

キャピラリーバリアを用いた廃棄物埋立地 底部集排水構造に関する研究 — 数値解析 —

東條安匡¹・田中信寿²・松藤敏彦³

¹正会員 工修 北海道大学助手 工学研究科環境資源工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13西8)

²フェロー会員 工博 北海道大学教授 工学研究科環境資源工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13西8)

³正会員 工博 北海道大学助教授 工学研究科環境資源工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13西8)

キャピラリーバリアに関する降雨浸透実験の実験結果¹⁾を土壌不飽和浸透理論を基にした数値計算モデルで模擬した。キャピラリーバリアは上部に砂層、下部に礫層を有する二層構造であるが、上部砂層には不飽和浸透理論式、下部の礫層には膜状流れ式を適用した。作成した計算モデルを用いて実規模でバリアの構造や上部層材料の粒度等を変化させてバリアの排水能力を増大させる方法について検討した結果、(1) 斜面の最下流端で上部層を下方へ引き込む効果はある深度で一定となる。(2) 上部砂層には、フィルター基準を満たす範囲で粒径の均一な砂を用いるほど効果が高い。(3) 上部層下端の毛管ポテンシャルが境界面の毛管ポテンシャルに達するまでの水量であれば浸入水の100%を側方排除可能であることがわかった。

Key Words: capillary barrier, sanitary landfill, drainage system

1. はじめに

本研究は、最終処分場底部での水分貯留による静水圧の発生を抑制するために、キャピラリーバリアを処分場底部に構築することを提案し、その水分排除の可能性に関して検討を行ったものである。はじめに、キャピラリーバリアを構成する材料、勾配、降雨強度、斜面の最下流端の構造、実験の規模を変化させた実験を実施し、バリアの排水能力とその影響因子に関して検討した¹⁾。本報告は、その実験結果を理論的に模擬するために、まず、砂層、礫層に用いた各試料の一次元/二次元浸透実験を実施し、実験結果を表現できる計算モデルを従来の浸透理論を基盤として検討した。次に、砂層、礫層の二層境界面における境界条件の設定方法等の検討を行った。以上の結果を基に、キャピラリーバリアにおける浸透現象の模擬を試みた。そして、開発された計算モデルを用いて、キャピラリーバリアの機能が実規模で発揮されるための条件について検討を行った。

2. 既往の研究

キャピラリーバリアの排水能力を与える式はRoss²⁾によって解析的に誘導された式が広く知られている。しかしながら、斜面をバリアが有効な領域と破過が生ずる領域を完全に2分しているなど、様々な単純化のための仮定がなされている。Oldenburg³⁾、Webb⁴⁾らは計算機上に仮想のキャピラリーバリアを設定して数値計算を行い、Ross式から導かれるバリアの限界長と比較した結果、計算ではRoss式で推定される限界長よりも遙かに前方で破過が生じ、Ross式ではこうしたfingering現象等を扱えないとしている。しかし、実際の実測値等との比較はなされていない。キャピラリーバリアの浸透現象を実験的に検討し、それを数値解析によって表現することを試みた報告は、筆者が調べた限りではMorris⁵⁾、Kampf⁶⁾、堀内⁷⁾の報告に見られる程度で極めて少ない。Morris⁵⁾は斜面長7m、層厚1.2mのキャピラリーバリアに対して降水実験を行い、それを有限差分法により解析しているが、斜面最下流端での流出の非定常応答特性は概ね一致するものの土層底部から流出する水分の分布に実測値と計算値の間で大きな差異が認められるとし、その原因を供試土壌の水分特性の把握の難しさ、流出口付近の土層の不均

一性にあると考察している。また、Kampf⁶⁾は斜面長8m, 層厚1.5m, 幅0.2mのキャピラリーバリアに対する勾配, 供給水量等を変化させた浸透実験の結果に対して有限要素法を用いた解析を行っているが, 上部細粒子層の水分特性値に関しては, コアサンプルを用いた実験により得られたパラメーターが使用できるが, 下部粗粒子層の特性は, コアサンプルのパラメーターでは十分でないとし, 実測の流出と層内圧力分布に一致するパラメーター探索を行っている。堀内⁷⁾は, 二次元の実験装置(斜面長40cm, 層厚30cm, 幅5cm)内に, 細砂, 粗砂, 細砂の互層構造を境界面を傾斜させた状態で作成し, 勾配, 上部からの供給水量を変化させた実験を行い, 有限要素法を用いた数値解析を行っているが, 不飽和透水係数の推定の問題, 封入空気の影響などにより, 実験結果を定性的には再現できるものの, 定量的な再現には問題があると指摘している。また西垣⁸⁾は, 斜面長76.5cm, 層厚56cm, 幅9cmの亚克力槽内に二層の土壤材料, および遮水材料を設置して上端から降雨を浸透させる実験で浸潤前線の変化, 層内圧力, 排水量を経時的に追跡している。その研究の中で, 境界部における水分の貯留と下部層への浸透を層内圧力の観点から詳細に検討し, 下部層が礫層やジオテキスタイルのような材料では, 境界面での圧力水頭はゼロに等しく, 上部細砂層内の水圧が正圧にならなければ下部層への浸透は生じないと述べ, 下部粗粒子層の不飽和浸透特性の把握が課題であると述べている。

3. 研究の目的

上述したとおり, 実験的に測定されたキャピラリーバリアにおける水分移動を数値解析によって表現する上で課題となっているのは, 計算モデルに与える材料特性に, キャピラリーバリア実験の各土層内の水分移動状況に即した不飽和水分移動特性を与えられるか, また, その特性はどのようにして決定すべきか, 特に, 下部粗粒子層の水分移動特性に関して, 細粒子層との境界条件も含めてどのような数理モデルにより表現すべきかと言うことであると考えられる。

そこで, 本研究では, 第一にキャピラリーバリアに使用した各材料の一次元/二次元浸透実験を行い, それぞれに対して浸透理論に基づく数値計算を実施することで, 各材料の鉛直, 水平方向水分移動がどこまで従来の浸透理論によって再現できるのかを検討した。特に礫層に関しては, 膜状流れ式⁹⁾を導入して水分移動を表現することを試み, 二層境界部の条件は, 砂層と礫層を互層にした土柱法から決定した。最終的にこ

