

# 打撃試験による局所モード振動数変化を利用した鋼部材の健全度評価

Damage Assessment of Steel Members Based on Frequency Changes in Local Higher Modes by Hammering Test

吉岡 勉\*, 山口宏樹\*\*, 松本泰尚\*\*\*, 高橋 眞\*\*\*\*

Tsutomu Yoshioka, Hiroki Yamaguchi, Yasunao Matsumoto, Makoto Takahashi

\*博(工), 大日本コンサルタント(株), 保全エンジニアリング研究所 (〒170-0003 東京都豊島区駒込 3-23-1)

\*\*工博, 埼玉大学大学院教授, 理工学研究科 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)

\*\*\*PhD, 埼玉大学大学院, 准教授 理工学研究科 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)

\*\*\*\*工修, 東海旅客鉄道(株), 新幹線鉄道事業本部 (〒441-8019 愛知県豊橋市花田町西宿)

This article examines about a possibility of the damage assessment of steel members by using local higher modes. Firstly, the local vibration characteristics of diagonal member were analyzed by FEM eigenvalue analysis. Through the analysis, the mode dependence of frequency changes caused by the damage in the steel member was also confirmed in the analysis with the damage model. Secondly, healthy and damaged members with same specifications were examined by the hammering test on site. As a result, it was concluded that the decreases in the natural frequencies of higher modes are prominent enough to assess the damage.

*Key Words: hammering test, frequency changes, steel members, damage assessment*

キーワード: 打撃試験, 振動数変化, 鋼部材, 健全度評価

## 1. はじめに

近年, 鋼下路式トラス橋の斜材において, 床版コンクリート貫通部での局部腐食や, 沿岸地域での斜材上端部の内面局部腐食, 格点部ガセット近傍での疲労亀裂など, 重大損傷が顕在化し, 定量的な健全度評価手法の確立が急務な状況である。

トラス橋は同一諸元の斜材が周期的に配置されているため, それらを打撃加振で比較計測し, 初期値が無くとも異常を検知できれば有益である。また, 見た目の損傷劣化の調査だけではなく, 性能低下を定量的に表す指標が必要と考えられる。打撃加振による健全性診断は機械やプラント分野において比較的良く用いられている<sup>1)</sup>。橋梁においても, 河川内橋脚の重錘打撃加振による固有振動数の大きさから洗掘状況を診断する手法<sup>2)</sup>やケーブルの打撃加振・手加振による張力測定<sup>3)</sup>など, 橋梁の構成部材を直接, 強制加振して健全性を診断する技術が既に実用化されている。また, 打撃加振による診断法を橋梁の主桁に応用しようとする研究もある<sup>4)</sup>。

このような背景のもと, 著者らは, 細長い鋼部材を対象とした打撃加振診断法の確立を意図して, 腐食程度の

異なるトラス斜材, 当て板補強前後のトラス斜材, 局所変形の有無が見られるランガー垂直材を対象に, 打撃加振による振動計測を行った。理論モード解析を含めた詳細なデータ分析より, 高次局所モードの振動数変化を利用した健全度評価の可能性について検討した。

## 2. 研究対象とした橋梁概要

### 2.1 鋼トラス橋の概要

研究対象の一つとした鋼トラス橋は, 図-1 に示す支間長 70.77m の単径間鋼下路式ワーレントラス橋 5 連であり, 1965 年に竣工した橋梁である。

支点に最も近い H 断面の D1 引張斜材は, 大型車のジョイント通過時の泥跳ねによる水分・塩分の付着が原因と考えられる腐食が進行し, 孔食が散見される状態のもの(写真-1(b))と, 車両の走行方向との関係から比較的健全な状態にあるもの(写真-1(a))が複数存在する。腐食は路面位置から斜材軸方向に 1.2m 程度の範囲に発生し, フランジ内面が顕著に孔食している。

