

粒子法を用いた土・水連成解析による津波越流 および洗掘解析手法の開発

阿部 慶太* 室谷 浩平**

Development of Analysis Method of Tsunami Overflow and Scouring
by Soil-water Coupled Analysis Using Mesh Free Method

Keita ABE Kohei MUROTANI

The tsunami induced by 2011 earthquake off the Pacific coast of Tohoku caused a lot of tremendous damage to railway embankments. Furthermore, in recent years, heavy rainfalls near water catching terrain have caused overflow, erosion, and scouring in the embankment, indicating that heavy rainfall disasters have tended to become more serious. In this study, we developed an analysis method of tsunami overflow and scouring by soil-water coupled analysis using mesh free methods. Such a method can be an effective tool to predict the damage due to overflow and scouring in the embankment, evaluate countermeasures against the damage, and further deepen model experimental studies. This paper explains overview of the developed analysis method and then presents the results from reproduction analyses of a series of model experiments.

キーワード：盛土，津波越流解析，洗掘解析，連成解析，粒子法，模型実験

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、津波による鉄道盛土の被害が多く発生した。このような被害は、津波による衝撃波圧ではなく、津波襲来前の地震によって損傷を受けた盛土が、津波による長時間越流によって生じる浸食・洗掘に起因していることが、被害調査や模型実験結果による検討により報告されている¹⁾。また、近年、豪雨災害が激甚化する傾向があり、集水地形に構築された盛土や河川に近接する盛土についても、長時間の越流によって侵食・洗掘被害を受けることが報告されている²⁾。これらの被害の予測および対策に関する研究は急務であり、これまでは主として模型実験による検討が行われているが、コストと時間の制約上、多くのケースを検証することが困難な上、縮小モデルでのスケールが限られた検討となる。

そこで、本研究では、土と水の相互作用による被害のうち、越流による洗掘被害を対象とし、鉄道盛土の越流・洗掘被害の予測、対策技術への応用、および模型実験での検討を深度化するためのツール構築を目的に、粒子法を用いた土・水連成解析による津波越流および洗掘解析手法を開発した。本論文では、はじめに開発した解析手法を説明した後に、過去に鉄道総研で実施した剛体盛土模型に対する津波越流実験と、ジオテキスタイル補強盛

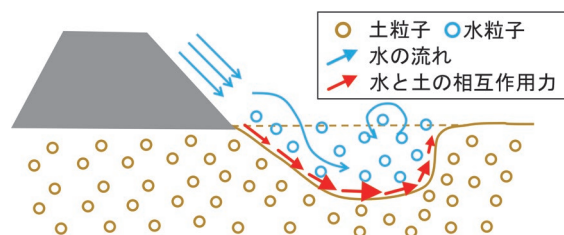


図1 土・水連成解析手法のイメージ

土模型に対する津波越流および洗掘実験の再現解析結果を示し、解析手法の有効性について示す。

2. 粒子法を用いた土・水連成解析手法

2.1 概要

図1に解析手法のイメージを示す。津波越流および洗掘解析においては、盛土周辺を流れる水の流れと、盛土と支持地盤を構成する土の変形を解析可能な手法が必要となる。前者については、非圧縮性流体を扱う解析手法として実績をもつ、Moving Particle Simulation (MPS)³⁾やSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH)⁴⁾が有効である。後者については、土の弾塑性変形に加え、土が離散化し流水により流出される現象を扱う必要があるため、Discrete Element Method (DEM)⁵⁾やMaterial Point Method (MPM)⁶⁾等の土の大変形、崩壊を扱うことが可能な手法が有効である。そこで、既往の研究において、土と水の連成を考慮した解析として、MPSと

* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

** 鉄道力学研究部 計算力学研究室

1) 水と土の相互作用力の計算

- 土粒子の物理量を背面格子点に転送
- 水粒子の物理量を背面格子点に転送
- 背面格子点で土と水の相互作用力を計算

2) 土粒子位置の更新

- 背面格子のひずみを計算
- 土粒子位置を更新

3) 水粒子位置の更新

- 格子点の相互作用力を水粒子に転送
- 土粒子を固定壁として扱う。
- 水粒子位置を更新

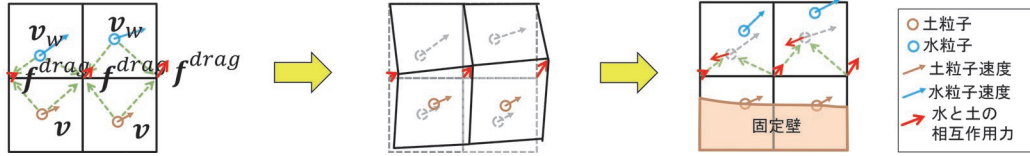


図2 MPM-MPS 連成解析手法のフロー

DEM を連成した解析手法⁷⁾等の開発が行われている。しかしながら、DEM では解析モデルの粒子最小サイズに限界があり、盛土や支持地盤のような砂質土または粘性土の応力ひずみ関係を正確にモデル化することは難しい。

