

# 低透水性材料の巨視的透水係数の簡易評価手法に関する提案

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>

巨視的透水係数の計算方法には、説明性が高い浸透流解析による方法と簡便に計算できる Dagan の計算式による方法がある。浸透流解析による方法は Dagan の計算式よりも計算に時間を要する点、Dagan の計算式による方法は算出される巨視的透水係数が浸透流解析による方法よりも非安全側となる点が短所である。本論文では巨視的透水係数の計算方法として、より簡便で説明性が高い方法を模索するため、多数の透水係数分布を設定した浸透流解析による方法と Dagan の計算式による方法で計算した巨視的透水係数を比較した。その結果、Dagan の計算式から求めた巨視的透水係数にある乗率を乗じることで簡便で非安全側とならない説明が可能であることを確認した。

キーワード：巨視的透水係数、浸透流解析、低透水性材料、ベントナイト混合土、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性能が求められている<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。さらに、著者ら<sup>7)</sup>は、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した結果、浸透流解析による方法の説明性が高いことを確認した。同時に、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ことから、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。

ここで、巨視的透水係数マップとは、計算領域の要素単位の透水係数の確率分布パラメータである平均値と標準偏差をそれぞれ横軸と縦軸にとったグラフ内に、この平均値と標準偏差から求めた巨視的透水係数の常用対数の等値線を描いた図である（図-1参照）。計算領域において要素単位の透水係数の平均値と標準偏差が得られている場合、巨視的透水係数マップを用いると、巨視的透水係数の等値線と、透水係数の確率分布の平均値と標準偏差の位置関係から補間して計算領域の巨視的透水係数を容易に求めることができる。

しかしながら、この実施工前までに巨視的透水係数マップを準備する方法は、浸透流解析に要する時間を前倒ししたに過ぎず、浸透流解析の手間がなくなるわけではない。

そこで本論文では、計算領域に分布する要素単位の透水係数（以降、要素透水係数と呼ぶ）について、巨視的透水係数マップのように要素透水係数の確率密度分布ケースを網羅的に設定し、浸透流解析による方法と Dagan の計算式<sup>6)</sup>による方法で巨視的透水係数を計算し、両者の関係を比較検討する。

本論文の構成は以下の構成になっている。

2章では、浸透流解析による方法と Dagan の計算式<sup>6)</sup>

\*1 原子力部 \*2 土木研究部

による方法によって、巨視的透水係数を計算する際のケース設定について説明する。

3章では、巨視的透水係数を計算する方法として、浸透流解析による方法と Dagan の計算式<sup>6)</sup>による方法について説明する。

4章では、2章と3章で説明した計算ケースと計算方法を踏まえて巨視的透水係数を計算し、その計算結果について比較検討する。

5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。

次章からの本文中では、透水係数の常用対数および巨視的透水係数の常用対数を常用対数の表記を省略して表現する。

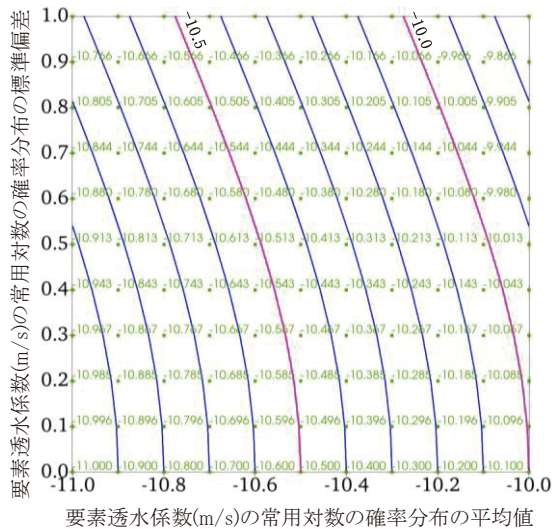


図-1 巨視的透水係数マップ

## 2. 計算ケースの設定

浸透流解析による方法と Dagan の計算式<sup>6)</sup>による方法によって巨視的透水係数を計算するケースは、計算領域内に分布する要素透水係数の確率分布を基に設定する。要素透水係数の確率分布は、既往の研究<sup>3)7)</sup>によると、要素透水係数が正規分布を示すことから、巨視的透水係数の計算ケースは、正規分布のパラメータとなる要素透水係数の平均値および標準偏差の組合せを基に設定する。また、既往の研究<sup>7)</sup>では、図-2に示す例題モデルを基に巨視的透水係数を計算したものの、計算領域形状が異なる場合についての巨視的透水係数への影響を確認できていないことから、複数の異なる形状の計算領域モ

デルケースを設定する。

要素透水係数の確率分布パラメータは、放射性廃棄物処分場のうち浅地中処分におけるピット処分施設の難透水性覆土や、地層処分施設における処分坑道の埋め戻し材に要求される透水性を包括するように設定する。具体的には、透水係数として、ピット処分施設では $1 \times 10^{-10} \text{m/s}^2$ 、地層処分施設では $1 \times 10^{-11} \text{m/s}^8$ が要求される透水性の目安となっていることから、これらが包括されるように要素透水係数の平均値を-9~-12の範囲で設定する。また、要素透水係数の標準偏差は、人工物として設置するものであることから、透水係数として1オーダーもばらつかないと考えて、0~1の範囲で設定する。

