

木造逆アーチ形式歩道橋の振動実験および構造同定

Field vibration test and structure identification of wooden pedestrian inverted arch bridge

北海道大学工学部	○学生員	佐藤 雅一 (Masakazu Sato)
北海道大学大学院工学研究院	フェロー	林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
北海道大学大学院工学研究院	正 員	何 興文 (Xingwen He)
北海道大学大学院工学研究院	正 員	松本高志 (Takashi Matsumoto)

1. まえがき

天然素材を用いて建設される木橋は、一般的に自然環境と調和しやすく、良い景観を呈するとされている。材料として用いられる木材は多種多様であり、優れたデザイン性を持っていると言える。これは、色や模様、あるいは材料強度のような特性は種類によって大きく異なり、人々の欲求や制約条件によって使い分けることができるからである。木橋を建設することは、コンクリート橋や鉄橋の建設と比較すると、エネルギー消費量が少ないことも利点の一つとして挙げられる。木材はコンクリートや鋼とは違い、無限に再生産が可能な素材であり、環境への負荷が非常に少ない材料である。人類による環境破壊が懸念される近年において、このような材料を有効活用することは環境対策として意義があり、社会的なニーズに合致するものと考えられる。

しかし、我が国において木橋の設計基準等は未だに整備されておらず、部材の接合部や支持部についての詳細な規定、取り扱いが決まっていない。実務設計では建築の設計基準や諸外国の規定を用いているのが現状であり、構造物を我が国特有の環境に対応させるためにも、規定整備が求められる。

木材を使用する際には、菌類やシロアリによる腐朽劣化に注意しなければならない。腐朽菌は水分を多く含む部位に局所的に発生し、材料の劣化を引き起こす。このため、比較的にこまめに点検や修復を行う必要性があり、怠ってしまうと所定の供用年数を経ずして撤去あるいは崩落してしまう場合もある。ところで、木橋は前例の少ない加工材料や珍しい構造形式をとることから、定量的な点検方法についても未だ確立されていない。近年に見られる景気後退による予算不足から、橋梁の架け替えのような大規模な計画は難しく、点検や補修で長期にわたり供用されることが望まれる。

本研究では、北海道札幌市平岡公園の木造歩道橋である「梅の香橋」を対象に、現場振動実験に基づいた立体有限要素骨組モデルによる構造同定を行う。実験では人力加振法を採用し、得られた自由減衰振動から橋梁の固有振動数と振動モードを求める。立体骨組モデル解析において、木造アーチ橋が有する支持部、連結部などの不確実さについては、有力な最適化手法のひとつである遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm、以下 GA) を用いて取り扱いについて検討する。GA とは自然界における生物の遺伝や進化の過程を個体の選択、淘汰、遺伝子の交叉、突然変異によって再現し、これを簡単な数理モデルに置き換え、最適化を図るものである。本橋ではアーチクラウン部、ゲルバーヒンジ部、アーチ支持部、

2次部材接合部、補剛桁支持部、木材のヤング係数を離散的パラメータとして扱い、最適なパラメータの組み合わせを求める。個体の適応度の評価については、現場振動実験で得られた固有振動数を用いて評価することとする。

梅の香橋は架設から約 20 年経過しており、劣化が予想される。本研究は、木橋の不確定構造を明確にした上で、過去の同橋梁に関する研究で得られた固有振動数やパラメータを比較し、諸数値の変化を調べることを目的とする。

2. 木造アーチ橋の概要

研究対象とした橋梁は、札幌市豊平区の豊平公園内に建設された木造アーチ形式歩道橋（梅の香橋）であり、その一般図を図 1 に示す。本橋は平成 5 年 12 月に竣工され、供用からおよそ 20 年経過している。構造形式は 3 ヒンジゲルバー桁を補剛桁とする上路 3 ヒンジアーチ橋であり、橋長 70m、アーチ支間長 45m となっている。材料は、全体に輸入木材のエッキ材 (Ekki、別名ボンゴシ、またはアソベ) が使用されている。西アフリカの熱帯雨林に生育するエッキは、多くの珪素を含むため、硬くて比重も大きい事に加えて、耐摩耗性や耐腐食性、耐火性に優れている。エッキ材の外側は非常に硬いため、ドリフトピンで一体とした重ね梁方式が採用されている。アーチ主構は 8 層構造、補剛桁は 3 層構造となっている。

我が国において、木橋の設計基準は整備されておらず、部材の連結部等に取り扱いの不確実な構造が見られる。本橋では以下の 6 つの検討すべき部位を挙げ、これらの結合状態および支持条件について検討する。

