

(1)式で表される。

(1)式を用いて Wash Load を算定するとき、 α の値を普遍的に定めることが必要である。江崎¹⁾によると、 $Q_w = \alpha Q$ として、 $\alpha = C_1 I^2 + C_2 f (A_d/A) S^2$ また 芦田²⁾によると、 $\alpha = C_3 (A_d/A) S$ 、ここに I : 河床こう配、 A_d は 裸地面積 A : 流域面積 S : 裸地こう配である。裸地侵食量 $E^3)$ は、一般に裸地こう配の $3/2$ 乗と表されることから、 α の値は、勾配の 1 乗または 2 乗に比例するとみなせる。

著者は、(1)式のままでは α に次元が入るので、(1)式を、

$$Q_w/r_t \cdot Z \cdot A = \alpha^1 (Q/r_0 A)^2 \quad (2)$$

ここに r_t : 土の単位重量、 Z : 浸食高 (mm/日)、 r_0 : 降雨量 (mm) とかき直し、流域の異なる 4 ケ所の測定値を用いて、 α^1 と $A_d \cdot S$ の関係を調べた。その結果、図 4 に示すように直線関係が得られ

$$\alpha^1 = 0.42 \times 10^{-3} \cdot e^{84 \frac{1}{A} \Sigma (A_d \cdot S)} \quad (3)$$

の関係を得た。 A_d, S の数値は、政府の地質調査所の地図上で Eroded Area と区分されて箇所から採用した。図で $A_d = 0$ のときの Wash Load は 溪岸浸食によるものと判断される。

2-2 Bed Material Load

掃流砂は、例えば、土研公式によると

$$Q_B = \alpha_2 Q \quad \alpha_2 = w_0 g^{1/2} n I / h^{1/6} \quad (4)$$

と表現されるから、別に求め、加えることにする。

2-3 雨量の流量変換とその推計学的予測

これらの計算に用いる流量から、その場所に適当な変換式を用いると求められるから、ここでは述べない。将来の予測をするときは従来の降雨量分布の平均値と分布形を知るならば、模擬的に発生させることは可能である。先の測定例では、こうして求めた侵食係数 3.1 mm/年 と算定された。

3. 土石流による土砂量

3-1 土石流による土砂量の懸案地点への寄与

土石流の発生は、堆積物の勾配と堆積物の性質およびその上を流下する水深によって定まる。さて発生した土石流が、流動を続けるかどうかは、河道こう配がある値次下であることおよび流動を続けるに要するせん断力を与え続けるに必要な水量を供給し続けるかどうかによって定まる。もし、懸案地点がこの区域内に内にあるなら、土石流発生量がそのまま発生土砂量になる。一方、土石流はあるこう配次下では、土石流としての流動は出来なくなり、そこに堆積し、一部は個別運搬の形式で下流側に流出する。したがって、懸案地点がどこに位置するかによって、図 1 に示す判定条件を経て、流動型式を決めていく必要がある。

3-2 土石流の発生条件

1) 長大斜面上における土石流の発生限界

斜面上の堆積物が土石流として流動を起こす限界については、Bagnold⁴⁾によって論ぜられ、著者⁵⁾もそれが成立つことを実験で確めた。高橋⁶⁾はさらにその限界を詳細に定義した。それ⁶⁾によると、図 5 の範囲に示される。限界の勾配と、表面流の関係は次式に示すとおりである。

