

表土におおわれた岩盤斜面内への降雨浸透機構

Infiltration Mechanism of Rain into Fractured Rock Covered with Surface Soil

埼玉大学工学部 正員 渡 辺 邦 夫

東京大学工学部 正員 玉 井 信 行

はじめに

山地流域の流出過程を物理的にとらえるためには、降雨が山地斜面上あるいは斜面内をどのように流れるかを調べる必要がある。山地斜面は一般的に、表土層とその下の岩盤によって構成されているとモデル化しうる。降雨は、斜面表面上を流れる成分や蒸発成分を除いて、表土層中あるいは岩盤中を流れる。したがって、山地流域の流出現象の把握にあたっては、表土と岩盤という2つの異なった透水帯より成る系内の流れを調べるのが重要である。従来、こういった系内の流れは十分にはわかっていない。今回の研究は、この表土-岩盤系内の流れのなかで、とくに重要で基礎的と思われる、表土から岩盤内への降雨浸透機構に注目し、実験、理論両面から検討したものである。本研究で得られた成果は、山地河川流出の解析のみならず、岩盤斜面崩壊など、降雨とその地下浸透が関与する多くの問題に適用しうると思われ、工学的重要性は大きいと考えられる。

1 従来の研究

表土と岩盤との間の降雨浸透機構については、その現象の重要性にも拘らず、まだ詳しい研究があまり進んでいない。従来の研究のなかで、特筆すべきものとしては、Reeves¹⁾による野外実測に基づいた報告がある。これはチョーク層より成る岩盤を対象として行われたもので、彼は表土-岩盤系を図-1のようにモデル化した。このモデルで、岩盤中には透水経路となりうる多くの開口割れ目が存在している。Reeves は、それら割れ目を、主に間隙幅の大きさから microfissure と macrofissure に分けて考え、それらが混在しているものとした。前者は $1 \sim 20 \mu m$ 、後者は数 mm 程度の間隙幅である。降雨流出の野外実測から Reeves は、降雨強度が小さい場合、あるいは降雨終了後では、microfissure が主な浸透経路となり、降雨強度の大きい場合のみ macrofissure が浸透経路となることを示し、年間を通じてみた時、microfissure 系を通る流量が macrofissure 系を通る量よりはるかに多いことを明らかにした。この研究は、チョーク層という特定の岩盤地域に対する指摘にとどまっているものの、表土から岩盤内への降雨浸透が、間隙幅など岩盤割れ目の個々の性質に影響されている点を示した点で注目される。

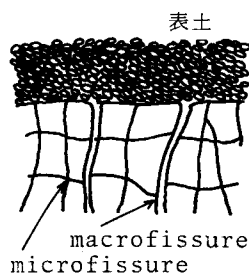


図-1 Reevesのモデル

一方、渡辺^{2),3)}は、この報告をふまえ、岩盤中の割れ目を種々の径を持つガラス管などでおきかえた実験装置を用いて表土-岩盤系の降雨浸透の性質を調べ、Reeves の指摘の妥当性を検証している。

以上の研究は、実測、実験をふまえているが、まだ一般的な岩盤への適用性や、実験装置の妥当性に疑問が残りの、また、浸透のメカニズムに立ち入った詳しい議論はなされていない。今回の研究は、それらの問題点をふまえ、実際の表土-岩盤系のモデル化を行い、浸透メカニズムを考察するものである。

2 表土-岩盤系のモデル化

モデル化にあたって、表土と岩盤の境界近傍を考える。またすでに報告しているように⁴⁾、岩盤内の主な浸透経路は、破碎帯や、風化した岩盤帯における開口した割れ目として良い。こういった表土-岩盤系の一般的形状を図-2(a)に模式的に示す。岩盤中には、種々の大きさの破碎帯や開口割れ目が発達し、さらに、

