

クロスホール透水試験による 岩盤の水理地質構造の新しい評価方法の提案

New imaging method for hydraulic structure in rock masses by cross-hole hydraulic test

青木謙治*・水戸義忠*・山本真哉**

Kenji AOKI, Yoshitada MITO and Shinya YAMAMOTO

This paper proposes the imaging method for hydro-geological structure in rock masses by cross-hole hydraulic test in order to detect the heterogeneous flow that strongly affects the hydraulic behavior of excavation disturbed zone around rock tunnels or caverns in underground. This method is based on the multidimensional scaling and spatial interpolation, and has several advantages that are not found in conventional back analytical methods. The numerical simulations using several models with different hydraulic structures are conducted to validate the appropriateness of the methodology.

1. はじめに

地層処分研究開発の第 2 次取りまとめ¹⁾によると、坑道の掘削に伴って水理学的な変化（透水係数の増加）が発生する領域は、力学的影響範囲とほぼ同様の領域である。これは、掘削の影響により発生した亀裂が、岩盤の力学的特性を低下させると同時に、地下水の水みちとなり、その領域の透水性を増加させることによる。

この掘削影響領域に発生した亀裂は、初期的に存在していた亀裂とともに、坑道の埋め戻し時にグラウトなどによりシーリングされることになる。このとき適切な止水処理を行わないと、操業時にサイト全体の地下水流動が著しい影響を受けることになるため、深部地下水環境を維持するためのフラクチャーシーリング技術の開発は極めて重要な課題であると考えられる。具体的には、従来には透水性改良の対象とされていなかった低透水性の微小亀裂が分布する不均質なサイトの水理特性を的確に評価し、これに対して確実にシーリングを行うことによって、透水性を改良することが必要となる。

サイトの水理特性を的確に評価するにあたっては、岩盤の水理地質構造を精度良く把握することが重要であり、特に坑道周辺岩盤の水理学的な評価にはクロスホール透水試験²⁾³⁾が有効とされている。クロスホール透水試験は、1 つのボーリング孔に注水区間を設定するとともに他のボーリング孔に水圧観測区間を設定し、水圧の伝播応答を利用して、孔間に存在する岩盤の方向透水係数および比貯留係数を求める試験方法である。岩盤の巨視的な 3 次元透水異方性を評価することができ、比貯留係数の測定精度も高いことが知られている⁴⁾⁵⁾。

掘削影響領域周辺の水理地質構造評価にあたって特に重要となるのが、岩盤内における不均質流れの把握である。岩盤内の不均質流れは、水みちとなる不連続面の幾何学的配置に依存して、地下水がその部分のみを支配的に流れるために生じる。このため、クロスホール透水試験において計測の対象となる地下水は、物理探査で用いられる一般的なジオトモグラフィーにおける弾性波や電磁波などの物理波とは異なり、必ずしも直線的

* 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 ** 電力中央研究所我孫子研究所

に観測孔に到達するのではなく、複雑な幾何学的経路をもつ水みちを経由して観測孔に到達するのがむしろ一般的である。このような場合、通常ジオトモグラフィーの技術では、水みちを再構成することは困難であり、これまでと異なる新しい逆構成法を開発する必要がある。

ここで、透水テンソルに代表される等価多孔体としての物性評価ではなく、岩盤内の水理学的特性の不均質性を直接的に評価するにあたっては、離散化モデルなどの不均質モデルを用いた逆解析手法が必要であり、この方法として、いくつかの格子ベースの方法が開発されている（例えば、文献⁶⁾⁷⁾⁸⁾）。格子ベースの方法では、水みちの形状に関わりなく格子が設定されるため、格子パターンに適合しないような水みちを経由する地下水の解析には不向きである。また、一般に初期モデルに対する依存性が大きく、より現実の流れと類似した初期モデルを用いない場合には、妥当な再構成結果を得ることが保証されないという問題点をもっている。これらの問題点を踏まえ、本研究においては、クロスホール透水試験（2.参照）結果から、多次元尺度構成法（3.参照）と空間補間法（4.参照）を利用して、不均質な岩盤の水理学的地質モデルを合理的に構築する方法を提案（5.参照）し、その妥当性を数値実験によって検証（6.参照）する。

