

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とその検証

Verification of new imaging method for hydraulic structure by cross-hole hydraulic test

青木謙治*・水戸義忠*・山本拓治**・大場公德*・幸岡智也*

Kenji AOKI, Yoshitada MITO, Takuji YAMAMOTO, Masanori OBA and Tomoya KOOKA

A new imaging method for hydro-geological structure in rock mass is proposed in this study. This method aims to accurately detect heterogeneous groundwater flow paths, which strongly govern the hydraulic behavior of EDZ (excavation disturbed zone) around rock caverns. The hydraulic data set from cross-hole hydraulic test, which represents hydraulic connectivity between different points, is processed to generate a spatial distribution map of hydraulic property by multidimensional scaling (MDS) and inverse distance weighted (IDW) interpolation. The proposed method has several advantages that are not found in the conventional inversion methods. The appropriateness of the methodology is validated through numerical experiments using several continuum models with different hydraulic structures, and the applicability of the method to the field interpretation is also validated through an actual field study.

Key Words: imaging method, hydro-geological structure, flow paths, cross-hole hydraulic test, multidimensional scaling (MDS), inverse distance weighted interpolation (IDW)

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分施設においては空洞の貯蔵施設としての機能を確保・維持するために、坑道周辺岩盤の掘削影響領域の水理特性をグラウチングなどによる止水処理によって向上させることが必要であり、確実かつ効果的なフラクチャーシーリング技術が求められている。

確実かつ効果的に止水処理を行うためには、坑道周辺岩盤の水理特性に大きく影響する水みちの検知が必要不可欠となる。特に坑道周辺岩盤の水理学的な評価には、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るクロスホール透水試験¹⁾²⁾が有効とされている。

現在までにクロスホール透水試験結果から孔間の水理特性の空間分布を推定するためにいくつかの逆解析手法が提案されている。しかし、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。また、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。

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結果から、多次元尺度構成法と空間補間法を利用して、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する。また、その妥当性を数値実験によって、その実用性を現場実験によって検証する。

* 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

** 鹿島 技術研究所 土木技術研究部

2. イメージング手法

2.1. クロスホール透水試験によるデータ取得

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（図-2.1）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(pumped interval)または観測区間(observation interval)に分けておく。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）を評価する。なお本研究で提案する手法においては、注水孔においても水圧の経時変化を観測するものとする。

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。詳細な評価方法については、文献³⁾に譲る。

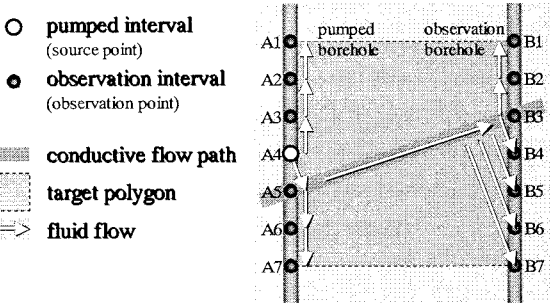


図-2.1 クロスホール透水試験

2.2. 多次元尺度法による観測点の水理学的布置の算出

クロスホール透水試験の観測点の配置は地理的距離が尺度となる現実の地理的空間(geographical subspace)におけるデカルト座標系で表される。ここで、水理学的距離が尺度となるような水理学的亜空間(hydraulic subspace)という別の座標系で観測点の配置を表現することを考える。

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、データ間の非類似度をあらわす概念である距離行列から多次元空間上での各データの配置を求める方法である。すなわち類似度が大きいほどデータ間での距離が小さくなるという関係を基にデータの空間配置を求めるものである（Kruskalの方法⁴⁾）。なお、このときの空間配置のことを布置（configuration）と呼ぶ。

表-1は算出した水頭拡散率をもとに作成した水理学的距離行列であり、これに多次元尺度法を適用することにより、図-2.2に示すような水理学的亜空間における観測点の布置を求めることができる。

