

大規模木製トラス車道橋の構造モデル化と構造特性

Structural Models and Characteristics of Large Scale Timber Truss Highway Bridge

○伊東隆博* 本田秀行**

ITOU Takahiro and HONDA Hideyuki

*金沢工業大学大学院 環境土木工学専攻(〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇ヶ丘 7-1)

**工博 金沢工業大学 環境・建築学部 環境土木工学科(〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇ヶ丘 7-1)

ABSTRACT The purpose of this study is to evaluate the structural models and the structural characteristics of the subjected bridge. The subjected bridge is large-scale king-post truss timber highway bridge constructed in Miyazaki prefecture on 2003. The bridge is composed slab, cross beam and lower chord member in floor system with height of about 3.5 m. Therefore, the three structural models were made in the objected floor structural system to find out the modeling method of the bridge, and then three dimensional static and eigenvalue analyses were performed using these models. Based on the results of structure analyses, this study describes the difference of structural characteristics for each structural model and the modeling method.

Keywords : 大規模木製トラス車道橋、構造モデル化、床組構造、構造特性
a large scale truss timber Highway Bridge, structural modeling, floor system, and structural characteristics

1. まえがき

従来の研究で行われてきた木橋の3次元構造解析モデルに関しては、床組を同一平面でモデル化した粟飯戸橋(下路式アーチ橋)¹⁾、杉の木橋(上路式アーチ橋)²⁾、金峰2000年橋(上路式アーチ橋)³⁾、八幡橋(下路式アーチ橋)⁴⁾、神楽橋(下路式アーチ橋)⁵⁾、百目石橋(下路式タイドアーチ橋)⁶⁾、坊中橋(キングポストトラス橋)⁷⁾、かじか橋(上路式アーチ橋)⁸⁾、横桁を棒要素でモデル化した神の森大橋(中路式アーチ橋)⁹⁾、かりこぼうず大橋(キングポストトラス橋)¹⁰⁾、¹¹⁾、横桁を面要素でモデル化したおおさる橋(中路式アーチ橋)¹²⁾、床組と補剛トラス桁を同一平面でモデル化した用倉大橋(斜張橋)¹³⁾、主桁と床組を同一平面でモデル化した八丁平つなぎ橋(桁橋)¹⁴⁾、主桁と床組を互いに面要素でモデル化した丸山沢橋(桁橋)¹⁵⁾、主桁と床組を同一平面でモデル化した丸山沢橋(桁橋)¹⁶⁾、主桁を2層の面要素でモデル化した常盤橋(桁橋)¹⁷⁾ などがある。

以上に記述した各種の構造解析モデルは、数値モデルの作成の労力とその結果および計算機能力の事項を基盤に、対象とする橋梁の構造形式や床組構造を考慮して精度の高い解析値を得るためのモデル化法である。しかしながら、対象とする橋梁が違えば構造解析モデル化も異なり、確立された解析モデル化法は一般的に存在しない。このことが解析上の困難な点である。

そこで、本研究では床版厚が0.46m、横桁高さが1.17m、下弦材高さが1.87mの合計が約3.5mと顕著に大きい床組構造を持つかりこぼうず大橋を対象橋梁として、巨大な床組構造を構造モデル化する考え方や各構造モデルによる構造特性の相違について検討を行う。

すなわち、本研究では、以前に行われてきた研究^{1)~17)} および平成15年7月に橋梁の剛性およ

び振動性状の把握のため、静的実験として試験車両載荷試験、動的实验として常時微動測定試験、砂袋落下衝撃試験、試験車両走行試験、トラス部材挙動試験、その他の実験として路面凹凸測定試験、キングポスト鋼材張力測定試験の7種類の実験が行われた実験結果¹⁰⁾を基に、FORTRAN言語でのプログラムによる固有値解析、静的解析、動的応答解析を行い過去の研究結果と実験結果を踏まえた上で、新たな構造解析モデルを作成した。そして、固有値解析と静的解析を行い、実験値と構造モデル化の相違による解析値とを比較し、構造モデル化と構造特性に対して検討を行う。

2. 対象橋梁

本研究で対象とした橋梁は、2003年3月に宮崎県児湯郡西米良村に架設され、地元材料のスギ集成材を用いたキングポストトラス木車道橋である。本橋対象部は、桁長49.85m、支間長48.2m、トラス高24.108m、幅員7.0m(車道部)であり、縦断勾配2.5%、横断勾配-1.50%である。かりこぼうず大橋の対象部である大キングポストトラス橋の一般図を図-1に、設計概要を表-1に示す。

