

土 木 研 究 所 資 料

水平面内に異方透水性を有する 地盤に対する透水試験

昭和63年7月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

Copyright © (1988) 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。

水平面内に異方透水性を有する 地盤に対する透水試験

フィルダム研究室 室長 松本 徳久
研究員 山口 嘉一

要 旨

本資料の内容をまとめると以下の通りである。

- ① ダム基礎の透水性に水平面内の異方性が存在している場合、その異方透水係数を把握することの重要性を定量的に示した。
- ② 水平面内異方透水試験方法（原位置）として、既往の研究も踏まえて3種類提案した。
- ③ ②で提案した3種類の試験方法のうち最も実用化の可能性が高い方法と判定したボーリング孔を利用した方法について、具体的な方法を示すとともに、その精度が高いことを数値実験により実証した。
- ④ 本試験実施に際しての注意点として、a) 水平放射流達成のための対策、b) 透水性の主軸方向も決定するための対策、c) 割れ目岩盤への適用の3点についても記した。

キーワード：ダム基礎，原位置透水試験，異方透水性，ダルシー則

目 次

1. はじめに	1
2. 研究目的	2
3. 水平面内の異方透水性の影響	3
4. 水平面内異方透水試験方法の検討	6
4.1 概 説	6
4.2 具体的試験方法と実用化の可能性	6
4.2.1 単孔式流向・流速測定を応用する方法	6
4.2.2 ボーリング孔からの注水による方法	7
4.2.3 スリットからの注水による方法	9
4.3 各試験方法の評価	10
5. ボーリング孔からの注水による水平面内異方透水試験	11
5.1 異方透水係数算定式	11
5.2 α と k_x/k_y の関係式	15
5.2.1 概 説	15
5.2.2 解析概要	15
5.2.3 解析結果	16
5.3 試験精度の検討	22
5.3.1 概 説	22
5.3.2 解析概要	22
5.3.3 解析結果	23
5.4 試験実施に際しての注意点	30
5.4.1 水平放射流達成のための対策	30
5.4.2 透水性の主軸方向も決定する場合	30
5.4.3 割れ目岩盤への適用	34
6. まとめと今後の課題	35
参考文献	36
参 考 図	37

1. は じ め に

ダム基礎の透水性は一般にルジオンテストによって調査され、基礎の透水性はルジオン値で評価されている¹⁾。この試験法は、原則として孔径 66 mm のボーリング孔の 5 m 区間から圧力水を注入する方式を採るため、試験区間長が孔径よりも非常に大きく、結果として求まる透水性は水平面内の透水性を代表していることになる。湛水時のダム基礎内浸透流の方向が水平方向に卓越していることを考慮すれば、ルジオンテストから求まる透水性を用いて基礎からの漏水量を予測することの正当性は誰も疑う余地のないところであろう。しかし、ダム基礎において割れ目、地質境界部の弱層あるいは断層・破碎帯が水平面内である卓越した方向を有し、水平面内で透水性の異方性が存在している場合も上記の正当性を自信を持って主張できるであろうか。答えは明らかに“No”である。特に、透水性の卓越方向がダムの上下流方向に一致した場合には、ルジオンテストから求めた透水性を用いて基礎からの漏水量を予測することは、漏水量の過小評価につながる。そこで今回は、ダム基礎の水平面内異方透水性を求める透水試験方法を既往の研究も考慮したうえで3種類提案し、そのうち最も汎用性を有していると思われる異方透水試験法について、具体的な方法、試験精度等の検討を行う。

2. 研究目的

今回の研究目的を以下に列挙する。

- ① ダム基礎の透水性が水平面内で異方性（ダム軸方向と上下流方向の2方向を想定すれば良い。）を有している場合、この基礎の異方透水性とルジオンテストから求まる透水性にいかなる関係があるのかを検討する。
- ② ダム基礎の水平面内異方透水係数を求める原位置試験方法を既往の研究も踏まえて3種類提案する。
- ③ ②で提案した3種類の試験方法のうち、ダム基礎に対する試験法としては、最も汎用性があると思われるボーリング孔を利用した注水方式による方法について、具体的な試験方法を詰めるとともに、その精度等について検討する。

3. 水平面内の異方透水性の影響

ここでは、ダム基礎の透水性が水平面内において異方性を有している際、ダム基礎の水平面内の平均的な透水性を把握することになるルジオンテストの結果を用いて予測した湛水に伴う基礎からの漏水量が実際の漏水量とどの程度の誤差があるのかを試算することにする。

まず、試算に先立って以下の仮定を設ける。

- ① ダム基礎が多くの割れ目を有する岩盤であっても、砂礫地盤であっても、ダム基礎内の浸透流は巨視的には（広範な流れ場では）ダルシー（Darcy）則に従う。
- ② 湛水に伴うダム基礎内の浸透流およびルジオンテストにおける注水の流れは水平流である。
- ③ ダム基礎水平面内の透水性の異方性を考慮する際、透水性の主軸方向は、ダム軸方向と上下流方向に一致する。
- ④ ダム基礎の透水性の異方性度合は、止水処理部も未処理部と差がないと考える。

上記の4つの仮定のうち①と②については、現実と大きく掛け離れたものではなく妥当なものと言える。しかし、③と④の仮定の妥当性は、ダム基礎の地質状況により大きく左右される。

図-3.1 に示すダム基礎の浸透流の場における流れの基本式（異方性地盤）は次式で表せる。

$$k_x \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} + k_y \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここに、X, Y：流れの主軸方向、 k_x, k_y ：X, Y 方向の透水係数、 Φ ：流れのポテンシャル。

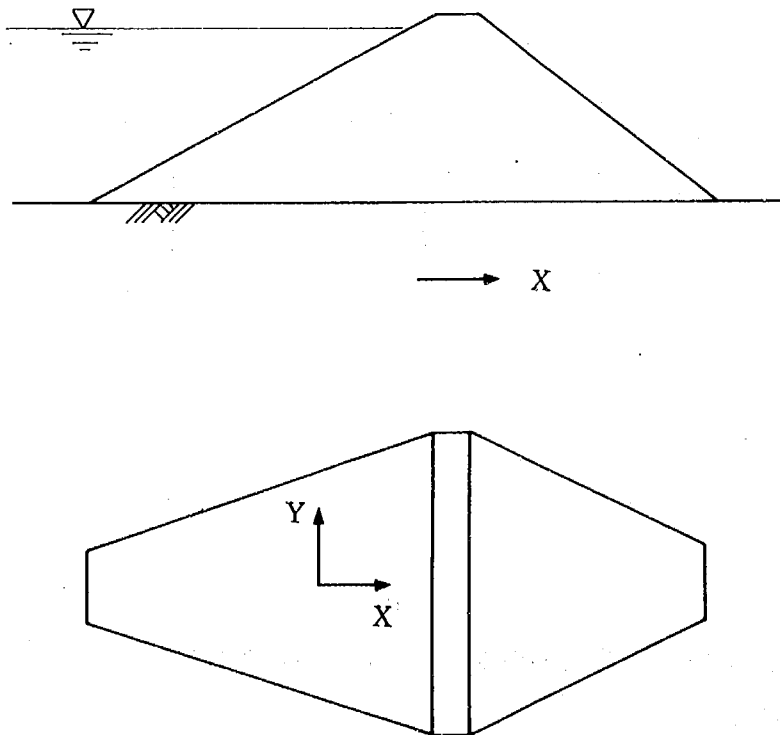


図-3.1 ダム基礎浸透流の場

いま、式(3.1)に対して式(3.2)に示した座標変換を施すことにより、水平面内の異方性地盤であるダム基礎内の浸透流の基本式を等方性地盤における浸透流の基本式であるラプラス (Laplace) 方程式に変換することができる。

$$\left. \begin{aligned} X' &= X \\ Y' &= \sqrt{k_x/k_y} \cdot Y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$k_e \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial X'^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y'^2} \right) = 0 \dots\dots\dots (3.3)$$

ここに、 k_e は式(3.2)の座標変換により異方性地盤を等方性地盤として取り扱う際の等方性地盤における透水係数にあたる。よって、これを等価等方透水係数と称す²⁾。 k_e は以下のようにして求めることができる。

まず、図-3.2に示すように、 $X'Y'$ 座標系において流線と等ポテンシャル線で構成される辺長 a の微小正方形とこれを XY 座標系に変換した微小長方形を想定する。この両座標系の微小体中の X', X 方向の流量 $q_{x'}, q_x$ はダルシー (Darcy) 則によりそれぞれ次式で求められる。

$$q_{x'} = k_e \cdot \frac{(-\Delta \Phi)}{a} \cdot a = -k_e \cdot \Delta \Phi \dots\dots\dots (3.4)$$

$$q_x = k_x \cdot \frac{(-\Delta \Phi)}{a\sqrt{k_x/k_y}} \cdot a = -\sqrt{k_x \cdot k_y} \cdot \Delta \Phi \dots\dots\dots (3.5)$$

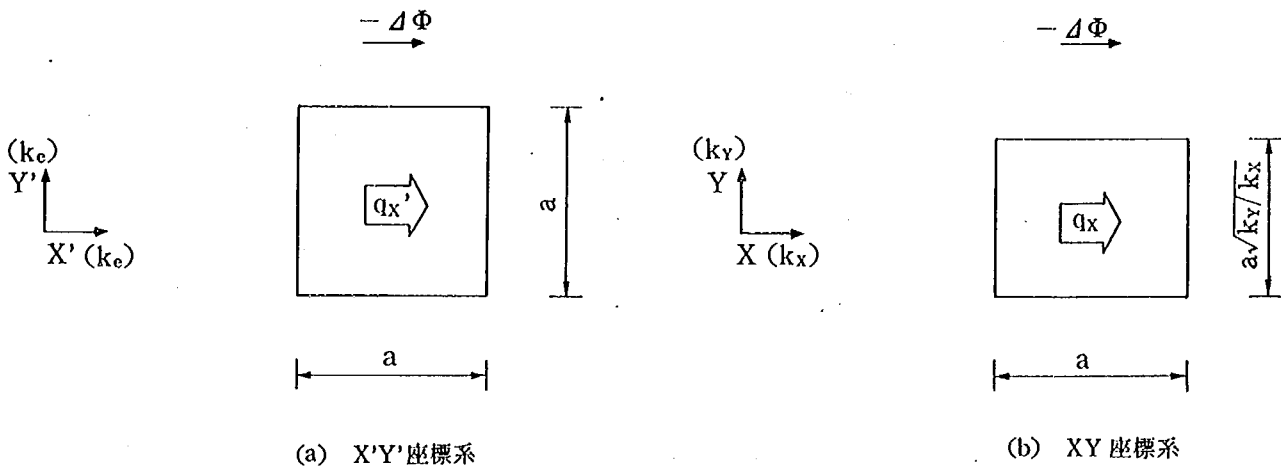


図-3.2 $X'Y'$ 座標系および XY 座標系における浸透流

図-3.2に示した2つの流れは、1つの流れを2つの座標系から眺めただけで本質的には全く同一のものである。つまり、微小体中の X', X 方向の流量 $q_{x'}, q_x$ は同じ値である。よって、式(3.4)と(3.5)より等価等方透水係数 k_e は次式で表すことができる。

$$k_e = \sqrt{k_x \cdot k_y} \dots\dots\dots (3.6)$$

なお、式(3.6)の関係は、流れ方向として Y' , Y 方向を想定しても得られるものである。

式(3.6)で得られる k_e は、ダム基礎の水平面の透水性には異方性がないとして解釈が行われるルジオンテストから求めた透水性を表している。そこで、 k_e と k_x, k_y の関係を $k_x \geq k_y$ の条件下で図化したものを図-3.3に示す。この図から $k_x/k_y = 10$ の異方性が存在すれば、ルジオンテストより求まる k_e を用いて湛水に伴う基礎からの漏水量を推定することは、漏水量を実際の約 1/3 に過小評価してしまうことにつながる事がわかる。

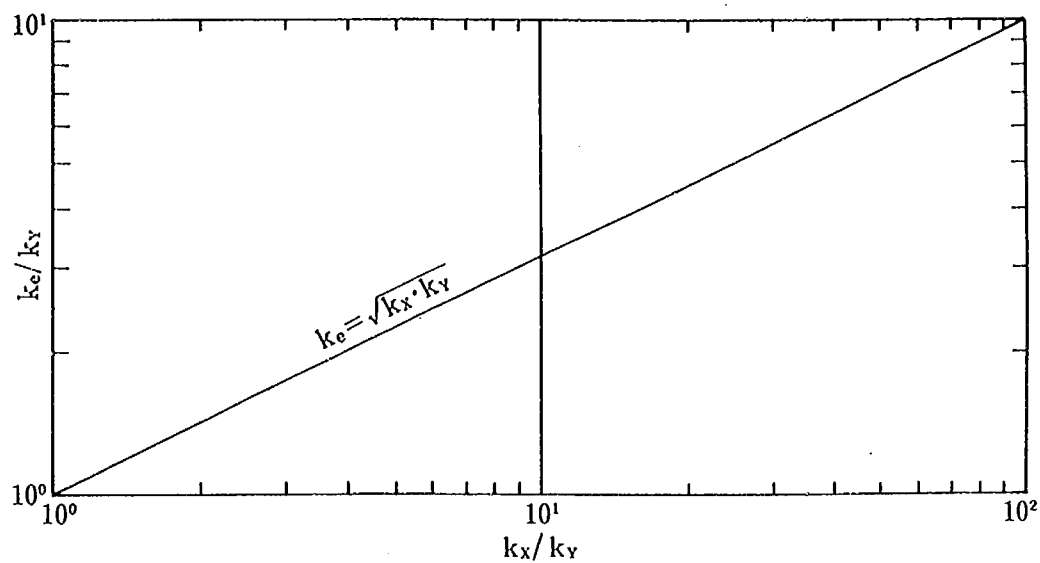


図-3.3 k_e と k_x, k_y の関係

4. 水平面内異方透水試験方法の検討

4.1 概 説

ダム基礎の水平面内の異方透水性を把握することの意義については前述した通りである。ここではこれを受けて、水平面内の異方透水係数を求める試験方法を現在の技術レベルで可能と思われる範囲で3種類提案（既に他の研究者により提案されている方法も1つ含む。）し、各試験法の長短所を種々の観点から検討し、最も実用化の可能性が高い方法を決定する。

提案する水平面内異方透水試験を、その試験における最も主たる技術を用いて表現すると以下の通りである。

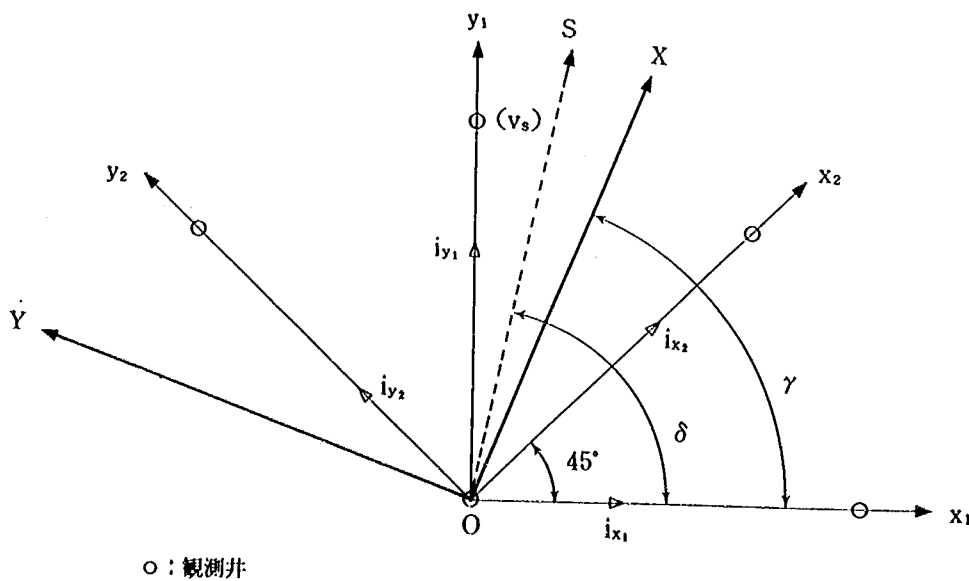
- ① 単孔式流向・流速測定を応用する方法
- ② ボーリング孔からの注水による方法
- ③ スリットからの注水による方法

4.2 具体的試験方法と実用化の可能性

4.2.1 単孔式流向・流速測定を応用する方法

本試験方法は、山上・植田³⁾によって既に提案されたものである。具体的な方法は以下に示す通りである。

図—4.1 に示すように、地盤中の流れの主軸方向である (X, Y) 座標と γ なる角度をなす任意の座標系 (x_1, y_1) と、 (x_1, y_1) 座標系と 45° の角度をなす (x_2, y_2) 座標系を考える。なお、流れの方向 S は、 x_1 軸と δ の傾きをなしているものとする。この座標系において、原点 O および各座標軸上に図—4.1 に



図—4.1 地盤中の流れに対する座標系

示すような計5本の観測井を設ける。そして、各観測井における地下水压を測定することによって、各座標軸方向の動水勾配 i_{x1} , i_{y1} , i_{x2} , i_{y2} を求める。さらに、最近、注目を浴びている地下水の流向および流速を単孔内で測定する計器を利用して、原点Oにおける地盤内の流れ方向の x_1 軸からの傾き δ と流速 v_s を測定することにより主軸方向の透水係数 k_x と k_y を求めるというものである。

この試験方法の長短所を以下に列挙する。

- ① 透水性はダルシー (Darcy) 則に基づいて求める。さらに、単孔式流向・流速測定の出部部長が精々1m程度ということもあり試験孔周辺における割れ目等の存在による異方性が試験精度を落とすという現状での技術レベル^{4)~6)}等も考えると、本試験方法がある程度の精度を確保したうえで適用できる地盤は、その透水性が地盤構成粒子間の間隙に大きく支配されるシラス、旧河床砂礫、低溶結凝灰岩等で構成された地盤である。
- ② 単孔式流向・流速測定器として建設省の技術評価を受けている3機の測定原理および流速測定能を表4.1に示す^{4)~6)}。この表を見ると流速測定範囲の下限は 10^{-4} cm/s 程度であることがわかる。そのため、試験対象地盤の透水性にもよるが、地盤内の水の流れの動水勾配がある程度大きくないと本試験方法の適用が難しくなる。

表4.1 単孔式流向・流速測定器の測定原理と流速測定能

項目 \ 開発者	大成基礎	鹿島建設	建設技術研究所
測定原理	電位差測定方式	中性子計数方式	定温度加熱方式及び熱拡散測定方式
流速測定能 (cm/s)	$1 \times 10^{-2} \sim 3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-1} \sim 3 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-3}$

- ③ 本試験方法によると、圧力水を注入するという方法を採用しないため、原地盤の水圧分布を乱すことなく試験を進めることができる。
- ④ 本試験方法は、地下水の流向・流速を知ることによって地盤の異方透水性を求める訳であるから、明らかに地下水面下でしか適用できない。

なお、単孔式の流向・流速測定でなく、種々のトレーサを用いる多孔式の測定法を採用し、かつ、トレーサ注入区間や水圧観測区間を長くすることにより、上記①、②の問題点をある程度解決し、本試験方法が適用できる範囲を広げることが可能ではないかと考える。しかし、多孔式を採用することによるコスト増は避けられない。

4.2.2 ボーリング孔からの注水による方法

本試験方法は、ボーリング孔を利用した定水位透水試験を水平面内二次元放射流を達成したうえで実施して、この注水孔を原点とした水平面内の直交座標軸上に注水孔から等距離の位置に観測孔を設けて、水压を測定することにより直交座標軸方向の異方透水性を求めるというものである(図4.2参照)。