そこで、本研究では土を弾塑性体として扱い、変形レベルに拘らず応力ひずみ関係をモデル化可能な MPM を土の解析手法として採用した。また、水の解析手法として、非圧縮性の粘性流体を扱える MPS を採用し、MPM と MPS を連成した解析手法の開発を行った。以下では、MPM と MPS の概要を述べた後、連成解析手法について説明する。

2.2 MPM-MPS 連成解析手法

図2に MPM-MPS 連成解析手法のフローを示す。連成解析手法として、土と水の間の相互作用力を Akbari らの式⁸⁾⁹⁾を用いて求め、その相互作用力により土の変形を求める手法を構築した。さらに、土の変形に伴って水の流れを更新する手法を構築し、これらの手法による計算を繰り返すことで、水の流れに伴う土の変形現象を取扱える解析手法を構築した。

2.2.1 Akbari らの式と相互作用力

Akbari らの式は、土と水の間の相互作用力をモデル化した式であり、式(1)で表現される。

$$\mathbf{f}^{drag} = a(\mathbf{v}_w - \mathbf{v}) + \beta(\mathbf{v}_w - \mathbf{v})|\mathbf{v}_w - \mathbf{v}| \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{f}^{drag}$ は土に対する水からの相互作用力ベクトル (m/s^2)、 $\mathbf{v}$ は土の速度ベクトル (m/s)、 $\mathbf{v}_w$ は水の速度ベクトル (m/s)、 $a(\text{s}^{-1})$ 、 $\beta(\text{m}^{-2})$ は土の間隙比 n と平均粒径 D_{50} (m) で決まる定数であり、式(2a)~(2d)で求められる。

$$a = a_c \frac{v(1-n)^2}{n^3 D_{50}^2} \quad (2a)$$

$$\beta = \beta_c \frac{1-n}{n^3 D_{50}} \quad (2b)$$

$$a_c = \frac{41n^2}{\varepsilon^{2/3}(1-\varepsilon^{1/3})(1-\varepsilon^{2/3})} \quad (2c)$$

$$\beta_c = \frac{n^2}{(1-\varepsilon^{2/3})^2} \quad (2d)$$

ここで、 $\varepsilon = 1 - n$ 、 $v = 1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ である。けい砂 6 号の場合は、 $D_{50} = 3.6 \times 10^{-4} \text{m}$ 、 $n = 0.6$ であり、 $a_c = 68.0$ 、 $\beta_c = 1.72$ 、 $a = 388 \text{s}^{-1}$ 、 $\beta = 4630 \text{m}^{-2}$ である。土と水の間の相互作用力をモデル化した式としては、他にも Ergun 式¹⁰⁾等があるが、Akbari らの式は土粒子と間隙水間に作用する力を理論的に導出した Prieur du Plessis 式¹¹⁾に基づきモデル化しており、他の式に比べ精度面で優位にある。

2.2.2 MPM におけるモデル化

土の解析手法として用いた MPM は、解析対象を、質量を有した粒子群でモデル化し、以下のステップで計算を行う。①粒子背面に設定した格子（以後、背面格子）で計算したひずみ増分値を用いて各粒子位置で応力を計算する。②この応力やひずみ、質量等の物理量を、内挿関数を通じて背面格子の格子点に集約し、内力および外力を計算する。③これらの力と格子点に集約した質量から加速度を計算し速度を更新する。④更新した速度を用いて粒子の位置を更新するとともに、格子内のひずみを計算し次計算ステップの粒子位置での応力を求める。その後格子は元の位置に戻る。なお、粒子自体は独立して運動するため、このプロセスで粒子の物性（剛性、強度等）が混合することはない。以下に計算式を示す。

運動量保存則より、式(1)に示す相互作用力を含んだ土の支配方程式は式(3)で表すことができる。

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} + \overline{\rho}_w \mathbf{f}^{drag} \quad (3)$$

