

土石流段波モデルの可視化と荷重・変位計測実験

Visualization of Debris Flow Surge Model and Measurement Test of Load and Deformation

石川信隆*, 井上隆太**, 別府万寿博***, 長谷川祐治****, 水山高久*****

Nobutaka Ishikawa, Ryuta Inoue, Masuhiro Beppu, Yuhji Hasegawa and Takahisa Mizuyama

*工博 防衛大学校名誉教授 (砂防鋼構造物研究会 研究顧問) (〒102-0093 千代田区平河町 2-7-5)

**共生機構(株) (砂防鋼構造物研究会 研究員) (〒160-0022 新宿区新宿 1-23-1)

***博 (工) 防衛大学校 准教授 建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

****(財)建設技術研究所 研究員 (〒300-2633 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: 土石流段波モデル、ボラ、可視化実験、土石流荷重、変位・ひずみ測定

Key Words: Debris Flow Surge Model, Bora, Visualization Test, Debris Flow Load, Measurement of Deformation and Strain

1. はじめに

最近、地球温暖化の影響と思われる集中豪雨により土砂崩壊が頻繁に起こり、各地に被害が起こっている。このため土石流災害によって多くの人命や財産が失われてきた。土石流の中でもサージ¹⁾(段波)と呼ばれる衝撃的流体力による被害は特に大きいと思われる。

著者ら^{2),3),4)}は、これまで清水、土砂+水、礫+土砂+水、ビーズ+水、桜島産の軽石(ボラ)などを土石流モデルとして用い、衝撃的流体力の荷重測定を行ってきた。その際、ボラを用いた場合に段波が形成され、ピーク荷重までの立ち上がり時間が短い衝撃的流体力が発生することがわかった。ここでは、さらに段波が形成される条件および段波荷重の特徴や段波が砂防えん堤モデルに作用したとき変位・ひずみなどの動的挙動にどのような影響を及ぼすかについて考察しようと試みたものである。すなわち、本研究では、以下のことに重点をおき考察した。

①土石流段波を再現させるために、ボラを土石流モデルとして用いて、自然発生的に流下する場合(自然発生型)とダムが決壊する状態(ダム決壊型)の

2つを想定して、段波形成のための条件を検討した。

②土石流モデルの荷重を分力計と圧力センサーを同時に用いて測定し、荷重～時間曲線を求めた。その際、高速ビデオに同期させてピーク荷重と堆積状況との関係を把握し、どのような堆積状況のときピーク値に達するかを調べた。

③また段波荷重が砂防えん堤モデルに作用するときの動的挙動を実験的に把握するため、最も単純でかつ鋼材の特徴を表す薄肉鋼板を用いてひずみと変位を測定した。さらに簡単なはり理論を用いて、ひずみデータから応答変位を算出する方法を提案した。

2. 実験の概要

2.1 実験方法

実験は、図-1に示す(財)建設技術研究所の変可勾配水路(幅 10cm, 高さ 30cm, 長さ 7m, 粗度係数 $n=0.016s/m^{1/3}$)を用いて水路勾配 8° および 10° で行った。土石流モデルとして桜島産の軽石(以下ボラと呼ぶ、乾燥密度 $0.876g/cm^3$ 、湿潤密度 $1.138g/cm^3$)を用いた。流下方法は①床面に $1.5mm$ の一

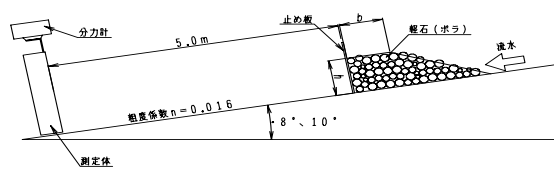


図-1 実験概要図 (ダム決壊型)