2. クロスホール透水試験

岩盤の水理特性を把握するための現場試験のうち、孔間水理試験は、複数のボーリング孔を配置することによりボーリング孔間での地下水の変化を直接的に観測できるため、水理特性の空間的な広がりや水理学的な連続性を把握するのに適しており、その代表的な試験方法としてクロスホール透水試験がある。クロスホール透水試験には注水孔と少なくとも1本の観測孔を用いる。試験の準備段階においては、注水孔および観測孔の孔内に止水パッカーと間隙水圧計を設置し、ボーリング孔内を複数の注水区間または観測区間に分けておく。試験時には、注水区間において所与の条件で注水を行い、観測区間において水圧の経時変化を観測することによって対象岩盤の水頭拡散率（透水係数／比貯留係数：圧力水頭の拡散の減衰を支配する定数）などの水理特性を評価するものである。一定流量で注水する定流量試験と正弦波の圧力で注水するサイナソイダル試験の2つの方法が提案されている。水頭拡散率の算定にあたっては、クロスホール透水試験によって得られた水圧の経時変化の実測値から得られる実測水頭変化カーブと理論解によるタイプカーブとをマッチングさせ、そのマッチングポイントの読み取り値から求める。詳細な方法については、文献⁹⁾に譲る。

3. 多次元尺度構成法

多次元尺度構成法（Multidimensional Scaling：MDS）はデータ内に潜在するデータ構造を可視的に解釈することを目的として、データ間の関係に基づいて多次元空間上での各データの配置を求める方法である。このときの空間的配置のことを布置（configuration）と呼ぶ。多次元尺度構成法ではデータ間の関係を表すものとして類似度と呼ばれる指標が用いられる。この類似度と布置上でのデータ間の距離の関係は単調減少であると仮定する。すなわち類似度が大きいものどうしほど布置上での距離は小さくなるとした仮定を基に布置を求める。

なお、類似度のデータに欠損値がある場合には、その欠損値に対応する対象の組み合わせを除いて計算をすることもでき、対象の個数にもよるが、対象すべての組み合わせ数の1/4から1/2の組み合わせの類似度を用いれば、すべての組み合わせを用いた場合とほぼ同様の布置が得られることが知られている。

布置の決定方法には、いくつかのアルゴリズムが提案されているが、詳細な方法については、文献¹⁰⁾に譲る。なお、本研究においては、最もよく用いられているKruskalの方法¹¹⁾を用いる。

4. 空間補間法

空間データの補間に用いる空間補間法には、線形結合を基本とする地球統計学のクリギングなどの線形写像を応用したものが多く、その最も単純かつ明解な方法として逆距離補間（inverse distance weight interpolation: IDW）を挙げることができる。この方法は、推定位置までの距離の逆数の p 乗（一般に $p=2$ がよく用いられる）によって各データに重み付けする（重みの総和を 1 とする）ものである。逆距離補間法において、ある任意の位置 x' における補間値 $Z(x')$ は次式により算出される。

$$Z(x') = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i) \quad (1)$$

ここで、 $Z(x_i)$ は既存のデータであり、 n は既存データの数である。また w_i は重み係数であり、次式で表される。

$$w_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-p}} \quad (2)$$

但し、 h_i は位置 x' と x_i との間のユークリッド距離である。逆距離補間は厳密な補間方法であり、推定位置で標本値が得られている場合には、解（推定値）はその値と等しくなる。

5. 水理地質構造の評価方法の提案

ここで、クロスホール透水試験から得られる情報を基に多次元尺度構成法と空間補間法を用いて岩盤の水理学的地質モデルを高精度に構築する方法の提案を行う（水理学的地質モデル構築法の概念図を図-1 に示す）。この方法は次に示すような 5 つの手順よりなる。

