



Title	キャピラリーバリアを利用した廃棄物処分場排水システムの開発
Author(s)	東條, 安匡; 松藤, 敏彦; 田中, 信壽 他
Description	第7回衛生工学シンポジウム (平成11年11月11日 (木) -12日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 2 廃棄物 2 . P2-5
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 7, 59-63
Issue Date	1999-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7265
Type	departmental bulletin paper
File Information	7-2-5_p59-63.pdf



2-5

キャピラリーバリアを利用した廃棄物処分場排水システムの開発

東條安匡、松藤敏彦、田中信壽、松尾孝之、相楽光宏(北海道大学)

1.はじめに

最終処分場が周辺環境へ与える影響を低減するためには浸出水の適正な管理が極めて重要である。しかしながら、国内で顕在化している処分場建設に反対する住民運動の多くは、浸出水の管理に対する不信感に根ざしたものが多く、こうした事態は、現状の技術や管理手法が十分な信頼性を持って答えられていないということに起因している。最終処分場における浸出水の漏洩対策は、遮水工に高度な漏洩防止技術を採用する事に加えて、遮水工に到達する水分を最小化する事、すなわち遮水工上における水分の貯留を防ぎ、浸出水が外部に漏洩するエネルギーを最小化することが重要であると考えられる。浸出水の内部貯留を防ぐには、処分場表面に不透水性のトップカバーを敷設するという手段も取り得るが、埋立期間中には採用できないことや廃棄物の安定化に対する影響等についての十分な議論が必要である。すなわち、埋立期間中を含めて現実的な方法とは、廃棄物層内に浸入した雨水を如何にして底部に到達させることなく迅速に排除するかであると考えられる。そこで、本研究では、処分場底部にキャピラリーバリアを用いた水分排除構造を設けることを提案し、その実現可能性について実験、数値計算から検討した。

2.キャピラリーバリアの原理

キャピラリーバリアとは、図 1 に示すような粗粒土層上に細粒土層を配した2層構造から成る。こうした2層構造において細粒土層上部から浸入した水分は、上下層の毛管力の差によって上部の細粒土層内に保持される。上部層内の水分量が毛管力に打ち勝って下方浸透を開始する程度にまで増大しない限りは下部層への水分移動は生じない。従って、この上部層内に水分が保持された状態で境界面を傾斜させることにより、水分は上部層内を側方移動して排除することが可能になる。

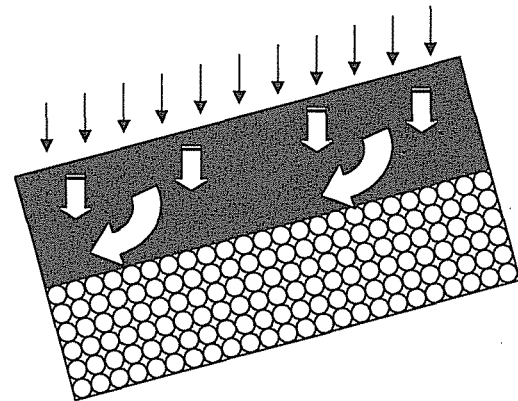


図 1 キャピラリーバリアの原理

3.既往の研究

キャピラリーバリアは、毛管力の異なる2層が傾斜した状態で互層を成す条件であれば必然的に機能するため、自然界に於いても成層を成している土壤の境界近傍では類似の現象が発生することが伝えられている。一方、渡辺は埼玉県内の数百の古墳を調査し、多雨の我が国に於いても良好な保存状態を維持している古墳には、その周囲に粗粒土、細粒土の互層構造が築かれており、それがキャピラリーバリアとなって内部への水分の浸入を抑止したためであると報告している。キャピラリーバリアが水分制御のための技術として再度注目されたのは、1970年代後半からであり、主に放射性廃棄物保管場の周辺構造を対象として欧米各国で研究が開始されている。その後、理論的、実験室規模の実験が進み、昨今では、放射性廃棄物や有害廃棄物保管場のトップカバーとして性能を確認する為の現場実証試験が数多く実施されている。

しかしながら、キャピラリーバリアを実際に設計するための十分な理論は未だ確立されていない。Ross はバリアの限界排水能力を上部細粒土層の飽和透水係数、勾配、及び毛管吸引力から導く単純な関係式を得ているが、その後の様々な研究で、現実のバリア内水分移動は複雑で、Ross 式では評価できない面が多いということが報告されている。そのため、有限要素法や差分法などを駆使した数値シミュレーションが試みられているが、下部層の水分移動特性の表現方法については、特に課題が多

