

複雑な形状の鉄道橋りょうの被害を地震後即時に推定する



月岡 桂吾
Keigo Tsukioka

鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室
研究員



坂井 公俊
Kimitoshi Sakai

鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室長



豊岡 亮洋
Akihiro Toyooka

前 鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室長



金田 崇男
Takao Kaneda

本州四国連絡高速道路株式会社
前 長大橋・技術部
総括・耐震耐風グループサブリーダー
(現 企画部 企画課 課長代理)



西谷 雅弘
Masahiro Nishitani

本州四国連絡高速道路株式会社
長大橋・技術部
次長

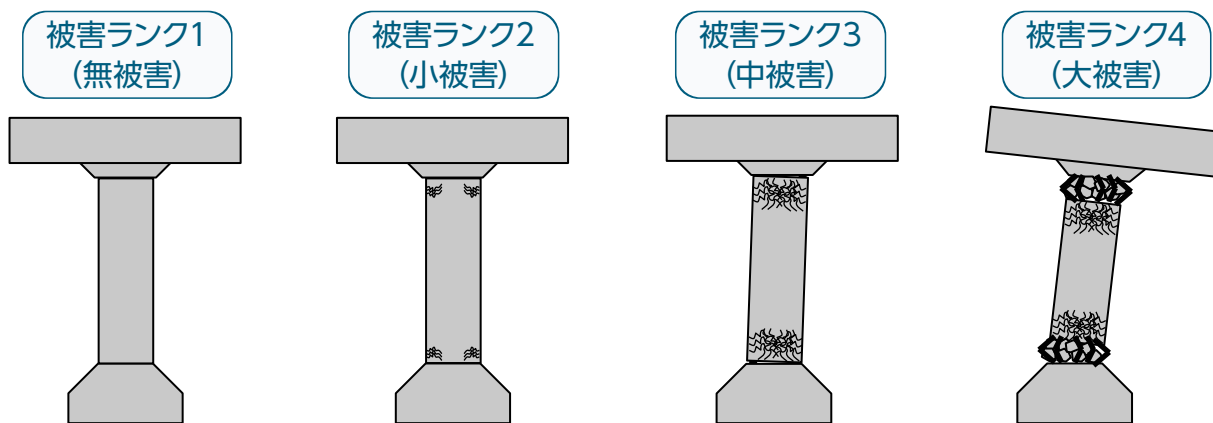
はじめに

鉄道や道路は線状に連続した輸送システムであるため、地震による損傷が1箇所発生しただけで運行が困難になります。したがって、地震発生直後にはすべての構造物の地震被害を把握したうえで、運行再開を判断する必要があります。しかし、路線延長が長い場合や、構造物が多数ある場合には、点検箇所が多くなり運行再開までに多大な時間を要する場合があります。

このような課題を解決するために、地震発

生直後に鉄道沿線の地震動や構造物の地震被害を推定するシステム(鉄道地震被害推定情報配信システムDISER)を開発・運用しています。DISERでは、地震発生直後にもにK-NET(防災科学技術研究所が運用する地震観測網)の観測データを用いて地震動の面的な分布を推定し、さらに路線に沿った地震動や構造物の被害ランク(図1)の推定を行い、これらの情報を配信します¹⁾²⁾。DISERを使用することにより、地震発生直後に沿線の地震被害推定結果を素早く把

