

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

伊藤一誠・大井幸雄
大塚康範・近藤達敏

Development of Pulsation Test System —Permeability Testing System in Fractured Rock Masses and its Field Application—

Kazumasa ITOH, Yukio OHI,
Yasunori OTSUKA and Tatsutoshi KONDOH

Abstract

For hydrogeological site investigations, the conventional method of permeability testings utilizing single borehole has been carried out until now. However, especially in fractured or inhomogeneous rock masses, it is very important to identify distribution and permeability of flow paths, which can never be evaluated adequately by conventional methods. In the field of geological disposal of radioactive wastes, the 'Sinusoidal test' has been developed to determine the permeability of single fracture with low permeability. However, there has been no adequate testing method for the identification of complex flow paths.

The authors have developed new cross-hole interference test and measuring/analyzing system. The 'Pulsation Test System' proposed in this paper consists of pulsation test apparatus and numerical inversion technique. The obtained transient pressure data are utilized to reconstruct permeability distribution or flow paths by means of numerical inversion.

The pulsation test apparatus consists of pulse generator and receiver devices. In order to apply this method to rock or soil that varies in permeability from high to very low, the pulse generator is equipped with wide ranging flowmeters and automatically operated flow valves, and the receiver device has 4 pressure transducers with extremely high resolution for the purpose of accurate and efficient measurement.

In pulsation test analysis, Finite Difference reservoir simulator is utilized to calculate pressure performance, and parallel plate model is applied in modeling fracture network into Finite Difference grid system. And, nonlinear least square method is adopted to modify unknown parameters.

In this paper, the pulsation test apparatus and an example of application of this system to site investigations in fractured rock mass are introduced.

Consequently, the authors will mention that the proposed pulsation test system is a useful method to investigate hydraulic characteristics of jointed or inhomogeneous rocks, and to monitor permeability improvement by grouting.

1 はじめに

ダム基礎岩盤や地下発電所などのような地下構造物において、岩盤の水理特性を把握することは、止水設計ならびに排水計画を立てる上で極めて重要な要素である。岩盤の透水性を調べるためには、従来から単孔式の透水試験としてルジオン試験が採用されている。しかしながら、割れ目系岩盤をはじめとして、透水性に関する異方性あるいは不均質性を有する地盤においては、高透水性ゾーンの確認あるいはグラウチングによる透水性改良範囲の把握のために、対象地盤内の透水性の空間的分布を明らかにすることは不可欠である。

石油工学の分野においては、油層評価の一手法としてパルス試験が実施されている (Kamal ほか, 1977)。この方法は油層全体を均質とみなして透水性を評価するものであり、比較的小範囲における透水性の局部的変化が問題となる場合には適用できない。また、放射性廃棄物地層処分の分野では、シヌソイダル試験と呼ばれている試験方法が開発されている (Black ほか, 1986)。この方法においては、水みちの構造があらかじめ明確に規定されていることが必要であり、また、試験装置の構造

上、低い注入流量で試験が可能な低透水性地盤を対象としている。

これらの2方法には上記のような問題点があり、割れ目のある比較的透水性の高い岩盤に対してそのまま用いることができないため、新しいパルス試験法およびそのための試験装置の開発を行った。すなわち、一本のボーリング孔の所定区間に対して既知流量の流体の注入を行い、その注入区間および周辺にあるボーリング孔の各深度における圧力の経時変化を計測するための装置、ならびにこの装置によって得られた非定常な圧力データを用いて、透水係数分布を再構成する逆解析手法を開発した。

2 新パルス試験法

2.1 試験方法

新パルス試験法の模式図を図-1に示す。試験は、発信孔の所定の区間をダブルパッカーで遮断し、その区間に断続的に水を注入して行う。注水によって上昇した発信区間の水圧は、試験領域の地盤の透水性に従って受信区間まで伝播する。試験開始とともに、注入流量、発信区間における圧力および受信区間における圧力が経時的