いとされている。

4.実験の概要

表 1 試料の物性値

	比重 Gs	代表粒径			均等係数 Uc	曲率係数 Uc'	飽和透水 係数Ks
		D ₁₀ [mm]	D ₃₀ [mm]	D ₆₀ [mm]			
砂	2.7	0.24	0.39	0.9	3.75	0.70	0.02
碎石	2.63	5.5	7	10	1.82	0.89	8

4.1 試料

キャピラリーバリアを構成する材料として、上部層用試料には砂を、下部層用試料には碎石を用いた。各試料の粒度分布を図 2 に、比重、飽和透水係数、その他粒度特性値を表 1 に示す。2層が安定しているための必要条件は、水分移動に伴って細粒土試料が粗粒土層内に移動しないことであるため、アースダム等で用いられるフィルター則を満足することを条件に試料を選択した。用いた砂試料は、粒度分布の比較的良い試料で、飽和透水係数は**0.02cm/s**であった。一方、下部層用の碎石は単粒土碎石 6号で、粒度はほぼ均一であり、**50%粒径約 10mm**と粗大間隙が多い試料であった。土柱法により水分特性曲線を測定した結果を図 3 に示すが、砂試料は、粒度分布がなめらかで、飽和毛管帯も緩やかに上昇する傾向を示し、飽和毛管帯の高さは概ね **10cm** 程度であった。一方、碎石試料は、粗大間隙が大半であるため、毛管帯はほとんど確認されず、下部からほぼ垂直に立ち上がる性状を呈した。また、残留水分も約 **4%**で、表面吸着水のみであると考えられた。

4.2 実験装置

実験は図 4,5 に示す小規模装置、及び大規模装置を使用した。

(1)小規模装置

実験装置は図 4 に示すようなアクリル製の直方体で、高さ **70cm**、奥行き **15cm**、幅 **60cm** である。下部は高さ **15cm** の仕切版により **11** 個に仕切られており、下端に流出口を設けた。上部には降雨装置として **22** 本の注射針を配置し、下側タンクからポンプで上側の圧力タンクに送水し、加圧することで水分が土層表面に供給されるようにした。また、底部の片側にあるジャッキによってカラム全体に傾斜をつけることが可能なものとした。

(2)大規模装置

一方、大規模装置は、幅 **4m**、奥行き **1m** の鉄製土台の上に、幅 **350cm**、奥行き **20cm** の土層を作成するもので、層の両面に高さ **20cm** のアクリル製板を積み重ねながら側壁を形成し、その内部に試料を充填していく方式とした。装置上部には、塩ビパイプに注射針を **40** 個配置し、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た。また、小規模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。

