

## 粒子法による地盤の大変形・崩壊挙動評価

構造物技術研究部 基礎・土構造研究室  
研究員 阿部 慶太

### 1. はじめに

近年、巨大地震の顕在化，異常降雨の増加に伴い，図1に示すような鉄道沿線での斜面崩壊，浸透破壊，液状化，土石流等の地盤の大変形，崩壊現象に関わるリスクについて年々関心が高まっている。このような背景の下，模型実験による検証，円弧すべり法による安全率に基づく安定性評価に加え，地盤の大変形，崩壊後の挙動を，数値解析により定量的に評価することが求められている。しかし，従来，地盤の変形解析に多く用いられている有限要素法では，地盤が大変形するにつれ有限の要素に大きな歪みが生じ解析が不能になる。また，その他の変形解析手法である，個別要素法は地盤内の土粒子を一つ一つモデル化し，粒子相互間の力をばねと

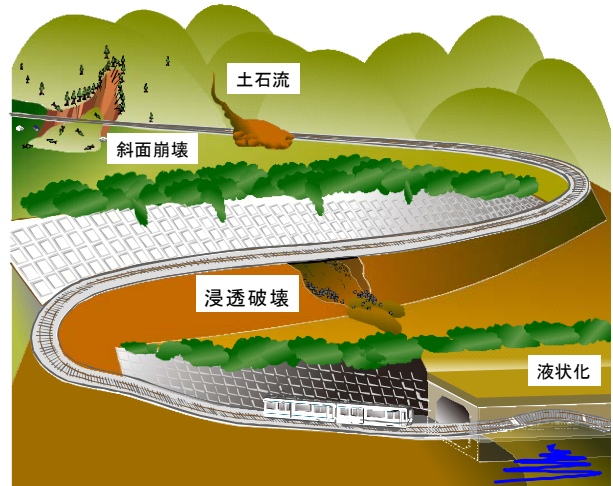


図1 鉄道沿線の地盤の大変形・崩壊現象

ダッシュポット等でモデル化するため，土質調査データを用いた粒子相互間力，粒子形状のモデル化が必要であり，実際の地盤に適用するには現状では困難である。一方，物体を粒子の集合でモデル化し，大変形，崩壊解析に適用性が良い「粒子法」が近年発展しているが，複雑な非線形構成則（応力ひずみ関係）を有する地盤の大変形，崩壊現象への適用には多くの課題があった。そこで，地盤を粒子でモデル化する一方，ひずみの算定は有限要素法と同様に格子で扱うMaterial Point Method<sup>1)</sup>（以後，MPMと呼ぶ）を用い，一連の地盤の非線形構成則を整備することで，地盤の大変形・崩壊解析を可能にする解析手法を開発した。そして，様々な地盤の大変形・崩壊現象へ適用した。本稿では，開発した粒子法による解析手法の概要と，地盤の大変形・崩壊挙動評価への適用に向けた検討結果について示す。

### 2. 粒子法（MPM）による地盤の大変形解析手法の概要

図2に基盤となる解析手法として用いたMPMの計算の流れを示す。MPMは，地盤の変形解析コードFLAC<sup>2)</sup>と同じUpdate-Lagrangian法と陽解法の組み合わせによる手法である。MPMでは地盤を粒子の集合として表し，応力，ひずみ等の物理量を粒子群により輸送する。一定

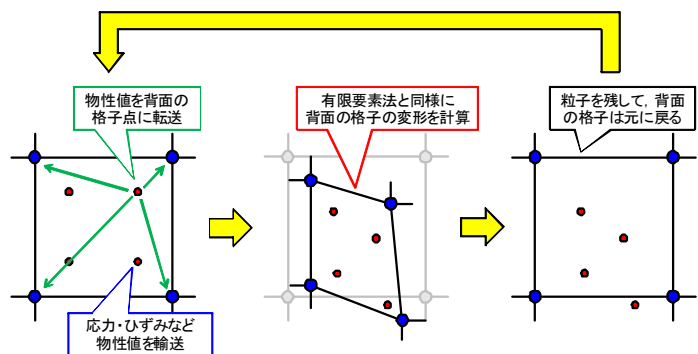


図2 MPMにおける計算の流れ

時間刻み  $\Delta t$  毎にそれらの物理量を粒子群が存在する空間に固定した背面格子の格子点に内挿関数を通じて集約し、運動方程式を解き格子点速度を求める。格子点速度からひずみ増分  $\Delta \epsilon$  を求め、それに伴う格子の変形に従い粒子の位置、物理量を更新する。変形した格子は次ステップの計算に備え粒子を残し元に戻る。微小な時間刻み  $\Delta t$  では微小変形理論が成り立つと仮定し、微小変形理論に基づく既存の非線形構成則を用いてひずみ増分  $\Delta \epsilon$  から応力増分  $\Delta \sigma$  が計算され、地盤のひずみはひずみ増分  $\Delta \epsilon$  の累積として計算する。以上の流れにより地盤の大変形、崩壊挙動を表現する。具体的な式の導出、計算のアルゴリズムについては文献 1), 3) を参照頂きたい。