開口割れ目といっても、表土層より流入した粘土や、割れ目壁面の風化産物である変質鉱物によって部分的に埋められているなど、非常に複雑である。つまり、岩盤中の割れ目系は、各々特有の、方向、大きさと、流入粘土、変質鉱物、破碎帯物質など介在物を持つ割れ目の集合である。モデル化にあたって、今回まず図-2(b)のように、表土と接しており降雨の浸透に直接関係する割れ目をすべて鉛直と仮定する。さらに、各割れ目の間隙幅を一定とし、その中に粘土・砂など種々の介在物をつめることによって、各割れ目の浸透経路としての性質を表現しようと仮定した。たとえば、微小な間隙幅で多少変質鉱物を有するような割れ目を、細粒の粘土に埋められた一定幅の割れ目でおきかえ、一方、大きく開口しほとんど介在物を持たない割れ目を、粗粒砂やガラスビーズを持った割れ目でおきかえる。こういったおきかえの妥当性や、具体的なおきかえ方については、表土と岩盤間の浸透機構を明らかにした上で、あらためて検討する。また図-2(b)に示されるように、各割れ目は水平方向の割れ目で連結されているとしている。こういったモデル化は、第1次近似的には妥当なものと考えている。

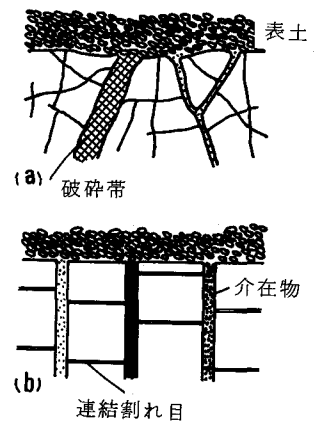


図-2 表土-岩盤系(a)とそのモデル化(b)

3 実験

2節で述べたモデル化を考慮して、今回図-3(a)(b)に示す2つの実験装置を作製した。(a)は3次元モデルで、表土層下部に2つの割れ目がある。各々の割れ目は相互に連結せず独立している。一方、(b)は2次元モデルで、4つの割れ目が存在し、各々は2本のビニールパイプで連結している。

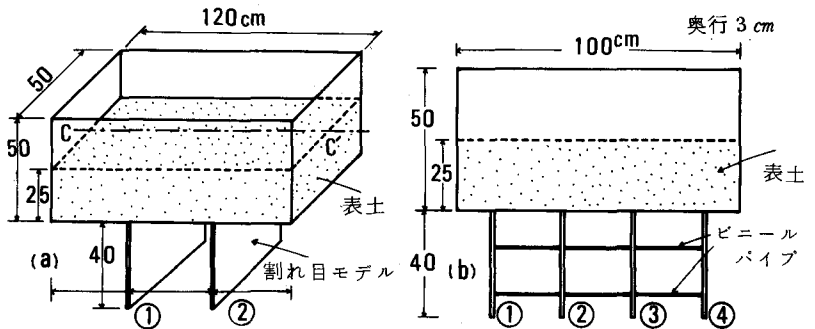


図-3 実験装置の概略図、(a)=Aモデル、(b)=Bモデル

表-1 実験条件(表土、割れ目の性質組み合わせ)

実験 ケース	実験 モデル	表土	割れ目			
			①	②	③	④
-1	A	3か砂	粗粒 ガラス玉	細粒 ガラス玉		
-2	B	標準砂	粗粒 ガラス玉	3か砂	標準砂	細粒 ガラス玉
-3	B	細粒 ガラス玉	〃	〃	〃	〃

以下、(a)、(b)の実験装置をそれぞれAモデル、Bモデルと名づける。各々のモデルの割れ目に、図左より順に①、②、③、④の番号をつけてあらわす。これら2つのモデルに、上方より注射針方式により種々の強度の降雨を与え、浸透の特性をみた。さらにAモデルでは、図-3(a)中C-C'で示される中心線上の任意点に約20℃の塩水をトレーサーとして流し、浸透流の性質をみた。なお、ここで考えている表土近傍の上部岩盤は、一般に不飽和状態となっているとしよう。このことを考慮し、図-3の実験装置の割れ目下端は大気圧とした。