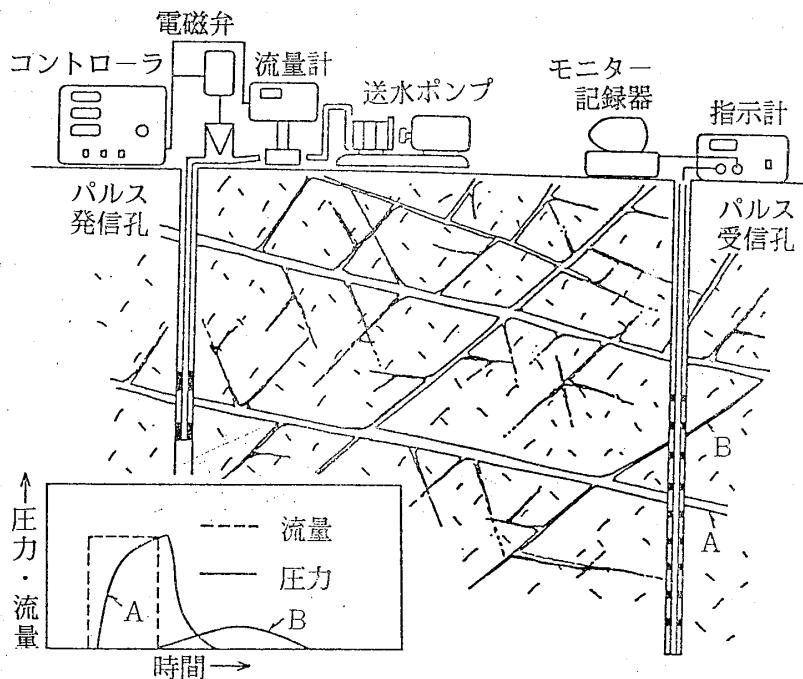


図-1 新パルス試験模式図

Fig.1 Schematic diagram of Pulsation Test

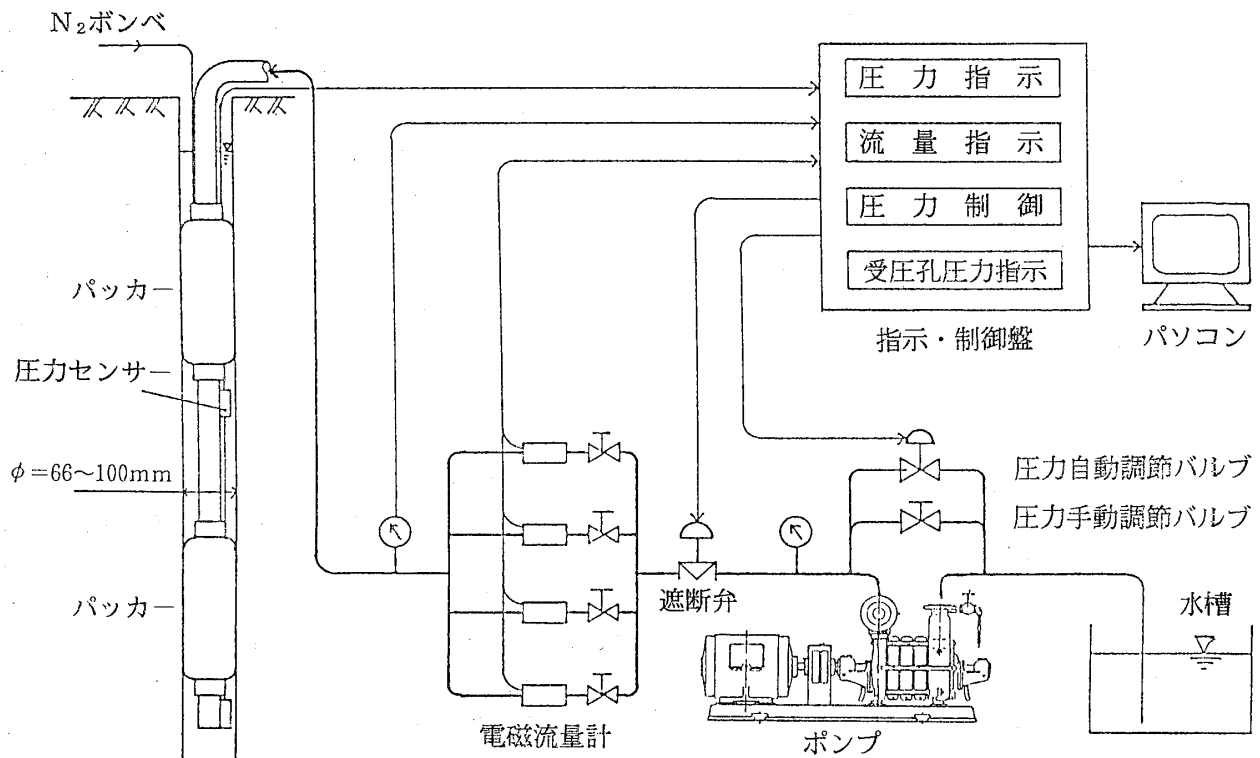


図-2 パルス発生装置の構成
Fig.2 Block diagram of pulse generator

に記録器に記録される。この試験法の特徴は、比較的簡単な構造の試験装置によって得られた非定常的な圧力変化を用いて解析を行うことにある。

2・2 試験装置*

試験装置はパルス発生装置およびパルス受信装置からなる。

(1) パルス発生装置

パルス発生装置の構成を図-2に示す。パルス発信に必要な流量は、地盤の透水性の高低によって大きく変化する。したがって、高透水性地盤から低透水性地盤までの広い範囲の地盤に適用することができるようにするために、この装置における給水装置としては、多段式渦巻ポンプを採用した。このポンプは高圧の状態で大流量を吐出し、圧力が比較的安定しやすいという特徴を持っている。ポンプの吐出側には戻りパイプが接続されており、その戻り流量を調節するための手動および自動のバルブが取り付けられている。このバルブの開度を調節することによって、発信区間の透水性に応じた適切な流量を得ることができるようにした。

このパルス発生装置において、手動バルブの開度を一定にしておき、遮断弁を開閉することによって、発信区間に矩形波状の流量パルスを与えることができる。また、注入区間の圧力の経時変化をあらかじめ設定しておくことによって、自動バルブの開度が調節され、正弦波などの任意の圧力波形をつくることが可能である。

流量の測定に関しては、小流量から大流量までの幅広い範囲にわたって、できるだけ精度良く測定するために、測定範囲の異なる4台の電磁流量計を取付け、測定中の状況に応じて切換えて使用できるようにした。それぞれの電磁流量計の測定範囲は、下記の通りである。

- 50ml/分～ 5l/分
- 200ml/分～ 20l/分
- 1l/分～100l/分
- 3l/分～300l/分

パルス発信装置によって発信孔の所定の深度に印加された水圧は、発信孔と受信孔の間の地盤の水理特性に従った経路および圧力で受信孔に伝播する。たとえば、割れ目系岩盤における圧力の伝播方向は、割れ目の方向によって規制され、応答圧力の強度は、高透水性割れ目では大きく、低透水性割れ目では小さい。

(2) パルス受信装置

発信孔と受信孔との距離が大きくなると、応答圧力は小さくなる。しかしながら、透水性地盤が広い範囲にわ

*この試験装置の概要は、1990年、土木学会第22回岩盤力学に関するシンポジウム、および1990年、ISRMのConference on Rock Jointsにおいて発表。

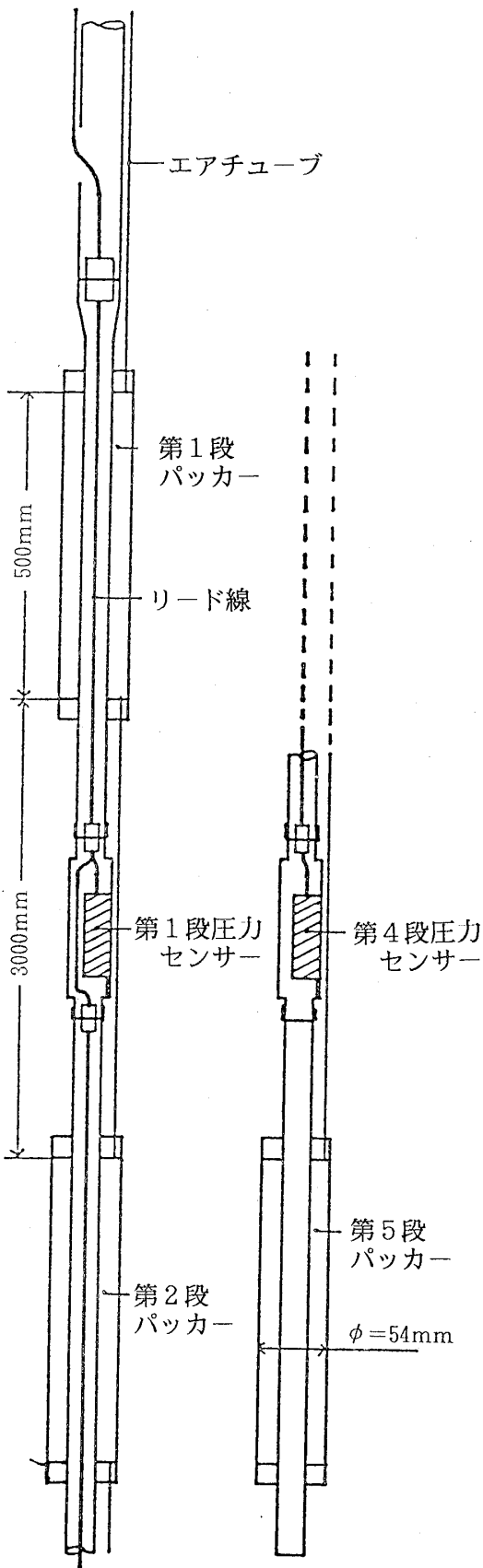


図-3 パルス受信装置の孔内ユニット
Fig.3 Borehole unit of pulse receiver

たり、大きい孔間距離で測定を行うことが必要である場合、良好な記録を得るためには、パルス受信装置としては、高感度・高分解能の圧力センサーが必要である。

このために、水晶振動子式の圧力センサーを内蔵した同時多段式の間隙水圧計を開発し、これを受信孔内に設置するパルス受信装置の孔内ユニットの中に組み込むことにした。このセンサーは、水晶振動子の固有振動数が、振動子に加わる圧力によって変化することを利用したもので、圧力が振動数に変換されてデジタル量で取扱われるために、 $1\text{mmH}_2\text{O}$ という極めて高い感度を有している。