図1 被害ランクと被害状況の対応



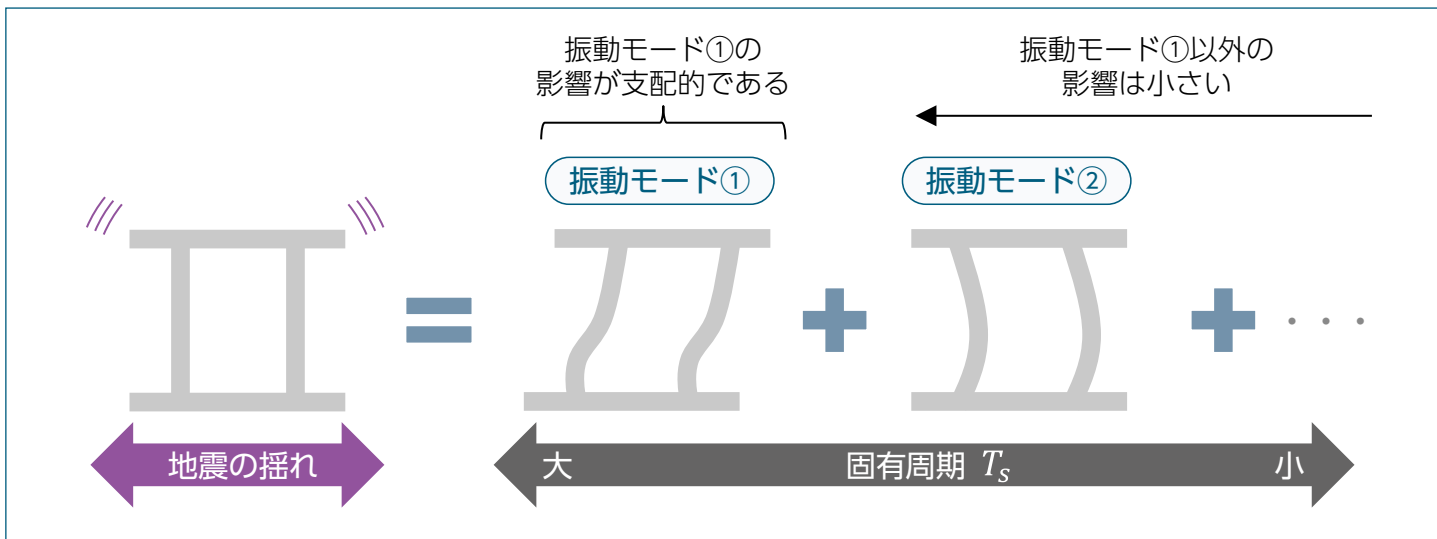


図2 一般的な鉄道橋りょうの地震時の挙動

握できるため、点検範囲の絞り込みなどへの活用が期待されます。

しかし、現在のDISERで地震被害推定が可能な構造物は、一般的な鉄道橋りょう、盛土などであり、長大橋りょうのような複雑な形状の鉄道橋りょうは対象としていません。そこで、複雑な形状の鉄道橋りょうの地震被害推定を行うための方法を開発しました。ここでは、はじめに現行のDISERで一般的な鉄道橋りょうの地震被害を推定する方法について説明します。次に、新たに開発した方法の概要と、開発方法により配信可能な情報について説明します。

一般的な鉄道橋りょうの地震被害をどのように推定するのか？

ここでは、DISERを用いて一般的な鉄道橋りょうの地震被害を推定する方法について説明します。はじめに、一般的な鉄道橋りょうの地震時の挙動について説明します。その挙動は図2に示すように、固有周期 T_s が異なる複数の振動モード¹⁾に分解することができます。図2の例では、頂部が左右に大きく動くような振動

1) 振動モード

特集記事5(免震・制震装置で補強された鉄道橋りょうの地震時走行性を確保する)のコラム「固有振動モードと固有値解析」を参照。

モード(振動モード①)や、柱がはらみ出すような振動モード(振動モード②)など、さまざまな振動モードに分解されます。一般的な鉄道橋りょうにおいては、振動モード①の影響が支配的であり、それ以外の振動モードの影響は小さいことが知られています。そこでDISERでは、図2中の振動モード①を想定して作成された地震被害推定ノモグラム³⁾を使用することで、地震発生直後に構造物の地震被害を推定します。具体的な手順は以下のとおりとなります(図3)。

図3 一般的な鉄道橋りょうの地震被害推定の流れ

ステップ① 構造物の情報を整理する

↑ 事前準備

地震発生

↓ 事後対応

ステップ② 地震動の情報を受信する

ステップ③

地震被害推定ノモグラムにより構造物の被害ランクを推定する(図4)

ステップ① 構造物の情報を事前に整理します。DISERでは、固有周期 T_s と構造物の強さを表す降伏震度 k_{hy} という指標が必要となります。これらの指標は設計計算書から収集することができます。設計計算書が入手できない場合は、設計図から構造物の寸法や鉄筋量を読み取り、それらの情報を鉄道総研が所有している構造物データベースと照合することで推定します⁴⁾。

