大規模木製トラス車道橋の構造モデル化による動的応答特性

Dynamic Response Characteristics by Structural Models 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 dynamic response characteristics by structural models of the subjected bridge. The subjected bridge is a large-scale king-post truss timber highway bridge constructed in Miyazaki prefecture on 2003. The bridge is composed of slab, cross beam and lower chord members in the floor system with the height of about 3.5 m. Therefore, the two structural models were made in the objected floor structural system to find out the modeling method of the bridge, and then using these models. Based on the results of three dimensional dynamic response analysis due to moving vehicle of the subjected bridge, this study describes the difference of dynamic response characteristics by each structural model.

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

1．まえがき

従来の研究[1), 2)]にあるように 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、横桁を棒要素でモデル化、横桁を面要素でモデル化、主桁と床組を同一平面でモデル化、主桁と床組を互いに面要素でモデル化、主桁と床組を同一平面でモデル化、主桁を 2 層の面要素でモデル化など多種多様である。

そこで、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、従来の研究[1), 2), 3), 4), 5), 6)]では巨大な床組構造のモデル化や、モデル化した各構造解析モデルの固有値解析や静解析、実橋実験、材料性状の検討などを行ってきた。しかし、従来の研究では床組構造のモデル化による構造特性を把握することは困難である。よって、本研究では文献 2)での研究内容を拡張した各構造解析モデルの

固有値解析に加えて、さらに 3 次元動的応答解析から車両走行による動的応答性状の相違を把握することを目的とする。

すなわち、以前に行われてきた研究[1), 2)]を基に、本研究では新たに 3 次元構造解析モデルによる固有値解析と車両走行による 3 次元動的応答解析を実施し、実験値と構造モデル化の相違による動的応答性状とを比較し、構造モデル化と動的挙動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、地元産材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 7m(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一般図を図-1 に、設計概要を表-1 に示す。

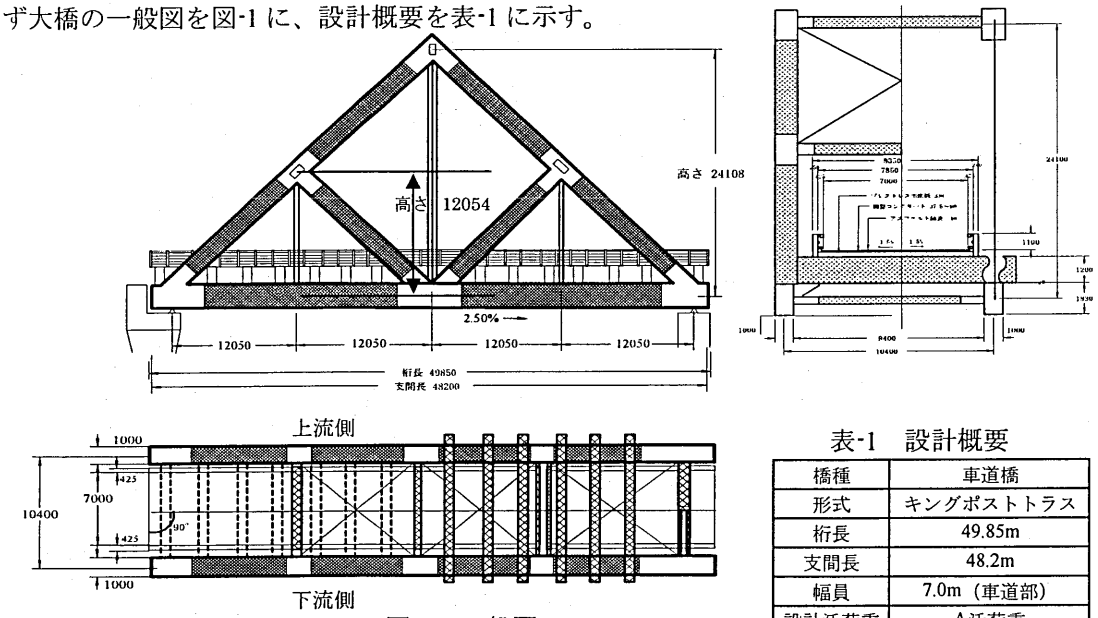

図-1　一般図

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	48.2m
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

