

粘性土石流の表面流速解析による 流動機構の考察

A DISCUSSION ON MECHANISM OF VISCOUS DEBRIS FLOW
VIA SURFACE VELOCITY ANALYSIS

新井宗之¹・劉 雪蘭²・高橋 保³

¹正会員 工博 名城大学助教授 理工学部土木工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口一丁目501番地)

²学生会員 工学 名城大学大学院 理工学研究科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口一丁目501番地)

³フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

The viscous debris flow occurs frequently in the southwest of China. This natural event inflict damage on people or property. For the purpose of mitigation planning, it need to elucidate the mechanism of viscous debris flow. And then, it is necessary to analyze the motion of it.

On July 24th, 1997, a viscous debris flow was recorded with a digital video camera in JiangJia Gully, Dongchuan City, Yunnan Province, China. These images were saved as files formatted as BMP by computer interface board. Since the absolute coordinates of targets which were near the channel were surveyed by an infrared-light distance meter, the distance of a pixel of images about motion of debris flow is estimated in x and y direction, respectively. A new image analysis method, the auto-correlation method, is used to analyze the surface velocity of debris flow.

In this paper, the two results of image analysis are shown: one is the mean surface velocity change of central of several surges, another is the change of surface velocity vector in a fixed cross section. According to these results and the field experiment, it could be concluded that viscous debris flow is a kind of complex flow. It is a turbulence in the front of a surge; in the middle of a surge, it could be considered as a kind of cohesive flow; and due to the cohesion or yield strength, the flow almost stops in the end of a surge.

Key Words : Viscous Debris Flow, Observation, Surface Velocity, Mechanism

1. はじめに

中国では、広い国土で地質、地形、気候の多様性(図-1)に応じて、様々な土石流の流動タイプが見られる。それらの中の一つは中国の西南部によく分布しているもので、力学的に定義されたものではないが、粘性土石流と呼ばれる体積濃度が70%もある非常に高濃度の流れがある。この土石流は間欠的に100波程度も発生する特徴がある。これらの土石流は、種々の山地災害を引き起こしてきた。このため、粘性土石流のメカニズムの解明とその対策に関する研究は非常に重要である。

今まで、この粘性土石流の流動メカニズムは大別すると二つの流動モデルが考えられている。一つは粘塑性流体モデル(ビンガム流体モデル)で、もう一つは粘性流体モデルである。前者は中国の研究者に多いが、土石流

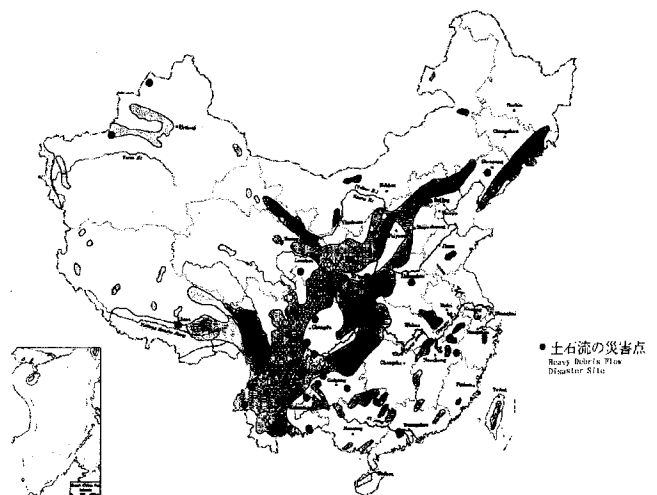


図-1 中国の土石流災害分布¹⁾

の流動物質に粘土を20～30%程度含むことから降伏応力を有するビンガム流体の一種であると考えられるものである。また、後者は実験や観測から、粘土を高濃度に含む流れを一種の粘性流体と考えることができるとするものであり、高橋²⁾によって多くのことが説明されている。しかしながら、実際の粘性土石流の流動機構を解明するためには、流下現象を解析することが不可欠である。

