

Smoothed Particle Hydrodynamics 法による粒状地盤の浸透破壊解析手法の開発

名古屋工業大学 正会員 前田 健一
 名古屋工業大学[院] 学生会員 坂井 守
 名古屋工業大学[院] 学生会員 ○坂井 宏隆

1. はじめに

地盤の浸透破壊挙動に及ぼす土の不飽和度や間隙水の飽和度の影響は大きく、地盤内に発生する気泡が地盤を劣化させることは重要な課題であると指摘されている¹⁾。洪水時の堤防の決壊や激しい水位変動を受ける斜面の崩壊、波浪を受ける海底地盤、海底メタンハイドレード採取時に予想される海底地盤の変状等は、固(土)・液(水)・気(空気等)相3相の相互作用による複雑な変形・破壊挙動である。一方で、地盤材料のような離散性材料の変形・破壊挙動は流動変形や極度の変形の局所化を伴う。そこで、本報告では、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法^{2), 3)}を用いた解析法の提案を行う。また、簡単な模型実験で観察された現象と解析結果⁴⁾を比較し、解析法の妥当性と可能性を検討する。

2. 解析方法

2.1 SPH 法の特徴

大変形を伴う破壊解析には Discrete な解析法が有用であるが、個別要素法 (DEM) 等では大きな解析領域の問題には向かない。一方、FEM では流動変形、亀裂、剥離、相変化や複雑で異なる相間の界面の発生や移動を扱うのは難しい。そこで、本研究では、メッシュフリー法の一つで、宇宙物理分野から発達した SPH 法^{2), 3)}を用いて Discrete な手法と連続体的手法の長所を生かした手法の開発に取り組んでいる。

2.2 SPH 法における離散化

SPH 法は重なり合って存在する連続体の粒子状の素片(図 1 参照)に着目し、状態方程式や構成式を取り込むとともに個々の素片(半径 h)に対して Lagrange 的に運動方程式を計算する。土であれば土粒子ではなく土塊を、水は水塊を要素とする。本研究では SPH 法に数種の工夫を施した⁵⁾。したがって、DEM に比べて大きなサイズの解析が容易にでき、剥離や吸着等の離散的挙動の表現も可能となる。素片同士の重なり合いで場を記述し、物理量は素片中心と共に移動する。ここで、 x_i における物理量 f_i やその gradient は、次式のように x_j に中心が位置する周辺の素片 j (質量と密度を m_j, ρ_j) の物理量 f_j と平均化関数 (Smoothing Function/ kernel Function) W_{ij} (3 次 B-Spline 関数) の重ね合せで表現できる。

$$\langle f(\mathbf{x}_i) \rangle \cong \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_j} W_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) \quad (1)$$

$$\nabla \langle f(\mathbf{x}_i) \rangle \cong \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_j} \nabla W_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) \quad (2)$$

また、平均化関数において次式が成り立つ。

$$\int W_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) d\mathbf{x}_j = 1 \quad (3)$$

2.3 密度計算方法の工夫と運動方程式の定式化

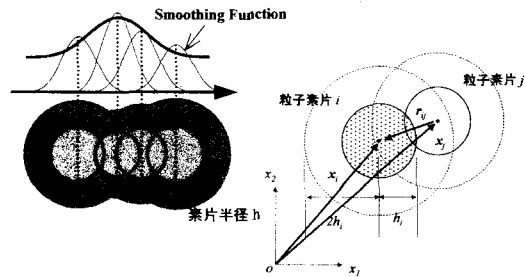


Fig.1 Particles and distributions of a physical property in SPH.

式(1)において $f_i = \rho_i$ とすると密度は次式となる。

$$\rho_i = \sum_{j=1}^N m_j W_{ij} \quad (4)$$

しかし、密度や状態方程式が大きく異なる物質が接する境界付近や自由境界付近の誤差が大きくなる。そこで、次式のように (例えば物質 a について)、同じ物質間で重ね合せをし、正規化することでこの問題を回避する工夫をした。

$$\rho_{i \in \text{Material } a} = \frac{\sum_{j \in \text{Material } a} m_j W_{ij}}{\sum_{j \in \text{Material } a} \left(\frac{m_j}{\rho_j} \right) W_{ij}} \quad \text{for Material } a \quad (5)$$

また、各相の運動方程式は、素片 i の速度を \mathbf{v} 、応力テンソルを $\boldsymbol{\sigma}$ 、物体力を \mathbf{f}_i とすると次式のようになる。

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\boldsymbol{\sigma}_j}{\rho_j^2} + \frac{\boldsymbol{\sigma}_i}{\rho_i^2} + \Pi_{ij} \mathbf{I} \right) \cdot \nabla W_{ij} + \mathbf{f}_i \quad (6)$$

ここで、 Π_{ij} は素片同士の衝突時の衝撃を緩和するダンパーの役割を果たす^{2), 3)}。

2.4 各相の相互作用

固体相と流体相との重ね合せの際には両者の間に空隙率 n と透水 (もしくは透気) 係数 k を考慮した以下の相互作用力 $\mathbf{f}^{sf} = -\mathbf{f}^{fs}$ を次式のように導入する。

$$\mathbf{f}^{sf} = -\mathbf{f}^{fs} = n \frac{\rho_f g}{k} (\mathbf{v}^s - \mathbf{v}^f) \quad (7)$$

2.5 各相の状態方程式および構成則

本報告の解析で用いた各相の状態方程式と構成則は紙面の都合上省略する (既報⁵⁾ と同じである)。気体は空気を想定した圧縮流体、液体は水を擬似非圧縮体、土は弾・完全塑性体とした。

