

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

地震情報とシミュレーションで被害を即座に予測する

大規模地震発生後の早期運転再開や迅速な復旧活動に役立つ情報を即座に提供するための技術として、広範囲の被害推定を即時的に実施可能な自動修正機能付鉄道地震被害予測シミュレーターを開発しました。開発したシミュレーターは、緊急地震速報と連動して自動的に起動するとともに、沿線の土木構造物、電化柱、車両の挙動を動的解析によって推定します。さらに、地盤調査結果や設計計算書といった情報、過去の地震による被害状況などを蓄積することで、挙動評価に用いる条件の自動的な更新・精度向上を可能とする機能を搭載しています。

はじめに

近年の我が国は地震活動期に入ったとされており、たとえば2016年からわずか3年間で振り返っても、2016年4月の熊本地震、10月の鳥取県中部の地震、2018年6月の大阪府北部の地震、2018年9月の北海道胆振東部地震など、震度5弱以上の地震が30回以上も発生しています。そしてこのような地震が発生した場合には、各鉄道施設の状態を正しく把握した上で運転再開の判断を行う必要がありますが、これに多くの時間を費やす場合があります。

そこで、早期運転再開や迅速な復旧活動に役立つ基本情報を即座に提供するための技術として、広範囲の被害推定を即時的に実施可能な自動修正機能付鉄道地震被害予測シミュレーターを開発しました。

局所的な地盤特性や構造物条件の変化を詳細に考慮した評価は困難でした。

今回開発した自動修正機能付鉄道地震被害予測シミュレーター(図1)は、緊急地震速報と連動して自動的に起動し、その時点で利用可能な情報(震源情報、地震観測記録など)をすべて活用した上で、沿線の地震動波形を即時に推定することを可能としました。さらに、この地震動波形を用いて全線の土木構造物、電化柱、車両の挙動を詳細な動的解析によって自動的に評価します。これにより、各地点の深層地盤から地表までの地盤特性の違い、各施設の振動特性の変化などを適切に考慮した上での被害予測などを数分~数十分以内で実施することを可能としました。

地震情報を活用した路線全体の早期挙動予測

地震発生後の鉄道の健全度評価は、これまで沿線地震計による震度情報を用いた判定や、構造物の固有周期と降伏加速度をパラメーターとしたノモグラムによる被害推定¹⁾が行われており、

地震波形を用いた即時挙動予測

本シミュレーターでは、沿線の地震動波形を推定するとともに、これを用いた構造物、車両挙動を即時に推定する手法を開発し、実装しています。これら各手法の概要について説明します。

まず、各地点の地震動波形は、緊急地震速報の受信後、震源近傍で取得さ



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
主任研究員
[専門分野] 地震工学



田中 浩平
Kohei Tanaka
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



津野 靖士
Seiji Tsuno
鉄道地震工学研究センター
地震解析研究室
副主任研究員
[専門分野] 地震工学



和田 一範
Kazunori Wada
前 鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室
副主任研究員
[専門分野] 地震工学



