

(44) 廃棄物/覆土互層境界に生ずる側方流を用いた水分移動制御

Control of water movement by using lateral flow at waste and cover boundary.

東條安匡*, 田中信寿*, 松藤敏彦*, 松尾孝之*

Yasumasa Tojo*, Nobutoshi Tanaka, Toshihiko Matsuo, and Takayuki Matsuo

ABSTRACT; Reduction of leachate reaching a landfill bottom is important for minimizing leakage risk. Usually, leachate reduction is achieved after final cover and adequate drainage facilities are installed at the landfill surface. However, more active control of leachate movement inside of the landfill must be effective in order to manage leachate. In this study, lateral water movement arising at the boundary of waste and intermediate cover layer was investigated. First, infiltration experiments were conducted under the condition of waste overlying intermediate cover layer. The lateral water flow in the condition was identified; that it is highly dependent on hydraulic conductivity of lower cover layer. Then, generation of capillary barrier at the boundary of sand overlying waste layer was confirmed by experiments which were carried out for double layer of sand and waste. Result of large scale multi-layer rainfall experiments also exhibited lateral flow functioning effectively for controlling vertical infiltration of leachate. Good agreement is confirmed between experimental and simulation results.

KEYWORDS; Leachate, lateral flow, intermediate cover, capillary barrier, leakage risk

1. はじめに

浸出水の漏洩リスクを低減することは、廃棄物埋立地の抱える重要な課題の一つである。埋立地に水分を浸入させないという方策は、その最も直接的な解決策であるが、廃棄物を早期に安定化させるためには、廃棄物層への適度な量の水分の供給は不可欠である。筆者らは、廃棄物層に水分を浸入させながらも、底部における漏洩リスクは最小化するという目的には、埋立地内で水分の流れを制御することが必要であると考え、埋立地の表面、底部における水分移動とその制御法について検討を行ってきた^{1),2),3)}。その結果、埋立地底部にキャピラリーバリア型の集排水構造を用いる事は漏洩リスクの回避に有効であることを確認した。しかし、その検討から、実規模で本構造が有効に機能するには底部到達量を抑制できるしくみを埋立層内に築く必要があることが明らかとなった。そこで、本研究では、埋立地内部の中間覆土と廃棄物層の境界に生ずる側方流の生成機構を用いて水分の鉛直浸透を制御し、底部到達量を削減することを目的に検討を行った。また、渡辺らは⁴⁾、廃棄物層とマサ土の互層においてキャピラリーバリア型の側方流が生ずることを報告しているが、本研究では、その現象を利用して埋立地内部へと浸入する水量を積極的に制御するために、覆土の下に砂層を配置することによる水分の側方排除と浸透制御についても検討を行った。具体的に検討した事項は以下の3点である。

- ・ 中間覆土の上に廃棄物がある場合の覆土上側方流を対象とした実験を行い、廃棄物層内に生ずる側方流の生成機構と、下部覆土層の透水係数、及び勾配、浸入水量の関係について検討した。
- ・ 覆土下への砂層挿入による側方排除効果を確認するために、上層：砂層、下層：廃棄物層の互層を作成し、浸透実験を行った。また、廃棄物と砂層の間に形成されるキャピラリーバリアの排水効果と影響因子の関係について検討した。
- ・ 廃棄物層・砂層・覆土層が互層になった場合の側方排除と下方浸透の割合を検討するために、4層構造における大規模実験を実施した。さらに、表面流、覆土内不飽和浸透流、廃棄物層内1次元、二次元水分移動を表すために作成した数値計算モデルを用いて実験結果を再現できるか否かを検討した。

*北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

2. 中間覆土上に廃棄物がある場合の水分移動現象

2.1 実験装置・実験概要

実験は、図-1 に示す装置（幅 600mm、高さ 700mm、奥行き 150mm）を用いた。本装置に図中に示すように下部に覆土を 200mm、上部に廃棄物を 200mm 充填し、傾斜をつけた場合に最も下流側になる流出口 No.1 には覆土層と同じ高さ(200mm)まで礫を充填した。実験に用いた試料は、上部の廃棄物層に破碎残渣、焼却灰、熔融スラグの 3 種類を、下部層として最終処分場から採取した覆土材を使用した。使用した試料と上下層の組み合わせ、および実験条件を表-1 に示す。表中に示すように、下層覆土の充填密度を変えることで透水性に変化を付け、case1~3 では下層の覆土の透水係数を高く設定し ($10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s), case4~6 では低く設定した ($10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/s)。

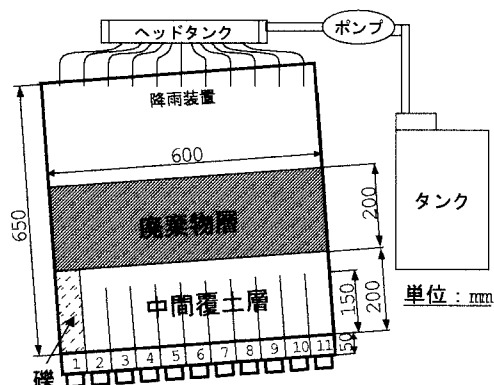


図-1 実験装置

各 case で勾配を 0.5, 10% の 3 段階、各勾配につき降雨強度を約 15, 40, 70mm/h の 3 段階に変化させ、各ケースにつき合計 9 回の実験を実施した。実験は、試料充填の後、勾配を設定してから一定強度の降雨を長期間与えることで定常状態を形成させ、その後一旦排水して自然排水状態としてから、各設定強度での降水実験を開始した。測定は、下端の各流出口 (No.1~No.11) の流出水量を測定した。同一勾配で降雨強度のみを変化させる場合は、前段の定常流出の測定が終了してから次の降雨強度

