

SPH 法を用いた複雑流れとしての土石流の連続体解析

名古屋工業大学 ○ 前田健一
名古屋工業大学 坂井宏隆
名古屋工業大学 福岡雅俊
名古屋工業大学 舘井 恵

1. はじめに

斜面災害のメカニズム解明や被害の予測という観点から数値解析には、大変形、流動変形、破壊、剥離、接触といった固体と流体の両方の挙動を再現できる必要がある。また、土砂と流体の混合体として取り扱う際には、土砂という固体とその間隙に存在する間隙水との相互作用、つまり連成問題を解く必要がある。さらに、局所的な内部侵食から大規模崩壊、流動、堆積と一連の現象を連続して表現できる方が望ましい。このような計算は数値実験として用いることで、メカニズム解明や設計の大きな手助けとなるとおもわれる。

以上のことを鑑みると、メッシュを有する連続的手法や計算要素が極端に小さな分散化手法では上記の要求に応えることが難しい場合がある。そこで、両者の長所を活かしたメッシュフリー手法で粒子法的一种である、SPH (Smoothed Particle Method) 法^{1), 2)}を用いることが一つの解答とおもわれる。粒子法では、連続体としての計算要素(有限要素法のメッシュ)を援用しつつも、上記のような変形・流動・破壊のような現象を追跡することが可能である。また、連続体としての一面をもつので、開発された構成モデルも取り込むことが可能な点が特徴である。さらに細かな現象の表現には個別要素法(DEM)との併合も考えられる。

本報告では、著者が土砂災害に適用できるようにSPHを改良した点について述べ、そのパフォーマンス例を示す。さらに、土砂災害解析として必要な事項について検討する。

2. 数値解析手法

2.1 SPH 法の概要

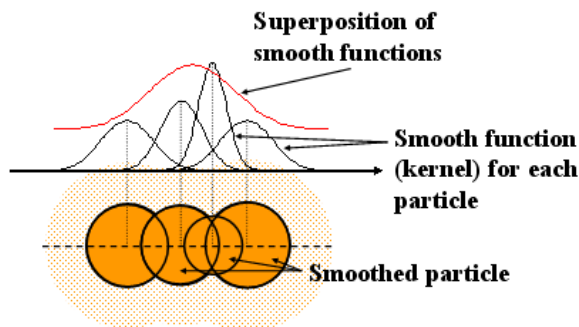


図-1 SPH 法における物理量の表現

SPH 法は宇宙物理分野から発達した Lagrange 的手法である^{1), 2)}。この手法では、土粒子や水分子を要素とするのではなく、土や水の集合体である「土塊」や「水塊」を一つのメッシュ(粒子素片)とし、各素片が物理量を

有し滑らかな重み関数(kernel function)に従って分布させる(図-1)。任意の点の物理量は重み関数の重ね合わせで表現できる。SPH 法では個別要素法に比べ粒子数は少なく有限要素法のような大領域での計算を可能としながらも、個別要素法のような粒子としての挙動も再現可能である。この手法は様々な改良³⁾が成されている。

2.2 土砂解析のための改良点⁴⁾

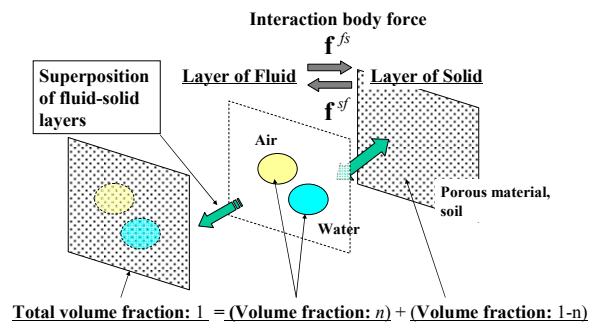


図-2 固体相と流体相の重ね合わせ(連成)

オリジナルの手法^{1), 2)}では自由表面や境界面における密度計算が問題となる。そこで、本研究では式(1)のように密度計算式の正規化を行うとともに、同一物質のみを計算対象とすることでこの問題を解決した。

$$\rho_{i \in (\text{Material } a)} = \sum_{j=1}^N m_j W_{ij} / \sum_{j=1}^N (m_j / \rho_j) W_{ij} \quad (1)$$

ここに、 m , W , ρ はそれぞれ粒子素片の質量、重み関数(Kernel function)、密度である。また、連成を表現するために固体相と流体相をともに SPH 法で計算し、式(2)に示すとおり作用力を考慮して重ね合わせる(図-2)。

$$f^{sf} = n \rho_f g / k (v_s - v_f) \quad (2)$$

ここで、 f^{sf} , n , ρ_f , k , v_s , v_f はそれぞれ固体相から流体相への作用力、間隙率、流体相の密度、透水係数、固体相と流体相の速度を表す。さらに、流体相の表面張力効果を導入するため、式(3)で表わされる力を導入している。

