

## 多層地盤内への降雨浸透とその制御法

## Infiltration into the Layered Soil and its Seepage Controlling Methods

西垣 誠 \* (Makoto Nishigaki)

梅田 美彦 \*\* (Yoshihiko Umeda)

河野 伊一郎 \*\*\* (Iichiro Kono)

産業廃棄物の処分等において、人工盛土内に水平層を設け、降雨水をすみやかに排水する工法が用いられる。水平層として、難透水層と透水層が考えられるが、水の蒸発による水分移動を考慮すると透水性の水平ドレーン層を用いるのが有利である。しかし、ジオテキスタイル等の水平ドレーン層による降雨水の排水機構については現在まだ説明されてはいない。本報告では、水平ドレーン層の排水機構を説明することを目的として、標準砂ジオテキスタイル、およびジオメンブレンを用いて実施した室内降雨実験について述べた。実験ではこれらの材料で多層傾斜地盤を形成し、砂層内の負圧と排水量を測定した。その結果、透水層でも難透水層でも同様な遮水効果があることが分った。また、透水層による遮水効果について考察を行い、上下層の不飽和浸透特性から遮水効果を説明した。

キーワード： 降雨、止水、室内実験、浸透、毛管現象、土中水、排水、不飽和土 D-4 E-7

## 1. はじめに

斜面へ浸透した降雨をすみやかに排水する目的で、人工盛土内に透水性の高い水平ドレーン層を設ける工法が用いられている。近年では、特にジオテキスタイル工法の発達により、これらの水平ドレーン工法が頻繁に施工されている。しかし、これらの工法での排水ドレーンの機能の評価は、飽和状態についてのみで、不飽和状態については、まだ、それほど定性的にも定量的にも多くなされていない。

本研究では、これらの水平方向のドレーン工法の機能について実験的に検討し、人工盛土内に降雨を浸入させない排水工法について論述する。すなわち、図-1のように各種の産業廃棄物を埋設処分した際に、降雨の浸透により、浸透水が廃棄物に触れると、汚染物質を溶解して、地下水汚染等の社会的な問題を引き起こす。したがって、浸透水が廃棄物に触れる前にすみやかに排水する工法を開発しなければならない。降雨浸透水を制御する方法としては、処分場の上部に図-2のように難透水層を設けるか、高透水性の排水層を設ける方法が提案される。これらの中で難透水性の層を処分場の上部に設ける事は、実際に降雨浸透を遮蔽して一見、きわめて有効のように思われるが、地表面で蒸発がある時には、難透水層が粘土層である時には、処分場から逆に汚染物質をサクシオンにより引き上げてくるため、地表近くまで汚染が拡大する事がある。このような現象を防止するため、難透水層として人工のジオメンブレンによって遮水する工法も考えられるが、ジオメンブ

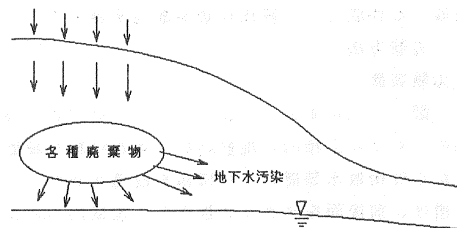


図-1 各種廃棄物の地下水汚染

図-1 各種廃棄物の地下水汚染

\* 岡山大学工学部土木工学科 助教授

\*\* 岡山大学自然科学研究科(日本国土開発院)

\*\*\* 岡山大学工学部土木工学科 教授

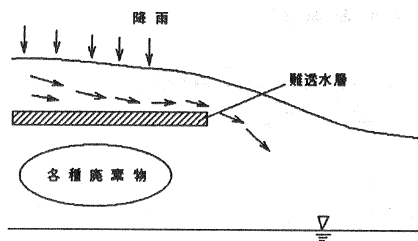


図-2(a) 難透水層による降雨浸透の制御

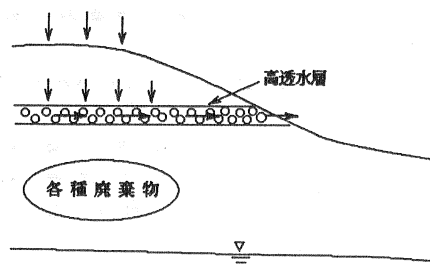


図-2(b) 高透水層による降雨浸透の制御

レンの長時間（廃棄物が放射性物質の時は数100年の間）の機能の信頼性がない。

一方、高透水層を処分場の上部に設置する工法は、盛土内の排水工法として良く用いられる方法で、ジオテキスタイルが用いられることが多い。しかし、このような人工素材は長期間の信頼性とばしいため自然の砂礫層を設置する工法が一般に採用されようとしている。ただし、このように上部に細粒層、下部に粗粒の排水層がある場合の排水挙動については、まだ解明すべき点が残されている。また、この高透水層は、地表部が乾燥して、地下水の動きが地下から地表に向かう場合にも、この部分で毛管が切れるため、水の上昇が抑えられ、処分場の汚染物質を地表まで引き上げるのを防ぐためきわめて有効である。下部に粗粒層を配置することによって上部の細粒層内で水を遮断する考えはキャピラリーバリアと呼ばれ、1960年代にPalquist等によって提案されており<sup>1)</sup>、低レベル放射性廃棄物の浅層地層処分へ適用されようとしている。

高透水層によって、降雨の下部への浸透を制御する方法は、古墳時代より考えられており、多くの古墳が図-3に示すように古墳内を乾燥状態に保つために上部に高透水層を設けている。しかし、この場合には、盛土の排水層のように高透水層を傾斜して設けておらず、古墳の周囲を覆うだけの構造である。このような構造でなぜ、降雨が古墳内に浸透して来ないかについては、まだまだ正確な科学的な説明がなされていない。

本研究では、多層構造をしている地盤内での降雨の浸透状況を種々の条件で室内実験によってモデル実験を行い、その結果より、盛土の水平ドレーンの機能や廃棄物処分場の降雨浸透制御について考察する。

