

雨水流による土砂流出の研究 — ガリ浸食について —

岐阜大学工学部 正 員 河村三郎

岐阜大学大学院 学生員 横山 武

1 まえがき 最近の宅地造成工事は、丘陵地帯で行なわれており、広大な裸地斜面が作り出されている。これらの地域からの土砂流出量は多量で、田畑、および既設の利水、下水構造物への被害は増加している。斜面浸食は、降雨、土質、勾配などに支配される複雑な現象である。図-1は斜面勾配44.5%, 斜面長19.8m, 試験面積118.8m²の屋外試験地で得られたHollyらのデータをプロットしたもので、シートとガリ浸食には遷移領域があるように思われる。筆者らは、特に盛土斜面におけるガリ浸食の特性、すなわち、head cutの進行、ガリ床面の波動性について研究を行なった。

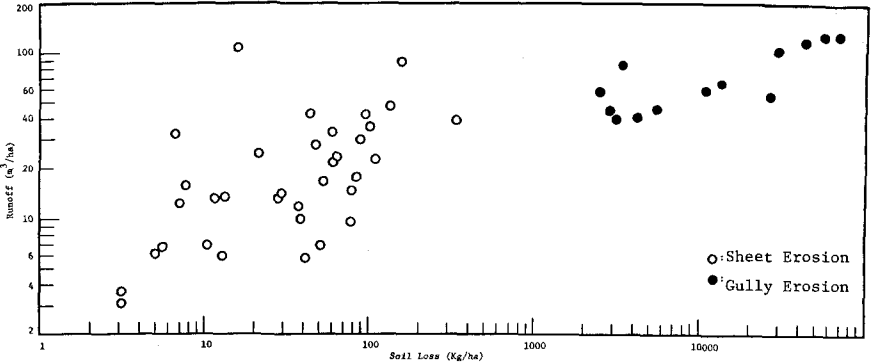


図-1

2 実験装置と方法 実験装置は幅40cm, 高さ35cm, 長さ650cmの鋼製水路, 幅50cm, 高さ25cm, 長さ1620cmの木製水路を使用し、土右側170cmは砂利を敷き、斜面勾配は土砂で形成した。土砂は平均粒径0.44mm, 2.62mm, 2.63mmの軽量骨材, 砂, 岐阜県端浪市陶町の土砂(珪砂)を使用し、リル形態をV字型に斜面に入れ、流量は一定量を流した。

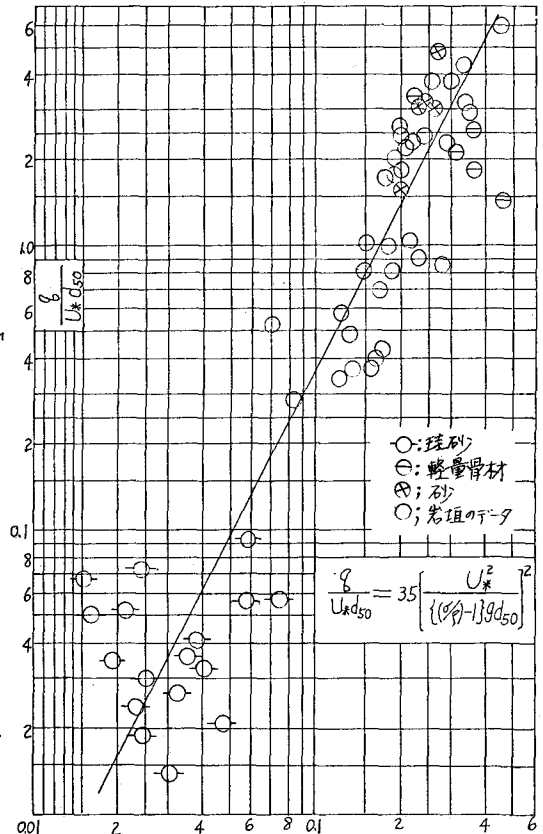


図-2

3 理論的考察 ガリの床に沿って流水方向にX軸、鉛直方向にZ軸をとると、不定流の基礎方程式は

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{2}{2g} \left(\frac{U^2}{2g} \right) = i - \frac{U^2}{8gR} \quad (1)$$

$$i = i_0 - \frac{\partial Z}{\partial x} \quad (2)$$

流砂の連続式は、単位幅当りの流砂量を q_s とすると、

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

掃流砂公式として Kalinske - Brown 形式の式を使用すると、

$$\frac{g_s}{U_* d_s} = a_s \left\{ \frac{U_*^2}{[(0.75) - 1] g d_s} \right\}^P \quad \text{--- (4)} \quad d_s = \text{平均粒径} \quad P = \text{無次元指数} \quad a_s = \text{常数}$$