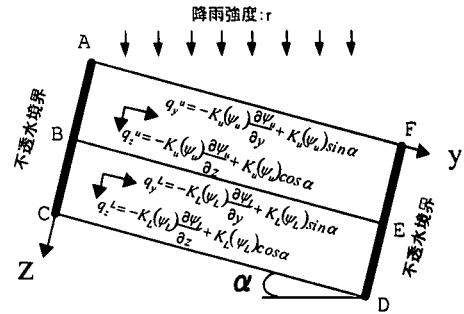


図-1 傾斜二層構造における座標系とフラックス成分

れらの結果すべてを結合してキャピラリーバリア内での水分移動を表現する二次元モデルを作成し, それを元に実規模での排水能力に関して検討した。

4. 解析に用いた式

キャピラリーバリアは傾斜した二層構造内における不飽和水分移動現象であるため, 図-1のような座標系においては一般に以下の式で記述される¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} (S_w S_s + C(\psi)) \frac{\partial \psi}{\partial t} &= \text{div} K(\psi) \nabla(\Phi) \\ &= -\frac{\partial}{\partial y} \left\{ -K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} + K(\psi) \sin \alpha \right\} \\ &\quad -\frac{\partial}{\partial z} \left\{ -K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} + K(\psi) \cos \alpha \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで, S_w : 飽和度[-], S_s : 比貯留係数[L⁻¹], $C(\psi)$ ($= \partial \theta / \partial \psi$): 比水分容量[L⁻¹], $K(\psi)$: 不飽和透水係数[LT⁻¹], Φ : 全水頭[L], ψ : 圧力水頭[L], α : 傾斜角[-], y : 斜面方向距離[L], z : 斜面と直角方向距離[L], t : 時間[T]. 境界条件は, 図-1に示すような条件では, 不透水境界のAC, DF面で $q_y=0$, AF面は降雨浸透境界で $q_z=r \cos \alpha = -K_u(\psi_u) \{ \partial \psi_u / \partial z \} + K_u(\psi_u) \cos \alpha$, CD面は自由流出境界であれば $\psi=0$ または $(\partial^2 \psi / \partial z^2 = 0)$, また, 2層境界BEでは, 圧力水頭の連続($\psi_u = \psi_l$), 流量の連続($q_z^u = q_z^l$)が設定される(添え字u, lはそれぞれ上部層, 下部層を示す)^{7), 8)}. 式(1)における比水分容量, 不飽和透水係数は, 土壤毎に水分量と圧力水頭の関係が必要であり, 従来, その決定には水分特性曲線からの推定や不飽和透水係数と圧力水頭の実測と言った方法が採られる。よく使用される式として, 以下に示すようなVan Genuchten式¹¹⁾(以下V.G式)の水分特性曲線に関する式

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ 1 + (\alpha |\psi|^n) \right\}^{-m}, \quad m = 1 - 1/n \quad (2)$$

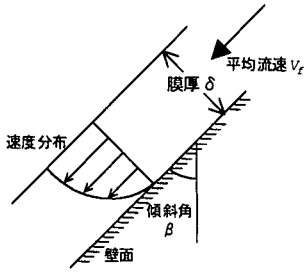


図-2 膜状流れ理論の概念図

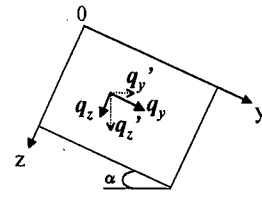


図-3 膜状流れを適用する際のフラックス成分

及び不飽和透水係数

$$K(\psi) = K_s K_r(\psi) = K_s \frac{\{1 - (\alpha|\psi|)^{n-1} [1 + (\alpha|\psi|)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha|\psi|)^n]^{m/2}} \quad (3)$$

または、Brooks-Corey式¹²⁾(以下B.C式)による水分特性曲線式

$$\Theta = (\psi_b / \psi)^\lambda \quad (|\psi| \geq |\psi_b|) \quad (4)$$

そしてその不飽和透水係数式がある。

$$K(\psi) = K_s K_r(\psi) = K_s (\psi_b / \psi)^{2+3\lambda} \quad (|\psi| \geq |\psi_b|) \quad (5)$$

ここで、 K_s : 飽和透水係数[L/T], θ_r : 残留含水率[-], θ_s : 飽和含水率[-], α [1/L], m, n : 定数, ψ_b : 空気侵入圧[L], λ : 定数である。

礫層に関しては、礫表面を薄膜状となって水分が移動するという仮定の下に以下に示す膜状流れ式を採用し、その適合性について検討した。

膜状流れ式は、図-2に示すような傾斜角 β を持つ壁面に沿って定常的に流れる水膜の流速 V_f [LT⁻¹] を、

$$V_f = \rho_w g \delta^2 \cos \beta / 3\mu \quad (6)$$

(ここで、 ρ_w : 水の密度[ML⁻³], g : 重力加速度[LT⁻²], μ : 水の粘性係数[MT⁻¹L⁻¹] で表現し、液膜の厚み δ [L] と流量 q_f [LT⁻¹], 膜状含水率 θ_f [-] の間の以下のような関係、

$$q_f = V_f a \delta \quad (7)$$

$$\theta_f = a \delta / \cos \beta \quad (8)$$

(a : 単位断面積に存在する膜流れ面の長さ [L⁻¹]) をもとに下式でフラックスを記述するものである。

$$q_f = (\rho_w g / 3\mu) (\cos^2 \beta / a)^2 \theta_f^3 \quad (9)$$

上式は、傾斜した面上を液膜が重力によって流下することを表すものであり、多孔質媒体への適用が検証されているものではない。しかしながら、土壌のマクロポアを流下する流れにも類似の式が用いられていること^{13), 14)}などを参考に、本研究では、礫表面では水分は液膜となって流下すると考え、上式を基礎に鉛直方

向のフラックスを

$$q_z' = C_1 \theta_f^{C_2} \quad (10)$$

と仮定した。そして、一次元充填層に対し、流速制御法^{15), 16)}を実施して流量と増加含水率の関係を求め、 C_1, C_2 を決定した。

一方、二次元での水平方向フラックスに関しては、液膜の水平方向への水分移動は、水分勾配を駆動力として生ずると仮定して、

$$q_y' = -D_y (\theta_f) \frac{\partial \theta_f}{\partial y} = -C_3 \theta_f^{C_4} \frac{\partial \theta_f}{\partial y} \quad (11)$$

で表し、 C_3, C_4 は二次元水分拡散実験の実測流出分布に合う最適パラメータを探索し、決定した。

以上の2式により、図-3のような傾斜角 α での斜面方向及び斜面と直角方向の流速 q_x, q_y は次のように記述した。

$$q_x = q_z' \cos \alpha - q_y' \sin \alpha \quad (12a)$$

$$q_y = q_z' \sin \alpha + q_y' \cos \alpha \quad (12b)$$

以上の式を下式の連続の式に代入し、礫層内の水分移動を表現した。

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial t} = -\frac{\partial q_x}{\partial z} - \frac{\partial q_y}{\partial y} \quad (13)$$

5. 一次元浸透現象に関する実験による検討

キャピラリーバリアの実験¹⁾において上部層に使用した3種類の砂(砂I, 砂II, 砂III), 下部層に用いた3種類の礫(礫I, 礫II, 礫III)を対象に一次元の非定常不飽和浸透実験を行った。なお、各試料の比重、粒度分布、水分特性曲線、飽和透水係数は既報¹⁾に示したのでここでは省略する。