表-1 実験条件と試料の特性

試料	上部廃棄物層			下部覆土層			勾配 (%)	降雨強度 (mm/h)
	試料	充填密度 (g-dry/cm ³)	飽和透水係数 (cm/s)	試料	充填密度 (g-dry/cm ³)	飽和透水係数 (cm/s)		
case1	破碎残渣	0.74	2.18	覆土	1.51	2.4E-4	0.5, 10	15, 40, 70
case2	焼却灰	1.28	0.033	覆土	1.55	1.4E-4	0.5, 10	15, 40, 70
case3	スラグ	1.77	0.15	覆土	1.47	1.7E-3	0.5, 10	15, 40, 70
case4	破碎残渣	0.76	2.18	覆土	1.68	1.2E-5	0.5, 10	15, 40, 70
case5	焼却灰	1.14	0.058	覆土	1.74	8.6E-6	0.5, 10	15, 40, 70
case6	スラグ	1.77	0.15	覆土	1.65	1.2E-5	0.5, 10	15, 40, 70

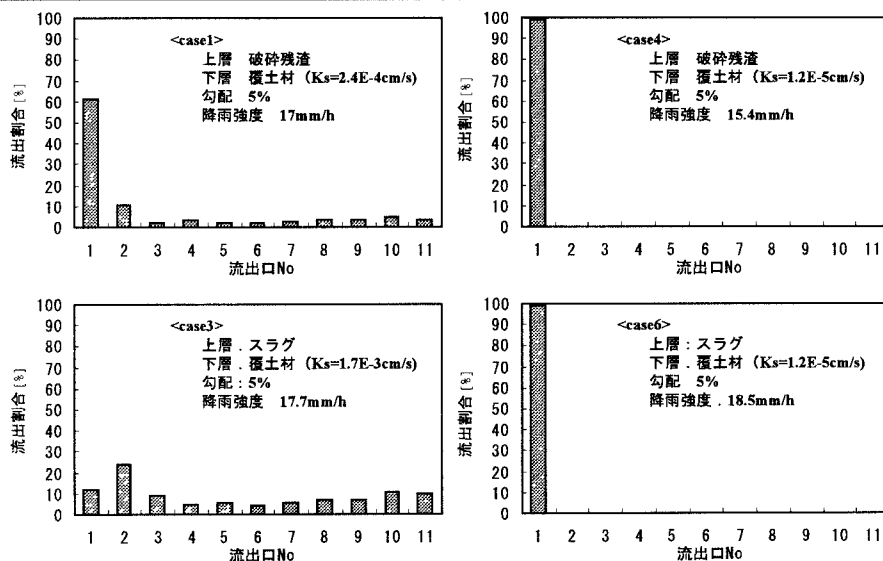


図-2 実験結果（上層：廃棄物，下層：覆土材）

に切り替えた。各 case のすべての実験が終了した後に、透水係数を測定した。覆土層、焼却灰層は、円筒サンプラーで試料を採取し、変水位の透水試験を実施した。破碎残渣、スラグに関しては、サンプラーによる試料採取が困難であったため、別途定水位の透水試験を行って求めた。

2.2 実験結果

例として、勾配 5%, 降雨強度約 15mm/h の実験条件で case1,3,4,6 の実験結果を図-2 に示す。いずれも定常時の流出分布を示しており、横軸が流出口 No, 縦軸が割合(%)である。図中右段に示す下層覆土材の透水係数が $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{cm/s}$ 程度と低い case4, case6 では、供給降雨のほぼ 100% 近くが境界面上を側方移動し、下流端の流出口から排除されている。一方、左段に示す case1, case3(下層覆土透水係数($10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm/s}$)が供給降雨強度(15mm/h= $4 \times 10^{-4} \text{cm/s}$)と同程度もしくは降雨強度が下層覆土材の透水係数より小さい場合)では、下方浸透する割合が高くなっており、上部層が破碎残渣であるかスラグであるかという上層廃棄物種の差異よりも下層覆土材の透水係数が支配的であるといえる。

図-3 は、上部層がスラグである場合を例に、横軸に勾配、縦軸に No.1 流出口からの流出割合を示したものであるが、勾配、供給水強度の変化による No.1 流出口からの流出割合の変化は、低透水性の覆土では、ほとんど変化が認められないが、下部層覆土の透水係数が降雨強度と同程度もしくはそれ以上になると、勾配が上昇するほど No.1 流出割合は増大する傾向にある。下部の覆土層の飽和透水係数が降雨強度に対して極めて小さい場合には、定常時に下部層の含水率が十分に上昇していたとしても浸入水の強度を上回ることがないために、境界面に到達した水分は下方への浸透を抑制され、境界面上を側方移動して No.1 流出口に流出する。その結果、勾配や降雨強度によらずほぼ 100% の流出となる。これに対し、覆土材の飽和透水係数が降雨強度と同等かそれを上回る条件では、下部の覆土層は不飽和状態のままで境界面に到達した水分を十分に排除できる。そのため、勾配が増大する場合、不飽和浸透流束の水平方向成分が増加し、その結果、下流側の流出口からの流出割合が高くなると考えられる。

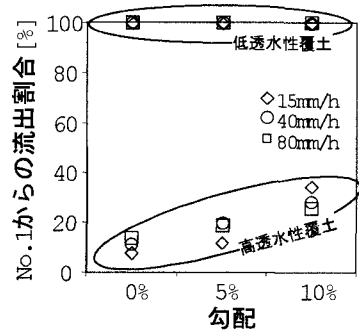


図-3 No.1 流出口からの流出割合に与える下層覆土材透水性及び勾配、流量の影響 (上層: スラグ)

