

開発土木研究所河川研究室

正員 市川 嘉輝 北海道大学

正員 藤田 睦博

正員 清水 康行 パシフィックコンサルタンツ

正員 寺島 貴志

1 はじめに

本研究では流出の特性を土層中の間隙水圧、及び流出量を測定することにより明確にする。また斜面の降雨・流出機構を物理的に表現すべく Richards¹⁾の式を用いて飽和・不飽和浸透流モデルの計を行い2次元斜面における降雨・浸透・流出実験との比較を行うことによりモデルの特性を検討する

2 実験装置

実験装置は図-1に示す土層部・降雨発生部のほか、流出測定部・データ表示および蓄積部より構成される。土層部には珪砂7号(粒径 $\phi = 0.2\text{mm}$)を充填し、下流端20cmには珪砂流出防止用の砂利を配置した。側面の21箇所には土中負圧(サクション ψ)測定のためのテンシオメーターを設置した。それぞれのケースの実験開始前には、土層内の初期条件を揃えるため2~3日の排水を行った。

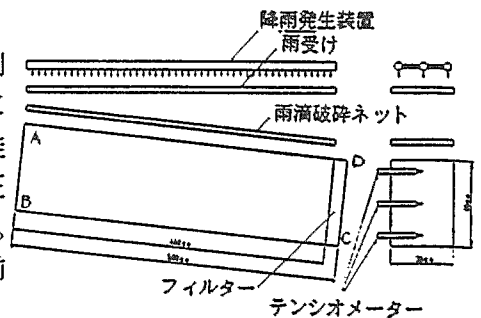


図-1 実験装置概要図

3 実験結果と考察

実験は、降雨強度が10mm/hrと30mm/hrの2種でそれぞれ斜面勾配が1/5と1/10の2種の験ケースを行った。このうち、条件が降雨強度10mm/hr、勾配1/5のハイドログラフを図-2に、

降雨強度30mm/hr、勾配1/10のハイドログラフを図-3に示す。ここで流出量は、浸透流 $[q_1(\text{mm/hr})]$ 、表面流 $[q_2(\text{mm/hr})]$ および全流出 $[q_3(=q_1+q_2)]$ である。サクションについては降雨強度30mm/hr、勾配1/10の条件

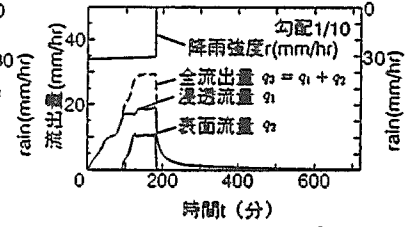
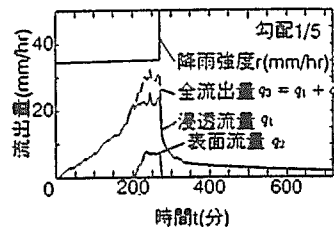


図-2 降雨強度及び流出量の時間変化 図-3

での水路上端・中間・下端での測定結果を図-4の(a)(b)(c)に示す。図-3、図-4によるといずれも浸透流が定常になり表面流出が発生したものである。表面流の流出が定常になり始めた頃のサクションを見るとほとんどの値が0以上となっはいるため、このことより、今実験の表面流は土層が飽和したためといえる。降雨停止直後、流出量が極端に減少している。同じくサクション図にも急激な負方向への変化を示している。降雨終了直後に、土層内の含水量の減少が急激に生じないにもかかわらず、サクションが急激に変化するのにはヒステリシス現象(土壌の湿潤過程と脱水過程の関係で同一の曲線を通らない現象)によるものと思われる。流出形態として、勾配の緩い方が急な方より土中流出のピークに達する時間は速いが、ピーク流出量は勾配の急な方が多い。これは、土中の初期条件や、重力による影響が大きいものと思われる。

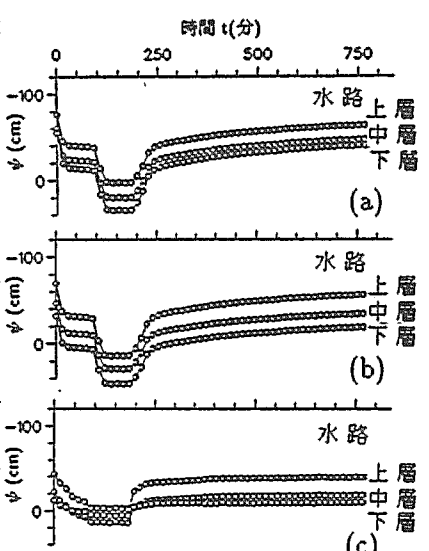


図-7 サクション ψ の時間変化

4 飽和・不飽和浸透流モデル

Richards¹⁾による飽和-不飽和浸透流解析を行う。(1)式は土中水分量の連続の式。ここで、 x は地表面に添った斜面方向、 z は x 軸と垂直な下方向、 V_x 、 V_z はそれぞれの浸透流速度の方向成分、 θ は体積含水率、 t は時間を表す。 V_x 、 V_z はダルシー則に従い(2)式で与える。ここで、 ϕ は全水頭、 K は透水係数を表す。(1)式に比水分容量 $C(\psi) = \partial\theta/\partial\psi$ を導入し(1)式を $\partial\psi =$ の式にする。斜面勾配は α 、 $\psi \sim \theta(\psi)$ および $\psi \sim K(\psi)$ の関係を、(4),(5)式に示す谷¹⁾の式で表す。 C は、(6)式を用いる。 S_e は、有効飽和度で、 $S_e = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$ と定義される。ここで、 θ_s は飽和含水率、 θ_r は移動可能な水がほとんど無いとみなせる含水率、 ψ_0 は比水分容量 $C \frac{\partial V_x}{\partial x} = 0$ (CD面)、 $V_z = r(t) \cos \alpha$ (AD面)の最大値を与える圧力水頭値、 K_s は飽和透水係数、 β は不飽和領域における不飽和透水係数の傾き。境界条件は、図-1に示した記号 A,B,C,D を用いて(7)式の様