表-1 水理学的距離行列

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
A2	44													
A3	158	44												
A4	794	417	158											
A5	1096	794	417	158										
A6	1514	1096	794	417	44									
A7	2069	1514	1096	794	158	44								
B1	2069	1514	1514	1096	1514	2069	2069							
B2	1514	1514	1096	794	1096	1514	2069	44						
B3	1514	1096	575	302	575	1096	1514	158	44					
B4	1096	794	302	575	302	794	1096	794	417	158				
B5	1514	1096	575	302	575	1096	1514	1096	794	417	158			
B6	2069	1514	1096	794	1096	1514	1514	1514	1096	794	417	44		
B7	2069	2069	1514	1096	1514	1514	2069	2069	1514	1096	794	158	44	

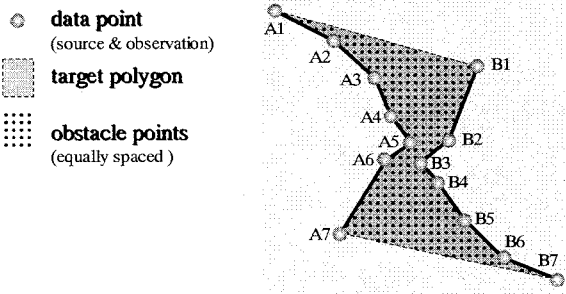


図-2.2 水理学的布置

2.3. 水理学的亜空間から地理的空間への変換

水理学的亜空間においては距離の等しい任意の2点間の水頭拡散率は等しくなる。そこで、水理学的亜空間内に均一に点群を設置したとき、この点群は流体の流れにとっての、土壌内における土粒子のような障害物と等価な意味を持つ。そこで、図-2.3に示すように観測点の地理学的布置と水理学的布置の関係に基づいて、これらの点群を地理的空間に再配置することを考える。ここで以下のことを仮定する。

- (1) この2つの空間にまたがる布置を対応付けることができる、無次元の幾何学的な距離が尺度となる幾何学的超空間(geometric hyperspace)において点群の再配置を行う。
- (2) それぞれの空間での観測点を結んでできる多角形の面積は、幾何学的超空間で等しい値をとる。
- (3) 幾何学的超空間においては多角形の重心の位置が同一となるように配置する。
- (4) 水理学的亜空間から地理的空間の同一点へのベクトルは幾何学的超空間において空間的相関性を持つ。

この仮定のもとに、均一に設置した点群の地理的空間上での配置を決定することができ、水理学的亜空間から地理的空間へ変換することができる。(図-2.4)

空間補間法の中で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 $\mathbf{x}'$ 補間値 $Z(\mathbf{x}')$ は次式により算出される。

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

ここで、 $Z(\mathbf{x}_i)$ 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 $\mathbf{x}'$ と $\mathbf{x}_i$ 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。

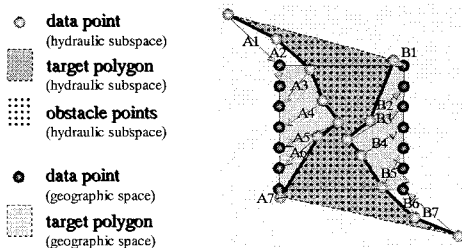


図-2.3 幾何学的再構成

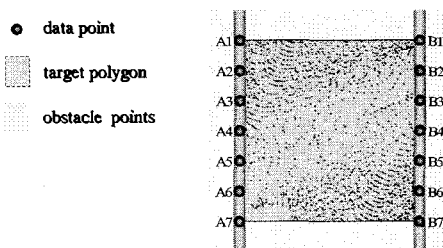


図-2.4 地理的空間に再配置された点群

2.4. 水みちの可視化

地理的空間における点群の密度は岩盤の不透水性の程度を意味すると考えられる。したがって、点群の密度分布図において密度の低い領域は水みちを表していることになる。なお、空間内の密度を表現するに際していくつかの手法が考えられるが、例えばラスター形式の表示方法では図-2.5のような結果を得る。

