

MPMの盛土斜面大変形解析への適用

桐山 貴俊¹

¹正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4番17号)

E-mail:kiriyama@shimz.co.jp

地盤の大変形解析を行う手法としてMPMに着目し、計算コードの開発と解析手法の検討を行った。MPMは格子法と粒子法のハイブリッド法であり、FEMに代表される格子法との親和性が高い。格子法で培われた解析技術を反映しやすくかつ大変形解析まで行えるという特徴を持つ。本論文ではMPMの大変形解析の適用性を検討するために、盛土斜面の大変形解析を対象とし、地盤非線形性の導入、静的解析の計算方法、地震外力の載荷方法に関して検討した。MPMによる解析結果を実験結果と比較することでその妥当性を検討した。

Key Words : MPM, slope, large deformation, particle, collapse

1. はじめに

斜面の変形問題を対象とする計算法として、これまで多くの手法が用いられてきた。古典的な安全率による判定法、Newmark法による累積変位法、数値解析法などが挙げられる。安全率による手法は、仮定したすべり面の破壊の有無を判断する。Newmark法は、安全率と地震応答解析により変形量を求める方法であり、安全率による方法を発展させた手法である。数値解析法は、近年斜面の変形問題への適用例が多く注目されている。

数値解析法は、大きく分けて格子法と粒子法に分けられる。また両者を掛け合わせたハイブリッド法と位置づけられる手法もある。格子法の代表的なものは、有限要素法(FEM: Finite Element Method)、有限差分法(FDM: Finite Difference Method)などが知られている。格子法は実績が多く、汎用な数値解析法として確立している。しかし、地盤分野の解析では、複雑な地層構成を対象とした場合に以下の問題点が指摘されている。

- ・メッシュ生成に多大な労力を要する。
- ・大変形解析時にメッシュ形状が破綻する。
- ・メッシュを再分割する場合の計算負荷が大きい。

一方、粒子法の代表的なものは、MPS法(Moving Particle Semi-Implicit)¹⁾、SPH法(Smoothed Particle Hydrodynamics)²⁾、があげられる。MPS法、SPH法は、空間に配置した粒子の運動を周辺粒子の運動から補完関数を用いることで物理量を計算する手法である。この補完関数は、MPS法では重み関数、SPH法ではカーネル関数と呼ばれている。補完関数を用いることで、格子法で言う要素が必要なく

なり、連続体を粒子に離散化することを可能にしている。粒子の運動および大変形解析時の粒子の分離・結合は、この補完関数に支配されている。固体力学における応力ひずみ関係を構成則として導入することが可能であり、地盤の数値解析においても適用例が報告されている。格子法の問題点として指摘した、メッシュ生成、メッシュ形状の破綻、メッシュの再分割、の問題を解決しているという点で、格子法に比べて優位な解析手法と言える。ただし、計算時間の大部分が隣接粒子検索に費やされるという問題点がある。この様に、格子法と粒子法はその数値計算法としての能力に一長一短がある。

MPM(Material Point Method)³⁾はSulskyらが提唱した解析手法であり、流体解析で発展したPIC (Particle In Cell) 法を固体力学に応用した粒子法の一つと位置づけられる。MPMは空間内に固定された計算格子と格子内に配置した粒子 (Material Point) を用いる数値解析法である。運動方程式は格子点で解き、計算した物理量を粒子に投影する。粒子は物理量を持ちながら空間内を移動し、所属する格子へ物理量を輸送する。粒子が移動することで物理量が輸送され、大変形まで含めた数値解析が可能となる。格子点から粒子へ物理量を投影する過程は、有限要素法における変位ベクトルから、ひずみベクトル、応力ベクトルを求める方法と同じ手法であり、構成則など既存の格子法の計算技術がそのまま適用できる。また、MPMの計算格子は、MPS法やSPH法で見られる粒子法の補完関数を空間に固定してたものと解釈できる。この様にMPMは格子法と粒子法の特徴を持ち合わせているため、格子法と粒子法のハイブリッド法と理解することも

できる。MPMは、MPS法やSPH法同様に固体力学における応力ひずみ関係を構成則として導入することが可能である点、粒子法の問題点である隣接粒子検索に費やす計算負荷が少ない点、でMPS法、SPH法に比べて優位である。MPMは、格子および粒子における物理量を二重管理しなければならず、計算記憶領域をより多く必要とする難点はあるが、前述した優位点が大きく、有望な数値計算法である。

