

土 木 研 究 所 資 料

岩盤の流水抵抗則に関する研究

平成3年3月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

Copyright © (1991) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

岩盤の流水抵抗則に関する研究

フィルダム研究室	研究員	山口 嘉一
	研究員	安仁屋 勉
	室 長	松本 徳久

要 旨

高透水性岩盤の水理特性を正確に把握するために、同一の試験地点において実施した高粘性流体を用いた透水試験とルジオンテスト、あるいはルジオンテストのみの結果から岩盤の層流および乱流の流水抵抗則を求める方法を提案するとともに、モデルダムおよび室内試験での実測データに適用した結果を報告する。さらに、乱流の抵抗則も考慮できる浸透流解析プログラムを用いて、モデルダムの漏水量算定も試みたのであわせて報告する。

キーワード：ダム、透水試験、流水抵抗則、漏水量

TECHNICAL MEMORANDUM OF
P.W.R.I. No. 2968

A Study on Flow Resistance Laws of Rock Masses

Yoshikazu YAMAGUCHI
Research Engineer, Fill Dams Division
Tsutomu ANIYA
Research Engineer
Dr. Norihisa MATSUMOTO
Chief

Synopsis:

We have developed new field permeability testing methods in order to grasp permeability characteristics as input property for seepage analysis. In this paper, we reported these testing procedures and interpretation methods to get resistance laws in both laminar and turbulent flow conditions of jointed rock foundation. Furthermore, we have developed seepage analysis program with which we can take laminar and turbulent flow conditions into consideration. By using this program, we also predicated amount of leakage from some dam reservoir and reported the results.

Keywords: Dam, Permeability test, Flow resistance law, Leakage

はじめに

地盤内を流れる水も含めて、地盤を対象にした建設工事は非常に多い。こうした建設工事の実施に際して、地盤の透水則を把握しておけば、その設計・施工に非常に役立つ。地盤が土質基礎である場合、その透水則については古くから研究されており、現象の解明はかなり進んでいる。ダルシー (Darcy) の法則が最も基本的な透水則であることは衆知のことと思われる。

一方、岩盤の透水性は土質基礎のように土粒子間隙に依存しているのではなく、複雑に分布する割れ目という透水性の卓越部分に依存しているため、その透水現象は極めて複雑である。しかし、エネルギーの備蓄、地層処分などの地下空間の利用および水資源開発に伴う地下ダムの開発、トンネルの掘削等の必要性の高まりに伴い、岩盤における透水現象の解明に大きな期待が寄せられている。特に、我々が携わっているダムに関していえば、以下の示すような観点から岩盤の透水現象の解明が望まれている。

近年、良好なダムサイトの減少に伴い、地下水位が低く、かつ高透水性岩盤上にもダムの建設に対する要求が高まりつつある。このような高透水性岩盤サイトにおいても、ダムの湛水に伴い発生する基礎浸透流の動水勾配が小さいことを考えると、巨視的に岩盤の層流状態での透水係数を求め、Darcy の法則に基づく浸透流解析により得られる貯水池からの漏水量をパラメータに合理的な止水処理範囲を決定できるのではないかと考えた。そのためには、水を用いた透水試験、一般にルジオンテストでは結果に乱流の影響を受けることを避けられない高透水性岩盤の層流時の流水抵抗則、つまり透水係数を原位置で測定する方法を開発しなければならない。具体的な対策として、水の代わりに高粘性の流体を地盤に注入する透水試験を実施し、高透水性岩盤の透水係数を得ることに成功した。その試験方法および結果については既に報告している^{1)~3)}。しかし、同時に、ダムの湛水により基礎岩盤に発生する程度の小さい動水勾配の浸透流でも、乱流状況にあるような岩盤も存在することも判明した。そのため、岩盤の透水係数のみを把握してダム貯水池からの漏水量を Darcy 則で算定することの精度に疑問が生じた⁴⁾。そこで今回は、これまでの研究をさらに一歩進めて、同一の試験地点において実施した高粘性流体を用いた透水試験とルジオンテスト (一般のルジオンテストより圧力制御および流量測定精度の高いもの) の結果から高透水性岩盤の層流および乱流時の流水抵抗則を求める方法⁵⁾、あるいは高精度のルジオンテストの結果のみから流水抵抗則を求める方法について提案するとともに、これらの方法を実際のダムでの現場試験データ³⁾、および室内試験で得られたデータに適用し、その精度を検討した結果についても報告する。さらに、本研究と並行開発していた乱流の流水抵抗則も考慮できる浸透流解析プログラム⁶⁾を用いて、上記ダムでの漏水量の算定も試みたので併せて報告する。

なお、本研究の一部は、平成元年度科学技術振興調整費による重点基礎研究課題「岩盤における透水抵抗則に関する研究」として実施したことをここに付記することにより、御協力賜った関係各位への謝意に代えさせて頂きたい。

目 次

はじめに

1. 研究概要	1
2. 透水試験の原理と結果の解釈法	2
2.1 概要	2
2.2 岩盤モデルの設定と浸透流の基本式	2
2.2.1 概要	2
2.2.2 層流型の場合の基本式	3
2.2.3 乱流型の場合の基本式	4
2.2.4 乱層流型の場合の基本式	6
2.2.5 流れの形態の判定	6
2.3 抵抗則の求め方	7
2.3.1 概要	7
2.3.2 高粘性流体試験と高精度のルジオンテストから求める方法	8
2.3.3 高精度のルジオンテストの結果のみから求める方法	9
2.4 高粘性流体試験	10
2.4.1 概要	10
2.4.2 層流ルジオン値の算定	10
2.4.3 層流限界圧力の算定	13
2.5 高精度のルジオンテスト	15
3. 現場試験および室内試験	16
3.1 概要	16
3.2 現場試験	16
3.2.1 概要	16
3.2.2 試験サイトの概要	16
3.2.3 試験方法	17
3.2.4 試験結果	20
3.2.5 流水抵抗則	24
3.3 室内試験	46
3.3.1 概要	46
3.3.2 供試体	46

3.3.3	試験方法	47
3.3.4	試験結果	49
3.3.5	流水抵抗則	55
4.	現場での適用に際しての留意点	60
4.1	概要	60
4.2	異方性	60
4.3	均質性	60
4.4	水平流	60
4.5	ポテンシャル流	60
5.	乱流抵抗則を考慮した浸透流解析	61
5.1	概要	61
5.2	解析条件	61
5.3	解析結果	63
6.	ま と め	65
	謝 辞	67
	参考文献	68
	参考試料 1	
	透水性コンクリート供試体の配合決定試験	69
	参考資料 2	
	Oダムサイトにおける第三法の適用例	75
	付 図	
	浸透流解析結果	83

1. 研究概要

本研究においては、岩盤の透水現象を解明することを主目的に以下に示す検討を実施した。

- ① 岩盤の層流および乱流時の抵抗則を求めるための高粘性流体試験と高精度のルジオンテストの方法を紹介する。
- ② ①の両試験結果から岩盤の層流および乱流時の抵抗則を求める方法を示す。
- ③ 高精度のルジオンテストの結果のみから層流および乱流時の抵抗則を求める方法を示す。
- ④ 室内試験により、②、③の方法の精度を検証する。
- ⑤ ダムサイトで実施した試験結果にも②、③の方法を適用する。
- ⑥ 層流および乱流の抵抗則を考慮できる浸透流解析プログラム⁶⁾を使用し、上記ダムからの漏水量を試算するとともに、合理的止水処理範囲の提案を試みる。

2. 透水試験の原理と結果の解釈法

2.1 概要

高透水性岩盤において多段圧力注水式の透水試験であるルジオンテストを実施すると、結果として得られる注入圧力と注入量の関係（以後、 $p-q$ 曲線と呼ぶ）は、注入圧力が大きくなればなる程、注入圧力を縦軸として下に凸の曲線を描く逐次流量減少型の $p-q$ 曲線^{7), 8)} となる。この原因は、岩盤内の水流が乱流になったことにある。本章では、高透水性岩盤のモデルを設定し、そのモデル岩盤の基本式を導き、その理論式を適用して乱・層流の抵抗則を求めるのに必要な現場透水試験とその原理について述べることにする。

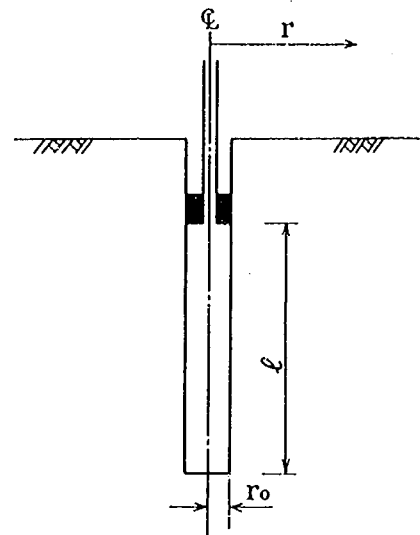
2.2 岩盤モデルの設定と浸透流の基本式⁷⁾

2.2.1 概要

後述する現場透水試験結果から層流および乱流時の流水抵抗則を求めるために、岩盤モデルを設定し、そのモデル地盤に対してルジオンテストを実施した場合（図—2.1 参照）の岩盤内の浸透流（放射流）の基本式を誘導する。

まず、岩盤モデルに以下の仮定を設ける。

- ①対象岩盤はマクロにみて均質な多孔質媒体と考える。
- ②異方性については考慮しない。
- ③試験孔からの水の流れはポテンシャル流で、かつ孔軸に垂直である。



図—2.1 ルジオンテストの概要

以上の仮定を考慮したうえ、岩盤内の層流および乱流時の運動方程式はそれぞれ（2.1）式、（2.2）式で表現するものとする。

なお、この岩盤モデルと実岩盤の差異をいかに考慮すれば後述の試験が現場試験として適用するか、等については4章で詳述する。

(1) 層流時の抵抗則（運動方程式）

$$i = v / k \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ここに、 i ：動水勾配、

v ：見かけの流速、

k ：透水係数。

(2) 乱流時の抵抗則（運動方程式）

$$i = c v^n \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

ここに、 c, n ：乱流の抵抗則を示す定数。

(2.1) 式は多孔質媒体の層流状態の運動方程式として有名な Darcy 則である。一方、乱流状態の運動方程式には (2.2) 式以外に、 $i = a v + b v^2$ (a 、 b は定数) なる式もある⁹⁾ が、今回は式形が比較的扱い易い (2.2) 式を採用した。ただし、両式とも 2 変数表示であることに変わりなく、浸透流の表現精度に大きな差はないものとする。

なお、一次元流を想定すると、流れは層流と乱流の 2 種類である (実際には、2 つの流れの間に遷移的な領域¹⁰⁾ があるが、ここでは考慮しないこととする。また、それによる誤差は、さほど大きくないものとする¹¹⁾。) が、今回対象とするルジオンテスト時の放射流には、図 2.2 に示す①層流型、②乱流型、③乱層流型の 3 種類がある。よって、以下では、各種流れ形態ごとに浸透流の基本式を導くことにする。

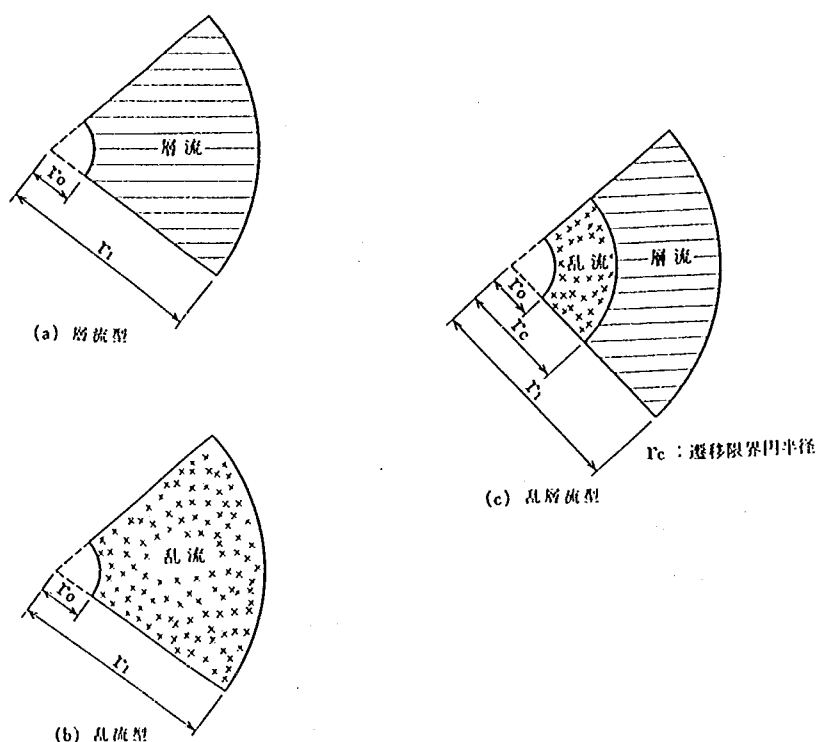


図 2.2 ルジオンテストを対象にした流れ状態の分類 (放射流)

2.2.2 層流型の場合の基本式 (図 2.2(a) 参照)

定圧注入された試験孔からの水流が層流であるとする、次式が成り立つ。

$$v = ki = -k \frac{\partial \phi}{\partial r} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

ここに、 ϕ : 速度ポテンシャル, r : 半径方向座標。

また、連続方程式は、他の流れ形態も考慮すると、

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q}{2\pi\ell} &= rv = r_0 v_0 = r_1 v_1 = r_c v_c \\ v_c &= v_{cr} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.4)$$

ここに、 Q は試験孔からの注入量、 ℓ は試験区間長である。 v_0 、 v_1 、 v_c はそれぞれ r が r_0 、 r_1 、 r_c 地点での流速である。また、 v_{cr} とは層流と乱流との限界における限界流速である。

(2.3)式、(2.4)式より、

$$Q = -2\pi\ell k r \frac{\partial \phi}{\partial r} \dots\dots\dots (2.5)$$

この微分方程式を $r: r_0 \rightarrow r$ 、 $\phi: h_0 \rightarrow h$ の範囲で解くと、

$$h_0 - h = \frac{Q}{2\pi\ell k} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) \dots\dots\dots (2.6)$$

ここに、 h_0 は $r=r_0$ （孔壁部）でのポテンシャル値で、有効注入圧力の水頭表示に等しい。

(2.4)式、(2.6)式より、任意地点 r での流速 v は次式として求めることができる。

$$v = \frac{k(h_0 - h)}{r \ln(r/r_0)} \dots\dots\dots (2.7)$$

さらに、影響半径 r_1 （理論解を求める際、その地点での圧力を0と見なしても差し支えない地点と試験孔中心軸との距離）を想定し、 $r=r_1$ で $h=h_1=0$ （ここに、 h_1 は $r=r_1$ でのポテンシャル値）なる境界条件のもとで(2.4)式を(2.7)式に代入すると、試験孔からの注入量 Q は次式として得られる。

$$Q = vA = v \times (2\pi r \ell) = \frac{2\pi\ell k h_0}{\ln(r_1/r_0)} \dots\dots\dots (2.8)$$

ここに、 A は試験区間孔壁面積を示す。

(2.8)式を透水係数 k について整理すると、

$$k = \frac{Q}{2\pi h \ell} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) \dots\dots\dots (2.9)$$

2.2.3 乱流型の場合の基本式（図—2.2(b)参照）

まず、(2.1)式、(2.2)式に層流から乱流に移行する点での限界動水勾配 i_{cr} 、限界流速 v_{cr} を代入すると、

$$i_{cr} = \frac{1}{k} v_{cr} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

$$i_{cr} = c v_{cr}^n \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

(2.10) 式、(2.11) 式より乱流の抵抗則を示す定数 c と n には次式の関係が成立する。

$$c = \frac{v_{cr}^{1-n}}{k} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

さらに、(2.12) 式を乱流の抵抗則 (2.2) 式に代入すると、

$$i = c v^n = \frac{1}{k} \left(\frac{v_{cr}}{v} \right)^{1-n} v = \frac{1}{k(v)} v \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

ここに、 $k(v)$ ($= k (v_{cr}/v)^{n-1}$) は、乱流域にも層流域の Darcy 則を拡張した場合の見かけ透水係数に当たるものである。

試験孔からの水流方向が水平で、かつ影響半径までの区間が乱流であるとする (図—2.2 (b)参照)、

$$v = k(v) i = -k \left(\frac{v_{cr}}{v} \right)^{n-1} \frac{\partial \phi}{\partial r} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

(2.14) 式と連続方程式である (2.4) 式より、

$$Q^n = - (2 \pi \ell)^n k v_{cr}^{n-1} r^n \frac{\partial \phi}{\partial r} \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

この微分方程式を $r: r_0 \rightarrow r$, $\phi: h_0 \rightarrow h$ の範囲で解くと、

$$h_0 - h = \left(\frac{Q}{2 \pi \ell} \right)^n \frac{r_0^{1-n} - r^{1-n}}{k v_{cr}^{n-1} (n-1)} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

(2.4) 式と (2.16) 式より、任意地点 r での流速 v は次式として求めることができる。

$$v = \left\{ \frac{(h_0 - h) k v_{cr}^{n-1} (n-1)}{r^n (r_0^{1-n} - r^{1-n})} \right\}^{1/n} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

さらに、影響半径 r_1 を想定し、 $r = r_1$ で $h = h_1 = 0$ なる境界条件と (2.4) 式を (2.17) 式に代入すると、試験孔からの注入量 Q は、

$$Q = 2 \pi \ell \left\{ \frac{h_0 k v_{cr}^{n-1} (n-1)}{r_0^{1-n} - r_1^{1-n}} \right\}^{1/n} \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

2.2.4 乱層流型の場合の基本式 (図—2.2(c)参照)

この型の流れでは、図—2.2(c)に示すように、 $r_0 \leq r < r_c$ で乱流、 $r_c \leq r \leq r_1$ で層流である。

まず、(2.15) 式を $r: r_0 \rightarrow r_c$, $\phi: h_0 \rightarrow h_c$ (ここに、 h_c は $r = r_c$ におけるポテンシャル値) の範囲で、(2.5) 式を $r: r_c \rightarrow r_1$, $\phi: h_c \rightarrow h_1 = 0$ の範囲で解くと、

$$h_0 - h_c = \left(\frac{Q}{2\pi\ell} \right)^n \frac{(r_0^{1-n} - r_c^{1-n})}{k v_{cr}^{n-1} (n-1)} \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

$$h_c = \frac{Q}{2\pi\ell k} \ell n \left(\frac{r_1}{r_c} \right) \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

(2.19) 式、(2.20) 式より h_c を消去したうえで、(2.4) 式を用いて Q を消去すると次の等式が得られる。

$$h_0 = (r_c v_{cr})^n \frac{(r_0^{1-n} - r_c^{1-n})}{k v_{cr}^{n-1} (n-1)} + (r_c v_{cr}) \frac{\ell n(r_1/r_c)}{k} \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

(2.21) 式をニュートン (Newton) 法等により数値的に解くことで、未知のパラメータ r_c を求める事ができる。 r_c が決まれば、次式より乱層流型の場合の注入量 Q を求めることができる。

$$Q = 2\pi\ell r_c v_c = 2\pi\ell r_c v_{cr} \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

2.2.5 流れの形態の判定

前述したとおり、ルジオンテストにより発生する浸透流の形態には、①層流型、②乱流型、③乱層流型の3種類がある。それでは、ある圧力あるいは水頭で注入された場合、これらの3つの浸透流形態のどれに当たるかの判定は以下の手順に従う。

① まず、層流型になると仮定したうえで、最大流速が発生する孔壁部での流速

$v_0 \left(= \frac{k h_0}{r_0 \ell n(r_1/r_0)} \right)$ を算出し、それが、限界流速 v_{cr} より小さい場合は層流型と判定する。

② そうでない場合は、乱流型を仮定したうえで、最小流速が発生する影響半径地点 ($r = r_1$)

での流速 $v_1 \left(= \left\{ \frac{h_0 k v_{cr}^{n-1} (n-1)}{r_1^n (r_0^{1-n} - r_1^{1-n})} \right\}^{1/n} \right)$ が v_{cr} より大きい場合は乱流型、小さい場合は乱層流型と判定する。

2.3 抵抗則の求め方

2.3.1 概要

ここでは高透水性岩盤の層流および乱流抵抗則を高粘性流体試験と高精度のルジオンテスト、あるいは高精度のルジオンテストの結果のみから求める手順を示す。なお、試験方法については、過去の論文^{1)~5)}で発表しているが、2.4で後述する。

まず、抵抗則を決定するに際し原位置試験で求めるべき物性値を整理するために、前節でルジオンテストを対象に誘導した層流型、乱流型、乱層流型の流れの基本式を再掲する。

(1)層流型

$$Q = \frac{2 \pi \ell k h_0}{\ell n(r_1/r_0)} \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

(2)乱流型

$$Q = 2 \pi \ell \left\{ \frac{h_0 k v_{cr}^{n-1} (n-1)}{r_0^{1-n} - r_1^{1-n}} \right\}^{1/n} \quad \dots\dots\dots(2.18)$$

(3)乱層流型

$$h_0 = (r_c v_{cr})^n \frac{(r_0^{1-n} - r_c^{1-n})}{k v_{cr}^{n-1} (n-1)} + (r_c v_{cr}) \frac{\ell n(r_1/r_c)}{k} \quad \dots\dots\dots(2.21)$$

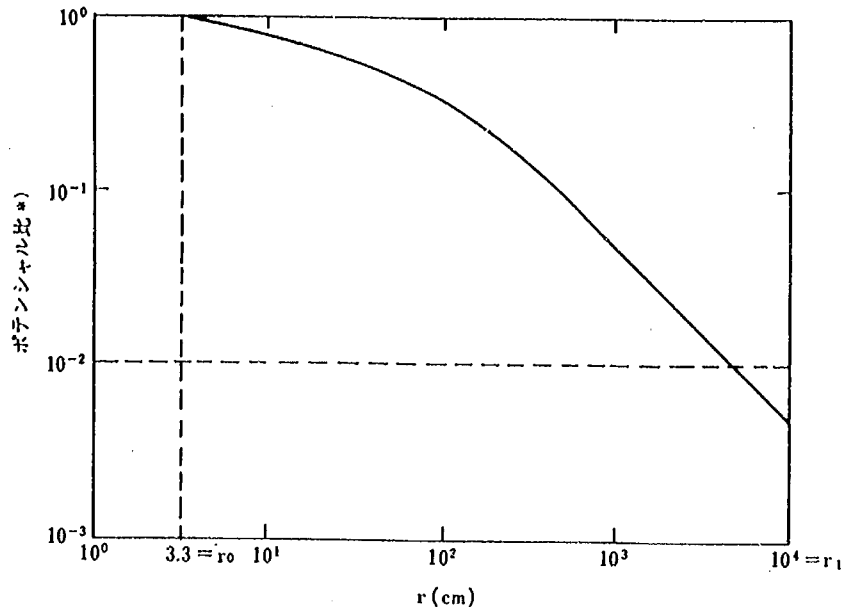
(2.21) 式を Newton 法等により数値的に解くことで、未知のパラメータ r_c を求める事ができる。 r_c が決まれば、次式より乱層流型の場合の注入量 Q を求めることができる。

$$Q = 2 \pi \ell r_c v_{cr} \quad \dots\dots\dots(2.22)$$

その流れの形態によらずルジオンテスト時の流量は、以下の物性値の関数で与えられる。ただし、層流型の場合は、 n が落ちる。

$$Q = \text{Func}(\ell, h_0, k, h_0, v_{cr}, n, r_0, r_1) \quad \dots\dots\dots(2.23)$$

上式中、 ℓ 、 r_0 は試験区間の寸法であり、影響半径 r_1 は、試験孔から地盤への水の流れが Darcy 則に従い、かつ試験孔軸上に存在する湧源からのポテンシャルフローであると仮定した場合に、任意点でのポテンシャルが孔壁部 ($r = r_0$) のその 1% 以下に減じるところまでの距離として 100m (ただし、 $\ell = 5$ m、 $r_0 = 3.3$ cm の場合。図—2.3 参照) 程度とすれば問題ないと考えられる。また、 Q と h_0 の多くの組み合わせがルジオンテストの結果として得られることから、 v_{cr} 、 k を原位置試験 (これが高粘性流体試験) で得ることができれば乱流抵抗則を表す係数 n を実測値と予測値の残差の 2 乗和が最小になるようにして求めることができる。なお、 c は v_{cr} 、 k 、 n から求めることができる。



注) *) ポテンシャル比とは、任意地点のポテンシャル値を孔壁部のポテンシャル値で除したものである。

図- 2. 3 試験孔周辺地盤内のポテンシャル分布⁷⁾

2. 3. 2 高粘性流体試験と高精度のルジオンテストから求める方法⁵⁾

この方法は v_{cr} と k を高粘性流体を用いた透水試験を実施することにより求めておいて、さらにルジオンテストから n を求めるという方法である。

高粘性流体試験の原理等については後述するが、ここでは試験結果から v_{cr} と k を直接求めるのではなく、ルジオンテストの結果に乱流の影響を受ける場合に、その水流が層流であると仮定した時のルジオン値である層流ルジオン値 $Lu'\ell$ と注入水が層流状態で流れる最大の注入圧力 p_{ec} を求めているので、 v_{cr} と p_{ec} および k と $Lu'\ell$ の関係を示す。

透水係数 k は、高粘性流体試験で得られる層流ルジオン値 $Lu'\ell$ ($\ell/\text{min}/\text{m}$) から以下の方法で求まる。

ルジオンテスト孔の標準寸法として、 $\ell = 500\text{cm}$ 、 $r_0 = 3.3\text{cm}$ とすると、試験区間 5 m 当りの流量 Q (cm^3/s) は (3.24) 式で得られる。

$$Q = \frac{5000}{60} Lu'\ell \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

この層流状態での流量 Q を次式に代入すると透水係数 k が得られる。

$$k = \frac{Q}{2\pi h\ell} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

v_{cr} は高粘性流体試験で得られる層流限界圧力水頭 h_c (層流限界圧力 p_{ec} の水頭表示) を用いて次式から求める。

$$v_{cr} = \frac{k h_c}{r_0 \ell n(r_1/r_0)} \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

n は、その値を順次変化させて前述の理論式による数値計算を行い、それから得られる圧力、流量関係とルジオンテストの結果として得られるその残差の 2 乗和が最小となる値として推定した。以後、この 1 変数変動による方法を第一法と呼ぶ。

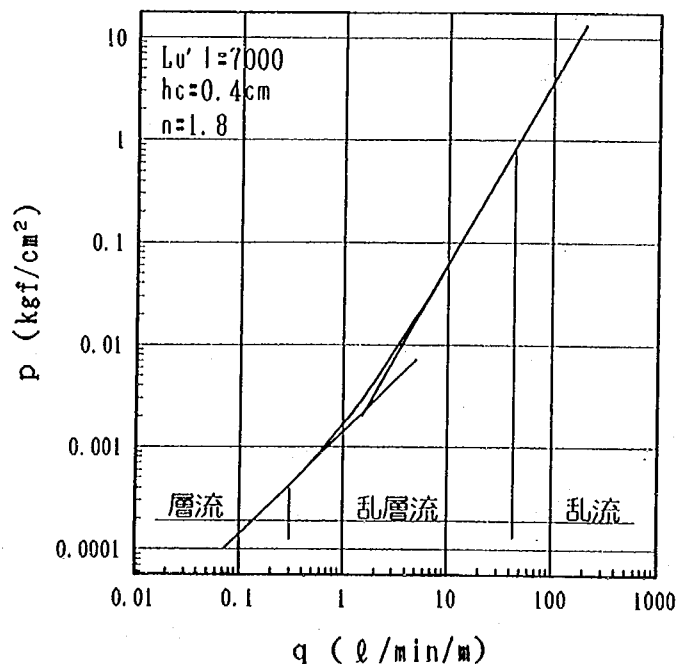
また、高粘性流体試験結果から層流限界圧力水頭を求めるのが困難な場合 (いかなる困難があるかは 2.4 で後述する。)、あるいは層流限界圧力水頭の決定誤差が全体精度に与える影響が大きい場合は、 p_{ec} と n の値の組み合わせを順次変化させて理論式による数値計算を行い、それから得られる圧力、流量関係とルジオンテストから得られるその残差の 2 乗和が最小になる場合の p_{ec} と n を推定すればよい。この方法を用いれば、後述する高粘性流体試験において、層流限界圧力を推定するためには必要な粘性段階を若干省略できるという利点がある。以後、この 2 変数 (n 、 p_{ec}) 変動による方法を第二法と呼ぶ。

2.3.3 高精度のルジオンテストの結果のみから求める方法

この方法は、高粘性流体試験を実施せず、 $Lu'\ell$ 、 p_{ec} 、 n の値の組み合わせを順次変化させて理論式による数値計算を行い、それから得られる圧力、流量関係とルジオンテストから得られるその残差の 2 乗和が最小になる場合

の $Lu'\ell$ 、 p_{ec} 、 n の組み合わせを求めるものである。以後、この 3 変数 ($Lu'\ell$ 、 p_{ec} 、 n) 変動による方法を第三法と呼ぶ。

乱流の影響を受けているルジオンテストの $p-q$ の関係を、 $Lu'\ell$ 、 p_{ec} 、 n を仮定して (2.8) 式、(2.18) 式、(2.22) 式により算定し、両対数紙上にプロットすると図—2.4 に示すような形状となる。この図から、 $p-q$ の関係は、両対数紙上において、乱層流型の範囲では注入圧力の増加に伴って勾配が次第に急になり、完全に乱流になると一定勾配となることがわかる。



図—2.4 注入圧力と注入量の関係

ここで、乱流型の流量を算定するための理論式 (2.18) 式を h_0 について解くと、次式が得られる。

$$h_0 = \frac{r_0^{1-n} - r_1^{1-n}}{2 \pi \ell k v_{cr}^{n-1} (n-1)} Q^n \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

この式中のべき数 n は、両対数上における乱流域での p 、 q 関係の直線勾配を表している。このことから (2.27) 式は、

$$h_0 = \alpha Q^n \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

ここに、 α ：定数とおける。

この2つの式から、両対数紙上で直線となる乱流域での p 、 q 関係を満足する k と v_{cr} ($Lu'\ell$ と p_{ec}) の組み合わせは無数にあることがわかる。

このことから、ルジオンテストの結果のみから流水抵抗則を求めるためには、少なくとも乱層流域でのデータを得る必要があることがわかる。

実際の現象では、水流の影響半径が不明確であるため、はっきりと乱層流型と乱流型の区別ができるとは考え難いが、両対数紙上で勾配が徐々に急になる乱層流域での $p-q$ の連続した傾向がある程度得られれば、第三法の適用は可能であると考えられる。ただし、そのためには、極力低圧部に重点をおいて、通常5段階で行われるルジオンテストをさらに多段階で実施する必要があると考える。

2.4 高粘性流体試験³⁾

2.4.1 概要

本試験の目的は、ルジオンテストの結果に乱流の影響を受ける高透水性岩盤において、粘性が既知の高粘性流体を注入し、注入圧力、注入量、粘性の関係から、層流形態で流れると仮定した時のルジオン値 $Lu'\ell$ 、およびルジオンテストにおいて水を注入した際にその水流が層流状態で流れる限界の注入圧力である層流限界圧力 p_{ec} を推定することにある。

2.4.2 層流ルジオン値の算定

流体の抵抗係数とレイノルズ数 Re の関係は、図—2.5 のようになることが知られている。レイノルズ数の極めて小さい領域 ($Re = 10^{-5} \sim 10^{-6}$ 以下) では抵抗係数の極めて大きい高粘性流が存在するが、レイノルズ数がある程度大きくなると抵抗係数とレイノルズ数が反比例するダルシー流 (層流) となり、レイノルズ数がさらに大きな値となると、乱流となる。この層流と乱流の臨界のレイノルズ数が限界レイノルズ数 Re_{cr} である。なお、レイノルズ数は (2.29) 式で表される無次元量である。

$$R_e = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad \dots\dots\dots (2.29)$$

ここに、 R_e ：レイノルズ数、
 v ：流速、
 d ：流路の代表寸法
 ν ：動粘性係数 ($\nu = \mu / \rho$)、
 μ ：粘性係数、
 ρ ：密度。

流況を乱流から層流にするには、レイノルズ数を小さくすればよい。レイノルズ数を小さくするには、流速下げるか、粘性を上げることになるが、流体の粘性を上げれば、抵抗が増加するため同一の注入圧力では流速が減少し、結果的にレイノルズ数がより小さくなり、大きな効果が期待できる。

透水試験に先立って、どの程度の粘性の流体より層流が得られるかを予測することはできない。そこで実際には、流体の粘性を段階的に上げていき、レイノルズ数を段階的に減少させ、図—2.5に示した抵抗係数とレイノルズ数の関係で直線関係の成り立つ層流域を探す手順をとる。

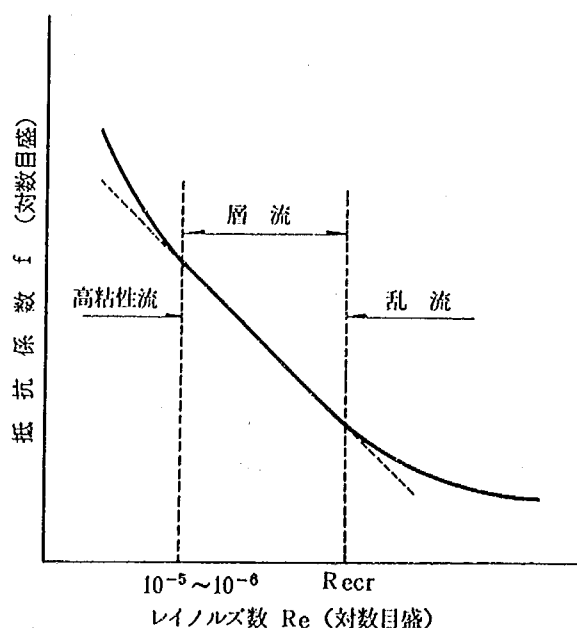
以下に層流状態における抵抗係数とレイノルズ数の関係が、透水試験時に流量と粘性の関係に現れることを示す。

使用する記号は以下のとおりである。

F ：流線方向の有効力 ($F = p \cdot A$)、
 p ：流線方向の有効圧力、
 A ：断面積、
 f ：抵抗係数、
 g ：重力加速度、
 v ：流速、
 R_e ：レイノルズ数、
 ρ ：流体の密度、
 B ：流れの断面の周長の代表寸法、
 L ：流れ方向の代表寸法、
 μ ：粘性係数、
 ν ：動粘性係数 ($\nu = \mu / \rho$)。