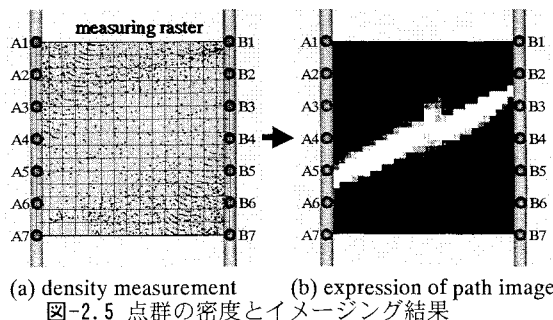


図-2.5 点群の密度とイメージング結果

3. 提案したイメージング手法の検証

本件急で提案したイメージング手法の妥当性・適用性を検証するために、数値実験及び現場実験を行った。

3.1. 数値実験

具体的な検証にあたっては、まず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、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う。次に解析結果を基に、提案した方法によりイメージングし、水理地質構造モデルと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-3.1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45m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1.67m間隔で1孔あたり7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 、透水層以外については透水係数を 10^{-5}cm/s とする。なお、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ものと考えられるが、今回は 10^{-4}m^{-1} と一定値を与える。
- 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に対して2次元非定常有限要素法浸透流解析を行うことにより、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80m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7つの注水区間から順次行う。

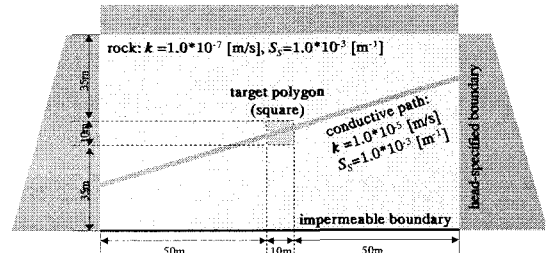


図-3.1 数値実験モデル

数値実験の結果を図-3.2、図-3.3、図-3.4、図-3.5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算出した水理学的布置、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-3.2は、水平な透水層が上部に位置するものから下部に位置するものまでの7つのモデル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、7つのいずれの布置においても水理地質構造モデル上にて透水層によって連結される観測点どうしの距離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-3.3は、透水層の傾斜が低角度で注水孔－観測孔間を連結するもの、高角度で注水孔－観測孔間を連結するものの2つについて比較したものである。これらの水理学的布置についても、透水層で連結される観測点間の距離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-3.4は、透水層が平行に複数存在するもの、複数存在してX字状に交差するものの2つについて比較したものである。これらの水理学的布置についても、透水層で連結される観測点どうしの距離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、複数の透水層を有するモデルに対しても高い精度で水理地質構造を再現できることがわかる。

図-3.5 は、注水孔及び観測孔と透水層が直接交差しが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考ええる。

