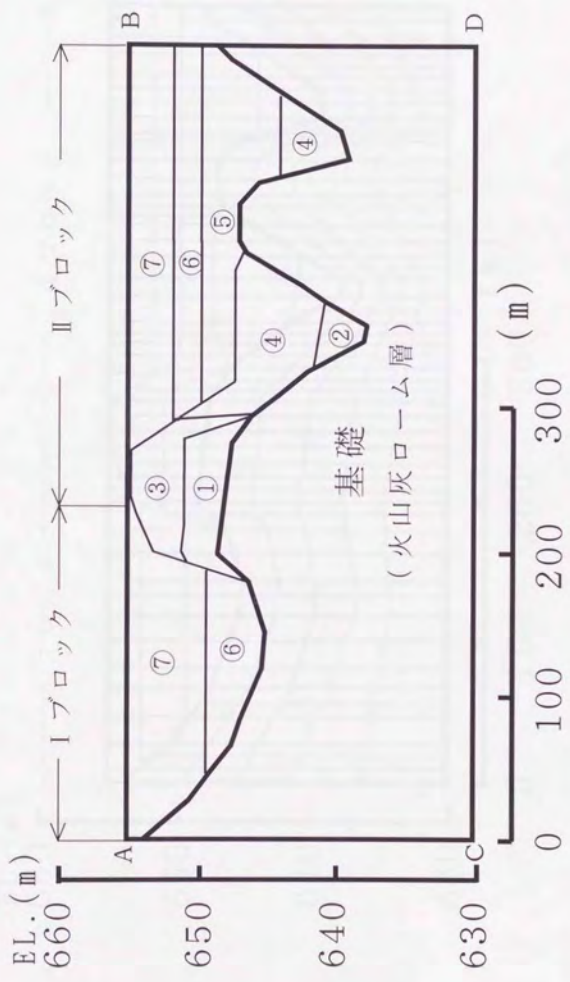


図7-3 堤体の築堤過程 (番号は築堤順序を示す)

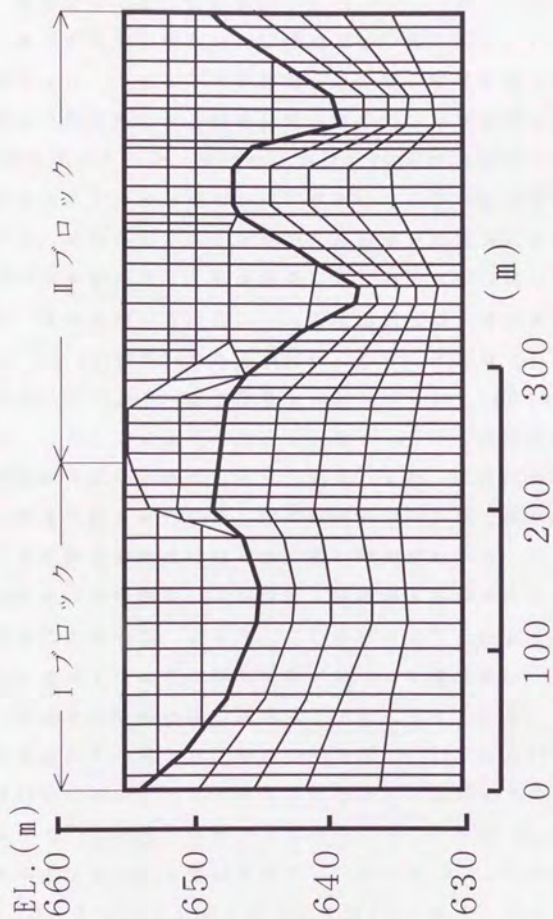


図7-4 築堤解析メッシュ図

7. 3 解析結果

水理破碎の原因となる亀裂が基礎に発生する危険性を調べるために、偏差応力と最大圧縮強度の比 $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3)_i$ 、伸びひずみ、水平土圧の三点について検討する。特に図7-3に示す①、③の築堤により、その直下の基礎部分に破壊の限界を越えた伸びひずみ（厚肉円筒試料による引張試験の結果では破壊伸びひずみは0.08～0.16%であったため、伸びひずみが0.15%程度あれば伸びによる破壊は生じ始めていると思われる）が生じている可能性が考えられる。これは、先行してかさ上げされた基礎部分は両側に谷部があるため、側方の拘束が少なく、築堤荷重により側方へ伸び易いからである。また、基礎地盤の火山灰ロームの圧縮強度は三軸試験の結果 $q_u = 0.8 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^2 \text{ kPa}$ であるの対し、かさ上げ高はブロックIIでは8m程度行われており、盛土荷重 $\gamma_s \cdot H = 15.5 \times 8 = 1.24 \times 10^2 \text{ kPa}$ の方が大きい。このことにより、先行した盛土の直下では圧縮破壊による亀裂が多数生じた可能性も考えられる。また、基礎は透水係数が 10^{-6} cm/s 程度の難透水性の粘土性の火山灰ローム層であり、ダルシー流による浸潤面の形成には非常に長い時間がかかる。そのため亀裂が貯水開始以前に発生していれば、試験湛水時の水圧はまず、亀裂面に垂直に作用する。従って、この水圧が水平土圧よりも大きければ、先行した盛土により生じた亀裂が拡大し水理破碎へと発達することは、現場水理破碎試験の結果より十分に考えられる。

引張試験の結果より、伸びひずみが0.15%程度あれば伸びによる破壊は生じ始めていると考えられるため、③層までの築堤で伸びひずみが0.15%を越える部分と築堤完了後に貯水位 EL.653.5mの水圧が水平土圧を上回る部分をポアソン比 ν を0.3とした場合について図7-5に、0.35とした場合について図7-6に示す。また、三軸試験の結果より、偏差応力と最大圧縮強度の比が0.7～0.8に達すると破壊による亀裂面が発生し始めると考えられるため、偏差応力と最大圧縮強度の比が0.8を越える部分と水圧が水平土圧を上回る部分について、図7-7 ($\nu = 0.3$)、図7-8 ($\nu = 0.35$) に示す。

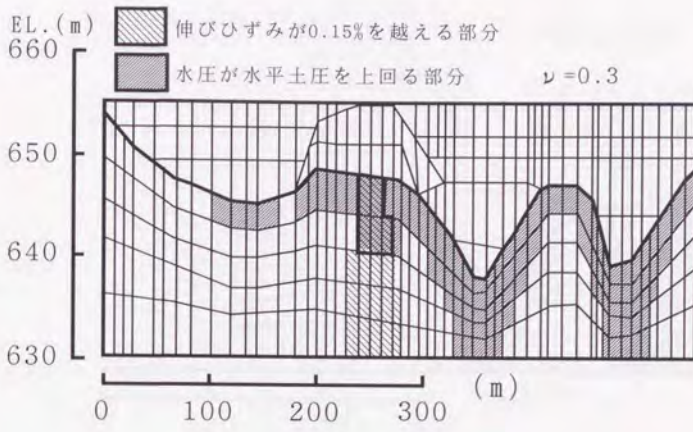


図 7-5 伸びひずみが0.15%を越える部分と
水圧が水平土圧を上回る部分 ($\nu=0.3$)

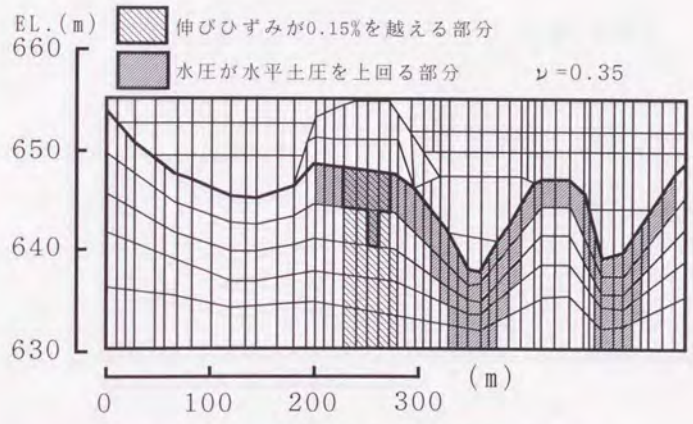


図 7-6 伸びひずみが0.15%を越える部分と
水圧が水平土圧を上回る部分 ($\nu=0.35$)

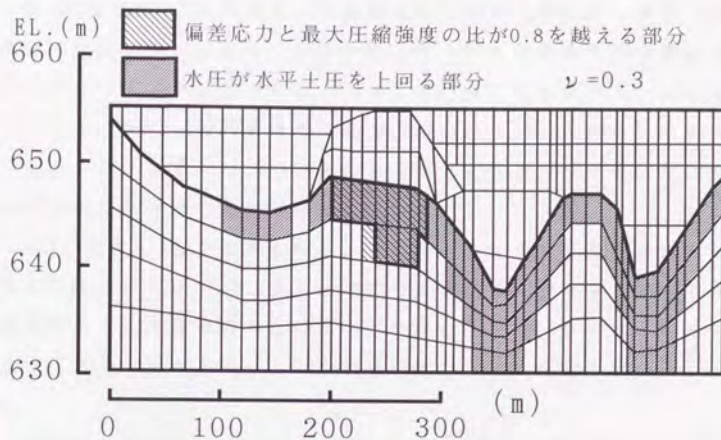


図 7-7 偏差応力と最大圧縮強度の比が0.8を越える部分と
水圧が水平土圧を上回る部分 ($\nu=0.3$)

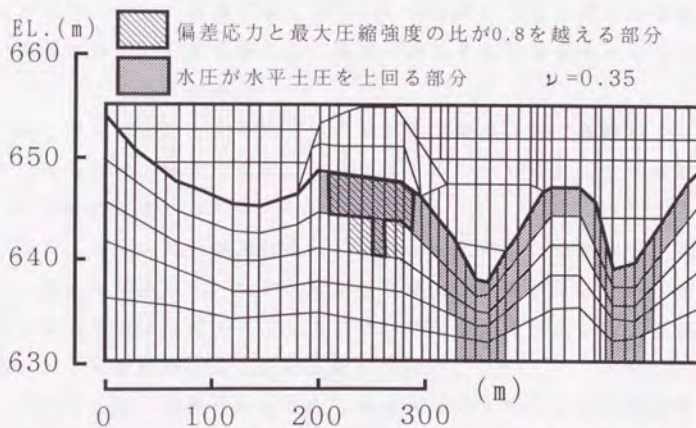


図 7-8 偏差応力と最大圧縮強度の比が0.8を越える部分と
水圧が水平土圧を上回る部分 ($\nu=0.35$)

図7-5及び図7-6よりポアソン比が大きくなるに従い同一荷重でも側方の土圧が大きくなり、①層の直下で水圧が土圧を上回る範囲は小さくなっていることが分かる。ひずみに関してはポアソン比が大きくなるに従い 0.15%を越える範囲は広がっているが、いずれにしても、伸びひずみが 0.15%を越える部分と水圧が水平土圧を上回る部分の重なり合う範囲が存在している。

図7-7と図7-8を比較するとポアソン比が小さい場合で偏差応力と最大圧縮強度の比が 0.8を上回る部分が僅かに大きくなっているが、両者の場合とも偏差応力と最大圧縮強度の比が 0.8を上回る部分と水圧が水平土圧を上回っている部分の重なり合う範囲が存在している。

伸びひずみが 0.15%以上でかつ偏差応力と最大圧縮強度の比が 0.8以上の部分もあるが、この範囲では限界荷重を越えた盛土が原因となり、伸びによる破壊が生じ鉛直方向に亀裂が生じている可能性が高い。さらにこの部分で水圧が水平土圧を上回っている範囲（図7-9及び図7-10の中央部、太枠内）もあり、亀裂が拡大発達する危険性がある。また、基礎表面（図6-2の AB区間）では多数の乾燥亀裂が観測されており貯水圧により亀裂が発達する初期条件の一つとなっていると考えられる。

以上のことより、大谷内ダムの漏水は、築堤過程で基礎部分に発生した亀裂を、急速な水位の上昇による水圧が発達させた水理破砕によるものと推定される。

このことは、地盤の強度に比して過大な盛土あるいは地震等の原因で、堤体や基礎にセン断または引張等による亀裂が生じていた場合、貯水圧が亀裂部分の土圧より大きければ亀裂を押し広げ内部侵食を促進する可能性があることを示唆している。

このことは、地盤の強度に比して過大な盛土あるいは大地震等の原因で、堤体や基礎にセン断または引張等による亀裂が生じていた場合、貯水圧が亀裂部分の土圧より大きければ亀裂を押し広げ内部侵食を促進する可能性があることを示唆している。

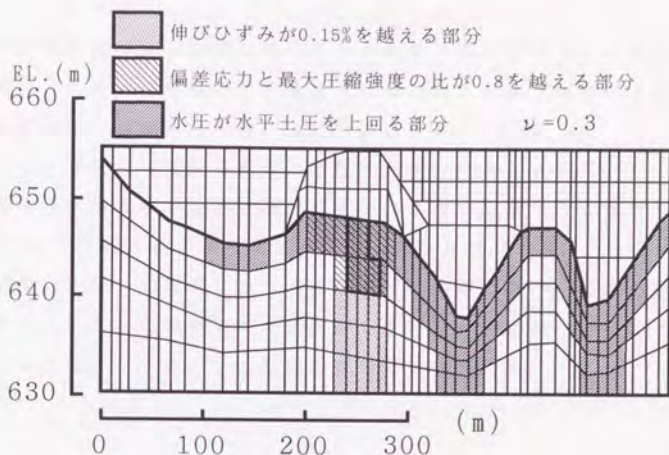


図7-9 築堤により生じた亀裂が水圧により押し拡げられる可能性のある範囲 ($\nu=0.3$)

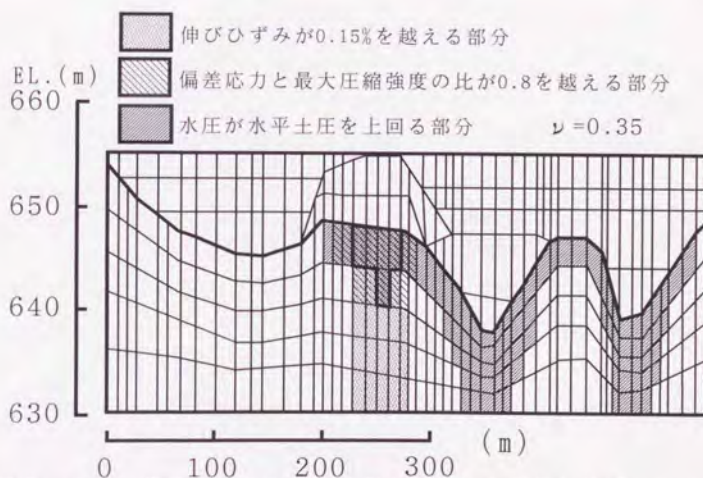


図7-10 築堤により生じた亀裂が水圧により押し拡げられる可能性のある範囲 ($\nu=0.35$)

7. 4 まとめ

- 1.有限要素法による築堤解析を行った結果、築堤が先行した直下の基礎部分において破壊の限界を越える伸びひずみ及び偏差応力と最大圧縮強度の比が八割を越える部分が広範囲に生じていた。このことにより築堤時に亀裂の生じた可能性が十分に考えられる。
- 2.築堤完成後の水平土圧を築堤解析により求めた結果、貯水位がEL. 653.5mでの貯水圧が水平土圧を上回る部分が存在した。
- 3.上記1.及び2.の両者に該当する部分が基礎部にあり、乾燥亀裂や築堤により生じた亀裂を貯水圧が押し広げながら発達させることによる水理破砕が大谷内ダムの漏水原因と推定される。

第 8 章 漏水対策とその効果

8. 1 ブランケットの追加施工

大谷内ダムでは平成五年度に漏水への対策として、解析により水理破砕の生じる可能性の高い部分を含む範囲に対し粘土によるブランケットを追加施工した（その位置は 図 8-1 に示す、基礎地盤内にオープンピエゾメーターを設置し地下水位を測定しているが、ブランケット施工範囲内における設置位置も、図 8-1 に示す）。

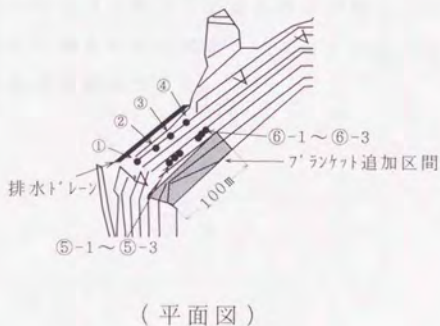
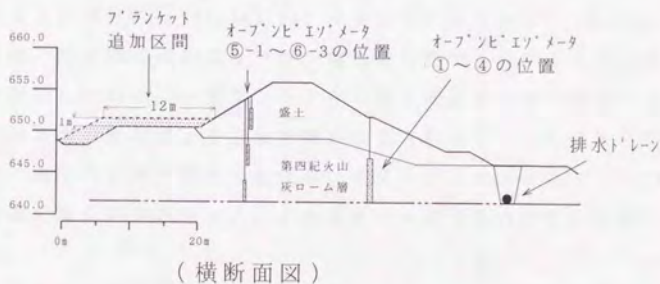


図 8-1 追加ブランケット施工区間

ブランケットの材質は盛土と同質であり、その厚さは1m程度である。なお、その施工範囲は水理破砕を生じる危険性のある部分より

も大きく、図 7-7で示す破壊域と貯水圧が水平土圧を上回る範囲の重なりあう部分とほぼ等しくなっている。これは安全側を考慮した結果であり、妥当な大きさと考えられる。

8. 2 対策工の効果

平成四年度における試験湛水時の貯水計画を図 8-2に、ブランクセット施工前後での漏水量（単位時間当たりの流量）と貯水位の関係を図 8-3に、オープンピエゾメーターの水位（図 8-1の③と④）と貯水位の関係を図 8-4に示す。

ブランクセット施工前の試験湛水は平成四年 5 月 6 日に始まり、5 月 15 日で F.W.L. (EL. 653.5m) に達している（図 8-2、図 8-3）。その後、貯水位の増加はないが、漏水量は急増し 6 月 21 日に最大値を記録している。一方ブランクセット施工後はある幅で変動するだけで貯水位の変化による急激な増加は見られなくなった（図 8-3）。また、施工の前後で同貯水位におけるオープンピエゾメーターの水位も低くなりブランクセットによる遮水が有効であったことを示している。

