

キャピラリーバリア効果を利用した廃棄物処分場トップカバーの検討

Capillary Barrier Effect on Landfill Site Top-Cover

小林 弘明 小澤 一喜
川端 淳一 薦田 敏郎¹⁾

要 約

廃棄物処分場内の埋立廃棄物に含まれる有機物残渣を早期に分解して安定化させる技術が望まれている。有機物の分解には適度な水分の供給と空気の循環が必要であり、廃棄物処分場のトップカバーとしてキャピラリーバリア効果を利用した降雨浸透制御システムが知られている。その構造は、地盤材料を用いて上部に細砂層、下部に粗粒層とした二層で構成されている。本研究では、従来の地盤材料から構成された構造において、キャピラリーバリア効果の低減度合について検証した。また、廃棄物層へより安定した水分量の供給ができるように、1)地盤材料のみの構造、2)撥水性通気シートを利用した構造、3)改良した撥水性通気シートを利用した構造の3種類において降雨浸透実験を行い、廃棄物層への浸透量と降雨強度の関係についてそれぞれ検討した。その結果、撥水性通気シートを改良した構造のみで、定量的な設計に耐えることが明らかになった。

目 次

- I. はじめに
- II. キャピラリーバリアのメカニズム
- III. 実験目的
- IV. 降雨浸透実験
- V. まとめ

I. はじめに

我が国においては、1998年3月に厚生省から「全国1901施設ある最終処分場のうち、ガラスくず等浸出水の処理が必要のない廃棄物のみを処理しているものを除き、遮水工または浸出水処理設備を設置していない不適正一般廃棄物最終処分場が538施設ある」と公表された¹⁾。これらの不適正最終処分場では、廃棄物が嫌気状態となっていることからメタンや硫化水素ガスの危険性、及び浸出水による汚染が懸念されており、遮水工または浸出水処理施設の設置による対応のみならず、廃棄物の早期安定化が望まれている。現在の廃棄物埋立処分場の構造は、雨水に対する表面遮水機能を保ちつつ、ある程度の通気性を維持できる準好気性の概念に基づいている²⁾³⁾。廃棄物層内を準好気性状態に維持するためには、微生物分解を促進させる適度な水分と空気の供給が不可欠であり、この条件を長期的に安定して保てるようなトップカバーシステムを確立させる必要がある。

そこで、上部細砂層、下部粗粒層の二層構造から成り、各地盤材料の毛管力の差(キャピラリーバリア効果)を利用して下部粗粒層への浸透を制御し、さらに勾配を設けることで側方への排水を促進させるシステムに着目した。既往の研究でもトップカバーシステムとしての適用性や底部集排水構造への適用について検討されている

4,5,6)。本報告は、室内土槽実験装置を用いて、地盤材料のみから構成された構造で、降雨浸透させて一度降雨を停止し、再度降雨させた場合のキャピラリーバリア効果の低減作用について検証すると同時に、より安定した水分の供給と空気の循環ができるようなシステムを構築するため、地盤材料のみの構造、撥水性通気シートを利用