3. 3 次元構造解析モデル

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 と合計約 3.5m と顕著に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、文献 2)のモデル A と同様にトラス部を棒要素、床版、横桁、下弦材を面要素で構成した。しかし文献 2）でも一応の精度を有していたが、さらに高い精度を求めるため、新たに解析モデルを作成した。よって、モデル B より実橋に近い忠実な構造モデル化と言える。モデル A では、各面要素は部材の図心にあり、各面要素の高さと厚さを実際の寸法と同様にした。モデル A の詳細図を図-3 に部材の諸元の一例としてヤング係数を表-2 に示す。次にモデル

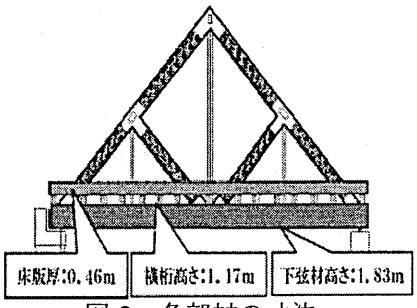

図-2　各部材の寸法

Bでは、文献2)のモデルC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Bでは、床版以外の部材を棒要素としているため、木材の異方性を無視するものとなっている。また、モデルBでは同一平面とした床組構造の厚さを床版の厚さである0.46mとし、棒要素である横桁と下弦材には実際と同様の断面積を用いた。このため、モデルBはモデルAと比べより簡略化した構造モデル化となっている。モデルBの詳細図を図-4に部材の諸元の一例としてヤング係数を表-3に示す。両モデルともポアソン比μは木材を0.4、鋼材を0.3としている。以上の2モデルを用いて固有値解析と車両走行による3次元動的応答解析を行う。

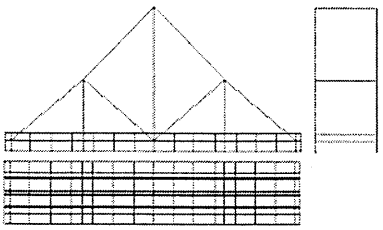

図-3　解析モデルA

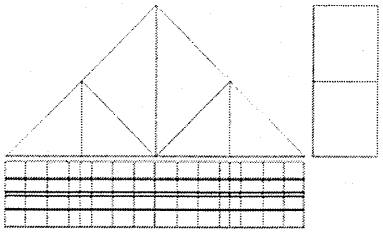

図-4　解析モデルB

表-2　解析モデルA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)	4.00
横桁(y方向)	0.20
床版(x方向)	6.00
床版(y方向)	0.30
上弦材	4.00
斜材	4.00
鋼材	210.00

表-3　解析モデルB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
上弦材	2.00
斜材	2.00
鋼材	210.00

4. 固有値解析

4. 1　橋梁モデル

本研究では、作成した対象橋梁の3次元有限要素モデルの振動特性を確認するために、新たにサブスペース法を用いて固有値解析を実施した。サブスペース法は実対称行列Aの固有値と固有ベクトルを同時に求める反復法である。サブスペース法の特徴はn個の固有値をすべて求めるのではなく、一部のm個(m≪n)を求める場合に適していることである。

4. 2　固有値解析結果

表-4に本橋の平成15年度[1)]に行われた実験の振動モードと固有振動数の実験値とモデルA、Bの解析値を示す。両モデルにおいて実験値と解析値の振動モードの出現順は同様となっている。せん断弾性係数Gに関しては$G=E/2(1+\mu)$を基に、表-2、3に示すヤング係数Eとポアソン比μ=0.4で算出した値で評価している。モデルAの固有振動数の解析値は実験値と比べ差異がモデルBより小さく、特に鉛直曲げ振動における剛性が実験値と近似していることが見て取れる。モデルBは2次振動と3次振動では実験値に近い値となっているが、全体的に実験値と解析値に差異が見られる。特にモデルBは振動次数が高次になるほど実験値との差異が大きくなっている。