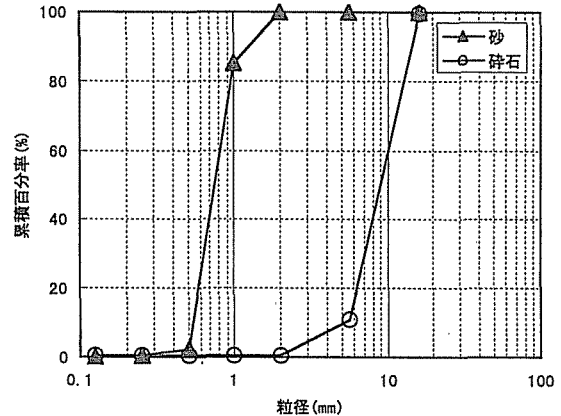


図 3 試料の粒度分布

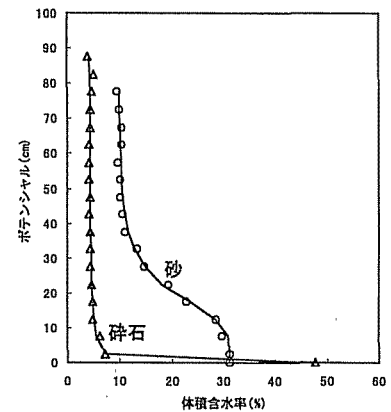


図 2 水分特性曲線

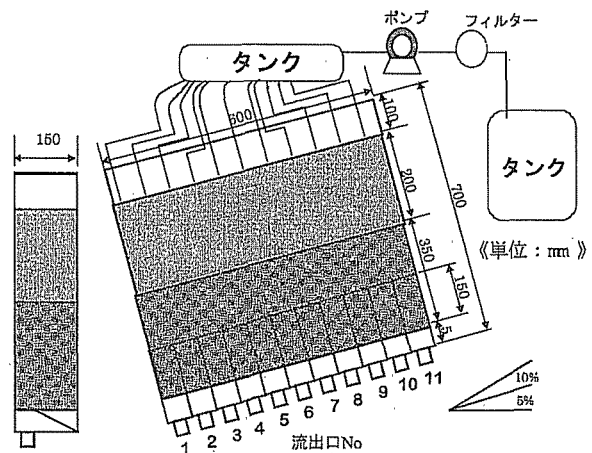


図 4 実験装置図 (小規模)

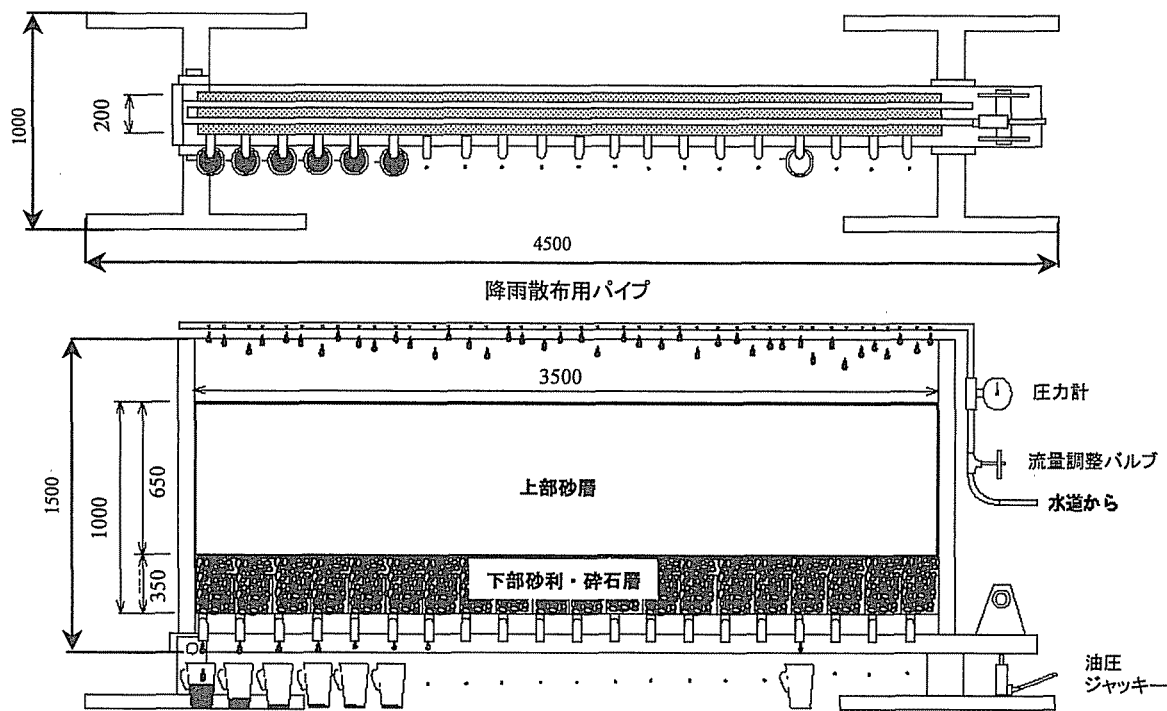


図 5 実験装置図 (大規模)

4.3 実験の概要

小規模実験, 大規模実験いずれも図 6 に示す2種類の構造を採用して実験を行った。充填は, 5cm 毎に試料を締め固めながら行った。特に上下層境界面は平坦になるように注意して充填した。小規模実験では, 予定の高さまで充填が完了した後, 装置下端から注水し, 一旦層内を飽和させ, その後排水して数日放置して層内の水分移動が停止した時点から降水を開始した。大規模実験は, 装置の構造上, 飽和させることができなかったため, 充填完了後, 一定期間放置した後, 一定降雨強度で数日間降水を続け, 一様な水分分布になるようにした。



