

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

Structural Characteristics and Analytical Models of Timber Cable Stayed Bridge

本田秀行

Honda Hideyuki

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 7-1)

ABSTRACT The preparation of the structural model for timber bridges is generally more difficult than steel and concrete bridges. Then, for world-largest timber cable stayed bridge (Yokura bridge) which used glulam for stiffening truss girder, structural characteristics by various structural model was examined in this study from both sides of experiment of the bridge and faithful three-dimensional structure analysis. In addition, rigidity conversion formula necessary for the three-dimensional fish bone model was made in this paper and investigated validity of the model on static and dynamic characteristics.

Keywords : 木橋, 斜張橋, 構造モデル

timber bridge, cable stayed bridge, structural model

1. まえがき

構造用大断面集成材などを使用した近代木橋は、欧米の主要国から40年後に架設が行なわれ、わが国での近代木橋は15年ほどの歴史よりない。この短期間の中に、わが国では約1,000橋近い木橋が架設されている。そのほとんどが歩道橋であるが、約40橋の本格的な車道橋も架設されるようになってきた。しかし、木製橋梁の設計法や安全性に関係する構造解析と剛性評価などの研究は、単体の木部材に対する検討は日本建築学会や日本木材学会などで多く行なわれているが、橋梁全体に対する検討は研究者も少ないこともあって国内外的にも少ないのが現状である。

そこで、本研究では、木製橋梁の構造解析や剛性評価を行うための基礎資料や一般的な3次元魚骨構造モデルを作成する際のモデル化を検討するために、先ず対象橋梁の3次元構造モデルを忠実に作成し、MSC/NASTRANを用いて静的および固有値解析を実施した。そして、補剛トラス桁の各点部を剛結合、ピン結合、弾性ばねを挿入する中間剛性モデルに対する振動特性に検討を加えている^{1)~4)}。さらに、3次元魚骨構造モデルを作成するための剛性換算式を検討し、その式の妥当性を静的解析および固有値解析の結果と対象橋梁の実験値との比較を基に検討を加えている。

2. 対象橋梁

本研究で対象とした橋梁は、新広島空港周辺の広島県立中央公園内のサイクリングロード1号橋で、平成6年に開催された広島アジア大会の施設の一部として平成5年に架設された橋梁である。

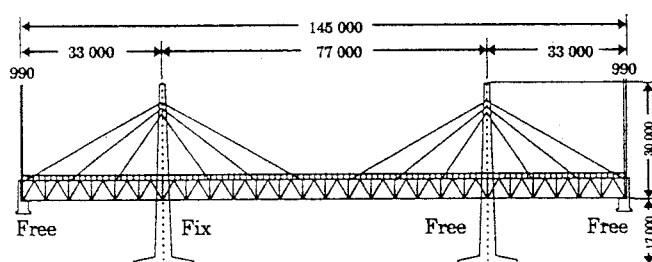


図-1 解析での対象橋梁

構造的には、図-1 に示すようにトラス補剛桁を有する2面吊り斜張橋で、中央支間長が77 m、橋長145 mの旧 TL-14 荷重で設計された世界最大の木斜張橋である。本橋は、タワーがコンクリート製であるが、トラス補剛桁等が集成材を使用した木製橋梁である点の特徴になっており、その重量は1470 kNを超える大規模なものである。

本橋は、完成後すぐに静的・動的実橋実験^{5), 6)}が実施された。その実験で得られた振動特性値を表-1に示す。また、静的たわみ値は、中央径間1/2点载荷で14 tf車1台が9.3 mm、14 tf車2台直列が16.2 mm、14 tf車4台直列が24.4 mmであった。

表-1 対象橋梁の振動特性実験値

Vibration modes	Resonance curve	Ambient vibration	Free vibration
Vertical 1st	2.04 (Hz)	2.21 (Hz)	2.03 (Hz)
Torsional 1st	3.37	3.45	3.39
Vertical 2nd	3.98	4.09	4.12
Vertical 3rd	4.30	5.02	4.44

3. 立体構造モデル

3.1 モデル化

対象橋梁の立体構造モデルを図-2に示す。この構造モデルは、魚骨モデルに置換する前の基礎的研究として節点数498、要素数1174の上下弦材、斜材、垂直材、上下横構、地覆や高欄に至るまで実橋を忠実にモデル化している。なお、このモデル化における部材質量の算定では、鋼部材の他にケーブル定着金具、部材接合金具やそのボルト本数も考慮している。

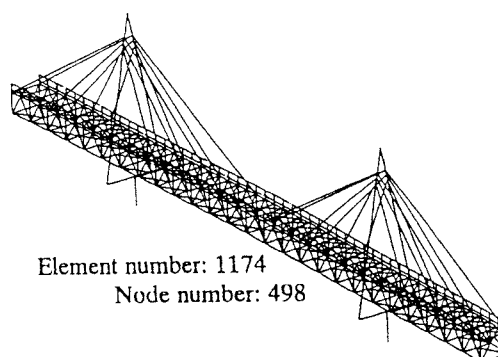


図-2 立体構造モデル

本橋においては、トラス補剛桁の格点接合部がボルト締めしてあるため、実際の格点部は半剛結であると考えられる。そこで、以下の解析においては、解析するに当たって格点部を剛結合にした構造モデルと、ピン結合にした構造モデル、さらに実橋格点部を忠実にモデル化した半剛結の構造モデルを作成し、それら構造モデルによる構造特性に検討を加えた。

