JNC TJ7400 2005-064

PNC PJ1559 93-001

社内資料

地下水流動に関する調査・解析研究（その2）

（動力炉・核燃料開発事業団　委託研究成果報告書）

1993年2月

社団法人　システム総合研究所

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

〒319-1184　茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部　技術協力課
Tel: 029-282-1122（代表）
Fax: 029-282-7980
e-mail: jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

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

~~この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。~~

~~本資料についての問い合わせは下記に願います。注)~~

~~〒107　東京都港区赤坂1　9　13~~
~~動力炉・核燃料開発事業団~~
~~技術協力部　技術管理室~~

JNC TJ7400 2005-064

~~社内資料~~
~~PNC TJ1559 93-001~~
1993　年　2月

地下水流動に関する調査・解析研究（その2）

社団法人　システム総合研究所
理事長　　槌木　義一

要　旨

「地下水流動に関する調査・解析研究（その2）」として、平成4年度に実施された研究内容は以下に要約される。

「地下水流動に関する調査解析研究のとりまとめ」では、本年度実施された研究の成果のとりまとめを行う。
「岩盤節理情報の統計処理とその浸透流解析への応用」では、亀裂の幾何学的情報および水理学的試験結果を統計的に処理し、より合理的に亀裂性岩盤の透水性を評価する手法に関する研究を行う。「3次元地下水流動機構に関する研究」では、地表水と深層地下水との関連に関する研究、岩盤の地下水流れの新しい解析プログラムの開発に関する研究を行う。「水理試験法および水理試験装置の研究開発」では、異方性岩盤の不飽和特性の計測法、トンネル掘削における緩みの浸透特性の調査法に関する研究を行う。「深層水理の調査手法およびモデル化に関する研究」では、ウェルテスト・トモグラフィー技術の実用化に関する研究を行う。「地下水の地球化学特性調査に関する研究」では、火山山麓地域の岩盤地下水流動に関する研究、深部花崗岩中の地下水流動特性に関する研究、洪積台地の地下水の涵養・流動特性に関する研究を行う。
研究活動として、3回の地下水流動に関する調査研究専門委員会を開催し、わが国を対象とした地下水流動モデルについて意見交換を実施した。

本報告書は、社団法人システム総合研究所が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。
契約番号　：040－D0250
事業団担当部課室および担当者：環境技術開発推進本部　地層科学研究グループ
主幹　山川　稔

広域地下水流動に関する調査研究専門委員会

構　成　員

委員長	東京大学	工学部資源開発工学科	教　授	小島　圭二
委　員	京都大学	大学院工学研究科	助教授	大西　有三
委　員	埼玉大学	工学部地盤水理実験施設	助教授	渡辺　邦夫
委　員	岡山大学	工学部土木工学科	助教授	西垣　誠
委　員	東京大学	工学部資源開発工学科	助教授	登坂　博行
委　員	筑波大学	水理実験センター	講　師	嶋田　純

（順不同、敬称略）

目　　次

1．地下水流動に関する調査解析研究のとりまとめ……1

2．岩盤節理情報の統計処理とその浸透流解析への適用……2
1．　序論
2．　従来の研究
3．　検討手順と地下研究施設の概要
3．1　本研究の検討手順
3．2　地下研究施設の概要
3．3　試験概要
4．　不連続性岩盤の不均一・異方透水性の評価手法
4．1　亀裂密度および長さの推定
4．2　ＲＥＶの評価
4．3　αijの計算
4．4　不均一場の再現手法
5．　実際問題への適用
5．1　亀裂密度及び長さ分布の推定
5．1．1　亀裂に関するデータ
5．1．2　亀裂セットの推定
5．1．3　亀裂長さと亀裂密度の推定
5．2　ＲＥＶの評価
5．3　αijの計算
5．4　不均一場の再現
6．　浸透流解析
6．1　解析条件
6．2　解析手法
6．3　解析結果
7　　結論

3．3次元地下水流動機構に関する研究……46
3．1　本年度の研究目的
3．2．1　今年度の方向
3．2．2　Ｄｏｎ－Ｃｈａｎモデルの考え方と物質移動解析コンセプト
3．2．3　現場対話型への拡張
3．2．4　モデル計算
3．3　岩石の不飽和特性の評価
3．3．1　目的と評価の重要性
3．3．2　不飽和特性の計測法
3．3．3　Ｖａｎ－Ｇｅｎｕｃｈｔｅｎ方式の妥当性の検証方法
3．3．4　解析と実測値との対応
3．3．5　岩石の不飽和特性の計測
3．3．6　今後の問題

4．水理試験法及び水理試験装置の研究開発……72
4．1　緒言
4．2　異方性岩盤の不飽和浸透特性の計測法
4．2．1　はじめに

4．2．2　不飽和浸透特性に関する研究
4．2．3　亀裂性岩盤モデル作成のための割れ目の発生手法と
　　透水テンソル
4．2．4　降雨浸透実験
4．2．5　降雨浸透実験結果と考察
4．2．6　亀裂性岩盤の不飽和透水係数
4．2．7　亀裂性岩盤の不飽和透水係数の試験法
4．2．8　まとめ
4．3　トンネル掘削による緩み領域の浸透特性の調査法
4．3．1　はじめに
4．3．2　緩み領域の定水位透水試験
4．3．3　まとめ
5．深層水理の調査手法及びモデル化に関する研究……154
5．1　はじめに
5．2　ウエルテストトモグラフィー技術のまとめ
5．3　亀裂ネットワーク問題の逆解析
5．4　三次元板状断層問題の逆解析
5．5　グラウト効果判定問題の逆解析
5．6　まとめ

6．地下水の地球化学特性調査に関する研究……170
6．1．1　はじめに
6．1．2　地質・地下水状況
6．1．3　地下水中の安定同位体比およびトリチウム濃度
6．2　深部花崗岩中の地下水流動特性に関する研究
6．3　洪積台地における地下水の涵養・流動特性
6．3．1　はじめに
6．3．2　研究地域の概要
6．3．3　採水
6．3．4　不圧地下水のトリチウム濃度
6．3．5　被圧地下水のトリチウム濃度

7．第４回　ＯＥＣＤ／ＮＥＡ　ストリパ　プロジェクト　シンポジウム…199
7．1　参加報告概要１（東京大学　小島圭二）
7．2　参加報告概要２（埼玉大学　渡辺邦夫）
7．3　参加報告概要３（京都大学　田中　誠）

1. 地下水流動に関する調査・解析研究のとりまとめ

地下水流動に関する調査・解析研究は、地表から地下深部にわたる地下水の水理特性を評価するために、原位置試験および室内試験等の結果を踏まえ、広域かた局地的な範囲にわたる水理地質モデルの構築と解析、割れ目系岩盤の水理機構の解析とモデル化、岩盤水理特性調査技術の検証と開発、地下水の地球化学特性の調査等に関する研究を実施することを目的とする。

本年度は、以下に示す研究項目に加え、3回の地下水流動に関する調査研究専門委員会を開催し、わが国を対象とした地下水流動モデルについて意見交換を実施した。

「岩盤節理情報の統計処理とその浸透流解析への応用」では、地下研究施設のデータを用い、亀裂の幾何学的情報および水理学的試験結果を統計的に処理し、より合理的に亀裂性岩盤の透水性を評価する手法の研究を行う。

「3次元地下水流動機構に関する研究」では、地表水と深層地下水との関連に関する研究、岩盤の地下水流れの新しい解析プログラムの開発に関する研究を行う。

「水理試験法および水理試験装置の研究開発」では、水理試験機器の設計開発研究に関連して、異方性岩盤と不飽和岩盤の透水性の計測技術の開発と測定機器の適用試験を実施するとともに、岩盤掘削に伴う緩み領域の透水性変化を測定する技術の研究を行う。

「深層水理の調査手法およびモデル化に関する研究」では、3次元空間の水理特性分布を、複数坑井での非定常型ウェルテスト結果により描きだすウェルテスト・トモグラフィー技術の実用化に関する研究を行う。

「地下水の地球化学特性調査に関する研究」では、火山山麓地域の岩盤地下水流動に関する研究、深部花崗岩中の地下水流動特性に関する研究、洪積台地における地下水の涵養・流動特性に関する研究を行う。

以上の研究項目は、地下水流動特性を把握する上で重要な要素となるデータ取得手法、モデル化、解析手法、検証手法について広範囲に研究した結果を現時点でとりまとめたものであり、この分野の研究は今後もさらに継続して実施する必要があると考えられる。

2．岩盤節理情報の統計処理とその浸透流解析への適用

第1章　序論

現在、石油に代わるエネルギーとして注目されている原子力エネルギーは我が国においてもその依存度がますます高まりつつあるが、その核燃料サイクルで発生する放射性廃棄物の処分方法に大きな問題が残っており、地下深部への地層処分が計画されている。

放射性廃棄物の地層処分においては、処分した廃棄物が人間の生活圏内に再度現われないことが第一に満たすべき条件である。現在、人間の生活圏に処分した廃棄物が漏洩するシナリオとしては、地下水による移行が最も危険であると考えられている。そのため、地盤・岩盤中の物質移行に関する予測技術が、現在世界中で活発に研究されている。しかし、岩盤中には通常、多くの亀裂が複雑に存在しており、その中の流速分布や物質の移行状態を精度良く予測することは現在の技術レベルでは非常に難しいとされている。そのような予測技術の確立と検証を目的として、欧米では地下研究施設を用いて種々の研究がなされている[1)]。その様な地下研究施設では、多くの亀裂の情報および水理学的情報が収集されている。

本研究の目的は亀裂の幾何学的情報および水理学的試験結果を統計的に処理し、より合理的に亀裂性岩盤の透水性を評価する手法を確立することである。本手法の妥当性の検証例および手法の具体的な適用例として、ある地下研究施設のデータを用いる。まず2章で従来の研究について述べ、3章で検討手順と地下研究施設の概要を説明する。4章で不連続性岩盤の不均一・異方透水性の評価手法を述べ、5章でその評価手法を実際問題へ適用する。そして、6章において、浸透流解析を行う。最後に7章で結論を述べる。

第1章　序論

現在、石油に代わるエネルギーとして注目されている原子力エネルギーは我が国においてもその依存度がますます高まりつつあるが、その核燃料サイクルで発生する放射性廃棄物の処分方法に大きな問題が残っており、地下深部への地層処分が計画されている。

放射性廃棄物の地層処分においては、処分した廃棄物が人間の生活圏内に再度現われないことが第一に満たすべき条件である。現在、人間の生活圏に処分した廃棄物が漏洩するシナリオとしては、地下水による移行が最も危険であると考えられている。そのため、地盤・岩盤中の物質移行に関する予測技術が、現在世界中で活発に研究されている。しかし、岩盤中には通常、多くの亀裂が複雑に存在しており、その中の流速分布や物質の移行状態を精度良く予測することは現在の技術レベルでは非常に難しいとされている。そのような予測技術の確立と検証を目的として、欧米では地下研究施設を用いて種々の研究がなされている[1)]。その様な地下研究施設では、多くの亀裂の情報および水理学的情報が収集されている。

本研究の目的は亀裂の幾何学的情報および水理学的試験結果を統計的に処理し、より合理的に亀裂性岩盤の透水性を評価する手法を確立することである。本手法の妥当性の検証例および手法の具体的な適用例として、ある地下研究施設のデータを用いる。まず2章で従来の研究について述べ、3章で検討手順と地下研究施設の概要を説明する。4章で不連続性岩盤の不均一・異方透水性の評価手法を述べ、5章でその評価手法を実際問題へ適用する。そして、6章において、浸透流解析を行う。最後に7章で結論を述べる。

第２章　従来の研究

岩盤浸透流解析において岩盤内に含まれる亀裂等の不連続面の存在を加味したうえで岩盤を等価な多孔質体に置換して計算を行う方法として、Longら[2]によるジョイント要素を用いた数値解析的手法とOda[3]のクラックテンソルによる方法等が代表的なものとして知られている。しかしこれらの方法を単独で用いる場合、置換できる領域の大きさがどれくらいか、また断層などの特別長大な不連続面をどう扱うかについて問題が生じる。したがって、ある程度不連続面の規模が大きくなるとその影響を陽に計算できる決定論的手法の導入が不可欠であると考えられる。その最も簡単な一つの手法として長大な不連続面は独立した不連続面として取り扱い、それ以外の細かな不連続面を有する岩盤部分を等価な透水係数テンソルをもつ連続体に置き換えるというハイブリッド的な方法が提案できる。そうするとたとえば有限要素法による２次元解析では、岩盤を四辺形要素、長大な割れ目を線要素として計算を行えばよいことになる。この手法は踏査やボーリング調査データなどの不連続面情報を生かすかたちで、不連続性の効果を具体的に計算内容に取り入れることができるので、既存の解析プログラムに多少手を加えるだけで岩盤の不連続性による不均質性を考慮した浸透解析が可能になる[1]。

現在行われている代表的な亀裂性岩盤内の浸透流解析の比較として、ストリーパプロジェクトで行われたハウエル研究所、ゴルダーアソシエイツ、ローレンスバークレー研究所（LBL）の３機関の解析手法の同一の原位置試験を対象とした比較検討が参考になる[5]。

ハウエル研究所は、原位置で計測された亀裂の統計的特性を検討し、その特性にしたがって亀裂を２次元平面と仮定して、岩盤の不連続面の幾何学的構造を再現し、その規模を変えることにより、等価な多孔質媒体モデルの透水係数テンソルを求めて、まず連続体としての解析を行っている。そして、この解析結果を境界条件として、坑道周辺を亀裂ネットワークモデルを用いた不連続体としてのより詳細な解析を行っている。

ゴルダーアソシエイツのモデルは、亀裂が多数集中したゾーンとそれ以外の部分の比較的小さな亀裂群を別々に発生させる不連続体としての解析を行っている。そして原位置透水試験をシミュレーションすることにより最適なモデルを作成する手法を用いている。ゴルダーアソシエイツのモデルの亀裂頻度は、ハウエル研究所のものより１オーダ少ないにもかかわらず、透水性の平均値は１オーダ大きいため、総湧水量の計算結果はハウエル研究所のものより多くなっている。

ハウエル研究所とゴルダーアソシエイツが亀裂観察結果に基づいて岩盤をモデ

ル化しているのに対し、LBLは原位置におけるクロスホール試験などの透水試験や湧水量データに基づいて不連続モデルを逆解析により同定しており、原位置の水理状況をモデルに反映した手法と考えられる。しかしその半面、亀裂特性に関するデータを用いないため、十分な原位置透水試験データがなければよいモデルが作成できず、詳細な解析になればなるほど必要とする試験データも多くなる欠点がある。

以上の3機関の解析手法で異なる点は、ハウエル研究所とゴルダーアソシエイツが個々の亀裂を対象としているのに対し、LBLは断層のみを対象としていることである。さらには、断層以外の部分において、ハウエル研究所はゴルダーアソシエイツよりも多くの亀裂を考慮し、LBLは亀裂を全く考慮していないことである。

ハウエル研究所とゴルダーアソシエイツが個々の亀裂を対象とし、LBLは断層のみを対象としていることを考えると、前者は比較的狭い範囲の解析に適し、後者が比較的広域な解析に適していると考えられる。逆に、LBLの解析では、亀裂面内の異方性を考慮できるという観点から考えると、クロスホール試験やトレーサ試験により得られたある1つの亀裂あるいは亀裂ゾーンに対してシミュレーションを実施するのに適しているとも考えられる。

LBLの手法は、地下水の流動が大きな亀裂ゾーンのみに支配されるようなサイトにおいては有効となるが、岩盤内に一様に存在する亀裂に地下水の流れが支配されるような場合にはモデル化が困難となることが予想される。

以上のように、亀裂性岩盤の浸透流の解析では、大小に関わらず亀裂などの分布に依存する不均一かつ異方的な流水場をどのようにモデル化するかが焦点となっている。その際に重要となるのはゴルダーアソシエイツとハウエル研究所の比較からも分かるように、亀裂の密度と大きさの推定である。実際の問題として、この両者の統計的特性を直接現地で計測することは難しく、何らかの推定手法が必要である。

第３章　検討手順と地下研究施設の概要

３．１　本研究の検討手順

一般に、岩盤の亀裂に関する情報はボーリングから得られるものと露頭面から得られるものの２つに分けられる。ボーリングから得られるデータからは、ボアホールの方向ベクトル、単位長さ辺りの亀裂本数で表される亀裂密度、あるいは好条件下ではボアホールを横切る割れ目の走向傾斜分布、単孔式透水試験より得られた透水係数分布等がある。露頭面からはそこで観察される亀裂長さの平均と分散等が得られる。本研究ではこのような亀裂データと整合するように亀裂密度と亀裂長さを推定する手法を提案する。次に、推定された亀裂の統計的情報を用いて、小田の提案するクラックテンソルにより、最小構造規模(Representative Elementary Volume:以下REV) の計算を行う。そして、REV規模における異方的な透水特性の算定を単孔式透水試験データより行う。更にこの様にして得られた異方的な透水特性の不均一性を再現するために地盤統計手法(Geostatistics)の条件付きシミュレーション手法（第４章参照）を用いることを検討する。そして、以上のようにして求めた不均一異方場を用いて、浸透流のシミュレーションを行い、実測値と比較することにより本研究の妥当性を検討する。以上の手順を図-1に示す。

３．２　地下研究施設の概要

本研究の適用例として選んだ地下研究施設の地質は花崗岩類よりなる。規模は地表から地下５００mに至る全長３km アクセス坑道とこれから派生する８本の側方坑道（坑道総延長３．６km）よりなる。

研究計画については、以下の通りである。

１）事前調査段階

目的：a）広域的な地質環境初期条件の把握および処分場規模での
の地質環境の予測

b）施設建設の影響予測

２）地下施設の建設を伴う試験研究段階

目的：a）坑道の掘削が地質環境に与える影響の解析評価

b）地質環境初期条件の予測手法の検証及び改良

c）改良された手法による地質環境の詳細な予測

d）各種地球科学データの取得

e）水理／物質移行モデルの高度化

3）地下施設を利用した試験研究段階

目的：a）処分場規模における水理／物質移行モデルの確証

b）ニアフィールドにおける各種移行現象の把握

c）処分場建設技術の開発及びモックアップ試験

現在は、2）の段階にあり、種々の亀裂情報、原位置試験が行われている。本論では、提案する手法の適用例として、本サイトの地下情報及び原位置透水試験結果を用いる。

3.3 試験概要

本論の6章で検討する浸透流解析に関するデータはある1本のボアホールで行われた約68時間に及ぶ長期揚水試験の結果である。図-2に試験場付近の概要図を示す。試験概要については後述するが、本研究ではこの揚水試験の結果を使って浸透流の解析を行い、周辺のボアホールでの観測結果と比較を行う。

第４章　不連続性岩盤の不均一・異方透水性の評価手法

４．１　亀裂密度および長さの推定

岩盤に掘られたボアホール（長さL）に垂直な領域全体に広がる面積Aを考え、V=A×L なる領域Vを定義する（図-3参照）。この体積Vの中にM枚の亀裂が存在すると仮定し、ボアホールが貫く亀裂の枚数をN枚とする。体積Vの中の任意の面積aを有する１枚の亀裂を面Aに写像した面積をa_fとすれば、この亀裂がボアホールに貫かれる確率は、a_f/Aである[6)]。したがって、ボアホールが貫く亀裂の枚数Nは、この確率に領域中の総亀裂枚数Mを乗じることにより与えられる。

$$N=\frac{a_f}{A}M=\frac{a_f}{A}LA\rho=a_fL\rho \tag{1}$$

ここで、ρは亀裂密度でρ＝M/Vである。上式より、亀裂密度は以下のようになる。

$$\rho=\frac{N}{La_f} \tag{2}$$

ここで、N/Lはボアホールで観察される亀裂頻度である。また、a_fは亀裂を面Aに写像したときの面積であるから、亀裂面と面Aとの間の角をθとすると、a_fは次式のように書ける。

$$a_f=a\cos\theta \tag{3}$$

ここで、亀裂面を円形であると仮定し、亀裂面の直径をrとすれば、式(3)は次のようになる。

$$a_f=a\cos\theta=\frac{\pi r^2}{4}\cos\theta \tag{4}$$

$\cos\theta$は、ボアホールの単位方向ベクトルbと亀裂の単位法線ベクトルnとの内積で表される。したがって、亀裂密度はボーリングから得られた亀裂頻度、ボアホールの方向ベクトル、亀裂の法線ベクトルをもとに亀裂長さおよびその分布を推定して求めることができる。

式(4)の亀裂長さの２乗にはその期待値を用いるが、それは亀裂長さ分布に依存する。この亀裂長さ分布は亀裂の直径と同様に実測は困難であるので、その分

布と平均値（あるいは分散も）を仮定して密度の計算を行う。そして、得られた亀裂密度と長さを用いて亀裂構造を再現し、露頭面と同じ方向および位置をもつ面で切られる亀裂長の平均と分散、密度の値と露頭面での観察値を比較して実際の値に近くなるように亀裂長さ分布と平均の推定の修正を繰り返すという作業を行う。このようにすることによりボーリングおよび露頭面の両方での観察結果と整合の取れた亀裂密度と長さおよびその分布が得られる。図-4 に上述のプロセスのフロー図を示す。

また一般に亀裂密度と長さは、位置により異なり、また、亀裂の方向セットによっても異なる。亀裂の方向と長さ、密度はその生成過程に大きく依存しており、一般に同様の方向を持つ亀裂は、同様の生成過程から生じた可能性が強く、亀裂セットにより亀裂特性を区分することができる。位置による亀裂特性のばらつきは生成過程における境界条件あるいはその他の環境因子により生じるものと思われ、その傾向は測定による分析が最も確実であると思われる。さらに、実際問題として測定される項目も状況により異なり、量の多少、質の高低はプロジェクトにより様々であるのが実情である。

以上のことを考慮し、式(2)で表される亀裂密度、長さ（面積）関係も状況により、つぎの３つの場合が想定できるものと思われる。

a)ボーリング内の亀裂の走行と傾斜が測定されている場合

$$\left[\frac{N}{L}\right]^{km} = [a_f]^{km}[\rho]^{km} \tag{5}$$

ここでkは亀裂セット数、mはボーリング孔数であり、$\left[\frac{N}{L}\right]^{km}$、$[a_f]^{km}$、$[\rho]^{km}$は亀裂セットとボーリング孔で区分されたマトリックスを示している。このマトリックスを解くことにより密度の空間的かつ方向的な分布が得られる。この場合は、各ボアホールでボアホールカメラ等により亀裂セット毎に亀裂密度が求められている状況である。

この場合の亀裂モデルの検証としては異なる面方向を持つ露頭面での亀裂トレース長の平均と分散、密度等との比較が考えられる。

b)ボーリング内の亀裂頻度しか測定されてない場合

（方法１）亀裂密度が亀裂セットに関して均一であると仮定するモデル

$$\left[\frac{N}{L}\right]^{m} = \rho^{m}\sum_{1}^{k} a_f^{km} \tag{6}$$

ここでは各亀裂セット毎に推定された平均亀裂面積に、亀裂セットに対して

均一な亀裂密度を乗じ、その和が各ボアホール毎の亀裂頻度となっている。

この場合は、ボアホールごとに亀裂密度が求められ、亀裂セット間で亀裂密度は変わらない。したがって、平面的な亀裂密度、長さ平均の分布が求められる。この場合の検証法でも露頭面の方向と位置が既知である露頭面の情報が必要となる。

（方法２）亀裂密度は空間的に均一であるが、セット毎に異なると仮定するモデル

$$\left[\frac{N}{L}\right]^m=[a_j]^{km}[\rho]^k \tag{7}$$

ここでは上式のマトリックス方程式を解くことにより、各セット毎の亀裂密度が求められる。しかし、状況によってはボーリング孔数が亀裂セット数を下回る場合があり、その場合はこのモデルは使用できない。逆にボーリング孔数が亀裂セット数を上回る場合はこのモデルでは解が定まらないので、最小二乗法を用いて最適解を定める。このモデルは、亀裂セット毎に亀裂密度が求められ、ボアホール間で亀裂密度は変わらない。

この場合、亀裂データの統計的特性は空間的に均一であると仮定しているので、検証としての露頭面の情報は、面方向が既知であれば、場所には関係ないようになり、亀裂構造再現も領域全体について必ずしも行う必要はなく、任意の体積で良いことになる。

4.2　REVの評価

上節で求めた亀裂情報をもとに、亀裂構造から生じる異方性および、その異方性挙動の体積依存性を検討し、最小構造体積(REV)を検討する。一般に、岩石の一軸圧縮強度には、明瞭な寸法効果のあることが知られている。すなわち供試体の寸法を大きくすると、強度は低下しある停留置に収束する傾向を示す。この停留置を示す供試体寸法は岩石のREVを与えると考えられえる。しかし、取りうる供試体寸法には限界があって、複雑に絡み合った亀裂（クラック）のすべてを供試体に取り込むことは不可能である。

不連続性岩盤の水理・力学的性質が、内在するクラックに決定的に依存するとすれば、REVは不連続面の幾何学的特性から推定できるものと思われる。小田[7]は、彼の提案するクラックテンソルを用いて２次元問題でREVの検討を行い、平均亀裂長さの２～３倍がREVと結論づけた。しかし、不連続面を２次元平面条件

で表現することは、実際の構造とは大きく異なるものであり、またクラックテンソルを実際問題に適用する際の密度、長さ分布等の求め方の検討もなされていないため、この結論の実際問題への適応には疑問が残る。そこで本論では上節で検討したボアホールおよび露頭面で観察された亀裂情報と整合のとれた亀裂長さ分布、平均亀裂長さおよびその分散、亀裂密度を用いて、３次元のクラックテンソルを使って、小田が行ったのと同様のREVの検討を行う。

小田によると、透水係数テンソルはクラックテンソルを用いて次式のように書ける[7]。

$$k_{ij}=\frac{1}{12\mu}\left(P_{kk}\delta_{ij}-P_{ij}\right) \tag{8}$$

$$P_{ij}=(\pi\rho/4)\int_0^{r_m}\int_0^{t_m}\int_\Omega r^2 t^3(\delta_{ij}-n_i n_j)E(\mathbf{n},r,t)d\Omega dr dt \tag{9}$$

これを次式のように書き換える。

$$k_{ij}=\frac{\alpha_{ij}^3}{12\mu}\left(Q_{kk}\delta_{ij}-Q_{ij}\right) \tag{10}$$

$$Q_{ij}=(\pi\rho/4)\int_0^{r_m}\int_\Omega r^2 n_i n_j E(n,r)d\Omega dr \tag{11}$$

ここで、ρは単位体積あたりのクラック数で表される亀裂密度、n_iはクラック面の単位法線ベクトル成分、rはクラックを円で表したときの直径であり、r_mはその最大値、E(n,r)は、n、rを持つクラックの確率密度分布、Ωは立体角で４πに等しい。

α_{ij}は透水係数の大きさに関するパラメータでREV内で一定と仮定される。物理的にはREVを代表する亀裂幅に相当する。一般に鉛直方向の透水性の測定はボアホールを用いた試験では難しい場合が多いのでα_{33}の情報は少ない場合が多い。したがって、α_{33}の値が小さく求められる可能性があるので、実際の適用では$\alpha_{11}, \alpha_{22}, \alpha_{33}$の平均値を求めて、それを、代表的な亀裂幅として考える。

Q_{ij}は、透水係数テンソルの内、亀裂幅に関する情報を除いたものである。

亀裂幅は実際にはその測定が非常に難しく、又、露頭で計測される亀裂幅と透水に関与する亀裂幅は、一般に異なる。又、亀裂幅と亀裂の大きさには相関がある可能性も強いが、その相関は必ずしも正であるとは限らず、その測定による同定は幅の測定と同様、実際問題としては、かなり困難である。そこで、ここでは

透水係数テンソルとして、式(10)のように亀裂幅とその他の情報に分類し、Q_{ij}が亀裂の存在による構造の異方性とその体積依存性を表すものとし、このQ_{ij}を用いて透水係数テンソルの体積依存性を検討し、REVを求める。そして、REVを代表する亀裂幅α_{ij}はREV規模の透水試験結果をもとに推定する手法をとる。

テンソルQ_{ij}の求めるに際し、以下のような仮定を設ける。

1)亀裂面の形状は円形とする。

2)亀裂の中心位置はPoisson分布に従う。

3)亀裂の走行傾斜はPoisson分布に従う。

4)境界外の亀裂長さは考慮しない。

以上の仮定のうち、3)については、十分な情報が存在する場合には実際の確率密度を推定することが可能となる。しかし、一般に各セット毎に、30～50点以上もの実測値がある場合は少なく、その場合にはこの3)のような仮定を用いても妥当性があると考えられる。

以上の仮定をもとに初期の乱数を変えて標本を50取り、その平均値をQ_{ij}の値とする。

4.3　α_{ij}の計算

α_{ij}は、先述のようにREVの透水性の大きさに関する特性であり、REV内で一定と考える。しかし、実際にはREVを考慮して透水試験を行うことはなく、ボアホールを用いた単孔式の透水試験では通常、2～ 10m程度の任意の間隔で試験が行われる。クラックテンソルを用いて同定される亀裂性岩盤のREVは、立方体の場合、その一辺は、平均亀裂長さの数倍から数10倍程度であり、通常の単孔式透水試験の間隔よりも大きい。そこで前節で検討したREVから求められる一辺の長さに相当するように透水試験結果を修正する。修正は、幾何平均（対数平均）を用いて行う。

そして、次にα_{ij}を決定するために、ボアホールを用いた単孔式透水試験結果から求められた透水係数テンソルを、解析で用いる座標系に変換しなければならない。ボアホールで計測された透水係数をボアホールに垂直な面内にx',y'軸を取り、ボアホール軸方向にz'軸を取り、マトリックス表示すると次式の様になる（図-5参照）。

$$[k_{ij}]=\begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{12}$$

ここで、$k_{i'j'}$は、x',y',z'座標における透水係数kの行列成分である。

一般に単孔式透水試験から透水係数を求める場合、注入点から放射状に水が注入するものとし、境界条件としては無限領域を仮定することが多い。したがって得られる透水係数は、ボーリングに垂直な面の透水性を評価していることになる。実際には、亀裂の分布状況により、注入された水は種々の方向を向いていると思われるが、それは評価の中では考慮されていない。したがって、一般の評価手法ではz' 方向の透水性は評価していない。

解析で用いる座標系は、ボアホール軸と亀裂面方向を定めるのに便利な様に、z軸を鉛直上向き、y軸を西、x 軸を北にとった座標系を用いる。変換の際に使う変換行列Tは、ボアホールの方向ベクトルbが、$b=(\sin\theta\cos\lambda, \sin\theta\sin\lambda, \cos\theta)$と表されるので次式のように書ける。

$$[T]=\begin{bmatrix} \cos\theta\cos\lambda & \sin\lambda\cos\theta & -\sin\theta \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\lambda\sin\theta & \sin\theta\sin\lambda & \cos\theta \end{bmatrix} \tag{13}$$

ここで、θは鉛直上向き軸からのボアホール軸方向への角度、λはボアホール軸の水平面への射影線の北（x軸方向）からの角度である。$k_{i'j'}$からk_{ij}に次式により変換する。

$$[K_{ij}]=[T]^t[K_{i'j'}][T] \tag{14}$$

ここでtは転置を表す記号である。こうして求められたk_{ij}を用いて亀裂幅α_{ij}を次式より求める。

$$\alpha_{xx}=\sqrt[3]{\frac{12\mu k_{xx}}{Q_{yy}+Q_{zz}}} \tag{15}$$

$$\alpha_{yy}=\sqrt[3]{\frac{12\mu k_{yy}}{Q_{xx}+Q_{zz}}} \tag{16}$$

$$\alpha_{zz}=\sqrt[3]{\frac{12\mu k_{zz}}{Q_{xx}+Q_{yy}}} \tag{17}$$

ここで、μは動粘性係数で、20℃で約$1\times10^{-6}(m^2/s)$である。先述の様に、通常の単孔式透水試験は、鉛直下方あるいは斜孔を用いて行われることが多く、水平孔を用いて行われることは極めてまれである。又その評価も先述の様にボアホールに垂直な面内の流れのみを考えて行われることが多い。したがって、情報として鉛直方向の透水性に関するデータを多数得ることは一般に難しいことが予想される。したがってそのような場合には上述のα_{zz}の値が、α_{xx}, α_{yy}に比べて小さくなることが予想される。無論、全ての方向に対して、十分な情報が得られる場合には、α_{ij}の全ての成分を求め、時節で述べる不均一場の再現法をその全成分に対して行うことも有効であろう。しかし方向に関して情報に偏りがある場合には、その様な方法を行っても、地盤特性の再現性の精度は保証されない。その様な場合には対角成分のみの平均を、そのREVを代表する亀裂幅に相当するものと考え、その不均一性を再現する方が合理的であろうと思われる。

4.4　不均一場の再現手法

4.3で求めたREVを代表する亀裂幅の不均一性を考慮するため、ここでは、地盤統計学で行われる条件付きシミュレーション手法[8]を用いて地盤の不均一性を再現する。

地盤統計学では地盤の特性をランダム関数として考え、地盤特性$z_0(x)$の空間的な分布はランダム関数Z(x)の1つの標本であると考える。ランダム関数は多くの場合、平均値が全空間一定であり、共分散が距離のみに依存する、2次定常状態を仮定することができ、平均値と距離のみの関数で表された共分散、あるいはバリオグラムでモデル化することができる。地盤統計学では、不均一性の再現法として、クリギングによるもの(estimationと呼ばれる)と、シミュレーションによる方法の2種類がある。クリギングは実測値間の補間をバリオグラムによって表される距離による相関特性を考慮しながら補間するものであり、滑らかな分布を再現するが、再現される統計的特性は実際とは異なる。一方、シミュレーションによる方法では、ランダム関数が持つ統計的特性を保持して、再現される。したがって、シミュレーション手法そのままでは測定点での値も再現できない。測定点での実測値を条件として、シミュレートする手法は条件付きシミュレーション手法と呼ばれ、現在、不均一場の再現手法として最も良く使われている手法である。本論では、この条件付きシミュレーション手法を用いる。図-6は、条件付きシミュレーション手法とクリギングの差を模式的に示したものである。同図から分かるように、クリギングでは実測値を滑らかに結んでいるが、実測値がもつ

バラツキを表現していない。一方、条件付きシミュレーション手法では、必ずしもバラツキの方向は再現していないが、その大小は再現している。このような不均一性の再現手法は、流速や水圧の空間的なバラツキが重要である場合に用いられる。環境アセスメント等で行われる物質移行解析では、地盤中の流速分布のバラツキが物質挙動に重要な影響を与える。そのため、多くの場合、透水性のバラツキは、条件付きシミュレーション手法を用いて、再現される。条件付きシミュレーション手法におけるランダム関数は次式で表される。

$$Z^*_{sc}(x)=Z^*_{ok}(x)+[Z_s(x)-Z^*_{sk}(x)] \tag{18}$$

ここで、$Z^*_{ok}(x)$は、実測値を用いたクリギングによる値であり、$Z_s(x)$は、観測値の条件を付けないシミュレーションによる値である。そして、$Z^*_{sk}(x)$は観測点におけるシミュレーションによる値を用いてクリギングした値である。本論ではシミュレーションの手法として、移動平均法を用いたターニングバンド法[9]を用いる。

第５章　実際問題への適用

５．１　亀裂密度及び長さ分布の推定

５．１．１　亀裂に関するデータ

１）各ボアホールごとの亀裂頻度

本論で用いる地下研究施設での実測例においても、各ボアホールの亀裂の走行・傾斜の実測はなされておらず、ボアホール毎の亀裂密度が分かっているだけである。そこで、4.1節で述べたb)のケースに相当する検討を行う。又、露頭面の観測は地表をはぎ取った水平な露頭面でのデータがほとんどであり、異なる方向を持つ露頭面での観察結果がないので、ここではb)の方法2)、すなわち、亀裂密度は空間的に均一であるがセット毎に異なると仮定するモデルの適用を行う。

現地では、１２本のボアホール（ボアホール番号（02～09,11～14））を横切る透水性亀裂の位置が計測されている。この本数とボアホール長さより、ボアホール全体の亀裂頻度（N/L）を求める。ここで、Nは亀裂本数、Lは深さ方向の長さである。表-1に、ボアホールの亀裂頻度を示す。

２）各ボアホールの方向ベクトル

各ボアホールの方位と伏角が分かっているので、それを使ってボアホール毎の方向単位ベクトルbを求める。このとき、x座標を北に、y座標を西に、z座標を鉛直上向きにとり、方向は北から時計回りを正に取る。

例えば、ボアホール02(方位:330°,伏角:85°)の場合

X座標（N）：cos85°×cos(360°-330°)

Y座標（W）：cos85°×sin(360°-330°)

Z 座標　（鉛直上向き）：-sin85°

となる。よって、b＝（0.0755,0.0436,-0.996)となる。全てのボアホールの方向ベクトルの成分の値を表-1に示す。

３）ボアホールごとの透水係数

12本中7 本のボアホールで３ｍ間隔の透水係数が単孔式透水試験により、計測されている。

４）露頭面でのトレース長さ

５４箇所における露頭面の位置、0.5ｍ以上の長さの亀裂長さ、走向と傾斜

が計測されている。それら54箇所全ての露頭面で観察された亀裂長さの平均値は1.41mで、分散は3.77であり、露頭面の単位面積当りの亀裂本数は2.64（本／m^2）である。また、それぞれの露頭面は大体鉛直上方を向いており、観察された亀裂の傾斜は立ったものだけがサンプリングされている。露頭面のデータの計測例を、図-7に示す。

5.1.2　亀裂セットの推定

一部のボアホールで計測されている亀裂の走向傾斜分布と54箇所の露頭面でのデータなどから亀裂の卓越した走向と傾斜の値は、走向がN30° EとN30° W、N80° EとN80° Wであり、傾斜が80° Eと80° W、20° Eと20° Wであると判断した。これらの値を地質調査に照らし合せると（図-2参照）、走向が南北に延びて、傾斜が立っているNNWと呼ばれる亀裂群と走向が東西に延びて、傾斜の寝ているEW-5と呼ばれる亀裂群に相当していると思われる。よって本研究においては表-3に示す8個の亀裂セットを設定し、モデル化することにする。8個の亀裂セットの法線ベクトルを求める際の方位ψ、伏角ϕの場合分けを表-2に示す。ここで、走向は北より時計回りを正にとった値を用いている。亀裂の単位法線ベクトル$n^k(k=1,8)$は、ボアホールと同様にX座標を北、Y座標を西、Z座標を鉛直上向きにとった座標系で求める。

表-2より8個の法線ベクトルの方位と伏角が計算されるので、それを以下の式に代入することによって単位法線ベクトルの成分が求められる。結果を表-3に示す。

X座標（N）：$\cos\phi \times \cos(360^\circ - \psi)$

Y座標（W）：$\cos\phi \times \sin(360^\circ - \psi)$

Z　座標　（鉛直上向き）：$-\sin\phi$

5.1.3　亀裂長さと亀裂密度の推定

12本のボアホールの単位方向ベクトルbと8個の亀裂セットの単位法線ベクトルnとの間の角度をθとして$\cos\theta$の値を計算する。求める$\cos\theta$の値は96(=12×8)個である。

次に8個の亀裂セットごとの平均亀裂長さr_0（直径）と分散の初期値を設定する。ここでは亀裂長さの確率密度分布としてガンマ分布、指数分布、対数正規分布の3つについて検討を行う。ガンマ分布、指数分布、対数正規分布のそれぞれについてrの2乗の期待値を計算する。指数分布とガンマ分布の計算結

果は以下の通りである。

(a)指数分布

確率密度関数：$P_{(r)}=\frac{1}{r_0}e^{\frac{r}{r_0}}$

$$E(r^2)=\int_0^{\infty} r^2P_{(r)}dr=2r_0^2$$

(b)ガンマ分布

確率密度関数：$P_{(r)}=\frac{r}{r_0}e^{\frac{r}{r_0}}$

$$E(r^2)=\int_0^{\infty} r^2P_{(r)}dr=6r_0^2$$

しかし、対数正規分布に関しては積分が容易ではないので数値的に計算す方法をとった。

次に$\cos\theta$とｒの２乗の平均を用いて、３つの分布ごとに亀裂面積のボアホールに垂直な面への射影面積であるa_fを求め、亀裂セットmとボーリングkで構成されるマトリックスa_f^{km}を作成する。そして、(7)式により８個の亀裂セットごとの亀裂密度と平均亀裂長さと分散を求める。更にこの亀裂情報をもとに10m立方の領域の中に亀裂を発生させて、露頭面を想定した水平断面で、その中央部を切断し、50cm以上の亀裂をとりだし、平均と分散及び亀裂密度（本／m^2）を計算する。そして、このトレース長さの平均と分散及び密度を実測値とあうように亀裂長さ、分散を変えて計算を繰り返す。図-8に以上の手順を示す。３つの分布ごとの計算結果を表-4に示す。そして、仮定した露頭面上での亀裂の計算結果と実測値との比較を表-5に示す。表-5から、実測値に最もよく合っているのは対数正規分布であると考え、以下のREVの検討では対数正規分布についてのみ検討する。

５．２　REVの評価

5.1で対数正規分布の８個の亀裂セットごとに亀裂密度と亀裂長さの平均と分散が決まったので、その値を用いて、式(11)よりクラックテンソルQ_{ij}を求める。初めは2m立方の体積でQ_{ij}を求め、そして徐々に大きさを増やしていく。そのQ_{ij}の計算結果を図-9に示す。グラフの３本の線はそれぞれQ_{xx}, Q_{yy}, Q_{zz}であり、Q_{ij}の値が大体一定になったときの長さをREVとする。

ここでは、Q_{xx}, Q_{yy}, Q_{zz}共に大体長さが30m付近で一定になっていると判断し、REVの値を30m立方とする。

5.3　α_{ij}の計算

最終的に浸透流解析をするにあたり、透水性の大小に最も関わっているのはα_{ij}である。亀裂幅α_{ij}を式(10)から求めるために、REV規模の透水係数を算定する。先述の様に、各ボアホールで3m毎の透水係数が実測されているので、前節で検討したREVから求められる一辺の長さに相当するように、透水試験結果を修正する。

前節でREVが30mと決定したので、各ボアホールの3m毎に計測されている透水係数を30m毎に幾何平均する。各ボアホールにおいて、透水係数が得られている一番浅い地点より30m下がった地点までの透水係数の幾何平均をとり、その幾何平均された透水係数はその区間の中点、つまり一番浅い地点より15m下がった地点の代表値とする。次には先程よりも全体的に3m下がった区間、つまり透水係数が得られている一番浅い点より3m下がった点より30mの区間の透水係数の幾何平均をとり、得られた値は先程と同じように区間の中点の値とする。後は同様にして求めていき、ボアホール毎に30m毎の幾何平均された値を持つ点が3m毎に求められることになる。そして、4.3で述べた様に、ボアホールを用いた単孔式透水試験結果から透水係数テンソルを解析で求める座標系に変換し、解析で用いる座標系に相当する透水係数テンソルを求める。以上より、計算されたα_{ij}の個数は約1000点となる。

5.4　不均一場の再現

5.3で求めたα_{ij}は深さ方向及び、水平方向に種々の値をもっている。それらを統計的に処理するためにバリオグラムを作成する。まず全てのボアホールにおける前節で求めた中心点間の距離を全て求め、その距離を横軸に亀裂幅の2乗の差を2で割った値を縦軸にとって、α_{xx}, α_{yy}, α_{zz}のそれぞれのバリオグラムを作る。そして、それらに合うようなモデル化したバリオグラムを作成する（図-10参照）。そのモデルとして、球形モデルを用いてフィッティングを行った。その結果は以下の通りである。

$h<a;\ \omega\left[\frac{3}{2}\left(\frac{h}{a}\right)-\frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^3\right]$

$h>a;\ \omega$

$\omega=1.0\times10^{-10}$、 a=300

亀裂幅の統計的バラツキを決定したので、次に解析領域のメッシュ図を作成す

る。本論での解析領域の大きさは、南北に600m,東西に510m, 深さ750mである（図-11参照）。5.2でREVを30m に決定したため、一辺が30mの立方体を基本格子として、解析領域のメッシュを切る。ボアホールや断層は斜めに延びているため、その周辺のメッシュについては、立方体ではなく種々の多面体となっている。図-12に地表面のメッシュ図を示す。本解析に用いる有限要素数は8500、節点数は9828である。4章で述べた地盤統計学の条件付きシミュレーション手法を用いて、この8500個の要素全てに、異なる $\alpha_{ii}/3$ を振り分ける。今回の検討では、Q_{ij} は全領域で一定としたが、これも乱数を変えて発生させることにより、その不均一性を再現することは可能である。

第６章　浸透流解析

６．１　解析条件

前章で求めた、不均一な異方透水係数テンソル分布を用いて、原位置透水試験の結果と比較する。解析は、図-11,12で示した様に、断層と２次元平面要素で表した３次元浸透流解析である。原位置試験は、長期間（68.2時間）行われており、ほぼ定常に達した時の観測孔での水位が記録されている。そこで、解析は定常条件として、境界条件は全側方面を水位固定として行う。揚水過程は、揚水孔（ボアホールNo.7）の水圧を観測された値に固定することにより模擬する。また、図-2,および図-11で表示した断層は２次元平面要素でモデル化している。また、観測孔(No.2,8)も斜孔であり、パッカーをかけずに観測されている。この状況を再現するために、ボアホールは１次元線要素で次式で表される管路の流れを想定した透水性を与えた。

$$k=\frac{gr^2}{8\mu} \tag{19}$$

６．２　解析手法

解析に用いた支配方程式は以下の様である。

$$(k_{ij}h_j)_{,i}=0 \tag{20}$$

ここでk_{ij}は透水係数テンソル、hは全水頭である。上式をガラーキン法を用いて、有限要素方程式に離散化して計算を行う。要素は、任意形状を扱うため、４面体線形要素を用いている。

６．３　解析結果

観測孔における水位低下量の計算値と実測値の比較を表-6に示す。表-6に見られる様に、解析結果は、ボアホールNo.2では大体良好な値が得られたが、ボアホールNo.8では実測値よりもかなり小さい水位低下を示している。これは、おそらく境界の位置が実際よりも狭い、北側の側面を水位固定にした為であろう（図-2参照）。図-13に地表面直下及び、地表から深さ390mの位置における流速及び、全水頭分布を示す。同図では、大きさが非常に異なるので、断層部分の流速は省略してある。同図によると、全水頭コンターが岩体部分で凹凸をもってい

るが、これはクラックテンソルで表した異方性の影響である。また、深度390mの地点では、揚水孔は断層に当たっており、断層内での大きな水頭変化が見られる。また、図中央部付近に見られる-2.5mの島状コンターは、ボアホールNo.8に集まる地下水の流れを示している。以上により、本論で述べた様な亀裂性岩盤の透水性の評価手法を用いることにより、種々の問題が残されているが、実際現象を再現できることが分かった。

第７章　結論

岩盤の亀裂の幾何学的情報から透水性の異方性及び、REVを検討し、統計的に不均一場を再現することにより、合理的な水理モデルを作成することを試みた。従来の研究では、REVと言う概念が明確でなかったが、本論で述べた様な空隙の幾何学的情報を用いることにより、推定できることが分かった。今回は、小田のクラックテンソルを用いたが、これは唯一の方法ではなく、今後、より合理的な理論の研究の余地があるものと思われる。

また、今回不均一場の再現法として、地盤統計学における条件付きシミュレーション手法を導入したが、この手法は、統計量として2次モーメントまで再現することができ、より精度の高いモデル化が可能である。また、今回の検討により、その実用可能性も示された。

本論では、提案した透水性のモデル化手法を揚水試験で検証した。その結果は、大体良好であったと思われるが、ここで、述べたような不均一性や異方性の効果は、物質移行問題において、大きな影響をもつと思われるので、今後、継続した検討を行う予定である。

参考文献

1) 動力炉・核燃料事業団：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書—平成3年度—,1992.

2) Long, J.C.S., Remer, J.S., Wilson, C.R and Witherspoon, P.A.(1982) : Porous Media Equivalents for Networks to Discontinuous Fractures, Water Resources Research, Vol.18, No.3, pp.645～658.

3) Oda, M.(1985) : Permeability Tensor for Jointed Rock Masses, Geotechnique, Vol.35 (4).

4) 大西有三・鍵本広之・西野賢治(1986):岩盤節理情報の処理とその浸透流解析への適用について,土木学会論文集,第376号／III-6

5) D. Hodgkinson, N. Cooper (1992): A Comparison of Measurements and Calculations for the Stripa Tracer Experiments, Stripa Project Report No.92-20, SKB

6) 鍵本広之(1988)：岩盤割れ目の評価方法の関する研究,京都大学工学部修士論文

7) Oda, M(1986) :An Equivalent Continuum Model for Coupled Stress and Fluid Frow Analysis in Jointed RockMasses, Water Resources Research Vol.22, No.13, pp1845-1856.

8) A.G.Journel and CH.J.Huijbregts (1978) : Mining Geostatics, Academic Press, London

表-1　各ボアホールのデータと単位方向ベクトルと亀裂頻度

borehole	ボアホールの孔口の座標			長さ	伏角	方位	方向単位ベクトルb			亀裂頻度
No.	x座標	y座標	z座標	(m)	(°)	(°)	x座標	y座標	z座標	N/L
02	7250.11	2125.22	7.68	924	85	330	0.0755	0.0436	-0.996	no data
03	7758.22	1805.20	8.79	1002	85	330	0.0755	0.0436	-0.996	3.71
04	7636.82	1955.06	11.66	481	60	135	-0.354	-0.354	-0.866	6.02
05	7247.97	2059.61	8.68	550	85	150	-0.075	-0.0436	-0.996	2.54
06	7067.74	2175.08	5.16	602	60	335	0.498	0.0436	-0.866	3.61
07	7229.66	2215.40	4.58	604	59	205	-0.467	0.218	-0.857	3.65
08	7451.05	2150.44	7.66	601	60	135	-0.354	-0.354	-0.866	2.91
09	6925.19	2091.11	4.08	450	60	169	-0.491	-0.0954	-0.866	4.07
11	6937.02	2090.71	4.26	249	89	22	0.0102	-0.0065	-1.000	4.00
12	7568.80	2156.60	4.83	380	69	150	-0.310	-0.179	-0.934	3.97
13	7264.40	2169.00	3.89	406	62	267	-0.0246	0.469	-0.883	2.91
14	6948.54	2138.80	3.70	212	60	137	-0.366	-0.341	-0.866	5.43

ボアホールの孔口の座標はｘ座標を北から15.45°反時計回りにずらした方向、ｙ座標も東から同じだけずらした方向である。

ボアホールの方向ベクトルの方位は北から時計回りを正の方向にとる。

表-2　法線ベクトルの計算のnの場合分け

亀裂セット		法線ベクトルn	
走向	傾斜	方位 ψ	伏角 ϕ
西向き	西向き	90° - (走向)	90° - (傾斜)
西向き	東向き	270° - (走向)	90° - (傾斜)
東向き	西向き	90° + (走向)	90° - (傾斜)
東向き	東向き	270° + (走向)	90° - (傾斜)

表-3　亀裂セットの単位法線ベクトルn

亀裂セット	伏角 ϕ(°)	方位 ψ(°)	x (北)	y (西)	z (上)
N30W80W	10	60	0.492	-0.853	-0.174
N30W80E	10	240	-0.492	0.853	-0.174
N30E80W	10	120	-0.492	-0.853	-0.174
N30E80E	10	300	0.492	0.853	-0.174
N80W20W	70	10	0.337	-0.0594	-0.940
N80W20E	70	190	-0.337	0.0594	-0.940
N80E20W	70	170	-0.337	-0.0594	-0.940
N80E20E	70	350	0.337	0.0594	-0.940

表-4　セット別平均亀裂長さと亀裂密度の計算結果

亀裂セット	対数正規分布			指数分布		ガンマ分布	
	亀裂長さ		密度	亀裂	密度	亀裂	密度
	平均	標準偏差	(本/m^2)	平均	(本/m^2)	平均	(本/m^2)
N30W80W	1.0	0.8	17.8	0.3	289	0.5	4.88
N30W80E	1.0	0.8	14.4	1.2	12.2	1.2	18.9
N30E80W	1.0	0.8	22.6	0.3	325.7	0.5	5.50
N30E80E	1.0	0.8	29.1	1.2	2.45	1.2	38.2
N80W20W	0.5	0.55	16.7	0.5	190.6	1.0	35.7
N80W20E	0.5	0.55	14.5	0.5	216.5	1.0	40.6
N80E20W	0.5	0.55	11.9	0.5	218.1	1.0	40.9
N80E20E	0.5	0.55	10.8	0.5	189	1.0	35.4

表-5　実測値との比較結果

水平面を横切る亀裂特性	トレース長さの平均(m)	トレース長さの標準偏差	トレース亀裂の密度(本/m^2)
対数正規分布	1.83	1.92	2.33
指数分布	1.51	1.42	4.65
ガンマ分布	3.41	3.05	9.11
実測値平均	1.41	3.77	2.64

表-6　水位低下量の計算値と実測値の比較

ボアホールNo.	計算値(m)	実測値(m)
2	4.6	1.9～3.0
8	0.13	1.05

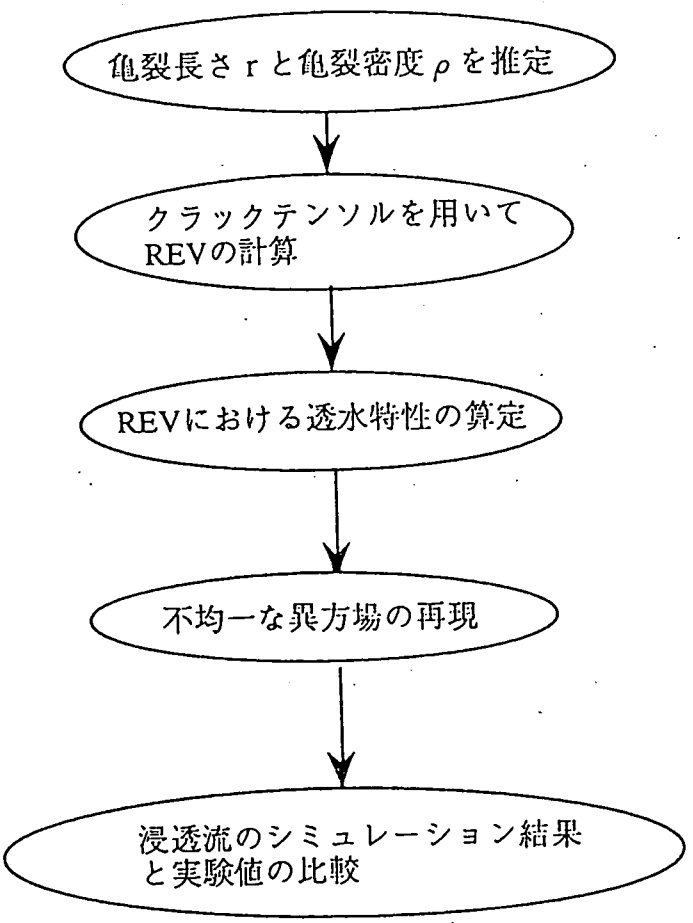


図-1　亀裂モデル作成の検討手順

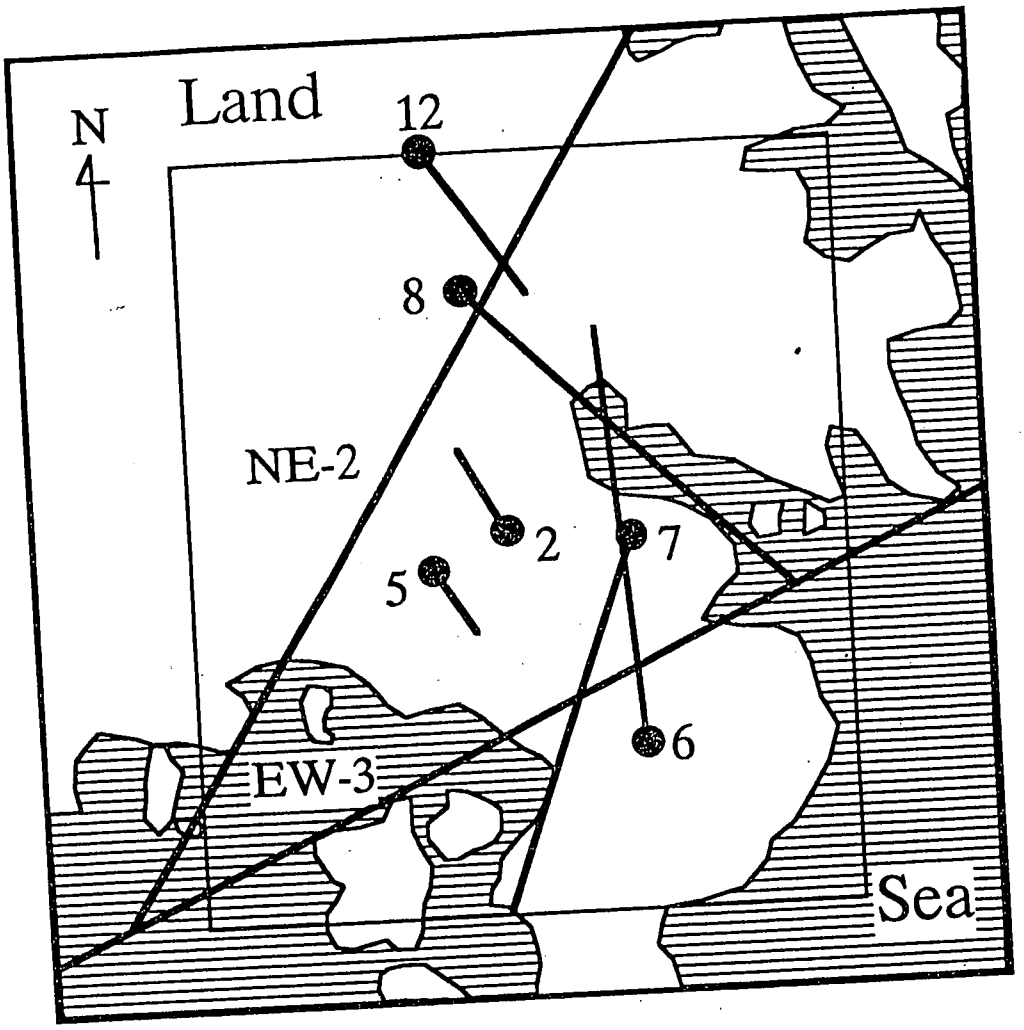
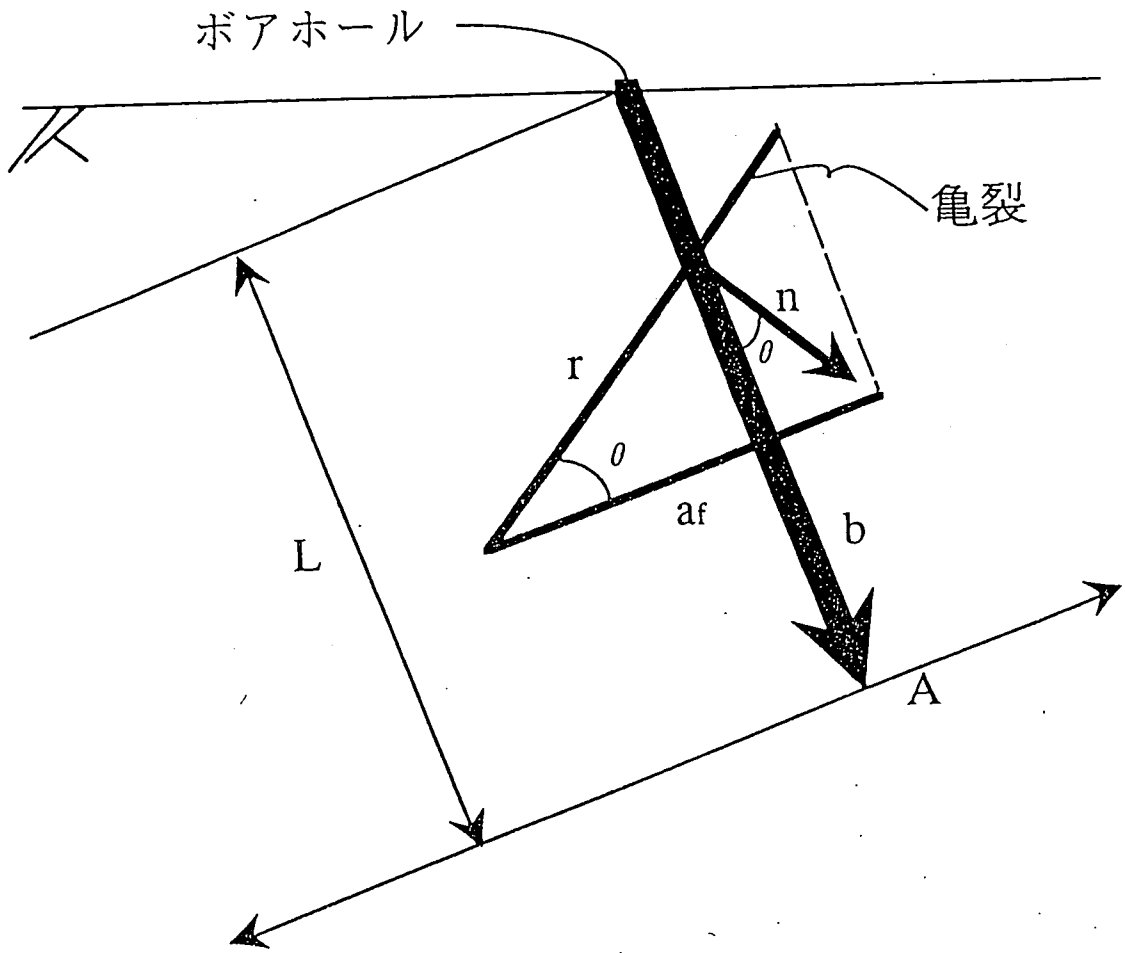


図-2　ボーリングと断層の位置

内側の実線枠が本研究の解析領域。
No.7のボアホールより揚水。
NE-2,EW-3は、確認されている断層。



V=LA
r：亀裂の直径
n：亀裂面の法線ベクトル
b：ボアホールの方向ベクトル
af：領域Aに写像した亀裂の面積

図-3　亀裂長さ r と亀裂密度 ρ の設定方法

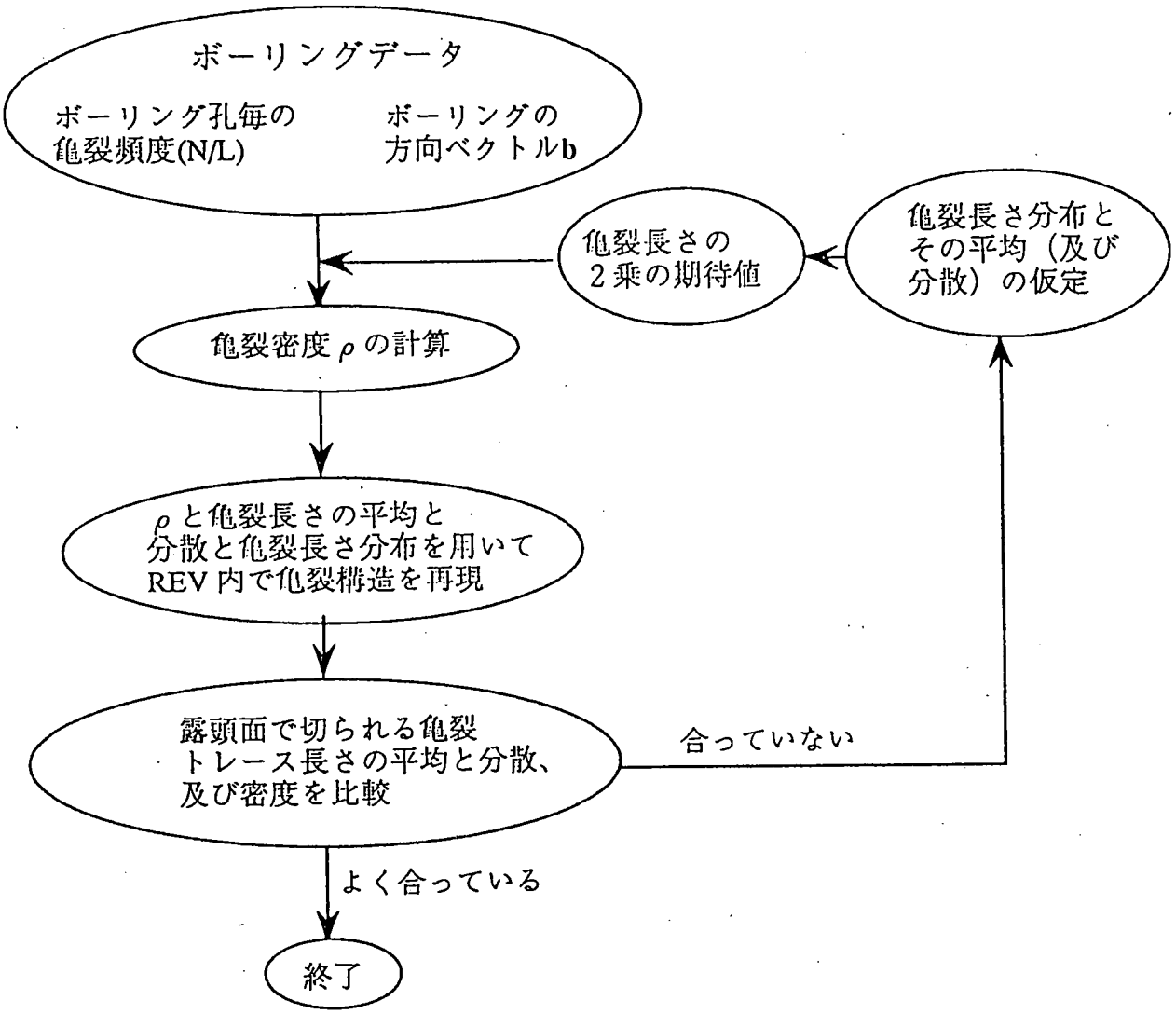


図-4　亀裂密度及び長さの設定方法のフロー図

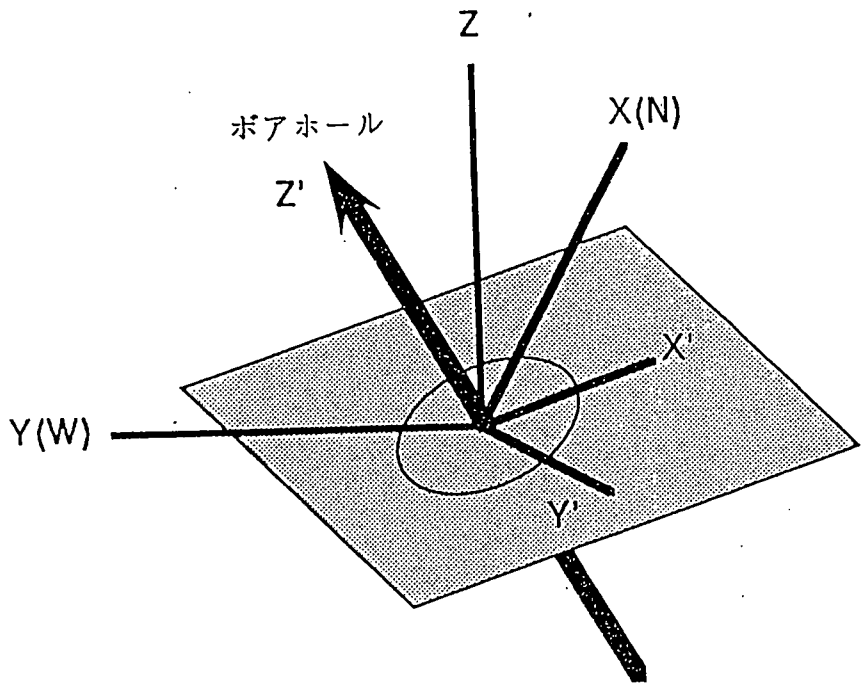
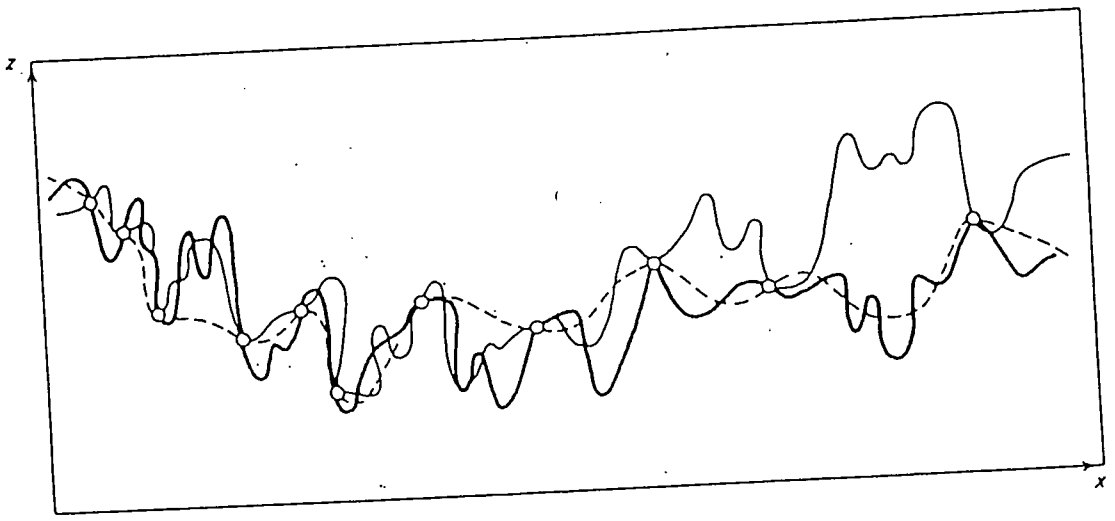
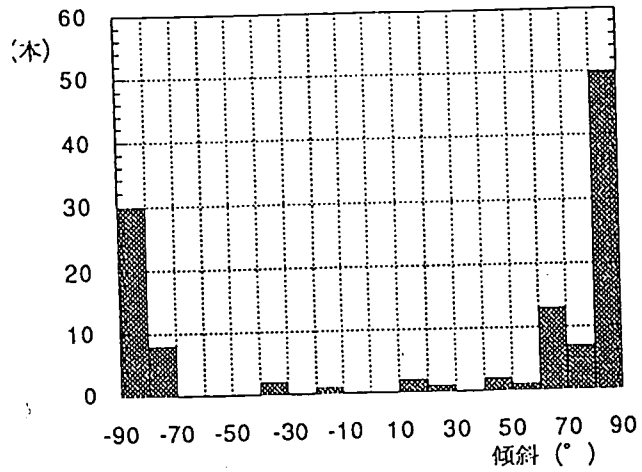


