

# ベントナイト混合土の巨視的透水係数評価手法に関する検討

平井 哲<sup>\*1</sup>・上田祥央<sup>\*2</sup>・山下 亮<sup>\*1</sup>・今井 久<sup>\*1</sup>

放射性廃棄物処分場の移行抑制機能を確保するためのベントナイト混合土には、巨視的透水係数が  $1 \times 10^{-10}$  m/s 以下であることが要求されている。しかしながら、現状では標準的な巨視的透水係数の計算方法がない状況である。本論文では、巨視的透水係数の計算方法として、浸透流解析による方法と Dagan の計算式による方法を比較した。その結果、浸透流解析による方法の説明性が高いことを確認した。また、実施時に巨視的透水係数を確認するために浸透流解析を行うには、かなりの時間を要する。そのため、実施時の巨視的透水係数の確認を簡略化する方法を検討した。その結果、実施前までに巨視的透水係数マップを準備する方法が有効であることを確認した。

キーワード：(巨視的)透水係数, ベントナイト混合土, 浸透流解析, 地盤統計学, 放射性廃棄物処分場

## 1. はじめに

放射性廃棄物処分場の核種漏えい抑制の計画では、放射性物質の閉じ込めおよび移行抑制のための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になっている<sup>1)</sup>。

この人工バリアの主要な性能として、浅地中処分のピット処分施設の難透水性覆土では、ベントナイト混合土の透水性能として、巨視的透水係数  $1.0 \times 10^{-10}$  m/s 以下という透水性に関する非常に高い要求基準が求められている<sup>2)</sup>。ここで、巨視的透水係数とは、ある領域について空間的なばらつきを考慮しても主要な部位ごとに全体として期待できる透水係数のことをいい<sup>2)</sup>、領域内で局所的にサンプリングして求めた透水係数とは区別される。

このベントナイト混合土のような低透水性材料の締固め工事の施工管理では、道路や宅地などの盛土や一般廃棄物の最終処分場の実績を参考にできるが、そこでの品質管理において巨視的透水係数を管理目標値とした施工実績は見当たらず、巨視的透水係数を求める標準的な方法がない状況である。

一方、既往の研究において、巨視的透水係数を評価した事例が幾つかある。例えば、山田ら<sup>3)</sup>は地盤統計学<sup>4)</sup>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、測定していない地点のデータを補間して構築した三次元モデルに対して浸透流解析を実施し、ベントナイト混合土の巨視的透水係数の評価を行っている。また、本島ら<sup>5)</sup>は、岩盤の原位置透水試験データを整理して、Dagan の計算式<sup>6)</sup>を用いて、岩盤が分布する領域の巨視

的透水係数を推定している。

本論文では、ベントナイト混合土の巨視的透水係数について、上述の山田らや本島らの巨視的透水係数の評価事例を参考に、浸透流解析を用いる方法と Dagan の計算式<sup>6)</sup>による方法について、例題を通じて説明性の高い方法を比較検討する。また、実施時に巨視的透水係数を求める際に、低透水性材料を念頭に置いた施工品質管理のための評価方法を検討する。

本論文は以下の構成になっている。

2章では、ベントナイト混合土を施工する場合の品質評価の流れを説明するとともに、本論文の検討課題について説明する。

3章では、2章で説明した検討課題を踏まえて、巨視的透水係数を求める方法を挙げ、それぞれの方法を説明するとともに共通の例題に対してそれぞれの方法で巨視的透水係数を計算し、計算結果を比較検討する。

4章では、3章の巨視的透水係数を求める方法の比較検討結果を踏まえ、ベントナイト混合土の施工品質管理のための巨視的透水係数の評価方法を検討する。

5章では、4章で検討した巨視的透水係数の評価方法を適用した事例を示す。

6章では、以上の検討結果をまとめるとともに、今後の課題についても提示する。

## 2. ベントナイト混合土の品質評価の流れ

図-1には、現状想定している巨視的透水係数を求める全体フローを示す。このフローは、既往の現場施工試

\*1 原子力部 \*2 土木研究部

験結果<sup>3)</sup>、既往検討<sup>8)</sup>や事業者の安全審査資料<sup>7)</sup>を参考に作成したものである。以下に、図-1について説明する。

- ①サンプリング調査は、実施工直後のベントナイト混合土の締固め土を対象に密度を取得する。
- ②地盤統計学的分析では、サンプリング調査で取得した密度のデータについて、標本の平均・標準偏差から、母集団の平均・標準偏差を評価する。また、サンプリングの位置情報と密度のデータを基にバリオグラムを作成し、空間的相関性の有無を確認する。
- ③空間的相関性があり、地盤統計学的の適用が可能な場合は、条件付きシミュレーション<sup>9)</sup>を適用して、密度の空間分布を作成する。また、空間的相関性がない場合は、評価した密度の母集団の平均と標準偏差に基づいた累積正規分布と乱数を用いて、密度の空間分布を作成する。
- ④分布の換算では、目標を達成するための指標の決定の段階や現場施工試験において得た密度と透水係数の関係を用いて、密度の空間分布を透水係数の空間分布へ換算する。
- ⑤浸透流解析による計算では、前段階で換算した透水係数の空間分布を基に有限要素法による三次元地下水浸透流解析を実施し、解析結果から巨視的透水係数を計算して求める。

既往の知見に基づいた巨視的透水係数を求める全体フローの現状案は、以上で説明したように、実施工において、密度を取得して、浸透流解析の実施後に巨視的透水係数が求められ、巨視的透水係数を確認するまでに時間を要する。本論文では、実施工時の品質管理において、巨視的透

