

## アーチ木歩道橋の構造特性と使用性

Vibrational Serviceability and Structural Characteristics of Pedestrian Timber Arch Bridge

○ 山田基司\* 本田秀行\*\* 古村崇\*\*\*

YAMADA Motoji, HONDA Hideyuki and FURUMURA Takashi

\*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)

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

\*\*\*川田建設(株)北陸支店工事部 (〒939-1521 富山県東砺波郡福野町苗島 4760)

**ABSTRACT** The Kagura bridge subjected in this study is the pedestrian timber arch bridge constructed in Toyama prefecture. When the field tests of the bridge was conducted in July 2003, static and the dynamic characteristics were investigated. This study is performed proof the structural characteristics of the bridge from the both sides of experiment value and analysis values. Furthermore vibrational serviceability of the bridge is inspected based on the field test.

**Keywords :** 木歩道橋、構造特性、振動使用性

*timber pedestrian bridge, structural characteristic, vibrational serviceability*

### 1. まえがき

近代木橋の動向の中で、大断面構造用集成材を使用した木橋の建設技術はめざましい進展を遂げており、スパンの長大化と多形式化が進んでいる。本研究で対象とした富山県新湊市に架設された神楽橋は、県内でも初の本格的な集成材木橋であり、集成材を用いた下路式アーチ木歩道橋である。写真-1、写真-2に対象橋梁とした「神楽橋」の全景写真を示す。

本橋は、橋軸方向の荷重分配効果をもたらす縦桁の配置、部材断面の設計法、雨水対策に基づく耐久設計などが用いられている。そこで、静的試験および動的試験から得た実験値および3次元構造解析での解析値の両面から、本橋の剛性評価や振動特性の検証を行った。さらに、本橋の使用性についても検討を加えるために、平成14年7月に本橋の実験を行った。

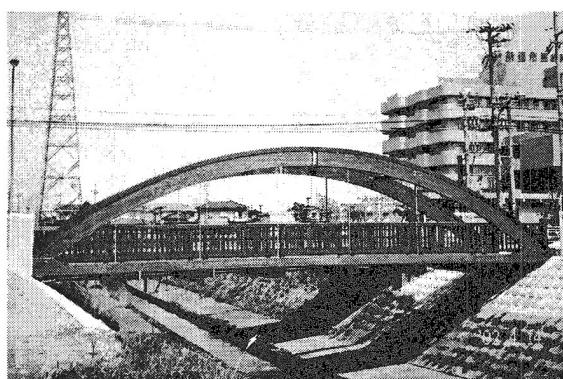


写真-1 神楽橋全景

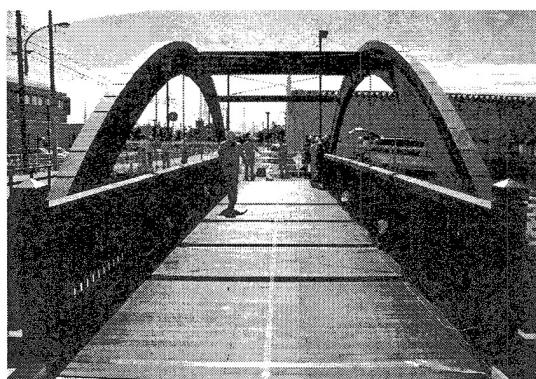


写真-2 神楽橋全景(橋軸方向)

## 2. 対象橋梁

神楽橋は市街地および中央病院などに隣接するため、周辺景観との調和や地元産材の活用による周辺施設からへの展示効果、地域のシンボル的効果を意識したデザインが工夫されている。

神楽橋の設計概要を表-1に示す。主要部材であるアーチ部材はベイ松集成材の幅18cm、高さ50cmの断面形成である。アーチリブの支点はゴム支承である。床版は踏板形式で、イペ材を用いた木床版である。また、橋台上の端横梁は構造的に常時湿気を帯びた箇所に位置するため、木材の腐朽の恐れから鋼材を使用している。

