

I-43 GA を用いた木造アーチ橋の剛結度の推定

北海道大学工学部 フェロー 林川 俊郎
 北海道大学工学部 学生員 須志田 健
 北海道大学工学部 正員 小幡 卓司
 北海道大学工学部 フェロー 佐藤 浩一

1. まえがき

従来より橋梁には、鋼・PC・RC を主な材料として用いられている、しかし、環境への配慮が重要視される近年、木材を主材料とした橋梁が見直されてきている。特に公園などでは周囲の環境との調和を保ち、優れた景観を提供するという観点から、木構造遊歩道橋が次々と架設され、今後より多くの架設が予想される。

しかし、現在我が国において木橋の設計基準は①材料が多くの不確実な部分を有すること（ヤング係数、断面2次モーメントなど）、②接合部、支承部の明確な取り扱いが定められていないこと、③木構造遊歩道橋を対象とした報告例も少ないという理由から十分に確立されていないのが現状である。今後ますます増加するであろう木橋の設計および架設方法を確立することは、重要な課題となりつつある。

筆者らは、接合部、支承部の条件、および断面剛性を考慮した数値解析により求めた固有周期と実験値を比較することにより、適切なモデル化について検討を行ってきた。しかし、木橋特有の不確実な部分である接合部、支承部の取り扱い方や断面剛性の値は経験的に求めたものであり、その評価方法が依然として未解決のまま残されている。

そこで、本研究は木橋が有する不確実さを最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズムを用い推定するものである。具体的には、接合部、支承部の剛度比や断面剛性（ヤング係数）の値を離散的パラメータとして取り扱い、現場振動実験で得られた固有周期をもとに、実在する木造アーチ橋におけるこの不確実な部分を推定しようとするものである。

2. 木造アーチ形式遊歩道橋

本研究で対象とするのは、平成5年9月に札幌市豊平区の平岡公園内に建設された木造アーチ形式遊歩道橋である。本橋は図-1のように、3径間ゲルバー桁を補剛桁とするアーチ橋で、橋長70m、アーチスパン45mを有し、木造アーチ橋としては国内最大級のものである²⁾。使用した木材は、南アフリカの熱帯雨林で産出されるエッキ材である。このエッキ材は枝分かれしないため節が少なく、またケイ素を多く含むため、非常に硬く比重も1.0を越え、耐腐朽性、耐磨耗性、耐火性に優れた木材で

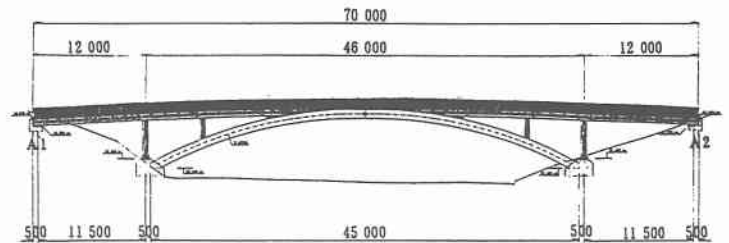


図-1 平岡公園木構造アーチ橋

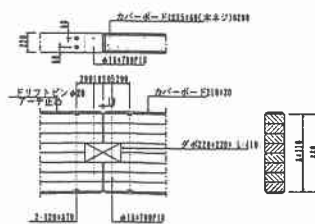


図-2.a 重ね梁
(アーチクラウン部)

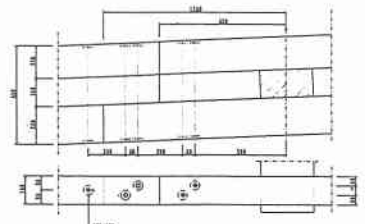


図-2.b 重ね透かし梁
(側径間部)

Estimation of Rigid stiffness of Wooden Arch Bridges by Using Genetic Algorithm
 by Toshiro HAYASHIKAWA, Ken SUSHIDA, Takashi OBATA and Koichi SATO