流出応答に対して、式(1)~(5)による不飽和浸透流解析と、礫層に関しては膜状流れ式に基づく数値計算を実施し、その適合性について検討した。

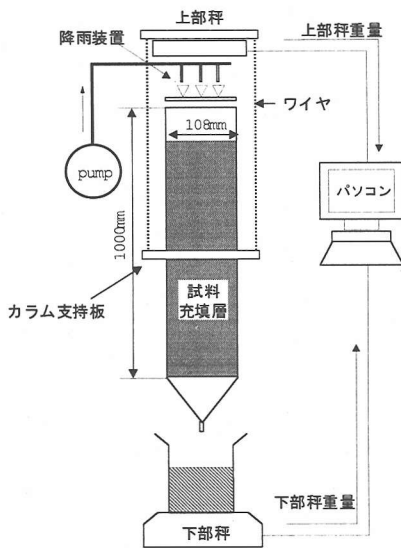


図-4 一次元浸透実験装置図

表-1 各試料の Van Genuchten 式のパラメーター
(砂 II に関しては Brooks-Corey 式)

試料名	θ_s [-]	θ_r [-]	α [cm ⁻¹]	n [-]
砂 I	0.426	0.0593	0.0476	7.04
砂 III	0.312	0.0975	0.054	4.27
礫 I	0.390	0.0323	0.648	11.7
礫 II	0.453	0.0669	0.863	2.77
礫 III	0.477	0.0402	13.13	1.73
試料名	θ_s [-]	θ_r [-]	ψ_b [cm]	λ [-]
砂 II	0.379	0.0936	-24.34	3.40

表-2 礫試料の膜状流れ式パラメーター

試料名	C_1	C_2	C_3	C_4
礫 I	1897	3.00	8295.6	2.28
礫 II	400.7	3.95	4235.2	3.36
礫 III	5.76E+08	7.78	3.39E+08	6.19

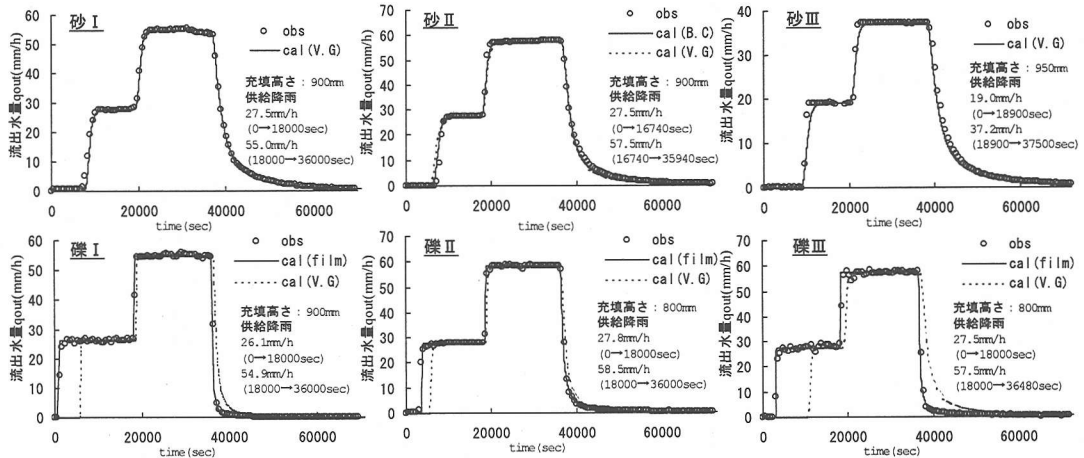


図-5 一次元ステップ応答実験の結果と計算結果

(1) 実験方法

図-4 に示すアクリルカラム (直径 108mm, 高さ 1000mm) に各試料を乾燥状態のまま所定の高さに充填した。充填終了後、一旦下端より水分飽和させた後に排水し、十分排水が完了してから上部より降水を与えた。計測は降雨開始後より下部の天秤で流出水量を経時測定し、上部天秤でカラム全体の重量を測定した。二層実験に使用した試料すべてに対して降雨強度を 2 段階に変化させた降水実験を実施した。各充填層に対して同様の測定を、排水時間において 2~3 回繰り返して実施した。

礫層に対して実施した流速制御法^{(15), (16)}は、降水実験の終了した充填層を約 2 日間排水させた後、本実験

装置で安定して供給できる最小の降雨強度 (約 10mm/h) で降雨を与え、その降雨強度で流出水量と全体重量が定常に達したのを確認してから、次の降雨へと切り替えていった。同様の操作で、階段状に徐々に降水量を増大させ、本実験装置での最大降雨強度 (約 500mm/h) まで達したら、逆に階段状に降雨強度を下げていった。測定は最小降雨の開始から最後の降水まで連続して流出水量と全体重量を計測した。得られた流出水量と全体重量の測定値より、各降雨強度段階での定常時の値を抽出し、その時の平均含水率から初期含水率を差し引くことで層内の増加含水率を算出し、式(8)で定義する膜状含水率とした。この膜状含水率と流量の関係をグラフ上にプロットし、曲線近似により膜状流れ式(10)のパラメーターを決定した。

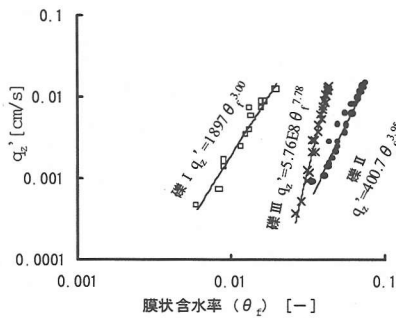


図-6 流速制御法により決定した礫層の膜状流れ関数

(2) 実験結果と解析値の評価

砂の結果を図-5上段に示した。式(1)およびV.G式より推定した不飽和透水係数を用いた解析結果も合わせて示した。V.G式のパラメーター α 、 n は土柱法から得られた水分特性曲線(排水過程)に対してSimplex法¹⁷⁾により探索して求めたものである。図より実測の流出応答と計算結果は良好に一致する傾向を確認できる。ただし、砂IIに関してはV.G式による不飽和透水係数よりもB.C式を用いたほうが僅かに実測値に一致する傾向が強かったため、砂試料に関してはB.C式を用いることとした。各砂試料に関するV.G式及びB.C式のパラメーターは表-1に示した。

礫の結果を図-5下段に示した。図より、V.G式を用いた計算値(破線)は実測値に対して大きく遅れる傾向にあった。一方、流速制御法によって得られた膜状流れ関数を図-6に示すが、この式を用いた計算結果(実線)はV.G式を用いた計算結果よりも実測値と一致する傾向が強かった。いずれの礫試料に対しても膜状流れの関数系を用いた計算結果は実測値を概ね良好に再現した。礫層に関するV.G式のパラメータを表-1に、膜状流れ式のパラメータを表-2示した。

