

多次元尺度法を用いた 岩盤の 3 次元水理地質構造評価法

青木 謙治¹・水戸 義忠²・張 傳聖³・佐藤 健一³

¹正会員 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
E-mail:aoki@kumst.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設や石油ガス貯蔵岩盤タンクにおいては空洞の貯蔵施設としての機能を確保・維持するために適切な地下水制御を行う必要があり、このためには岩盤の水理地質構造を精度良く把握することが極めて重要である。岩盤の水理学的な評価には、複数のボーリング孔を用いて孔井間の透水特性を 3 次元的に評価するクロスホール透水試験が有効である。本研究においては、多次元尺度構成法と空間補間法 (MDS-IDW 変換) を利用して、3 次元空間に位置するクロスホール透水試験結果から、3 次元の水理特性を評価するシステムを提案する。また、手法自体の妥当性を数値実験によって検証した上で、その有用性を現場実験によって検証した結果について報告する。

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の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・維持するために湧水を伴う割れ目に適切な止水処理を行わなくてはならない。このためには岩盤の水理地質構造を精度良く把握することが極めて重要である。特に坑道周辺岩盤の水理学的な評価には、複数のボーリング孔を用いて孔井間の透水特性を 3 次元的に評価するクロスホール透水試験¹⁾が有効とされている。

地下水は、一般的なトモグラフィーとは異なり、直線的に観測孔に到達するのではなく、卓越した透水経路を経由して観測孔に到達する。このことから、クロスホール透水試験の結果から水理地質構造をイメージングするにあたっては、既往の逆解析手法をそのまま適用することが難しく、卓越透水経路の評価が困難となっている。

この問題点を踏まえ、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 3 次元水理特性を評価する方法を提案する。また、手法自体の妥当性を数値実験によって検証した上で、その実用性を現場実験によって検証する。

2. 3 次元水理特性評価システム

本研究で提案するクロスホール透水試験による岩盤の 3 次元水理特性評価システムの内容を以下に述べる。

(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。

図-1 に示すような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。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システムにおいては、可能な限り注水孔でも観測を行うものとする。

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²⁾に譲る。

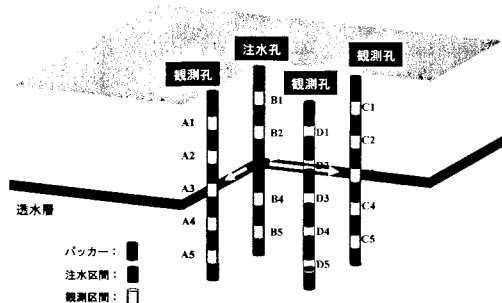


図-1 クロスホール透水試験の概念図

(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³⁾)。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。

(3) 水理学的空間から地理的空間への変換

水理学的空間においては距離の等しい任意の2点間の水理学的な連結性は等しくなる。このとき、水理学的空間内に均一に点群を設置すると、この点群は流体の流れにとつて、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。いま、図-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。