表-1 設計概要

橋種	歩道橋
アーチ形式	木製下路式アーチ
アーチ種類	ローゼタイプ
橋長	18.0m
支間長	18.2m
幅員	3.0m
主構造	主にベイマツ集成材

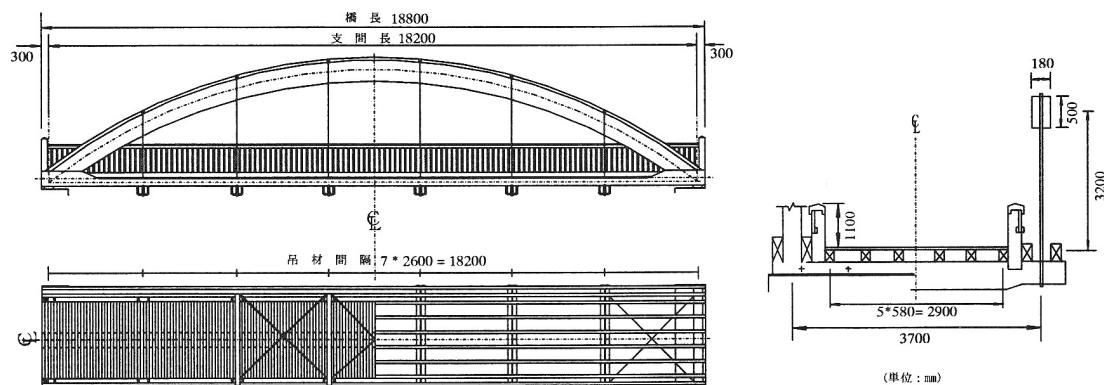


図-1 神楽橋一般図

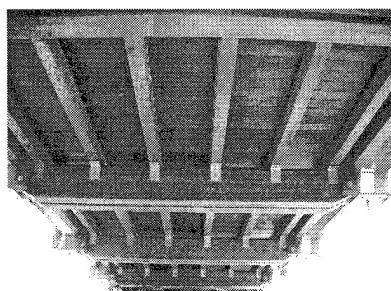


写真-3 床組構造

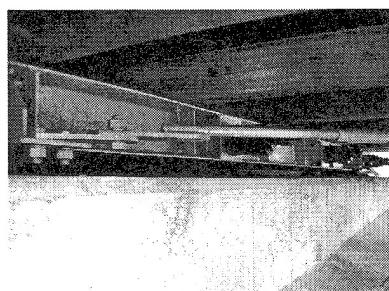


写真-4 端横梁

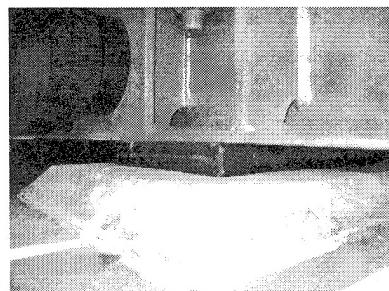


写真-5 支承部

## 3. 実験概要

本橋に対して静的載荷試験・常時微動測定試験・砂袋落下衝撃試験・人力加振試験の4種類の実験を行った。各測定点の位置を図-2に示す。図中の記号★(S<sub>1</sub>～S<sub>9</sub>)はオートレベル計で橋梁の静的たわみを計測する測定点を示している。また、●(A<sub>1</sub>～A<sub>7</sub>)はサーボ型振動速度計（振動変位および振動加速度を同時に測定可能）であり、橋梁の振動を計測する測定点である。アーチ部材の振動測定試験においての●(A<sub>8</sub>～A<sub>11</sub>)は、アーチ部材の振動挙動を計測するための鉛直(V)、水平(H)、橋軸(L)の3方向に設置するサーボ型振動速度計である。

