

# 埋め立て処分場遮水壁に対する原位置透水性評価の試み

岐阜大学工学部 佐藤 健  
市川工務店 林 昌宏

## 1. はじめに

廃棄物処分場の遮水壁にゴムシートに加え、粘土も用いる事例が増えつつある。EPAはクレイライナーの使用を積極的に推奨しており、我が国でも今後、使用例が増すものと予想される。放射性廃棄物の地中処分では、既にベントナイトが遮水材料に用いられており、透水性の評価が室内試験を中心に行われている。粘土など不透水性材料の透水係数の測定は、流量が極わずかで、試験時間も長期にわたるので、かなり高圧の浸透圧力を負荷して、飽和状態の実験が行われている。

石灰水洗ケーキと高炉スラグ、軽焼生石灰を混合して作成した遮水材による模擬処分場において、遮水材の透水性評価を行う機会を得た。均質な材料に対する室内試験よりも施工後の材料に対する原位置試験のほうが、処分場の遮水機能の評価する上では重要であると考え、透水係数の原位置推定法の研究に取り組んだ。難透水性材料の透水試験の流量計測にもとづく室内実験を中心に検討されているのに対して、ここで試みるのは、流量計測は放棄して、土中水分量の経時変化から推定する方法である。同様の提案は丸山<sup>1)</sup>によって行われたが、ここでは、重力の影響も考えた検討を行っている。透水係数の推定にはBrooks and Corey<sup>2)</sup>が提案する関数近似モデルを使用した。

## 2. 原位置試験の原理

鉛直一次元方向の水分移動として、

$$q_w = -D(\theta_w) \frac{\partial \theta_w}{\partial z} - k(\theta_w) \quad (1)$$

を考へて、連続の条件を(1)式に適用すると、

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = D(\theta_w) \frac{\partial^2 \theta_w}{\partial z^2} + \frac{\partial k(\theta_w)}{\partial \theta_w} \frac{\partial \theta_w}{\partial z} \quad (2)$$

が得られる。(2)式の $\frac{\partial^2 \theta_w}{\partial z^2}$ と $\frac{\partial \theta_w}{\partial z}$ を直接計測して、(2)式中の $D(\theta_w)$ と $\frac{\partial k(\theta_w)}{\partial \theta_w}$ を推定する。土中の鉛直方向の薄層間隔の水分量の計測は、TDR(Time Domain Reflectometry)によって土の見かけの誘電率を推定した。

## 3. TDRによる土中水分量の計測

数センチ間隔の土中水分量の計測には、TDRセンサーを気中に出した状態でその指示値を記録しておき、順次、土中に数センチ毎にセンサーを貫入させながら、各貫入深度ごとのTDRの読みと空気中での指示値、センサーの空気中長さを考慮して推定した。TDRの計測原理から考へて、電磁波が所定の長さのセンサーを通過するのに必要な時間は、センサーが空気、土粒子、水と触れる長さの割合に比例するので、こうした方法が適用できると考へた。なお、模擬処分場の撤去後に、ブロック・サンプルを屋外に放置して、土中水分量の経時変化を採土乾燥によって計測し、 $D(\theta_w)$

$$\frac{\partial k(\theta_w)}{\partial \theta_w}$$

と $\frac{\partial \theta_w}{\partial z}$ を推定して、TDRによる結果の妥当性を調べた。

## 4. Brooks and Corey モデル<sup>2)</sup>

モデルに含まれるパラメータが比較的簡単に決定できることから、不飽和透水係数を推定する入門モデルとしてよく利用されている。この方法は、水分保持特性曲線を

$$Se(\theta_w) = \left( \frac{\psi_c}{\psi} \right)^\lambda \quad \psi < \psi_c \quad (3)$$

$$Se(\theta_w) = 1 \quad \psi \geq \psi_c \quad (4)$$

$\psi$ : 圧力水頭 (cm) (本文では以下、圧力水頭と呼ぶ)

$\phi_c$ : 空気侵入値 (AEV), Bubbling Pressure と呼ばれる。  
 $\lambda$ : 間隙径分布にかんするパラメータ

$$Se(\theta_w): \text{相対飽和度と呼ばれ, } Se(\theta_w) = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r}$$

と関数近似する。比透水係数 ( $Kr(\theta_w) = K(\theta_w)/K_{sat}$ )は

$$Kr(\theta_w) = 1 \quad \phi \geq \phi_c \quad (5)$$

$$Kr(\theta_w) = \{ Se(\theta_w) \}^{3+2/\lambda} \quad \phi < \phi_c \quad (6)$$

