

# 動的応答解析に基づく近代木橋の経年による健全度の評価法

豊田 淳<sup>1</sup>・本田 秀行<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 サンコーコンサルタント(株) 技術第1部 (〒136-8522 東京都江東区亀戸 1-8-9)  
E-mail:a.toyoda@suncoh.co.jp

<sup>2</sup>正会員 金沢工業大学教授 環境建築学部環境土木工学科 (〒921-8501 石川県野々市市扇ヶ丘 7-1)  
E-mail:honda@neptune.kanazawa-it.ac.jp

経年による健全度を評価する場合、幾度かのモニタリング調査を実施して健全度を評価することは一般的な方法であるが、この方法では多大な労力と費用が必要になる。本研究は、今後の維持管理のための基礎研究として、実橋の実験で測定された実験値を用いた走行車両による対象橋梁の3次元動的応答解析を実施し、経年による振動特性と動的応答性状を解析的に検討することによって健全度を評価することが可能であるか検討する。この評価法は、一度の実橋での実験で得られたデータを用いて経年による健全度の評価を解析的に検討する方法である。

**Key Words:** modern timber bridge, soundness, evaluation method, vibration analysis

## 1. まえがき

近代木橋の保全に関して、健全度に対する検査や評価法を構築することは重要な課題になっている。一般的に、検査法に対しては超音波伝播速度や含水率などの非破壊試験、静的実験、動の実験などが行われている。また、評価法に関しては非破壊試験で測定されたデータに対しての定性的な評価、あるいは静的・動の実験で得られた測定データの検討に基づく構造性能から定量的な評価<sup>1)</sup>が行われている。特に、経年による健全度を評価する場合、幾度かのモニタリング調査を実施して健全度を評価することは一般的な方法<sup>2)</sup>であるが、この方法では多大な労力と費用が必要になる。

本研究の目的は、健全度の評価に基づく維持管理や保全法のための基礎研究として、実橋の実験で測定された実験値を用いた走行車両による対象橋梁の3次元動的応答解析を実施し、経年による振動特性と動的応答性状を解析的に検討することによって健全度を評価することが可能であるかの可能性を見出すことである。この評価法は、一度の実橋での実験で得られたデータを用いて経年による健全度の評価を解析的に検討する方法である。なお、本評価法は実験値と解析値とが良く一致している、すなわち対象とする近代木橋に対して実際の構造剛性を解析上で忠実に再現していることが基本的に必要である。

## 2. 対象橋梁

本研究での対象橋梁は、高知県梼原町に町産の木材の

有効活用、木材のPR、地域の活性化などを目的として2007年に架設された梼原橋で、約10年供用されている。構造形式では我が国で最大規模を誇る集成材中路式アーチ道路橋であり、縦桁と横桁を有する床組構造で橋軸と橋軸直角方向の荷重分配を考慮した橋梁である。なお、本橋は、地形上の理由から中路式アーチ橋が採用されている。本橋は竣工の直後に著者の本田ら<sup>3)</sup>によって構造性能を把握するための静的および動の実験が実施され、維持管理に対する初期値データが計測されている。対象橋梁の橋梁全景および床組構造を写真-1、写真-2に、側面図を図-1、平面図を図-2に、設計概要を表-1に示す。



写真-1 梼原橋の全景



写真-2 対象橋梁の床組構造

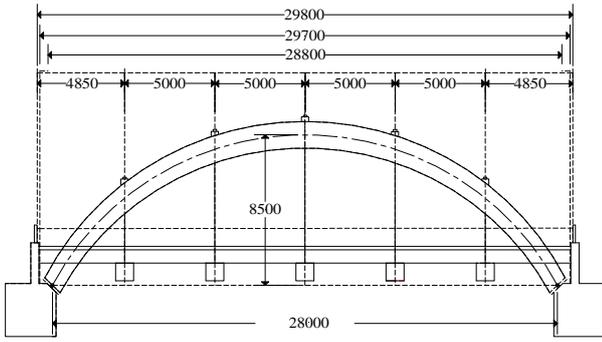


図-1 対象橋梁の側面図

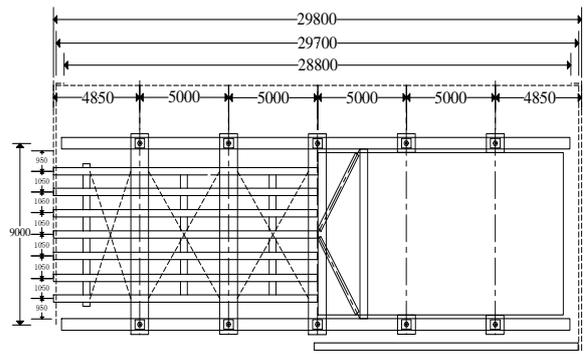


図-2 対象橋梁の平面図

表-1 対象橋梁の設計概要

架設年	2007年4月
橋種	道路橋
形式	2ヒンジ中路式アーチ橋
橋長	29.8m
アーチ支間長	28.0m
幅員	車道：5.0m、歩道：2.0m
設計活荷重	A活荷重
使用部材	主要部材：スギ集成材 床版：プレストレスト木床版
支承部	ゴム支承 (2.2cm)

### 3. 走行車両による3次元動的応答解析

本研究では、経年による対象橋梁の劣化実態を解析的に把握する。そこで、過去の研究<sup>3)</sup>で行った試験車両走行試験で測定された実験データを基に解析用のデータを作成し、大型車両の走行による本橋の3次元動的応答解析を行った。

