論 文

地盤統計学的手法を用いた土構造物の透水性の評価

山田淳夫 *1・上田祥央 *1・山下　亮 *1

盛土工事等では品質管理に締固め度の測定を行っているが，その頻度は1000m^{3}につき1回程度とそれほど多くはなく，構築した土構造物全体の代表値を測定しているとは言い難い。そこで，地盤統計学におけるクリギング法および条件付きシミュレーションを用いて，測定していない地点のデータを補間し，3次元モデルを構築する手法を適用した。この手法によって透水係数の分布モデルを生成することができ，土構造物の透水性能の評価を行うことが可能となる。この手法を用いて既往の施工試験のデータの測定頻度を変えた検討を行った結果，少ない測定頻度でも透水性能を適切に評価できる可能性があることを確認できた。

キーワード： 地盤統計学，放射性廃棄物，低透水性材料，ベントナイト混合土，浸透流解析

１．はじめに

放射性廃棄物処分場の核種漏洩抑制の計画では，人工バリアとしてベントナイトそのものやベントナイトを地盤材料と混合したベントナイト混合土を用いることとなっている[1)]。この人工バリアの主要な性能として，透水係数で1.0×10^{-10}m/sという，透水性に関する非常に高い要求水準が求められている[2)]。このような人工バリア材の施工管理では，道路や宅地などの盛土や一般廃棄物の最終処分場を参考とすることができるが，そこでの品質管理において測定するデータの頻度は数百m^3～千m^{3}につき1回程度と決して高くはなく，構築した土構造物全体の代表値を測定しているとは言い難い。このような，少ない測定頻度で構造物の性能を評価するのは困難である。

鈴木ら[3)]は，地盤統計学[4)]におけるクリギング法および条件付きシミュレーションより土質定数の空間分布の推定を行っており，田中ら[5)]は，施工時に採取した乾燥密度などのデータより，同手法を適用して測定値，測定位置の座標，平均値，分散から測定位置以外の場所のデータを統計的に補間する方法を適用して数値解析的に土構造物全体の透水性の評価を行っている。

本研究では，上述の田中らの手法を適用し，実際の施工試験時の測定頻度を変えた計算を実施することで，少ない頻度で品質管理を行った場合の影響を評価する。

２．本研究の流れ

本研究では，まず3章で施工データから透水係数を求める方法について示す。低透水性材料を対象とした透水試験は数十日を要し，施工時の品質管理に用いることは事実上不可能である。このため，施工現場では透水係数と相関性の高い代替指標を用いて品質管理を行う場合が多い。本論文では，乾燥密度・含水比・ベントナイトの混合率から求められる代替指標と透水係数との相関関係について説明する。

4章では，適用した施工試験の概要について説明した上で，本研究における施工目標や施工試験における施工方法・データの集計結果についてまとめる。また，施工時に取得したデータより代替指標を算出し，それと透水係数との相関性より透水係数を換算した例を示す。

5章では，施工試験で採取したデータを用いて地盤統計学的手法によるモデル化について述べ，この手法を適用することで得られる透水係数の空間分布モデルの作成例を示す。

6章では，5章に示した手順で作成した透水係数の空間分布モデルを用いて浸透流解析を行い，施工後の土構造物全体での透水性の評価結果を示す。ここでは，透水係数の空間分布モデルを，測定頻度を変えて複数作成することで，その影響を比較検討する。

３．透水係数の代替指標

３．１　代替指標の概要

透水係数の代替指標として，ダム現場などでは乾燥密度が用いられてきた事例が多い。また，土工事では締固め度D値（%）が指標として用いられる。このD値とは室内締固め試験で取得できる締固め曲線のピーク値である最大乾燥密度に対する密度比である。土工事では透水係数が適正な値となるよう，それとの相関性よりD値の下限値が95%以上となるように管理が行われる場合が多い。

*1 原子力部

次節では，締め固めたベントナイト混合土に最適化した代替指標について述べる。

３．２　本研究における代替指標

本研究で取り扱う材料はベントナイト混合土である。ベントナイト混合土は，一般的な土質材料と異なり吸水膨張することが特徴の一つである。

ベントナイトは混合土中の水分を吸収膨潤することで混合土中の間隙が充填される。その結果，混合土中のベントナイト分のみを考慮した密度は透水係数と強い相関性を持つことが知られている[6]。そのため放射性廃棄物処分の分野では，ベントナイト分のみの密度を考慮した物理量として，有効粘土密度 ρ_b，さらにはベントナイト中の膨潤に大きく影響を与える鉱物であるモンモロリナイトの密度を考慮した有効モンモリロナイト乾燥密度 ρ_{md} が用いられている。ρ_b および ρ_{md} はそれぞれ**式 (1)**，**式 (2)** のように表すことができる。

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \rho_d \dfrac{R_s}{\rho_s}} \qquad \text{式 (1)}$$

