

幹線水路溢水時における隣接水路周辺地盤の洗掘シミュレーション

Numerical simulation of scour around the adjacent irrigation canal when main canal overflows

○豊田辰方*・小林範之*

Tatsunori TOYOTA, Noriyuki KOBAYASHI

1 はじめに

仙台市東部は平坦な地形をなした水田地帯が広がっているが、令和元年東日本台風(台風第 19 号)に伴う被害が発生し、幹線水路からの溢水により隣接道路沿いの用水路周辺地盤が洗掘され、用水路が破壊される事例が確認された。本研究では、非連続体である土石の挙動を解析する DEM と自由表面を有する流体を解析できる MPS 法をカップリングした 2D-DEM-MPS 法に簡易侵食モデルを導入し、用水路周辺地盤の洗掘現象をシミュレートした。

2 解析手法

2.1 DEM-MPS 法

DEM-MPS 法の流体要素と土要素の運動方程式を次式となり、MPS 法の支配方程式である Navier-Stokes 式を基本に圧力勾配項、粘性項、外力項で構成されている。

$$\text{流体要素} \quad \frac{D\mathbf{u}_l}{Dt} = \left(-\frac{1}{\rho_l} \nabla p_l + \nu_{mix} \nabla^2 \mathbf{u}_l \right)_l + \left(-\frac{1}{\rho_l} \nabla p_l + \nu_{mix} \nabla^2 \mathbf{u}_l \right)_s + g \quad (1)$$

$$\text{土要素} \quad \frac{D\mathbf{u}_s}{Dt} = \left(-\frac{1}{\rho_s} \nabla p_s + \nu_{mix} \nabla^2 \mathbf{u}_s \right)_s + \left(-\frac{1}{\rho_s} \nabla p_s + \nu_{mix} \nabla^2 \mathbf{u}_s \right)_l + (g + \mathbf{a}_{DEM}) \quad (2)$$

ここで、 ρ : 密度、 \mathbf{u} : 速度ベクトル、 p : 圧力、 ν_{mix} : 混相流の動粘性係数、 \mathbf{a}_{DEM} : DEM で求めた要素間作用力 F_p による加速度ベクトル。なお、添え字 l, s はそれぞれ液相、固相を表している。

2.2 侵食モデル

本研究では、Navier-Stokes 式に式(3)に示す簡易侵食モデルを導入し、洗掘現象を表現する。侵食速度式から求められた侵食深さが固定要素粒径を超えると剥離し、可動要素となることで侵食を表す。

$$E = \begin{cases} \alpha \left(\frac{u_d^2}{u_{th}^2} - 1 \right)^\gamma & u_d \geq u_{th} \\ 0 & u_d < u_{th} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 E : 侵食速度、 α : 速度の次元を持つパラメータ、 γ : 無次元のパラメータ、 u_d : 底面付近のせん断方向の流速、 u_{th} : 剥離が起こる限界の流速(以下限界せん断流速)。

3 解析条件

解析モデルを図 1 に示す。13,917 個の土要素を用いて地盤、道路、用水路をモデル化し、幹線水路から流体要素を流出させる。すべての要素径は 2cm、土要素および流体要素の密度は、2.65g/cm³、1.00g/cm³ と

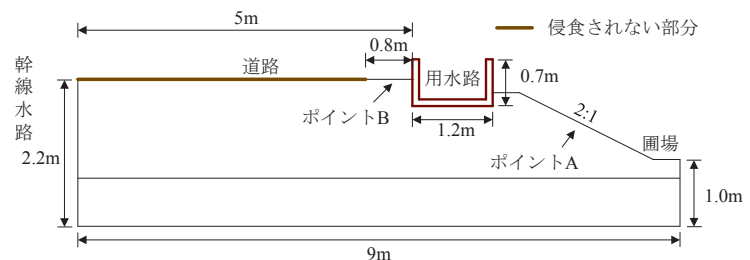


図 1 解析モデル

*愛媛大学大学院農学研究科: Graduate School of Agriculture, Ehime Univ. キーワード: 侵食, MPS, 混相流

した。解析ケースを表 1 に示す。

4 解析結果と考察

図 2 に、累積剥離要素数の経時変化を示す。溢水流量が大きく、限界せん断流速が小さいほど剥離量が多い。用水路を越流すると剥離要素数が急激に増加するが、その後の増加傾向に溢水流量による差はほとんどないことがわかる。