ステップ② 地震発生直後に地震動の情報（地表面最大加速度PGA，地表面最大速度PGV）を防災科学技術研究所から受信します。そして、地震動の卓越周期 T^* をPGAとPGVにより計算します。ただし、これらの情報は地震計が設置された場所ではしか得られません。したがって、空間補間⁵⁾により地震計が設置されていない場所の地震動の情報を推定し、構造物の建設位置における地震動の情報を入手します¹⁾。

ステップ③ 図4のように、ステップ①とステップ②で整理した構造物および地震動の情報を地震被害推定ノモグラムに当てはめることで、構造物の被害ランクを推定します²⁾。

図4の地震被害推定ノモグラムにおいて、横軸は地震動と構造物の周期比 T/T_s を表し、

降伏震度 k_{hy}

構造物に対して作用する水平加速度を徐々に大きくすると、柱などが少しずつ損傷していき、降伏点とよばれる時点から急に変形が進みます。降伏点における水平加速度を重力加速度 g で割った値を降伏震度 k_{hy} とよび、構造物の強さを表す指標になります。

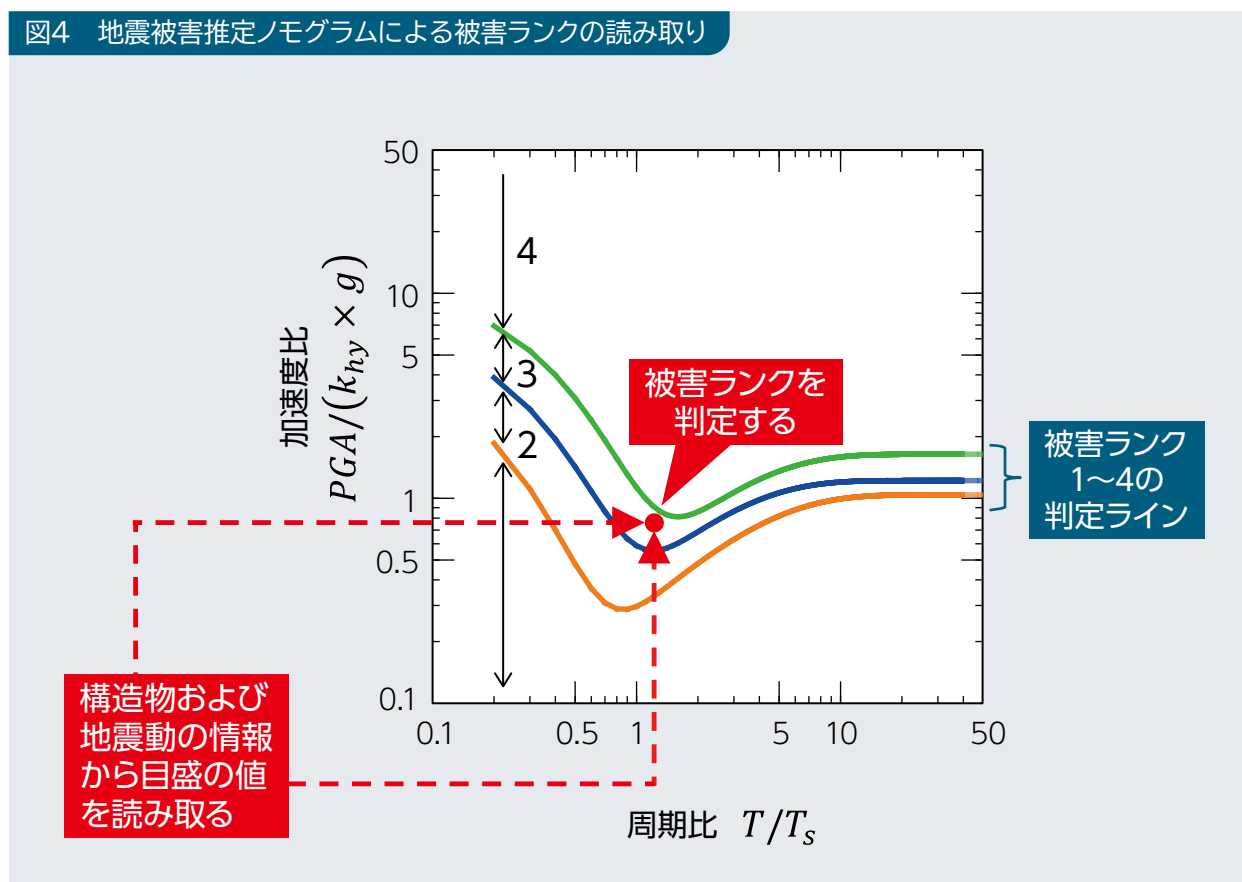
地震動の卓越周期 T

地震の波は、さまざまな周期の波が重なってできている。その中でもとくにエネルギーをたくさんもっている波の周期を卓越周期 T とよびます。

空間補間

地震計が設置されていない場所の揺れを、地震計で観測した揺れの情報を用いて推定する方法を表します。

図4 地震被害推定ノモグラムによる被害ランクの読み取り



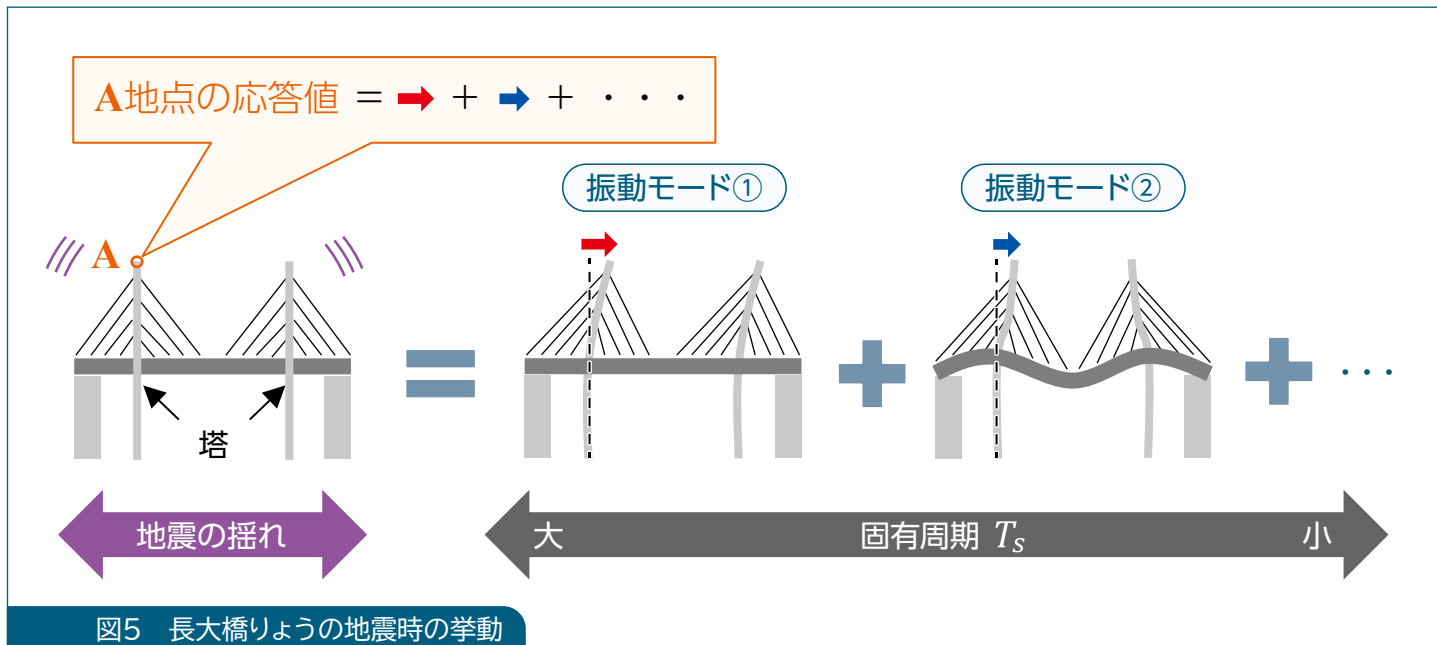


図5 長大橋りょうの地震時の挙動

縦軸はPGAと降伏点において構造物に作用する加速度 ($k_{hy} \times g$) の比 $PGA / (k_{hy} \times g)$ を表します。

現時点では、DISERは長大橋りょうのような複雑な形状の鉄道橋りょうには適用できません。これは、長大橋りょうの地震時の挙動が、DISERで想定している一般的な鉄道橋りょうの地震時の挙動とは異なり複雑であるためです。

