

粘性土石流の抵抗則を考慮した転波列発生条件に関する研究

Occurrence condition of the roll wave surges on the viscous debris flow regarded the flow mechanism

新井宗之*, 堀江 渉**, 秋江三根男***
Muneyuki Arai, Wataru Horie, Mineo Akie

*博(工), 名城大学准教授, 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1丁目501)

** 修(工) 愛知県瀬戸市役所 (〒489-8701 愛知県瀬戸市追分町64-1)

*** 名城大学理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1丁目501)

This paper shows the conditions of the occurrence of roll waves on the high viscous flow with solid particles as viscous debris flow surges. And it is discussed about the theoretical and experimental results considering the flow mechanism of the viscous debris flow as a high viscous laminar flow laden with solid particles. Under the rectangular channel, laminar flow condition and the flow with constantly dispersed solid particles in the depth, the occurrence of the roll wave dose not depend on the viscous and concentration of the particles.

Key Words: viscous debris flow, high viscous fluid, roll wave, occurrence condition, theory, experiments

キーワード: 粘性土石流, 高粘性流体, 転波列, 発生条件, 理論, 実験

1. はじめに

粘性土石流と呼ばれる土石流が中国の広い範囲で発生することが観測され, 報告されている. この土石流の大きな特徴の一つには, 段波状の不連続な推進変化を有するサージ状の流れが周期的に多数発生し持続的に流下することである. この流動体の固相の容積濃度は70%程度もあり, 極めて高濃度であると言える^{1), 2)}. 写真-1は中国雲南省東川の蔣家溝で観測された粘性土石流の一例である. 写真下部中央に粘性土石流サージの先端部が見えるが, 河床からサージ上端までの高さは約2mである. この先端部の移動速度は約6m/sであり, 河道勾配は3°~5°である. 写真-2は土石流サージが連続的に流下している例である. 河道上流奥にも次の土石流サージ先端部が見える. ここで観測される粘性土石流サージは, 蔣家溝の場合1.5~3分程度の周期で間欠的に流下し, 継続的に100波程度発生することも珍しくない. したがって, このような現象が生じ始めてからサージ状の流れが発生しなくなるまで4~5時間要することも珍しくない.

このような長時間に及ぶ周期的で間欠的なサージが生じる原因としていくつかのモデルが提案されている. 高橋等³⁾は, 支川からの多量の土砂流入や側岸の土砂崩壊等により, 河道内に天然ダムが生じ湛水によりそれが崩壊しサージが発生することで説明している. 確かに側岸の崩壊が生じることは観測され, 支川からの土砂流入も観測されている. しかし, 長時間にわたる周期的な多数のサージの発生を説明することは難しいと思われる. Ko-fei, Liu等⁴⁾は

流れがビンガム流体であるとの仮定から, ビンガム流体の降伏応力の概念より間欠性の説明をしている. しかし, 著者等⁵⁾の蔣家溝土石流の観測結果に基づく詳細な解析から粘性土石流の流れ構造にビンガム流体特有の栓流は認められなかった. したがって, 流れをビンガム流体としてサージの間欠性を説明することは適切でないと考えられる. 粘性土石流の構成は粘土粒子程度の微細な粒子が10%以上も含まれていることから, 微細粒子が流体と同様な挙動をするとともに, 見掛けの粘性を大きなものにしてしまうと考えられる. 蔣家溝で観測された土石流を層流と仮定した場合の粘性係数は水の約 $10^3 \sim 10^4$ 倍程度である.

一方, 転波列に関する研究は, Dressler⁶⁾が先駆的な研究を行い, 日本では石原・岩垣・岩佐^{7), 8)}の薄層流に関する優れた研究がある. Needham⁹⁾, Merkin¹⁰⁾は乱れの特性が明確になるような運動方程式を導き直している. その他転波列に関する研究は多い. しかし, 固体粒子を含有する場合の転波列に関する研究は非常に少ない. 芦田等¹¹⁾は非粘着性粒子を含有する流れにおいて, 石原・岩垣・岩佐らの結果が比較的良好に適用できることを明らかにしている. 新井等¹²⁾は, 粘性土石流に関連して, 高粘性の流体を用いた流れの転波列発生条件を, 摩擦損失係数を導入した運動方程式より導き直し, 高粘性の流れにおいても従来の条件がよく適用できることを明らかにしている.

