

1. まえから: 急勾配の堆積層上に発生した砂礫と水の混合物による段波が, 流下に伴って発達する過程を取り扱い, ついで十分発達して定常的な流動状態になった土石流段波先端部の流下速度, 波高, 砂礫濃度について考察を加える。

2. 土石流段波の形状と発達: 図-1 に示したように, 勾配角 θ , 容積濃度 C_d の水で飽和された砂礫堆積層上に, 波高 h , 濃度 C_d の水と砂礫が一体となった段波が流下してきた瞬間を考える。堆積層は空隙が十分に発達しており, 粘着力, 過剰間隙水圧は作用しないものとする。堆積層表面下 a の位置におけるせん断力とせん断抵抗力は, それぞれ, $T = g \sin \theta \{ C_d h + C_s a \} (0.5 - f) + (r + a) f$, $T_c = g \cos \theta \{ C_d h + C_s a \} (0.5 - f) \tan \phi$ である。したがって, 図-1 に示したように, $T = T_c$ とする深さ a_L は,

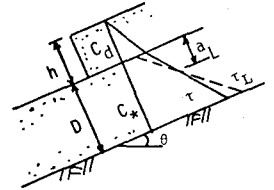


図-1 土石流の発生

$$a_L = \frac{f \tan \theta - C_d (0.5 - f) (\tan \phi - \tan \theta)}{C_s (0.5 - f) (\tan \phi - \tan \theta) - f \tan \theta} h \quad \dots (1)$$

となる。ただし, ϕ は砂礫層の内部摩擦角である。

地表面にまで水流が存在するときの全層流動の発生限界勾配: $\tan \theta = [C_s (0.5 - f) / \{ C_d (0.5 - f) + f \}] \tan \phi \quad \dots (2)$

よりも緩い勾配では, (1) 式の分母は正となり, $C_d \leq f \tan \theta / \{ (0.5 - f) (\tan \phi - \tan \theta) \} \quad \dots (3)$

で, $a_L \geq 0$ となる。 $a_L > 0$ のとき, 段波先端部は流下に伴って発達する。 $a_L = 0$

となる (3) 式の等号の成立する濃度を C_{dm} と書くことにしよう。

さて, (2) 式で示されるよりも緩い勾配の堆積層について, $a_L > 0$ のときの流下 U

に伴う波高 h 濃度 C_d の変化を考える。図-2 のように, 侵食による増加量は先端 a_L

部の長さ L の部分に蓄積されるものとし, 流下速度 U は一定であると仮定する。

砂礫および水の保存則より, それぞれ,

$$\frac{dh}{dt} = (U/L) \{ C_{dm} - C_d \} / (C_s - C_{dm}) \quad \dots (4), \quad \frac{dC_d}{dt} = (U/L) \{ C_s - C_d \} (C_{dm} - C_d) / (C_s - C_{dm}) \quad \dots (5)$$

を得る。(5) 式の $t=0$ で $C_d=0$ という条件下の解は, $C_d = C_{dm} \{ 1 - \exp(-Ux/L) \} - C_s \{ 1 - \exp(-Ux/L) \} \quad \dots (6)$

であって, $t \rightarrow \infty$ で $C_d \rightarrow C_{dm}$ である。(6) 式を (4) 式に入れ, $t=0$ で $h = (U_0/U) h_0$ であるものとする。

$$h/h_0 = (U_0/U) \{ C_s - C_{dm} \exp(-Ux/L) \} / (C_s - C_{dm}) \quad \dots (7) \text{ となり, } t \rightarrow \infty \text{ とすれば, } h/h_0 = (U_0/U) C_s / (C_s - C_{dm}) \quad \dots (8)$$

である。ただし, U_0, h_0 は, それぞれ堆積層の上端部から与えられる供給水の流速と水深である。以上は, 1) ま対象としたような勾配では, 段波が定常流動に漸近することを示している。

勾配が (2) 式で示されるものよりも急な堆積層では, 理論上は, 地表面

まで飽和しなければ全層の流動が発生することになるが, 実際上は側圧の

影響などにより, 図-1 のような段波が供給されて, はじめて流動を開始

する場合が多い。このときの流動を図-3 のようにモデル化する。前述の

場合と同様, 全体の移動速度 U を一定とし, 流動の水面勾配 $\tan \gamma$ は (2)