(1) アーチクラウン部

アーチ主構クラウン部には曲げモーメントの低減を目指した内部ヒンジが挿入されている。実際は、8 層の重ね梁の中央に角材(ダボ)を挟み込む形式となっており、完全に曲げモーメントの抵抗が自由となる結合とはなっていない。このため、ヒンジ結合と剛結合の中間的状態にあると考えられる。

(2) ゲルバーヒンジ部

ゲルバーヒンジ部は主径間の補剛桁に側径間の補剛桁を重ね、ドリフトピンで締め付けた形式の構造となっている。この部分も完全なヒンジ結合とは言えず、ヒンジ結合と剛結合の中間的なものである。

(3) アーチ支持部

アーチ支持部はコンクリート台座の上にゴムマットを挟みその上に乗せられた状態となっている。橋軸外向きに動くことは出来ない。ヒンジ結合に近い状態にあると考えられるが、

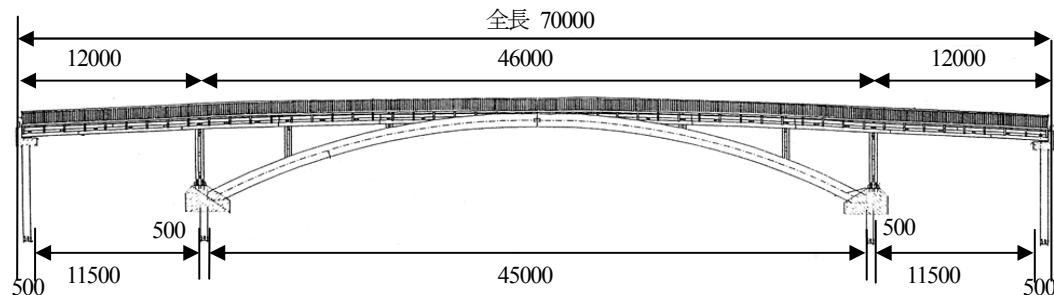


図1. 平岡公園アーチ形式歩道橋の一般図 (単位 mm)

支持条件が珍しいものであるため、検討が必要である。

(4) 2次部材結合部

2次部材（対傾材、横構、垂直材）の接合部について、ピンもしくはピンとボルトを用いて接合されている。我が国において、木橋は接合部の取り扱いについて明確な規定がない。

(5) 補剛桁支持部

補剛桁支持部はコンクリート台座の上に簡易的な沓に主桁の端部を乗せた状態となっている。固定していないため橋軸方向へ可動できるが、沓の摩擦やせん断抵抗を考えるとローラー支承とヒンジ支承のどちらとも言えない。

(6) 主材料のヤング係数

主材料のエッキ材については我が国の木構造計算基準・同解説には規定されておらず、様々な値が提唱されている。

3. 現場振動実験

(1) 実験方法と解析方法

本橋の固有振動性状を調べるため、人力加振による減衰自由振動実験を実施した。減衰自由振動実験では鉛直1次、鉛直2次、および水平1次固有振動数を対象とすることにした。上路アーチ形式の橋梁であることから、鉛直1次、鉛直2次固有振動数は、それぞれ逆対称、対称のモードに対応することが予想された。また、供用から20年程度経過していること

から、各固有振動数の低減も考えられた。

振動測定は、橋長を6等分するように5つの加速度計（測点1～5）を桁の下流側に配置して行った。鉛直加振において、人力加振によるねじれ振動が含まれているかどうかを確認するため、中央地点の上流側に1つの加速度計（測点6）を配置した。水平加振においては、測点6の加速度計を鉛直方向に配置し、大きな鉛直振動が生じていないかを確認した。

鉛直振動モードを把握するに際し、その形状を考慮して10名の人間が1/4地点、3/4地点および1/2地点で同時にジャンプし、橋梁を加振することにした。また、水平振動モードについては10名の人間が中央地点において高欄を叩き、十分振動していることを確認してから加振を止め、応答を測定した。

解析方法は、高速フーリエ変換(FFT法)によりフーリエスペクトル解析を行い、固有振動数を推定した。数値を推定する際に、便利のためハミング窓関数を用いた。

(2) 実験結果

図2と図3は、それぞれ1/4地点加振、3/4地点加振で得られた自由減衰振動を元に解析した測点2および測点4のフーリエスペクトルである。劣化を考慮してより低い固有振動数をとると、鉛直逆対称1次モードの固有振動数は2.686Hzと推測される。振動モード解析ソフトのバンドパスフィルターを用いて周辺の振動モードを表示させたところ、逆対称1次