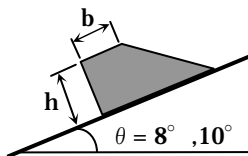


図-2 ダムモデル

様砂を貼り付け、**5.0m**の土石流流下区間とし、その上流にボラを敷き詰め、**1.00/s**の流水を定常的に供給して自然に土石流を発生させる方法(自然発生型)と②止め板で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(ダム決壊型)の2つの方法を採用した。ダムは、図-2に示すような台形状に形成させ、ダム高さ**h**と上辺**b**をパラメータとした。

2.2 測定項目

(1) 荷重・圧力計測：荷重は図-1のようにダムから**5m**下流に設置した分力計と圧力計(図-3のように下から**5,10,15cm**の3個)で計測し、高速ビデオによる堆積状況と同期させた。

(2) 変位・ひずみ計測：砂防えん堤モデルとして薄肉鋼板(厚さ**0.5mm**および**1.0mm**、ヤング率 **$E=200\text{kN/mm}^2$**)を用い、下側を固定して図-4のように頂点変位とひずみ(下から**5,10,15cm**の位置)をそれぞれレーザー式変位計とひずみゲージで計測し、またビデオ解析からも変位を測定した。

3. 土石流段波再現のための条件

表-1に実験ケースの一覧を示す。段波とは、先端部(フロント)が大きく盛り上がった波形をいい、このような波形を形成させるような環境条件を見出すと共に、その荷重～時間関係と高速ビデオによる可視化を試みた。

まずボラを上流に堆積させて自然発生的に流下させた**No.1～No.4**のケースでは、いずれも段波は発生しなかった。次にダム決壊型の場合は、ダム高さ

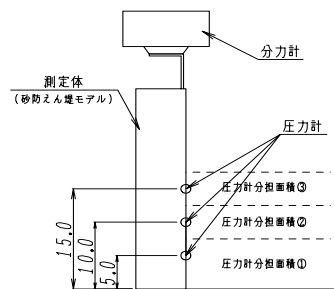


図-3 荷重測定

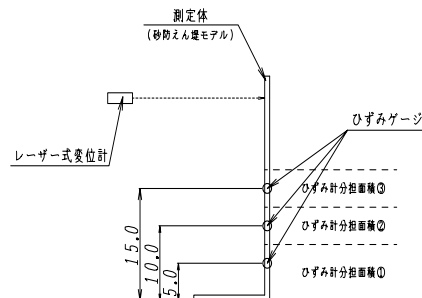


図-4 変位・ひずみ測

h=13cm、上辺**b=25cm**で勾配**10°**のNo.5のケースも、ダム高さが十分でなかったためか段波を形成しなかった。よって、ダム高さ**h**および上辺**b**を変化させたところ、 **$h \geq 15\text{cm}$** 、 **$b \geq 10\text{cm}$** の条件の範囲で段波を再現できた。すなわち、本実験で使用した土石流モデル(ボラ)や実験装置と実験条件に限定すれば、ダム高さ**h**を**15cm**以上にすると、また勾配が**8°**の場合でも段波を形成することがわかった。これより、今回の実験では段波形成されるための条件として、以下のことが考えられる。

①十分なダム高さが必要である。本実験範囲内では、ダム高さ **$h \geq 15\text{cm}$** のとき段波が形成された。②ボラのような材料を用いると段波が形成されやすい。これは、底面から水面までの流下速度、流動深、輸送濃度にも影響されるが、フロントが盛り上がりやすい材料である。③今回は水路勾配**8°～10°**で段波が生じた。これは、土石流発生勾配の高橋の式¹⁾で密度**1.14**の場合、勾配**4°**でも土石流になるということからも十分な勾配と思われる。

