

1. まえがき 斜面侵食の形態には、ある広がりをもってほぼ均一に生じる面状侵食 (sheet erosion) と、流路を形成してその部分に侵食が集中する雨裂侵食 (gully erosion) とがあり、通常、侵食の進行に伴って前者から後者への移行が生じる。その過程において、どの程度の規模の流路が形成され、侵食量などのようになるかを予測することは、斜面自体の維持および下流への過度の土砂流出防止の対策をたてる上で重要となる。

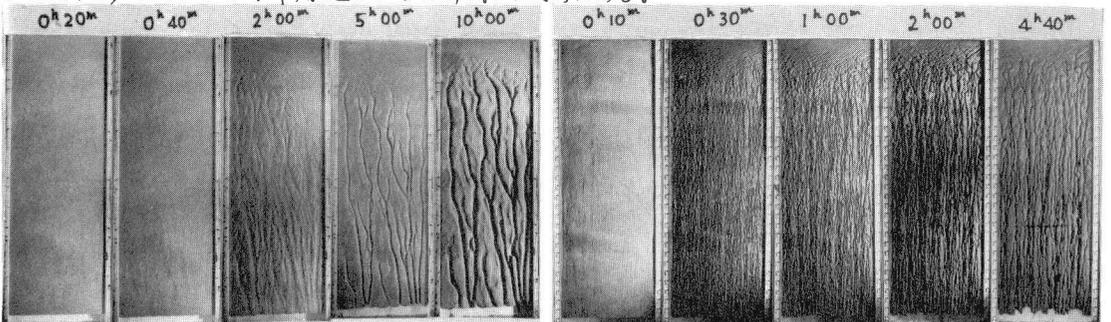
本研究は、そのような観点から、裸地斜面における流路網の形成過程について、実験的検討を行うとともに、降雨条件や斜面条件からそれを予測するシミュレーションモデルを提示しようとするものである。

2. 人工降雨による流路網の形成に関する実験

a) 実験方法 実験に用いた斜面は、幅1m、長さ3m、深さ10cmの土槽に、粒径1mmの砂とベントナイトと水を重量比9:1:3で練り合わせて8cmの厚さに敷いたもので、時間雨量120mmの霧状の人工降雨を与えて、流路網の発達状況および下流端流出土砂量を測定した。斜面勾配は、1/5 (約11°) と 2/3 (約34°) の2通りで、それぞれ、EXP.ⅡおよびEXP.Ⅲと呼ぶ。なお、著者ら¹⁾は以前に、同じ斜面、同じ材料を用いて上端給水による侵食実験を行っている (EXP.Ⅰ)。

b) 実験結果 写真-1は、EXP.ⅡおよびⅢにおける流路網の発達状況を示したものである。いずれのケースでも、降雨開始後まもなく斜面全体が sheet flow で覆われるが、数分後にはほぼ等間隔 (EXP.Ⅱでは約2cm、EXP.Ⅲでは約1.5cm) で高さ1mm程度の縦筋が見られるようになる。この縦筋が発達すると、周辺に比べて相対的に流速や水深の大きい部分が明瞭に識別できるようになり、これを流路と呼ぶことにする。個々の流路は不規則に変動しながら分合流をくり返すか、やがて合流の過程が支配的となり、1~2時間後には流路網の骨格はほぼでき上がる。流路の横断形状は最初は比較的扁平であるが、しだいに幅・水深比が小さくなり、やがてほぼ一定の幅・水深比 (約5程度) を示すようになる。さらに時間が経過すると、流路内に縦断方向の凹凸が発達するとともに、流路の低下と蛇行が合わさったいわゆる穿入蛇行が顕著となり、流路壁面のオーバーハングも随所に見られるようになる。

図-1~3は、流路本数、流路幅密度 (斜面全幅のうちで流路部分の占める割合) および下流端流出土砂量の変化を示したものである。図中には、後述のシミュレーション結果も合わせて載せてある。流路本数と流路幅密度はいずれも時間の経過に伴って減少するが、その変化速度はしだいに遅くなる。一方、流下方向への変化は初期を除いてきはほど顕著でなく、大局的には一定とみよされるが、これは、上端給水の場合に流路本数や流路幅密度が流下方向に減少するのと著しく異なっている。下流端からの流出土砂量は、EXP.Ⅱでは時間的にほぼ一定であるのに対し、EXP.Ⅲでは時間の経過とともに漸減する傾向にある。



EXP. II

写真-1 流路網の発達状況

EXP. III

3. 流路網の発達過程に関するシミュレーション

流路網の発達過程には、流路の分裂と統合の過程があるが、比較的初期の段階を除けば統合の過程が卓越する。流路の統合の原因は個々の流路の横変動と合流点における流量配分の偏りにあり、それらを適切にモデル化することによって、流路網の発達過程の予測が可能となる。