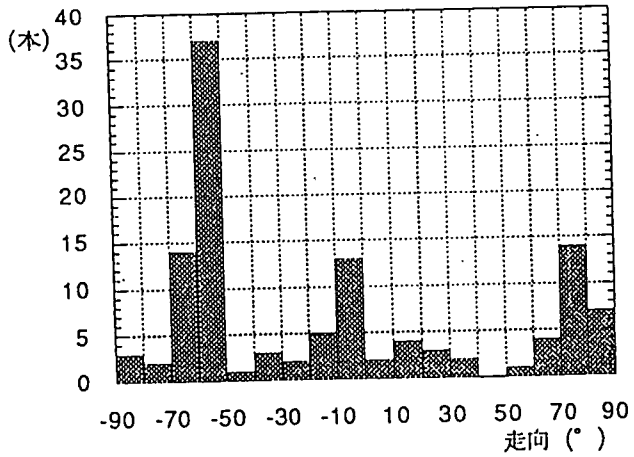
図-5 X'Y'Z'座標系とXYZ座標系



太い実線は実際の値、細い実線は条件付きシミュレーション、
点線はクリギングによるモデル化である。
○はconditioning dataである。

図-6 conditional simulationとクリギングの差





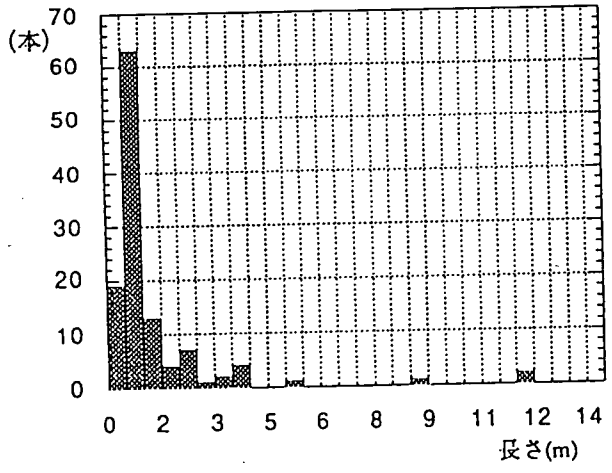


図-7　露頭面での走向、傾斜、トレース長さの例
傾斜は東向きを正、走向は北から時計回りを正とする。

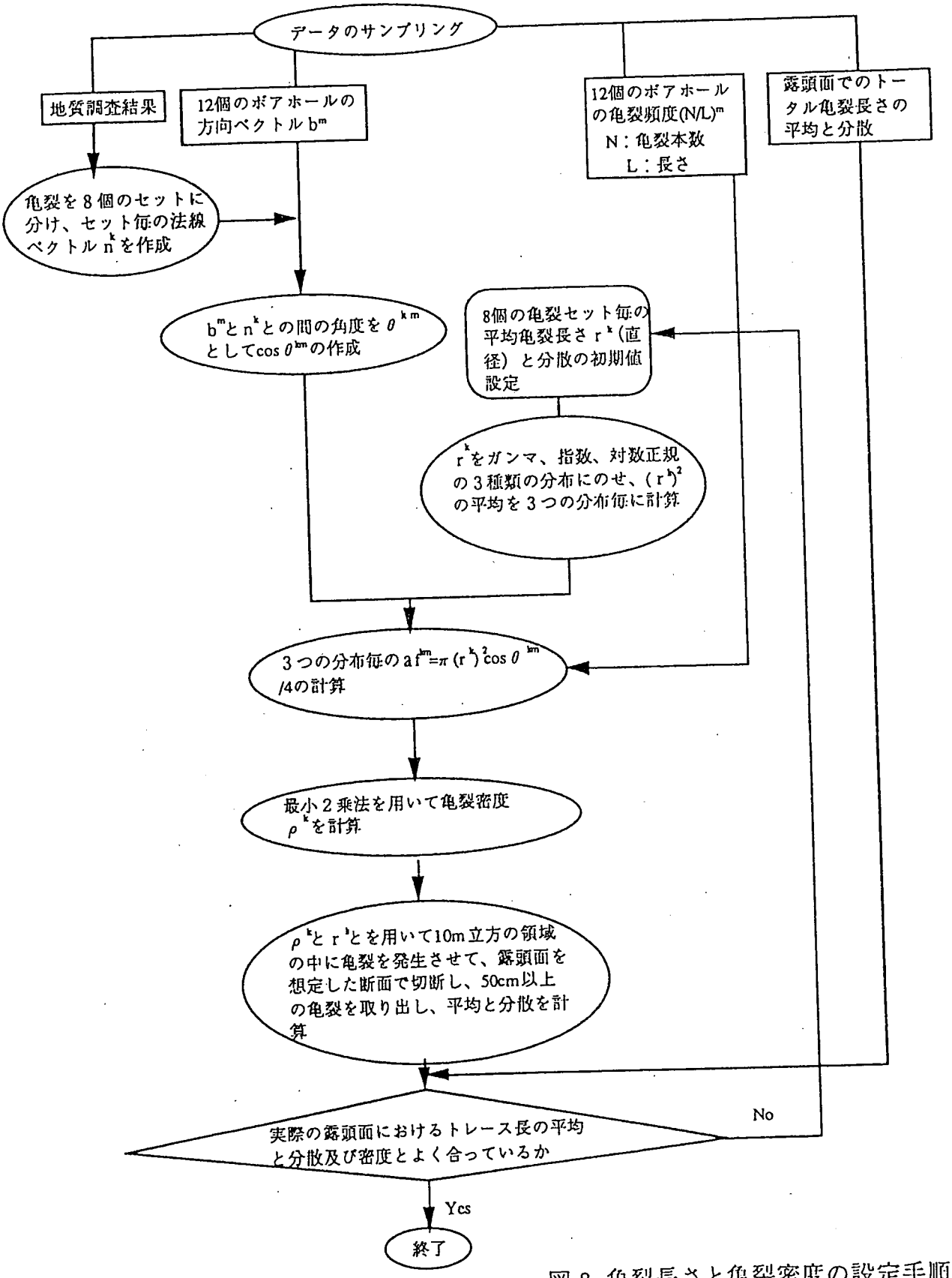


図-8 亀裂長さと亀裂密度の設定手順

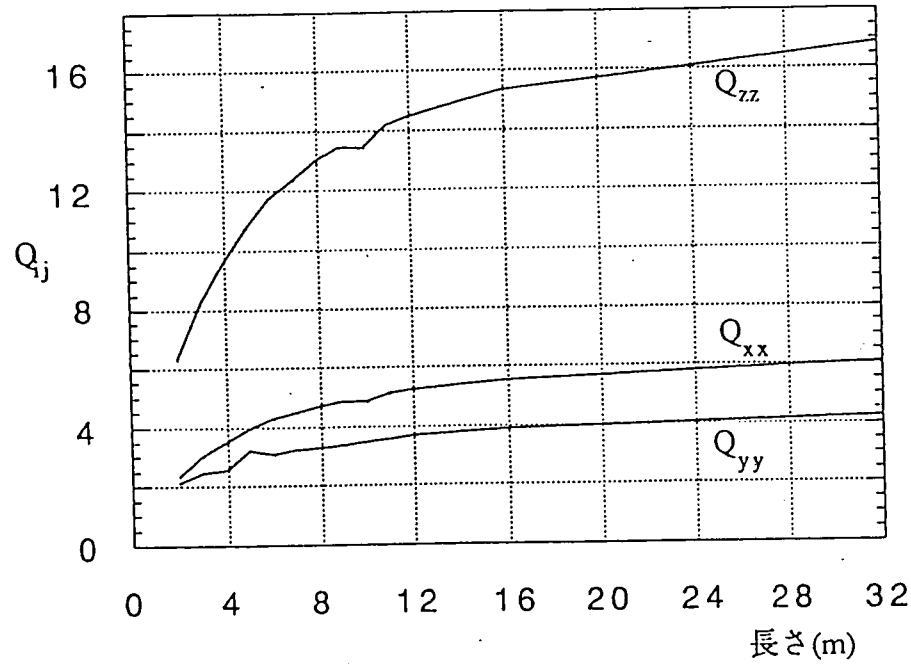


図-9　種々の大きさにおけるQ_{ij}

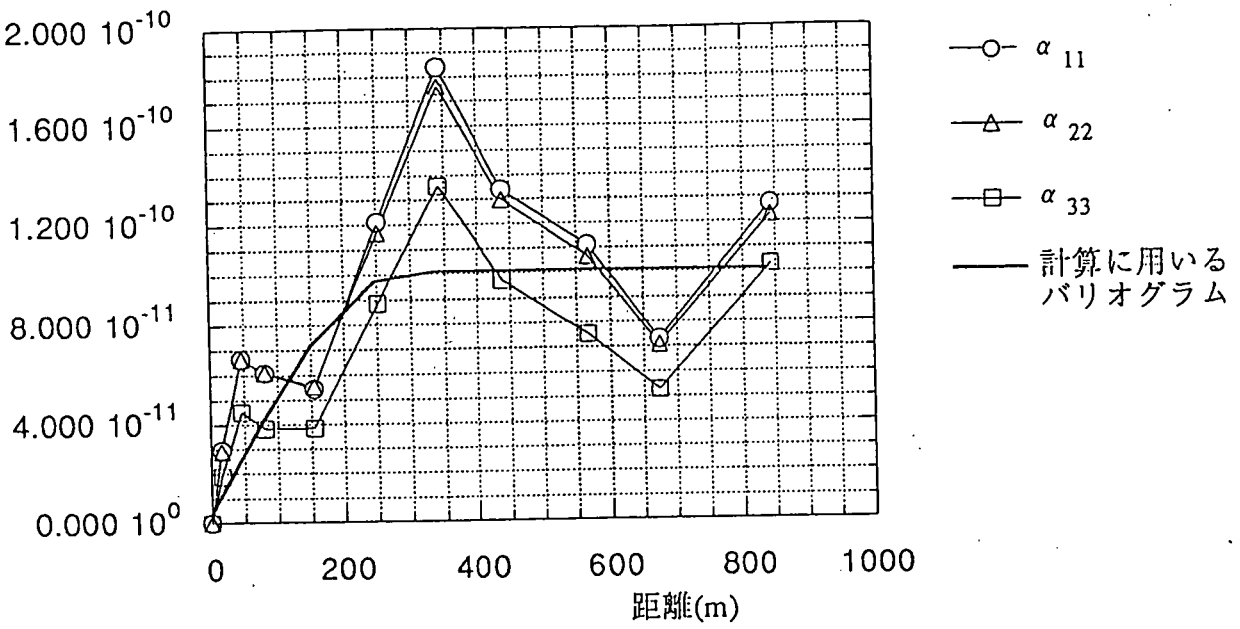

2.000 10-10
1.600 10-10
1.200 10-10
8.000 10-11
4.000 10-11
0.000 100
0
200
400
600
800
1000
距離(m)
α 11
α 22
α 33
計算に用いる
バリオグラム

図-10　バリオグラム

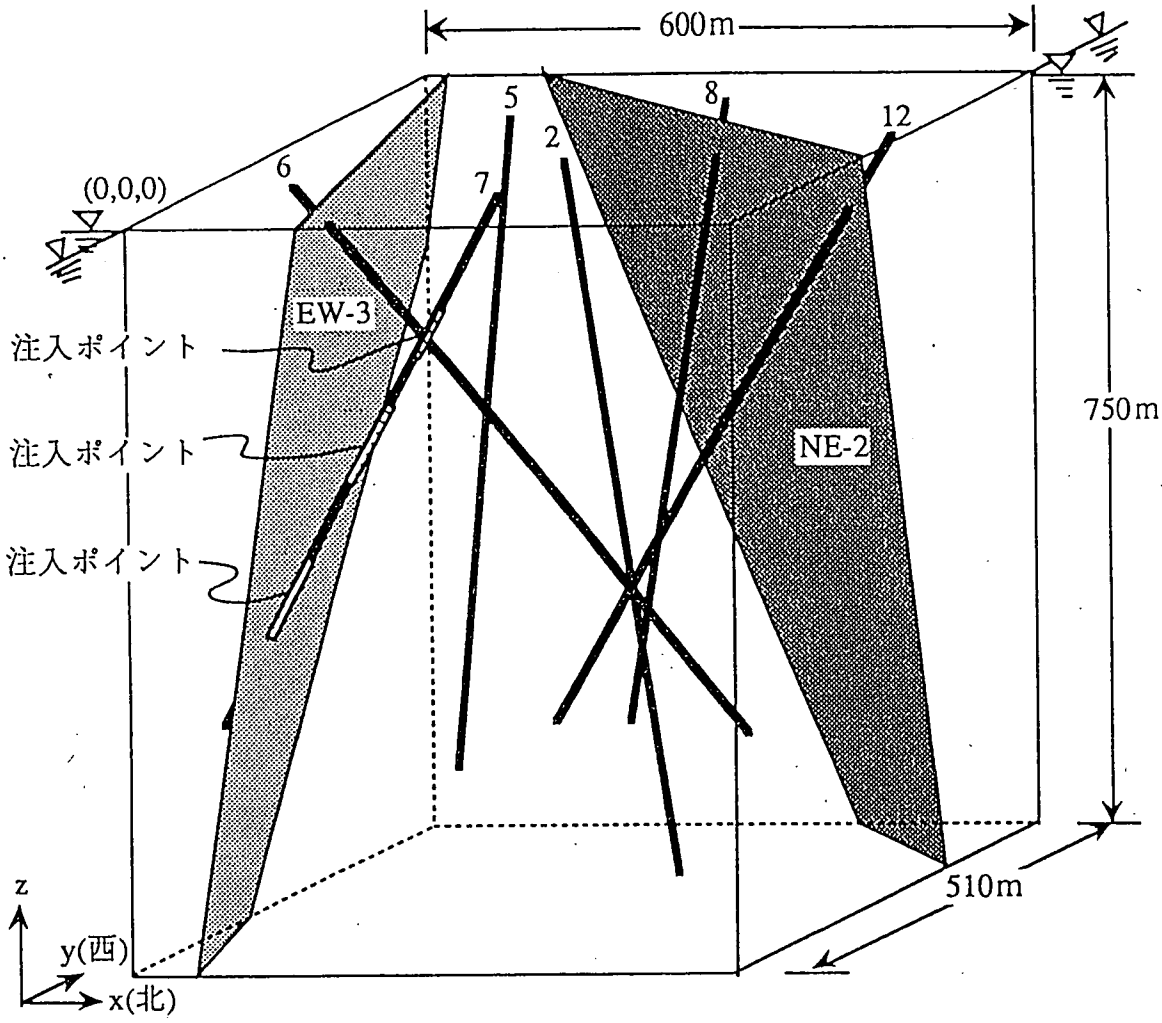


図-11 解析モデルの模式図

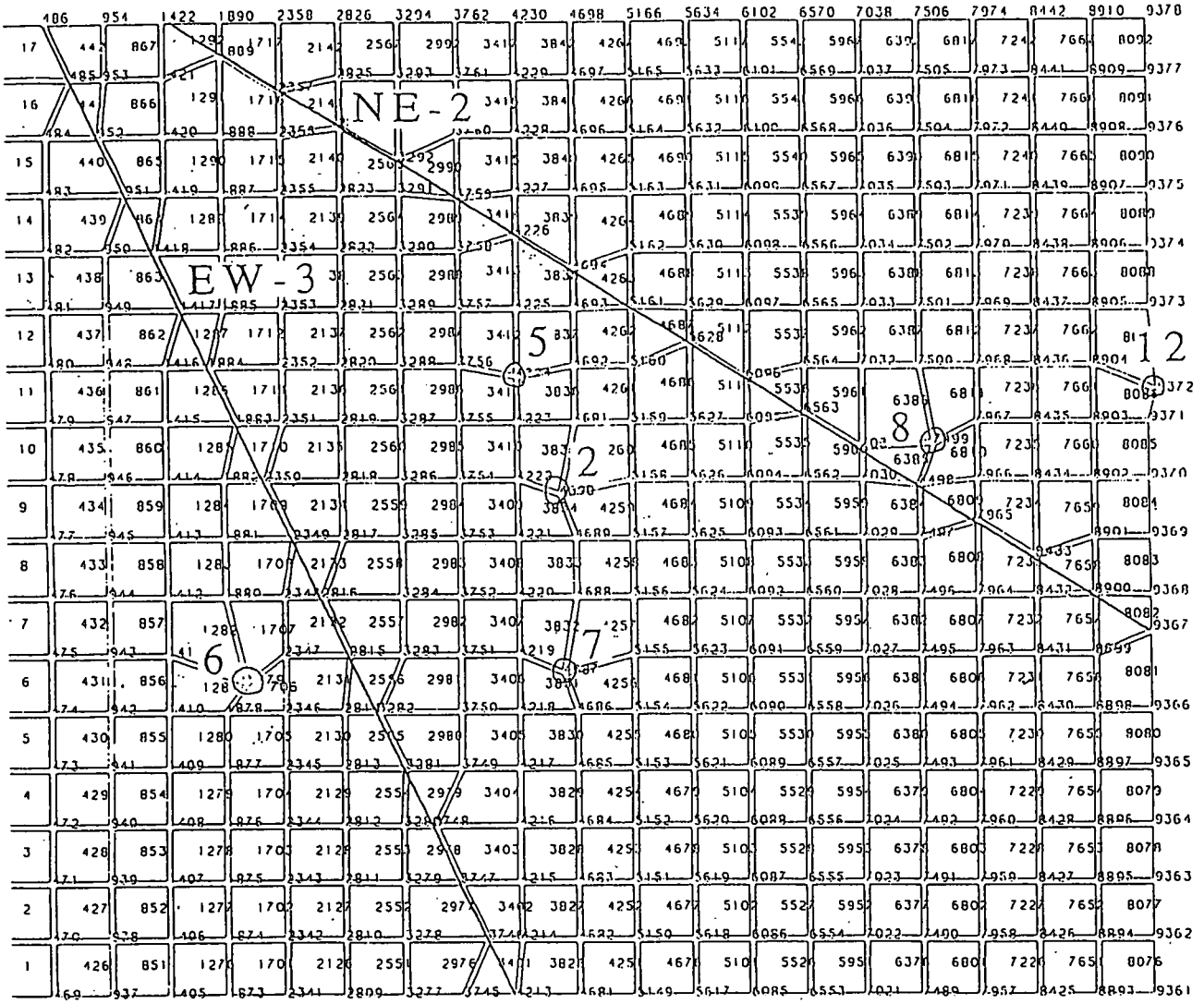


図-12　解析メッシュ図の例（地表面）

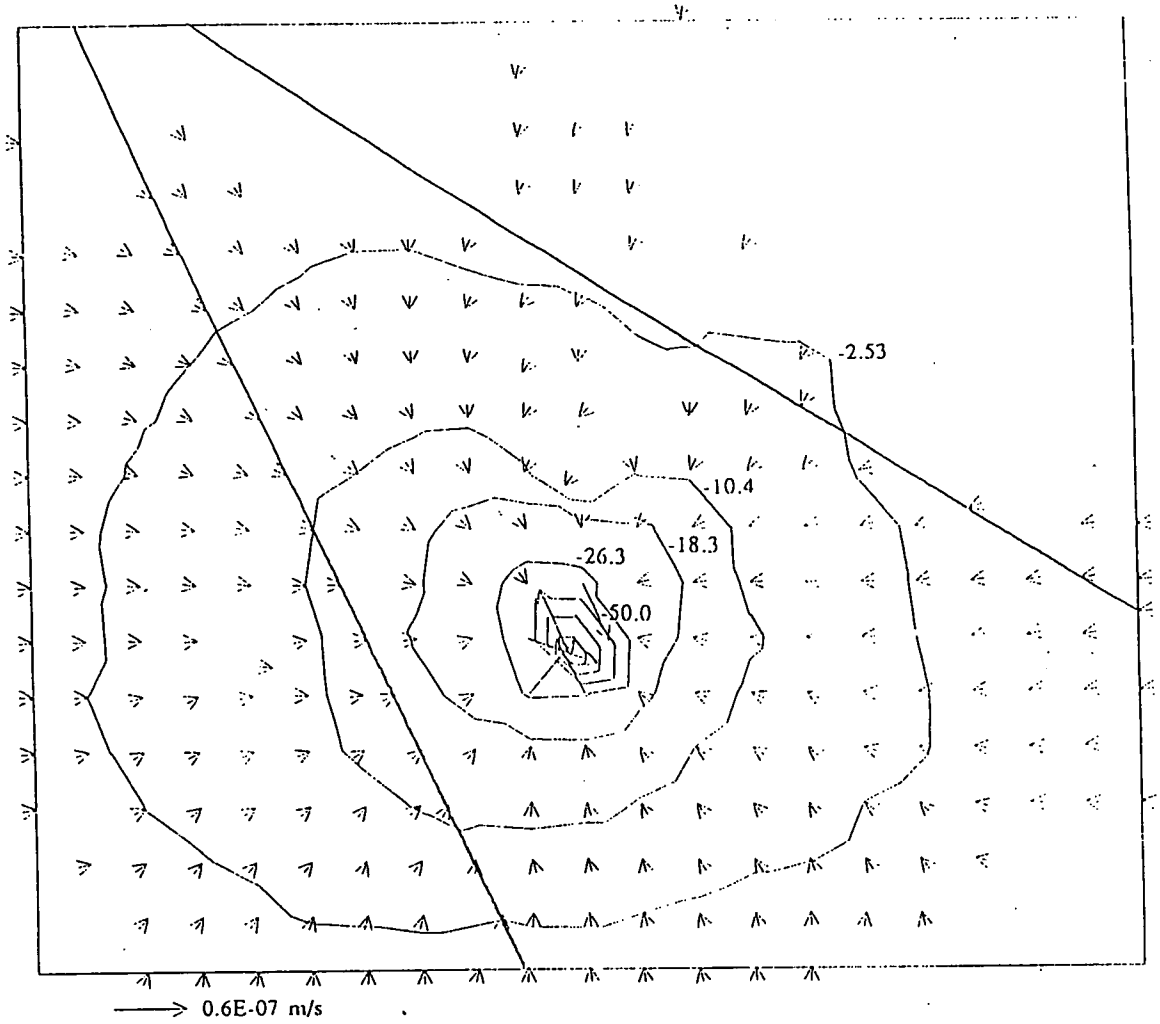


図-13(a)　地表面直下の流速と全水頭分布の計算結果

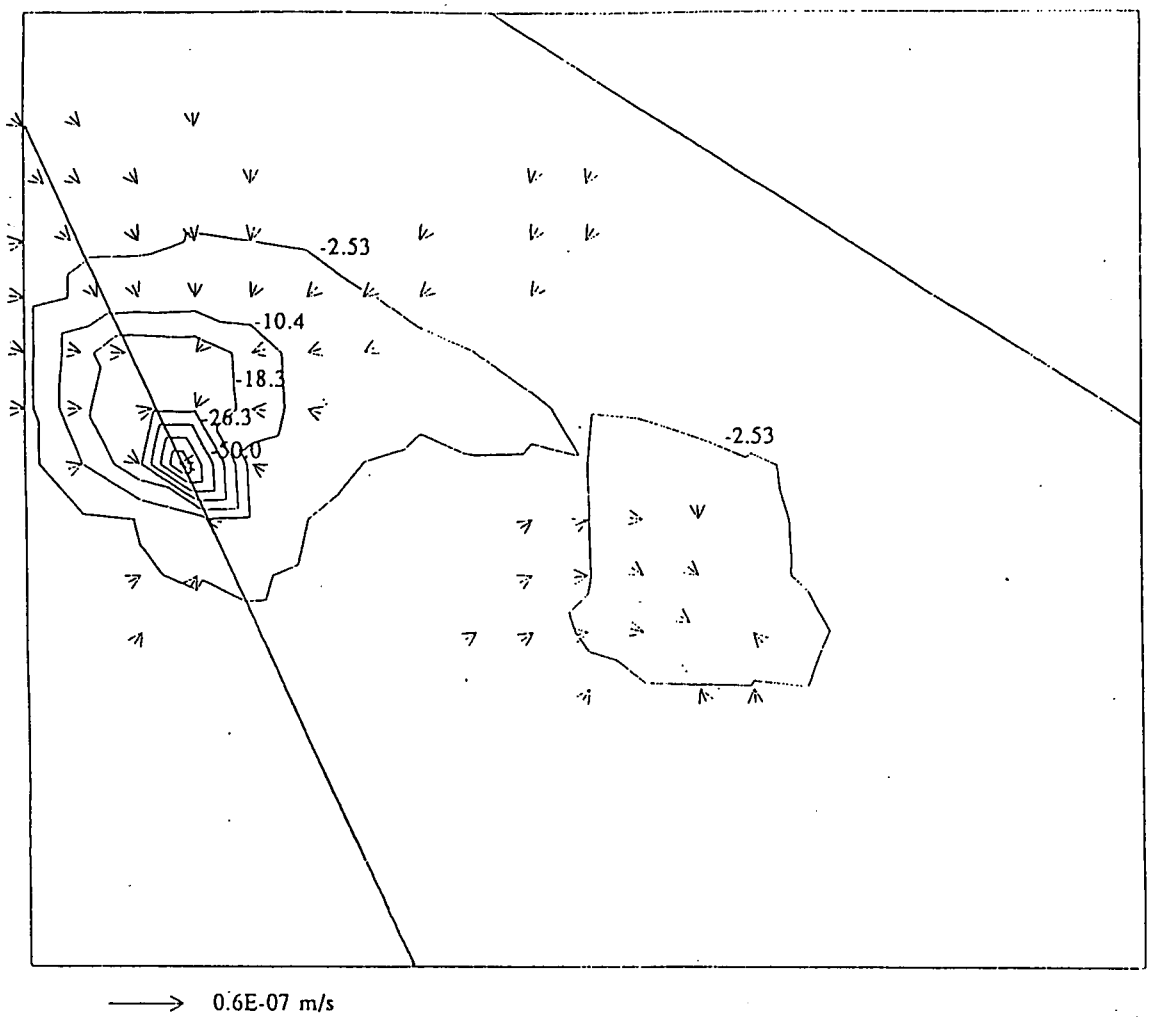


図-13(b)　地下390mの流速と全水頭分布の計算結果

付　録

3　3次元地下水流動機構に関する研究

3．1　本年度の研究の目的

本年度の研究の目的は、以下ののように整理することができる。

（1）岩盤の割れ目系を考慮した地下水流れ、物質移動解析のプログラム（Ｄｏｎ－Ｃｈａｎ）モデルの開発を進め、実際の現場の解析の準備を進めること。

（2）岩盤の不飽和特性（飽和度－サクション圧、飽和度－不飽和透水係数の関係）の評価を行うために、各種岩石の不飽和特性を簡単に評価しうる方法の開発を進め、実際に評価してみること。

（3）山地表層の地下水水理の調査・解析法を新たに開発すること。

こういった各研究を整理し、将来的な、総合地下水解析のフレームを作ってゆく第一歩とすることが目的であった。以下、各々の項目について報告する。

3．2　Ｄｏｎ－Ｃｈａｎモデルによる地下水流れと物質移動解析

3．2．1　今年度の方向

Ｄｏｎ－Ｃｈａｎモデルについては、一昨年、昨年とその基礎的なフレーム作りを行い、釜石鉱山ＫＤ９０坑道を対象として、このモデルの実用性と利点を検討してきた。その中で以下の２点の問題がクローズ・アップされてきた。それらは、

①現場でも簡単に使用できるように、グラフィック機能を整備し、現場対話型モデルに拡張すること。

②物質移動の解析機能を持たせること。

である。今年度はこれらの２点の研究を行った。

3．2．2　Ｄｏｎ－Ｃｈａｎモデルの考え方と物質移動解析コンセプト

このモデルの基本的な考え方は、

①割れ目内にパイプ状の水みちを考える。今年度、２方向にパイプを発生しうるようにプログラムの拡張を行った。

②割れ目相互の交線部も水みちとしてパイプで表現する。

つまり、これらの水みちで構成された３次元管路網で割れ目の中の流れを表現するわけである。図－３．１に、この管路網の作り方を模式的に示す。

本モデルの利点としては、

①管路網の中の流れを取り扱うため、計算が容易である。

②そのため、現場対話型モデルとしての拡張が容易である。

ことが挙げられる。他方、欠点としては、

①非定常計算ができ難い。

②割れ目の中の水みちの形状（方向、間隔など）をあらかじめ把握しておかねばならない。しかし、現状の地質調査ではそれを評価する技術がなく、今後技術開発を行ってゆくことが必要である。

が指摘される。

このような問題は残るものの、今回まずこのモデルにパーティクル・トラッキング法を基礎として、物質移動の解析機能を組込んだ。その手順は、以下である。

①管路網内の各管路の流速を計算する。

②管路網内の１点から物質（粒子）を流す。粒子は管路内を流れ、次の管路交点に達する。

③粒子の到達した交点から流速を考慮して、次の管路内を流下させる。

④その交点に、複数の流下管路が存在している場合、どの管路に入るかは、各々の管路内の流速によって、確率的に定まるものとする。つまり、モンテ・カルロ法により定めることとする。

３．２．３　現場対話型への拡張

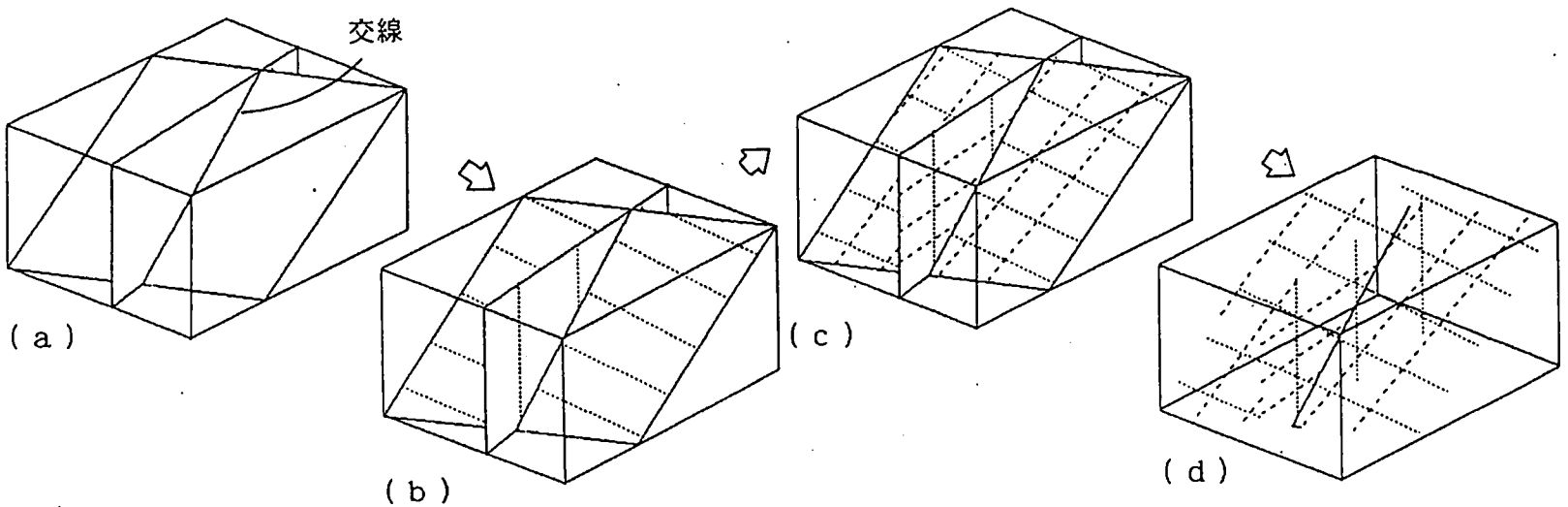
現場対話型へ拡張する場合、最も重要な点は、グラフィック機能を充実させることである。今回、サン・ワークステーションをベースとして、プログラムを作

り、ｐｈｉｇｓプログラムを使ってグラフィック処理を行うこととした。現在、まだ完全な現場対話型になっておらず、またプログラム上で改良すべき点は多く残っているが、基本的なプログラムのフレームはできた。

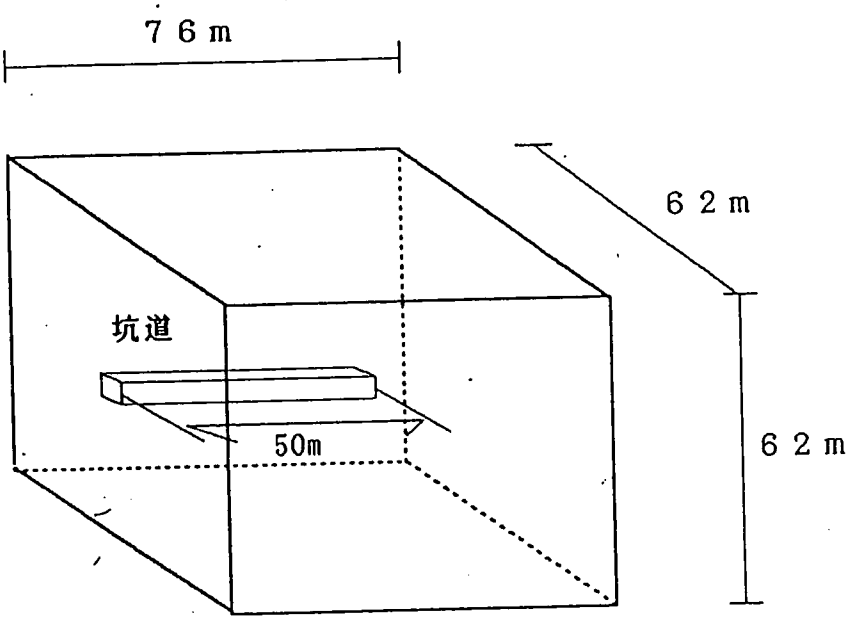
３．２．４　モデル計算

図－３．２に示す３次元領域に２０枚の割れ目を発生させて、モデル的な計算を行った。図中わかるように、トンネルを設定している。発生させた割れ目の状況を図－３．３に示す。水みちは各々直交する２方向に設定した。また、水みち相互の間隔は５ｍとした。全交点数は、５８５６であった。領域内にかなり多数の計算点を取りうることがわかる。境界条件は、トンネルの入口を含む面を流入出０、その他の面を、トンネル中心高さを基準として、水頭３７ｍの一定水頭境界、トンネル壁面上を浸出条件（位置水頭に等しい一定水頭を与える）とした。なお、物質は、図－３．４の＊位置から投入した。図中、パーティクル・トラッキングによる、投入粒子の軌跡を併せて示している。なお、与えたパーティクルは、今回モデル計算であることもあって、２０個とした。

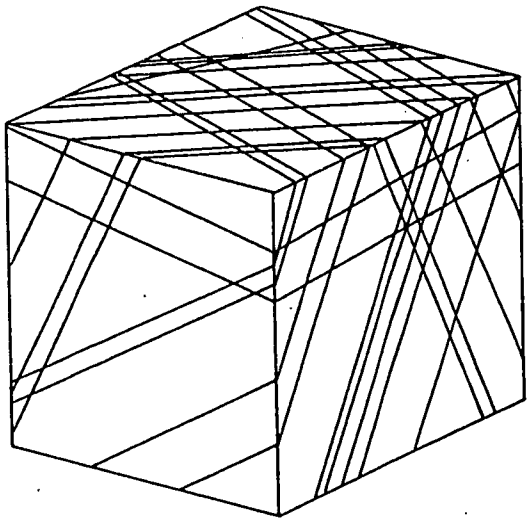
図－３．５（ａ）は、トンネル展開図上に割れ目のトレース、湧水量分布を表したものである。また、図－３．５（ｂ）は、投入したパーティクルの出現場所と量を示す。これらの図を比較すると、湧水はトンネル全域にわたってほぼ一様に現れているものの、パーティクルの出現場所には、場所的な偏りがあることがわかる。このことは、トレーサー試験によって、モデルの検証ができ易いことを示している。　いづれにしても、こういった情報を計算機画面上に表示することができ、視覚的に訴えた解析が可能なモデルの一歩が作り得たと言える。今後は、さらにプログラムを改良し、使い易くして行くことが必要である。



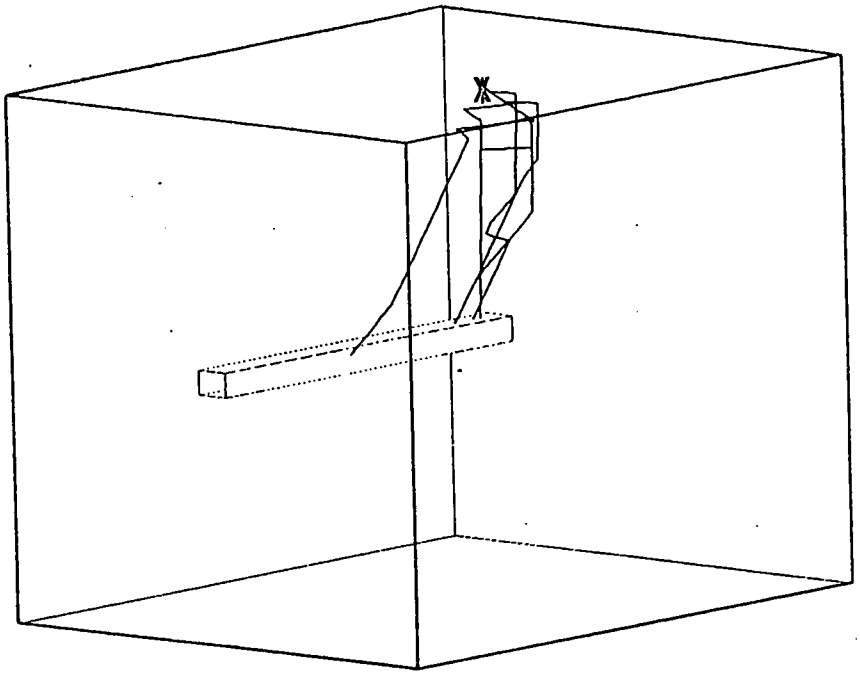
図－３．１　Ｄｏｎ－Ｃｈａｎモデルにおける、３次元管路網の作製手順



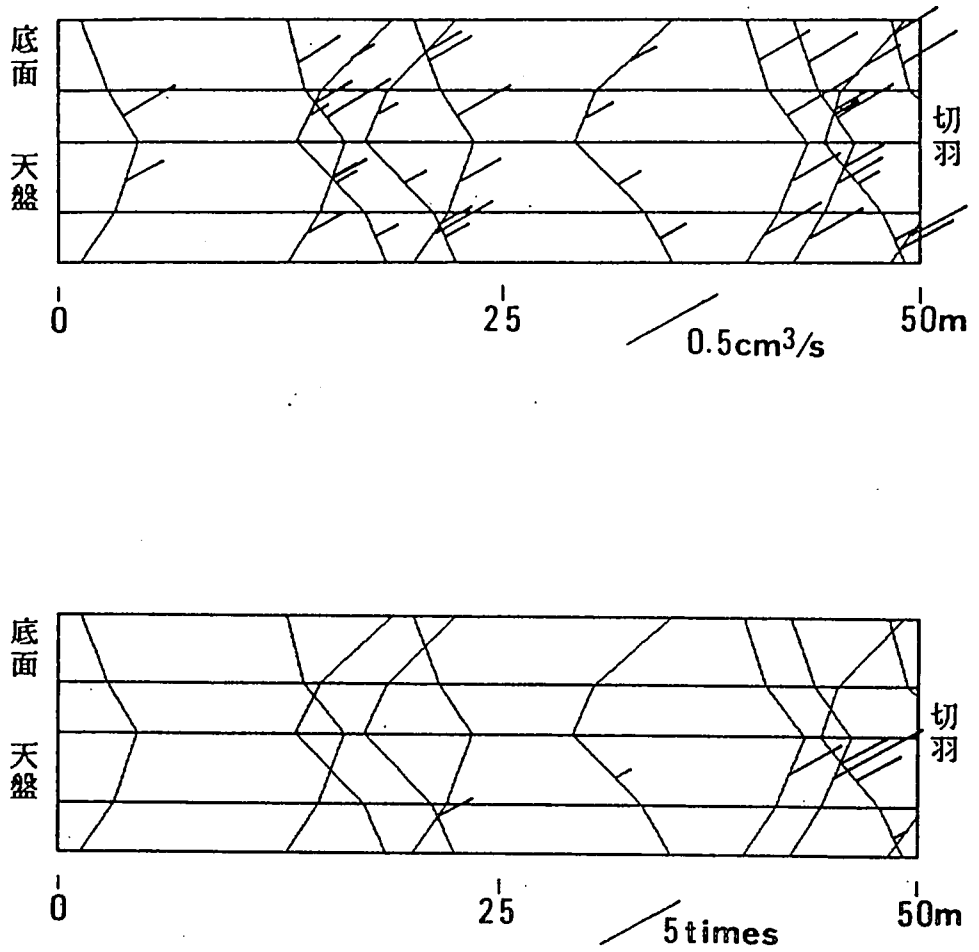
図－３．２　解析領域の設定



図－３．３　設定した割れ目モデル



図－３．４　トレーサーの移動解析。パーティクル・トラッキング法による解析。
図中＊位置より、２０個投入した場合の軌跡を描いている。



図－３．５　解析結果。トンネル展開図上に、湧水分布（上図）、トレーサー分布（下図）を見ている。

3．3　岩石の不飽和特性の評価

3．3．1　目的と評価の重要性

現在、トンネルなどの地下構造物周辺の地下水流れの解析では、一般に飽和・不飽和浸透解析が行われている。この時、岩盤の不飽和特性（飽和度－サクション圧、飽和度－不飽和透水係数）の関係の評価が大事となる。しかし、従来、飽和透水係数は測られているものの、不飽和特性はほとんど計測されていない。これは、その計測が難しく、計測法さえまだ確立していないことによるものである。そのため、解析結果の妥当性の評価が困難であった。

岩盤は、基本的に、種々の岩石や割れ目などからなる複合体である。そのため、複合岩体としての性質をとらえねばならない。しかし、一足飛びに複合岩体の性質を評価することは難しく、まず、単一岩の不飽和特性を評価することとした。それができた後で、単一岩を組み合わせて、全体的な性質を把握するわけである。単一岩の特性を把握する場合でも、まず計測法を開発しておかねばならない。

3．3．2　不飽和特性の計測法

従来、岩石の不飽和特性の評価が困難であった理由は、

①岩石のサクション圧の計測方法が確立していないこと。

②岩石中を通過する微小な流量の計測がきわめて困難であること。

であった。最近になって、スイスでサクション圧の計測方法が開発された。また、微小流量については、蒸発計測によって、把握しうる可能性がある。今回は、このうち蒸発計測を基礎として、計測法を考えることとした。

提案する計測法は、蒸発計測と数値計算による逆解析を組み合わせたものである。まず、図－3．6に示す実験を行う。この実験では、まず岩石の円柱状試料を用意する。この試料の側面は、シリコン・シーラントにより覆われ、側面からの蒸発を防いでいる。この試料の底面を水槽につけ、一定水頭を与える。一方、上面から蒸発させ、蒸発量を測る。つまり、試料内に、蒸発による一次元流を作る。試料内の流れが定常になった後に、試料を破壊、もしくは切断し、鉛直方向

の水分分布を計測する。この一連の実験が終了した後に、この試料内の流れを不飽和一次元流として解析する。この時、岩石の不飽和特性を種々変えて定常水分分布を計算し、実測値と合わせる。実測値と最も良い一致を見た不飽和特性を、その岩石の特性とする。つまり、逆解析法である。この方法では、不飽和特性特性として、あらかじめなんらかの関数を用いると便利である。この関数として、Ｖａｎ－Ｇｅｎｕｃｈｔｅｎ式を用いた。以下にその関数系を示す。

$$S_e = \{1 + |\alpha\psi|^n\}^{-m} \quad \cdots (1)$$

$$S_e = (S - S_r) / (S_s - S_r)$$

$$K(S) = K_s \cdot S_e^{1/2} \{1 - (1 - S_e^{1/m})^m\}^2 \quad \cdots (2)$$

S_e ：有効飽和度，　S_s ：飽和水分量，　S_r ：最小水分量

S：飽和度，　K(S):不飽和透水係数，　K_s ：飽和透水係数

Ψ：圧力水頭，　α，m：パラメータ (n=1/(1-m))

この関数では、基本的に２つのパラメーターλ、ｍのみで不飽和特性が表せるため、逆解析に有利である。これら一連の手順をフローチャートで示したものが図－３．７である。なお、逆解析には、修正マーカット法を組み込んでいる。なお、この手順で評価を行う場合、まず、試料の飽和透水係数を求めておくことが必要である。

しかし、岩石の不飽和特性がＶａｎ－Ｇｅｎｕｃｈｔｅｎ式で表現できるかどうかは、全くわかっていない。そのため、まず、この式を用いることの妥当性を検証しておかねばならない。今回、スイスのグリムゼル地下研究所で計測された非定常サクション圧変化を解析することによって、この検証を行うこととした。

３．３．３　Ｖａｎ－Ｇｅｎｕｃｈｔｅｎ式の妥当性の検証方法

グリムゼル地下研究所のベンチレーション試験用坑道を用いて、トンネル壁面近傍のサクション圧の非定常変化が計測された。その試験は、まず、湿度７０％の空気をトンネルの一部区間に送入し、この条件下での定常時サクション圧分布

をトンネル壁面近傍で計測する。計測位置は、壁面から、５ｃｍ、１０ｃｍ、２０ｃｍ、４０ｃｍ、８０ｃｍ、１６０ｃｍ深であった。なお、この条件下で同時に、蒸発計測を行い、ほぼ１ｍｇ／ｍ２／ｓの蒸発量を得た。次に、空気の送入を停止する。その後は、トンネル内湿度は１００％となり、蒸発は停止する。このため、岩盤内の飽和度は上昇し、サクション圧が低下する。このサクション圧の低下が次に計測されたわけである。これら、定常時サクション圧分布と非定常サクション圧分布を解析し、不飽和浸透解析の妥当性とＶａｎ－Ｇｅｎｕｃｈｔｅｎ式を用いることの有用性を検討するわけである。計算では、まずグリムゼルの岩石の不飽和特性を評価しなければならない。この岩石については、飽和度とサクション圧の関係が計測されている。そのため、この関係をＶａｎ－Ｇｅｎｕｃｈｔｅｎ式で近似し、特性を決定することとした。実測値と、そのＶａｎ－Ｇｅｎｕｃｈｔｅｎ式の当てはめの結果を図－３．８に示す。もし、実測データがこういうように求めたパラメーターでうまく解析できたならば、解析や不飽和の特性評価が妥当ということができる。

３．３．４　解析と実測値との対応

図－３．９に解析領域とその要素分割を示す。解析領域は、対称性を考えて、トンネル中心線より片側としている。境界条件としては、まずトンネル中心線上は流入出０とした。トンネル壁面上には、実測蒸発量を与えた。他の境界上には、実測水頭値を参考にして、トンネル中心高さを基準として、２４ｍの一定水頭を与えた。

まず７０％空気湿度条件下での定常飽和度分布を計算したものを図－３．１０に示す。図－３．１１は、計算値と実測値との比較を示す。極めて良い一致が認められる。図－３．１２は、湿度が１００％となり、蒸発量が０となったあとのサクション圧の低下過程を計算し、壁面から１０、２０、４０、８０ｃｍ位置で実測値との比較を行ったものである。これらも、良い一致をしていることがわかる。

これらの一連の計算によって、トンネル近傍の岩盤に対してＶａｎ－Ｇｅｎｕｃｈｔｅｎ式を適用して飽和－不飽和解析を行うことの妥当性がかなり良く示さ

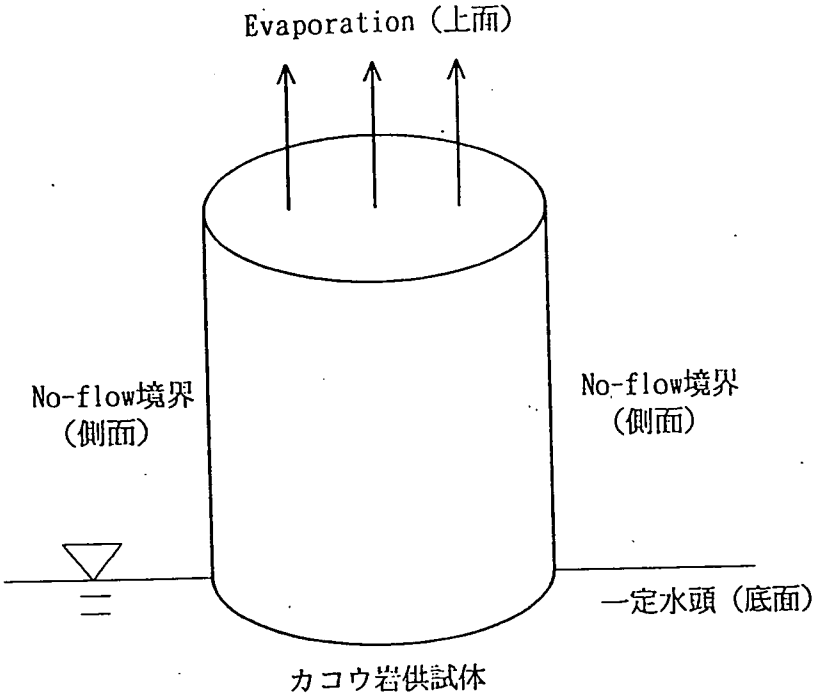
れたと考える。

３．３．５　岩石の不飽和特性の計測

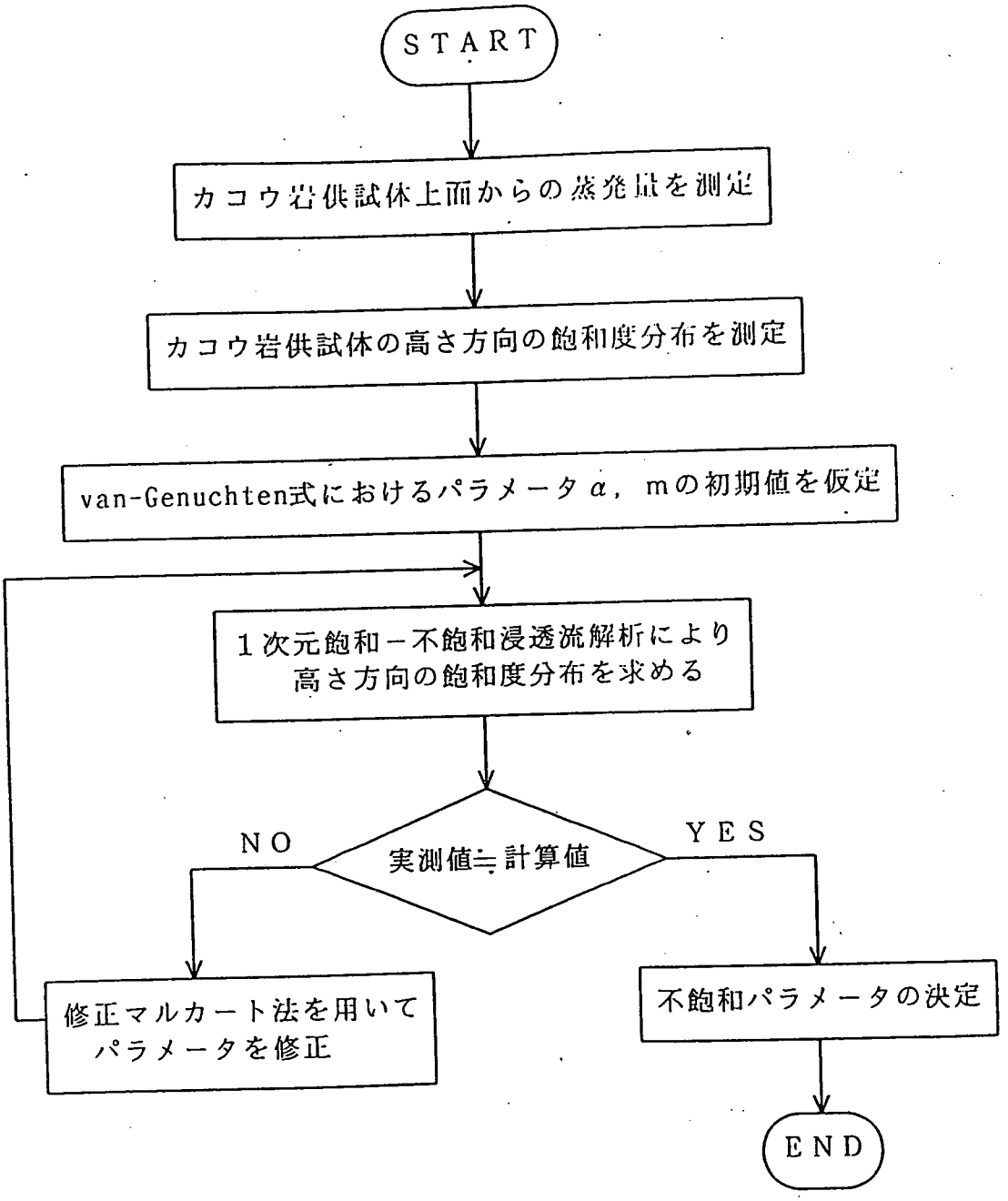
以上の結果を踏まえ、今回７つの岩石試量について不飽和特性を計測した。岩石は、第三紀の泥岩が６個、釜石鉱山の花　岩が１個である。泥岩については、沖縄島尻層群、宮崎層群、瑞浪層群からそれぞれ２個づつ測定した。このうち、飽和透水係数の測定が最も精度良く行われたものは、瑞浪層群のものであり、他の精度があまり良いとは言えない。それらの特性を表－３．１に取りまとめた。表－３．２は、結果を取りまとめたものである。　図－３．１３は、これらの泥岩試料の水分分布の実測値と計算値の比較である。また、図－３．１４は、求められた不飽和特性である。一方、図－３．１５は、花　岩試料について、水分分布を比較した結果であり図－３．１６は得られた不飽和特性である。試料は１５ｃｍと２０ｃｍのものを用いている。このように、不飽和特性が評価しうれば、それを取り入れて、より妥当に３次元的な地下水流れを解析することができることになる。

３．３．６　今後の問題

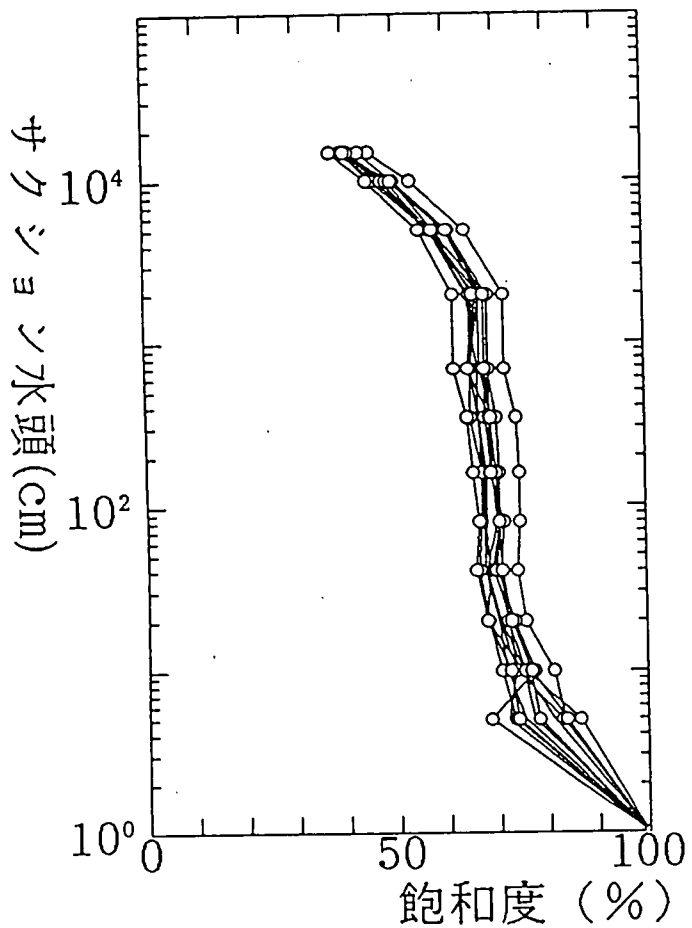
以上述べたように、今回の方法によって、岩石の不飽和特性が評価しうることがわかった。今後の問題としては、このように得られた各種岩石の値を組み合わせて、どのように複合岩体の全体的な性質評価に結びつけてゆくかである。これについては、次年度以降研究を進めてゆきたい。

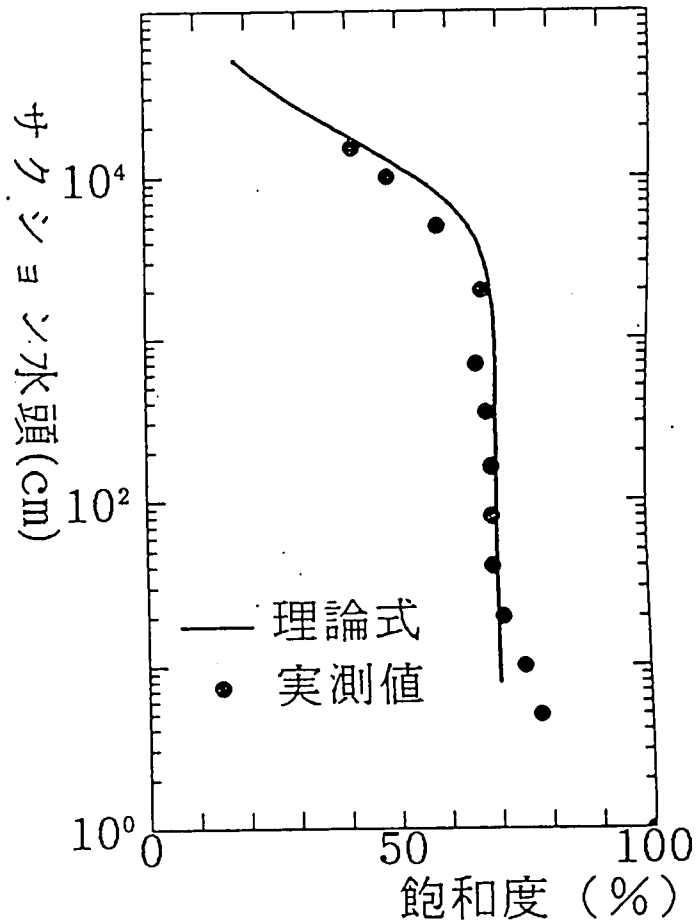


図－３．６　岩石の不飽和パラメーター同定のための室内実験模式図

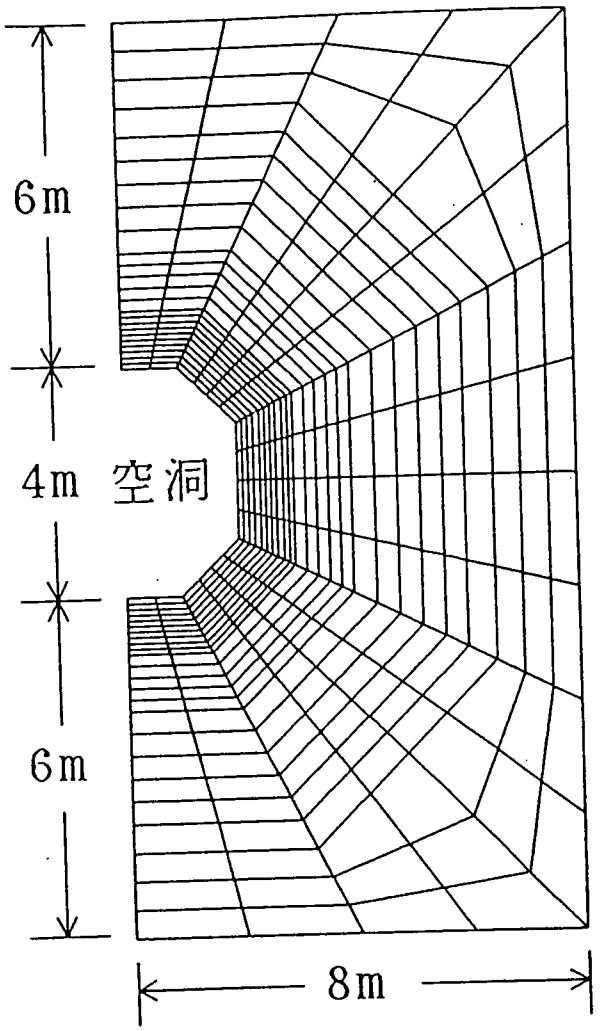


図－3．7　岩石の不飽和パラメーター決定の手順フロー・チャート



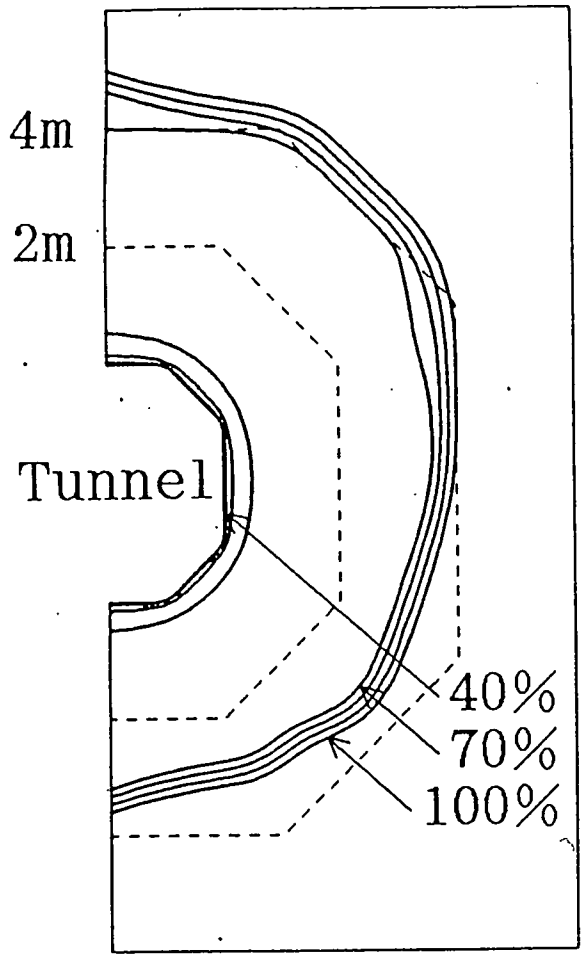


図－３．８　グリムゼル花崗岩の水分特性曲線と、そのＶａｎ－Ｇｅｎｕｃｈｔｅｎ式のあてはめ。

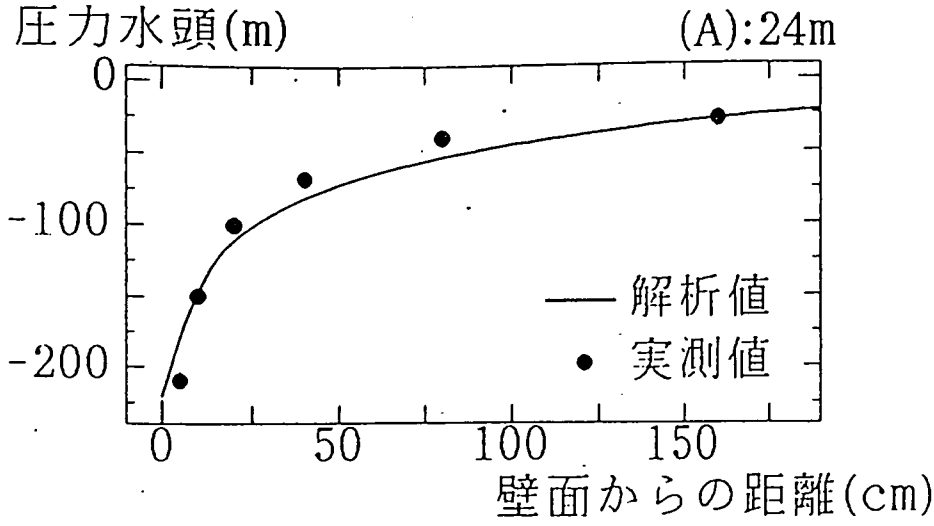


（要素数:384,節点数:425）

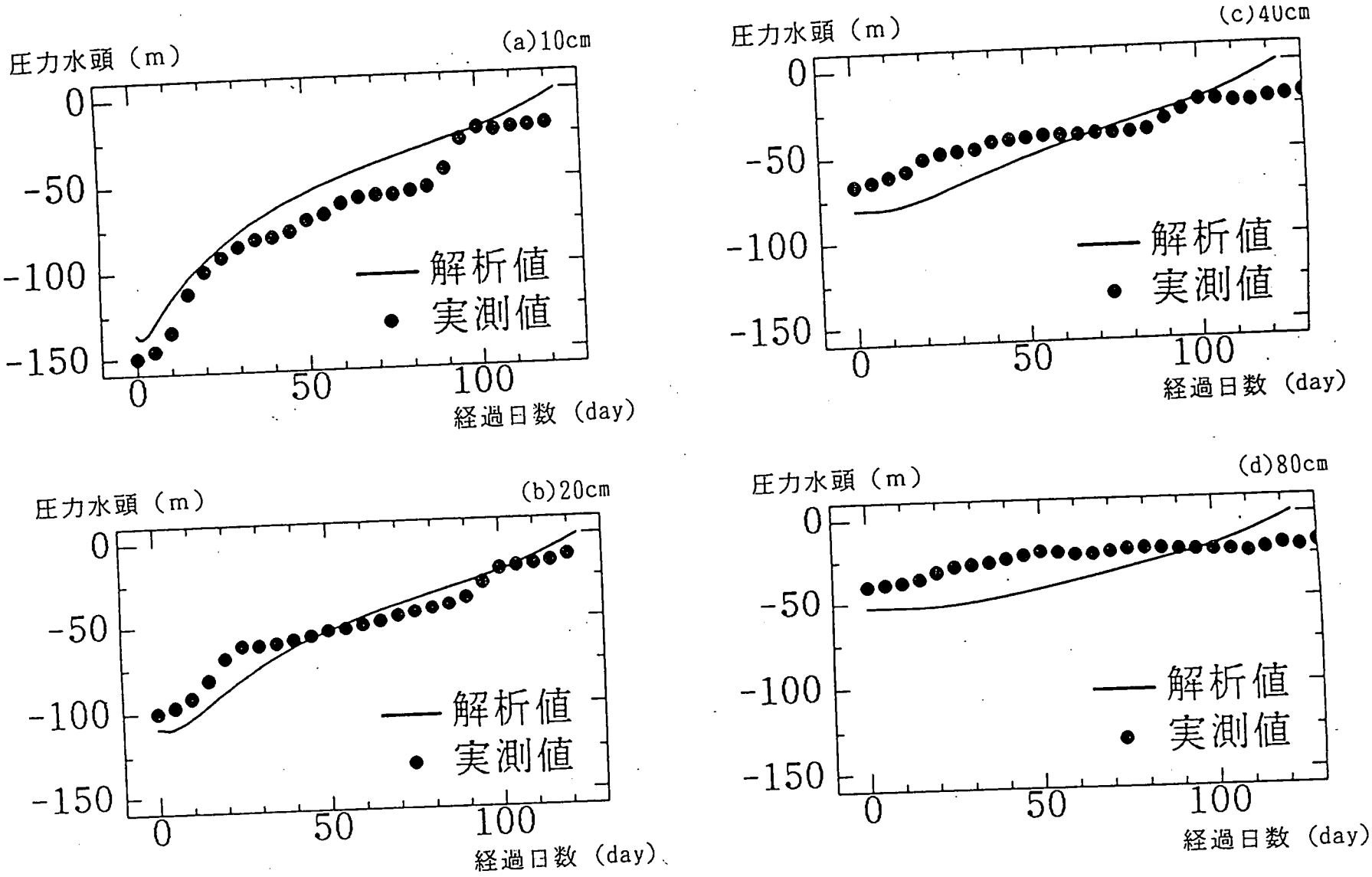
図－３．９　計算領域の設定



図－３．１０　定常飽和度分布の計算結果



図－３．１１　定常時飽和度分布の解析と実測との比較



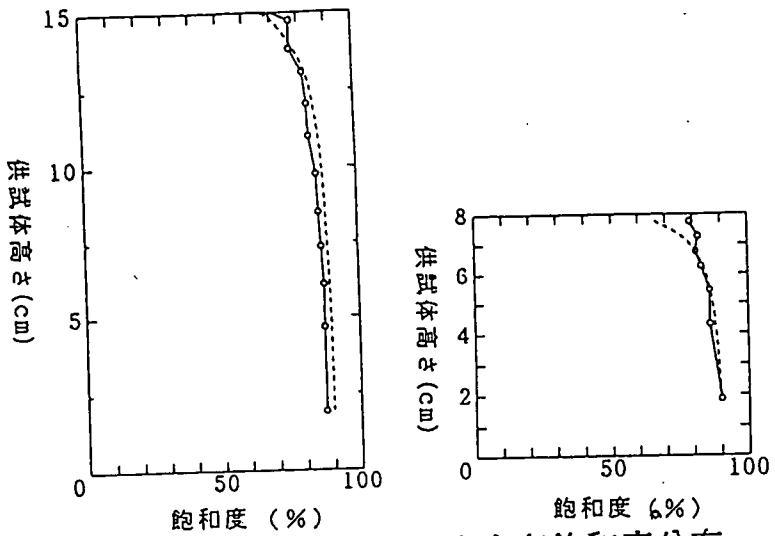
図－３．１２　非定常圧力分布の計算と実測との比較

表－１　用いた第三紀泥岩の性質

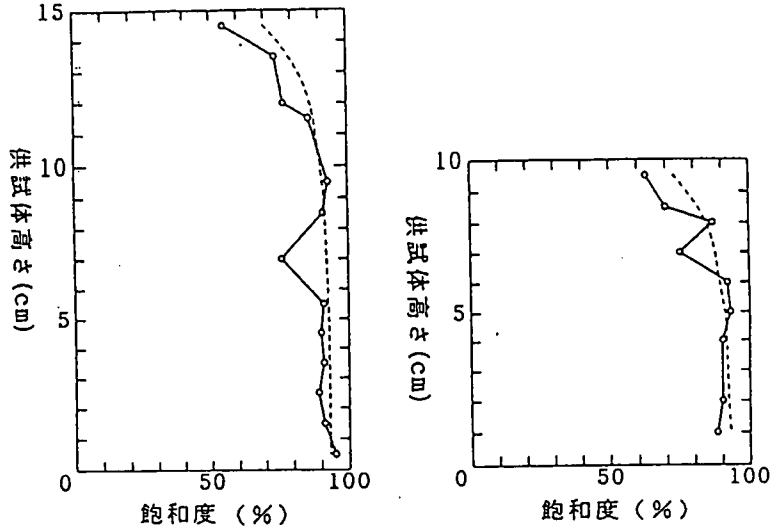
	供試体長さ(cm)	間隙率	飽和透水係数(cm/s)	平均採取蒸発量(mg/m^2/s)
島尻層泥岩	15	0.411	1.0×10^{-7}	21.0
	8	0.411	1.0×10^{-7}	17.0
瑞浪層泥岩	10	0.511	1.6×10^{-10}	3.0
	8	0.511	1.1×10^{-10}	5.0
宮崎層群泥岩	15	0.365	1.0×10^{-7}	13.0
	10	0.365	1.0×10^{-7}	12.0