なお、集成材は防腐剤を加圧注入されたひき板（ラミナ）を接着剤で加圧接着した断面になっている。その断面も強度の強い樹種のひき板を断面の上下箇所を用いるなど、ひき板の断面構成に多くの種類がある。もちろん、スギやヒバなど樹種によって比重やヤング係数などの物性値は定まっているが、構造用集成材の断面として有効な物性値はひき板同士の平均値にならない。このように、鋼やコンクリート材料の物性値は確定値と考えられるが、集成材の場合には含水率、比重、ヤング係数などの物性値が一つの確定値にならない点が木橋の構造解析と実験値との整合性を困難にしている。

3.2 剛結合とピン結合モデル

構造解析においては、前述した剛結合とピン結合の両モデルに対して静的および固有値解析を様々な条件で行った。以下の解析では、ケーブルの張力も考慮している。

(1) 静的解析

静的解析では実験条件と同様に、中央径間中央部に14 tf車の前・後輪荷重を载荷して中央径間中央点での静たわみ値を求めた。

本橋は集成材のヤング係数が $E=1.1 \times 10^6$ tf/m²で設計されている。しかし、前述したように、このヤング係数値が実態値でないことから、構造系全体としてのヤング係数を評価するために集成

材のヤング係数を $E=1.1 \times 10^6 \text{ tf/m}^2 \sim 3.3 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$ まで変えた解析を行った。その結果を示したのが、図-3 である。表中の Rigid frame struc.が剛結合を、Truss structure がピン結合モデルを示している。

一般的に、格点部をピン結合にした場合より剛結合にした方が大きい静たわみ値になっている。

これは、ピン結合による格点部の折れによってケーブル張力が増加する結果として静的たわみ値が小さくなることを解析的に検証している。いま、9.3 mm の実験値を規準にすると、 $E=1.5 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$ 前後が構造系全体としてのヤング係数値と思われる。なお、集成材のポアソン比が静たわみに及ぼす影響はほとんど認められなかった。

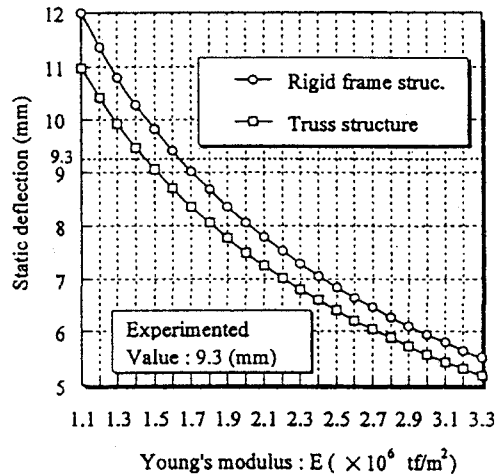


図-3 集成材のヤング係数と最大静たわみ

(2) 固有値解析

固有値解析では、静的解析で得られた結果を基に、

集成材のヤング係数を $E=1.1 \times 10^6 \text{ tf/m}^2 \sim 1.7 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$ の範囲で解析を行った。固有値計算は、修正ギブンス法とランチョス法を用いている。

本橋の設計では、集成材の単位体積重量として $\rho=0.5 \text{ tf/m}^3$ が用いられているが、建築学会等では一般的に $\rho=0.8 \text{ tf/m}^3$ 前後の値が多く用いられているようである。ちなみに、この $\rho=0.8 \text{ tf/m}^3$ 前後の値は、ひき板の樹種や含水率によって変動するが、集成材の接着剤や接合部の鋼添接板・ボルト・ドリフトピンの重量などを総合した単位体積重量と言われている。

本来、集成材の単位体積重量は一つの確定値にならない上述したことを踏まえ、集成材補剛トラス桁の単位体積重量を $\rho=0.5 \text{ tf/m}^3$ 、 $\rho=0.65 \text{ tf/m}^3$ 、 $\rho=0.8 \text{ tf/m}^3$ の値で、剛結合とピン結合の両構造モデルに対して固有値解析を実施した。その結果を示したのが、表-2 である。表中の値は、集成材のポアソン比を $\nu=0.5$ として、剛結合とピン結合モデルを節点質量系に置換して修正ギブンス法で求めた値である。

一般的に、トラス格点部をピン結合にしたモデルは、剛結合モデルより若干固有振動数が小さい傾向にある。また、単位体積重量が大きくなるにつれて両解析モデルとも固有振動数が小さくなり、逆にヤング係数の増加によってその値が大きくなる傾向が見られる。