貯水位と漏水量及びオープンピエゾメーター水位との関係を見る限り今回行ったブランクセットによる効果が極めて明瞭に現れている。

以上のことは漏水の推定が正しいことを示しており、今回行った推定法の有効性を確認できた。

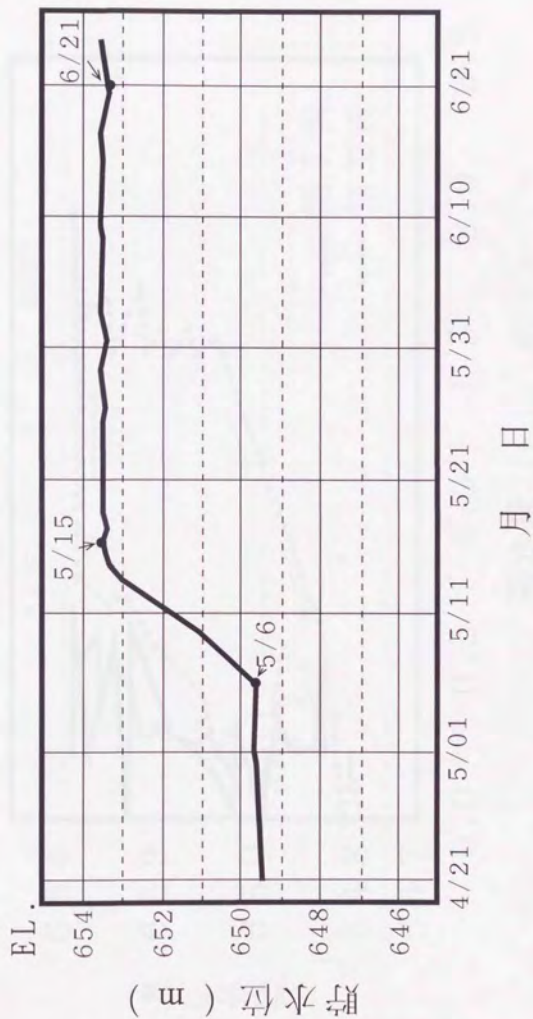


図 8 - 2 試験湛水時の貯水計画

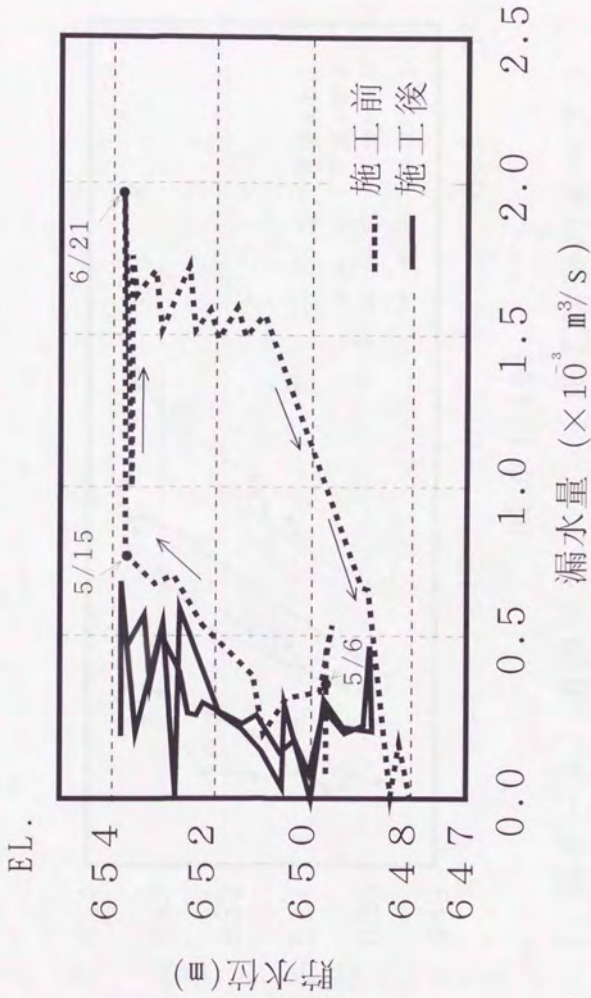


図8-3 追加ブランクット施工前後の漏水

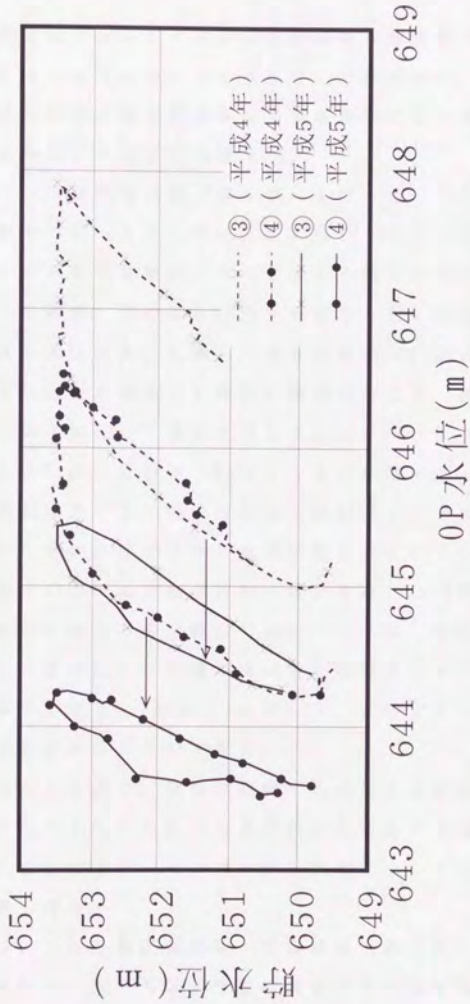


図8-4 追加ブランクエッター施工前後のオープン
ピエゾメーター水位の変化

第 9 章 結 論

本研究ではフィルタイプダムに生じる水理破碎の発生メカニズムを究明するうえで次の二つの点について検討した。

①水理破碎に関する定性的事実の現場実験による確認

②水理破碎発生の推定法の提案

①については現場実験（第4章）を行った。この実験ではダムの基礎地盤中に掘ったオーガー孔を利用し、水圧によって亀裂を発生させ、そのときの破壊圧力や一度生じた亀裂が再度開く圧力等を調べた。その結果、次のことが明らかになった。すなわち、オーガー孔に液体を加圧注入した場合、ある破壊圧力 P_b が必ず存在し、これより大きな圧力を加えると地盤に亀裂が生じる。また、一度破壊圧力 P_b 以上まで加圧して亀裂を発生させたボーリング孔に、再度加圧注水すると P_b より低い圧力 P_s で注入量が急増する。つまり、一度発生した亀裂は水平土圧程度の水圧で再び開くと考えられる。このことは、何らかの原因で堤体・基礎に亀裂が生じていた場合、貯水圧が亀裂部分の土圧より大きければ亀裂を押し広げ内部侵食を促進する可能性があることを示唆している。さらに、破壊水圧 P_b に達した後、水圧を徐々に下げ流量がほぼ零になる点の水圧 P_s を求めれば、これは水平土圧 σ_h （全応力）と等しく、この方法により水平方向の初期土圧を求めることができる。

以上のことにより、軟弱な地盤での現場水理破碎試験を可能にし、貯水圧が水平土圧を上回ると水理破碎の可能性のあることを確認した。このことにより、ペンマンが定性的に示した性質を現場実験により確認できた。

②については三軸圧縮試験・引張試験（第5章）、築堤解析（第7章）を行い、土の力学的性質の測定で得た亀裂発生の判断基準と解析値の比較により水理破碎発生の可能性を推定した。

三軸圧縮試験・引張試験では現場実験を行ったダム（基礎及び堤

体)より採取した試料の力学的性質を調べ、どの程度の応力・ひずみ量で破壊による亀裂が堤体・基礎に発生するかを検討した。この試験では微小ひずみレベルでの測定を行い、圧縮側の応力～ひずみ関係、弾性係数、ポアソン比等を求めた他に、厚肉円筒試料を用いた引張試験を行い、圧縮側と引張側の力学的性質を比較した。その結果、盛土(攪乱土)の破壊ひずみは不攪乱土に比べ、引張側で3～6倍、圧縮側で約20倍となった。これは繰り返すことにより脆性から延性的材料へと顕著に変化し圧縮や引張による亀裂が生じにくくなることを示している。さらに、基礎地盤は過圧密を受けているため、築堤荷重が限界荷重の付近に達すると破壊により多くの箇所に亀裂が発生する可能性が考えられる。今回の実験で得られた大谷内ダム基礎の限界伸びひずみは $\varepsilon_{ult}=0.08\sim 0.16\%$ であり、築堤の過程で基礎地盤内に生じる伸びひずみはその範囲を越えている場合、引張による亀裂が考えられる。築堤荷重により伸びが水平方向に生じる場合、引張による亀裂は鉛直方向に発生するため水理破砕の原因となる可能性が高い。

築堤解析は有限要素法を用いて行い、堤体・基礎における築堤過程の土圧・ひずみを求めた。これと三軸圧縮試験・引張試験より得られた亀裂発生判断基準となる応力・ひずみを比較し、堤体・基礎に亀裂の発生している可能性について検討した。その結果、築堤が先行した直下の基礎部分において破壊の限界を越える伸びひずみ及び軸ひずみと偏差応力と最大圧縮強度の比が八割を越える部分が広範囲に生じていた。このことにより築堤時に亀裂の生じた可能性が十分に考えられる。また、貯水位がEL.653.5m(漏水の急増した貯水位)の場合、築堤完成後の水平土圧が貯水圧より低くなる部分が存在することが解析により明らかになり、築堤過程に生じた亀裂が貯水圧により拡大・発達する可能性が考えられる。

築堤過程で基礎に生じた亀裂は堤体を横断するほど大きなものであればそれのみで漏水の原因となる。また、破壊による亀裂は小さくても散在しており、水平土圧を越える貯水圧により拡大・発達し

一つの大きな亀裂となる可能性が高い。このことは、現場実験で、一度生じた亀裂は水平土圧程度で再び開くことが確かめられている点からも考えられる。今回対象としたダムでは、築堤時の基礎部分で乾燥亀裂が観察されており亀裂の発達の初期条件の一つになっていたと考えられる。

第6章では基礎地盤において浸透解析を行い、漏水測定区間でのダルシ一流による浸透量を求めたが、その結果は実測値をかなり下回り、漏水が土粒子間の微視的なダルシ一流では説明できないことが明らかになった。漏水の原因としてダルシ一流以外の流れが考えられ、その流れとしては亀裂間の巨視的な流れが挙げられる。

以上のことより、乾燥亀裂や築堤により生じた亀裂を貯水圧が押し拡げながら発達させることによる水理破碎が大谷内ダムの漏水原因と推定された。

第8章では今回解析の対象とした範囲に漏水対策として粘土によるブランケットを施工した結果について示したが、漏水量は激減しオープンピエゾメーターの水位も下がった。このことは解析の対象とした範囲に漏水の原因が存在したことを示し、今回行った解析による水理破碎の推定の有効性が確かめられた。

水理破碎発生の推定手順をまとめると以下の様になる。

1. 実験及び解析

1) 基礎・堤体の土の力学的性質の測定

…圧縮破壊強度、限界伸びひずみ等の測定

2) 有限要素法による解析

…基礎・堤体の応力・ひずみ量の算定

2. 水理破碎発生域の推定

1) 亀裂の発生域の推定

…破壊の判断基準となる応力・ひずみ量と解析値の比較

(1. の1)と2)の比較)

2) 貯水圧が土圧を上回る部分の推定

…解析による土圧と貯水時の水圧との比較

2. の1)と2)の重なり合う部分で水理破砕の危険性が考えられる。

本研究では現場実験により、破壊圧力 P_0 と一度生じた亀裂が再び開く圧力(≒亀裂が閉じる圧力 P_c)の存在を明らかにした。このことにより亀裂が再び開く圧力は水平土圧程度であり、水圧が水平土圧を越えた場合には水理破砕へと発達する危険性が示された。しかし、亀裂が拡大するために必要な圧力は明確にはされなかった。このことに関し、Murdochは亀裂の幅と破壊圧力の関係を室内実験により求め、破壊圧力は亀裂の幅の平方根に反比例して小さくなることを文献¹⁰⁾で示している。しかし、現場で生じる亀裂の条件等が実際の現場での状況と異なるためさらに研究・実験が必要と思われる。このことが明らかになれば、築堤前に乾燥等による初期亀裂が水理破砕へと発達する可能性を知ることができる。また、堤体及び基礎中に亀裂が生じる可能性については第5章で述べているが、築堤の過程で亀裂が生じるかを確かめる上で築堤材(堤体及び基礎)の力学的性質を知る必要があることを示した。特に、水平方向の伸びによる破壊で亀裂は鉛直に入り水理破砕を誘発する可能性が高いため、引張試験による破壊伸びひずみ等の測定は重要である。

今回対象としたダムでは、乾燥亀裂や築堤過程での破壊による亀裂が水理破砕の原因となったと考えられるが、放流管周りに生じるアーチ作用による土圧の減少も原因の一つとなる可能性が指摘されており今後の問題である。

参考・引用文献

- 1) 山田康晴, 安中正実, 川口徳忠, 藤原信好: 昭和60年梅雨前線豪雨によるため池被災の特徴, 昭和61年農業土木学会大会講演, pp. 320~321 (1986)
- 2) Penman A.D.M.: On the embankment dam, *Geotechnique*, 36(3), pp. 303~348 (1986)
- 3) Penman A.D.M. and Charles J.A.: The influence of their interface on the behaviour of clay cores in embankment dams, *Tran. 13th Int. Congr. Large Dams, New Delhi 1*, pp. 695~714 (1979)
- 4) Yanagisawa E. and Panah A.K.: Laboratory studies on hydraulic fracturing criteria in soil, *Soils and Foundations* 29(4), pp. 1~13 (1989)
- 5) Hubbert, M.K. and Wills, D.G.: Mechanics of Hydraulic fracturing, *Trans., AIME, Vol. 210*, pp. 153~166, (1957)
- 6) Kehnle, R.O.: Determination of Tectonic Stresses through Analysis Of Hydraulic Well Fracturing, *Jour. of Geophys., Res., Vol. 69*, pp. 259~266 (1964)
- 7) 岩盤力学委員会: 初期地圧測定法の現状と課題, 土木学会, pp. 46~48
- 8) Bjerrum L., Nash J.K.L., Kennard R.M. and Gibson R.E.: Hydraulic fracturing in field permeability testing, *Geotechnique* 22(2), pp. 319~332 (1972)
- 9) Bozozuk M.: Minor principal stress measurement in marine clay with hydraulic fracture tests, *Proc. Eng. Found. Conf. on "Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction"*, Henniker, ASCE, pp. 333~349 (1974)
- 10) L.C. Murdoch: Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments, Part 1. Methods and observations, *Geotechnique* 43, No. 2, pp. 255~265 (1992)
- 11) L.C. Murdoch: Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments, Part 2. Propagation, *Geotechnique* 43, No. 2, pp. 267~276 (1992)
- 12) L.C. Murdoch: Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments, Part 3. Theoretical analysis, *Geotechnique* 43, No. 2, pp. 277~287 (1992)
- 13) 龍岡文夫・越智健三・金有性・木幡行宏: 堆積岩の非線形変形特性の調査・試験法, 土と基礎 Vol. 40 No. 11 Ser. No. 418, pp. 7~8 (1992)
- 14) Kokusho, T.: Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range, *Soils and foundations*, Vol. 20, No. 2, pp. 45~60 (1980)
- 15) 龍岡文夫・渋谷啓: 三軸試験お原位置試験法との関連 (変形特性について) 三軸試験方法に関するシンポジウム, 土質工学会 (1991)
- 16) Boyce, J.R. and Brown, S.F.: Measurement of elastic strain in granular materials, *Geotechnique*, 26-4, pp. 637-640 (1976)
- 17) 仲野良紀・嶋崎藤雄・清水英良: 珪藻質泥岩の力学的異方性とその限界伸びひずみについて, 農業土木学会論文集第141号, pp. 121~130 (1989)
- 18) 緒方信英・安田正幸: 礫を含んだ不攪乱土の動的特性, 第17回土質工学研究発表講演集, pp. 1609-1612 (1982)
- 19) 野間達也・石井武美: 岩石の三軸試験機における軸ひずみの測定法について, 土木学科

第41回年次学術講演会, 第三部, pp. 657-658(1986)

- 20) Burland, J. B. and Symes, M. J. : A simple axial displacement gauge for use in tri-axial apparatus, *Geotechnique* 32, No. 1, pp. 62-65(1982)
- 21) Jardine, R. J., Symes, M. J. and Burland, J. B. : The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus, *Geotechnique* 34-3, pp. 323-340(1984)
- 22) Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y. S. and Sato, T. : A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory, *Soils and Foundations* (to be published) pp. - (1991)
- 23) Desrnes, J. : La Localisation de la deformation dans les materiaux granulaires, Ph.D. thesis, Univ. of Grenoble, (1984)
- 24) Tatsuoka, F., Nakamura, S., Hung, C-C. and Tani, K. : Strength anisotropy and shear band direction in plane strain tests of sand, *Soils and foundations*, Vol. 30, No. 1, pp. 35-54(1990)
- 25) Haefeli, R. : "Investigation and Measurements of Shear Strength of Saturated Cohesive Soils," *Geotechnique*, London, England, Vol. 2, No. 3, Sept., pp. 186-208(1951)
- 26) Hasegawa, H., and Ikeuti, M. : "On the Tensile Strength of Disturbed soils," *Symposium on Rheology and Soil Mechanics*, J. Kravtchenko and P. M. Sirieys, eds., Springer-Verlag, Berlin, West Germany, pp. 405-412(1966)
- 27) Ingles, O. G., and Frydman, S. : "An Examination of Some Methods for Strength Measurement in soils," *Proceedings of the fourth Australian-New Zealand conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 213-219(1963)
- 28) Kezdi, A., "Tensile and Flexural Strength of earth Dam Materials," *Transactions of the Eleventh International Congress on Large Dams, International Committee in Large Dams, Vol. III*, pp. 165-172(1973)
- 29) Tschebotarioff, G. P., Ward, E. R., and DePhillippe, A. A. : "The Tensile Strength of Disturbed Recompactd Soils," *Proceedings of the Third International Conference on soil Mechanics and foundation Engineering, International Society for Soil Mechanics and foundation Engineering, Vol. 1*, pp. 207-210(1953)
- 30) Leonalds, G. A., and Narain, J. : "Flexibility of Clay and Cracking of Earth Dams," *Journal of the soil Mechanics and Foundations division, ASCE, Vol. 89, No. SM2, Part 1, Mar.*, pp. 47-98(1963)
- 31) Narain, J., and Rawat, P. P. : "Tensile Strength of compacted soils," *Journal of the Soil Mechanics and foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. SM6, Proc. Paper 7646, Nov.*, pp. 2185-2190(1970)
- 32) Fang, H. Y., and Chen, W. F. : "New Method for Determination of tensile Strength of Soils," presented at the 50th Annual Meeting of High Way Research Board, held at Washington, D. C.
- 33) Addanki V. Gopala Krishnayya, Zdenek Eisenstein, Norbert R. Morgenstern : Behavior of compacted soil intension, *Journal of the geotechnical engineering*

division, pp.1051~1061(1974)

- 34) 仲野良紀：フィルダム、堤体の設計，農業土木ハンドブック改訂五版，pp.200~204
- 35) 清水英良・仲野良紀：フィルダム築堤時の珪藻質泥岩基礎の変形挙動とハイドロロックチャリング—新第三紀層泥岩の力学的特性とその実務への応用(Ⅱ)—，農業土木学会論文集第142号，pp.65~74(1989)
- 36) 構造改善局建設部設計課：農業用ダム設計施工検討会（第8回）テキスト：pp.219~238(1995)
- 37) 仲野良紀：ハイドロロックフラクチャリング，農業土木学会誌第47巻第12号，p.28(1979)
- 38) Timoshenko, S.P. and Goodier, J. : Theory of elasticity, McGraw-Hill (1951)
- 39) Goodman R.E. (大西, 谷本訳) : わかりやすい岩盤力学, 鹿島出版会, pp.68~92(1984)
- 40) 仲野良紀, 清水英良 : 第三紀層軟岩の土質工学的性質に関する研究, 昭和59・60年度科学的研究補助金(一般研究B(広領域))研究成果報告書, pp.35~37(1986)
- 41) Atkinson J. H. & Mair R. J. : Soil Mechanics aspects of soft ground tunneling, Ground Engineering, July, pp.20~38(1981)
- 42) Morgenstern N.R. and Vaughan P.R. : Some observations on allowable grouting pressures, Grouts and drilling muds, London, Institution of Civil Engineers, pp.36~42(1963)
- 43) Yanagisawa E. and Panah A.K. : Laboratory studies on hydraulic fracturing criteria in soil, Soils and Foundations 29(4), pp.1~13(1989)
- 44) Terzaghi K. & Peck R.B. : Soil Mechanics in Engineering Practice Second Edition, pp.116~118
- 45) Larry J. Segerlind (川井忠彦監訳) : 応用有限要素解析, 丸善, pp.73-79
- 46) Kondner, R.L. : Hyperbolic Stress-Strain Response, Cohesive Soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol.89, No. SM1, pp.115~143(1963)
- 47) Janbu, N. : soil compressibility as Determined by Oedometer Triaxial Tests, Proceedings, European conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, vol.1, pp.19~25(1963)
- 48) Seed, H.B. and F.G. Mitry, C.L. Monismith and C.K. Chang : Prediction of Flexible Pavement Deflection From Laboratory Repeated Load Tests, National Cooperative Highway Research Program Report 35, Highway Research Board(1967)
- 49) Duncan, J.M. and Chang C-Y : Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, Journal of the Soil Mechanics and foundations Division, ASCE, vol.96, No. SM5, pp.1629~1653(1970)
- 50) Kulhawy, F.H. and J.M. Duncan : Stresses and Movements in Oroville Dam, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol.98, No. SM7, pp.652~665(1972)
- 51) Kulhawy, F.H., J.M. Duncan and H.B. Seed : Finite Element Analysis of stresses and Movements in Embankments during construction, Report No. TH-69-4-10 U.S. Army Engineers, Dept. of Civil Engineering, Inst. of Transportation and Traffic