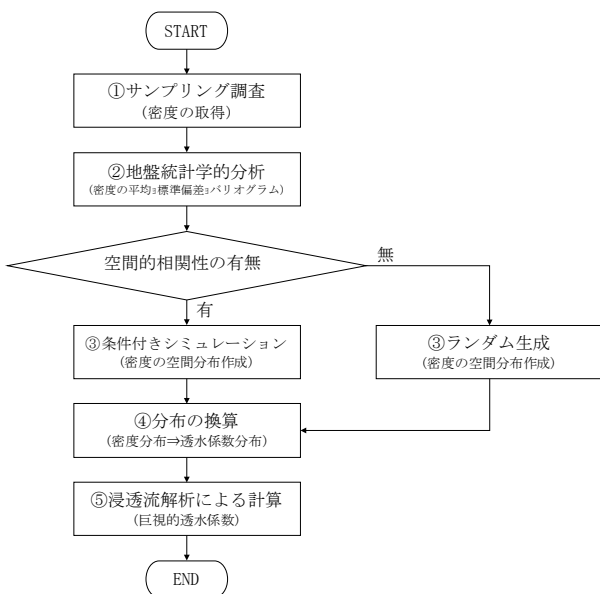


図-1 巨視的透水係数を求める全体フローの現状案

水係数を現状案のフローよりも迅速かつ正確性を損なわない方法について検討する。

次の3章では、巨視的透水係数を求める方法について整理し、迅速性や正確性に着目して比較検討する。

### 3. 巨視的透水係数を求める方法の整理

#### 3.1 巨視的透水係数を求める方法

ある領域内で複数サンプリングした透水係数から領域全体の巨視的透水係数を求める方法には、領域内の空間的な透水係数分布を求めてから浸透流解析によって全体の透水係数を計算する方法、および計算式から求める方法がある。以下に、それぞれの方法の概要を説明する。

##### (1) 空間的な透水係数分布を求めてから計算する方法

領域内の空間的な透水係数分布を求めてから全体の透水係数を計算する方法は、まずサンプリングした透水係数とサンプリング地点の領域内の空間的な位置情報を基に、サンプリングしていない位置の透水係数を地盤統計学的な補間や透水係数の確率分布に基づいたシミュレーションによって透水係数の三次元空間分布モデルを作成する。

この透水係数の三次元空間分布モデルは、図-2に示すような六面体要素の有限要素メッシュモデルとして表現される。

領域全体の巨視的透水係数は、この透水係数の三次元空間分布モデルに対して浸透流解析を行い、条件として与えた動水勾配および解析領域の形状ならびに解析結果の解析領域境界の流入出流量を用いて、ダルシーの法則に基づいた式(1)によって求められる。

この方法は、領域全体の流入出流量に基づいていることから、領域全体の透水係数を表していることの説明性が高い。また、透水係数の三次元空間モデルを多くのパターンについて作成して領域全体の透水係数を求め、全てのパターンの領域全体の透水係数の平均値を巨視的透水係数とする場合、パターン数が多いほど、巨視的透水係数の正確さが増す。

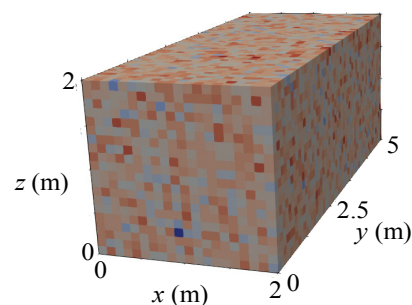


図-2 透水係数の三次元空間分布モデルの例<sup>8)</sup>

$$k = \frac{Q}{Ai} \quad (1)$$

ここで、 $k$  : 透水係数  
 $Q$  : 流入出面断面流量  
 $A$  : 流入出面断面積  
 $i$  : 動水勾配

(2) 計算式から求める方法

計算式から求める方法は、領域内でサンプリングした透水係数の確率分布が対数正規分布とみなせる場合、透水係数の常用対数平均値および常用対数標準偏差を用いて、式 (2) に示す Dagan の巨視的透水係数の計算式<sup>6)</sup>によって領域全体の巨視的透水係数を求める。

$$k_{eff} = 10^{\lambda_k} \left( 1 + \frac{c^2 \xi_k^2}{6} \right) \quad (2)$$

ここで、 $k_{eff}$  : 巨視的透水係数  
 $\lambda_k$  : 常用対数平均値  
 $c$  :  $\ln(10)$   
 $\xi_k$  : 常用対数標準偏差

この方法は、常用対数平均値と常用対数標準偏差から簡単に巨視的透水係数を求められる利点がある。

図-3は、式 (2) を基に巨視的透水係数  $1.0 \times 10^{-10}$  m/s になる透水係数の常用対数平均値と常用対数標準偏差の組合せをプロットして描いた曲線である。例えば、サンプリングした透水係数のデータから求めた常用対数平均値と常用対数標準偏差を図-3にプロットすることで目標値を満足するかの確認ができる。

ただし、この方法は、地盤統計学的な相関長がない場合に適用できる。

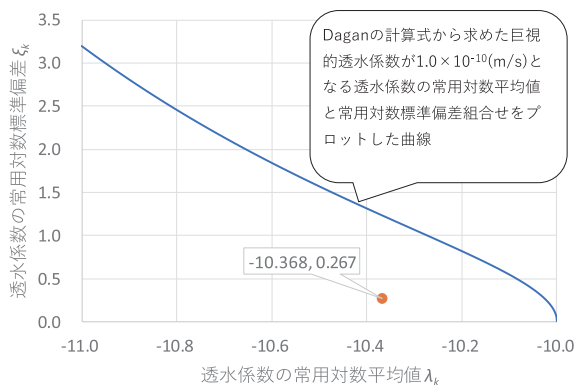


図-3 Dagan の計算式による平均値と標準偏差の関係

3.2 比較検討

(1) 検討条件

比較検討に用いる例題は、山田ら (2020)<sup>3)</sup> の研究で述べている現場施工試験とする。表-1には例題の諸条件

を示す。表-1に示す諸条件のうち現場施工試験の透水係数の標準偏差および相関長を比較検討の簡単化のために出典<sup>3)</sup>で設定している値から変更する。具体的な変更内容は、標準偏差については信頼区間を考慮しない条件、相関長については考慮しない条件に変更する。

比較検討の対象にする巨視的透水係数を求める方法は、前節 3.1 で説明した2つの方法に加え、透水係数の空間分布モデルの要素単位の透水係数を集計した結果も対象とする。ここで、透水係数の空間分布モデルの要素単位の透水係数を集計した結果とは、空間分布モデルの全要素の透水係数を算術平均および幾何平均した結果のことである。表-2には比較検討の対象にする巨視的透水係数を求める方法を示す。透水係数の空間分布については、相関長がない条件としたことから、ランダム生成により作成する。

表-1 例題の諸条件

項目		条件
空間モデル	形状・寸法	図-4参照
	節点数・要素数	22,331・20,000
現場施工試験の透水係数	データ数	200
	平均値 (m/s)	$5.13 \times 10^{-11}$
	標準偏差 (m/s)	$3.23 \times 10^{-11}$
	対数の平均	-10.368
	対数の標準偏差*	0.267
	相関長 (m)	0m

