

(33) 土石流モデルを用いた衝撃的流体力の測定実験について

EXPERIMENTAL APPROACH ON MEASUREMENT OF IMPULSIVE FLUID FORCE USING DEBRIS FLOW MODEL

石川信隆*, 井上隆太**, 林 建二郎***, 長谷川祐治****, 水山高久*****

Nobutaka ISHIKAWA, Ryuta INOUE, Kenjiro HAYASHI, Yuhji HASEGAWA and Takahisa MIZUYAMA

*工博 砂防鋼構造物研究会 研究顧問 (〒102-00093 東京都千代田区平河町 2-7-5)

**砂防鋼構造物研究会 研究員 (〒102-0093 東京都千代田区平河町 2-7-5)

***Ph.D 防衛大学校 建設環境工学科 助教授 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

****(財)建設技術研究所 研究員 (〒300-2633 茨城県つくば市遠東 904-1)

*****農博 京都大学大学院農学研究科 教授 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

キーワード: 土石流モデル, 衝撃的流体力, 砂防えん堤, 水理模型実験

(debris flow model, impulsive fluid force, check dam, hydraulic model experiment)

1. はじめに

近年、わが国では毎年のように集中豪雨や台風などにより土砂災害¹⁾が起きており、土石流の直撃を受け家屋が破壊したり、人的被害を受ける例が多くなってきている。土石流災害を見ると場所によっては衝撃的に作用している場合もあるように思われる。さて、土石流の衝撃力に関しては、水山²⁾が、土石流中の巨礫による衝突(固体理論による)と、土石流という流体による衝突(流体理論による)とに分類し、現行設計法では、礫衝突による荷重と定常噴流の動水圧による流体力荷重の2つに分けて砂防えん堤の設計が行われている。一方、構造体(1質点系モデル)に衝撃的流体力のモデル荷重(完全弾塑性型の荷重-時間曲線を仮定)を作用させて動的解析を行うと、最大荷重までの立ち上がり時間(t_r)と構造物の固有周期(T)との比が小さい場合($t_r/T < 0.5$)には、動的変位が静的変位の約2倍近くになり、衝撃的流体力が作用することが判明している³⁾。これは、同じ大きさの流体力であっても、静的に作用させるか、衝撃的に作用させるかによって、構造物の応答が大きく異なることを意味している。

これまで流体理論による土石流流体力に関して多くの研究がなされてきた^{4) - 9)}。

しかし、衝撃的流体力の測定には、応答周波数の高い測定器が必要であり、また構造体(受圧板全体)の固有振動数との関係も重要である。さらに土石流発生装置や流速・流量にも工夫が必要であり、土石流モデルとして用いる材料にもなるべく現場に擬似したものが適しているものと思われる。

本研究では、先ず予備実験として衝撃的流体力の測定精度を確認するため、1/50 勾配(1.15度)および1/5 勾配(11.5度)をもつ水路において清水のみの土石流モデルを用いて分力計と圧力センサーの両方により荷重を測定し、計測精度を比較した。次に、土砂+水、礫+土砂+水およびビーズの土石流モデルを用いて急勾配水路(勾配17度)における水理模型実験を行い、分力計によって荷重を測定した。さらに、桜島産の軽石(通称ボラ)を用いた土石流モデルにより湛水させた後ダムを決壊させる場合と自然発生的に流下させる場合の荷重~時間関係を測定した。

2. 清水のみによる予備実験¹⁰⁾

2.1 流体力測定実験装置

長さ 12m, 幅 0.5m, 高さ 0.4mの可変勾配水路 (1/50 と 1/5 勾配) を使用し、水路上流端の堰を急開放して衝撃的流体力を発生させ、分力計と圧力計によって測定した。砂防えん堤モデルは、図-1 のようにアルミ製チャンネル (高さ 100mm、横幅 100mm、水路方向長さ 50mm、厚み 5mm、重さ 270gf) を鉛直に設置した。