また, D5 斜材の上下端ガセットプレート付近において, フランジに亀裂損傷が発生し, 応急対策としてガセット

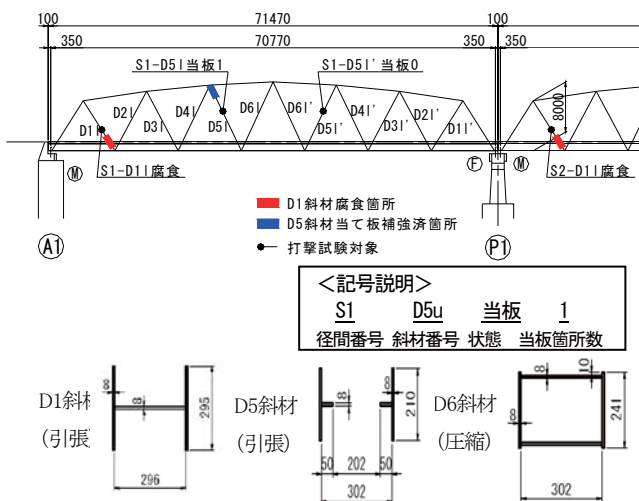


図-1 鋼トラス橋側面図と斜材代表断面



(a) 第1径間\_上流側：健全 (b) 第1径間\_下流側：腐食 (S1-D1u) (S1-D1l)

写真-1 D1斜材の腐食状況の一例

の位置から約 1.5m の範囲に対して当て板補強が施されている。

## 2.2 鋼ランガー橋の概要

もう一つの研究対象は、図-2に示す支間長 87.2m の単径間鋼ランガー橋3連であり、1971年に竣工した橋梁である。V5垂直材のいくつかは、車両の衝突が原因と考えられるフランジ端部の変形が存在し(写真-2(a))、V1垂直材のいくつかは、歩道部のコンクリートが垂直材に接触している状態のものがあった(写真-2(b))。

## 3. FEM解析による鋼部材の局所振動特性の把握

打撃試験に先立ち、鋼部材単独の FEM 固有振動解析を行い、鋼部材の局所振動特性についての分析を行った。解析対象は、打撃試験時に著しい腐食が確認された鋼トラス橋の D1 斜材とした。

### 3.1 解析モデルと解析ケース

D1 斜材の FE モデルと解析ケースを図-3に示す。設計上の格点間距離である骨組長 9.465m の範囲をモデル化した。斜材本体はシェル要素でモデル化し、要素分割はフランジおよびウェブの幅方向を 8 分割、長手方向を 10cm ピッチとした。ガセット部は剛体はり要素を用いて

