

1.はじめに

黄土高原砂防工事の発展とともに土壌の侵食定量研究に対する要求は強くなっている。筆者らは人工降雨装置を使って、種々の植生条件のレス斜面で降雨実験をした。そして、一定降雨強度に対応する地表流の流出量と土砂侵食量を測定し、レス斜面における降雨侵食プロセスを分析して数値モデルの構築を試みた。黄土高原における砂防の主な目的は水と土砂の保全である。そこで以下のような二つの部分で検討した。(1)降雨時不飽和斜面における土壌水の流動モデルを構築して、降雨時の土壌含水量と地表浸透能の変化を計算する。(2)斜面における降雨→流出→侵食という過程を分析し、流出量と土砂侵食量を計算する。その後、実験と比較する。

2.降雨時レス斜面の土壌の浸透則について

降雨時土壌含水量及び浸透能の経時変化は、斜面の流出流量と土壌の侵食抵抗能力を把握する場合極めて重要である。レスが更新世に風で運ばれて堆積した無層理、均質的な陸上堆積物であるという説に基づいて、黄土高原で典型的な斜面状況を考えると図1のような模式図となる。

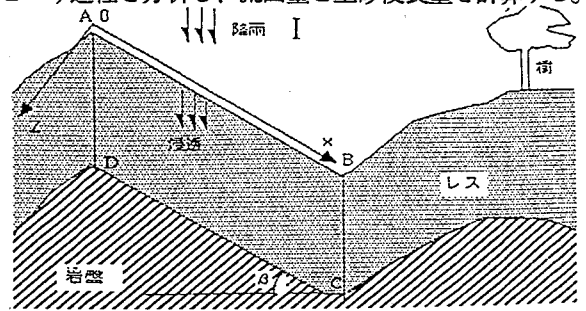


図1 降雨時の斜面における水の移動の模式図

2.1 モデル

図1のABCD区域における水の運動に対して、斜面の場合にはダルシー拡散方程式は次の式になる：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_x(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_z(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial K_x(\theta)}{\partial x} \sin \beta - \frac{\partial K_z(\theta)}{\partial z} \cos \beta \quad (2.1)$$

ここで： $\theta$ ：土壌の含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )； $D(\theta)$ 土壌の拡散率； $K(\theta)$ ：土壌の浸透能である。この問題に対して： $D(\theta) = -K(\theta) \partial h_c / \partial \theta$ 、 $h_c(\theta)$ ：土壌の吸水力。

レスは厚くて、浸透能も小さい、山の対称性を考えて降雨時自然の斜面に対して、下記のような二つの状態に応じて数値モデルを提案する。

(A):地表水流が発生しない時の解析条件：

$$\begin{aligned} \theta(x, z, t) &= \theta_0(x, z, 0) & t &= t_0 = 0 \\ \sin^2 \beta K_x(\theta) + \cos^2 \beta K_z(\theta) - \sin \beta D_x(\theta) \partial \theta / \partial x - \\ & - \cos \beta D_z(\theta) \partial \theta / \partial z = i \cos \beta & \text{ABに沿い, } 0 < t \leq t_p \\ \cos \beta \partial \theta / \partial x - \sin \beta \partial \theta / \partial z &= 0 & \text{BC, ADに沿い, } 0 < t \leq t_p \\ \theta(x, z, t) |_{z=z_1} &= \theta_0(x, z_1, 0) & \text{DCに沿い, } 0 < t \leq t_p \\ & \dots \dots \dots & \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (2.2)$$

(B):地表水流が発生した後の解析条件：

$$\begin{aligned} \theta(x, z, t) &= \theta_0(x, z, t_p), & t &= t_p \\ \theta(x, z, t) &= \theta_b & \text{ABに沿い, } t > t_p \\ \cos \beta \partial \theta / \partial x - \sin \beta \partial \theta / \partial z &= 0 & \text{BC, ADに沿い, } t > t_p \\ \theta(x, z, t) |_{z=z_1} &= \theta_0(x, z_1, t_p) & \text{DCに沿い, } t > t_p \\ & \dots \dots \dots & \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここで： $t_p$ ：地表流開始に対応する時間； $\theta_b$ ：飽和含水量である； $R(t) = I \cos \beta$  I：実際の降雨強度である。

(C)：浸透総量（斜面の幅： $D_s$ ）：

$$W(t) = D_s \int_0^{z_1} \int_0^{x_1} [\theta(x, z, t) - \theta_0(x, z, 0)] dz dx \quad (2.4)$$

