

## ハイブリッド型の木桁車道橋の構造特性と構造性能

Structural characteristics and performance of timber highway bridge with hybrid-type girder

○ 大澤雄司\* 本田秀行\*\* 渡辺浩志\*\*\* 久保田努\*\*\*\*

\*金沢工業大学大学院工学研究科環境土木工学専攻 (〒921-8501 石川県石川郡扇が丘 7-1)

\*\*金沢工業大学 環境・建築学部 環境土木工学科 (〒921-8501 石川県石川郡扇が丘 7-1)

\*\*\*ピーシー橋梁(株)東京支店 技術部(〒105-0004 東京都港区新橋 6-17-19 新御成門ビル2階)

\*\*\*\* (株)長野技研 (〒390-1241 長野県松本市新村 2326)

**ABSTRACT** The bridge (Maruyamasawa bridge) subjected in this study is timber girder highway bridge constructed in Nagano prefecture at 2003, and is timber bridge of hybrid type which composed by lag screw between RC slab and each main timber girder inserted four PC steel wire. To investigate the terms on design factors, safety, structural rigidity, environmental vibration problems and store of initial data for maintenance, the static and dynamic tests of the bridge were done in July 2005. The structural characteristics and performances on static and dynamic behaviors were investigated in the terms such as deflection, response vibration, natural frequency, vibration mode, damping coefficient, dynamic increment factor, vibration sense of pedestrians for vibration serviceability and so on. Furthermore, three-dimensional static and eigenvalue analyses of the bridge were also done using FEM. This study is investigated the structural characteristics and performances from the results of the field tests and the analyses, and then gives a valuable data to evaluate structural rigidity and design factors for modern timber highway bridges.

**Keywords:** 集成材 ハイブリッド型木桁 構造特性

*glulam timber, hybrid-type timber girder, structural characteristics*

### 1. まえがき

本研究で対象とした長野県の林道日影入線に架設されている丸山沢橋は、構造形式は単純合成桁木車道橋で、4本のPC鋼線を挿入した集成材主桁とRC床版とをラグスクリューにより結合した合成構造となっており、我が国では初の構造形式の近代木車道橋である。主な長所として、耐荷性能、構造性能、耐久性能の向上、コスト縮減を具現化している。また、木橋にRC床板を採用したことで、積雪地域における主桁の冰雪や雨水対策等の役目も果たしている。本研究では、平成16年に実施した本橋の静的および動的試験から、実験結果と3次元構造解析での解析結果の両面から、本橋の静的・動的構造特性および振動使用性についても検討を加えた。

### 2. 対象橋梁

丸山沢橋は、写真-1に示すように『長野県林道木橋標準設計』の桁橋として平成15年3月に初めて施工された橋梁である。

表-1に対象橋梁の設計概要を、図-1,2に一般図および写真



写真-1 丸山沢橋全景

2～4 に主要構造の写真を示す。

表-1 設計概要

形式	活荷重合成単純桁橋
橋格	1級林道橋
橋長	20.000m
支間長	19.000m
幅員構成	7.000m
使用部材	集成材 信州からまつ
舗装	アスファルト舗装
床版	鉄筋コンクリート舗装
横断勾配	-5.00%
上部工構造形式	単純合成集成材桁橋
下部工構造形式	鉄筋コンクリート造逆T式橋台

