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

<u>1.はじめに</u>

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.

<u> 2 . 解析方法</u>

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.

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

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



次に ,SPH 法で表記した連続式と運動方程式を示す . 連続式 : $\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{i=1}^{N} m_j v_{ij} \nabla_i W_{ij}$, $v_{ij} = v_i - v_j$ (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, $\rho, m, v, \sigma_{ij}, \Pi_{ij}, F_i$ 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.

<u>3.解析結果および考察</u>

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

Tomoaki SATOMI, Ha, H. Bui, Kazunari SAKO, Ryoichi FUKAGAWA



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.
- Monaghan, J.J. : Simulating free surface flow with SPH, J.Comput.Phys., Vol.110, p.399, 1994.
- 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.

