

インベントリー法による橋りょう・高架橋の被害推定法

小野寺 周* 和田 一範*
坂井 公俊* 室野 剛隆**

Seismic Damage Estimation of Railway Bridges and Viaducts by Inventory Method

Meguru ONODERA Kazunori WADA
Kimitoshi SAKAI Yoshitaka MURONO

In order to early resumption of railway operation after an earthquake, it is important to estimate the damage of the whole section of a railway line and take precautions such as retrofitting the existing structures and determining the priority of inspection. For such damage estimation, earthquake disaster simulation is an effective method. However, it requires much time and cost to construct many structural models. We have developed an “inventory method” that constructs many structural models efficiently by using fewer structural characteristics and estimates seismic damage of the whole railway line. An equivalent natural period T_{eq} and a yielding coefficient k_{heq} of SDOF are estimated with an error of about 10% by this method. This is an effective method to the seismic estimation of the whole railway line and can be utilized to determinate the prior measures for early resumption.

キーワード：被害推定，インベントリー法，全線評価，橋りょう・高架橋

1. はじめに

日本は活発な地震活動にさらされており，国内の発達した鉄道交通網は高い地震リスクを抱えている。地震によって鉄道の機能が喪失した場合，企業活動や利用者の生活に与える影響は非常に大きいため，機能を喪失させないこと，仮に機能喪失に至っても早期に回復させることが重要である。そのために，多数の構造物から構成される鉄道では，地震に対する路線全線の被害状況を事前に推定し，耐震補強等の事前対策，点検の優先順位決定等の復旧対策を講じておくことが重要である。この事前の被害推定には路線全線にわたる広域な地震災害シミュレーションが有効な手段であり，多分野で広域シミュレーションに関する検討が行われている^{例えは1) 2)}。

こうした背景を踏まえ，鉄道総研では「鉄道地震災害シミュレータ³⁾」(以下，災害シミュレータと呼ぶ)を開発している。災害シミュレータは図1に示すように，3つのシミュレータと3つのデータベースから構成されており，深層地盤や表層地盤の地盤条件(層構成や物性値等)と構造諸元(構造高さや断面諸元等)の情報を基に，自動的に解析モデルを構築する「自動モデリング機能」を有している。このうち，構造物挙動シミュレータは，鉄道路線にある橋りょう・高架橋および盛土を対象とし

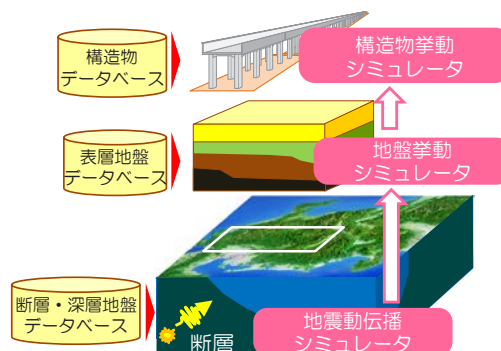


図1 鉄道地震災害シミュレータ³⁾

た広域の地震被害をシミュレーションによって評価するものである。

一方で，災害シミュレータによって路線全線の地震被害を推定するためには，各構造物に対して一般図や配筋図から抽出した詳細な情報を用いる必要がある。しかしながら，路線全線の中には，設計年代が古いために図面等が整理されていない場合や読み取りが困難な場合等，詳細な情報が入手困難な構造物も多く存在する。こうした構造物に対しては，モデルを構築するための情報収集に多大な労力が必要であり，災害シミュレータによる全線のモデル化を困難としている。

そこで，本研究では従来の災害シミュレータよりも少ない情報から橋りょう・高架橋のモデル化と地震被害推

* 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

特集：地震対策技術

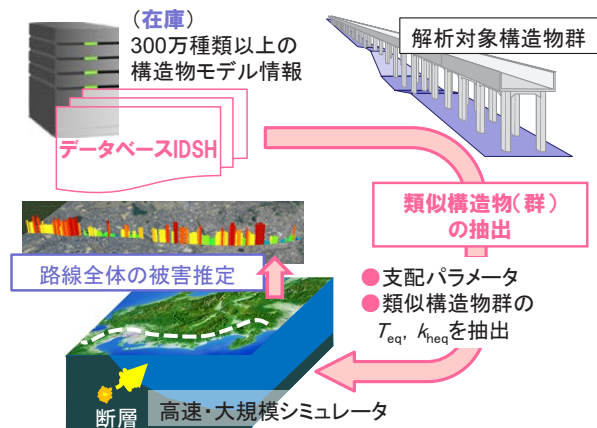


図2 インベントリー法の概要

定が可能な「インベントリー法」を開発した。そして、インベントリー法により推定したモデルの精度検証を実施し、インベントリー法が全線の被害推定に有効な手法であることを示した。

