第Ⅲ部門　　SPH 法を用いた地震時斜面の応答解析における境界条件および人工粘性項に関する一考察

立命館大学　理工学部　学生員　○松本　拓
立命館大学　総合理工学研究機構　正会員　BUI H. Ha
立命館大学　グローバル・イノベーション研究機構　正会員　酒匂　一成
立命館大学　理工学部　フェロー会員　深川　良一

1.　はじめに

FEM(Finite Element Method:有限要素法)や DEM（Distinct Element Method:個別要素法)等が、従来、斜面崩壊問題の解決に良く用いられてきた。しかし、メッシュに基礎を置く FEM 法では、大規模変形問題を取り扱うことが困難であり、また、DEM 法では粒子数が膨大な量になるため計算コストが高くなる。そこで、本研究では、メッシュを必要とせず、計算コストにも優れている SPH 法を地震時斜面の応答解析に適用する。具体的には、SPH 法において境界条件の結果に与える影響および人工粘性項のパラメータ決定について、検討を行った。

2.　SPH 法とは

SPH 法は、粒子群が質量・密度・応力などの材料特性有すると仮定するラグランジュ座標系に従うメッシュフリー法である。SPH 法は、Lucy[1)]や Monaghan[2)]によって宇宙物理学における課題に対応するために開発され、その後、広範囲に適用されてきた。

SPH 法では、コンピュータ上の領域は粒子の有限数に変更されている。各粒子の材料特性は Kernel 変換式を利用することにより計算される。Kernel 変換式は以下の式(1)のような物理量 $f(x)$ の積分表現に近似できる。

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x')W(x-x',h)\,\mathrm{d}x' \tag{1}$$

ここで、W は Kernel 関数つまり平滑化関数であり、h は W の影響領域を定める影響半径である。本研究では、Monaghan and Lattanzio[3)]によって提案された三次のスプライン関数を平滑化関数として適用する。

また、運動方程式は以下のように表現される。

$$\frac{Dv_i^{\alpha}}{Dt} = \sum_{j=1}^{N} m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} - \Pi_{ij}\delta^{\alpha\beta} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x^{\beta}} + g^{\alpha} \tag{2}$$

ここで、Π_{ij} は人工粘性であり、以下のように表現される。

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-\alpha_{\Pi} c_{ij}\phi_j + \beta_{\Pi}\phi^2}{\rho_{ij}} & v_{ij}\cdot x_{ij} < 0 \\ 0 & v_{ij}\cdot x_{ij} \geq 0 \end{cases} \tag{3}$$

c は粘着力、ϕ は内部摩擦角であり、α_{Π} と β_{Π} は人為的要素が大きい定数である。

3.　解析結果

3.1　解析条件

振動台実験のデータを基に**表-1** に示す地盤材料定数を用いた。

表-1　地盤材料定数

実験 Case	単位体積重量 γ(kN/m³)	粘着力 c(kPa)	内部摩擦角 ϕ(deg)	弾性係数 E(kPa)	ポアソン比 ν	湿潤密度 ρ_t(g/cm³)
1	16.8	0.78	22.56	2570	0.33	1.68