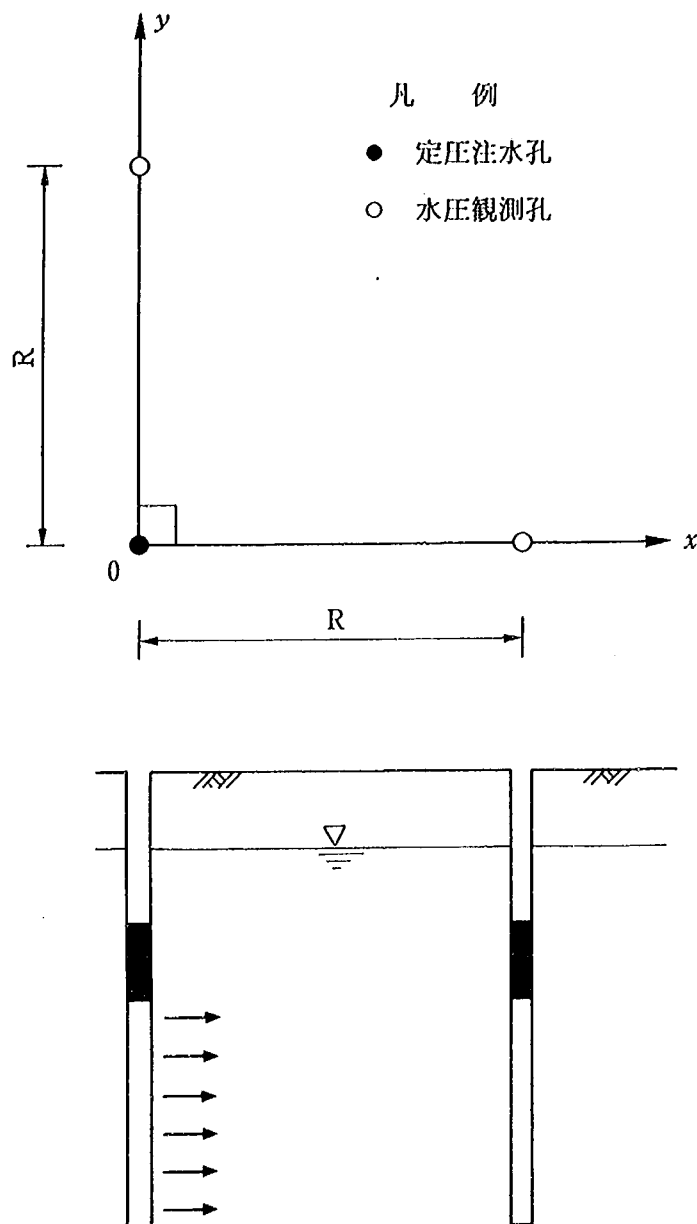


図-4.2 注水孔と観測孔の配置

この試験方法の長短所を以下に列挙する。

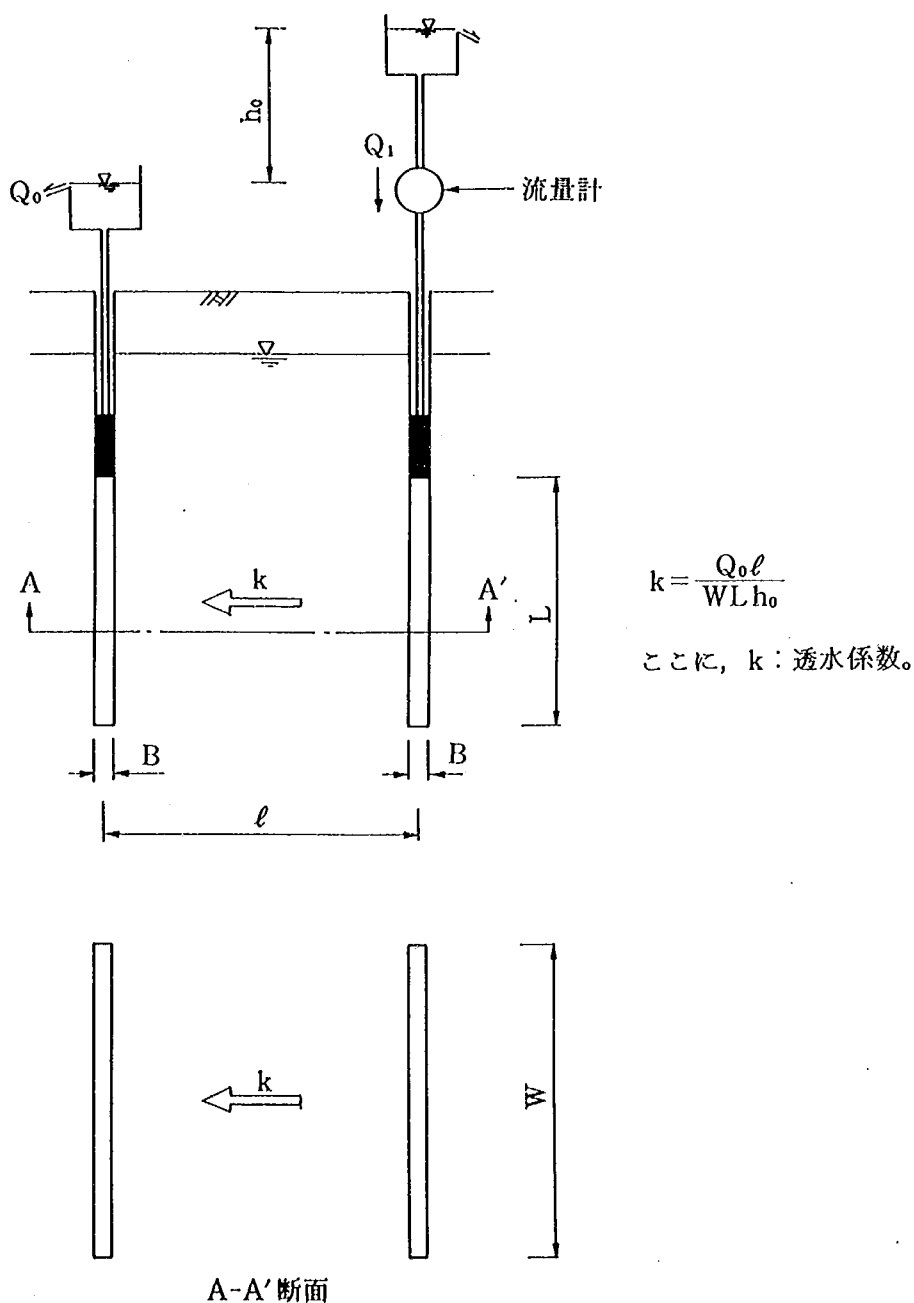
- ① ボーリング孔を利用した定水位透水試験および地下水圧測定といった非常に基本的な調査手法の組み合わせによって試験を実施するため、特別困難なことはない。
- ② ボーリング孔を利用した試験方法であるため、地盤中の任意の深度、特に深い部分での実施が比較的容易である。
- ③ 地盤の異方透水性はダルシー (Darcy) 則に基づいて求めることになるため、卓越方向を有する割れ目や断層・破碎帯が存在する場合には試験の精度が落ちることが考えられる。しかし、こうした場合にも水圧観測孔の数を増すこと、注水区間長、水圧観測区間長を長くすることによってある程度の精度は確保することができると考える。また、最悪の場合でも注水孔周辺の等価等方

透水係数 k_0 と定性的な異方性（例えば、上下流方向の透水性の方がダム軸方向のそれより大きい等）は押えることはできる。

- ④ 地下水面上の不飽和領域において試験を実施すると、水流が重力の影響を受け水平面内の二次元放射流を達成することが困難となる。よって、不飽和領域での適用は避けるべきである。

4.2.3 スリットからの注水による方法

本試験方法は、透水性を知りたい方向の法線方向にその長辺が平行となるようなスリットを2溝設置し、1溝から注水、他の1溝から排水することにより、水平面内の一次元流を達成したうえで、ダルシー（Darcy）則に従い透水性を決定するというものである（図—4.3 参照）。



図—4.3 スリットからの注水による方法

この試験方法の長短所を以下に列挙する。

- ① 透水性はダルシー (Darcy) 則に基づいて求めるが、割れ目岩盤においても、割れ目密度を考慮したうえで、図-4.3 の W, L を決定することで十分な試験精度を確保することができる。
- ② ボーリング孔に比べるとスリットを設けることはかなり面倒な作業となり、費用もかさむ。それ故、地盤深部における本試験の実施は困難であると考える。
- ③ 地下水面上の不飽和領域において本試験を実施すると、水流が重力の影響を受け水平面内の一次元流を達成することが困難となる。よって、不飽和領域での本試験の実施は避けるべきである。

4.3 各試験方法の評価

4.2 においては、地盤内の水平面内の異方透水性を求めるための試験方法を3種類挙げるとともにその長短所も示した。それを受けてここでは、これらの長短所を総合的に評価し、ボーリング孔からの注水による方法を最も実用化の可能性が高い試験方法だと判定した。総合評価結果をまとめたものを表-4.2 に示す。

表-4.2 異方透水試験方法の総合評価

検討項目 試験方法	① 使用技術の 平易さ	② 適用深度	③ 割れ目岩盤 への適用性	④ コ ス ト	⑤ 不飽和領域 での適用	⑥ そ の 他	評 点
単孔式流向・ 流速測定を応 用する方法	○	○ 測定機器の設置を考 えたと、あまり深い ところでの実験は難 しい。	△ ・かなり困難である。 ・多孔式流向・流速 測定法を採用すれ ばかなり改善され よう。	△	×	○ 調査のみならず、グ ラウチング施工領域 でも適用できる。	8 点
ボーリング孔 からの注水に よる方法	◎	◎ ダム基礎の調査範囲 では、ほぼ任意の深 度で実施できる。	○ 注水区間・水圧測定 区間を長くし、観測 孔を増やすことによ って十分適用でき る。	○	×	○ 調査のみならず、グ ラウチング施工領域 でも適用できる。	12 点
スリットから の注水による 方法	◎	△ 基礎深部での実施は 困難である。	○ 図-4.3 の W, L を 岩盤の割れ目密度・ 間隔を考慮して十分 大きくとることによ り十分適用できる。	△	×	△ 調査としては、実施 できるが、施工との 並行作業は難しい。	8 点

◎: 3 点, ○: 2 点, △: 1 点, ×: 0 点。

5. ポーリング孔からの注水による水平面内異方透水試験

5.1 異方透水係数算定式

ポーリング孔からの注水による水平面内異方透水試験の概略は、4章で示した通りであるが、ここでは、試験方法を説明しながらこの試験を実施した際に、いかにして異方透水係数を求めるかについて詳述する。

まず、ダム基礎の水平面内において異方透水性を知りたい直交2方向(X, Y)を設定し、その直交座標軸(X, Y)の原点に注水孔Oを、またX, Y軸上に注水孔から等距離R離れた位置に水圧観測孔 H_x , H_y を設置する(図-5.1 参照)。注水孔Oにおいて、有効注入水頭 h_0 で定水位透水試験を実施して定

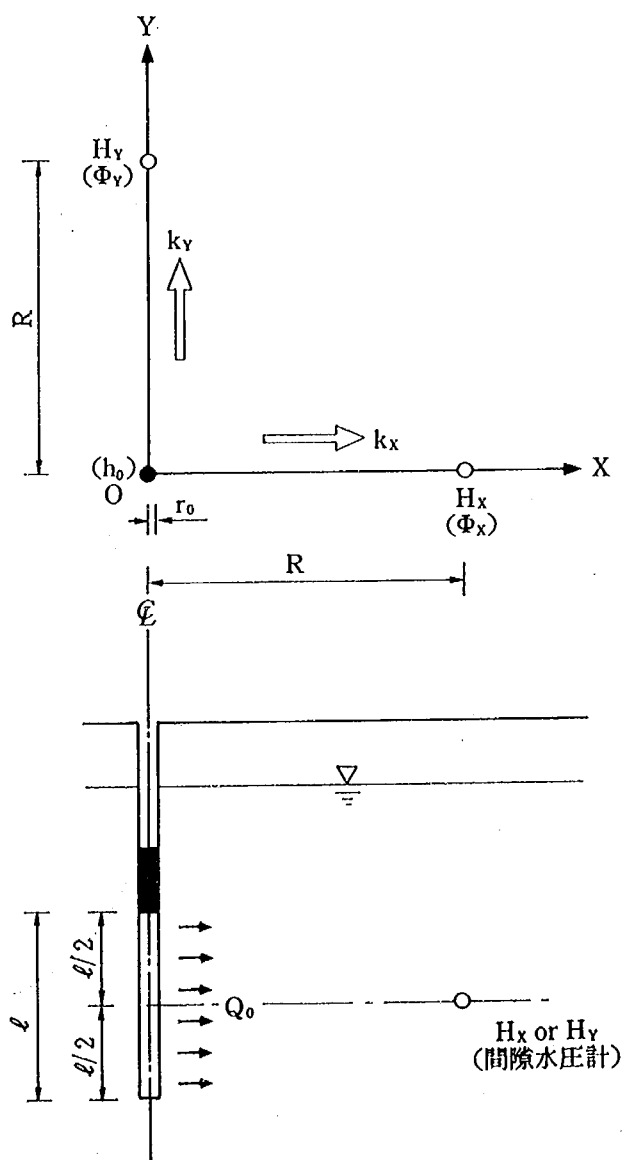


図-5.1 試験概略図

常注入流量 Q_0 を知るとともに、水圧観測孔 H_x, H_y において定常水圧上昇量 Φ_x, Φ_y を求める。これら 4 つの値 (h_0, Q_0, Φ_x, Φ_y) と注水孔寸法より水平面内の異方透水係数 (k_x, k_y) を求める訳である。

なお、異方透水係数の算定式を誘導するにあたり以下の仮定を設ける。

- ① 水平面内の異方透水性を知りたい直交 2 方向が地盤の透水性の主軸方向に一致する。一致しない場合の対応は 5.4.2 で述べる。
- ② 透水性には、 $k_x \geq k_y$ の関係が成り立つ。この際 $\Phi_x \geq \Phi_y$ の関係も同時に成り立つ。ただし、 $k_y > k_x$ の場合でも、 k_x, k_y を求める過程に何ら違いはない。
- ③ 注水孔からの流れは、水平放射流である。この仮定を成立させるための対策は 5.4.1 で述べる。

水平面内の異方透水性を有する地盤においても、式(3.2) に示す座標変換を施すことで、等方透水性地盤と同様の取り扱いができ、この際の等価等方透水係数 k_e が式(3.6) で表現できることは 3 章でも述べた通りである。

上述の等価等方透水係数 k_e は、注水孔 O で実施した定水位透水試験から求めることができる。しかし、式(3.2) の座標変換を施すことにより得られた等方透水性地盤の注水孔 O の形状は直径 $2r_0$ の円形ではなく、短軸、長軸の長さが $2r_0, 2r_0\sqrt{k_x/k_y}$ の楕円形となる (図-5.2 参照)。そこでここでは、等方透水性地盤において上記の楕円形状の注水孔を利用して定水位透水試験を実施した場合と同様の定常注水量が得られる直径 $2r_e$ の円形状の注水孔を考える。この r_e を楕円注入孔の短軸長さの半分 r_0 で表現する。

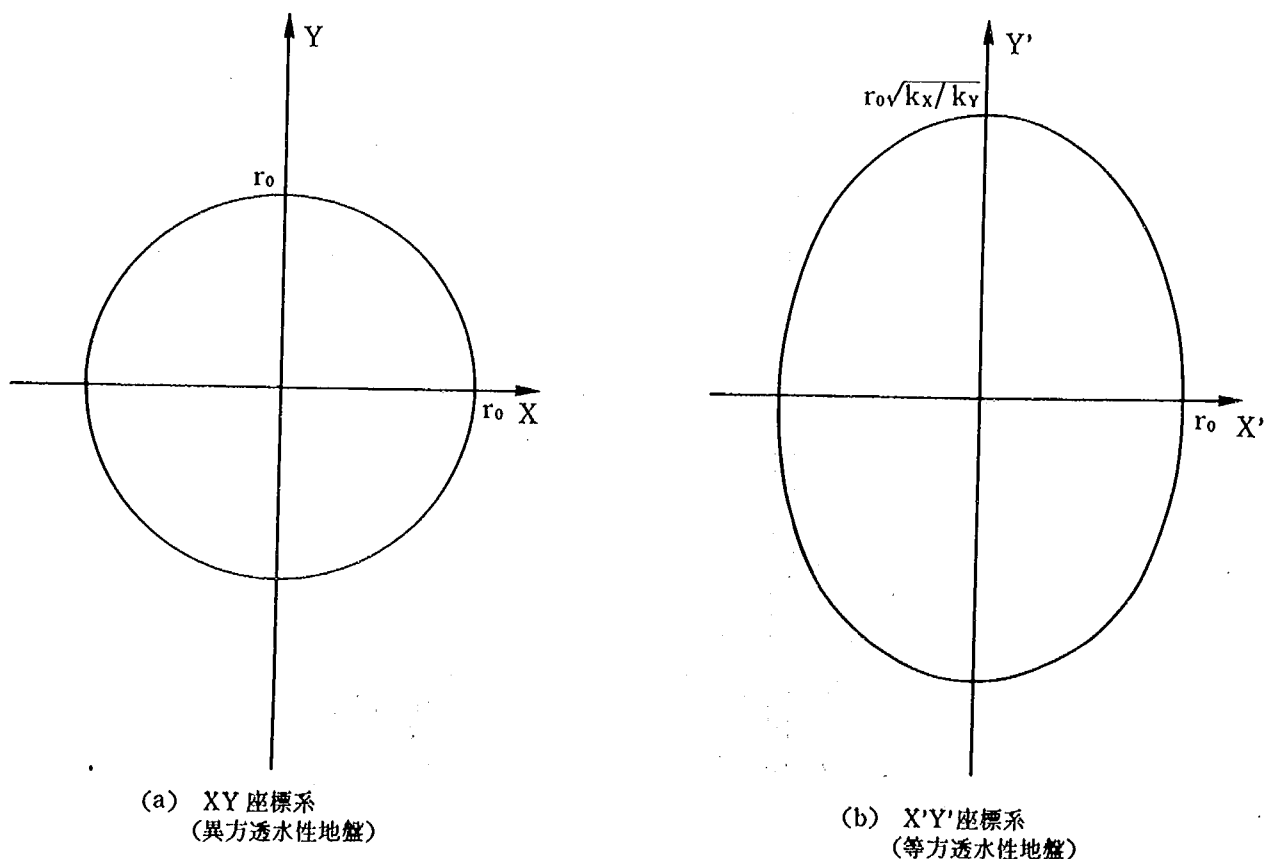


図-5.2 注水孔の形状

$$r_e = \alpha r_0 \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ここに、 α は k_x, k_y の関数である。なお、 α と k_x, k_y の関係は 5.2 で求めることにして、このまま話を進める。

式(3.2) の座標変換を施すことによって得られた等方性地盤において、注水孔 O からの水流が水平面内放射流を達成したとすると、地盤中の流れは次式によって表現できる (図-5.3 参照)。

$$v = k_e i = -k_e \frac{d\Phi}{dr} \quad (\text{運動方程式}) \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

$$Q_0 = vA = v \times (2\pi r \ell) = 2\pi r \ell v \quad (\text{連続方程式}) \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

ここに、 v : 定常流速、 k_e : 等価等方透水係数、 i : 動水勾配、 Φ : 流れのポテンシャル、 r : 水流方向、 Q_0 : 定常注入流量、 A : 通水断面積、 ℓ : 注水区間長。

式(5.2), (5.3) より、

$$d\Phi = -\frac{Q_0}{2\pi \ell k_e} \frac{dr}{r} \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

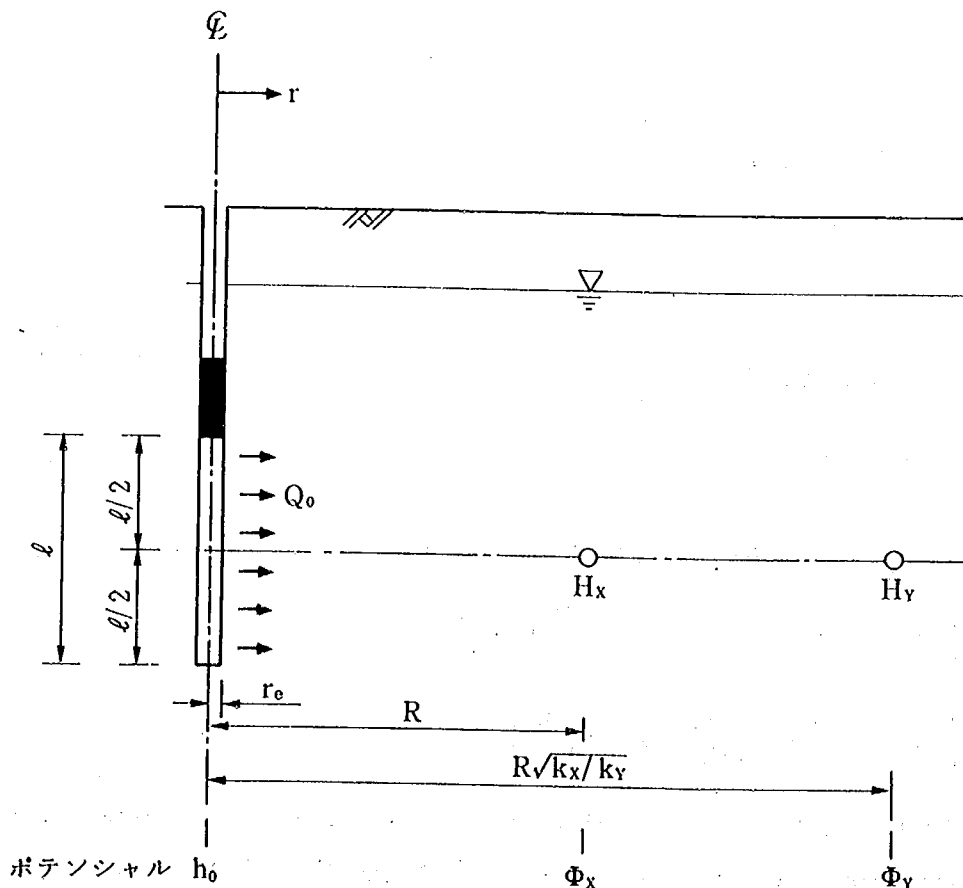


図-5.3 等価等方透水性地盤

式(5.4)を Φ, r に関して積分すると,

$$\Phi = \int d\Phi = -\frac{Q_0}{2\pi\ell k_e} \int \frac{dr}{r} = -\frac{Q_0}{2\pi\ell k_e} \ell_n r + \Phi_0 \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

ここに, ℓ_n : 自然対数関数, Φ_0 : 積分定数。

いま, 注水孔壁部の境界条件として, $r=r_e$ の際 $\Phi=h_0$ を式(5.5)に代入すると,

$$h_0 = -\frac{Q_0}{2\pi\ell k_e} \ell_n r_e + \Phi_0 \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

式(5.5), (5.6)より Φ_0 を消去すると,

$$\Phi - h_0 = \frac{Q_0}{2\pi\ell k_e} \ell_n \left(\frac{r_e}{r} \right) \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

式(5.7)に H_x, H_y で得られた水圧上昇量 $\Phi_x (r=R)$, $\Phi_y (r=R \sqrt{k_x/k_y})$: 式(3.2)の座標変換による)を代入する。

$$\Phi_x - h_0 = \frac{Q_0}{2\pi\ell k_e} \ell_n \left(\frac{r_e}{R} \right) \quad \dots\dots\dots (5.8)$$

$$\begin{aligned} \Phi_y - h_0 &= \frac{Q_0}{2\pi\ell k_e} \ell_n \left(\frac{r_e}{R \sqrt{k_x/k_y}} \right) \\ &= \frac{Q_0}{2\pi\ell k_e} \left\{ \ell_n \left(\frac{r_e}{R} \right) - \ell_n (\sqrt{k_x/k_y}) \right\} \\ &= (\Phi_x - h_0) - \frac{Q_0}{2\pi\ell k_e} \ell_n (\sqrt{k_x/k_y}) \quad \dots\dots\dots (5.9) \\ &(\because \text{式(5.8)}) \end{aligned}$$

式(5.8), (5.9)から k_e および k_x/k_y は次式として求まる。

$$k_e = \frac{Q_0}{2\pi\ell (h_0 - \Phi_x)} \ell_n \left(\frac{R}{r_e} \right) \quad \dots\dots\dots (5.10)$$

$$\sqrt{\frac{k_x}{k_y}} = \left(\frac{R}{r_e} \right)^{\left(\frac{\Phi_x - \Phi_y}{h_0 - \Phi_x} \right)} \quad \dots\dots\dots (5.11)$$

式(5.10), (5.11)および式(3.6) ($k_e = \sqrt{k_x \cdot k_y}$)より, k_x, k_y は次式として求まる。

$$k_x = k_e \left(\frac{R}{r_e} \right)^{\left(\frac{\Phi_x - \Phi_y}{h_0 - \Phi_x} \right)} = \frac{Q_0}{2\pi\ell (h_0 - \Phi_x)} \ell_n \left(\frac{R}{r_e} \right) \times \left(\frac{R}{r_e} \right)^{\left(\frac{\Phi_x - \Phi_y}{h_0 - \Phi_x} \right)} \quad \dots\dots\dots (5.12)$$

$$k_y = k_e \left(\frac{R}{r_e} \right)^{-\left(\frac{\Phi_x - \Phi_y}{h_0 - \Phi_x} \right)} = \frac{Q_0}{2\pi\ell (h_0 - \Phi_x)} \ell_n \left(\frac{R}{r_e} \right) \times \left(\frac{R}{r_e} \right)^{-\left(\frac{\Phi_x - \Phi_y}{h_0 - \Phi_x} \right)} \quad \dots\dots\dots (5.13)$$

