

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 —

東條安匡¹・田中信寿²・松藤敏彦³・松尾孝之⁴

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)

⁴正会員 北海道大学技官 工学研究科環境資源工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13西8)

最終処分場底部にキャピラリーバリアによる排水構造を設けることを提案し、その可能性について実験的に検討した。実験では、試料、勾配、降雨強度の他、斜面の最下流端の構造、斜面長を変化させ、それらが排水能力に与える影響を検討した。その結果、キャピラリーバリアの排水効果は、①勾配が大きい、②降雨強度が小さい、③砂の粒度が均一、④最下流端の構造は上部層を下部層側へ引き込む、⑤斜面長が短いほど高い傾向にあった。キャピラリーバリアの排水効果は、降雨強度に斜面の水平距離を乗じた総浸入水量に依存するため、実規模で用いる場合には底部到達水強度を極めて小さくしなければ効果を発揮できない。しかし、年降水量(1600mm/年)が埋立層内で十分に平均化されて底部に到達するとすれば対応できる可能性がある。

Key Words : capillary barrier, sanitary landfill, drainage system

1. はじめに

環境に対して安全で信頼性のある廃棄物埋立地が求められている今日、浸出水を適正に管理し、外部へその影響が及ぶことを防止することは極めて重要である。特に、全国で頻出する処分場立地に関連する住民紛争の主要な争点が生出水の管理に関連していることから、浸出水の地下水への漏洩防止に対する効果的な対策や技術の確立は急務の課題といえる。こうした状況から、遮水工の設計理念は、平成10年度に改正された最終処分場の技術上の基準に見られるように、「多重安全構造」の概念が掲げられ、浸出水漏洩に対しても、より厳重な管理が求められるようになった。

しかし、浸出水の漏洩リスクは、遮水シート上に到達した水分が貯留され、遮水シート上に水圧が付加される限り存在することとなる。従って、本質的な漏洩抑制としては、シート上にかかる水圧を喪失させることが有効な解決策の一つであると考えられる¹⁾。そのためには、トップカバーによる埋立地浸入水の表面での遮断、あるいは浸入水分の迅速な排除による底部到達水量の最小化等が有効な方策であると考えられるが、いずれにしても、従来型の底部構造では、最終的

に底部に到達した浸出水は遮水シート上もしくはその上にある砂質保護層内に飽和帯を形成し、集排水管へと向かう飽和浸透流を形成する。そのため遮水シート上への静水圧の負荷を回避できない。

そこで、本研究では、漏洩の直接的な原因となるシート上への水圧の付加を回避するために、キャピラリーバリアを用いた排水システムを処分場底部に構築することを提案し、キャピラリーバリアそのものの水分排除特性について実験的に検討すると共に、処分場底部キャピラリーバリアの水分排除の可能性について検討する。

2. 既往の研究

キャピラリーバリアは、毛管力の大きな微細間隙を有する土を粗大間隙を有する土の上に配置した二層構造の土層において、上部から浸入してきた水分が水分保持特性の差によって上部土層内に保持され、二層境界面の勾配等により上部土層内を側方移動して側方で排水される機構である。

本現象は、粗大間隙を有する土の上に微細間隙を有

する土が重なって層を形成している不飽和な場であれば再現されることから、成層土など、自然界中に多く見いだすことができるといわれている^{2),3)}。一方、人為的に水分移動制御に利用した例は、古くは我が国の古墳建設技術の中にも確認できると渡辺⁴⁾は報告している。1970年代後半以降、放射性廃棄物隔離技術として注目され^{5),6)}、その後1990年代にはいと放射性廃棄物以外にも有害廃棄物や汚染修復土壌のトップカバーとしてもその適用性が検討されるようになった。最近では実規模の現場実証試験や他のカバーとの比較試験^{7)~11)}が欧米各国及び我が国でも多数実施されている。しかし、多くは自然気象条件下での排水能力を測定することで効果を確認しているのみであり、排水能力に与える種々の影響因子を詳細に扱った研究は少ない。また、我が国においては、マサ土による覆土と埋立廃棄物である焼却灰との境界においてもキャピラリーバリアによる水分の側方移動が生ずることを渡辺ら¹²⁾が報告している。

キャピラリーバリアを水分移動制御技術として実用化するためには、バリアの排水能力に対する影響因子を定量的に明らかにして、設計理論を確立する必要がある。排水能力の決定に関する理論的記述はRoss¹³⁾によってなされている。Rossは、上部の微細粒子層内の斜面方向フラックスを不飽和透水係数の準線形近似を用いて積分し、バリアが輸送できる限界の水量(Diversion Capacity)を得る式を導き、それが勾配、降雨強度、上部層の透水係数と不飽和水分特性の関数となることを示している。これに対して、実験的な検討は、前述のような大規模な現場試験で特定の構造、自然の気象条件下でなされているものが多いが、勾配、降雨強度等を多様に変化させ、それらが排水能力に与える影響を探求した例はMiyazaki¹⁴⁾、Kampf¹⁵⁾の研究の中に見いだせる。Miyazaki¹⁴⁾は、砂とガラスビーズで作成した傾斜二層構造に対して降水実験を行い、上部層から下部層への破過が生ずる最初の位置が勾配に比例して上流側へと移動すること、そしてその間隔が降雨強度に依存することを確認したほか、実測値とRoss式を用いた推定値を比較し、良好な一致が低勾配においては見られるが、勾配の増大に伴い乖離が大きくなること、また推定に用いる不飽和浸透特性の決定には注意が必要であると述べている。一方、Kampf¹⁵⁾は、試料と勾配を16通り設定し、降雨強度を段階的に変化させた大規模な室内実験から、下部層への破過開始水量が勾配に比例すると報告しているが、Ross式との適合性は評価していない。また、実際の現象はRoss式によって表現される現象よりも複雑であるとの観点から、Oldenburg¹⁶⁾やWebb¹⁷⁾は仮想的な場を対象として有限要素法や差分法を用いた数値解析