3. 覆土下への砂層挿入による側方排除に関する実験的検討

3.1 実験装置・実験概要

前節と同じ装置に、図-4 のように下部に廃棄物層を 200mm, その上部に砂を 350mm の厚さで充填し、流出口 No.1 には廃棄物と同じ高さまで礫を充填した。試料を充填し、勾配を設定した後、一定強度の降水を与えて定常状態を形成させ、その状態から各実験を開始した。上部層に用いた砂と、下部の廃棄物層に用いた破碎残渣の粒度分布と水分特性曲線を図-5、図-6 に示した。下部の廃棄物層に用いた破碎残渣は、上部の砂層が下部層に浸入しない組み合わせとして A と B の 2 種類を用いた。砂層は、粒度分布の差の顕著な砂として 3 種類 (砂 0, 砂 I, 砂 II) を用いた。粒径は細かいものから砂 I, 0, II の順であり、砂 0 が最も均質で、砂 II は広範な粒度分布となっている。透水係数は砂 0 が最も大きく、次いで砂 I, そして粒度分布の良い砂 II が最も透水性が低い。水分特性曲線は、図-6 に示すとおり、砂 0, I は残留水分率から飽和含水率までの幅が広いが、粒度分布の良い砂 II は狭い。毛管水縁の高さは砂 I が 20cm 程度と最も高い。一方、破碎残渣の粒度分布は破碎残渣 A が破碎残渣 B に比較して粗い試料となっている。

実験条件を表-2 に示した。実験は case1,2,3 共に、勾配を 0,5,10% の 3 段階、各勾配に関して降雨強度を約 15,40,70mm/h の 3 段階に変化させ、下部流出口からの定常時の流出水量を計測した。

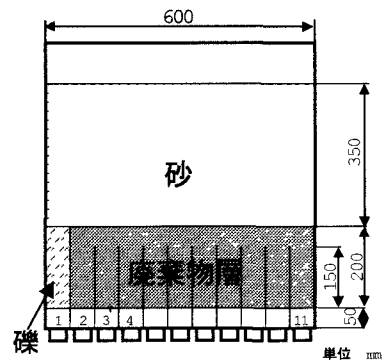


図-4 実験装置と充填構造

3.2 実験結果

例として、勾配10%の実験条件での測定結果を図-7(a)(b)(c)に示す。図は横軸に流出口番号、縦軸が定常時の各流出口からの流出割合である。粒子径が均一で、一定の高さの毛管水縁を広い幅で有

する砂を用いた(a)case1, (b)case2 で No.1 流出口からの流出が高い割合で生じている。この結果は、破碎残渣のような特性（粒径が粗く、水分特性曲線に明瞭な毛管水縁が認められな

い）を有する廃棄物であれば、廃棄物層と砂層との間においてもキャピラリーバリアが発生し、側方流排除が可能であることを示している。但し、case3 のように、全く効果のない組み合わせも存在する。キャピラリーバリアの排水能力は、上部砂層の水分特性に大きく依存する。例えば、Ross⁵⁾は、理論解析からキャピラリーバリアの限界の排水能力を $Q_{\max} < (K_s \cdot \tan \phi) / \alpha$ として表しているが（こ

こで、 $Q_{\max}$ ：下部層への破過を生じずに輸送できる限界の水量、 K_s ：上部層の飽和透水係数、 ϕ ：バリアの傾斜角、 α ：上部層の不飽和透水係数を $K = K_s e^{\alpha \psi}$ としたときのパラメータであるが、 α の逆数は毛管水縁の高さに相当する言われている^{6,7)}、本式は、上部層の飽和透水係数(K_s) が大きいほど、また傾斜角(ϕ)が大きいほど、そして毛管水縁の高さ($1/\alpha$)が大きいほど限界の排水量が大きくなることを示している。飽和透水係数や毛管水縁の高さは粒度分布に強く関係していると考えられるが、著者らは、既報^{2,3)}にて埋立地底部へのキャピラリーバリアの適用を目的に実験及び数値解析を元に検討を行い、上部層に粒度の均一な砂を用いるほど効果が高くなることを確認している。これは、上部層材料が下部層材料に浸入しない条件（フィルター則）を満たす範囲で、粒度が均一なほど、 D_{10} が

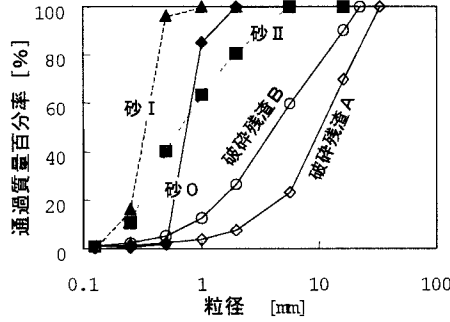


図-5 砂と破碎残渣の粒度分布

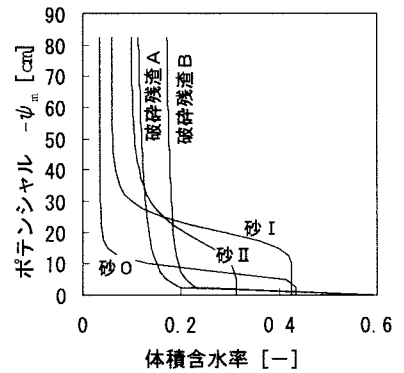


図-6 砂と破碎残渣の水分特性曲線

表-2 実験条件と試料の特性（上部層：砂，下部層：破碎残渣）

	上部砂層			上部砂層			実験条件	
	試料名	充填密度 (g-dry/cm ³)	飽和透水係数 (cm/s)	試料名	充填密度 (g-dry/cm ³)	飽和透水係数 (cm/s)	勾配 (%)	降雨強度 (mm/h)
case1	砂 O	1.50	0.17	破碎残渣 A	0.76	2.1	0.5, 10	15, 40, 70
case2	砂 I	1.51	0.04	破碎残渣 A	0.79	2.1	0.5, 10	15, 40, 70
case3	砂 II	1.72	0.02	破碎残渣 B	0.57	1.0	0.5, 10	15, 40, 70

