

希望の丘公園木歩道橋の動的挙動と振動使用性

Dynamic Behavior and Characteristics of The Kibou-no-oka Pedestrian Bridge

石松和哉* ○山田基司* 本田秀行**

ISHIMATSU Kazuya, YAMADA Motoji and HONDA Hideyuki

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

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

ABSTRACT The Kibou-no-oka bridge subjected in this study is the timber pedestrian bridge constructed in Ishikawa prefecture. This bridge is also a bridge which has function of plaything structure in the park. When the filed tests of the bridge was conducted in November 2003, the dynamic characteristics were investigated. This study describes the result of structural performance obtained by the experiment and the analysis. Furthermore vibrational serviceability of the bridge is inspected based on the field test.

Keywords: 木歩道橋、動的挙動、振動使用性

timber pedestrian bridge, dynamic behavior, 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。そして、このような架設実績は、今後さらに増加する傾向にある。しかしながら、欧米に比べて近代木橋の歴史が新しいこともあり、わが国での設計法や現場施工技術の信頼性を大幅に向上させるための積年の研究開発が必要であると同時に、これらの技術の発展には幾多の実橋での性能検査などで得られるデータが、今後の近代木橋への大切な情報となる。

近年、公園内に集成材を用いた大規模な遊具ブリッジが建設されるようになってきた。公園内の遊具ブリッジであっても大規模な歩道橋としての橋梁構造物の一つである。しかしながら、公園内遊具ブリッジは、公園モニュメントとして、また多様な利用者の付加効果をもたらすために、一般橋梁と若干異なる構造形式を有している。このために、公園内遊具ブリッジであっても、近代木歩道橋としての安全性や振動使用性などを検討し、子供からお年寄りにいたる多様な利用者に支障が生じないことを検照する必要がある。

これまでに近代木橋が多く架設されているが、近代木歩道橋の動的挙動や振動使用性に関する研究や実験は極めて少ないことから、振動特性値に関するデータが不足している。そこで、本研究では、トラス構造木歩道橋である希望の丘公園木歩道橋を対象橋梁とした。この希望の丘公園木歩道橋に対して、設計等への基本資料を得る目的から、動的実験を行った。そして、実験から得られたデータを基にして、本橋の動的挙動、動的特性、使用性、維持管理、振動使用性や設計係数の検証を行っている。

2. 対象橋梁

本研究における対象橋梁は、写真-1に示すように、石川県七尾市万行町希望の丘公園に平成13年10月に架設された。本橋の一般図を図-1に、設計概要を表-1に示す。また、主要構造の写真を写真-2~4に示す。本橋は、国の進める「木の香りあふれる住環境整備モデル事業」の一環として、快適な生活環境実現のためのモデルとなることを目的に計画された。希望の丘公園内に県産材を使用した全木造の橋を設けることで、公園内移動の利便性を高め、希望の丘公園のシンボルとなるように計画されている。