Engineering Univ. of California (1969)

- 52) Goodman, L. E. and C. B. Brown : Dead load Stresses and the Instability of slopes, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions, ASCE, vol. 89, No. SM3, pp. 103~134 (1963)
- 53) Clough, R. W. and R. J. Woodward III : Analysis of Embankment Stresses and Deformations Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE, vol. 93, No. SM4, pp. 529~549 (1967)

謝 辞

本研究を進めるにあたり、岐阜大学に勤務し始めてから今日まで御指導・御鞭撻を頂きました岐阜大学農学部仲野良紀教授に深甚の謝意を表します。

東京大学農学部中村良太教授、久保成隆先生には、卒業論文、修士論文と学生時代から公私にわたり大変お世話になりました。特に、土質力学の分野である本研究を農業水文学研究室で面倒見て頂くにあたり、大変なご尽力を頂き、誠にありがとうございました。

明治大学農学部田中忠次教授、東京大学工学部龍岡文夫教授、東京大学農学部中野政詩教授、佐藤洋平教授、島田正志助教授には、本論文作成に際し、御多忙にも拘わらず貴重な時間を割いて頂きました。ここに記して謝意を表します。

岐阜大学農学部清水英良助教授、松本康夫教授、千家正照教授、西村直正博士、愛媛大学農学部酒井俊典助教授には御助言と励ましの言葉を頂き、公私にわたり非常にお世話になりました。また、実験を行うに際し北陸農政局苗場開拓建設事業所津南原支所の皆様に、実験及びデータ整理に関して平成三年度岐阜大学卒業生村上裕則氏（現京都府庁）、竹山徹氏（現滋賀県庁）、平成四年度卒業生桜井剣氏（現水資源開発公団）、桑原一浩氏（現岐阜県庁）にご協力頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

付 録

1. 注入液の粘度測定 …… 1
2. 大谷内ダムの貯水位とオーガー孔内の地下水位 ……11
3. 非接触磁気変位計（ギャップセンサー）の概要 ……14
4. 非線形弾性解析に用いるパラメーターについて ……21
5. 現場水理破碎実験実測値 ……27

1. 注入液の粘度測定

概説

本節では現場実験に使用したグリセリン水溶液の粘度 (μ) を回転円筒形粘度計とオストワルド粘度計を用いて測定した結果について述べる。粘度は温度によって著しく変化するが、野外では日光の影響を受けて水溶液が温度変化を起こし粘度は一定になりにくい。大谷内ダムでの実験温度変化範囲内 (約 25℃ ~ 35℃) での粘度を小型の恒温室を使って温度管理をして正確に測定した。

測定したグリセリン水溶液の濃度は

(体積比) グリセリン:水 = 6:4

(重量%) 65.5%

ただし 重量% の計算に用いた数値は以下のものである。

グリセリンの密度 1.264 g/cm^3 (20℃)

水の密度 0.998 g/cm^3 (20℃)

(1993 理科年表) である。

1.1 実験方法

1.1.1 回転円筒形粘度計 (ビスコテスター : 図 1-1) を用いた測定方法

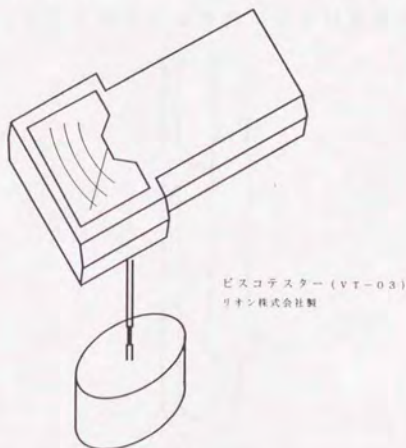
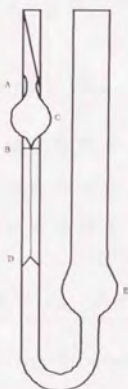


図 1-1 ビスコテスター概要図

- ① 温度設定した恒温室の中でグリセリン水溶液が一定温度になるまで数時間放置する。
- ② 所定の温度になったグリセリン水溶液を恒温室から取り出し、ビスコテスターの下にセットする。
- ③ ビスコテスターの目盛り板の水準器により水平を保持する。ローターを試料容器の中心に置き、ローターの液面マークのほぼ中央まで液中加入する。
- ④ スイッチを入れると、指針は試料の粘度に応じて右に振れ、まもなくバランスがとれて停止する。（粘度の単位はミリパスカル秒で読む。）

1.1.2 オストワルド粘度計を用いた測定方法（図1-2を参照）

- ① ピペットを使って水溶液を 10cm^3 取り、オストワルド粘度計に入れる。
- ② 温度設定した恒温室の中でグリセリン水溶液が一定温度になるまで数時間放置する。
- ③ 吸い上げて上球Cの中に水溶液を入れる。
- ④ AB間の流下時間、水溶液温度、濃度を記録する。（液体の粘度は温度によって著しく変化するため、測定は恒温室で行う。）



オストワルド粘度計

図 1 - 2 オストワルド粘度計

(器具の選択方法)オストワルド粘度計の大きさは幾種類もあり、毛細管部分BDの長さは約10cm、上球Cと下球Eとの落差は10~15cm、毛細管の半径Rは0.2~1.0mm前後、上球Cの容量は3cm³程度となっている。落差が10~15cm位になるように液を入れて流下時間が2~3分程度の半径のものを選ぶ。毛細管を細くして流下時間を長くすれば精度は良くなるが、測定に時間がかかる。

オストワルド粘度計の測定結果はハーゲン-ポアズイユ式より得られる次式により求められる。

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\pi \rho R^4 t}{8V_0 l} \bigg/ \frac{\pi \rho_0 R^4 t_0}{8V_0 l} \quad \dots (1.1)$$

μ_0 : 水の粘度

ρ_0 : 水の密度

t_0 : 水の流下時間

μ : 測定する液体の粘度

ρ : 測定する液体の密度

t : 測定する液体の流下時間

V_0 : 流下した液体の体積

l : 毛細管の長さ

R : 毛細管の半径

これから次式を得る。

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\rho t}{\rho_0 t_0} \quad \dots (1.2)$$

この式より、液体の密度と流下時間を測定すれば、標準物質(今の場合は水)に対する試料液体の粘度の比すなわち相対粘度を知ることができる。理科年表より水の粘度を表1-1密度を表1-2に示す。

表 1 - 1 水の密度

水温 ℃	密度 (g/cm ³)
20	0.998
30	0.995

表 1 - 2 水の粘度

温度 ℃	粘度 [mPas]
20	1.0046
25	0.8941
30	0.8019
35	0.7205

1.2 実験結果

回転円筒式粘度計によるグリセリン水溶液の測定結果を表1-3に示す。なお、密度(24℃)は 1.16g/cm^3 である。

表 1 - 3 回転円筒式粘度計による測定結果

温度 (℃)	粘度 (mPas)	温度 (℃)	粘度 (mPas)
20.0	21.3	28.0	15.7
23.0	17.8	28.0	15.8
23.6	18.3	30.0	14.7
25.0	17.2	30.1	14.8
25.1	16.0	35.0	10.8
27.0	16.0	35.0	11.0

オストワルド粘度計の測定結果

粘度計は四種類用い各粘度計で二～三回の測定を行い、水とグリセリン水溶液の流下時間を表1-4～表1-7に示す。

表 1 - 4 オストワルド粘度計による測定結果
(液温 20℃ の場合)

測定器 No.	回数	流下時間 (s)		グリセリン水溶液
		水	グリセリン水溶液	水
1	1	71.95	637.30	9.16
	2	69.60	646.10	
	3	68.58	---	
	平均	70.04	641.70	
2	1	63.23	587.40	9.26
	2	63.40	586.44	
	平均	63.32	586.92	
3	1	71.10	873.10	12.67
	2	67.00	867.13	
	3	67.86	---	
	平均	68.65	870.12	
4	1	67.18	705.60	12.24
	2	66.36	653.60	
	3	35.29	707.26	
	平均	56.28	688.82	

表 1 - 5 オストワルド粘度計による測定結果
(液温 23℃ の場合)

測定器 No.	回数	流下時間 (s)		グリセリン水溶液
		水	グリセリン水溶液	水
1	1	71.11	632.33	8.91
	2	69.66	635.23	
	平均	70.39	633.78	
2	1	67.71	---	---
	2	68.39	---	
	平均	68.05	---	
3	1	86.43	781.80	9.09
	2	85.69	783.00	
	平均	86.06	782.40	
4	1	70.60	595.14	8.39
	2	71.10	594.00	
	平均	70.85	594.57	

表 1 - 6 オストワルド粘度計による測定結果
(液温 28℃ の場合)

測定器 No.	回数	流下時間 (s)		グリセリン水溶液
		水	グリセリン水溶液	水
1	1	62.18	621.82	9.78
	2	63.32	605.76	
	平均	62.75	613.79	
2	1	63.10	650.18	9.81
	2	65.60	612.32	
	平均	64.35	631.25	
3	1	70.63	792.85	11.04
	2	71.60	777.70	
	平均	71.12	785.28	
4	1	64.83	642.46	9.62
	2	65.12	607.63	
	平均	64.98	625.05	

表 1 - 7 オストワルド粘度計による測定結果
(液温 35℃ の場合)

測定器 No.	回数	流下時間 (s)		グリセリン水溶液
		水	グリセリン水溶液	水
1	1	58.43	513.39	8.64
	2	58.09	488.78	
	3	57.91	505.68	
	平均	58.14	502.62	
2	1	56.13	440.29	7.58
	2	57.63	424.67	
	3	56.07	421.63	
	平均	56.61	428.86	
3	1	65.68	567.00	8.49
	2	66.33	554.46	
	3	65.09	552.60	
	平均	65.70	558.02	
4	1	57.59	519.56	8.67
	2	55.85	480.93	
	3	58.18	488.29	
	平均	57.21	496.26	

水の密度とグリセリン水溶液の密度の比はほぼ1:1.16であるから(1.2)式よりグリセリン水溶液の粘性 μ は

$$\mu = 1.16 \cdot \mu_0 \cdot \frac{t}{t_0} \quad \dots (1.3)$$

となる。実験結果からグリセリンの流下時間は水の流下時間のほぼ8~13倍程度であることが分かる。従って、(1.3)式よりグリセリンの粘性 μ は水の粘性 μ_0 の9~15倍程度となる。表より23℃、28℃での水の粘度直線補間で求めると、それぞれ0.9383mPas、0.8388mPasとなる。これよりオストワルド計によるグリセリン水溶液の粘性は表となる。

表1-8 オストワルド法によるグリセリン水溶液の粘性測定結果

水温(℃)	水の粘度[mPas]	t / t_0	グリセリン水溶液の粘度[mPas]
20	1.0046	9.16~12.67	9.20~12.73
23	0.9383	8.39~9.09	7.87~8.53
28	0.8388	9.62~11.04	8.07~9.26
35	0.7205	7.58~8.67	5.46~6.25

回転円筒式粘度計の値がオストワルド粘度計の値に比べ大きくなっている。化学工学便覧(図1-3に示す)によると濃度65.5%のグリセリン水溶液では20℃で約17[mPas]、40℃で約7[mPas]となり回転円筒式粘度計の値がより近い結果となった。今回実験を行った温度の範囲で、グリセリンの粘性は水の10倍以上であるため、透水係数は1/10以下になると考えられる。

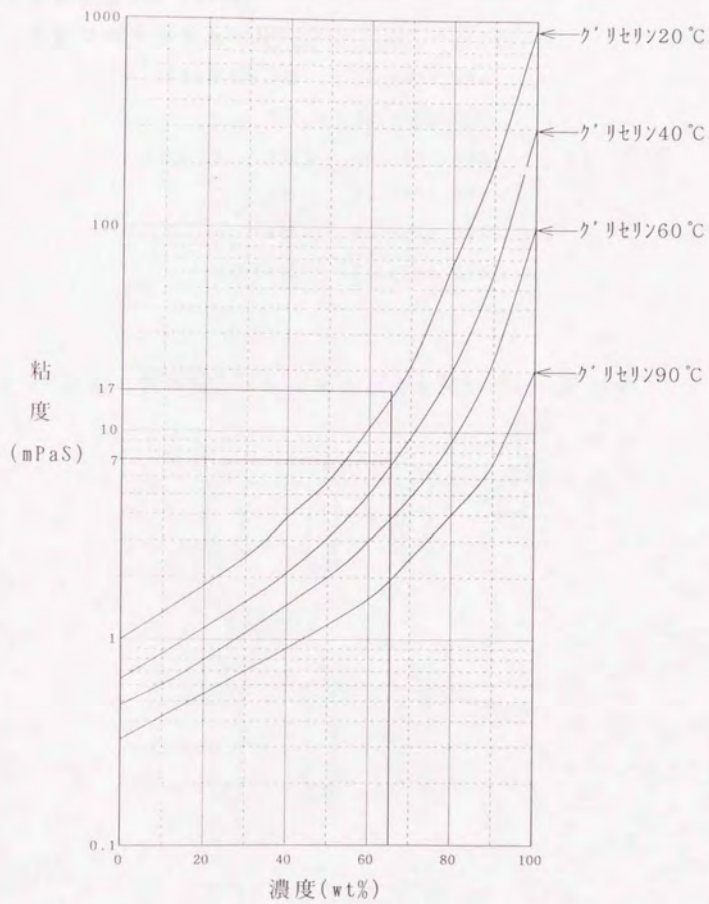


図 1 - 8 グリセリン水溶液の粘性 (化学工学便覧より)

2. 大谷内ダムの貯水位とオーガー孔内の地下水位

2.1 実験期間中の大谷内ダムにおけるデータの補足

・ 実験位置 (EL. = 644m)

・ 実験期間中の貯水位は

1992年 8月 1日	EL. = 652.55m
3日	EL. = 652.52m
4日	EL. = 652.40m
5日	EL. = 652.24m
6日	EL. = 652.05m
9月 30日	EL. = 645.82m

2.2 全注入管の地下水位を測定結果を図2-1~2-5に示す。

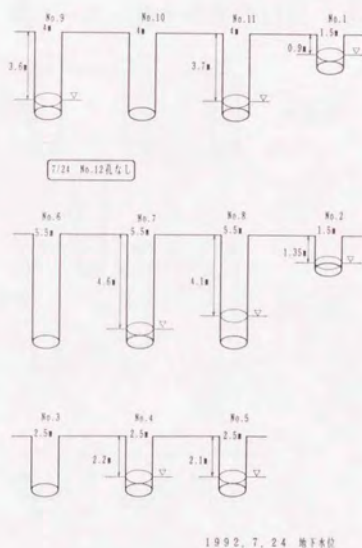


図 2 - 1 地下水位 (1992. 7. 24)

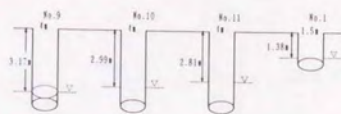
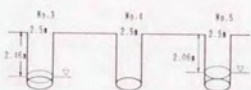
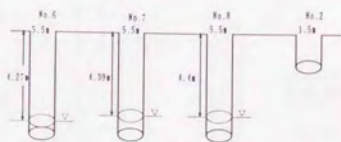
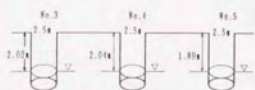
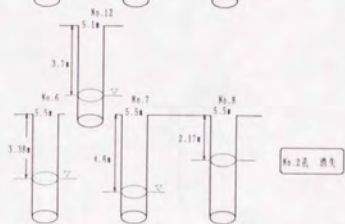
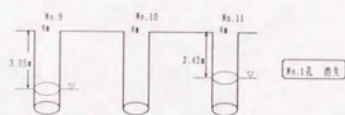


图 2-2 12 号井



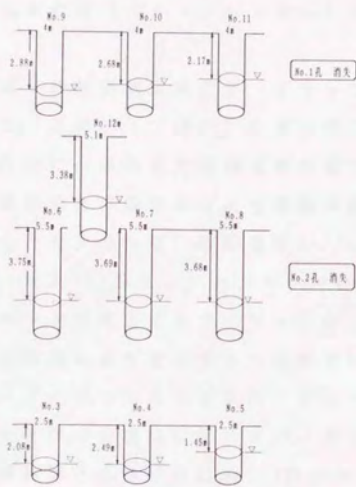
1992.8.4 (午前) 地下水位

图 2-2 地下水位 (1992.8.4)



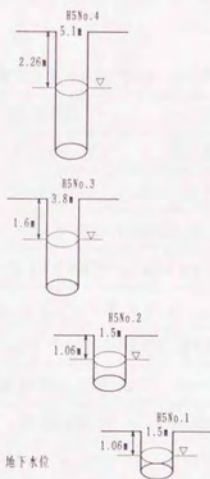
1992.8.6 (午前) 地下水位

图 2-3 地下水位 (1992.8.6)



1992. 9. 30 地下水位

图 2 - 4 地下水位 (1992. 9. 30)



1993. 8. 10 地下水位

图 2 - 5 地下水位 (1993. 8. 10)

3. 非接触型磁気変位計（ギャップセンサー）の概要

3.1 仕様

今回の試験では非接触型磁気変位計（ギャップセンサー）は電子応用製を使用した。これは、プローブに高周波コイルを使用し、プローブコイル磁界内に伝導体または磁性体が近づいたとき、伝導体内に発生する過電流または磁性体による導磁率変化を利用するものである。使用したセンサーは、測定範囲0~2mmのものと、0~8mmの二種類である。表3-1にギャップセンサーの仕様を示す。

ギャップセンサーが対象とするターゲットは、金属であればよいが、感度は金属の種類により変化する。試験では、鉄用に調整したものをを使用した。ターゲットの大きさは、プローブコイルの二倍以上の相対面を有すれば、感度は変化しない。ターゲット面がプローブコイル面積と同じ場合には感度は約0.7倍となる。ターゲットの面がプローブコイル面積の直径比で1/2の場合感度は半減する。また、ターゲットの厚みは0.2mm以上あれば厚みの影響は受けないことになっている。

表3-1 三軸試験圧縮に用いたギャップセンサーの仕様

GAP SENSER	変換器	AEC-5505
	プローブ	PU-05(φ5)
	ケーブル	PC-03
測定範囲	0~2000μm	
出力	±5V(5mV/μm)Rout250Ω	
分解能	0.5μm	
周波数特性	DC~20KHz-20dB	
直線性	±0.5%以内(フルスケールに対し)	
使用温度範囲	変換器	-10°C~+55°C
	プローブ	-30°C~+120°C
電源	DC±12V、±40mA	

3.2 ギャップセンサーの検定

3.2.1 検定方法

検定はマイクロメーターを用い、ターゲットには三軸圧縮試験で使用する鉄製のものを用いた。すなわち、測定範囲 2mmのセンサーのターゲットには1cm×1cmのもの、測定範囲 8mmのターゲットにはセンサーのプローブコイルと同じ面積を有する円形のターゲットを使用した。

マイクロメーターにギャップセンサーとターゲットをセットし、センサーとターゲットを密着させる。この状態でマイクロメーターをゼロセットする。次にギャップセンサーとターゲットを徐々に離しマイクロメーターから読みとった値を変位量として記録する。この時ギャップセンサーに接続されている変換器からの出力をテスターで読み込み電圧の変化を記録する。また、ギャップセンサーからの出力はレコーダーにより記録する。レコーダーの入力レンジは10Vで行った。ギャップセンサーからの出力は ±5Vであるため、入力レンジ 10Vによりギャップセンサーから出力される全範囲を観察できることになる。

3.2.2 検定結果

検定の結果を表3-1～表3-2に示す。この結果から、測定範囲2mmのギャップセンサーではほぼ性能通りの、0V付近では信頼性のある結果が示された。しかし測定範囲8mmのギャップセンサーでは、約6mm変位させた時点で測定不能になった。

センサーのプローブコイルとターゲットの直径比が1:1であるため、感度比が0.7になっているとすれば測定範囲が $8 \times 0.7 = 5.6$ mmであると考えられる。よって測定範囲8mmのセンサーを使い正確な測定をするには、プローブの2倍以上の相対面を有するターゲットを使用する必要がある。

表 3 - 1 測定範囲 2mm のギャップセンサーの検定結果

プローブ NO. 12214

変換器 NO. 2774

変位量 mm	電圧 V
0.0	-4.94
0.2	-4.1
0.4	-3.16
1.0	-0.57
2.0	3.29
2.776	5.1

プローブ NO. 12295

変換器 NO.

