

# 貯水池内での土砂流入に伴う水面波に関する実験的研究

道上 正規・檜谷 治・木戸 正二

土木工学科

(1996年 8月28日受理)

Experimental study on waves due to inflow sediment  
into reservoir

by

Masanori MICHIE, Osamu HINOKIDANI and Shoji KIDO

Department of Civil Engineering

(Received August 28, 1996)

In a dam reservoir, a big wave sometimes is generated by huge inflow of sediments due to a landslide or debris flow, and causes serious damage to human beings. For example, the Vaiont dam disaster in 1963 is most popular event of this kind of phenomena. Therefore, it is very important to investigate the characteristics of waves in the reservoir due to inflow sediments.

In this study, the total 40 cases of experiments were carried out using a experimental flume. In the experiments, time variation of water surface level and vertical distribution of flow velocities due to inflow of cubic body instead of inflow sediments were observed. It was found that the characteristics of wave height is influenced by depth, length and velocity of inflow sediments and water depth in a reservoir.

Key words : Reservoir, Wave, Landslide, Sediment inflow

## 1. はじめに

ダム建設を行う場合、ダム本体の破壊の危険性については十分な検討がなされているが、ダム貯水池内での斜面崩壊あるいは土石流の流入によってダム内の水位がどのように変動するかという問題に対しては十分検討されているとは言えない。この現象に関する災害では、イタリアのバイオントダム災害が最も有名である。このダムでは、1963年に湖岸の大規模崩壊により貯水池の大半が埋没し、巨大な波が発生した。発生した波は、対岸や上流はもちろんのこと、約150mの波高となって、ダムを乗り越え下流域を廃墟にし、一瞬にして2125人の人命を奪った<sup>1)</sup>。

現在、世界中には約3万のダムがあるが、我が国は、中国、アメリカに次いで世界第3位の約2200のダムを有しており、国土面積当たりのダムの数では世界で一番多い。したがって、豪雨によって土砂崩壊が頻繁に発生する我が国では、貯水池内に土砂が流入するような崩壊が発生する可能性が高く、発生する波の特性に対して検討しておく必要があると考えられる。

そこで本研究では、ダム貯水池内での斜面崩壊により発生する表面波の形成過程に関して、1次元モデルの実験を行い、発生する波の特性について検討する。

## 2. 実験の概要

実験に用いた貯水池は、図-1に示すような水路長5.0m、幅0.3mの水平水路内に貯水池を模擬した閉鎖水域を作り、その一端に勾配 $\theta$ の斜面を設けたものである。実験は、その斜面から幅30.0cmで、厚さと先端の形状を種々変化した土塊を水路内に自由落下させることにより表面波を発生させるというものである。

実験の種類は、最大波高について検討した実験Aと、流速分布について検討した実験Bの2種類である。なお、落下中の土塊の位置は、図-1に示すポテンションメーターおよびビデオ撮影により測定した。

各実験の方法を以下に示す。

## 1) 実験A

図-1(a)のように、サーボ式水位計を土塊の最終流入地点から下流に0cm、15cm、30cm、45cmの所にサーボ式水位計を設置するとともに、ビデオ撮影によって水位変動の時間的変化を測定するというものである。実験条件として

は、最大波高に影響すると考えられる

水深： $h$

土厚： $D$

土砂流入速度： $v$

斜面勾配： $\theta$

土塊流入距離： $L$

土塊先端形状：CaseA (RunNo. 1~23)

CaseB (RunNo. 24~38)

の6項目について種々に変化させ実験を行った。なお、先端形状については、図-2に示す2パターンを考えた。すべての実験については、実験条件等をまとめて表-1に示す。

## 2) 実験B

実験の概要を図-1(b)に示す。この実験では、3次元電磁流速計を用いた流下方向および鉛直方向の流速測定が主目的であり、同時にサーボ式水位計およびビデオ撮影による水位測定を行った。流速および水位の測定位置は、土塊最終流入地点を基準として-10cmから+47cmの位置まで、最小1cm間隔で測点を設け、流速測定では、各測点に

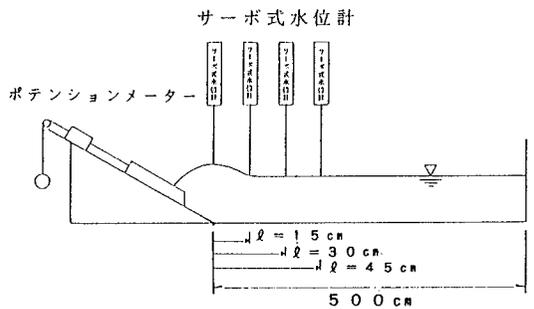


図-1(a) 実験の概要(実験A)