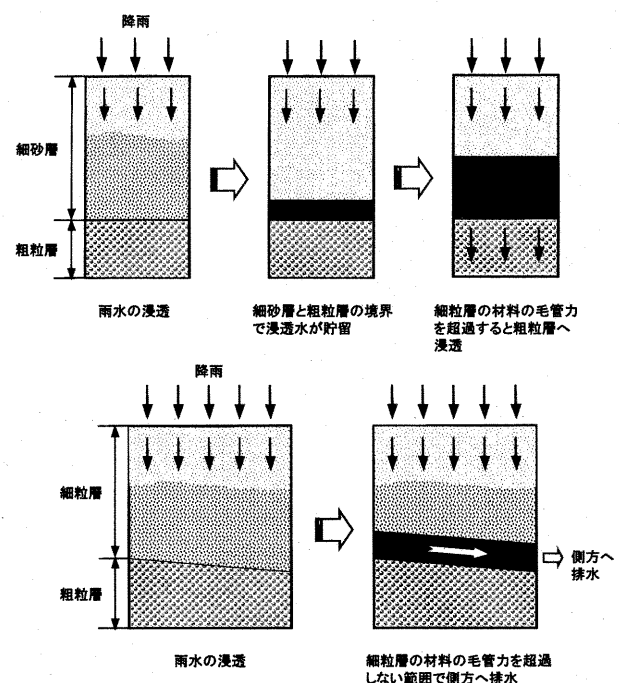


Fig.1 キャピラリーバリアのメカニズム
(Mechanism of Capillary Barrier)

1) 土木設計本部

キーワード: キャピラリーバリア, 廃棄物処分場, 準好気性, 降雨強度, 浸透率, 側方排水

した構造、部分的に通水機能を保有させた撥水性通気シートを利用した構造の3種類に対して、繰返し間欠的な降雨浸透実験を実施し、各々のキャピラリーバリア効果、下部粗粒層への浸透特性について検討した結果を報告するものである。

II. キャピラリーバリアのメカニズム

キャピラリーバリアのメカニズムをFig.1に示す。上図のように降雨浸透が生じて、上部細砂層と下部粗粒層の境界部に浸透水が到達しても、下部粗粒層の材料が持つ毛管力より上部細砂層の材料が持つ毛管力のほうが大きい場合下部粗粒層へは浸透しない。上部細砂層の材料の水分を保水する限界の毛管力高さまでは、下部粗粒層へ浸透せずに上部細砂層で水分が保持され、貯留する。しかし、限界毛管高さまで到達すると、上部細砂層内では水分を保持できずに境界部に貯留していた浸透水が、下部粗粒層へ徐々に浸透が開始される。

そこで、下部粗粒層へ極力浸透させないようにするためには、Fig.1 中の下図に示すように上部細砂層と下部粗粒層の境界部に勾配を設ける。勾配を設けることで、境界上部の貯留水を勾配に沿って側方へ排水させる。このように側方への排水を促進させることで、下部粗粒層への浸透、つまり廃棄物層への浸透を制御するメカニズムである。

III. 実験目的

従来からの地盤材料のみから構成された構造において、上部細砂層の材料が下部粗粒層へ混入することで、当初設計したキャピラリーバリア効果が低減する可能性がある。キャピラリーバリア効果の低減割合について繰返し降雨浸透により検討する。

また、廃棄物層への浸透量を容易に制御させるような構造や材料

の組合せの検討を目的とする。つまり、廃棄物の状態や各地域の年間平均降雨強度をもとに、所定の降雨量を廃棄物層へ浸透させることを目的として、降雨強度と下部粗粒層への浸透量との関係について検討する。さらに、上部細砂層と下部粗粒層の境界部に撥水性通気シートを敷設した構造と撥水性通気シートに部分的に通水機能を保有させた構造について、各浸透特性をそれぞれ検討した。

IV. 降雨浸透実験

1. 実験概要

Fig.2 に示すように塩化ビニル製の土槽実験装置(高さ:1000mm, 幅:500mm,奥行き:150mm)を作成し、二層構造を構成した。上部細砂層と下部粗粒層の鉛直境界部(排水口 No.4 と No.5 の間)には、鉛直境界の影響を受けないよう遮水板を200mm 設けた。また、土槽上部に水槽を設置し降雨強度を一定に維持できるようにした。降雨調整は、水槽の底面にシリンジ針を多数設置し、水頭差で降雨強度を制御できるようにした。さらに、土槽背面には電気伝導度測定用の孔隙を5cm 間隔で設けている。今回実験に使用した材料の物理特性値をTable 1に、粒径加積曲線、水分特性曲線をFig.3,4にそれぞれ示す。なお、水分特性曲線測定時における飽和含水量(PF=0)の体積含水率は0.42~0.48 である。