## 2. 降雨浸透実験

### 2.1 実験の目的

多層地盤内に浸透した降雨がどのように挙動をするかを定量的にとらえるために、2層モデル（上部が細砂、下部が粗砂）を作成して、降雨浸透実験を実施した。

### 2.2 実験方法

#### (1) 実験装置

実験は、図-4に示すような長さ76.5cm、奥行き9cm、高さ56cmの亚克力土槽内に地盤材料、遮水材料を設置し、上端から降雨散水装置により降雨を浸透させた。

実験土槽は、前後面を亚克力板とし、地盤内への水の浸透状況を観察できるようにした。土槽後面は、間隙水圧計を設置するため等間隔に穴を開け、任意の場所で水圧測定ができるようにした。また、底盤と右下流側壁は土中の間隙空気が自由に入出力できるように金網を使用した。

降雨散水装置は、点滴用の装置を等間隔に穴をあけた幅10cmの亚克力板に差し込んで作製した。この装置を土槽上左端に設置し、定水頭で100cm<sup>3</sup>/minの定量水を土槽内へ供給した。

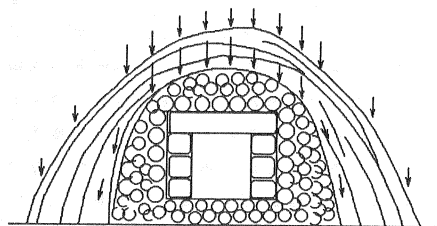


図-3 古墳内の石積み構造例

実験地盤は、密度を一定にするためロートに砂を充填し、砂面から30cmの高さから自由落下させて作製した。

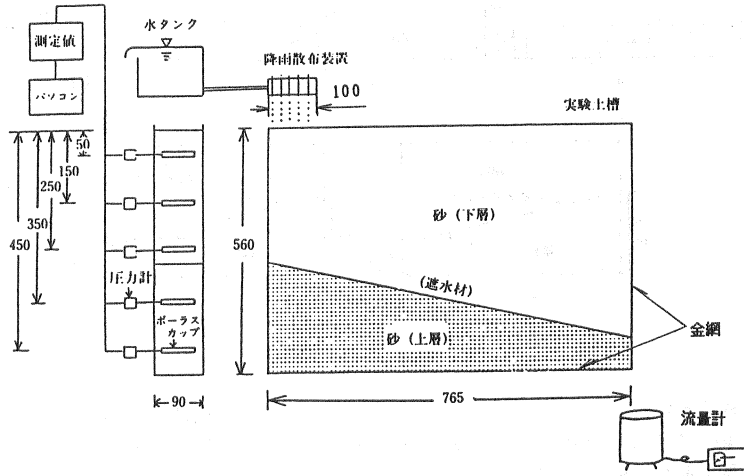


図-4 実験装置 (単位mm)

(2) 使用材料

実験に使用した材料は以下のものである。材料特性を表-1に示す。

細砂：実験地盤の主要構成材料として用いた。材料は豊浦標準砂を使用した。

粗砂：細砂の下部に設置し、天然材料によるキャピラリーバリアを構成するために用いた。まさ土をふるいにかけて、1～5mm径のものを使用した。

ジオテキスタイル：人工のキャピラリーバリア材料として使用した。厚さ5mmの不織布(高透水性)である。

ジオメンブレン：人工の難透水性材料として使用した。不透水性のナイロン製品である。

降雨水：水道水を使用した。

なお、実験はすべて乾燥砂中へ降雨水を散水して実施した。

(3) 実験モデル

不飽和浸透流の挙動の変化を知るために、地盤を構成する土の粒径、地層境界の傾斜角、地盤内に敷設する土木用人工材料をそれぞれ変化させ、以下に述べる5種類のモデルについて実験を行った。実験モデルを図-5に示す。

ケース a は、粗砂の上に細砂を載せた水平2層モデル

ケース b, c は、傾斜させた粗砂の上に細砂を載せ、粗砂の傾斜角をそれぞれ変えた傾斜2層モデル

ケース d, e は、細砂中にそれぞれジオテキスタイル、ジオメンブレンを傾斜させて敷設したモデル

(4) 計測

計測は、以下に述べる項目について実施した。

(a) 浸潤前線の時間推移

降雨開始後、一定時間ごとに写真撮影を行い、砂の濡れ具合から浸潤前線の推移を肉眼により観察した。

表-1 実験地盤の材料特性

項目	材料	細砂	粗砂
透水係数 (cm/s)		$1.72 \times 10^{-2}$	1.00
間隙比		0.886	0.673
比重		2.642	2.605
粒径 (%)	礫	0	63.4
	砂	99.1	36.5
	シルト・粘土	0.9	0.1

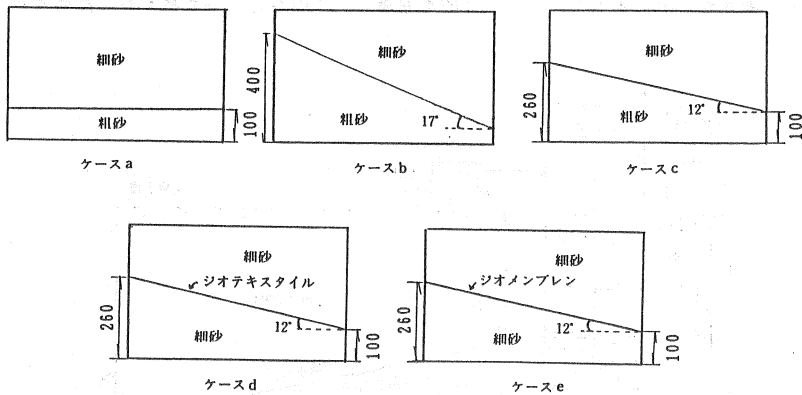


図-5 実験モデル (単位mm)

(b) 間隙水圧の経時変化

間隙水圧は、図-6に示すように、左側壁から水平方向に5cmの位置で土層上部から鉛直方向に5cm, 15cm, 25cm, 35cm, 45cm、および水平方向に25cm, 65cmの7箇所に間隙水圧計を設置して測定した。間隙水圧計は、φ7mm×70mmの脱気飽和したポラスカップに圧力計を組み込んだテンションメータを使用した。測定は、テンションメータをひずみ測定器に接続し、パソコンで制御しながら実施した。