以上より、砂試料の一次元浸透には、V.G式(B.C式)による水分特性曲線と不飽和透水係数の推定式を用いて式(1)を解くことで実測値を再現できることが確認できた。一方、礫試料に関してはこうした推定式を用いた場合には実測値との良好な一致が認められなかったため、実験結果をもとに決定した膜状流れ式によって表現する方法を採用することとした。

6. 二次元水分拡散現象に関する検討

砂層の二次元浸透も一次元浸透と同様に、水分特性曲線からの推定式と式(1)によって再現できるかを確認すること、また、礫層は鉛直方向に膜状流れ式を採

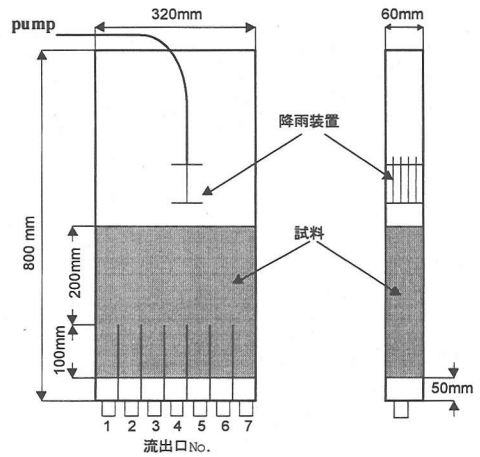


図-7 二次元水分拡散実験装置図

用したため、水平方向移動を表現できる式を得ることを目的に二次元単層の水分拡散実験を実施した。

(1) 実験方法

図-7に示す幅320mm、奥行き60mm、高さ800mmの直方体カラムを用いた。下部100mmには仕切板を入れ7つの流出口に分割した。乾燥試料を仕切板の上約200mmの高さにまで充填し、一旦下端より水分飽和させてから排水し、十分に排水が完了してから、上部中央から給水した。測定は、給水開始からの下端の各流出口からの流出水量を経時測定した。実験は各試料に関して給水量を3~5段階に変化させて実施した。

(2) 実験結果と解析値の評価

図-8(a)に砂IIIの実験値(定常流出時の水平方向分布)と式(1)とV.G式による解析値を例として示す。砂に関しては一次元実験と同様に式(1)とV.G式を用いた解析値は実測値を良好に模擬できた。給水量を変化させた場合も同様に一致する結果が得られた。他の砂試料に対しても結果は概ね同様であり、今回用いた砂試料に関して式(1)とV.G式(砂IIはB.C式)は二次元不飽和浸透現象に十分適用できた。

図-8(b)に礫IIIの結果を例として示す。図中に示すようにV.G式による解析結果(破線)は実測値に対して拡散の幅が狭く中央に偏る傾向がある。他の礫試料に対しても概ね同様の傾向であった。そこで、実測の流出分布に最も一致する式(11)のパラメーターをSimplex法¹⁷⁾により探索し、各流量毎(3段階の流量毎)に最適値(図-8(b)中の探索D)を求めた。図-9に示すように、流量別に得られた式(11)の $D_e(\theta_e)$ は θ_e に対して概ね同一線上に集まったことから、その結果を基に各試料に対する定数 C_3 、 C_4 を決定した。探

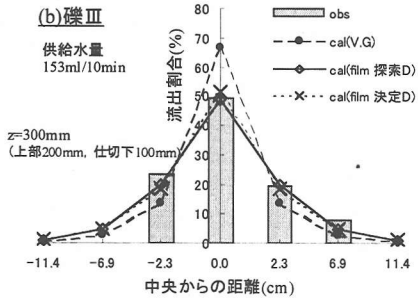
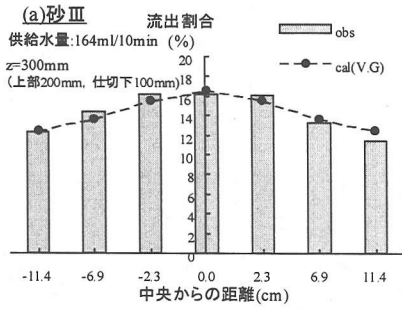


図-8 二次元水分拡散実験の結果と計算値

探索されたパラメーターによる計算値(実線)と全実験を元に決定したパラメータ(図-8(b)中の決定D)を用いた計算値(点線)をそれぞれ図-8(b)中に示した。実測結果に一致するように決定したパラメーターに基づくため、当然良好な一致を示したが、礫層に関しては以降の解析においてもこれらのパラメーターと膜状流れ式を用いて解析することとした。各礫試料に関して求められた C_s, C_l を表-2に示した。

7. 二層境界面の境界条件の検討

以上の検討から、キャピラリーバリアにおける水分移動を表現するために、上部砂層に関しては式(1)を、下部礫層に関しては式(12)(13)を用いることとした。しかし式(1)は圧力の式であり、式(12)(13)は含水率の式である。そのため、二層の境界条件は流量のみ連続とし、上部砂層の最下端圧力は二層の土柱法を実施して決定した。

(1) 実験方法

内径67mm、高さ50mm(25mm)の塩ビパイプを連結して高さ1000mmとし、下端より高さ500mmまで礫を、500mmから1000mmまで砂を充填した。下端からゆっくりと水分を供給して飽和させ、その状態で約3日間放置した後排水し、1, 3, 7日後の含水率分布を測定した。境界面を挟んで40cm~70cmの間では

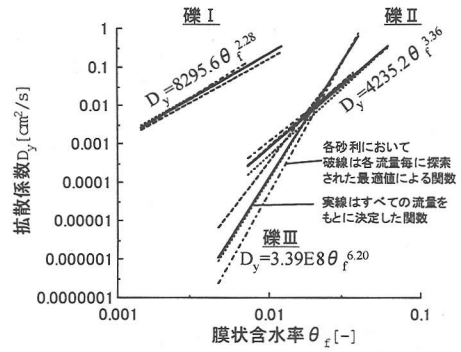


図-9 流量の異なる3つの二次元実験の結果から探索された各礫層の拡散係数とそれを元に決定した拡散係数

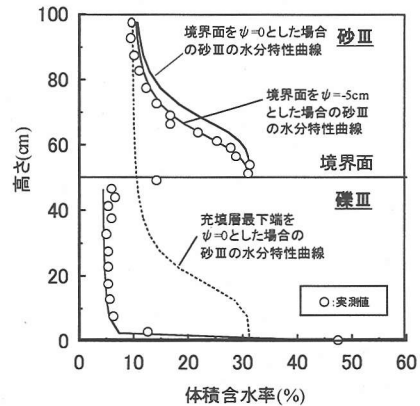


図-10 砂Ⅲ/礫Ⅲの互層での水分特性曲線

2.5cm間隔で、それ以外の箇所では5cm間隔で含水率を測定した。

(2) 結果

例として、砂Ⅲ、礫Ⅲの測定結果を図-10に示す。1日排水を除き3日と7日排水は概ね同様の含水率分布となったことから、3日排水の結果を示した。含水率分布は境界面で急激に変化し、砂層側の含水率が高くなっているが、その含水率は砂層単体で行った含水率分布を元にして、①土柱最下端を起点に算出した含水率よりも大きく、②境界面を起点に算出した含水率よりも若干低くなっている。一般に毛管ポテンシャルの連続条件を仮定する場合、最下端を起点に毛管ポテンシャルを設定し、それに対応する含水率が決定されるが、①からその連続条件が適用できないことがわかる。また、礫層との境界を大気解放面あるいは水面と同様に扱い毛管ポテンシャルをゼロと仮定することも適当でないといえる。そこで、測定された砂層含水率に最も一致する境界面の毛管ポテンシャルを探索した

