

鉄道地震災害シミュレータの開発

本山 紘希* 坂井 公俊**
井澤 淳** 室野 剛隆***

Development of Earthquake Disaster Simulator for Railways

Hiroki MOTOYAMA Kimitoshi SAKAI
Jun IZAWA Yoshitaka MURONO

We have developed an earthquake disaster simulator for railways to assess seismic performance of the structure group continuously existing in a long section of the railway line. This simulator has functions to evaluate the wave propagation from the fault to the bedrock, the seismic responses of the subsurface ground and the structures on the line. The simulator has automatic modeling functions making use of the data obtained from each archive (faults/ground/structures), seismic response analysis functions and resultant visualization functions. Here, the development of the simulator and its calculation examples are shown.

キーワード：鉄道地震災害シミュレータ，全線評価，弱点箇所抽出，自動モデリング

1. はじめに

日本は世界的に見ても地震活動が活発な地域であり、鉄道構造物を含む土木構造物は、常に巨大地震に対するリスクに晒されている。そのような状況において、鉄道構造物は長い区間に亘って連続するシステムであり、局所的な構造物の地震被害であっても、路線全体の性能が損なわれる可能性がある。実際、2011年東北地方太平洋沖地震においては、地震動による鉄道構造物に対する被害が発生し、運転が再開されるまでに少なからず時間を要した。今後も、南海トラフ地震など超巨大地震の発生が懸念されており、構造物におけるロバスト性やレジリエンスの確保は喫緊の課題と考えられている。これに対する有効な対策の一つとして、路線における地震への弱点箇所を事前に抽出し、耐震補強戦略や復旧シナリオを検討することが挙げられる。

弱点箇所を抽出するには、想定される地震動に対する各構造物の損傷程度を評価する必要がある。鉄道総研では、これまでも、構造物の被害推定において地震動の特性および構造物の振動特性を考慮できる手法として、地震被害推定ノモグラムによる手法を提案している¹⁾²⁾。本手法は、簡易であり、かつ被害の概略判定手法として有効であることが確認されている。一方で、各地点の時刻歴の地震動波形の評価手法の高精度化やスーパーコンピュータを使用した数値解析の大規模化・高速化に

より、各構造物について非線形の時刻歴応答解析を実施し、地盤・構造物の応答や損傷状況を詳細に評価することが現実的な選択肢となってきた。これらの状況に鑑み、ここで開発するシミュレータは、各地点の地震動を評価し、その地震動を入力として地盤・構造物の地震時応答を直接的に算出することを目的としている。

この目的を達成するために重要になる機能が、地盤・構造物のモデリング機能である。例えば、耐震設計で用いる手法により構造物のモデル化を行う際に、通常は、部材の寸法だけでなく、上部工の荷重や部材における鉄筋の配置、基礎の配置など大量のデータが必要となる。これらのデータを全線にわたって収集するのは困難であるだけでなく、不可能な場合も多い。そのため、データが全て手に入る場合だけでなく、可能な限り少ないデータから、実用に足る精度の数値解析モデルを作成する技術が必要となる。また、膨大な構造物を処理するにあたっては、処理の自動化が重要であるため、自動化が可能なモデル化を検討する必要がある。

以上を念頭に、断層から構造物までのモデル化を自動で行い、地震応答解析を実施可能な鉄道地震災害シミュレータの開発を行った。モデル化においては、断層、地盤および構造物の情報アーカイブスを構築し、そのアーカイブスから取得したデータにより自動的に解析モデルを構築する機能を開発した。地震応答解析においては、スパコンによる並列計算を行い解析時間の短縮を図っている。また、耐震補強や復旧シナリオの検討において、意思決定を支援するため、得られた解析結果をGIS (Geographic information system, 地理情報システム) 上

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室
** 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室
*** 鉄道地震工学研究センター