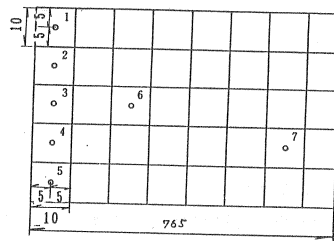


図-6 間隙水圧計配置図

(c) 色素を用いた浸透速度の測定

水位が定常状態になった後、降雨散布箇所スポイトで色素を流入し、一定時間ごとの色素の位置を写真撮影して、土槽内の水の流れを観測した。

(d) 排水量の測定

土槽の側壁および底盤から排水される水をアクリル槽で受け、一箇所に集めて排水量を測定した。測定には雨量計を用いた。

2.3 実験結果

以下に各計測ごとの実験結果を述べる。

(1) 浸潤前線の時間推移

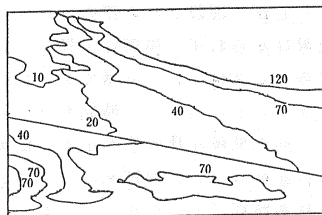
写真撮影による各ケースごとの浸潤前線の位置を図-7に示す。図中の数字は、降雨散水開始後の経過時間(分)である。これらの図から、以下に述べる点が明らかになった。

- (a) いずれのケースにおいても、上層の浸潤前線は当初縦長の楕円状に広がり、層境界に達した後は境界面に沿って横方向に移動する。その後、下流側面に達するとともに水位は上昇し、やがて定常状態になる。
- (b) 下層地盤への浸潤は、上層地盤で側壁に達した水が、側壁付近を降下して下層地盤に至った後、下層地盤内を左方向へ浸潤するものと、層境界を通して直接下層地盤に浸潤するものがある。層境界から直接下層地盤に浸潤する水の浸潤が開始される時間は、制御層の傾斜が緩いほど早い。
- (c) 定常状態での右側壁付近の水位は、2層水平モデル(ケースa)では境界から13.5cm、2層傾斜モデル(ケースb, c)では傾斜角にかかわらずほぼ19cmであり、傾斜モデルの方が水位は高い。また、傾斜角が同じモデル(ケースc, d, e)について、制御層の違いによる側壁部の水位を比較すると、2層傾斜モデル、ジオテキスタイルを敷設したモデル、ジオメンブレンを敷設したモデルの順にそれぞれ19cm, 23cm, 25cmとなっている。

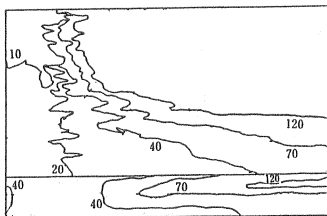
ジオメンブレンを敷設したケースでは、不透水層であるジオメンブレンで遮断された水が、メンブレン上部

を横方向に流れて下流側壁部から排水される。今回観測された水位は、横方向に流れる水から吸引された水の毛管上昇高さを表していると考えられるが、標準砂の毛管上昇高さ約25cmから考えて妥当な値である。粗砂およびジオテキスタイルで観測される水位は、上下の土の水分特性の違いによって、境界部分に停滞する水分の大きさを表している。これについては後で考察する。

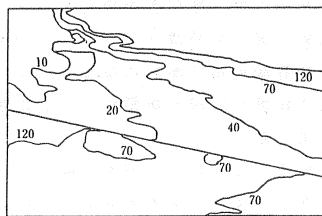
以上の結果から、いずれのケースも、降雨の不飽和領域への浸透バリア機能を備えており、不飽和浸透水の制御が可能であることが確認できた。



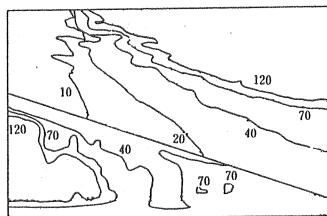
ケース c



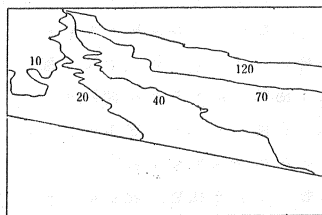
ケース a



ケース d



ケース b



ケース e

図-7 目視による浸潤前線の時間的推移 (単位 min)

(2) 間隙水圧の経時変化

図-8 にケース c の経時的な間隙水圧の測定結果を示す。

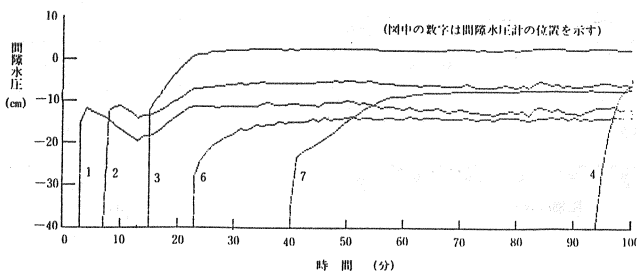


図-8 間隙水圧の経時変化 (ケース c)

図-8 より、降雨位置の下部に埋設した圧力計 (1, 2, 3) では、浸潤前線が圧力計の位置に到達すると、瞬時に間隙水圧の上昇が生じる。その時点での圧力は、-30~-10cm程度である。その後、浸潤前線が通過する

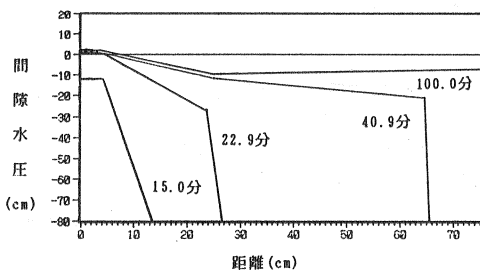
と圧力降下が始まるが、浸潤前線が境界層に達した時点で再び圧力の上昇が起こり、やがて定常状態となる。一方、降雨位置より右側に埋設された圧力計（6，7）では、浸潤前線の通過による圧力降下や、その後の圧力反射による圧力上昇はみられず、単調に上昇しながら定常状態となっている。以上のような間隙水圧の経時変化の傾向は、すべてのケースについて同様であった。