複雑な形状の鉄道橋りょうの地震被害をどのように推定するのか？

複雑な形状の鉄道橋りょうに対してDISERを適用する方法を新たに開発しました⁵⁾。ここでは、特集記事1(本四備讃線橋りょうを耐震補強する)の図2に示すような長大橋りょうの鉄道桁の支承部を例に、開発方法の概要や、開発方法により配信可能な情報について説明します。

はじめに、長大橋りょうの地震時の挙動について説明します。その挙動は一般的な鉄道橋りょうと同様に、異なる複数の振動モードに分解することができます(図5)。図5の例では、2つの塔が同じ方向に動く振動モード(振動モード①)や、2つの塔が逆方向に動く振動モード(振動モード②)など、さまざまな振動モード

に分解されます。ただし、一般的な鉄道橋りょうと異なり、その挙動は1つの振動モードでは表現できないため、複数の振動モードを考慮する必要があります。このとき、長大橋りょうの応答値は、それぞれの振動モードにおける応答値の合計となります。図5の例では、長大橋りょうのA地点の応答値は、振動モード①におけるA地点の応答値(図5中の赤矢印) + 振動モード②におけるA地点の応答値(図5中の青矢印) + ...というように計算することができます。開発した手法では、この性質を利用します。具体的な手順は、以下のとおりとなります(図6)。

ステップ① 長大橋りょうの情報を事前に整理します。まず、固有値解析により、長大橋りょうのさまざまな振動モードについて形状、固有周期 T_s および刺激係数^⑤を評価します。次に、評価したそれぞれの振動モード(図5の例では、振動モード①や振動モード②)の中から、刺激係数が大きいものを選びます。

⑤ 刺激係数

固有値解析から求められる各振動モードの影響の大きさを表す指標であり、振動モードごとに値が異なります。刺激係数が大きい振動モードほど影響が大きくなります(応答値が大きくなります)。