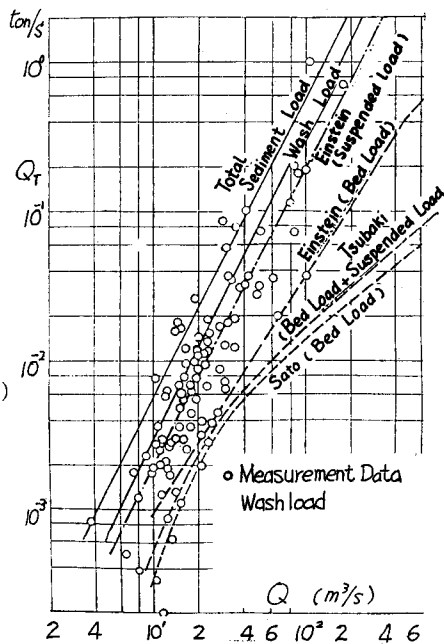


図 3 流砂量と流量の関係

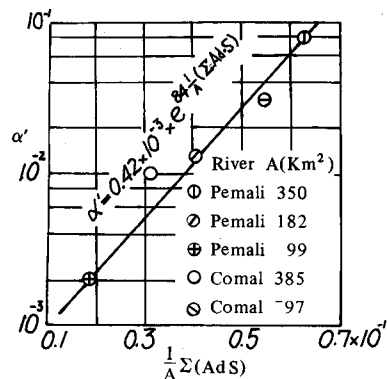


図 4 α' と $\Sigma Ad \cdot S / A$ の関係

$$\tan \theta = \frac{C_* (\sigma - \rho)}{C_* (\sigma - \rho) + \rho (1 + 1/K)} \tan \phi, K = 1 \text{ or } 0.7 \quad (5)$$

$$\tan \theta = \frac{C_* (\sigma - \rho)}{C_* (\sigma - \rho) + \rho [1 + h_0/d]} \tan \phi \quad (6)$$

ここに、 ϕ はまさつ角、 C_* ；堆積層内の砂れきの容積濃度、 θ ；斜面のこう配、 σ, ρ ；れきおよび水の密度である。

以上の解析は、長大斜面の条件で、静的な釣合い条件から求められ(5)、(6)式の有用性は十分認められるが、基岩の凹凸、狭さくのある溪床での発生、あるいは堆積面に岩等の衝突あるいは間げき圧の異常上昇の影響を加味する場合には、これらの影響を評価できる形で発生条件を議論する必要がある。

基岩の凹凸、狭さくの存在は、堆積層を下流側で支えていることになり、このような状態での流動開始は、図6に示すように、主動領域が下流側の受動領域を押上げていく形での流動開始であろう。

2) 下部に支えのある堆積層における土石流の発生

図6のように、下部に支えのある場合を考える。この堆積層が流動するためには、スベリ面が生じ、主動域が受動域を押しやる場合である。無限斜面を考え、表面に水深 h_0 が存在するとき、 x を流下方向、 y をそれと法線方向に下向きにとるとき、堆積層の深さ a における釣合い式は、図6のように表層に水流が厚さ h_0 存在するとき、

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} = g \cdot \cos \theta \{C_* (\sigma - \rho) a\} \quad (7) \quad \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = g \cdot \sin \theta \{C_* (\sigma - \rho) a + \rho (a + h_0)\} \quad (8)$$

である。 x 方向に諸力の変化はないとして積分し、境界条件を0とすると

$$\sigma_y = g \cos \theta \{C_* (\sigma - \rho) a\} \quad (9) \quad \tau_{yx} = g \sin \theta \{C_* (\sigma - \rho) a + \rho (a + h_0)\} \quad (10)$$

となる。地盤に極限平衡状態がなりたつためには

$$(\sigma_y + C \cdot \cot \phi) \tan \phi \geq |\tau_{yx}| = g \sin \theta \{C_* (\sigma - \rho) y + \rho (y + h_0)\} \quad (11)$$

ここに、 ϕ は内部摩擦力、 C は粘着力である。

さて、このような堆積層内のスベリ面の方程式は

$$dy/dx = -\tan(\Psi \pm \delta), \quad \delta = \pi/4 - \phi \quad (12)$$

ここに、 Ψ はスベリ面が主応力面からなす角度で、複号の上号は+mスズリを、下号は-mスベリを表わす。

しかし、(11)式の形のままで(12)式を解くことは、複雑になる。ここでの目的は、スベリ域の規模を定めることにあるので、次のように取扱う。

すなわち、(9)式の実応力を、乾燥した堆積層の実応力との関係と比較すると図7に示されるように、間げき水圧だけ有効応力が減少し、滲透圧あるいは表面流の水圧の斜面方向の分力が増加したことになる。有効応力減少分を $k_1 r$ 、せん断力の増加分を $k r$ とし、応力の算定に用いる質量 r が、 x, y 方向で違うことも k によって補正すると、

$$r_0 = \frac{(1 - k_1)}{\cos \varepsilon} r, \quad \theta_0 = \theta + \varepsilon, \quad \varepsilon = \tan^{-1} \frac{k}{1 - k_1} \quad (13)$$

