

## GA を用いる木造歩道橋の構造同定および健全度評価に関する研究

Structural identification and soundness evaluation of timber pedestrian bridges using genetic algorithm optimization

|                |        |      |                       |
|----------------|--------|------|-----------------------|
| 北海道大学大学院工学研究科  | ○ F 会員 | 林川俊郎 | (Toshiro Hayashikawa) |
| 北海道大学大学院工学研究科  | 正会員    | 何 興文 | (Xingwen He)          |
| 北海道大学大学院工学研究科  | 正会員    | 松本高志 | (Takashi Matsumoto)   |
| 札幌市建設局管理部道路維持課 |        | 須志田健 | (Ken Sushida)         |
| 北海道大学工学部       | 学生員    | 壽崎貴彦 | (Takahiko Suzuki)     |

## 1. まえがき

21 世紀の世界で環境との共生の重要性が認識されている。人類が生息する地球の環境が、その人類の活動によって破壊され、汚染されている。地球温暖化、砂漠化は深刻な状況を迎つつある。現在、すべての行為において環境と共生できるかどうかを問うことを求められている。橋の建設においても環境への配慮が厳しく求められるようになっている。木橋は、自然の素材である木材を用いるところから、鉄橋、コンクリート橋などと比較して周辺の自然に調和し、優れたデザイン性を持ち、素材の製造にエネルギーが不要で、建設時もエネルギー消費が少なく、廃棄時もリサイクル可能という環境負荷のもっとも少ない架橋形式である。こうした面からもっとも環境への負荷が少ない木橋が注目されている。環境面から見る以外に、工業面、経済面から見ても木橋が注目されている。工業面では、木材の加工技術が進歩したことにより、木材の持つ特性から派生する問題を解決できるようになった。経済面では、ほとんどの木橋が地方自治体により建設されるので、建設現地周辺の木材を使い、地域公益性への貢献、地域への経済的効果を果たしている。

しかし、日本では木橋の設計基準が整備されていないため、建築の基準<sup>1)</sup>や設計マニュアル<sup>2)</sup> および諸外国の規定を用いて設計をしてきた。木材は国産材だけでも何百種もあり、それぞれに基本的な性質が異なる上、有機材であるので、その生育、乾燥、製材、保存状況によってもその物理的性質がさまざまに変化する。このため、設計基準の整備が遅れている。日本では、木橋について架設例が少なく、研究報告例も少なく、設計基準の拠り所となるデータ数も不足している。そして木橋の需要が高まっているところから、木橋の設計基準の確立が急ぎ望まれている。現在、国土交通省では、歩道橋以外の木橋を認めていないが、その規制の緩和、国の事情に沿った基準の確立が求められている。その一方、鋼橋やコンクリート橋と比べ、木橋の耐久性が比較的に低く、供用期間中に構造物の劣化状況を監視し、その健全度を適切に評価する必要がある。

木橋は、上述のように材料的にも構造的にも不確定要素を含み、その不確かさを明らかにするために現場実験データが重要とされている一方、木橋構造の特性を理論的に解明するために、適切な解析モデルの確立も重要な課題である。そこで、本研究では、滝川市丸加高原内に

建設された 2 つの木造遊歩道橋の現場振動実験を行い、得られた固有振動数と固有振動モードを確定値とし、木橋の適切なモデル化について検討する。また、対象橋梁において建設 4 年後の平成 9 年 8 月 4 日に一回振動実験を実施し、健全時における構造特性の同定を行った<sup>3), 4)</sup>が、現在すでに供用後 16 年以上を過ぎていて木材の腐食や劣化などにより、建設時に比べ固有振動モード、固有振動数は変わっていると考えられるため、本研究では、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた構造同定により、その劣化状況や健全度の評価も行う。

本論文では、平成 21 年 6 月 4 日に行った現場振動実験で得られた対象橋梁の鉛直方向と水平方向における応答加速度のデータを処理し、現在における 2 つの木橋の固有振動数および振動モードを確認したので、その結果を報告する。また、今後行う GA による構造特性の同定や健全度評価に用いる手法についても紹介する。

