SPH 法による人工粘性を考慮した 荒砥沢地すべりの滑動再現

石川 大地¹·小野 祐輔²·酒井 久和³

¹学生会員 法政大学大学院 デザイン工学研究科 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33) E-mail: daichi.ishikawa.4e@stu.hosei.ac.jp

²正会員 鳥取大学教授 工学部社会システム土木系学科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101) E-mail: ysk@cv.tottri-u.ac.jp

³正会員 法政大学教授 デザイン工学部 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33) E-mail: hisaki@hosei.ac.jp

本研究では、地すべり崩土到達距離の推定手法として SPH 法の適用性を示すことを目的に、荒砥沢地す べりを対象とした二次元の再現解析を行った.流動量が実被害に比べ過少評価される原因として人工粘性 を挙げ、その影響を感度分析した.荒砥沢地すべりの発生機構として、すべり層である砂岩・シルト岩が 地震時の間隙水圧に伴いせん断強度が低下したことが考えられ、残留内部摩擦角を見かけのせん断抵抗角 まで低減することにより、実被害の流動量・残留変形の特徴が良好に再現された.人工粘性の値を適切に 設定することで、荒砥沢地すべりの様な大変形を伴う問題に対しても SPH 法が適用可能であることを示 した.

Key Words: Aratozawa, landslide, Smoothe particle hydrodynamics (SPH) method, artificial viscosity

1. 研究の背景と目的

地震時における斜面崩壊・地すべり等の土砂災害は, 土砂の流動による直接的被害に加え,道路の寸断による 孤立集落の発生や河道の閉塞による家屋の水没といった 副次的災害を引き起こす.内閣府によると国内では 17,212 集落が災害時孤立集落になる可能性が指摘され, その内 97%の要因が「地震,風水害に伴う土砂災害によ る道路構造物の損傷,土砂堆積」である^D.ここ十数年 内に発生した大規模地震でも,土砂災害により集落の孤 立が多数発生し,救助支援活動・生活物資の搬送に支障 が生じた^D.こうした土砂災害による被害を低減するた めに,地震時における斜面の安定性に加え,崩壊時の流 動距離についても評価・検討することが重要である.

数値解析による斜面の安定性評価には有限要素法 (FEM)が広く用いられ、実績も豊富である.FEM は地す べり等の崩壊を伴う大変形の取り扱いは不得意であるた め、崩土の流動距離の評価には必ずしも適していない. 個別要素法(DEM)は大変形問題に適した手法である が、要素間の相互計算に用いるバネ定数の設定法が課題 として残る. 近年,連続体の大変形問題を容易に取り扱う手法として,粒子法の一種である SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法が注目されている. SPH 法は 1970 年代に Lucy や Monaghan らによって開発され,流体問題や星間衝突 問題で実績を残してきた.その利便性から現在は多くの 分野で応用されており,斜面安定性評価と崩土到達距離 の推定を行うためのツールとしても期待される.

地震による土構造物の大変形問題へSPH法を適用した 研究として、小野ら³は Mohr-Coulomb の破壊基準と Drucker-Prager の塑性ポテンシャルを SPH 法へ導入した. さらに、地震応答解析において FEM と同程度の解析精 度を示す計算式の提案と、レイリー減衰の導入を行い、 遠心模型実験の再現解析により手法の妥当性を示した³. Bui et al.⁴らは塑性ポテンシャルの概念を含む Drucker-Prager の破壊基準を導入し、振動模型実験を対象とした 再現解析を行った.実験との比較では変位量が良好に再 現され、SPH 法の適用性を示した.

また,自然斜面に対して,小野ら⁹は2008年の荒砥沢 地すべりを対象とした三次元解析を行った.加振前に重 力の作用により崩壊する結果となったが,流動量は良好 に再現された.しかし,地表面が一様な平面になるなど,



図-1 荒砥沢地すべり断面(森林管理局)

残留変形の再現性については課題が残った.これ対し、石川ら[®]は粒子の弾塑性状態を適切に評価し、自重で崩壊する問題を改善した.すべり面の形成など一部の現象は再現されたが、流動量は実被害の 1/3 程度まで減少した.