を行い、Ross式との比較を行っている。しかし、実現象の再現は、各層の水分特性値の把握が難しく、特に下部層の粒子が粗い場合には、小さなコアサンプルを元に測定した測定値での解析値は実測値への適合性が悪いという報告¹⁸⁾もあり、西垣¹⁹⁾も下部粗粒子層の水分移動表現及び境界面の扱いについては課題であることを報告している。

3. 研究の目的と方法

前記したとおり、キャピラリーバリアに関しては、理論・実験・数値解析を通して様々な取り組みがなされているが、現時点においてキャピラリーバリアを十分な精度を持ってその能力を予測する手法は確立されているとは言い難く、その実用化には、さらに実験的、解析的情報の集約が必要であると考えられる。さらに、最終処分場底部へのキャピラリーバリアの適用を考えた場合には、バリアを通過する水量は最小化することが望ましく、より効果の高い構造、条件の探求が必要であると思われる。そこで、本研究では、試料、勾配、降雨強度、構造を変化させた多様な条件での実験を通じてキャピラリーバリアの排水能力に影響する因子とその排水効率との関係について検討し、最終的に処分場底部に適用可能なキャピラリーバリアの条件を明らかにすることを目的とした。

具体的に実施した検討事項は以下の通りである。

- ①小型のキャピラリーバリア浸透実験により、キャピラリーバリアの排水能力と影響因子(構成材料の特性、勾配、浸入水量、バリア層の構造)の関係について検討する。(小型二次元二層実験)
- ②大型の実験装置を用いて小型と同種の条件で浸透実験を行い、規模の拡大が排水効果に与える影響について検討する。(大型二次元二層実験)

4. 二次元二層浸透実験

(1) 試料

試料は、上部層として砂を三種類(砂Ⅰ、砂Ⅱ、砂Ⅲ)、下部層として礫を三種類(礫Ⅰ、礫Ⅱ、礫Ⅲ)採用した。各試料の粒度分布を図-1に、比重、代表径(D_{10} 、 D_{30} 、 D_{60})、均等係数、曲率係数、飽和透水係数と測定時の密度を表-1に、水分特性曲線を図-2に示す。比重はJIS A 1202、粒度分布はJIS A 1204に従って測定した。飽和透水係数は定水位法により、水分特性曲線は土柱法により測定した。上部層に用いた砂は、砂Ⅱが最も細かく、次いで砂Ⅰ、砂Ⅲの順で

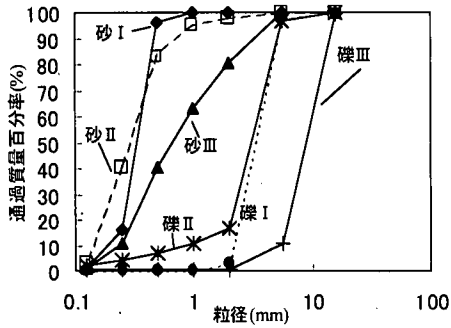


図-1 試料の粒度分布

表-1 試料の諸物理特性

上部砂層用試料				
	単位	砂 I	砂 II	砂 III
比重	(-)	2.70	2.56	2.57
D_{10}	(mm)	0.18	0.15	0.24
D_{30}	(mm)	0.28	0.21	0.39
D_{60}	(mm)	0.36	0.34	0.9
均等係数	(-)	2	2.27	3.75
曲率係数	(-)	1.21	0.86	0.7
飽和透水係数	(cm/s)	0.04	0.02	0.02
密度 ($g\text{-dry}/cm^3$)		1.56	1.58	1.73
下部礫層用試料				
	単位	礫 I	礫 II	礫 III
比重	(-)	2.67	2.56	2.63
D_{10}	(mm)	2.1	0.8	5.5
D_{30}	(mm)	2.5	2.3	7
D_{60}	(mm)	3.7	3.5	10
均等係数	(-)	1.8	4.38	1.82
曲率係数	(-)	0.8	1.89	0.89
飽和透水係数	(cm/s)	1.6	3.5	8
密度 ($g\text{-dry}/cm^3$)		1.63	1.41	1.38

(密度は飽和透水係数測定時の充填密度)