ここで、 ρ は土の密度、 $\boldsymbol{\sigma}$ は土の応力テンソル、 $\mathbf{b}$ は土の体積力ベクトル、 $\overline{\rho}_w$ は液相の密度であり、 $n\rho_w$ (ρ_w ：水の密度) である。

MPM によって支配方程式は次のように離散化され

る。タイムステップ k における時刻を t^k とし、土を N_p 個からなる土粒子 $p (=1, \dots, N_p)$ でモデル化し、それぞれの土粒子 p の位置ベクトルと質量を $\mathbf{x}_p^k$, m_p とする。また、背面格子の格子点 $i (=1, \dots, N_i)$ の位置ベクトルを $\mathbf{x}_i$ とする。このとき、格子点上での支配方程式は式 (4) で表せる。

$$m_i^k \mathbf{a}_i^k = \mathbf{f}_i^{int k} + \mathbf{f}_i^{ext k} + \mathbf{f}_i^{drag k} \quad (4)$$

ここで、 m_i^k , $\mathbf{a}_i^k$, $\mathbf{f}_i^{int k}$, $\mathbf{f}_i^{ext k}$, $\mathbf{f}_i^{drag k}$ は、それぞれ時刻 t^k での格子点 i の質量、加速度ベクトル、内力ベクトル、外力ベクトル、相互作用力ベクトルである。

格子点 i での質量 m_i^k は式 (5) で表される。

$$m_i^k = \sum_{p=1}^{N_p} m_p N_{ip}^k \quad (5)$$

ここで、 N_{ip}^k は、土粒子 p の格子点 i に対する内挿関数である。

格子点 i の内力ベクトル $\mathbf{f}_i^{int k}$, 外力ベクトル $\mathbf{f}_i^{ext k}$ は式 (6a), (6b) で表される。

$$\mathbf{f}_i^{int k} = - \sum_{p=1}^{N_p} \frac{m_p}{\rho_p} \nabla N_{ip}^k \cdot \boldsymbol{\sigma}_p^k \quad (6a)$$

$$\mathbf{f}_i^{ext k} = \sum_{p=1}^{N_p} m_p \mathbf{b}_p^k N_{ip}^k \quad (6b)$$

ここで、 ρ_p , $\boldsymbol{\sigma}_p^k$, $\mathbf{b}_p^k$ は、土粒子 p の密度、応力テンソル、体積力ベクトルである。

格子点 i の土に対する水からの相互作用力ベクトル $\mathbf{f}_i^{drag k}$ は式 (7) で表される。

$$\mathbf{f}_i^{drag k} = \overline{m_{wi}^k} \{ \alpha (\mathbf{v}_{wi}^k - \mathbf{v}_i^k) + \beta (\mathbf{v}_{wi}^k - \mathbf{v}_i^k) | \mathbf{v}_{wi}^k - \mathbf{v}_i^k | \} \quad (7)$$

$\mathbf{v}_{wi}^k$, $\mathbf{v}_i^k$ は格子点 i の水、土の速度ベクトルである。格子点 i の液相の質量 $\overline{m_{wi}^k}$ は式 (8) で表される。

$$\overline{m_{wi}^k} = \sum_{p=1}^{N_p} \overline{\rho_{wp}} \frac{m_p}{\rho_p} N_{ip}^k \quad (8)$$

式 (4) より格子点 i の加速度ベクトルを求め、格子点 i の速度ベクトル $\mathbf{v}_i^k$ から $\mathbf{v}_i^L$ を式 (9) で求める。

$$\mathbf{v}_i^L = \mathbf{v}_i^k + \mathbf{a}_i^k \Delta t \quad (9)$$

$\mathbf{v}_i^L$, $\mathbf{a}_i^k$ を用いて土粒子 p の位置ベクトル $\mathbf{x}_p^k$ と速度ベクトル $\mathbf{v}_p^k$ を式 (10a), (10b) で更新する。

$$\mathbf{x}_p^{k+1} = \mathbf{x}_p^k + \Delta t \sum_{i=1}^{N_i} \mathbf{v}_i^L N_{ip}^k \quad (10a)$$

$$\mathbf{v}_p^{k+1} = \mathbf{v}_p^k + \Delta t \sum_{i=1}^{N_i} \mathbf{a}_i^k N_{ip}^k \quad (10b)$$

$\mathbf{v}_p^{k+1}$ を用い格子点での速度ベクトル $\mathbf{v}_i^{k+1}$ を求める。

$$\mathbf{v}_i^{k+1} = \sum_{p=1}^{N_p} m_p \mathbf{v}_p^{k+1} N_{ip}^k / m_i^k \quad (11)$$

