

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

潘紹元¹・山口裕矢²・森口周二²・寺田賢二郎²

¹東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 ²東北大学災害科学国際研究所

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・評価を目的とし，混合体理論に基づくMPM (Material point method)^{2),3)}の適用性を確認する．2層粒子を用いた土骨格-水二相混合MPMを使用することで，混合体モデルによる海底地すべり計算と非圧縮性流体モデルによる津波計算を一貫した枠組みで表現することが可能となる．また，従来の混合MPMの数値誤差を軽減するために，固液各相の体積分率を考慮した数値積分手法を導入する．海底中の土斜面を模擬したモデルに対して提案手法を適用し，土斜面の崩壊・流動およびそれに誘発される波の表現性能を確認する．

解析手法

(1)固液混合MPM

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．

$$(1-n)\rho_s a_s = \nabla \cdot \bar{\sigma}_s + \hat{P}_s + (1-n)\rho_s b \quad (1)$$

$$n\rho_w a_w = \nabla \cdot \bar{\sigma}_w + \hat{P}_w + n\rho_w b \quad (2)$$

$$\nabla \cdot [(1-n)\mathbf{v}_s + n\mathbf{v}_w] = 0 \quad (3)$$

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， $\mathbf{v}$ は速度， $\bar{\sigma}$ は部分応力， b は物体力， $\hat{P}$ は固液間の相互作用項を表す．部分応力は次式で与える．

$$\bar{\sigma}_s = \sigma' - (1-n)p_w \mathbf{I} \quad (4)$$

$$\bar{\sigma}_w = -np_w \mathbf{I} \quad (5)$$

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．

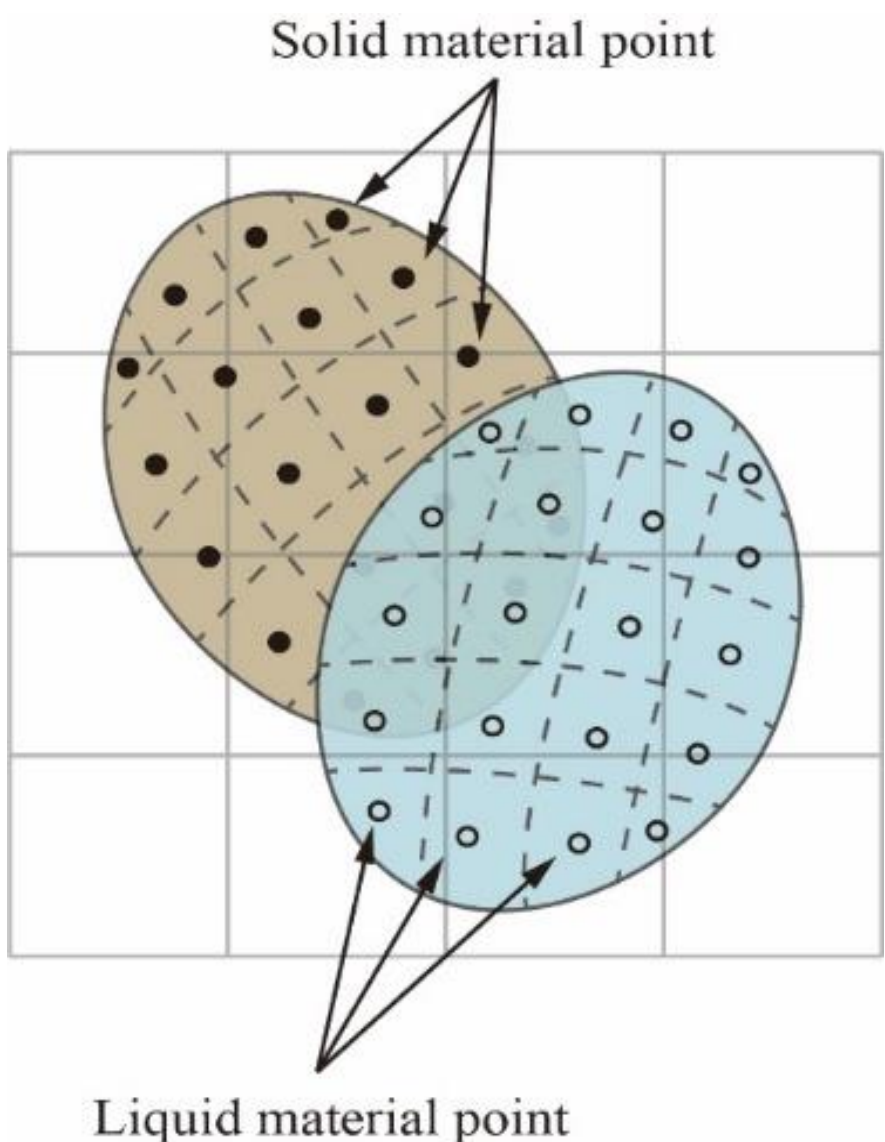
$$\hat{P}_s = -\hat{P}_w = \hat{P}_E - p_w \nabla n \quad (6)$$

$$\hat{P}_E = \frac{n^2 \mu}{k} (\mathbf{v}_w - \mathbf{v}_s) + \frac{175}{\sqrt{150}} \frac{\rho_w n^2}{\sqrt{k}} \frac{|\mathbf{v}_w - \mathbf{v}_s|}{n^{\frac{3}{2}}} (\mathbf{v}_w - \mathbf{v}_s) \quad (7)$$