しかし, 高粘性の流体に固体粒子を含有するような粘性土石流の抵抗則を考慮した転波列(サージ)発生条件についてはほとんど明らかにされていない. そこで本研究では, Phillips等¹³⁾の理論を展開して, 粘性土石流の抵抗則を導



写真—1 中国・蔣家溝の粘性土石流
サージ先端部例



写真—2 中国・蔣家溝の粘性土石流
連続流下状況例

いた高橋等の式を用いて、高粘性流体に固体粒子を含有した層流領域の流れの転波列発生条件について理論的、実験的に検討したものである。

2. 粘性土石流の抵抗則を考慮した転波列発生条件に関する理論的検討

急激な水面変動をとまなう流で、横流入の無い1次元の運動方程式、連続式は次のように表すことができる¹²⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \beta v \frac{\partial v}{\partial x} + (1 - \beta) \frac{v}{A} \frac{\partial A}{\partial t} \\ = g \sin \theta - g \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{f' v^2}{2 R} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial (Av)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

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' : 径深における摩擦損失係数、 x : 座標軸の変数、 t : 時間。

式(1)の運動方程式の左辺第1項は加速度項、第2項は移流項、第3項は流積の変動による応力項で流積変動が緩やかな流れでは無視される。右辺第1項は水路勾配に基づく軸方向へ作用する質量力の成分、右辺第2項は水面勾配による作用力、右辺第3項は底面摩擦による抵抗項である。上式を速度 c により、次式の関係を用いて移動座標系に変換する。

$$v(x, t) = U(x - ct) = U(\xi) \quad (3)$$

$$h(x, t) = H(x - ct) = H(\xi) \quad (4)$$

$$\text{ここに、} \xi = x - ct \quad (5)$$

式(1)、(2)は、上式の関係を用いると次式のような移動座標系上の式に変形できる。

$$\begin{aligned} c \frac{\partial U}{\partial \xi} - \beta U \frac{\partial U}{\partial \xi} + c(1 - \beta) \frac{U}{A} \frac{\partial A}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial \xi} \\ = -g \sin \theta + g \cos \theta \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{f' U^2}{2 R} \end{aligned} \quad (6)$$

$$(U - c) \frac{\partial A}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial \xi} + A \frac{\partial U}{\partial \xi} = 0 \quad (7)$$

式(7)より、

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} = -(U - c) \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial \xi} \quad (8)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \xi} = - \frac{A}{(U - c)} \frac{\partial U}{\partial \xi} \frac{\partial H}{\partial \xi} \quad (9)$$

式(8)を式(6)に代入して $\partial H / \partial \xi$ を、式(9)を式(6)に代入し

て $\partial U / \partial \xi$ を求めると、次式のようなのである。

$$\begin{aligned} \frac{dH}{d\xi} = \\ \frac{A \left\{ g \sin \theta - \frac{f' U^2}{2 R} \right\}}{\{(\beta U - c)(U - c) + c(1 - \beta)U\} \frac{dA}{dH} - gA \cos \theta} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{dU}{d\xi} =$$

$$\frac{(U-c)\frac{\partial A}{\partial H}\left\{g\sin\theta - \frac{f' U^2}{2R}\right\}}{\{(\beta U - c)(U - c) + c(1 - \beta)U\}\frac{dU}{dH} - gA\cos\theta} \quad (11)$$

$$\frac{dH}{dU} = \frac{dH}{d\xi} \frac{d\xi}{dU} \text{ の関係から, 式(10), (11)を用いると}$$

$$\frac{dH}{dU} = \frac{A}{(c-U)\frac{dA}{dH}} \quad (12)$$

$$\text{の関係が得られる。さらに, } \frac{dA}{dU} = \frac{dA}{dH} \frac{dH}{dU} \text{ の関係を用}$$

いて, 式(12)を変数分離して解くと次式を得る.

$$(c-U)A = K_A \quad (13)$$

K_A は進行流量と呼ばれ定数である。これは速度 c の移動座標系から見た任意点における流量が一定であることを意味している。石原・岩垣・岩佐は単位幅あたりの式として取り扱っており, その進行流量を K で表し任意点において一定(定数)であることをすでに示しているが, ここでは, 任意断面形状においても進行流量 K_A は一定(定数)であることを示しているものである。また, 上記の導出の過程で $c-U > 0$ すなわち $c > U$ であり, 座標の移動速度 c は任意の断面平均流速 U より大きい場合に成り立つ。

$dH/d\xi$, $dU/d\xi$ の式(10), (11)を進行流量 K_A を用いて表すと次式のようなである。

$$\frac{dH}{d\xi} = -\frac{A\left\{g\sin\theta - \frac{f' 1}{2R} \frac{(cA - K_A)^2}{A^2}\right\}}{\left\{\beta\left(\frac{K_A}{A}\right)^2 + c^2(1-\beta)\right\}\frac{dA}{dH} - gA\cos\theta} \quad (14)$$

$$\frac{dU}{d\xi} = -\frac{\left(\frac{K_A}{A}\right)\frac{dA}{dH}\left\{g\sin\theta - \frac{f' 1}{2R} \frac{(cA - K_A)^2}{A^2}\right\}}{\left\{\beta\left(\frac{K_A}{A}\right)^2 + c^2(1-\beta)\right\}\frac{dA}{dH} - gA\cos\theta} \quad (15)$$

