

広島大学 工学部 正員 三島隆明
広島大学 工学部 正員 金丸昭治

I. まえがき 山腹斜面を単純モデル化した単一層斜面からの流量減衰期における現象に関して従来おこなってきた実験結果¹⁾を詳細に分析してみると、比較的早い時期から流出する毛管水あるいは毛管水帯上部からの流出が、量的には総流出量の約5割を占め、時間的には流量が比較的少くなる流出中期以降、長期間にわたって流出する。このように移流効果が卓越してくる期間における現象においては、これらの流出成分の影響を無視することはできない。

この研究では、この時期に関する自由水の流動ならびに毛管水の流動に関して考察した結果を述べる。

II. 移流効果卓越期における自由水の流動 単純斜面における自由水の流量減衰期の流動現象は、Darcy則のみに従って流動するものとするれば、(1)式の $\frac{\partial H}{\partial T} + 2\alpha \frac{\partial H}{\partial X} - \left(\frac{\partial H}{\partial X}\right)^2 - H \frac{\partial^2 H}{\partial X^2} = 0$ (1) ような無次元式で表わされ、流動特性を考慮する

と、以下のような方法で解析できる。すなわち、拡散効果が卓越して、 $\alpha^2 < Q_1$ あるいは $(\frac{\partial H}{\partial X})_{X=0} > \alpha - \sqrt{\alpha^2 - Q_1}$ となる期間の現象は、文献²⁾に示した方法で、また、移流効果が卓越する $(\frac{\partial H}{\partial X})_{X=0} \leq \alpha - \sqrt{\alpha^2 - Q_1}$ となった後の期間の現象は、(2)式のような解によって解析される。

$$\left. \begin{aligned} H = & -\frac{(X-2\alpha T-C_2)^2}{6(T+C_1)} + \frac{C_3}{(T+C_1)^{1/2}}, \quad C_2 = -\left\{ \frac{6S_0}{Q_{10}}(QS_0-5\alpha)+b \right\} \\ & + \left\{ \left\{ \frac{6S_0}{Q_{10}}(QS_0-5\alpha)+b \right\}^2 - 4 \left\{ \frac{36S_0}{Q_{10}}(\alpha-S_0)-9 \right\} \times \left\{ \frac{6S_0}{Q_{10}}(\alpha-3S_0) \right. \right. \\ & \left. \left. -1 \right\} \right\}^{1/2}, \quad C_1 = (3C_2-1)/18S_0, \quad C_3 = C_2^2/6C_2^{3/2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、Hは水深、 Q_1 は下流端流量、Sは貯留量、 $Q_0=(Q_1)_{T=0}$ 、 $S_0=S_{T=0}$ である。したがって、 $H=0$ となる自由水面上端の移動は、 $X=2\alpha T+C_2-\frac{C_2}{C_1^{1/2}}(T+C_1)^{1/2}$ のように表わされ、現象の生起期間は特性曲線法で求めた値の約5割増の値になり、長期化する。また、従来おこなった実験資料と上式の解とを比較した図-1からわかるように、この解は流出変化を良く表わし、一般に片対教紙上で向上に凸な曲線形を示す。

III. 毛管水流動の実験的考察 毛管水の流量減衰期の流動特性について実験的に検討した。(1) 実験方法：図-2に示すような装置に川砂および標準砂を充填して、上流端より水道水を吸上げさせて定常化し、圧力分布を測定するとともに上流側マノメータからフルレセインジウム液を注入させて層内の平均流速分布を測定した後、給水を遮断して流量減衰期の下流端流量および斜面中央部の層内圧力の時間的変化を調べた。

(2) 定常時流速分布：定常時の圧力分布は図-4からもわかるように負圧を示し、いずれの場合も層内全体が毛管水流動になっていた。図-3は流速分布を示したものであり、ほぼ放物線分布していることが確認された。

