

埼玉大学 大学院 学生員

○飯沢雅人

埼玉大学 工学部 正会員

佐藤邦明

はじめに

降雨によって地上に供給された水は、地中を鉛直方向に飽和浸透し、地下水面に到達する。このときの地下水帯への水供給量やその時間内的変化状態を知ることは、地下水の涵養機構や地下水流出現象を説明する上で、重要であると考えられる。しかしながら、鉛直方向に飽和浸透過程において、水分拡散方程式を厳密に解いて実際と対応させることは、困難を伴う。そこで、本研究では多孔体円筒を用いて実験をし、降雨と流出の応答関係を捉えるという立場より、降雨水浸透による地下水帯への水供給過程の定性的・定量的性格を検討した。

1. 実験方法

図-1に示すような、内径20cm、長さ90cmのアクリル製透明円筒に多孔体を数層に分けて一様に詰め、あらかじめオーバーフロー装置を調節して地下水面を設定しておき、注射針を用いた降雨シミュレーターにより表面に湛水が生じたい程度の降雨を与える。そして、鉛直方向に飽和浸透によって設定地下水面に到達する透過水を、オーバーフロー装置で計量し、ハイドログラフを得る。なお、多孔体としては、7号砂石($d_{50}=4.3\text{mm}$, 空隙率=49.2%)、3号砂($d_{50}=0.5\text{mm}$, 空隙率=48.5%)を使用し、降雨強度は、 $0\sim 40\text{mm/min}$ 、継続時間は、20min, 60minで、各々、数ケースの実験をした。

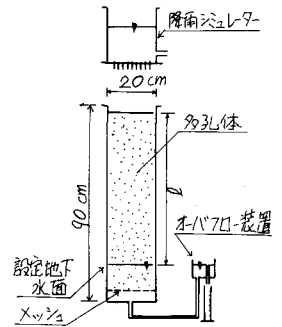


図-1 実験装置

2. 流出関数による表現

実験から得たハイドログラフに関して、流出関数による表現を試みた。流出関数 $K(t)$ としては、石原、斎藤らが由良川洪水解析の際に研究したものを用い、これに実際ハイドログラフの積分値、すなわち、総流出量 Q を掛けて次のように流出関数による単位時間当りの流出量 $g(t)$ を定めた。

$$K(t) = \alpha^{N+1} / \Gamma(N+1) \cdot t^N \cdot e^{-\alpha t}, \quad \overline{g(t)} = Q \cdot K(t) \quad \dots (1)$$

ここに、 α は係数、 Γ はガンマ関数、 N は降雨強度によって変化する数、 t は時間、である。

なお、 N 、 α は実際ハイドログラフの流出開始からピークまでの時間とピーク流出量が、 $\overline{g(t)}$ のそれと、一致するように、決定した。

3. 鉛直飽和浸透流の解析による流出量変化

Kluteの拡散方程式において、重力項を無視し、拡散係数 D が含水量にかかわらず一定であるとすれば、 θ が含水量、 z が表面からの鉛直距離、 t が時間のとき、 $\partial\theta/\partial t = D \cdot \partial^2\theta/\partial z^2$ となる。これを次の2つの場合について解く。(a)無降雨状態で、初期含水量 θ_0 が鉛直方向に一様に分布しているときに降雨を与える場合——初期条件、 $t=0$ で $\theta=\theta_0$ 、境界条件、 $z=0$ で $\theta=\theta_c$ (降雨時の地表面の含水量)、 $z=L$ で $\partial\theta/\partial z=0$ (土管上昇部に接続)。(b)降雨中で鉛直方向の含水量が θ_c で、一様に分布しているときに降雨を止めた場合——初期条件、 $t=0$ で $\theta=\theta_c$ 、境界条件、 $z=0$ で $\theta=\theta_c$ (土管含水量)、 $z=L$ で $\partial\theta/\partial z=0$ 。(2)

$$(a) \frac{\theta - \theta_0}{\theta_c - \theta_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{(2n-1)\pi} \exp\left\{-\frac{(2n-1)^2\pi^2}{4} T\right\} \sin\frac{(2n-1)\pi}{2} L, \quad (b) \frac{\theta - \theta_c}{\theta_c - \theta_c} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{(2n-1)\pi} \exp\left\{-\frac{(2n-1)^2\pi^2}{4} T\right\} \sin\frac{(2n-1)\pi}{2} L \dots (2)$$

ここに、 T, L は無次元量で、 $T=D^2 t / l^2$, $L=z/l$ であり、含水量は、体積含水率($V_v/V \times 100\%$)で表わすものとする。

この式(2),(a),(b)から、 $l=75\text{cm}$ 、 $L=1.0$ の位置での θ の変化を求め、それから流出量を求めた。すなわち、 $\theta > \theta_c$ のときは単位時間当り、 $q = (\theta - \theta_c) \cdot 100 \cdot A \cdot v$ (A は円筒断面面積、 v は θ の含水 線の降下速度)だけ流出し、 $\theta < \theta_c$ では流出しないと考え、 D, θ_c, θ_c をそれぞれ仮定して、試みに計算した。(図-2参照)

