

| |
|-------|
| 鉄道一般 |
| 車両 |
| 施設 |
| 電気 |
| 運転・輸送 |
| 防災 |
| 環境 |
| 人間科学 |
| 浮上式鉄道 |

弱点箇所を見極めた設計により盛土の地震時安全性を高める

盛土の耐震設計では、地震による盛土の沈下量を計算するために、ニューマーク法とよばれる手法が用いられています。この手法は比較的簡単に計算ができるものの、実際の盛土の壊れ方を厳密に再現できておらず、地震が発生したときに実際に観測された沈下量と算定した沈下量が大きく異なる場合があることが近年わかってきました。そこで、地震時の盛土の壊れ方を模型実験によって明らかにし、その壊れ方を再現可能な計算手法を用いた新しい耐震設計を提案しましたので紹介します。

はじめに

現在の盛土の耐震設計では、盛土のもっとも上の面(以下、天端)の沈下量を指標とした評価を行います¹⁾。これは、盛土の沈下量が地震後の復旧のしやすさに大きく影響を与えるためです。沈下量を算定する際には、一般的にニューマーク法とよばれる計算手法が用いられています¹⁾。この計算では、図1に示すように盛土に円弧状の滑り線が発生する壊れ方を想定します。そして、土塊が地震動によって滑ろうとする力と滑りに抵抗する力を比べることで土塊の滑る量を計算し、沈下量を算定します。この手法は、計算に必要なデータが少なく比較的簡単に沈下量を算定で

きることや、計算のイメージがわかりやすいことから広く活用されています。

しかし、地震が発生したときに実際に観測された沈下量と、ニューマーク法により算定した計算値が大きく異なる場合があることが近年わかってきました²⁾。この要因の一つとして、ニューマーク法では実際の盛土の壊れ方を厳密に再現できていないことがあげられます。そこで、実際の盛土の壊れ方を再現可能な計算手法を用いた新しい耐震設計方法を提案³⁾しましたので、その概要について紹介します。



伊吹 竜一
Ryuichi Ibuki
鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室
研究員



土井 達也
Tatsuya Doi
鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室
副主任研究員



井澤 淳
Jun Izawa
鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室長



小島 謙一
Kenichi Kojima
前 鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室長
(現 総務部 総務課長)

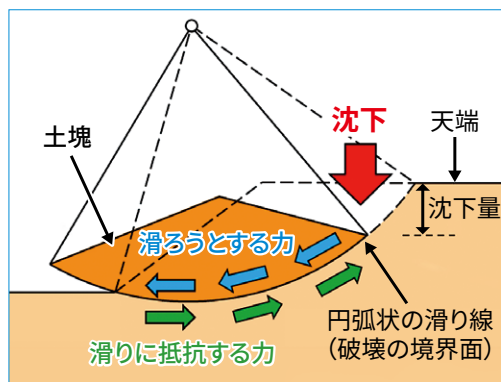
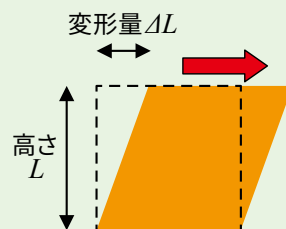


図1 ニューマーク法の計算イメージ

せん断ひずみ

四角形が平行四辺形になるように変形する際の変形量 ΔL を元の高さ L で割った値、つまり $\Delta L/L$ をせん断ひずみとよびます。せん断ひずみは破壊の度合いを表す指標として用いられることがあります。



