

流路等に影響される土石流氾濫の再現計算手法の研究

八千代エンジニアリング株式会社
独立行政法人 土木研究所

○井戸清雄 武蔵由育 茹瑛
三雲是宏、秋山一弥、栗原淳一

1. はじめに

土石流が氾濫する際、通常の地形であれば谷の出口から扇状に氾濫域が広がっていくことが想定されるが、近年のように河川の上流部まで土地利用が進んでいる状況では土石流の氾濫形態は氾濫域の人工的な地形改変の影響を受ける場合が多くなってきている。そのような土砂氾濫範囲の予測では、地形条件の影響を反映できる土石流氾濫シミュレーション手法の開発が求められており、大学等において非構造格子モデルを利用する研究^{1,2)}が進められている。その成果を参考に平成11年広島災害時の屋代川における住宅密集地の土砂氾濫災害³⁾及び水理模型実験結果⁴⁾の氾濫解析を実施し、通常の構造格子における氾濫解析結果より、実現象に近い結果が得られた。

このような土石流氾濫計算手法の向上は、より多くの事例を手がけることでその精度の確認、問題点の抽出が可能となるものと考え、今回は、既往の実験例から氾濫位置、氾濫形態において流路の影響を受けたものを抽出し、その結果の再現計算を実施することで計算手法の向上を図ることとした。

2. 再現計算対象概要

再現計算対象は平成元年に旧建設省土木研究所において実施された写真-1の土石流氾濫水理模型実験結果を採用した。この実験では流路による土石流氾濫状況が影響を受けており、左岸側に土砂氾濫が集中している。

表-1 水理模型実験諸元一覧表

扇状地模型	12.0 m×10.6 m
流路	深さ 10 cm×幅 20 cm
流下土砂量	240 ㍓
氾濫土砂量	170 ㍓
流出土砂量	70 ㍓
土砂平均粒径	25% フライッシュ 0.02 mm
	75% 粗粒分 3.00 mm

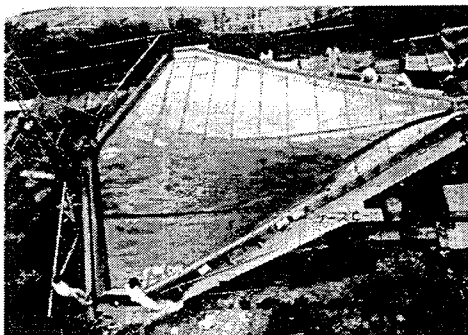


写真-1 水理実験土砂堆積状況

3. 非構造格子を用いた氾濫解析手法の検討

3.1 基礎式

土砂と水が渾然一体となった流れの運動量式および連続式は二次元平面流れ式形を用いると以下のように表される。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \beta \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_T} \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \beta \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_T} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = i \quad (3)$$

ここに、 M, N ; それぞれ x, y 方向の流量フラックスで、 $M=vh, N=vh, u, v$; それぞれ x, y 方向の平均流速、 H ; 水位で $H=ht+z_0+z_b, z_0$; 初期地盤高、 z_b ; 浸食あるいは堆積土砂厚、 g ; 重力加速度、 β ; 運動量補正係数である(土石流の場合は $\beta=1.25$ 、それ以外 $\beta=1.0$)、 τ_{bx}, τ_{by} ; 流れの流砂形態に応じた x, y 方向のせん断応力、 ρ_T ; 流れにおける水と土砂粒子の混合物の密度、 i ; 浸食あるいは堆積速度であり、侵食のとき

$$i = \delta \frac{C_\infty - C}{C_\infty - C_0} \cdot |\mu| \quad (4)$$

堆積のとき

$$i = \delta' \frac{C_\infty - C}{C} \cdot |\mu| \quad (5)$$

とする。ここで、 δ と δ' は定数であり、 C_∞ は平衡土砂濃度である。

3.2 重力項差分式の検討

式(1)、(2)は下記のように差分化して、非構造格子間の境界リンク上の x, y 方向の流量フラックスが求められる。詳細は文献^{1), 2)}に示される。

$$\frac{M_L^{n+2} - M_L^n}{2\Delta t} + M1 + M2 = g\tilde{h}_L^{n+1}(\nabla H)_x - T_x \quad (6)$$

$$\frac{N_L^{n+2} - N_L^n}{2\Delta t} + N1 + N2 = g\tilde{h}_L^{n+1}(\nabla H)_y - T_y \quad (7)$$

