ブロック工法を用いた難透水性覆土の巨視的透水係数の評価方法について

清水建設（株）　正会員　○郷家　光男
正会員　戸栗　智仁
正会員　沖原　光信

１．はじめに

わが国において，原子力発電所で発生した低レベル放射性廃棄物のうち，放射能レベルが比較的低い廃棄物は，浅地中処分される計画となっている．そして，青森県上北郡六ヶ所村の日本原燃株式会社の低レベル放射性廃棄物埋設センターにある埋設設備は，1992 年に操業を開始し，廃棄体を受け入れている [1)]．



図−1　廃棄体埋設地の概念

廃棄体埋設地の概念を**図−1** に示す [1)]．下部覆土の上限面が岩盤の中に入るように掘削された埋設地に，鉄筋コンクリート製の埋設設備が構築される．埋設設備は内部仕切設備で区画され，区画内に廃棄体が定置された後，区画内にモルタルが充填される．その後，上部に覆いコンクリートが打設され，覆土が構築される．覆土が完了した後は，段階的な管理が約 300 年間行われ，その間に埋設した廃棄体中の放射能は安全なレベルまで減衰する [2)]．

覆土に求められる機能としては，放射性物質を含んだ地下水の移行抑制が挙げられる．この移行抑制機能は，地下水の浸入を抑制する機能と放射性物質を収着する機能に分けられる．埋設設備内への地下水の浸入を抑制するために，低透水性を有する土質系材料の難透水性覆土と下部覆土が埋設設備の上面および側面に設置される．また，放射性物質を収着させるために，土質系材料が有している収着性能も期待されている．難透水性覆土，下部覆土および上部覆土の仕様 [3)]を，**表−1** に示す．なお，巨視的透水係数とは，空間的なばらつきを考慮しても全体として期待できる透水係数を示している．難透水性覆土の場合，不均質性によって透水係数が局所的に 1.0×10^{-10} (m/s)を超えたとしても，全体として 1.0×10^{-10} (m/s)以下となっていれば，要求性能を満たすことになる．

難透水性覆土の構築法としては，原位置での敷き均し・転圧による方法が想定される．しかし，施工時の降雨等によってベントナイトが膨潤し，目標とする密度に締固めることが困難となることが懸念される．そのため，降雨時には施工を中断せざるを得ず，品質確保だけでなく，工程管理の観点からも改善が望ましい．

このような問題点に対して，我々は，事前に工場等でベントナイト混合土をブロック化しておき，現地ではそのブロックを定置する構築法（以下，ブロック工法）を開発してきた [4), 5)]．

表−1　覆土の主要な部位と主な仕様

主要な部位	材料	透水係数	厚さ
難透水性覆土	ベントナイト混合土	巨視的透水係数として 1.0×10^{-10} (m/s)以下	2 m 以上
下部覆土	現地発生土に必要に応じてベントナイト，砂および砕石を混合	巨視的透水係数として 1.0×10^{-8} (m/s)以下	2 m 以上
上部覆土	現地発生土に必要に応じて砂および砕石を混合	廃棄物埋設地周辺の第四紀層と同程度（10^{-6} (m/s)程度）	難透水性覆土および下部覆土と合わせて埋設設備上面から 6 m 以上

キーワード　低レベル放射性廃棄物，ピット処分，ベントナイト混合土，不均質性，有効粘土密度
連絡先　〒104-8370　東京都中央区京橋 2-16-1　清水建設（株）土木技術本部バックエンド技術部　Tel. 080-9504-6170

