

## 長大橋りょうの地震時被害即時推定手法の開発

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○月岡桂吾 坂井公俊 豊岡亮洋  
 本州四国連絡高速道路(株) 正会員 金田崇男 西谷雅弘  
 四国旅客鉄道(株) 正会員 角野拓真 菊地佳誉

**1. 目的** 道路や鉄道構造物は線状に連続した輸送システムであるため、地震発生後には全構造物の地震時被害を把握した上で運行を再開する必要がある。筆者らの一部は、これまでに鉄道構造物を対象として地震時に即時的に被害を推定する手法を開発してきた<sup>1)</sup>。しかし、本手法は長大橋りょうのような複雑な構造物には現状では適用できない。そこで、長大橋りょうの地震時被害即時推定手法を開発した。本稿では、長大橋りょうのうちの鉄道縦桁支承部に着目して、推定手順および推定精度について述べる。

**2. 提案手法の概要**

(1) **使用する情報** 提案手法ではモード解析の考え方を応用する。必要な構造物情報は、事前に算定可能な刺激関数、固有周期およびモード減衰比である。地震動情報としては、地震発生直後には地震動波形を入手できない可能性もあるため、代わりに地表面位置での地震動加速度および速度の最大値 (PGA および PGV) を使用する。また、PGA および PGV から地震動の卓越周期 $T(= 2\pi PGV/PGA)$ を推定して用いる。

(2) **推定手順** 鉄道縦桁における絶対加速度応答の最大値 $w_{max}$  (評価対象位置および方向に応じたスカラー) を推定し、これにより鉄道縦桁支承部に作用する慣性力を求めて、支承部材の限界値と比較することで損傷状態を把握する。このとき、手順 1)が地震発生前の処理であり、手順 2)以降が地震発生後の処理である。提案手法では、連立一次方程式の求解等は必要としない閉形式を採用しているため、即時的な評価が可能となっている。

1) 刺激関数の絶対値が閾値よりも大きい $N$ 個の振動モードを選定し、各振動モードの刺激関数 $\beta_s W_s$  (モード次数、評価対象位置および方向に応じたスカラー)、固有周期 $T_s$ およびモード減衰比 $h_s$  ( $s = 1 \dots N$ ) を整理する。ここで、 $\beta_s W_s$ の閾値は、評価結果に影響を及ぼす振動モードが全て選定されるような値の中で、可能な限り使用モード数が少なく計算時間が短くなるような値を事前に検討しておく必要がある。なお、本稿で検討対象とする構造物のように要素別剛性比例減衰を使用している場合は、モード減衰比 $h_s$ は直接的には評価できない。このような場合には、評価対象部材における剛性比例減衰の値をモード減衰比 $h_s$ として設定する。

2) 各振動モードの絶対加速度応答の最大値 $S_s$ を以下の式(1)により求める<sup>2)</sup>。

$$S_s = R(h_s) \times \text{PGA} \times \left( \frac{T_r}{0.757} \right)^2 \left/ \left\{ 0.586 \sqrt{\left( 1 - \left( \frac{T_r}{0.757} \right)^2 \right)^2 + 4 \left( \frac{0.491 T_r}{0.757} \right)^2} \right\} \right. \quad (1)$$

式(1)において、 $T_r$ は地震動と各振動モードの周期比 ( $= T/T_s$ ) である。上記の式はモード減衰比 5%を仮定したものであるが、各振動モードのモード減衰比 $h_s$ はこの値とは異なる。式(2)における $R(h_s)$ はこの違いを補正する係数であり式(2)のように定義される。

$$R(h_s) = 1.884 \times \sqrt{\frac{1 - \exp(-66\pi h_s)}{66\pi h_s} \{0.424 + \ln(66\pi h_s + 1.78)\}} \quad (2)$$

3) CQC法<sup>3)</sup>により、各振動モードの最大応答値を重ね合わせて $w_{max}$ を求める。

$$|w_{max}|^2 = \sum_{s=1}^N (\beta_s W_s \cdot S_s)^2 + \sum_{r=1}^N \sum_{r \neq s}^N (\beta_s W_s \cdot S_s) \rho_{sr} (\beta_r W_r \cdot S_r) \quad (3)$$

式(3)において下付き添え字の $s$ および $r$ はそれぞれモード次数を表す。 $S_s$ および $S_r$ はそれぞれ $s$ 次モードおよび $r$ 次モードの絶対加速度応答の最大値であり式(1)によって求められる。 $\beta_s W_s$ および $\beta_r W_r$ はそれぞれ $s$ 次モードおよび $r$ 次モードの刺激関数である。 $\rho_{sr}$ は $s$ 次モードおよび $r$ 次モードの相関係数に相当し、各モードの固有周期およびモード減衰比から求まる。具体的な計算方法については、文献 3) を参照されたい。

キーワード 長大橋りょう, 斜張橋, 地震時被害即時推定, モード解析, 道路鉄道併用橋

連絡先 〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 地震動力学研究室 TEL 042-573-7394

### 3. 提案手法の有効性検証

(1) 対象とする構造物 道路鉄道併用型の斜張橋 (図1) を対象に検討を行う。振動モードに関する情報は、非構造物材 (管理路等) 以外を全てモデル化した詳細なモデルによる固有値解析から評価する。対象橋りょうの具体的な諸元や詳細なモデル化方法等については文献4)を参照されたい。