表-2 に示した実験値と両解析モデルを比較すると、剛結合モデルの方がより実験値に整合して

表-2 剛結合とピン結合構造モデルでの振動特性解析値

Vibration modes	Rigid frame structure with lumped mass model												Truss structure with lumped mass model															
	$\rho = 0.5 \text{ (tf/m}^3\text{)}$				$\rho = 0.65 \text{ (tf/m}^3\text{)}$				$\rho = 0.8 \text{ (tf/m}^3\text{)}$				$\rho = 0.5 \text{ (tf/m}^3\text{)}$				$\rho = 0.65 \text{ (tf/m}^3\text{)}$				$\rho = 0.8 \text{ (tf/m}^3\text{)}$							
	Young's modulus of glue laminated timber : $E \text{ (} \times 10^6 \text{ tf/m}^2\text{)}$																											
	1.1	1.3	1.5	1.7	1.1	1.3	1.5	1.7	1.1	1.3	1.5	1.7	1.1	1.3	1.5	1.7	1.1	1.3	1.5	1.7	1.1	1.3	1.5	1.7	1.1	1.3	1.5	1.7
Horizontal 1st	1.91	2.07	2.24	2.36	1.82	1.87	2.11	2.25	1.73	1.88	2.02	2.14	1.81	1.97	2.11	2.25	1.67	1.87	1.95	2.07	1.55	1.68	1.80	1.92				
Vertical 1st	2.27	2.38	2.49	2.58	2.15	2.26	2.35	2.45	2.05	2.15	2.24	2.33	2.17	2.36	2.48	2.58	1.95	2.11	2.27	2.42	1.79	1.94	2.09	2.22				
Torsional 1st	3.40	3.61	3.82	4.00	3.19	3.39	3.57	3.75	3.00	3.18	3.36	3.52	3.39	3.60	3.80	3.99	3.19	3.39	3.57	3.75	3.01	3.19	3.36	3.53				
Horizontal 2nd	4.18	4.53	4.88	5.16	3.97	4.30	4.61	4.90	3.78	4.10	4.39	4.67																
Vertical 2nd	4.42	4.74	5.05	5.30	4.18	4.48	4.75	5.01	3.97	4.25	4.51	4.76	4.41	4.73	5.02	5.29	4.03	4.37	4.69	4.99	3.72	4.04	4.34	4.62				
Horizontal 3rd	4.66	5.06	5.46	5.75	4.43	4.81	5.15	5.47	4.26	4.62	4.95	5.26																
Vertical 3rd	4.79	5.17	5.56	5.88	4.53	4.89	5.24	5.56	4.31	4.66	4.99	5.30	4.78	5.16	5.53	5.87	4.33	4.71	5.06	5.39	3.97	4.25	4.56	4.86				
Horizontal 4th	4.85	5.26	5.66	5.98	4.61	5.00	5.36	5.69	4.42	4.79	5.13	5.45																
Vertical 4th	6.02	6.45	6.87	7.23	5.70	6.10	6.48	6.83	5.39	5.80	6.18	6.54	5.96	6.43	6.82	7.20	5.38	5.84	6.27	6.67	4.99	5.42	5.82	6.19				
Vertical 5th	6.13	6.57	7.01	7.37	5.78	6.21	6.60	6.97	5.45	5.83	6.20	6.54	6.12	6.56	6.97	7.38	5.75	6.19	6.59	6.96	5.43	5.82	6.18	6.54				

ρ : Gravity of glue laminated timber, Poisson's ratio $\nu=0.5$

いると言える。

例えば、剛結合モデルで、 $\rho=0.8 \text{ tf/m}^3$ 、 $E=1.1 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$ の場合の解析値は、鉛直曲げ 1 次、2 次、3 次振動モード良く一致している。しかし、ねじれ 1 次固有振動数は、実験値と間に 1 割強の差異が生じている。

修正ギブンス法を用いて節点質量系と分布質量系とを両解析モデルで計算した結果、振動モード別で多少の変動はあるが、両解析モデルとも分布質量系の方が若干ながら小さい値になる傾向が認められる。これは、両質量系での相違に関して、分布質量系では質量が部材に直接かかるために部材同士が結合される格点部の結合条件による影響を受けやすく、一方節点質量系では質量が節点に直接かかり格点部の結合条件による影響をあまり受けないことに起因しているものと考えられる。

分布質量系の場合、 $\rho=0.8 \text{ tf/m}^3$ で $E=1.1 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$ の剛結合において、水平 1 次が 1.68 (Hz)、鉛直 1 次が 2.02 (Hz)、ねじれ 1 次が 3.15 (Hz)、鉛直 2 次が 3.93 (Hz)、鉛直 3 次が 4.29 (Hz) の解析値となり、節点質量系の場合よりねじれ 1 次に若干の差異があるが、実験値により近い結果となった。

分布質量系において修正ギブンス法とランチョス法とによる固有値計算方法別での検討では、両解析モデルともほとんど同様な解析結果となった。

図-4 に、一例として、表-2 に示した $\rho=0.8 \text{ tf/m}^3$ 、 $E=1.1 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$ の値を用いた剛結合モデルでの解析による 5 次振動までの振動モードを示す。

以上の立体構造モデルでの固有値解析によって、トラス格点部をピン結合より剛結合にした方が実験値との整合性は高く、剛結合モデルでもそれなりの結果を得られるものと思われる。

3.3 中間剛性モデル

前節でトラス格点部を剛結合にした場合でもそれなりの結果が得られることが認められた。しかし、集成材補剛トラス桁の格点部は、本質的に完全な剛結合やピン結合でなく、それらの中間的な剛性を有する結合であるものと考えられる。

そこで、図-5 のように本橋トラス桁の 5 種類の格点部構造について、5 箇所の格点部種類に対する 3 次元モデル化を試みた。これら 5 つの格点部を Gird Type-a ~ Gird Type-e とする。Gird Type-a と Gird Type-d は、トラス桁ブロック同士の接合点であり、ガセットプレートも他の格点部より大きく千鳥配置のボルト接合となっている。

図-6 は、図-5 に示した格点部構造に対する 3 次元モデルである。集成材はソリッド要素を、ガセットプレートは 3 および 4 節点シェル要素を用いた。集成材接合は、基本的に支圧接合に近い。そこで、格点部のモデル化では、ガセットプレ-