計算モデルは、図-3に示すような $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ の立方体領域で要素サイズ $0.1\text{m} \times 0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ の立方体メッシュモデルを基本モデルとする。計算モデルケースは、この基本モデルに対して、水の流れ方向へ領域が大きくなるケースと、流れ方向に直交方向へ領域が大きくなるケースをそれぞれ複数設定する。具体的には、計算可能な範囲で、基本モデルの辺長の2倍、5倍、10倍、20倍、50倍および100倍となる計算モデルを設定する。

表-1には、以上を踏まえて設定した計算ケースを整理した。また、図-4には、計算モデルケースを示した。

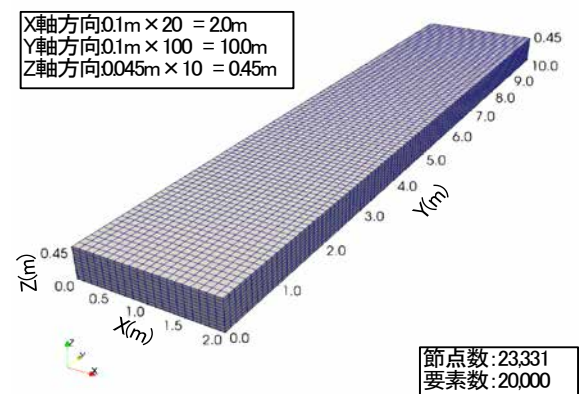


図-2 例題のモデル<sup>7)</sup>

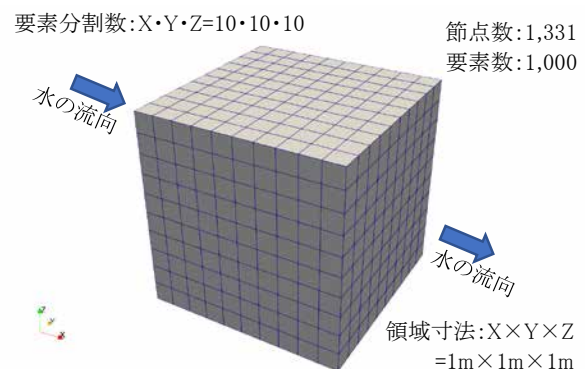


図-3 基本モデル

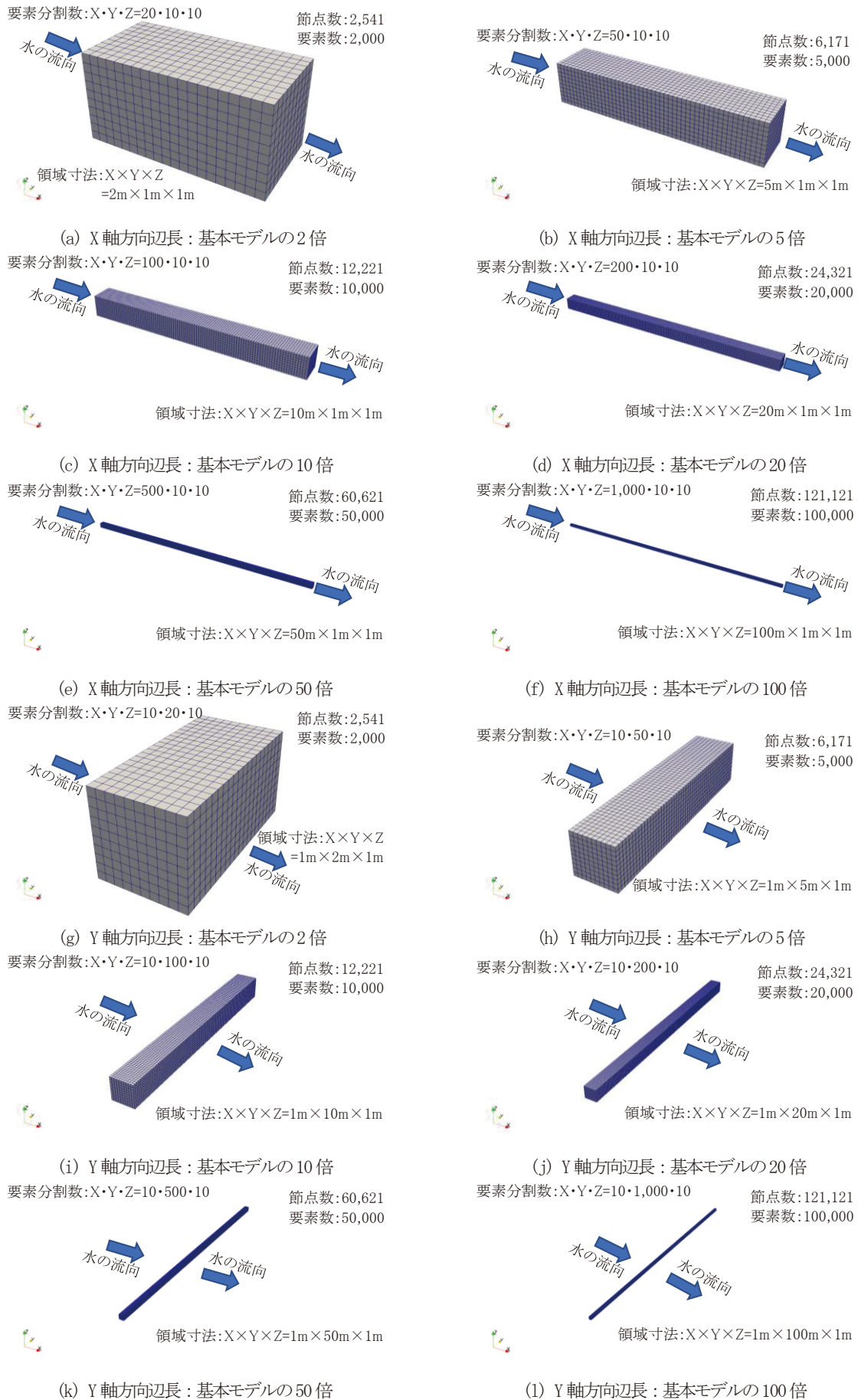


図-4 計算モデルケースのイメージ



表-1 計算ケース (4,433 ケース)

モデル区分	計算モデルケース					確率分布ケース	
	辺長倍率	領域寸法 X × Y × Z 方向	分割数 X · Y · Z 方向	節点数	要素数	要素透水係数の常用対数	
						平均値	標準偏差
基本モデル	1 倍	1m × 1m × 1m	10 · 10 · 10	1,331	1,000		
基本モデルで 水の流れ方向* の辺長を大きく するケース	2 倍	2m × 1m × 1m	20 · 10 · 10	2,541	2,000	-12.0, -11.9, -11.8, -11.7, -11.6, -11.5, -11.4, -11.3, -11.2, -11.1, -11.0, -10.9, -10.8, -10.7, -10.6, -10.5, -10.4, -10.3,	平均値のそれ ぞれに対して 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4,
	5 倍	5m × 1m × 1m	50 · 10 · 10	6,171	5,000		
	10 倍	10m × 1m × 1m	100 · 10 · 10	12,221	10,000		
	20 倍	20m × 1m × 1m	200 · 10 · 10	24,321	20,000		
	50 倍	50m × 1m × 1m	500 · 10 · 10	60,621	50,000		
	100 倍	100m × 1m × 1m	1000 · 10 · 10	121,121	100,000		
