

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

鉄道地震災害シミュレーターで 構造物被害を予測する

鉄道路線は非常に長い区間にさまざまな構造物が存在します。したがって、大規模地震時にどのようなリスクがどこに存在するかを探索し、事前に対策することが重要です。そこで、鉄道路線全体の地震時被害を予測可能な鉄道地震災害シミュレーターを開発しました。本シミュレーターは、断層破壊による地震の発生、大規模領域の表層地盤の揺れ、さらに多数の構造物の応答・被害を評価し、大規模地震時に何が起るのかを理解できます。ここでは、本シミュレーターを構成する情報アーカイブスや自動モデリングツール、可視化ツールについて紹介します。



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
主任研究員
[専門分野] 地盤工学



坂井 公俊
Kimitoshi Sakai
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
[専門分野] 地震工学



本山 紘希
Hiroki Motoyama
鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室
研究員
[専門分野] 地震工学



室野 剛隆
Yoshitaka Murono
鉄道地震工学研究センター
研究センター長
[専門分野] 地震工学、
耐震工学

はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東北から関東にかけての広範囲で強い地震動を観測し、鉄道も広範囲で被害を受けました。また、津波の発生、電化柱の損傷、東京湾沿岸での大規模な液状化、繰り返し発生する大きな余震など、想定していなかったような事象も見られました。鉄道は線状のシステムで、さまざまな地盤の上に多くの構造物、軌道、電化柱が建設、設置され、その上を車両が走行します。そのため、一部のシステムが損傷を受けることで、路線全体の機能が不全となる危険性があります。今後発生が危惧されている大規模地震に対して、鉄道路線全線のどのような箇所にもどのような弱点があるかを事前に把握し、どのような箇所を耐震補強しておくべきか、地震後にどのように復旧を進めるのかなどを事前に検討しておくことで、構造物被害やそれに伴うダウンタイムを低減することができます。このような事前検討を行う際、シミュレーションを実施することが有効です。

鉄道路線は多種多様な地盤上に膨

大な数の構造物が建設されています。地震災害シミュレーションを実施する際、これら一つ一つの構造物について解析モデルを作成してシミュレーションを行うことは非常に手間のかかる作業となります。したがって、路線全体を対象としてシミュレーションを実施することはこれまで困難でした。また、どのような地震動が各構造物の位置で観測されるかを予測するためには、断層の破壊から発生する地震動の特徴や、比較的浅い表層地盤の揺れの特徴を適切に評価する必要があります。そこで、断層破壊、表層地盤、構造物の解析モデルを自動で作成して、500kmにおよぶ鉄道路線全体の地震時の挙動シミュレーションを可能とする鉄道地震災害シミュレーターを構築しました。

鉄道地震災害シミュレーターとは

図1に構築した鉄道地震災害シミュレーターの概要を示します。このシミュレーターは、シミュレーションを実施する地震動、表層地盤挙動、構造物群挙動シミュレーターという3つの

