

貯水池内での斜面崩壊に伴う水面波に関する研究

Study on waves generated by landslides in a reservoir

道上正規^{*}・檜谷 治^{**}・松田信彦^{***}

By Masanori MICHIE, Osamu HINOKIDANI and Nobuhiko MATSUDA

In a reservoir, a big wave sometimes is generated by huge inflow of sediments such as a landslide and debris flow, and causes serious damage to human beings. Therefore, it is very important to investigate the characteristics of waves in the reservoir due to inflow sediments. In this paper, a two-dimensional numerical simulation model based on shallow water equations integrated with the water depth is applied to some experimental results and Vaiont dam disaster in Italy for waves generated by inflow sediments, and its characteristics are discussed.

Keywords: waves, reservoir, landslide, numerical simulation

1. はじめに

貯水池などの閉鎖領域において大規模な土砂崩壊が発生すると、それに伴い巨大な波が発生し、ダム構造物や下流域の都市などに大きな被害を及ぼすことが予想される。本研究では、このような水面波を数値計算によって解析し、その発生・移動特性を検討することを目的としている。

この貯水池内の土砂崩壊に伴う表面波発生に関する研究に関しては、1963年にイタリアのバイオンタダムで発生した水面波による災害以降、数多くの研究行われており、実験的研究としては、河西ら¹⁾の研究、数値解析的な研究としては、土砂流入を水柱と仮定したPezzoliら²⁾、村上ら³⁾の研究があり、土砂流入を横流入と仮定したGavrilidisら⁴⁾、Mingら⁵⁾の研究等がある。しかしながら、これらの研究は土砂流入を基本的に清水と置き換えており、多量の土砂流入がある場合には、流入土砂による地形変化の影響を考慮できない。そこで、本研究では、簡単な土砂流入の実験を行い、発生する波の特性について検討するとともに、数値計算法として、河床上昇によって土砂の移動を表現する方法を提案し、実験結果を数値シミュレーションすることによって計算法の妥当性を検討した。さらに、同計算法を用いて1963年に発生したバイオンタダム災害の数値シミュレーションも行っている。なお、本研究で使用した数値計算法は、浅水流方程式に基づいたMacCormack法である。

正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4-101)

正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (同上)

学生会員 鳥取大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (同上)

2. 基礎式と数値計算法

2. 1 流れの基礎方程式

流れの基礎方程式としては、次に示す二次元浅水方程式に基づく連続式および運動方程式を用いた。

$$\text{連続式: } \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\text{運動方程式: } \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = E_x, \quad \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial y} = E_y \quad (2)$$

ここに、

$$H = h(x, y, t), U = u(x, y, t)h(x, y, t) \quad (3)$$

$$V = v(x, y, t)h(x, y, t), G = uvh = UV/h \quad (4)$$

$$F = u^2h + \frac{1}{2}gh^2 = \frac{U^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2, \quad S = v^2h + \frac{1}{2}gh^2 = \frac{V^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \quad (5)$$

$$E_x = gH(S_{0x} - S_{fx}) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \varepsilon \frac{\partial (uh)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \varepsilon \frac{\partial (uh)}{\partial y} \right\} \quad (6)$$

$$E_y = gH(S_{0y} - S_{fy}) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \varepsilon \frac{\partial (vh)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \varepsilon \frac{\partial (vh)}{\partial y} \right\} \quad (7)$$

$$S_{fx} = \frac{n^2 U \sqrt{(U^2 + V^2)}}{H^{10/3}}, S_{fy} = \frac{n^2 V \sqrt{(U^2 + V^2)}}{H^{10/3}}, \quad S_{0x} = -\frac{\partial z}{\partial x}, S_{0y} = -\frac{\partial z}{\partial y} \quad (8)$$

h : 水深, u : x 方向の水深平均流速, v : y 方向の水深平均流速, g : 重力加速度, S_{0x} : x 方向の水路勾配, S_{0y} : y 方向の水路勾配, S_{fx} : x 方向の底面摩擦勾配, S_{fy} : y 方向の底面摩擦勾配, ε : 水平方向の渦動粘性係数, n : マニングの粗度係数である。