2. インベントリー法による等価固有周期 T_{eq} および降伏震度 k_{heq} の推定

2.1 概要

路線全線の被害を推定する場合、既に設計計算や耐震検討等によって解析モデルが構築された区間においては、それらのモデルを活用すれば良い。一方、それ以外の区間に対しては何らかの解析モデルを構築する必要がある。本来、設計計算で用いるフレームモデル等の詳細なモデルを構築するためには、1 構造物に対して設計計算書の多数の情報が必要であるが、既設構造物に対してそれらの情報を整理することは一般に多大な労力を必要とする上、必要な情報がすべて揃わないこともある。一方、一般的な橋りょう・高架橋の応答は1 自由度系モデルで表現できることが多く⁴⁾、モデルに必要な等価固有周期 T_{eq} と降伏震度 k_{heq} を算定することができれば、応答値を適切に評価可能である。

「インベントリー法」とは、図2に示すように、事前に構築した膨大なデータベースから限られた情報に基づき1 自由度系モデルの T_{eq} および k_{heq} を抽出する手法である。データベースには、 T_{eq} および k_{heq} と、それらへの感度が大きい構造諸元とが紐づけられて格納されている。すなわち、評価対象とする構造物の構造諸元とデータベース上の構造諸元の類似性を判断することで T_{eq} 、 k_{heq} を抽出し、1 自由度系モデルを構築することで被害推定が可能となる。なお、「インベントリー (Inventory)」とは「在庫調べ」という意味であり、地震工学の分野では設計用地震動を抽出する手法として検討事例がある⁵⁾。

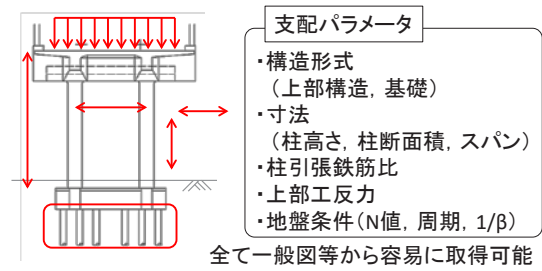


図3 選定した支配パラメータ

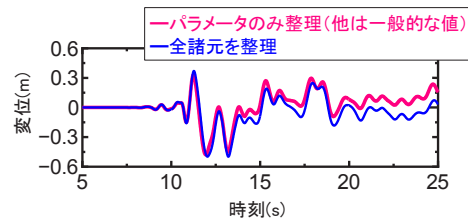


図4 支配パラメータの有効性の検証結果

2.2 データベースに格納する情報の決定

限られた構造諸元から効率的に T_{eq} 、 k_{heq} を評価するために、 T_{eq} 、 k_{heq} への影響が大きい「支配パラメータ」を選定した。選定した支配パラメータを図3に示す。支配パラメータは各諸元の入手の容易さおよび T_{eq} 、 k_{heq} への感度分析の結果を勘案して選定している。選定した支配パラメータの有効性を確認するために、まず、詳細な情報すべてを整理して構築したフレームモデルと、支配パラメータ以外の諸元は一般的な値で代用して構築したフレームモデルに対して、それぞれプッシュ・オーバー解析を行った。そして、算定した T_{eq} 、 k_{heq} から構築した1 自由度系モデルによる応答解析の結果を比較した。その結果、一例として図4に示すように、両モデルの全体的な振動特性や最大応答変位はよく一致しており、一般的な橋りょう・高架橋においては、支配パラメータのみを整理することで応答を推定できることが分かった。