表-1 設計概要

橋種	車道橋
形式	キングポストトラス
桁長	49.85m
支間長	42.8m
幅員	7.0m(車道部)
設計活荷重	A活荷重
縦断勾配	2.50%
横断勾配	-1.50%
舗装	アスファルト舗装
床版	プレストレス木床版
使用部材	地元スギ集成材

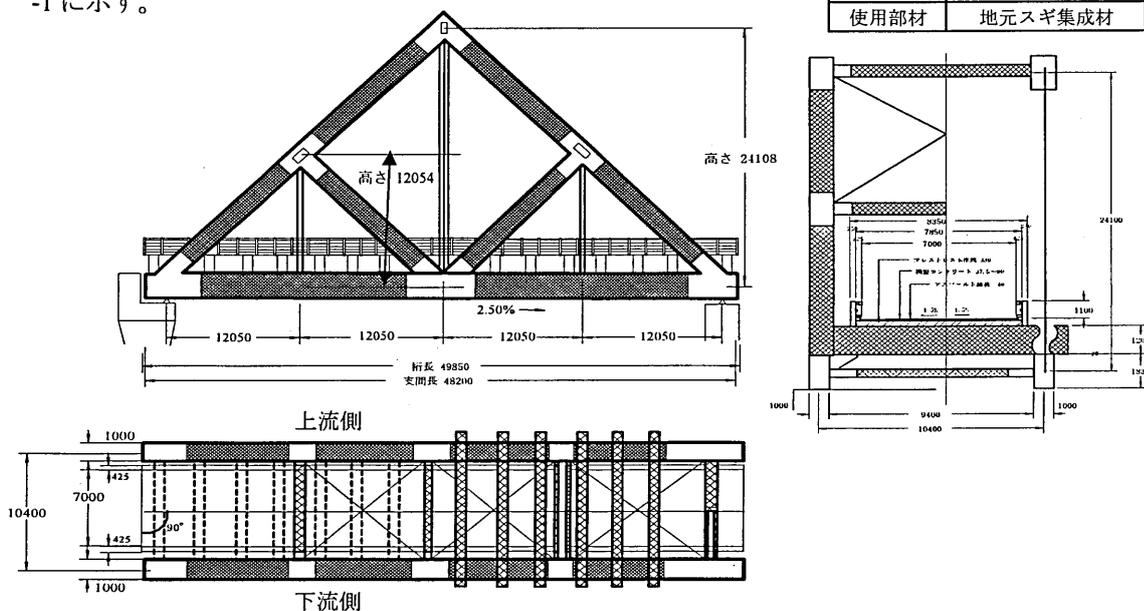


図-1 一般図

3. 構造解析モデル

以前に行われた走行車両によるかりこぼうず大橋の動的応答解析に関する研究¹⁰⁾において、30km/hで車両が走行した時、3L/4点付近の15秒過ぎから顕著に大きい振動波形が生じていた。そこで、種々な観点から構造解析モデル、解析プログラム、解析入力データ等の精査を行ったが原因は不明であった。このことから、精度の高い動的応答特性が得られなかった。そこで、前述したように構造モデル化の方法が確立されていないこともあり、より精度の高い構造解析モデルの作成を再検討した。すなわち、床組構造を忠実に再現した構造モデルと、床組構造を

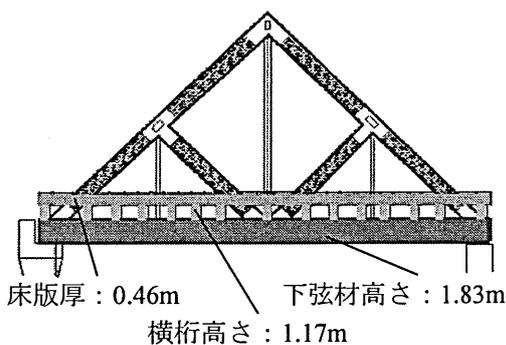


図-2 床組構造と寸法

簡略化した構造モデルの2つを新たに作成した。対象橋梁は前述したように、床組構造が床版厚0.46m、横桁高さが1.17m、下弦材高さが1.83mと巨大なため床組部の構造モデル化に重点を置いた。図-2に床版、横桁、下弦材の構造と寸法を示す。