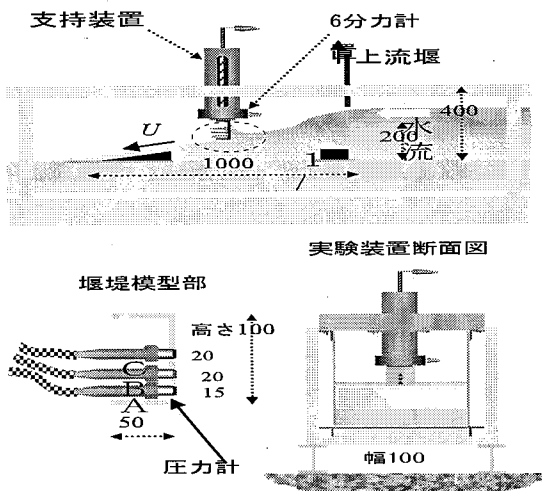


図-1 実験水路 (勾配 1/5)

2.2 測定項目

荷重の測定には、模型えん堤の上端に分力計(固有振動数 700Hz)を片持梁形式で取り付け、水平方向の流体力を計測した。また局所圧力分布を測定するために、3個の圧力計を(受圧面径 10mm,固有振動数 2.5KHz)を図-1および2のように取り付けた。受圧板全体の固有振動数は 450Hzであった。流速の測定には、レーザードップラー流速計を使用した。

2.3 計測精度

図-3は勾配 1/50 で流速 2.6m/sec の場合の流体力-時間関係を示したもので、分力計と圧力計の合計

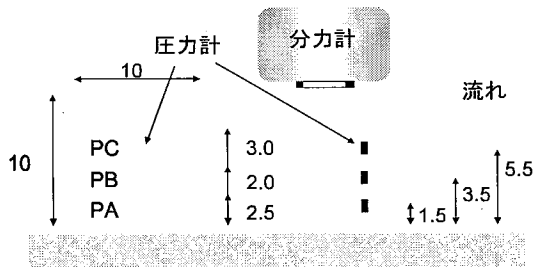


図-2 測定システム

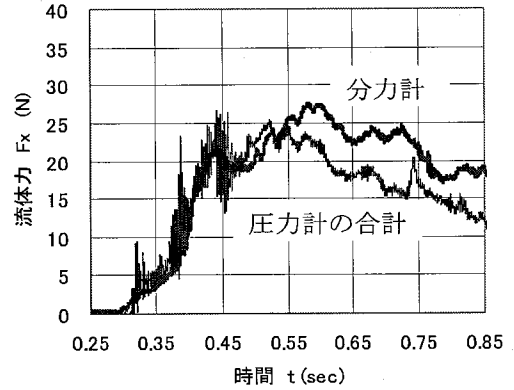


図-3 流体力~時間関係 (勾配 1/50、流速 2.6m/s)

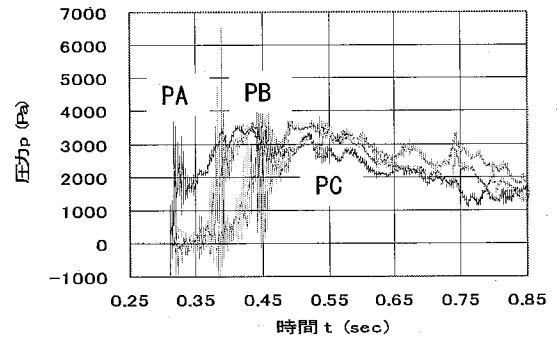


図-4 流体力~時間関係 (勾配 1/50、流速 2.6m/s)

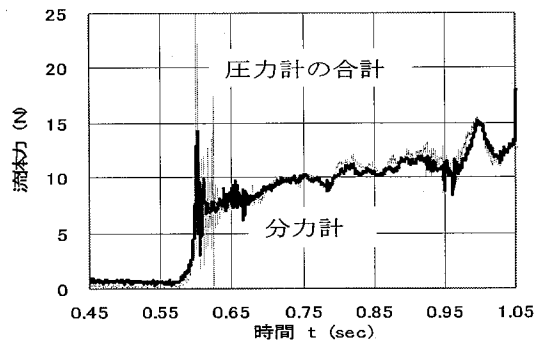


図-5 流体力~時間関係 (勾配 1/50、流速 2.6m/s)