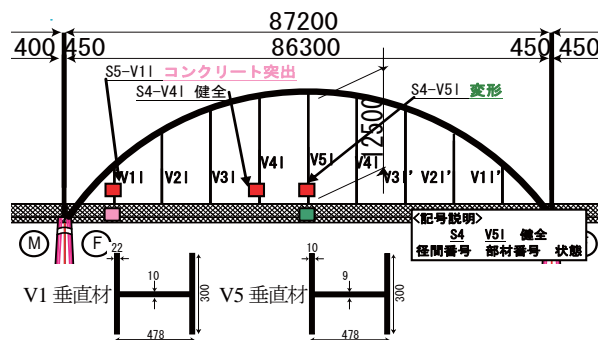


図-2 鋼ランガー橋側面図と垂直材代表断面



(a) V5 局所変形 (b) V1 コンクリート接触  
写真-2 垂直材の損傷状況

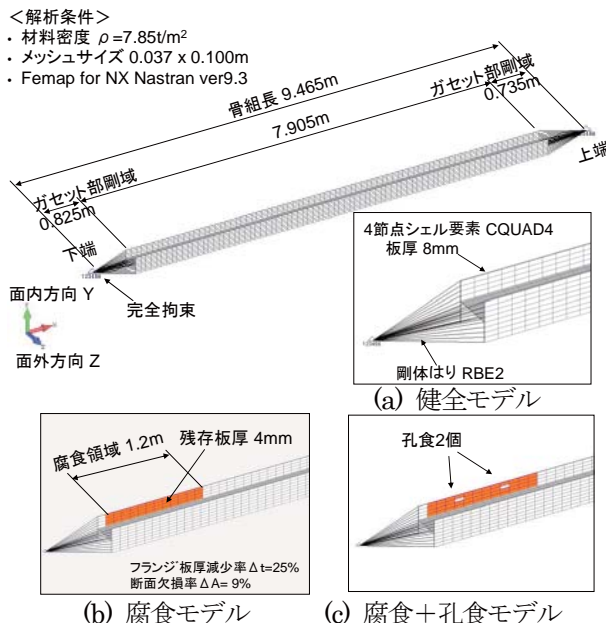


図-3 D1斜材の FEM モデルと解析ケース

剛域扱いとし、ピラミッド型で集約した節点の全自由度を完全拘束した。質量は斜材シェル要素に鋼材の材料密度  $7.85t/m^2$  を与えることでモデル化し、ガセット部は振動しない剛域扱いとしたことから、ガセットおよびリベットは考慮していない。このようなモデル化を健全モデル(図-3(a))とした。

図-3(b)に示す腐食モデルは、実際に D1 斜材で生じた腐食状態を想定したケースであり、ガセット近傍から長手方向に 1.2m の範囲のフランジ自由突出部の片側を板厚 4mm にしたケースである。健全断面からの断面欠損

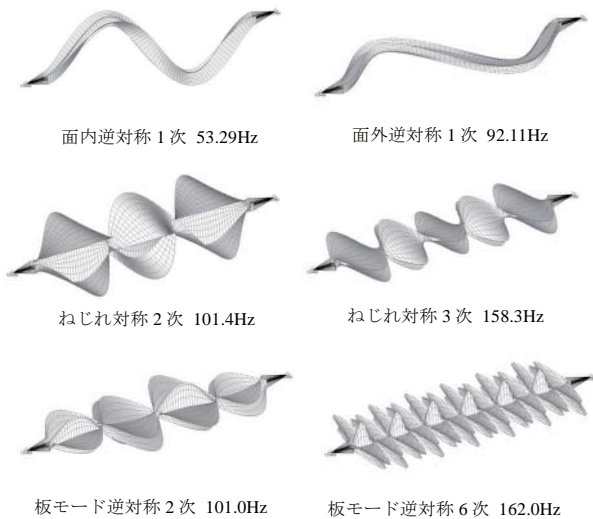


図4 D1斜材の主要な固有振動モード

率は9%であり、実際に生じる腐食程度である。なお、断面の欠損に伴って質量も欠損すると仮定したモデル化であり、錆の付着による質量付加は考慮していない。図-3(c)に示す腐食+孔食モデルは腐食に加え、シェルを2要素削除して孔食を模擬したケースである。

### 3.2 斜材の基本振動特性

D1斜材の健全モデルにおける主要な固有振動モードを図4に示す。同図に示すように斜材の固有振動モードは、トラス面内方向の曲げモード、トラス面外方向の曲げモード、ねじれモード、および高次でフランジ・ウェブの板振動が卓越するモードに大別される。それら分類された各モードは高次になるにつれて、腹、節の数が増えていくといった固有振動特性を示した。

### 3.3 斜材損傷による理論上の振動数変化

D1斜材の健全モデルおよび腐食モデルにおけるモード次数と固有振動数の関係を図5に示す。同図は、前述した固有振動モードの分類に即して凡例を分けている。まず、健全モデルの振動数分布を見ると、95Hz程度までは単純梁としての振動モードである面内・面外曲げモードおよびねじれモードが出現している。95Hz以上からはウェブとフランジが連成して振動する板振動モードが数多く出現する。また、140Hz以上からは単純梁としてのねじれモードと板振動モードが交互に現れる傾向にある。

次に、腐食モデルの振動数分布と比較して見ると、140Hz以上で明確な振動数の差が見られ、振動数の低下から同一モードが出現する次数の変化も認められる。図-6は健全モデルの振動数に対する腐食モデルの振動数差を示したものである。140Hz以上のねじれモードおよび板振動モードにおいて2Hz以上の振動数低下が生じ、それらのモード類が高次になるにつれて振動数の低下が