式の $\tan \theta$ と等しいものと仮定する。このとき, 水流と砂礫に関する連続式より,

$$\{ (h - h_0) / \tan(\theta - \gamma) \} dh/dt = DU + h_0 (U_0 - U) \quad \dots (9) \text{ が成立し, } t=0 \text{ で } h = (DU + h_0 U_0) / U \text{ とし, (9) 式を解けば,}$$

$$h = [2 \{ DU + h_0 (U_0 - U) \} (x/U) \tan(\theta - \gamma) + \{ DU + h_0 (U_0 - U) \}^2 / U^2]^{1/2} + h_0 \quad \dots (10) \text{ となる。これは段波波高が流下}$$

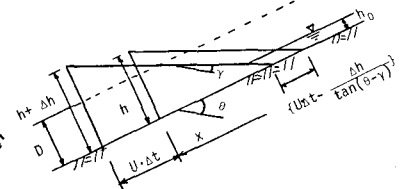
とともに増大して行くことを示している。一方, 濃度に対しても同様の考察を行うことにより, 多少の簡略化で,

$$C_d = DC_s U [1 - \{ DU + h_0 (U_0 - U) \} h_0 / (DU + h_0 U_0) \{ 2 \tan(\theta - \gamma) x + DU + h_0 (U_0 - U) \}] / \{ DU + h_0 (U_0 - U) \} \quad \dots (11)$$

を得る。これは, $x \rightarrow \infty$ で $C_d = DC_s U / \{ DU + h_0 (U_0 - U) \} \quad \dots (12)$, また, $(\theta - \gamma) \rightarrow 0$ のとき, x の値にかかわらず,

$$C_d = DC_s U / (DU + h_0 U_0) \quad \dots (13) \text{ である。}$$

図-3. 全層流動のモデル



3. 流動速度および波高: 前述の議論は、いずれも段波の移動速度 U が与えられたものとして行っているので、これに関する考察が必要である。前報¹⁾においても、Dement'jev の与えたタイラント流動の式を用いて議論したが、ここでは Bagnold の与えた流動式に立脚して、定常状態に対する流速と波高の無次元表示式を導くと、

$$\left(\frac{U}{\sqrt{gd}}\right) / \left(\frac{q^2}{gd^3}\right)^{0.3} = \frac{0.693 \sin^2 \theta \left\{ \left(\frac{q}{C_d} \right)^3 - 1 \right\}^{0.9} \left\{ C_d + (1 - C_d) \frac{q}{q_0} \right\}^{0.2}}{(q_i \sin \phi_r)^{0.2} (1 - C_d)^{0.6}} \dots (14), \left(\frac{h}{d}\right) / \left(\frac{q^2}{gd^3}\right)^{0.2} = \frac{1.443 (q_i \sin \phi_r)^{0.2}}{\sin^2 \theta \left\{ \left(\frac{q}{C_d} \right)^3 - 1 \right\}^{0.4} \left\{ C_d + (1 - C_d) \frac{q}{q_0} \right\}^{0.2} (1 - C_d)^{0.5}} \dots (15)$$

である。ここに、 d は平均粒径、 ϕ_r は安息角、 C_d は係数であるが、Bagnold の実験値を参考にすると、 $C_d < 0.81 C_d$ で $q_i = 0.042$, $C_d > 0.81 C_d$ で $q_i = \left[\frac{1}{3} \left(\frac{q}{C_d} \right)^3 - 1 \right] - 14 \times 0.066 + 0.042$ である。また、 q は流動層内の水のみ単位幅流量であるが、すべり堆積層内に含まれていた水を加えて流動していることを考慮すると、 q_0 を上流端からの給水流量として、 $q = \left\{ C_d (1 - C_d) / (C_d - C_d) \right\} q_0 \dots (16)$ で与えられる。(14)式と(15)式を辺々乗じ、(16)式を用いると(18)式を得る。すなわち、 $q_i = 0$ となる定常流動の流速と波高は(14)式と(15)式で与えられることが判明する。ところで、(14)式は(16)式を代入すれば、 q_0 が一定であるかぎり、 U は C_d あるいは θ の変化に対して顕著に変化しないことが判る。すなわち、段波の波高の発達過程においても、 U はほぼ一定であるとみなすことができ、前述の議論を支持している。