まず、モデルAとして、トラス部を棒要素、床版、横桁、下弦材を面要素で構成した。床組構造を面要素で作成したことにより構造解析モデルに実橋と同様の高さを持たせることができ、他の構造モデルより実橋に近い忠実な構造モデル化と言える。しかし、本来ならば、モデルAではトラス部も面要素で作成し木材特有の異方性についても考慮することで、さらに実橋に忠実な構造モデル化とするべきであるが、プログラムの作成上の制約により棒要素で作成した。モデルAと詳細図を図-3に示す。

次に、モデルBとして、床版を面要素で、トラス部や横桁、下弦材を棒要素で構成した。そのため床版部と下弦材部が離れているがこの間に棒要素（剛体要素）を用いた。このモデルBはモデルAより簡易的な構造モデル化ではあるが、床組構造の高さを考慮した中間的な構造モデル化と言える。また、トラス部や横桁などの棒要素で作成した部分については異方性を無視するものとなっている。モデルBとその詳細図を図-4に示す。

最後に、モデルCでは、モデルBと同様に床版を面要素、トラス部や横桁、下弦材を棒要素で構成した。このモデルでは床版、横桁、下弦材の床組構造の下弦材の図心を基準として同一平面としている。モデルCでは、床版以外の部材を棒要素としているため、モデルBと同様に木材の異方性を無視するものとなっている。このため、モデルCはモデルA、Bと比べより簡略化した構造モデル化法となっている。モデルCと詳細図を図-5に示す。図-6、7、8は各モデルの床組構造の詳細を示す。

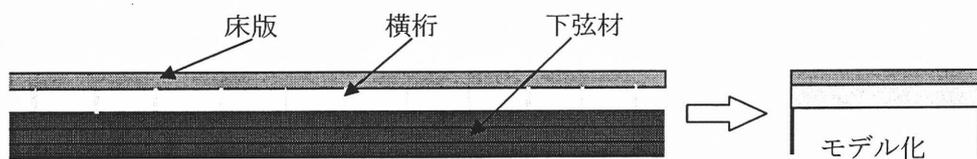
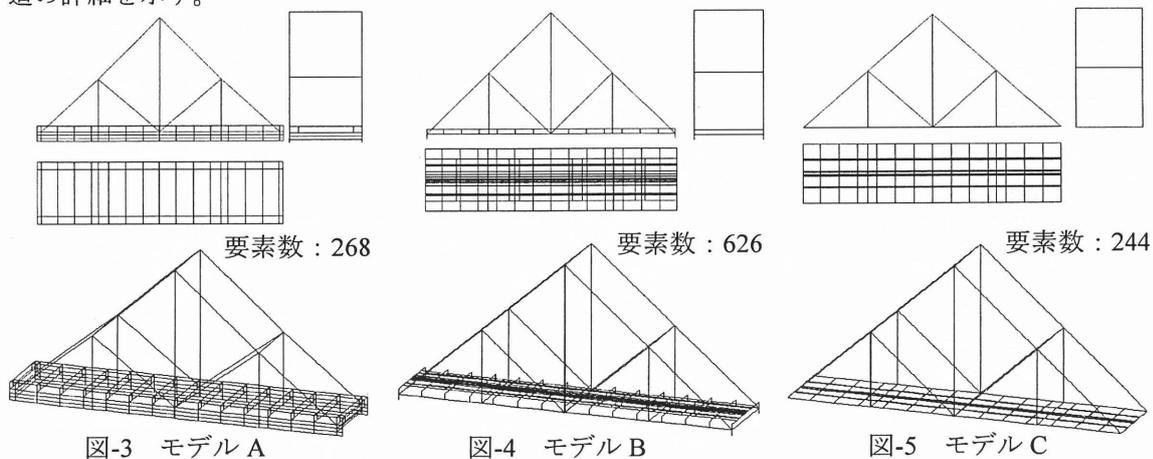