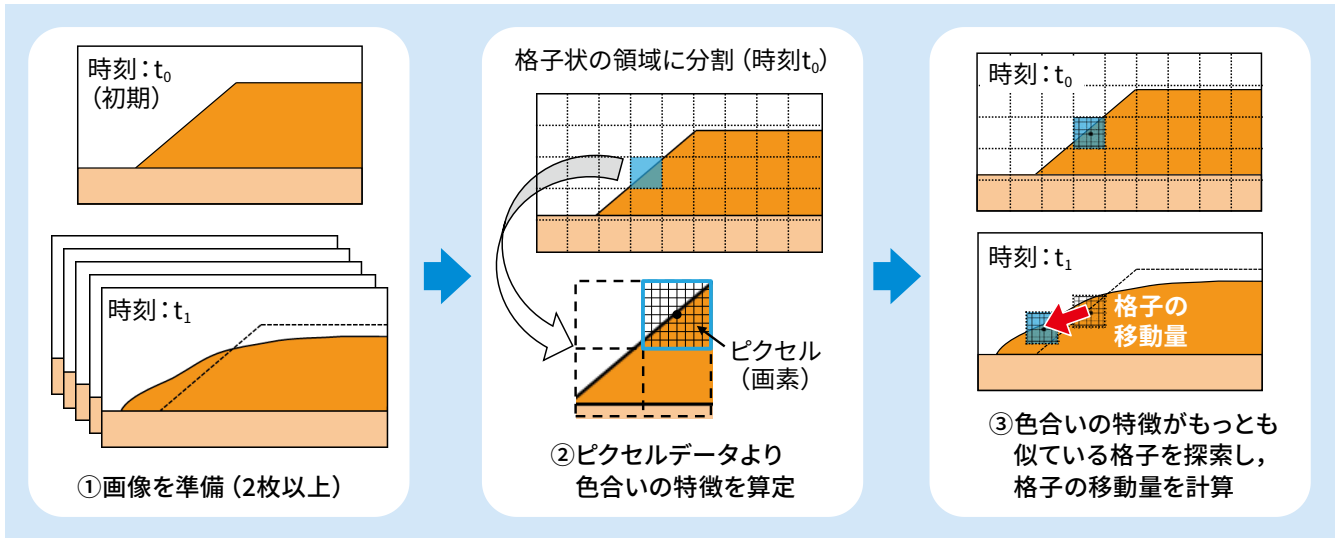


図2 PIV解析の手順

盛土の動きを観察する

実際の盛土の壊れ方を再現可能な計算手法を検討するために、まずは実験を行い、地震時の盛土の動きを観察しました。盛土の模型実験を行う場合、一般的には変位計や加速度計を用いて、盛土がどのくらい変形したか、どのくらい揺れたかを測定し、盛土の動きを観察します。この場合、変位計や加速度計を設置した箇所の動きはわかりますが、盛土が全体的にどのように動いているかを詳細に観察することはできません。そこで、粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry, PIV) という画像解析手法 (以下、PIV解析) を用いて、実験中に撮影した画像から地震時の盛土の動きを詳細に観察しました。

PIV解析の手順を図2に示します。まず、PIV解析を適用する画像を2枚以上準備します (図2①)。次に、個々の画像を複数の格子状の領域に分割し、各格子内のピクセル (画素) データから色合いの特徴を算定します (図2②)。最後に、次の瞬間の画像と比較して、色合いの特徴がもっとも似ている格子を探索し、各格子の移動量を計算します (図2③)。この手順を複数の画像に対して行えば、各画像間で発生した移動を連続的に観察することができます。