水面形を表す式(14)は, 次のようにも記す。

$$\frac{dH}{d\xi} = -\frac{f_1(H)}{f_2(H)}$$

ここに,

$$f_1(H) = A\left\{g\sin\theta - \frac{f' 1}{2R} \frac{(cA - K_A)^2}{A^2}\right\} \quad (16)$$

$$f_2(H) = \left\{\beta\left(\frac{K_A}{A}\right)^2 + c^2(1-\beta)\right\}\frac{dA}{dH} - gA\cos\theta \quad (17)$$

ここで, 移動速度 c の座標系から見た水面形で, 転波列を生じる流れでは頂部で常流の領域を有し, 谷部で射流の領域が存在することが必要で, 常流から射流二断面が存在する。この断面の条件は式(10)または式(14)の分母が 0 となる $f_2(H) = 0$ であり, $dH/d\xi$ が有意な値を持つためには $f_1(H) = 0$ である必要があり, 支配断面としての条件

$$f_1 = 0, \quad f_2 = 0 \quad (18)$$

を満足する必要がある。支配断面の水深を H_0 とすると, 転波列の発生条件は

$$\lim_{H \rightarrow H_0} \frac{dH}{d\xi} = \lim_{H \rightarrow H_0} -\frac{df_1/d\xi}{df_2/d\xi} \geq 0 \quad (19)$$

であることが, 石原等によって示されている。

ここで, 流積 A が矩形断面で水深 H の線形関数で表さ

$$\text{れる場合について検討する。式(17)は, } \frac{d}{dA}\left(\frac{dA}{dH}\right) = 0 \text{ で}$$

あるから, 次式のようなになる。

$$\frac{df_2}{dA} = -2\beta K_A^2 A^{-3} \frac{dA}{dH} - g\cos\theta \quad (20)$$

$$\text{さらに, } \frac{df_2}{dA} = \frac{df_2}{d\xi} \frac{d\xi}{dA} = \frac{df_2}{d\xi} \frac{d\xi}{dH} \frac{dH}{dA} \text{ を考慮すると,}$$

$$H \rightarrow H_0 \text{ において } \frac{dH}{d\xi} > 0 \text{ の条件であり, 流積 } A \text{ が有}$$

$$\text{意な値(プラス)を持つためには } \frac{dA}{dH} \geq 0 \text{ であり, これ}$$

$$\text{より } \frac{d\xi}{dH} \frac{dH}{dA} \geq 0 \text{ である。したがって, 式(20)より}$$

$$\frac{df_2}{d\xi} < 0 \text{ であるから,}$$

$$-\frac{df_2}{d\xi} > 0 \quad (21)$$

である。これより、式(19)を満足する条件は

$$\frac{df_1}{d\xi} \geq 0 \quad (22)$$

であり、これが転波列の発生条件となる。

ここで、粘性土石流の抵抗則について、高橋等の抵抗則を用いるものとする。高橋等は、Phillips の層流における中立浮遊粒子の相対運動の分散圧力の考えを基にして、重い粒子が分散して流れる機構を明らかにし、抵抗則を次のように表し粘土粒子を用いた実験でその妥当性を明らかにした³⁾。

$$\frac{v}{u_*} = \frac{1}{3} \frac{\rho u_*}{\mu} \left(1 - \frac{\bar{C}}{C_*}\right)^{1.82} (1 + \varepsilon \bar{C}) h \quad (23)$$

ここに、 v : 断面平均流速、 μ : 間隙流体の粘性係数、 $\bar{C}$: 断面平均固体粒子体積濃度、 C_* : 粒子の最大充填体積濃度、 $\varepsilon = (\sigma/\rho - 1)$ 、 ρ : 間隙流体の密度、 σ : 固体粒子の密度、 h : 水深、 u_* : 摩擦速度。

また、流速分布は次式のようなものである。ただし、ここでの式の取り扱いを考慮して、高橋等の示した式を若干変形している。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{\rho u_* h}{\mu} \left(1 - \frac{\bar{C}}{C_*}\right)^{1.82} (1 + \varepsilon \bar{C}) \left\{ \left(\frac{z}{h}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{h}\right)^2 \right\} \quad (24)$$

ここに、 z : 水路床を 0 とする水深方向の位置、 u : z における流速。

一般的な任意断面としての取り扱いは困難であるから、水路幅が水深に比して十分大きいような断面を対象にすると抵抗則は移動座標系において次式のように表すことができる。

$$\frac{f'}{2} = \frac{U_*^2}{U^2} = \frac{3\nu}{\left(1 - \frac{\bar{C}}{C_*}\right)^{1.82} (1 + \varepsilon \bar{C}) U R} \quad (25)$$