今、微少区間の流れの力学的釣り合いを考える。

流れ方向の力の差は、壁面との摩擦抵抗に等しいから (2.30) 式が成り立つ。



図—2.5 流体の抵抗係数とレイノルズ数の関係

$$F = f \cdot \frac{\rho}{2} v^2 \cdot L \cdot B \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

上式を f について解くと、

$$f = \frac{2 \cdot F}{\rho \cdot v^2 \cdot L \cdot B} \quad \dots\dots\dots (2.31)$$

層流状態では、図—2.5 からも明らかなように $Re \cdot f = C_0$ (定数) であるから、(2.29) 式および (2.31) 式より次式が得られる。

$$\frac{v \cdot d}{\nu} \cdot \frac{2 \cdot F}{\rho \cdot v^2 \cdot L \cdot B} = C_0 \quad \dots\dots\dots (2.32)$$

(2.32) 式を v について解くと、(2.33) 式が得られる。

$$v = \frac{2 \cdot d}{B \cdot C_0} \cdot \frac{1}{\rho \cdot \nu} \cdot \frac{F}{L} = \frac{2 \cdot d \cdot A}{B \cdot C_0} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{p}{L} = K \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{p}{L} \quad \dots\dots\dots (2.33)$$

ここに、 $K = (2 \cdot d \cdot A) / (B \cdot C_0)$ 。

(2.33) 式の右辺において、 K は通過する媒体の形状係数で、媒体固有の値であり、固有浸透係数と呼ばれる。したがって、圧力勾配 p/L を一定とすれば、流速 v と粘性係数 μ は反比例する。

いま、圧力勾配を動水勾配に置き換えると、

$$\frac{p}{L} = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{L} = \rho \cdot g \cdot \frac{H}{L} = \rho \cdot g \cdot i \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

ここに、 H は流線方向の有効圧力の水頭表示、 i は動水勾配である。

(2.34) 式を (2.33) 式に代入すると、(2.35) 式として抵抗則が得られる。

$$v = K \cdot \frac{g}{\nu} \cdot i \quad \dots\dots\dots (2.35)$$

すなわち、動水勾配を一定とすれば、流速と動粘性係数が反比例する。

流速と流量は比例するから、結局、圧力勾配を一定とした試験においては流量と粘性係数が反比例し、動水勾配を一定とした試験においては流量と動粘性係数が反比例することがわかる。

よって、一定の圧力のもとで実施した試験の結果得られた流量と粘性係数との関係を図—2.6 のようにプロットするところにより、層流状態が確認できる。

図一 2. 6 の縦軸は流量比で、上に行くほど流量が小さく、横軸は粘性比で、右に行くほど粘性が高くなる。流量比、粘性比の基準値は原則として水とし、それぞれ q_w 、 μ_w と添え字 W を付けて示してある。同様に添え字 H は高粘性流体を示している。なお、目盛りはいずれも対数目盛りとした。以下、本図を $q-\mu$ 対数曲線と呼ぶ。

いま、試験の有効注入圧力を一定 (p_0) としたとき、粘性が段階的に上がり、流れが層流に至ると、データポイントは傾きが 45° の直線に乗ってくる。この直線と $\mu_H / \mu_w = 1$ (縦軸) との交点を $q_{L/T}$ とすれば、この試験圧力下で仮に水が層流で流れた時の流量 q_{WL} を (2.36) 式により推定できる。

$$q_{WL} = q_w / q_{L/T} \quad \dots\dots\dots (2.36)$$

この q_{WL} と試験圧力 (p_0) により、層流時の換算ルジオン値を (2.37) 式で求めることができる。

$$L u' \ell = \frac{10}{p_0} \cdot q_{WL} \quad \dots\dots\dots (2.37)$$

ここに、 $L u' \ell$: 高粘性流体試験により求まる層流時の換算ルジオン値、

p_0 : 試験注入圧力 ($\text{kg f} / \text{cm}^2$)、

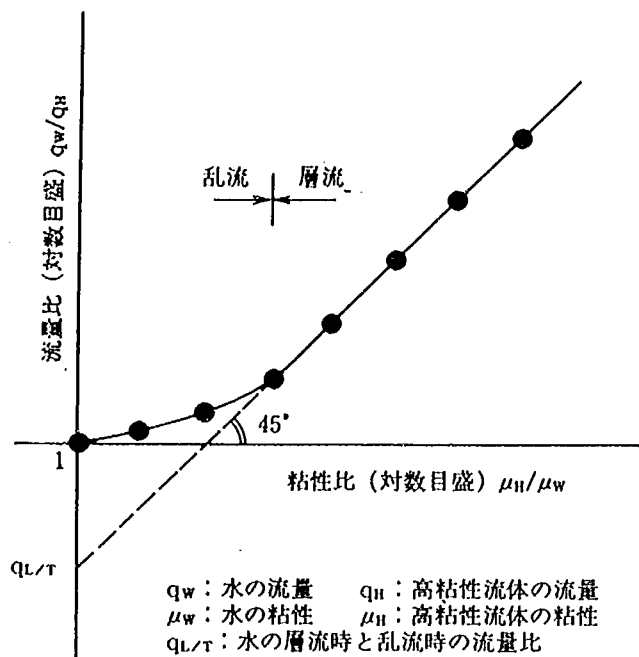
q_{WL} : 試験圧力における水の層流状態の推定流量 ($\ell / \text{min} / \text{m}$)。

この層流ルジオン値を通常ルジオン値や換算ルジオン値を区別して、「粘性換算層流ルジオン値」と定義する。

2.4.3 層流限界圧力の算定

高粘性流体試験結果をもとに、水のルジオンテストでは、どの程度の注入圧力以下で層流が得られるかを推定できる。この圧力を層流限界注入圧力と呼び、記号 p_{ec} で表す。

圧力 p_0 なる高粘性流体試験において、粘性 μ_{Hcr} から層流へ移行し、このときの流量を q_H とする。この臨界点におけるレイノルズ数 Re_H と同じレイノルズ数が達成される流れであれば、



図一 2. 6 高粘性流体試験における流量比と粘性比の関係

水においても層流が得られる。限界レイノルズ数 R_{ecr} となる水の流速を得る圧力が p_{ec} となる。

層流の流速と注入圧力の関係は、(2.33) 式に示すとおりである。

水の場合も高粘性流体の場合も臨界点では層流条件が成り立つから、流速と圧力の関係(2.38) 式、(2.39) 式が成り立つ。

$$v_{Hcr} = K \cdot \frac{1}{\mu_{Hcr}} \cdot \frac{p_0}{L} \quad \dots\dots\dots(2.38)$$

$$v_{Wcr} = K \cdot \frac{1}{\mu_W} \cdot \frac{p_{ec}}{L} \quad \dots\dots\dots(2.39)$$

ここに、 v_{Hcr} ：高粘性流体試験の乱流から層流への遷移時の流速、

v_{Wcr} ：ルジオンテスト時の層流限界注入圧力の流速、

μ_{Hcr} ：高粘性流体試験の乱流から層流への遷移時の粘性、

μ_W ：水の粘性。

一方、(2.40) 式、(2.41) 式で示す両レイノルズ数が等しいとすると、(2.42) 式が得られる。

$$R_{eH} = \frac{\rho_H \cdot v_{Hcr}}{\mu_{Hcr}} \quad \dots\dots\dots(2.40)$$

$$R_{ecr} = \frac{\rho_W \cdot v_{Wcr}}{\mu_W} \quad \dots\dots\dots(2.41)$$

$$\frac{\rho_H \cdot v_{Hcr}}{\mu_{Hcr}} = \frac{\rho_W \cdot v_{Wcr}}{\mu_W} \quad \dots\dots\dots(2.42)$$

(2.42) 式に、(2.38) 式、(2.39) 式を代入し、 p_{ec} を (2.43) 式として得る。

$$p_{ec} = \left(\frac{\mu_W}{\mu_{Hcr}} \right)^2 \cdot \frac{\rho_H}{\rho_W} \cdot p_0 \quad \dots\dots\dots(2.43)$$

使用する高粘性流体の密度 ρ_H が近似的に水の密度 ρ_W と等しければ、 p_{ec} は (2.44) 式で推定できる。

$$p_{ec} \doteq \left(\frac{\mu_W}{\mu_{Hcr}} \right)^2 \cdot p_0 \quad \dots\dots\dots(2.44)$$

実際、我々が採用した高粘性流体では、 $\rho_H \doteq \rho_W$ である。

2.5 高精度のルジオンテスト

一般のルジオンテストは事前に測定すべき圧力段階を決めておく方式であるが、高透水性岩盤を対象にして、乱流および層流の抵抗則を求める場合は、ポンプ能力と測定点数（なるべく多くの点がほしい）のかねあいから、圧力の単純なステップ割をして設定値を決定するだけでなく、流量にも設定値を設ける必要がある。すなわち、ある圧力段階から次の圧力段階に上げるときに、圧力が設定値に達していなくても流量が設定値に達した場合には、その規定の流量時の圧力を測定する方式をとるわけである。

また、圧力測定には孔内挿入式圧力計を用い、有効注入圧力を直接測定できるようにし、測定精度を高める必要がある。

3. 現場試験および室内試験

3.1 概要

ダム基礎となるような岩盤は、その透水性のメカニズムから次の3種に分類できる。すなわち、

- ① 開口性節理を有する硬岩のような、岩質自体はほとんど不透水で、岩体内の割れ目が透水経路となっているもの
- ② 岩体内には透水経路となるような割れ目は存在しないが、岩質自体の間隙に依存した透水性があるもの
- ③ ①、②の中間的なもの、すなわち岩質自体の透水性と割れ目による透水性の両方が関与しているもの

に区分できる。本章では①および②に区分される岩盤を想定し、①については現場試験を、②についてはそのような岩盤を想定した多孔質媒体（透水性コンクリート、ガラスビーズ）を用いて室内で透水試験を行った。これらの試験で得られたデータを用いて、第一、二、三法で層流および乱流抵抗則を求めた。

3.2 現場試験^{1) - 5)}

3.2.1 概要

本節では3.1 ①に区分される高透水性の割れ目岩盤を試験サイトとして、高精度のルジオンテストと高粘性流体試験を実施した。その結果、ルジオンテストにおいては $p-q$ の関係が注入圧力が大きくなればなる程、層流を想定した場合よりも注入量が小さくなるいわゆる逐次流量減少型となり、乱流状態を示した。一方、高粘性流体試験結果より粘性換算層流ルジオン値と層流限界圧力を算定することができた。また、この両値とルジオンテストのデータから乱流抵抗則を求めた。

3.2.2 試験サイトの概要

試験を実施したのは九州地方のダム建設予定地点である。このダムサイトでは、リム部に開口した冷却節理の発達した第四紀の安山岩質の溶岩が分布し、高透水ゾーンとなっている。高粘性流体試験は、このゾーンの乱・層流抵抗則を求めるのに必要な層流ルジオン値と層流限界圧力を把握する目的の調査として実施した。

試験の対象とした図—3.1に記号E Lで示す輝石安山岩質の溶岩は、その岩質は比較的新鮮で、透水性に関与するのは節理面を主とする割れ目である。主たる六角柱状節理面は水平に対し約70度の傾斜で立っているため、透水試験孔の角度により割れ目との遭遇率が大きく異なり、ルジオン値が異なることが既往の調査により指摘されている。また、川よりでは山よりに比べ透水性が大きいことも指摘されている。地下水位は季節により多少の変動があるが、試験実施時期においては、横坑（R—1坑）の下盤から約3 m下に存在し、試験は全て地下水位以深で実施した。

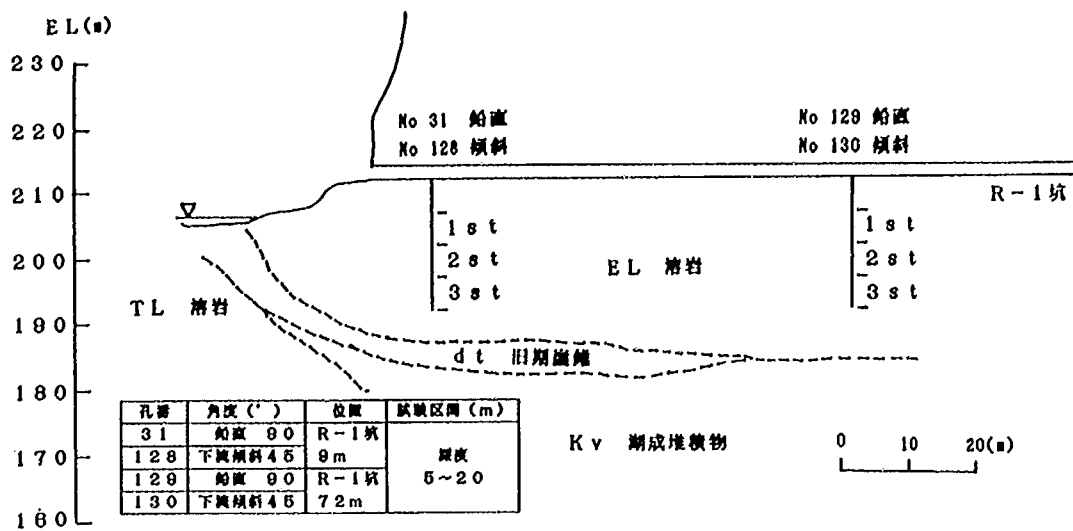


図-3.1 試験サイトの地質模式断面図と試験位置

3.2.3 試験方法

(1)試験孔

試験孔は横坑内からボーリングすることにより設け、その位置は既設調査（グラウトテスト、ピット式透水試験等）の影響の小さい位置で、横坑坑口からそれぞれ9.0m、72.0mの2箇所とした。また、節理の角度を考慮し、それぞれの位置で鉛直孔と45度の傾斜孔（下流傾斜）を設けた。各試験孔の諸元を表-3.1に示す。

試験深度は、横坑下盤から5.0~20.0mとし、ステージ割りは3st（5m/st）とした。図-3.2に試験孔の模式図を示す。

表-3.1 試験孔諸元

区 分	孔番	孔長(m)	角度(°)	位 置	試験区間(m)
既設孔	31	45.0	90	R-1坑内 坑口から	深度 5.0~20.0
新設孔	128	20.0	下流向き 45	9.0m地点	
	129		90	R-1坑内 坑口から	
	130		下流向き 45	72.0m地点	

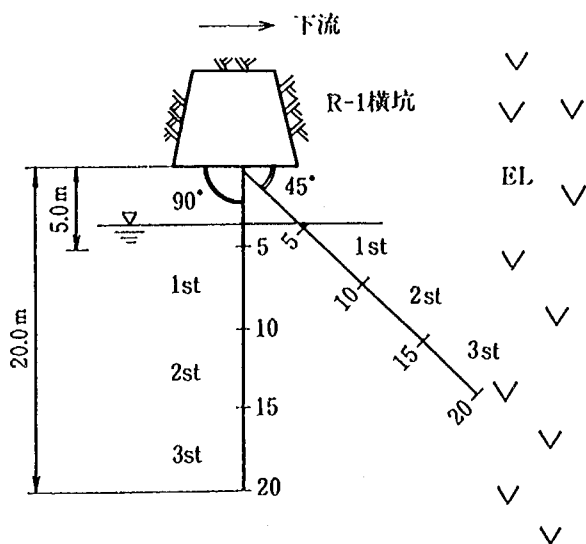


図-3.2 試験孔の模式図

(2)高精度のルジオンテスト

高精度のルジオンテストは、高粘性流体試験に先立って実施し、この試験結果により高粘性流体透水試験の注入圧力の設定と粘性の割り振りの決定及び、後述する乱流の抵抗則を求める際に必要な $p-q$ のデータを得ることを目的としている。高粘性流体試験の注入圧力は、岩盤に大きな変形を与えない範囲で、水から水の1000倍程度の粘性の流体までの流量が測定可能範囲に入るように設定しなければならない。すなわち、高透水性の場合は注入圧力を小さくし、低透水性の場合には注入圧力を大きくする必要がある。具体的には、低透水の場合には、一般のルジオンテストと同様に設定した圧力のもとでの流量を測定し、高透水の場合には、設定した流量時の圧力を測定すればよい。圧力測定には孔内挿入式圧力計を用い、直接有効注入圧力が測定できるようにし、測定精度を高めた。

(3)高粘性流体の選定

試験に用いる高粘性流体は、次の条件を満足しなければならない。

- ① 近似的に、ニュートン流体（せん断摩擦力とせん断速度が一次比例する流体）とみなせること。
- ② 温度や時間変化によって、物性が変化しないこと。

上記の条件を満たすものとしては、グリセリン、水ガラス、流動パラフィン、エチレングリコール、寒天、メチルセルロース系の増粘剤等があるが、環境上の問題、経済性、物性試験の結果から総合的に判断してメチルセルロース系の増粘剤の水溶液を使用することにした。

(4)高粘性流体試験

試験に使用する高粘性流体の粘性の選定に当たっては、この種の試験の実施例がほとんどないことから、試験に使用できる粘性範囲の限界を知りたいこともあって、水から若干の非ニュートン性の表れる水の1000倍程度までの粘性範囲から10種類を選択することとした。

高粘性流体の粘度の割り振りは、水から最終粘性までが指数的に規則的に配置することが望ましいが、5 $\text{mpa} \cdot \text{s}$ 以下の粘性の測定が難しいことから、最も粘性の低い高粘性流体の粘性 5 $\text{mpa} \cdot \text{s}$ として、以後を指数的に増加する粘性が得られる配合とした。

注入圧力は、原則として、水の注入量がステージ当たり、およそ 50 ℓ/min となる注入圧力としたが、この圧力が非常に小さく設定が困難なときは、設定可能な最小の圧力で実施した。ただし、この場合は流量がスケールアウトとすることが予測される低粘性の流体は試験を省略した。粘性比の基準値は通常水であるが、この場合は水の粘性を使用した流体の最小粘性として試験結果をプロットした。

(5)試験設備

図一 3.3 に機械設置と配管系統を示す。

横坑外に高粘性流体の作成プラントを設け、ここで作成した高粘性流体は坑内の貯液タンクにポンプ圧送し、脱気、温度調整を行った。

ルジオンテストも、高粘性流体試験も同一の設備を用いて行った。流量、圧力の制御は電磁流

量計と注入ポンプに装備したインバータにより行った。流量は電磁流量計により測定し、圧力は孔内挿入式の圧力センサーにより測定した。注入配管内の口元に透明の亚克力管を設け、高粘性流体中に含まれる気泡を観察できるようにした。

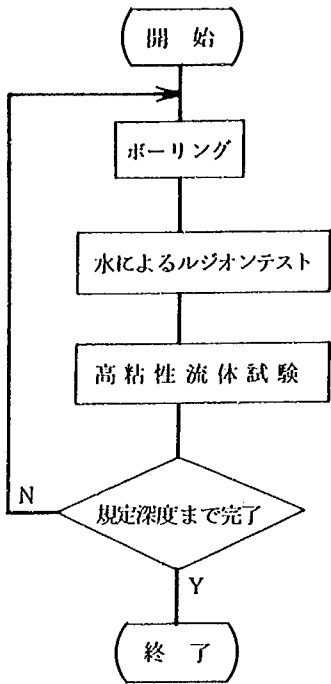
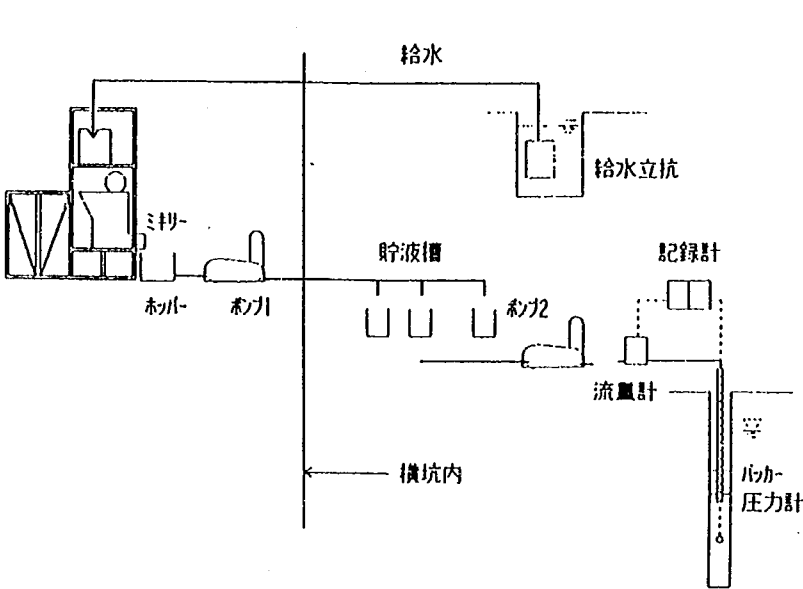
高粘性流体試験時には、それぞれの高粘性流体の注入開始直前に流体の温度、粘性、比重を測定した。

試験に使用した機械・計器の仕様を表－3.2に示す。

使用した機械の機種を選定に当たっては、事前にミキサー、ポンプの能力、配管の径について予備試験を行って決定したものであるが、ほとんどグラウチングに使用している機械である。

(6)試験手順

試験フローを図－3.4に示す。



図－3.3 機械配置と配管系統

図－3.4 試験のフロー

表－3.2 使用機器の仕様

名 称	型 式	仕 様	出力kW	用 途	台数
揚水ポンプ	水中ポンプ	φ50mm 高揚程	2.2	給水	1
ミキサー	MPM-10	150rpm, 300ℓ×2, 横型2槽	3.7	作液	1
グラウトポンプ	MG-10	2速複動, 0～120ℓ/min, 0～70kgf/cm ²	7.5	送液・注入	2
電磁流量計	CAMISA-FG12L	圧力:15,30kgf/cm ² , 流量:15,120ℓ/min, ±1%FS		流量測定記録	1
孔内圧力センサ	棒型	アンブ内蔵式, 0～15kgf/cm ² , ±1.5%FS		圧力測定	1
タンク		1 m ³		貯液・脱気	10
粘度計	CVR-20	回転粘度計 校正済		粘度測定	1
比重計		比重浮秤		比重測定	1式
温度計		0～50℃, 1℃目盛り		温度測定	4

3.2.4 試験結果

図—3.5 に高精度のルジオンテストの $p-q$ 曲線図を、図—3.6 に高粘性流体試験の $q-\mu$ 曲線図を示す。

また、図—3.6 中にはこれらの結果から得られた各ステージの粘性換算層流ルジオン値 (Lu')、乱流から層流への遷移点の粘性比を示す。

なお、No128孔では透水性が極めて高く、高粘性流体試験における最小の粘性の流体を水とすると、水のときの流量を 50 l/min 程度にするには注入圧力を極めて低くしなければならず精度上の問題があると判断し、第一段階の粘性から高粘性流体を使用した。

試験結果に問題のあったステージとその問題点は以下のとおりである。

No128孔の 1 st ではルジオンテストの結果に乱流の影響が見られない。

No128孔の 2 st、No130孔の 3 st では高粘性流体試験における乱流の影響を受けたデータが少なく、層流限界圧力が推定できない。

No128孔の 3 st は、他目的の試験に変更した。

No129孔の 1 st は、非定常の影響により高粘性流体試験結果の信頼性が低く、層流限界圧力を推定できない。

No129孔の 3 st は、透水性が極めて小さいため、高粘性流体の注入量が極めて小さくなることが予想され、測定精度・計測時間の点で問題があり、高粘性流体試験は実施しなかった。また、このステージではルジオンテストの結果に乱流の影響がみられない。

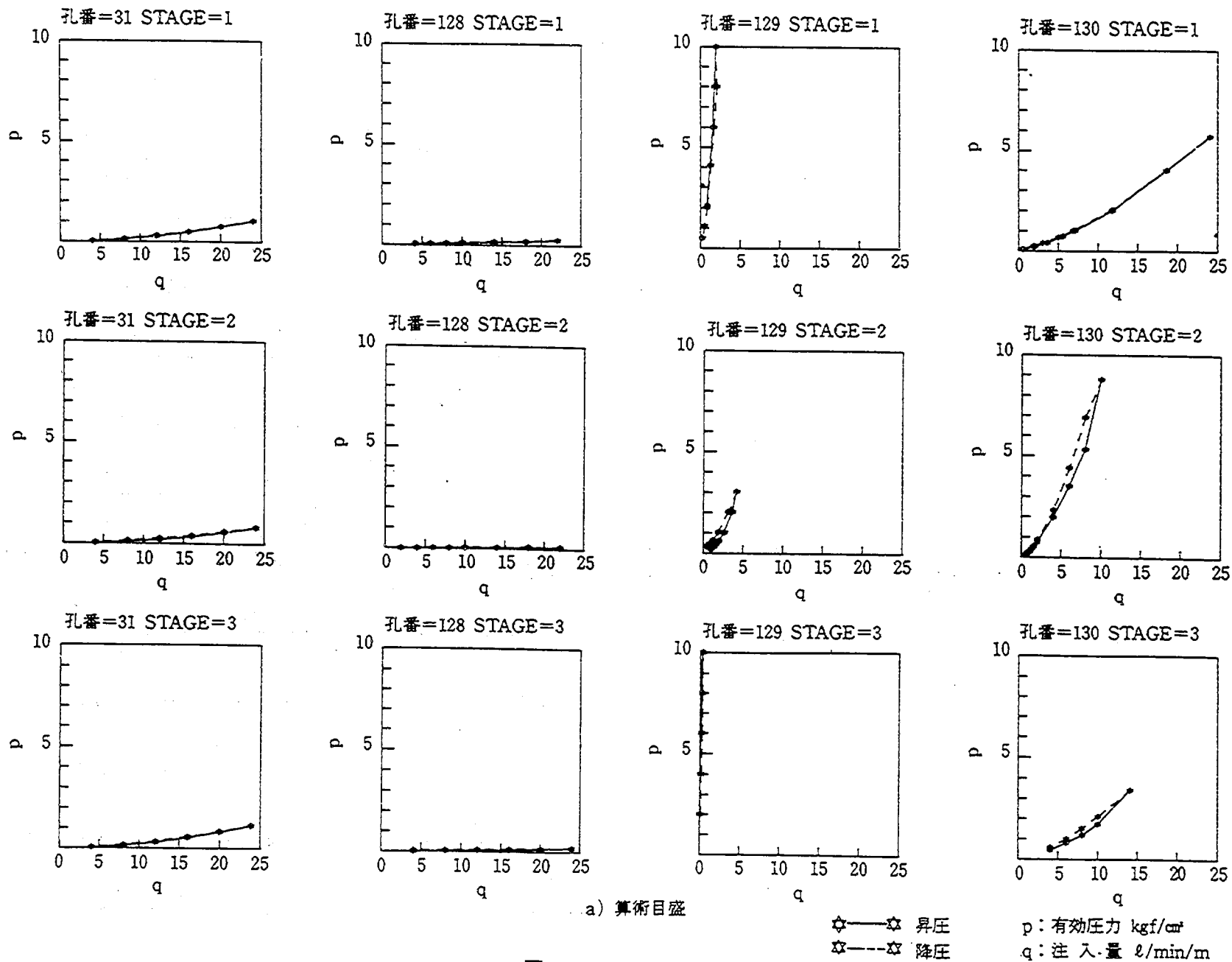


図-3.5 $p-q$ 曲線図(1)

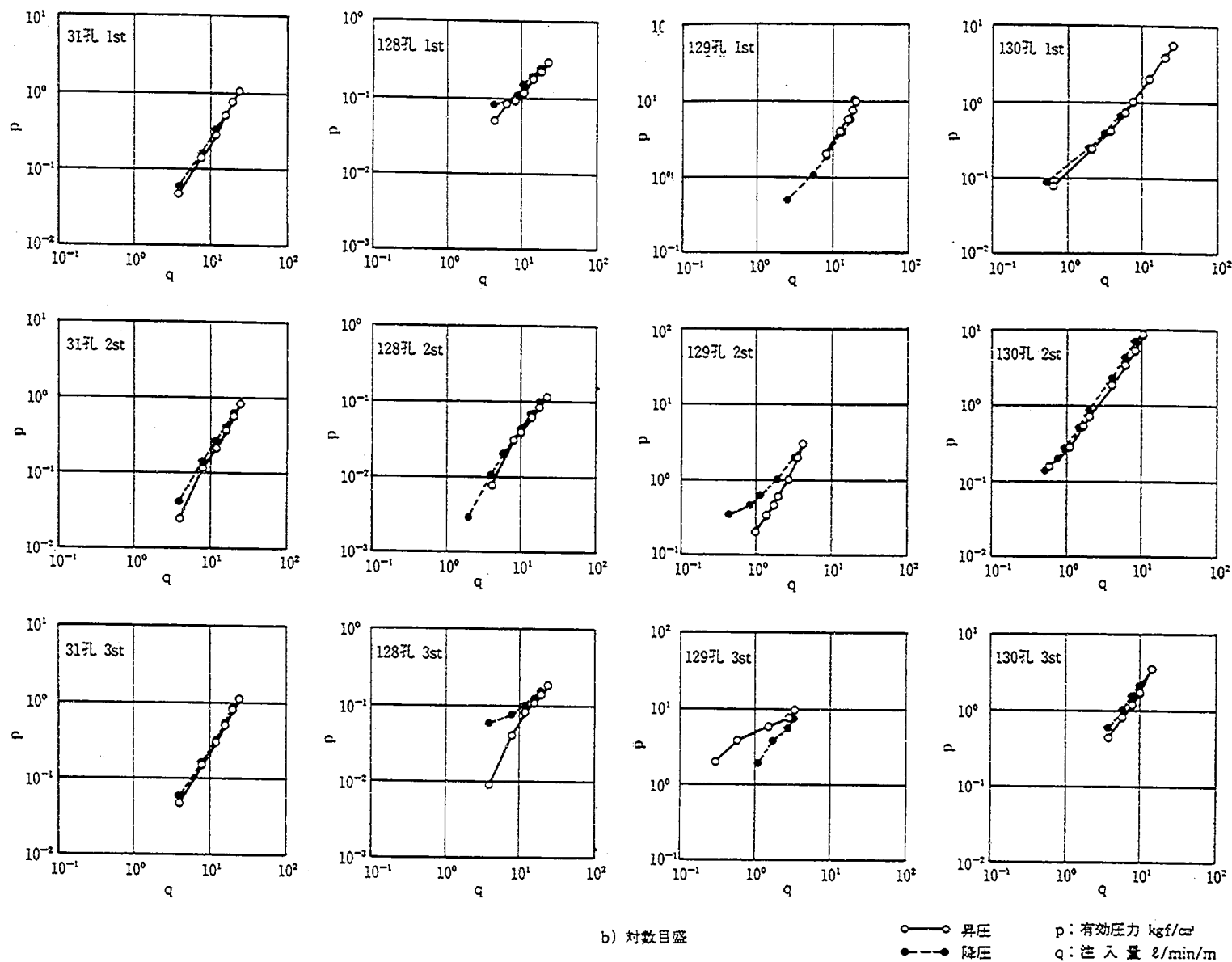


図-3.5 $p-q$ 曲線図(2)

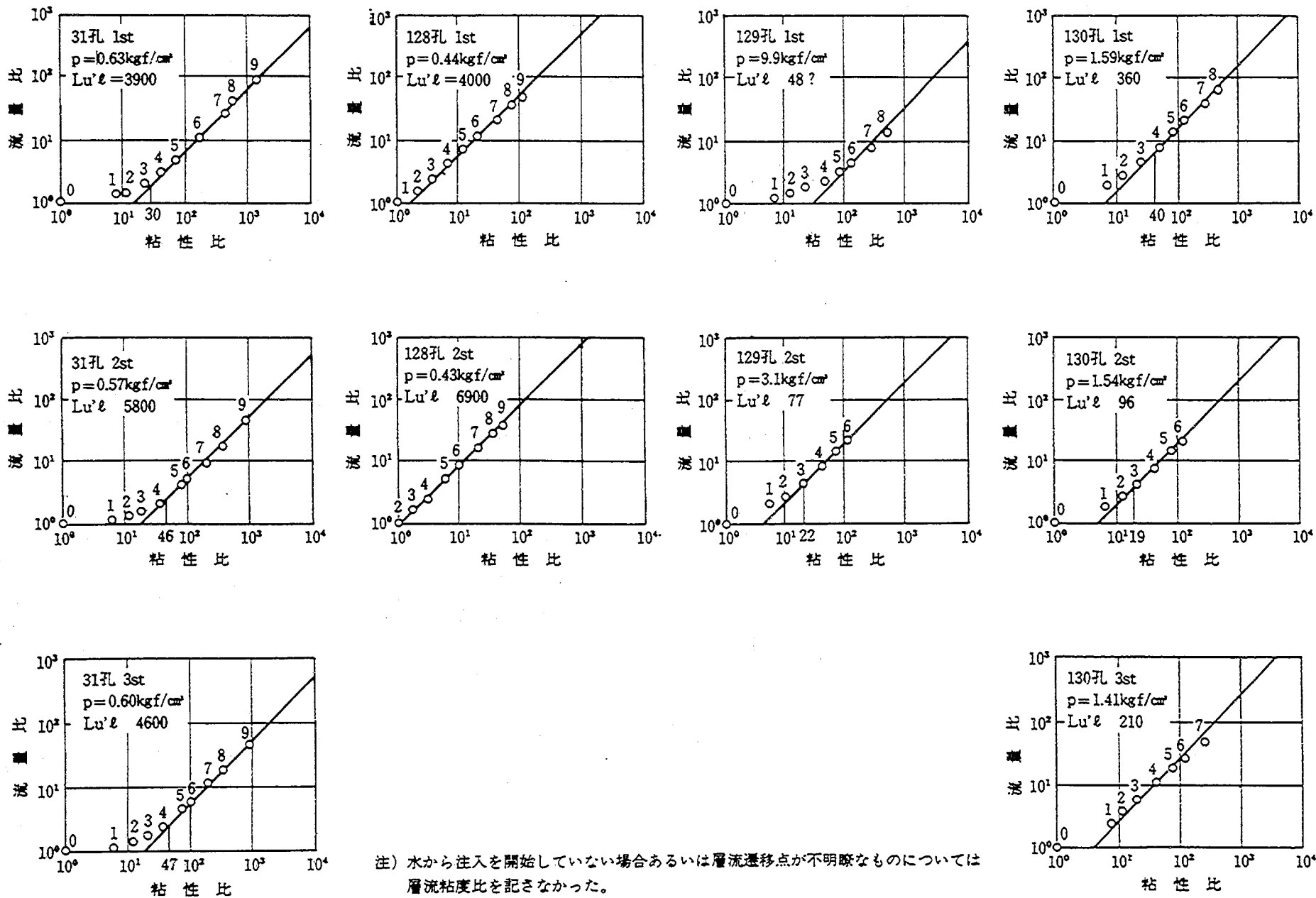


図-3.6 $q-\mu$ 曲線図

3.2.5 流水抵抗則

(1)第1法による解析結果

2.3.2に示した第一法により求めた層流ルジオン値 $Lu'\ell$ 、層流限界圧力 p_{ec} 、限界動水勾配 i_{cr} 、層流限界流速 v_{cr} 、透水係数 k 、乱流抵抗則の定数 n 、 c を表—3.3に示す。