はほぼ一致している。

図-4は圧力計より局所圧力~時間関係を示したもので、その発生時刻はPA,PB,PCの順になっている。分力計の立ち上がり時間は $t_r = 0.13\text{sec}$,圧力計PAの立ち上がり時間は $t_r = 0.01\text{sec}$ である。

図-5は勾配 1/5 で流速 2.0m/sec の場合を示したもので、分力計と圧力計の合計が一致している。

3. 土石流モデルの急勾配水路実験

3.1 実験方法

ここでは、図-6のように勾配17度の土石流水路(水路幅 10cm)において清水のみ、水+土砂(平均粒径 0.14cmの一様砂)、水+礫+土砂(最大径 2.0cm、平均粒径 0.82cmの混合砂)、水+ビーズ(径 1.5cmの一様径)の土石流モデルを流した。流量は 1.5 l/s である。壁面に分力計を設置して荷重-時間曲線を測定した。また超音波センサーによって流速-時間曲線を、ビデオ撮影によって水深-時間曲線を求めた。

土石流の発生方法としては、所定の位置に止め板を設置して、その背後に土砂を高さ 40cm に敷き詰めたのち、定常で水を流し天端を越流開始した直後に止め板を取り除くことにより土砂を流下させた。なお、図-6において分力計を設置しないで、土石流のみを流して、下流端で瞬時に箱の中に土砂を捕捉して土石流粒度分布の時間的な変化も調べた。実験ケースと主な結果は表-1のとおりである。

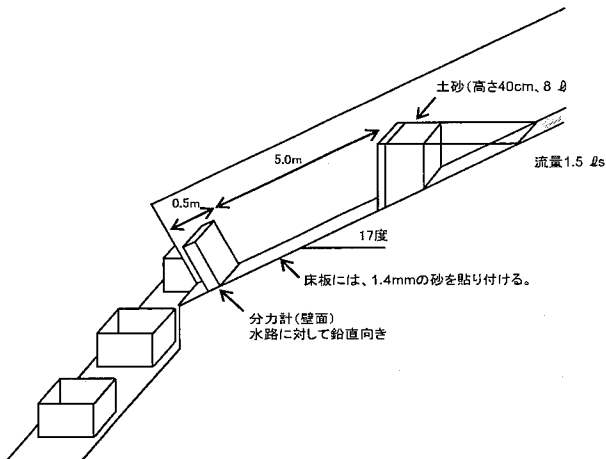


図-6 急勾配水路実験(勾配 17 度)

3.2 土石流モデルの荷重-時間曲線

図-7,8,9,10 は、それぞれ清水のみ、土砂+水、礫+土砂+水、ビーズ+水の場合の荷重-時間曲線を示したものである。ここで、 F_x は水路方向の流体力を示す。

表-1 および図-7,8,9,10 より土砂+水の場合や礫+土砂+水およびビーズ+水の場合は、清水のみの場合より立ち上がり時間が遅く、また流速も遅いことが分かった。これは、土砂やビーズの場合、平衡濃度まで到達せずに先端部が楔状となっ