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．

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

右に固液混合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 $\mathbf{v}_s$ ， $\mathbf{v}_w$ 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，液相圧力は圧力に関するPoisson方程式を陰的に解くことで算出する．



(2)材料構成則

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，次に示すDrucker-Prager の降伏基準を採用する．

$$\Phi(\sigma, c) = \sqrt{J_2(s(\sigma))} + \eta p - \xi c \quad (9)$$

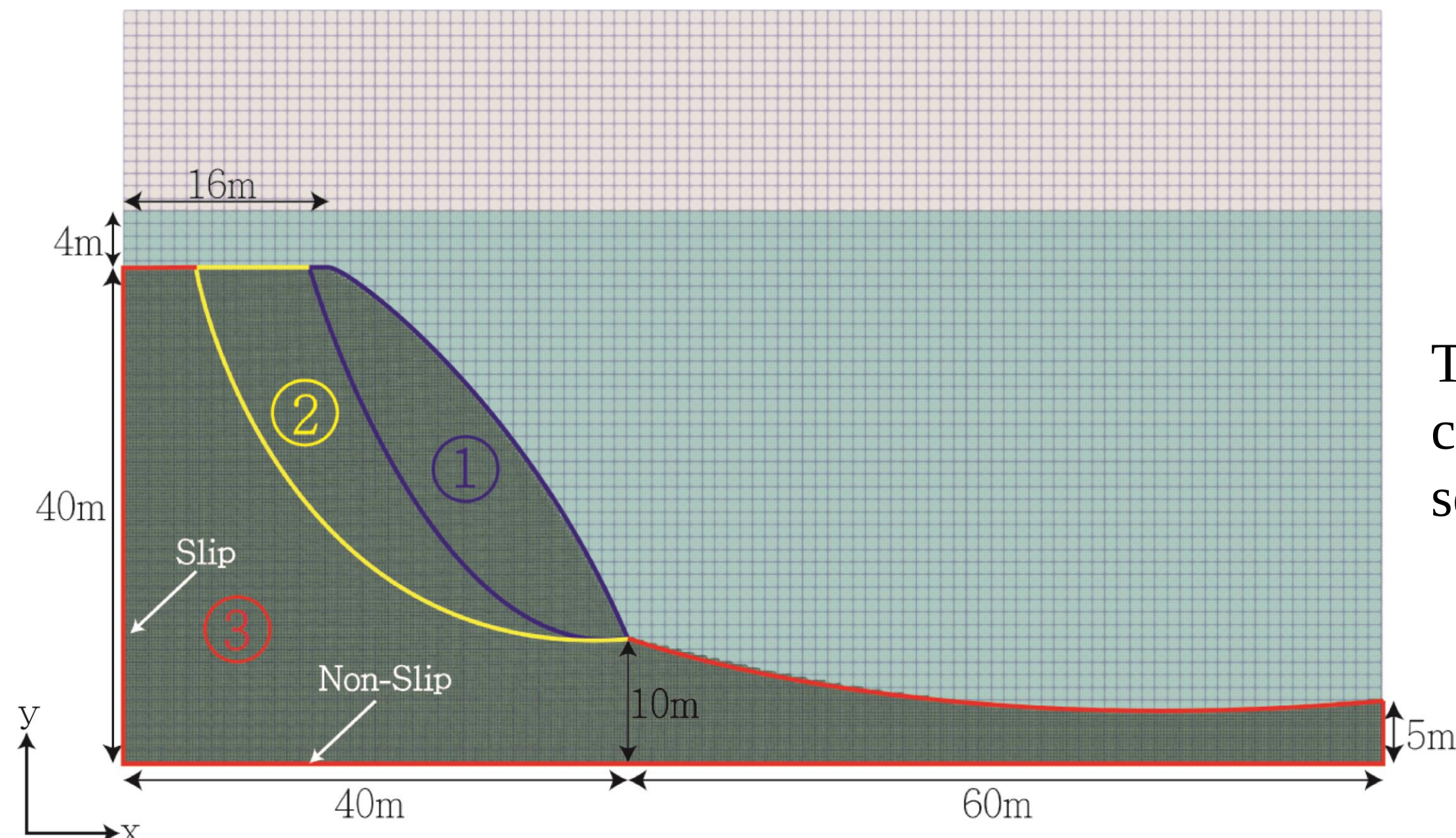
ここに， s は偏差応力， J_2 は偏差応力の第二不変量， p は固相の静水圧応力， c は粘着力， η ， ξ は内部摩擦角 ϕ より定まる材料パラメータであり，次式を用いる．

$$\eta = \frac{3 \tan \phi}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}} \quad (10)$$

$$\xi = \frac{3}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}} \quad (11)$$