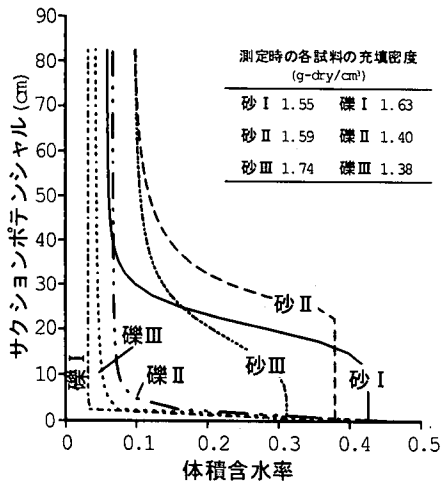


図-2 試料の水分特性曲線

表-2 キャピラリーバリア試料の組み合わせ

呼称	上部層用試料	下部層用試料
case1	砂 I	礫 I
case2	砂 II	礫 II
case3	砂 III	礫 III

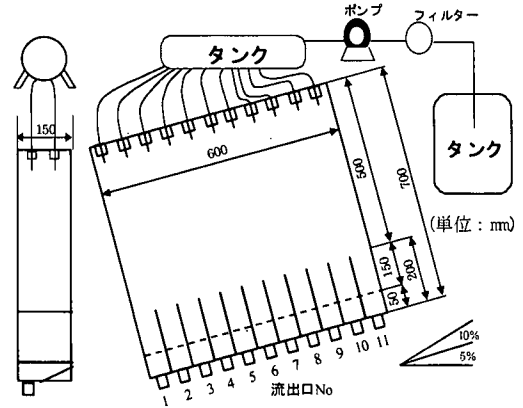


図-3 小型実験装置

あった。砂 I, II は比較的粒度が均一であったが、砂 III は砂 I, II と比較して広範な粒度分布を示した。透水係数はいずれも 10^{-2}cm/s のオーダーであり、透水性はよい。水分特性曲線から、砂 I, 砂 II には 10cm または 20cm の明瞭な毛管水縁が確認できるが、砂 III は毛管水縁が他に較べて低く、緩やかに立ち上がる傾向を示している。下部層用の礫は、礫 I が玉砂利、礫 II は碎石 7 号、礫 III は碎石 6 号である。透水性は極めてよく、 10^0cm/s のオーダーである。水分特性曲線はいずれの試料も、毛管水縁をほとんど持たず垂直に立ち上がる性状を呈し、表面吸着水のみである。二層を形成するための各試料の組み合わせは表-2 に示すように決定した。これは上部層試料が境界面を通して下部層内間隙に浸入することのないように、フィルター基準²⁰⁾を満たすように選択した。

(2) 小型二次元二層実験

a) 実験装置

実験装置を図-3 に示す。実験カラムは直方体で、高さ 70cm、奥行き 15cm、幅 60cm である。下部 20cm は高さ 15cm の仕切版により 11 個に仕切られており、下端が流出口となっている。上部には降雨装置として 22 本の注射針を配置し、ポンプで上側の圧力タンクに送水した水分が土層表面に供給されるようにした。降水量はポンプからの送水量により制御した。降水の均一性は、各注射針からの水量をポリ瓶に直接受けて確認したが、各注射針からの降水量は、全注射針の降水量平均値の $\pm 5\%$ 以内であった。勾配は、底部の片

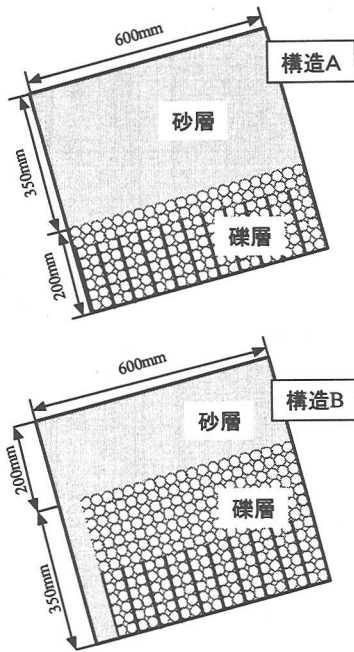


図-4 充填の形式

側のジャッキによって操作した。

b) 実験方法

試料の充填は、装置を水平に置いた状態で乾燥試料を層内に偏りが生じないように約5cm毎に締め固めながら行った。下部の礫層の充填が終了した後は、境界面の凹凸に特に注意を払い平滑に仕上げるようにつとめた。上部砂層までの充填が終了した後、勾配をセットし、底部の全流出口から送水して一旦水分飽和させた。その後約24時間放置した後に排水を開始し、流出が停止するまで放置することで実験開始時には自然排水状態が形成されるようにした。降水開始後の下部からの流出水の測定は、降雨開始直後から10分間隔で各流出口からの流出水をポリエチレンボトルに受け、その質量を計測した。流出水量が供給水量と同等になり、各流出口からの流出水量に変化がない状態が約1時間程度継続して確認されたら定常と見なし、次の降雨強度に切り替えて同様の計測を繰り返した。実験終了後に全試料を装置から取り出し、乾燥器で乾燥させて充填密度を測定した。

c) 実験条件

実験は、図-4に示すような単純な二層構造（構造A：上部層厚35cm，下部層厚20cm）と、斜面最下流端の流出口に上部砂層を引き込んだ構造（構造B：上部層厚20cm，下部層厚35cm）の2通りとし、表-2に示す3ケースの試料の組み合わせそれぞれについて実施した。各充填構造に対して、勾配を0, 5, 10%と変化させ、その各勾配において降水量を約10, 30, 50mm/h

表-3 実験条件（小型実験）

構造	case	勾配	降雨強度 (mm/h)		密度 (g-dry/cm ³)	
			砂層	礫層	砂層	礫層
構造A	case1	0%	9.9	30.4	46.3	
		5%	10.0	29.5	47.6	1.56 1.62
		10%	10.3	31.1	47.1	
	case2	0%	10.4	30.3	47.3	
		5%	10.1	30.5	47.5	1.57 1.41
		10%	7.8	30.6	47.4	
	case3	0%	10.5	28.6	44.0	
		5%	11.5	30.5	47.6	1.70 1.38
		10%	11.6	29.6	47.7	
構造B	case1	0%	9.9	30.4	46.3	
		5%	10.0	29.5	47.6	1.55 1.62
		10%	10.3	31.1	47.1	
	case2	0%	10.4	30.3	47.3	
		5%	10.1	30.5	47.5	1.59 1.40
		10%	7.8	30.6	47.4	
	case3	0%	10.5	28.6	44.0	
			56.4	72.7	96.7	
			105.5	139.4	177.2	
			209.5	232.2	249.2	
			11.5	30.5	47.6	1.71 1.37
			51.1	76.6	114.7	
		10%	140.2	161.2	194.6	
			225.6	251.0	277.2	
			11.6	29.6	47.7	
			67.4	85.2	129.6	
			163.5	206.5	216.1	
			252.4	277.8		