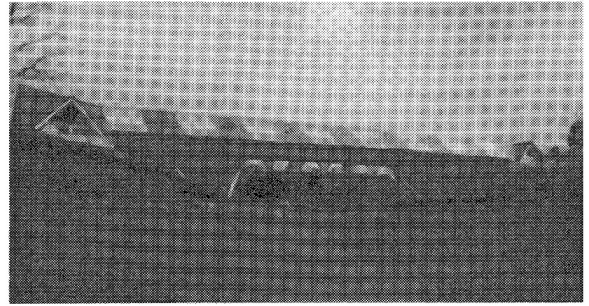


写真-1 希望の丘公園木歩道橋全景

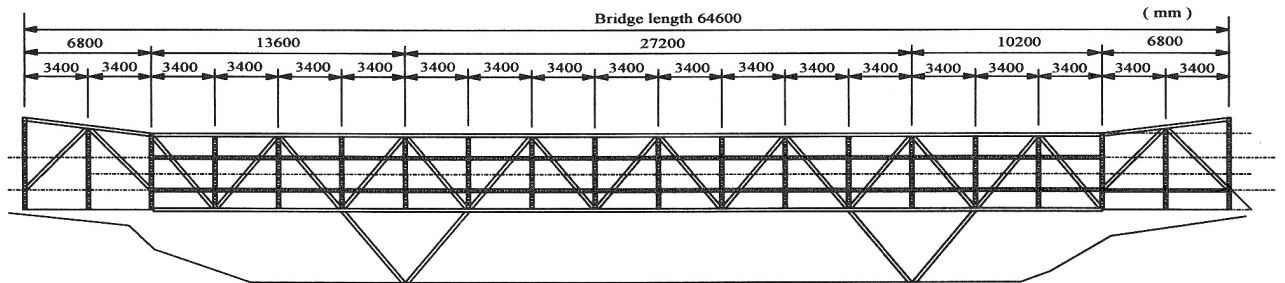


表-1 設計概要

橋種	歩道橋	
橋梁形式	トラス木橋	
橋長	65,000mm	
最大支間長	20,400mm	
天井高さ	1,900mm	
床幅	2,600mm	
主要構造	集成材	能登ヒバ集成材（県産材）50m ³
	床・壁・垂木	杉（県産材）57m ³
	屋根	鉄板、ポリカーボネイト板
	遊具	鉄、強化プラスチック

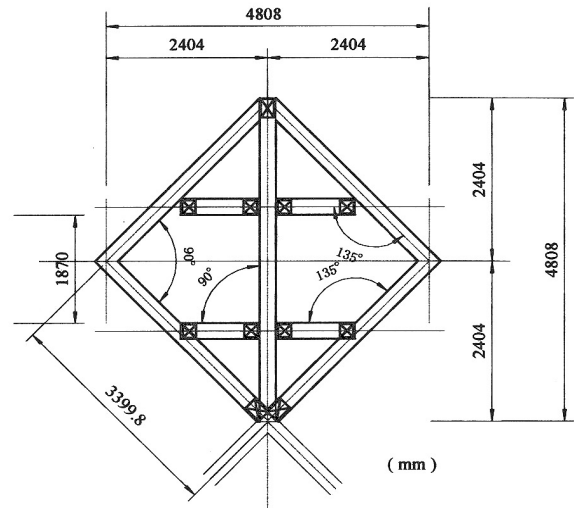


図-1 希望の丘公園木歩道橋一般図

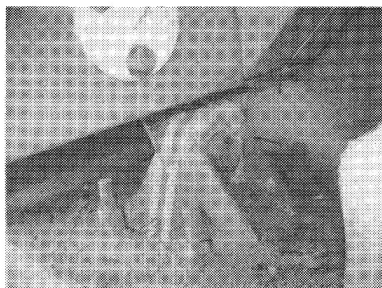


写真-2 支承部

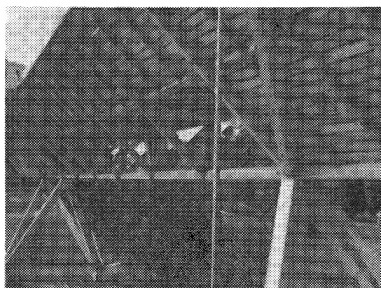


写真-3 床組構造

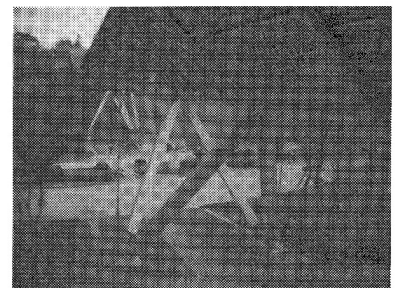


写真-4 テンションロッド
及び橋脚支持脚部

3. 実験概要

本橋に対しての動的特性を把握するため、常時微動測定試験、砂袋落下衝撃試験、人力加振試験の4種類の実験を実施した。図-2に対象橋梁のセンサー配置位置と測定点を表す。図中の●はサーボ型速度計による速度と加速度の測定点であり、Vは鉛直方向、Hは水平方向を示している。