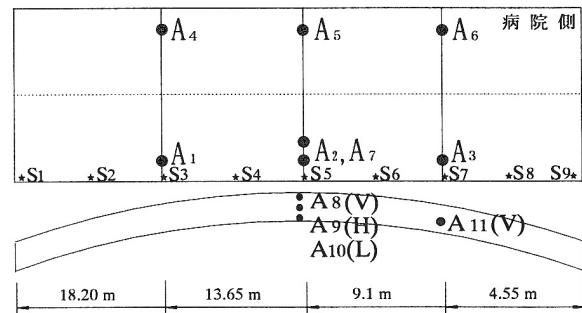


図-2 各試験での測定配置

静的載荷試験では、既知荷重として総重量約4.41kNの鋼材を用いてL/4点付近、L/2点付近、3L/4点、L/4点、L/2点への橋面上に載荷した。各測定点での静的な鉛直たわみ値を±0.1mmの精度を有する2台のオートレベル計を用いて測定した。常時微動測定試験では、橋梁に外力がない状態で、自然の微振動に対する橋梁の応答速度から約5分間の連続測定を行った。砂袋落下衝撃試験では、約0.1kNの砂袋を高さ1mから落下させることにより、本橋に鉛直曲げやねじれ加振を与えた。人力加振試験では、共振歩行試験をはじめ共振屈伸試験や共振走行試験、ランダム走行試験を行った。

本橋は病院の近くに架設されていることから、歩行・走行試験に関しては、被験者を歩行者、車椅子を押す人や車椅子に乗っている人と定義して振動感覚についてアンケートも実施した。人力加振試験で用いたアンケート項目を表-2に示す。

これらの試験を行うことにより、どの程度の振動の大きさが生じるのか確認し、またその振動が歩行者に不快な感覚を生じさせるかどうかを検証する。これらのことと検討するため、実橋における振動レベルを測定し、歩行者が受ける振動の感じ方を分析し、本橋の使用性について検討を行った。写真-6～写真-8は測定状況を示している。

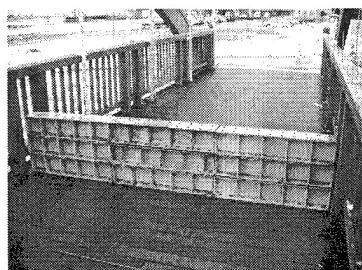


写真-6 静的載荷試験

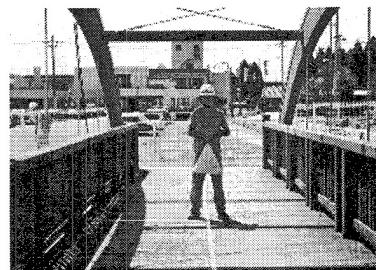


写真-7 砂袋落下衝撃試験



写真-8 人力加振試験

#### 4. 実験結果

##### 4.1 静的特性

本橋の支間L/2点付近(ST.Type2)に対して測定された静的たわみ値を図-4に示す。表中の実験値はオートレベル計によって測定された測定点S<sub>1</sub>～S<sub>9</sub>での静的たわみ値の変位を示している。なお、オートレベルには±0.1mm程度の測定機器固有の測定誤差が介在していると考えられる。

さらに、MSC/NASTRANを用いて本橋を直交異方性格子構造とする3次元に

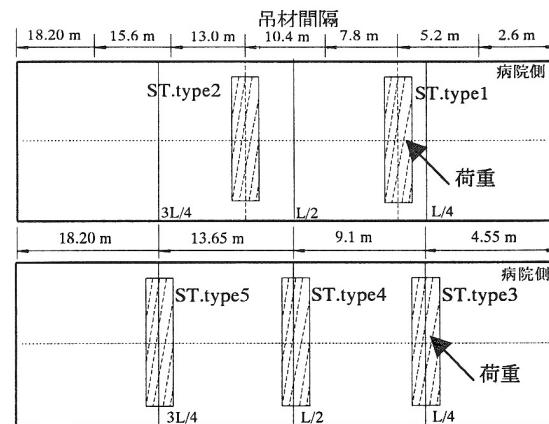


図-3 鋼材載荷位置 (ST.type1～ST.type5)