より推定する。未知のパラメータは  $K_{sat}, \theta_{sat}, \theta_r, \psi_c, \lambda$  の5つである。通常  $K_{sat}$  と  $\theta_{sat}$  は既知量として、パラメータ推定を行うことが多い。 $\theta_r, \phi_c, \lambda$  の推定にはいろいろな方法が提案されているが、ここでは、 $\theta_r$  を 0.1 とし、 $\phi_c, \lambda$  を TDR の計測値を利用した (2) 式より推定した。

### 5. 透水係数の推定法

相対飽和度  $Se(\theta_w)$  の定義より、 $\theta_w = Se(\theta_w)(\theta_{sat} - \theta_r) + \theta_r$  が得られるので、 $\frac{\partial k(\theta_w)}{\partial \theta_w}$  を Brooks and Corey モデル<sup>2)</sup> に直接適用すると、

$$\frac{\partial k(\theta_w)}{\partial \theta_w} = \frac{2+3\lambda}{\lambda} Se(\theta_w)^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}-1} \frac{k_{sat}}{\theta_{sat} - \theta_r} \quad (7)$$

が得られる。また、水分拡散係数  $D(\theta_w)$  が、

$$D(\theta_w) = \frac{k(\theta_w)}{\partial \theta_w / \partial \psi} = \frac{Se(\theta_w)^{\frac{1+2\lambda}{\lambda}} k_{sat} \psi_c}{-\lambda(\theta_{sat} - \theta_r)} \quad (8)$$

のようになる。したがって、(2) 式にもとづいて、TDR の計測値より得られた  $\frac{\partial k(\theta_w)}{\partial \theta_w}$  と  $D(\theta_w)$  を (7), (8) 式に代入して、Brooks and Corey モデルの  $\phi_c$  と  $\lambda$  を決定した。

### 6. 原位置試験の位置と結果

図-1 に試験位置とブロック・サンプル採取位置、図-2 に N-S-TDR での計測結果を示した。図-1 で N-S-TDR は遮水壁北面の地表面での TDR の計測結果、NE-M-B S は遮水材北東面の中間高さのブロック・サンプルの結果であることを表している。試験実施日は快晴で、いずれの結果も、地表面に向かって体積含水率が低下し、地表面からの蒸発現象が伺われる結果となっている。太陽がよく当たる午後 1~3 時付近で、クレイライナーからの蒸発が多くなっている様子も伺われる。

表-1 推定結果

位置方法	D (cm <sup>2</sup> /min)	$\partial K(\theta_w) / \partial \theta_w$ (cm/min)	$\theta_w$ の範囲 (%)
N-S-TDR	$2.0 \times 10^{-2}$	$5.7 \times 10^{-2}$	10~30
NW-B-B S	$9.4 \times 10^{-3}$	$5.6 \times 10^{-3}$	20~40
NE-M-B S	$3.2 \times 10^{-4}$	$3.8 \times 10^{-3}$	20~40
C-B-B S	$1.6 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-2}$	20~40

## 7. 水分拡散率と透水係数

得られた値をまとめて表1に示した。TDRによる結果が、採土乾燥法で推定した値よりかなり大きくなっている。深度方向の測定間隔の違いによるものか、TDRの計測精度によるものなのか、遮水壁の非均質性によるものなのか、今後も計測事例の蓄積が必要と考える。しかし、提案法は水分拡散係数以外に透水係数に関する情報も同時に得られる特徴を有しており、ここでは問題点を指摘するに留め、更に透水係数の推定を続けた。

## 8. 透水係数の推定

透水係数の推定に当たって、以下の各値を利用した。

飽和透水係数 ( $k_{sat}$ ) =  $1.0 \times 10^{-3}$  (cm/s) (室内透水試験の結果で一番大きい値)

飽和の体積含水率 ( $\theta_{sat}$ ) = 0.52 (ブロックサンプルの間隙比  $e$  を 1.081 とした)

最小体積含水率 ( $\theta_r$ ) = 0.1 (これ以上は排水できない最小の体積含水率として定義されており、実験していないので、仮定値)

表1の各値を使って、(7)、(8)式より透水係数を推定した結果が図-3~6である。図には透水係数とともに水分保持特性曲線も併せて示した。

処分場撤去時の含水率に基づいてクレイライナーの飽和度を推定すれば、42~70%となる。相対飽和度に換算すると0.26~0.62が推定され、図-3~6より対応する透水係数を読み取れば  $10^{-8}$ ~ $10^{-5}$  (cm/s) が得られる (N-S-TDRは除く)。

平成7年8月1日~平成9年9月30日の降水量と処分場からの流出量の対応に基づき推定したタンクモデルのパラメータによれば、クレイライナーの透水係数は  $2 \times 10^{-7}$  (cm/s) が推定されている。タンクモデルが処分場全体の遮水性を表現したもので、今回の局所的な透水係数と直接比較するには問題がある。しかしながら、タンクモデルによる逆算結果がここで提案する方法による透水係数とそれ程大きく違わないことは興味ある点である。