て流下したためと考えられる。

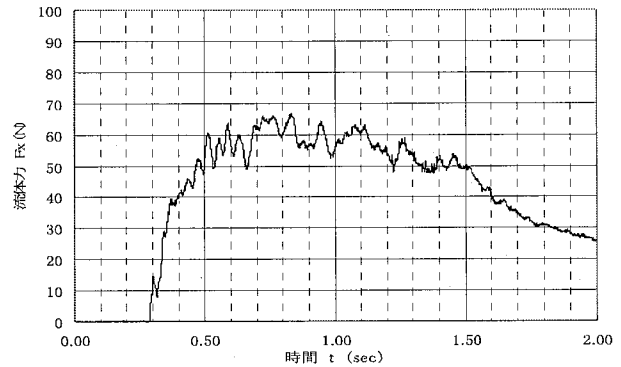


図-7 清水のみの場合

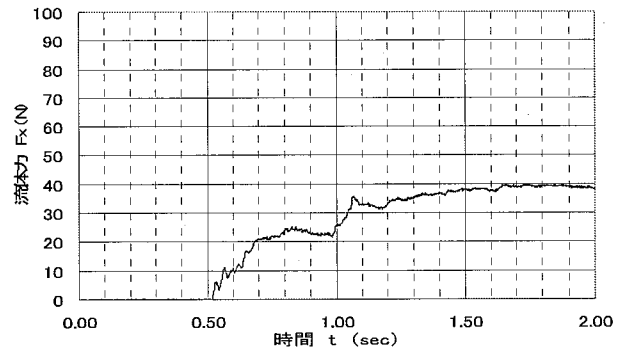


図-8 土砂+水の場合

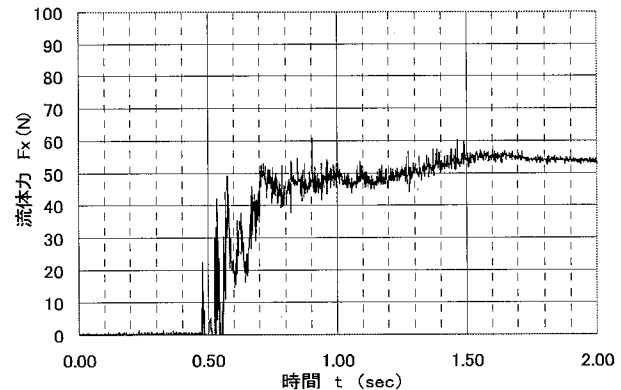


図-9 礫+土砂+水の場合

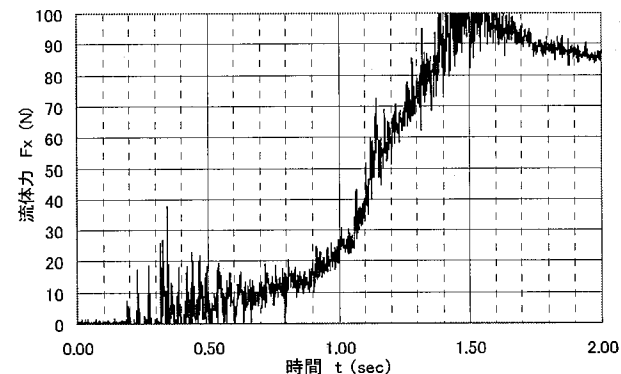


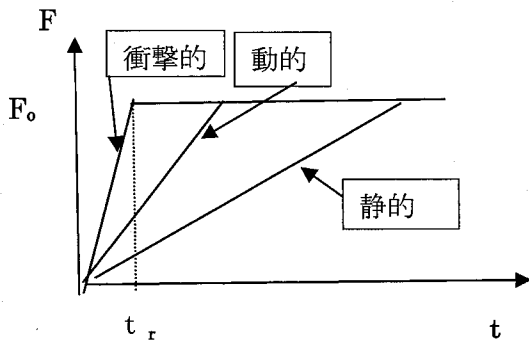
図-10 ビーズ+水の場合

表—1 急勾配（17度）水路実験の実験ケースと主な結果

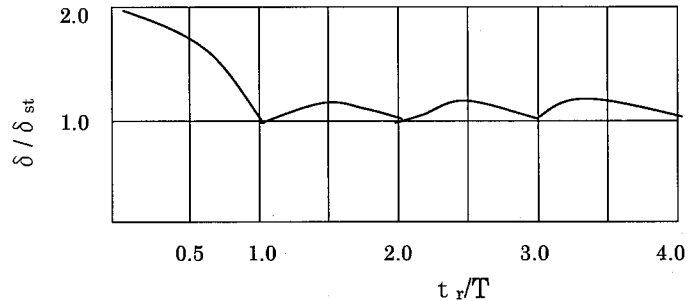
ケース	第1ピーク荷重(N)	立ち上がり時間 t_r (sec)	流速 v (m/sec)	最大水深 h (cm)	$F_0 = \rho A v^2$ (N)	密度 ρ (g/cm ³)	t_r/T	判定
1 (清水)	60.5	0.10	3.42	4.05	47.4	1.0	3.0	静的
2 (清水)	60.5	0.10	3.26	3.93	41.8	1.0	3.0	静的
3 (水+土砂)	40.0	0.20	3.05	2.34	39.2	1.8	6.0	静的
4 (水+礫+土砂)	50.0	0.20	2.38	4.91	46.5	1.67	6.0	静的
5 (水+礫+土砂)	50.5	0.15	2.54	4.84	52.2	1.67	4.5	静的
6 (水+礫+土砂)	50.0	0.20	1.96			1.67	6.0	静的
7 (水+礫+土砂)	45.0	0.20	2.21			1.67	6.0	静的
8 (水+ビーズ)	90.0	0.40	2.33	6.98	79.6	2.1	12.1	静的
9 (水+ビーズ)	90.0	0.50	2.40	6.91	83.6	2.1	15.1	静的

ただし、 $T=0.033\text{sec}$ ：受圧板（幅 10cm）全体の固有周期、 F_0 ：流体力の設計式

t_r ：第1ピーク荷重までの立ち上がり時間、 ρ ：密度、 A ：断面積、 v ：流速



図—1 1 土石流モデル荷重



図—1 2 動的倍率—ライズタイム比関係

3.3 第1ピーク値までの立ち上がり時間と固有周期との関係