以上に述べた理由から、本論分では、地盤の数値解析法として大変形解析まで扱えるMPMが優位と考えて、盛土斜面の大変形解析を対象として、地盤解析へのMPMの応用と、その適用性について検討する。

2. MPMの定式化

MPMの定式化は、計算格子を空間に固定する点、粒子に物理量を輸送する点、に計算手法としての特徴がある。Konagaiら⁴⁾は、MPMで用いる格子として差分法を採用したLPFDM (Lagrangian Particle Finite Defference Method) という手法を開発し、地盤の2次元解析へ適用している。清野ら⁵⁾は、これを3次元に拡張し、地震の波動伝播解析へ適用している。阿部ら⁶⁾は、斜面を流れる乾燥砂の流動解析にMPMを適用し、高さ方向へ自由度を持たせた疑似3次元解析へと拡張している。またHIGOら⁸⁾は、固相をMPMで、液相をFDMでモデル化することにより、多相連成大変形解析を実現している。この様にMPMは、物理量輸送のための粒子と計算格子を自由に組み合わせることが可能であり、定式化の自由度が高い手法と言える。

本論文で用いるMPM解析プログラムは計算格子にFEMを用いたオリジナルMPMである。以下にその定式化の内、後の説明に必要な代表的な部分のみ記載する。より詳細は参考文献3)、6)を参照すること。式(1)～式(13)中にある上添え字 k は計算ステップ数を表す。 $k+1$ はステップ k から1ステップ進んでいることを示す。また格子点物理量は下添え字 g 、粒子物理量は下添え字 p で表している。

粒子質量から式(1)により格子点質量を算出する。 m_g 、 m_p 、 N_p 、 np 、はそれぞれ、格子点質量、粒子質量、粒子位置における形状関数、格子内にある粒子数、である。

$$m_g^k = \sum_{i=1}^{np} m_{p,i} N_{p,i} \quad (1)$$

粒子応力から式(2)により格子点内力を算出する。 f_g^{int} 、 ρ_p 、 G_p 、 σ_p 、はそれぞれ、格子点内力、粒子密度、形状関数の導関数、粒子応力、である。

$$f_g^{int,k} = - \sum_{i=1}^{np} \frac{m_{p,i}^k}{\rho_{p,i}^k} G_{p,i} \sigma_{p,i}^k \quad (2)$$

体積力係数 g^k から格子点外力 f_g^{ext} を式(3)で算出する。

$$f_g^{ext,k} = m_g^k \cdot g^k \quad (3)$$

式(1)～(3)から格子点における運動方程式が自由度毎に立てられて、格子点加速度 a_g は式(4)より算出できる。

$$a_g^k = \frac{1}{m_g^k} (f_g^{int,k} + f_g^{ext,k}) \quad (4)$$

粒子の座標を式(5)から算出する。 x 、 v_g 、 Δt 、 ng は、粒子座標、格子点速度、時間刻み、粒子が所属する格子の頂点数、である。

$$x^{k+1} = x^k + \Delta t \cdot \sum_{i=1}^{ng} v_{g,i}^k N_{p,i}^k \quad (5)$$

粒子変位 u を式(6)から算出する。

$$u^{k+1} = u^k + \Delta t \cdot \sum_{i=1}^{ng} v_{g,i}^k N_{p,i}^k \quad (6)$$

式(1)～(4)と式(5)、式(6)は独立な関係にあるのでどちらを先に計算しても結果に影響は無い。

粒子体積、密度を式(7)、式(8)から算出する。 $Volume$ は体積、 ε_v は体積ひずみである。上添え字の0は初期値を表す。

$$Volume^{k+1} = Volume^0 \cdot (1 + \varepsilon_v^k) \quad (7)$$

$$\rho^{k+1} = \frac{\rho^0}{(1 + \varepsilon_v^k)} \quad (8)$$

粒子加速度 a_p を式(9)から算出する。

$$a_p^k = \sum_{i=1}^{ng} a_{g,i}^k N_{p,i}^k \quad (9)$$

粒子速度 v_p を式(10)から算出する。

$$v_p^{k+1} = v_p^k + \Delta t \cdot a_p^k \quad (10)$$

格子点速度 v_g を式(11)から算出する。

$$v_g^{k+1} = \sum_{i=1}^{np} \frac{N_{p,i} m_{p,i}}{m_g^k} v_p^{k+1} \quad (11)$$