既知の諸量を式(5.1), (5.11)に代入して異方透水係数比 k_x/k_y および $\alpha (= \text{func } (k_x/k_y))$: 5.2 参照)をニュートン (Newton) 法により求める。これらの値を式(5.10), (5.12), (5.13)に代入して k_e, k_x, k_y を決定する。

5.2 α と k_x/k_y の関係式

5.2.1 概 説

5.1 に示した方法により地盤の異方透水係数を求めるためには、式(5.1)中の α を k_x, k_y の関数として表現しなければならない。そこでここでは、平面二次元浸透流解析を実施して、 α と k_x, k_y の関数形を決定する。

5.2.2 解析概要

α と k_x, k_y の関係を以下に示す手順で求める。等方透水性地盤において、図-5.2(b) に示す短軸長さが $2r_0$ 、長軸長さが $2r_0\sqrt{k_x/k_y}$ の楕円形の注水孔を用いた定水位透水試験における注入流量 Q_0 を平面二次元浸透流解析により求める。これと同圧で定水位透水試験を円形の注水孔を用いて実施した場合に、 Q_0 の注入流量が得られる注水孔の半径として r_0 を定義する。さらに、式(5.1)の関係から α と k_x, k_y の関係を知る。

平面二次元浸透流解析モデルは、流れの軸対称性を考慮して図-5.4 に示す通り、中心角 90° の扇形とした。

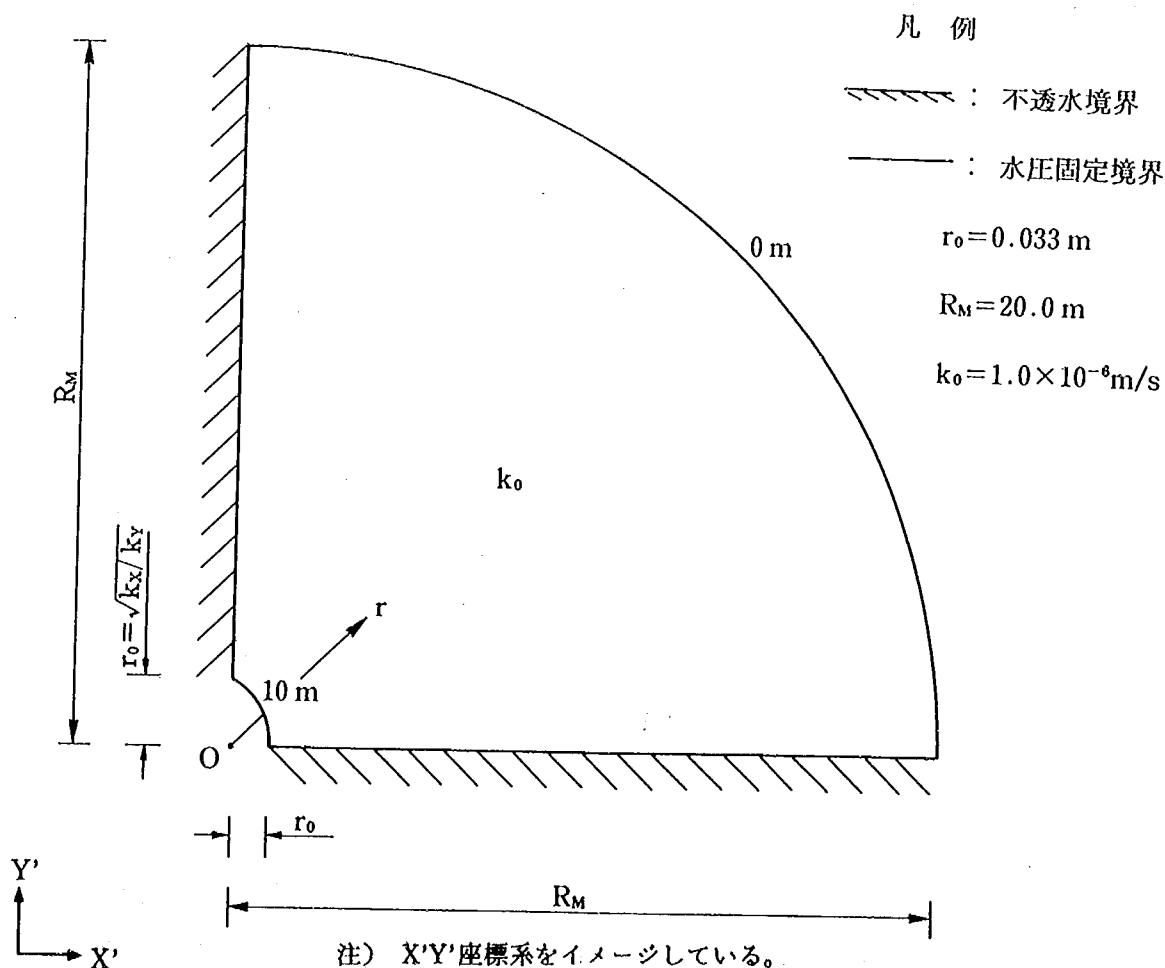


図-5.4 解析モデルの概要

注水孔の形状は、長軸と短軸の長さ比 $\sqrt{k_x/k_y}$ が1, 2, 3, 5の計4種類の楕円とし(解析ケースは各々, Case-1~4), 要素分割は各 $\sqrt{k_x/k_y}$ ごとに実施した。なお, 要素分割図は巻末の参考図-1.1~1.5としてまとめておいたので参照されたい。

r_0 の値は, $\phi 66$ mm のボーリング孔を基本に考え 33 mm とした。

扇形モデルの半径 R_M としては, 注水孔からの水の流れがほぼ無限の広がりをもつ透水性媒体中での流れとみなせる程度の大きさとして 20 m を採用した。この 20 m という値は以下の手順に従って求めた。まず, 注水孔からの水の流れが孔中心軸上に存在する点湧源集合からのポテンシャル流であると考え⁷⁾。この場合の流れのポテンシャルの注水区間中央の半径方向分布を図-5.5 に示す。この図より $r=20$ m でのポテンシャルは, 孔壁部である $r=r_0=0.033$ m におけるポテンシャルの約 2.5% に低減していることがわかる。よって, この孔中心軸からの距離が 20 m の地点をモデル外端として浸透流解析を行っても, ほぼ無限の広がりをもつ透水性媒体における試験を再現することができると考える。

境界条件としては, 注水孔部とモデル外端を水圧固定境界として各々 10 m, 0 m の水圧を与えた。また, それ以外の部分は不透水境界である。

入力物性値としては, モデル地盤の飽和透水係数 k_0 を 1.0×10^{-6} m/s とした。

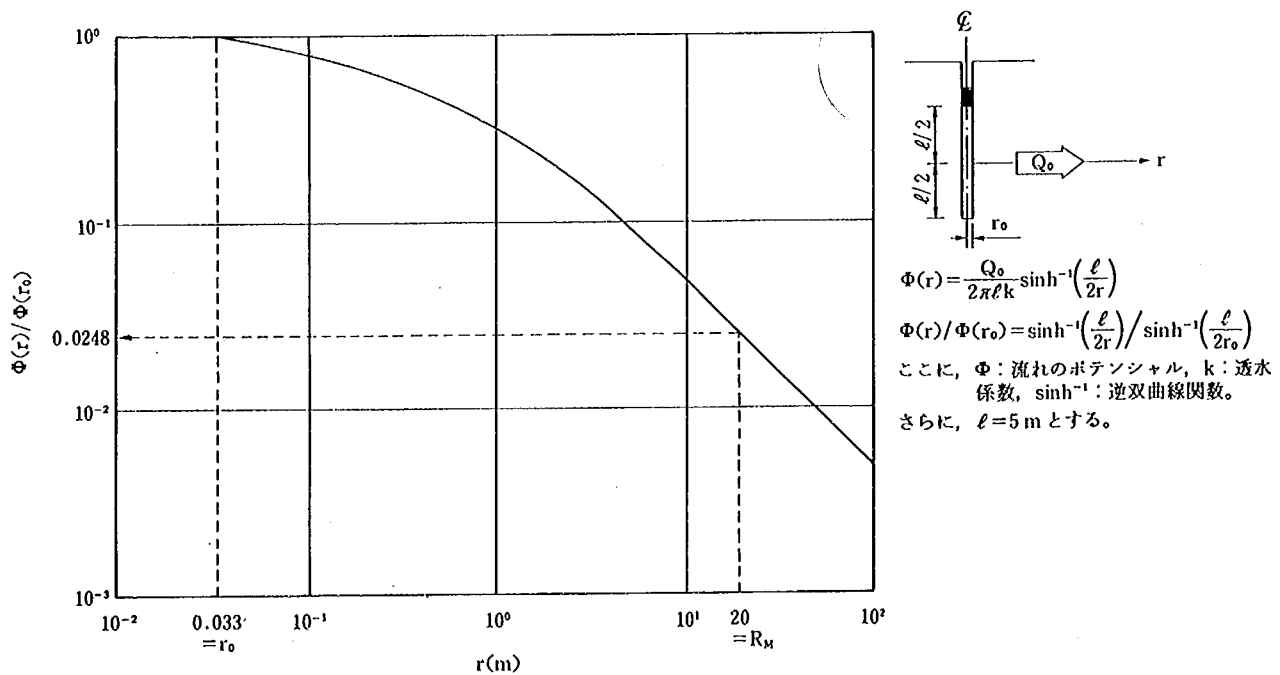


図-5.5 ポテンシャル分布

5.2.3 解析結果

α の値を求める前に, 今回の解析に用いた有限要素モデルの要素分割の細かさが適当であったか否かを検討する。具体的には理論解が得られる Case-1 ($\sqrt{k_x/k_y} = 1$) のモデルの数値解析をもとに, ①解析により求めた単位長さ当たりの注入流量 $Q_0/4\ell$ (モデルの中心角が 90° であるため) をもとにモデ

ル地盤の透水係数を逆算して、設定した透水係数との差を見る、②半径方向のポテンシャル分布について理論解と数値解析解の差を見る、という2点から検討する。

① 等方透水性地盤において、半径 r_0 の円形注水孔から水の流れが水平面内の放射流を達成した場合の透水係数 k の算定式は、式(5.7)を参考に次式として求まる。

$$k = \frac{Q_0}{2\pi\ell(h_0 - \Phi)} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad \dots\dots\dots (5.14)$$

ここに、円形注水孔ゆえ、式(5.7)の r_e は r_0 に等しい。

Case-1 のモデルに対する数値解析結果として求まった $Q_0/4\ell = 2.489 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 、境界条件として㉔ $r=r_0=0.033 \text{ m}$ でのポテンシャル $h_0=10 \text{ m}$ 、㉕ $r=R_M=20 \text{ m}$ でのポテンシャル $\Phi=0 \text{ m}$ を式(5.14)に代入すると、

$$k = \frac{2 \times (2.489 \times 10^{-6})}{\pi \times (10 - 0)} \times \ln\left(\frac{20}{0.033}\right) = 1.015 \times 10^{-6} \text{ (m/s)} \quad \dots\dots\dots (5.15)$$

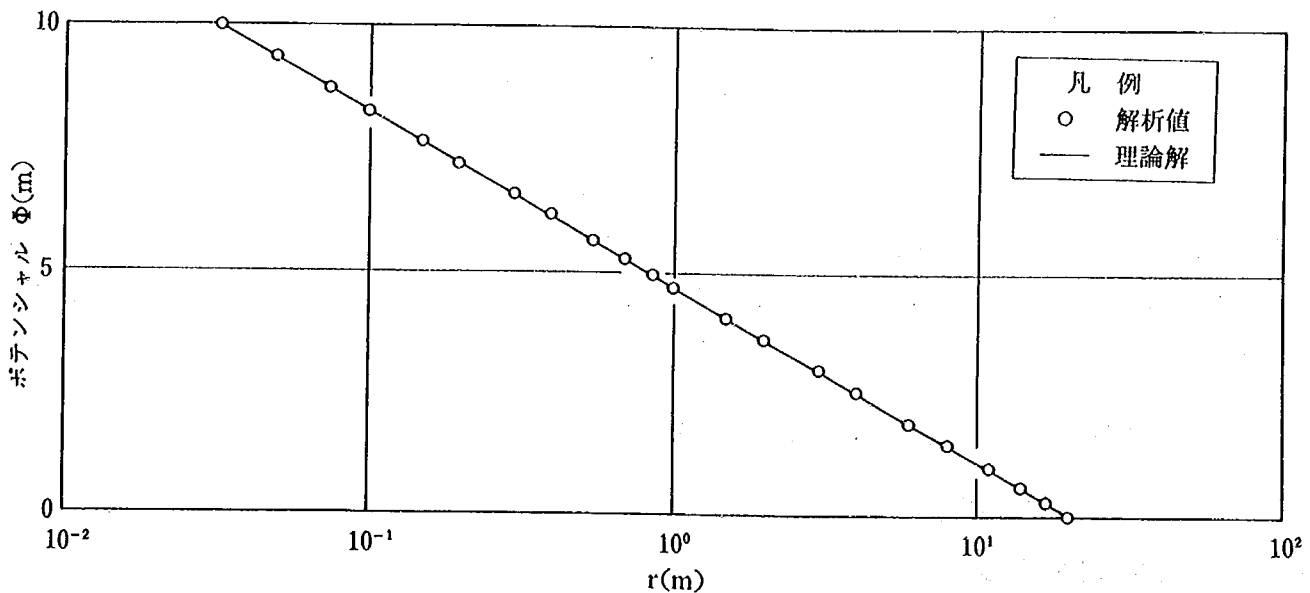
と、モデル地盤に与えた透水係数 $k_0 (=1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s})$ に対して高々1.5%の誤差でしかないことがわかる。

② 式(5.14)と㉔で示した境界条件とを考慮すると、半径方向のポテンシャル分布の理論解は次式として求まる。

$$\Phi = h_0 \frac{\ln(R_M/r)}{\ln(R_M/r_0)} = 10 \times \frac{\ln(20/r)}{\ln(20/0.033)} = 1.561 \times \ln(20/r) \quad \dots\dots\dots (5.16)$$

(単位：m)

式(5.16)で表現できるポテンシャル分布の理論解と数値解析値を図—5.6に示す。この図より、この両者はほぼ完全に一致していることがわかる。



図—5.6 半径方向のポテンシャル分布

以上の2点についての考察により、今回の Case-1 の解析モデルの有限要素分割の細かさは適切なものであったことがわかる。他のケースのモデルについても、Case-1 のモデルに準じて有限要素分割を行っているので大きな問題はないと考える。

モデルの有限要素分割の適切さが実証できたので、次に各ケースの α を決定する。まず、 r_e の算定式は式(5.7)を変形することにより次式として求まる。

$$r_e = \frac{r}{\exp\left\{\frac{2\pi k_0 \ell (h_0 - \Phi)}{Q_0}\right\}} \quad \dots\dots\dots (5.17)$$

なお、式(5.17)においては、式(5.7)における等価等方透水係数 k_e の代りにモデル地盤の設定透水係数 k_0 を採用している。

式(5.17)に、解析の結果求まった単位長さ当たり注入流量 $Q_0/4\ell$ と、解析の設定条件、㉑ $k_0 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 、㉒ 注水孔壁部の設定ポテンシャル $h_0 = 10 \text{ m}$ 、㉓ モデル外端部 $r = R_M = 20 \text{ m}$ におけるポテンシャル $\Phi = 0 \text{ m}$ 、を代入して各ケースの r_e を決定する。さらに、この r_e を式(5.1)に代入することにより各 $\sqrt{k_x/k_y}$ に対応した α を求めることができる。なお、 r_0 は 0.033 m である。この結果を表-5.1 にまとめておく。

表-5.1 r_e, α の値

Case No. 項 目	1	2	3	4
$\sqrt{k_x/k_y}$	1	2	3	5
$\frac{Q_0}{4\ell} (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$	2.489×10^{-6}	2.652×10^{-6}	2.783×10^{-6}	3.000×10^{-6}
$r_e (\text{m})$	3.633×10^{-2}	5.353×10^{-2}	7.075×10^{-2}	1.064×10^{-1}
$\alpha \left(= \frac{r_e}{r_0} \right)$	1.101	1.622	2.144	3.225

注) $r_0 = 0.033 \text{ m}$ 。

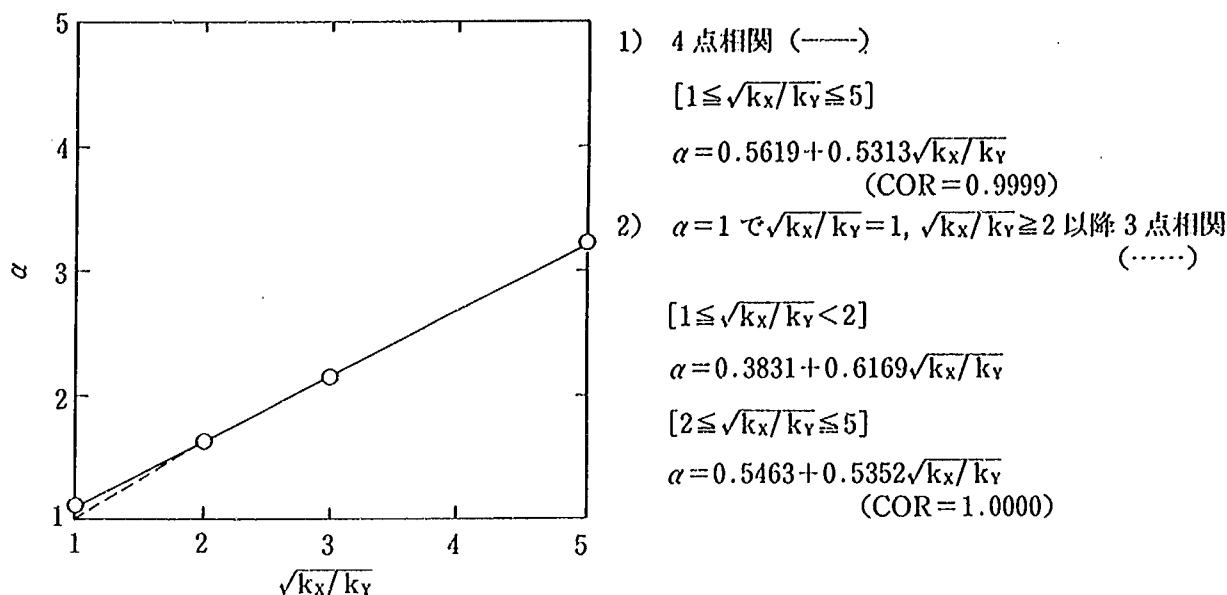
表-5.1 に示した α と $\sqrt{k_x/k_y}$ の関係を図化したものを図-5.7 に示す。この図より、 α と $\sqrt{k_x/k_y}$ には非常によい直線関係があることがわかる。そこで、図中の4点から直線回帰式を求めると(図-5.7 中の実線)。

$$\alpha = 0.5619 + 0.5313\sqrt{k_x/k_y} : 1 \leq \sqrt{k_x/k_y} \leq 5 \quad \dots\dots\dots (5.18)$$

(COR=0.9999)

ここに、COR は相関係数である。

いま、式(5.18)の $\sqrt{k_x/k_y}$ に1を代入すると、 α は、1.0932 となり等方透水性地盤の値である1よりも1割程度大きい。そのため、式(5.18)をそのまま採用すると異方性が小さい地盤での誤差がやや



注) COR: 相関係数。

図-5.7 α と $\sqrt{k_x/k_y}$ の関係

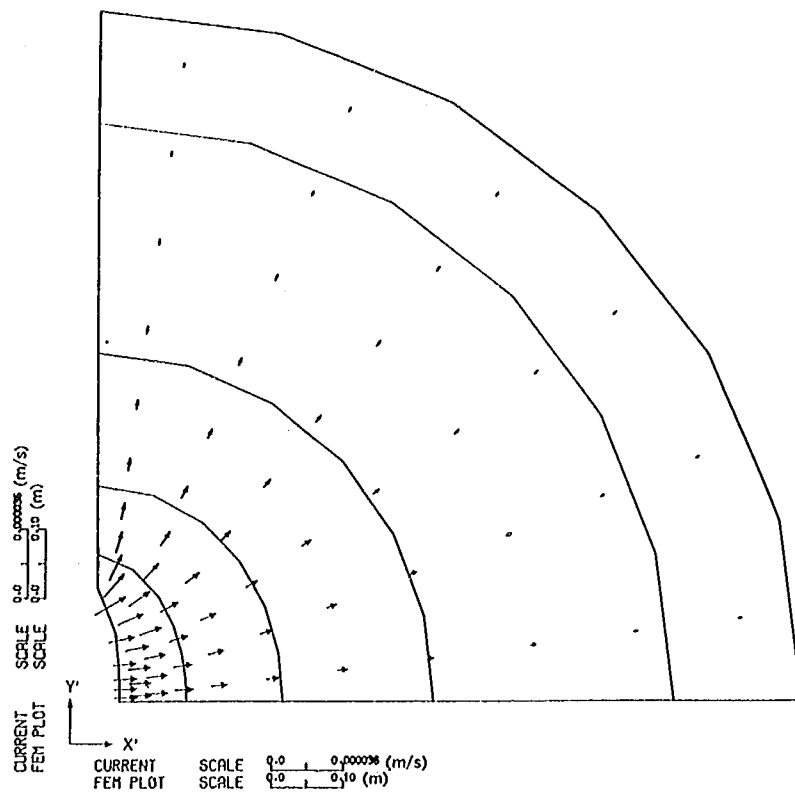
大きくなる可能性がある。そこで、 $(5 \geq) \sqrt{k_x/k_y} \geq 2$ の領域については、3点の直線回帰式を求め、 $(1 \leq) \sqrt{k_x/k_y} < 2$ の領域については、3点直線回帰式に $\sqrt{k_x/k_y} = 2$ を代入して求まる $(\sqrt{k_x/k_y}, \alpha)$ 座標値と $(\sqrt{k_x/k_y}, \alpha) = (1, 1)$ を結んだ直線を α と $\sqrt{k_x/k_y}$ の関係式とする補正式も求めておく。

$$\alpha = \begin{cases} 0.3831 + 0.6169\sqrt{k_x/k_y} : 1 \leq \sqrt{k_x/k_y} < 2 \\ 0.5463 + 0.5352\sqrt{k_x/k_y} : 2 \leq \sqrt{k_x/k_y} \leq 5 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5.19)$$