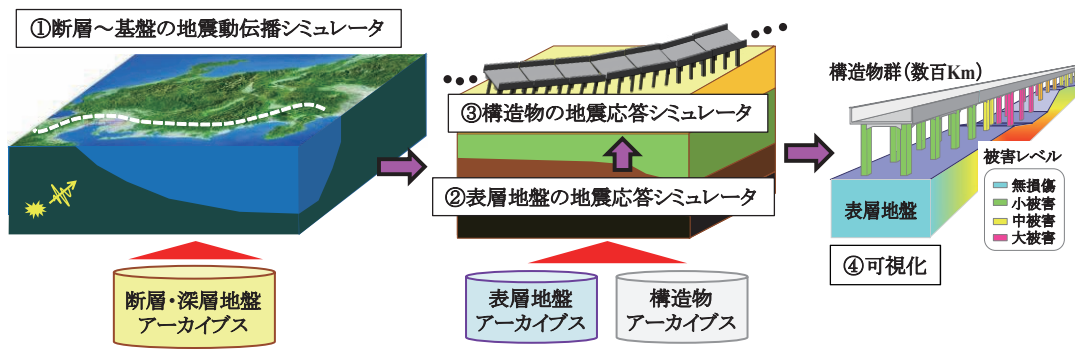


図1 鉄道地震災害シミュレータ概要

で表示する機能や損傷状況をイメージ化する機能も有している。本論文では、鉄道地震災害シミュレータの構成とシミュレータを構成する各機能について説明する。また、本シミュレータを用いた試算結果およびその精度について示す。

2. 鉄道地震災害シミュレータの構成

鉄道地震災害シミュレータは①断層～基盤の地震動伝播シミュレータ、②表層地盤の地震応答シミュレータ、③構造物の地震応答シミュレータおよび④可視化機能の4つから構成される(図1)。それぞれのシミュレータにおいて、順次、解析結果を受け渡すことにより最終的に路線上の各構造物の応答や損傷を評価するものとなっている。可視化機能は、それぞれの構造物の地震応答や損傷状況を受け取り、路線全体の被害状況をイメージ化するものである。

各機能を分離し、情報の受渡しにより連系することで、それぞれのシミュレータで解析条件を個別に変更することが可能である。そのため、地震動や地盤・構造物を構成する材料のばらつきを考慮した多数の解析を容易に行うことができる。また、入力される情報と受け渡し情報を共通のものとして作成すれば、各シミュレータのプログラムの入替えも比較的容易に行えるため、今後の技術開発にも配慮した構成となっている。

3. シミュレータを構成する機能

本章では、図1に示す①～④の機能について、モデル化、地震応答評価および可視化機能を説明する。

3.1 断層～基盤の地震動伝播シミュレータ

断層～基盤の地震動伝播シミュレータにおいては、断層および深層地盤のアーカイブスのデータを元に、地震波の短周期成分を修正統計的グリーン関数法³⁾、長周期成分を3次元の有限要素法⁴⁾により計算し、それらを振動数領域で重ね合わせるハイブリッド合成法⁵⁾によ

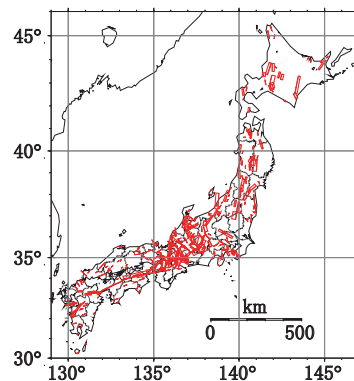


図2 深層地盤情報アーカイブの情報例
(活断層の位置情報)

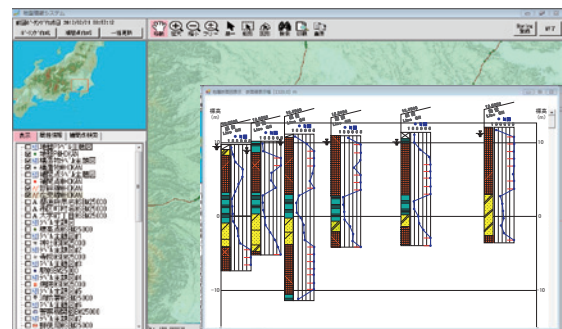


図3 地盤情報アーカイブに入力された情報の例

て広域の地震動を広い周期帯域において精度よく推定できる手法を開発した。アーカイブの情報例として、活断層の位置情報を図2に示す。

FEM解析は、スパコンによる並列計算に対応しており、2011年の東北地方太平洋沖地震のように広い範囲において揺れが発生するような地震であってもモデル化および応答解析が可能なものとなっている。