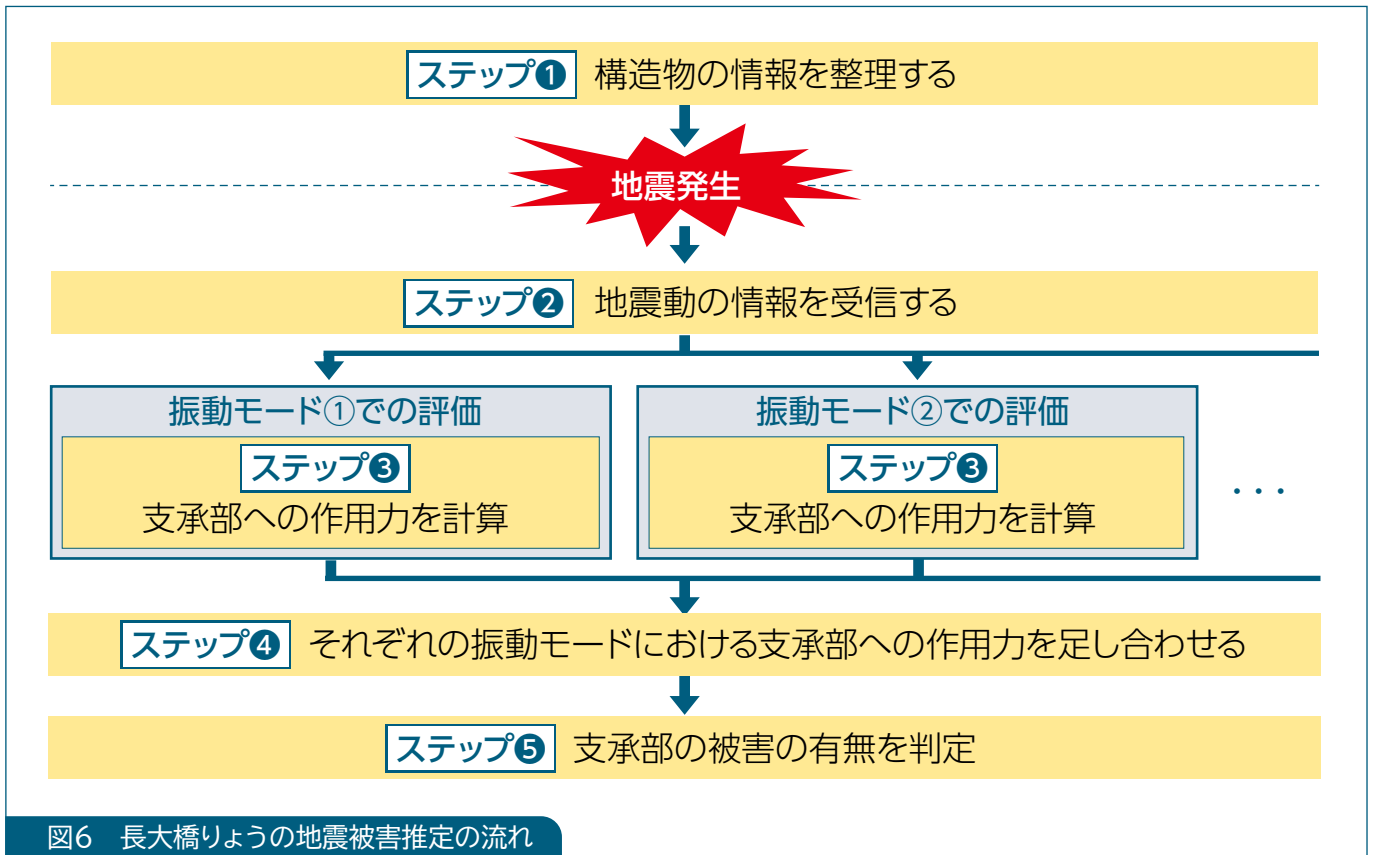


図6 長大橋りょうの地震被害推定の流れ

ステップ② 現行のDISERと同じ方法で、長大橋りょうの架橋位置における地震動の情報を取得します。

ステップ③ 鉄道総研で提案している簡易評価式⁵⁾を用いて、それぞれの振動モードにおける支承部への作用力を計算します。この計算には、地震動の卓越周期 T 、地表面最大加速度PGA、各振動モードの固有周期 T_S および刺激係数、支承部の支持荷重（桁荷重や列車荷重）といった情報が必要になります。このとき、固有周期 T_S および刺激係数は振動モードに応じて変わるので、支承部への作用力も振動モードごとに異なります。

ステップ④ ステップ①で選んだすべての振動モードに対して、ステップ③により支承部への作用力を計算します。計算したすべての作用力を足し合わせることで、実際に長大橋りょうの支承部に作用する力を求めます。

ステップ⑤ ステップ④で計算した作用力と支

承部の耐力を比較することで被害の有無を判定します。

登録事業者にはどのような情報が配信されるか？

上記の方法により、地震発生直後の長大橋りょうにおける鉄道桁の支承部の地震被害を、登録事業者へ情報配信することが可能となります。配信情報の一例を図7に示します。図7において、横軸が起点側から割り振った支承部の番号を表し、縦軸が特集記事2（鉄道道路併用橋の鉄道桁を耐震補強する）の図3に示すようなサイドブロックの照査値⁶⁾を表しています。この例では、全箇所の照査値が1.0を大幅に下

照査値

地震時に部材に作用する力を、その部材の耐力で割った値を照査値とよびます。照査値が1.0を下回っていれば部材は損傷しておらず、1.0を上回っていれば部材は損傷しているということになります。