基本モデルで 水の流れ方向* の直交方向*の 辺長を大きく するケース	2 倍	1m × 2m × 1m	10 · 20 · 10	2,541	2,000	-10.2, -10.1, -10.0, - 9.9, - 9.8, - 9.7, - 9.6, - 9.5, - 9.4, - 9.3, - 9.2, - 9.1, - 9.0	0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 を設定
	5 倍	1m × 5m × 1m	10 · 50 · 10	6,171	5,000		
	10 倍	1m × 10m × 1m	10 · 100 · 10	12,221	10,000		
	20 倍	1m × 20m × 1m	10 · 200 · 10	24,321	20,000		
	50 倍	1m × 50m × 1m	10 · 500 · 10	60,621	50,000		
	100 倍	1m × 100m × 1m	10 · 1000 · 10	121,121	100,000		

\* 水の流れ方向は +X 軸方向、流れの直交方向は +Y 軸方向とした。

### 3. 巨視的透水係数の計算方法

巨視的透水係数の計算方法について、浸透流解析による方法および Dagan の計算式<sup>9)</sup>による方法について説明する。

#### (1) 浸透流解析による方法

浸透流解析による方法は、図-5 に示すフローで求める。以下に、表-1 の計算モデル 1 ケース、確率分布ケース 1 ケース当たりの計算フローについて、図-5 の項目ごとに説明する。

- ①空間分布モデル作成では、先ず表-1 の計算モデルケースに応じた領域寸法および要素分割したメッシュモデルを作成する。このメッシュモデルの全要素に対して、表-1 の確率分布ケースに応じた要素透水係数の平均値および標準偏差をパラメータとする累積確率分布と乱数から要素透水係数を求め、空間分布モデルとする (図-6 参照)。
- ②浸透流解析では、①で作成した空間分布モデルを解析メッシュモデルとして、表-2 および図-7 に示す条件で浸透流解析を行い、水の流入もしくは流出面におけるそれぞれ節点流量の合計を求め、解析領域を通過する水の流量とする。
- ③巨視的透水係数の計算では、以下のダルシーの法則に基づく式 (1) に対して、②で求めた解析領域を通過する水の流量と②の浸透流解析の与条件である動水勾配と解析領域寸法から求められる流入流出面の面積を代入して求め、1 空間分布モデル当たりの巨視的透水係数とする。
- ④巨視的透水係数の評価では、所定数の空間分布モデルの巨視的透水係数を幾何平均した値を計算モデル 1 ケース、確率分布ケース 1 ケース当たりの巨視的透水係数として評価する。なお、空間分布モデルの

