

加速度センサー搭載タブレットを用いた めもと橋の振動特性評価

及川 大輔¹・岩崎 圭音²・後藤 文彦³・青木 由香利⁴

¹学生会員 秋田大学 大学院理工学研究科 (〒 010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)

E-mail: d8522009@s.akita-u.ac.jp (Corresponding Author)

²秋田大学理工学部 (〒 010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)

E-mail: s7019516@s.akita-u.ac.jp

³正会員 秋田大学教授 大学院理工学研究科 (〒 010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)

E-mail: gotou@gipc.akita-u.ac.jp

⁴正会員 秋田大学助教 大学院理工学研究科 (〒 010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)

E-mail: yaoki@gipc.akita-u.ac.jp

橋梁の振動特性を把握することは、橋梁全体の剛性の評価などの観点から重要である。しかし、橋梁の振動測定で用いられるサーボ型速度計などの測定機器は高価なものが多く、点検目的や研究目的で誰もが容易に入手して使用できるものではない。そこで、本研究では加速度計が搭載されている安価なタブレット端末を用いて、木歩道橋に対して十分な精度の振動測定が行えるかどうかを検討した。最も卓越する鉛直逆対称モードに関しては、雑音の影響も少くタブレット端末による測定値と数値解析との誤差は -4.0%程度となり、加速度計を搭載したタブレット端末による振動測定の有用性が確認された。また、固有振動数や減衰定数の値を、鋼・コンクリート橋に対する概算式から得られる値と比較することで、測定した木歩道橋の振動特性について考察した。

Key Words: *gulumam timber bridge, tablet device with accelerometer, phyphox, modal analysis, Salome-Meca 2020*

1. はじめに

国内の橋梁に対して 2014 年度に 5 年に一度の定期点検が義務化¹⁾されてから、多くの道路橋で定期点検・劣化診断が行われるようになった。しかし、こうした点検は基本的に目視によるものであり、目視では見つけられない部材内部の劣化を調査するには、超音波探傷器などの特殊な機材を必要とするため、加速度センサー付きの携帯情報端末を利用して橋梁の固有振動数を測定する方法なども試みられている²⁾。

一方、木製橋梁は雨水などの影響で劣化が進行しやすい木材を主材料としているため、劣化を見据えた維持管理が必要であり、特に大断面集成材を用いた近代木橋では、架設当初から劣化に対する点検手法・メンテナンス手法の検討が多く行われている³⁾。そのため、現在発刊されている定期点検要領⁴⁾では、木橋の劣化事例などが多く掲載されており、木橋の維持管理に関する手法が分かりやすくまとめられている。その中では、一般的な橋梁点検で行われる目視点検の他にも、超音波や応力波を用いて木部材内部の劣化状況、木部材のヤング率を測定する点検法や簡単に木材表面の腐朽状態を測定できる点検法など、目視だけでは判断できない劣化状態でも、比較的簡単に測定・評価できる点検法も紹介されている。しかし、これらの点検方法でも、

専用の測定機材が必要であったり、ある程度の技術が求められることから、誰でも簡単にできる測定法とまでは言えない。

そこで本研究では、加速度センサー内蔵の携帯タブレット端末を用いて振動試験を行い、取得した応答加速度から橋梁の固有振動数と減衰定数を算出するとともに、動的応答値における振動使用性評価を試みる。橋梁の振動試験は、振動特性から経年による橋梁全体の剛性の低下を評価したり⁵⁾、橋梁の残存年数の推定に利用する⁶⁾など、劣化診断において様々なアプローチが可能であることから、木橋においては、特に有用な試験方法と言える。従来の振動試験は、センサー類などは高価なものも多く、データ取得のためには複数の機材を用いる必要があるなど、測定には一定のスキルを要するものであったが、測定機器を携帯タブレット端末で代替することにより、測定の難度を大幅に軽減すると考えられる。

2. めもと橋の概要

めもと橋は、秋田県にある「仁別国民の森」内に架設されている大断面集成材を用いた木橋である。橋長は 23m、アーチ支間長は 20m の 2 ヒンジ中路式アーチ橋である。本橋は 2020 年に旧橋から架け替えられた新

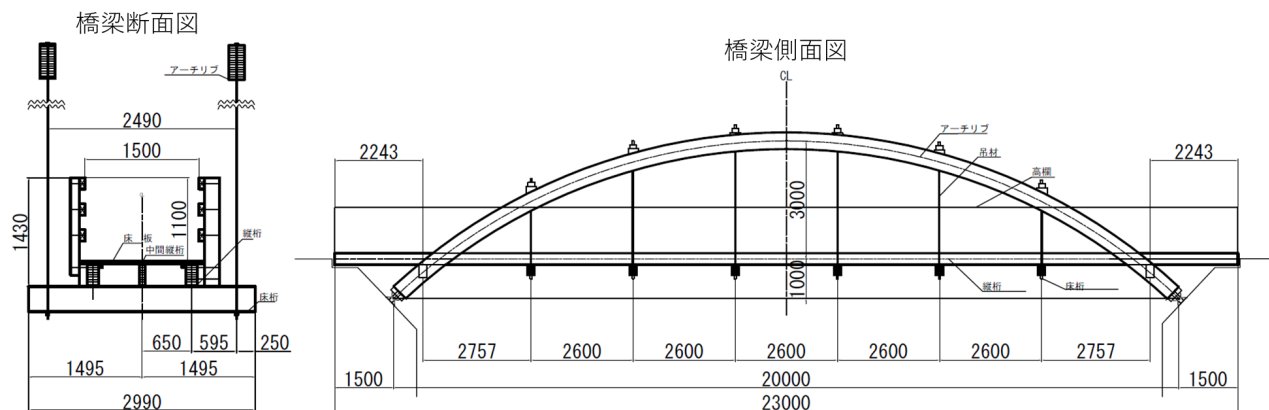


図-1 新橋めもと橋一般図



図-2 新橋めもと橋外観

橋であり、アーチリブ・縦桁・床桁などの主構造部材は秋田スギ集成材，その他の部材は秋田スギ製材を使用している．旧橋ではアーチリブの外側に接合されていた2つの補剛桁を，新橋ではアーチリブの内側に離間して2つの縦桁として設置し，その上に床板を並べられるように，この2つの縦桁の間にもう1つ小さな縦桁を加えた構造となっている（図-1,2）．そのため，旧橋では床桁の上に100×100×2720mmの角材を床版として橋軸方向に並べていたが，新橋では縦桁の上に30×150×1500mmの板材を橋軸直角方向に並べられるようになり，交換などのメンテナンスが容易になっている．国内の木製歩道橋などでは，縦桁を用いずに床組構造の床版を横桁に直接載せている中路式アーチ橋が多いため，このような縦桁を設けた新橋は，近代木橋としては比較的珍しい構造であると考えられる．本橋は仁別国民の森のシンボルでもあるめもと杉の手前にあり，多くの観光客やハイキング客が利用している．