表—3.3 試験結果一覧 (第一法)

孔-st	Lu'l	$P_{1c} \times 10^{-3} \text{kgf/cm}^2$	i_{cr}		$v_{cr} \text{ cm/s}$	$k \text{ cm/s}$		n		$c \text{ (cm,s単位)}$		備考
			$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$		$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$	$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$	$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$	
31-1	3900	0.70	0.042	0.026	2.19×10^{-3}	5.19×10^{-2}	8.29×10^{-2}	2.01	2.14	9160	12900	
31-2	5800	0.27	0.016	0.010	1.26×10^{-3}	7.72×10^{-2}	1.23×10^{-1}	1.89	2.01	4930	6750	
31-3	4600	0.27	0.016	0.010	9.98×10^{-4}	6.13×10^{-2}	9.78×10^{-2}	1.87	1.98	6750	9170	
128-1	4000	—	—	—	—	5.33×10^{-2}	8.51×10^{-2}	—	—	—	—	注1
128-2	6900	—	—	—	—	9.19×10^{-2}	1.47×10^{-1}	—	—	—	—	注2
128-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	注3
129-1	48	—	—	—	—	5.86×10^{-4}	9.36×10^{-4}	—	—	—	—	注4
129-2	77	6.4	0.39	0.24	3.96×10^{-4}	1.03×10^{-3}	1.64×10^{-3}	1.50	1.64	50200	88400	
129-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	注1
130-1	360	0.99	0.060	0.037	2.86×10^{-4}	4.79×10^{-3}	7.66×10^{-3}	1.48	1.57	10800	13800	
130-2	96	4.3	0.28	0.16	3.32×10^{-4}	1.28×10^{-3}	2.04×10^{-3}	1.57	1.68	76400	116000	
130-3	210	—	—	—	—	2.80×10^{-3}	4.47×10^{-3}	—	—	—	—	注2

- 注1) ルジオンテストの結果に乱流現象が認められないため除外
 注2) 乱流のデータが少ないため層流限界圧力が決定できない
 注3) 他目的の試験に使用
 注4) 非定常の影響により信頼度が低い場合除外

第一法では、 $Lu'\ell$ 、 p_{ec} を高粘性流体試験より求め、 n 、 c をルジオンテストの結果から求めた。

k 、 v_{cr} は、それぞれ(2.25)、(2.26)式より算出している。

限界動水勾配 i_{cr} は、以下のようにして算出した。

まず、(2.6)式を再掲する。

$$h_0 - h = \frac{Q}{2\pi\ell k} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

(2.6)式に境界条件として $r = r_1$ 、 $h = 0$ を代入すると、

$$h_0 = \frac{Q}{2\pi\ell k} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

(2.6)式を(3.1)式で除すと、

$$\frac{h_0 - h}{h_0} = \frac{\ln(r/r_0)}{\ln(r_1/r_0)} \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

(3.2)式の両辺を r で微分するとにより動水勾配を求める。

$$i = -\frac{\partial h}{\partial r} = \frac{h_0}{\ell n(r_1/r_0) \cdot r} \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

いま、層流限界圧力 p_{lc} の水頭表示である h_c での注入時の孔壁部 ($r = r_0$) 動水勾配が限界動水勾配に一致する。

$$i_{cr} = \frac{h_c}{\ell n(r_1/r_0) \cdot r_0} \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

No128孔の1st、2st、3st、No129孔の1st、3st、No130孔の3stについては前述の理由(3.2.4参照)から第一法による解析は行えず、一部あるいは全部の物性値を求めることができなかった。

なお、解析の際に用いた影響半径 r_1 には、試験孔から地盤への水の流れが Darcy 則に従い、かつ試験孔軸上に存在する湧源からのポテンシャルフローであると仮定した場合に、任意点 ($r = r_1$) でのポテンシャルが孔壁部 ($r = r_0$) のその1%以下に減じるところ(図—2.3参照)までの距離として100m、試験区間(ステージ)長程度として5mの2種類を採用した。図—3.7、図—3.8、図—3.9にはそれぞれ層流ルジオン値 $Lu'\ell$ と n 、 c 、層流限界圧力 p_{lc} の関係を示す。また、図—3.10にはルジオンテストより得られたデータと表—3.3に示した物性値を用いて(2.8)、(2.18)、(2.22)式より求めた $r_1 = 5$ mおよび $r_1 = 100$ mの場合の $p-q$ 曲線を示す。これらの図表から以下のことがわかる。

- ① 表—3.3および図—3.7より、透水性は川よりもの方が山よりに比べ大きく、既往の調査と同様な結果が確認された。また、一般に乱流抵抗則のベキ数 n は1.0~2.0の値をとる⁹⁾とされているが、第一法による結果ではNo31孔の1st、2stで若干2.0を上回るものの、それ以外はその範囲にあった。 n の値は、透水性の大きい川側ではほぼ2.0比較的透水性の小さい山側ではほぼ1.5であった。 $n = 1.0$ で層流、 $n = 2.0$ で完全な乱流、その間では乱流と層流が混在していると考え、川よりでは割れ目幅が広く、孔周辺での流れは完全に乱流となっているが、山よりでは幅の狭い割れ目もあり、孔周辺でも層流部分があると考え。また、 $r_1 = 100$ mの方が $r_1 = 5$ mの場合よりも若干大きい。
- ② 図—3.8より、層流ルジオン値 $Lu'\ell$ が増加するに従い乱流抵抗則の定数 c は減少する傾向があることがわかる。このことは、乱流抵抗則と層流抵抗則の式形を比較すると、定数 c は乱流の基本式において $n = 1$ の時、 $c = 1/k$ で与えられる透水性に相当する係数であることから容易に推察される。また、 c の値は $r_1 = 100$ mの方が $r_1 = 5$ mの場合よりも若干大きい。
- ③ 図—3.9より、層流ルジオン値 $Lu'\ell$ が増加するに従い、層流限界圧力 p_{lc} は減少する傾向があることがわかる。これは、透水性が大きいほど小さな圧力から乱流に移行することを示している。

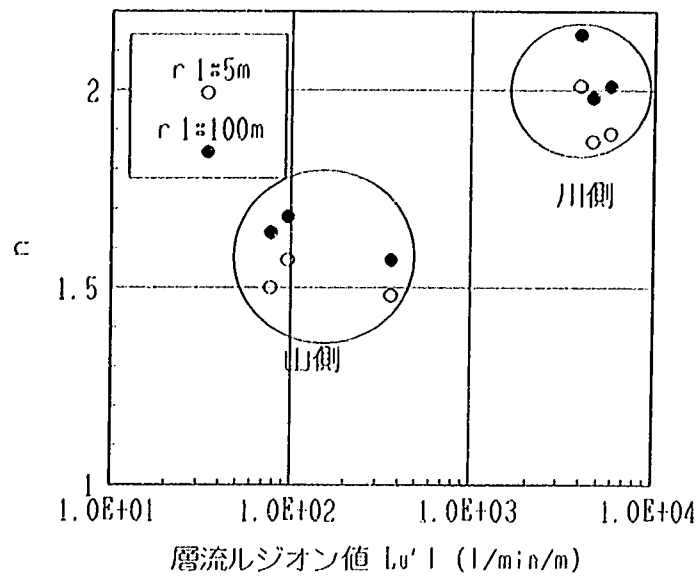


図-3.7 層流ルジオン値と n の関係 (第一法)

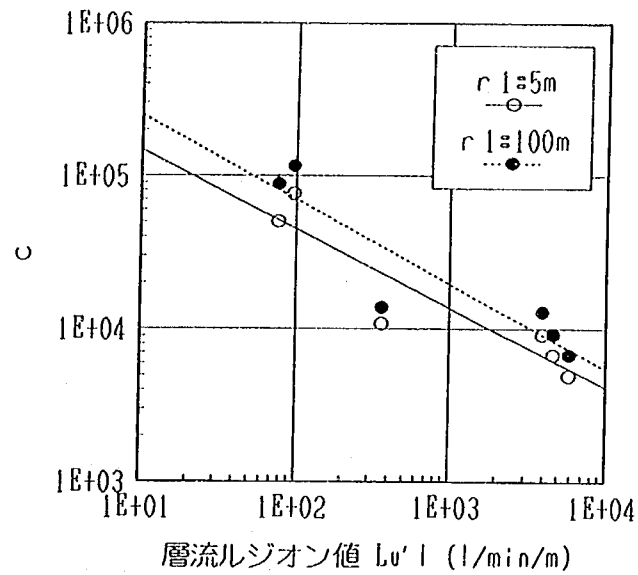


図-3.8 層流ルジオン値と c の関係 (第一法)

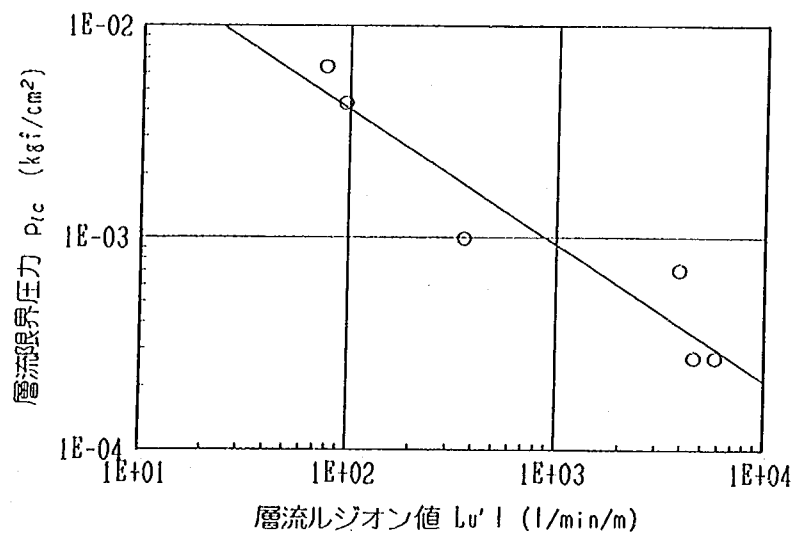
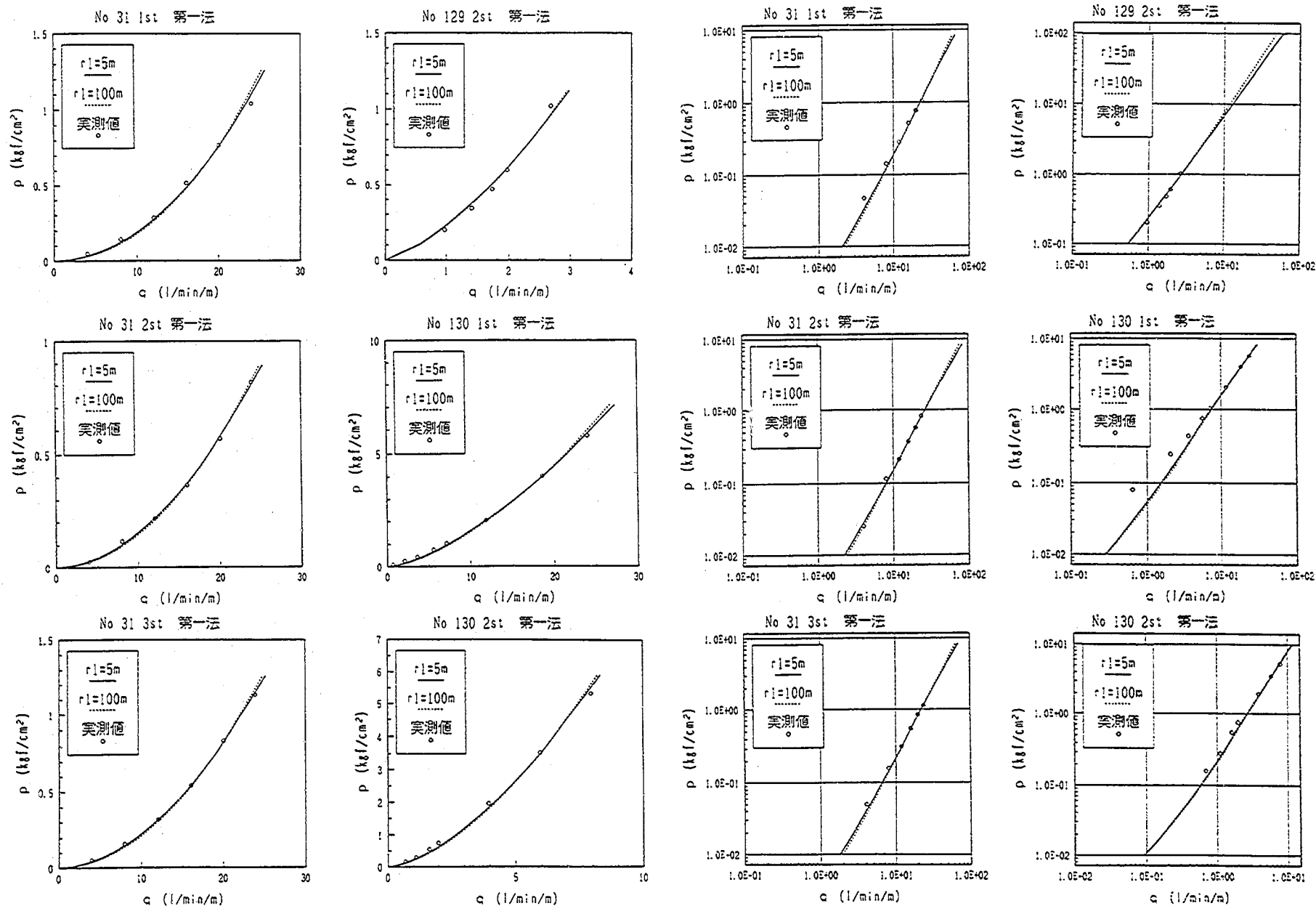


図-3.9 層流ルジオン値と層流限界圧力の関係 (第一法)



图—3.10 $p-q$ 曲线图

④ 図—3.10より、第一法で得られた物性値を用いて理論式より求めた $p-q$ 曲線とルジオンテストの実測値は、よく一致していることがわかる。また、理論式より得られた $p-q$ 曲線の形状には、 r_1 の値の違いによる差はほとんど見られない。

(2)第二法による解析結果

2.3.2に示した第二法により求めた層流限界圧力 p_{ec} 、限界動水勾配 i_{cr} 層流限界流速 v_{cr} 、透水係数 k 、乱流抵抗則の定数 n 、 c を表—3.4にまとめて示す。

表—3.4 試験結果一覧 (第二法)

孔-st	Lu'l	$P_{ic} \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^2$		i_{cr}		$v_{cr} \text{ cm/s}$		$k \text{ cm/s}$		n		$c \text{ (cm, s単位)}$		備考
		$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$	$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$	$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$	$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$	$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$	$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$	
31-1	3900	0.33	0.22	0.020	0.0083	1.03×10^{-3}	6.90×10^{-4}	5.19×10^{-2}	8.29×10^{-2}	1.82	1.84	6260	6500	
31-2	5800	0.28	0.18	0.018	0.0068	1.23×10^{-3}	8.35×10^{-4}	7.72×10^{-2}	1.23×10^{-1}	1.89	1.91	4870	5100	
31-3	4600	0.20	0.13	0.012	0.0050	7.54×10^{-4}	4.84×10^{-4}	6.13×10^{-2}	9.78×10^{-2}	1.81	1.83	5680	5850	
128-1	4000	—	—	—	—	—	—	5.33×10^{-2}	8.51×10^{-2}	—	—	—	—	注1
128-2	6900	0.017	0.006	0.0010	0.00023	9.43×10^{-5}	3.33×10^{-5}	9.19×10^{-2}	1.47×10^{-1}	1.24	1.24	101	84	
128-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	注2
129-1	48	1.14	0.89	0.069	0.026	4.39×10^{-5}	2.65×10^{-5}	6.39×10^{-4}	1.02×10^{-3}	1.77	1.78	3580000	3720000	
129-2	77	20.35	16.37	1.23	0.62	1.26×10^{-3}	1.01×10^{-3}	1.03×10^{-3}	1.64×10^{-3}	1.67	1.96	327000	448000	
129-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	注1
130-1	360	0.30	0.13	0.018	0.0049	8.77×10^{-5}	3.73×10^{-5}	4.79×10^{-3}	7.66×10^{-3}	1.39	1.39	7610	6970	
130-2	96	1.44	0.78	0.067	0.029	1.11×10^{-4}	8.00×10^{-5}	1.28×10^{-3}	2.04×10^{-3}	1.44	1.46	41100	41600	
130-3	210	6.12	3.55	0.31	0.13	8.64×10^{-4}	5.99×10^{-4}	2.80×10^{-3}	4.47×10^{-3}	1.51	1.56	13000	14400	

注1) ルジオンテストの結果に乱流現象が認められないため除外

注2) 他目的の試験に使用

第二法では、 $Lu'l$ のみ高粘性流体試験から求め、第一法においては $q-\mu$ 曲線から求めるとその精度が落ちると思われる p_{ec} （実際には限界の μ_H / μ_W の図上での読み取り）は c 、 n とともにルジオンテストの結果から求めた。

その他の係数は、第一法と同様の手法により算出した。

No.128孔の1st、3st、No.129孔の3stについては前述の理由（3.2.4参照）から第二法による解析は行えず、物性値の一部あるいは全てを求めることができなかった。なお、ここでは非定常の影響により高粘性流体試験結果の信頼性が低く、層流限界圧力 p_{ec} を明確に推定できないため第一法では解析の対象から除外したNo.129孔の1stについても解析を行ってみた。ただし、推定した層流ルジオン値の信頼性が低いため全体の解析精度も低いと考えられる。

影響半径 r_1 は第一法の場合と同様に100mと5mの2種類の値を採用した。

図—3.11、図—3.12、図—3.13にそれぞれ層流ルジオン値 $Lu'l$ と n 、 c 、層流限界圧力 p_{ec} の関係を示す。また、図—3.14にはルジオンテストより得られたデータと表—3.4に示した物性値を用いて（2.8）式、（2.18）式、（2.22）式より求めた $r_1 = 5\text{m}$ 、 $r_1 = 100\text{m}$ の場合の $p-q$ 曲線を示す。また、図—3.15には、 $r_1 = 5\text{m}$ 、 $r_1 = 100\text{m}$ のケースについて、第一、二法それぞれの方法で得られた物性値を用いて求めた $p-q$ 曲線を、図—3.16～図—3.18には第一法と第二法で求めた p_{ec} 、 c 、 n の比較図を示す。これらの図表から以下のことがわかる。

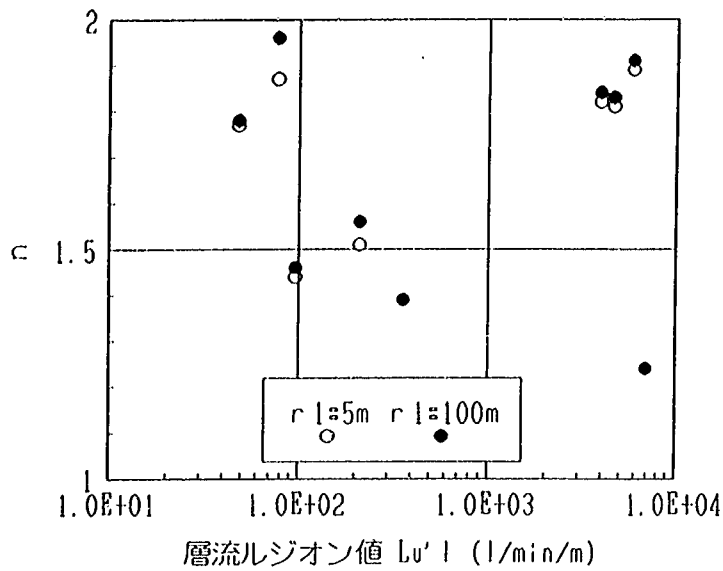


図- 3.11 層流ルジオン値と n の関係 (第二法)

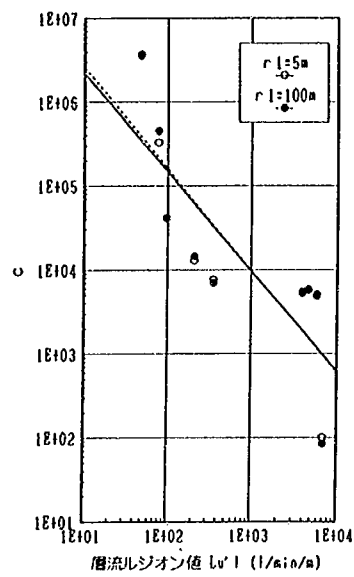


図- 3.12 層流ルジオン値と c の関係 (第二法)

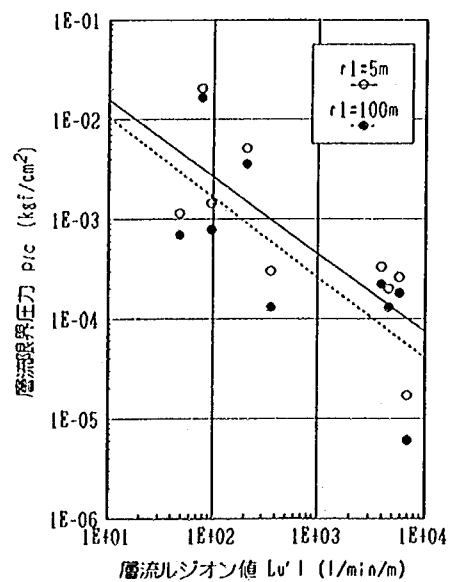


図- 3.13 層流ルジオン値と層流限界圧力の関係 (第二法)

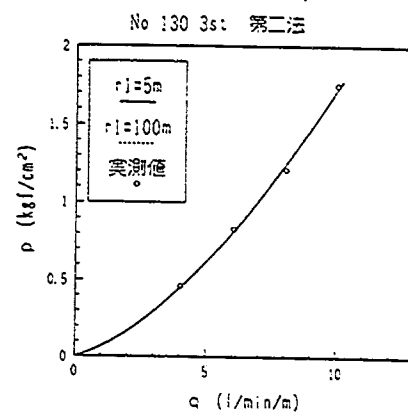
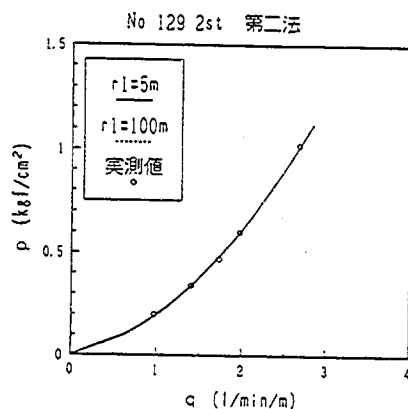
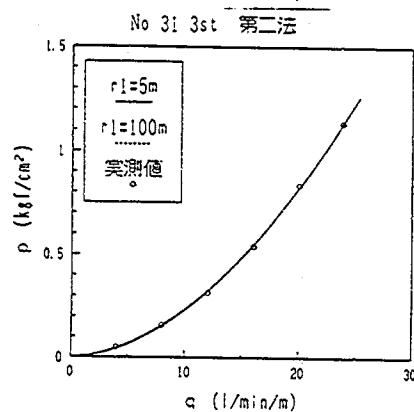
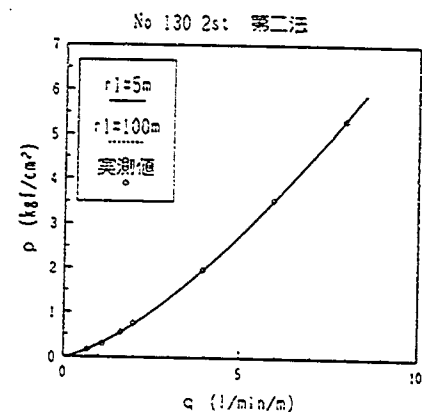
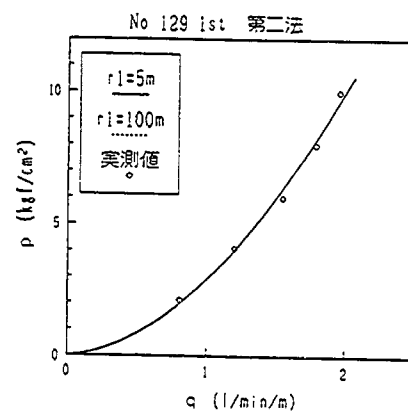
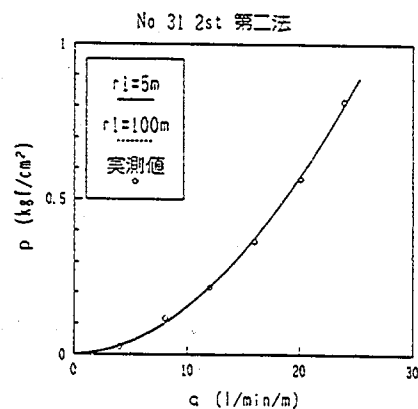
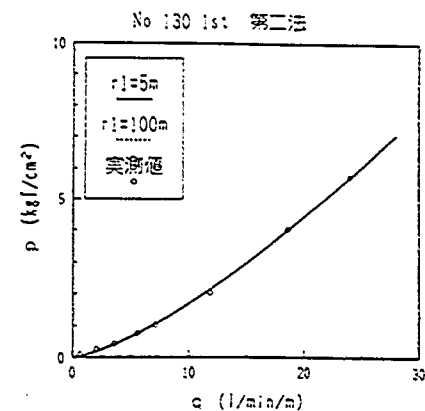
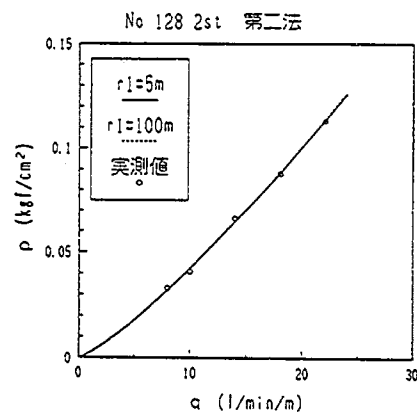
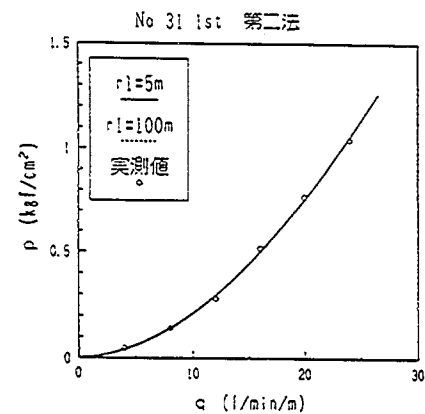


図-3.14 $p-q$ 曲線図 a) 算術目盛

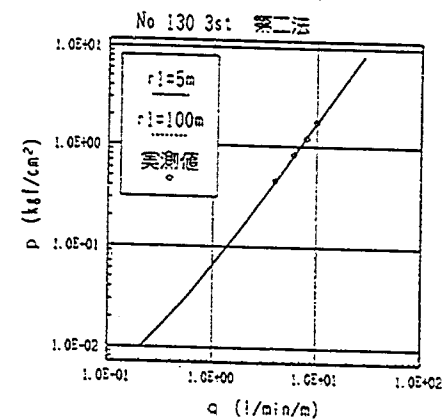
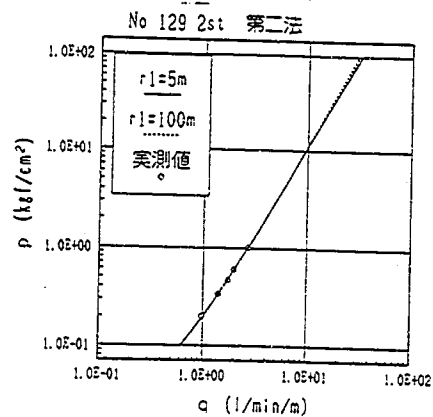
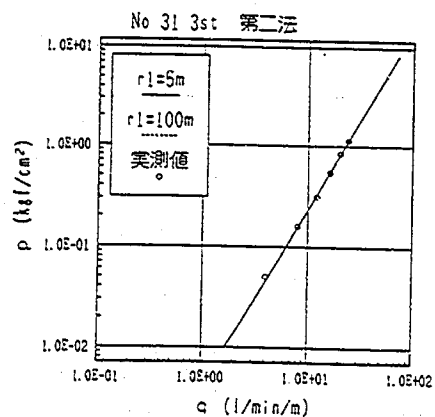
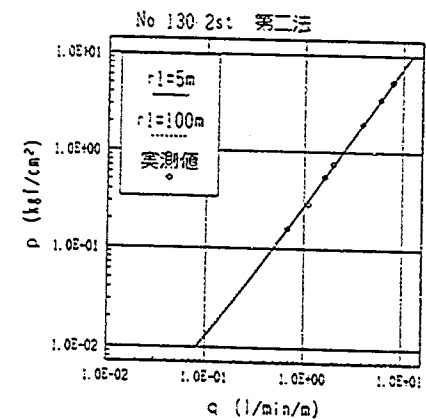
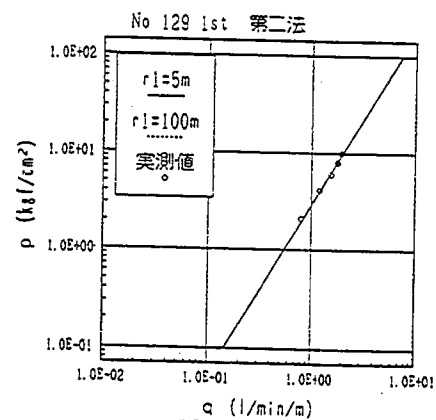
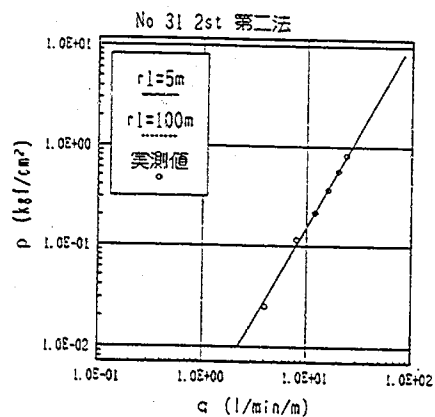
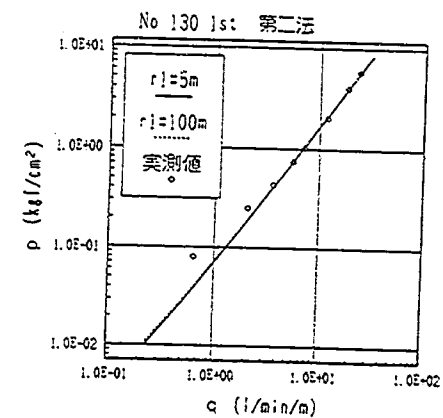
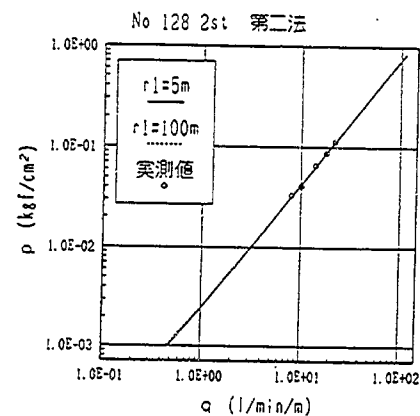
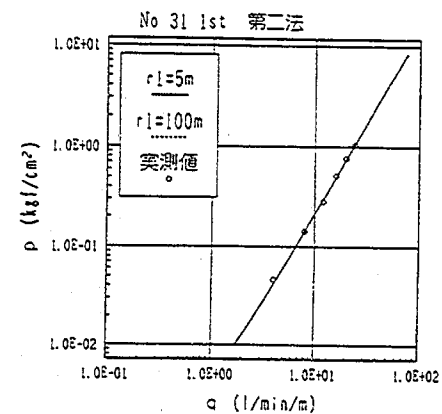


