

非定常データを利用した
単孔透水試験の新しい解析手法の開発

伊藤 一 誠

Development of New Analysis Methods
for Single Hole Hydraulic Tests with Transient Data

Kazumasa ITOH

Abstract

In hydrogeological investigation of rock mass for dam foundation or underground cavern, single hole injection test is widely utilized in order to obtain hydraulic characteristics of rock mass. However, in conventional analysis methods for injection test, steady state flow condition is assumed to estimate permeability coefficient, while, in actual injection test, flow condition can not reach steady state in short time. And, some parameters, which are assumed in conventional analysis, such as initial hydraulic pressure, are unknown.

In order to estimate hydraulic properties precisely, the author has developed two kinds of analysis method utilizing transient pressure and flow rate data obtained in injection test. One is variable rate analysis, in which permeability coefficient of rock mass and initial hydraulic pressure around injection section would be analyzed with nonlinear optimization. And the other is finite reservoir analysis, in which permeability coefficient and radius of independent reservoir such as single fracture or sand layer would be calculated with same manner.

In this paper, numerical experiment is applied to these analysis methods. In numerical experiment, results of radial three dimensional numerical simulation with various permeability coefficient, depth of test section, initial pressure, and radius of reservoir are analyzed with these two analyses. Through numerical experiments, following results have been shown.

- 1) With variable rate analysis, calculated permeability coefficient and initial pressure showed good accordance with these properties of models, with permeability coefficient between 10^{-2} cm/s and 10^{-5} cm/s.
- 2) If the depth of injection section is shallower than the length of injection section, correct parameters can not be calculated by variable rate analysis due to the effect of water table.
- 3) For the analysis in finite reservoir, permeability coefficient and radius of reservoir can be analyzed correctly in models with permeability coefficient between 10^{-5} cm/s and 10^{-2} cm/s and radius between 5m and 50m.

In application of these methods to actual hydraulic test, utilization of analysis method in right case according to geological condition and insight of obtained data would be mostly important. Appropriate utilization of these analyses would present useful information for three dimensional numerical simulation or inversion in crosshole hydraulic test.

1 はじめに

ダムサイトや地下空間建設地域において、岩盤の水理特性を把握する目的で、ルジオン試験などの注水試験や揚水試験、孔間透水試験などのさまざまな透水試験が実施されている。試験の結果得られる透水係数などの物性値は、地下空間における漏水量予測などの数値シミュレーションに用いられている。最近、世界的に見て、岩盤中の地下水流動あるいは物質移行の予測を精緻に行う解析プログラムが開発されている。しかしながら、それらのプログラムの基本的な入力データとなる水理物性を正確に、かつ、効率良く求める方法は必ずしも確立されていない。

一般に、ダムサイト、地下空間などで利用されている透水試験に関しては、定常状態における水圧および流量を用いることが多い。この場合は、得られるデータとしては圧力および流量のみであり、複雑な解析を行わずに透水係数を求めることが可能である。しかしながら、実際の透水試験において、実用的な測定時間内に定常状態が得られているかということについては、特に、不飽和領域の試験においては問題が残る。

一方、岩盤水理調査における試験装置は、現在までにいろいろな改良が加えられ、試験時の原位置における間隙水圧あるいは注水・揚水の流量を経時的に計測あるいは制御することが可能となってきた。

筆者は、現在までに複数孔を利用し、その内の1つの試験孔への注水、停止による周辺の間隙水圧の経時変化から三次元的な水理特性分布を求めるパルステストについて発表を行ってきた (Kojima, et al., 1990: 伊藤ほか, 1990)。

本論文においては、パルステストと同様に、非定常データを用いた新しい単孔透水試験解析手法について、その理論的背景と数値実験による検証結果を示す。

2 非定常単孔透水試験解析手法の検討

2.1 非定常単孔透水試験の基本式

注水式の透水試験において、注水孔を中心とした水平放射状流を仮定すると、2次元円筒座標形における地下水流動の基本方程式は、以下のように表される。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{K}{\mu B} r \frac{\partial P}{\partial r} \right) + q = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right) \quad (1)$$

ここで、 μ : 水の静粘性係数

B : 容積係数

r : 中心からの半径

K : 半径方向の浸透率

P : 圧力

q : 流量

ϕ : 間隙率

t : 時間

ただし、浸透率 K は、地盤自体の持つ流体の浸透性を表す物性値であり、流体の種類には依存しない量である。ここで、流体を水とした場合の透水係数 k との関係は、以下ようになる。

$$K = \frac{P}{\mu} k \quad (2)$$

また、容積係数 B は、基準状態 (大気圧状態) と圧力下における同一質量の流体の体積比であり、流体の圧縮性を示す無次元量である。

図-1に模式的に示すように、飽和帯および不飽和帯において、圧力および流量が時間とともに変化する場合の透水試験の解析式 (変圧・変流量解析) は、無次元圧力および無次元時間を導入し、時間で重ね合わせることによって、次式のように表される。

$$P_i - P_{wfN} = \frac{B\mu}{2\pi Kh} \left[\sum_{j=1}^N (q_j - q_{j-1}) \times \{ P_{Dj-1}((t_N - t_{j-1})_D) \} \right] \quad (3)$$

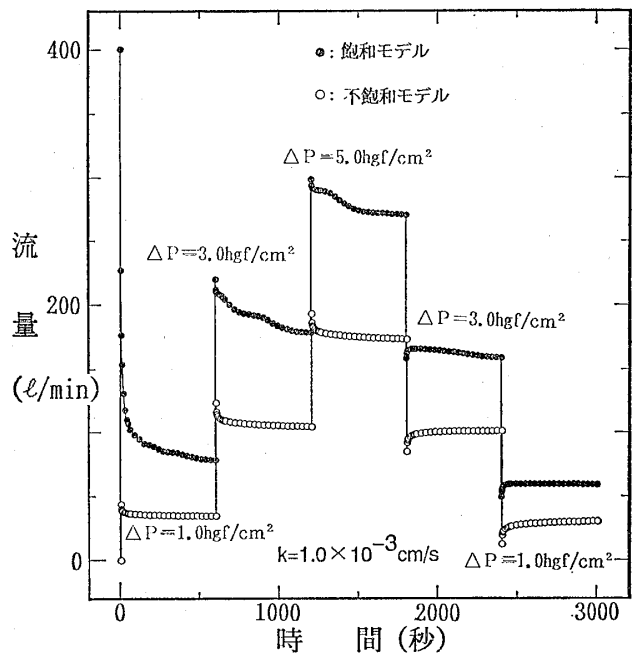


図-1 透水試験における非定常圧力-流量の挙動図

Fig. 1 An example of transient pressure and flow rate behaviour in injection well test

ここで、無次元時間 t_D は、つぎのように定義される。

$$t_D = \frac{K(t_N - t_{j-1})}{\phi \mu c_t r_w^2} \quad (4)$$

また、無次元圧力 P_D は、つぎのように定義される。

$$P_{Dj-1}((t_N - t_{j-1})_D) = \frac{1}{2}(\ln(t_N - t_{j-1}) + \ln \frac{K}{\phi \mu c_t r_w^2} + 0.80907) \quad (5)$$