粒子のひずみ ε_p を式(12a)、式(12b)から算出する。

$\Delta \varepsilon_p$ は Δt 間の粒子ひずみ増分である。

$$\Delta \varepsilon_p^{k+1} = \frac{\Delta t}{2} \cdot \sum_{i=1}^{ng} (G_{p,i} v_g^{k+1} + (G_{p,i} v_g^{k+1})^T) \quad (12a)$$

$$\varepsilon_p^{k+1} = \varepsilon_p^k + \Delta \varepsilon_p^{k+1} \quad (12b)$$

粒子の応力 σ_p を式(13a)、式(13b)から算出する。 K は要素剛性マトリックス、 $\Delta \sigma_p$ は Δt 間の粒子応力増分である。

$$\Delta \sigma_p^{k+1} = K \cdot \Delta \varepsilon_p^{k+1} \quad (13a)$$

$$\sigma_p^{k+1} = \sigma_p^k + \Delta\sigma_p^{k+1} \quad (13b)$$

式(1)～式(13)の一連の手順が解析の1ステップに相当する。この間の時間刻みは Δt であり、 t 時間の計算を行う場合は $t/\Delta t$ ステップだけ上記手順を繰り返す。

3. 地盤解析への適用

MPMを盛土斜面の地震応答解析へ適用する場合、静的解析の計算方法、地盤非線形性の導入、地震外力の载荷方法、の3点を解析手法として考慮しなければならない。これらの課題に対する対処方法を以下で検討したので、その内容を報告する。

(1) 静的解析の計算方法

そもそものMPMの定式化は動的解析法である。そのため、提唱されたMPMそのままでは静的な力の釣り合いを解くことはできない。動的な外力として一定外力を与えたとしても個体が振動してしまうからである。静的な釣り合いを解こうとした場合の対処法としては、この振動を抑制する方法を考えればよいことになる。今回は、式(4)の右辺にある外力を駆動力 f_g^{drive} として定義し、速度 v_g と反対方向に駆動力の α 倍の減衰力 f_g^{damp} を作用させることで、振動を抑制する方法⁹⁾を試みた。この作用させる減衰力を式(14)に示す。

$$f_g^{drive} = f_g^{int} + f_g^{ext} \quad (14a)$$

$$f_g^{damp} = -\alpha \cdot \text{sign}(v_g) \cdot f_g^{drive} \quad (14b)$$

この減衰力を式(4)に代入すると、次式のように変形できる。

$$a_g^k = \frac{1}{m_g^k} (f_g^{drive,k} + f_g^{damp,k}) \quad (15a)$$

$$a_g^k = \frac{1}{m_g^k} (1 - \alpha \cdot \text{sign}(v_g^k)) \cdot f_g^{drive,k} \quad (15b)$$

α が正の場合、駆動力と速度が同符号であれば運動は抑制され、異符号であれば運動は励起され、運動は次第に減衰していく。この過程を収束過程と呼ぶ。収束過程を経て、最終的に駆動力、減衰力がともにゼロとなり、力の釣り合いが取れる。この時の結果が静的解となる。

α の値はどの程度を採用すれば良いか、精度検証を行ったので報告する。精度検証に用いたのは2次元の100(m)×100(m)の矩形モデルである。単位体積重量20(kN/m³)、重力加速度9.8(m/s²)を設定した自重解析を実施した。境界条件は、側方は鉛直ローラ(水平自由度固定)、底面は固定条件(水平、鉛直自由度固定)である。

MPM解析では10(m)×10(m)の領域を1つの粒子に代表させ、粒子総数は100粒子でモデル化した。最下層にある粒子位置では、地表から95(m)、モデル底面から5(m)における応答値が得られることになる。この位置での鉛直応力は、20(kN/m³)×95(m)=1900(kN/m²)、であり、これを厳密解として静的解析の精度検証に用いた。図-1はMPMによる静的解析において、 α を変数とした場合の鉛直応力 σ_y の収束状況を示している。 $\alpha=0.5$ の場合、厳密解を超えた値を示した後、振動を繰り返して厳密解に収束していく。非線形性を考えた場合、厳密解を超えるような応答は、収束過程で降伏応力に達してしまう場合があるため、振動を繰り返す $\alpha=0.5$ は好ましくない。 $\alpha=0.95$ の場合、振動せず厳密解に収束していく。 $\alpha=1.0$ の場合、収束速度が非常に遅くなっていることが分かる。式(15b)を見ると分かるが $\alpha=1.0$ の場合は、速度 v_g が正の場合に右边がゼロとなり運動が発生しない。载荷方向に動き出そうとすると運動が停止してしまうので、収束が極端に遅くなってしまっているからである。以上より、振動せず厳密解を求めることができる α として、 $\alpha=0.95$ が最も好ましい。以後の解析では、減衰定数として $\alpha=0.95$ を採用することにする。

