

湛水した砂防ダムに流入する土石流の影響

The influence of debris flow on a sabo dam brimmed with water

建設省土木研究所 正会員 高山 高久
 " 吉松 弘行
 " 鈴木 浩之

1. 緒 論

長崎（昭和57年）、島根（昭和58年）など、近年、土石流によって大きな災害が発生している。この土石流による災害を防止軽減するため、砂防ダム等の構造物による対策と、警戒避難体制の整備などの構造物によらない対策が建設省によって進められている。土石流の発生する可能性の高い溪流には、土石流対策砂防ダムをまず少なくとも一基建設することが当面の目標となっている。土石流対策砂防ダムは、透過型と不透過型の2種類に大別される¹⁾。不透過型は従来より建設されてきたマスコンクリート製の砂防ダムに代表され、透過型には鋼管製スリット砂防ダムや、コンクリート製スリット砂防ダムがある。透過型砂防ダムは、土石流発生前の小規模な土砂流出による不要なダム堆砂を防ぐことができる反面、土石流中の巨礫の衝突に関する挙動が複雑で、現在理論的および実験的に検討が進められている。一方、不透過型砂防ダムは従来より、砂防ダムとして採用されてきたものであるが、除石によってその貯砂容量を確保するという条件を付けて、土石流対策砂防ダムとしても使用しようとしている。このコンクリート製砂防ダムは、土石流による衝撃力を直接受ける状態を考えると水通し天端がかなり厚くなる。しかし、通常この種のダムに設けられている水抜暗渠は断面が小さいので、土石流発生前に石礫やゴミによって閉塞していなくても、土石流発生前の小流量で砂防ダムは満水状態である場合が多いと考えられる。このような状態に土石流が流入してくる場合には、袖部を除いて土石流の直接的な衝撃を受けることは少ない。したがって、予想される土石流の土砂量にみあう貯砂容量の砂防ダムが準備できればよいと考えられる。ここで一つ考慮しなければならないのは、湛水したところに流入する土石流によって発生する波である。これは、貯水池に発生する地すべりによって波が発生する²⁾のと類似の現象であるが、河床が急勾配で、貯水量に比べて流入してくる土石流の量が無視できないほど大きいので、流入した土石流と同程度のピーク流量の波が砂防ダムを越流して下流水路に流入することも考えられる。そこで、水路実験と数値解析によって、湛水した砂防ダムに流入する土石流の挙動とこれによって発生する波の規模について検討した。

2. 実験的研究

2.1 実験の概要

図-1に示す長さ5m、幅20cmの木製、片面アクリル製水路を、土石流発生限界勾配以上の17.2度に傾け、下流端付近に高さ15cmおよび20cmの板を砂防ダムの模型として設置した。水路内に図-2に示す粒度分布を有する砂礫を敷

き、砂防ダムを湛水させた後、水路上流端より1.5 l/sec、2.0 l/sec、2.5 l/secの三種の流量を与えて土石流を発生させた。土石流の運動と、土石流が湛水域に流入するこ

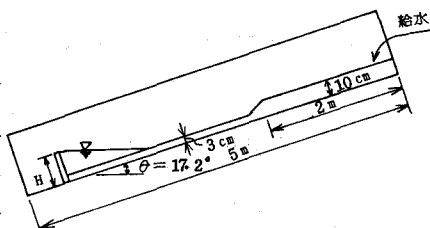


図-1 実験に用いた水路

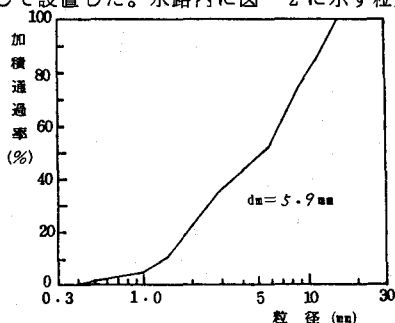


図-2 実験に用いた河床材料

表-1 実験条件と結果

Run #	ダム高 (cm)	流量 (l/sec)	流入する土石流		発生した波		
			波高 (cm)	流速 (cm/sec)	波高 (cm)	波速 (cm/sec)	波長 (cm)
1	15	1.51	4.3	62	4.1	102	29.4
2	15	1.99	5.2	49	6.9	73	38.2
3	15	2.51	6.5	68	7.8	61	54.8
4	20	1.51	4.2	74	5.3	60	29.6
5	20	1.99	5.6	73	5.1	101	60.7
6	20	2.51	6.0	54	3.6	109	43.1

