

岩盤の水理特性分布の評価に対する 多次元尺度構成法の適用

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地層処分施設においては貯蔵施設としての機能を確保・維持するために、建設段階における坑道周辺岩盤内の地下水制御をグラウチングなどによって実施することが重要である。確実に地下水制御を行うためには、坑道周辺岩盤の水理特性を支配する高精度な水理地質モデルの構築が必要不可欠となる。そこで筆者らは、クロスホール透水試験結果から不均質な岩盤の水理学的地質モデルを構築する方法として、多次元尺度構成法と逆距離空間補間法 (MDS-IDW変換) を利用したベクトルベースの逆解析方法を提案し、妥当性を数値実験によって検証してきた。本研究においては、この方法による水理特性分布の算定手法について述べるとともに、数値実験および現場実験による検証結果を示す。

Key Words : *hydraulic property, groundwater flow pathway, crosshole hydraulic test, multidimensional scaling (MDS), inverse distance weight interpolation (IDW)*

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、地下水の卓越透水経路となり、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。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、卓越透水経路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²⁾において計測の対象となる地下水は、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。

筆者らはこのような卓越透水経路の把握を目的として、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構造をイメージングする方法を提案し、その妥当性を数値実験によって検証してきた³⁾。今回は、この方法をさらに

高精度化するとともに透水係数分布を算定する方法を提案し、数値実験および現場実験結果を基にその検証を行う。

2. MDS-IDW変換によるイメージング手法の概要

ここではまず、過去に筆者らが提案したイメージング手法³⁾の概要について述べる。

(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-1a)。クロスホール透水試験は、岩盤内に1つの注水区間と多数の観測区間を設定した後、注水区間から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多数の観測区間の間の水頭拡散率 (透水係数/比貯留係数) を求めるものである。この試験によりイメージングにあたっての基本データを得る。

(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。いま、水頭拡散率の逆数によって定義される水理学的な観点からの点間の近さ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。また、このときの距離尺度を水理学的距離 (hydraulic distance) と呼び、点の空間配置のことを布置 (configuration) と呼ぶ。クロスホール透水試験を行うことによって得られた多数の点間の水頭拡散率データに対して多次元尺度構成法 (Multidimensional Scaling: MDS) を適用することにより、図-1b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。

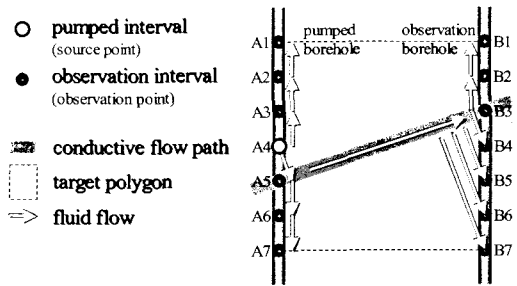
(3) 水理学的亜空間から地理的空間への変換

水理学的亜空間においてはあらゆる場所において距離の等しい任意の2点間の水頭拡散率は等しくなる。いま、この水理学的亜空間内に均一に点群を設置する。ここで、以下のa-dの仮定のもとで、図-1c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。

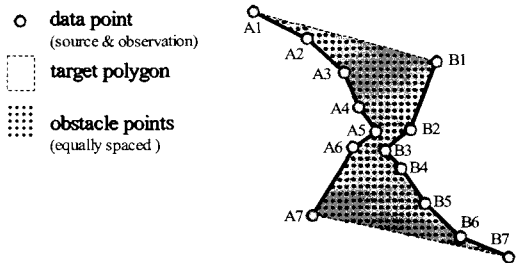
- 無次元の幾何学的な距離が尺度となる幾何学的超空間 (geometric hyperspace) において、2つの異なる空間に存在する布置を対応付けることができる
- それぞれの空間での観測点を結んでできる多角形の面積は、幾何学的超空間で等しい値をとる。
- 幾何学的超空間においては多角形の重心の位置が同一となるように配置する。
- 水理学的亜空間から地理的空間の同一点へのベクトルは幾何学的超空間において空間的相関性を持つ。このとき、超空間内に位置する同一観測点を結ぶベクトルを空間補完することによって、均一に設置した点群に対して移動ベクトルを決定すれば、その地理的空間上での配置を決定することができる (図-1d)。空間補完にあたっては、逆距離補間 (inverse distance weight interpolation: IDW) 法を用いる。