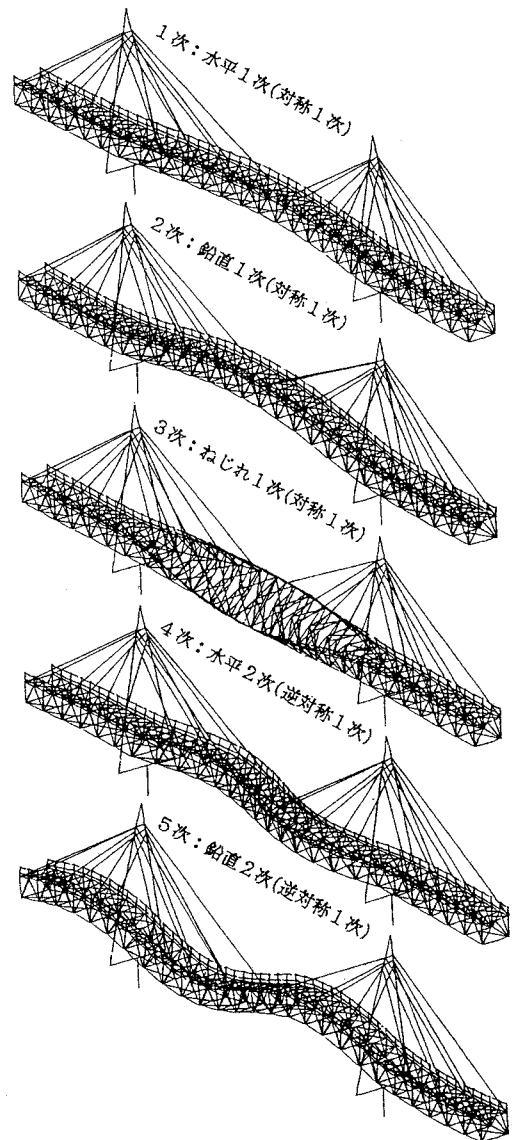


図-4 解析による振動モード例
($\rho=0.8 \text{ tf/m}^3$ 、 $E=1.1 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$)