ここに、 $\nu = \mu/\rho$: 間隙流体の動粘性係数、 $U_* = u_*$ 。

上式の関係、および径深 $R = AS$ の関係を用いると式(16)は次式のように変形できる。

$$f_1(H) = A \left\{ g \sin \theta - \frac{3\nu}{\left(1 - \frac{\bar{C}}{C_*}\right)^{1.82} (1 + \varepsilon \bar{C})} (cA - K_A) A^{-3} S^2 \right\} \quad (26)$$

ただし、 S : 潤辺。

ところで、 $\frac{df_1}{dA} = \frac{df_1}{d\xi} \frac{d\xi}{dA} = \frac{df_1}{d\xi} \frac{d\xi}{dH} \frac{dH}{dA}$ であるから、

ここで対象としている条件は $\frac{dH}{d\xi} > 0$ であり、また矩形

断面のような水深 H に対して流積 A が線形の関係にある

断面を考えているので、 $\frac{dA}{dH} > 0$ であるから、 $\frac{df_1}{d\xi} \geq 0$

の条件は $\frac{df_1}{dA} \geq 0$ である。式(26)より $\frac{df_1}{dA} \geq 0$ の関係を求めると次式のようなものである。

$$\sin \theta \frac{\left(1 - \frac{\bar{C}}{C_*}\right)^{1.82} (1 + \varepsilon \bar{C})}{3\nu} \frac{1}{(cA - K_A) S^2} A^3 - \frac{c}{g} \frac{A}{(cA - K_A)} + \frac{2}{g} - \frac{2}{g} \frac{A}{S} \frac{dS}{dA} \geq 0 \quad (27)$$

支配断面においては、 $f_1 = 0$ の条件を有することから、式(26)より $f_1(H) = 0$ とした関係を用いて、式(27)を変形する

と転波列が生じる条件 $\frac{df_1}{d\xi} \geq 0$ として、次式の関係を得る。

$$\frac{U_0}{c} (1 + 2m) \geq 1 \quad (28)$$

ここに、 $m = 1 - R \frac{dS}{dA}$ (29)、 U_0 : 移動座標系上の支

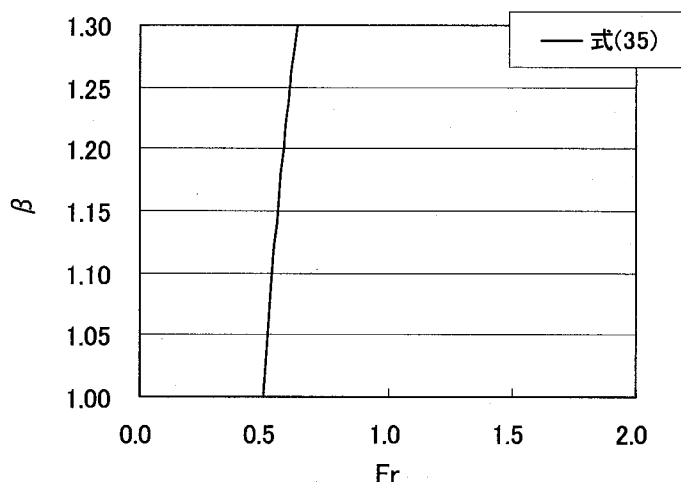
配断面における断面平均流速。

さらに、支配断面においては $f_2 = 0$ の関係も成り立つ必要があるから、式(17)の関係より、

$$\left\{ \beta \left(\frac{K_A}{A} \right)^2 + c^2 (1 - \beta) \right\} \frac{dA}{dH} - gA \cos \theta = 0 \quad (30)$$

である。ここで、フルード数 $F_r = \frac{U}{\sqrt{gR \cos \theta}}$ を用いる

と、式(30)より、次式の関係を得る。



図—1 β と F_r の関係

$$U_0 = \frac{\beta \frac{dA}{dH} - \sqrt{\beta(\beta-1) \left(\frac{dA}{dH} \right)^2 + \frac{dA}{dH} \frac{S}{F_r^2}}}{\beta \frac{dA}{dH} - \frac{S}{F_r^2}} c \quad (31)$$

上式の関係式(28)に代入すると、粘性土石流の抵抗則を考慮した転波列の発生条件は次式のようなである。

$$\frac{\beta \frac{dA}{dH} - \sqrt{\beta(\beta-1) \left(\frac{dA}{dH} \right)^2 + \frac{dA}{dH} \frac{S}{F_r^2}}}{\beta \frac{dA}{dH} - \frac{S}{F_r^2}} (1+2m) \geq 1 \quad (32)$$

または、

$$\frac{\frac{dA}{dH} (1+2m)}{\beta \frac{dA}{dH} + \sqrt{\beta(\beta-1) \left(\frac{dA}{dH} \right)^2 + \frac{dA}{dH} \frac{S}{F_r^2}}} \geq 1 \quad (33)$$