2. 実験条件

Table 2 に示す実験条件で、ある一定降雨強度で連続降雨させて各排水口からの水量が定常となった時点で一度停止し、土層内の飽和度が一定の状態となった後、降雨強度を上げて再び連続降雨を与える繰返し降雨浸透実験を行った。連続降雨時間は、Fig.2 に示す細粒層(排水口 No.5)からの排水を確認してから3 時間以上とした。全ての実験ケースにおいて、上部細砂層、下部粗粒層共に乾燥密度 ρ_d 1.60t/m³程度で充填させた。実験条件の詳細を以下に示す。

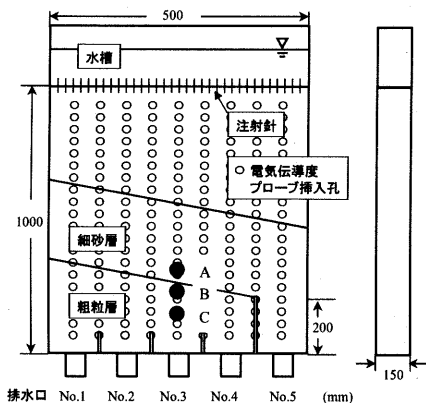


Fig.2 土槽実験装置
(Tank Experiment Device)

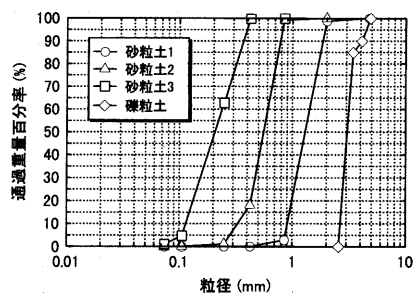


Fig.3 使用材料の粒径加積曲線
(Grain Size Accumulation Curve
of the Used Material)

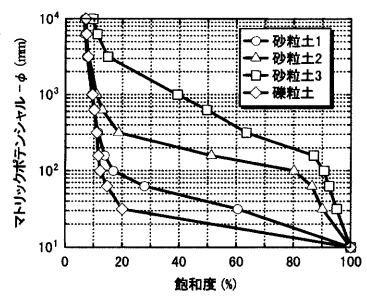


Fig.4 使用材料の水分特性曲線
(Moisture Characteristic Curve
of the Used Material)

Table 1 使用材料の物理特性
(Soil Properties of Barrier System)

	砂粒土 1	砂粒土 2	砂粒土 3	礫粒土
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.68	2.68	2.65	2.63
透水係数 k_s (cm/sec)	1.95E-02	1.74E-02	9.61E-03	4.57E-02
均等係数 U_c	1.74	1.79	1.47	0.97
曲率係数 U_c'	1.11	0.99	0.96	1.19

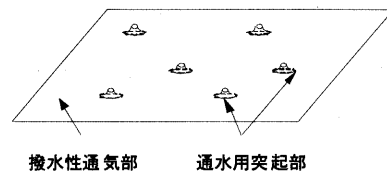


Fig.5 改良した撥水性通気シート
(Improved Geotextile Image)

Table 2 実験条件
(Experimental Conditions)

	実験構造	上部 細砂層	下部 粗粒層	細砂層厚 (mm)	勾配 (%)	開口率 (%)	突起部高さ (mm)	開口径 (mm)	シートの 飽和透水係数 (cm/sec)
Case A-1	地盤材料のみの構造	砂粒土 3	砂粒土 1	200	8.7	-	-	-	-
Case A-2			礫粒土		5				
Case B-1	撥水性通気シートを利用した構造	砂粒土 3	砂粒土 2	400	1	-	-	-	9.72E-07
Case B-2									1.63E-04
Case C-1	通水機能を保有した撥水性通気 シートを利用した構造	砂粒土 1	砂粒土 1	400	1	5	32	13.7	9.72E-07
Case C-2						1			
Case C-3						2.8	10	33	
Case C-4						1	32	13.7	
Case C-5		礫粒土	礫粒土			1	10	13.7	