本研究では近年発達した画像解析手法の中の相関法(PIV)により、中国雲南省における蒋家溝で観測された粘性土石流の幾つかのサージの表面流速の解析を行なった。解析はサージの流心部の平均流速変化、また横断面の流速変化である。これらの解析結果と現地で行われた実験結果を比較して、流動機構について検討した。

2. 粘性土石流の観測条件

観測流域は中国雲南省東川市における長江の上流の金沙江という流域の小江の支流である。小江の一支流である蒋家溝では流域面積48.6 km²、河道全長は13.9 kmである(図-2)。粘性土石流を毎年平均約15回に発生することで知られている。最も多い年は28回発生している。その流動の特徴は、土石流がサージとして何度も繰り返し間欠的に流下すること、またこの一連の現象は数時間にも及び、最大流量は約2820 m³/s、最大流速は約15m/s程度を有する流れであることである。

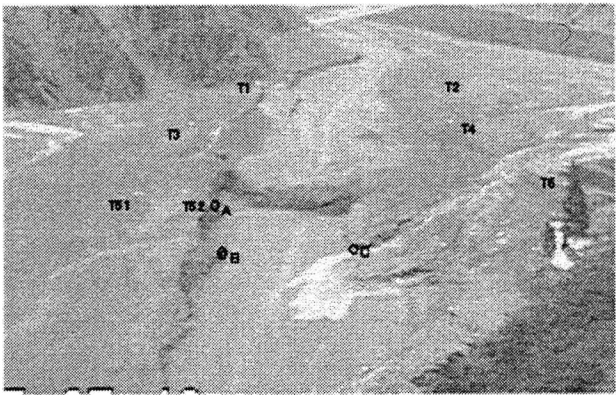


写真-1 流下河道と基準点の位置

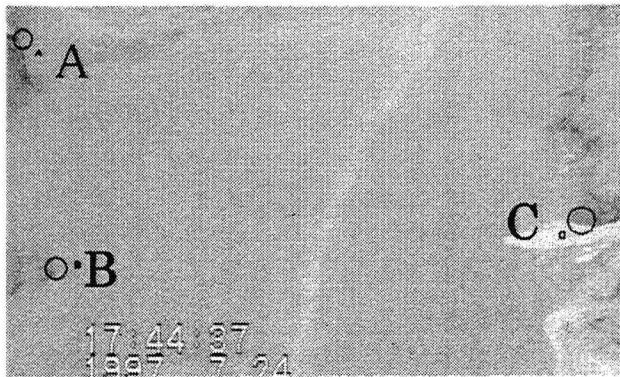


写真-2 解析画像での基準点

表-1 基準点の座標

	実測座標 (単位:m)			写真-1の 画像座標	
	x	y	z	px	py
T1	1201.691	3332.975	1363.195	293	108
T2	1126.006	3304.199	1363.434	423	110
T3	1248.813	3246.858	1355.869	244	137
T4	1156.046	3221.838	1356.885	437	136
T51	1282.738	3147.398	1349.991	203	187
T52	1270.335	3143.162	1350.706	238	185
T6	1174.335	3112.100	1353.179	522	181

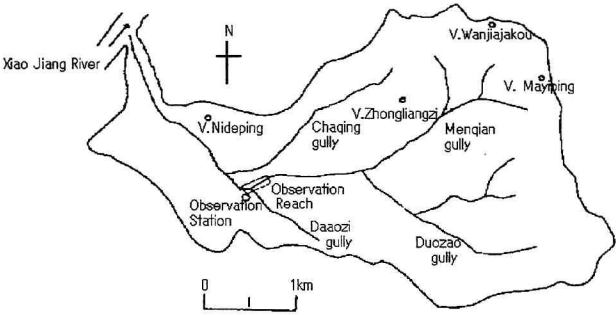


図-2 蒋家溝の流域

蒋家溝で1997年7月24日午後、上流域での降雨から1時間後、16:30ごろから21:30ごろまで約5時間、間欠的にサージとして流下した。粘性土石流を観測した中流部ではほとんど降雨はなかった。