ここで，ρ_b：有効粘土密度 (Mg/m^3)，ρ_d：ベントナイト混合土の乾燥密度 (Mg/m^3)，ρ_s：ベントナイト混合土の土粒子密度 (Mg/m^3)，R_s：砂の混合率 (%)

$$\rho_{md} = \frac{\rho_b C_m}{100 - \rho_b \dfrac{(100 - C_m)}{\rho_{et}}} \qquad \text{式 (2)}$$

ここで，ρ_{md}：有効モンモリロナイト乾燥密度 (Mg/m^3)，ρ_{et}：ベントナイト中の随伴鉱物の土粒子密度 (Mg/m^3)，C_{m}：ベントナイト中のモンモリロナイト含有率 (%)

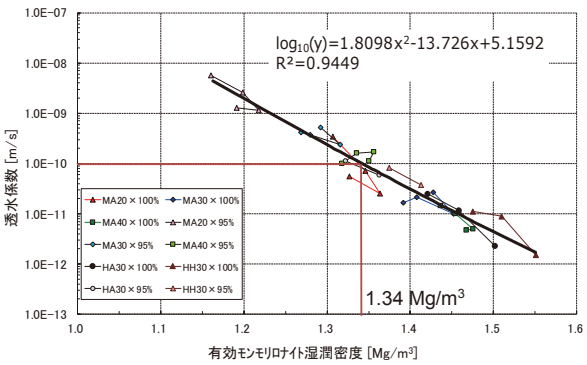
最近の研究・報告では，ベントナイトが吸水膨潤する挙動を考慮し，ベントナイト分の湿潤密度を考慮した有効モンモリロナイト湿潤密度 ρ_{ms} が新たな指標として**式 (3)** のように提案されている[2]。ρ_{ms} は**図－１**[2] に示すように，本研究で扱う貧配合のベントナイト透水係数と相関性が高いことより，その代替指標として採用することとした。

$$\rho_{ms} = \rho_{md} + \frac{\rho_b w \dfrac{100}{100 - R_s}}{100 - \rho_b \dfrac{(100 - C_m)}{\rho_{et}}} \qquad \text{式 (3)}$$

ここで，ρ_{ms}：有効モンモリロナイト湿潤密度 (Mg/m^3)，w：含水比 (%)

本研究では，ρ_{ms}と透水係数との間の相関より透水係数 k を求める。**式 (4)** および**図－１**中に記載の式は，その相関式である。

$$\log_{10}(k) = 1.8098{\rho_{ms}}^2 - 13.726\rho_{ms} + 5.1592 \qquad \text{式 (4)}$$



図－１　有効モンモリロナイト湿潤密度と透水係数の関係[2]

表－１　乾燥密度と換算した透水係数の関係

乾燥密度 (Mg/m^3)	透水係数 (m/s)
1.40	1.82×10^{-7}
1.45	4.61×10^{-8}
1.50	1.13×10^{-8}
1.55	2.67×10^{-9}
1.60	6.11×10^{-10}
1.65	1.35×10^{-10}
1.70	2.90×10^{-11}
1.75	6.03×10^{-12}
1.80	1.22×10^{-12}
1.85	2.39×10^{-13}
1.90	4.60×10^{-14}
1.95	8.70×10^{-15}
2.00	1.62×10^{-15}

ここで，k：透水係数 (m/s)

例として，含水比 w = 19.0%，砂の混合率 Rs = 70.0% とし，ベントナイト混合土の土粒子密度 ρ_s = 2.71(Mg/m^3)，ベントナイト中の随伴鉱物の土粒子密度 ρ_{et} = 2.81(Mg/m^3)，ベントナイト中のモンモリロナイト含有率 C_{m} = 82.0(%) とした場合，乾燥密度と透水係数の換算結果は**表－１**となる。

４．適用した施工試験の概要

４．１　施工の概要

表－２に示す Ca 型ベントナイト，**表－３**および**図－２**に示す砂によるベントナイト混合土を材料として，締固めの施工試験を実施した。施工手順を**図－３**に示す。

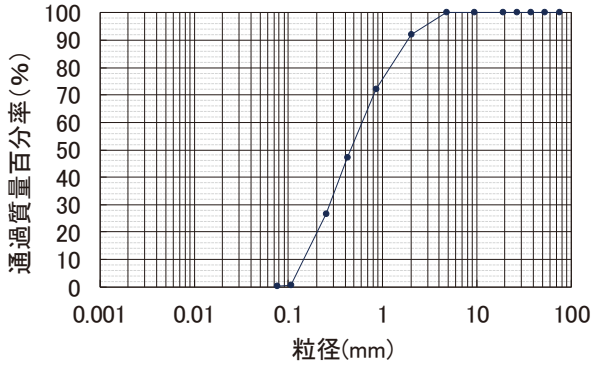
コンクリートピット脇の空間を模擬するために，**図－４**に示すような施工境界に砕石を転圧した抑え盛土とコンクリート壁（長手方向の１辺のみ）で施工箇所を取り囲むように配置した。抑え盛土はベントナイト混合土の施工高さを合わせるように交互に施工した。敷均しは小型フィニッシャを用いて延長 12 m（うち，有効試験区間長 10 m），幅 2 m，厚さ 100 mm で実施した。その後，コンバインドローラによる予備転圧（無振動）を行い，小型振動ローラ（1.5 t 級）で振動転圧した。8 回