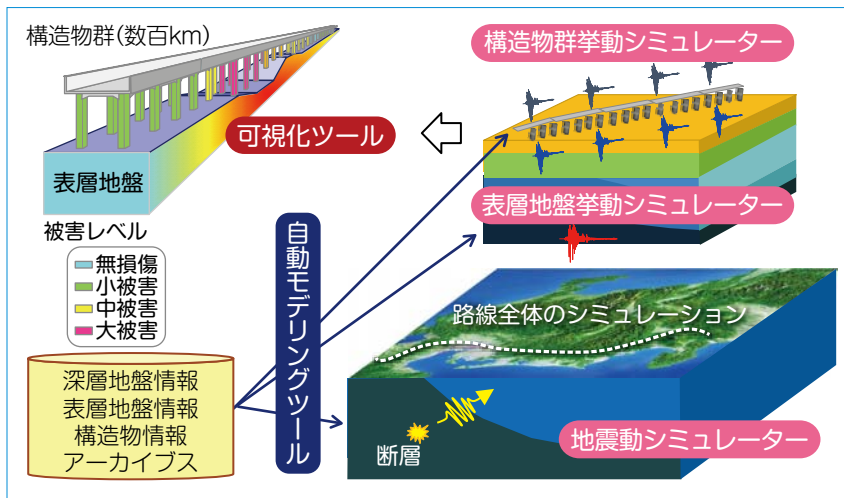


図1 鉄道地震災害シミュレーターの概念図

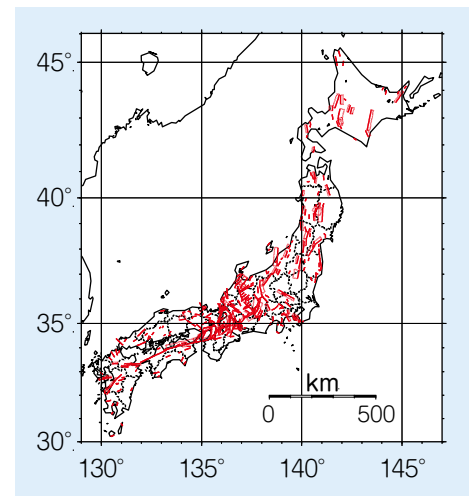


図2 深層地盤情報アーカイブの情報例 (活断層の位置情報)

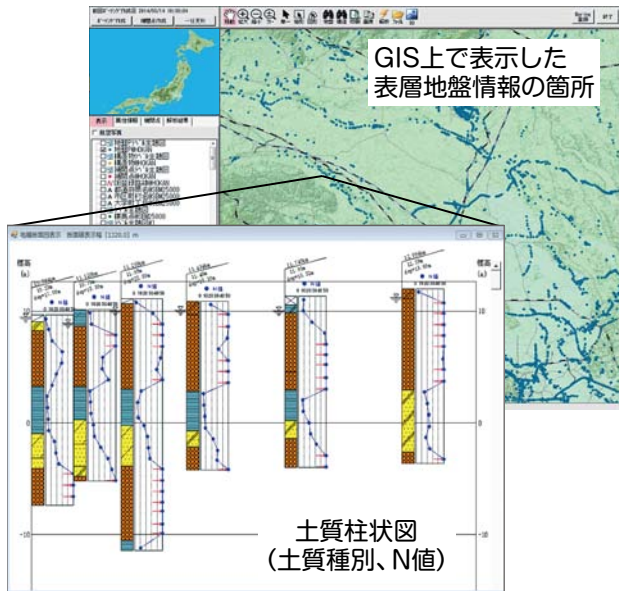


図3 表層地盤情報アーカイブの情報例

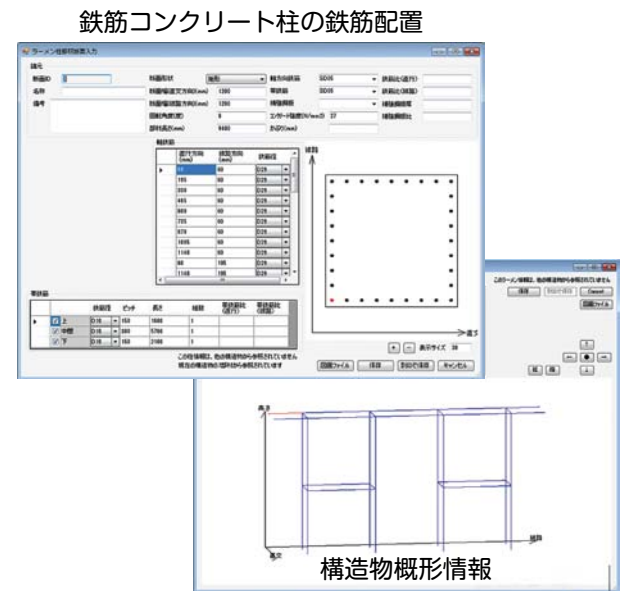


図4 構造物情報アーカイブの情報例

個別シミュレーターのほか、解析モデルの作成に必要な情報を蓄えておく情報アーカイブ、アーカイブから情報を取り出して膨大な数の地盤・構造物群の解析モデルを自動で作成する自動モデリングツール、シミュレーション結果を表示する可視化ツールの3つのツールから構成されています。