4. 土石流段波荷重の特徴

4.1 荷重・圧力～時間関係

図-5に**No.8～No.10**の荷重・圧力～時間関係を示す。これより、ダム高さ**h**を**20cm**、**18cm**、**15cm**

表一 1 荷重実験結果と段波形成

No.	流下方法	h (cm)	b (cm)	傾斜	立ち上がり 時間 (sec)	ピーク荷 重 $F_{max}(N)$	収束荷 重 $F_0(N)$	F_{max}/F_0	段波形成
1	自然発生型			8°	—	—	—	—	×
2	同上			8°	1.5	18	23	0.8	×
3	同上			10°	1.0	43	32	1.3	×
4	同上			10°	1.0	43	32	1.3	×
5	ダム決壊型	13	25	10°	0.5	10	5	2.0	△
6	同上	20	25	10°	0.1	75	32	2.3	○
7	同上	20	10	10°	0.1	60	26	2.3	○
8	同上	20	10	8°	0.05	60	25	2.4	○
9	同上	18	10	8°	0.05	46	27	1.7	○
10	同上	15	15	8°	0.05	35	17	2.1	○
11	同上	15	15	8°	0.05	60	20	3.0	○
12	同上	15	15	8°	0.05	12.5	3.5	3.6	○
13	同上	15	15	8°	0.05	30	16	1.8	○

と変化させた場合、ピーク荷重が 60N、46N、35N となり、ダム高さが段波のピーク荷重に与える影響が大きい。またピーク荷重までの立ち上がり時間も約 0.1sec 以下（表一 1 参照）で、極めて短いことが特徴である。圧力～時間曲線は、測定板の下から 5cm、10cm、15cm の順に小さくなっている。これは、下からボラが衝突し始めるからで、すべての最大圧力が同じ時刻となるとときに段波が形成されることを意味している。

4.2 ピーク荷重と収束荷重の比

表一 1 より No.5 から No.13 までのピーク荷重と収束荷重との比は約 1.7～3.6 であるが、段波が形成されるときはほとんど約 2.0 以上である。

4.3 フロント形状

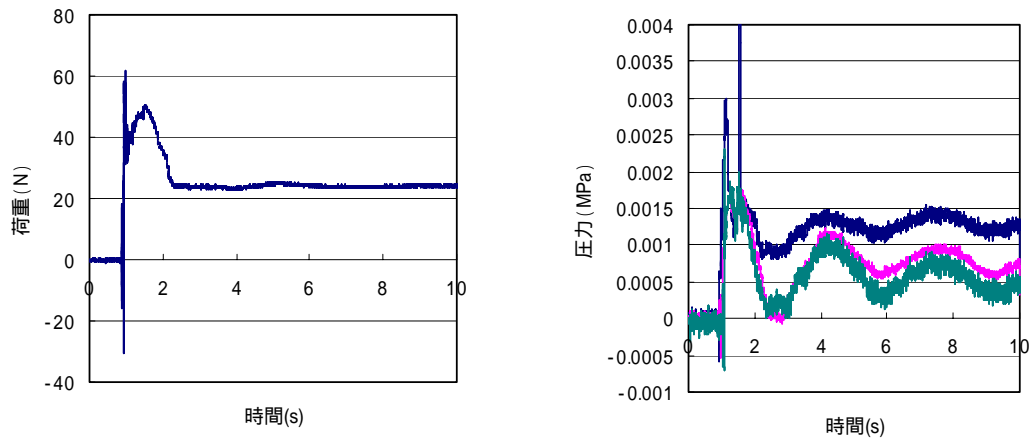
図一 6(a)は、No.5 の場合のフロント（先端部）の堆積形状と荷重～時間曲線を同期させたものである。No. 5 のダム高さ $h=13\text{cm}$ の場合は、フロントがくさび形状を示している。一方、図一 6(b)は No. 6 の $h=20\text{cm}$ の場合で、フロントが盛り上がっている状況が明瞭に確認でき、また荷重～時間曲線からピーク荷重までの立ち上がり時間も短いことが認められる。これは、フロント形成によって堤体への衝突面積が大きくなるためと思われる。