筆者らの実験によれば図-2から $a_s = 3.5$, $P = 2$ であるから, 式(4)から

$$g_s = \beta_s U_*^5 \quad \text{--- (5)} \quad \beta_s = 3.5 / \{[(0.75) - 1] g\}^2 d_s$$

運動方程式を近似的に $i = U_*^2 / g h$ --- (6)

とし, 抵抗法則として, Manning 式を用いければ $U_* = g^{1/2} n g / h^{1/6}$ --- (7)

$$\begin{aligned} \text{式(7)より} \quad \frac{\partial U_*}{\partial x} &= -\frac{7}{6} \frac{g^{1/2} n g}{h^{13/6}} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial x} &= -\frac{6}{7} \frac{h^{13/6}}{g^{1/2} n g} \frac{\partial U_*}{\partial x} \quad \text{--- (8)} \end{aligned}$$

$$\text{式(6)より} \quad \frac{\partial i}{\partial x} = \frac{2 U_*}{g h} \frac{\partial U_*}{\partial x} - \frac{U_*^2}{g h^2} \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{--- (9)}$$

$$\begin{aligned} \text{式(8)(9)より} \quad \frac{\partial i}{\partial x} &= \frac{2 U_*}{g h} \frac{\partial U_*}{\partial x} + \frac{U_*^2}{g h^2} \frac{6}{7} \frac{h^{13/6}}{g^{1/2} n g} \frac{\partial U_*}{\partial x} \\ &= \frac{2 U_*}{g h} \frac{\partial U_*}{\partial x} + \frac{6}{7} \frac{U_*}{g h} \frac{\partial U_*}{\partial x} \\ &= \frac{20}{7} \frac{U_*}{g h} \frac{\partial U_*}{\partial x} \quad \text{--- (10)} \end{aligned}$$

$$\text{式(2)(10)より} \quad \frac{\partial U_*}{\partial x} = -\frac{7}{20} \frac{g h}{U_*} \frac{\partial z}{\partial x^2} \quad \text{--- (11)}$$

$$\text{式(3)(5)より} \quad \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{5 \beta_s U_*}{1 - \lambda} \frac{\partial U_*}{\partial x} = 0 \quad \text{--- (12)}$$

$$\text{式(11)(12)より} \quad \frac{\partial z}{\partial t} - \frac{5 \beta_s U_*}{1 - \lambda} \frac{7}{20} \frac{g h}{U_*} \frac{\partial z}{\partial x^2} = 0 \quad \text{--- (13)}$$

$U/U_* = \varphi_0 \quad K = \frac{7}{4} \frac{\beta_s g g U_*^2}{(1 - \lambda) \varphi_0}$ とおくと式(13)は拡散方程式となる。

$$\frac{\partial z}{\partial t} - K \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0 \quad \text{--- (14)}$$

A head cutの進行性について リル浸食からガリ浸食への進行過程においては斜面に多数の head cutが出現する。各々の head cutは進行速度が異なり, 重ね合せが行なわれて上流側へ進行する。そこで, 単一の head cutが斜面に出現し, 上流側へ進行する場合を考慮することにし, head cutを次式で表わす。右図を参照して,

$$f(x) = h_0 \frac{x}{l} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{h_0}{n\pi} \left(1 + \sin \frac{2n\pi}{l} (l-x) \right)$$

$v(x, t) = w(x) - z(x, t)$ として $U(x) = h_0(l-x)/l$ を使用し式(14)を

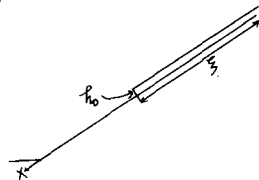
初期, 境界条件 $z(x, 0) = f(x) \quad z(0, t) = h_0 \quad z(l, t) = 0$ で解けば,

$$z(x, t) = \frac{h_0(l-x)}{l} - \sum_{n=1}^{\infty} F_n \exp\left(-\frac{Kn^2\pi^2 t}{l^2}\right) \sin \frac{n\pi x}{l} \quad \text{--- (15)}$$

ここに

$$F_n = \frac{2}{l} \int_0^l F(\eta) \sin \frac{n\pi \eta}{l} d\eta, \quad F(x) = \frac{h_0(l-x)}{l} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{h_0}{n\pi} \left(1 + \sin \frac{2n\pi}{l} (l-x) \right)$$