表－２　Ca 型ベントナイトの材料特性

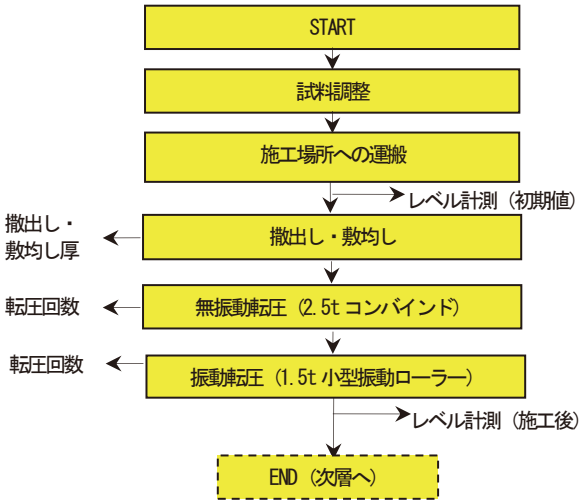
産地	宮城県苅田郡蔵王町
土粒子密度（Mg/m^3）	2.66
含水比（%）	10.6
pH	8.5
メチレンブルー吸着量（mmol/100g）	121
モンモリロナイト含有量（%）	86
膨潤力（ml/2g）	7

表－３　砂（三沢産コンクリート用細骨材）の材料特性

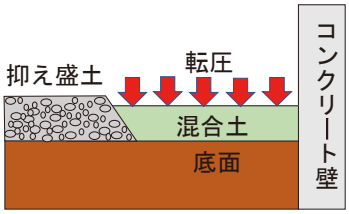
産地	青森県三沢市
土粒子密度（Mg/m^3）	2.730
自然含水比（%）	3.2
細粒分含有率（%）	0.2
最大粒径（mm）	4.8
均等係数　U_c	4.2
曲率係数　U'_c	0.85



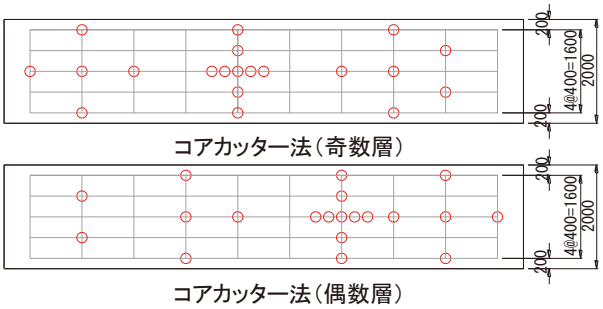
図－２　砂（三沢産コンクリート用細骨材）の粒径加積曲線



図－３　施工手順

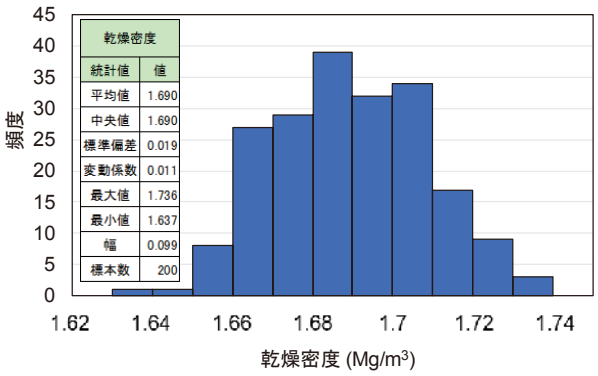


図－４　施工境界概念図

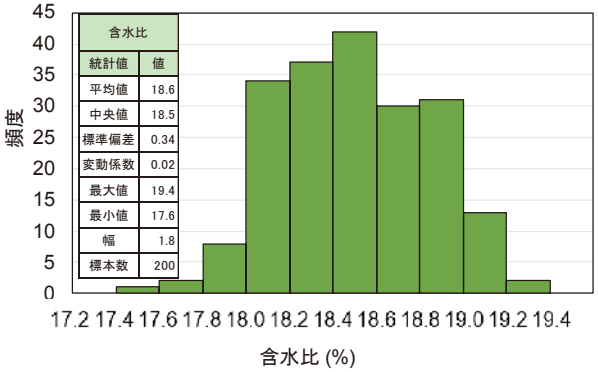


図－５　試験施工箇所の平面図と測定箇所

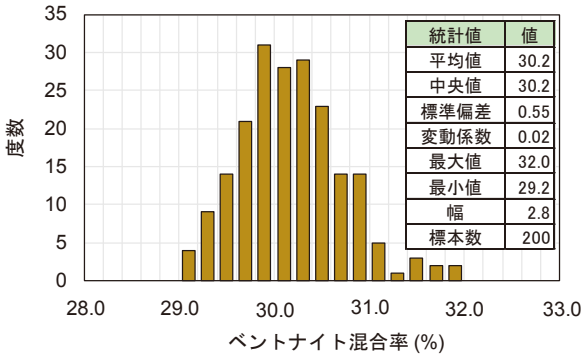
写真－１　施工試験の状況



図－６　コアカッター法による乾燥密度



図－７　コアカッター法による含水比



図－８　コアカッター法によるベントナイト混合率

の振動転圧後の層厚は 50mm 程度となった。転圧後は**図－５**に示す平面位置においてコアカッター法（JGS 1613-2012[7]）により各層の乾燥密度，含水比を測定した。施工試験では，以上の手順を 10 回繰り返した。施工試験の状況を**写真－１**[8] に示す。