図 6 充填構造

小規模実験, 大規模実験の各実験条件を表 2 に示す。実験は勾配を3段階, 各勾配について降水量を3段階に変化させた。

4.4 実験結果

1) 小規模実験結果

構造 A, 構造 B それぞれの定常時流出分布を図 7 に示す。

図 7 は横軸が実験装置の流出口番号, 縦軸が定常時の流出流速である。また, 各図中の 3 本の棒グラフはそれぞれ流量の異なる実験結果を表している。図中の実線は後述する数値計算結果を表している。構造 A では, 勾配 0%での水分流出は不規則であり, 排水効果は全く見られないが, 勾配を 5%, 10%と増大させていくことにより, 徐々に流出が下流側に集中ようになる。一方, 同一勾配における流量の変化は, 流量が増大するほど, 上流側(流出口 No.1)以外で流出する水量が増大する傾向にある。構造 A では, 勾配を 10%まで増大させても流出口 No.1 からの流出割合は全供給水量の 4 割以下であり, 残りの 6 割強が No.1 以外で流出している。これを処分場底部で考えると, 集排水管に誘導する前に遮水シートに到達する水分が約 6 割存在するということを

表 2 各実験の条件

小規模実験				
構造	勾配	上部供給水量 (mm/h)		
構造A	0%	10.5	28.6	44.0
	5%	11.5	30.5	47.6
	10%	11.6	29.6	47.7
構造B	0%	8.1	26.7	44.3
	5%	8.1	26.3	42.5
	10%	8.0	26.8	40.3
大規模実験				
構造	勾配	上部供給水量 (mm/h)		
構造A	5%	12.0	20.0	35.6
	10%	8.5	29.0	37.5
	構造B	0%	11.3	18.3
	5%	10.3	28.1	45.9
	10%	14.2	21.4	43.2

意味する。

構造 **B** では、勾配 **0%** の時点から流出口 **No.1** に流出が集中しており、勾配を増大し、流量を減少させるほど下流端からの流出割合が増加し、ほぼ **100%** となる。最も不利な条件である勾配 **0%**、流量 **44mm/h** でも、約 **6** 割が流出口 **No.1** から流出している。構造 **B** は、流出口 **No.1** に上部砂層を引込んだ為に、層内のポテンシャルの基準面が最下端まで下がり、その結果、境界面ポテンシャルが低下してより多くの水分を保持できるようになったことが排水効果の上昇につながったと考えられる。実際に処分場底部で用いる場合には流末に集排水管が位置することになるために構造 **B** が現実的である。すな

