

崩壊土塊の影響を考慮した段波の数値解析法

鳥取大学大学院 学生員 ○梶川 勇樹
鳥取大学工学部 フェロー 道上 正規
筑波大学農林工学科 正会員 宮本 邦明

1. はじめに

本研究は、大規模崩壊土砂が水域に突入することによって発生する段波の形成過程について、水域突入後の土塊と水との相互作用を考慮した二層流数値モデルを開発することを目的としている。ここでは相互作用として抗力を導入し、1 次元モデルを作成し、土塊突入実験¹⁾の再現計算を行って比較検討をしたものである。

2. 支配方程式

静水圧分布を仮定し、図-1 に示すように水域を上層、崩壊土塊を下層とした二層流を考え、運動方程式及び連続式を以下のように表す。崩壊土塊の構成則として江頭・宮本らの研究成果²⁾を用い、段波の形成過程の数値計算法としては、土砂の進入を河床の上昇により表現し波を発生させる計算法³⁾をもとに、土塊と水との相互作用による抗力を加えて計算を行った。

<連続式>

$$\text{上層} \quad \frac{\partial(\eta_1 - D_2)}{\partial t} + \frac{\partial M_1}{\partial x} = 0 \quad ①$$

$$\text{下層} \quad \frac{\partial D_2}{\partial t} + \frac{\partial M_2}{\partial x} = 0 \quad ②$$

<運動方程式> ※抗力(形状抵抗)は先端部のみで考慮する。

$$\text{上層} \quad \frac{\partial M_1}{\partial t} + \beta_1 \frac{\partial}{\partial x}(u_1 M_1) = -g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \frac{1}{\rho_1} F D \quad ③$$

$$\text{下層} \quad \frac{\partial M_2}{\partial t} + \beta_2 \frac{\partial}{\partial x}(u_2 M_2) = -g D_2 \left\{ \alpha \frac{\partial D_1}{\partial x} + \frac{\partial D_2}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \right\} - \frac{1}{\rho_2} (\tau_0 + F D) \quad ④$$

但し、添字の 1, 2 はそれぞれ上層(水)、下層(土塊)を示す。

FD : 形状抵抗 h : 水深 η_1 : 静水面からの水位変化量 D_2 : 土塊の流動深

$D_1 (= \eta_1 + h - D_2)$: 全水深 M : 流量フラックス ρ_1, ρ_2 : 上層及び下層の密度

$\alpha (= \rho_1 / \rho_2)$: 密度比 τ_0 : 下層の底面せん断力

また、先端部に働く形状抵抗 FD を次式で示す⁴⁾。

$$FD = \frac{1}{2} C_D \rho_1 (u_2 - u_1)^2 \delta_m \quad ⑤$$

C_D : 抗力係数

δ_m : 先端部でのメッシュ毎の土塊流動深の差

これらの式を Leap-Frog scheme により差分化し数値解析を行った。

3. 水域突入 1 次元モデル

水域突入 1 次元モデルとして図-3 に示すように、土塊を 40° の斜面上に設置し、斜面を流下後に 20° の勾配をもつ水域に突入するモデルについて数値解析を行った。計算条件として土塊は乾燥状態であり、その他の材料特性を、内部摩擦角 $\phi_s = 36.86^\circ$ 、砂礫の密度 $\sigma = 2.65 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ 、粒子濃度 $C = 0.6$ 、粒径 $d = 0.02 \text{ m}$ とし、抗力係数 $C_D = 2.0$ 、土塊の到達域より沖での底面のマニングの粗度係数を $n = 0.01$ 、離散間隔を $\Delta x = 0.1 \text{ m}$ 、 $\Delta t = 0.005 \text{ sec}$ とした。