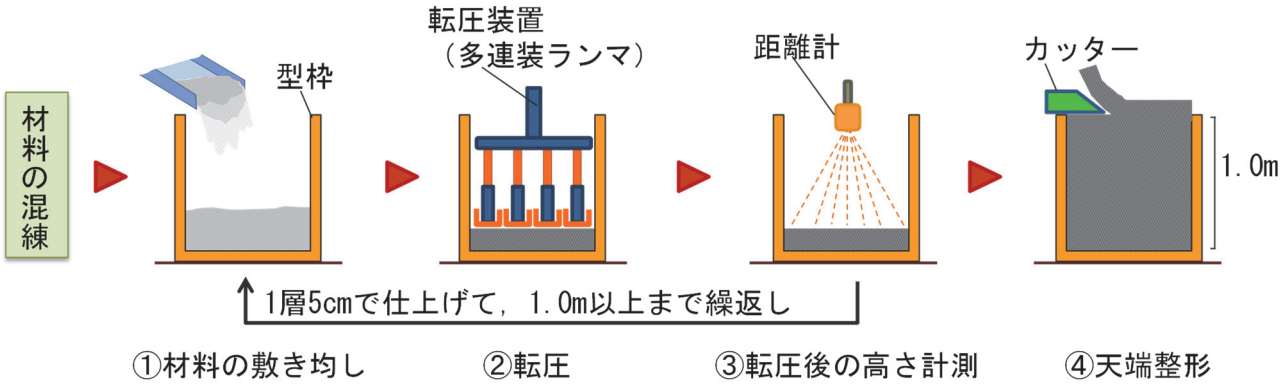


図-2　ブロックの製造方法



図-3　鋼製型枠

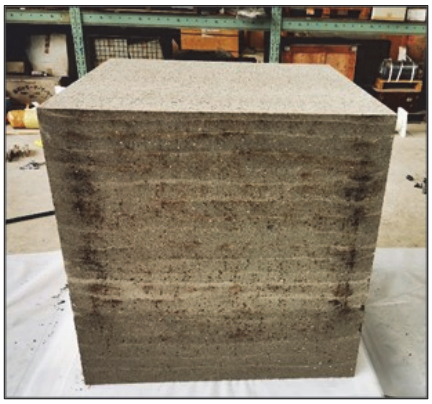


図-4　試作した 1m ブロック



図-5　プッシュプルフォーク

ただし，ブロック工法の場合でも内部の不均質性は排除しきれないことと，定置直後のブロック間の隙間によって，難透水性覆土としての性能への影響が懸念される．

そこで，本稿では，ブロック内部の不均質性や隙間の影響を考慮した難透水性覆土の巨視的透水係数の評価方法を検討した．

２．ブロック工法の概要

(1) 製造方法

ブロックの製造方法の概念を図-2 に示す．ベントナイト，砂および水をミキサで混練後，仕上がり厚さ 5 cm 分の量を図-3 に示すような型枠内に敷き均す．そして，多連装ランマで転圧し，転圧後に厚さを確認する．高さが 1m 以上になるまで，これを繰返す．最後に天端を整形して高さ 1m に仕上げる．試作した 1m×1m×1m のブロック（以下，1m ブロック）を図-4 に示す．なお，試作した 1m ブロックはクニミネ工業社製のクニゲル V1 が 20%，青森県産砂が 80%の割合で配合されている．

(2) 搬送・定置方法

1m ブロックの搬送・定置時には，プッシュプルアタッチメントを装着したフォークリフト（以下，プッシュプルフォーク）を用いることを想定している [5]．プッシュプルフォークを図-5 に示す．製造された 1m ブロックをシートパレットと呼ばれる厚さ数 mm のシートの上に置き，床面とシートパレットの間にプッシュプルフォークの爪を差し込んでシートパレットごと 1m ブロックを持ち上げる．持ち上げた状態で定置位置まで自走し，ブロックを水平に押し出して配置する．

３．透水係数の代替指標と室内透水試験

(1) 代替指標

難透水性覆土の透水性の評価に関して，一般的な敷き均し・転圧工法では，構築後の性能を確認するためには，現場でコアを採取して室内透水試験を行うが，試験に要する時間等を考慮すると，代替指標で速やかに確認できることが望ましい．これに対して，ベントナイト混合土の透水係数は有効粘土密度と相関があることが報告されている[例えば6)]．よって，本稿では，有効粘土密度を代替指標として，迅速に難透水性覆土の性能を評価できる手法の確立を目指した．なお，有効粘土密度とは，ベントナイト混合土から砂分を除いたベントナイトと間隙で構成される乾燥密度と定義され，次式で表される．

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_S)}{100 - \rho_d R_S/\rho_S} \tag{1}$$

