

振動計測による木造歩道橋の動的特性および健全度評価

Dynamic characteristics and soundness evaluation of timber pedestrian bridges by vibration tests

壽崎貴彦*・林川俊郎**・何興文***・松本高志****

Takahiko Suzuki, Toshiro Hayashikawa, Xingwen He, Takashi Matsumoto

* 北海道大学大学院工学院北方圏環境政策工学専攻(〒060-0814 北海道札幌市北区北 13 西 8)
**工博 北海道大学教授 大学院工学研究院(〒060-0814 北海道札幌市北区北 13 西 8)
***Ph.D. 北海道大学准教授 大学院工学研究院(〒060-0814 北海道札幌市北区北 13 西 8)
****博(工) 北海道大学助教 大学院工学研究院(〒060-0814 北海道札幌市北区北 13 西 8)

The importance of timber bridges has been rising in recent years due to the needs of environmental protection. However, the researches of timber bridges are few, and the filed data are insufficient in Japan. Furthermore, the design standards of timber pedestrian bridge does not exist until nowadays in Japan and needs to be established urgently. To meet those demands, the site vibration experiments of two timber pedestrian bridges in Takikawa City of Hokkaido after 16 years of construction are carried out to obtain fundamental data in this paper. The dynamic characteristics are extracted from the measured data and compared with those obtained right after construction. Then, a structural identification approach using Genetic Algorithm is also proposed to evaluate the soundness of the bridges.

Key Words: timber pedestrian bridge, dynamic characteristics, vibration measurement, soundness evaluation, GA optimization

キーワード：木造歩道橋、動的特性、振動計測、健全度評価、GA 最適化

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えつつある。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きている。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¹²⁾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³⁾や設計マニュアル⁴⁾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。そして木橋の重要性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。同様に

木橋の維持管理においても、諸外国では維持管理手法の開発が進んでいるが、上述の木材の性質を考慮すると諸外国の管理方法や基準をそのまま適用することはできない。日本の木橋の架設は平成 8 年にピーク⁵⁾を迎えたが、木橋は完工後 10 年以内に補修工事を行うことが多く、20 年以内に補修工事を行うこともある。ピーク時に架設された木橋が補修工事を必要としていることから、木橋の建設基準だけではなく、日本の木橋の管理方法や管理基準も早急に確立させる必要である。

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。近年、離散的な設計変数を含む組み合わせ最適化問題の有力な解析方法の一つとして遺伝的アルゴリズム(GA)が注目され、工学的分野で幅広く応用されている。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等のプロセスをシミュレーションし、最適解を求める手法である。GA は最適解の探索過程において、問題の種類を問わずその処理手順は非常に簡単であり、解の評価が可能であれば有意な解を検索する特徴を有している。そのため、木橋のような多くの不確定パラメータを含む構造物において、GA は有効な同定ツールとなり得ることが考えられる。

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。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、部材の剛性や部材の接合の不確かさを有しているので GA を用いて健全時における構造特性の同定を行った^{6) 7)}が、現在すでに供用後 16 年以上を過ぎており、木材の腐食や劣化などにより、建設時に比べ固有振動特性はさらに変化していると考えられる。そこで、本研究の最終目的は、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を行うこととする。

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結果について報告する。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、北海道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繋ぐ役割を担って

いた(平成 22 年 9 月撤去)。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。両橋の建設概要を表-1、立体骨組みモデルを図-1 と図-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 ²	350kg/m ²
使用材	べいまつ大断面 集成材 26 m ³	べいまつ大断面 集成材 21 m ³
事業費	4400 万円	3800 万円