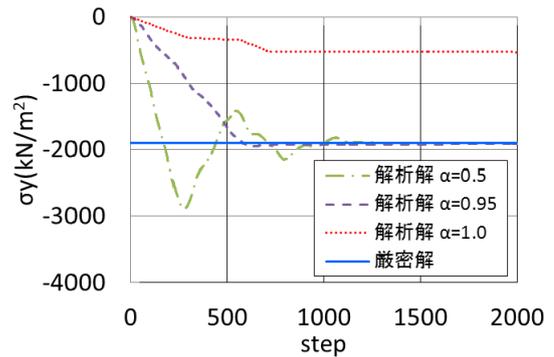


図-1 静的解析時の収束状況

今回採用する静的解析法は、陽解法の動的解析法の範囲内で、解析的に静的解析を実施する方法である。採用した方法とは別に静的解析を実施する方法として、静的釣り合い方程式をMPMへ展開したQuasi-static MPM¹⁰⁾がBEUTHらにより提案されている。今回は、静的解析から動的解析と連続した計算を行うことを想定しているため、静的解析しか実行できないQuasi-static MPMは採用していない。

(2) 破壊基準

設計における実用性と簡便性を考慮して、導入する構成則としては弾完全塑性体を仮定し、破壊基準としては式(16)に示すMohr-Coulombの基準を採用した。

$$\tau = C + \sigma \cdot \tan \phi \quad (16)$$

Mohr-Coulombの破壊基準において、地盤は破壊面までは弾性挙動、破壊後は塑性挙動を示す。採用した構成則は、破壊面に達した後は残留塑性、残留強度へ移行するものとしている。関連流れ則、非関連流れ則などを採用した弾塑性理論に基づいた構成則ではない。これは粒子同士が分離・結合を繰り返すため、破壊基準に達した後は粒子間の関係が途切れることを想定したDEM的な非線形性の考え方をに基づいている。式(16)中の τ 、 C 、 σ 、 ϕ 、はそれぞれ、せん断応力、粘着力、直応力、内部摩擦角、である。

Mohr-Coulombの破壊基準はせん断の破壊基準である。これに加えて、地盤の引張に対して引張強度 σ_t を定義して式(17)に示す引張に対する破壊基準を定義する。

$$\sigma = -\sigma_t \quad (17)$$

破壊基準に達した粒子は剛性を低減させ、弾性域となるように式(18)を用いて応力を修正する。

$$\sigma_{x,new} = \sigma_m + (\sigma_x + \sigma_m) \cdot (L/R) \quad (18a)$$

$$\sigma_{y,new} = \sigma_m + (\sigma_y + \sigma_m) \cdot (L/R) \quad (18b)$$

$$\tau_{xy,new} = \tau_{xy} \cdot (L/R) \quad (18c)$$

式(18)中の、 σ_m 、 R はそれぞれ、モール円中心の直応力、モール円の半径、である。また、 L は、モール円中心からモールクーロン破壊基準までの距離、モール円中心から引張強度までの距離、の小さい方を採用する。これは粒子がせん断破壊か引張破壊いずれかの破壊基準を満たした場合に破壊と判定するためである。

MPMは常に全体の力の釣り合いを解くため、応力修正により発生した不釣り合い力は、式(4)の右辺に内力と外力の差分として自動的に次の計算ステップに反映される。不釣り合い力はMPMの解析手法により自動的に処理されると考えて良い。

提案するモールクーロンの破壊基準が適切に組み込まれているか、他の大変形解析プログラムと比較することで検証した。図-2は後述する3.(4)で説明する解析モデルを用いて、静的な盛土斜面大変形解析を有限差分法コードFLAC3Dで計算した最大せん断ひずみの分布図である。自重によりせん断破壊が進行するように地盤の強度定数は、後述する地震応答解析で用いる値から半減させている。図-3は3.(1)、3.(2)で説明した手法を用いて、MPMによる同じ静的な盛土斜面大変形解析で計算した最大せん断ひずみの分布図である。図-3、図-4は最大せん断ひずみの値、せん断帯の発生位置、が良い一致を示しており、今回提案した手法を用いると、大変形領域において有限差分法による大変形解析と整合性の取れる結果が得られることが確認できた。