\* 例題の出典<sup>3)</sup>では、本論文の設定値と異なり、信頼区間95%としているため、値が3倍となっている。

表-2 比較検討の対象にする巨視的透水係数を求める方法

巨視的透水係数を求める方法		概要	
空間分布	浸透流解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>空間分布のパターン数 : 300</li> <li>コード : Dtransu3D-EL<sup>10)</sup></li> <li>計算条件 : 定常・飽和解析</li> <li>動水勾配 : 0.1 (X軸方向流れ)</li> <li>巨視的透水係数 : 流入出面の節点流量平均を流入出面積と動水勾配で除した値 300パターン分の平均値</li> </ul>	
	要素単位の集計	算術平均	<ul style="list-style-type: none"> <li>空間分布 : 浸透流解析と同じ</li> <li>巨視的透水係数 : 空間分布モデルの要素 20,000 個の透水係数の算術平均値 300パターン分の平均値</li> </ul>
		幾何平均	<ul style="list-style-type: none"> <li>空間分布 : 浸透流解析と同じ</li> <li>巨視的透水係数 : 空間分布モデルの要素 20,000 個の透水係数の幾何平均値 300パターン分の平均値</li> </ul>
Dagan の計算式*		<ul style="list-style-type: none"> <li>式 (2) の <math>\lambda_k</math> : -10.368, <math>\xi_k</math> : 0.268</li> <li>巨視的透水係数 : 式 (2) により計算</li> </ul>	

\*  $\lambda_k$  と  $\xi_k$  は、現場施工試験データの透水係数の対数の平均値と対数の標準偏差を示す。

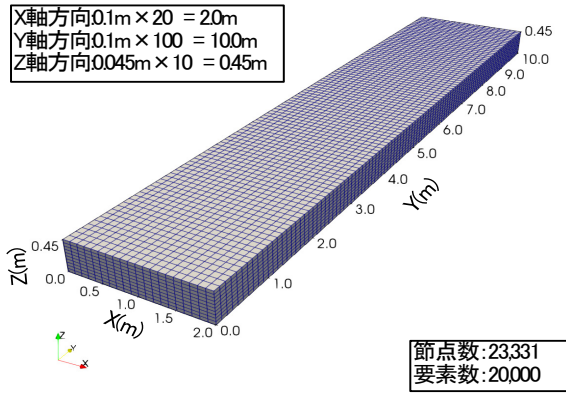


図-4 例題のモデル

(2) 計算結果および比較

表-3には、表-2の方法により巨視的透水係数を計算した結果を示す。

巨視的透水係数の大小関係は、表-3に示すように、大きい順に要素単位の算術平均値、浸透流解析、Daganの計算式、要素単位の幾何平均値となっている。

巨視的透水係数のばらつきは、表-3に示すように透水係数の空間分布を作成した浸透流解析および要素単位の集計では、変動係数が1%未満と小さい。これは、空間分布を作成した浸透流解析および要素単位の集計では300個の巨視的透水係数を集計しており、データのばらつきが打ち消されて小さくなっているためと考える。

表-3 巨視的透水係数の計算結果

巨視的透水係数を求める方法		巨視的透水係数 (m/s)	標準偏差 (m/s)	変動係数	計算時間 <sup>*1</sup> (分)
空間分布	浸透流解析	$4.65 \times 10^{-11}$	$2.28 \times 10^{-13}$	0.005	2470 <sup>*2,*4</sup>
	要素単位の算術平均	$4.94 \times 10^{-11}$	$2.48 \times 10^{-13}$	0.005	2470 <sup>*3,*4</sup>
	要素単位の幾何平均	$4.09 \times 10^{-11}$	$1.89 \times 10^{-13}$	0.005	2450 <sup>*3,*4</sup>
Daganの計算式 式(2)の $\lambda_i: -10.364$ , $\xi_i: 0.267$		$4.56 \times 10^{-11}$	—	—	30 <sup>*5</sup>

- \*1 サンプルデータが揃ってから巨視的透水係数が求められるまでの時間。
- \*2 計算には自動処理プログラム適用 (PCによる自動処理プログラムの計算時間: 40分)。
- \*3 計算には自動処理プログラム適用 (PCによる自動処理プログラムの計算時間: 20分)。
- \*4 PCのスペック (プロセッサ: Intel(R) Core(TM) i5-10310U CPU @ 1.70GHz 2.21 GHz, メモリ: 8.00 GB, OS: Windows 10 Pro(64bit))。
- \*5 Microsoft Excel でサンプルデータを整理の上、関数電卓で巨視的係数を計算。

図-5には、領域全部の要素の透水係数を母集団として求めた標準偏差を空間分布モデルごとにプロットし、空間分布モデル No. までの標準偏差の平均を描画したグ

ラフを示す。図-5に示すように、空間分布モデル個別の標準偏差は  $3.2 \times 10^{-11} \sim 3.4 \times 10^{-11}$  m/s の範囲ではらついているが、空間分布モデル No. までの平均は、集計する空間分布モデル No. が2を超えると  $3.3 \times 10^{-11}$  m/s 付近で一定となる。なお、表-1に示す現場施工試験データの標準偏差  $3.23 \times 10^{-11}$  m/s は、空間分布モデル個別の標準偏差の範囲内であり、作成した空間分布モデルがうまくばらつきをもって作成されていることがわかる。

以上から、巨視的透水係数を精度よく求めるには、ばらつきの観点からは、透水係数の空間分布を多数作成してそれらを平均するとよいことがわかる。

次に、具体的に作成する空間分布モデルの数について検討する。図-6には、空間分布モデルごとに浸透流解析から求めた巨視的透水係数をプロットし、空間分布モデル No. までの巨視的透水係数の平均を描画したグラフを示す。

空間分布モデル個別の巨視的透水係数は、図-6に示すように、 $4.6 \times 10^{-11} \sim 4.7 \times 10^{-11}$  m/s の範囲ではらついているが、空間分布モデル No. までの平均は、集計する空間分布モデル No. が5付近を超えると  $4.65 \times 10^{-11}$  m/s 付近で一定となる。なお、値が一定となる空間分布モデル No. は、要素単位の集計の場合も同様である。

以上から、空間分布モデルを多数作成してその平均値から巨視的透水係数を求める場合に作成する空間分布モデルの数は、モデルごとの値を平均した値が一定となる空間分布モデルの個数が10未満であることから、余裕を見込んで20以上作成すれば十分と考える。

