

I - 66

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 フェロー 林川 俊郎

北海道大学大学院工学研究科 学生員 須志田 健

北海道大学大学院工学研究科 正 員 小幡 卓司

北海道大学大学院工学研究科 フェロー 佐藤 浩一

1. まえがき

近年、オートキャンプ場や公園内の遊歩道等で木橋が多く架設されるようになってきた¹⁾。木橋は、その材料に天然素材を用いているため、鋼橋、コンクリート橋等に比較して自然環境とのなじみが良く、優れた景観を呈する場合が多い。また、木材は鋼、コンクリート、アルミニウム等の工業材料に比べ、エネルギー消費量が小さく²⁾、無限の再生産が可能な資源であり、「地球に優しい」材料とすることができる。木橋は林産業等の地域産業の振興、社会の土木構造物への要求の多様化、地球的な規模での資源の有効的活用という面からも見直され、復活されつつある。

しかしながら、我が国においては木橋の設計基準が整備されておらず、現在の実務設計においては、建築の設計基準³⁾や諸外国の規定を用いて設計が行われているのが現状である。また、鋼橋、RC橋、PC橋等では、新しい構造形式や材料を採用した場合には、その橋梁の安全性や設計値の妥当性の検証などの観点から、橋梁完成後の現場実験が数多く行われてきたが、木橋に関しては静的たわみ実験および動的振動実験が極端に少ないことも現実である^{4), 5)}。そこで、本研究では、滝川市内丸加高原内に建設された2つの木構造遊歩道橋の現場振動実験を行い、得られた固有周期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を行うものである。具体的には、木橋が有する不確実な部分を離散的パラメータ（ロッド伸び剛性、ブレース材の伸び剛性、接合部の剛度比）として取り扱い、有効な最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm：以下GAと称す）^{6), 7)}を用いることにより、構造同定を行うものである。

2. 木構造遊歩道橋

本研究で対象とする木橋は、滝川市内丸加高原内に、平成5年に架設されたべいまつを主材料とするニールセン橋（やすらか橋、写真-1）、および斜張橋（すこやか橋、写真-2）である。両橋ともに橋長 30m、幅員 1.5m と比較的規模の小さな木橋であるが、周囲の自然景観によくけ込んでおり、木橋の特徴が生かされている。特に、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。

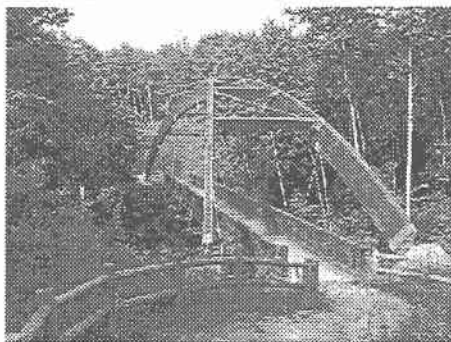


写真-1 ニールセン橋（やすらか橋）

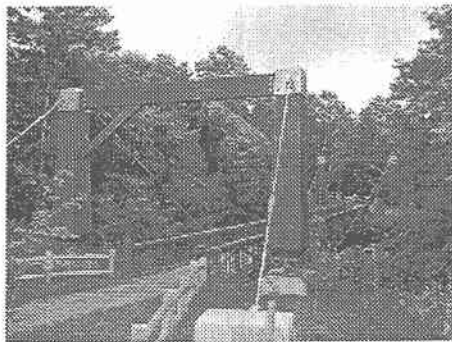


写真-2 斜張橋（すこやか橋）

Structural Identification of Wooden Pedestrian Bridges by Using Genetic Algorithm
by Toshiro HAYASHIKAWA, Ken SUSHIDA, Takashi OBATA and Koichi SATO

3. 現場振動実験

現場振動実験では、人力加振による減衰自由振動実験を行った。スパン 1/2 点、1/4 点において、人力による鉛直加振、水平加振、および偏心加振により、それぞれ鉛直振動、水平振動、およびねじり振動の固有振動数を測定した。図-1a, b, c はそれぞれ、鉛直、水平、ねじり振動モードに対応する加速度計の配置図、および加振位置を示している。各加速度計により測定された応答加速度波形から FFT 解析を行い、固有振動数の算定を行ったところ、ニールセン橋、および斜張橋ともに得られた応答フーリエスペクトル曲線は非常に複雑になり、明確に各振動モードを推定することは困難であった。