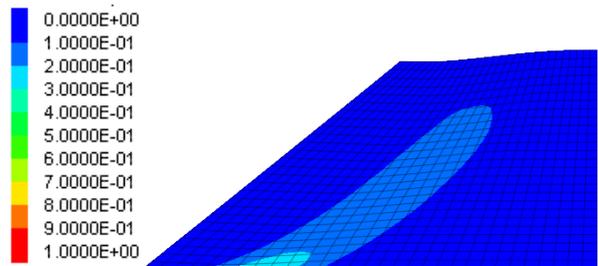


図-2 有限差分法による最大せん断ひずみ

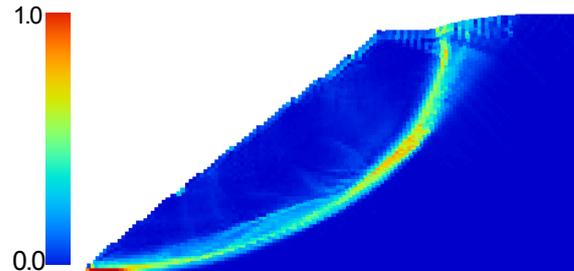


図-3 MPMによる最大せん断ひずみ

(3) 地震外力の载荷方法

MPMでは格子点で運動方程式を解き、その結果を粒子に投影する手法である。その為、粒子ではなく、運動方程式を計算する格子点に地震外力を作用させることになる。格子点への地震外力の载荷方法として、モデル底面における格子点において、式(4)の左辺の加速度を地震加速度として直接与える方法を検討した。底面加速度を規定する方法は、地震応答解析で言うE+F入力を行っていることと同じである。しかしながら、加速度のみを規定しただけでは底面条件として不十分である。式(11)から明らかなように粒子からの物理量のフィードバックにより格子点速度が更新されてしまうからである。物理量をフィードバックすると格子点速度は平均化されてしまい、底面の加速度拘束条件を満足することができない。その為、地震外力の载荷する場合、底面における格子点の拘束条件として、式(4)における加速度に地震加速度を与えることと、式(11)における速度に地震加速度を速度に変換した値を与えることが必要となる。底面格子点に加速度と速度の拘束条件を合わせて地震外力の载荷方法とした。

(4) 盛土斜面大変形解析への適用

今回解析対象としたのは、常田ら¹¹⁾¹²⁾が実施した、道路盛土構造物を想定した遠心载荷実験の盛土地盤である。解析モデルを図-4に示す。解析空間は縦10(m)、横25(m)である。1つの計算格子寸法は0.25(m)×0.25(m)の矩形格子とし、縦方向に40格子、横方向に100格子配置している。盛土は底面16.5(m)、上面6(m)、高さ9(m)の片側斜面の台形形状で、空間内に右寄せ配置とした。粒子総数は1611個で、解析時間間隔は0.001(sec)である。

解析は、初期応力解析を静的解析により実施し、その後、初期応力を引き継いで、地震応答解析を動的解析として実施する。この時、静的解析から地震応答解析へは応力のみ引き継ぎ、変形は引き継がない。また初期応力解析時は、変位の更新は行わない微小変形解析を行っている。微小変形の場合は、MPMの定式化では、式(5)、式(7)、式(8)の処理を行わなければならない。

解析に用いた地盤は均質と仮定した。地盤物性値を表-1に示す。残留時のヤング率はピーク時の1/10とした。また、内部摩擦角、粘着力の残留強度が不明のため、今回はピーク強度と同じとした。3.(1)で説明したように、動的陽解法で静的解析を実施するため、静的解析を求める収束過程で塑性域に達してしまう恐れがある。その為、静的解析時の地盤物性は、引張強度 σ_t に大きい値を設定し弾性としている。静的応力状態が再現できた段階で物性を変更し、本来の強度定数に戻している。