$$(dv_i/dt) = 2a/m_i^2 \sum_{j=1}^N m_j \nabla_i W_{ij} \quad (3)$$

ここで a は物質に応じた定数である。

3. 計算結果例

図-3 に水，粘性が水の 3 倍の流体，摩擦材料によるダムブレイク現象の解析例である．材料の特徴を表現できるといえる．

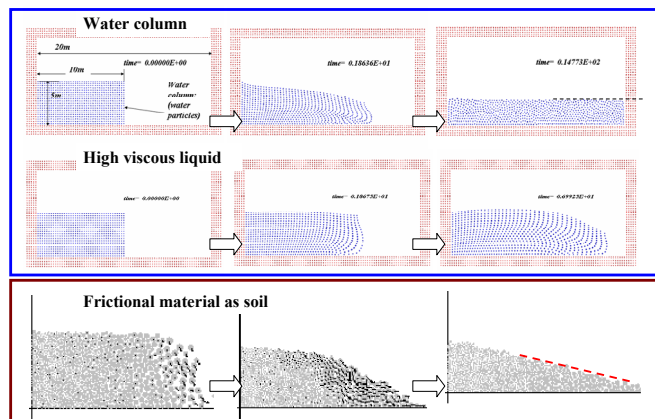


図-3 SPH 法によるダムブレイク計算例：上から，水，水の粘性の 3 倍の流体，摩擦性材料．

図-4 は土砂の堤体に図の左側の水位が上昇し堤体が進行性破壊を起こす様子を計算したものである．初期条件を図-4(a)に，素片の移動速度分布を図 4-(b-d)を示す．

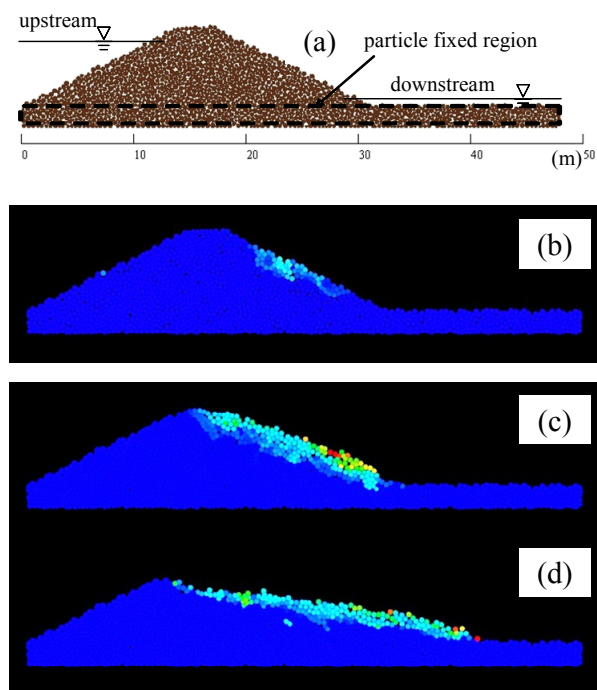


図-4 SPH 法による進行性破壊挙動の再現

堤体内に浸透後，堤体左側（上流部）を一定水位とした．水位上昇後，堤体右側（下流部）の法面中腹域で小崩壊がはじまり（図-4(b)），堤体上部に向かって伝播していく（図-4(c)）．法先からの崩壊がいったん上部に達すると，堤体法面が図-4(d)のように洗い流される．この結果から分かるように，侵食，変形，崩壊，流動，堆積というプロセスが固体－流体連成のもと表現可能である．

さらに，地盤内に気泡が発達し地盤を劣化させながら破壊が進行する現象も表現するのに成功している．ただし，気泡発生の変態についてはエンタルピーを用いたモデリングを行っている途中である．

4. 粒度変化を考慮した構成モデルの導入⁶⁾

図-4 からわかるように，堤体の決壊に代表される浸透破壊現象は，土砂の移動とそれに伴う変形によって局所的な破壊が進行し，マクロな破壊へと発達する．また，土構造物内部で土粒子の移動が生じるとパイピング時の限界動水勾配が著しく低下するとの報告や，気泡が介在する地盤では間隙比の増加に伴う限界動水勾配の低下に加えて浸透力の増加を招きボーリングに対する安全性が低下するという研究⁹⁾がある．よって，このような現象を適切に評価するためには透水力による土粒子とそれに伴う変形を同時に扱う構成式が必要となる．

そこで，著者らは個別要素法（DEM）を用いて，細粒分流出に伴う粒度変化による変形・破壊挙動を解析しそのメカニズムとモデリングを試みている⁶⁾．この構成式は従来のように材料が一定で応力やひずみ状態が変化するというものでなく，例えば応力状態が一定であっても，材料自身がその特性を変えることで生じる力学現象を表現しなければいけない．このようなモデルを開発した数値解析に取り入れることで，内部侵食から堆積までの一連のプロセスを解析可能と考えている．

謝辞： この研究で用いた装置の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)20360120 および特別研究員奨励費 20-8411 によるものであり，深謝の意を表します．

参考文献：

- 1) Gingold, R.A. and Monaghan, J.J.: Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.181, pp.375-389, 1977.
- 2) Lucy, L. B.: A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, Astronomical Journal, Vol.82, pp.1013-1024, 1977.
- 3) G. R. Liu, M. B. Liu: Smoothed Particle Hydrodynamics, World Scientific, 2007.
- 4) K. MAEDA, H. SAKAI and M. SAKAI: Development of seepage failure analysis method of ground with smoothed particle hydrodynamics, Journal of structural and earthquake engineering, JSCE, Vol.23, No.2, pp.307-319, 2006.
- 5) 小中智博, 坂井宏隆, 前田健一: 浸透流を受ける砂地盤の安定性に及ぼす気泡の影響, 第 43 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1095-1096, 2008.
- 6) D. M. Wood and K. MAEDA: Changing grading of soil: effect on critical states, Acta Geotechnica, Vol.3, No.1, pp.3-14., 2008.