

II-6

実験斜面における流出測定および計算

北海道開発局 開発土木研究所 正員 市川 嘉輝
北海道大学 工学部 正員 清水 康行

1. はじめに

著者¹⁾らは平成4年度に室内で可傾斜水路を用いた雨水浸透流出実験を行った。実験では土中のサクションの測定と下流端流出の測定を行った。また、この実験結果に基づき Richards の式を用いた2次元斜面流出モデルを作成した。実験の中で降雨量の多かったケースでは、土層が飽和した後に表面流出が発生する現象が見られた。しかし、この時のモデル計算では降雨-流出課程はうまく表現することはできなかった。今年度は実験データを基に降雨開始から表面流出が発生するまでの課程を検討し、表面流出発生メカニズムの検討を行った。この結果を考慮して、表面流出と中間流出の相互作用をも考慮したより一般的な流出モデルの作成を行った。

2. 実験装置と条件

実験装置は、表層土として上流端面と底面を不透水面とした水路に、延長480cm、深度40cm、幅30cmに珪砂を敷き詰めたものを用いた。水路の側面にテンシオメータを21箇所(図-1)設置しサクションと水路下流端では流出量を、それぞれ単位時間ごとに測定した。本研究に使用した実験条件は、水路勾配1/5、降雨強度30mm/hr、降雨時間4.5hrである。

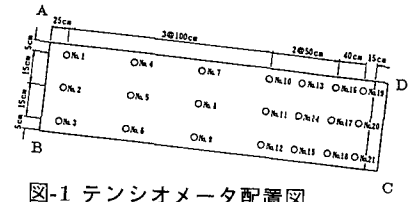


図-1 テンシオメータ配置図

3. 土中水の推移

土中の水分移動はサクションの測定値より推定した(図-2)。はじめサクションは不飽和の状態であるため全て負の値を示しており、重力水頭とのバランスにより各々の値で分布している。降雨を開始し、しばらくすると水路下端の不透水面上に自由水面が現れた(図-2a)。その後、水路側面のテンシオメータが下段に位置するものから上段の方へ、不圧値から正圧値へ変化して行きそのことにより自由水面が上昇していく様子がわかった(図-2b)。自由水面が上昇し地表面にまで達すると、その達した地点より表面流出が発生した。初めに自由水面が地表面に現れた位置は水路最下端でなくそれよりやや上流であった。これは流入と流出のバランスで流出が流入に追いつかないために水が貯留し自由水面となって現れたものと考えた。

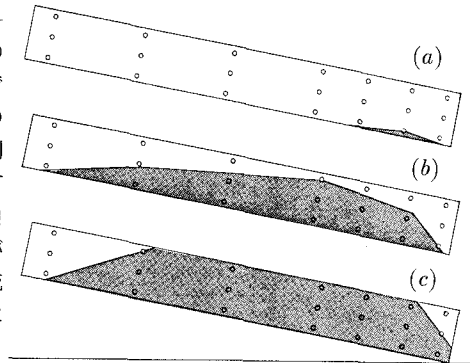


図-2 自由水面の推移図

地表の飽和面は土層が飽和していくとともに広がっていき、最後には地表全面にまで広がった(図-2c)。

4. 流出計算

流出計算は表面流出の計算と中間流出の計算に分けて行った。以下にその基礎式を記す。

表面流出計算

$$\frac{\partial h}{\partial t} + C_o \frac{\partial h}{\partial x} - r_* = K_o \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right)$$

$$C_o = V_o(1 + m)$$

$$K_o = \frac{V_o h j_o}{I_o}$$

$$V_o = Dh^m I_o^j \quad (4)$$

- (1) h は表面流水深、 x は水路斜面方向長、 t は
(2) 時間、 V_o は流速を表し本研究ではマンニング
の流速式を用いた、 I_o は近似的に河床勾配
(3) を用いる。