パルス受信装置の孔内ユニットを図-3に示す。図に示すように、パッカーを5段に接続し、それぞれのパッカーの間に圧力センサーを設置した。これによって、受信孔内の4区間における圧力が同時に測定できる。したがって、試験作業の能率が向上するとともに、パルスの発信回数を少なくすることができ、試験による地盤状況の乱れを少なくすることができる。

なお、この孔内ユニットは孔径が $66\sim 116\text{mm}$ のボーリング孔に使用することができる。

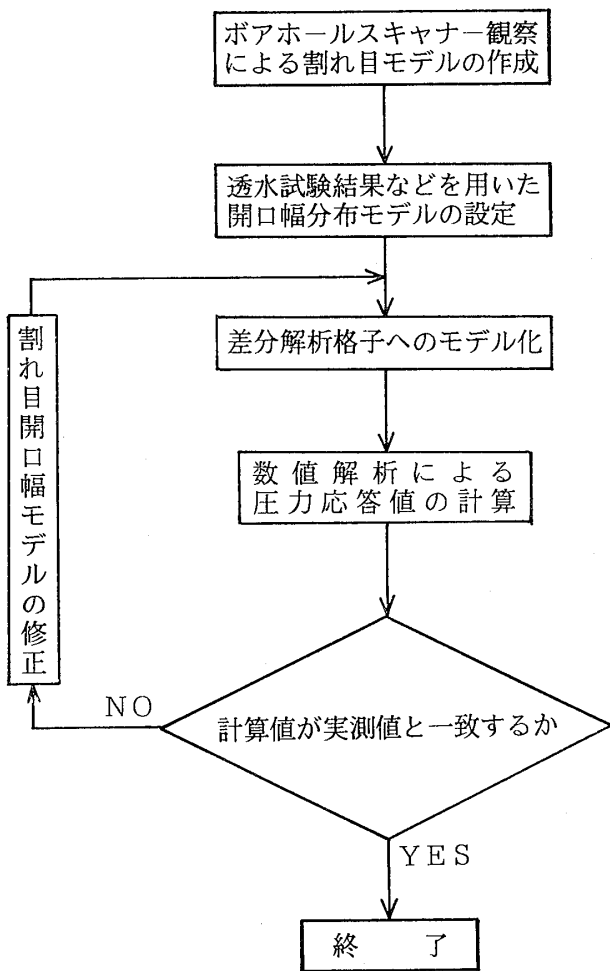
3 新パルス試験の解析に対する考え方*

石油工学の分野で用いられているパルス試験や放射性廃棄物地層処分分野のシノソイダル試験の場合には、解析モデルを可能な限り単純化して、未知のパラメーターを最小限にしているために、受信圧力の振幅と位相差のみで解析を行うことができる。しかしながら、新パルス試験の場合のように、試験領域内地盤の透水性の複雑な分布を再構成することを目的とするときには、パラメーターの数の増加に加え、計測を行う上での空間的な制限から、非定常的な発信圧力および受信圧力のデータのすべてを使用して解析を行うことが必要となる。

解析においては、計測された圧力の経時変化と数値解析の結果が合致するように解析モデルを修正するが、浸透率と圧力の関係が非線形であるために、非線形最小二乗法の反復解析によって浸透率を求めた。解析の流れ図は図-4に示す通りである。

解析には、地下水位以下の地盤を想定し、つぎに示す水のみの一相流動で、水および地盤の圧縮性を考慮した

*この解析法の概要は、1990年、ISRM の Conference on Rock Joints, 1990年、土木学会第22回岩盤力学に関するシンポジウム、および1990年、日本応用地質学会平成2年度研究発表会において発表。



図一四 新パルス試験解析流れ図
Fig.4 Flowchart of inversion process

地下水流動の基本方程式を用いた。

$$\nabla \left\{ \frac{k}{\mu B} \nabla (P - \rho g z) \right\} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right) + q \quad (1)$$

- ここに、
 k : 割れ目の浸透率 [L²]
 μ : 地下水の静粘性係数 [ML⁻¹T⁻¹]
 B : 水の容積係数
 P : 水の圧力 [ML⁻¹T⁻²]
 ρ : 水の密度 [ML⁻³]
 g : 重力の加速度 [LT⁻²]
 Z : 深度 [L]
 t : 時間 [T]
 φ : 地盤の間隙率
 q : 単位体積あたりの注入・揚水量 [T⁻¹]

容積係数とは、流体の圧縮性を示す量で、基準状態と圧力下の状態における同一質量の流体の体積比として定義されている。

いわゆる順解析においては、(1)式において浸透率 k を

既知量として、水の流入・揚水あるいは空洞掘削などによる水圧 P の経時変化を求めている。しかしながら、パルス試験においては、注水に伴う圧力 P の経時変化が既知の量であり、これらの非定常的データによって未知量である浸透率 k を求める逆解析を行うことになる。

このような非定常的データを用いる逆解析法はヒストリーマッチングと呼ばれており、パラメーターとなる透水係数（浸透率）の分布モデルの修正には、パラメーターを人為的に更新する方法（マニュアルマッチング）と非線形最小二乗法（自動ヒストリーマッチング）と呼ばれているものがある。

(1) マニュアルマッチング

比較的少数の割れ目が水みちとなるような岩盤の場合には、マニュアルマッチングを適用することが可能である。Witherspoonほか(1979)によれば、割れ目を平行平板と仮定した場合、割れ目の浸透率は、割れ目の開口幅を用いてつぎのように表すことができるとしている。

$$k = \frac{(2b)^2}{12} \quad (2)$$

ここに、2b : 割れ目の開口幅 [L]

解析を行うにあたっては、まず、領域内の各割れ目の開口幅を仮定する。つぎに、浸透流解析（順解析）を行い、解析による圧力の経時変化の値を実測値と比較し、両者の値が一致するようになるまで、開口幅分布モデルを変更するという操作を繰返し行う。

順解析で用いる差分格子上に割れ目ネットワークをモデル化する方法の模式図を図一五に示す。この場合、各格子に関して、隣接している格子との間の浸透率は、割れ目の開口幅を用いてつぎの式によって算出される。

$$k_{i+(1/2)} = \sum_{j=1}^n \{ (2b_j)^2 / 12 \} / D \quad (3)$$

ここに、 $k_{i+(1/2)}$: i 番目の格子と i + 1 番目の格子間の浸透率 [L²]