2.3 データベース IDSH の構築

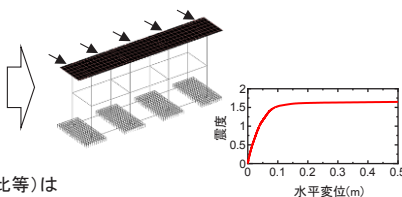
図5にデータベースの構築方法を示す。図5に示すように、一般的な橋りょう・高架橋の諸元を包含するようにそれぞれの支配パラメータの値を複数設定した。次に、それらを網羅的に組み合わせる上で、災害シミュレータが有する自動モデリング機能³⁾によって300万ケースの3次元モデル群を構築し、プッシュ・オーバー解析を実施した。そして、支配パラメータと、プッシュ・オーバー解析結果から算定された T_{eq} 、 k_{heq} を紐づけて格納した「地震災害シミュレーションのためのインベントリー・データベース IDSH (Inventory Database for Seismic Hazard analysis)」を構築した。なお、IDSHには網羅的に設定した支配パラメータの値以外にも、実際の構造物の構造

支配パラメータの組み合わせ

構造形式：橋りょう、高架橋(杭基礎、直接基礎)
 構造高さ：5~15m
 柱の断面幅：□700~1100mm
 柱の鉄筋比：0.2~1.5%
 柱の軸応力：0.5~3.0N/mm²
 地盤条件：G3~G5地盤

※支配パラメータ以外の諸元(梁部材の諸元や帯鉄筋比等)は一般的な値で代用してモデル化
 ※データベースは逐次更新

自動モデリング、プッシュ・オーバー解析



データベースIDSHの構築



支配パラメータとプッシュ・オーバー解析の結果を格納

図5 データベース IDSH の構築手順

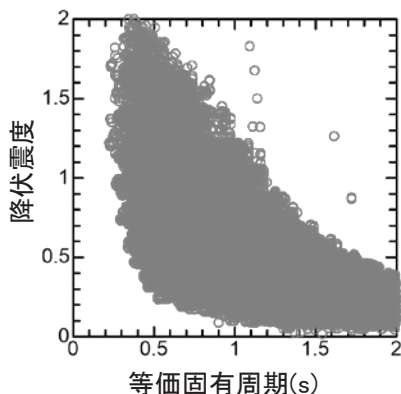


図6 IDSH 上の T_{eq}, k_{heq} の分布

諸元と設計計算から得られた T_{eq}, k_{heq} も格納している。

図6にIDSHに格納された T_{eq}, k_{heq} の分布を示す。図6に示すように、支配パラメータの組み合わせによって広範な特性が包含されていることが分かる。なお、格納されたデータの中には、支配パラメータを網羅的に組み合わせるために、k_{heq} が極端に小さい等、設計での照査を満足しない非現実的な値も存在しているが、これらは後述する T_{eq}, k_{heq} の推定手法によって評価候補から除外されるため、推定結果に影響を及ぼすことはない。

2.4 T_{eq}, k_{heq} の推定方法

評価対象とする構造物の支配パラメータと全く同一の組み合わせが IDSH 上にあれば、従来の災害シミュレータで算定した値とほぼ同一の T_{eq}, k_{heq} を推定することができる。一方、IDSH 上の支配パラメータの値は離散的であるため、当然ながら同じ支配パラメータの組み合わせが IDSH 上に無い場合がある。そこで、対象構造物と IDSH 上の支配パラメータの類似性を判断して T_{eq}, k_{heq} を推定する方法を開発した。

まず、図7に示すように、対象構造物と IDSH 上の構造物群の支配パラメータを比較し、支配パラメータごとに値が一致した場合はその1ケース、一致しない場合は対象構造物の支配パラメータの値を挟み込む前後2ケースを選択する。そして、それらの組み合わせの数だけ類似構造物群を抽出する。

表1に示す構造物を対象として、類似構造物群を抽出した結果を図8に示す。図8には類似構造物群の等価

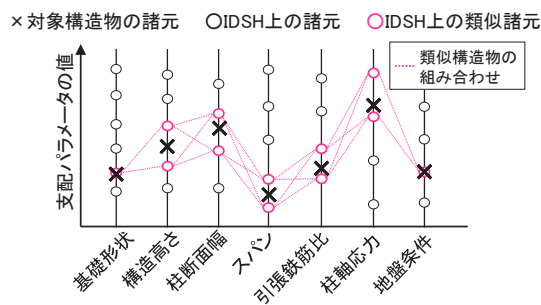


図7 類似構造物の抽出方法のイメージ

表1 対象構造物と類似構造物群の支配パラメータ

パラメータ	対象構造物	IDB
構造形式	同一(1層ラーメン高架橋)	
基礎形状	同一(杭基礎, 1柱1杭, φ=1200)	
構造高さ(m)	7.0	6.5, 7.5
柱断面幅(mm)	□850	□800, □900
C方向スパン(m)	5.0	4.5, 5.5
引張鉄筋比(%)	0.66	0.5, 0.7
柱軸応力(N/mm ²)	1.70	1.50, 1.75
地盤条件		同一