ここで、 P_i : 初期間隙水圧

P_{wfN} : 試験区間圧力

q_j : j 時間ステップにおける流量

c_t : 岩盤と水の合算圧縮率

s : スキンファクター

r_w : 井戸半径

h : 透水層厚

したがって、(4)式および(5)式を(3)式に代入し、両辺を q_N で割ることによって、非定常単孔透水試験の基本式として、つぎの式が得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{P_i - P_{wfN}}{q_N} \\ &= \frac{B\mu}{2\pi Kh} \left[\sum_{j=1}^N \frac{1}{2} (q_j - q_{j-1}) \ln(t_N - t_{j-1}) \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{2} q_N \left(\ln \frac{K}{\phi \mu c_t r_w^2} + 0.80907 \right) + q_{NS} \right] \quad (6) \end{aligned}$$

既往の変圧・変流量解析においては、非定常透水試験で得られた時間-圧力-流量データから、(6)式右辺の \sum 項を横軸にとり、左辺の項を縦軸としてプロットされた直線の傾きから、透水量係数 (Kh) を求めるといった方法が用いられている。

2・2 改良型変圧・変流量解析

既往の変圧・変流量解析における未知量としては、浸透率 (透水係数) のみであると考え、試験実施前の間隙水圧 (初期間隙水圧) は既知量と考えている。一般に、透水試験においては、ボーリング孔の孔内水位から初期間隙水圧を推定している。しかしながら、実際の地盤においては、被圧帯水層の存在などのような地質の状況によって、単純に孔内水位から間隙水圧を求めることは困難な場合が多い。また、特に低透水性地盤において、孔内で正確に初期間隙水圧を求めるためには、長期の測定が必要となる。

したがって、2・1節に示した変圧・変流量解析を改

良し、透水係数および初期間隙水圧の両者を未知量として、同時に解析する手法についての検討を行った。

初期間隙水圧を未知量とすると、(6)式の両辺を直接求めることが不可能となる。そこで、試験孔周辺の地下水流動が、(1)式で示した水平放射状流に従うと仮定すれば、前節に示したように、(6)式の右辺の \sum 項と左辺の項は直接関係となる。(6)式によれば、浸透率 K は、 \sum 項および左辺には存在しないために、上記の直線性には影響しない。一方、初期間隙水圧 P_i は、左辺に存在しているので、これが正しい値でない場合には、直線性が損なわれる。したがって、(6)式の左辺と \sum 項の間の相関係数を最大とするような初期間隙水圧が求められれば、その値が実際の値を代表するものと考えられる。ここで、相関係数は -1 から 1 の間の値をとる。非線形最小2乗法では、目的関数を最小化する必要があるため、ここでは、未知のパラメータの取りうる範囲 (≥ 0) において連続となる目的関数を、次式のように選択した。

$$J = \frac{1}{1 + R^2} \quad (7)$$

そして、Newton法によって、この目的関数を最小化するように、初期間隙水圧を決定する方法を採用した。

ここで、目的関数を最小にする際に、未知パラメータとしての初期間隙水圧は常に正の値となるため、直接の未知量としては初期間隙水圧の対数として、初期間隙水圧が負とならないようにしている。

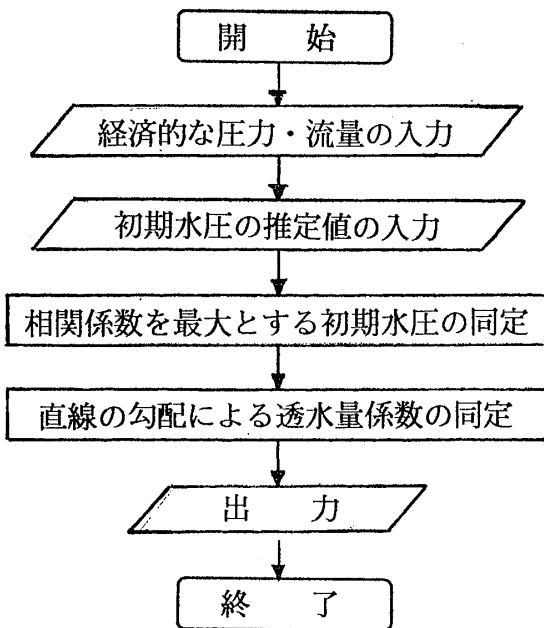
以上の解析によって、最適な初期間隙水圧 p_i を決定した後に、(6)式の左辺と \sum 項とのプロットを行い、その傾きから透水係数を決定する。

ここに提案する改良型変圧・変流量解析の流れは、図-2に示すとおりである。

2・3 有限領域における改良型変圧・変流量解析

2・2節に示した改良型変圧・変流量解析は、境界が無限遠方に存在するという仮定のもとに展開されたものである。しかしながら、実際の地盤においては、たとえば、独立した亀裂や土丹中の挟在砂層などのような限られた領域を持つ透水ゾーンが存在する場合も多い。このような場合に、建屋基礎などの掘削の影響を予測する数値解析のモデル作成を行う上では、透水ゾーンの空間的な広がりおよび透水性を把握することが必要となる。

そこで、定流量注水試験を対象として、上記のような有限な領域における透水試験の非定常データを用い、透水ゾーンの広がりおよび透水性を同時に解析する手法の開発のために、次式に示す関係を導入した。



図一 改良型変圧・変流量解析の流れ
Fig. 2 Flow chart of modified variable rate analysis

$$\frac{P_i - P_{wfN}}{q_N} = \frac{B\mu}{2\pi Kh} P_D(t_D) \quad (8)$$

この解析における無次元圧力 P_D は、無限媒体の場合と異なり、次式のように定義される。

$$P_D = \frac{1}{2} \left\{ Ei\left(-\frac{1}{4t_D}\right) - Ei\left(-\frac{1}{4t_{De}}\right) - 4t_{De} \exp\left(-\frac{1}{4t_{De}}\right) \right\} \quad (9)$$