図-6 モデルAの床組構造の詳細

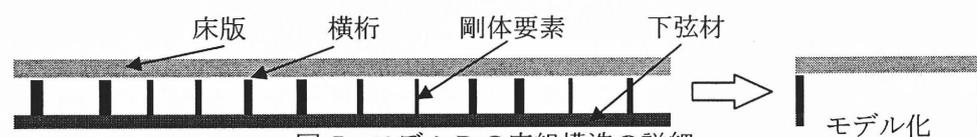


図-7 モデルBの床組構造の詳細



図-8 モデルCの床組構造の詳細

各モデルの物性値については、モデルA、B、Cのヤング係数(N/mm²)、せん断弾性係数(N/mm²)、単位体積重量(kN/m³)、各要素の厚さや断面積などの値は各構造解析モデルにおいて同じ値を入力している。従って、同じ入力値であることから、各構造モデル化によるモデルの相違から解析結果の比較を検討することが可能となる。また、図-1において対傾ブレースが配置されているが、このブレースが構造モデル化に与える影響は低いと考えられるため本研究ではモデル化しなかった。以上のことを踏まえた上で作成した3つの構造解析モデルを用いて固有値解析と静的解析を行う。

4. 固有値解析

固有値解析のケースIとして、モデルAにおいて行った固有値解析の結果、最も実験値に近くなる時の物性値をモデルB、Cに入力し解析を行った。物性値の一例としてケースIにおけるヤング係数を表-2に示す。その解析結果と実橋実験による実験値を表-5に示す。同様にケースIIとしてモデルBの固有値解析を行った。ケースIIにおけるヤング係数を表-3に示す。結果の物性値をモデルA、Cに入力した解析結果と実験値を表-6に、ケースIIIとしてモデルCの物性値をモデルA、Bに入力した解析結果と実験値を表-7に示す。また、ケースIIIにおけるヤング係数を表-4に示す。

まずケースIでは、モデルB、Cの両方でねじれ逆対称1次より先に鉛直曲げ対称2次が出現する結果となった。これは本橋梁の横桁を棒要素にして剛体で下弦材と接続したモデルB、および床組を棒要素で同一平面としたモデルCのモデル化によって、実際の床組構造が有するねじれ剛性が若干小さくなったことに起因するものと言える。また、この結果よりモデルAは実験値に対して十分な精度を有しているが、鉛直曲げ振動において若干大きな値を示している。モデルBについては1次から3次振動までは十分な値といえるが、4次から6次振動においては実験値より小さな値になっている。モデルCは1次および6次振動を除きほとんどの解析値が実験値より大きくなっている。

次にケースIIでは、モデルAは鉛直曲げ振動に対しては近似しているが、ねじれ振動に対して差異が生じている。特にねじれ振動においては実験値より小さい値になっている。これは横桁の剛性が本来より低くなったことに起因している。本解析では同じ木材の物性値を用いているが、モデルAのようなモデル化では横桁のヤング係数を大きく見積もる必要があると思われる。モデルCについては、ねじれ振動だけでなく鉛直曲げ逆対称振動についても差異が現れる結果となった。また、ケースIIにおいて、モデルCはねじれ対称1次でモデルAの値よりよりよい結果も見られるが、実験値と比べ全体的に数値が小さくなる傾向が見える。このことは、本橋のような巨大な床組構造を棒要素で同一平面にモデル化する方法ではあまり適切でないことを意味しているものと思われる。

表-2 ケースIでのヤング係数

部材	ヤング係数×10 ³ (N/mm ²)
下弦材(x方向)	8.00
下弦材(y方向)	0.40
横桁(x方向)	3.00
横桁(y方向)	0.15
床版(x方向)	6.00
床版(y方向)	0.30
斜材	2.00
鋼材	210.00
上弦材	34.00

表-3 ケースIIでのヤング係数

部材	ヤング係数×10 ³ (N/mm ²)
下弦材	8.00
横桁	3.00
床版(x方向)	6.00
床版(y方向)	0.20
斜材	2.00
鋼材	210.00
上弦材	34.00
剛体	21000

表-4 ケースIIIでのヤング係数

部材	ヤング係数×10 ³ (N/mm ²)
下弦材	5.00
横桁	1.00
床版(x方向)	2.00
床版(y方向)	0.20
斜材	2.00
鋼材	210.00
上弦材	20.00

最後にケースⅢでは、モデルAにおいては鉛直曲げ対称2次以外の振動で、モデルBでは全ての振動モードにおいて実験値より小さな値になっている。特にモデルAではねじれ振動、モデルBでは鉛直曲げ振動において非常に小さな値を示している。これらは上述したように横桁の構造モデル化の相違に起因するものと考えられる。