(1) Case A (地盤材料のみの構造)

砂粒土の組合せから成る構造と下部粗粒層を礫粒土とした組合せから成る構造の2ケースとした。上部細砂層と下部粗粒層の各材料の組合せは、フィルター基準⁷⁾を満たすように決定した。Case A-2では、上部細砂層と下部粗粒層の鉛直境界部(排水口 No.4 と No.5 の間)の厚さを400mmとした。また、排水を促進するため、傾斜勾配はCase B,C に比べて急勾配とした。Case A-1 で、乾燥砂で作成した土層を用いて降雨浸透させて、キャピラリーバリア効果が消失するまでの現象を検証し、その効果の低減度合については、繰り返し降雨浸透させて検討した。その際、電気伝導度測定から評価したが、電気伝導度測定で得られる飽和度の値は、材料毎にキャリブレーションを行って算出した。ただし、礫粒土については砂粒土1の校正式を代用した。

(2) Case B (撥水性通気シートを利用した構造)

撥水性通気シート(以下シート)自体のキャピラリーバリア効果を利用するため、上部細砂層と下部粗粒層の境界部にシートを敷設する構造とした。シート自体の構造は、表裏がポリプロピレン不織布、中間層がポリエチレン不織布から構成されている。シートは2種類(Case B-1; 厚さ0.9mm, 飽和透水係数 K_s : 9.72E-07cm/sec, Case B-2; 厚さ0.9mm, 飽和透水係数 K_s : 1.63E-04cm/sec)用意して浸透特性をそれぞれ検討した。

傾斜勾配は1%でありCase A に比べて緩勾配とした。

(3) Case C (改良した撥水性通気シートを利用した構造)

Case B-1 に使用したシート(厚さ0.9mm, 飽和透水係数 K_s : 9.72E-07cm/sec)に、上部細砂層内の鉛直浸透を部分的に透過させるために小孔を多数設けた。さらに、シート直上細砂層部の飽和度が高く排水過程にある側方排水方向の浸透水が、小孔に流入するのをできる限り防ぐために孔の周囲に突起部を設けた。そこで、突起部の高さは、できるだけ鉛直浸透成分のみが下部粗粒層へ浸透するように決定した。Fig.3 に示す使用材料(砂粒土1)の水分特性曲線から、飽和度60%のマトリックポテンシャル値である32mmの高さのものとはほぼ飽和状態と考えられる10mmの高さのもの、の2パターンを用意した。改良したシートの概念図をFig.5に示す。

Case C-1~3 では、突起の高さと開口率の関係について検討した。改良したシートの削孔部の径は13.7mm, シートに対する孔隙部の比率(以下開口率)は1%,5%の2パターンとした。

Case C-4 では、突起部の開口径の違いによる浸透量の影響について検討した。開口径33mm とほかのケースの約2.4倍としたものを用いて試験を行った。

Case C-5 では、改良したシートを実施工で敷設する場合を想定した。施工の際、突起部の高さはできるだけ低くするほうが敷設しやすいため、シート上面の材料に応じて開口率を調整するか、又はシート上面の材料をより保水性の小さいものを使用するかである。本ケースでは、後者のシート上面の材料をほかのケースより保水性の小さい礫粒土を用いて検討した。その他の物性は、Case C-3 に準拠している。