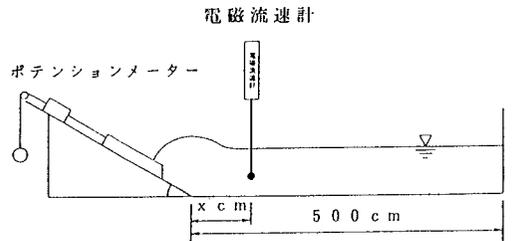


図-1(b) 実験の概要(実験B)

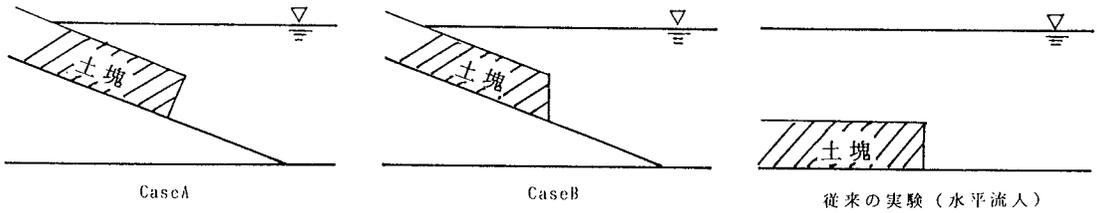


図-2 先端形状

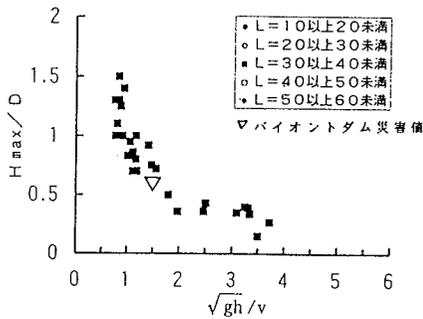


図-3(a) 最大波高と流入速度の関係(従来の実験)

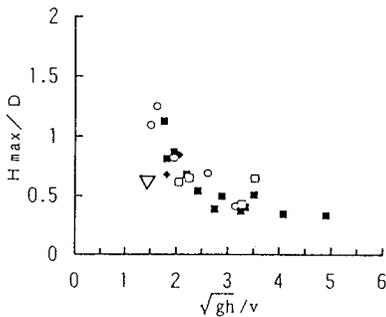


図-3(b) 最大波高と流入速度の関係(CaseA)

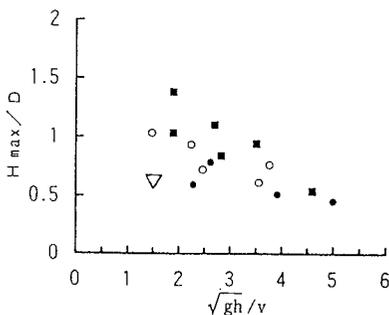


図-3(c) 最大波高と流入速度の関係(CaseB)

対して水深方向に1cm間隔で流下方向および鉛直方向の流速分布を測定した。

実験条件としては、水深、土砂流入速度を一定にして、Case1(D=3.0cm)とCase2(D=5.0cm)の2ケースについて行った。実験条件等を表-2に示す。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 実験Aに対する実験結果

##### 1) 最大波高

図-3(a)から(c)は、最大波高 $H_{max}$ と実験条件( $h, D, v$ )の関係について検討するため、土塊流入距離 $L$ をパラメータとし、最大波高 $H_{max}$ を土厚 $D$ で無次元化したものと長波の波速 $\sqrt{gh}$ を土砂流入速度 $v$ で無次元化したものとの関係を示したものである。また、参考までに、土塊を水路底面から平行流入させた従来の実験結果(図(a))も示し<sup>2)</sup>、比較検討する。なお、実験における土塊流入速度は流入時の平均速度とした。

まず、これらの図から全体的傾向として、水平流入実験で示されたように<sup>2)</sup>、 $\sqrt{gh}/v$ の値が小さくなる方向、つまり $v$ が大きくなり長波の波高に近づくにつれて $H_{max}$ が高くなり、かつ、最大波高は土砂流入距離に比例する傾向にあることがわかる。