5. 変位・ひずみ応答

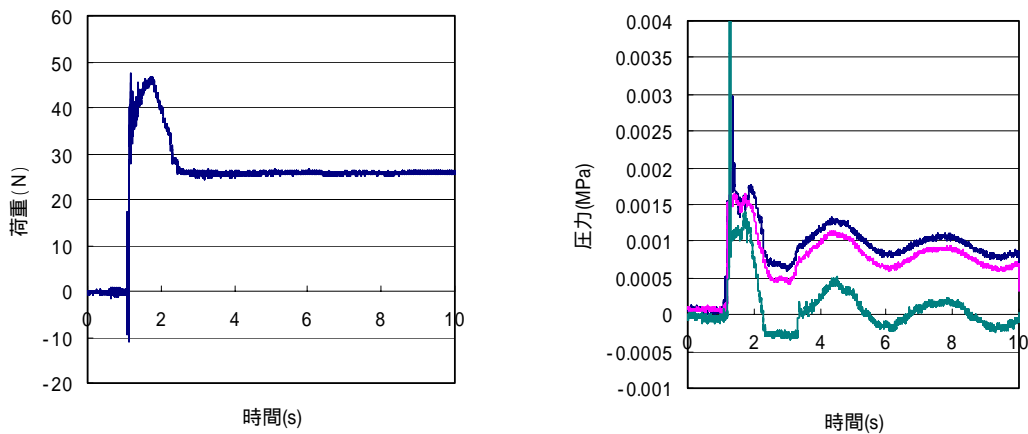
5.1 変位・ひずみ～時間曲線

変位・ひずみ計測における荷重はすべて No.10～No.13 に相当する段波荷重を作用させた。まず板厚 0.5mm の場合は、段波荷重のうちピーク荷重よりむしろ収束荷重の影響を受けて倒壊した。次に、表一 2 のケースはすべて板厚 1mm の場合で、堤体の先端に重錘をつけて固有周期 T を変化（No.14～16 : $T=0.1\text{sec}$ 、No.17～19 : $T=0.2\text{sec}$ 、No.20～21 : $T=0.3\text{sec}$ ）させた場合である。

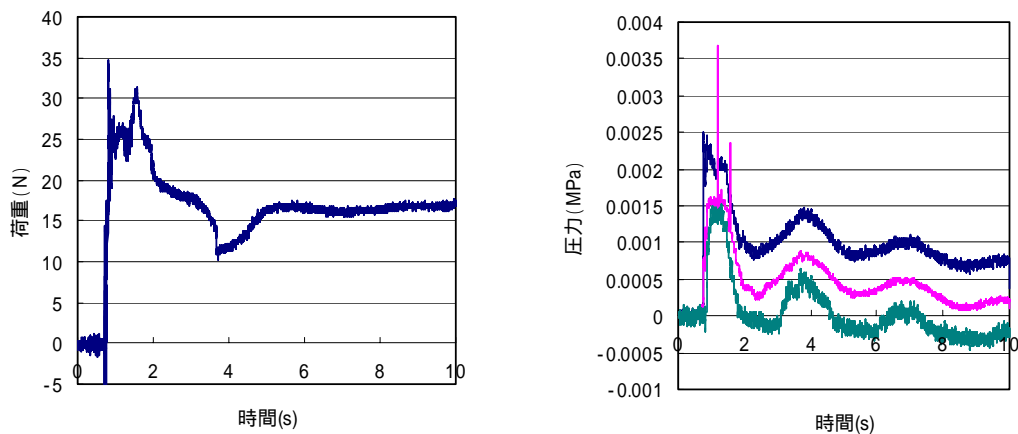
図一 7 は、表一 2 の No.20 の変位～時間関係とひずみ～時間関係を示したものである。堤体モデルの下流側より計測したレーザー式変位計は、越流水の影響で衝突時のピーク値を測定できなかった。よって、表一 2 の最大変位の実験値は、高速ビデオから読み取った値である。図一 7 のひずみの最大値は下から 5cm、10cm、15cm の順に小さくなって、ほぼ同時刻に最大値に達している。これより、変位に及ぼす段波の影響は、当初の衝突時におけるピーク値に明確に現れなかったが、ひずみに対して動的・準静的応答に顕著に現れている。よって、当初の衝突



