

流体モデルに基づく流下土砂の構造物に作用する荷重に関する数値計算

小山内信智 (国土交通省 国土技術政策総合研究所)  
 内田太郎 (国土交通省 国土技術政策総合研究所)  
 ○武蔵由育 (八千代エンジニアリング株式会社)

1 はじめに

崩土が構造物に衝突する際に構造物に作用する荷重を推定することは、構造物の安定性を評価する上で重要である。崩土が構造物に作用する力は実験により検討され、崩土の流速、流動深、密度によって決まることが指摘されてきた(内田ら、2006)。崩土の流速や到達範囲については、崩土を質点として扱うモデルが提案されているが、この方法では流動深の変化を表現することは出来ない。一方、近年提案されてきた崩土を流体として扱うモデルや、個別要素法によるモデルでは、流速、流動深の変化が算出できることが明らかにされてきた。しかし、これらのモデルを崩土が構造物に作用する荷重算出に用いられた例はない。

そこで、本研究は、構造物に崩壊土砂が衝突した場合に作用する荷重の算出方法を確立することを目的とし、崩土を流体として取り扱う数値計算モデルを用いて、崩壊土砂の流下・衝突実験による流下中の形状と衝撃力を再現したものである。

2 崩土を流体として扱うモデル

流体の連続式および運動方程式はそれぞれ式(1)、(2)で表される。ここに、 $h$ : 流動深、 $Q$ : 流量、 $\beta$ : 運動量補正係数、 $\tau_{0i}$ : 底面せん断力、 $H$ : 土塊表面の標高、

$\rho_m$ : 土塊の平均質量密度である。

また、江頭・宮本ら(1997)は、崩土と同様に砂礫粒子を高濃度に含む土石流の構成則をエネルギー保存則から求め、式(3)~(9)で表している。ここに、 $p$ : 圧力、 $\tau$ : せん断応力、 $p_s$ : 準静的な圧力、 $\tau_s$ : 固体摩擦応力、 $p_d$ : 粒子の衝突に起因する圧力、 $\tau_d$ : 粒子の衝突に起因するせん断応力、 $p_w$ : 間隙流体が受け持つ圧力、 $\tau_f$ : 流体相がせん断を受けることにより生じるせん断応力、 $\phi_s$ : 内部摩擦角、 $e$ : 反発係数、 $d$ : 粒子相の代表粒径、 $c_s$ : 堆積層の粒子濃度、 $k_f$ : 係数(0.16~0.25)、 $k_d$ : 係数(0.0828)である。道上・宮本ら(1998)は、この土石流の構成則を崩土の運動に適用しており、同様の取り扱いが可能であることを示している。

本研究では、道上・宮本らの研究成果をもとに、式(1)、式(2)をスタッガード格子を用いた有限体積法により差分化して数値計算を行う。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{-----(1)}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \beta \frac{\partial uQ}{\partial x} = -gA \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{A \tau_{0i}}{h \rho_m} \quad \text{-----(2)}$$

$$p = p_s + p_d + p_w \quad \text{-----(3)}$$

$$\tau = \tau_y + \tau_d + \tau_f \quad \text{-----(4)}$$

$$\tau_y = p_s \tan \phi_s \quad \text{-----(5)}$$

$$p_s = \alpha(p_s + p_d), \quad \alpha = (c/c_s)^{1/5} \quad \text{-----(6)}$$

$$p_d = k_d \sigma e^2 c^{1/3} d^2 \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad \text{-----(7)}$$

$$\tau_d = k_d \sigma (1 - e^2) c^{1/3} d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad \text{-----(8)}$$

$$\tau_f = k_f \rho \frac{(1 - c)^{5/3}}{c^{2/3}} d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad \text{-----(9)}$$

3 擁壁部の取り扱い

擁壁地点*i*断面では、擁壁の上流側の*i-1/2*断面の水位が、擁壁天端標高より低く越流しない場合と高く越流する場合とに分けて運動を考察する。越流しない場合は、擁壁地点*i*断面において、 $Q_i = 0$ とし、連続式により流動深の変化を算出する。この場合、運動方程式が(10)のように表されることから、衝撃力は式(11)のように表される。