## 2. 対象橋梁

本研究で対象とする木造歩道橋は、滝川市丸加高原内に平成 5 年に架設されたニールセン橋(やすらか橋、写真 - 1)と斜張橋(すこやか橋、写真 - 2)である。農林水産省の農業構造改善事業の一環として整備され、研修宿泊施設と多目的スポーツ広場をつなぐ役割を担っている。両橋はともにべいまつを主材料とし、橋長 30 m、幅員 1.5 m の比較的規模の小さい木橋であるが、周囲の自然景観によくとけ込んでおり、木橋の特徴が生かされている。また、ニールセン橋は上弦材が頂部で交差しており、アーチ橋としては珍しい構造形式を有している。建設概要を表 - 1、ニールセン橋の立体骨組みモデルを図 - 1、斜張橋の立体骨組みモデル図 - 2 にそれぞれ示す。



写真 - 1 やすらか橋  
(ニールセン橋)



写真 - 2 すこやか橋  
(斜張橋)

表 - 1 木造遊歩道橋の建設概要

| 名称   | やすらか橋                            | すこやか橋                            |
|------|----------------------------------|----------------------------------|
| 構造形式 | ニールセン橋                           | 斜張橋                              |
| 橋長   | 30m                              | 30m                              |
| 幅員   | 1.5m                             | 1.5m                             |
| 荷重   | 350kg/ m <sup>2</sup>            | 350kg/ m <sup>2</sup>            |
| 使用材  | べいまつ大断面<br>集成材 26 m <sup>3</sup> | べいまつ大断面<br>集成材 21 m <sup>3</sup> |
| 事業費  | 4400 万円                          | 3800 万円                          |

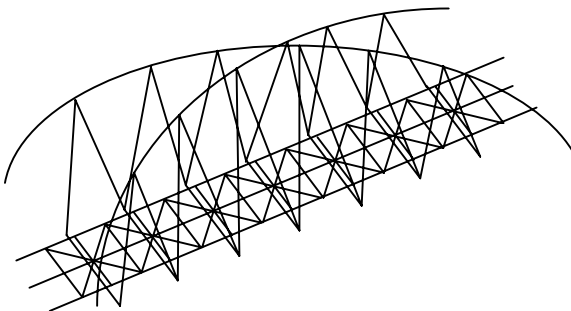


図 - 1 ニールセン橋骨組み図

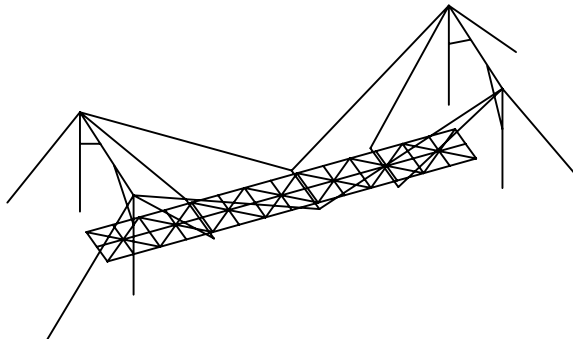


図 - 2 斜張橋骨組み図

### 3. 現場振動実験

現場振動実験は、以前建設後に行われた実験と同様に、各木橋の固有振動数および固有振動モードを推定するのが主な目的である。橋梁支間を6分割して幅員方向に2分割した各点に加速度計を設置する(図-3)。通常、基本振動モードを求める時は、支間距離を4等分する位置に加速度計を設置するが、今回は高次の振動モードまで求めるために支間距離を6等分する。加振方法は、減衰自由振動を起こさせる人力加振によって行い、衝撃を与える方法と励起させる方法の2つを用いる。多くの加振方法がある中、人力加振を選択したのは、特別な装置を必要とせず、比較的簡単に行うことができるからである。人力加振法は、歩道橋などで用いられ、十分な振幅が得られることが分かっている。加振位置は、支間距離の

1/4 地点、1/2 地点、3/4 地点(図-3 中矢印)のいずれとする。加振位置が3か所あるのは振動モードによっては特定の加振点では変位しなかったり、しにくいモードを他の加振点で発見しやすくするためである。鉛直方向と水平方向の2つの方向について実験を行い、測定点における振動加速度応答を測定した。

### 4. 振動実験結果

#### 4.1 振動データ処理

振動実験で得られた各計測点の応答加速度のデータをFFT変換して、卓越振動数を求める。固有振動数ごとに振動モードは決まっており、異なる振動数で同じモードが出ることはない。この性質を利用して固有振動数を推定する。生波形における振動成分は非常に複雑であるが、卓越振動数付近でバンドパスフィルター処理することにより、複雑な加速度波形の中から特定幅の振動数のみを抽出することができ、各計測点の振動の位相差から固有振動モードを求めることができる。この方法は、実測加速度応答中に複数の卓越した波が混在した状態、或いはノイズを含む場合等において、波形より直接振動モードを推定するのが困難な場合に有効である。