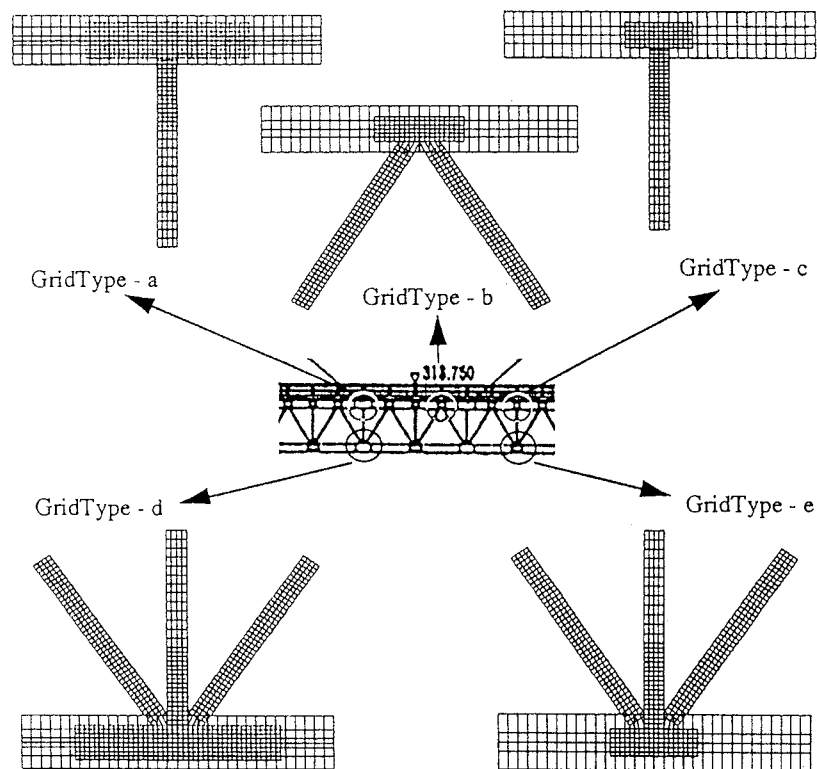


図-5 対象橋梁の格点部構造

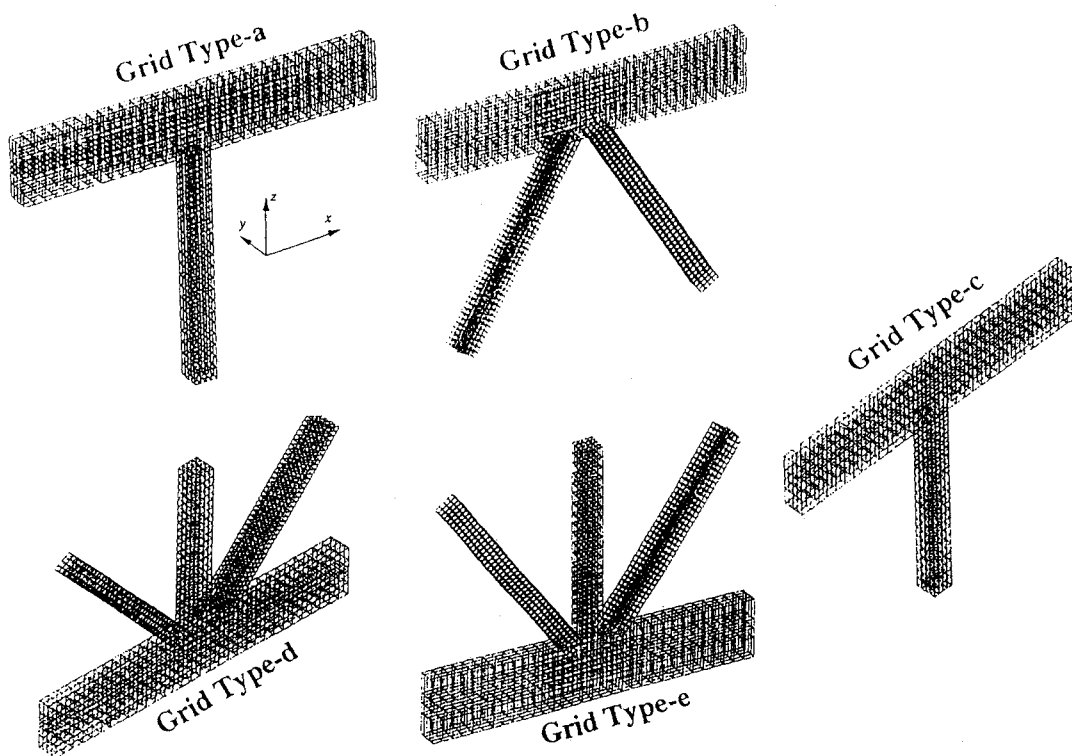


図-6 格点部の3次元モデル

トと集成材の接合部にばね要素を用いて実橋でのボルト締めとして接合されている接合条件を可変できるように考慮している。格点部モデルに対する静的解析から荷重と変位関係等を求め、橋軸、水平、鉛直方向の格点部に関するばね定数やたわみ角等を検討した。その結果を基に、図-2 に示した立体構造モデルの全格点部に6成分のばね定数等を挿入した節点質量系モデルによって固有値解析を実施した。その結果を表-3 に示す。 $\rho=0.8 \text{ tf/m}^3$, $E=1.1 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$ の場合に実験値と良く対応しているが、ねじれ1次振動モードである2.94 (Hz)の固有振動数が実験値の3.98 (Hz)に比べて小さくねじれ定数等の算定に検討の余地が残る。なお、各振動次数による振動モードは、図-4 に示した振動モードと基本的には同様な結果になっている。

表-3 中間剛性モデルでの振動特性解析値

Vibration modes	$\rho=0.5 \text{ (tf/m}^3)$			$\rho=0.65 \text{ (tf/m}^3)$			$\rho=0.8 \text{ (tf/m}^3)$		
	Young's modulus of glue laminated timber : E ($\times 10^6 \text{ tf/m}^2$)								
	1.1	1.3	1.5	1.1	1.3	1.5	1.1	1.3	1.5
Horizontal 1st	1.86	2.01	2.16	1.77	1.91	2.05	1.69	1.82	1.96
Vertical 1st	2.26	2.36	2.47	2.14	2.24	2.34	2.04	2.13	2.22
Torsional 1st	3.33	3.52	3.72	3.13	3.31	3.48	2.94	3.11	3.27
Horizontal 2nd	4.05	4.36	4.67	3.84	4.14	4.43	3.66	3.94	4.22
Vertical 2nd	4.40	4.69	4.98	4.16	4.43	4.71	3.95	4.21	4.47
Horizontal 3rd	4.52	4.87	5.22	4.29	4.63	4.96	4.12	4.44	4.76
Horizontal 4th	4.70	5.06	5.43	4.47	4.81	5.16	4.28	4.61	4.94
Vertical 3rd	4.75	5.12	5.49	4.49	4.84	5.19	4.28	4.61	4.95
Vertical 4th	5.94	6.34	6.73	5.62	6.00	6.37	5.26	5.63	6.00
Torsional 2nd	6.03	6.45	6.86	5.64	6.04	6.44	5.38	5.74	6.09

ρ : Gravity of glue laminated timber, Poisson's ratio $\nu=0.5$

いま、 $\rho=0.8 \text{ tf/m}^3$, $E=1.1 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$ の場合を基に、表-2 の剛結合モデルと表-3 に示した中間剛性モデルとを比較すると、両者の振動特性値に関する有意な差は見られない。

トラス格点部の中間剛性評価のためのモデル作成は容易ではなく、またその剛性に関するばね定数等の算定も困難であり、さらにそれらの結果を基にした立体構造モデルの作成は非常に困難を要する。

以上の結果から、対象橋梁の補剛トラス桁に関しては、格点部が6自由度成分を有する単純な剛結合と考えた方が解析も容易であり、また実験値に比較的近い整合性のある結果が得られた。

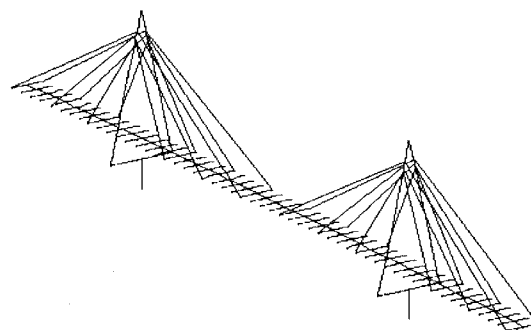


図-7 魚骨構造モデル

4. 魚骨構造モデル

4.1 モデル化

前章で述べた立体構造モデルは、対象とした橋梁の構造を忠実にモデル化する意味において簡便な方法である。しかしながら、そのモデル作成には多大な時間を要する。一般的には、立体の構造モデルを簡便な1本の橋軸ばりや横ばりなどに置換した魚骨構造モデルが実際的に多く作成される。そして、その魚骨構造モデルを用いた各種の構造解析によって、対象橋梁の構造特性などが検討されている。

