

高濃度泥流の転波列性サージ波長に関する検討

名城大学理工学部 正会員 新井宗之

1 まえがき

鹿児島県・桜島の野尻川等で観測される泥流状の土石流は短時間に多数のサージ状で流下することが観測されている。これは、日本の急傾斜地で発生する流れの先端部に巨礫を集合させて流れる石礫型土石流とは異なる流れの形態をしている。また、含有する粒子は火山灰を主成分とするような砂程度の粒径であり、粘土粒子の含有割合は少ない。このような泥流型土石流のサージ波長・周期に関する研究は非常に少ない。本研究では、この非粘着性粒子を高濃度に含有する転波列性泥流のサージ波長について理論的、実験的に検討するものである。

2 非粘着性粒子含有の泥流サージ波長

基礎方程式として、一次元流れの運動方程式、連続式を用いる。波速 c により、流速 v および水深 h を $v(x, t) = U(x - ct) = U(\xi)$, $h(x, t) = H(x - ct) = H(\xi)$, $\xi = x - ct$ により移動座標系で表わすと、運動方程式、連続式は次式のようになる。

$$c \frac{\partial U}{\partial \xi} - \beta U \frac{\partial U}{\partial \xi} + c(1 - \beta) \frac{U}{A} \frac{\partial A}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial \xi} = -g \sin \theta + g \cos \theta \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{f' U^2}{2 R} \quad (1)$$

$$(U - c) \frac{\partial A}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial \xi} + A \frac{\partial U}{\partial \xi} = 0 \quad (2)$$

ここに、 v ：断面平均流速、 A ：流積、 g ：重力加速度、 θ ：水路勾配、 R ：径深、 h ：水深、 β ：運動量補正係数、 f' ：摩擦損失係数。

上式より水面形の式として水深に比して幅 B の広い長方形断面であると仮定し、進行流量 $K = (c - U)H$ の関係を用い、支配断面の水深を H_0 とすると、水面形の方程式は次式の関係となる。

$$\frac{dH}{d\xi} = \tan \theta \frac{(H - H_A)(H - H_B)}{H^2 + (H_0 + \psi_3)(H + H_0)} \quad (3)$$

ここに、

$$H_A = \frac{1}{2} \left[(\psi_1 - H_0) + \sqrt{(\psi_1 - H_0)^2 + 4 \{ H_0 (\psi_1 - H_0) - \psi_2 \}} \right]$$

$$H_B = \frac{1}{2} \left[(\psi_1 - H_0) - \sqrt{(\psi_1 - H_0)^2 + 4 \{ H_0 (\psi_1 - H_0) - \psi_2 \}} \right]$$

$$\psi_1 = \frac{U_* c}{g \sin \theta \varphi}, \quad \psi_2 = \frac{U_* K}{g \sin \theta \varphi}, \quad \psi_3 = \frac{(\beta - 1) c^2}{g \cos \theta}.$$

Keyword：高濃度泥流，転波列，サージ波長，理論，実験

〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-501 Tel: 052-832-1151

また、流速係数 φ は、粒子衝突と粒子と間隙水が一体となって混合する応力を考慮した新井・高橋¹⁾の泥流型土石流の抵抗則を用いると、平均流速式 U は次式のような。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{H}{\phi_1} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{y_0}{\phi_1} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{\phi_1}{H} \right)^2} + \left(\frac{\phi_1}{H} \right) \right] \quad (4)$$

$$\text{ここに、} \phi_1 = \sqrt{\lambda^2 \left(\frac{a_i \sin \alpha}{\kappa^2} \right) \left(\frac{\sigma}{\rho_m} \right) d}, \quad \lambda = \left\{ \left(\frac{C_*}{C} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right\}^{-1},$$

$$y_0 = \begin{cases} \text{滑面の場合: } y_0 = \frac{a v_0}{U_*}, a = \frac{1}{9.025} \\ \text{粗面の場合: } y_0 = b k_s, b = \frac{1}{30} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 λ ：線濃度、 h ：水深、 ρ ：間隙流体の密度、 σ ：固体粒子の密度、 C ：濃度、 C_* ：最充填濃度、 d ：粒径、 $\rho_m = \rho + (\sigma - \rho)C$ ：平均密度、 κ ：カルマン定数、 $a_i \sin \alpha$ ：バグノルドの定数(0.022)、 v_0 ：間隙流体の動粘性係数、 k_s ：相当粗度、 $U_* = \sqrt{gH \sin \theta}$ 、 θ ：水路勾配。