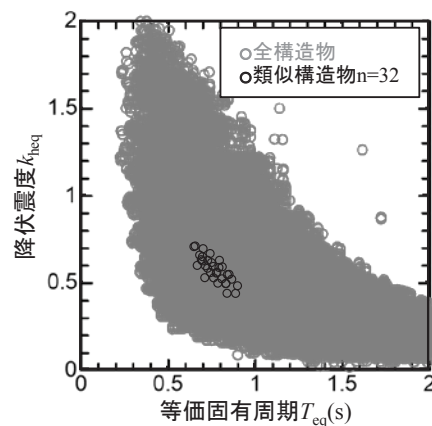
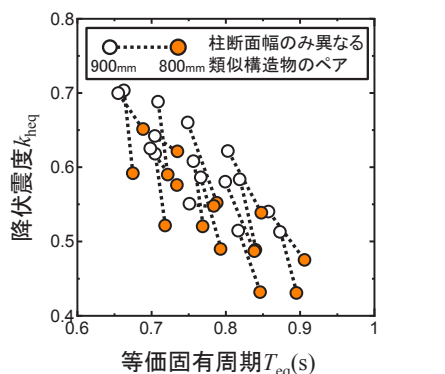
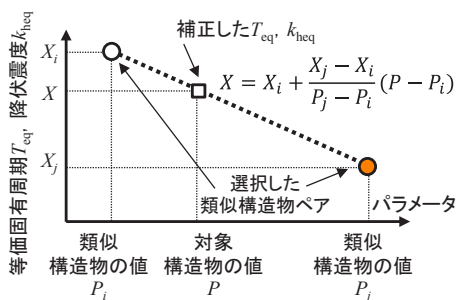


図8 類似構造物群の T_{eq}, k_{heq}

固有周期 T_{eq} と降伏震度 k_{heq} を示している。表1の条件では、一致しない支配パラメータが5つ存在することから 2⁵ = 32 ケースの類似構造物群が抽出され、それらの T_{eq}, k_{heq} の値がある範囲にまとまって分布していることが分かる。なお、本検討では表1に示すように、地盤条件は IDSH に格納されている対象地点と同一条件のものを抽出している。



(a) ペアを選択



(b) 支配パラメータによる線形補間

図9 代表値の推定方法

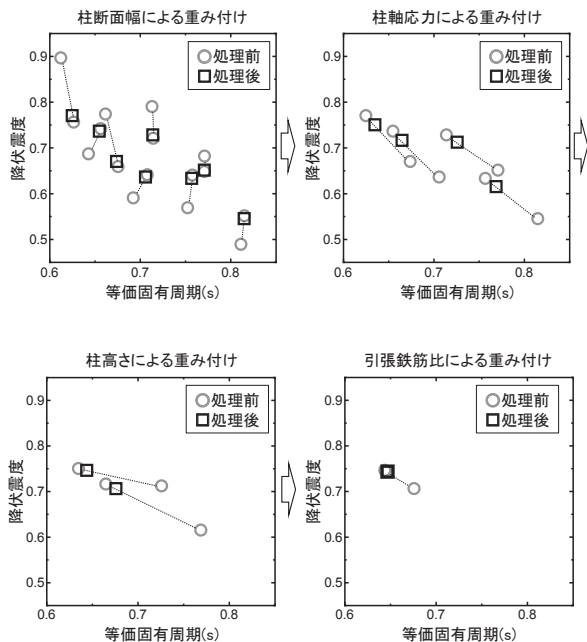


図10 代表値の推定過程

続いて、抽出された複数の類似構造物群の T_{eq} , k_{heq} から、被害推定に用いる1つの代表値を推定する。そこでまず、ある1つの支配パラメータのみが異なり、その他は同じ組み合わせとなる類似構造物のペアを選択する。図9(a)には、例として柱断面幅のみが異なり、他の支配パラメータは同じ組み合わせとなる類似構造物のペア