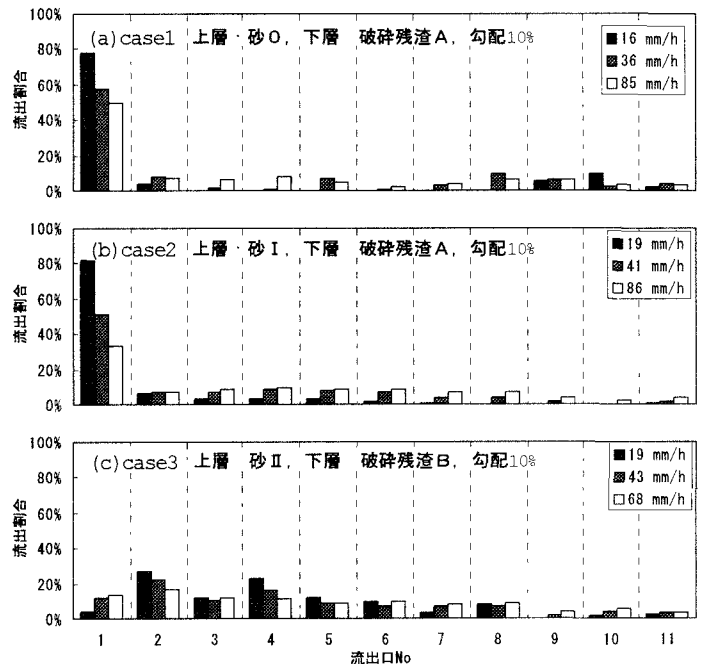


図-7 実験結果（上層：砂，下層：廃棄物）

大きくなり、曲線が D_{10} に近接した位置で鋭角に立ち上がる結果、飽和透水係数が大きくなり（例えば、Hazen 式では、 D_{10} が大きいほど飽和透水係数は大きくなる）、かつ毛管水縁も高くなる（ D_{10} 以上の粒径をもった粒子から形成される間隙径が最小化し、間隙径の分布幅も狭くなる）からである。そのため、case3 の砂Ⅱのような粒度分布の良い試料では、透水係数が比較的低いことや、水分特性曲線から推察されるように間隙径分布の幅が広いことが影響して排水効果が低下していると考えられる。また、case3 では、境界部で砂層が破碎残渣層に浸入する傾向が顕著に認められ、そのような部分において上部砂層内の水分が下部層内に浸入しやすくなり、図に示すような不規則な流出分布を呈する結果になったと考えられる。勾配と降雨強度の影響は、降雨強度が増大するほど排水効果は低下し、逆に勾配が上昇するほど排水効果が上昇する結果となった。

4. 覆土・廃棄物・覆土互層構造における水分排除の検討

4.1 実験装置・実験の概要

図-8 に示すように大型実験装置に3段階に分けて、(Step1: 2層)、(Step2: 3層)、(Step3: 4層)で廃棄物・砂・覆土の互層構造を作成した。実験は、最初に覆土と廃棄物（破碎残渣A）を充填して Step1 の降水実験を行い、次いで、破碎残渣層の上に砂層を充填して Step2 の実験、そして最後に最上部の覆土層を充填して、Step3 の降水実験を行い、層の増加にともなう側方流出と底部流出の分配の変化を確認した。

各層に用いた試料は、最下層と最上層に埋立地から採取した最終覆土層、廃棄物層として破碎残渣A、砂層として砂Ⅰである。各層の充填試料と充填条件を表-3 に示す。また、各層の最下流側の流出口位置には図-8 に示すように礫を充填した。最上部覆土上にも表面流の発生に伴い浸食が生ずるために下流端部に礫を充填した。

実験はすべて勾配 5% の条件下で行った。降雨は各実験において、3～5 段階(約 1,5,10,12,20mm/h)で変化させた。

4.2 実験結果

図-9 に勾配 5%、降雨強度 約 12mm/h での実験結果を示す。図には (step1), (step2), (step3)のそれぞれでの、定常時における流出水量収支と各流出成分の割合を示した。図中に示す水量は、降雨強度 (cm/h)に充填層の幅(cm)と奥行き (cm)を乗じた総水量 (mL/h)で表現している。総水量の入力値が 2,3,4 層で徐々に増大しているのは、層を増すほどに充填層全体の長さ(斜面長)が長くなっているためである。以下に、それぞれの段階での結果について考察する。

(1)step1 (2層)

2層を充填した段階で上部から降雨を与えると、7875mL/h の総供給水量に対して 7804mL/h(99%)が破碎残渣層と覆土層の境界面を側方移動して下流端の流出口から