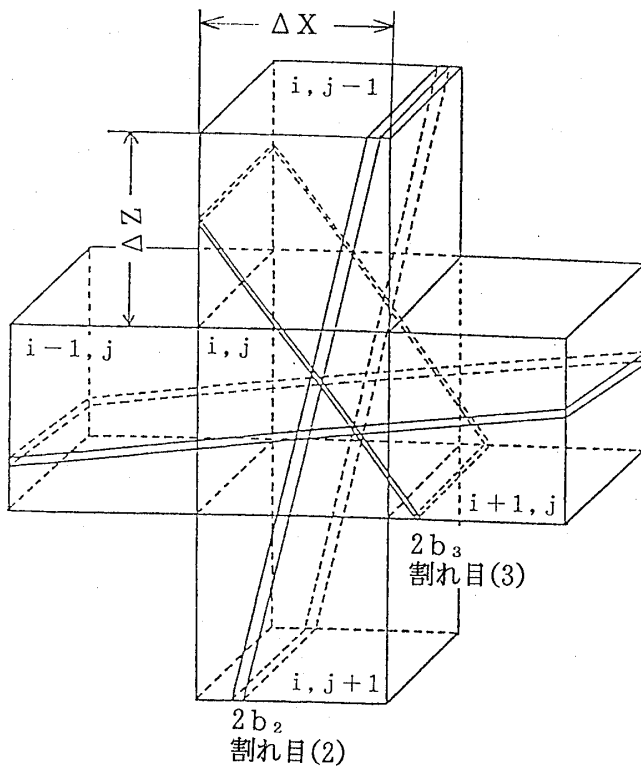
n : 格子境界を切る割れ目の数

2b_j : j 番目の割れ目の開口幅 [L]

D : グリッドの透水区間長 [L]

(2) 自動ヒストリーマッチング

自動ヒストリーマッチングに関しては、Carreraほか(1986)、Yangほか(1988)、河野ほか(1989)などによる研究があるが、複雑な割れ目系を有する不均質な透水性岩盤における水理特性の分布を明らかにするためには、膨大な数のパラメーターの同定を行う必要があり、本手法の実用化のためには、計算時間が短く効率的な解析アルゴリズムが要求される。



割れ目(1)

 $2b_1$

格子(i, j)と格子(i-1, j)間の浸透率

$$: k_{i-(1/2), j} = (2b_1)^3 / (12 \cdot \Delta Z)$$

格子(i, j)と格子(i+1, j)間の浸透率

$$: k_{i+(1/2), j} = \{(2b_1)^3 + (2b_3)^3\} / (12 \cdot \Delta Z)$$

格子(i, j)と格子(i, j-1)間の浸透率

$$: k_{i, j-(1/2)} = \{(2b_2)^3 + (2b_3)^3\} / (12 \cdot \Delta X)$$

格子(i, j)と格子(i, j+1)間の浸透率

$$: k_{i, j+(1/2)} = (2b_2)^3 / (12 \cdot \Delta X)$$

図-5 割れ目ネットワークモデル

Fig.5 Schematic diagram of fracture network model

したがって、筆者らは、不均質性を有する地盤の透水係数分布を、できるだけ少ない計算時間で再構成するための実用的なアルゴリズムとして、Powellのハイブリッド法を使用することにした。ここに、逆解析のパラメータとして差分格子間の浸透率を用いている。ハイブリッド法は、目的関数（ここでは、実測圧力値と計算圧力値の残差2乗和）の一次微分値のみを算出し、パラメーターベクトルの修正値（修正ベクトル）を求める Gauss-Newton法に属する非線形最小二乗法である。ここに使用した Powellのハイブリッド法の特徴は、最急降下法と Gauss-Newton法の両者を折衷した形をとっているために、比較的線形性の強い問題においても、安定した解の収束挙動が得られることである。また、Gauss-Newton解を求めるために必要なヤコビアン行列の逐次修正法として、Broydenによるヤコビアン行列の逐次修正アルゴリズムを使用し、各反復ステップにおける目的関数の勾配の計算を省略することによって、計算時間の短縮を行った。

ヤコビアン行列の修正値 A' は、浸透率パラメーターの修正ベクトル $\Delta \vec{x}$ 、計算された圧力の前反復段階からの変化量 ΔP_{cal} および前段階のヤコビアン行列 A を用いて、つぎの式に示す方法によって求められる。

$$A' = A \Delta \vec{x} + (\Delta P_{cal} - A \Delta \vec{x}) \Delta \vec{x} / \|\Delta \vec{x}\|^2 \quad (4)$$

ただし、各反復ステップにおける残差2乗和が連続して増加する場合には、この逐次修正法によらず、圧力の勾配をあらためて求めることによって、ヤコビアン行列を更新するという方法を採用し、収束の安定をはかっている。

4 割れ目系岩盤の透水性の測定と解析例

以上に述べた新パルス試験を割れ目系岩盤の透水性を調べるために使用する場合の調査・解析の流れ図は、図-6に示す通りである。

割れ目モデル作成にあたって、割れ目部分以外の実質部分は、割れ目部分に比較して透水性が極めて小さいので、簡単化のために不透水として取扱うこととした。

新パルス試験の実施に際して発信孔 (P) および受信孔 (R1) としたボーリング孔を含め、試験区域の4本のボーリング孔におけるポアホールスキナーによる観測結果を用いて割れ目解析を実施し、図-7に示すような初期割れ目モデルを作成した。

解析に用いる浸透率の初期値は、以下に示す手順によ

って求めた。

- ① 新パルス試験の各注入区間の圧力～注入量の関係から，注入区間の岩盤の浸透率を求める。
- ② 平行平板を仮定し，ボアホールスキャナーによって観察された区間内の割れ目の数によって，割れ目

の平均浸透率および平均開口幅を求める。

- ③ ボアホールスキャナーによって観察された開口幅によって，平均開口幅に重み付けをし，区間内の各割れ目に分配する。
- ④ 以上の方法によって，割れ目開口幅（浸透率）の