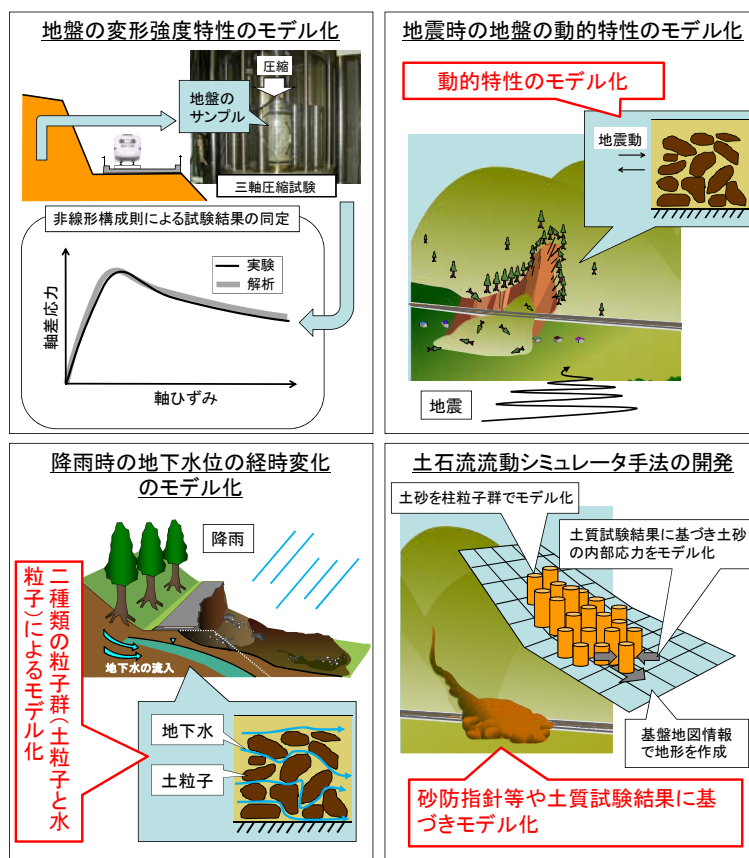


図3 解析手法におけるモデル化の概要

以上の計算の中で、地盤の変形

強度特性は非線形構成則により表現される。具体的には、図3に示すように、実際の地盤から採取した供試体で三軸圧縮試験、繰返し三軸試験を行い、試験結果を同定してモデル化を行う。地盤の非線形構成則としては、モール・クーロンモデルから浅岡らのSYS Cam-clayモデルに至るまで数多くのモデルが提案されており、これらの一連の構成則をMPMにも適用できるように整備することで、地盤の変形強度特性を表現できるようにした。

また、地震時の地盤の大変形・崩壊挙動評価では地盤の動的特性の表現、降雨時の地盤の大変形・崩壊挙動評価では地盤内の地下水位の経時変化の表現が必要となる(図3参照)。地盤の動的特性を表すためには減衰の表現が重要になるが、従来の有限要素法に用いられているレーリー減衰をMPMにも適用できるようにすることで対応を可能とした。地盤内の地下水位の経時変化については、地盤を土粒子(固相粒子)と水粒子(液相粒子)の二種類の粒子群でモデル化する手法を用い、水粒子が地盤内を浸透水圧に伴い移動できるようにすることで対応を可能とした。

その他、地盤の大変形・崩壊現象として土石流がある。土石流の特徴は複雑な溪流地形を流下後、鉄道が走る平地部に土砂が大きく広がり被害を拡大する点である。この点を考慮し、国土地理院から無償提供されている基盤地図情報と連携した粒子法(MPM)<sup>3)</sup>による流動シミュレーション手法も開発した(図3参照)。必要なパラメータは、砂防指針等の参照で容易に決められるように、崩土の土砂量、粘着力、内部摩擦角、ダイレイタンシー角、変形係数、底面摩擦角とした。

### 3. 粒子法(MPM)による地盤の大変形・崩壊挙動評価

ここでは、地震時での地盤の大変形・崩壊挙動評価として斜面崩壊への適用性を、降雨時の地盤の大変形・崩壊挙動評価として盛土の浸透破壊への適用性を検討した事例を取り上げる。また、