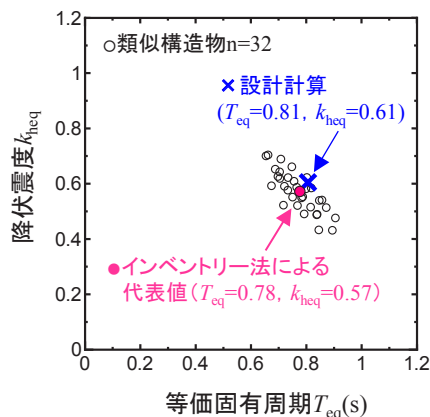


図11 T_{eq} , k_{heq} の推定結果の例

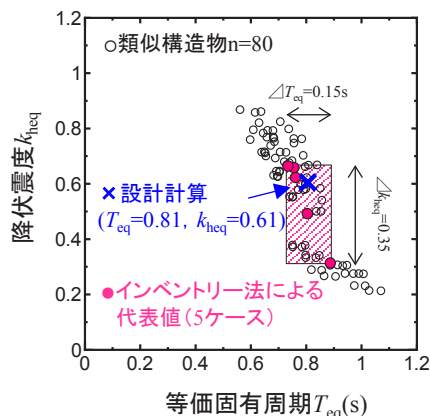


図12 T_{eq} , k_{heq} の推定結果の例
(引張鉄筋比が不明な場合)

を点線で結んでいる。次に、ペアごとに支配パラメータの値を対象構造物と比較し、図9(b)に示すような線形補間によって新たに T_{eq} , k_{heq} を算定する。算定した T_{eq} , k_{heq} の群は、線形補間で用いたものを除いて1つの支配パラメータのみが異なり、他は同じ組み合わせとなっているため、上記手順を繰り返すことで図10に示すように1つの代表値を算定することができる。

表1に示す構造物に対して、抽出された類似構造物の T_{eq} , k_{heq} と推定した代表値を図11に示す。図11に示すように、詳細なフレームモデルを用いた設計計算によって算定された値 ($T_{eq}=0.81s$, $k_{heq}=0.61$) に対して、 T_{eq} は相対誤差4% (0.78s), k_{heq} は相対誤差7% (0.57) で代表値を推定できた。

2.5 情報が揃わない場合の T_{eq} , k_{heq} の推定方法

前節では、図3に示す支配パラメータがすべて入手できることを前提としていたが、例えば配筋図の紛失や読み取り困難等により引張鉄筋比が不明である等、すべての支配パラメータが入手できない場合も考えられる。そこで、支配パラメータの一部が揃わない場合の T_{eq} , k_{heq}

の推定手法についても検討した。

T_{eq} , k_{heq} の推定の流れは前節と同様である。ただし、値が不明な支配パラメータに対しては、類似構造物群の抽出時に、IDSH 上に含まれるすべての値を選択する。また、代表値を推定する際は、値が不明なもの以外の支配パラメータを用いて線形補間を行う。試算例として、表 1 に示した対象構造物の支配パラメータのうち、引張鉄筋比が不明な場合を想定して上記方法による代表値の推定を行った。

代表値の推定結果を図 12 に示す。対象構造物に対して、すべての支配パラメータが揃っている場合よりも多い 80 ケースの類似構造物群が抽出され、最終的に 5 ケースの代表値が推定できた。

このように、不明な支配パラメータがある場合には、最終的に複数の代表値が推定されることになる。なお、図 4 に示した結果より、それぞれの代表値の推定結果は、IDSH 上のある鉄筋比を仮定した際の詳細モデルと同等の精度があると言える。また、推定結果の群が分布する範囲を調べると、等価固有周期 T_{eq} の分布範囲は 0.73 秒～0.88 秒、降伏震度 k_{heq} の分布範囲は 0.31～0.66 であり、詳細な設計計算による算定結果 ($T_{eq}=0.81$ 秒, $k_{heq}=0.61$) がこれらの分布範囲の中に含まれていることが分かる。すなわち、支配パラメータの一部が入りできない場合であっても、評価不可能とするのではなく、可能性のある解の範囲を適切に評価することができる。

3. インベントリー法による適用性の検証

次に、連続した構造物群を対象として、開発したインベントリー法の適用性を検証する。検討対象とした構造物群は表 2 に示す 15 構造物である。これらの構造物群はこれまでに設計標準⁶⁾ に準拠してフレームモデルが構築され、プッシュ・オーバー解析によって T_{eq} , k_{heq} が算定されている。そこで、既に算定された T_{eq} , k_{heq} を正解値としてインベントリー法との比較を行った。