(COR=1.0000)

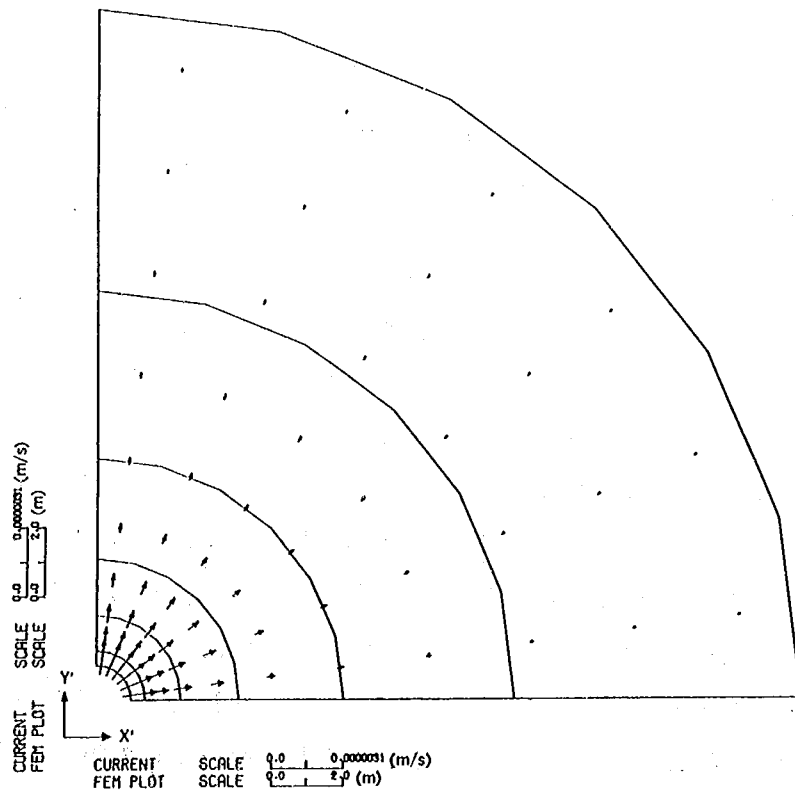
式(5.18)を用いた場合と、式(5.19)を用いた場合で求まる k_x, k_y にどの程度の差が生じるのか(特に、透水性の異方性が小さい場合)については、次節5.3において検討する。

なお、以上の過程では、注水孔中心軸を中心とする半径 R_m の円周が等ポテンシャル線となるモデル外端でのポテンシャル値を式(5.17)中の Φ に代入して α を求めている。そこでここでは、他の地点でのポテンシャル値を用いて α を求めた際に、上記の値とどの程度の違いが生じるかを検討しておく。まず、 α を求める際には、等方透水性地盤における円形注水孔を利用した透水試験を想定しているので、本解析において注水孔形状が楕円であることによる影響がほとんどなくなり等ポテンシャル線がほぼ円形になる領域を求める必要がある。今回の解析において、等ポテンシャル線の円形からの乱れが最も大きい $\sqrt{k_x/k_y} = 5$ (Case-4) の場合の等ポテンシャル線図を図-5.8 に示す(他の解析ケースの等ポテンシャル線図は巻末の参考図-2.1~2.3 に示す)。また、原点からの距離 r が同一の地点でのポテンシャルの差が最も大きくなる X' 軸上と Y' 軸上のポテンシャル分布を図-5.9 に示す。これらの図面より、原点より 1m 以遠では、等ポテンシャル線はほぼ円形になっていることがわかる。そこで、1m



(a) $0.033 \text{ m} \leq r \leq 1.0 \text{ m}$

図-5.8 流速ベクトルおよび等ポテンシャル線図 ($\sqrt{k_x/k_y}=5$ の場合)



(b) $1.0 \text{ m} \leq r \leq 20.0 \text{ m}$

図-5.8 流速ベクトルおよび等ポテンシャル線図 ($\sqrt{k_x/k_y}=5$ の場合)

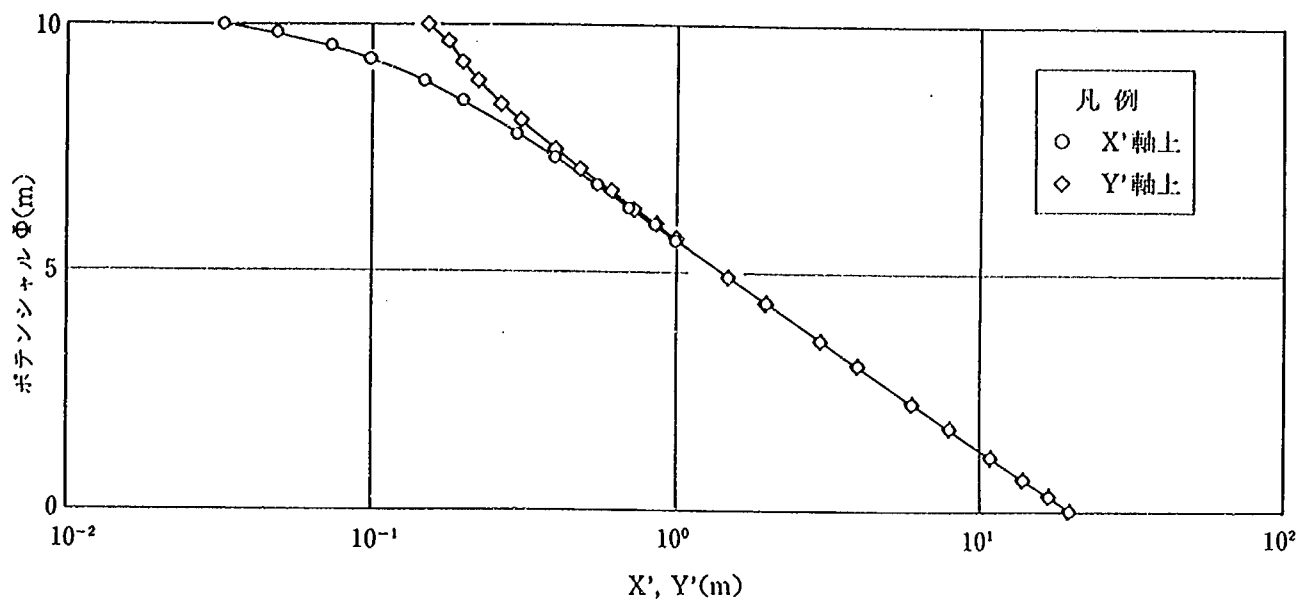


図-5.9 X' 軸, Y' 軸上のポテンシャル分布

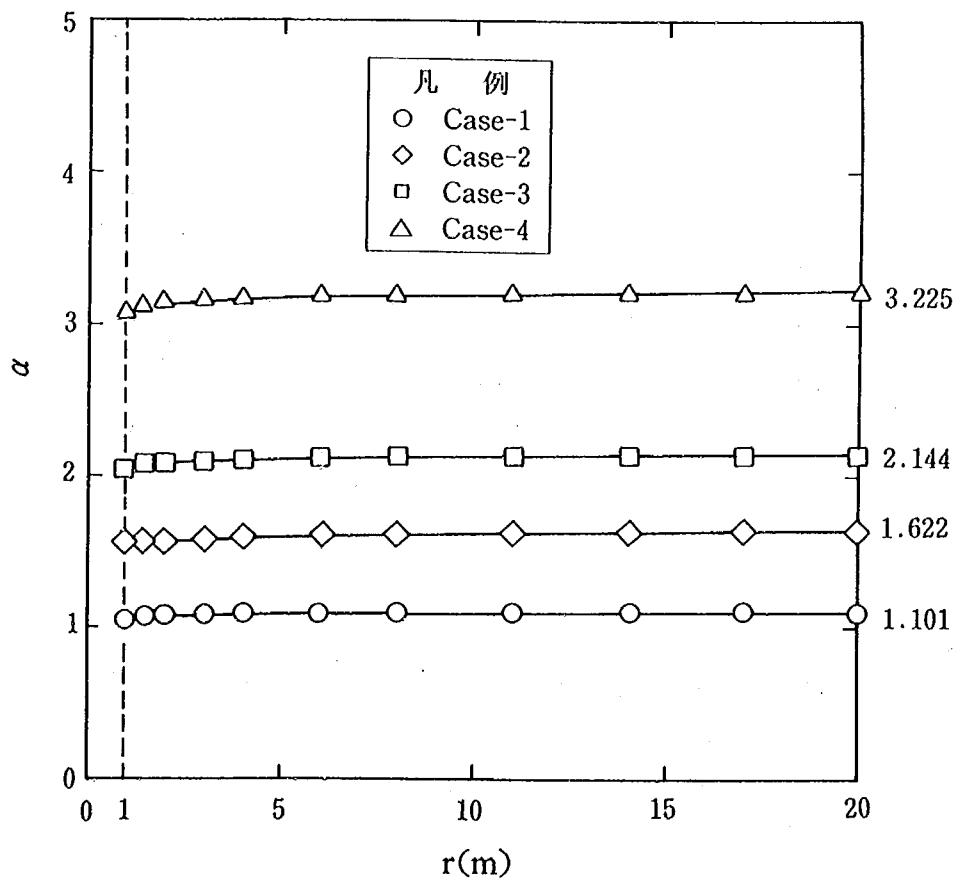


図-5.10 α の分布

以遠での各節点ポテンシャル値を式(5.17)中の Φ に代入して求めた α を図-5.10に示す。なお、 Φ は X' 軸上の値を用いた。この図より、等ポテンシャル線がほぼ円形となる原点から1 m 以遠のどの節点ポテンシャル値を採用しても得られる α に大きな差がないことがわかる。

5.3 試験精度の検討

5.3.1 概 説

5.1, 5.2 では、ボーリング孔からの注水を利用した水平面内異方透水試験を実施した場合の異方透水係数の算定式を示した。そこで本節においては、水平面内二次元浸透流解析を実施して、この算定式の精度を検討する。

5.3.2 解析概要

解析モデルは、5.2 で示した $X'Y'$ 座標系における $\sqrt{k_x/k_y}=1$ (Case-1) のモデルと全く同じとした。また、解析条件もモデル地盤の透水係数以外は、5.2 における解析と全く同じとした(図-5.11 参照)。モデル地盤の異方透水係数 k_{x0} , k_{y0} は表-5.2 に示すように設定した。

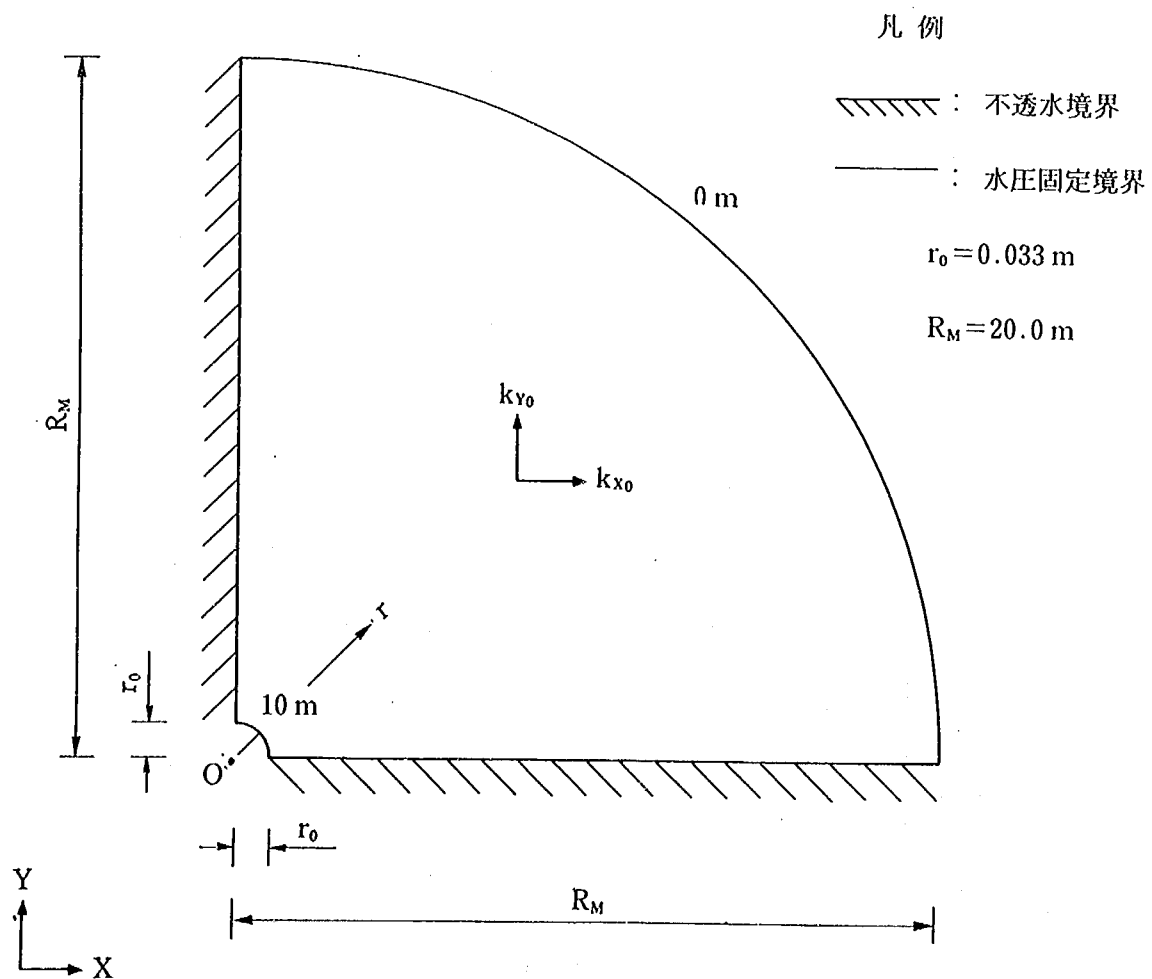


図-5.11 解析モデルの概要

表—5.2 モデル地盤の異方透水係数

Case No. 項 目	I	II	III	IV	V
k_{x0} ($\times 10^{-6} \text{m/s}$)	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0
k_{y0} ($\times 10^{-6} \text{m/s}$)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
k_{x0}/k_{y0}	1	2	5	10	20

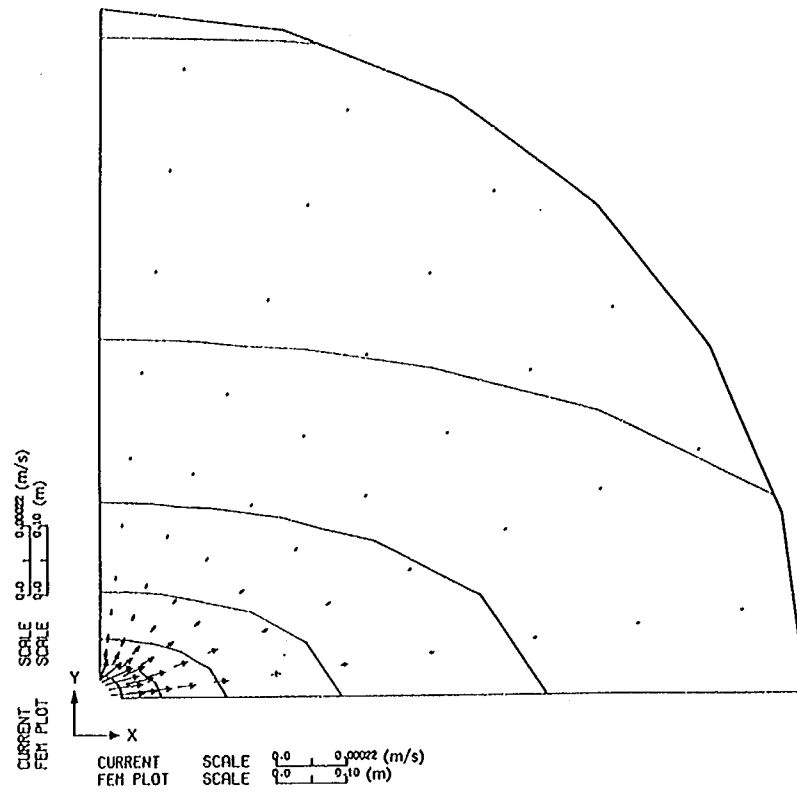
5.3.3 解析結果

5.1, 5.2 で示した水平面内の異方透水係数算定式の精度を検討する前に、「異方透水性地盤である XY 座標系に式(3.2) に示した座標変換を施すことにより等方透水性地盤と同様の取り扱いができる X'Y'座標系が得られる」という前提条件の是非について検討を加えておく。上記の条件が成立するのであれば、等方透水性地盤である X'Y'座標系で円形となる等ポテンシャル線は、XY 座標系の異方透水性地盤では長軸と短軸の比が $\sqrt{k_{x0}/k_{y0}}$ の楕円となるはずである。そこで、図—5.12 に $k_{x0}/k_{y0}=5$ のケース (Case-III) の等ポテンシャル線図を示す (他のケースの等ポテンシャル線図は参考図—3.1~3.4 に示す。)。この図より、注水孔壁部およびモデル外端部付近を除き、ポテンシャル線がほぼ楕円を描いていることが伺える。次に、この楕円の長軸と短軸の比が $\sqrt{k_{x0}/k_{y0}}$ になっているか否かを判定するために、式(3.2) の座標変換により定まる X'(=X) 軸および Y'(= $\sqrt{k_{x0}/k_{y0}} \cdot Y$) 軸上のポテンシャル分布を図—5.13 に示す。この図より、注水孔壁部およびモデル外端部付近を除き、X~ Φ 曲線と Y $\sqrt{k_{x0}/k_{y0}}$ ~ Φ 曲線が一致しており、結果として XY 座標系における楕円等ポテンシャル線の長軸と短軸の比が $\sqrt{k_{x0}/k_{y0}}$ に一致していることがわかる。

以上により、前述した水平面内の異方透水係数算定式の前記条件は、今回の解析において成立していることが実証できた。

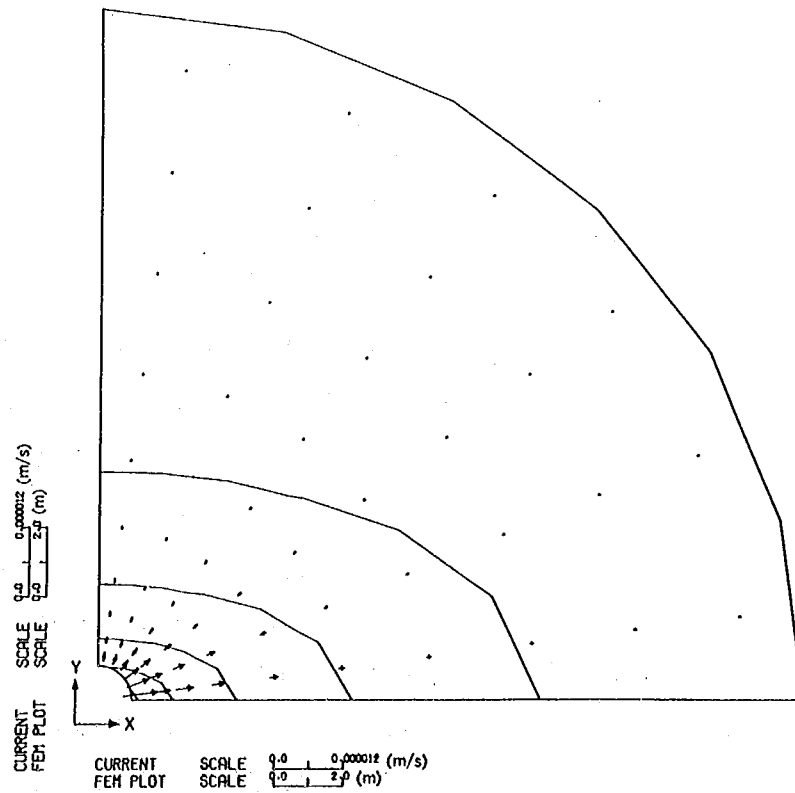
次に、各解析ケースの設定透水係数 k_{x0} , k_{y0} と解析結果として得られた注入流量、ポテンシャル値を 5.1, 5.2 で示した水平面内の異方透水係数の算定式に代入して求めた k_e , k_x , k_y を表—5.3 にまとめて示す。なお、注水孔と水圧観測孔との距離 R の値としては、モデル外端の影響を受けずほぼ無限の広がりを持つ地盤での試験と同様の水圧値が得られ、かつ試験を実施する際に十分な精度が確保できる程度の範囲を考慮して 2m, 3m を採用した。また、表—5.3 に示したデータを $k_{x0}/k_{y0} \sim k_x/k_y$, k_x/k_{x0} あるいは $k_y/k_{y0} \sim k_{x0}/k_{y0}$, $\sqrt{k_{x0} \cdot k_{y0}} \sim k_e$ の 3 つの関係について整理したものをそれぞれ図—5.14, 15, 16 に示す。これらの図表から以下のことが言える。

- ① α と $\sqrt{k_x/k_y}$ の関係式として式(5.18) を採用した場合と式(5.19) を採用した場合で求まる k_e , k_x , k_y には数パーセントの差しかない。よって、現場試験での適用に際しては、式形が簡単な式(5.18) を採用する方が良いと考える。そこで、図—5.14, 15, 16 も式(5.18) を採用した場合の結果のみを図化した訳である。