ここで、 t_D : 試験孔径に基づく無次元時間

t_{De} : 透水層連続性に基づく無次元時間

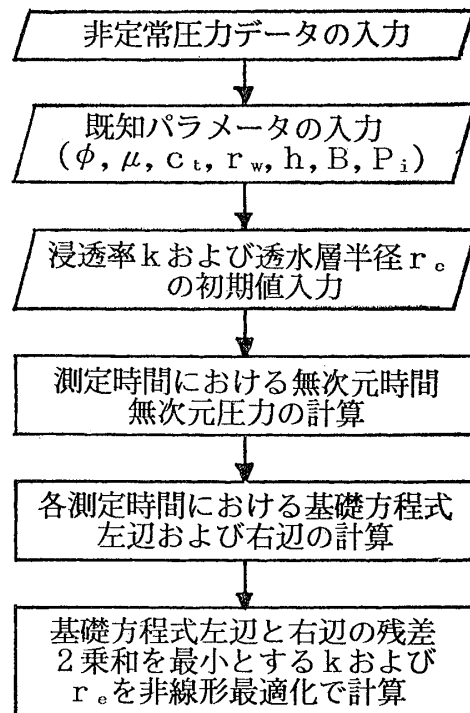
また、(9)式中の $Ei(-x)$ は、指数積分関数である。ただし、指数積分関数は、つぎの式で近似され、近似誤差は1%以内である。

$$Ei(-x) = -\int \frac{e^{-u}}{u} du \doteq \ln(x) + 0.5772 \quad (10)$$

(9)式中の無次元時間のうち、試験孔径に基づく無次元時間 t_D は、(3)式と同様に定義されるが、連続性に基づく無次元時間 t_{De} は、次式のように定義される。

$$t_{De} = \frac{Kt}{\phi\mu c_t r_w^2} = t_D \frac{r_w^2}{r_e^2} \quad (11)$$

したがって、(3)式、(9)式および(11)式を(8)式に代入することによって、円形有限領域における圧力挙動の基礎式を得ることができる。



図一 有限領域解析の流れ
Fig. 3 Flow chart of finite reservoir analysis

従来、このような有限領域における透水試験解析を行う際には、透水層半径を既知量と仮定して、タイプカーブフィッティングなどの方法によって浸透率 K を算定しているが、ここでは、非線形最小2乗法を用い、浸透率と透水層半径を同時に算出する解析手法を提案する。

解析の手順は図一に示すとおりである。領域の境界の影響が注入の圧力挙動に現れている場合、すなわち、注入によって圧力が上昇している段階においては、圧力挙動は以上に示した基礎式に従う。また、基礎式である(8)式の左辺および右辺は、透水係数および透水層半径の初期値を与えることによって、各計測時間ステップにおいて独立に計算することができる。ここでは正しい透水係数および透水層半径が得られれば、(8)式が成立することから、(8)式の左辺と右辺の残差2乗和を最小にするように、透水係数および透水層半径を同時に同定した。非線形最小2乗法としては、前節の手法と同様に、Newton法を用いている。

