

広範囲な地盤の大変形を解析する

阿部 慶太
構造物技術研究部
(基礎・土構造 研究員)

篠田 昌弘
同
(同 副主任研究員)



あべ けいた しのだ まさひろ

はじめに

鉄道の安全で安定な運行を保つためには、線路を支える橋、トンネル、盛土など土木構造物が常に安全であることを確認する必要があります。特に、地震時や豪雨時などの防災の視点からこの確認が重要となります。一般に土木構造物は、地盤上または地盤内に建設されることから、地盤の変形を考慮することが必要不可欠となります。特に災害時は、斜面崩壊、土石流、液状化現象（地震時に構造物周辺の地盤が液体ようになる現象）など、地盤が大変形する場合（図1）が多く、地盤がどのように大変形し、土木構造物の安全性を脅かすか、評価する必要があります。鉄道総研では、大変形する地盤が土木構造物の安全性に与える影響を評価する方法の構築を目的に、広範囲な地盤を対象とした大変形解析法の研究開発を行っています。ここでは、その取り組みの一端を紹介致します。

広範囲に大変形する地盤

一口に地盤の大変形と言っても、多種多様な条件やその様相が存在します。図2に地盤の大変形に係わる現象の代

表的な例として斜面崩壊と盛土の大崩壊を示しました。一言で斜面崩壊と言っても、その様相は地盤の種類、斜面の形状などで大きく異なります。例えば、勾配の緩やかな斜面では、崩壊した土砂はゆっくりと滑りますが、勾配の急な斜面では、唐突かつ急速に土砂が滑ります。さらに、滑った先に溪流などがあると、土石流となって遠方まで流動する場合があります。また、地山から浸透水が集中する箇所や、沢が存在する谷渡り盛土などでは、盛土内の地下水面上昇に伴う大崩壊が多く発生しています。そのほか、地盤