式(15)は単一の head cutの進行状態を示すものである。



次に式(4)を任意の初期、境界条件、すなわち $z(x,0)=\varphi(x)$, $z(0,t)=C_0$ $z(l,t)=C_1$ で解くと、

$$z(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-\frac{kn^2\pi^2 t}{\rho^2}\right) \sin \frac{n\pi x}{l} + C_0 + \frac{C_1 - C_0}{l} x \quad (6)$$

$$B_n = \frac{2}{l} \int_0^l \left\{ \varphi(x) - C_0 - \left(\frac{C_1 - C_0}{l}\right)x \right\} \sin \frac{n\pi x}{l} dx$$

式(6)を使用し上流、下流側で水位低下させた場合を考える。

Case I 上流側で水位低下させた場合は次のようになり、図-3、図-4は理論結果を示す。

$$z(x,t) = -\left(1 - \frac{x}{l}\right)z_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2z_0}{n\pi} \exp\left(-\frac{kn^2\pi^2 t}{\rho^2}\right) \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (7)$$

Case II 下流側で水位低下させた場合は次のようになり、図-5は理論結果を示す。

$$z(x,t) = -\frac{z_0}{l}x + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2z_0}{n\pi} (-1)^{n+1} \exp\left(-\frac{kn^2\pi^2 t}{\rho^2}\right) \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (8)$$

Bガリの液動性について、ガリの床面に head cut が多数生じ、各々の head cut が上流へ進行した状態では、ガリの床面に液動性がある。この液動性は多数の要素に影響されるが、特に降雨量の時間的变化に支配されるとすれば、液動は次のように求まることが出来る。

$$\text{式(5)から } \frac{\partial z_0}{\partial x} = 5\beta_5 U_*^4 \frac{\partial U_*}{\partial x} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{式(3)(9)から } \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial z_0}{\partial x} \right) \\ &= -\frac{5\beta_5}{1-\lambda} \left\{ 4U_*^3 \frac{\partial U_*}{\partial t} \frac{\partial U_*}{\partial x} + U_*^4 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial U_*}{\partial x} \right) \right\} \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{式(11)(10)から } \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} &= -\frac{5\beta_5}{1-\lambda} \left\{ 4U_*^3 \frac{\partial U_*}{\partial t} \left(-\frac{7}{20} \frac{gh}{U_*} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right) + U_*^4 \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{7}{20} \frac{gh}{U_*} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right) \right\} \\ &= \frac{5\beta_5}{1-\lambda} \left\{ \frac{28}{20} U_*^2 gh \frac{\partial U_*}{\partial t} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{7}{20} U_*^4 \left(-\frac{gh}{U_*} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \frac{\partial U_*}{\partial t} + \frac{gh}{U_*} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right) \right) \right\} \\ &= \frac{5\beta_5}{1-\lambda} \left\{ \frac{28}{20} gh U_*^2 \frac{\partial U_*}{\partial t} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - \frac{7}{20} gh U_*^3 \frac{\partial U_*}{\partial t} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{7}{20} gh U_*^3 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right) \right\} \\ &= \frac{21}{4} \frac{\beta_5 gh U_*^2}{1-\lambda} \frac{\partial U_*}{\partial t} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - \frac{7}{4} \frac{\beta_5 gh U_*^3}{1-\lambda} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right) \quad (11) \end{aligned}$$

式(11)の右辺第二項は、 z の x 方向の二階微分のさらに時間的变化を求めるものであるから無視すると、

式(11)は

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \left[\frac{21}{4} \frac{\beta_5 gh U_*^2}{1-\lambda} \frac{\partial U_*}{\partial t} \right] \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad (12)$$

式(12)で $U/U_* = \varphi_0$ とおくと $U_* = U/\varphi_0$ となる、17-877

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \left[\frac{21}{4} \frac{\beta_5 gh U_*}{(1-\lambda)\varphi_0} \frac{\partial U_*}{\partial t} \right] \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad (13)$$

式(13)で $\partial U_*/\partial t$ は降雨量の時間的变化と置き換えることができる。すなわち降雨量 U の一次関数とすれば、 $\partial U_*/\partial t$ はある定数となるから、式(13)の括弧を k と置くと一次元の液動方程式であるから、ガリの液動性をあらわしている。