図-4 に計算開始から 1.5、2.5 sec 後の計算結果を示す。まず上層部の水の動きに着目すると、 $t = 1.5 \text{ s}$ 後に土塊の突入により持ち上げられた水は、 $t = 2.5 \text{ s}$ 後に土塊の前方に流れ落ち、段波が形成されている。また水深が大きくなることによって、土塊の流下速度よりも大きな波速の段波が生じている。次に土塊の動きに着目すると、 $t = 1.5 \text{ s}$ では水域に突入した土塊が流下を続け、 $t = 2.5 \text{ s}$ 後に土塊前面に働く形状抵抗と水深が大きくなることによる圧力の増加により、先端部の流下速度が小さくなり、盛り上がり形成され始めていることが分かる。

図-5 に、このモデルで形状抵抗を考慮しない場合 ($C_D = 0.0$) との土塊の最終体積形状の比較図を示す。この図より、形状抵抗を考慮した場合には考慮しない場合に比べ土塊先端の到達距離が短くなり、堆積厚が若干大きくなる傾向にあるものの、それらの違いに大きな差は認められない。このことから、本二層流数値モデルでの水域突入後の土塊の停止は、形状抵抗よりも土塊が水域に突入することによる圧力勾配の減少に大きく依存していると考えられる。

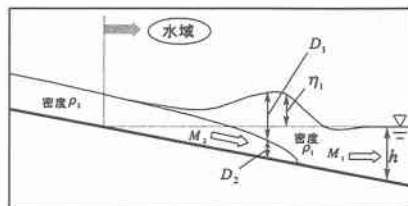


図-1 変数の説明

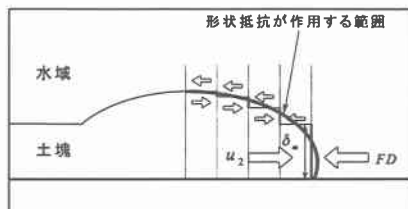


図-2 土塊先端部の形状

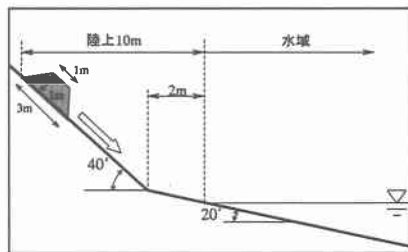


図-3 水域突入 1 次元モデル

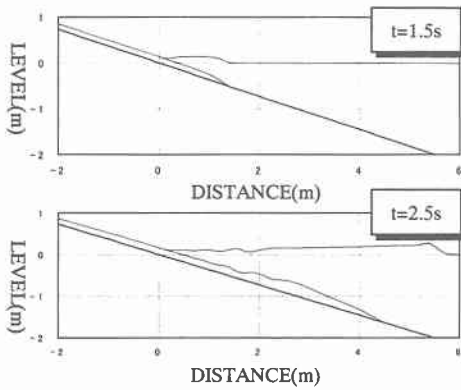


図-4 計算結果

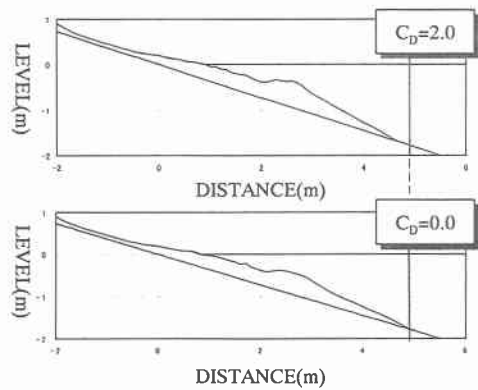


図-5 最終体積形状の比較

4. 土塊突入実験の再現計算

土塊突入実験¹⁾は、 42° の斜面上に、粒径5mmの乾燥砂からなる有限土塊を三角形(底辺83.3cm高さ25cmの二等辺三角形)に設置し、水深 h が一定($h=40$ cm)な水槽内へ流入させることにより行われた。この実験に対して、土塊の材料特性を内部摩擦角 $\phi_s=36.86^\circ$ 、砂礫の密度 $\sigma=2.65$ (g/cm³)、粒子濃度 $C=0.6$ とし、土塊の流下距離 $L(=1, 2\text{m})$ 、砂礫の粒径 $d(=0.5, 1.0, 2.0\text{cm})$ 、及び抗力係数 $C_D(=2, 10)$ をそれぞれ変化させ再現計算を行った。