表-2 アンケート項目

No.	振動感覚ケース
①	振動を感じない
②	少し振動を感じる
③	明らかに振動を感じる
④	少し不快感を感じる
⑤	大いに不快感を感じる

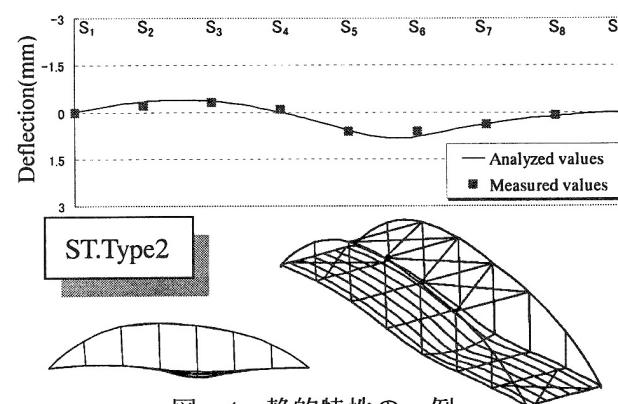


図-4 静的特性の一例

構造モデル化し、静的解析を行った結果を図-4に示す。本解析では、支承部でのゴムプレートも橋軸方向の弾性バネ係数<sup>1)</sup>に換算して考慮している。また、荷重の載荷状態に対しては、本実験と同じ条件で解析を行った。静的たわみ値から一般的な傾向として、支間 L/2 点付近に鉛直の正のたわみが生じた場合、L/4 点では負のたわみが生じるという、基本的なアーチ形式の構造上の特性が認められる。

#### 4.2 固有振動数と固有振動モード

表-3 に本橋の固有振動数の実験値と解析値を示す。図-5 に解析結果による振動モード形状を 4 次振動まで示す。動的試験より 5 個の卓越した固有振動数、振動モードを得た。本橋の固有振動数と振動モードは、アーチリブのみが水平に挙動するアーチ水平モードが 1 次振動の 2.63 Hz、橋梁全体が水平方向に挙動する水平曲げ振動モードが 2 次振動の 4.41 Hz、鉛直曲げ振動モードが 3 次振動の 6.64 Hz、橋梁全体がねじられるような挙動のねじれ振動が、4 次振動の 6.96 Hz、橋梁全体が鉛直方向に挙動する鉛直曲げ振動モードは 5 次振動の 10.35 Hz である。

本橋の固有振動特性を他の道路橋と比較するため、通常のアーチ系鋼橋の鉛直曲げ逆対称 1 次固有振動数を概算的に算定する式<sup>2)</sup>

$$f_1 = 154.8 L^{-1.057} \text{ Hz} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (1)$$

(L : アーチ支間長) を用いて概算すると、本橋のアーチ支間長は 18.2 m であるから、7.21 Hz を得る。この値と鉛直曲げ逆対称 1 次固有振動数の 6.64 Hz を比較すると、約 1.1 倍小さい値を示した。また、鉛直 1 次振動に対する概算式 ( $f_1=100/L$ )においては、実験値が約 1.2 倍大きい。従って、固有振動数は橋梁の剛性と密接な関係があることから、鉛直方向への振動に対しては一般的な同アーチ支間長のアーチ系鋼橋とほぼ同等の鉛直曲げ剛性を有しているものと判断される。

実験での固有振動数と直交異方性格子構造モデルとして 3 次元固有値解析を行った解析値とは、固有振動数とその振動モードと同等な値および形状が認められるため、本解析モデルの妥当性が検証された。