両橋における全ての観測点について応答加速度の波形を出しているが、例としてニールセン橋における1/4地点加振時の観測点2の応答加速度の波形を図-4に示す。さらに、応答加速度データをFFT変換してスペクトル図を求める。ここで、図-5に同じく例として1/4地点加振時の観測点2のフーリエスペクトル図を示す。また、上述方法より求めた振動モードを、ニールセン橋の鉛直振動モードを図-6に例示する。

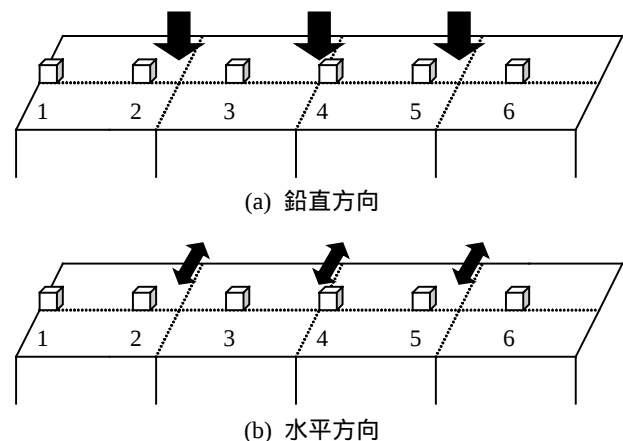


図 - 3 加速度計設置位置および加振点

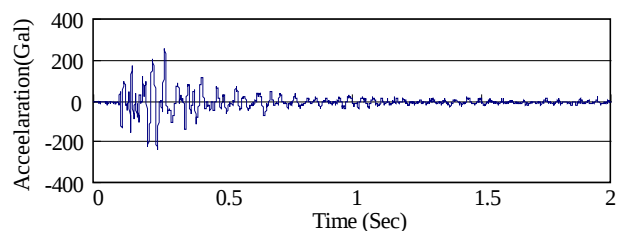


図 - 4 1/4 地点加振時観測点2の応答加速度

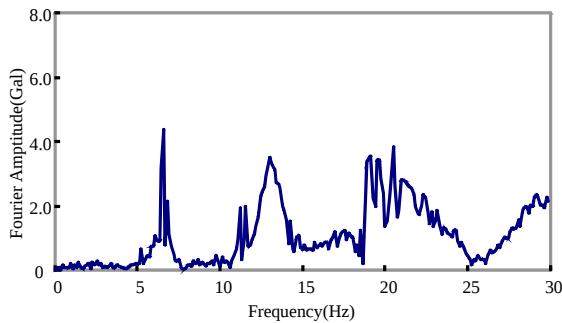


図 - 5 観測点 2 の応答加速度スペクトル図

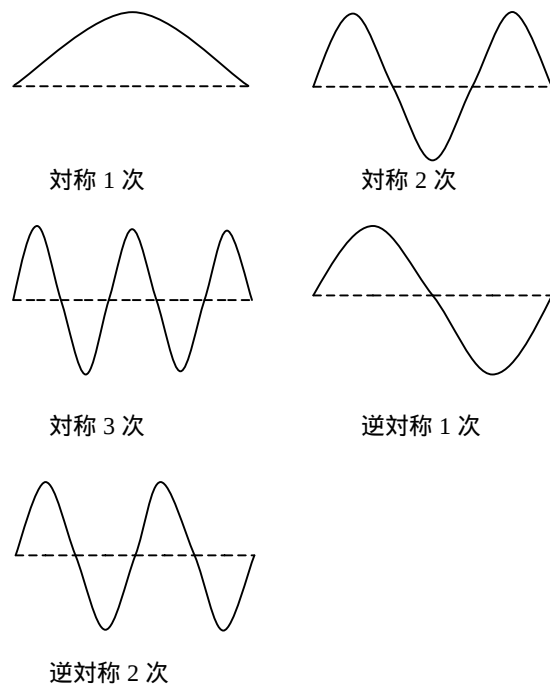


図 - 6 ニールセン橋鉛直振動モード図

表 - 2 ニールセン橋鉛直方向振動特性

| 振動モード     | 建設時      | 16 年後    | 減少率    |
|-----------|----------|----------|--------|
| 鉛直対称 1 次  | 10.13 Hz | 9.77 Hz  | -3.57% |
| 鉛直対称 2 次  | 14.53 Hz | 14.04 Hz | -3.35% |
| 鉛直対称 3 次  | 24.05 Hz | 23.81 Hz | -0.99% |
| 鉛直逆対称 1 次 | 6.96 Hz  | 6.72 Hz  | -3.42% |
| 鉛直逆対称 2 次 | 20.75 Hz | 19.54 Hz | -5.84% |