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z}\right) \quad (1)$$

$$V_x = -K \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad V_z = -K \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2)$$

$$\phi = \psi - x \sin \alpha - z \cos \alpha \quad (3)$$

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi}{\psi_0} + 1\right) \exp\left(-\frac{\psi}{\psi_0}\right) + \theta_r \quad (4)$$

$$K = K_s S_e^\beta \quad (5)$$

$$C(\psi) = -(\theta_s - \theta_r) \frac{\psi}{\psi_0^2} \exp\left(-\frac{\psi}{\psi_0}\right) \quad (6)$$

$$[\psi = \psi'(\psi' \leq 0), \quad \psi = 0(\psi' > 0)] \quad (6)$$

$$V_x = 0 \text{ (AB面)}, \quad V_z = 0 \text{ (BC面)}$$

$$V_x = 0 \text{ (CD面)}, \quad V_z = r(t) \cos \alpha \text{ (AD面)} \quad (7)$$

に与える。ここで $r(t)$ は、降雨強度である。

5 実測値とモデルとの比較および考察

条件、降雨強度 10mm/hr、勾配 1/5 での計算結果と実験結果との比較を行なった。このケースは全ての降雨量が地表面から浸透することとして計算を行なった。本実験とは別に、鉛直浸透実験(図-5)および不飽和透水試験を行ない。パラメーターとして $\theta_r = 0.06$ 、 $\theta_s = 0.40$ 、 $\psi_0 = -25\text{cm}$ 、 $\beta = 2.00$ 、 $K_s = 8 \times 10^{-3}(\text{cm}/\text{sec})$ を得た。計算はクラック・ニコルソン法により差分計算を行なった。図-6に浸透流出量の時間変化の実測と計算結果の比較を示す。特に、降雨終了後に実測と計算の相違が目立つのは脱水過程における θ と ψ の関係式の与え方に問題があるためと考えられる。これは、もともと一価関数ではない θ と ψ の関係を図-5に示したような一価関数で表すことの限界とも言える。図-7にサクシオン ψ の時間変化の計算結果と実測の比較を示す。若干の相違が見られるが全体的には計算結果と実測の適合度は良い。

6 おわりに

本実験の、強降雨の場合において、勾配の違いによる流出形態で興味深い現象が見られた。数値計算との比較を行なった結果、土中のサクシオンについては実験結果の傾向をほぼ再現することが可能であるが、ヒステリシス現象の影響また、表面流発生時の扱い方等も今後の検討課題としたい。

参考文献

1) 日野幹雄、太田猛彦、砂田憲吾、渡辺邦夫：洪水の数値予報、森北出版株式会社、p120-128 1989.

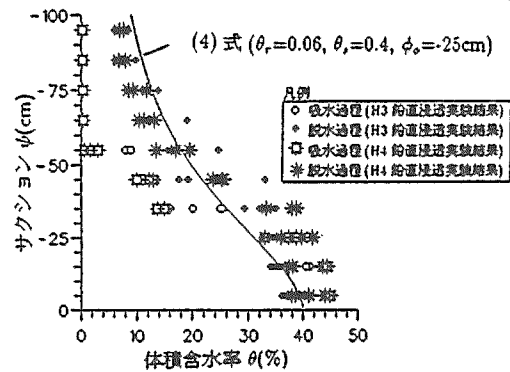


図-5 体積含水率 θ とサクシオン ψ の関係

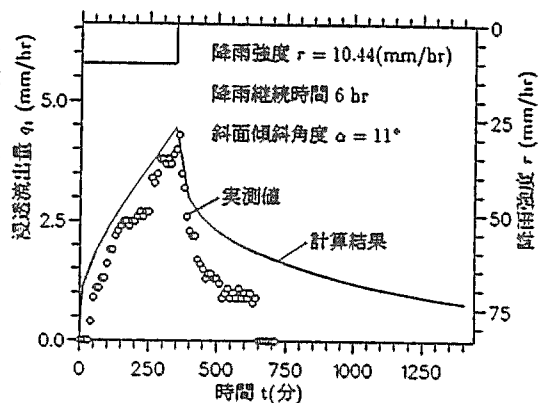


図-6 降水強度 r 及び浸透流出量 q_1 の

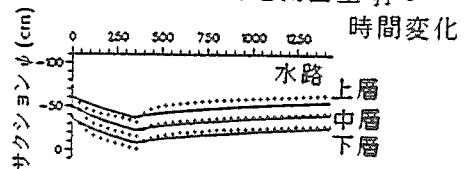


図-7 サクシオン ψ の時間変化