(a) ダム高さ $h=20\text{cm}$ の場合



(b) ダム高さ $h=18\text{cm}$ の場合



(c) ダム高さ $h=15\text{cm}$ の場合

図-5 荷重および圧力～時間曲線（圧力は図中上から 5,10,15cm 位置の圧力計の値）

時において破壊または降伏をクリアすれば動的・準静的の応答段階に進む。今回はステンレスという延性材料を用いたため、衝突現象よりも動的・準静的な応答によって支配されたと思われる。しかし、コンクリートのような脆性材料を用いた場合は、当初

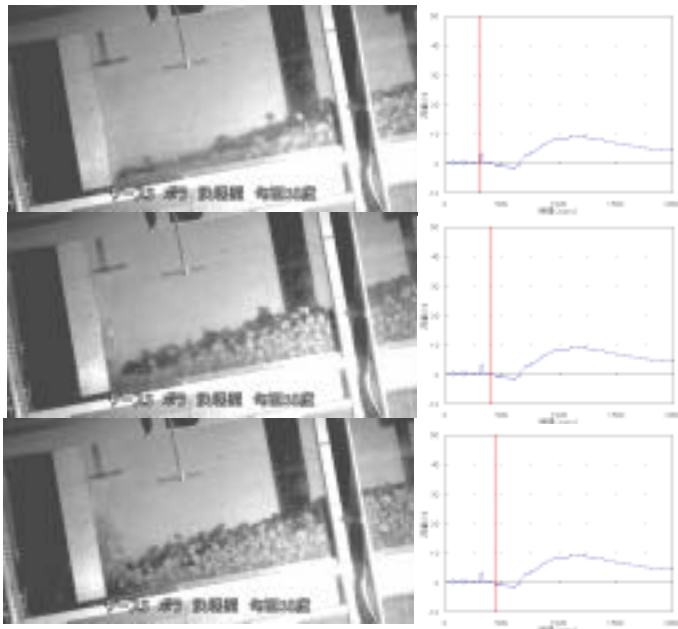
の衝突現象によりひび割れ現象が生じ、その後動的・準静的の応答が起こるため破壊に繋がりやすいと思われる。

5.2 ひずみを用いた変位算定式

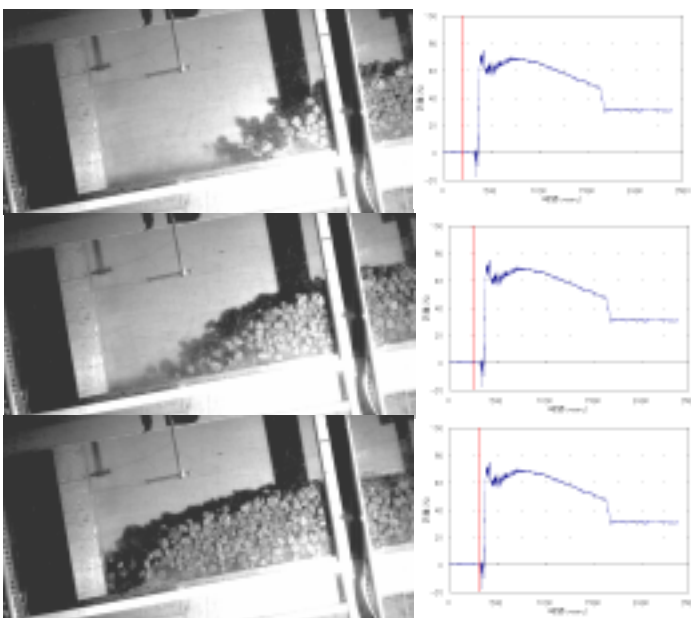
薄肉鋼板を片持ちはりとして仮定して、自由端のたわ

みを求めると式 (1) がえられる。ここで荷重 $q(t)$ は段波荷重が準静的に満載等分布荷重として作用した場合であり、ひずみ $\varepsilon(t)$ は x 点の t 時刻のひずみである。これよりひずみ計測から変位を表-2のように算定することができる。

$$y_B(t) = \frac{q(t)l^4}{8EI} \quad (1) \quad q(t) = \frac{-4EI\varepsilon(t)}{(l-x)^2 d} \quad (2)$$