## 9. 今後の課題

原位置での流量観測が難しいことを勘案して、流量計測に代わって土中水分量の変化から透水係数を推定する方法を試みた。TDRの適用実績は砂質土に集中しており、粘土や安定処理土に対する適用例は少ない。また、間隙水中の溶質濃度によって影響を受けることも指摘されている。こうした影響で、N-S-TDRが採土乾燥法の結果にくらべかなり大きな透水係数を与えたものと考えられた。

今回の方法は、熱風を負荷する必要がなく、結果の解析に特別の変換を施す必要がない、などいくつかの利点を有しているので、今後の継続検討によって精度向上を目指したい。特に、地表付近の薄層の水分量計測が精度向上のポイントであり、TDRの計測間隔5cmを、採土乾燥法の1cm間隔まで縮小することが出来ればかなり実用化の可能性は出てくるものと思われる。

## 参考文献

- 丸山栄三(1961):土じょう面蒸発に関する研究, 研究時報, 14(1), 1-32.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T.(1966): Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow, ASCE, IR(92), 61-88.

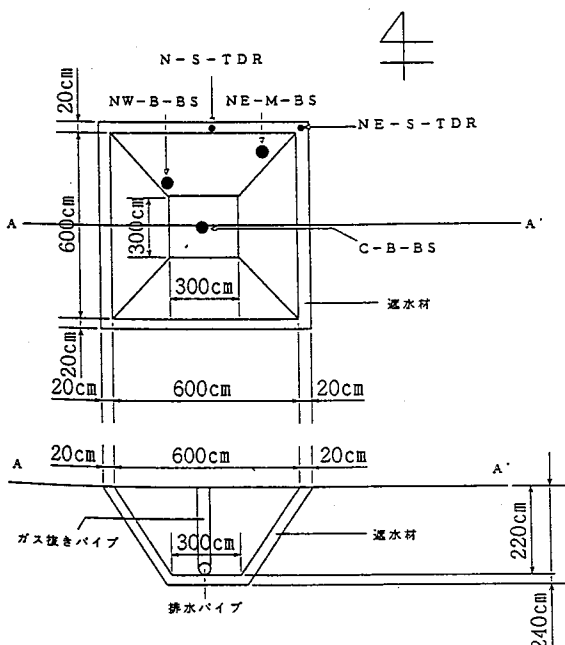


図-1 模擬処分場の概要と試料採取位置

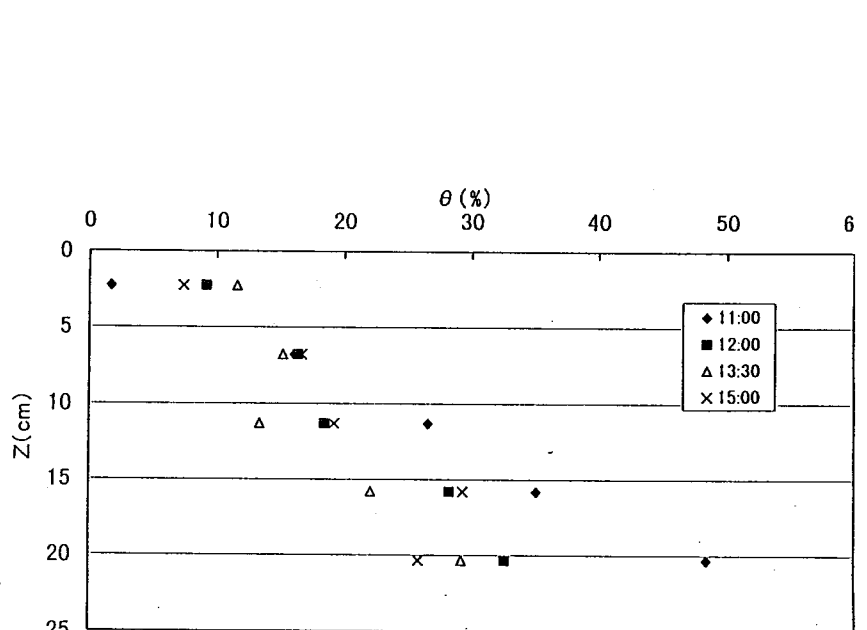
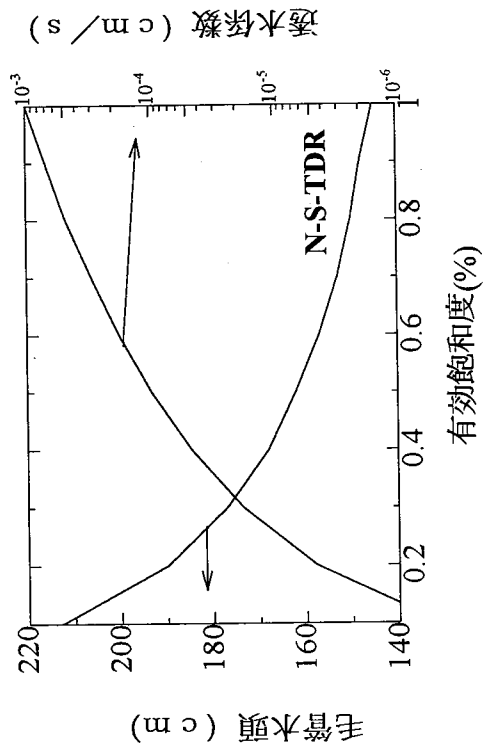
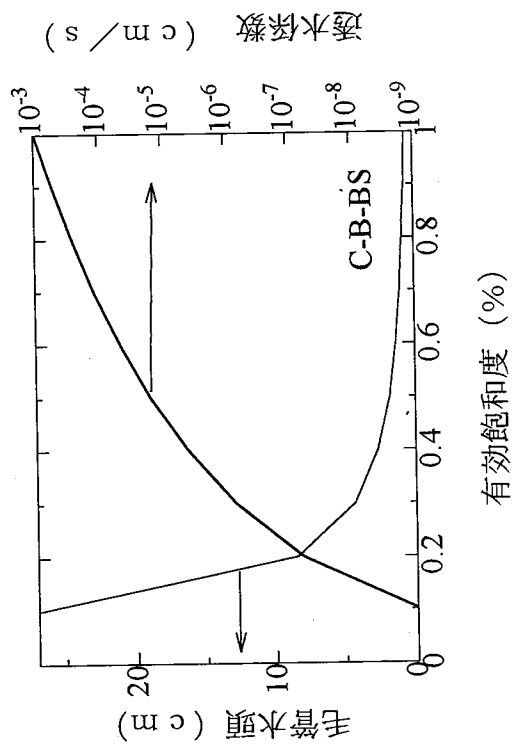