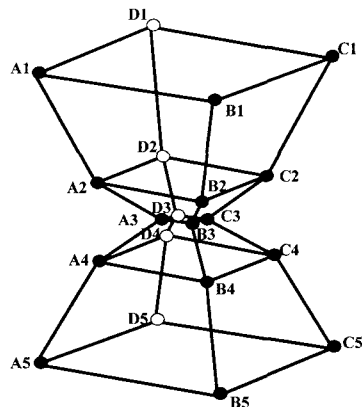


図-2 水理学的布置

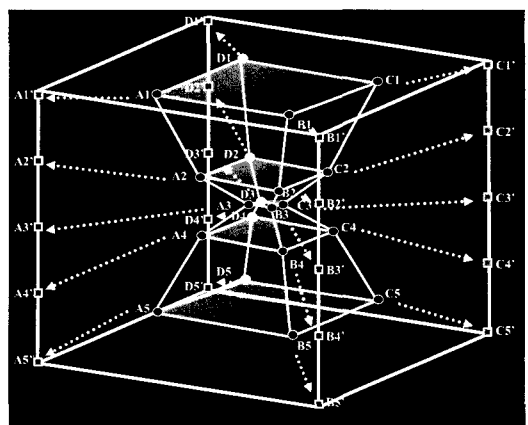


図-3 幾何学的再構成

表-1 水理学的距離行列

	a1	a2	a3	a4	a5	b1	b2	b3	b4	b5	c1	c2	c3	c4	c5	d1	d2	d3	d4	d5
a1		316	1318	2399	1862	3631	3631	2692	3802	3548	6918	5754	3548	5248	4467	6918	5754	3548	5248	4467
a2	316		288	891	1862	3631	2188	1072	1778	3548	5754	3090	1380	2512	4467	5754	3090	1380	2512	4467
a3	1318	288		398	1202	2692	1072	468	1000	1950	3548	1380	676	1259	2630	3548	1380	676	1259	2630
a4	2399	891	398		309	3802	1778	1000	2188	3090	5248	5248	1259	3020	4898	5248	5248	1259	3020	4898
a5	1862	1862	1202	309		3548	3548	1950	3090	3631	4467	4467	2630	4898	6918	4467	4467	2630	4898	6918
b1	3631	3631	2692	3802	3548		316	1318	2399	1862	6918	5754	3548	5248	4467	6918	5754	3548	5248	4467
b2	3631	2188	1072	1778	3548	316		288	891	1862	5754	3090	1380	2512	4467	5754	3090	1380	2512	4467
b3	2692	1072	468	1000	1950	3548	288		398	1202	3548	1380	676	1259	2630	3548	1380	676	1259	2630
b4	3802	1778	1000	2188	3090	2399	891	398		309	5248	5248	1259	3020	4898	5248	5248	1259	3020	4898
b5	3548	3548	1950	3090	3631	1862	1862	1202	309		4467	4467	2630	4898	6918	4467	4467	2630	4898	6918
c1	6918	5754	3548	5248	4467	6918	5754	3548	5248	4467		316	1318	2399	1862	3631	3631	2692	3802	3548
c2	5754	3090	1380	2512	4467	5754	3090	1380	2512	4467	316		288	891	1862	3631	2188	1072	1778	3548
c3	3548	1380	676	1259	2630	3548	1380	676	1259	2630	1318	288		398	1202	2692	1072	468	1000	1950
c4	5248	5248	1259	3020	4898	5248	5248	1259	3020	4898	2399	891	398		309	3802	1778	1000	2188	3090
c5	4467	4467	2630	4898	6918	4467	4467	2630	4898	6918	1862	1862	1202	309		3548	3548	1950	3090	3631
d1	6918	5754	3548	5248	4467	6918	5754	3548	5248	4467	3631	3631	2692	3802	3548		316	1318	2399	1862
d2	5754	3090	1380	2512	4467	5754	3090	1380	2512	4467	3631	2188	1072	1778	3548	316		288	891	1862
d3	3548	1380	676	1259	2630	3548	1380	676	1259	2630	2692	1072	468	1000	1950	1318	288		398	1202
d4	5248	5248	1259	3020	4898	5248	5248	1259	3020	4898	3802	1778	1000	2188	3090	2399	891	398		309
d5	4467	4467	2630	4898	6918	4467	4467	2630	4898	6918	3548	3548	1950	3090	3631	1862	1862	1202	309	

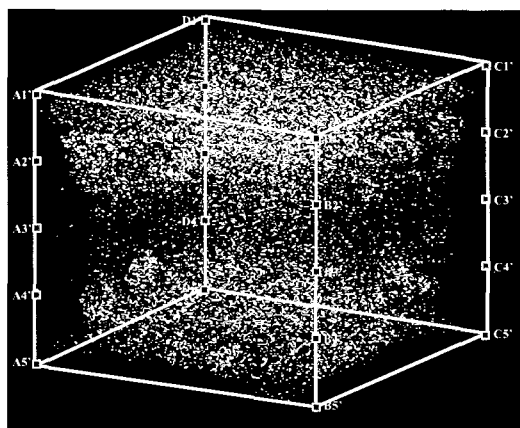


図-4 地理的空間に再配置された点群

- ① 水理学的空間 (hydraulic subspace) と地理的空間 (geographical subspace) 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 幾何学的超空間においては観測点の重心の位置が同一となるように配置する。
- ③ かつ、水理学的空間における観測点 (A1, A2, …, D5) と地理的空間における観測点 (A1', A2', …, D5') の距離の総和が最小になるように配置する。
- ④ 水理学的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、水理学的空間から地理的空間へ変換することができる。図-4 より点群の移動に関しては、空間補間法の中でも最も単純で平易なもののひとつである逆距離補間法 (inverse distance weight interpolation: IDW) を用いた。

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 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。

(4) 水理地質構造のイメージング

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。空間補間によって点群を再配置すると、均一であった点群の密度が不均質となる。この点群の密度を孔間内部の各領域で計数する。点群の密度は試験領域内の不透水性の程度をあらわし、点群の密度の小さい領域は透水性の高い領域、すなわち透水経路を示すこととなる。