- ① クロスホール透水試験（図-1(a)）：定流量試験あるいはサイナソイダル試験により水圧の経時変化を測定し、注水区間と各観測区間との間の水頭拡散率を算出する。但し、通常のカロスホール透水試験では、注水区間を設置する注水孔側には観測区間を設けないのが普通であるが、ここに提案する方法では、その試験において実際に注水を行う区間を除く注水孔・観測孔のすべての区間に観測区間を設ける（図-1(a)）。すべての区間で注水が完了するまで、注水区間を順次かえながらこのような観測を実施する。
- ② 水頭拡散率の算出：クロスホール透水試験から得られた水頭の経時変化を示す実測水頭変化カーブと理論解によるタイプカーブをマッチングする点を読み取ることにより注水区間と観測区間のすべての組み合わせに関する水頭拡散率を算出する。

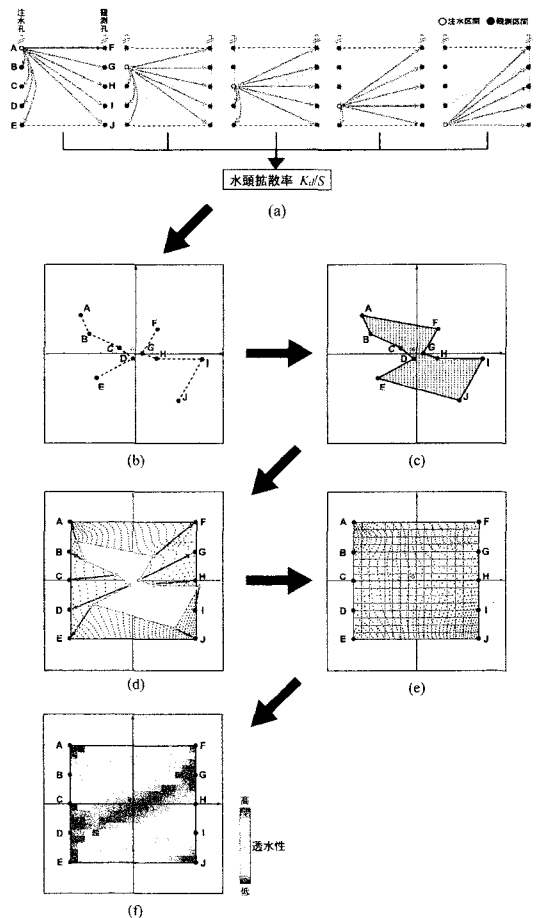


図-1 水理学的地質モデル構築法の概念図

- ③多次元尺度構成法による布置の算出 (図-1(b)) : ②で得られた水頭拡散率の逆数を多次元尺度構成法における類似度として用いて観測点の布置を求める。この空間における観測点間の距離は、観測点間の水理学的な距離を表しており、また空間内における任意の点間の距離もこれと同様の物理的関係をもつことになる。すなわち、この距離空間における仮想的な媒体は完全に等方均質の透水性をもつことになる。
- ④逆距離補間による水理地質構造の幾何学的再構成 : まず、求められた布置間を現実の空間における配置に対応するように直線で結び、その多角形の重心位置を原点と一致させる。次に、現実の空間における位置とそれに対応する布置の差の2乗が最小となるように、原点を中心として座標軸を回転する。この多角形内に均一な密度で点群を配置することによって、この空間に存在している水理学的に均質な(一定の間隙率をもつ)媒体を表現する (図-1(c))。次に、この空間における点の布置を現実の空間の位置に戻す操作を行う。具体的には、観測点の布置と現実の空間位置との間のベクトルの線形結合によって、均質に配置した点群を現実の空間位置に移動させる (図-1(d))。線形結合の重み係数の決定にあたっては、逆距離補間法を用いる。
- ⑤水理地質構造のイメージング : 現実の空間に位置させた点群の密度(間隙率)を孔間内部の各領域で計測する (図-1(e)) ことによって孔間内部の間隙率の空間分布を表現し、水理地質構造をイメージングする (図-1(f))。