$\mathbf{v}_i^{k+1}$ より土粒子 p のひずみ増分テンソル $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_p^{k+1}$ を求める。

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_p^{k+1} = \frac{\Delta t}{2} \sum_{i=1}^{N_i} \{ \nabla N_{ip}^k \mathbf{v}_i^{k+1} + (\nabla N_{ip}^k \mathbf{v}_i^{k+1})^T \} \quad (12)$$

$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_p^{k+1}$ を用いて土粒子 p の応力テンソル $\boldsymbol{\sigma}_p^k$ を更新する。

$$\boldsymbol{\sigma}_p^{k+1} = \boldsymbol{\sigma}_p^k + \mathbf{T} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_p^{k+1} \quad (13)$$

ここで、 $\mathbf{T}$ は剛性マトリクスである。

2.3.2 MPS におけるモデル化

水のモデル化に用いた MPS は、解析対象を、質量を有する粒子群でモデル化し、粒子同士の相互作用を用いてナビエストークス方程式を解く手法である。MPS では、外力と粘性力により粒子を移動した後、密度が一定になるように粒子位置での圧力を求め、粒子の位置と速度を更新する。その際に、速度や圧力の勾配とラプラシアンを計算する必要があるため、影響範囲内にある粒子の物理量と微分作用モデルを用いて勾配とラプラシアンを計算する。なお、MPS は MPM とは異なり格子を用いず、影響範囲内の粒子が持つ物理量を用いて計算する。本研究では、Shakibaenia ら¹²⁾ が提案した陽的 MPS 法を用いた。本手法は、疑似圧縮性流体とみなして圧力計算を陽的に解くことができ、半陰的計算を要した従来の MPS より計算速度が速い特長がある。以下に計算式を示す。

Akbari らによる相互作用力式 (1) を含んだ水の支配方程式は式 (14a), (14b) で表すことができる。

$$\frac{\partial P_w}{\partial \rho_w} = c^2 \quad (14a)$$

$$\frac{D \mathbf{v}_w}{Dt} = - \frac{1}{\rho_w} \nabla P_w + \nu \Delta \mathbf{v}_w + \mathbf{b}_w + \frac{\overline{\rho_w}}{\rho_w} \mathbf{f}_w^{drag} \quad (14b)$$

ここで、 P_w , ρ_w , c , $\mathbf{v}_w$, ν , $\mathbf{b}_w$, $\mathbf{f}_w^{drag}$ はそれぞれ圧力 (Pa), 密度 (kg/m^3), 音速 (m/s), 流速ベクトル (m/s), 動粘性係数 (m^2/s), 体積力ベクトル (m/s^2), 水に対する土

からの相互作用力ベクトル (m/s^2) である。MPS によって支配方程式は式 (15a)~(15d) のように離散化される。

$$\mathbf{v}_{\text{wp}}^* = \mathbf{v}_{\text{wp}}^k + \Delta t \left(\mathbf{v}[\Delta \mathbf{v}]_{\text{wp}}^k + \mathbf{b}_{\text{wp}}^k + \frac{\bar{\rho}_w}{\rho_w} \mathbf{f}_{\text{wp}}^{\text{drag}k} \right) \quad (15a)$$

$$\mathbf{r}_{\text{wp}}^* = \mathbf{r}_{\text{wp}}^k + \Delta t \mathbf{v}_{\text{wp}}^* \quad (15b)$$

$$P_{\text{wp}}^{k+1} = c^2 \rho_w \frac{n_{\text{wp}}^* - n^0}{n^0} \quad (15c)$$

$$\mathbf{v}'_{\text{wp}} = -\frac{\Delta t}{\rho_w} [\nabla P]_{\text{wp}}^{k+1} \quad (15d)$$

ここで、 $\mathbf{r}_{\text{wp}}$ 、 $\mathbf{v}_{\text{wp}}$ 、 $\mathbf{b}_{\text{wp}}$ は水粒子の位置ベクトル、速度ベクトル、体積力ベクトル、 $\mathbf{f}_{\text{wp}}^{\text{drag}k}$ は水粒子 wp の土からの相互作用力ベクトルである。 n_{wp} 、 n^0 はそれぞれ単位体積あたりの粒子数、初期粒子数である。式 (15) に現れる微分作用素 $[\nabla \phi]_{\text{wp}}$ 、 $[\Delta \phi]_{\text{wp}}$ (ϕ : 任意のスカラー量) は式 (16a)、(16b) のように表せる³⁾。

$$[\nabla \phi]_{\text{wp}} = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq \text{wp}} \frac{\phi_j - \phi_{\text{wp}}}{\|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_{\text{wp}}\|^2 w(\|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_{\text{wp}}\|)} \quad (16a)$$

$$[\Delta \phi]_{\text{wp}} = \frac{2d}{\lambda^0 n^0} \sum_{j \neq \text{wp}} (\phi_j - \phi_{\text{wp}}) w(\|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_{\text{wp}}\|) \quad (16b)$$

