

京都大学工学部 学生会員 ○新井 智之
 京都大学大学院工学研究科 正会員 五十里 洋行
 京都大学大学院工学研究科 正会員 後藤 仁志

1. はじめに

河川堤防の補強工を行う上で、越流破堤現象への理解は重要であり、昨今は数値計算によるシミュレーションが盛んに行われている。本稿では、粒子法の一つである MPS 法の弾塑性モデルを用いて、堤体越流侵食過程の流体-弾塑性体連成解析を行った。

2. 数値解析の概要

本稿では、流体と地盤の連成解析を行う。流体の解析には標準的な MPS 法¹⁾を用い、地盤は MPS 法の弾塑性体モデルに塑性計算を組み込んで計算する。また、侵食モデル²⁾を導入する。

液相粒子および固相粒子の運動方程式は以下のよう書ける。

$$\rho_l \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p_l + \mu_l \nabla^2 \mathbf{v}_l + \rho_l \mathbf{g} + \mathbf{F}_{lsp} \quad (1)$$

$$\rho_s \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \delta_{ep} (\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}) + \rho_s \mathbf{g} + \mathbf{F}_{colp} - \mathbf{F}_{lsp} \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_{lsp} = (-\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u})_{ls} \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{u} : 流速ベクトル、 p : 圧力、 ρ : 密度、 μ : 粘性係数、 \mathbf{g} : 重力加速度ベクトル、 \mathbf{F}_{colp} : 固相粒子間衝突力ベクトル（衝突力は個別要素法型のバネとダッシュポットによって計算）、 \mathbf{F}_{lsp} : 液相-固相間相互作用力ベクトル、添字 l,s はそれぞれ液相、固相を示す。 δ_{ep} は、弾塑性計算をする場合のみ 1 となるクロネッカーのデルタである。 $\boldsymbol{\sigma}$ は、応力テンソルであり、

$$\boldsymbol{\sigma} = \lambda \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}_e) \mathbf{I} + 2\mu \boldsymbol{\varepsilon}_e \quad (4)$$

と書ける。ここで、 $\boldsymbol{\varepsilon}_e$: 弾性ひずみテンソル、 $\text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon})$: 体積ひずみ、 λ, μ : ラメの定数である。以上の式における微分演算子は、MPS 法の標準的な粒子間相互作用モデル¹⁾を用いて離散化される。

塑性ひずみテンソルは、現在の応力場から適当な降伏関数によって降伏判定を行い、降伏条件を満足した場合のみ、以下の式によって求める。

$$\{d\boldsymbol{\varepsilon}_p\} = d\lambda \left\{ \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\} = \frac{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\}^T [D_e] \{d\boldsymbol{\varepsilon}\}}{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\}^T [D_e] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\}} \left\{ \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_e^{k+1} = \boldsymbol{\varepsilon}^{k+1} - \boldsymbol{\varepsilon}_p^{k+1} = \boldsymbol{\varepsilon}^{k+1} - (\boldsymbol{\varepsilon}_p^k + d\boldsymbol{\varepsilon}_p) \quad (6)$$

ここで、 f : 降伏関数、 g : 塑性ポテンシャル関数、 D_e : 弾性マトリクス、 $\boldsymbol{\varepsilon}$: 全ひずみテンソル、 $\boldsymbol{\varepsilon}_p$: 塑性ひずみテンソル、 $d\boldsymbol{\varepsilon}_p$: 塑性ひずみ増分、 k : 計算ステップである。なお、本稿では、降伏関数に Drucker-Prager 式を適用し、関連流れ則とした。ひずみテンソルの各成分は、MPS 法の勾配モデルを用いて離散化される。

侵食モデルについては後藤ら³⁾の研究と同様、4 種類の粒子 (i) 水と直接接する壁粒子、 $\Xi_i = 0$; ii) ダミー壁粒子、 $\Xi_i = 1$; iii) 水粒子、 $\Xi_i = 2$; iv) 土砂粒子、 $\Xi_i = 3$) を用い、*pick-up* には表層せん断と水流の衝撃の 2 つの要因を想定する。

表層せん断による *pick-up* については、

$$\text{if } (\bar{u}_b > u_{bcr} \text{ and } \Xi_i = 0) \text{ then } \Xi_i = 3 \quad (7)$$

$$\bar{u} \equiv \frac{1}{N_k + 1} \sum_{k=-N_k/2}^{N_k/2} u(t + k\Delta t) \quad (8)$$

一方、水流の衝撃による *pick-up* については、

$$\text{if } \left[\begin{array}{c} \bar{v}_b(t + \Delta t) - \bar{v}_b(t) > v_{bcr} \\ \text{and} \\ \Xi_i = 0 \end{array} \right] \text{ then } \Xi_i = 3 \quad (9)$$

$$v_{bcr} = (F_{col} \cdot \Delta t / \rho)_{cr} \quad (10)$$

のようにフラッグ処理を行う。ここで、 u_b, v_b : 固定壁表層粒子の近傍流速、 u_{bcr} : せん断による移動限界流速、 v_{bcr} : 単位体積当たり水による衝撃力を速度次元量に変換した指標である。