ここに，ρ_bは有効粘土密度(Mg/m^3)，ρ_dは乾燥密度(Mg/m^3)，R_Sは砂の混合率(%)，ρ_Sは砂の土粒子密度(Mg/m^3)を示す．

(2) 室内透水試験

有効粘土密度と透水係数の関係について，クニゲル V1 を用いたベントナイト混合土の室内透水試験で確認を行った．試験条件は，クニゲル V1 の混合率を 10%，15%，20%の 3 水準とし，青森県産の砂を使用した．また，直径 100 mm，高さ 100 mm の円柱供試体を使用し，試験方法は変水位法を適用した．室内透水試験の結果として，有効粘土密度と透水係数の関係を**図-6** に示す．既往の結果と同様に，有効粘土密度－透水係数関係の回帰式は，黒色実線のように片対数の直線式で表された．ただし，本稿では，安全側の評価になることを考慮して，橙色点線のように，試験値のばらつきの上限を包含する形にして，以下の関係式を設定した．

$$\log_{10} k = -0.8970\rho_b - 11.04 \tag{2}$$

ここに，kは透水係数(m/s)を示す．

ブロック工法の場合，定置直後には隙間が生じているが，水が浸入した際には，ベントナイトの膨潤により隙間は閉塞される．ただし，閉塞した隙間のベントナイトの密度は，ブロック本体よりも低くなると考えられるため，閉塞後の隙間の透水係数は，ブロック本体よりも高くなると想定される．巨視的透水係数によって全体としての性能を評価するためには，閉塞した隙間の透水性についても定量的に把握して，評価に考慮する必要がある．そこで，初期隙間幅と膨潤して閉塞した隙間の透水係数の関係を把握するため，クニゲル V1 混合率 20%の円柱供試体に人工的に隙間を作成し，初期隙間幅を変えた室内透水試験を行った．初期隙間幅は，3 mm，6 mm，9 mm，20 mm，30 mm の 5 水準とした．供試体に作成した隙間の例を**図-7** に示す．また，通水後に外観上，膨潤によって隙間は埋まったことを確認している．室内透水試験で直接得られる透水係数は，隙間以外の部分の透水性の影響も含んでいる．よって，膨潤して閉塞した隙間の透水係数は，以下に示す面積の重みづけ平均の関係から評価した．

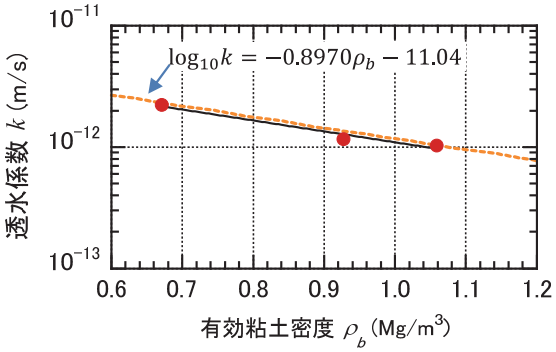


図-6　有効粘土密度－透水係数関係

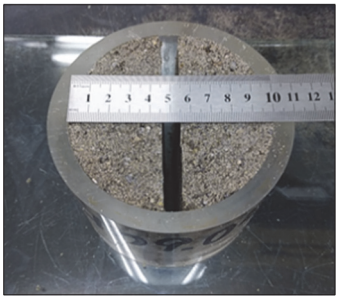


図-7　初期隙間幅 9 ㎜ の例

$$k = \left(k_f A_f + k_m A_m\right)/A \tag{3}$$

ここに，k_fは膨潤後の隙間の透水係数(m/s)，A_fは隙間の面積(m^2)，Aは円柱供試体の断面積(m^2)，A_mは隙間以外の面積(m^2)を示す．また，k_mは隙間以外の透水係数であり，**図-6** に示されたクニゲル V1 混合率 20%時の隙間なしの試験値より 1.03×10^{-12} (m/s)とした．

隙間を考慮した室内透水試験から，初期隙間幅－膨潤後の隙間の透水係数の関係を整理した結果を**図-8** に示す．この図において，点線は 95%信頼区間の上下限を示している．後述するように本稿の評価方法では，膨潤後の隙間の透水係数が大きくなるほど，巨視的透水係数も大きくなる．そこで，膨潤後の隙間の透水係数についても，巨視的透水係数が安全側の評価になることを考慮して，信頼区間の上限を評価に用いる保守的な値として採用することにした．初期隙間幅 20 mm の場合，信頼区間の上限値は 1.07×10^{-10} (m/s)となることから，膨潤後の隙間の透水係数は，$1.07\times10^{-10}/1.03\times10^{-12} = 104$ 倍と評価できる．