ここに、 M_j, N_j ; それぞれ格子辺 L の中点上で定義された x, y 方向の流量フラックス、 M_p, M_2 及び N_p, N_2 ; それぞれ式(1)、式(2)の左辺第2、第3項の移流項、 $(\nabla H)_x, (\nabla H)_y$; それぞれ格子 i と格子 j 間の水面勾配の x, y 方向成分である。

$$(\nabla H)_x = \frac{H_j^{n+1} - H_i^{n+1}}{DL} \cdot \frac{x_j - x_i}{DL} \quad (8)$$

$$(\nabla H)_y = \frac{H_j^{n+1} - H_i^{n+1}}{DL} \cdot \frac{y_j - y_i}{DL} \quad (9)$$

ここに、 H_i, H_j ; それぞれ格子 i と格子 j での水位、 $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$; それぞれ格子 i と j の重心の座標、 DL ; 格子 i と j の重心間距離である。

まず、このモデルをそのまま用いてこの計算対象に適用したところ、発散・振動により計算不能となった。武田等⁵⁾に準じて、移流項計算の際の格子中央の流量フラックスの計算方法を改良したが、谷の出口(計算最上流端)付近で氾濫してしまい、再現性は高くならなかった。

従来モデルでは、重力項の計算は式(8)、(9)のように格

子の重心間の水面勾配を x 、 y 方向の角度で割り振る方式がとられているが、この方法がその場の流れを忠実に表せないのではないかと考え、以下のような改良を検討した。

格子リンク(辺)の中央点で x 、 y 方向の水面勾配を次のように定義する。

$$(\nabla H)_x = \frac{H_{m1}^{n+1} - H_{m2}^{n+1}}{dlx} \quad (10)$$

$$(\nabla H)_y = \frac{H_{n1}^{n+1} - H_{n2}^{n+1}}{dly} \quad (11)$$

図-1で、直線 $m2-m1$ 、直線 $n2-n1$ はリンク(辺)の midpoint を通り、 X 、 Y 軸に平行な直線であり、かつ、点 $m2$ 、 $m1$ 、 $n2$ 、 $n1$ はメッシュを構成するリンク(辺)上の点である。

$$dlx = x_{m1} - x_{m2} \quad (12) \quad dly = y_{n1} - y_{n2} \quad (13)$$

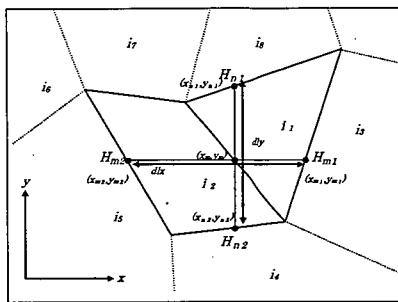


図-1 水面勾配の計算に使用する諸元

3.3 氾濫シミュレーション

重力項の計算手法を x 、 y 方向の水面勾配を直接求める方式で計算を実施したところ、図-2のような計算結果となった。堆積速度係数 δ が大きいと上流部で氾濫してしまうが、 δ を小さくすると氾濫ポイントが下流部に移動した。定性的には、実験結果に近づいた。しかし、氾濫域については、再現性が良くなく、 $\delta = 0.01 \sim 0.001$ の間で、係数を変化させたが、再現性は向上しなかった。