3 数値実験による検証

ここでは、前章で提案した解析手法の検証を目的として、数値解析結果を測定データとみなして数値実験を行い、その結果の評価を行った。

3・1 改良型変圧・変流量解析の適用性

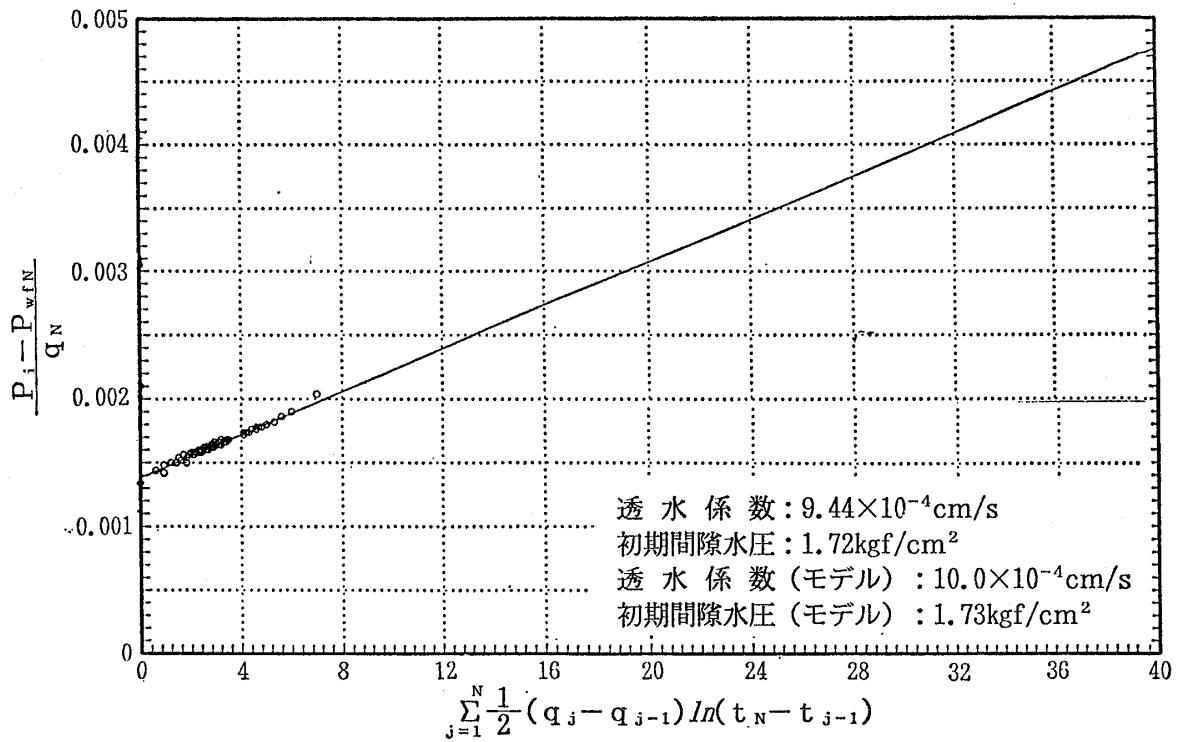


図-4 改良型変圧・変流量解析の解析結果例
 Fig. 4 A result of modified variable rate analysis

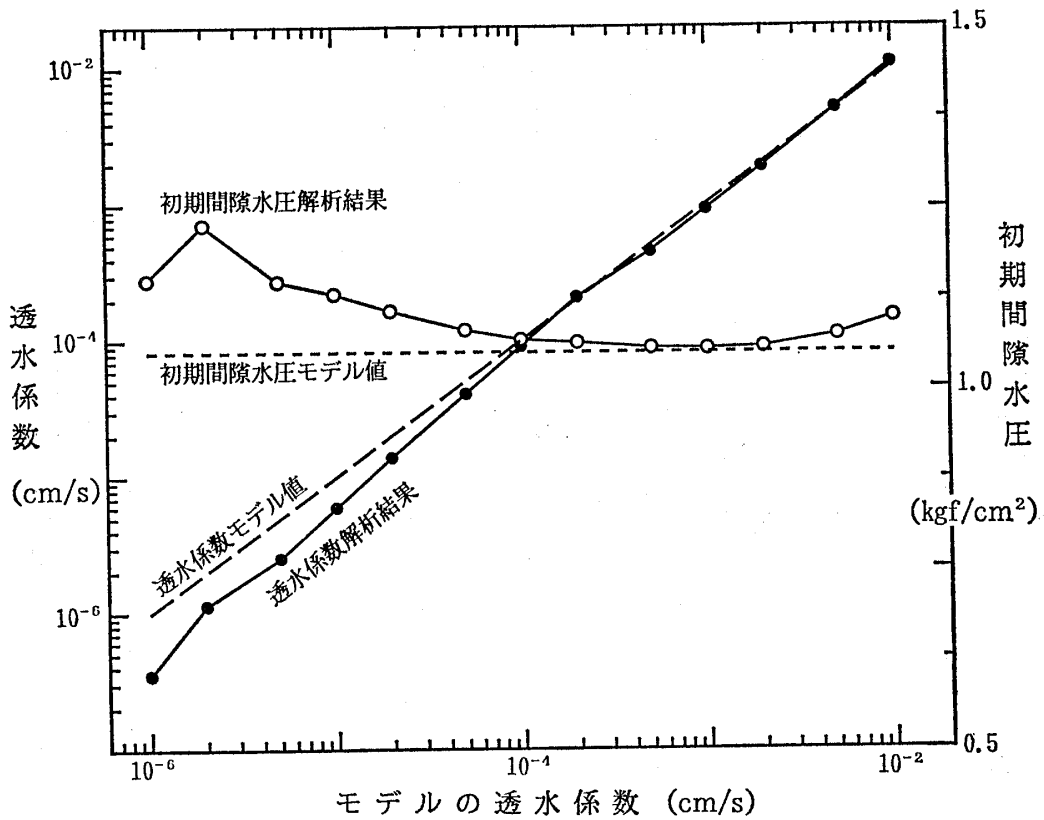


図-5 改良型変圧・変流量解析の解析結果への透水係数の影響
 Fig. 5 Effect of permeability coefficient to modified variable rate analysis

前章で提案した改良型変圧・変流量解析手法の適用性を検討するために、円筒座標系における3次元浸透流解析結果を模擬的に測定データとし、そのデータに対して解析を行った。ここでは、一般的なルジオンテストと同様に、注入圧力を段階的に上昇・下降させたデータを解析に利用している。

改良型変圧・変流量解析による解析結果の一例を、図-4に示す。この解析の基となるモデルは、注水区間長5m、初期間隙水圧および透水係数は、図中に示すように、それぞれ、 1.73kgf/cm^2 および $1.0 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ としている。また、ここでは透水層厚は既知と仮定し、透水量係数から透水係数への換算を行っている。

解析の結果は、初期間隙水圧が 1.72kgf/cm^2 、透水係数が $9.44 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ となり、この例においては、未知パラメータを工学的に有意な誤差範囲内で再現していることが示された。

つぎに、この解析手法の適用可能範囲を検討するために、初期間隙水圧（注入深度）および透水係数を変化させたモデルにおける軸対称3次元2相浸透流解析結果を測定データとして、改良型変圧・変流量解析を行った。

解析モデルは、帯水層厚20mとした。透水係数を変化させる解析では、注入深度を地下水面下8~13mの深度（注入区間の中心深度：10.5m）に設定し、注入深度を

変化させる解析では、透水係数を $1.0 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ に固定した。また、自由地下水面を想定し、地下水面上に大気層を設け、地下水面が自由に変化するような解析を実施している。

図-5に、注入深度を固定し、透水係数を変化させた場合の解析結果を示す。この結果によれば、透水係数が 10^{-5}cm/s オーダーから 10^{-2}cm/s までの範囲で、透水係数、初期間隙水圧ともに有意な精度で解析されていることが示されている。一方、透水係数が 10^{-6}cm/s オーダーでは、解析精度が大きく低下している。この解析手法が有効である条件としては、注水によって帯水層全体で、水平放射状流が発生することが必要である。低透水性地盤において、解析精度が低下するのは、帯水層の上下方向全体に圧力が伝播しないで、水平放射状流が達成されていないためであると考えられる。

図-6に、透水係数を固定し、注入区間の深度を変化させた場合の解析結果を示す。この結果によれば、注入区間中心部の深度が7.5m（注入区間：5m~10m）以深では、透水係数および初期間隙水圧は、十分な精度で解析されているが、それよりも浅くなると、初期間隙水圧の解析結果が、しだいに、真値から離れるようになる傾向が見られる。これは、自由地下水面が注水によって上昇する影響と考えられる。また、注入区間が深部に近