図-7に、本研究で作成した魚骨構造モデルを示す。鋼橋やコンクリート系橋梁では一般的な魚骨構造モデルであるが、木橋の場合にはまったく検討されていない。特に、木橋は地覆や高欄も木製の場合が多い。高欄は強度を確保するために大断面の集成材を、さらにその高欄を支えるために地覆も大断面の集成材が採用され、これら高欄や地覆の断面の橋軸曲げ剛性を無視できない。

鋼橋やコンクリート系橋梁では、高欄や地覆の曲げ剛性を無視して非構造質量として付加質量を考えるのが一般的であるが、木橋の場合には、前述の理由から地覆や高欄の付加質量以外に橋軸曲げ剛性も無視できない。さらに、集成材の3次元トラス補剛桁を1本のはりと横ばりに剛性を置換する方法の研究はまったく行なわれていないのが現状である。

4.2 剛性換算式

魚骨構造モデルは、上下弦材、斜材、鉛直材、地覆、高欄などの要素を1本ばりに置換するために、精度の高い剛性換算式の開発が必要である。そこで、本研究では、参考文献 7) を基に、

対象橋梁に適用できる剛性換算式を検討した。以下に、集成材3次元トラス補剛桁の1本ばり、横ばり、高欄と地覆・床版の曲げ剛性に関する換算式を示す。

(1) 1本ばりの剛性換算式

断面積 $A = 2(A_u + A_l)$

断面二次モーメント(面内)

$$I_v = \frac{2A_u \times A_l}{(A_u + A_l)} \times h^2 \quad \dots (1)$$

断面二次モーメント(面外)

$$I_h = \frac{A_u + A_l}{2} \times b^2 \quad \dots (2)$$

純ねじり定数

$$J = \frac{1}{G} \times \frac{b_1^2 - b_2^2}{b_1} \quad \dots (3)$$

$$b_1 = G(t_1 \cdot b + t_2 \cdot h) \frac{b \cdot h}{2}$$

$$b_2 = G(t_1 \cdot b - t_2 \cdot h) \frac{b \cdot h}{2}$$

$$t_1 = \frac{E}{G} \cdot \frac{A_a \cdot y \cdot b}{2a^3} \quad t_2 = \frac{E}{2G} \cdot \left(\frac{A_{b1} \cdot y \cdot b}{4z^3} + \frac{A_{bu} \cdot y \cdot b}{2x^3} \right)$$

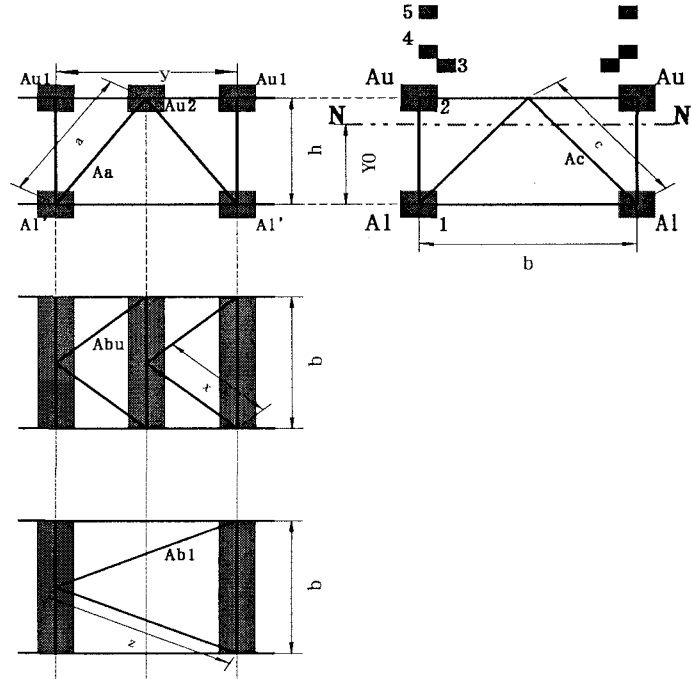


図-8 補剛トラスの部材構成と記号

(2) 横ばりの剛性換算式

横梁は、断面積 $A_a = 2(A_{u1} + A_{l1})$, $A = A_u + A_{u2}$

断面二次モーメント(面内)

$$I_{a1} = \frac{2 \cdot A_{u1} \cdot A_{l1}}{A_{u1} + A_{l1}} \cdot h^2, \quad I_1 = I_{a1} + I_{u1} \quad \dots (4)$$

断面二次モーメント(面外)

$$I_{u2} = \frac{A_{u1} + A_{l1}}{2} \cdot b^2, \quad I_2 = I_{a2} + I_{u2} \quad \dots (5)$$