表-1 測定日までの一週間降水量

日付(5月)	11日	12日	13日	14日	15日	16日
降水量(mm)	0.0	0.0	0.5	22.0	3.5	0.0
日付(7月)	6日	7日	8日	9日	10日	11日
降水量(mm)	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表-2 試験内容

試験名	加振位置	加振方向
砂袋落下衝撃試験	床版幅員中央	鉛直
人力鉛直加振試験	高欄上部	鉛直
人力水平加振試験	高欄中部	水平
アーチ水平加振試験	アーチリブ側面	水平
歩行試験	床版上面	鉛直

3. 振動試験

めもと橋を対象として，加速度センサー付きタブレット端末を用いた振動試験を実施した．試験は，天候の影響なども考慮し2022年5月17日と7月12日の間隔を開けた2日に分けて実施しており，両日とも固有振動数，固有振動モード，減衰定数の算出を目的とした試験を実施した．また，対象としているめもと橋は歩道橋であるため，歩行時に感じる振動使用性の検討を

目的とした歩行振動試験を実施した。なお歩行振動試験に関しては、7月12日のみ実施している。表-1にアメダス⁷⁾から取得したためおと橋周辺における各試験日までの1週間の降水量を示す。なお、5月17日の天候は晴れ、7月12日の天候は曇りであった。表-2に各試験内容を示す。下記に各試験における測定概要と測定に用いた機材について述べる。

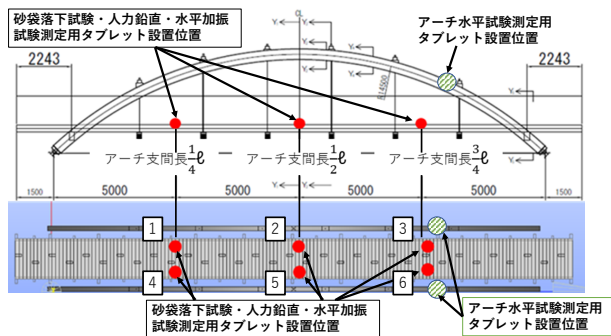


図-3 タブレット端末加速度計の設置位置



図-4 タブレット端末加速度計の設置の様子

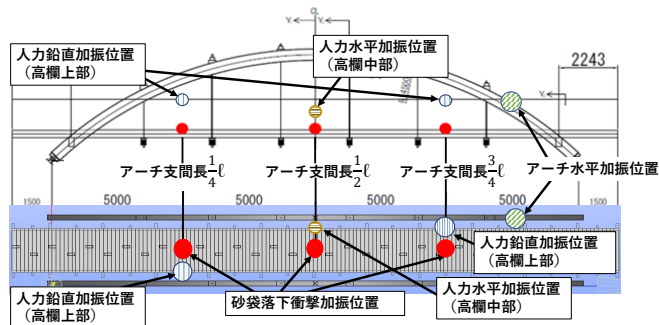


図-5 加振位置

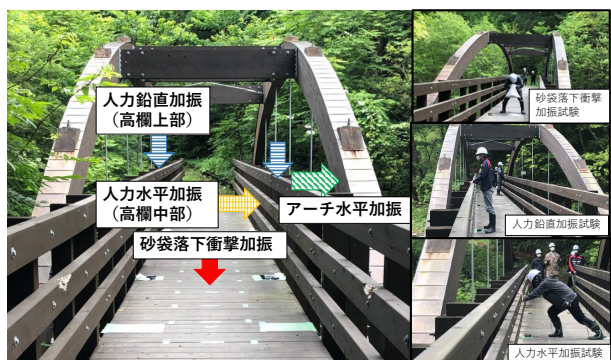


図-6 各試験の加振方向と試験の様子

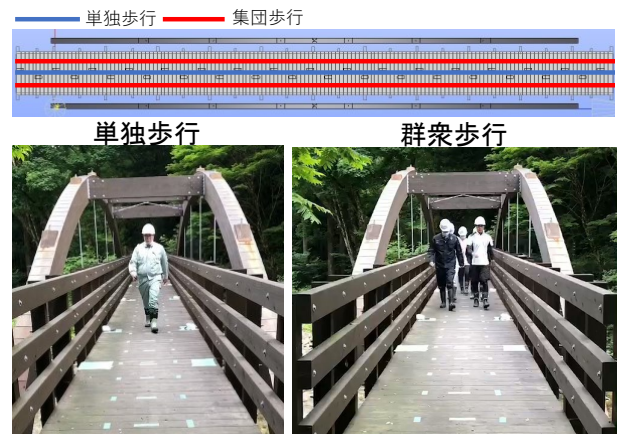


図-7 歩行試験の歩行路と様子

(1) 測定概要

a) センサーの設置位置

加速度センサーは、鉛直対称・逆対称1次モード、水平対称1次モード、ねじれ対称1次モードの比較的低次の各種のモードを各振動モードの振動の腹の位置で測定できるように、対象橋梁の床版上面のアーチ支間長1/4点、1/2点、3/4点の床版幅員両端に図-3のように6箇所に設置した。また、アーチ水平1次振動モードの測定では、図-3のようにアーチリブの吊り材挿入位置のアーチ上面に設置した。なお、ここでは各モードの最低次のモードを正弦1半波数が2以上でも1次モードと呼ぶ。タブレット端末加速度計の設置方法は、強力両面テープを介して床版上面に固定した。また床版保護のため先に養生テープを貼り、その上に両面テープを貼り付けた。図-4にタブレット端末加速度計の設置方法を示す。

b) 加振方法

加振位置は、図-5に示すようにアーチ支間長1/4点、1/2点、3/4点の床版幅員中央部、高欄上部、高欄中部、アーチリブ側面とし、誘起させたい振動モードごとに加振点を変えて試験を行った。加振方法は、10kgfの砂袋を加振点から40cmの高さに持ち上げて鉛直方向に落下させる砂袋落下衝撃加振（鉛直逆対称1次振動モード）、一定のテンポ（毎秒2回）で鉛直方向（ねじれ対称1次振動モード）、水平方向（水平対称1次振動モード・アーチ水平1次振動モード）に加振する人力加振を行った。各加振方法における加振方向と加振の様子を図-6に示す。なお、測定時間は30秒、サンプリング周波数は100Hzで、各試験ごとに2~3回の計測を行った。次章に示す方法で卓越固有振動数の実測値を算出した段階では、どの測定回から算出された測定値も有効桁2桁が一致する。

c) 歩行試験

本試験では、歩行荷重に対する橋梁の動的応答を測定するため、単独歩行(1人)、群衆歩行(5人)の2種類の歩行方法で測定を行った。歩行は、一般的な歩調である1.7~2.3Hzで実施し、歩幅は70cmとした。群衆歩行は、先頭から2人、2人、1人の3列で歩行し、各列の間隔は橋軸方向に2歩分空けている。歩行ラインを図-7に示す。

