Lagrangian Particle Finite Difference Methodによる斜面崩壊シミュレーション

東京大学大学院　　　　　　学生会員　沼田　宗純
東京大学生産技術研究所　　正会員　小長井　一男

1. はじめに

斜面崩壊は非常に複雑な現象であり，そのメカニズムを解明するためには未だに困難な点が多い．

これまで斜面崩壊のメカニズムの解明に向け，多くの研究が行われてきた．解析的な試みでは，二次元解析から得られた知見が主流であり，現実的な地形・地盤情報を考慮した三次元的な知見を得るには至っていない．

実際に三次元解析を行おうとすると，広大な領域の地形・地盤情報を与えなければならず，そのための調査と解析の膨大な手間に比べ，得られた結果の精度が見合わない．解析手法としては，これまで FEM, DEM などが用いられてきたが，地盤の変形が大きい場合には，FEM は要素の変形が著しくなり計算が破綻してしまう．一方，DEM では粒子サイズと粒子数が，広大な広がりをもつ地盤を表現する上で大きな制約になる．

本研究では，三次元的な知見を二次元解析から得るための現実的な手法を検討するものである．具体的には，三次元の斜面を縦断面(**図 2**)と上方から水平面に投影した平面(**図 3**)という二つの二次元断面から捉え，各面の二次元解析で得られた知見を相互に関連させることで，擬似三次元的な知見を得ようとするものである.解析手法としては，Lagrangian Particle Finite Difference Method(以下 LPFDM とする)を用いることにする．この手法は，物性変数などの情報をラグランジュ材料点で代表させるもので，その材料点を空間に固定されたオイラー座標系の要素に投影させ，要素の節点で運動方程式を解くものである．従って，LPFDM では変形が大きくなることで計算が破綻することはない．

本報告では，擬似三次元解析に先立ち，各面の二次元解析を個別に行い，LPFDM の地盤の大変形に対する有益性，今後の発展の可能性と課題を検討する．

2. Lagrangian Particle Finite Difference Method

2.1 運動方程式

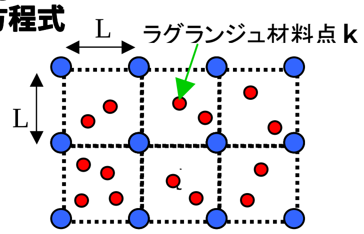

図1 要素Jとラグランジュ材料点k

図 1 はオイラー座標系に固定された格子に，物性値が代表されるラグランジュ材料点 **k** を示したものである．**L** は要素 **J** の辺長である．

要素 **J** の応力は，要素 **J** 中のラグランジュ材料点の応力 $\langle\sigma_{ij}\rangle_k$ を要素内で平均化することで以下のように表せる．

$$\langle\sigma_{ij}\rangle_J = \left\{\sum_{k\in J}\left(\frac{m_k}{\rho_k}(\sigma_{ij})_k + p_k\delta_{ij}\right)\right\}/L^2 \quad ------①$$

ここに，m_k/ρ_kは密度，p_k は間隙水圧である．

式①より得られた要素 **J** の応力 $\langle\sigma_{ij}\rangle_J$ から節点力 $F_i^{[k]}$ は

$$F_i^{[k]} = \frac{\langle\sigma_{ii}\rangle_J (x_j^{[k-1]} - x_j^{[k+1]})}{2} + \frac{\langle\sigma_{ij}\rangle_J (x_i^{[k-1]} - x_i^{[k+1]})}{2} \quad ---②$$

となる．そして，節点変位 $\Delta u_i^{(k)}$ は運動方程式(式③)を陽的に解くことで求められる．$m^{(k)}$ は接点[k]の質量である．

$$\Delta u_i^{(k)}(t+\Delta t/2) = \Delta u_i^{(k)}(t-\Delta t/2) + \frac{\Delta t^2}{m^{(k)}}\sum F_i^{(k)} \quad --③$$

2.2 間隙水圧

粒子層内の圧力損失は，空塔速度 $\vec{\mathbf{v}}$ が小さい場合はほぼ $\vec{\mathbf{v}}$ に比例するが，流速が速くなると $\vec{\mathbf{v}}^2$ に強く依存するようになる．したがって，大きく変形する飽和地盤内の間隙水圧の影響は，このような層流から乱流域までの圧力損失を表す **Ergun(1952)**の式④を用いることにする．

$$\Delta p_k = f_1\cdot|\vec{\mathbf{v}}| + f_2\cdot|\vec{\mathbf{v}}|^2 \quad ------④$$

