

# 鋼板補強された実大高架橋の損傷度判定に関する基礎的研究

鉄道総合技術研究所（東大生研） 正会員 上半 文昭  
 東京大学生産技術研究所 正会員 目黒 公郎

## 1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、鉄道RC高架橋に甚大な被害が発生した。地震後、その被害を教訓として多くの高架橋柱に鋼板巻立て工法を用いた耐震補強が実施され、鋼板補強高架橋は現在では主要な鉄道構造物の一つとなっている。構造物の検査は技術者による目視を中心に行なわれているが、鋼板補強高架橋では鋼板内部のRC柱の損傷状況を目視で確認できない。そのため地震直後の損傷度検査等に支障をきたすことが予想されており、目視に代わる鋼板補強構造物の健全度検査法の開発が望まれている。衝撃振動や常時微動を測定して構造物の劣化や損傷に伴う振動特性の変化（固有振動数の低下等）を検出する手法が有力視されているが、鋼板補強構造物の損傷による振動特性の変化に関するデータの蓄積はまだ十分とは言えない。

これらを背景として、著者らは新しい非線形構造解析手法である応用要素法 (Applied Element Method, AEM)<sup>1)</sup>を用いて鋼板補強RC構造物の数値解析モデルを作成し、鋼板補強構造物の損傷による振動特性の変化を調べることにした。ここでは、鋼板補強された実大高架橋の損傷による固有振動数変化のシミュレーションを実施して、提案モデルの精度を検証した。

## 2. 鋼板補強RC柱の2次元解析モデル

### 2-1 応用要素法 (Applied Element Method: AEM)<sup>1)</sup>

応用要素法 (AEM) では、解析対象を仮想的に分割した要素の集合体として取り扱う。各要素は法線方向とせん断方向の2種類の分布バネでつながれている (Figure 1)。2次元解析の場合、各要素は水平、鉛直、回転の3自由度を有しており、分布バネを介して周囲の要素と力のやり取りを行う。各分布バネには、コンクリートの材料モデルが適用され、分布バネが代表する領域の材料がその領域に作用する応力に耐えられなくなると、バネが切断してクラックが自然に発生する。また鉄筋位置には鉄筋の材料モデルを適用したバネが並列に配置され、鉄筋バネは降伏応力に達すると降伏し、さらに破断応力に達すると破断する。応用要素法はこの様なメ

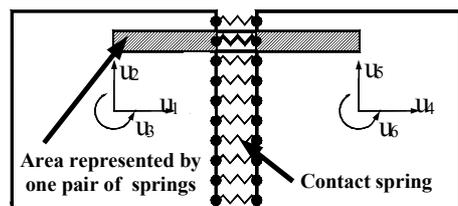


Figure 1 Spring distribution and area of influence of each pair of springs

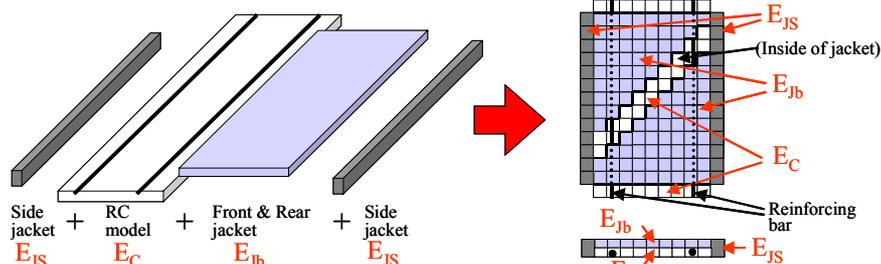


Figure 2 2-Dimensional AE modeling of jacketed RC column

カニズムによって微小変形領域から大変形崩壊領域までの構造物の挙動を解析できる。

### 2-2 鋼板補強柱の2次元解析モデル

鋼板内部のRC要素  $E_C$ 、左右両端の鋼板要素  $E_{JS}$ 、両端の鋼板をつなぐ鋼板要素  $E_{JB}$  の3種類の要素を用い、鋼板補強されたRC柱を平面応力状態の仮定のもとで2次元モデル化する (Figure 2)。要素  $E_C$  にはコンクリートの材料特性、要素  $E_{JS}$  及び要素  $E_{JB}$  には鋼の材料特性を与える。RC要素  $E_C$  の中で鉄筋の位置には鉄筋バネが配置される。要素  $E_C$  と要素  $E_{JB}$  は、初期状態ではその要素中心が一致する状態で配置されるが、両者は連結されておらず独立に挙動できる。鋼板内部のRC要素  $E_C$  と両端の鋼板要素  $E_{JS}$  は連結されており、鋼板内部のRC柱が変形すると、両端の鋼板要素  $E_{JS}$  もそれに応じて変形しようとする。要素  $E_{JS}$  と要素  $E_{JB}$  が連結されているため、内部のRC柱が損傷して外側にはらみ出そうとするのを鋼板によって拘束することができる。このモデルを用いれば鋼板内部のRCの損傷と鋼板の損傷の両方をシミュレーションできる。