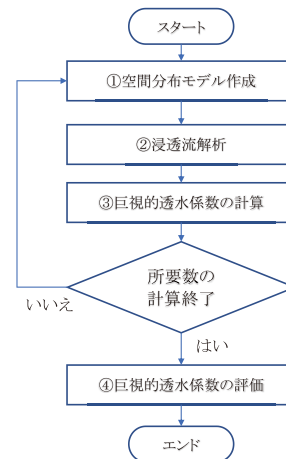


図-5 浸透流解析による方法の計算フロー

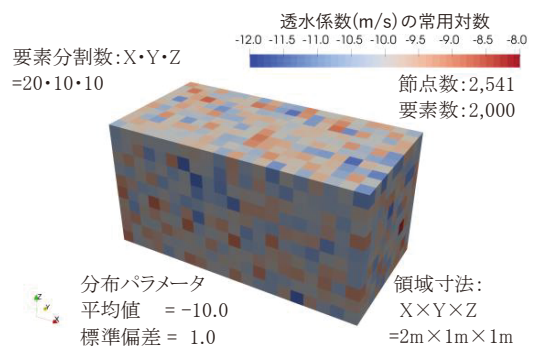


図-6 要素透水係数の空間分布の例

表-2 浸透流解析の諸条件

項目	条件
コード	Dtransu3D-EL <sup>9)</sup>
計算条件	飽和・定常解析
水の流れる方向	+X 軸方向
動水勾配	0.1
境界条件	動水勾配が 0.1 になるように水位固定境界を設定 (図-6 参照)。

所定数は、著者らの既往の研究<sup>7)</sup>により20以上で十分であるものの、本研究で扱う空間分布モデルの要素数が既往の研究よりも少ないモデルもあるため、100に設定する。

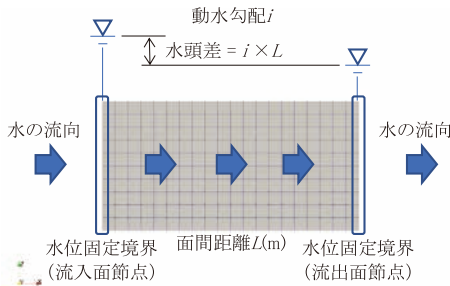


図-7 浸透流解析の境界条件

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

ここで、 $k$ ：透水係数

$Q$ ：流入出面を通過する水の流量

$A$ ：流入出面の面積

$i$ ：動水勾配

(2) Dagan の計算式による方法

Dagan の計算式<sup>6)</sup>による方法は、計算領域内の要素透水係数の確率分布が正規分布とみなせる場合に適用でき、要素透水係数の平均値および常用対数の標準偏差を用いて、式(2)<sup>6)</sup>によって計算領域の巨視的透水係数を求める。式(2)<sup>6)</sup>による巨視的透水係数は、計算領域内の要素数が $\infty$ の場合に相当する。

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

ここで、 $k_{eff}$ ：巨視的透水係数

$\lambda_k$ ：要素透水係数の常用対数の確率分布の平均値

$c$ ： $\ln(10)$

$\xi_k$ ：要素透水係数の常用対数の確率分布の標準偏差

#### 4. 巨視的透水係数の計算結果および比較検討

ここでは、巨視的透水係数の計算結果について、浸透流解析による方法の計算結果に対して、巨視的透水係数の収束性を確認する。また、巨視的透水係数の計算結果について説明するとともに、空間分布モデルの寸法の違いによる計算結果、浸透流解析による方法と Dagan の計算式による方法の計算結果について比較検討を行う。以下、これらについて説明する。

(1) 巨視的透水係数の収束性の確認

浸透流解析による方法で巨視的透水係数を求める際、作成する空間分布モデルの数が少ない場合、1計算ケース当たりの巨視的透水係数が十分に収束していないこと

が懸念される。ここでは、表-1の計算ケースにおいて巨視的透水係数が収束しがたいケースとして、最も要素数が少なく、確率分布パラメータのばらつきが大きいケースについて、巨視的透水係数の収束性を確認する。具体的には、計算モデルケースは基本モデルケース、要素透水係数の確率分布パラメータの標準偏差は1.0のケース、要素透水係数の平均値はピット処分施設の難透水性覆土の透水性の目標値<sup>2)</sup>に着目して-10とする。

図-8には、基本モデルのうち要素透水係数の確率分布パラメータが平均値-10、標準偏差1.0のケースについて、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の常用対数をプロットし、空間分布モデルNo. (繰り返し演算数) までの巨視的透水係数の平均および標準偏差を描画したグラフを示す。

空間分布モデルごとの巨視的透水係数は、図-8に示すように、-9.698 ~ -9.489 の範囲でばらついているものの、空間分布モデルNo. までの平均値(オレンジ線)は、集計する空間分布モデルNo. が5付近を超えると-9.58付近で一定となる。また、空間分布モデルNo. までの標準偏差(灰色線)では、集計する空間分布モデルNo. が35付近を超えると0.038 ~ 0.040の範囲で値がほぼ一定となる。