したがって、水面形の式(3)を ξ , H について解くことにより、 ξ と H の関係を得ることができ、流速係数 φ に H に関する逆双曲線関数を含んでいるため解析的に解くことは今のところ困難である。このため、はじめに、1) 流速係数 φ を H_0 による定数として、一次近似としての解析解を求める。 $\xi = \xi_b$ で最大水深 $H = H_b$, $\xi = \xi_f$ で最小水深 $H = H_f$ とすると、泥流サージの波長 λ_m は、 $\lambda_m = \xi_b - \xi_f$ であるから、解析解による波長 λ_{m1} は次式のような。

$$\lambda_{m1} = \frac{1}{\tan \theta} \left[(H_b - H_f) + \frac{H_A^2 + H_A(H_0 + \psi_3) + H_0(H_0 + \psi_3)}{H_A - H_B} \ln \frac{H_b - H_A}{H_f - H_A} - \frac{H_B^2 + H_B(H_0 + \psi_3) + H_0(H_0 + \psi_3)}{H_A - H_B} \ln \frac{H_b - H_B}{H_f - H_B} \right] \quad (6)$$

つぎに、2) 抵抗則をべき級数展開の一次式で近似して解析解を求める。微小項を無視した線形近似式は

$$\varphi(H) = \frac{1}{2\kappa} \left(\frac{H}{\phi_1} \right) \quad (7)$$

である。これより解析的に解くと、この一次近似の波長 λ_{m1} は

$$\lambda_{m1} = \frac{1}{\tan \theta} \left[(H_b - H_f) + \frac{(2\psi_{11} + H_0\psi_3)}{\sqrt{3H_0^2 - 4\psi_{11}}} \right]$$

$$\times \left\{ \tan^{-1} \frac{H_0 + 2H_f}{\sqrt{3H_0^2 - 4\psi_{11}}} - \tan^{-1} \frac{H_0 + 2H_f}{\sqrt{3H_0^2 - 4\psi_{11}}} \right\} + \frac{1}{2} \psi_3 \ln \frac{H_0^2 - \psi_{11} + H_0 H_b + H_b^2}{H_0^2 - \psi_{11} + H_0 H_f + H_f^2} \quad (8)$$

ここに, $\psi_{11} = \frac{2\kappa U_* \phi_1 c}{g \sin \theta}$

である.

3. 実験の概要及び考察

実験水路は図1に概念図で示している. 水路長は28m, 幅10.0cm, 深さ10.0cmの両側壁透明塩化ビニール製, 水路床はアルミ製の可変勾配水路である. 実験条件を表1に示す. 実験に使用した粒子は, 石炭粒粒子(No.1~No.3)およびポリプロピレン粒子(No.4, No.5)で, 石炭粉粒子は中央粒径 $d_{50}=0.67\text{mm}$, 粒子密度 $\sigma=1.41\text{g/cm}^3$, 粒子の最充填濃度 $C_*=0.57$ である. また, ポリプロピレン粒子は, 長径2.97mm, 短径2.14mm, 長さ2.97mmの円柱状の形状で, 名目直径 d は $d_{50}=2.9\text{mm}$, 粒子密度 $\sigma=1.06\text{g/cm}^3$, 粒子の最充填濃度 $C_*=0.54$ である.

実験結果の波長 λ_{me} と抵抗則の水深を等流水深とする解析的な波長 λ_{mt} の式(6)との関係を図2に示す. 実験結果と式(6)の理論値との関係は, 全体的な傾向はある程度対応するものの実験結果の方が理論値よりも大きな値を示している. 実験におけるサージは, 大きなサージが小さなサージを乗り越えるなど複雑な現象で, 小さなサージがそのようなときに消滅してしまう場合がある. このため実験のサージ波長が解析値より大きくなる傾向があると考えられる. 抵抗則を線形近似した解析解の式(8)と実験結果との関係を図3に示す. この場合, 解析値は実験結果に比べると非常に小さな値となっている. したがって, 抵抗則を一次の項までによる解析解では適切に示せないと考えられる.