4 4 極山武

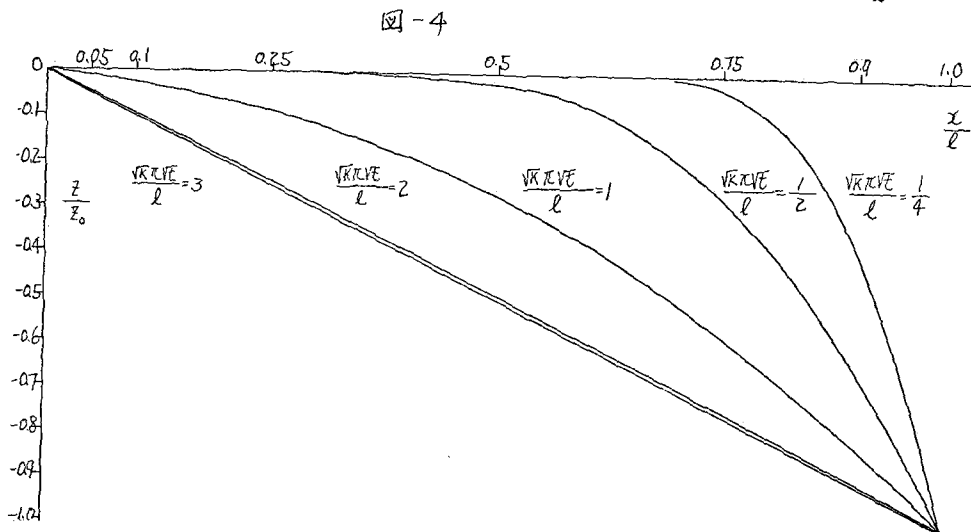
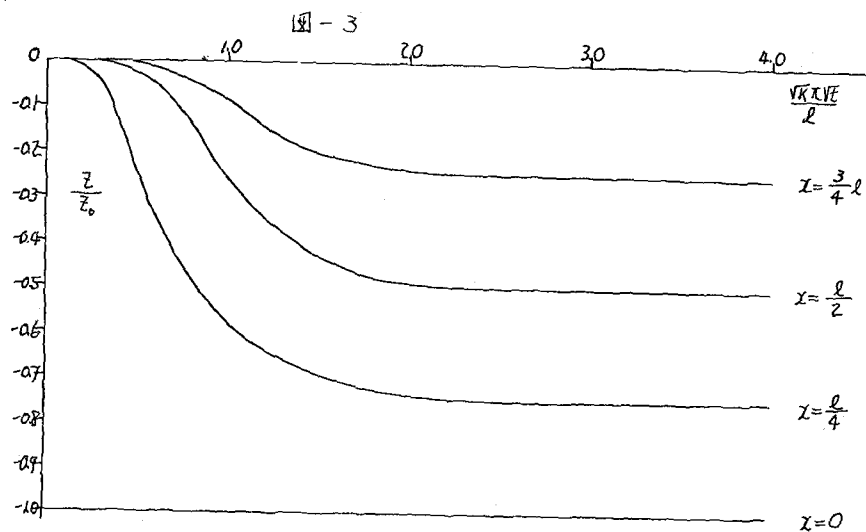
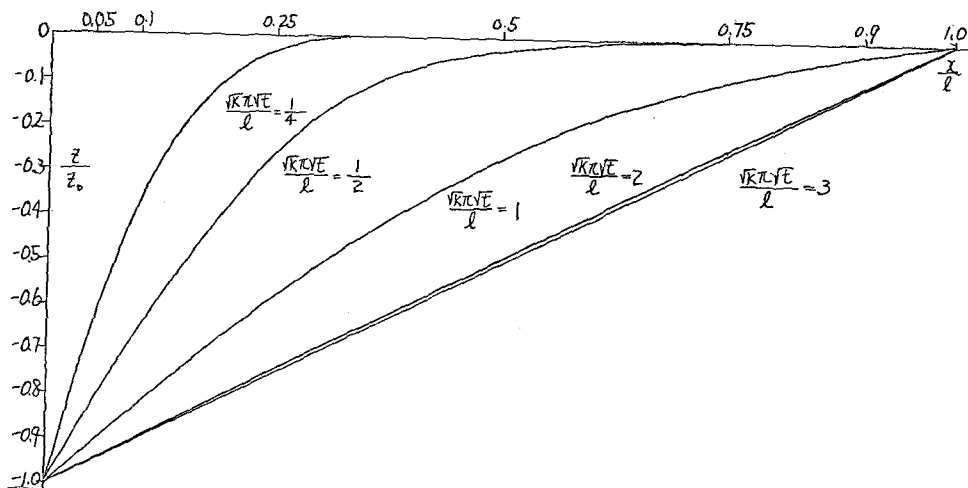


图-5