

人力加振によるつなぎ橋の固有振動特性評価

An Evaluation of Vibration Characteristics of Tsunagi Pedestrian Bridge by Means of Man-Power Excitation Test

室蘭工業大学

(株)日本製鋼所 室蘭製作所
(株)KGE

室蘭市 都市建設部土木課

室蘭工業大学

フェロー

○正 員
正 員

正 員

岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

寺田 寿 (Hisashi Terada)

巽 治 (Osamu Tatsumi)

三上 俊一 (Syun-ichi Mikami)

小室 雅人 (Masato Komuro)

1. はじめに

つなぎ橋は、平成14年4月に室蘭市が八丁平地区に建設した木材（集成材）と鋼材から構成される複合型の歩道橋である。このような木材を用いた橋梁は、自然環境および景観にも優れていることから、近年その建設数が増加している¹⁾。しかしながら、このような橋梁に関する施工技術や設計法が未だ整備されていないため、現在その準備が進められている。従って、本橋のような木材と鋼材を組み合わせた複合橋梁（以後、鋼補剛木橋）の振動特性を把握することは、今後建設される類似の橋梁に対する挙動特性把握の観点および維持管理の観点から重要であるものと考えられる。

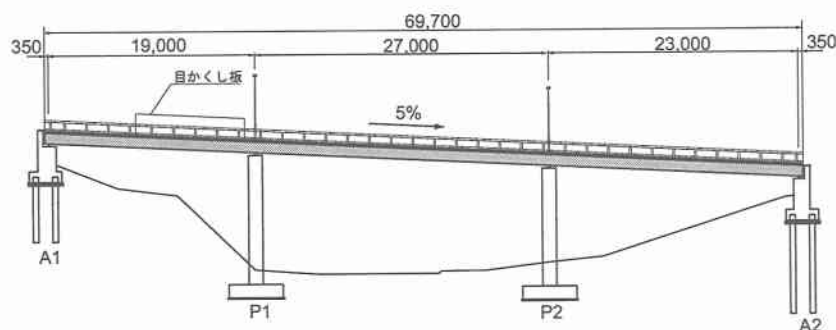
このような背景より、本論文では、本鋼補剛木橋の供用開始後の歩行者の制限度の観点および固有振動特性把握のための基礎資料を得ることを目的として、常時微動観測および人力による強制加振実験を実施した。本論文では、上述の強制加振実験の概要およびその結果（低次固有振動数、振動モードおよび減衰定数）について考察を行う。また、常時微動観測結果と人力加振結果の比較検討も行っている。

2. つなぎ橋の概要

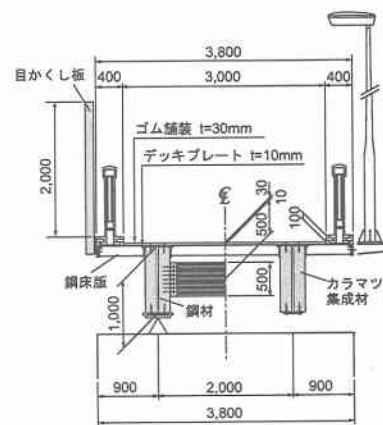
つなぎ橋は、図-1に示すように集成材と鋼材を組み合わせた3径間連続鋼床版鋼補剛木橋である。2本の主桁には、鋼材と北海道産カラマツの集成材を使用し、主桁の上部に鋼床版、下部に鋼板を差し込むことにより、所定の強度を確保している。以下に本橋の諸元を示す。