本研究では、上式をMacCormack法によって基礎式を定式化し解を求めているが、ここでは、紙面の都合上省略する⁶⁾。なお、MacCormack法を適用する際の連続式に関する人工粘性項に関しては、土砂流入によって河床勾配が大きくなることを考慮して、水深の代わりに水位を変数として与えている。

2. 2 境界条件と土砂流入のモデル化

MacCormack法では、流速(u , v)と水深(h)の計算点は同一の節点上にある。いま、図-1のように節点 $i+1$ が陸地境界であるとすると、 x 方向の境界条件としては節点 $i+1$ での流速(u , v)は0、水深に関しては、水位一定という次式で与えた。

$$h(i+1) + z(i+1) = h(i) + z(i) \quad (9)$$

なお、人工粘性項に関しては、陸地境界で勾配0としている。

また、実際の貯水池での計算では、波の遡上等の条件が必要であるが、本研究では以下の条件を用いている。

wet $\rightarrow$ dry: 節点周辺の平均水位が節点の河床高よりも Δh 以上高くなった場合

dry $\rightarrow$ wet: 水深がある h_{min} 以下になった場合

つぎに、土砂流入もモデル化に関しては、図-2に示しているように、基本的に節点の河床高 $z_1(t)$ をある時間変数と $z_1(t)$ で変化させることで表現した。

3. 土砂流入実験

3. 1 実験の概要

実験は、長さ約4m、幅30cmの閉鎖水域の上流から、

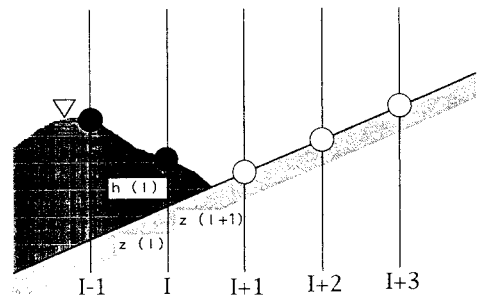


図-1 境界条件

長さ38.5cm, 幅30cm, 高さ5.5cmの直方体を流入させ、土砂流入を表現したものである。実験条件は、3種類の水深に対して流入速度を種々に変化させ、合計28ケース実施した。また、土砂流入速度および水面形は、ビデオ撮影によって0.1秒毎に計測した。

3. 2 実験結果および考察

図-3は、実験結果の一例を示したものであり、縦軸は0.1秒毎の水位、横軸は最上流端からの距離を表している。なお、実験条件は、ケースAの場合、水深8.50cm, 平均流入速度0.91m/sで、ケースBの場合、水深8.83cm, 平均流入速度0.48m/sである。まず、両ケースとも土砂流入に伴って波が徐々に発達している。しかしながら、最大波高に関しては流入速度の早いケースAの方が大きくなっていることがわかる。つぎに、図の下に示しているのが各時刻の流入土砂の先端位置を示したものであるが、流入速度の遅いケースBについてみると土砂流入速度よりも発生した波の下流への伝播速度の方が早い。一方、ケースAについてみると、波のクレスト部の移動速度と流入速度がほぼ一致している。上述した最大波高の違いは、この波の移動速度と流入速度の相対関係に大きく依存している可能性がある。

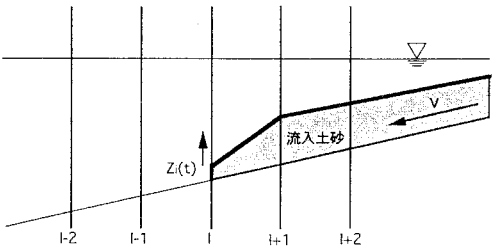


図-2 土砂流入のモデル化

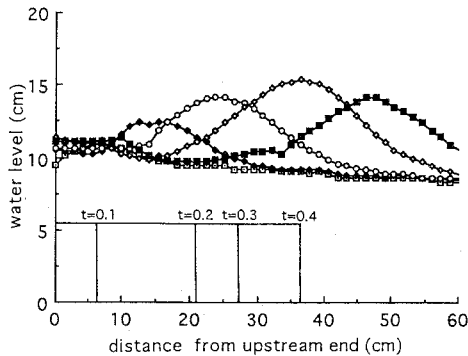


図-3 (1) 実験結果 (ケースA)