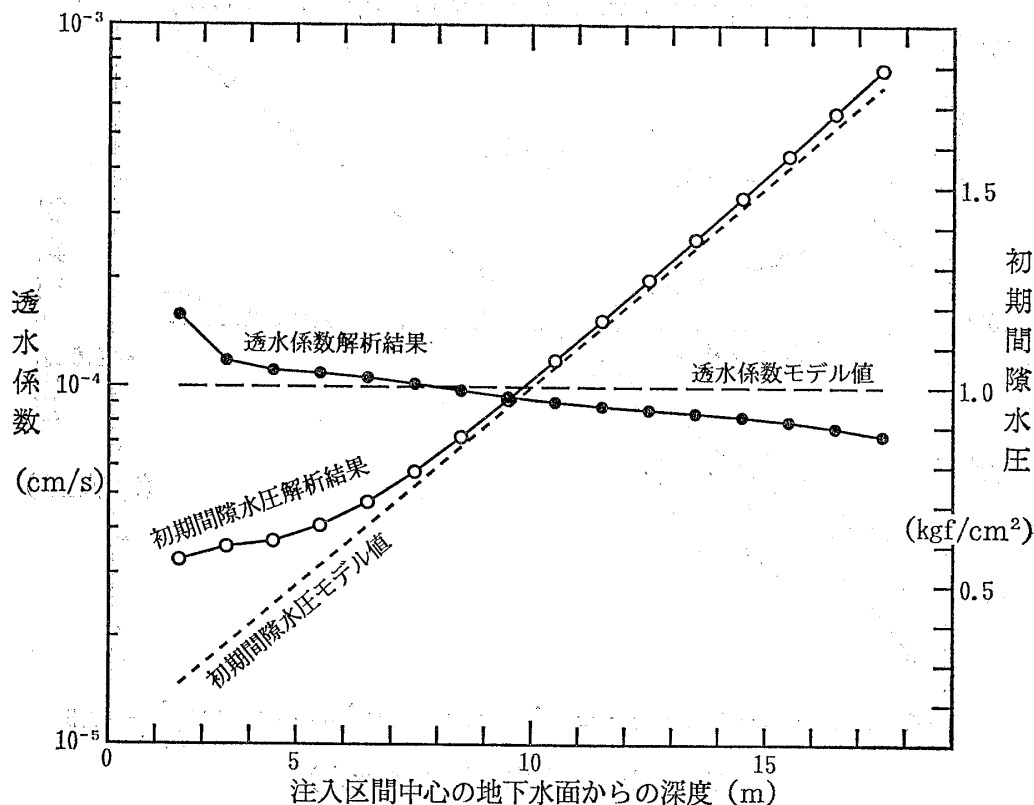


図-6 改良型変圧・変流量解析の解析結果への試験深度の影響

Fig. 6 Effect of test section depth to modified variable rate analysis

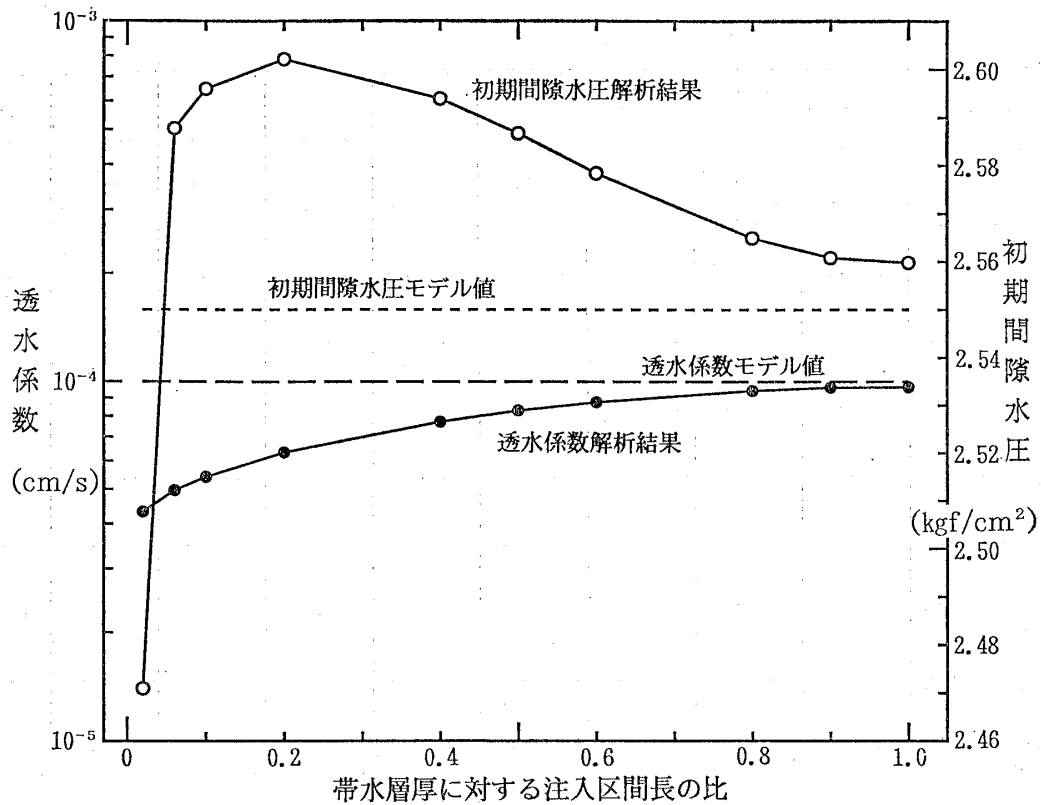


図-7 改良型変圧・変流量解析の解析結果への試験区間長の影響

Fig. 7 Effect of test section length to modified variable rate analysis

づくに従って、透水係数解析結果の精度が低下しているが、これは、下部の不透水境界の影響が現れているためと考えられる。

先に述べたように、この解析手法の成立のためには、帯水層全体における水平放射状流の成立が必要条件である。そのため、帯水層厚に対して注入区間が短い場合には、その条件が成立しない場合も考えられる。したがって、帯水層厚に対する注水区間長の比を変化させた解析を実施した。

解析は、帯水層厚を50mとし、注入区間の中心の深度は変化しないようにして、注入区間長を1mから50mまで変化させて実施した。解析結果を図-7に示す。この結果によれば、帯水層厚に対して注入区間長が10%以下の場合には、透水係数の誤差が30%以上になり、透水係数の解析精度が低下することが示された。また、初期間隙水圧に関しては、最大 0.08 kgf/cm^2 (水位80cm相当) の誤差であり、透水係数に比較して誤差は小さい。

3・2 有限領域解析への適用性

有限領域解析の数値実験では、単一亀裂あるいは独立の挟在砂層などを対象として、2次元の軸対称モデルによる解析結果を用いた。ここでは、定流量の注水式透水試験を対象とした数値実験を実施し、その適用性を評価

する。透水係数を $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 、層厚を1cmとし、透水層半径が5m~50mの場合の注水圧力を求めた。その結果を両対数グラフにプロットすると、図-8のようになる。図中には、ほぼ無限領域と考えられる半径500m

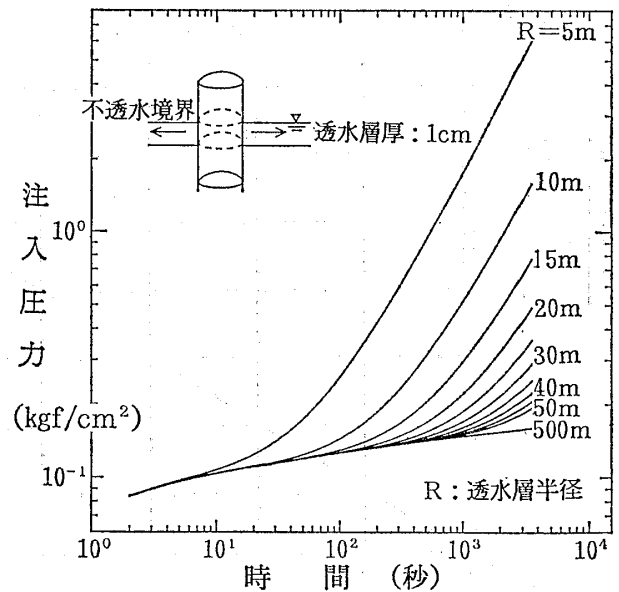


図-8 有限領域における定流量透水試験の圧力挙動 (透水係数: $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$)