荒砥沢地すべりに対し、大野ら⁷は二次元不連続変形 法による解析を実施し、メカニズムの考察を行った. 地震によりすべり面にせん断変位が生じ、動的間隙水 圧の発生を伴いながらすべり面せん断強度が低下した と考察した.滑動時の動的なせん断抵抗角(間隙水圧を 含む見かけの抵抗角)は1°未満であったと推定してい る.風間ら⁸は1自由度の単純な剛体モデルを用いて滑 動解析を行い、累積変位に応じ有効応力を低下させるこ とで、低角度での長距離のすべりを再現した.この際、 試験結果で得られた物性値では300mの流動は説明でき ないため、液状化による有効応力低下に加え、堆積由来 の固結構造の消失等、別の力学特性もすべり抵抗の低下 する要因である可能性を示唆している.

本研究では、大規模地すべりにおける崩土到達距離の 推定手法としてSPH法の適用性を検討することを目的に、 荒砥沢地すべりの再現解析を行う.現在、著者らの研究 グループにおいて、荒砥沢の解析では実被害に比べ流動 量が小さいことが課題である.SPH法において計算を安 定化させる人工粘性が要因となり流動量を抑制している 可能性があるため、この影響について明らかにする必要 がある.また、流動時の物性値についても弾塑性状態を 適切に評価した状態で再度検討が必要である.

2. 荒砥沢地すべり概要

荒砥沢地すべりは、2008年6月14日に発生した岩手・ 宮城内陸地震(M7.2)を誘因として、宮城県栗原市の荒砥 沢ダム上流部で引き起こされた地すべりである.その規 模は幅約900m,長さ1,300mの範囲に及び、6,700万㎡の 土砂が流動した.地すべり後の断面図 ⁹及び航空写真を 図-1、2に示す.地すべり頭部では、高低差150mに達す



図-2 荒砥沢地すべり航空写真(アジア航測)

る滑落崖と陥没帯が形成され,陥没帯内にはリッジ状の 軽石凝灰岩ブロックが2つ残された.中央部では比較的 変形が少なく,土塊として水平方向へ移動している.下 部から末端部にかけては,移動体が対岸岩盤に衝突し圧 縮され,著しい攪乱と64mの隆起が生じた.水平移動 距離はそれぞれ地すべり上部で250m,中央部で最大 300m,下部で200m,末端部で70~150mとされ,端部で の圧縮・隆起により中部が上回る.ボーリング調査から 砂岩・シルト岩互層ですべり面が形成されたと推定され (最大深度127m),すべり面傾斜角は0~2度とほぼ水平 である.目撃者の証言によれば,地震発生後5分以内に は,既に地すべりが完了していたことがわかっている¹⁰.

3. 解析方法

(1) SPH 法基本式

SPH 法では、連続体を粒子の集合体として扱い、粒子の位置 x における物理量f(x)の近似値(f(x))はある幅 hを持った重み関数W(x,h)を用いて次式のように求められる^{11)[2)}.

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

ここで, x は評価点座標値, x'は任意の評価点座標値, W(x,h)はカーネル関数と呼ばれる重み関数, h は粒子 間の相互作用を特徴づけるパラメータで影響半径と呼ば れる. SPH 法におけるカーネル関数は、原点を頂点とした釣鐘状の関数であり、影響半径hの外ではではゼロとなる.式(1)はある物理量f(x)を重み関数によって平均化したカーネル評価となる.この平均化はSmoothingと呼ばれ、SPH 法を特徴づける要素である¹³.

次に、式(1)を離散化することで次式を得る.

$$\langle f(x)\rangle = \sum_{j=1}^{N} m_j \frac{f(x_j)}{\rho_j} W(x - x_j, h)$$
(2)

ここで、N は影響半径以内に存在する近傍粒子の個数で あり、 m_j 、 ρ_j 、 x_j 、 $f(x_j)$ はそれぞれ任意の粒子 j での 質量、密度、座標及び物理量である.