6. 提案方法の妥当性の検証

ここでは、提案した水理学的地質モデル構築法の妥当性・有効性を検証するために、高透水層が存在する典型的な水理地質構造モデルをいくつか作成し、これらを用いたシミュレーション(数値実験)を行う。

具体的な検証にあたっては、水理学的に等方均質な領域内に様々な位置・方向を有する高透水層を配置させた水理地質構造モデルを用いてクロスホール透水試験を模擬した2次元非定常有限要素法浸透流解析を行い、この解析結果を基に提案した方法によりイメージングした推定水理地質構造と解析を行った水理地質構造モデルとを比較することによって手法の妥当性・有効性を検証した。浸透流解析の手順は以下の通りである。

- ①解析領域の設定 : 図-2に示すような解析領域を設定し、クロスホール透水試験を想定した孔長20mの鉛直な注水孔および観測孔を水平距離で10m離れるように配置する。注水区間および観測区間については2.5m間隔で1孔あたり5箇所設定している。
- ②水理地質構造の設定 : 透水層の位置・傾斜角が異なる複数の水理地質構造モデルを作成する。このとき、透水層の透水係数を 10^{-3}cm/s 、透水層以外の一般部の透水係数を 10^{-5}cm/s とする。また、比貯留係数については圧力応答の計算値に大きな影響を与えるとものと考えられるが、今回は 10^{-4}m^{-1} と一定値を与える。

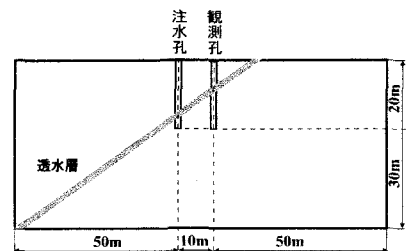


図-2 浸透流解析モデルと透水層の例

- ③クロスホール透水試験のシミュレーション : 作成した水理地質構造モデルを用いた2次元非定常有限要素法浸透流解析により、クロスホール透水試験(定流量注水試験)をシミュレートする。境界条件としては、解析領域の上下両端を不透水境界とし、左右両端に50mの全水頭を与える。これを定常解析することにより領域内各所の水頭の初期条件を設定する。この条件のもと、注水区間において $10\text{cm}^3/\text{s}$ の定流量を境界条件として与えることで非定常解析を行う。なお、注水は注水孔における5つの注水区間から順次行う。

数値実験の結果を図-3、図-4、図-5、図-6に示す。これらの図においては、左にシミュレーションに用いた水理地質構造モデル、中央に解析の結果得られた水頭拡散率を基に多次元尺度構成法分析によって算出した布置、右に逆距離補間法による幾何学的再構成で得られたイメージング結果をそれぞれ示してある。

まず、図-3は、水平な透水層が(a)試験領域中央に位置するもの、(b)試験領域上部に位置するもの、(c)試

験領域下部に位置するもの、の3つについて比較したものである。まず、これらの布置について着目すると、3つのいずれの布置においても水理地質構造モデル上で注水孔・観測孔と透水層が交わる観測点どうしの距離((a): C-H 間, (b): B-G 間, (c): D-I 間)が小さくなっていることがわかる。すなわち、2点間の水理学的な距離が小さいことを表している。また、水理地質構造モデルとイメージング結果を比較すると、いずれも高精度で水理地質構造を再現していると考えられる。これより、提案した方法によって透水層の位置を適正に再現できることが検証された。

次に図-4は、透水層の傾斜が(a)低角度(水平)で注水孔・観測孔間を連結するもの、(b)中程度のもの、(c)高角度(45度)で注水孔・観測孔間を連結するもの、の3つについて比較したものである。これらの布置についても、同様に注水孔・観測孔と透水層とが交わる観測点間の距離((a): C-H 間, (b): D-G 間, (c): E-F 間)が小さくなっていることが確認できる。イメージング結果に関しては、図-4(a)(b)は高精度で、図-4(c)は概ね良好な精度で水理地質構造を再現していると考えられる。これより、提案した方法によって透水層の傾斜角度を適正に再現できることが検証された。