表-4　固有振動数と振動モード

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
1	トラス水平	1.00	0.81	0.75
2	鉛直曲げ対称1次	2.46	2.48	2.58
3	ねじれ対称1次	3.30	3.75	3.36
4	鉛直曲げ逆対称1次	4.86	4.48	4.61
5	ねじれ逆対称1次	6.74	6.98	5.71
6	鉛直曲げ対称2次	7.16	7.53	5.83

5. 走行車両による3次元動的応答解

5. 1　車両－橋梁系の運動方程式[7)]

橋梁の各節点の変位ベクトルをZとすると車両－橋梁系の運動方程式は、ダランベールの原理により、

$$[M]\{\ddot{Z}\}+[C]\{\dot{Z}\}+[K]\{Z\}=\{F\} \tag{1}$$

で表される。$[M]$ は橋梁の全体質量マトリックス、$[C]$ は全体減衰マトリックス、$[K]$ は全体剛性マトリックスである。$\{F\}$は車両の走行により橋梁に加わる外力ベクトルである。

5. 2　動的応答解析法[7)]

(1)　概説

動的応答解析法はモーダルアナリシス法と直接積分法に分けられる。モーダルアナリシス法は固有値解析から得られた任意の数の固有振動数と振動モードを用いて、比較的容易に解が得られ、考慮する振動モードの数により解が変化することが特徴である。一方、直接積分法は式(1)の微分方程式を厳密に計算することができる。本研究では直接積分法による解析を実施した。

(2)　数値積分手法[8)]

本研究では、式(1)を次式の(2)と(3)に示すNewmark's β 法を用いて解いている。

$$\dot{Z}_{t+\Delta t}=\dot{Z}_t+[(1-\delta_e)\ddot{Z}_t+\delta_e\ddot{Z}_{t+\Delta t}]\Delta t \tag{2}$$

$$Z_{t+\Delta t}=Z_t+\dot{Z}_t\Delta t+[(1/2-\beta)\ddot{Z}_t+\beta\ddot{Z}_{t+\Delta t}]\Delta t \tag{3}$$

β と δ_e は、積分精度と安定性が得られるように決めるパラメータである。本研究においては、一定平均加速度法に対応する $\beta=0.25$、$\delta_e=0.5$、積分時間間隔 $\Delta t=0.01$ 秒を用いて解析を行った。

(3)　減衰の考慮[8)]

本研究において，減衰マトリックスはRayliegh減衰を仮定している。Rayliegh減衰は、減衰が質量と剛性の1次結合であり、式(4)で表される。本研究では、実橋実験の結果[1)]より鉛直曲げ1次振動モードの $f_1=2.46$Hz で減衰定数 $h_1=0.009$、鉛直曲げ2次振動モードの $f_2=4.86$Hz で減衰定数 $h_2=0.013$ を用いて計算を行い、$\alpha=7.44\times10^{-4}$、$\eta=1.00\times10^{-2}$ の値で解析を行った。

$$[C] = \alpha[K] + \eta[M] \tag{4}$$

$$\alpha = (h_1 f_1 - h_2 f_2)/(\pi(f_1^2 - f_2^2)) \tag{5}$$

$$\eta = 4\pi f_2 (h_2 - \pi f_2 \alpha) \tag{6}$$

5. 3　車両モデルと車両の運動方程式[7)]