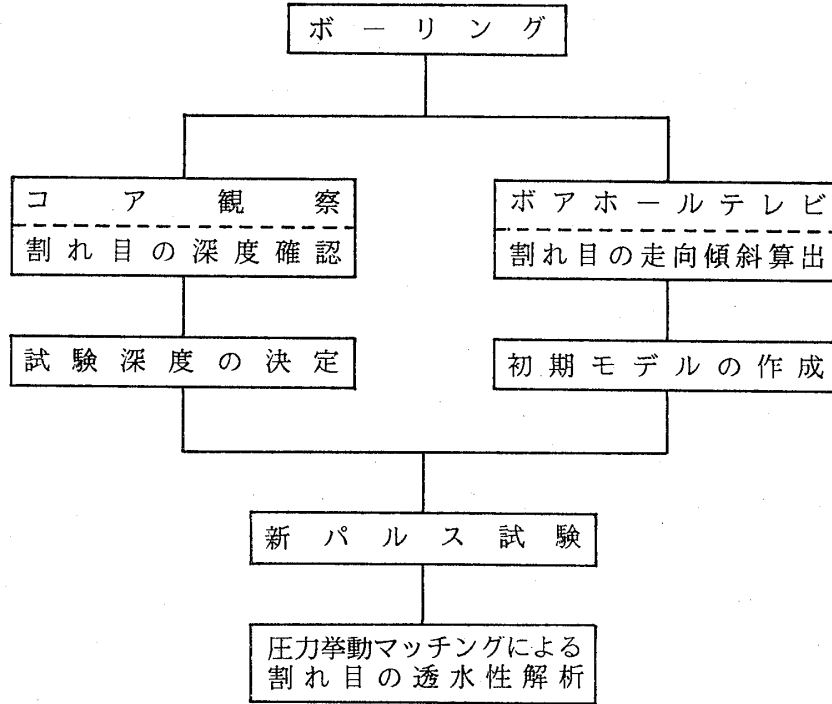


図-6 割れ目系岩盤における調査・解析の流れ図

Fig.6 Flowchart of Pulsation Test in fractured rock mass

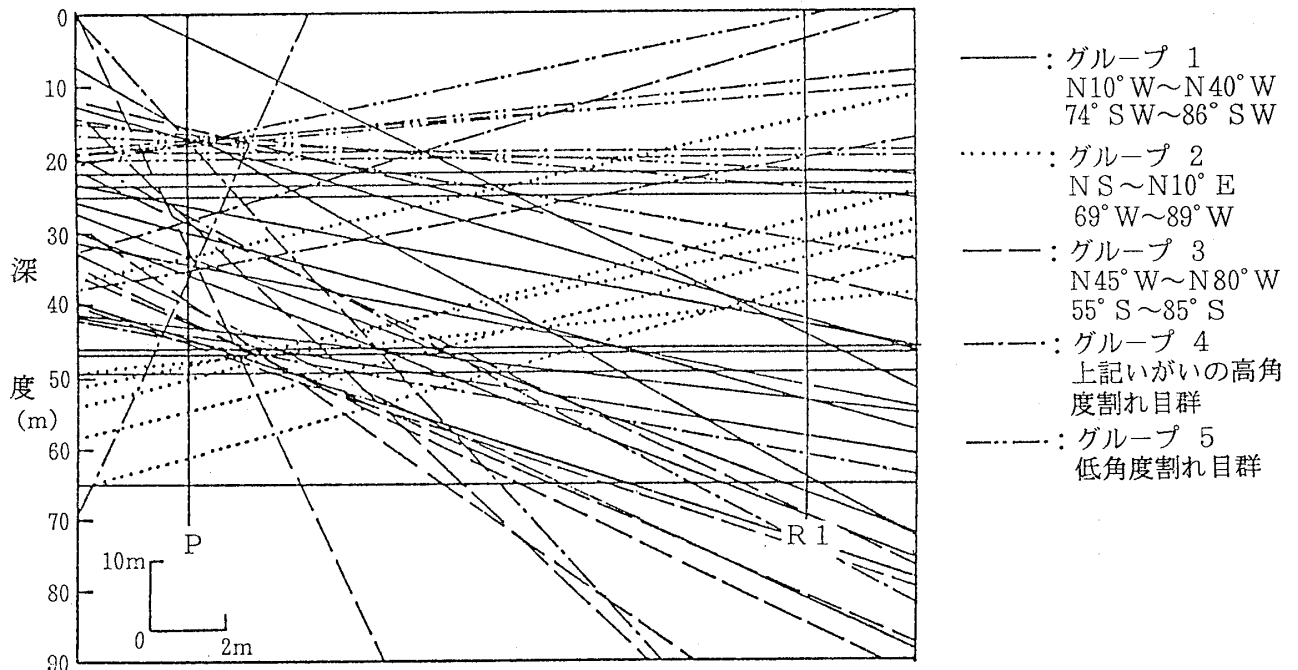


図-7 ボアホールスキャナーによる初期割れ目モデル

Fig.7 Initial fracture network model obtained from borehole scanner

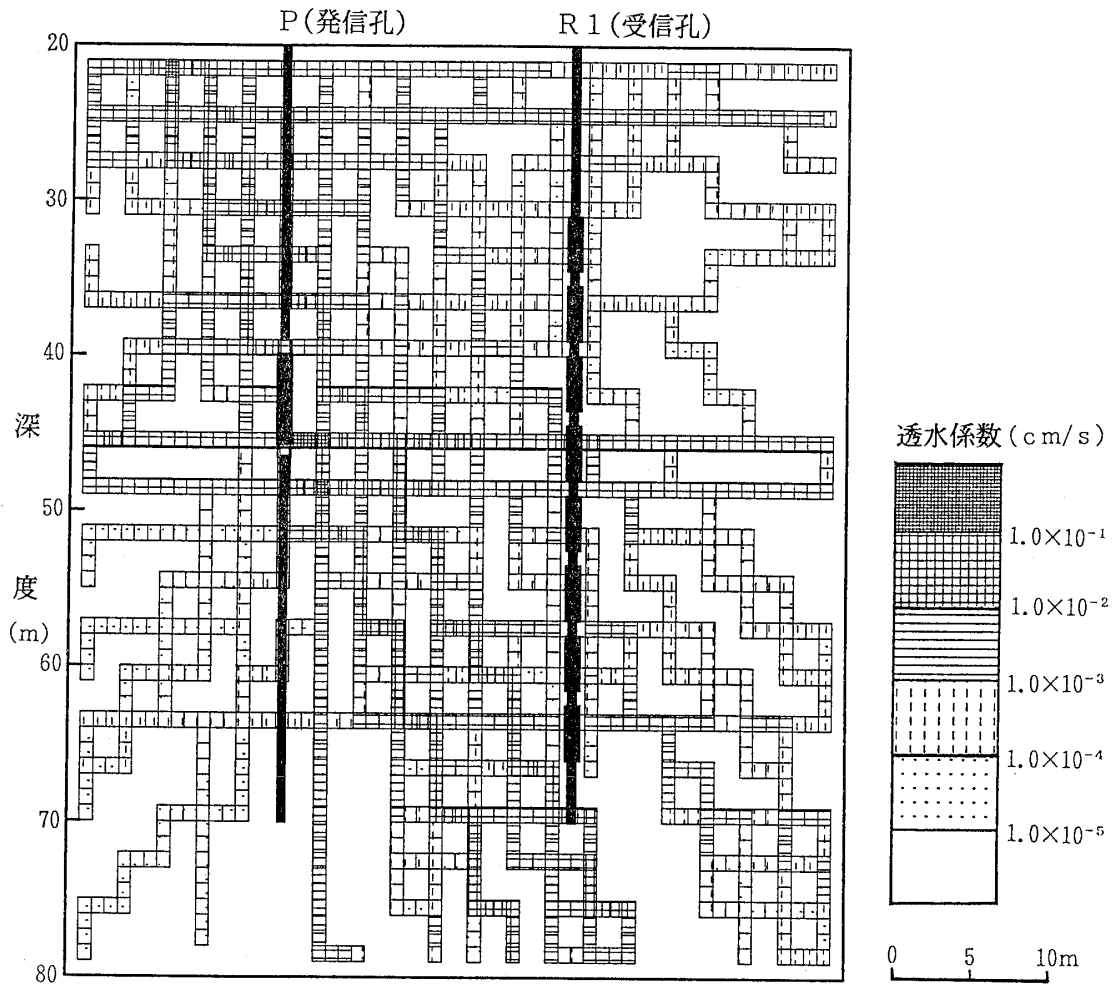


図-8 初期グリッドモデル

Fig.8 Initial permeability distribution model
obtained from initial fracture network model