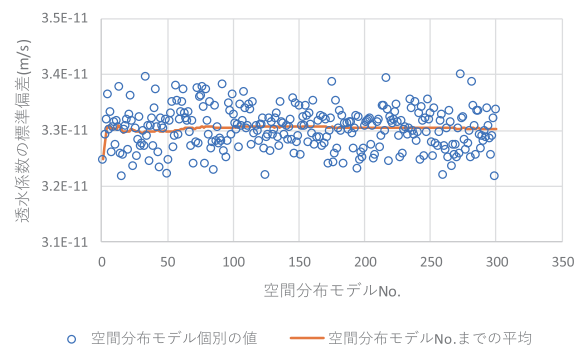


図-5 空間分布モデルごとの要素の透水係数の標準偏差

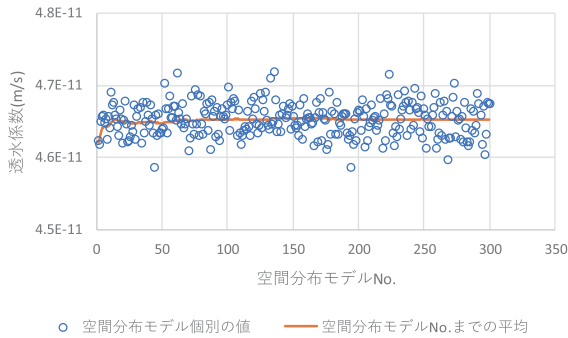


図-6 空間分布モデルごとの浸透流解析から求めた巨視的透水係数

これまでの比較検討結果と既往の知見を踏まえ、巨視的透水係数を求める方法について、求められる巨視的透水係数の正確性、安全性、求める際の簡便性に着目して相対的に評価する。正確性は、求めた巨視的透水係数の正確さの説明性の高さで評価する。安全性は、放射性廃棄物処分場からの核種漏えいを想定し、安全側に巨視的透水係数が大きい側に求められる方法を基準に評価する。簡便性は、透水係数のサンプリングデータが揃ってから巨視的透水係数が求められるまでの時間に着目して評価する。これらを踏まえ、表-4に比較検討結果をまとめた。

次の4章では、比較検討結果を踏まえて、図-1の巨視的透水係数を求める全体フローの現状案の問題点に対する解決策を検討する。

表-4 比較検討結果

巨視的透水係数を求める方法		正確性	安全性	簡便性	
空間分布	浸透流解析	◎	○	×*	
	要素単位の集計	算術平均	○	◎	×*
		幾何平均	○	×	×*
Daganの計算式		?	△	◎	

◎：非常に良い ○：良い △：標準的 ×：悪い ?：不明  
\*：相関長がない場合の評価。相関長がある場合、簡便性は低下。

#### 4. 施工品質管理のための評価方法の検討

本章では、2章の最後で述べたように、実施工時の品質管理において、図-1に示した巨視的透水係数を現状案のフローよりも迅速かつ正確性を損なわない方法について、3.2節の比較検討結果を踏まえて検討を行う。

3.2節の比較検討結果は、表-4に示すように、巨視的透水係数を求める方法のうち最も正確性の高い方法は、浸透流解析から求める方法である。安全性が最も高い方法は、空間分布モデルの要素の透水係数を算術平均して求める方法である。また、簡便性の最も高い方法は、

Daganの計算式から求める方法である。

以上のように、比較検討した巨視的透水係数を求める方法で迅速性と正確性の両者を兼ね備えた方法はないことから、工夫することを考える。

まず、巨視的透水係数を求める方法のうち簡便性の高いDaganの計算式による方法に着目する。図-3に示したDaganの計算式による透水係数の常用対数標準偏差と常用対数平均値の関係は、巨視的透水係数が $1.0 \times 10^{-10}$  m/sとなる透水係数の常用対数平均値と常用対数標準偏差をプロットして描いた曲線である。例えば、巨視的透水係数の目標値が $1.0 \times 10^{-10}$  m/s以下、サンプリングした透水係数のデータから求めた常用対数平均値と常用対数標準偏差がそれぞれ-10.368と0.267である場合、これらの値を図-3にプロットすると、巨視的透水係数 $1.0 \times 10^{-10}$  m/sになる透水係数の常用対数平均値と常用対数標準偏差の組合せをプロットした曲線の下側になり、巨視的透水係数が $1.0 \times 10^{-10}$  m/s以下になることが分かり、簡単に目標値を満足することを確認できる。しかし、Daganの計算式による方法の巨視的透水係数は、浸透流解析から求めた場合に比べ、値自体には大きな差がないが、浸透流解析から求めた場合に比べて小さくなる傾向があり非安全側の値となる。よって、Daganの計算式による方法を適用すると、後段の検討や安全評価などでパラメータとして使う場合に、安全側に数値を丸める必要があり、説明を要することになる。

そこで、透水係数の空間分布モデルによる浸透流解析を利用して、図-3のような簡単に巨視的透水係数がわかる図（以降、巨視的透水係数マップと呼ぶ）を作成することを考える。

透水係数の空間分布モデルを作成するには、領域内の要素の透水係数が必要である。通常の作成方法は、現場でサンプリングしたデータの平均値、標準偏差やバリオグラム分析結果を基に、領域内の要素の透水係数を相関長の有無によって、条件付きシミュレーションやランダム生成によってデータの無い要素の透水係数を補間または確率分布を利用した不均質場を作り出し、領域内の全要素について透水係数が設定される。

透水係数の空間分布モデルを作成するためのインプット情報は、領域の形状、領域内の透水係数の平均値、標準偏差および相関長である。平均値、標準偏差および相関長は、通常、実施工後にサンプリングしたデータから求めるが、サンプリングデータがなくても、平均値、標準偏差および相関長を設定すれば、空間分布モデルを作成することができ、その空間分布モデルを基に巨視的透