図1 地盤の大変形を伴う災害

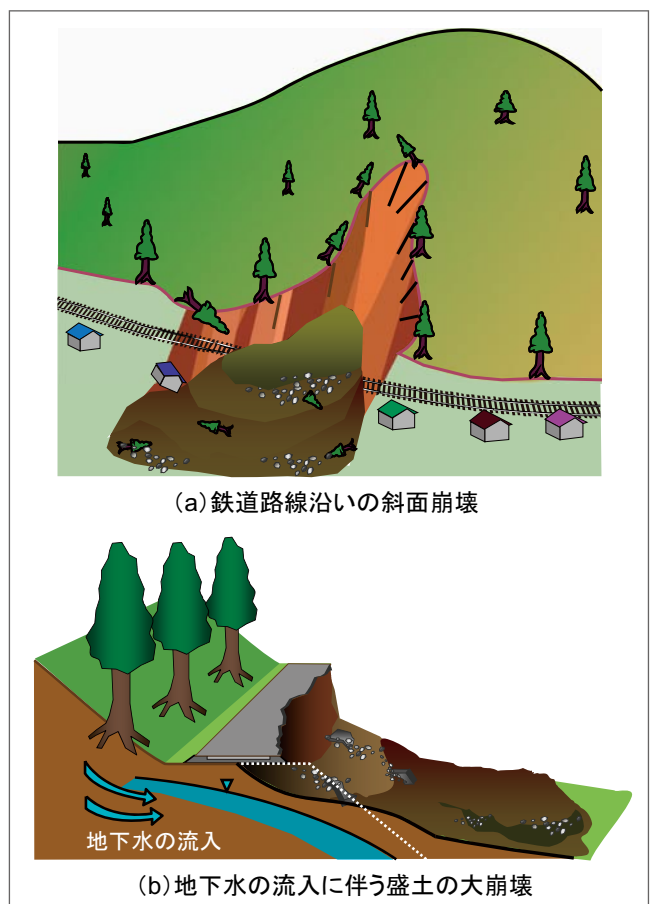


図2 地盤の大変形に係わる現象

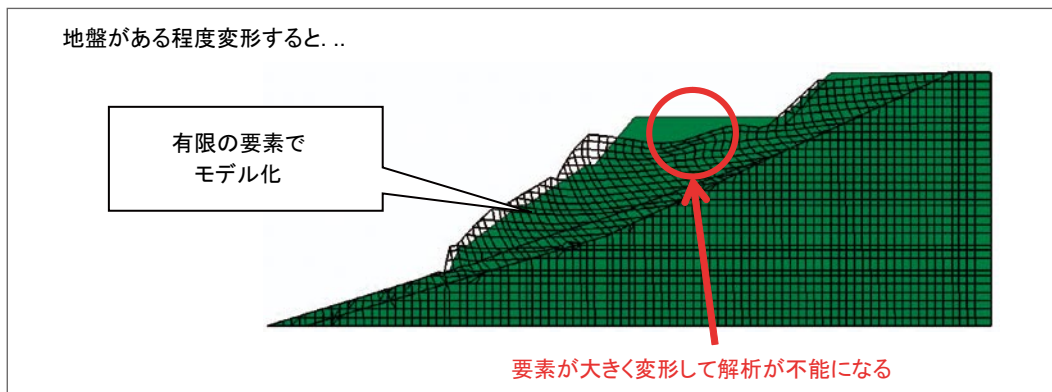


図3 有限要素法の課題

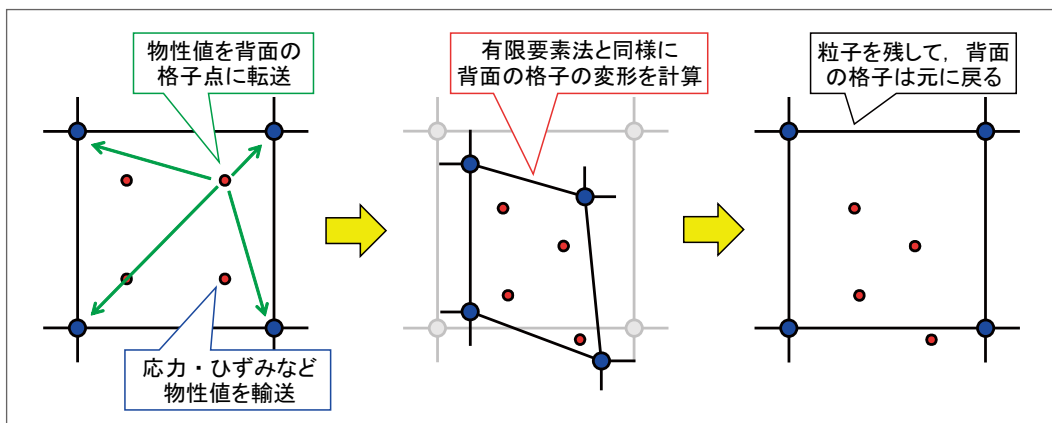


図4 MPMによる計算

の大変形に関する現象として軟弱な地盤での液状化現象があります。主な被害としては、液状化した地盤内の杭基礎の被害、構造物の倒壊、地下鉄などの開削トンネルの浮き上がりの被害があります。

地盤の大変形を解析する

多種多様で、複雑に様相が変化する地盤の大変形を定量的に評価することは、容易なことではありませんが、地盤の大変形に対応可能な解析手法の構築に向けて、多方面で研究が行われています。現在、一般的な地盤の変形解析法として「有限要素法」と呼ばれるものがあります。有限要素法とは、地盤を小さな有限の要素の集合体としてモデル化し、地盤全体の変形を解析する方法であり、地盤の変形解析法として、実務設計において最も一般的な方法として用いられています。しかしながら、地盤が大変形すると、図3に示すように、有限の要素が地盤の大変形に追従することができなくなり解析が不能になってしまう課題がありました。そこで、地盤の大変形にも対応できる新しい解析手法の構築が求められてきました。