Fig. 8 Pressure behaviour in constant rate test in finite reservoir

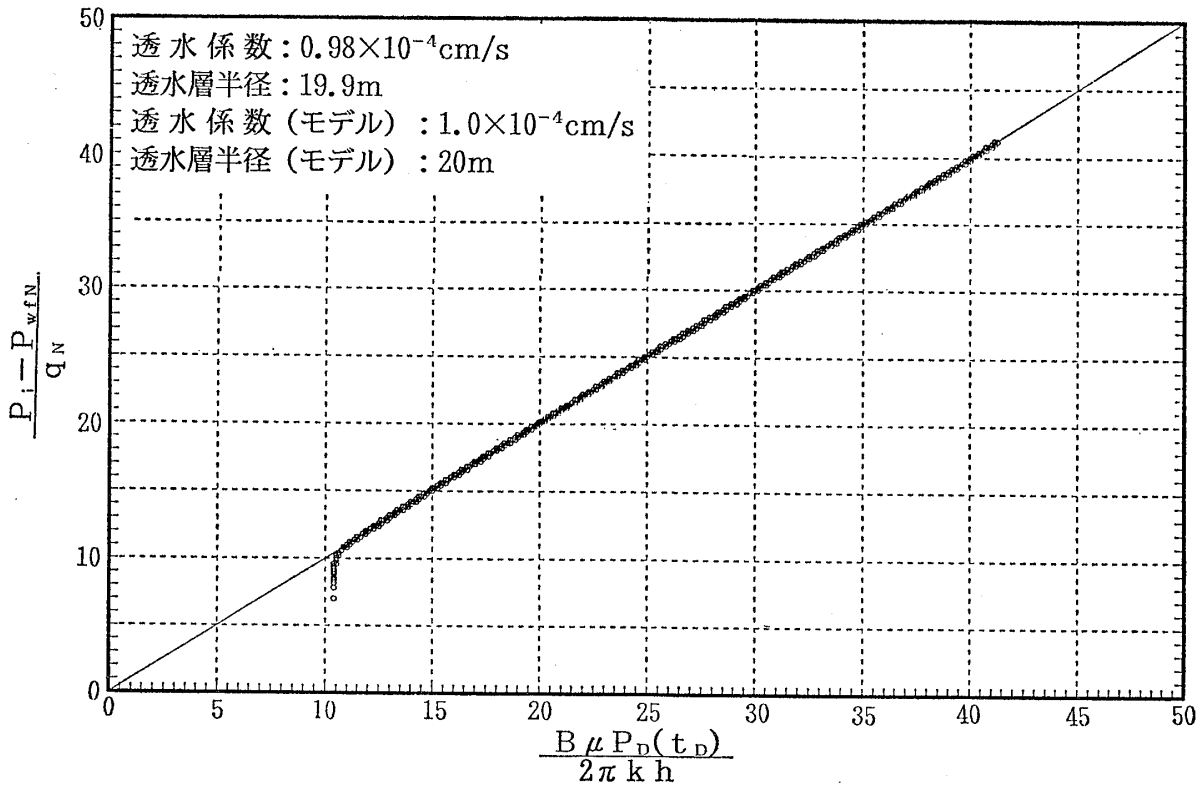


図-9 有限領域解析の解析結果 (透水層半径: 20m)

Fig. 9 An example of finite reservoir analysis (Radius: 20m)

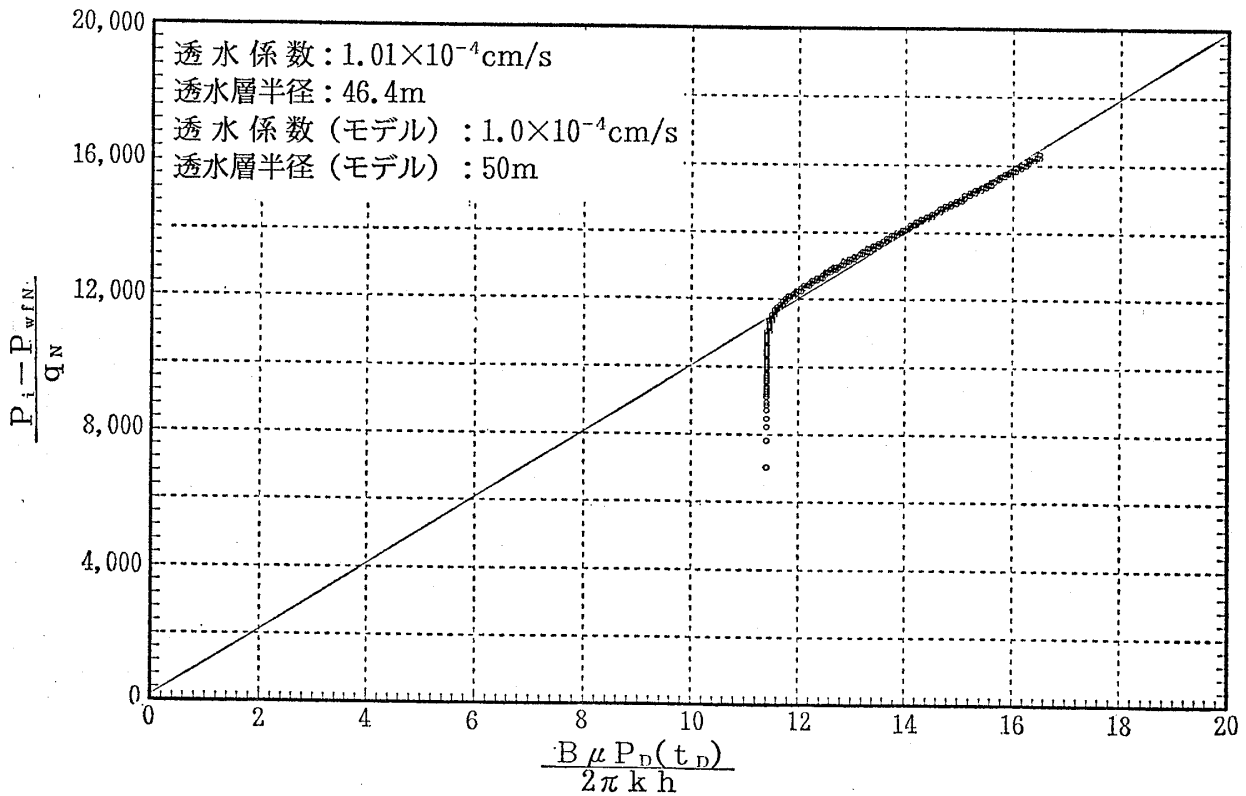


図-10 有限領域解析の解析結果 (透水層半径: 50m)

Fig. 10 An example of finite reservoir analysis (Radius: 50m)

の解析結果も併記してある。なお、この解析で設定した注水時間は1時間である。この図によれば、各ケースとも、初期の段階では無限媒体と考えられる半径が500mの場合と同様に、両対数グラフで、ほぼ直線関係を示すが、透水層の規模、連続性に対応した時間に至ると、直線関係からはずれて、圧力が急激に上昇する。

実際の原位置計測では、測定開始直後においては、装置の配管系統の膨張などの影響によって、測定精度が低い。図-8に示す結果よれば、透水層半径が5mの場合には、試験開始後10秒以内で圧力が急激に上昇する。したがって、圧力上昇後のデータを解析することとなり、無限媒体を仮定した解析手法を用いた場合には、透水係数を過小に見積る可能性がある。

上記の解析結果に対して、有限領域解析を適用した例を示す。図-9は透水層半径を20mとした場合であり、図-10は、透水層半径を50mとした場合である。これらの図においては、(8)式の右辺を横軸に、左辺を縦軸として、プロットを行っている。したがって、理想的な解析結果の場合には、傾きが1で、切片が0の直線となるはずである。

図-10の例から明らかのように、図-9の例と比較して、透水層半径が大きい場合には、有限領域解析のプロットを行うと、経時的データの前半部では、初期の無限領域における放射状流で近似できる圧力挙動によって、直線に乗らないが、後半部においては、有限領域解析が適用できる圧力挙動に移行する。

ここに示した2例の解析結果では、図中に記してあるように、透水係数および透水層半径ともに、誤差は5%以内に収まっている。なお、その他の透水層半径について実施した解析について、透水層半径のモデルと解析結果を比較したものを図-11に示す。この図によれば、透水層半径が大きくなるにしたがって、解析結果とモデルの間の誤差が増大する傾向が見られる。これは、前述したように、透水層半径が大きくなると、無限領域での放射状流の圧力挙動と同様のデータが増大し、相対的に有限領域の放射状流の圧力挙動データが減少するためであると考えられる。