(2) 運動方程式

連続体の運動方程式は次式で表される.

$$\frac{dv^{\alpha}}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\sigma^{\alpha\beta}}{x^{\beta}} + b^{\alpha}$$
(3)

ここで、vは速度tは時間、 σ は応力、bは物体力、 α 及び β は座標軸を示す.

次に,式(3)をSPH法によって離散化することにより次 式を得る.

$$\frac{dv_i^{\alpha}}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left\{ \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{(\rho_i)^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{(\rho_j)^2} + \Pi_{ij} \right\} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x} + b_i^{\alpha} \qquad (4)$$

ここで、 $W_{ij} = W(x_i - x_j, h)$ 、 Π_{ij} は人工粘性(artificial viscosity)と呼ばれ、SPH 法では数値誤差から表れる解の 振動を防ぐために導入される減衰項である、人工粘性は 次のように定義される.

$$\Pi_{ij} = \frac{-\eta c_{ij} \mu_{ij} + \xi(\mu_{ij})^2}{\rho_{ii}}$$
(5)

$$\mu_{ij} = \frac{h\boldsymbol{v}_{ij} \cdot \boldsymbol{r}_{ij}}{(\boldsymbol{r}_{ij})^2 + \kappa h^2} \tag{6}$$

ここで, $c_{ij} = (c_i - c_j)/2$, $\rho_{ij} = (\rho_i - \rho_j)/2$, $v_{ij} = v_i - v_j$, $r_{ij} = r_i - r_j$ であり, c は物体中の音速を表す. $\eta \geq \xi$ は減衰の大きさを表す任意の係数であり, 1.0 や 2.0 が用いられる¹²⁾. κ は振動を抑制するためのパラメータ であり, 一般に 0.01 が用いられる¹⁴⁾. $\eta \geq \xi$ が大きいほど 減衰は大きくなり, κ が大きいほど小さくなるという特 徴を持つ.

4. 人工粘性による影響

SPH 法の人工粘性は、宇宙物理学における超高速圧縮 性流体の衝撃波を有効に生じさせるために必要な手段と して導入された¹⁰.現在、SPH 法による構造解析におい て、人工粘性は単に数値拡散を抑制する役割を果たし、 導入が推奨されている.

深澤ら¹⁵はSPH法を用いて鋼製片持ち梁を対象に弾性 及び弾塑性衝撃応答解析を行った.その結果,人工粘性 を導入した SPH 法では, η と ξ の大小によって残留変位 に違いが生じた.そのため,パラメータの η と ξ は慎重 に選択すべきである.

本章では、人工粘性による地すべり崩土の流動量への 影響を感度分析する.

	密度 (g/cm ³)	ヤング率 (MN/m ²)	ポアソン比	ピーク粘着 力(kN/m ²)	ピーク内部 摩擦角(°)	残留粘着 力(kN/m ²)	残留摩擦力 (゜)	ダイレタン シー角(゜)
旧陥没帯内堆積物	1.76	80	0.40	28.09	15.73	0.00	10.00	0.00
溶結凝灰岩	1.90	1000	0.35	1282.00	52.08	0.00	40.00	0.00
軽石凝灰岩	1.65	80	0.40	200.00	35.00	0.80	27.80	0.00
砂岩・シルト岩	1.61	700	0.35	650.00	50.00	0.00	5.00	0.00
凝灰岩	2.25	1000	0.30	230.00	20.00	0.98	7.80	0.00

表-1 解析に用いる物性値

表-2 解	析パラ	メータ
11-4 11+	101 · · /	/ /

粒子数	2,892個
粒子間隔	10m
影響半径	13m
積分時間間隔	0.001秒
解析ステップ数	300,000ステップ
継続時間	300秒



図-3 解析モデル

(1) 解析条件

三次元モデルを用いた解析では計算コストが高く,感 度分析するには効率が低いことから,図-3に示す荒砥沢 地すべりを対象とした二次元モデルを用いて検討を行う. 構成則は Moth-Coulomb の破壊基準に従った弾塑性モデ ルとし,地盤材料ごとの物性値は実験等を行い,小野ら ⁵が設定した値を使用する.まず,ピーク強度を用いた 自重解析により初期応力状態を設定する.次に破壊後の 状態を想定し,残留強度を用いて流動量の評価を行う.