以上のように、本研究における計算ケースのうち最も収束しがたい計算ケースについて、空間分布モデルの作成数に対する巨視的透水係数の収束性を確認した結果、少なく見積もってもモデル数が35以上であれば、収束することがわかった。本研究では空間分布モデル作成数は100としていることから、本研究における全ての計算ケースにおいて十分な作成数であると考えられる。

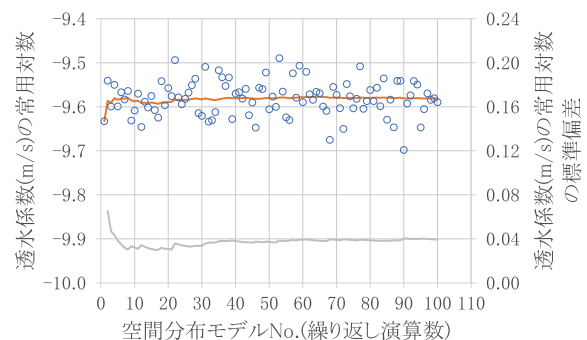


図-8 空間分布モデルごとの巨視的透水係数の常用対数

(2) 巨視的透水係数の計算結果

図-9には、浸透流解析による方法における各計算モデルケースと Dagan の計算式による方法で計算した巨視的透水係数を巨視的透水係数マップとして整理した。巨

表-3 計算結果一覧 (抜粋)

要素透水係数の常用対数の確率分布パラメータ		巨視的透水係数(m/s)の常用対数													Daganの計算式による方法	
		浸透流解析による方法														
		基本モデル	基本モデルで水の流れ方向の辺長を大きくするケース							基本モデルで水の流れ方向の直交方向の辺長を大きくするケース						
平均値	標準偏差	辺長1倍	辺長2倍	辺長5倍	辺長10倍	辺長20倍	辺長50倍	辺長100倍	辺長2倍	辺長5倍	辺長10倍	辺長20倍	辺長50倍	辺長100倍		
-10.0	0.0	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000
	0.1	-10.000	-10.000	-10.001	-10.001	-10.001	-10.002	-10.002	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000	-10.001	-10.001	-10.001	-9.996
	0.2	-9.987	-9.988	-9.989	-9.990	-9.991	-9.991	-9.992	-9.986	-9.986	-9.987	-9.987	-9.988	-9.988	-9.988	-9.985
	0.3	-9.962	-9.964	-9.967	-9.968	-9.969	-9.970	-9.971	-9.960	-9.961	-9.961	-9.962	-9.963	-9.963	-9.963	-9.967
	0.4	-9.928	-9.931	-9.935	-9.937	-9.938	-9.940	-9.941	-9.925	-9.925	-9.925	-9.926	-9.927	-9.928	-9.928	-9.943
	0.5	-9.885	-9.890	-9.896	-9.898	-9.899	-9.901	-9.903	-9.880	-9.880	-9.880	-9.881	-9.882	-9.884	-9.884	-9.913
	0.6	-9.835	-9.842	-9.849	-9.852	-9.854	-9.856	-9.858	-9.829	-9.828	-9.828	-9.829	-9.830	-9.832	-9.832	-9.880
	0.7	-9.779	-9.788	-9.797	-9.801	-9.803	-9.806	-9.808	-9.771	-9.769	-9.770	-9.771	-9.772	-9.774	-9.774	-9.844
	0.8	-9.718	-9.728	-9.739	-9.744	-9.746	-9.750	-9.752	-9.707	-9.705	-9.705	-9.706	-9.708	-9.710	-9.710	-9.805
	0.9	-9.652	-9.664	-9.677	-9.682	-9.685	-9.689	-9.692	-9.639	-9.636	-9.636	-9.637	-9.639	-9.641	-9.641	-9.766
1.0	-9.581	-9.596	-9.611	-9.617	-9.620	-9.624	-9.628	-9.566	-9.563	-9.562	-9.563	-9.565	-9.568	-9.568	-9.725	

視的透水係数マップでは、巨視的透水係数の等値線（青色線および桃色線）の分布を確認することで計算モデルケース間の全体的な傾向を比較できる。また、表-3には、要素透水係数の確率分布パラメータの平均値のうち浅地中ピット処分施設における難透水性覆土の巨視的透水係数の目標値と同じ-10の計算結果を抜粋して一覧に整理した。図-9および表-3から以下のことがわかる。

- ①巨視的透水係数マップにおいて巨視的透水係数の等値線は、標準偏差0.2を超える範囲で計算モデルケースや計算方法の違いで若干変化するものの、その差は最大でも0.2程度である。
- ②巨視的透水係数マップの基本モデルの水の流れ方向の辺長を大きくするケースにおいて、辺長が長いケースほど、巨視的透水係数の等値線における上部の曲線部分の勾配が急になる傾向がある。
- ③②に対して水の流れ方向に直交方向の辺長を大きくするケース（通過断面が大きくなるケース）では巨視的透水係数の等値線に有意な差は認められない。
- ④巨視的透水係数マップにおいてDaganの計算式<sup>6)</sup>による巨視的透水係数の等値線は、浸透流解析による方法から求めた等値線よりも勾配が急である。
- ⑤計算結果一覧において、確率分布パラメータが同じ平均値の場合、標準偏差が大きくなると、巨視的透水係数は大きい値を示し、標準偏差が0から1になると、巨視的透水係数は0.3～0.5程度増える。