表－２　決定されたパラメーター

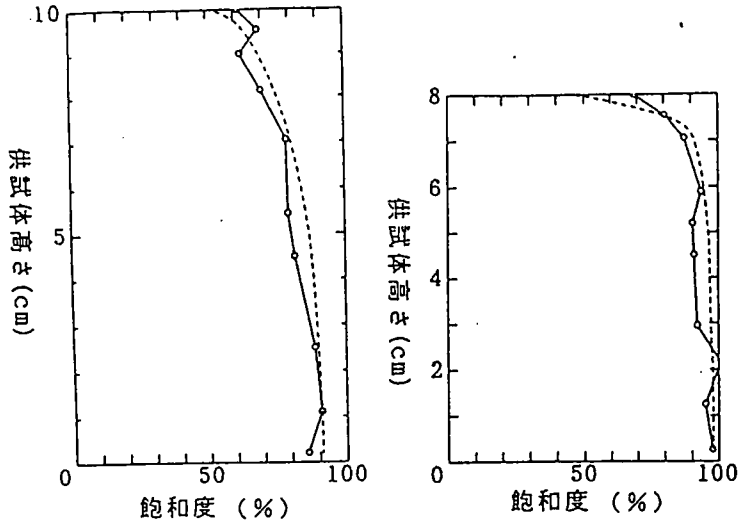
	供試体長さ(cm)	α	m
島尻層泥岩	15	0.003	0.4
	8	0.002	0.4
瑞浪層泥岩	10	0.00008	0.59
	8	0.00004	0.43
宮崎層群泥岩	15	0.008	0.7
	10	0.008	0.5



島尻層泥岩の鉛直方向飽和度分布

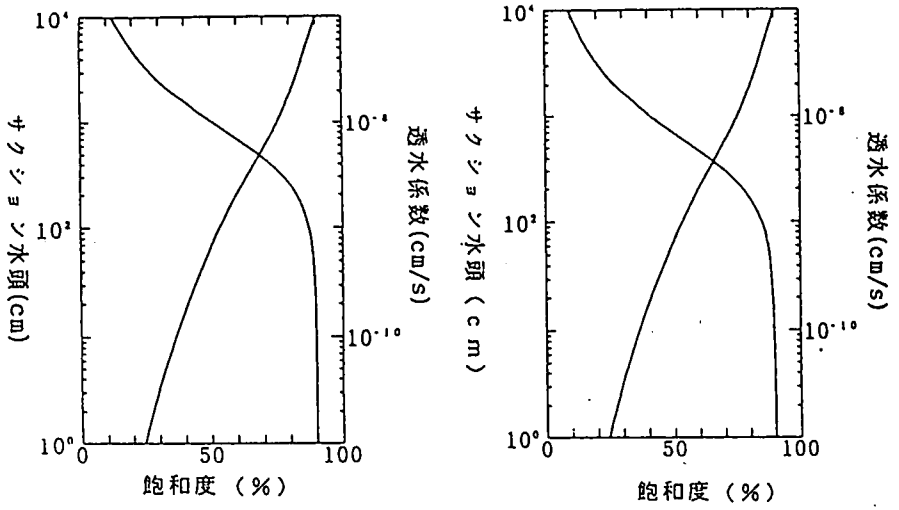


宮崎層群泥岩の鉛直方向飽和度分布

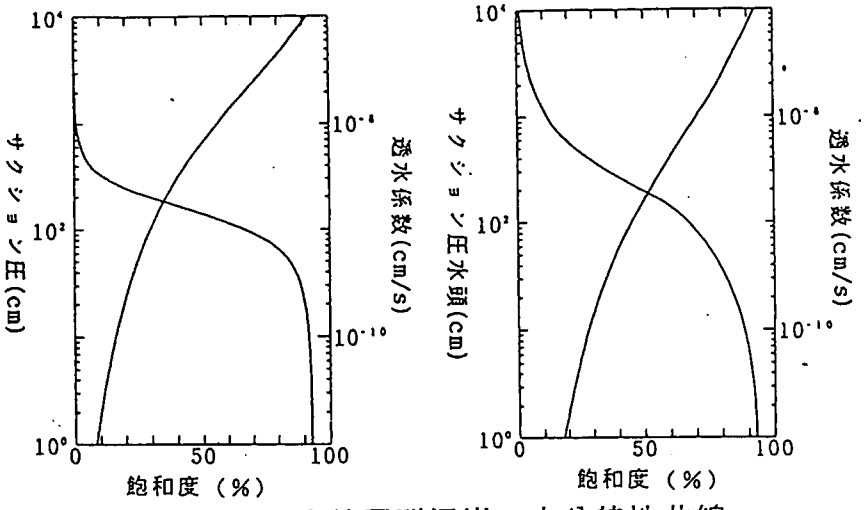


瑞浪層泥岩の鉛直方向飽和度分布

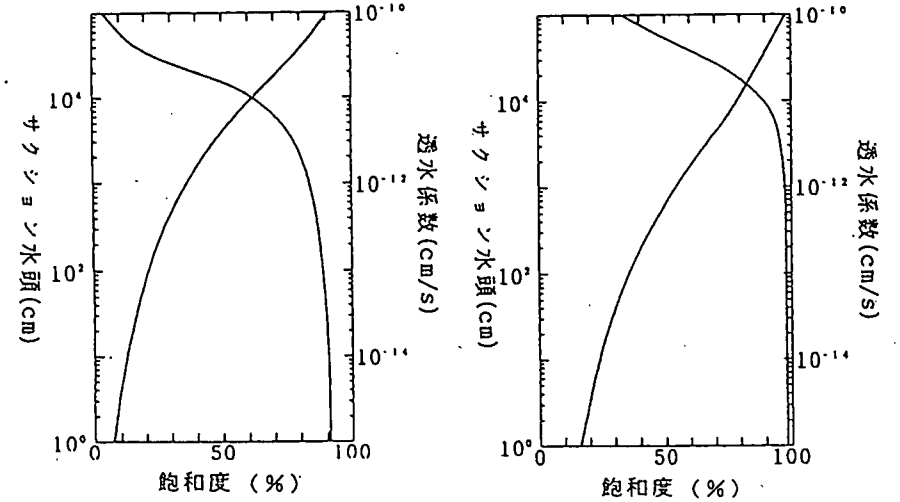
図－３．１３　第三紀泥岩の水分分布と理論式のあてはめ



島尻層泥岩の水分特性曲線

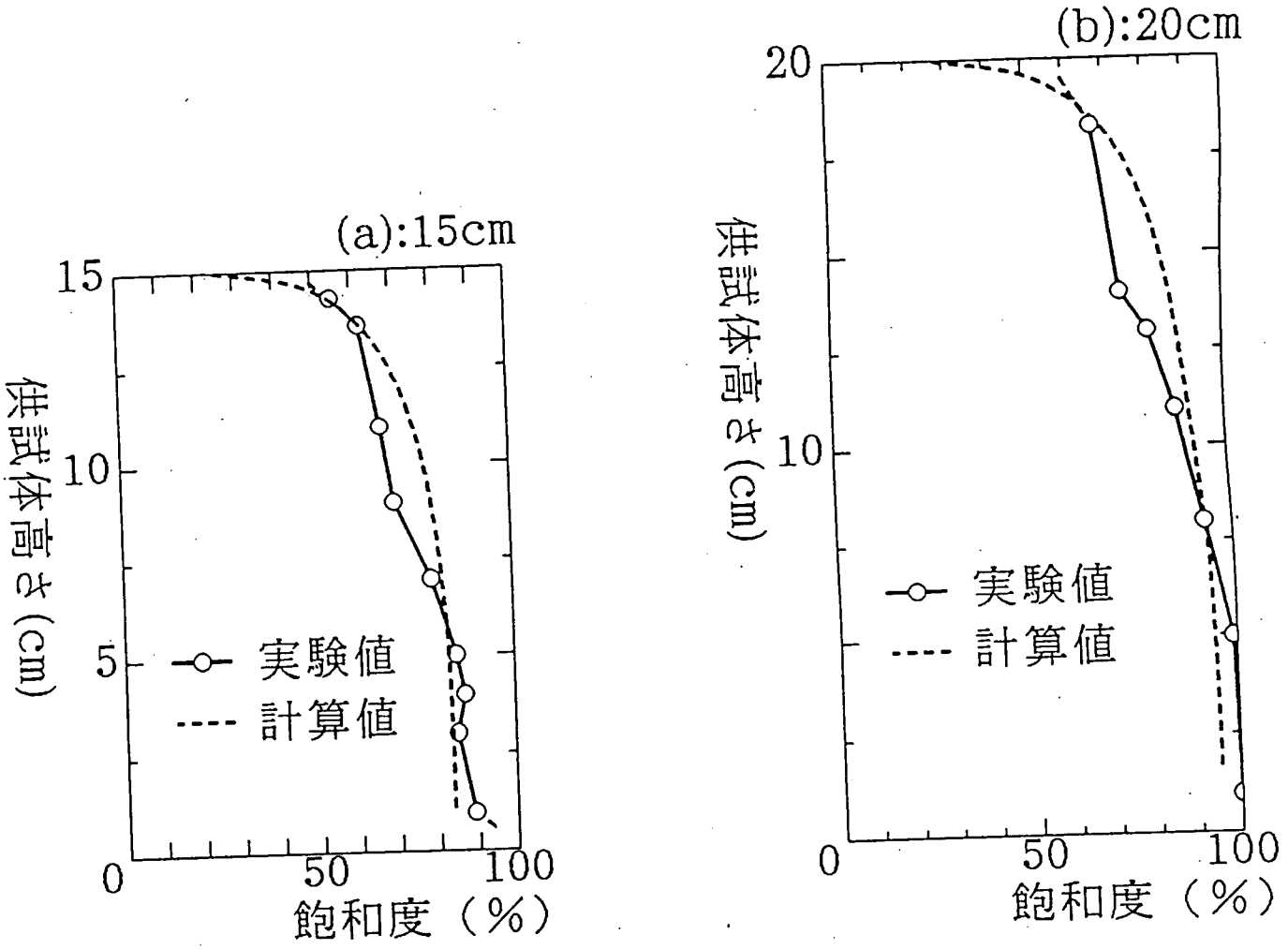


宮崎層群泥岩の水分特性曲線

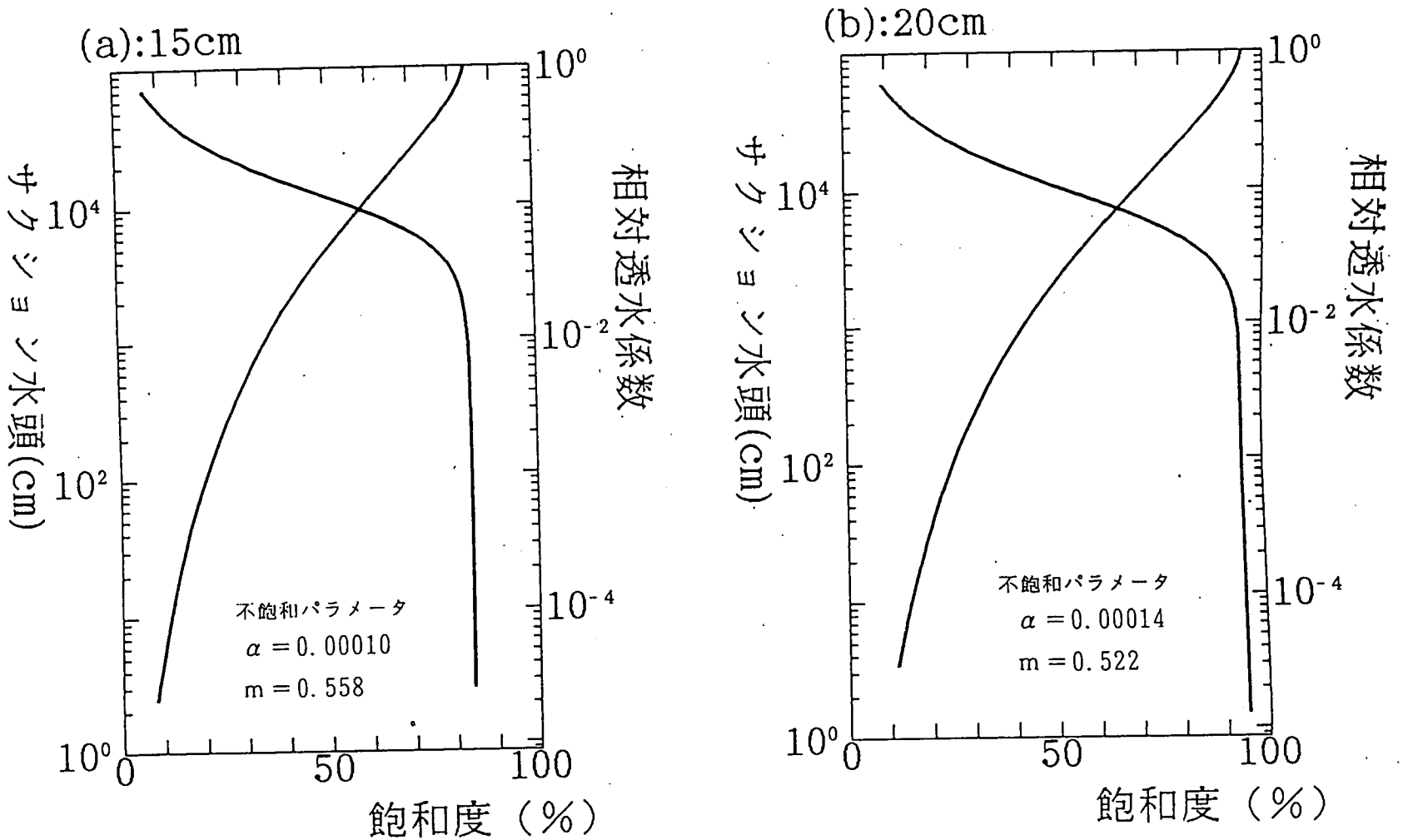


瑞浪層泥岩の水分特性曲線

図－３．１４　第三紀泥岩の不飽和特性



図－３．１５　釜石花崗閃緑岩の試料内水分分布と理論式のあてはめ



図－３．１６　釜石花崗閃緑岩の不飽和特性

3．4　山地表層の地下水評価に向けて

山地表層の降雨に伴う地下水流れを評価することは、以下の点で重要である。

①深層岩盤への降雨灌養量を見積ること。これは、岩盤浸透流を計算する場合に、上部のフラックス境界条件を定めるものである。

②表層の速い地下水流れによる希釈効果を見積る。

これは、廃棄物の地層処分に直接的に関係したものである。このように直接的な関連がなくとも、処分場周辺の降雨－地下水－河川水を総合した水環境を把握することは、処分場の決定などの段階で極めて重要となる。この研究は、山地斜面表層部に対象を絞り、より物理的に降雨や地下水の流れを評価するものである。

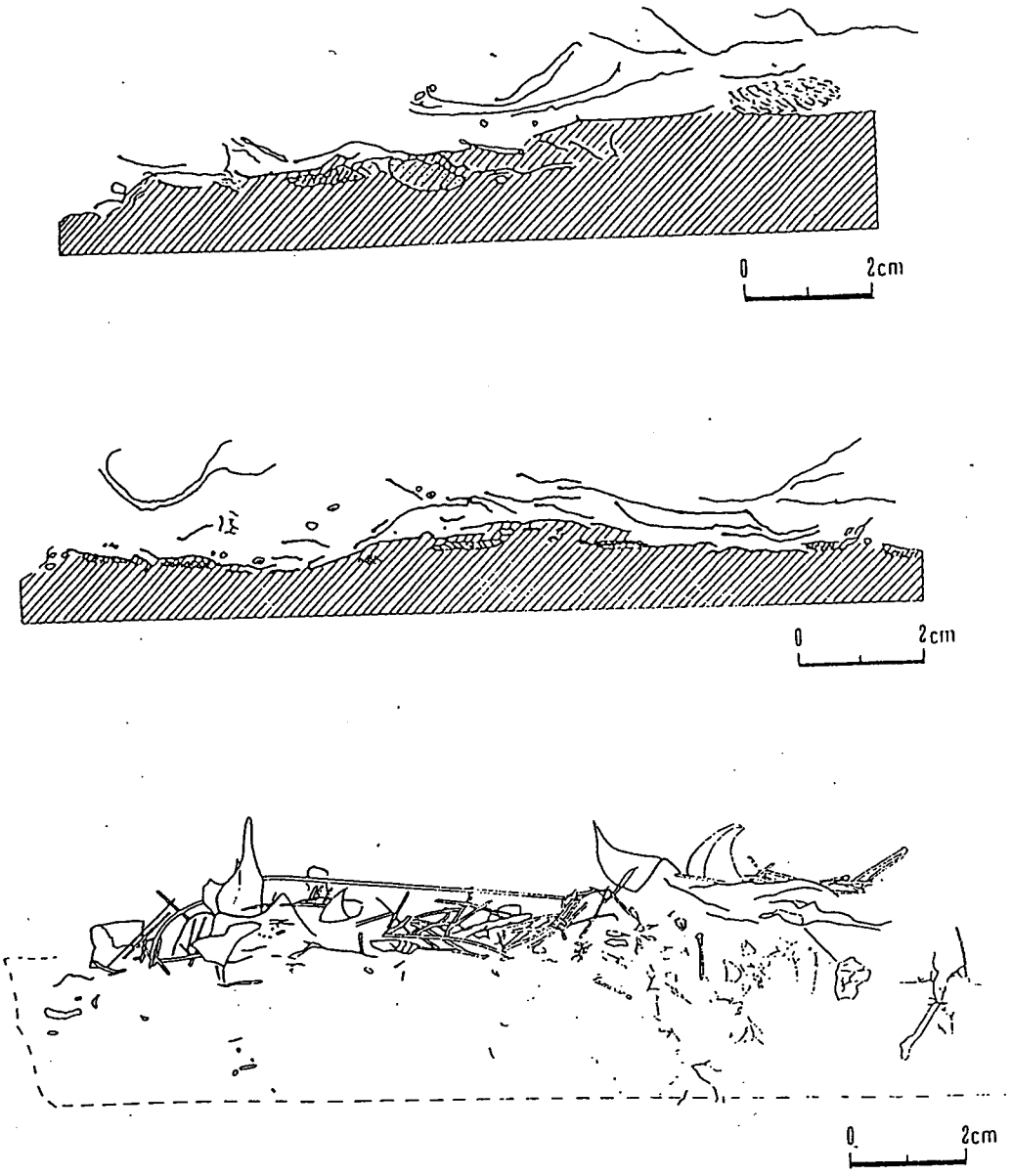
今年度、まず、従来よく性質がわかっていなかった表層の落葉層や腐食土層の形態や不飽和浸透特性を調べた。落葉層構造については、実際の落葉層を酢酸ビニル樹脂やゼラチンで固め、その構造を見た（図－３．１７）。落葉層や腐食土層の不飽和特性については、３．１節で説明した方法を用いた。

さらに、東濃鉱山敷地内に図－３．１８のようなモデル的な流出試験場を設定し、３種類の人工降雨を与えた実験を行った。この結果、表層の落葉層や腐食土層より成る高透水層は、降雨強度が多くなると、顕著な浸透経路となることがわかった（図－３．１９）。また、根が降雨浸透に際して、水みちを形成する性質を観察した。このようなことから、表層の高透水流れを評価する場合、植生の効果を十分評価しておかねばならないことが明かとなった。その中でも、前述した根に沿った流れの評価と植生による、根からの蒸散量の評価は重要である。

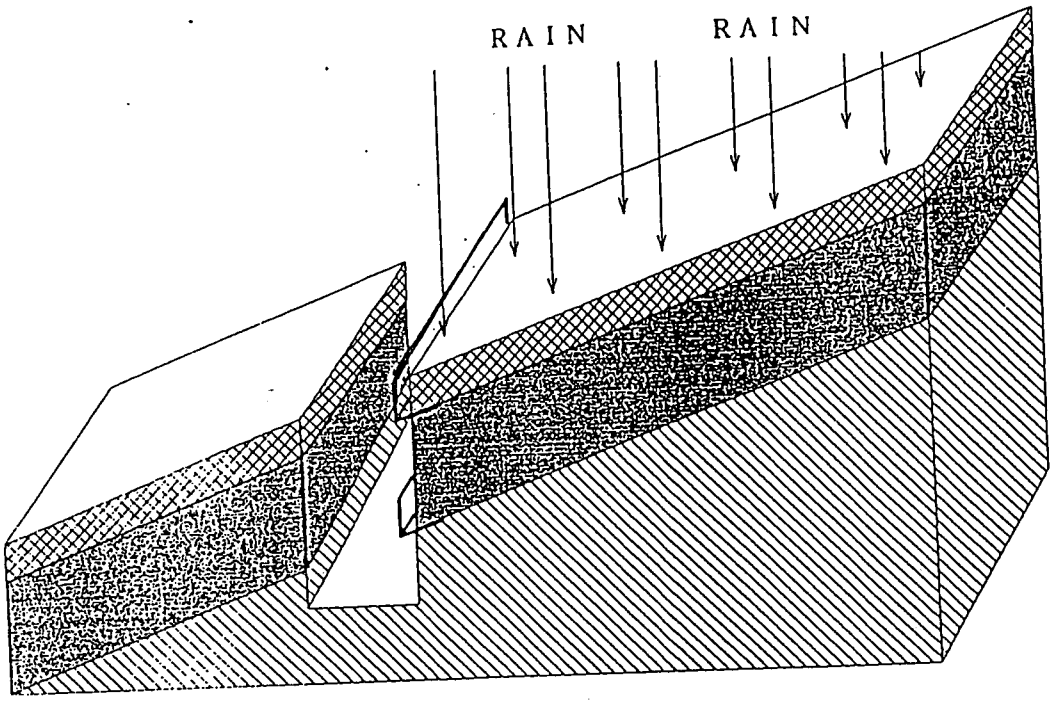
3．4．2　蒸散量測定装置の開発

とくに、蒸散の評価に関して、今年度、新しい測定装置を開発した。その装置はまだ製作、試験中であり、結果はでていない。この装置では、まず多くの葉をビニール袋で覆い、その中に空気を送り込む。この空気の湿度は、蒸散により大きくなる。従って、袋に送入する水分と、袋から排気される空気の湿度差から、蒸散量が求めうることとなる。

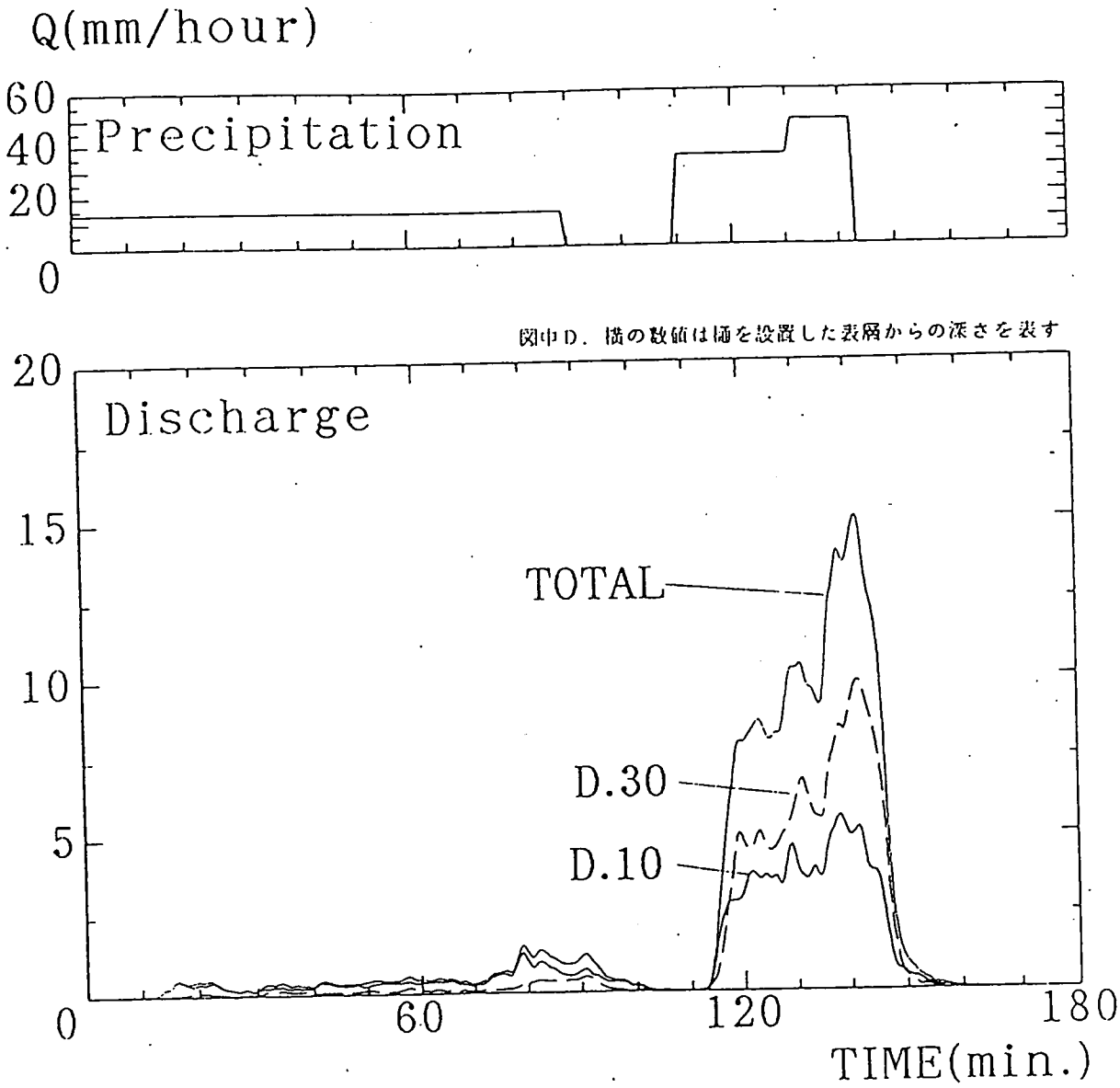
実際の測定は、次年度以降行ってゆきたい。



図－３．１７　東濃鉱山山地の落葉層の観察



図－３．１８　表層の流出実験模式図。格子部は、落葉層。塗りつぶした部分は腐食土層。樋によりそれらからの流出量（D．１０、D．３０）をもとめる。



図－３．１９　３種類の人工降雨に対する流出応答。Ｄ．１０、Ｄ．３０はそれぞれ、落葉層と腐食土層からの流出。Ｔｏｔａｌは総量。降雨強度が大きくなるほど、これらの層からの流出量が増大する。

4. 水理試験法及び水理試験装置の開発研究

4. 1 緒言

岩盤内の浸透を定量的に評価するためには、岩盤の浸透特性を明確にする事と、境界条件および初期条件を的確に選定する必要がある。

本研究では、岩盤の種々の浸透特性を原位置あるいは室内試験により測定する方法及び装置の開発の中で、次の2つの課題について実施したので、その結果を報告する。

(1)異方性岩盤の不飽和浸透特性の計測法

(2)トンネル掘削による緩み領域の浸透特性の調査法

4. 2 異方性岩盤の不飽和浸透特性の計測法

4. 2. 1 はじめに

地盤、ならびに岩盤に流れる水が土木構造物の挙動に多大な影響を与えていることはよく知られている。ダムの基礎岩盤内の浸透流、フィルダム提体内の流れ、地下空洞内への地下水の流入、降雨貯水による斜面の安定、また近年では石油地下備蓄や放射性廃棄物の地層処分など、土木構造物の大型化、複雑化、合理化に伴い岩盤の浸透特性をより正確に把握することが必要となっている。

また、これらの問題は大別すると次の2つに分けることができる。[1)]

(1) 透水係数が比較的大きく、不飽和浸透流が影響を与える領域における問題

(2) 透水係数が比較的小さな領域における問題

これらは、同じ岩盤浸透に係わる問題であるが大きく性質を異にする。そのため、取り扱い方法も様々である。

従来、単一亀裂内の浸透流について多くの場合、平行板モデルを使用して研究されてきたが、それでは高圧応力化での開口幅の小さい亀裂や粗度の大きい天然の亀裂に於て不十分であるためより実際に即した岩盤モデルによる研究が必要とされる。

また、岩盤は本来不連続面を多く含んでいるためそれらの影響で岩盤中の浸透流の動きはきわめて複雑となり、その挙動を的確に把握し解析する方法が、既に確立されているとはいい難いのが現状である。

岩盤内の亀裂を取り扱う方法としては、種々の手法が提案されているが、亀裂の幅、方向、長さ等確立統計的に取り扱う方法が一般的になってきている。しかし、従来、研究されてきているのは、あくまで、飽和領域での透水係数であり、不飽和領域での透水性について研究されたものはない。

また、降雨が岩盤斜面に作用する問題や岩盤内に自由水面を有する問題に関しては、亀裂性岩盤内の不飽和浸透特性を解明する事がきわめて重要なことである。すなわち、地下水の浸透において水収支を定量的に取り扱うためには、亀裂性岩盤とはいえ、この岩盤の不飽和領域における浸透特性を測定する必要がある。

本研究では、亀裂性岩盤の不飽和浸透もDarcyの法則が満足する連続性のある浸透と仮定して、その浸透特性を求める方法を提案する。

4．2．2　不飽和浸透特性に関する従来研究と本研究の目的

著者は自然岩盤の単一割れ目内の不飽和浸透特性を室内実験より計測する方法を提案した。[2)]すなわち割れ目を介在物のあるものとないものとに分け、介在物のある割れ目に関しては粘性土の不飽和浸透特性を計測するHot air methodを改良した方法を提案し、介在物のない割れ目に関しては割れ目内の実流速をトレーサ法によって計測し、飽和度と流量の関係より不飽和透水係数の算定を行なった。

この算定法は次の通りである。

Darcy則が、不飽和領域でも成り立つとして平均流速$\bar{v}$を次のように定義する。

$$\bar{v} = k_u\, i = k_u \frac{(Z_1-\phi_1)-(Z_2-\phi_2)}{L} \qquad (5.1)$$

ここで、　　i ；動水勾配

Z_1, Z_2 ；基準点から供試体の流入点、流出点までの位置水頭

ϕ_1, ϕ_2 ： 圧力水頭

L ： 供試体長(cm)

割れ目内の圧力水頭が等しいと仮定すると、

$$\phi_1 = \phi_2 \tag{5.2}$$

また、

$$Z_1 - Z_2 = L \tag{5.3}$$

よって、

$$\overline{v} = ku \tag{5.4}$$

また、飽和度Srは割れ目断面積(a)に対する通水断面積(a')と定義すると

$$Sr = a'/a \tag{5.5}$$

また、流量qに対して

$$q = a\overline{v} = a'v \tag{5.6}$$

よって飽和度は、次式のように平均流速と実流速との比で表わされる。

$$Sr = \overline{v}/v \tag{5.7}$$

このように単一割れ目に関しての不飽和浸透特性を計測する方法を提案したが、実際の割れ目は複雑であり、それに対応するために割れ目の形状、性質、を定量的に評価し、より正確な、より多くの原位置における割れ目の情報の収集方法を開発する必要がある。　さらに、降雨状態における岩盤内の浸透流の挙動の解明が重要な課題である。

したがって、本研究の目的は、岩盤内への降雨浸透を解くため、マクロな亀裂性モデル岩盤における降雨時の割れ目内への浸透流の挙動を解明することである。そして、岩盤を連続体と考えた岩盤浸透流解析の妥当性を検討するために、飽和、不飽和状態における岩盤の浸透特性を解明する。すなわち、亀裂性の岩盤モデルを作成して、降雨浸透によりどの様な自由水面になるかを計測する。また、複数割れ目モデルの不飽和状態での透水係数の求め方を開発する。

4．2．3　亀裂製岩盤モデル作成のための割れ目の発生手法と透水テンソル

（1）透水テンソルについて

岩盤内の亀裂をFig.5.1に示すように、直径r、開口幅大の円板出モデル化すると、その方位は円板に立てた法線の単位ベクトルnで表わすことができる。亀裂の幾何学形状データよりクラックテンソルP_{ij}は$Oda^{3)}$(1984)によると、次式で定義される。

$$P_{ij} = \langle t^3 \rangle$$

$$P_{ij} = \frac{\pi \rho}{4} \langle t^3 \rangle \langle r^2 \rangle N_{ij} \quad (i,j = 1,2,3) \tag{5.7}$$

$$\langle t^3 \rangle = \int_0^\infty t^3 \, g(t) \, dt$$

$$\langle r^2 \rangle = \int_0^\infty r^2 \, f(r) \, dt$$

$$N_{ij} = \int n_i \, n_j \, E(n) \, d\Omega$$

ここに　　ρ；　亀裂の分布密度

$g(t)$；　亀裂開口幅の確率分布密度

$f(r)$；　亀裂長の確率分密度

$E(n)$；　亀裂方位の確率分布密度

Ω；　立体角

異方性透水テンソルK_{ij}は、クラックテンソルP_{ij}を用いて次式のように表わせる。

$$K_{ij} = \lambda (P'_{kk} \delta_{ij} - P'_{ij}) \quad , \quad (i,j = 1,2,3) \tag{5.8}$$

ただし、P'_{ij} は $P'_{ij} = (1 - \alpha\theta) P_{ij}$で定義される2階の対称テンソルであり、水の浸透に有効な亀裂の幾何学性を表わしている。ここに、λは亀裂の連結の程度を表わす未知定数であり、$\lambda \leqq 1/12$である。$\alpha\theta$は$0 < \alpha\theta < 1$で1から次第に減少させていき、透水性が実質的に零となるときの値を持ってあるから$\alpha\theta$とする。

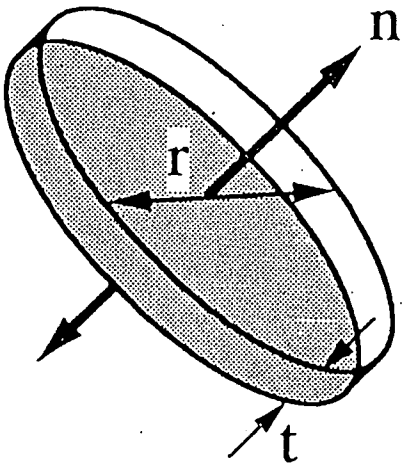


Fig.5.1 Geometry of fissure

（２）割れ目の発生手法

岩盤の浸透特性に支配的な影響を与えるものは、岩盤内に多数存在する節理である。節理は多数存在することと調査可能な領域が限定されるため、その全てについて決定論的な取り扱いは不可能である。従って節理の分布の規則性を利用し、確立統計学的な考察を加えることにより、節理系の幾何学的モデルを作成し、それを基に解析モデルを作成することが１つの有効なアプローチとなる[4]。この解析モデルの作成法を簡単に示す。

節理の特性は、開口幅、方向、位置、長さで決定され、開口幅は指数分布、方向はフィッシャー分布、位置はポアッソン分布、長さは指数分布に従う。発生手順は次の通りである。

(a)節理本数の算出

節理本数は、正規分布式に従い乱数を発生させることにより決定する。

$$F(x) = \frac{1}{2\pi\sigma} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \qquad (5.9)$$

(b)節理中心の決定

節理の位置はポアッソン分布に従う。しかし一般に乱数を発生させること

は困難であるため、疑似乱数を発生させ決定する。

(c)節理の方向の決定

節理の方向はフィッシャー分布式に従う。

$$F(\phi) = \frac{\kappa}{4\pi \sin h(\kappa)} e^{K\cos(\kappa)} \qquad (5.10)$$

一様乱数を発生させてϕを決定し、それぞれの節理のθの値を一様乱数に従うように決定する。節理ごとにϕ、θから方位ベクトルが決定する。

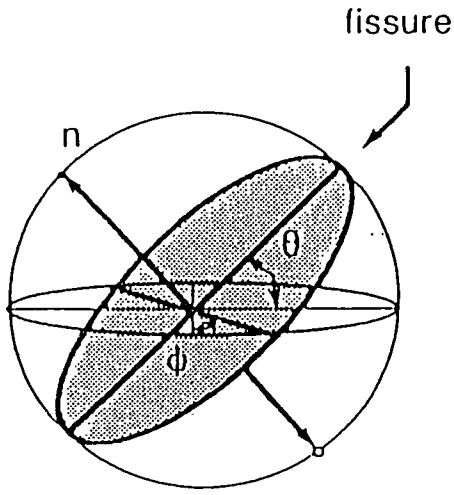


Fig.5.2 Stereographic projection

(d)節理の長さの決定

節理のは、指数分布式に従うものとする

$$F(x) = \frac{1}{\mu} e^{-x/\mu} \qquad (5.11)$$

(e)節理の開口幅の決定

節理の開口幅も指数分布式に従う。

以下、Fig.5.3に発生手順のフローチャート、Table.5.1に本研究で用いた各確立分布の入力データを示す。また、これらの情報に従って発生させた亀裂性岩盤モデルをFig.5.4に示す。ここでは、1985本の割れ目を発生させた。

Table.5.1　入力データ

パラメータ 項目(単位)	分布系	平均	標準偏差	確立変数の範囲	
		μ	σ	最小	最大
亀裂発生密度　ρ (本/m^2)	正規分布	1000	10	900	1100
亀裂長 (mm)　r	指数分布	125	———	10	500
開口幅 (mm)　t	指数分布	2.5	———	1.5	5

方位データ	フィッシャー分布 (中心数；3)	中心数	分布比	ϕ	θ	κ
		1	0.7	70	180	10
		2	0.15	60	90	10
		3	0.15	80	270	10

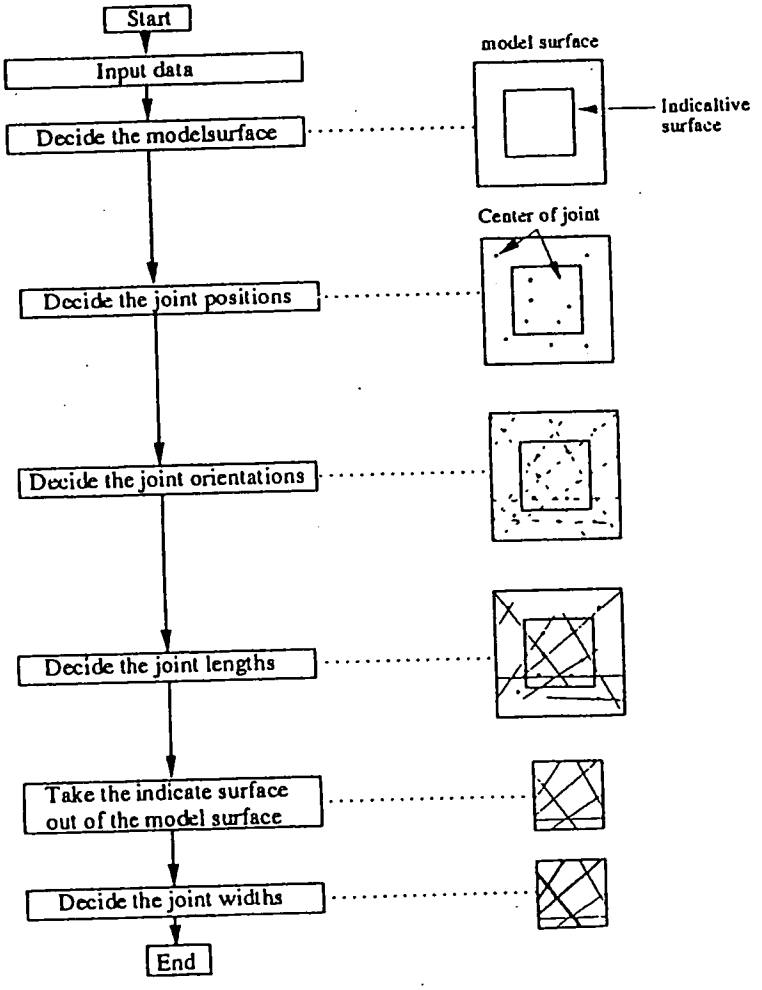


Fig.5.3 Modeling method of joint rock mass [6]

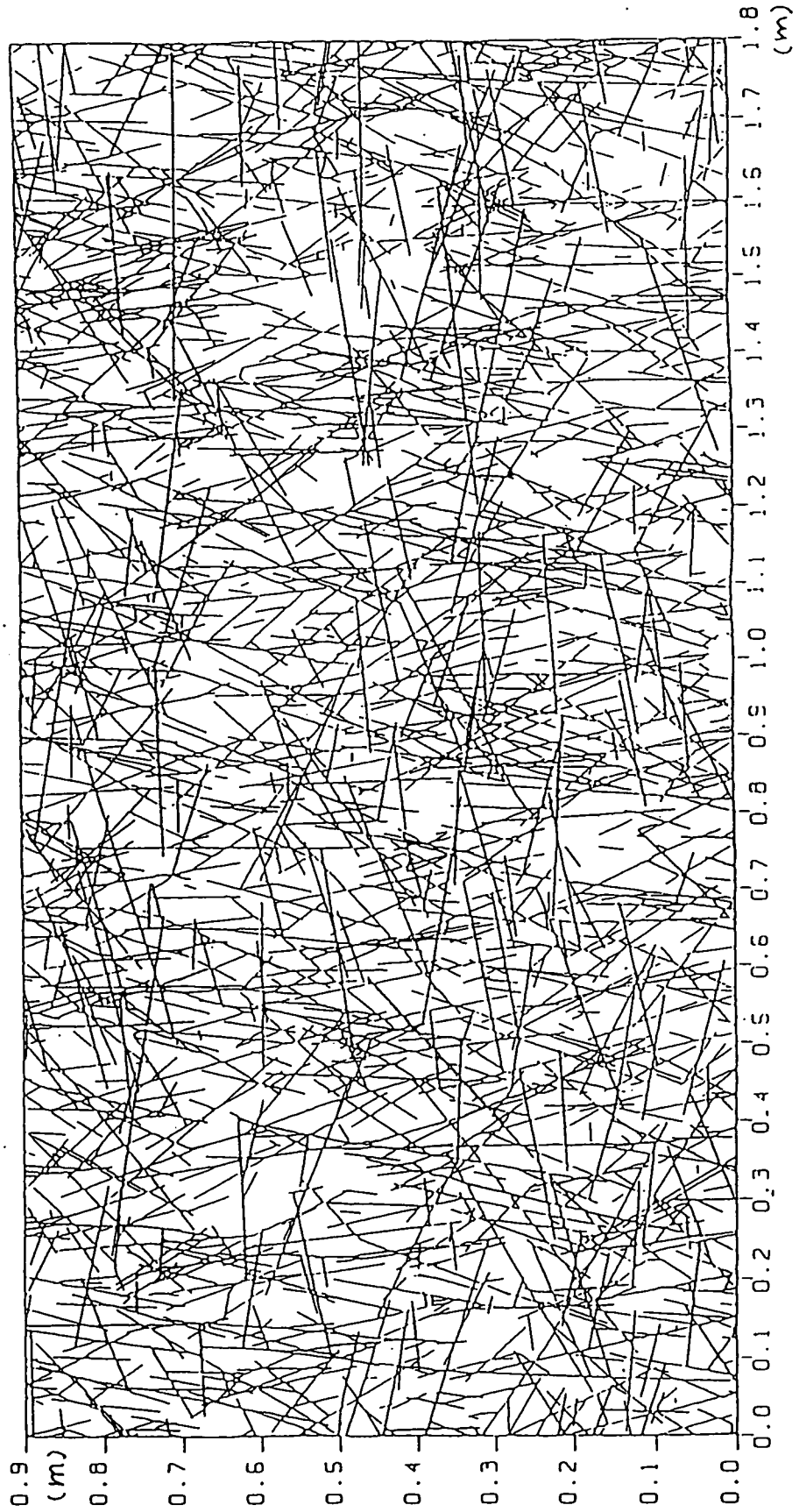


Fig.5.4 Fissured rock model

4．2．4　降雨浸透実験

（1）亀裂性岩盤モデルの作成

供試体は、統計データをもとにFig.5.4に発生させた割れ目をアクリルに彫り込んだモデルを使用する。その製作過程を次に示す。

a)1000×2000×20(mm)のアクリル板に深さ5(mm)、幅30(mm)の定水位供給用の溝を上下流にルーターによって彫り込む。

b)900×1800(mm)の領域に深さ5(mm)、開口幅1.5～4.5(mm)の7段階の幅でモデルにしたがってルーターで彫り込む。

c)1000×2000×2(mm)のアクリル板をFig.5.5に示すように両面テープ出張り合わせて供試体を作成する。

（2）実験装置と手順

降雨浸透実験装置をFig.5.6に示す。装置は、給水用水槽、降雨用水槽、水槽を設置する台で構成される。

実験は次の手順で行なった

(a)供試体中に下部から水を注入し、初期水位を与える。

(b)マノメーター内の空気を抜く。

(c)岩盤モデルの上流水位を20.0cm、下流水位を41.0cmに固定して浸透実験を行う。

(d)初期水位が安定した後、一定の降雨を作用させる。

(e)マノメーターにより水圧の変化を経時的に計測する

(f)降雨量を変えて(a)～(e)を数回行う。（Table5.2参照）

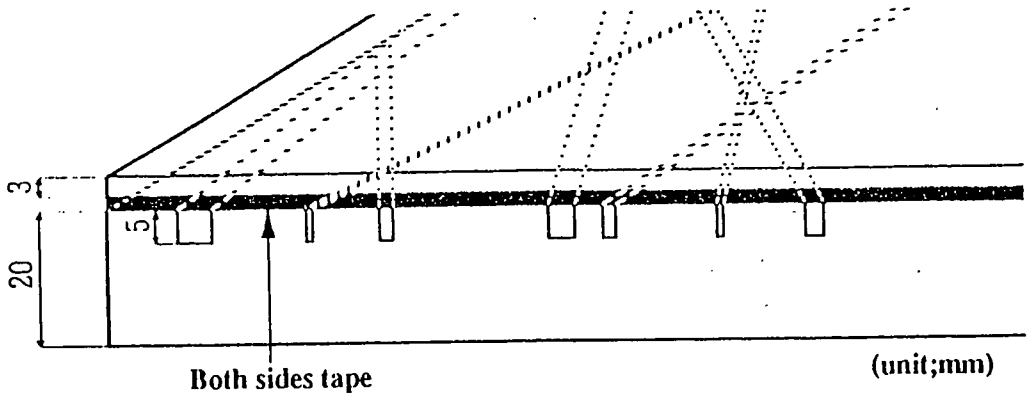


Fig. 5. 5 Fracture rock model

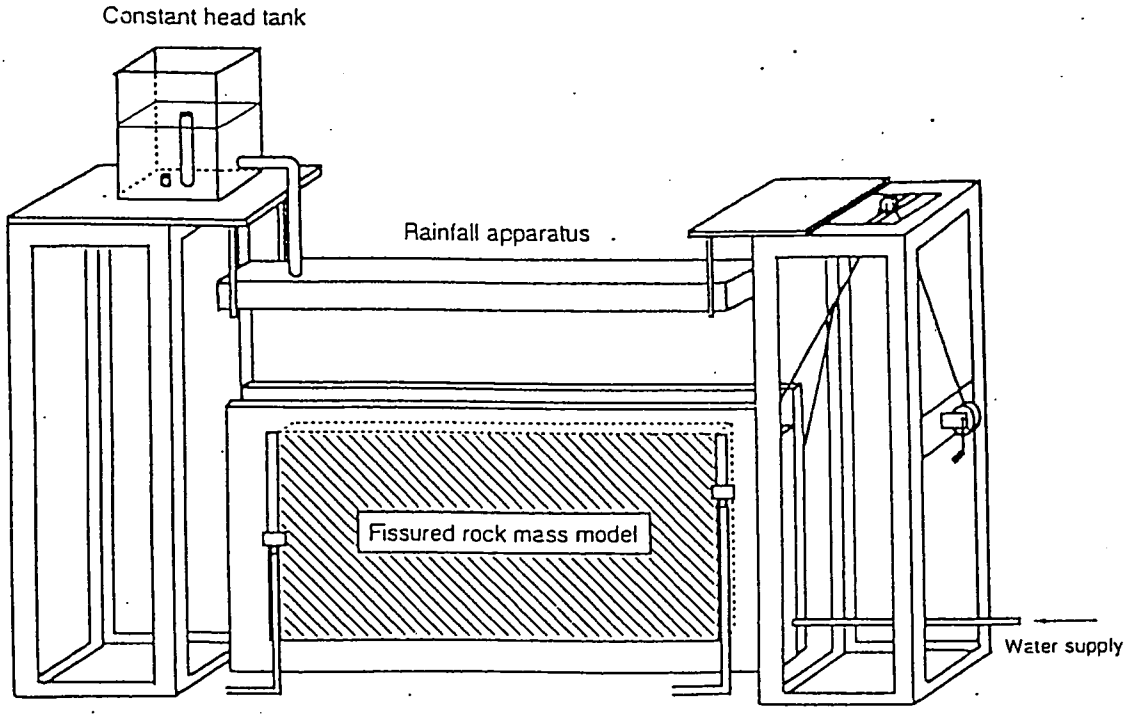


Fig. 5. 6 Rainfall seepage experimental apparatus

Table 5.2 Initial conditions of expriment

	Infiltration rate(mm/h)	An angle of inclination	Initial water level (cm)	
			Uper side	Lower side
Case.1	26750	0.0	20.5	41.5
Case.2	40750	0.0	20.5	41.5
Case.3	57560	0.0	20.5	41.5
Case.4	57560	9.6	25.0	74.5

4. 2 降雨浸透実験と結果と考察

Case.1の水面形の経時的変化をA.Fig.3.3,3.4にCase.2をA.Fig.3.10,3.11、Case.3をA.Fig.3.17,3.18、Case.4をA.Fig.3.22に示す。各マノメータの経時的変化をA.Fig.3.5～3.9,A.Fig.3.12,～3.16,A.Fig.3.19～3.23,A.Fig.3.25,～3.29に示す。また、マノメータの設置場所をA.Fig.3.1とA.Table 3.1に示す。

岩盤モデルを水平状態にして実験を行ったとき(Case1～3)と傾斜状態にして行ったときの初期水位定常状態での下流側からの流出量をTable5.3に示す。

水面形の経時的変化は、Fig.5.7,Fig.5.8からもわかるように、降雨が作用し始めてから1分の間に大きく上昇し、その後微少な上下変動を繰り返し定常に達する。この微少な上下変動は、岩盤モデルの全体で生じており、これは不飽和領域において割れ目の中に空気が溜ったり、水と空気の2層流となっているためであると思われる。

Case.3(降雨量57560(mm/h))において、岩盤モデルの中央付近で顕著なマウント現象が生じた。これは、岩盤モデル上半分の部分(高さ45～90cm)において鉛直方向の透水性が水平方向の透水性より良いため、上方向から多量の降雨が作用した場合、浸透流は横方向に浸透しにくくなって溜り、水面が上昇しマウント現象が生じると考えられる。

割れ目内の不飽和状態での浸透流の様相を観ると、降雨が直接作用する部分(高さ80～90cm,Fig.5.7参照)においては、Fig.5.9(a)(b)に示すような流れが、また、その下(80cm)から自由水面までの部分においては、Fig.5.9(c)(d)に示

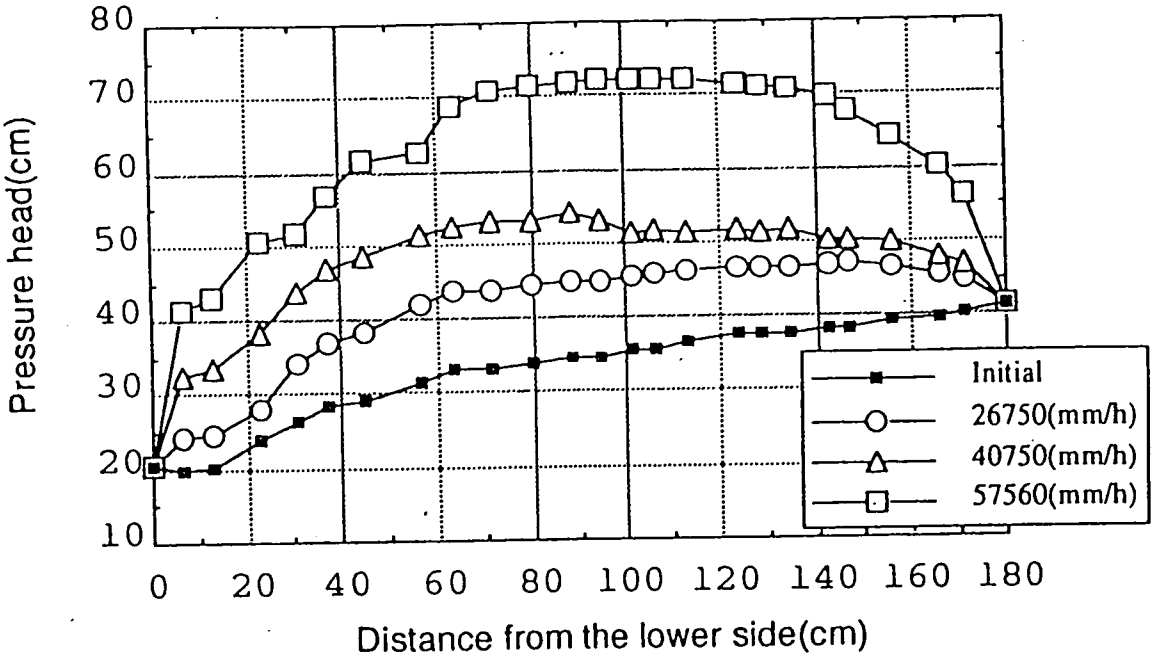


Fig. 5. 7 Change of free surface after 1 minute

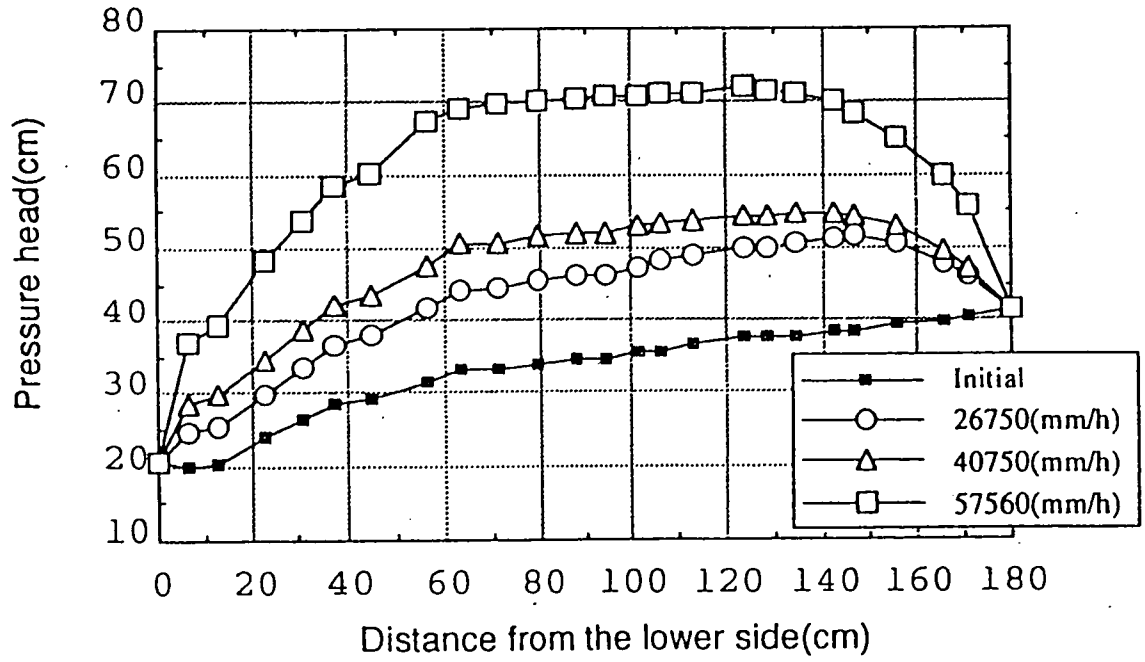


Fig. 5. 8 Change of free surface after 1440 minute

すような流れが多くみられた。

これは、岩盤モデル上部の表面部分(降雨が作用する面)において降雨は割れ目以外には浸透できず、割れ目の口のある辺りに降った降雨がすべてその割れ目に流れ込むようになる。そのためにFig.5.9(a)のような開水路の流れが生じると考えられる。表面から少し下の部分においては、割れ目が入り込んでいるため割れ目の中にあった空気と、降雨と一緒に浸透してきた空気が逃げ場を失いFig.5.9(b)のような流れが生じる。そして、その部分より下の自由水面までの部分においては、このような空気が集結しFig.5.9(c)(d)の形ととなって流れると考えられる。

これらの空気の作用により不飽和状態での岩盤の透水性は悪くなると考えられる。　また、どの部分においても、亀裂の開口幅が大きく傾きが急なほどよく浸透し、開口幅が小さく傾きが緩やかなほど浸透しにくいように思える。

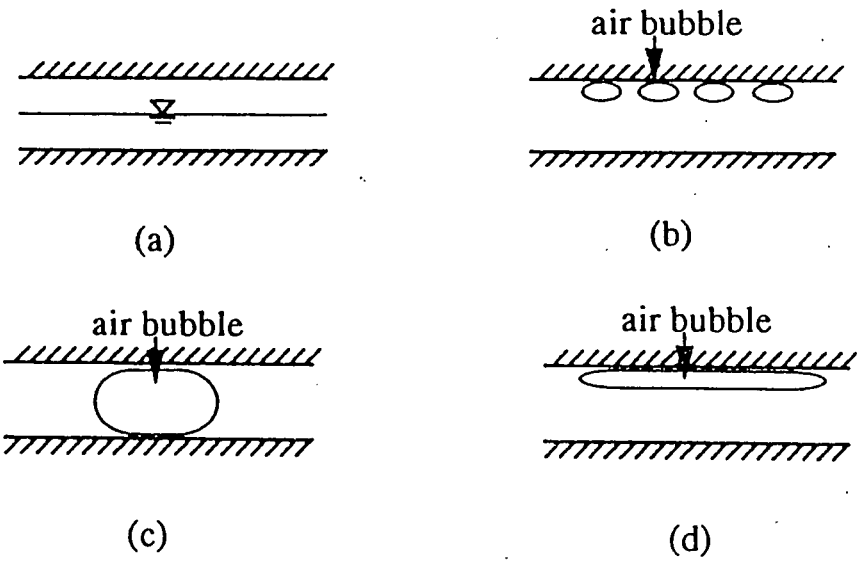


Fig.5.9 Conditions of unsaturated flow

Table5.3 Out flow of initial condition

Condition of rock model	Q (cm3/sec)
Level (θ = 0)	16.26
Inclination (θ = 9.6°)	32.67

4．2．6　亀裂性岩盤の飽和透水係数

（1）亀裂性岩盤の飽和透水係数の測定法

Fig.5.4の岩盤モデルをFig.5.10に示すように6分割し、岩盤の浸透特性解明のためのパラメーターの1つである飽和透水係数(X,Z方向)を定水位透水試験によって測定した。

飽和透水係数は、式(5.12)より求める。ただし、断面積は、岩盤を土地盤と同じ連続体と考えるので、割れ目の深さ(= 0.5cm)に6分割されたそれぞれの供試体の長さを乗じたものとする。

$$k = \frac{QL}{HA\Delta t} \qquad (5.12)$$

ここで、Q ：流出流量 (cm^3)

L ：供試体長 (cm)

H ：水頭差 (cm)

A ：供試体の断面積 (cm^2)

Δt ：計測時間 (sec)

Table5.4に供試体の断面積を示す。

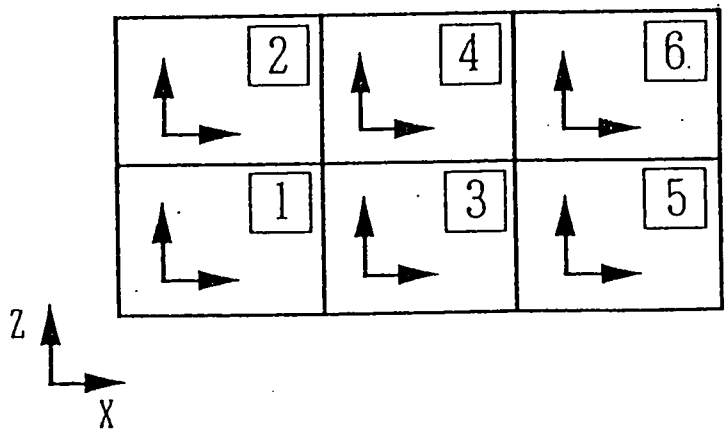


Fig.5.10 Division of fissured rock model

試験はFig.5.11に示す装置によって次の手順で行なう。

(a)岩盤モデルをルーターによって6分割(60×45cm)する。

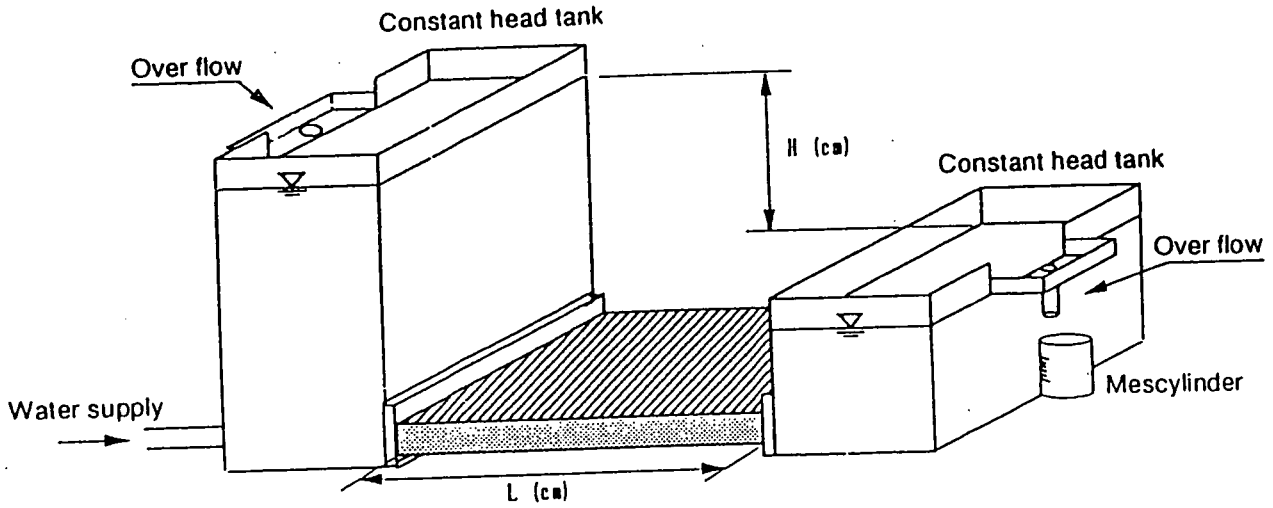
(b)1方向(Xまたは、Z方向）を拘束し、試験装置に取り付ける。

(c)上下流の水位を一定にする。

(d)流出流量を計測する。

Table5.4 Sizes of fissure rock model

Brock.No.	X (cm)	Z (cm)	Ax (cm^2)	Az (cm^2)
1	59.08	43.95	29.54	21.98
2	59.00	44.05	29.50	22.03
3	58.80	44.00	29.40	22.00
4	58.00	44.15	29.00	22.08
5	58.95	44.05	29.48	22.03
6	59.05	44.15	29.53	22.08



Divition of fracture rock model

H:Z方向の透水係数(kz)計測時　5.0(cm)

X方向の透水係数(kx)計測時　4.0(cm)

L:Z方向の透水係数(kz)計測時　41.0(cm)

X方向の透水係数(kx)計測時　56.0(cm)