必要な情報を蓄積する

シミュレーションに必要な解析モデルを作成するには、できる限り詳細な情報をそろえておく必要があります。

そこで、簡易な情報から詳細な情報までを蓄積できる情報アーカイブを構築しました。この情報アーカイブは、主要な断層や非常に深い位置の地盤の剛性などの深層地盤情報(図2)、構造物を建設する際に実施される比較的浅い地盤の地盤調査結果や土質試験結果などの表層地盤情報(図3)、構造物の形状や鉄筋の配筋などの構造物情報(図4)の3つの情報アーカイブから構成されています。表層地盤情報と構造物情報については、地理情報システム(GIS)で管理でき、路線の線形と

キロ程のデータを入力することで、路線ごとのキロ程と緯度経度情報を関連付けて管理することができます。

解析モデルを自動作成する

路線全体の地震災害シミュレーションをする場合、まずはどのような地震動が発生するかを予測する必要があります。地震動の予測には修正統計的グリーン関数法¹⁾と有限要素法を組み合わせた手法を採用した地震動シミュレーターを用います。このとき必要となる断層の諸元や深い位置の地盤の剛

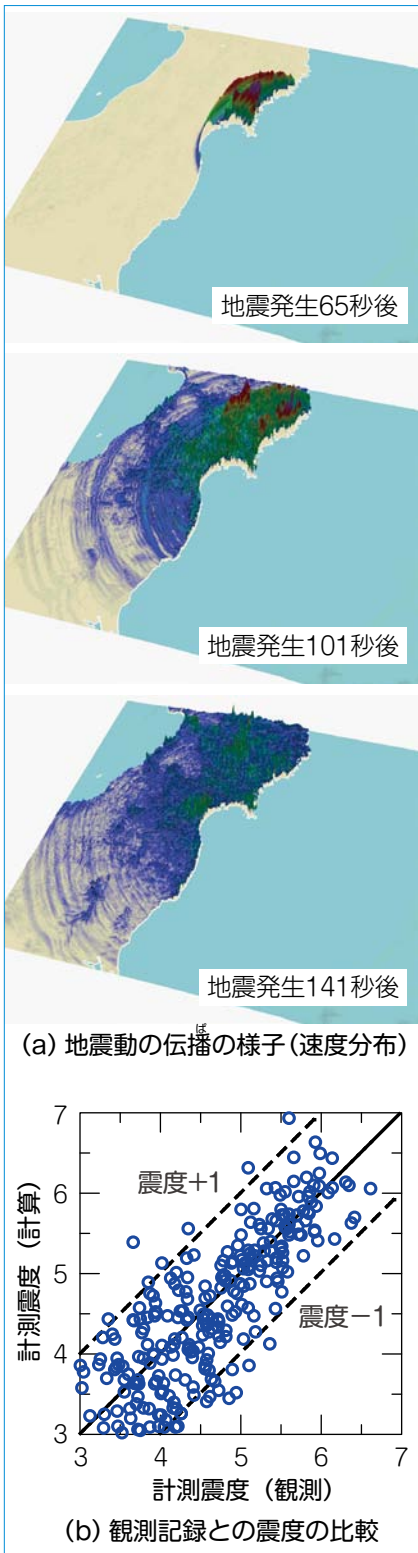


図5 2011年東北地方太平洋沖地震の再現解析結果

性などを深層地盤情報アーカイブスから取り出して、自動で解析モデルを作成できるようにしています。図5に2011年東北地方太平洋沖地震を対