#### 4.3 減衰定数

表-3 に測定された減衰定数を示す。減衰定数  $h$  の算出<sup>2)</sup>には、次式を用いた。

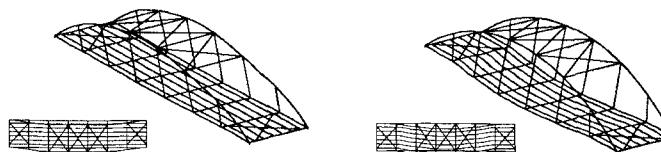
$$\delta = \log_e(X_{i+1}/X_i), \quad h = \delta/2\pi \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここに、 $\delta$  は対数減衰率、 $X_i$  は振幅である。

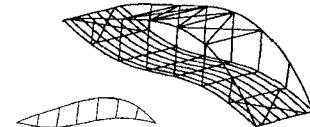
表-3 固有値と固有振動モード

振動 次数	振動モード	固有振動数(Hz)		減衰定数	
		実験値			
		常時微動	砂袋落下		
1	アーチ水平曲げ対称1次	2.63	2.63	0.0950	
2	水平曲げ対称1次	4.41	—	5.41	
3	鉛直曲げ逆対称1次	—	6.64	6.64	
4	ねじれ逆対称1次	6.93	6.96	0.0162	
5	水平曲げ逆対称1次	—	—	10.42	
6	鉛直曲げ対称1次	10.44	10.35	12.92	
				0.0011	

Mode 1:アーチ水平曲げ対称 1 次 Mode 2:水平曲げ対称 1 次



Mode 3:鉛直曲げ逆対称 1 次



Mode 4:ねじれ逆対称 1 次

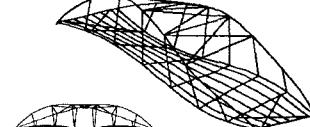


図-5 解析による振動モード

本橋を代表する減衰定数  $h$  は、鉛直曲げ 1 次振動モードの 0.0054 と考えられる。橋梁の振動照査法に関する研究から鋼橋やコンクリート橋に用いられる減衰定数と支間長との関係を概算的に算定する式<sup>3)</sup>

$$h = 0.12/\sqrt{L} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3)$$

( $L$  : 支間長 m) を用いて概算すると、本橋のアーチ支間長は 18.2 m であるから  $h=0.028$  を得る。この値と本橋の減衰定数 0.0054 を比較すると、一般的な鋼橋やコンクリート橋の値より小さい値を示している。これは、構造的な特性に起因する下路式アーチ木橋に共通する傾向であり、本実験においてもその傾向が確認された。本実験で得た減衰定数の値は、支間長 18.2 m のアーチ橋に対する一つの値である。減衰定数の評価は、固有振動を計算するような場合と異なり、解析的検討が不可能に近い。従って、集成材橋梁の合理的な設計法、耐震性能、健全度などの評価に減衰定数の値は重要な因子となるため、今後、多くの集成材橋梁で実験を行い、そのデータの蓄積に基づく統計分析によって定量的に評価をしていく必要性がある。

#### 4.4 使用性（歩行者の振動感覚）

人力加振試験において各試験ケースでのセンサー  $A_1 \sim A_6$  の測定値から応答速度の実効値の最大値を選出し、本橋梁の使用性を評価した。本実験で得た実効値による評価を図-6 に示す。

図-6 から認められるように、1人歩行試験から 5 人ランダム走行試験になるにつれて応答速度も大きくなる。その際、橋梁上の歩行者への振動刺激も大きくなることが確認できる。また、5 人 2.4Hz 走行、2 人ランダム走行や 5 人ランダム走行など極限的な走行ケース時に受ける歩行者の振動感覚は、「振動を少し感じた」程度の反応と確認できる。