3. 数値実験によるシステムの妥当性の検証

(1) 数値実験の方法

水理学的に均質等方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、3次元非定常有限要素法によるクロスホール透水試験のシミュレーションを行う。この解析結果に提案するシステムを適用してイメージングした推定水理地質構造と解析に用いた水理地質構造モデルを比較することによって手法の妥当性を検証した。以下に詳しい検討手順を示す。

① 解析領域の設定：図-5 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 1 本および観測孔 3 本を水平距離で 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・方向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 とした。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ものと考えられるが、今回の数値実験においては 10^2 m^1 と一定値を与えた。

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 3次元非定常有限要素法により、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、外側に 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

10cm³/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なう。

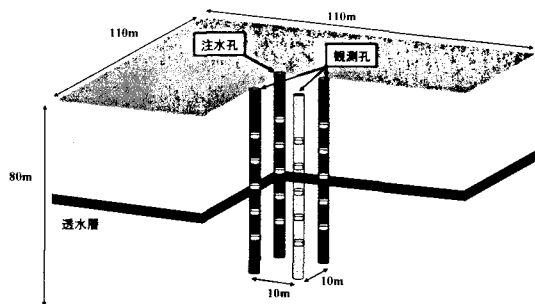


図-5 解析領域

(2)数値実験の結果

数値実験の結果を図-6 に示す。本図では、上段に設定した水理地質構造モデルを、下段に本手法により得られたイメージング結果をそれぞれ示してある。いずれも対応する水理地質構造モデルを高精度に再現できることから、本手法の妥当性が検証された。

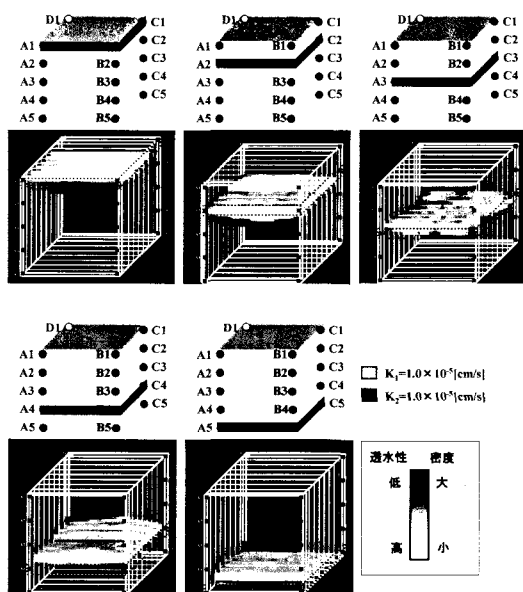


図-6(a) 数値実験結果(水平層)

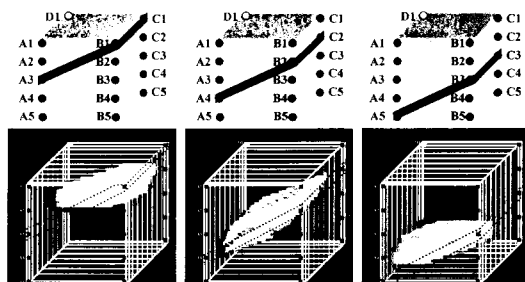


図-6(b) 数値実験結果(傾斜層)

4. 現場試験によるシステムの実用性の検証

原位置クロスホール透水試験結果に本システムを適用することにより、その実用性の検証を行った。

(1)原位置試験の概要

原位置透水試験は山梨県大月市葛野川発電所における中生代砂岩泥岩互層中の横孔から掘削した鉛直下向き 2 本、斜め 73° 下向き 1 本の計 3 本のボーリング孔を用いてサイナソイダル試験を実施した⁴⁾。試験地点の近傍には図-7 に示すように、東西走向で北に急傾斜した比較的大規模の大きい破碎帯が存在し、これとほぼ平行方向に節理や層理が発達している。ボーリングコアの平均 RQD は 50% 程度であった。

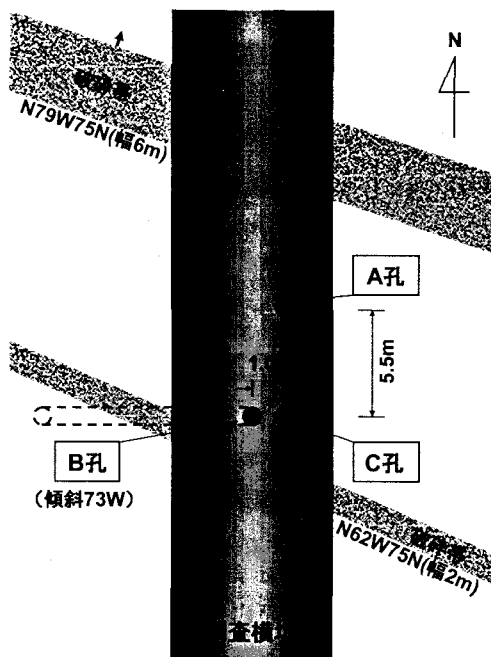


図-7 ボーリング孔配置(平面図)