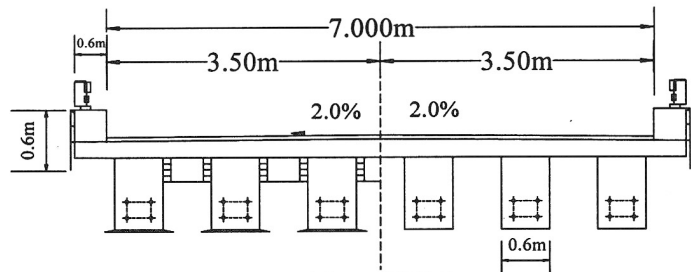


図-1 側面図

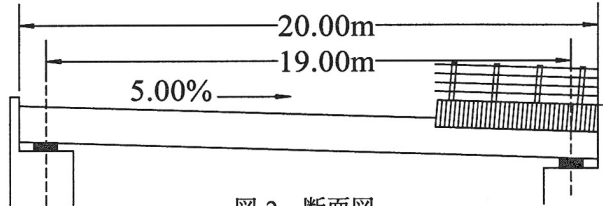


図-2 断面図

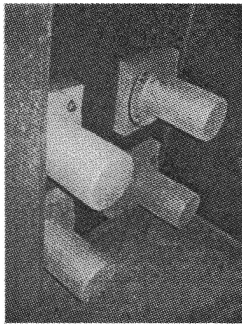


写真-2 PC鋼線による主桁の締め付け

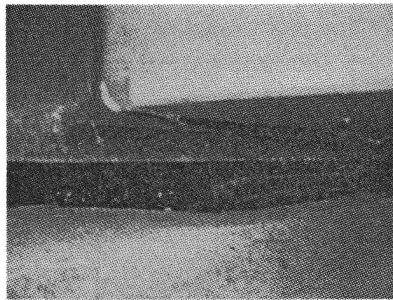


写真-3 ゴム支承部

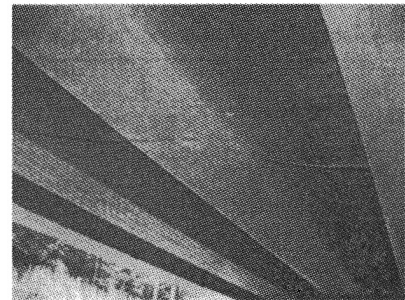


写真-4 床組構造

### 3. 実験概要

本実験では、静的試験と動的試験を行った。静的試験では、試験車を橋面上の各載荷位置に停車させて、静的たわみの測定を行った。また、動的試験では常時微動測定試験、砂袋落下衝撃試験、試験車両走行試験を行い、応答振動の測定を行った。

#### 3.1 静的試験

静的載荷試験では、試験車両を1台もしくは2台載荷させ、鉛直たわみを0.1mm以上の精度で特殊なオートレベル計を使用して測定した。図-3に、試験車両の載荷例と、静的たわみを計測する測定点を示す。写真-5に実験風景を示す。

#### 3.2 動的試験

常時微動試験では、橋梁に外力荷重としての加振源がない状態で、自然の微振動に対する橋梁の応答加速度や応答速度などを測定した。また、砂袋落下衝撃試験では、常時微動測定法で本橋のねじれ振動モードなど振動特性が雑音等によって精度よく検出できない場合もあるので、約30kgの砂袋を高さ約30cmから落下させ、橋梁に純粹の鉛直曲げやねじれ衝撃加振を与え、その時の応答速度を測定した。

試験車両走行試験では、既知荷重として総重量約20tfのダンプトラックを用いて橋面上を1台もしくは2台走行させることにより不規則振動を橋梁に与え、その時の橋梁の応答加速度および応答速度を測定した。走行速度は、10 km/h、30km/h、50 km/h