3. 実験結果

(1) Case A (地盤材料のみの構造)

a. キャピラリーバリア効果の低減作用

Case A-1 の条件でキャピラリーバリアの低減作用について検討した。降雨浸透時の上部細砂層と下部粗粒層との境界部の飽和度の結果(測定点の位置; Fig.2 参照, 凡例に示す数値は境界部からの距離を示す。)をFig.6 に示す。降雨強度を約10mm/hとしたTrial-1,2では、境界部分の粗粒層に設置した計測点Bをみると、飽和度が上昇している。これは、土層を乾燥状態で締め付けたために、粗粒層の材料が持つ毛管力が作用したものと考えられる。一方、境界部より10cm離れた計測点Cでは水分が到達しておらず飽和度は上昇していない。Trial-3で降雨強度を約20mm/hに上昇させたところ、下部粗粒層の飽和度が40~60%上昇し、水みちができて破過した現象を目視で確認した。しかし、降雨停止させたところ下部粗粒層の飽和度は低下しており、キャピラリーバリア効果が低下する上部細砂層から下部粗粒層へ水分移動が生じた際にのみ一時的に飽和度が上昇する傾向が見られた。また、Fig.7 に示すように、キャピラリーバリアが一度破過するまでの粗粒層への浸透量(Trial-1,2)は、その後の浸透量と比較して約2倍多く、その後繰り返しほぼ同じ程度の降雨強度で浸透させても、粗粒層への浸透量(Trial-4,6)はほぼ同じであった(一部Fig.8参照)。上部細砂層の飽和度(計測点A)は、降雨浸透の有無に関係なく約50%であった。一方、Case A-1,2における降雨強度がそれぞれ22.7mm/h, 28.2mm/hで細砂層からの排水量が定常状態時の土層内全体の飽和度分布図をFig.8に示す。両ケースとも上部細砂層と下部粗粒層との境界部分全体で飽和度が大きく異なっている様子が分かる。なお、Case A-1の下部粗粒層の底面で飽和度

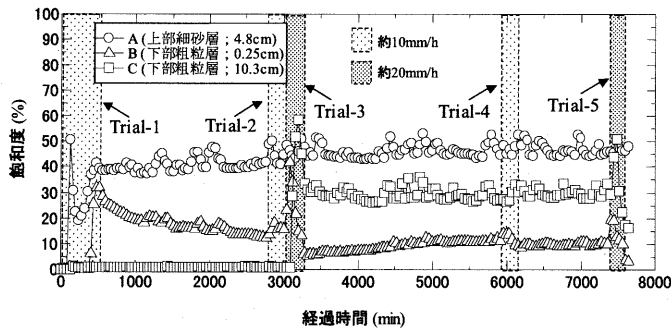


Fig. 6 Case A-1の飽和度の経時変化
(Measured Water Content in Case A-1)

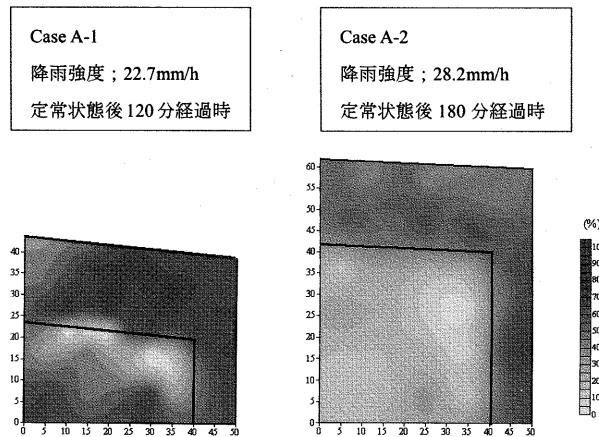


Fig. 8 Case Aの飽和度の飽和度分布図
(Water Content Distribution in Case A)

が高いのは、排水効率が悪かったためである。

ここで、Case A-2におけるキャピラリーバリア効果の低減の度合いを、降雨強度毎の各排水口からの排水強度で表し、その結果をFig. 9に示す。遮水壁や壁面の影響が比較的小さい排水口 No. 2, 3を見ると、鉛直境界部より離れた位置にある No. 2 のほうが排水流量は多い。斜面長を長く採ると、下部粗粒層への浸透量は増加するとの報告⁷⁾もあり、本実験での斜面長は 40cm 程度だが、これより長く採る場合は廃棄物層への浸透量も増加すると思われる。

b. 浸透特性

各種構造における降雨強度と降雨強度に対する下部粗粒層（廃棄物層を想定）への浸透量の比率（以下浸透率）の関係を Fig. 10～13 に示す。なお浸透率は、砂層（排水口 No. 5）からの排水量が定常となって約 3 時間後の排水量と降雨強度から算出している。実験結果については、下部粗粒層への浸透量が降雨強度の 10% を目標とする仮定のもとに検討する。Case B, Case C についても同じ仮定のもとに検討する。