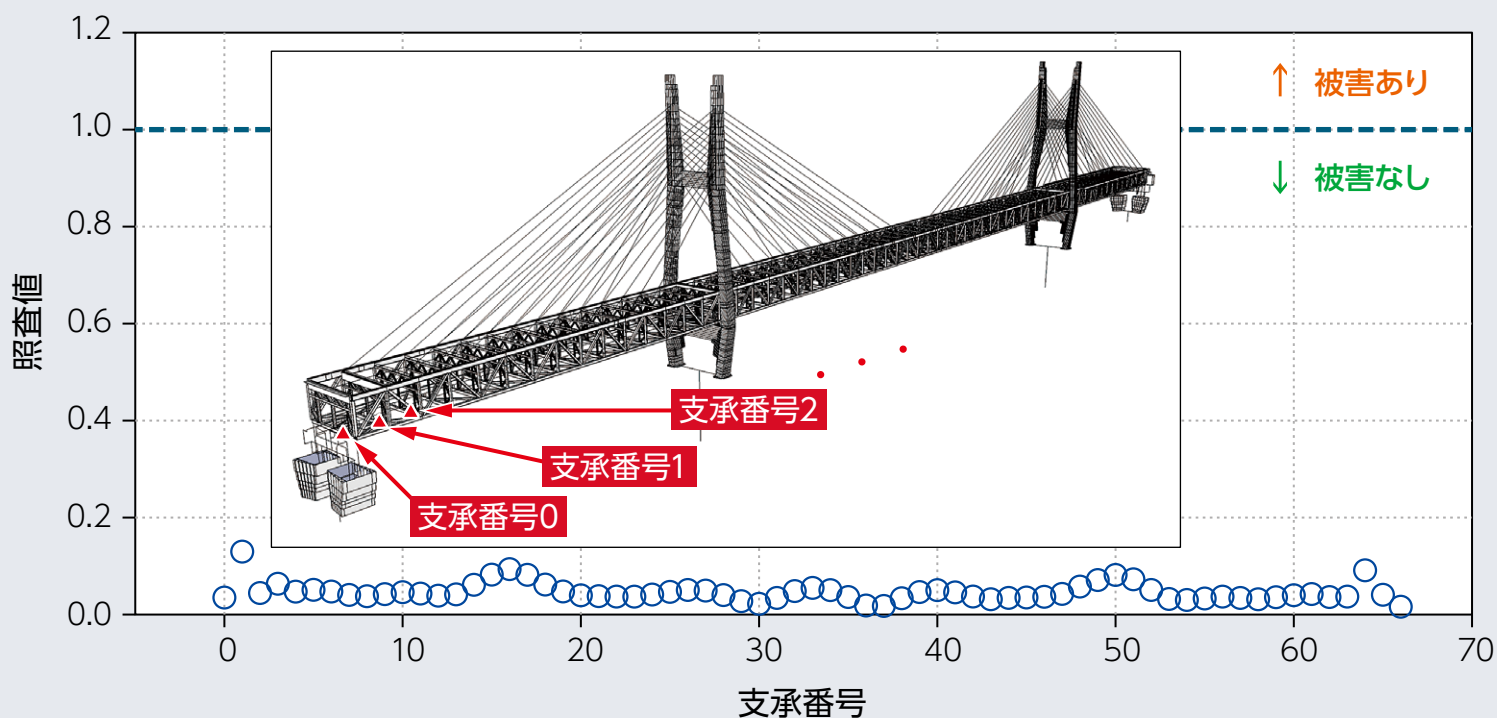


図7 配信情報の例

回っていることから、支承部点検の必要はないと判断することができます。また、仮に点検を行う場合には、照査値が大きい箇所を優先的に点検するべきであるということが判断できます。このように、開発した方法により地震発生直後の長大橋りょうの点検の必要性や点検箇所の優先順位を判断することが可能となります。

おわりに

地震発生直後に鉄道沿線の地震動や構造物の地震被害を推定するシステム（鉄道地震被害情報配信システムDISER）は、一般的な鉄道橋

りょう、盛土などを対象としたものであり、長大橋りょうのような複雑な形状の鉄道橋りょうは対象としていませんでした。そこで、複雑な形状の鉄道橋りょうを対象にDISERを使用するための方法を新たに開発しました。今後は、いろいろな形状の構造物に対して開発方法の検証を積み重ねていき、実用化に向けた準備を進めていく予定です。実用化後は、利用実績を積み重ねていくなかでユーザーの意見を反映し、より利用しやすいシステムをめざします。

なお、本研究は本州四国連絡高速道路株式会社との共同研究により実施しました。[RRR](#)

文献

- 1) 岩田直泰, 坂井公俊, 山本俊六, 室野剛隆, 青井真: 鉄道地震被害推定情報配信システム (DISER) を利用して素早く運転を再開する, RRR, Vol.77, No.2, pp.12-15, 2020
- 2) 土井達也, 小野寺周, 坂井公俊: 構造物被害を推定し即時的に情報配信する, RRR, Vol.78, No.3, pp.20-23, 2021
- 3) 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.I_32-I_39, 2015
- 4) 小野寺周, 和田一範, 坂井公俊, 室野剛隆: 構造物データベースで地震リスクを求める, RRR, Vol.76, No.3, pp.24-27, 2019
- 5) 月岡桂吾, 坂井公俊, 豊岡亮洋, 金田崇男, 西谷雅弘, 角野拓真, 菊地佳音: 長大橋りょうの地震時被害即時推定手法の開発, 令和4年度土木学会全国大会, 2022