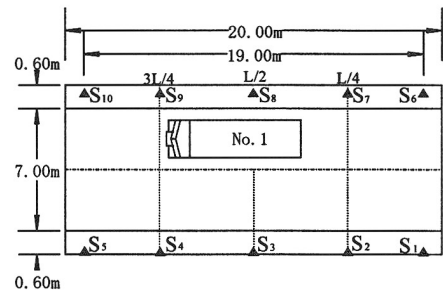


図-3 静的たわみ測定点と載荷位置例

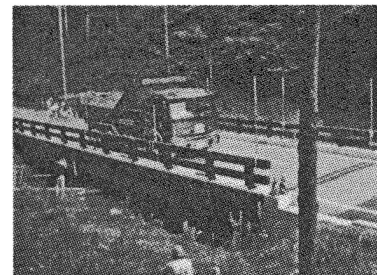


写真-5 静的載荷試験

とした(2台走行時は、30km/hを最高速度とした)。

図-4に動的試験でのセンサー配置位置を、また、写真-7,8にそれらの実験状況を示す。

#### 4. 実験結果

##### 4.1 静的試験

表-2に、各载荷ケースでの鉛直静的たわみの実験結果と解析値を一例として示す。また、図-5に実験結果と解析値を図化した一例および解析モデルを示す。解析は直交異方性格子構造として3次元に構造モデル化し、金沢工業大学計算機センター所有のMSC/NASTRANを用いて行った。本解析では、支承部でのゴムプレートを水平方向の弾性バネ係数に換算して考慮している。

本実験では、試験車2台を下流側に载荷させた時において、静的たわみ値の最大が測定点S<sub>8</sub>での6.6mmである。このとき、上流側のたわみ値はS<sub>3</sub>が最大で0.7mmとなっている。また、同様に上流側に試験車1台をL/2点に载荷させた時のたわみ

値はS<sub>3</sub>での3.7mmであるが、下流側のS<sub>8</sub>では0.3mmほどしかたわんでいないことがわかる。

上流側と下流側とでたわみ値に差異が生じるのは、それは本橋に横桁が架設されていないために、水平方向の荷重分配がされていないことに起因していると考えられる。これらの図において実験値と解析値を比較してみると、多少の差異は生じてはいるが、たわみ形状や荷重分配の有無の傾向を示しており、両者は比較的一致していることがわかる。

次いで、図-6に本橋の静解析によって静的剛性が同定された3次元構造解析モデルに、本橋の設計時での活荷重と同じ载荷方法になるように、床版に設計活荷重を载荷した時の载荷図と着目点を示す。その結果、最大たわみ7.3mmを得た。この値と設計たわみ値14.00mmを比較すると、解析値は設計値よりも小さい。すなわち、本橋完成後の実質的な静的鉛直の曲げ剛性が、2倍ほど大きいことを意味している。従って、本橋は車両等の活荷重に対する実際の抵抗強度と安全性が設計時より大きいことを示していると判断される。

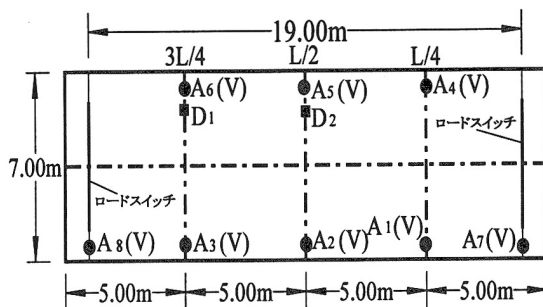


図-4 センサー配置図

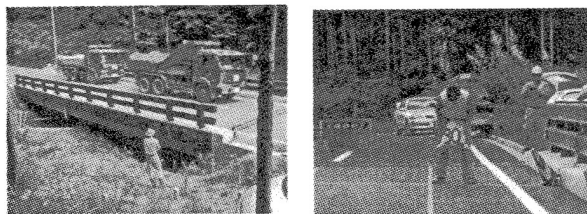


写真-7 試験車両走行試験 写真-8 砂袋落下衝撃試験

表-2 静的たわみの一例

CASE		上流側					下流側				
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
上流側 L/2 点一台载荷	実験値 (mm)	-0.1	2.2	3.7	2.7	0.3	-0.3	0.0	0.3	0.0	0.7
	解析値 (mm)	0.2	2.2	4.1	3.0	0.6	0.0	0.1	0.3	0.3	0.1
センター L/2 点一台载荷	実験値 (mm)	-0.2	0.8	1.5	1.2	-0.2	-0.2	0.7	1.3	0.7	0.2
	解析値 (mm)	0.0	0.6	1.4	1.3	0.3	0.1	1.4	1.6	1.1	0.2
下流側 L/2 点一台载荷	実験値 (mm)	-0.2	0.0	0.4	0.3	0.2	0.1	2.2	4.1	2.7	0.3
	解析値 (mm)	0.0	0.3	0.7	0.9	0.3	0.1	1.7	3.0	2.0	0.3