車両の挙動および橋梁に加わる外力ベクトル$\{F\}$を算出するために、車両の運動方程式の数値計算を行う必要がある。車両の運動方程式は式(7)で表される。

$$[M_v]\{\ddot{Z}_v\} + [C_v]\{\dot{Z}_v\} + [K_v]\{Z_v\} = \{F_v\} \tag{7}$$

$[M_v]$、$[C_v]$ 、$[K_v]$ は車両の質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスであり、$\{F_v\}$は橋梁が車両に与える外力ベクトルである。また、本研究では、車両モデルは 3 次元 11 自由度系車両モデル[5)]を用いて数値計算を行う。3 次元 11 自由度系車両モデルを図-5 に示す。

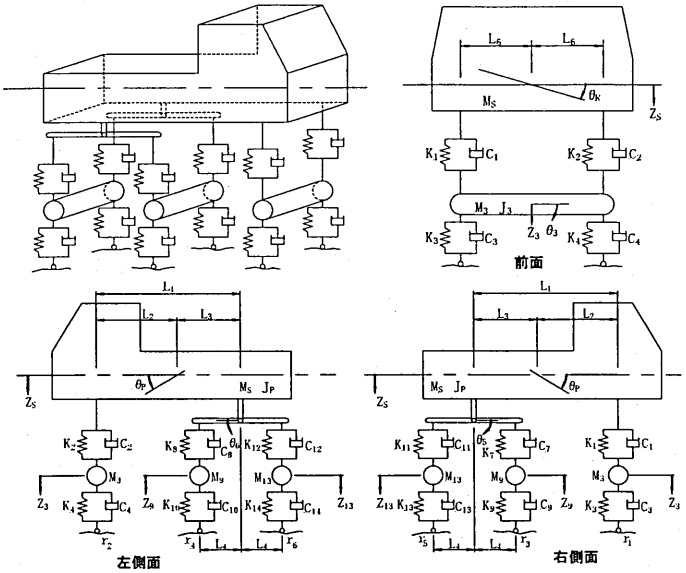

図-5　3 次元 11 自由度系車両モデル[9)]

5. 4　3 次元動的応答解析

(1)　解析条件

図-6 に試験車両走行試験におけるセンサーの設置位置を示す。図中の●はサーボ型振動速度計であり、橋梁の振動を計測する測定点である。■はゲージ型振動変位計で橋梁の振動変位を計測する測定点である。なお、解析点も同様の位置である。図-7 に本橋の 10cm 間隔で測定されたセンターラインから 50cm 離れた縦断方向の路面凹凸形状を示す。解析条件の一例として 196kN の大型車両が上流側を 30km/h で走行したときの実橋実験での応答変位、応答加速度を図-8 に、解析での応答変位、応答加速度を図-9、10 に示す。