ことによって発生する波の形状と速度をビデオカメラによって記録し、判読した。実験条件と、湛水域流入直前の土石流の波高と流速およびダム越水開始直前の波の波高、波速、波長を表-1に示す。

2.2 実験の結果

(1) 湛水域へ進入する土石流と波の発生

湛水域に流入する直前の土石流の波高と、先端部の流速を図-3 図-4に示す。土石流の波高は流量が増加するにつれて増加する傾向があるが、流速はほぼ一定となっている。図-5、図-6は、ビデオテープより $\frac{1}{10}$ 秒毎に判読した土石流と水面の波の例である。土石流は湛水域に流入しても、流速をほとんど減ずることなくダム地点にまで侵入し、かなり大きい波が形成されていることがわかる。

(2) 土石流と波の諸元について

湛水域に流入する直前の土石流の諸元と、土石流が流入することによって生ずる波の諸元を比較してみる。図-7は、土石流先端部と水の波の走時曲線である。これからも流入した土石流が比較的一定速度で運動し、形成された波の速度が土石流先端部の速度より速く、土石流がダム地点に到達するよりも早く水の波がダムを越流することが読み取れる。

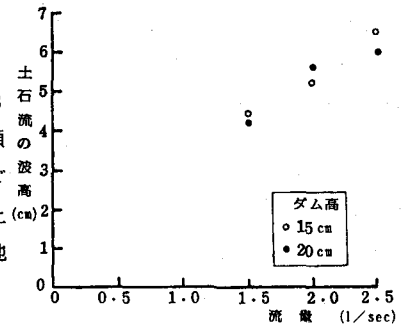


図-3 湛水域に流入直前の土石流の波高

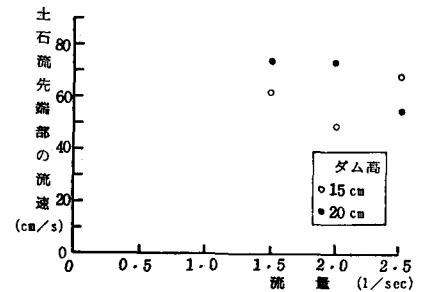


図-4 湛水域に流入する時の土石流先端部の速度

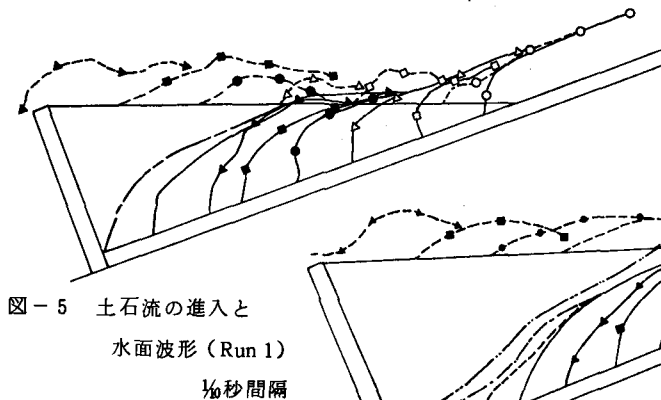


図-5 土石流の進入と
水面波形 (Run 1)
 $\frac{1}{10}$ 秒間隔

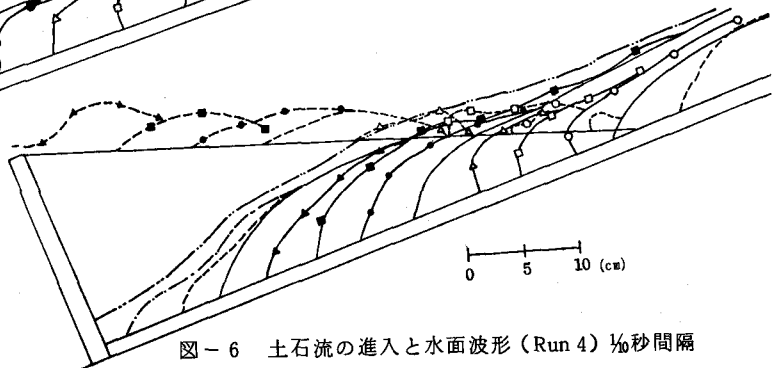


図-6 土石流の進入と水面波形 (Run 4) $\frac{1}{10}$ 秒間隔

湛水域流入直前の流速と発生した波の速度を比較すると図-8のようになり、全てのケースについて波の速度が土石流の速度を上まわっている。つぎに、土石流の波高と水の波の高さを比べると図-9に示すようにほぼ等しくなっている。

湛水域に入る土石流のハイドログラフ（流量の時間的变化）とダムを越流水のハイドログラフをダムの高さ別に読み取ったものが図-10と図-11である。これらより、流入する土石流のピーク流量と、ダムを越流する水のピーク流量を比較すると図-12のようになり、流入する土石流のピーク流量より、形成される波のピーク流量の方が大きくなっている。