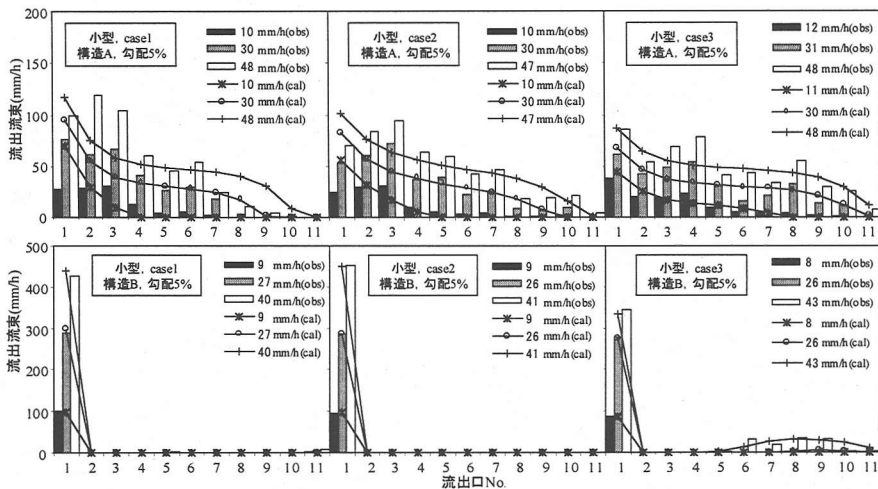


図-11 小型実験の実測流出分布に対する計算結果

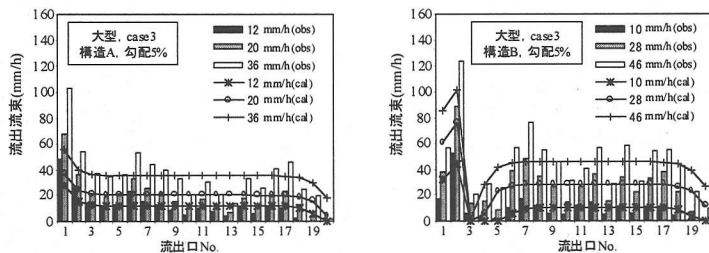


図-12 大型実験の実測流出分布に対する計算結果

結果、砂Ⅲ/礫Ⅲ(case3)では境界面で-5cmの毛管ポテンシャルを仮定した場合が最も実測値に近い曲線を得た。他のcaseについても同様の測定結果から、case1:-10cm, case2:-10cmという境界面の毛管ポテンシャルを設定した。

8. キャピラリーバリアの計算モデルの検証

前節の上部砂層内水分移動モデル、下部礫層内水分移動モデルを用い、上下層の境界条件には二層土柱法から決定した境界面の毛管ポテンシャルを上部層下端の毛管ポテンシャル($\psi_{b,p}$)に設定して $\psi_u|_{z=z_i} = \psi_{b,p}$ とし、 $q_z^u|_{z=z_i} = -K(\psi_u) \frac{\partial \psi_u}{\partial z} + K(\psi_u) \cos \alpha$ から算出される q_z^u を礫層上部への浸入フラックス($q_x^l = q_z^u$)として与える二次元二層の計算モデルを作成し、キャピラリーバリア実験¹⁾の全ケース、全実験条件を対象に計算を実施し、実測値の再現を試みた。case1, 2, 3の勾配5%での小型実験(構造A, B)の各計算結果を図-11に、case3の勾配5%での大型実験(構造A, B)の計算結果を図-12に示した。

不規則な流出分布は再現できていないが、流出分布

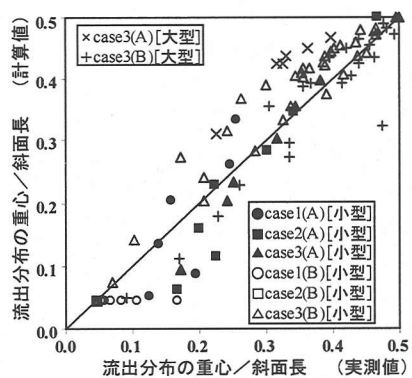


図-13 実測と計算の流出分布の重心位置の比較

の傾向は概ね一致する結果を得ることができたと考えられる。他の条件に関しても一致の程度を確認するために、得られた各caseの計算結果から流出分布の重心位置(斜面の最下流端から流出分布の重心位置までの距離)を算出し、実測流出分布から得られた重心位置と比較することで評価した。結果を図-13に示す。小型実験に対する比較結果からは、構造Aで流量が小さいとき(重心距離が小さいとき)に計算値が実測値に比べ重心距離が小さいこと、及びcase3で全体的に

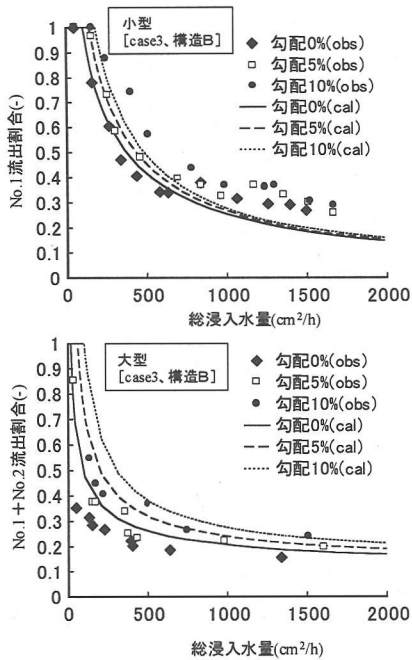


図-14 小型実験と大型実験での総浸入水量と最下流端からの流出割合の関係 (case3, 構造B)

計算値の方が実測値よりも大きいことが確認できる。一方、大型実験に関する比較では、構造Aに関しては計算結果の重心距離が大きく、構造Bに関しては逆に小さくなる傾向にあった。しかし、実測値と計算値の関係は概ね1対1の直線上に集まる傾向にあり、本計算モデルによりキャピラリーバリアにおける水分移動が概ね再現できたものと考えられる。