実験では表土層と各割れ目に異なった粒径を持つ砂(ろか砂、標準砂)およびガラス玉(粗粒、細粒)をつめた。行った実験の砂、ガラス玉の組み合わせを表-1にまとめて示す。降雨強度は各ケース

表-2 砂、ガラス玉の水利的性質

性質 多孔体	50%粒径 (mm)	透水係数 (cm/s)	毛管上昇 高さ(cm)
粗粒 ガラス玉	2.5	1.09	0.4
細粒 ガラス玉	0.95	0.74	1.7
3か砂	1.7	0.48	2.8
標準砂	0.18	0.024	19.5

において3～8種類変えた。用いた砂、ガラス玉の50%粒径、透水係数、毛管上昇高を表-2に示す。毛管上昇高は、径5cmの透明アクリルパイプに砂、ガラス玉をつめ、水面に接した時の水の上昇高さである。なお実験は、あらかじめ長期の雨をふらし、割れ目から十分流出させた後に降雨を止め、流出が終了してからはじめた。

最初に実験ケース-1の結果について述べる。このケースはAモデルを用いたものである。表-1、-2からわかるように、表土層、粗粒ガラス玉割れ目①

(以下適宜粗粒割れ目と略す)、細粒ガラス玉割れ目②(細粒割れ目)の3組の透水係数、毛管上昇高をそれぞれ(k_s, H_{cs})、(k_c, H_{ce})、(k_f, H_{cf})とした時、 $k_c > k_f > k_s$ 、かつ $H_{cs} > H_{cf} > H_{ce}$ である。実験結果の例を図-4、-5に示す。与えた降雨強度 I_s (mm/hour)については図中に示した。いずれも横軸が時間であり、各々上図が粗粒割れ目、細粒割れ目それぞれの流出量 Q_c 、 Q_f を示し、下図は電気伝導度(mv)で、トレーサー(塩水)の到達を示す。塩水は

図中矢印の時点、つまり降雨開始時、定常流出時、降雨終了時の3回、図-6の④、⑤点いずれかに投入した。図-6は、図-3(a)のC-C'を含む鉛直断面である。

各図の流出量をみると、まず最初に細粒割れ目より流出し、 ΔT 時間後に粗粒割れ目からの流出がはじまる。 ΔT は、降雨強度の小さい図-4の方が大きい。また定常時に各割れ目からの流出量 Q_c と Q_f とを比較すると、図-4の方が、 Q_c に比べ Q_f が大きくなっている。ここで、多くの種類の降雨強度について、 Q_c/Q_f 比と Q_c+Q_f との関係をみたものが図-7である。この図から、降雨量が小さいと相対的に Q_f が大きいことがわかる。さらに、降雨終了後の流出をみると、図-4、-5共 Q_c が急速に低下するのに対し、 Q_f の減少は小さい。つまり、降雨終了後は、この実験条件では、細粒割れ目からの流出が卓越するといえる。以上の流出特性は、前述したReevesの指摘と一致する。

つぎに、電気伝導度について述べる。図-6からわかるように、塩水投入点④、⑤はいずれも相対的に粗粒割れ目に近い位置である。図-4、-5共、降雨開始時に④点に投入した塩水は、より近い粗粒割れ目にほぼ全量が流出している。一方、定常流出時に同じ点に投入されたものは、降雨量の小さい図-4ではほとんど細粒割れ目に流出し、図-5では粗粒割れ目に流出している。また、降雨終了時に投入した塩水は、図-4、-5共細粒割れ目に多く流出している。とくに図-5では投入点が⑤であり、細粒割れ目とはかなり速いにも拘らず、粗粒割れ目を越えて細粒割れ目に流れる。このような傾向は、他の降雨強度でも調べられ、以下の2点の性質が顕著という。①定常時にあ