橋 長：69.7m

支 間：19.0m + 27.0m + 23.0 m



側面図



断面図

図-1 つなぎ橋の概要

幅 員：歩道部 3.0m, 地覆部 0.4m × 2

橋 格：人道橋

形 式：3径間連続鋼床版鋼補剛木橋

支 承：積層ゴム支承

集成材：北海道産カラマツ

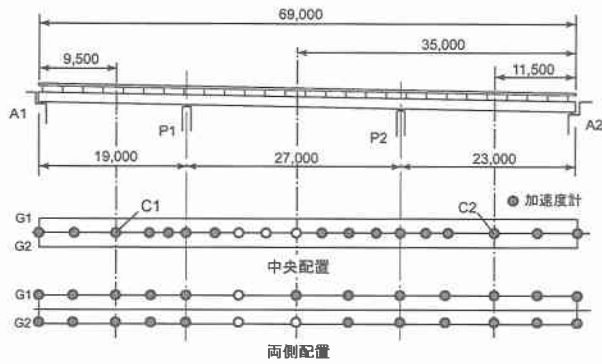
また、写真-1には、つなぎ橋の全景を示している。

3. 測定および試験の概要

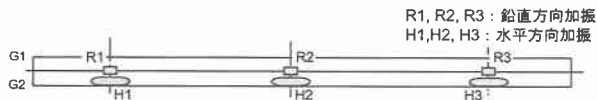
人力加振や常時微動観測波形により、本橋の固有振動特性を評価するために、桁上にサーボ型加速度計（容量：9.8 m/s²あるいは19.6 m/s²、周波数特性：DC～100 Hz）を設置している。図-2(a)には、加速度計の配置を示している。鉛直振動成分観測時には、曲げ振動成分に着目して断面中央部に19 chを、またねじり振動および水平振動成分観測時には、断面両端部に26 ch設置した。計測は、加速度計からの出力波形を200 Hzのサンプリング周波数でメモリーレコーダーアナライザーにて一括収録している。なお、鉛直および水平振動成分観測時には、中央径間の3つ



写真-1 つなぎ橋の全景



(a) 加速度計の配置



(b) 加振位置

図-2 加速度計の配置と加振位置

の加速度計（図-2(a)における○印）に不具合が生じたため、これらの実測データを後述の実験結果から除外することとした。

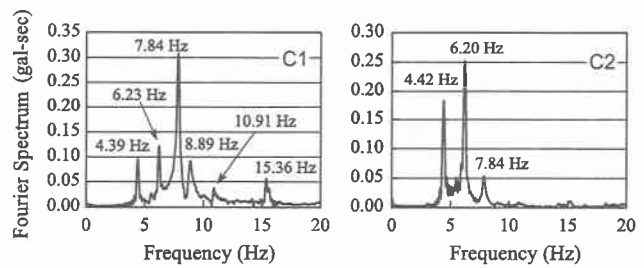
また、橋梁の固有振動特性を把握するための加振実験には一般に起振機が使用されている。しかしながら、歩道橋のように規模が小さく、主桁の剛性が比較的小さい場合には、人力による加振でも十分な振動を励起することが可能である²⁾。従って、本実験では人間の跳躍等による人力強制加振を行った。すなわち、鉛直方向加振は、1人の人間が椅子から飛び降りることによって、また水平方向加振は、3人の人間が斜め腕立て伏せにより高欄部を加振することによって行っている。加振位置は様々な振動モードの励起を想定し、鉛直方向および水平方向加振とも各径間中央部で行っている。図-2(b)には加振位置を示している。また、上記の加振実験の他、常時微動観測による加速度波形の収録も行っている。

4. データ整理の概要

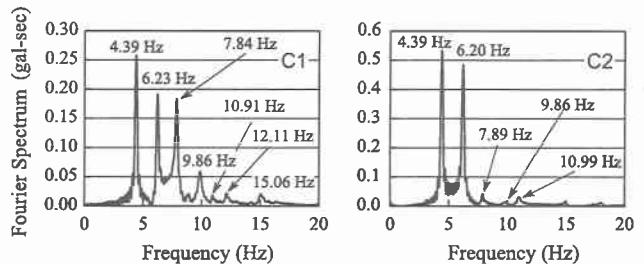
4.1 固有振動モードおよび固有振動数の決定

人力加振および常時微動観測より得られる加速度波形を用いた本橋の低次固有振動モードおよび固有振動数の決定は、以下の過程に基づいて実施した³⁾。

- 1) 人力加振および常時微動により励起された加速度波形を収録する。
- 2) 全地点の収録波形に関して、一定時間（加振実験時：振動励起後5 sec間、常時微動観測時：30 sec間）について高速フーリエ変換(FFT)処理を施し、フーリエスペクトルを求める。
- 3) 主要な点に関するフーリエスペクトルから低次固有振動数であると考えられる卓越振動数を抽出する。
- 4) 3)で着目した卓越振動数における各測点のフーリエスペクトル値および位相スペクトル値を用いて、各測点の振幅を時間軸を統一し、かつ最大振幅で正規化した状態で1/2振幅ごとにプロットする。
- 5) 各時間におけるモード分布の節や腹が軸方向に移動せず、振動モードが連成していないことを確認し、固有