変位量 mm	電圧 V
0.0	-5.34
0.5	-3.15
1.0	-0.76
2.0	3.58
2.329	4.67

プローブ NO. 12277

変換器 NO.

変位量 mm	電圧 V
0.0	-4.81
0.5	-2.46
1.0	-0.15
1.5	2.03
2.0	4.07
2.34	5.2

表 3 - 2 測定範囲 8mm のギャップセンサーの検定結果

プローブ NO. 12128

変換器 NO. 5870

変位量 mm	電圧 V
0.0	-4.26
1.0	-2.36
2.0	-0.59
3.0	1.16
4.0	2.88
5.0	4.65
5.596	5.70

プローブ NO. 12205

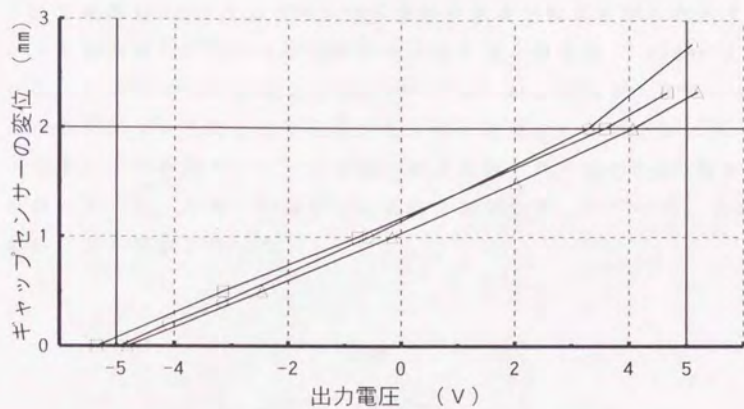
変換器 NO. 5261

変位量 mm	電圧 V
0.0	-4.37
2.0	-1.07
4.0	1.58
6.0	3.70

プローブ NO. 12266

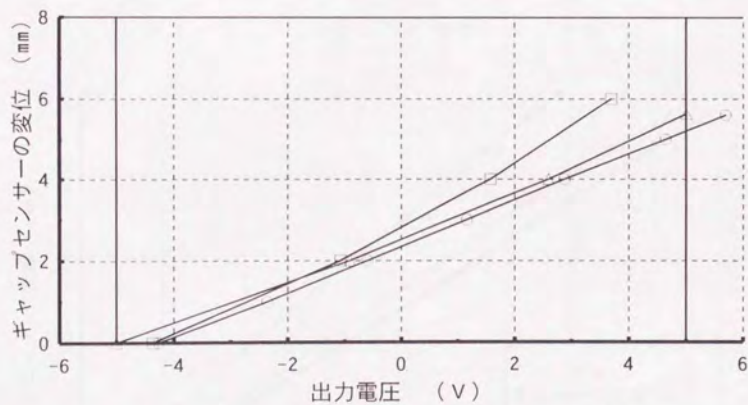
変換器 NO. 5262

変位量 mm	電圧 V
0.0	-5.0
2.0	-0.9
4.0	2.6
5.627	5.0



プローブNO. — 12214 — □ — 12295 — △ — 12277

図 3 - 1 測定範囲 2mmギャップセンサーの検定結果



プローブNO. — 12128 — □ — 12205 — △ — 12266

図 3 - 2 測定範囲 8mmのギャップセンサーの検定結果

3.3 ターゲットの改良および検定

測定範囲8mmのギャップセンサーを使い正確な測定を行うためターゲットを改良し、図-3に示すターゲット板(厚さ約0.35mm)を作った。これをグリースにより円形ターゲットの上に接着し使用した。このターゲットを用いてギャップセンサーを検定した結果をに図-4示す。この結果ターゲットを取り替えた後では、ほぼ8mmの測定が可能となった。なおこの検定では電圧を測定せず、レコーダー上の記録により観察を行った。

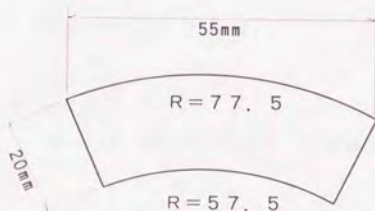


図3-3 8mmセンサー用ターゲット板

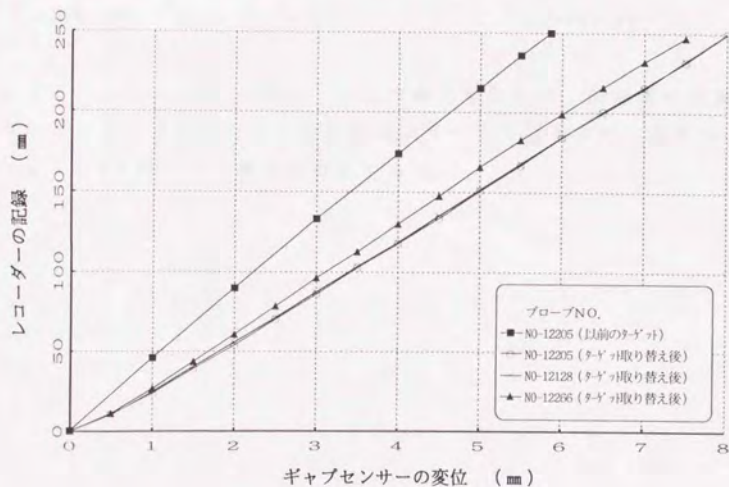


図3-4 ギャップセンサー（ターゲット改良後）の検定結果

3.4 ギャップセンサーで測定できるひずみレベルについて

GAP-SENSOR・PU-05（測定範囲 0～2mm）

分解能 0.5 μm ($0.5 \times 10^{-3}\text{mm}$) : 出力 5mV/ μm

このセンサーを使い、試料長100mmの圧縮試験を行った場合限界最小測定ひずみは、

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{より}$$

$$\epsilon = \frac{0.5 \times 10^{-3} \text{ mm}}{100 \text{ mm}} \quad \text{となり}$$

$\epsilon = 0.5 \times 10^{-5}$ (5.0×10^{-6}) となる。

レコーダーへの入力は

(入力レンジ) (レコーダーのフルスケール) (記録紙一目盛りの変位量)

10 V	—	2 mm	—	0.02 mm
1 V	—	0.2 mm	—	0.002 mm
500 mV	—	0.1 mm	—	0.001 mm
200 mV	—	0.04 mm	—	0.0004 mm

よって、入力レンジ 200mV により測定を行えば、記録紙一目盛り当たりの変位量がセンサーの分解能より小さくなるので、ひずみレベル 5.0×10^{-6} での測定が可能である。

4. 非線形弾性解析に用いるパラメーターについて

上の非線形性を表す方法として、7.2.2で説明した方法を採用しているが、解析に必要なパラメーターは以下の様に求めた。

三軸圧縮試験で求められた、応力～ひずみ関係を双曲線（(7.14)式）で近似すれば(7.15)式の直線関係が得られる。実際は図4-1

（側圧 $0.3 \times 98 \text{ kPa}$ の場合）中の●点の様に完全が直線にはならないため回帰により近似直線を求める。この直線の切片、傾きはそれぞれ(7.14)式の a, b になり、その逆数はそれぞれ初期弾性係数 E_i 、双曲線の漸近線の値 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\infty}$ となる。

$$E_i = \frac{1}{a} \quad \dots (4.1)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\infty} = \frac{1}{b} \quad \dots (4.2)$$

また、(7.16)式の R_i は実験で求められた最大軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_i$ と漸近線の値 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\infty}$ との比で表される。

$$R_i = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_i}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\infty}} = b \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)_i \quad \dots (4.3)$$

側圧 $0.3 \times 98 \text{ kPa}$ の場合、回帰直線の傾き $= 8.88 \times 10^{-3}$ 、回帰直線の切片 $= 2.3882 \times 10^{-3}$ 、最大軸差応力 $= 100.64 \text{ kPa}$ となるため(4.1)式、(4.3)式より

$$E_i = \frac{100}{2.3882 \times 10^{-3}} = 41872 \text{ (kPa)}$$

（分子の100はひずみが $\%$ で表示されていることによる）

$$R_i = 100.63 \cdot 8.88 \times 10^{-3} = 0.893$$

となる。

$0.3, 0.5, 0.7, 1.0 \times 98 \text{ kPa}$ の各側圧で求めた回帰直線と応力～ひずみ関係の近似曲線を図4-1～4-8に示す。

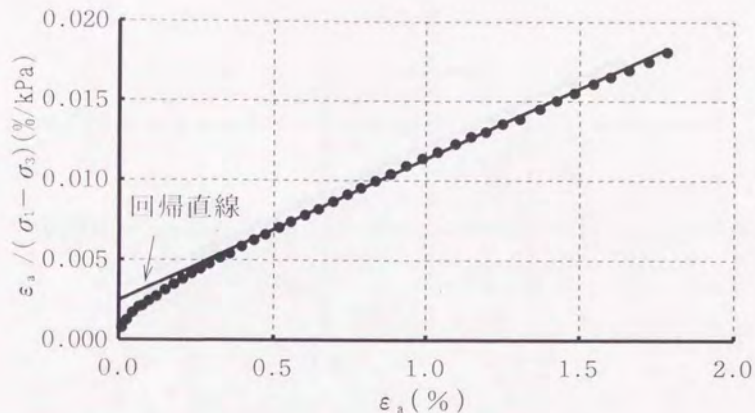


図 4 - 1 $\epsilon_a \sim \epsilon_a / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 関係の回帰直線 (側圧 $0.3 \times 98 \text{ kPa}$)
 回帰直線の傾き $= 8.88 \times 10^{-3}$
 回帰直線の切片 $= 2.3882 \times 10^{-3}$

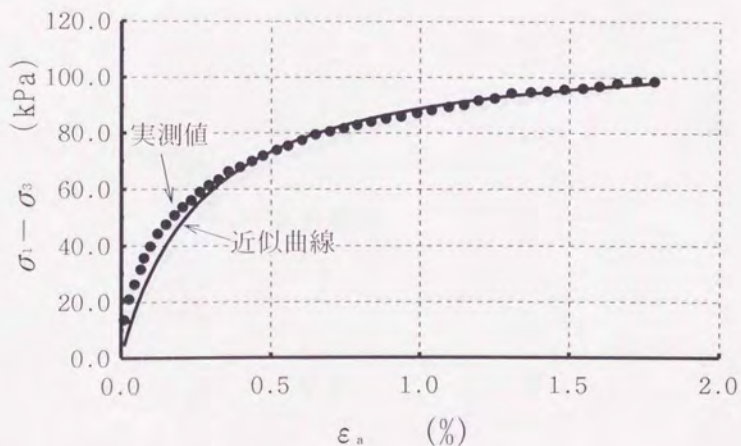


図 4 - 2 応力～ひずみ曲線と双曲線近似曲線 (側圧 $0.3 \times 98 \text{ kPa}$)

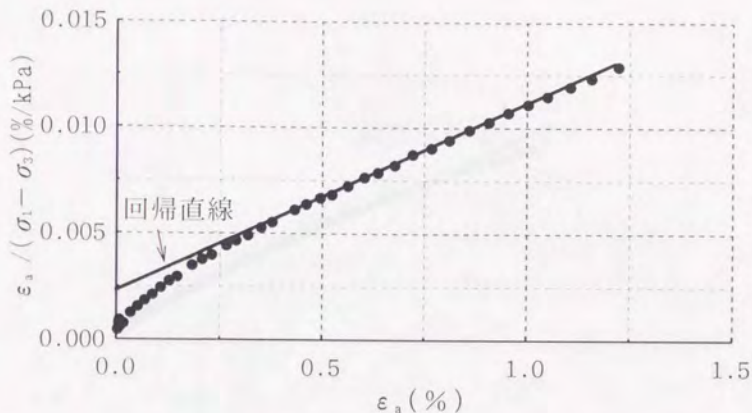


図 4-3 $\varepsilon_a \sim \varepsilon_a / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 関係の回帰直線 (側圧 $0.5 \times 98 \text{ kPa}$)

回帰直線の傾き $= 8.85 \times 10^{-3}$

回帰直線の切片 $= 2.1995 \times 10^{-3}$

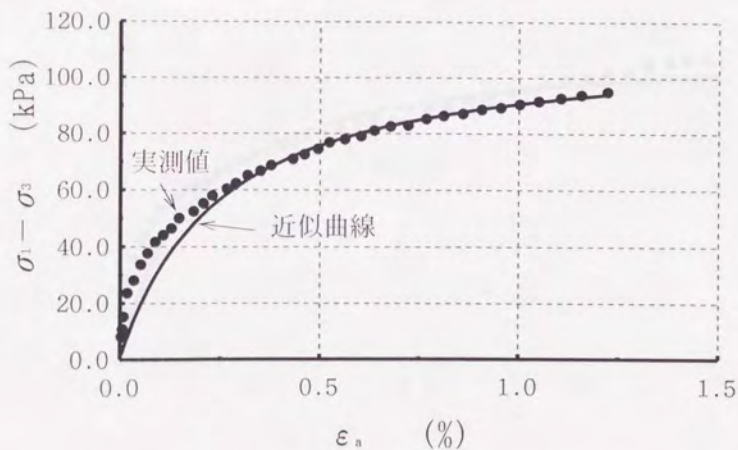


図 4-4 応力～ひずみ曲線と双曲線近似曲線 (側圧 $0.5 \times 98 \text{ kPa}$)

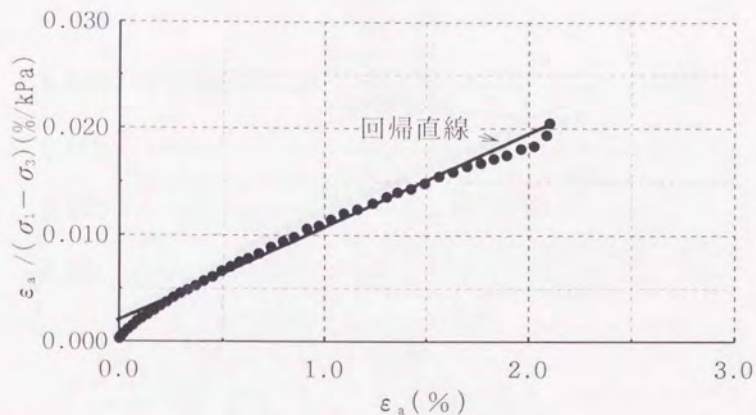


図 4 - 5 $\varepsilon_a \sim \varepsilon_a / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 関係の回帰直線 (側圧 $0.7 \times 98 \text{ kPa}$)
 回帰直線の傾き $= 8.73 \times 10^{-3}$
 回帰直線の切片 $= 2.1137 \times 10^{-3}$

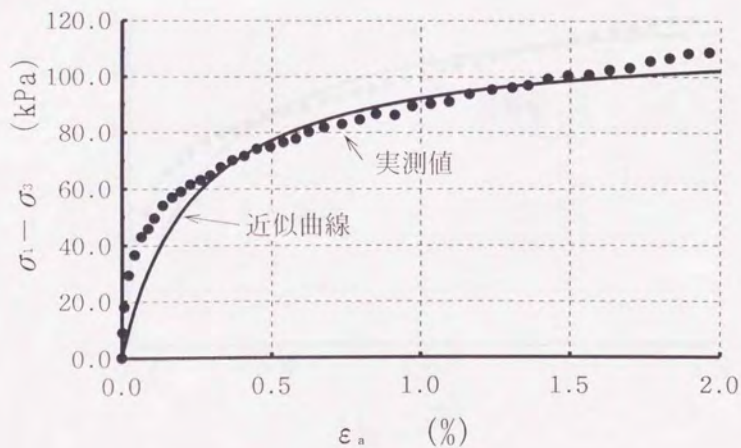


図 4 - 6 応力～ひずみ曲線と双曲線近似曲線 (側圧 $0.7 \times 98 \text{ kPa}$)

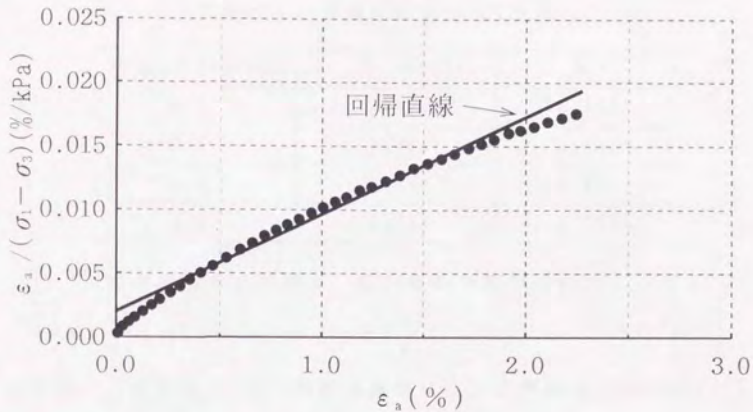


図 4-7 $\varepsilon_a \sim \varepsilon_a / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 関係の回帰直線 (側圧 $1.0 \times 98 \text{ kPa}$)
 回帰直線の傾き $= 7.68 \times 10^{-3}$
 回帰直線の切片 $= 2.0065 \times 10^{-3}$

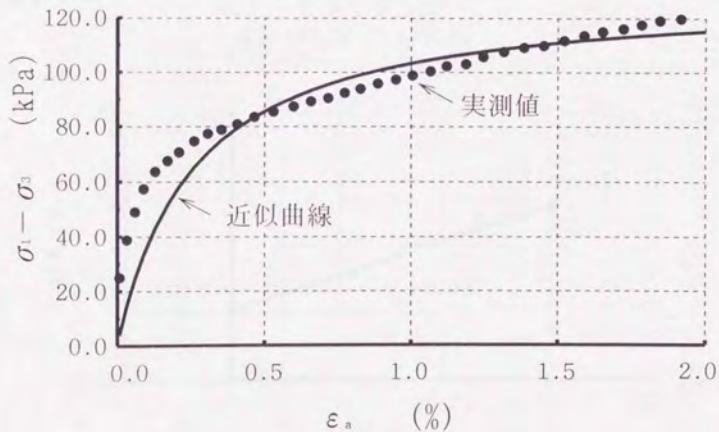


図 4-8 応力～ひずみ曲線と双曲線近似曲線 (側圧 $1.0 \times 98 \text{ kPa}$)

各側圧での R_i と E_i を表 4-1 に示す。

表 4-1 各側圧による E_i と R_i

側圧 ($\times 98 \text{ kPa}$)	E_i (kPa)	R_i
0.3	41872	0.893
0.5	45464	0.840
0.7	47310	0.967
1.0	49838	0.983

(7.17) 式の両辺を p_a で除し、それぞれの常用対数をとると

$$\log \left(\frac{E_i}{p_a} \right) = \log(K) + n \cdot \log \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right) \quad \dots (4.4)$$