４．２　施工試験結果

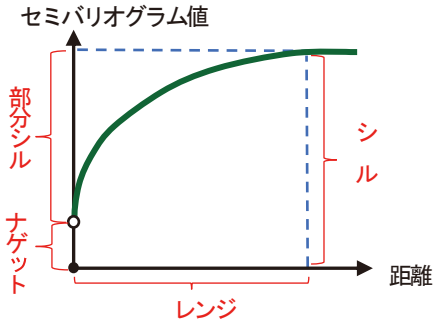
コアカッター法による測定は，**図－５**に示したように奇数層と偶数層とで採取位置を変えて合計 200 点実施した。このときの乾燥密度と含水比の測定結果を**図－６**および**図－７**に示す。コアカッター法による試料から，ベントナイトの混合率を測定した。ここで砂の細粒分含有率は十分小さく無視できるので，細粒分含有率＝ベントナイトの混合率とした。その測定結果を**図－８**に示すが，その度数分布によれば，ベントナイト混合率は 30.0 ± 2.0 % の範囲内にあった。

５．地盤統計学的手法による地盤のモデル化

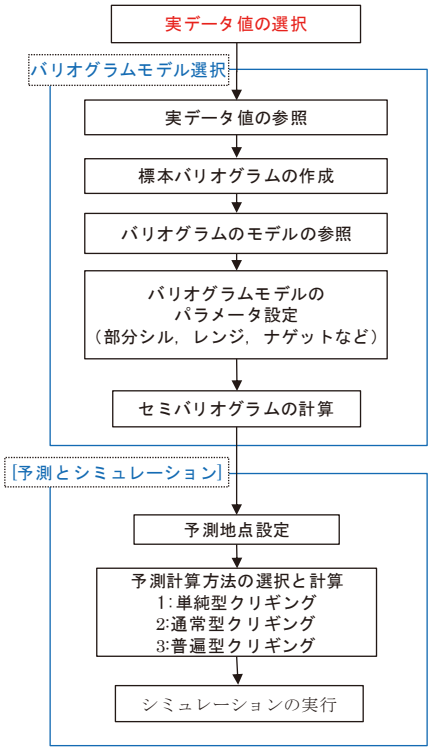
締め固めた粒状ベントナイト地盤の透水モデルを，地盤統計学的手法により不均一性を考慮して評価した事例[7] を参考にし，転圧後のベントナイト混合土地盤に対して適用した例をまとめる。本研究で用いる地盤統計学的手法としては，クリギング法と条件付きシミュレーションを採用した。

地盤統計学的手法では，**図－９**に示すような実データにフィットするバリオグラムモデルを設定（バリオグラムモデル選択）し，そのモデルを適用して予測地点における予測値を計算する（予測とシミュレーション）。バリオグラムモデルとは，データの相関性に関するモデルであり，本論文ではそれらについての詳細は省略するが，複数種類が提唱されている[4]。

予測値の計算では，バリオグラムモデルに対して最も適切とみなせる解を計算する方法（予測）および対象となる変数が確率変数であることを考慮し，乱数により多数の解を計算する方法（シミュレーション）がある。そ



図－９　標本バリオグラムとバリオグラムモデルの概念図



図－10　クリギング法における主な処理

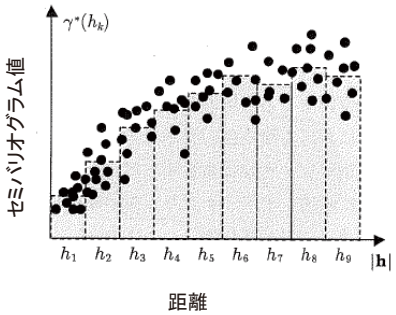
れらを合わせて「予測とシミュレーション」としている。本研究では，「予測」にあたるクリギング法は，その結果が不確実性を含むことを考慮し，その後に実施するシミュレーションの入力条件として用いることとする。

シミュレーションの一つである条件付きシミュレーションは，測定値のある箇所はそれをそのまま採用し，それ以外では予測値を算出するものである。以上の手続きを**図－10** のフローに示す。

５．１　クリギング法の概要

クリギング法[4] では，対象位置 $\vec{x}$（3 次元ベクトル表示）における変数 $z(\vec{x})$ を確率変数（値に対する確率が存在する変数）とする。また，実データは，測定位置における変数の確率分布に従った多くの可能性の中から，たまたま一つの値が実現された値とみなす。

