固液混合 MPM による海底地滑りに起因する津波シミュレーション Solid-liquid coupled material point method for tsunami caused by submarine landslide

潘紹元 (東北大) 山口 裕矢 (東北大) 森口 周二 (東北大) 寺田 賢二郎 (東北大) Shaoyuan PAN, Tohoku University Yuya YAMAGUCHI, Tohoku University Shuji MORIGUCHI, Tohoku University Kenjiro TERADA, Tohoku University FAX: 022-752-2133, E-mail: pan.shaoyuan.t6@dc.tohoku.ac.jp

The applicability of MPM (Material Point Method) combined with mixture theory is investigated from the perspective of predicting tsunami hazards induced by submarine landslide. By use of two overlapped layers for soil and water particles, soil-water mixture and incompressible fluid models are used to respectively represent the submarine landslide and the resulting tsunami event in a consistent manner. Numerical example is presented to simulate the collapse of an undersea soil slope on the seabed and examine the performance in reproducing the fluidized soil movement and resulting elevated waves.

1. はじめに

2018年9月28日にインドネシアのスラウェシ島付近で モーメント・マグニチュード (Mw) 7.5 の地震が発生した. この地震によって、液状化に伴って生じた側方流動により 大規模な地盤変状が生じるとともに、島内の都市であるパ ルの沿岸部には津波が襲来した. Pakoksung¹⁾らは被害状況 や分析結果に基づいて、この津波が海底地滑りの影響を受 けたことを指摘している. 海底地すべりによる津波の誘発 については、現象が複雑であるため、その予測や事前評価 が非常に難しい. また, 海底地すべりによる土塊の移動特 性が、それによって誘発される津波の伝播特性にどのよう な影響を与えるかについては、より詳細な検討が必要であ る.本研究では、海底地滑りに誘発される津波の予測・評 価に対して混合体モデルに基づく MPM(Material Point Method)^{2),3)}を適用し、その表現性能を確認することを目的 とする.

2. 解析手法

本研究では土と水の相互作用による地盤の変形とそれに 伴う津波現象を表現するために,多孔質体理論に基づく固・ 液混合体モデルを用いる.以下では多孔質理論に基づく質 量保存則と運動方程式を示す.

$$(1-n)\rho_s \boldsymbol{a}_s = \nabla \cdot \overline{\boldsymbol{\sigma}}_s + \widehat{\boldsymbol{P}}_s + (1-n)\rho_s \boldsymbol{b}$$
(1)

$$n\rho_{w}\boldsymbol{a}_{w} = \nabla \cdot \overline{\boldsymbol{\sigma}}_{s} + \boldsymbol{P}_{w} + n\rho_{w}\boldsymbol{b}$$
(2)
$$\nabla \cdot [(1-n)\boldsymbol{v}_{s} + n\boldsymbol{v}_{w}] = 0$$
(3)

$$\nabla \cdot \left[(1-n)\boldsymbol{v}_s + n\boldsymbol{v}_w \right] = 0$$

ここに, s,w は固相, 液相の物理量を表し, ρは密度, n は間隙率, a は加速度, v は速度, $\overline{\sigma}$ は部分応力, b は 物体力, p は固液間の相互作用項を表す. 部分応力は次 式で与える.

$$\overline{\boldsymbol{\sigma}}_{s} = \boldsymbol{\sigma}' - (1 - n)p_{w}\boldsymbol{I} \tag{4}$$
$$\overline{\boldsymbol{\sigma}}_{w} = -np_{w}\boldsymbol{I} \tag{5}$$

ここに、 σ' は土骨格の有効応力、 p_w は水圧を表す.相互 作用項については、高いレイノルズ数領域に対応するた め, Darcy-Forchheimer 則を採用する.

$$\widehat{\boldsymbol{P}}_{s} = -\widehat{\boldsymbol{P}}_{w} = \widehat{\boldsymbol{P}}_{E} - \boldsymbol{P}_{w} \nabla \boldsymbol{n}$$

$$\widehat{\boldsymbol{P}}_{E} = \frac{n^{2} \mu}{(\boldsymbol{p}_{w} - \boldsymbol{p}_{c})} + \frac{175}{2} \frac{\rho_{w} n^{2} |\boldsymbol{v}_{w} - \boldsymbol{v}_{s}|}{(\boldsymbol{p}_{w} - \boldsymbol{p}_{c})}$$
(6)
(7)

 $\frac{1}{k}(\boldsymbol{v}_w - \boldsymbol{v}_s) + \frac{1}{\sqrt{150}} \frac{1}{\sqrt{k}}$ $n^{\frac{3}{2}}$ $(\boldsymbol{\nu}_w)$'s) ここに、 μ は動粘性係数、kは透水係数を表し、間隙 率に対応する次の Kozeny-Carman 式を用いる.

$$k = \frac{D_{50}^2 n^3}{150(1-n)^2} \tag{8}$$

ここに、D₅₀は平均粒径を表す.また、土骨格の材料構成則 には変形勾配の乗算分解を仮定した弾塑性モデルを採用

する. 固相の弾性応答を表現するために Hencky 超弾性モ デルを, 塑性変形を表現するために非関連流れ則に基づく Drucker-Prager の降伏基準を採用し、完全塑性を仮定する.