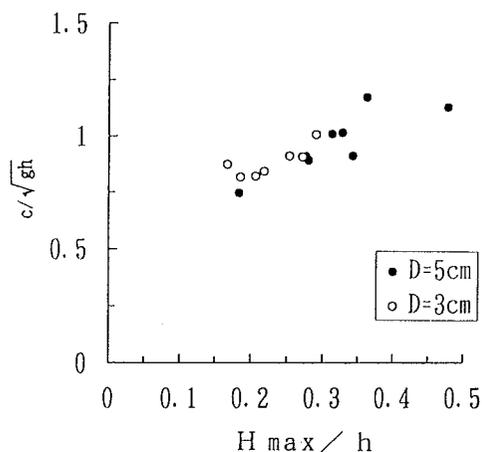
つぎに、平行流入と斜め流入を比較すると、斜め流入のほうが波高がやや高くなる傾向にある。これは、斜め流入の場合は直接水面に流入するため波の立ち上がりが大きいためだと考えられる。また、同じ斜め流入でも、先端の形状によってやや結果が異なっている。すなわち、先端の角度が $90^\circ$ のCaseAの場合、CaseBよりやや波高が低くなっている。これは、CaseAの場合、水面に突入する際、先端の面がやや下向きになり、水を押し込む形になるためと考えられる。また、この形状の場合、波高が

表 - 1 実験条件(実験 A)

R u n No	斜面勾配 (°)	水深(cm) (cm)	土厚 (cm)	土砂流入速度 (cm/s)	土砂移動距離 (cm)	最大波高 (cm)	波速 (cm/s)	波長 (cm)
1	20	19.47	9	71.07	65.53	7.6		
2	20	19.41	9	81	70.1	6.11		
3	25	14.41	9	26.73	25.11	2.97		
4	25	14.41	9	39.19	30.12	3.58		
5	25	14.41	9	47.71	35.11	3.43		
6	25	19.4	9	46.49	39.52	3.82		
7	25	19.38	9	67.36	46.32	5.84		
8	25	19.4	9	43.02	36.57	5.82		
9	25	19.38	9	73.93	51.24	5.53		
10	30	14.49	9	43.74	21.85	3.66		
11	30	14.49	9	48.97	33.04	3.29		
12	30	19.47	9	65.7	43.11	4.84		
13	30	19.42	9	81.23	53	7.82		
14	30	19.33	9	45.13	33.06	4.51		
15	30	19.3	9	87.13	48.02	7.3		
16	30	14.49	9	52.22	26.83	4.42		
17	30	14.47	9	90.56	31.81	9.83		
18	35	14.6	9	55.42	19.93	6.2		
19	35	19.12	9	40.91	27.2	3.05		
20	35	19.12	9	75.79	32.5	6.1		
21	35	19.11	9	94.65	37.45	10.11		
22	35	14.62	9	74.2	24.9	7.37		
23	35	14.6	9	89.58	29.92	11.23		
24	25	14.93	5	29.05	35.33	2.74	89.8	59.27
25	25	14.93	5	47.16	35.33	4.19	107.5	56.98
26	25	14.93	5	70.62	35.33	5.13	109.9	52.75
27	25	10.97	5	32.14	25.96	3.04	94	44.18
28	25	10.97	5	46.21	25.96	3.6	104.8	401.87
29	25	10.8	5	76.55	25.55	5.17	115.8	46.32
30	25	8.18	5	25.12	19.36	2.57	90.1	34.24
31	25	8.18	5	43.223	19.36	2.97	104.8	24.58
32	25	15.17	3	38.37	35.9	2.81	99.2	62.49
33	25	15.17	3	49.85	35.9	3.31	102.3	64.96
34	25	15.17	3	71.42	35.9	4.13	110.3	66.18
35	25	11.07	3	30.5	26.19	2.29	85.3	45.21
36	25	10.95	3	50.81	25.91	2.78	94	46.06
37	25	8	3	19.52	18.93	1.34	77.1	36.24
38	25	8	3	37.22	18.93	2.33	88.9	34.67

表 - 2 実験条件(実験 B)

C a s e N o	斜面勾配 (°)	水深 (cm)	土厚 (cm)	土砂流入速度 (cm/s)	土砂移動距離 (cm)
1	25	15	3	53.5	35.47
2	25	15	5	55.8	35.47