また，クリギング法では，計算対象となる位置に対し，



図－11　標本バリオグラムの例
（参考文献 4）より抜粋・加筆）

実データから推定された値が求められる。この値は，確率を考慮して予測された値であるため「予測値」，計算対象個所は「予測地点」と呼ばれる。

さらに，本手法では実データに基づく標本バリアグラムを作成する。標本バリオグラムとは，全データ点から抽出したペア（2 点の組み合わせ）に対し，距離および実データの相関を示すグラフである。その例を**図－11** に示す。ペアは，距離が近いほど実データ間の相関が強い（実データ値の差が小さい）が，距離が大きくなるにつれて相関は弱くなっていく。

このようなペアの距離に対する値の相関度を表す値がセミバリオグラム値であり，**式 (5)** で求められる。

$$\gamma(h_k) = \frac{1}{2n_k}\sum_{i=1}^{n_k}\left[z(\vec{x_i}+\vec{h}) - z(\vec{x_i})\right]^2 \qquad \text{式 (5)}$$

ここで，$z(x_i)$：位置ベクトル $\vec{x_i}$ における実データ値
$\vec{h}$：セミバリオグラム値を計算するペア間のベクトル
n_k と $\gamma(h_k)$：2 点間距離 $|\vec{h}|$ が $\Delta h\cdot(k-1) \le |\vec{h}| < \Delta h\cdot k$ であるようなペアの数とセミバリオグラム値
Δh：標本バリオグラムを計算するための 1 つの区間の長さ

標本バリオグラムは，2 点間の距離が大きくなると 2 点間の相関性がなくなるため，セミバリオグラム値が一定値になる傾向がある。セミバリオグラム値が一定になるまでの距離を「レンジ」，一定になるセミバリオグラム値を「シル」と呼ぶ（**図－8** 参照）。実データ値の誤差などにより距離ゼロにおけるセミバリオグラム値が発生する。この値を「ナゲット」と呼び，シルからナゲットを差し引いた値を「部分シル」と呼ぶ。バリオグラムにおける主なパラメータは，部分シル，ナゲットおよびレンジである。本研究では，ナゲットと部分シルの合計値であるシルを入力パラメータとする。

次に，標本バリオグラムをバリオグラムモデルにあてはめる。このプロセスでは，バリオグラムモデルに適応するように部分シル，レンジ，ナゲットの各パラメータを推定する。パラメータの推定方法として本研究では，最尤推定法[9] を採用した。最尤推定法による判定はA.I.C 基準[10] により，この値が最大となるようにバリオグラムモデルの選択とパラメータの決定を行う。

バリオグラムモデルの選定とパラメータの設定がなされたら，予測地点における予測値の計算を行う。クリギング法では，予測値が既知のデータの線形結合で記述できると考え，その重み係数を推定誤差分散が最小となるように定める。既知の点 x_α (α=1,2,…,n) の確率場 $Z(x_\alpha)$の線形結合により，未知の点 x での確率場の予測値 $Z^*(x)$ は**式 (6)** のように表される。

$$Z^*(x) = \sum_{\alpha=1}^{n} w_\alpha Z(x_\alpha) \qquad \text{式 (6)}$$

ここで，$Z^*(x)$：未知の点 x での予測値，x_α：既知の点（α=1, 2, …, n），$Z(x_\alpha)$：既知の点 x_α（α=1, 2, ⋯, n）の確率場，w_α：既知の点 x_α（α=1, 2, ⋯, n）の重み係数

５．２　条件付きシミュレーションの概要

条件付きシミュレーションは，クリギングによる予測値が不確実性を含むことを考慮し，確率的に起こりうる多数の予測値を乱数により発生させる方法である。本手法では，オリジナルのクリギングにより推定される確率変数を $\hat{Z}(\vec{x})$ とし，それとは別個の確率変数 $S(\vec{x})$ をシミュレーションにより順次作成する。シミュレーションは繰り返し実行され，前回の結果から乱数により次の結果が作られる。

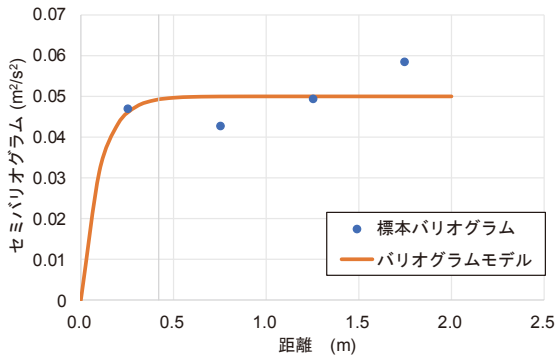
オリジナルのクリギング結果に対し，以下の**式 (7)** で新たな確率場の結果を付加し，条件付きシミュレーション結果とする。測定地点における値 $S(\vec{x})$ は，オリジナルの実データである $Z(\vec{x_i})$ と異なるが，**式 (9)** の右辺の括弧［ ］内が測定地点ではゼロになる。そのため，本手法では，測定地点において両者は同じ値になる。

$$T_n(\vec{x}) = \hat{Z}(\vec{x}) + \left[S_n(\vec{x}) - \hat{S}_n(\vec{x})\right] \qquad \text{式 (7)}$$