また、各ケースにおける固有振動数の最も精度の高かった値をまとめたものを表-8に、各構造モデルでの振動モードの一例を図-9に示す。これらよりモデルAはモデルB、Cと比較して鉛直曲げ振動における剛性が高くなっている。モデルBは全体的に実験値と解析値が一致している。モデルCでは全体的に実験値と解析値に若干の差異が見られる。特に振動次数が高次になるほど差異が大きくなっていることがわかる。以上の結果を踏まえた上で固有値解析においてはモデルAとBはモデル化に対する整合性が高いと言えるが、モデルCはその整合性が低い結果となった。

表-5 ケースⅠにおける振動特性

振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)			
		実験値	解析値		
			モデルA	モデルB	モデルC
1	トラス水平	1.00	0.83	1.04	0.88
2	鉛直曲げ対称1次	2.46	2.63	2.40	3.49
3	ねじれ対称1次	3.30	3.00	3.34	4.41
4	鉛直曲げ逆対称1次	4.86	4.80	4.07	5.53
5	ねじれ逆対称1次	6.74	6.66	5.96	7.33
6	鉛直曲げ対称2次	7.16	9.55	5.69	6.41

表-6 ケースⅡにおける振動特性

振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)			
		実験値	解析値		
			モデルA	モデルB	モデルC
1	トラス水平	1.00	0.76	0.99	0.49
2	鉛直曲げ対称1次	2.46	2.61	2.46	2.38
3	ねじれ対称1次	3.30	2.67	3.18	2.92
4	鉛直曲げ逆対称1次	4.86	4.51	4.87	4.11
5	ねじれ逆対称1次	6.74	4.64	6.71	4.50
6	鉛直曲げ対称2次	7.16	8.30	7.21	6.54

表-7 ケースⅢにおける振動特性

振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)			
		実験値	解析値		
			モデルA	モデルB	モデルC
1	トラス水平	1.00	0.68	0.76	0.75
2	鉛直曲げ対称1次	2.46	2.24	1.84	2.58
3	ねじれ対称1次	3.30	2.25	2.45	3.36
4	鉛直曲げ逆対称1次	4.86	4.00	3.56	4.61
5	ねじれ逆対称1次	6.74	4.09	5.17	5.71
6	鉛直曲げ対称2次	7.16	8.07	6.30	5.83

表-8 各モデルの最良値

振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)			
		実験値	解析値		
			モデルA	モデルB	モデルC
1	トラス水平	1.00	0.83	0.99	0.75
2	鉛直曲げ対称1次	2.46	2.63	2.46	2.58
3	ねじれ対称1次	3.30	3.00	3.18	3.36
4	鉛直曲げ逆対称1次	4.86	4.80	4.87	4.61
5	ねじれ逆対称1次	6.74	6.66	6.71	5.71
6	鉛直曲げ対称2次	7.16	9.55	7.21	5.83