Fig.5.11 Constant head permeability test

（２）　実験結果と考察

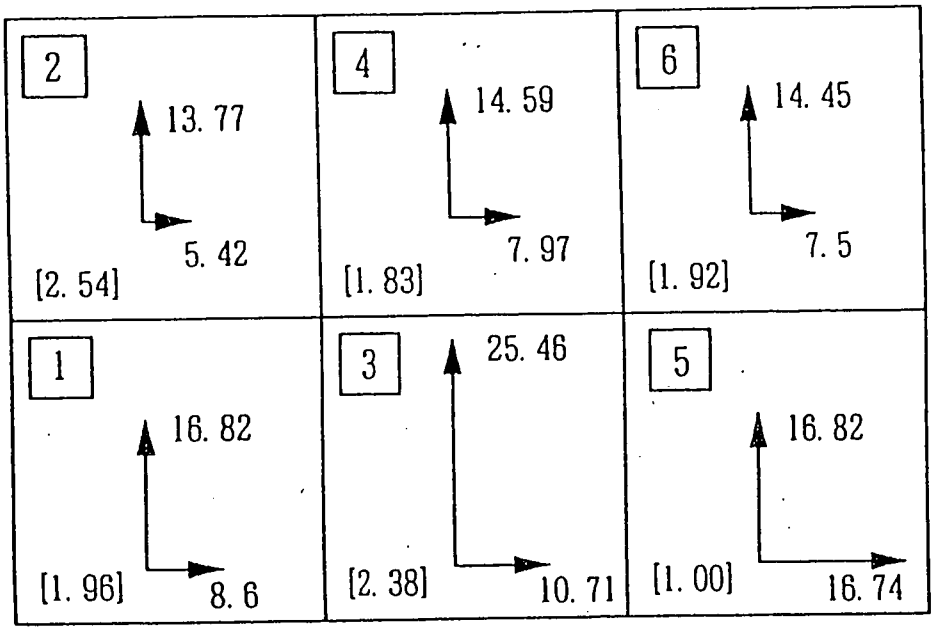
定水位透水試験の結果をTable5.5とFig.5.12に示す。計測結果の詳細は、A.Table 4.1～ 4.12に示す。

透水試験の結果、どの分割岩盤モデルにおいても鉛直方向の透水係数(kz)が水平方向の透水係数(kx)よりも大きいという結果が得られた。この結果は岩盤の異方性がよく現れたものであると考えられる。

Fig.5.12のBrock.No.2とNo5の水平方向の透水係数(kx)を比較すると、岩盤モデルの割れ目の総体積（間隙）が同じような値であっても、必ずしも透水係数が等しくはならないということがわかる。これは、岩盤モデルの割れ目の中にその割れ目を飽和した水が流れず、浸透流の流れに関与しない部分が存在するためであると考えられる。また、割れ目の総体積が大きいと透水係数が大きくなるとは限らないことがわかる。つまり、岩盤の透水係数は総割れ目（間隙）の体積に影響されるものではなく、割れ目の方向性に影響されるものであると考えられる。

Table5.5 Results of saturated permeability

Brock.No	Saturated permeability(cm/s)		Rate	Total volume of crack(cm^3)
	kx	kz	kz/kx	
1	8.60	16.82	1.96	781.33
2	5.42	13.77	2.54	636.47
3	10.71	25.46	2.38	850.44
4	7.97	14.59	1.83	712.78
5	16.74	16.82	1.00	652.70
6	7.50	14.45	1.92	603.33



[ ] : kz/kx

unit : (cm/sec)

Fig. 5. 12 Results of the permeability test

4. 2. 7 亀裂性岩盤の不飽和透水係数の試験法

（1）概説

ここでは、岩盤浸透流における不飽和浸透特性の指標である不飽和透水係数を求める方法を提案する。ここで不飽和浸透とは、水が割れ目内の空隙を完全に満たさずに流れることを示す。岩盤浸透問題において、不飽和透水係数の算定は非常に難しい。それは、不飽和透水係数が飽和度の関数として表わされるものであり、その飽和度の定義及び計測法が難しいためである。

本研究では、岩盤モデルの割れ目の全体積と、不飽和状態において岩盤モデルの割れ目内を浸透している水の流量（体積）との比を飽和度と定義し、不飽和透水係数k_u(cm/sec)を測定する。

（2）不飽和透水係数k_u(cm/sec)の算定法

Darcy則が不飽和領域においても成り立つとすると、平均流速$\bar{v}$は次のように定義できる。

$$\bar{v} = k_u i = k_u \frac{(Z_1+\phi_1)-(Z_2+\phi_2)}{L} \tag{5.13}$$

ここで　　i；動水勾配

Z_1, Z_2；基準点からの供試体の流入点、流出点までの位置水頭

ϕ_1, ϕ_2；供試体の流入点、流出点での圧力水頭

L；供試体長

圧力水頭は等しいと仮定すると式(5.13)は次式のようになる。

$$\bar{v} = k_u \frac{Z_1-Z_2}{L} \tag{5.14}$$

また、　$Z_1-Z_2 = L$ (5.15)

したがって、式(5.13)は次のようになる。

$$\bar{v} = k_u \tag{5.16}$$

またΔt時間当りの流量ΔQは次式のように示される。

$$\Delta Q = VA' \Delta t \tag{5.17}$$

ここで、　　A'；供試体の割れ目の断面積

よって、式(5.16)と式(5.17)より不飽和透水係数kuは

$$k_u = \frac{\Delta Q}{A \cdot \Delta t} \tag{5.18}$$

ここで、　　ΔQ ; 定常時の流出流量 (cm^3), Δt ; 計測時間 (sec)

次に、kuがどの飽和度に対応しているかを求める必要がある。これに対しては以下のように考える。不飽和状態での岩盤モデルの割れ目内の飽和度Srを岩盤モデル内の割れ目の総体積に対する割れ目内を浸透している水の体積の比として定義すると、式(5.19)のように示される。

$$S_r = \frac{V_{ri}}{V_i} \quad , (i=1 \sim 6) \tag{5.19}$$

ここで　　V_{ri}; 岩盤モデルの割れ目内浸透している水の体積 (cm^3)

V_i; 岩盤モデルの割れ目の総体積 (cm^3)

また、Vriは透水試験において一定時間ごとの岩盤モデル内への流入量、流出量を測定することにより、次式より求めることができる。

$$V_{ri} = \int_0^t Q_{in}\, dt - \int_0^t Q_{out}\, dt \tag{5.20}$$

ここで、　　Q_{in}; 流入流量 (cm/s)

Q_{out}; 流出流量 (cm/s)

t; 試験開始から定常になるまでの時間 (sec)

つまり、Vri(cm^3)は実験開始後から定常になるまでの流入量 Qin(cm^3/s)、流出量 Qout(cm^3/s) の経時的変化を表わした2本の曲線で囲まれる面積に相当する(Fig.5.13参照)。

また、実験開始後からのトータルの流入量からトータルの流出量を差し引くことによっても求まる(Fig.5.14参照)。

$$V_{ri} = \Sigma Q_{in} - \Sigma Q_{out} \tag{5.21}$$

ここで、　　ΣQ_{in} ;実験開始後からの総流入量 (cm^3)

ΣQ_{ut};実験開始後からの総流出量 (cm^3)

Vi(cm^3)は、水槽(20×62×60cm)内に岩盤モデルを沈め上昇した流量より求める

（付録参照）。

また、実験結果の整理に用いた計算法の詳細は、A.1に示す。

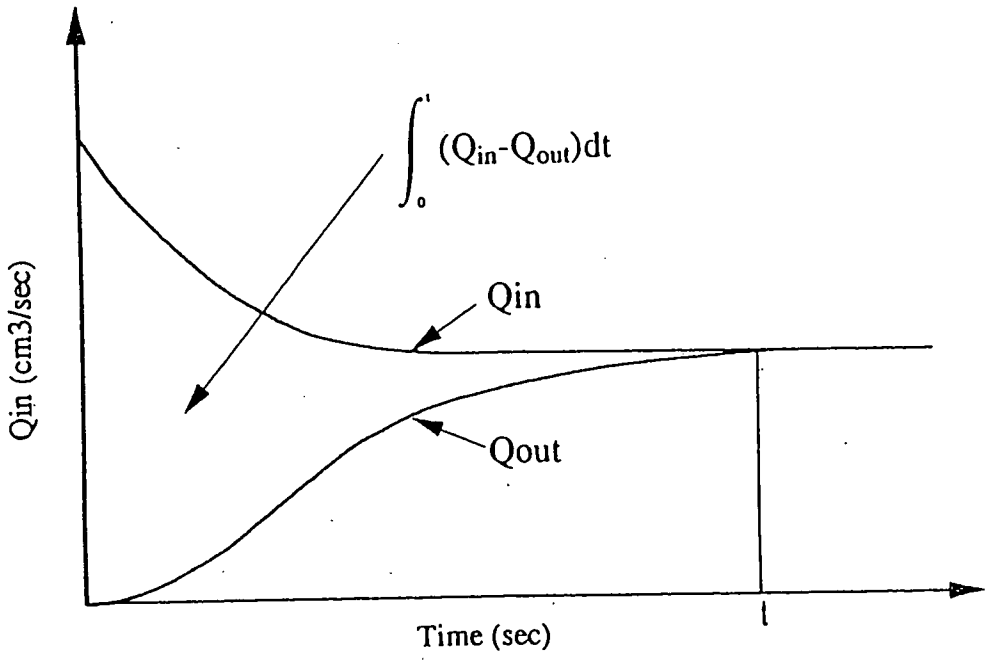


Fig. 5.13 Change of Qin and Qout with time

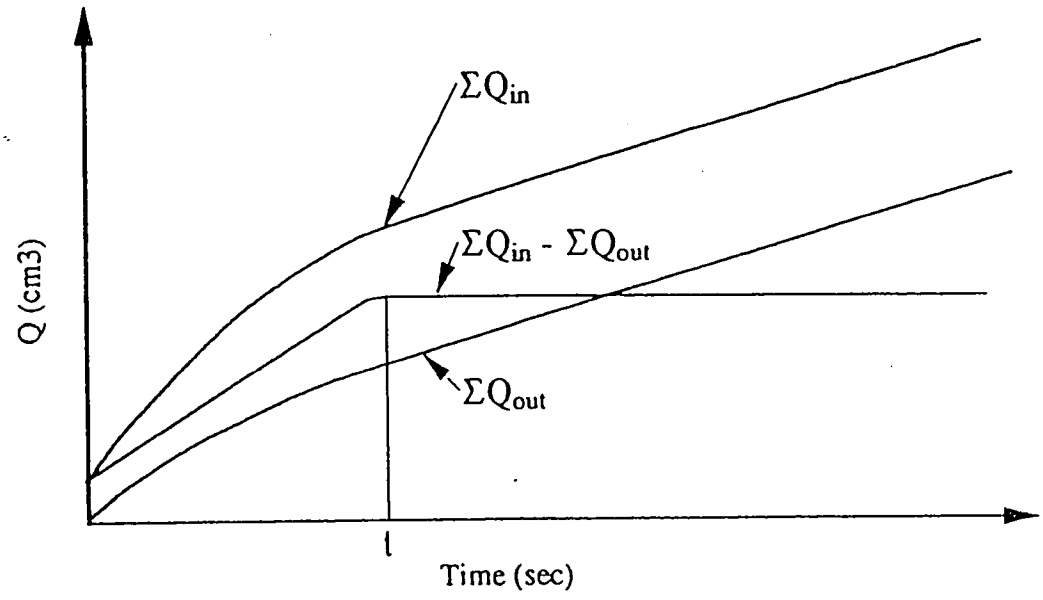


Fig. 5.14 Change of Σ Qin and Σ Qout with time

（３）試験装置と試験手順

供試体は飽和試験で用いた6分割された岩盤モデルを用いた。試験装置は、電子秤(Metllar製 PE3600)、マリオットサイフォン、定水位供給用水槽、流出流量用水槽である。試験装置の概観をFig.5.15に示す。

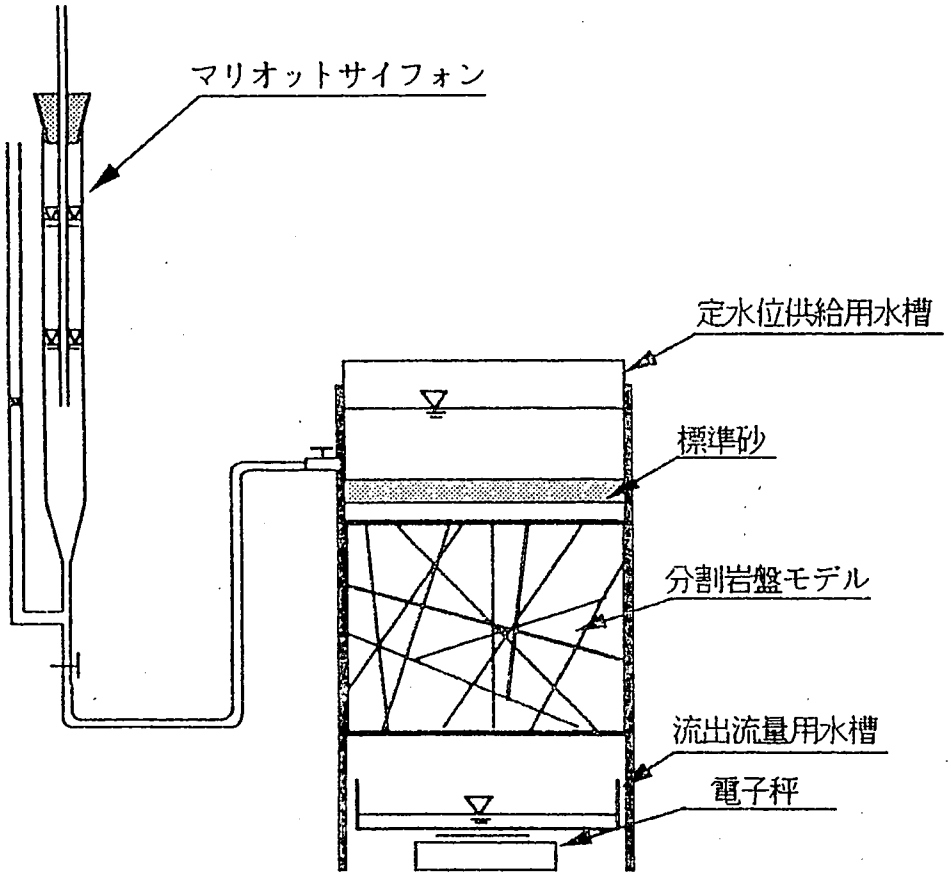


Fig.5.15 Experimental instrument
for permeability test of unsaturated rock

試験は次に示す手順によって実施した。

(a) 各分割岩盤モデル内の割れ目の総体積を測定する。

(b) 試験装置に岩盤モデルを取り付ける。

(c) 定水位供給用水槽の底に絶乾状態の標準砂を任意の厚さに詰める。

(d) マリオットサイフォンによって水位を固定する。

(e) マリオットサイフォンのコックを開き、実験を開始する。

(f) 一定時間での流入量、流出量を計測する。

(g) 定常確認後、計測を終了する。

(h) (c),(d)の標準砂の厚さと固定水位を変化させることによって流入量を変化させる。

(i) 1つの岩盤モデルに対して、2方向(X,Z方向)試験を行い、計12回試験を行なう。

（４）結果と考察

Fig.5.4の岩盤モデルNo.1～No.6を用いて不飽和透水試験を行なった。その結果をA.Table 5.1～5.12に示す。また飽和度と不飽和透水係数の関係を図化したものをFig.5.16,5.17,A.Fig.5.1～A.Fig.5.10に示す。また比透水係数k_rを用いて飽和度との関係を整理したものがFig.5.18,5.19である。

これらの結果より、不飽和透水係数は亀裂性岩盤モデルの飽和透水係数より約１オーダー小さく、飽和度との関数であると認められる。また、比透水係数は各岩盤モデルによる明確な違いはみられなかった。

不飽和透水係数は、飽和透水係数の0.01から飽和度が比較的大きい部分でも、0.10未満であり、この範囲内の値をとることがわかる。つまり、割れ目内に空気が混入し、不飽和状態になると著しく透水係数が低下することが示された。

したがって、亀裂性岩盤の透水係数も飽和度に依存することがわかったが、Srとlogkrの関係はほぼ直線と仮定しても良いような結果を得た。

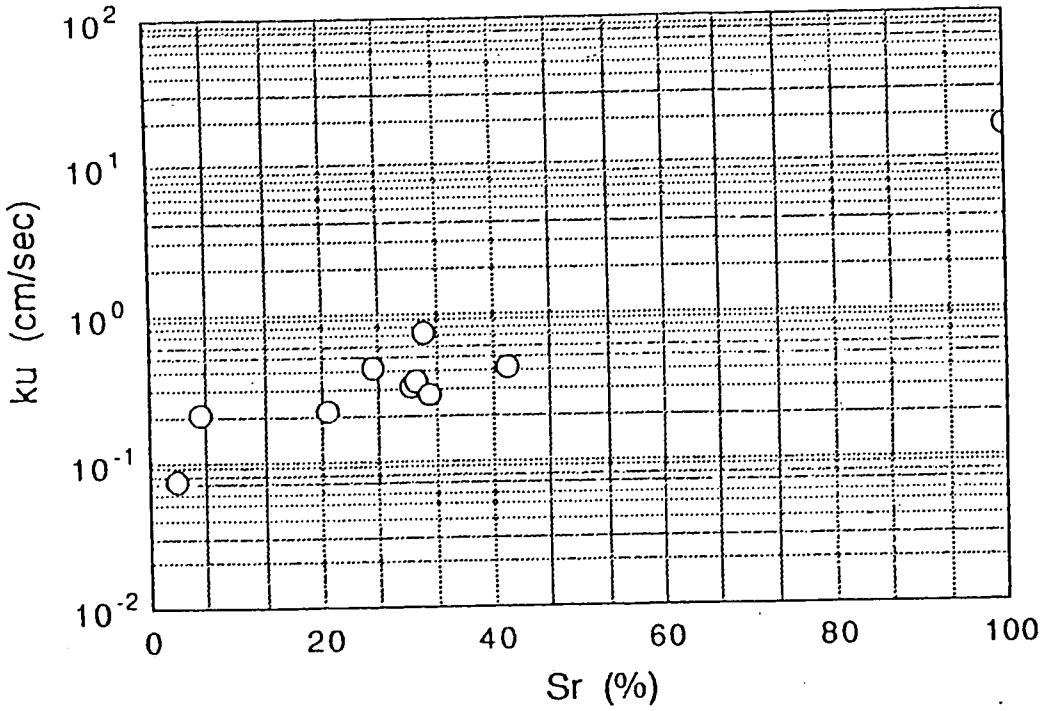


Fig. 5.16 Relation Between ku-Sr (Brock. No. 1-Z)

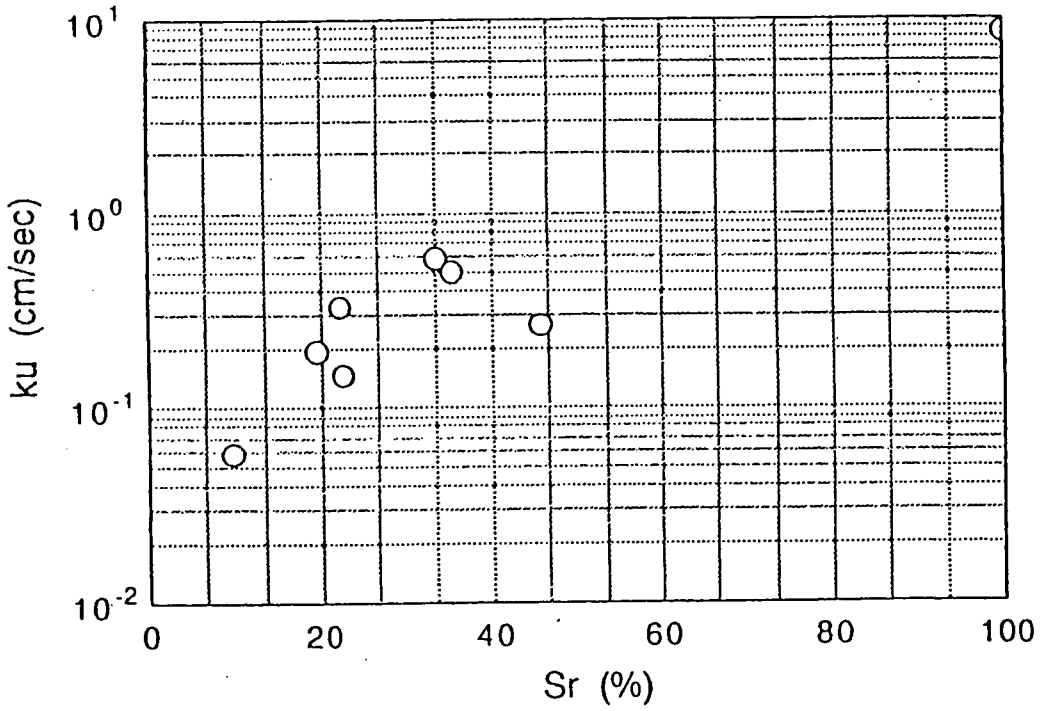


Fig. 5.17 Relation Between ku-Sr (Brock. No. 1-X)

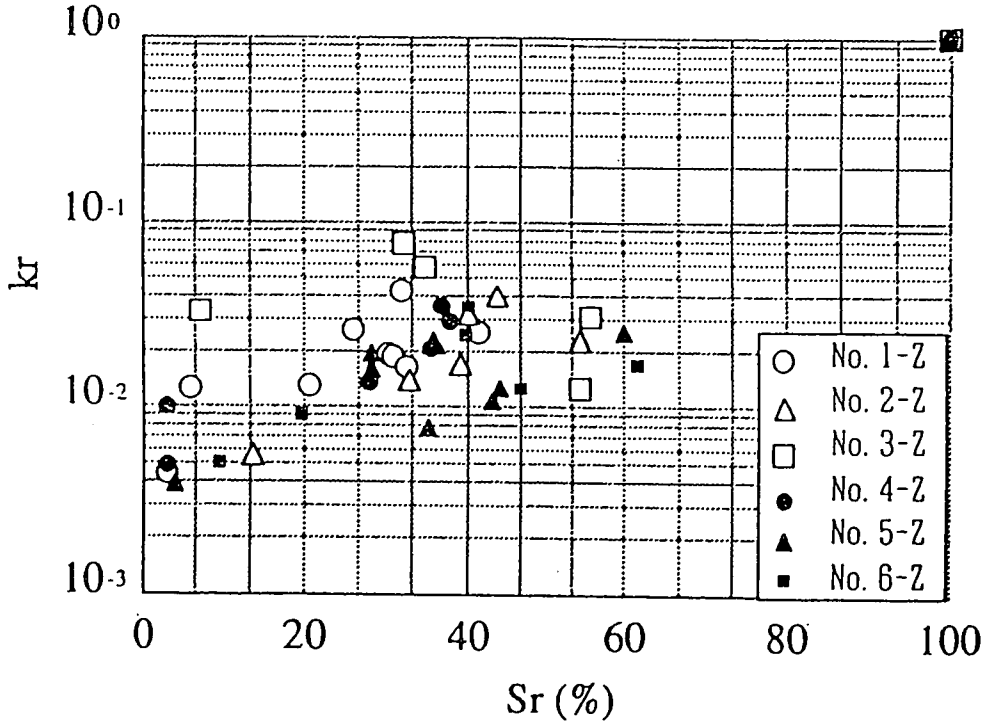


Fig. 5. 18 Relation Between kr-Sr (Brock. No. 1-No. 6, -Z)

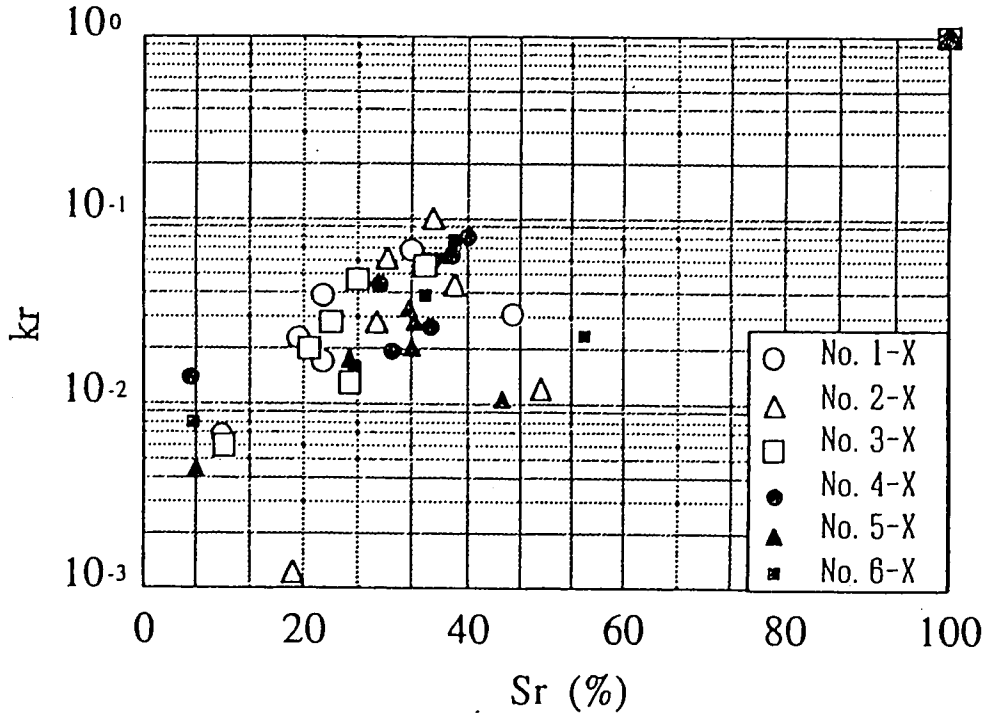


Fig. 5. 19 Relation Between kr-Sr (Brock. No. 1-No. 6, -X)

4．2．8　まとめ

本研究では、岩盤を連続体と考えた浸透流解析の妥当性検討することを目的とし、亀裂性岩盤モデルを用いて降雨を作用させ浸透特性を把握する方法と岩盤モデルの飽和、不飽和透水係数を求めることにより不飽和浸透流の挙動を解明する方法について述べた。その内容、結果を総括し以下に述べる。

（１）二次元の亀裂性岩盤モデルを作成し降雨浸透実験と飽和、不飽和の透水試験を行い、連続体解析の実験データを提示した。

（２）降雨浸透実験において、岩盤の異方性によって、マウント現象が生じることがわかった。

（３）浸透流を観察することにより、岩盤モデル内の不飽和領域において様々な流れが生じていることがわかり、水の流れは割れ目の開口幅だけでなく、傾きにも影響されることがわかった。

（４）各降雨量に対して、それぞれ異なった自由水面ができることがわかった。

（５）飽和透水試験において、透水係数は割れ目（間隙）の体積に影響されるものではなく、割れ目の方向性に影響されることがわかった。

（６）従来、岩盤の不飽和透水係数を求める試験方法は確立されていないが、本研究においてその試験方法を立案した。

（７）不飽和透水試験の結果より、不飽和状態における透水係数は、飽和状態における透水係数の0.10以下であることがわかった。

（８）飽和透水試験の結果と不飽和透水試験の結果を入力データとして数値解析を行い、その結果と降雨浸透実験で得られた実験データとを照合することにより、その解析手法の妥当性を評価、検討することができると考えられる。

4．3　トンネル掘削による緩み領域の浸透特性の調査法

4．3．1　はじめに

地下空間を利用する際には、利用する空間までのアプローチトンネルを掘削しなければならない。しかし、このアプローチトンネルの掘削によって堅固な岩盤を乱してしまうことがある。トンネルとして掘削した空間は、ベントナイトを主体としたバッファー材によってシーリングを行なうことが可能であるが、トンネル掘削によって生じたトンネル周辺の緩み領域を元の状態に修復することは、きわめて困難である。

しかしながら、今日では、トンネル掘削により、トンネル周辺がどの程度緩み、その周囲の透水係数が本来の地山の透水係数よりどの程度、大きくなったかを計測する方法すらない。トンネル掘削により変位がどの程度生じるかを計測した例もあるが、その変位が生じたことによって、透水係数がどの程度大きくなるかは、別の方法で変位と透水性の関係を求めなければならない。

本研究では、トンネル周辺での透水係数を直接原位置で計測する方法について検討し、今年度は、その方法の妥当性の模索結果について報告する。

4．3．2　緩み領域の定水位透水試験

（1）試験条件の検討

Fig.5.20に示すようにトンネル周囲にφ56のボーリング孔を開け、トンネルの壁面からLだけ入ったところの10cm区間での定水位透水試験を実施した際に、トンネル壁面からどれほどの深さまで貫入させれば良いかが問題となる。したがって、Fig.5.21に示すようにトンネル孔壁よりLだけ貫入した点で定数位透水試験を実施した試験を有限要素法によりシュミレーションを行なった。

解析に用いた領域はFig.5.22に示すようにトンネルの壁面より20m×20mを対象とし、Fig.5.23に要素分割図に示す。

なお、Lの長さは、L＝15,25,35,45,55cmの5種類に対して行なった。

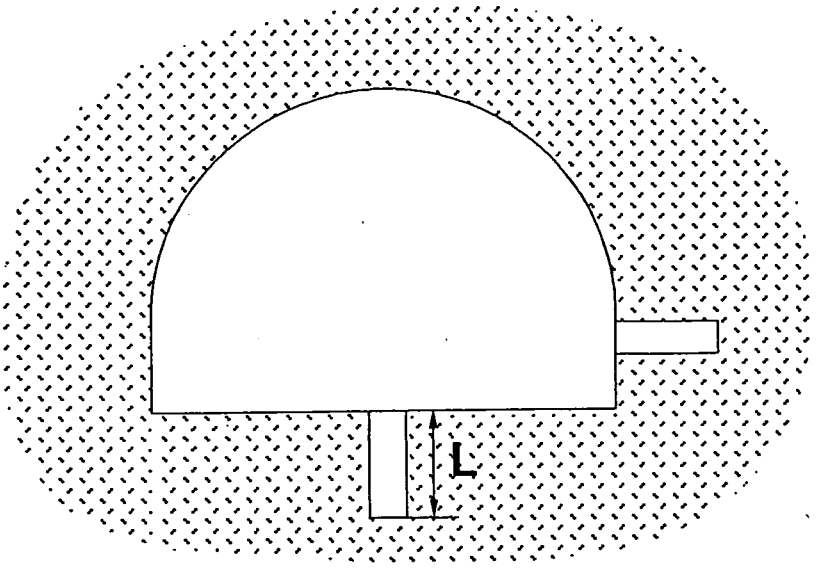


Fig. 5. 20　原位置における緩み領域の透水試験

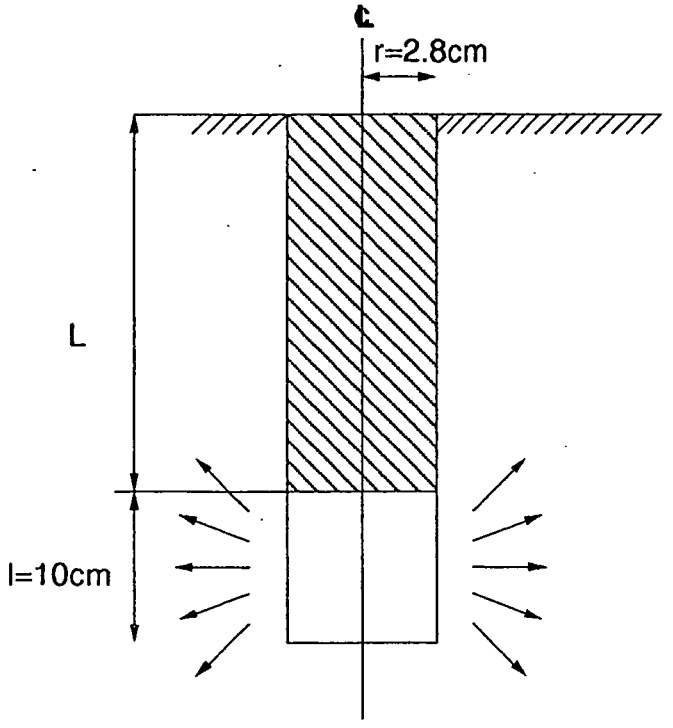


Fig. 5. 21　注水部分の拡大図

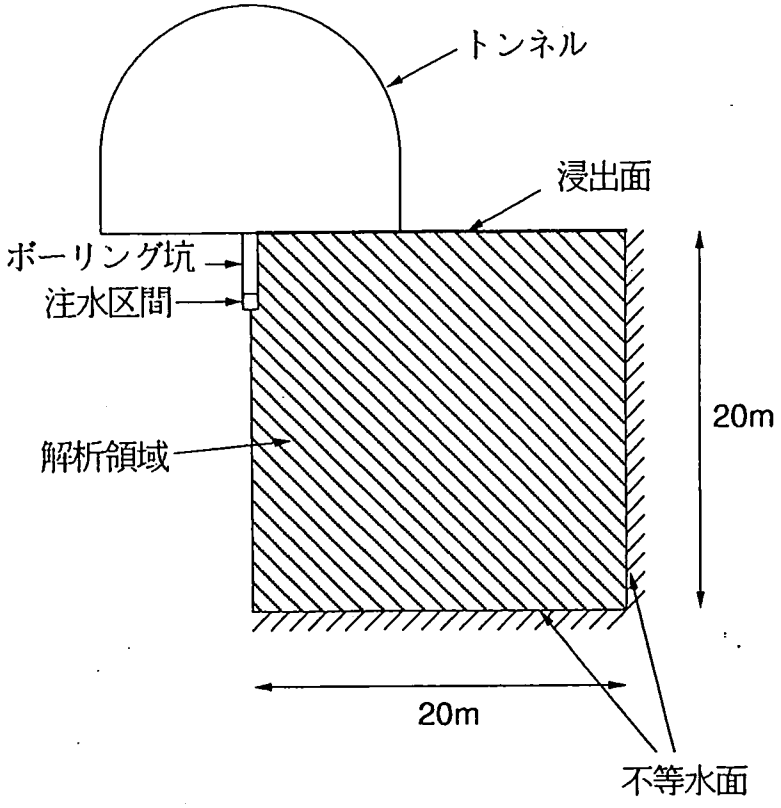


Fig. 5. 22　解析領域

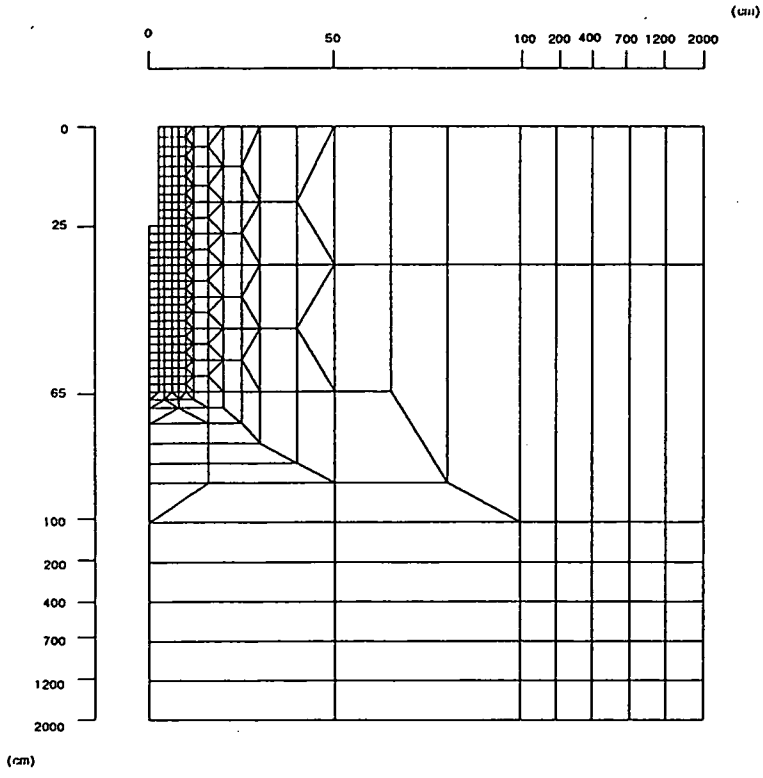


Fig. 5. 23　モデル図

（２）定水位透水試験のシュミレーション結果

試験条件の検討の所で示した方法で定水位透水試験のシュミレーションを行なった。その結果をFig.5.24に示すが、トンネル底面からの試験区間までの深さを種々に変化させたときの定常になるまでの時間は、Ｌの長さに関係なく、ほぼ一定である。この場合、解析に$k=1.0\times10^{-5}cm/s, Ss=1.0\times10^{-6}cm^{-1}$ を用いて解析しているが、試験開始後、約100秒程度で定常に達していることがわかる。透水係数の値が小さくなるほど、この定常になるまでの時間は長くなり、比貯留係数の値が大きいほど、同様に長くなる。

原位置での定水位透水試験結果より透水係数を求める式は、次のパッカー法の式になる。

$$k = \frac{Q}{2\pi Hpl} \sinh^{-1}\left(\frac{l}{2r_o}\right) \qquad (5.22)$$

ここで、Hp：注水部の水頭と自然水位との差(cm)

l　：注水区間(cm)

ro：ボーリング孔の半径(cm)

シュミレーションで得られた注水流量を(5.22)式に代入して求めた透水係数kと、数値解析に用いたkoとの比を示すとFig.5.25に示すようになった。この結果より、トンネル底面より、15cm程度貫入すれば、トンネル壁面での自由水面の影響を受けないで、その点での透水係数が測定できることがわかる。

（３）緩み領域の判定

原位置での定水位透水試験より、トンネル掘削による岩盤の緩み領材の判定方法については、次のように考え得られる。掘削壁面より定水位の試験区間を次々深くし、それぞれの点（10cm区間）での透水係数を測定し、その透水係数を測定し、その透水係数の分布を測定する。このように試験を行なうことにより、透水係数の値がFig.5.26のように低下するとそれより浅い所がゆるんだために透水係数が大きくなっていると判断できる。

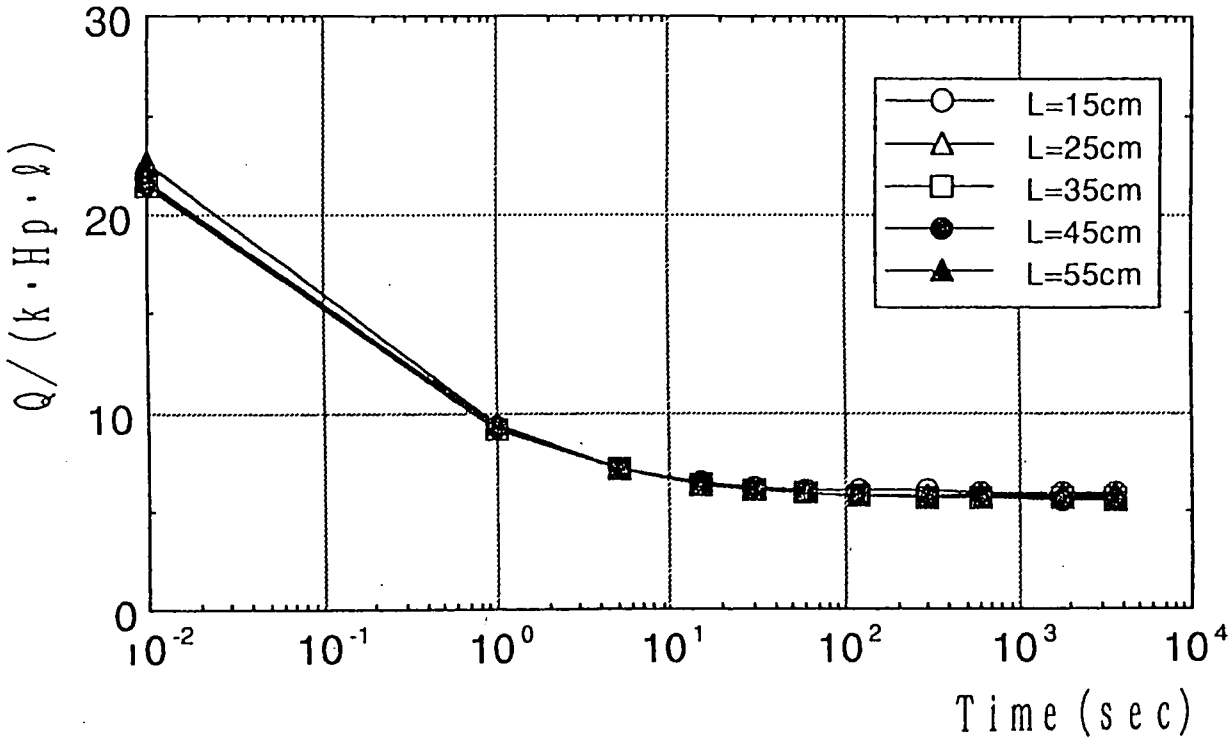


Fig. 5.24　Q/(k・Hp・l)の時間的変化

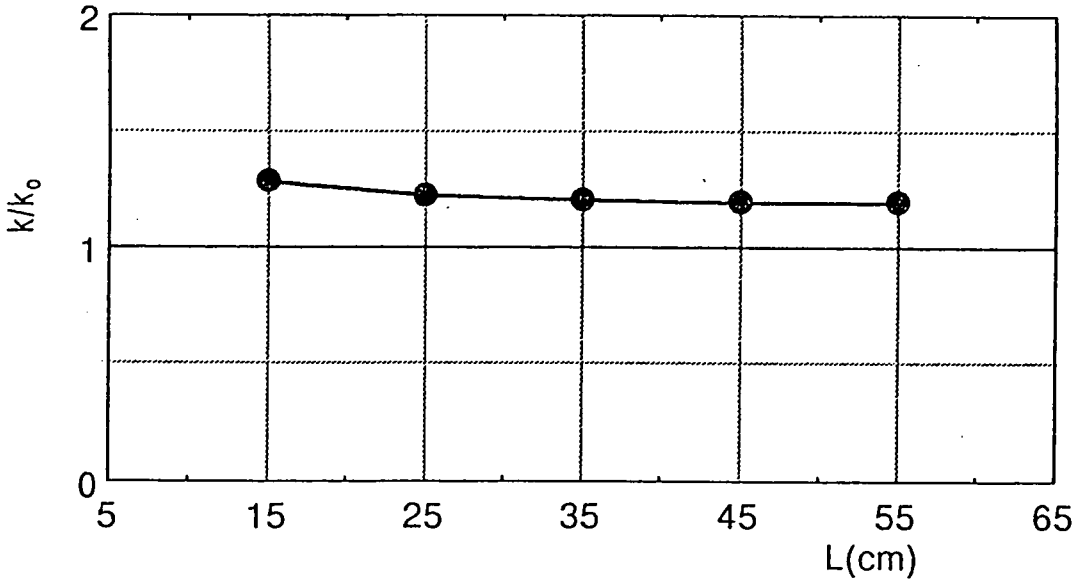


Fig. 5.25　解析結果とパッカー法の理論式との比較

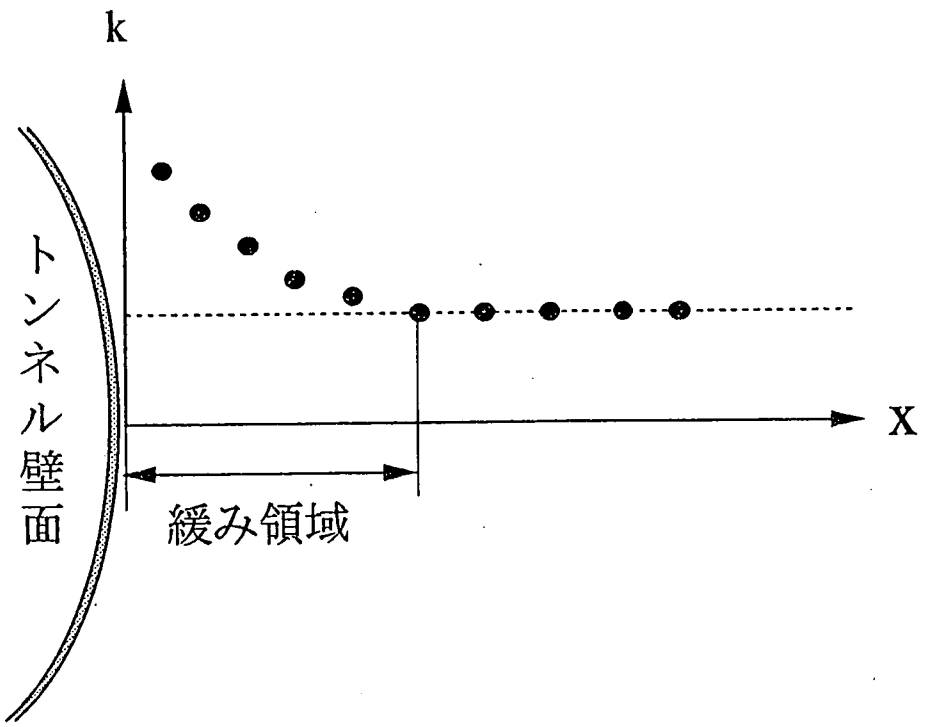


Fig.5.26　緩み領域の判定法

4．3．3　まとめ

トンネル掘削による緩み領域の浸透特性の調査法に関する試験をここでは提案した。その結果、トンネル壁面より定水位透水試験を実施すると緩み領域が判定できることがわかった。他に、緩み領域の判定法として、岩盤の透気性試験により判定する方法が提案されているが[5,6]、これらの研究は、岩盤が乾燥している状態についてのみ用いられる方法であり、我国のように地下水位の高い領域に対しては利用できるものではない。

ここで、提案した方法は、トンネル底面に対しての方法である。しかし、トンネルの周囲はFig.5.?のように地下水が流動しているため、壁面より貫入深さが変わることによって間隙水圧[21]の値は異なっている。したがって、このような間隙水圧分布の条件での原位置定水位透水試験をシュミレートして、トンネルへの地下水の浸透が試験結果にどの程度影響するかを検討しておく必要がある。

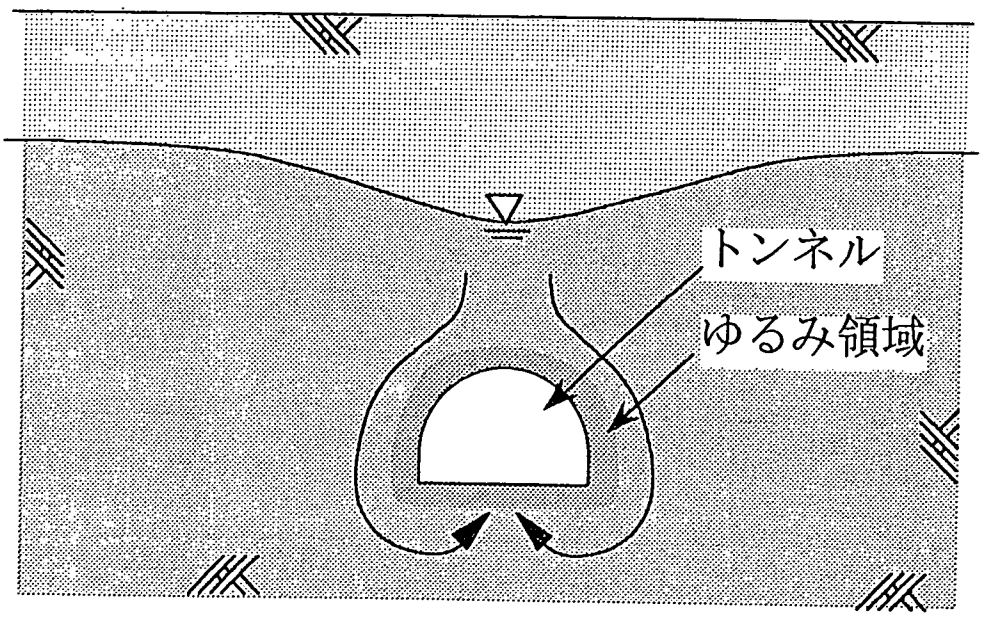


Fig.5.27　トンネル掘削面周囲の地下水浸透

緩み領域においては、Fig.5.27に示すように、不飽和状態になる領域も存在する。このような領域に対し不飽和状態の原位置定水位透水試験で本当に緩み領域の判定ができるのかどうかの問題が生じる。また、その領域での不飽和状態でどの程度の負の圧力水頭が発生しているかと言う疑問もある。そのような負の圧力水頭を原位置でどのように計測できるかと言う問題もある。

Fig.5.28～Fig.5.31は、今回開発した固結地盤での負の圧力水頭を計測する方法である。すなわち、固結地盤では、負の圧力水頭を計測するシステムと地盤との密着性に問題があった。

ここで、提案する方法は、岩盤の負の圧力を測定する面の型を取り、その型に一致したセラミックデスクを無収縮の石膏で作成し、脱気を行なってボーリング孔内で孔壁に圧着して、負の圧力水頭を計測する方法である。

Fig.5.32には、大谷岩を対象として、排水によって生じる負の圧力水頭の値を計測結果の一例を示す。

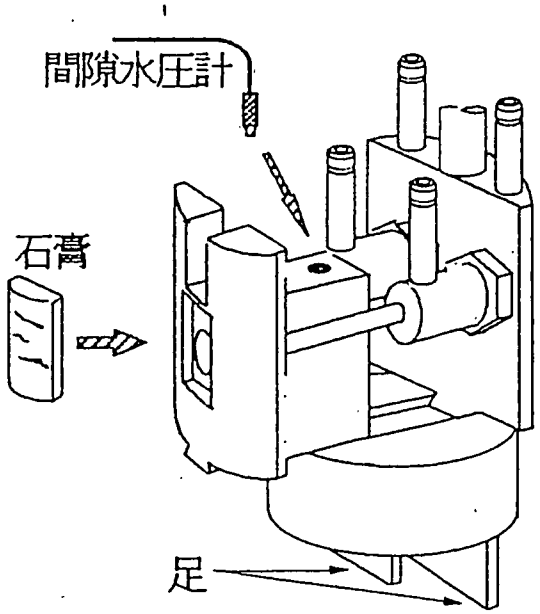


Fig.5.28　本体の固定

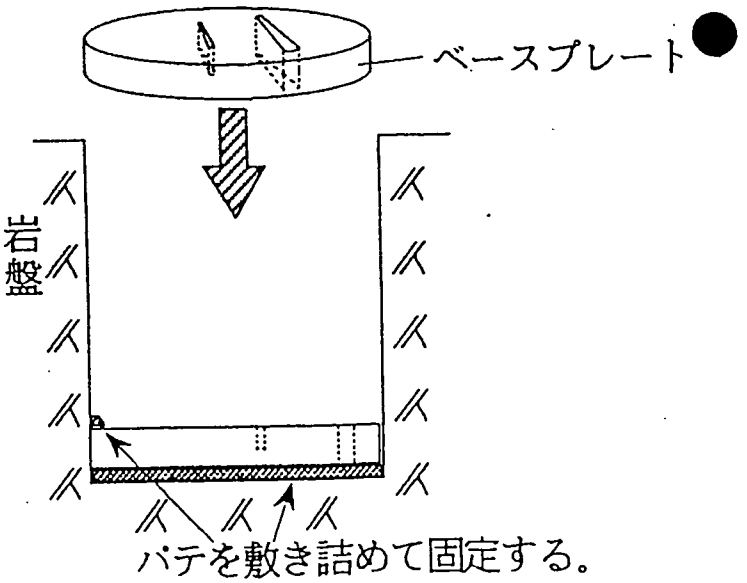


Fig.5.29　ベースプレートの固定

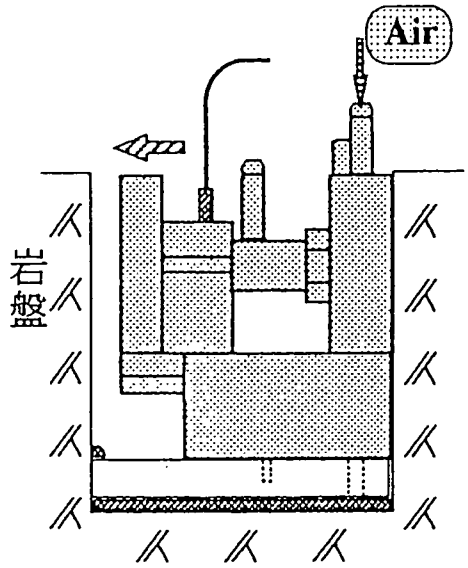


Fig. 5.30　ヘッド密着

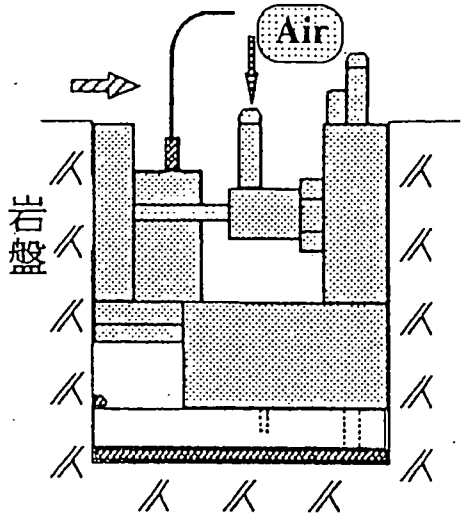


Fig. 5.31　本体回収

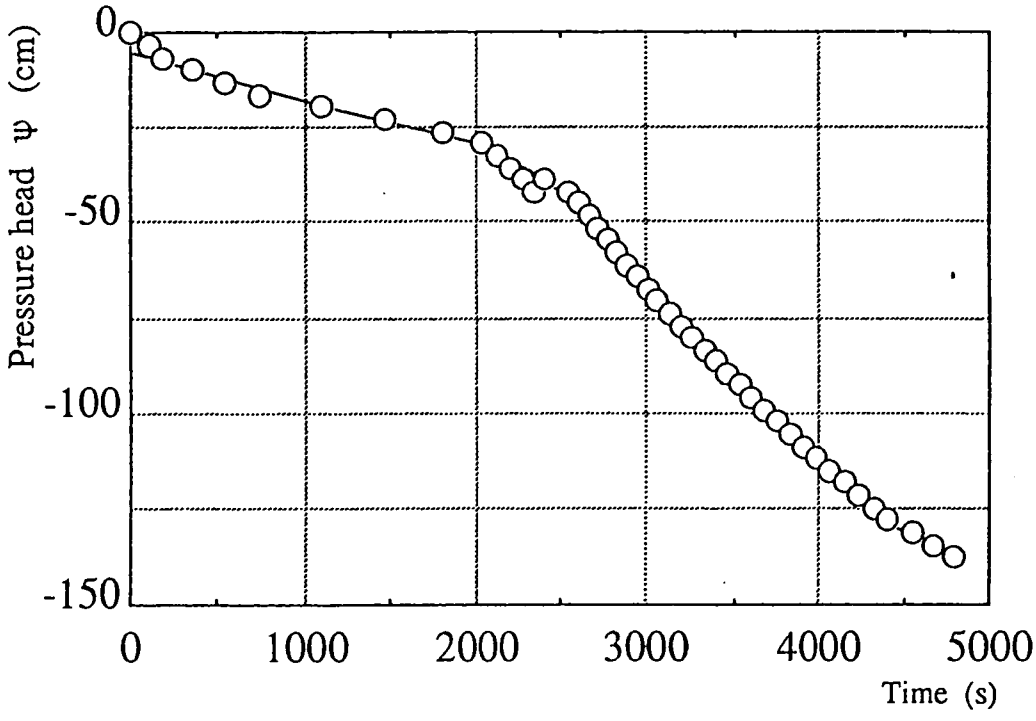


Fig. 5.32　Pressure head of block (green tuff)

4．4　結論

本研究では、二つの課題についての研究を行なった。それぞれの課題に関する結論は、それぞれの所で述べたため、ここでは割愛する。なお、課題（１）に関しては、ほぼ、最後結論を得た。残る問題は、このようにして求められた不飽和浸透特性を用いて、実施の実験の降雨浸透挙動が、再現できるかどうかを検討する事である。これは、きわめて重要な検討であり、1993年度に実施する予定である。

また、課題（２）に関しては、すでに述べたが、まだ、多くの研究テーマが含まれている。ここで、提案した方法の原位置での実行可能性の検討が必要である。さらに、提案した方法は、堆積岩のように比較的連続体として取り扱われる岩盤に関しては適用可能であるが、亀裂性の結品質岩盤に対しては、10cm間隔の試験区間内に亀裂がある場合とない場合では、透水性がきわめて異なるためFig.5.?のような方法で、緩み領域を判定することは不可能である。このような岩盤に関しては、別の方法を提案しなければならない。

トンネル掘削により生じた緩み領域の存在が判明し、その領域の透水係数がトンネル掘削後埋め戻すバッファー材の透水係数より大きくなると、別の大きな問題が生じて来る。すなわち、このような、緩み領域の透水性をどのように低下させるかが最終的な課題となる。その方法として、一般に２つの手法が考えられる。

（１）緩み領域をグラウト材によってグラウトする方法

（２）緩み領域にロックボルトやロックアンカーによって力を加えて、生じた変位や開いた亀裂を小さくする方法

それぞれの手法に関して、新たな課題がある。すなわち、グラウトをする方法には、

（１）1000年程度の長期間、効果が維持できるようなグラウト材があるのか

（２）トンネル壁面近くでのグラウトが可能か、また、その効果の判定方法を検討する必要がある。

（３）透水係数が低い岩盤に広範囲に均質に効果的にグラウトする方法の開発

また、ロックボルト等により地山内に応力導入により緩み領域の透水係数を低下させる方法には、長期間、応力を導入する方法の信頼性（材料の風化、クリ

ープ特性）に関する問題がある。これらの課題を今後は解決する研究を実施する。

参考文献

1)渡辺邦夫：　岩盤浸透流に係わる諸問題と現状、昭和60年度岩盤力学委員会研究報告会、pp.1-2、1986。

2)西垣、宮本、小野、小久保：岩盤割れ目内の不飽和浸透特性の測定法、第25回土質工学研究発表会、1990、pp.1651-1652。

3)小田匡寛：　クラックテンソルによる岩盤透水係数の評価、第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.121-126、1984。

4)大西有三、鍵本広之、西野賢治：　岩盤節理情報の処理とその浸透流解析への適用について、土木学会論文集第376号/Ⅲ-6、pp.241-248、1986。

5)石丸、川岸、中山：透気性テストによる岩盤緩み領域の判定について、土木学会第46回年次学術講演会、Ⅲ-428、pp.878-879。

6)中谷、川谷、中山：透気性からみた亀裂性岩盤の緩みの評価、土木学会第46回年次学術講演会、Ⅲ-429、pp.880-881。

APPENDIX

Appendix Figures, Table

		page
A.1	飽和度の計算法	1
A.Fig. 2.1	Fissure rock model by Nakaya joint width 1.5(mm)	3
2.2	Fissure rock model by Nakaya joint width 2.0(mm)	4
2.3	Fissure rock model by Nakaya joint width 2.5(mm)	5
2.4	Fissure rock model by Nakaya joint width 3.0(mm)	6
2.5	Fissure rock model by Nakaya joint width 3.5(mm)	7
2.6	Fissure rock model by Nakaya joint width 4.0(mm)	8
2.7	Fissure rock model by Nakaya joint width 4.5(mm)	9
A.Fig. 3.1	Position of manometer	10
A.Table 3.1	Position of manometer	10
A.Fig. 3.2	Rain seepage experimental apparatus	11
3.3	Change of free surface(0～240min.) I=26750(mm/h)	12
3.4	Change of free surface(240～1440min.) I=26750(mm/h)	12
3.5	Change of pressure head(No.1～5) I=26750(mm/h)	13
3.6	Change of pressure head(No.6～10) I=26750(mm/h)	13
3.7	Change of pressure head(No.11～15) I=26750(mm/h)	14
3.8	Change of pressure head(No.16～20) I=26750(mm/h)	14
3.9	Change of pressure head(No.21～25) I=26750(mm/h)	15
3.10	Change of free surface(0～240min.) I=40750(mm/h)	15
3.11	Change of free surface(240～1440min.) I=40750(mm/h)	16
3.12	Change of pressure head(No.1～5) I=40750(mm/h)	16
3.13	Change of pressure head(No.6～10) I=40750(mm/h)	17
3.14	Change of pressure head(No.11～15) I=40750(mm/h)	17
3.15	Change of pressure head(No.16～20) I=40750(mm/h)	18
3.16	Change of pressure head(No.21～25) I=40750(mm/h)	18
3.17	Change of free surface(0～240min.) I=57560(mm/h)	19
3.18	Change of free surface(240～1440min.) I=57560(mm/h)	19
3.19	Change of pressure head(No.1～5) I=57560(mm/h)	20

3.20 Change of pressure head(No.6～10) I=57560(mm/h) 20
3.21 Change of pressure head(No.11～15) I=57560(mm/h) 21
3.22 Change of pressure head(No.16～20) I=57560(mm/h) 21
3.23 Change of pressure head(No.21～25) I=57560(mm/h) 22
3.24 Change of free surface I=57560(mm/h) 22
(An angle of inclination θ=9.6°)
3.25 Change of pressure head(No.1～5) I=57560(mm/h) 23
(An angle of inclination θ=9.6°)
3.26 Change of pressure head(No.6～10) I=57560(mm/h) 23
(An angle of inclination θ=9.6°)
3.27 Change of pressure head(No.11～15) I=57560(mm/h) 24
(An angle of inclination θ=9.6°)
3.28 Change of pressure head(No.16～20) I=57560(mm/h) 24
(An angle of inclination θ=9.6°)
3.29 Change of pressure head(No.21～25) I=57560(mm/h) 25
(An angle of inclination θ=9.6°)
A.Table 3.2 Result of experiment I=26750(mm/h) 26
3.3 Result of experiment I=40750(mm/h) 27
3.4 Result of experiment I=57560(mm/h) 28
3.5 Result of experiment I=57560(mm/h) 29
(An angle of inclination θ=9.6°)
A.Table 4.1 Measurment result of permability test for brock No.1 30
（Z方向）
4.2 Measurment result of permability test for brock No.1 30
（X方向）
4.3 Measurment result of permability test for brock No.2 30
（Z方向）
4.4 Measurment result of permability test for brock No.2 30
（X方向）
4.5 Measurment result of permability test for brock No.3 31

（Z方向）
4.6 Measurment result of permability test for brock No.3 31
（X方向）
4.7 Measurment result of permability test for brock No.4 31
（Z方向）
4.8 Measurment result of permability test for brock No.4 31
（X方向）
4.9 Measurment result of permability test for brock No.5 32
（Z方向）
4.10 Measurment result of permability test for brock No.5 32
（X方向）
4.11 Measurment result of permability test for brock No.6 32
（Z方向）
4.12 Measurment result of permability test for brock No.6 32
（X方向）
A.Fig.5.1 Relation between ku-Sr (Brock.No.2-Z) 33
5.2 Relation between ku-Sr (Brock.No.2-X) 33
5.3 Relation between ku-Sr (Brock.No.3-Z) 34
5.4 Relation between ku-Sr (Brock.No.3-X) 34
5.5 Relation between ku-Sr (Brock.No.4-Z) 35
5.6 Relation between ku-Sr (Brock.No.4-X) 35
5.7 Relation between ku-Sr (Brock.No.5-Z) 36
5.8 Relation between ku-Sr (Brock.No.5-X) 36
5.9 Relation between ku-Sr (Brock.No.6-Z) 37
5.10 Relation between ku-Sr (Brock.No.6-X) 37
A.Table 5.1 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.1 38
（X方向）
5.2 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.1 38
（Z方向）
5.3 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.2 38

（X方向）
5.4 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.2 38
（Z方向）
5.5 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.3 39
（X方向）
5.6 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.3 39
（Z方向）
5.7 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.4 39
（X方向）
5.8 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.4 39
（Z方向）
5.9 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.5 40
（X方向）
5.10 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.5 40
（Z方向）
5.11 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.6 40
（X方向）
5.12 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.6 40
（Z方向）

A．1　飽和度の計算法

本研究の不飽和透水試験で用いた飽和度の計算法を以下に説明する。

（1）飽和度の算定式

$$Sr = \frac{Vri}{Vi} \quad ,(i=1\sim6) \tag{1}$$

ここで　　Vri；岩盤モデルの割れ目内浸透している水の体積（cm^3）

Vi；岩盤モデルの割れ目の総体積（cm^3）

（2）各岩盤モデルの割れ目の総体積 Vi（cm^3）

飽和度を求めるために必要な岩盤モデル内の割れ目の総体積は、水槽(20×62×60cm)内に岩盤モデルをゆっくりと沈め、上昇した流量より求める。

$$Vi = Vbi - a\Delta h \tag{2}$$

ここで、　　Vbi；各分割モデルの体積（cm^3）

a；水槽の断面積（cm^2）

Δh；上昇水位（cm）

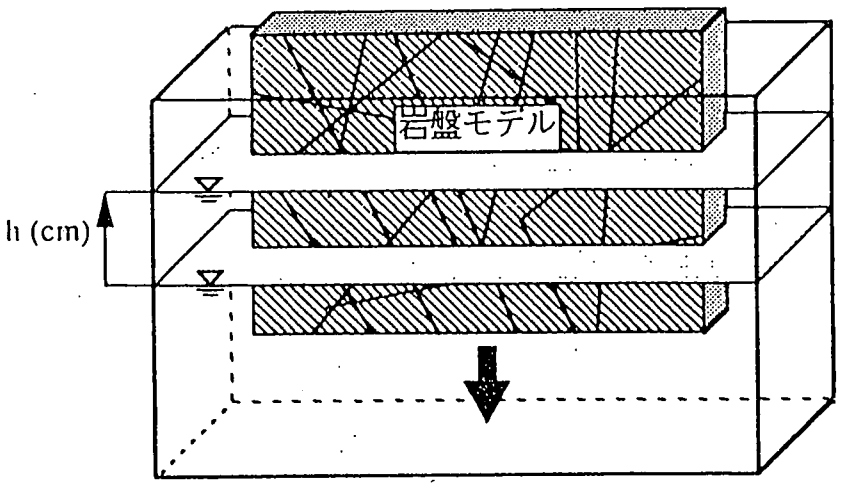


Fig.1 岩盤ﾓﾃﾞﾙ内の割れ目の総体積の求め方

（3）岩盤モデルの割れ目内を浸透している水の体積　Vri（cm^3）

試験開始から定常になるまでのトータルの流入量とトータルの流出量を測定することにより、定常状態における岩盤モデルの割れ目内を浸透する水の体積

を式(3)より算定する。

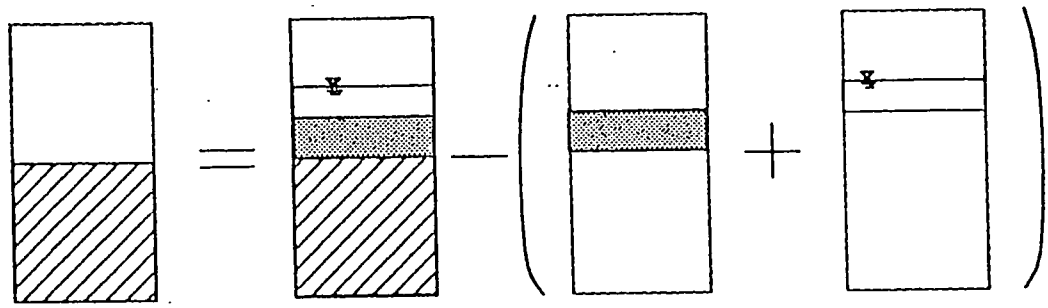


Fig.2 浸透流の体積の求め方

$$V_{ri} = V_a - V_{sw} - V_w \qquad (3)$$

ここで、(a) 試験装置内の水の体積 $V_a(cm^3)$

試験装置内の水の体積は定常状態における試験開始後からの総流入量より総流出量を引いたのと等しい。

$$V_a = \Sigma Q_{in} - \Sigma Q_{out} \qquad (4)$$

Q_{in} ;総流入量 (cm^3)

Q_{out} ;総流出量 (cm^3)

(b) 標準砂間隙内の水の体積 $V_{sw}(cm^3)$

標準砂を水を割れ目に均一に浸透させ、流入量を調整するために定水位供給用水槽の底に詰める。その標準砂の間隙内の水の体積は、砂の絶乾状態の重量と詰める水槽の体積によって求まる。