このような解析手法として、多くの研究者により、多種多様な手法が提案されておりますが、ここでは、1995年

にSulskyらにより提案された「Material Point Method」(以後、MPMと呼びます。)を採用しました。図4にMPMによる計算の流れを示します。この手法では、地盤を有限の要素に代わり粒子の集合体としてモデル化します。一方で、粒子群の背面に、固定した格子群を配置し、粒子で地盤の大変形を制限なく表現する代わりに、背面の格子で有限要素法と同様に解析を行います。このようにすることで、有限要素法に関する多くの技術や解析モデルをMPMにも適用できるため、他手法に比べ大きな変更なく有限要素法に関する多くの研究成果を生かすことができます。さらに、前述したように、有限要素法は実務設計において一般的な解析手法になっているため、有限要素法の延長線上の手法として、実務での適用可能性を大いに有した解析手法とも考えられます。以下では、このMPMを用いた解析例を数例紹介し、その有用性について述べます。

斜面の大変形を解析する

はじめに、地震時の斜面崩壊のシミュレーション解析結果を紹介します。解析モデルとして斜面勾配が緩やかなものと急なものを想定し、大変形した際の土砂の挙動を解析しました。図5に解析結果を示します。図中のカラーバー

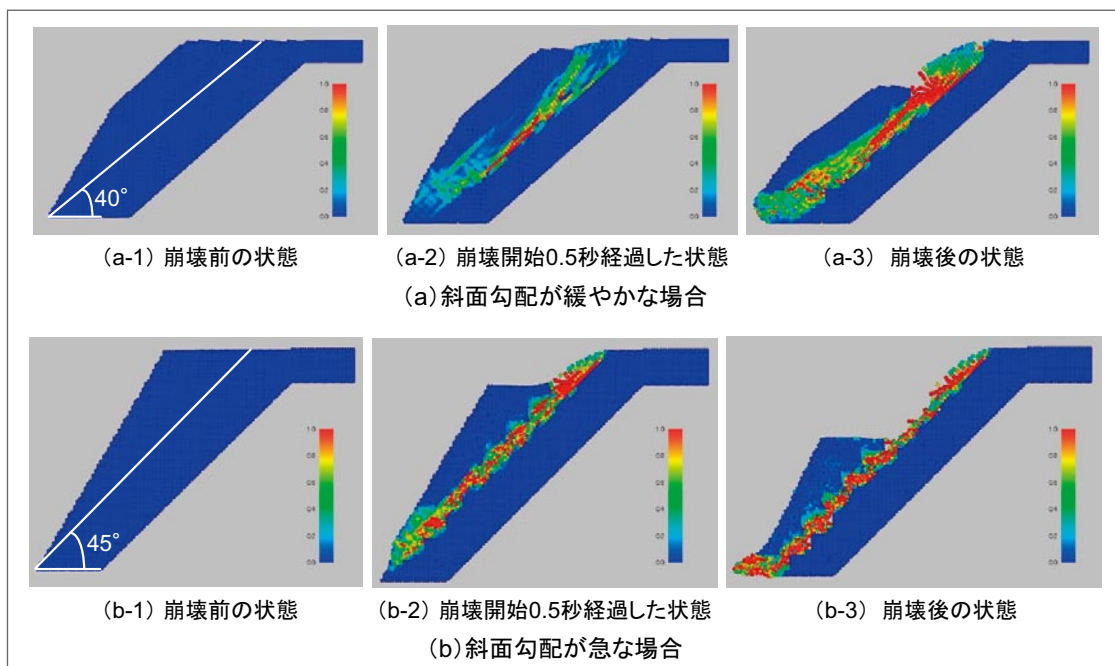


図5 斜面崩壊のシミュレーション結果(カラーバー：最大せん断ひずみ)