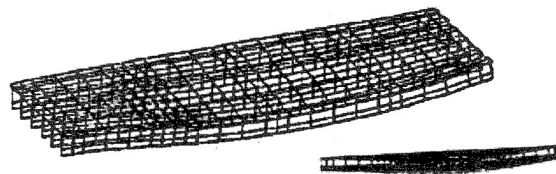
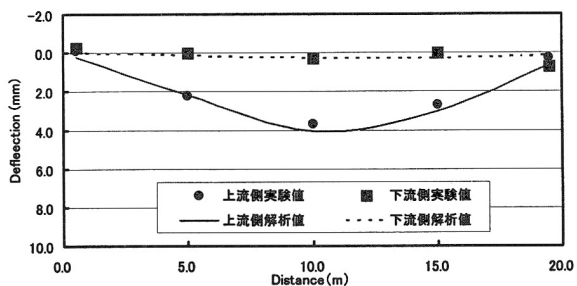


図-5 静的特性の一例(図-3での载荷ケース)

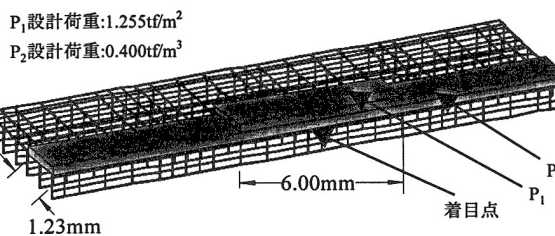


図-6 設計活荷重载荷図と着目点

なお、本橋梁 L/2 点で測定した主桁のひずみ分布によると、設計時の中立軸より約 20cm ほど下がっていることが認められた。これによっても、主桁と床版との合成効果は期待できるものと思われる。

#### 4.2 振動挙動

図-7に、常時微動測定試験における応答速度の一例を、図-8に砂袋落下衝撃試験における応答速度の一例を示す。常時微動試験では、最大速度 0.00032 (cm/s) を、砂袋落下衝撃試験では、0.208 (cm/s) の最大速度が得られた。

図-9に、試験車両走行試験における応答加速度および速度の一例を示す。実験で得られた最大加速度は、図-9に示すように1台(50km/h)の走行時で 121.1 (cm/s<sup>2</sup>)、2台(30km/h)の走行時で 86.1 (cm/s<sup>2</sup>) が得られた。最大速度においては、1台(50km/h)の走行時で 2.2 (cm/s)、2台(30km/h)の走行時で 6.4 (cm/s) が得られた。

#### 4.3 固有振動数と振動モード

表-3に、本橋固有振動数の実験値と解析値を示す。また、図-10に解析結果による振動モードを示す。実験から得られた固有振動モードは、鉛直対称1次振動とねじれ対称1次振動の2つである。実験値と解析値を比較すると、振動特性が両方とも比較的一致し、解析モデルの妥当性が検証される。

表-3 固有振動数と減衰定数

振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)		
		実験値		解析値
		常時微動	砂袋落下	
1	鉛直曲げ対称1次	5.71	5.56	5.39
2	ねじれ対称1次	6.44	6.34	6.39
3	ねじれ逆対称1次	—	—	12.84
4	鉛直曲げ逆対称1次	—	—	14.16