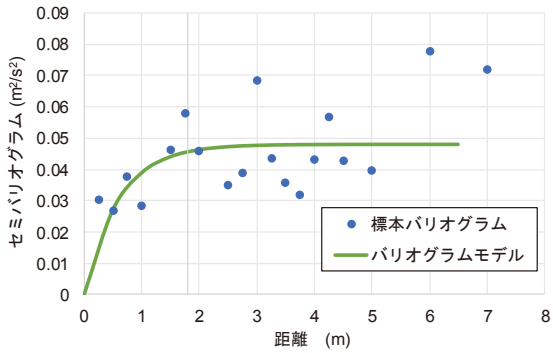
ここで，$\hat{Z}(\vec{x})$：実データ値 $Z(\vec{x_i})$ を用いたクリギング予測結果，$S_n(\vec{x})$：$S(\vec{x})$ の n 回目シミュレーション結果，$\hat{S}_n(\vec{x})$：測定地点における n 回目シミュレーション結果 $S_n(\vec{x_i})$ を用いたクリギング予測結果，$T_n(\vec{x})$：n 回目条件付きシミュレーション結果

５．３　モデル化

クリギング法によるモデル化にあたり，まず測定データである乾燥密度，含水比及び混合率を式（1）～（4）に代入して，測定位置における透水係数を求めた。次に，測定位置における透水係数を入力値としてクリギング法を適用した。例として，標本バリオグラムとバリオグラ



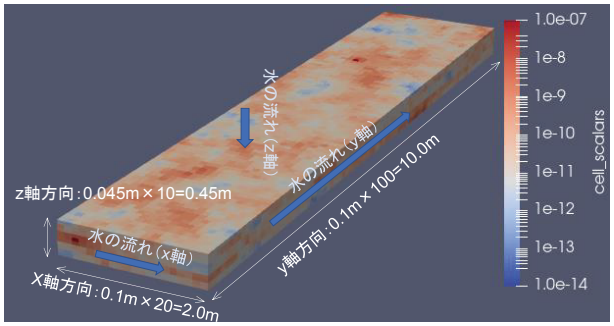
図－12　x 軸方向のバリオグラムの例



図－13　y 軸方向のバリオグラムの例

表－4　クリギング法の入力パラメータ

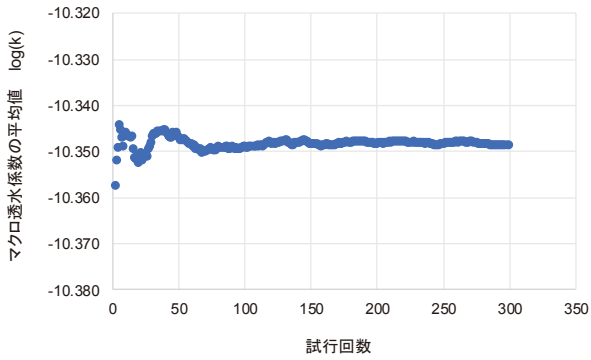
換算した透水係数		シル (m^2/s^2)	レンジ (x 方向) (m)	レンジ (y 方向) (m)
平均値 (m/s)	分散 (m^2/s^2)			
5.13×10^{-11}	0.0640	0.05	0.42	1.8



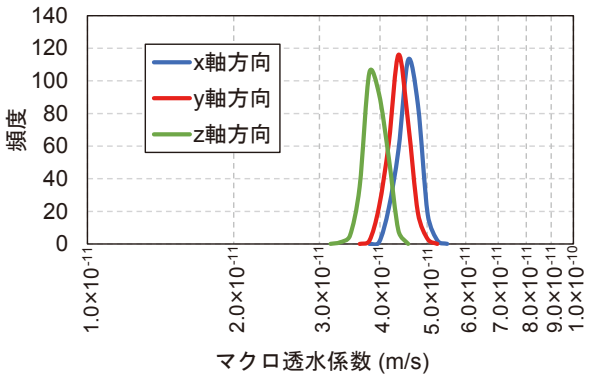
図－14　透水係数の三次元空間分布モデルの例

ムの選定結果を図－12 および図－13 に示す。図－12 は x 軸方向の，図－13 は y 軸方向の例である。モデルを当てはめて得られた部分シル・レンジの値を表－4 に示す。表－4 には，入力値として測定データより換算した透水係数の平均値・分散も併記した。

これらをパラメータとしてクリギング法による予測を行った。図－14 に最終的にクリギング法によって求めた透水係数の 3 次元分布の例を示す。同図では測定位置以外の透水係数が補間されているのが分かる。このようなク



図－15　マクロ透水係数の平均値の試行回数による推移



図－16　300 回試行後のマクロ透水係数の頻度分布

リギングの結果を用いて条件付きシミュレーションを 300 回実施した。シミュレーションでは試行ごとに図－14 のようなモデルが一つ生成される。本研究の解析対象の空間の寸法は施工試験後の土構造物体に等しくなるよう，2m × 10m × 0.45m とした。また，要素の大きさはコアカッター法での測定寸法を考慮して 0.1m × 0.1m × 0.045m とした。