ここで，$f_1 = 150\dfrac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\dfrac{\mu}{D^2}$，　$f_2 = 1.75\dfrac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}\dfrac{\rho}{D}$ である．

ε:空隙率　μ:水の粘性率　D:粒子径

ρ:粒子と同体積の球の表面積/粒子の外部表面積

2.3 解析モデル

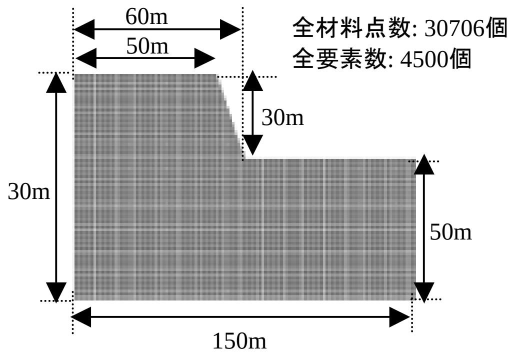

図 2 縦断面解析モデル

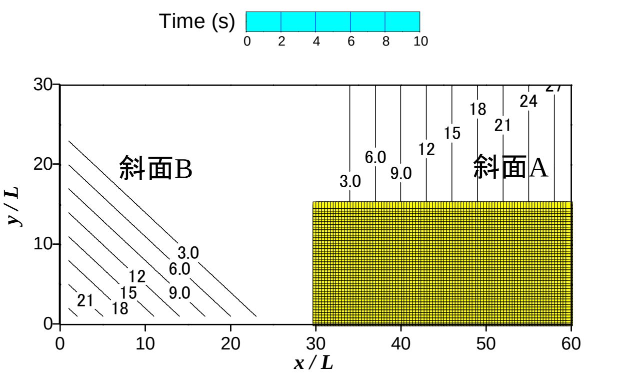

図 3 上方から水平面に投影した平面の解析モデル

キーワード：地盤の大変形，斜面崩壊，数値解析，LPFDM，Ergun の式
〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 小長井研究室 Tel:03-5452-6142，Fax: 03-5452-6144

3. 解析結果

表 1 解析パラメータ

L	E	Poisson' ratio	rou
1	5.10E+07	0.33	2.50E+04
dt	cohesion	void ratio	phi(rad)
0.0001	1.00E+05	0.5	0.5