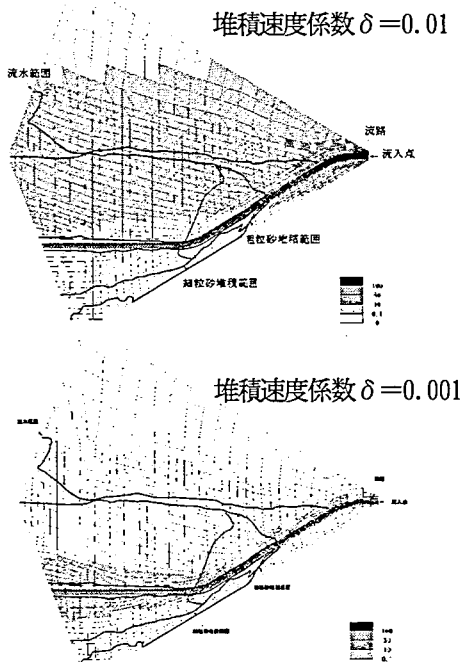


図-2 動水勾配修正後モデルによる計算結果

なお、粗度係数は $n = 0.03$ 、堆積土砂濃度 $C_s = 0.6$ 、計算時間刻み $\Delta t = 0.0001$ 秒で計算した。

3.4 河床変動モデルの検討

従来の河床変動モデル^{1), 2)}では堆積速度式により、河床変動を計算する方式となっており、土石流の堆積現象において非平衡性を重視したモデルとなっているが、一方、平衡濃度式を与えて流砂量を計算し、その収支で河床変動を計算する手法^{3), 4)}もある。そこで、その手法を本非構造格子モデル計算に適用することで河床変動を計算することとした。

土石流の濃度は高橋式によって計算しているが内部摩擦角 ϕ をパラメタとして流送能力を調整することで、かなり氾濫範囲を再現することができた。図-3に $\tan \phi = 0.25$ 、泥流の密度 $\rho_T = 1.3$ の計算結果を示す。抵抗則はマニング則で計算を行った。また、高橋・新井⁵⁾の乱流型土石流の抵抗則でも計算したが、あまり結果の差異は認められなかった。

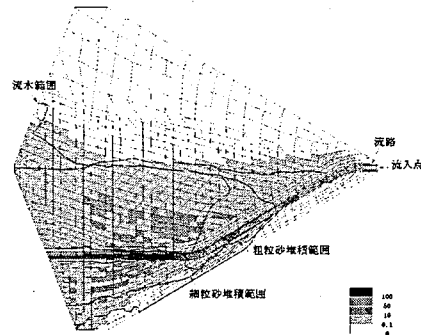


図-3 動水勾配・河床変動モデル変更後の計算結果

4. まとめ

流路を流れ、途中で氾濫した土石流の水力実験結果の再現シミュレーションを非構造格子モデルによる土石流氾濫解析手法により実施した。

しかし、従来モデル^{1)~4)}では、格子がかなり細くなったこともあり、いい再現結果を得ることができず、平面流れの重力項の差分モデル、堆積・侵食モデルを従来のものと変更して計算を行ったところ、再現結果が向上した。しかし、氾濫土砂の堆積深等については再現不十分なところが今後の課題と考えられる。

参考文献 1) 川池ら・急傾斜都市における土砂・氾濫災害の解析 京都大学防災研究所年報 第43号 B-2 2000 2) 中川ら・1999年ベネズエラのカムリグランド流域で発生した土砂災害について 京都大学防災研究所年報 第44号 B-2 2001 3) 仲野ら・住宅密集区域での土砂氾濫シミュレーション手法 平成13年度 砂防学会概要集 4) 三雲ら・複雑な地形上における泥流氾濫予測手法の機能向上に関する研究 平成17年度 砂防学会概要集 5) 武田ら・非構造格子を用いた氾濫解析に関する一考察 水工学論文集, 第17巻, 2003年2月 pp.895~900 6) 水山ら・土石流氾濫シミュレーションと模型実験による土石流災害の再現 新砂防, Vol.40, No. 3(152) 昭62.9 7) 中川ら・平成9年鹿児島県出水市針原川で発生した土石流災害について 京都大学防災研究所年報 第41号 B-2, 1998 8) 高橋・土石流の機構と対策 近未来社 p.239 2004