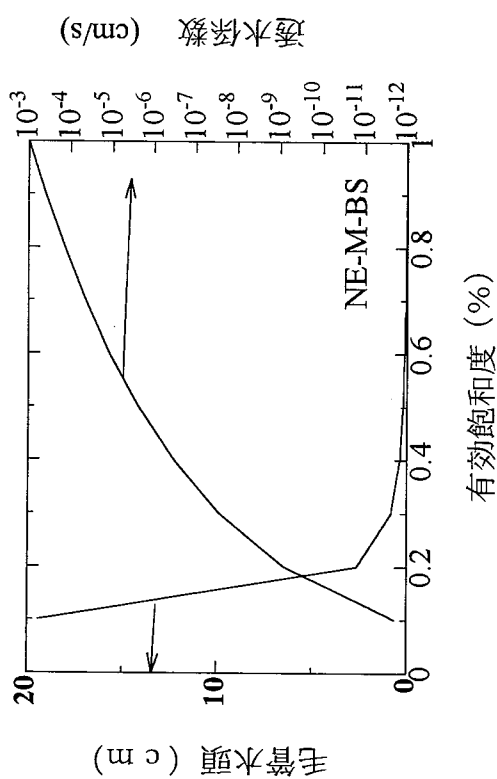
図-2 体積含水率の経時変化



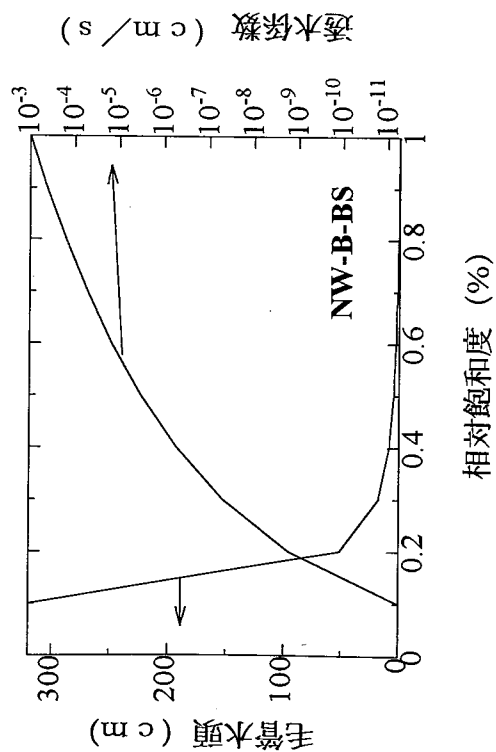
圖—3 透水係數 (N-S-TDR)



圖—4 透水係數 (C-B-BS)



圖—5 透水係數 (NE-M-BS)



圖—6 透水係數 (NW-B-BS)