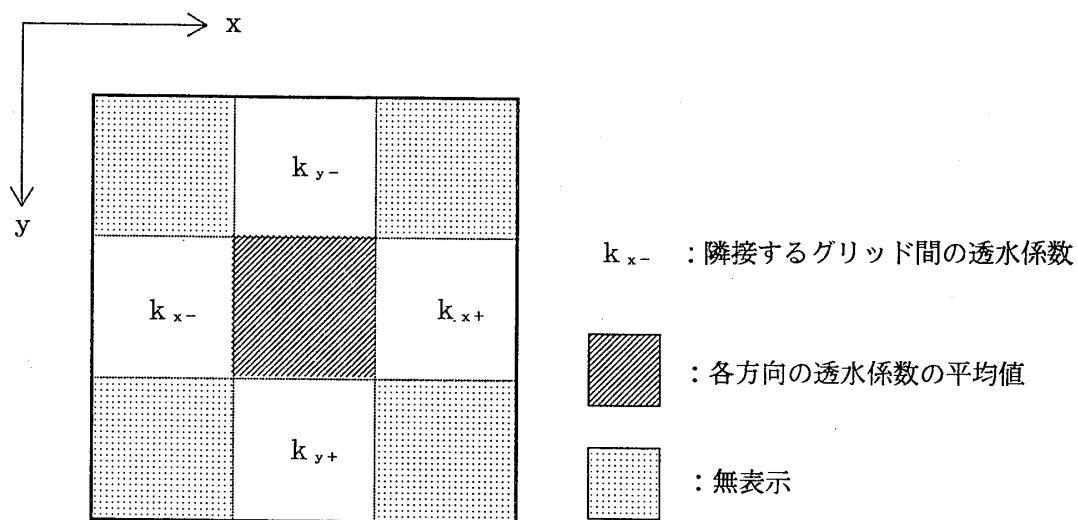
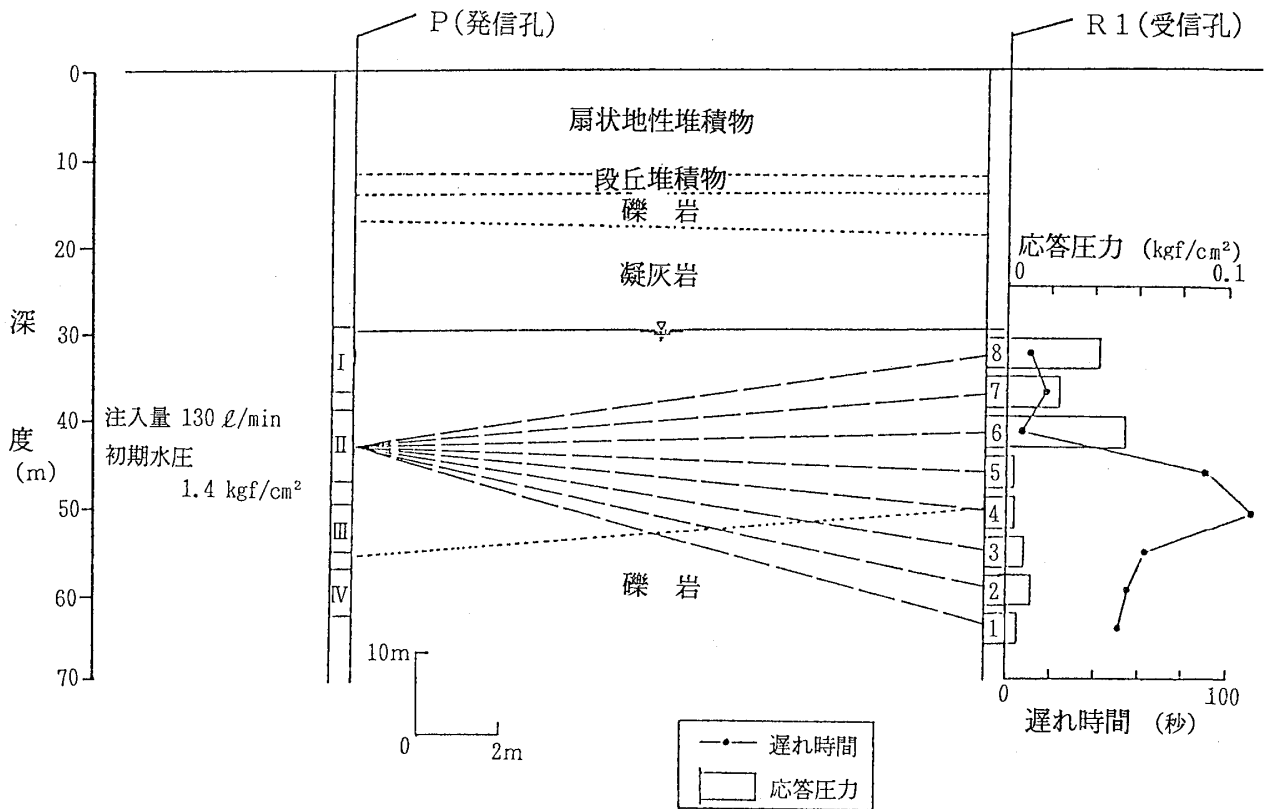