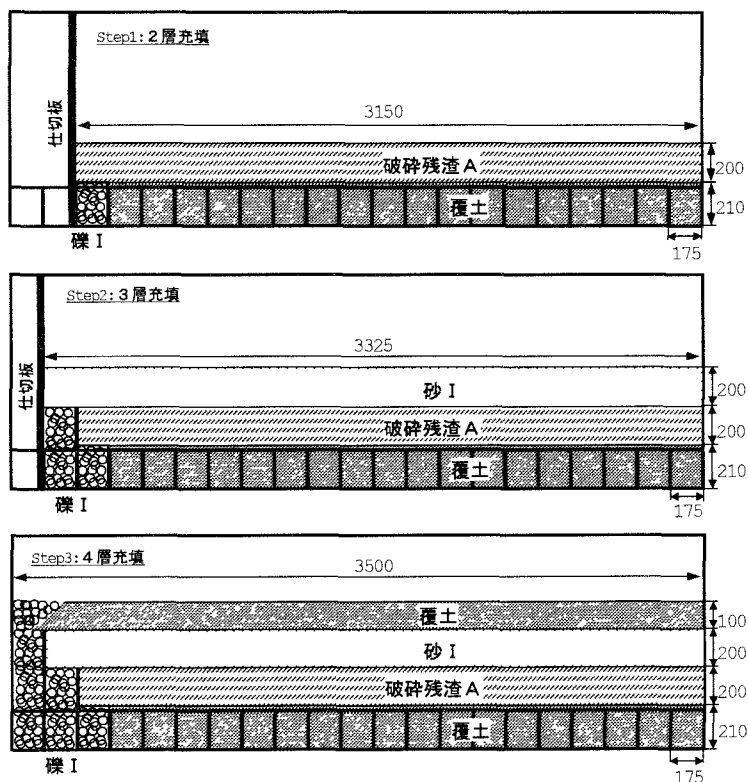


図-8 実験装置と充填構造

流出した。覆土層を下方浸透した水量は 71mL/h(約 1%)であり、下層覆土の透水係数 10^{-6}cm/s と同等の水量が通過している。下部の覆土の充填を密にしすぎたために、中間覆土層の透水係数としては低すぎる値となってしまうているが、側方流出と下方浸透の割合が覆土層の透水係数依存であるということとは前述した 2.の実験で得られた結果と同様である。

(2)step2 (3層)

破碎残渣層の上に砂層を充填し全 3 層として降雨を与えた。step1 と比較すると 8313mL/h の供給水量のうち 1604mL/h(約 20%)が砂層内から側方排除されている。キャピラリーバリアは砂層が負担する総水量が増大すると効果が低下する³⁾。したがって、同じ試料(破碎残渣 A と砂 I)の組み合わせとなる小型実験であった 3.の case2 と比べると、規模の拡大により排水効率は低下している。しかし、約 20%を廃棄物と接触させずに側方排除できていることから、さらに砂層上部に負荷される水量が減少すれば、より高い効果が期待できると考えられる。一方、砂層を通過して破碎残渣層には 6708mL/h の水分が浸入しているが、最下層の覆土層は、その透水係数に相当する水量の下方浸透は許すため、破碎残渣層にそれを上回る水分が浸入してくる限りは下方浸透水量に変化は現れない。そのため、下方浸透水量は step1 と同等の約 70mL/h (約 1%)となっている。

(3)step3

砂層の上に最終覆土層として透水係数 10^{-6}cm/s の覆土層を形成した。本覆土層も、最下部の覆土層と同様、充填を密に行いすぎたため、透水係数が極めて低くなっている。その影響で、約 12mm/h という降雨を与えた場合、そのほとんどは表面流出するという結果となった。8750mL/h の供給水量に対して、最終覆土層上を表面流出し、排除された水量が 8561mL/h (97.8%)である。一方、覆土層によって大幅に負荷水量が減少した砂層では 189mL/h の浸入水に対して 166mL/h(87%)を側方排除しており、バリアが効果を発揮している。しかしながら、その効果は、上部の覆土層によって砂層浸入水強度が約 $0.3\text{mm/h}(=189\text{mL/h} \div (332.5\text{cm} \times 20\text{cm}))$ にまで低減しているにもかかわらず、100%とはならず、本結果では、破碎残渣と砂の互層では、キャピラリーバリアを破過してしまう水分が存在することが認めら

表-3 実験条件と試料の特性

		試料名	充填厚さ (cm)	充填密度 (g-dry/cm ³)	飽和透水係数 (cm/s)
第4層	最終覆土層	覆土	10	1.81	4.9×10^{-6}
第3層	砂層	砂 I	20	1.51	0.04
第2層	廃棄物層	破碎残渣 A	20	0.74	2.1
第1層	中間覆土層	覆土	21	1.79	4.7×10^{-6}

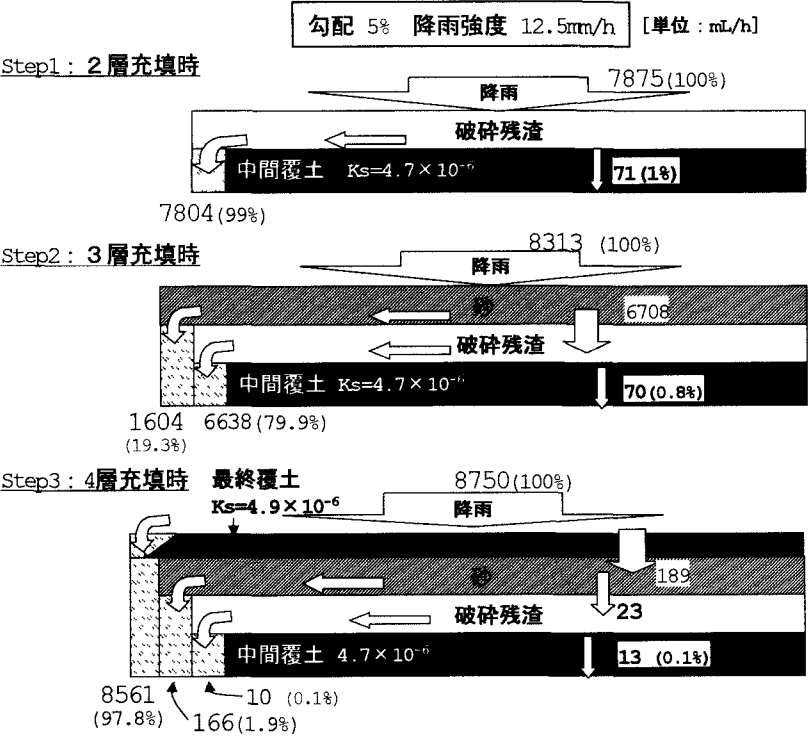


図-9 各充填時での定常時水量収支 [勾配 5%, 降雨強度 12mm/h]

れる。この点については、後述する数値計算結果と比較することによって考察する。一方、第3層破碎残渣と第4層中間覆土の境界における水分の分配に関しては、破碎残渣層への浸入水量（ $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s} (=23 \text{mL/h} \div (315 \text{cm} \times 20 \text{cm}))$ ）が中間覆土層の透水係数を下回るため、すべてが下方浸透すると考えられたが、実際は破碎残渣層と中間覆土の境界面においても側方排除が生ずる結果となった。この原因としては、前段の実験における排水が不十分であった可能性が考えられる。