Fig. 10 に示すように、Case A-1, Case A-2 は下部粗粒層の材料が異なるが、両者の下部粗粒層への浸透特性は大きく異なっている。Case A-1 では降雨強度 10mm/h 程度で、Case A-2 では降雨強度 30mm/h を超過すると下部粗粒層へ浸透を始める。すなわちその値以下ではキャピラリーバリア効果により下部粗粒層へ浸透はほぼ発生しない。一度浸透が開始されると浸透率は降雨強度が増すとともに大きくなり、その傾きも大きくなる。このことは下部粗粒層への浸透が一度

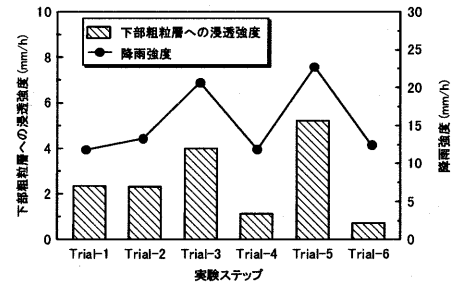


Fig. 7 降雨強度と下部粗粒層の浸透強度の関係(Case A-1)
(Relation of Rainfall and Infiltrate mounts into Lower Layer of Capillary Barrier(Case A-1))

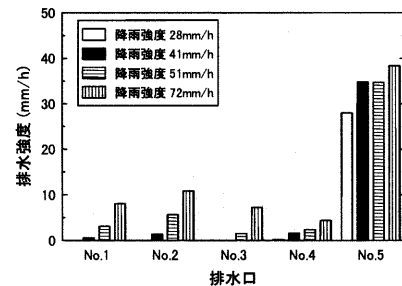


Fig. 9 各排水口の排水強度(Case A-1)
(Drain Strength of each Drain Point in Case A-1)

始まると過大な浸透が発生することを意味しており、下部粗粒層への浸透量を一定以下に制御（設計）することは難しいものと考えられる。

(2) Case B (撥水性通気シートを利用した構造)

Fig. 11 に示すように、飽和透水係数が 2 オーダ以上異なる撥水性通気シートを使用しても、降雨強度約 40mm/h 以下では下部粗粒層へ浸透しない結果となり、Case A に比べて大きなキャピラリーバリア効果が得られた。その理由として、シートが飽和状態とならないため、浸透が抑制されたものと思われる。これは、例えば集中豪雨のように一時的に大きな降雨強度が生じた場合に限り、廃棄物層へ浸透することを意味する。しかし、浸透開始後（キャピラリーバリア効果消失後）の下部粗粒層への浸透率が降雨強度とともに増していく傾向は Case A と変わらない。また、浸透率の増加傾向自体もばらつきが大きく不安定となっており、浸透量を制御することは困難である。浸透する割合はシートの透水係数が大きい Case B-1 のほうが降雨強度に対する浸透量は大きくなる結果を得た。これより、本使用シートよりさらに透水性の大きなものを使用したとしても、浸透率のばらつきが大きくなり、下部粗粒層への浸透量を制御することが難しくなることが予想される。

(3) Case C (改良した撥水性の通気シートを利用した構造)

Case C-1～3 の降雨浸透結果を Fig. 12 に示す。まず、通水機能部分の突起部の高さを 32mm とした Case C-1, C-2 を比較すると、下部粗粒層への浸透率は降雨強度に係らずほぼ一定となった。開口率