(2) タブレット端末の動機方法

本試験では、複数のタブレットから測定された波形データをもとに振動モードの推定を行うことを目的の一つとしている。そのため、各タブレット端末の測定開始時刻をできる限り揃える必要がある。しかし、めもと橋は、携帯電話の圏外エリアにあるため、ネットワークを介したタブレット端末の遠隔操作は行えず、手動で測定開始の操作を1台ずつ6台に行う必要があるが、操作を行える人員は3人しか確保できなかった。そこで、床版上面のアーチ支間長1/4点、1/2点、3/4点に1人ずつを配置し、上流側・下流側に1m間隔で設置された2つのタブレットの開始操作を行う。加速度測定アプリのタイマー計測機能を用いることで、上流側タブレットの開始操作をしてから10秒後に下流側の開始操作をして同時に測定が開始されるように設定した。3人の上流側・下流側の開始操作のタイミングをそろえるために、メトロノームアプリを用いて毎分60拍のパルス音をスピーカから流して、測定を行った。

(3) 測定機器

加速度計が搭載されているタブレット端末6台を用いて応答加速度を計測した。タブレット端末は、7インチ型の小型タブレット端末FFF-TAB7⁸⁾を用いた。FFF-TAB7はネット通販で1万円程度で購入できる比較的安価なタブレットである。加速度計測には測定アプリのPhyboxを用いた。Phybox⁹⁾はアーヘン工科大学が公開しているオープンソースソフトウェアでAndroidやiOSにインストールでき、使用デバイスに搭載されている加速度センサーなどの各種物理センサーにアクセスし、測定した加速度をxlsx形式かcsv形式で出力できる振動計測に有用なツールである。

(4) 振動試験結果

各試験で得られた測定波形の一例を図-8~11に示す。鉛直方向加振、水平方向加振の2方向の加振で振動が測定されたことからタブレット端末加速度計による3軸方向の測定にも問題がないことが確認された。

図-8の砂袋落下試験の振動波形では、ノイズは少なく判別しやすい自由減衰波形が確認され、特に不

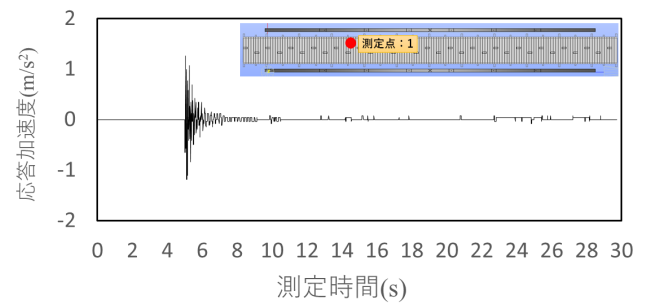


図-8 砂袋落下試験測定波形(床版幅員中央鉛直加振)

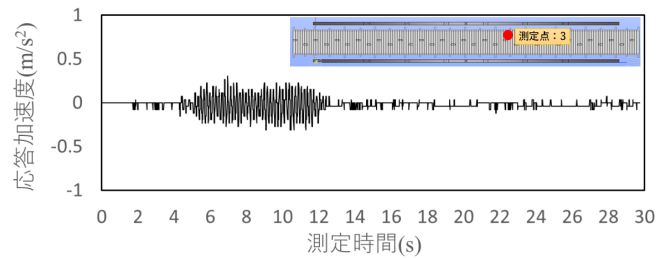


図-9 人力加振試験測定波形(高欄上部鉛直加振)

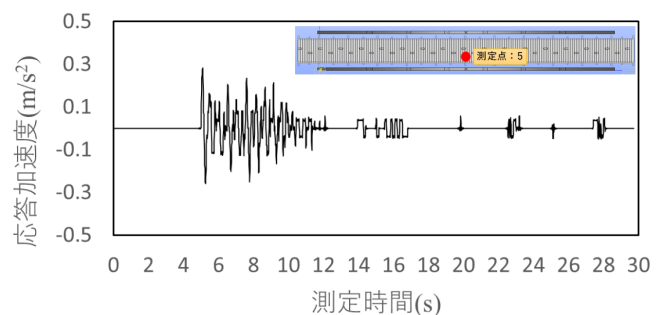


図-10 人力加振試験測定波形(高欄中部水平加振)

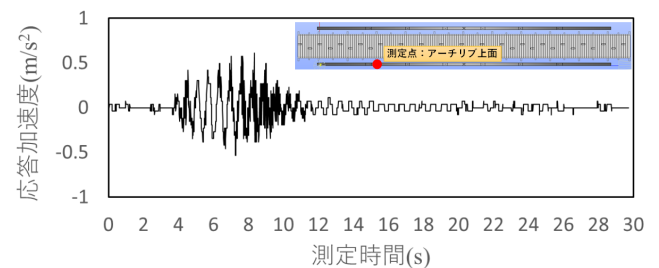


図-11 アーチリブ加振試験測定波形(アーチ水平加振)

自然な振動現象は確認されなかった。

しかし、図-9、10の人力鉛直加振試験、水平加振試験では、振動は測定できているものの砂袋落下試験よりも振動振幅は小さく、はっきりとした減衰波形は確認されなかった。図-11のアーチリブの水平加振試験では、

表-3 実測による各振動モードごとの固有振動数と減衰定数

振動モード	固有振動数 (Hz)		減衰定数	
	1 回目	2 回目	ハーフ パワー法	自由減衰 波形法
アーチ水平 1 次 (人力)		1.56	0.039	0.032
水平対称 1 次 (人力)	3.90	2.93	0.025	0.027
鉛直逆対称 1 次 (砂袋)	5.56	5.86	0.018	0.019
鉛直対称 1 次 (砂袋)	8.89	8.89	0.041	0.037

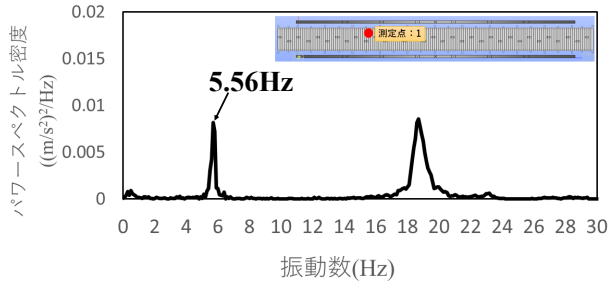


図-12 砂袋落下試験による PSD : 5 月 (加振 $\frac{1}{4}\ell$ 点)