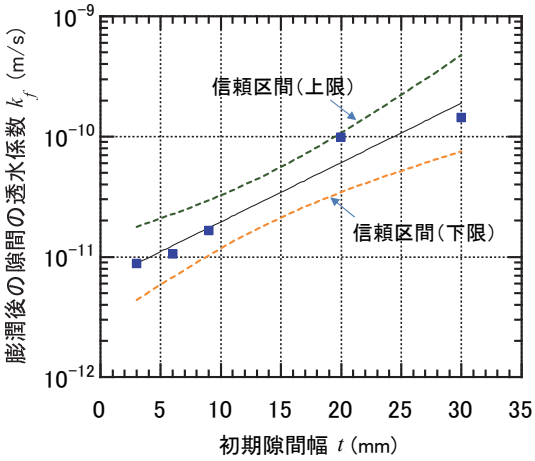


図-8　初期隙間幅－膨潤後の隙間の透水係数関係

4．ベントナイト混合土の統計量

図-4 に示したようにクニゲル V1 混合率 20%で 1m ブロックを試作した際，締固め厚さ 5 cm ごとに乾燥密度を測定し，式(1)より各層の有効粘土密度を求めた．得られた有効粘土密度の鉛直方向分布を**図-9** に，ヒストグラムを**図-10** に示す．これらより，有効粘土密度の平均は 1.11 (Mg/m^3)，標準偏差は 0.0653 (Mg/m^3)であることが分かった．また，有効粘土密度の正規性について，有意水準 5%でシャピロ・ウィルク検定を行った結果，p = 0.97 で正規性は棄却されず，正規分布で近似できると判断した．

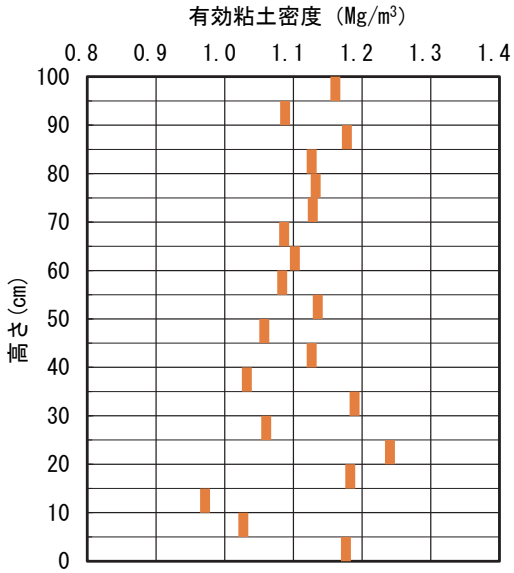


図-9　有効粘土密度の鉛直方向分布

図-9 より，有効粘土密度は層ごとにばらついていて，不均質性を有していることは分かったが，空間的な相関性の有無を調べるために，次式で示される有効粘土密度のセミバリオグラム$\gamma(h)$を求めた [7]．

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}\{\rho_b(x_i) - \rho_b(x_i + h)\}^2 \tag{4}$$