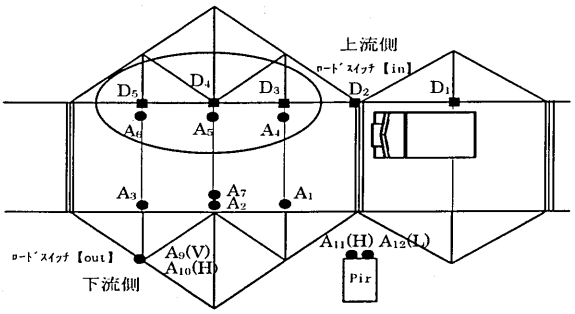

図-6　センサー配置図

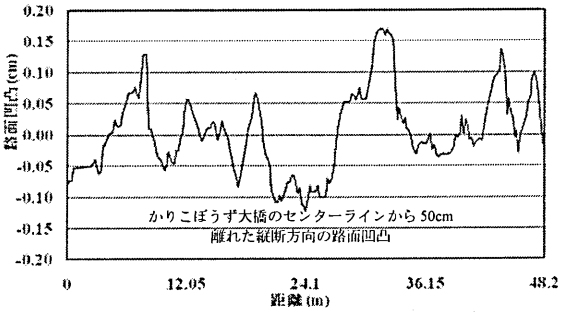

図-7　路面凹凸形状

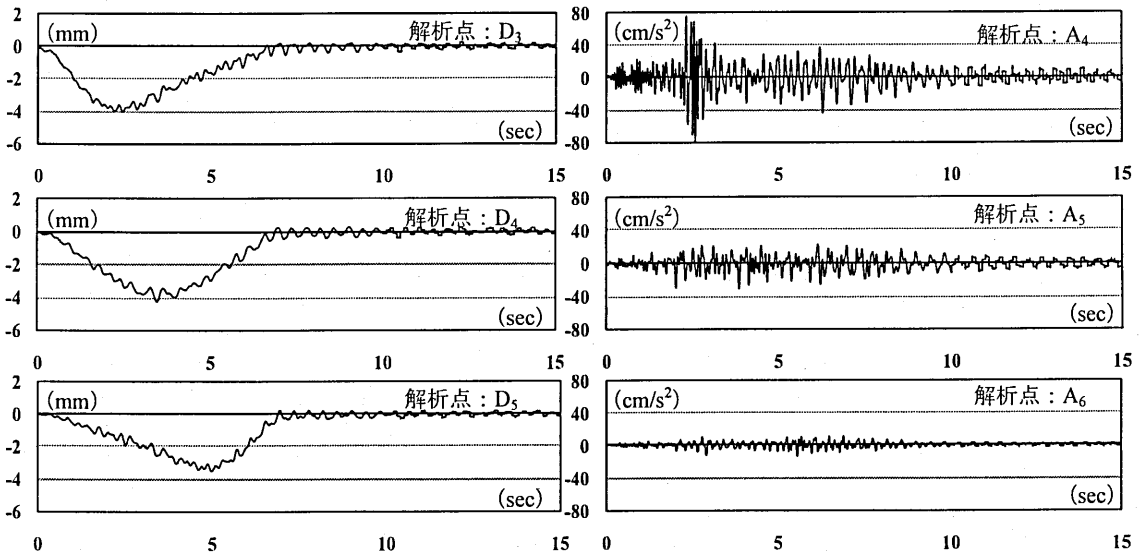

図-8　実橋実験による応答変位と応答加速度の一例

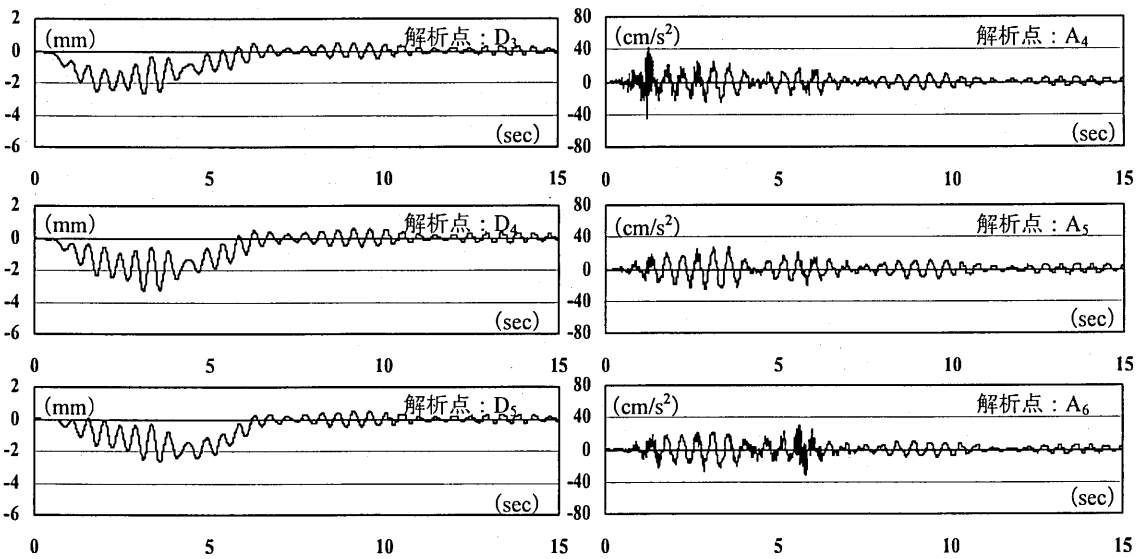

図-9　3 次元動的応答解析によるモデル A の応答変位と応答加速度の一例

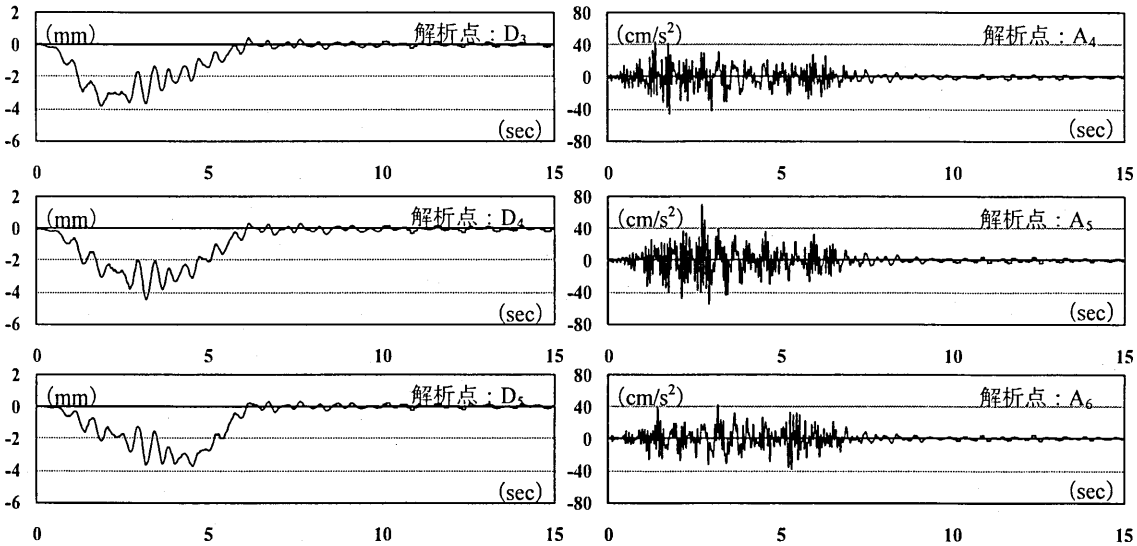

図-10　3 次元動的応答解析によるモデル B の応答変位と応答加速度の一例

(2)　解析値と実験値の比較

図-8、9、10 から応答変位を比較すると、両モデルにおいて応答波形の形状とその最大値の位置は実験値と同様であることがわかる。しかし最大値についてはモデル A において差異が生じている。これは固有値解析の結果からもわかるように床組構造の高さを実橋と同等としたため鉛直曲げ振動に対する剛性が高くなったことに起因している。また、応答加速度を比較すると、両モデルとも解析点 A_4 と A_5 では若干の差異はあるものの波形形状や加速度の最大値は概ね一致しているが、解析点 A_6 については実験値が解析結果と比べ非常に小さくなっている。モデル A と B を比較すると、モデル B が応答変位や応答加速度で最大値が大きい。これらの結果から、2 つの構造解析モデルの床組構造の相違が及ぼす影響が明確に表れていることがわかる。