#### (1) 車両—橋梁系の運動方程式

走行車両による橋梁の振動解析は、路面凹凸によって励起された車両振動が外力として橋梁に加わることに伴って橋梁振動が生じ、その橋梁振動を車両が受けて橋梁に外力を与えて走行する車両—路面—橋梁の連成振動の挙動を呈する。橋梁の各節点の変位ベクトルを $Z$ とすると、車両—橋梁系の運動方程式はダランベールの原理によって次式で表せる。

$$[M]\{\ddot{Z}\} + [C]\{\dot{Z}\} + [K]\{Z\} = \{F\} \quad (1)$$

ここに、 $[M]$ は橋梁の質量マトリックス、 $[C]$ は減衰マトリックス、 $[K]$ は剛性マトリックス、 $\{F\}$ は車両の走行によって橋梁に加わる外力ベクトルである。

#### (2) 対象橋梁の解析モデル

解析モデルは、床組構造を直交異方性格子構造として、床版を面(SHELL)要素、アーチ部材を含めたそれ以外の部材を棒(BAR)要素で構成して3次元に構造モデル化した。各節点の結合は6自由度としている。したがって、木材特有の異方性は床版のみに考慮している。また、高欄については非構造質量として考慮されている。図-3

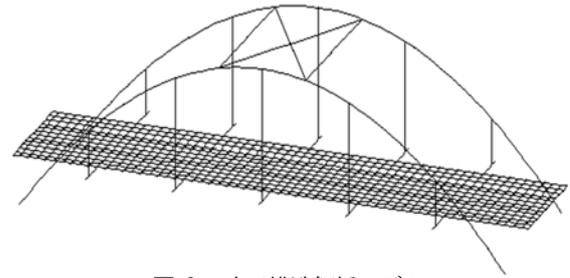


図-3 3次元構造解析モデル

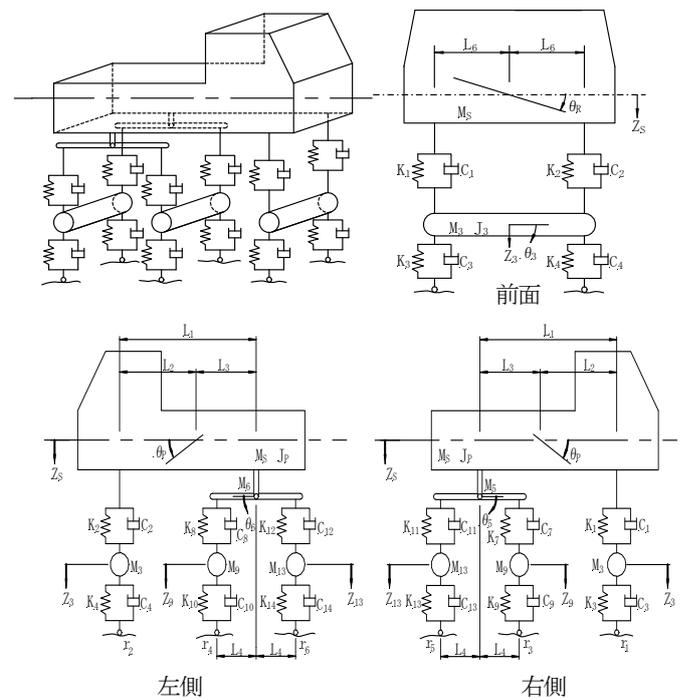


図-4 3次元11自由度系車両モデル

に3次元構造解析モデルを示す。

#### (3) 車両モデルと車両の運動方程式

##### a) 車両モデル

本研究で用いた大型車両の3次元11自由度系車両モデル<sup>4)</sup>を図-4に示す。大型車両の3次元振動の挙動に対して、バネ上部上下振動( $Z_3$ )、ピッチング振動( $\theta_p$ )、バネ下部各車軸の上下振動( $Z_3, Z_9, Z_{13}$ )、左右のトラニオン部でのピッチング振動( $\theta_3, \theta_6$ )、バネ上部のローリング振動( $\theta_r$ )、バネ下部各車軸のローリング振動( $\theta_3, \theta_9, \theta_{13}$ )の11

座標を考慮している。

**b) 車両の運動方程式**

大型車両の3次元の挙動および橋梁に加わる外力ベクトルを算出するために、車両の運動方程式を作成する必要がある。その運動方程式は式(2)で表される。

$$[M_v]\{\ddot{Z}_v\} + [C_v]\{\dot{Z}_v\} + [K_v]\{Z_v\} = \{F_v\} \quad (2)$$

ここに、 $[M_v]$ 、 $[C_v]$ 、 $[K_v]$ は車両の質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスであり、 $\{F_v\}$ は橋梁が車両に与える外力ベクトルである。11自由度系車両モデルに対する外力ベクトル $\{F_v\}$ の具体的な運動方程式は、以下の式で表わされる。

$$\ddot{Z}_S = [A\{(M_R\lambda_3\lambda_6)^2 - (M_P\lambda_3^2 + J_P)(M_P\lambda_6^2 + J_R)\} + B\{M_R^2\lambda_3\lambda_6^2 - M_P\lambda_3(M_P\lambda_6^2 + J_R)\} + C\{M_P M_R^2 \times \lambda_3^2\lambda_6 - M_R\lambda_6((M_P\lambda_3^2 + J_P))\}/EB \quad (3)$$