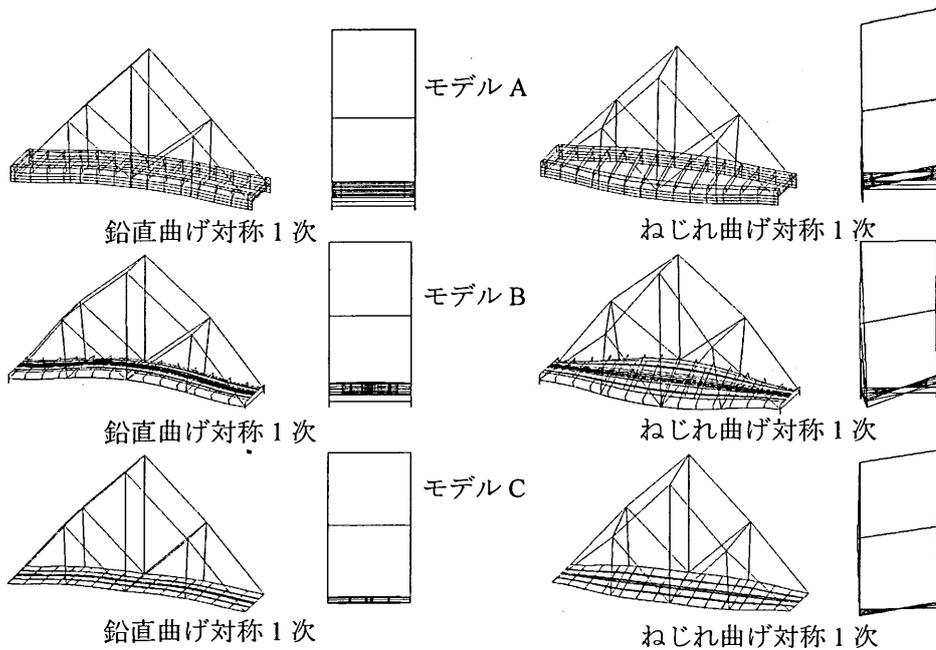


図-9 振動モード例

5. 静的解析

静的载荷の一例として、約 $2.0 \times 10^4 \text{kg}$ のダンプトラック車を支間 $L/2$ 点の中央に载荷した場合の静的解析を行った。本解析に用いた物性値は、モデル A は表-2、モデル B は表-3、モデル C では表-4 を用いた。ダンプトラック車は前後左右の 4 軸载荷として解析している。その解析結果を図-10 に示す。図中の実験値と解析値で、 $L/4$ 点および $3L/4$ 点から支点部の方向にたわみ形状が上に凸の変形しているのは、両点でのキングポストと斜材によるせん断剛性に起因していると思われる、図-9 に示す鉛直曲げ対称 1 次振動モードにもその傾向が見られる。この図よりモデル A はたわみの形状とたわみの最大値がほぼ一致している。モデル B は実験値と解析値の差異が若干あるが、たわみの形状と最大値は一致している。モデル C はたわみの形状はほぼ一致しているが、最大値については若干の差異が生じている。これらの結果より、静的解析の点においてモデル C は若干劣るがモデル A と B は十分に精度の高いモデル化法であることが認められる。

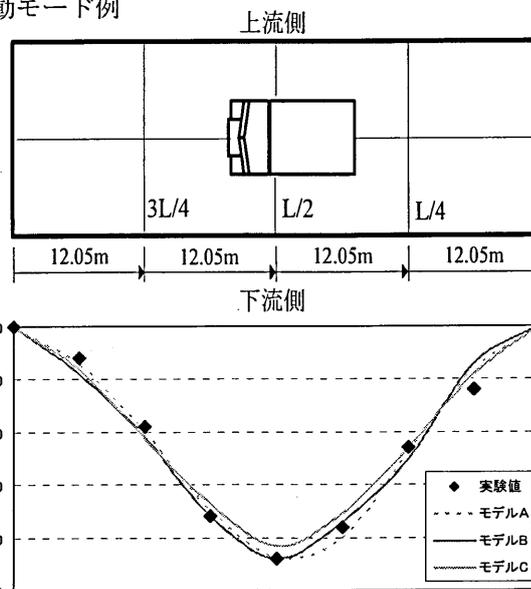


図-10 静的解析の一例

6. あとがき

本研究では、高さが約 3.5m の床組構造を 3 つの構造モデル化によって固有値解析と静的解析の 2 つによって比較を行い、かりこぼらず大橋の構造モデル化による構造特性を検討した。その結果、モデル A では固有値解析で鉛直曲げ振動が若干高くなっていたが、これは横桁を面要素としたため鉛直の曲げに対する剛性が高くなったことに起因する。固有値解析と静的解析の両面で見ると実橋実験による実験値と整合性は高いと言える。モデル B では固有値解析と静的解析

の両面において高い整合性を有すると言える。モデル C では固有値解析と静的解析の両面においてモデル A、B と比較して整合性が低い結果となった。これは約 3.5m の高さを有する床組構造を同一平面にしたため、床組のねじれの剛性が実際の剛性より低く評価された可能性がある。

構造解析モデル化は、膨大な接点数や要素数になるが、実際の構造に忠実にモデル化する方法は最も簡単である。しかし、最も簡易的な構造モデルで高い精度を有しているモデル化法は最良と言えるが、木材および木橋全体の曲げやねじれなどの剛性換算に不明の点が多い^{13),14)}ため、構造モデル化法も困難になる。本研究で検討した結果、モデル A と B の整合性が高い結果になったが、各構造モデル化に関して、モデル A や B では解析モデルの作成に莫大な時間と労力を要するが、その分、解析は精度の高い結果が得られる。モデル C については作成時間が非常に短くなり解析モデルが簡単でかつ工夫などが容易になるが、精度が低くなってしまふ。その結果、一長一短があるため一概にはモデル C が不適格とは言いがたい。この点に関して、各構造モデルに対する適用が可能な床組構造の深さ限界をより明確にする必要がある。