(a) R1 加振時



(b) R2 加振時

図-3 鉛直方向加速度波形のフーリエスペクトル

振動モードを決定する。

4.2 減衰定数の決定

人力加振および常時微動観測より得られた加速度波形を用いた各固有振動成分に関する減衰定数は、以下の過程により算出した。

- 1) 各固有振動モードが卓越する測点に関して、人力加振および常時微動によって得られた加速度波形データにFFT処理を施し、フーリエスペクトルを求める。
- 2) 着目している固有振動成分のみを卓越されるため、バンドパスフィルタ処理を施し、波形を生成する。
- 3) 人力加振の場合には、十分な振幅を有する減衰自由振動が励起されていることより、波形を直接使用することとする。一方、常時微動観測の場合には、ランダム成分が卓越するため、RD法を適用しランダム成分を相殺後、減衰自由振動のみを抽出する。
- 4) 得られた波形の包絡線を次式のように仮定し、半周期毎の極大値、極小値を用いた最小二乗法により減衰定数を決定する。

$$y = A \exp(-h\omega t) \quad (1)$$

ここで、 A ：振幅、 h ：減衰定数、 ω ：角速度、 t ：時間である。

5. 測定結果および考察

5.1 固有振動数および固有振動モードの決定

図-3(a), (b)には、それぞれR1およびR2加振時における測点C1およびC2の鉛直方向加速度波形から得られるフーリエスペクトルを示している。図より、最大振幅には差異が見られるものの、加振位置および測点にかかわらずほぼ同一な卓越振動数を確認することができる。図-4には、H2加振時における測点C1, C2の水平方向加速度波形から得られるフーリエスペクトルを示している。図より、最大振幅は0.07程度と鉛直方向のフーリエスペクトルと比較して非常に小さいことがわかる。また、図-5に

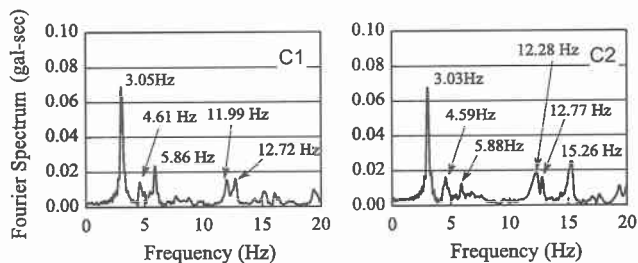


図-4 水平方向加速度波形のフーリエスペクトル
(H2 加振時)

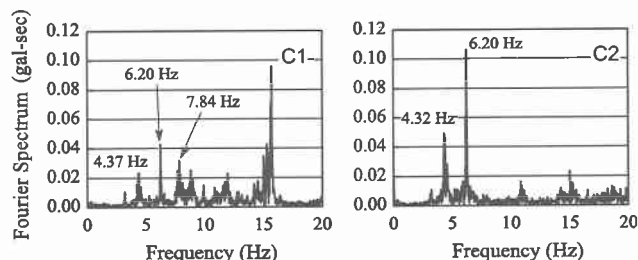


図-5 常時微動観測波形から得られた鉛直方向
加速度波形のフーリエスペクトル

表-1 固有振動数一覧 (Hz)

振動モード		鉛直方向加振 *1			常時微動	水平方向加振 *2		
		加振位置				加振位置		
		R1	R2	R3		H1	H2	H3
曲げ 振動	一次	4.39			4.37	-		
	二次	6.23			6.23	-		
	三次	7.83		-	7.83	-		
ねじれ振動		抽出不可能				-		
水平一次振動		-			抽出不可能			

^{*1} 鉛直方向加振は1人が1回のジャンプすることにより実施。

^{*2} 水平方向加振は3人が同時に斜め腕立て伏せをすることにより実施。

は、常時微動観測波形より得られる鉛直方向加速度波形を示している。図より、常時微動観測結果と図-3に示す加振実験結果を比較すると、最低次固有振動数に若干の差異がみられるものの、ほぼ同様な卓越振動数を示していることがわかる。ここでは、これらのスペクトル図を用いて、各卓越振動数に関する1/2振幅毎のモード図を作成し、振動モードの特定を行った。