図-9には、ケースcについて、時間をパラメータとして、降雨位置下方の鉛直方向の間隙水圧分布を示す。縦軸と横軸にはそれぞれ土槽上端からの深度（cm）、間隙水圧（cm）を採っている。また、図中の数字は、経過時間（分）を示している。

間隙水圧の深度による変化をみると、浸潤前線が上下部層の境界に至るまでは先に述べたように、浸潤前線から上部へ直線的に圧力が減少し、上部から下部へ順次水が浸入しているのがとらえられている。前線が境界に達した時点（17.7分）から上部層の水圧が増加を始め、これは境界層の水圧が0になる時点（40.0分）まで継続する。この変化は下部層への浸入が停止し、上部層に水が保持されている状態を表している。

以上の傾向は他のケースについても同様であったが、ジオメンブレンを使用したケースでは、ジオメンブレンの上部10cmほどの間の水圧が他のケースより小さく、十分な水分供給がなされていないことが読み取れた。これは、ジオメンブレンでは境界付近の空気の排除が十分行われていないことが原因と思われる。

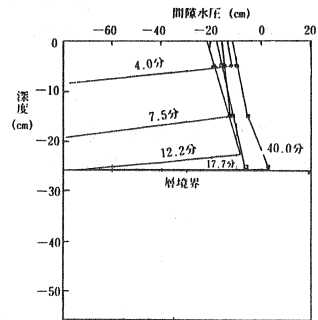
図-10には同様に、ケースcの水平境界層直上部の間隙水圧の分布を示す。縦軸と横軸にはそれぞれ間隙水圧（cm）、土槽左端からの投影距離（cm）を採っている。図中の数字は、経過時間（分）である。間隙水圧の水平方向分布においても、左方から右方に向かって浸潤前線が移動している状態が読み取れる。定常状態になった時点では、降雨位置直下の圧力はほぼ0で右側では圧力は下がっている。この結果も、他のケースで同様であったが、ジオメンブレンを使用したケースでは、定常状態では右側ほど圧力が高く、側壁付近では正圧になっていた。



(ケースc)

図-10 水平方向の間隙水圧の経時変化

表-2に、図-6で示した各測点へ浸潤前線が到達する時間を、目視と圧力計の上昇する時間から読み取った値を示す。目視と圧力計による到達時間の値は、どの位置においてもほぼ一致しており、いずれの方法でも浸潤



(ケースc)

図-9 鉛直方向の間隙水圧の経時変化

表-2 浸潤前線の到達時間

位置		ケース				
		a	b	c	d	e
1	X=5.0	2.0	2.5	3.0	2.5	2.0
	Y=5.0	3.1	2.6	3.1	2.2	3.1
		2.5	2.5	2.5	3.0	2.0
2	X=5.0	7.0	7.0	9.0	9.0	10.0
	Y=15.0	6.0	6.1	7.4	5.5	7.1
		7.0	10.0	9.0	10.0	10.0
3	X=5.0	15.0	—	16.0	11.5	12.0
	Y=25.0	11.1	—	15.0	10.1	11.1
		16.0	—	22.0	23.0	35.0
4	X=5.0	17.0	—	—	—	—
	Y=35.0	16.1	—	—	—	—
		26.0	—	—	—	—
5	X=5.0	25.0	—	—	—	—
	Y=45.0	27.9	—	—	—	—
		35.0	—	—	—	—
6	X=25.0	25.0	35.0	22.0	17.0	20.0
	Y=25.0	25.8	36.8	22.9	17.1	20.0
		32.0	24.0	24.0	29.0	37.0
7	X=65.0	61.0	13.0	42.0	36.0	42.0
	Y=35.0	60.8	13.8	40.9	37.9	40.0
		—	52.0	68.0	75.0	92.0

上段 目視  
中段 圧力計  
下段 色素

(分)

前線の到達時間の測定が可能であることが確認できた。

浸潤前線の到達時間から、各ケースにおける不飽和浸透水の制御効果をみると、次の点が明らかになった。

- (a) 制御層の傾斜角を変えたケース b, c を比較すると、測点 7 に到達する時間はケース b の方が速く、傾斜角が大きいほど横方向の浸潤速度が速い。
- (b) 傾斜角が同じで制御条件の違うケース c, d, e から、傾斜角が同一の場合には、制御方法によらず浸潤速度はほぼ同一である。

(3) 色素を用いた浸透速度の測定

水流がほぼ定常状態になった時点で、地盤内部の水の浸透速度を測定するため、色素を流して流速を測定した。

図-11に、ケース c, e について、色素の時間ごとの到達位置から算出した浸透速度をベクトルで示す。図中の数字は色素の流入時からの経過時間を表し、破線はその時の色素の位置を、また実線は定常状態での浸透水の上面を示す。各ケースについてベクトル図から水の流れを読み取った結果は、次のようである。

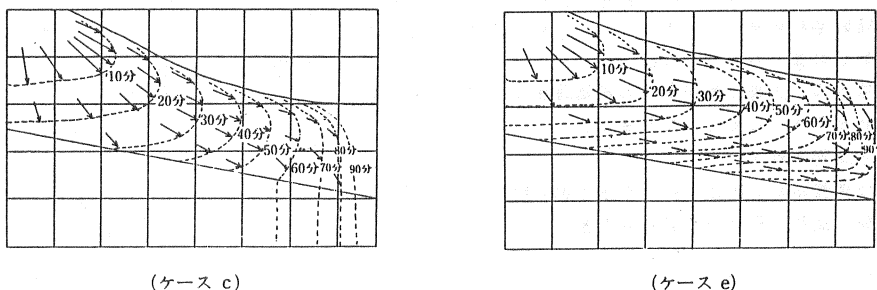


図-11 浸潤速度のベクトル図

- (a) 水平2層モデル(ケース a)では、鉛直方向の流れが卓越し、他のケースのように右側壁まで流れることなく、下層地盤に浸透する。下層地盤ではほぼ鉛直に流下し、排水されている。
- (b) 傾斜モデル(ケース b, c, d)では、降雨水は上部層を傾斜面に沿ってほぼ均一に流下した後、右側壁部に至って下方に流下している。ジオメンブレンを使用したモデル(ケース e)と比べると、これらのケースでは傾斜面付近での流線が傾斜面と平行とはなっておらず、多少の漏水が生じていることがうかがえる。下層に浸透した水はほぼ鉛直に下方に向かって流れている。