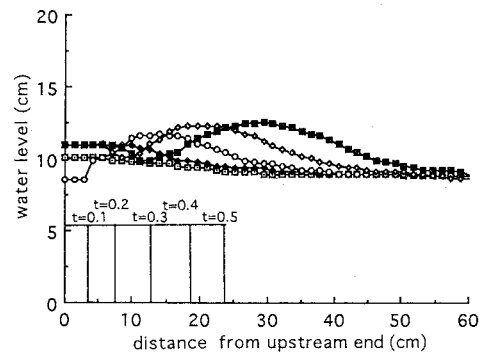


図-3 (2) 実験結果 (ケースB)

そこで、全実験データにおける最大波高 $\eta_{\max}$ を土砂流入厚 D で無次元化した $\eta_{\max}/D$ と、平均流入速度 $\bar{v}$ を長波の波速 $\sqrt{gh}$ で無次元化した $\sqrt{gh}/\bar{v}$ との関係を示したものが図-4である。図中の丸印が実験結果であるが、実験結果はほぼ1つの曲線上にあり、平均流入速度と波速との比が1に近いほど相対的に波高が高くなる傾向にあることがわかる。さらに、 $\sqrt{gh}/\bar{v}$ が1付近での最大波高の値は土砂流入厚の約1.5倍になっている。

4. 計算結果

4. 1 実験結果の再現計算

図-3に示したケースAに対する再現結果を図-5に示す。なお、 $\Delta x = 0.06\text{cm}$, $\Delta t = 0.001$ 秒, 人工粘性係数 $k=1$ である。計算結果と実験結果を比較すると、波高および移動速度ともよく両者は一致している。また、最大波高の実験値と計算値を比較したものが図-4中の●印(実験値)と□(計算値)であるが、この点に関しても計算値は実験値を良く再現できている。

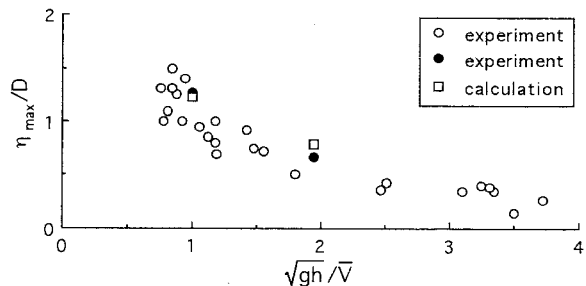
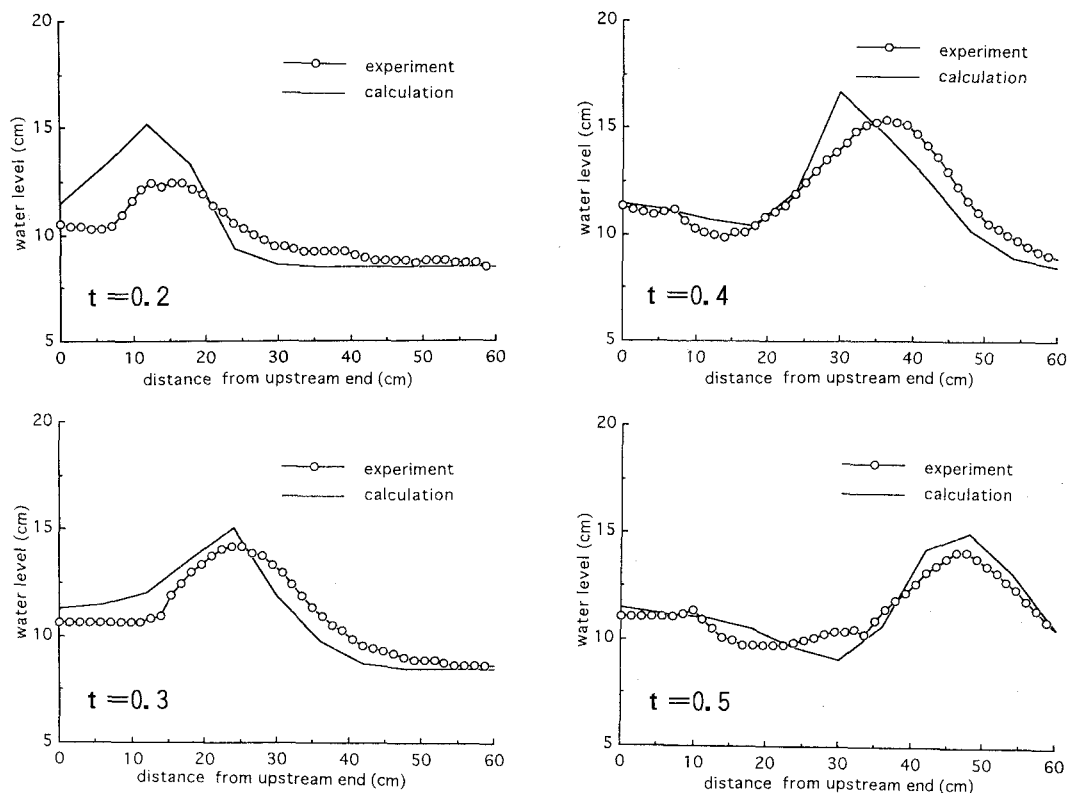