表-4 実験条件（大型実験）

構造	case	勾配	降雨強度 (mm/h)		密度 (g-dry/cm ³)	
			砂層	礫層	砂層	礫層
構造A	case3	5%	12.0	20.0	35.6	1.74 1.39
		10%	8.5	29.0	37.5	
構造B	0%	11.3	18.3	38.3		
		1.5	3.8	4.3		
		6.5	11.6			
	case3	5%	10.3	28.1	45.9	1.73 1.40
			1.0	4.4	5.0	
			10.8	12.5		
	10%	14.2	21.4	43.2	6.3	
						3.7

で与えた。case3では特に構造Bについてのみ、降雨強度の変化を多くとって測定を行った。すべての実験ケースを表-3に示す。

(3) 大型二次元二層実験

a) 実験装置

図-5に実験装置を示す。実験装置は、高さ1m，奥行き20cm，幅350cmである。装置下部20cmは仕切版により、20個のコンパートメントに分割され、それぞれ最下端が流出口となっている。上部には40個の注射針を配置し、水道水を2段のバルブによって水圧制御して流量をコントロールできるようにし、土層表面に降雨を与える形式としている。降水の均一性は、各注射針からの水量を直接測定した結果、各注射針からの水量は、全注射針の降水量平均値の±8%以内であった。また、小型と同様に装置底面の端部に油圧ジャッキを取り付け、勾配を変化させることができるようにした。

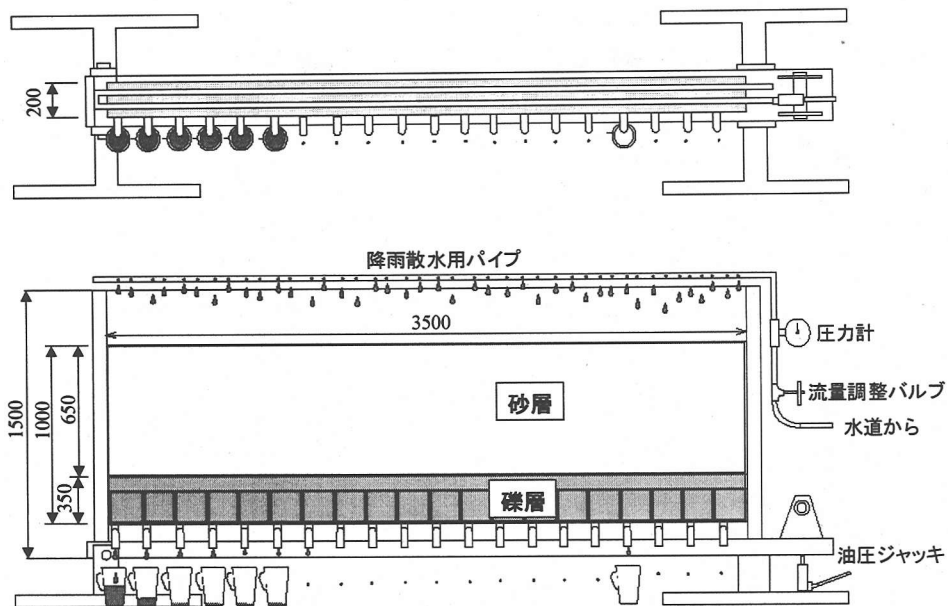


図-5 実験装置 (大型)

b) 実験方法

試料の充填は、小型と同様に、下部に礫層を充填した後、境界面を平滑に仕上げ、砂層を充填した。砂層は採取時の含水率（約10%）の状態ですべて5cm毎に締め固めながら充填した。装置の構造上、充填終了後に小型装置のように水分飽和させることができなかったため、充填後約1週間一定降水を与え、その後約2週間排水が終了するまで放置し、自然排水状態が形成されるように努めた。排水が完了した後、各実験条件の降水を開始した。降雨は設定強度での供給を定常時の流出分布測定が終了するまで継続し、その後段階的に降雨強度を切り替えて同様の測定を行った。測定は、約6時間間隔で各流出口からの流出水量を5リットルのポリバケツで受け、約30分間の流出水採取した。降雨強度を変えて同様の測定を各流出口からの流出水量が上部からの供給水量と一致するまで（定常に達するまで）繰り返し測定した。水量が定常に達した後は12時間間隔で3回同様の測定を行い、定常と測定値の再現性の確認を行った。全実験終了後に、上部層の砂試料は100ml試料円筒を用いて、表面付近、上部層中間付近、境界面付近からそれぞれ3試料、合計9試料を採取して密度を測定した（表-4には、9試料の平均値を示した）。礫層は充填時の乾燥試料の投入重量から密度を求めた。

c) 実験条件

実験にはcase3の試料の組み合わせのみで行った。構造は、小型と同様に2通りの構造（構造A、構造B）としたが、構造Bでは斜面の最下流側2つ分の流出口

にまで上部試料を引き込んだ。各構造に関して、勾配を3段階に変化させ、各勾配で降雨強度を約10, 30, 40mm/hに設定したが、構造Bに関しては、約1, 4, 5, 7, 10mm/hの小さな降雨強度での実験も実施した。（表-4）

(4) 実験結果及び考察

a) 小型実験の結果

小型実験の結果を、構造A、B別に以下に示す。特に勾配、降雨強度、試料の組み合わせの各要素が排水効果に与える影響に関して考察する。

①構造A

各case、各勾配毎に3種類の降雨条件下での定常時の各流出口からの流出流速(mm/h)（流出水量を流出口断面積で除したものを）を図-6に示した。横軸は各流出口番号を示し、流出口番号の小さい方が斜面の下流側である。同図中には、各実験における流出分布の重心位置（重心位置[cm] = \sum （各流出口からの流出水量[m³/h] × 各流出口中心の斜面最下流端からの距離[cm]） / （定常時全流出水量[m³/h]））も示した。