$$\ddot{\theta}_P = [A\{M_R^2\lambda_3\lambda_6^2 - M_P\lambda_3(M_P\lambda_6^2 + J_R)\} + B\{(M_R\lambda_6)^2 - M_G(M_P\lambda_6^2 + J_R)\} + C\{M_G M_R \lambda_3\lambda_6 - M_P M_R\lambda_3\lambda_6\}]/EB \quad (4)$$

$$\ddot{\theta}_R = [A\{M_P M_R\lambda_3^2\lambda_6 - M_R\lambda_6((M_P\lambda_3^2 + J_P))\} + B\{M_G M_R\lambda_3\lambda_6 - M_P M_R\lambda_3\lambda_6\} + C\{(M_P\lambda_3)^2 - M_G(M_P\lambda_3^2 + J_P)\}]/EB \quad (5)$$

$$\ddot{Z}_3 = 1/M_3\{k_1vk_1 - k_3vk_3 + k_2vk_2 - k_4vk_4 + c_1vc_1 - c_3vc_3 + c_2vc_2 - c_4vc_4\} \quad (6)$$

$$\ddot{\theta}_3 = 1/J_3\{\lambda_3(k_1vk_1 - k_3vk_3 - k_2vk_2 + k_4vk_4 + c_1vc_1 - c_3vc_3 - c_2vc_2 + c_4vc_4\} \quad (7)$$

$$\ddot{\theta}_5 = 1/J_5\{\lambda_4(k_7vk_7 - k_{11}vk_{11} + c_7vc_7 - c_{11}vc_{11})\} \quad (8)$$

$$\ddot{\theta}_6 = 1/J_6\{\lambda_4(k_8vk_8 - k_{12}vk_{12} + c_8vc_8 - c_{12}vc_{12})\} \quad (9)$$

$$\ddot{Z}_9 = 1/M_9(k_7vk_7 - k_9vk_9 + k_8vk_8 - k_{10}vk_{10} + c_7vc_7 - c_9vc_9 + c_8vc_8 - c_{10}vc_{10}) \quad (10)$$

$$\ddot{\theta}_9 = 1/J_6\{\lambda_6(k_7vk_7 - k_9vk_9 - k_8vk_8 - k_{10}vk_{10} + c_7vc_7 - c_9vc_9 - c_8vc_8 + c_{10}vc_{10})\} \quad (11)$$

$$\ddot{Z}_{13} = 1/M_{13}\{k_{11}vk_{11} - k_{13}vk_{13} + k_{12}vk_{12} - k_{14}vk_{14} + c_{11}vc_{11} - c_{13}vc_{13} - c_{12}vc_{12} + c_{14}vc_{14}\} \quad (12)$$

$$\ddot{\theta}_{13} = 1/J_{13}\{\lambda_6(k_{11}vk_{11} - k_{13}vk_{13} - k_{12}vk_{12} + k_{14}vk_{14} + c_{11}vc_{11} - c_{13}vc_{13} - c_{12}vc_{12} + c_{14}vc_{14})\} \quad (13)$$

ここに、式(3)から式(13)に記述されている変数を以下の式に示す。なお、車両は路面凹凸の変位である $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$ 、および路面凹凸の速度である $\dot{r}_1, \dot{r}_2, \dot{r}_3, \dot{r}_4, \dot{r}_5, \dot{r}_6$ によって振動が励起される。

$$M_G = M_S + M_5 + M_6$$

$$M_P = M_5 + M_6$$

$$M_R = M_5 - M_6$$

$$vk_1 = k_1(Z_S + \lambda_2x\theta_P - \lambda_6x\theta_R - Z_3 - \lambda_6x\theta_3)$$

$$vk_2 = k_2(Z_S + \lambda_2\theta_P - \lambda_6\theta_R - Z_3 - \lambda_6\theta_3)$$

$$vk_3 = k_3(Z_3 + \lambda_6\theta_3 - r_1)$$

$$vk_4 = k_4(Z_3 + \lambda_6\theta_3 - r_2)$$

$$vk_7 = k_7(Z_S - \lambda_3\theta_P - \lambda_6\theta_R - \lambda_4\theta_5 - Z_9 - \lambda_6\theta_9)$$

$$vk_8 = k_8(Z_S - \lambda_3\theta_P + \lambda_6\theta_R - \lambda_4\theta_6 - Z_9 + \lambda_6\theta_9)$$

$$vk_9 = k_9(Z_9 + \lambda_6\theta_9 - r_3)$$

$$vk_{10} = k_{10}(Z_9 - \lambda_6\theta_9 - r_4)$$

$$vk_{11} = k_{11}(Z_S - \lambda_3\theta_P - \lambda_6\theta_R - \lambda_4\theta_5 - Z_{13} - \lambda_6\theta_{13})$$

$$vk_{12} = k_{12}(Z_S - \lambda_3\theta_P + \lambda_6\theta_R - \lambda_4\theta_6 + Z_{13} + \lambda_6\theta_{13})$$

$$vk_{13} = k_{13}(Z_{13} + \lambda_6\theta_{13} - r_5)$$

$$vk_{14} = k_{14}(Z_{13} - \lambda_6\theta_{13} - r_6)$$

$$vc_1 = c_1(\dot{Z}_S + \lambda_2\dot{\theta}_P - \lambda_6\dot{\theta}_R - \dot{Z}_3 - \lambda_6\dot{\theta}_3)$$

$$vc_2 = c_2(\dot{Z}_S + \lambda_2\dot{\theta}_P + \lambda_6\dot{\theta}_R - \dot{Z}_3 + \lambda_6\dot{\theta}_3)$$