9. 計算によるキャピラリーバリアの排水能力の検討

(1) 総浸入水量と排水効率の関係

実験¹⁾では、規模の異なるバリアの排水能力は、降雨強度ではなく、降雨強度に斜面の水平距離を乗じた総浸入水量で比較する必要があった。小型、大型実験における総浸入水量と最下流端からの流出割合の関係と、本研究で作成したモデルによる計算結果を図-14に示す。計算結果にもバリアの排水能力(最下流端からの流出割合)が総浸入水量の増大によって低下する傾向を同様に確認できる。このようにバリアの排水能力が総浸入水量の影響を強く受けるならば、実規模で斜面長が長くなった場合には、バリアに浸入する水分

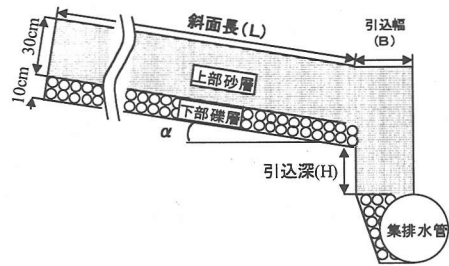


図-15 標準とした実規模構造

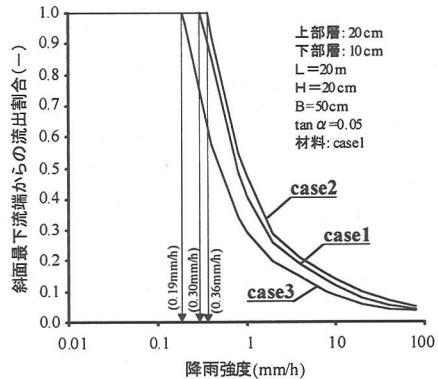


図-16 降雨強度と最下流端からの流出割合の関係 (斜面長 20m, 勾配 0.05) [定常時]

の強度を極めて小さくしなければならなくなると思われる。そこで、現実には集排水管間隔は20m以上となると考えられることから、図-15に示すような構造で斜面距離を20mとして計算を試みた。結果を図-16に示すが、下方浸透を生じさせずに斜面最下流端まで輸送できる水量はcase1で61cm²/h(0.3mm/h)、case2で73cm²/h(0.36mm/h)、case3で39cm²/h(0.19mm/h)にまで低下した。

以上より、現実的な規模で最終処分場底部にキャピラリーバリア型の集排水構造を用いる場合、長期にわたる降雨を前提とする限り、バリアへ到達する水分の強度を0.2~0.4mm/h程度に削減しなければ、効果は発揮できないと考えられる。既報¹⁾で述べたとおり、我が国の年降水量が十分に平均化されるならば対応可能となるが、そのためには、埋立層内に降雨変動を十分に平均化する仕組みを設けるか、処分場表面での降雨浸入の抑制、層内での浸出水排除の促進等によって底部到達フラックスを削減する必要がある。今回用いたような試料によって底部にキャピラリーバリアを築く場合には、覆土層に5×10⁻⁶~1×10⁻⁵cm/s程度の材料を採用するか、キャピラリーバリアを中間覆土層等の位置に多段で挿入し、徐々に下方浸透水量を削減させることが必要となる。

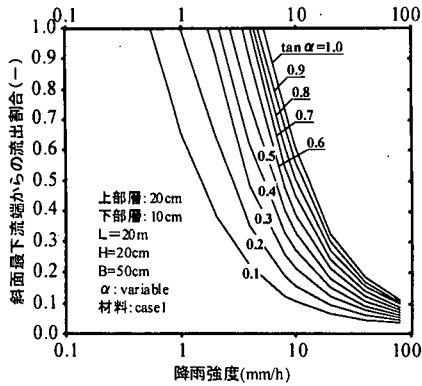


図-17 勾配を変化させた場合の降雨強度と最下流端からの流出割合〔定常時〕

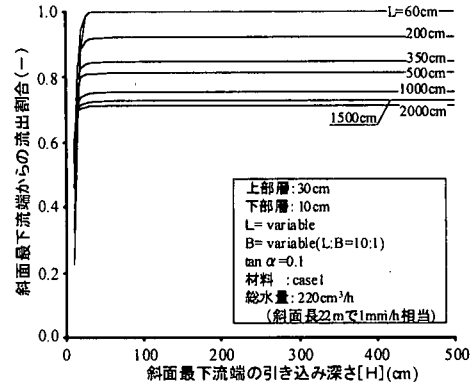


図-18 流出割合に対する引き込み深さの影響〔定常時〕

そこで、以降の検討ではバリアの排水能力に影響すると考えられる因子（勾配、斜面の最下流端での引き込み深さ、斜面距離、材料）に関して検討を実施し、これらの設計因子の改善によって、より高い効果を得ることが可能となるか否かを作成した計算モデルを用いて検討した。

(2) 勾配の影響

Ross²⁾式では、キャピラリーバリアが下方浸透を生じずに分離できる最大水量は勾配に比例するとされている。従って勾配が大きくなるにつれて斜面の最下流端からの流出割合は増大すると考えられる。そこで、図-15の実規模構造を対象に勾配を0.1から1(45度)まで変化させて計算を実施した。結果を図-17に示す。勾配を大きくすることによって斜面最下流端から100%排除可能な降雨強度は増大し、勾配1(45度)まで上げると約5mm/hまで増加した。しかし、埋立地表面や急傾斜地に建設された埋立地以外では、このような高い勾配は想定し難い。埋立地底部では埋立容量の確保等から現実的には0.1程度が限界であると考えられる。そのため、以降の計算では勾配を0.1と設定することとした。

(3) 斜面最下流端における引き込みの影響

既報¹⁾の小型実験において、土層の最下流側端部で砂層を礫層側に引き込む構造（構造B）は、単純な二層構造に比べて下流側からの流出が大きく上昇した。そこで引き込み深さ（図-15のH）を10cm～500cmまで変化させた計算を実施した。また、斜面長と引き込みの効果の関係を検討するために斜面長（L）も60cm～2000cmまで変化させ、斜面長と下流端の引き込み幅の比（L:B）は10:1とした。また、降雨強度は各斜面長で総浸入水量が同等になるように2200cm（斜面長