図-4 $\eta_{\max}/D$ と $\sqrt{gh}/\bar{v}$ の関係



ことがわかる。

図-5 計算結果

4.2 バイアントダム災害の再現計算

(a) バイアントダム災害の概要⁶⁾

バイアントダムはアドリア海に注ぐピアベ川の支川に1960年に建設されたダムで、高さ約265mのアーチダムである。このダムは、湛水直後からダム直上流の左岸で地滑りが発生し、1963年10月9日について大崩壊が発生した。崩壊は、左岸に沿って約1.8kmの長さで、厚さ約250mの土塊が右岸に向かって20m/s～30m/sの速度で約400m移動したというものである。移動した土塊の量は2億7千万 m^3 とされている。災害前後の地形図を図-6に示す。この崩壊は貯水池を横に横断する形で発生しており、貯水池の水が右岸に押し寄せられ、右岸では貯水池水位（標高700m）よりも最大で約270mの高さまで波が到達した。さらに、直下流のダムでは天端より約100mの高さの波が流下し、下流で約2000名の人命が失われた。なお、右岸での波の到達地点を図-6中の点線で示している。

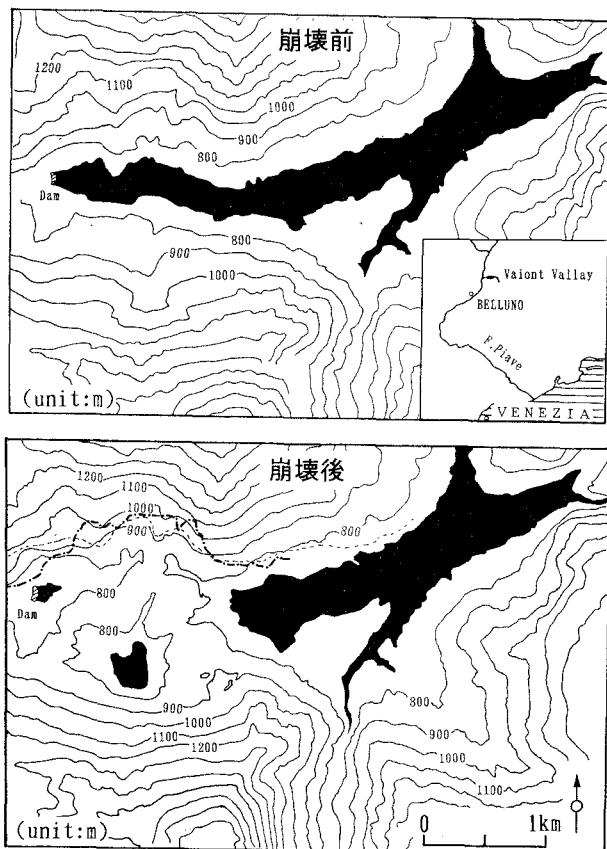


図-6 崩壊前後の地形図

1:50,000

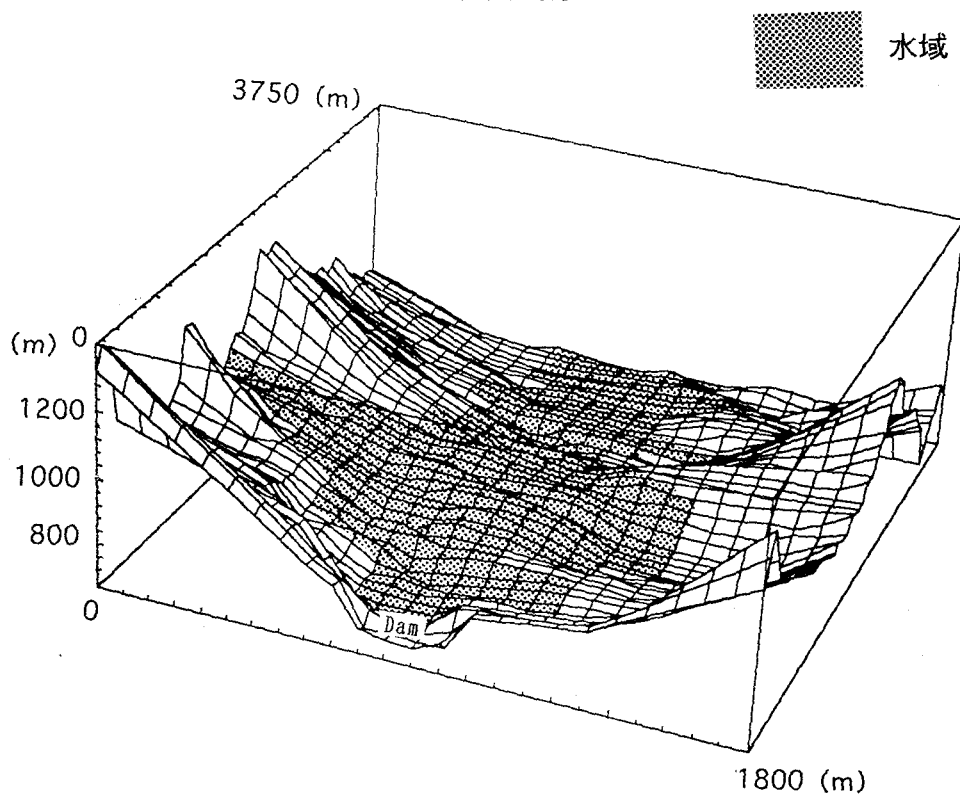
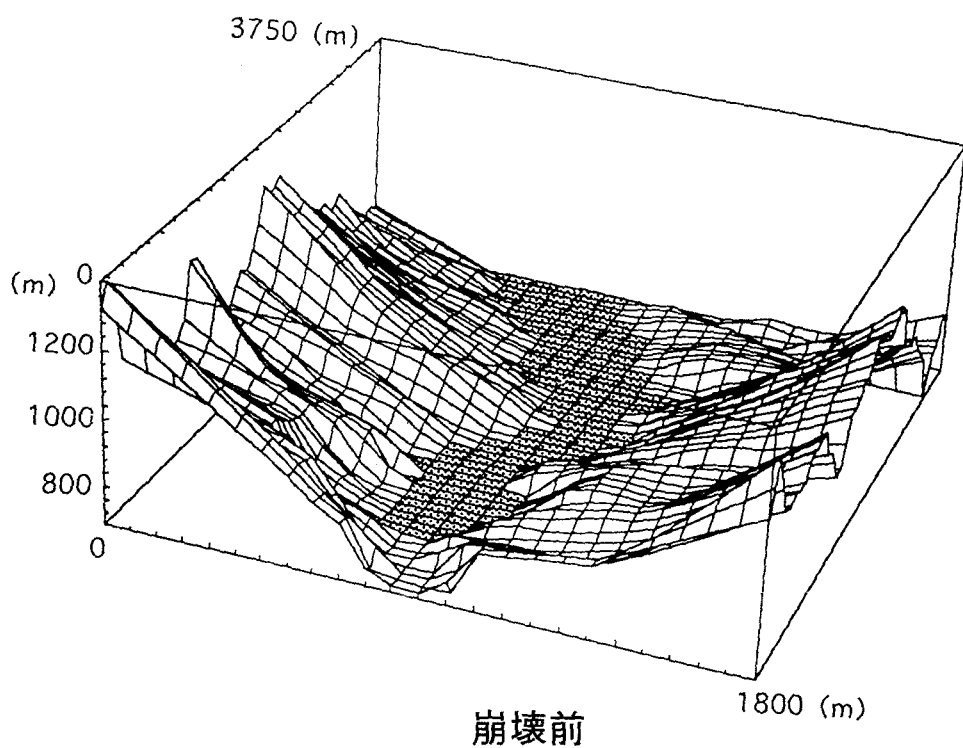