図3に、PIV解析を盛土の振動台実験

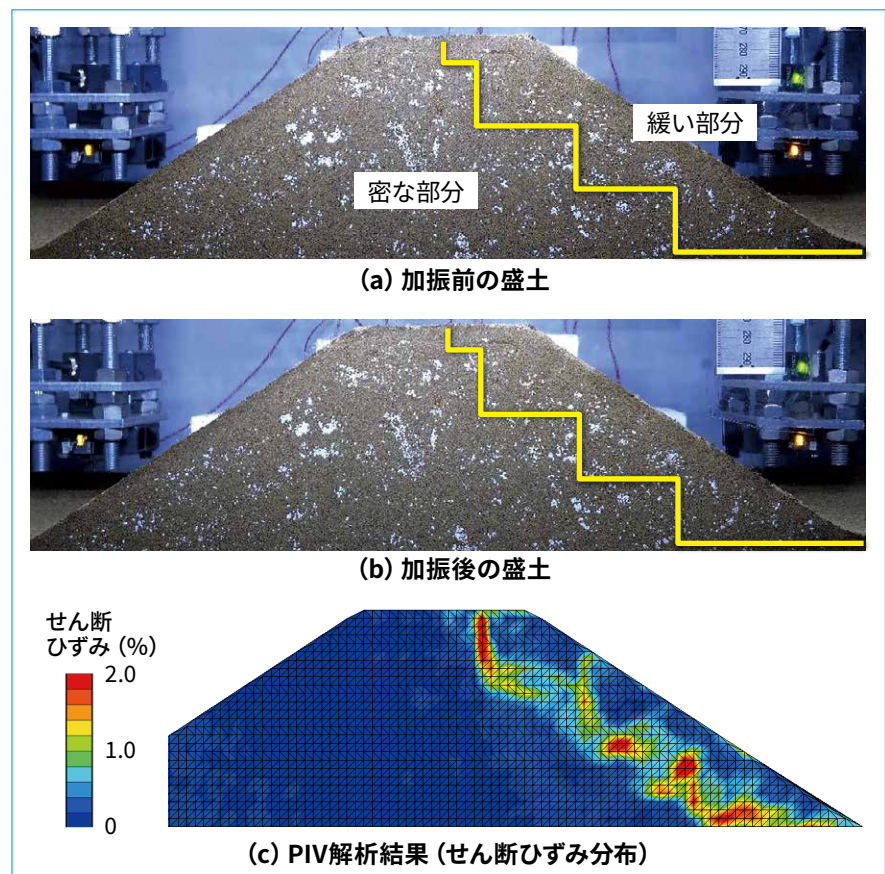


図3 盛土の振動台実験に対するPIV解析の適用事例

験に適用した結果を示します。この盛土模型は、変形する箇所をわかりやすくするために、良く締固められた密な部分と、あまり締固められていない緩い部分に分けられています。加振前後に撮影した画像を図3 (a) (b) にそれぞれ示しますが、画像からは明らかな盛土の変形は見られません。一方、こ

れらの画像を用いたPIV解析より得られたせん断ひずみ分布 (参照) を図3 (c) に示しますが、密な部分と緩い部分の境界に変形が集中していることがわかります。このように、PIV解析を行うことで、目視では確認できないような盛土内部の動きを詳細かつ全体的に観察することができます。これ

までも、盛土模型の表面に複数の標点を設置して、その移動を観察するPIV解析に似た手法がありました。しかしながら、この方法では標点の設置間隔に制限があり多点の変形が観察できないことや、大きな変形により標点が消えてしまうことで観察ができなくなるなどの問題がありました。PIV解析ではこれらの問題が解決でき、破壊に至るまでの盛土の大きな変形を詳細に観察可能です。

盛土の壊れ方を明らかにする

地震時に盛土がどのように壊れるかを観察するために実施した遠心力载荷実験(☞参照)に対してPIV解析を適用した結果を説明します。この実験では、高さ100mmの盛土模型を作製し、重力加速度(1G)の50倍の遠心加速度(50G)を载荷することで高さ5mの盛土の拘束圧を再現しました。ここでは、高さ5mの盛土として実験結果を整理しています。そして、盛土に地震動を与えることで、**図4**に示すように滑り破壊が発生し、土塊が崩落する大規模な破壊が生じました。

図5 (a)に、盛土に与えた地震波形と、**図4**に青丸で示した箇所の変位波形を示しますが、加振中に盛土斜面の変形が進行していることがわかります。**図5 (b)**には変形が進行する領域の拡大図をPIV解析用の画像を撮影したタイミングとともに示します。**図4**