(4) 卓越透水経路の可視化

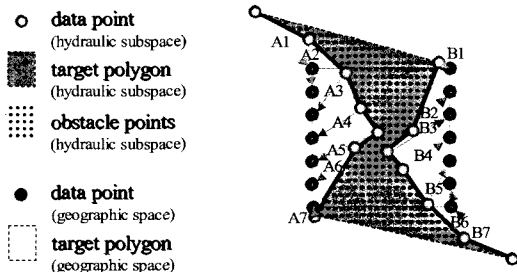
地理的空間における点群の密度は岩盤の不透水性の程度を意味すると考えられる。したがって、点群の密度分布図において密度の低い領域は水みちを表していることになる (図-1e)。



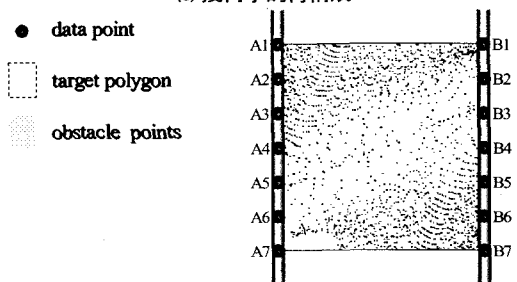
(a) クロスホール透水試験



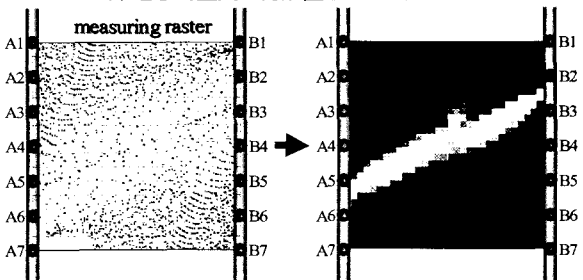
(b) 水理学的布置



(c) 幾何学的再構成



(d) 地理的空間に再配置された点群



(e) 点群の密度とイメージング結果

図-1 MDS-IDW変換によるイメージング手法の概要

3. イメージングの高精度化

これまでに数値実験や現場実験によってMDS-IDW変換によるイメージング方法の妥当性を検証してきたが³⁾、高透水層が注水孔および観測孔と交差していない場合については、やや精度が低くなる傾向が見られた。ここでは水理学的布置のパターンから、観測孔と交差していない卓越透水経路の存在を合理的に推測し、より精度の高いイメージング結果を得ることを考える。

まず、図-2のような解析条件のもとで、卓越透水経路のパターンを様々変化させてクロスホール透水試験の数値シミュレーションを行った。注水・観測に利用するボーリング孔は鉛直下向きであり、正方形の試験対象領域の両側方境界に位置する。なお、対象領域の上下境界にも仮定の観測点を設置し、対象領域を取り囲むように観測点を配置することで水理学的歪空間における対象領域の完全な形状を把握した。その結果、水理学的歪空間における対象領域の面積 S_d は水理学的距離の2乗の次元 $[T^2L^2]$ を持つ物理量であるが、この値は、クロスホール透水試験結果から得られた透水楕円の面積とほぼ等しいことが判明した。また、対象領域内に注水・観測に利用したボーリング孔と直接交差しない卓越透水経路が存在する場合には、水理学的歪空間における対象領域の形状に次のような特徴があることが判明した。