(2) 複数の地震動による検証 複数の地震動に対して特定の鉄道縦桁における加速度を評価した際の提案手法の有効性を検証する。使用する地震動は文献1)と同様である。理想的には、詳細なモデルによる非線形動的解析 (以下、詳細解析) の結果との比較による検証が望ましいが、複数の地震動に対してこれを実施するには膨大な時間を要する。そこで、短時間で実施可能な詳細なモデルによるモード解析法の結果との比較を行うが、詳細解析とモード解析法の結果が大きく乖離していないことは確認している。検証では、橋りょう中心位置を対象とし、線路直角方向に地震動を与えた際の、同方向の鉄道縦桁 (図2) の最大加速度を評価する。なお、提案手法における刺激関数の閾値は0.1とする。比較結果を図3に示す。モード解析法に対する提案手法のRMSPEは0.34であり、全線の被害の俯瞰的な把握という観点で実用に足る精度が確保できているといえる。

(3) 複数の支承部を対象とした検証 (2)では様々な地震動に対して提案手法が有効なことを示した。(3)では特定の地震動を用いて、提案手法により実際に長大橋りょう全線の被害推定が可能なことを示す。使用する地震動は1つのみであり計算時間は問題とならないため、比較には詳細解析を用いる。詳細解析では橋脚位置に応じて地震動 (水平と鉛直方向) を与えるが、提案手法では各橋脚位置の地震動 (水平方向のみ) を平均化した波形からPGAとPGVを読み取る。検証では、橋りょう全線の鉄道縦桁支承部を対象とし、水平方向を線路直角方向として伏在逆断層による地震動 (図4) を与えた際の、同方向のサイドブロックの水平力に関する照査値を評価する。なお、詳細解析では支承ばね要素から直接的に水平反力を算定するが、提案手法では鉄道縦桁位置の加速度値に支持荷重を乗じて水平反力を算定する。また、提案手法における刺激関数の閾値は0.01とする。比較結果を図5に示す (支承番号は起点側から昇順)。端部における結果が若干乖離しているが、全線にわたる傾向は概ね一致していることから、提案手法を全線の被害の俯瞰的な把握に活用できることが示された。

4. まとめ 長大橋りょうの地震時被害即時推定手法を提案した。提案手法により地震発生直後の長大橋りょう全線の被害を俯瞰的に把握することが可能となる。今後は、他形式の長大橋りょうや他部材においても同様の評価が可能なることを検証予定である。なお、本研究は本州四国連絡高速道路 (株) と (公財) 鉄道総合技術研究所との共同研究によるものである。

参考文献 1) 坂井ら：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)，第71巻，第4号，I\_32-I\_39，2015。 2) 田中ら：土木構造物上の電車線柱の地震応答値即時推定手法の提案，第22回鉄道工学シンポジウム講演プログラム，2018。 3) E.L. Wilson et al. : A replacement for the SRSS method in seismic analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 9, No. 2, pp. 187-192, 1981。 4) 西谷ら：瀬戸大橋斜張橋 (櫃石島橋、岩黒島橋) の耐震補強設計，本四技報，第42巻，第130号，2018。

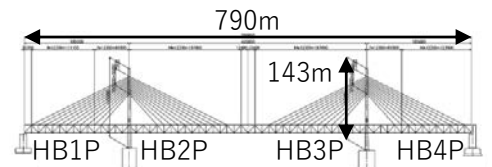


図1 対象橋りょうの概況

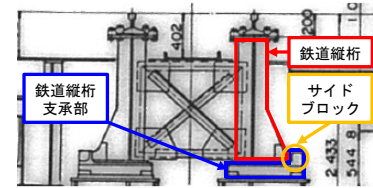


図2 鉄道縦桁支承部

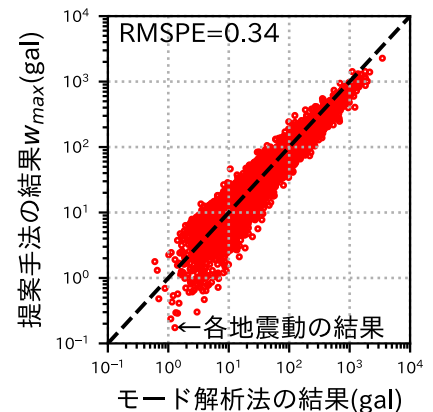


図3 提案手法とモード解析法の比較

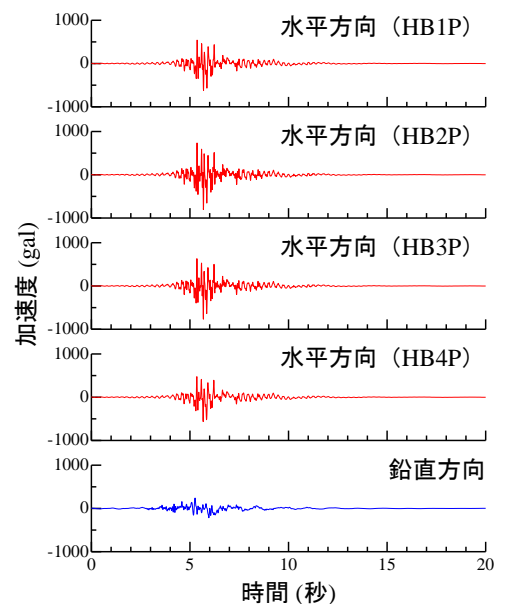


図4 伏在逆断層による地震動

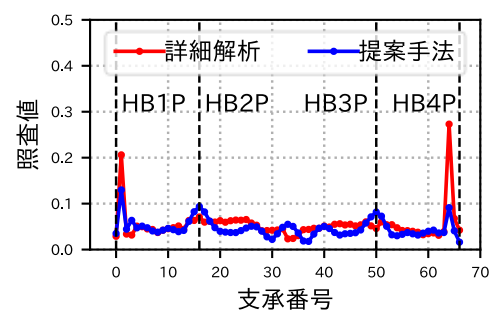


図5 提案手法と詳細解析の比較