となる。(式中の σ_3 は大気圧を基準にし、三軸試験で側圧を 0 としたときの (σ_3/p_a) の値を 1 としている。)

表 4-1 より $\log(E_i/p_a)$ 及び $\log(\sigma_3/p_a)$ の値を求め回帰直線を求めると図 4-9 となる。パラメータ n は回帰直線の傾きとなるため、

$$n = 0.387$$

また、パラメータ K は側圧 = 0 の場合の (E_i/p_a) の値であるが、回帰直線の切片の値 (2.578) の指数で表され、

$$K = 10^{2.578} = 378.44$$

となった。

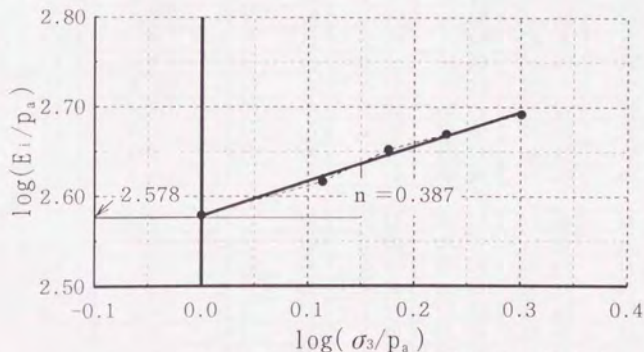


図 4-9 $\log(E_i/p_a) \sim \log(\sigma_3/p_a)$ 関係の回帰直線

5. 現場水理破碎実験実測値

1992.8.4 No.1 管グリセリン水溶液 (グリセリン:水=6:4体積比)で実験
 グリセリン水溶液温度 30.5℃
 天気 快晴

$$\textcircled{6} = \textcircled{4} / \textcircled{5} * 60 / 1000$$

No.	流量の計算						間隙水圧計		
	① 始点 [cm]	② 終点 [cm]	③ ②-① [cm]	④ ③×10 [cc]	⑤ 時間 [sec]	⑥ 流量 [cc/sec]	⑦ 始点 [kPa]	⑧ 終点 [kPa]	⑨ 平均値 [kPa]
圧力増加一回目									
1	51.3	51.5	0.2	2	15	0.13	21.07	21.07	21.07
2	51.8	51.9	0.1	1	15	0.07	21.56	21.56	21.56
3	52.1	52.4	0.3	3	60	0.05	21.07	21.07	21.07
4	26.0	26.3	0.3	3	30	0.10	24.50	24.50	24.50
5	10.8	11.2	0.4	4	30	0.13	24.50	24.50	24.50
6	11.5	11.9	0.4	4	30	0.13	26.17	26.17	26.17
7	13.6	14.1	0.5	5	30	0.17	26.95	26.95	26.95
8	14.4	14.9	0.5	5	30	0.17	26.95	26.95	26.95
9	16.0	16.5	0.5	5	30	0.17	27.44	27.44	27.44
10	17.0	17.5	0.5	5	30	0.17	27.44	27.44	27.44
11	18.7	19.3	0.6	6	30	0.20	28.42	28.42	28.42
12	19.6	20.2	0.6	6	30	0.20	27.93	27.93	27.93
13	21.1	21.9	0.8	8	30	0.27	28.91	28.91	28.91
14	22.3	23.0	0.7	7	30	0.23	28.71	28.71	28.71
15	24.3	25.1	0.8	8	30	0.27	29.40	29.40	29.40
16	11.5	12.7	1.2	12	30	0.40	31.36	31.36	31.36
17	13.5	14.8	1.3	13	30	0.43	31.07	31.07	31.07
18	16.0	17.5	1.5	15	30	0.50	31.36	31.36	31.36
19	18.4	19.9	1.5	15	30	0.50	31.36	31.36	31.36
20	21.7	23.4	1.7	17	30	0.57	32.14	32.14	32.14
21	24.4	26.2	1.8	18	30	0.60	31.85	31.85	31.85
22	27.8	29.8	2.0	20	30	0.67	32.34	32.34	32.34
23	12.2	15.0	2.8	28	30	0.93	33.61	33.61	33.61
24	17.2	20.7	3.5	35	30	1.17	34.10	34.10	34.10
25	24.1	28.2	4.1	41	30	1.37	34.30	33.81	34.06
26	14.5	17.2	2.7	27	15	1.80	35.28	35.28	35.28
27	20.4	23.4	3.0	30	15	2.00	35.57	35.38	35.48
28	15.0	18.5	3.5	35	15	2.33	36.06	36.06	36.06
29	17.0	21.9	4.9	49	15	3.27	37.73	37.24	37.49
30	17.0	22.9	5.9	59	15	3.93	38.51	38.51	38.51
31	18.5	25.6	7.1	71	15	4.73	39.20	39.20	39.20
32	19.8	27.6	7.8	78	15	5.20	40.18	39.69	39.94
33	20.0	26.1	6.1	61	10	6.10	40.96	40.38	40.67
圧力減少一回目									
1	19.8	25.6	5.8	58	10	5.80	40.18	39.69	39.94
2	19.4	25.2	5.8	58	10	5.80	40.18	39.89	40.03
3	19.0	24.8	5.8	58	10	5.80	39.69	39.40	39.54
4	18.0	23.7	5.7	57	10	5.70	38.91	38.91	38.91
5	17.6	22.5	4.9	49	10	4.90	37.73	37.83	37.78
6	16.3	21.1	4.8	48	10	4.80	37.24	37.44	37.34
7	16.9	21.6	4.7	47	10	4.70	37.24	37.24	37.24
8	18.2	22.4	4.2	42	10	4.20	36.46	36.26	36.36
9	15.3	19.2	3.9	39	10	3.90	35.57	35.57	35.57
10	15.6	19.0	3.4	34	10	3.40	34.79	34.59	34.69
11	14.5	17.5	3.0	30	10	3.00	33.81	33.61	33.71
12	14.2	16.9	2.7	27	10	2.70	32.93	32.93	32.93

13	14.2	16.7	2.5	25	10	2.50	31.85	31.85	31.85
14	13.9	16.0	2.1	21	10	2.10	30.87	30.67	30.77
15	13.3	15.2	1.9	19	10	1.90	30.18	30.18	30.18
16	13.1	15.6	2.5	25	15	1.67	29.40	29.40	29.40
17	11.9	14.1	2.2	22	15	1.47	28.42	28.42	28.42
18	12.2	14.3	2.1	21	15	1.40	27.44	27.44	27.44
19	12.0	13.8	1.8	18	15	1.20	26.75	26.75	26.75
20	16.0	17.9	1.9	19	15	1.27	26.17	26.17	26.17
21	19.7	21.3	1.6	16	15	1.07	25.68	25.48	25.58
22	23.0	24.6	1.6	16	15	1.07	25.19	25.09	25.14
23	27.8	28.5	0.7	7	15	0.47	24.70	24.70	24.70
24	30.9	32.3	1.4	14	15	0.93	24.50	24.50	24.50
25	34.8	36.1	1.3	13	15	0.87	23.81	23.81	23.81
26	37.2	38.5	1.3	13	15	0.87	23.52	23.52	23.52
27	39.7	40.9	1.2	12	15	0.80	23.32	23.23	23.28
28	43.7	45.8	2.1	21	30	0.70	22.93	22.93	22.93
29	48.5	50.4	1.9	19	30	0.63	22.54	22.54	22.54
30	52.8	54.5	1.7	17	30	0.57	22.05	22.05	22.05

正方增加二回目

1	61.6	62.8	1.2	12	30	0.40	20.58	20.38	20.48
2	51.3	52.6	1.3	13	30	0.43	21.56	21.56	21.56
3	41.5	43.0	1.5	15	30	0.50	22.54	22.34	22.44
4	32.0	33.8	1.8	18	30	0.60	23.52	23.52	23.52
5	22.1	24.2	2.1	21	30	0.70	24.79	24.50	24.65
6	12.5	14.9	2.4	24	30	0.80	25.48	25.48	25.48
7	12.7	15.5	2.8	28	30	0.93	26.46	26.26	26.36
8	11.9	15.1	3.2	32	30	1.07	27.44	27.44	27.44
9	12.4	16.1	3.7	37	30	1.23	28.42	28.42	28.42
10	13.2	17.3	4.1	41	30	1.37	29.40	28.91	29.16
11	13.2	18.0	4.8	48	30	1.60	30.18	29.69	29.94
12	17.2	20.0	2.8	28	15	1.87	30.38	30.38	30.38
13	15.2	18.3	3.1	31	15	2.07	31.36	31.36	31.36
14	16.8	20.3	3.5	35	15	2.33	32.34	32.05	32.19
15	16.0	20.0	4.0	40	15	2.67	33.52	33.32	33.42
16	18.0	22.4	4.4	44	15	2.93	34.30	34.30	34.30
17	21.0	26.1	5.1	51	15	3.40	34.79	34.30	34.55
18	19.2	23.0	3.8	38	10	3.80	36.06	35.87	35.97
19	21.4	25.6	4.2	42	10	4.20	36.46	36.46	36.46
20	21.0	25.7	4.7	47	10	4.70	37.24	37.24	37.24
21	19.5	25.1	5.6	56	10	5.60	38.32	38.32	38.32

1992.8.4 No.2 管グリセリン水溶液 (ケリ:シ'=6:4) で実験
グリセリン水溶液温度 ℃

$$\textcircled{6} = \textcircled{4} / \textcircled{5} * 60 / 1000$$

No.	流量の計算						間隙水圧計		
	① 始点 [cm]	② 終点 [cm]	③ ②-① [cm]	④ ③×10 [cc]	⑤ 時間 [sec]	⑥ 流量 [cc/sec]	⑦ 始点 [kPa]	⑧ 終点 [kPa]	⑨ 平均値 [kPa]
圧力増加一回目									
1	70.4	70.8	0.4	4	15	0.27	19.60	19.60	19.60
2	51.7	52.3	0.6	6	15	0.40	22.05	22.05	22.05
3	32.1	32.6	0.5	5	15	0.33	24.30	24.30	24.30
4	13.2	13.8	0.6	6	15	0.40	26.46	26.46	26.46
5	14.5	16.0	1.5	15	15	1.00	28.22	28.22	28.22
6	14.8	17.1	2.3	23	15	1.53	30.18	29.89	30.04
7	15.9	18.3	2.4	24	15	1.60	33.42	33.32	33.37
8	15.4	17.4	2.0	20	10	2.00	35.48	35.38	35.43
9	17.3	19.9	2.6	26	10	2.60	37.24	37.24	37.24
10	17.1	20.5	3.4	34	10	3.40	38.71	38.51	38.61
11	18.5	22.7	4.2	42	10	4.20	40.18	40.18	40.18
12	21.2	26.6	5.4	54	10	5.40	41.45	41.16	41.31
13	22.2	29.0	6.8	68	10	6.80	43.32	42.92	43.12
14	25.5	33.9	8.4	84	10	8.40	44.69	44.10	44.39
圧力減少一回目									
1	31.5	39.0	7.5	75	10	7.50	42.14	41.75	41.94
2	23.2	29.8	6.6	66	10	6.60	41.16	40.77	40.96
3	20.1	28.2	8.1	81	10	8.10	39.20	39.00	39.10
4	23.6	29.1	5.5	55	10	5.50	37.24	36.85	37.04
5	25.5	30.4	4.9	49	10	4.90	35.28	35.77	35.53
6	16.2	20.3	4.1	41	10	4.10	35.28	35.08	35.18
7	18.1	21.6	3.5	35	10	3.50	32.83	32.83	32.83
8	16.1	19.0	2.9	29	10	2.90	31.36	31.36	31.36
9	15.1	17.7	2.6	26	10	2.60	29.60	29.40	29.50
10	14.7	16.9	2.2	22	10	2.20	27.44	27.44	27.44
11	13.7	15.3	1.6	16	10	1.60	25.58	25.48	25.53
12	32.2	33.6	1.4	14	10	1.40	24.01	23.81	23.91
13	51.0	52.2	1.2	12	10	1.20	22.05	21.66	21.85
14	70.5	71.5	1.0	10	10	1.00	19.60	19.60	19.60
圧力増加二回目									
1	55.3	56.5	1.2	12	10	1.20	21.56	21.56	21.56
2	34.8	36.0	1.2	12	10	1.20	23.72	23.72	23.72
3	14.0	15.4	1.4	14	10	1.40	25.97	25.97	25.97
4	15.0	16.9	1.9	19	10	1.90	27.64	27.64	27.64
5	15.6	17.8	2.2	22	10	2.20	29.89	29.89	29.89
6	17.4	20.1	2.7	27	10	2.70	31.36	31.36	31.36
7	16.7	19.9	3.2	32	10	3.20	33.52	33.42	33.47
8	18.5	22.2	3.7	37	10	3.70	35.67	35.48	35.57
9	18.0	22.3	4.3	43	10	4.30	37.24	37.24	37.24
圧力減少二回目									
1	17.8	21.5	3.7	37	10	3.70	35.38	35.38	35.38
2	16.8	19.9	3.1	31	10	3.10	34.01	33.81	33.91
3	14.2	16.8	2.6	26	10	2.60	32.14	32.14	32.14
4	13.6	15.8	2.2	22	10	2.20	30.38	30.38	30.38
5	13.2	15.1	1.9	19	10	1.90	28.32	28.22	28.27
6	12.2	13.8	1.6	16	10	1.60	26.46	26.36	26.41
7	32.4	33.7	1.3	13	10	1.30	24.11	24.11	24.11
8	50.1	51.1	1.0	10	10	1.00	22.25	22.25	22.25

9	70.2	71.0	0.8	8	10	0.80	20.09	20.09	20.09
---	------	------	-----	---	----	------	-------	-------	-------

1992.8.5 No.4管 グリセリン水溶液使用 (°C)
 抜き取った水の水温 °C
 天気 快晴

$$\textcircled{6} = \textcircled{4} / \textcircled{5} * 60 / 1000$$

No.	流量の計算						間隙水圧計		
	① 始点 [cm]	② 終点 [cm]	③ ②-① [cm]	④ ③×10 [cc]	⑤ 時間 [sec]	⑥ 流量 [cc/sec]	⑦ 始点 [kPa]	⑧ 終点 [kPa]	⑨ 平均値 [kPa]
圧力増加一回目									
1	74.4	76.7	2.3	23	15	1.53	28.616	28.616	28.616
2	54.9	56.8	1.9	19	10	1.90	31.360	31.164	31.262
3	33.4	37.9	4.5	45	30	1.50	33.810	33.320	33.565
4	14.3	19.0	4.7	47	30	1.57	36.260	35.966	36.113
5	15.4	17.8	2.4	24	15	1.60	38.024	38.024	38.024
6	13.6	16.8	3.2	32	15	2.13	40.180	40.180	40.180
7	12.8	16.6	3.8	38	15	2.53	42.140	41.944	42.042
8	14.4	19.5	5.1	51	15	3.40	43.904	43.610	43.757
9	15.7	22.3	6.6	66	15	4.40	45.766	45.276	45.521
10	15.3	20.9	5.6	56	10	5.60	47.530	47.040	47.285
11	16.0	23.2	7.2	72	10	7.20	49.000	48.020	48.510
12	17.8	27.7	9.9	99	10	9.90	50.960	49.490	50.225
13	19.3	33.5	14.2	142	10	14.20	51.940	50.470	51.205
14	20.9	50.2	29.3	293	15	19.53	53.410	49.980	51.695
15	24.0	49.3	25.3	253	10	25.30	54.880	51.940	53.410
16	26.4	57.4	31.0	310	10	31.00	55.860	52.920	54.390
17	30.4	66.3	35.9	359	10	35.90	56.350	52.920	54.635
圧力減少一回目									
1	37.8	79.8	42.0	420	10	42.00	55.860	52.430	54.145
2	32.0	54.5	22.5	225	5	45.00	53.900	52.920	53.410
3	29.5	51.5	22.0	220	5	44.00	53.410	51.940	52.675
4	26.5	47.0	20.5	205	5	41.00	49.000	50.960	49.980
5	28.8	62.0	33.2	332	10	33.20	49.980	48.020	49.000
6	29.0	55.0	26.0	260	8	32.50	49.000	47.040	48.020
7	27.2	43.0	15.8	158	5	31.60	48.020	47.040	47.530
8	24.4	38.6	14.2	142	5	28.40	47.040	46.060	46.550
9	26.5	48.0	21.5	215	10	21.50	45.570	43.610	44.590
10	24.5	44.4	19.9	199	10	19.90	44.100	42.140	43.120
11	23.0	40.9	17.9	179	10	17.90	42.140	40.180	41.160
12	18.6	34.2	15.6	156	10	15.60	40.670	39.690	40.180
13	19.0	32.0	13.0	130	10	13.00	39.200	37.730	38.465
14	18.3	28.8	10.5	105	10	10.50	37.240	36.260	36.750
15	18.8	28.2	9.4	94	10	9.40	36.260	35.770	36.015
16	33.8	42.0	8.2	82	10	8.20	35.280	34.300	34.790
17	67.0	72.7	5.7	57	10	5.70	31.360	30.870	31.115
圧力増加二回目									
1	55.6	62.0	6.4	64	10	6.40	32.340	32.340	32.340
2	36.1	44.1	8.0	80	10	8.00	34.300	34.300	34.300
3	17.4	27.4	10.0	100	10	10.00	36.750	36.064	36.407
4	17.0	27.2	10.2	102	10	10.20	37.240	36.946	37.093
5	17.0	29.5	12.5	125	10	12.50	38.710	38.220	38.465
6	19.1	33.6	14.5	145	10	14.50	40.376	39.200	39.788
7	19.0	36.2	17.2	172	10	17.20	42.140	41.160	41.650
8	19.4	39.4	20.0	200	10	20.00	44.100	42.434	43.267
9	21.0	43.2	22.2	222	10	22.20	45.080	44.100	44.590
10	22.5	47.1	24.6	246	10	24.60	47.040	45.080	46.060
11	30.5	55.8	25.3	253	10	25.30	48.020	46.060	47.040
12	23.0	41.0	18.0	180	5	36.00	49.980	49.000	49.490

13	24.8	44.2	19.4	194	5	38.80	50.960	49.980	50.470
压力减少二回目									
1	23.2	54.0	30.8	308	5	61.60	49.980	48.020	49.000
2	22.0	38.0	16.0	160	5	32.00	48.020	47.040	47.530
3	22.0	36.0	14.0	140	5	28.00	47.040	46.060	46.550
4	22.5	35.0	12.5	125	5	25.00	46.060	45.080	45.570
5	19.0	39.6	20.6	206	10	20.60	44.100	43.120	43.610
6	18.8	37.3	18.5	185	10	18.50	43.120	41.650	42.385
7	18.7	34.1	15.4	154	10	15.40	41.160	40.180	40.670
8	17.4	30.7	13.3	133	10	13.30	39.690	38.710	39.200
9	17.0	28.1	11.1	111	10	11.10	38.220	37.240	37.730
10	17.2	27.4	10.2	102	10	10.20	37.240	36.260	36.750
11	32.5	41.2	8.7	87	10	8.70	35.280	34.790	35.035
12	53.5	60.1	6.6	66	10	6.60	33.124	32.830	32.977
13	67.5	73.2	5.7	57	10	5.70	31.850	31.360	31.605