ここで、 d 、 λ^0 、 $w(\|\cdot\|)$ は、次元数、ラプラシアン作用素の正規化定数、重み関数である。

水粒子 wp の土からの相互作用力ベクトル $\mathbf{f}_{\text{wp}}^{\text{drag}k}$ は式 (17) で表せる。

$$\mathbf{f}_{\text{wp}}^{\text{drag}k} = -\sum_{i=1}^{N_i} \mathbf{f}_i^{\text{drag}k} N_{i\text{wp}}^k \quad (17)$$

ここで、 $N_{i\text{wp}}^k$ は、水粒子 wp の格子点 i に対する内挿関数である。

3. MPS の津波越流解析に対する適用性

3.1 剛体盛土模型に対する越流実験の概要

MPS の津波越流解析に対する適用性を検証するため、過去に鉄道総研が実施した盛土模型の越流実験¹³⁾ に対する再現解析を実施した。図 3 に越流実験の概要を示す。実験は独立行政法人 農村工学研究所が所有する造波水路実験施設を利用し、同図に示す高さ 0.4m の剛体盛土模型に対して越流実験を行った。実験装置は、全長 63m、幅 0.8m の開水路であり、端部から 20m の地点に

ゲートが設けられている。あらかじめ盛土よりゲート側の水位（前浜水位）とゲート内水位を調整することで、ゲート開放後に発生する津波の波形（段波）の形状を変化させることができる。本研究では、ゲート内水位を 1.48m、前浜水位を 0.73m とした実験を対象とし、図 3 の地点 A と B で測定した波高、および測定地点 C で測定した盛土模型の接線方向流速について実験値と解析値を比較した。なお、流速の測定には、高速度カメラ（解像度 2352×1728 、サンプリング周波数 150Hz）を用い、水中に混入させたトレーサー（直径：0.25mm、比重：1.01 のイオン交換樹脂）を画像解析（PIV）によって追跡することで測定した。

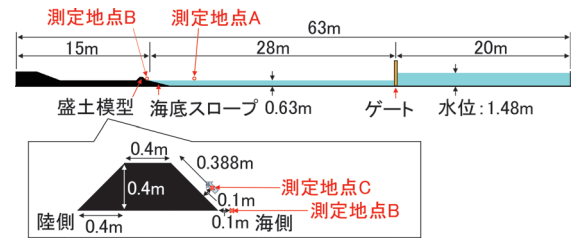


図3 越流実験の概要と剛体盛土模型

3.2 解析結果

図3に示す水路実験施設を直径 1.0cm の粒子によりモデル化した。同図の黒色の部分を固体壁粒子とし、水色の部分を流体粒子とした。動粘性係数は $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ に設定した。ゲートは実験の様子を撮影した動画から、1.0m/s の速度で上部に移動した。解析において、測定地点 A と B の波高は測定地点を中心とする幅 1.0cm の範囲に存在する最も高い粒子の高さとした。そのため、波が砕けて飛沫となる碎波の場合は、高く舞上がった飛沫が波高とみなされることがある。また、測定地点 C の流速は、測定地点を中心とする直径 1.0cm の範囲に存在する粒子の流速の平均値から求めた。

図4は、盛土模型に波が到達した時の越流状況を側面から見た結果である。図5は、盛土模型付近の波高・流速を比較した結果である。

測定地点 A では、時刻 6.0s~7.0s の間、解析の波高に振動が発生している。この波高の振動は、進行する波の表面上を飛跳ねる微少な飛沫が生じた結果である。それ以外の時刻では、実験と解析の波高は概ね一致している。

測定地点 B では、時刻 8.0s~9.2s の間、解析の波高が大きい結果になっている。解析では、全ての飛沫を観測してしまうため、このような結果になる。それ以外の時刻では、実験と解析の波高は概ね一致している。