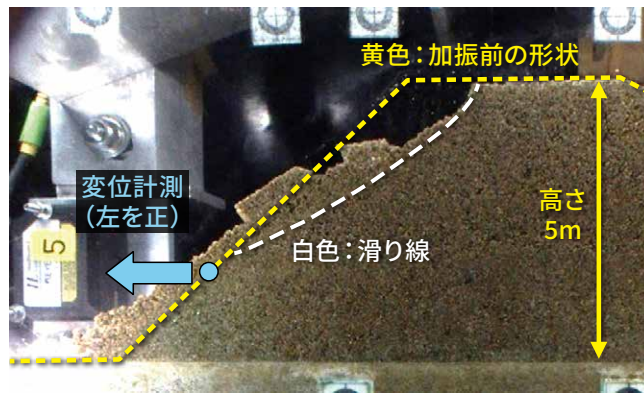


図4 破壊後の盛土模型

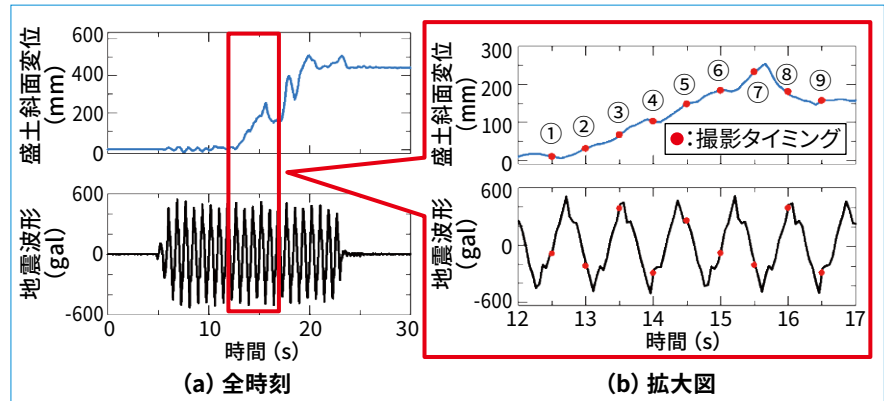


図5 地震波形と盛土斜面下部の変位波形

に示した滑り破壊は⑧~⑨の段階で発生しましたが、それ以前の⑦の段階でも200mm以上の比較的大きな変形が生じていることがわかります。**図6**に、PIV解析の結果を、使用した画像とともに示します。加振開始から13.5秒後(**図7 (a)**)までに盛土斜面の中腹付近にせん断ひずみが集中し始め、徐々に内部に進行した後、15.5秒後(**図7 (d)**)には円弧状に近い滑り線が確認できます。その後、盛土は**図4**のように急激に破壊しました。このように、ニューマーク法で想定するような滑り破壊が発生する前のある程度の変形が生じること、その変形は盛土斜面のある箇所を起点として生じ始めること、滑り破壊が発生すると大規模な崩壊が発生する可能性があることがわかります。なお、さまざまな条件で同様の模型実験を実施した結果、滑り破壊が発生する場合は、同様の壊れ方をすることを確認しています。

盛土の壊れ方を考慮して設計を行う

前章で紹介した盛土の模型実験から、盛土の地震時安全性を高めるためには、滑り破壊の起点となる変形が集中し始める箇所を特定し、弱点箇所として配慮した設計をすることが大切だと考えられます。一方、ニューマーク法では滑り破壊後の沈下量を計算するため、滑り破壊前の盛土の変形を評価できません。

鉄道総研では、このような実際の盛土の壊れ方を考慮した新しい耐震設計方法を提案しています³⁾。その概要を**図7**に示します。この方法では、有限要素法とよばれる計算手法を用います。有限要素法では、計算対象の盛土をいくつかの要素に分割した計算モデルを作成し、各要素に盛土材料の変形特性モデル(作用する力と変形の関係)を設定します(**図7 ①**)。この計算モデルに地震動を入力することにより、各

☞ 遠心力载荷実験

土の強さは周りから受ける力(拘束圧)に強く影響されます。土構造物の実験に縮小模型を用いる場合、そのままでは拘束圧も実際より小さくなってしまいます。遠心力载荷実験では、縮小模型に遠心力を载荷させて、通常の重力加速度よりも大きな遠心加速度を与えることで、実物大に近い拘束圧を再現できます。

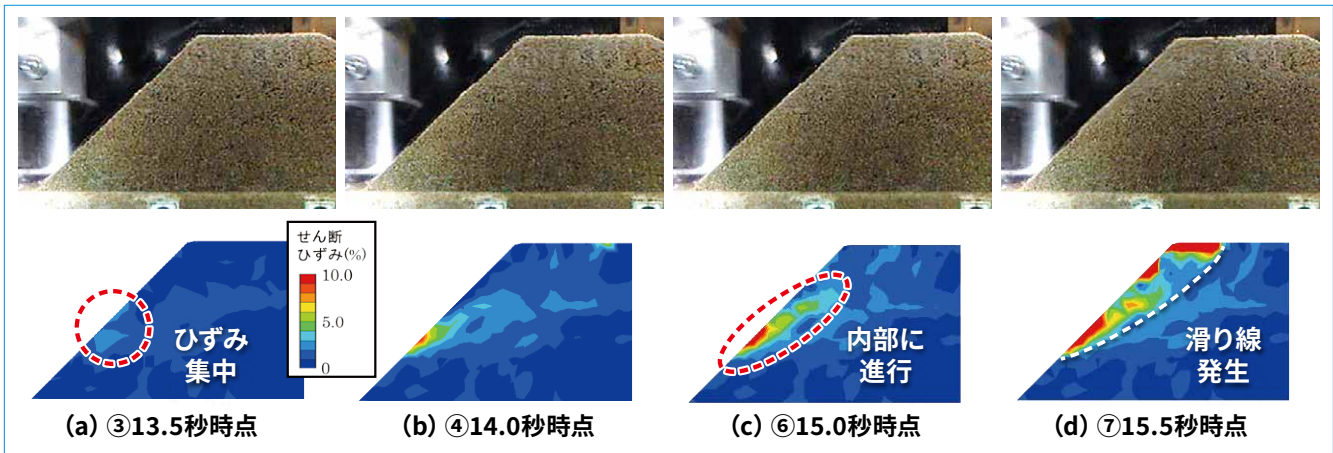


図6 加振中に撮影した画像とPIV解析より得られたせん断ひずみ分布 (撮影タイミングは図5に対応)