観測された土石流の流下河道は長さ約300m、幅約30m、深さ約3m、水路勾配が約5°のほぼ直線状である(写真-1)。河道の兩岸に基準点としてターゲットT1～T6を設け、光波測距儀によって相対的な3次元の位置を定めている(表-1)。流下中の土石流を採泥方法により得た。その土砂の粒度分析の一例は図-3のようであり、中央粒径 d_{50} =5.7mm である。

土石流記録用のカメラは1フレーム1/30 s のデジタ

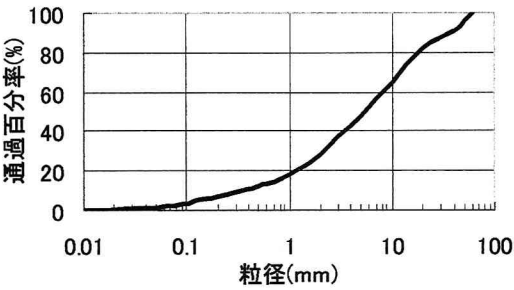


図-3 粒度曲線

ル・ビデオカメラであり、解像度は640×480である。記録した映像はインターフェイス・ボード介してコン

コンピュータに画像データとして取り込まれた。画像のサイズを小さくするために、幅は640×380としている、解像度の精度は損失していない（写真2）。

ところで、解析画像の両岸の基準点A, B, Cは光波測距儀によって得られる画像（写真-1）から換算し、画像の1ピクセル当たりのx, y方向距離を決めている。それぞれの値は次のようである。

$$\Delta x = 0.0593\text{m}, \Delta y = 0.1470\text{m}$$

3. 解析法

粘性土石流の表面流速の解析には相関法(PIV)を用いている³⁾。相関法は、微小時間間隔 Δt をおいて撮られた2枚の画像AとBを、流速を求めようとする位置を中心とした適当な広さの領域 $M \times M$ ピクセル内に、次式で表わされる相互相関関数を用いるものである。

$$r_{ab} = \frac{\sum_j \sum_i \left[\frac{a_{i,j}}{a_{i,j}} - 1 \right] \left[\frac{b_{i,j}}{b_{i,j}} - 1 \right]}{\sqrt{\sum_j \sum_i \left[\frac{a_{i,j}}{a_{i,j}} - 1 \right]^2} \sqrt{\sum_j \sum_i \left[\frac{b_{i,j}}{b_{i,j}} - 1 \right]^2}} \quad (1)$$

ここで、 $a_{i,j}$ は時刻tの画像Aで、位置 x_i, y_i の位置における $M \times M$ 領域内の明るさの強度であり、 $b_{i,j}$ は時刻 $t + \Delta t$ の画像Bで任意の $M \times M$ 領域内の明るさの強度である。 $\overline{a_{i,j}}, \overline{b_{i,j}}$ は画像AとBのそれぞれ明るさの強度平均値である。ところで、画像の明度の値はBMPファイルのRGBの平均値を用いている、範囲は0～255。 i, j はx, y方向のインデックスである。そして、画像Bで相関関数が最大値 r_{ab_max} をもつ位置が $\Delta x_{max}, \Delta y_{max}$ であるとする

と、位置 x_i, y_i での速度は $u = \Delta x_{max} / \Delta t$,

$v = \Delta y_{max} / \Delta t$ となる。

これは移動量が画像の1ピクセル当たりの値によって決められてしまうが、相関関数の最大値の前後の値を用いて補正することができる。ここでは放物線近似を行い、移動量を補正している。すなわち、最大の相関値 r_2 の位置 x_2 とその前後の相関値 (x_1, r_1) と (x_3, r_3) とから、放物線近似を行うと：