$$vc_3 = c_3(\dot{Z}_3 + \lambda_6\dot{\theta}_3 - \dot{r}_1)$$

$$vc_4 = c_4(\dot{Z}_3 - \lambda_6\dot{\theta}_3 - \dot{r}_2)$$

$$vc_7 = c_7(\dot{Z}_S - \lambda_3\dot{\theta}_P - \lambda_6\dot{\theta}_R - \lambda_4\dot{\theta}_5 - \dot{Z}_9 - \lambda_6\dot{\theta}_9)$$

$$vc_8 = c_8(\dot{Z}_S - \lambda_3\dot{\theta}_P + \lambda_6\dot{\theta}_R - \lambda_4\dot{\theta}_6 - \dot{Z}_9 + \lambda_6\dot{\theta}_9)$$

$$vc_9 = c_9(\dot{Z}_9 + \lambda_6\dot{\theta}_9 - \dot{r}_3)$$

$$vc_{10} = c_{10}(\dot{Z}_9 - \lambda_6\dot{\theta}_9 - \dot{r}_4)$$

$$vc_{11} = c_{11}(\dot{Z}_S - \lambda_3\dot{\theta}_P - \lambda_6\dot{\theta}_R - \lambda_4\dot{\theta}_5 - \dot{Z}_{13} - \lambda_6\dot{\theta}_{13})$$

$$vc_{12} = c_{12}(\dot{Z}_S - \lambda_3\dot{\theta}_P + \lambda_6\dot{\theta}_R - \lambda_4\dot{\theta}_6 - \dot{Z}_{13} + \lambda_6\dot{\theta}_{13})$$

$$vc_{13} = c_{13}(\dot{Z}_{13} + \lambda_6\dot{\theta}_{13} - \dot{r}_5)$$

$$vc_{14} = c_{14}(\dot{Z}_{13} - \lambda_6\dot{\theta}_{13} - \dot{r}_6)$$

$$A = k_1vk_1 + k_2vk_2 + k_7vk_7 + k_8vk_8 + k_{11}vk_{11} + k_{12}vk_{12} + c_1vc_1 + c_2vc_2 + c_7vc_7 + c_8vc_8 + c_{11}vc_{11} + c_{12}vc_{12}$$

$$B = \lambda_2(k_1vk_1 + k_2vk_2 + c_1vc_1 + c_2vc_2) - \lambda_3(k_7vk_7 + k_8vk_8 + k_{11}vk_{11} + k_{12}vk_{12} + c_7vc_7 + c_8vc_8 + c_{11}vc_{11} + c_{12}vc_{12})$$

$$C = \lambda_6(-k_1vk_1 + k_2vk_2 - k_7vk_7 + k_8vk_8 - k_{11}vk_{11} + k_{12}vk_{12} - c_1vc_1 + c_2vc_2 - c_7vc_7 + c_8vc_8 - c_{11}vc_{11} + c_{12}vc_{12})$$

$$EB = (M_P\lambda_3^2 + J_P)\{M_G \cdot (M_P\lambda_3^2 + J_P)(M_R\lambda_3)^2\} + (2M_P - M_G)(M_R\lambda_3\lambda_6)^2 - (M_P\lambda_6^2 + J_R)(M_P\lambda_3)^2$$

**c) 車両の諸元**

車両の諸元は、対象橋梁の実験<sup>3)</sup>で用いた196 kNのダンプトラック車を参考文献4)に基づいて作成した。

**(4) 路面凹凸モデル**

道路橋における3次元動的応答解析では路面凹凸の影響を考慮する必要がある。本解析に用いた路面凹凸データは、図-5に示した対象橋梁の実測で得られた路面凹凸データ<sup>3)</sup>である。この路面凹凸データを最大エントロピー法でスペクトル解析し、 $S_f(\Omega) = a\Omega^{-n}$ の指数関数に近似

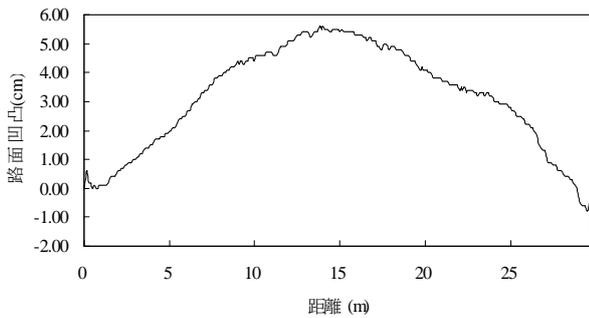


図-5 路面凹凸の形状

した. ここに,  $a$  は平滑度を表すパラメーターで,  $n$  は指数関数の勾配である. この  $a$  値に対して, 本田<sup>5)</sup> が開発した ISO に対応する路面状態の評価法から  $a=0.0051$ 、 $S_r(Q=1/2\pi)=0.123$  となり, 対象橋梁の路面は良好な路面状態と判断される.