宮崎は、このような傾斜2層地盤境界での不飽和浸透流の屈折則を明らかにし、次の関係を導いた<sup>2)</sup>。

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} \quad \text{--- (1)}$$

ここに、 $K_1, K_2$ : 上下層の不飽和透水係数

$\alpha, \beta$  : 境界における流れの入射角, 反射角

この関係から、2層境界では不飽和状態および飽和状態で上下層に著しい透水係数の差がある場合には、境界部に沿った流れが発生することを見いだしている。また、下層へは部分流として流下することを報告している。上記の実験結果は、境界層に沿った流れと下層への部分流とについて同様な結果を与えているものと考えられる。

- (c) ジオメンブレンを使用したモデル(ケース e)では、水は上層で傾斜面に沿って平行に流下した後、側壁部から排水される。一定の傾斜をもった斜面にジオメンブレンを敷設した場合、定常状態では、ジオメンブレンに平行な流れだけが生じることが理論的に明らかにされている<sup>3)</sup>。上記の実験結果はこれを裏づけたものとなっている。

表-2中に、降雨地点から各位置に色素が到達するのに要する時間を示した。これらの位置で、浸潤による到

達時間と色素の到達する時間を単純に比較すると、色素の到達時間の方が遅い。色素の到達時間が遅くなる原因としては、定常状態では、重力のみの効果によって水が動くのに対して、浸潤時には毛管ポテンシャルの効果が付加されていること、水の流れが、定常時には地盤全体にほぼ一様に流れるのに対して、浸潤時には境界層付近に集中して流下していること等が考えられる。

図-12に、各位置でのベクトル図から算出したx, y方向それぞれの浸透速度を示す。縦軸と横軸には浸透速度 (cm/min), 土槽上左端を原点とする座標 (cm) を採っている。

図から、ケースaを除くと、降雨下部では鉛直方向の速度が大きく、右側では水平方向の速度が大きくなっている。また、傾斜2層モデルケースb, cを比較すると、傾斜角が大きいケースbの方が傾斜部でx, y方向とも浸透速度が大きい。また、傾斜角が同じで層境界条件の違うケースc, d, eは、y方向の一部を除き、ほぼ同様な値となっている。

以上の結果から、上部不飽和土中の浸透速度は、制御層の傾斜角が大きいほど大きくなると結論できる。

(4) 排水量測定結果

底盤および側壁部から排出された水量の測定結果を図-13に示す。図の縦軸と横軸はそれぞれ累積排水量 (cm<sup>3</sup>), 経過時間 (分) である。

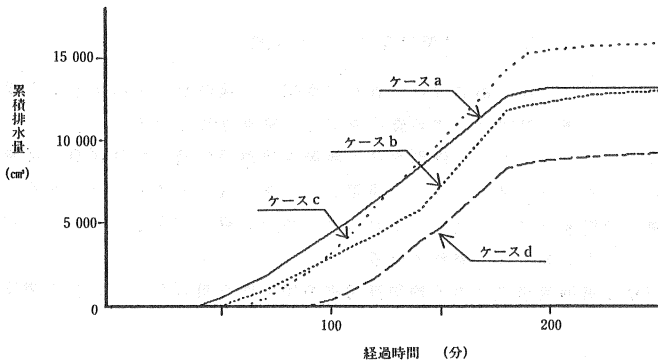


図-13 累積排水量

降雨開始から排水の開始されるまでの時間はケースによって異なり、水平2層モデル、傾斜2層モデル(急)、傾斜2層モデル(緩)、ジオテキスタイルの順に遅くなっている。また、排水開始時刻と図-7の浸潤前線の図を比較すると以下のようである。

- (a) 水平2層モデルでは、上層から下層地盤へ水が浸透した時点で、排水が開始されている。
- (b) 傾斜2層モデルでは、上層地盤の水が下流側壁に達した後、側壁部で下層地盤に水が流下した時点から排水が開始されている。
- (c) ジオテキスタイルを敷設したモデルでは、下流側壁部で上層地盤から下層地盤へ水が移動した後、相当時間が経過してから排水が開始されている。

これらの結果から、地盤からの排水が開始される時間は、上部細粒層の排水条件によって規定され、粗粒層の影響がほとんどないことが分かる。

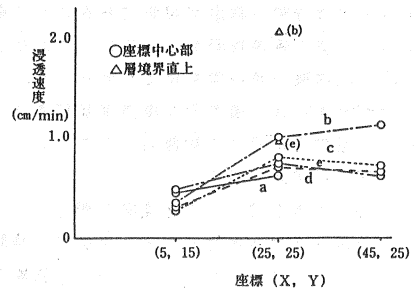


図-12 a) X方向の浸透速度 (cm)

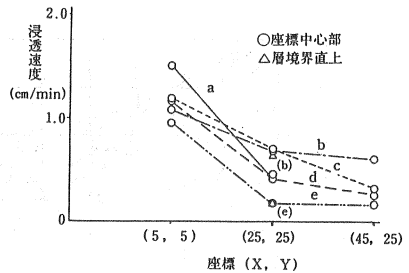


図-12 b) Y方向の浸透速度 (cm)