ここに，$\rho_b(x_i)$は場所x_iにおける有効粘土密度，$N(h)$は距離hだけ離れた組合せの個数である．

算定結果を**図-11** に示す．層間が近い場合でもセミバリオグラムは小さくならなかったことから，各層の有効粘土密度に空間的な相関性は見られなかった．

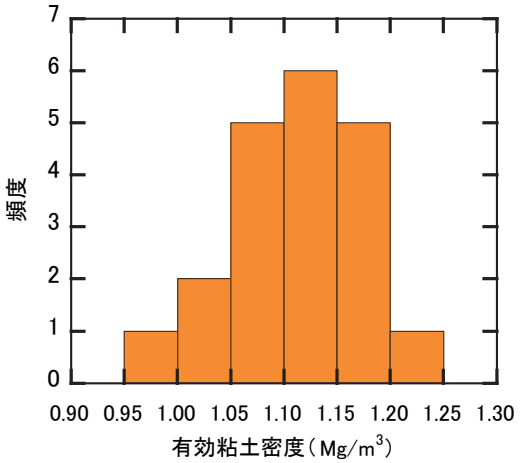


図-10　有効粘土密度のヒストグラム

５．有効粘土密度の統計量－巨視的透水係数関係による評価方法

(1) 評価方法の考え方

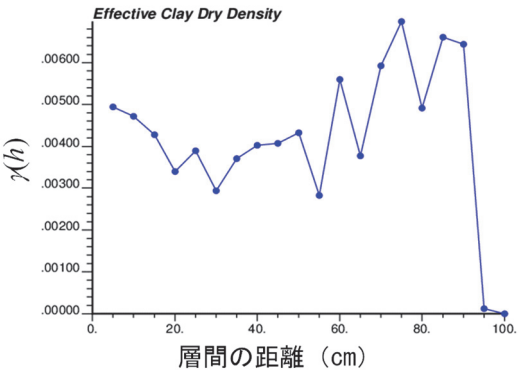


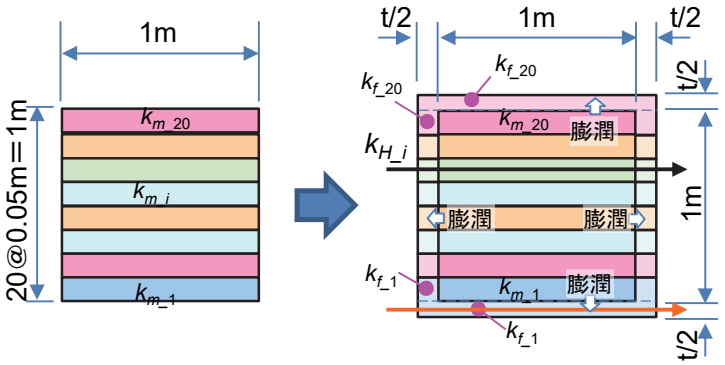
図-11　有効粘土密度のセミバリオグラム

前章までの有効粘土密度－透水係数関係，膨潤後の隙間の透水係数，および 1m ブロック内の不均質性の特性の結果を考慮して，モンテカルロシミュレーションによって有効粘土密度の統計量と 1m ブロックの巨視的透水係数の関係を整理して，性能を評価する手法を構築する．現場での 1m ブロックの製造工程を考慮すると，各材料計量値や製造後の 1m ブロックの重量計測等から，1m ブロックごとの有効粘土密度は取得可能であると考えられる．そして，ある製造単位で 1m ブロック個々の製造データから有効粘土密度の平均や標準偏差の統計量を取得することで，1m ブロックの巨視的透水係数を評価するという考え方となっている．

ただし，現場で得られる 1m ブロックの有効粘土密度は，1m ブロックを構成する 20 層の有効粘土密度の標本平均に相当する．したがって，1m ブロックごとの有効粘土密度の標準偏差σ_Bと層ごとの有効粘土密度の標準偏差σ_Lには，中心極限定理より，$\sigma_L = \sqrt{20}\sigma_B$の関係があることに留意する必要がある．

(2) ばらつきや隙間の影響を考慮した 1m ブロックの等価透水係数

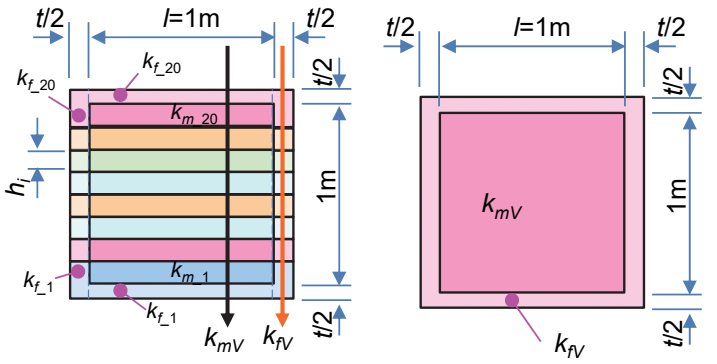
1m ブロックの内部は層ごとに有効粘土密度が異なり，不均質性が生じている．よって，1m ブロックの定置後に隙間に水が浸入してくると，有効粘土密度が異なる層ごとに膨潤して，膨潤後の隙間にも不均質性が生じると考えられる．このときの膨潤後隙間の不均質性の概念を図-12 に示す．この図では，第 1 層を下端，第 20 層を上端とするように 1m ブロックが製造されたものとする．そして，第 i 層の側面にある隙間は，第 i 層が膨潤することによって閉塞する．また，第 1 層の下面の隙間は第 1 層が，第 20 層の上面の隙間は第 20 層が閉塞するとする．