(5) 動的応答解析法

動的応答解析法は, モーダルアナリシス法と直接積分法に分けられる. 本研究では, 振動モードごとに分解しない直接積分法による解析を実施している. 直接積分法は式(1)の微分方程式を厳密に計算する解法である.

a) 数値解析法

本研究では, 式(3)~式(13)を合わせて 12 元連立微分方程式を解く数値積分法として, Newmark's  $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ,  $\gamma=1/2$ ) を用いている. 数値積分の時間間隔は  $\Delta t=0.01$  秒を用い, 各積分時間間隔での仮定加速度と計算加速度の絶対値の差は 1/1000 の収束精度で解析を行った.

b) 減衰特性

本解析における減衰マトリックスは, Rayleigh 減衰<sup>6)</sup> を仮定している. Rayleigh 減衰は減衰が質量と剛性の 1 次結合の式(14)で表され, 式中のパラメーター  $\alpha$ ,  $\eta$  を式(15), (16)に示す. また, これらの減衰を用いる場合には, 各次の振動モードは直交することが条件とされている.

$$[C] = \alpha [K] + \eta [M] \quad (14)$$

$$\alpha = (h_1 f_1 - h_2 f_2) / (\pi (f_1^2 - f_2^2)) \quad (15)$$

$$\eta = 4\pi f_2 (h_2 - \pi f_2 \alpha) \quad (16)$$

ここに, 式中の  $f_i$  は橋梁の  $i$  次固有振動数,  $h_i$  は  $i$  次減衰定数である.

経年による減衰定数の低減率に関するデータは国内外を含めて皆無に近いので, 図-6 に示すように, 著者の本田研究室で 28 年経過した近代木アーチ道路橋に対する 3 回の健全度調査を行った結果<sup>7)</sup> を参考に, 経年による減衰定数の低減率を用いた.

(6) 解析法

最初に対象橋梁の 3 次元構造解析モデルに対する固有値解析を行った. 次に, 経年によって腐朽等による劣化を予測するために 5 年ごとの構造剛性の低減率を算出した. 具体的には, ヤング係数, せん断弾性係数, 減衰パラメーターの剛性と質量を低減させた. それらの結果を用い

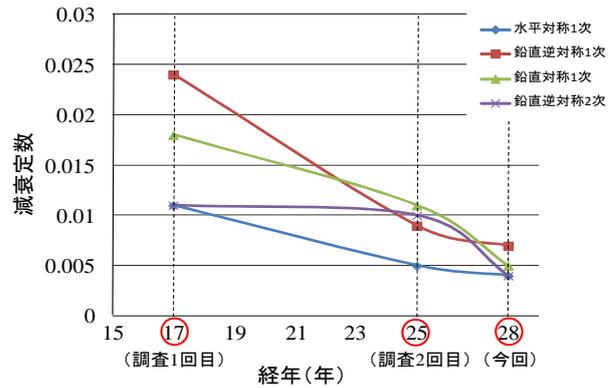


図-6 経年による減衰定数の低減率

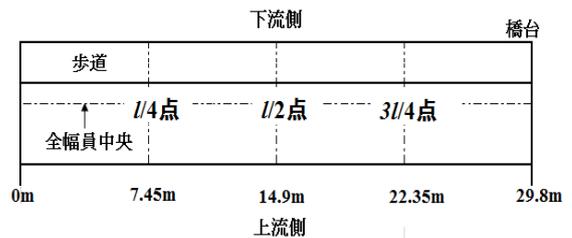


図-7 解析点

表-2 対象橋梁の振動特性と解析値

振動次数	振動モード	固有振動数 $f_i$ (Hz)		減衰定数 $h_i$ 減衰自由振動
		実験値	解析値	
1	アーチ水平対称1次	1.25	1.24	0.0133
2	鉛直逆対称1次	4.83	4.72	0.0062
3	鉛直対称1次	5.29	5.62	0.0065
4	ねじれ逆対称1次	7.8	8.04	0.0038

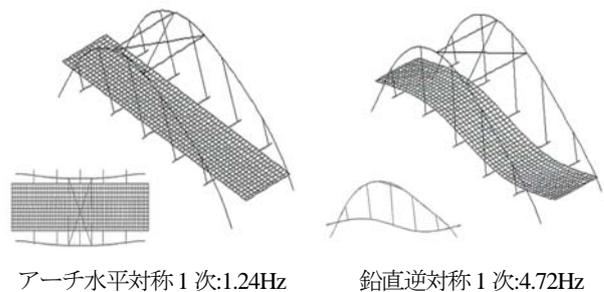


図-8 固有値解析による振動モード例

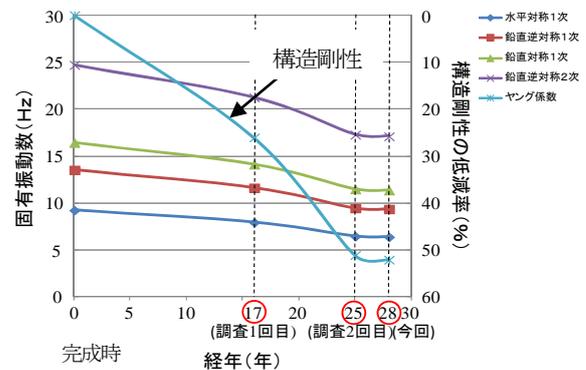


図-9 経年による固有振動数と構造剛性の低減率

て3次元走行車両による対象橋梁の3次元動的応答解析を行った。

車両の走行は、振動実験時<sup>3)</sup>と同様に、196kNの大型車両が下流側を10km/hで走行すると仮定して、完成時から5年ごとに30年経過までの動的応答解析を行った。