とすると、(7)式の右边は、 $r_0 \cos \theta_0$ 、(8)式の右边は $r_0 \sin \theta_0$ とおくことができる。 r_0 は深さ y の関数であるが、深さ y について無関係とみなす、(9)、(10)式はそれぞれ、 $\sigma_y = g \cos \theta r_0$ 、 $\tau_{xy} = g \sin \theta r_0$ となるから、(11)式の関係は、 $\phi < \theta_0$ のとき、

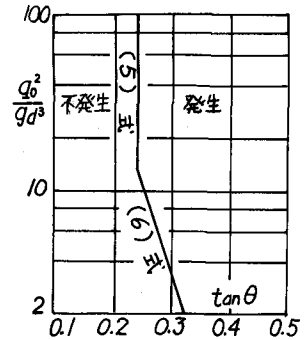


図5 土石流の発生領域（高橋）

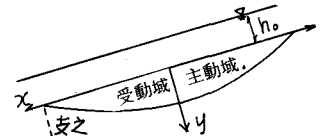


図6 下端で堆積層を支える場合の移動域

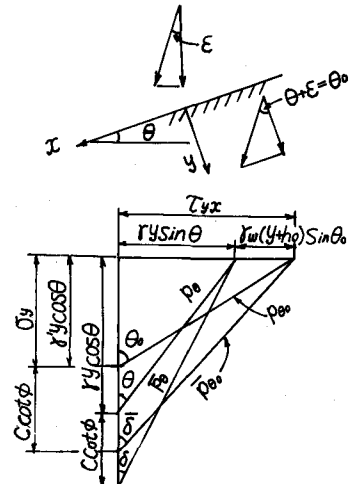


図7 変換応力

$$y \geq \frac{C}{r_0} \frac{\cos \phi}{\sin(\theta_0 - \phi)} \quad (14)$$

において、極限が成立する。 θ_0 の物理的意味は、勾配 θ の堆積面に平行な堆積層内の面に作用する応力を求めるとき、この面は外力の影響で $\theta + \epsilon$ だけ傾いているとみなすことに相当する。

このような取扱いをすると、一樣斜面上のスベリ面についての従来の解折かそのまま使えることが、モールの円より考察される。スベリ面の位置、 x, y を表わす式は⁷⁾

$$\left. \begin{aligned} x &= -\frac{C}{r_0} \frac{b}{a} \frac{\cos^2 \phi}{\sin \phi} (I_1 + I_2) + C_1 \\ y &= \frac{\bar{p}}{r_0} \frac{\sin \bar{\delta} - \sin \phi \sin(2\psi + \bar{\delta})}{\sin \theta_0 + \sin \phi \sin(2\phi - \theta_0)} \end{aligned} \right\} (15)$$

ここに

$$\sin 2\psi = \frac{A \sin \theta_0}{B + A^2 \sin^2 \theta_0} (1 - A \sin \phi \cos \theta_0 \pm \sin \phi \sqrt{B})$$

$$A = -\frac{y}{\cos \phi} \frac{r_0}{C}, \quad B = \{1 - A \sin(\phi + \theta_0)\} \{1 - A \sin(\phi - \theta_0)\}$$

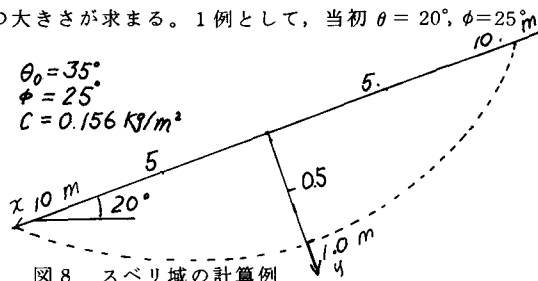
C; 粘着力(巨れきの場合の初期せん断抵抗値を含ませる), $\bar{p} = (\sigma_y + C \cot \phi) / \cos \bar{\delta}$,