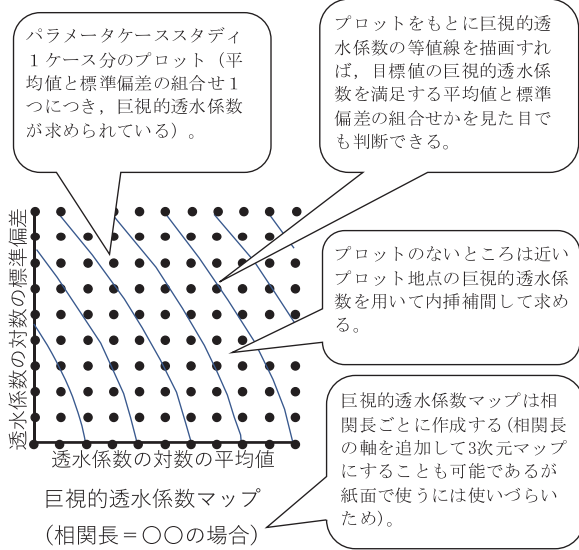


図-7 巨視的透水係数マップのイメージ

水係数を求めることができる。

巨視的透水係数の目標値とモデル化する領域の形状を与えられれば、領域内の要素の透水係数の平均値、標準偏差、相関長の現実的に取りうる範囲は経験的に設定可能である。例えば、巨視的透水係数の目標値を  $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$  以下とした場合、巨視的透水係数は空間分布モデル内の要素単位の透水係数のばらつきを見込んでいることから、巨視的透水係数の目標値を満たすには、要素単位の透水係数のばらつきを考慮するとその平均値が巨視的透水係数よりも小さい値でなくてはならない。また、要素単位の透水係数の標準偏差は、きちんと施工すれば、その平均値のオーダー内に収まると考える。さらに、既往の現場施工試験の実績<sup>3)</sup>によると、サンプリングデータの透水係数の平均値と標準偏差は、対数でそれぞれ -10.4 程度と 0.2 ~ 0.3 である。以上のことから、領域内の要素の透水係数の平均値および標準偏差の現実的に取りうる範囲は、それぞれ巨視的透水係数の目標値から 1 オーダ小さい範囲、および 1 オーダ以内と設定することができる。一方、相関長の現実的な範囲は、領域内の 2 点間距離の最大値以内となる。これらの設定した範囲内でそれぞれのパラメータについて、適当な間隔でパラメータケーススタディを実施することによって、それぞれのケースで求めた巨視的透水係数との関係を図-7に示すような巨視的透水係数マップとしてまとめておけば、平均値、標準偏差および相関長を与えれば、巨視的透水係数を簡単に求めることができる。

なお、領域内の要素の透水係数は、対数正規分布に従うことから、確率分布を利用する計算では透水係数を対数で扱うことに注意する。

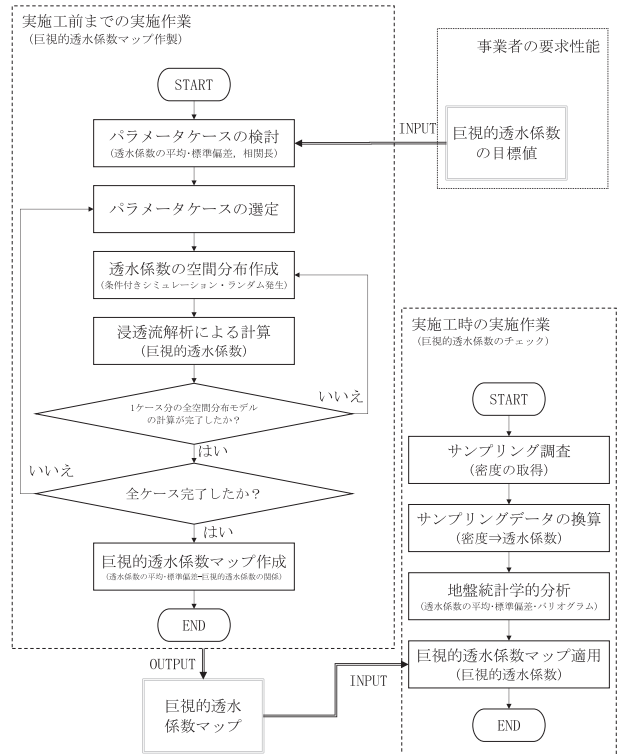


図-8 巨視的透水係数を求める全体フロー案の改訂版

表-5 ケーススタディの諸条件

項目	条件	備考
巨視的透水係数の目標値	$1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下 (対数で -10.0 以下)	参考文献2) による
空間分布モデル	形状・寸法	図-4 参照
	節点数	22,331
	要素数	20,000
要素透水係数のパラメータケース	対数の平均	-11 ~ -10 (0.1 ピッチ) ... 11 パターン
	対数の標準偏差	0.0 ~ 1.0 (0.1 ピッチ) ... 11 パターン
	相関長 (m)	0.0 (相関なし)
		全 212 ケース

巨視的透水係数マップの作成には、実施工時のサンプリングデータは必要ないことから、実施工前に準備することが可能であり、巨視的透水係数マップを用いれば、実施工時に透水係数の空間分布モデルを作成して浸透流解析を実施する時間を省略することができる。

図-8には、図-1の巨視的透水係数を求める全体フローについて、巨視的透水係数マップを実施工前に準備するように見直したフローを示す。見直し後の全体フローでは、多くのパラメータケーススタディを実施する必要から、実施工前に実施する作業量が増えるが、巨視的透水係数マップが実施工前に利用できる状態になれば、実施工時の巨視的透水係数のチェックにかかる

作業量を減らすことができる。

次に5章では、ケーススタディとして、巨視的透水係数マップを作成する。

## 5. 巨視的透水係数マップの作成例

### 5.1 ケーススタディの条件

4章で見直した巨視的透水係数を求める全体フロー案の改訂版(図-8)を基に、ケーススタディとして、巨視的透水係数マップを作成する。

ケーススタディの題材は、3.2節の比較検討における例題と同様に、山田ら(2020)<sup>3)</sup>の研究における現場施工試験とし、検討範囲の形状や現場施工試験のサンプリングデータについても同じ条件とする。

表-5に示すケーススタディの諸条件について説明する。

巨視的透水係数の目標値は、 $1.0 \times 10^{-10}$ m/s以下(対数で-10.0以下)とする。また、空間分布モデルの形状・寸法、節点数および要素数は、3.2節の例題と同じとする。空間分布モデルの数は、3.2節(2)の図-6における空間分布モデルNo.と透水係数の関係の説明でも述べたように、20個以上あれば十分であるが、3.2節の例題に合わせて300個とする。