(2) クロスホール透水試験

サイナソイダル孔間透水試験は、それぞれ No.2 孔を発信孔、No.1 および、No.3 孔を受信孔とした。試験区間長は図-8 に示すように 1m として、合計 24 測線を設定した。各試験区間の深度を表-2 に示す。ここで、発信区間に正弦波状の注水と揚水を繰り返し、受信区間における応答水圧を観測した。発信圧力の振幅は、0.02～0.2MPa の範囲で、また正弦波の周期は 30 秒～80 分の範囲で数段階に変化させた。

なお、試験期間中を通して 3 孔ともに若干の孔口湧水が観測され、試験地点の岩盤は飽和されているものと推定された。

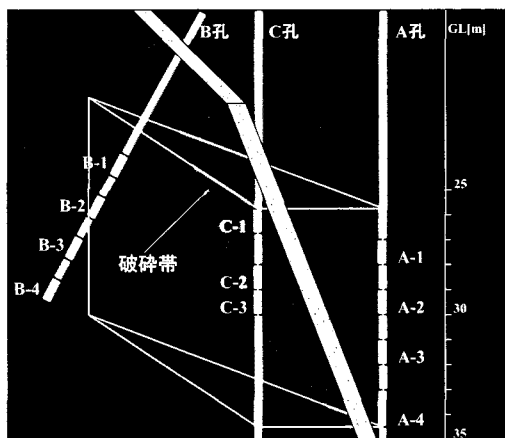


図-8 注水・観測区間の配置

表-2 各試験区間の深度 (m)

試験区間	上端深度	下端深度
C - 1	25	26
C - 2	28	29
C - 3	29	30
A - 1	27.2	28.2
A - 2	29.2	30.2
A - 3	31.2	32.2
A - 4	33.2	35
B - 1	28	29
B - 2	30	31
B - 3	32	33
B - 4	34	35

(3) イメージング結果と考察

図-9に対象領域の3次元イメージング結果を示す。点線は存在が確認されている破碎帯の位置を示したものである。この結果をみると、2次元イメージングで再現できなかった破碎帯の3次元的な分布を概ね良好な精度で再現できていることがわかる。

以上の結果から、原位置クロスホール透水試験結果に本研究で提案する手法を適用したところ、高透水層となりうる唯一の地質構造である破碎帯の3次元的な位置をよく再現していることが判明した。これにより提案する3次元イメージング手法が現場においても高い実用性を持つことが検証された。

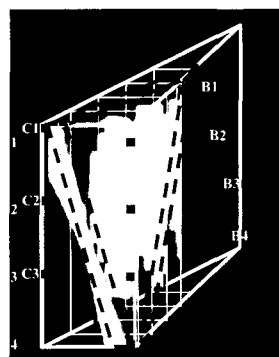
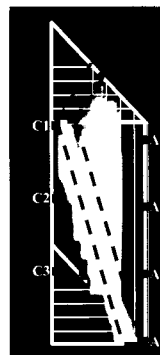
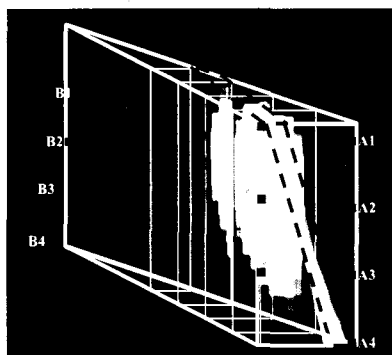


図-9 3次元のイメージング結果

5. 結論

本研究では、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3次元水理構造を評価する方法を提案した。また、数値実験および現場試験により、本システムの妥当性・実用性がそれぞれ検証された。

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) 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
- 3) 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
- 3) 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

THREE DIMENSIONAL IMAGING OF HYDRO-GEOLOGICAL STRUCTURE IN ROCK USING MDS-IDW TRANSFORM

Kenzi AOKI, Yoshitada MITO, Chuag Sheng CHANG and Ken-ichi SATO

The 3D 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 the rock cavern. The hydraulic data set from cross-hole hydraulic test represents hydraulic connectivity between different observation points. By processing these data, a spatial distribution map of hydraulic property is generated using 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. The applicability of the method to the field interpretation is also validated through an actual field study.