幅の広い矩形断面水路として $B \gg h$ であるような断面形

$$\text{を対象とすると, } m = 1 - R \frac{dS}{dA} = 1 - R \frac{dS}{dH} \frac{dH}{dA} = 1$$

より、式(33)は転波列発生条件として次式のようなになる。

$$\frac{3}{\beta + \sqrt{\beta(\beta-1) + \frac{1}{F_r^2}}} \geq 1 \quad (34)$$

または、

$$F_r \geq \frac{1}{\sqrt{9-5\beta}} \quad (35)$$

式(35)の β と F_r の関係は図—1に示す。図中の実線より右側が転波列（サージ）発生領域である。

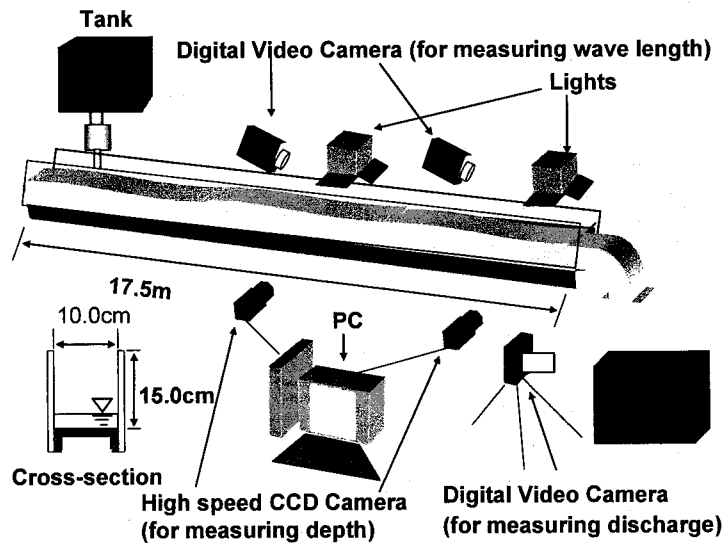
ここで、高橋等の粘性土石流の流速分布式(24)および平均流速式(23)より運動量補正係数 β を求める。 β の定義より、

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{1}{A} \int_A \left(\frac{u}{v} \right)^2 dA \\ &= \int \left[3 \left\{ \left(\frac{z}{h} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right\} \right]^2 d \left(\frac{z}{h} \right) = \frac{6}{5} \end{aligned}$$

したがって、この粘性土石流の抵抗則の運動量補正係数 β は

$$\beta = \frac{6}{5} \quad (36)$$

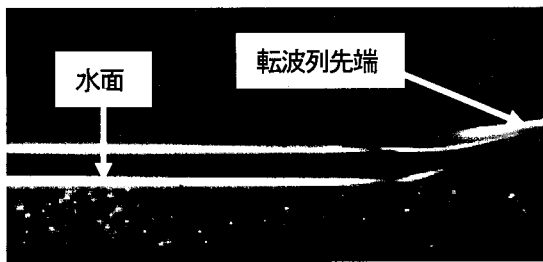
である。これは清水の開水路層流の運動量補正係数 $\beta = 6/5$ と同じである⁷⁾。この値を式(35)に代入すると固体粒子を含有する高粘性流れとしての粘性土石流の転波列（サージ）の発生条件は、式(37)のようなである。