表 - 3 斜張橋鉛直方向振動特性

| 振動モード     | 建設時      | 16 年後    | 減少率     |
|-----------|----------|----------|---------|
| 鉛直対称 1 次  | 5.25 Hz  | 4.88 Hz  | -7.03%  |
| 鉛直対称 2 次  | 12.94 Hz | 11.60 Hz | -10.35% |
| 鉛直対称 3 次  | 23.07 Hz | 17.70 Hz | -23.28% |
| 鉛直逆対称 1 次 | 8.55 Hz  | 7.33 Hz  | -14.22% |

表 - 4 ニールセン橋水平方向振動特性

| 振動モード     | 建設時      | 16 年後    | 減少率     |
|-----------|----------|----------|---------|
| 水平対称 1 次  | 2.81 Hz  | 2.44 Hz  | -13.11% |
| 水平逆対称 1 次 | 5.86 Hz  | 4.88 Hz  | -16.71% |
| 水平逆対称 2 次 | 12.45 Hz | 12.21 Hz | -1.94%  |

表 - 5 斜張橋水平方向振動特性

| 振動モード     | 建設時     | 16 年後   | 減少率     |
|-----------|---------|---------|---------|
| 水平対称 1 次  | 3.05 Hz | 2.44 Hz | -20.05% |
| 水平逆対称 1 次 | 7.20 Hz | 6.11 Hz | -15.16% |

#### 4.2 歩道橋振動特性の変化

今回の実験結果より求められた固有振動数、振動モードを建設直後のそれらとの比較結果を、2つの橋梁の鉛直および水平方向について、それぞれ表 - 2、3、4、5に示す。同じ振動モードにおいて、建設時と比べ16年後の固有振動数は減少していることがわかった。また、各モードにおける固有振動数の減少の仕方が、すべて同じ割合で減少しているわけではないので、部材ごとに劣化具合が異なると思われる。

#### 5. 最適化手法による構造特性の同定

本研究では、現場振動実験で得られた固有振動数と固有振動モードを確定値とし、木橋の適切なモデル化を試みる。具体的には、対象橋梁の骨組み有限要素モデルを作成し、剛性や減衰等の構造動的特性を変化するパラメータとして設定し固有値解析を行い、振動数および振動モードの実験値と一致するような解析結果を与える構造特性を真の値として求める。構造特性パラメータが無数に存在するため、真の値を得ることが容易ではない。そのため本研究では、最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズム (GA) による構造特性の同定を行う。以下に本手法で用いる固有値解析および GA 最適化手法について紹介する。

##### 5.1 固有振動解析

構造物の動的応答は、構造物が受ける外力の性質(地震、風、走行車両など)と構造物自身の固有振動性状と減衰性状に依存している。固有振動性状とは、構造物の固有振動数およびこれに対応する固有振動モードであり、固有振動性状を求める方法を固有値解析という。

構造物の動的なつりあい条件式は D'Alembert の原理、Hamilton の原理或いは Lagrange の運動方程式によって誘導される。構造物の動的な平衡条件は仮想仕事の原理などの変分法から誘導される。運動を支配する微分方程式を解く方法としては、微分方程式論による理論解析と近似的な数値解析がある。理論解析では厳密解が求められ、数値解析では振動モード形状を仮定し、変分法による基礎微分方程式を直接解く方法である。さらに構造物の離散化によって数値解析を求める有限要素法がある。有限要素法による固有振動解析には、構造物の質量を毛

デル化する方法によって離散座標系による解と分布座標系による解とに分類できる。離散座標系は、構造物の質量を多質点系に離散化して解を求める近似解法で、離散化の方法により2つの方法がある。1つは部材要素の片側半分の質量と質量モーメントを両節点に等しく置換する集中質量法、もう1つは軸変形には1次式、および曲げ変形には3次式の変位関数を用いて部材要素の質量を分配する整合質量法である。分布座標系には、骨組構造物の質量や剛性等の力学的特性を連続的な分布量として扱い、厳密解を求める連続質量法がある。

一般に多自由度の運動方程式は次のように表される。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t)$$

ここで、 $M$  は質量マトリックス、 $C$  は減衰マトリックス、 $K$  は剛性マトリックス、 $x$  は変位ベクトル、 $f(t)$  は外力に関する時間関数である。