$$I_1 = -\frac{\tan \theta_0}{\sin(2\psi - \theta_0) + \frac{1}{b}}, \quad I_2 \text{ は例えば } \phi < |\theta_0| \text{ のとき } \frac{(b^2 - 1)}{b^2} = n^2, \quad (n > 0) \text{ として,}$$

$$I_2 = 2 \frac{\mp a(b^2 n^2 + 1) - b}{n^3 b^4} \tan^{-1} \frac{1}{n} \left\{ \tan\left(\psi - \frac{\theta_0}{2}\right) + \frac{1}{b} \right\} - \frac{b \pm a}{b^2} \left[\frac{1 + \cos(2\psi - \theta_0)}{b + \sin(2\psi - \theta_0)} + \frac{2}{n^2 b^2} \cdot \frac{\tan\left(\psi - \frac{\theta_0}{2}\right) + \frac{1}{b}}{\left\{ \tan\left(\psi - \frac{\theta_0}{2}\right) + \frac{1}{b} \right\}^2 + n^2} \right]$$

である。(15)中の C_1 は(15)式を満足する点($x_0; y_0$)よりきめる。

この解折法によると、当初勾配 θ では流動しない堆積層が外力を受けて θ_0 になると、(14)式を満足する深さでスベリが生じることを示し、初期に動き出す堆積物の大きさが求まる。1例として、当初 $\theta = 20^\circ, \phi = 25^\circ$ で安定であった堆積層に、 kr ($k = 0.17$)のみかけのせん断力が増したとき $\theta_0 = 30^\circ$ となる。みかけの粘度 $C = 0.16 \text{ kg/m}^2$ のスベリの大きさは図8のようなになる。この例から、スベリ域の大きさが相対的に大きくないことから、れきの衝突、浸透圧の局部増加によって、堆積層の移動が十分引起される可能性があることを示している。



3) 土石流発生の危険度

以上、述べてきた事項によって、土石流の力学的要因についてはかなり明瞭になってきたが、これによって、現地の土石流の発生を予測する場合、いろいろと困難を伴う。

一番問題になることは、抵抗力としての堆積物の性質、堆積の状況が場所によって著しく異なり、その変動を正確に把握するということが難しい。一方、外力としてのその地点に供給される流量の予測は、流域面積が一般に数ヘクタールと少なく山岳地帯の降雨の局地性、雨水流出の非線形性を顕著に受けるため、流出率をとりあげても千差万別となって、ときには流出率が1*を超えることがある。

こうした状況において、発生の危険率をいかにして表現するかが問題となる。

i) 発生限界雨量と発生可能流量との比を危険率とする方法

(6)式において、堆積物が集合流動しうる水深を h_0 とし、堆積層上にこの h_0 を発生させるだけの雨量強度を

きめると、これを発生限界雨量と決めることができる。発生限界雨量は、勾配、流域面積、流路幅、粗度係数に係するがこれを F_d とする。一方、そこに発生可能雨量を基本雨量 R_d とすると、危険率を

$$\text{危険率} = F_d / R_d \quad \text{あるいは安全率} \zeta_d = R_d / F_d \quad (16)$$

と定義できる。 ζ_d と基本安全率とよぶ。

ii) 堆積層の下側に支持がある場合の発生危険率

⑭式において、 $\theta_0 < \phi$ のとき、全ての場において安定である。 $\theta_0 > \phi$ のときのみ、極限状態がある。したがって、現在の堆積物のこう配 θ を求め、表面流によるせん断力あるいは、外力を予想してそれを仮想的に作用させ、換算応力とその作用角 θ_0 を求め、⑭式で極限条件が成立するか検査し、成立するならば、これによって滑動の大きさを知ればよい。この解法では、長大斜面の場合と違って、滑動域の大きさが決まるので、想定外力を質量力に換算したとき、滑動域のもつ抵抗力に対して想定外力の相対の大きさが評価できる。この場合の危険度は、想定外力によって、当初の θ_{01} (堆積面まで滲透流のある場合) より θ_{02} に移行して、 ϕ を越える度合と、 θ_{01} との比によって表せる。

