

土壌侵食におけるリル発生限界

山口大学工学部 正員 藤原 輝男
 宮崎大学農学部 細山田 健三
 山口大学農学部 日下 達朗
 福山コンサルタント 正員 O山本 幸夫

1. まえがき 地表に雨が落下すると水は地下に浸透するが、土が飽和状態に達すると地表のくぼみに集中するようになる。これが斜面だとその作用は一層強く流れを生じ易くなる。そして、表流水や降雨エネルギーによる飛散により土壌侵食を引き起こす。また、その斜面状態が悪く、強い降雨強度のもとでは、流れはかなり収束し溝を形成する。そうしてできたものがリルである。本論文は、模擬降雨装置を用いてモデル斜面に雨を降らせ、リルの発生及び発達過程を解析をした。

2. 実験方法及び実験条件 実験方法：試料土を所定の乾燥密度になる様に実験斜面に充填し、実験開始までシートで覆い所定の降雨強度に模擬降雨を調節して、シートをはずして実験を開始する。実験開始後、リルが発生する角度に至るまで、徐々に傾斜を上げていく。リルが発生すると傾斜を固定して実測を開始する。

実験条件：降雨強度が70 mm/hr から120 mm/hr まで10 mm/hr ごとに変化させた6種類、乾燥密度が1.20 g/cm³ から1.60 g/cm³ まで0.1 g/cm³ ごとの5種類、上記を組み合わせて合計30種類について実験を行なった。

3. リルの発生状況及び発達状況 リル発生状況：雨が地表に降ると、わずかの間は雨水は土を浸透していくが、土が飽和状態になるとすなわち浸透速度より流下速度の方が大きくなると流れはすぐ斜面上のわずかのくぼみに集中して流れる。掃流砂を動かす流水の力を掃流力というが、掃流力は流水が底面に及ぼすせん断力であって、静止状態の河床土に働いて移動を開始させる限界のせん断力が限界掃流力である。掃流力が限界掃流力を上回ると砂が移動しはじめる。しかし、ある程度の掃流力の流水で移動した砂はすぐに堆積してしまう。それ故、ある程度の傾斜、流量においてはリルは発生しないのである。しかし、ある傾斜、流量を越えると堆積した砂をも流れ方向に侵食し始め、ついには堆積層を突き破って下方へ流下していく。その様にして生じた浅い溝をリルと呼ぶ。このリル内において土砂は掃流砂や浮流砂として流下したり、それとは逆に堆積したりする。

リルの発達状況：斜面に雨が降ると降雨エネルギーによりかなりの土が飛散される。土中に雨水が浸透して飽和状態になると、下端には(Photo 1)にみられる様な溝が発生する。始めは2~3本の溝ができるがしだいに流れが1本に集まる様になってくる。その状態に達すると流出土量が大量に出だしてリルが形成される。しかしリルが発生しても初期には発達しない。それは、かなりの傾斜、流量がないといずれ下方に土が堆積し、実際として傾斜が緩やかになるからである。この場合リル谷頭では侵食が進むが、下方では堆積作用が進む。これはある長さのリルがしだ

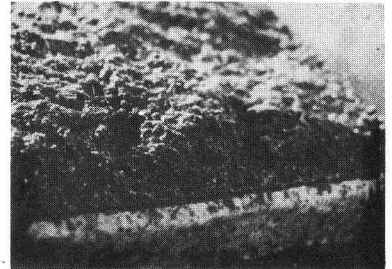


Photo 1 Initial stage of rill occurrence

いに上方へ登っていく様に見られる。かなりの傾斜、流量で本格的にリルが形成されると流水はリルの中を集中的に流れ、リル底を侵食して深さを増す。(Photo 2) それと同時にリルの頭部が侵食されるので、リルは長さを増し傾斜の急な谷壁を持つガリ(gully)に発達する。ガリとは底部が地下水面まで到達していないもの、つまり降水時のみ水流を見るものである。リルの側壁で、ある程度までしか侵食(崩壊)が起らないのは、リル谷頭に比べて表流水の流下が少ないために同じ降雨エネルギーのもとでも崩壊が起きにくいのである。

