

振動計測と GA を用いた木造歩道橋の構造同定および健全度評価

Structural identification and soundness evaluation of timber pedestrian bridges using vibration test data and GA optimization

北海道大学大学院工学院
北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科
札幌市建設局管理部道路維持課

○学生員 壽崎貴彦 (Takahiko Suzuki)
F 会員 林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
正会員 何 興文 (Xingwen He)
正会員 松本高志 (Takashi Matsumoto)
須志田健 (Ken Sushida)

1. まえがき

木橋は、自然の素材である木材を用いるところから、鋼橋、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、環境負荷のもっとも少ない架橋形式である。こうした面から木橋^{1), 2)}が注目されている。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、日本の状況に適した設計基準の整備が求められている。また、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、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り、木橋の不確定構造特性の同定に用いることができる。

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、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。

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)。両橋の建設概要を表-1に示す。

3. GA を用いた構造同定手法

- (1) 橋梁を有限要素でモデル化し、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。
- (2) 3 ビットの遺伝子列を用いてコード化する。
- (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。

本研究のGAを用いた構造同定^{8), 9)}は図-1のような手順となる。

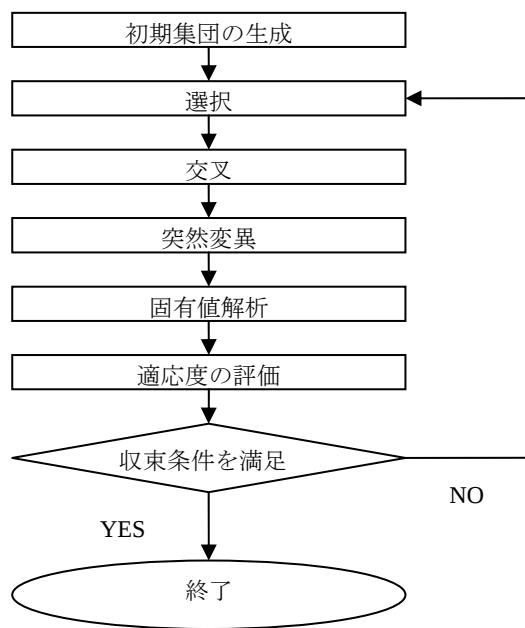


写真-1 やすらか橋
(ニールセン橋)

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



図一1 GA の処理操作

4. 木材自身の剛性変化を考慮しない解析

本解析では、まず木材自身の剛性が変化しない前提で構造同定を行うこととする。不確定構造となり得る部材をパラメータ化して、その特性を明らかにする。また、建設時と 2009 年の実験データを基にし、比較検討する。

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う接合状態にある。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)吊材伸び剛性
- (2)ブレース材伸び剛性
- (3)横桁剛度比

を不確定構造とし、剛性を低減させるパラメータとした。斜張橋では、

- (1)吊材伸び剛性(側径間側)
- (2)吊材伸び剛性(主径間側)
- (3)ブレース材伸び剛性
- (4)横桁剛度比

を不確定構造とし、剛性を低減させるパラメータとした。

吊材、ブレース材は 0.1 から 1.0 まで変化させ剛性を低減させるパラメータで、横桁剛度比は 0 から 1 まで変化させ、0 に近づくほどヒンジ結合を示し、1 に近づくほど剛結合を示すパラメータとした。

4.1 解析結果

同定解析で得られたニールセン橋の不確定構造特性の比較を表-2 に示し、固有振動数の建設時と 2009 年の比較を表-3 に示す。また、解析において確認した各固有振動数に対応する各振動モードを図-2 に示す。

斜張橋の不確定構造特性の比較を表-4 に示し、固有振動数の建設時と 2009 年の比較を表-5 に示す。また、解析において確認した各固有振動数に対応する各振動モードを図-3 に示す。

表-2 ニールセン橋不確定構造比較

	建設時	2009 年
吊材伸び剛性低減率	0.1	0.1
横構ブレース材剛性低減率	0.1	0.1
横桁剛度比	0.1	0

表-3 ニールセン橋振動数比較

	建設時		2009	
	実験値	解析値	実験値	解析値
v1	10.01	11.86	9.77	11.86
v2	6.96	6.77	6.72	6.77
v3	14.77	13.14	14.04	13.14
h1	2.81	2.98	2.44	2.86
h2	5.86	5.90	4.88	4.64