（a）膨潤前　　（b）膨潤後

図-12　膨潤後隙間の不均質性の概念

図-8 より，膨潤後の隙間の透水係数は，初期隙間幅によって変わるが，ここでは，初期隙間幅$t = 20$ (mm)と想定すると，第 3 章第 2 節より，第 i 層の透水係数k_{m_i}と第 i 層における膨潤後の隙間の透水係数k_{f_i}の関係は，$k_{f_i} = 104 \times k_{m_i}$とすることができる．



（a）正面から見たイメージ　　（b）上面から見たイメージ

図-13　鉛直方向の等価透水係数の概念

図-12 (b) のように水平方向に流れる場合，黒色矢印のように膨潤後の隙間→ベントナイト混合土層→膨潤後の隙間の順で流れる箇所と，橙色矢印のように 1m ブロックの上端，下端および側面の膨潤後の隙間だけを流れる箇所がある．第 i 層における膨潤後の隙間→ベントナイト混合土層→膨潤後の隙間を流れる場合の等価透水係数k_{H_i}は，以下のようになる．

$$k_{H_i} = \frac{t + l}{\frac{t}{k_{f_i}} + \frac{l}{k_{m_i}}} \tag{5}$$

ここに，lは 1m ブロックの幅(m)，tは初期隙間幅(m)を示す．

そして，1m ブロックにおいて，各層のばらつきや膨潤後の隙間の影響を考慮した水平方向の等価透水係数K_Hは，以下のようになる．

$$K_H = \frac{\sum_{i=1}^{20}\left(k_{H_i}h_i l + k_{f_i}h_i t\right) + k_{f_1}(l+t)\frac{t}{2} + k_{f_20}(l+t)\frac{t}{2}}{\left(t + \sum_{i=1}^{20} h_i\right)(l+t)} \tag{6}$$

ここに，h_iは第 i 層の層厚(m)を示す．

一方，**図-13(a)**のように鉛直方向に流れる場合，黒色矢印のように膨潤後の隙間→20 層のベントナイト混合土→膨潤後の隙間の順で流れる箇所と，橙色矢印のように各層の膨潤後の隙間だけを流れる箇所がある．膨潤後の隙間→20 層のベントナイト混合土→膨潤後の隙間の等価透水係数k_{mV}と，各層の膨潤後の隙間の等価透水係数k_{fV}は，以下のようになる．

$$k_{mV} = \frac{t + \sum_{i=1}^{20} h_i}{\frac{t/2}{k_{f_1}} + \sum_{i=1}^{20}\frac{h_i}{k_{m_i}} + \frac{t/2}{k_{f_20}}} \tag{7}$$

$$k_{fV} = \frac{t + \sum_{i=1}^{20} h_i}{\frac{t/2}{k_{f_1}} + \sum_{i=1}^{20}\frac{h_i}{k_{f_i}} + \frac{t/2}{k_{f_20}}} \tag{8}$$

1m ブロックの鉛直方向の等価透水係数は，**図-13(b)**に対して面外方向に流れる場合に相当する．よって，ばらつきや膨潤後の隙間の影響を考慮した鉛直方向の等価透水係数K_Vは，以下のようになる．