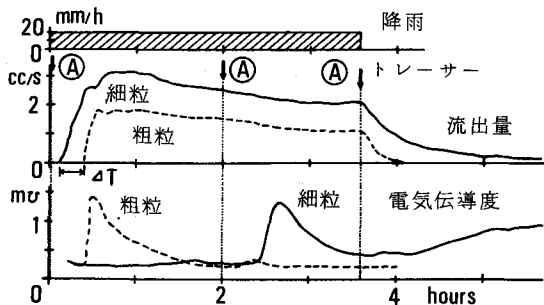


図-4 実験結果(ケース-1)

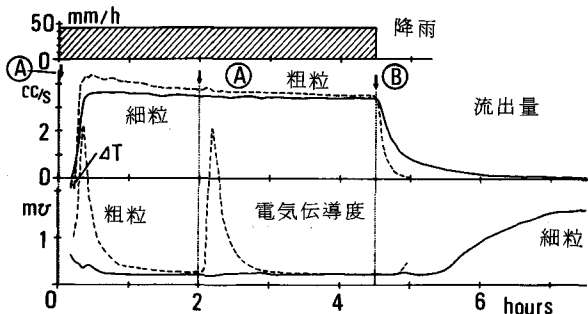


図-5 実験結果(ケース-1)

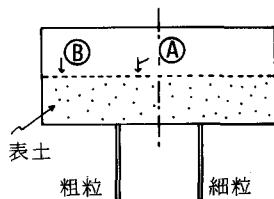


図-6 塩水投入点④、⑤

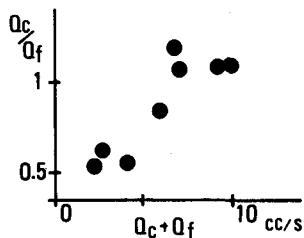


図-7 Q_c と Q_f との比較

いて、降雨強度が小さい程、細粒割れ目に流出する範囲は大きくなる。②降雨終了後では、細粒割れ目はかなり広い範囲から水を集めている。つまりこの実験ケース-1の条件では、降雨強度の小さい場合や降雨終了後において、細粒の割れ目が表土から岩盤への水の移動に大きな影響を与えているといえる。

つぎに、Bモデルを用いた実験ケース-2、-3の結果について述べる。ケース-2、-3の違いは表-1からわかるように、表土層が標準砂より成る(ケース-2)か、細粒ガラス玉より成る(ケース-3)かの違いである。割れ目の性質は全く同じであり、①粗粒ガラス玉割れ目、②ろか砂割れ目、③標準砂割れ目、④細粒ガラス玉割れ目である。ケース-3は、ケース-2に比べ、表土層の粒径と透水係数を増加させ、毛管上昇高を低下させた場合とって良い。

実験結果例を図-8、-9に示す。図-8はケース-2であり、降雨強度を2種類(a)=2.46 mm/hour、(b)=25.9 mm/hour)与えた結果である。まず図-8(a)より、この程度の小さい降雨では、降雨開始約4時間後から25時間後までの長い間標準砂割れ目からのみ流出し、約25時間たつて、ろか砂から流出しはじめたことがわかる。他のガラス玉割れ目からの流出は、28時間降雨を与えつづけても、起らなかった。また降雨終了後を見ると、ろか砂割れ目からの流出が除々に少なくなり、約2時間後にはほとんど0となるが、標準砂割れ目からの流出はあまり変わっていないことがわかる。一方、降雨強度の大きい図-8(b)では、約30分後に標準砂割れ目より流出が生じ、ついで約2時間15分後にろか砂より、約2時間50分後に細粒・粗粒ガラス玉から流出した。降雨終了後粗粒ガラス玉割れ目、細粒ガラス玉割れ目、ろか砂割れ目、標準砂割れ目の順に流出が少なくなり停止する。標準砂割れ目の流出は、とりわけ長くつづく。図-8(a)、(b)の結果より、砂の方がガラス玉に比べて流出開始が早く、降雨後の流出がより長く継続することがわかる。とくに、この傾向は粒径の最も小さい標準砂で顕著である。