3.2 表層地盤の地震応答シミュレータ

地盤情報アーカイブは地盤情報をxml形式で管理するものとなっており、N値や土質種別といったボーリング情報から、PS検層等の地盤調査結果、室内土質試験結果等の詳細情報までを整理可能としている。GISソフトウェア SuperMap と連携を図り、入力、更新および

閲覧をGISソフトウェア上で可能にしている。図3に地盤情報アーカイブスに入力された情報の例を示す。

表層地盤のモデル化は1次元の質点系モデルを構築する手法を基本とした。上述のようにアーカイブスは多様なデータに対応可能なように構築しているが、モデル化においては、取得のコストが比較的小さい情報としてN値と土質種別をのみ情報を用いたモデリングアルゴリズムを開発・実装することとした。

幅広いひずみレベルで地盤の非線形性を表現するために鉄道総研で開発しているGHE-Sモデル⁶⁾を適用する。このGHE-Sモデルのパラメータ設定は、通常の耐震設計で使用する場合、PS検層、三軸試験、繰り返し三軸試験などを実施して得られた試験結果と整合するように設定する必要がある。しかし、これには相当の手間がかかること、必要とする詳細な情報が全線で得られないことから、路線全体に通常の耐震設計の手法を適用することは現実的ではない。そこで、これまでの調査・試験結果を整理して設定したGHE-Sモデルの標準パラメータ⁷⁾を用い、アーカイブスに整備されているN値と土質種別のみから地盤応答解析に必要なパラメータを設定可能なアルゴリズムを開発した。モデル化手法の概略を図4に示す。深さ方向に要素長1mを基本に離散化し、各要素に対応したN値および土質種別から要素の剛性・非線形性を算定するアルゴリズムとなっている。

また、より詳細なモデル化として、2次元FEMを用いたモデル化も導入している。基本的なアルゴリズムは1次元質点系モデルと同様であり、各要素に土質種別とN値情報から算定したGHE-Sモデルによる応力-ひずみ関係を与えることでモデル化している。ボーリングデータを補間して2次元的に連続するデータを作成する手法は文献8)などで別途検討を実施している。

シミュレーションにおいては、3.1節で示した断層～基盤の地震動伝播シミュレータにより算出された基盤位置での地震動波形を入力波として設定し、地盤群の応答解析を連続的に実行し、対象路線の全線にわたる地表面地震動波形を算出する。

3.3 構造物の地震応答シミュレータ

構造物アーカイブスは、構造物について設計計算に用いるような詳細な情報を管理できるものとして構築しており、橋梁、高架橋および盛土に対応している。ここでは、橋梁および高架橋について、特に説明する。

本アーカイブスの特徴として、データ入力省力化が挙げられる。具体的には、まず、部材データを作成し、作成した部材データをあたかもブロックのように組合せて構造物全体のデータを構成している(図5)。これにより、何度も同様の部材データを入力する必要がなく、効率的にデータ入力が行える。図6に構造物情報アーカ