（勾配の影響）図の最上段は各caseの勾配0%での結果を示している。いずれのcaseも流出は不規則な分布性状を呈しているが、重心位置もほぼ中央となって、側方への水分移動効果は認められなかった。流出分布に見られる不規則な乱れは、降水の均一性を事前に確認していることから、砂層充填の不均一性や二層境界面の凹凸、礫層内での偏り流れ等によって生じたものであると考えられる。同図中段、下段はそれぞれ

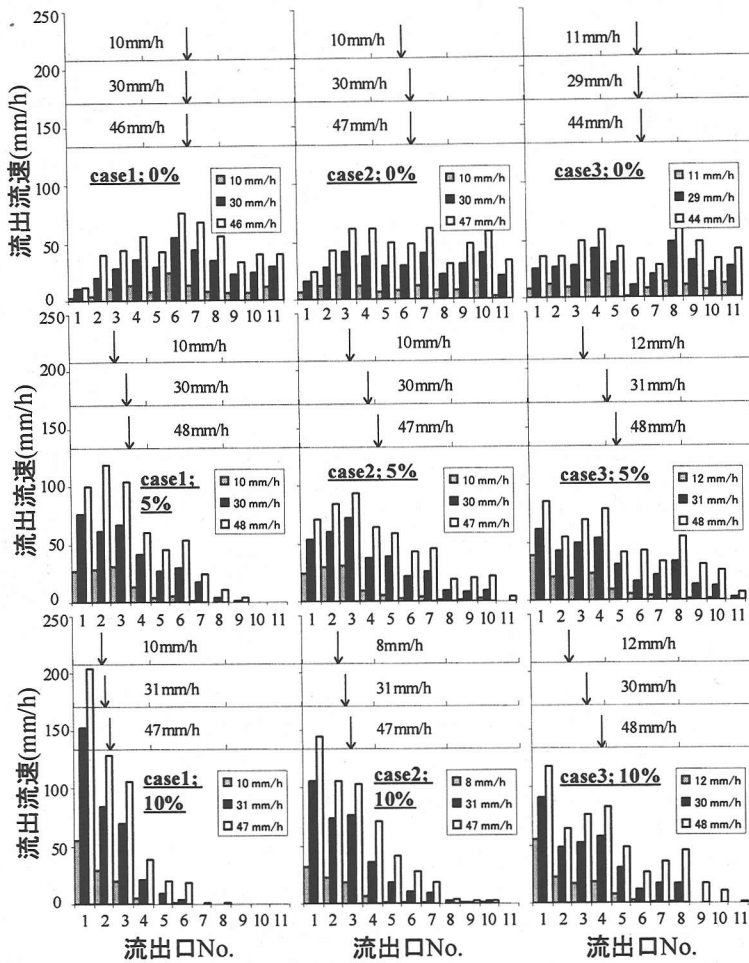


図-6 実験結果 (小型【構造A】)
定常時の各流出口からの流出流速と流出分布の重心位置

勾配を5%と10%にした場合の流出分布を示しているが、勾配が大きくなるにしたがって流出が下流側に偏るようになり、重心位置も下流側に移動していることが確認できる。従って、勾配の上昇によりキャピラリーバリアによる水分の側方排除効果が強く発現したものと考えられる。

(降雨強度) 各case共に降雨強度の増大に伴って流出の重心位置が中央側に移動していることから、降雨強度の増大がキャピラリーバリアの水分側方排除効果を低下させていることが確認できる。降雨強度の増大に対する排水効果の低下傾向はcase3において最も顕著に現れ、勾配10%、降雨12mm/hでは最下流端の流出口(No. 1)の流出割合が43% (=No. 1流出口からの流出水量/全流出口からの流出水量: 以下同様にして算出)であったものが、降雨強度を48mm/hへ増大することで22%に半減した。対照的にcase1では大きな低下は

なく、勾配10%、10mm/hで48%であった流出口(No. 1)の流出割合は、最大降水量47mm/hでも40%となり8%の減少しか生じなかった。

(各caseの差) 勾配5%では各caseの流出分布に大きな差は認められなかったが、勾配10%では、case2, 3に比較してcase1の流出分布が最も下流側へ偏る傾向が認められ、側方排除効果が高かった。また、降雨強度の変化に対してもcase1が最も安定しており、case3が降雨強度の増大による側方排除効果の低下傾向が最も著しかった。case1, 2とcase3では、上部砂試料に関して、砂Ⅰ, Ⅱが粒度が均一で水分特性曲線も明瞭な毛管水縁を有し、残留水分率と飽和含水率の差が大きいのに対し、砂Ⅲは、粒度が砂Ⅰ, Ⅱと比較して広範なため、明瞭な毛管水縁が確認し難いという点で異なっている。すなわち、上部砂試料の水分保持特性の差が排水効果の差となって現れたと考えられ