(D)：地表単位面積の平均浸透能の変化則（斜面の面積：）

$$P(t) = \partial w(t) / \partial t / S \quad (2.5)$$

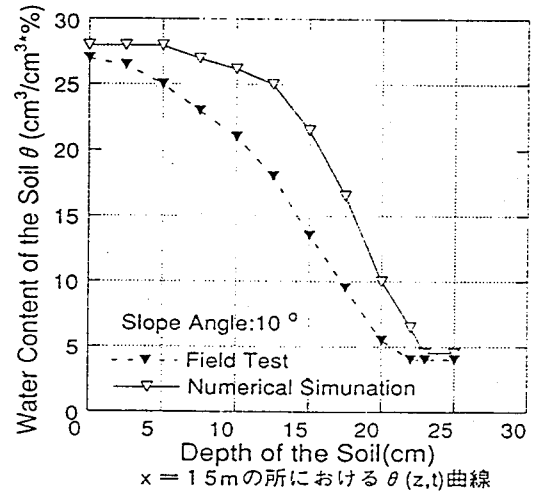


図2 降雨後の斜面土壌含水量の変化

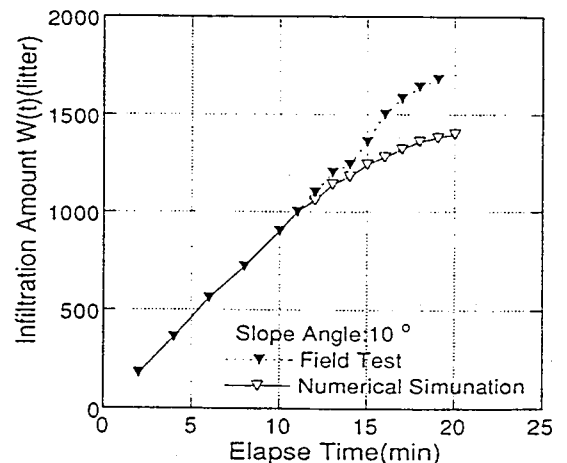


図3 総浸透水量の経時変化

## 2.2 モデルの数値計算

上述の方程式は非線形なのでここでalternating direction implicit method と predicting-correcting method を使って方程式を線形化させ、含水量の変化と総浸透量を計算した。計算時、採用したパラメータは下記のとおりである。 $K_{\lambda}(\theta)=16.3\theta^{9.08}$ (cm/min),  $D_{\lambda}(\theta)=258.21\theta^{5.91}$ (cm<sup>2</sup>/min)、 $\theta_b=0.30$ 、同じ土層に対して $D_x(\theta)=\lambda D_{\lambda}(\theta)$ と仮定すると、 $K_x(\theta)=\lambda K_{\lambda}(\theta)$ になり、逆計算を通して、 $\lambda=0.77$ を求めた。計算した結果は図2.~図4.で示している。

### 3. 斜面表流水の流出量と土砂侵食量の予測

#### 3.1 表流水の流出量予測

一定時間経過後、地表蒸散量を無視すると、降雨、浸透、地表の流出の連続方程式は以下のように表れる(図5.)。

$$i_e - P = \partial r / \partial t + \partial q / \partial x \quad (3.1)$$

ここで、 $i_e$ :有効降雨強度(mm/min);  $P$ :地表の浸透能(mm/min);  $t$ :時間;  $r$ :流出の水深(mm);  $q$ :流出の単位幅あたり流量(mm<sup>2</sup>/min)。

黄土高原での降雨による斜面流出は平均的に薄い。流出を等速流と見なせば、Carson, M.A.(1984)の理論により表流水の平均流速 $V_0$ と単位幅あたりの流量 $q$ は下式を得る。

$$V_0 = C_1 (\sin 2\beta)^{0.5} r^{0.5+b};$$

$$q = V_0 r = C_1 (\sin 2\beta)^{0.5} r^{1.5+b} \quad (3.2)$$

ここで、 $C_1$ :定数;  $b$ :修正係数、 $1/8 \leq b \leq 1.0$

方程式(3.1)と(3.2)から水深 $r(t,x)$ を求めると、斜面末端部の流出流量は計算できる。

#### 3.2 斜面の流出量に対応する土砂侵食量

(1): 芦田(1986)理論により単位幅あたりの流量による掃流砂量:

$$q_B(x) = q_{\max} \{ 1 - \exp[-(\tau - \tau_0)/(\tau - \tau_0 + 0.03)]x/D/100 \} \quad (3.3)$$

ここで、 $q_B(x)$ :  $x$ のところにおける単位幅あたりの流出量に含まれる掃流砂 $q_{\max}$ : 流出に対する最大運搬掃流砂;  $D$ : 土砂の直径;  $\tau$ : 流出のせん断力;  $\tau = C_3 V_0^2$ ;  $C_3$ : 定数;  $\tau_0$ : 定数、土砂のせん断抵抗力。

(2): H.A.Einstein(1972)の理論によって単位幅あたりの流量による浮遊砂量:

$$S_q = c_2 q_B(x) \left[ \int_0^1 (1 + 2.5 \ln r') / r' dr' \right] \quad (3.4)$$