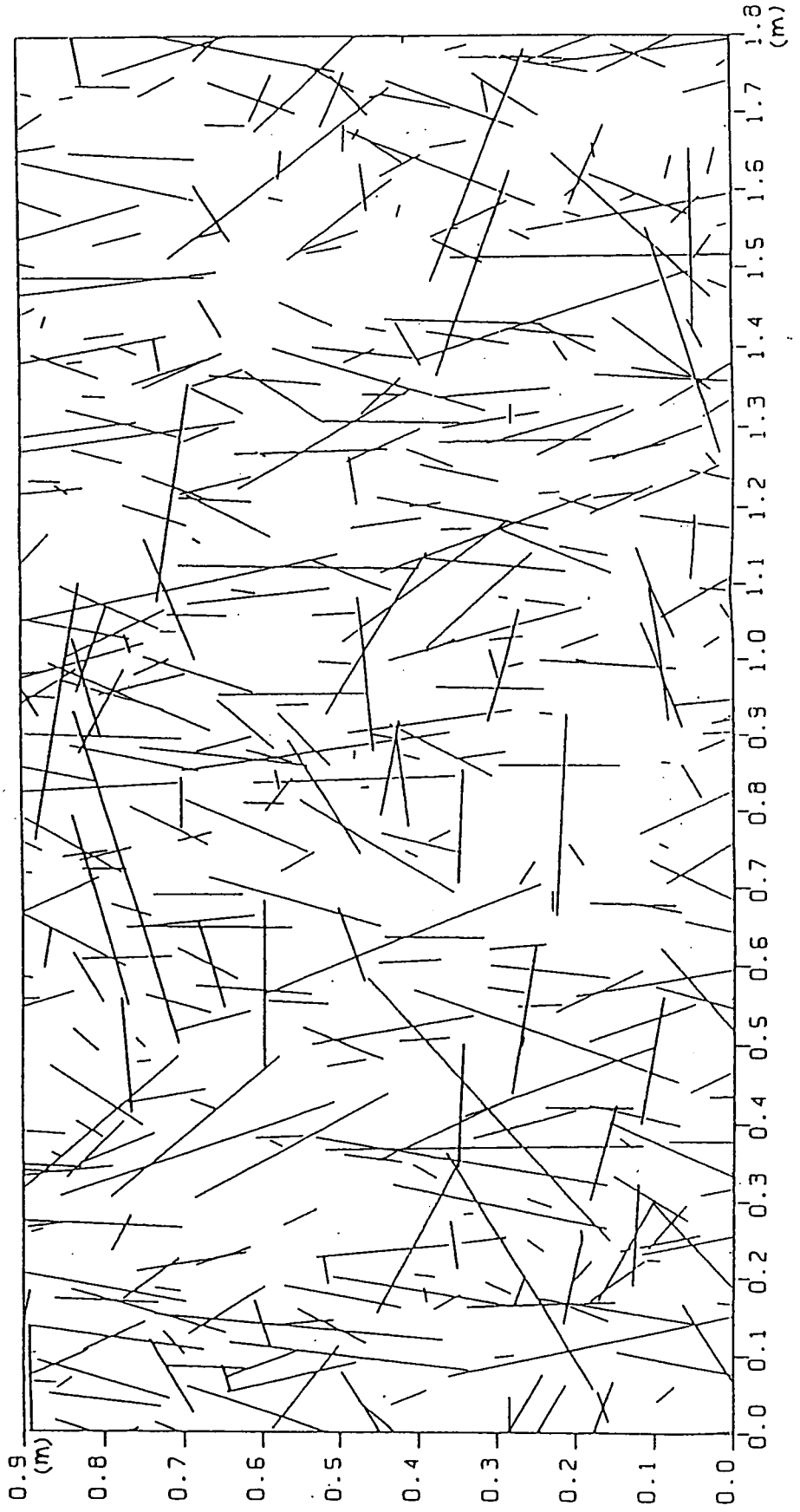
(c) 水の体積 $V_w(cm^3)$

水の水位に断面積を乗じることによりも求まる。

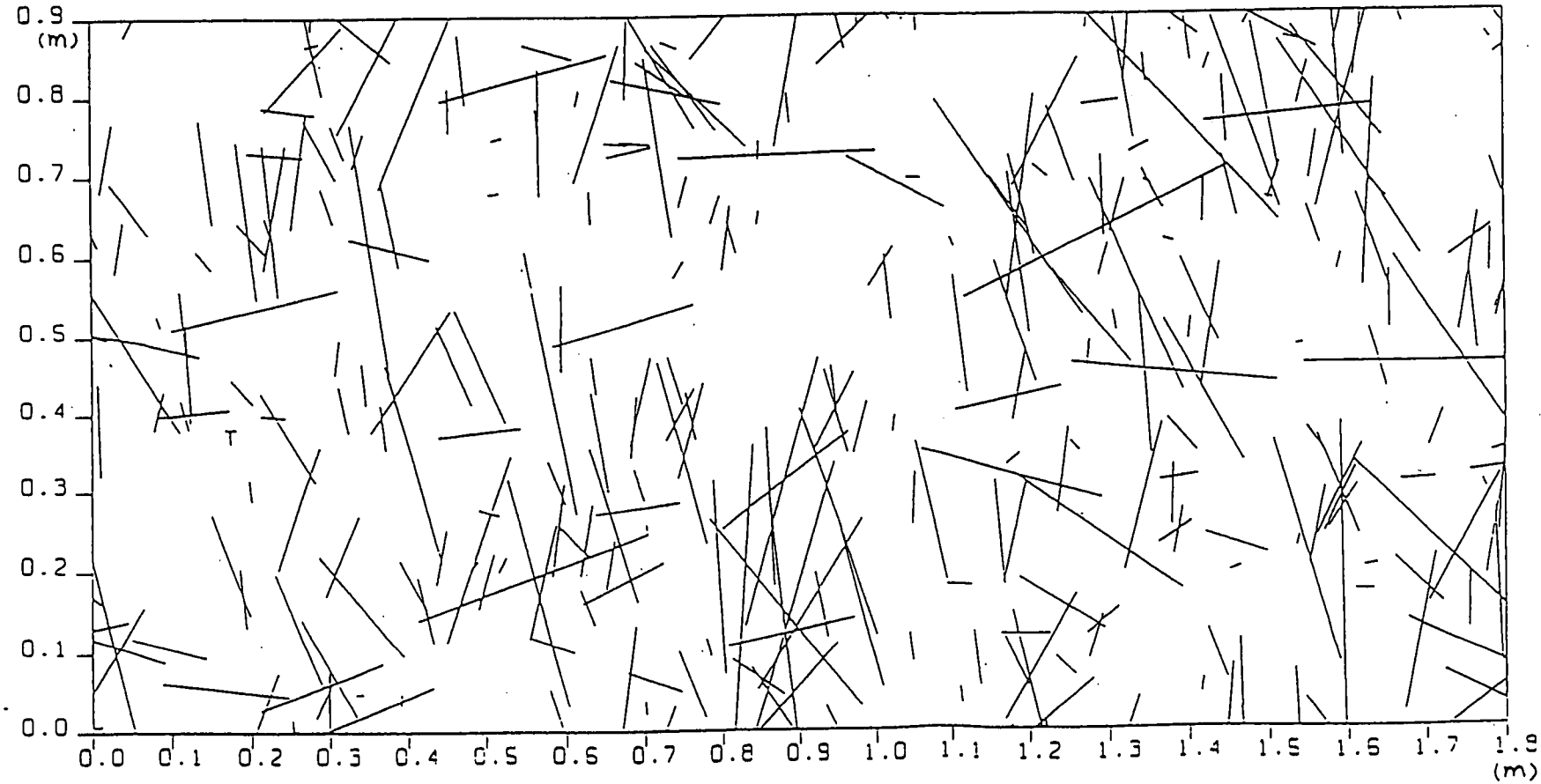
$$V_w = ah$$

a ;水槽の断面積(cm^2)

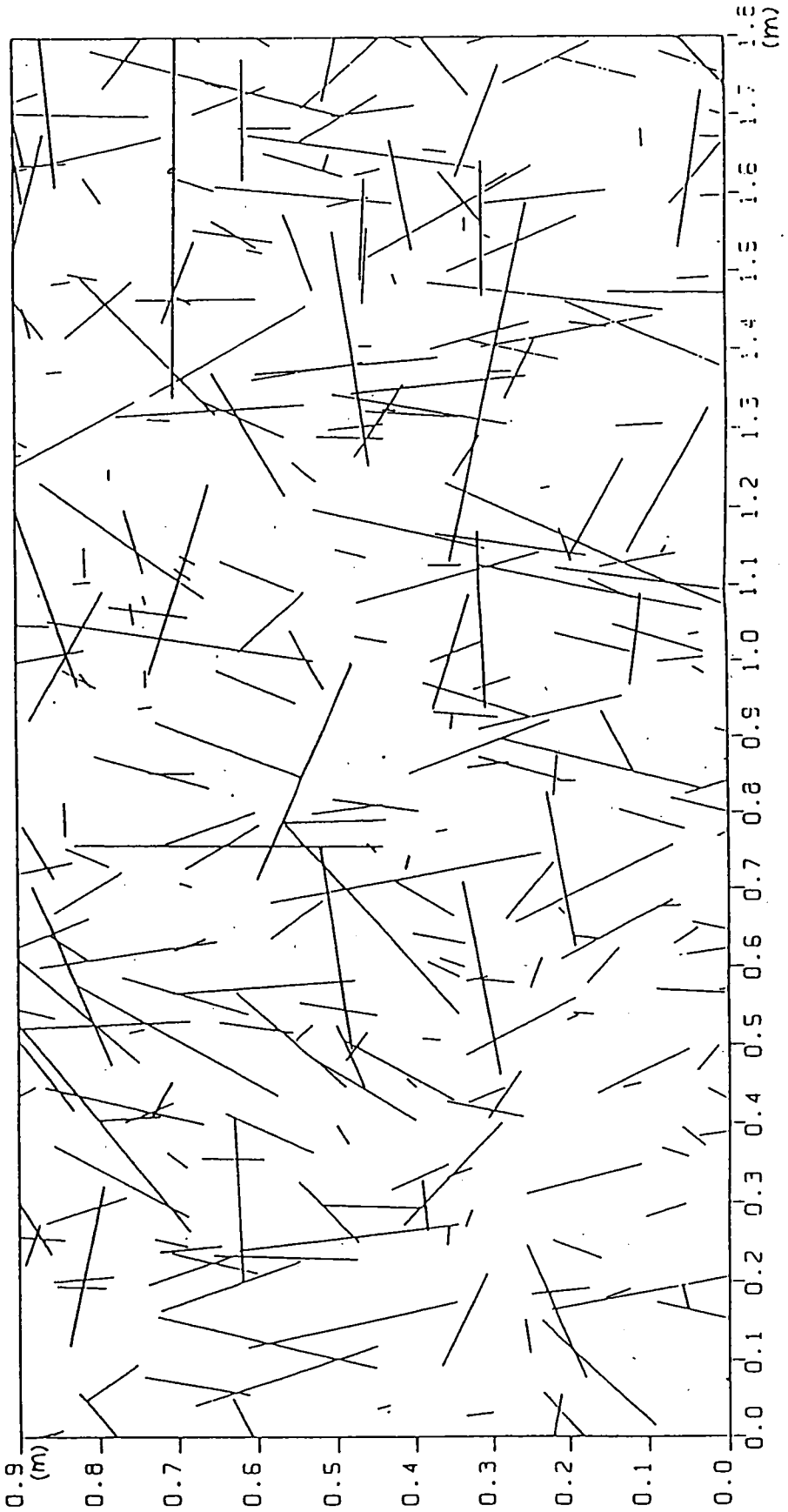
h ;水位(cm)



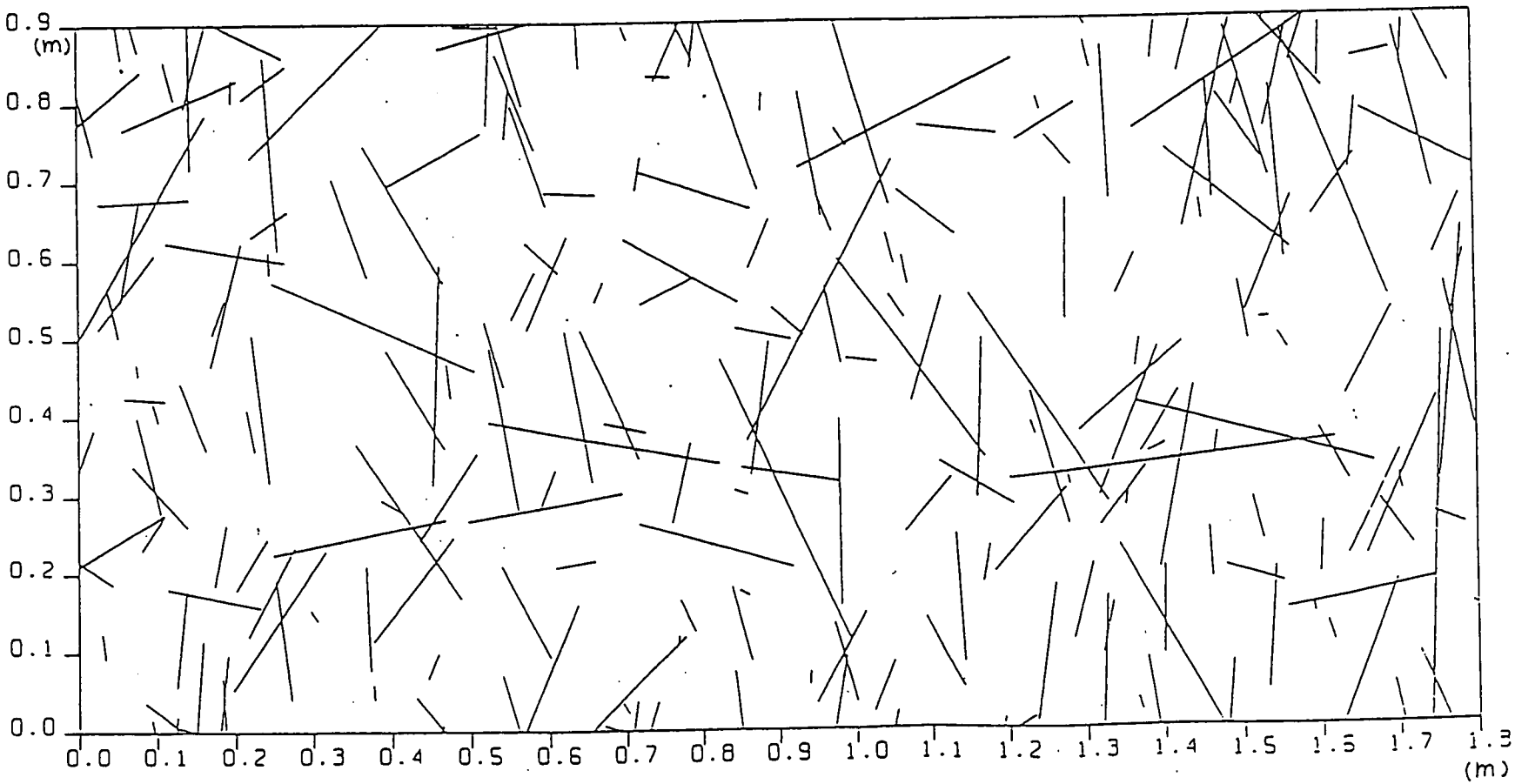
A.Fig.2.1 Fissure rock model by Nakaya joint width 1.5(mm)



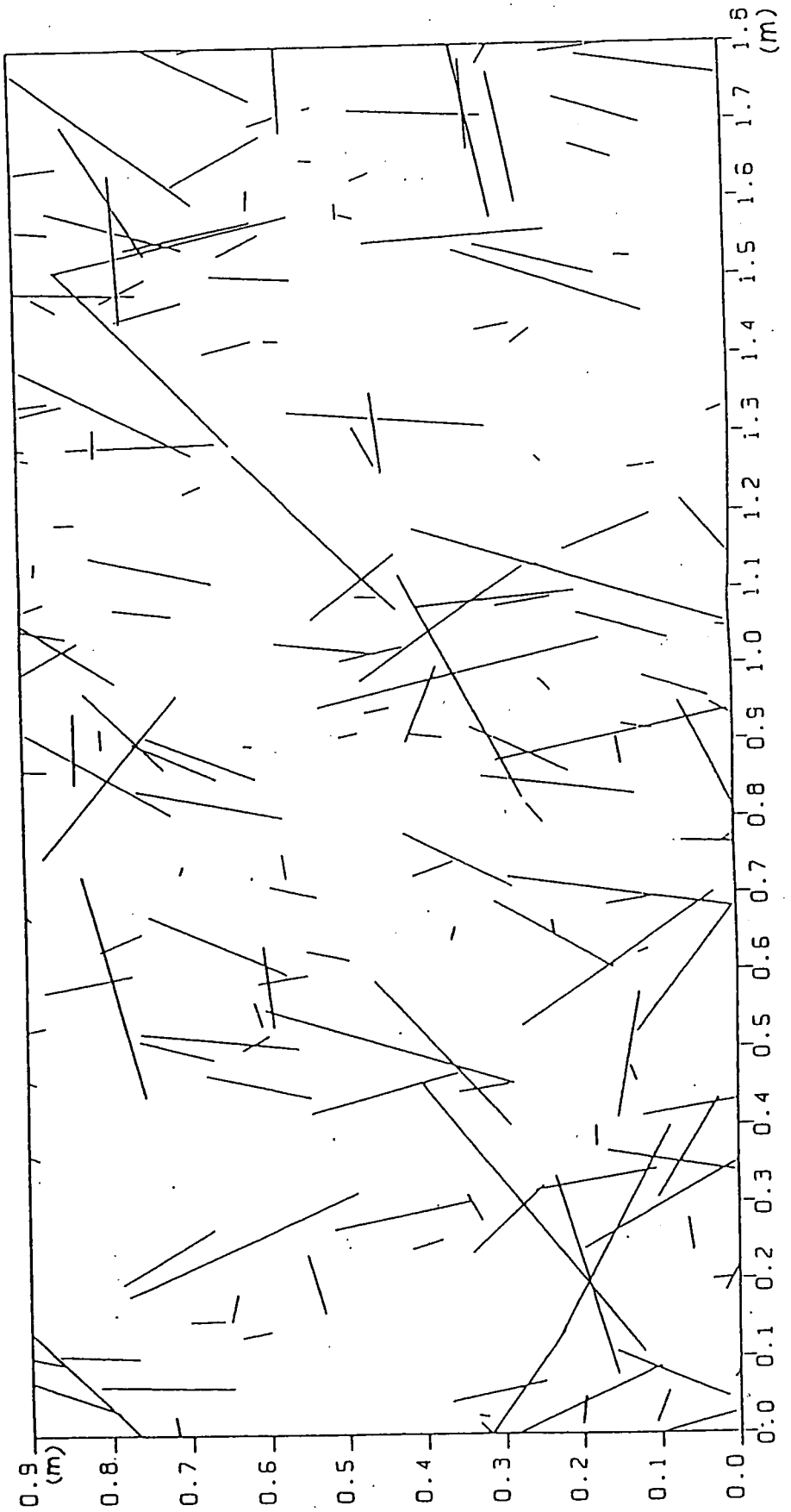
A.Fig.2.2 Fissure rock model by Nakaya joint width 2.0(mm)



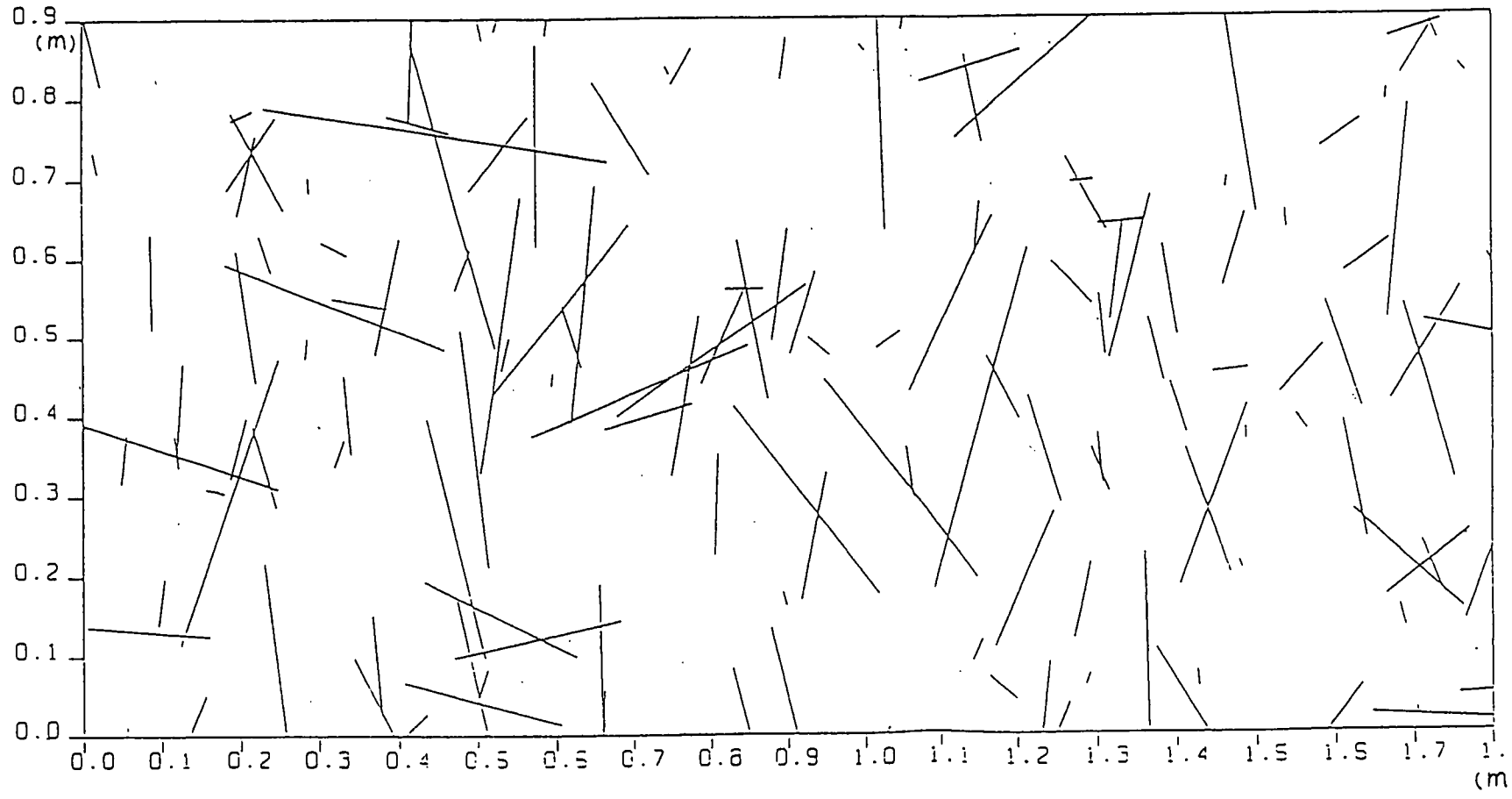
A.Fig.2.3 Fissure rock model by Nakaya joint width 2.5(mm)



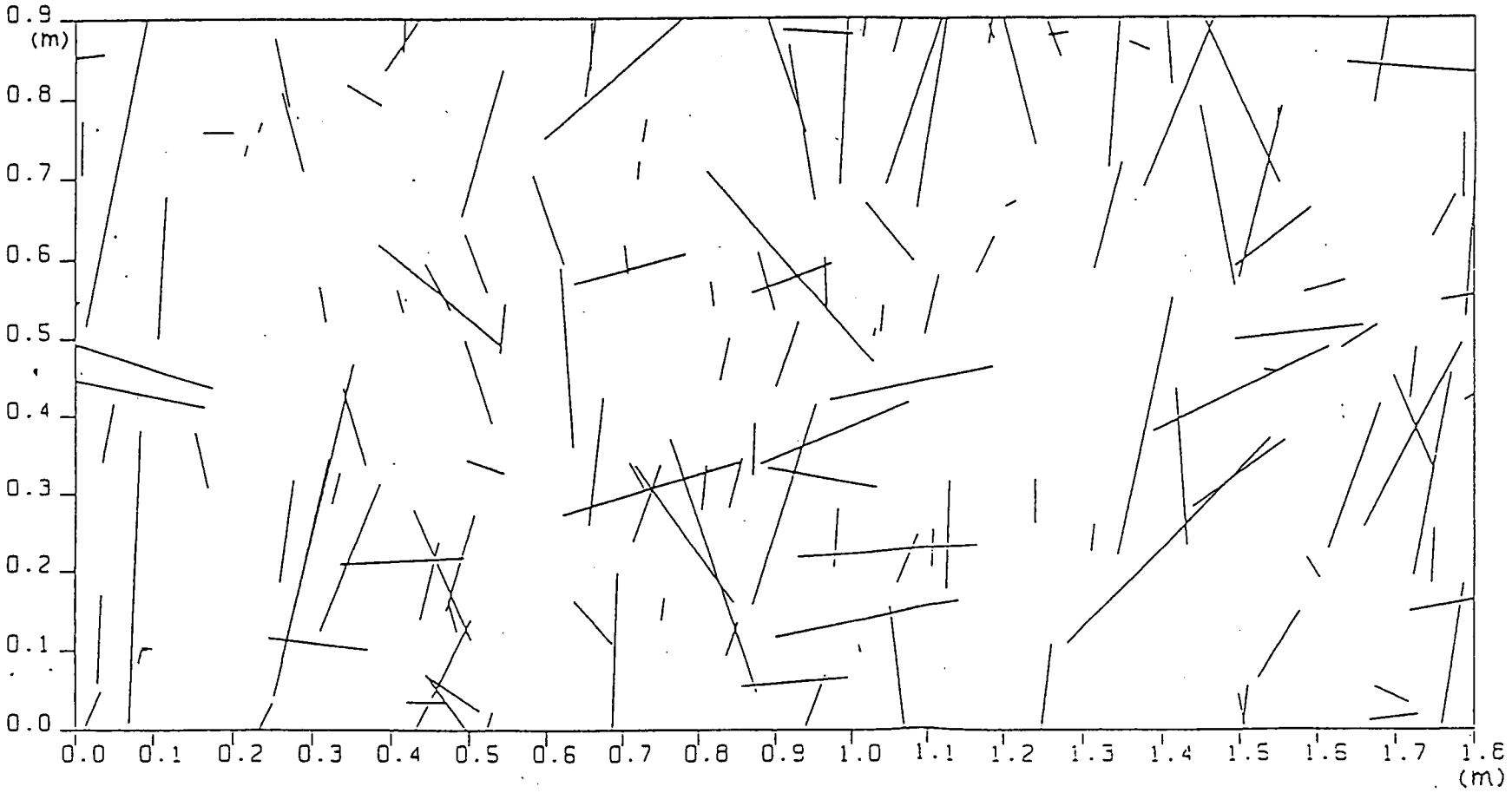
A.Fig.2.4 Fissure rock model by Nakaya joint width 3.0(mm)



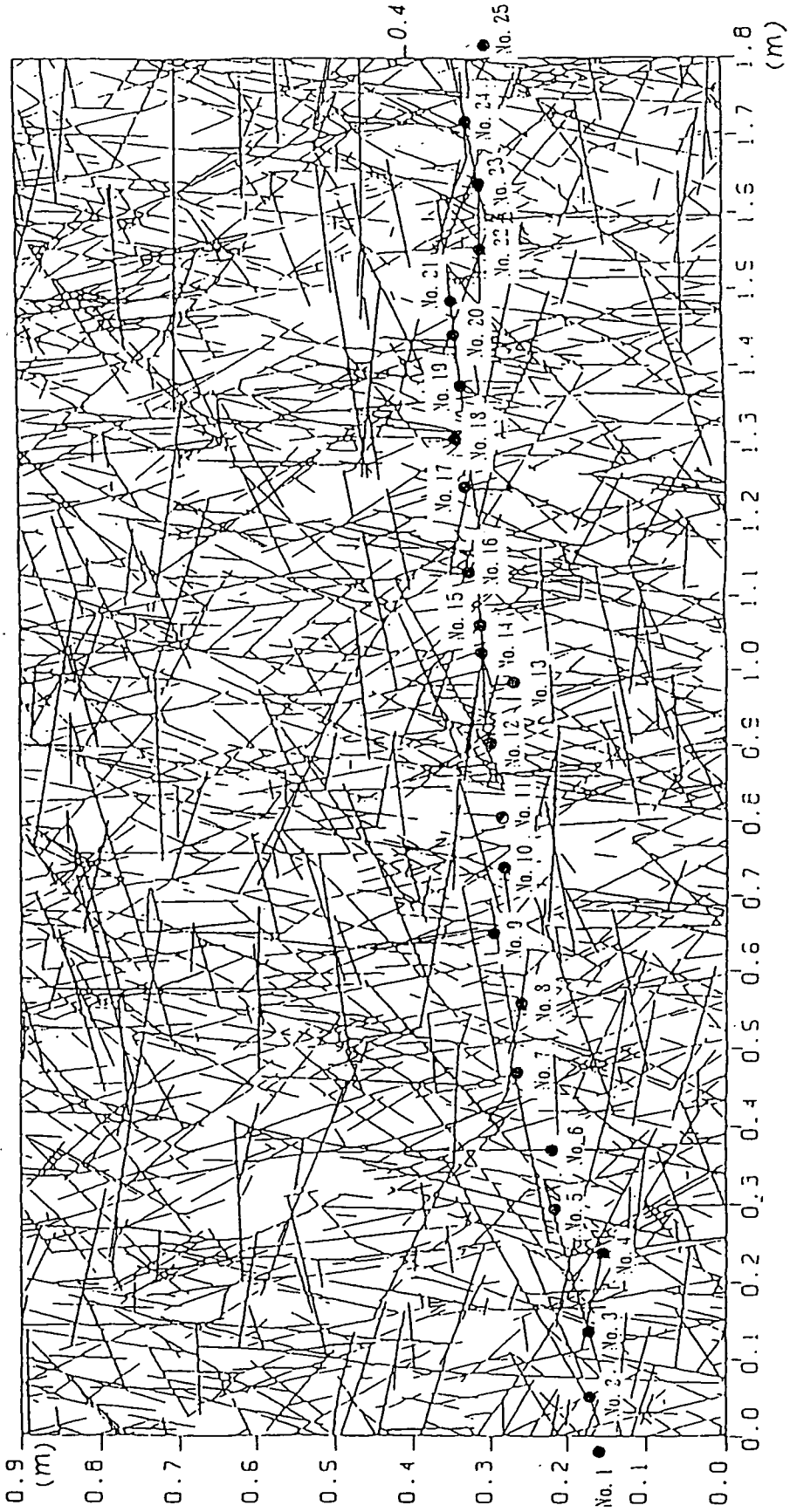
A.Fig.2.5 Fissure rock model by Nakaya joint width 3.5(mm)



A.Fig.2.6 Fissure rock model by Nakaya joint width 4.0(mm)



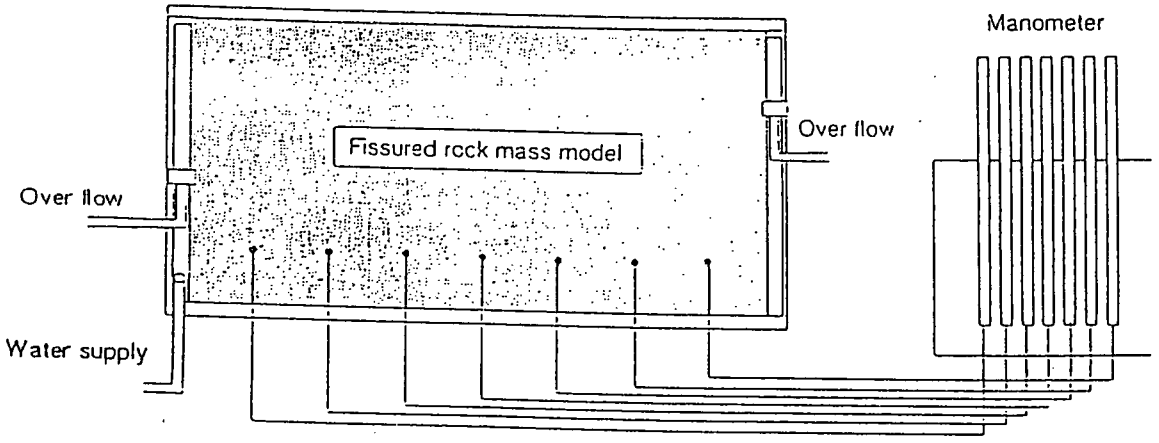
A.Fig.2.7 Fissure rock model by Nakaya joint width 4.5(mm)



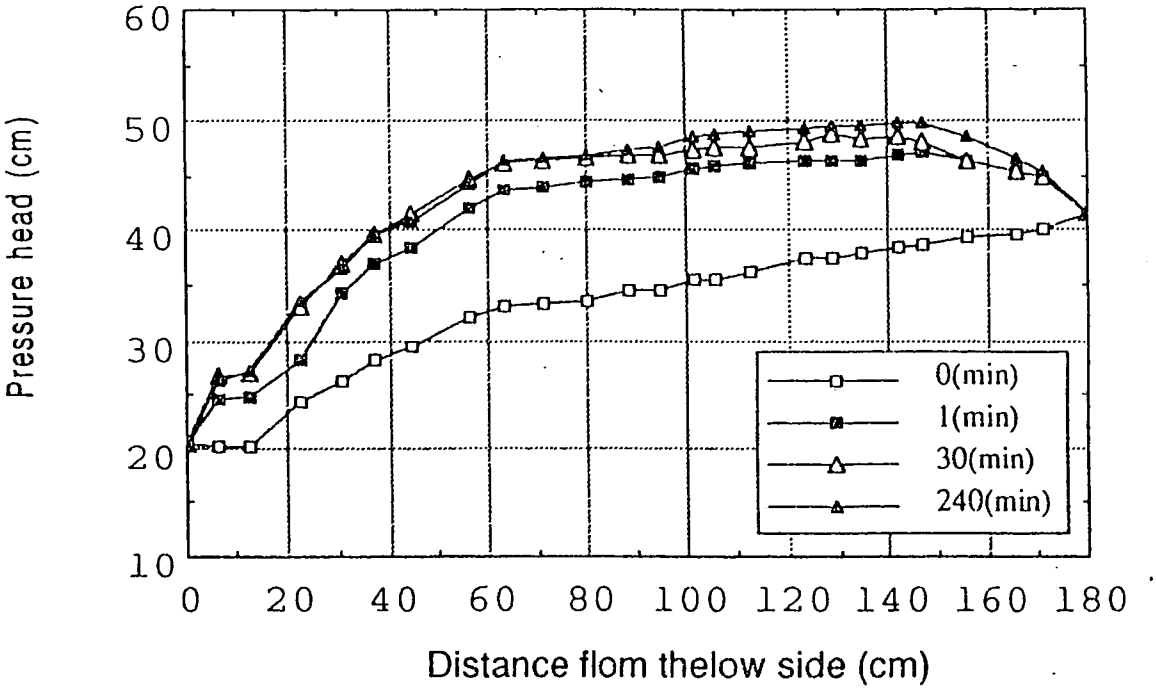
A.Fig.3.1 Position of manometer

A.Table 3.1 Posicion of manometer

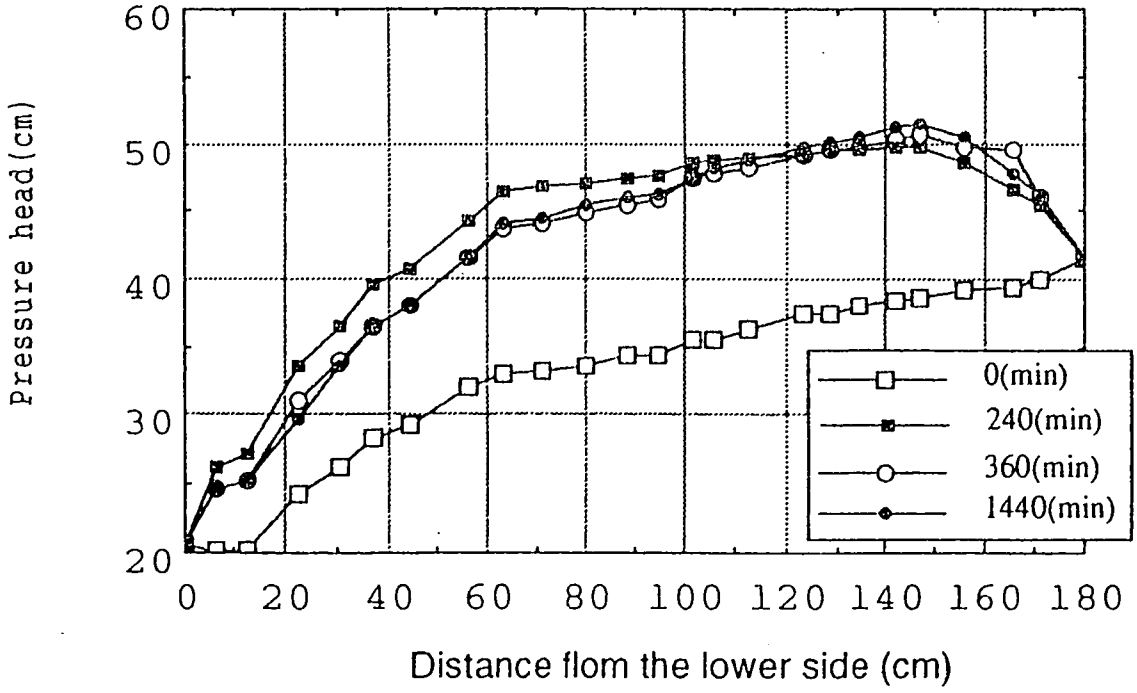
observated point	distance from the lower side (cm)	observated point	distance from the lower side (cm)
No. 1	0. 0	No. 14	101. 5
No. 2	6. 2	No. 15	106. 0
No. 3	12. 9	No. 16	112. 9
No. 4	22. 6	No. 17	123. 6
No. 5	30. 6	No. 18	128. 6
No. 6	37. 1	No. 19	134. 4
No. 7	44. 4	No. 20	142. 1
No. 8	56. 1	No. 21	146. 7
No. 9	63. 1	No. 22	155. 5
No. 10	71. 1	No. 23	165. 6
No. 11	79. 7	No. 24	170. 9
No. 12	88. 2	No. 25	180. 0
No. 13	94. 6		



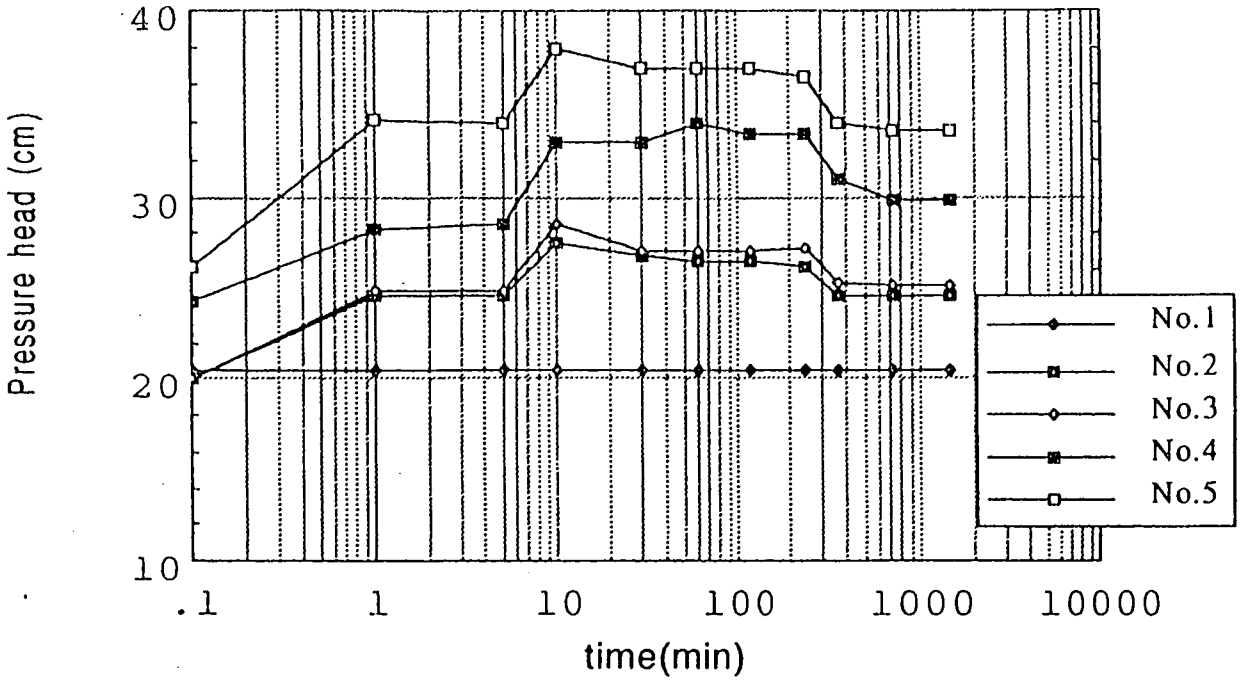
A. Fig. 3. 2 Rain seepage experimental apparatus



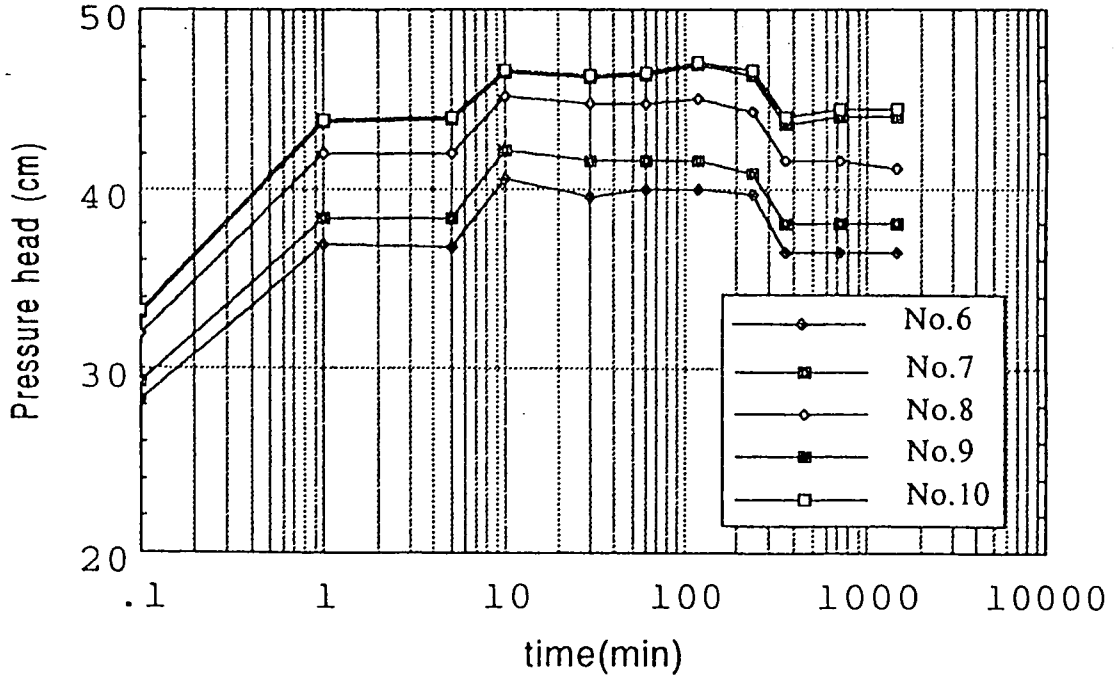
A.Fig.3.3 Change of water surface
I=26750(mm/h)



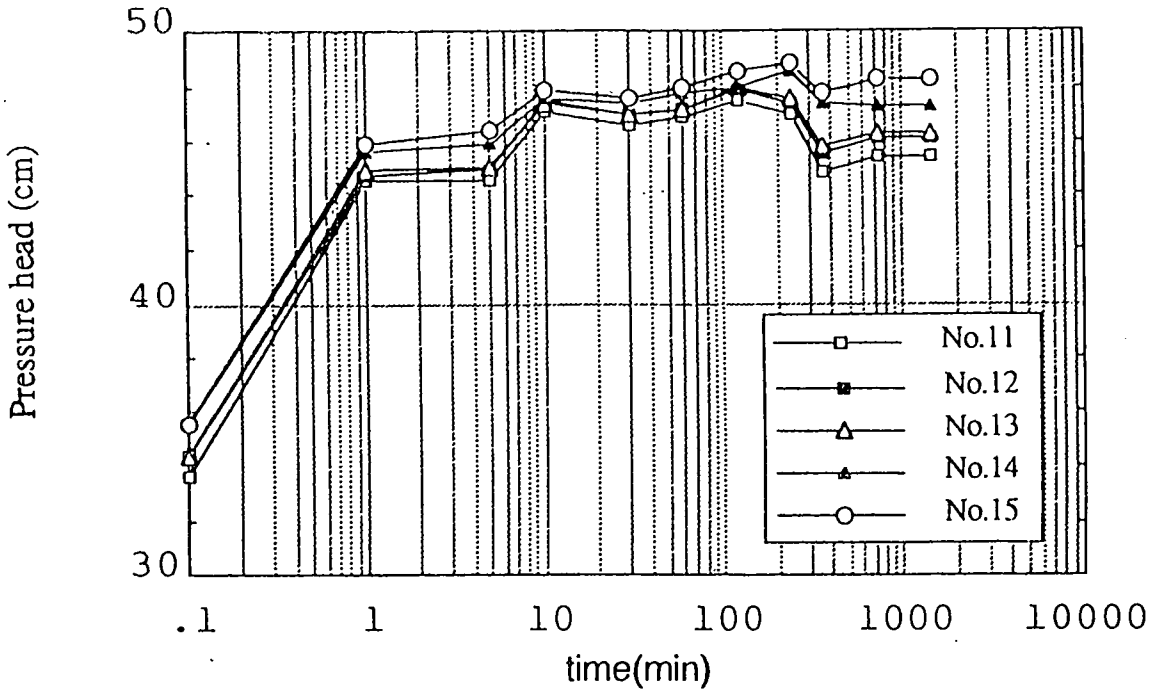
A.Fig.3.4 Change of free surface
I=26750(mm/h)



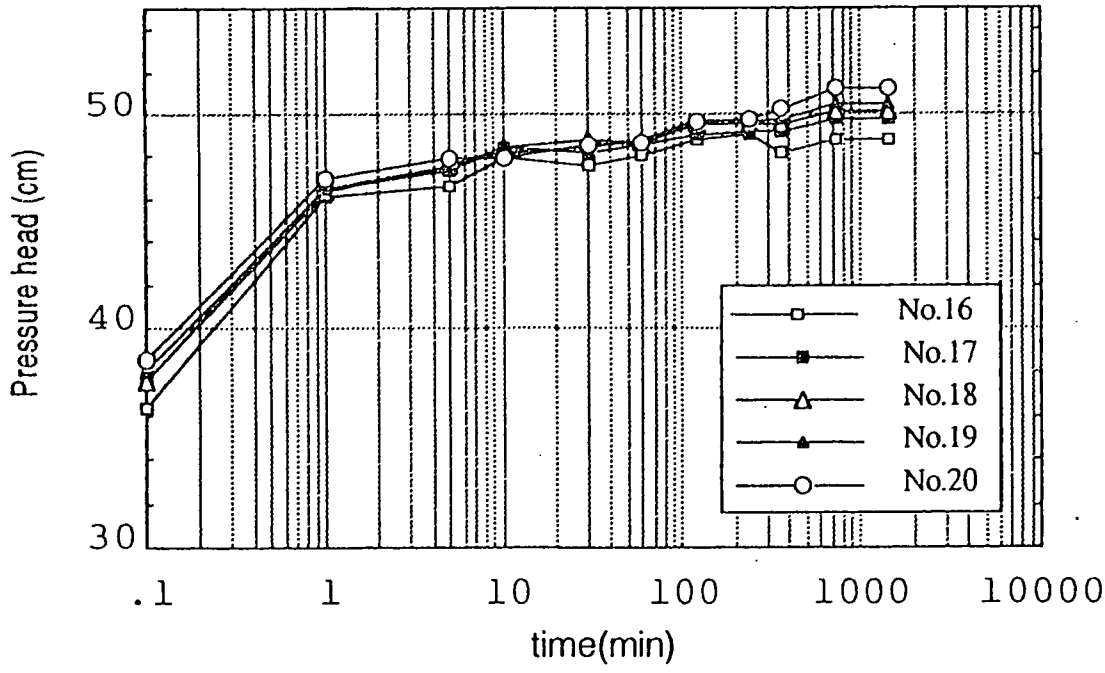
A.Fig.3.5 Change of pressure head
I= 26750(mm/h)



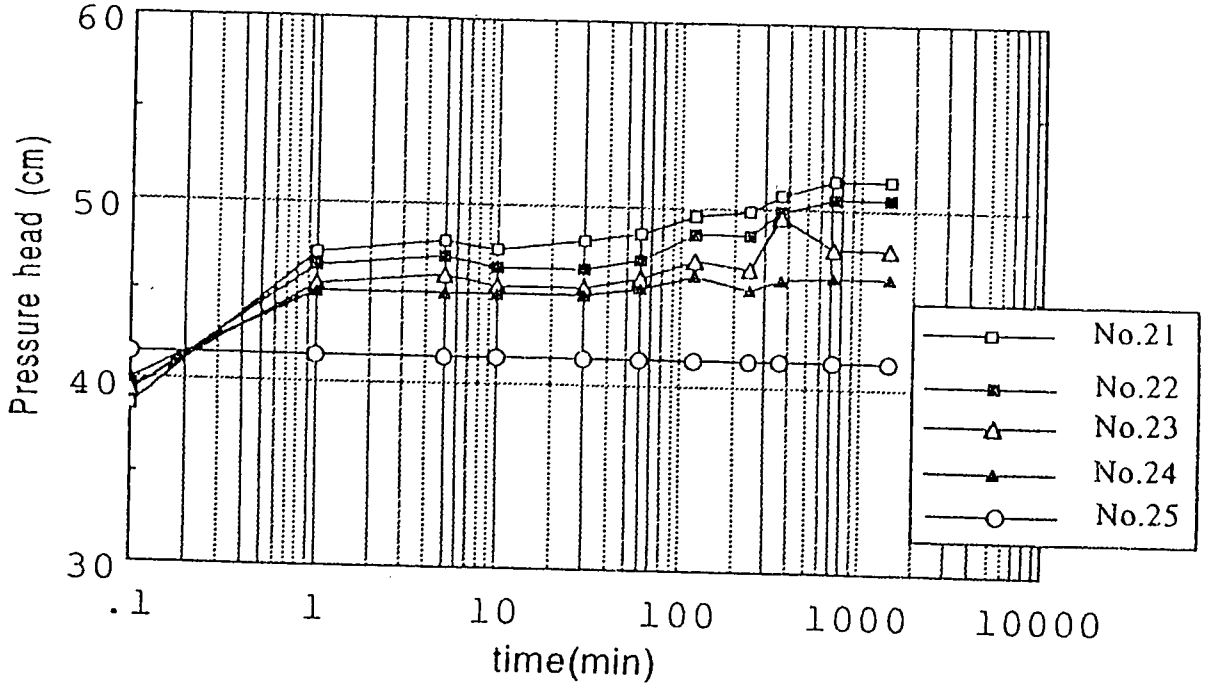
A.Fig.3.6 Change of pressure head
I= 26750(mm/h)



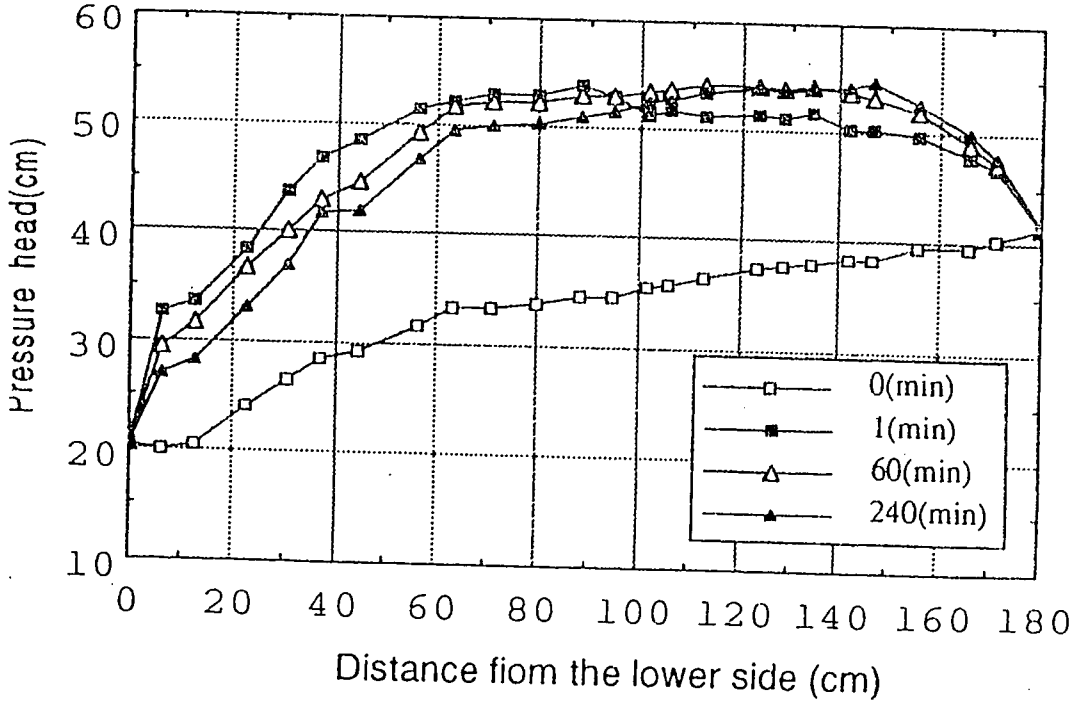
A.Fig.3.7 Change of pressure head
I= 26750(mm/h)



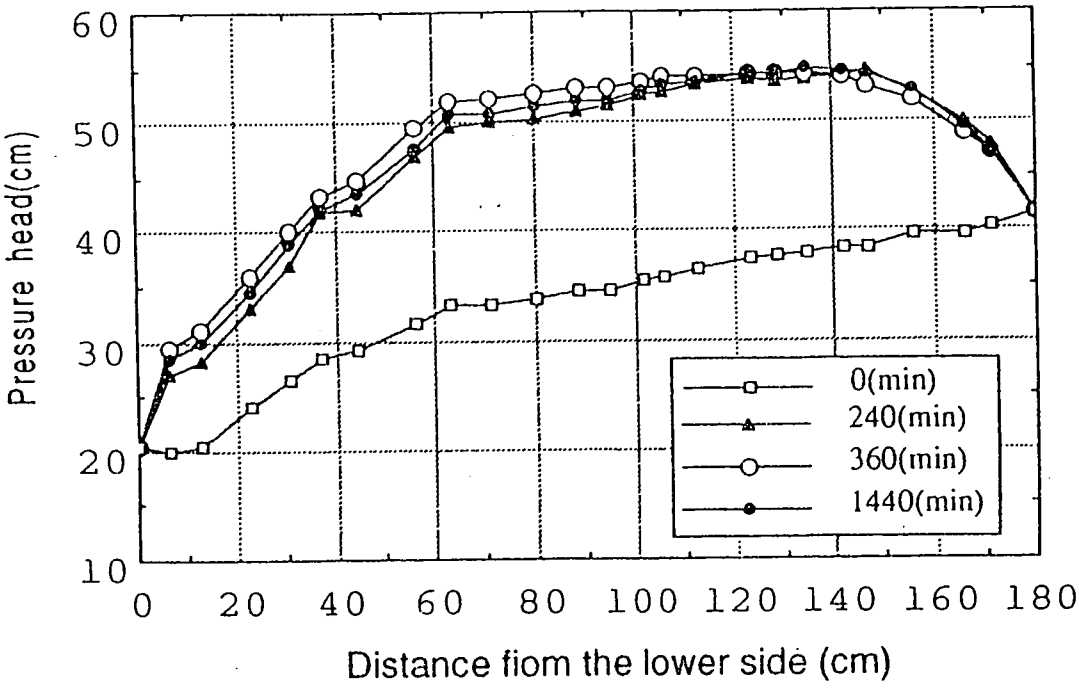
A.Fig.3.8 Change of pressure head
I= 26750(mm/h)



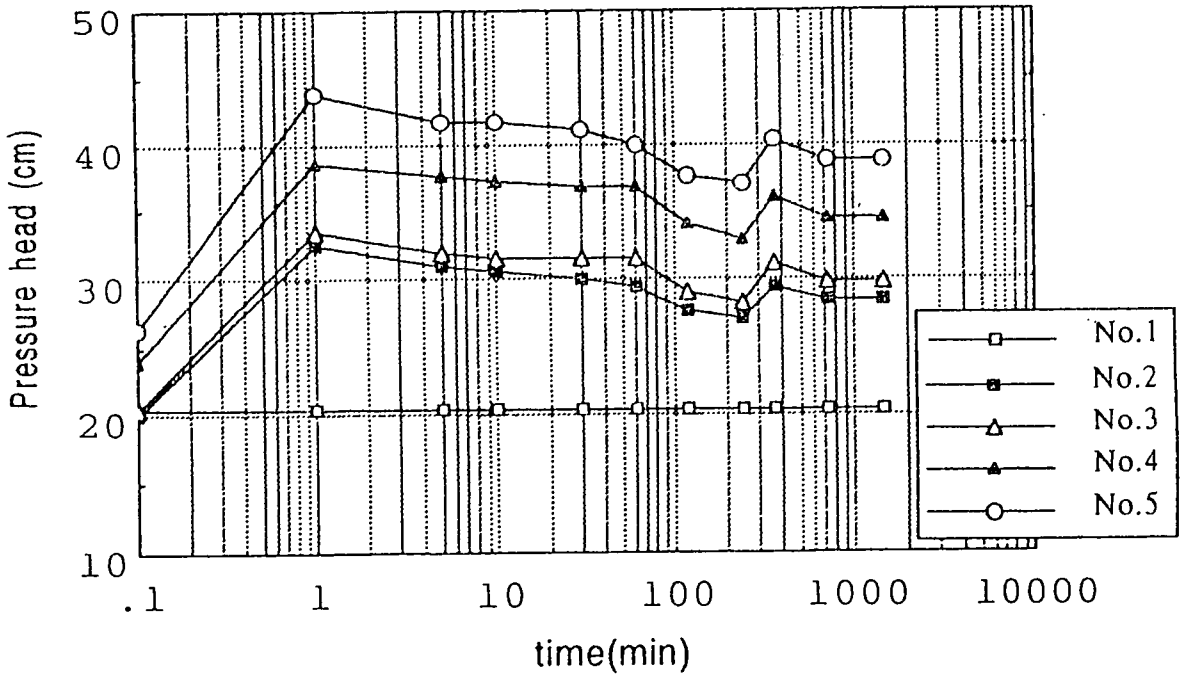
A.Fig.3.9 Change of pressure head
I= 26750(mm/h)



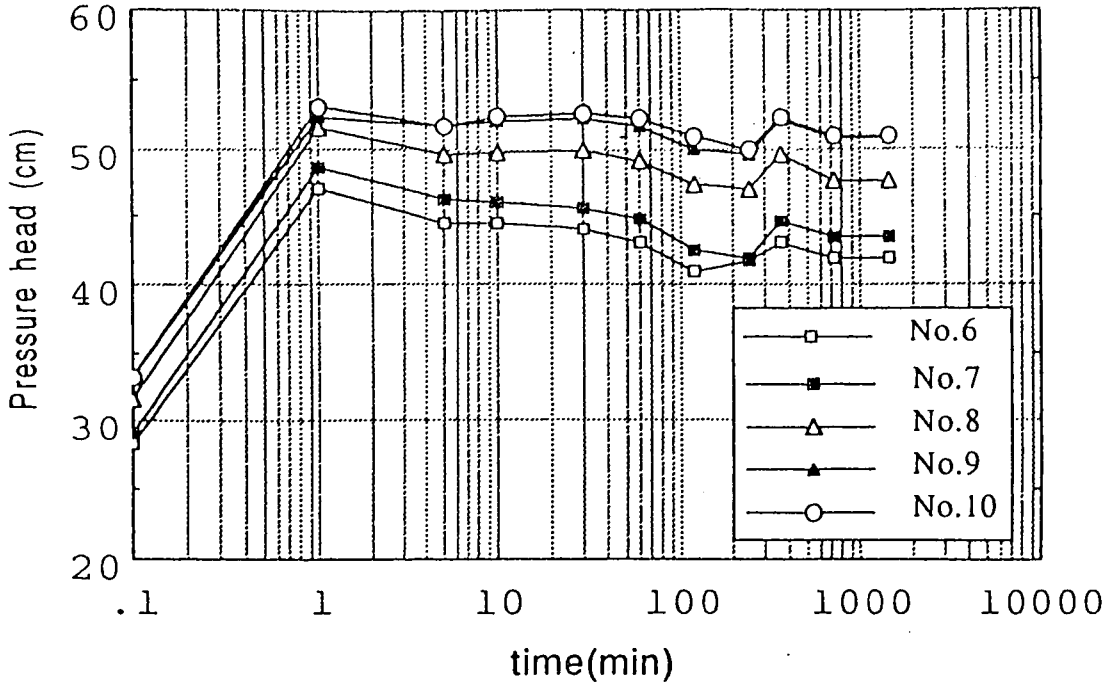
A.Fig.3.10 Change of water surface
I=40750(mm/h)



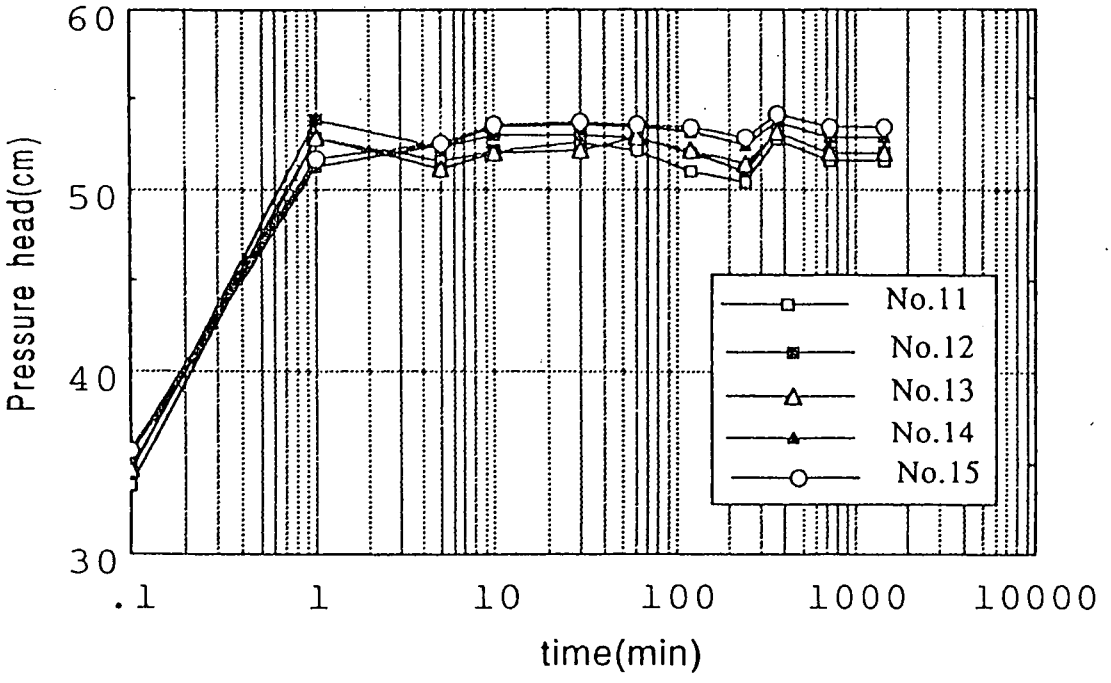
A.Fig.3.11 Change of water surface
I=40750(mm/h)



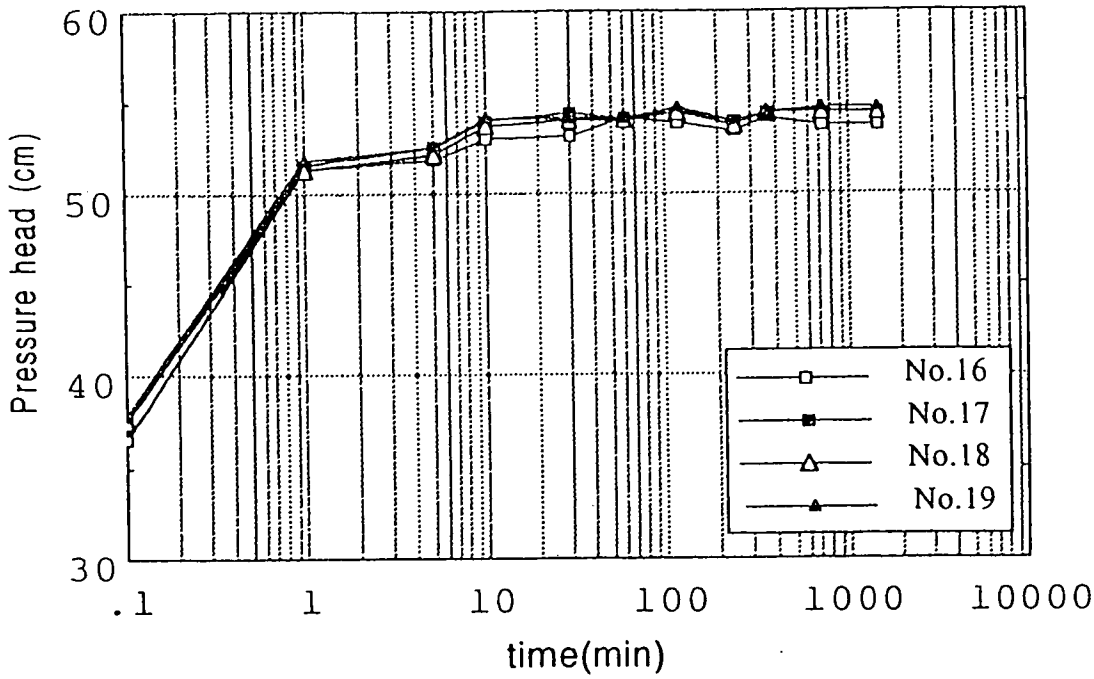
A.Fig.3.12 Change of pressure head
I=40750(mm/h)



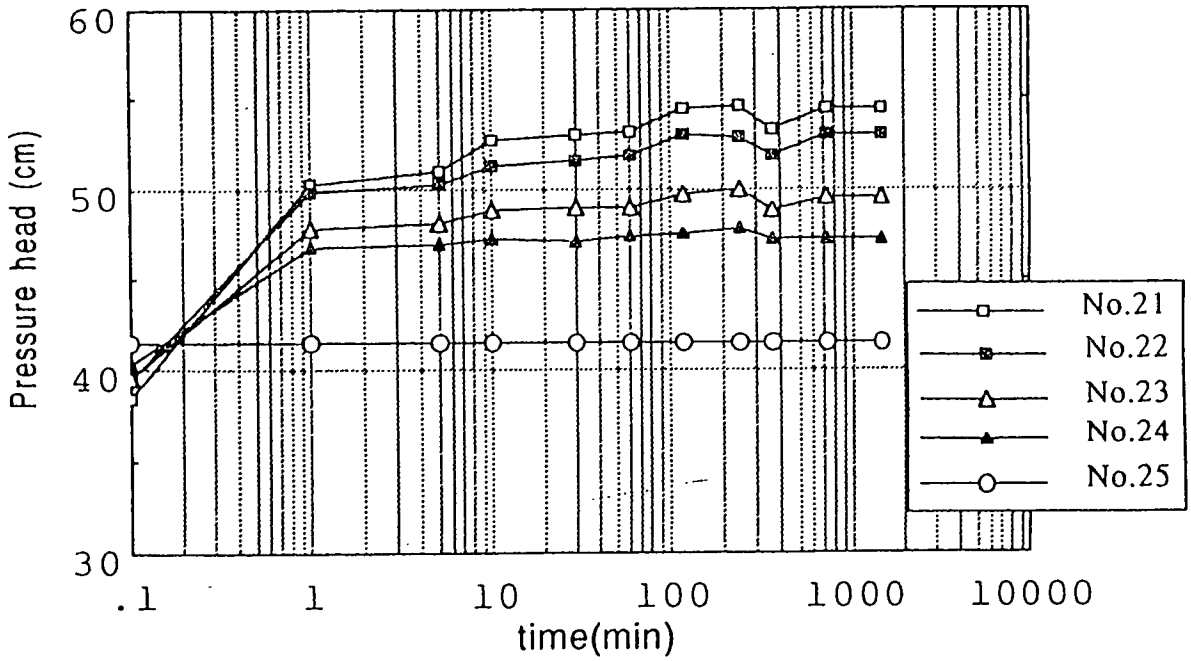
A.Fig.3.13 Change of water surface
I=40750(mm/h)