室野 剛隆
Yoshitaka Muroto
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

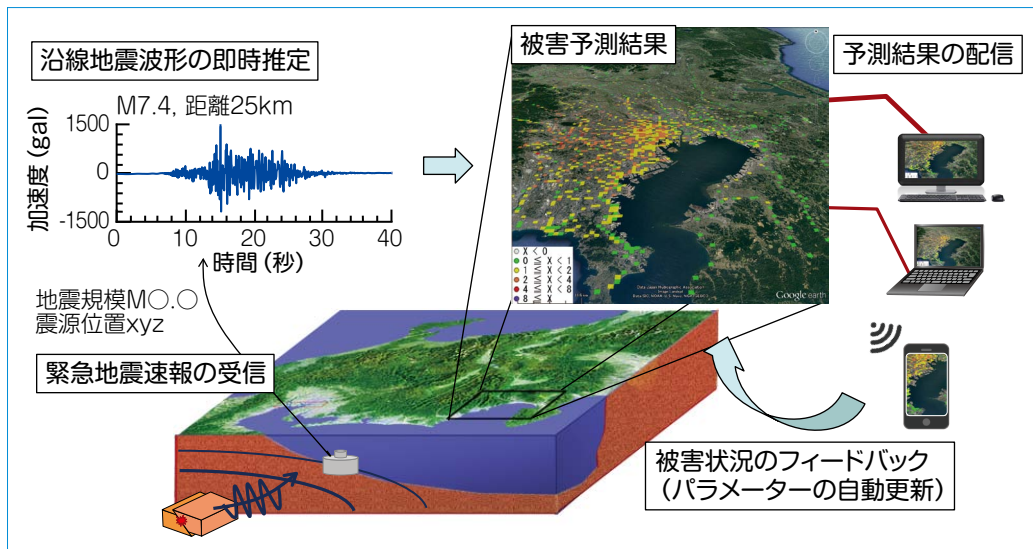


図1 自動修正機能付鉄道地震被害予測シミュレーターの概要

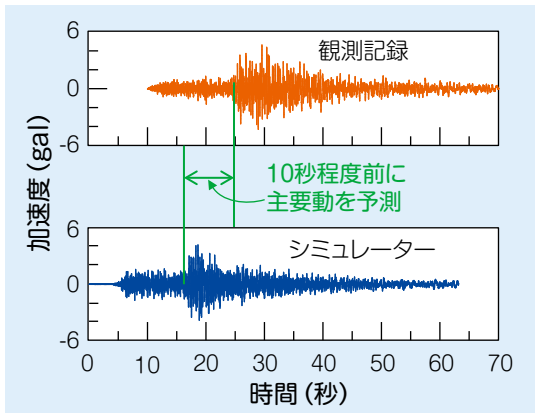


図2 地震波形の即時予測

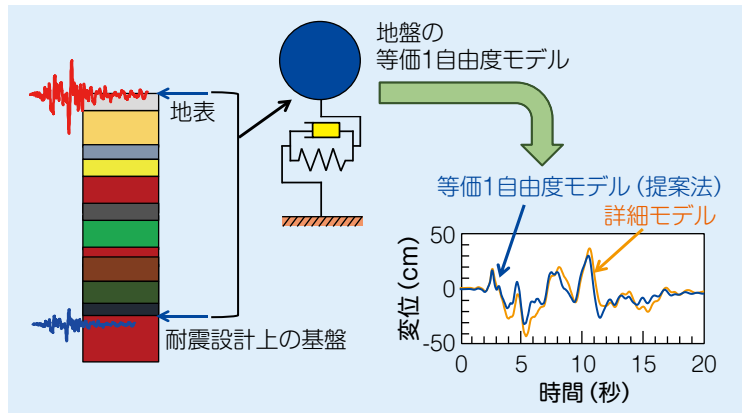


図3 表層地盤挙動の即時予測

れる地震記録を沿線各位置の地震増幅特性を加味した上で補正を行うことで、基盤地震動を主要動の到達前に予測可能としました。本手法の一例を図2に示しますが、実際に地震動が観測される10秒程度前におおむね同程度の振幅の地震動を予測できていることがわかります。

さらに、大規模地震時の地表面地震動は、地盤の非線形挙動の影響を強く受けることがわかっているため、これを適切に考慮することが重要です。そこで、複雑な表層地盤の特性を簡易な1質点モデルに置換することで、即時かつ高精度に地表面地震動を予測する

手法を開発しました²⁾。図3に結果の一例を示しますが、1質点モデルを用いた場合でも詳細モデルの結果とほぼ同等の精度で地表面地震動を適切に評価できていることがわかります。

さらに、橋りょう・高架橋や盛土といった土木構造物、電化柱も表層地盤と同様に等価な1質点モデルに置換することで、各施設の挙動評価、被害推定を適切かつ即時的に実施可能とする³⁾⁴⁾とともに、車両の走行性も土木構造物の応答波形から適切に評価する手法を構築しました⁵⁾。

これらの各手法を組み合わせることで、本シミュレーターでは地震波形を

用いた鉄道全線の詳細な挙動評価を瞬時に実施可能としています。

情報入手にともなう自動修正機能

今回開発したシミュレーターではさらに、ボーリング調査結果や設計計算書などの情報の追加、さらには実地震情報の蓄積により、被害予測に用いるパラメーターを自動的に更新するアルゴリズムを実装しています。