1992.8.6 No.5 管グリセリン水溶液 (カリ:ズ=6:4) で実験
 グリセリン水溶液温度 30.5℃
 天気 快晴 管の中の抜き取った水温 24.8℃
 ⑥=④/⑤*60/1000

No.	流量の計算						間隙水圧計		
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
	始点 [cm]	終点 [cm]	②-① [cm]	③×10 [cc]	時間 [sec]	流量 [cc/sec]	始点 [kPa]	終点 [kPa]	平均値 [kPa]
圧力増加一回目									
1	69.1	69.3	0.2	2	15	0.13	30.380	30.380	30.380
2	50.5	50.7	0.2	2	15	0.13	32.536	32.536	32.536
3	31.6	31.7	0.1	1	15	0.07	34.790	34.790	34.790
4	11.0	11.3	0.3	3	15	0.20	37.240	37.240	37.240
5	10.1	10.3	0.2	2	15	0.13	38.220	38.220	38.220
6	12.0	12.9	0.9	9	15	0.60	40.670	40.670	40.670
7	11.6	13.2	1.6	16	15	1.07	42.434	42.434	42.434
8	12.7	15.2	2.5	25	10	2.50	43.904	43.610	43.757
9	11.2	11.8	0.6	6	10	0.60	46.256	46.060	46.158
10	10.2	10.9	0.7	7	10	0.70	48.216	48.020	48.118
11	11.1	12.4	1.3	13	15	0.87	50.078	49.980	50.029
12	11.1	12.3	1.2	12	10	1.20	52.234	51.940	52.087
13	12.8	14.6	1.8	18	10	1.80	53.900	53.704	53.802
14	13.0	15.5	2.5	25	10	2.50	55.860	55.664	55.762
15	18.5	22.1	3.6	36	10	3.60	56.938	56.742	56.840
16	14.5	20.0	5.5	55	10	5.50	59.290	58.898	59.094
17	16.0	23.3	7.3	73	10	7.30	60.760	60.564	60.662
18	16.7	26.2	9.5	95	10	9.50	62.720	61.936	62.328
19	18.5	25.5	7.0	70	5	14.00	63.896	63.700	63.798
20	20.5	29.7	9.2	92	5	18.40	64.484	63.896	64.190
圧力減少一回目									
1	21.5	31.5	10.0	100	5	20.00	62.720	62.328	62.524
2	23.0	33.0	10.0	100	5	20.00	60.564	59.976	60.270
3	22.0	34.0	12.0	120	5	24.00	58.016	57.820	57.918
4	22.5	34.5	12.0	120	5	24.00	55.664	55.272	55.468
5	23.0	34.2	11.2	112	5	22.40	53.900	53.900	53.900
6	24.0	33.8	9.8	98	5	19.60	52.626	52.136	52.381
7	22.0	31.1	9.1	91	5	18.20	50.960	50.764	50.862
8	19.2	28.0	8.8	88	5	17.60	49.000	48.804	48.902
9	17.0	25.3	8.3	83	5	16.60	47.334	47.138	47.236
10	16.4	24.0	7.6	76	5	15.20	45.864	45.668	45.766
11	15.2	25.8	10.6	106	10	10.60	44.100	43.414	43.757
12	14.0	22.6	8.6	86	10	8.60	42.336	41.748	42.042
13	14.8	22.7	7.9	79	10	7.90	40.474	39.984	40.229
14	13.3	19.3	6.0	60	10	6.00	39.200	39.200	39.200
15	12.1	17.3	5.2	52	10	5.20	37.632	37.240	37.436
16	12.6	16.3	3.7	37	10	3.70	35.868	35.672	35.770
17	30.0	32.4	2.4	24	10	2.40	34.300	34.104	34.202
18	48.7	50.6	1.9	19	10	1.90	31.948	31.752	31.850
19	64.5	66.2	1.7	17	10	1.70	30.380	30.184	30.282
圧力増加二回目									
1	56.0	57.7	1.7	17	10	1.70	31.654	31.654	31.654
2	35.8	37.7	1.9	19	10	1.90	33.320	33.124	33.222
3	13.5	16.5	3.0	30	10	3.00	35.868	35.476	35.672
4	13.3	16.9	3.6	36	10	3.60	37.730	37.436	37.583
5	13.5	18.5	5.0	50	10	5.00	39.200	39.102	39.151
6	14.2	19.9	5.7	57	10	5.70	40.376	40.180	40.278
7	14.3	22.0	7.7	77	10	7.70	42.140	41.748	41.944

8	15.1	25.2	10.1	101	10	10.10	43.806	43.120	43.463
9	17.4	30.5	13.1	131	10	13.10	45.864	45.080	45.472
10	18.7	34.7	16.0	160	10	16.00	47.138	46.354	46.746
11	21.3	32.0	10.7	107	5	21.40	48.412	48.020	48.216
12	20.8	34.6	13.8	138	5	27.60	49.000	48.510	48.755

压力减少二回目

1	19.5	32.1	12.6	126	5	25.20	48.020	47.628	47.824
2	19.0	38.0	19.0	190	5	38.00	46.256	45.864	46.060
3	17.5	27.3	9.8	98	5	19.60	45.080	44.884	44.982
4	16.6	25.0	8.4	84	5	16.80	43.512	43.316	43.414
5	16.0	22.8	6.8	68	5	13.60	41.160	41.062	41.111
6	15.2	20.7	5.5	55	5	11.00	40.180	39.984	40.082
7	14.1	21.6	7.5	75	10	7.50	38.416	38.220	38.318
8	13.8	20.0	6.2	62	10	6.20	37.240	37.240	37.240
9	14.2	19.4	5.2	52	10	5.20	35.672	35.280	35.476
10	32.2	35.5	3.3	33	11	3.00	33.516	33.320	33.418
11	50.6	53.2	2.6	26	10	2.60	31.556	31.360	31.458
12	68.6	70.4	1.8	18	10	1.80	29.792	29.400	29.596

水温
天気 快晴

⑥=④/⑤*60/1000

No.	流量の計算					間隙水圧計			
	① 始点 [cm]	② 終点 [cm]	③ ②-① [cm]	④ ③×10 [cc]	⑤ 時間 [sec]	⑥ 流量 [cc/sec]	⑦ 始点 [kPa]	⑧ 終点 [kPa]	⑨ 平均値 [kPa]
圧力増加一回目									
1	57.2	57.5	0.3	3	30	0.10	54.880	54.880	54.880
2	31.9	32.4	0.5	5	30	0.17	57.820	57.820	57.820
3	11.5	12.0	0.5	5	30	0.17	59.780	59.780	59.780
4	9.8	10.3	0.5	5	30	0.17	60.760	60.760	60.760
5	11.0	11.5	0.5	5	30	0.17	63.700	62.720	63.210
6	10.8	11.3	0.5	5	30	0.17	64.680	64.680	64.680
7	10.7	11.2	0.5	5	30	0.17	66.640	66.640	66.640
8	10.1	10.7	0.6	6	30	0.20	68.600	68.600	68.600
9	10.3	10.9	0.6	6	30	0.20	70.560	70.560	70.560
10	10.4	11.0	0.6	6	30	0.20	72.520	72.520	72.520
11	10.9	11.8	0.9	9	30	0.30	76.440	76.440	76.440
12	10.8	11.5	0.7	7	30	0.23	78.400	78.400	78.400
13	10.8	12.6	1.8	18	60	0.30	82.320	82.320	82.320
14	11.6	15.2	3.6	36	30	1.20	86.240	86.240	86.240
15	14.3	22.4	8.1	81	30	2.70	88.200	86.240	87.220
16	15.7	34.6	18.9	189	30	6.30	89.180	87.220	88.200
17	19.0	59.1	40.1	401	30	13.37	90.160	86.240	88.200
18	22.5	61.1	38.6	386	15	25.73	92.120	88.200	90.160
19	29.0	68.0	39.0	390	10	39.00	93.100	88.200	90.650
20	23.0	52.3	29.3	293	5	58.60	93.100	90.160	91.630
圧力減少一回目									
1	24.0	48.0	24.0	240	5	48.00	89.180	87.220	88.200
2	23.0	59.5	36.5	365	10	36.50	85.260	82.320	83.790
3	18.5	43.5	25.0	250	10	25.00	81.340	80.360	80.850
4	17.0	34.4	17.4	174	10	17.40	77.420	76.440	76.930
5	17.0	28.5	11.5	115	10	11.50	76.440	75.460	75.950
6	15.4	24.0	8.6	86	10	8.60	74.480	74.480	74.480
7	14.3	21.2	6.9	69	10	6.90	73.500	73.500	73.500
8	13.6	19.4	5.8	58	10	5.80	72.520	72.520	72.520
9	13.5	18.5	5.0	50	10	5.00	72.520	72.520	72.520
10	13.5	17.7	4.2	42	10	4.20	71.540	71.540	71.540
11	13.3	16.8	3.5	35	10	3.50	70.560	70.560	70.560
12	12.2	15.0	2.8	28	10	2.80	70.070	70.070	70.070
13	12.5	14.8	2.3	23	10	2.30	67.620	67.620	67.620
14	12.2	14.0	1.8	18	10	1.80	66.640	66.640	66.640
15	11.8	13.1	1.3	13	10	1.30	64.680	64.680	64.680
16	11.0	12.1	1.1	11	10	1.10	62.720	62.720	62.720
17	11.2	12.1	0.9	9	10	0.90	60.760	60.760	60.760
18	29.3	30.0	0.7	7	10	0.70	58.800	58.800	58.800
19	50.1	50.7	0.6	6	10	0.60	56.840	56.840	56.840
20	69.8	70.2	0.4	4	10	0.40	54.880	54.880	54.880
圧力増加二回目									
1	51.3	51.9	0.6	6	10	0.60	56.840	56.840	56.840
2	32.1	32.7	0.6	6	10	0.60	58.800	58.800	58.800
3	11.3	11.9	0.6	6	10	0.60	60.760	60.760	60.760
4	10.8	11.4	0.6	6	10	0.60	62.720	62.720	62.720
5	8.8	9.4	0.6	6	10	0.60	64.680	64.680	64.680
6	7.9	8.6	0.7	7	10	0.70	66.640	66.640	66.640

7	10.2	11.0	0.8	8	10	0.80	68.600	68.600	68.600
8	11.0	11.8	0.8	8	10	0.80	70.560	70.560	70.560
9	11.5	12.5	1.0	10	10	1.00	72.030	72.030	72.030
10	12.8	13.9	1.1	11	10	1.10	73.990	73.990	73.990
11	11.8	13.1	1.3	13	10	1.30	75.950	75.950	75.950
12	12.2	13.5	1.3	13	10	1.30	77.420	77.420	77.420
13	12.7	14.0	1.3	13	10	1.30	79.380	79.380	79.380
14	12.2	13.8	1.6	16	10	1.60	81.340	81.340	81.340
15	13.0	15.0	2.0	20	10	2.00	83.300	83.300	83.300
16	16.6	19.4	2.8	28	10	2.80	84.280	84.280	84.280
17	14.0	16.7	2.7	27	10	2.70	85.260	85.260	85.260
18	12.9	16.1	3.2	32	10	3.20	86.240	86.240	86.240
19	13.9	17.6	3.7	37	10	3.70	88.200	87.220	87.710
20	14.7	15.5	0.8	8	10	0.80	88.200	88.200	88.200
21	15.4	19.4	4.0	40	10	4.00	90.160	89.670	89.915
22	14.4	19.1	4.7	47	10	4.70	90.650	90.160	90.405
23	14.3	19.7	5.4	54	10	5.40	91.630	91.140	91.385
24	15.3	21.0	5.7	57	10	5.70	90.650	90.160	90.405
25	15.6	22.3	6.7	67	10	6.70	93.590	93.100	93.345
26	16.5	25.1	8.6	86	10	8.60	94.080	93.590	93.835
27	20.0	32.2	12.2	122	10	12.20	95.060	94.080	94.570
28	19.8	36.5	16.7	167	10	16.70	96.040	94.080	95.060
29	20.0	36.0	16.0	160	10	16.00	98.000	96.040	97.020
压力減少二回目									
1	20.5	35.5	15.0	150	10	15.00	96.040	94.080	95.060
2	18.5	33.1	14.6	146	10	14.60	93.100	92.120	92.610
3	19.0	31.5	12.5	125	10	12.50	91.140	90.160	90.650
4	17.5	27.8	10.3	103	10	10.30	88.200	87.710	87.955
5	21.2	25.3	4.1	41	10	4.10	86.240	86.240	86.240
6	14.2	18.0	3.8	38	10	3.80	85.750	85.750	85.750
7	12.8	16.0	3.2	32	10	3.20	84.280	84.280	84.280
8	12.3	14.9	2.6	26	10	2.60	82.320	82.320	82.320
9	11.5	13.3	1.8	18	10	1.80	79.380	79.380	79.380
10	11.3	12.7	1.4	14	10	1.40	77.420	77.420	77.420
11	10.5	11.6	1.1	11	10	1.10	74.480	74.480	74.480
12	9.8	10.7	0.9	9	10	0.90	72.520	72.520	72.520
13	10.1	10.8	0.7	7	10	0.70	70.560	70.560	70.560
14	10.3	10.9	0.6	6	10	0.60	68.600	68.600	68.600
15	10.5	11.0	0.5	5	10	0.50	68.600	68.600	68.600
16	10.2	10.6	0.4	4	10	0.40	66.640	66.640	66.640
17	10.0	10.4	0.4	4	10	0.40	64.680	64.680	64.680
18	10.6	10.9	0.3	3	10	0.30	62.720	62.720	62.720

1992.8.5 No.7管 グリセリン水溶液使用
 抜き取った水の温度
 天気 快晴

⑥=④/⑤*60/1000

No.	流量の計算						間隙水圧計		
	① 始点 [cm]	② 終点 [cm]	③ ②-① [cm]	④ ③×10 [cc]	⑤ 時間 [sec]	⑥ 流量 [cc/sec]	⑦ 始点 [kPa]	⑧ 終点 [kPa]	⑨ 平均値 [kPa]
圧力増加一回目									
1	72.4	76.0	3.6	36	30	1.20	61.544	61.250	61.397
2	51.4	53.4	2.0	20	15	1.33	63.700	63.700	63.700
3	32.2	34.5	2.3	23	15	1.53	65.660	65.660	65.660
4	12.5	15.5	3.0	30	15	2.00	68.110	68.110	68.110
5	12.5	15.9	3.4	34	15	2.27	70.070	70.070	70.070
6	13.0	17.3	4.3	43	15	2.87	72.030	71.540	71.785
7	13.3	18.4	5.1	51	15	3.40	73.794	73.598	73.696
8	14.1	19.7	5.6	56	15	3.73	75.852	75.558	75.705
9	15.2	20.5	5.3	53	15	3.53	77.910	77.910	77.910
10	14.0	19.0	5.0	50	10	5.00	79.086	79.086	79.086
11	13.5	18.9	5.4	54	10	5.40	79.870	79.870	79.870
12	15.2	22.3	7.1	71	10	7.10	81.340	81.340	81.340
13	17.4	27.4	10.0	100	10	10.00	82.810	82.320	82.565
14	20.0	33.9	13.9	139	10	13.90	84.280	83.300	83.790
15	17.5	39.9	22.4	224	10	22.40	85.260	83.790	84.525
16	28.0	62.0	34.0	340	10	34.00	83.790	81.830	82.810
圧力減少一回目									
1	32.0	71.0	39.0	390	10	39.00	81.340	78.890	80.115
2	25.0	62.5	37.5	375	10	37.50	79.380	78.400	78.890
3	29.0	65.5	36.5	365	10	36.50	78.400	76.930	77.665
4	27.5	67.0	39.5	395	10	39.50	76.930	75.460	76.195
5	26.0	60.5	34.5	345	10	34.50	75.460	73.500	74.480
6	25.0	57.2	32.2	322	10	32.20	74.480	73.500	73.990
7	21.0	51.0	30.0	300	10	30.00	74.480	72.520	73.500
8	20.5	47.5	27.0	270	10	27.00	72.520	71.540	72.030
9	21.5	43.5	22.0	220	10	22.00	71.050	70.560	70.805
10	18.5	38.8	20.3	203	10	20.30	70.070	69.384	69.727
11	17.5	35.3	17.8	178	10	17.80	68.600	67.816	68.208
12	20.3	35.0	14.7	147	10	14.70	68.110	67.130	67.620
13	35.7	48.0	12.3	123	10	12.30	66.640	65.660	66.150
14	52.0	61.2	9.2	92	10	9.20	64.680	64.190	64.435
15	65.0	72.4	7.4	74	10	7.40	63.700	63.210	63.455
16	56.5	66.2	9.7	97	10	9.70	64.680	63.994	64.337
圧力増加二回目									
1	37.2	49.1	11.9	119	10	11.90	66.150	65.170	65.660
2	18.8	33.5	14.7	147	10	14.70	68.306	67.424	67.865
3	18.0	34.3	16.3	163	10	16.30	69.580	68.110	68.845
4	19.0	37.1	18.1	181	10	18.10	71.050	69.874	70.462
5	18.0	37.4	19.4	194	10	19.40	71.050	69.874	70.462
6	20.0	41.3	21.3	213	10	21.30	71.736	71.344	71.540
7	21.0	46.5	25.5	255	10	25.50	73.500	72.030	72.765
8	22.0	51.7	29.7	297	10	29.70	74.480	73.500	73.990
9	24.0	58.1	34.1	341	10	34.10	75.460	73.990	74.725
10	24.5	63.3	38.8	388	10	38.80	75.460	74.480	74.970
11	28.0	72.0	44.0	440	10	44.00	76.930	75.460	76.195
12	29.0	68.0	39.0	390	10	39.00	75.460	74.480	74.970
圧力減少二回目									
1	30.0	51.6	21.6	216	10	21.60	74.480	73.990	74.235

2	26.0	61.0	35.0	350	10	35.00	73.500	72.030	72.765
3	24.0	56.5	32.5	325	10	32.50	72.520	71.540	72.030
4	24.0	52.7	28.7	287	10	28.70	71.540	70.560	71.050
5	21.5	47.5	26.0	260	10	26.00	70.560	69.580	70.070
6	19.0	42.0	23.0	230	10	23.00	69.090	68.600	68.845
7	18.5	44.3	25.8	258	15	17.20	67.914	66.934	67.424
8	19.4	38.4	19.0	190	10	19.00	68.110	67.620	67.865
9	35.4	49.8	14.4	144	10	14.40	67.130	66.640	66.885
10	53.9	64.1	10.2	102	10	10.20	65.954	65.170	65.562
11	70.5	77.2	6.7	67	10	6.70	64.680	63.896	64.288