- ①水理学的歪空間における観測点を楕円で回帰すると、長軸が各ボーリング孔の布置を表す曲線と直交する。
- ②ボーリング孔の布置を表す曲線はいずれも対象領域の外側方向に凸となる。
- ③対象領域の上側境界ならびに下側境界の観測点をそれぞれ結んだ曲線間の距離は所定の位置で最小値をとる。
- ④上記①の楕円の長軸方向において、両ボーリング孔の上端あるいは下端の点から上記③の位置までの長さの比は、両ボーリング孔の上端と下端を結んだ直線の長さの2乗比とほぼ一致する。
- ⑤両ボーリング孔の上端あるいは下端の点から上記③の位置までの曲線の形状は、対象領域の外側方向に凸となる、べき乗関数で近似できる。

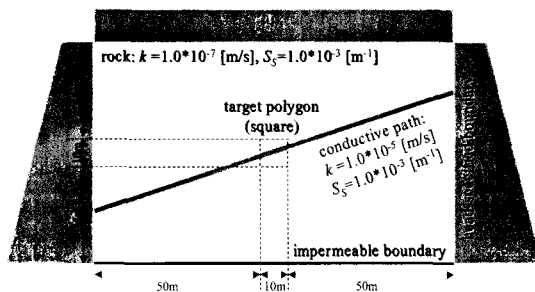


図-2 数値実験の条件

これらの特徴を基に、対象領域の上側境界ならびに下側境界を次の手順で推定する(図-3参照)。

- ①クロスホール透水試験結果から得られた水理学的布置に最小2乗法を用いて楕円をフィッティングさせる。このとき、ボーリング孔の布置を表す曲線と交差する楕円の軸の最大値および最小値はその軸方向の水理学的布置の最大値および最小値を超えないように制約条件を与える。
- ②水理学的布置で囲まれる面積が楕円の面積と同一になるように対象領域の上側境界および下側境界を規定するべき乗関数を決定する。なお、楕円の長軸がボーリング孔の布置を表す曲線と交差する場合には、長軸に沿った中間点で上側境界の関数と下側境界の関数の差が最小値とり、交差しない場合には短軸に沿った中間点で最大値をとることになる。
- ③決定した関数上に仮定観測点の水理学的布置をプロットする。このとき楕円の軸方向に対して等間隔で布置をプロットするものとするが、上記②の極値を取る点には強制的に布置を与えるものとする。

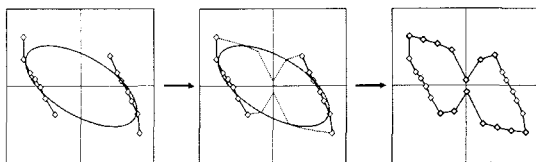


図-3 数値実験の概念図

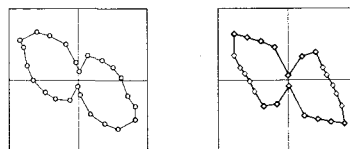


図-4 真の水理学的布置(左)と推定の布置(右)との比較

このような手順で推定した水理学的布置を上下境界上の観測点を既知として求めた水理学的布置と比較した一例を図-4に示す。両者がよく合致していることがわかる。

4. 岩盤の水理特性の評価

ここでは、イメージングの結果から岩盤の水理特性のうち透水係数分布を推定する方法を提案する。

(1) 観測点間の水理学的距離行列の算出

まず、観測点間の水頭拡散率 K/S_s に対して比貯留係数 S_s を仮定し観測点間の透水係数 K を算出する。得られた透水係数 K と観測点間の距離 D_g を用いて水理学的距離 D_h

