

第II部門

MPS法による地盤崩壊とその崩壊土砂による津波の発生過程の計算力学

京都大学工学部 学生会員 ○吉年 英文
 (株) ニュージェック 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

一般的な津波と異なり、地盤崩壊による大量の土砂の流入により発生する津波が存在する。1792年の雲仙・眉山崩壊のように、このケースの津波は発生事例こそ少ないが甚大な被害をもたらす可能性がある。

地盤崩壊や津波の再現計算は、大変形を伴うためメッシュフリーな粒子法を用いるのが最適である。そこで粒子法の一つであるMPS法の地盤における弾塑性モデルを開発し、さらに流体-地盤の連成解析を行った。

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法の弾性体モデル²⁾に塑性計算を組み込んで計算する(図-1 計算フロー参照)。

液相粒子および固相粒子の運動方程式は以下のよう

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

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

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

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のデルタ関数である。 $\boldsymbol{\sigma}$ は、応力テンソルであり、

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

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、一般的なFEM解析で用いられる以下の式によって求める。

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

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

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。

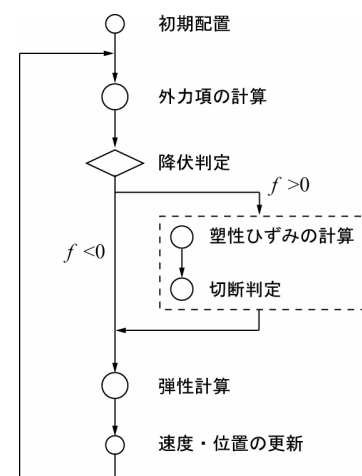


図-1 計算フロー

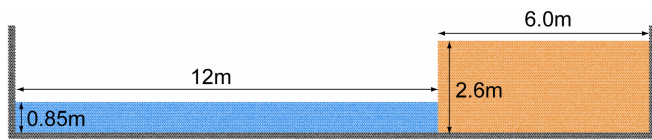


図-2 計算領域

表-1 地盤定数

弾性係数 $E(\text{kN/m}^2)$	粘着力 $c(\text{kN/m}^2)$	内部摩擦角 $\phi(\text{deg})$	密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$	ポアソン比 ν	ダイレイタンシー角 $\psi(\text{deg})$
5.6×10^6	1.5×10^4	20	1.8×10^3	0.40	20

3. 地盤崩壊とその崩壊土砂による水面波の発生過程のシミュレーション

(1) 計算条件

図-2 に計算領域を示す．粒子径は 5.0cm，数値振動の影響を抑えるため粒子は密に配列する．また，地盤定数は表-1 のように設定する．

(2) 計算結果

図-3 に代表的な瞬間像を示す．1.5 秒時にはすべり面が現れ，法尻部から地滑りが生じた．2.0 秒時には崩壊土砂が水域に流入することで水面波が生じた．その後，水面波は左方向に伝播し，5.0 秒時には水面波が左端まで到達した．さらに水面波が固定壁により反射し，8.0 秒時には反射波が崩壊した土塊まで到達した．

4. 結論

本稿では，地盤崩壊とその崩壊土砂による津波発生の再現計算を通し，MPS 法による流体-地盤の連成解析を行った．計算結果より，地盤崩壊から津波発生までの定性的な再現性は示された．今後はすべり面の形状，崩壊土砂量，水面波の速度及び波高等を確認した上で，再現精度を向上させることが課題となっている．

参考文献

- 1) Koshizuka, S., Tamako, H. and Oka, Y.: A Particle Method for Incompressible Viscous Flow with Fluid Fragmentation, *Comput Fluid Dynamics J.*, 4, 29-46, 1995
- 2) 越塚 誠一，近澤 佳隆，岡 芳明：弾性体に対する陽的な粒子計算モデルの開発，第4回計算工学講演会論文集，4，37-40，1999

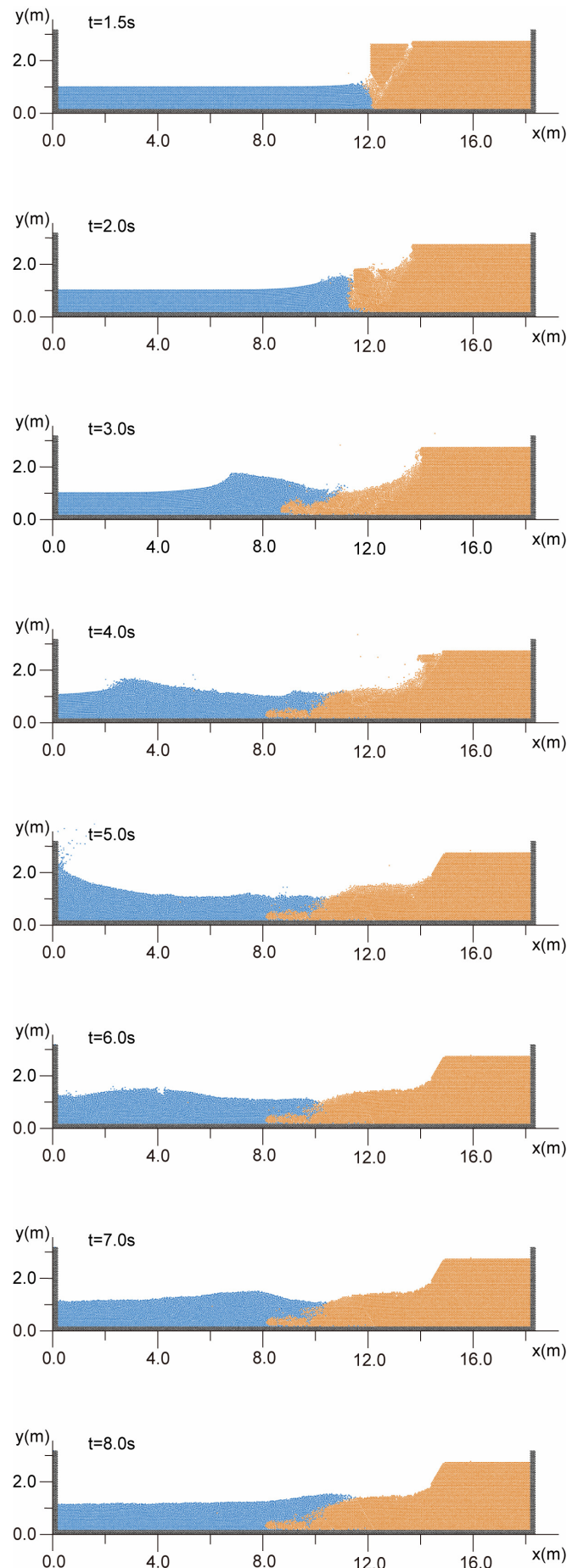


図-3 瞬間像