そこで、本研究はバンドパスフィルター⁹⁾を用いて固有振動モードの推定を行った。バンドパスフィルターはノイズ等を含んだ信号を処理し、必要な情報を取り出す有効な手法の一つとして知られている。本研究においてはフーリエ級数に基づいた FIR 型バンドパスフィルターを用い、あらかじめ FFT 解析により予想された各振動モードの振動数区間で、実測応答加速度波形に対しフィルターをかけることにより複雑な応答加速度波形の中から特定幅の振動数の波形のみを取り出すことを試みた。

図-2a, b, c にニールセン橋の支間 1/4 点で鉛直に加振した場合の測点 2、測点 3、および測点 4 におけるフーリエスペクトルを示す。これらより、測点 2、および測点 4 では 6.958(Hz) 付近にピークが見られるのに対し、測点 3 においてこの近傍では卓越した振動数が見られないことがわかる。このことより、6.958(Hz) 付近において、測点 3 (スパン中央) を節とする振動モードが現れていることが推察される。そこで、測点 1～5 の実測応答波形に対し 6.0(Hz)～8.0(Hz) の幅でバンドパスフィルターをかけ、6.958(Hz) 近傍の波形だけを取り出したものを図-3 に示す。測点 3 を節として、測点 2, 4 が逆位相で振動し、さらに測点 1, 2 および測点 4, 5 がそれぞれ同位相で振動しているのがわかる。これらより 6.958(Hz) が逆対称 1 次モードであることが確認される。同様にして、各振動モードについて解析を行うことにより、ニールセン橋と斜張橋について推定された振動数を表-1 にまとめて示す。

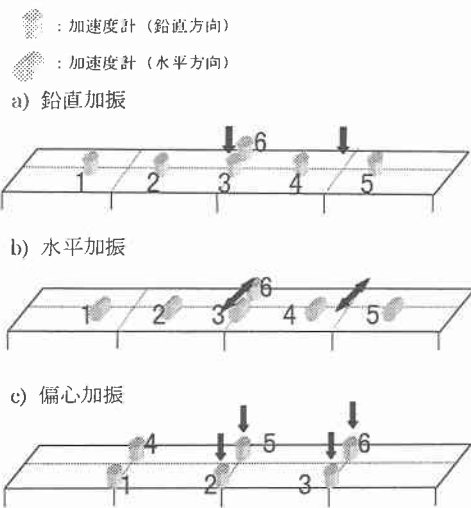


図-1 加速度計配置図と加振位置

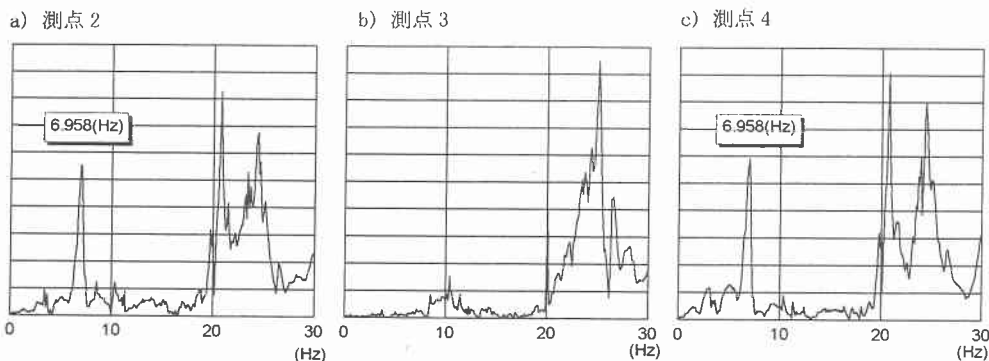


図-2 鉛直 1/4 点加振フーリエスペクトル

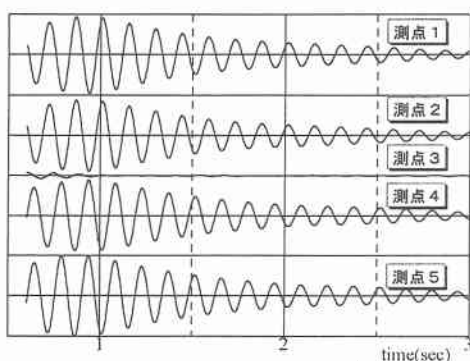


図-3 フィルター処理した応答加速度
(バンド幅：6.0～8.0(Hz))