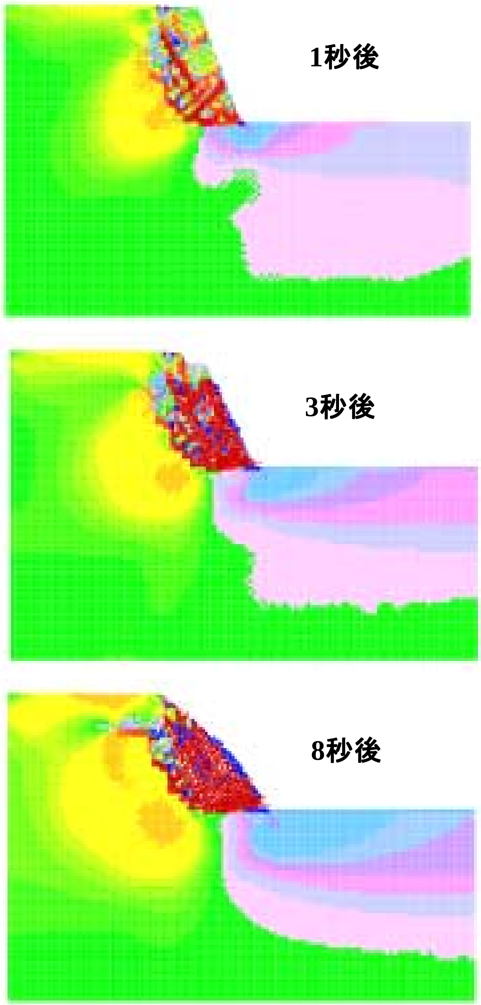

図 4 斜面縦断面のアニメーション

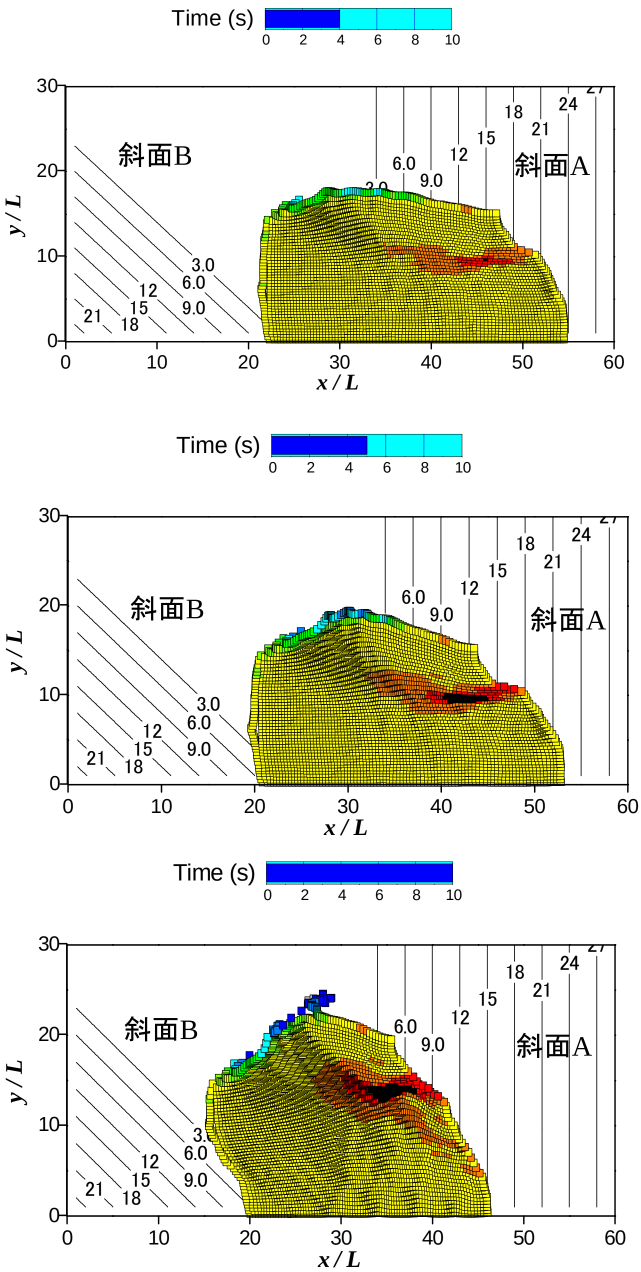

図 5 上方から水平面に投影した平面のアニメーション

図 4 に斜面縦断面のひずみ分布の解析事例を示す.解析開始 1 秒の時点では，せん断層が応力の集中する斜面先から発達し，斜面内には複数のせん断層が現れる．解析開始 3 秒の時点では，このうちの一つのせん断層がすべり面となり，斜面前方から崩壊が始まることが分る．さらに解析開始 8 秒の時点では，斜面の崩壊が著しく進行し，流下している様子が観測される．

図 5 はすべり面の深さがほぼ一様の斜面が崩壊していく状況を，水平面に投影したものである．図中の等高線は，ここに伏角45° の2つの斜面 A，B が異なる方位角で存在していることを示している．土砂が斜面 A を流下し，土砂の先頭が斜面 B に到達すると，斜面 B を沿うように運動方向が転換している様子が示されている．

5. おわりに

本報告は，斜面縦断面と，斜面を上から俯瞰した面のそれぞれに対する二次元解析事例を示し，LPFDM の地盤の大変形に対する有益性と今後の発展の可能性を検討した．

それぞれの二次元解析は個別に行われたものであるが，今後は擬似三次元的な解析を行うための関連付けが必要である．

この方式で，実際の自然斜面において問題となる「崩壊土砂の影響がどこまで広がるか」についての三次元的な議論が可能になると期待される．

【参考文献】

Konagai, K. and J., Johansson[2001], Two Dimensional Lagrangian Particle Finite Difference Method for Modeling Large Soil Deformations, Structural Eng./Earthquake Eng. 18(2), 91s-95s.

Konagai, K. and J., Johansson[2001],Lagrangian Particles for Modeling Large Soil Deformations, Pros., Seismic Fault-induced Failures, Konagai et al. eds., IIS, University of Tokyo, 99106.