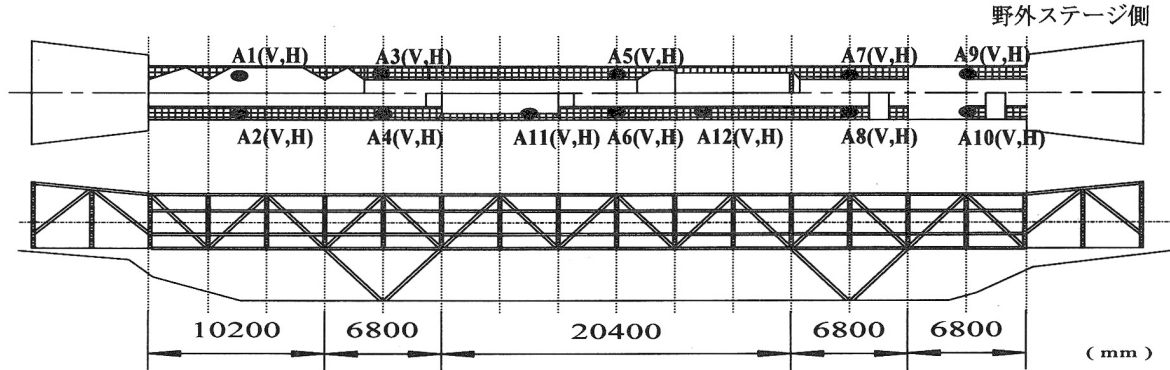


図-2 各試験での測定点配置

3.1 動的実験

動的実験は、サーボ型速度計を用いることで、測定対象とする物理量を振動速度、振動加速度とし、固有振動数、振動モード、減衰定数の同定を目的とした。

常時微動測定試験は、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速度を測定した。本実験での測定データは、本橋の振動特性の評価に利用した。

砂袋落下衝撃試験は、常時微動測定法ではねじれ振動モードなどの振動特性が雑音によって精度よく検出できない場合があるため、0.2 kNの砂袋を約1mの高さから落下させ橋梁に純粋な鉛直曲げ、ねじれ振動加振を与え、そのときの応答速度を測定した。本実験での測定データは固有振動数とその振動モードの同定に利用した。また、衝撃加振後の減衰自由振動波形から減衰定数を算出した。

人力加振試験では、2.5 Hzの振動数で、歩行者1人および2人で屈伸・歩行・走行などを行うことで加振を行った。表-2に人力加振試験の詳細を示す。屈伸試験では、一定のピッチにあわせて、30秒間の強制加振を行ったときの動的応答を求めた。歩行試験や走行試験では、試験者を一定の速さで歩行、走行をさせることによって、橋梁への進入から退出までの動的応答を求めた。進入から退出までの間を把握するため、踏むことによりパルス信号を発生させ、荷重の通過位置を分かるようにした。ランダム走行試験は、試験者が好きな速さで走るため日常の振動に一番近いケースである。

本実験では主に鉛直曲げ1次固有振動数 f_1 (Hz)を対象に加振を行うことが困難なため、振動数を2.5 Hzとした。このときの橋梁の応答速度、応答加速度を測定した。

写真-5は、これら測定状況を示している。

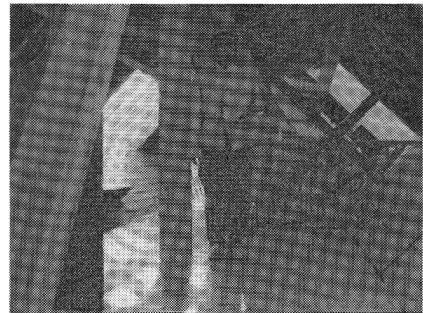


写真-5 実験風景
(上；砂袋試験、下；屈伸試験)