表—1に図—7から図—10で得られた第1ピーク荷重値までの立ち上がり時間 (t_r) と固有周期 (T) との比 (t_r/T) を求め、これより以下の区分に基づいて表—1の右欄のように応答の判定を行った。

- ① $0 \leq t_r/T \leq 0.5$ ：衝撃的応答
- ② $0.5 \leq t_r/T \leq 1.0$ ：動的応答
- ③ $1.0 \leq t_r/T$ ：静的応答

その結果、ここで得られた現象はすべて静的応答とみなされた。

3.4 設計流体力と第1ピーク荷重との関係

表—1に設計流体力 F_0 の値を求め、第1ピーク荷重と比較すると設計式のほうが全般にやや小さいがほ

ぼ推定していることが分かった。

4. 桜島産軽石の土石流モデル実験

4.1 実験ケースと主な実験結果

現地桜島産の軽石（ボラ、密度 1.29g/cm^3 ）を用いた土石流モデルで水路勾配 10 度にして、止め板で天然ダム形状に堆積させ、流水の越流と共に止め板をはずして流下させる方法（湛水後決壊）と、水路床にボラを敷き詰め、流水により自然に土石流を発生させる場合（自然発生）の2つの方法を採用した。いずれも流速はほぼ同じ（約 $1.6\text{--}1.7\text{m/sec}$ ）であった。

表—2に主な実験結果をまとめたが、いずれも段波的となり、第1ピーク値までの立ち上がり時間も短

表-2 桜島産軽石（ボラ）の実験ケースと実験結果

ケース	第1ピーク荷重 (N)	立ち上り時間 t_r (sec)	流速 v (m/sec)	最大水深 h (cm)	$F = \rho A v^2$ (N)	密度 ρ (g/cm ³)	t_r/T	判定
1 (湛水後決壊) 勾配 10 度	82.0	0.006	1.71	9.9	28.0	1.29	0.26	衝撃的
2 (自然発生) 勾配 10 度	55.0	0.008	1.68	12.9	35.2	1.29	0.35	衝撃的
3 (自然発生) 勾配 10 度	62.3	0.016	1.59	12.8	31.3	1.29	0.70	動的
4 (自然発生) 勾配 10 度	67.5	0.010				1.29	0.43	衝撃的
5 (自然発生) 勾配 17 度	40.8	0.007	2.29	9.6	48.7	1.29	0.30	衝撃的

