MPS 法を用いた破壊挙動の不確定性に関する基礎的考察

東京都市大学大学院　学生会員　○大庭　啓輔
東京都市大学　正会員　吉田　郁政

１．はじめに

我が国では地震による構造物や地盤の崩壊などの被害が多く，大変形や破壊挙動を予測できる手法に対するニーズが高まっている．現在，様々な検討や設計において有限要素法(FEM)が用いられることが多い．FEM は大変優れた方法であり，非常に多くの実績があるが大変形挙動や破壊の解析には困難が伴う．また，対象とする空間の要素分割が必要であり複雑な形状になるとモデル作成に非常に大きな労力が必要となる．そのため最近では大変形解析が可能で，要素分割を必要としない粒子法への期待も高まっている[1)]．本研究では粒子法である MPS 法(Moving Particle Semi-implicit または Simulation)の地震時の斜面安定性評価へ適用を最終目標にしている．

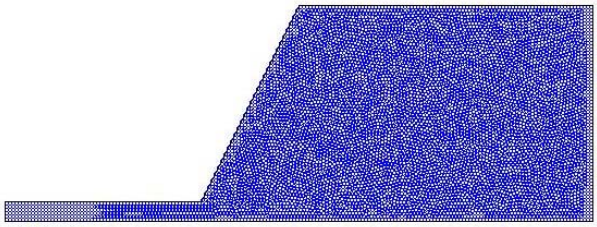
MPS 法を用いて計算した斜面の崩壊解析などの結果は初期粒子配置の違い，計算環境の違いによって計算結果が変わり，微小な条件の変化が破壊挙動に影響を与えるというカオス的性質が見られる場合がある．本論文では MPS 法による斜面崩壊解析を対象として条件を変えた解析を多数行い，その解析結果のばらつきの性質について基礎的な検討を行う．

２．不確定性に関する検討条件と結果

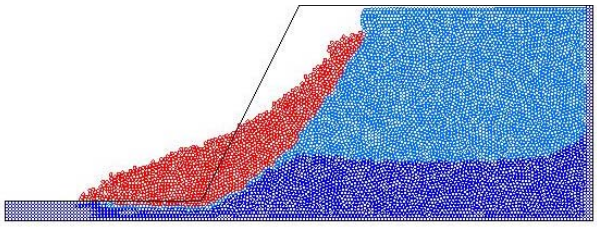
図-1 に示すモデルについて斜面崩壊解析を行った．斜面の高さは 20m，勾配は 1:0.5 とした．5 秒間かけて重力加速度を正弦波に従い大きくして斜面を崩壊させた．5 秒の時には約 50m/s^2 まで大きくしており，通常の重力場の約 5 倍，すなわち崖の高さを 100m まで大きくしていることに相当する．計算条件や物性値をまとめて**表-1** に示す．変形係数は土被り厚依存を仮定し，次式で与えることとする．

$$E = E_0 + dC_E \qquad (1)$$

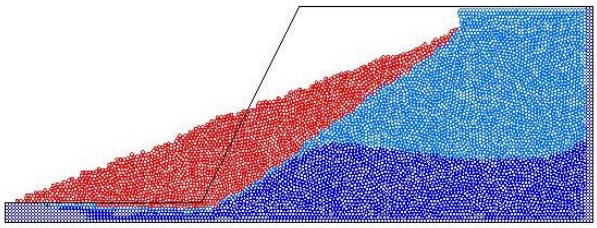
ここで，E はヤング率，E_0 は地表面でのヤング率であり，d は土被り厚，C_E は d に対するヤング率の増分値である．粒子半径は 0.167m，粒子数は 7380 個，時間刻みは 5.0×10^{-5} 秒，影響粒子半径は粒子の直径の 1.5 倍として計算を行った．



(1)　0 秒時（初期状態）



(2)　5 秒時



(3)　10 秒時(崩壊終了後)

図-1　斜面崩壊の様子

○ 0.1m 未満，○ 0.1～0.5m 未満，○0.5m 以上

表-1　解析パラメタ

物性値		計算条件	
E_0 ヤング率[kPa]	50000		
C_E ヤング率の増加率[kPa/m]	500	粒子半径[m]	0.167
ポアソン比	0.35	粒子数	7380
減衰比	0.05	時間刻み[s]	5.0×10^{-5}
粘着力[kPa]	80.0	影響半径[m]	粒子半径の1.5倍
内部摩擦角[deg.]	30.0		

図-1 に 0，5，10 秒の時の粒子の変位を示す．表示倍率は 1.0 とし，変位量（水平，鉛直のベクトル合成値）が 0.1m と 0.5m で色分けしている．試行錯誤の結果，変位量 0.5m を色分けのための境界値としており，図に示されているようにほぼ崩壊土を表していることがわかる．地表面でのヤング率 E_0，ヤング率の増分値 C_E を確率変数として，応答のばらつきを算