中間流出計算

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$V_x = -K_x \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad V_z = -K_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (6)$$

$$\phi = \psi - x \sin \alpha - z \cos \alpha \quad (7)$$

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi}{\psi_0} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\psi}{\psi_0} \right) + \theta_r \quad (8)$$

$$K = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\beta \quad (9)$$

z は流下方向の鉛直下方向成分、 θ は体積含水率、 ϕ は全水頭、 α は水路勾配、 θ_s は飽和含水率、 θ_r は水の移動がないと思われる含水率、 K は不飽和透水係数、 K_s は飽和透水係数、 β は不飽和領域における透水性の程度を表す。

5. 計算結果と考察

表面流出の計算は土層の表面に一番近い計算点のサクシオン ψ がゼロになった時点から開始した。このとき降雨強度は浸透に寄与する成分と表面流出に寄与する成分に分かれるものとした。計算条件は実験条件と同じとし、その他計算に必要なパラメータとして粗度係数 $I_o = 0.01$ 、 $\theta_r = 0.07$ 、 $\theta_s = 0.44$ 、 $K_s = 1.5 \times 10^{-2} (cm/sec)$ 、 $\beta = 10.0$ を用いた。中間流出計算は土層を x 方向に20分割、 z 軸方向に10分割、表面流出は x 軸方向に20分割し、クランク・ニコルソン法による差分を用いた計算を行った。図-3に降雨強度 r と流出量 q の時間変化を示

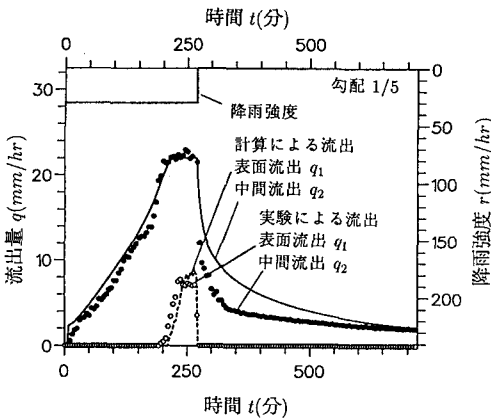


図-3 降雨強度 r と流出量 q の時間変化図

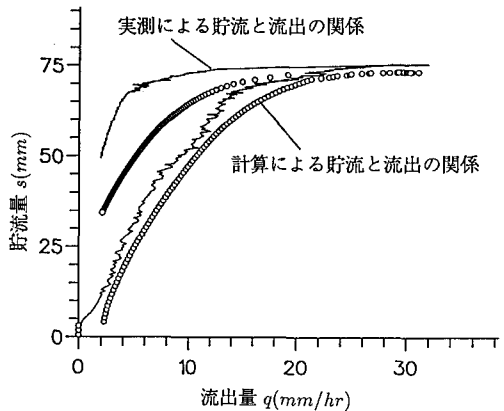


図-4 流出量 q と貯留量 s の関係図

す。計算のうち特に表面流出量は発生からピークおよび減水にいたるまで実測値をほぼ表現できている。中間流出量も上昇期における実験値との適合性は良好であるが、降雨停止後の流出において誤差が見られる。図-4に流出量 q と貯留量 s の関係図を示す。図中において $s-q$ の関係が流出量 q 軸に水平になる部分がある。これは土層が全て飽和し、表面流が発生し流出していることを表している。実測値と計算値を比較すると、 $s-q$ カーブのループの面積において、計算結果の方がせまい。これは図-3に示したように降雨停止後における計算の流出量の実測の流出量より多いため、すなわち計算上では降雨停止後の流出が実際より多く生じていることによる。

6. おわりに

本研究においては、まず実験水路内に設置されたテンシオメータによるサクシオンより自由水面の動きを把握し、これと表面流発生との因果関係を調べた。次に、表面流と中間流の両方を扱える数値計算モデルを作成し、このモデルを用いて実験の再現計算を行った。計算モデルにより表面流出を含めた降雨と下流端流出量の関係や下流端流出量と貯留量の関係をほぼ再現することが可能となった。ただし、本研究における実験、計算ともに非常に単純化された条件で行われているため、今後はより一般性を持たせた検討が必要と考えられる。

<参考文献>

- 市川嘉輝、山本太郎他:地下水流を考慮した流出モデルに関する研究, 1993, 北海道支部論文, 第49号
- 市川嘉輝、清水康行:表面流を考慮した中間流出モデルに関する研究, 1994, 北海道支部論文, 第50号