図-6には、各卓越振動数に対応する振動モードを示している。なお、前述のように中央径間に配置された加速度計に不具合が生じたため、いずれの場合においても該当する箇所のデータを除去する形で振動モードの特定を行った。(a)図より、曲げ一次振動に関しては、モードの節や腹が明瞭に現れており、固有振動数に対応するものであることがわかる。一方、(b)、(c)図より、曲げ二次および三次振動に関しては、支点部の他、その近傍における振幅が極めて小さく、支点部近傍における橋桁の変形曲率が小さい分布を示していることがわかる。これは、1)本橋が5%の縦断勾配を有していること、2)支間割が非対称であるこ

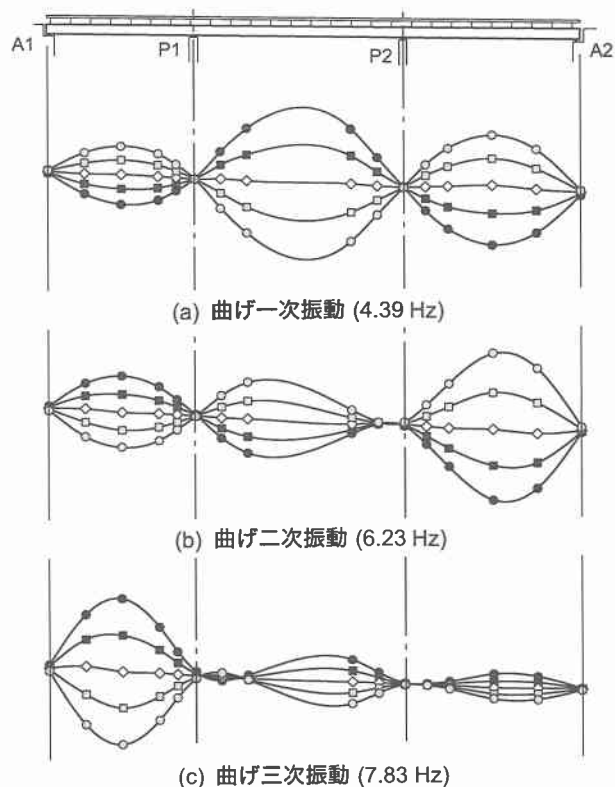


図-6 人力加振実験結果より得られる各振動モード

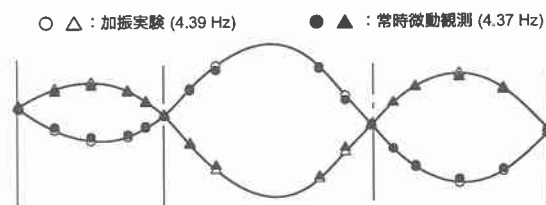


図-7 人力加振実験結果と常時微動観測結果による
モード分布の比較

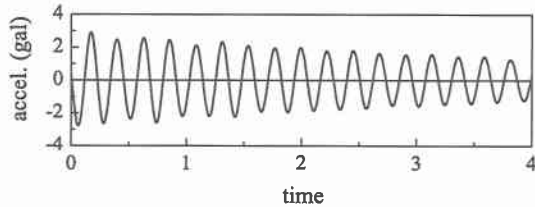
と、および3)支承部に積層ゴム支承を使用していること、等に起因しているものと考えられる。なお、別途実施した固有振動解析においても、同様な振動モードが得られることを確認している⁴⁾。

一方、水平振動およびねじり振動に関しては、明確な振動モードの特定が困難であった。これは、いずれの場合も起振力が小さいために卓越振動モードが十分に励起されなかったためと推察される。

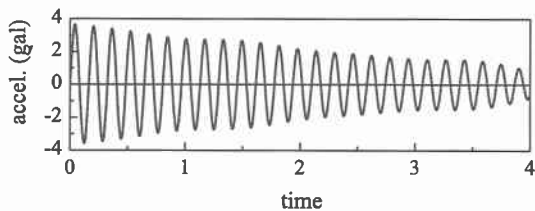
図-7には、加振実験と常時微動観測から特定された曲げ一次振動モードを比較して示している。また、表-1には、両実験結果から得られる固有振動数を比較して示している。図および表より、両実験結果を比較すると、曲げ一次振動モードに関しては固有振動数に若干の差異がみられるものの、振動モードは非常に良く一致していることがわかる。他の振動モードに関しても、固有振動数およびその振動モードが両方で一致していることを確認している。これより、常時微動観測データを用いる場合にも、人力加振実験結果と同様の固有振動数およびその振動モードを特定できることが明らかになった。