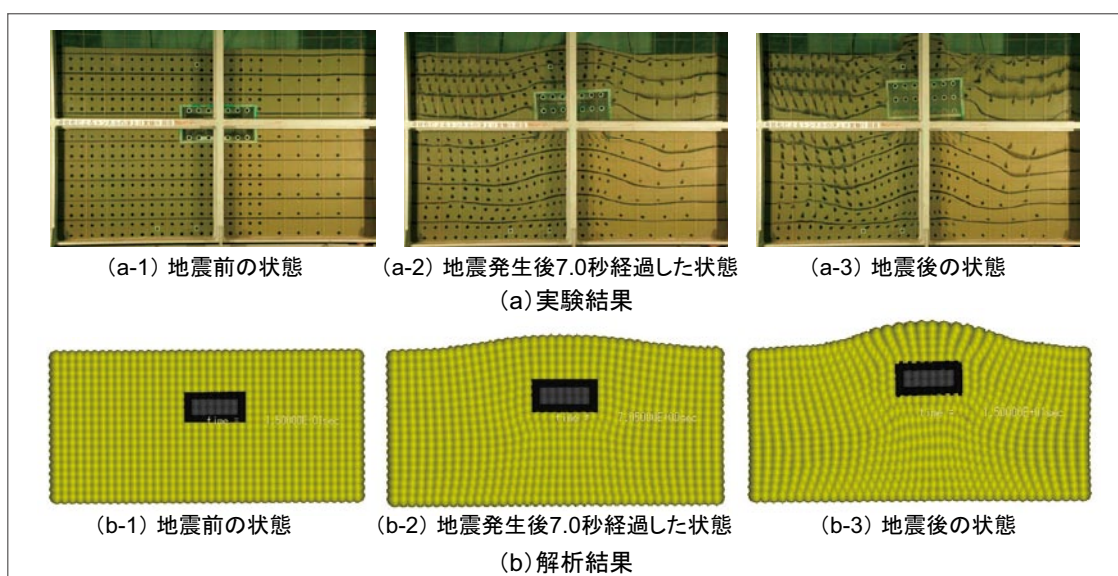


図6 開削トンネルの浮き上がりのシミュレーション結果

は最大せん断ひずみの大きさ(地盤の変形の程度を表す諸量)を表わしています。勾配が緩やかな場合では土砂はゆっくりと滑りますが、勾配が急な場合では、土砂が急速に滑ることが分かります。この点は、前述した一般的な斜面崩壊の様相と一致しており、MPMが斜面の大変形解析に適していることが分かります。

トンネルの浮き上がりを解析する

次に、地震時の液状化に伴う開削トンネルの浮き上がりのシミュレーション解析結果を紹介します。ここでは、浮き上がりに関する振動実験の再現解析を行いました。図6

に実験結果と解析結果を示します。実験で見られたような液状化の進行に伴うトンネル模型の浮き上がり現象を、地表面が盛り上がる大変形領域まで表現できていることが分かります。

盛土の大崩壊を解析する

続いて、高い地下水面を有した盛土の大崩壊のシミュレーション解析結果を紹介します。図7に地下水面を有した盛土半分をモデル化した場合の解析結果を示します。盛土の大崩壊現象を表現できていることが分かります。図中のカラーバーは最大せん断ひずみの大きさを表しています。