ただし、 $T=0.023\text{sec}$: 受圧板 (幅 7.5cm) 全体の固有周期

くなった。これは、軽石が砂礫よりも早く流水によって平衡濃度まで取り込まれる形態をとったことと、軽石間の抵抗が大きいためと考えられる。また、実験による第1ピーク荷重は、設計流体力式よりも約1.5~3倍大きく、段波的な土石流が発生しそうな場合は砂防えん堤の設計・設置に注意する必要がある。

4.3 軽石（ボラ）の堆積状況（ビデオ）

写真-1 (a) は土石流の先端がちょうど堰堤部に接した時点を $t=0$ としており、写真-1 (b)~(f) において先頭部の形状がかなり段波的になって、堰堤モデルに衝突している様子が見られる

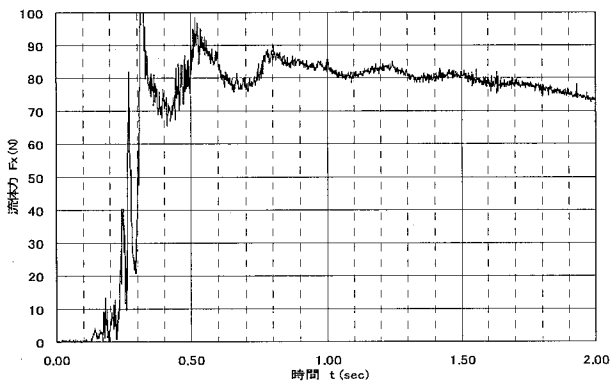


図-13 軽石ケース1：湛水後決壊

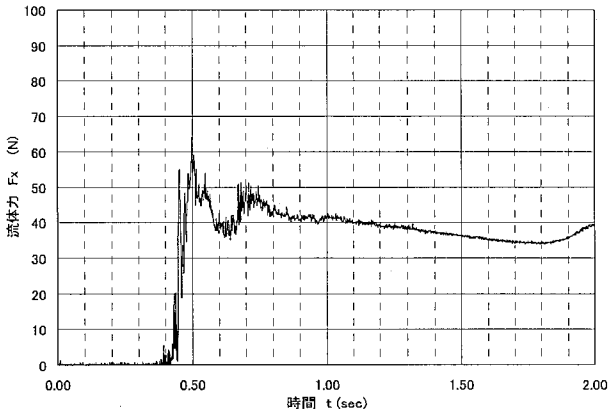


図-14 軽石ケース2：自然発生

4.2 荷重—時間曲線

図-13~15 は軽石（ボラ）を用いた場合のケース1~ケース3の荷重~時間曲線を示したものである。これらの図より、第1ピーク値までの立ち上がり時間は3.2の土石流モデル（清水、土砂+水、礫+土砂+水）の場合より短く、したがって、 $t_r/T < 0.5$ となり、衝撃的になっている様子が見られる。これは、軽石が先頭部の流れの抵抗を増加させて、段波形状を呈したためと考える。

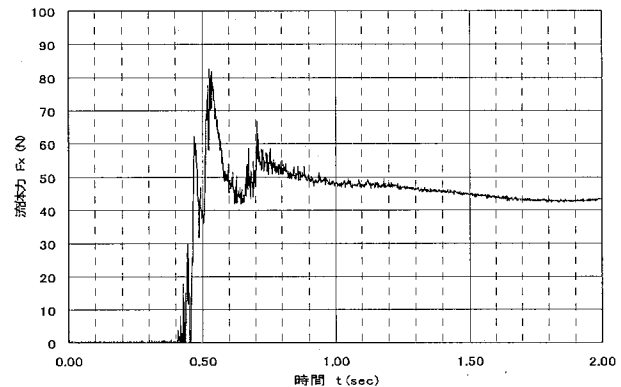
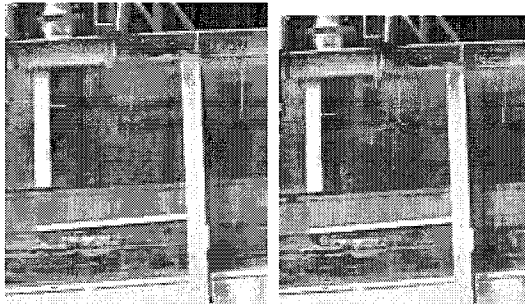
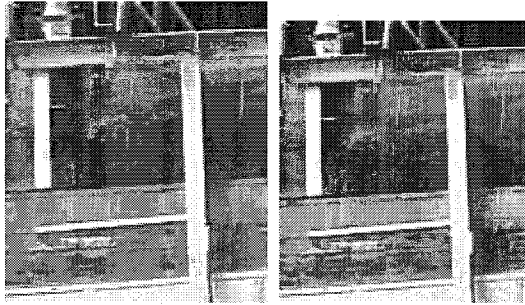