純ねじり定数 $J = \frac{1}{G} \times \frac{b_1^2 - b_2^2}{b_1} \quad \dots (6)$

$$b_1 = G(t_1 \cdot y + t_2 \cdot h) \frac{y \cdot h}{2} \quad b_2 = G(t_1 \cdot y - t_2 \cdot h) \frac{y \cdot h}{2} \quad t_1 = \frac{E}{G} \cdot \frac{A_c \cdot b \cdot h}{2c^3}$$

$$t_2 = \frac{E}{2G} \cdot \left(\frac{A_{b1} \cdot y \cdot b}{4z^3} + \frac{A_{bu} \cdot y \cdot b}{2x^3} \right)$$

ここに、 A_u 、 A_l は補剛トラスの上下弦材の断面積で、 A_b 、 A_l は補剛トラスの斜材、横構の断面積である。

(3) 高欄と地覆・床版の曲げ剛性の換算法

高欄と地覆・床版の曲げ剛性については、1本ばり方向の断面一次モーメントの和から図心

(N-N) を算出し、断面二次モーメントの公式である $I = I_0 + A \cdot y^2$ を用いて、その値を高欄、地覆、床版の断面二次モーメントを算出した。その具体的な算出方法を以下に記述する。

先ず一本ばり（面内）について式（7）から図心 y_0 を求める。この位置から高欄、地覆、床版までの距離を求めて、この軸に対する断面二次モーメントを式（8）から算出する。上・下弦材部の曲げ剛性 I_v は式（1）から算出できるので、全ての断面二次モーメント I_G は、式（9）のようになる。

1 本ばり（面外）も同様に、式（2）から I_h が得られる。横ばり方向や純ねじり定数には高欄と地覆の曲げ剛性は関与しないので、式（3）～（6）より算出され得る。

$$y_0 = 2 \cdot \sum_{n=1}^5 \frac{G_n}{y_n} \quad \dots (7) \quad I_v = 2 \cdot \sum_{i=3}^5 I_n \quad \dots (8) \quad I_G = I_v + I_v' \quad \dots (9)$$

ここに、 G_n は部材 n の断面 1 次モーメント、 y_n は部材 n の図心までの距離である。なお、以上の式で用いられている記号を図-8 に示す。

(4) 解析法

以下の解析では、上述した剛性の他に実験で測定されたケーブルの固有振動数⁶⁾ から算定した 1 本ずつの合計 24 本のケーブル張力を考慮している。補剛トラス桁の格点部は前章での結果から剛結合モデルとして、また質量に関しては節点質量系として解析を行っている。

(5) 静的解析

集成材の単位体積重量 $\rho = 0.8 \text{ tf/m}^3$ 、ヤング係数 $E = 1.1 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.5$ の場合について解析した結果の一例を図-9 に示す。実験値が 9.3 mm で、解析値が 9.23 mm の結果を得た。また、14 tf 車 2 台を直列に中央径間中央に載荷した時の中央径間中央点での解析値は 17.82 mm であり、実験値の 16.2 mm と比較すると 1.62 mm の差異が生じている。荷重強度が大きくなると差異も大きくなる傾向にあるが、1 台載荷、2 台載荷ともに比較的良い結果となったことから、前述した剛性換算式がある程度の精度を有しているものと考えられる。

(6) 固有値解析

固有値解析はランチョス法を用いた。そして、静的解析と同様、 $\rho = 0.8 \text{ tf/m}^3$ 、 $E = 1.1 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$ 、 $\nu = 0.5$ の場合について解析を行った。その解析値と実験値とを併記して、表-4 に示す。また、解析での基本的な振動モードを図-10 に示す。

以上の解析結果から、鉛直曲げ振動 1 次、2 次、およびねじれ振動 1 次の固有振動数は、実験値に良く対応しており、精度の高い剛性換算が算出されているものと考えられる。

表-4 の中で、3 次振動が水平 1 次振動モード（対称モード）になっている。しかし、表-2、3 に示した立体構造モデルについて解析した結果は、補剛トラス桁の格点部を剛結合、ピン結合、中間剛性に考えたいずれの場合も水平 1 次振動モード（対称モード）は 1 次振動に出現している。水平 1 次の振動モ

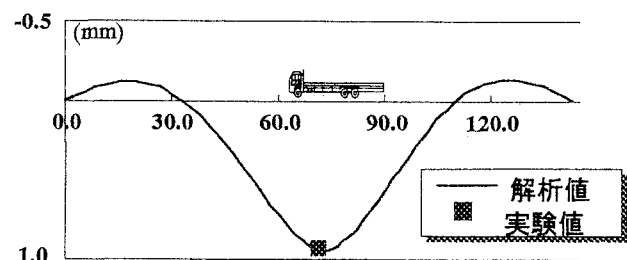


図-9 14tf 車 1 台載荷時の静的たわみ値

表-4 魚骨構造モデルでの固有振動数

No.	Vibration modes	Natural frequencies (Hz)	
		Analyzed	Measured
1	Vertical 1st	1.99	2.04
2	Torsional 1st	3.45	3.37
3	Horizontal 1st	3.64	---
4	Vertical 2nd	3.99	3.98

ードは実験値が同定されていないので正確な判断は困難であるが、長支間橋梁を考慮すると、やはり1次振動に現れることが実際的ではないかと思われる。このことから、本研究で検討した魚骨構造モデルの剛性換算式は、水平方向（面外方法）の剛性換算法に検討の余地があるものと思われる。