表-2 人力加振試験の詳細

実験項目	人数	加振状態
屈伸試験	1	2.5Hzの振動数で屈伸加振
	2	
歩行試験	1	2.5Hzの振動数で歩行加振
	2	
走行試験	1	2.5Hzの振動数で走行加振
	2	
ランダム走行試験	2	ランダムな歩調での走行加振

4. 実験結果

4.1 動的挙動

図-3は、橋長 L/2 点での各試験から得られた、鉛直方向への応答速度と応答加速度波形を示す。波形の種類として、上から2人屈伸、2人歩行、2人走行、ランダム走行の順である。歩行や走行では、橋梁の進入(in)や退出(out)を図内に示す。

歩行試験の応答波形からは、2人の歩調が合っているため走行試験との波形と違い、振幅が一定であるのが見受けられる。

走行とランダム走行の波形を比較すると、若干ランダム走行の応答波形が小さいように見える。これは、試験者のランダム外力がお互いに振動を打ち消し合うような現象に起因しているものと思われる。

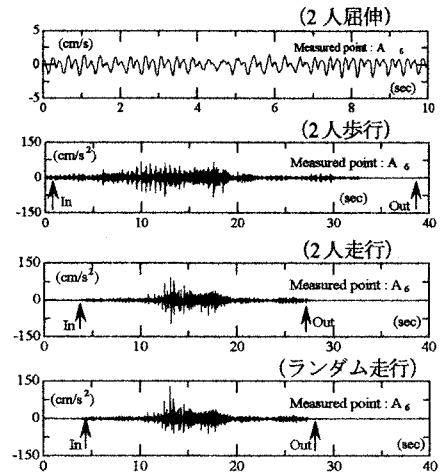


図-3 橋長 L/2 点による応答波形

4.2 動的特性

実橋実験より得られた対象橋梁の動的特性（固有振動数・振動モード・減衰定数）を表-3に示す。対象橋梁の実験より得られた固有振動数、応答速度から評価される振動使用性等について、一般的な鋼橋、RC橋等の材料別、および過去に実測された近代木橋のデータから本橋の動的特性の検討を行った。

(1) 固有振動数と振動モード

動的実験で得られた本橋の固有振動数は、水平曲げ対称1次が3.12 Hz、ねじれ対称1次が4.44 Hz、鉛直曲げ対称1次が7.73 Hz、ねじれ逆対称1次が11.32 Hzの計4振動である。本橋の構造は、正方形断面の木造トラス形式である。そのため、風などの影響を受けやすい構造から、鉛直振動の前に、ねじれ振動モードが出現しているものと考えられる。

本橋のように細長い橋梁の1次振動数が水平曲げ対称モードになることは、一般的に見られる傾向である。2次振動数が鉛直曲げ対称モードでなく、ねじれ対称モードで出現していることは、基本構造が垂直立体トラス構造に床構造と上下の屋根構造が組み合わされた菱形形状の本橋特有の構造となっていることから、鉛直曲げ剛性よりもねじれ剛性が小さいことによって、ねじれ対称モードが鉛直曲げ対称モードよりも先に出現したものと考えられる。

次に、図-4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固有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従って減少する傾向¹⁾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。

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

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20.4mであるから4.90 Hzを得る。この値と本橋の鉛直曲げ1次振動7.73 Hzを比較すると約1.6倍大きい値となる。すな

表-3 実橋実験から得た本橋の振動特性

振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)	減衰定数 h
			減衰自由振動
1	水平曲げ1次振動	3.12	0.0006
2	ねじれ1次振動	4.44	0.0179
3	鉛直曲げ1次振動	7.73	0.0211
4	ねじれ2次振動	11.32	0.0175