以上の①～⑤より、巨視的透水係数は、計算モデルの水の流れ方向の辺長が大きくなると小さくなる傾向があること、水の流れ方向に直交な方向の辺長が大きくなるケースでは変化が小さいこと、Daganの計算式<sup>6)</sup>による方法が最も値が小さいことを確認した。

(3) 計算モデルの違いによる巨視的透水係数への影響

図-10には、浸透流解析による方法で求めた巨視的透水係数について、基本モデルの辺長を大きくするケースを対象に基本モデルケースの値を基準とした場合の巨視的透水係数の比率を求め、箱ひげ図として整理した。

図-10から以下のことがわかる。

- ①基本モデルの水の流れ方向の辺長が大きくなるケースでは、巨視的透水係数の比率が1よりも大きく、基本モデルよりも巨視的透水係数が小さい。
- ②また、①のケースでは、辺長が大きくなるにつれて、巨視的透水係数の比率が大きくなり、その巨視的透水係数の比率の最大値は辺長100倍のケースの1.0054であり、基本モデルの値からの変化量は基本モデルの値の1%未満である。
- ③基本モデルの水の流れ方向の直交方向の辺長が大きくなるケースでは、巨視的透水係数の比率が1よりも小さく、基本モデルよりも巨視的透水係数が大きい。
- ④また、③の直交方向の辺長のケースにおいて、辺長が基本モデルの2～10倍のケースでは巨視的透水係数の比率が減少し、20倍以上のケースでは比率が増加する傾向に変化するものの、巨視的透水係数の比率の最小値は、辺長10倍のケースの0.9978であり、基本モデルの値の1%未満である。

以上の①～④より、計算モデルの水の流れ方向および流れに直交方向の辺長が100倍の長さに変化したとしても、その変化量は巨視的透水係数で1%未満である。

(4) 浸透流解析とDaganの計算式による結果の比較

図-11には、要素透水係数の確率分布パラメータの平均値と標準偏差が同じ場合に、浸透流解析による巨視的透水係数を縦軸に、Daganの計算式による巨視的透水係数を横軸としてプロットしたグラフを示す。また、図-11には、前述のプロットのばらつき具合の目安として、縦軸にDaganの計算式による巨視的透水係数をとった直線、Daganの計算式<sup>6)</sup>による巨視的透水係数に0.99を乗じた直線および0.98を乗じた直線も併記した。図-11から以下のことがわかる。

- ①浸透流解析による巨視的透水係数は、要素透水係数の確率分布パラメータの平均値と標準偏差が同じ場合のDaganの計算式<sup>6)</sup>による巨視的透水係数とほぼ同じ、もしくは大きな値を示す。