4. 解析モデル

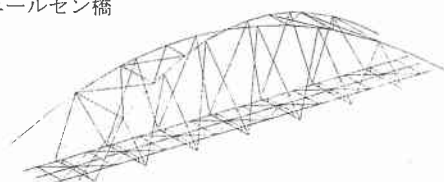
図-4a, b に本研究に用いた立体骨組解析モデルを示す。集成材の弾性係数は、木構造計算基準³⁾より 1.0×10^5 (kgf/cm²)とした。各モデルの節点数および部材数は、ニールセン橋については節点数 115、部材数 221、斜張橋については節点数 86、部材数 115 とした。両橋の吊材にはセミハイテンタイロッドが用いられている。ニールセン橋にはφ25、斜張橋には側径間側φ42、主径間側φ32 のものが用いられている。従来、斜張橋などに用いられるケーブル部材などは内部に高い引張応力が生じるために張力管理がなされている。しかし、両橋に用いられているセミハイテンタイロッドは架設時に張力管理が行われておらず、わずかではあるが遊んだ状態となっている。これら内部応力が低いロッドのモデル化は従来のものと比較して難しいものと考えられる。図-5 に両橋の床組のモデル図を示す。

横構には、ニールセン橋にはφ24、斜張橋にはφ27 のブレース材が用いられている。吊材のロッドと同様に、横構のブレース材は張力管理がなされていないものである。現場振動実験により得られた張力を考慮した固有振動解析を行ったところ、ロッドの張力の影響は比較的小さいことから、軸力のみを伝えるトラス部材としてモデル化することとした。斜張橋などのケーブル部材ではその内部応力が低い場合見かけ上のヤング率を低減することが知られている¹⁰⁾。そこで、本研究ではセミハイテンタイロッド、およびブレース材の伸び剛性を低減するものとする。また、横桁と主桁の接合部としてはL形板を継手として、ボルトで締め付けた状態となっている。横桁と主桁の接合部は、剛結とヒンジ結合の中間を表す半剛結としてモデル化を行う。なお、半剛結の剛結度は剛度比パラメータで表し¹¹⁾、剛度比は0.0でヒンジ結合、1.0で剛結合を表すものである。本研究では、吊材のロッド、床組の横構のブレース材、および横桁と主桁の接合部を不確実なものとして取り扱い、GAにおける離散的パラメータとして木橋の構造同定を行うものである¹²⁾。

表-1 固有振動数の実験結果

振動モード	ニールセン橋 (Hz)	斜張橋 (Hz)
鉛直対称1次	10.010 ～ 10.498	5.127 ～ 5.249
鉛直対称2次	14.526 ～ 14.771	12.939
鉛直対称3次	23.682 ～ 25.146	23.071
鉛直逆対称1次	6.859	8.545
鉛直逆対称2次	20.752	
水平対称1次	2.808	3.052
水平逆対称1次	5.732 ～ 5.859	7.202
水平逆対称2次	12.451	

a) ニールセン橋



b) 斜張橋

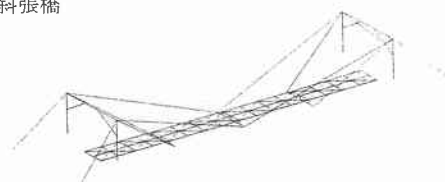


図-4 立体骨組解析モデル

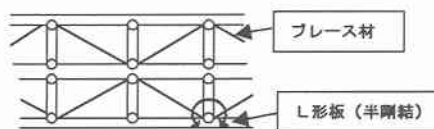


図-5 床組モデル図

5. GA によるパラメータの推定

遺伝的アルゴリズム (GA) は最近、探索・学習・最適化の技術的手法として、種々の工学分野で注目されている。GA は自然界における生物の遺伝・進化の過程を繁殖・淘汰、遺伝子の交叉、および突然変異等のプロセスを簡単な数理モデルに置き換え、それを最適化手法として用いようとするものである。また、GA は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、従来の最適化手法のように解の微係数、あるいは感度解析をする必要がない。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いう問題は多数存在する。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考えられている⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。

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 0.1 とした単純 GA を用いている。設計変数としては、上に述べたロード、ブレース材の伸び剛性の低減率、および横桁と主桁の接合部の剛度比をそれぞれ 3 ビットの遺伝子列を用いてコード化を行った。表-2a, b はそれぞれ、ニールセン橋、斜張橋に用いたパラメータを示す。また、斜張橋については側径間側と主径間側におけるロードの径が異なるため、それぞれ独立したパラメータとして取り扱った。目的関数 ; OBJ に関しては、式(1)のように、実験値から得られた、鉛直低次 1 次、2 次、3 次、および、水平低次 1 次、2 次の固有円振動数と数値解析値の残差を用い、GA により目的関数が最小となる各パラメータの値を求めた。図-6 にその流れ図を示す。