図-4  $c/\sqrt{gh}$ と $H_{max}/h$ の関係

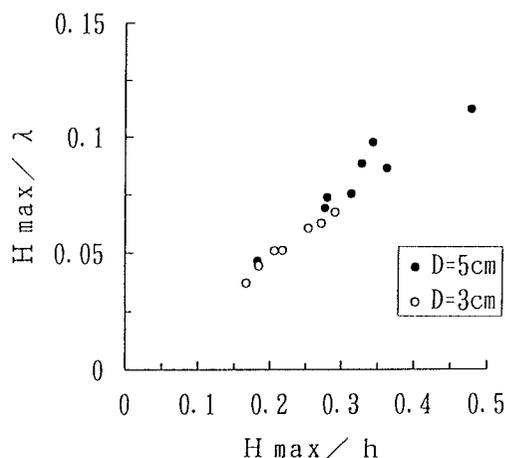
高くなると砕波し易い傾向があり、その影響も含まれていると考えられる。さらに、この砕波の影響によると考えられるが、土砂流入距離 $L$ の影響はCaseBの方が顕著であることがわかる。

この実験は、貯水池の川幅スケールの土塊が上流端で発生した場合の状況を再現したものである。土砂流入距離 $L$ （すなわち実際の場合は水深スケールと考えられる）によってやや異なるが、貯水池の水深の関数である長波の波速と同程度の速さの流入速度で土塊が流入した場合、土塊の高さの2倍程度の波が発生する可能性があることがわかる。

バイオントダムの場合、土塊の厚さが約250mで、水深約150mの貯水池に流速約25m/sで流入したと考えられている<sup>1)</sup>。この場合、 $\sqrt{gh}/v$ の値は約1.5であり、最大波高としてを150mとすると $H_{max}/D$ の値は0.6となる。この値を図中に示しているが、実験結果とほぼ一致した結果を示していることがわかる。したがって、貯水池内で斜面崩壊等の発生が予想される場合、崩壊の厚さおよび速度を推定することによって貯水池で発生する波の最大波高がある程度予測することが可能であると考えられる。

## 2) 波の移動速度

図-4は、CaseBに対する波（波の峰）の移動速度を $c$ とし、 $c$ と水深に対する長波の波速 $\sqrt{gh}$ との比を最大波高

図-5  $H_{max}/\lambda$ と $H_{max}/h$ の関係

$H_{max}$ を水深 $h$ で無次元化したものを横軸にとって示したものである。この図から、波の移動速度 $c$ はほぼ長波の波速と一致しているが、水深に対して最大波高が高い場合波速が大きくなる傾向にあることがあり、 $H_{max}/h$ が0.3以上になると長波の波速以上となっている。

## 3) 波長（波形勾配）

土塊の流入によって発生する波は、一種の孤立波であり、波長を定義することは困難であるが、ここでは、最大波高から下流に向かって最大波高の10%の水位が現れる地点までを半波長と考えて結果を整理した。図-5は波長 $\lambda$ を最大波高 $H_{max}$ で無次元化した波形勾配 $H_{max}/\lambda$ と $H_{max}/h$ の関係を示したものである。この図から、水深に対して最大波高が高い場合、波形勾配が大きくなる、すなわち、とがった波となっていることがわかる。

## 4) 波の発達状況

図-6は、CaseAの実験に対して、波の発達状況に関して、最大波高が生じる位置について検討したものであり、落下地点から最大波高が生じる位置までの距離と $\sqrt{gh}/v$ との関係を示したものである。この図から、実験結果にばらつきはあるものの、 $\sqrt{gh}/v$ が大きくなるにつれて最大波高が生じる位置が下流に移行している。この結果は、 $\sqrt{gh}/v$ が大きくなる、すなわち相対的に流入速度が波速に比べて遅い場合、波は徐々に発達する傾向があること

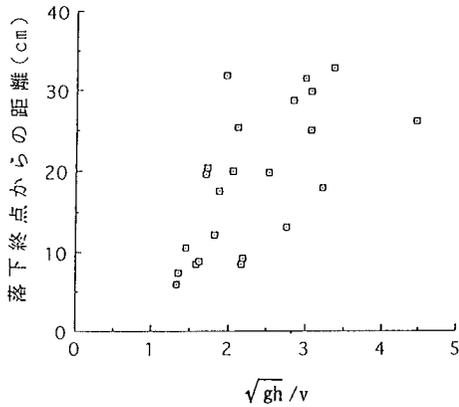


図-6 最大波高の位置と  $\sqrt{gh}/v$  の関係

を意味している。

したがって、上述した1)～3)を総合して考えると、 $\sqrt{gh}/v$ の値が1に近づくると波高が急激に発達し、波形勾

配の大きな波が形成される。この場合生じる波高は、土塊の厚さ以上となり、非常に高くなる。一方、 $\sqrt{gh}/v$ の値が大きくなると、波の発達が遅くなり、波長の発達に伴って波形勾配が小さい波が形成される。この場合、生じる波の波高は相対的に低くなる。