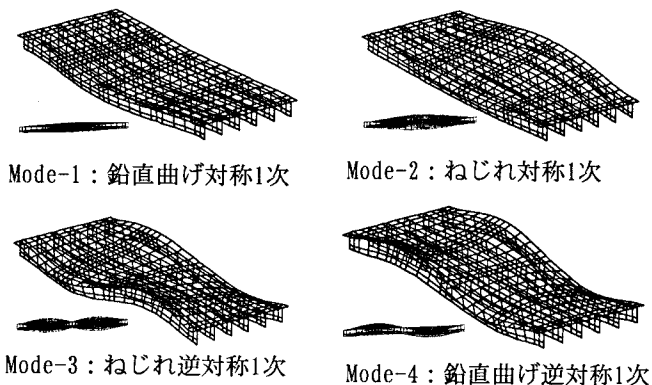


図-10 解析による振動モード

次に、図-11は、近代木橋に対する最大支間長と実験から得られた鉛直曲げ基本振動数との関係を示している。一般的に、橋梁の鉛直曲げ基本固有振動数は、歩道橋、道路橋、鉄道橋ともに、支間長の増大にしたがって、減少する傾向<sup>1)</sup>がある。この遞減傾向は、基本固有振動数を  $f_1$ (Hz)、最大支間長を  $L$ (m) とするとき、概算的に数式で評価される。

$$f_1 = 100/L \text{ (Hz)} \cdots (1)$$

式(1)を用いて、本橋の鉛直曲げ方向の基本固有振動を概算すると、支間長は 19.0m であるか

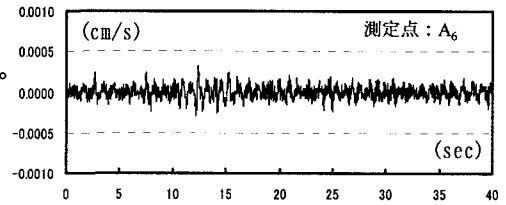


図-7 常時微動測定試験における応答波形

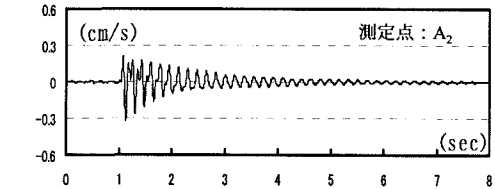


図-8 砂袋落下衝撃試験における応答波形

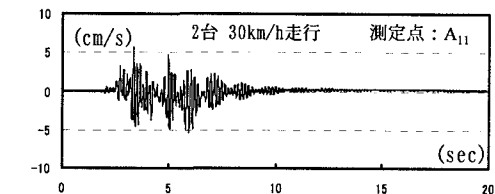
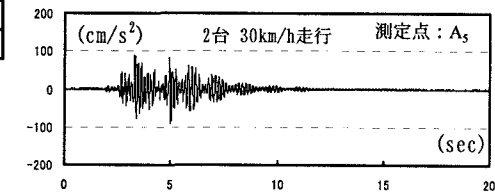
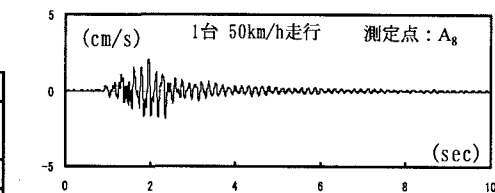
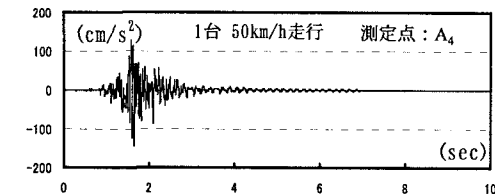


図-9 試験車両走行試験における応答波形

ら 5.26Hz を得る。この値と本橋の鉛直曲げ対称 1 次振動の 5.56Hz を比較すると、同等以上の値となる。すなわち、固有振動数は橋梁の剛性と密接な関係があることから、鉛直振動に関して同支間長、同形式の鋼橋と同等以上の鉛直曲げ剛性を有していると判断される。

#### 4.4 減衰定数

減衰定数の算出には、次式<sup>2)</sup>を用いた。

$$\delta = \log_e (X_{i+1} / X_i), h \doteq \delta / 2\pi \cdots (2)$$

ここに、 $\delta$  は対数減衰率、 $X_i$  は振幅である。振動モード別の減衰定数は、鉛直曲げ対称 1 次振動で 0.016、ねじれ対称 1 次振動で 0.019 であった。本橋を代表とする減衰定数  $h$  は、減衰自由振動波形により得られた鉛直曲げ対称 1 次振動の 0.016 と考えられる。