1992.8.6 No.8 管グリセリン水溶液 (グリ:水'=6:4)で実験
 グリセリン水溶液温度 ℃
 目詰まりの状態をなおして実験

⑥=④/⑤*60/1000

No.	流量の計算						間隙水圧計		
	① 始点 [cm]	② 終点 [cm]	③ ②-① [cm]	④ ③×10 [cc]	⑤ 時間 [sec]	⑥ 流量 [cc/sec]	⑦ 始点 [kPa]	⑧ 終点 [kPa]	⑨ 平均値 [kPa]
圧力増加一回目									
1	70.4	70.6	0.2	2	10	0.20	62.720	62.720	62.720
2	50.5	50.8	0.3	3	10	0.30	64.680	64.680	64.680
3	30.4	30.7	0.3	3	10	0.30	66.640	66.640	66.640
4	10.8	11.3	0.5	5	10	0.50	69.580	69.580	69.580
5	10.8	11.3	0.5	5	10	0.50	72.520	72.520	72.520
6	11.4	11.8	0.4	4	10	0.40	74.480	74.480	74.480
7	10.1	10.4	0.3	3	10	0.30	78.400	78.400	78.400
8	10.9	11.1	0.2	2	10	0.20	80.360	80.360	80.360
9	10.4	10.6	0.2	2	10	0.20	83.300	83.300	83.300
10	10.4	10.6	0.2	2	10	0.20	86.240	86.240	86.240
11	11.2	11.4	0.2	2	10	0.20	89.180	89.180	89.180
12	10.2	10.4	0.2	2	10	0.20	92.120	92.120	92.120
13	11.0	11.2	0.2	2	10	0.20	95.060	95.060	95.060
14	10.4	10.6	0.2	2	10	0.20	98.000	98.000	98.000
15	10.5	10.7	0.2	2	10	0.20	100.940	100.940	100.940
16	10.2	10.4	0.2	2	10	0.20	103.880	103.880	103.880
17	11.0	11.2	0.2	2	10	0.20	106.820	106.820	106.820
18	10.4	10.6	0.2	2	10	0.20	109.760	109.760	109.760
19	11.4	11.6	0.2	2	10	0.20	112.700	112.700	112.700
20	10.7	11.4	0.7	7	10	0.70	115.640	115.640	115.640
21	11.0	11.6	0.6	6	10	0.60	118.580	118.580	118.580
22	11.1	11.9	0.8	8	10	0.80	121.520	121.520	121.520
23	11.6	13.0	1.4	14	10	1.40	124.460	124.460	124.460
24	11.9	14.0	2.1	21	10	2.10	127.400	127.400	127.400
25	13.2	16.4	3.2	32	10	3.20	129.360	129.360	129.360
26	13.3	17.9	4.6	46	10	4.60	132.300	132.300	132.300
27	15.0	21.1	6.1	61	10	6.10	135.240	135.240	135.240
28	15.6	23.2	7.6	76	10	7.60	138.180	137.200	137.690
29	17.5	28.5	11.0	110	10	11.00	140.140	139.160	139.650
30	17.5	32.1	14.6	146	10	14.60	143.080	141.120	142.100
31	20.0	39.1	19.1	191	10	19.10	145.040	142.100	143.570
32	21.0	50.0	29.0	290	10	29.00	147.000	142.100	144.550
圧力減少一回目									
1	23.5	39.0	15.5	155	5	31.00	143.080	140.140	141.610
2	23.3	41.0	17.7	177	5	35.40	140.140	136.220	138.180
3	27.0	50.0	23.0	230	5	46.00	135.240	130.340	132.790
4	26.5	62.0	35.5	355	7	50.71	131.320	124.460	127.890
5	27.5	55.0	27.5	275	5	55.00	127.400	122.500	124.950
6	29.0	59.0	30.0	300	5	60.00	123.480	117.600	120.540
7	29.5	61.0	31.5	315	5	63.00	119.560	113.680	116.620
8	30.5	63.0	32.5	325	5	65.00	115.640	109.760	112.700
9	26.5	56.5	30.0	300	5	60.00	111.720	106.820	109.270
10	26.0	56.0	30.0	300	5	60.00	107.800	102.900	105.350
11	34.5	63.0	28.5	285	5	57.00	101.920	98.000	99.960
12	28.1	53.2	25.1	251	5	50.20	98.980	95.060	97.020
13	22.0	43.0	21.0	210	5	42.00	96.040	93.100	94.570
14	22.0	40.0	18.0	180	5	36.00	91.140	89.180	90.160
15	17.5	31.2	13.7	137	5	27.40	88.200	87.220	87.710

16	16.2	27.3	11.1	111	5	22.20	84.280	83.300	83.790
17	16.6	24.4	7.8	78	5	15.60	80.360	79.380	79.870
18	14.9	21.0	6.1	61	5	12.20	76.440	75.460	75.950
19	14.2	21.2	7.0	70	10	7.00	71.540	71.540	71.540
20	13.2	17.5	4.3	43	10	4.30	67.620	67.620	67.620
21	30.4	33.6	3.2	32	10	3.20	65.660	65.660	65.660
22	54.2	56.4	2.2	22	10	2.20	62.720	62.720	62.720
23	75.4	77.0	1.6	16	10	1.60	60.760	60.760	60.760
压力增加二回目									
1	52.4	54.0	1.6	16	10	1.60	62.720	62.720	62.720
2	31.2	33.1	1.9	19	10	1.90	65.660	65.660	65.660
3	12.6	14.8	2.2	22	10	2.20	67.620	67.620	67.620
4	12.0	14.5	2.5	25	10	2.50	69.580	69.580	69.580
5	12.3	15.0	2.7	27	10	2.70	71.540	71.540	71.540
6	12.7	15.7	3.0	30	10	3.00	73.500	73.500	73.500
7	12.8	16.5	3.7	37	10	3.70	74.480	74.480	74.480
8	13.2	17.3	4.1	41	10	4.10	76.440	76.440	76.440
9	14.1	18.8	4.7	47	10	4.70	78.400	78.400	78.400
10	15.8	21.6	5.8	58	10	5.80	81.340	81.340	81.340
11	15.7	22.6	6.9	69	10	6.90	84.280	83.300	83.790
12	15.5	24.3	8.8	88	10	8.80	87.220	86.240	86.730
13	16.3	28.8	12.5	125	10	12.50	90.160	88.200	89.180
14	16.2	32.0	15.8	158	10	15.80	92.120	90.160	91.140
15	18.5	29.0	10.5	105	5	21.00	94.080	93.100	93.590
16	19.2	32.8	13.6	136	5	27.20	96.040	94.080	95.060
压力减少二回目									
1	18.5	30.8	12.3	123	5	24.60	93.100	91.140	92.120
2	17.7	29.6	11.9	119	5	23.80	91.140	89.180	90.160
3	17.5	27.8	10.3	103	5	20.60	88.200	87.220	87.710
4	17.0	26.2	9.2	92	5	18.40	85.260	84.280	84.770
5	16.1	24.1	8.0	80	5	16.00	81.340	82.320	81.830
6	15.3	24.6	9.3	93	7	13.29	80.360	79.380	79.870
7	14.8	20.2	5.4	54	5	10.80	78.400	77.420	77.910
8	13.3	17.4	4.1	41	5	8.20	74.480	74.480	74.480
9	12.5	18.2	5.7	57	10	5.70	73.500	73.500	73.500
10	12.0	16.4	4.4	44	10	4.40	69.580	69.580	69.580
11	12.4	15.7	3.3	33	10	3.30	66.640	66.640	66.640
12	29.9	32.2	2.3	23	10	2.30	64.680	64.680	64.680
13	48.8	50.5	1.7	17	10	1.70	62.720	62.720	62.720
14	66.1	67.4	1.3	13	10	1.30	60.760	60.760	60.760

天気 快晴

⑥=④/⑤*60/1000

No.	流量の計算					間隙水圧計			
	① 始点 [cm]	② 終点 [cm]	③ ②-① [cm]	④ ③×10 [cc]	⑤ 時間 [sec]	⑥ 流量 [cc/sec]	⑦ 始点 [kPa]	⑧ 終点 [kPa]	⑨ 平均値 [kPa]
圧力増加一回目									
1	70.2	70.4	0.2	2	10	0.20	41.160	41.160	41.160
2	51.0	51.2	0.2	2	15	0.13	43.120	43.120	43.120
3	31.3	31.8	0.5	5	30	0.17	45.080	45.080	45.080
4	11.5	13.0	1.5	15	30	0.50	47.040	47.040	47.040
5	12.0	14.2	2.2	22	30	0.73	48.020	48.020	48.020
6	11.9	13.3	1.4	14	15	0.93	50.960	50.960	50.960
7	12.9	14.9	2.0	20	15	1.33	51.940	51.940	51.940
8	12.9	15.0	2.1	21	15	1.40	53.900	53.900	53.900
9	13.6	15.3	1.7	17	10	1.70	55.860	55.860	55.860
10	13.7	15.7	2.0	20	10	2.00	57.820	57.820	57.820
11	13.3	15.8	2.5	25	10	2.50	58.800	58.800	58.800
12	14.0	17.2	3.2	32	10	3.20	60.760	60.760	60.760
13	15.0	20.3	5.3	53	10	5.30	62.720	62.720	62.720
14	19.7	28.5	8.8	88	10	8.80	63.700	62.720	63.210
15	21.0	36.4	15.4	154	10	15.40	65.660	64.680	65.170
16	22.0	47.3	25.3	253	10	25.30	66.640	64.680	65.660
圧力減少一回目									
1	22.7	39.5	16.8	168	5	33.60	64.680	63.700	64.190
2	20.8	37.0	16.2	162	5	32.40	62.720	61.740	62.230
3	19.5	33.8	14.3	143	5	28.60	60.760	60.760	60.760
4	18.5	32.2	13.7	137	5	27.40	58.800	58.800	58.800
5	19.4	31.4	12.0	120	5	24.00	57.820	56.840	57.330
6	19.5	38.1	18.6	186	10	18.60	55.860	54.880	55.370
7	14.8	30.1	15.3	153	10	15.30	54.880	53.900	54.390
8	15.2	29.2	14.0	140	10	14.00	52.920	51.940	52.430
9	14.6	25.3	10.7	107	10	10.70	50.960	50.960	50.960
10	13.5	22.6	9.1	91	10	9.10	49.000	49.000	49.000
11	12.9	19.9	7.0	70	10	7.00	48.020	48.020	48.020
12	14.0	19.0	5.0	50	10	5.00	47.040	47.040	47.040
13	12.8	17.4	4.6	46	10	4.60	47.040	47.040	47.040
14	23.5	27.1	3.6	36	10	3.60	46.060	46.060	46.060
15	29.8	33.0	3.2	32	10	3.20	45.080	45.080	45.080
16	37.9	41.4	3.5	35	10	3.50	45.080	45.080	45.080
17	37.6	41.1	3.5	35	10	3.50	45.080	45.080	45.080
18	47.9	50.1	2.2	22	10	2.20	44.100	43.120	43.610
19	56.4	58.5	2.1	21	10	2.10	43.120	43.120	43.120
20	65.0	66.4	1.4	14	10	1.40	42.140	42.140	42.140
21	68.7	69.9	1.2	12	10	1.20	41.160	41.160	41.160
22	72.0	73.5	1.5	15	10	1.50	41.160	41.160	41.160
圧力増加二回目									
1	63.9	65.7	1.8	18	10	1.80	42.140	42.140	42.140
2	52.6	54.4	1.8	18	10	1.80	43.120	43.120	43.120
3	41.1	43.0	1.9	19	10	1.90	44.100	44.100	44.100
4	22.3	25.0	2.7	27	10	2.70	46.060	46.060	46.060
5	4.4	8.0	3.6	36	10	3.60	48.020	47.040	47.530
6	13.7	18.6	4.9	49	10	4.90	49.000	49.000	49.000
7	14.8	22.3	7.5	75	10	7.50	50.960	50.960	50.960
8	15.8	26.5	10.7	107	10	10.70	53.900	52.920	53.410

9	17.5	34.0	16.5	165	10	16.50	55.860	54.880	55.370
10	18.0	26.5	8.5	85	10	8.50	54.880	53.900	54.390
11	18.6	30.1	11.5	115	5	23.00	56.840	56.840	56.840
压力减少二回目									
1	18.6	36.3	17.7	177	10	17.70	55.860	53.900	54.880
2	20.0	34.7	14.7	147	10	14.70	52.920	52.920	52.920
3	15.4	28.2	12.8	128	15	8.53	51.940	50.960	51.450
4	13.9	24.2	10.3	103	10	10.30	50.960	49.980	50.470
5	11.3	20.1	8.8	88	10	8.80	49.000	49.000	49.000
6	12.3	19.0	6.7	67	10	6.70	48.020	48.020	48.020
7	12.9	19.1	6.2	62	10	6.20	47.040	47.040	47.040
8	23.3	27.8	4.5	45	10	4.50	46.060	46.060	46.060
9	30.4	34.5	4.1	41	10	4.10	45.080	45.080	45.080
10	36.6	40.3	3.7	37	5	7.40	45.080	45.080	45.080
11	42.8	46.0	3.2	32	5	6.40	44.100	44.100	44.100
12	47.8	50.8	3.0	30	5	6.00	44.100	44.100	44.100
13	55.4	57.6	2.2	22	5	4.40	43.120	43.120	43.120
14	60.0	62.1	2.1	21	5	4.20	43.120	43.120	43.120
15	64.9	67.2	2.3	23	5	4.60	42.140	42.140	42.140

压力减少二回目

1	23.5	37.5	14.0	140	5	28.00	56.840	56.840	56.840
2	20.5	33.0	12.5	125	5	25.00	55.860	55.860	55.860
3	18.5	28.5	10.0	100	5	20.00	54.880	54.880	54.880
4	17.0	29.0	12.0	120	10	12.00	53.900	53.900	53.900
5	16.0	26.2	10.2	102	10	10.20	52.920	52.920	52.920
6	16.3	26.3	10.0	100	10	10.00	52.920	52.920	52.920
7	33.5	38.6	5.1	51	10	5.10	51.940	51.940	51.940
8	51.7	55.6	3.9	39	10	3.90	49.980	49.980	49.980
9	68.5	70.4	1.9	19	10	1.90	49.000	49.000	49.000

グリセリン水溶液温度 ℃
 天気 快晴

$$\textcircled{6} = \textcircled{4} / \textcircled{5} * 60 / 1000$$

No.	流量の計算						間隙水圧計		
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
	始点 [cm]	終点 [cm]	②-① [cm]	③×10 [cc]	時間 [sec]	流量 [cc/sec]	始点 [kPa]	終点 [kPa]	平均値 [kPa]
圧力増加一回目									
1	51.4	51.7	0.3	3	30	0.10	49.294	49.098	49.196
2	40.1	40.3	0.2	2	30	0.07	50.470	50.470	50.470
3	29.7	29.9	0.2	2	30	0.07	51.940	51.940	51.940
4	19.8	19.9	0.1	1	30	0.03	52.920	52.920	52.920
5	10.0	10.2	0.2	2	30	0.07	53.900	53.900	53.900
6	11.3	11.7	0.4	4	30	0.13	54.880	54.880	54.880
7	10.1	10.4	0.3	3	30	0.10	56.840	56.840	56.840
8	11.1	11.5	0.4	4	30	0.13	58.800	58.800	58.800
9	9.8	10.2	0.4	4	30	0.13	60.270	60.270	60.270
10	11.1	11.6	0.5	5	30	0.17	62.230	62.230	62.230
11	10.3	12.6	2.3	23	30	0.77	63.994	63.994	63.994
12	14.8	17.6	2.8	28	15	1.87	65.170	65.170	65.170
13	10.8	11.5	0.7	7	15	0.47	66.640	66.640	66.640
14	10.5	11.6	1.1	11	15	0.73	67.620	67.620	67.620
15	12.0	14.0	2.0	20	15	1.33	68.404	68.404	68.404
16	11.7	14.2	2.5	25	15	1.67	69.090	69.090	69.090
17	12.4	16.0	3.6	36	15	2.40	69.874	69.874	69.874
18	14.0	19.4	5.4	54	15	3.60	70.070	70.070	70.070
19	15.5	24.7	9.2	92	15	6.13	70.854	69.776	70.315
20	17.4	27.6	10.2	102	10	10.20	71.246	70.560	70.903
圧力減少一回目									
1	23.0	35.9	12.9	129	10	12.90	71.148	70.266	70.707
2	27.5	41.0	13.5	135	10	13.50	69.580	68.600	69.090
3	22.5	33.7	11.2	112	10	11.20	68.894	68.404	68.649
4	20.5	32.2	11.7	117	10	11.70	68.110	67.620	67.865
5	21.7	32.7	11.0	110	10	11.00	67.130	66.640	66.885
6	20.0	31.5	11.5	115	10	11.50	66.150	65.268	65.709
7	18.0	28.9	10.9	109	10	10.90	65.170	64.680	64.925
8	19.2	28.8	9.6	96	10	9.60	64.288	63.700	63.994
9	17.0	26.3	9.3	93	10	9.30	63.406	63.014	63.210
10	15.7	24.2	8.5	85	10	8.50	62.720	62.132	62.426
11	17.0	24.3	7.3	73	10	7.30	61.740	61.348	61.544
12	15.3	22.7	7.4	74	10	7.40	61.054	60.760	60.907
13	14.6	21.3	6.7	67	10	6.70	60.466	60.466	60.466
14	14.0	20.7	6.7	67	10	6.70	59.388	59.682	59.535
15	13.8	20.0	6.2	62	10	6.20	58.506	58.800	58.653
16	14.0	18.5	4.5	45	10	4.50	58.114	58.016	58.065
17	13.2	17.0	3.8	38	10	3.80	57.526	57.526	57.526
18	12.2	15.5	3.3	33	10	3.30	56.840	56.840	56.840
19	11.5	14.0	2.5	25	10	2.50	55.958	55.958	55.958
20	11.0	13.0	2.0	20	10	2.00	54.880	54.880	54.880
21	10.4	11.9	1.5	15	10	1.50	53.900	53.900	53.900
22	9.9	11.2	1.3	13	10	1.30	52.920	52.920	52.920
23	9.6	10.8	1.2	12	15	0.80	52.430	52.430	52.430
24	11.9	13.1	1.2	12	15	0.80	52.430	52.430	52.430
25	19.0	20.2	1.2	12	15	0.80	51.156	51.156	51.156
26	26.8	27.6	0.8	8	15	0.53	50.274	50.078	50.176

27	40.3	40.7	0.4	4	15	0.27	49.000	49.000	49.000	
28	45.8	46.1	0.3	3	15	0.20	48.020	48.020	48.020	
29	50.5	50.9	0.4	4	15	0.27	47.628	47.628	47.628	
30	55.4	55.5	0.1	1	15	0.07	47.040	47.040	47.040	
31	60.5	61.0	0.5	5	30	0.17	46.354	46.354	46.354	
32	67.2	68.0	0.8	8	30	0.27	45.570	45.570	45.570	
33	71.2	71.9	0.7	7	30	0.23	45.080	45.276	45.178	
压力增加二回目										
1	50.0	51.7	1.7	17	15	1.13	48.020	47.530	47.775	
2	31.2	34.0	2.8	28	15	1.87	49.784	49.784	49.784	
3	13.1	16.6	3.5	35	15	2.33	51.940	51.940	51.940	
4	13.6	18.1	4.5	45	15	3.00	53.900	53.900	53.900	
5	14.5	20.0	5.5	55	15	3.67	55.664	55.664	55.664	
6	13.2	18.8	5.6	56	15	3.73	55.664	55.664	55.664	
7	15.7	22.3	6.6	66	15	4.40	57.134	57.134	57.134	
8	15.4	21.6	6.2	62	10	6.20	58.800	58.800	58.800	
9	17.9	24.6	6.7	67	10	6.70	60.270	59.780	60.025	
10	19.0	28.0	9.0	90	10	9.00	61.740	61.054	61.397	
11	18.0	28.0	10.0	100	10	10.00	62.230	62.034	62.132	
压力减少二回目										
1	17.5	26.0	8.5	85	10	8.50	60.760	60.760	60.760	
2	15.5	22.0	6.5	65	10	6.50	59.388	59.584	59.486	
3	12.5	17.7	5.2	52	10	5.20	58.114	58.310	58.212	
4	12.5	15.5	3.0	30	10	3.00	56.840	56.448	56.644	
5	11.0	12.8	1.8	18	10	1.80	54.880	54.880	54.880	
6	9.8	10.9	1.1	11	15	0.73	52.920	52.920	52.920	
7	9.4	10.2	0.8	8	15	0.53	51.940	51.940	51.940	
8	29.9	30.4	0.5	5	30	0.17	49.882	49.980	49.931	
9	47.1	48.3	1.2	12	30	0.40	48.020	48.020	48.020	
10	65.7	66.1	0.4	4	30	0.13	45.766	45.766	45.766	