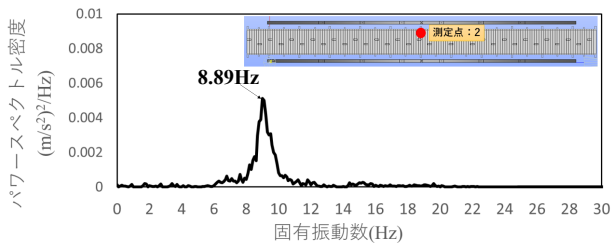


図-13 砂袋落下試験による PSD : 5 月 (加振 $\frac{1}{2}\ell$ 点)

ノイズが少なく判別しやすい減衰波形が確認された。

今回、人力で加振を行った試験では、振幅が小さく十分な加振が行えていないことが考えられる。特に図-9と図-10で、はっきりとした減衰波形とならなかったのは、加振力が影響していると考えられる。この影響については、4章で後述する。

4. 実測値の算出

各振動試験において得られた振動波形から数値解析ソフトウェア MATLAB2022¹⁰⁾を用いて固有振動数、振動モード、減衰定数を算出した。実測から得られた固有振動数と減衰定数を表-3に示す。算出方法と結果について以下に詳しく述べる。

(1) 固有振動数、固有振動モードの推定方法

各振動試験から得られた応答加速度に対してローパスフィルタを通過させ、30Hz以上の周波数成分を取り除いた。その後、数値解析ソフトウェア MATLABを用いてFFT処理により応答パワースペクトル密度 (PSD)¹¹⁾を求めた。

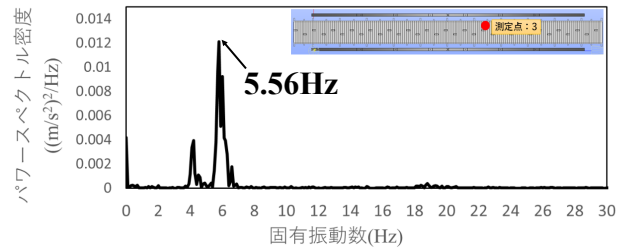


図-14 鉛直人力加振試験による PSD : 5 月

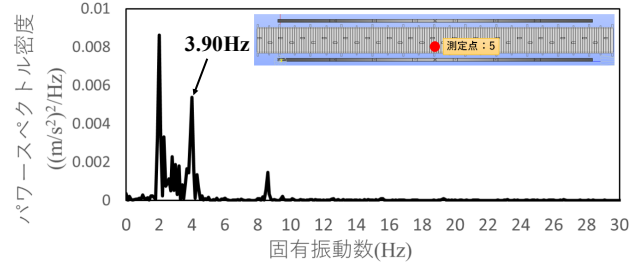


図-15 水平人力加振試験による PSD : 5 月

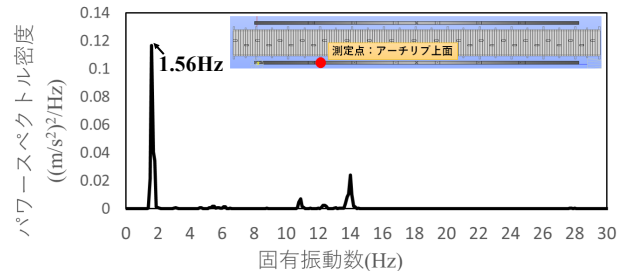


図-16 アーチ水平人力加振試験による PSD : 5 月

また、測定点の位相差から振動モードの同定を行った。位相差を求めるにあたって測点ごとの測定開始時刻の同時性が重要となる。前述したように振動試験の段階でできるだけ同時刻に測定を開始できるように測定方法を工夫したが、パルス音を聞いた測定者が人力で開始操作を行うことによるずれを解消する必要がある。測定開始時刻は各測定で出力したxlsxデータに0.001秒単位で記録されている。そのため、基準とするタブレット端末の測定開始時刻とその他のタブレット端末の測定開始時刻との差を0.001秒単位で算出し、その算出した差で測定波形データの開始点の調整を行った。サンプリング周期は0.01秒なので、開始時刻差による誤差はその1/10に収まると考えられる。なお、FFTデータ数は1024個、サンプリング時間間隔は0.01秒、周波数分解能は0.098Hzである。

(2) 固有振動数、固有振動モードの推定結果

図-12~16に各試験において求めたPSDの一例を示す。図-12, 13に示すように、砂袋落下測定試験で測定した鉛直加振による振動では、アーチ支間長 $1/4$ 点に

落下させた場合、アーチ支間長 1/2 点に落下させた場合のどちらの場合においても、PSD が卓越する振動数が明瞭で、雑音の影響等は確認されなかった。卓越する振動数のうち、1 次モードと考えられる低い振動数を用いて振動モードの同定を行った結果、それぞれ鉛直逆対称 1 次振動モード (5 月：5.56Hz, 7 月：5.86Hz)、鉛直対称 1 次振動モード (5 月：8.89Hz, 7 月：8.89Hz) が確認された。鉛直逆対称 1 次振動モードで、5 月と 7 月で固有振動数が変化している。この要因については 4.(3) で後述する。

ねじれ振動モードの誘起を目的とした高欄上部への人力鉛直加振試験の結果では、図-14 に示すように PSD が卓越する振動数が 2 つ確認されたものの、この振動数は鉛直逆対称 1 次モードのものと推定され、ねじれ振動は観測されなかった。ねじれ振動の誘起を目的とした人力鉛直加振試験では、ねじれ振動を誘起するほどの外力で加振することができなかったことも要因であると考えられる。

水平 1 次振動モードの誘起を目的とした高欄中部への人力水平加振試験の結果では、図-15 に示すように 5Hz 以下の低周波帯で卓越する複数箇所の振動数が確認されたが、固有振動数、固有振動モードの推定に影響を与えるほどの雑音は確認されなかった。卓越する振動数に対応する測定点の加速度の位相差から、水平対称 1 次振動モードと見なせる箇所を探しながら同定を行ったところ、水平対称 1 次振動モード (5 月：3.90Hz, 7 月：2.93Hz) が確認された。また、同様にアーチリブへの人力水平加振試験の結果でも、図-16 に示すように固有振動数・振動モードの推定に影響を与えるほどの雑音はなく、卓越する振動数に対応する測定点の位相差から、アーチ水平対称 1 次振動モードと見なせる箇所を探しながら同定を行ったところ、アーチ水平 1 次振動モード (7 月：1.56Hz) が確認された。なお、1 回目の 5 月の試験では、アーチリブ 1 本のみにタブレット端末を設置して測定を行っており、2 本のアーチリブの位相差から雑音がないことの確認ができなかったため、2 回目の 7 月の結果のみを示している。図-10 で人力水平加振試験の加速度波形に認められた多少の乱れが PSD 波形に影響すると思われたが、結果を見る限り、影響は少なかったと判断できる。