図—2 実験水路概念図

表—1 実験条件・実験結果

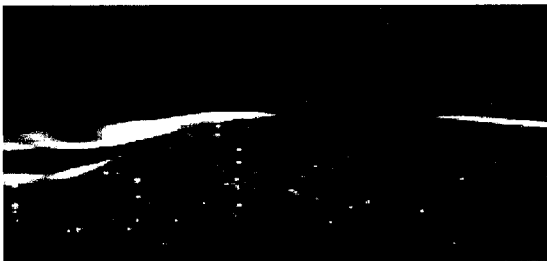
No.	水路勾配 θ (DEG)	水深 h (cm)	平均流量 Q (cm ³ /s/cm)	平均流速 v (cm/s)	粘性係数 μ (mPa·s)	フルード数 Fr	固体粒子濃 度 (%)	転波列	
								非発生	発生
1	2.6	0.69	7.5	10.8	98.0	0.42	3.32	○	
2	2.6	1.15	13.0	11.3	95.0	0.34	3.34	○	
3	2.6	0.93	13.7	14.8	97.0	0.49	3.28	○	
4	2.6	2.09	98.9	47.3	95.0	1.05	2.97		●
5	2.6	2.14	88.1	41.2	95.0	0.90	3.61		●
6	2.6	2.12	94.4	44.6	90.0	0.98	3.77		●
7	2.6	2.17	88.7	40.9	93.0	0.89	3.03		●
8	2.6	2.35	86.9	37.0	95.0	0.77	3.31		●
9	2.6	2.33	101.1	43.5	100.0	0.91	2.18		●
10	2.6	2.48	95.4	38.4	98.0	0.78	6.43		●
11	2.6	2.24	90.0	40.1	98.0	0.86	4.13		●
12	3.8	0.76	10.4	13.6	41.5	0.50	0.00	△	
13	3.8	0.84	13.6	16.2	41.5	0.56	0.00	△	
14	3.8	0.67	10.6	15.9	38.9	0.62	0.00	△	
15	3.8	0.93	19.8	21.3	41.5	0.71	0.00		▲
16	3.8	1.15	34.1	29.7	41.5	0.89	0.00		▲
17	3.8	1.03	29.5	28.6	41.5	0.90	0.00		▲
18	3.8	1.35	46.9	34.8	41.5	0.96	0.00		▲
19	3.8	1.41	67.3	47.6	41.5	1.28	0.00		▲
20	5.5	1.29	30.7	23.9	34.0	0.67	0.00		▲
21	10.7	0.48	12.4	25.8	31.0	1.20	0.00		▲
22	7.0	0.92	38.2	41.4	88.0	1.38	1.30		◆
23	8.1	1.19	72.8	61.3	127.5	1.80	1.30		◆
24	17.0	4.50	432.0	96.0	3800.0	1.48	64.00		■



(a) $t = 0 \text{ sec.}$



(b) $t = 0.015 \text{ sec.}$



(c) $t = 0.030 \text{ sec.}$

写真—3 転波列発生実験の映像例

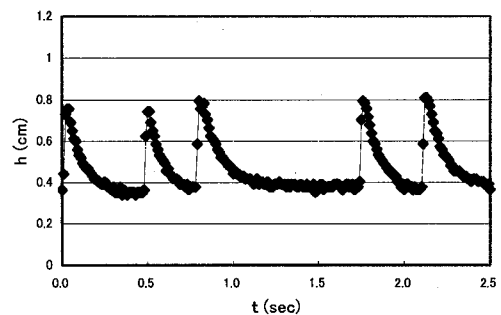
$$F_r \geq \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (37)$$

この関係は、石原等が示した清水の層流における転波列の条件⁷⁾と同じ結果となっている。このことは高粘性流体に固体粒子を含有した流れにおいて、転波列（サージ）の発生条件に、粒子濃度や間隙流体の粘度には直接関係していないことを意味している。しかし、当然フルード数 F_r を定める断面平均流速 v に粒子濃度や間隙流体の粘度が関係する。