図-3.14 $p-q$ 曲線図 b) 対数目盛

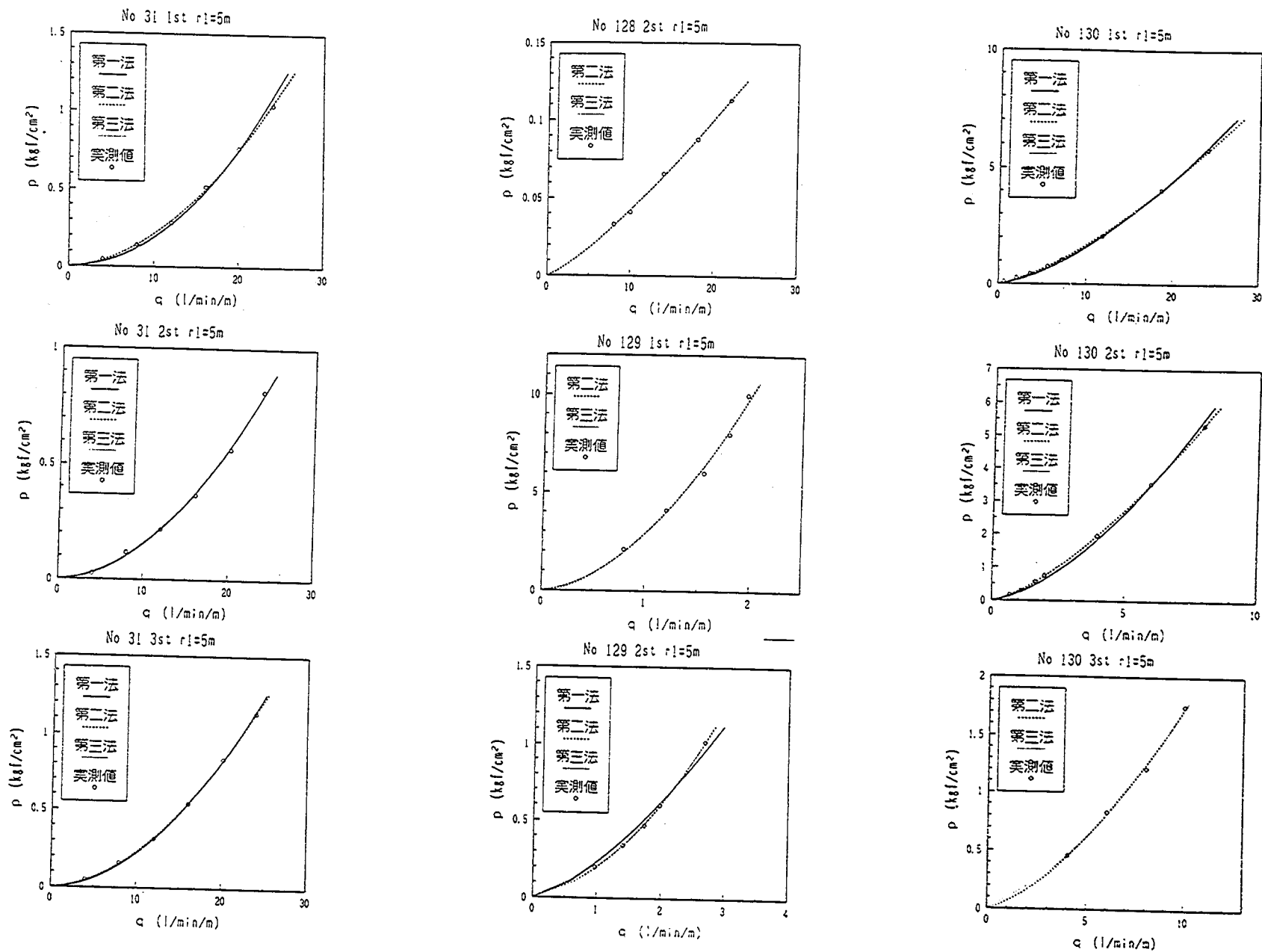


图-3.15 $p-q$ 曲线图 ($r_1=5\text{m}$) a) 算術目盛

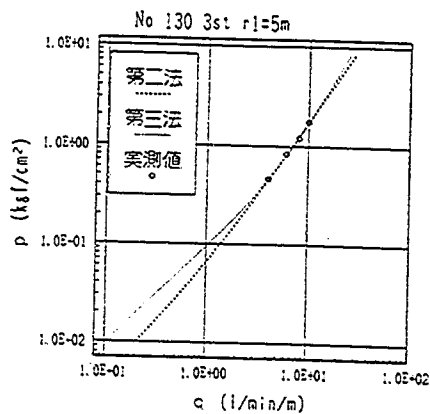
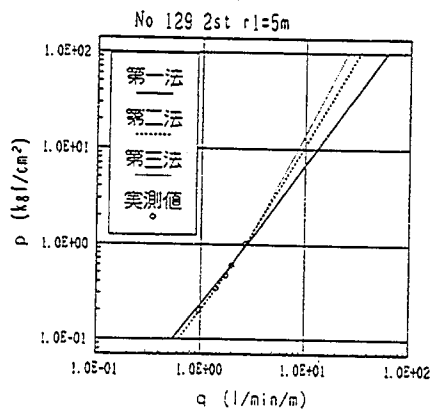
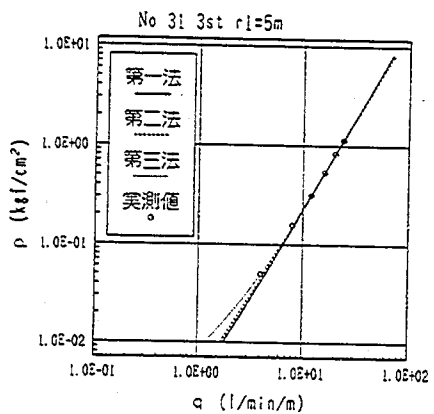
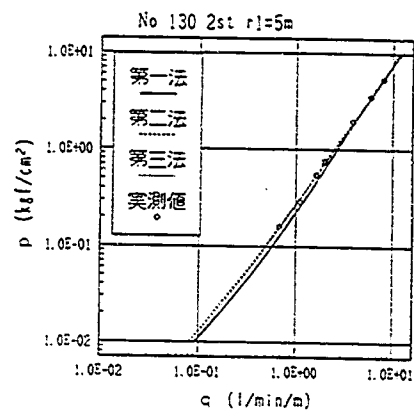
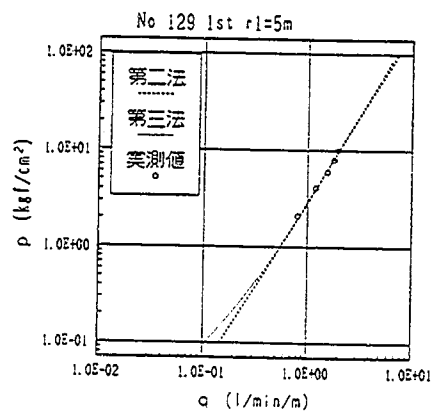
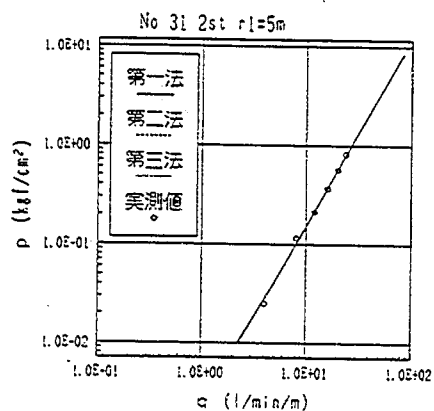
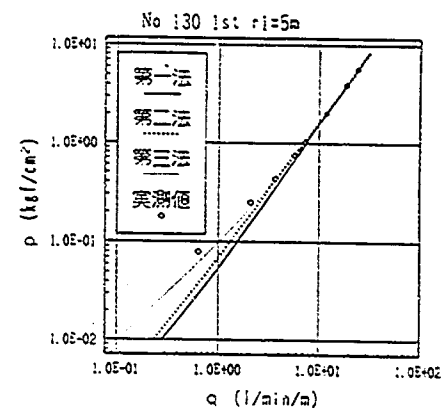
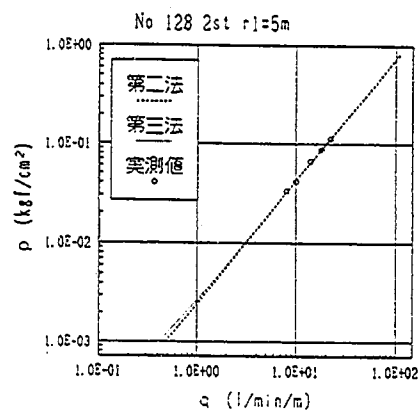
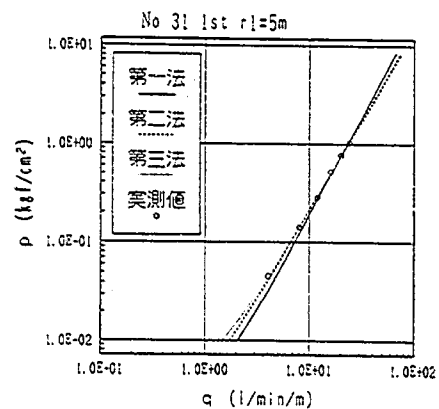


图-3.15 $p-q$ 曲线图 ($r_i=5m$) b) 对数目盛

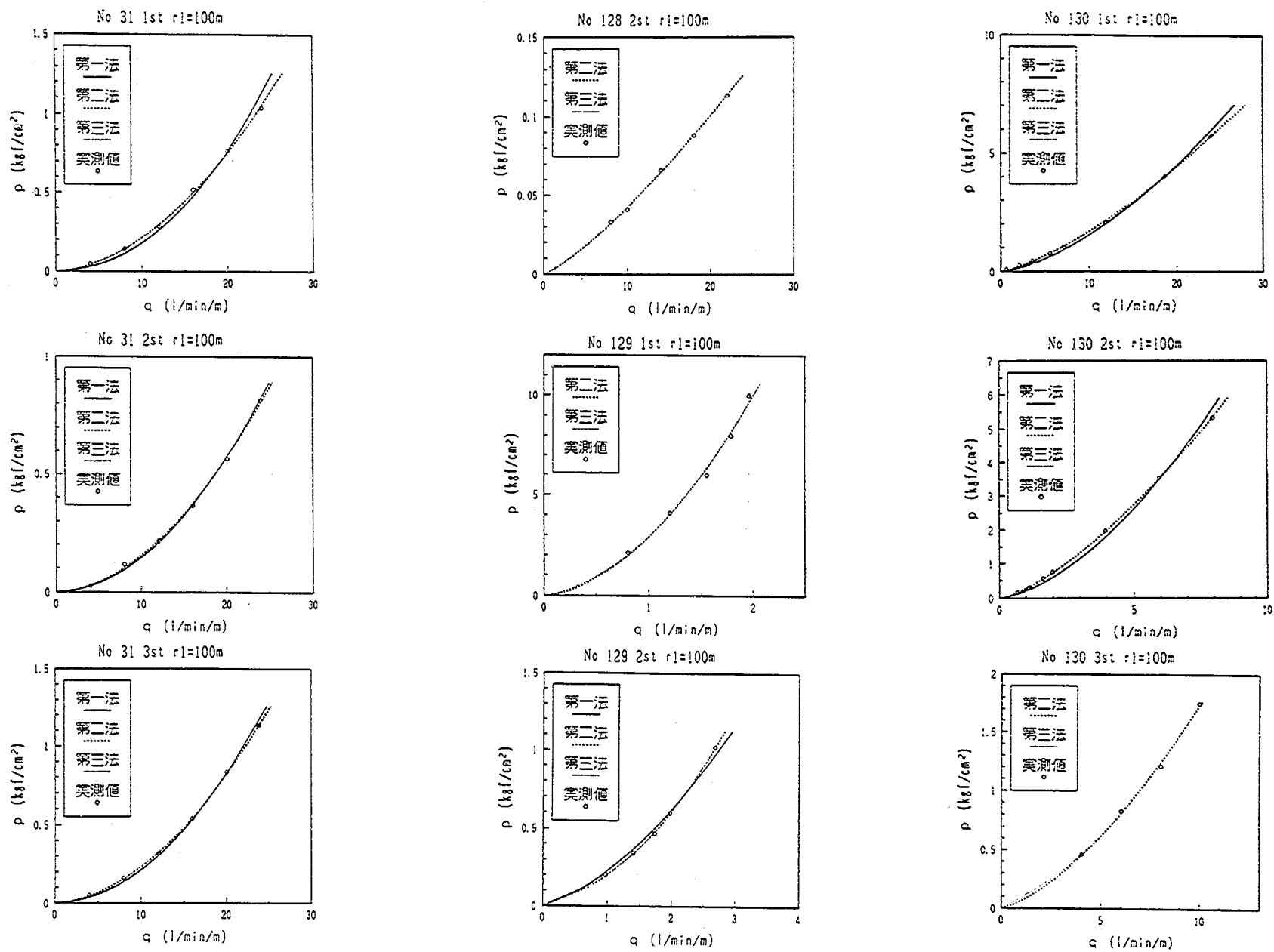


図-3.15 $p-q$ 曲線図 ($r_1=100m$) c) 算術目盛

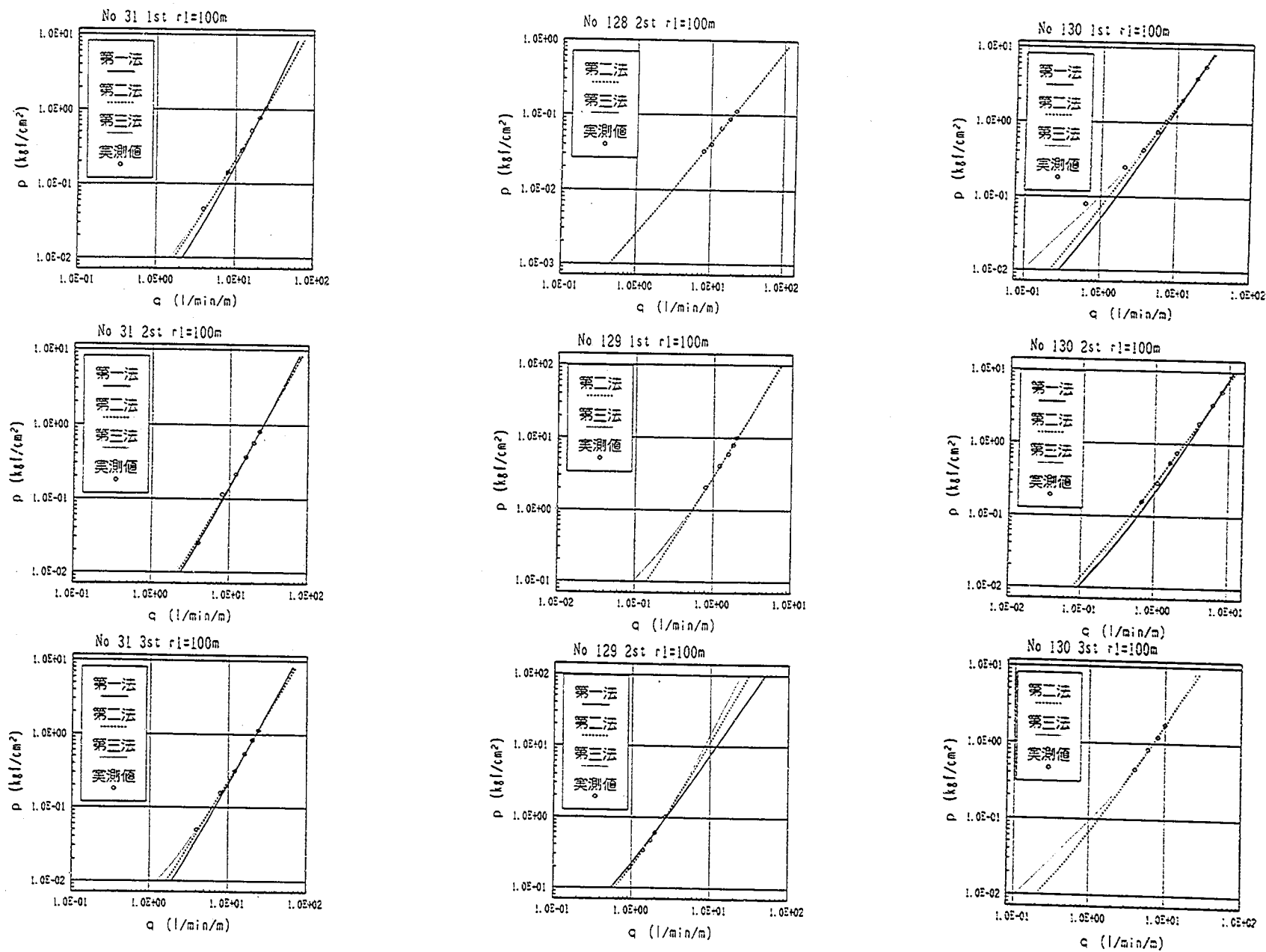


图-3.15 $p-q$ 曲线图 ($r_1=100\text{m}$) d) 对数目盛

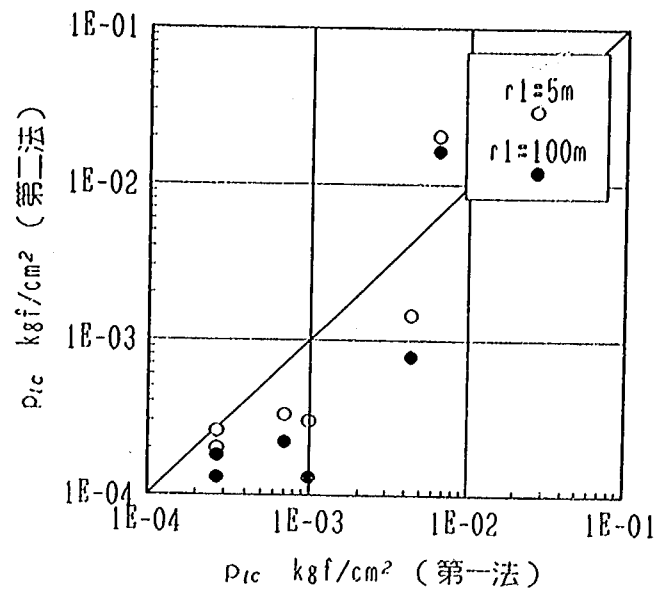


図-3.16 層流限界圧力の比較図 (第一法と第二法)

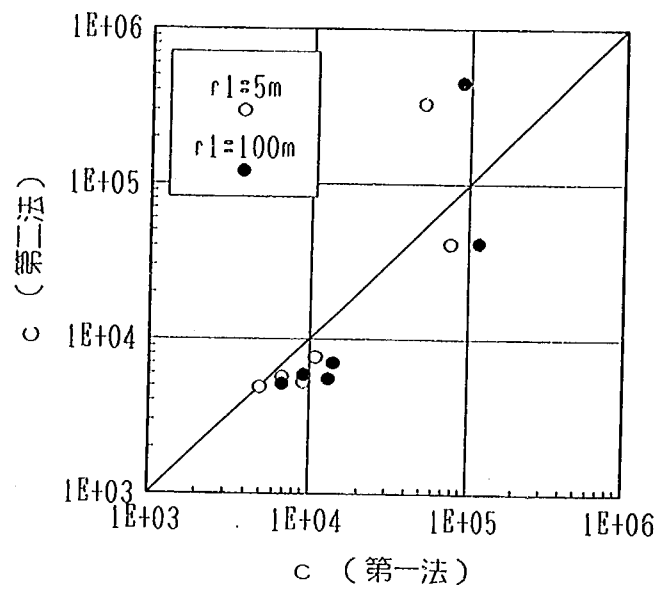


図-3.17 c の比較図 (第一法と第二法)

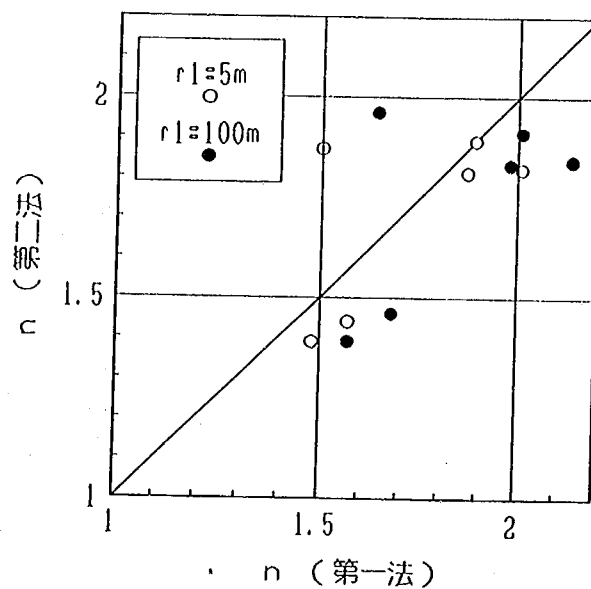


図-3.18 n の比較図 (第一法と第二法)

- ① 第一法では、高粘性流体試験時の乱流のデータが少なく層流限界圧力が決定できないため、乱流抵抗則が求められなかった試験孔（No.128孔の2st、No. 130孔の3st）についても第二法を適用すれば抵抗則を求めることができる。
- ② $Lu'\ell$ と p_{ec} および c の関係を、第一法の場合と比較すると、図—3.16、図—3.17に示すように、それぞれの値に違いはあるものの、図—3.12、図—3.13と図—3.8、図—3.9に示すように全体的には同様な傾向を示している。
- ③ 第一法では、 n の値が2.0を超えるケースもあったが、第二法ではすべて1.0～2.0の範囲内であった。一般的には、 n の値は1.0～2.0の範囲にあるといわれていることから、ここで得られた値は、より実際の値に近いものと考えられる。また、第二法の結果では、川側と山側での n の値の明確な差は見られず、山側でも1.6～1.9という高い値を示している。
- ④ 第一法で求めた c 、 n の値は、 $r_1 = 100\text{m}$ の方が $r_1 = 5\text{m}$ の場合よりも若干大きかったが、第二法によるとそれが逆転するケースもあり、一概に大小関係を云々することはできないようである。また、表—3.3と表—3.4を比較するとわかるように、第二法では、 r_1 の設定の違いによる c 、 n の値の差は、第一法のそれよりもかなり小さい。これは、第一法に比べると動かせる変数が n のほかに p_{ec} もあり、2変数となるため、実測 p 、 q データと理論式から求める p 、 q データをより近づけられるような変数の変化が可能になったためと考える。
- ⑤ 図—3.15より、第二法で得られた物性値を用いて理論式より求めた p — q 曲線とルジオンテストによる実測値は、第一法の場合よりもさらによく一致していることがわかる。また、図—3.14より、得られた p — q 曲線の形状は、第一法の場合よりもさらに r_1 の設定の違いによる差が小さくなっている。
- ⑥ 上述の第一法と第二法による結果の差は、層流限界圧力 p_{ec} の推定方法の違いによるものである。そこで、第二法で求めた p_{ec} を高粘性流体試験から得られた値であると仮定して、高粘性流体試験の乱流から層流への遷移点の粘性比を(2.44)式より逆算した結果を表—3.5に示す。この表と前出の図—3.6から、両方法で求めた遷移点には多少のズレが認められるが、これらの図表を見る限りは、いずれを遷移点としても不自然ではない。このことと⑤に示したことを勘案すると、高粘性流体試験結果から得られた q — μ 曲線より図式的に p_{ec} を決定すると、その確からしい遷移点にかなりの幅があるため、必ずしも正確な値が得られるとは限らないことがわかる。そのような不確定要素を排除できること、高粘性流体試験において層流限界圧力を推定するための粘性段階を省略できる等の理由から、第二法は現地試験の簡略化、及び解析の精度の点で有効な手法であると言える。

表—3.5 層流遷移粘性比

孔-st	層流遷移粘性比 μ_{Hcr}/μ_w		
	第一法	第二法	
		$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$
31-1	30	44	54
31-2	46	47	56
31-3	47	55	68
128-1	—	—	—
128-2	—	159	268
128-3	—	—	—
129-1	—	93	120
129-2	22	12	14
129-3	—	—	—
130-1	40	73	111
130-2	19	33	44
130-3	—	17	20

(3)第三法による解析結果

2.3.3 に示した第三法により求めた層流ルジオン値 $Lu'\ell$ 、層流限界圧力 p_{ec} 、限界動水勾配 i_{cr} 、層流限界流速 v_{cr} 、層流時の透水係数 k 、乱流抵抗則の定数 n 、 c をまとめて表—3.6 に示す。

第三法では、流水抵抗則を求めるのに必要なすべての物性値をルジオンテストの結果のみから求めた。

No128孔の1st、No129孔の3stではルジオンテストの結果に乱流の影響が見られないため解析の対象からは除外した。No128孔の3stは、他目的の試験に変更したため解析の対象からは除外した。

また、影響半径 r_1 は、第一、二法と同様に100mと5mの2種類の値を採用した。

図—3.19、図—3.20、図—3.21に、それぞれ層流ルジオン値 $Lu'\ell$ と n 、 c 、層流限界圧力 p_{ec} の関係を示す。また、図—3.22にはルジオンテストより得られたデータと表—3.6 に示した物性値を用いて(2.8)式、(2.18)式、(2.22)式より求めた $r_1 = 5\text{m}$ 、 $r_1 = 100\text{m}$ の場合の $p-q$ 曲線を示す。また、図—3.23～図—3.26には、 $r_1 = 5\text{m}$ 、 $r_1 = 100\text{m}$ のケースについて、第一、第二法と第三法で求めた p_{ec} 、 c 、 n 、 $Lu'\ell$ の比較図を示す。これらの図表から以下のことがわかる。

- ① $Lu'\ell$ と p_{ec} および c の関係は、第一、二法の場合と比較して、図—3.23、図—3.24に示すようにそれぞれの値に多少の差異はあるものの、図—3.20、図—3.21に示すように全体的には同様な傾向を示している。
- ② 図—3.15より、第三法で得られた物性値を用いて、理論式より求めた $p-q$ 曲線とルジオンテストデータは、第二法と同様に非常によく一致していることがわかる。
- ③ 第三法から求めた $Lu'\ell$ と高粘性流体試験よりかなり高い精度で求めた第二法 $Lu'\ell$ の関係は、1:1の関係を示す直線周辺に分布しているが、数倍の開きがあるものもある。これは、 T ダム溶岩の透水性がかなり大きいため、 p_{ec} がルジオンテストの最小圧力よりもかなり小さく、実際に得られた圧力・流量データからかなり離れた外挿部分での層流の抵抗則を求めなければならないことに起因しているものと考えられる。
- ④ 第二、三法から求めた c は $Lu'\ell$ に比して、比較的よく一致している。これは、 $Lu'\ell$ とは逆に、得られた圧力・流量データが乱流の影響を強く受けているためだと考える。
- ⑤ 第三法から求めた n の方が第二法の n より全体的にやや大きい傾向にあるが、1点を除いて、一般に言われているとおり1から2の間に分布している。
- ⑥ p_{ec} は、③に示したのと同様の理由から第二、三法ではかなりの差がある。
- ⑦ ③、⑥に示したように、得られた物性値に多少の違いがあっても、②のような結果が得られるのは、第三法での3種類の物性値 ($Lu'\ell$ 、 p_{ec} 、 n) の組み合わせによって、その組み合わせが多少異なっても似通った曲線が得られることを示している。一方、ある $Lu'\ell$ 、 n 、 p_{ec} を仮定して、それを(2.8)式、(2.18)式、(2.22)式に適用して得られる $p-q$

のデータから逆算して第三法で物性値を求めると、仮定した物性値と一致する（例えば、図—2.4 に示した圧力、流量の関係より表—3.7 に示す 9 点を選択して第三法で物性値を求めたところ $Lu'\ell=7000$ 、 $p_{ec}=0.4\times 10^{-3}\text{kgf/cm}^2$ ($h_c=0.4\text{cm}$)、 $n=1.8$ が得られ、仮定した物性値と一致した）。むろんこれは、現実とは異なるいくつかの仮定を含む理論式による解析の結果であり、そのことが即第三法の適用性を示すとは考えられないが、少なくとも第三法で抵抗則をより精度よく求めるには、ルジオンテストを丁寧に行い、その精度を高める努力が必要である。しかし、その範囲が広い各圧力段階におけるルジオンテストデータ全てに高い精度を要求するのは現実的に不可能である。そこで、本方法の適用にあたっては、精度的に問題のあるデータが解析に与える影響を少なくする意味で、通常昇圧 5 段階で行われるルジオンテストを低圧部に重点をおいてさらに多段階で行うことや、ルジオンテストを行う際に、各圧力段階ごとに $p-q$ の関係を両対数紙上にプロットしてみる等の手法で、乱層流域でのデータが得られているかということとその連続性を確認し、異常値と思われるようなデータが発生した場合は、その段階について再度試験を行う等の処置が必要である。しかし、定水位法により低圧力の注水を行うには、孔内水位を調整しながらの静水圧載荷が必要となる場合がある。この作業が煩雑であると思われる場合には、変水位法の適用も考えられる。ただし、この手法が実用に供するものになれば、岩盤の層流、乱流状態の抵抗則をルジオンテストのみから決定でき、その経済的効果は図りしれない。

表-3.6 試験結果一覧 (第三法)

孔-st.	Lu' l		$P_{1c} \times 10^{-3} \text{kgf/cm}^2$		i_{cr}		$v_{cr} \text{ cm/s}$		$k \text{ cm/s}$		n		$c \text{ (cm,s単位)}$		備考
	$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$	$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$	$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$	$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$	$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$	$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$	$r_1=5\text{m}$	$r_1=100\text{m}$	
31-1	1800	2000	2.44	1.17	0.15	0.044	3.43×10^{-3}	1.92×10^{-3}	2.33×10^{-2}	4.33×10^{-2}	1.88	1.90	6150	6300	
31-2	29000	36000	0.008	0.003	0.00048	0.00011	1.87×10^{-4}	8.73×10^{-5}	3.88×10^{-1}	7.70×10^{-1}	1.88	1.88	4750	4710	
31-3	1200	1400	5.56	3.10	0.34	0.12	5.49×10^{-3}	3.41×10^{-3}	1.64×10^{-2}	2.90×10^{-2}	1.93	1.96	7650	7900	
128-1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	注1
128-2	4400	6900	0.16	0.005	0.0099	0.00019	5.85×10^{-4}	2.79×10^{-5}	5.91×10^{-2}	1.48×10^{-1}	1.24	1.24	100	81	
128-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	注2
129-1	11	10	47.18	41.09	2.85	1.55	4.17×10^{-4}	3.30×10^{-4}	1.46×10^{-4}	2.13×10^{-4}	1.87	1.90	5950000	6600000	
129-2	57	59	62.88	47.25	3.79	1.79	2.88×10^{-3}	2.24×10^{-3}	7.59×10^{-4}	1.25×10^{-3}	2.15	2.23	1090000	1420000	
129-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	注1
130-1	100	98	60.51	60.47	3.65	2.29	4.96×10^{-3}	4.76×10^{-3}	1.36×10^{-3}	2.08×10^{-3}	1.52	1.63	11500	13600	
130-2	131	321	0.51	0.011	0.031	0.00042	5.37×10^{-5}	2.84×10^{-6}	1.74×10^{-3}	6.83×10^{-3}	1.43	1.43	40900	37400	
130-3	100	106	111.21	87.05	6.71	3.29	9.30×10^{-3}	7.42×10^{-3}	1.39×10^{-3}	2.25×10^{-3}	1.86	1.96	39600	48400	

注1) ルジオンテストの結果に乱流現象が認められないため除外

注2) 他目的の試験に使用

表-3.7 逆算に用いた圧力、流量データ

$p \text{ kgf/cm}^2$	0.005	0.010	0.021	0.045	0.096	0.21	0.44	0.94	2.00
$q \text{ l/min/m}$	2.04	3.32	5.28	8.24	12.72	19.52	29.85	45.56	69.50
流れ形態	乱 層 流							乱 流	