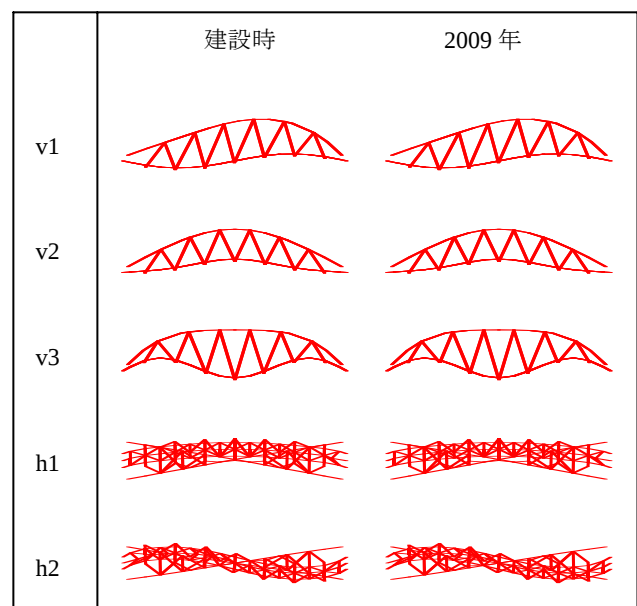


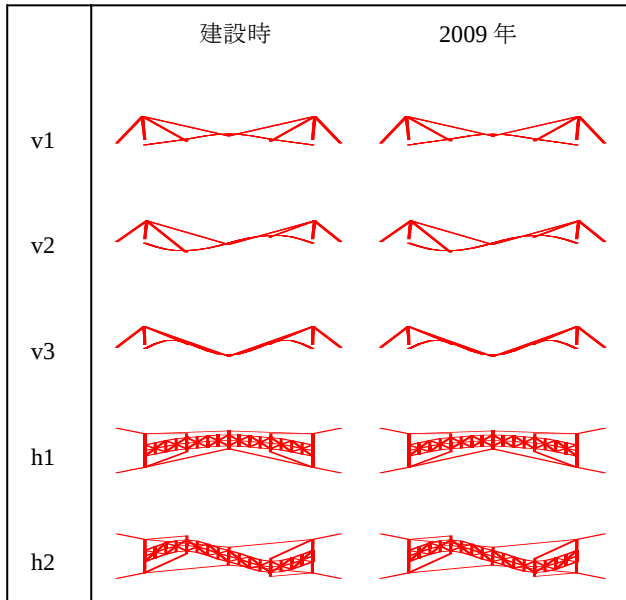
図-2 ニールセン橋振動数モード

表-4 斜張橋不確定構造比較

	建設時	2009 年
吊材伸び剛性低減率(側径間)	0.4	0.3
吊材伸び剛性低減率(主径間)	0.4	0.3
横構ブレース材剛性低減率	0.1	0.1
横桁剛度比	0.2	0

表－5 斜張橋振動数比較

	建設時		2009 年	
	実験値	解析値	実験値	解析値
v1	5.25	5.32	4.88	4.71
v2	8.55	8.38	7.33	7.67
v3	12.94	11.12	11.60	10.69
h1	3.05	3.05	2.44	2.76
h2	7.20	6.31	6.11	5.74



図－3 斜張橋振動数モード

4.2 考察

木材の剛性変化を考慮しないモデルにおいて、ニールセン橋では吊材、2009 年と建設時と比べブレース材の剛性は変化しなかった。しかし、横桁剛度比は減少し、部材劣化し、ヒンジ結合に近づいたことを示した。固有振動数も鉛直振動モードの値は変化せず、水平方向のものだけが変化した。この原因として、解析プログラムにおいて吊材、ブレース材の下限が 0.1 でこれ以上下がるのができなかったためと考えられる。また、横桁剛度比は、鉛直方向の固有振動数に影響をあたえないと考えられる。

一方、斜張橋では、吊材伸び剛性が、主径間側、側径間側ともに減少し、張力が落ちた。しかし、ニールセン橋同様にブレース材は変化しなかった。横桁剛度比もニールセン橋同様に減少し、ヒンジ結合に近づいたことがわかる。吊材、横桁剛度比が減少したのは、部材劣化が原因だと考えられ、ブレース材も他の部材同様に劣化していると考えられるが、解析プログラム上のブレース材の下限が 0.1 で減少することしかできなく、変化しなかった。

両橋ともに、固有振動数をより近づけるには、ブレース材の下限を下げる、ビット数を増やし、不確定部材により細かい値を与えることができるようにし、さらに木材自身の剛性変化を考えることが必要と考えられる。

5. 木材の剛性変化を考慮した解析

両橋が撤去された主な原因として木材の劣化が考えられる(写真－3)。また、結合部の劣化はあまりないように思われる(写真－4)。前節で用いた不確定構造は、建設時と 2009 年のものとあまり大きな変化がなく、変化しないパラメータとして仮定し、建設時の解析結果の値を不確定部材の確定値として、木材の剛性だけを変動するパラメータとしてモデル化を行う。

ニールセン橋では、

(1)主桁の剛性

(2)横桁の剛性

(3)アーチ主構部分の剛性

を不確定構造とし、剛性を低減させるパラメータとした。

斜張橋では

(1)主桁の剛性

(2)横桁の剛性

(3)主塔の剛性

を不確定構造とし、剛性を低減させるパラメータとした。主桁、横桁、アーチ主構、斜張橋の主塔はすべて 0.1 から 1.0 まで変化させ剛性を低減させるパラメータとした。

5.1 解析結果

ニールセン橋の不確定構造の比較を表－6 に示し、固有振動数の建設時と 2009 年の比較を表－7 に示す。また、解析において確認した各固有振動数に対応する各振動モードを図－4 に示す。