2000cm+引込幅200cm）で1mm/hの降雨に相当する水量を与えた。上部層厚、下部層厚等は図-15と同様である。結果を図-18に示すが、いずれの斜面長においても引き込み深さが約30cm以上になると流出割合の向上は認められなくなった。問題を単純化するために、本構造を縦長の鉛直層と横長の水平層に分離して考える。両層に同一の降雨を与えた場合、定常時には両層ともそのフラックスに対応する含水率分布を形成する。鉛直層の下部は水平層と同じ厚さまでは水平層と同じ含水率分布となり、上部はほぼ一定含水率になる。この状態で両者を接触させると、両層間の含水率差によって水分移動が生ずるが、鉛直層上部の含水率一定の部分では、どの位置に水平層を接触させても両層間の含水率差に変化はなく、含水率勾配に基づく水分移動には差がなくなる。引き込み深さをある深度以上大きくしても排水効果が変わらなくなるのはこうした理由によるものと考えられる。また、斜面長が大きいと同じ引き込み深さでも効果が小さくなっているが、距離の増大により含水率勾配が小さくなるためであると考えられる。以上より、以降では引き込み深さ30cm（下部層厚10cm+引き込み20cm）に設定し、斜面長は、実際は集排水間隔20mとした場合、分水嶺を挟んで片側を10mとする程度が限界であると考えられるため10mとした。再度、図-15の構造にて斜面長10m、勾配0.1、引き込み深さ30cmとした計算を行った結果、100%排除可能な降雨強度はcase1（約1.1mm/h）、case2（1.2mm/h）、case3（0.75mm/h）となった。

(4) 材料の性質が与える影響

本研究においてはベルトラムのフィルター基準⁸⁾を満たすことを条件に、3種の礫それぞれに適用可能な砂を3種類採用した。しかし、用いた砂はフィルター基準の範囲内で必ずしも最適なものではない。Ross²⁾

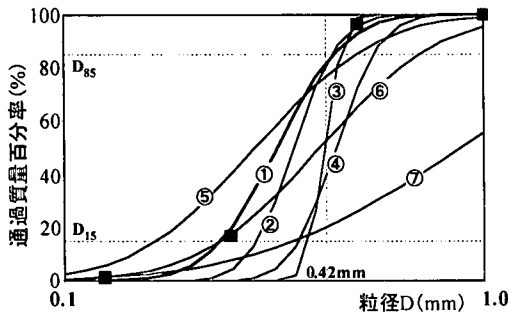


図-19 仮定した粒度分布

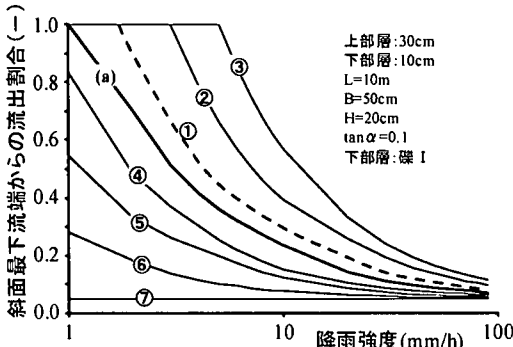


図-20 各粒度分布を元にした計算結果

式では、キャピラリーバリアの最大分離水量は、透水係数が大きいほど、また毛管吸引力が大きいほど大きくなるが示されている。従って、そのような砂試料を選択すれば、排水能力を増大させることができるはずである。そこで、本研究で用いた礫に対して最も効果の高い砂を探索することを試み、それによる排水能力の向上の可能性について検討した。

まず、フィルター基準を満たす範囲内で、粒度分布を仮定し、その粒度分布から Arya and Paris¹⁹⁾ のモデルによって水分特性曲線を推定した。本方法は、粒度分布を各粒径要素に分割し、砂の真比重とかさ密度、そして粒子が球形で空隙が円柱形であるという仮定から空隙径分布に変換する。空隙径分布の特定の点を定めるとその点までの空隙量の総和が含水率となり、対応する空隙径から毛管式により毛管ポテンシャルが決定される。また、透水係数は仮定した粒度分布に対して Hazen 式^{20, 21)} を適用した。計算の対象は図-15 の構造で斜面長 10m、勾配 0.1、引き込み深さ 30cm、下部礫層は case1 の礫 I とした。砂層の真比重は 2.7、かさ密度を 1.5g/cm³ とした。仮定した粒度分布を図-19 に、各粒度分布を元に計算した結果を図-20 に示す。図-19 において、点 (■) が本研究で用いた砂 I の粒度分布であり、①がそれを近似した粒度分布曲線、②～⑦が仮定した粒度分布である。なお、下部層に礫 I ($D_{15}=2.1\text{mm}$) を採用したため、フィルター基準が

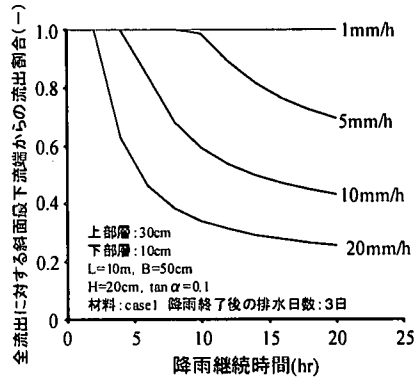


図-21 降雨継続時間と斜面最下流端からの流出割合

ら適用可能な砂の粒度は $D_{15} < 0.42\text{mm} < D_{85}$ である。計算結果を示した図-20 においてはそれぞれの曲線の番号が、粒度分布の番号に対応している。(a) は実験で得られた砂 I の水分特性曲線と飽和透水係数を用いた計算結果、①が砂 I の粒度分布に近似した曲線から推定される値を用いた計算結果であるが、①は (a) よりも大きくなった。これは、Arya and Paris のモデルによる水分特性曲線が実測値にくらべて若干上方に推定されたこと、及び Hazen 式によって推定される飽和透水係数が実測値より大きく推定されたことによる。従って、本推定により定量的な検討は困難であるが、上部層に採用する砂試料の粒度分布とキャピラリーバリアの排水能力の定性的な関係に関しては議論できると考えられる。本計算結果からは、粒度が広範な試料 (⑤～⑦) は排水能力が低く、均質な試料 (①～④) ほど効果が上昇する傾向にあるといえる。特にフィルター基準の 0.42mm 付近で最も勾配の急な③の分布は効果が高く、最下流端から 100% 排除できる限界の降雨強度は 5mm/h まで上昇した。

(5) 非定常による検討

非定常な条件で流出割合の検討をするために降雨強度を 1, 5, 10, 20mm/h、それぞれで降雨継続時間を 2～20 時間、降雨停止後の排水日数を 3 日とし、その期間内で流出する全水量に対する斜面の最下流端からの全排水量の比を求めた。計算は図-15 の構造で斜面長 10m、勾配 0.1、試料は case1 とした。結果を図-21 に示す。100% の水分をバリアによって側方排除可能な降雨継続時間は、5mm/h で 8 時間、10mm/h で 4 時間、20mm/h で 2 時間となり、共通して降雨量 40mm で限界となった。40mm とは二層境界面に接する上部層の毛管ポテンシャルが境界面の毛管ポテンシャル (-10cm) に達するまでの上部層内の増加水分量にほぼ等しい。すなわち、この水量は破過が生ずるまで上部層内に保