測定地点 C では、波が盛土模型に衝突した直後の時刻 8.3s~8.5s の間は、解析の方が、流速が大きい、その後、徐々に解析の方で流速が減衰する様子がみられる。

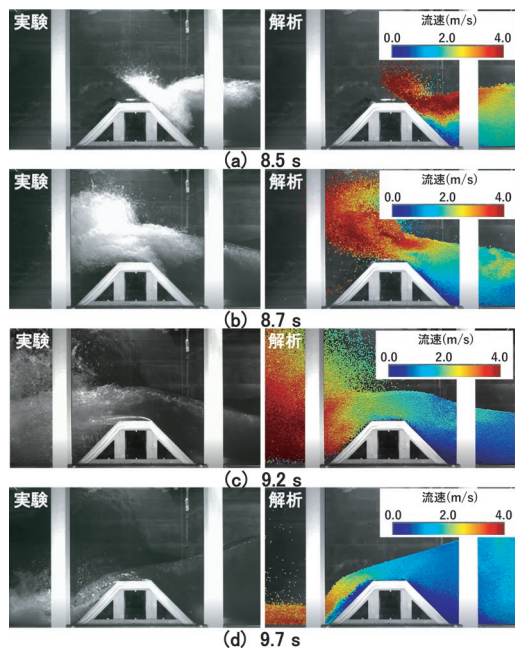


図4 津波到達時の解析結果（カラーバー：流速（m/s））

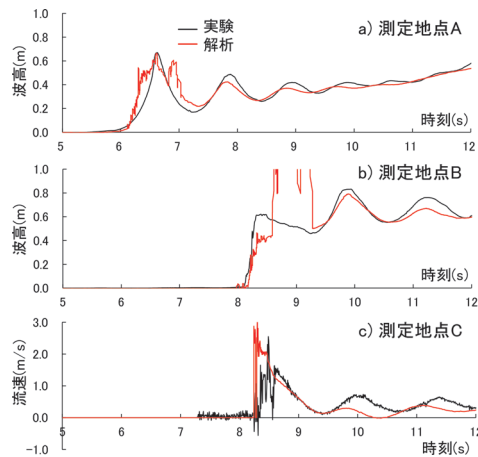


図5 盛土模型付近の波高と流速の結果

これらの結果から、飛沫発生箇所での妥当性は、図4の実験写真と解析結果を目視で比較して類似することを確認できる程度であるが、それ以降は、解析結果の減衰が若干大きいものの実験を概ね再現しているといえる。

4. MPM-MPS 連成解析の洗掘解析に対する適用性

4.1 補強盛土模型に対する津波洗掘実験の概要

過去に鉄道総研で実施したジオテキスタイル補強盛土模型に対する津波越流および洗掘実験¹⁴⁾¹⁵⁾の再現解析を実施した。本実験模型の概要を図6に示す。実験模型は、補強盛土および支持地盤から構成され、左側から右側への一方方向の越流を長時間継続して受けた際の補強盛土堤体と支持地盤の洗掘挙動（落堀）について検討している。

表1に実験に用いた地盤材料について示す。支持地盤については細粒分を含んだベントナイト混合珪砂を用いている。表中に示した支持地盤の粘着力および内部摩擦角は、この地盤材料と類似した配合を有する材料（配合率、珪砂6号：珪砂8号：ベントナイト＝50：50：1（重量比）、含水比 $w=15.0\%$ 、湿潤密度： 1.57g/cm^3 ）で実施した三軸圧縮試験（CUb試験）より得られたものである。なお、補強盛土堤体についてはL2地震に対する耐震設計がなされた鉄道盛土を想定し、盛土材料としては粒調碎石を用い、その内部にはジオテキスタイルを敷設している。そのため、支持地盤と比較して強度が高く実験時に生じた浸食も限定的であったことから、解析上、弾性体でモデル化した。

4.2 解析モデル

図7に解析モデルを示す。本モデルは3次元モデルであるが、奥行長さを 0.01m とした平面ひずみ条件の2次元モデルとしてモデル化した。

水流は、MPS粒子が左側境界から進入して右側境界

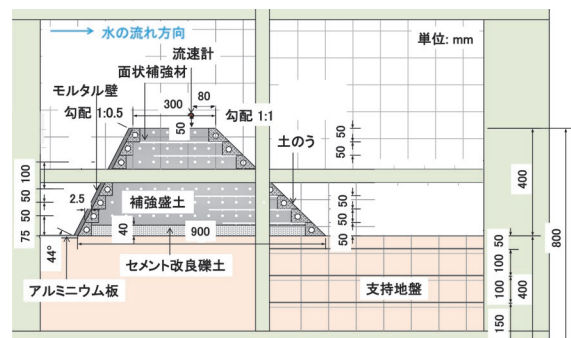


図6 補強盛土に対する津波越流 / 洗掘実験模型

表1 実験に用いた地盤材料と解析に用いた強度

種別	地盤材料	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (°)
支持地盤	ベントナイト 混合珪砂	86.8*	30.9*
補強盛土	粒調碎石＋ セメント改良土	-	-