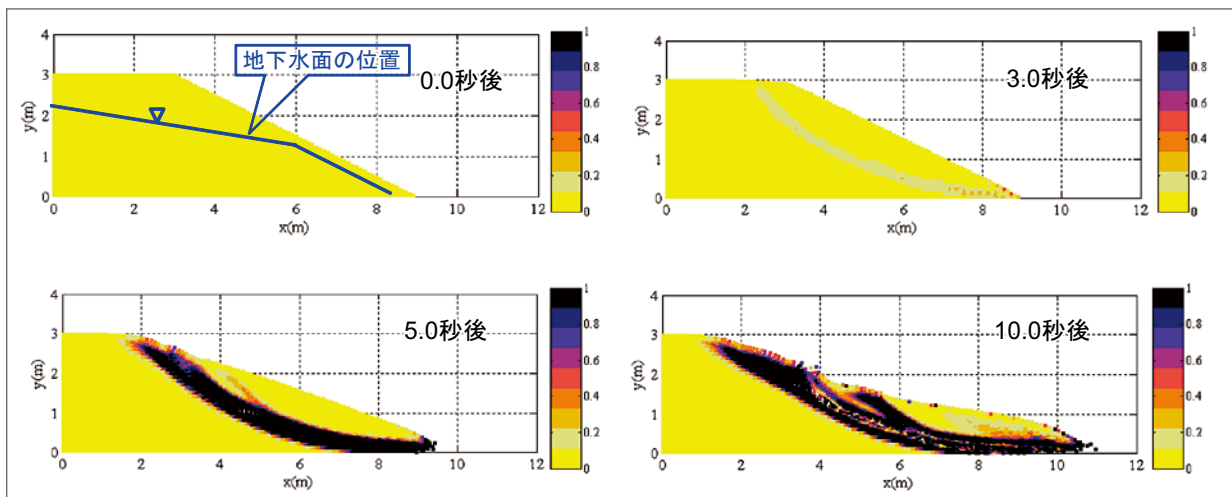


図7 盛土の大崩壊のシミュレーション結果(カラーバー：最大せん断ひずみ)

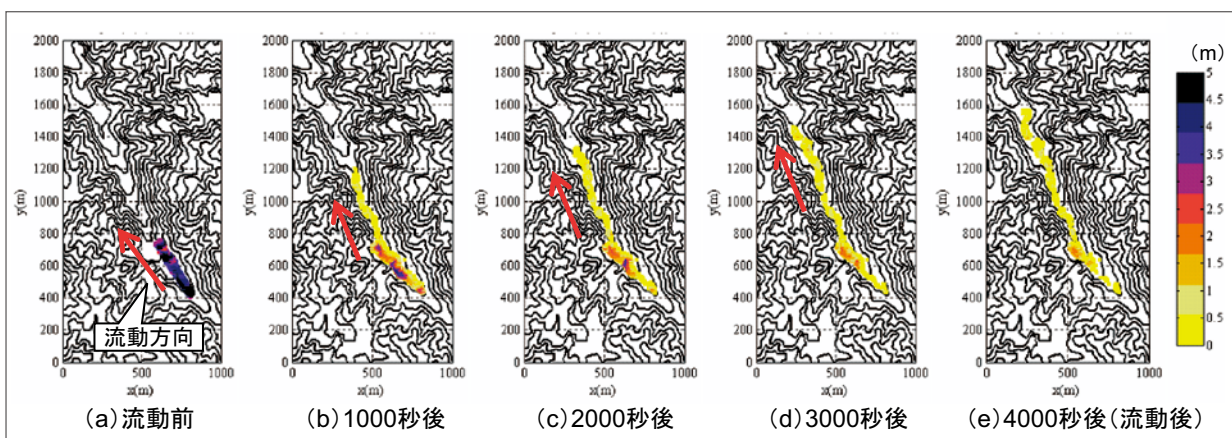


図8 土石流流動のシミュレーション結果(カラーバー：土石流厚さ(m))

変形が進行するにつれ、盛土の崩壊時に確認される、円弧状のすべり線が発達していく過程を確認できます。

遠方まで達する土石流を解析する

最後に、遠方まで達する土石流のシミュレーション解析結果を紹介します。ある土石流危険渓流の上流で、土石流が発生したことを想定し解析を行いました。図8に解析結果(平面図)を示します。図中のカラーバーは土石流の厚さ(単位:m)を表わしています。これより渓流に沿って土石流の土砂が厚さを変えながら流動していく様子が確認できます。

おわりに

ここでは広範囲な地盤の大変形解析法に関する研究開発の一端を紹介しました。鉄道構造物の安全性の確保に向け、地盤の大変形解析法の構築の重要性とともに、有限要素法に代わる新しい手法「MPM」およびその有用性と、数例の解析結果を紹介しました。鉄道が建設される地盤、あるいは既存の地盤には、今回紹介した現象以外にも大変形を伴

う現象が多く存在します。それらの中には発生メカニズムが未解明なものも多く、それらのメカニズム解明に向けても、今回紹介したような解析手法による研究が重要なものと考えられます。以上を踏まえ、今後も地盤の大変形解析法構築に向けた研究開発に取り組んでいく予定です。RRR

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) 渡辺健治, 澤田亮: 液状化による開削トンネルの浮き上がりに対する各種対策工法の効果の検討, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, 2005.
- 3) 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.
- 4) 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.