(a) くさび形状を示す場合 (No.5)



(b) 段波形状を示す場合 (No.6)

図-6 荷重～時間曲線に同期させたフロント形状

ただし、 EI, l, d : 薄肉鋼板の曲げ剛性、長さ、厚さ
表-2 より全体的に計算値は実験値とほぼよく一致

表-2 ひずみから算出した変位

No.	最大ひずみ (μ)			最大変位 (cm)	
	x=5cm	x=10cm	x=15cm	計算値	実験値
14	-890	-500	-250	5.2	4.8
15	-800	-420	-200	4.6	4.6
16	-800	-420	-200	4.3	4.8
17	-800	-400	-200	4.3	4.5
18	-750	-450	-220	4.5	4.3
19	-800	-400	-220	4.4	4.9
20	-875	-500	-250	5.1	5.2
21	-800	-400	-200	4.3	4.7

していることが分かる。表-2 の実験値は高速ビデオから読み取った値である。

5.3 変位～時間曲線の比較

図-8 は、高速ビデオから読み取った変位～時間曲線と式 (1) から求めた変位～時間曲線を比較したもので、これより、変位の最大値だけでなく時刻歴応答においても、変位の計算値は実験値によく一致していることが確かめられた。

5.4 砂防えん堤モデルの固有周期の影響

図-9 に砂防えん堤モデルの固有周期がひずみ～時間曲線に与える影響を調べたが、あまり影響がないことが認められた。

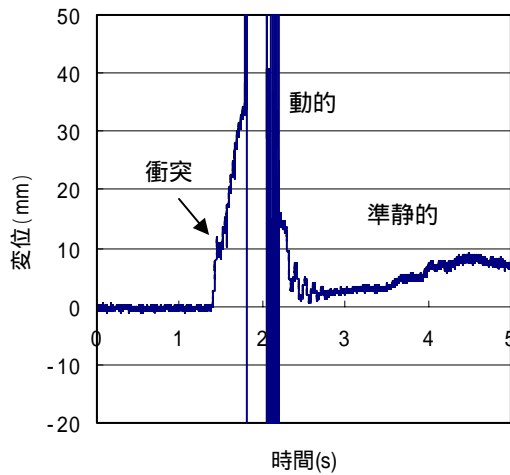
6. 結論

(1)土石流段波の形成には、ダム決壊高さが1つの要因であることが分かり、本実験材料と実験条件に限れば、ダム高さが **15cm** 以上になると段波が形成することが認められた。

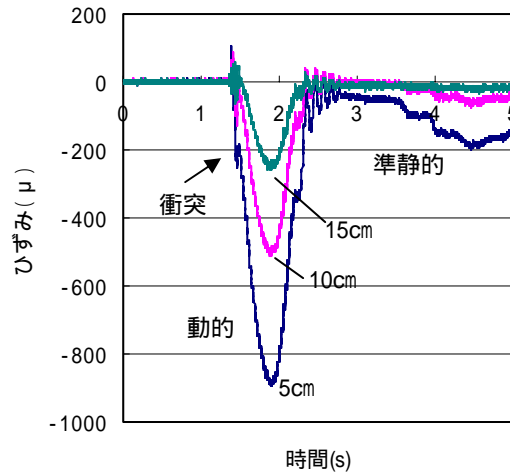
(2)本実験における段波荷重は、ピーク荷重と収束荷重の比が約2倍以上で、立ち上がり時間が **0.1sec** 以内であることが認められた。