1992.8.5 No.12管グリセリン水溶液使用 (°C)
 抜き取った水の温度 °C
 天気 快晴

$$\textcircled{6} = \textcircled{4} / \textcircled{5} * 60 / 1000$$

No.	流量の計算						間隙水圧計		
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
	始点 [cm]	終点 [cm]	②-① [cm]	③×10 [cc]	時間 [sec]	流量 [cc/sec]	始点 [kPa]	終点 [kPa]	平均値 [kPa]
圧力増加一回目									
1	71.7	72.0	0.3	3	10	0.30	59.780	59.780	59.780
2	50.8	51.2	0.4	4	15	0.27	61.740	61.740	61.740
3	31.1	31.7	0.6	6	15	0.40	64.680	64.680	64.680
4	11.3	11.7	0.4	4	15	0.27	66.640	66.640	66.640
5	10.6	11.0	0.4	4	15	0.27	68.600	68.600	68.600
6	10.4	10.8	0.4	4	15	0.27	70.560	70.560	70.560
7	10.7	11.2	0.5	5	15	0.33	72.520	72.520	72.520
8	10.8	11.3	0.5	5	15	0.33	74.480	74.480	74.480
9	10.4	11.0	0.6	6	15	0.40	76.440	76.440	76.440
10	10.8	11.3	0.5	5	15	0.33	77.420	78.400	77.910
11	10.6	11.2	0.6	6	15	0.40	80.360	80.360	80.360
12	10.6	11.2	0.6	6	15	0.40	81.340	81.340	81.340
13	10.5	11.1	0.6	6	15	0.40	83.300	83.300	83.300
14	11.8	12.4	0.6	6	15	0.40	85.260	85.260	85.260
15	10.6	11.2	0.6	6	15	0.40	87.220	87.220	87.220
16	10.7	11.5	0.8	8	15	0.53	89.180	89.180	89.180
17	11.0	11.9	0.9	9	15	0.60	91.140	91.140	91.140
18	10.9	12.0	1.1	11	15	0.73	93.100	93.100	93.100
19	11.3	13.0	1.7	17	15	1.13	95.060	95.060	95.060
20	11.6	13.8	2.2	22	15	1.47	97.020	97.020	97.020
21	12.2	15.4	3.2	32	15	2.13	98.980	98.000	98.490
22	13.0	18.5	5.5	55	15	3.67	99.960	99.960	99.960
23	14.5	21.1	6.6	66	10	6.60	101.920	100.940	101.430
24	16.7	28.3	11.6	116	10	11.60	102.900	101.920	102.410
25	19.5	29.5	10.0	100	5	20.00	103.880	102.900	103.390
26	20.5	34.0	13.5	135	5	27.00	104.860	102.900	103.880
圧力減少一回目									
1	21.5	36.5	15.0	150	5	30.00	101.920	99.960	100.940
2	21.5	37.5	16.0	160	5	32.00	99.960	98.000	98.980
3	22.5	39.5	17.0	170	5	34.00	97.020	95.060	96.040
4	21.5	39.5	18.0	180	5	36.00	94.080	93.100	93.590
5	23.0	41.0	18.0	180	5	36.00	92.120	91.140	91.630
6	21.5	41.0	19.5	195	5	39.00	90.160	89.180	89.670
7	22.0	40.5	18.5	185	5	37.00	89.180	87.220	88.200
8	20.0	38.0	18.0	180	5	36.00	86.240	85.260	85.750
9	20.0	37.5	17.5	175	5	35.00	84.280	83.300	83.790
10	20.0	36.5	16.5	165	5	33.00	83.300	82.320	82.810
11	19.0	34.5	15.5	155	5	31.00	81.340	80.360	80.850
12	19.0	33.0	14.0	140	5	28.00	80.360	79.380	79.870
13	18.0	31.5	13.5	135	5	27.00	78.400	77.420	77.910
14	16.5	29.0	12.5	125	5	25.00	77.420	76.440	76.930
15	18.0	28.5	10.5	105	5	21.00	75.460	74.480	74.970
16	16.5	26.5	10.0	100	5	20.00	73.500	73.500	73.500
17	15.0	24.0	9.0	90	5	18.00	71.540	71.540	71.540
18	15.0	22.5	7.5	75	5	15.00	70.560	70.560	70.560
19	14.5	26.0	11.5	115	10	11.50	68.600	68.600	68.600
20	14.0	23.7	9.7	97	10	9.70	66.640	66.640	66.640
21	13.4	21.1	7.7	77	10	7.70	65.660	65.660	65.660

22	13.6	20.5	6.9	69	10	6.90	64.680	64.680	64.680
23	30.2	34.6	4.4	44	10	4.40	62.720	62.720	62.720
24	49.7	50.6	0.9	9	10	0.90	60.760	60.760	60.760
25	68.3	70.3	2.0	20	10	2.00	58.800	58.800	58.800
压力增加二回目									
1	53.5	59.0	5.5	55	15	3.67	59.780	59.780	59.780
2	33.8	38.2	4.4	44	10	4.40	62.720	62.720	62.720
3	14.1	19.3	5.2	52	10	5.20	64.680	64.680	64.680
4	13.5	19.3	5.8	58	10	5.80	66.640	66.640	66.640
5	13.7	20.5	6.8	68	10	6.80	67.620	67.620	67.620
6	14.2	22.2	8.0	80	10	8.00	69.580	69.580	69.580
7	15.5	24.8	9.3	93	10	9.30	71.540	70.560	71.050
8	14.5	20.5	6.0	60	5	12.00	73.500	73.500	73.500
9	16.0	23.7	7.7	77	5	15.40	75.460	75.460	75.460
10	17.1	26.3	9.2	92	5	18.40	77.420	76.440	76.930
11	17.4	28.3	10.9	109	5	21.80	78.400	77.420	77.910
12	19.0	31.2	12.2	122	5	24.40	79.380	78.400	78.890
13	19.5	34.7	15.2	152	5	30.40	80.360	79.380	79.870
压力减少二回目									
1	18.0	32.5	14.5	145	5	29.00	78.400	78.400	78.400
2	18.2	32.2	14.0	140	5	28.00	76.440	76.440	76.440
3	17.4	41.8	24.4	244	10	24.40	75.460	73.500	74.480
4	17.3	29.6	12.3	123	5	24.60	73.500	73.500	73.500
5	19.3	29.5	10.2	102	5	20.40	71.540	71.540	71.540
6	15.1	24.4	9.3	93	5	18.60	70.560	70.560	70.560
7	13.2	21.6	8.4	84	5	16.80	68.600	68.600	68.600
8	12.4	24.5	12.1	121	10	12.10	66.640	66.640	66.640
9	13.7	23.3	9.6	96	10	9.60	65.660	64.680	65.170
10	13.2	22.0	8.8	88	10	8.80	63.700	63.700	63.700
11	32.7	39.0	6.3	63	10	6.30	62.720	62.720	62.720
12	49.7	53.5	3.8	38	10	3.80	60.760	60.760	60.760
13	68.8	71.0	2.2	22	10	2.20	58.800	58.800	58.800

1992.8.5 No.H5-1 グリセリン水溶液使用 () (°C)
 抜き取った水の温度 °C
 天気 快晴

$$\textcircled{6} = \textcircled{4} / \textcircled{5} * 60 / 1000$$

No.	流量の計算						間隙水圧計		
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
	始点 [cm]	終点 [cm]	②-① [cm]	③×10 [cc]	時間 [sec]	流量 [cc/sec]	始点 [kPa]	終点 [kPa]	平均値 [kPa]
圧力増加一回目									
1	51.50	61.80	10.30	103	15	6.87	15.68	15.68	15.68
2	34.00	55.00	21.00	210	15	14.00	16.95	17.64	17.30
3	52.10	58.20	6.10	61	15	4.07	19.11	18.62	18.87
4	34.30	42.00	7.70	77	15	5.13	21.56	20.58	21.07
5	13.20	22.60	9.40	94	15	6.27	23.52	22.54	23.03
6	26.50	36.00	9.50	95	15	6.33	23.03	22.54	22.79
7	14.70	25.70	11.00	110	15	7.33	26.46	25.97	26.22
8	15.20	27.50	12.30	123	15	8.20	28.42	27.93	28.18
9	15.10	27.50	12.40	124	15	8.27	30.38	29.40	29.89
10	14.50	28.50	14.00	140	15	9.33	32.34	31.36	31.85
11	15.00	29.50	14.50	145	15	9.67	34.30	33.32	33.81
12	16.20	32.40	16.20	162	15	10.80	36.26	35.28	35.77
13	16.50	34.30	17.80	178	15	11.87	38.22	36.75	37.49
14	16.00	36.00	20.00	200	15	13.33	39.69	38.22	38.96
15	17.70	40.50	22.80	228	15	15.20	41.16	39.20	40.18
16	16.60	34.30	17.70	177	10	17.70	43.12	42.14	42.63
17	16.50	38.10	21.60	216	10	21.60	44.59	43.12	43.86
18	20.50	34.30	13.80	138	5	27.60	46.06	45.08	45.57
19	20.50	36.50	16.00	160	5	32.00	46.06	44.59	45.33
20	21.00	39.50	18.50	185	5	37.00	49.00	47.04	48.02
圧力減少一回目									
1	21.00	40.00	19.00	190	5	38.00	46.06	45.08	45.57
2	20.50	36.60	16.10	161	5	32.20	45.08	44.10	44.59
3	20.20	36.10	15.90	159	5	31.80	44.10	43.12	43.61
4	18.00	32.00	14.00	140	5	28.00	42.63	41.16	41.90
5	17.70	30.60	12.90	129	5	25.80	41.16	40.18	40.67
6	16.00	28.00	12.00	120	5	24.00	39.20	38.71	38.96
7	17.10	27.30	10.20	102	5	20.40	37.63	37.24	37.44
8	17.50	26.90	9.40	94	5	18.80	36.26	35.77	36.02
9	17.00	24.90	7.90	79	5	15.80	34.79	34.30	34.55
10	15.80	22.60	6.80	68	5	13.60	32.83	32.34	32.59
11	15.50	26.50	11.00	110	10	11.00	31.36	30.38	30.87
12	15.50	25.80	10.30	103	10	10.30	28.91	28.42	28.67
13	14.20	23.40	9.20	92	10	9.20	26.75	26.46	26.61
14	15.30	23.20	7.90	79	10	7.90	24.99	24.50	24.75
15	14.20	21.40	7.20	72	10	7.20	23.52	23.52	23.52
16	25.50	31.80	6.30	63	10	6.30	22.54	22.05	22.30
17	35.80	41.50	5.70	57	10	5.70	21.56	21.07	21.32
18	45.00	50.30	5.30	53	10	5.30	20.58	20.09	20.34
19	54.50	60.00	5.50	55	10	5.50	19.60	19.60	19.60
20	64.00	68.80	4.80	48	10	4.80	18.62	18.13	18.38
圧力増加二回目									
1	51.50	57.60	6.10	61	10	6.10	19.60	19.60	19.60
2	35.70	42.40	6.70	67	10	6.70	21.56	21.07	21.32
3	22.00	29.20	7.20	72	10	7.20	22.83	22.54	22.69
4	14.20	21.10	6.90	69	10	6.90	23.52	23.52	23.52
5	14.00	21.70	7.70	77	10	7.70	25.28	24.50	24.89
6	13.80	22.50	8.70	87	10	8.70	27.44	26.46	26.95

7	14.00	23.40	9.40	94	10	9.40	28.91	28.42	28.67
8	15.70	26.10	10.40	104	10	10.40	31.36	30.38	30.87
9	15.50	27.50	12.00	120	10	12.00	32.83	32.34	32.59
10	16.20	29.90	13.70	137	10	13.70	34.30	33.81	34.06
11	16.00	31.80	15.80	158	10	15.80	36.46	35.28	35.87
12	16.00	33.90	17.90	179	10	17.90	38.22	37.24	37.73
13	16.50	27.70	11.20	112	5	22.40	39.89	39.20	39.54
14	17.90	30.90	13.00	130	5	26.00	41.16	40.18	40.67
15	18.00	32.10	14.10	141	5	28.20	42.43	41.65	42.04
16	17.20	34.20	17.00	170	5	34.00	44.10	43.12	43.61
17	20.00	39.00	19.00	190	5	38.00	45.08	44.10	44.59
压力減少二回目									
1	20.30	40.80	20.50	205	5	41.00	43.61	42.63	43.12
2	20.10	38.20	18.10	181	5	36.20	43.12	41.16	42.14
3	19.00	35.60	16.60	166	5	33.20	41.65	40.18	40.92
4	18.50	32.60	14.10	141	5	28.20	39.69	38.71	39.20
5	17.70	30.70	13.00	130	5	26.00	38.71	38.22	38.47
6	16.00	25.60	9.60	96	5	19.20	35.77	35.57	35.67
7	17.80	25.90	8.10	81	5	16.20	34.30	34.01	34.15
8	15.90	23.30	7.40	74	5	14.80	32.34	32.34	32.34
9	15.00	26.70	11.70	117	10	11.70	30.38	29.89	30.14
10	16.00	25.90	9.90	99	10	9.90	28.42	28.42	28.42
11	14.50	23.90	9.40	94	10	9.40	26.95	26.46	26.71
12	13.80	21.80	8.00	80	10	8.00	25.48	24.99	25.24
13	13.50	20.40	6.90	69	10	6.90	23.52	23.52	23.52
14	23.60	29.90	6.30	63	10	6.30	22.54	22.54	22.54
15	33.00	38.60	5.60	56	10	5.60	21.56	21.56	21.56
16	41.40	46.90	5.50	55	10	5.50	20.58	20.58	20.58
17	50.20	55.10	4.90	49	10	4.90	19.60	19.60	19.60

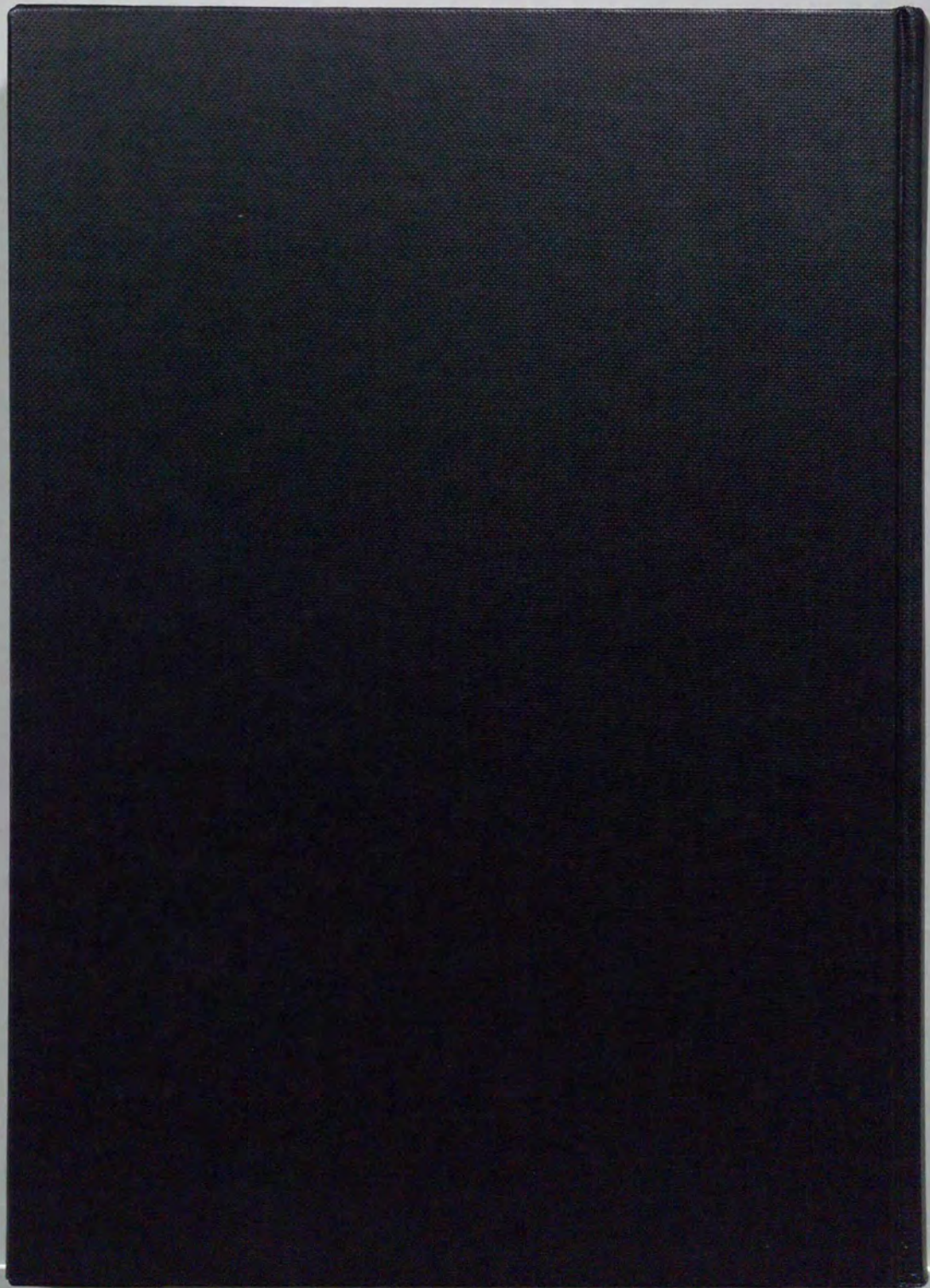
1992.8.5 No.H5-4グリセリン水溶液使用 (°C)

抜き取った水の温度 °C

天気 快晴

$$\textcircled{6} = \textcircled{4} / \textcircled{5} * 60 / 1000$$

流量の計算						間隙水圧計			
No.	① 始点 [cm]	② 終点 [cm]	③ ②-① [cm]	④ ③×10 [cc]	⑤ 時間 [sec]	⑥ 流量 [cc/sec]	⑦ 始点 [kPa]	⑧ 終点 [kPa]	⑨ 平均値 [kPa]
圧力増加一回目									
1	50.2	50.9	0.7	7.0	30	0.23	56.74	56.74	56.74
2	30.7	31.3	0.6	6.0	30	0.20	58.80	58.80	58.80
3	10.2	10.9	0.7	7.0	30	0.23	61.25	61.25	61.25
4	10.9	11.6	0.7	7.0	30	0.23	65.66	65.66	65.66
5	10.6	11.4	0.8	8.0	30	0.27	70.56	70.56	70.56
6	10.6	11.4	0.8	8.0	30	0.27	75.46	75.46	75.46
7	11.2	12.1	0.9	9.0	30	0.30	80.36	79.87	80.12
8	10.8	11.7	0.9	9.0	30	0.30	84.77	84.77	84.77
9	11.5	12.4	0.9	9.0	30	0.30	89.67	89.67	89.67
10	11.0	12.0	1.0	10.0	30	0.33	94.67	94.67	94.67
11	11.6	12.7	1.1	11.0	30	0.37	99.47	99.47	99.47
12	11.6	12.9	1.3	13.0	30	0.43	103.88	103.88	103.88
13	11.4	12.8	1.4	14.0	30	0.47	108.78	108.78	108.78
14	12.2	14.0	1.8	18.0	30	0.60	113.68	113.68	113.68
15	12.9	14.5	1.6	16.0	30	0.53	118.58	118.58	118.58
16	11.7	13.1	1.4	14.0	30	0.47	123.48	123.48	123.48
17	12.3	40.1	27.8	278.0	15	18.53	128.38	118.58	123.48
圧力増加二回目									
1	11.0	13.8	2.8	28.0	15	1.87	61.74	61.25	61.50
2	21.5	27.3	5.8	58.0	15	3.87	64.68	63.70	64.19
3	33.3	40.3	7.0	70.0	15	4.67	68.11	67.62	67.87
4	42.7	52.2	9.5	95.0	15	6.33	71.74	71.54	71.64
5	49.0	62.0	13.0	130.0	15	8.67	74.97	74.97	74.97
6	55.3	61.5	6.2	62.0	5	12.40	77.42	77.91	77.67
7	64.0	72.5	8.5	85.0	5	17.00	80.36	80.85	80.61
圧力減少二回目									
1	52.0	58.0	6.0	60.0	5	12.00	78.40	78.40	78.40
2	46.4	52.2	5.8	58.0	10	5.80	75.46	75.46	75.46
3	32.5	36.8	4.3	43.0	10	4.30	73.01	73.01	73.01
4	18.5	21.8	3.3	33.0	10	3.30	69.58	69.58	69.58
5	15.1	18.1	3.0	30.0	15	2.00	66.15	65.66	65.91
6	11.2	13.3	2.1	21.0	15	1.40	61.25	61.25	61.25
7	31.2	34.0	2.8	28.0	30	0.93	59.78	59.29	59.54



inches
1 2 3 4 5 6 7 8
cm
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM, Kodak



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM, Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 B 17 18 19