以上のように、タブレット端末を用いた振動試験においても、雑音等の影響も少なく固有振動数、固有振動モードの推定が行えることが確認された。

(3) 試験日による環境因子について

次に、試験日ごとの環境要因について考察する。鉛直の基本固有振動モードである鉛直逆対称 1 次モードでは、天候上の理由から 2 日に分けて試験を行ったた

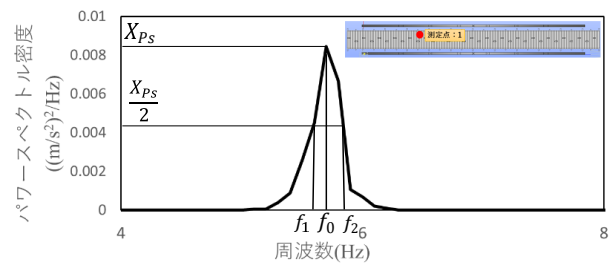


図-17 ハーフパワー法 (鉛直逆対称 1 次)

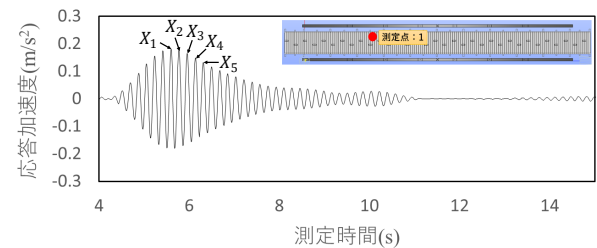


図-18 自由減衰波形法 (鉛直逆対称 1 次)

め、試験日によって算出された固有振動数が 5.56Hz (5 月 17 日)、5.86Hz (7 月 12 日) と異なり、0.3Hz 程度変動している。屋外曝露化での木材含水率は周期的に変動することが報告されており¹²⁾、春～夏にかけては含水率が 10%程度低下すると報告されている。また 5 月 17 日の試験では、試験日までの 1 週間に 3 日の降水が確認されている一方、7 月 12 日の試験では、試験日までの 1 週間に降水日はなく、この天候も測定で算出された固有振動数に影響したのではないかと考えられる。とはいえ鉛直逆対称 1 次モードなどでは、7 月 12 日の測定値の方が固有振動数が高くなり、水平振動に関しては低くなっているなど、全ての測定値に対して整合性のある変化ではない。部材の含水率の変化が各モードの固有振動数に与え得る影響については、数値解析を含めて今後も検討を続ける。

(4) モード減衰定数

各試験における加速度応答波形から、各振動モードにおける減衰定数をハーフパワー法と減衰自由波形法の 2 種類の方法により求めた。ハーフパワー法¹³⁾は、各振動モードにおいてパワースペクトル密度が卓越している固有振動数の範囲をバンドパスフィルターを用いて抽出し、波形のピーク値の 1/2 になる 2 点に対応する振動数の差から減衰定数 h を算出する方法である。算出例を図-17 に示すが、ピーク点の周波数を f_0 、1/2 点の周波数を f_1 、 f_2 とすると、式 (1) から h が求まる。

$$h = \frac{f_2 - f_1}{2f_0} \quad (1)$$

自由減衰波形による減衰定数の算出¹⁴⁾は、各振動モードにおいてパワースペクトル密度が卓越している固有振動数の範囲をバンドパスフィルターを用いて抽出し、**図-18**のように表されるその周波数範囲の加速度波形の最大値から式(2)によって減衰比 ζ を求める方法である。

$$h \doteq \zeta = \left\{ \frac{\ln \left(\frac{X_1}{X_2} \right)}{2\pi} \right\} \quad (2)$$

なお、ここでは減衰定数 h を ζ で近似する。自由減衰波形による減衰定数の算出は、単一モードのみ卓越している減衰波形であっても、過渡応答の影響などにより波形が乱れる場合が多い¹⁴⁾。そのため、今回は**図-18**のように示される $X_1 \sim X_5$ までの1波形ごとに減衰定数を求め、平均値を各振動モードにおける自由減衰波形による減衰定数としている。

各試験において3回程度の測定を行っているが、算出した減衰定数は対象とする振動モードの中でも各測定ごとにばらつきが生じたため、算出されたモード減衰定数の中で最も安全側となる最低値を各振動モードの減衰定数とした。各モードの減衰定数を**表-3**に示したが、2つの推定法による大きな違いは確認されない。また、**図-18**に示す代表的な減衰波形の例を見ると、タブレットの加速度計でも問題なく自由減衰波形を測定できていることから、タブレットを用いた振動試験でも減衰定数の測定は行えると判断した。

(5) めおと橋の動的特性

前節までにおいて、測定された振動波形から固有振動数・振動モード・減衰定数の算出・推定を行った。これらの結果から、一般的な歩道橋と比較しためおと橋の動的特性について以下に述べる。

はじめに、めおと橋の鉛直逆対称1次モードの固有振動数をもとに、めおと橋の剛性について評価を行った。一般的に基本固有振動数は、鋼・コンクリートの道路橋・歩道橋・鉄道橋などで測定された多数のデータから支間長の増大にしたがって小さくなる統計的な傾向が確認されている。その傾向から鉛直曲げの基本固有振動数 f_a (Hz)は支間長 ℓ (m)を用いて概算的に式(3)で算出される。また、通常のアーチ系鋼道路橋では、式(4)から鉛直逆対称1次固有振動数が概算的に算出され、一般的な鋼桁歩道橋では、式(5)から鉛直曲げの基本固有振動数が概算的に算出される^{15),16)}。

$$f_a = \frac{100}{\ell} \quad (3)$$

$$f_b = 154.8\ell^{-1.057} \quad (4)$$

$$f_c = 7.06 - 0.11\ell \quad (5)$$

この各概算式に本橋のアーチ支間長：20mを当てはめて計算すると基本固有振動数 $f_a = 5\text{Hz}$ 、 $f_b = 6.53\text{Hz}$ 、

$f_c = 4.86\text{Hz}$ となり、めおと橋の鉛直逆対称1次モードの実測値5.86Hzは、 $f_b = 6.53\text{Hz}$ (アーチ系鋼道路橋)より10%程度低いものの、歩道橋であるにもかかわらず、鉛直振動に関してはアーチ系鋼道路橋とほぼ同程度の鉛直曲げ剛性を有していると考えられる。

