第 部門 地盤工学分野へのSPH法適用に関する一考察

立命館大学理工学部 学生員 里見 知昭 立命館大学大学院 学生員 Ha, H. Bui 立命館大学 COE 推進機構 正会員 酒匂 一成 立命館大学理工学部 正会員 深川 良一

1.はじめに

我が国は自然災害と向き合う機会が多く,2004年は観測史上最多10個の台風上陸を記録し,集中豪雨が誘因となった斜面崩壊や河川の氾濫により多大な被害を受けた.これらの現象を適切に評価するには,構成する要素を粒状体としてモデル化し,解析による解明を試みることも意義のあることである.しかし,従来の粒子法は個々の粒子に着目してきたために,コンピュータの負担が問題となった.斜面崩壊のような大きな解析領域では計算コストが懸念され,新たな解析手法の適用が必要となっていた.本報告では宇宙物理学で適用された SPH 法(Smoothed Particle Hydrodynamics)¹⁾を用いて,解析手法の有用性に関する検討および地盤工学分野への適用に関する考察を試みた.

2.解析方法

まず,SPH 法の概要について述べる.SPH 法は個々の粒子に着目せずに,流体を粒子群(個々の粒子の集合体;以後,粒子と呼称)として離散化する.粒子は連続体力学に基づく支配方程式を満たす.図-1 に示すように粒子間の相互作用を考慮するために,評価粒子i を中心に影響半径h を設定する.その際,円内の周辺粒子j は評価粒子i からの影響を受け,影響半径h の外にある粒子の影響は受けないようにする.また,粒子の重なりによる密度分布の円滑性やそれぞれの粒子に対する相互作用を与えるために,平滑化関数W (本報告では,2次元の SPH 法での 3 次のスプライン関数を適用:式(2),s の範囲外はW=0 と設定)より物理量に重みを掛ける(図-2 参照).したがって,位置x の物理量 f(x) は以下のように表現される.

$$\langle f(x)\rangle = \int f(x')W(x-x',h)dx'$$
, $\int W(x-x',h)dx'=1$ (1)

$$W_{ij} = \frac{15}{7\pi h^2} \begin{cases} \frac{2}{3} - s^2 + \frac{1}{2}s^3 & (0 \le s < 1) \\ \frac{1}{6}(2 - s)^3 & (1 \le s \le 2) \end{cases}, \quad s = \frac{\left|x_i - x_j\right|}{h}$$
 (2)

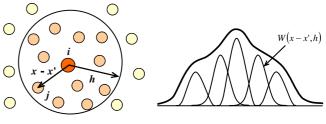


図-1 SPH 法の概念

図-2 SPH 法による物理分布

次に、SPH 法で表記した連続式と運動方程式を示す.

連続式:
$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{i=1}^{N} m_j v_{ij} \nabla_i W_{ij} , \quad v_{ij} = v_i - v_j$$
 (3)

運動方程式:
$$\frac{dv_i}{dt} = -\sum_{j=1}^{N} m_j \left(\frac{\sigma_j}{\rho_j^2} + \frac{\sigma_i}{\rho_i^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla W_{ij} + F_i$$
 (4)

ここで, ρ ,m,v, σ_{ij} , Π_{ij} , F_i はそれぞれ密度,質量,速度,応力,人工粘性,体積力を意味する.また,i,jは粒子番号を示している.

最後に,計算手順について述べる.初めに,粒子の初期パラメータの入力を行い,影響半径を設定する.連続式(式(3))より密度を計算し,状態方程式および構成式より応力を求める.そして,応力を用いて運動方程式(式(4))より粒子の変位を求める.このとき,速度の修正として XSPH という手法を用いる 2).この手法で用いた係数 ε は $0 \le \varepsilon \le 1$ の範囲を満たし,今回は流体の挙動を考慮して $\varepsilon = 0.001$ を用いた.また,境界の設定方法は J.J.Monaghan の方法にならっており 3),用いた係数は $n_1 = 12$, $n_2 = 4$ としている.

3.解析結果および考察

図-3 /4 は矢板周りの水の挙動を解析した結果である.ここで,水面が下降および上昇している様子が見られた.また,下降時において水面が下に凸となっている過程が示された.しかし,図-3 では水面が一致する結果が得られなかった.この原因として境界設定における不明確性が推測される.そこで,図-5 に示している境界を2層とする提案により境界からの影響を明確に

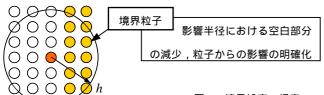


図-5 境界設定の提案

すると考えた.図-4 が改善による解析結果であり,最終的に水面が一致する結果が得られたので,良好に表現できたと考えられる.したがって,1 層から2 層への提案によって解析結果は定性的ではあるが,改善された.今後は境界の設定について検討を行う.

4. 地盤工学分野へのSPH法適用について

地盤工学分野における SPH 法を用いた既往の研究 についてまとめる.前田ら4)は SPH 法において地盤材 料による浸透破壊解析手法を提案しており,成果を挙 げている. 土粒子からなる固体相と, 水および空気か らなる流体相を個別のレイヤで表し,全ての相を SPH 法で解いて重ね合わせる方法より、混相における解析 の成果を挙げている.ここで,地盤の浸透現象の一例 として降雨時の斜面崩壊が挙げられる.今後, SPH法 を斜面に適用するためには,以下に示す現象を念頭に おく必要がある.まず,浸透による土の含水比の増加 から変形・破壊を引き起こす.また,浸透力によるパ イピング、表面流によるガリ浸食が起きる.この際に, 粒子法の一つである SPH 法を用いて降雨時の斜面に おける様々な現象を適切に評価できるのではないかと 推測される.この理由として,粒子法は離散的に扱っ ているために変形に留まらず,破壊の表現ができるこ

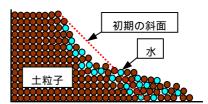


図-6 斜面崩壊のイメージ

とである.また,SPH 法は粒子群として扱うために粒子数の問題が解決され,斜面に対して適用性があると考えられる.以上より,降雨時の斜面における現象を解析によって表現するには(図-6 参照),土が三相構造であることから液体,気体,固体による混相の解析が必要となる.例えば,液体と固体より飽和状態,気体と固体より乾燥状態の適切な表現が可能ではないかと推測される.解析に用いる際の構成式は対象とする要素において任意に適用可能であることが分かっているため,構成式に関する検討が今後の課題である.
[参考文献]

- Monaghan, J.J. & Gingold, R.A.: Shock Simulation by the Particle Method SPH, J.Comput.Phys., Vol.52, pp.374-389, 1983.
- Monaghan, J.J.: Smoothed particle hydrodynamics, Annual Review of Astronomy and Astrophysics., Vol.30, pp.543-574, 1992.
- 3) Monaghan, J.J.: Simulating free surface flow with SPH, J.Comput.Phys., Vol.110, p.399, 1994.
- 4) 前田健一, 坂井守: Smoothed Particle Hydrodynamics 法による粒状地盤の浸透破壊解析手法の開発, 土木 学会, 応用力学論文集, Vol.7, pp.775-786, 2004.