図-7 バイオントダム災害の再現結果

(b) 計算条件および計算方法

計算領域は、ダム貯水池部を含む流下方向に3750m、横断方向に1800mの領域とし、その領域内を25m×25mのメッシュに分割した。つぎに、土砂流入のモデル化であるが、崩壊過程の詳細なデータが存在しないため、崩壊前後の地形変動量が左岸から右岸に向かって速度25m/sで進行するとした。なお、地形変動の先端は流下方向軸と平行に移動すると仮定し、先端から125mの範囲の河床を徐々に変化させることで先端部に傾斜を持たせた。また、波の遡上等に関する係数 Δh および h_{min} は、計算の安定性を考慮して2mおよび1mとし、さらに河床の粗度係数 n は0.1、人工粘性係数は10とした。なお、 $\Delta t=0.01$ 秒であり、計算時間は一度右岸に遡上した波が反対の左岸に打ち上げる状況までの100秒間とした。

(c) 計算結果

図-7は、計算初期と土砂崩壊後約35秒後の結果を鳥瞰図にしたものであるが、流入土砂によって貯水池の水が右岸に遡上している様子がわかる。また、ダム天端での越流水深は約80mであり、実測値とほぼ一致した結果が得られた。しかしながら、右岸での波の最高到達地点に関して示した図-6中の一点鎖線と実測値の点線を比較するとやや異なっている。これは、土砂の移動を流下方向軸に平行にしている点など、実際の土砂流入状態を十分に計算に取りれていないことが最大の原因と考えられ、再現性を向上させるためには、土砂崩壊のシミュレーション等と組み合わせた計算が必要であると思われる。

5. おわりに

本研究では、貯水池内で発生した斜面崩壊によって生じる水面波を実験的・数値解析的に検討した。得られた主要な結果をまとめると以下のようである。

1) 土砂流入の実験では、表面波の発達には土砂流入速度と水深に大きく影響され、最大波高は平均土砂流入速度と水深から求めた長波の波速との比が1に近いほど大きくなることが明らかになった。また、この比 $\sqrt{gh}/v$ が1付近での最大波高の値は土砂流入厚の約1.5倍以上をとることがわかった。

2) 本計算法では、土砂の流入を河床上昇で表現したが、計算結果は実験結果の波高の発達等を十分な精度で再現でき、この計算法で土砂流入による波の発生を予測することが可能であることがわかった。

3) 実例としてイタリアのバイオントダム災害の再現計算を行ったが、崩壊土砂の移動状況に関する十分な資料が無いために、実測値と計算値の適合性はあまり良くないが、右岸での波の遡上あるいはダム天端での波高などオーダー的には一致しており、今後、実際の崩壊土砂の移動特性を計算に取り込むことができれば計算精度は向上するものと思われる。

参考文献

- 1) 河西：地すべりによる貯水池の水位変動，第28回水理講演会論文集，pp.819-826，1984。
- 2) Pezzoli, G.: The Catastrophic Rockslide of Vajont: 30 Years Later, Proc. 25th IAHR, Vol.4, pp.17-23, 1993.
- 3) 村上ら：貯水池における表面波伝播シミュレーション，第46回年講，Vol.2, pp.466-467, 1991.
- 4) Gavrilidis, I., Spathopoulos, G. and T. Papathanassiadis: Estimation of Waves due to Landslide, Proc. 25th IAHR, Vol.4, pp.9-16, 1993.
- 5) Ming et.al: Studies on Waves Generated by Landslide, Proc. 25th IAHR, Vol.4, pp.1-8, 1993.
- 6) 道上ら：貯水池における表面波発生の数値解析，第45回中四，pp.230-231, 1993.
- 7) G. Melidoro: Introductory Report, Proc. of the Meeting of the 1963 Vaiont Landslide, pp.31-42, 1986.