次に、めおと橋の減衰性について検討を行った。減衰定数に関しても、鋼橋・コンクリート橋の減衰定数 h と支間長 ℓ (m)の関係から概算式(6)が成立すると報告されている¹⁶⁾。

$$h = \frac{0.12}{\sqrt{\ell}} \quad (6)$$

この概算式に本橋のアーチ支間長を代入して計算した結果、 $h = 0.027$ となった。本橋の鉛直逆対称1次振動の減衰定数 $h = 0.018$ と比較すると、本橋のほうが30%程度低い値となっている。近代木橋の減衰定数の傾向として、上路式アーチ橋は、鋼橋・コンクリート橋と同程度の減衰性、またはそれ以上の減衰性を有しているが、中路式・下路式アーチ橋に関しては、縦桁を有していない影響¹⁷⁾などから、上路式アーチ橋と比べると減衰定数は70%程度低くなる¹⁸⁾。本橋の減衰定数を中路式・下路式アーチの近代木橋の減衰定数と比較すると4割近く高い値を示しているが、縦桁を有する中路式アーチ橋の特性が現れたものと考えられる。

5. 実測値と解析値の比較

3Dソリッド要素モデルで作成しためおと橋の固有振動数をモーダル解析から算出する。数値解析には有限要素解析ツールSalome-meca2020¹⁹⁾を用いる。本橋は2021年にFAKOPPを用いて部材ヤング率の推定を行っており²⁰⁾、本解析においては、そのデータを用いた。なお、密度については実橋での測定が難しかったため、一般的なスギ材の 0.38g/cm^3 (気乾含水率15%程度)を用いた。なお、アーチリブは等方性材料、その他部材は異方性材料として解析を行った。**表-4**に実測における振動モードごとの固有振動数と解析値を示す。相対誤差は、 $\frac{\text{実測値}-\text{解析値}}{\text{解析値}}$ を%で示している。また解析によって得られた振動モードを**図-19~22**に示す。

解析の結果、鉛直曲げの基本固有振動モードは鉛直逆対称1次モードとなり、めおと橋は実測・解析の両面から鉛直逆対称1次モードが基本固有振動モードであることが確認された。モード解析においてねじれ振動モードは確認されなかった。

実測値と解析値を比較すると、卓越モードである鉛直逆対称1次の固有振動数は、相対誤差が1.2%(7月)、-4.0%(5月)程度、アーチ水平対称1次振動は相対誤差が-15%程度と低次振動モードでは相対誤差が比較的小さいが、その他のモードでは、相対誤差がかなり大きいものもある。近代木橋を対象としたサーボ型速

表-4 固有振動数の解析値と実測値の比較

振動 モード	固有振動数 (Hz)			相対誤差 (%)	
	実測値		解析値		
	1 回目	2 回目		1 回目	2 回目
アーチ水平 1 次		1.56	1.83		-14.75
水平対称 1 次	3.90	2.93	7.88	-50.51	-62.82
鉛直逆対称 1 次	5.56	5.86	5.79	-3.97	1.21
鉛直対称 1 次	8.89	8.89	13.50	-33.41	-33.41



図-19 アーチ水平 1 次モード

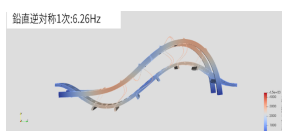


図-20 鉛直逆対称 1 次モード

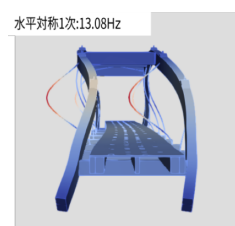


図-21 水平対称 1 次モード

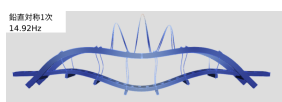


図-22 鉛直対称 1 次モード

度計を用いた振動試験の実測と数値解析の比較²¹⁾では、対象としている 7 橋で、実測と解析の固有振動数が両者よく一致していることも確認されているが、本研究では、鉛直逆対称 1 次振動モードのみが解析とよく一致している結果となった。鉛直対称 1 次振動や水平対称 1 次振動で大きな誤差となっている原因については、測定時の加振力の影響や解析モデルの影響なども考えられる。とはいえ、鉛直曲げの基本固有振動モードで誤差が非常に小さくなったことは、タブレットの加速度計を用いた振動試験による固有振動数・振動モードの同定に関して、十分な正確性が反映されている可能性が示唆される。

タブレット端末加速度計と数値解析の比較については、数値解析モデルの正当性や数値解析に用いた密度（気乾含水率 15%）の値など、検討が必要な部分も多いため、他の橋梁での結果なども含めて今後の検討課題としていきたい。

6. 歩行時の振動使用性

めもと橋は歩道橋であるため、歩行者が通行する際に感じる振動に対する評価も重要である。そこで、単独歩行試験と群衆歩行試験の測定データを基に振動使用性に関する評価を行った。歩道橋の振動評価法につ

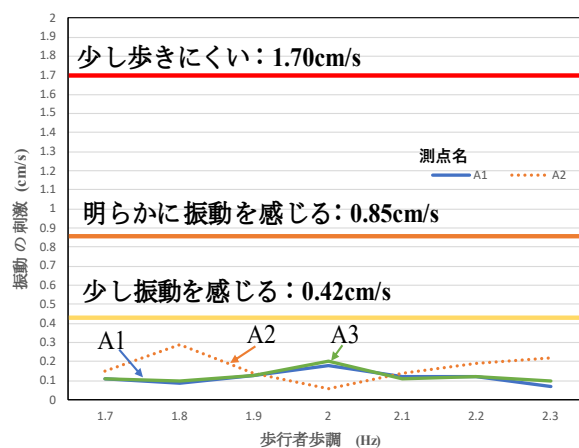


図-23 単独歩行における振動刺激

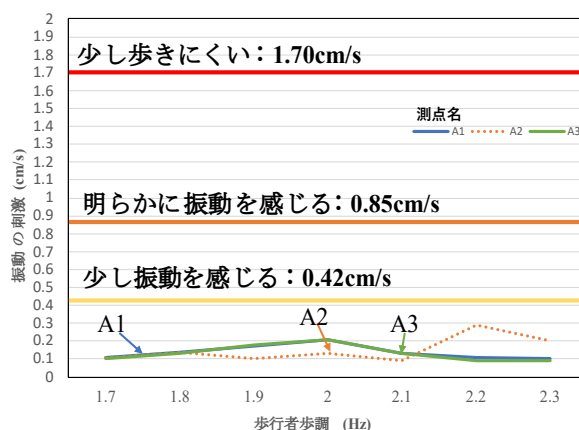


図-24 群衆歩行における振動刺激

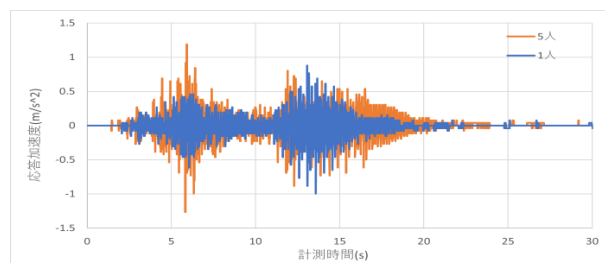


図-25 単独歩行と群衆歩行の比較

いては、金沢大学の小堀ら²²⁾によって、橋梁振動の許容限度（恕限度）が示されており、その中で、歩行時における振動が人間に及ぼす影響、歩行者が歩きにくく感じないとされる振動速度の実効値（1.7cm/s 未満）が提案されている。また実測において、速度計以外で振動計測を行った場合の振動刺激としての振動速度の求め方も考案されているため、本研究では、これらの方法に従ってめもと橋の振動使用性の評価を行うこととした。歩行時における振動が人間に及ぼす影響に関しては、5 段階の категорияに分類されているため、本研究の結果が振動速度の実効値 1.7cm/s 未満かつ現在の振動がどの категорияに分類されるかで評価した。図-23, 24 に横軸を歩調 (Hz), 縦軸を振動速度 (cm/s) として単