つぎに、ケース-3の図-9をみる。図-8とはかなり異っていることが認められる。まず、流出する割れ目の順番は、同程度の降雨を与えた図-8(b)とは全く逆であり、粗粒ガラス玉割れ目、細粒ガラス玉割れ目、ろか砂割れ目、標準砂割れ目の順である。また、降雨終了に伴って、多少の違いはあるものの、ほとんど同時に流出が停止し、図-8(b)のように、標準砂割れ目のみとくに長く流出することはない。図-8、-9の比較から、割れ目の性質が同じ場合、流出特性、つまり表土から岩盤への浸透特性は、表土の性質によって影響されることがわかる。図-8では、降雨強度の小さい(a)の場合や、降雨終了後に、最も細粒の標準砂割れ目からの流出が卓越するなど、Reevesの指摘と一致する傾向を示している。しかし、図-9では必ずしもそのようにはなっていないわけであり、表土と割れ目の性質組み合わせが重要であることを示している。つぎに、こういった結果の生ずるメカニズムについて考察する。

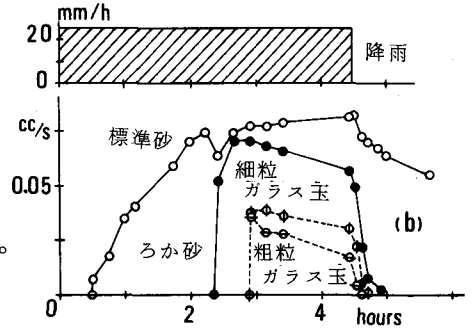
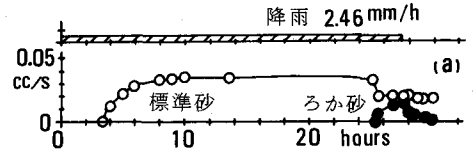


図-8 実験ケース-2の結果例

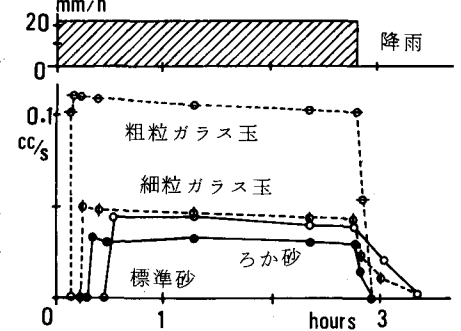


図-9 実験ケース-3の結果例

4 表土-岩盤境界部の浸透機構の考察とその数値シミュレーションの試み

以上実験的に明らかとなった流出の特性は、表土と岩盤内割れ目（破碎帯、開口割れ目を含む）境界における毛管力の差によって説明しうると思われる。最初に、定性的にメカニズムを述べ、つぎに、その数値シミュレーションを試みる。

いま、図-10に示されるようなA、B2つの異なった多孔体が1つの界面を持って接していたとする。これら両多孔体層が完全に飽和していた状態から、図下向きに、重力による脱水が行なわれたとする。A層に比べ、B層の粒子径が大きく毛管力が小さければA層中に h_{AB} の高さで飽和水が残留する。この高さ h_{AB} は、化学工学のろか理論でも示されているように⁵⁾、界面における力のつり合いから以下の式で見積りうる。

$$\rho g h_{AB} = \sigma (2/R_A - 2/R_B) \cdots \cdots (1)$$

ここに、 ρ = 水の密度、 g = 重力加速度、 σ = 表面張力、 R_A, R_B = それぞれA、図-10 残留飽和水B両層の最大粒子間隙に対する水の自由表面主曲率半径である。また、 $2\sigma/R_A$ 、

$2\sigma/R_B$ は、それぞれ各層の毛管上昇高によって近似的には表現しえよう。式(1)によれば、B層の最大粒子間隙が大きいほど、つまり一般的には粒子径が大きい程、 h_{AB} は大きな値を持つことになる。この現象を今回の実験に適用してみる。いま、A層を表土層、B層を各割れ目内介在物とする。式(1)を各々の表土-割れ目境界部に適用すれば、各割れ目ごとに、特有の残留飽和水高さ h_{si} が定義しうる。ここで h の添字 s は表土、 i は各割れ目をあらわす($i = 1 \sim N$, N = 割れ目数)。