を算出する，水理学的距離行列を作成する．水理学的距離 D_h は流れのトラベリングタイムに比例する値である．

$$D_h = \frac{D_g}{K} \quad (1)$$

(2) 水理学的布置の算出

水理学的距離行列に多次元尺度構成法を適用し水理学的布置を算出する．ここで水理学的布置によって囲まれる試験対象領域の面積 S_h は試験対象領域の水理特性を表す物性値であり，その平方根 $S_h^{1/2}$ は試験対象領域における水理学的距離 D_h の代表値となる．さらに，地理的空間における試験対象領域の面積 S_g を面積 S_h で除したものは透水係数 K の2乗の次元を持ち，その平方根は試験対象領域における透水係数の代表値 K_T と等しくなる．

$$K_T = \sqrt{\frac{S_g}{S_h}} \quad (2)$$

(3) 透水係数分布の算出

次に不透水性を表す指標となる点群を水理学的布置で囲まれる領域に配置する．ある均質性をもって配置した点密度 γ は水理学的布置によって表される面積 S_h と線形関係であるため， $\gamma^{1/2}$ は水理学的距離の代表値 $S_h^{1/2}$ および透水係数の代表値 K_T に比例する．この点群を逆距離補間によって地理的空間に再配置すると，対象領域の各所で点密度 γ が得られる．この点密度を次式で補正して γ を求め，透水係数 K_T と関連付ける．

$$\gamma_h = 5 \times 10^{-2} \exp(12.3\gamma'_h) \quad (3)$$

ここで，この補正式は数値実験結果のパラメータスタディにより得られたものであり，空間補間法に起因する偏りの影響を補正するものである．

5 数値実験による検証

(1) 数値実験の方法

図-2の解析条件のもとで，透水層の位置，傾斜，観測孔との交差の有無を変化させた7ケースの水理地質構造についてクロスホール透水試験（定流量注水試験）の数値シミュレーション（2次元非定常有限要素法浸透流解析）を行った．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．注水・観測に利用するボーリング孔は鉛直下

向きであり，1辺10m正方形の試験対象領域の両側方境界に位置する．注水点および観測点については1孔あたり7箇所設定し，順次注水を行うとともに観測点で水頭の経時変化を観測する．透水層の透水係数については透水係数を 10^3cm/s ，透水層以外については透水係数を 10^5cm/s と設定した．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^3 と一定値を与えた．

(2) 透水係数の推定結果

図-5(a)は透水層が水平に存在し位置が異なる4つのモデルについての評価結果である．どのモデルについても透水層の位置だけでなく透水特性分布も適切に表現できていることがわかる．