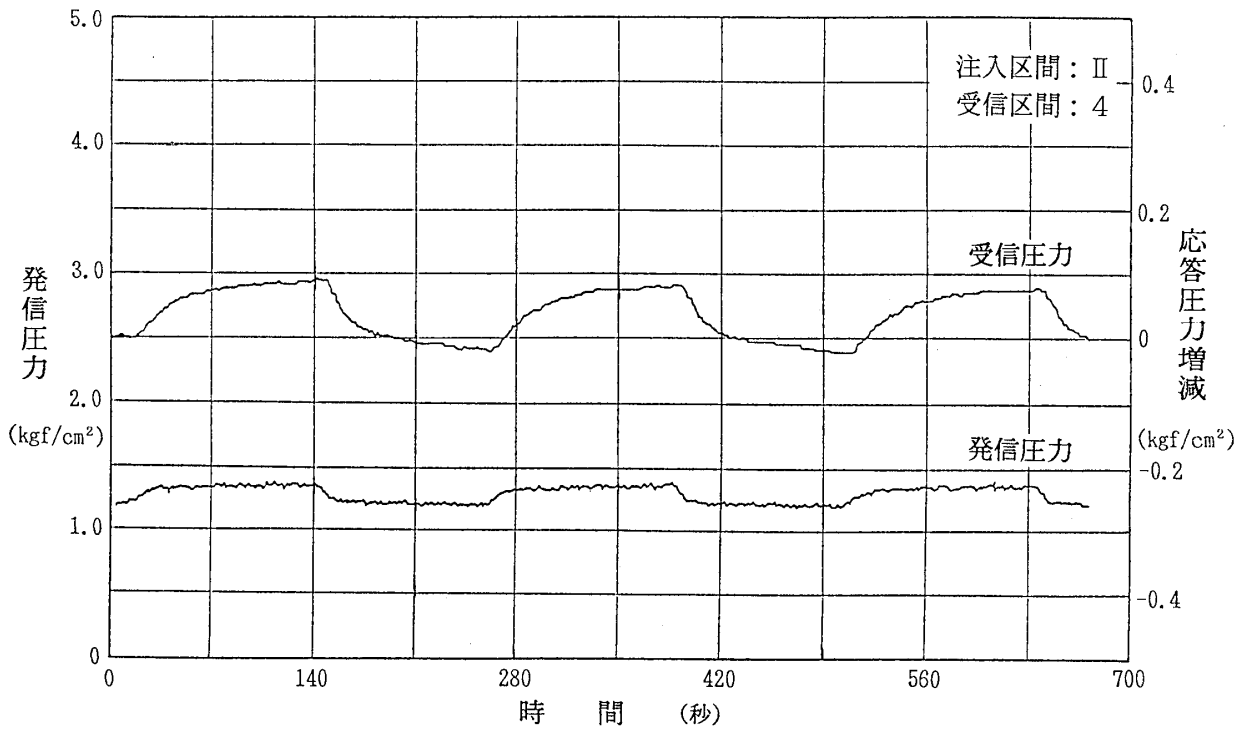
図-9 格子間浸透率表示法模式図

Fig.9 Schematic diagram of inter-grid
permeability illustration



図—10 新パルス試験における圧力挙動総括図

Fig.10 Example of summarized pressure performance in field application



図—11 新パルス試験における圧力挙動の実測例

Fig.11 Example of pressure performance obtained from field application

初期推定値を算出し、計算に用いる差分格子間の浸透率に振り分ける。

このようにして設定した初期グリッドモデルを図-8に示す。なお、この図においては、浸透率を次式によって透水係数に換算して示してある。

$$K = \frac{g}{\nu} k \quad (5)$$

ここに、 K : 格子間の透水係数 [LT⁻¹]

ν : 水の動粘性係数 [L²T⁻¹]

g : 重力の加速度 [LT⁻²]

k : 差分格子間の浸透率 [L²]

しかしながら、浸透率の表示方法としては、図-9に示すように、各差分格子に対する方向ごとの浸透率を表現するために、1つの差分格子を9分割した小グリッドを用いた表示を行っている。

新パルス試験によって得られた各注入区間および受信区間に対する実測圧力データは、注入区間ごとに受信点

における応答圧力振幅および圧力ピークの時間遅れについて整理される。図-10は、注入区間Ⅱ（深度 GL-39～46.6m）の場合（注水量：130l/min、初期水圧：1.4 kgf/cm²）の受信圧力の測定結果をまとめたものである。図-11は、この注入深度Ⅱの場合に、最も高い透水性割れ目のある受信区間4において受信したパルス応答の例である。

本報文における解析は、図-10に示した受信圧力の振幅に対するマッチングという形で行った。発信孔Pと受信孔R1の間の最適モデルを図-12に示す。図-12における透水係数の表示は図-8と同じ方法を用いている。図-12によって明かなように、発信孔Pと受信孔R1の間における卓越する透水経路として、つぎの3つの経路が認められる。

- ① P孔のGL-30～-45mの間において、R1孔の方向に斜め下方に伸びる経路。
- ② P孔のGL-45～-50mから水平に伸びる経路。
- ③ P孔のGL-35mからR1孔の方向に斜め上方に

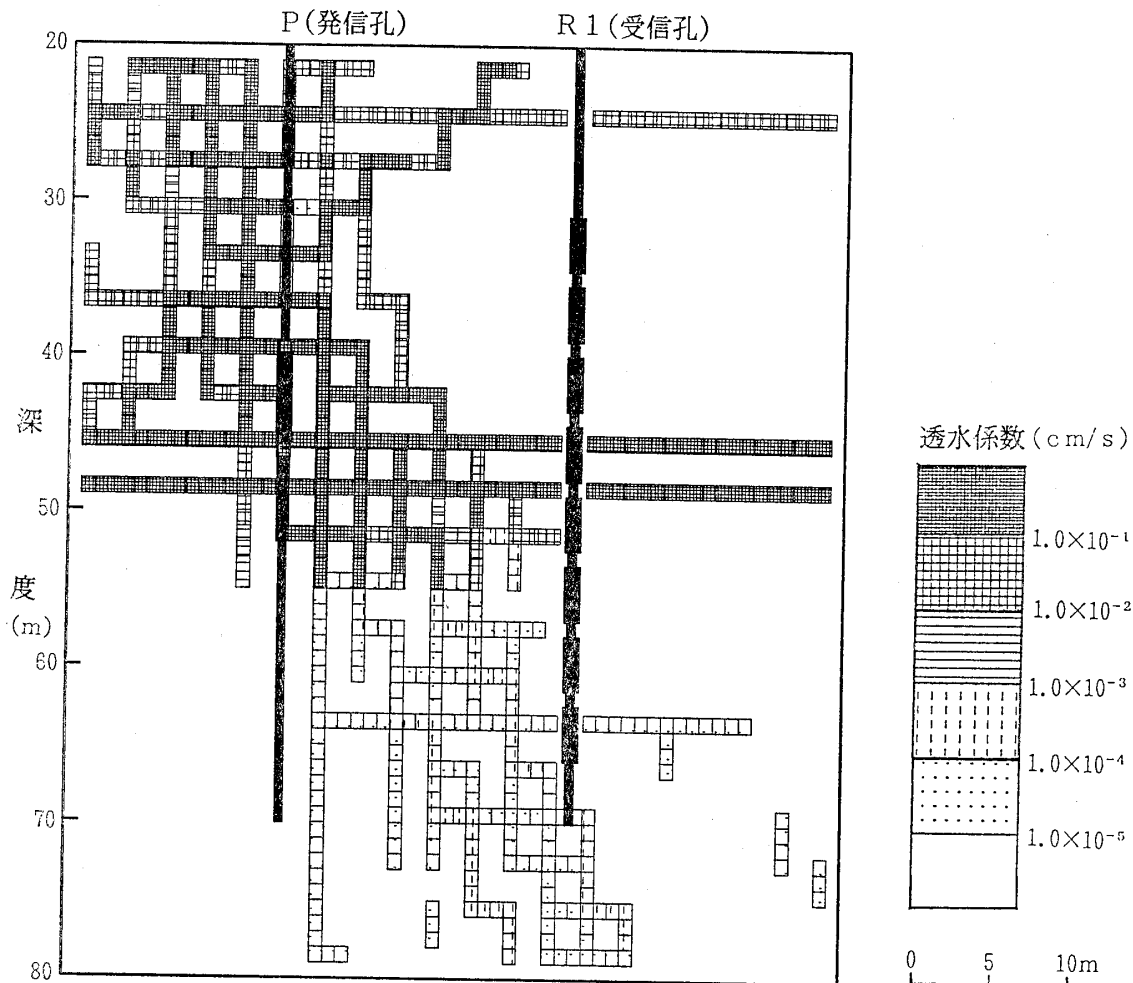
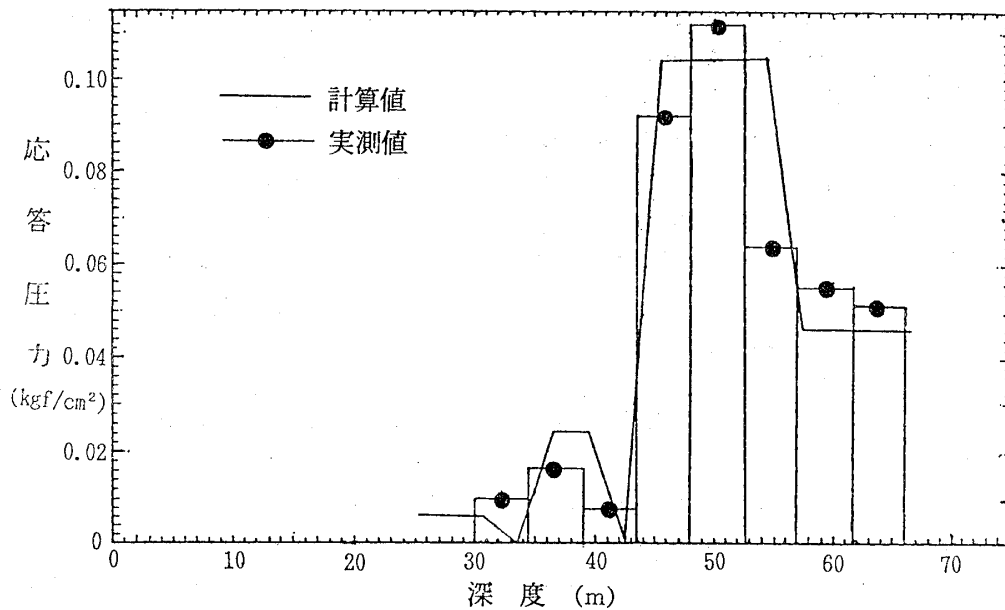


