

ため池決壊氾濫有限要素解析手法について FEM flood analysis on small earth dams

○小嶋 創*・向後 雄二*・島田 清*・正田 大輔**・鈴木 尚登**

Hajime KOJIMA・Yuji KOHGO・Kiyoshi SHIMADA・Daisuke SHODA・Hisato SUZUKI

1 はじめに：東日本大震災を契機として、ため池決壊時のハザードマップ作成を目的とした氾濫解析手法の研究が進められている。小嶋ら¹⁾は過去の決壊事例を対象とした氾濫解析を行った。その結果、氾濫原にある別のため池や排水路がため池決壊時の氾濫流況に大きな影響を与えることがわかった。そこで本研究では、非構造格子を用いてこれらの地物の形状を精度よく表現することを目的として、ため池決壊氾濫解析への有限要素法の適用を検討する。ここでは、構築した解析手法(以下、本手法)の検証のため、直線水路における段波の解析、および二次元ダム破壊流れの解析を行った結果を報告する。

2 基礎方程式と離散化手法：浅水流方程式を用いた平面二次元非定常流解析を行う。重み付き残差法によって積分形式で表された浅水流方程式を式(1)~(3)に示す。式(3)の左辺第4項は Gauss の発散定理によって導かれた流量フラックスの境界積分項であり、この項に各時間の決壊氾濫流量を入力する。また、この項を0とした場合には、解析領域の境界を通過する流量フラックスなしの条件(以下、壁条件)が課される。

$$\text{運動方程式}(x\text{方向}): \int_A w \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \right\} dA = 0 \quad (1)$$

$$\text{運動方程式}(y\text{方向}): \int_A w \left\{ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \right\} dA = 0 \quad (2)$$

$$\text{連続式}: \int_A w \frac{\partial H}{\partial t} dA - \int_A hu \frac{\partial w}{\partial x} dA - \int_A hv \frac{\partial w}{\partial y} dA + \int_S \{wF_x, wF_y\} \cdot n dS = 0 \quad (3)$$

ここに、 t :時間、 u, v : x 方向、 y 方向の流速、 H :水位(水面標高)、 h :水深($=H - Z_B$; Z_B は水路床標高)、 g :重力加速度、 n :マンニングの粗度係数、 w :重み関数、 A :解析領域、 S :解析領域の境界、 F_x, F_y :領域に流入出する流量フラックス($=uh, vh$)、 n :領域境界の法線ベクトルである。

式(1)~(3)を、空間方向には三角形一次要素を用いたガラーキン法、時間方向には2段階陽的解法²⁾を用いて離散化した。計算の安定化のため、質量行列に混合質量行列を用いることとし、付加される数値粘性の大きさをランピングパラメータ e ($0 \leq e < 1$)によって調整した²⁾。

3 直線水路における段波の解析：急激な水位変動を伴う流れの典型的な例として、直線水路を伝播する段波の挙動を解析した。解析領域は延長(x 方向)10.0 m、幅(y 方向)0.80 mの矩形領域とした。 $\Delta x=0.05$ m、 $\Delta y=0.1$ mとして規則的に節点を配置し、解析領域を三角形要素に分割した。総節点数は1809個、総要素数は3200個である。水路床は水平($Z_B=0.0$ m)とし、領域の境界は全て壁条件とした。初期水位は、 $x=5$ mを境として上流側に $H=1.0$ m、下流側に $H=0.5$ mを与えた。計算時間刻みは $\Delta t=0.005$ s、ランピングパラメータは $e=0.80$ とした。また、ここでは底面摩擦項は無視($n=0.0$)して解析した。

解析結果の水面形($t=1.0$ s)を Fig.1 に示す。図中には解析初期の水面形を破線で、理論値³⁾の水面形を実線で併記した。解析結果は理論値と概ね一致しており、本手法によって急激な水位変化を伴う流れが解析できることが確認できた。

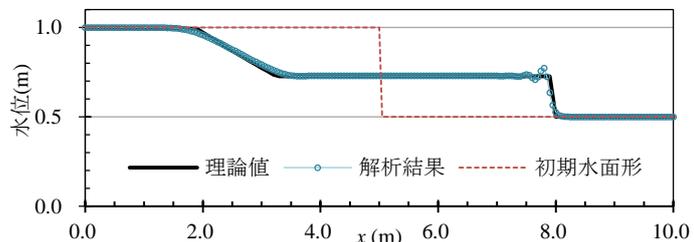


Fig.1 段波の解析結果($t=1.0$ s, 水面形)

4 二次元ダム破壊流れの解析：氾濫解析においては、氾濫流が既に到達している(ウェット)領域から未到達(ドライ)の領域へと拡大する挙動を再現する必要がある。本手法がこの挙動をどの程度忠実に再現できるかを検証するため、秋山ら(2002)⁴⁾による二次元ダム破壊流れの実験の再現解析を試みた。実験装置は上流側の貯水槽部と下流側の氾濫原部からなるアクリル製の水槽で

*東京農工大学大学院 *Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

** (独)農研機構 農村工学研究所 **National Institute for Rural Engineering

キーワード：水利構造物・有限要素法・ため池氾濫解析

ある。貯水槽部と氾濫原部の境界には厚さ 0.06 m の隔壁が設けられている。隔壁に設置された幅 0.50 m のゲートを瞬時に開放することで、あらかじめ貯水槽部に貯留した水(初期貯水深 0.40 m)を氾濫原部に流出させる。