再現計算における水域突入時の速度は、図-6、7の横軸から分かるように流下距離を変化させても大きく変わらず、粒径の違いによりその差が大きく表れ、粒径が大きくなるほど流入速度は小さくなる。また、実験結果と実験に対応する粒径の計算結果とを比較すると、計算結果が実験結果より大きい結果となった。

図-6に、最大波高 $H_{\max}$ と土塊の流入速度 V との関係を示す。縦軸は最大波高 $H_{\max}$ を水域突入直前の土塊の厚さ D で除し無次元化している。図に示す2つの曲線は、先端部の角度 30° と 45° の剛体による実験結果の近似曲線²⁾を表している。土塊の突入実験との流入速度に関する比較の問題を除けば、流入速度と最大波高との関係は、剛体実験及び土塊の突入実験の結果とも、良く説明していることが分かる。また、粒径を一定にして抗力係数の違いによる最大波高の変化を見ると、流入速度が小さい時は、抗力係数の大小による最大波高の変化は小さいが、流入速度が大きくなるほど、抗力係数が大きくなるにつれ最大波高も大きく表れる。

図-7に、波速 C と土塊の流入速度 V との関係を示す。この図より、実験結果は計算結果よりも波速がやや遅いが、土塊の流入速度 V には依存せず、ともにほぼ長波の波速に近い値となっていることが分かる。

5. おわりに

本研究では、土塊の水域突入に伴う段波の発生過程について、抗力を考慮に入れて二層流数値モデルを作成し数値解析を行った。その結果、抗力そのものは土塊の運動に大きな影響を与えず、水域に突入することによる圧力勾配の減少に大きく依存していた。また、段波の形成過程については、土塊の流入速度が大きくなるほど抗力の影響が表れていた。今後は、両層間の相互作用を種々考慮に入れて土塊の水域突入後の運動と、段波の形成過程を調べていきたい。

参考文献

- 1) 道上ら(1997)：土塊が水域に突入することによる段波の形成過程に関する実験的研究、砂防学会研究発表会概要集、pp.190-191。
- 2) 江頭・宮本・伊藤(1997)：掃流砂量に関する力学的解釈、水工学論文集, vol. 41, pp789-800。
- 3) 道上ら(1995)：地滑りによる貯水池内の波の形成に関する研究、第47回中支, pp167-168。
- 4) 玉井信行(1980)：密度流の水理、新体系土木工学, vol. 22, pp.152。

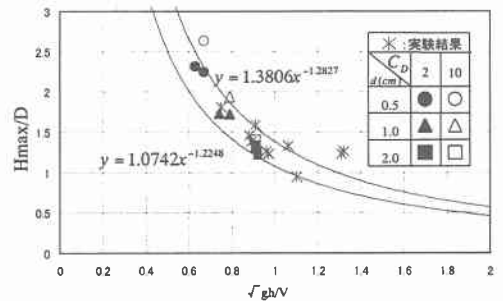


図-6 最大波高と流入速度の関係

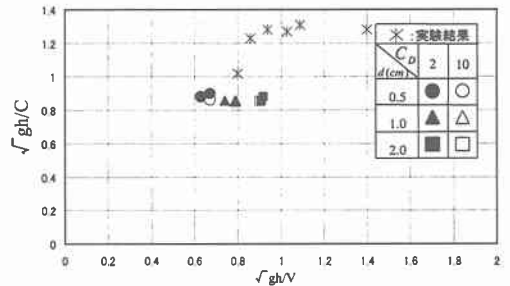


図-7 波速と流入速度の関係