しかしながら、この4層の実験から、覆土の下へ砂層を挿入する方法は、砂層と廃棄物層によるキャピラリーバリアが耐えられる水量にまで覆土によって浸入水量を低減できれば、その下の廃棄物層へ浸入する水量を制御する上で効果的に機能を発揮できるということがわかる。この4層実験では全供給水量の内、約99.7%が破碎残渣層と接触せずに排除されている。

4.3 数値計算

以上の大規模2,3,4層実験に対してシミュレーションを行い、実験値との適合性を検証した。用いた計算法はそれぞれ以下のとおりである。

(1)計算に用いた式

①覆土上表面流：

既報¹⁾で適用性を確認した開水路非定常流の運動量方程式と表面流の拡散波近似式を用いて以下のようにして表現した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial y} = \gamma_e - q_{z0} \quad (1)$$

$$q_s = \frac{\sqrt{i_0 - (\partial h / \partial y)} \cdot h^{\frac{5}{3}}}{n} \quad (2)$$

$$q_{z0} = -K(\psi_m) \frac{\partial \psi_m}{\partial z} + K(\psi_m) \cos \alpha \quad (3)$$

ここで、 h ：表面流水深[L]， t ：時間[T]， q_s ：単位幅当たりの表面流流量[L²/T]， γ_e ：有効降雨強度[L/T]， y ：斜面方向の距離[L]， q_{z0} ：覆土表面から覆土内へ浸透するフラックス[L/T]， i_0 ：斜面勾配， n ：Manningの粗度係数（=0.02：土，直線で一樣な場合）， $K(\psi_m)$ ：不飽和透水係数[L/T]， ψ_m ：圧力水頭[L]， α ：斜面の傾斜角[rad]である。

②覆土層内および砂層内飽和不飽和浸透流：

覆土層内及び砂層内の傾斜二次元の飽和不飽和浸透流は Richards 式で表現できることを既報^{1),3)}で確認していることから、以下のようにして表現した。

$$(S_w S_s + C(\psi_m)) \frac{\partial \psi_m}{\partial t} = \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (4)$$

$$q_y = -K(\psi_m) \frac{\partial \psi_m}{\partial y} + K(\psi_m) \sin \alpha, \quad q_z = -K(\psi_m) \frac{\partial \psi_m}{\partial z} + K(\psi_m) \cos \alpha \quad (5)$$

また、不飽和透水係数の推定には Van Genuchten 式⁸⁾を用いた。

$$S_w = \left(1 + (\alpha_v \psi_m)^n\right)^{-m}, \quad K(\psi_m) = K_s \cdot \frac{\left\{1 - (\alpha_v \psi_m)^{n-1} [1 + (\alpha_v \psi_m)^n]^m\right\}^2}{[1 + (\alpha_v \psi_m)^n]^{-m/2}} \quad (6)$$

ここで、 S_w ：飽和度[-] ($S_w = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$)， θ ：体積含水率[-] (θ_s ：飽和含水率[-]， θ_r ：残留水分率[-])， S_s ：比貯留係数[1/L]， $\alpha(\psi_m)$ ：比水分容量[1/L]， ψ_m ：圧力水頭[L]， z ：斜面に対して鉛直方向の距離[L]， y ：斜面方向の距離[L]， q_z ：斜面に対して鉛直方向フラックス[L/T]， q_y ：斜面方向フラックス[L/T]， $K(\psi_m)$ ：不飽和透水係数， K_s ：飽和透水係数[L/T]， α ：斜面勾配[rad]， $\alpha_v, n, m = (1 - 1/n)$ ：定数

③廃棄物層内浸透流：

廃棄物層と礫層に関しては、既報^{3),9)}において、それぞれ各材料ごとに単一層を充填したカラムを用いて一次元不飽和浸透実験及び二次元水分拡散実験を行い、Richards 式の適用性を検討した。その結果、Richards 式と Van Genuchten 式を用いた数値計算結果は、実測の流出応答や水平方向流出分布

を良好に再現できなかった。そのため、各材料ごとに流束制御法によって含水率と流束の関係を実測し、以下に示す一次元水分移動式のパラメータを決定した。また、水平方向水分移動式は、二次元の水分拡散実験を行って、定常時の流出分布に適合する拡散係数のパラメータを探索した。測定法の詳細は既報^{3),9)}に示すとおりである。

$$(\text{不飽和}) \quad q_z = a_v \theta_f^{b_v} \cos \alpha - a_h \theta_f^{b_h} \frac{\partial \theta_f}{\partial y} \sin \alpha, \quad q_y = a_v \theta_f^{b_v} \sin \alpha - a_h \theta_f^{b_h} \frac{\partial \theta_f}{\partial y} \cos \alpha \quad (7)$$

$$(\text{飽和}) \quad q_z = -K_s \frac{\partial h}{\partial z} + K_s \cos \alpha, \quad q_y = -K_s \frac{\partial h}{\partial y} + K_s \sin \alpha \quad (8)$$

(連続の式)

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial t} = -\frac{\partial q_z}{\partial z} - \frac{\partial q_y}{\partial y} \quad (9)$$

ここで、 q_z : 斜面と直角方向のフラックス[L/T], q_y : 斜面方向フラックス[L/T], θ_f : 膜状流れ含水率 (あるいは急速増加含水率) [-], $\theta = \theta - \theta_{im}$, θ : 体積含水率[-], θ_{im} : 自然排水時初期含水率[-], a_v, b_v, a_h, b_h : 鉛直・水平各方向水分移動式のパラメータ, z : 斜面に直角方向の距離[L], y : 斜面方向距離[L], α : 傾斜角[rad], K_s : 飽和透水係数[L/T], h : 圧力水頭 (正圧) [L]である。