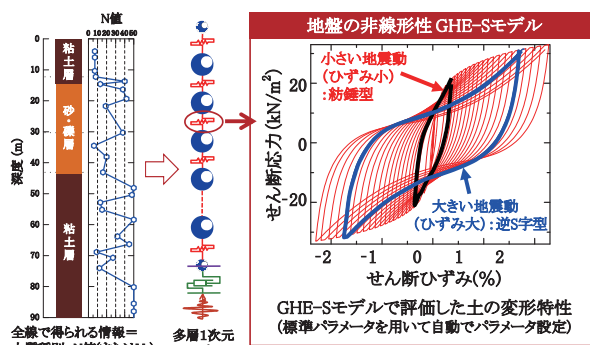


図4 表層地盤のモデル化アルゴリズム概要

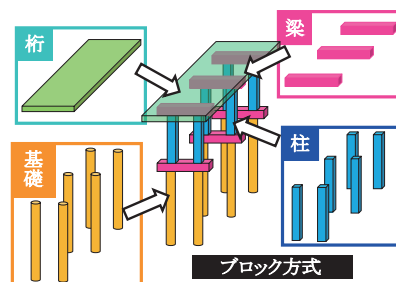


図5 ブロック方式のイメージ図

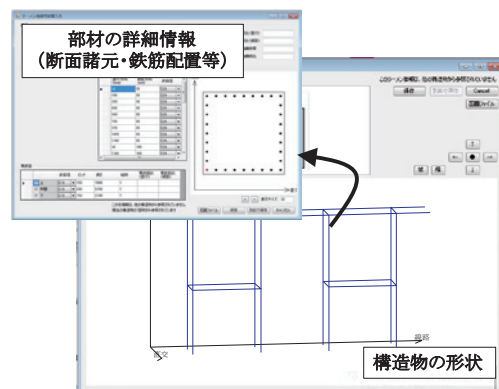


図6 構造物情報アーカイブスに入力された情報の例

イブスに入力されているデータの例を示す。図に示した部材の詳細情報が上述の個々のブロックに相当するものである。

構造物情報アーカイブスに詳細なデータが入力可能な場合を想定し、耐震設計に使用するレベルの詳細な3次元骨組モデルを作成する詳細アルゴリズムの開発を行った。本手法は、上述のブロック方式で整理されたアーカイブスの情報を活用し、各部材について詳細な剛性や非線形性を算定し、構造物全体系の解析モデルを構築する手法となっている。データ入力のコストは大きいですが、解析を実施する全構造物について、現状では最も信頼性の高い解が得られる。なお、3次元骨組モデルの作成においては、データ入力コストの省力化に配慮し、情報の圧縮についても検討を行っている。ここでは、詳細は省略するが、例えば、杭基礎の諸元や配置の情報を圧縮し、

特集：地震防災・耐震技術

標準的な値によるモデル化を実施するための検討として、杭配置や諸元等を変更した感度解析を実施している⁹⁾。

一方で、詳細なデータは全ての構造物では入手できないことを想定し、構造物を1自由度系の数値解析モデルで評価することも可能にした。1自由度系のモデル化においては、構造物の等価固有周期と降伏震度の情報が必要となる。一般的な耐震設計では、構造物の詳細な骨組モデルを作成し、プッシュ・オーバー解析により等価固有周期と降伏震度を算定する¹⁰⁾。しかし、プッシュ・オーバー解析に必要なデータを全線にわたって取得するのはコストが高いため、構造高さと構造物の等価固有周期・降伏震度との相関性が高いことに着目し、構造物の高さと構造物の建設位置における地盤種別のみから、等価固有周期・降伏震度を算出し、1自由度系のモデルを構築するアルゴリズムを導入した。具体的には、事前に、地盤種別ごとに構造物の高さと構造物の等価固有周期・降伏震度の回帰式を作成しておく。シミュレータにおいては、各構造物の構造高さを本回帰式に適用することで、等価固有周期および降伏震度を算定し、モデル化を行う(図7)。本手法は、簡易な手法であるため、精度は少なからず犠牲になっているが、数100kmにおよぶような長い区間について、各構造物の応答の性状を把握した上で、弱点箇所を抽出するには十分な手法と考えられる。例えば、本手法で1次スクリーニングを行い、詳細な検討が必要である箇所を抽出する場合に使用できる。

シミュレーションにおいては、3.2節で示した表層地盤の地震応答シミュレータにより算出された地表面における地震動波形を入力波として設定し、連続的に構造物群の応答解析を実行し、対象路線の全線にわたる各構造物の地震応答および損傷状態を評価する。この際、特に3次元骨組モデルは解析コストも大きいため、スパコンによる並列計算を実施することにより、解析時間の短縮を図っている。