独歩行時と群衆歩行時の振動速度の実効値を示す。また図中に心理的影響のカテゴリー名とその閾値を示す。なお、測定した加速度応答値から振動速度を算出する算出式は次式で与えられる²²⁾。

$$S = \left\{ \sum_{i=1}^M \left(\frac{\sigma_{ai}}{2\pi f_i} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

ここに、 S ：振動刺激における振動速度の実効値、 f_i ：PSD 波形で卓越する周波数、 σ_{ai} ： f_i に対応する実効値、 M ：周波数成分の個数である。めおと橋の歩行試験の結果から振動使用性について評価を行ったところ、単独歩行、群衆歩行のどちらにおいても全く感じない程度の振動であることが明らかになった。

単独歩行と群衆歩行であまり差が生じていないが、測定した加速度応答値(図-25)で比較しても、振動が生じている時間の長さには差があるものの振動の大きさにはあまり差が生じていない。今回、群衆歩行時の歩行の同期はスマートフォンのメトロノームアプリを用いてスピーカーからパルス音を流し、各歩行者がパルス音に合わせて歩行することで同期を取っているため、歩行者同士の同期が大きくずれているとは考えにくい。とはいえ、単独歩行と振動の大きさがあまり変わらないことから、歩行者同士の同期が不十分であった可能性は残る。今後経年劣化に伴って振動使用性がどのように変化していくか、今回のデータを基準として継続的な評価を行っていく必要がある。

7. まとめ

従来、橋梁の振動測定などに用いられていた機材は、高価なものが多く、誰もが容易に入手して使用できるものではない。そこで、本研究では加速度計が搭載されている安価なタブレット端末を用いて、木歩道橋のめおと橋に対して十分な精度の振動測定を行えるかどうかを、実測値と数値解析との比較も含めて検討したところ、以下の知見を得た。

- ・タブレット端末加速度計で測定した波形でも、スペクトル解析から固有振動数、振動モードの算出が可能であることが確認された。しかし、十分な加力がなされていない場合ノイズの影響も多く、固有振動数の算出が難しくなることも示唆された。
- ・タブレット端末加速度計で測定した波形でも、ハーフパワー法、自由減衰波形法のどちらの算出方法からも減衰定数の算出を行えることが確認された。
- ・めおと橋の卓越振動モードは、アーチ橋の卓越振動モードとして一般的な鉛直逆対称 1 次モードであることが確認され、その固有振動数は、5.86Hzであった。これは、鋼橋やコンクリート橋と同程

度の値であり、曲げ剛性も同程度であることを示唆する。

- ・めおと橋の減衰定数は、一般的な鋼橋・コンクリート橋などと比較すると低い値となったものの、他の中路的アーチの近代木橋と比較すると 4 割近く高い値となり、縦桁の影響が現れる結果となった。
- ・FAKOPP で測定しためおと橋の部材ヤング率(密度：気乾含水率 15%程度)を用いた数値解析と実測値の比較では、鉛直曲げの基本固有振動数である鉛直逆対称 1 次振動モードで解析値と実測値の誤差は 1.2%～4.0%程度となり、タブレットの加速度計を用いた振動試験による固有振動数・振動モードの同定に関して、十分な正確性を有することが示唆される。
- ・通行時における振動使用性に関しては、単独歩行・群衆歩行の 1.7～2.3Hz のどの歩調においても、全く振動を感じない程度の振動刺激であることが明らかとなった。

以上、タブレット端末を用いた実橋の振動測定において、固有振動数、固有振動モード、減衰定数、動的応答値の算出が可能であることが示された。しかし、サーボ型速度計では、相対誤差がかなり近くなっていた数値解析との比較では、多少懸念が残る結果となった。今後の課題として、他の橋梁形式の橋などでタブレット端末加速度計を用いた振動試験を実施し、タブレット端末の遠隔操作を用いた振動測定や、三次元動的応答解析による検討も含めて、タブレット端末加速度計の有用性をより確実なものとしていきたい。最後に、本研究で明らかになっためおと橋の振動特性が今後の維持管理などの指標として参考になれば幸いである。

謝辞：本研究の実測調査に協力していただいた秋田大学構造研究室の方々に深く感謝の意を表す。なお、本研究の一部は科研費 20K04658 の助成を受けたものである。

REFERENCES

- 1) 国土交通省：道路の維持修繕に関する省令・告示の制定について、2014。[Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Dôro no izi-syûzen ni kansuru syôrê-kokuji no sête ni tuite*, 2014.]
- 2) 八幡 太一、小池 真紀夫、木村 吉郎：携帯情報端末を用いた簡易振動測定の試み、土木学会第 67 回年次学術講演会、pp.191-192, 2012。[Hatiman, T. Koike, M. and Kimura, K.: *keitaizyo-houtanmatu wo motiita kanisindousokutei no kokoromi*, Proceedings of 2012 JSCE Annual Meeting, pp.191-192, 2012.]
- 3) (財) 国土技術研究センター：木歩道橋設計・施工に関する技術資料、pp.184-232, 2003。[Japan Institute of Country-ology and Engineering: *Mokuhoudoukyo-sekkei & sekou ni kansuru gizyutusriryô*, pp.184-232, 2003.]
- 4) 日本林道協会・木橋技術協会：木橋の定期点検要領 version2, pp28-37 ,2022。[Japan Forest Road Association,

Mokkyougizyutukyokai: Mokkyou no teikitenkenyouryo-version2, pp28-37, 2022.]