解析に用いた境界条件を図-5に示す。底面および右側面の水平方向を加速度・速度の拘束条件とした。その他境界は、全て面外自由度を拘束するローラー条件である。

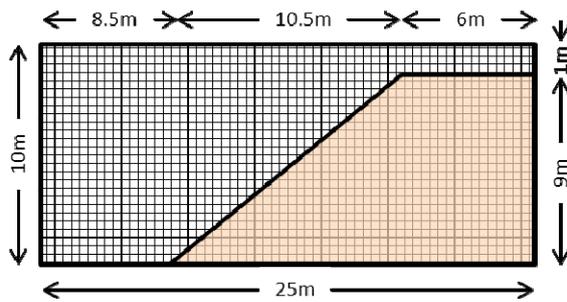


図-4 解析モデル

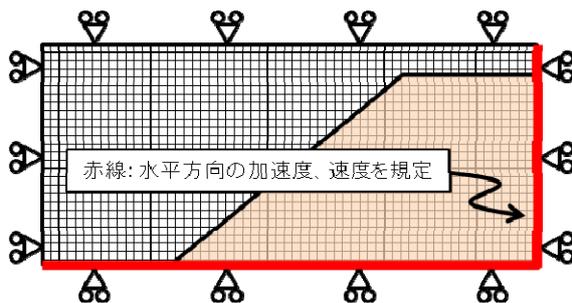


図-5 境界条件

加速度・速度の拘束条件とは、3.(3)で説明した地震外力の载荷方法のことである。またローラー条件とは、式(4)において固定する格子点の自由度に相当する加速度を、強制的にゼロとすることで実現している。底面および側面へ加速度を入力する理由は、今回対象とする解析モデルが、剛土槽内にある模型地盤を模擬していることによる。仮に剛土槽に囲まれていない実地盤を対象とする場合、側方の境界条件は水平ローラーとすれば良い。

図-6に地震外力として入力した加速度、速度の時刻歴波形を示す。この波形は遠心振動台を、継続時間が20秒の正弦波でスイープ加振した時に記録した、土槽底面の加速度記録である。速度波形は、加速度記録を0.1Hz以下を除去して周波数領域で変換したものである。

図-7に初期応力解析結果を示す。初期応力解析はバックチェックとして有限要素法による応力解析を行い、有限要素法による結果との整合性を確認している。

表-1 解析に用いた物性値

項目	単位	自重解析	動的解析	
			ピーク時	残留時
ヤング率	kN/m ²	1.60E+05	1.60E+05	1.60E+04
ポアソン比	-	0.4	0.4	0.4
単位体積重量	kN/m ³	15.0	15.0	15.0
内部摩擦角	°	30.5	30.5	30.5
粘着力	kN/m ²	1.00E+10	8.5	8.5
引張強度	kN/m ²	0.0	0.0	0.0