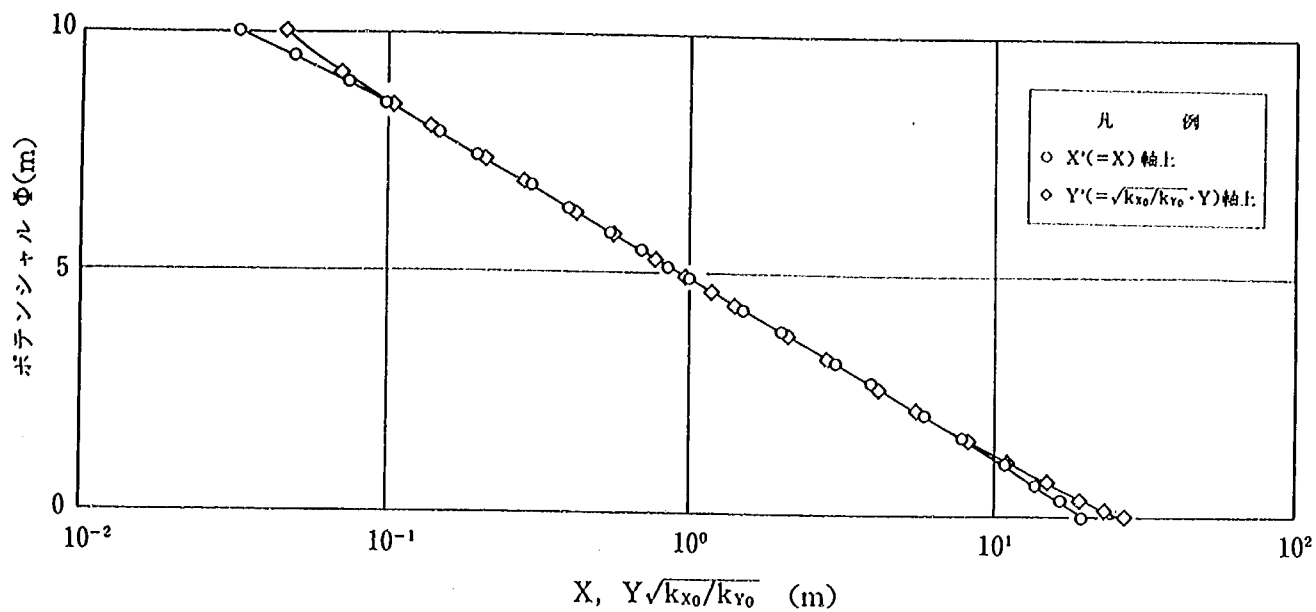
(a) $0.033 \text{ m} \leq r \leq 1.0 \text{ m}$

図-5.12 流速ベクトルおよび等ポテンシャル線図 (Case-III, $k_{x0}/k_{y0}=5$)



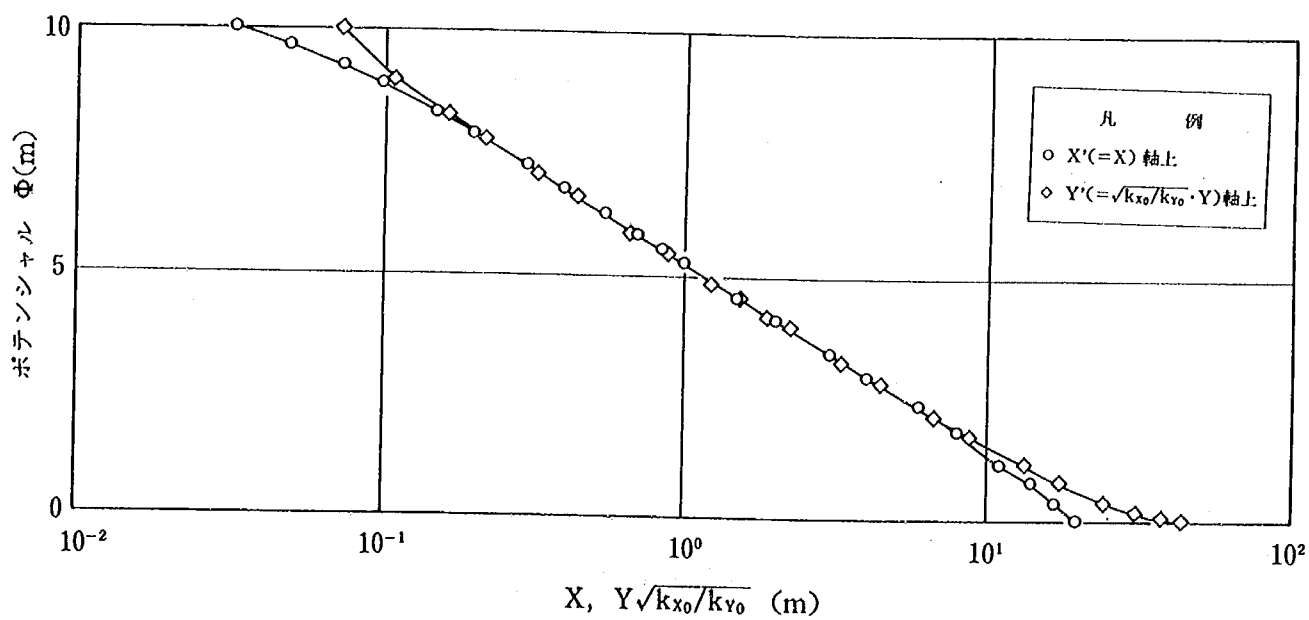
(b) $1.0 \text{ m} \leq r \leq 20.0 \text{ m}$

図-5.12 流速ベクトルおよび等ポテンシャル線図 (Case-III, $k_{x0}/k_{y0}=5$)



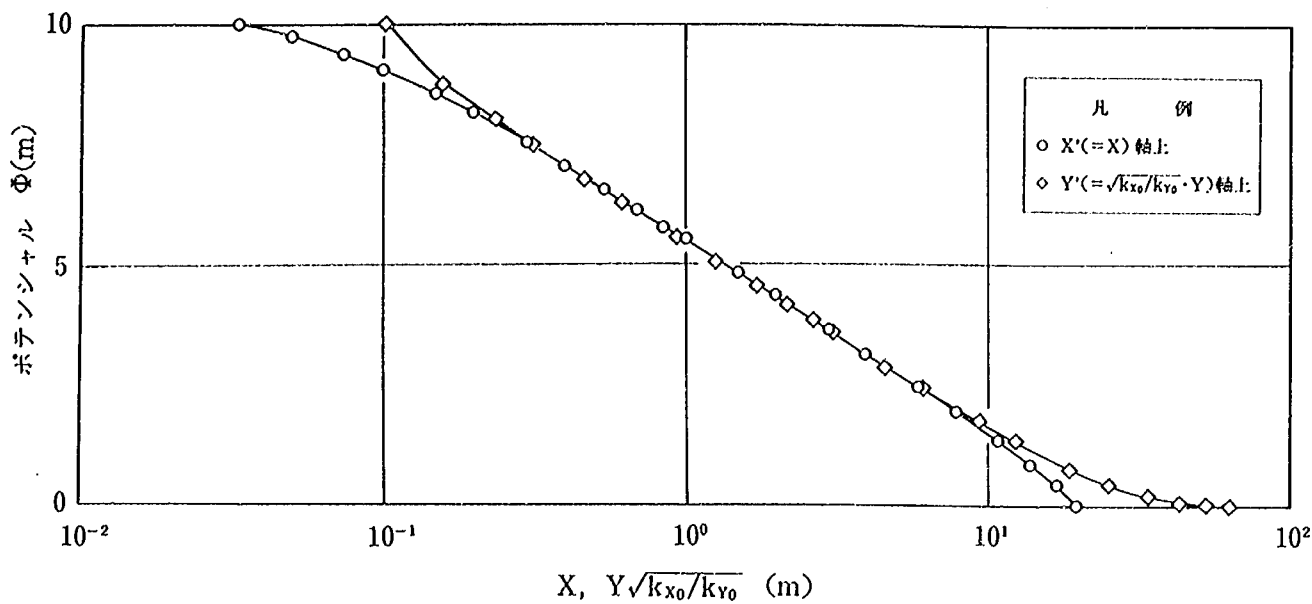
(a) Case-II, $k_{x0}/k_{y0}=2$

図-5.13 ポテンシャル分布



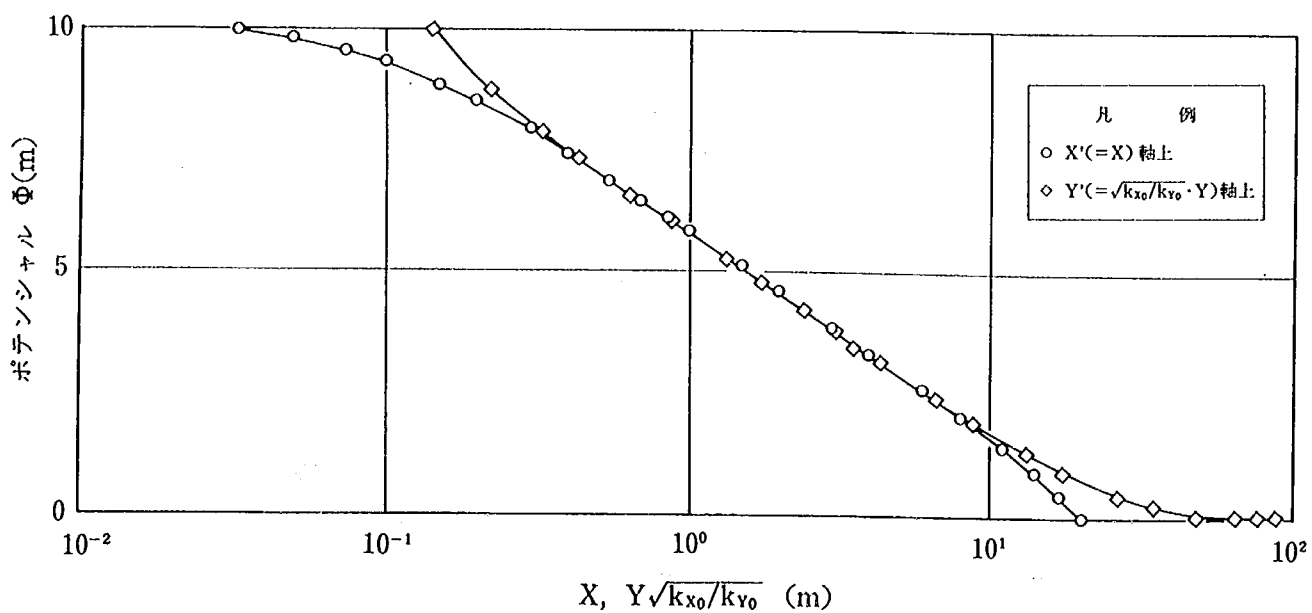
(b) Case-III, $k_{x0}/k_{y0}=5$

図-5.13 ポテンシャル分布



(c) Case-IV, $k_{x0}/k_{y0} = 10$

図-5.13 ポテンシャル分布



(d) Case-V, $k_{x0}/k_{y0} = 20$

図-5.13 ポテンシャル分布

表—5.3 異方透水係数算定式の精度検討結果

		Case No. 項目	I		II		III		IV		V	
設定条件		k_{x0} (m/s)	1.000×10^{-6}		2.000×10^{-6}		5.000×10^{-6}		1.000×10^{-5}		2.000×10^{-5}	
		k_{y0} (m/s)	1.000×10^{-6}		1.000×10^{-6}		1.000×10^{-6}		1.000×10^{-6}		1.000×10^{-6}	
		$\sqrt{k_{x0} \cdot k_{y0}}$ (m/s)	1.000×10^{-6}		1.414×10^{-6}		2.236×10^{-6}		3.162×10^{-6}		4.472×10^{-6}	
		k_{x0}/k_{y0}	1.000		2.000		5.000		10.00		20.00	
解析結果	R=2.0 m	$Q_0/4\ell$ ($m^3/s/m$)	2.489×10^{-6}		3.556×10^{-6}		5.855×10^{-6}		8.696×10^{-6}		1.312×10^{-5}	
		Φ_x (m)	3.597		3.838		4.112		4.338		4.612	
		Φ_y (m)	3.597		3.293		2.806		2.043		1.990	
		$\alpha, \sqrt{k_x/k_y}$ 関係式	式(5.18)	式(5.19)	式(5.18)	式(5.19)	式(5.18)	式(5.19)	式(5.18)	式(5.19)	式(5.18)	式(5.19)
		k_x/k_y	1.000	1.000	1.970	1.985	4.840	4.848	9.610	9.618	19.28	19.27
		$\alpha (=r_0/r_0)$	1.093	1.000	1.308	1.252	1.731	1.725	2.209	2.206	2.895	2.896
		k_0 (m/s)	9.936×10^{-7}	1.016×10^{-6}	1.409×10^{-6}	1.425×10^{-6}	2.251×10^{-6}	2.253×10^{-6}	3.238×10^{-6}	3.239×10^{-6}	4.714×10^{-6}	4.714×10^{-6}
		k_x (m/s)	9.936×10^{-7}	1.016×10^{-6}	1.978×10^{-6}	2.008×10^{-6}	4.952×10^{-6}	4.961×10^{-6}	1.004×10^{-5}	1.005×10^{-5}	2.070×10^{-5}	2.069×10^{-5}
		k_y (m/s)	9.936×10^{-7}	1.016×10^{-6}	1.004×10^{-6}	1.011×10^{-6}	1.023×10^{-6}	1.023×10^{-6}	1.045×10^{-6}	1.044×10^{-6}	1.074×10^{-6}	1.074×10^{-6}
	R=3.0 m	$Q_0/4\ell$ ($m^3/s/m$)	2.489×10^{-6}		3.556×10^{-6}		5.855×10^{-6}		8.696×10^{-6}		1.312×10^{-5}	
		Φ_x (m)	2.997		3.201		3.452		3.652		3.891	
		Φ_y (m)	2.997		2.660		2.158		1.745		1.384	
		$\alpha, \sqrt{k_x/k_y}$ 関係式	式(5.18)	式(5.19)	式(5.18)	式(5.19)	式(5.18)	式(5.19)	式(5.18)	式(5.19)	式(5.18)	式(5.19)
		k_x/k_y	1.000	1.000	1.964	1.978	4.791	4.798	9.382	9.389	17.48	17.48
		$\alpha (=r_0/r_0)$	1.093	1.000	1.306	1.251	1.725	1.719	2.189	2.187	2.783	2.784
		k_0 (m/s)	9.960×10^{-7}	1.016×10^{-6}	1.413×10^{-6}	1.427×10^{-6}	2.257×10^{-6}	2.259×10^{-6}	3.249×10^{-6}	3.251×10^{-6}	4.766×10^{-6}	4.766×10^{-6}
		k_x (m/s)	9.960×10^{-7}	1.016×10^{-6}	1.980×10^{-6}	2.007×10^{-6}	4.940×10^{-6}	4.978×10^{-6}	9.953×10^{-6}	9.960×10^{-6}	1.993×10^{-5}	1.993×10^{-5}
		k_y (m/s)	9.960×10^{-7}	1.016×10^{-6}	1.008×10^{-6}	1.015×10^{-6}	1.031×10^{-6}	1.031×10^{-6}	1.061×10^{-6}	1.061×10^{-6}	1.140×10^{-6}	1.140×10^{-6}

注) $h_0=10$ m, $r_0=0.033$ m。

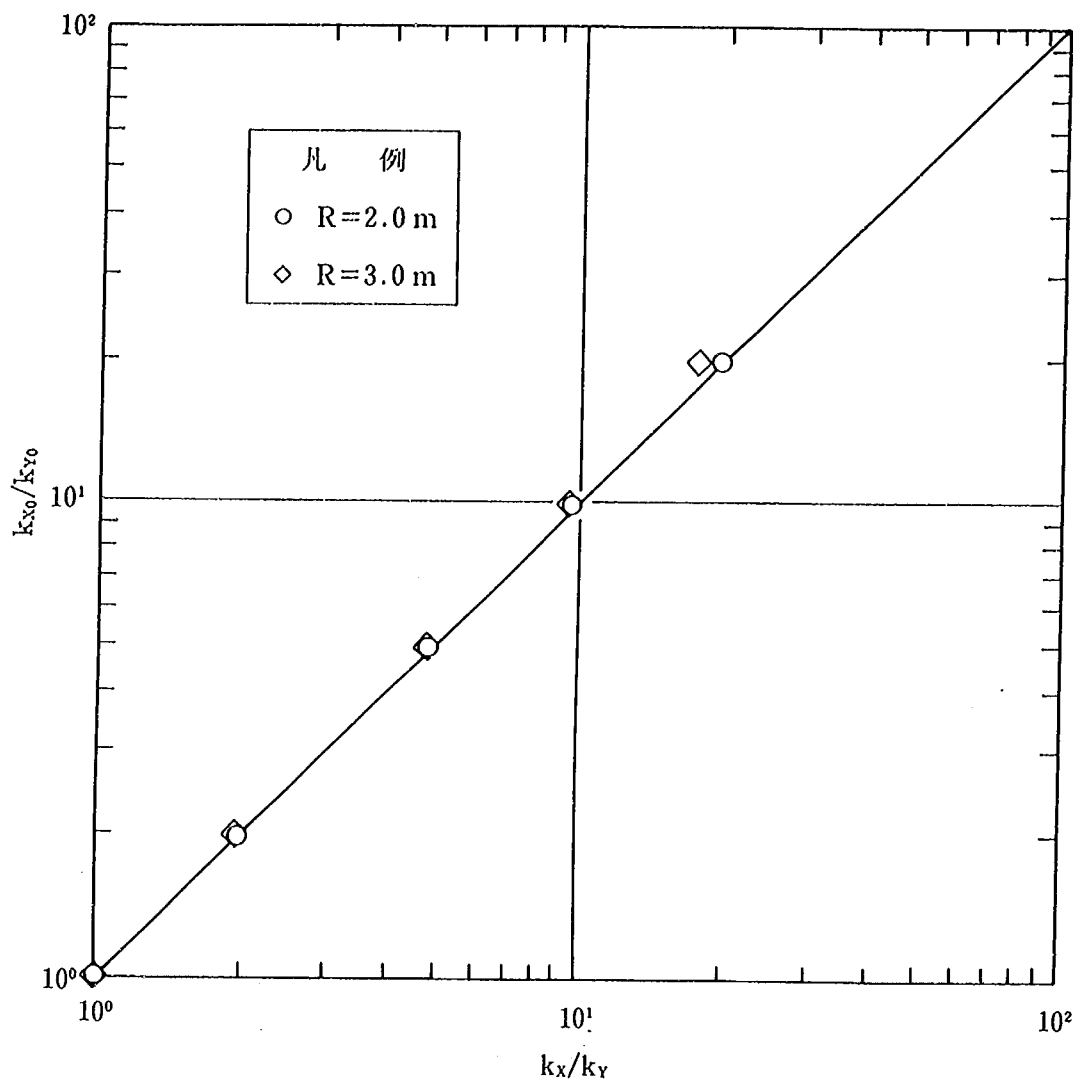
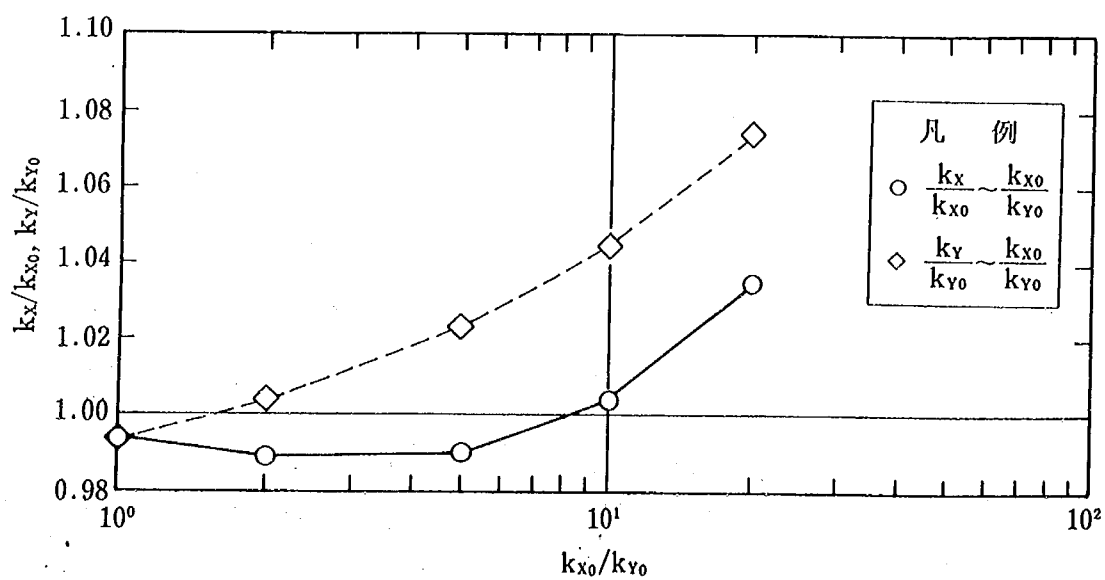
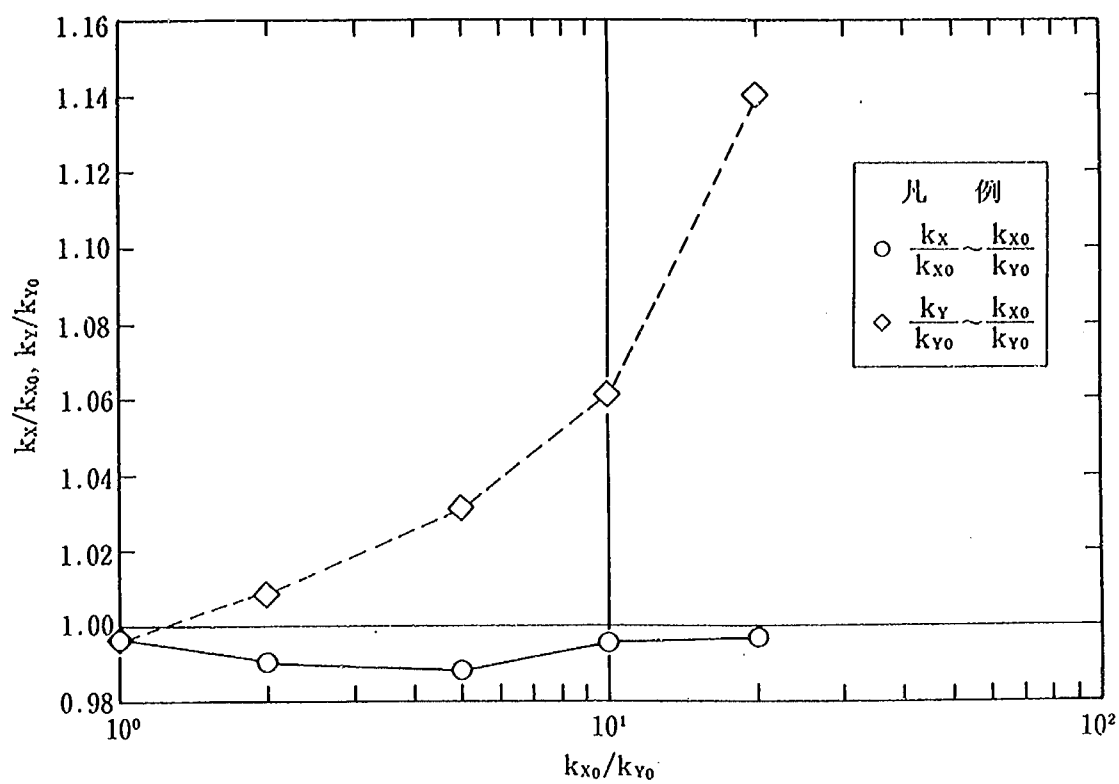