$$K_V = \frac{k_{mV}\cdot l^2 + k_{fV}\cdot(2tl + t^2)}{(l+t)^2} \tag{9}$$

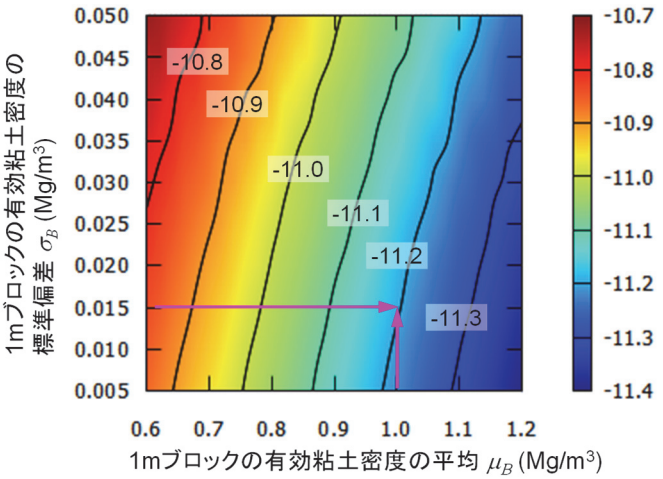
(3) 有効粘土密度の統計量－巨視的透水係数関係の整理と評価方法

有効粘土密度の統計量と 1m ブロックの巨視的透水係数の関係について，整理方法を以下に示す．

1) 1m ブロックの有効粘土密度の平均と標準偏差を 1 組設定する．
2) 第 4 章より，有効粘土密度は正規分布で近似できること，各層の有効粘土密度に空間的な相関性はないことから，正規分布に従う乱数で 20 層分の有効粘土密度を与えて，式(2)に基づき各層の透水係数を求める．
3) 式(6)より水平方向の等価透水係数，式(9)より鉛直方向の等価透水係数を算定し，大きい方を 1m ブロックの等価透水係数とする．
4) 2)と 3)を繰返し，1m ブロックの等価透水係数のサンプル数が事前に設定した値（例えば，1,000 個）に達したら，等価透水係数を小さい順に並べ直す．そして，全体の 95%がその値以下になる境界の値を 1)で設定した 1 組の有効粘土密度の平均と標準偏差に対する巨視的透水係数とする．
5) 様々な平均と標準偏差の組合せに対して，2)～4)を繰返して，1m ブロックの巨視的透水係数を求める．
6) 有効粘土密度の平均・標準偏差と巨視的透水係数の関係を 2D コンター図の形で整理する．

整理した結果を**図−14** に示す．図中の「-11.0」等の値は，巨視的透水係数(m/s)の常用対数値である．なお，**図−14** の整理のとき，膨潤後の隙間の透水係数をクニゲル V1 混合率 20%，初期隙間幅 20 mm の場合を前提としたことから，評価の適用条件は，クニゲル V1 混合率 20%，初期隙間幅 20 mm 以下となる．

例えば，1m ブロック製造時に 1m ブロックの有効粘土密度の平均μ_Bが 1.0 (Mg/m^3)，標準偏差σ_Bが 0.015 (Mg/m^3)であったとすると，**図−14** より，1m ブロックの巨視的透水係数は，95%の確率で $1\times10^{-11.2} = 6.3\times10^{-12}$ (m/s)以下になると評価できる．



図−14　有効粘土密度の統計量－巨視的透水係数関係

６．おわりに

本稿では，低レベル放射性廃棄物の廃棄体埋設地の難透水性覆土にブロック工法を用いた場合，それに適用できるブロック内部の不均質性や隙間の影響を考慮した巨視的透水係数の評価方法を検討した．

今後の課題として，実際の現場に適用する際には，実プラントでデータを取得して，それを反映させる必要がある．また，1m ブロック製造後，コアを採取して室内透水試験を行うことで，評価方法の妥当性を確認する必要もある．

参考文献

1) 日本原燃：埋設設備の構造，https://www.jnfl.co.jp/ja/business/about/llw/summary/structure.html（2026 年 7 月 14 日閲覧），2024.
2) 佐々木泰：日本原燃（株）低レベル放射性廃棄物埋設センターにおける 30 年間の運用と安全の実績，日本原子力学会誌，Vol. 66，No. 5，pp. 19-23，2024.
3) 日本原燃：廃棄物埋設施設における許可基準規則への適合性について，2021.
4) 則松勇，坂本嵩延，沖原光信，戸栗智仁，郷家光男，工藤郁：ブロック定置によるベントナイト混合土層の構築方法　その 1（ブロック透水試験），令和 6 年度土木学会第 79 回年次学術講演会講演概要集，CS12-25，2024.
5) 坂本嵩延，則松勇，沖原光信，戸栗智仁，郷家光男，工藤郁：ブロック定置によるベントナイト混合土層の構築方法　その 2（ブロック定置試験），令和 6 年度土木学会第 79 回年次学術講演会講演概要集，CS12-26，2024.
6) 原子力発電環境整備機構：国内産ベントナイトおよびベントナイト混合土の基本特性データ（NUMO-電中研共同研究），NUMO-TR-21-02，2022.
7) Deutsch, C. V. and Journel, A. G.: GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide, 2nd edition, pp. 43-62, Oxford University Press, 1997.