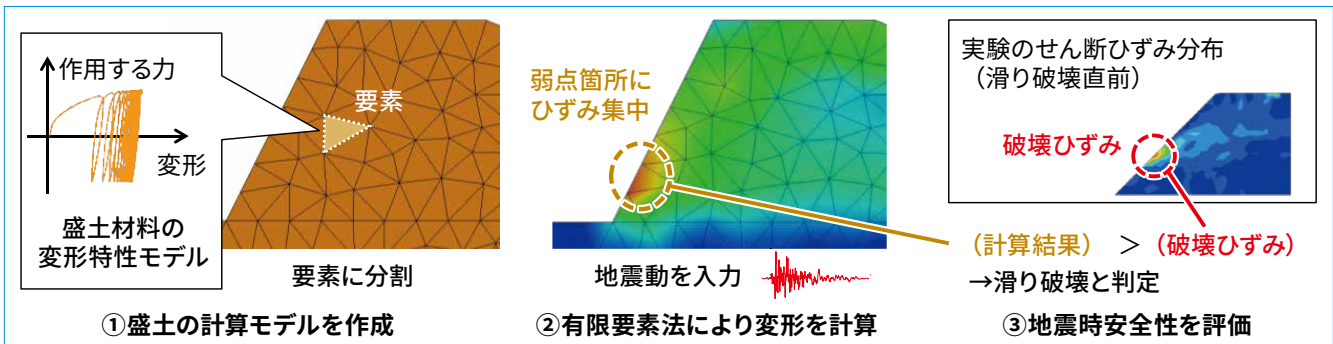


図7 新しく提案した耐震設計の概要

要素に作用する力とその時の変形を計算します(図7②)。その結果、変形がもっとも大きくなる箇所を弱点箇所として特定することができます。一方で、弱点箇所のせん断ひずみがあるしきい値(以下、破壊ひずみ)に達すると滑り破壊が発生することも、これまでの実験からわかっています。有限要素法により計算したせん断ひずみが破壊ひずみよりも大きな場合、滑り破壊が発生すると判断できます(図7③)。したがって、弱点箇所のせん断ひずみが破壊ひずみよりも大きくならないように盛土の設計を行うことで、滑り破壊を防止し、地震時安全性を高めることができます。また、既設の盛土に対しても、有限要素法によって見極めた弱点箇所に補強材を設置するなどの対応で、滑り破壊を防止することができます。なお、有限要素法は従来から使用されている計算手法ですが、盛土材料の変形特性モデルを新しく開発することで、

盛土の弱点箇所に変形が集中していく現象を再現できるようにしています。

ところで、実際の盛土の壊れ方はニューマーク法の想定と異なりますが、鉄道構造物として一般的に構築される盛土形状の場合は、ニューマーク法を適用した従来の設計方法でも安全性を確保できることが経験的にわかっています。一方、30mを超える高さや、おおむね45度より急な斜面角度となる盛土形状の場合は、ニューマーク法を適用すると非現実的な沈下量となる場合があり、安全性を確保するためには経済的でない設計となります。そのため、今回提案した耐震設計方法を用いる必要があると考えられます。

おわりに

地震時の盛土の壊れ方を解明するための模型実験や、新しく提案した耐震設計について紹介しました。このような取り組みにより、盛土の弱点箇所を

見極めて設計することで、地震時安全性をより高めることが期待されます。今後は、補強された盛土や、擁壁がある盛土といったさまざまな土構造物に対しても検討を進めていきたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，2012
- 2) 藤原寅士良，中村貴志，谷口善則，高崎秀明，金田淳：東北地方太平洋沖地震の鉄道盛土円弧すべり解析による被害要因の考察，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.71，No.4，pp.1_87-94，2015
- 3) 土井達也，伊吹竜一，井澤淳，小島謙一，鈴木聡：損傷過程を追跡可能な盛土の耐震性能評価手法，鉄道総研報告，Vol.35，No.5，pp.35-40，2021