解析領域とその要素分割を Fig.2 に示す。 $\Delta x = \Delta y = 0.05$ m を目安として規則的に節点を配置し、領域を三角形要素に分割した。総節点数は 5461 個、総要素数は 10524 個である。水路床は水平($Z_B = 0.0$ m)とし、粗度係数は全領域 $n = 0.01$ とした。領域の境界は全て壁条件とし、貯水槽部には初期水位 $H = 0.40$ m を与えた。計算時間刻みは $\Delta t = 0.001$ s、ランピングパラメータは $e = 0.90$ とした。

また、ウェット状態の節点とドライ状態の節点を区別するため、秋山らの解析手法に倣って以下 3 点の処理を行った。(1) 氾濫原部には初期水深として $h_{min} (= 0.0008$ m) を与える。(2) $h < h_{cr} (= 0.001$ m) となった節点では底面摩擦項を無視して解析する。(3) $h \leq h_{min}$ となった節点では $h = h_{min}, u = v = 0$ とする。

解析結果の水面形($t = 1.0$ s)をワイヤフレーム図として Fig.3 に示す。また、 $t = 0.50$ s, 0.77 s, 1.50 s における氾濫原部の浸水域を Fig.4 に示す。Fig.4 には秋山らによる実験結果の浸水域を赤の実線で示した。解析結果の浸水域はゲート直下から隔壁に沿って横断方向へと拡大しており、実験結果のそれとは形状が異なった。そこで、隔壁による摩擦の影響を考慮し、隔壁上の流速を 0 として再解析したが、結果は大きく変わらなかった。

二次元ダム破壊流れでは、ゲートを通る水の慣性によって下流方向に向かう流れが卓越するが、本解析ではこの効果が適切に評価できていないものと考えられる。ゆえに、ゲート直下の水面勾配に従い、浸水域は横断方向へと拡大した。ゲート部の流速が下流の氾濫原部に与える効果を正しく表現するためには、本手法に風上化スキームを導入することが必要と考えられる。

5 おわりに: 非構造格子によるため池決壊氾濫解析を行うため、有限要素法を用いた解析手法を構築した。本手法は、直線水路における段波の解析では、理論値と概ね一致する解析結果が得られたが、二次元ダム破壊流れの解析では、浸水域の形状が実験結果とは異なった。実際のため池決壊事例への適用に向け、風上化スキームの導入等により解析精度を向上させることが今後の課題である。

引用文献:

- 1) 小嶋ら(2014): ため池の決壊を想定した氾濫解析における地形標高データ解像度の影響, 平成 26 年農業農村工学会大会講演会要旨集, pp.806-807.
- 2) 川原(1986): 有限要素法流体解析, 日科技連.
- 3) 本間・安芸(1962): 物部水理学, 岩波書店.
- 4) 秋山ら(2002): 非構造格子を用いた有限体積法に基づく 1 次および 2 次精度平面 2 次元洪水流数値モデル, 土木学会論文集 No.705/II-59, pp.31-43.

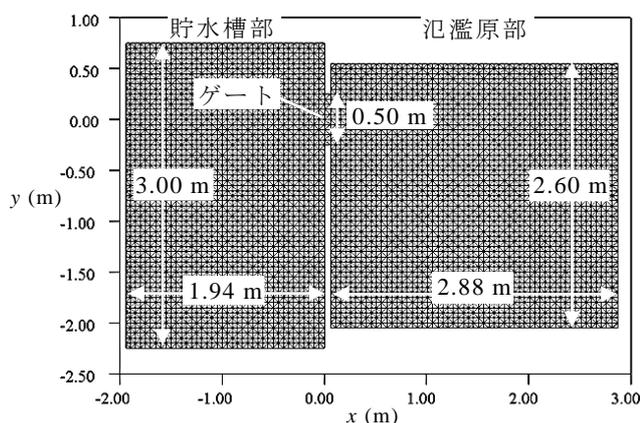


Fig.2 二次元ダム破壊流れ解析領域

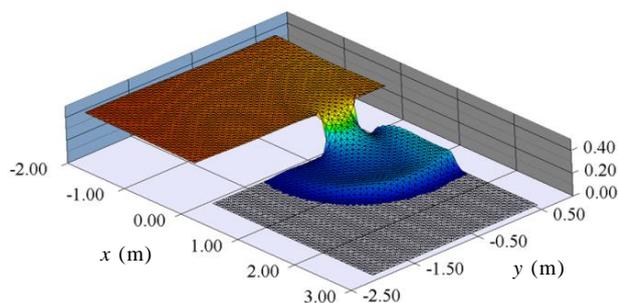


Fig.3 二次元ダム破壊流れ解析結果($t = 1.0$ s, 水面形)

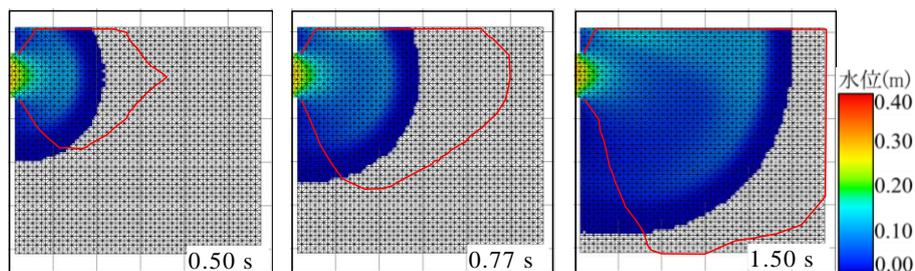


Fig.4 二次元ダム破壊流れ解析結果浸水域(赤の実線は秋山ら(2002)の実験結果)