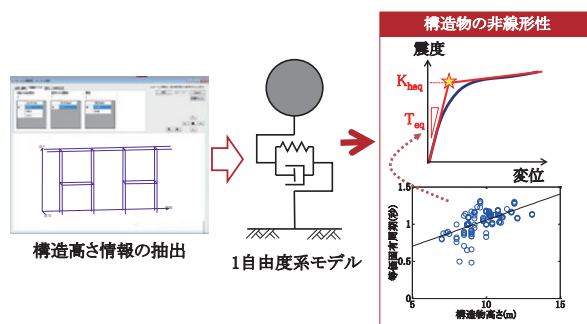


図7 構造物のモデル化(1自由度系モデル)概要

3.4 可視化機能

本シミュレータが、耐震補強戦略や復旧シナリオ等における意思決定を支援するツールであることを考慮し、可視化においては、路線の被害状況がイメージできるものとした。GISソフトウェア上の可視化と構造物の損傷イメージの可視化の2つに対応している。GISソフトウェア上での可視化においては、構造物の地震応答や損傷程度を地図上に表示できるものであり、弱点箇所の地図上での位置を直接的に示すことが可能である。GISソフトウェア上では地盤や構造物の固有周期等の振動特性を示すことも可能であり、想定した地震に対して弱点となる地盤や構造物の特性を考察する上でも使用できるものとなっている。また、損傷イメージの可視化は、連続する構造物の被害状況を、破壊形態(曲げ破壊・せん断破壊)や損傷レベルに応じて3次元的にイメージ化・アニメーション化するものであり、路線としての耐震対策を検討する際に、特に土木技術者以外とのイメージの共有に資するものとなっている。本シミュレータによる可視化の概要を図8に示した。