持可能な限界の水分量であり、初期含水率と境界面の毛管ポテンシャルにより決定される。したがって、降雨強度が小さいほど、あるいは継続時間が短いほど効果が発揮されるが、一方でこの限界水量を大きくするためには勾配を上昇させて初期含水率を低下させるか、境界面にジオテキスタイルなどを挿入して毛管遮断し、境界面の毛管ポテンシャルをゼロに近づけることが有効であると考えられる。

埋地地底部では、廃棄物層や覆土層により降雨変動が緩和され、降雨に比べて弱い強度の水分が定期的に到達してくると考えられるため、水分排除を目的に用いるキャピラリーバリアは、定期的にその強度に対応できるものでなければならない。しかし本検討結果から、粗大間隙や亀裂等を通してくるような短絡流等によって過度の負荷がかかった場合においても、継続時間が短ければ対応可能であると考えられる。

10. 結論

最終処分場底部での水分排除を目的に実施したキャピラリーバリアの水分移動実験¹⁾に対し、上部層にV.G式(B.C式)とRichards式、下部層に膜状流れ式を用い、両層境界を二層の土柱法から決定した境界面の毛管ポテンシャルで接続する計算モデルを作成した。作成した計算モデルは実験結果を概ね再現できたことから、実規模のキャピラリーバリアを対象に計算を試みた結果、斜面距離20m、勾配0.05程度では、約0.2~0.4mm/hに浸入水の強度を抑制すれば、下方浸透を生じずに排除可能であることが明らかとなった。そこで、排水能力を向上させるための種々の検討を行った結果、以下のような知見を得た、

1) Ross式で表現されるとおり、勾配を大きくするほど排除能力は大きくなるが、埋地地底部で実現可能な勾配を想定すると限界となる水分の浸入強度が0.5mm/h程度に上昇するにすぎない。

2) 斜面の最下流端において上部層を下部層へ引き込むことの効果は、ある深度(本研究で用いた試料では約30cm)を超えると変化が無く、また斜面長が大きくなるに従い小さくなることから、斜面長を10mとし、勾配0.1、引き込み深さ30cmとすると限界強度は約1mm/hとなる。

3) 下部の礫層に対するフィルター基準を満たす範囲で、粒径が均等な分布を有する砂が最も排水効果が高く、本研究で用いた礫に最適な砂を適用すれば、約5mm/hにまで限界強度を上昇できる可能性がある。

4) 破過が生ずるまでの限界保持水量は、上部層の初期含水率と境界面の毛管ポテンシャルによって定まるた

め、降雨強度が大きくとも、この水量に到達しない降雨継続時間であればバリアは有効となる。

参考文献

- 1) 東條安匡, 田中信寿, 松藤敏彦, 松尾孝之: キャピラリーバリアを用いた廃棄物埋地底部集排水構造の排水効率に関する研究-実験的研究-, 土木学会論文集, No. 692, VII-21, pp. 53-62, 2001.
- 2) Benjamin Ross: The Diversion Capacity of Capillary Barriers, *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 10, pp. 2625-2629, 1990.
- 3) Curtis M. Oldenburg and Karsten Pruess: On Numerical Modeling of Capillary Barriers, *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 4, pp. 1045-1056, 1990.
- 4) Stephen W. Webb: Generalization of Ross's tilted capillary barrier diversion formula for different two-phase characteristic curves, *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 8, pp. 1855-1859, 1997.
- 5) Carl E. Morris and John C. Stormont: Evaluation of numerical simulations of capillary barrier field tests, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 201-213, 1998.
- 6) Kampf, M., Holfelder, T. and Montenegro, H.: Inspection and Numerical Simulations of Flow Processes in Capillary Barrier Cover Systems. *3rd Int. Conference on Hydrosience and Engineering, ICHE, proceedings*. 1998.
- 7) 堀内将人: 土壌水分の不飽和性に注目した通気層内物質移動の解析と制御に関する研究, 京都大学博士論文, 1995.
- 8) 西垣 誠, 梅田美彦, 河野伊一郎: 多層地盤内への降雨浸透とその制御法, *地盤と建設*, Vol. 9, No. 1, pp. 105-117, 1991.
- 9) Bird, R. B.: TRANSPORT PHENOMENA, John Wiley & Sons, 1960.
- 10) 日野幹雄, 太田猛彦, 砂田憲吾, 渡辺邦夫: 洪水の数値予報<その第一歩>, 森北出版株式会社, 1989.
- 11) van Genuchten, M. T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 44, pp. 892-898, 1980.
- 12) Brooks, R. H. and Corey, A. Y.: Properties of porous media affecting fluid flow, *J. of Irrigation and Drainage Div., proceedings. ASCE*, vol. 92, (IR2), pp. 61-68, 1966.
- 13) 中野政詩: 土の物質移動学, 東京大学出版界, 1994.
- 14) Germann, P. F. and Beven, K.: Kinematic wave Approximation to Infiltration into soils with sorbing macropores, *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 7, pp. 990-996, 1985.
- 15) 中野政詩, 宮崎 毅, 塩沢 昌, 西村 拓: 土壌物理環境実験法, 東京大学出版会, 1995.
- 16) 西垣 誠, 梅田美彦, 河野伊一郎: 高透水性材料の不飽

- 和浸透特性の測定法, 地下水学会誌, Vol. 35, No. 2, pp. 113-122, 1993.
- 17) 化学工学協会編集: 化学工学プログラミング演習, 培風館, 1976.
- 18) 山村和也, 鈴木音彦: 現場監督者のための土木施工5, 土と水の諸問題, 鹿島出版会, 1977.
- 19) Arya, L. M. and Paris, J. F.: A Physicoempirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic from Particle-Size Distribution and Bulk Density Data, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 45, pp. 1023-1030, 1981.
- 20) 河上房義: 土質工学計算法-土質および基礎の工学的計算法-, 森北出版, 1975.
- 21) Russel G. Shepherd: Correlations of Permeability and Grain Size, *Ground Water*, Vol. 27, No. 5, pp. 633-638, 1989.

(2001. 3. 19 受付)

AN APPLICATION OF CAPILLARY BARRIER AS A LEACHATE DRAINAGE SYSTEM AT BOTTOM OF LANDFILL -NUMERICAL ANALYSIS -

Yasumasa TOJO, Nobutoshi TANAKA and Toshihiko MATSUTO

Experimental results presented in previous¹⁾ report was almost reproduced by numerical model, which is employing film flow expression for water movement in gravel layer. The result of real scale numerical experiments carried out by the model showed leachate can be drained completely by capillary barrier if the intensity of leachate reached at the bottom of landfill was below 0.4mm/h. Several effective parameters were altered for examining the drainage capacity. As results, 1) the effectiveness of down dip structure dragging down upper layer can not improve after it exceeds certain depth. 2) more uniform sand can increase drainage capacity. 3) barrier can drain leachate completely as far as infiltrated water is small enough against the amount of water which can decrease potential of upper layer to boundary potential.