- 5) 及川 大輔, 故 菅沼 源二郎, 本田 秀行, 後藤 文彦: 経年による木製アーチ道路橋(かじか橋)の構造性能と健全度調査, 木材工学論文報告集 19, pp.72-79, 2021. [Oikawa, D. Suganuma, G. Honda, H. and Gotou, H.: Structural performance and soundness evaluation of aging timber arch highway bridge, Paper Reports on Wood Engineering 19, pp.72-79, 2021.]
- 6) 篠原 聖人, 加藤 真吾, 豊田 淳, 本田 秀行: 経年による木橋の構造剛性に基づく劣化度と残存年数の算定法, 木材利用研究論文報告集 18, pp.16-24, 2019. [Shinohara, M. Kato, S. Toyoda, A. and Honda, H.: Calculation method of deterioration degree and remaining years based on structural rigidity of timber bridges, Paper Reports on Use of Wood for Civil Engineering 18, pp.16-24, 2019.]
- 7) 日本気象協会: アメダス実況(気温) [https://tenki.jp/amedas/\(2022/10/25 閲覧\)](https://tenki.jp/amedas/(2022/10/25%20閲覧)) [Japan Weather Association: *Amedasu zikkyou (kion)* [https://tenki.jp/amedas/\(browsed in 2022-10-25\)](https://tenki.jp/amedas/(browsed%20in%2022-10-25))]
- 8) FFF SMART LIFE CONNECTED 株式会社: FFF SMART LIFE CONNECTED TABLET PC, [http://www.marshall-no1.jp/products/fff-tab7.html\(2022/5/10 閲覧\)](http://www.marshall-no1.jp/products/fff-tab7.html(2022/5/10%20閲覧)) [FFF SMART LIFE CONNECTED: FFF SMART LIFE CONNECTED TABLET PC, [http://www.marshall-no1.jp/products/fff-tab7.html\(browsed in 2022-05-10\)](http://www.marshall-no1.jp/products/fff-tab7.html(browsed%20in%2022-05-10))]
- 9) RWTH Aachen University, phyphox, [https://phyphox.org/\(browsed in 2022-04-16\)](https://phyphox.org/(browsed%20in%2022-04-16))
- 10) MathWorks, [https://matlab.mathworks.com/\(browsed in 2022-11-17\)](https://matlab.mathworks.com/(browsed%20in%2022-11-17))
- 11) 長松昭男: モード解析入門, コロナ社, 1993 年. [Nagamatu, A.: *Môdo Kaiseki Nyûmon*, CORONA PUBLISHING Co., LTD., 1993.]
- 12) 岡崎泰男: 3 年間屋外曝露した木材の面圧強度の変化, 木材工業 第 67 巻 第 8 号 (通巻 785 号), pp334-338, 2012. [Okazaki, Y.: Embedding Strength of Woodexposed to Field Conditions for Three Years, Wood Industry Vol.67, No.8, pp334-338, 2012.]
- 13) 日本建築学会: 建築物の減衰, pp. 85-93, 2000. [Architectural Institute of Japan: Damping in buildings, pp. 85-93, 2000.]
- 14) 土木学会: 橋梁振動モニタリングのガイドライン, 土木学会, PP.81-84, 2000. [Japan Society of Civil Engineers: Guidelines for bridge vibration monitoring, Japan Society of Civil Engineers, pp. 81-84, 2000.]
- 15) 日本鋼構造協会【編】: 構造物の耐風工学, 東京電機大学出版局, 1997. [Japanese Society of Steel Construction: *kouzoubutu no taihu-kougaku*, Tokyo Denki University Press, 1997.]
- 16) 橋梁振動研究会: 橋梁振動の計測と解析, 技報堂出版, pp.103-114, 1984. [*Kyôryôshindô Kenkyûkai: Kyôryôshindô no Kêsoku to Kaiseki*, GIHODO SHUPPAN Co.,Ltd pp. 103-114, 1984.]
- 17) 中田 雄太, 本田 秀行, 植野 芳彦: 縦桁を有する木製中露式アーチ車道橋の構造特性, 構造工学論文集 Vol.55A, pp.915-924, 2009.[Nakada, Y. Honda, H. and Ueno, Y.: Structural characteristics of half through arch timber highway bridge with stringer, Journal of Structural Engineering, Vol. 55, pp.915-924, 2009.]
- 18) 糠山尚希, 本田秀行: 集成材を用いた近代木橋の構造性能に関する実態把握, 木材利用研究論文報告集 9, pp.146-157, 2010. [Nukayama, N. and Honda, H.: Actual Evaluation on Structural Performance of Modern Glulam Timber Bridges, Paper Reports on Use of Wood for Civil Engineering 9, pp.146-157, 2010.]
- 19) [https://code-aster.org/\(browsed in 2022/06/15\)](https://code-aster.org/(browsed%20in%2022/06/15))
- 20) 藤原有沙, 及川 大輔, 後藤 文彦, 野田 龍, 青木 由香利: 架替えられた木橋の部材状況について, 令和 3 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集 (CD-ROM), I-13, 2022. [Fujiwara, A. Oikawa, D. Gotou, H. Noda, R. and Aoki, Y.: The Condition of The Members of The Timber Bridge That Was Replaced, Proceedings of the 2021 Tohoku Branch Technical Conference of the Japan Society of Civil Engineers (CD-ROM) , I-13, 2022.]
- 21) 豊田 淳, 本田 秀行, 篠原 聖人, 加藤 真吾: 経年による木橋の動的特性の実態に基づく構造剛性, 木材利用研究論文報告集 17, pp.24-30, 2018/12. [Toyoda, A. Honda, H. Shinohara, M. and Kato, S.: STRUCTURAL RIGIDITY BASED ON DYNAMIC PERFORMANCE OF TIMBER BRIDGE BY PASSING AGE, Paper Reports on Use of Wood for Civil Engineering 17, pp.24-30, 2018/12.]
- 22) 小堀 為雄, 梶川 康男: 橋梁振動の人間工学的評価法, 土木学会論文報告集, 第 230 号, pp. 23-31, 1974 年. [Kobori, T. and Kajikawa, Y.: Ergonomic Evaluation Methods For Bridge Vibrations, Proceedings of Japan Society of Civil Engineers Issue230, pp.23-31, 1974.]

(?)

(?)

ESTIMATION OF VIBRATION CHARACTERISTICS OF MEOTO BRIDGE USING TABLETS WITH ACCELEROMETER

Daisuke OIKAWA, Keito IWASAKI, Humihiko GOTOU and Yukari AOKI

It is important to understand vibration characteristics of bridges for estimation of the stiffness of the entire bridge. Generally equipments for vibration measurement are so expensive that everyone can not easily carry out the measurement using the equipments. In this study, we try vibration measurement with enough accuracy using tablet devices with accelerometer for a timber pedestrian bridge. For the most dominant vertically-antisymmetrical mode, error of measured value by the tablet devices to the numerically calculated value is about -4.0%. It shows the utility of vibration measurement using tablet devices with accelerometer. Besides, we discuss vibration characteristics for the measured timber pedestrian bridge, comparing values of natural frequency and of damping constant with the values obtained by the approximate equation for steel/concrete bridges.