図-12 最適グリッドモデル

Fig.12 Optimum permeability distribution model after history matching



図一13 最適モデルにおける応答圧力の計算値と実測値との比較
 Fig.13 Pressure calculated from optimum model versus pressure measured in field application

伸びる経路。

また、下位の礫岩層における割れ目の開口幅は、上位の凝灰岩層の5%程度に低下するという結果が得られた。

これらの結果をボアホールスキャナーによる観測から求めた割れ目モデル（図一7）と対比すると、図一7中のグループ1およびグループ2に該当し、この2孔間においては、割れ目が連続していることは明らかである。

さらに、最適モデルにおける受信圧力ピークの解析結果と実測値との比較を図一13に示す。この図によって明らかかなように、各深度ごとの応答圧力の解析結果と実測結果は、かなり良好な一致を示している。

上記の測定例に示したように、新パルス試験は、割れ目を含む岩盤の水理特性を把握し、地下水の流動挙動を予測する目的にとって、有効な試験手法であるということが出来る。

5 まとめ

本報文においては、岩盤に対する新しい透水試験法として、新パルス試験の試験方法および解析方法の概要を示すとともに、特に、割れ目系岩盤の透水性調査に適用する際の考え方・手法および事例を紹介した。

新パルス試験を行うことによって、割れ目系岩盤における卓越した水みちとなる割れ目の位置、方向および透水性を面的に把握することが可能であるので、従来の単

孔式の透水試験の結果との対応を明らかにすることによって、ダム基礎岩盤に対する止水のためのカーテングラウト計画をより合理的に策定することができると考える。また、地盤改良のためのコンソリデーショングラウトの前後における試験結果を比較することによって、空間的および定量的にグラウト効果を判定することに役立つものと思われる。

本報文において紹介した事例では、水みちとなる割れ目の数が比較的少なく、特に高透水性の割れ目が少数存在する場合であったので、マニュアルマッチングによってパラメーターの同定を行うことが可能であったが、自動ヒストリーマッチングの実用化をはかり、より複雑な割れ目系岩盤に対する解析ができるようにすることが必要である。また、地下空洞周辺あるいは浅い深度の不飽和領域の岩盤に対して、新パルス試験を適用するためには、試験方法および解析方法の両面からの改良を進める必要があると考えている。

参考文献

- Black, J.H., Barker, J.A. and Noy, D.A. (1986): Crosshole Investigations-The method, theory and analysis of crosshole sinusoidal pressure tests in fissured rock, Internal Report of STRIPA PROJECT, SWEDISH NUCLEAR FUEL AND WASTE MANAGEMENT CO.

- Carrera, J. and Neuman, S.P. (1986): Estimation of Aquifer Parameters under Transient and Steady State Conditions (1-3), Water Resources Research, Vol.22, No.2, pp.199~242.
- 伊藤一誠, 増本清, 登坂博行, 大塚康範(1990): パルステストによる岩盤水理特性分布の逆解析 日本応用地質学会平成2年度研究発表論文集 pp.97~100.
- Kamal, M. and Brigham, W.E. (1975): Pulse-Testing Response for Unequal Pulse and Shut in Periods, Soc. Pet. Eng. J. Trans. AIME, 259.
- Kojima, K., Tosaka, H., Otsuka, Y., Ito, K. and Kondoh, T. (1990): Hydraulic Characterization of Jointed rock masses using the "Pulsation Test", Proc. of ISRM Conf. on Rock Joints.
- 河野伊一郎, 西垣誠, 竹下祐二(1989): 逆解析手法を用いた被圧帯水層における揚水試験結果の解析方法 土質工学会論文報告集 第29巻 第2号 pp.159~168.
- 大井幸雄, 大塚康範, 伊藤一誠(1990): パルステストによる不均質性岩盤の透水性調査手法について 土木学会第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 pp.161~165.
- 登坂博行, 伊藤一誠, 増本清, 大塚康範(1990): 非定常地下水流れを考慮したパルステストによる透水性逆解析手法について 土木学会第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 pp.156~160.
- 登坂博行, 増本清, 伊藤一誠, 大塚康範(1990): パルステストデータを用いた岩盤水理特性分布の3次元逆解析手法 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集 pp.399~405.
- Witherspoon, P.A., Wang, J.S.Y., Iwai, K. and Gale, J.E. (1979): Validity of Cubic Law for Fluid Flow in a Deformable Rock Fracture, Swedish-American Co-operative Program on Radioactive Waste Storage in Mined Caverns in Crystalline Rock, Technical Information Report, No.23.
- Yang, P.H. and Watson, A.T. (1988): Automatic History Matching with Variable Metric Methods, Soc. Pet. Eng. Reservoir Engineering, pp.995~1001.