以上のことから、1人や 2 人など日常的な走行ケースにおいては、「振動を全く感じない」程度の反応であり、本橋の使用性に関しては特に問題がないものと思われる。

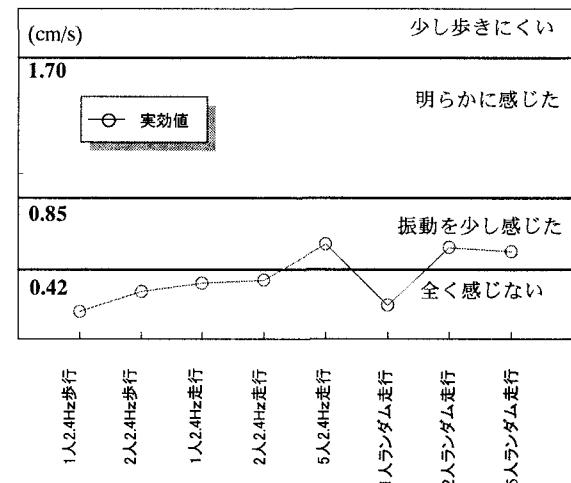


図-6 実効値による評価

#### 4.5 振動に関するアンケート調査

共振歩行試験、共振走行試験およびランダム走行試験時に、人間が加振源として本橋の歩行・走行した時の進入から退出するまでに被験者が振動を感じる感覚調査をした。なおアンケートの項目は、表-2 に示してある。

アンケート結果を表-4 に示す。アンケートの結果から、WO.type1 の試験結果では半数が振動を感じないと答えたが圧倒的であった。RU.type などの走行試験では、人数が多くなるにつれて共振レベルも大きくなり、被験者のアンケートの回答にも明らかに振動を感じるという結果が得られた。また、RR.type では、実験者が各自好きな速度で走るため、加振源である実験者同士が相互に振動を打ち消し合う相殺効果も認められた。

本橋は、病院の近くに架設されているため、入院患者が本橋を通過することも日常的に考えられる。以上のアンケート調査から、車椅子の被験者は「明らかに振動を感じる」程度であり、「少し不安感を感じる」までの反応を示さない結果を得た。従って、入院患者が本橋を通過した場合における本橋の使用性には、特に問題がないものと思われる。