まず表層地盤の情報は、初期状態としては地形分類や標高などの情報から推定します。これにボーリング調査結果を追加することで、ボーリング調査

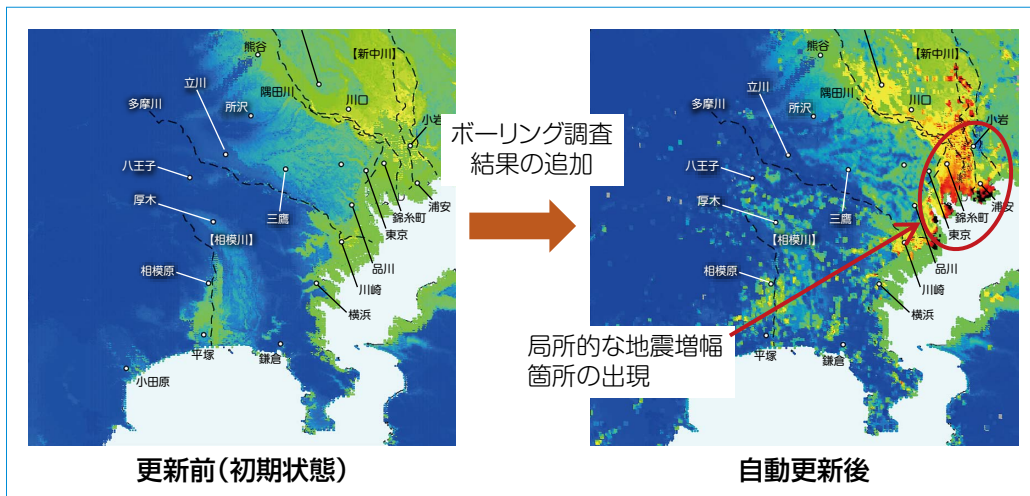


図4 地盤情報の自動更新

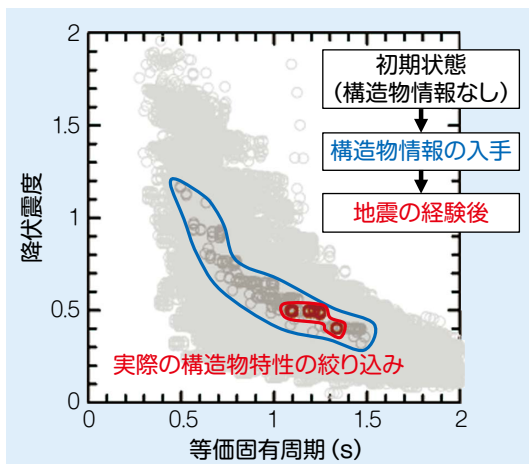


図5 土木構造物情報の自動更新例



図6 シミュレーターの実行画面

地点だけでなく、その周辺も含めて地盤条件を自動的に更新するアルゴリズムを構築しました⁶⁾。図4に関東地方を対象とした表層地盤の固有周期評価結果を示しますが、ボーリング調査結果を追加することで、地形区分などの限られた情報だけでは表現が困難であった東京都市部の局所的な軟弱地盤箇所を適切に評価できていることがわかります。

さらに土木構造物については、前述した通り等価な1自由度モデルに置換するのですが、この時には固有周期と降伏震度が重要な指標となります。これらの情報は、構造物ごとに設計計算書から情報を抽出し、詳細な計算を実

施することで詳細に評価することができますが、建設年代が古い路線などではこれらの情報が十分にそろっていない場合もあります。そのときに、構造物高さなどの限られた情報のみから固有周期と降伏震度を絞り込む技術を開発する⁷⁾とともに、地震などを経験することにより得られる情報(被害有無の情報、衝撃振動試験の情報など)を蓄積することで、構造物パラメータについても自動更新を行う機能を実装しています(図5)。

これらの機能を統合したシミュレー

ションを実施することで、利用可能な情報をすべて活用したうえで、可能な限り精度の高い挙動予測を実現しています。

シミュレーターの自動実行

上述したように、本シミュレーターは緊急地震速報と連動しているため、地震が発生するたびに起動し、各種情報の取得からシミュレーションの実施、結果の画像化、までを自動的に実施可能です(図6)。