形成された波がダム地点に達した時の波形を読み取り、その波長と波高を求めると図-13のようになる。

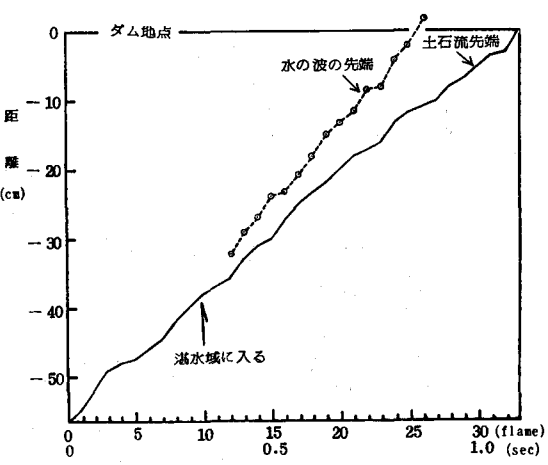


図-7 土石流先端と水の波の走時曲線

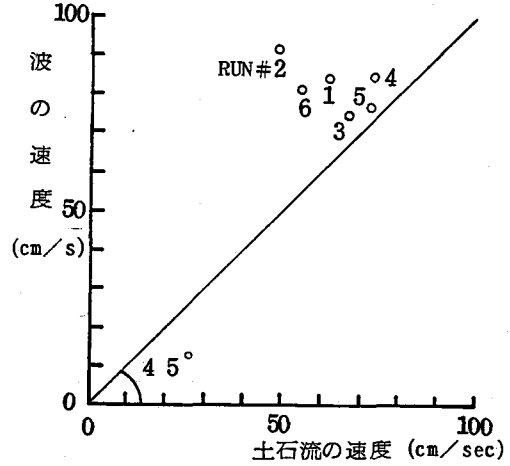


図-8 土石流の流速と波の速度