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

ここで、 ω^* は現場振動実験から得られた固有円振動数であり、 ω は GA システム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た固有円振動数を示している。なお、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 次に対応している。初期集団の個体数は 20 個体、交叉についてはランダム 1 点交叉法を用いており、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。

6. 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、ニールセン橋と斜張橋のパラメータの推定値は表-3a, b のように得られた。また、逆にこれらのパラメータの値を用いて固有振動解析を行った結果

表-2 離散的パラメータ

a) ニールセン橋

yr1 (吊材)	0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.7 0.9 1.0
yr2 (横構)	0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.7 0.9 1.0
gm (横桁剛度比)	0.0 0.1 0.2 0.3 0.5 0.7 0.9 1.0

b) 斜張橋

yr1 (吊材:側径間側)	0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.7 0.9 1.0
yr2 (吊材:主径間側)	0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.7 0.9 1.0
yr3 (横構)	0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.7 0.9 1.0
gm (横桁剛度比)	0.0 0.1 0.2 0.3 0.5 0.7 0.9 1.0

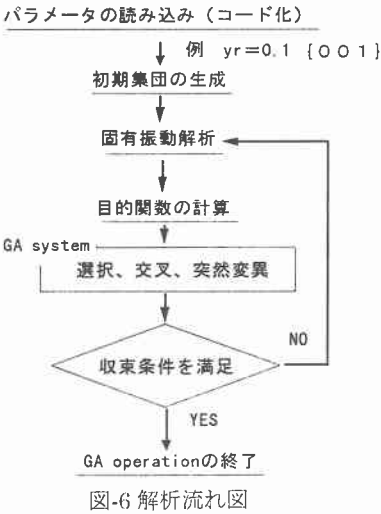


表-3 パラメータ推定値

a) ニールセン橋

yr1 (吊材)	0.1
yr2 (横構)	0.1
gm (横桁剛度比)	0.1

b) 斜張橋

yr1 (吊材:側径間側)	0.4
yr2 (吊材:主径間側)	0.4
yr3 (横構)	0.1
gm (横桁剛度比)	0.2

求められた固有振動モードを、ニールセン橋については図-7、斜張橋については図-8に示す。図-7、8 からわかるように、ニールセン橋、斜張橋ともに比較的实验値に近い解析結果を得ることができた。高次振動振動モードでは、若干の差異が認められるが、基本固有振動モードでは、比較的精度が高い解析結果が得られたものと考えられる。また、ニールセン橋については固有振動解析による結果において、鉛直1次モードとして、逆対称モードが確認できアーチ橋特有の性状を示していることが確認できる。表-3 のパラメータの推定値より、吊材に用いられているロッドの伸び剛性の低減率は、ニールセン橋については 0.1、斜張橋については、側径間側 0.4、主径間側 0.4 となった。両橋の構造形式を比較して、斜張橋のロッドはニールセン橋のロッドに比べて内部応力が高いことから、セミハイテンタイロッドは内部応力の違いにより、伸び剛性を低減する方法が有効であると考えられる。さらに、床組の横構として用いられているブレース材の伸び剛性の低減率は両橋ともに 0.1 となった。横構に用いられているブレース材は張力管理されていないものであり、その内部応力が低いことから、吊材同様に伸び剛性を低減するモデル化が妥当であると考えられる。

横桁と主桁間の接合部の剛度比はニールセン橋については 0.1、斜張橋については 0.2 となった。両橋ともに剛結合というよりはむしろヒンジ結合に近い半剛結状態にあることがわかる。横桁、主桁間の接合部はL形板を用い、ボルトで締め付けた形状を示しており、やや回転を拘束する接合状態になっていることがわかる。

7. あとがき

以上のように、本研究は GA を用いて木構造遊歩道橋の固有振動特性に影響を与える、吊材として用いられているセミハイテンタイロッド、床組の横構であるブレース材、および横桁と主桁間の接合条件に関する構造同定を行ったものである。GA を用いて同定したパラメータを用い固有振動解析を行った結果、固有振動数および固有振動モードともに実験結果に近いことが確認できた。本論文により得られた事項を箇条書きにすると以下のようになる。