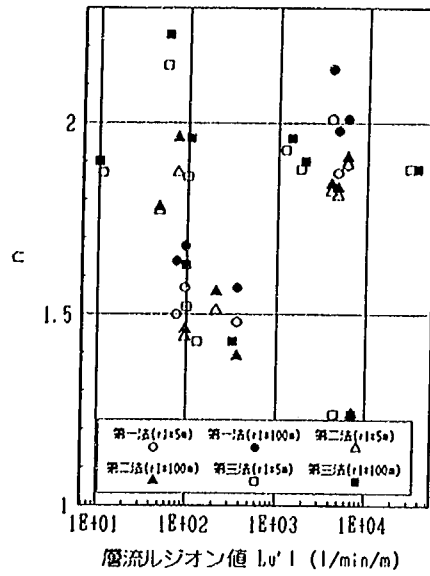


図-3.19 層流ルジオン値と n の関係

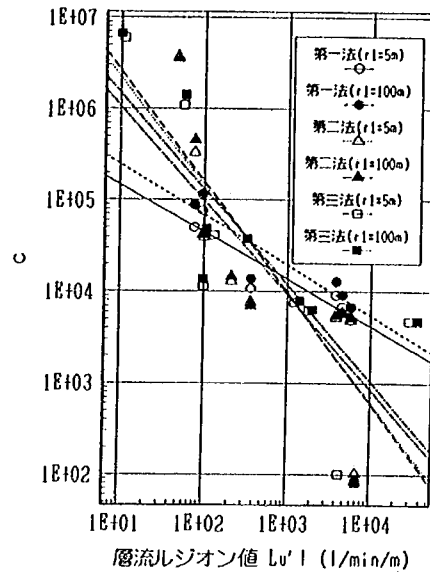


図-3.20 層流ルジオン値と c の関係

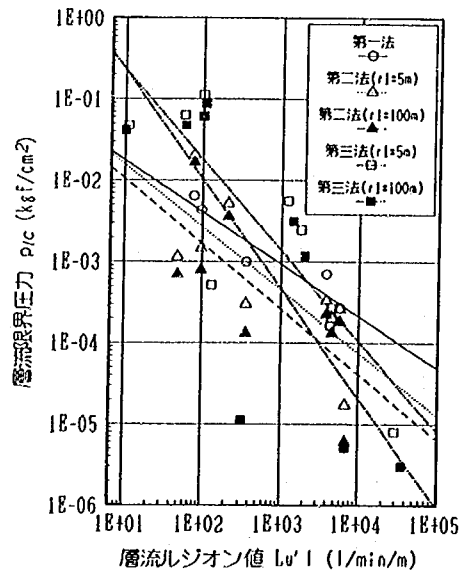
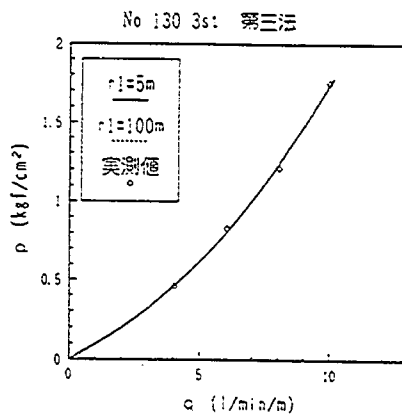
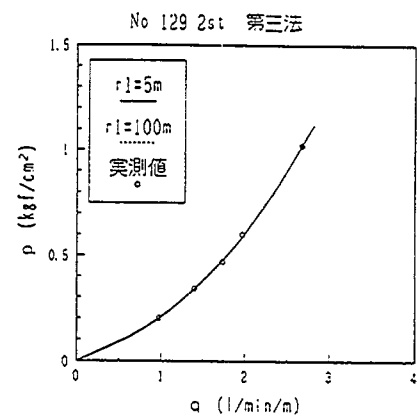
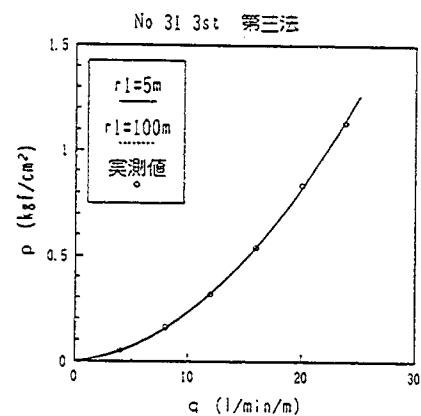
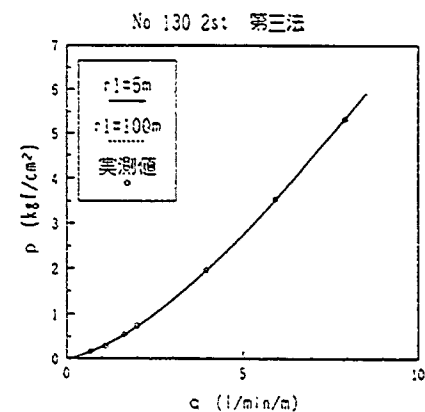
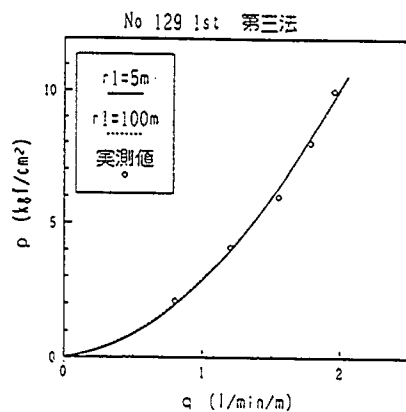
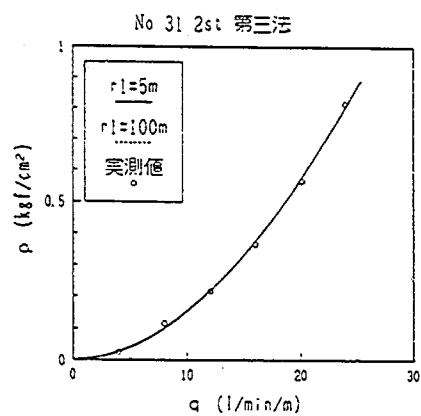
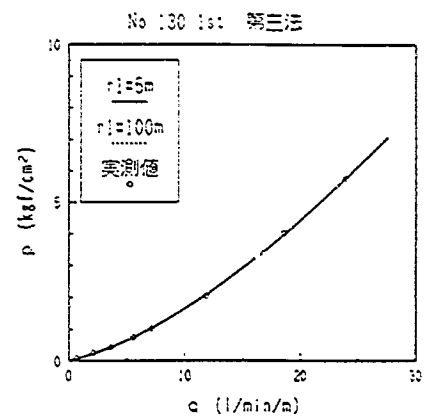
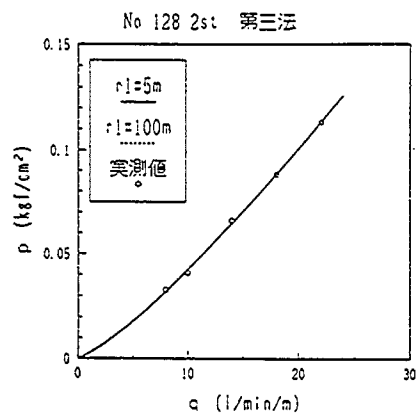
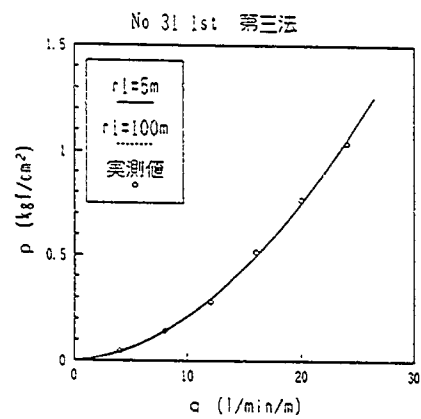
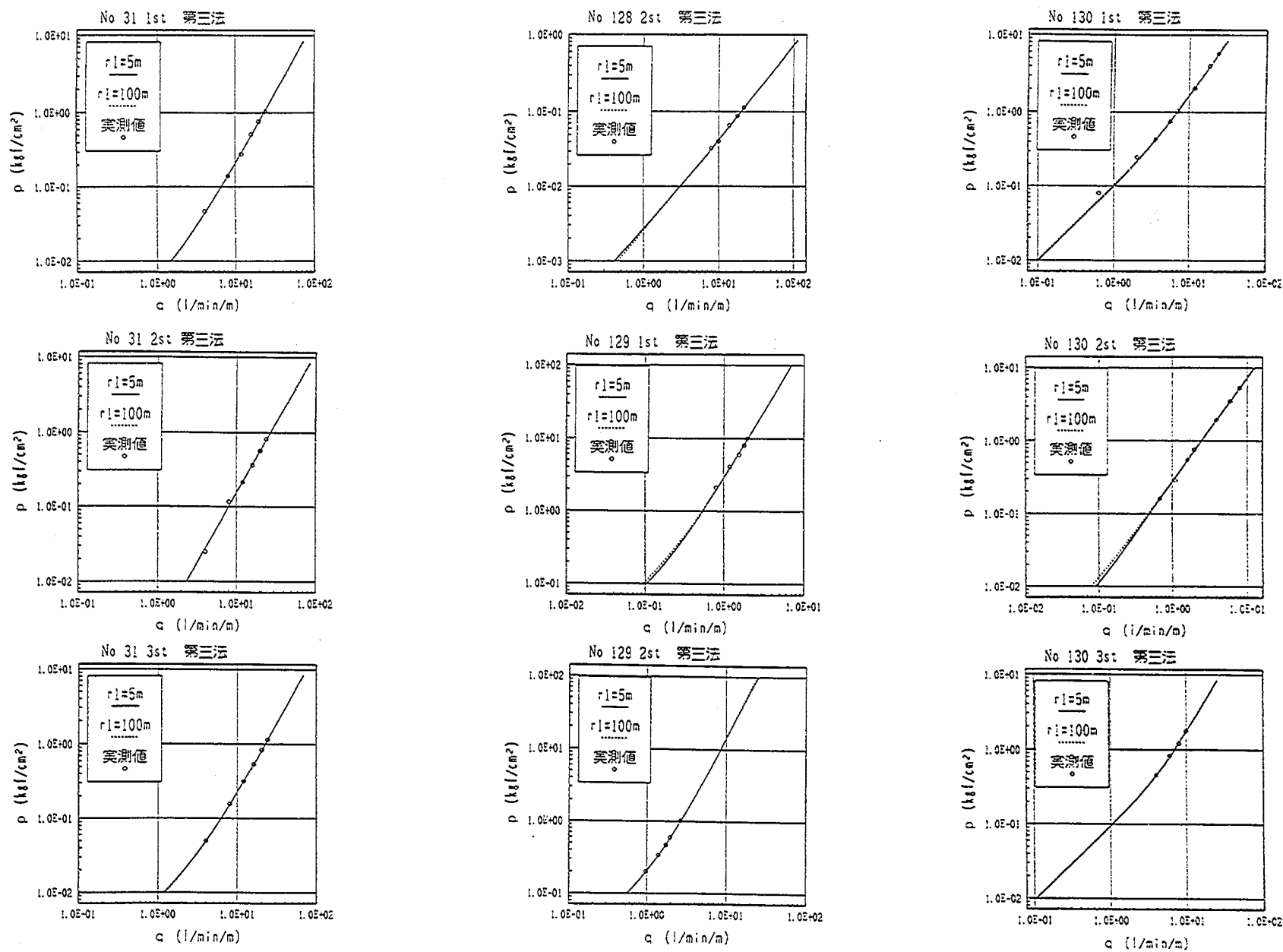


図-3.21 層流ルジオン値と層流限界圧力の関係



図—3.22 $p-q$ 曲線図 a) 算術目盛



図—3.22 $p-q$ 曲線図 b) 対数目盛

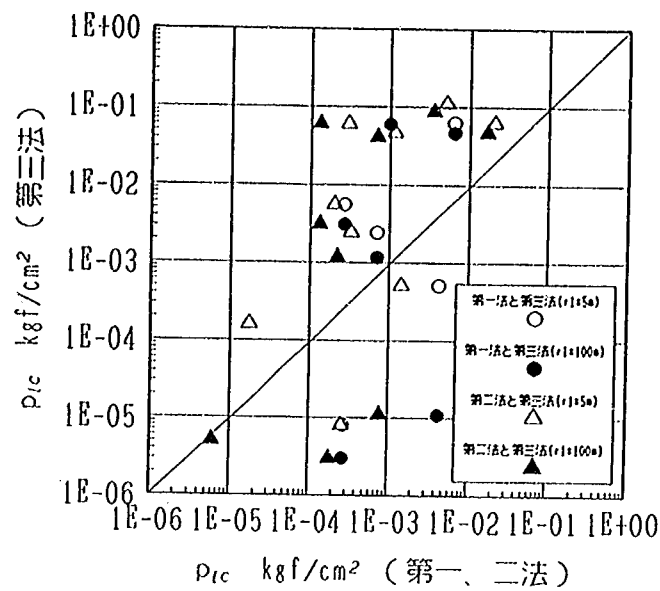


図-3.23 層流限界圧力の比較図 (第一、二法と第三法)

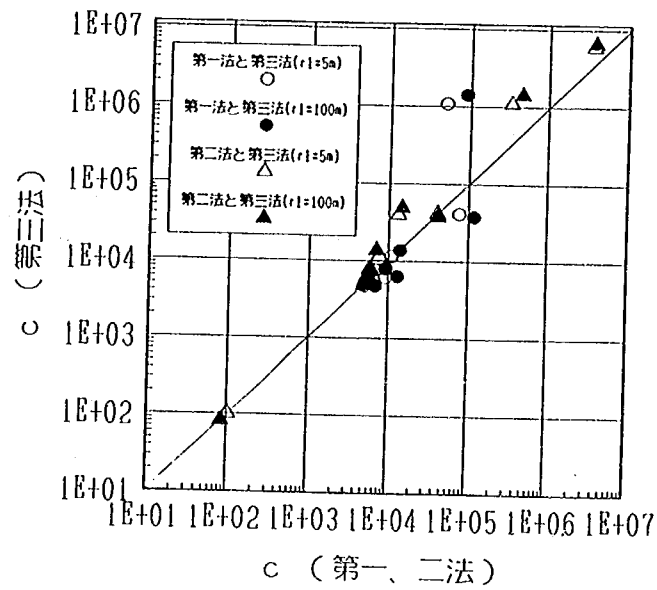


図-3.24 c の比較図 (第一、二法と第三法)

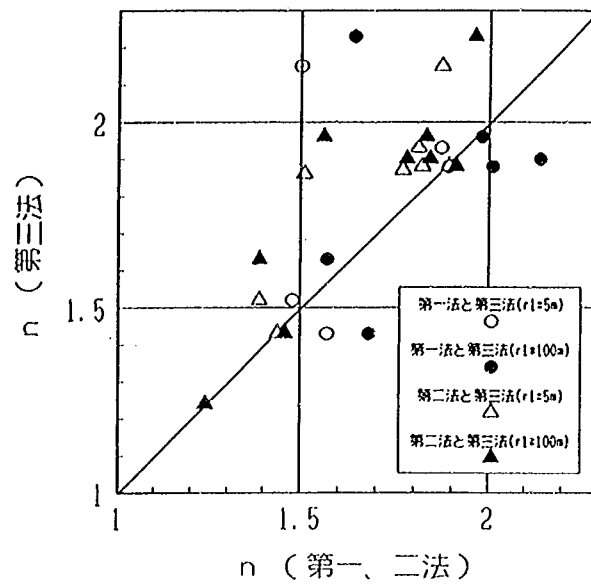


図-3.25 n の比較図 (第一、二法と第三法)

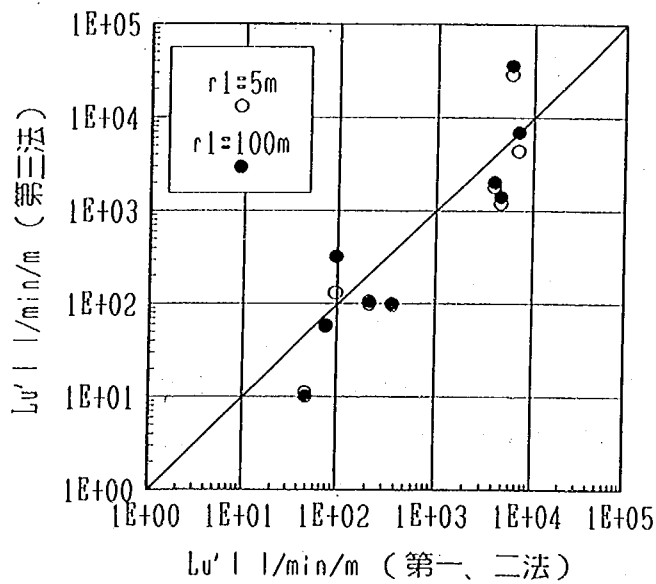


図-3.26 層流ルジオン値の比較図 (第一、二法と第三法)

3.3 室内試験

3.3.1 概要

本節では、前章までに示した方法により、岩盤の流水抵抗則をどの程度の精度で求めることができるのかを室内試験により検証する。そこで、3.1②に示した岩盤モデルに近い供試体を透水性コンクリートとガラスビーズで作製し、その透水性について検討した。以後、このような岩種を多孔質媒体と呼ぶことにする。

ここでは、多孔質媒体供試体に対して、ルジオンテストを想定した放射流下での透水試験を実施して、その流水抵抗則を求めた。また、その推定精度を検討する目的で、1次元流下での透水試験も実施した。

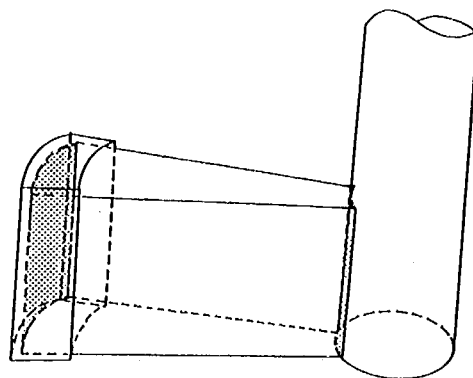
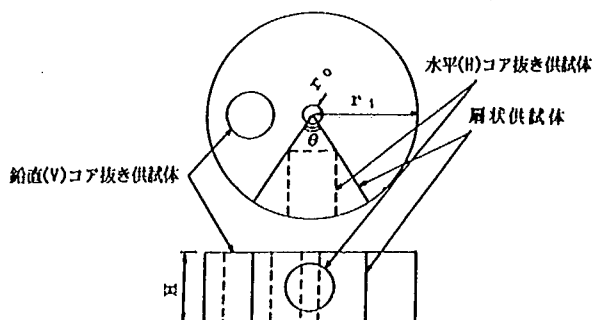
3.3.2 供試体

(1)扇状供試体

放射流下での試験に供す透水性コンクリートの供試体として、セメントペースト（水セメント比 $W/C=30\%$ ）と骨材をセメントと骨材の質量比1：7で混合し、型枠内で電動ランマにより締固めて図一3.27に示す円環状の供試体を作製した。なお、中央の円空断面は現場透水試験孔に相当する。室内試験における給水装置の能力を考慮して、円環状供試体を扇状に切断し、現場試験を模した放射流による透水試験に供した。流体の流入、流出部となる供試体の内、外周面以外はシール材により遮水して不透水境界とした。さらに、試験孔を模した内周面には注水用パイプを取り付けた。

一方、ガラスビーズの供試体は、透水性コンクリートと同様な形状とするために、図一3.28に示す容器内にガラスビーズを詰めることにより作製した。なお、容器はアクリル樹脂製であるが、流体の流入、流出部となる内、外周面には金網を張り、透水境界とした。

供試体の材質および寸法等の諸元を表一3.8にまとめて示す。



図一 3.27 透水性コンクリートの円環状供試体

図一 3.28 ガラスビーズ用透水試験容器

表-3.8 扇状供試体の諸元

供試体	材 質	粒 径 (mm)	r_0 (cm)	r_1 (cm)	θ (°)	H (cm)	乾燥密度 (g/cm ³)
A	透水性コンクリート	1.18~2.0 (骨材)	1.65	19.83	48.25	11.95	1.780
B	〃	1.18~5.0 (骨材)	2.06	20.23	40.63	13.68	1.772
C	ガラスビーズ	0.99~1.4	2.40	20.00	29.51	8.80	1.635
D	〃	1.5~2.5	2.40	20.00	29.51	8.80	1.660

なお、透水性コンクリート供試体の配合を決定するに先立って、いかなる配合であれば目標の透水性 ($k = 2 \sim 4 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ 程度) が得られるかを確認するため8種の異なる配合で、直径100mm、長さ150mmの供試体を13本作成して水による透水試験を行った。その試験結果、その他については巻末の参考資料1を参照されたい。

(2)円柱供試体

扇状供試体に対して、前章までに説明した透水試験を実施してその流水抵抗則を求める。その推定精度を検討する目的で、透水性コンクリートからは図-3.27に示す位置からコアを採取し、ガラスビーズは円筒容器内に扇状供試体と極力同じ間隙比となるように締固めて円柱供試体 ($\phi 100\text{mm} \times h 125\text{mm}$) を作製し、1次元流下での透水試験に供した。

なお、透水性コンクリートのコアは、供試体締固め方向とコアの高さ方向 (通水方向) が一致するものと直交するものを採取し、それぞれを鉛直 (V) および水平 (H) 方向供試体とした。扇状供試体を用いた試験では、通水方向が水平方向に一致するため、扇状供試体からは水平方向供試体を採取した。また、透水試験に際しては、円柱供試体周面はシール材とゴムスリーブを用いて止水した。

円柱供試体の諸元を表-3.9に示す。

図-3.9 円柱供試体の諸元

供試体	直 径 (cm)	高 さ (cm)	乾燥密度 (cm ³ /s)
A-V	9.95	10.79	1.791
A-H	9.97	9.13	1.768
B-V	9.95	10.53	1.786
B-H	9.93	6.63	1.738
C-1	10.25	12.50	1.618
D-1	10.25	12.50	1.576

3.3.3 試験方法

(1)試験手順

2種類 (配合) の透水性コンクリートおよびガラスビーズを用いた供試体に対して以下に示す3段階の試験を実施した。

- a : 水による透水試験 (放射流)
- b : 高粘性流体による透水試験 (放射流)
- c : 水による透水試験 (1次元流)

供試体番号は供試体の種類を表-3.8、3.9に示すように透水性コンクリートを用いた放射

流試験用供試体を配合の違いによってA、Bで区分し、コア抜き一次元流試験用供試体を水平方向H、鉛直方向をVとしてA—H、A—Vのように示した。また、ガラスビーズを用いた放射流試験用供試体をビーズの粒径によってC、Dで区分し、その一次元流用供試体をC—1、D—1のように示した。

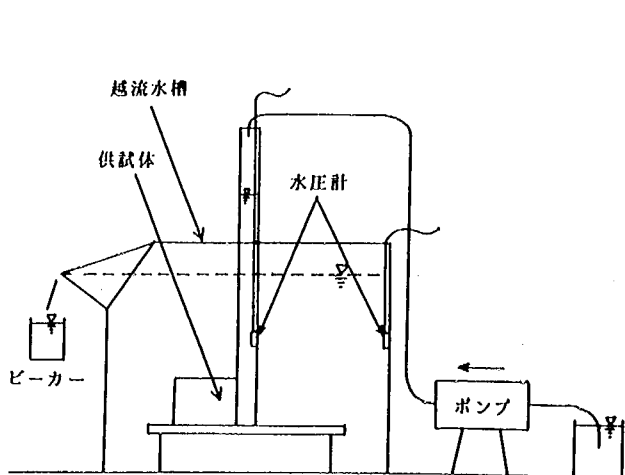
(2)試験装置

放射流試験には図—3.29に示す透水試験装置を用いた。この装置は、供試体に取り付けたアクリルパイプに水または高粘性流体を注入することにより、最大200cm程度の水頭をかけることができる。供試体上下面および切断面のシールにはシリコン樹脂を用いた。その効果確認は、試験に先立ちフレオレセイン水溶液をアクリルパイプ内に注入し、100cm程度の水頭をかけ目視により行った。その結果上記方法によるシール効果は十分であった。

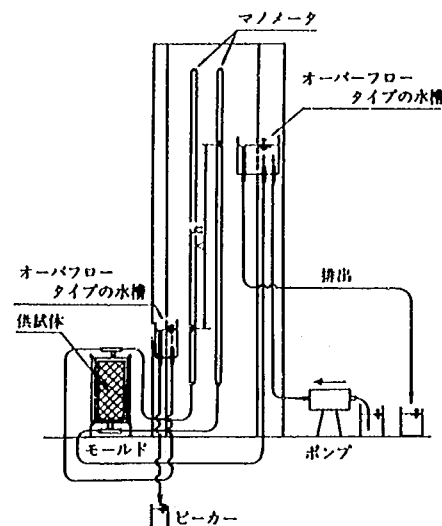
1次元流試験には図—3.30に示す定水位透水試験装置を用いた。この装置は、上流側および下流側の越流槽の高さを調節することにより、長さ100mmの供試体に対して、動水勾配を最大18程度までかけることができる。供試体周辺のシールにはゴムスリーブとシリコン樹脂を併用した。その効果確認は、透水性コンクリート供試体と同じ形状の難透水性のコンクリート供試体をセットし、最大動水勾配をかけた時の透水量の測定により行った。その結果、測定できるような透水量はなく、上記方法によるシール効果が十分であることを確認した。

(3)水による透水試験（放射流）

原則として低い水頭から段階的に上げ、それぞれの水頭時の安定流量を3回測定し、その平均値を測定流量とした。しかし、低い水頭で通水を継続すると気泡による目詰まりの影響だと思われる流量の減少がみられたため、ある水頭から次の水頭にあげるときに、一度最大水頭（200cm程度）まで上げて、その水圧で供試体の気泡の押し出しを行ってから次の段階へ移行することとした。透水試験には供給量の理由から水道水を用い、事前に脱気を行うなどの処置はとらなかった。水頭測定にはアクリルパイプ内と越流槽に間隙水圧計を設置し、その差を試験水頭とした。



図—3.29 放射流透水試験用装置



図—3.30 1次元流用透水試験装置

(4)高粘性流体による透水試験 (放射流)

高粘性流体には前述のメチルセルローズ系増粘剤の水溶液を使用した。最大粘度は50 c P程度とし、高粘性流体を作成後十分脱気し、一定の水頭のもとで粘性の低い流体から順々に使用して、それぞれの粘性段階における安定流量を3回測定し、その平均値を測定流量とした。この場合も通水を継続すると流量の減少がみられたため、そのような場合には水道水で最大水頭まで上げて、その水圧で供試体内の気泡の押し出しを行ってから次の粘性の液体へ移行した。高粘性流体の粘性の測定にはブルックフィールド型回転粘度計を用いた。

(5)水による透水試験 (一次元流)

低い動水勾配から段階的に上げ、それぞれの動勾配時の安定流量を3回測定し、その平均値を測定流量とした。ここでも、小さい動水勾配で通水を継続すると気泡の混入による目詰まりの影響だと思われる流量の減少がみられたため、そのような場合には、ある動水勾配から次の動水勾配にあげるときに、最大の動水勾配まで上げて、その水圧で供試体の気泡の押し出しを行ってから次の段階へ移行することとした。透水試験には水道水を用い、事前に脱気を行うなどの処置はとらなかった。

3.3.4 試験結果

(1)水による透水試験 (放射流)

A、B、C、D供試体それぞれの $p-q$ の関係を扇状形モデルから円環形モデルに換算した結果を図—3.31に示す。A、B、Cについては最小水頭の段階から乱流状況が発生しており、両対数紙上で傾き 45° となる層流状態は認められなかったが、Dについては、低水頭部で層流状態が認められた。

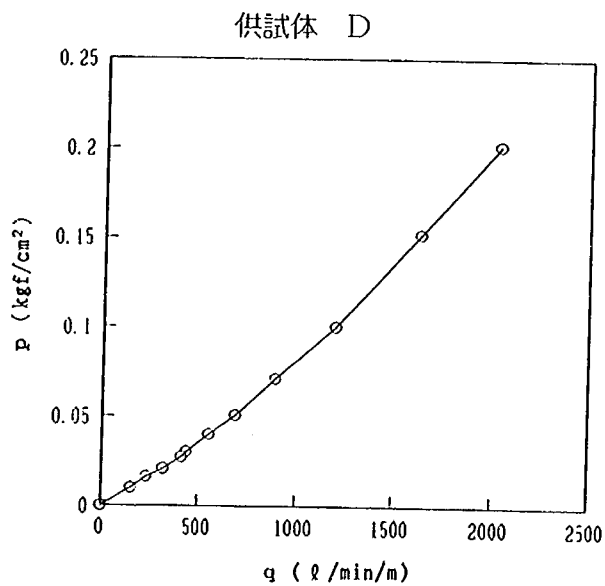
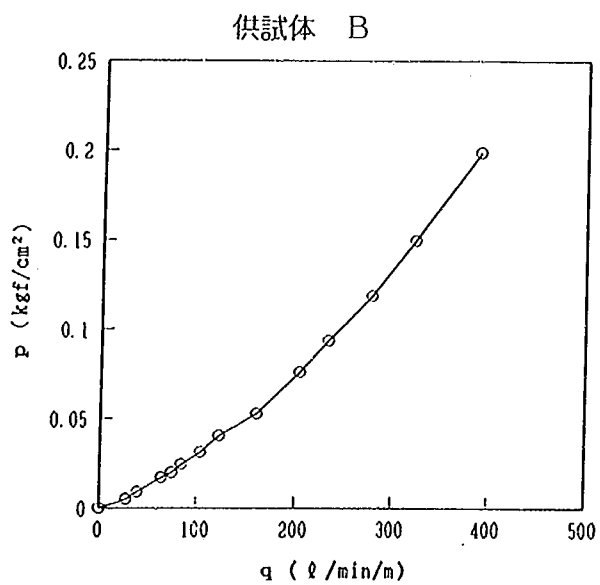
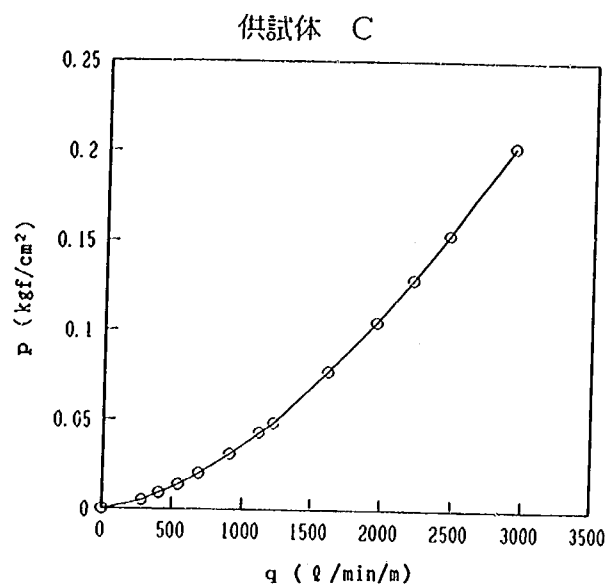
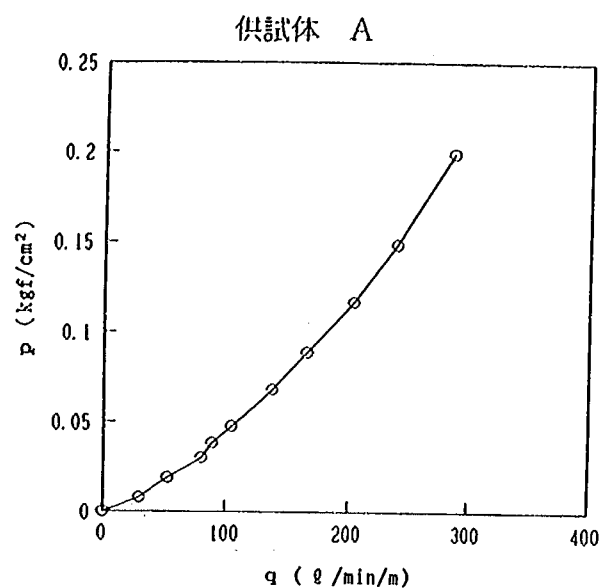


図-3.31 $p-q$ 曲線図 a) 算術目盛

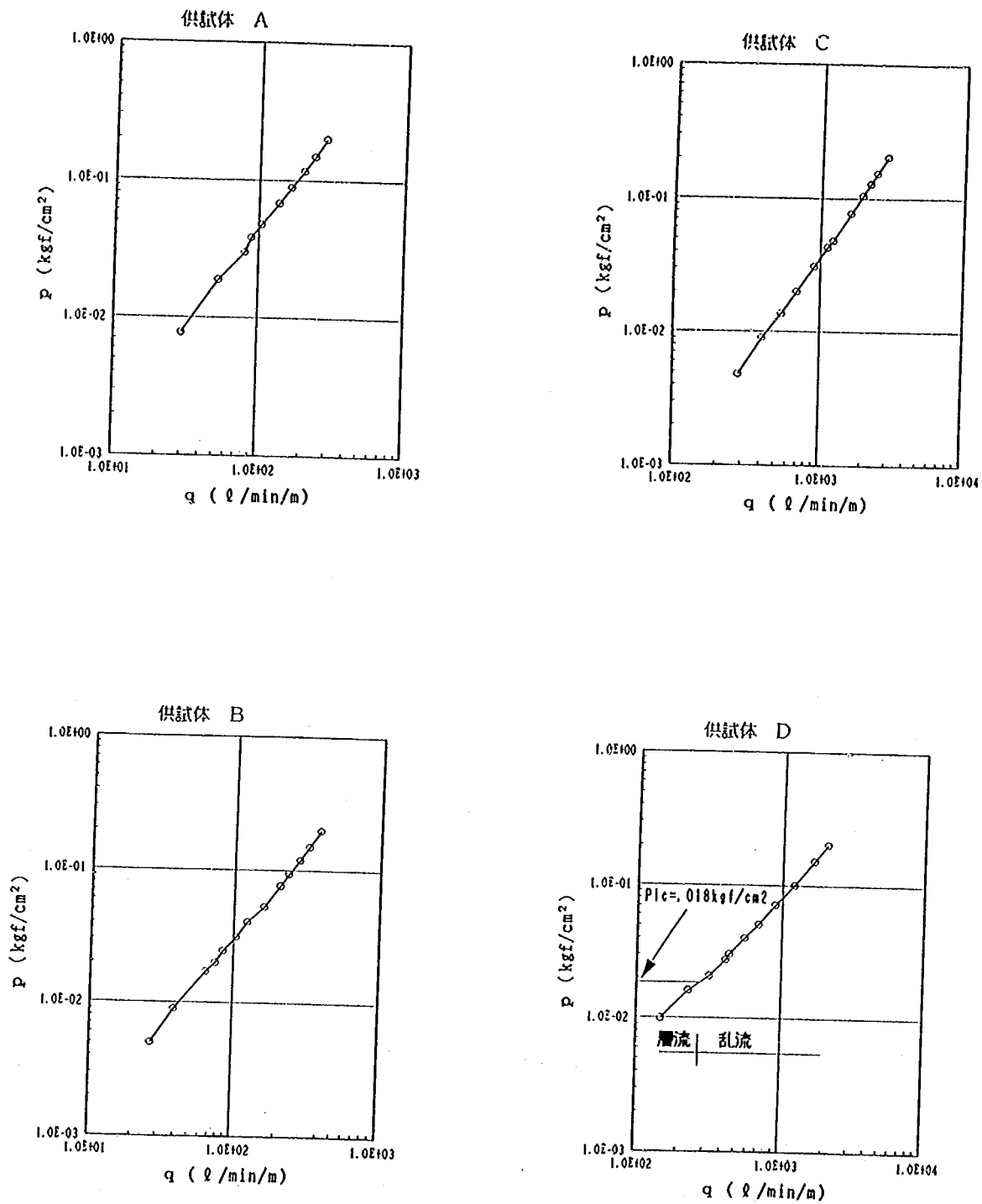
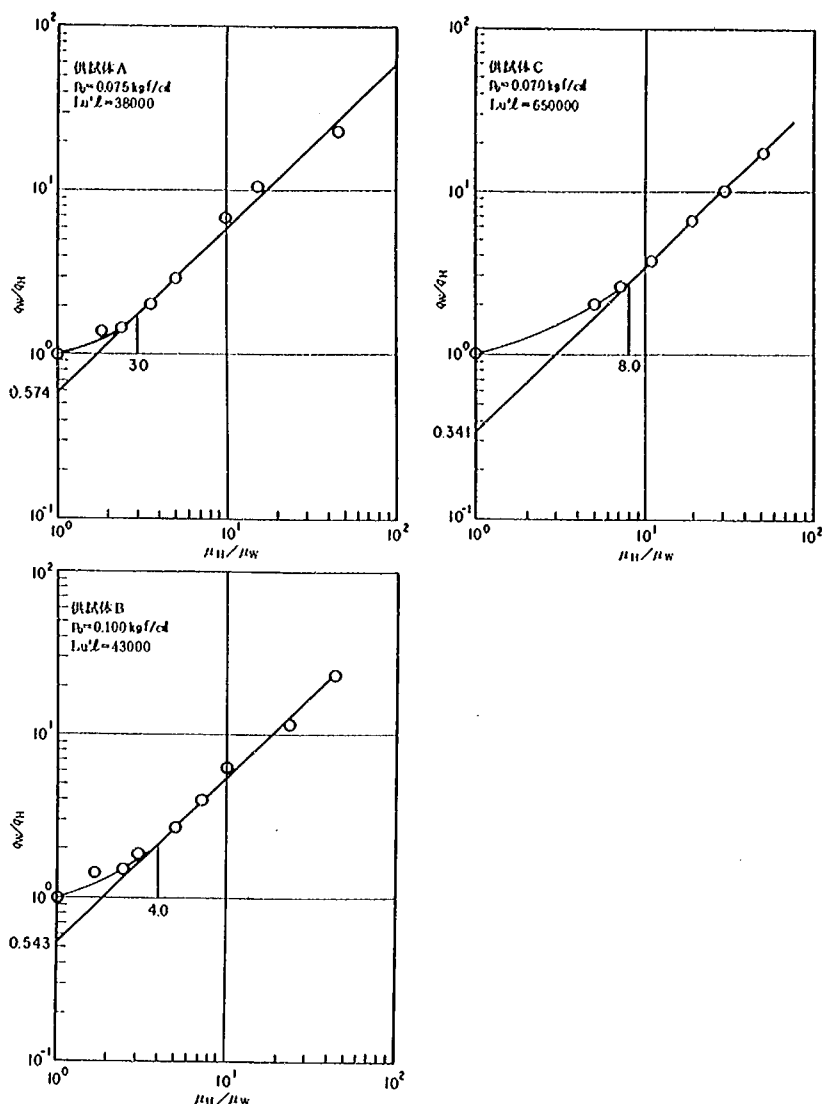


图-3.31 $p-q$ 曲线图 b) 对数目盛

(2)高粘性流体による透水試験（放射流）

A、B、C供試体それぞれの流量比（ q_w / q_H ）—粘性比（ μ_H / μ_w ）の関係を図—3.32に示す。また、図中に試験水頭、粘性換算層流ルジオン値（ $L u' \ell$ ）、および図から読み取った層流遷移粘性比（ μ_{Hcr} / μ_w ）を示す。なお、D供試体については、水による透水試験で層流状態が認められたため高粘性流体による透水試験は行わなかった。



図—3.32 流量比—粘性比図

(3)水による透水試験（1次元流）

それぞれの供試体の動水勾配と流速の関係を図—3.33に示す。C—1については、水による試験では層流状態とならなかったため、粘性流体を用いて水による透水試験（1次元流）と同じ方法で試験を行った。その結果を図—3.34に示す。結果の見方の一例として図—3.33に示すA—Hを例にとると、ここでは動水勾配の低い方から6点までを層流、7点目から11点目までを遷移領域、以後を乱流と判定した。複数の層流のデータから得られる直線上の動水勾配1のときの流速を透水係数 k とした。