6．地盤統計学的手法による透水性の評価

6．1　三次元飽和定常浸透流解析の概要

構造物全体を均一な透水係数を持つ要素と見立てた場合の等価な透水係数をマクロ透水係数[3]とし，これを評価するために，図－14 に示した方向に，一方向流れとなる動水勾配 0.1 を設定し，三次元飽和定常浸透流解析を行った。解析には Dtransu3D[11] を使用した。

マクロ透水係数は三次元飽和定常浸透流解析の結果より得られる領域から流出する断面流量から算出した。式 (8) にマクロ透水係数の算出式を示す。

$$k = \frac{Q}{Ai} \qquad \text{式 (8)}$$

ここで，k：マクロ透水係数 (m/s)，Q：断面流量 (m^3/s)，A：断面積 (m^2)，i：動水勾配

６．２　三次元飽和定常浸透流解析の結果

（１）シミュレーション回数の検討

三次元飽和定常浸透流解析において，解析が収束するために必要な条件付きシミュレーション回数を検討した。**図－15** に試行回数によるマクロ透水係数の平均値の推移を示す。平均値の推移とは，例えば，試行回数 50 回では，マクロ透水係数 50 個分の平均値と標準偏差を意味する。図によれば試行回数の増加に伴いこれらが収束していく傾向がみられ，試行回数は概ね 100 回程度で十分であることが確認できる。したがって，300 回の試行を行えば，十分にばらつきが排除された最尤値が得られるといえる。

300 回の試行による三次元飽和浸透流解析の結果より得られたマクロ透水係数の頻度分布を，**図－16** に示す。この解析では，x 軸，y 軸および z 軸に平行な三方向から通水させた。x 軸方向と y 軸方向ではほぼ同様な分布となったが，z 軸方向では卓越した低透水性を呈する結果となった。これは，異なる層間では通水しやすい要素のつながりが生じにくくなるためであると考えられる。

図－16 の結果よりマクロ透水係数の中央値は，x 軸方向；4.49×10^{-11}m/s，y 軸方向；4.27×10^{-11}m/s，z 軸方向；3.81×10^{-11}m/s であり，いずれも 1.0×10^{-10}m/s 以下と評価された。これは，低レベル放射性廃棄物の浅地中ピット処分施設の「難透水性覆土」に求められている透水係数の要求性能[2)] を十分に満足する値である。

（２）測定頻度の影響評価

図－４ に示した測定頻度（1m^2 につき 1 点）を基本ケースとして，測定頻度を 1/2 倍（2m^2 につき 1 点），1/4 倍（4m^2 につき 1 点）および 1/10 倍（10m^2 につき 1 点）にした場合のマクロ透水係数への影響を評価した。**表－５** にクリギングによる予測計算時の入力パラメータを示す。測定頻度を少なくしても，観測データから式 (1) ～式 (4) により換算した透水係数の平均値・分散の値は大きく変わらない結果となった。また，クリギング法の主な入力パラメータであるシル，レンジに関してもほぼ同じ結果となったため，ここでは基本ケースである 1m^2 につき 1 点の値を用いた。

同表に示した各ケースはクリギング法による予測計算結果を用いて条件付きシミュレーションを 100 回行い，100 個のモデルを生成したものである。三次元飽和浸透流解析は各ケースにつき 100 回行った。これにより，全 100 ケースのマクロ透水係数の計算結果について**図－16** のような中央値についてのヒストグラムが得られた。

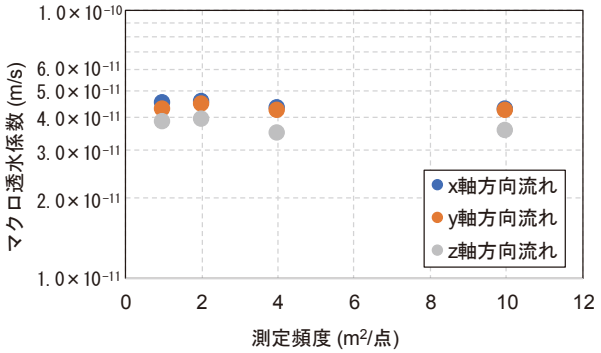
図－17 に 100 回の数値解析結果より得られたマクロ透水係数の中央値を示す。ここでは，x 軸方向と y 軸方向の流れの結果は各ケースとも大きな差はみられず，z 軸方向の流れのみ x 軸，y 軸方向よりも小さいマクロ透水係数となる傾向が見られた。

一方，測定頻度の違いによる差は見られなかった。これは，**表－５** に示したように各ケースの入力値がほぼ等しかったためであり，特に今回のケースでは透水係数の平均値・分散が測定頻度によらずほぼ一定値となったことが影響していると考えられる。

表－５　測定頻度の影響評価 入力パラメータ

測定頻度 (m^2/点)	換算した透水係数 平均値 (m/s)	換算した透水係数 分散 (m^2/s^2)	シル (m^2/s^2)	レンジ x 方向 (m)	レンジ y 方向 (m)
1	5.13×10^{-11}	0.0640	0.05	0.42	1.8
2	5.12×10^{-11}	0.0691	0.05	0.42	1.8
4	5.41×10^{-11}	0.0657	0.05	0.42	1.8
10	4.82×10^{-11}	0.0572	0.05	0.42	1.8