次に要素透水係数のパラメータケースの設定方法について説明する。

巨視的透水係数の目標値が $1.0 \times 10^{-10}$ m/s以下(対数で-10.0以下)の場合には、要素透水係数が $1.0 \times 10^{-10}$ m/sよりもできる限り小さく、かつばらつきも小さくなることを目標に施工することから、実施時に適切な施工を行えば、ごく一部の要素透水係数が $1.0 \times 10^{-10}$ m/sよりも大きくなったとしても、巨視的透水係数が $1.0 \times 10^{-10}$ m/sよりも大きくなることはないと考え。したがって、実施後にサンプリングした透水係数の平均や標準偏差はオーダー単位で変化しないと考え、要素透水係数の平均が巨視的透水係数の目標値よりも1オーダー小さい範囲に収まるとして要素透水係数の対数の平均の範囲を-11~-10、ばらつきも1オーダーも変化しないとして要素透水係数の対数の標準偏差の範囲を0~1に設定する。また、パラメータのピッチは、巨視的透水係数マップにおいて、パラメータケース間の平均値と標準偏差の組み合わせについて同じ精度で巨視的透水係数を内挿補間して求められるように等間隔とし、パラメータ範囲を10分割とする。

相関長については、図-9に示す現場施工試験でサンプリングした密度から換算した透水係数とサンプリング位置から作成したバリオグラムにおいて、相関長が認め

られないことから、相関長を0とする。

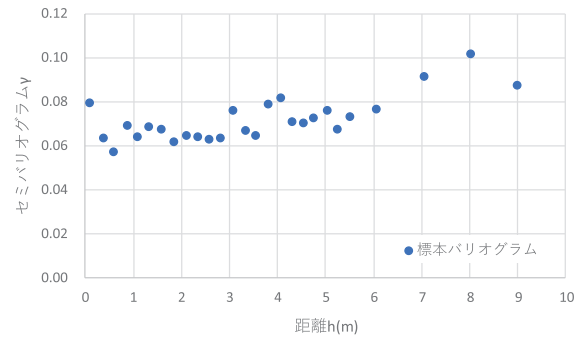


図-9 透水係数のバリオグラム

表-6に示す浸透流解析の諸条件について説明する。

浸透流解析のコードは、Dtransu3D-EL<sup>10)</sup>を用い、計算条件は、飽和・定常解析とする。空間分布モデルを通過する地下水の流向は+X軸方向とし、動水勾配の大きさを0.1とする。解析領域境界面に与える境界条件は、図-10に示すように、動水勾配が0.1になるよう解析モデル範囲のX軸方向の両端部のY-Z軸面に平行な平面上の節点に水位固定境界を設定する。

以上の条件設定により、パラメータケーススタディ212ケース、1ケース当たり300個の空間分布モデルに対して、浸透流解析を36,300回実施し、巨視的透水係数マップを作成する。次の5.2節ではその結果を示す。

表-6 浸透流解析の諸条件

項目	条件
コード	Dtransu3D-EL <sup>10)</sup>
計算条件	飽和・定常解析
地下水の流向	+X軸方向
動水勾配	0.1
境界条件	動水勾配が0.1になるように解析モデル範囲のX軸方向の両端部のY-Z軸面に平行な平面上の節点に水位固定境界を設定(図-10参照)。

### 5.2 ケーススタディの結果

ケーススタディの結果については、空間分布モデルの作成結果、巨視的透水係数の計算結果および巨視的透水係数マップの作成結果の順に説明する。

#### (1) 空間分布モデルの作成結果

図-11には、作成例として、要素透水係数の対数の平均値が-10.5で標準偏差が0.0, 0.2, 0.5および1.0の場合について、透水係数の空間分布モデルの鳥観図を抜粋して示す。

標準偏差0.0の場合は、図-11(a)に示すように透水

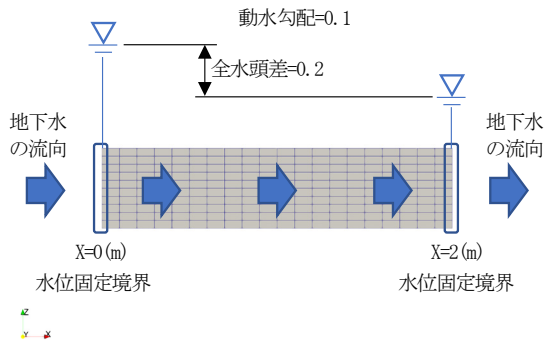


図-10 透浸透流解析の境界条件

係数の対数が-10.5の一色であり、全くばらつきがないことを示している。

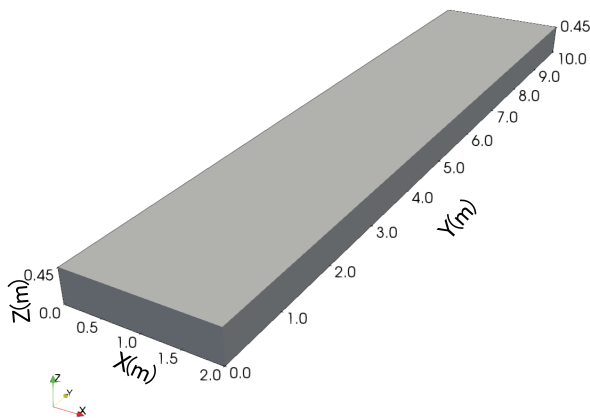
標準偏差が0.2, 0.5, 1.0の場合は、図-11(b)～(d)に示すように、標準偏差の値が増加するに従い、透水係数の対数の濃淡差が大きくなり、ばらつきが大きくなっていることがわかる。

以上から、空間分布モデルは、標準偏差に応じて適切に作成されていることがわかる。

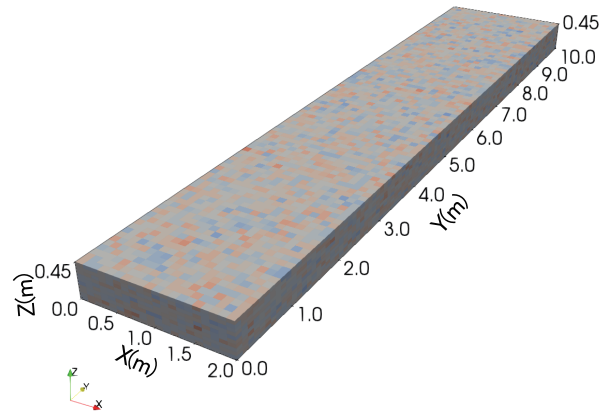
図-12には、例として、図-6と同様に要素透水係数の対数の平均-10.5、標準偏差1.0のケースにおける空間分布モデルごとの巨視的透水係数をプロットして、空間分布モデルNo. までの個別の巨視的透水係数を平均した値を描画した曲線を示す。空間分布モデルNo. までの平均値は、図-6と同様にNo. 2付近を超えると $1.0 \times 10^{-10}$  m/s付近で一定になることがわかる。したがって、この例からも空間分布モデルの作成数は20個以上としておけば十分であることがわかる。