iii) 各溪床を単位にした相対危険率

i) の方法で危険率を表現する場合、河道に関する情報は容易に得がたく、特に土石流が発生する以前には難しく、たとえ得られたとしても完全なものとは得られない。1つの溪流における抵抗力の分布は、極めて大きい。土石流が1ヶ所で生じると、水量が十分であるときは、土石流の移動を誘起し、発生が全面的に及ぶので、溪流中の最小の抵抗力が全体の危険度を規定する。土石流発生の危険度を求めるには、この抵抗力の分布を対象にしなければならぬ。この抵抗力の分布は、1溪流について各断面ごとに求められた限界発生雨量の分布で表わすことが出来る。一方、外力としての降雨強度の生起もある確率関数によって表される。そこで、発生の確率は、雨量強度 R が、発生限界雨量 F をこえる確率であると定義できる。発生の確率を μ とすると、上記の定義は、次のように表される。

$$\mu = P_r \{ R - F > 0 \} \quad (17)$$

$P_r\{A\}$ を事象 A が現われる確率とする。 R の確率関数を $\phi(R)$ 、 F の確率分布を $\Psi(F)$ とすると、

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(R) \int_{-\infty}^F \Psi(F) dR \cdot dF \quad (18)$$

F の関数形であるが、常願寺川上流湯川流域における6つの溪床について表面水深 $h_0 = 2d$ 、 d : 堆積物の表面の平均径 $\approx 15 \text{ cm}$ 、流路幅 $b = 1.0 \sim 0.5 \text{ m}$ まさつ係数 $f = 1.12 \sin \theta^{(6)}$ として、合理式より発生限界雨量を求め、それらを1溪流内での相対度数で表わすと、図10に示すような対数正規分布とみなせる。この分布の平均値を F_0 、標準偏差を δ_F とする。一方、雨量強度は、平均値 R_0 、標準偏差 δ_R を持つ対数正規分布である。したがって、 $R - F = X$ とおくと、 F 、 R 共に対数正規分布であるから、

$$\mu = \int_0^{\infty} f(X) dX = \int_C^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_X} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{X - \bar{X}}{\sigma_X} \right)^2 \right\} \quad (19)$$

ここに、 $C = -\bar{X} / \sigma_X$ 、 $\bar{X} = \ln(R/F)$ 、 $\sigma_X = \sqrt{\delta_R^2 + \delta_F^2}$ である。(19)式は確率積分表より求まる。(16)式の R_d 、 F_d を、それぞれ平均値と結びつけ $R_0 = aR_d$ 、 $F_0 = bF_d = b\zeta_d R_0$ となる。そこで

$$\mu = f(aR_d, b\zeta_d R_d) \quad (20)$$

とおくと、発生の確率 μ は、個々の断面の安全率 ζ の関数になるから、発生の確率 μ_0 を指定すると、 C をき

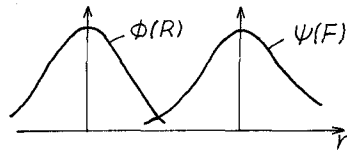


図9. 土石流の発生確率

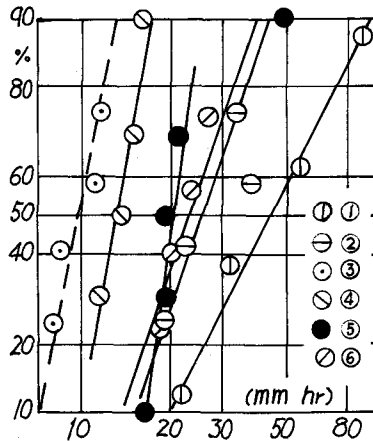


図10. 湯川の各溪床の発生限界雨量の相対度数

めることができ、もし $\zeta_0 = F_0/R_0$ とおけば、 $C = 1n\zeta_0/\sqrt{\delta_R^2 + \delta_F^2}$ 。これをといて、

$$\zeta_d = \exp(\sqrt{A_R^2 + A_F^2})(R_0/F_0)(F_d/R_d) \quad (21)$$

ここに $\zeta_0 = \exp(\sqrt{A_R^2 + A_F^2})$ 、 $A_R = C \cdot \delta_R$ 、 $A_F = C \cdot \delta_F$ として安全率 ζ_d が定義される。 δ は対数正規分布における標準偏差である。一つの流域における各溪床の危険度は μ の大きさの比較によって定められる。