### 3. 2 実験Bに対する実験結果

#### 1) 全体的な流速場と波の発達

図-7は、Case1に対して、各時刻の水面形と流速ベクトル図を重ねて示したものである。まず、土塊の流入によって起きる流速場は、いわゆる波のような円運動を伴った流況を有しておらず、開水路流のように下流に向かう、鉛直方向に一様に近い流れとなっていることがわかる。

つぎに、土塊の落下中とそれ以後に分けてみると、土塊落下中(0.4～0.7秒後)は、土塊の移動に伴い土塊先端付近の流速が激しく発達しており、水面付近では流速が鉛直前方に発達し、波の発生を促している様子が分かる。一方、土砂落下以後(0.8～1.1秒後)では、時間とともに流速の発達範囲が下流方向に移動し、波の

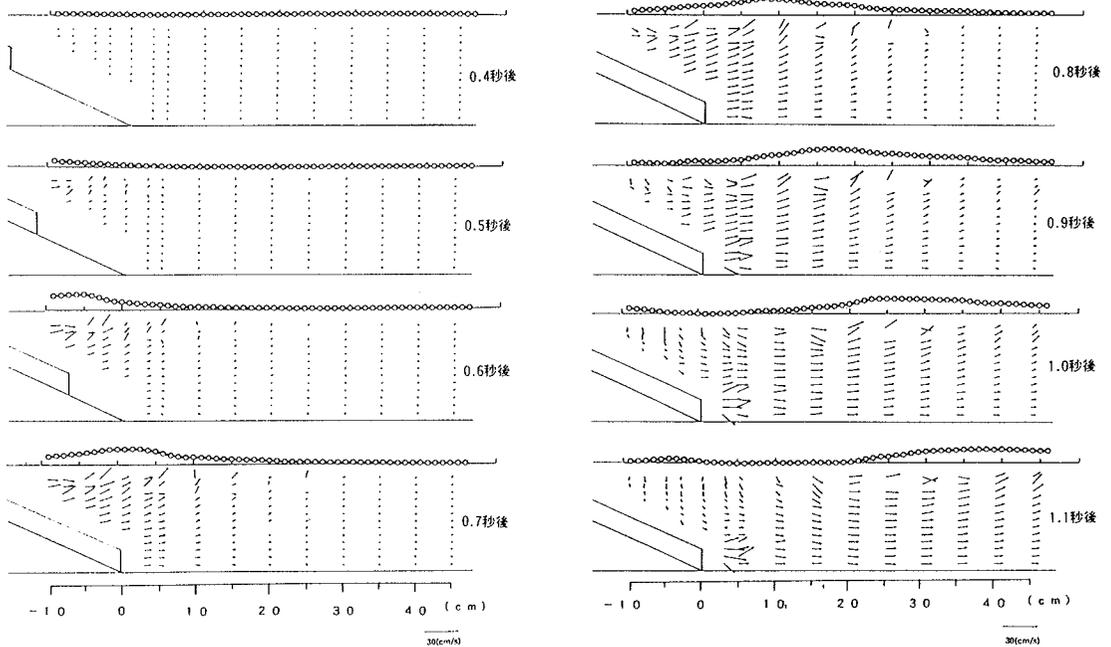


図-7 水面形と流速ベクトル図

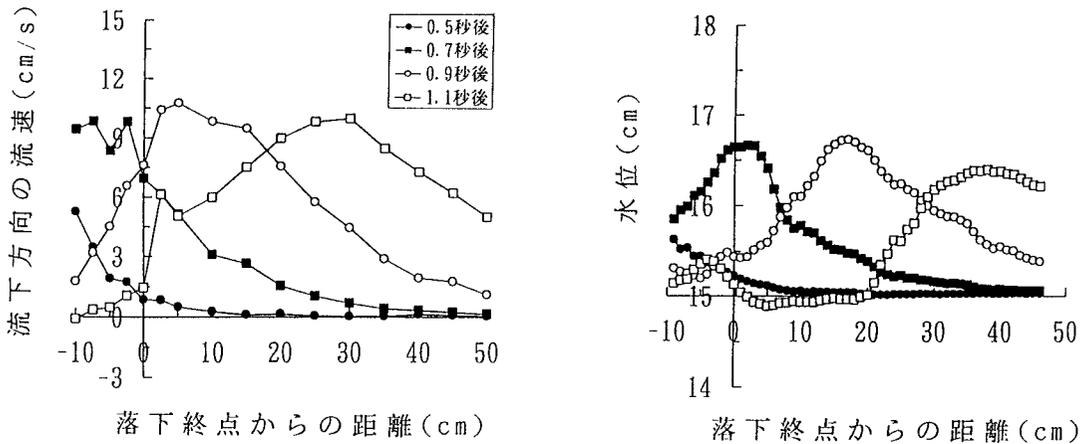


図-8 水面形と流下方向の流速の関係

通過後は下向き流速が卓越してくる様子が見られる。この傾向は、土厚が大きいCase2と同様であった。

2) 波の形状と流下方向流速  $u$  の関係

つぎに、水位変化と流下方向の流速成分  $u$  について見ると、 $u$  の発達開始位置と水位の上昇開始位置は一致しており、土砂流入直後 (0.4~0.6秒後) は水位とともに  $u$  も同様に増加している。しかしながら、水位のピークが表れる位置に流速の最大値が生じているのではなく、最大波高が先行する形になっている。この様子を詳細に示したものが図-8であるが、流下方向流速の最大値は、水位のピークの約1/4波長後方に生じていることが分かる。

また、鉛直流速分布は、土塊落下以後はほぼ一様分布となっており、波の通過後は急激に流速が減少している。

3) 波の形状と鉛直流速  $w$  の関係

図-6より波の形状と鉛直流速  $w$  の関係についてみると、すべての時刻において水位と鉛直流速の変動範囲およびピーク位置が一致しており、水位が大きくなれば鉛直流速も大きくなる傾向にある。また、波が通過した後の状態を示す1.1秒後を見ると、土塊先端付近では流下方向の流速はほとんど見られないが、水位の低下を誘起する鉛直方向の下降流が見られている。