※類似試料の三軸圧縮試験より得られた値

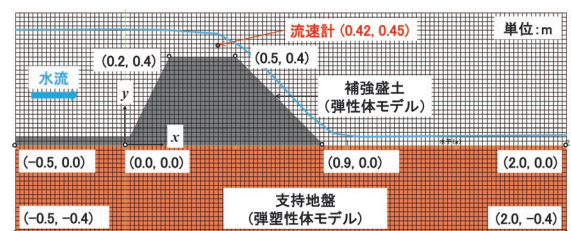


図7 津波越流 / 洗掘解析の解析モデル

へ抜けていくようにモデル化し、左側から右側への一方の流れを表現した。また、MPS 粒子の動粘性係数を $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ に設定した。

支持地盤および補強盛土は、ともに MPM でモデル化し、左端は固定境界、右端および下端は MPM 粒子が境界を越えた時点で粒子を削除した。このような境界を設定することで、右端および下端は無限に連続した状態を表現している。支持地盤の構成則として、Drucker-Prager モデルを降伏曲面とする完全弾塑性モデルを適用し、補強盛土は弾性体でモデル化した。支持地盤の粘着力、内部摩擦角は表 1 に示したものを適用し、変形係数は $5.0 \times 10^3 \text{kPa}$ に設定した。盛土部分の変形係数は、強度が高いことを踏まえ $2.0 \times 10^4 \text{kPa}$ に設定した。また、模型実験において、左端から盛土までの支持地盤の地表面にアルミ板を敷設していたことを踏まえ、変形係数 $2.0 \times 10^4 \text{kPa}$ の弾性体粒子を配置した。背面格子長さは 0.020m とし、各格子に 4 個粒子を設定した。

土と水の相互作用力は、Akbari らの式を適用し、定数 α 、 β は、けい砂 6 号、8 号が主流であることを踏まえ、けい砂 6 号の定数 ($\alpha = 388 \text{s}^{-1}$ 、 $\beta = 4630 \text{m}^{-2}$) を用いた。

4.3 解析結果

図 8 に、同時刻での実験結果と解析結果（流速と支持地盤内の最大せん断ひずみ分布）を示す。流速は、盛土天端から落水時に最大となり、支持地盤との衝突時に減速している。支持地盤の洗掘の進行により、洗掘形状に沿った流れが発生し、計算終了時には、支持地盤に衝突

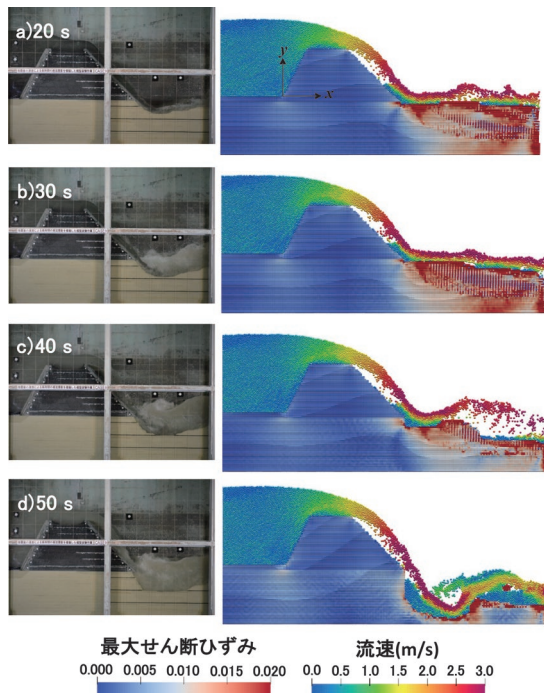


図 8 津波越流・洗掘実験の実験、解析結果

した水が跳ね返り、渦状の流れが生じている。これらの挙動は、実験で目視観察された挙動と類似している。

支持地盤内の最大せん断ひずみ分布に着目すると、水流衝突時に、くさび状、円弧状のすべり面が確認できる。これは、支持地盤の地表面に対して法線方向に作用する水流による衝突力で、支持地盤がすべり破壊した状況と考えられる。その後、支持地盤表面の浸食に伴い、支持地盤内の拘束圧が低下し、それに伴って地盤強度も低下し、洗掘がより一層進行したものと考えられる。