3-3 発生土砂量

以上の結果、土石流による発生土砂量は、発生確率とそ
の場合の移動土砂量との積によって表される期待値として
表される。土石流では、発生するかどうかより土砂量が重
要である。この量は、現在、溪流に堆積する堆積土砂量と
土石流発生時に生ずる崩壊のうち、流出するものとなるが、
その量は、降雨の量と継続時間に関係する。この量につい
ては、個別例について実際に調査する以外にない。

3-4 土石流の堆積と個別運搬への移行

土石流の堆積限界については、椿、高橋らによって研究
が進められ、土石流としての流動を停止する勾配として、

$$\tan \theta \geq \frac{K(\sigma/\rho - 1)C_*}{(1+K) + K(\sigma/\rho - 1)C_*} \tan \alpha$$

が与えられている。このうち、個別運搬によって運ばれる
土砂量については、既往の発生例についての値を参照する
ものとせざるを得ない。

4. むすび

生産土砂量の算定にあたって、土砂量を Wash Load, Bed

Material Load および土石流に分けて取扱い、土石流発生限界雨量以下では、Bed Material Load および Wash Load
のみであるから、現在最も不明な Wash Load を表わす式の係数 α について 1 つの実測式を提案した。また土石
流による土砂量として、その発生限界は、従来の長大斜面における発生限界のほか、斜面の下流側に受動
領域が生じる場合の初期移動の条件を示した。

この土石流の発生の危険度は、堆積層の抵抗力が一つの溪流で、性質を完全に知ることは不可能で大きく
分布することから、その抵抗力を確率関数として表示する以外に、土石流の発生確率は、これら抵抗を
上回る雨量が発生する確率によって表されるとした。

参考文献

- 1) 江崎一博：貯水池の堆砂に関する研究，建設省土木研究所報告，第 129 号，pp. 55-83，66'
- 2) 芦田和男，奥村武信：ダム堆砂に関する研究，京大防災研究所年報，第 17 号，pp. 555-570
- 3) 河村三郎：Hydraulics of Slope Erosion by Overland Flow, Proc. ASCE, vol 102 No. HY10, pp 1573-1586, 76'
- 4) Bagnold : The Flow of Cohesionless Grain in Fluid, Phi. Trans of Royal Soc. of London Ser. A. Vo 249 57'
- 5) 大同淳之：急こう配上の多量の砂れきを含む流れの流動特性，第 18 回水理講演集，pp. 199-203，74'
- 6) 高橋 保：土石流の発生と流動に関する研究，京大防災研究所年報，第 20 号，pp. 405-435，77'
- 7) 市原松平：地震時モール円とその擁壁土庄への適用について，土木学会論文集，第 136 号，pp. 25-34.

昭 41.

- 8) 池田哲夫：構造物の安全率と破損の確率，土木学会法，40-5 pp. 236-241，55'

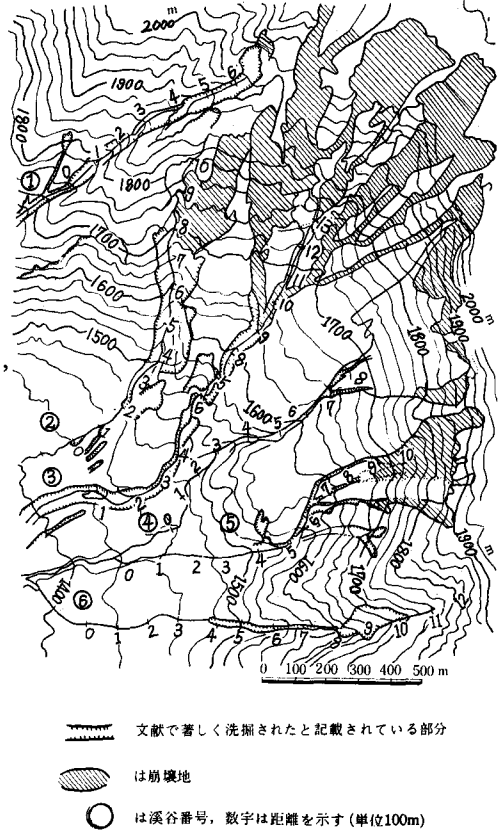


図 11. 湯川流域図