(2) 巨視的透水係数の計算結果

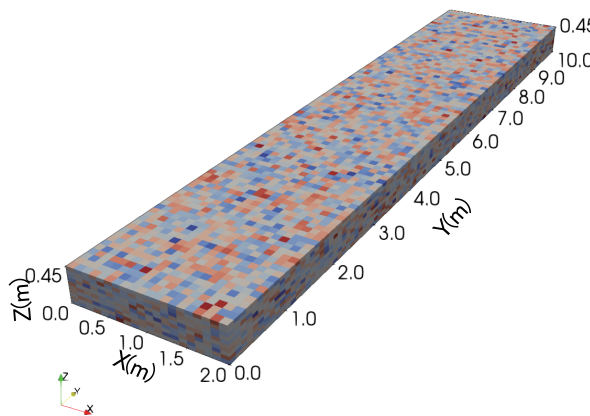
表-7は、列方向に要素透水係数の対数の平均、行方向に標準偏差をとり、そのマトリックスの列と行の位置に該当する巨視的透水係数の計算結果を対数表示したものである。要素透水係数の対数の標準偏差が0～0.1の



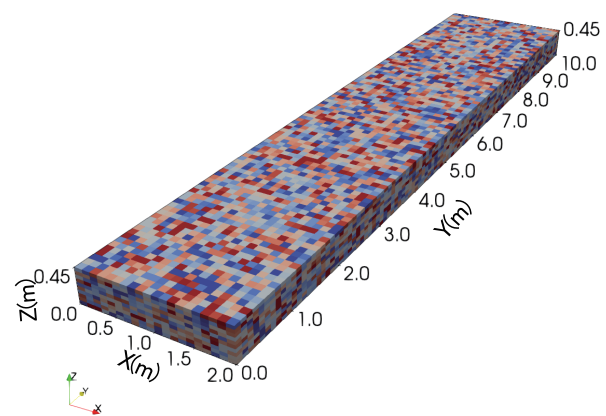
(a) 平均-10.5, 標準偏差0.0, 空間分布モデルNo. 100



(b) 平均-10.5, 標準偏差0.2, 空間分布モデルNo. 100



(c) 平均-10.5, 標準偏差0.5, 空間分布モデルNo. 100



(d) 平均-10.5, 標準偏差1.0, 空間分布モデルNo. 100

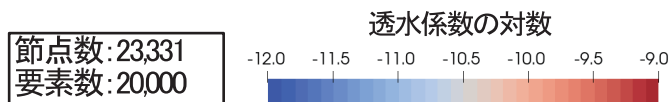


図-11 透水係数の空間分布の作成例 (相関長 0m の場合)



表-7 巨視的透水係数の計算結果 (相関長 0m の場合)

		透水係数の対数の平均値											
		-11.0	-10.9	-10.8	-10.7	-10.6	-10.5	-10.4	-10.3	-10.2	-10.1		-10.0
透水係数の対数の標準偏差	1.00	-10.502	-10.401	-10.302	-10.200	-10.102	-10.002	-9.902	-9.802	-9.702	-9.600	-9.501	1.00
	0.90	-10.582	-10.481	-10.383	-10.282	-10.182	-10.082	-9.983	-9.882	-9.782	-9.682	-9.582	0.90
	0.80	-10.658	-10.560	-10.459	-10.359	-10.259	-10.159	-10.059	-9.960	-9.859	-9.759	-9.659	0.80
	0.70	-10.731	-10.631	-10.531	-10.431	-10.332	-10.232	-10.132	-10.031	-9.931	-9.832	-9.731	0.70
	0.60	-10.798	-10.698	-10.598	-10.498	-10.398	-10.298	-10.198	-10.098	-9.998	-9.898	-9.798	0.60
	0.50	-10.858	-10.758	-10.659	-10.558	-10.458	-10.358	-10.258	-10.158	-10.058	-9.958	-9.858	0.50
	0.40	-10.911	-10.811	-10.711	-10.610	-10.511	-10.410	-10.310	-10.211	-10.110	-10.011	-9.911	0.40
	0.30	-10.953	-10.853	-10.753	-10.653	-10.553	-10.453	-10.353	-10.253	-10.153	-10.053	-9.953	0.30
	0.20	-10.983	-10.883	-10.783	-10.683	-10.583	-10.483	-10.383	-10.283	-10.183	-10.083	-9.983	0.20
	0.10	-11.000	-10.900	-10.800	-10.700	-10.600	-10.500	-10.400	-10.300	-10.200	-10.100	-10.000	0.10
0.00	-11.000	-10.900	-10.800	-10.700	-10.600	-10.500	-10.400	-10.300	-10.200	-10.100	-10.000	0.00	
		透水係数の対数の平均値											
		-11.0	-10.9	-10.8	-10.7	-10.6	-10.5	-10.4	-10.3	-10.2	-10.1	-10.0	

(補足)表中の太枠内のハッチング範囲は巨視的透水係数の対数を示す。枠外の透水係数の平均値と標準偏差の組合せの交差箇所の中の数字が、その平均値と標準偏差の組み合わせについての巨視的透水係数の対数を示す。

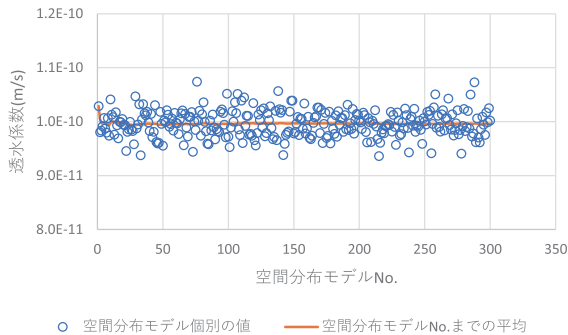


図-12 空間分布モデルごとの巨視的透水係数 (相関長 0m, 平均 -10.5, 標準偏差 1.0 の場合)

(3) 巨視的透水係数マップの作成結果

図-13は、表-7の巨視的透水係数の計算結果を用いて、巨視的透水係数マップを作成したものである。図-13の巨視的透水係数マップに現場施工試験のサンプリングデータを集計して求めた透水係数の対数の平均値 -10.368 と標準偏差 0.267 を当てはめると、巨視的透水係数の対数は -10.3 程度の位置になり、巨視的透水係数の目標値の対数 -10.0 よりも小さいことから、目標値を満足することを容易に確認できる。