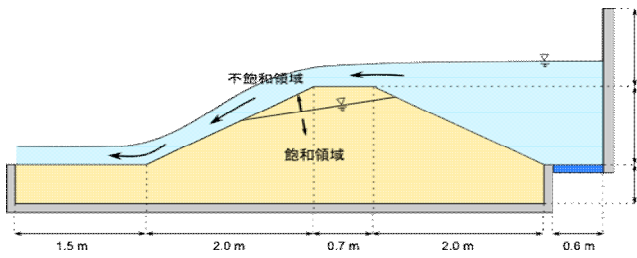


図-1 計算領域

表-1 地盤定数

弾性係数 E (kN/m ²)	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 φ (deg)	密度 ρ (kg/m ³)	ポアソン比 ν	ダイレイタンシー角 ψ (deg)
6.0×10 ³	13.5	19.4	1.9×10 ³	0.40	19.4

また、侵食過程の再現を実時間で行うことは現実的ではないため、侵食速度のみ400倍で進行させる。

3. 堤体の越流侵食過程のシミュレーション

(1) 計算条件

図-1 に計算領域を示す。粒子径は 2.0cm で、数値振動の影響を抑えるため粒子は密に配列する。地盤定数は表-1 のように設定する。また、 $u_{bcr}=1.31\text{m/s}$ 、不飽和領域で $v_{bcr}=1.00\text{m/s}$ 、飽和領域で $v_{bcr}=0.60\text{m/s}$ とし、侵食速度の湿潤面上下の比は、表層せん断については 1.74、水撃作用については 2.0 とする。

(2) 計算結果

図-2 に代表的な瞬間図を示す。侵食開始から 3.0 秒、実時間 20 分相当経過時には法尻部が侵食され始め、その後、6.0 秒、実時間 40 分相当経過時には法尻から斜面全体にかけて侵食が進んだ。さらに 9.0 秒、実時間 60 分相当経過時には法肩の侵食が天端の半分程度まで進行した。また、図-3 に示すように法尻部付近でせん断応力の集中が見られたが、斜面が大きな土塊となって滑ることはなかった。

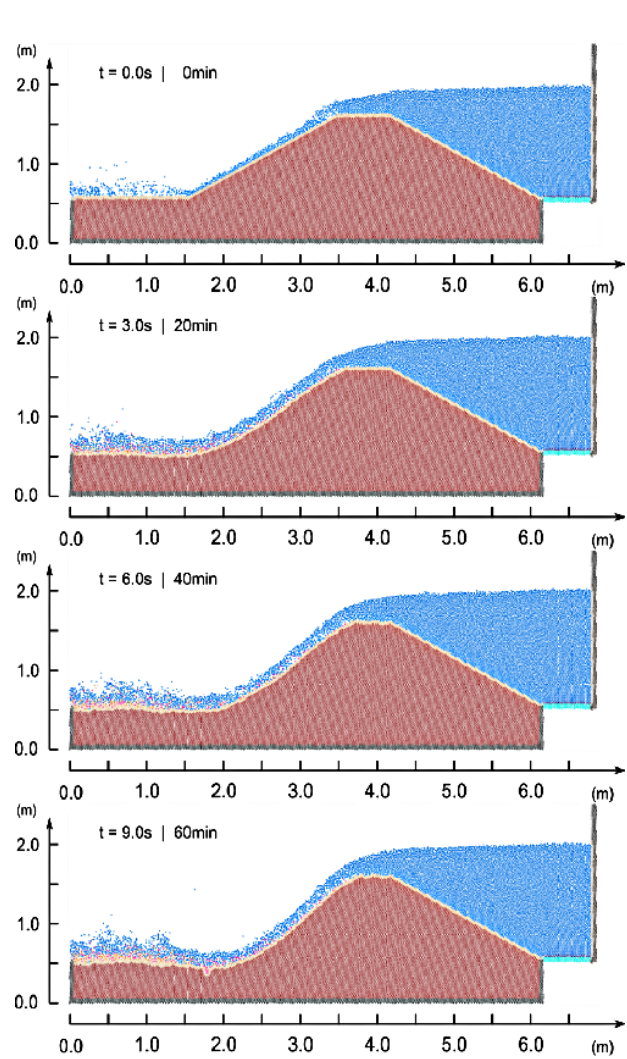


図-2 瞬間図

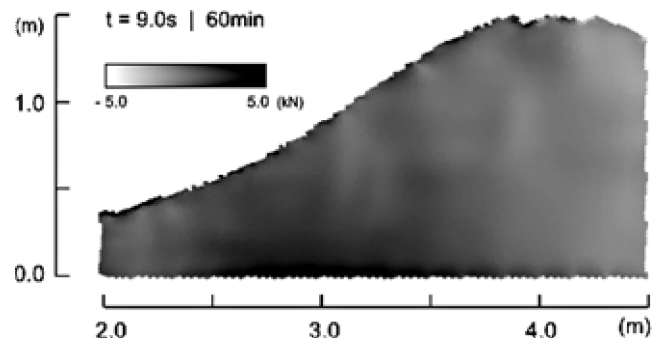


図-3 応力図

4. 結論

本稿では、侵食モデルを組み込んだ MPS 法による流体 - 弾塑性体連成解析によって堤体の越流侵食過程の再現を行った。計算結果より、侵食過程は定性的に再現できたものの、すべり面は再現できなかった。今後は間隙水の影響を考慮した地盤の変形解析モデルの開発が課題となっている。

参考文献

- 1)越塚誠一：粒子法，日本計算工学会，2005.
- 2)後藤仁志，林 稔，織田晃治，酒井哲郎：越流水による河川堤防侵食過程のグリッドレス解析，水工学論文集，第 46 巻，pp.439-444，2002.