図-12 は最大支間長と鉛直方向の基本固有振動数に対する減衰定数の関係を示している。構造用集材材を用いた木歩道橋は、橋梁形式や支間長などの要因が関係し、また実測データが不足しているために定量的な評価は困難であるが、鋼橋やコンクリート橋に用いられる減衰定数と支間長  $L(m)$  との関係は  $h = 0.12 / \sqrt{L}$  の式によって、概算的に算出することができる。

本橋の支間長は 19.0m であるから、 $h = 0.028$  を得る。この値と本橋の減衰定数 0.016 を比較すると、本橋の減衰定数が小さい傾向を示している。これは、本橋の橋軸と橋軸直角方向の荷重分配効果などの構造上の特性に起因していると思われる。

#### 4.5 動的増幅率

図-13 に動的応答変位の一例を示す。動的増幅率  $i$  の算出には、次式<sup>3)</sup>を用いた。

$$i = (y_{dy.max} - y_{st.max}) / y_{st.max} \cdots (3)$$

ここに、 $y_{dy.max}$  は最大動的たわみ応答値、 $y_{st.max}$  は最大静的たわみ応答値である。

試験車両走行試験において、図-4 に示した測定点  $D_1$ 、 $D_2$  での振動変位計での応答変位波形から、式(3)を用いて算出された値は、試験車両 1 台を 50km/h でセンターラインを走行させた時の  $D_1$  で 0.197、 $D_2$  で 0.212 を示している。下流側での試験ケースにおいては、さらに大きな値が得られているが、車両走行ケースや振動変位計の設置位置などを考慮すると、この値が最も妥当であると考えられる。

図-14 は、近代木橋の設計衝撃係数 0.25 と実橋実験より得られた実験値を比較したものである。一般的に、支間長が 20m 以下の短支間橋梁に対しては、設計衝撃係数 0.25 を超える橋梁も存在している。本橋梁においては、支間長 19.0m に対して設計衝撃係数 0.25 を下回っている。本実験で得た動的増幅率を一つの動的応答係数として、衝撃係数を考えた場合、本橋は安全側に設計された値が