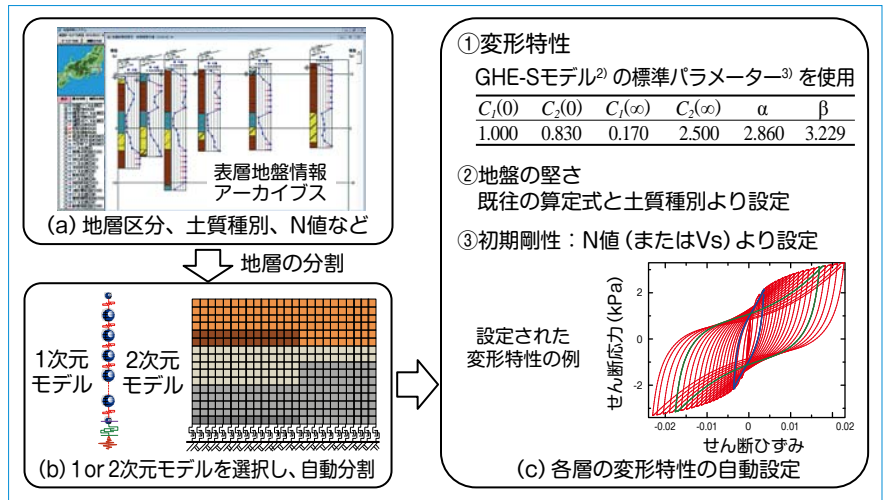


図6 表層地盤の自動モデリング手順

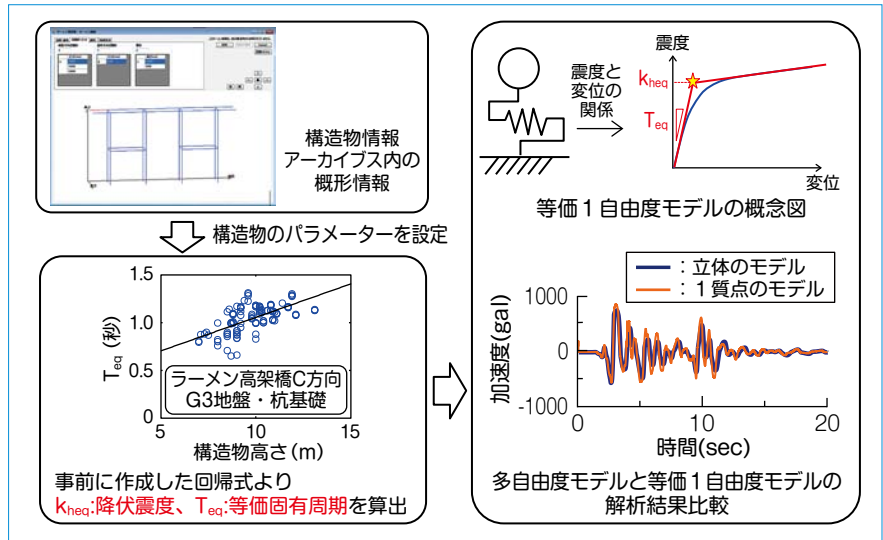


図7 構造物の等価1自由度モデルの自動モデリング手順

象として実施した再現解析結果を示します。東北から関東にかけての非常に広い領域の揺れを再現(図5(a))でき、観測記録とも整合するシミュレーション結果(図5(b))が得られていることが分かります。

次に比較的浅い地盤(表層地盤)の揺れを予測します。表層地盤は地震時に揺れて変形すると、その剛性などが極端に小さくなるなどの特徴があります。そのため、表層地盤の特性を適切に考慮しないと構造物に直接作用する地震動を評価することができません。そこで、鉄道総研で開発したGHE-Sモデル²⁾という、表層地盤の変形特性

を精緻に評価可能なモデルを適用します。しかし、このモデルを使うためには多くのパラメーターを設定する必要がありますが、非常に大きな手間がかかるという問題がありました。本シミュレーターでは、多くの地盤情報の統計処理から求めた標準パラメーター³⁾を用いることで、地盤の堅さを表すN値と粘土や砂といった土質種別程度の情報から図6に示す手順で解析モデルを自動作成可能としています。なお、表層地盤の挙動シミュレーションでは、各地点の地盤を深さ方向に一本の柱でモデル化した1次元モデルと、線路方向にも連続した2次元のモデルを選択でき