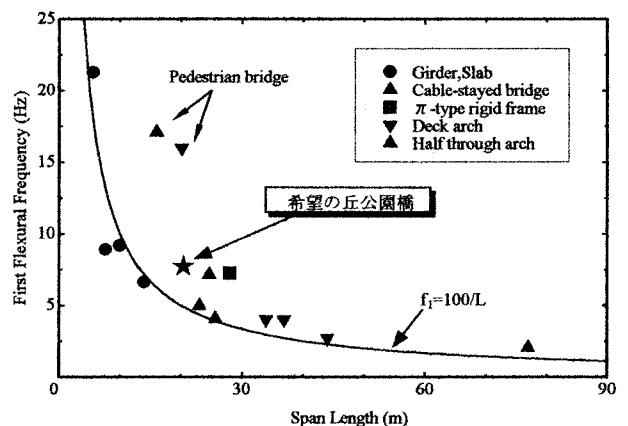


図-4 支間長と固有振動数

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、同形式の鋼橋より同等以上の鉛直曲げ剛性を有していると判断される。

(2) 減衰定数

減衰定数 h の算出には、次式²⁾を用いた。

δ は対数減衰率、 X_i は振幅である。

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

振動モード別の減衰定数は、ねじれ振動モードの 4.44 Hz で 0.0179、鉛直曲げ対称振動モードの 7.73 Hz で 0.0211、ねじれ逆対称振動モードの 11.32 Hz で 0.0175 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 1 次振動モードの 0.0211 と考えられる。

図-5 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。

構造用集成材を使用した木歩道橋は、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 $L(m)$ との関係を概算的に算出する式³⁾を以下に示す。

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

本橋のアーチ支間長は 20.4 m であるから $h=0.026$ を得る。この値と本橋の減衰定数 0.0211 を比較すると、一般的な鋼橋と同程度の値を示している。

実験で得た減衰定数の値は、支間長 20.4 m の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。したがって、集成材橋梁の合法的な設計法、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。今後、多くの集成材橋梁で実験を行う必要がある。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ことが必要である。

(3) 振動使用性

人力加振試験における各試験タイプの実効値は試験者が対象橋梁へ進入してから退出までで計算した。また、歩行者への振動使用性の評価は、最大値により評価するものと実効値により評価するものがある。しかし、その評価では差違が出ることから、歩行者の振動使用性を検討するために、最大値での評価と実効値の両方で評価を行なった。本実験から得た応答速度による各試験ケースの最大値を示したのが図-6である。そして、実効値を評価したのが図-7である。

図-6 から分かるように、2 人歩行の 1.784 cm/s の時が応答速度の最も大きな値である。このことは、振動を少し感じた程度であった。

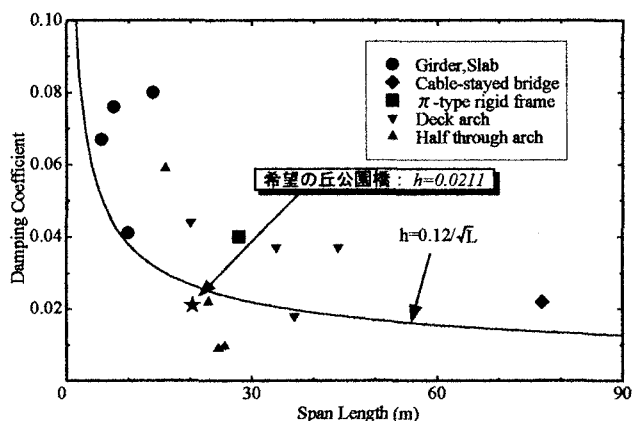


図-5 支間長と減衰定数

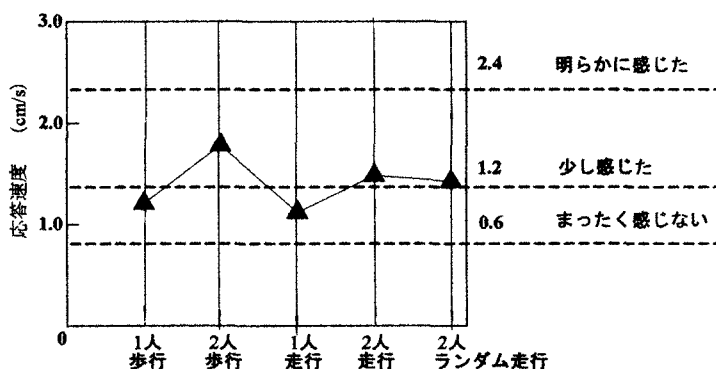


図-6 振動使用性(最大値)