また、モデルの透水層半径と透水係数の解析結果を比較したものを図-12に示す。この図によれば、図に示す透水層半径の範囲においては、解析結果とモデルの間の誤差は5%以内に収まっているが、透水層半径が大きくなると、解析結果の透水係数の値が大きくなる傾向が見られる。この原因としては、透水層半径が大きくなるとともに、透水層半径の解析結果が実際の値よりも小さくなるために、相補的に透水係数の解析結果が大きくなる

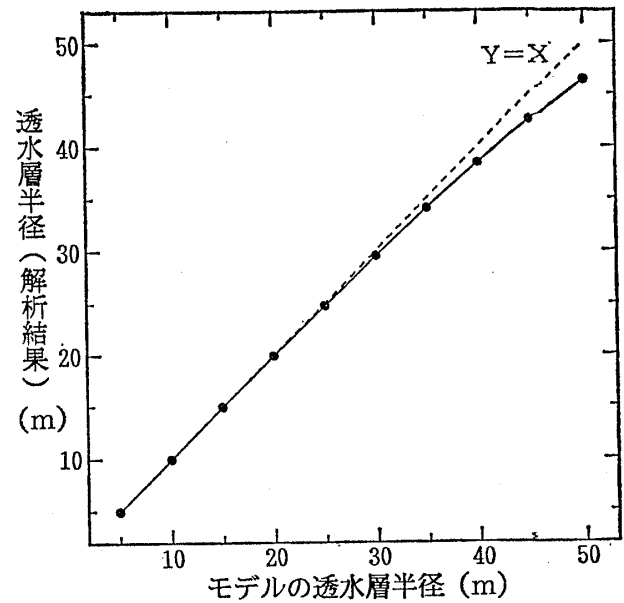


図-11 有限領域解析における透水層半径解析結果の比較
Fig. 11 Comparison of reservoir radius in finite reservoir analysis

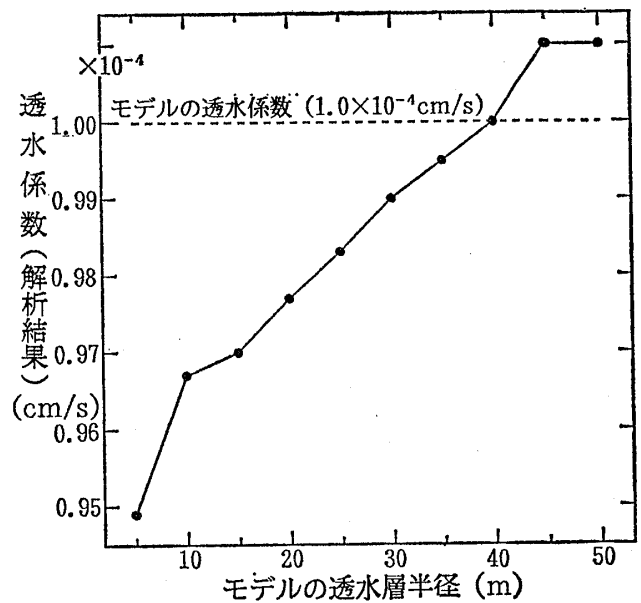


図-12 有限領域解析における透水係数解析結果の比較
Fig. 12 Comparison of permeability coefficient in finite reservoir analysis

ためであると考えられる。

さらに、この解析手法の適用性を検証するために、透水係数および透水層半径をいろいろに変化させて数値実験を実施した。この場合、注水は1時間の定流量注水を想定している。

図-13は、モデルの透水層半径と解析結果の透水層半径を比較したものである。この図によれば、解析の結果は、モデルのほぼ10%の誤差範囲に収まっているが、透水係数kが 10^{-5} cm/s および 10^{-6} cm/sの場合について

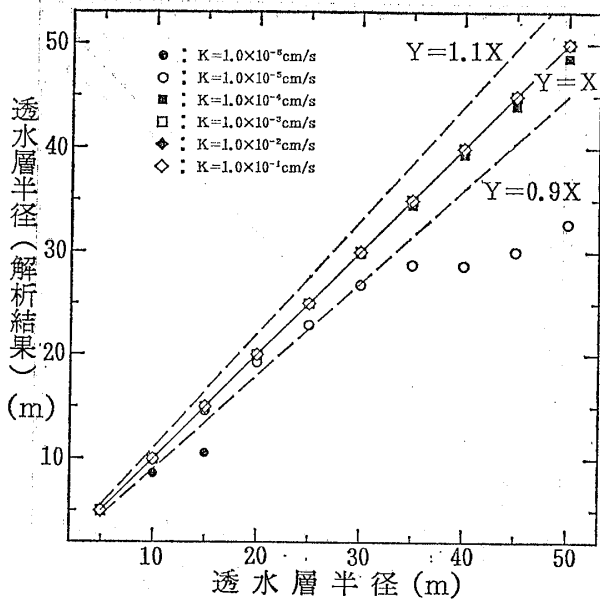


図-13 透水層半径解析結果への透水層半径および透水係数の影響

Fig. 13 Effect of reservoir radius and permeability coefficient to reservoir radius analysis

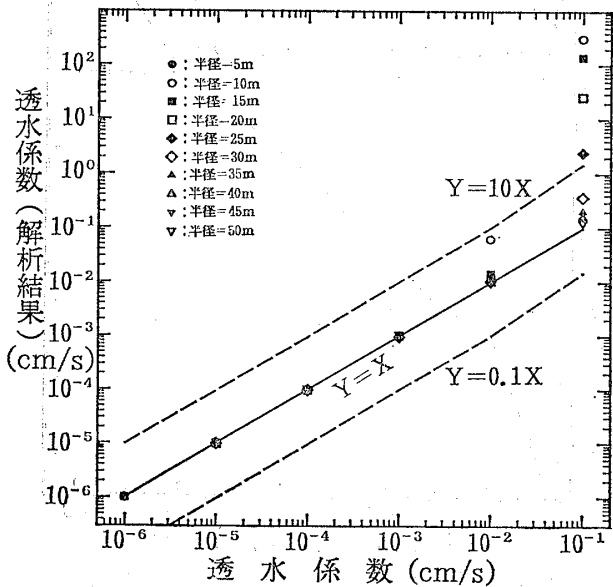


図-14 透水係数解析結果への透水層半径および透水係数の影響

Fig. 14 Effect of reservoir radius and permeability coefficient to permeability coefficient analysis

は、透水層半径が大きくなると解析結果の誤差が大きくなる。とくに、 10^{-6} cm/s の場合には、透水層半径が20mあるいはそれ以上では解析が不能となった。これは、注水孔周辺への圧力伝播が小さいために、境界の影響が十分現れていないためであると考えられる。