一方、越流する場合は、擁壁部に作用する圧力を図-1に示すように考え、運動方程式を式(12)のように取り扱う。ここで、 $A_y$ は擁壁台上流面の面積を示す。 $A_i^n$ は擁壁直上流部の流積を表し、 $A_i^n = 1/2 \cdot \{(A_{i+1/2} + A_y) + A_{i-1/2}\}$ である。式(12)における擁壁に作用する圧力から、作用する衝撃力は式(13)で表される。

$$\frac{-Q_i^n}{\Delta t} + \beta \frac{-u_{i-1/2}^n Q_{i-1}^n}{\Delta x} + gA_i^n \frac{-h_{i-1/2}^n}{\Delta x} + \frac{F/\rho_m}{\Delta x} = - \left( \frac{A \tau_{0i}}{h \rho_m} \right)_i \quad \text{-----(10)}$$

$$F = \left\{ \frac{Q_i^n}{\Delta t} + \beta \cdot u_{i-1/2}^n Q_{i-1}^n + gA_i^n h_{i-1/2}^n - \left( \frac{A \tau_{0i}}{h \rho_m} \right)_i \right\} \rho_m \quad \text{-----(11)}$$

$$\frac{Q_i^{n+1} - Q_i^n}{\Delta t} + \beta \frac{u_{i+1/2}^n Q_i^n - u_{i-1/2}^n Q_{i-1}^n}{\Delta x} + gA_i^n \frac{(h_{i+1/2}^n + h_y) - h_{i-1/2}^n}{\Delta x} + gA_i^n \frac{z_{i+1/2}^n - z_{i-1/2}^n}{\Delta x} + A_y \frac{1/2 \cdot u_i^2}{\Delta x} = - \left( \frac{A \tau_{0i}}{h \rho_m} \right)_i \quad \text{-----(12)}$$

$$F = 0.5 \rho_m g A_y (2h_{i+1/2}^n + h_y) h_y + 0.5 \rho_m A_y u_i^2 \quad \text{-----(13)}$$

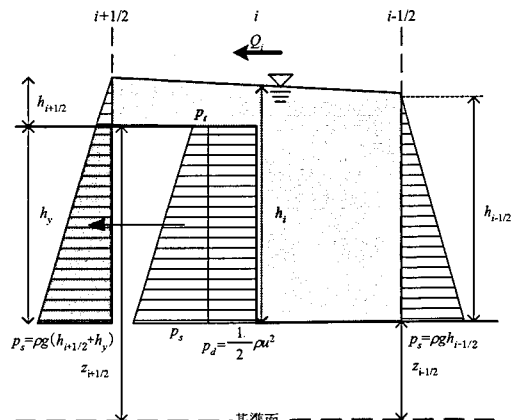


図-1 擁壁を越流する場合の圧力の取り扱い

#### 4 崩壊土砂の流下・衝突実験の再現計算

ここでは、内田ら(2006)の実験結果を用い、モデルの再現性を検討する。実験水路は、長さ 5.25m、幅 0.8m、の勾配可変水路を用いて行われた。今回再現対象とする実験に用いた試料は、砂礫(最大粒径 19mm、平均粒径 4.38mm)、礫(最大粒径 19mm、平均粒径 5.45mm)で含水率が 2~3%の自然乾燥状態の乾燥砂である。水路下流端には擁壁を模した高さ 25m の「受荷台」を取り付けており、ロードセルで衝撃力を計測している。また、ビデオ撮影により受荷台から 25cm 上流部で流動深と流速を計測している(内田ら、2006)。

図-2 に示した受荷台の無い場合の計算結果から流動深・流速が良く一致しているのが確認でき、道上ら(1998)の結果を再現できた。

次に図-3 に受荷台を設置した場合の計算結果を示す。衝撃力の変化過程を概ね再現できる結果となった。すなわち、構造物周辺を式(10)~(13)に従い計算することにより、崩壊土砂を流体とみなした数値計算モデルにより構造物への衝撃力の時間変化を再現可能であることが明らかとなった。

最後に、本研究にあたり多くのご指導を頂いた筑波大学宮本教授に記して謝意を表す。

#### (参考文献)

- 江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭 掃流砂量に関する力学的解釈、水工学論文集 第 41 巻 pp.789-800 1997  
 道上正規・宮本邦明・片嶋啓介・植村慎 土塊の運動機構と 1 次元数値計算法 水工学論文集 第 42 巻 pp.925-930 1998  
 宮本邦明 土塊の運動の 2 次元数値シミュレーション 砂防学会誌 Vol.55 No.2 pp.5-13 2002  
 内田太郎ほか 衝突時に崩壊土砂が構造物に作用する荷重に関する実験、砂防学会誌 (印刷中) 2006

表-1 再現計算ケース

ケース名			Case-1	Case-2	Case-3
実験材料			砂礫	砂礫	礫
崩土量	$V_s$	m <sup>3</sup>	0.1	0.25	0.25
斜面勾配	$\theta$	度	45.0	45.0	45.0
土粒子の密度	$\sigma$	t/m <sup>3</sup>	2.697	2.697	2.676
流下土砂濃度	$c$		0.286	0.252	0.176
堆積土砂濃度	$c_s$		0.629	0.629	0.635
内部摩擦角	$\phi_s$	度	34.8	34.8	37.2
平均粒径	$d$	mm	4.38	4.38	5.45