挙動評価結果は、地震動強さや被害

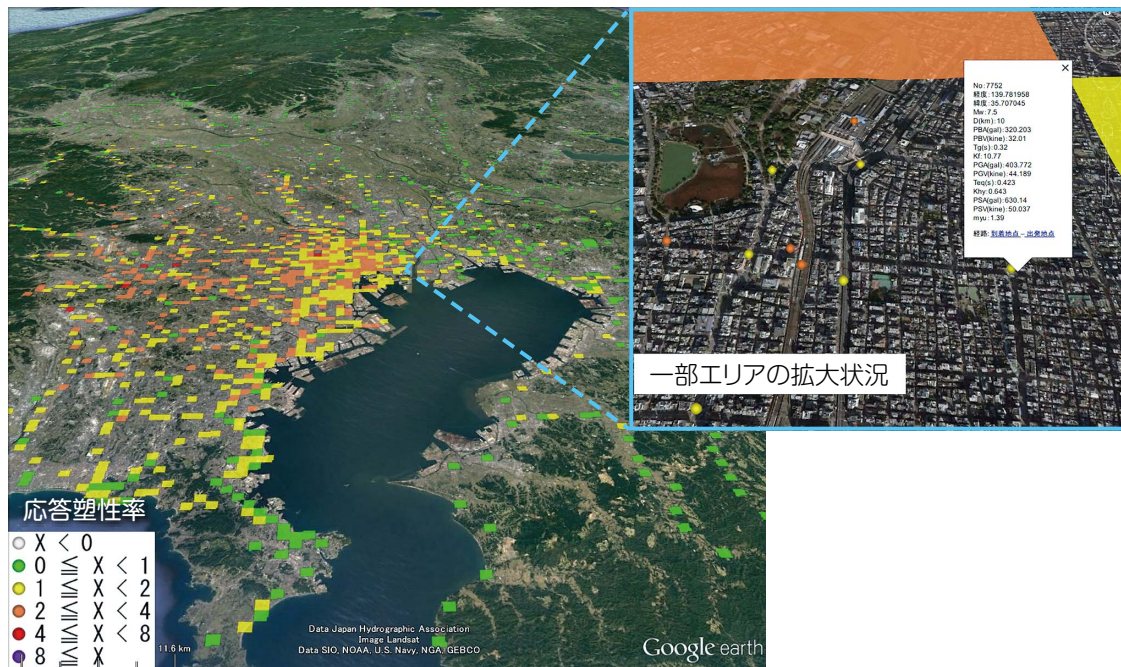


図7 開発したシミュレーターによる結果表示の例

程度を指標として地図上に自動的に色分けがされ、表示されるようになっていきます(図7)。また、表示される結果を拡大することで、詳細な構造物の位置情報や構造物名称、被害程度などの情報も個別に知ることができる仕様となっており、各路線、各箇所での挙動評価結果を把握しながら現場に向かうことも可能となります。

開発したシミュレーターを用いて熊本地震などの過去に発生した大規模地震のシミュレーションを実施した結果、適切な情報を収集しておくことで、実際に観測された地震動の分布や構造物の被害発生状況などを適切に再現できており、開発した各手法の有効性を確認しています。

おわりに

今回は、広範囲の被害推定を即時的に実施可能な自動修正機能付鉄道地震被害予測シミュレーターの紹介を行いました。このシミュレーターの特徴としては、緊急地震速報とともに起動し、鉄道施設の挙動評価を動的解析によ

て即時的な高精度推定を可能とした点と、地盤調査結果や設計計算書、過去に発生した地震での被害状況などの各種情報を蓄積するにともない自動的に精度向上が可能となる点があげられます。

このシミュレーターを用いることで、地震後の被害状況を即時的かつ従来よりも高い信頼性で把握することができるため、早期運転再開や迅速な復旧活

動に役立つと考えています。今後、この機能を鉄道用地震情報公開システム⁸⁾に搭載することで、鉄道事業者の地震時対応に活用できる形で提供していく予定です。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発補助金を受けて実施しました。

RRR

文献

- 1) 室野剛隆, 野上雄太, 宮本岳史: 簡易な指標を用いた構造物および走行車両の地震被害予測法の提案, 土木学会論文集A, Vol.66, No.3, pp.535-546, 2010
- 2) 坂井公俊, 室野剛隆: 地盤の等価1自由度モデルを用いた非線形動的解析法の提案, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.71, No.3, pp.341-351, 2015
- 3) 室野剛隆, 佐藤勉: 構造物の損傷過程を考慮した非線形応答スペクトル法の適用, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.520-528, 2007
- 4) 坂井公俊, 荒木豪, 室野剛隆: 等価1自由度モデルを用いた盛土の地震時非線形挙動の評価, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.73, No.1, pp.174-186, 2017
- 5) 宮本岳史, 野上雄太, 室野剛隆: 地震時の車両挙動の解明と地震防災への適用(その3)~地震波から脱線可能性を推定する方法, 第14回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL 2007)講演論文集, pp.221-224, 2007
- 6) 田中浩平, 坂井公俊: 離散的な土質情報を活用した面的な地盤固有周期の推定手法の提案, 鉄道工学シンポジウム論文集, 第22号, pp.69-74, 2018
- 7) 日野篤志, 室野剛隆, 和田一範: インベントリーデータベースを用いた構造物のリスク評価手法の提案, 平成29年度土木学会全国大会第72回年次学術講演会, 2017
- 8) 山本俊六, 岩田直泰, 岡本京祐, 坂井公俊, 室野剛隆: 地震情報公開システムで地震後の早期復旧を支援する, RRR, Vol.73, No.3, pp.16-19, 2016