ある。アーチ主構と補剛桁には図-2.a, b に示すようにドリフトピンによって合成された、それぞれ8層および3層からなる重ね梁と重ね透かし梁という集成方法が用いられている。さらに、部材の添接には、断面中央に亜鉛メッキ鋼版を挿入して強度を高める方法が用いられている。また、アーチ主構の支持部は図-2.c のようにコンクリートの台座の上にゴムマットを挟み、補剛桁支持部は図-2.d のように橋台上の簡易的な沓に直接載せた構造になっている。

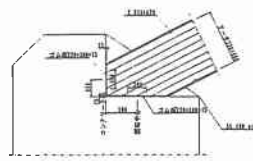


図-2.c アーチ主構支持部

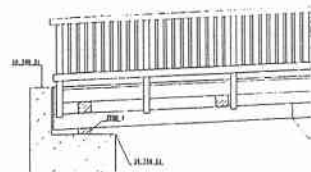


図-2.d 補剛桁支持部

3. 現場振動実験

現場振動実験では、人力加振法による減衰自由振動実験を行った。加振位置はアーチ支間の1/4点および1/2点とし、鉛直逆対称モード、鉛直対称モードに関する基本的な固有周期および減衰定数をFFT解析により求めた。実験結果を表-1に示す。また、センサーは2g用加速度計を用い、本橋が対称な構造物であることを考慮して、図-3に示すように片側半分に鉛直方向6カ所に配置した。

表-1 振動実験結果

	周期(sec)	減衰定数
鉛直逆対称1次	0.366	0.022
鉛直対称2次	0.311	0.019

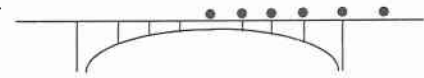


図-3 加速度計配置図

4. 木造アーチ橋のモデル化

本研究に用いた平面骨組モデルを図-4に示す。アーチ主構と補剛桁に用いられているエッキ材は、非常に硬く、接着剤がしみこまないため、集成材のように張り合わせることができない。そこで、十分な断面を確保するため、前述のようにドリフトピンによって合成された重ね梁と重ね透かし梁という集成方法が用いられている。補剛桁は3層、アーチ主構は8層構造になっており、不完全合成断面と考えられる。本研究においては、DIN に準じて算定した断面2次モーメントを用いて計算を行っている³⁾。表-2にアーチ主構と補剛桁の断面諸元を示す。なお() は完全剛性として計算された断面2次モーメントとの比を示す。



図-4 平面骨組モデル

表-2 断面2次モーメント (m⁴)

アーチ主構	1.0920 × 10 ² (87.4%)
補剛桁 (側径間)	2.8900 × 10 ² (78.9%)
補剛桁 (主径間)	1.9900 × 10 ² (54.3%)

図-4の●、◎、◆の部分は本研究において、次節で誘導する半剛結としてモデル化される接合部、支承部を表している。●、◎、◆は、前述したアーチクラウン部の重ね梁(図-2.a)、側径間部の重ね透かし梁(図-2.b)、アーチ主構支持部(図-2.c)にそれぞれ対応している。また、補剛桁支持部には、図-4に示すような仮想ばね要素を導入することにする。ここで、仮想ばね要素の伸び剛性を $K \cdot (EA/L)$ と表し、係数 K の変化によりローラ支承からヒンジ支承のモデル化を行う。つまり、 $K=0.0$ でローラ支承、 $K=\infty$ でヒンジ支承を表している。

5. 半剛結部のモデル化

図-5には曲げ部材の節点力(Y_i, M_i, Y_j, M_j)と節点変位($V_i, \theta_i, V_j, \theta_j$)が示されている。ここで、共役梁(Conjugate beam)法により、共役梁の両端のせん断力は実際の梁のたわみ角に等しいことから

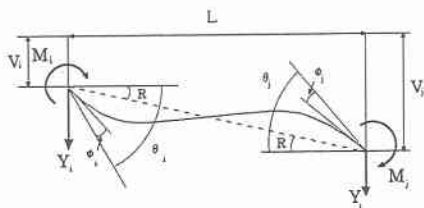


図-5 梁部材

$$\theta_i - \phi_i - R = \frac{M_i L}{3EI} - \frac{M_j L}{6EI} \quad \theta_j - \phi_j - R = \frac{M_j L}{3EI} - \frac{M_i L}{6EI} \quad (1.a,b)$$