計算に用いた各層のパラメータを表-4に示す。水分特性曲線のパラメータ ($\alpha_v, n, \theta_s, \theta_p$) は、土柱法により実測した排水過程の水分特性曲線に Van Genuchten 式を曲線近似して求めた。飽和透水係数 (K_s) は、覆土と砂層に関しては、大型実験を行った各層から試料円筒により採取したサンプルに対して変水位試験を、破砕残渣層に関しては、大型実験と同様の密度に充填したカラムを用いて定水位透水試験を実施して測定した。廃棄物層に関する膜状流れパラメータ (a_v, b_v, a_h, b_h) は、前記したとおり、それぞれ、単層充填した一次元カラム、二次元カラムを対象に、流束制御法、水分拡散実験を実施して実験的に決定した。

(2) 計算結果

計算によって得られた各 Step 毎の各層からの流出割合を実測値と共に表-5に示す。3層実験(Step2)の降雨強度が小さい

条件で砂層流出の計算値が実測値に比べ高くなっているが、それ以外は概ね一致する結果が得られている。実験の考察で、4層充填時に砂層浸入水強度が低下しているにも関わらず、砂層と廃棄物層からなるキャピラリーバリアでは破過が生じていることを述べた。ここで実施した計算上では4層状態では100%砂層内で排除されるため、中間覆土上流出と下方流出は0となっている。このような、キャピラリーバリアよりも下の層で流出が認められる原

表-4 数値計算に用いた各層のパラメータ値

		水分特性曲線					膜状流れパラメータ			
		α_v	n	θ_s	θ_p	K_s	a_v	b_v	a_h	b_h
第4層	覆土	0.0579	3.11	0.453	0.198	4.9×10^{-6}				
第3層	砂 I	0.0476	7.04	0.426	0.059	0.04				
第2層	破砕残渣 A	22.1	1.39	0.618	0.085	2.1	391	4.49	352	2.94
第1層	覆土	0.0579	3.11	0.453	0.198	4.7×10^{-6}				

表-5 実験と数値計算による各層からの流出割合の比較

	qin	表面流出		砂層流出		中間覆土上流出		下方流出	
	(mm/h)	(obs)	(cal)	(obs)	(cal)	(obs)	(cal)	(obs)	(cal)
2層 実験 結果	5.83	—	—	—	—	98.43	97.13	1.57	2.87
	12.98	—	—	—	—	99.10	98.74	0.90	1.26
	20.79	—	—	—	—	99.76	99.24	0.24	0.76
	qin	表面流出		砂層流出		中間覆土上流出		下方流出	
	(mm/h)	(obs)	(cal)	(obs)	(cal)	(obs)	(cal)	(obs)	(cal)
3層 実験 結果	5.81	—	—	29.48	56.48	68.86	42.04	1.66	1.48
	13.50	—	—	19.29	27.27	79.86	71.61	0.85	1.12
	20.81	—	—	16.19	19.51	83.25	79.76	0.56	0.72
	qin	表面流出		砂層流出		中間覆土上流出		下方流出	
	(mm/h)	(obs)	(cal)	(obs)	(cal)	(obs)	(cal)	(obs)	(cal)
4層 実験 結果	5.64	94.97	94.97	3.60	5.03	0.66	0.00	0.77	0.00
	12.62	97.84	97.81	1.89	2.19	0.11	0.00	0.15	0.00
	13.52	97.24	97.95	2.15	2.05	0.25	0.00	0.36	0.00
	20.54	98.76	98.67	0.92	1.33	0.17	0.00	0.15	0.00

因としては、前段の2層、3層における実験からの排水時間が短かったため、破碎残渣層内、あるいは中間覆土層内に移動性の水分が残存していたことや、境界面の不均一性による破過が生じたこと等が考えられる。

4.4 砂層挿入による鉛直浸透水量削減効果の検討

本実験では、覆土層の透水係数を 10^{-6}cm/s と極めて低くしたため、表面、および中間覆土上で大量の側方移動が生じる結果となったが、これは最終覆土としては考えられるものの中間覆土材としては現実的ではない¹⁰⁾。実際の中間覆土の透水係数は $10^{-4}\sim 10^{-5}\text{cm/s}$ 程度が現実的であると考えられる。その場合、最終覆土の透水性が高い条件では、通常の雨水は廃棄物層に浸入して中間覆土上に至るが、中間覆土の透水性も高いために、浸入した雨水はそのまま中間覆土層を通過して下方浸透することが予想される。覆土層が持つ鉛直方向水分移動の抑止力は透水性に依存しているため、透水係数が高い限りは、それ以下のフラックスを遮断して側方排除することは困難である。

そこで、覆土材の透水係数が比較的高い場合に、砂層と置換する、もしくは砂層と併用することを仮定する。砂層部におけるキャピラリーバリア型の側方流は、浸入水強度が大きい場合は破過する割合が高いが、多段にすることによって徐々に下方浸透水量を削減することができる可能性がある。

そこで、単純な計算により必要な段数を算出してみた。本研究で用いた試料（砂Ⅰと破碎残渣Ⅳ）では、大型3層(Step2)、4層(Step3)の実験から、砂層負荷水量（砂層浸入水強度に砂層斜面方向長さを乗じたもの：奥行き方向単位幅当たりの砂層に負荷される水量 $[\text{mL}/(\text{h}\cdot\text{cm})]$ に相当）と砂層からの側方排除割合は図-10のような関係にある。図中には、4.3の数値計算から得られた砂層排除割合も示した。これらの結果を曲線近似したが、関数形は対数関数近似が高い相関が得られたため、図中に示すような関数を用いて砂層排除率を推定することとした。なお、同図より、理論計算値よりも実測値の方がキャピラリーバリアの効果が低く、多段化による排水効果の可能性を示すためには、実測値を近似した曲線を用いる方が安全側になると考えられるため、以下では、実測値から得られた関数型を用いて多段化の効果を示す。