4. おわりに

本研究では、ダム貯水池内での斜面崩壊により発生する表面波の形成過程に関して、1次元モデルの実験を行い、発生する波の特性について検討した。得られた結果をまとめると以下のようである。

1) 従来の水平流入実験と同様に、土塊の流入によって発生する波の最大波高については、土塊の流入速度が長波の波速に近くなるほど土塊の厚さに対する最大波高が高くなる傾向にあるが、最大波高は流入距離にも比例して大きくなる傾向にある。特に、貯水池の水深の関数である長波の波速と同程度の速さの流入速度で土塊が流入した場合、土塊の高さの2倍程度の波が発生する可能性があることがわかった。

また、実際の災害例であるバイオントダムでの実測の値は、実験結果とほぼ同一の結果を示した。この結果から、現地規模での状態に対して最大波高の推定がある程度可能であることが判明した。

2) 波の発達は、 $\sqrt{gh}/v$  の値が1に近づくほど急激であり、波形勾配の大きな波が形成される。一方、 $\sqrt{gh}/v$  の値が大きくなると、波の発達が遅くなり、波長

の発達に伴って波形勾配が小さい波が形成される。この場合、生じる波の波高は相対的に低くなる。

3) 土砂流入によって起きる流速分布は、いわゆる波のような分布を有しておらず、流下方向に様な流れである。また、土砂流入時では、鉛直方向の流速の最大値は最大波高地点と一致するが、流下方向の最大流速は最大波高位置よりも約1/4波長後方に発生する。

4) 波の移動速度は、ほぼ長波の波速と一致しているが、 $H_{max}/h$ の値に影響され、水深に対して最大波高が高い場合、相対的に速度が増加し、 $H_{max}/h$ が0.3以上では波速以上の速度となる。また、波形勾配も $H_{max}/h$ と比例関係にあることが分かった。

#### 参考文献

- 1) G. Melidoro : Introduction Report, Proc. of the Meeting of the 1963 Vaiont Landslide, pp. 31-42, 1986.
- 2) 道上正規：貯水池内での大崩壊に伴う水位変動について、ダム技術、No. 105、pp. 4-11、1995.