6. おわりに

本論文では、ベントナイト混合土の実施工における品質管理の方法として、巨視的透水係数を品質管理の目標値に設定した場合を想定して、巨視的透水係数を求める方法について、巨視的透水係数の正確性および簡便性の観点で整理した。また、巨視的透水係数の正確性と簡便性を両立する方法を検討し、ケーススタディを行った。以下に、その結果をまとめるとともに、今後の課題を述べる。

(1) 巨視的透水係数を求める方法の整理

正確性の高い計算方法は、透水係数の空間分布モデルを作成し、そのモデルに対して浸透流解析を実施し、浸透流解析から巨視的透水係数を求める方法である。この方法の短所としては、空間分布モデルの作成と浸透流解析に時間を要するところである。

簡便性の高い計算方法は、サンプリングデータから求めた透水係数の対数平均値と対数標準偏差を用いて、Dagan の計算式により巨視的透水係数を求める方法であ

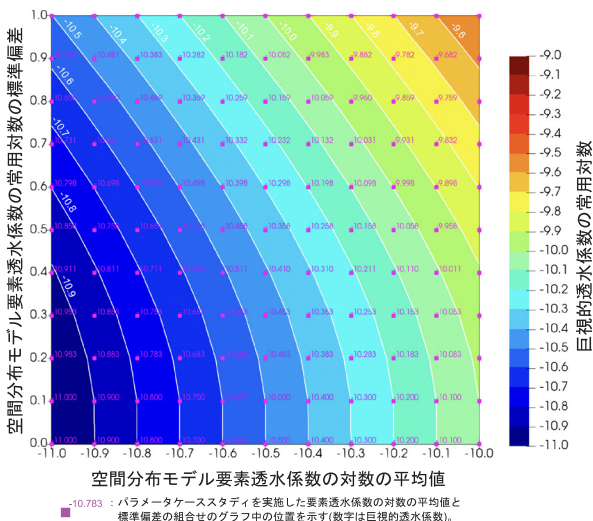


図-13 巨視的透水係数マップ (相関長 0m の場合)

場合の巨視的透水係数の対数は、要素透水係数の対数の平均値と同じ値を示す。また、標準偏差 0.2 よりも大きい場合は、標準偏差が増加するにつれて、巨視的透水係数の対数も増加していることがわかる。

る。この方法の短所としては、浸透流解析による方法に比べて、巨視的透水係数が小さく、非安全側の値になるところである。

## (2) 巨視的透水係数の正確性と簡便性を両立する方法

実施工時に巨視的透水係数を確認する時間を削減する方法を検討した結果、以下の手順で実施工前までに巨視的透水係数マップを準備しておけば良いことが分かった。

- ①実施工時のサンプリングデータの平均値と標準偏差の範囲を予め想定する。
- ②その範囲を基にパラメータケースを設定する。
- ③それらの設定したケースについて透水係数の空間分布モデルを作成して浸透流解析を実施する。
- ④浸透流解析結果から巨視的透水係数を計算する。
- ⑤平均値、標準偏差および巨視的透水係数を巨視的透水係数マップに整理する。

実施工時に、サンプリングデータの標本平均と標本標準偏差を求め、巨視的透水係数マップと照らし合わせて巨視的透水係数を求めれば、迅速に巨視的透水係数の目標値を満足するかを確認できる。

また、実際にケーススタディで巨視的透水係数マップを作成し、作成可能であることとその簡便性を確認した。

## (3) 今後の課題

本論文では、相関長がない場合についての巨視的透水係数マップの作成を行った。今後の課題として、相関長がある場合の巨視的透水係数マップの作成にも取り組んでいく予定である。

また、本論文では、実施工時のサンプリングデータの標本の平均や標準偏差を母集団のそれと同じとして扱って検討を行った。今後の課題として、最低限必要なサンプル数の検討にも取り組んでいく予定である。

## 参 考 文 献

- 1) 経済産業省・資源エネルギー庁ホームページ：放射性廃棄物について、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](http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html), 2021.9.17 参照
- 2) 原子力規制委員会ホームページ：廃棄物埋設事業変更許可申請書の一部補正について（2021 埋計発第 54 号）(1/5), <https://www.nsr.go.jp/data/000356052.pdf>, 2021.9.17 参照
- 3) 山田淳夫, 上田祥央, 山下亮：地盤統計学的手法を用いた土構造物の透水性の評価, 安藤ハザマ研究年報 Vol. 8, 2020.
- 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) 本島貴之, 佐々木泰：不均質岩盤の巨視的透水係数設定方法に関する考察, 土木学会論文集 C, Vol. 68, No. 2, pp. 239-250, 2012.
- 6) Gedeon Dagan: Statistical Theory of Groundwater Flow and Transport: Pore to Laboratory, Laboratory to Formation, and Formation to Regional Scale, Water Resources Research, Vol. 22, No. 9, Pages 120S-134S, August 1986.
- 7) 原子力規制委員会ホームページ：令和 3 年 06 月 21 日 日本原燃株式会社第二種廃棄物埋設事業変更許可申請に係る新規規制基準への適合確認に関する資料受理 資料 1(5/9), <https://www.nsr.go.jp/data/000356647.pdf>, 2021.9.17 参照
- 8) 上田祥央, 山田淳夫, 山下亮, 今井久：浸透流解析を用いた放射性廃棄物埋設土の品質管理方法に関する検討, 日本地下水学会 2019 年秋季講演会, P-04, 2019.
- 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. 101-116, 2010.
- 10) 西垣誠：誌面講座 地下水数値計算法 (12) 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.

---

---

Examination of macroscopic hydraulic conductivity evaluation method  
for bentonite mixed soil

Satoru HIRAI, Akihiro UEDA, Ryo YAMASHITA and Hisashi IMAI

At a radioactive waste disposal site, the hydraulic conductivity of bentonite mixed soil is required to be  $1 \times 10^{-10}$  m/s or less with a macroscopic hydraulic conductivity. However, there is no standard method for calculating the macroscopic hydraulic conductivity. In this paper, we compared osmotic flow analysis and Dagan's formula as methods for calculating the macroscopic hydraulic conductivity. As a result, it was confirmed that osmotic flow analysis is more explanatory. In addition, it takes time to perform osmotic flow analysis at the time of implementation. Therefore, we examined a method to simplify the confirmation of the macroscopic hydraulic conductivity during the construction work. As a result, it was confirmed that the method of preparing a macroscopic hydraulic conductivity map before the implementation work is effective.