図 3 に、限界せん断流速が同じであるケース 4,8 の水路右側（ポイント A）の洗堀状況を示す。ケース 8 では、剥離開始位置から圃場方向へのみ洗堀が進行していくが、ケース 4 では剥離開始位置から用水路側へも洗堀が進行していき、その幅は約 8.7cm である。また、ケース 8 は斜面表層のみが洗堀されていくが、ケース 4 では円弧を描くように深い位置まで洗堀されている。剥離はせん断方向の流速に起因するため、用水路越流後の流体要素の速度が大きいほど洗堀が起こりやすい。さらに、洗堀が始まると鉛直方向の流速も影響を及ぼし、用水路からより遠くまで流体が到達する方が洗堀されやすくなる。

図 4 に水路左側（ポイント B）における累積剥離要素数の経時変化を示す。同じ限界せん断流速であれば剥離の個数に大きな差は見られないが、ケース 1, 3, 5, 6 ではそれぞれ 10s, 16s, 19s, 17s 付近で急激に剥離要素数が増加する。これは用水路壁前面で循環する流れが発生し、剥離した土要素が浮き上がり、削られた地盤が露出するため勾配ができた表面をさらに剥離させるためだと考えられる（図 5）。また、ポイント B の剥離は、時間の経過とともに左側、中心部、右側の順に洗堀されるが、最終的には用水路に近い右側が最も深く洗堀され、実際の被害と近い状況になった。

5 おわりに

今回は、用水路は連続しており移動がないものとして解析しているため、用水路周辺の土の侵食が大きくならなかった。今後は、用水路を可動するものとしてモデル化し、さらに解析を行う。

参考文献：[1] 越塚誠一(2005)：粒子法，丸善。[2] 後藤仁志・五十里洋行・谷岡弘国・山本和久(2008)：粒子法による河川堤防裏の裏面の数値シミュレーション，水工学論文集，Vol.52，979-983。[3] Fujisawa, K. (2008): Failure of an Embankment due to Overflow, Doctoral dissertation, Kyoto University.

表 1 解析ケース

ケース	溢水流量 (m ³ /s)	限界せん断流速 (m/s)
1	0.314	0.2
2	0.314	0.3
3	0.314	0.4
4	0.314	0.8
5	0.196	0.2
6	0.196	0.3
7	0.196	0.4
8	0.196	0.8

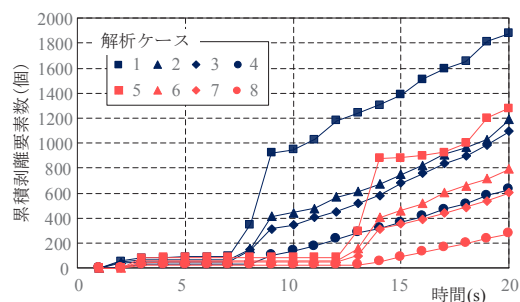


図 2 累積剥離要素数の経時変化

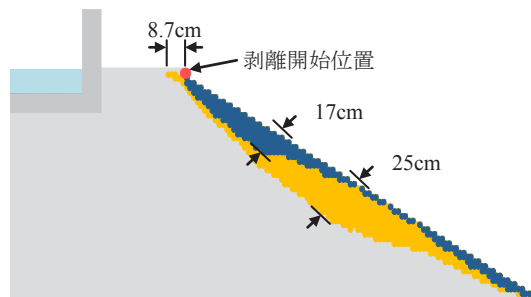


図 3 水路右側斜面の洗堀状況

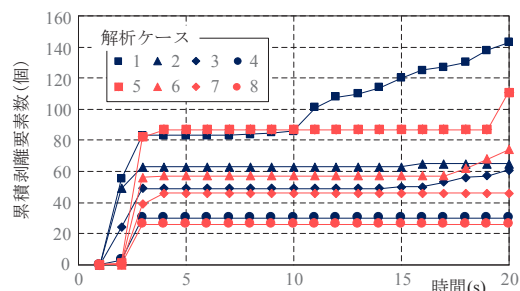


図 4 ポイント B の累積剥離要素数の経時変化

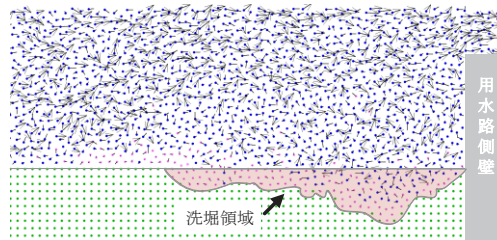


図 5 ポイント B の流速ベクトル