(3)高速ビデオによる堆積状況の撮影と荷重～時間関係の時間軸を同期させることで、これよりくさび形状の場合と段波形状の場合における荷重～時間関係の違いを明瞭に見ることができた。

(4)砂防えん堤モデルとして簡単な薄肉鋼板を用



(a) 変位～時間関係



(b) ひずみ～時間関係

図-7 No.20 の実験結果

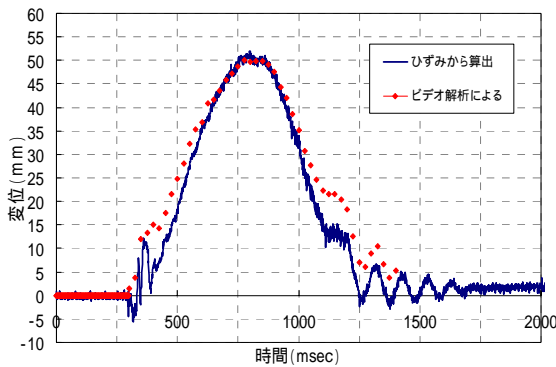


図-8 変位～時間関係

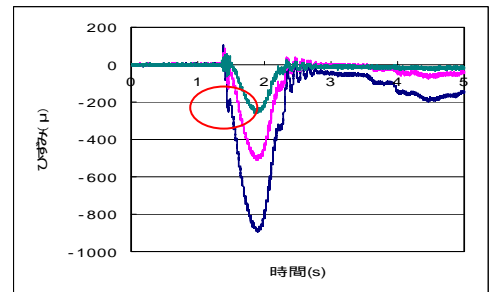
(ビデオ解析による変位とひずみから算出した変位)

いて変位とひずみを計測することにより、簡単なはり理論を用いて変位を推測することができた。

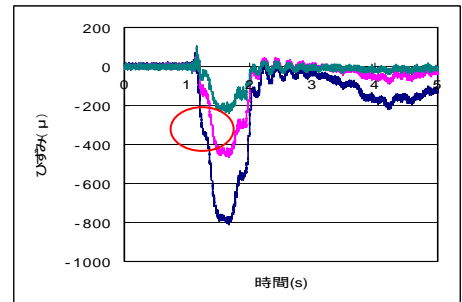
(5)本実験のデータは、粒子法などの土石流シミュレーション解析の有用な資料を提供するものと思われる。

参考文献

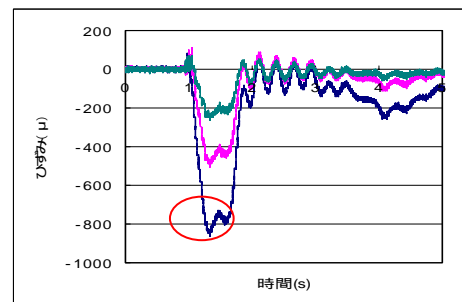
- 1) 高橋 保；地質・砂防・土木技術者/研究者のための土石流の機構と対策、近未来社、2004年9月
- 2) 石川信隆、井上隆太、林建二郎、長谷川祐治、水山高久；土石流モデルを用いた衝撃的流体力の測定実験について、第8回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、pp. 199-204、2006年11月
- 3) 井上隆太、石川信隆、林建二郎、長谷川祐治、水山高久；桜島産軽石を用いた土石流モデルによる衝撃的流体力の荷重測定実験に関する一考察、平成19年度砂防学会研究発表会概要集、pp. 254-255、2007年5月
- 4) 井上隆太、石川信隆、別府万寿博、長谷川祐治、水山高久；土石流段波モデルによる砂防えん堤モデルの荷重・変位計



(a) 固有周期 $T=0.1\text{sec}$ (No.15)



(b) 固有周期 $T=0.2\text{sec}$ (No.18)



(c) 固有周期 $T=0.3\text{sec}$ (No.21)

図-9 砂防えん堤モデルの固有周期の影響

測と堆積状況の可視化実験、平成20年度砂防学会研究発表会概要集、pp. 290-291、2008年5月