ここで、例として前述のAモデルを用いた実験ケース-1を考えてみる。粗粒割れ目、細粒割れ目について、残留飽和水高さ h_{sc} 、 h_{sf} が定義しえ、表-1、表-2より各々の毛管上昇高さ H_{cc} 、 H_{cf} は $H_{cf} > H_{cc}$ であるから、 $h_{sc} > h_{sf}$ となる。このモデルに降雨が与えられた後停止し、ある程度時間が経過した時点で、図-11(a)のような飽和地下水面（ここでは毛管帯上面を意味する）ができたとする。各々の割れ目上部には、 h_{sc} 、 h_{sf} が定義しうる。この高さは、式(1)を考慮すると、上層（表土）中の飽和水が下層（割れ目）に流入する限界の飽和地下水高さ（毛管帯を含む）と考えることができる。図-11(a)において、粗粒割れ目面上においては、地下水高さが、 h_{sc} より低いため、流出は生じない。一方、細粒割れ目上では、地下水高さが h_{sf} より高いため、流出する。図中矢印位置にトレーサーが投入されれば、それは粗

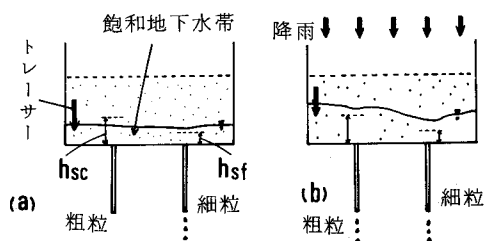


図-11 実験ケース-1の降雨浸透モデル

粒割れ目を越えて細粒割れ目に流入する。一方、再び降雨が与えられ、図-11(b)のような状態の地下水面形になれば、粗粒割れ目からも流出し、矢印位置のトレーサーは、粗粒割れ目に流れ込む。もし与えられた降雨強度が小さく、地下水面の上昇が小さければ、粗粒割れ目からは地下水の流出が起こらないこともありうるわけである。このようなメカニズムによって、実験ケース-1の結果は説明しうる。特別な場合として、実験ケース-2、-3の場合のように、表土と1つの割れ目の介在物が同じ場合、あるいは、表土の毛管上昇高が、数個の割れ目毛管上昇高より小さい場合（つまり式(1)において右边が負値を取る場合）は、それら割れ目について、 $h_{si} = 0$ とすれば良い。実験ケース-2の場合は、実験ケース-1と同様に説明しうる。一方、実験ケース-3は、表-1、-2からわかるように、表土の毛管力が小さく、各割れ目の h_{si} がすべて0かそれに近い値を取る場合である。仮りに、いますべての h_{si} が0とすれば、表土から割れ目への浸透は同時となり、降雨後の浸透停止も同時となる。実験ケース-3において、粗粒ガラス玉割れ目のみこの

高さ h_{gc} が 0 より大きい、ほぼこういった状態であったと考えられよう。実験ケース - 3 の結果例図 - 9 で、流出の開始に各割れ目で差がある理由は、この実験装置の割れ目部の長さが 40 cm と長く、そこを流下するに要する時間の差であると考えられる。これは、割れ目（介在物）の透水係数によって決まるものである。