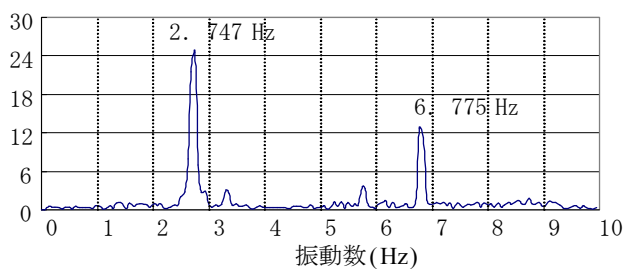


図2. 鉛直1/4加振動における測点2のフーリエスペクトル

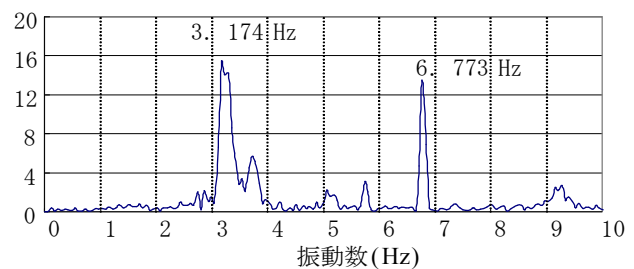


図4. 鉛直中央加振における測点3のフーリエスペクトル

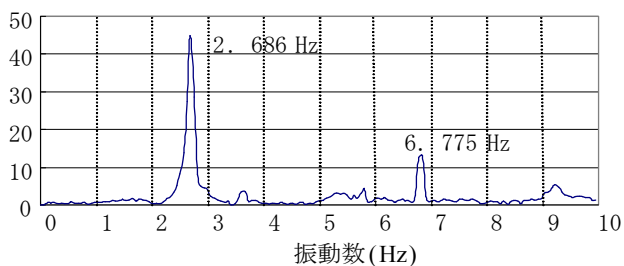


図3. 鉛直3/4加振における測点4のフーリエスペクトル

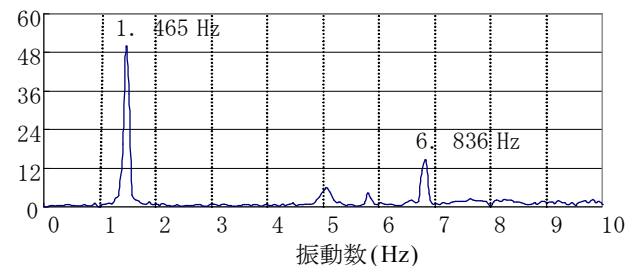


図5. 水平中央加振における測点3のフーリエスペクトル

表 1. 固有振動数とモード波形

振動モード	平成10年 振動数	平成24年 振動数	振動モード図
鉛直逆対称 1次モード	2.732	2.686	
鉛直対称 2次モード	3.215	3.174	
水平対称 1次モード	1.471	1.465	

表 2. 変数設計と離散値

gg1 (アーチクラウン部：剛度比)	0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0
gg2 (ゲルバーヒンジ部：剛度比)	0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0
gg3 (アーチ支持部：剛度比)	0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0
gg4 (2次部材：剛度比)	0.0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0
syu (補剛桁支持部水平ばね)	0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 0.99
eeey (ヤング係数)	0.95, 1.00, 1.05, 1.10, 1.15, 1.20, 1.25, 1.30

モードの波形が確認された。測点 3、6 の自由減衰波形は同位相であり、ねじれ振動は確認されなかった。

図 4 は、橋梁の中央地点で鉛直加振した際に、測点 3 で観測された減衰自由振動波形を元に解析したフーリエスペクトルである。ここから、鉛直対称 2 次の固有振動数は 3.174Hz と予想される。振動モード解析ソフトを用いて周辺の振動モードを表示させたところ、対称 2 次モードの波形が確認された。ねじれ振動は生じなかった。

全ての鉛直加振実験において、6.773Hz 付近の振動数が卓越していることが分かる。解析ソフトを用いて振動モードを描かせたところ、鉛直逆対称 1 次モードに似た波形が得られた。これは、アーチ主構部の鉛直 1 次モードであると考えられる。

中央地点で水平に衝撃を加えた実験について、測点 3 で観測された減衰自由振動波形から解析したフーリエスペクトルを図 5 に示す。これにより、水平対称 1 次の固有振動数は 1.465Hz と予想されたため、振動モード解析ソフトに表示させたところ、対称 1 次モードの波形が見られた。