$$r = ax^2 + bx + c \quad (2)$$

から、最大相関関数の位置xは、次のように得られる。

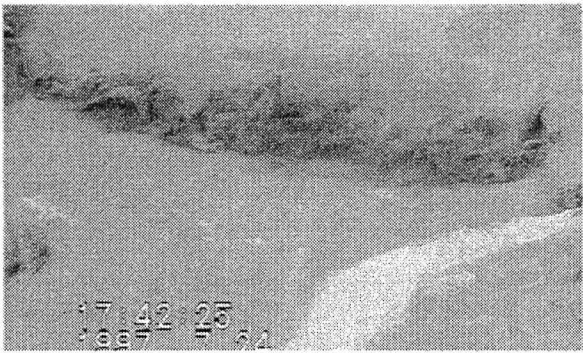


写真-3 土石流の先端部

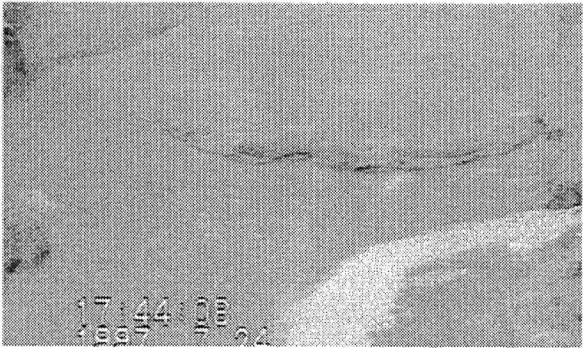


写真-4 土石流の先端部

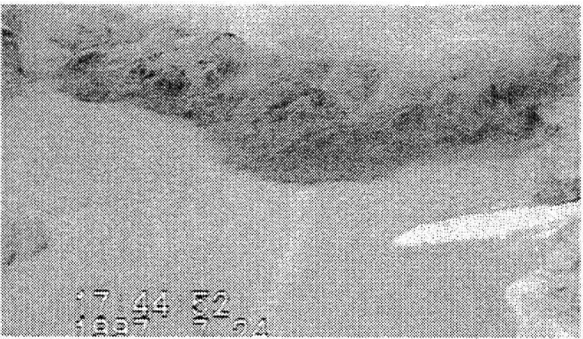


写真-5 土石流の先端部

$$x = \beta / 2\alpha \quad (3)$$

ここに、

$$\alpha = X1 / Det \quad \beta = X2 / Det \quad (4)$$

$$Det = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \end{bmatrix} X1 = \begin{bmatrix} r_1 & x_1 & 1 \\ r_2 & x_2 & 1 \\ r_3 & x_3 & 1 \end{bmatrix} X2 = \begin{bmatrix} x_1^2 & r_1 & 1 \\ x_2^2 & r_2 & 1 \\ x_3^2 & r_3 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここでは、x方向のみ表示しているが、y方向も同様な方法によって求めることができる。このB画面での位置と、A画面での位置 (x_i, y_i) の差が $\Delta x_{max}, \Delta y_{max}$ である。

また、ここでは流動面を平面として解析し、解析のテンプレートの大きさは15×15ピクセルを用いている。

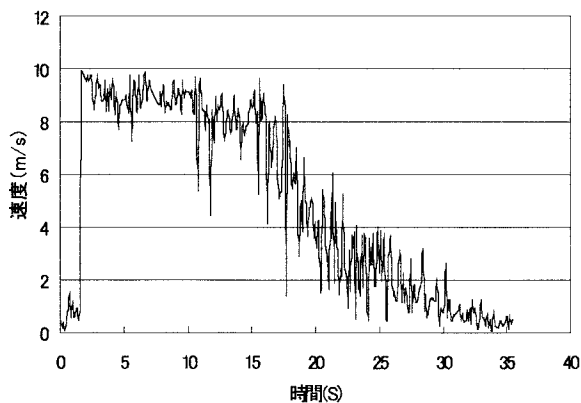


図-4 17:42:25サージの河道中央部の流速

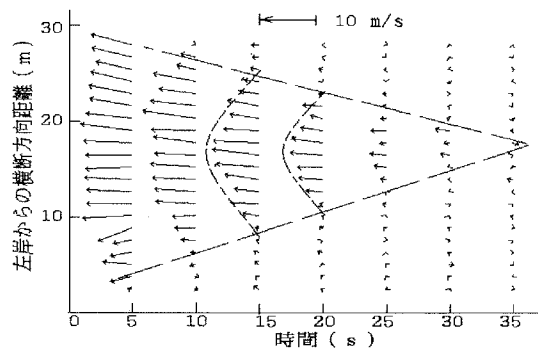


図-7 流速ベクトルの横断分布(17:42:25)