以上定性的に、実験でみられた現象の説明を行ったが、つぎに、より定量的な現象のシミュレーションを試みる。この現象は、毛管帯中の流れが大きく影響するから、厳密なシミュレーションのためには、その中の流れの特性をよく把握しておかねばならない。また、表土の表面から毛管帯に至るまでの、不飽和帯中の降雨浸透機構を十分に調べておかねばならない。しかし、これらの詳しい研究は、従来まだ完全におこなわれておらず、今回も近似的に考えざるを得ない部分がある。用いるシミュレーションモデルの概念図を図 - 12 に示す。ここで、降雨は、開始に伴って毛管帯上面に一樣に供給されるとしている。また飽和地下水帯に、毛管帯では $\phi = z - h_c$ 、その下の通常地下水帯には $\phi = z + h_p$ の地下水ポテンシャル ϕ を考える。ここに、 h_c は毛管力水頭、 h_p は圧力水頭、 z は表土 - 割れ目境界面より上方に測った位置水頭である。また計算は、図に示すように $x - z$ の 2 次元断面で行う。ポテンシャル ϕ を以上のように決めれば、この 2 次元断面内の流れは、通常の地下水流れと同様に、降雨浸透量を q (次元 1 / T) とし

$$k_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + q = 0 \dots\dots\dots (2)$$

を数値的に解くことにより解析しうる。ここに、 k_x, k_z はそれぞれ表土層の x, z 方向の透水係数である。境界条件としては、図 - 12 に示すように、側方境界での流入出 0、下底面においては、割れ目部以外では流入出 0、割れ目部では、この場合粗粒割れ目、細粒割れ目とし、おのおの $-H_{cc}, -H_{cf}$ で与えた。 H_{cc}, H_{cf} は、前述したように、割れ目介在物の毛管上昇高さである。また、毛管帯上面での条件は、通常自由地下水面の解析と同様、水分子が水面にとどまる条件⁸⁾を用い、式(2)と連立させて水面変化を計算する。また、表土から割れ目への浸透流量は、表土と割れ目との境界部でのポテンシャル勾配と、割れ目部を流しうる最大流量で決まるものである。今回、ポテンシャル勾配で決まる流量が、最大流量より大きくなった時、最大流量を流量とした。この場合、割れ目部の境界条件を少し変えて式(2)を計算する必要がある。最大流量は、割れ目内の動水勾配を近似的に 1 と考え、割れ目透水係数と、割れ目面積の積で得た。初期条件は、表土内の飽和地下水帯（この場合毛管帯）内での流れがない条件とした。具体的には、表土の毛管上昇高を H_{cs} とおき、水位を $H_{cs} - H_{cf}$ 、地下水帯内ポテンシャルを $-H_{cf}$ とした。計算は、前述の実験ケース - 1 を想定し、透水係数毛管上昇高は、表 - 2 に示す値を使った。

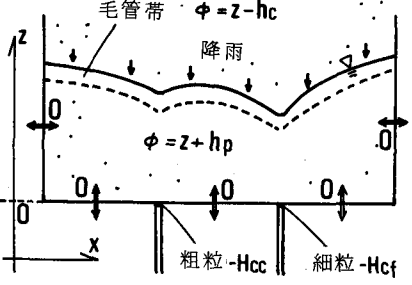


図 - 12 計算モデル

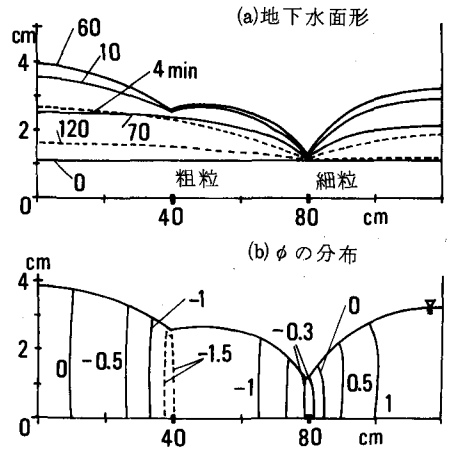


図 - 13 計算結果 (a): 地下水面形 (毛管帯上面変化), (b): 降雨終了時のポテンシャル ϕ の分布)