図-5.14 k_{x0}/k_{y0} と k_x/k_y の関係



(a) $R=2.0$ m の場合

図-5.15 k_x/k_{x0} および k_y/k_{y0} と k_{x0}/k_{y0} の関係



(b) $R=3.0$ m の場合

図-5.15 k_x/k_{x0} および k_y/k_{y0} と k_{x0}/k_{y0} の関係

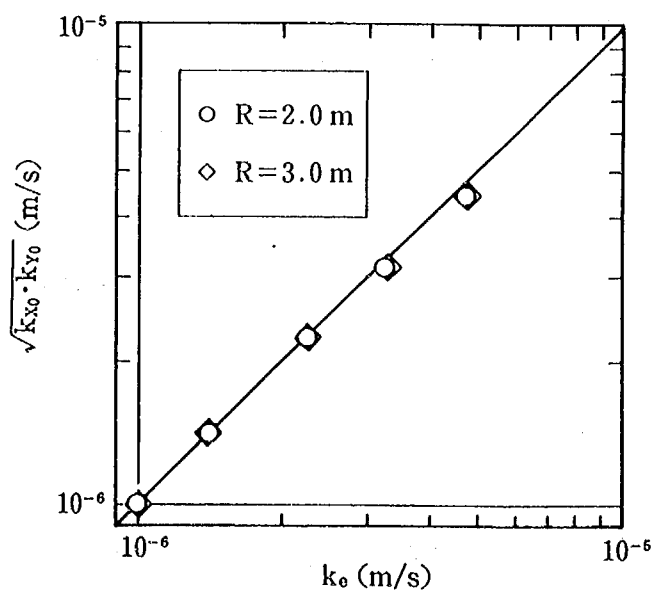


図-5.16 $\sqrt{k_{x0} \cdot k_{y0}}$ と k_0 の関係

② k_x/k_y と k_{x0}/k_{y0} の開きは、透水性の異方性 (k_{x0}/k_{y0}) が大きくなるほど、また $R=2.0\text{ m}$ よりも $R=3.0\text{ m}$ の場合の方が大きくなっている。これは、今回の浸透流解析を k_{x0}/k_{y0} の値によらず同一のモデルを使用して行っているため、異方性が大きくなるほどモデル外端部の影響を強く受け、無限の広がりを持つ地盤に対する理論解との差が大きくなったものだと考える。しかし、 $k_{x0}/k_{y0}=20$, $R=3.0\text{ m}$ のケースを除いて、その差はさほど小さくなく、実用上は大きな問題とはならないと考える。

③ k_x と k_{x0} , k_y と k_{y0} をそれぞれの比ではなく個別に比較する。最大透水係数である k_x と k_{y0} の差は k_{x0}/k_{y0} , R にかかわらず数パーセント程度と非常に小さい。最小透水係数の k_y と k_{y0} の差は k_x と k_{x0} の差よりも大きく、このことが②に示した結果として表れている。しかし、 $k_{x0}/k_{y0}=20$, $R=3.0\text{ m}$ のケースを除いて、その差はさほど大きくない。

以上より、ここで提案した水平面内の異方透水試験の精度はかなり高く、十分実用に供するものだと考える。

5.4 試験実施に際しての注意点

5.4.1 水平放射流達成のための対策

今回開発した水平面内の異方透水試験を精度良く実施するためには、注水孔からの水の流れが水平放射流になっていることが必要である。そのためには、注水区間長 ℓ を注水孔径 r_0 より十分大きく採り、注水孔と水圧観測孔との距離 R をあまり大きく採らないことが一つの対策として挙げることができる。具体的には、 R を 5.3 で示したように $2\sim 3\text{ m}$ に採り、かつ $r_0=33\text{ mm}$ ($\phi 66\text{ mm}$) のボーリング孔を注水孔に用いるのであれば、注水区間長 ℓ を $4\sim 5\text{ m}$ とすればよいのではないかと考える。さらに、より確実な対策としては、図—5.17 に示すような多重バックカを利用し、中央と上下の注水区間からの注水圧を同一としたうえで、中央注水区間からの注入流量を測定することが挙げられる。

5.4.2 透水性の主軸方向も決定する場合

ここまでは、透水性を知りたい直交 2 方向であるダム上下流方向とダム軸方向が透水性の主軸方向に一致するものとして話を進めてきた。そこでここでは、ダム上下流方向とダム軸方向の直交 2 方向が透水性の主軸方向と一致しない場合に、主軸方向の透水係数 k_x, k_y ($k_x \geq k_y$) と上記の直交 2 方向と透水性の主軸方向のなす角 β (ラジアン表示) を求める方法について述べる。なお、ダム上下流方向 (x) とダム軸方向 (y) の xy 座標系と透水性の主軸座標系である XY 座標系の位置関係を図—5.18 に示すように設定する。

まず、 k_x, k_y, β の 3 つの未知数を求めるためには、注水孔から等距離 R の位置として x, y 軸の他にもう 1 か所 (ここでは、 $y=x$ 上とする。), 全 3 か所に水圧観測孔を設けなければならない。異方透水性地盤において得られた 3 か所での水圧値は、式(3.2) に示した座標変換を施すことにより得られる等価等方透水性地盤においては、注水孔中心軸からの距離が以下に示す値に一致する地点での値となる (図—5.19 参照)。

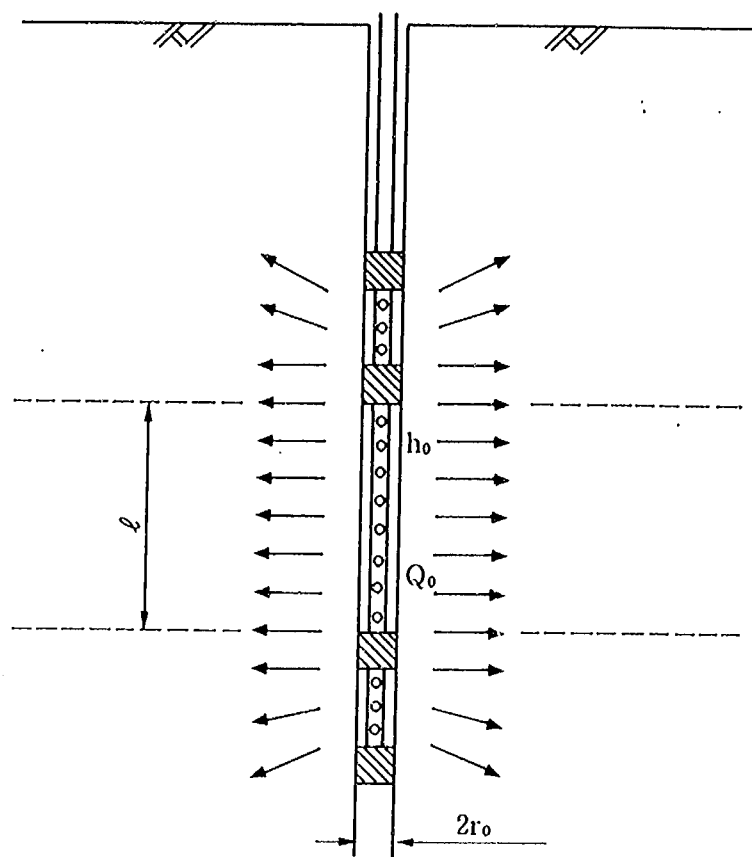


図-5.17 多重パッカを利用した注水

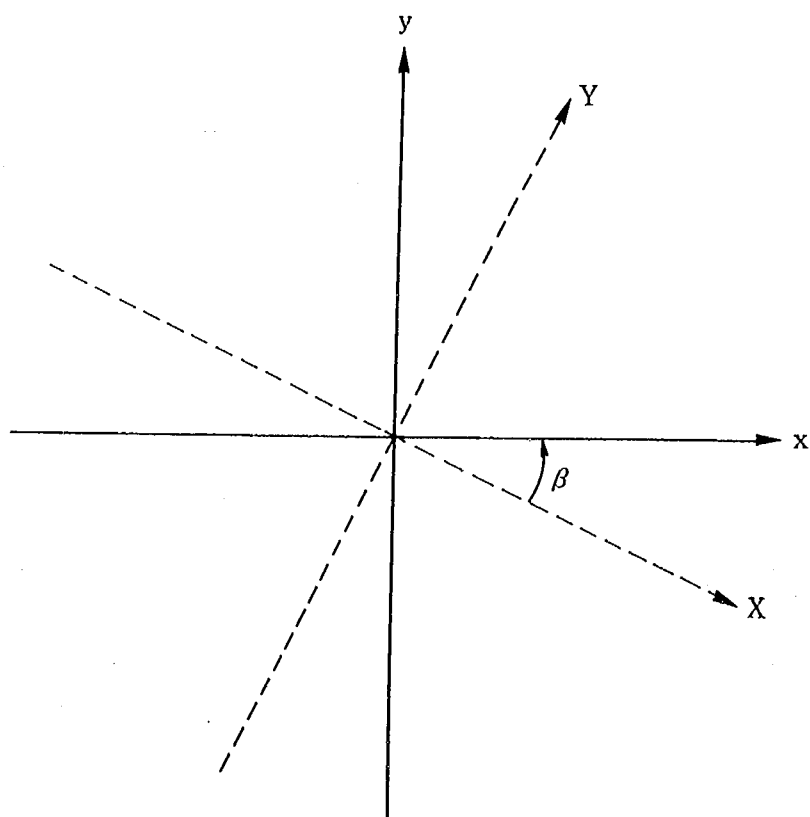
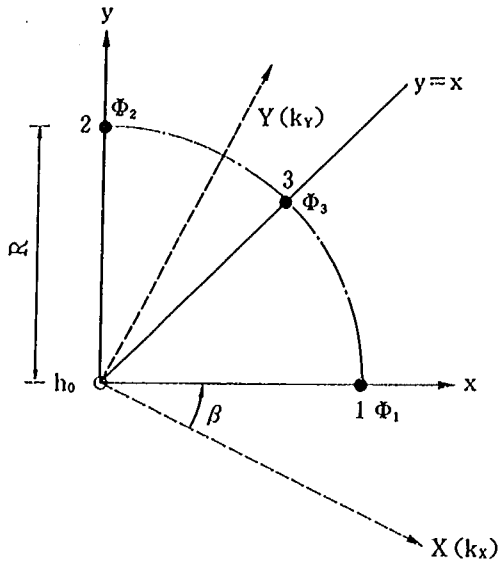


図-5.18 $x y$ 座標系と $X Y$ 座標系の位置関係

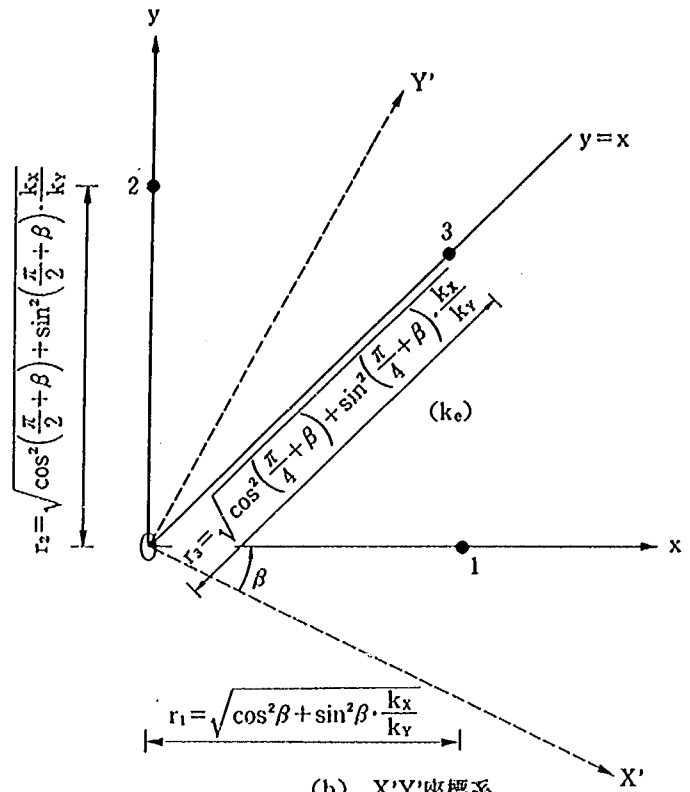
凡 例

○, : 注水孔

● : 水圧観測孔



(a) XY 座標系



(b) X'Y'座標系

図—5.19 注水孔と観測孔の配置

① x 軸上の水圧観測孔 (観測孔 1)

$$r_1 = \sqrt{\cos^2 \beta + \sin^2 \beta \cdot \frac{k_x}{k_y}} \dots \dots \dots (5.20)$$

② y 軸上の水圧観測孔 (観測孔 2)

$$r_2 = \sqrt{\cos^2 \left(\frac{\pi}{2} + \beta \right) + \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} + \beta \right) \cdot \frac{k_x}{k_y}} \dots \dots \dots (5.21)$$

③ y=x 上の水圧観測孔 (観測孔 3)

$$r_3 = \sqrt{\cos^2 \left(\frac{\pi}{4} + \beta \right) + \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} + \beta \right) \cdot \frac{k_x}{k_y}} \dots \dots \dots (5.22)$$

さらに、観測孔 1, 2, 3 で測定されたポテンシャルを Φ_1, Φ_2, Φ_3 とし、式(5.7)に代入すると、

$$\Phi_1 - h_0 = \frac{Q_0}{2\pi k_e \ell} \ell_n \left(\frac{r_e}{r_1} \right) \dots \dots \dots (5.23)$$

$$\Phi_2 - h_0 = \frac{Q_0}{2\pi k_e \ell} \ell_n \left(\frac{r_e}{r_2} \right) \dots \dots \dots (5.24)$$

$$\Phi_3 - h_0 = \frac{Q_0}{2\pi k_e \ell} \ell_n \left(\frac{r_e}{r_3} \right) \dots \dots \dots (5.25)$$

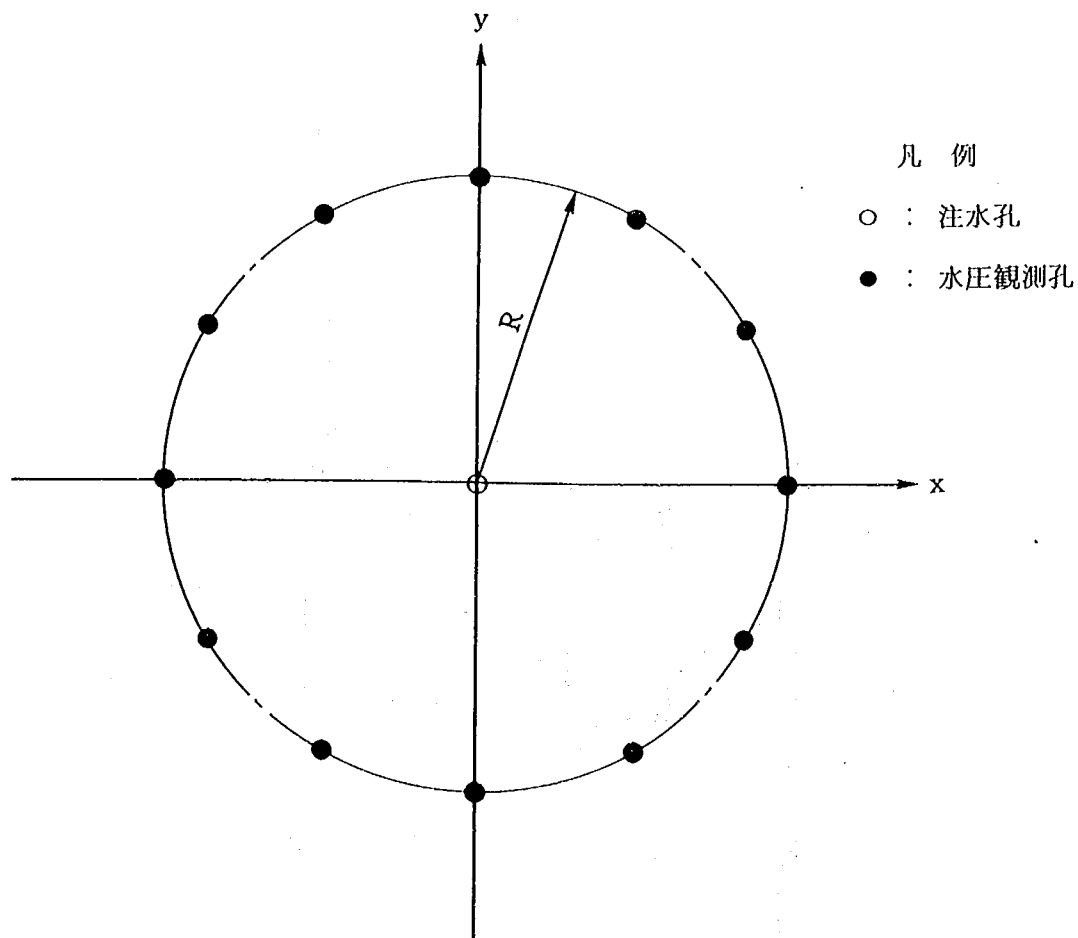
式(5.20), (5.21), (5.22) の r_1, r_2, r_3 を各々式(5.23), (5.24), (5.25) に代入して求まる 3 式から

k_x, k_y, β を求めればよい。なお、 k_e は式(3.6)に示したように k_x と k_y の関数である。

上記3式から k_x, k_y, β を求めることが出来れば、得られた値の精度はかなり高いことは5.3で判明した以下の事実より明らかである。

- ① 透水性の主軸方向が明らかな場合、今回提案した透水試験方法の精度は高い。
- ② 水平面内の異方透水性地盤において、注水孔から水平放射流を発生させて注水した場合の水平面内の等ポテンシャル線は、長軸長さと短軸長さの比が $\sqrt{k_x/k_y}$ の楕円形となる。

しかし、上記3式から k_x, k_y, β の理論解を求めることはできず、数値解析解として求めざるを得ない。そこで数値解析解を求めようと試みてみたが、 k_x, k_y, β の初期値として非常に解に近い値を代入しない限り解が収束せず目的を達成することができないことが判明した。よって、今回のような数値実験に比べるとはるかに不確実な要素の多い現場実験にこの方法を適用してもその精度にはやや疑問が残る。そこで、透水性の主軸方向も決定する場合には、図—5.20に示すように、注水孔から等距離に多くの水圧観測孔を設置し、注水時に測定した水圧分布から透水性の主軸方向を決定し、そのうえで5.1、5.2に示した方法で主軸方向の透水係数 k_x, k_y を求めることを提案する。なお、均質な異方性地盤という仮定に従って試験を行うのであれば、その軸対称性を考慮して注水孔中心軸を原点として中心角 90° の範囲のみに水圧観測孔を設置すればよい。



図—5.20 透水性の主軸方向を決定するための水圧観測孔の配置

5.4.3 割れ目岩盤への適用

今回提案した水平面内の異方透水試験における異方透水係数の算定式は、地盤が水平面内において均質な異方透水性を有するとして誘導している。そのため、その透水性が地盤構成粒子間の空隙に支配されているような多孔質媒体地盤や、割れ目を有しているがその数が非常に多いため割れ目が卓越方向を持たず、巨視的には均質と見なせるような割れ目岩盤等においては、本試験の精度は十分満足いくものであると考える。しかし、その透水性が数本の卓越した割れ目に支配されているような割れ目岩盤においては、水圧観測孔を2~3本程度しか設置しなければ、その卓越した割れ目を注水孔と水圧観測孔が、①ともに切った場合、②どちらかが切った場合、③ともに切らない場合、とどの場合をとっても本試験の精度はやや疑わしいものとなる。この場合は、図-5.20に示したように注水孔軸から等距離Rの位置にある程度多くの水圧観測孔を設置し、得られた水圧分布から卓越した水路方向を決定したうえで、岩盤を多孔質媒体モデルではなく割れ目モデルで表現して透水性の解析を行う必要がある。この際、高レベル放射性廃棄物処分の計画の1つであるストリッパ・プロジェクト (Stripa Project) の中で実施されているクロスホール (Cross hole) 試験における概念が参考となる⁸⁾。

また、割れ目岩盤においては、地下水圧を地点の値として得るのではなく、図-5.21に示すように試験対象層の平均値として求める方が試験精度を向上させることができる。

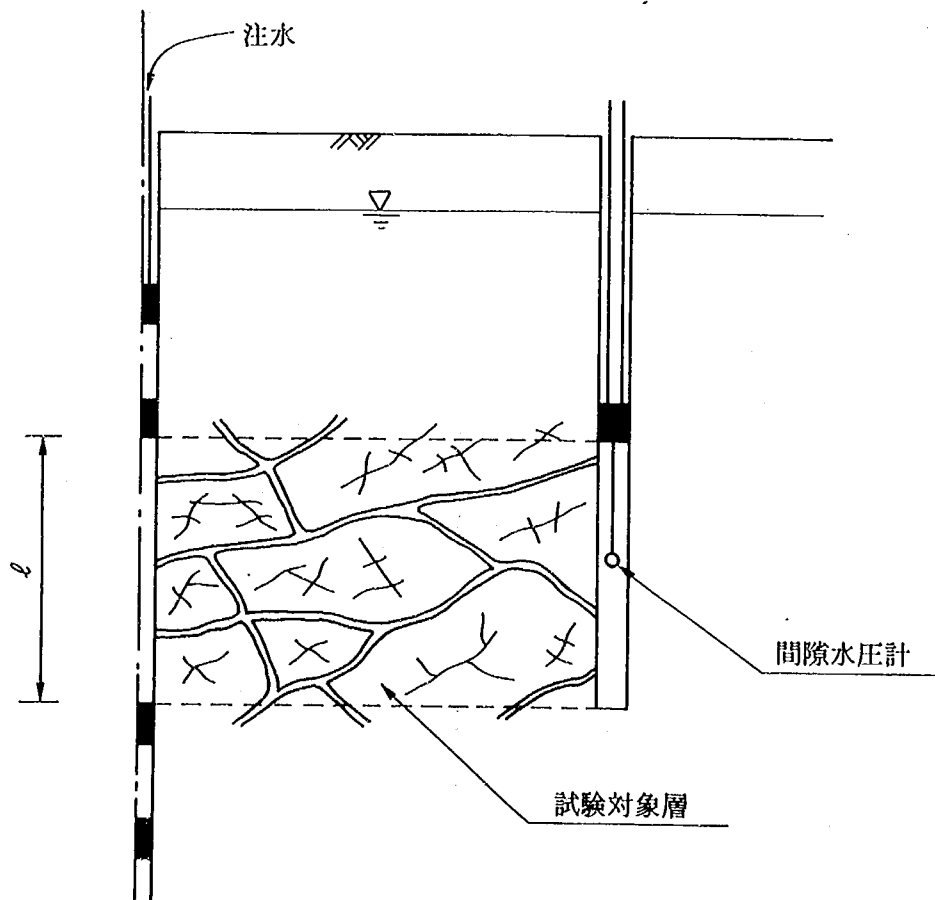


図-5.21 割れ目岩盤における地下水圧の測定方法

6. まとめと今後の課題

本資料の内容をまとめると以下の通りである。

- ① ダム基礎の透水性に水平面内の異方性が存在している場合、その異方透水係数を把握することの重要性を示した。具体的には、ダム基礎の異方透水性とルジオンテスト等の単孔式透水試験から求まる等価等方透水性の差を示すことで対応した。
- ② ダム基礎の水平面内異方透水試験方法（原位置）として、既往の研究も踏まえて以下の3種類を提案した。
 - a) 単孔式流向・流速測定を応用する方法
 - b) ボーリング孔からの注水による方法
 - c) スリットからの注水による方法
- ③ ②で示した3種類の試験方法の実用化の可能性を検討した結果、ダム基礎調査技術としても最も一般的なボーリングにより設けられた孔を利用したb)の試験方法が最も有望であると判断した。
- ④ ボーリング孔からの注水による方法の具体的な試験方法を詰めるとともに、水平面内の異方透水係数の算定式を理論解として求めた。なお、この算定式は、透水性の主軸方向が既知という仮定の基に成り立っている。
- ⑤ 本試験方法を均質な異方性地盤において実施した際の精度が非常に高いことを数値実験により実証した。
- ⑥ 本試験実施に際しての注意点として、a) 水平放射流達成のための対策、b) 透水性の主軸方向も決定するための対策、c) 割れ目岩盤への適用の3点についても記した。