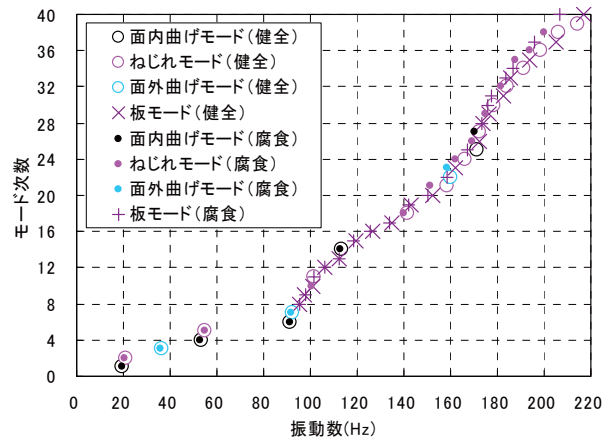
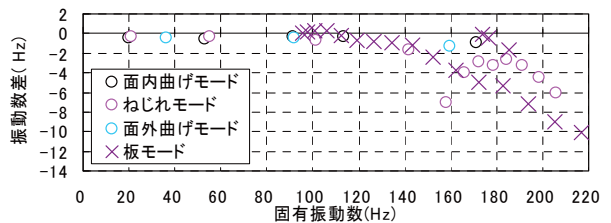


図5 健全モデルと腐食モデルの振動数分布比較



振動数差(Hz)=腐食モデル振動数-健全モデル振動数

図6 腐食による振動数変化の理論値

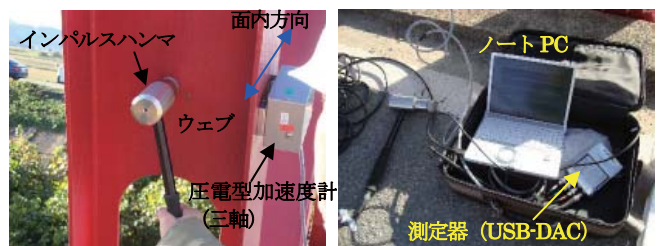


写真3 打撃試験状況と計測システム

顕著となる傾向にある。ただし、次数の増につれて単調低下するのではなく、約158Hzのねじれモードのように低下が特に顕著となるモードがあり、損傷による振動数変化のモード依存性が確認される。

## 4. 打撃試験による局所モード振動数変化の同定

### 4.1 打撃試験対象と試験方法

鋼トラス橋において打撃試験の対象とした斜材は、図-1に示したように、車両通過時の泥はねにより局部的に腐食が進行したD1斜材と、斜材上下端のガセット近傍で亀裂が生じて応急措置として当て板補強されたD5斜材とした。打撃試験は斜材の補修補強工事前後の2008年11月(平均気温8.2℃)と2009年10月(平均気温16.0℃)の2回に分けて行った。鋼ランガー橋においては図-2に示したように、局所変形の有無が見られたV5垂直材および歩道部コンクリートの接触があったV1垂直材を打撃試験対象とした。

打撃試験の状況と計測システムを写真-3に示す。計測

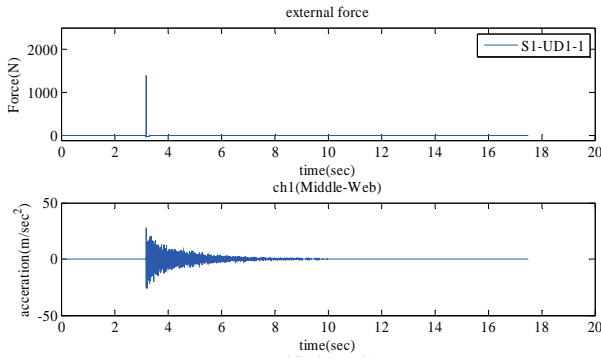


図-7 加振力波形(入力)と加速度波形(応答)