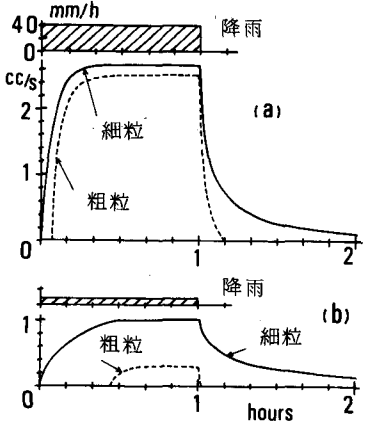


図 - 14 浸透量の計算結果

計算結果を図-13、-14に示す。図-13および図-14(a)は、降雨40mm/hourを1時間与え、その後降雨を停止した場合である。図-13(a)は、飽和地下水面(毛管帯上面)の変化をあらわす。図中の実線は、降雨継続時の変化、破線は降雨終了後の変化を示し、図中の数字は経過時間である。また、図-13(b)は、降雨終了時のポテンシャル ϕ の分布である。さらに、図-14(a)は、粗粒、細粒各割れ目への浸透量(流出量)である。この図から、まず細粒割れ目から流出がはじまり、つぎに、粗粒割れ目から流出することがわかる。また降雨終了後、細粒割れ目からの流出が粗粒割れ目と比べて長く継続することがわかる。図-14(b)は、比較のため計算した、降雨強度が10mm/hourと小さい場合の浸透量変化である。降雨強度が小さくなると、細粒割れ目への浸透量が粗粒割れ目に比べて相対的に大きくなり、各々の割れ目への浸透開始時刻の差がより大きくなることがわかる。こういった傾向は、実験結果と一致している。したがって、今回のシミュレーションは、現象をうまく表現していると考えられる。もちろん、前述したように、このシミュレーションの考え方にはまだ不十分な点が含まれているが、第1次近似としては妥当であろう。

5 考察と今後の問題点

今回、表土-岩盤系をモデル化してとらえ、表土から岩盤内への降雨浸透機構を考察した。このモデル化の過程で、実際の割れ目を、一定間隙幅を持ち、種々の介在物を含む割れ目で近似した。浸透機構の考察によれば、表土から岩盤への浸透は表土と割れ目の毛管力と透水係数で決まるから、それらを一致させれば今回のモデルは十分妥当といえよう。ただ今後の問題として、実際の岩盤の割れ目の性質を調べ、具体的な問題への応用を考えてゆく必要がある。

また、今回の実験では、割れ目下端での圧力が大気圧との条件を考えたが、もし割れ目が地下水面に到達しておれば、この条件設定は問題といえる。この点については、具体的な現場において、綿密な調査を行った上で考察する必要がある。これも今後の問題であり、さらに研究するつもりである。

いずれにしても、今回の研究により、表土から岩盤への降雨浸透機構が明らかとなり、そのシミュレーションがなしうることが示された。これは、山地流域の流出など、表土-岩盤系の関与する現象の解明に対して、大きく貢献するものと考えられる。

謝 辞

今回の研究を行うにあたり、実験への協力を惜しまなかった埼玉大学学生、押尾泰寿、山田正敏両君にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Reeves, M. J., Recharge and pollution of the English chalk: some possible mechanism, Eng. Geol., vol.14, pp. 231 - 240, 1979
- 2) 渡辺邦夫, 岩盤中の地下水帯への降雨涵養機構に関する実験的研究, 第17回自然災害科学シンポジウム, 1980
- 3) 渡辺邦夫, 岩盤斜面における降雨浸透機構について-実験的基礎研究-, 昭和56年度日本応用地質学会研究発表会, 1981
- 4) 渡辺邦夫, 茂木君郎, 志知龍一, 破砕帯内地下水流れの特徴とその数値シミュレーション, 応用地質, vol. 22, no.1, pp. 104 - 117, 1981
- 5) 大山義年, 山口賢治, 重力場における粒子層の平衡含液量について, 理化学研究所報告, vol. 38, no.4, pp. 392 - 400, 1962
- 6) 田中伸和, 安芸周一, 燃料地下タンクの技術開発に関する研究, 電力中央研究所報告, no. 379006, pp. 1 - 65, 1979