応答速度の実効値の結果からは、図-7を見ても分かるように、歩行試験から走行試験にかけて応答速度の値も大きくなるのが推測されるが、本橋では2人歩行よりも2人走行の方が小さい値となった。このことは、①橋梁内に遊具があるため同一のルートで2人が走行することが出来なかった、②歩調を2.5Hzで加振しているため歩行時の試験者2人は2.5Hzの同一歩調で歩行できたが、歩行時の試験者2人は2.5Hzの同一歩調で走行ができずに試験者同士が互いに振動を打ち消すようなダンパーの挙動が生じたことが起因としている。

以上のことから、振動使用性を検証した人力加振での全ケースにおいては、歩行者の振動感覚として『まったく振動を感じない』、あるいは『振動を少し感じた』程度の結果が得られた。従って、1人や2人などの日常的な歩行や走行ケースにおいては、本橋の振動使用性に関して特に問題がないことが認められる。

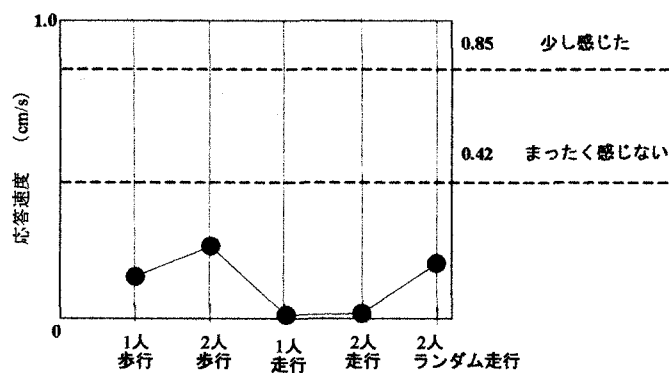


図-7 振動使用性(実効値)

5. あとがき

本研究ではあまり施工実績のない正方形断面トラス構造の動的試験について検討したものである。その得られた主な結果を列挙すると以下のようである。

- ① 本橋梁は、基本構造が垂直立体トラス構造に床構造と上下の屋根構造が組み合わされた菱形形状の本橋特有の構造となっていることから、鉛直曲げ剛性よりもねじれ剛性が小さいことによってねじれ対称モードが鉛直曲げ対称モードよりも先に出現することが認められた。
- ② 減衰定数に関しては、本実験で得られた鉛直曲げ振動の代表的な減衰定数は0.0211であった。鋼橋やコンクリート橋の概算値 $k=0.026$ と本橋の減衰定数 $k=0.0211$ を比較すると、同程度の値であった。従って、本橋は鋼橋と同等な減衰性能を有しているものと考えられる。
- ③ 本橋の振動使用性に対して、歩行者が受ける振動感覚の観点から検討した。その結果、日常の一般的な利用や歩行および走行などによって橋梁振動を受ける歩行者・利用者の振動感覚は、「まったく感じない」、あるいは「少し振動を感じる」程度の反応であると推定される。従って、本橋の振動使用性に関しては、日常的な利用に関して特に問題がないと思われる。

以上のように、本橋に関しては鉛直曲げ剛性と、その減衰性能が高く、また振動使用性に特に問題がないことが検照された。しかしながら、大規模な遊具ブリッジは利用者が多様であるための管理として、近代木歩道橋としての安全性や使用性の検照もしていくことが必要である。

参考文献

- 1)北城章・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,pp369-376,2002.3.
- 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研究、名古屋大学学位論文、pp73-74,1984.7.