また、モデルとして高さ 50(cm)、長さ 90(cm)、斜面角は 45(deg)の二次元モデルを採用した。

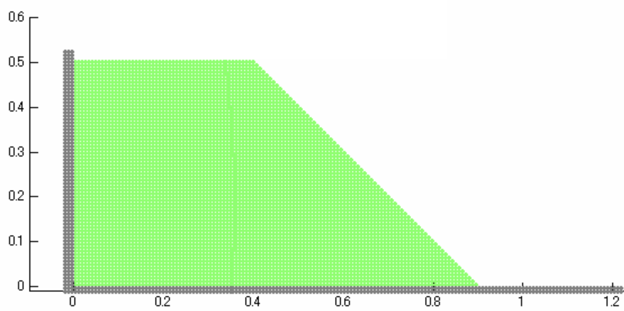

図-1　解析モデル

3.2　α_{Π}、β_{Π} の検証

以下に $\alpha_{\Pi} = 1.0$、$\beta_{\Pi} = 1.0$ (**図-2**)、$\alpha_{\Pi} = 0.1$、

Taku MATSUMOTO, Ha Hong BUI, Kazunari SAKO and Ryoichi FUKAGAWA

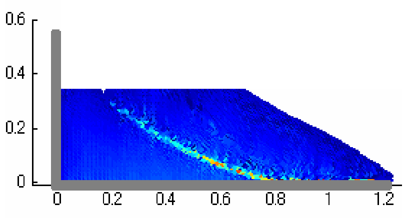

図-2 $\alpha_{\Pi}=1.0$ $\beta_{\Pi}=1.0$

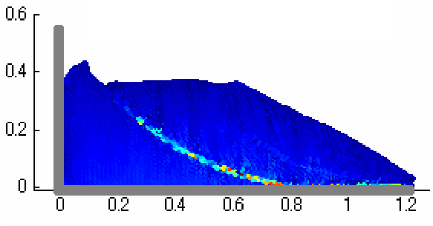

図-3 $\alpha_{\Pi}=0.1$ $\beta_{\Pi}=0.1$

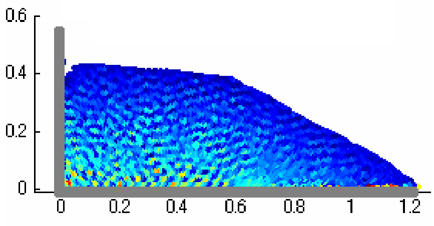

図-4 $\alpha_{\Pi}=0.01$ $\beta_{\Pi}=0.01$

$\beta_{\Pi}=0.1$ (図-3)、$\alpha_{\Pi}=0.01$、$\beta_{\Pi}=0.01$ (図-4)の 3 パターンの応力図を示す。

ここで図-4 では、応力状態が不安定であるため、人工粘性項に$\alpha_{\Pi}=0.01$、$\beta_{\Pi}=0.01$を適用することは不適切である。一方、図-2、図-3 から、この両図は応力状態が安定している。しかし、人工粘性項はより小さい値が好ましいため、本研究では$\alpha_{\Pi}=0.1$、$\beta_{\Pi}=0.1$を用いる。

3.3　境界粒子の選定

図-5 に示す Liversky[4]によるゴースト粒子の境界条件では、解析が進むにつれ境界粒子の消失が発生している。これは、影響半径外に粒子が移動したためであると考えられる。またゴースト粒子の境界条件は自由滑動条件であるため粒子に摩擦を与えることができない。そのため粒子は動き続けるといった結果を招いている。

次に、図-6 に示す Ha H. BUI[5]による固体粒子の境界条件では、粒子が動かないため境界粒子の消失は発生していない。よって、本研究では固体粒子の境界条件の方が望ましいという結果が得られた。

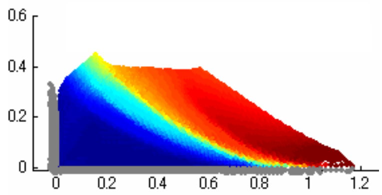

図-5 変位量（ゴースト粒子境界）

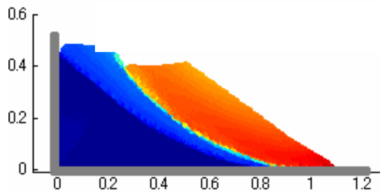

図-6 変位量（固体粒子境界）

4.　結論

得られた主要な結果を以下に述べる。

1) 境界条件についてはゴースト粒子の境界条件より、固体粒子の境界条件の方がより良い結果が得られた。

2) SPH シミュレーションにおいて、境界粒子がすべり面の形成を左右する。

3) 人工粘性は$\alpha_{\Pi}=0.1$、$\beta_{\Pi}=0.1$とした。境界条件を固体粒子境界とすると、ゴースト粒子時の問題を解決できる。

5. 参考文献

1) Lucy,L.B. : A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, Astronomical Joural, vol.82, pp.1013-1024, 1977.

2) Monaghan,J.J., Gingold,R.A. : Smoothing particle hydro-dynamics: theory and application to non-spherical stars, Mon. Not. R. Astr. Soc, vol.181, pp.375-389, 1977.

3) Monaghan JJ, Lattanzio JC. A refined particle method for astrophysical problems. *Astronomic and Astrophysics*, vol.149, pp.135, 1985.

4) Liversky LD, Petschek AG. Smoothed particle hydro-dynamics with strength of materials. In *Proceedings of the Next Free Lagrange Conference*, vol.395, Trease H, Frits J, Crowley W (eds). Springer: New York, pp.248-257, 1991.

5) Ha H. Bui, Ryoichi Fukagawa, Kazunari Sako, Shintaro Ohno. Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil constitutive model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol.32, pp.1537-1570, 2008.