写真－3 木材

写真－4 結合部

表－6 ニールセン橋の不確定部材の比較

	建設時	2009 年
主桁剛性低減率	1.0	0.7
横桁剛性低減率	0.9	0.1
上弦材剛性低減率	0.9	0.9

表－7 ニールセン橋の
建設時と 2009 年の振動数の比較

振動モード	建設時		2009 年	
	実験値	解析値	実験値	解析値
v1	10.01	11.71	9.77	11.55
v2	6.96	6.57	6.72	6.64
v3	14.77	12.95	14.04	12.40
h1	2.81	2.86	2.44	2.66
h2	5.86	5.69	4.88	4.62

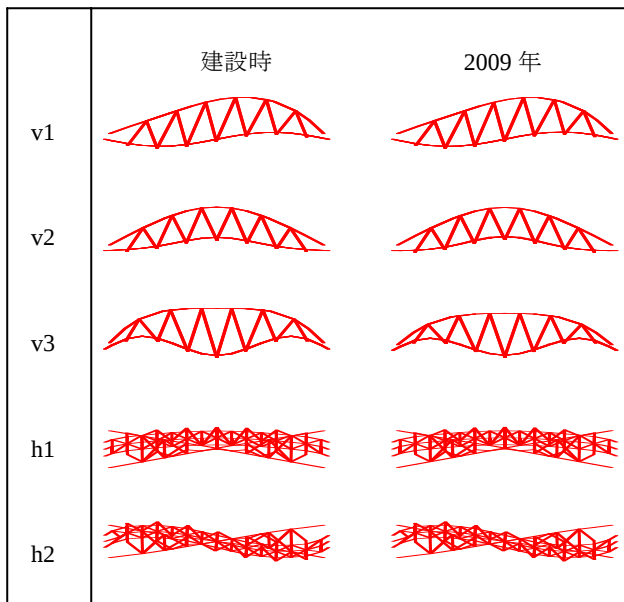


図-4 ニールセン橋振動モード

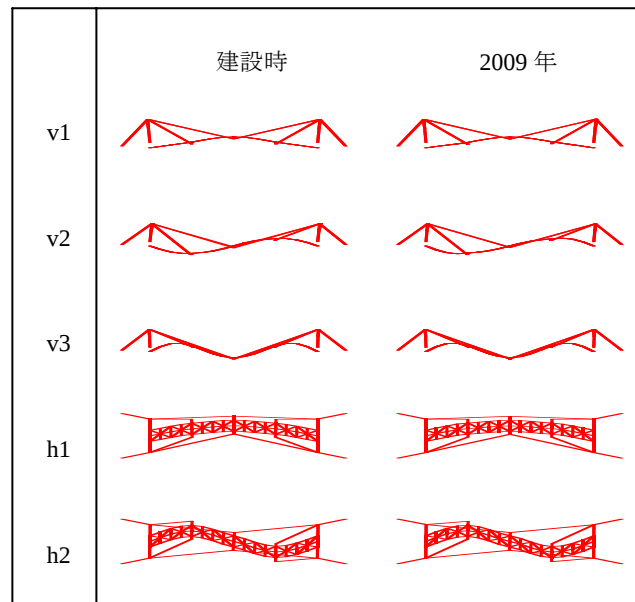


図-5 斜張橋振動モード

表-8 斜張橋の不確定部材の比較

	建設時	2009年
主桁剛性低減率	1.0	0.9
横桁剛性低減率	1.0	0.1
主塔剛性低減率	1.0	0.1

表-9 斜張橋の建設時と2009年の固有振動数の比較

振動モード	建設時		2009年	
	実験値	解析値	実験値	解析値
v1	5.25	5.30	4.88	5.07
v2	8.55	8.26	7.32	7.38
v3	12.94	9.39	11.60	8.73
h1	3.05	3.73	2.44	2.65
h2	7.20	7.64	6.11	5.39

斜張橋の不確定構造の比較を表-8に示し、固有振動数の建設時と2009年の比較を表-9に示す。また、解析において確認した各固有振動数に対応する各振動モードを図-5に示す。

5.2 考察

木材の剛性変化を考慮した解析モデルにおいて、ニールセン橋では、アーチ主構剛性は変化せず、主桁剛性が減少し、横桁剛性においては大幅に減少した。斜張橋でも、ニールセン橋同様、主桁剛性が減少し、横桁剛性が大幅に減少し、さらには主塔の剛性も大幅に減少した。両橋ともに建設時と2009年時点の比較をすると、撤去原因となったと考えられた木材自体の劣化を確認することができる。

固有振動数についてみると、木材の剛性変化を考慮しないモデル同様、実験値と解析値が一致しないものも多く、ビット数の問題、吊材、ブレース材、横桁剛度比を確定値として扱ったことに原因があると考えられる。

6. あとがき

本報告では、木材自身の剛性を不確定部材として考慮しないモデルと考慮したモデルについて比較検討した。木材とそれ以外の不確定部材を別々に考慮した解析では、ある程度実験値と解析値の固有振動数が一致するが、より精度を上げるには、両方を考慮した解析モデル、ビット数の多いGAアルゴリズムの採用が必要である。

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。