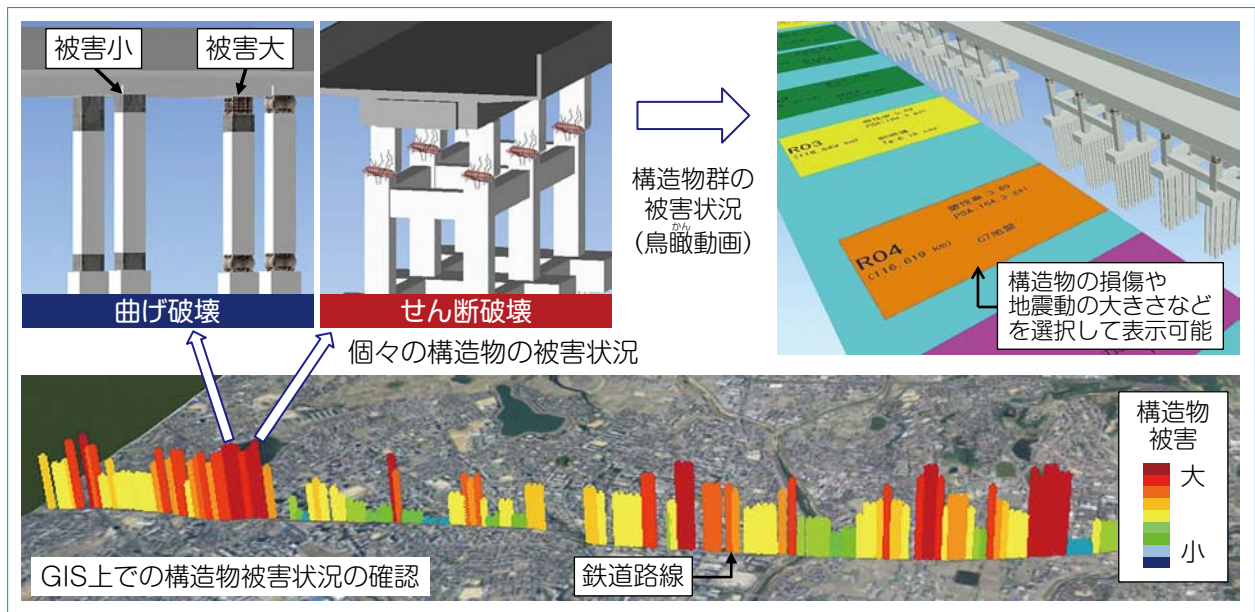


図8 シミュレーション結果の可視化例

ます(図6(b))。

構造物については耐震設計の際に用いるような立体のモデルを作成してシミュレーションすることで、構造物全体の揺れの大きさや、どのような箇所がどの程度の被害を受けるかなどを評価できます。この場合、モデルの作成やシミュレーションの実施に非常に多くの時間を費やします。また、構造物の詳細な情報を用意する必要もあります。最近建設された構造物であればそのような情報が残っていますが、建設年度の古い構造物では残されていない場合があります。そのような場合を想定して、構造物を一つの質点(重り)と一つのばねでモデル化し、応答を適切に評価可能な1質点のモデル⁴⁾も適用できるようにしています。この1質点のモデルの作成については、図7に示すように構造物の高さなどの簡単に入手可能な情報から必要なパラメータを自動設定できるようにしています。

このように、地盤と構造物について2種類のモデル化手法を採用することで、精度を重視したシミュレーションと計算速度を重視したシミュレーショ

ンを、入手可能なデータの量や質、目的などに応じて使い分けられます。

結果を分かり易く表示する

シミュレーション結果については、構造物を専門としない方々にも地震時の弱点箇所やどのような被害が想定されるかを理解していただく必要があります。そこで、地盤の揺れの大きさや構造物の被害状況などを視覚的に理解できるように可視化を行います。図8にシミュレーションから得られた構造物の被害の大小関係を路線に表示した例と、個別の構造物の損傷状況を可視化した例、多数の構造物の被害状況を鳥瞰^{かん}した動画のスナップショットを示します。この様に被害の大きい構造物が路線上のどこに位置しているかを容易に理解でき、必要に応じて構造物の損傷状況を詳細に確認することもできます。

まとめ

日本では首都直下地震や南海トラフ地震などの大規模地震の発生が危惧されていますが、本シミュレーターは鉄

道の地震安全に対するさまざまな方面で活用可能です。また、今後もアーカイブスの情報を拡充するとともに、被災事例とのキャリブレーションによりさらなるモデルの高精度化や計算効率の向上、地震後の早期運転再開システムなどとの連携などを目指したいと考えています。

なお、本研究の一部は、国土交通省補助金を受けて実施しました。RRR

文献

- 1) 坂井, 室野: 土木構造物の性能照査のための本震-余震波形群の評価に関する基礎的検討, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), 2014
- 2) 室野, 野上: S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力-ひずみ関係, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.494-497, 2006
- 3) 野上, 室野: S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定, 第30回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2009
- 4) 室野, 佐藤: 構造物の損傷過程を考慮した非線形スペクトル法の適用, 土木学会地震工学論文集, 第29巻, pp.520-528, 2007