a) 解析点

3次元動的応答解析での解析点は、実橋実験<sup>3)</sup>と同様に1/4点、1/2点、3/4点とした。解析点を図-7に示す。

b) 固有値解析

対象橋梁に対する完成時の振動実験で得られた主な振動特性と固有値解析から得た解析値を表-2に示す。実験値と解析値の両者よく一致していることが認められる。図-8に固有値解析による振動モードの一例を示す。固有値解析での振動モードは振動実験(1.24Hz,4.72Hz)での振動モードと一致しており、対象橋梁に対する構造解析モデルの妥当性が確認できる。

c) 経年による構造剛性の低減率

経年による固有振動数の低下率を把握する基礎データは国内外を含めて皆無に近い。そこで、図-9に示すように、第二著者の所属する本田研究室で28年経過した近代木アーチ道路橋に対する3回の健全度調査を行った結果<sup>7)</sup>を参考に、経年による固有振動数の低減率を用いて橋梁全体に対する構造剛性(ヤング係数)の低減率を推定した。本解析では、この構造剛性の低減率を基に、対象橋梁に対する経年による固有振動数の低減を行った。なお、30年経過の低減率は現時点で得られていないので、構造剛性の低減率から予測した。

d) 経年による固有振動数の低減と振動モード

経年によって構造剛性が低減する場合、表-2に示した振動次数による振動モードの出現順が完成時と異なることが予測される。このことから、経年による固有振動数の性状と振動モードの出現順を検証するために、上述した経年による構造剛性の低減率を基に、完成時から30年経過までの固有値解析を行った結果を図-10に示す。この図から理解できるように、完成時から30年経過まで固有振動数は徐々に低減し、また振動モードの出現順に変化がないことを確認した。

4. 動的応答の波形性状

3次元動的応答解析では解析点1/4点、1/2点、3/4点で行ったが、各解析点での応答波形に特異な性状が認められなかったこと、アーチ橋では1/2点より1/4と3/4点の方が静的および動的応答が大きくなる特性から、代表として3/4点での完成時、20年経過、30年経過における応答変位を図-11、応答速度を図-12、応答加速度を図-13に波形例を以下に示す。