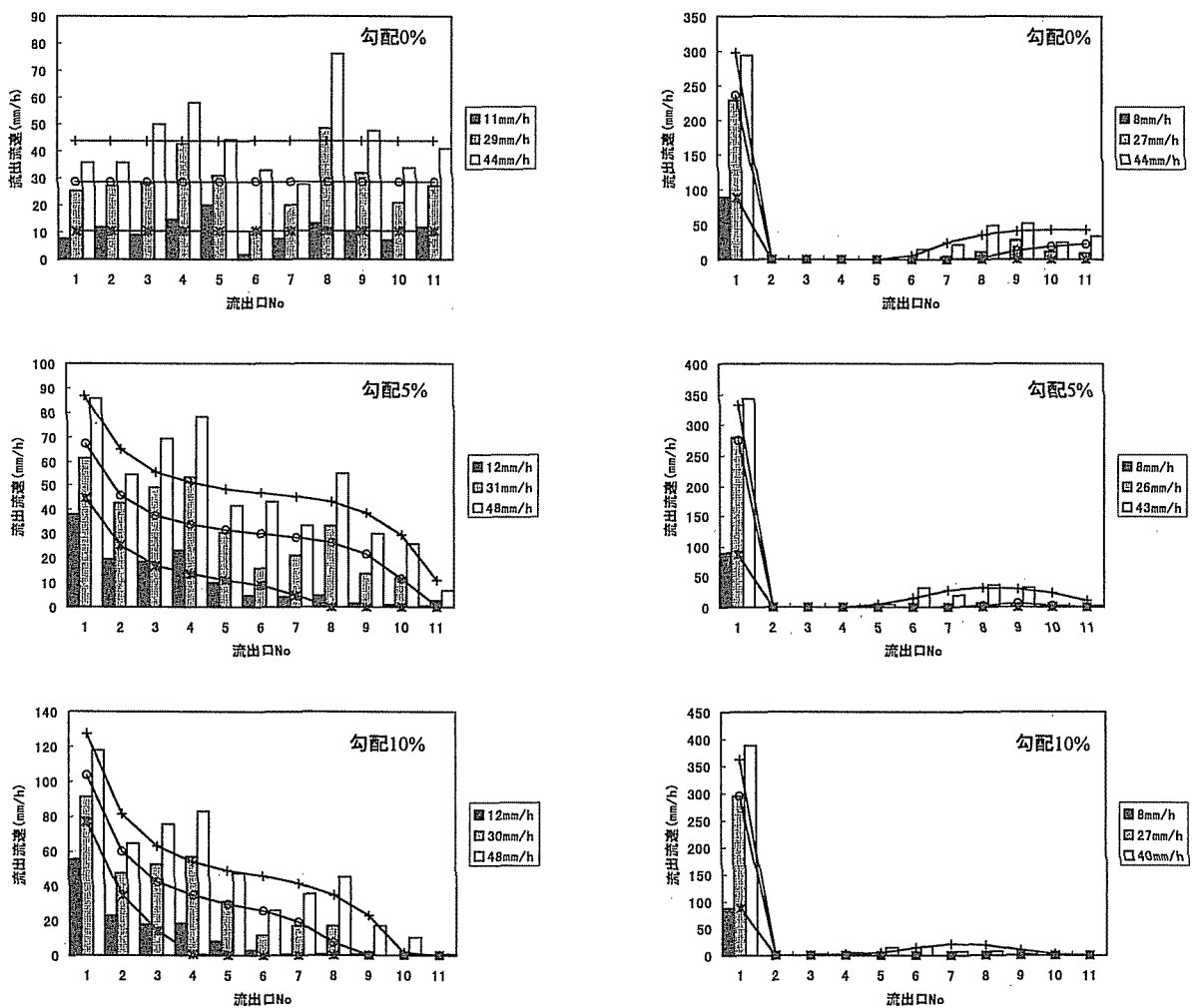


図 7 小規模実験の定常時流出分布

わち、最下流端を下げる構造をとることで十分な排水効果が得られることが小規模実験から明らかになった。

2)大規模実験結果

大規模実験に関しても構造 **A**、構造 **B** について実験を行ったが、小規模実験の結果から構造 **B** が排水効果に優れ、且つ現実的であると考えられたことから、構造 **B** の実験結果のみを図 **8** に示す。小規模実験では著しく排水効果が高かった構造 **B** であるが、図 **8** に示すように小規模実験とほぼ同程度の降雨強度であるにも関わらず、下流端流出口からの流出割合が著しく低下し、上流部での流出が増大していることが確認できる。下流端の引き込み深さはいずれも **35cm** であり、境界面のポテンシャルは斜面距離の長い大規模実験の方が下がるために、保持可能な水分量は大規模の方が多いと考えられる。しかし、それに反して、大規模化で著しく排水効果が低下しているのは、降雨を受ける面積が増大す

ることでバリアが負担する水分総量が排水能力に大きな影響を与えていると推察される。

3) 流量変化実験

そこで、降雨強度ではなく、降雨水を受ける面積も考慮した総水分量で大規模実験と小規模実験での排水効果の違いを定量的に把握することを試みた。実験は、水分総量(降雨強度×斜面長さ)が同様になるように降雨強度を設定して行った。例えばバリアが負担する総水分量を $100\text{cm}^3/\text{h}/\text{cm}$ とした場合、小規模実験では降雨強度 $16\text{mm}/\text{h}$ に相当し、大規模実験では $2.8\text{mm}/\text{h}$ となる。両実験規模の結果を図 9 に示す。図 9 は横軸がバリアに負荷される総水分量であり、縦軸が排水効率であるが、水量の増大が排水効率に大きな影響を与えていることが確認できる。

5. 数値解析

飽和不飽和浸透理論を元に、数値シミュレーションを行い、実験結果の再現を試みた。各試料の1次元、2次元単層実験を個別に行い、それぞれの鉛直方向、水平方向の水分移動モデルを作成し、それを2層傾斜モデルに拡張した。上部砂層は毛管ポテンシャルモデルで表現し、下部砂利層は膜状流れモデルで表現した。また互層境界面の境界条件は互層の土柱法を実施し、その結果得られた境界面ポテンシャルを採用した。各計算結果は実測値のグラフに実線で示したが、概ね良好な一致を確認することができた。