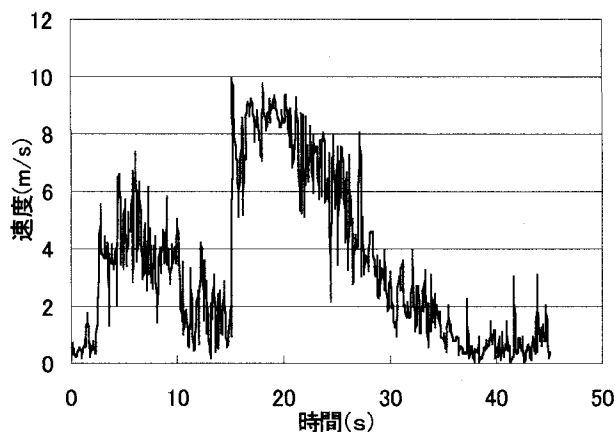


図-5 17:44:02サージの河道中央部の流速

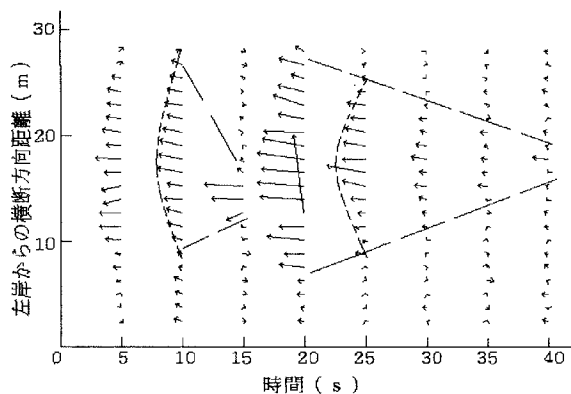


図-8 流速ベクトルの横断分布(17:44:02)

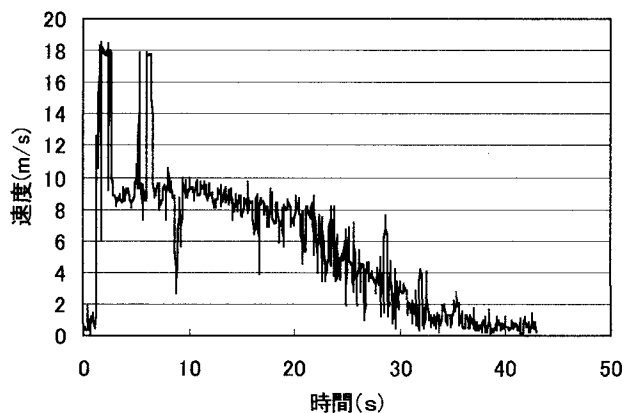


図-6 17:44:52サージの河道中央部の流速

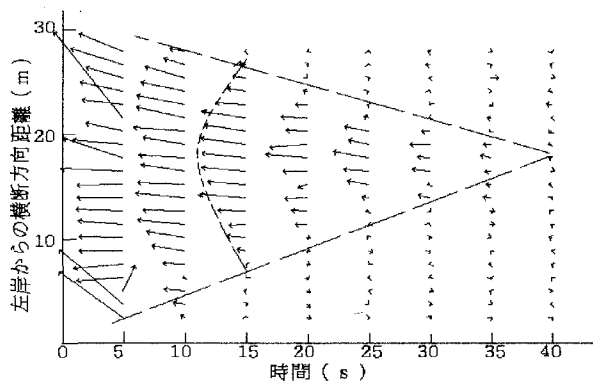


図-9 流速ベクトルの横断分布(17:44:52)