(1) 応答変位

図-11の応答変位の波形を見てわかるとおり、経年に

よりたわみ量が増大していくことが明らかである。その

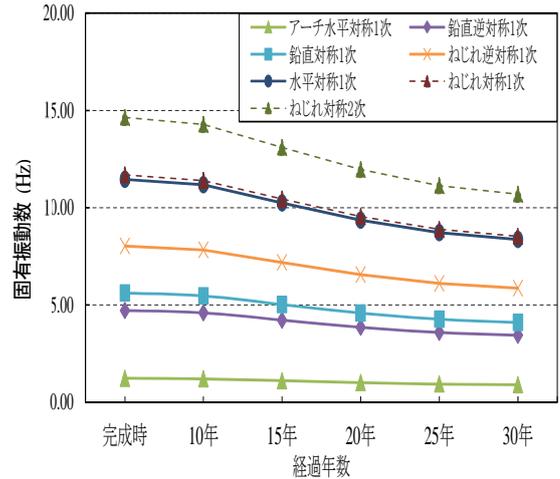


図-10 経年による固有振動数の低減と振動モード

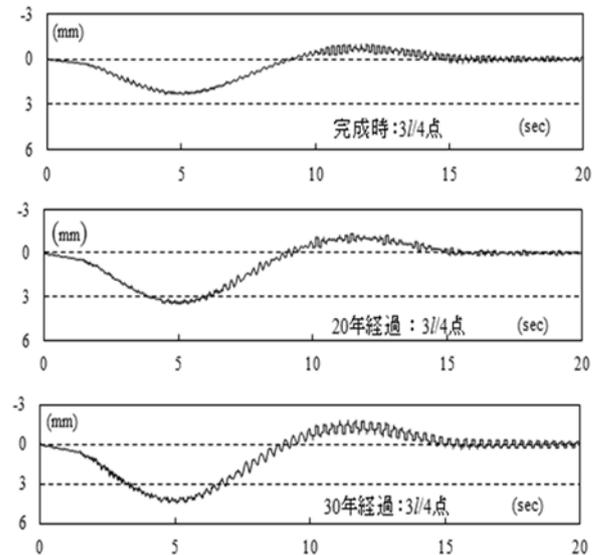


図-11 応答変位の波形例

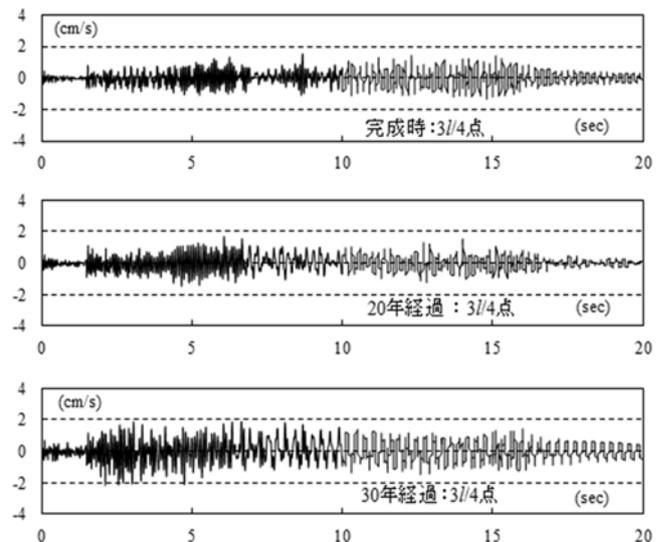


図-12 応答速度の波形例

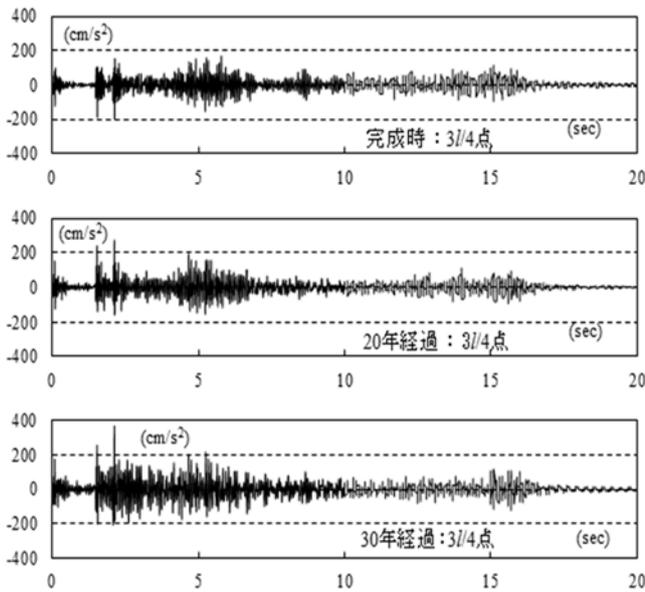


図-13 応答加速度の波形例

ため、経年による構造剛性の低減には応答変位が大きく影響を及ぼすと判断できる。

応答変位は、静的な変位と動的な振動成分が複合したものである。経年による構造剛性の低減によって動的な振動成分の変化より静的な変位の変化率が大きいことに起因している結果と考えられる。

(2) 応答速度と応答加速度

図-12, 図-13の応答波形を見てみると応答変位波形と同様に、経年によって徐々に応答波形が大きくなる傾向がある。本解析の当初、経年に比例して応答速度と応答加速度の波形が全体的に増大すると思われた。しかし、部分的に増減している箇所も見られるが、明確に増大するとは言えない。

応答速度と応答加速度の両者の振動成分は、式(1)の左辺第1項の慣性力である $[M]\{\ddot{Z}\}$ の中で、特に橋梁の質量 $[M]$ の影響が大きい傾向がある。しかしながら、定量的な評価は基礎データが皆無であるために困難であるが、30年程の経年による木材の質量の低減は大きくないものと考えられることから、慣性力 $[M]\{\ddot{Z}\}$ の影響が大きいことによって応答速度と応答加速度の波形は経年によって顕著な差異が生じない結果になっていると思われる。

(3) 動的応答の特性値による評価

前節に述べた各動的応答の波形性状だけでは、経年による構造劣化の定量的な推定が困難であった。そこで、各応答波形の振動性状に対する最大値と工学的な平均値と言われる実効値(2乗平均平方根)の両者の特性値で推定が可能か否かを検討した。そして、完成時から30年経過まで5年間ごとに計算した結果を図-14, 図-15, 図-16に示す。

図-14に示した応答変位の最大値と実効値の両特性値

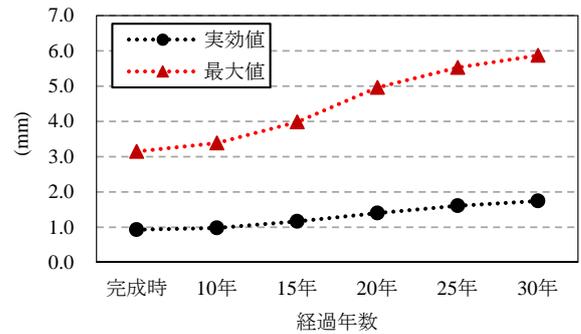


図-14 応答変位の最大値と実効値 (3/4点)

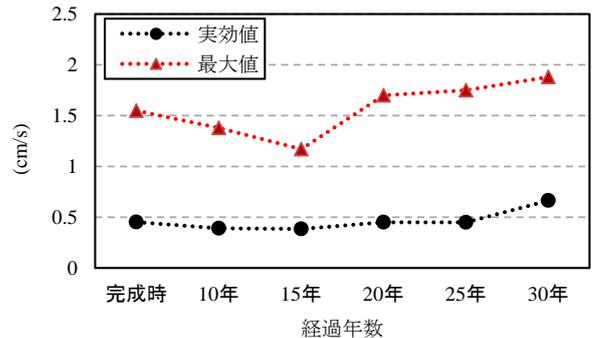


図-15 応答速度の最大値と実効値 (3/4点)

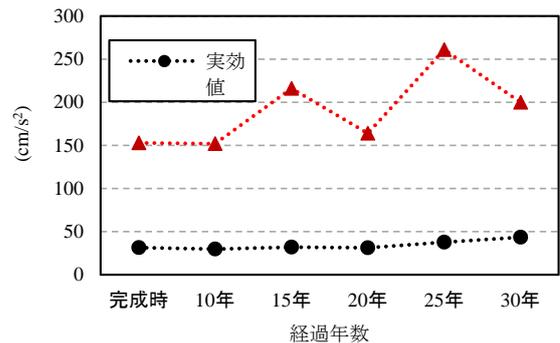


図-16 応答加速度の最大値と実効値 (3/4)