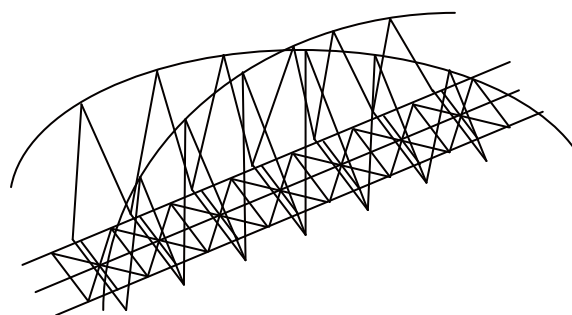


図-1 ニールセン橋骨組み図

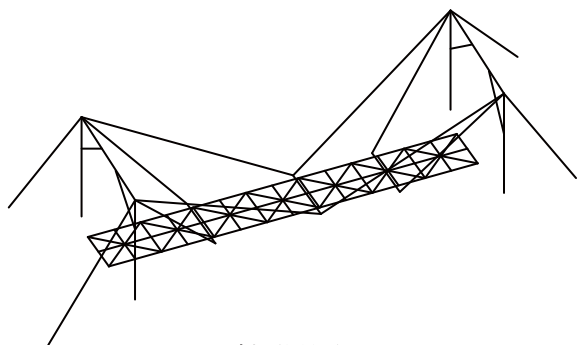


図-2 斜張橋骨組み図

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⁹⁾と同様に、各木橋の固有振動数および固有振動モードを特定することが主な目的である。今回はある程度高次の振動モードまで求めるために、橋梁支間を6等分して幅員方向に2等分した各点に加速度計を設置する(図-3)。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得られにくい振動モードを他の加振点で発見しやすくするためである。鉛直方向と橋軸直角水平方向の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力しているが、例としてニールセン橋における鉛

直方向1/4地点加振時の観測点2の応答加速度の波形を図-4(a)に示す。さらに、応答加速度データをFFT変換して求めたスペクトル図を図-4(b)に示す。ニールセン橋における水平方向1/4地点加振時の観測点2の応答加速度の波形を図-5(a)にスペクトル図を図-5(b)に示す。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および水平方向についてそれぞれ図-6および図-7に例示する。