6. 床組構造の高さの変化による固有値解析と 3 次元動的応答解析

次に床組構造の高さの変化による影響を調べるためモデル A とモデル B とは別に新たな解析モデルを作成した。すなわち床版を面要素、下弦材を棒要素、横桁を棒要素とし、床版と下弦材を繋ぐため棒要素（剛体要素）を用いることでモデル A より簡易的な構造モデル化ではあるが、解析モデルに高さを再現した中間的な解析モデルである。詳細図を図-11 に物性値の一例として各部材のヤング係数を表-5 に示す。そこで本来の床組構造の高さである 3.46m を基準とし 0.5m 間隔で床版と下弦材の間にある横桁の高さを変化させることにより、解析モデルの床組構造の高さを変化させた。固有値解析の結果を表-3 に示す。また、3 次元動的応答解析の解析条件は前項と同様に、Newmark's β 法を用いて一定平均加速度法に対応する $\beta=0.25$、$\delta_e=0.5$、積分時間間隔 $\Delta t=0.01$ 秒を用い、減衰は Rayliegh 減衰を仮定し、$\alpha=7.44\times10^{-4}$、$\eta=1.00\times10^{-2}$ を用いて解析を行った。床組構造の高さを 2.46m、2.96m、3.46m、3.96m、4.46m とした時の 3 次元動的応答解析の図-6 の A_5 点における応答加速度の結果の一例を図-12 に示す。

表-6 と図-12 より、床組構造を高くすることで鉛直曲げに対する剛性は高くなり、逆にねじれに対する剛性は低くなる傾向が見られる。3 次元動的応答解析の結果を見ても床組構造を高くす

るにつれ応答加速度の波形の形状は変化がないが、最大値は小さくなる傾向にある。これらの結果より、高さを変化させた場合では固有値解析と3次元動的応答解析の両面において実際の高さと同じである3.46mの条件が最も良い結果となった。これは実際的な解析モデルであり、床版以外の部材を棒要素で作成し剛体要素を用いることで実際の高さを再現しているため、この解析モデルはより実橋に近い剛性を得たと考えられる。そのため本章のように巨大な床組構造の高さを考慮し、モデル化する場合は、実際の高さと同様の高さを持たせることが最良のモデル化と言える。

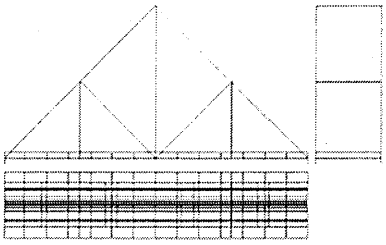

図-11　解析モデル

表-5　解析モデルのヤング係数

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
上弦材	3.40
斜材	2.00
鋼材	210.00
剛体	21000

表-6　高さの変化による固有振動数と振動モード

振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)					
		実験値	解析値				
			2.46m	2.96m	3.46m	3.96m	4.46m
1	トラス水平	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98
2	鉛直曲げ対称1次	2.46	2.38	2.40	2.46	2.55	2.66
3	ねじれ対称1次	3.30	3.21	3.20	3.16	3.09	3.01
4	鉛直曲げ逆対称1次	4.86	4.56	4.66	4.90	5.22	5.58
5	ねじれ逆対称1次	6.74	6.70	6.70	6.70	6.68	6.63
6	鉛直曲げ対称2次	7.16	6.72	6.92	7.26	7.59	7.93