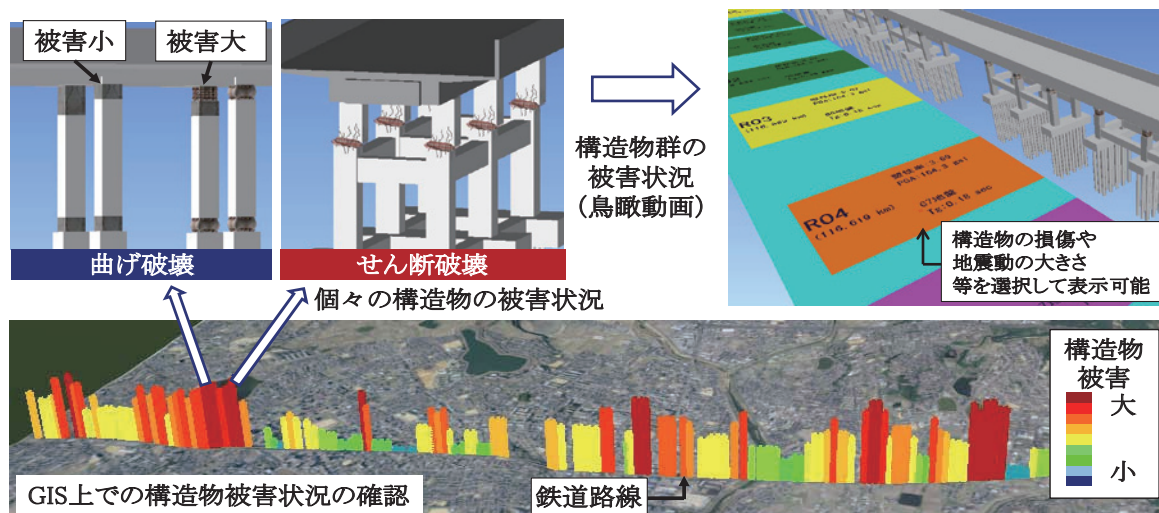


図8 シミュレーション結果の可視化機能の概要

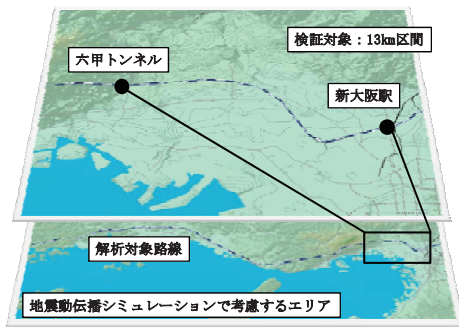


図9 1995年兵庫県南部地震における検証対象エリア

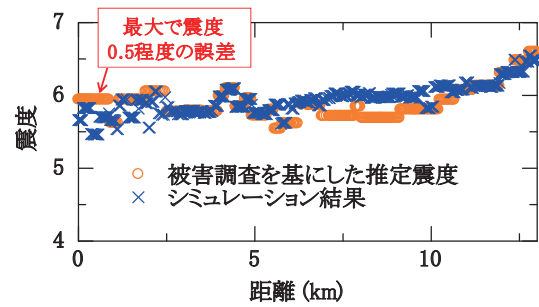


図10 シミュレータで算定した地表面地震動と調査結果の震度による比較

4. シミュレータによる試算

1995年兵庫県南部地震における高架橋の被害について、公開情報^{12) 13)}などを元に、被害の比較的大きかった約13kmの区間(新大阪～六甲トンネル：図9)について、本シミュレータを用いた再現解析を行った。本章では、その概要および調査との比較結果を示す。

4.1 地震動の算出および精度の検証

ここでは、地表面地震動により精度の議論をする。地表面地震動は、上記で説明したように、地震動伝播シミュレータにより基盤における地震動を算定し、それを入力とした表層地盤の地震応答解析を行うことにより算出する。図9に示したように、地震動伝播シミュレーションでは対象区間に対して十分に広いエリアを考慮した解析を行った。

精度の検証として、地表面地震動を元に各地点の震度を算出し、被害調査を基に推定した推定震度分布¹¹⁾と比較した(図10)。本シミュレーションについては、最大で震度0.5程度の誤差で地震動を評価できていることが分かる。なお、本シミュレータで2011年東北地方太平洋沖地震の再現シミュレーションを行った場合についても、各地で得られている地震観測記録との誤差が震度±1.0程度に収まることが確認できている。いずれの解析においても、震源パラメータを適切に設定することで、地震動に関する高精度の再現シミュレーションが可能である。

4.2 構造物の地震応答の算出および精度の検証

構造物のモデル化においては、構造高さから、回帰式を用いて等価固有周期および降伏震度を算定し、1自由度系のモデル化を行う手法を用いることとした。また、本検討においては、被害箇所における精度の比較的高い回帰式を作成するため、まず、公開データから多数の構造物について、実設計で使用する詳細な解析モデル(2次元骨組モデル)を作成し、プッシュ・オーバー解析を実施することで、構造高さと同値固有周期・降伏震度の

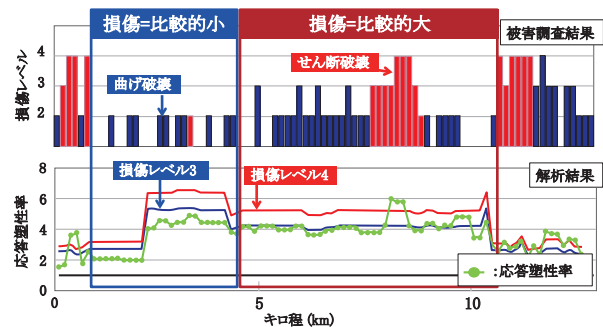


図11 構造物のモデル化(1自由度系モデル)概要

表1 シミュレーションによる高架橋の損傷判定の被害調査との比較

	損傷程度別高架橋数	
	補修不要	補修必要
被害調査 (全69基)	59基	10基
シミュレーション (全69基)	51基	18基

69基中8基(12%)の誤差

関係を整理した。整理したデータから構造高さと同値固有周期・降伏震度の回帰式を求めた。

上記により作成した回帰式を用いてモデル化を行い、4.1節で算出した地表面地震動を入力することで、構造物の応答および損傷状況の評価を行い、被害調査結果と比較した。結果を図11に示す。図の上段の棒グラフが被害調査結果を示しており、図の下段がシミュレーションによる構造物の応答塑性率を示している。ここで示した応答塑性率は高架橋が曲げ破壊形態であると仮定して算定したものである。また、シミュレーション結果のグラフには各構造物が曲げ破壊形態である時の損傷レベル3および4の限界値についても示した。図より、被害調査において構造物の損傷が大きかった地域では、シミュレーションの結果も損傷レベル3および4の限界値に対して応答が大きいのことを示している。一方で、構造物の