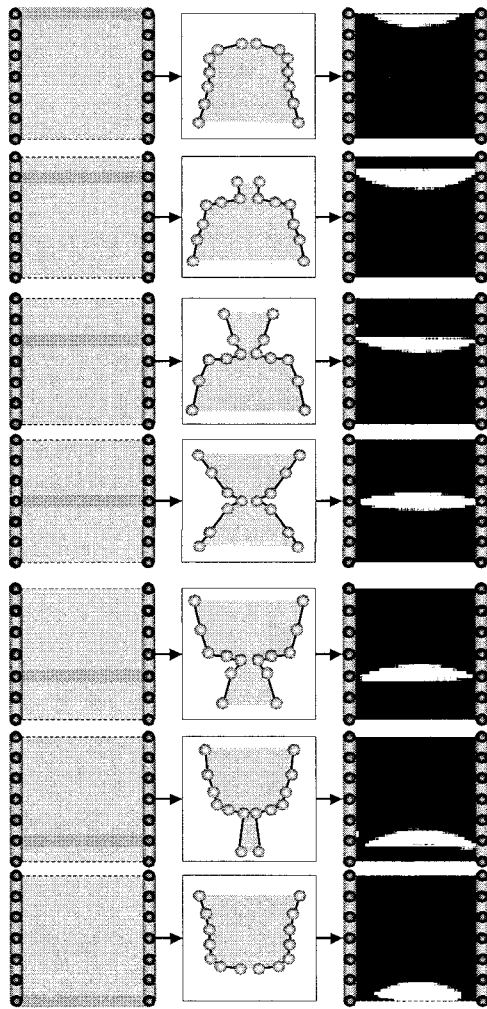


図-3.2 透水層が水平なモデル

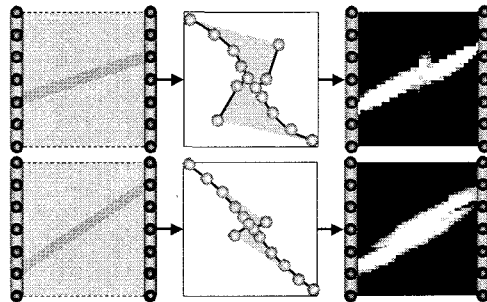


図-3.3 透水層が傾斜しているモデル

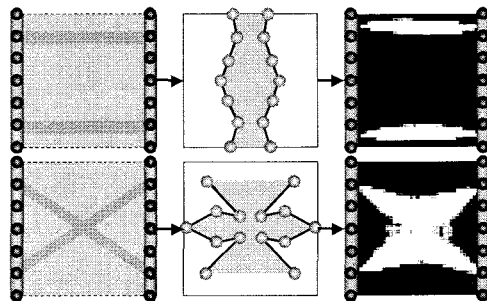


図-3.4 透水層が複数存在するモデル

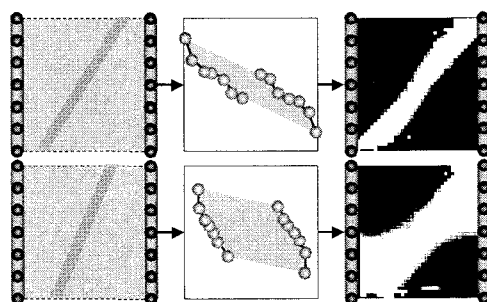


図-3.5 注水孔・観測孔と透水層が交差しがないモデル

3.2. 現場実験

本手法の実用性を検証するために、現場実験による検討を行った。

本研究では、地下発電所の調査横坑から削孔した2本のボーリング孔を用いてサイナソイダルクロスホール透水試験を行った。本地点の岩盤は白亜紀砂岩泥岩互層から構成される。図-3.6 は調査横坑から深度25～35mに設定した7つの注水・観測区間の配置を示したものである。横坑壁面の観察やボアホールテレビ観察により、本図に示す

ような急傾斜した破碎帯の存在が確認されている。なお、注水区間・観測区間とこの破碎帯は直接交差していない。

図-3.7 は注水点・観測点の水理学的布置と対象領域のイメージング結果を示している。これは対象領域において高透水層となりうる唯一の地質構造である破碎帯の位置をよく再現している。このことから提案手法が現場において高い適用性をもつことが確認された。

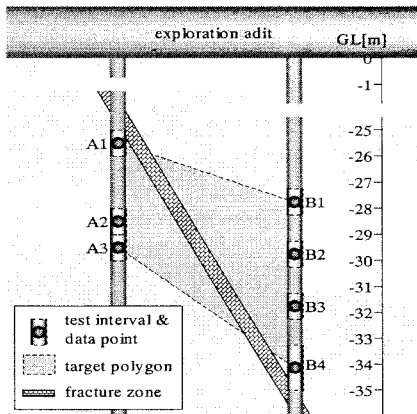


図-3.6 現場実験の概要

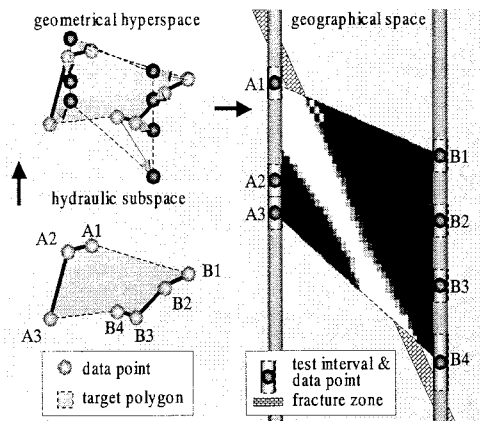


図-3.7 現場実験に対する手法の適用結果

4. 結論

本研究では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手法を提案した。本手法は観測点間の連結性をあらわす一連の水理データから多次元尺度法と逆距離補間法を用いて水理特性の空間分布を推定するものであり、主に掘削影響領域周辺の水理挙動を支配する不均質な地下水の流れを高精度に把握することを目的としている。

本手法の妥当性・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。また、この手法の現場での実用性を検証するために、現場データの解釈に適用したところ、高透水層となりうる地質構造とよく一致するイメージング結果をえた。

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ベクトル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などである。

今後は①イメージング結果と水理物性値との関連付け、②空間補間法の選定などを通した推定精度の向上、③3次元空間への拡張、を行っていく所存である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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