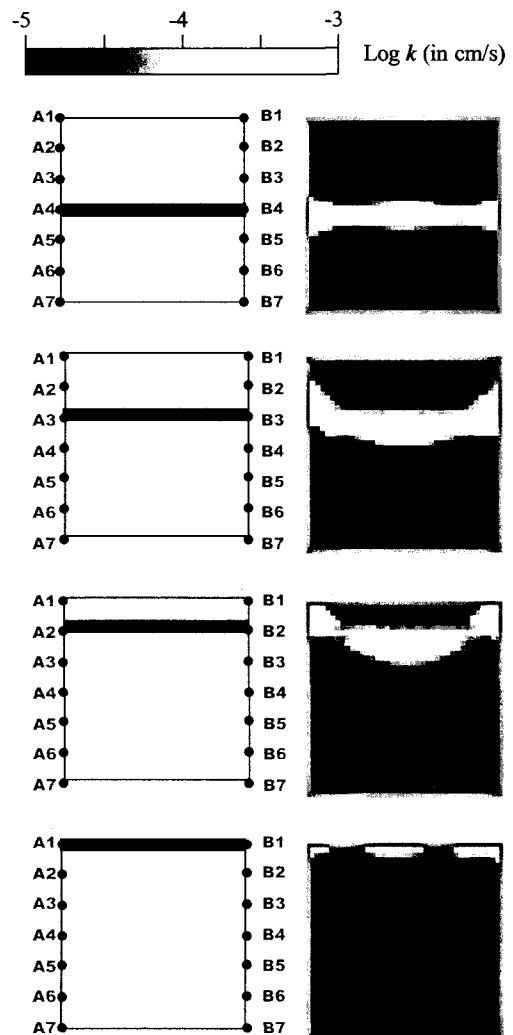


図-5(a) 透水係数分布の推定結果

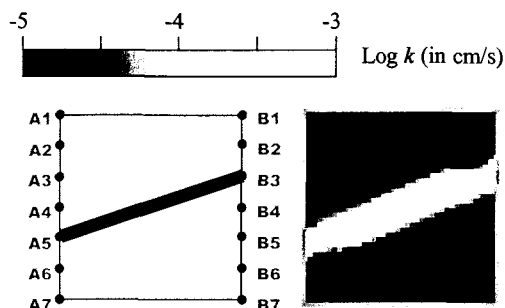


図-5(b) 透水係数分布の推定結果

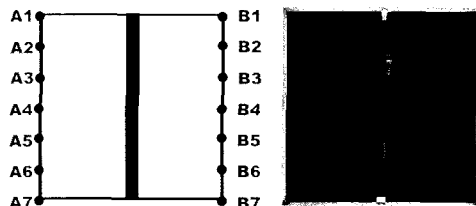


図-5(c) 透水係数分布の推定結果

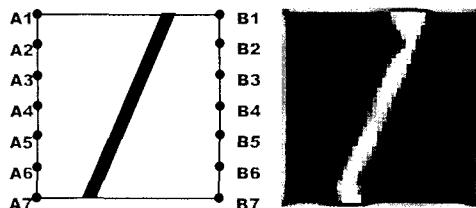


図-5(d) 透水係数分布の推定結果

図-5(b)は透水層が傾斜して存在するモデルについての評価結果である。透水層の位置、傾きだけでなく透水特性分布も適切に表現できていることがわかる。

図5(c)は透水層が観測孔と直接交差しがない場合についての評価結果である。一般に水理地質構造ならびに水理特性の評価が困難とされている本モデルについても、他のモデルに対する適用結果よりも精度は多少落ちるものの、透水層の透水係数のオーダーを良く再現しているといえる。これにより本手法が、透水層が観測孔と直接交差しがない場合についても透水層の位置だけでなく透水特性分布も適切に表現できるといえる。

図-5(d)は透水層が傾斜して存在しかつ観測孔と交差しがない場合についての結果である。このモデルに関しても透水層の位置、傾きだけでなく透水特性分布も適切に表現できていることがわかる。

以上の結果から本手法を適用することで得た水理地質モデルならびに水理特性分布が実際の水理地質構造を良く再現できることが確認され、提案する手法の妥当性、有効性が検証された。

5 現場実験による検証

(1) 現場実験の方法

本研究では新生代新第三紀層状堆積岩類のサイトにおいて実施された原位置クロスホール透水試験結果に提案手法を適用して、試験領域の透水係数分布を算定し、ボーリング孔壁面観察などの調査結果と比較することにより本手法の実用性を検証した。試験地点の鉛直断面図を図-6に示す。削孔深度はNo.1,2,4孔で40m、No.3孔では36.5mで、No.1,2,3孔にはΦ100mmの、No.4孔にはΦ75mmの塩ビケーシングが設置してある。No.1孔は深度17.15mから5m毎に4カ所、70cmのストレーナーが切っており、周辺岩盤と塩ビケーシングの間はストレーナーを含む1m区間は珪砂で、その他はベントナイトペレットで埋め戻されている。No.2孔はNo.1孔と同様にストレーナーが設置されており、No.3孔はストレーナーの位置が深度11.15mから5m毎に5カ所、70cmのストレーナーが切っている。No.4孔は深度4.5mから40mまで連続してストレーナーが切っており、周辺岩盤と塩ビケーシングの間は珪砂のみで埋め戻されている。

今回は、No.2孔を受信孔R、No.3孔を発信孔Sとし、それぞれ図-6に示すように発信、受信区間を設け、合計20測線を設定し、クロスホール透水試験の中でも、定流量試験を実施した。注水条件は、1区間につき毎分2Lずつ注水し、計40Lまで注水を続け、受信区間での間隙水压を測定した。注水終了後も最低60分間まで観測した。