## 3. 損傷による固有振動数変化のシミュレーション

### 3-1 実験概要

吉田ら<sup>2)</sup>は、新幹線品川駅新設に伴って撤去される高架橋を用いて、鋼板補強された実大高架橋の載荷実験を行った。実験に用いた高架橋の構造形式は単線2柱式3径間RCラーメン高架橋である。高架橋及び載荷装置の概要をFigure 3に示す。各柱はFigure 4に示すように厚さ6mmの鋼板で補強されており、柱と鋼板の間には無収縮モルタルが充填されている。隣接する高架橋に壁体を設置して反力高架橋とし、高架橋間のスラブを切断して載荷ジャッキを設置し、変位制御で橋軸方向の正負交番載荷が実施された。正負に15mm, 30mm, 60mm, 90mm, 120mm, 150mm, 180mm, 210mm, 240mmの9ステップの変位を各3回載荷した後、最終ステップとして+350mmの単調載荷が実施された。また、線路方向の天端位置打撃による衝撃振動試験も実施されており、高架橋の損傷による固有振動数の変化が調べられている<sup>3)</sup>。

キーワード：応用要素法、非線形構造解析、耐震補強、鉄道高架橋、衝撃振動試験

連絡先 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38, TEL: (042) 573-7290, E-mail: uehan@rtri.or.jp)

3-2 解析概要および結果

解析対象高架橋の柱をサイズ 8.25cm×8.25cm の AEM 要素を用いてモデル化した。柱上端部の境界条件は回転拘束として桁部の全質量の 1/8 を付加することにより、柱1本で高架橋全体の挙動を代表させた。Table 1 に示す C<sub>1</sub>~C<sub>3</sub> と S<sub>1</sub>,S<sub>2</sub> を組み合わせた計6ケースの材料値を持つモデルを作成した (Table 2)。ここで材料特性 C<sub>1</sub>,S<sub>1</sub> は設計強度を、C<sub>2</sub>, S<sub>2</sub> は実強度を、C<sub>3</sub> は劣化時の強度を想定したものである。なお、モデルの底部に地盤-基礎バネを配して柱の固有振動数が実高架橋の固有振動数の実測値と等しくなるよう調整したので、Case (1)~(6)の各モデルの全体系の損傷前の初期状態における固有振動数はすべて等しい。

Table 1 Material properties

	Compressive strength	Young's Modulus
Concrete C <sub>1</sub>	23.5 MPa	24.5 GPa
Concrete C <sub>2</sub>	35.0 MPa	28.0 GPa
Concrete C <sub>3</sub>	17.6 MPa	21.6 GPa
	Yield stress	Young's Modulus
Longitudinal bar S <sub>1</sub>	490 MPa	200 GPa
Longitudinal bar S <sub>2</sub>	558 MPa	200 GPa
Stirrup	400 GPa	200 GPa

Table 2 Combination of material properties

Case	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Concrete	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>
Longitudinal bars	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>

Figure 5 に実験および解析結果を示す。実験結果によれば、1δ<sub>y</sub> 載荷終了時で固有振動数が交番載荷開始前の固有振動数に対して 85%程度で、4δ<sub>y</sub> 載荷終了時には 50%程度まで低下し、それ以降はあまり固有振動数が低下していない。(1)~(6)の異なる材料特性を有する数値モデルによるシミュレーションで得られた固有振動数の低下は、1δ<sub>y</sub> 載荷終了時で 79~83%、4δ<sub>y</sub> 載荷終了時が 55~61%、8δ<sub>y</sub> 載荷終了時が 50~54%、11.7δ<sub>y</sub> 載荷終了時が 47~51%であった。特に実強度を想定した Case (4)に着目すれば、固有振動数の誤差は 1δ<sub>y</sub> 載荷後が 5.0%、4δ<sub>y</sub> 載荷後が 9.4%、8δ<sub>y</sub> 載荷後が 0.6%、11.7δ<sub>y</sub> 載荷後が 6.1%であった。衝撃振動試験や常時微動測定などの振動測定を利用した構造物の検査手法の損傷度評価基準の作成など、実務分野に応用するのに十分な精度があるものと考えられる。