図-5は、透水層が(a)単一のもの、(b)複数存在してX字状に交差するもの、(c)複数存在してY字状に交差するもの、の3つについて比較したものである。これら布置についても、水理学的距離が小さくなるべき観測点間の距離((b): B-D-G-I 間, (c): B-D-I 間)が小さくなっていることが確認できる。イメージング結果をみると、提案した方法は複数の透水層を有するX字状あるいはY字状を呈する水理地質構造に対しても高い精度で再現できることが確認された。

図-6は、注水孔および観測孔と透水層が交差しない場合の検討結果を示したものである。このようなケースでは、透水層を通る地下水の挙動が明確な観測結果として得られにくいため、観測結果から水理地質構造を再構成するのは極めて困難である。しかしながら、本図をみると、高透水層が観測結果に与える小さな影響をも反映した布置が得られているとともに、高透水層の位置が特定できるイメージング結果が得られることが確認された。

以上の結果から、提案した方法によって各種の水理地質構造を適正に再現できることが判明し、その妥当性・有効性が検証されたものとする。

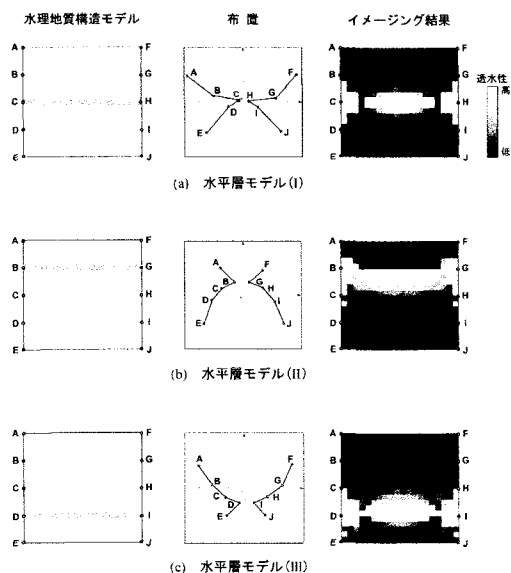


図-3 数値実験結果(1)

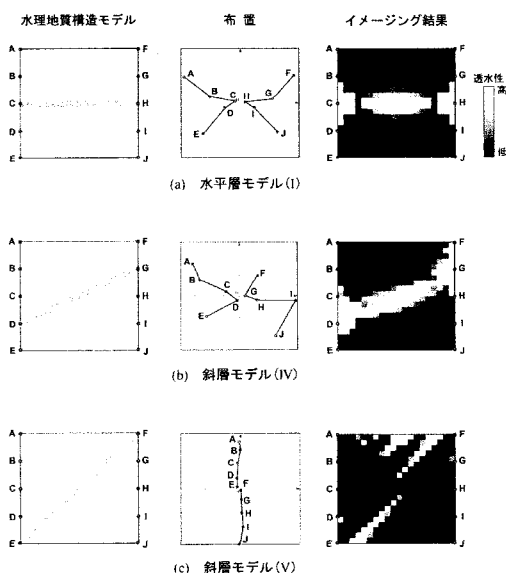
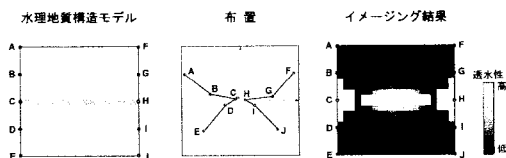
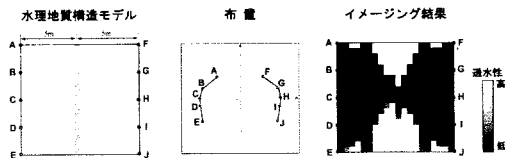


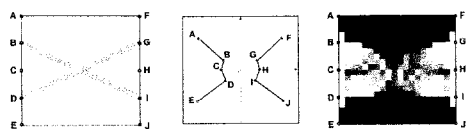
図-4 数値実験結果(2)