今回の実験で得られた固有振動数と振動モード、および平成 10 年に本橋に対して行われた現場振動実験で得られた固有振動数を、表 1 にまとめた。

4. 解析モデルと GA によるパラメータ同定

(1) 解析モデル

橋梁のように、梁や柱で構成される構造物の振動解析では、平面あるいは立体の骨組構造物モデル化されることが多い。今回の研究では、図 6 に示すような次元立体骨組モデルを用いて固有振動解析を行うこととした。

研究対象の木造アーチ形式歩道橋は、接合部の取り扱いが

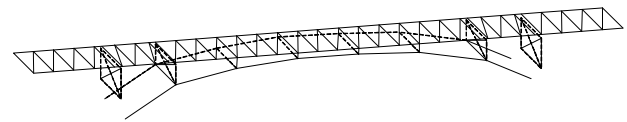


図 6. 逆アーチ橋の立体骨組モデル

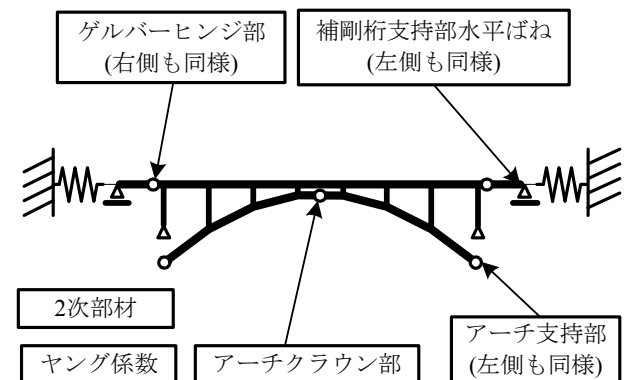


図 7. 不確定部位の詳細

不確実な部位がある。一般に構造物の固有振動解析では平面あるいは立体骨組にモデル化され、各点は軸力のみを伝達するヒンジ結合、または軸力、せん断力、曲げモーメントを伝達する剛結合として扱われるが、必ずしも完全な剛結合もしくはヒンジ結合とは限らず、中間的な結合状態にある場合も少なくない。本研究では半剛結の考え方を導入し、ヒンジ結合と剛結合の中間的な状態を、部材端部に作用する曲げモーメントに対応する線形な回転ばねとしてモデル化することとした。その度合を剛度比 γ で表す。 γ は 0.0 から 1.0 までの値をとり、 $\gamma=0.0$ で完全なヒンジ結合を、 $\gamma=1.0$ で完全な剛結合を示すものとする。本橋では、アーチクラウン部、ゲルバーヒンジ部、アーチ支持部、2次部材接合部に剛度比を定義した。補剛桁支持部はローラー支承とヒンジ支承の中間的な状態にあり、これをモデル化するに際し、水平方向に仮想ばね要素を挿入することで再現した。仮想ばね係数を K とし、 $K=0.0$ で完全なローラー支承を、 $K=1.0$ で完全なヒンジ支承を表すものとする。しかし、 $K=1.0$ で計算を行った場合、ばねの値が無限大になるという計算上の問題が生じてしまうため、1.0 の代わりに 0.99 を用いることとした。0.99 で計算を行ったものは、ほぼ完全なヒンジ支承となることが確認されている。

(2) 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA)

遺伝的アルゴリズム (GA) は、探索・学習・最適化の技術的手法として、様々な工学分野で注目されている。GA はダーウィンの自然淘汰説を基本概念とし、繁殖、淘汰、交叉および突然変異のプロセスを簡単な数理モデルに置き換え、これを最適化の手法として用いようとするものである。適応する問題の種類に関わらずその計算過程はほぼ一定で、得られた解の評価が可能であれば最適解を求めることができる。多数の離散値を有する最適化問題に GA を応用することは非常に有効であるとされている。GA の処理手順を図 8 に示す。