本検討により、粒子法を用いた土と水の連成解析手法を用いて、実験で見られた洗掘状況および経時変化を定性的に再現する結果が得られたと考えられる。今後は定量的にも良好な再現結果を得ることに向けて、解析精度の高度化についてさらなる検討を進めていきたい。

5. まとめ

地震および豪雨時に発生する盛土の津波越流および洗掘に関する解析手法を開発し、先行研究における模型実験の再現解析を実施した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 土と水の相互作用力として Akbari らの式を用い、土の大変形を解析可能な MPM と水の流れを解析可能な MPS を双方向に連成した解析手法を開発した。
- (2) 既往の研究で実施された剛体盛土モデルに対する津波越流実験の再現解析を実施し、津波越流現象に対する MPS の有効性を確認した。
- (3) 既往の研究で実施された補強盛土モデルに対する津波越流および洗掘実験の再現解析を実施し、MPM と MPS を連成した解析手法により、支持地盤の洗掘形状と経時変化を定性的に再現できることを確認した。

なお、本論文は文献 16 と同じ内容を含んでいる。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17K05152 の助成を受けて実施した。

文 献

- 1) 地盤工学会：地震時における地盤災害の課題と対策 2011 年東日本大震災の教訓と提言, 2012
- 2) 太田直之：短時間に強く降る雨による土砂災害を防ぐ, 第 30 回鉄道総研講演会, 2017
- 3) S. Koshizuka, Y. Oka: Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, Nucl. Sci. Eng., Vol. 123, pp.421-434, 1996.

- 4) L. Lucy: A numerical approach to testing the fission hypothesis, *Astron. J.*, Vol. 81, pp.1013-1024, 1977.
- 5) P.A. Cundall, O.D.L. Strack: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol. 29, pp.47-65, 1979.
- 6) D. Sulsky, Z. Chen, H.L. Schreyer: A particle method for history-dependent materials, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 118, pp.176-196, 1994.
- 7) 後藤仁志, 鶴田修己, 原田英治, 五十里洋行, 久保田博貴: 固液混相流解析のための DEM-MPS 連成手法の提案, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No.2, I_021-I-025, 2012
- 8) H. Akbari, and M. Montazeri Namin: Moving particle method for modeling wave interaction with porous structures, *Coastal Engineering*, Vol. 74, pp.59-73, 2013.
- 9) H. Akbari: Modified moving particle method for modeling wave interaction with multi layered porous structures, *Coastal Engineering*, Vol. 89, pp.1-19, 2014.
- 10) S. Ergun: Fluid flow through packed columns. *Chem. Eng. Prog.* Vol. 48, 1952.
- 11) J. Prieur du Plessis: Analytical Quantification of Coefficients in the Ergun Equation for Fluid Friction in a Packed Bed, *Transport in Porous Media*, Vol. 16, pp.189-207, 1994.
- 12) A. Shakibaeinia, Y.C. Jin: A Weakly Compressible MPS Method for Modeling of Open-boundary Free-surface Flow, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 63, pp.1208-1232, 2010.
- 13) 野中隆博, 渡辺健治, 松浦光佑, 工藤敦弘, 毛利栄征, 松島健一, 田村幸彦, 飯島正敏: 津波により盛土のり面周辺に作用する揚圧力の評価, 第 49 回地盤工学会研究発表会, 2014
- 14) 渡辺健治, 中島進, 藤井公博, 工藤敦弘, 松浦光佑: 粘り強い鉄道盛土構造で大地震と長時間の津波越流に耐える, *RRR*, Vol. 73, No.3, pp.24-27, 2016
- 15) K. Watanabe, S. Nakajima, K. Fujii, K. Matsuura, A. Kudo, T. Nonaka, Y. Aoyagi: Development of geosynthetic reinforced soil embankment resistant to severe earthquakes and prolonged overflows due to tsunamis, *Soils and Foundations*, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.08.006>.
- 16) K. Abe, K. Murotani and K. Watanabe: Development of MPM-MPS coupling method and numerical analysis of scouring of embankment caused by overflow, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics)*, Vol. 76, No. 2 (*Journal of Applied Mechanics*, Vol. 23), I_205-I_216, 2020.