上述した流動シミュレーション手法による土石流の流動範囲予測への適用性について示す。

はじめに、地震時での斜面崩壊挙動評価への適用性把握に向けた、地震時の斜面崩壊に関する既往の模型実験の再現解析結果を示す。対象とした実験は篠田ら<sup>4)</sup>による弱層を有する斜面模型を用いた振動台実験である。斜面模型は、基盤層、弱層、表層で構成され、弱層の勾配を変化させた2モデル（以後、緩勾配モデル、急勾配モデルと呼ぶ）からなる（図4参照）。各層の物性を三軸圧縮試験結果（表1参照）より設定し、構成則については、弱層と表層にドラガーブラガー型弾完全塑性モデル、基盤層に弾性体モデルを用いた。図4に崩壊後形状についての実験および解析結果を示す。急勾配モデルが脆性的に滑落し底面に堆積する挙動、緩勾配モデルが進行的変形し加振途中で停止する挙動を、弱層勾配の大きさに応じて表現できた。このように、地震時では、鉄道沿線で弱層勾配に応じて土塊の滑落速度が変化し、最終的に被害が及ぶ範囲も異なる。上記の再現解析結果より、対象斜面の層構造、変形強度特性を粒子法で適切にモデル化することで、崩壊前の安定解析のみでは評価しにくい地盤の大変形・崩壊挙動の評価も可能になると考えられる。

次に、降雨時での浸透破壊挙動評価への適用性把握に向けた、既往の盛土の浸透破壊実験の再現解析結果を示す。当該実験は、独立行政法人土木研究所にて伊勢野ら<sup>5)</sup>により行われた盛土高3.0m、幅9.0m、勾配1:2の一部飽和した模型盛土（盛土材：山砂[S-F]、細粒分率：13%、平均締固め度：75%）の浸透破壊実験である。盛土背面に水位2.3mで一定とした外水位を設定している。浸透開始から6時間経過した時点初期条件とし、崩壊が生じた13時間後までの挙動を解析した。物性は土質試験結果を用い構成則にはモールクーロン型弾完全塑性モデルを用いた。図5に解析結果を示す。液相粒子（地下水位）の移動に伴い最大せん断ひずみが発達し脆性的に崩壊に

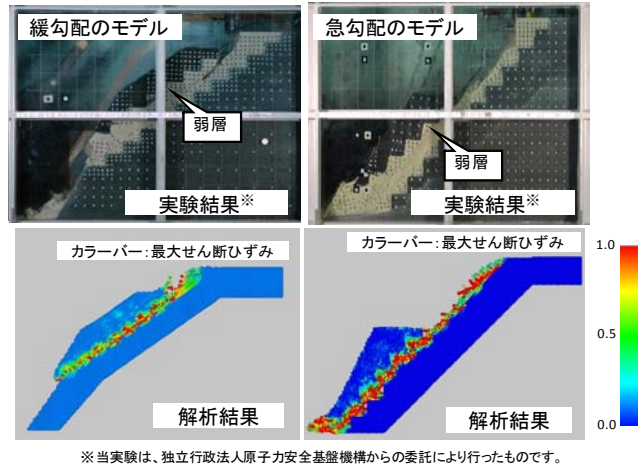
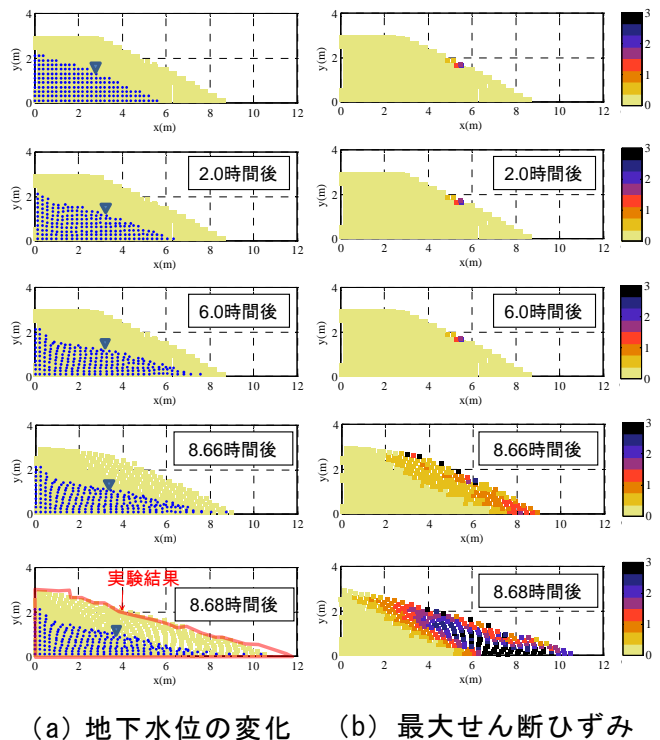