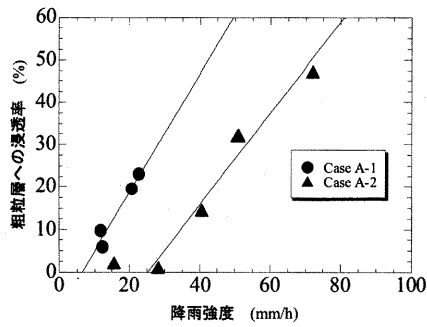


Fig. 10 Case Aの降雨浸透結果
(Rainfall Infiltration Result in Case A)

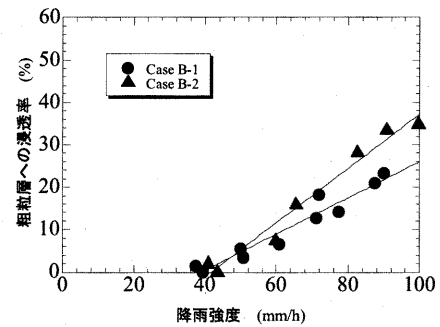


Fig. 11 Case Bの降雨浸透結果
(Rainfall Infiltration Result in Case B)

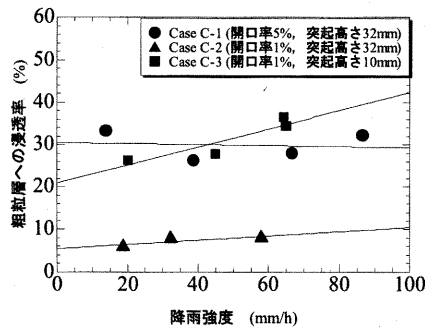


Fig. 12 Case C-1,2,3の降雨浸透結果
(Rainfall Infiltration Result
in Case C-1,2,3)

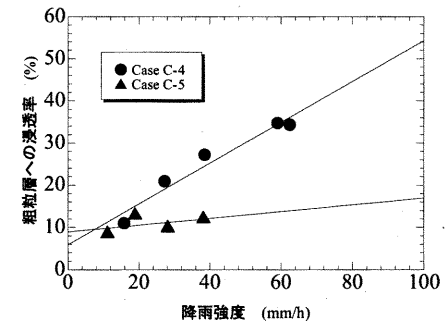


Fig. 13 Case C-4,5の降雨浸透結果
(Rainfall Infiltration Result in Case C-4,5)

5%のCase C-1で浸透率28~32%程度、開口率1%のCase C-2で浸透率5~10%程度であり、開口率に比例した結果となった。即ち開口率を制御することにより廃棄物層への浸透率を制御できるといえる。つまり、下部粗粒層への浸透率が一定となることで、対象とする処分場の地域の平均的な降雨量に応じた設計が容易となる。一方、突起部の高さを10mmとしたCase C-3では、同じ開口率1%であるCase C-2と比較すると、下部粗粒層への浸透率は3~4倍程度大きい。これは、シート上面の飽和度の高い領域における側方排水方向の水分量が突起部の孔隙への浸透に影響を与えたものと考えられる。また、降雨強度40mm/h以上の浸透率が増加しているのは、シート自体が飽和状態となって浸透率が増加したものと考えられる。

Case C-4,5の降雨浸透結果をFig. 13に示す。開口径を13.7mmから33mmとスケールアップさせたCase C-4では、下部粗粒層への浸透率が降雨強度と共に増していく傾向が見られる。浸透率の増加傾向自体は、Case Aと比べるとばらつきが小さいものの不安定となっており、若干浸透量を制御し難い結果となった。上部細砂層に礫粒土を使用したCase C-5では、下部粗粒層への浸透量は降雨強度に係らず浸透率が10%程度でほぼ一定となった。

これより、シート上部の材料に応じて、開口率や突起部の高さを調整することで、下部粗粒層への浸透を制御することが可能であるといえる。つまり、本構造は廃棄物の状態やそれぞれの地域の年間平均降雨量をもとに、所定の降雨量を廃棄物層へ浸透させることができるシステムといえる。