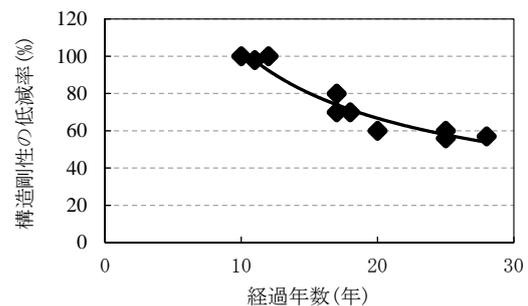


図-17 近代木橋の構造剛性の低減率

は、ともに経過年によって数値が徐々に大きくなっていること、最大値は実効値より経過年によって明らかに増大していることが認められる。また、30年経過でたわみ量が両特性値ともに約2倍となっていることがわかる。

図-15と図-16に示した応答速度と応答加速度の実効値に関しては、経年によってわずかに値が増大する傾向は認められるが、顕著な変動がないために定量的に傾向を明確に評価することは困難であると思われる。また、

応答速度と応答加速度の最大値に関しても、経年によって値が増大する傾向は認められるが、経年によって顕著な変動があるために定量的に傾向を明確化することは困難であると思われる。

#### (4) 健全度評価法

(2)節と(3)節で述べたように、動的応答解析から求めた応答速度と応答加速度の波形性状および最大値と実効値は、経年による構造剛性を定量的に推定することが困難であった。しかしながら、応答変位の最大値と実効値に関しては、経年による構造剛性を定量的に推定することが可能である一つの評価尺度になり得る知見を得た。そこで、応答変位の特性値から経年による構造剛性の低減に基づく健全度を評価する方法論を検討した。

図-17は、近代木橋の10橋に対して本田研究室が行った実橋での健全度調査と振動実験で得られた成果を統合化した経年による近代木橋の構造剛性の低減率を示している。完成時から10年程までは変化がないと予測ができ、経過年数が10年以降は徐々に構造剛性の低減が見られる。図-14で記述した応答変位の最大値あるいは実効値が、例えば完成時から25年の経過によって約1.6倍あるいは約1.8倍になる場合、図-17から構造剛性が約60%になり完成時から約40%低減していることが分り、健全度の評価としては厳しい状況にあることが言える。そして、そのような健全度の評価に対する維持管理や保全法として、今後の詳細点検や修繕工事等の施策を講じる必要性を提示して行くことが可能である。

以上のように、本研究での評価法は、近代木橋の構造剛性から経年による健全度を解析的に評価する方法であり、その評価に対する保全法の施策を検討して行くことである。なお、図-17に示した近代木橋の構造剛性の低減率に関しては、現時点で評価に資するデータが不足しているが、今後の基礎データの充実によって本評価法の評価精度を向上することが期待できる。

## 5. あとがき

本研究は、近代木中落式アーチ道路橋を対象に、まず経年による大型車両の走行による3次元動的応答解析法を定式化した。次いで、動的応答解析で得られた応答変

位、応答速度、応答加速度に対して振動の波形性状および最大値と実効値の両特性値から、経年による橋梁の構造低減率に基づく健全度の評価法を検討した。その結果、応答速度と応答加速度は波形形状や両特性値から定量的な経年による健全度の評価が困難であると思われるが、応答変位の両特性値に関しては定量的な経年による健全度の評価が可能である知見を得た。本研究で示した健全度の評価法は、一度の実橋での実験で得られたデータを用いて経年による健全度の評価を解析的に検討する方法である。

本研究の評価法を推進する場合、経年による固有振動数と減衰定数の低減率、経年による構造剛性の低減率が必要になるが、現時点では検討に資する基礎データが充足している状況にない。今後、これらの基礎データが充足することによって、本研究で示した経年による健全度の評価法の評価精度を向上することが可能である。

#### 参考文献

- 1) 石松和哉・二瓶友樹・本田秀行：上落式木車道橋の健全度評価、第4回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集、pp.59-64, 2005.
- 2) 本田秀行：25年経過した上落式アーチ木製車道橋の健全度と構造性能、木材利用研究論文報告集、No.12, pp.51-57, 2013.
- 3) 中田雄太・本田秀行・植野芳彦：木製中落式アーチ車道橋の構造特性、第7回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集、pp.13-20, 2008.
- 4) 本田秀行・橋野智洋・田中孝義：振動実験による20tfおよび25tf大型貨物車の振動特性と3次元車両モデルの諸元橋梁振動コロキウム'97論文集、pp.147-152, 1997.
- 5) Honda Hideyuki, Kajikawa Yasuo and Kobori Tameo: Spectra of road surface roughness on bridges, Proc. of the ASCE, Vol. 108, No.ST 9, pp. 1956-1966, 1982.
- 6) 山田 均・米田昌弘：土木系大学講義シリーズ 22 応用振動学、コロナ社、pp.65, 2003.
- 7) 篠田篤志・田中寛大：経年による石川県民の森かじか橋の構造性能と健全度調査、平成27年度金沢工業大学環境土木工学科プロジェクトデザインⅢレポート(卒業論文)、pp.1-77, 2016.

(2017.8.31 受付)

# **EVALUATION METHOD OF SOUNDNESS BY PASSED YEARS TO MODERN TIMBER BRIDGE BASED ON DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS**

Atsushi TOYODA and Hideyuki HONDA

The construction of evaluation method and inspection to soundness becomes an important problem for maintenance of modern timber bridges. Especially, it is a generalized method to evaluate soundness from the execution of field tests by several-time monitoring when the soundness by passing age is evaluated. However, a lot of labors and cost are needed in this method. As a fundamental study for the maintenance in the future, the purpose of this study is to evaluate soundness by passing age from the vibration characteristic and the dynamic response properties obtained by three dimensional dynamic response analysis used the measured data obtained by field test.