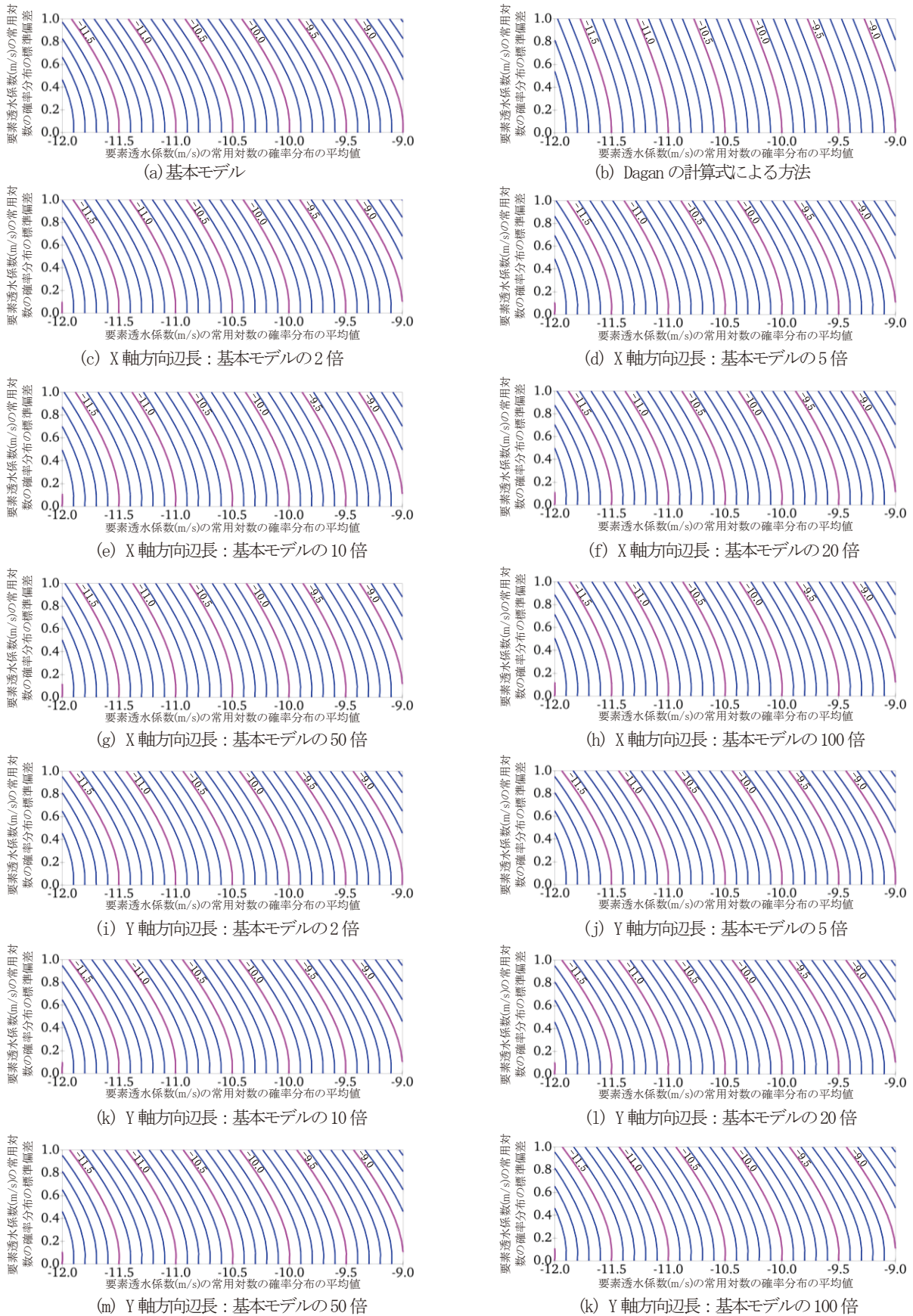


図-9 巨視的透水係数マップ (巨視的透水係数の常用対数の 0.1m 間隔等値線分布)