Drucker-Prager モデルについては，過剰なダイレイタンシーを抑制するため，本研究ではダイレイタンシー角はゼロとする．

計算例

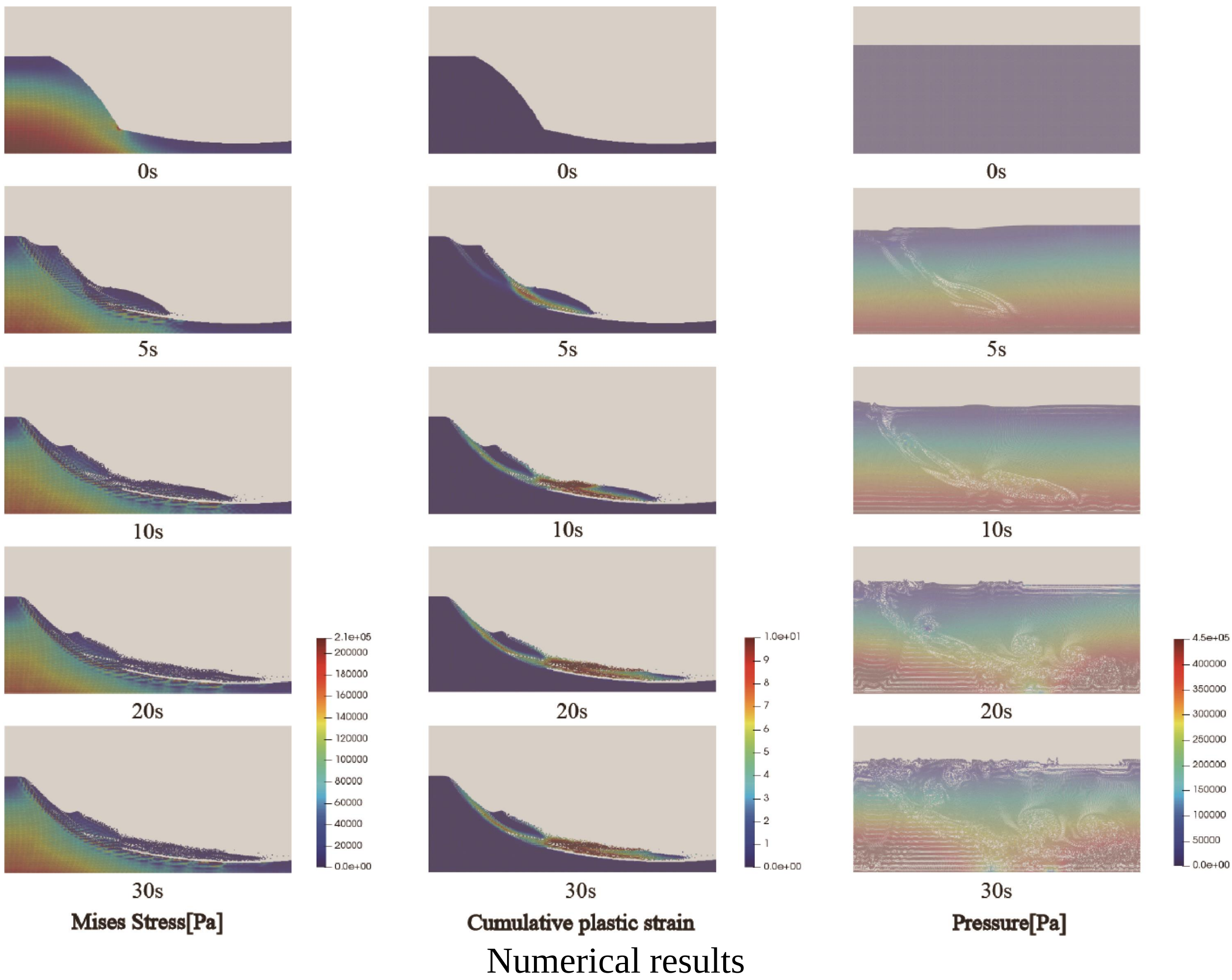


The slope was composed of three separate materials

Numerical model of slope stability analysis

Parameters for slope stability analysis

Parameter				
Solid	Material	①	②	③
	Density ρ_s [kg/m ³]	2700	2700	2700
	Young's modulus E [MPa]	10	10	10
	Poisson ratio ν	0.3	0.3	0.3
	Cohesion C [KPa]	0	14	40
	Initial porosity n	0.4	0.4	0.4
	Internal friction angle ϕ [°]	20	20	20
	Average diameter D_{50} [m]	2	2	2
Water	Density ρ_w [kg/m ³]	1000		
	Dynamic viscosity μ [Pa.s]	1.0×10^{-3}		
Particle number/Grid		4×4		
Grid size[m]		1×1		
Gravity force[m/s ²]		9.8		
Time increment Δt [s]		2.0×10^{-3}		
Total time[s]		30		



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

- 1) 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.
- 2) Bandara, S, and Soga, K : Coupling of soil deformation and pore fluid flow using material point method. Computers and geotechnics, 63, 199-214, 2015.
- 3) 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.