2.4 考察

図-5の5つのケースについての降雨浸透実験を行った。その結果、図-7のケースd, eより傾斜2層地盤での透水性の良いジオテキスタイルと不透水層のジオメンブレンの結果を比較すると、両者はほぼ同じような浸透の挙動をしているのが分る。トレーサ試験でも水は透水性の良いジオテキスタイルの中ではなく、砂層とジオテキスタイルの上部境界面に沿って浸透する。この現象は、上下部層の不飽和特性の違いによって、境界の上部に水が停溜するために生じるものである。これを一次元鉛直浸透より考察してみる。図-14(a)のように一次元の鉛直排水を対象とした時、最初に土柱は飽和状態で、下部のコックを開けると、下部の圧力水頭は零( $\phi_b = 0$  cm)になる。この状態で排水を続け、平衡状態になった場合には、土柱内の圧力水頭の分布は図-14(b)のような状態になっている。平衡状態での土柱内の体積含水率の分布を $\gamma$ 線等で計測すると図-14(c)のような状態になっている。ここで、土柱の下部の数十cmの高さまで土中水が排水しない領域が存在する。この土柱の底部からここまでの高さは限界毛管上昇高(エア・エンリー・バリュウ、( $\phi_{cr}$ ))と言われている。種々の土に対してこの値が得られている<sup>4)</sup>。この状態での土柱内での土中水は平衡状態と考えられるため、流動していない状態であるが、図-14(b)の高さ方向のBCの領域では、地下水は微小であるが流動している。すなわち、

$$u = k(\phi) \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} + 1 \right) \quad (2)$$

ここで、

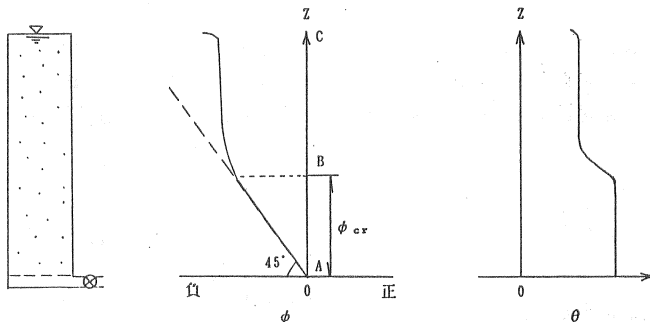
- $u$  : 流速
- $\phi$  : 圧力水頭
- $k(\phi)$  : 透水係数
- $z$  : 標高

で  $\partial \phi / \partial z = 0$  とすると、

$$u = k(\phi) \quad (3)$$

となり、下方に地下水が流動する。

一方、AB区間では、(2)式で  $\partial \phi / \partial z = -1$  であるから、 $u = 0$  となり、この区間では流動がないことになる。仮に、CB区間より水が流入してB点での圧力水頭が高くなると、AB区間でも地下水の流動が生じる。なお、図-15に不飽和土の浸透特性を示すが、この図より、AB区間では透水係数が飽和状態の透水係数とほぼ等しい値である。このように大きな透水係数を持っていても、AB区間では飽和状態で水が排水されないことがわかる。



(a) 飽和状態からの排水

(b) 平衡状態での圧力水頭分布

(c) 平衡状態での体積含水率分布

図-14 鉛直一次元排水実験

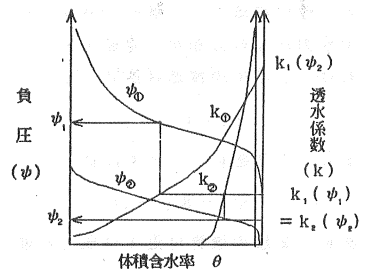


図-15 不飽和浸透特性

次に、初期が気乾状態の土柱の中に定流量を上部から浸透させるとどのような現象がおこるかについて考察してみる。図-16(a)に示すような鉛直一次元のカラムに降雨浸透を生じさせた時、土柱内の体積含水率の値は図

-16(c) のように変化して行く。そして、 $t = t_4$  で浸潤前線は、土柱の開放された下端に達する。この状態で下端で排水が生じて良いが、下端が空気に接している場合には、次の2つの条件を満足しないかぎり下端からの排水は生じない。

① 下端の圧力水頭  $\geq 0$

② 下端の圧力水頭勾配 ( $\partial \phi / \partial z$ )  $> -1$

これは、下端が浸出面になるための条件である。図-16(b) 中の破線は  $\partial \phi / \partial z = -1$  を示している。

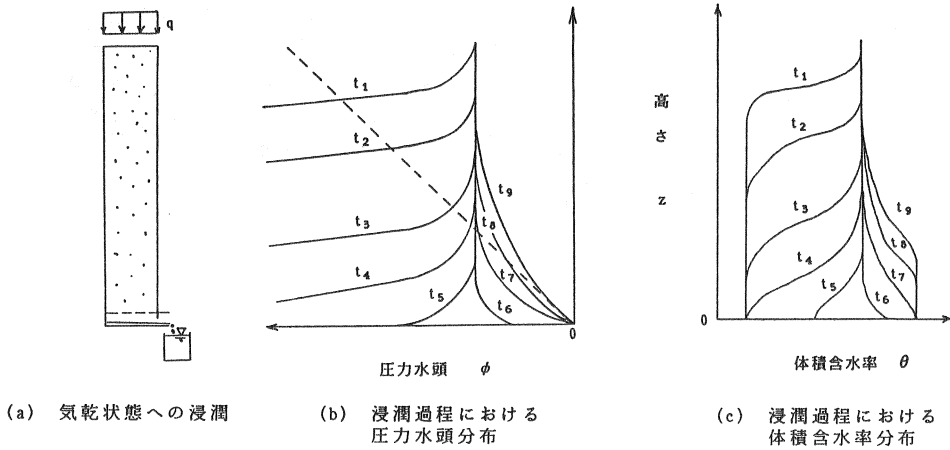


図-16 鉛直一次元浸潤実験

2層構造においては、層間にどのような条件が満足する時に層間の浸透が生じるのであろうか。鉛直の2層カラム内の降雨浸透に関する実験は多くの研究者によってなされている<sup>2), 3), 5), 6)</sup>。不飽和状態の2層カラム内で、図-17(a) のように上層に粗砂があり、下層に細砂がある場合には数値解析等において2層の境界面において、特別な配慮は必要としない。ただ、飽和、不飽和浸透流解析において、不飽和状態における浸透特性をどのように定めるかが大きな問題となる。しかし、これが求められると解析的に予測することはそれほど大きな課題ではない。