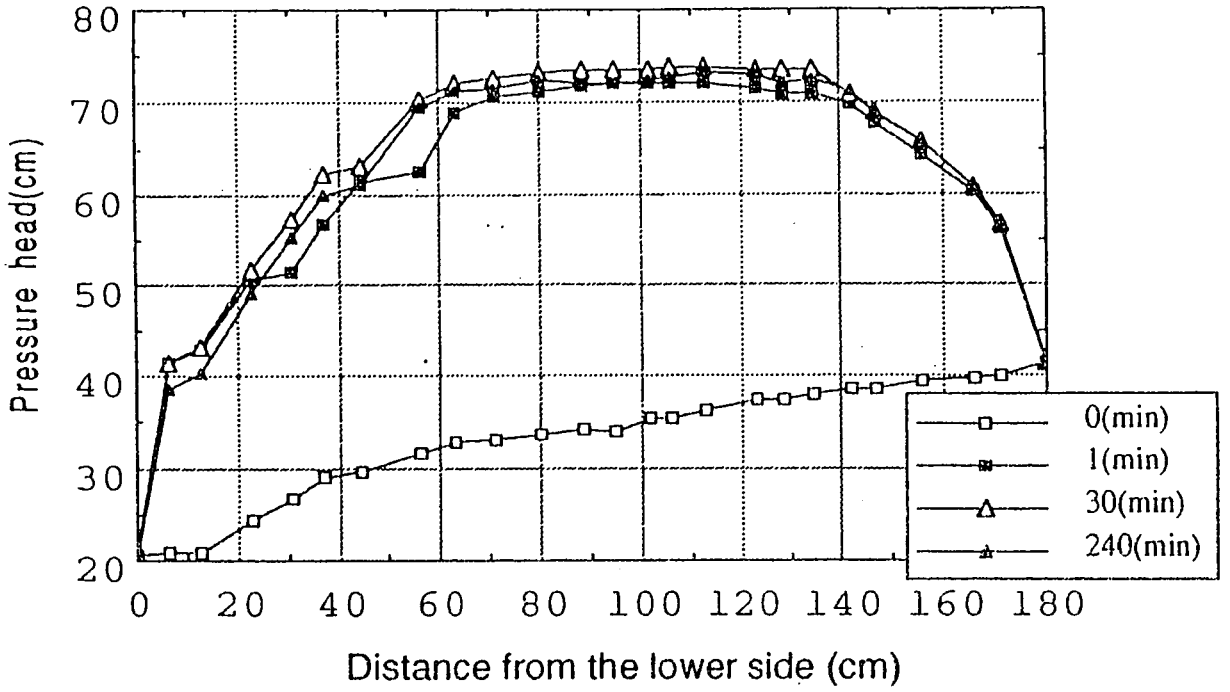
A.Fig.3.14 Change of water surface
I=40750(mm/h)



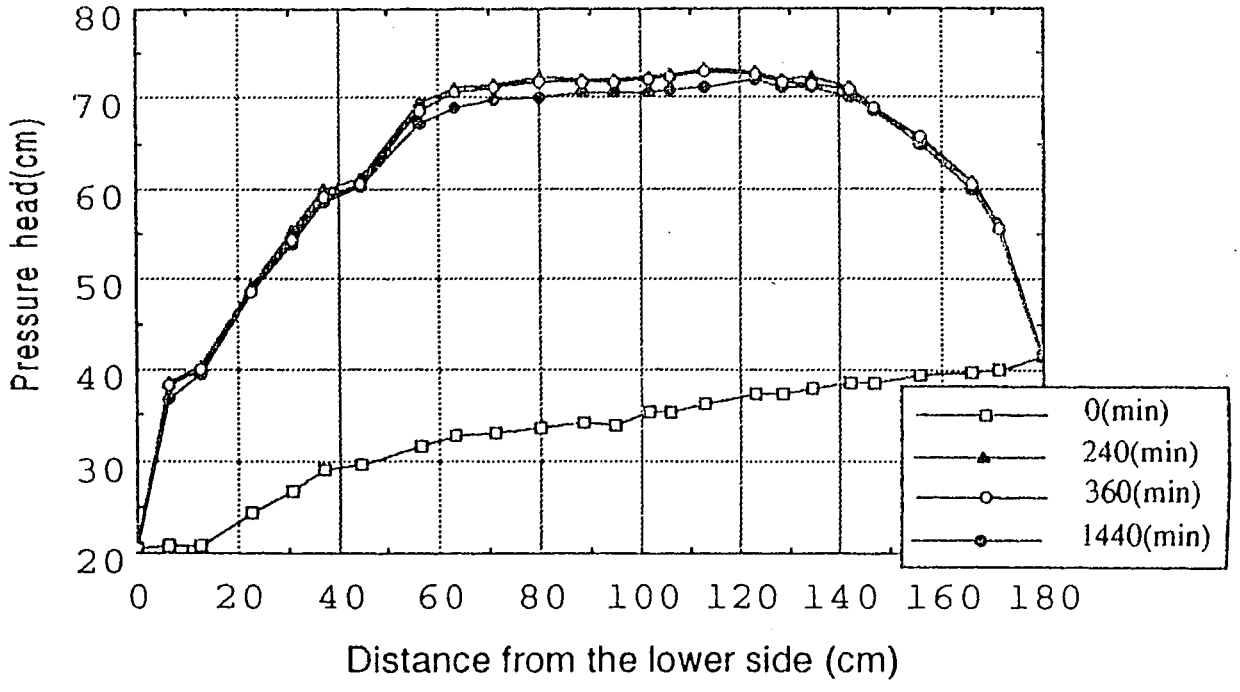
A.Fig.3.15 Change of water surface
I=40750(mm/h)



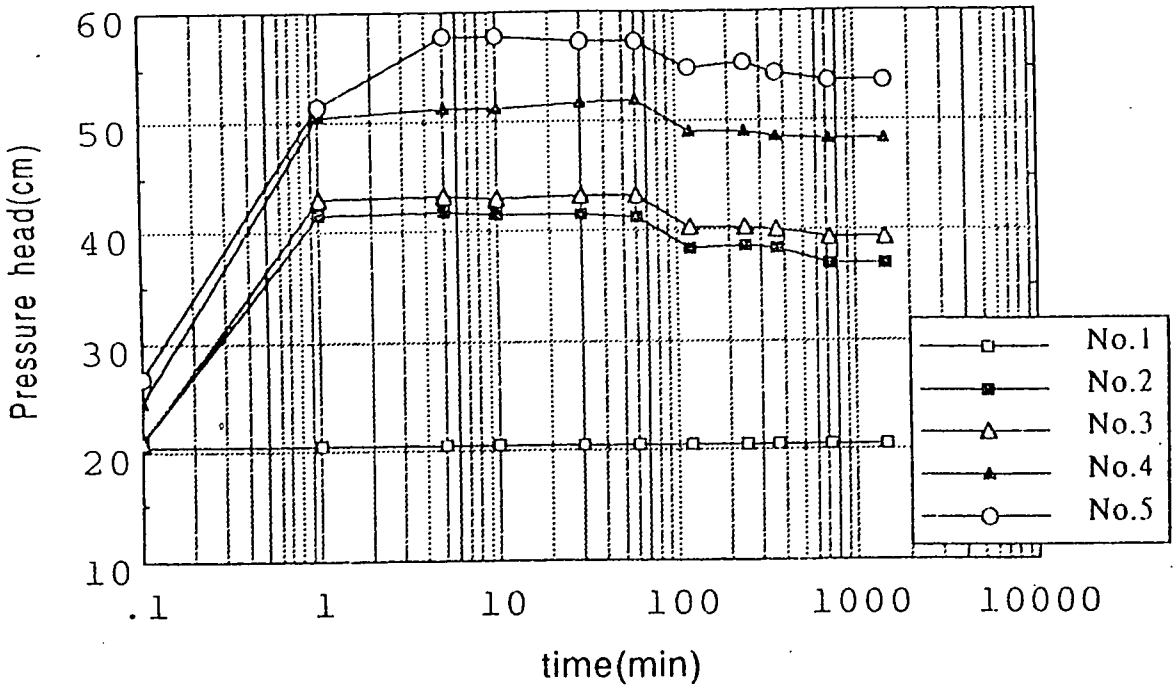
A.Fig.3.16 Change of water surface
I=40750(mm/h)



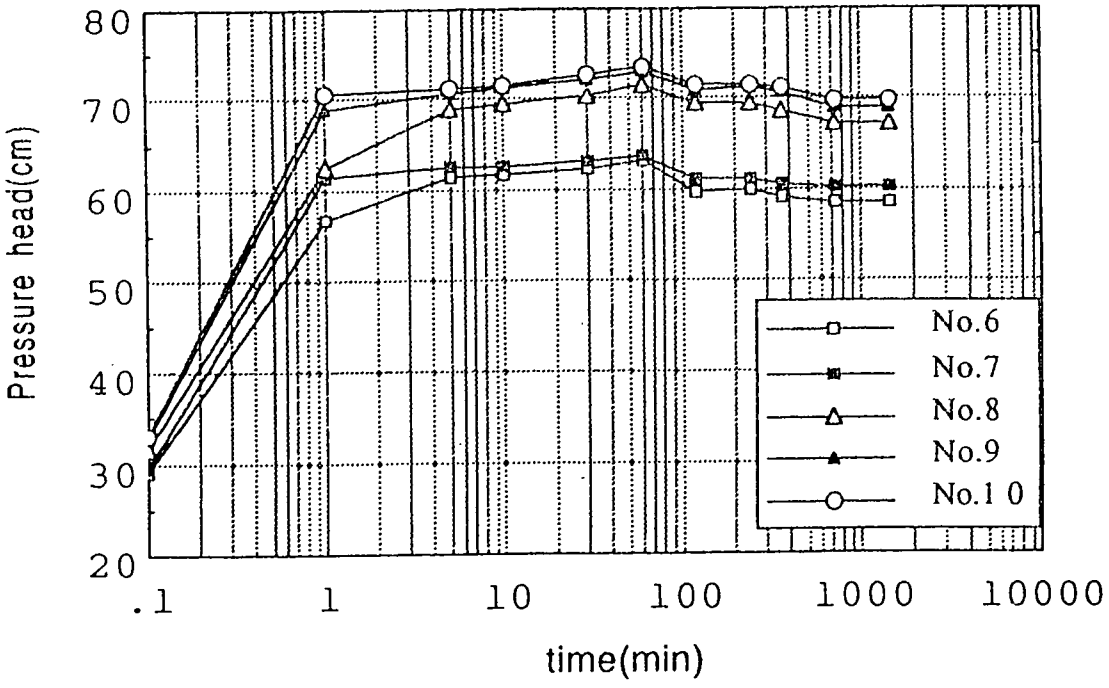
A.Fig.3.17 Change of water surface
I=57560(mm/h)



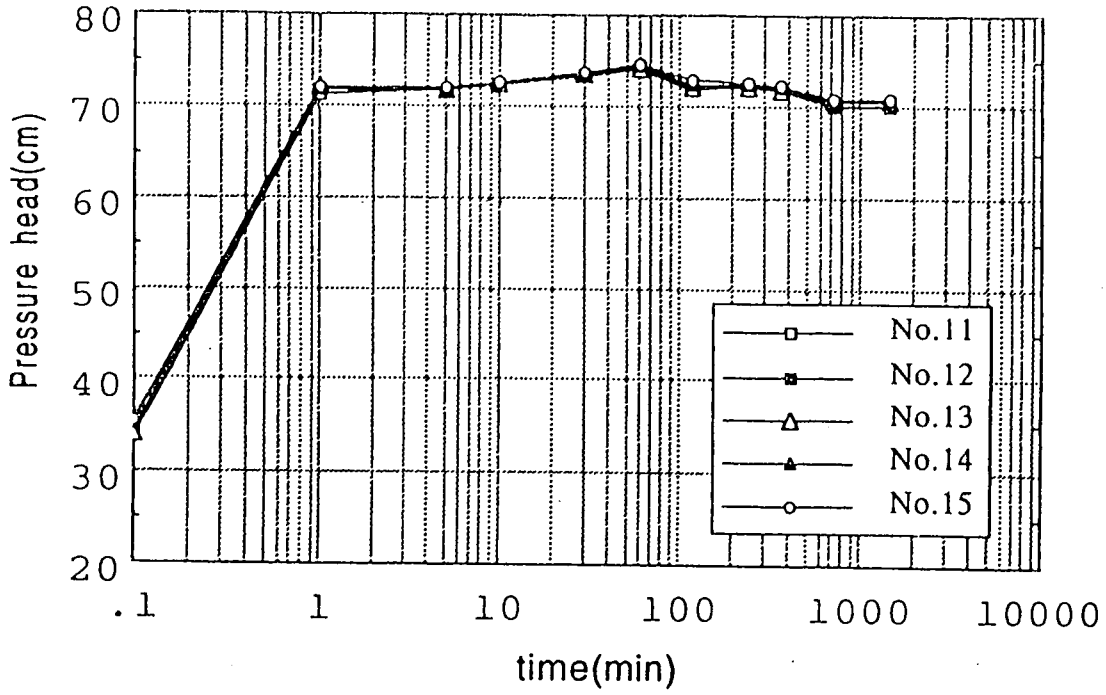
A.Fig.3.18 Change of water surface
I=57560(mm/h)



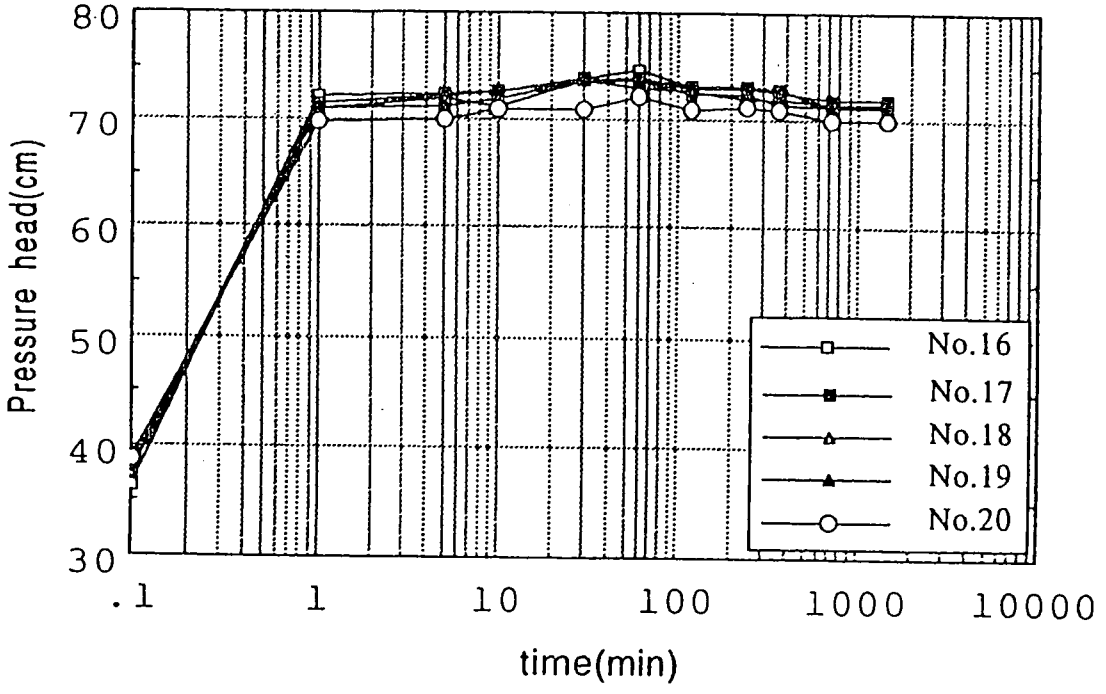
A.Fig.3.19 Change of pressure head(cm)
I=57560(mm/h)



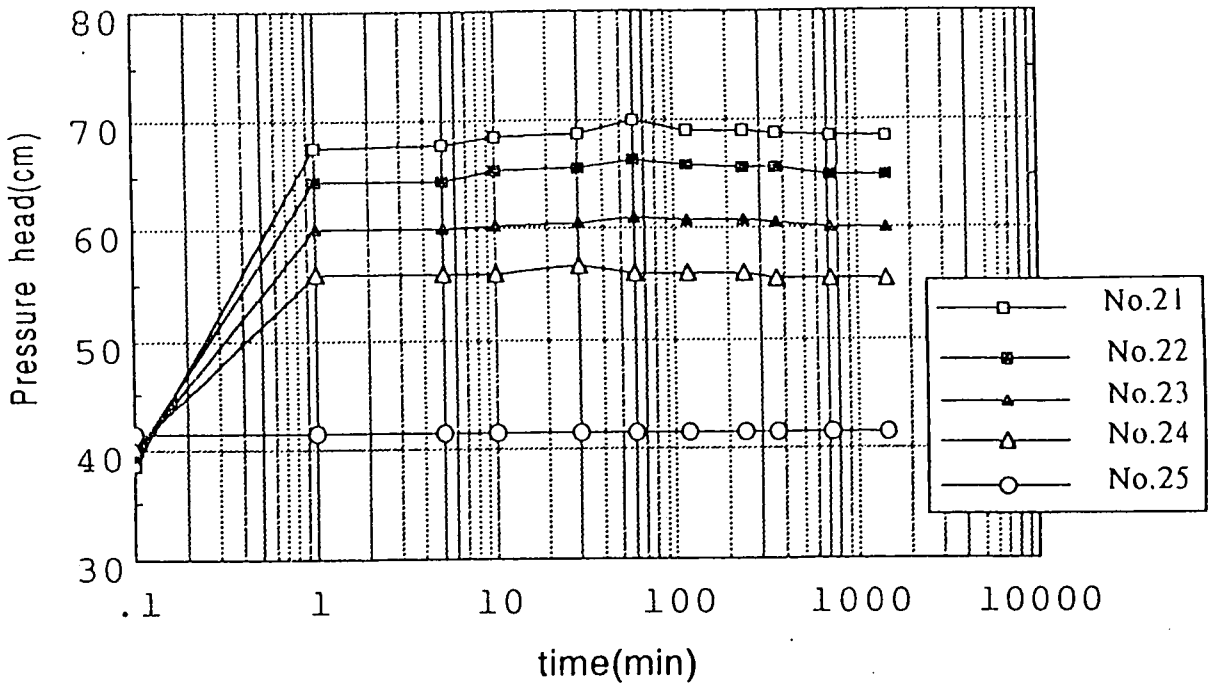
A.Fig.3.20 Change of pressure head(cm)
I=57560(mm/h)



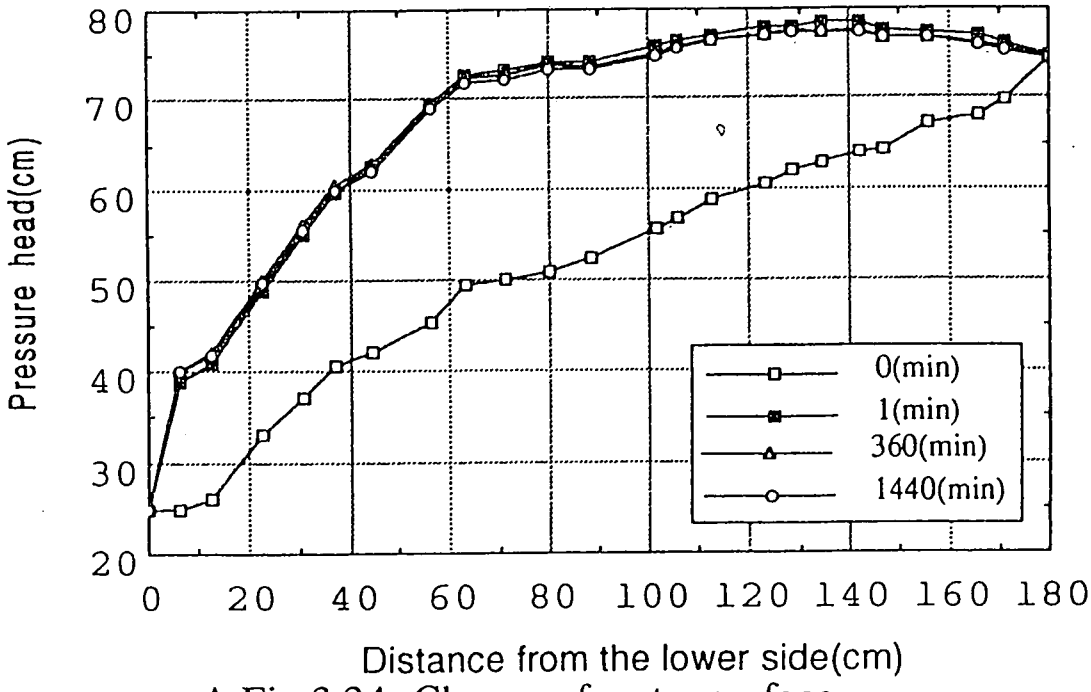
A.Fig.3.21 Change of pressure head(cm)
I=57560(mm/h)



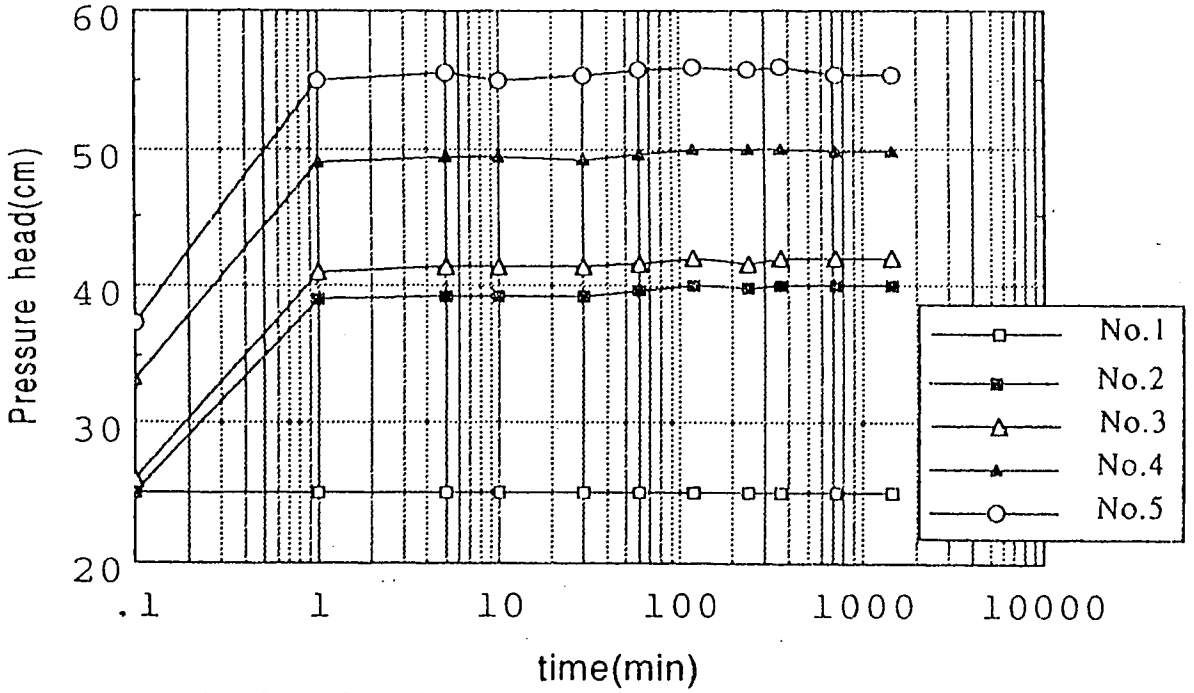
A.Fig.2.22 Change of pressure head(cm)
I=57560(mm/h)



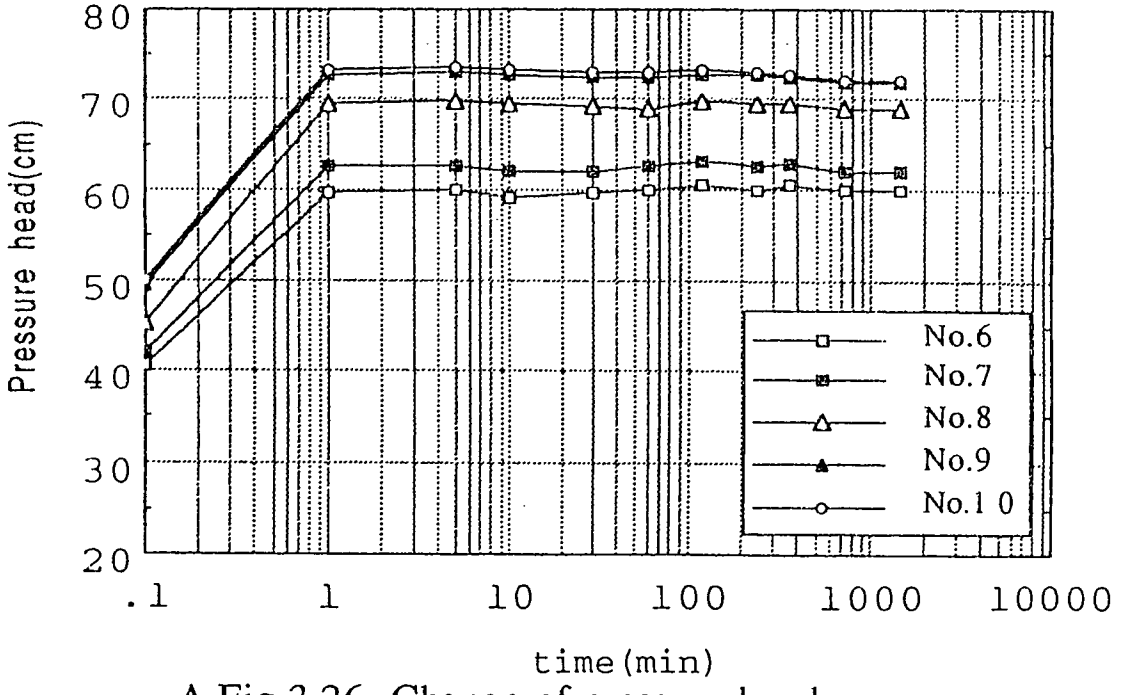
A.Fig.3.23 Change of pressure head(cm)
I=57560(mm/h)



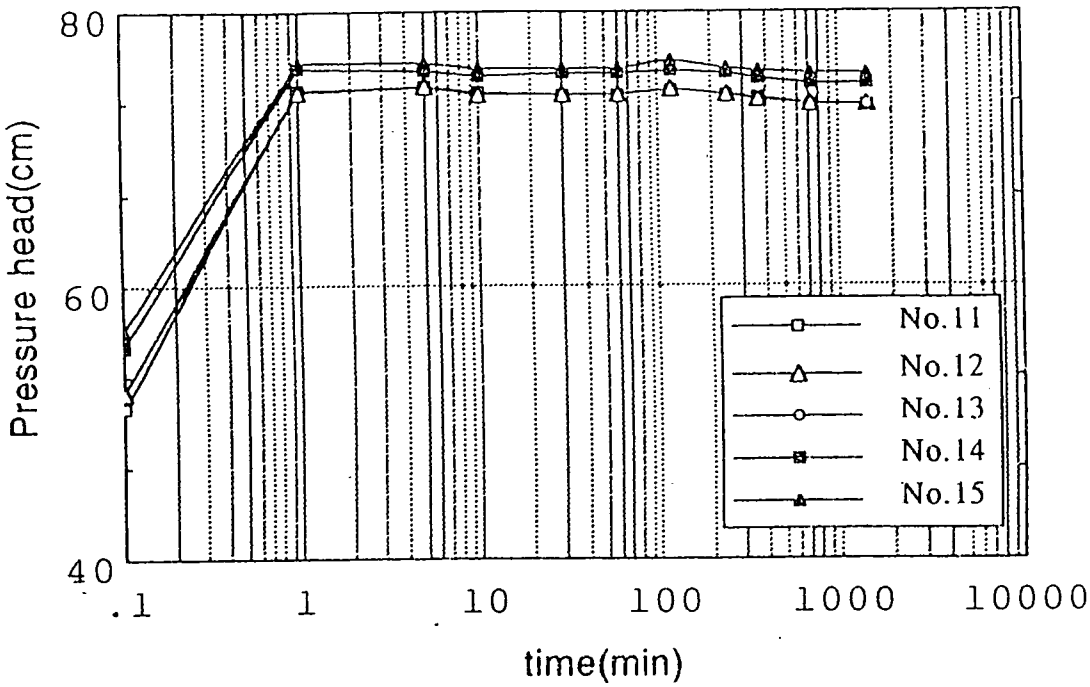
A.Fig.3.24 Change of water surface
An angle of inclination θ=9.6°
I=57560(mm/h)



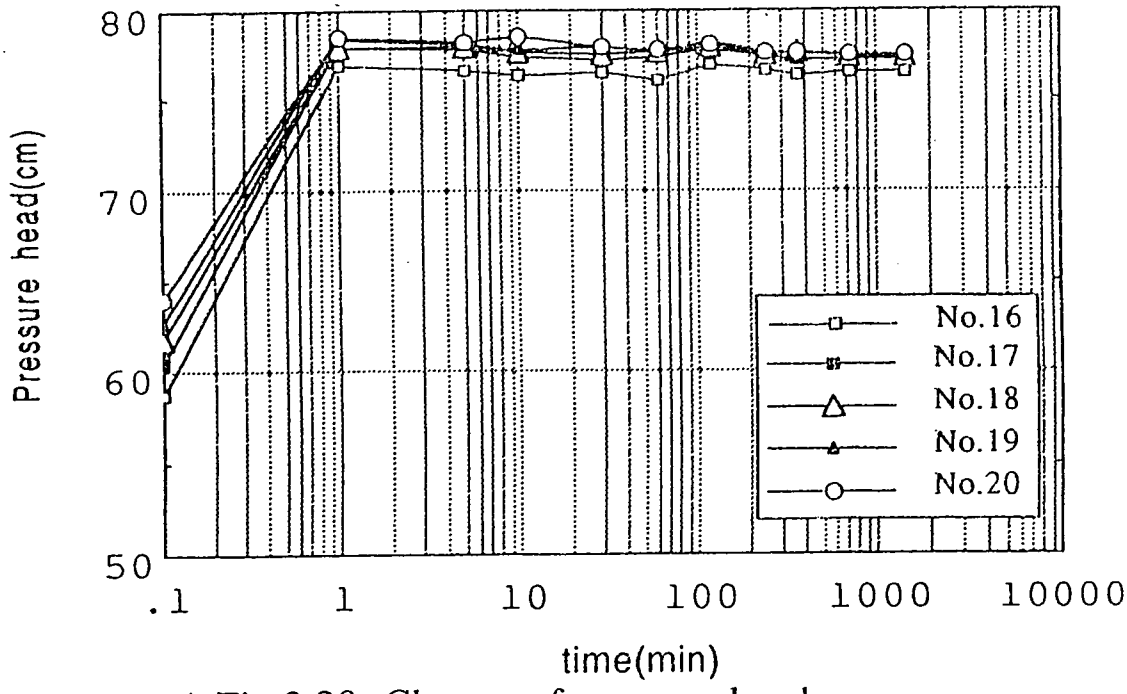
A.Fig.3.25 Change of pressure head
An angle of inclination θ=9.6
I=57650(mm/h)



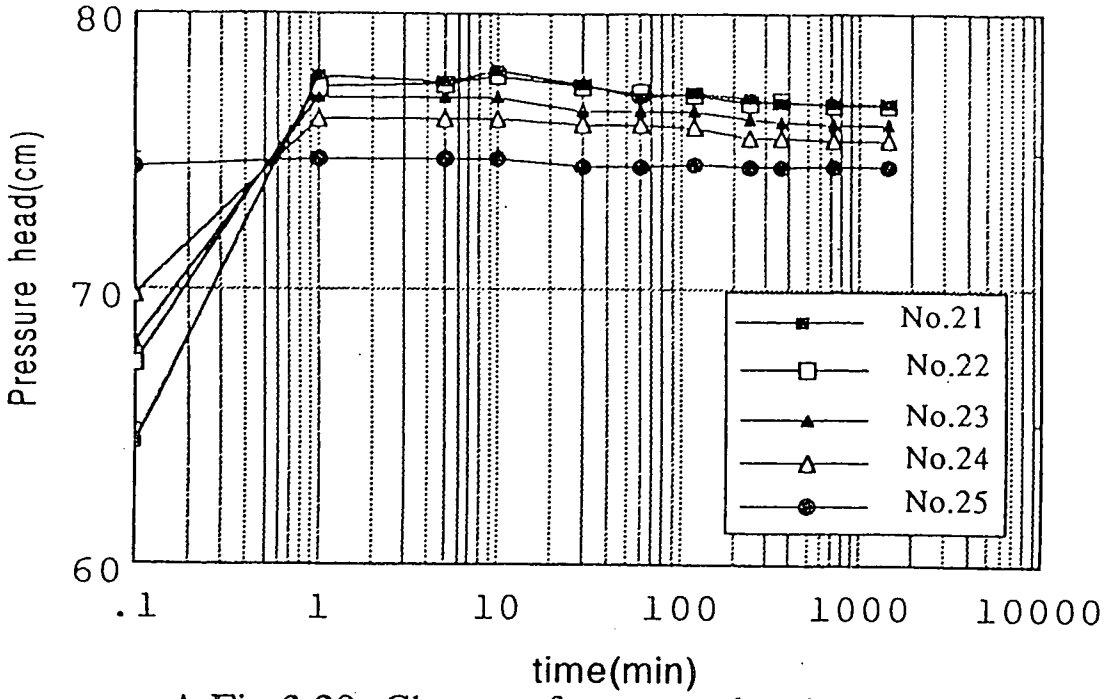
A.Fig.3.26 Change of pressure head
An angle of inclination θ=9.6°
I=57650(mm/h)



A.Fig.3.27 Change of pressure head
An angle of inclination θ=9.6°
I=57650(mm/h)



A.Fig.3.28 Change of pressure head
An angle of inclination θ=9.6°
I=57650(mm/h)



A.Fig.3.29 Change of pressure head
An angle of inclination θ=9.6°
I=57650(mm/h)

A.table 3.2 Result of experiment I = 26750 (mm/h)

observation point	Time										
	0 (min)	1 (min)	5 (min)	10 (min)	30 (min)	60 (min)	120 (min)	240 (min)	360 (min)	720 (min)	1440 (min)
1.0	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5
2.0	20.1	24.5	24.5	27.5	26.7	26.5	26.5	26.2	24.6	24.6	24.6
3.0	20.1	24.8	24.8	28.5	27.0	27.0	27.0	27.2	25.3	25.2	25.2
4.0	24.2	28.2	28.5	33.0	33.0	34.0	33.5	33.5	31.0	29.8	29.8
5.0	26.2	34.2	34.0	37.9	37.0	37.0	37.0	36.5	34.0	33.6	33.6
6.0	28.3	36.9	36.7	40.5	39.5	40.0	40.0	39.6	36.5	36.5	36.5
7.0	29.3	38.4	38.4	42.2	41.5	41.5	41.5	40.8	38.0	38.0	38.0
8.0	32.0	42.0	42.0	45.2	44.7	44.8	45.0	44.3	41.6	41.6	41.6
9.0	33.1	43.8	43.9	46.5	46.2	46.4	46.9	46.4	43.6	44.0	44.0
10.0	33.3	43.9	44.0	46.7	46.3	46.5	47.1	46.7	44.0	44.5	44.5
11.0	33.6	44.5	44.5	47.1	46.6	46.9	47.5	47.0	44.8	45.4	45.4
12.0	34.4	44.7	44.9	47.5	47.0	47.2	47.9	47.4	45.5	46.1	46.1
13.0	34.4	44.9	45.0	47.4	47.0	47.2	48.0	47.6	45.8	46.3	46.3
14.0	35.6	45.6	45.9	47.6	47.4	47.8	48.0	48.5	47.4	47.3	47.3
15.0	35.6	45.9	46.4	47.9	47.6	48.0	48.5	48.8	47.8	48.2	48.2
16.0	36.3	46.1	46.6	47.9	47.6	48.0	48.8	49.0	48.2	48.8	48.8
17.0	37.5	46.5	47.3	48.4	48.2	48.5	49.0	49.2	49.2	49.8	49.8
18.0	37.5	46.4	47.5	48.4	48.8	48.7	49.5	49.5	49.5	50.1	50.1
19.0	38.0	46.5	47.5	48.2	48.4	48.8	49.8	49.6	49.8	50.5	50.5
20.0	38.5	47.0	47.9	47.9	48.5	48.7	49.6	49.7	50.3	51.2	51.2
21.0	38.6	47.2	47.9	47.5	48.0	48.5	49.5	49.8	50.7	51.5	51.5
22.0	39.3	46.4	47.0	46.5	46.5	47.0	48.5	48.5	49.8	50.5	50.5
23.0	39.5	45.4	46.0	45.5	45.5	46.0	47.0	46.6	49.5	47.8	47.8
24.0	40.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.5	46.2	45.4	46.0	46.2	46.2
25.0	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5

A.Table 3.3 Result of experiment I=40750(mm/h)

observation point	Time										
	0 (min)	1 (min)	5 (min)	10 (min)	30 (min)	60 (min)	120 (min)	240 (min)	360 (min)	720 (min)	1440 (min)
1	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5
2	20.0	32.6	31.0	30.5	30.0	29.5	27.6	27.0	29.5	28.4	28.4
3	20.4	33.5	32.0	31.6	31.5	31.5	29.0	28.3	31.2	29.8	29.8
4	24.0	38.5	37.5	37.2	36.8	36.8	34.0	33.0	36.0	34.5	34.5
5	26.4	43.8	41.6	41.6	41.0	40.0	37.6	37.0	40.2	38.8	38.8
6	28.4	47.0	44.5	44.4	44.0	43.1	41.0	41.7	43.2	42.0	42.0
7	29.1	48.5	46.3	46.1	45.6	44.8	42.6	42.0	44.7	43.5	43.5
8	31.6	51.4	49.6	49.8	50.0	49.2	47.4	46.9	49.5	47.6	47.6
9	33.2	52.3	51.6	52.0	52.2	51.7	50.0	49.5	52.0	50.7	50.7
10	33.3	53.0	51.6	52.5	52.6	52.2	50.9	50.0	52.2	50.8	50.8
11	33.8	52.9	51.5	52.2	52.6	52.2	51.0	50.4	52.7	51.6	51.6
12	34.5	53.9	52.3	53.0	53.0	52.9	52.0	51.0	53.2	52.0	52.0
13	34.6	52.9	51.1	52.0	52.2	52.9	52.1	51.4	53.2	52.0	52.0
14	35.6	51.3	52.4	53.5	53.6	53.5	53.2	52.5	53.8	52.9	52.9
15	35.7	51.7	52.6	53.6	53.7	53.6	53.5	52.8	54.2	53.4	53.4
16	36.5	51.2	51.8	53.0	53.1	54.2	53.9	53.4	54.2	53.8	53.8
17	37.5	51.6	52.6	54.0	54.4	54.2	54.5	54.0	54.5	54.4	54.4
18	37.6	51.3	52.2	53.8	54.0	54.0	54.4	53.8	54.4	54.5	54.5
19	37.8	51.8	52.6	54.2	54.2	54.2	54.8	54.0	54.5	54.8	54.8
20	38.5	50.4	51.9	53.9	53.5	53.6	54.5	54.2	54.2	54.6	54.6
21	38.5	50.3	50.9	52.7	53.0	53.1	54.4	54.6	53.3	54.4	54.4
22	39.5	49.8	50.2	51.3	51.6	51.9	53.0	52.8	51.9	53.0	53.0
23	39.6	47.8	48.0	48.8	49.0	49.0	49.7	50.0	48.8	49.5	49.5
24	40.4	46.8	46.9	47.2	47.0	47.3	47.5	47.8	47.2	47.2	47.2
25	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5

A.Table 3.4 Result of experiment I=57560(mm/h)

observation point	Time										
	0 (min)	1 (min)	5 (min)	10 (min)	30 (min)	60 (min)	120 (min)	240 (min)	360 (min)	720 (min)	1440 (min)
1	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5
2	21.0	41.5	41.7	41.5	41.6	41.4	38.3	38.6	38.4	36.9	36.9
3	21.0	43.0	43.2	43.1	43.3	43.2	40.4	40.3	40.0	39.4	39.4
4	24.5	50.5	51.3	51.3	51.8	52.1	49.0	49.0	48.6	48.4	48.4
5	26.8	51.6	57.7	57.7	57.4	57.4	55.0	55.3	54.5	53.8	53.8
6	29.0	56.7	61.4	61.6	62.3	63.0	59.6	60.0	59.0	58.4	58.4
7	29.7	61.4	62.5	62.5	63.2	63.6	61.2	61.2	60.5	60.3	60.3
8	31.7	62.5	69.0	69.4	70.3	71.6	69.4	69.5	68.5	67.2	67.2
9	32.8	68.8	70.8	71.2	72.2	73.0	71.0	71.2	70.7	69.0	69.0
10	33.2	70.8	71.2	71.6	72.6	73.7	71.5	71.6	71.2	69.7	69.7
11	33.8	71.4	71.8	72.4	73.4	74.2	71.9	72.4	71.7	70.2	70.2
12	34.2	71.9	71.8	72.5	73.6	74.2	72.0	72.2	71.9	70.6	70.6
13	34.0	72.0	71.9	72.4	73.7	74.3	72.0	72.0	71.9	70.7	70.7
14	35.3	72.0	71.9	72.5	73.6	74.4	72.5	72.5	72.2	70.8	70.8
15	35.5	72.2	72.0	72.6	74.0	74.7	72.9	72.8	72.5	71.0	71.0
16	36.4	72.2	72.5	72.7	74.0	74.7	73.2	73.2	72.9	71.2	71.2
17	37.5	71.6	72.2	72.6	73.6	74.0	73.0	72.9	72.7	72.0	72.0
18	37.6	71.0	72.0	71.3	73.6	73.0	72.8	72.0	71.9	71.4	71.4
19	38.0	70.9	71.3	72.0	73.6	73.6	72.5	72.5	71.6	71.2	71.2
20	38.7	69.8	70.0	71.0	71.0	72.2	71.0	71.2	71.0	70.0	70.0
21	38.5	67.7	67.9	68.5	68.8	70.0	69.0	69.0	68.8	68.5	68.5
22	39.5	64.4	64.5	65.5	65.7	66.4	65.9	65.8	65.8	65.0	65.0
23	39.7	60.2	60.0	60.4	60.7	61.0	60.8	60.8	60.6	60.0	60.0
24	40.2	56.0	56.0	56.0	56.6	55.9	56.0	56.0	55.6	55.6	55.6
25	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5

A.Table 3.5 Result of expriment I=56750(mm/h) , An angle of inclination $\theta = 9.6^{\circ}$

observation point	Time										
	0 (min)	1 (min)	5 (min)	10 (min)	30 (min)	60 (min)	120 (min)	240 (min)	360 (min)	720 (min)	1440 (min)
1	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
2	25.0	39.0	39.2	39.2	39.3	39.6	40.0	39.8	40.0	40.0	40.0
3	26.0	41.0	41.3	41.3	41.3	41.6	42.0	41.6	42.0	41.9	41.9
4	33.2	48.9	49.4	49.3	49.2	49.6	50.0	50.0	50.0	49.8	49.8
5	37.3	55.0	55.6	55.0	55.3	55.7	56.0	55.8	56.0	55.4	55.4
6	40.7	59.5	60.0	59.0	59.5	60.0	60.5	60.0	60.4	60.0	60.0
7	42.0	62.6	62.6	62.0	62.0	62.6	63.0	62.6	62.8	62.0	62.0
8	45.3	69.6	69.8	69.5	69.3	69.0	69.8	69.5	69.5	68.8	68.8
9	49.4	72.6	72.9	72.8	72.5	72.5	72.8	72.6	72.5	71.7	71.7
10	50.0	73.4	73.6	73.4	73.0	73.0	73.4	73.0	72.8	72.2	72.2
11	51.0	74.3	74.6	74.2	74.0	74.0	74.3	73.9	73.8	73.2	73.2
12	52.2	74.2	74.5	74.0	74.0	74.0	74.3	73.9	73.6	73.2	73.2
14	55.6	76.0	75.8	75.4	75.5	75.5	75.8	75.5	75.1	74.8	74.8
15	56.7	76.4	76.3	76.0	76.0	76.0	76.5	76.0	75.8	75.6	75.6
16	58.8	77.0	76.6	76.3	76.5	76.0	77.0	76.7	76.4	76.5	76.5
17	60.5	78.0	77.8	77.4	77.3	77.4	77.8	77.4	77.2	77.2	77.2
18	61.8	78.0	78.0	77.6	77.5	77.6	78.0	77.5	77.6	77.4	77.4
19	62.7	78.4	78.1	77.8	78.0	77.6	78.2	77.7	77.5	77.5	77.5
20	64.0	78.5	78.2	78.6	78.0	77.8	78.1	77.7	77.6	77.5	77.5
21	64.4	77.8	77.6	78.0	7.5	77.0	77.2	77.0	76.8	76.8	76.8
22	67.3	77.4	77.5	77.8	77.4	77.2	77.1	76.8	76.9	76.7	76.7
23	68.1	77.0	77.0	77.0	76.5	76.5	76.5	76.2	76.1	76.0	76.0
24	69.8	76.2	76.2	76.2	76.0	76.0	75.9	75.5	75.5	75.4	75.4
25	74.5	74.8	74.8	74.8	74.5	74.5	74.6	74.5	74.5	74.5	74.5

A.Table 4.1 Measurement result of permeability test for brock No.1

Head loss	4.90	cm
Length	40.30	cm
Cross section	59.08	cm

Brock No.1 (Direction of Z axis)			
Measurement No	1	2	3
Time (sec)	10	10	10
Q (cm3)	608.0	605.0	606.0
Permeability(cm/sec)	16.87	16.79	16.82

Average of saturated permeability (cm/sec)	16.82

A.Table 4.2 Measurement result of permeability test for brock No.1

Head loss	5.60	cm
Length	55.70	cm
Cross section	43.95	cm

Brock No.1 (Direction of X axis)			
Measurement No	1	2	3
Time (sec)	10	10	10
Q (cm3)	190.0	191.0	192.0
Permeability(cm/sec)	8.56	8.60	8.65

Average of saturated permeability (cm/sec)	8.60

A.Table 4.3 Measurement result of permeability test for brock No.2

Head loss	5.00	cm
Length	41.30	cm
Cross section	59.00	cm

Brock No.2 (Direction of Z axis)			
Measurement No	1	2	3
Time (sec)	10	10	10
Q (cm3)	490.0	495.0	490.0
Permeability(cm/sec)	13.73	13.87	13.73

Average of saturated permeability (cm/sec)	13.77

A.Table 4.4 Measurement result of permeability test for brock No.2

Head loss	5.60	cm
Length	56.00	cm
Cross section	44.50	cm

Brock No.2 (Direction of X axis)			
Measurement No	1	2	3
Time (sec)	15	15	15
Q (cm3)	180.0	182.0	181.0
Permeability(cm/sec)	5.39	5.45	5.42

Average of saturated permeability (cm/sec)	5.42

A.Table 4.5 Measurement result of permeability test for brock No.3

Head loss	4.90 cm
Length	40.80 cm
Cross section	58.80 cm

Brock No.3 (Direction of Z axis)			
Measurement No	1	2	3
Time (sec)	10	10	10
Q (cm3)	891.0	895.0	909.0
Permeability(cm/sec)	25.25	25.37	25.76

Average of saturated permeability (cm/sec)	25.46

A.Table 4.6 Measurement result of permeability test for brock No.3

Head loss	5.50 cm
Length	55.70 cm
Cross section	44.00 cm

Brock No.3 (Direction of X axis)			
Measurement No	1	2	3
Time (sec)	10	10	10
Q (cm3)	232.0	234.0	232.0
Permeability(cm/sec)	10.68	10.78	10.68

Average of saturated permeability (cm/sec)	10.71

ATable 4.7 Measurement result of permeability test for brock No.4

Head loss	5.00 cm
Length	40.70 cm
Cross section	58.80 cm

Brock No.4 (Direction of Z axis)			
Measurement No	1	2	3
Time (sec)	10	10	10
Q (cm3)	528.0	530.0	525.0
Permeability(cm/sec)	14.6	14.66	14.52

Average of saturated permeability (cm/sec)	14.59

A.Table 4.8 Measurement result of permeability test for brock No.4

Head loss	5.60 cm
Length	56.00 cm
Cross section	44.15 cm

Brock No.4 (Direction of X axis)			
Measurement No	1	2	3
Time (sec)	10	10	10
Q (cm3)	180.0	172.0	176.0
Permeability(cm/sec)	8.15	7.79	7.97

Average of saturated permeability (cm/sec)	7.97

A.Table 4.9 Measurement result of permeability test for brock No.5

Head loss	4.90 cm
Length	40.50 cm
Cross section	58.95 cm

Brock No.5 (Direction of Z axis)			
Measurement No	1	2	3
Time (sec)	10	10	10
Q (cm3)	601.0	604.0	595.0
Permeability(cm/sec)	16.85	16.93	16.68

Average of saturated permeability (cm/sec)	16.82

A.Table 4.10 Measurement result of permeability test for brock No.5

Head loss	5.65 cm
Length	56.10 cm
Cross section	44.05 cm

Brock No.5 (Direction of X axis)			
Measurement No	1	2	3
Time (sec)	10	10	10
Q (cm3)	360.0	362.0	362.0
Permeability(cm/sec)	16.67	16.78	16.78

Average of saturated permeability (cm/sec)	16.74

A.Table 4.11 Measurement result of permeability test for brock No.6

Head loss	5.10 cm
Length	40.90 cm
Cross section	59.05 cm

Brock No.6 (Direction of Z axis)			
Measurement No	1	2	3
Time (sec)	10	10	10
Q (cm3)	538.0	532.0	530.0
Permeability(cm/sec)	14.58	14.41	14.36

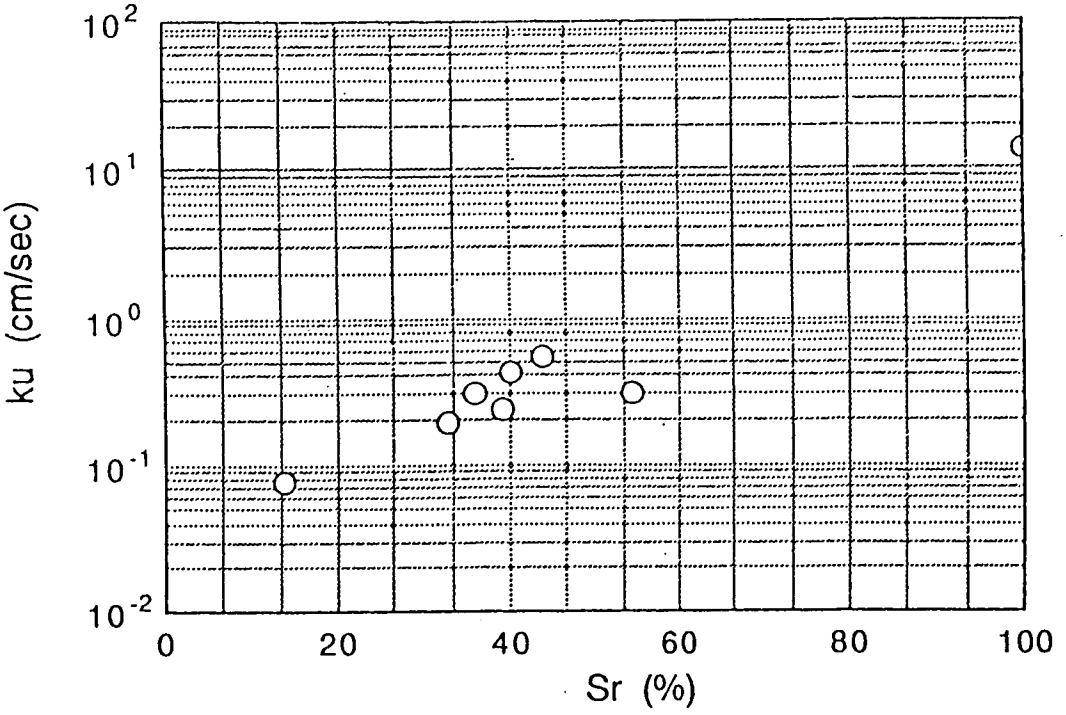
Average of saturated permeability (cm/sec)	14.45

A.Table 4.12 Measurement result of permeability test for brock No.6

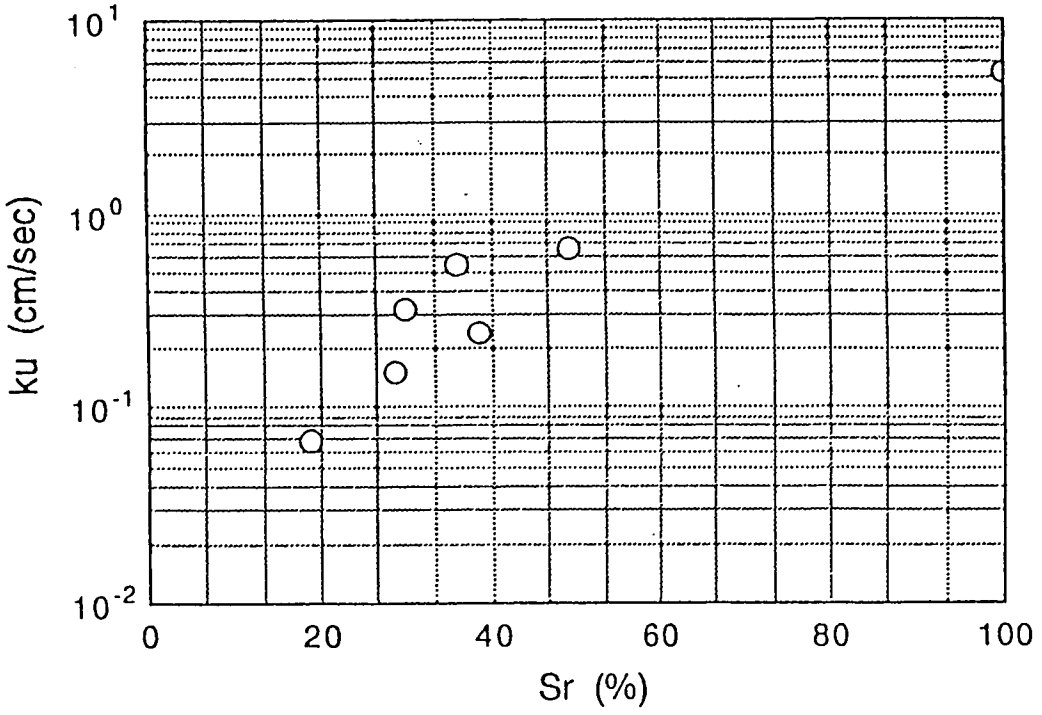
Head loss	5.50 cm
Length	56.00 cm
Cross section	44.15 cm

Brock No.6 (Direction of X axis)			
Measurement No	1	2	3
Time (sec)	10	10	10
Q (cm3)	162.0	163.0	162.0
Permeability(cm/sec)	7.49	7.53	7.49

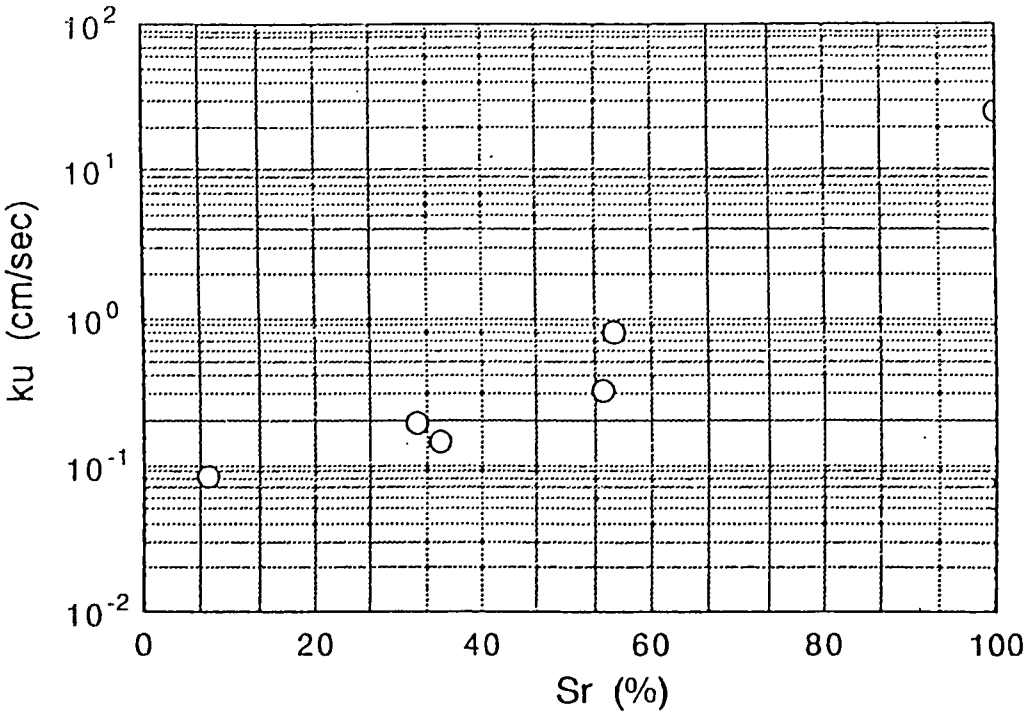
Average of saturated permeability (cm/sec)	7.50



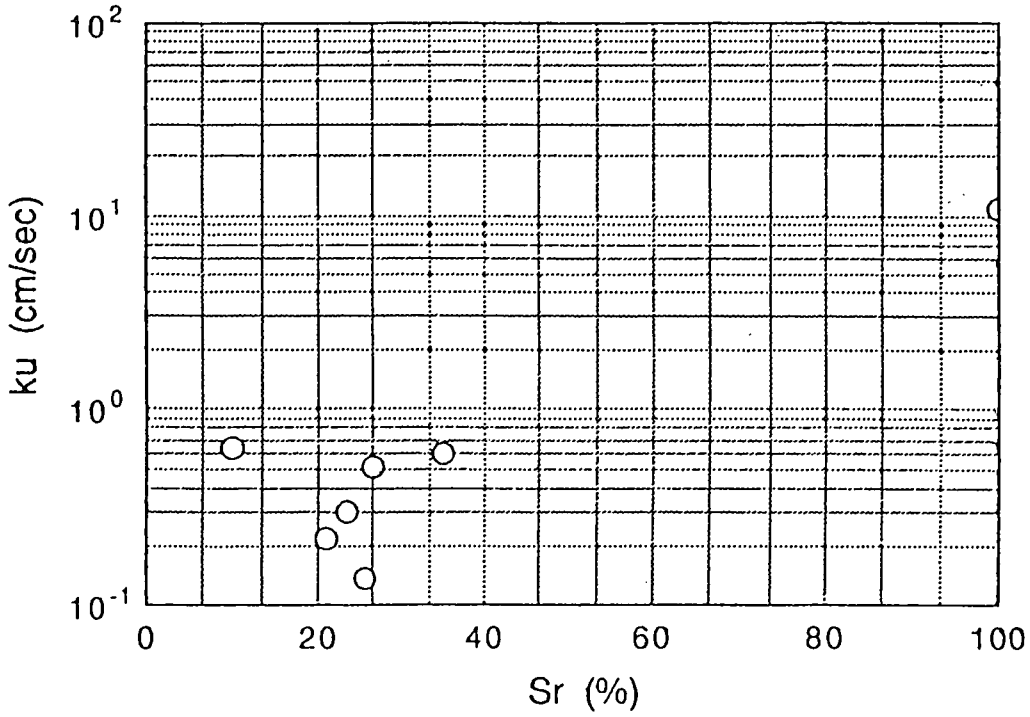
A.Fig.5.1 Relation between ku-Sr (Brock.No.2-Z)



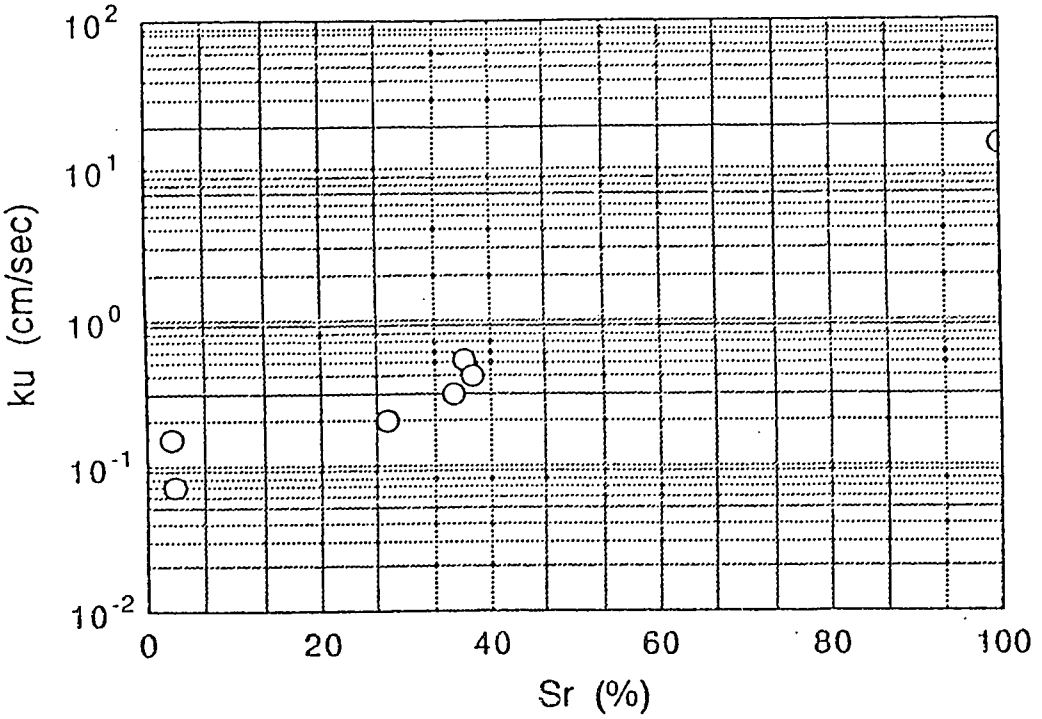
A.Fig.5.2 Relation between ku-Sr (Brock.No.2-X)



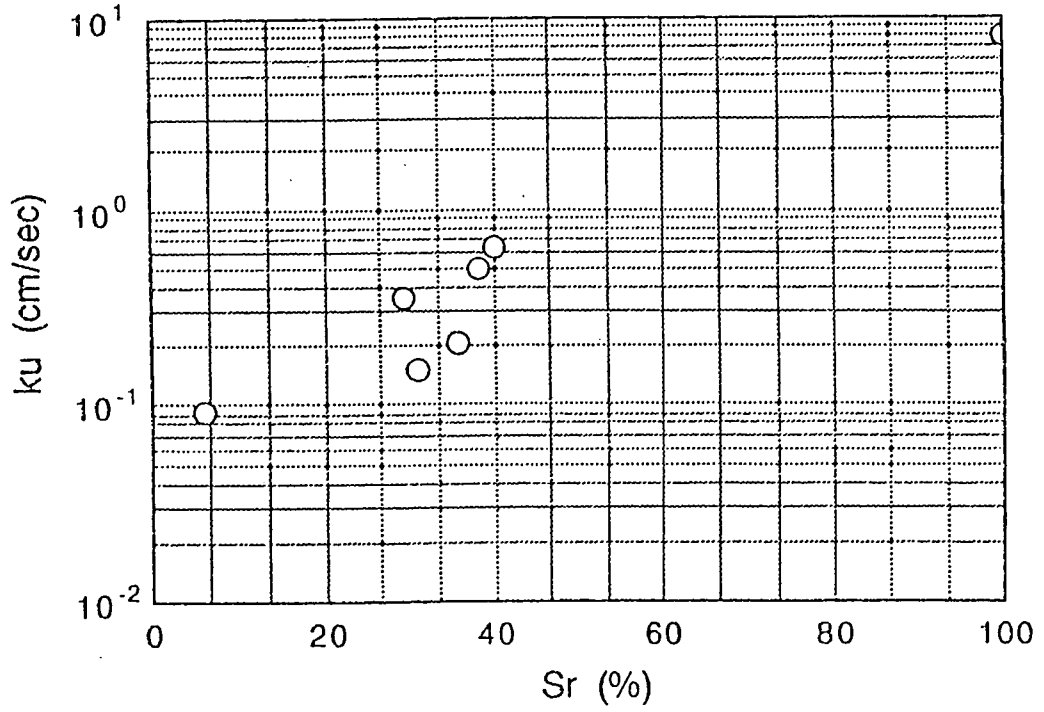
A.Fig.5.3 Relation between ku-Sr (Brock.No.3-Z)



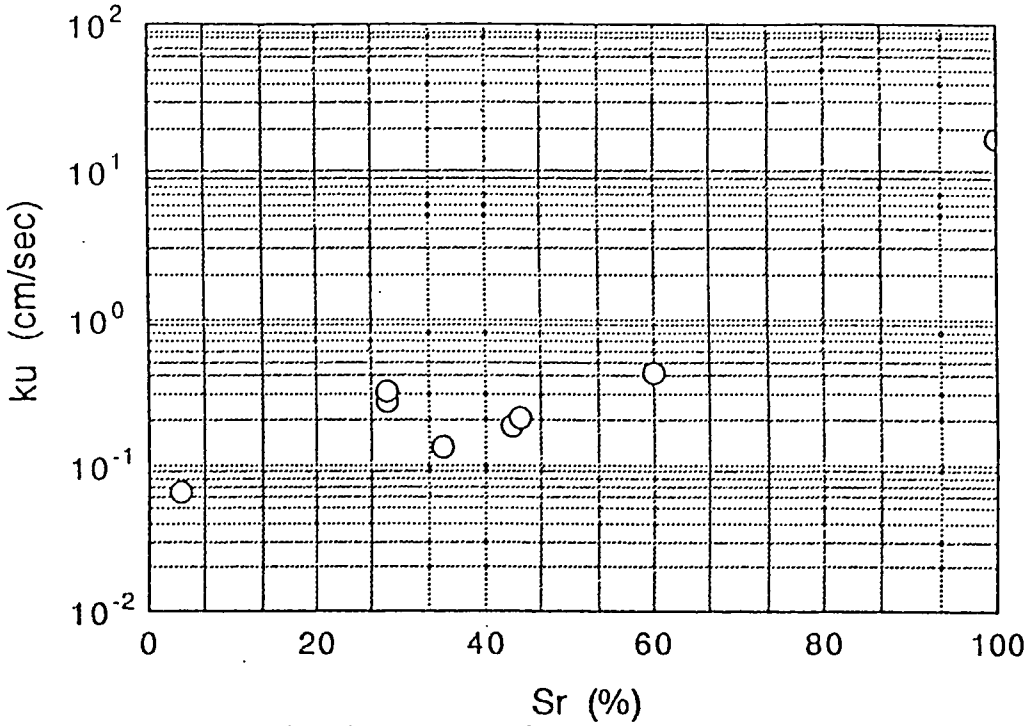
A.Fig.5.4 Relation between ku-Sr (Brock.No.3-X)



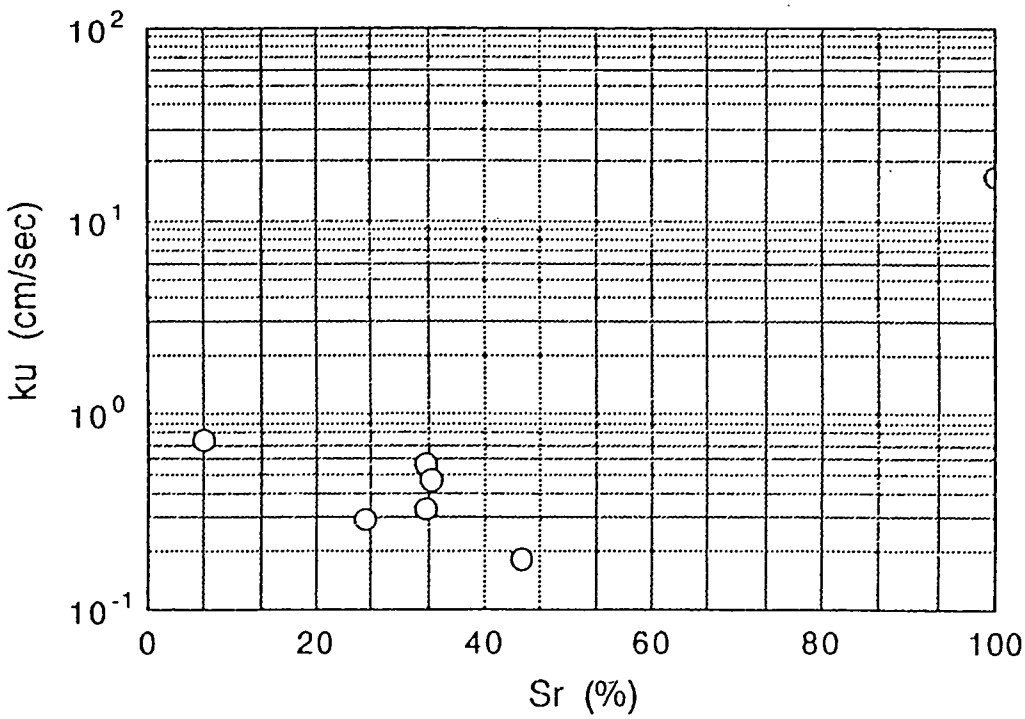
A.Fig.5.5 Relation between ku-Sr (Brock.No.4-Z)