表－２ 設定したバンドパスフィルタ域と減衰定数

振動モード		加振実験（鉛直方向）						常時微動	
		加振位置 R1		加振位置 R2		加振位置 R3		フィルタ 域 (Hz)	減衰定数
		フィルタ 域 (Hz)	減衰定数	フィルタ 域 (Hz)	減衰定数	フィルタ 域 (Hz)	減衰定数		
曲げ 振動	一次	0～5.4	0.007	0～6.1	0.006	0～5.4	0.008	0～5.4	0.010
	二次	5.5～7.1	0.008	5.8～7.4	0.007	5.4～8.0	0.008	5.8～7.1	0.008
	三次	7.0～8.6	0.011	7.2～9.2	0.010	－	－	7.3～8.6	0.007

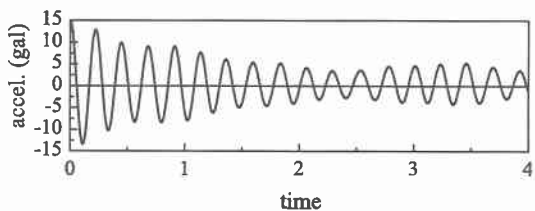


(a) 曲げ一次振動



(b) 曲げ二次振動

図－８ 人力加振実験より得られる減衰自由振動波形



図－９ 常時微動観測波形に RD 法を適用して得られる減衰自由振動波形（曲げ一次振動）

5.2 減衰定数の特定

前節で特定された各固有振動モードに対応する減衰定数の特定を試みた。ここでは、人力加振および常時微動観測データから得られた加速度波形を対象に、各固有振動成分波形を励起させるためにバンドパスフィルタ処理を施し、減衰自由振動波形の生成を行った。得られた減衰自由振動波形に最小二乗法を適用し減衰定数を特定した。

図－８には、加振実験結果から得られた減衰自由振動波形の一例として、曲げ一次および二次振動モードに関する結果を、図－９には、常時微動観測波形から得られた曲げ一次振動に関する減衰自由振動波形を示している。なお、常時微動観測波形から生成された自由振動波形は、RD 法による重ね合わせ回数を 1,000 回とした場合の結果である。

表－２には、適用したバンドパスフィルタ域と各固有振動モードに対応する減衰定数を示している。表より、加振

実験から得られる減衰定数は、加振位置および振動モードにかかわらず 0.006～0.010 程度となっている。これらの値は、既往の研究による他の歩道橋の振動実験から得られる減衰定数⁵⁾と概ね一致している。一方、常時微動観測から得られた減衰定数は、加振実験結果と比較して、一次振動モードで大きく、三次振動モードで小さく示されているものの、両者の差は小さい。これより、本橋の場合には、加振実験における減衰定数と常時微動観測によるそれは、ほぼ一致することが明らかになった。

6. まとめ

本研究では、集成材と鋼材を組み合わせた複合歩道橋であるつなぎ橋を対象に、その固有振動特性を評価することを目的に、人力加振実験および常時微動観測を実施した。本研究で得られた結果を整理すると、以下のようになる。

- 1) 本橋の固有振動特性として、曲げ一次、二次および三次振動に関する固有振動数およびその振動モードを特定することができた。一方、水平およびねじり振動についてはその特定が困難であった。
- 2) 人力加振実験と常時微動観測から得られる固有振動数およびその振動モードは、最低次固有振動数で若干の差異が確認されたものの、他の振動数および振動モードは非常に良く一致することを確認できた。
- 3) また、各振動モードに対応する減衰定数は、両者で概ね一致した。その程度は概ね 0.6～1.0 % 程度である。

参考文献

- 1) 土木学会，鋼構造委員会 木橋技術小委員会のホームページ：http://www.civil.kumamoto-u.ac.jp/jsce-mokkyo
- 2) 岸 徳光，小室雅人，巽 治，松本一希：人力加振による鳥崎川公園歩道橋の固有振動特性評価，土木学会北海道支部論文報告集，Vol. 58，pp.188-191，2002.1.
- 3) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル入門，鹿島出版会，1994.5.
- 4) 奥野寛人，岸 徳光，小室雅人，巽 治，三上俊一：鋼補剛木歩道橋の固有振動数解析，土木学会北海道支部論文報告集，Vol. 59，2003.1.
- 5) 高橋朋代，岸 徳光，三上 浩，竹本伸一：常時微動観測による鳥崎川公園歩道橋の固有振動特性評価，土木学会北海道支部論文報告集，Vol. 58，pp.184-187，2002.1.