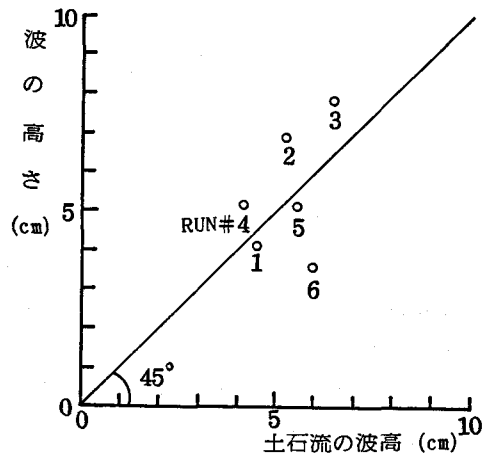


図-9 土石流の波高と波の高さ

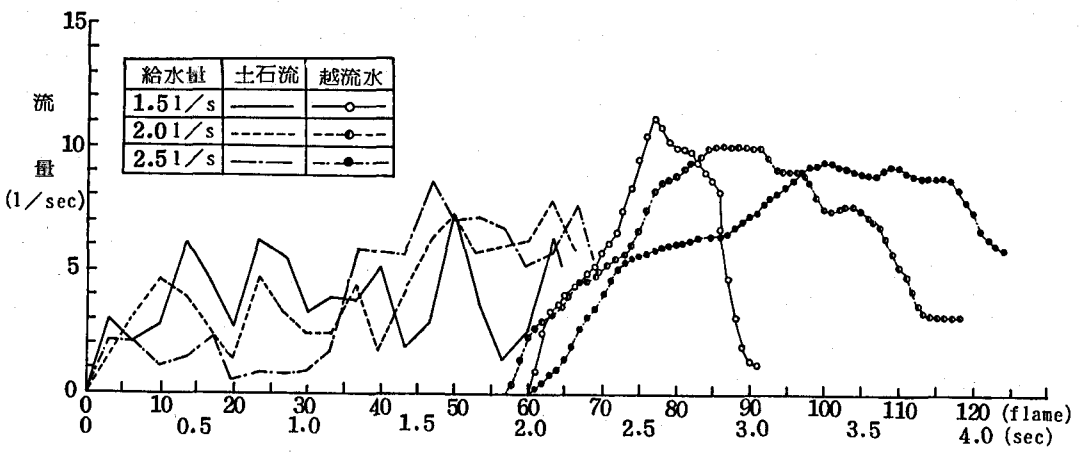
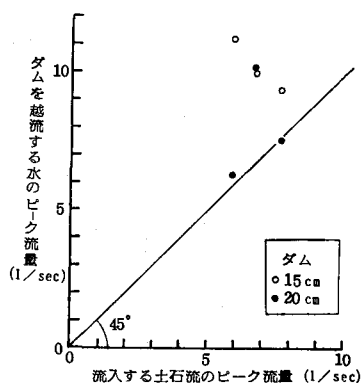
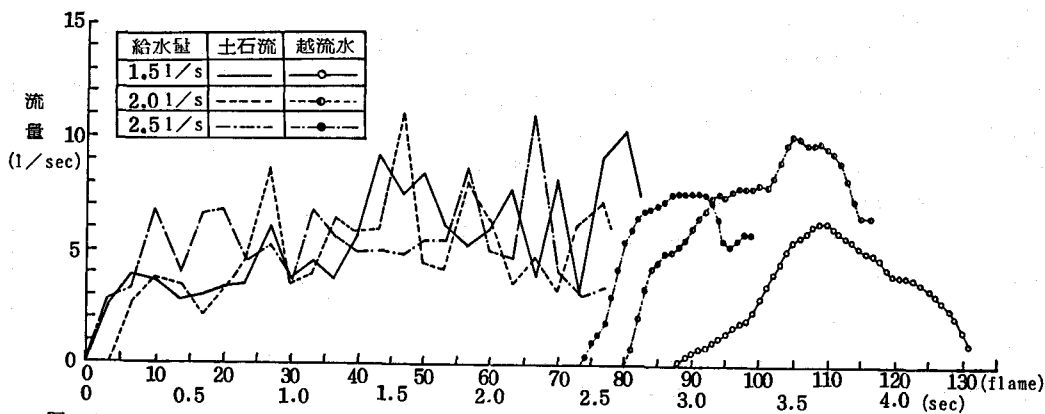