図-15 軽石ケース3：自然発生



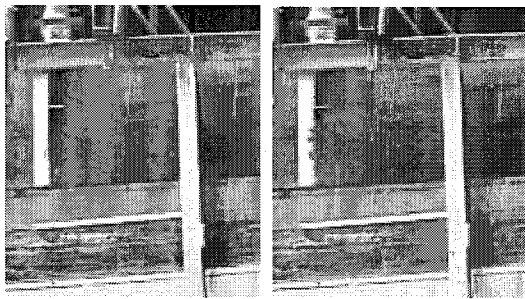
(a) $t=0.000$ sec

(b) $t=0.017$ sec



(c) $t=0.033$ sec

(d) $t=0.050$ sec



(e) $t=0.067$ sec

(f) $t=0.083$ sec

写真—1 軽石ケース3：自然発生

5. 結論

(1) 分力計による荷重と高応答周波数の圧力センサーの合計値は、ほぼ一致することを確認し、分力計で流体力を測定しても差し支えないことを認めた。

(2) 急勾配水路を用いても礫+土砂+水、土砂+水、ビーズ+水の土石流モデルは、衝撃的流体力を現出させることは難しいことが分かった。

(3) 桜島産の軽石(ボラ)を使用した土石流モデルは、水路勾配10度で、湛水後決壊状態および自然堆積状態から流水による自然発生で流下させたところ、いずれも先端部が段波状になり、衝撃的な流体力が発生することが明らかになった。

なお、実際の土石流がどの程度段波的になるか、土

石流が段波的になる条件などについては、今後さらに検討していく予定である。

参考文献

- 1) (財)砂防・地すべり技術センター；土石災害の実態、2005、平成18年5月
- 2) 水山高久；砂防ダムに対する土石流衝撃力の算定とその問題点、新砂防,112,pp.40-43,昭和54年8月
- 3) 石川信隆,嶋丈示,吉田一雄,別府万寿博；土石流流体力を受ける砂防えん堤の動的挙動に関する一考察、平成17年度砂防学会研究発表会概要集,平成17年5月。
- 4) 平尾公一,天田高白,田畑茂清,松永正昭,市ノ瀬栄彦；段波の衝撃圧に関する基礎的実験(その1)、新砂防,Vol.76, pp.11-16, 1970
- 5) 大同淳之；砂防ダムに作用する土石流の衝撃力、昭和63年度砂防学会研究発表会概要集,pp.275-276, 1988
- 6) 宮本邦明,大同淳之；堤体荷作用する土石流段波の衝撃力に関する研究(1)、立命館大学理工学研究所紀要,Vol.41, pp.61-79,1983
- 7) 水山高久,下東久巳,中西宏,松村和樹；鋼管製透過型砂防ダムに対する土石流荷重に関する実験的研究、新砂防, Vol.37, No.5,(136) pp.30-34, 昭和60年1月。
- 8) 三好岩生,鈴木雅一；土石流の衝撃力に関する実験的研究、新砂防,Vol.43, No.2, (169),1990年7月
- 9) 堀井直幸,豊澤康雄,玉手聡,橋爪秀夫；土石流の流下特性に関する実験的研究、産業安全研究所特別研究報告,No.25,2002
- 10) 石川信隆,林建二郎,嶋丈示,水山高久；砂防えん堤モデルに作用する衝撃的流体力の測定実験について、平成18年度砂防学会研究発表会概要集, pp.226-227, 平成18年5月