そこで、各流路の流量と勾配から水理量を決定論的に求めた後、材料の侵食性や流路の蛇行特性を加味して、ある時間差分 ΔT 内の流路の横変動 ΔY を確率的に選択し、合流判定を行って流路網を再編するという手順でシミュレーションを行った。この手法は以前¹⁾に、上端給水の場合を対象として考案したものであるが、その基本式を要約すると、表-1のようになる。ここに、各記号は慣用に従っているが、図-4に示すように、 ΔY_{max} は ΔT の間に可能最大横変動、 ΔY_{dmax} は流下区間 ΔX における流路偏倚量の概略の上限値を表しており、 ΔY は、 ΔY_{max} と ΔY_{dmax} の両者により、規定される範囲から、一様乱数に従って選択する。

流量 Q は、上端給水の場合には流路網をたどって直上流の流路の流量を受け継げばよいが、降雨がある場合には、さらに周辺の集水域からの雨水の流入を加える必要がある。これが今回のシミュレーションの主要な変更点であり、 ΔX 間の流量の増分は、流路の配列状況に応じて、図-5の斜線で囲まれた領域の面積に有効降雨強度をかけて求めている。計算条件は、EXP. II および EXP. III に対応させ、それぞれ RUN-II、RUN-III と呼び、材料の侵食性を $E/u_{*c} = 0.75 \times 10^{-4}$ 、流水の抵抗係数を $f = 0.5$ 、流路の横断形状を $b/h = 5$ で代表させることにした。パラメータ α および β はいずれも 1 とおいている。

4. 考察 図-1, 3に見られるように、本シミュレーションによって、流路本数と流出土砂量はかなりよく模擬できている。図-2に示す流路幅密度は、実験とシミュレーションの間にかつり目の隔たりがあるが、EXP. IIIの流路幅は実験中に直接計測したのではなく、斜面上方から撮影した35mmフィルムを拡大投影して溝幅(水面幅ではなく、側壁間の距離)を読み取ったものであり、必ずしもシミュレーション結果と流路幅を過小に評価しているとは言いつれもない。しかし、いずれにしても、初期流路本数やパラメータ α , β の選定方針について、さらに検討を加える必要がある。

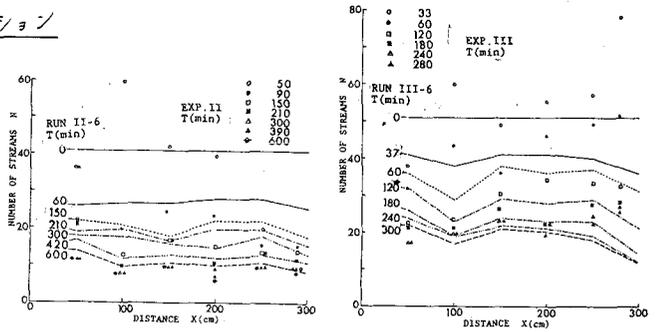


図-1 流路本数

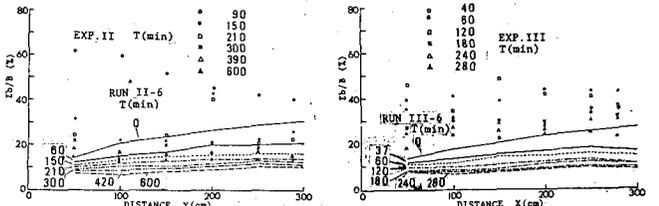


図-2 流路幅密度

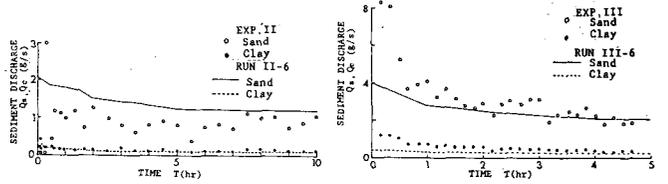


図-3 流出土砂量

表-1 基本式

$$Q = b \cdot h \cdot V \quad \dots (1) \quad U/u_{*c} = \sqrt{8/f} \quad \dots (2)$$

$$u_{*c} = \sqrt{g \cdot h \cdot I} \quad \dots (3) \quad E = f_n(u_{*c}) \quad \dots (4)$$

$$u_{*c}/u_{*c} = \sqrt{8/f} / [6.0 + 5.75 \log_{10}(h/d)] \quad \dots (5)$$

$$\Delta Y_{max} = \alpha \cdot \{ E / (h/b) \} \cdot \Delta T \quad \dots (6)$$

$$\Delta Y_{dmax} = \beta \cdot b \quad \dots (7)$$

$$\Delta Z = E \cdot b \cdot \Delta T / (b + |\Delta Y|) \quad \dots (8)$$

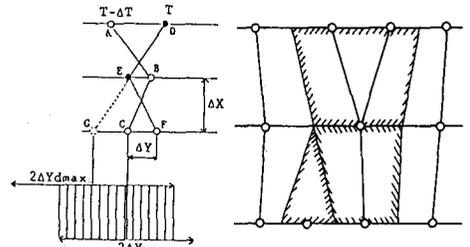


図-4 流路の横変動

図-5 集水域の分割

Figure 5: Watershed division. A schematic diagram showing a watershed divided into sub-watersheds by stream channels. The diagram shows a cross-section of the watershed with points A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z. The watershed is divided into sub-watersheds by stream channels.

1) 芦田和男・田中健二：裸地斜面における流路の形成過程に関する研究，京大防災研年報，第18号B，昭50。