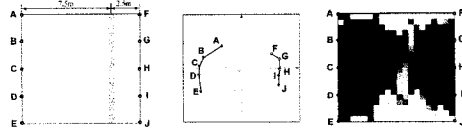
(a) 水平層モデル(I)



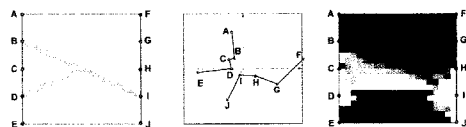
(a) 鉛直層モデル(VII)



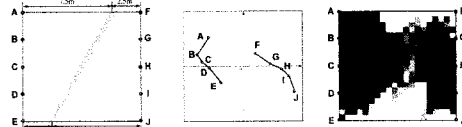
(b) 複層モデル(VI)



(b) 鉛直層モデル(IX)



(c) 複層モデル(VII)



(c) 高角度層モデル(X)

図-5 数値実験結果(3)

図-6 数値実験結果(4)

7. おわりに

本研究では、掘削影響領域周辺の水理地質構造評価にあたって特に重要となる岩盤内不均質流れの把握を目的として、多次元尺度構成法と空間補間法（逆距離補間法）を用いて、クロスホール透水試験の結果から水理学的地質モデルを合理的に構築する方法を提案する。この方法の特徴は、①不均質岩盤を対象とする推定方法であること、②オブジェクトベースの推定方法であるため、不連続面の交差によって形成される複雑な水みちを推定するのに有利であること、③初期モデルを必要としないこと（初期モデル依存性がない）、④3次元への拡張が容易であること、⑤極めて簡易な手法であること、である。提案した方法の妥当性・有効性を検証するために、高透水層が存在する典型的な水理地質構造モデルをいくつか作成し、数値シミュレーションを行ったところ、提案した方法によって各種の水理地質構造を適正に再現できることが判明した。今後は水理物性値との関連付け、空間補間法の選定などを通じた提案方法の高精度化、現場データを用いた実証を行っていく所存である。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術的信頼性—地層処分研究開発第2次とりまとめ」, 1999.
- 2) Hsieh, P. A.: Characterizing the hydraulic properties of fractured rock masses, Methodology and case studies, 28th US Symposium on Rock Mechanics, pp.465-472, 1987.
- 3) Black, J.H. and Kipp, K.L.: Determination of hydrological parameters using sinusoidal pressure tests, Water Resources Research, Vol.17, No.3, pp.686-692, 1981.
- 4) 青木謙治, 塩釜幸広, 手塚康成, 小淵孝晃：クロスホール透水試験による亀裂性岩盤の透水係数評価について, 鹿島建設技術研究所年報, No.38, pp.169-174, 1990.
- 5) 青木謙治, 塩釜幸広, 手塚康成, 小淵孝晃：クロスホール透水試験による亀裂性岩盤の透水係数評価について(2), 鹿島建設技術研究所年報, No.39, pp.201-206, 1991.
- 6) 奥野哲夫, 鈴木誠：不圧地下水を対象とした拡張カルマンフィルタによる透水係数の空間分布推定法, 土木学会論文集, No.469, III-23, pp.93-102, 1993.
- 7) MASUMOTO K., TOSAKA H., KOJIMA K., ITOH K. and OTSUKA Y.: New Measuring System and High Speed Three Dimensional Inversion Method for Hydropulse Tomography, 8th Congress of International Society on Rock Mechanics, pp.847-850, 1995.
- 8) 杉村叔人, 松田育子, 富森勲, 増本清, 渡辺邦夫. 水みちネットワークモデルを用いた岩盤浸透流逆解析, 土木学会論文集, No.638, III-49, pp.41-50, 1999.
- 9) 鹿島建設技術研究所：サイナソイダル法による孔間透水試験技術, KaTRI リーフレット, 2000.
- 10) 岡太彬訓, 今泉忠：「パソコン多次元尺度構成法」, 共立出版株式会社, 1994.
- 11) Kruskal, J.B. & Wish, M.: Multidimensional Scaling. London: Sage Publications, 1978.