4. 実験結果と考察

図-3は、降雨強度 $R=21.0\text{mm}$ 、継続時間 $dt=60\text{min}$ 、 $R=7.0\text{mm}$ 、 $dt=240\text{min}$ について、実験と流出関数とを比較したもので、ゆるやかなハイドログラフの方が流出関数によって、良く表現できることが判る。他のデータについても同様の傾向を示した。また、前者の実測ハイドログラフに対して、前述の水分拡散理論において、 $D=15\text{cm}^2/\text{min}$ 、 $\theta_c-\theta_c=2\%$ と仮定して計算し、図中・で記した。これより、ハイドログラフの立ち上がり部分では大きな差がみられるが、下り部分では良く一致することが判る。次に、図-4は流出関数によって表現を試みた降雨に対して、降雨強度 R と式(4)中の N の値との関係を示したものであり、7号砂石に關しては右上がりの傾向にあることが判る。さらに多くの実験をし、 R - N 関係が明かできれば、降雨から流出を予測する手立てとなろう。

図-5は、降雨強度 R が異なる場合のハイドログラフの性格を示したものである。 R によって、流出開始までの遅れ時間やピーク流出量 g_{max} は変化するが、それぞれの下り部分では、お互いに一致するような傾向がうかがえる。これは、下り減特性が多孔体の物理的性質に依存しているためと考えられる。また、 R と g_{max} の関係を図-6に示したがほぼ比例関係にあることが判る。

図-7は、多孔体の粒径の大小に伴うハイドログラフの性格について示したものであり、7号砂石($d_{50}=0.43\text{mm}$)と3号砂($d_{50}=0.5\text{mm}$)に、ほぼ等しい強度の雨を降らせただけの場合について比較している。これより、粒径の大きい、すなわち、透水係数の大きいものの方が急峻な形状になることが判る。特に、降雨停止から、下り減が始まるまでの時間、排水に要する時間が短い。

図-8は、断続型降雨の場合のハイドログラフの性格について示したもので、同じ降雨でも、2ピーク流出量が極端に大きくなるという傾向を示すことが判る。

5. 結論

今回の実験より、比較的ゆるやかなハイドログラフは、流出関数によりある程度表現でき、また、水分拡散理論から求めた流出量曲線は、下り減部分では実測ハイドログラフとよく一致するが、立ち上がり部分では大きな差を生じる。さらに、ハイドログラフの性格として、同一多孔体では降雨強度によらず、下り減部分が一致することなどが判った。

(参考文献) (1) 金沢明治・高柳琢馬 著、水文学、朝倉書店、pp.203, (2) (1)に同じ pp.101~103,

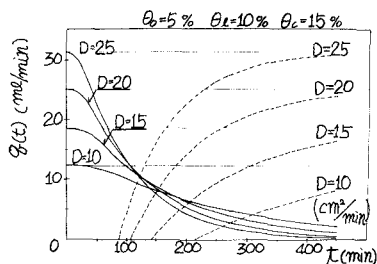


図-2 水分拡散理論による流出量変化

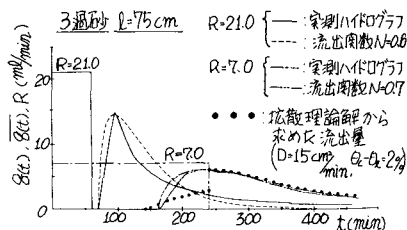


図-3 実験値と流出関数および拡散理論解との比較

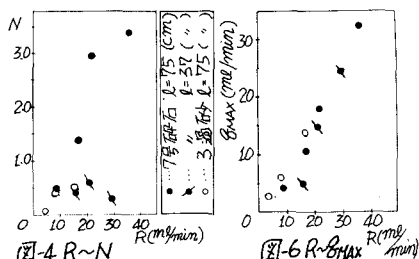


図-4 $R \sim N$

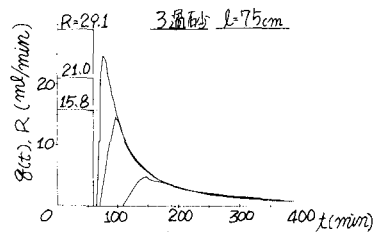


図-5 降雨強度とハイドログラフ

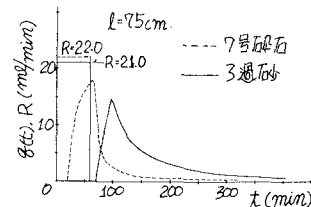


図-6 $R \sim g_{\text{max}}$

図-7 多孔体粒径とハイドログラフ

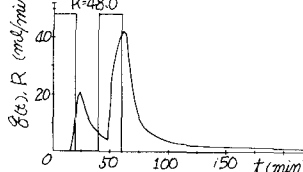


図-8 断続型降雨によるハイドログラフ