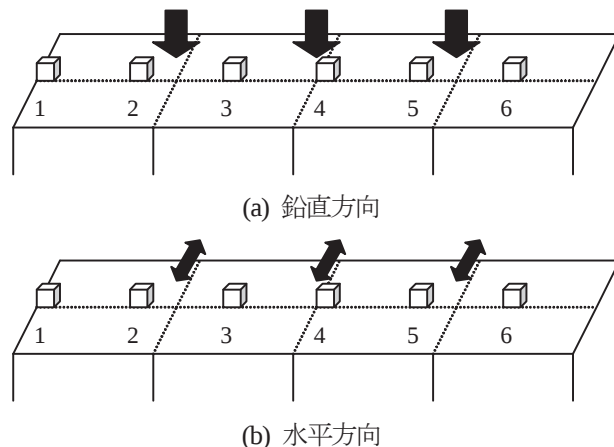


図-3 加速度計設置位置および加振点

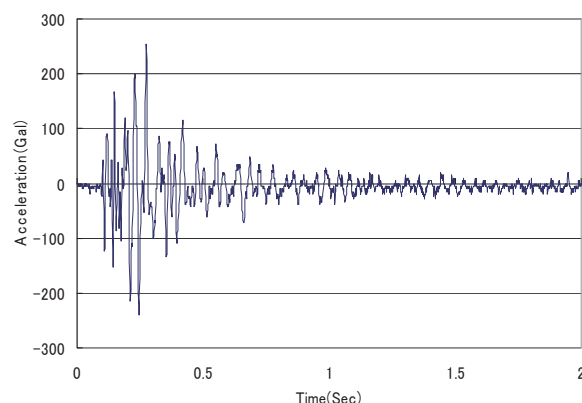


図-4(a) 1/4地点加振時観測点2の応答加速度

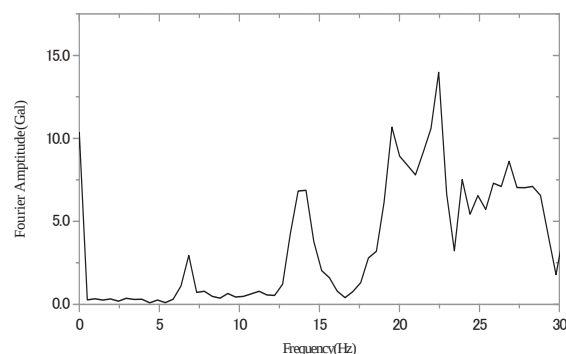
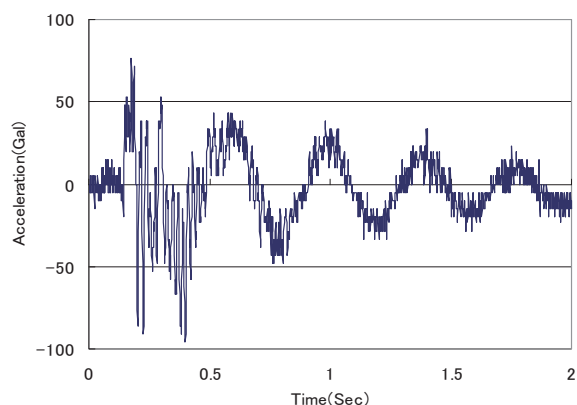
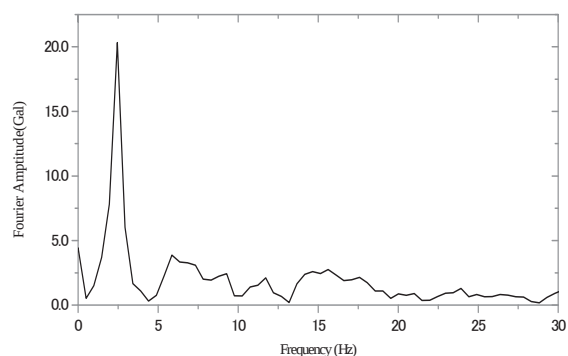


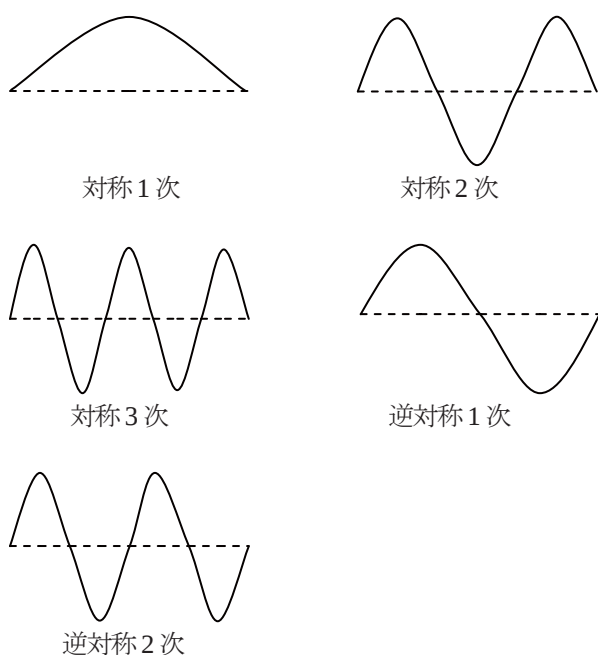
図-4(b) 1/4地点加振時観測点2 加速度フーリエスペクトル図



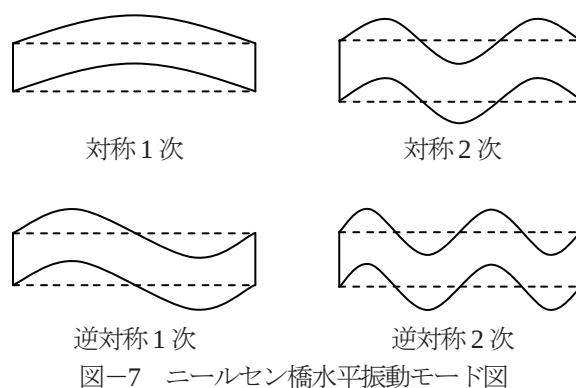
図一5(a) 1/4 地点加振時観測点2の応答加速度



図一5(b) 1/4 地点加振時観測点2
加速度フーリエスペクトル図



図一6 ニールセン橋鉛直振動モード図



図一7 ニールセン橋水平振動モード図

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⁹⁾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2～5に示す。同じ振動モードにおいて、建設直後と比べ16年後の固有振動数は減少していることがわかる。また、各モードにおける固有振動数の減少の傾向が、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。