そこで、流量変化実験で、各規模実験で **100%**の効率となる水量を本計算モデルを用いて検討した。図 9 中の実線がその結果であるが、大規模、小規模両実験とも、排水効率が **100%**となるのは、約 $100\text{cm}^3/\text{hr}$ である。実際の処分場の底部にバリアを導入した場合、斜面距離は **20m** 程度になると考えられる。その場合、前記の検討結果から、浸入水の **100%**を排除することを考えるならば、限界の流速は約 $0.5\text{mm}/\text{h}$ となる。すなわち、これ以下の流速で底部に到達してきた水分は **100%**バリアにより集水管に誘導可能である。我が国の年間降水量を 1500mm とし、それが、定常的に降ったと考えると、約 $0.2\text{mm}/\text{h}$ である。したがって、バリアの機能を確実に発揮するためには降雨変動を如何にして小さくするかということが課題となる。

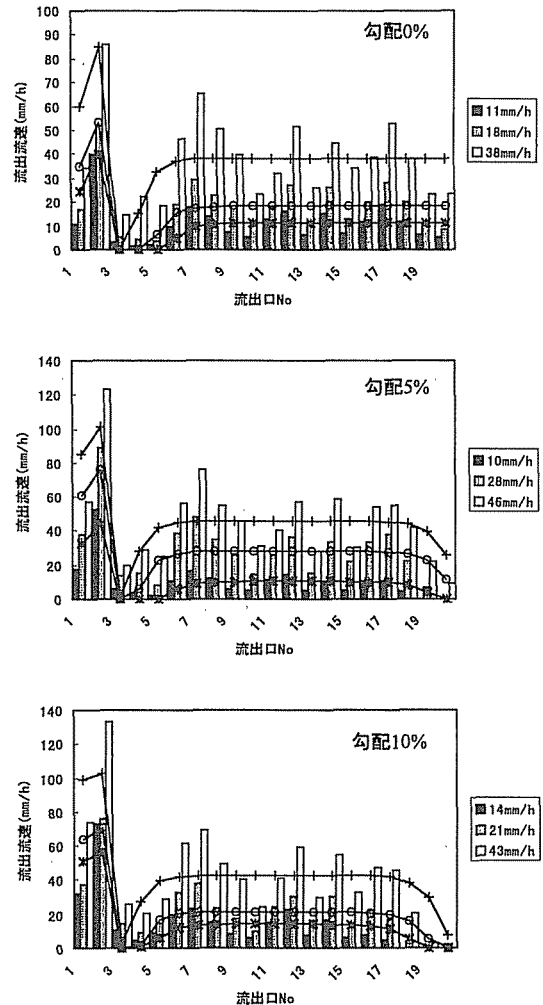


図 8 大規模実験の定常時流出分布

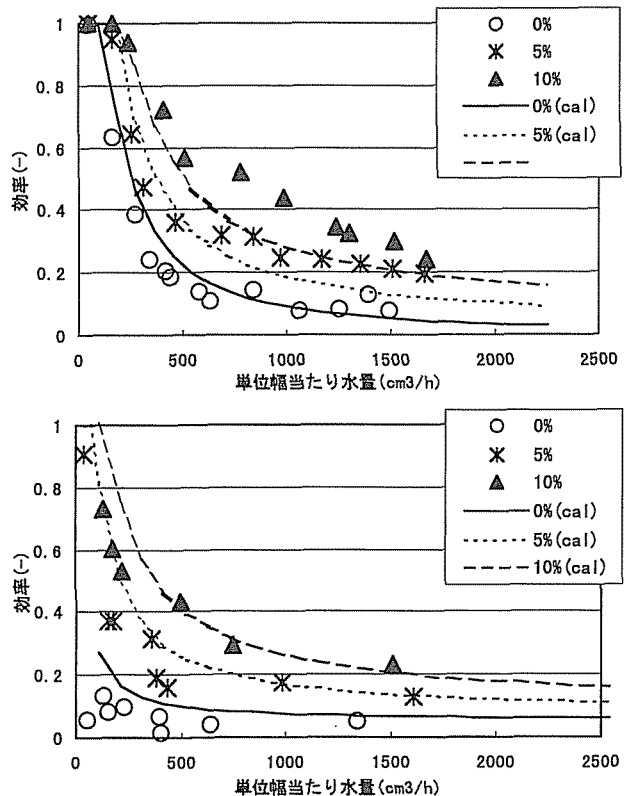


図 9 流量と排水効率の関係