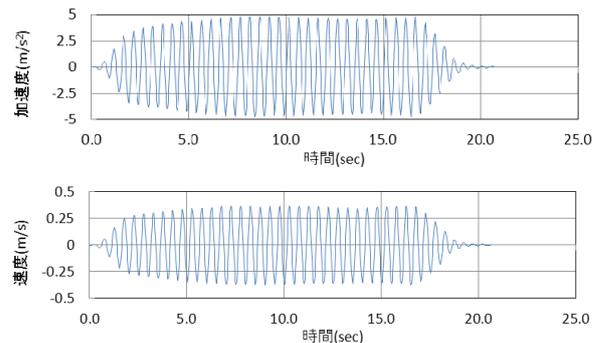


図-6 入力加速度と速度

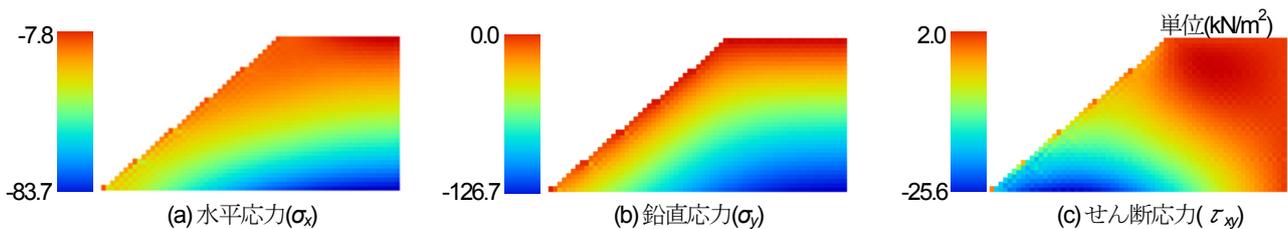
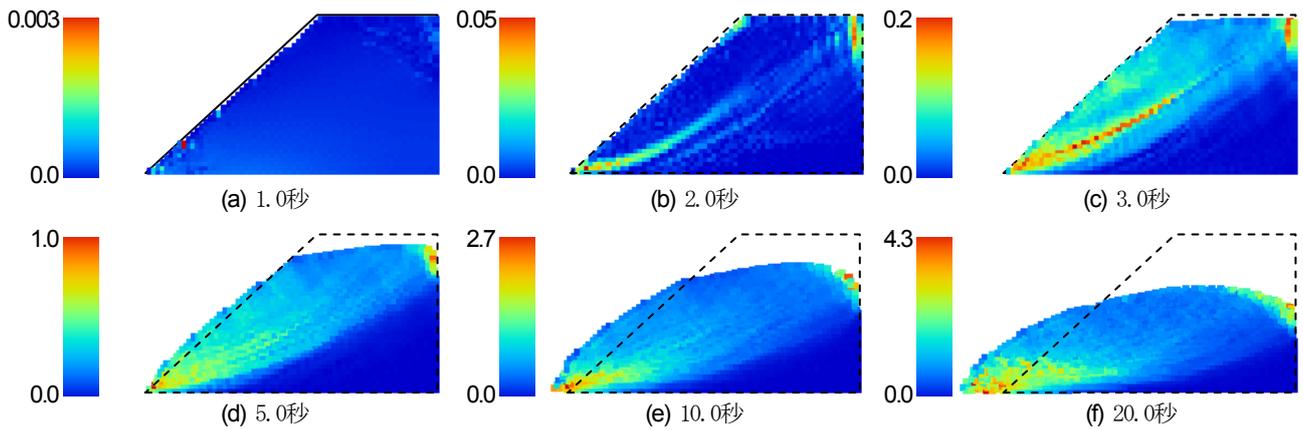


図-7 初期応力解析結果



コンター図：最大せん断ひずみ、変形倍率：1.0倍

図-8 地震応答解析結果

地震応答解析で図-8に示す最大せん断ひずみ分布が得られたので、その結果を解説する。加振開始1.0秒後では斜面は安定を保っている。加振開始2.0秒後の結果を見ると斜面法尻部から斜面を駆け上がる方向に最大せん断ひずみが進行していく様子が分かる。この時点で最大せん断ひずみは5%に達している。加振開始3.0秒後には最大せん断ひずみが進行し20%を示している。また同時刻の変形状態を見ると斜面が崩壊し始めていることが確認できる。加振開始から5.0秒以降は斜面が全体的に崩壊していく様子が見られる。

図-9は解析対象とした遠心載荷実験における、実験前後の盛土変形のスケッチ図である。実験では、図-9の赤点線で示すせん断帯を境にして、上部土塊が下部にある健全な斜面をすべり落ちている。上部土塊はせん断帯における擾乱を示すものの、せん断帯より上にある土塊は離散することなく、法肩部を除いて、概ね加振前の形状を残している。以上より、実験と解析結果を比較すると以下の事が言える。

図-8(b)より、解析によるせん断帯の発生位置は、実験結果と良い一致を示しており、概ね再現できていると言える。

図-8(c)より、解析によるせん断帯の発達方向は、斜面上流側の側方境界上部へ向かっており、実験結果と整合しない。これは、実験では側方に硬質EPSを設置し、振動がある程度吸収されること、および、解析における側方境界は面外固定としているため、盛土の引張応力が側方境界付近に集中してしまうことが原因であると思われる。

図-8(d)、図-8(e)、図-8(f)を見ると、実験結果に見られる様な、せん断帯が発達し、上部土塊が下部土塊の上を滑り落ちるような傾向は見られなかった。解析結果の上部土塊は粉々に崩壊し、流れ落ちている結果である。これは、解析では層厚が9.0(m)であるが、初期剛性の拘束圧依存性を考慮していないこと、残留強度が不明確であ