4. まとめ

泥流の転波列性サージ波長について, 理論的な検討を行うとともに, 実験結果との対応を検討した. 波長の近似解として, 抵抗則の流速係数における水深 H を等流水深 H_0 の定数の場合と線形近似の場合で, 解析解を導出した. 前者の場合, おおよその傾向は対応しているが実験結果はその解析解よりも全体的に大きな値であることを示し, また後者の場合は近似解としては適切でないことを示した.

謝辞: 実験にあたり京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーの施設を使用した. ここに記して関係各位に謝意を表します.

参考文献: 1) 新井宗之、高橋保: 泥流型土石流の流動機構, 論文報告集, 土木学会, II, No.375, pp.69-77, 1986.11.

表1 実験条件

No.	θ (deg.)	Q (cm^3/s)	h (cm)	v cm/s	d_{50} cm	σ g/ cm^3	C
1	2.5	2148	1.6	134.4	0.067	1.41	0.177
2	3.0	1931	1.6	121.0	0.067	1.41	0.071
3	3.0	2520	2.0	128.0	0.067	1.41	0.202
4	3.0	1745	1.3	134.1	0.29	1.06	0.165
5	3.0	1150	1.3	88.0	0.29	1.06	0.158

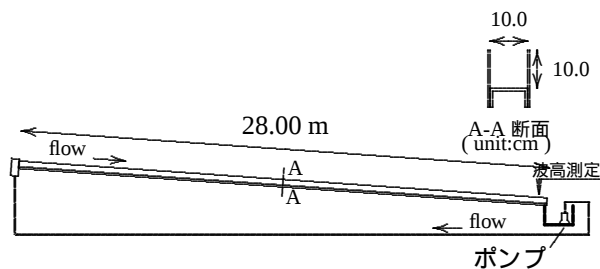


図1 実験水路概念図

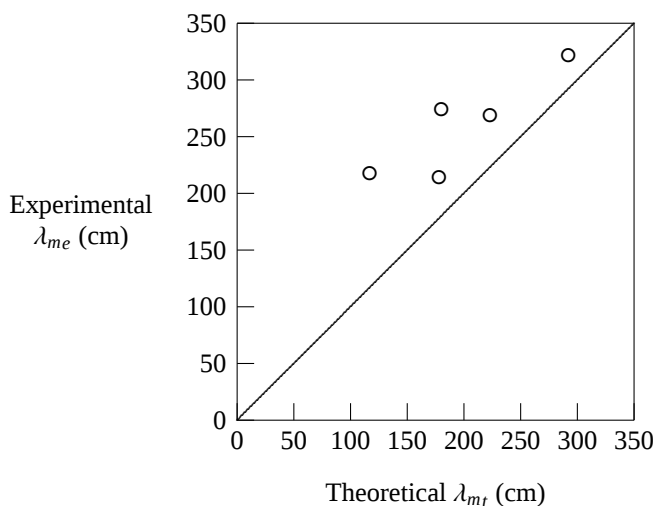


図2 H_0 理論波長 λ_{mt} と実験結果 λ_{me} との関係

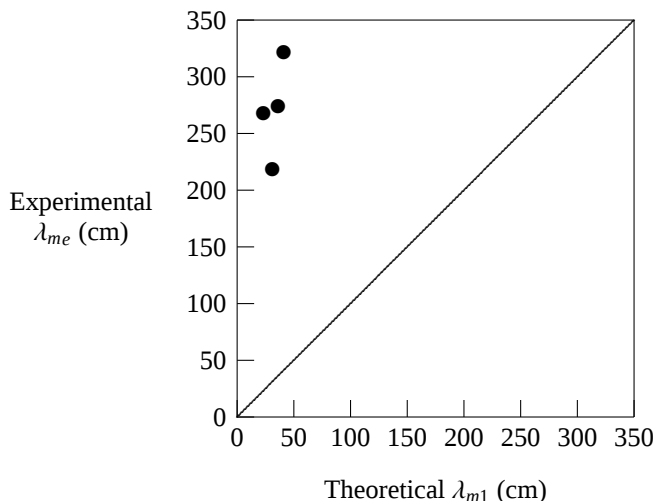


図3 線形近似理論波長 λ_{m1} と実験結果 λ_{me} との関係