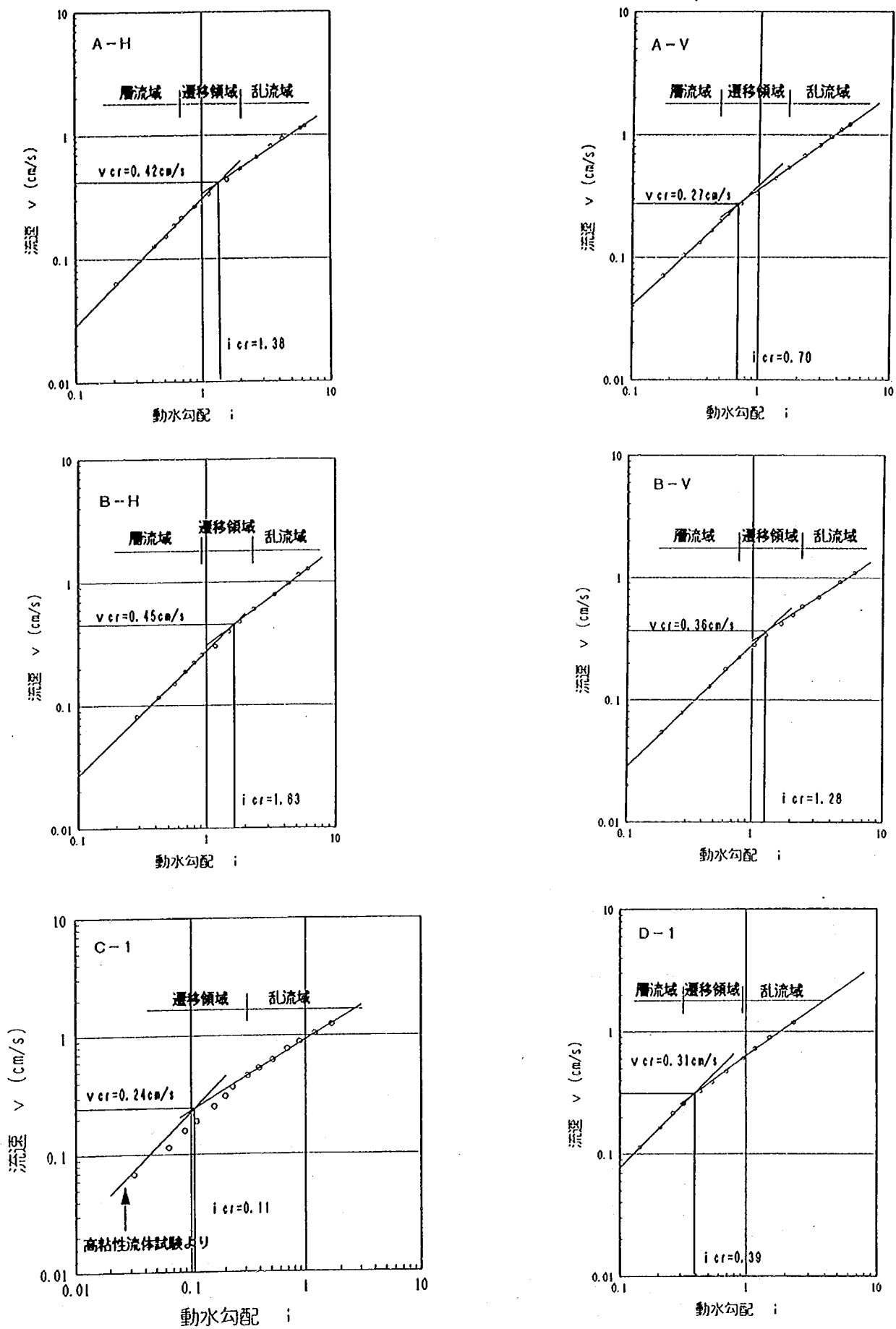


図-3.33 動水勾配と流速の関係

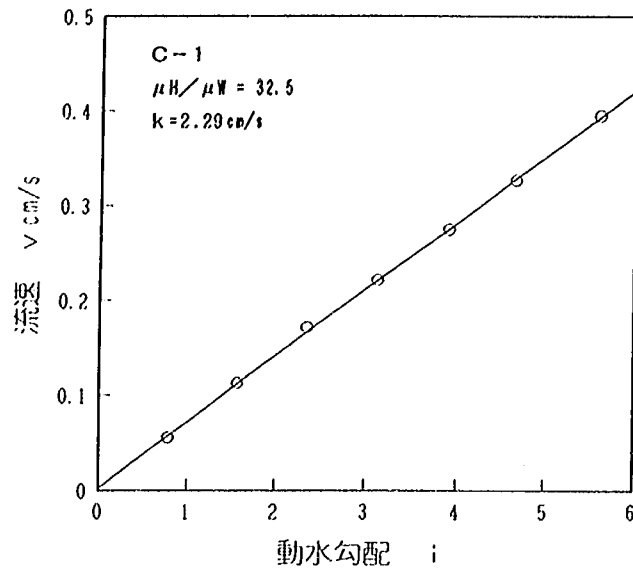


図-3.34 動水勾配と流速の関係（高粘性流体試験）

また、室内試験結果のうち層流時の動水勾配と流速のデータから得られる回帰直線式と乱流のデータから得られる回帰直線式の交点を求め、その点の値をそれぞれ限界動水勾配（ i_{cr} ）および限界流速（ v_{cr} ）とした。

また、乱流域のデータを次式に回帰したときの乱流抵抗則定数 c ， n も求めた。

$$i = c v^n \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

これらの結果の一覧を表-3.10に示す。なお、表中には、円柱型の透水性コンクリートに対して実施した透水試験結果³⁾も記載している。

表-3.10 室内試験結果一覧

供試体	項 目	Lu'	$P_{ic} \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^2$	μ_{Hcr}/μ_w	i_{cr}	$v_{cr} \text{ cm/s}$	$k \text{ cm/s}$	n	$c (\text{cm,s単位})$
A	放射流（第一法）	38000	8.30	3.0	(2.02)	0.51	0.25	1.88	7.29
	放射流（第二法）	38000	2.79	5.18	(0.68)	0.17	0.25	1.44	8.71
	放射流（第三法）	45000	1.53	—	(0.37)	0.11	0.30	1.43	8.73
	一次元流（水平）	(46000)	(5.68)	—	1.38	0.42	0.31	1.46	4.89
	一次元流（鉛直）	(60000)	(2.85)	—	0.70	0.27	0.39	1.30	3.74
B	放射流（第一法）	43000	6.25	4.0	(1.33)	0.35	0.26	1.48	6.37
	放射流（第二法）	43000	5.58	4.24	(1.18)	0.31	0.26	1.45	6.47
	放射流（第三法）	41000	7.39	—	(1.57)	0.39	0.25	1.47	6.39
	一次元流（水平）	(46000)	(7.67)	—	1.63	0.45	0.28	1.28	4.53
	一次元流（鉛直）	(47000)	(6.02)	—	1.28	0.36	0.28	1.41	5.31
C	放射流（第一法）	650000	1.10	8.0	(0.22)	0.79	3.66	1.54	0.31
	放射流（第二法）	650000	1.54	6.74	(0.30)	1.11	3.66	1.62	0.26
	放射流（第三法）	690000	1.32	—	(0.26)	1.00	3.87	1.62	0.26
	一次元流	(410000)	(0.54)	—	0.11	0.22	2.29	1.67	1.12
D	放射流（第一法）	150000	18.00	—	(3.54)	2.99	0.84	1.41	0.76
	放射流（第二法）	150000	13.80	—	(2.71)	2.29	0.84	1.32	0.91
	放射流（第三法）	150000	14.71	—	(2.89)	2.42	0.84	1.33	0.89
	一次元流	(140000)	(1.98)	—	0.39	0.31	0.80	1.33	1.83

山口ら³⁾（一次元流）

供試体名	i_{cr}	$v_{cr} \text{ cm/s}$	$k \text{ cm/s}$	n	$c (\text{cm,s単位})$
a-1	0.41	0.23	0.57	1.56	4.06
b-1	4.00	0.053	0.013	1.48	309

3.3.5 流水抵抗則

表一3.10に放射流透水試験の結果を用いて2.3.2、2.3.3に示した第一、二、三法により、層流ルジオン値 $L u' l$ とその値から換算した透水係数 k 、層流限界圧力 p_{lc} 、層流限界流則 v_{cr} 、乱流抵抗則の定数 n 、 c を求めた結果と一次元流試験結果から求めた透水係数 k 、層流限界動水勾配 i_{cr} 、乱流抵抗則の定数 n 、 c を示す。なお、表中の()内に示した層流ルジオン値 $L u' l$ は(2.24)、(2.25)式より、また層流限界圧力 p_{lc} 、限界動水勾配 i_{cr} は(3.4)式により算出した。また、図一3.35には、第一、二、三法で求めた物性値を用いて理論式より求めた $p-q$ 曲線と透水試験(放射流)の実測データを示す。これらの図表から以下のことがわかる。

- ① いずれの材質の供試体についても、 μ_{Hcr} / μ_w を両対数紙上から求める第一法と、定圧透水試験から求める第二法では、ほぼ同程度の物性値が得られているが、客観的に μ_{Hcr} / μ_w を決定できる分、第二法の方が優れていると考える。
- ② 第二法と第三法から求めた物性値は上記以上に良く一致しており、室内試験レベルであれば、多段階の定圧透水試験のみで正確に抵抗則を求めることが可能であることが確認できた。この理由としては、低圧での試験が可能なこと、かなり多い段階の圧力で試験を行ったこと、水流の影響半径が明確なこと(影響半径は供試体半径である)が挙げられる。
- ③ 放射流試験から求めた諸物性値を用いて算出した $p-q$ 曲線は、実験データと良く一致している。
- ④ 締固めて作製された透水性コンクリートには顕著な異方性がないことが、水平と鉛直方向円柱供試体から求めた諸物性値に大きな差がないことからわかる。
- ⑤ 放射流試験と1次元流試験から得られた諸物性値は概ね一致しているが、 c 、特にガラスビーズのそれにはやや差がある。これは、ガラスビーズ供試体の場合、円柱と扇状でやや密度が異なること、扇状では天端、隅角部に水みちが発生しやすいこと等の供試体形状の差に依るところが大きく、試験方法の精度上の問題ではないと考える。
- ⑥ 多孔質媒体を対象とした室内試験結果を3.2に示した節理性岩盤を対象とした現場試験の結果と比較するために、図一3.36～3.38にそれぞれの透水係数 k と i_{cr} 、 c 、 n の関係を示す。なお、現場試験、および室内試験での放射流のデータはすべて第二法(現場試験は $r_1 = 100m$)の結果を用いた。これらの図より多孔質媒体の室内試験から推定した限界動水勾配は、同程度の透水性を有する節理性岩盤での現場試験から推定した限界動水勾配に比較して大きいことがわかる。これは、同程度の透水性を有していれば多孔質媒体は節理性岩盤に比較して乱流になりにくい、つまりルジオンテスト時に乱流の発生する最小の注入圧力は大きいことを示している。乱流抵抗則の定数 c については、多孔質媒体、節理性岩盤ともにこれまで述べたように透水係数が小さくなるほど大きくなる傾向がある。ただし、同じ透水係数であれば、その値は節理性岩盤の方が大きい。また、 n の値は、節理性岩盤の方が多孔質媒体よりも大きい傾向にある。 $n=1.0$ で層流、 $n=2.0$ で完全な乱流、その間では乱流と層流が混在していると考

えると、節理性岩盤では、通水経路が割れ目という透水性の卓越部であることから、実流速が大きいため乱流の傾向が強く出ており、多孔質媒体では、その通水経路は媒体内に無数にある細かな空隙であるため層流がかなり混在していると考えられる。

- ⑦ 図—3.39に乱流換算ルジオン値 $Lu't$ と層流ルジオン値 $Lu'l$ の関係をOダムでの結果（詳細については参考資料2参照）も含めて示す。なお、これまで $Lu't$ は、圧力・流量データをベキ乗回帰して求めた、圧力が 10kgf/cm^2 での流量（ $\ell/\text{min}/\text{m}$ ）と定義してきた³⁾が、この定義には物理的な根拠がないため、ここでは、Tダムおよび室内試験については第二法より、Oダムについては第二法を実施していないため、第三法より求めた諸係数より算出した理論曲線から、圧力 10kgf/cm^2 の時の流量値（ $\ell/\text{min}/\text{m}$ ）として定義した。この $Lu't$ は、ルジオン（M.Lugeon）¹²⁾が定義したルジオン値により近いものであると考えられる。ただし、両者から得られる値には、ほとんど差がなかった。この図より、Lugeonの定義したルジオン値に非常に近い $Lu't$ が数ルジオン程度までは、 $Lu'l/Lu't=1.0$ 程度であるが、それ以降 $Lu't$ が大きくなる程 $Lu'l/Lu't$ は大きくなる傾向が認められ、節理性岩盤については $Lu't$ が数十ルジオン程度になると $Lu'l$ は $Lu't$ よりも1～2オーダー大きな値となることがわかる。ただし、多孔質媒体については、 $Lu't$ が数千～数万ルジオン程度と大きな値であっても、 $Lu'l$ は $Lu't$ の10倍程度の値である。これは、⑥でも記したように、節理性岩盤では、通水経路が割れ目という透水性の卓越部であることから、実流速が大きく乱流の傾向が強く出ているため $Lu'l$ と $Lu't$ の差が大きく、多孔質媒体では、その通水経路は媒体内に無数ある細かな空隙であるため層流がかなり混在し $Lu'l$ と $Lu't$ の差が小さいと考えられる。

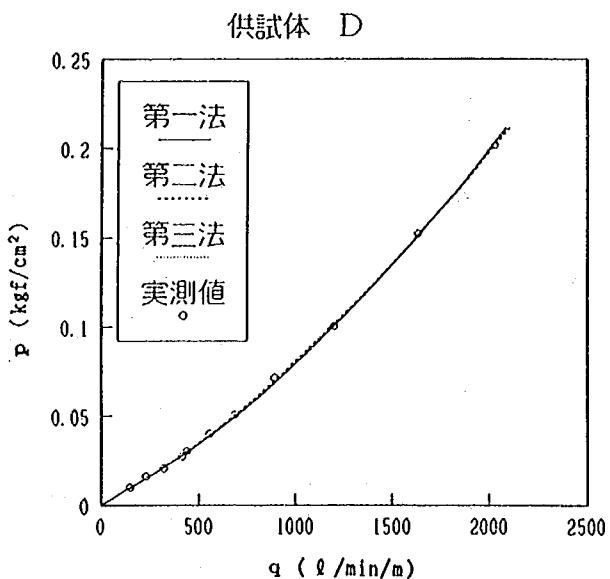
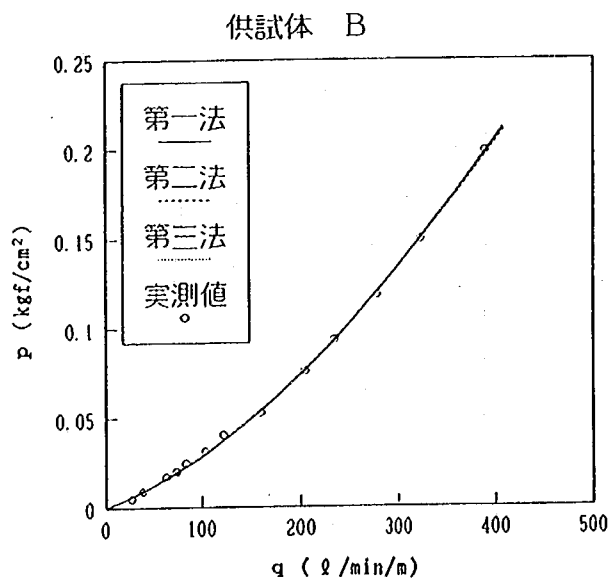
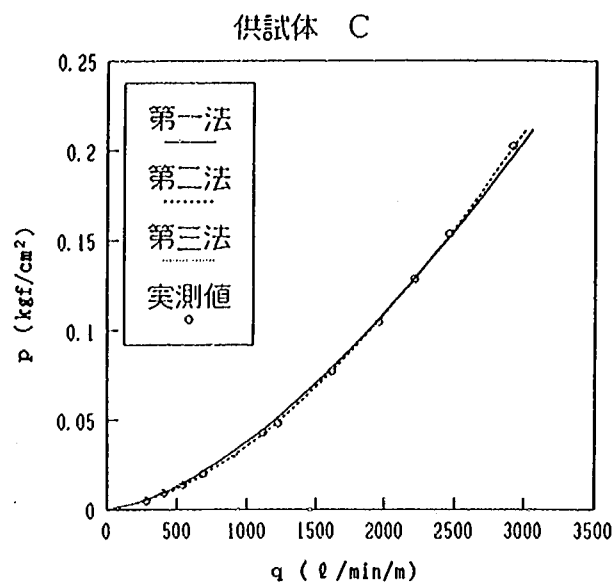
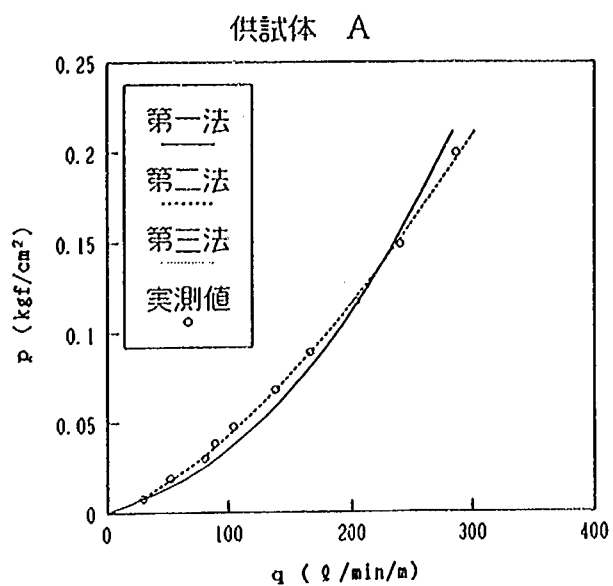


図-3.35 $p-q$ 曲線図 a) 算術目盛

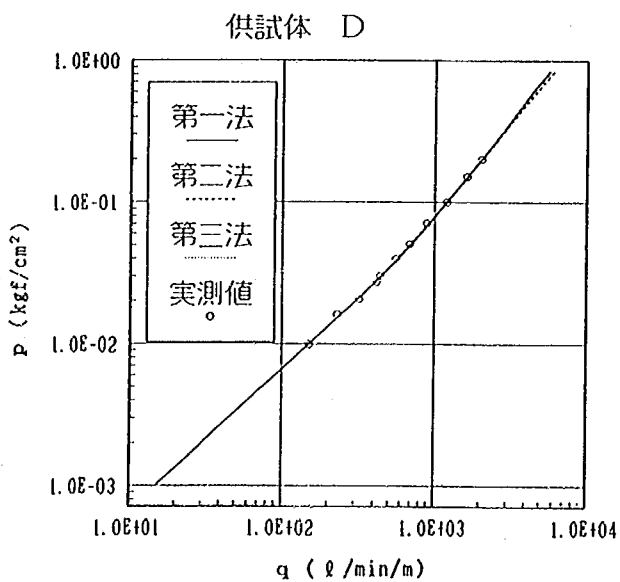
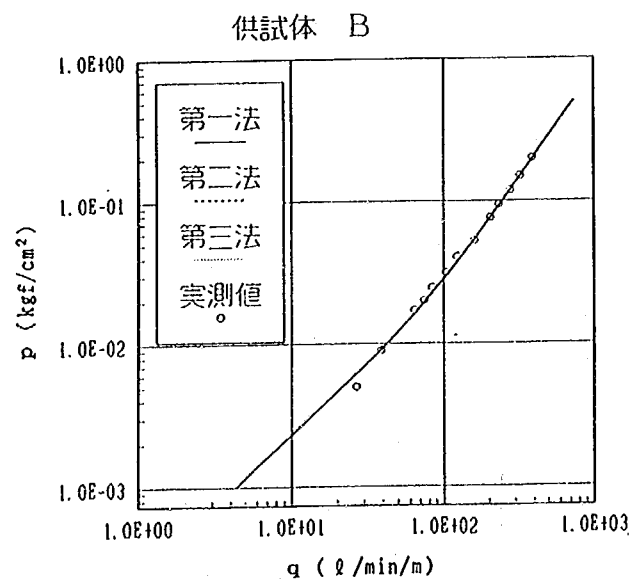
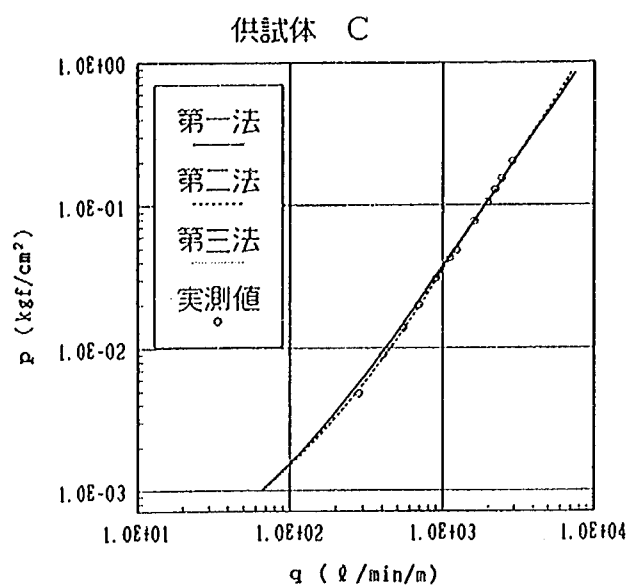
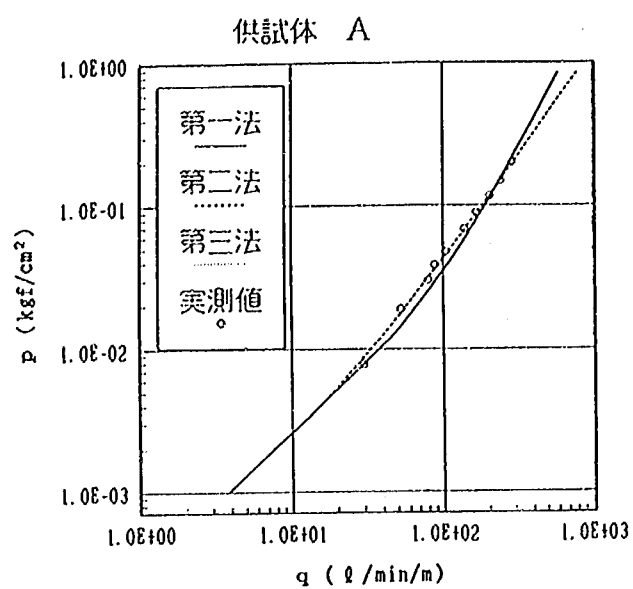


図-3.35 $p-q$ 曲線図 b) 対数目盛

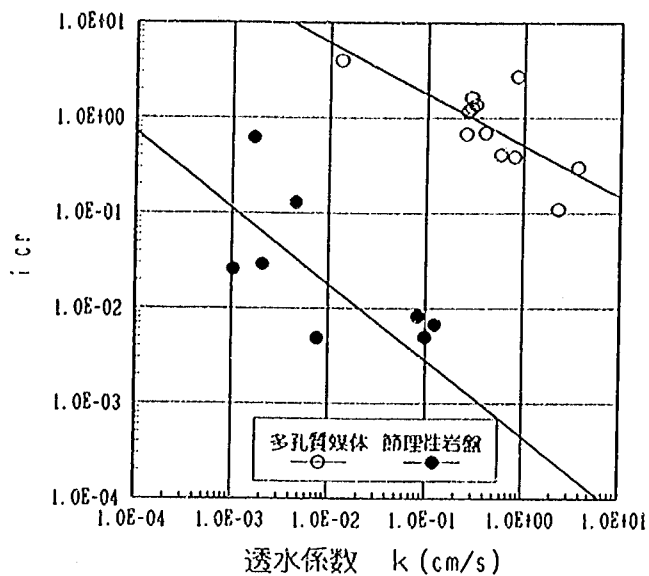


図-3.36 透水係数と限界動水勾配の関係

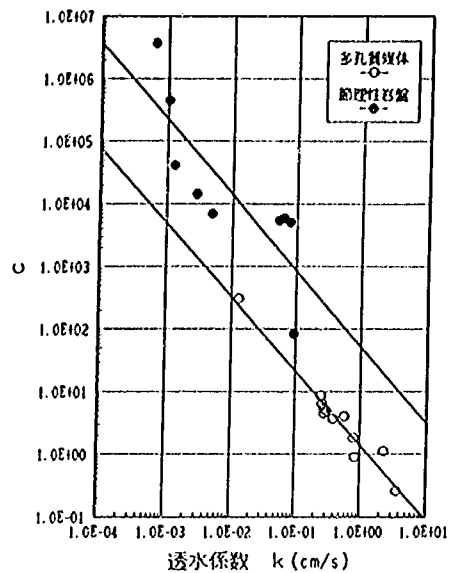


図-3.37 透水係数とcの関係

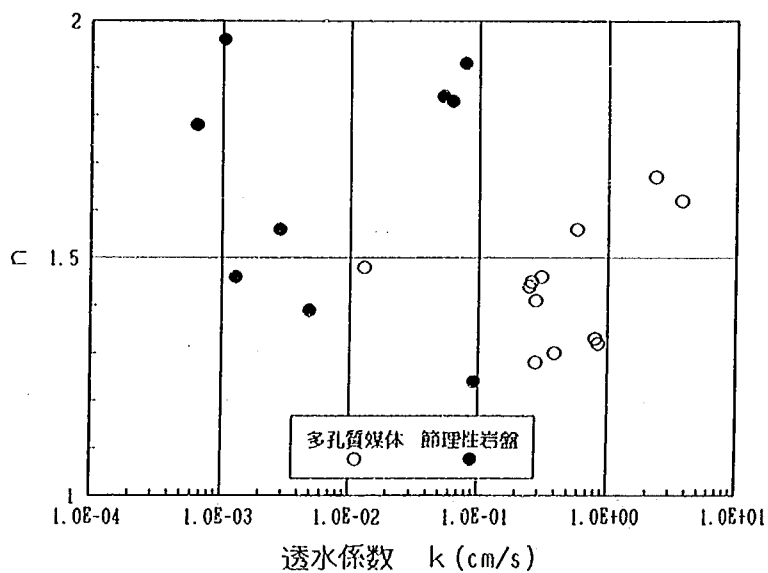


図-3.38 透水係数とnの関係

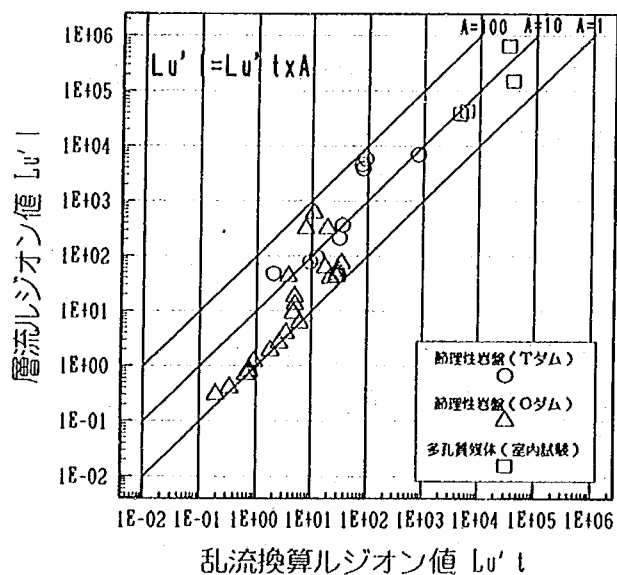


図-3.39 $Lu' t$ と $Lu' l$ の関係

4. 現場での適用に際しての留意点¹³⁾

4.1 概要

本研究で提案した現場透水試験法は、2.2.1で示した岩盤モデルを対象にした場合、その精度が比較的良いことを室内試験により実証することができた。そこでここでは、3章での結果をふまえて本試験を現場で適用するにあたり、いかなる点に留意すれば岩盤モデルと実岩盤との差異を考慮できるかを整理しておきたい。

4.2 異方性

岩盤の透水性には、明らかに異方性がある。そこで、地質調査により水みちとなる亀裂の卓越方向を知ったうえで、鉛直のみならず斜めのボーリング孔も利用して透水試験を行い k 、 c 、 n の異方性を把握することが必要となる。また、より正確さを期すのであれば、西垣ら¹⁴⁾が提案している3次元異方透水係数を求める試験の併用も考えられる。

4.3 均質性

岩盤の均質性を論じる際には、その対象規模が大きな問題となってくる。しかし、ボーリングコアの観察により対象岩盤の亀裂間隔を把握し、極力多くの亀裂を切るような試験区間長で透水試験を実施することにより、ダム湛水時の漏水を規定する抵抗則を求めることができるのではないかと考える。また、現実には、亀裂幅の大小により、乱流域と判定されている孔壁付近でも実際には乱流と層流が混在している場合もあるが、それについては今回の岩盤モデルは考慮できない。しかし、その現象については n の値の大小($n=2.0$ の場合には層流は混在しない。 n の値がそれよりも小さい場合にはその値に応じて層流が混在している。)である程度推察されるものとする。

4.4 水平流

ボーリング孔を試験孔とする場合、試験区間長は孔半径よりも十分大きいことが一般的で、孔からの流れはほぼ水平(孔に直交)であるといってもよい。ただ、より岩盤モデルの仮定に近づけるためには、多連パッカを用いた注入も考えられる。

4.5 ポテンシャル流

地下水面下での試験では、この仮定は成り立つ。しかし、地下水面上の試験では、重力の影響を受ける。ここで対象にしている岩盤では、地下水面上での試験も多くなると思われるので、その影響度合いについては検討が必要と思われる。

5. 乱流抵抗則を考慮した浸透流解析

5.1 概要

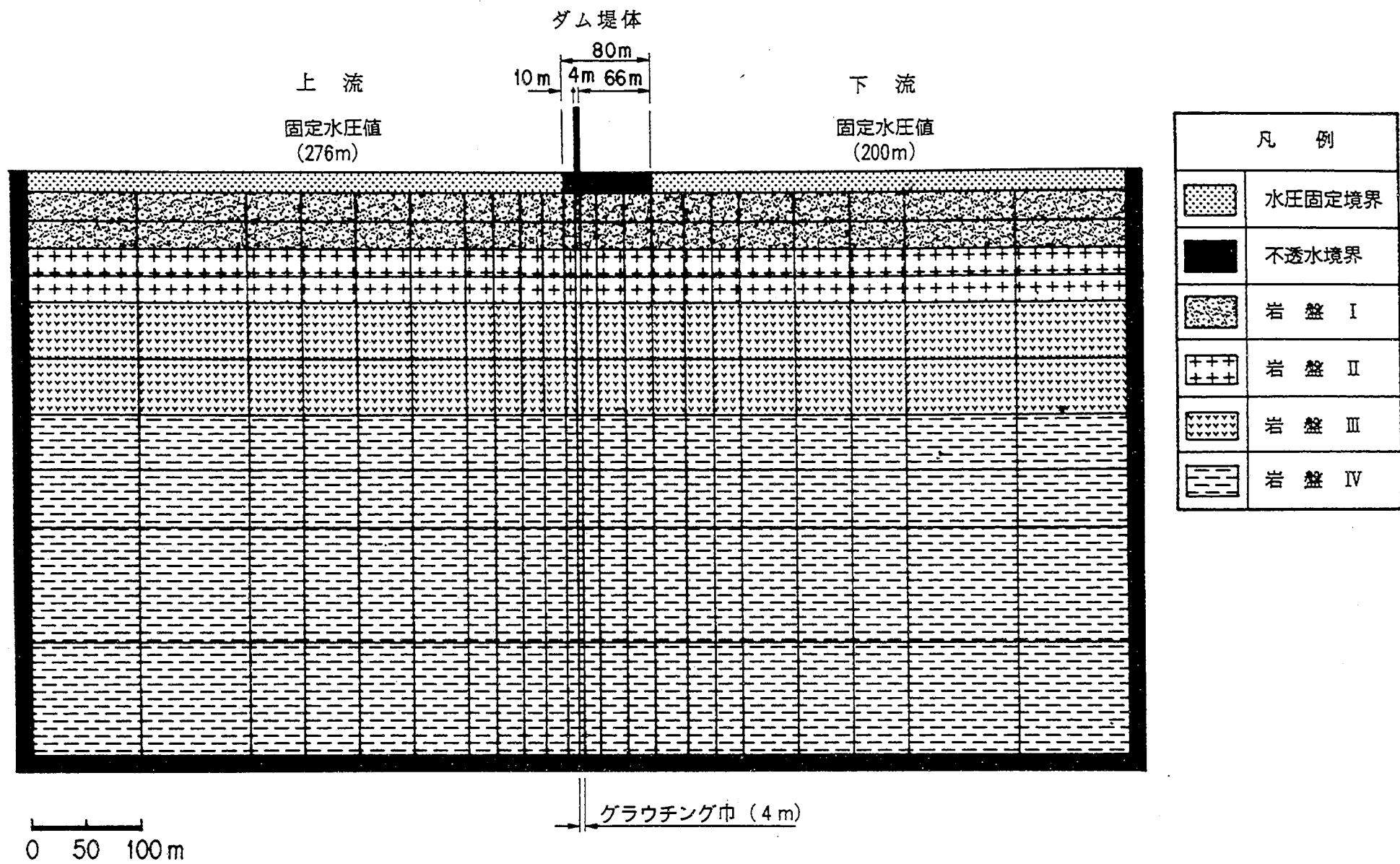
前章までにおいて、岩盤の乱流および層流時の流水抵抗則を原位置で測定する方法および現場、室内での測定例について述べてきた。本章では、乱流、層流の抵抗則を考慮できる浸透流解析プログラム⁶⁾を使用した解析例として、3.2で述べたTダムのリム部のグラウチング範囲と漏水量の関係を求めてみる。その際、乱流の発生状況を確認するとともに、得られた透水係数のみを用いて層流条件で解析した場合との比較も行う。

5.2 解析条件

浸透流解析用モデルの有限要素分割図を図—5.1に示す。これはダムの右岸地山を平面的にモデル化したものである。上下流、および右岸地山方向のモデルの大きさは、その範囲外の浸透流が全体の浸透流量に与える影響がさほど大きくない程度ということを考慮して決定した。このモデルにおいてリムグラウチング長を0, 50, 100, 200, 400mと5種類に変化させて解析を行った。表—5.1に解析に用いた入力物性値を示す。表中のケース1とは、乱流抵抗則を考慮したもので、岩盤I、IIの入力物性値は今回の試験結果（第二法）を参照して決定し、III、IVについては過去のルジオンテスト結果に乱流の影響を考慮して層流状態を推定して求めた透水係数より多少大きめの透水係数を与え、図—3.36～図—3.38を参考にその他の物性値を決定した。ケース2は、層流抵抗則のみで解析したものである。