T_{eq} , k_{heq} の比較結果を図 13 に示す。図中のプロットは、上部構造物先行降伏の場合は橙色、基礎構造物先行降伏の場合は青色で示している。なお、インベントリー法による推定に際しては、地盤条件は IDSH に格納されている各対象地点と同一条件のものを抽出している。

図 13(a) より、 T_{eq} について、表 2 に示す No.6～8, 10, 11 の直接基礎形式の構造物を除くと、最大 0.2 秒程度の誤差に収まる。特に、No.9, 12～14 の杭基礎形式で上部構造物先行降伏の場合は精度良く推定することができている。直接基礎形式における誤差は、フーチング底面の地盤抵抗のモデル化が既往検討では回転ばね、災害シミュレータでは分布ばねと異なることに起因している。

表 2 検討対象の構造物群

No.	構造形式	基礎形式
1	橋台	杭基礎
2～5	壁式橋脚	杭基礎
6～8	壁式橋脚	直接基礎
9	1層ラーメン高架橋	杭基礎
10, 11	壁式橋脚	直接基礎
12～14	1層ラーメン高架橋	杭基礎
15	2層ラーメン高架橋	杭基礎

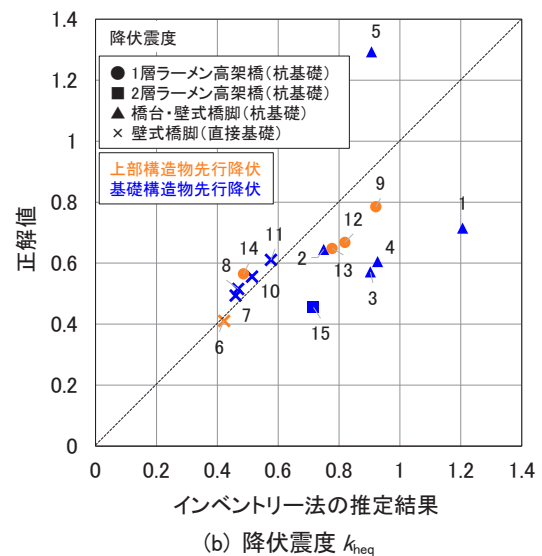
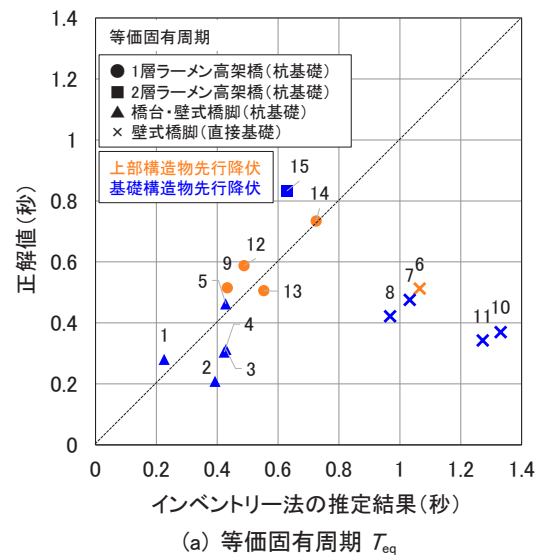


図 13 振動パラメータの推定結果

一方、図 13(b) より k_{heq} について、No.1～5 の杭基礎形式で橋台・壁式橋脚の場合は誤差が比較的大きいものの、その他の構造物では最大 0.15 程度の誤差に収まる。No.1～5 はいずれも基礎構造物先行降伏となっており、特に No.5 は杭が先行して降伏する破壊形態であることを確認している。このように基礎の損傷が進展する場合