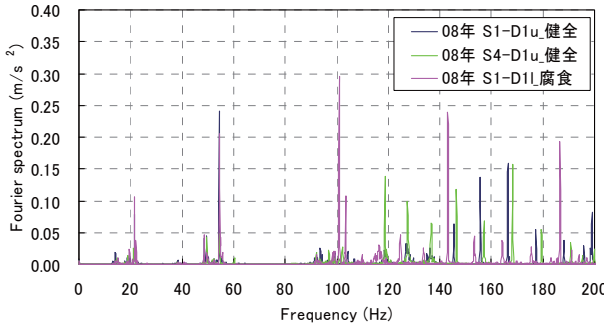


図-8 フーリエスペクトル比較

システムは、圧電型加速度計、打撃ハンマ、データ集録装置およびノート PC のみであり、USB を介してノート PC からの電源供給で駆動する小型のデータ集録器を用いていることから、非常にポータブルで簡易に振動計測できるシステムを用いている。一人でも打撃および計測が可能である。打撃ハンマには、加振力を計測できるインパルスハンマを用い、ハンマ先端のチップは低次モードまで適切に加振できるようにソフトチップを使用し、ウェブ中央を主構面内方向に打撃した。計測のサンプリング周波数は 1000Hz とし、打撃直前から打撃後の自由減衰波形約 20 秒間を計測した。また、一つの斜材に対して 2 回試験を行った。

計測データの代表として、健全な D1 斜材の加振力波形と加速度波形を図-7 に、D1 斜材の腐食程度の違いによるフーリエスペクトル比較を図-8 にそれぞれ示す。

#### 4.2 健全な斜材の振動特性と再現性

次に、加振方向と同じトラス面内方向の 2ch のデータを用いて単点 ERA 解析<sup>5)</sup>を行い、固有振動数を精緻に同定した。ERA の解析条件は、打撃後 5 秒間の自由振動波形を入力波形とし、ハンケルマトリクスのサイズを 3000×2000、システム次数を 100 次とした。ERA 結果の安定性評価方法としては、MAC の値が 0.9 以上、かつ、モード減衰比が 0 以上 0.01 以下を満たす値をまず抽出し、Stabilization diagram において、システム次数が連続する同定値同士の固有振動数の差が 0.1Hz 以下となり、かつ、連続している次数の数が 30 以上の群のみを再度抽出し、

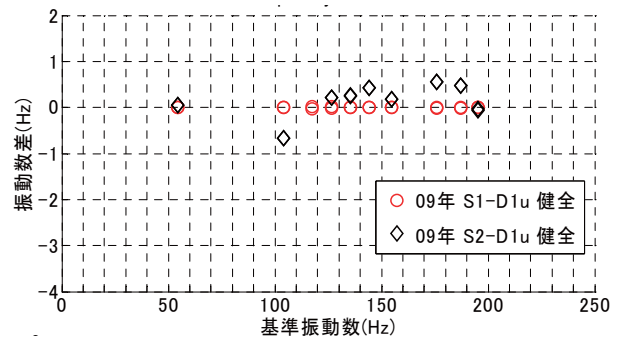


図-9 健全な D1 斜材同士の振動数差

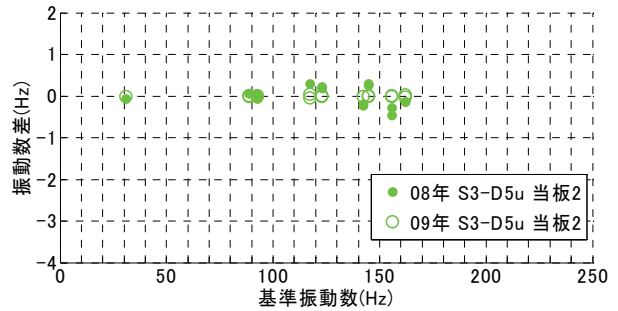


図-10 当て板 D5 斜材の固有振動数の経時変化

その群の平均値をもって振動数の最終同定値とした。このように安定性の評価を厳しく行っているため、安定的に出現するモードのみ同定される。したがって、モード形状の同定までは行えないとしても同定値の数が比較部材で概ね揃い、その振動数帯から比較すべき値を選定することが可能となる。

単点 ERA 解析によって同定された健全な D1 斜材同士の固有振動数を比較して図-9 に示す。各斜材で 2 回分の試験結果を同じ凡例でプロットしているが、総じて、1 回目と 2 回目の同定振動数の差は極小さく、叩き方に依存しない安定的な方法と言える。また、基準振動数としている S1-D1u のプロットに対して、S2-D1u のプロットを見ると、振動数差 ±1Hz 未満とばらつきは小さい。