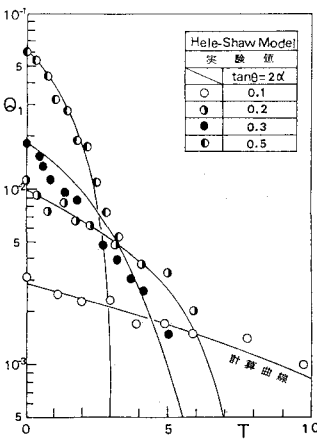


図-1 移流効果卓越期の Q - T 関係

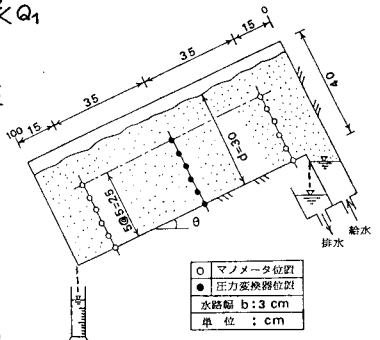


図-2 毛管水流動実験装置

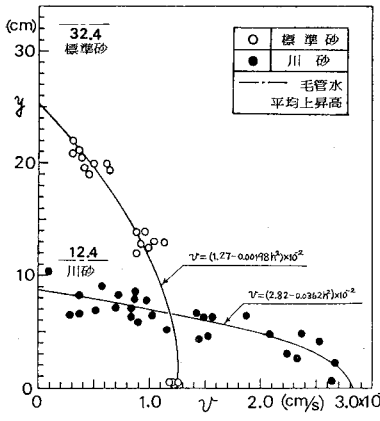


図-3 定常時流速分布

また、図に示したように、毛管水帯の上部約1/4の毛管水は斜面方向には流動しないようである。流動部分を対象にして平均的な取り扱いをすれば、毛管水帯における流動においても自由水の流動の場合と同様にDarcy則が適用できるものと考えられる。平均流動厚、平均動水こう配を用いて算出した毛管水帯の透水係数 k_c ならびに有効空隙率 m_e は表-1のようである。(3) 流量減衰期の現象：層内の圧力および Q_1 の時間的变化は図-4および図-5に示すとおりである。標準砂の場合について見ると、流量減衰開始後 $T=4$ (中央点の圧力変化については $T=2$)までは、毛管水は水路床にそって流動し、圧力ならびに流量とともに急激に減少した後安定化し、圧力については水分の再分布がおこるものと考えられる。その後の期間($4 < T < 14$)における現象は比較的緩慢で、しかも一様な変化、すなわち、片対数紙上ではほぼ直線的に変化する傾向が強い。さらに、 $T > 14$ になると、全体が完全に不飽和状態になり、流量変化はさらに緩慢扁平化する。このような変化特性から考えて、自由水面が実際に存在する場合の毛管水の流動は自由水面の移動に呼応して比較的急激な変化をし、自由水の流動が終了すると、単一層斜面における自由水の Q_1 が S に比例した流出になるように、毛管水も S に比例した Q_1 を保持しながら流動するものと考えられる。このことから、流量減衰期の毛管水の流動は、透水係数および有効空隙率を適切に評価すれば、Darcy則にしたがう流動として取り扱うことも可能であることがわかる。

	d_{50} cm	k_c cm/s	m_e	$\tan \theta$
標準砂	0.022	0.00756	0.070	1/2
川砂	0.060	0.0329	0.079	1/6

表-1 透水係数など

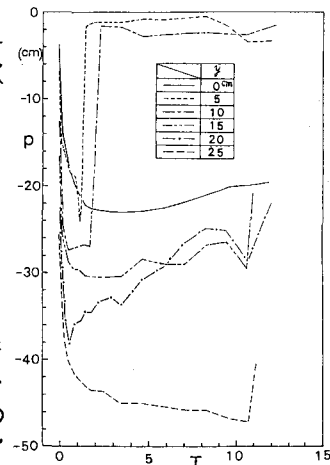


図-4 層内圧力の時間変化(標準砂)

したがって、自由水の流動と関連を持って毛管水が流動する期間の現象については、厳密には上述の特性とⅡで述べた自由水の流動とを考慮した解析をすることが必要であるが、近似的には、既に発表したような二層構成斜面からの流出の解析法¹⁾と同様な取り扱いをして解析することも一方法である。試算した結果は、既に発表したように極めて良い適合度を示している。⁴⁾

さらに、物理的意味を十分説明しうるものではないが、上述の各分割期における Q_1 の変化が、指数関数的に変化する傾向があることを活用して、取り扱いの容易なタンクモデルによって近似解析することも一方法である。

Ⅳ. タンクモデルによる解析例 従来から実験に使用している砂試料斜面に三角形降雨を降した場合の代表流出を2段タンクモデルで近似した例が図-5である。既に発表した定常降雨後の流出の場合と同様に⁴⁾図-1および図-5の Q_1 の変化傾向から類推されるように、 q_1 は自由水の流出を、 q_2 は毛管水の流出を、 q_3 は残留した毛管水の流出を表わしている。

この結果は、層内の自由水面の消失時間が q_1 の流出終了時間とほぼ一致していたことから諒解しうるものである。定常降雨後の流出解析例においては、計算値と実験値とは良く一致していたが、この場合には、変化傾向は良く取らえているものの鉛直浸透に伴う遅れが顕著であり、タンクモデルにみづらず、今後、鉛直浸透を考慮した現象解析を行う必要があると考えられる。

Ⅴ. おわりに 毛管水流動が無視し得ない比較的流量の少ない時期における現象について述べたが、さらに詳細については講演時に述べる予定である。

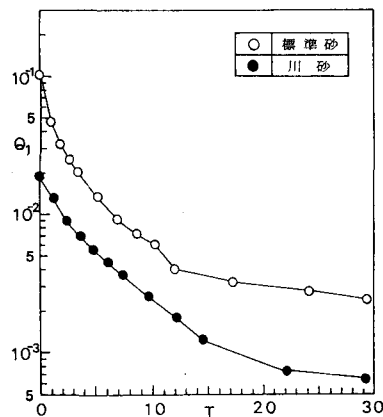


図-5 毛管水の Q_1 - T 関係

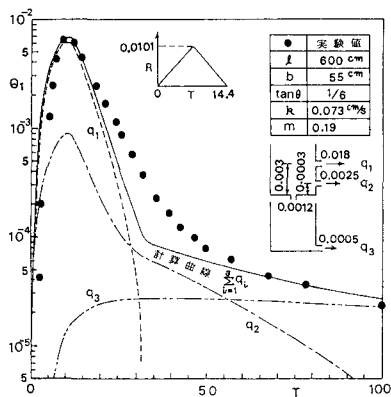


図-6 タンクモデルによる解析例

参考文献：①三島金丸，第33回年講，②金丸三島義満，第30回中四学講，③三島金丸，第31回年講，④金丸三島，宮本，第32回中四学講