なお、本研究では今後、走行車両による対象橋梁の 3 次元動的応答解析を行い、応答の振動波形を含む動的応答特性から今後の課題を含めた構造解析モデル化法に検討を加えて行く所存である。

以上、本研究で検討した構造モデル化と得られた知見が本橋のような高さを有する床組構造および剛性の高い横桁等の構造モデル化を行う場合に参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 小川史彦・本田秀行・高木和芳：実験と解析に基づく下路式アーチ木車道橋の構造特性評価，土木学会・第 1 回木橋技術に関する講習会テキスト・シンポジウム論文報告集，pp. 55-60,2001 年 1 月。
- 2) 北城章・本田秀行・佐々木幸久：実験と解析に基づく上路式アーチ木車道橋の構造特性，土木学会・第 1 回木橋技術に関する講習会テキスト・シンポジウム論文報告集，pp. 61-66,2001 年 1 月。
- 3) 北城章・本田秀行・佐々木幸久：実験と解析に基づく上路式アーチ木車道橋の構造特性，土木学会・第 1 回木橋技術に関する講習会テキスト・シンポジウム論文報告集，pp. 61-66,2001 年 1 月。
- 4) 吉川彰彦・本田秀行・三品吉彦・瀬戸繁樹：実験と解析による 2 連アーチ木車道橋の構造性能評価，土木学会・第 2 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp. 51-58,2003 年 7 月。
- 5) 山田基司・本田秀行・吉村崇：アーチ木歩道橋の構造特性と使用性，土木学会・第 2 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp. 59-64,2003 年 7 月。
- 6) 佐成屋孝之・本田秀行・佐々木貴信：自立式タイドアーチ木車道橋の構造性能評価，土木学会・第 2 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp. 65-72,2003 年 7 月。
- 7) 草薙貴信・本田秀行・寺田寿・佐々木貴信：ハイブリッド型キングポストトラス木車道橋の構造特性の評価：土木学会・第 2 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp. 73-80,2003 年 7 月。
- 8) 石松和哉・二瓶友樹・本田秀行：上路式アーチ木車道橋の健全度評価：土木学会・第 4 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp. 59-64,2005 年 7 月。
- 9) 小川史彦・本田秀行・高木和芳：実験と解析に基づく下路式アーチ木車道橋の構造特性評価，土木学会・第 1 回木橋技術に関する講習会テキスト・シンポジウム論文報告集，pp. 55-60,2001 年 1 月。
- 10) 吉川彰彦・本田秀行・有村英樹・宮里順：大規模キングポストトラス木車道橋の構造性能評価，土木学会・第 3 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp. 39-46,2004 年 7 月。
- 11) 池田拓郎・今井富士夫・中澤隆雄・飯村豊・林久智・宮里順・木場和義・入江達雄：かりこぼうず大橋の静的・動的性状，土木学会・第 2 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp.29

- 34,2003年7月.

- 12) 草薙貴信・壁村秀水・小川史彦・本田秀行：実験と解析に基づく中路式アーチ木車道橋（お
おさる橋）の構造特性,土木学会・第1回木橋技術に関する講習会テキスト・シンポジウム論
文報告集, pp. 67-72,2001年1月.
- 13) 本田秀行：集成材補剛トラス桁を有する斜張橋の構造特性と解析モデル化, 土木学会・第3回
木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp. 65-74,2004年7月.
- 14) 石松和哉・本田秀行：ハイブリッド型近代木歩道橋の剛性評価に関する一考察, 土木学会・第
3回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp. 161-166,2004年7月.
- 15) 大澤雄司・本田秀行・渡辺浩志・久保田努：ハイブリッド型の木桁車道橋の構造特性と構造
性能, 土木学会・第4回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp. 65-70,2005年7月.
- 16) 大澤雄司・本田秀行：ハイブリッド型近代木桁車道橋の動的挙動と動的影響評価, 土木学会・
第5回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp. 55-62,2005年7月.
- 17) 日下真彰・本田秀行：解析による大規模木製歩道橋の動的挙動と振動使用性, 土木学会・第6
回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp. 9-20,2007年8月.