表—5.1 入力物性値

ケース1……乱流も考慮						ケース2……層流のみ		グラウチング長	
領域	k (cm/s)	c (cm,s単位)	n	v_{cr} (cm/s)	i_{cr}	領域	k (cm/s)	ケースNo	グラウチング長
岩盤I	7×10^{-2}	3000	1.9	2.63×10^{-3}	3.76×10^{-2}	岩盤I	7×10^{-2}	1,2-1	0 m
岩盤II	2×10^{-3}	150000	1.7	2.89×10^{-3}	1.45×10^{-1}	岩盤II	2×10^{-3}	1,2-2	50 m
岩盤III	3×10^{-4}	1000000	1.7	2.89×10^{-3}	9.63×10^{-1}	岩盤III	3×10^{-4}	1,2-3	100 m
岩盤IV	1×10^{-4}	3000000	1.7	2.89×10^{-3}	2.89	岩盤IV	1×10^{-4}	1,2-4	200 m
グラウチング部	1×10^{-5}	—	—	—	—	グラウチング部	1×10^{-5}	1,2-5	400 m



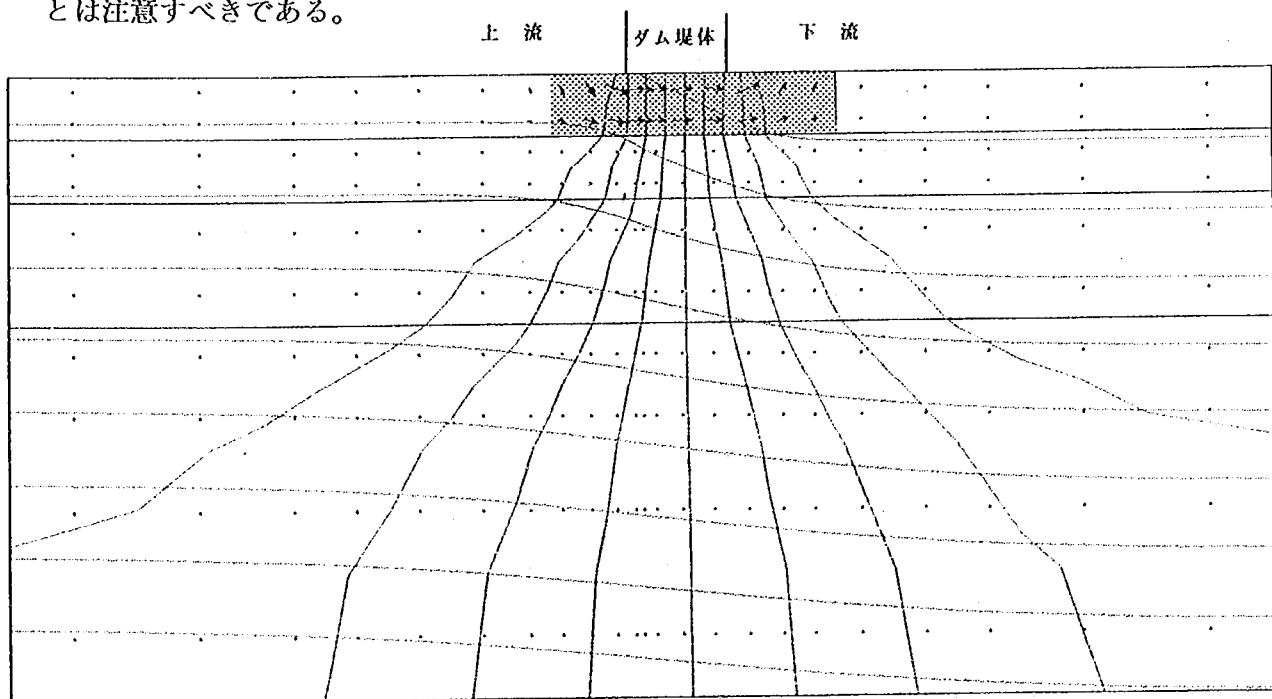
図— 5.1 有限要素分割図

5.3 解析結果

ケース1で、解析結果に乱流の影響が現れた例を図—5.2（ケース1—1）、図—5.3（ケース1—2）に示す。これらは、リム部のグラウチング長をそれぞれ50m、100mとした場合のもので、図中のハッチング部分が乱流発生範囲である。なお、すべてのケースの解析結果を巻末に付図として添付しておく。また、図—5.4にケース1とケース2、それぞれの場合のリムグラウチング長と漏水量（単位厚さ1m）の関係を示す。

これらの図から以下のことがわかる。

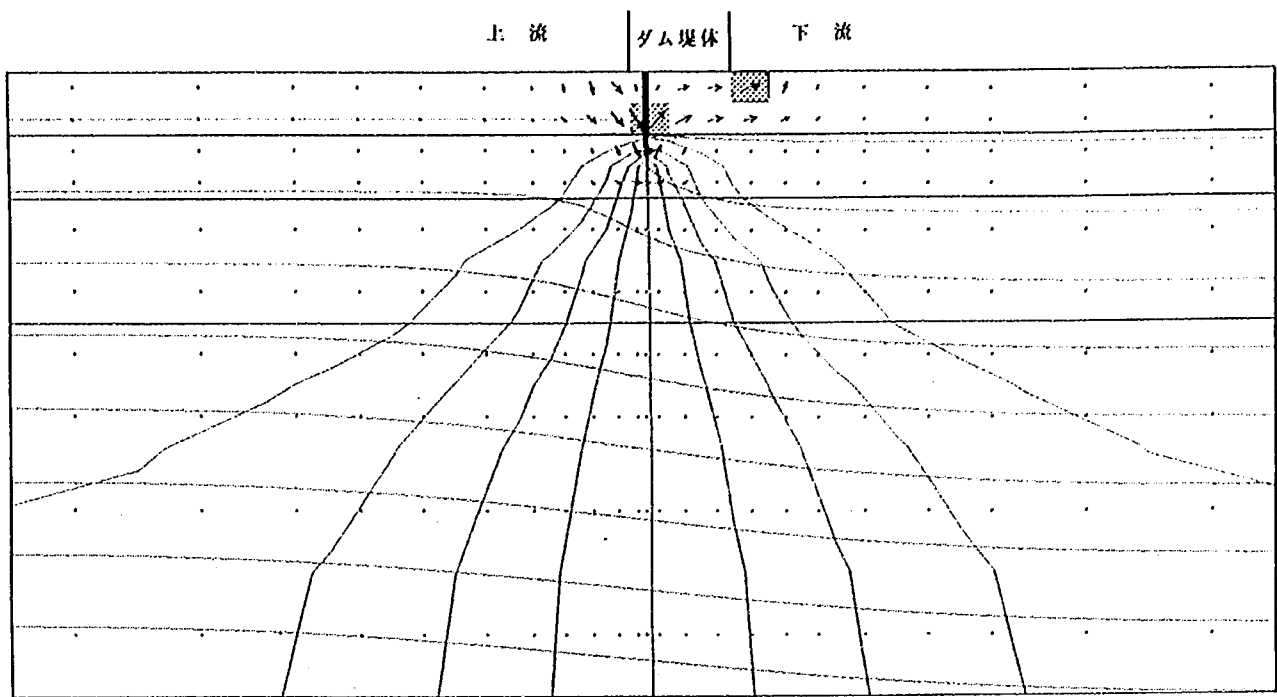
- ① ケース1から、グラウチングを施さない場合では、堤体付近の地山のかかなりの範囲で乱流が発生している。
- ② ケース1のグラウチング長50mの場合では、グラウチング範囲の末端部と浸透流の最短の出口である堤体直下流部で乱流が発生している。
- ③ ケース1でもグラウチング長が100m以上になると乱流は発生していない。
- ④ リムグラウチング長0～100mと短いケースでは、乱流の抵抗則をも考慮した場合（ケース1）の漏水量は層流のみを考慮した場合（ケース2）に比べてかなり小さく、層流抵抗則のみで漏水量を正確に推定するのは困難である。
- ⑤ ただし、高透水域部程度（本ケースでは200m程度）の範囲をクウチングすれば漏水量の低減は限界となっていることは、層流の抵抗則を考慮するだけでも知ることはできた。ただこれは、本ダムモデルでは、地山の奥行き方向に透水性が徐々に小さくなる傾向があることに起因しており、いかなる場合でも、層流の抵抗則のみを考慮するだけで、上記結果を必ずしも得られないことは注意すべきである。



CURRENT SCALE 0.0 0.050
FEM PLOT SCALE 0.0 8000.0

CASE-1-1

図—5.2 浸透流解析結果例（ケース1—1）



CURRENT SCALE 0.0 0.016
FEM PLOT SCALE 0.0 8000.0

CASE-1-2

図-5.3 浸透流解析結果例 (ケース1-2)

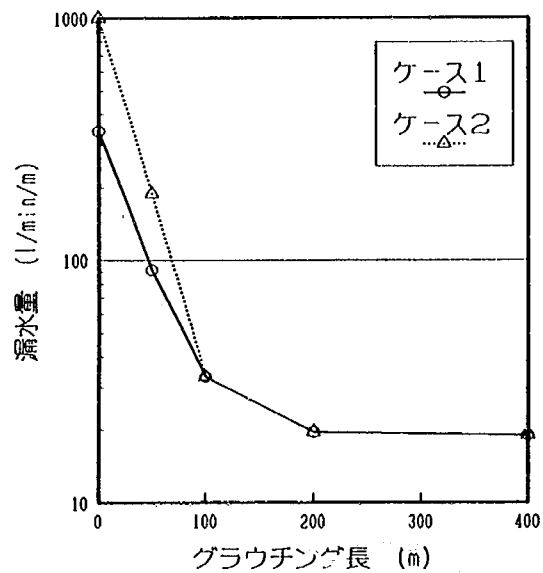


図-5.4 リムグラウチング長と漏水量の関係

6. ま と め

本研究は、岩盤、特に高透水性岩盤の透水現象を解明することを主目的に実施した。その結果、以下に示す知見を得ることができた。

- ① ルジオンテスト時に試験孔からの水流が乱流となる場合の注入流量 q と注入圧力 p の関係を理論的に求めた。
- ② 高粘性流体を用いた透水試験により、層流時の抵抗則を表現する透水係数 k と、水を注入した場合に層流が得られる最大の注入圧力である層流限界圧力 p_{lc} を求める方法を示した。
- ③ 岩盤の乱・層流時における流水抵抗則を求める方法として以下の3通りの方法を示した。
 - 1) k 、 p_{lc} を高粘性流体試験結果より求め、これらとルジオンテスト結果から残りの諸係数を求める方法（第一法）。なお、 p_{lc} は両対数紙上での読み取り値によるため、その客観性に問題がある。
 - 2) k のみを高粘性流体試験結果から求め、これとルジオンテスト結果から残りの諸係数を求める方法（第二法）。この方法では、 p_{lc} も客観的に決定することができる。
 - 3) ルジオンテスト結果のみから求める方法（第三法）。非常に経済的な方法である。
- ④ 節理性の高透水岩盤で透水試験を実施し、流水抵抗則を求めた。その結果以下のことがわかった。
 - 1) 乱流抵抗則のべき数 n は、1.2~2.0の間に分布する。
 - 2) 透水性が大きくなるに従い乱流抵抗則の定数 c は減少する傾向がある。
 - 3) 透水性が大きくなるに従い層流限界圧力 p_{lc} は小さくなる傾向がある。
 - 4) 第二法は原位置試験の簡略化、および解析の精度の点で有効な方法である。
 - 5) 第三法によれば、ルジオンテスト以外に特別な試験を行わなくても概略の乱・層流の抵抗則を把握することができる。また、ルジオンテストを低圧部に重点をおいて多段階で行えば、さらに精度よく抵抗則が求められる可能性がある。
- ⑤ 多孔質媒体の供試体に対して室内透水試験を実施し、その流水抵抗則を求めた。その結果以下のことがわかった。
 - 1) 室内試験レベルであれば、第三法を適用することにより、水による試験のみでも十分正確に流水抵抗則を求めることができる。
 - 2) 水を通水した場合に層流が得られる最大の動水勾配である限界動水勾配は、多孔質媒体の方が節理性岩盤よりも大きい。
 - 3) 乱流抵抗則の定数 c は、同じ透水係数であれば、節理性岩盤の方が多孔質媒体よりも大きい。
 - 4) n の値は、節理性岩盤の方が多孔質媒体よりも大きい傾向にある。
 - 5) $Lu't$ と $Lu'l$ の比較を行った。その結果、 $Lu't$ が数ルジオン程度までは、 $Lu'l/Lu't=1.0$ 程度であるが、それ以降 $Lu't$ が大きくなる程 $Lu'l/Lu't$ は大きくなる傾向が認められ、節理性岩盤については $Lu't$ が数十ルジオン程度になると、 $Lu'l$ は $Lu't$ よりも1~2オーダー大きな値となるが、多孔質媒体については、 $Lu't$ が数千~数万ルジオン程度と大きな値であっても、

$Lu'l$ は $Lu'l$ の10倍程度の値である。

- ⑥ 結果の解析にあたって設けた仮定と実際の岩盤の差異を踏まえて、試験実施に際しての対応策を述べた。ただし、岩盤の異方性、岩盤を均質体と見なせるための試験規模、試験孔からの水流方向に対しては明確な対応策を示すことができたが、地下水面上での試験については今後の検討が必要である。
- ⑦ 層流および乱流の抵抗則を考慮できる浸透流解析プログラムを用いてモデルダム地山からの漏水量を算定した。その結果以下のことがわかった。
- 1) リムグラウチング長が短いケースでは、乱流の抵抗則をも考慮した場合の漏水量は層流のみを考慮した場合に比べてかなり少なく、層流抵抗則のみで漏水量を正確に推定することは困難である。
 - 2) ただし、高透水域部程度（今回の解析ケースでは200m程度）の範囲をグラウチングすれば漏水量の低減が限界となることは、層流の抵抗則を考慮するだけでも知ることができる。なお、これはモデル岩盤の透水性が地山の奥行き方向に小さくなる傾向にあるときに限る。

謝 辞

本研究の一部は、平成元年度科学技術振興調整費、重点基礎研究課題「岩盤における透水抵抗則に関する研究」として実施したものである。関係各位には、深く感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 松本徳久・山口嘉一・渋市秀雄：高粘性流体を用いた透水試験、第23回土質工学研究発表会論文集、pp.125～126、1988、6。
- 2) 山口嘉一・渋市秀雄・松本徳久：ルジオンテストにおける乱流の影響と対策、第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp.401～405、1989、2。
- 3) 山口嘉一・渋市秀雄・松本徳久：高透水性岩盤に対する透水試験、建設省土木研究所報告、第180～1号、1990、1。
- 4) 山口嘉一・松本徳久：高透水性岩盤の透水性評価、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集、第III部門、pp.1010～1011、1989、10。
- 5) 山口嘉一・安仁屋勉・松本徳久・渋市秀雄：高透水性岩盤の流水抵抗則、第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp.161～165、1990、2。
- 6) 建設省土木研究所フィルダム研究室：乱・層流浸透流解析プログラム（仮題）（執筆中）
- 7) 松本徳久・山口嘉一・弘末文紀：ルジオンテストの各種境界条件下での精度と結果の解釈、建設省土木研究所資料、第2518号、1987、11。
- 8) 山口嘉一・松本徳久：ダム基礎の透水性とルジオン値、土木学会論文集、No412/III-12、pp.51～60、1989、12。
- 9) Muskat, M. : Flow of homogeneous fluids, McGraw—Hill Book Company, 1946。
- 10) 土木学会：水理公式集（昭和60年版）、pp.24～28、1985、1。
- 11) 宮田美幸、他：不連続面に注目し乱流領域の存在を考慮した岩盤浸透流解析、第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp.156～160、1985、2。
- 12) Lugeon, M. : Barrages et géologie, Dunod, Paris, 1933。
- 13) 松本徳久・山口嘉一・安仁屋勉：岩盤透水性の新たな評価の試み、第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、岩の力学連合会等、pp.423～428、1990、11。
- 14) 西垣誠・中尾眞司・河野伊一郎：原位置におけ節理性岩盤の3次元異方性透水係数の測定方法に関する一考察、第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp.376～380、1990、2。

参 考 資 料 1

透水性コンクリート供試体の配合決定試験

1. はじめに

本文中で、室内透水試験に供する透水コンクリートの多孔質媒体供試体を作製する際に、いかなる配合であれば目標の透水性 ($k = 2 \sim 4 \times 10^{-1} \text{cm/s}$) が得られるかを確認するために、8種の異なる配合で、直径100mm、高さ150mmの円柱供試体を13本作製して水による透水試験を行った旨を述べた。ここでは、その供試体の性状、試験結果について詳しく述べる。

なお、目標の透水係数 $k = 2 \sim 4 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ は、容易に乱流状態になるようになるべく透水性の大きい供試体を使用したいということと、今回の実験装置の能力、特に水の供給能力の兼ね合いから、実験の行える最大の透水係数を推定して決定したものである。

2. 供 試 体

多孔質媒体供試体には、透水性コンクリートを用いた。それを用いた理由は本文中で述べた通りである。

配合決定のために用意した供試体は、8 配合、13本である。

表一1 にそれぞれの供試体の配合を、表一2 には、それぞれの供試体の形状、および性状を示す。なお、表一2 中の番号のうち、左側は供試体の配合番号で、右側は同一配合のものの中の番号である。

表一1 多孔質媒体の配合

供試体番号	水セメント比 W/C (%)	セメント骨材比 C : S	細骨材比 骨材1 : 骨材2 : 骨材3 : 骨材4
1	30	1 : 8	3 : 1 : 0 : 0
2	〃	〃	3 : 0 : 1 : 0
3	〃	〃	1 : 1 : 0 : 0
4	〃	〃	1 : 0 : 1 : 0
5	〃	1 : 7	1 : 1 : 0 : 0
6	〃	〃	1 : 0 : 1 : 0
7	〃	1 : 6	3 : 0 : 1 : 0
8	〃	1 : 4	0 : 0 : 0 : 1

ただし、細骨材1 : 3号珪砂 粒径1.18~2.0mm
 細骨材2 : 渡良瀬川産川砂 粒径2.5~5.0mm
 細骨材3 : 栗野産硬質砂岩7号砕石 粒径2.5~5.0mm
 細骨材4 : 5号珪砂 粒径0.29~0.84mm

表一2 供試体諸元

供試体 No	質 量 (g)	高 さ (cm)	直 径 (cm)	断面積 (cm ²)	体 積 (cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)
1 - 1	2057.8	15.25	10.01	78.65	1199.6	1.715
1 - 2	2016.1	15.26	10.00	78.51	1198.0	1.683
2 - 1	2053.6	15.25	10.02	78.81	1201.9	1.709
3 - 1	2032.2	15.15	9.98	78.21	1184.7	1.715
3 - 2	2004.0	14.97	10.00	78.51	1174.9	1.706
4 - 1	2062.7	15.36	10.01	78.63	1207.8	1.708
4 - 2	2063.3	15.33	10.02	78.87	1209.3	1.706
5 - 1	2056.3	15.17	10.01	78.65	1192.7	1.724
5 - 2	2068.2	15.28	10.00	78.55	1199.9	1.724
6 - 1	2206.1	15.23	10.06	79.41	1209.0	1.825
6 - 2	2238.3	15.27	10.01	78.76	1202.7	1.861
7 - 1	2131.1	15.18	9.99	78.43	1190.2	1.791
8 - 1	1936.7	15.04	9.95	77.69	1168.7	1.657

3. 試 験

試験、および結果のとりまとめは、本文中3.3.3(5)、3.3.4(3)と同様の方法で行った。

試験結果の一覧を表一3に、図一1～図一3にそれぞれ透水係数 k と限界動水勾配 i_{cr} 、乱流抵抗則 c 、 n の関係を示す。

これらの図表から以下のことがわかる。

- ① 透水係数 k は、8—1を除くと概ね $3 \sim 8 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ の範囲にある。
- ② 水が層流で流れる限界の動水勾配である限界動水勾配 i_{cr} は、概ね $1 \sim 7 \times 10^{-1}$ の範囲である。
- ③ 乱流抵抗則の定数である c は、8—1を除くと $2 \sim 8$ の範囲にあり、透水係数 k が小さくなるに従って大きくなる傾向が見られる。
- ④ 乱流抵抗則のべき数 n は、 $1.1 \sim 1.5$ の範囲である。

これらの結果から配合を決定するにあたって以下のことを考慮した。

- ① 透水係数が $2 \sim 4 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ であること。
- ② 1次元流試験において、水による試験のみで層流が得られるような程度限界動水勾配が大きいこと。
- ③ 乱流状況がはっきりと確認できるよう n が(なるべく)大きいこと。

以上のことを勘案して、試験に用いる透水性コンクリートの供試体の配合を本文中に示す配合とした。

表一3 多孔質媒体に対する透水試験結果(1次元流)

供試体番号	i_{cr}	$v_{cr} \text{ cm/s}$	$k \text{ cm/s}$	n	$c \text{ (cm,s単位)}$
1-1	0.24	0.095	0.39	1.17	3.82
1-2	0.70	0.32	0.46	1.29	3.04
2-1	0.39	0.17	0.43	1.48	5.54
3-1	0.60	0.33	0.54	1.47	3.10
3-2	0.13	0.060	0.45	1.43	7.44
4-1	0.17	0.11	0.67	1.20	2.33
4-2	0.44	0.36	0.82	1.31	1.67
5-1	0.44	0.26	0.60	1.22	2.23
5-2	0.37	0.17	0.46	1.15	2.86
6-1	0.12	0.044	0.36	1.19	5.15
6-2	0.35	0.11	0.32	1.20	4.80
7-1	0.26	0.069	0.26	1.29	8.32
8-1	0.19	0.011	0.055	1.21	46.9

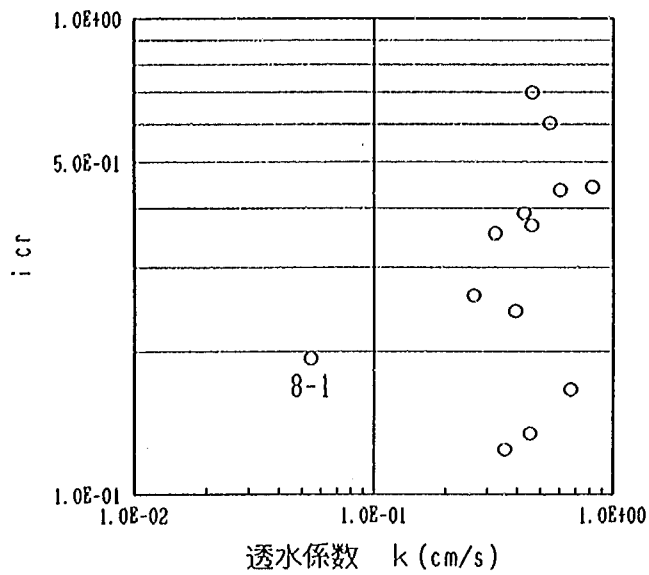


図-1 透水係数と限界動氷勾配の関係

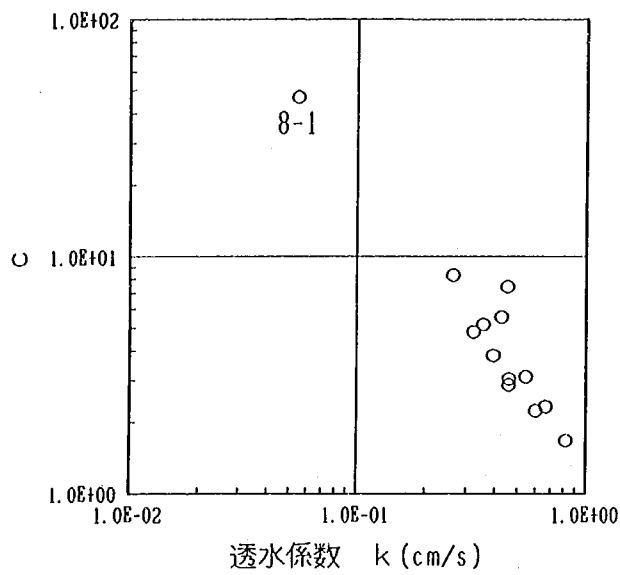


図-2 透水係数と c の関係

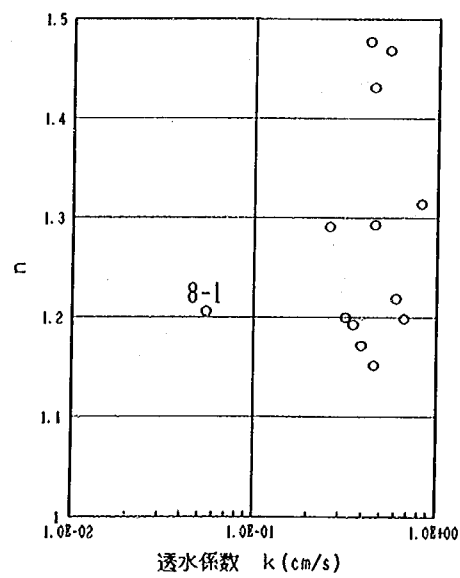


図-3 透水係数と n の関係

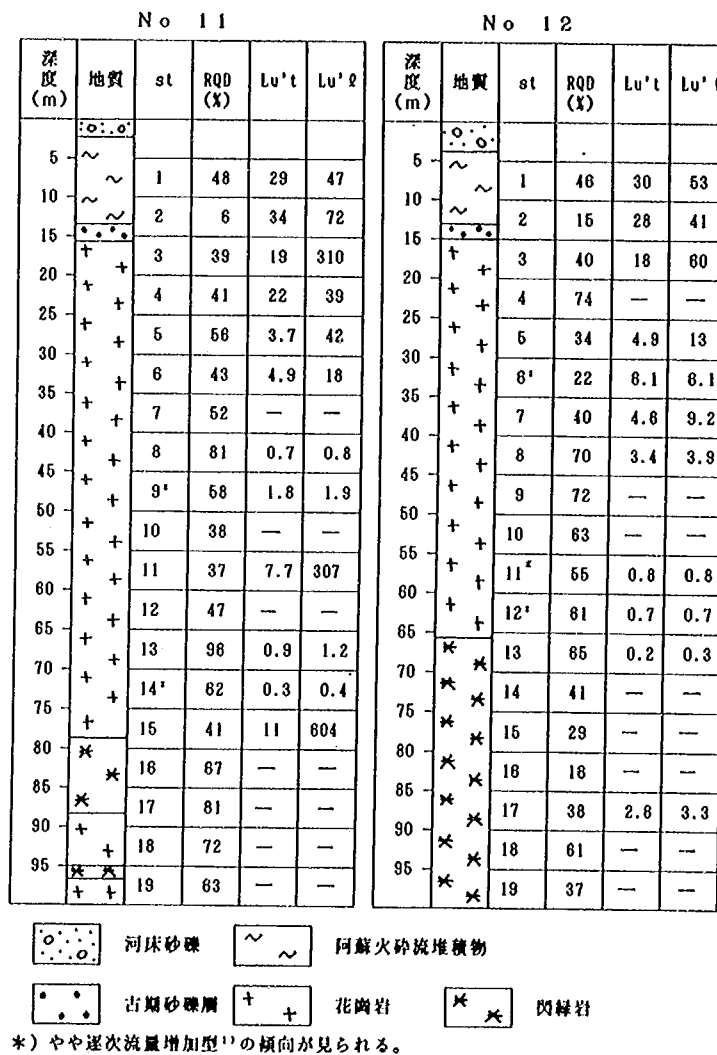
参 考 資 料 2

〇ダムサイトにおける第三法の適用例

1. 試験の概要

試験は、九州地方のOダム建設予定サイトで実施した。

Oダム建設予定サイトには、主として透水性の小さい中性代白亜紀の花崗岩が基盤として分布しているが、河床部ではその上位に透水性の大きい新世代第四紀の火砕流堆積物が分布している。この試験サイトでは、河床部の2本のボーリング孔内で実施したルジオンテスト結果に第三法を適用して流水抵抗則を求めた。なお、2本のボーリング孔で採取したコアから描いたボーリング柱状図を図—1に示す。



図—1 ボーリング柱状図

2. 試験結果

図—1には、第3法で求めた層流ルジオン値 Lu'_{ℓ} と乱流換算ルジオン値 Lu'_{t} も示してある。なお、図中で Lu'_{t} 、 Lu'_{ℓ} を記していないステージが存在するが、これは低透水性のため測定流量値の精度が低く、解析を行えなかったことによる。

Oダムで実施したルジオンテスト結果を用いて第三法により求めた諸係数の一覧を表—1および表—2に示す。また、図—2にはそれらの値を用いてもとめた圧力・流量の理論曲線とルジオンテストの実測値を示す。この図から、理論曲線は実測値を非常によく再現していることがわかる。ただし、No.11孔の9st、14st、No.12孔の6st、11st、12stのように逐次流量増加型¹⁾の圧力・流量関係の傾向を有するものについては、本手法では、ベキ数 n を1.0以上として解析していることと、流量の実測値と理論値の残差2乗和を最小にするように計算しているため、層流型として計算した時の残差2乗和が最小の場合以外は、 n が非常に1.0に近い乱流型として再現される（その場合、圧力・流量関係は算術目盛グラフ上でほぼ原点を通る直線となる）。また、ルジオンテスト結果によっては、視察により層流型と判断される場合でも流量・圧力関係の多少のばらつきにより、計算上 n の値が非常に1.0に近い乱流型と判定される場合もあるため、 n の値がほぼ1.0のケースについては計算上乱流型として判定されていても層流型と判断し、 p_{ec} 、 v_{cr} 、 c の値は意味を持たないものとした。

表-1 試験結果一覧 (No11)

孔-st	Lu't	Lu'l	$P_{1c} \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^2$	$v_{cr} \text{ cm/s}$	$k \text{ cm/s}$	n	c (cm,s単位)	備考
11-1	29	47	368.88	1.38×10^{-2}	9.89×10^{-4}	1.62	14100	
11-2	34	72	605.96	3.51×10^{-2}	1.53×10^{-3}	2.33	56300	
11-3	19	39	4.14	1.03×10^{-3}	6.59×10^{-3}	1.96	112000	
11-4	22	41	0.41	1.29×10^{-5}	8.29×10^{-4}	1.10	3760	
11-5	3.7	58	21.87	7.38×10^{-4}	8.93×10^{-4}	2.27	10399200	
11-6	4.8	18	0.30	4.31×10^{-5}	3.83×10^{-4}	1.23	44200	
11-7	—	—	—	—	—	—	—	注1
11-8	0.7	0.8	0.03	1.99×10^{-8}	1.70×10^{-5}	1.01	75300	
11-9	1.8	1.9	0.00001	1.53×10^{-11}	4.04×10^{-5}	1.003	28700	注2
11-10	—	—	—	—	—	—	—	注1
11-11	7.7	307	1.58	3.90×10^{-4}	6.53×10^{-3}	2.17	1480000	
11-12	—	—	—	—	—	—	—	注1
11-13	0.9	1.2	2242	2.16×10^{-3}	2.55×10^{-5}	2.59	677000000	
11-14	0.3	0.4	0.00001	3.22×10^{-12}	8.51×10^{-6}	1.01	153000	注2
11-15	11	804	0.04	1.94×10^{-5}	1.28×10^{-2}	1.68	125000	
11-16	—	—	—	—	—	—	—	注1
11-17	—	—	—	—	—	—	—	注1
11-18	—	—	—	—	—	—	—	注1
11-19	—	—	—	—	—	—	—	注1

注1) 低透水性のため測定流量値の精度が低いため除外。

注2) やや逐次流量増加型の傾向が見られる。

表-2 試験結果一覧 (No12)

孔-st	Lu't	Lu'l	$P_{1c} \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^2$	$v_{cr} \text{ cm/s}$	$k \text{ cm/s}$	n	c (cm,s単位)	備考
12-1	30	53	597.1	2.54×10^{-2}	1.13×10^{-3}	1.98	32800	
12-2	28	41	1735.19	5.72×10^{-2}	8.72×10^{-4}	2.57	102000	
12-3	18	60	135.39	6.53×10^{-3}	1.28×10^{-3}	2.03	142000	
12-4	—	—	—	—	—	—	—	注1
12-5	4.9	13	0.08	8.38×10^{-7}	2.76×10^{-4}	1.138	24300	
12-6	6.1	6.1	0.00001	4.90×10^{-11}	1.30×10^{-4}	1.00	7710	注2
12-7	4.6	9.2	340.59	2.52×10^{-3}	1.96×10^{-4}	1.87	927000	
12-8	3.4	3.9	1894.4	5.94×10^{-3}	8.29×10^{-5}	1.64	317000	
12-9	—	—	—	—	—	—	—	注1
12-10	—	—	—	—	—	—	—	注1
12-11	0.8	0.8	0.00001	8.43×10^{-12}	1.70×10^{-5}	1.00	63500	注2
12-12	0.7	0.7	0.00001	5.63×10^{-12}	1.49×10^{-5}	1.00	74500	注2
12-13	0.2	0.3	0.318	7.67×10^{-8}	6.38×10^{-6}	1.07	502000	
12-14	—	—	—	—	—	—	—	注1
12-15	—	—	—	—	—	—	—	注1
12-16	—	—	—	—	—	—	—	注1
12-17	2.6	3.3	7720.91	1.61×10^{-2}	5.53×10^{-5}	2.33	4320000	
12-18	—	—	—	—	—	—	—	注1
12-19	—	—	—	—	—	—	—	注1