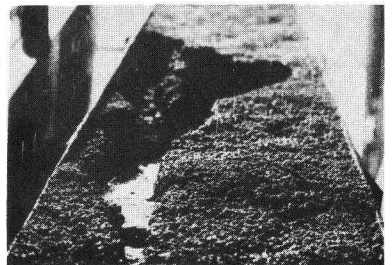


Photo 2 Developed stage of rill

4. 実験結果及び考察 リル発生限界：降雨強度 I (mm/hr) , 傾斜角度 λ (%), 乾燥密度 ρ_d (g/cm³) のうち $I=90$ (mm/hr) , $\lambda=45$ (%), $\rho_d=1.4$ (g/cm³) の標準状態に1つでも含まれるとリルが発生するかどうかグラフにより知る事ができる。ここでリルというのは、1(sec) 当り、巾1(cm) 当りの流出土量の無次元量 $q/\sqrt{sgd}$ が2を越える場合を考えた。というのは $q/\sqrt{sgd}$ の値が1前後を最低としてそれ以上でリルが発生しているが 2を越えて本格的リルに発達する事、また Fig.3 に示す様に表面侵食の状態では2を越えたものがない事より決定した。

リル発生限界傾斜：リル発生限界傾斜は Fig.1 に示す様に $I=90$ (mm/hr) のもとでは $\rho_d=1.4$ (g/cm³) 以上では約 43 (%) となっている。また ρ_d が 1.2 (g/cm³) 付近で約 35 (%) の値を示しているのは、既述 1.3 (g/cm³) 前後が最も流出土量が多いためである。

リル発生限界降雨強度：Fig.2 より $\lambda=45$ (%) 一定のもとでは ρ_d が 1.35 (g/cm³) 付近で $I=75$ (mm/hr) を最低として前後にしたいに大きな降雨強度でリルが発生する、これも ρ_d の持つ特色と一致するものである。

リル侵食に影響を及ぼすと予想される物理量について次元解析を行なった。

$$q = f(q, I, d, \nu, \rho, R, L_{rill}, \nu) \quad (1)$$

ここで繰り返し変数を q, d, ν として無次元量を求めると

$$f(I/\sqrt{gd}, \nu/\sqrt{gd}, \nu/\sqrt{gd}, R/d, L_{rill}/d, \nu/\rho g, \sqrt{sgd}/q) = 0 \quad (2)$$

$$q/\sqrt{sgd} = f(I/\sqrt{gd}, \nu/\sqrt{gd}, \nu/\sqrt{gd}, R/d, L_{rill}/d, \nu/\rho g) \quad (3)$$

またより相関の高い無次元量を得るために次の操作を行なった。

$$\begin{aligned} I/\sqrt{gd} \times \sqrt{R} &= I/\sqrt{gR}, \quad \nu/\sqrt{gd} \times \sqrt{R/d} \times R/d = \nu R/d \\ R/d \times q/\sqrt{sgd} &= qR/\sqrt{sgd}, \quad \nu R/d \times \sqrt{R/d} \times \sqrt{gd}/\nu R = \nu d/\sqrt{sgd} \end{aligned} \quad (4)$$

これより次の結果が得られた。

$$q/\sqrt{sgd} = f(I/\sqrt{gR}, \nu R/d, qR/\sqrt{sgd}, \nu d/\sqrt{sgd}, L_{rill}/d, \nu/\rho g) \quad (5)$$

式(5)において全データを代入して次の機微解析式を得た。

$$q/\sqrt{sgd} = 0.057 \cdot (I/\sqrt{gR})^{0.997} \cdot (L_{rill}/d)^{-0.871} \cdot (qR/\sqrt{sgd})^{0.519} \cdot (\nu d/\sqrt{sgd})^{0.116} \cdot (I/\sqrt{gR})^{0.793} \cdot (\nu/\rho g)^{-0.013} \quad (6)$$