図4 地震時の斜面崩壊実験の再現解析結果

表1 再現解析に用いた各層の物性値

	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	内部摩擦角 (deg)		粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	
		ピーク時	残留時	ピーク時	残留時
基盤層	18.9	57.3	53.4	280.5	5.4
弱層	16.6	39.5	36.3	2.9	1.7
表層	30.0	0.0	28.4	107.4	34.4



(a) 地下水水位の変化 (b) 最大せん断ひずみ

図5 降雨時の浸透破壊実験の再現解析結果

至る様子を再現できていることが分かる。また、崩壊後の形状は実験結果と概ね一致していることを確認できた。このように、降雨時の盛土、切土では、地下水の浸透が促進され、長時間をかけて脆性的な崩壊に至る可能性が大きい。崩壊挙動と浸透速度は、構成する地盤材料の変形強度特性、浸透特性、地下水の状況により大きく異なる。本解析手法によれば、それらの特性を構成則等により適切にモデル化することで、崩壊後の挙動も含めたリスク評価が可能となる。

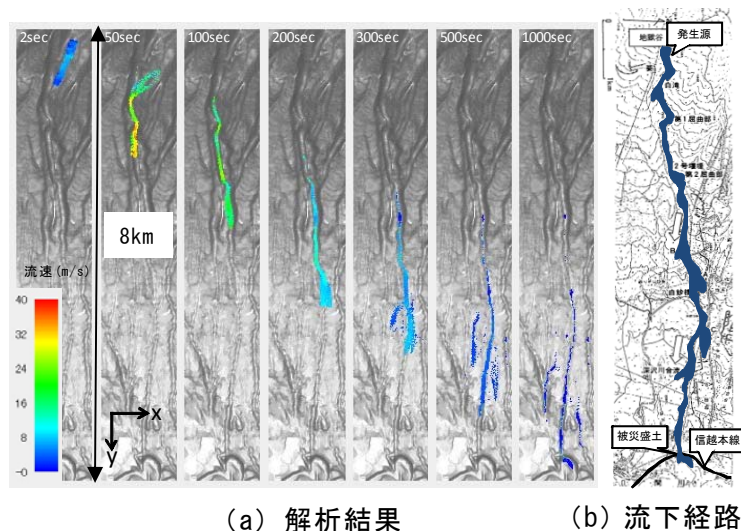


図6 土石流流動解析の結果と流下経路

最後に、上述した流動シミュレーション手法による、土石流流動範囲予測への適用性を検討した。土石流が流動する地形のデジタルデータは、国土地理院から無償で提供されている基盤地図情報を用いて作成した。なお、解析対象は1978年5月に発生した信越本線妙高高原・関山間の土石流とし、崩土を砂質系地盤としてモデル化した。解析結果を実際の土石流の流下経路<sup>6)</sup>とともに図6に示す。実際の土石流が流下した経路を概ね再現できた。発生源から被災地点までの流下距離は約8kmであり、平均流下速度は時速30kmである。これは一般的な土石流の流下速度(時速40~50km)と同等であり、土石流の流動予測手法としての適用性を確認することができた。

#### 4. おわりに

粒子法(MPM)による地盤の大変形解析手法を開発し、鉄道沿線で発生しうる地盤の大変形・崩壊挙動評価への適用性について検討した。今後の課題としては、実際の地盤への適用、実務への展開がある。今後は、地盤災害記録のシミュレーション例を増やし、実際の地盤への適用性をより確認するとともに、地盤の崩壊予測ツールを通して実務への展開を検討していく予定である。

#### 参考文献

- 1) Sulsky, D., Zhou, S. J. and Schreyer, H. L.: "Application of a particle-in-cell method to solid mechanics," Computer Physics Communications, Vol. 87, pp. 236-252, 1995.
- 2) Cundall, P. and Board, M.: A microcomputer program for modeling large-strain plasticity problems, Numerical Methods in Geomechanics (Innsbruck 1988), pp. 2101-2108, 1988.
- 3) 阿部慶太, JOHANSSON Jörgen, 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. 1.
- 4) 篠田昌弘, 渡辺健治, 阿部慶太, 西村隆義, 坂井公俊, 村田雅明, 中村英孝, 中村晋: 岩盤斜面の地震時安定性評価手法の構築に向けた試み, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 2935-2942, 2010.
- 5) 伊勢野暁彦, 小橋秀俊, 古本一司, 森啓年, 大野真希: のり尻ドレーン工法を用いた河川堤防の浸透強化対策に関する大型模型実験, 第39回地盤工学研究発表会, pp. 1255-1256, 2004. 7.
- 6) 村石尚: 信越本線妙高高原・関山間の土石流災害, 日本鉄道施設協会誌, Vol. 43, No. 5, pp. 328-330, 2005.