IV. まとめ

廃棄物処分場内の早期安定化を図るために、適度な水分量と空気量を供給する準好気性の概念を具現化する処分場構造が日本では求められている。そこで、自然材料である地盤材料の毛管力の差を利用して比較的透水性の高い材料で不飽和の鉛直浸透を制御できる可能性のあるキャピラリーバリア効果に着目し、ある程度の透気性を確保し、なおかつ、例えば降雨量の10%を廃棄物層内部へ供給するといった制御が可能かどうかについて検討を行った。

まず、地盤材料のみ、すなわち上部細砂層と下部粗粒層の材料を組み合わせたキャピラリーバリア構造について検討を行った。この構造では、浸透の発生と共に上部細砂層の材料が下部粗粒層内へ移動・混入し、キャピラリーバリア効果が徐々に低減する可能性が懸念されたため、降雨を繰り返して間欠的に発生させて、下部粗粒層への浸透量の変化について調べた。その結果、本実験の範囲内では、下部粗粒層への浸透量は同じ降雨量に対しては常に同じ浸透量となりこのような問題は発生しなかった。しかしながら、境界部では上部細砂層の材料が下部粗粒層に徐々に混入していく様子も観察され、本構造の長期安定性については疑問が残る結果となった。

次に降雨強度に応じて下部層への浸透する量を意図的、計画的に制御できるかどうかについて、地盤材料のみの構造、各種のジオシンセティックライナーを挟んだ構造についてそれぞれ検討を行った。

地盤材料のみの構造では、下部粗粒層、つまり廃棄物層への浸透量は降雨強度に対する浸透率にばらつきが大きく、廃棄物層への浸

透量を計画的に制御することは難しい結果となった。また、撥水性通気シートが持つキャピラリーバリア効果のみを利用した構造についても同様の検討を行ったが、通常の撥水性通気シートではシート自体の持つ高いキャピラリーバリア効果によって降雨強度 40mm/h まで廃棄物層へ浸透が発生せず、一度キャピラリーバリア効果が消失し、浸透が発生すると、廃棄物層へ大量の浸透が発生し、また量にもばらつきが見られ、意図的に制御することは困難であると考えられる。さらに、撥水性通気シートに部分的に通水機能を保有させた新構造とした場合について検討したところ、通水部分の突起部の高さを地盤材料の保水性に応じて決定し、なおかつ開口率を調整すれば、シート自体の高いキャピラリーバリア効果で側方排水を促進させ、かつ廃棄物層への浸透量自体も任意の浸透率に容易に制御できることが分かった。

以上より廃棄物処分場の準好気性を保つためのキャピラリーバリア効果を具現化するためには、地盤材料のみ構造では定量的な設計に耐えうる構造とすることは困難であり、撥水性通気シートを改良する方法が有効であることが明らかになった。

参考文献

- 1) 一般廃物処分場における処理の適正化について、厚生労働省ホームページ <http://www1.mhlw.go.jp>, 1998
- 2) 平成 14 年度研究報告書, 最終処分場技術システム研究会, 2003.
- 3) 廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領, 社団法人全国都市清掃会議, 2002.
- 4) Stephen, F. D. ; Alternative landfill covers pass the test, Civil Engineering, Vol. 68, No. 9, (1998), pp. 50-52.
- 5) 鈴木正人, 瀬尾有一, 田中信寿, 田中勝・大迫政浩; キャピラリーバリアを利用した降雨浸透制御型処分場の開発(その 2), 第 8 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, (1997), pp. 840-842.
- 6) 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, No. 692, VII21, (2001), pp. 51-62.
- 7) 日本道路協会, 道路土工, 道路排水工指針, 丸善, 1979, pp. 99-100.
- 8) 宮崎毅, 傾斜キャピラリーバリアーの限界長に関する研究 農業土木学会論文集, 1995, No. 179, pp. 49-56.