逆に、図-17(b) のように粗砂層の上に細砂がある場合には、この2つの層の境界でなんらかの処理をしないと一連の浸透として解析できなくなる。これを定常状態で考察してみる。2層の境界から上下に十分離れた地点で圧力水頭の分布が一定値であるとする、浸透速度は式(3) で表される。上層へ  $q_1$  なる降雨浸透があるとなれば、上層での浸透は次式になる。

$$q_1 = k_1(\phi_1) \quad \text{————— (4)}$$

また、下部層についても同様に次のように表される。

$$q_2 = k_2(\phi_2) \quad \text{————— (5)}$$

次に、2層の境界付近では圧力水頭に変化があるため、

$$q_1 = k_1(\phi) \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} + 1 \right) \quad \text{————— (6-a)}$$

$$q_2 = k_2(\phi) \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} + 1 \right) \quad \text{————— (6-b)}$$

境界では、上下層の圧力水頭は等しく、これを  $\phi_{12}$  とし水の連続性が保たれているとすれば、

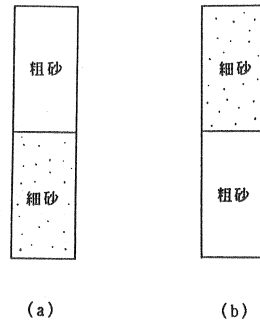


図-17 鉛直一次元浸透における2層構造

$$\begin{aligned}
 q_1 &= q_2 = k_1(\phi_1) = k_2(\phi_2) \\
 &= k_1(\phi_{12}) \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} + 1 \right) \\
 &= k_2(\phi_{12}) \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} + 1 \right) \quad \text{--- (7)}
 \end{aligned}$$

ここで、上層が細粒、下層が粗粒の場合には、水分特性は図-15のようであり、次の状態である。

$$\phi_1 < \phi_2 \quad \text{--- (8)}$$

また、下層のみについて考えると定常浸透状態では境界直下でも圧力水頭があまり変化していないので、 $\partial \phi / \partial z = 0$  となり

$$\phi_{12} = \phi_2 \quad \text{--- (9)}$$

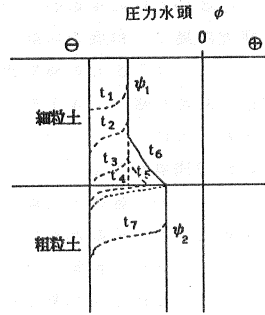


図-18 2層境界の浸透プロファイル

以上より、境界付近の定常状態の圧力水頭のプロファイルは、図-18に実線で示すごとくとなる。この状態は不飽和浸透特性上で見ると、図-15に示したようになる。

2層構造での水の浸潤過程での圧力プロファイルは、図-18の破線のようになると考えることができる。すなわち、 $t_3$  時間後に境界層に達した水は、下層への浸透が制限されるため上層に貯溜されるようになり、 $t_6$  時間後に境界部の上下層の浸透量が同一になるまで貯溜は続く。下層への浸透が制限される条件は次の2ケースが考えられる。

- ① 下層の浸透流量が上層より小さい時。
- ② 下層の圧力水頭が上層より大きい時。

この内、①の条件は下層が乾燥している場合であり、比較的早くから排水が生じる。このケースでは、上層から下層への水の排水量は式(6)で示され、境界面の圧力水頭( $\phi_{12}$ )、透水係数、圧力水頭勾配によって決定される。また②の条件は、下層が濡れた状態にある場合、及び礫等の負の圧力水頭の発生しにくい材料を下層に用いた場合に生じる。このケースでは、上層の圧力が低下して同一の圧力水頭になった時点で排水が開始される。礫やジオテキスタイルについては不飽和浸透特性が明確には求められていないため、不明な点が多いが、これらの材料は概念的には図-19に示すように、不飽和時にとり得る圧力水頭の幅が0に近い狭い範囲に限定された材料と考えることができる。このため、このような材料では上層から水分の供給がなく乾いた状態でも圧力水頭は小さくならず、境界部の圧力水頭は常に0に近い値となっているため、上層の圧力水頭がほぼ0の値になるまで下層への排水は生じない。従って、上層には限界毛管水頭に近い停溜域が生じる。また、先に述べた下端が空気が開放されたケースについては、

$$\begin{aligned}
 \text{圧力水頭} & \phi = 0 \\
 \text{透水係数} & \phi = 0 \quad \text{で} \quad k = \infty \\
 & \phi < 0 \quad \text{で} \quad k = 0
 \end{aligned}$$

の浸透特性を有する材料が下端に存在しているとみなす事ができる。

二次元で境界部が傾斜しているケースについて、宮崎<sup>2)</sup>は、本研究で行ったような降雨実験を実施して、2層の境界で浸透流フラックスが屈折することより、下層への浸透が生じないことを説明している。また、細砂と粗砂がある場合には、不飽和領域では、

$$\text{細砂の透水係数}(k_s) > \text{粗砂の透水係数}(k_g)$$

として、式(1)の屈折則を用いている。しかし、この説明では、細砂層の飽和領域が厚くなると、粗砂の中に浸透が生じることが説明できない。また、不飽和領域において  $k_s \gg k_g$  とは考えられない。逆に  $k_s$  は十分  $k_g$  より大きいと考えられる。この点に

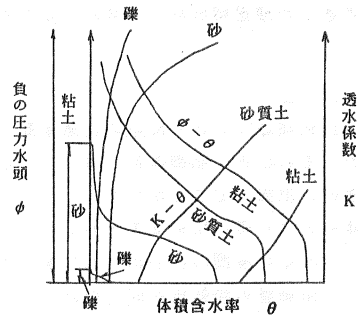


図-19 土質と不飽和特性の概念図

関しては、粗砂の不飽和浸透特性が定められるまで解答できない。成層傾斜地盤で、どのような現象が生じるかは今後の研究課題で、斜面の勾配と斜面方向の浸透、そして下部をドライに保つ方法を今後確立する必要がある。