人工粘性の影響度を評価するために人工粘性項の大き さをそれぞれ 100, 50, 30, 10, 0%とした 5 つの解析を 行い,流動量を比較する.モデル全体の人工粘性を低下 させると,数値振動により不安定になる可能性があるた め,すべり層である砂岩・シルト岩のみを対象に人工粘 性項を変化させた.人工粘性のパラメーターはそれぞれ $\eta = \xi = 1.0, \kappa = 0.01$ とする.

(2) 解析結果

各解析における土塊ブロックについて水平方向の時刻 歴変位及び最終変位量を図4,図-5に示す.人工粘性項 を100%とした Case1の変位量は約 60mと実被害の1/5程 度であった.Case2~4では、それぞれ 77m,90m,103m と人工粘性項の減少に伴い流動量は増加した.Case5で は195mと大きく流動したが、旧陥没帯内堆積物の一部 が飛び散るなど、不自然な挙動を示した.

(3) 考察

図-4, 図-5 から,人工粘性が減少すると流動量はほぼ 一定の割合で増加する関係があることが分かる. Case5 の過剰な流動については,人工粘性が無く,数値振動に より不安定となったためだと考えられる. また, Case1 ではほぼ一定の速度で流動しているが,人工粘性が小さ くなると解析直後の流動速度も増加する. 200秒から300 秒にかけては, Case1~4でほとんど同じ速度となる.

200 150 水平変位(m) 0%(Case5) 10%(Case4) 100 30%(Case3) 50%(Case2) 100%(Case1) 50 0 0 50 100 150 200 250 300 時間(s)

図4 土塊の水平変位

5. 荒砥沢地すべりの二次元再現解析

(1) 解析条件

本章では、荒砥沢地すべりの流動量を再現するために、 人工粘性による影響を考慮した物性値の検討を行う.

荒砥沢地すべりは大規模地震動を誘因とするが,大き な流動はせん断抵抗の低下による影響が大きと考えられ る.そのため,滑動中の地震動は考慮せず,残留強度を 用いた自重解析によって流動量を評価する.

すべり層である砂岩・シルト岩の残留内部摩擦角は, 乱した試料を用いた一面せん断試験から約 10 度と推定 されている⁷⁸. さらに,滑動時には間隙水圧により有効 応力が低下したと考えられる⁷⁰が,本研究で用いるプロ グラムは全応力解析であるため,間隙水圧による有効応 力の低下は,残留内部摩擦を低減させることによって考 慮する.

解析では、4 章と同様のモデル、解析パラメータ及び 解析手順を使用する.人工粘性と残留内部摩擦角が流動 量に与える影響を調べるため、人工粘性項の大きさを変 化させない Casel と 10%に低減した Case4 を対象に、砂 岩・シルト岩の残留内部摩擦角φをそれぞれ 0, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 20.0 度とした解析を行う.

(2) 解析結果

残留内部摩擦角と土塊ブロックの最終水平変位の関係 を図-6 に示す. Casel, Case4 共に残留内部摩擦角が小さ いほど土塊ブロックは大きく流動し, $\phi = 10.0$, 20.0 ま で大きくなるとほとんど流動しない結果となった. また, $\phi = 0 \sim 5.0$ の低角度において, 2 ケースの変位量に差が 見られた. Casel では全体的に流動量は小さく, $\phi = 0$ ま で低減しても変位量は 160m 程にとどまった.



図-5 水平変位と人工粘性の関係

安定的な解が得られ最も変位量が大きかった Case4 に ついて、 ϕ =1.0, 2.0 で変位量はそれぞれ 315m, 250m と 実被害に近い結果となった. ϕ =0 まで低減すると、水 平変位は 380m と実被害よりも大きく流動した.