4. まとめ

鋼板補強 RC 柱の複雑な損傷挙動を解析できる 2次元数値解析モデルを提案し、鋼板補強 RC 高架橋の損傷による固有振動数変化のシミュレーションを対象にしてその精度を確認した。本研究では、構造物検査の視点から構造物の変形量と固有振動数の変化の関係のみに着目したが、今後は鋼板補強構造物の損傷挙動をコンクリート、鉄筋、鋼板のそれぞれについて分析できるという提案モデルの長所を生かして、効果的な復旧工法の開発ツールや復旧工法の選択支援ツールへの応用を検討していきたい。

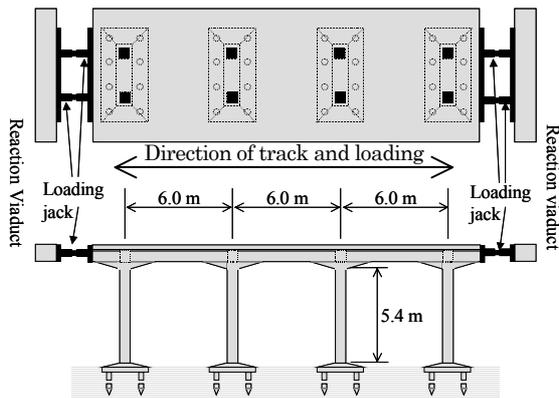


Figure 3 Viaducts and loading equipments

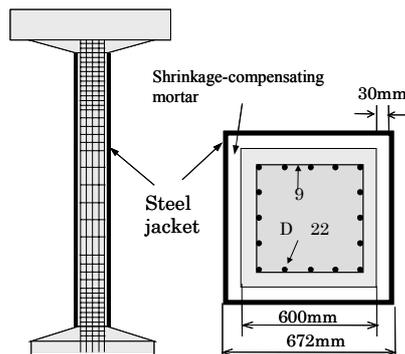


Figure 4 Arrangement of reinforcing bars and cross section of the jacketed column

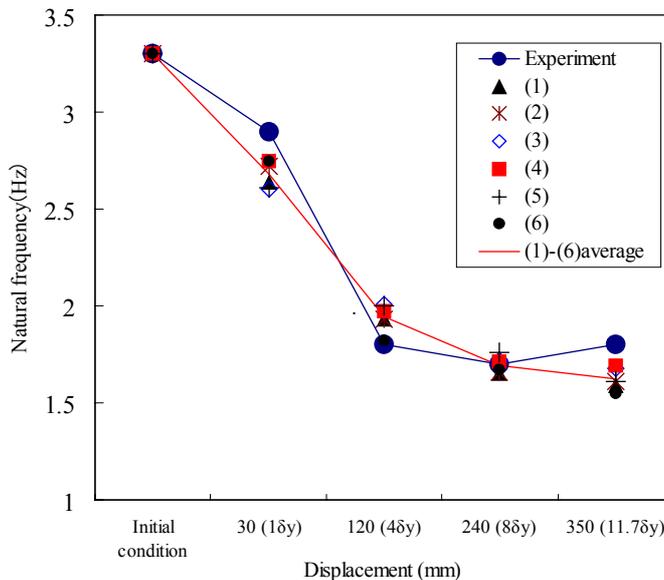


Figure 5 Change of natural frequency of the real viaduct and the numerical models

参考文献

- 1) Meguro K. and Tagel-Din H.: A new efficient technique for fracture analysis of structures, Bulletin of Earthquake Resistant Structure, IIS, Univ. of Tokyo, No.30, pp.103-116, 1997.
- 2) 吉田幸司他: 耐震補強を行った実物 RC ラーメン高架橋の載荷実験 (その1) ~実高架橋の交番載荷実験による耐震補強性能評価~, 土木学会第 55 回年次学術講演会概要集, V-500, 2000.
- 3) 長縄卓夫他: 耐震補強を行った実物 RC ラーメン高架橋の載荷実験 (その2) ~耐震補強高架橋に対する地震時被災度判定手法の検討~, 土木学会第 55 回年次学術講演会概要集, V-501, 2000.