オイラー的な表面流速の時間変化を示し、横軸に時間(sec)、縦軸に表面流速を示している。

これらの結果によると、一つのサージは先端部で流速が速く、しだいに減少し、最後に停止する流れである。また、サージの先頭部や後続部に比較的流速が一定な部分もあることがわかる

b. サージの横断表面流速

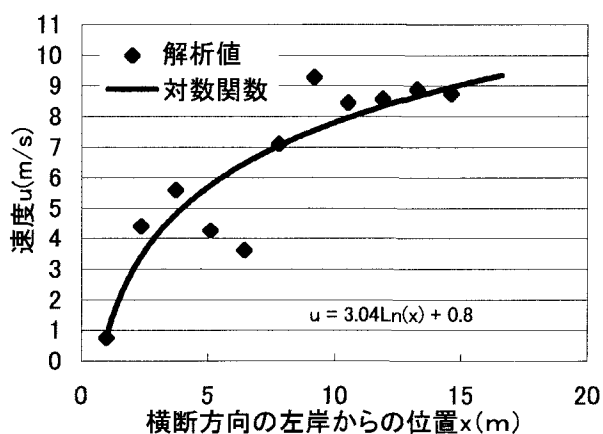
図-7～図-9は写真-3～5に対応するのサージの横断方向の流速ベクトルが流下時間とともに変化する様子を示しているものである。横軸は時間(sec)、縦軸は左岸

4. 解析結果及び考察

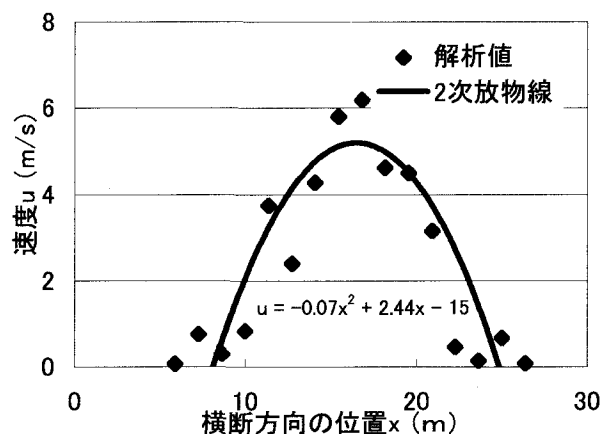
写真-3～写真-5 は粘性土石流の先端部分の画像例である。前述の相関法による解析結果は、以下のようである。

a. サージの中心部の流速変化

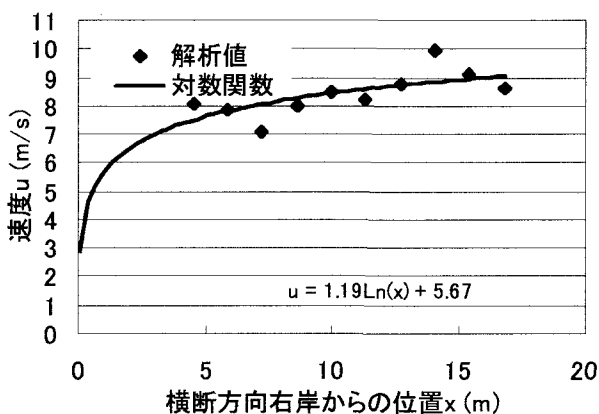
図-4～図-6 は流れのほぼ中央部での流速であり、



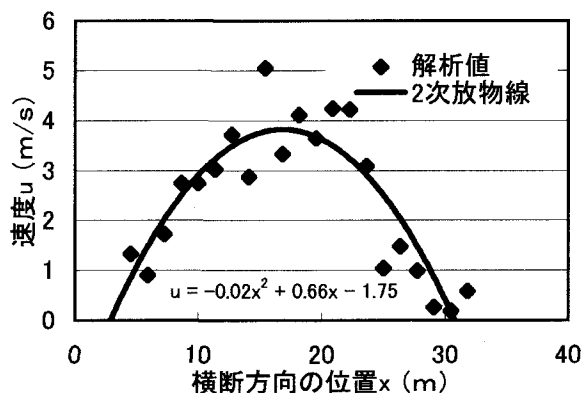
図一10 17:42:25サージの先端部の横断流速分布(左)