ここで、 $S_q$ : 単位幅あたりの流出量に含まれる浮遊砂、 $r' = r_y / r$ 、 $r_y$ は斜面からの距離;  $c_2$ : 修正係数である。

(3): 流出の単位幅あたり流量による土砂量:

$$q_s(x) = q_B(x) + S_q(x) \quad (3.5)$$

#### 3.3 計算と試験結果

問題の簡化のために、土砂侵食量を計算する時、全部の係数を合併させて一つのパラメータとして扱う。後、逆計算を通して実験曲線に合うようにパラメータを求めた。計算結果は図6.~図7.で示している。

#### 4. おわりに

以上の図で見ると構築したモデルにより計算した結果は実験結果と比べると、若干の誤差はあるものの、よく一致した。

5. 参考文献: 1) 王 功輝: 黄土高原斜面侵食に関するダイナミクス分析、蘭州大学修士論文(中国語で)、1991。

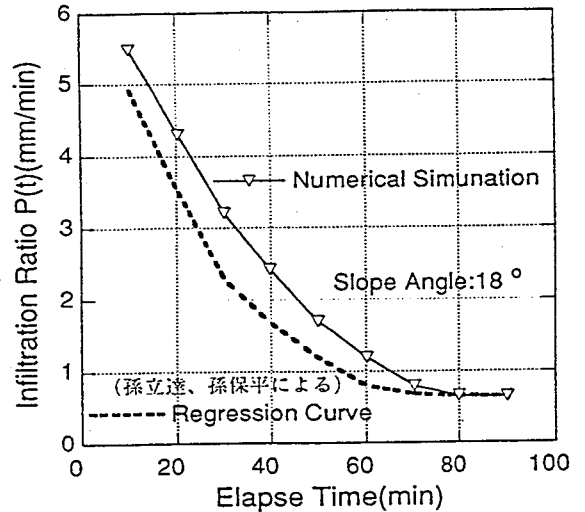


図4. 斜面浸透能の経時変化

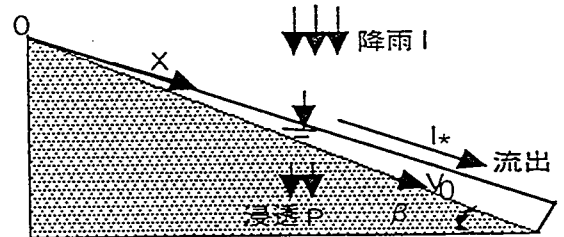


図5. 斜面における降雨、浸透、流出の関係

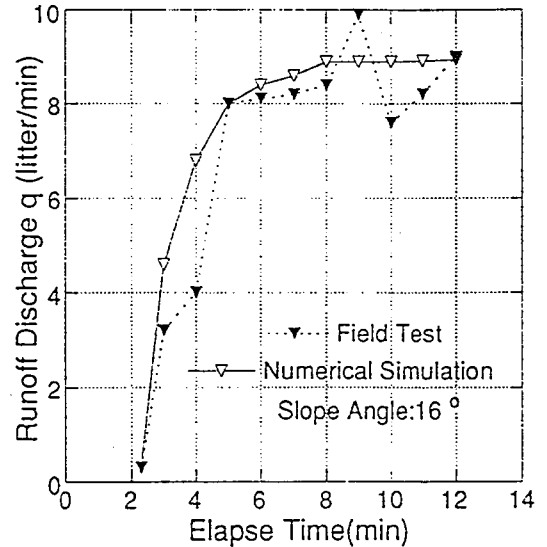


図6. 流量の経時変化

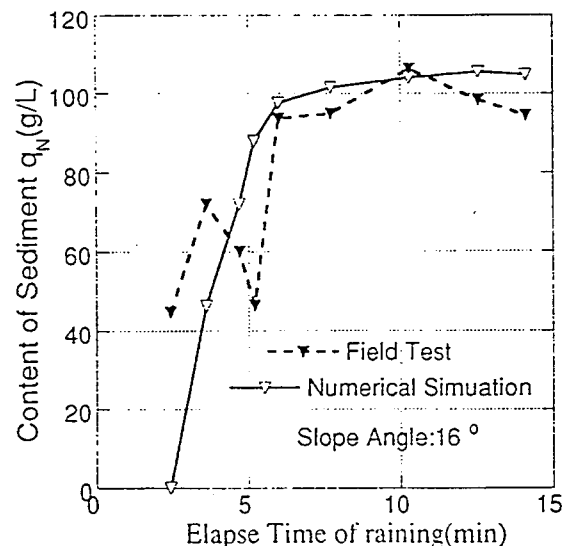


図7. 土砂量の経時変化