となる。部材両端の半剛結の曲げに伴う回転を線形なばね定数でモデル化すると次のように表される。

$$\phi_i = M_i \lambda_i \quad \phi_j = M_j \lambda_j \quad (2.a,b)$$

ここで、 λ_i 、 λ_j は剛結度を表すパラメータである。従って、式 (1.a,b) を式 (2.a,b) にそれぞれ代入すると次のようになる。

$$(L + 3EI\lambda_i) \frac{M_i}{L} = \left[3EI \frac{(\theta_i - R)}{L} \right] + \left(\frac{M_j}{2} \right) \quad (L + 3EI\lambda_j) \frac{M_j}{L} = \left[3EI \frac{(\theta_j - R)}{L} \right] + \left(\frac{M_i}{2} \right) \quad (3a,b)$$

ここで、上式の左辺第一項の係数を以下のように定義する。

$$\gamma_i = \frac{L}{L + 3EI\lambda_i} \quad \gamma_j = \frac{L}{L + 3EI\lambda_j} \quad (4a,b)$$

この γ_i 、 γ_j 無次元量であり、ここでは剛度比と呼ぶことにする。

この剛度比は部材両端の剛結度を示す。 γ_i 、 $\gamma_j = 0$ は回転自由のピン結合に対応し、 γ_i 、 $\gamma_j = 1$ は回転を拘束する完全剛結に対応している。本研究では、ここで導出した剛度比を剛性マトリックス、および質量マトリックスに組み込み固有振動解析を行う⁴⁾。

6. GA によるパラメータの推定

遺伝的アルゴリズムは最近、学習、最適化の技術として注目されている。GA は生物進化（選択、淘汰、突然変異）の原理に着想を得た手法であり、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。したがって、従来からある最適化の手法のように解の微係数を用いる必要はない。また、工学的問題には最適解が必ずしも明確ではないが評価は可能であると言う問題は多数存在するため、このような多数の離散値を有する最適化問題に応用するには非常に適した手法と言うことができる⁵⁾。

本研究における具体的な GA の適応方法は、交叉率 0.6、突然変異率を 0.01 とした単純 GA を用いている。設計変数として、図-4 に示した●、◎、◆部の剛度比、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を離散値として取り扱い、それぞれ 3 ビットおよび 2 ビットの遺伝子列を用いてコード化を行った。各設計変数とその離散値を表-3 に示す。またヤング係数は表-4 に示す算定値を用いる。

目的関数：OBJ に関しては式(5)のように、実験値から得た 1 次および 2 次の固有値と数値解析値の誤差を用い、目的関数が最小となる各パラメータの値を求めた。

$$OBJ = |ECM^*(1) - ECM(1)| + |ECM^*(2) - ECM(2)| \quad (5)$$

ここで、 $ECM^*(1)$ 、 $ECM^*(2)$ は現場振動実験より得られた固有周期から算出した固有値である。 $ECM(1)$ 、 $ECM(2)$ は GA システムから返される各パラメータを用いて固有値解析を行うことにより得られる値を示している。() 内はモード次数を表している。図-6 には GA による解析の流れが示されている。目的関

表-3 設計変数と離散値

$\gamma_{\bullet}$	0.0,0.1,0.2,0.3,0.5,0.6,0.8,1.0
$\gamma_{\circ}$	0.0,0.1,0.2,0.3,0.5,0.6,0.8,1.0
$\gamma_{\blacklozenge}$	0.0,0.1,0.2,0.3,0.5,0.6,0.8,1.0
K	0.0,0.1,0.2,0.3,0.5,0.6,0.8,1.0
E	1.26,1.64,1.73,1.89($\times 10^6$ ton/m ²)

表-4 ヤング係数の算定値($\times 10^6$ ton/m²)