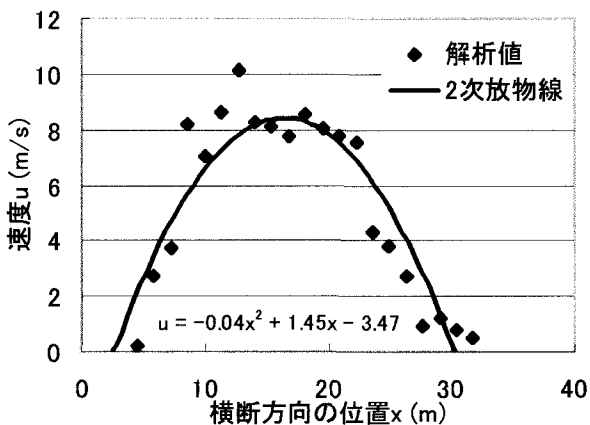
図一13 17:42:25サージ20秒後の横断流速分布



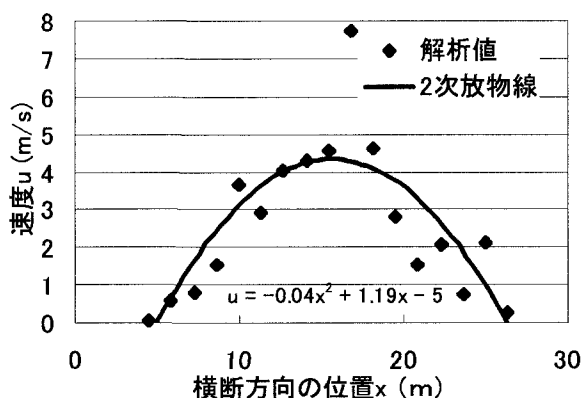
図一11 17:42:25サージの先端部の横断流速分布(右)



図一14 17:44:08のサージ10秒後の横断流速分布



図一12 17:42:25サージ15秒後の横断流速分布



図一15 17:44:08サージ25秒後の横断流速分布

からの距離を示している。

図中の破線は流速がほぼゼロとなっている境界をしめしている。これらによると、土石流のサージは、後続流において流速が減少して行くとともに流下幅も減少して行くことが示されている。また、図中の横断方向の点線は放物線を示している。

図一8、図一9の図中に異常と思われるベクトルがあるが、先の解析方法による結果をそのまま示しているもので他の補正に行っていないためであると考えられる。

図一5、図一8のサージでは小さなサージの直後に、より大きなサージが来たことを示している。この流れの場合、先の小さなサージは後続のサージに追いつかれ、一

体化して流下している。

ところで、土石流サージの横断方向の流速分布形について示したのが、図-10～図-15である。図-12、図-13は、図-4、図-7のサージ先端から15秒、20秒後の横断方向変化図である。横軸に左岸からの距離、点印は流下方向の流速である。層流とする粘性流体の場合、壁面からの流速分布は2次放物線である。図中の実線は横断流速分布に2次放物線を近似曲線として示したもので、比較的よく対応している。これは、粘性の効果が卓越した流れで、一種の粘性流体であることを示している。図-10、図-11は同じ図-4、図-7に対応するもので、先端から5秒後の横断方向の流速分布であるが、図-10は流心線から左岸側の部分を示し、図-11は流心線から右岸側の部分を右岸からの距離で示している。図中の実線は対数関数を近似曲線として示したもので、比較的良く対応している。これは、慣性項が卓越した流れで、乱流構造を有する流れであると考えられる。図-14、図-15は図-5、図-8に対応したもので、小さなサージの先端部、あるいは後続流の部分を示しており、それぞれ横断方向の流速分布形は、2次放物線の近似曲線に良く対応している。また、いずれの場合も、サージ最末端では、流速がゼロとなる現象となっている。通常の流れのように、指数関数的に逓減する現象とは異っている。