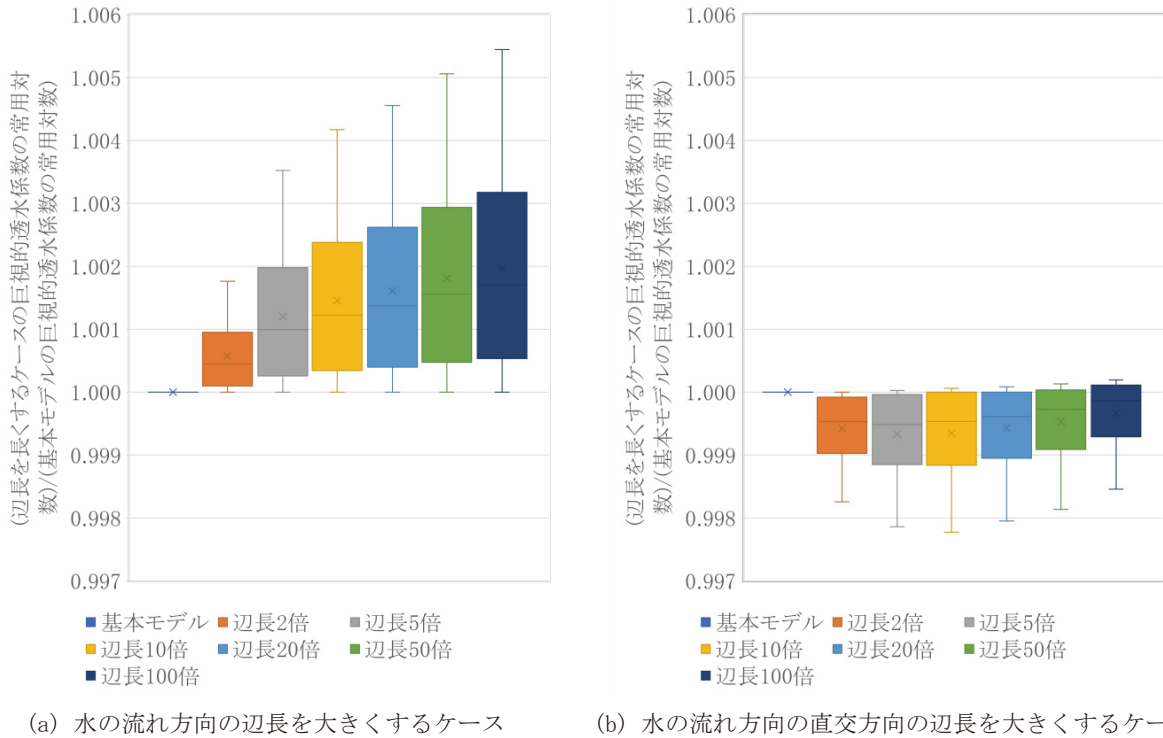


図-10 巨視的透水係数の常用対数の基本モデルに対しての比率に関する箱ひげ図

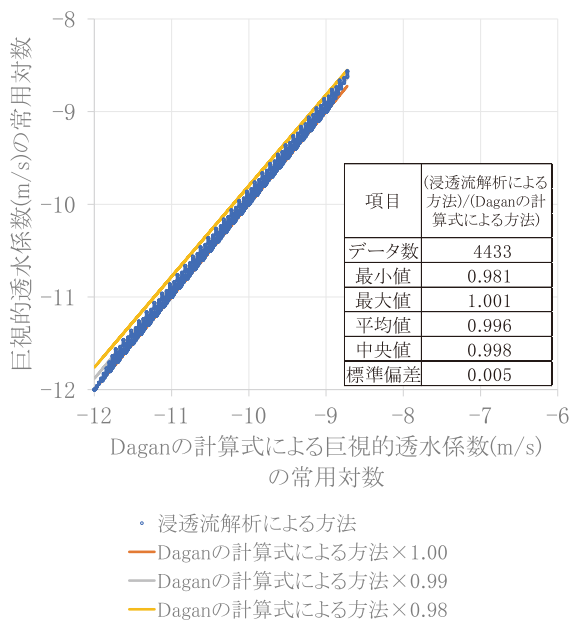


図-11 浸透流解析と Dagan の計算式の比較

②浸透流解析による巨視的透水係数は、全ての計算モデルケースにおいて、要素透水係数の確率分布パラメータの平均値と標準偏差が同じ場合の Dagan の計算式<sup>6)</sup>による巨視的透水係数に 0.98 を乗じた直線の下側にプロットされており、Dagan の計算式<sup>6)</sup>による巨視的透水係数に 0.98 を乗じた値よりも小さい。以上の①および②より、Dagan の計算式<sup>6)</sup>で求められ

る巨視的透水係数に 0.98 を乗じることで浸透流解析による方法と同等の評価ができると思われる。

## 5. おわりに

本論文では、計算領域に分布する要素単位の透水係数について、要素単位の透水係数の確率密度分布ケースを網羅的に設定し、浸透流解析による方法と Dagan の計算式<sup>6)</sup>による方法で巨視的透水係数を計算し、両者の関係を比較検討した。

Dagan の計算式<sup>6)</sup>による巨視的透水係数の常用対数は、既往の知見<sup>7)</sup>では、浸透流解析により求めた値よりも小さく、安全側の値とならないところが短所であった。

しかしながら、本研究の検討条件の範囲内において、Dagan の計算式<sup>6)</sup>による巨視的透水係数を求め、その値に 0.98 を乗じることで浸透流解析と同等に安全側の値を得られることがわかった。以下に、本研究における検討条件を列挙する。

- ①計算領域の要素数が 1,000 ~ 100,000 であること。
- ②計算領域の要素サイズが 0.1m であること。
- ③計算領域の水の流れ方向とその直角方向の辺長の比が 1:1 ~ 1:100 の範囲であること。
- ④要素透水係数の確率分布が正規分布であること。
- ⑤要素透水係数の正規分布パラメータの平均値が -9 ~ -12、標準偏差が 0 ~ 1 の範囲であること。



今後は、本研究の検討条件の範囲を外れるような計算領域の要素数が少ない場合や要素サイズの異なる場合についても同様の確認を行い、Dagan の計算式<sup>6)</sup>による方法の説明性を高め、Dagan の計算式<sup>6)</sup>で簡便に巨視的透水係数を計算できるように引き続き検討を進めていきたい。

### 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), 2022.9.22 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>, 2022.9.22 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) G.Dagan: Models of groundwater flow in statistically homogeneous porous formations, Water Resources Research, Vol. 15, No. 1, Pages 43S-63S, February 1979.
- 7) 平井哲, 上田祥央, 山下亮, 今井久：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, 安藤ハザマ研究年報 Vol. 9, 2021.
- 8) 平井哲, 山田淳夫, 川久保政洋：模擬坑道における埋め戻し材の巨視的透水係数の検討, 令和 4 年度土木学会土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会概要集, CS12-17, 2022.
- 9) 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.

---

## Proposal for simple evaluation method for macroscopic hydraulic conductivity of low permeable soil

Satoru HIRAI, Akihiro UEDA, Ryo YAMASHITA and Hisashi IMAI

There are two methods for calculating the macroscopic hydraulic conductivity: the highly explanatory method by seepage flow analysis and the simple method by Dagan's formula. The method based on seepage flow analysis has the disadvantage that it takes a long time to calculate. The method based on Dagan's formula has the disadvantage that the calculated macroscopic hydraulic conductivity is a value on the unsafe side compared to the method based on seepage flow analysis. In this paper, we compared the seepage flow analysis method and Dagan's formula for the purpose of obtaining a method for calculating macroscopic hydraulic conductivity that is simpler and easier to explain than conventional methods. As a result, it was confirmed that by multiplying the macroscopic hydraulic conductivity obtained from Dagan's equation by an appropriate multiplier, a value equivalent to the macroscopic hydraulic conductivity obtained from seepage flow analysis can be obtained.