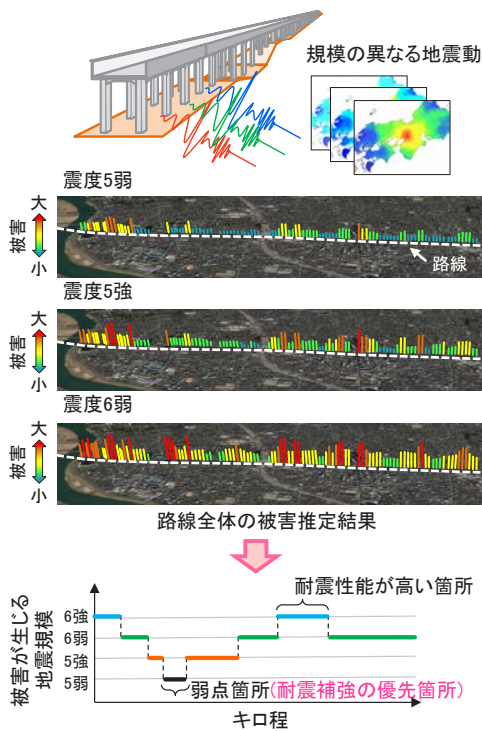


図 14 地震ストレステストのイメージ

には相対的に k_{heq} の誤差が大きくなる傾向にある。

以上より、連続した構造物群に対しても図3に示した支配パラメータのみを整理することで、精度を概ね維持したまま T_{eq} , k_{heq} を推定可能なことが分かった。なお、 T_{eq} , k_{heq} のそれぞれで正解値との誤差が比較的大きくなった直接基礎形式の壁式橋脚や一部の杭基礎形式に対しては、インベントリー法による推定結果の傾向に応じた補正をする等によって精度を向上できると考えられる。推定した T_{eq} , k_{heq} を用いて1自由度系モデルを構築することで、図4に示したように各構造物の被害を推定することが可能である。

4. まとめ

本研究では、得られる情報を最大限活用して、従来の鉄道地震災害シミュレータよりも少ない情報で橋りょう・高架橋のモデル・地震被害が推定可能な「インベントリー法」を開発し、その適用性について検討した。インベントリー法によって、限られた構造諸元のみから構造物の1自由度系モデルの等価固有周期 T_{eq} と降伏震度 k_{heq} を推定することができた。また、連続した構造物群に対しても精度を概ね維持して T_{eq} , k_{heq} を推定することができた。

インベントリー法は従来の災害シミュレータよりも効率的なモデル構築が可能であり、路線全線の被害推定に有効な手法と言える。そこで、路線の全線評価の被害推

定結果の活用例として、「地震ストレステスト」について述べる。地震ストレステストとは、図14に示すように、路線全体の構造物群に対して震度5弱、震度5強、震度6弱…と一律で地震規模を大きくして応答解析を実施し、それぞれの構造物に対して地震規模と被害程度の関係性を評価する手法である。これによって、相対的な弱点箇所を抽出することができ、耐震補強対策や地震後点検の優先順位の決定を支援することが可能である。

また、鉄道総研では「鉄道地震被害推定情報配信システム DISER (Damage Information System for Earthquake on Railway)」による地震後の即時被害推定の情報提供を開始している⁷⁾。これは、地震後の迅速な設備点検や運転再開を支援する目的で、揺れの分布や構造物被害を推定・配信するものである。DISERによる被害推定には地震動の情報以外に構造物の等価固有周期 T_{eq} と降伏震度 k_{heq} が必要であり、これらのパラメータを効率的に整理するためにインベントリー法による推定結果を活用することが可能である。

以上のように、地震後の鉄道機能の早期復旧に向けて、インベントリー法による全線評価結果を事前対策、即時対応に活用できると考えられる。

文献

- 1) 堀宗朗, 市村強, 中村光, 若井明彦, 海老澤健正, 山口直也: 都市内全構造物の地震応答シミュレーションに関する基礎的研究, 土木学会応用力学論文集, Vol. 7, pp. 917-926, 2004
- 2) 吉野廣一, 野中哲也, 本橋英樹, 金治英貞, 鈴木威, 八ツ元仁, 中村良平: 京コンピュータによる高架橋の広域3次元地震応答シミュレーション, 土木学会第17回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 1-8, 2014
- 3) 本山紘希, 坂井公俊, 井澤淳, 室野剛隆: 鉄道地震災害シミュレータの開発, 鉄道総研報告, Vol. 30, No. 5, pp. 5-10, 2016
- 4) 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
- 5) 田中浩平, 高田毅士: 既往観測波形インベントリーを用いた地震動予測のための波形選定手法の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 646, pp. 2219-2225, 2009
- 6) 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, 1999
- 7) 鉄道総合技術研究所 ニュースリリース 鉄道地震被害推定情報配信システム (DISER) の運用開始について: https://www.rtri.or.jp/press/is5f1i000000bt7d-att/20190729_002.pdf (参照日: 2019年11月8日)