(3) 考察

Case4において、 ϕ =1.0, 2.0では実被害に近い流動量 を再現した.これは、せん断抵抗の低減が考慮されてい るためだと考えられ、流動時に動的内部摩擦角が1度未 満であったという大野ら^のの見解と概ね一致する. ϕ =10.0 以上では、人工粘性項が10%と小さい場合でも ほとんど流動しないことから、人工粘性は流動量に影響 を与えるが、流動する要因とはならないと考えられる.

得られた残留変形形状について、全体としては陥没と 隆起による地表面の凹凸や地下構造の乱れが再現された. これは、上部層地盤の変形が小さく、下部層が大きく流 動していることが原因と考えられる.下部層の流動に伴 い上部の土塊が分裂することにより、複雑な残留変形と なった.実際に、上部の地盤は比較的強度の大きい溶結 凝灰岩であったのに対し、すべり層の砂岩・シルト岩は 液状化する可能性のある材料であったことが成分分析か ら判明している[®].

人工粘性項を 10%とした場合に、せん断抵抗の低下 を考慮することで流動量や残留変形が良好に再現された. 人工粘性の任意係数である η と ξ は解析対象によって異 なる値が採用されている. 高流動に対しては $\eta = 1.0$, $\xi = 2.0$ が用いられ、液体の自由表面流や波の計算では $\eta = 0.001 \sim 0.01$, $\xi = 0$ が用いられている¹⁰. また,深 沢ら ¹⁵の鋼製片持ち梁の衝撃応答解析では $\eta = \xi =$ 5.0~10.0を、小野ら⁵の土構造物を対象とした地震応答 解析では $\eta = \xi = 1.0$ を使用している. 人工粘性項を 10%とした Case4 場合, $\eta = \xi = 0.1$ に相当し、流体に近 い状態であったことが示唆される. 強振動の繰り返しせ ん断による液状化が 300m の流動に関与していることが 考えられ、パラメータの決定方法について対象とする連 続体の粘性との関係について検討が必要であると考える.



図-6 内部摩擦角と水平変位



図-7 残留変形図(300秒後)



(a) 5秒後



(b) 300秒後 図-8 累積せん断ひずみ分布図

6. 結論

本研究では、大規模地すべりにおける崩土到達距離の 推定手法としてSPH法の適用性を検討することを目的に、 荒砥沢地すべりを対象とした二次元再現解析を行った. また、人工粘性が流動量に与える影響について明らかに することを目的として感度分析を行った.

感度分析では、人工粘性項の低減により流動量が増加 したことから、人工粘性は流動量に影響を与え、残留内 部摩擦角の減少に応じて、人工粘性による流動量への影 響度が大きくなることを明らかにした.

再現解析では、人工粘性項を 10%とし、滑動時の強

度低下を考慮するため,残留内部摩擦角¢を2°まで低減することで流動量・残留変形は良好に再現された.地 すべり上部の滑落崖については,100mの沈没と実被害 に近い結果を示したが,モデル側面の固定した壁粒子か ら剥がれるような挙動を示した.この理由として,完全 に固定した壁粒子では境界条件を正しく取り扱えていな いという点が挙げられる.SPH法では境界の取り扱いが 難しく,流動量の評価への影響は小さいと考えられるが, 境界の取り扱い方法については,今後検討する必要があ る.

SPH 法における崩土の流動量評価において, 荒砥沢地 すべりのような大きな流動を伴う場合, 特に液状化の危 険性がある地盤材料では, 人工粘性の大きさによっては 流動量を抑制し, 崩壊土砂流動量を過少に評価してしま う可能性があるため, パラメータの設定には注意が必要 である.

謝辞:解析環境について,池田勇司氏に協力いただいた.本研究は JSPS 研究費 17K01343 の助成を受けたものです.ここに記して謝意を表します.