また、現在の木橋の状況をみても劣化していることが分かる。写真一3を見るとニールセン橋のアーチ結合部は、表面からあまり劣化していないように見えるが、撤去時の写真一4を見ると木材の劣化がかなり進行していることが分かる。雨などの水分によって腐食しただけでなく、蟻などに食われて中は空洞化している。

表一2 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%

表一3 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%



写真-3 ニールセン橋の結合部



写真-4 斜張橋の木材

5. GA 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の変化パターン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、前述した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。以下に本研究で用いる GA 最適化手法について紹介する。

5.1 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と考えられる。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。

5.2 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。

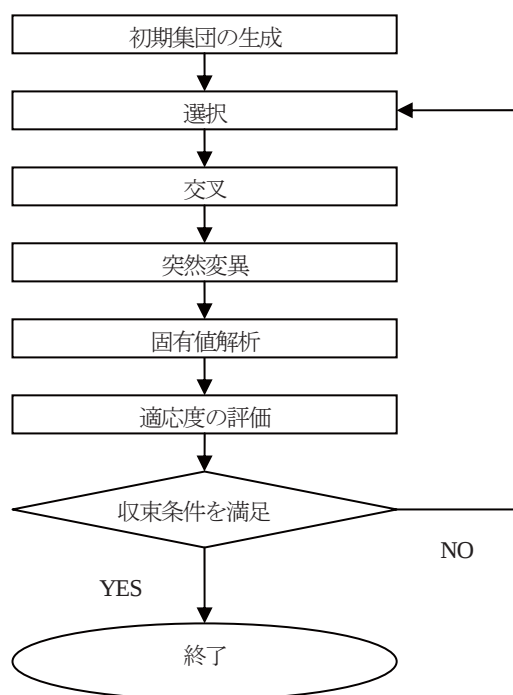
吊材として使われているセミハイテン・タイロッドは架設時に張力調整がされておらず、弛緩しているようなロッドも見受けられた。そこで本研究では張力の小さい斜張橋のケーブルの取り扱いに基づきロッドのヤング係数を低減する。

また、床組の横構には、ブレース材が用いられており、これも吊材と同様に張力調整がされておらず、吊材と同様に伸び剛性を低減する。

横桁と主桁はL形板を介してそれをボルトで締め付けるといった接合状態にある。このような接合部はヒンジ結合と剛結合の中間的立場にあると考えられる。

ニールセン橋では、①吊材ロッド伸び剛性低減率、②横構ブレース材剛性低減率、③横桁剛度比、斜張橋では①吊材ロッド伸び剛性低減率(側径間側)、②吊材ロッド伸び剛性低減率(主径間側)、③横構ブレース材剛性低減率、④横桁剛度比が不確定構造と判断され、構造同定が必要とされている。また、今回は建設後 16 年が経ち、前述の構造部材自体が劣化しているため、⑤各要素の剛性についても、不確定パラメータとして同定する必要があると考えられる。

(2) 本研究のGAを用いた構造同定のアルゴリズムは^{8),9)}は図-8のような手順となる。



図—8 GA の処理操作

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用い、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) 千田知弘、佐々木貴信、薄木征三、後藤文彦：支間中央に継手を持つハイブリッド木桁の性能試験及び FEM 解析、土木学会論文集 A1(構造・地震工学)、Vol.67、No.1、pp.108-120、土木学会、2011.
- 2) 千田知弘、佐々木貴信、薄木征三、後藤文彦、篠原義則、豊田淳：歩道橋用木製防護柵の基礎的研究、構造工学論文集、Vol.56A、pp.858-867、土木学会、2010.
- 3) 日本建築学会：木質構造設計基準、1995.
- 4) (財)日本住宅・木材技術センター：木橋設計施工の手引き、1996.
- 5) 本田秀行：近代木橋の経年による構造性能と健全度の実態評価に基づく維持管理方法とその基準開発、研究成果報告書、KAKEN、2009.
- 6) 林川俊郎、須志田健、小幡卓司、北島勉、松井義孝、佐藤浩一：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、pp.1315-1324、土木学会、1999.
- 7) 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、pp.1211-1218、土木学会、1998.
- 8) 杉本博之、鹿汴麗、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、pp.67-76、土木学会、1993.
- 9) 鹿汴麗、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、土木学会、1995.