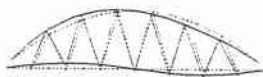
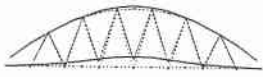
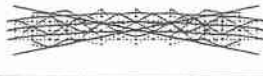
	mode shape	実験値 (Hz)	解析値 (Hz)
v 1		6.958	6.771
v 2		10.132	11.863
v 3		14.526	13.141
h 1		2.808	2.975
h 2		5.859	5.902

図-7 固有振動モード（ニールセン橋）

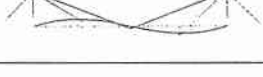
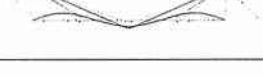
	mode shape	実験値 (Hz)	解析値 (Hz)
v 1		5.249	5.323
v 2		8.545	8.381
v 3		12.939	11.119
h 1		3.052	3.053
h 2		7.202	6.309

図-8 固有振動モード（斜張橋）

- (1) 人力加振法による減衰自由振動実験により、鉛直、水平の固有振動数と固有振動モードを求めることができた。ニールセン橋においては、アーチ橋特有の性状である鉛直 1 次モードとして逆対称モードが現れることを確認することができた。
- (2) 減衰自由振動実験により得られた応答加速度波形をフーリエスペクトル解析し、バンドパスフィルターを用いることにより、固有振動モードの判定を行った。比較的高次モードまで固有振動モードを確認することができることから固有振動モードの判定にはバンドパスフィルターが有効であると考えられる。
- (3) 吊材として用いられているセミハイテンタイロッド、および床組の横構として用いられているブレース材などの比較的内部応力が低い部材はモデル化の際に、その内部応力の差により伸び剛性を低減する方法が有効であると考えられる。
- (4) 横桁と主桁間の接合部は剛結合というよりはむしろヒンジ結合に近い半剛結状態にあり、やや回転を拘束する接合状態にあることがわかった。
- (5) GA を用いて同定したパラメータの値より数値計算した解析結果は、振動実験結果に近いものを得ることができた。したがって、本研究で検討したように、ロッド、およびブレース材の伸び剛性の低減率、横桁と主桁の接合部の接合条件を離散的パラメータとして取り扱う最適化問題に GA の適応は有効な手段であることが確認できたものと考えられる。

最後に、振動実験に際して協力いただいた北海道大学大学院工学研究科及川昭夫技官ならびに研究室の大学院生に感謝の意を表します。また、数値計算にあたり、GA による解析プログラムを提供していただいた北海学園大学大学院工学研究科杉本博之教授に謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 林野庁監修：近代木橋の時代-林道の新しい可能性を求めて-, 龍源社, 1995.
- 2) 三品吉彦・北原良紀：木造アーチ橋（支間長 45 メートル）の設計照査と木橋の可能性について, 土木学会第 48 回年次学術講演概要集, 第 VI 部, pp.312-313, 1993.
- 3) 日本建築学会：木構造計算基準・同解説, 技報堂, 1992.
- 4) 本田秀行：近代木橋の動向及び一般道路橋との振動特性比較, 土木学会構造工学委員会橋梁振動モニタリング研究小委員会資料, 1997.
- 5) 三品吉彦・薄木征三・本田秀行：木道路橋の現状と振動実測データから見た構造特性, 土木学会第 52 回年次学術講演会概要集, 第 I-B 部, pp. 486-487, 1997.
- 6) 杉本博之・鹿汗麗・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.
- 7) 鹿汗麗・杉本博之：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, pp. 619-626, 1995.
- 8) 須藤敦史・星谷 勝・宮沢和樹：遺伝的要素を考慮したインポートランス・サンプリングによる離散型変数を有するシステムの最適化, 土木学会論文集, No. 519/I-32, pp. 223-232, 1995.
- 9) 中村尚五：ビギナーズデジタルフィルタ, 東京電気大学出版局, 1995.
- 10) 土木学会：鋼斜張橋-技術とその変遷-, 1990.
- 11) Monforton, G. R. and Wu, T. S. : Matrix Analysis of Semi-Rigidly Connected Frames, Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 89, No. ST6, Dec., pp13-42, 1963.
- 12) 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遊歩道橋の剛度比の推定, 土木学会第 52 回年次学術講演会概要集, 第 I-B 部, pp. 462-463, 1997.