図-10 は、同一部材の経年比較が可能である両端を当て板した S3-D5u 斜材の 2008 年時と 2009 年時の固有振動数を同様に比較したものであるが、その差は ±0.5Hz 以内と十分に小さい。

以上より、同一部材であり、かつ、構造状態に変化がなければ、打撃試験による高次振動数同定のばらつきは ±1.0Hz 程度以内となり、本手法による同定値の再現性は確保されるものと考えられる。

#### 4.3 腐食の有無による斜材の振動特性の相違

単点 ERA 解析によって同定された健全斜材と腐食斜材の固有振動数差を図-11 に示す。腐食が進行した斜材の振動数はいずれも 100Hz 以上の振動数帯で健全な斜材より小さい値を示している。また、その振動数差は 2~3Hz ある。前節より、同一部材ではないことのばらつきを ±1.0Hz 以内と考えると、2Hz 以上の振動数差を示し

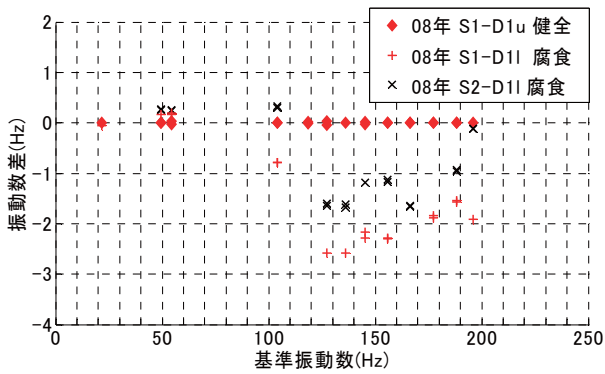


図-11 腐食の有無による D1 斜材の振動数差

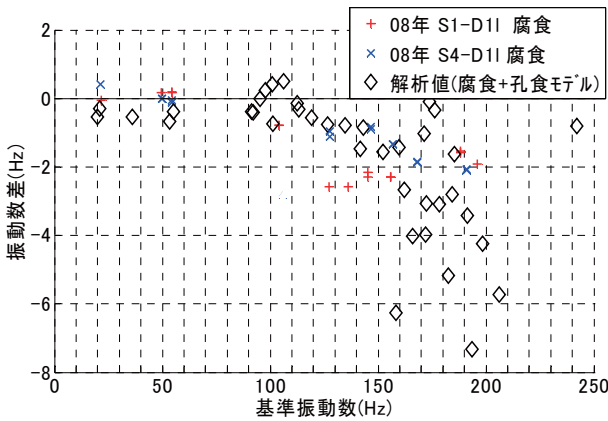


図-12 試験値と解析値の整合性

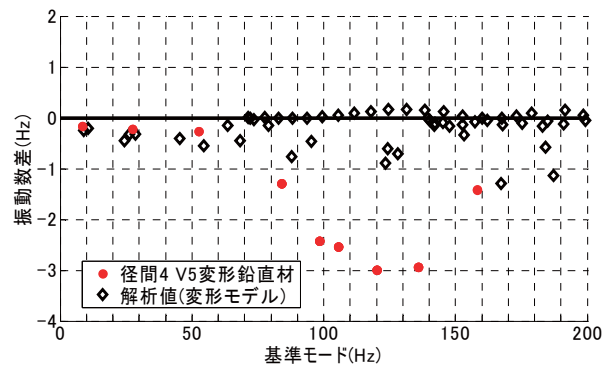
たことは有意であり、腐食による振動数低下を捉えているものと考えられる。

上記の結果を FEM 解析より得られた振動数変化の理論値と比較ものを図-12 に示す。写真-1(b)に示したように対象とした D1 斜材には腐食のほか孔食も散見されたことから、腐食+孔食モデルの解析結果と比較している。同図を見ると、120Hz 程度以下での腐食による振動数変化は 1Hz 以下と小さく、130~140Hz 以上のモードから振動数低下が大きいモードが出てくるといふ大まかな傾向は整合している。