3. 解析結果

アクリル製の水槽内に豊浦砂で地盤を作成し均等に水位を上昇させ、その後、水位差による浸透流を生じさせた (図 2)。空隙水内の DO が低い場合には、図 2 に示すように、矢板周りの浸透破壊では上流と

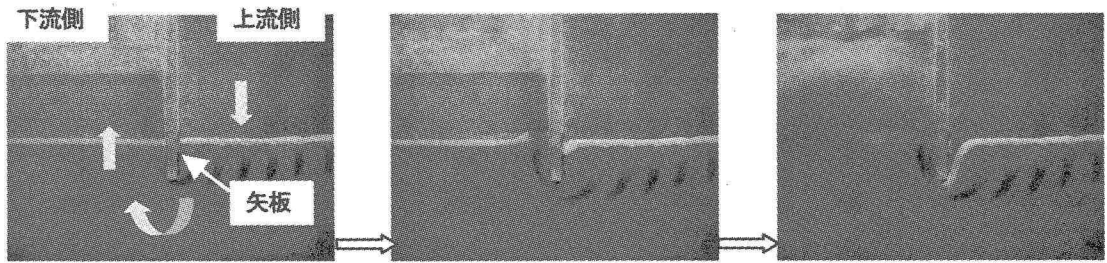


Fig.2 Model test about seepage failure of sandy ground around sheet pile with water of lower DO at critical head.

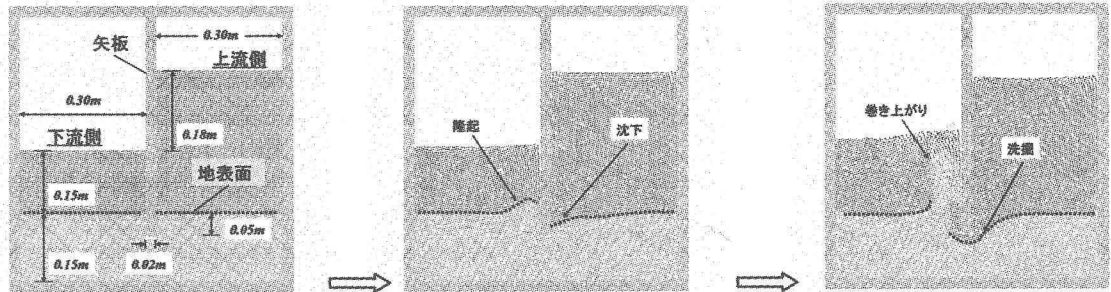


Fig.3 SPH analysis about seepage failure of sandy ground around sheet pile with water of lower DO.



Fig.4 Seepage failure of sandy ground around sheet pile with water of higher DO even below critical head.

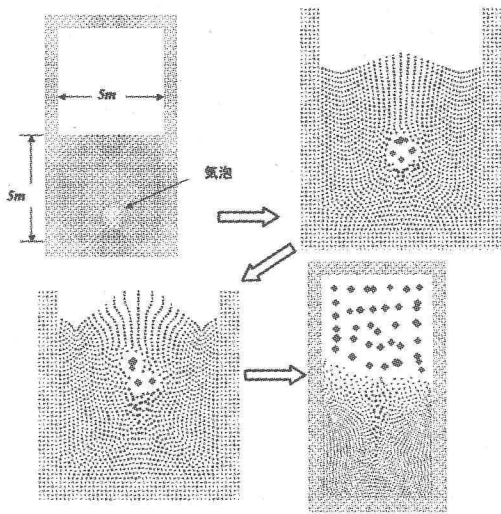


Fig.5 Two phase analysis of air bubbles in water.

下流の水位差が限界水位差に達すると急激に矢板周辺の地盤の変状が進み破壊に至る。解析結果を図3に示す。矢板周辺の地盤表面の下流側の隆起と上流側の沈下が進行し、やがて下流側では地盤が液状になり舞上がり、下流では洗掘が生じており、図2の模型実験の結果を良く表現できているといえる。一方、DOが高いと限界水位差よりも低い水位差を

保持した場合であっても、地盤は時間をかけてゆっくりと浸透破壊する。これは、図4に示すように地盤内に気泡が発生・発達し移動することに起因し、破壊前に下流側から気泡の激しい噴出がみられる。下流側にある空気の上昇速度は浮力のため水流よりも速く、しかも地盤内に大きな間隙をつくり地盤を劣化させる。この現象をSPH法で再現するにあたり、本報告では気相と液相の相互作用について図5のように、水の中に小さな気泡を集めた領域を作成し、気泡の浮上挙動を解析した。気泡群の浮上により水面が部分的に隆起し、水面が裂け気泡が飛び出していく様子が再現され、その際に気泡群が分裂していることがわかる。このようなダイナミクスの再現は提案する式(5)の密度算定の工夫の成果といえる。

4. おわりに

本報告の結果からも提案するSPH法による固・液・気3相の浸透破壊の表現は十分に可能であるといえる。今後は、模型実験による流速場、水圧、間隙等の変化の計測、3相相互作用による事例解析を試みたい。また、相変化の組込み、DEMとSPHの組み合わせによるさまざまなスケールにおける不飽和土の挙動への適用を試みる。

参考文献

- 1) 小高猛司, 浅岡頭, 土木学会論文集, 487/III-26, 129(1994).
- 2) L. B. Lucy, , Astronomical Journal, 82, 1013(1977).
- 3) R. A. Gingold and J. J. Monaghan, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 181, 375(1977).
- 4) 溝口洋一, 坂井守, 前田健一, 第39回地盤工学研究発表会概要集, 1177(2004).
- 5) 前田健一, 坂井守, 土木学会応用力学論文集, 7, 775(2004).