最終覆土の透水係数を 10^{-4}cm/s とした場合、図-11に示すように 10mm/h の降雨強度に対して覆土通過水量が覆土透水係数と同等として約 3.6mm/h となる。この砂層負荷水量から砂層排除水量を曲線近似した関数によって算出すると、第1段目の砂層を破過する水量は 1.1mm/h となる。同様の計算を繰り返すと、下方になるほど鉛直移動水量が減少し、砂層挿入数9段で底部到達水量がゼロになる結果となった。もし、最終覆土の透水係数が 10^{-5}cm/s であれば、必要段数は3段にまで減少する。また、砂層としてより効果的な材料を導入することでこの段数を減らすことも可能であると考えられる。単純な計算であるが、覆土層の代わりに砂層を用いて廃棄物層との間で側方排除することが、底部到達水量を削減するための一つの選択肢になりうると考えられる。

5. まとめ

覆土と廃棄物の互層構造における二次元的な水分移動に関する実験を実施し、互層境界に生ずる側方流を

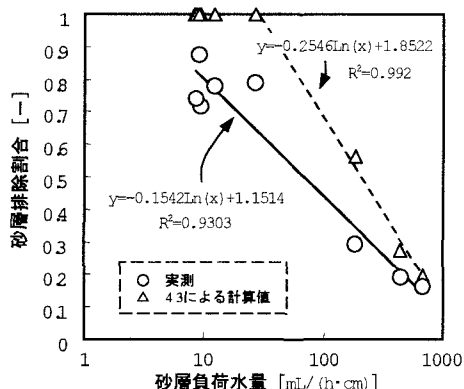


図-10 砂層負荷水量と排除割合の関係

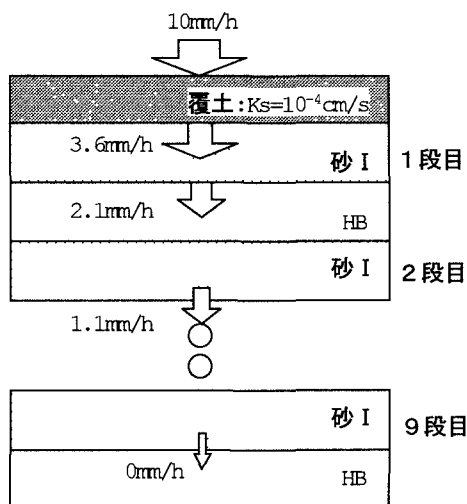


図-11 砂層必要段数の計算例

用いた水分排除による鉛直移動水量の削減に関して検討した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 中間覆土上に廃棄物層がある場合、下方浸透と側方流の配分は、覆土層の透水係数が支配的であり、覆土上の側方流を利用した水分排除は、覆土層の透水性を制御することで実現されることが考えられる。
- (2) 上層に砂層、下層に廃棄物を充填した2層構造に対する降水実験を実施し、砂層と廃棄物層の組み合わせによってもキャピラリーバリアが生ずることを確認した。砂層と廃棄物層の境界に生ずるキャピラリーバリアも、排除効率は砂層の水分特性が支配的であるため、砂層の種類によって排水効果が大きく異なる結果となった。また、砂層と礫層から形成されるキャピラリーバリアと同様に、排水能力は砂層に負荷される総水分量に影響されることを確認した。すなわち、砂層の上部に覆土を配置することで高い効果が期待できることが示唆された。
- (3) 覆土・廃棄物層の大型4層実験により、覆土材の透水係数で表面流、覆土上側方流を操作し、廃棄物層上の砂層により覆土通過水分を排除可能なことが、前記下2つの実験と同様に確認された。実験結果から、覆土材の透水係数を小さくすれば、通常考えられる10mm/h程度の降雨の99%近くを底部に到達させずに排除することが可能であることが確認できた。また、シミュレーション結果も実測値と概ね良好な一致を示した。
- (4) 透水係数の高い覆土が用いられ、表面排除が困難な場合でも、覆土材の透水係数以下のフラックスは、覆土材の代わりに砂層を多段で挿入することによって、底部へ到達するまでに喪失させることができる可能性を示した。

参考文献

- 1) 東條安匡, 田中信寿, 松藤敏彦, 松尾孝之: 廃棄物処分場覆土における表面流の生成とその排除, 環境工学研究論文集, Vol.37, pp.423-433, 2000.
- 2) 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立地底部集排水構造に関する研究—実験的研究—, 土木学会論文集, VII-21, No.692, pp.53-62, 2001.
- 3) 東條安匡, 田中信寿, 松藤敏彦: 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—, 土木学会論文集, VII-21, No.692, pp.41-52, 2001.
- 4) 渡辺亮一, 花嶋正孝, 松藤康司, 栗田陽一, 島岡隆行: 廃棄物と覆土層の土壌物理特性及びその応用, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, 第II部門, pp.918-919, 1988.
- 5) Ross, B.: The diversion capacity of capillary barriers, *Water Resources Research*, Vol.26, No.10, pp.2625-2629, 1990.
- 6) Cassiani, G.: A new method for the interpretation of the constant-head well permeameter, *Journal of Hydrology*, 210, pp.11-20, 1998.
- 7) Russo, D.: Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: On the selection of a model for the hydraulic properties, *Water Resources Research*, Vol.24, No.3, pp.453-459, 1988.
- 8) 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.
- 9) Yasumasa TOJO, Nobutoshi TANAKA, Toshihiko MATSUTO and Takayuki MATSUO: Unsaturated Hydraulic Characteristic of Various Residues from Intermediate Waste Treatment Process, *Proceedings of SARDINIA 2001 Eighth International Waste Management and Landfill Symposium*, III, pp.473-480, 2001
- 10) 谷上 裕: 最終処分場における雨水の排除による浸出水の削減について, 第9回全都清講演集, pp.178-180, 1988.