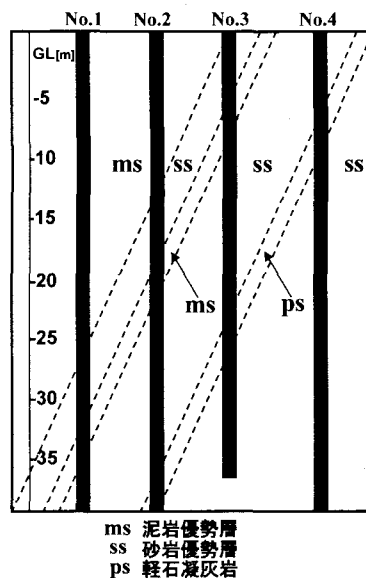


図-6 発信・受信区間の配置

(2) 透水係数の推定結果

図-7に透水係数分布の推定結果と地質断面図・RQD分布の対比を示す。平均RQDが砂岩、軽石凝灰岩に比べて大きい泥岩部については推定透水係数分布において低透水性を示している。また、砂岩部については、RQDの大きい上部（平均37%）、小さい中部（平均0%）、またやや大きい下部（平均32%）の3つの区間にわけることができるが、上部がやや透水性が高く、中部はこの試験領域内で最も透水性が低く、下部はやや透水性が低くなっており、RQD分布とよく対応している。多孔質な軽石凝灰岩の薄層については、高透水性を示している。

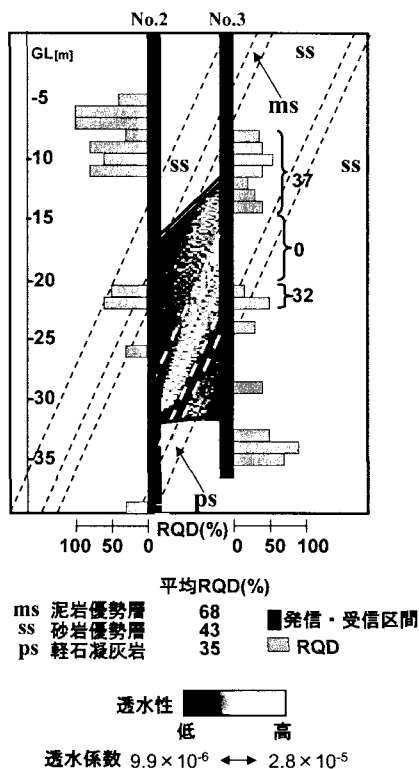


図-7 推定透水係数分布と地質断面図・RQDとの比較

以上より、透水係数分布の推定結果は、単斜構造を呈する本サイトの地質構造および地質分布とよく整合しており、また岩盤の不連続面分布の指標であるRQD分布ともよく対応していることがわかる。

7. おわりに

これまでに著者らは、多次元尺度構成法と逆距離空間補間法（MDS-IDW変換）を利用して、クロスホール透水試験結果から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してきたが、本研究においては、この方法の高精度化と推理特性分布の算定手法について検討・提案し、数値実験および現場実験により手法の妥当性を検証した。

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) Black, J.H. and Kipp, K.L.: Determination of hydrological parameters using sinusoidal pressure tests, *ater Resources Research*, Vol.17, No.3, pp.686-692, 1981
- 3) Aoki, K., Mito, Y., and Mori, T.: New imaging method for hydro-geological structure in rock masses by cross-hole hydraulic test, *3rd ARMS 2004*, 2004.

ESTIMATION OF HYDRAULIC PROPERTY IN ROCK USING MDS-IDW TRANSFORM

Kenji AOKI, Yoshitada MITO, Chuag Sheng CHANG and Ken-ichi SATOH

A method to estimate hydraulic property in rock mass is proposed in this study. 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 appropriateness of the methodology is validated through numerical experiments, and the applicability of the method to the field interpretation is also validated through an actual field study.