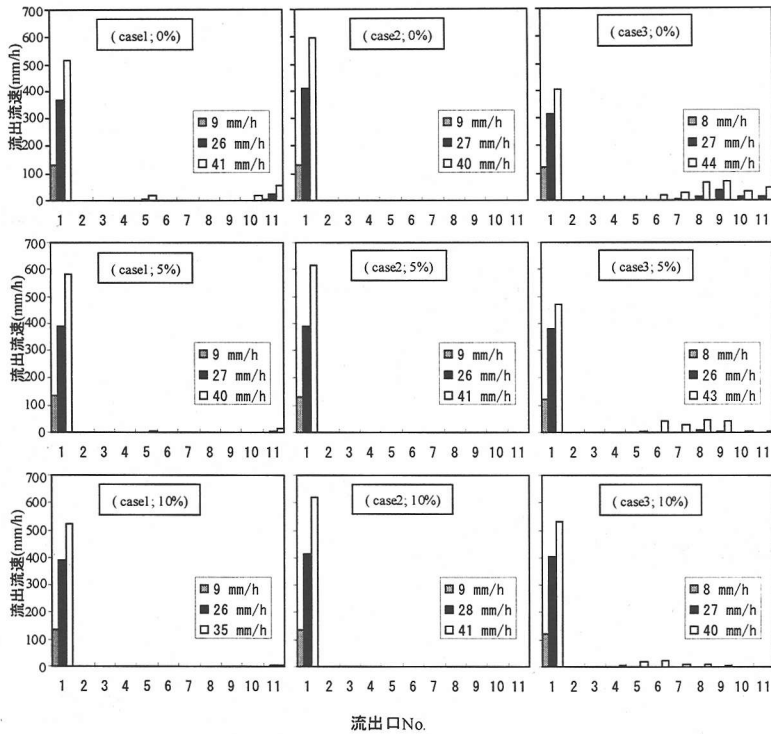


図-7 実験結果 (小型【構造B】) 定常時の各流出口からの流出流速

る。同等の毛管吸引力を示すcase1と2においてcase1の方がより側方への水分排除効果が高かったのは、透水係数が砂Ⅰの方が砂Ⅱに比べ若干大きかったことが要因として考えられる。キャピラリーバリアによる水分移動は上部砂層の毛管吸引力及び透水係数に強く支配されるといわれており¹³⁾、今回の試料においても、同特性の差異が排水能力の差として現れたと考えられる。

以上より、本研究で用いた3種の試料では、勾配を大きくするほど、降雨強度を小さくするほどキャピラリーバリアの効果が強く発現し、また、粒度が均一な砂を用いた組み合わせほど効果が高い傾向にあった。しかし、最も効果の高いcase1の勾配10%、降雨強度10mm/hの条件でも、最下流端(No.1流出口)以外から流出する水分が50%以上存在し、処分場底部への適用を考えた場合、底部到達水量の削減に向けて工夫が必要である。

②構造B

各caseの全実験結果を勾配毎に図-7に示す。case3はcase1,2と同降雨強度の結果のみを示した。構造Aとは大きく異なり、case1,2,3いずれの試料においてもほとんどの水分が最下流端の(No.1)流出口から流出する結果となった。特に、最上段に示す勾配が

0%の条件においてもNo.1流出口からの流出は極めて高くなった。case2においては全実験で最下流端(No.1)以外の流出口から流出は認められず、case1でも勾配0%で高い降雨強度条件でわずかに流出が認められるのみであった。最も効果の低いcase3では降雨強度が増すに従い他の流出口からの流出が増大するが、最大降雨44mm/h、勾配0%の条件でも約60%がNo.1から流出した。本実験より、単純に二層を重ねる構造Aに対し、上部層を最下流端にて下部層に深へと引き下げる構造Bとすることが排水効果の上昇に効果的であることがわかる。キャピラリーバリアの効果を上げるには、上部層の毛管吸引力を、より負側に大きくすることが有効であると考えられる。勾配を上昇させることは、その一つの手段であるといえるが、現実的な勾配には限界がある。このように下流端を引き下げた構造とすることは、最終処分場底部を想定した場合においても、下流端に集排水管が位置するため、十分可能であると考えられる。

b) 大型実験の結果

各実験の定常時流出流速分布とその重心位置を図-8に示す。図は降雨強度が小型と同程度の条件での結果を示した。構造Aと構造Bのいずれの実験においても、同様の勾配、降雨強度であるにも関わらず小型実

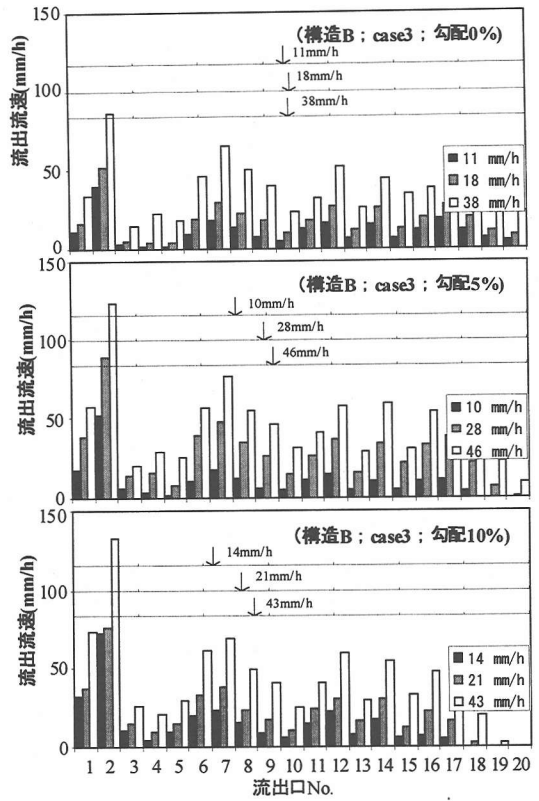
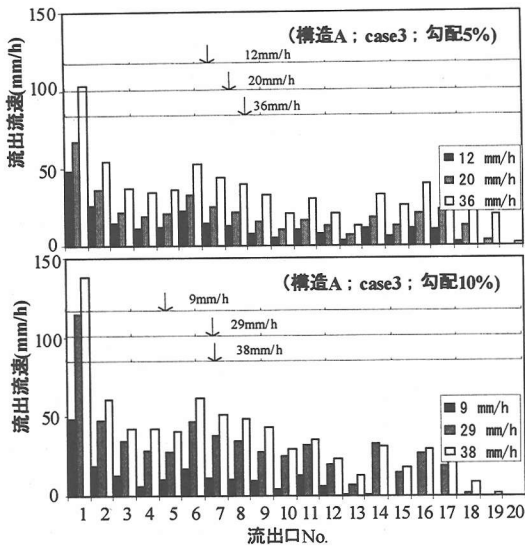