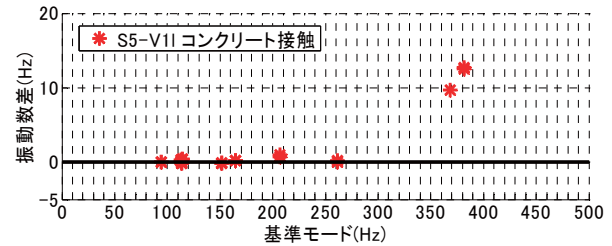
#### 4.4 局所変形の有無による垂直材の振動特性の相違

ERA 同定結果から健全な垂直材を基準として算出した各損傷部材の振動数差を図-13 に示す。同図には、3 章で示した FEM 解析と同様の方法で、局所変形の有無による V5 垂直材の固有振動数差を理論モード解析した結果を併せてプロットしている。局所的な変形が確認された V5 垂直材では、変形箇所の断面積が減少したことによる断面 2 次モーメントの低下が影響して周期的に振動数が減少している。また、歩道部コンクリートが接触している V1 垂直材は、接触部がフランジの振動を拘束するため、振動数が高次モードにおいて増加する傾向が確認された。

100~200Hz 付近までの高次振動数群を平均化し、損傷前後で平均振動数の差を取ったものを表-1 に示す。この



(a) 局所変形の有無 (V5 垂直材)



(b) 歩道コンクリート接触の有無 (V1 垂直材)

図-13 各損傷垂直材の健全部材に対する振動数差

表-1 高次振動数群による振動数差

損傷形態	健全状態に対する振動数差
腐食	-2.21Hz
局所変形	-1.78Hz
コンクリート接触	+16.30Hz

ような厳しい条件下の ERA 解析により同定された高次振動数群の平均振動数差は、周期性のある高次振動数変化を定量的に評価する際の有効な指標になりうるものと考えられる。

## 5. まとめ

鋼部材を対象とした打撃加振診断法の確立を意図して、損傷程度の異なるトラス斜材、ランガー垂直材を対象に打撃加振による振動計測を行い、高次局所モードの振動数変化を利用した健全度評価の可能性について検討した。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) FEM 解析より、H 断面鋼部材の局所的な腐食は 140Hz 以上の高次ねじれモードおよび板振動モードの振動数低下が顕著であり、振動数変化には損傷形態に応じたモード依存性があることが確認された。
- (2) 打撃試験データの ERA 解析より、同一部材であり、かつ、構造状態に変化がなければ、打撃試験による高次振動数同定のばらつきは±1.0Hz 程度以内となり、本手法による同定値の再現性が確認された。
- (3) 100Hz 以上の高次振動数領域において、腐食が進行した斜材や局所変形が生じた垂直材の固有振動数は健全部材の振動数に比べて一様に小さい値を示し、

FEM 解析によって得られた損傷による振動数変化と大まかに整合した。

- (4) 厳しい条件下の ERA により同定された高次振動数群の平均振動数差は、周期性のある高次振動数変化を定量的に評価する際に有効な指標となり得た。

今後は、鋼部材の残存耐荷力評価のために高次振動数変化量の閾値について検討するとともに、打撃試験でねじれや板振動のモードを簡易に分類して同定精度を向上させる方法について検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) 山本鎮男・編著：ヘルスマニタリングー機械・プラント・建築・土木構造物・医療の健全性監視ー，共立出版，1999.8.
- 2) 庄健介，山崎裕史，北村泰寿：重錘打撃試験による立

体ラーメン高架橋の損傷検知，土木学会論文集，No.756/VI-62，pp.33-47，2004.3.

- 3) 宇津野 秀夫，山極 伊知郎，遠藤 浩司，杉井 謙一：振動伝達関数法によるケーブル張力と曲げ剛性の同時推定法，構造工学論文集 Vol.44A，pp.853-860，1998.3
- 4) Anun Patjawit, Worsak Kanok-Nukulchai : Health monitoring of highway bridges based on a Global Flexibility Index, Engineering Structures, Vol.27, pp.1385-1391, 2005.4.
- 5) Juang, J.N. and Pappa,R.S. : An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and modal reduction, Journal of Guidance, control, and Dynamics, Vol.8, No.5, pp.620-627, 1985.