今後は、本試験を種々のダムサイトで実施し、本試験方法の適用性について検討を加えるつもりである。

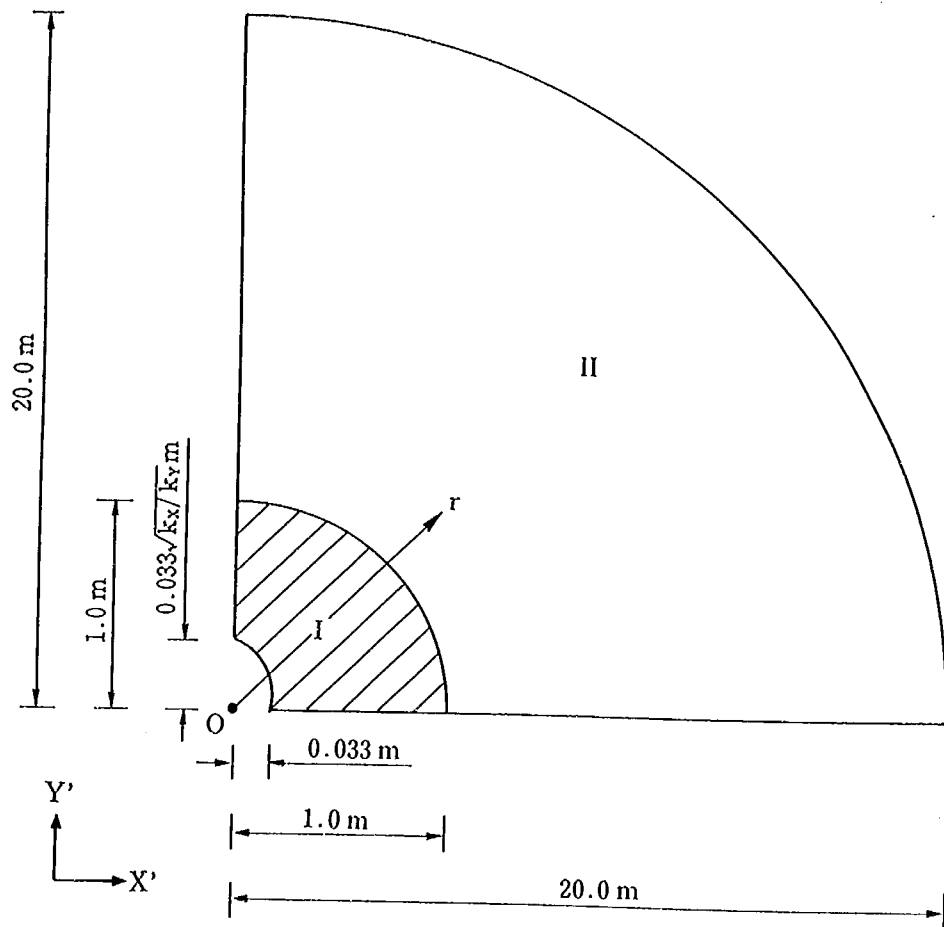
参 考 文 献

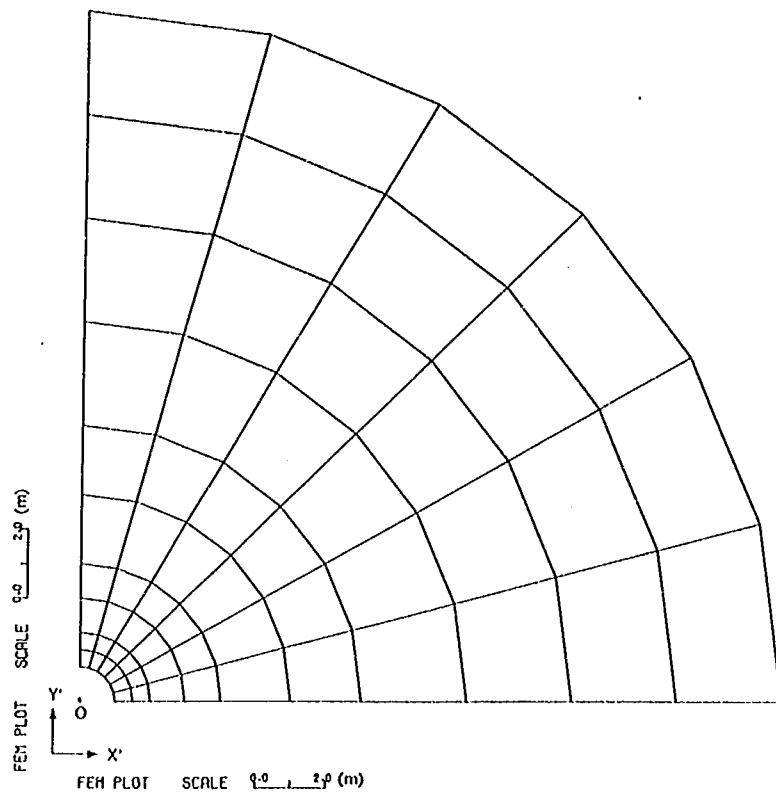
- 1) 建設省河川局開発課監修：ルジオンテスト技術指針・同解説，（財）国土開発技術研究センター，1984年6月。
- 2) 松本徳久・山口嘉一：異方性地盤における原位置透水試験方法に関する研究，建設省土木研究所資料，第2373号，pp. 25～27，1986年5月。
- 3) 山上拓男・植田康宏：非均質異方性地盤の現場透水係数決定に関する理論的検討，第17回土質工学研究発表会発表講演集，pp. 2333～2336，1982年6月。
- 4) 建設省大臣官房技術調査室：建設技術評価書，第83401号，1984年8月。
- 5) 建設省大臣官房技術調査室：建設技術評価書，第83402号，1984年8月。
- 6) 建設省大臣官房技術調査室：建設技術評価書，第83403号，1984年8月。
- 7) Zangar, C. N. : Theory and problems of water percolation, U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monographs No. 8, pp. 69～71, 1953.
- 8) Carlsson, L. & Olsson, T. : Hydrogeological and Hydrogeochemical Investigations in Boreholes-Final Report, STRIPA PROJECT, 85-10, 1985.

参 考 图

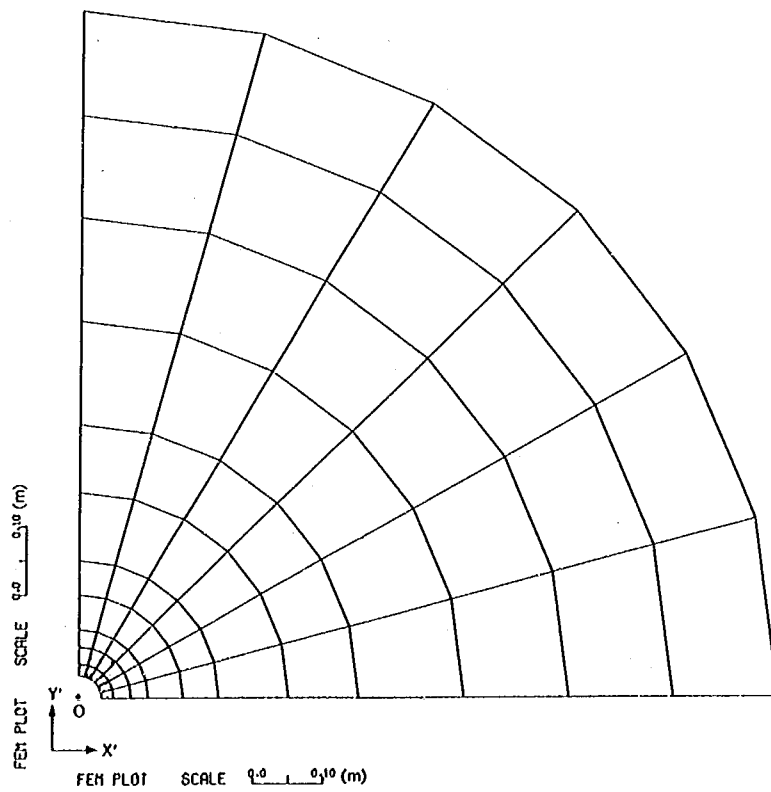
[参考図—1.1～1.5 についての説明]

全ケースの解析モデルに対して、 $1.0\text{ m} \leq r \leq 20.0\text{ m}$ の範囲は全て同じ有限要素分割を行い、 $0.033\text{ m} \leq r \leq 1.0\text{ m}$ の範囲は各モデルごとに異なった有限要素分割を行った。

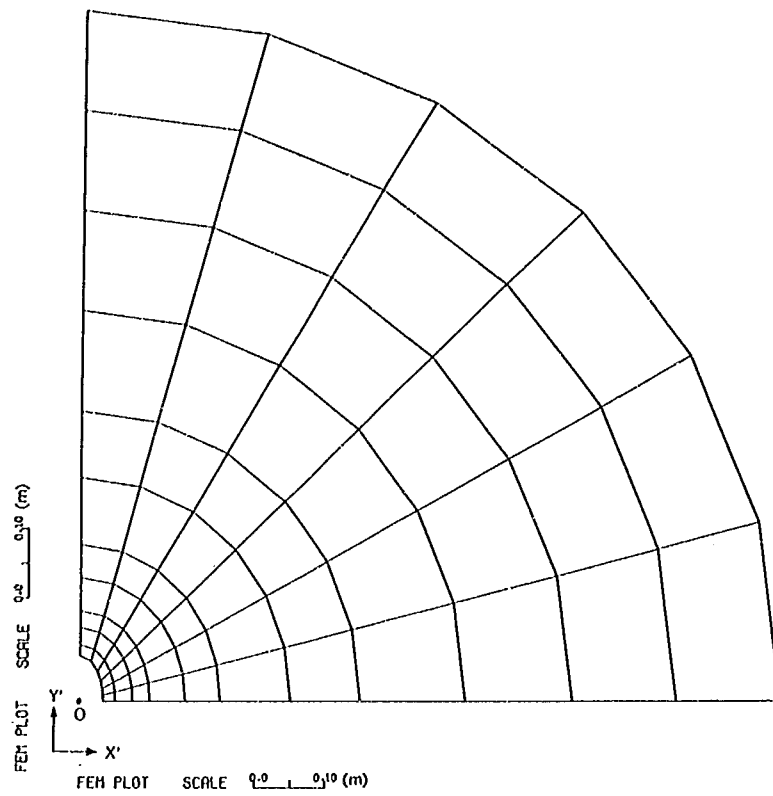




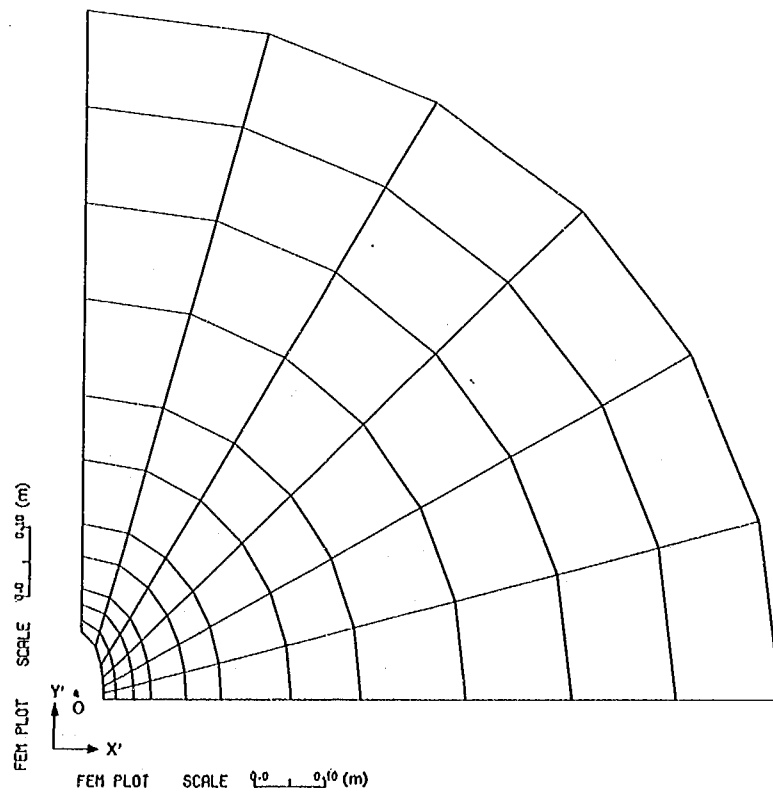
参考図—1.1 有限要素分割図 ($1.0 \text{ m} \leq r \leq 20.0 \text{ m}$, 全ケース共通)



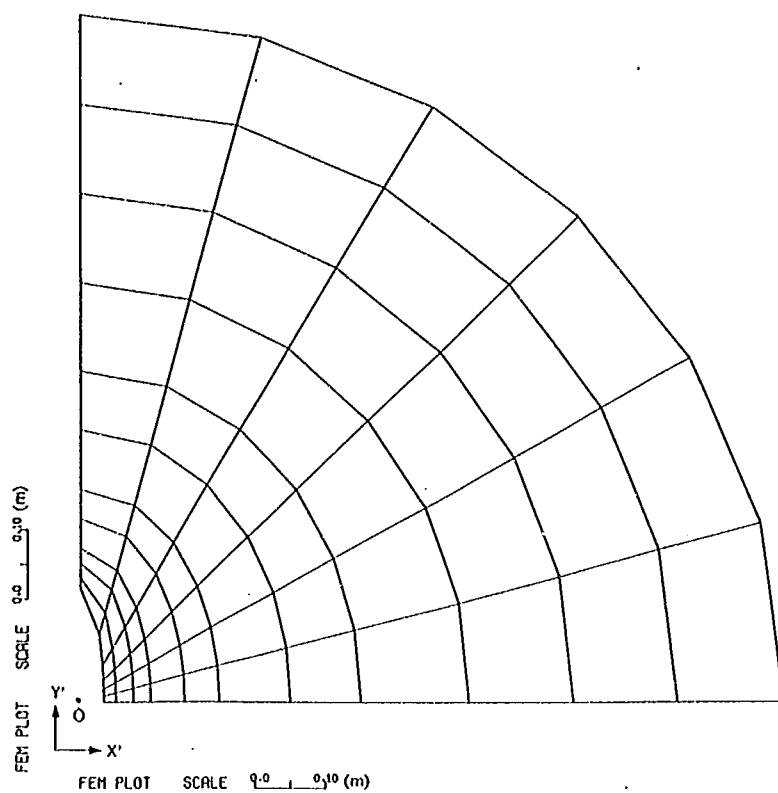
参考図—1.2 有限要素分割図 (Case-1, $\sqrt{k_x/k_y}=1$, $0.033 \text{ m} \leq r \leq 1.0 \text{ m}$)



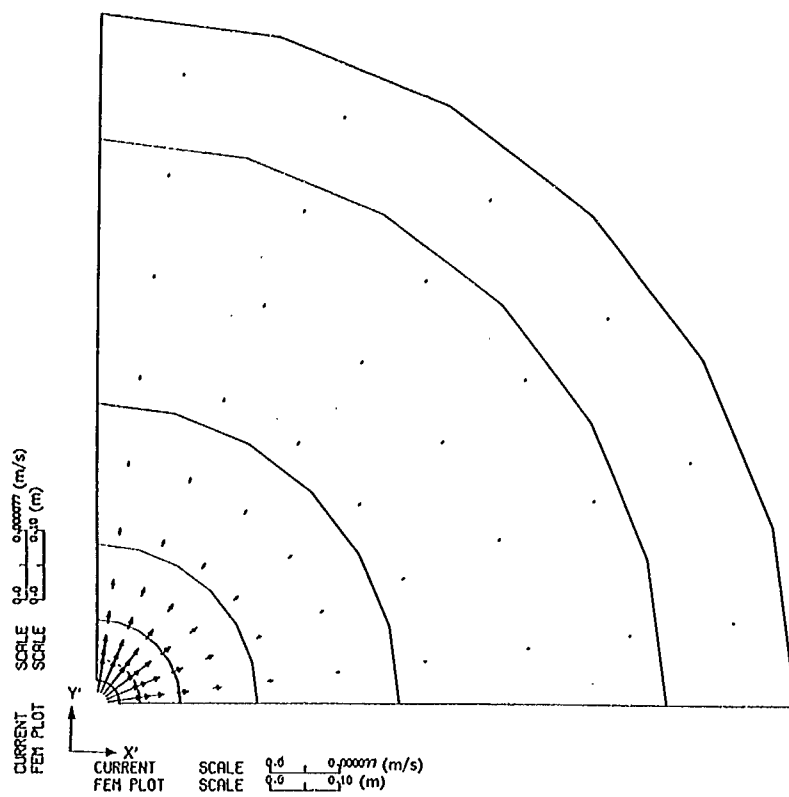
参考图—1.3 有限要素分割图 (Case-2, $\sqrt{k_x/k_y}=2$, $0.033 \text{ m} \leq r \leq 1.0 \text{ m}$)



参考图—1.4 有限要素分割图 (Case-3, $\sqrt{k_x/k_y}=3$, $0.033 \text{ m} \leq r \leq 1.0 \text{ m}$)

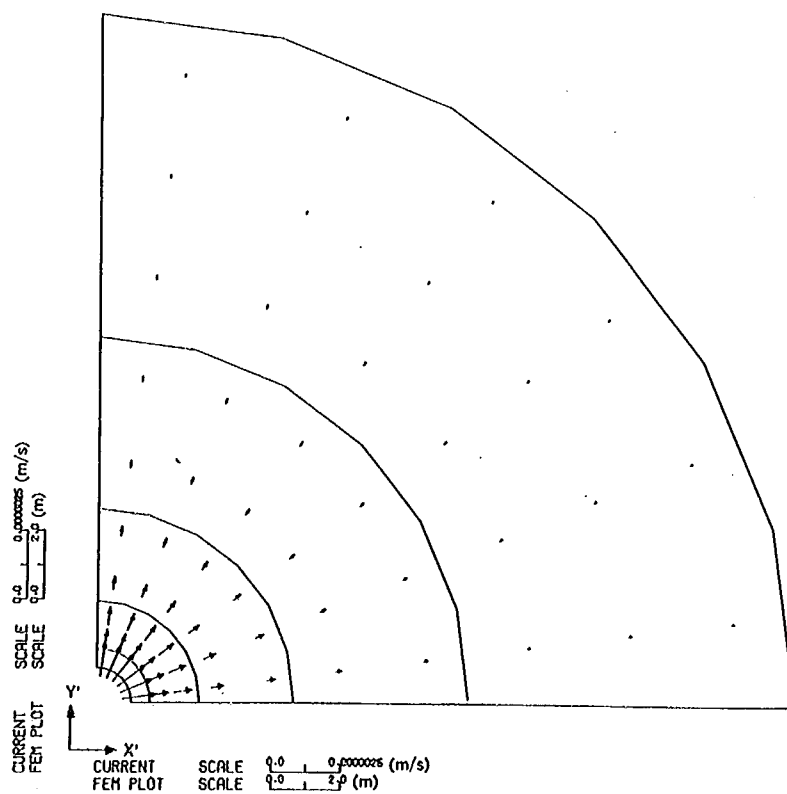


参考图—1.5 有限要素分割图 (Case-4, $\sqrt{k_x/k_y}=5$, $0.033 \text{ m} \leq r \leq 1.0 \text{ m}$)



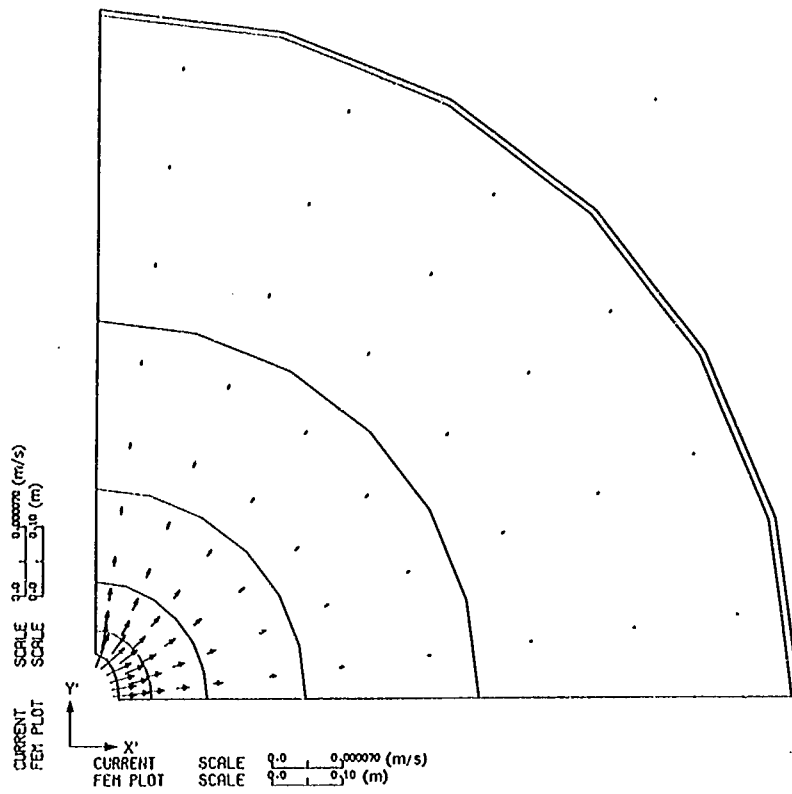
(a) $0.033 \text{ m} \leq r \leq 1.0 \text{ m}$