具体的な GA の適応方法について、交叉率 60%、突然変異率 10%、初期集団個数を 100 個体とした単純 GA を用いてい

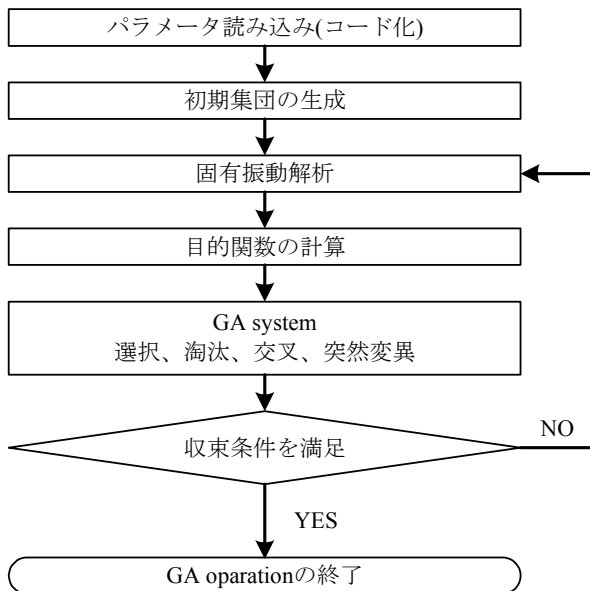


図8. 単純GAによる解析の流れ図

る。設計変数はアーチクラウン部、ゲルバーヒンジ部、アーチ支持部、2次部材の剛度比 γ (順に γ_1 γ_2 γ_3 γ_4 とする)、補剛桁支持部の仮想ばね係数 K 、およびエッキ材のヤング係数 E を離散値として取り扱い、それぞれ3ビットの遺伝子列によってコード化し同定を行うことにした。設定変数とそれぞれの離散値を表2に示す。

GAにおいて個体の適応度を評価する際に必要となる目的関数(OBJ)は、以下の式を用いた。

$$OBJ = \left| 1 - \omega_{v1} / \omega_{v1}^* \right| + \left| 1 - \omega_{v2} / \omega_{v2}^* \right| + \left| 1 - \omega_{h1} / \omega_{h1}^* \right|$$

ここで、 ω はそれぞれGAによって返されるパラメータを用いて固有振動解析をした際に得られた固有円振動数、 ω^* はそれぞれ現場振動実験で得られた固有円振動数を表している。

また、収束判定の方法は、ある世代における最良線列がその世代の個体数の1割となったところで収束したものとした。

(3) 解析結果

今回の解析で得られた最適なパラメータの組み合わせと、過去の研究で得られたパラメータの組み合わせを表3に示す。アーチクラウン部のパラメータは変化せず、わずかに回転を拘束するヒンジ結合に近い半剛結状態となった。ゲルバーヒンジ部、アーチ支持部、2次部材接合部のパラメータがそれぞれ大きな数値に変化した。これより、ゲルバーヒンジ部は完全な剛結合、アーチ支持部と2次部材接合部はヒンジ結合に近い半剛結状態となった。補剛桁支持部は大きな数値のパラメータをとっており、ほぼ完全なヒンジ結合として扱われた。ヤング係数は既往の研究で得られたパラメータより小さな数値のものが得られた。

表3. パラメータの最適値

	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	K	E
平成10年 パラメータ	0.1	0.0	0.0	0.05	0.7	1.26
平成24年 パラメータ	0.1	1.0	0.2	0.1	0.99	1.05

5. あとがき

現場振動実験では、鉛直逆対称1次モード、鉛直対称2次モード、水平対称1次モードが確認された。逆アーチ形式を有する本橋では、鉛直対称1次モードが存在しないことも確かめられた。いずれの振動モードにおいても、以前より小さい数値の固有振動数が現れる傾向にあったものの、撤去や崩落が危惧されるほど剛性に大幅な減少は見られなかった。

また、鉛直加振実験において、鉛直逆対称1次モードによく似た逆対称のモード波形が6.773Hz周辺で確認された。これはアーチ主構部分の振動モードと考えられ、桁とは別々に振動していた可能性がある。これを踏まえ、今後の実験方法、具体的には加振方法や加速度計の位置について更なる検討が必要である。

立体骨組モデルとGAを用いた解析では、取り扱いを不確定とした部位のパラメータは、変化しなかった部位もあったが、全体的に大きな値をとり、完全な剛結合もしくは剛結合に近い半剛結状態となった。ヤング係数は、既往の研究で同定された数値より小さい値となった。

本研究ではGAプログラムにおいて、ヤング係数のパラメータを低めに見積もって設定したが、エッキ材の経年劣化あるいは腐朽劣化による材料特性の変化を考慮し、その妥当性をさらに検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 林川俊郎・須志田健・小幡卓司・佐藤浩一：GAを用いた木造アーチ形式歩道橋の構造同定に関する研究、構造工学論文集 Vol.44A, pp1211-1218, 1998.3
- 2) 須志田健：GAを用いた木構造遊歩道橋の構造同定に関する研究、北海道大学大学院工学研究科土木工学専攻修士論文、1997
- 3) 壽崎貴彦：GAを用いた木造歩道橋の構造同定に関する研究、北海道大学大学院工学院北方圏環境政策工学専攻修士論文、2011
- 4) 浦 昭二：FORTRAN 77 入門 改訂版、培風館、1982
- 5) 石田良平・村瀬治比古・小山修平：パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用、森北出版、1997.7
- 6) 小堀 為雄・吉田 博：有限要素法による構造解析プログラム、丸善、1980