図-10 湛水域に流入する土石流の流量とダムを越流する水の流量の時間的变化（ダム高：15 cm）

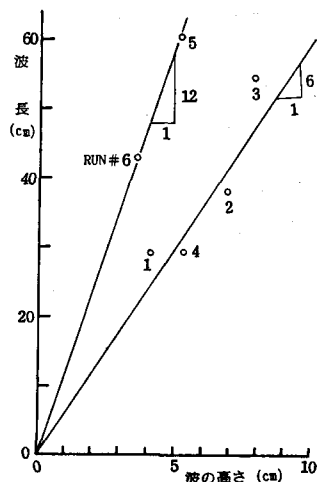


3. 数値解析的研究 図-12 土石流ピーク流量と越水ピーク流量の比較

3.1 基礎式

図-14のように横式化し、湛水池内の水が、非圧縮、非粘性流れは非回転とする。二次元的に解析することになると、支配方程式および境界条件はつぎのようになる。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad V \text{ 内} \quad \dots\dots\dots (1)$$



$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right\} + g\eta = 0 \quad S_1 \text{ 面上} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = n_y \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad S_1 \text{ 面上} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = - \frac{dX_p}{dt} \quad S_2 \text{ 面上} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad S_3 \text{ 面上} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 V : 流体内部、 S_1 : 自由表面、 S_2 : 土石流先端面、 S_3 : 湛水池の底面および側面、 ϕ : 速度ポテンシャル、 n : 各境界に立てた外向き法線、 n_y : n の y 軸に対する方向余弦、 g : 重力の加速度、 X_p : 土石流先端面の各時刻における位置である。

土石流が湛水した砂防ダムに流入する時の造波現象の解析は、ラプラス方程式(1)を境界条件(2)～(5)と適当な初期条件のもとで解く非線形初期値境界問題となる。

二次元のグリーン公式により積分方程式を得る。⁸⁾

$$\alpha_p \phi_p + \mathfrak{f}_s \phi_s \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\ell_n \frac{1}{r} \right) ds - \mathfrak{f}_{s_1} n_y \frac{\partial \eta}{\partial t} \ell_n \frac{1}{r} ds + \mathfrak{f}_{s_2} \frac{dX_p}{dt} \ell_n \frac{1}{r} ds = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $S = S_1 + S_2 + S_3$ 、 ϕ_p ：P点における ϕ の値、 α_p ：図-14の内角、 r ：PとQの距離、 $\oint$ ：Cauchyの主値である。

誤差の補正項Dを用いて、次のような非線形重みつき残差方程式を得る。⁸⁾

$$\int_{S_1} W \left[\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left\{ n_y^2 \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial S} \right)^2 \right\} + g\eta - \frac{\partial D}{\partial t} \right] ds = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、W：重み関数である。

(6)式を選点法によって解くこととし、各境界上の各節点をコントロールポイントとする。この P_i において離散化を行うと、

$$\alpha_i \phi_i + \sum_s A^t - \sum_{s_1} n_y |B^t| \dot{\eta} + \sum_{s_2} |B^t| \dot{X}_p = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{ここで、} \quad A^t = \int_0^t |N^t| \frac{\partial}{\partial n} \left(\ell_n \frac{1}{r} \right) ds \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$|B^t| = \int_0^P |N^t| \ell_n \frac{1}{r} ds \quad \dots\dots\dots (10)$$

つぎに(7)式について重み関数の任意性を考慮することにより次式を得る。

$$\sum_{s_1} \left[\ell |F| \phi + \frac{1}{2} \ell n_y^2 |H| \dot{\eta} + \frac{1}{2} \ell |P| \phi^2 |E| \phi + \ell |F| (g\eta - \dot{D}) \right] = 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\text{ここで、} \quad |E| = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad |F| = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/6 \\ 1/6 & 1/3 \end{bmatrix}, \quad |H| = \frac{1}{12} \begin{bmatrix} 3\dot{\eta}_j + \dot{\eta}_{j+1}, & \dot{\eta}_j + \dot{\eta}_{j+1} \\ \dot{\eta}_j + \dot{\eta}_{j+1}, & \dot{\eta}_j + 3\dot{\eta}_{j+1} \end{bmatrix}, \quad |P|^t = \frac{1}{2} [1, 1]$$