損傷が小さかった地域では、シミュレーションの結果も損傷レベル3および4の限界値に対して、応答が小さい傾向を示している。せん断破壊形態の損傷の判定も含めて、路線上の高架橋の損傷状況について、シミュレーション結果と被害調査の集計結果を表1に示す。表においては、高架橋の被害を、補修が不要（または軽微な補修のみ）な被害（損傷レベル1～2に相当）と補修が必要な被害（損傷レベル3～4に相当）に分類し、被害調査結果とシミュレーションの結果を分類している。結果として、シミュレータでは、被害を12%程度安全側に評価（損傷した高架橋の個数を多く評価）することが分かる。路線における弱点箇所抽出という観点においては、本試算については、十分な精度であると考えられる。

5. おわりに

新たに開発した鉄道地震災害シミュレータの構成およびシミュレータによる試算について示した。鉄道地震災害シミュレータの構成では、特に、表層地盤の地震応答シミュレータおよび構造物の地震応答シミュレータについて自動モデル化手法について説明した。また、モデル化における情報量の圧縮について検討し、地盤はN値と土質種別、構造物は構造高さで地盤種別からのモデル化手法について述べた。

シミュレータによる試算では、地震動伝播シミュレータおよび表層地盤地震応答シミュレータを用いて算定される地表面地震動の精度と、構造物地震応答シミュレータで評価される構造物の被害状況評価の精度について示した。本試算においては、地表面地震動は概ね震度±1.0以内の誤差で表現できている。構造物の損傷評価は12%の誤差（安全側の評価）であった。これより、本ケースについては、開発したシミュレータにより、高精度で再現解析ができたと考えられる。

今後は、地盤・構造物情報を拡充することが必要になると考えられる。特に地盤情報がない場合、本シミュレータにより、地表面の地震動を高精度で算定することは困難である。また、構造物情報については、構造物高さ情報などを、低コストに入手する手法を検討する必要がある。これらのデータの拡充と、実際の地震被害とのキャリブレーションを行っていくことにより、さらなる精度向上を目指す予定である。なお、本研究の一部は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

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: 地震動の最大加速度と最大速度を用いた土木構造物の地震被害推定ノモグラムの改良, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.4 (地震工学論文集第 34 巻), pp.32-39, 2015
- 3) 坂井公俊, 室野剛隆: 土木構造物の性能照査のための本震一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
- 4) 董勤喜, 柴山恭, 吉見顕一郎, 坂井公俊, 田中浩平, 室野剛隆: 減衰の設定方法が長周期地震動評価に与える影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 69 巻, 2014
- 5) Kamae, K., Irikura, K. and Pitarka, A.: A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.88, No.2, pp.357-367, 1998.
- 6) 室野剛隆, 野上雄太: 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
- 7) 野上雄太, 室野剛隆: 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
- 8) 桐生郷史, 野上雄太, 坂井公俊, 室野剛隆: 広域構造物の地震応答概略評価のための地盤モデル簡易構築手法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.4, pp.742-750, 2014
- 9) 本山紘希, 井澤淳, 室野剛隆, 上原純, 高橋健: 構造物の地震応答における杭基礎諸元の感度分析, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 70 巻, 2015
- 10) 国土交通省鉄道局監修, 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
- 11) 山口直也, 山崎文雄: 1995 年兵庫県南部地震の建物被害率による地震動分布の推定, 土木学会論文集, Vol. 612, No. I-46, pp. 325-336, 1999
- 12) 西日本旅客鉄道株式会社: 阪神・淡路大震災鉄道復旧記録誌, 1998
- 13) 財団法人鉄道技術総合研究所: 兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書, 鉄道総研報告, 特別第 4 号, 1996