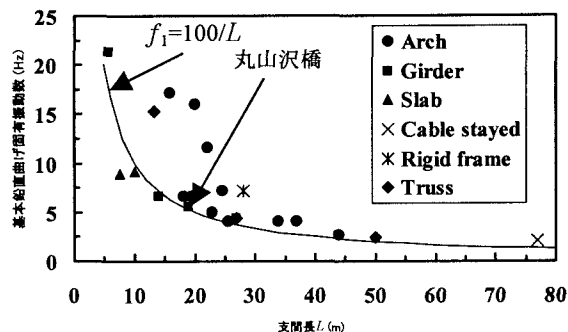


図-11 支間長と基本鉛直曲げ固有振動数

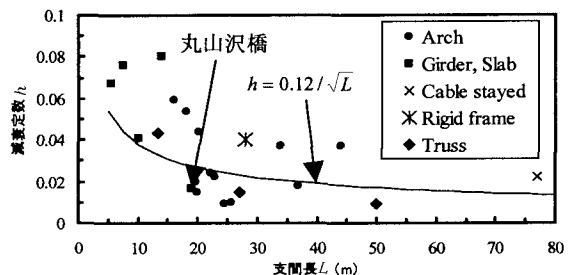


図-12 支間長と減衰定数

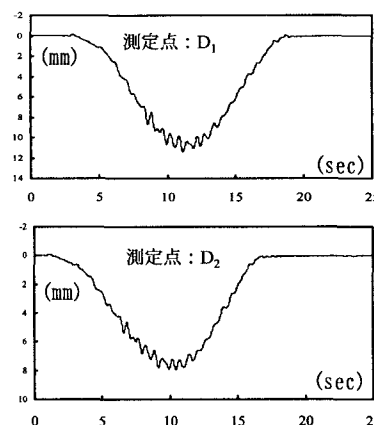


図-13 応答変位の一例

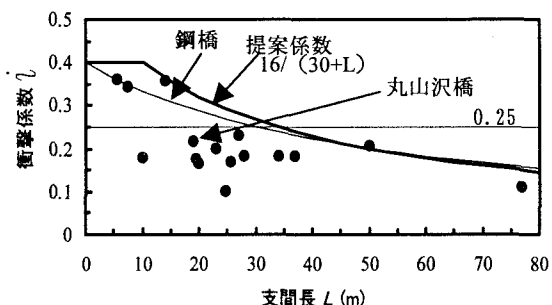


図-14 支間長と衝撃係数

用いられていることがわかる。

#### 4.6 振動使用性

日常的に起こりうる可能性のある1台単独(上流側、30km/h)で車両が走行した時の各応答速度(実行値)と振動の恕限度の一例を図-15に示す。A<sub>1</sub>~A<sub>6</sub>の各センサーの設置箇所は図-4に示されている。

橋梁振動により歩行者が歩行する時に受ける振動感覚の分類を恕限度として、応答速度の実効値から振動感覚の反応度を評価する。測定点A<sub>1</sub>~A<sub>6</sub>は、全てに

において「ほとんど振動を感じない」恕限度に属していることがわかる。これにより、本橋での振動感覚が「歩きにくい」となることは考えがたいと判断でき、本橋の架設地点での日常交通量を考えると、本橋の振動使用性として特に問題ないと思われる。

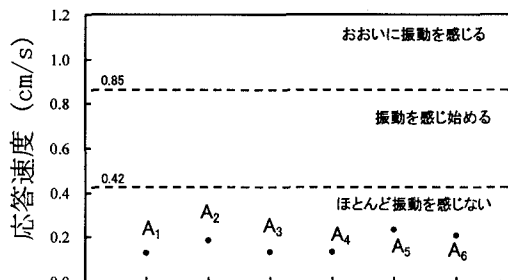


図-15 振動使用性

#### 5. あとがき

本研究では、ハイブリッド型木桁車道橋の構造性能を実験と解析の両面から検討した。その結果を列挙げると、以下のようである。

- (1) 静的載荷試験において、局部的なたわみが生じることはない。また、設計活荷重を考慮して静的剛性を検討した結果、本橋は車両等の活荷重に対する実際の静的剛性が設計時より顕著に大きいことが認められた。
- (2) 本橋の基本固有振動数は 5.56Hz である。この値は一般的な同支間長の鋼橋やコンクリート系橋梁と同等以上の値である。ちなみに本橋の主桁一本の固有値解析を行った結果、鉛直曲げ対称1次振動において、4.84Hzを得ている。また、本橋の動的増幅率は、0.25より小さい値を示すことから、安全側に設計された値が本橋の設計で採用されている。さらに、本橋の減衰定数は0.016であり、若干小さい傾向を示している。これは、本橋の橋軸と橋軸直角方向の荷重分配効果などの構造上の特性に起因しているものと思われる。
- (4) 本橋に対する、歩行者の振動感覚は「ほとんど振動を感じない」程度である。本橋の振動使用性に関しては、問題が具現化する確率が低いと判断される。

本研究で得られた知見が今後のハイブリッド型木桁車道橋の設計や維持管理の基礎資料にされば幸いである。

- 1) 北条章・小川史彦・草薙貴信・本田秀行：集成材を用いた木橋の現状と実験に基づく振動特性、構造工学論文集、Vol.48A, pp.369-376, 2003.3.
- 2) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析、技報堂出版、1993.10.
- 3) 加藤雅史：橋梁の振動調査法とその適用に関する名古屋大学学位論文、pp.73-74, 1984.7.