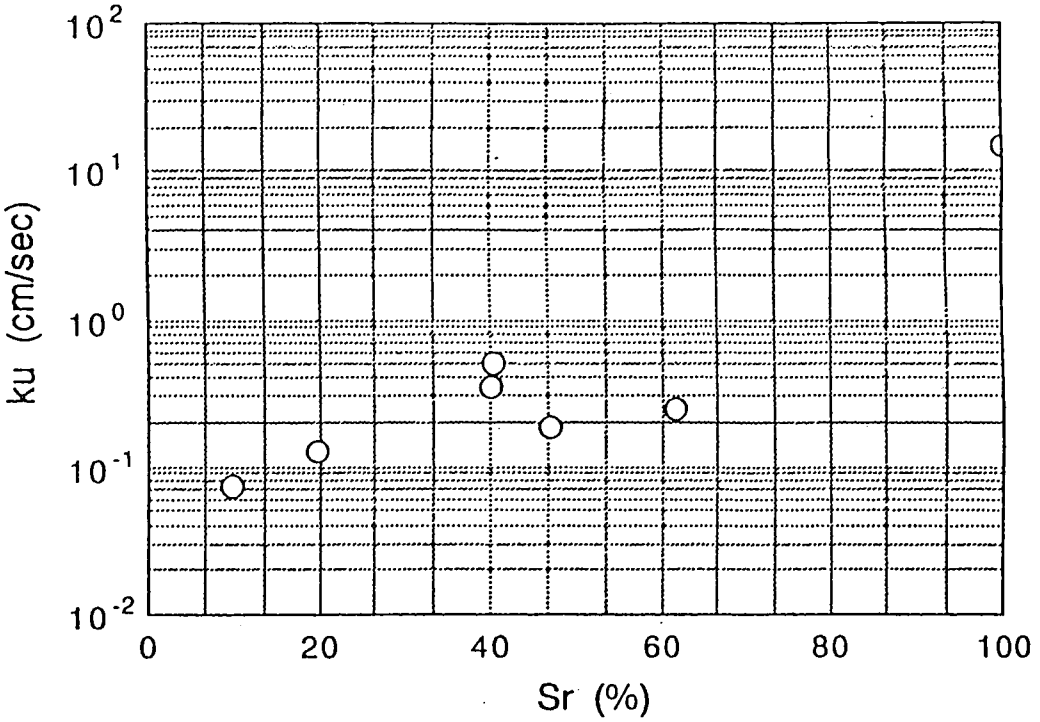
A.Fig.5.6 Relation between ku-Sr (Brock.No.4-X)



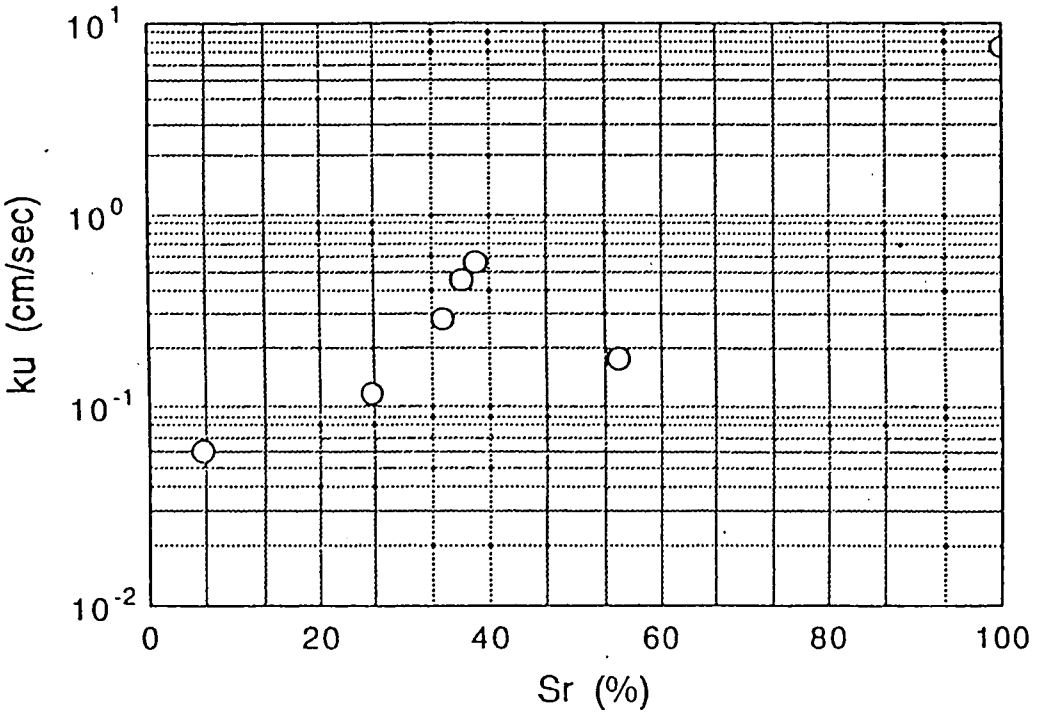
A.Fig.5.7 Relation between ku-Sr (Z)
(Brock.No.5-Z)



A.Fig.5.8 Relation between ku-Sr
(Brock.No.5-X)



A.Fig.5.9 Relation between ku-Sr (Brock.No.6-Z)



A.Fig.5.10 Relation between ku-Sr (Brock.No.6)

A.Table 5.1 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.1

Brock No.1-X , ks = 8.60(cm/s)

Qout(cm3/s)	ku(cm/s)	Sr(%)	kr
7.30	3.32E-01	0.223	3.86E-02
10.83	4.94E-01	0.352	5.74E-02
12.60	5.73E-01	0.333	6.66E-02
4.32	1.97E-01	0.193	2.29E-02
3.23	1.47E-01	0.225	1.71E-02
5.82	2.65E-01	0.456	3.08E-02
1.27	5.78E-02	0.098	6.72E-03

A.Table 5.2 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.1

Brock No.1-Z , ks = 16.82(cm/s)

Qout(cm3/s)	ku(cm/s)	Sr(%)	kr
6.43	2.18E-01	0.206	1.30E-02
8.24	2.79E-01	0.326	1.66E-02
9.49	3.21E-01	0.302	1.91E-02
12.63	4.29E-01	0.416	2.55E-02
6.15	2.08E-01	0.060	1.24E-02
10.06	3.41E-01	0.310	1.87E-02
12.72	4.31E-01	0.260	2.56E-02
21.17	7.17E-01	0.320	4.26E-02
2.20	7.45E-01	0.030	4.43E-02

A.Table 5.3 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.2

Brock No.2-X , ks = 5.42(cm/s)

Qout(cm3/s)	ku(cm/s)	Sr(%)	kr
7.18	3.26E-01	0.301	6.01E-02
11.92	5.41E-01	0.360	9.98E-02
14.54	6.60E-01	0.492	1.22E-01
3.33	1.51E-01	0.288	2.78E-02
5.27	2.39E-01	0.384	4.41E-02
1.46	6.63E-02	0.188	1.22E-03

A.Table 5.4 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.2

Brock No.2-Z , ks = 13.77(cm/s)

Qout(cm3/s)	ku(cm/s)	Sr(%)	kr
9.17	3.11E-01	0.544	2.26E-02
16.13	5.47E-01	0.436	3.97E-02
12.78	4.33E-01	0.400	3.14E-02
15.92	5.40E-01	0.439	3.92E-02
6.96	2.36E-01	0.390	1.71E-02
8.99	3.05E-01	0.359	2.21E-02
5.73	1.94E-01	0.329	1.41E-02
2.26	7.66E-02	0.137	5.56E-02

A.Table 5.5 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.3

Brock No.3-X , ks = 10.71(cm/s)

Qout(cm3/s)	ku(cm/s)	Sr(%)	kr
6.51	2.96E-01	0.233	2.76E-02
11.05	5.02E-01	0.266	4.69E-02
13.19	6.00E-01	0.349	5.60E-02
3.01	1.37E-01	0.256	1.28E-02
4.76	2.16E-01	0.208	2.02E-02
1.41	6.41E-02	0.101	5.99E-03

A.Table 5.6 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.3

Brock No.3-Z , ks = 25.46(cm/s)

Qout(cm3/s)	ku(cm/s)	Sr(%)	kr
9.53	3.24E-01	0.543	1.27E-02
23.14	7.87E-01	0.556	3.09E-02
4.22	1.44E-01	0.349	5.66E-03
5.70	1.94E-01	0.321	7.62E-03
2.42	8.23E-02	0.074	3.23E-03

A.Table 5.7 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.4

Brock No.4-X , ks = 7.97(cm/s)

Qout(cm3/s)	ku(cm/s)	Sr(%)	kr
11.12	5.04E-01	0.381	6.32E-02
13.96	6.32E-01	0.400	7.93E-02
7.75	3.51E-01	0.293	4.40E-02
4.54	2.06E-01	0.356	2.58E-02
3.35	1.52E-01	0.310	1.91E-02
2.01	9.10E-02	0.060	1.14E-02

A.Table 5.8 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.4

Brock No.4-Z , ks = 14.59(cm/s)

Qout(cm3/s)	ku(cm/s)	Sr(%)	kr
8.88	3.02E-01	0.355	2.07E-02
11.97	4.13E-01	0.378	2.83E-02
14.98	5.17E-01	0.369	3.54E-02
4.28	1.48E-01	0.028	1.01E-02
5.77	1.99E-01	0.279	1.36E-02
2.04	7.03E-02	0.031	4.82E-03

A.Table 5.9 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.5

Brock No.5-X , ks = 16.74(cm/s)

Qout(cm3/s)	ku(cm/s)	Sr(%)	kr
7.25	3.29E-01	0.332	1.97E-02
10.33	4.69E-01	0.336	2.80E-02
12.15	5.52E-01	0.330	3.30E-02
3.94	1.79E-01	0.445	1.07E-02
6.44	2.92E-01	0.258	1.74E-02
1.61	7.31E-02	0.067	4.37E-03

A.Table 5.10 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.5

Brock No.5-Z , ks = 16.82(cm/s)

Qout(cm3/s)	ku(cm/s)	Sr(%)	kr
7.89	2.68E-01	0.283	1.59E-02
9.54	3.24E-01	0.284	1.93E-02
12.40	4.21E-01	0.600	2.50E-02
3.84	1.30E-01	0.351	7.73E-03
5.36	1.82E-01	0.431	1.08E-02
6.17	2.09E-01	0.441	1.24E-02
1.90	6.45E-02	0.039	3.83E-03

A.Table 5.11 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.6

Brock No.6-X , ks = 7.50(cm/s)

Qout(cm3/s)	ku(cm/s)	Sr(%)	kr
6.32	2.86E-01	0.348	3.81E-02
10.08	4.56E-01	0.368	6.08E-02
12.60	5.71E-01	0.385	7.61E-02
2.62	1.19E-01	0.264	1.59E-02
3.95	1.79E-01	0.549	2.39E-02
1.32	5.98E-02	0.062	7.97E-03

A.Table 5.12 Result of unsaturated permeability test for Brock.No.6

Brock No.6-Z , ks = 14.45(cm/s)

Qout(cm3/s)	ku(cm/s)	Sr(%)	kr
10.25	3.47E-01	0.399	2.40E-02
14.76	5.00E-01	0.402	3.46E-02
3.80	1.29E-01	0.198	8.93E-02
5.42	1.84E-01	0.468	1.27E-02
7.35	2.49E-01	0.616	1.72E-02
2.18	7.38E-02	0.096	5.08E-03

5．深層水理の調査手法及びモデル化に関する研究

5．1　はじめに

３次元空間の水理特性分布を、複数坑井での非定常型ウエルテスト結果により描き出すことを目的とした”ウエルテストトモグラフィー”についての平成４年度の研究結果を報告する。

本年度は、実フィールドスケール（孔間１０ｍ程度で２次元、或いは４孔に囲まれた３次元領域）での逆解析問題のケーススタディをいくつか行った。現在までに、ワークステーションレベル（20MIPS程度）で未知浸透率数1000個を越える問題を２～３日程度のCPU時間で処理することが可能となっている。

次節以下、総括的に逆解析プロセスを記述すると共に、各種ケーススタディに関し説明する。

5．2　ウエルテストトモグラフィー技術のまとめ

ここでは、平成２、３年度において報告している数値解析上の諸点をまとめて示す。

（１）順解析法

地盤中の非定常的な地下流体流動は支配方程式(1)によって表される。

$$\nabla \cdot \frac{K}{\mu B} \nabla (P - \gamma D) - q = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\phi}{B}\right) \quad \cdots\cdots (5.1)$$

ここで、μ：流体の粘性係数、K:浸透率、B:流体の容積係数、P:圧力、γ：流体のカラム密度、D:深度、q:注入・生産量、t:時間、ϕ:孔隙率である。上式は、微圧縮性流体（水）、圧縮性流体の流れ、即ち、自由地下水面より上の空気パルス（ガスパルス）の流れ、も包含しており、差分解法によって３次元的に流体圧力分布を求めることが出来る。地下水面付近の水、空気混相流の影響はとりあえず

考えない。

（２）逆解析

逆解析では、孔隙率φを既知とし、３次元的な浸透率分布Kを未知量とする。逆解析法としては非線形最小２乗法を適用し、(5.1)式を拘束条件として(5.2)式の目的関数Jを最小にする浸透率分布Kを(5.3)式のように逐次修正することによ求める。

$$J=\int_{to}^{tf}\sum_{i=1}^{nw} W_{ob,i}\ \{P(x_i,t)-Pob(x_i,t)\}^2\,dt \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5.2$$

$$K_{k+1}=K_k+\Delta K_k \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5.3$$

ここで、Wob:観測値重み、P:計算圧力、Pob:観測圧力 、nw:観測孔数、Kk:反復段階での浸透率分布ベクトル、△Kk:浸透率の修正ベクトル、である。

一般のトモグラフィーと違う点は、目的関数 J に時間軸方向の和が含まれるとである。非線形回帰の方法としては準ニュートン法を使い、ヘッセ行列の逆行列（Hk）を直接に計算せず、その近似行列を目的関数の値Jと勾配dJの計算値か求める。Hkの逐次修正法としてBroyden のone-parameter 公式（(5.5)）を用いθは0.5とする。

$$\Delta K_k=\alpha_k S_k$$

$$S_k=H_k dJ_k \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5.4$$

$$H_{k+1}=H_k+\frac{\Delta K_k \Delta K_k^T}{\Delta K_k^T\ y_k}-\frac{H_k y_k y_k^T\ H_k}{y_k^T\ H_k y_k}+\theta \nu_k \nu_k^T$$

$$y_k=dJ_{k+1}-dJ_k$$

$$\nu_k=(y_k^T\ H_k y_k)^{1/2}\left(\Delta K_k/\Delta K_k^T y_k-H_k y_k/y_k^T\ H_k y_k\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5.5$$

$$\beta=\frac{\Delta K_k^T\ H_k^{-1}\ \Delta K_k}{\Delta K_k^T\ y_k} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5.6$$

:こで、 αk:直線探索の係数、Sk:修正ベクトルの方向ベクトル、dJk:目的関数の J配、である。(5.6)式で表されるβkはスケーリングファクターである。

（３）目的関数の勾配計算

目的関数の勾配dJは最適制御理論（optimal control theory）を用いることに :り一回の順解析計算で算出可能になる。最適制御理論では、支配方程式(5.1)に :るPの計算に加え、新たに導入した乗数ベクトルQの方程式(5.7)を終端から逆時]に解く。[6),7),8),9)]

$$\partial P/\partial t=f\{t,P(t),K(t)\},\quad P(t_o)=P_o \qquad \cdots\cdots(5.1')$$

$$J=\int_{to}^{tf} g\{t,P(t),K(t)\}dt \qquad \cdots\cdots(5.2')$$

$$\partial Q/\partial t=-f_p\cdot Q(t)+g_p,\quad Q(t_f)=0 \qquad \cdots\cdots(5.7)$$

.式で、t_0:初期時刻、t_f:終端時刻、Q:乗数ベクトル、f_p:$\partial f/\partial P$、g_p:$\partial g/\partial P$で ,る。さらに、K、P、QからdJは(5.8)式に従って求められる。

$$dJ=-\int_{to}^{tf} f_{Kk}\cdot Q dt,\quad f_{Kk}=\partial f/\partial K_k \qquad \cdots\cdots(5.8)$$

４）坑井境界の取扱い

坑井境界の取扱いは次のように行う。流体の圧入または生産が行われている孔 パルステストの場合はパルス発信点）を含む格子において、計算による格子圧 値P_oから坑底圧力値P_wを計算する式（Peaceman[6]）は(5.9)、(5.10)式の様に かれる。

$$P_w=P_o+\frac{qB\mu}{2\pi\Delta z\,(k_x k_y)^{1/2}h}\,ln\left(\frac{r_w}{r_o}\right) \qquad \cdots\cdots(5.9)$$

ただし、q：流量、μ：粘性係数、B：容積係数、r_w：坑井半径、Δz：層厚、Kx, Ky：x、y方向の格子浸透率、である。また、r_oは坑井を含む格子の有半径と呼ばれる量で、Peacemanによると格子の各辺の長さΔx、Δy、およびK_x、K_yを用いて次のように求められる。

$$ro=0.28\times\frac{\{(Ky/Kx)^{1/2}\Delta x^2+(Kx/Ky)^{1/2}\Delta y^2\}^{1/2}}{(Ky/Kx)^{1/4}+(Kx/Ky)^{1/4}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5.1$$

逆解析では特に、格子間浸透率を未知パラメータとして用い、目的関数の微計算を最適制御理論を応用した方法で求めている。従って、上記のPeaceman式逆解析プログラムに組み込むためには、P_wをP_oや格子間浸透率（$K_{i+1/2,j}$等で微分した値を求める必要があり、K_x、K_yを格子間浸透率で表すことが要求されるので、本解析では、K_xは、$K_{i+1/2,j}$と$K_{i-1/2,j}$の調和平均で近似できるものとし、K_yも同様とする。すなわち、

$$Kx=\frac{2}{(1/K_{i-1/2})+(1/K_{i+1/2})} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5.1$$

$$Ky=\frac{2}{(1/K_{j-1/2})+(1/K_{j+1/2})}$$

（５）　圧力データの正規化

実際のパルステストのような複数坑井を用いた干渉試験では、圧力伝播が３元的に拡散し、受信孔における圧力値は発信孔（流体注入井）における圧力値比べて大きく減衰する。重みW_nの与え方として坑井位置や圧力値に応じた方法いろいろと考えられるが、ここでは次式のように、発・受信圧力の各孔における圧力値の最高値を用いて重みW_nを決める。

$$Wn=\frac{1}{(Pn,max-Pn,st)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5.1$$

ここだし、$P_{n,ob}$：圧力データ、$P_{n,max}$：孔nにおける圧力の最大値、$P_{n,st}$：孔nの初期圧力値とする。

（６）　その他

実フィールドにおける様々な状況に対応するため、入力、出力に様々な工夫が必要であり、シミュレータパーフォーマンスの改良と合わせ、

・坑井毎、パルス毎の圧力データの入力形式

・圧入量経時データの入力形式

・出力形式とインタラクティブグラフィックス処理

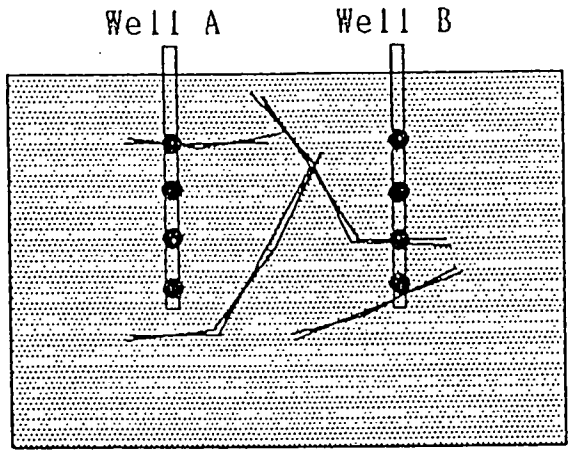
等の検討、作成を行った。

５．３　亀裂ネットワーク問題の逆解析[10]

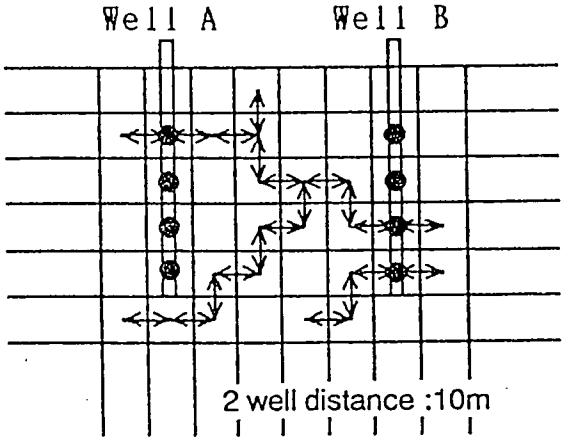
亀裂性岩盤のモデルとして、図-5-1(a)のような縦断面２次元モデルを想定した。亀裂は２本の坑井の一部で確認されているが坑井には現れないものも設定した。このようなモデルを二次元の格子に分割した図が図-5-1(b)である。亀裂のつながりは矢印付き直線で示した。亀裂の発達している部分の格子間浸透率を 500md（矢印部分）、その他の格子間浸透率を10mdとした。境界部分（斜線部分）の格子間浸透率は既知（10md）と仮定する。図-5-1(c)はつながりの状態を濃淡表示したもので、濃いところほど浸透率が大きい（図-5-1(f)参照）。

このフィールドで、２本の坑井中に４段に圧力受信器を置き、パルス発信点をA孔の①～④、B孔の⑤～⑧と移動し、その際の全ての受信点の圧力を記録するような方式でパルステストを実施するものとする。パルス形態は、図-5-1(d)の様な２サイクルパルスとした。このパルステストのデータは数値シミュレーションから作成する。

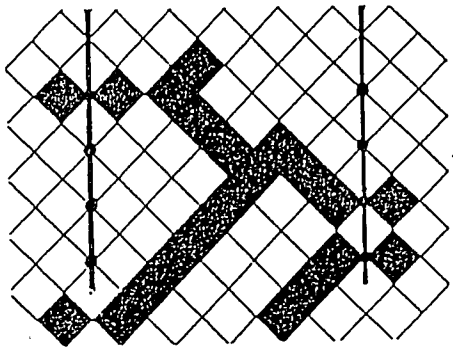
①～⑧で得られる圧力データを使い、初期推定浸透率を全領域10mdとして逆解析した結果を図-5-1(e)に示す。この結果より、亀裂性岩盤のような不均質性岩盤中の浸透率のコントラストがかなり明瞭に浮きでており、かつ、坑井では確認できないような断層の存在も認められる。坑井外の端部の広がりもおおよそ正解に



(a) Imagenary 2-D site and fractures

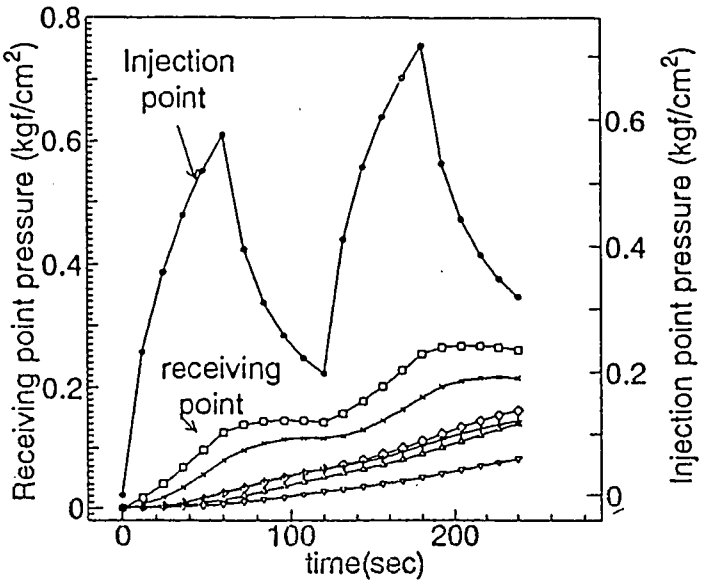


(b) Discretized 2-D model with fractures

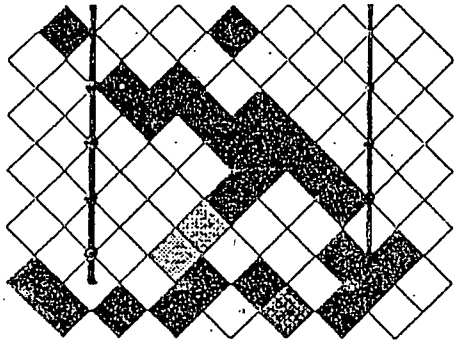


(c) Model permeability

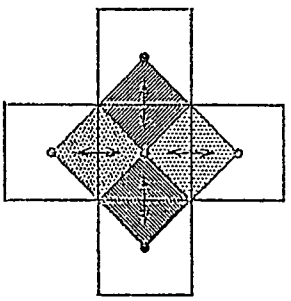
図-5-1　割れ目ネットワーク問題の逆解析



(d) Typical pressure responses



(e) Calculated permeability



intergrid permeabilities of
a gridblock in 2 directions
are graded and colored for
their contributing area
as shown in this figure.

(f) Explanation of permeability map

（前頁よりつづき）

図-5-1　割れ目ネットワーク問題の逆解析

近い。ただ、この問題は２次元問題であり、現実の地下には２次元で扱える状況は少ないから、本問題は、あくまで逆解析手法の有効性を示したものである。

５．４　三次元板状断層問題の逆解析[11]

このモデルは、図-5-2(a)のように、４本の井戸（A、B、C、D）に囲まれた領域の内部に板状で傾いた物体（断層、或いは地層）が存在する場合を想定したものである。観測点は、各井戸に３点づつ、計１２点ある。岩石の浸透率は100mdとし、断層のそれは粘土等のはさみを考え低透水（10md）としてある。ただし、板状断層の存在はどの坑井でも確認されていないものとする。

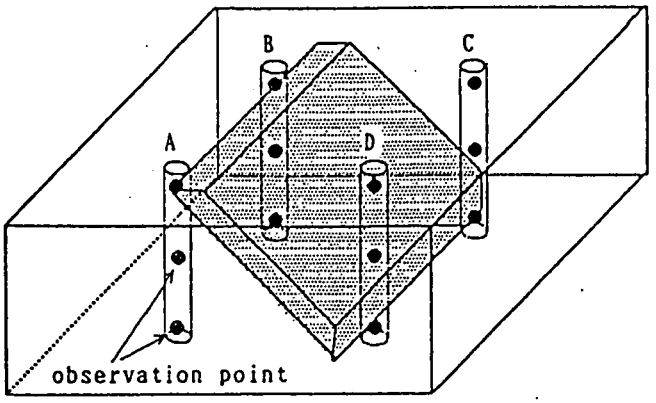
この領域を３次元の格子に分割した図が図-5-2(b)である。格子数は11x11x5＝605個、坑井間距離は12mである。図-5-2(c)、(d)は板状断層をこの格子モデルに置いた場合の浸透率分布を濃淡表示したものである（図-5-1(f)参照）。

以上の領域にパルステストを実施することを考える。発信点としては、移動しながら１２点全てを使い、かつ、全ての点で圧力を受信する。ここでは、図-5-2(e)の様に、発信点で、通常の圧入のみではなく、生産も行い圧力変動を大きくするよう試みている。

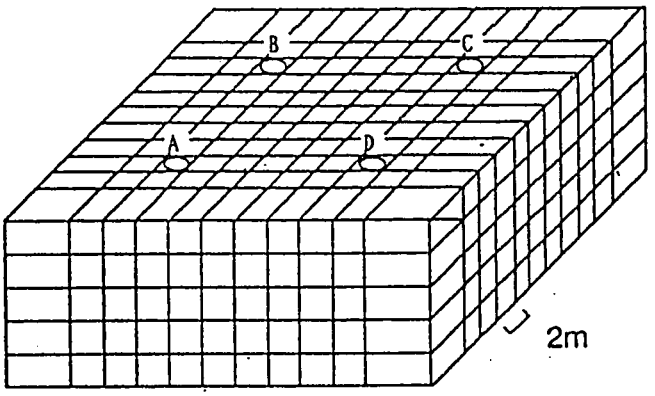
逆解析は、坑井が囲む領域より一つ外側の格子までの格子間浸透率を未知数とし、それより外側は既知（10md）とする。取り扱う未知数の個数は1044個である。図-5-2(f)、(g)には逆解析された結果を平面方向、断面方向各々について示す。図-5-2(c)、(d)と比較すると分かるが、実際のものに対し多少ぼやけた形で断層の存在が浮きでているのが分かる。

この問題では、本逆解析手法により、①坑井に全く現れない断層の形を捉える事が出来たこと、②１２の観測点のみのデータで１０４４個の浸透率の分布が求められていること、が強調できる。

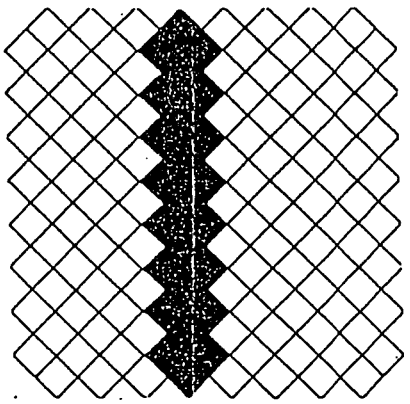
地下の特性を計測する上で、割れ目や断層を十分描き出せるだけ観測孔を密に配置することは、費用的、工期的に不可能な場合が多いが、そのような場合、ウエルテストトモグラフィーにより観測孔間の物性が信頼性よく捉えられれば、非常に大きなメリットとなろう。



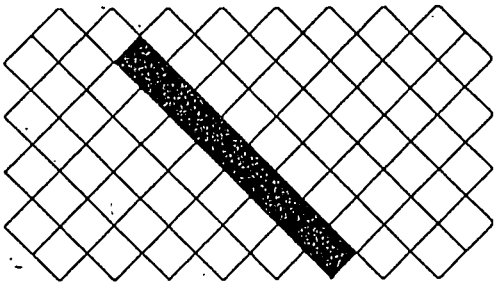
(a) Imaginary 3-D site illustration



(b) Discretized Model

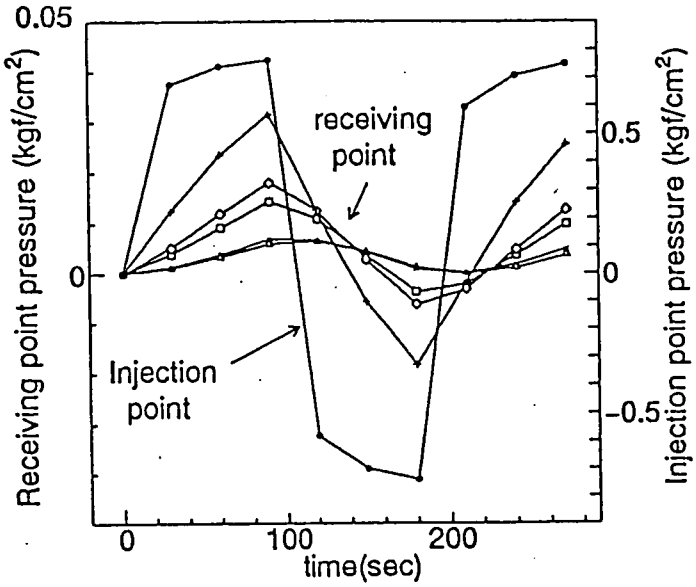


(c)Model permeabilities in X and Y directions of 3rd layer

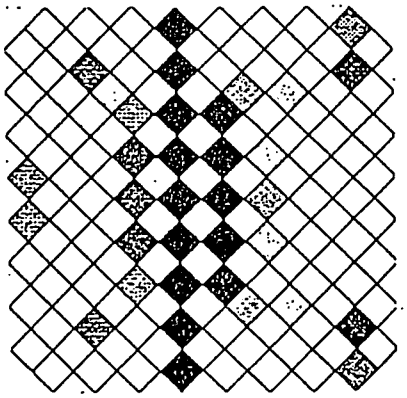


(d) Model permeabilities in Y and Z directions

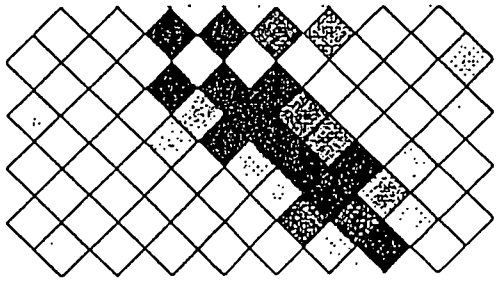
図-5-2　三次元板状断層問題の逆解析



(e) Typical pressure responses



(f) Calculated permeabilities in X and Y directions of 3rd layer



(g) Calculated permeabilities in Y and Z directions

（前頁よりつづき）

図-5-2　三次元板状断層問題の逆解析

．５　グラウト効果判定問題の逆解析[12]

ウエルテストトモグラフィーの応用ケースとして、特に著者ら（伊藤、増本、塚）の承諾を得て、グラウト効果判定問題の逆解析結果を報告する。

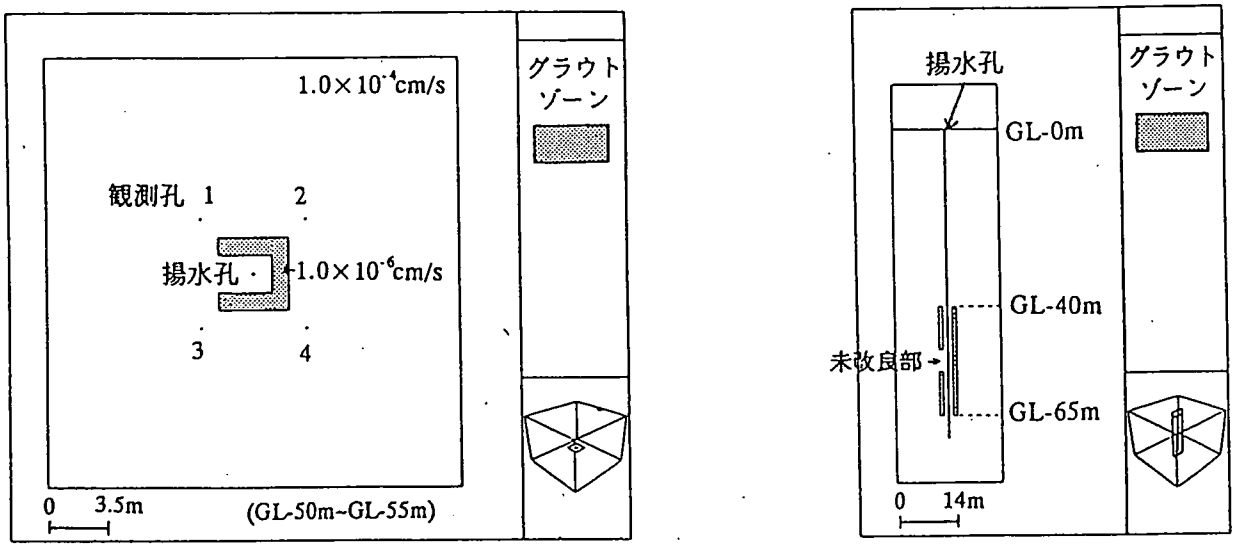
ある領域にカーテン状のグラウトを行ったものとする。領域の平面図及び垂直面図を図-5-3(a)、(b)に示す。グラウトは領域中心（図-5-3(a)の揚水点）を囲形で行われ、深度４０から６５ｍ（図-5-3(b)）、水平的に４ｍ程度（図-5-3(a)）の大きさである。岩盤の浸透率は100md（$1x10^{-4}$）、グラウト部分は、完全行われれば２オーダー低い 1md の改良壁が形成されるものとする。

問題の設定では、グラウトによる改良の不完全な部分が図-5-3(a)、(b)に示す置にできたとし、グラウトの状況を評価するため、揚水試験を実施するものとる。

試験には、周囲に掘られた４本の観測井と中央の揚水井を利用する。図-5-4(a)、)は、４本の観測井における揚水時の圧力変化の様子を、数値解析（解析領域全の大きさは124mx124mx90m、格子数23x23x17に分割）から求めたものである。図-5-4(a)は坑底から揚水した場合の４坑井の圧力変化、図-5-4(b)は未改良層近辺ら揚水した場合の４坑井の圧力変化である。明らかに、揚水位置の変化により測圧力は大きく異なる。図-5-5(a)、(b)は坑底からの揚水と、未改良部からの水時の地下水圧力低下を示している。

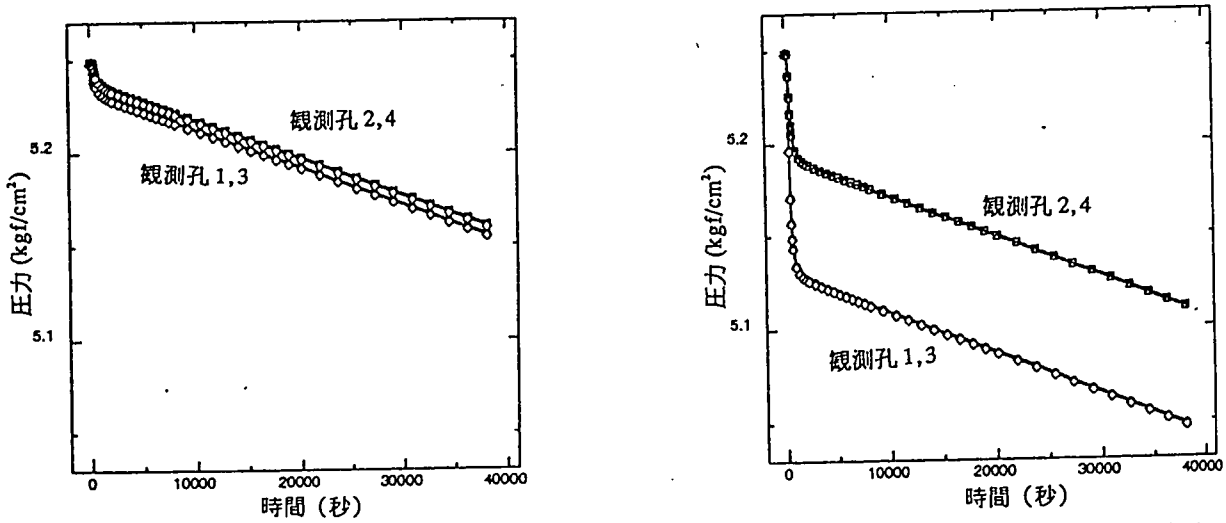
ここで、未改良部分からの揚水の場合の４坑井圧力データを基に逆解析を考え。逆解析モデルは、格子数15x15x8、未知数1044とし、計算圧力と坑井圧力の換には解析的坑井モデルを使う。この問題の場合、単孔試験により岩盤浸透率は0mdのオーダーであることは分かるし、改良部の浸透率は完全に改良された場合値 1md 程度と分かるので、比較的よい初期推定値から計算を開始できる。

逆解析の反復５０ステップにおける結果を図-5-6(a)、(b)に示す。図-5-6(a)は全に改良された部分の水平方向浸透率分布を示している。ほぼ揚水井を中心に称に求まっている。図-5-6(b)は未改良層での水平方向浸透率分布であるが、明かに左方に欠陥部分が認められる。以上のケースは、揚水と周辺４坑井でのデタのみを使っているが、揚水位置の交換などをすればさらに明確にグラウト効の判定が出来よう。



(a) 未改良部を含む深度の水平断面　　(b) 未改良部を含む鉛直断面

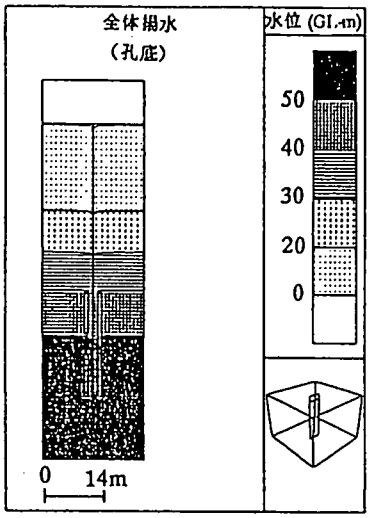
図-5-3 グラウト効果判定問題の逆解析
(領域平面図及び断面図)



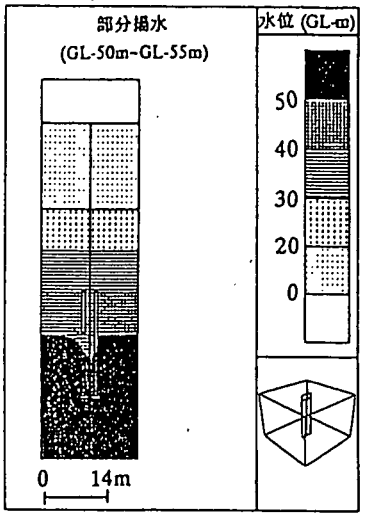
(a) 各観測孔における圧力経時変化
(孔底からの全体揚水)

(b) 各観測孔における圧力経時変化
(未改良深度からの部分揚水)

図-5-4 グラウト効果判定問題の逆解析
(揚水試験時の圧力挙動)

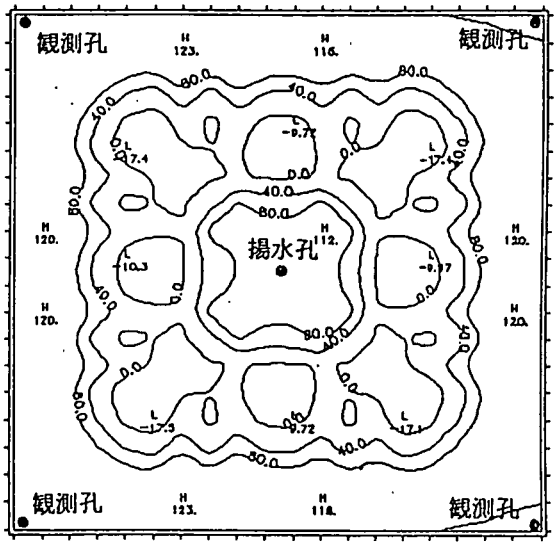


(a) 揚水に伴う水位低下
(孔底からの全体揚水)

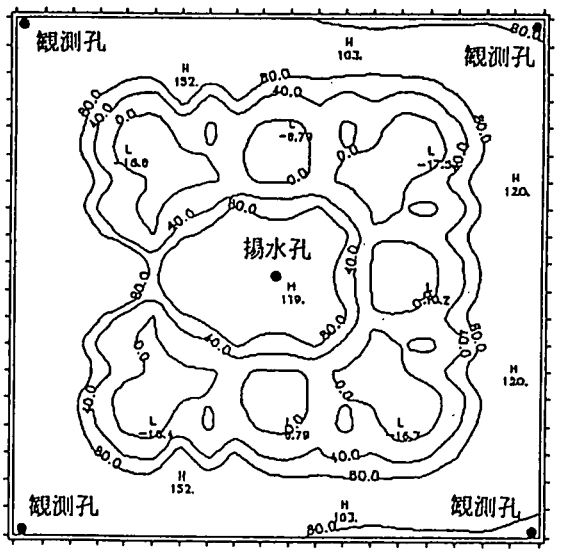


(b) 揚水に伴う水位低下
(未改良部分からの部分揚水)

図-5-5 グラウト効果判定問題の逆解析
(揚水試験時の水位低下)



(a) 水平方向の透水係数分布逆解析結果
(未改良部の上部層における水平断面)



(b) 水平方向の透水係数分布逆解析結果
(未改良部の深度における水平断面)

図-5-6 グラウト効果判定問題の逆解析
(浸透率逆解析結果)

5．6　まとめ

本年度行われたモデル解析は２次元、３次元とも良好な結果を示した。しかしフィールド計測結果の逆解析には、モデル化の問題、境界の取扱い、計算量の減少、等今後解決しなければならない問題が残されている。

最後に、本年度までのウエルテストトモグラフィーに関する進展と現状をまとめると以下のようになる。

（１）　水注入によるパルステストのフィールドテスト

地下備蓄基地、ダムサイト、鉱山等での実測が行われ、データが蓄積されつつある。地下水面より下部では、受信井においても良好な反応が認められ、その変化形態は数値解析により得られるものと整合的である。地下水面より上では、受信位置での反応は短時間では認められない。この場合に対処するため空気注入によるガスパルスを考えている。

計測は、まだ十分多点でかつ迅速に行うのが難しいため、本研究室においてもマルチゲージの高精度圧力観測システムを製作しつつある（文部省科学研究費）

（２）　ガスパルステスト実験およびフィールド計測

２次元媒体に対するガスパルステスト実験を進めている。これは，40cmx40cmxcmの供試体の内部の20cmx20cmの正方形領域の頂点に孔を配置し、空気の注入にう圧力変化を観測するものである。供試体は不均質であるが外面の模様によってその位置が判別できる。現在、種々のケースを設定して実験を行っており、逆解析可能性についてチェックしている。

また、ガスパルスによるフィールドテストは、応用地質（株）により行われ、良い応答が観測されている。

参考文献

) 登坂博行、小島圭二(1990):三次元流動条件を考慮したルジオン値から透水係数への換算方法について、第８回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.405-410

) R.C.Earlougher Jr.(1977):Advances in Well Test Analysis,Monograph vol.5 of H.L.Doherty, SPE-AIME.

) 登坂博行、伊藤一誠、増本　清、大塚康範：非定常流れを考慮したパルステストによる透水性逆解析手法について、土木学会第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.156-160、1990

) 伊藤一誠、増本　清、登坂博行、大塚康範：パルステストによる岩盤水理特性分布の逆解析、日本応用地質学会平成２年度研究発表会講演論文集、pp.97-100、1990

) 登坂博行、増本　清、伊藤一誠、大塚康範：パルステストデータを用いた岩盤水理特性分布の３次元逆解析手法、第８回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.399-404、1990

) Peaceman,D.W.:"Interpretation of Well-Block Pressures in Numerical Reservoir Simulation With Nonsquare Grid Blocks and Anisotropic Permeability," Soc.Pet.Eng.J., pp.531-43, June 1983

) Abou-Kassem,J.H.and Aziz,K.:"Analytical Well Models for Reservoir Simulation," Soc.Pet.Eng.J.,pp.573-79, August 1985

増本　清、登坂博行、伊藤一誠：パルステストデータによる岩盤水理物性分布逆解析手法の実用化に関する研究、第２４回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.56-60、1992.

登坂博行、伊藤一誠、大塚康範：不飽和帯における注水試験による岩盤水理特性の評価方法、第２４回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.51-55、1992.

) 増本清、登坂博行、小島圭二：ウエルテストトモグラフィーによる割れ目系岩盤水理特性分布の評価、地下亀裂のキャラクタリゼーションワークショップ論文集、pp.130-134、1992.

) H.Tosaka,K.Masumoto and K.Kojima: Hydropulse Tomography for Iden-

tifying 3-D Permeability Distribution、Proc. International High Level Radioactive Waste Management Conference,Las Vegas, Nevada, April 26-30, 1993（投稿中）

12) 伊藤一誠、増本清、大塚康範：揚水試験における非定常データを利用したグラウト効果判定、２５回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.456-460.

3．地下水の地球化学特性調査に関する研究

.1.火山山麓地域の岩盤地下水流動に関する研究

.1.1．はじめに

東北日本の秋田，岩手両県境には，東西約40km，南北約50kmにわたり複数の第4紀火山が分布していて，八幡平火山群と呼ばれている．岩手山はこの東端を占める第四紀火山である．岩手火山が直接覆う基盤は，主に新第三紀の堆積岩類および第四紀の玉川熔結凝灰岩類である．火山帯を形成した火山活動は更新世前期から現在に至るまで，150万年以上にわたっており，1719年には北東麓から焼け走り溶岩流を噴出している．山体は厚さ数mから数十mの比較的薄い安山岩質ないし玄武岩質の溶岩と火山砕屑物との互層によって構成されている（中川,1987）．

当地域では，地下水の賦存や涵養，流動状況に関する調査のための岩盤ボーリング孔が深度200mまでの深さで12本掘削されており（図-6-1），ここでは，これらのボーリング孔を利用して前年度までに実施された地下水採水調査から得られたサンプルについてトリチウム濃度分析を行いこれまでに実施された安定同位体比分析および一般水質分析結果およびポテンシャル測定結果を勘案することにより地下水流動の解析を試みた．

.1.2　地質・地下水状況

調査地域は，図-6-1に示した範囲で，AからLの最大深度200mのボーリング孔12本が掘削されている．調査地域における深度200mまでの地層は，主に玄武岩質安山岩，自破砕溶岩，凝灰角礫岩，火山砂礫等で構成されている．地形傾斜に沿った地質断面によれば，火山の噴火活動に伴う溶岩流や火山性堆積物を反映したものと考えられる地層の連属性が認められる．特に，ABC断面では安山岩層が深度4m付近から厚さ30m程度で連続的に分布している．

ボーリング掘削中に複数の深度において孔内の地下水頭(ポテンシャル）の測定が行われており，図-6-2は地形傾斜にそった３つの断面に於ける地下水のポテン

シャル分布を示している．地質断面に認められた安山岩層の連続性の有無がポテンシャル分布の違いにも現れている．例えば，ABCL断面では地下水流動系が深度40m以浅とそれ以深とで大きく異なり，特に深層の流動系は山麓のB地点などにおいて自噴状態を呈するようになっている．

地下水の化学成分を基にした地下水流動の研究では，当該深度の地下水が的確に採取できていることが基本であることは，これまで指摘してきた．1991年度，調査地域のボーリング孔６孔についてその孔内水をダブルパッカー付きのボーリング孔内採水ポンプを用いて採水を実施した．得られたサンプルについて，トリチウム濃度および安定同位体比の測定を行った．

表6-1　にこれらの分析結果を示す．

6.1.3. 地下水中の安定同位体比およびトリチウム濃度

昨年度の報告書に示したように，調査地域における地下水の安定同位体比のデルタダイヤグラムでは，何れのポイントも勾配８の天水線と平行に存在しており，基本的には地域の降水が涵養されて地下水となっていることがわかっている．図-6-3は，６つのボーリング孔からの地下水の安定同位体比の高度に対する関係をプロットしたものである．水素・酸素いずれの安定同位体においても，相対的に標高の低い地域にある自噴井の同位体比は軽いのに対し最も標高の高いボーリング孔Aの同位体比が最も重くなってることが興味深い．これは，降水の高度効果（標高が高くなるほどその同位体比が軽くなる）と全く逆の特性である．一般にわが国における降水の高度効果は，重水素で-2‰/100 m 重酸素で-0.25 ‰/100 m程度であることが知られており，この事実を勘案すると標高300m付近の自噴性の地下水は，標高635mのA孔の地下水よりも更に300～400 m 程高いところから涵養されていることになる．A孔の地下水は，採水を行った沢水の中では最も流域標高の高い有根沢（採水地点標高700m，平均流域標高約1000m）の沢水の同位体比に最も近い組成を示しており，その平均涵養高度は1000m程度と推定される．従って，山麓の自噴井は1300～1400m付近がその平均涵養高度と考えられ，標高差約1000m，流動距離約10kmスケールの地下水流動の存在が示唆された．これは，前述した地下水ポテンシャルや地質状況と調和的であり，火山山麓の地下水流動の典型を示

していると考えられる.

図-6-4は，地下水中および河川水中のトリチウム濃度の高度変化を示したものである．標高600～700m付近では10 T.U. 前後であるのに対し，標高500m 付近では20 T.U. 近くまで増大しており，地下水の流下に伴う顕著な濃度増加が認められる．一方標高300m 付近の自噴井では5 T.U前後と15T.U.付近とに濃度が分かれる．前述した安定同位体比から類推されるように，成層火山山麓における地下水は，その涵養源が極めて限定されており地下水流動中の混合は極めて少ないものと考えられる．いま，標高300m 付近の自噴井は本来5 T.U.前後の濃度を持っており，Hのボーリング孔で確認された15T.U:付近のトリチウム濃度は，地下水の流出域での様々な滞留時間の地下水の混合によるものと考えると，図-6-5に示した降水のトリチウム濃度を入力としたピストン流モデルによって推定される地下水の年齢は，標高600～700m 付近が17年，標高450～500m 付近が21年，標高300～400m 付近が38年と求められる.

安定同位体によって推定された涵養高度およびトリチウムによって推定された滞留時間をもとに，火山山麓における地下水の流動状態を図-6-6に示すように模式化した場合，それぞれの流動経路と滞留時間から推定される地下水の流速は，0.6 ～0.7 m/day(7～8 x 10^{-4} cm/sec)付近の一定値に収束し，山体の平均的な透水性としては,ほぼ妥当な値が得られた.

6.2. 深部花崗岩中の地下水流動特性に関する研究

昨年度に引続き岩手県釜石鉱山の北端部に展開する花崗閃緑岩中の坑道（NW押し）から掘削された500mのボーリング孔(KH-1)からの地下水の同位体（トリチウム濃度）変化を追跡することにより，深部花崗岩中での地下水流動の把握を行った.

KH-1ボーリング孔は，1987年5月に掘削されその後以下の５深度にパッカーを設置してボーリング孔を５つの区間に分割して各区間の地下水圧の変化をモニターしていたが，1990年4月より各区間に通じているチューブのバルブを解放することにより各区間からの地下水の採取を半年毎に行っている．いずれの区間もその地下水圧はボーリング孔の口元においても正圧を持っているためバルブを解放すれ

ば自噴する状態にある.

		孔内水の平均入れ替わり時間
KH-1-1	2.01 - 101.17 m	2.3 days
KH-1-2	102.25 - 236.41 m	5.9
KH-1-3	237.49 - 337.14 m	5.0
KH-1-4	338.22 - 410.94 m	19.2
KH-1-5	412.02 - 500.0 m	15.8

図-6-7 は解放直後の1990年4月より1992年8月までの５区間の地下水のトリチウム濃度の時間変化を示したものである. 相対的に浅い区間１において顕著な濃度低下が見られ, 降水のトリチウム濃度にみられる低減傾向や放射性減衰よりもはるかに大きな濃度低下であり, より年齢の古い地下水の混入による濃度低下と考えられる.1992年8月の時点で各区間のトリチウム濃度は, ほぼ一定値に収束しており, ボーリング孔周辺の亀裂からの低いトリチウム濃度の地下水の混入は平衡状態になったものと考えられる. いま各区間内の孔内水量を平均湧水量で割った平均入れ替わり時間を調べてみると, 上に示したように長くても２週間程度であり, トリチウム濃度変化から見られた半年から１年に比べるとはるかに短い.
この事実からも, トリチウム濃度の低減傾向は, 低いトリチウム水を混入させる亀裂域が次第にボーリング孔周辺に拡大していったものと考えられる. 区間の透水性が高く, 相対的に湧水量の多い KH-1-1 区間では, 大きな亀裂を伝わる6T.U. 程度の濃度を持つ循環性地下水と 0～0.5 T.U. 程度の亀裂中の停滞性地下水とがほぼ平衡状態になった時点で3 T.U.の濃度を形成したのに対し, 透水性が低く湧水量も少ないそのほかの区間では, 大きな亀裂からの循環性地下水の供給はほとんどなく, 結果的には亀裂中にある 0～0.5 T.U. 程度の停滞性地下水に殆ど入れ替わってしまったものと考えられる.

6.3. 洪積台地における地下水の涵養・流動特性

6.3.1. はじめに

東京の西部に大きく展開している多摩川扇状地としての洪積台地の中で、狭山丘陵より南の武蔵野台地西部を研究対象地域に選定し、地下水のトリチウム濃度の空間的分布から、地下水の涵養・流動機構を明らかにするとともに、不圧および被圧地下水の滞留時間を推定を試みた。

6.3.2 研究地域の概要

研究対象地域の地形は、多摩川によって形成された台地面と沖積低地、そして、それをとりまく丘陵面からなる。台地面は、形成年代の異なるいくつかの扇状地性の段丘からなっており（図-6-8）、形成年代の古い順に、下末吉面、武蔵野面、立川面、拝島面の各段丘面になっている。

現在の多摩川は台地面の南縁を流れており、河道を中心として幅数Kmの、台地面より低い沖積低地を形成している。また、扇状地の中央には多摩川によって形成された最も古い段丘面で、その後多摩川によって侵食されることなく残った残丘と考えられている狭山丘陵が存在している。 狭山丘陵は、平坦な台地面と対照的に起伏が激しく、密な水系を持っている。

当地域の地質は、関東ローム層と段丘砂礫層がほぼ地表面の勾配と同じ勾配で堆積しており、その下位に、砂礫層、砂層、シルト層からなる東京層群または上総層群が、北から北東方向に傾斜して堆積している。関東ローム層は、火山灰からなる層で、透水性は、$K=10^{-5}\sim10^{-6}$cm/secとあまり良くないが、間隙率が約70％と非常に大きく、かなり多量の土壌水が含まれている。武蔵野面には武蔵野ローム層と立川ローム層が、立川面には立川ローム層のみが堆積しており、段丘面によって異なる厚さの関東ローム層（武蔵野面では5～9m、立川面では2～5mの層厚）を有している（図-6-9）。

関東ローム層の下位には扇状地性の砂礫層が存在し、武蔵野面にある砂礫層は武蔵野砂礫層、立川面のそれは立川砂礫層と呼ばれる。これらの層は透水性が良

好($K=10^{-1}\sim10^{-2}$cm/sec)で、当地域の不圧地下水の主要帯水層になっている。層厚は武蔵野砂礫層が5～10mで、立川砂礫層が3～5m程度である。

これらの層の下位には、東京層群または上総層群が存在する。東京層群は、本地域では、さらに江戸川層と舎人層に分けられる。両層とも、砂礫層・砂層・シルト層の互層であり、この砂礫層・砂層・シルト層の堆積サイクルがいくつか繰り返している。このうち、砂礫層・砂層は、被圧地下水の良好な帯水層になっている。シルト層の層厚は数～20m程度である。城北砂礫層を基底とする東京層群は、当地域ではほぼ北東方向に、約0.5～2°の傾斜で降下している。

東京層群の下位には、上総層群に属する東久留米層が本地域のほぼ全域に分布し、その層厚は最大300mに達する。層相は、おもに砂層を主体とし、厚さ10m未満のシルト層を挟在している。本層も上位の東京層群とならんで、当地域の良好な被圧地下水の帯水層になっている。東久留米層の中位には、府中砂礫層といわれる連続性の良い被圧帯水層が存在する。

東久留米層の下位には、同じ上総層群に属する北多摩層が分布している。シルト層を主体とする透水性の悪い層で、層厚は500m以上と厚く、当地域における被圧地下水の不透水性基盤とみなすことができる。東久留米層と北多摩層の境界は、走向E－WでN方向に傾斜している。

6.3.3. 採水

トリチウム分析のための採水は、段丘砂礫層中の不圧地下水(民間の浅井戸および湧水)、多摩川河川水、狭山丘陵内の村山・山口貯水池、および、東京都の観測井について行った(図-6-10)。湧水のうち、黒目川沿いの17～19と国分寺崖線沿いの25～28は武蔵野砂礫層から、6および11はそれぞれ、拝島砂礫層、立川砂礫層から不圧地下水が湧出したものである。

不圧地下水、河川水、貯水池水の採水は、1991年7～8月と1992年7月の２回行った。村山貯水池(多摩湖)・山口貯水池(狭山湖)については、上水道用に湖底付近から浄水施設に導水している水を採水した。被圧地下水を対象とする観測井の採水は1991年11～12月に行った。採水深度は各観測井のスクリーンの中央に設定し、約５リットルのベーラーをもちいて、繰り返し採水を行った。

6.3.4. 不圧地下水のトリチウム濃度

不圧地下水のトリチウム濃度は3.3～9.3T.U.の範囲に入っており、全体的には武蔵野面では5～9T.U.、立川面では4～6T.U.と立川面よりも武蔵野面の方が高い傾向がある（図-6-11）。この武蔵野面と立川面の間の不圧地下水のトリチウム濃度の差は、前述した関東ローム層の層厚の違いに起因すると考えることができる。すなわち、武蔵野面では関東ローム層が相対的に厚いために、地表から浸透した水が関東ローム層を通過し、地下水面に到達するまでにより長い時間がかかる。そのため武蔵野砂礫層中の不圧地下水は、相対的に古い降水によって涵養され、濃度が高かった過去の降水がより多く含まれることにより立川面よりもトリチウム濃度が高くなっているものと考えられる。

不圧地下水の帯水層である段丘砂礫層は、平均透水係数が10^{-1}～10^{-2}cm/secと透水性がきわめて良いため、基本的には混合しやすい状況にあると考えられる。そこで、不圧地下水のトリチウム濃度を説明するモデルとして、完全混合モデルをとりあげた。武蔵野面および立川面の不圧地下水のトリチウム濃度は、それぞれ、5～9T.U.、4～6T.U.の範囲に分布しているが、各段丘面のトリチウム濃度の平均値を用いることにより、それぞれの不圧帯水層の平均的な滞留時間を推定することが可能である。

完全混合モデルは、系内の平均濃度Cを用いたトリチウムの収支式

$$\frac{\partial(C \cdot V)}{\partial t} = C_{in} \cdot R - C_o \cdot Q - \lambda(C \cdot V) \qquad (1)$$

において、系の定常性

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0 \qquad (2), \qquad R = Q \qquad (3)$$

と瞬間混合

$$C_o = C \qquad (4)$$

を仮定する。ここで、

C ：系内の平均トリチウム濃度

C_{in}：系内に浸透してくる水の平均トリチウム濃度

C_o ：系から流出する水の平均トリチウム濃度

V　：系の貯留量

R　：系内への浸透量

Q　：系からの流出量

λ　：トリチウムの壊変定数

である。

(1)～(4)式から、時刻tにおける地下水のトリチウム濃度$C_o(t)$は

$$\frac{dC_o(t)}{dt} = -(\lambda + \frac{1}{T}) \cdot C_o(t) + \frac{1}{T} \cdot C_{in}(t) \quad (5)$$

で表される。

ここで、Tは系の滞留時間で、V／RまたはV／Qで表される量である。

このうち、$C_{in}(t)$は、不圧地下水を涵養している浸透水のトリチウム濃度である。本地域では、段丘砂礫層の上位に関東ローム層が存在し、地表から浸透した降水は関東ローム層を通過して段丘砂礫層を涵養しているものと考えられる。梶根ら(1980)は、関東ローム層中では、土壌水は1.28m／年という速さで降下浸透し、その挙動はピストン流モデルにより説明できるとした。他にも関東ローム層中の土壌水の降下浸透速度が推定され(木村(1971)、Shimada(1988))、1.38～1.45m／年という類似した降下浸透速度が得られている。ここでは関東ローム層中では土壌水はピストン流的に降下浸透するものとし、その平均降下速度は1.4m／年と仮定した。前述したように、武蔵野面と立川面では関東ローム層の層厚が異なる。層厚は武蔵野面では5-9m、立川面では2-5mであることから、それぞれの平均値をとって、7m、3.5mとした。層厚と降下浸透速度から、関東ローム層を通過するのに要する平均時間T_pは、武蔵野面では約5年、立川面では約2.5年となる。

関東ローム層を降下浸透する間も放射壊変による減衰が起こるので、時刻tにおいて、ローム層下部から不圧地下水へ涵養される浸透水のトリチウム濃度$C_{in}(t)$は、

$$C_{in}(t) = C_R(t - T_p) \cdot e^{-\lambda T_p} \quad (6)$$

で表される。ここでT_pは関東ローム層の通過に要する時間、$C_R(t)$は時刻tにおける降水のトリチウム濃度を表す。

(6)式により決定された$C_{in}(t)$を用いることにより、(5)式で表されるモデルに滞留時間Tを与えれば、完全混合している不圧地下水の平均トリチウム濃度$C_o(t)$が推定できる。滞留時間を1年～15年に変化させたときの、モデルによるトリチウム濃度の推定値を求めた。図-6-12は、横軸に滞留時間、縦軸にそれに対応する本地域での不圧地下水の採水時点(1991年7月)でのモデルによるトリチウム濃度の推定値を示したものである。滞留時間が長くなるほど、過去の高トリチウム濃度の降水の影響が強く現れ、地下水のトリチウム濃度が大きくなる。

本地域において1991年7月に採水した不圧地下水のトリチウム濃度は、武蔵野面では平均 7.1 T.U.、立川面では平均 4.9 T.U. であった。図-6-12の２つのモデル出力曲線を用いて、武蔵野砂礫層および立川砂礫層中の不圧地下水の滞留時間を推定すると、それぞれ６～７年、約５年と求められた。

6.3.5. 被圧地下水のトリチウム濃度

本研究地域の被圧地下水中のトリチウム濃度は、一般的には深度とともに減少する傾向が認められる(図-6-13)。ポテンシャル分布から明らかにされたように、本研究地域は地下水涵養域であり、被圧地下水は、おもに、地表から浸透した降水によって涵養された比較的年齢の若い不圧地下水によって涵養されているものと考えられる。図-6-13は、この水が放射壊変による減衰をしながら、帯水層内を下向きに流動していることを示唆している。

東大和第２観測井と東村山第３観測井のサンプルは、同じ程度の深度のほかのサンプルと較べてトリチウム濃度が大きい。これらはいずれも狭山丘陵付近の観測井で、図-6-14よりこの２点はほぼ同じ地層上にあることがわかる。この東久留米層中位の府中砂礫層付近の帯水層が、その上下の帯水層よりも相対的にトリチウム濃度が高いことは、帯水層ごとに涵養・流動機構が異なり、地下水は地質に規制され、帯水層の傾斜方向に流動していることを暗示している。 12.6 T.U. が観測された東村山第３観測井では、その上に位置する第２観測井よりもポテンシャルが大きいことからも、この水は上方から流動してきたものではなく、帯水層にそって流動してきたものと考えられる。

この帯水層のトリチウム濃度が高い理由は、他の帯水層よりも核実験による高

トリチウム濃度の降水が多く含まれているためと推定されるが、これは、この帯水層に相対的に速い流動が存在し、1952年以降の降水が他の帯水層よりも多く流入したことによるものと考えられる。この層に他の層よりも速い流動が存在する原因としては、この付近でポテンシャル傾度が大きいことや、東久留米層がおもに砂層からなり、東京層群と比較して透水性の悪いシルト層が薄くて少ないことが考えられる。この帯水層が地表面と接するところには狭山丘陵が存在し、丘陵の不圧地下水が涵養源として働いている可能性がある。

これに対し、トリチウム濃度が 1 T.U. 以下の被圧地下水は、核実験による高トリチウム濃度の降水があまり含まれておらず、主として1952年以前の降水により涵養されたものと考えられる。これらの被圧帯水層への涵養量は相対的に小さく、帯水層内の流動の速度も相対的に小さいものと考えられる　狭山丘陵東部の東久留米・清瀬観測井付近では、1970年頃に、おもに東京層群から揚水が行われた結果、地下水位が低下し、地盤沈下が生じた。この事実も、ＡＡ'断面の東京層群への涵養量は相対的に小さいことを裏付けている。このように、被圧地下水への涵養は、すべての帯水層に対して一様に行われているのではなく、地質や涵養源などの条件により支配された不均質なものになっているものと考えられる。

観測井で採水された被圧地下水のトリチウム濃度に基づく滞留時間について考察する。地下水のトリチウム濃度の分布を説明するモデルとして、しばしば、ピストン流モデルが用いられる。ピストン流モデルでは、流動方向の前後の水と混合することはなく、新しい水が古い水を押し出す形で流動するものと仮定するため、水体のトリチウム濃度は放射壊変による減衰のみにより変化する。ここで、ある水体が涵養されたときのトリチウム濃度がC_{in}であったとすると、その水体が涵養されてからの時間tにおけるトリチウム濃度Cは、

$$C = C_{in} \cdot e^{-\lambda t} \qquad (7)$$

で表される。(7)式より、被圧地下水の入力となる水のトリチウム濃度がC_{in}であるとするならば、被圧地下水のトリチウム濃度Cから、それが涵養されてからの時間tを推定することができる。

そこで、図-6-14にみられるトリチウム濃度の高い府中砂礫層付近の帯水層を、このピストン流モデルで説明することを試みる。前述したように、この層は狭山丘陵の不圧地下水によって涵養されている可能性がある。しかし、狭山丘陵では

関東ローム層は侵食を受け、その層厚は地域的なばらつきが大きく、また、採水地点が少ないことから、モデルによる狭山丘陵の不圧地下水の経年変化の推定がむずかしい。そこで、被圧地下水への入力値となる不圧地下水のトリチウム濃度は、武蔵野砂礫層中の濃度変化に等しいと仮定した。図-6-15は、(7)式のピストン流モデルの入力値(C_{in})を、武蔵野砂礫層中の不圧地下水のトリチウム濃度の経時変化とした場合の出力結果である。図中、横軸は、被圧地下水が不圧帯水層である武蔵野砂礫層から涵養された時期を表す。例えば、トリチウム濃度約 50 T.U. の被圧地下水があれば、その水体は1970年頃に武蔵野砂礫層から涵養されたということになる。

前述したように、図-6-14のトリチウム濃度の高い府中砂礫層付近の帯水層では、狭山丘陵付近から東村山観測井に向かう方向の流動が存在することが示唆される。ここで、流動方向に対して涵養源に近い東大和第２観測井(8.4T.U.)よりも、相対的に流下方向にある東村山第３観測井(12.6T.U.)の方が濃度レベルが高いことから、東村山第３観測井の水は、武蔵野砂礫層中の不圧地下水のトリチウム濃度がピークに達した1970年以降に涵養され、東大和第２観測井の水はそれ以降に涵養されたものと推察できる。この帯水層中の地下水の流れを、前述したピストン流モデルを用いて解析すると、図-6-15から東村山第３観測井の水は1986年に不圧帯水層から涵養されたもの、東大和第２観測井の水は1989年に涵養されたものと推定される。

しかし、この推定には大きな矛盾が２つある。第１に、この推定が正しいと仮定すると、この帯水層内の被圧地下水は、2000m/年に近い速さで流動していることになり、この付近の透水係数(10^{-3}～10^{-4}cm/sec)および、ポテンシャル分布から得られた動水勾配から推定される地下水の実流速(有効間隙率を１％とした場合でも約300ｍ/年)よりはるかに速い流動が存在することを考えなければならない。第２に、図-6-15のピストン流モデルによって推定される1970年前後のトリチウム濃度のピークが、東村山観測井よりはるかに流下方向に存在していなければならず、かつ、その濃度は流下方向に向かって増加していなければならない。しかし、現実には東村山観測井より地下水流動上の下流域にはより高トリチウム濃度の地下水は確認されていない。このような観点から、この帯水層の地下水の流動は単純なピストン流モデルのみでは説明できないものと考えられる。

このように、被圧帯水層中のトリチウム濃度の実測値は、流動方向に向かう濃度増加はあるものの、ピストン流モデルによって説明される値よりもはるかに小さい。一方、図-6-16にみられるように、府中砂礫層付近の帯水層内での、トリチウム濃度の水平的な分布状態を見ると、このＡＡ'断面付近に高トリチウム濃度の地下水が尾根状に存在しており、その周辺のトリチウム濃度は1T.U.以下ときわめて低い。このことから、当地域の地下水の流動は、帯水層全体にわたる単純なピストン流的な流動ではなく、狭山丘陵付近の特定の帯水層において、不圧帯水層から被圧帯水層に流入してきた高トリチウム濃度の降水の影響を受けた水が、以前から被圧地下水帯水層内に存在していたほぼ0T.U.の水と混合し、希釈しながら流動してきた結果と考えれば、前述した矛盾点を解消できる。

すなわち、東村山第３観測井において測定された12.6T.U.の地下水は、前述したように武蔵野砂礫層中の不圧地下水のトリチウム濃度がピークに達した1970年以降に涵養された水が、混合・希釈されつつ到達したものと推定される。このとき、当観測井で採水された地下水は不圧地下水から涵養されてからせいぜい20年しか経過していないことになり、結果的には帯水層内を、年に300～400m程度の速さで流動していたものと推定された。

参考文献

樋根　勇・田中　正・嶋田　純(1980)：環境トリチウムで追跡した関東ローム層中の土壌水の移動．地理学評論，53-4，225-237

木村重彦(1971)：水中のトリチウムによる地下水の流れの研究．農業土木試験場報告，9，1-46

中川光弘(1987)：東北日本、岩手火山群の形成史．岩手鉱物鉱床学会誌.82，132-150.