注1) 低透水性のため測定流量値の精度が低いため除外。

注2) やや逐次流量増加型の傾向が見られる。

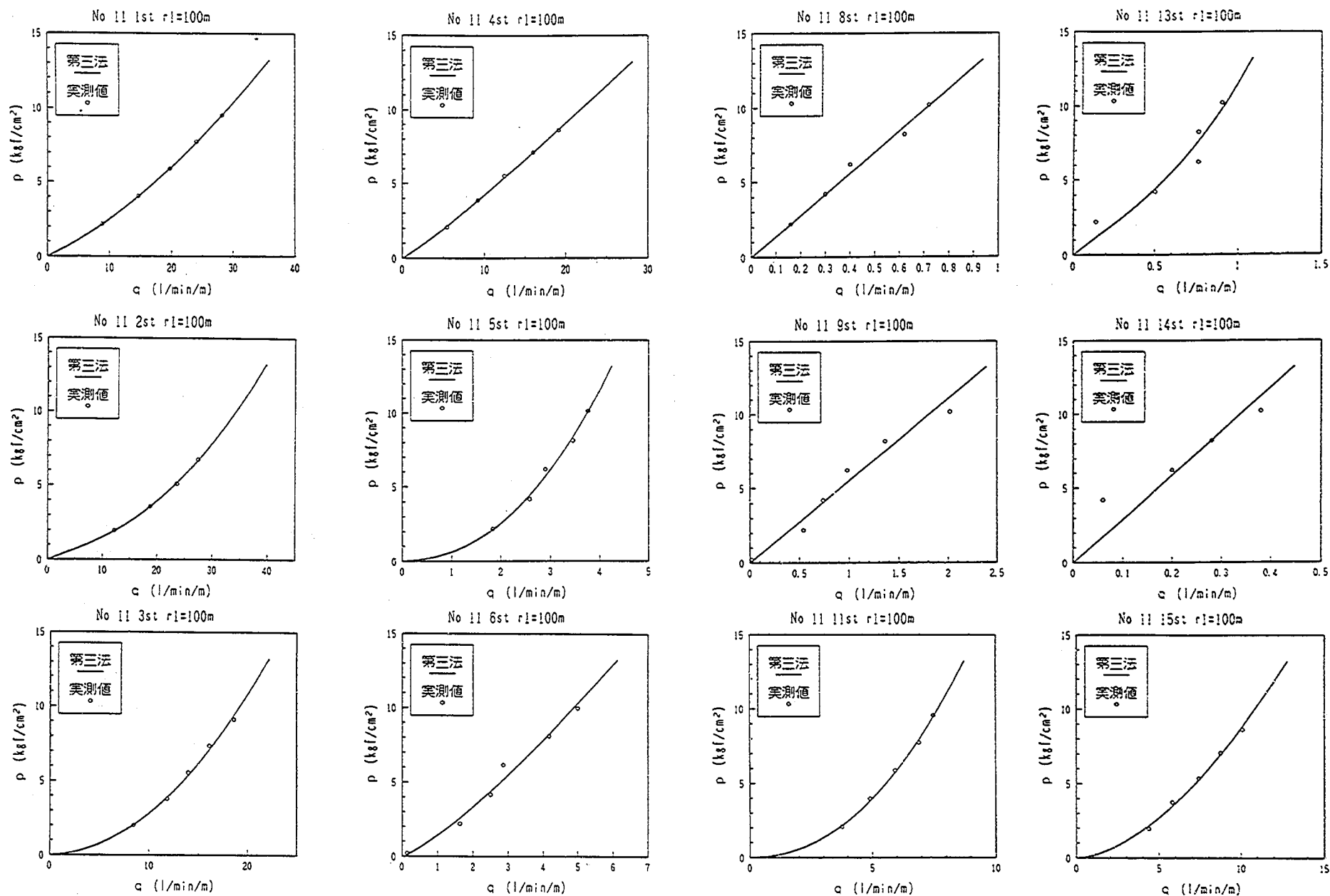


图-2 $p-q$ 曲线图(1)

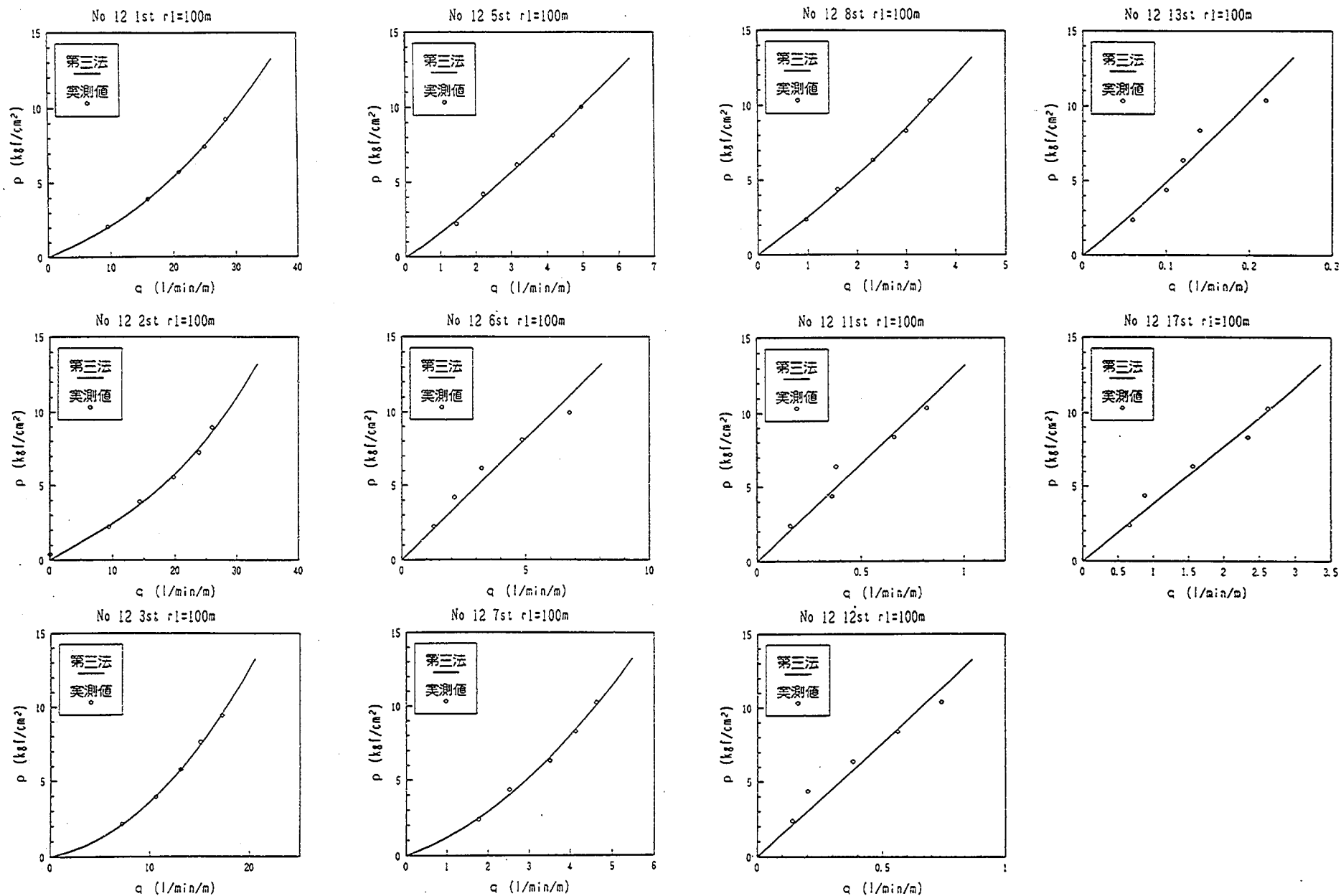


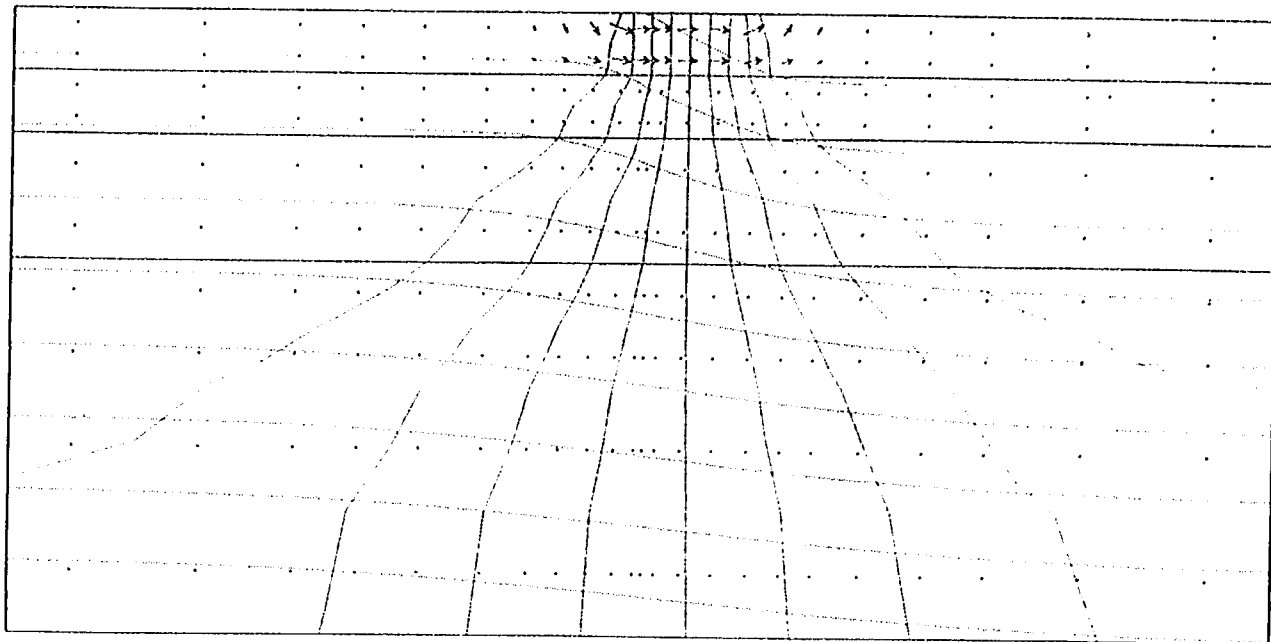
図-2 $p-q$ 曲線図(2)

参考文献

- 1) 山口嘉一・松本徳久：ダム基礎の透水性とルジオン値、土木学会論文集、No412/III-12、pp. 51~61、1989.12.

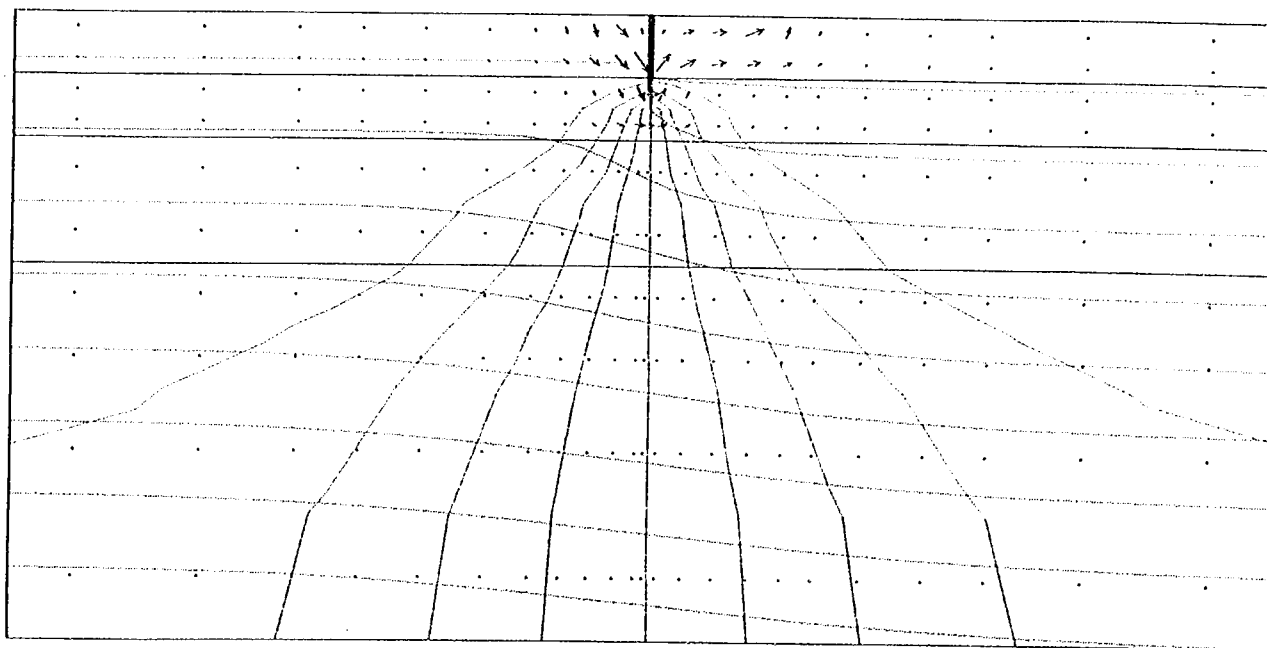
付 図

浸透流解析結果



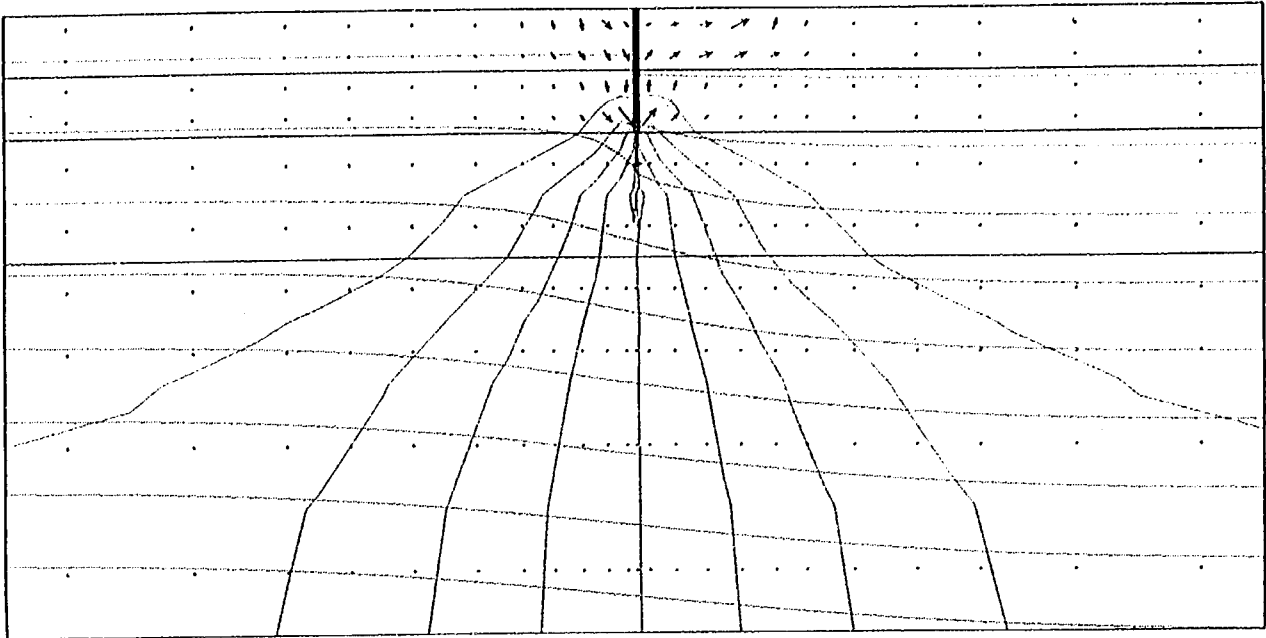
CURRENT SCALE 0.0 0.050
FEM PLOT SCALE 0.0 8000.0

CASE-1-1



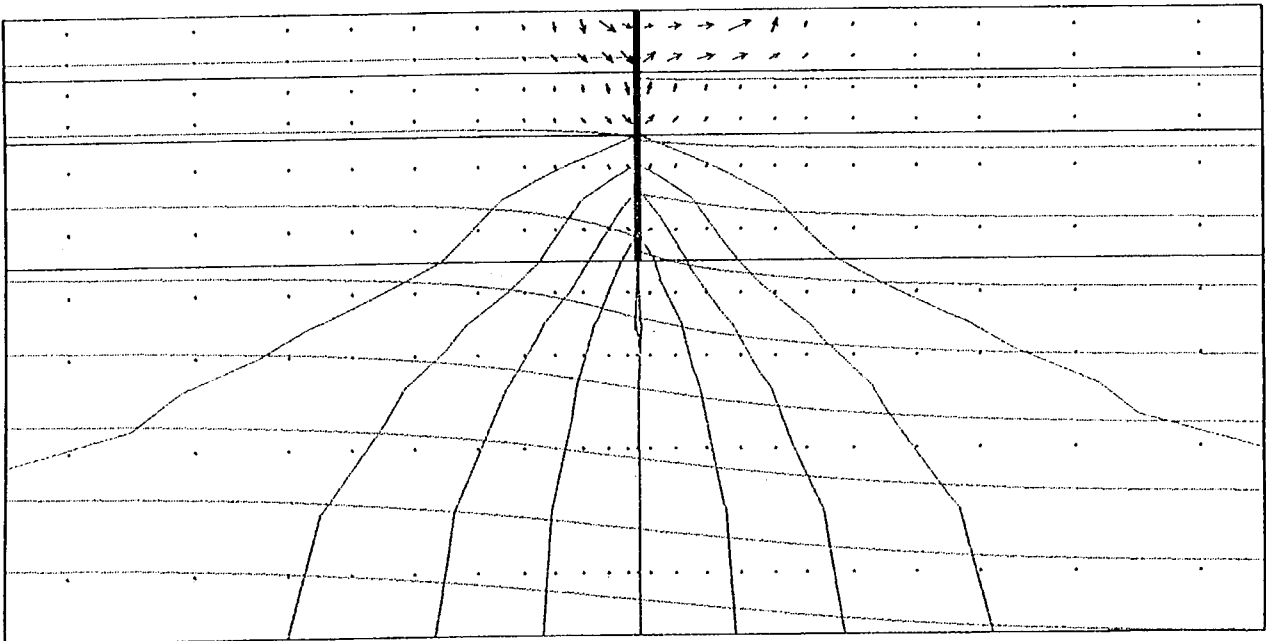
CURRENT SCALE 0.0 0.016
FEM PLOT SCALE 0.0 8000.0

CASE-1-2



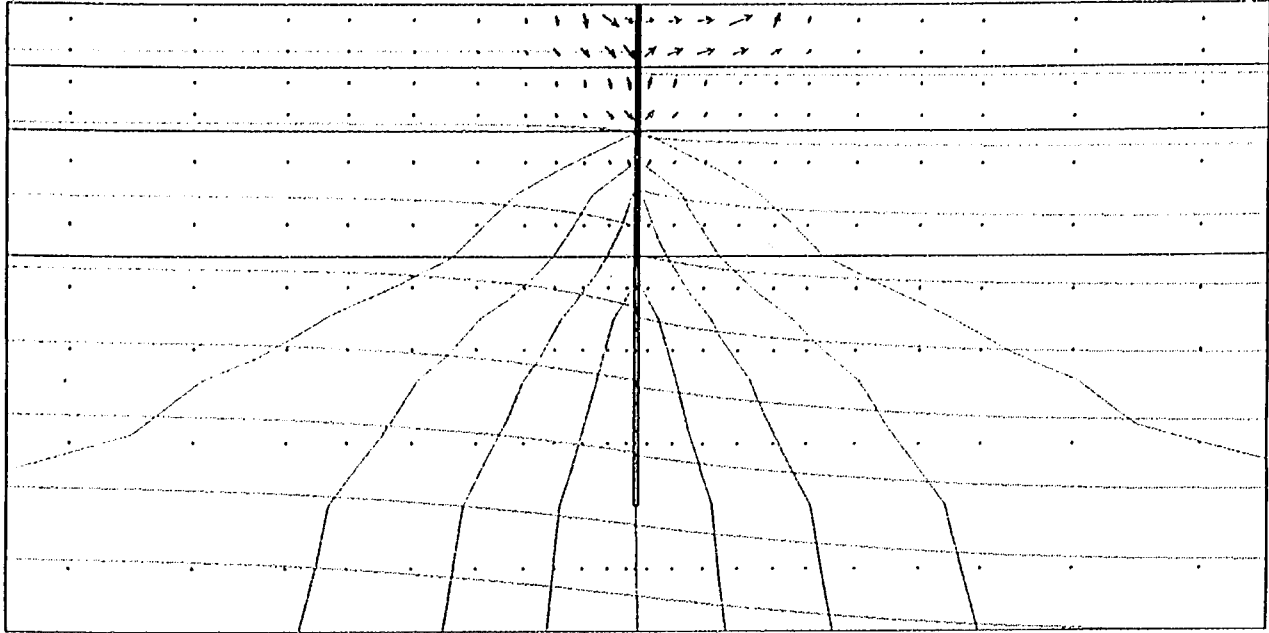
CURRENT SCALE 0.0 0.0056
 FEM PLOT SCALE 0.0 8000.0

CASE-1-3



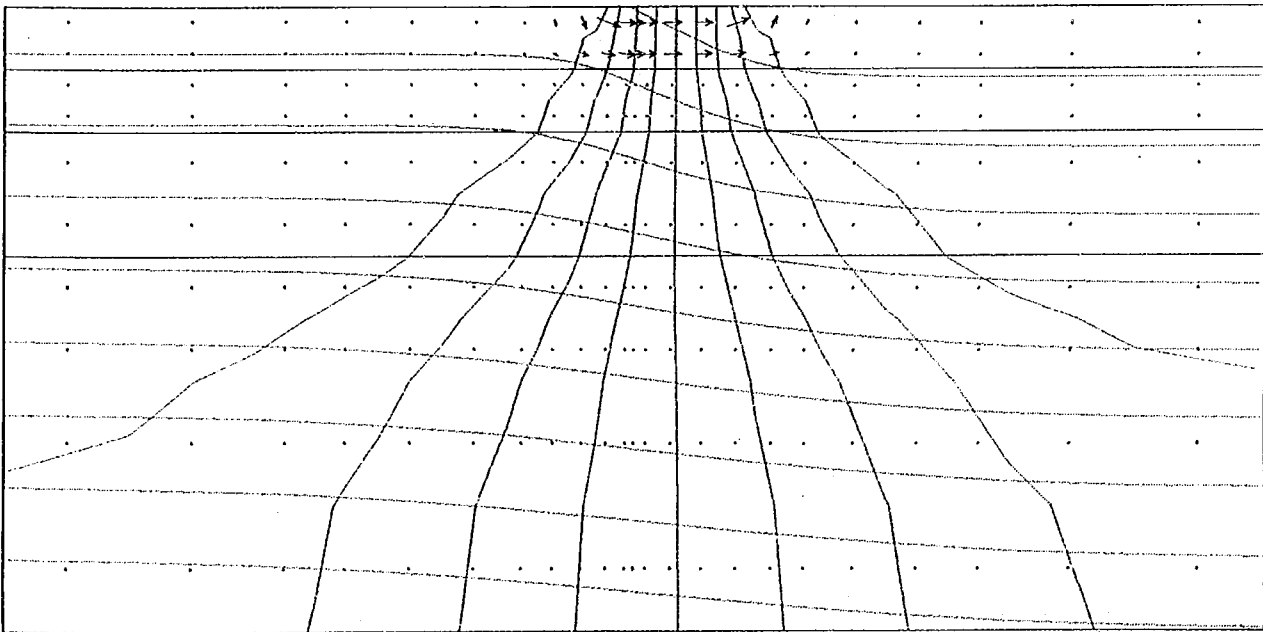
CURRENT SCALE 0.0 0.0025
 FEM PLOT SCALE 0.0 8000.0

CASE-1-4



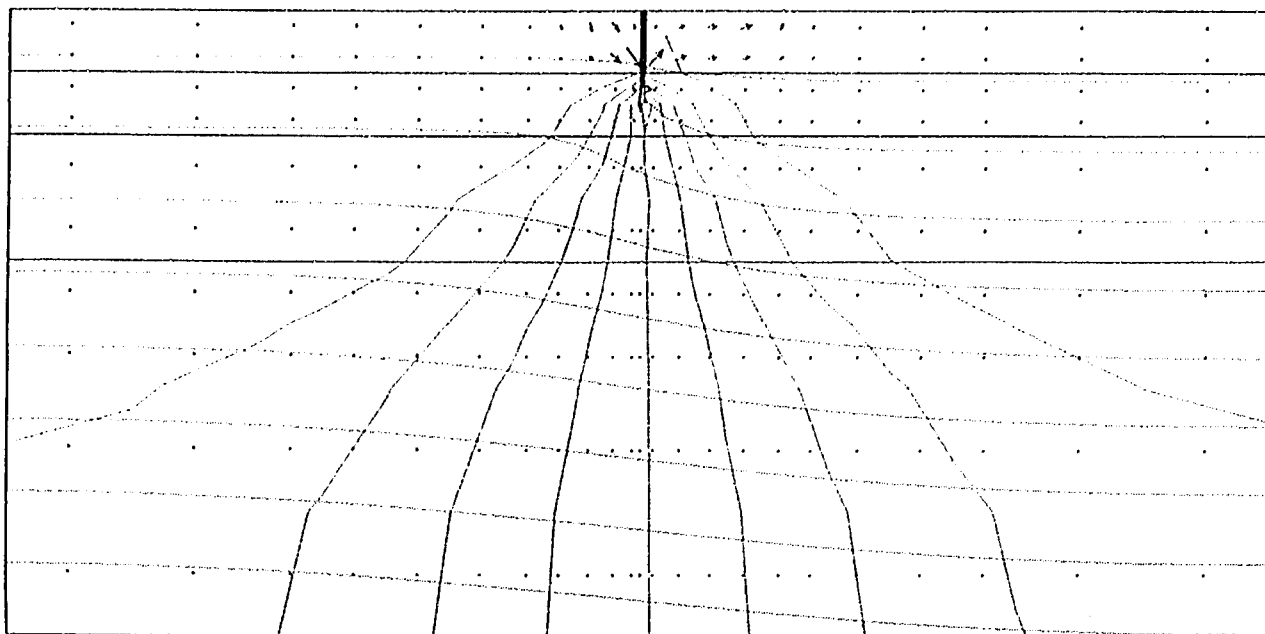
CURRENT SCALE 0.0 0.0025
 FEM PLOT SCALE 0.0 8000.0

CASE-1-5



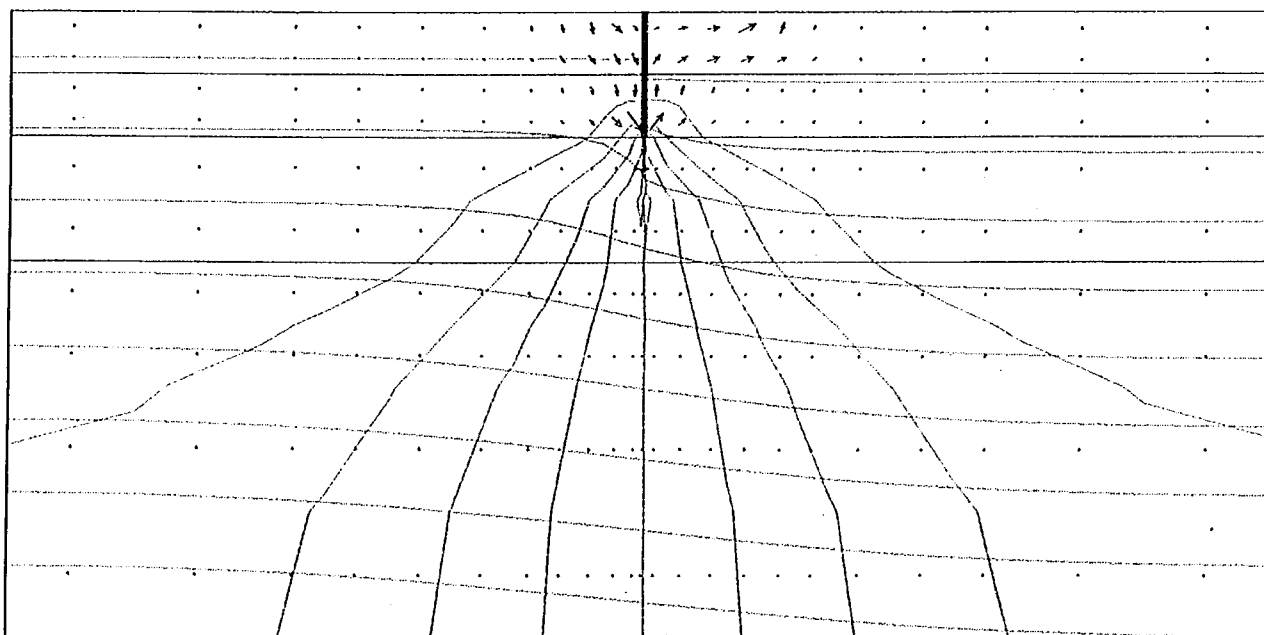
CURRENT SCALE 0.0 0.17
 FEM PLOT SCALE 0.0 8000.0

CASE-2-1



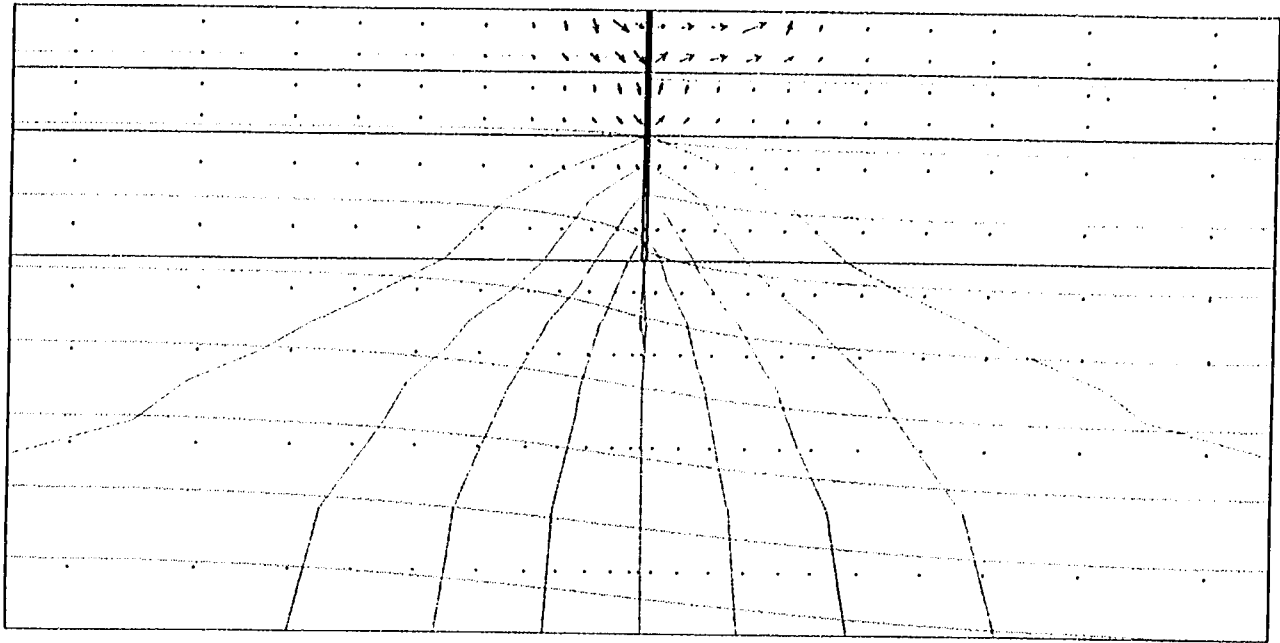
CURRENT SCALE 0.0 0.056
FEM PLOT SCALE 0.0 8000.0

CASE-2-2



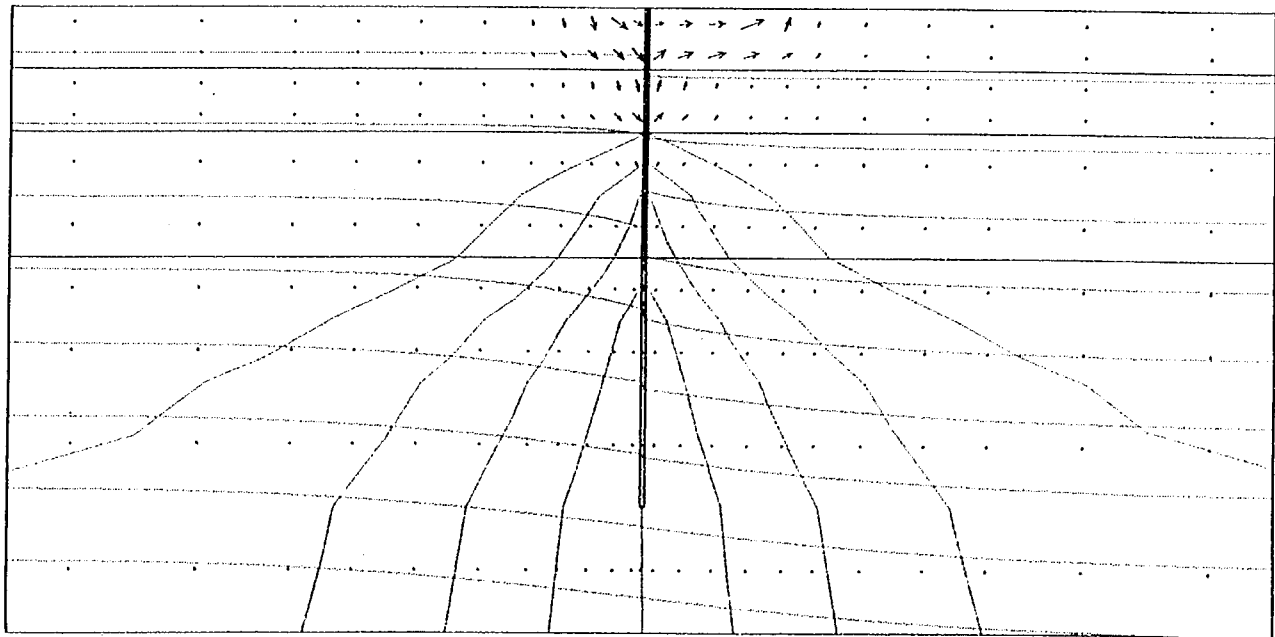
CURRENT SCALE 0.0 0.0056
FEM PLOT SCALE 0.0 8000.0

CASE-2-3



CURRENT SCALE 0.0 0.0025
FEM PLOT SCALE 0.0 8000.0

CASE-2-4



CURRENT SCALE 0.0 0.0025
FEM PLOT SCALE 0.0 8000.0

CASE-2-5

要 旨

高透水性岩盤の水理特性を正確に把握するために、同一の試験地点において実施した高粘性流体を用いた透水試験とルジオンテスト、あるいはルジオンテストのみの結果から岩盤の層流および乱流の流水抵抗則を求める方法を提案するとともに、モデルダムおよび室内試験での実測データに適用した結果を報告する。さらに、乱流の抵抗則も考慮できる浸透流解析プログラムを用いて、モデルダムの漏水計算定も試みたのであわせて報告する。

キーワード：ダム、透水試験、流水抵抗則、漏水量

郵便はがき

3 0 5 - □ □

四十一円切
手をはって
下さい。

建設省土木研究所
フィルダム研究室 行

茨城県つくば市旭一番地

No. 3

No. 3

配布先住所

配布先氏名

○

土木研究所資料 第 2 9 6 8 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印

○