$f(t)=0$  のとき、つまり自由振動のとき減衰項を無視すると、運動方程式は次のようにあらわされる。

$$M\ddot{x} + Kx = 0$$

ここで、 $x$  が固有振動数 $\omega$ で調和振動すると仮定すれば、解は次の式であらわされる。

$$x(t) = (a \sin \omega t + b \cos \omega t)X$$

$a$  および  $b$  は任意の定数、 $X$  は振動モードである。

$M\ddot{x} + Kx = 0$  と  $x(t) = (a \sin \omega t + b \cos \omega t)X$  とを  $X$  について解き、これが有意な解を持つという条件から次の振動数方程式を得る。

$$\det |K - \omega^2 M| = 0$$

よって、上式を $\omega$ について解くことにより構造物の固有振動解析が可能となる。

種々の固有値解析法はあるが、本研究では相似変換に基づく方法であるハウスホルダー法を用いる。

## 5.2 構造同定に用いる GA 最適化手法

### 5.2.1 概念

近年、学習、最適化の手法として GA が注目されている。GA と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て、それを最適化の手法として用いようとするものである。一般に GA は従来の最適化手法のように解の微係数を用いる必要はなく、適応する問題の種類に関わらずその計算過程はほとんど同一であり、解析によって得られる解の評価ができれば有意な解を検索することが可能であるという特徴を有している。工学的問題において最適解が必ずしも明確ではないが解の評価は可能であるという問題は多数存在するため、このような問題に適応することは非常に適した手法である考えられる。工学的分野への適応に際しては、用いられる個々の数値を如何にして遺伝子列と呼ばれる数列に対応させるか、またどのような評価関数を設定して効率よく解を収束させるかが課題となる。

通常、基本的なGAの処理操作<sup>5) 6)</sup> は以下のような手順：(1)初期集団の設定、(2)適応度の評価、(3)選択、(4)交叉、(5)突然変異で行われる。

### 5.2.2 木橋構造同定における GA の応用

(1) 橋梁をモデル化し、構造的、もしくは材料的に不確実な部分にパラメータを設定する。ニールセン橋では、吊材ロッド伸び剛性低減率、横構ブレース材低減率、横桁剛度比、斜長橋では吊材ロッド伸び剛性低減率(側径間側)、吊材ロッド伸び剛性低減率(主径間側)、横構ブレース材低減率、横桁剛度比をパラメータ化する。

(2) 3 ビットの遺伝子列を用いてコード化。

(3) 初期集団個体数は 20、選択方法はルーレット選択、交叉率は 0.6 でランダム 1 点交叉、突然変異率は 0.1、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とする。評価関数を以下に示す。

$$OBJ = \left| 1 - \frac{\omega_{v1}}{\omega_{v1}^*} \right| + \left| 1 - \frac{\omega_{v2}}{\omega_{v2}^*} \right| + \left| 1 - \frac{\omega_{v3}}{\omega_{v3}^*} \right| + \left| 1 - \frac{\omega_{h1}}{\omega_{h1}^*} \right| + \left| 1 - \frac{\omega_{h2}}{\omega_{h2}^*} \right|$$

$\omega^*$  は現場振動実験より得られた固有振動値、 $\omega$  は GA システムにより返されるパラメータを用いて固有振動解析を行うことにより得られる固有振動値を示している。添え字  $v1, v2, v3, h1, h2$  は、それぞれ鉛直低次 1 次、2 次、3 次および水平低次 1 次、2 次をあらわす。

## 6. あとがき

本研究では、現場振動実験結果により建設直後および供用して 16 年以上経過した後の木造遊歩道橋の振動特性の比較検討を行い、部材の劣化による構造物特性の変化を確認した。また、最適化手法を用いる構造同定および健全度評価のアプローチを提示した。今後は、不確定構造特性をパラメータ化し、固有振動解析法および GA を用い解析プログラムを構築し、木造歩道橋の構造同定および健全度評価を行う。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：木質構造設計基準、1995。
- 2) (財)日本住宅・木材技術センター：木橋設計施工の手引き、1996
- 3) (社)土木学会：セミハイテン・タイロッドを有する木造歩道橋のパラメータ同定に関する研究、構造工学論文集、Vol.45A、1999。
- 4) (社)土木学会：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、1999。
- 5) (社)土木学会：離散的構造最適設計のための GA の信頼性向上に関する研究、土木学会論文集、No.471、1993。
- 6) (社)土木学会：GA におけるパラメータの効果に関する研究、構造工学論文集、Vol.41A、1995。