(8)、(9)の連立方程式を解くにあたり、増分法を用いる。時刻 t_0 と $t+t_0$ における ϕ と η の値をそれぞれ ϕ_0 、 η_0 、 ϕ 、 η とすると、

$$\phi = \phi_0 + d\phi \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\eta = \eta_0 + d\eta \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\ell = \ell_0 + |L|^t \Delta \eta \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$n_y = n_{y0} \left(1 - \frac{1}{t_0} |L|^t \Delta \eta \right) \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t} d\phi - \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t} d\eta - \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} \right)_0 \quad \dots\dots\dots (17)$$

と近似でき、誤差の補正項を後退差分で近似し、 $t_0 + \Delta t$ 時刻において $D=0$ とすると、

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -\frac{D_0}{\Delta t} \quad \dots\dots\dots (18)$$

が得られる。(12)～(18)式を(8)式と(11)式に代入すると、 $\Delta \phi$ と $\Delta \eta$ に関する行列式が得られる。

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\phi \\ d\eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (19)$$

(19)式を解いて時刻 $t_0 + dt$ における ϕ 、 η 、 $\partial \phi / \partial t$ 、 $\partial \eta / \partial t$ の値が求められる。なお時刻 $t_0 + \Delta t$ における誤差補正項は次式で算出する。

$$D = D_0 + \Delta t \left(\frac{\partial D}{\partial t} \right) \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 $\partial D / \partial t$ の値は、 $t_0 + \Delta t$ における諸量の値を用いて、

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right\} + g\eta \quad \dots\dots\dots (21)$$

で算出する。

初期条件は、時刻 $t = 0$ において、流体は完全に静止しているものとして、 $\phi = \eta = 0$ 、

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0, \quad D = 0 \quad \text{とする。}$$

3.2 計算結果

流入する土石流を、高い壁とみなし、 $dX_p(t)/dt$ ：一定で計算を実施したところ、壁近傍で最高水位となり孤立波を形成することができなかった。そこで、孤立波を作り出せるピストンを導入して計算を実施した。ピストンの運動を与える式は、

$$X_p(t) = X_0 \tanh [w(t - t_0)] \quad \dots\dots\dots (22)$$

で与える。ここで、 w 、 t_0 はピストン壁の運動に関する係数である。ピストンの最大速度 (v_0) と最大波高 (A) の間には次の関係がある。

$$A = v_0 \sqrt{\frac{h}{g}} \quad \dots\dots\dots (23)$$

v_0 を、実験で求められた土石流流速とすると、図-15のような結果が得られた。実験で得られた波高の方が大きく流下につれて波高が減少しまだ十分満足できるものではないが、その傾向はある程度説明できた。

ただし、孤立波発生ピストン関数の諸量としては、 $X_0 = 0.6172$ 、 $w = 0.6481$ 、 $t_0 = 4.5$ をとっている。

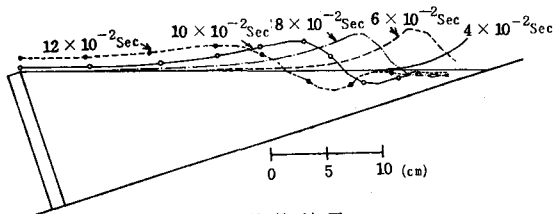


図-15 計算結果

参考文献

- 1) 瀬尾克美, 水山高久, 上原信司; 砂防ダムによる土石流の制御に関する実験的研究, 新砂防 129, 36 - 2 昭和 58. 9
- 2) 河西 基; 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, 1984年2月, pp 819 - 826
- 3) Nakayama, T; Boundary Element Analysis of Nonlinear Water Wave Problems; International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 19, 1983, pp 953 - 970