Shimada,J.(1988): The mechanism of unsaturated flow through a volcanic ash layer under humid climatic condition. Hydrol. proces., 2, 43-59.

Name	Altitude (m)	Depth (m)	Temp. (°C)	EC (μS/cm)	pH	HCO3- (meq/l	δD (‰)	δO (‰)	Tritium (T.U.)
A	635.7	150	4.1	58.1	7.75	0.61	-66.2	-10.49	10.6
B	480	150	13.5	198.1	6.95	1.37	-70.8	-11.05	18.6
H	343		10.4	92.4	9.15	0.44	-72	-11.02	14.6
I	323		15.5	184	8.02	1.28	-72.3	-11.2	4.4
J	479	160	8.4	60.8	8.26	0.41	-71.8	-10.89	19.9
K	399	80	10.5	108.5	9.87	1.01	-72	-11	4.6
Arine	700		3.9	78.7	7.8	0.31	-70.5	-10.58	8
Shoutoku	600		4.3	87.2	5.52	0.04	-70.5	-11.03	8.8
Shirakawa	600		3.5	141.2	6.09	0.03	-69.9	-10.81	11.5

表-6-1. 岩手山周辺の河川水及び地下水の水質一覧。

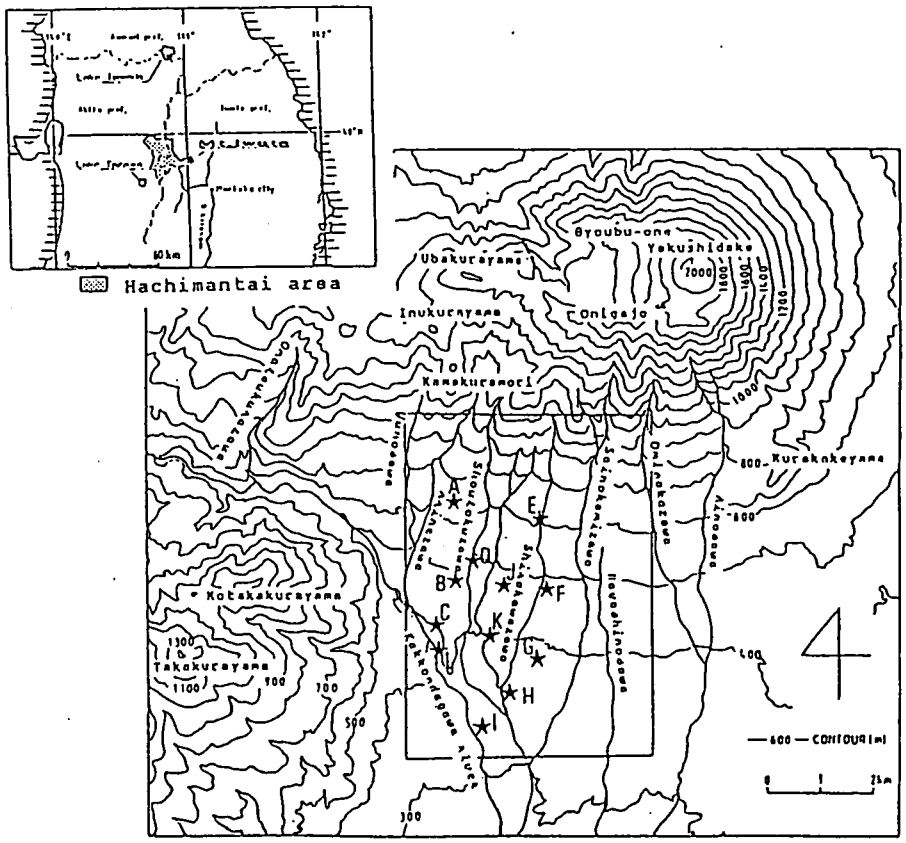


図-6-1. 調査地域周辺の地形及びボーリング孔の位置

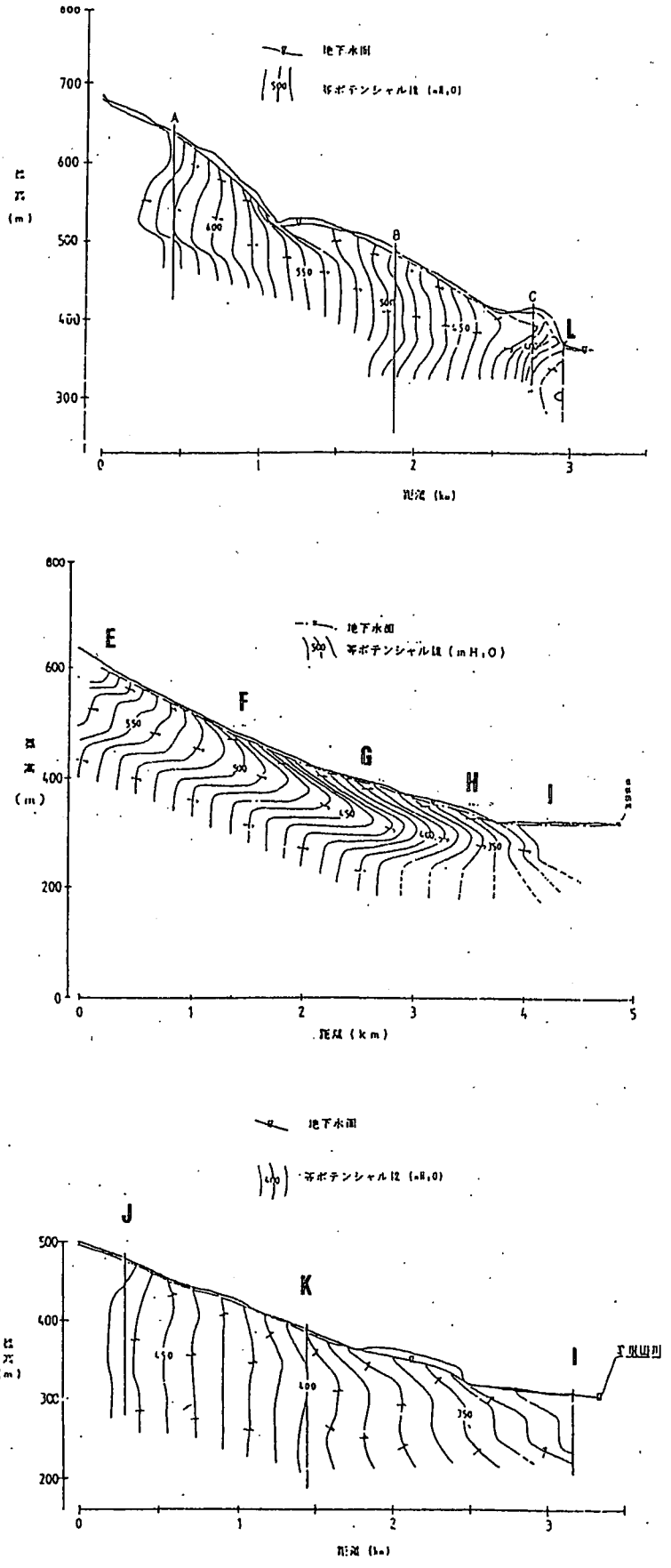


図-6-2. 地下水のポテンシャル分布図

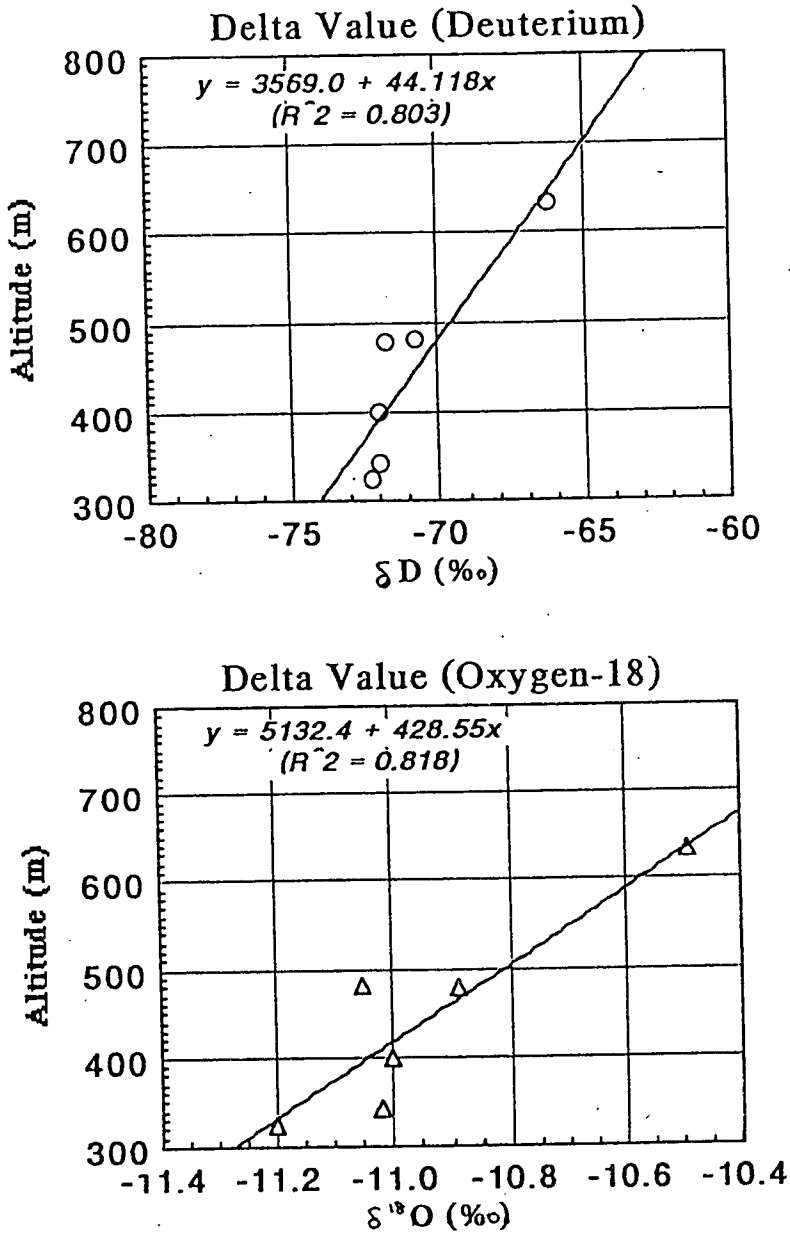


図-6-3. 地下水中の安定同位対比の高度に対する関係

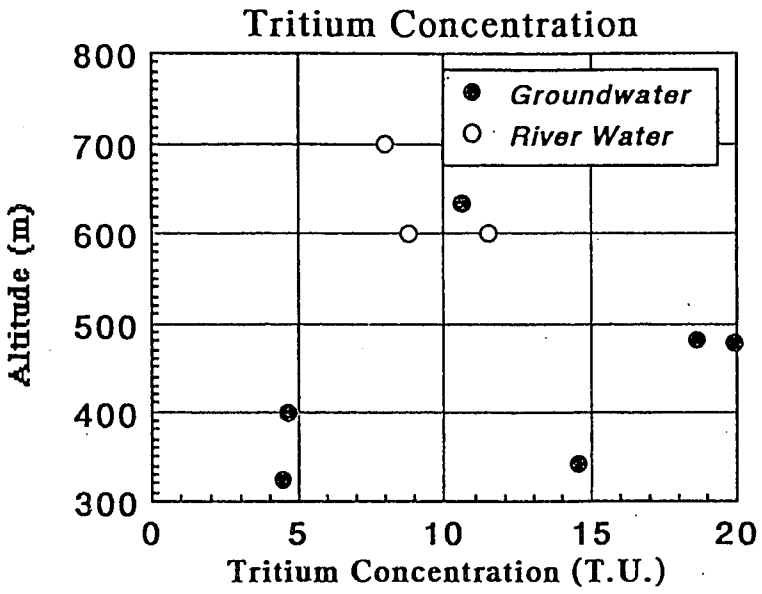


図-6-4. 地下水及び河川水中のトリチウム濃度の高度に対する関係

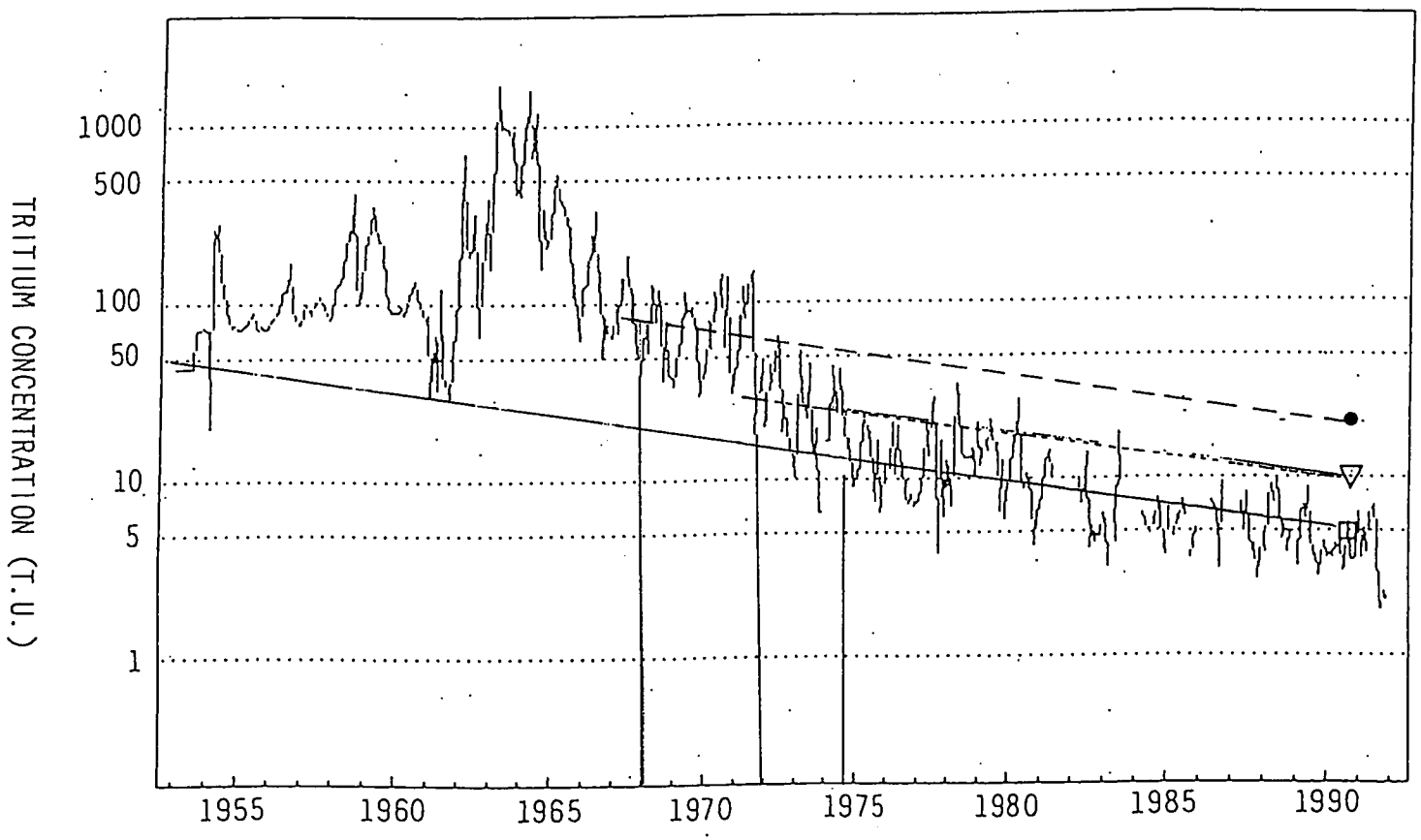
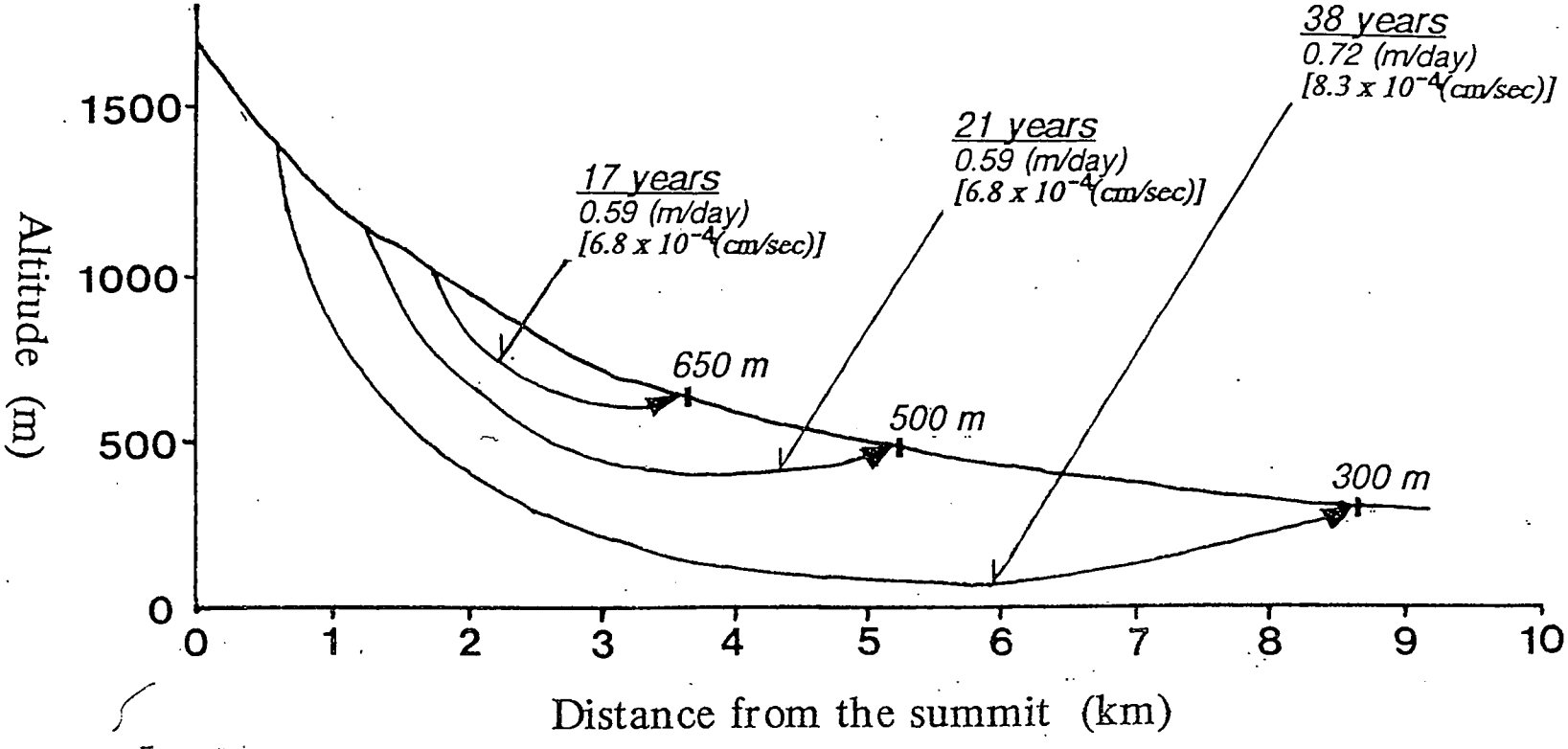
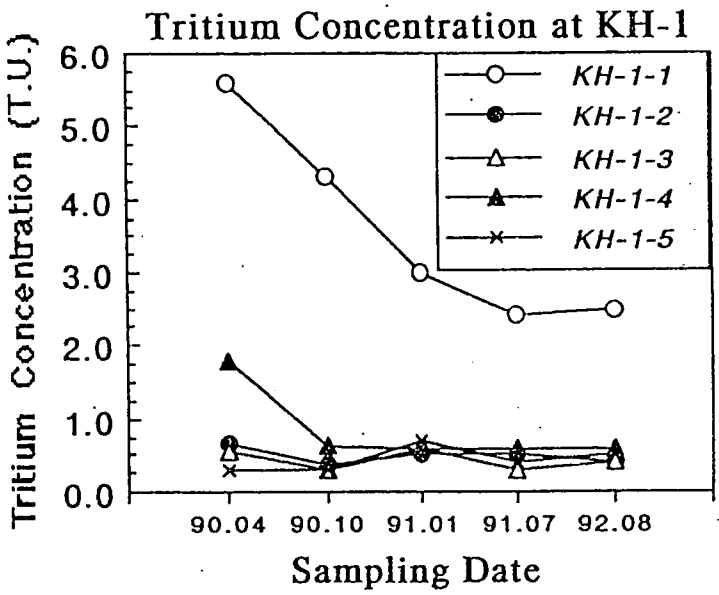


図-6-5. 筑波に於ける降水中のトリチウム濃度変化と岩手山の地下水のトリチウム濃度



この傾向は火山山麓に特徴的なデータかもしれない。
地質には関係ない。
地形に関係。

図-6-6. 岩手山麓に於ける地下水流動の模式図



ボーリング孔掘削から
1～1.5年で
ほぼ一様な濃度
になる傾向が見られる

図-6-7. KH-1 ボーリング孔における地下水中のトリチウム濃度の経時変化

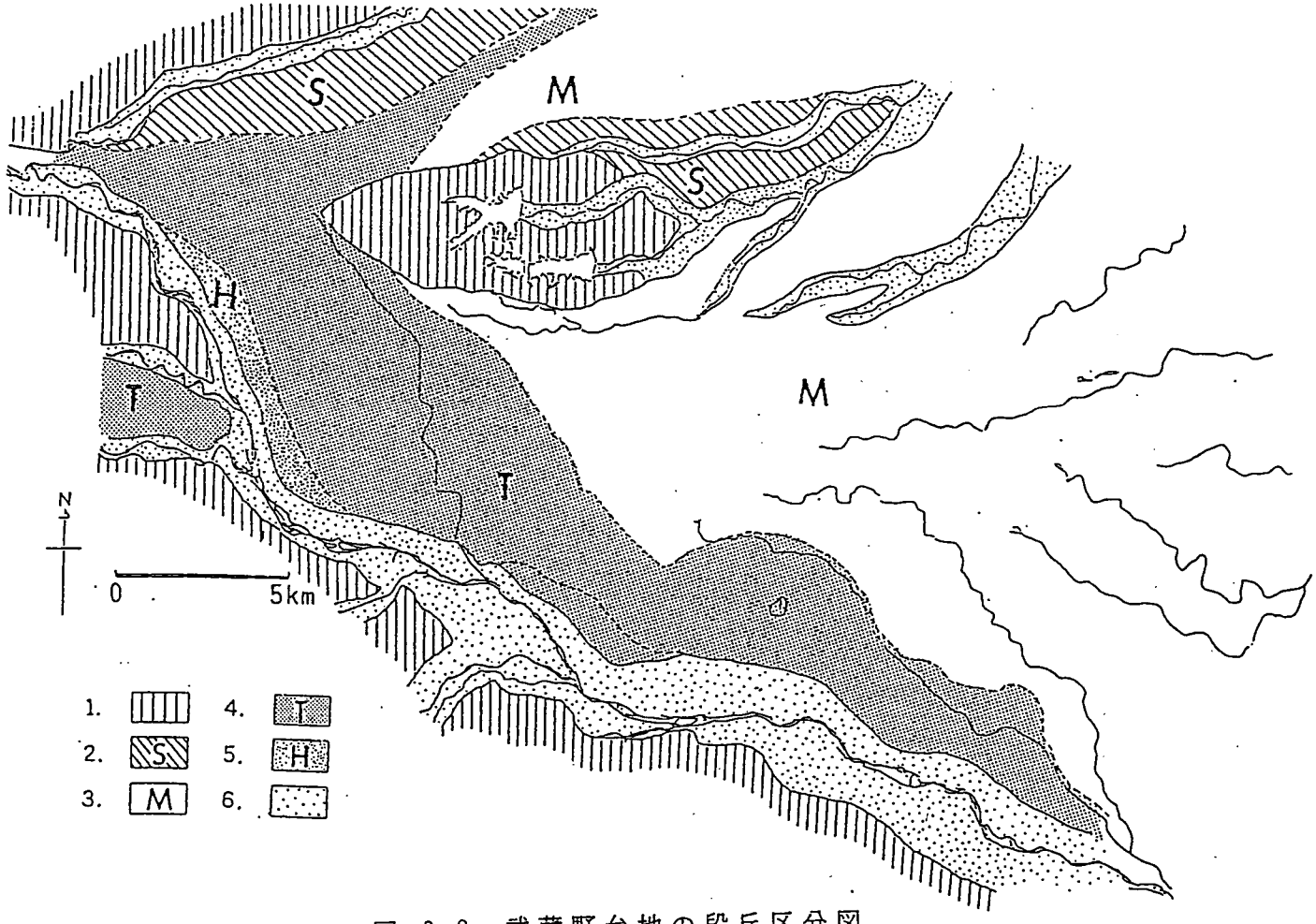


図-6-8. 武蔵野台地の段丘区分図

1. 丘陵　2. 下末吉面　3. 武蔵野面
4. 立川面　5. 拝島面　6. 沖積面

破線：段丘崖

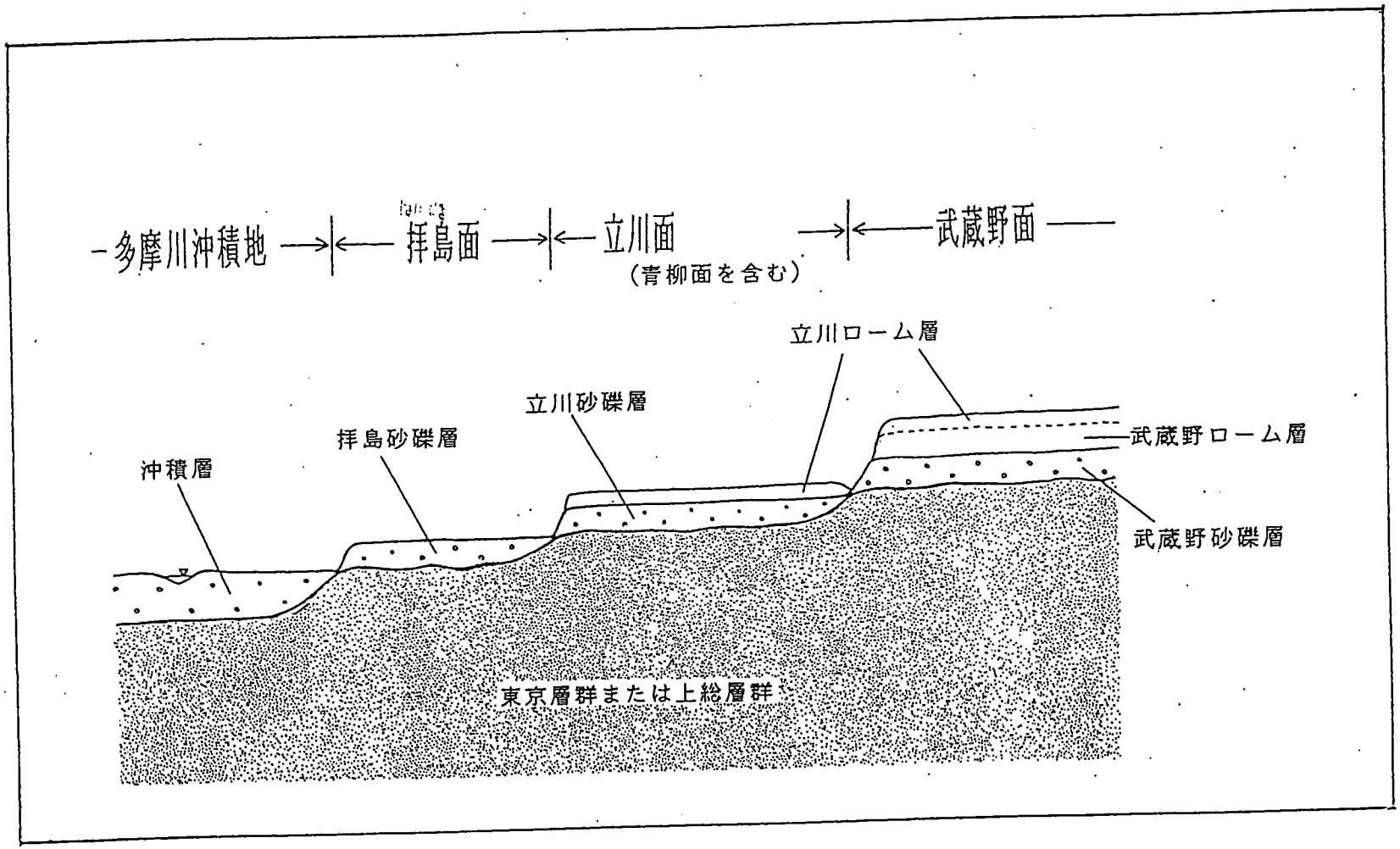


図-6-9. 段丘の模式断面図

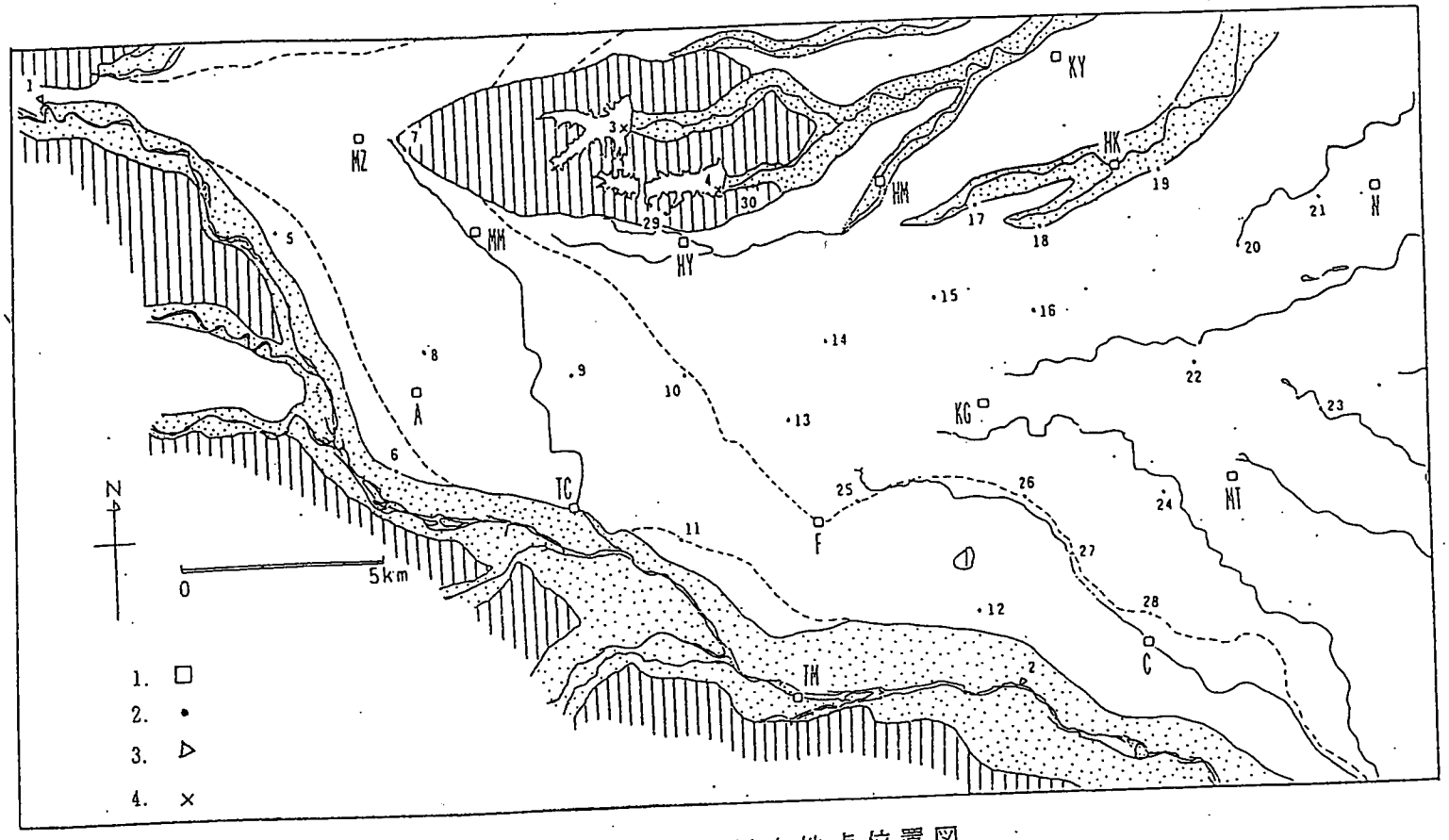


図-6-10. 採水地点位置図

1. 観測井
   MZ:瑞穂 MM:武蔵村山 HY:東大和 HM:東村山 KY:清瀬 HK:東久留米
   N:練馬 A:昭島 TC:立川 F:府中 KG:小金井 MT:三鷹 C:調布 TM:多摩
2. 浅井戸または湧水
3. 河川水
4. 貯水池水

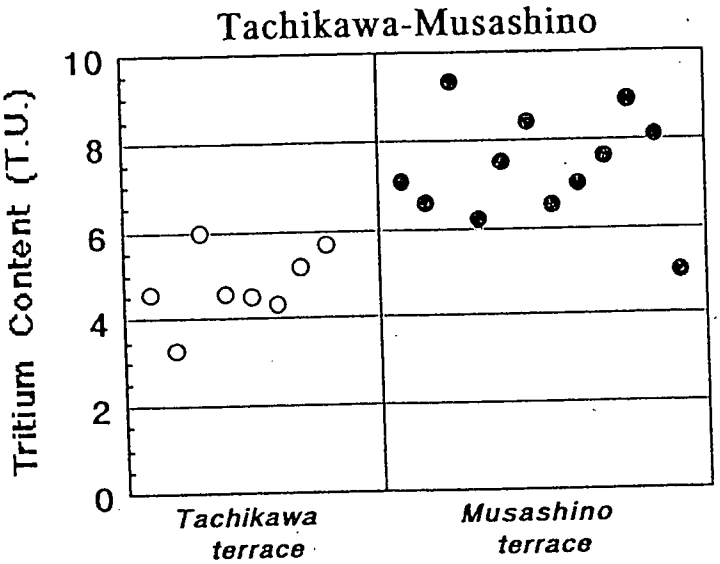


図-6-11. 不圧地下水中のトリチウム濃度

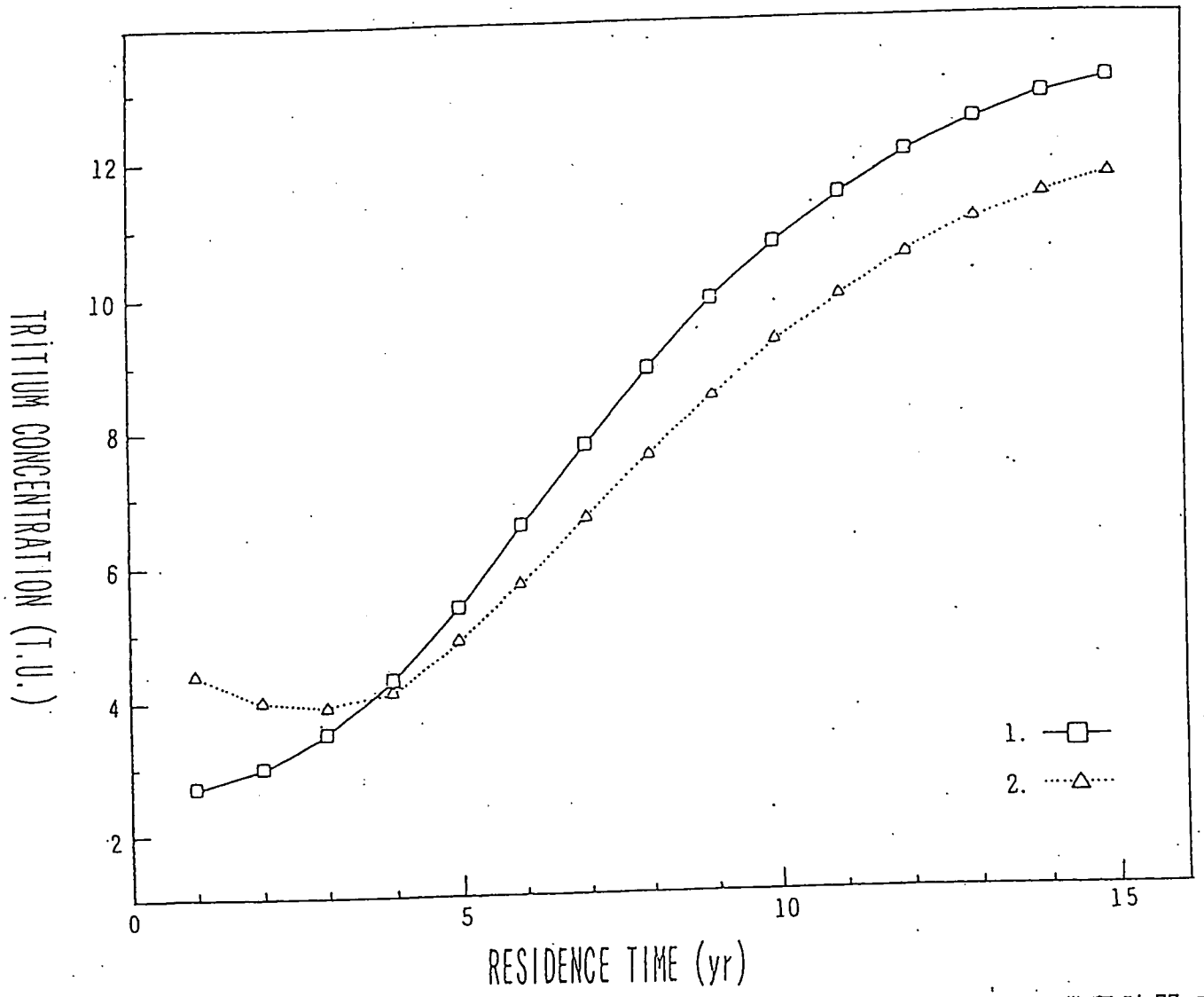


図-6-12. 完全混合モデルによる不圧地下水のトリチウム濃度と滞留時間の関係

（１：武蔵野礫層、２：立川礫層）

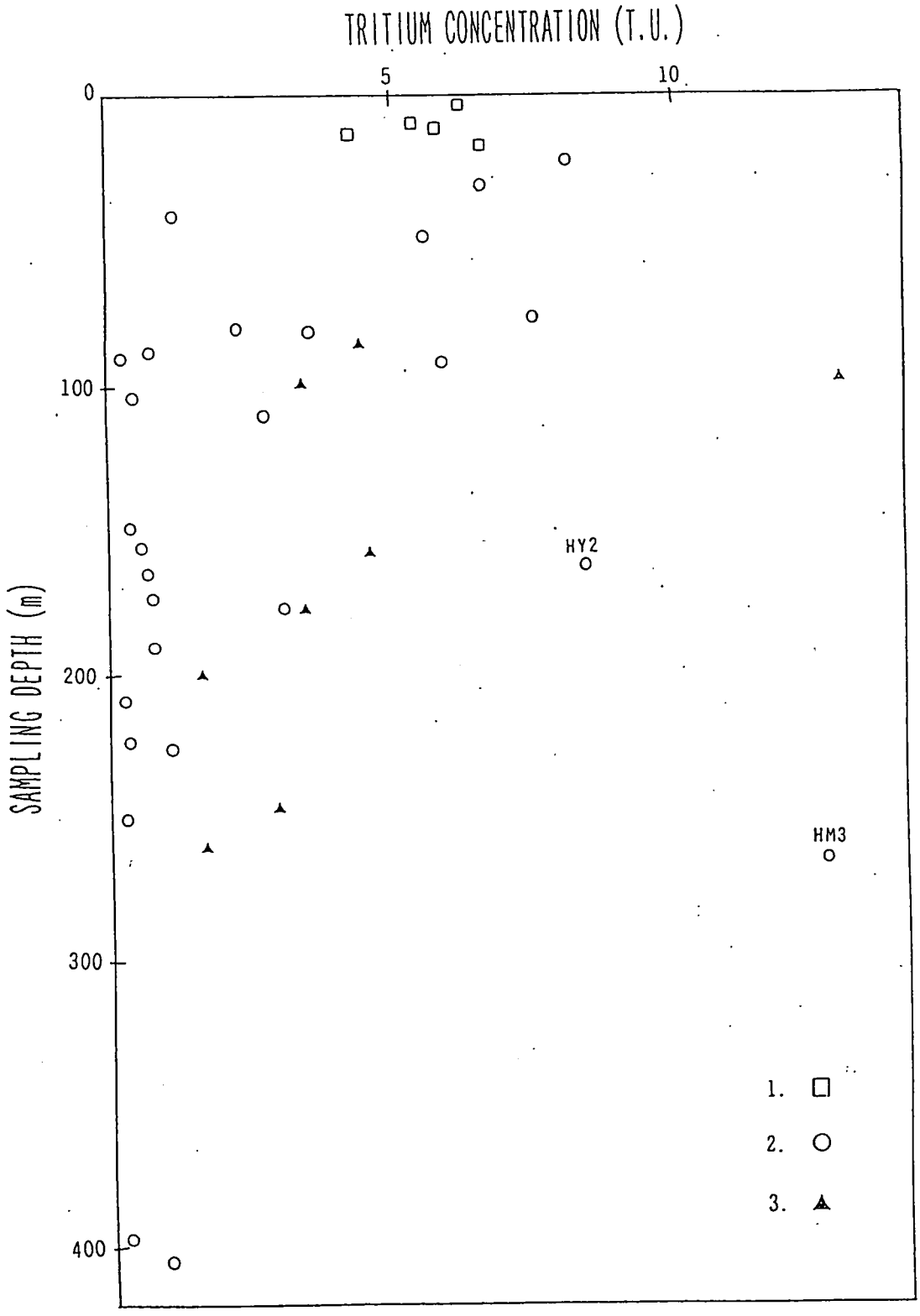


図-6-13. 被圧地下水観測井の深度とトリチウム濃度の関係

1. 浅井戸　2. 立川断層以東の観測井　3. 立川断層以西の観測井

HY2: 東大和第2観測井　HM3: 東村山第3観測井

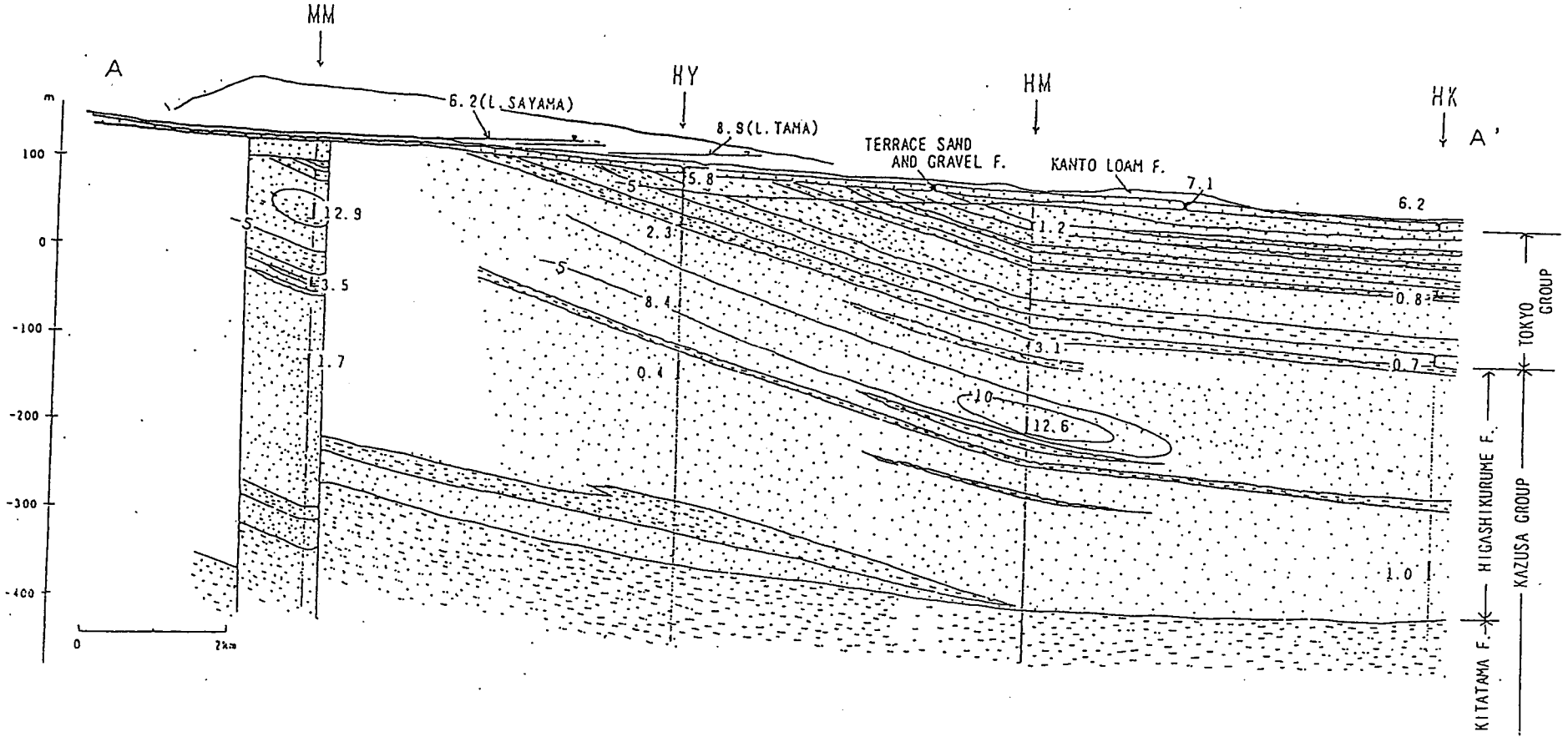


図-6-14. 狭山丘陵南部（ＡＡ'）断面における地下水中のトリチウム濃度分布

MM: 武蔵村山　HY: 東大和　HM: 東村山　HK: 東久留米

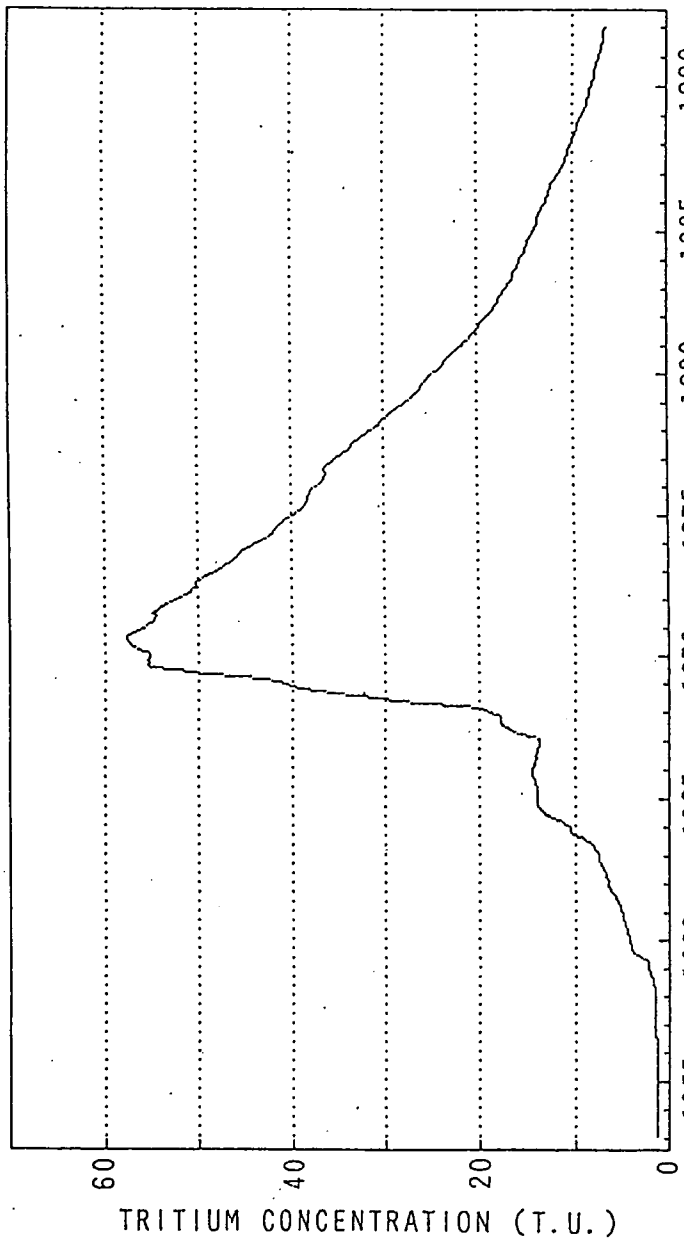


図-6-15. ピストン流モデルによるトリチウム濃度の出力結果

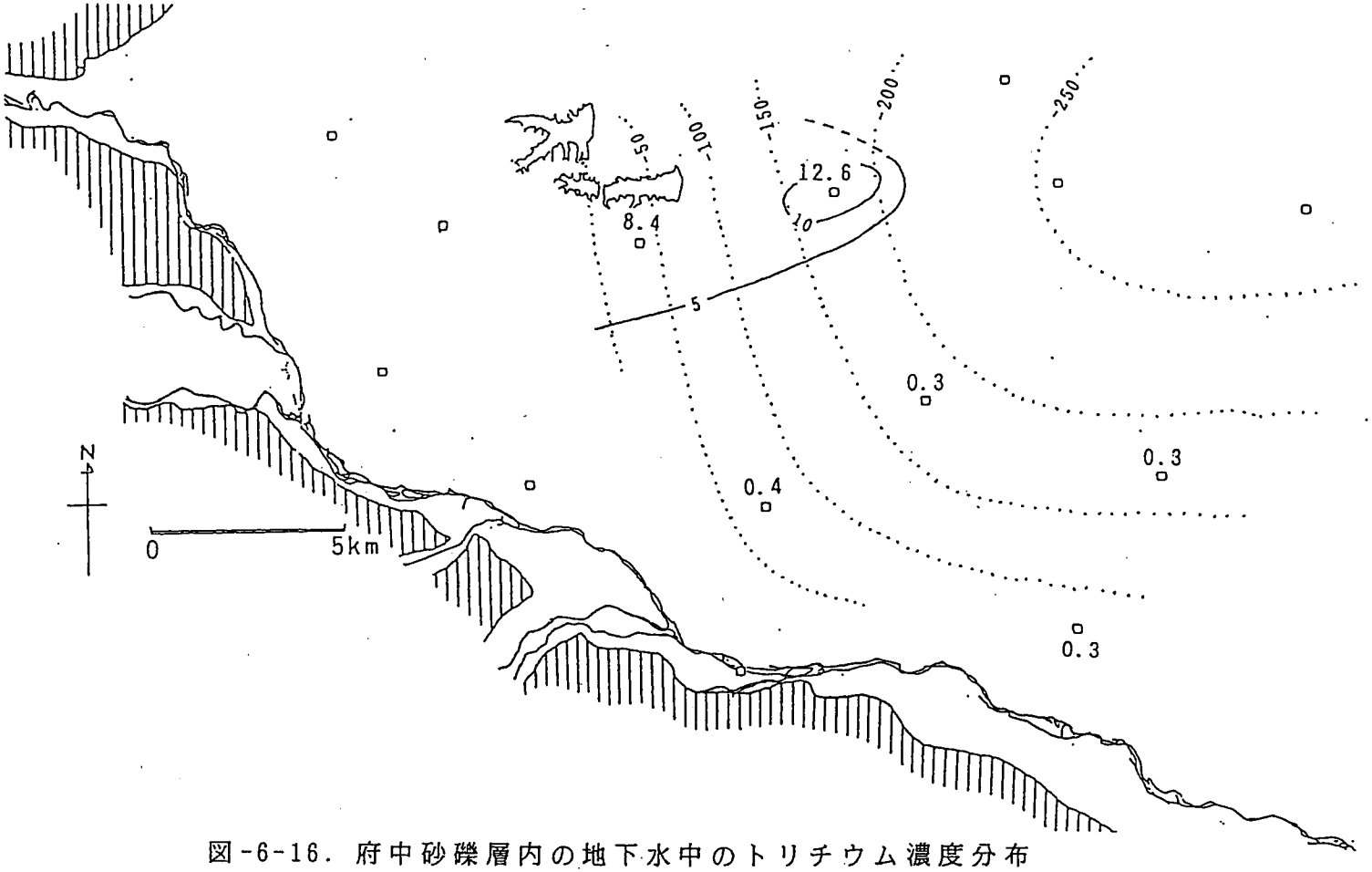


図-6-16. 府中砂礫層内の地下水中のトリチウム濃度分布

実線はトリチウム濃度(単位はT.U.)、点線は東久留米層中位に位置する府中砂礫層の標高(単位はm)を表す。

7．第４回　ＯＥＣＤ／ＮＥＡ　ストリパ　プロジェクト　シンポジウム参加報告概要

（ 4th International Synposium on The OECD/NEA Stripa Project Stockholm 14-16 Oct. 1992 ）

7．１　参加報告概要　１

東京大学　小島　圭二

プログラムの内容は、大テーマだけ以下に示す。

セション１．　天然バリアー特性評価（Natural barriers-characterization）

セション２．　天然バリアーモデリング（Natural Barriers-Modeling）

セション３．　人工バリア（Engineered Barriers）

セション４．　総括報告（Overview reporting）

セション５．　パネルディスカッション（Panel Discussion）

セション１から３までは、このプロジェクトの PhaseⅠから PhaseⅡ（1980 ～ 1992）について、各分野の成果の概要説明である。このプロジェクトの研究・開発の流れと内容が OHPを使って解説された。これらの詳細については、Stripa Overview Reportsが後ほど刊行される予定である。このレポートは、Ⅰ Synopsis、Ⅱ Natural Barriers、Ⅲ Engineered Barriersの三分冊で、今回のシンポジウムの内容は、この分冊のSynopsis に相当するものと思われる技術的な内容については、これらのレポートが出版された時点に譲るとして、ここでは、セション４、５を中心にして、シンポジウムの内容を記述してみる。なお、一部は、上記のOverview Reports Ⅰ Synopsis のドラフトを参考にした。

セション４では、ストリパ プロジェクトの総括が、天然バリア、人工バリアとにわけておこなわれた。ストリパで学んだこと、解ったことについて、以下のような内容のプレゼンテーションがあった。

（１）ストリパ プロジェクトは、社会的、政治的そいて法律的な問題を抜きにして純技術的な問題のみを扱ってきた。そして研究・開発は担当研究者が主

導する方式で、参加各国の技術的な代表と意見交換を行いながら、実施され、多くの成果を得た。

（2）担当研究者は、多くの研究・開発テーマに挑戦して、結晶質岩への地層処分に関する様々な課題を引き出してきた。地層処分サイトの特性評価の方法とそのツールの開発、電磁波トモグラフィーや水理試験機器の開発に焦点があてられた。自然界の、ばらつきの多い岩盤のモデル化と解析結果の実証に関わる方法の開発も注目に値する。人工バリアに関しては、低透水のシール技術として、空洞の埋め戻しと閉塞　、ゆるみ域の修復などが問題になった場合、十分対応できる技術の確立が目標とされた。またこのプロジェクトを通じて、ストリパ花崗岩の物性、地山にかかっている応力や地下水流れの特性などに関する多くの知見が集積され、データベースがつくられた。

（3）多くの分野の研究者、技術者からなる、経験豊かな集団ができたことは、なによりの収穫であった。ただ、各分野間の連携を保つ、インターフェイスの確立まではいかなかったことは、心残りであり、今後各国が、地層処分のプロジェクトを進めるに当たっては、最も留意すべきことと思われる。

ストリパ　プロジェクトの成果は以下のようにまとめられる。

（1）サイト特性に関しては、小規模の岩体については、ジオトモグラフィーや水理試験法などのツールや試験方法が実用化されたこと、割れ目の地下水流れは複雑で、核種移行も含めて、定性的には説明できるようになったが、定量的にはまだ未解決の問題が多いこと、地下水流れは、割れ目モデルや等価の粒状体モデルで表現できること、などが得られた。また地球化学的な方法にもめざましい発展が見られ、とくに同位体計測によって、深い地下水は、少なくとも数千年間は動いていないという知見がえられている。

（2）人工バリアについては、処分空洞の埋め戻しや処分区域への地下水浸入の抑制などの効果が原位置でデモンストレートされた。人工バリア材料の耐久性についても、信頼性をますことができた。

今後の問題としては、サイト評価の手法とツールの実規模サイトへの適用、地下水シミュレーションに関しては、手法の開発は進んだものの、実証面では、多くの問題を残しており、地球化学的な手法もあわせた今後の発展が望まれること、そしてシーリング関係では、ベントナイト以外の材料での原位置試験、

化学的耐久性および注入技術の発展が期待される。さらに空洞掘削にともなう、撹乱に関しては、ストリパでは、周辺の応力や地下水挙動の変化が認められたが、人工バリアの性能や長期安定性に、これらがどのような影響を及ぼすか、設計に関する知見を増す必要がある。

以上を総括すると、ストリパ　プロジェクトの重要な成果は、
（１）国際的な協力のもとにおこなう研究・開発の一つの方法を示し、その成果が大きいことが確認された。
（２）地層処分に関する、諸技術を経験し、また各国への技術のトランスファーができた。
（３）技術的な成果としては、試験機器や数値解析手法、結晶質岩に関する諸データベースの確立、そしてシーリング技術については、原位置でのデモンストレーションができたことなどがあげられる。

セッション５のパネル討論は、各国の研究・開発の現況報告とストリパ　プロジェクトとの関わりといった内容となった。そしてパネリストの共通した意見は、次のように要約される。
（１）ストリパでの研究・開発は、研究担当者が興味あるテーマを追求した、基本的、一般的なものである。したがって地層処分に責任をもつものではなく、安全評価にそのまま使えるものではない。
（２）ストリパでの成果を、より実用的なものにするためには、実規模の試験・研究、サイトスペシフィックな試験・開発が必要である。
（３）今後も、国際的なプロジェクトの存続が望まれる。また、若い研究者・技術者の育成も重要な問題である。とくにストリパ的な研究・開発には、大学の役割が、実用的な方向には、公的機関や企業の役割が大きいと思われる。
（４）ストリパ　プロジェクトはデモンストレーションの効果が大きかった。
（５）ストリパおよび各国での成果を、自国の条件にあわせて反映させるには、ＵＲＬが必要かつ有効に利用されている。
などであった。

7．2　参加報告概要　2

埼玉大学　渡辺　邦夫

今回ストリーパ国際会議に出席した目的は、ストリパ鉱山で測定した蒸発量計測結果をポスターにて発表し、併せてストリーパプロジェクトの問題点を概観することであった。ポスター発表では、岩石の不飽和パラメーターの推定法の提案も行った。

この発表の中で、多くの議論を行った。その中の１つはベントナイトの不飽和パラメーターの同定と、その中の不飽和浸透流の解析ができないかというカナダＡＥＣＬの研究者の話であった。その点について今後情報交換を行うとの合意を見た。

さらに、スイスＮＡＧＲＡの研究者やフランス人研究者など多くの研究者と親密な議論ができた。

次に国際会議の報告を全体的に聞いて、今までの成果や今後の問題について大把みすることができた。その中で、水の流れの解析やシーリングに関して最大の問題は、やはり岩盤中の水みちをどのように把握するかであることを確認した。とくに、水の流れの解析の１つの手法であるフラクチャーネットワーク　モデルでは、従来、ＭＯＮＴＥ－ＣＡＲＬＯ法をベースにした確率的取扱が主流である。この取扱に関しては、イギリスやアメリカの研究者によって、かなり限界まで完成に近づいているとの観がある。しかし、このモデルで考える割れ目数が多くなれば、結局、均質多孔体モデルに近くなり、特定の割れ目から水が出るという割れ目系岩盤の特徴が表現できない。

このことから、従来の確率論的手法は１つの限界に達し、もともとの立場に戻って、どの割れ目のどの部分から実際に水が出ているのか、どの割れ目を水が流れるのかという問題意識に立ち返ってモデル化を行う必要を痛感した。この点については、２、３の外国人出席者と意見の一致を見た。

つまり、釜石やＨＲＬの現場で、どんな地質要因をベースにして、より実際的なモデルを組み立てるかが問題となるのであり、このことを抜きにして、今後のフラクチャーネットモデルは、難しいのではないかということである。

同様なことはシーリングの問題についても言えることである。水の主要な流れ経路を予測することを抜きにして、的確なシーリングは困難である。

こういった水みちの把握が大事であることを浮き彫りにしたことが、ストリーパプロジェクトの研究面での最大の成果と考える。

ストリーパ国際会議の後、スイスに行き、ＮＡＧＲＡの技術者とグリムゼン地下研究所と本社において議論した。その内容は、岩盤の不飽和特性の評価の研究と釜石で行われている岩盤の凍結融解試験の結果報告であった。

凍結融解試験は、ＮＡＧＲＡと動燃事業団が計画している岩盤中のＭｉｇｒａｔｉｏｎ　Ｔｅｓｔに関係して興味を持たれた。つまり、トレーサーを流し、、その後岩盤を乱さないようにいかに試料を採取するかに関して、レジン注入と岩盤凍結の２つの方法のうち、どちらを採用するかについて、釜石の実験情報が大事なのである。これについては、今後さらに議論を続けてゆかねばならない。

このように今回のストリーパ国際会議出席とＮＡＧＲＡとの議論により、今後の問題点を把握し、又、今後の国際協同研究の進展の手掛かりが得られた。

7．3　参加報告概要　3

京都大学　　田中　誠

1. 目的

1. 第4回ストリーパ国際会議に参加し、ストリーパプロジェクトにおける放射性廃棄物処分の研究の現状を調査すること
2. 各国における低・中レベルおよび高レベル放射性廃棄物処分場候補地の現状を調査すること

2. 日程

10/12　ベルギー・モル王立原子力研究センター訪問
10/13　第4回ストリーパ国際会議ウェルカムレセプション参加（スウェーデン・ストックホルム）
10/14　第4回ストリーパ国際会議参加
10/15　第4回ストリーパ国際会議参加・同シンポジウムディナー参加
10/16　第4回ストリーパ国際会議参加
10/17　スウェーデン・エスペハードロック研究所訪問（会議の一環）
10/19　スイス・グリムゼル地下研究所訪問
10/21　米ニューメキシコ州・WIPP訪問
10/23　米ネバダ州・ヤッカマウンテンサイト訪問

3. ストリーパ国際会議

第4回ストリーパ国際会議は、10月14日から16日までの3日間、ストックホルムのTrygg-Hansaビルのホールにおいて、19か国177名のストリーパ計画に関係する研究者を集めて行われた。

会議のプログラムは次のようであった。

Opening Session
Session 1: NATURAL BARRIERS — Characterization
Session 2: NATURAL BARRIERS — Modelling
Session 3: ENGINEERED BARRIERS
Session 4: OVERVIEW REPORTING
Session 5: PANEL DISCUSSION

4. エスペハードロック研究所

運営主体　　スウェーデン核燃料廃棄物管理会社(Swedish Nuclear Fuel and Waste

Management Company, SKB)
地質　　花崗岩
掘削方法　発破（素掘り）
撮影　　可

エスペは、バルト海のスカンジナビア半島沿岸に接するように浮かぶ、2km四方にもおよばない小さい無人島である。半島（大陸）側から斜坑を掘削していき、島の地下部分に達してから螺旋状にトンネルを掘削する予定である。螺旋は3周する予定であるが、現在は1周したところまで掘削されている。

5. モル王立原子力研究所

運営主体　政府
地質　　boom粘土
掘削方法　シールド
撮影　　可（フランス研究チームの領域は不可）

boom粘土は、事実上不透水（透水係数が小さいものでは10^{-12}cm/sec程度）のほぼ均質な厚さ約100mにおよぶ層を形成している。処分場はこの粘土層の中につくられることになっている。

6. グリムゼル地下研究所

運営主体　ナグラ(Swiss National Cooperative for the Storage of Radioactive Waste, NAGRA)
地質　　花崗岩
掘削方法　TBM（素掘り）、NATM
撮影　　可

非常に良好な花崗岩の地山にTBMで直径3mのトンネルを掘削していた。透水試験等の実験設備をおく空洞は発破によって掘削していたが、空洞上半部にほんの申し訳程度に吹き付けされているだけであった。

7. WIPP

運営主体　連邦エネルギー局(Department of Energy, DOE)
地質　　岩塩
掘削方法　発破（鋼製支保・無支保）
撮影　　不可

当サイトの岩塩層は古生代から中生代にかけて堆積した。岩塩層が堆積しているということは、地下水の流れが皆無であるということを意味する。

トンネルは長方形断面であるが、クリープによるせり出しが年間数cmにも達する例があった。

塩が目に入るといけないので、入場者はゴーグルの着用を義務づけられる。坑道のエレベーター乗り場には非常用洗眼台が設けられている。

8. ヤッカマウンテンサイト

運営主体　連邦エネルギー局(Department of Energy, DOE)
地質　凝灰岩
掘削方法　TBM
撮影　不可

当サイトは、ネバダ砂漠の中央の乾燥地帯にある。年間降水量は約150mmであり、そのほとんどが蒸発する。また、火山活動が盛んで、凝灰岩質の平原に火成岩の丘が点在する。

処分場建設予定地となった地点は、地表面下の厚さ数百mにおよぶ不飽和帯の中である。訪問当時は、45本のボアホールが掘削されていたのみで、アクセストンネル工事は始まったばかりであった。

当サイトは以前から空軍用地であり、現在も軍の厳しい管理のもとにおかれている。入場者は発信器付き名札を着用することを義務づけられる。サイトの入口は武装した兵士によって見張られており、名札がチェックされる。発信器によって入場者は常に監視されている。当局によって定められた訪問スケジュールを守らない場合は、兵士に警告される。