※シル・レンジは各ケースでほぼ同値だったので，特定頻度が最大のものに合わせた。



図－17　測定頻度のマクロ透水係数への影響評価

７．おわりに

本研究では地盤統計的手法であるクリギング法および条件付きシミュレーションを適用し，限られたデータ数から構造物全体の透水性を評価する手法を構築した。加えてマクロ透水係数の解析では浸透流解析を用いた。

この手法に基づく解析の結果，現場で採取するデータからマクロ透水性を評価することが可能であることが確認された。また，実際の施工試験データにより得られたマクロ透水係数は低レベル放射性廃棄物の浅地中ピット処分施設の「難透水性覆土」に求められている要求性能[2)] を十分に満足する結果が得られた。

測定頻度についての検討を行った結果，測定頻度を 1/10 にしても，測定値から算出される透水係数の平均値・分散が大きく異なることがなければ，透水性の評価は大きく変わらないことがわかった。この検討結果より，透水係数の平均値・分散に影響を与える要因（製造方法の違いによるばらつき，転圧方法の違いによるばらつき）を排除することが重要であることが確認できた。

本研究で得られた知見より，実際の施工の前に行う試験盛土で統計的に有意な頻度でデータを採取し，数値解析に入力するパラメータ（**式 (1)** ～**式 (4)** から換算した透水係数の平均値・分散およびシル・レンジ等）を取得しておけば，本施工時で取得された少ないデータを用いて施工直後の層全体の透水性を評価できる。

本研究では，透水係数の平均値及び分散が変化した時の透水性への影響を評価することが課題として残っており，今後順次取り組んでいく予定である。

謝辞

本研究で用いたクリギング法および条件付きシミュレーションのプログラムの整備および本論文の作成において，千葉工業大学　鈴木誠教授の指導いただくとともに，多大なるご支援をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参　考　文　献

1）経済産業省・資源エネルギー庁ホームページ：放射性廃棄について，低レベル放射性廃棄物，放射性廃棄物の区分と発生，http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html，2018.1.5 参照

2）工藤淳，浪岡翔吾，千々松正和，木村誠，矢込吉則：低透水性材料であるベントナイト混合土の施工品質を評価する代替指標の提案，第 50 回地盤工学研究発表会（札幌），D-10，pp.337-338，2015.

3）鈴木誠，石井清：土質定数の空間分布推定法を用いた確率有限要素法，土木学会論文集，第 394 号 / Ⅲ-9，PP.97-104，1988.

4）Hans Wackernagel 原著，地球統計学研究委員会 訳著，青木謙治 監訳：地球統計学，森北出版，pp.8-100，2003.

5）田中幸久，中村邦彦，工藤康二，廣永道彦，仲神元順，庭瀬一仁，小松進一：地盤統計学手法により不均一性を考慮した締め固めたベントナイト地盤の透水性評価，土木学会論文集 C，Vol.63 No.1，PP.207-223，2005.

6）田中俊之，戸井田克：礫砂ベントナイト混合土の透水特性と透水係数の評価方法，土木学会論文集 C，Vol.64，No.1，pp.101-110，2008.

7）地盤工学会：地盤調査の方法と解説，第 9 編　現場密度試験，第 5 章　コアカッターによる土の密度試験，pp.801-807，2012.

8）山田淳夫，永井裕之，千々松正和，石濱裕幸，田嶋宏之，荻原績：低レベル放射性廃棄物処分施設における難透水性覆土の高度化の検討，第 71 回年次学術講演会講演概要集，CS13-018，pp.35 ～ 36，2016.

9）間瀬茂：地球統計学とクリギング法　R と geoR によるデータ解析，オーム社，pp.84-100，2010.

10）赤池弘次，室田一雄：赤池情報量規準 AIC モデリング・予測・知識発見，共立出版，2007.

11）西垣誠：誌面講座　地下水数値計算法 (13)2-4. 物質輸送のその他の解析法－オイラリアン－ラグランジアン法 (EL 法) －，地下水学会誌，第 33 巻，第 4 号，pp.265 ～ 276，1991.

Evaluation of the permeability of soil structures using geostatisitics

Atsuo YAMADA, Akihiro UEDA and Ryo YAMASHITA

The degree of compaction is measured for quality control in embankment work. However, few measurements have been performed in quality management regarding the frequency of the degree of 1000m^3 / times. Therefore, it is difficult to say that the representative value of the entire constructed soil structure has been measured. Therefore, we created the program that can make a three-dimensional distribution model by interpolating the measurement data by kriging. For example, if the hydraulic conductivity is estimated from the correlation between the dry density and the hydraulic conductivity and is applied to this program, a distribution model of the hydraulic conductivity can be obtained. By using this hydraulic conductivity distribution model, it is possible to evaluate the hydraulic conductivity of soil structures. As a result of applying the data of the past construction test, it was confirmed that the construction was completed with the required performance.