参考文献

- 内閣府政策統括官(防災担当):中山間地等の集落散在地 域における孤立集落発生の可能性に関する状況フォロー アップ調査,2014.10.
- 小野祐輔,西田真悟,清野純史:SPH法による土構造物の弾塑性解析,応用力学論文集,Vol9,pp.717-723,2006.C.R.ワイリー(富久泰明訳):工学数学(上),pp.123-140,ブレイン図書,1973.
- 小野祐輔: SPH 法による斜面の地震応答と崩壊挙動の弾 塑性解析, 土木学会論文集 A1(構造・地盤工学), Vol.69, No.4, , p.I_650-I_660, 2013.本間仁, 安芸皓一:物部水 理学, pp.430-463, 岩波書店, 1962.
- 4) Bui, Ha H.; Fukagawa, R.; Sako, K.; Okamura, Y.: Earthquake Induced Slope Failure Simulation by SPH, *International Conference*

on Recent Advances in Geotetchnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics.14, 2010.

- 5) 小野祐輔,岡本遼太,河野勝宣,酒井久和,秦吉弥,池 田勇司: SPH 法を用いた荒砥沢地すべりの三次元解析, 土木学会論文集 A1(構造・地盤工学), Vol.73, No4, 2017.
- 石川大地、小野祐輔、酒井久和:2008 年荒砥沢地すべり に対する SPH法による三次元地震応答解析、土木学会全 国大会、2017.8.
- 7) 大野亮一,山科真一,山崎考成,小山倫史,江坂文寿, 笠井史宏:地震時大規模地すべりの発生機構-荒砥沢地 すべりを例として一,日本地すべり学会誌,Vol.47, No.2, 2010.
- 8) 風間基樹,森友宏,株木宏明,松井哲志:荒砥沢ダム上 流部で発生した地滑りの活動計算とその考察,日本地震 工学論文集,Vol.11, No.5, 2011.
- 林野庁東北森林管理局:岩手宮城内陸地震に係る山地災 害対策検討会報告書, <u>http://www.ninya.maff.go.jp/tohoku/koho/saigaijoho/kyoku/kentokai/ji-suberikentou.html (2018 年 8 月 28</u> 日閲覧).
- 井口隆,大八木規夫,内山庄一郎,清水文健:2008年岩
 手・宮城内陸地震で起きた荒砥沢地すべりの地形地質的
 背景,防災科学技術研究所主要災害調査,Vol43,20103.
- 11) Lucy, L.: A numerical approach to testing fission hypothesis, Astronomical Journal, Vol.82, pp.1013-1024, 1977.
- inglid, R.A. and Monaghan, J.J. : Smoothed particle hydrodynamics : theory and application to nonspherical stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol.181, pp.375-389, 1977.
- 酒井譲: SPH粒子法の基礎と応用, <u>http://www.cae21.org/kaisekijuku2006/SPH.pdf</u> (2018年8月28日 閲覧)
- Monaghan, J.J.: An introduction to SPH, Common., Vol.48, pp89-96, 1988.
- 15) 深澤仁,園田佳巨: SPH粒子法の構造部材の弾塑性解析 への適用性に関する基礎的研究
- · 岡野豊明:SPH法入門,<u>http://www.ivis.co.jp/text/20180228.pdf</u>
 (2018年8月28日閲覧)

(?)

SPH SIMULATION OF ARATOZAWA LANDSLIDE CONSIDERING ARTIFICIAL VISCOSITY

Daichi ISHIKAWA, Yusuke ONO and Hisakazu SAKAI

In this paper, we analysed the effect of artificial viscosity on the landslide flow distance in the Smoothe Particle Hydrodynamics (SPH) method. Moreover, for the purpose of showing the applicability to estimation of flow distance, we conducted two-dimensional simulation of the Aratozawa landslide. As a result, we obtained good agreement with actual damage of flow distance and residual deformation by reducing residual internal friction angle until the shear resistance angle with pore water pressure. It showed that the SPH method considering artificial viscosity could be applied to problem with large deformation like sediment disaster.