そこで、ここでは二次元の傾斜流について、上部の砂層の限界毛管上昇高を用いて考えてみる。図-20に示すように細砂と高透水層（ジオテキスタイルか粗砂）の境界では、細砂より水滴が落下するものとする。すなわち、粗砂においてはサクションがきわめて少ないものとする。このような状態で細砂より水滴が落下するのは、細砂の中に飽和領域が発生し、その厚さが毛管上昇高以上にならなければならない。しかし、細砂と粗砂の境界が傾斜しているため、細砂内に傾斜方向の浸透が発生し飽和領域の厚さがそれほど厚くならない。したがって、細砂層から高透水層への漏水が生じないのである。

下流端では、上流から傾斜方向の浸透によって浸透水が集まって来る。ここで、下流端の水平方向でも、先ほどと同じように飽和領域が毛管上昇高さ以上の厚さになるまで、水平方向の排水が起きない。もし、ここで毛管上昇高さ以上の圧力が浸透水に作用すると水平方向の排水が生じるが、その時には、ほぼ同時に鉛直方向の排水も生じる。したがって、下流端では、図-11のケースcのように浸透のベクトルが下方に曲がって来る。このように排水された浸透水は高透水のジオテキスタイルや粗砂層を浸透して外部に排水される。この現象のため、長期間排水層が盛土内の排水にきわめて有効に作用していると考えられる。従来から、盛土内に用いるドレーン材やジオテキスタイルの透水性が問題となっていたが、盛土内にジオテキスタイルを入れてもジオメンブレンを入れても、盛土内の排水はそれほど変わらないことを考えると、盛土内のジオテキスタイルの透水性は下流端を除いてそれほど気にしなくて良いことになる。換言すると、ジオテキスタイルの目づまりによる透水性の問題より、ジオテキスタイルの水分特性曲線をいかに維持するかが大きな問題となる。

ジオメンブレンや粗砂の上部の細砂層内の飽和度が浸透によって高くなる現象は自然地盤でも観測されている<sup>7)</sup>。すなわち、段丘砂礫層上に関東ローム層が堆積しているような斜面では、ローム層単体で構成される斜面より斜面崩壊が多発しやすい現象がある。この場合も砂礫層上の関東ローム層中の飽和度が高くなりやすく、そこが弱層となって崩壊するためであると考えられる。

細砂層からの漏水が粗砂層に起こりにくいことについては、先に説明したが、古墳の構造においても、このような現象がおきているものと考えられる。また、古墳は盛土があるため、水平と鉛直の透水係数の異方性があると考えられる。この事も漏水を防止する大きなファクターになっている。異方性の大きな方法で漏水を防止している古来よりの方法として茅や葦屋根や糞がある。

地下水のこのような多層地盤での浸透の挙動は、粗砂層やジオテキスタイルの不飽和浸透特性（不飽和透水係数、 $p$ - $F$ 曲線等）が求めにくいことも原因となっているが、飽和-不飽和の数値解析ではシミュレートしにくい現象である。今後、限界毛管上昇高を考慮した浸透解析法の開発が必要である。

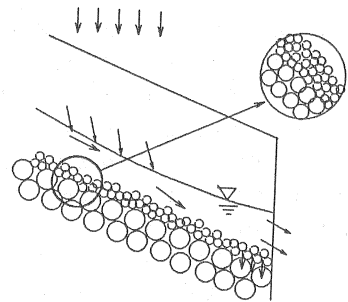


図-20 細砂の下端の浸透状況

### 3. 結論

不飽和領域における降雨の浸透挙動の把握とその制御を目的として、条件をそれぞれ変化させて室内実験を行った。その結果、制御条件の違いによる浸潤前線の移動経路、間隙水圧の経時変化、浸潤・浸透速度等について、定量的に把握することができた。

本研究より得た結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 降雨の浸潤の様子は、制御層の傾斜角度が同じ場合には、透水層でも難透水層でも同様な結果となる。
- (2) 制御層の傾斜角が同じ場合でも、条件を変化させると、定常状態での層境界上部の飽和帯の水位に違いが現れる。
- (3) 降雨浸潤後の圧力変化の様子は、傾斜角や層境界条件の違いにかかわらず鉛直方向、水平方向とも類似した結果を得た。しかし、詳細に検討すると、難透水層では定常状態で正の圧力水頭が発生しており、制御

条件によって圧力水頭分布は異なる。

- (4) 不飽和土中の浸透速度は、制御層の傾斜角によって支配されるが、今回の実験条件では、透水層、難透水層とも同様な値となった。
- (5) 浸透水の排水開始時間は、傾斜角や層境界条件の違いにより異なるが、細粒層の水分特性の影響を強く受けることを指摘した。
- (6) キャピラリーバリアを粗粒土の不飽和浸透特性を用いて説明できることが分った。

〔参考文献〕

- 1) Palmquist W.N, Jhonson A.I.(1962): Vadose flow in layered and non layered materials, U.S.Geol. Sur.Prof.Paper 450-C, pp.142~143.
- 2) Tuyoshi Miyazaki: WATER INFILTRATION INTO LAYERED SOILSLOPES(1988), 農業土木学会論文集, No133, PP.1~9.
- 3) 宮崎毅・中野政詩(1987):  $pF$ の原理と応用, 浸透流の基礎と $pF$ , 土と基礎, 35-8, pp.83~89.
- 4) 土質工学会(1991): 根切り工事と地下水, 土質工学会, PP.357~358.
- 5) 山田 正他(1988): 土壌中における降雨の浸透過程の研究, 第32回水理講演会論文集, pp.119~136.
- 6) 下島栄一 (1984): 雨水の地中への浸透機構に関する研究, 京都大学博士論文.
- 7) 丸井敦尚 (1988): 丘陵地の崩壊地形とその水文環境, 地質ニュース, No49, pp.48~55.