表-4 アンケート結果

試験タグ	被験者と種類	振動感覚	歩行・走行状態	試験タグ	被験者と種類	振動感覚	歩行・走行状態
WO.1-3	歩行の被験者1	振動を感じない	1人2.4Hzで歩行	Rr1-1	歩行の被験者10	少し振動を感じる	1人がランダム走行
WO.1-4	歩行の被験者2	振動を感じない	1人2.4Hzで歩行		車椅子の被験者10	少し振動を感じる	1人がランダム走行
WO.1-5	歩行の被験者3	少し振動を感じる	1人2.4Hzで歩行		車椅子を押す被験者10	振動を感じない	1人がランダム走行
WO.2-1	歩行の被験者1	振動を感じない	2人2.4Hzで歩行	Rr1-3	歩行の被験者11	少し振動を感じる	1人がランダム走行
WO.2-3	歩行の被験者2	振動を感じない	2人2.4Hzで歩行		車椅子の被験者11	振動を感じない	1人がランダム走行
WO.2-4	歩行の被験者3	振動を感じない	2人2.4Hzで歩行		車椅子を押す被験者11	振動を感じない	1人がランダム走行
Rr1-1	歩行の被験者1	明らかに振動を感じる	1人2.4Hzで走行	Rr1-4	歩行の被験者12	振動を感じない	1人がランダム走行
	車椅子の被験者1	振動を感じない	1人2.4Hzで走行		車椅子の被験者12	少し振動を感じる	1人がランダム走行
	車椅子を押す被験者1	少し振動を感じる	1人2.4Hzで走行		車椅子を押す被験者12	振動を感じない	1人がランダム走行
Rr1-2	歩行の被験者2	振動を感じない	1人2.4Hzで走行	Rr2-1	歩行の被験者13	振動を感じない	2人がランダム走行
	車椅子の被験者2	振動を感じない	1人2.4Hzで走行		車椅子の被験者13	振動を感じない	2人がランダム走行
	車椅子を押す被験者2	振動を感じない	1人2.4Hzで走行		車椅子を押す被験者13	振動を感じない	2人がランダム走行
Rr1-3	歩行の被験者3	少し振動を感じる	1人2.4Hzで走行	Rr2-2	歩行の被験者14	少し振動を感じる	2人がランダム走行
	車椅子の被験者3	少し振動を感じる	1人2.4Hzで走行		車椅子の被験者14	振動を感じない	2人がランダム走行
	車椅子を押す被験者3	振動を感じない	1人2.4Hzで走行		車椅子を押す被験者14	少し振動を感じる	2人がランダム走行
Rr2-1	歩行の被験者4	少し振動を感じる	2人2.4Hzで走行	Rr2-3	歩行の被験者15	少し振動を感じる	2人がランダム走行
	車椅子の被験者4	振動を感じない	2人2.4Hzで走行		車椅子の被験者15	振動を感じない	2人がランダム走行
	車椅子を押す被験者4	振動を感じない	2人2.4Hzで走行		車椅子を押す被験者15	少し振動を感じる	2人がランダム走行
Rr2-2	歩行の被験者5	少し振動を感じる	2人2.4Hzで走行	Rr3-1	歩行の被験者16	明らかに振動を感じる	5人がランダム走行
	車椅子の被験者5	振動を感じない	2人2.4Hzで走行		車椅子の被験者16	振動を感じない	5人がランダム走行
	車椅子を押す被験者5	少し振動を感じる	2人2.4Hzで走行		車椅子を押す被験者16	少し振動を感じる	5人がランダム走行
Rr2-3	歩行の被験者6	明らかに振動を感じる	2人2.4Hzで走行	Rr3-2	歩行の被験者17	明らかに振動を感じる	5人がランダム走行
	車椅子の被験者6	振動を感じない	2人2.4Hzで走行		車椅子の被験者17	振動を感じない	5人がランダム走行
	車椅子を押す被験者6	少し振動を感じる	2人2.4Hzで走行		車椅子を押す被験者17	少し振動を感じる	5人がランダム走行
Rr3-3	歩行の被験者7	明らかに振動を感じる	5人2.4Hzで走行	Rr3-5	歩行の被験者18	明らかに振動を感じる	5人がランダム走行
	車椅子の被験者7	少し振動を感じる	5人2.4Hzで走行		車椅子の被験者18	振動を感じない	5人がランダム走行
	車椅子を押す被験者7	少し振動を感じる	5人2.4Hzで走行		車椅子を押す被験者18	少し振動を感じる	5人がランダム走行
Rr3-5	歩行の被験者8	明らかに振動を感じる	5人2.4Hzで走行				
	車椅子の被験者8	少し振動を感じる	5人2.4Hzで走行				
	車椅子を押す被験者8	少し振動を感じる	5人2.4Hzで走行				
Rr3-6	歩行の被験者9	明らかに振動を感じる	5人2.4Hzで走行				
	車椅子の被験者9	少し振動を感じる	5人2.4Hzで走行				
	車椅子を押す被験者9	明らかに振動を感じる	5人2.4Hzで走行				

## 5. あとがき

実橋実験と解析の両面から構造特性を検討した結果、本研究の対象橋梁とした「神楽橋」の静的剛性や振動特性などを明らかにした。これらの結果は、本橋の維持管理等のための初期値として、今後、有意義なデータとなるものと考えられる。

近代木橋の構造特性を同定する方法として用いた構造モデル化に対しては若干の検討を要するが、本研究の実橋実験と構造解析の有用性が確認されたことは一つの成果である

近代木歩道橋に対する振動使用性に関しては、国際的にほとんど検討がなされていない。本研究では主に実験値から本橋の振動使用性を検討しているが、他の木歩道橋の実験値や歩行者による木歩道橋の3次元動的応答解析に基づく様々な観点からの検討が必要である。これらは今後の検討課題としたい。

## 参考文献

- 日本道路協会：道路橋支承便覧 改定案、2001.2.
- 加藤雅史：橋梁の振動調査とその適正に関する研究、pp.73-74,1984.7.
- 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.