上述の支配方程式の離散化には MPM を適用する. MPM では連続体を有限の粒子によって離散化し,各粒子は体積, 質量,速度,変形勾配等の物理量を保持する.そして,運 動方程式および質量保存式の計算は背面に設定する格子 点で行う. 粒子と格子は内挿関数によって結び付けられて おり,各ステップにおいて,粒子から格子へのマッピング, 格子上での計算、格子から粒子への補間、格子のリセット を行う.これにより、大変形を伴う場合でもメッシュが破 綻することなく、材料の履歴を保ちながら連続体の数値計 算が可能になる. Fig.1 に固液混合 MPM の模式図を示す. 図のように、土水混合体の挙動を MPM の枠組みで表現す る上で、飽和土を土骨格と間隙水に分離し、固相と液相か らなる2相の連続体の重ね合わせとして考える.その際, 各相に対して異なる2層の粒子による離散化を行い,運動 量交換項によって相互作用力を表現する.また、本研究で は fractional-step 法を適用することにより, 固相・液相それ ぞれの速度 v_s, v_w と水圧 p_w を未知数とした分離型解法を適 用する. その際, 速度については集中質量行列を用いて陽 解法を適用するのに対し,液相圧力は圧力 Poisson 方程式 より陰的に算出する.また、固液混合領域の積分において は各相の体積分率をマッピングと補間によって考慮する.



Fig.1 Schematic view of solid-liquid coupled



Fig.2 Numerical model of slope stability analysis

3. 海底地滑りモデルへの適用例

本節では、地盤の安定状態から崩壊に伴う海水の流動の 挙動の表現性能を確認するために、Yamaguchi³⁾の数値計算 を参考に、図2の解析モデルを用いた計算例を示す.格子 の境界条件としては、側面をスリップ条件、下面をノンス リップ条件とする.初期状態で固相は無負荷の弾性体とし、 固相・液相とも10s間で負荷を与える.解析に用いるパラ メータは Table 1 の通りである.

時刻 0, 10, 20, 30s における解析結果を Fig. 3 に示す. 図は固相の材料構成則に基づく応力から計算された von-Mises 応力,累積塑性ひずみおよび液相の水圧の分布であ る.これらの結果により,適用した固液混合 MPM によれ ば地盤の安定状態から崩壊に伴う海水の流動の大変形挙動 を捉えることが可能であることが分かる.初めの 10s で大 変形が生じた後に,徐々に斜面先端付近の塑性変形が進展 し,土砂の流動が発生していることが分かる.液相につい ては,斜面崩壊によって自由表面が波打つような挙動が確 認できる.また,土斜面の境界付近でも静水圧の分布は連 続しており,大域的にも安定していることが分かる.以上 から,採用した固液混合 MPM は海底地滑りの一連の現象 の表現性能を有すると考えられる.

4. おわりに

本研究では海底地滑りにより発生する津波の挙動を表現 することを目的とし、2 層粒子を用いた固液混合 MPM を 発展させた手法を採用して海底地滑りモデルの解析を行っ た.検証の結果、地盤の安定状態から崩壊に伴う海水の流 Table 1 Parameters for slope stability analysis

Parameter		Value
Solid	Particle number/Grid	4×4
	$Density[kg/m^3]$	2915
	Young's modulus[MPa]	100
	Poisson ratio	0.3
	Cohesion[KPa]	10
	Internal friction angle[degrees]	10
	$D_{50}[m]$	2
Liquid	Particle number/Grid	4×4
	$Density[kg/m^3]$	1429
Initial porosity		0.3
Gravity force $[m/s^2]$		9.8
Dynamic viscosity[Pa.s]		$1.0{ imes}10^{-3}$
Grid size[m]		1×1
Time increment[s]		$2.0{\times}10^{-3}$

動する様子が表現可能であることが示され,海底地滑りに 対するある程度の適用性が確認された.今後はより適切な 土・砂の材料構成則を検討し,同時に三次元解析に耐え得 るものとして計算の高速化を諮り,実際の災害への適用性 を検討して行く予定である.

参考文献

- Pakoksung. K, Suppasri. A, Imamura. F. et al.: Simulation of the Submarine Landslide Tsunami on 28 September 2018 in Palu Bay, Sulawesi Island, Indonesia, Using a Two-Layer Model, Pure and Applied Geophysics, Vol.176, pp. 3323-3350, 2019.
- Bandara. S, and Soga. K : Coupling of soil deformation and pore fluid flow using material point method. Computers and geotechnics, 63, 199-214, 2015.
- Yamaguchi. Y, Takase. S, Moriguchi. S. et al.: Solid–liquid coupled material point method for simulation of ground collapse with fluidization. Comp. Part. Mech. 7, 209–223, 2020.



Fig.3 Numerical results of stability analysis of an undersea soil slope on the seabed and resulting elevated seawater