図-14は、モデルの透水係数と解析結果の透水係数を比較したものである。この図に示すように、透水係数が

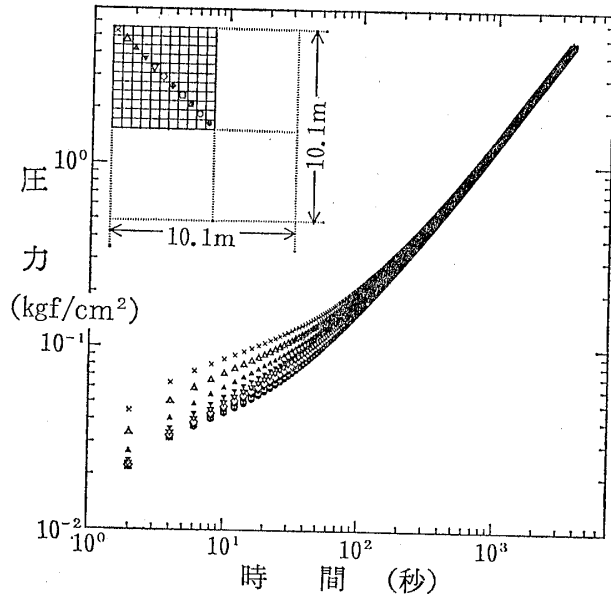


図-15 注入位置による圧力挙動の違い

Fig. 15 Pressure behaviour according to injection point in reservoir

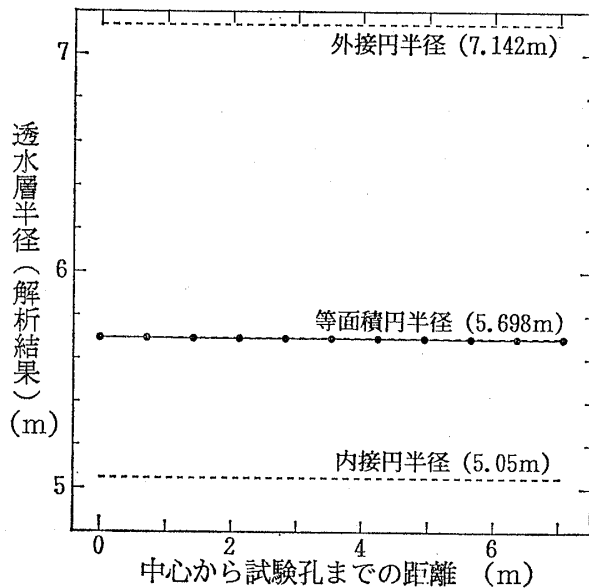


図-16 注入位置による透水層半径解析結果

Fig. 16 Result of reservoir radius according to injection point

10^{-2} cm/s よりも小さい場合には、モデルの透水係数をおおむね再現している。

ただし、透水係数が 10^{-1} cm/s の場合には、特に透水層半径が小さいモデルに関しては、透水係数が再現できなくなっている。

以上述べたことを総合すると、本解析手法は、透水係数が 10^{-5} cm/s~ 10^{-2} cm/s の範囲の有限な領域を持つ透水層に対しては有効であると考えられる。現実には、調査対象の亀裂あるいは透水層が有限であるか否かは予測できないため、無限領域における変圧・変流量解析と

の併用が必要となる。

ここで示した有限領域解析は、円形の透水層の中心で注水を行うことを前提とした解析手法である。しかしながら、実際の試験においては、帯水層は円形とは限らず、また、帯水層の中心で試験を行っているという保証もない。したがって、ここでは正方形の帯水層で、平面的な注水位置を変化させて、2次元モデルにおける注水試験のシミュレーションを実施し、その結果を利用して有限領域解析の数値実験を行った。解析は、10.1m×10.1mの正方形領域を考え、その対角線上に、順次、注水孔を配置した。図-15は、注水位置による圧力挙動の変化を示している。また、有限領域解析を実施した際の透水層半径解析結果と中心から試験孔までの距離の関係を示すと図-16のようになる。この結果によれば、試験孔の位置に関わらず、透水層半径は、おおむね一定の値となることが判明した。さらに、その解析結果は、帯水層全体の面積と等しい円の半径を示すことが示された。

4 まとめと今後の課題

単孔透水試験に対して、圧力および流量の非定常データを用いる新しい解析手法の提案を行い、数値実験によって適用性の検証を実施した。その結果、以下のことが判明した。

- (1) 改良型変圧・変流量解析を、多段階圧力の透水試験における非定常データに適用することによって、注水区間に自然状態で作用している間隙水圧（初期水圧）と、試験区間周辺の透水係数を同時に求めることが可能である。
- (2) 改良型変圧・変流量解析は、地盤の透水係数が $10^{-2}\text{cm/s}\sim 10^{-5}\text{cm/s}$ の範囲にある場合には、十分な精度をもって適用可能である。
- (3) 有限領域解析によって、独立した亀裂あるいは挟在砂層などの透水層の連続性および透水性を求めることが可能である。
- (4) 有限領域解析は、透水層半径が5～50mの範囲において、透水係数が $10^{-2}\text{cm/s}\sim 10^{-5}\text{cm/s}$ の地盤に対して有効である。

ここで示した解析手法は、両者ともに水平放射状流を仮定した解析手法である。したがって、注水試験時の注水孔周辺の流動形態が水平放射状流からはずれる場合には、解析精度が低下する。これに対しては、今後軸対象3次元解析に非線形最小2乗法の逆解析を組み合わせた形の解析手法を開発する必要がある。

また、ここで提案した手法を不飽和帯に適用する際に

は、不飽和帯における流動形態が、飽和帯とは異なる形を示すことが考えられるので、そのまま適用することは困難である。不飽和帯への適用に際しては、より多くの数値実験および原位置試験を実施し、基本方程式から吟味する必要がある。

参考文献

- 1) Kojima, K., Tosaka, H., Otsuka, Y., Itoh, K. and Kondoh, T. (1990) : Hydraulic characterization of jointed rock mass using the 'Pulsation Test'. Proceeding of the ISRM international symposium on rock koints, pp. 391-396.
- 2) 伊藤一誠, 大井幸雄, 大塚康範, 近藤達敏 (1990) : 割れ目のある岩盤の透水性調査法(新パルス試験法)の開発とその適用性について, 応用地質年報 No.12, pp.1-12.
- 3) Earlougher Jr, R. C.(1977) : Advances in well test analysis. Monograph Vol.5 of H. L. Doherty, SPE-AIME
- 4) 登坂博行, 伊藤一誠, 大塚康範 (1992) : 不飽和帯における注水試験による岩盤水理特性の評価方法, 土木学会第24回岩盤力学におけるシンポジウム講演論文集, pp.51-55.
- 5) 伊藤一誠, 登坂博行, 大塚康範 (1992) : き裂系岩盤中の不飽和領域における非定常注水試験結果とその解析手法, 資源素材学会第2回地下き裂のキャラクターゼーションワークショップ論文集, pp.1-5.
- 6) 伊藤一誠, 大塚康範 (1994) : 透水試験による岩盤中の割れ目連続性の推定に関する研究, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.425-430.
- 7) Itoh, K. and Otsuka, Y. (1994) : New analysis method of hydraulic testings for three dimensional fracture modeling in rock mass. Proceedings, 7th International Congress, International Association of Engineering Geology. pp.557-566.