3. 実験の概要、実験結果及び考察

3. 1 実験の概要

実験水路は図—2に示すよう水路長 17.5m、幅 10.0cm、深さ 15.0cm の両側壁透明塩化ビニール製で、水路床はス

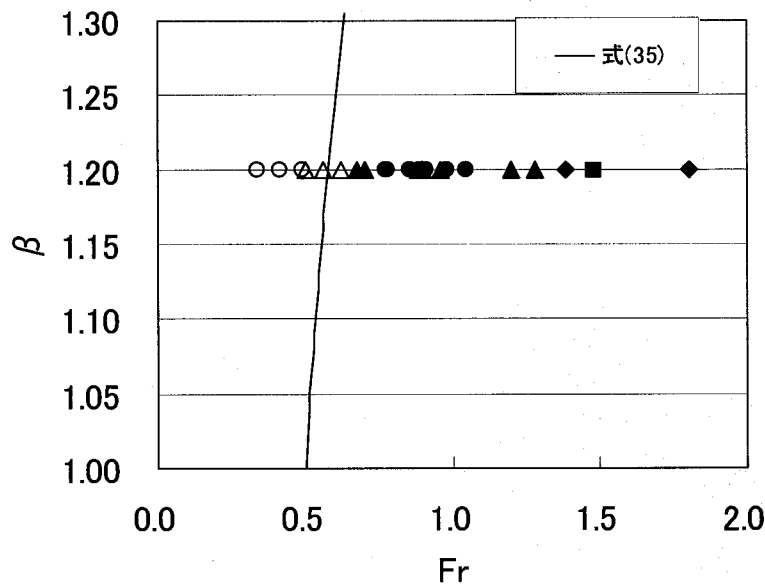


図—3 転波列発生実験の水深時系列変化例

チール製のペンキ塗布した滑面状の水路である。水路勾配は 2.6° の固定である。上流端に容量 300ℓ の給水槽を設け、高粘性流体と固体粒子を容器内で混合攪拌し、それを水路上流端より供給して流下させ実験に供した。供給槽は内部圧力が一定になるように工夫し、供給槽からの供給流量が一定になるようにしている。流況や水深はデジタルビデオカメラ、高速度 CCD カメラ（フォトロン社製）を用いて測定に供した。また、水路下流端で、流出軌跡から流速、及び水深をデジタルビデオカメラを用いて求め、流量を計測した。実験に使用した高粘性流体は、東亞合成株式会社製の高分子増粘剤（T-40）で、食品にも使用可能な安全性の高いものである。原液は清水の 1000 倍程度の粘度を有し、密度は $\rho = 1.3 \text{ g/cm}^3$ である。それを水で希釈して清水の 50～100 倍程度の粘度で実験に使用している。密度は $\rho = 1.2 \text{ g/cm}^3$ である。また、実験に使用した固体粒子は、硬質塩化ビニールペレットで径が 5mm、高さ 3mm の円筒状の円盤で密度は $\rho = 1.3 \text{ g/cm}^3$ である。固体粒子は流体密度にほぼ等しいものを使用し、流下中は中立浮遊的に流下するようにしている。

写真—3は高粘性流に転波列が発生し、流下する状況を高速度 CCD カメラを用いて時間間隔 $1/2000 \text{ sec}$ で撮影した映像例である。転波列の先端が画像の右端から左端へ移動している様子を画像 (a)、(b)、(c) で示している。ただし、それぞれの画像の時間間隔は $\Delta t = 0.015 \text{ sec}$ で、連続して撮影した映像の 30 コマ間隔の例である。また、(a) に水面の位置を矢印で示しているが、その水面の上に同様な白い線がある。これは反対側の水路側壁の水面が映っているためである。図—3は、固定点における水深変化を時系列的に 2.5 秒間示したものである。写真—3の映像ではそれほど急激な水深変化はないように見えるが、時系列的に見ると急激な水深変化を生じ、周期的に連続して生じていることが解る。

3. 2 実験結果及び考察



図—4 転波列発生の実験結果

実験条件及び実験結果は表—1に示している。表中のNo.1～No.11は上記の実験条件・実験結果で、No.12～No.24は文献12)による実験結果をこの考察に供するよう整理して加えたものである。上記実験での平均水深は $h=0.69\sim2.48\text{cm}$ 、断面平均流速は $v=10.8\sim47.3\text{cm/s}$ 、流体の粘度は $\mu=95\sim100\text{mPa}\cdot\text{s}$ で清水の約100倍の粘度を有しNo.12～No.21の実験の約2～3倍の粘度を有している。粘度の測定はB型粘度計を用いた。固体粒子は体積濃度で2.18～6.43%含有している。固体粒子の形状が円筒・円盤状で体積濃度は粒子の質量から算出しているため見かけの濃度はそれよりも高い。フルード数は $Fr=0.3\sim1.0$ で発生限界に近い領域で実験を行っている。

図—4は、粘性土石流の抵抗則を考慮した転波列（サージ）発生条件の式(35)と実験結果の関係を示している。横軸にフルード数 Fr 、縦軸に運動量補正係数 β をとり、粘性土石流の流速分布による運動量補正係数 β は式(36)に示すように $\beta=6/5$ である。このため、 $\beta=1.2$ 上に実験結果をプロットしている。図中のマークは表—1の実験条件・実験結果のマークに対応している。○印は、清水の約100倍の粘度の流体に硬質塩化ビニールペレット粒子を含有した流で、転波列が発生しなかったことを表している。●印は、同様な高粘性の流体に硬質塩化ビニールペレット粒子を含有した流で、転波列が発生したことを表している。△印は、清水の約40倍程度の粘度の流体に固体粒子を含有しない高粘性の流体だけの流で、転波列が発生しなかったこ

とを表している。▲印は、清水の約30～40倍の粘度の流体の流で、転波列が発生したことを表している。◆印は清水の約100倍前後の粘度に、 $d_{50}=0.1\text{mm}$ の硅砂、および $d_{50}=0.1\text{mm}$ のガラスビーズを体積濃度1.3%含有した流で、転波列が発生したことを表している。■印のNo.24は、土砂と粘土および水を混合・攪拌し、固体体積濃度が64%の状態で水路の上流端より供給し流下させた流れで、転波列が発生したことを表している。式(35)と実験結果の関係をみると、発生限界付近で理論値は実験結果よりも若干小さな値を示しているが、全体的に良好な一致を示しているといえる。

以上のことは、2節で述べたように、このような高粘性の流体に固体粒子を含有した流れで、粒子が水深方向に一樣に分散して流れるような場合には、流体の粘度の大きさや粒子濃度が転波列の発生条件に影響しないという重要な結果を意味しているものである。しかしながら、フルード数 Fr に依存するため、粘度や固体粒子濃度が平均流速に影響するかたちで、転波列発生条件に関係することは当然である。