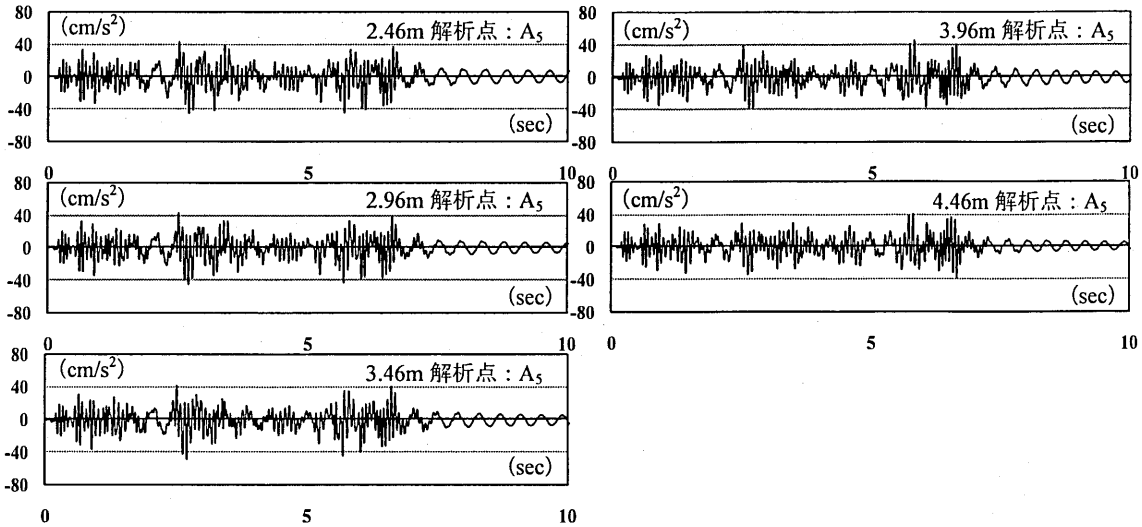

図-12　床組構造の高さの変化による3次元動的応答解析の応答加速度の一例

7. あとがき

本研究ではモデルの違いと床組構造の高さの違いによる固有値解析と新たに走行車両による本格の 3 次元動的応答解析を行い、それぞれについて構造性能、動的応答特性について検討を行ったその結果、モデル A は固有値解析、3 次元動的応答解析の両面において整合性が高いと言える。よってモデル A のように巨大な床組構造に対して実際の高さを持たせるモデル化は妥当と言える。モデル B は 3 次元動的応答解析において良い結果が出た。しかし、固有値解析の高次の振動モードにおいて差異が生じた。これは約 3.5m と巨大な床組構造をモデル化する際、同一平面としたことにより床組構造の剛性が低く評価されたと考えられる。そのため、本研究のように顕著に巨大な床組構造を同一平面でモデル化することは妥当ではない。しかし、3 次元動的応答解析の結果より構造モデル化の相違による固有値解析に及ぼす影響が明確になった。また、床組構造の高さの変化による解析や固有値解析においても実際の高さを持たせた解析モデルから高さを変化させたことにより、鉛直の固有振動数においてもねじれ振動においても共に大きく剛性が変化したことなどから、床組構造の高さの相違の影響が振動特性に明確に表れた。

以上のことから、本研究のように対象橋梁の床組構造が顕著に巨大な場合、モデル化をする際に、面要素等の接合がやや困難な点はあるが、実際の構造が有している高さを考慮することが重要であると言える。

これらの結果より対象橋梁の動的応答特性を評価するには未だ不十分である。そのため、構造モデル化の再検討や物性値の検討などを踏まえた上で、今後も走行車両による対象橋梁の 3 次元動的応答解析を行って、振動波形を含む動的応答特性から構造解析モデル化法に検討を加えて行く所存である。

参考文献

1) 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.
2) 伊東隆博・本田秀行：大規模木製トラス車道橋の構造モデル化と構造特性,土木学会・第 7 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp.21-28,2008 年 8 月.
3) 有村英樹・木場和義・一瀬浩二・細田直久：世界最大級の支間を有する車道木橋(かりこぼうず大橋)の施工,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.21-28,2003 年 7 月.
4) 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，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.
5) 中澤隆雄・飯村豊・今井富士夫・三浦功：キングポストトラス木車道橋の力学特性の経年変化，土木学会・第 4 回橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp.53-58,2005 年 7 月.

6) 中澤隆雄・飯村豊・今井富士夫・三浦功：キングポストトラス木車道橋の静的・動的力学特性の経年変化,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. 87-92,2007 年 8 月.
7) 深田宰史：橋梁の動的な性能照査のための立体解析モデルの確立に関する研究、金沢大学博士（工学）学位論文、1991.1
8) K.J.Bathe、E.L.Wilson、菊池文雄訳：有限要素法の数値計算、科学技術出版社、1979
9) 本田秀行・橋野智洋・田中孝義：振動実験による 20tf および 25tf 大型貨物車の振動特性と 3 次元車両モデルの諸言,橋梁振動コロキウム'97 論文集，pp. 147-152,1997 年 10 月.