図-8 実験結果 (大型実験 case3) 定常時の各流出口からの流出流速と流出分布の重心位置

験に比較して流出分布の下流側への偏りは少なく、ほぼ全流出口から流出が認められる。例として、小型実験で側方排除効果の高かった構造Bと比較してみると、例えば、小型実験(勾配5%, 降雨強度26mm/h)では、引き込み部(No.1)からの流出割合は96%であったが、大型実験(勾配5%, 降雨強度28mm/h)では、引き込み部(No.1と2)からの流出割合は23%にまで低下した(なお、小型実験の流出口No.1の斜面長に対する比率は1/11, 大型実験の流出口No.1と2の斜面長に対する比率は1/10であり、引き込み部の流出口面積の全斜面長に対する比率はほぼ等しい)。したがって、同一の降雨強度で比較した場合、流出分布形状は大型実験と小型実験で相似にはならず、大型実験の方が小型に較べて下流側への偏りが小さくなっているといえる。

大型実験は小型実験に比べて斜面長が大きく増大している。そのため、同一の降雨強度であっても、大型実験と小型実験では、バリアに負荷される総浸入水量(降雨強度×斜面の水平距離)は大きく異なると考えられ、それが側方への水分排除効果を低下させていると予想される。このことを確認するために、表-3,4に示すとおりcase3の構造Bに関しては総浸入水量を大型実験と小型実験で同じになるように、大型実験で

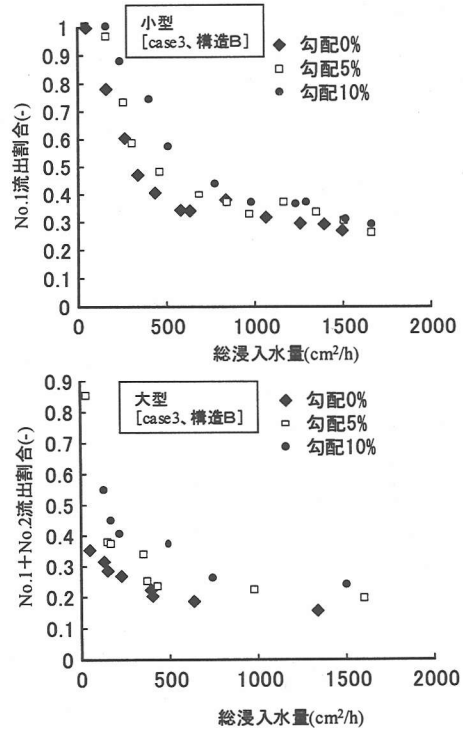


図-9 大型、小型実験における引き込み位置での定常時流出割合(case3, 構造B)

は極めて小さな降雨を、小型実験では逆に大きな降雨を与える実験も行った。その結果も含めて、case3, 構造Bの全データに関して小型、大型の各実験での定常時の斜面最下流端引き込み位置（小型ではNo.1, 大型ではNo.1, No.2）からの流出割合を浸入水量毎にプロットした結果を図-9に示す。図から分かるように、大型実験においても降雨強度を小さくし、小型と同程度の総浸入水量になれば、斜面最下流端からの流出割合が上昇するようになる。すなわち、排水の効率を考えるとときには降雨強度によらず、斜面の水平距離を乗じた総浸入水量によって評価すべきであるということがわかる。ただし、勾配0%の結果に見られるように総浸入水量が同程度であっても依然として大型実験の結果は小型実験の結果に比べ最下流端での流出割合が若干低い。これは、最下流端における引き込み深さの影響が斜面長の増大により及ばなくなることによるものと考えられる。

また、キャピラリーバリアの排水効率が総浸入水量で決定されるとするならば、実規模で斜面長が大きくなる場合には底部到達水強度をかなり小さく抑制する必要があるということになる。斜面長60cmの小型実験の結果から本バリアが斜面の途中で下方浸透を生ずることなく、100%の水量を引き込み部（No1 流出口）へと輸送できる限界の総浸入水量は、図-9の点が1となる水量から約160cm²/h(case3, 勾配10%)となる。これが20mになっても変わらないと仮定すると、限界の底部到達水強度は160cm²/h ÷ 2000cm = 0.8mm/hとなる。一方、我が国の年降水量を1600mmとし、それが覆土層や廃棄物層を通過することにより十分に平均化されて定常的に埋立地底部に到達すると考えると到達水強度は1600(mm/年) ÷ 365日 ÷ 24hr ≈ 0.2mm/hとなる。従って、埋立層内にて降雨の急激な変動を緩和し、底部到達水強度を一様にできれば、遮水シートに浸出水を到達させずに排除できる可能性があるといえる。

5. まとめ

最終処分場の底部への水圧負荷を抑制するために、底部にキャピラリーバリア型の集排水構造を築き、底部到達水量を低減することを提案し、キャピラリーバリアの排水能力に関して実験的に検討した。その結果、以下の点が明らかとなった。

- (1) キャピラリーバリアの排水能力は勾配、降雨強度の影響を強く受け、勾配が大きいほど、降雨強度が小さいほど、斜面長が短いほど効果が高い。
- (2) バリアを構成する上部砂層は、毛管吸引力が大き

く、透水係数が大きい材料ほど排水能力が高いことが既往の研究から報告されている。毛管吸引力は間隙径が小さいほど強く、逆に透水係数は間隙径が大きいほど大きくなるが、今回の検討では、均等係数3.8の試料よりも均等係数2および2.3の粒子径の偏りの大きいものほど効果が高い傾向にあった。