ところで、写真—4は写真—1、2と同じ中国雲南省蒋家溝において、粘性土石流が発生した時の最初の状況の写真である。写真—4(a)は粘性土石流が発生した第一波の写真である。(b)はその通過後に流木を拾うために地元の人が河道に入っているところである。これらのことから、流動深を30cm、流速を1m/sとし、現地で測定した河床勾



(a) 粘性土石流発生の最初



(b) 最初のサージ後の状況

写真—4 粘性土石流の初期流況

配 $\theta=5^\circ$ より、フルード数 Fr を求めると $Fr=0.58$ であり、式(37)の限界値 $Fr=0.57$ に非常に近い値である。これは不安定性の条件式の妥当性を示す一つであると考えられる。

4. 結論

今まで、固体粒子を含有する高粘性流体の転波列（サージ）発生条件は、理論的に解析されていなかった。本研究は、高橋等の粘性土石流の抵抗則を基礎方程式の抵抗項に導入しその発生条件を理論的に解析したものであり、実験結果等によりその条件式の妥当性を明らかにしたものである。

つまり、水深に比して幅の広い矩形断面流路において、水深方向に固体粒子が一樣に分散して流れる層流領域の流では、粒子濃度や流体の粘度には影響されず、転波列（サージ）の発生条件は、フルード数 Fr と運動量補正係数 β

の関係で次式のように表すことができる。

$$Fr \geq \frac{1}{\sqrt{9-5\beta}} \quad (35)$$

また、流動機構として高橋等が Phillips 等の理論を展開して明らかにした粘性土石流の抵抗則を適用すると、運動量補正係数 β は $\beta=6/5$ となり、発生条件は

$$Fr \geq \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (37)$$

となる。これらの関係は、高粘性流および高粘性流に固体粒子を含有した流れの実験結果と良好な一致を示し、その妥当性を明らかにした。

また、これらの結果は、従来粘性土石流の発生条件が、河床堆積土砂の降伏応力や粘着力を上回る条件、あるいは天然ダムの崩壊条件として考えられてきたが、流れの不安

定性によっても土石流サージが発生することを示したもので、従来の降伏応力等を基にした発生条件の考え方は全く異なる新しい知見と言える。

参考文献

- 1) DPRI, Kyoto University and IMHU, Chinese Academy of Sciences, "Japan-China Joint Research on the Prevention From Debris Flow Hazards", 195p, 1994.
- 2) DPRI, Kyoto University and IMHU, Chinese Academy of Sciences, "Japan-China Joint Research on the Mechanism and the countermeasures for the Viscous Debris Flow", 206p, 1999.
- 3) 高橋 保・中川 一・里深好文・緒方正隆: 粘性土石流の流動機構に関する研究(3)——土石流サージの形成と伝播——, 京都大学防災研究所年報, 第 41 号, B-2, pp.265-275, 1998.
- 4) Ko-fei Liu, and Chiang C. Mei, "Roll waves on a layer of a muddy fluid flowing down a gentle slope—A Bingham model", Phys. Fluids 6(8), pp.2577-2590, 1994.
- 5) 新井宗之・劉 雪蘭・高橋保: 粘性土石流の表面流速解析による流動機構の考察, 水工学論文集, 第 44 巻, pp.693-698, 2000.
- 6) R.F., Dressler, "Mathematical solution of the problem of roll-waves in inclined open channels", Communication on Pure and Applied Mathematics, Vol.II, No.2/3, 1949.
- 7) 石原藤次郎・岩垣雄一・岩佐義朗: 急斜面上の層流における転波列の理論——薄層流に関する研究(第5報)——, 土木学会論文集, 第 19 号(昭和 29.4), pp.46-57.
- 8) 岩垣雄一・岩佐義朗: 転波列の水理学的特性について——薄層流に関する研究(第7報)——, 土木学会誌, 40-1(昭和 30-1), pp.5-12.
- 9) D. J., Needham and J. H. Merkin, "On roll waves down an open inclined channel", Proc. R.Soc.Lond. A 394, pp 259-278, 1984.
- 10) J. H. Merkin and D. J. Needham, Proc. R. soc. London Ser. A 405, 103, 1986.
- 11) 芦田和男・高橋保・道上正則: 河川の土砂災害と対策、流砂・土石流・ダム堆砂・河床変動, 森北出版, 1983.
- 12) 新井宗之・劉雪蘭・田原伸彦: 粘性土石流の発生機構に関する検討, 土木学会, 応用力学論文集, Vol.7, pp.813-820, 2004.8.
- 13) Phillips, R. J., Armstrong, R. C., Brown, R. A., Graham, A. L. and Abbot, J. R., "A constitutive equation for concentrated suspensions that accounts for shear induced particle migration", Phys. Fluids, A, Vol.4, No.1, pp.30-40., 1992.

(2007 年 4 月 12 日 受付)