論 文

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*1·上田祥央*2·山下 亮*1·今井 久*1

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1×10⁻¹⁰m/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、実施工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、実施工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、実施工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¹⁾。

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1.0×10⁻¹⁰m/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²⁰。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²⁰,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 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⁵⁾は,岩盤の原位置透水試験データを整理して, Daganの計算式⁶⁾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⁶⁾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、実施工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³³,既往検討⁸⁰や事業者の安全審査資料⁷⁰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。

- 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⁹⁾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⁸⁾

$$k = \frac{Q}{Ai} \tag{1}$$

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⁶⁾に よって領域全体の巨視的透水係数を求める。

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

ここで、 k_{eff} : 巨視的透水係数

 λ_k :常用対数平均值

 $c: \ln(10)$

 ξ_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1.0×10⁻¹⁰m/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)³⁾ 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³⁾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

| | | タ (山 | | | |
|--------|------------|------------------------|--|--|--|
| | 項日 | 条件 | | | |
| 空間エデル | 形状・寸法 | 図-4 参照 | | | |
| 空間モノル | 節点数・要素数 | 22, 331 · 20, 000 | | | |
| | データ数 | 200 | | | |
| | 平均值 (m/s) | 5.13×10^{-11} | | | |
| 現場施工試験 | 標準偏差 (m/s) | 3.23×10^{-11} | | | |
| の透水係数 | 対数の平均 | -10.368 | | | |
| | 対数の標準偏差* | 0.267 | | | |
| | 相関長 (m) | Om | | | |

* 例題の出典²⁾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 [;] を | 視的 :求≀ | 透水係数 める方法 | 概要 |
|------------------|-----------|--------------|--|
| 空 | 浸透流解析 | | ・空間分布のパターン数:300 ・コード:Dtransu3D-EL¹⁰⁾ ・計算条件:定常・飽和解析 ・動水勾配:0.1 (X軸方向流れ) ・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 |
| 間 分 布 | 要素単位 | 算術平均 | ・空間分布:浸透流解析と同じ ・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 |
| | 位の集計 | 幾何平均 | ・空間分布:浸透流解析と同じ ・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 |
| Dag | an (| の計算式* | ・式 (2) のえょ:-10.368, <i>ξ</i> ょ:0.268 ・巨視的透水係数:式 (2) により計算 |

* えとられば、現場施上試験ア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。

| 巨視を対 | 的透力 求める | x係数 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 *1 (分) | |
|---|------------|-----------|------------------------|------------------------|----------|------------------------|--|
| 空間 分布 | 浸透 | | 4.65×10^{-11} | 2.28×10^{-13} | 0.005 | 2470*2,*4 | |
| | 要 | 算術 平均 | 4.94×10^{-11} | 2.48×10^{-13} | 0.005 | 2470 ^{*3,*4} | |
| | | 幾何 平均 | 4.09×10^{-11} | $1.89 	imes 10^{-13}$ | 0.005 | 2450 ^{*3, *4} | |
| Dagan の計算式 式(2)の λ_k :-10.364, ξ_k :0.267 | | | 4.56×10^{-11} | _ | _ | 30^{*5} | |

表-3 巨視的透水係数の計算結果

*1 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。

- *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, 0S:Windows 10 Pro(64bit))。
- *5 Microsoft Excel でサンプリングデータを整理の上, 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3.2×10⁻¹¹~3.4×10⁻¹¹m/sの範囲でば 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3.3×10⁻¹¹m/ 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3.23×10⁻¹¹m/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、4.6×10⁻¹¹~4.7×10⁻¹¹m/sの範囲でばらついて 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4.65×10⁻¹¹m/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。





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。

| 巨視的 | 的透水係数。 | を求める方法 | 正確性 | 安全性 | 簡便性 | | |
|----------|--------|--------|-----|------------------|------------|--|--|
| 空間 分布 | 浸透流解核 | 斤 | 0 | 0 | \times * | | |
| | 要素単位 | 算術平均 | 0 | 0 | \times * | | |
| | の集計 | 幾何平均 | 0 | × | \times^* | | |
| Dagan | の計算式 | | ? | \bigtriangleup | 0 | | |
| | | | | | | | |

表-4 比較検討結果

* 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 1.0×10⁻¹⁰m/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 × 10⁻¹⁰m/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 × 10⁻¹⁰m/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 × 10⁻¹⁰m/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 グラムの分析結果を基に,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な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が 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× 10⁻¹⁰m/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内に収まると考える。さらに、既往 の現場施工試験の実績³⁾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

| Ĩ | 頁目 | 条件 | 備考 | | |
|----------------------------------|-------------|---|----------------|--|--|
| 巨視的の目 | 透水係数 目標値 | 1.0×10 ⁻¹⁰ m/s以下 (対数で-10.0以下) | 参考文献 2) による | | |
| 声明八 五 | 形状・寸法 | 図-4 参照 | 1パラメー | | |
| 空間分布 | 節点数 | 22, 331 | タケース当 | | |
| | 要素数 | 20,000 | たり 300 個 | | |
| 要素透水 | 対数の平均 | -11~-10(0.1ピッチ) …11 パターン | A 010 | | |
| 保 <u>数</u> のパ ラメータ ケース | 対数の 標準偏差 | 0.0~1.0(0.1ピッチ) …11 パターン | 全 212 ケース | | |
| | 相関長 (m) | 0.0(相関なし) | | | |

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って いれば、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)³⁾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、1.0×10⁻¹⁰m/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1.0×10⁻¹⁰m/s以下(対 数で-10.0以下)の場合には,要素透水係数が1.0× 10⁻¹⁰m/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、実施工時に適切な施工 を行えば、ごく一部の要素透水係数が 1.0 × 10⁻¹⁰m/s より も大きくなったとしても、巨視的透水係数が1.0×10⁻¹⁰m/s よりも大きくなることはないと考える。したがって、実施 工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。



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-EL¹⁰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 ¹⁰⁾ |
| 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



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× 10⁻¹⁰m/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



| | | 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 | | |
| | 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 | |
| 消 | 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 | 「「米」 |
| 言準(| 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 | 三連(|
| 6 10 | 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 | <u> 5 1 5 1 5 1</u> 女の対数の標 |
| (の対数 | 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 | |
| 条类 | 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 | 係幾 |
| 悉 | 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 | 支き |
| 1 | 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 | 1 |
| | 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 | |
| | | -11.0 | -10.9 | -10.8 | -10.7 | -10.6 | -10.5 | -10.4 | -10.3 | -10.2 | -10.1 | -10.0 | | |
| 透水係数の対数の平均値 | | | | | | | | | | | | | | |

表-7 巨視的透水係数の計算結果(相関長 0m の場合)

(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セルの中の数字が、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。



(相関長 0m, 平均-10.5, 標準偏差 1.0 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。 (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 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

- 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, 2021.9.17参照
- 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.

- 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戻し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 1×10^{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.