(3) 斜面の最下流端で上部試料を引き込む構造は小型実験において効果が高かった。しかし、規模が大きくなると効果が低くなる傾向にあった。

(4) バリアの排水能力は斜面の勾配、上部層の粒度、降雨強度に強く関連するが、規模の異なるバリアを評価する場合にはバリアに負荷される総浸入水量(降雨強度×斜面の水平距離)によって評価することが必要である。

(5) 実埋立地底部に設置されたキャピラリーバリアによって長期にわたる降雨に対して高い排水効率を得ようとする場合、キャピラリーバリアに負荷される底部到達水強度を極めて小さくする必要がある。しかし、我が国の年降水量が十分に平均化されて底部に到達すると仮定すれば対応できる可能性がある。そのためには埋立層内で急激な降雨変動を緩和する仕組みを設け、底部到達水強度を一様にする必要がある。

謝辞：本研究は国立公衆衛生院の「最終処分場のリスク管理のための監視および修復技術の総合化に関する研究」の一部として実施したものです。多くのご助言をいただいた国立公衆衛生院の田中勝教授、大迫政浩氏、井上雄三氏、また、多くの情報と試料をご提供いただいた日本国土開発(株)の福島知行氏、鈴木正人氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 田中信寿：環境安全な廃棄物埋立処分技術，廃棄物学会誌，Vol. 10, No. 2, pp. 118-127, 1999.
- 2) 宮崎 毅：傾斜キャピラリーバリアの限界長に関する研究，農業土木学会論文集，Vol. 179, pp. 49-56, 1995.
- 3) Kung, K. J. S. : Preferential flow in a sandy vadose zone, 1, Field observation, *Geoderma*, 46, pp. 51-58, 1990.
- 4) 渡辺邦夫：地中の虹，近未来社，1993.
- 5) Frind, E. O. : Application of unsaturated flow properties in the design of geologic environments for radioactive waste storage facilities, *Finite Elements in Water Resources, Proceedings of the First International Conference on Finite Elements in Water Resources*, edited by W. G. Gray, G. F. Pnder, and C. A. Brebbia, pp. 3133-3163, 1977.
- 6) Johnson, T. M. : Modeling of moisture movement through layered trench covers, *Role of the unsaturated*

- zone in radioactive and hazardous waste disposal, edited by J.W. Mercer, pp.11-26, Ann Arbor Science, 1983.
- 7) Nyhan, J.W.:Water balance study of four landfill cover designs varying in slope for semiarid regions, *Journal of Environmental Quality*, Vol.26, No.5, pp.1385-1392, 1997.
- 8) Stephen, F.D.:Alternative landfill covers pass the test, *Civil Engineering*, Vol.68, No.9, pp.50-52, 1998.
- 9) O'Donnell, E., Ridkey, R.W. and Schulz, R.K.:Control of water infiltration into near Surface LLW disposal units -Progress report on field experiments at a humid region site, Beltsville, Maryland, in Waste Management 93, *Proceedings on Waste Management at Tucson, Arizona*, Vol.1, pp.65-78, 1994.
- 10) 福島知行, 瀬尾有一, 田中信寿, 大迫政浩, 田中勝:キャピラリーバリアを利用した降雨浸透抑制型処分場の開発, 第7回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.827-829, 1996.
- 11) 鈴木正人, 瀬尾有一, 田中信寿, 田中勝他, 大迫政浩:キャピラリーバリアを利用した降雨浸透抑制型処分場の開発(その2), 第8回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.840-842, 1997.
- 12) 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.
- 13) Benjamin Ross:The diversion capacity of capillary barriers, *Water Resources Research*, Vol.26, No.10, pp.2625-2629, 1990.
- 14) Miyazaki, T., Hasegawa, S. and Kasubuchi, T.: *Water Flow in Soils*. Marcel Dekker Inc., New York, pp.103-119, 1993.
- 15) Kampf, M. and Montenegro, H.: Assessing the effectiveness of capillary barriers. *Proceedings Sardinia 97, Sixth Int. Landfill Symposium*, Vol. III, pp.421-428, 1997.
- 16) Curtis M. Oldenburg and Karsten Pruess:On numerical modeling of capillary barriers, *Water Resources Research*, Vol.29, No.4, pp.1045-1056, 1990.
- 17) 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.
- 18) Kampf, M., Holfelder, T. and Montenegro, H.: Inspection and numerical simulations of flow processes in capillary barrier cover systems. *Proceedings of the 3rd Int. Conference on Hydrosience and Engineering, ICHE*, 1998, (http://wabau.kww.bauing.tu-darmstadt.de/forschu/projekte/fg_gw/kapillar/iche98-proceedings.html)
- 19) 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.
- 20) 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.

(2001.3.19 受付)

AN APPLICATION OF CAPILLARY BARRIER AS A LEACHATE DRAINAGE SYSTEM AT BOTTOM OF LANDFILL -EXPERIMENTAL STUDY -

Yasumasa TOJO, Nobutoshi TANAKA, Toshihiko MATSUTO and Takayuki MATSUO

Experiments had been conducted for investigating an applicability of capillary barrier as a leachate drainage system installing at bottom of landfill. Various characteristics, which include type of material, gradient, rainfall intensity, downdip structure, and length of slope, were changed in the experiments and their influences on drainage efficiency were evaluated. As a result, following consequences were obtained. Using high gradient, low rainfall intensity, uniform sand, dragging down upper layer at downdip, and short slope length increases the drainage capacity of capillary barrier. The drainage efficiency depends upon total quantity of water, which multiplied rainfall intensity by slope length. Therefore intensity of leachate reaching at the bottom of landfill should be restrained in practical use.