参考図—2.1 流速ベクトルおよび等ポテンシャル線図 (Case-1, $\sqrt{k_x/k_y}=1$)



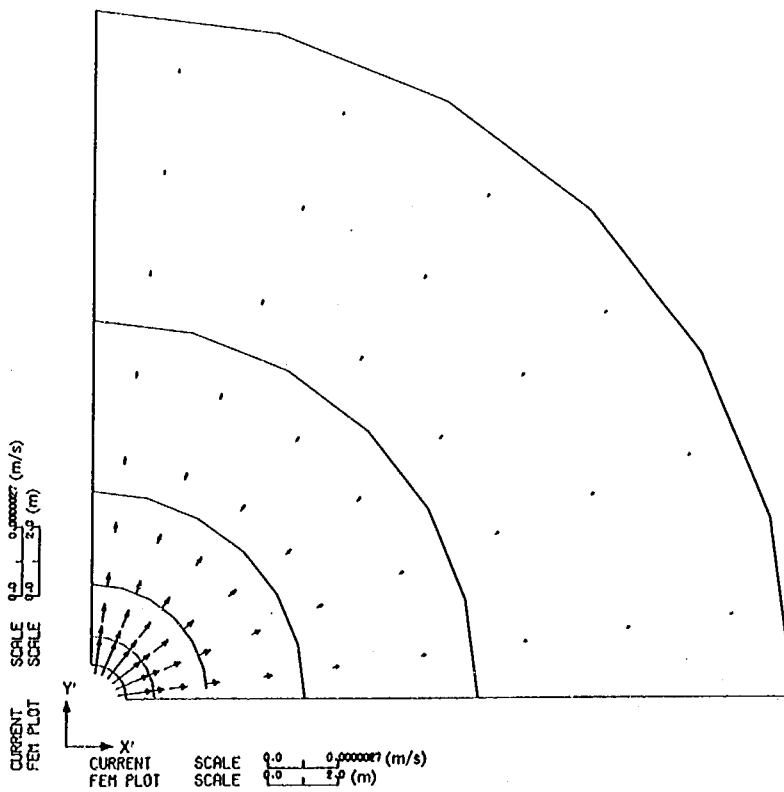
(b) $1.0 \text{ m} \leq r \leq 20.0 \text{ m}$

参考図—2.1 流速ベクトルおよび等ポテンシャル線図 (Case-1, $\sqrt{k_x/k_y}=1$)



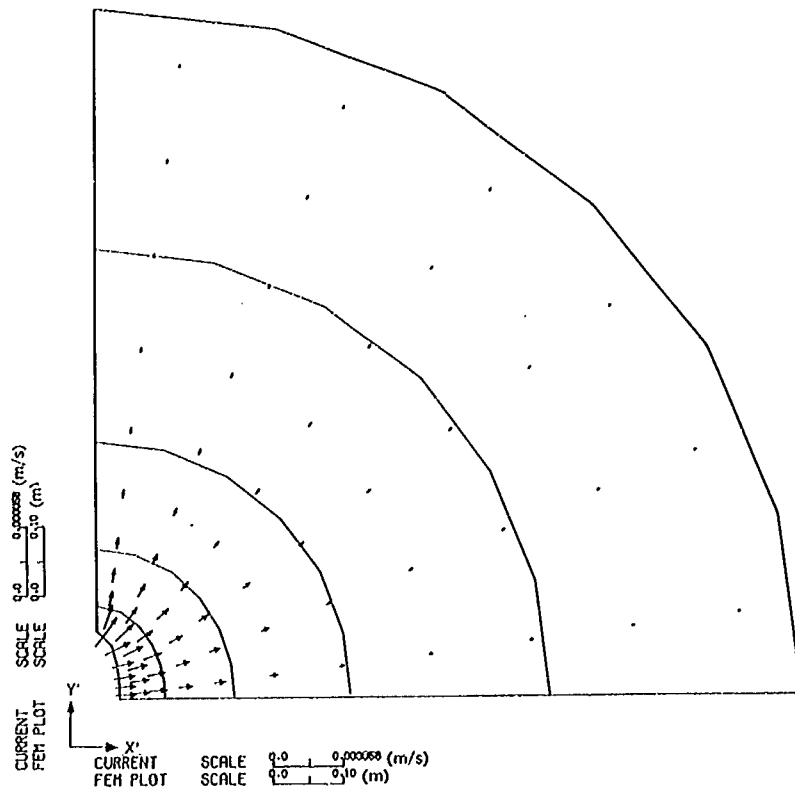
(a) $0.033 \text{ m} \leq r \leq 1.0 \text{ m}$

参考図-2.2 流速ベクトルおよび等ポテンシャル線図 (Case-2, $\sqrt{k_x/k_y} = 2$)



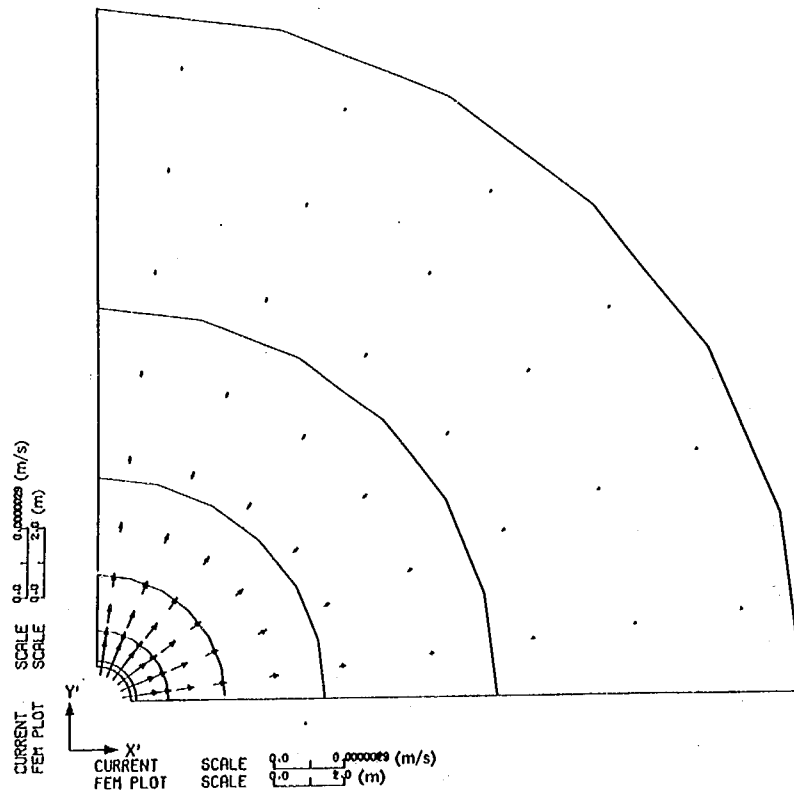
(b) $1.0 \text{ m} \leq r \leq 20.0 \text{ m}$

参考図-2.2 流速ベクトルおよび等ポテンシャル線図 (Case-2, $\sqrt{k_x/k_y} = 2$)



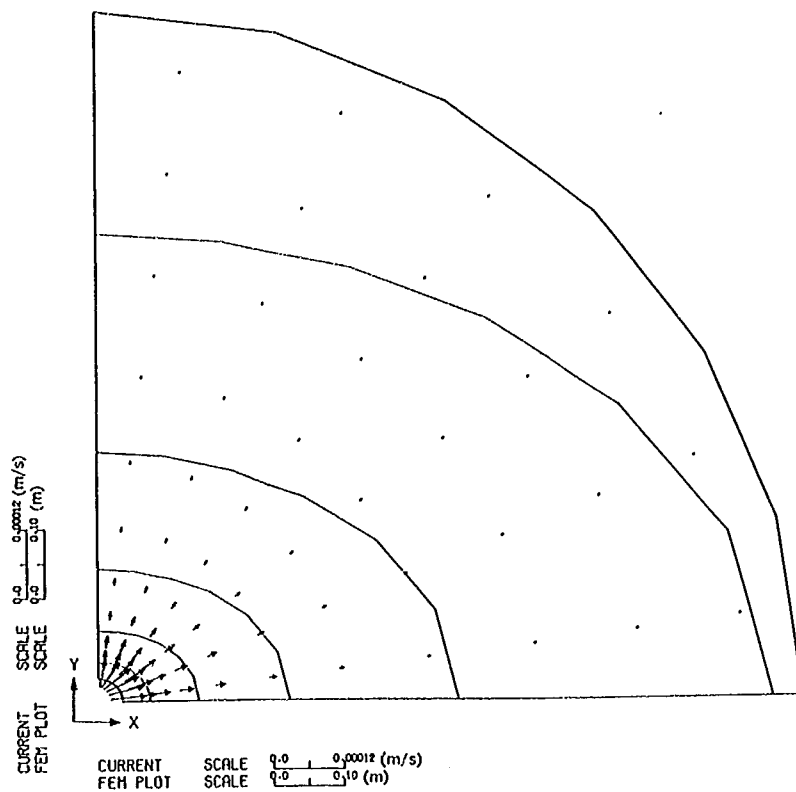
(a) $0.033 \text{ m} \leq r \leq 1.0 \text{ m}$

参考図-2.3 流速ベクトルおよび等ポテンシャル線図 (Case-3, $\sqrt{k_x/k_y}=3$)



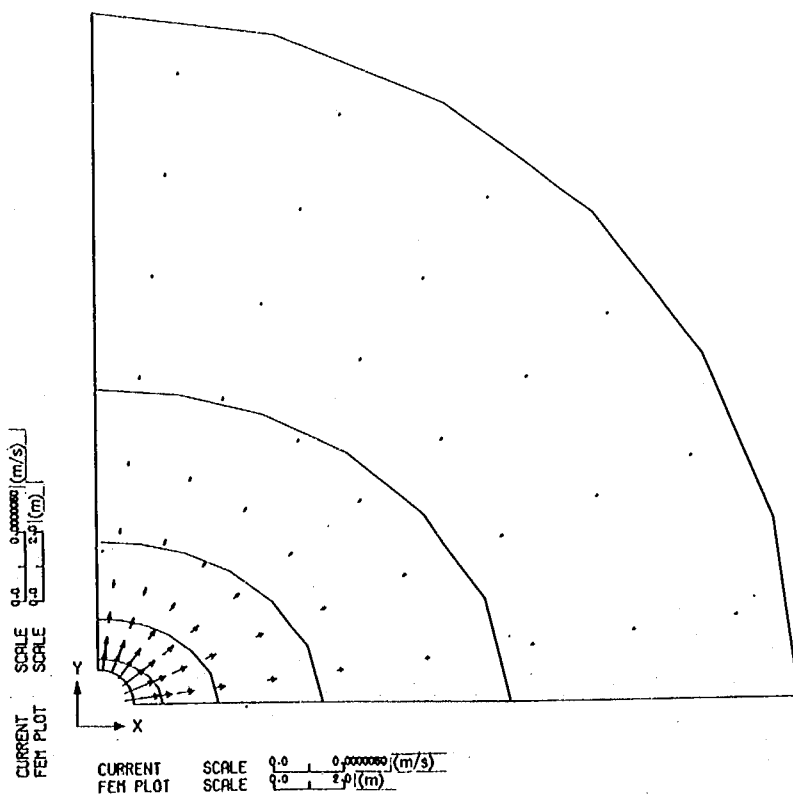
(b) $1.0 \text{ m} \leq r \leq 20.0 \text{ m}$

参考図-2.3 流速ベクトルおよび等ポテンシャル線図 (Case-3, $\sqrt{k_x/k_y}=3$)



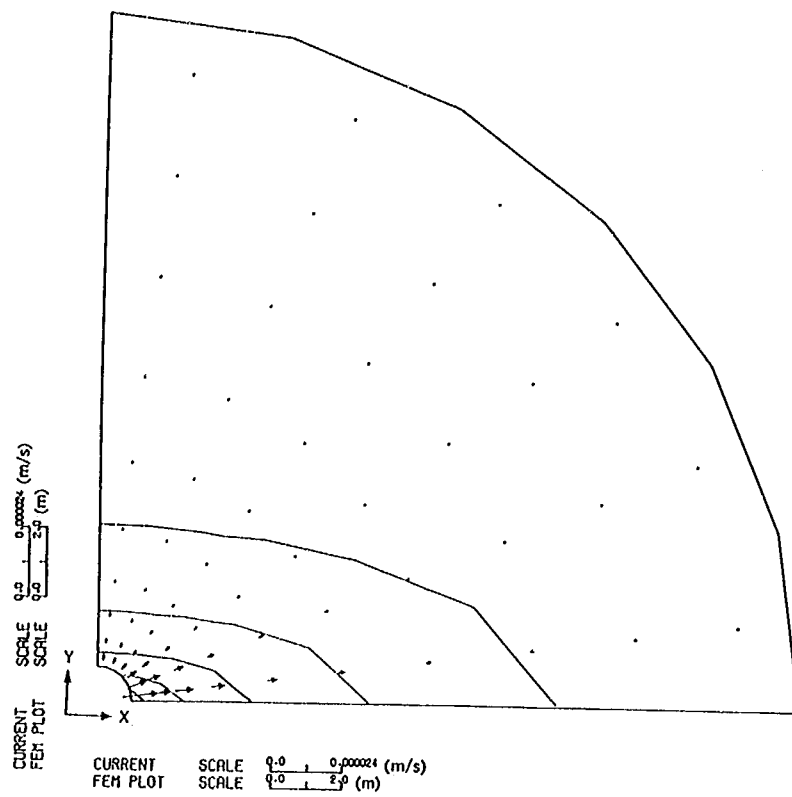
(a) $0.033 \text{ m} \leq r \leq 1.0 \text{ m}$

参考図-3.1 流速ベクトルおよび等ポテンシャル線図 (Case-II, $k_{x0}/k_{y0}=2$)



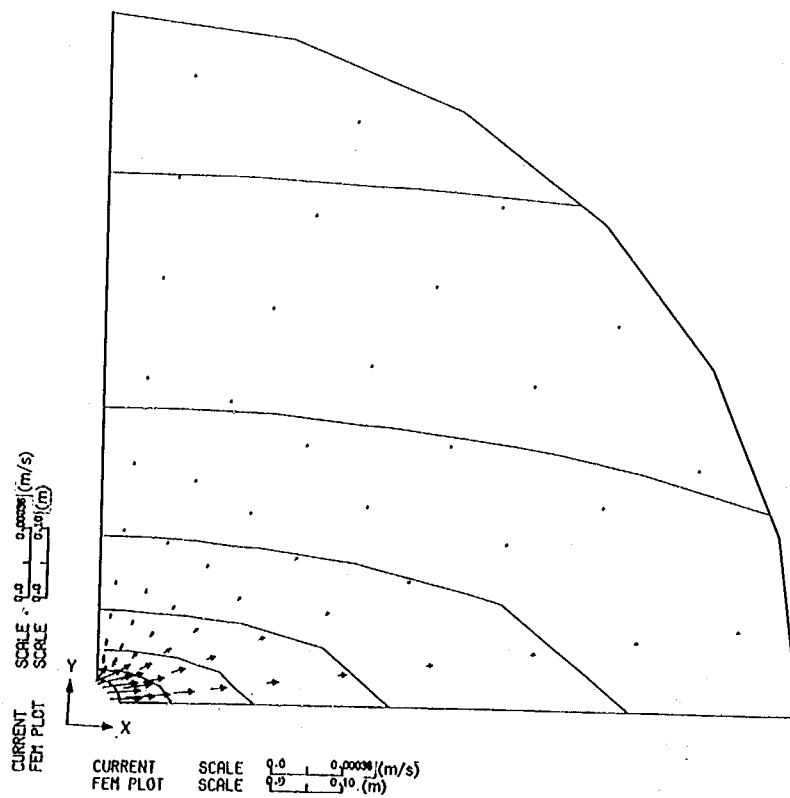
(b) $1.0 \text{ m} \leq r \leq 20.0 \text{ m}$

参考図-3.1 流速ベクトルおよび等ポテンシャル線図 (Case-II, $k_{x0}/k_{y0}=2$)



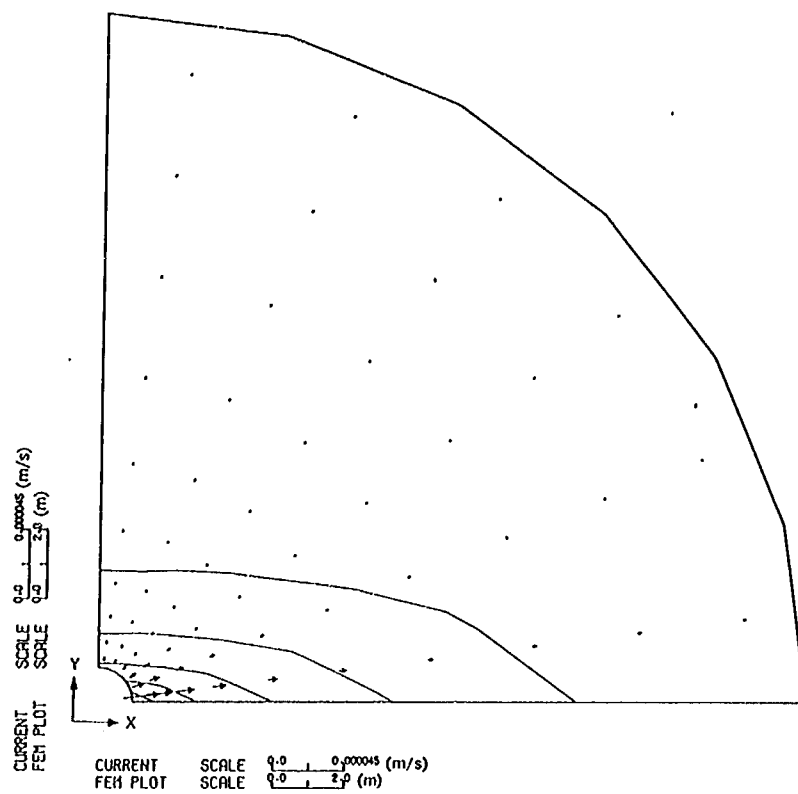
(a) $0.033 \text{ m} \leq r \leq 1.0 \text{ m}$

参考図-3.2 流速ベクトルおよび等ポテンシャル線図 (Case-IV, $k_{x0}/k_{y0}=10$)



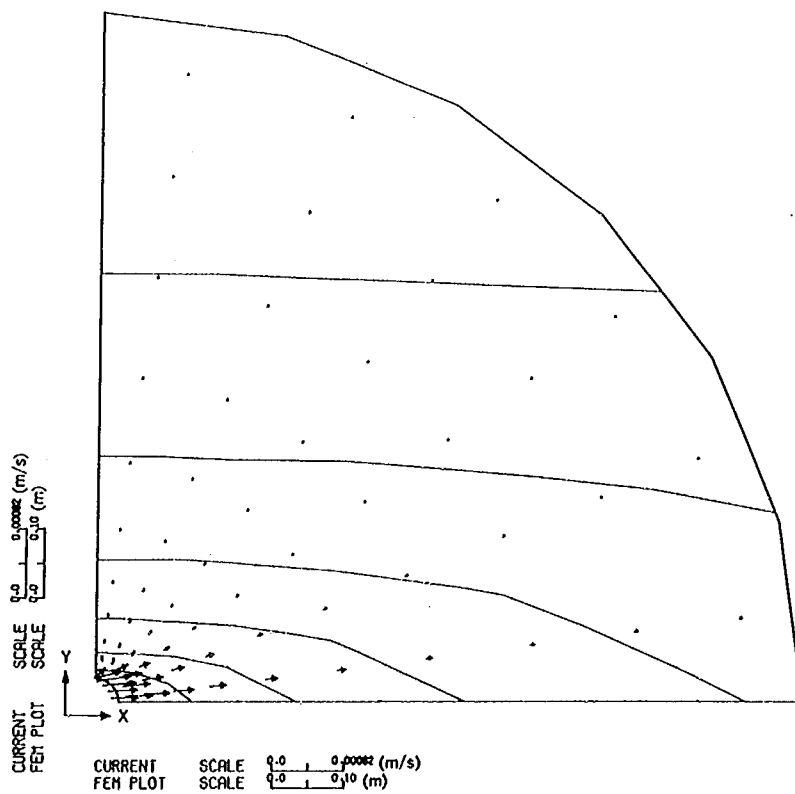
(b) $1.0 \text{ m} \leq r \leq 20.0 \text{ m}$

参考図-3.2 流速ベクトルおよび等ポテンシャル線図 (Case-IV, $k_{x0}/k_{y0}=10$)



(a) $0.033 \text{ m} \leq r \leq 1.0 \text{ m}$

参考図—3.3 流速ベクトルおよび等ポテンシャル線図 (Case-V, $k_{x0}/k_{y0}=20$)



(b) $1.0 \text{ m} \leq r \leq 20.0 \text{ m}$

参考図—3.3 流速ベクトルおよび等ポテンシャル線図 (Case-V, $k_{x0}/k_{y0}=20$)

水平面内に異方透水性を有する
地盤に対する透水試験

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2636号
昭和63年7月(1988)
ダム部フィルダム研究室
松本徳久・山口嘉一

要 旨

本資料の内容をまとめると以下の通りである。

- ① ダム基礎の透水性に水平面内の異方性が存在している場合、その異方透水係数を把握することの重要性を定量的に示した。
- ② 水平面内異方透水試験方法(原位置)として、既往の研究も踏まえて3種類提案した。
- ③ ②で提案した3種類の試験方法のうち最も実用化の可能性が高い方法と判定したボーリング孔を利用した方法について、具体的な方法を示すとともに、その精度が高いことを数値実験により実証した。
- ④ 本試験実施に際しての注意点として、a) 水平放射流達成のための対策、b) 透水性の主軸方向も決定するための対策、c) 割れ目岩盤への適用の3点についても記した。

キーワード：ダム基礎、原位置透水試験、異方透水性、ダルシー則

郵便はがき

3 0 5 - □ □

四十円切手
をはって下
さい。

建設省土木研究所

ダム部フィルダム研究室御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. 17

No. 17

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第 2636 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

土木研究所資料第 2636 号

○