4. 実験およびその結果: 幅 20 cm、長さ 7 m の水路にすべり所定の厚さに実験用砂を敷きならして置き、堆積層表面近くまで水面が達するように浸透流を与え、 $\frac{U}{\sqrt{gd}} / \left(\frac{q^2}{gd^3}\right)^{0.3}$ と $\frac{h}{d} / \left(\frac{q^2}{gd^3}\right)^{0.2}$ へ上流端より約 1/5 の清水を供給して土石流段波を発生させた。使用材料は $d_m = 3.0 \text{ mm}$, $d_{84}/d_{16} = 1.99$, $C_d = 0.60$, $\tan \phi = 0.75$, $\sigma = 2.58$ である。

図-4 は段波の流下速度の実験値と(14)、(16)式から得られる理論値を示している。

使用材料について(15)式の右辺の値は 0.365 となるので、これ以下の勾配に対しては、(15)式から算する q_{00} と C_d とし、これ以上の勾配に対しては、実験値の C_d を用いて計算した理論値はほぼ実験値と合っている。また、給水量一定のもとでは、流下速度が勾配の変化にわかかわらず、ほぼ一定であることが判る。

図-5 は波高の実験値と(15)、(16)式から得られる理論値を示す。ただし、 $\tan \theta > 0.365$

では、 C_d として下流端で測った実験値を用いている。(15)式によれば、(16)式で示されるより急勾配では、波高は流下に伴って増大するが、そのような場合に対しては、ほぼ(15)式を満足しながら流動していることは、このような段波状の流動に対して、凝結定流の取扱いか許されることを意味し興味深い。なお、図-6 は $\theta = 25^\circ$, $D = 4 \text{ cm}$ の場合について全層流動のモデルの適用性を調べたもので、飽和堆積層に対して(16)式を用い、さらにここでは省略したが、土石流の到達までは堆積層が乾燥しているものとして導いた式を用いて、実験値との比較を行っている。このような勾配に対しては、堆積層表面まで飽和状態にすることが困難であるので、むしろ乾燥堆積層の場合に近くになっているが、ここで導入したモデルの妥当性を示唆している。

図-7 は水路下流端での砂濃度の実験値と(15)式の C_d および(12)式あるいは(13)式を示したものである。 C_d の適用限界は、いまの場合、一定 $\tan \theta = 0.365$ までは与えられるが、そのとき $C_{d0} = C_d$ となってしまう流動は不可能であり、実際にはこれより小さい濃度で流動する。このような範囲では、(14)式と(15)式または(13)式によって、逐次近似的に C_d を求めることができる。そのようにして求めた結果は実験値とほぼ満足すべき一致の程度を示しており、ここで行った議論は総合的に見て妥当であるとみなせよう。

今後は堆積過程についての考察を加えるつもりである。

参考文献: 1) 高橋: 土石流の流動に関する研究, 第31回土木学会年次講演会, 昭51.

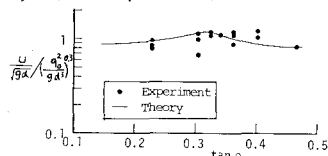


図-4 段波の移動速度

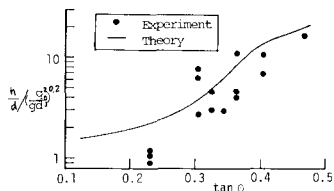


図-5 段波の波高

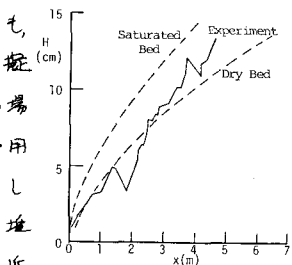


図-6 波高の増大

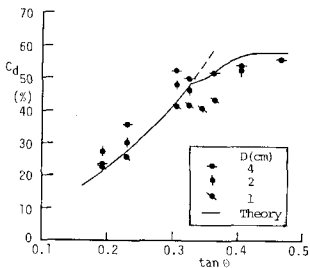


図-7 段波先端部の濃度