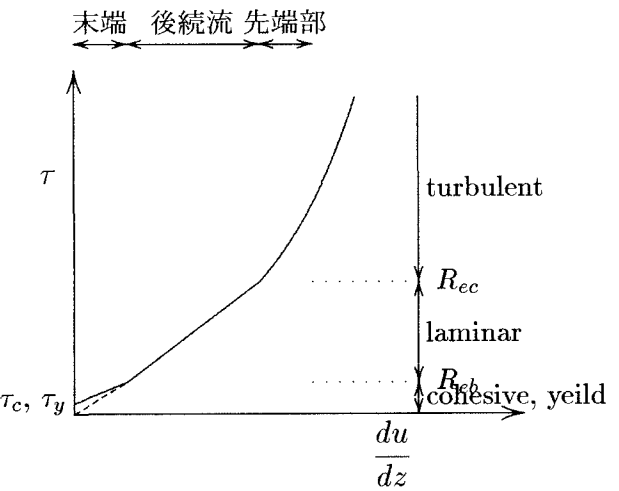


図-16 $\tau - du/dz$

ところで、1995年に、この蔦家溝にそそぐ流路勾配 13.4° 、幅は約2m、深さ約0.5mのガリ (gully) を用いて実験を行なっているが^{4)、5)}、その結果では流れの平均水深が0.14～0.2mで平均流速約0.2m/s (0.085～0.426m/s) というゆっくりとした流速を得ている。その

小規模な流れと実際の粘性土石流サージの先端部では慣

性項($u \frac{\partial u}{\partial x}$)と粘性項($\nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$)の比であるレイルズ数

$$R_e = UL/\nu \text{ が } 10^3 \text{ 程度の違いがあり、小規模な流れで}$$

は、粘性が卓越した流れであると考えられる。

以上のことから、図-16の応力 (τ) と速度勾配 (du/dz) の関係で示せば、先端部は慣性項が卓越し、時系列的に微小擾乱が発達する乱流構造を有する流れであり、後続流は粘性項が卓越した一種の層流状の粘性流体の流れであり、流れの最末端は、速度勾配に依存しない粘着力 (τ_c) や降伏応力 (τ_y) が影響する流れであると考えられる。ただし、流速がかなり小さな速度まで維持できることから粘着力等の値は非常に小さいものと考えられる。

5. 結語

以上の解析以外に7例の解析及び現地実験などから、粘性土石流の流動構造は単一の構造ではなく、先端部の慣性項が卓越した領域では乱流構造を有する流れであり、後続流は粘性項が卓越した一種の粘性流体であり、最末端では粘着力や降伏応力が影響する流れであると考えられる。

参考文献

- 1) 中国科学院東川泥石流観測研究站, P1.
- 2) 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), 京都大学防災研究所年報, No. 41, B-2, pp. 265-275, 1998.
- 3) ARAI, M., SAWADA, T. and TAKAHASHI, T.; An Application of Image Analysis Technique on the Velocity of Debris Flow Observation, Pro. Of 3rd International Conference on Hydro-Science and Engineering, IAHR, 1998, Fie.Reserveir.188, pp1-9.
- 4) 諏訪浩, 澤田豊明, 新井宗之, 高橋保, 水山高久; 粘性土石流の発生、流動、堆積のメカニズムと対策, 京都大学防災研究所年報, No. 40, IDNDR特別号, pp. 159-165, 1997.
- 5) 新井宗之, 高橋保, 山谷浩司; 中国・粘性土石流の現地実験, 土木学会第52回年次学術講演会概要集, II-228, pp. 456-457, 1997.

(1999. 9. 30受付)