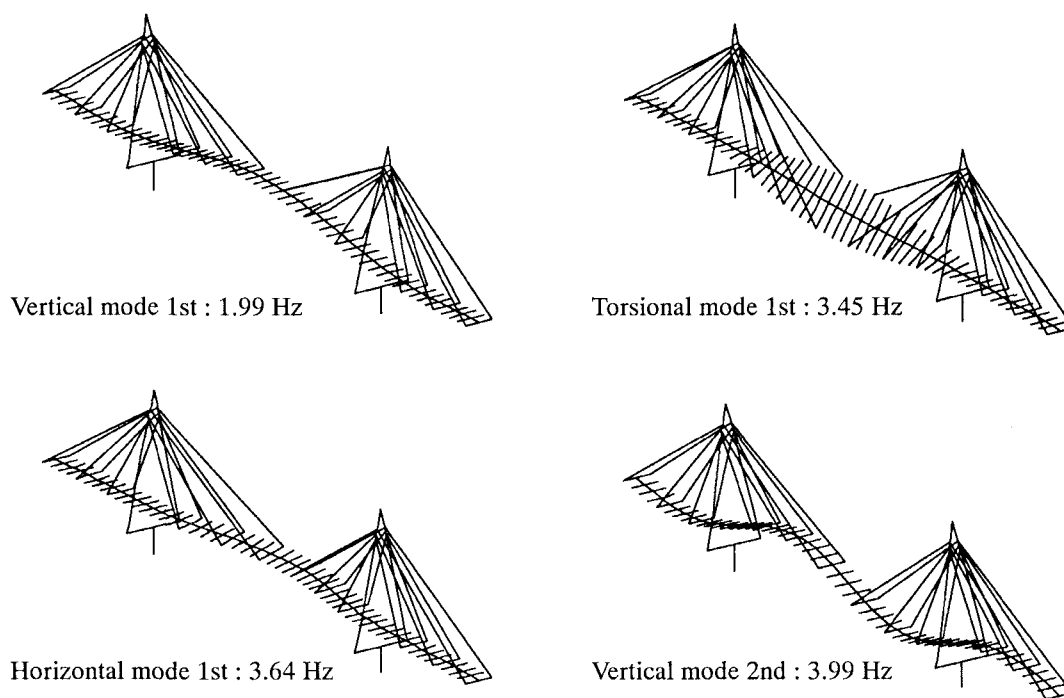


図-10 魚骨構造モデルでの解析振動モード例

4. あとがき

本研究は、木製橋梁の構造解析や剛性評価を行うための基礎資料、あるいは一般的な3次元魚骨構造モデルを作成する際のモデル化を検討するために、補剛トラス桁集成材を使用した斜張橋を対象橋梁に考え、その橋梁の3次元構造モデルを忠実に作成し、静的および固有値解析を実施した。そして、補剛トラス桁の各点部を剛結合、ピン結合、弾性ばねを挿入する中間剛性モデルに対する振動特性に検討を加えた。さらに、3次元魚骨構造モデルを作成するための剛性換算式を検討し、その式の妥当性を静的解析および固有値解析の結果と対象橋梁の実験値との整合性に検討を加えた。

以上の解析から、集成材補剛トラス桁の格点部は、実験値を基にした評価から、ピン結合より剛結合の方が実態に良く合う結果となった。また、5種類のトラス格点部に対する中間剛性モデルでの検討においても、剛結合と中間剛性とは、振動特性に対して両者に有意の差が見られなかった。

魚骨構造モデルに対する検討では、鉛直曲げ振動1次、2次モードおよびねじれ振動1次モードに精度の高い解析値が得られ、本研究で提示した剛性換算式はある程度の精度を有しているものと考えられる。

しかし、水平振動1次モードに対しては、その剛性換算法が水平方向（面外方向）の剛性を大きく算定する結果となり、今後検討の余地を残している。また、本研究で行った剛性換算

式の検討内容は対象としたある1橋についての木製斜張橋であり、全ての木製斜張橋、あるいは他形式の木橋に適用できるかどうか照査されておらず今後の課題であるが、木橋の構造特性や剛性評価、構造モデル化などの基礎資料になれば幸いである。

参考文献

- 1) 本田秀行・瀬戸繁樹・藤野陽三・岩本政巳・飯村 豊 : 木製斜張橋 (用倉大橋) の静的・動的解析と剛性に関する一考察, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集, I -565, pp.1128-1129, 1994.9.
- 2) 伊藤友彦・本田秀行: 木製斜張橋 (用倉大橋) の構造剛性に関する解析的考察, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, I -B69, pp.138-139, 1996.9.
- 3) Honda H., Fujino Y. and Iimura Y : Structural rigidity of cable stayed bridge used glue laminated timber based on test and analysis, Proc. of the IABSE 15th Congress, pp.1191-1192, 1996.6.
- 4) 本田秀行・高橋宗臣: 木製斜張橋の補剛トラス桁格点部のモデル化と振動特性に関する一解析例, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集, I -B271, pp.540-541, 1999.9.
- 5) 藤野陽三・岩本政巳・加藤雅史・岡林隆敏・本田秀行・長井正嗣・志水茂也・平本勝吉・飯村 豊 : 集成材を補剛桁に用いた斜張橋 (用倉大橋) の振動実験, 橋梁, Vol.29, No.6, pp.19-21, 1993.6.
- 6) 広島県立中央森林公園サイクリングロード 1 号橋「用倉大橋」振動実験報告書, 東京大学工学部土木工学科橋梁研究室, 1994.1.
- 7) 林 正・前田研一・増井由春・内海 靖・山野菜長弘: 長径間吊橋の立体有限変位解析, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.329-342, 1991.3.