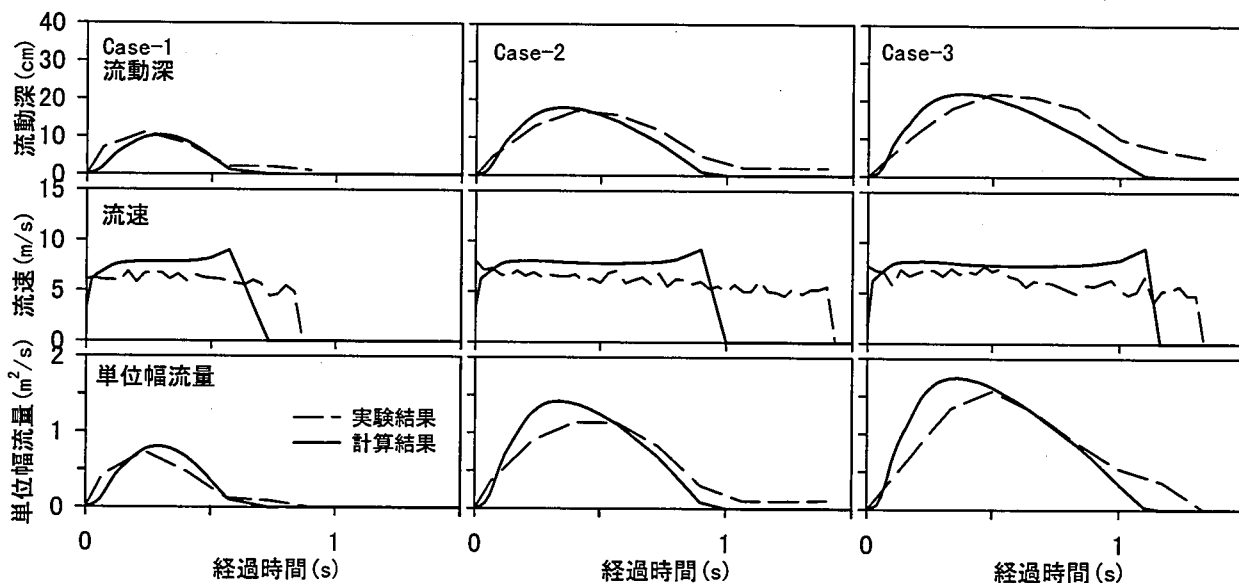


図-2 受荷台が無い場合の計算結果(受荷台から25cm地点)

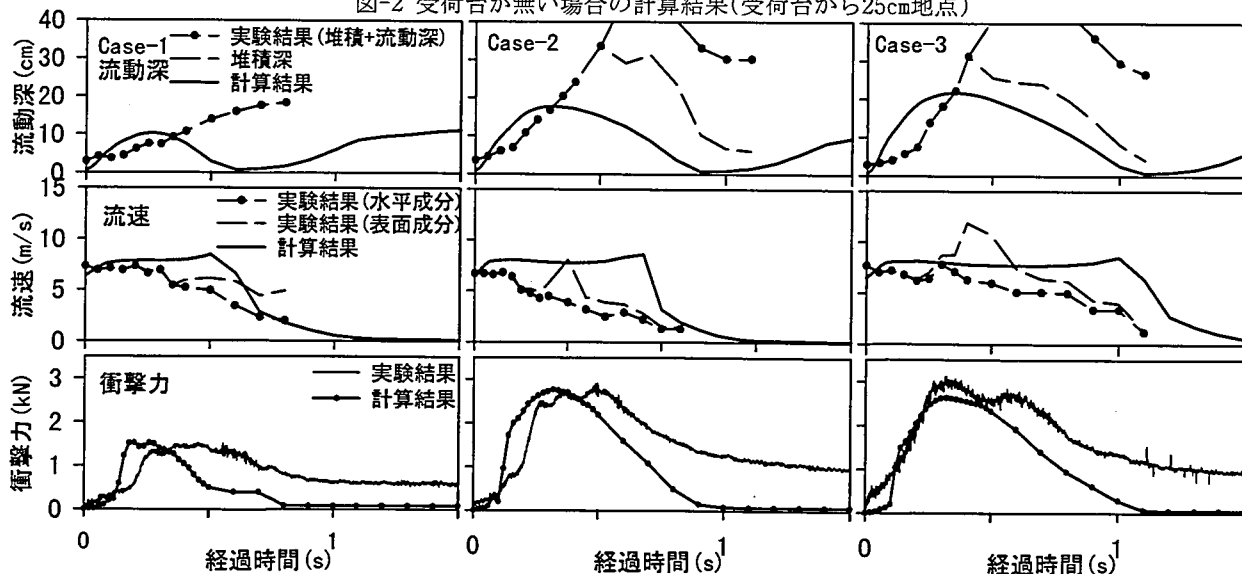


図-3 受荷台を設置した場合の計算結果