リル侵食変数 V, R, L_{rill} の表式

$$V = 24500 \cdot I^{1.57} \cdot \rho_d^{0.304} \cdot \nu^{-0.37} \quad (7)$$

$$R = 0.688 \cdot I^{-0.091} \cdot \rho_d^{-1.032} \cdot \nu^{0.001} \cdot L^{0.322} \quad (8)$$

$$L_{rill} = 1470 \cdot I^{0.549} \cdot \rho_d^{-1.27} \cdot \nu^{-0.591} \cdot L^{2.09} \quad (9)$$

式(6)の左辺を2とおいてこれを越えるものをリルとし、式(7),

(8), (9)を代入して解析を行なうと次の結果を得た。

$$1 = 3820 \cdot I^{2.31} \cdot \rho_d^{-1.65} \cdot L^{2.17} \cdot \nu^{-1.78} \quad (10)$$

左辺をKとおく

$$K = 3820 \cdot I^{2.31} \cdot \rho_d^{-1.65} \cdot L^{2.17} \cdot \nu^{-1.78} \quad (11)$$

このKの値が1を越えるとリルが発生する。

表面侵食との比較：リル発生と侵食の過渡期をばいいて、リル発生前の状態を表面侵食の状態といい、その実験結果と無次元量を比較したのが Fig.3 である。Fig.3は掃流力の無次元量 ($qR/\sqrt{sgd}$) と、単位巾、単位時間当りの流出土量の無次元量 ($q/\sqrt{sgd}$) との関係で、($q/\sqrt{sgd}$) が0.5~1の付近のデータがない、今後の課題として表面侵食状態からリル侵食状態になるまで連続的に実験を行ないその過渡期の状態を詳しく研究したいと思います。

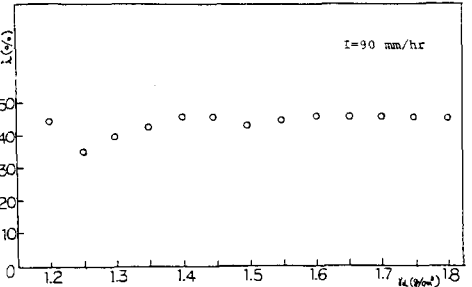


Fig.1 Limits of rill erosion

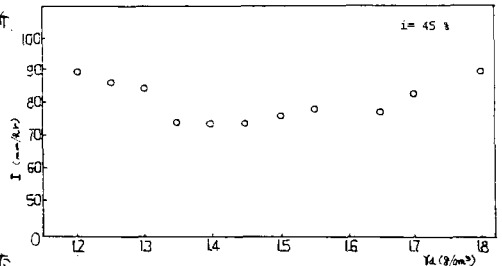


Fig.2 limits of rill erosion

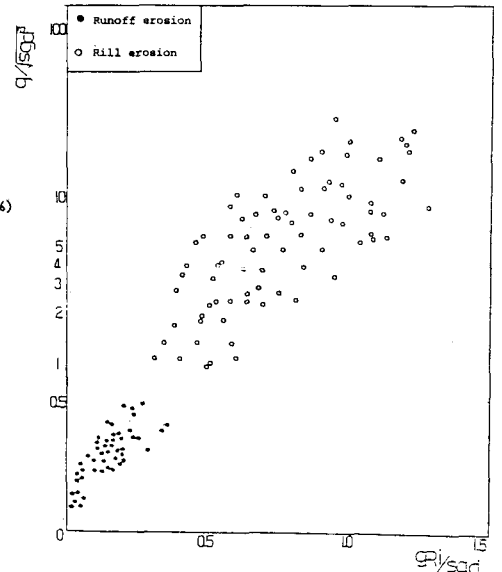


Fig.3 $q/\sqrt{sgd} - qR/\sqrt{sgd}$