1.26	BS による最小値
1.64	都立センターによる最大値
1.73	DIN による値
1.89	BS による最大値

パラメータの読み込み（コード化）

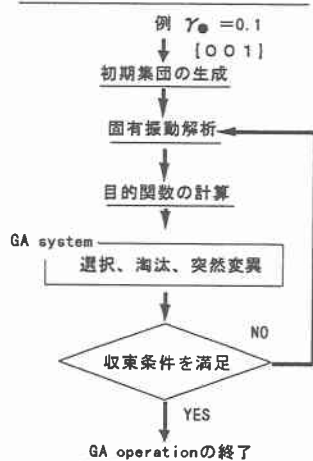


図-6 解析の流れ図

数に固有値を用いたのは、固有周期を用いるよりも目的関数の値を大きくし、解の収束性が高められるという理由からである。初期集団の個体数は 100 個体、交叉についてはランダム一点交叉法を用いている。収束条件としては、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するものとする。

7. 数値計算結果

以上のような解析手法により、収束計算を行ったところ、以下のようなパラメータの値を得た。

$$\gamma_{\bullet}=0.2 \quad \gamma_{\circ}=0.3 \quad \gamma_{\blacklozenge}=0.2$$

$$K=0.1 \quad E=1.73$$

$$OBJ=0.87$$

これらのパラメータの値を用いて数値解析をおこなった結果、実験に即した振動モードが図-7 のように得られることが確認された。

得られた鉛直 1 次逆対称モード $T_1=0.36578(\text{sec})$ 、および鉛直 2 次対称モード $T_2=0.3112(\text{sec})$ の固有周期は実験値にかなり近いことが認められる。

各パラメータの値は、重ね梁（アーチクラウン部）の剛度係数が 0.2、重ね透かし梁（中央径間、側径間境界部）が 0.3、アーチ主構支持部が 0.2 となり、剛結と言うよりもむしろ、ヒンジに近い状態であるということがわかった。本橋の支承部、および接合部は完全剛結とは考えられず、得られたパラメータの推定値は妥当な値であると考えられる。

補剛桁支持部の仮想ばね係数は、 $K=0.1$ となった。これは、ローラー支承に $0.1 \cdot (EA/L)$ なる水平ばねを付加したことを意味している。補剛桁支持部は、図-2.d に示すようにコンクリート台座の上に桁端部を置いた状態となっているため橋軸方向には移動が可能であり、ローラー支承に近い状態となり、この値は台座と桁との摩擦係数によるものと考えられる。本研究では各部材の断面 2 次モーメントを DIN により算出している。推定された木材のヤング係数は DIN による算定値 $1.73 \times 10^6 \text{ (t/m}^2\text{)}$ になることが確認された。

8. あとがき

本研究は GA を用いて、木造アーチ形式遊歩道橋の動的な特性に大きな影響を与える、接合部、支承部の取り扱い、およびヤング係数の推定を行ったものである。その結果、振動実験値に近い、固有周期、および振動モードを求めることができた。また、離散的な変数を含む最適設計の手法として、GA の有効性も確かめることができたものと考えられる。

木橋の不確実な部分の推定には、本研究で行った固有周期から推定する方法以外に、静的載荷実験による変位から推定する方法も考えられる。今後、静的載荷実験から得られたデータをもとに数値計算を行い、同様なパラメータの値を得られるか検討が必要である。

最後に、数値計算にあたりプログラムを提供していただいた、北海学園大学杉本博之教授にここに記して深い謝意を表する次第である。

<参考文献>

- 1) 林川俊郎、関康一郎、及川昭夫、小幡卓司、平沢秀之、佐藤浩一：木造アーチ形式遊歩道橋のモデル化と固有振動解析について、土木学会第 50 回年次学術講演概要集第 1 部、pp.1030-1031、1995。
- 2) 北原良紀：札幌市平岡公園の木造アーチ橋（人道橋）、橋梁、vol.29、No.6、pp.30-34、1993。
- 3) 鍵和田巧、小幡卓司、三品吉彦 他：木造アーチ形式人道橋の振動および静的載荷実験について、土木学会第 49 回年次学術講演概要集第 1 部 A、pp.356-357、1994。
- 4) 林川俊郎、須志田健、平沢秀之、佐藤浩一：アーチ橋の固有周期に与える半剛結の影響について、土木学会北海道支部論文報告集、第 52 号(A)、pp.362-365、1996。
- 5) 杉本博之、鹿汗腿、山本洋敬：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/I-24、pp.67-76、1993。



図-7.a 鉛直逆対称 1 次モード



図-7.b 鉛直対称 2 次モード