キーワード　粒子法，MPS 法，破壊挙動，不確定性
連絡先　〒158-8557　東京都世田谷区玉堤 1-28-1　東京都市大学　都市工学科　TEL03-5707-0104

定する．2 つの確率変数の変動係数は**表-2** に示すように 3 ケースの組み合わせを考えた．

応答のばらつきを評価するにはモンテカルロシミュレーションを実施することが好ましいが，計算時間の問題からここでは Rosenblueth[2]による点推定法を用いて算定することとし，2 つの確率変数について平均±標準偏差の組み合わせ（4 種類）に対して応答を求め，その標準偏差を算定する．またテーラー展開の 1 次近似の意味を持つ誤差伝播の式 [3]によるばらつきの推定も行った．誤差伝播の式を以下に示す．

$$\sigma_z^2 = h_{E0}\sigma_{E0}^2 + h_{CE}\sigma_{CE}^2 \qquad (2)$$

$$\text{ここで，}\quad h_{E0} = \frac{\partial z}{\partial E_0}, h_{CE} = \frac{\partial z}{\partial C_E}$$

ここでは，確率変数は互いに独立と仮定した．誤差伝播の式が成り立つ範囲では確率変数のばらつきの大きさに比例して応答のばらつきも大きくなることを意味している．本検討では微分係数は数値微分から求めた．

表-2 に示した各ケースについて求めた応答の標準偏差をまとめて**図-2** に示す．注目した応答は 10 秒の時の崩壊比率（崩壊土量の比率）と 1，2，4 秒の時の法肩の鉛直変位とした．また，初期粒子配置は乱数を用いてランダム配置となるように決めており，その初期粒子配置の影響も考察するために，初期配置を変えたケースを数回計算し，その標準偏差を図中に初期配置として**図-2** に示した．

まず，ケース 1, 2, 3 の比較を述べる．ほぼ線形の応答と思われる 1 秒の時の変位については変形係数のばらつきに対応して応答のばらつきも 10 倍，100 倍になっておりほぼ直線的に増加している．それに対して 2 秒の変位はケース 2, 3 はほぼ 10 倍の差があるがケース 1 と 2 の標準偏差はほぼ同程度である．さらに 4 秒になると，初期配置の違いによる標準偏差も含めてどのケースでも同じ程度の標準偏差となっている．崩壊比率についても同様であり全てのケースで同じ程度の標準偏差となっている．

誤差伝播の式による推定では，1 秒の変位については Rosenblueth 法による値と非常によく一致しており，誤差伝播の式が成立していることがわかる．一方，2 秒，4 秒の時の変位，崩壊比率についてはあまり関連性は見られない．非線形性が強くなると変形係数のばらつきの大きさとの比例関係は見られなくなって

表-2　変形係数の変動係数(%)

	E_0 ヤング率[kPa]	C_E ヤング率の増加率[kPa/m]
ケース1	0.1	0.4
ケース2	1.0	4.0
ケース3	10.0	40.0

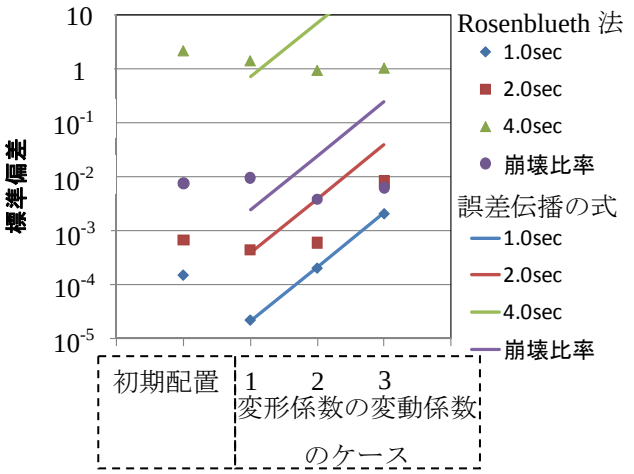


図-2　変形係数の応答のばらつきの比較

いることがわかる．ケース 1 では変動係数 0.1%, 0.4%という非常に小さなばらつきしか与えていないにもかかわらず，変動係数 10%，40%と大きなばらつきを与えているケース 3 と応答のばらつきは同じ，さらに，初期粒子配置の影響についても同程度のばらつきとなっている．

３．まとめ

MPS 法を用いた強非線形問題の応答は変形係数の微小な変化，初期粒子配置の違いに対しても大きな応答の違いとなる場合があることを示した．また，応答のばらつきは変形係数のばらつきの大きさに比例せずに同じ程度のばらつきとなることを示し，変形係数をばらつかせて求めた応答のばらつきと初期粒子配置を変更して求めた応答のばらつきの大きさは同程度となることも示した．

参考文献

1)吉田郁政，石丸真，MPS 法を用いた地震応答解析のための基礎検討，土木学会論文集 A，Vol.66, No.2, pp.206-218, 2010

2)土質工学会：土質基礎工学ライブラリー28　土質基礎の信頼性設計，土質工学会，1985

3)星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986