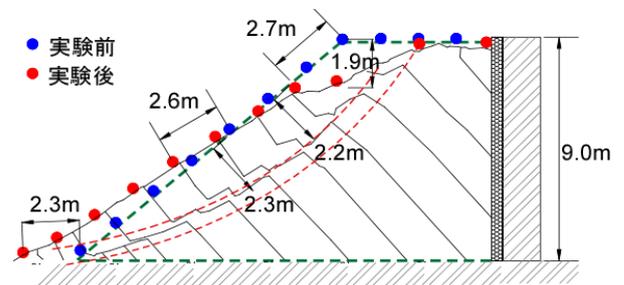


図-9 加振終了後の実験盛土の状況¹⁾

るという理由から、塑性後もピーク強度乗数を用いているため、ひずみの局所化が発生し難いことが影響していると考えられる。

4. まとめ

本論文の結論として以下の項目を挙げる。

- ・MPMは動的解法であるが減衰力を与えることで静的解析も可能となる。
- ・土の強度定数(C , ϕ)を導入することで地盤の数値解析へも適用することが可能である。
- ・地震外力は境界格子への加速度、速度入力することで可能となる。静的自重解析から物性変更、境界条件変更、地震応答解析まで、一連の解析を実施することが可能であることを示した。また斜面崩壊解析に関しては格子法では不可能であった大変形解析が行えることを定性的に示し、その妥当性を実験結果と比較して示した。

以上より、MPMで静的解析から動的解析まで一連の解析が行える可能性を示した。今後は、静的解析、地盤非線形性、地震応答解析、それぞれに関して定量的な考察が必要である。地盤の非線形性に関しては、用いる物性値に関する詳細な検討と拘束圧依存性を考慮した物性値の付与方法などを検討する必要がある。また、地震外力

の載荷方法は、波動伝播による精度検証が必要と考えられる。以上の観点から、今後の研究を進め、より精度の高いMPM解析を実施する予定である。

参考文献

- 1) 越塚誠一：計算力学レクチャーシリーズ 5, 粒子法, 丸善, 2005.
- 2) 酒井謙, 山下彰彦：SPH 理論に基づく粒子法による構造解析の基礎的検討, 日本機械学会論文集 A, Vol.67, No.659, pp.7-16, 2001.
- 3) D.Sulsky, Z.Chen, H.L.Schreyer : A particle method for history-dependent materials, .Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 118(1994) 179-196
- 4) K.Konagai and J.Johansson : Lagrangian Particles For Modeling Large Soil Deformations, Seismic Fault Induced Failures, pp.99-106, 2001.
- 5) 清野純史, 本田武史：断層近傍の大変形を考慮した差分法による地震動評価, 土木学会地震工学論文集, Vol.27, No.17, pp.1-8, 2005.
- 6) 阿部慶太, Jorgen Johansson, 小長井一男：MPM を用いた乾燥砂の流動解析, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, No.96, pp.1-10, 2005.
- 7) 阿部慶太, JOHANSSON Jorgen, 小長井一男：MPM を応用した高速長距離土砂流動の運動範囲予測のための数値解析手法, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.1, pp.93-109, 2007.
- 8) YOSUKE HIGO, FUSAO OKA, SAYURI KIMOTO, YUICHI MORINAKA, YUSUKE GOTO and ZHEN CHEN : A COUPLED MPM-FDM ANALYSIS METHOD FOR MULTI-PHASE ELASTO-PLASTIC SOILS, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.50, No.4, pp.515-532, 2010.
- 9) Cundall,P.A. : Distict Element Models of Rock and Soil Structure, Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics, Ch.4, pp.129-163. E.T. Brown, ed. London : Allen & Unwin., 1987.
- 10) L.BEUTH : LARGE DEFORMATION ANALYSIS USING A QUASI-STATIC MATERIAL POINT METHOD : Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Vol.38, No.1-2, pp45-60, 2008.
- 11) 常田賢一, 張至鎬, 小田和広, 中平明憲, 大槻明：地震時のすべり破壊に対する道路盛土の耐震性向上に関する遠心載荷実験, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.566-572, 2007.
- 12) 張至鎬, 福武毅芳：巨大地震による土構造物の変形量・崩壊現象を大変形解析で定量的に評価 ～崩壊メカニズムに基づく合理的対策の提案へ～, Geo-Labo Chubu ニュースレター, No.115, 2010.

APPLICATION OF MPM FOR EMBANKMENT LARGE DEFORMATION ANALYSIS

Takatoshi KIRIYAMA

The author developed the numerical analysis program based on the particle based numerical analysis method, MPM(Material Point Method) and applied it for large ground deformation simulations. MPM has characteristics of the similarity of Mesh Based Methods(e.g.FEM, FDM). Numerical simulation techniques developed in FEM or other methods are easily introduced into MPM.

In this paper, to simulate an embankment large deformation analysis, a static analysis method, material non-linearity and a method of an application of dynamic loads such as earth-quakes are studied. The results obtained through simulations are compared with experimental results and the effectiveness of these methods are qualitatively confirmed.