

S字形曲線トラス歩道橋（あやとりはし）の振動とその使用性
VIBRATION AND SERVICEABILITY OF S-CURVED THREE CHORD-TRUSS PEDESTRIAN BRIDGE

米田昌弘*・柳沢則文**・町田文孝**・鴨野一夫***

By Masahiro YONEDA, Norifumi YANAGISAWA, Fumitaka MACHIDA and Kazuo KAMONO

After the construction of S-curved three chord-truss pedestrian bridge (Ayatori Bridge), full scale dynamic testings and pedestrian-induced vibration analyses have been made in order to investigate the vibration serviceability of this bridge.

From the results of full scale dynamic testings and numerical analyses, the motion of this bridge caused by human walking will not exceed the recommended limit of unpleasant feeling, but the motion caused by human running will be nearly equal to the unpleasant level.

1. まえがき

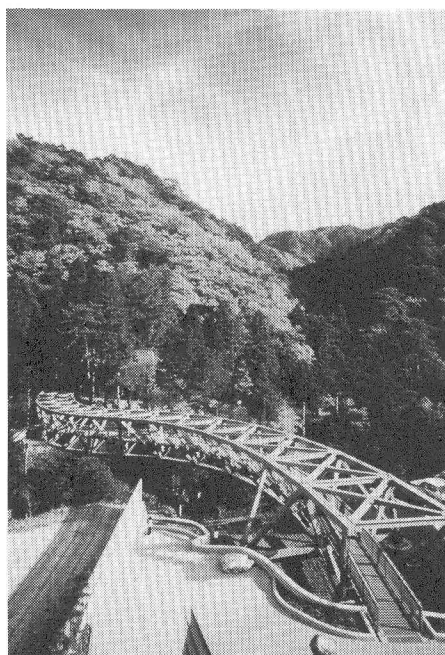
歩道橋とは、本来、河川や道路あるいは鉄道によって分断された地域のコミュニケーションを図ったり、学童や生徒の通学路を短縮するためのものである。しかしながら、時代の流れとともに近年では周辺との調和や景観等なども重要な設計項目となりつつあり、シンボリックな要素を多く含んだ遊歩道橋など道路を横断する以外の目的で架けられる歩道橋も増えている。

石川県江沼郡山中町にも従来のような単なるA地点からB地点への直線的な移動手段としてではなく、人々が橋と出会い、そして橋を媒介として意外な景色の展開を楽しめることを狙ったS字形曲線トラス歩道橋（あやとりはし）が建設された。一般に、側道橋や人道橋あるいは遊歩道橋などを設計する際、利用者に不安感や不快感を与えるような共振現象を避けるため、立体横断施設技術基準¹⁾に従って歩道橋のたわみ固有振動数を歩調域の2Hz前後（1.5Hz～2.3Hz）とならないようにしている。しかしながら、本橋は写真-1、2に示すように歩廊部を主構部から吊り下げ、振動そのものを楽しめることも考えた、過去にとらわれない非常にユニークな思想のもとで設計・架設されている²⁾。そこで、供用開始にあたり、振動実験を実施して歩行者によって誘起される振動の程度を把握することとなった。本文は、S字形曲線トラス歩道橋である“あやとりはし”の振動実験結果とその使用性に対する検討結果について報告するものである。

* 正会員 工博 川田工業(株)技術本部振動研究室長 (〒550 大阪市西区北堀江1-22-19)

** 正会員 川田工業(株)技術本部中央研究室 (〒114 東京都北区西ヶ原3-45-4)

*** 川田工業(株)富山本社技術部設計課 (〒939-15 富山県福野町苗島4610)



写真－１ あやとりはし（その１）



写真－２ あやとりはし（その２）

２．対象橋梁とその固有振動解析

“あやとりはし”は、石川県江沼郡山中町の山中温泉でも随一の景勝地である鶴仙溪に架けられたＳ字形曲線トラス歩道橋である。本橋の橋梁諸元と一般図をそれぞれ表－１，図－１に示す。図－１からもわかるように、本橋は三本の弦材で三角形断面を立体的に構成した三弦トラスであり、また、歩廊部は歩行者が歩くことによる振動を楽しめるように主構部から吊り下げられた揺れやすい構造となっている。さらに、支点部は脚を大きく開いた形状を採用しているが、これにより死荷重のみならず群集荷重が載荷された状態でもほとんど負反力とならない安定した状態を保つ構造系となっている。

本橋の固有振動数特性を把握するため、主構造部であるトラス部材のみを骨組構造物にモデル化し、固有振動解析を実施した。なお、固有振動解析にあたっては、可動支承部が設計条件通りの挙動を示すとした場合に加え、歩行時のような比較的小さい振幅域では可動支承部が設計条件通りの挙動を示さない可能性があることを考慮し、可動支承部を拘束した場合についても実施した。一例として、可動支承部を拘束した場合の代表的な振動モード図を図－２に示す。また、解析結果を表－２にまとめる。

図－２より、１次モードは鉛直振動成分が支配的であるのに対し、２次モードと３次モードは鉛直成分と橋軸直角方向成分およびねじれ成分がそれぞれ連成した複雑な振動性状を呈していることが

表－１ 橋梁諸元

主 構 長	83.577m
支 間 長	66.861m
歩 廊 長	94.709m
橋 格	歩道橋
幅 員	1.5m
床 組	木床版 (ノンスリップゴム付き)
雪 荷 重	2.5m(積雪高)30年再現値
風 荷 重	40m/s(基本風速)

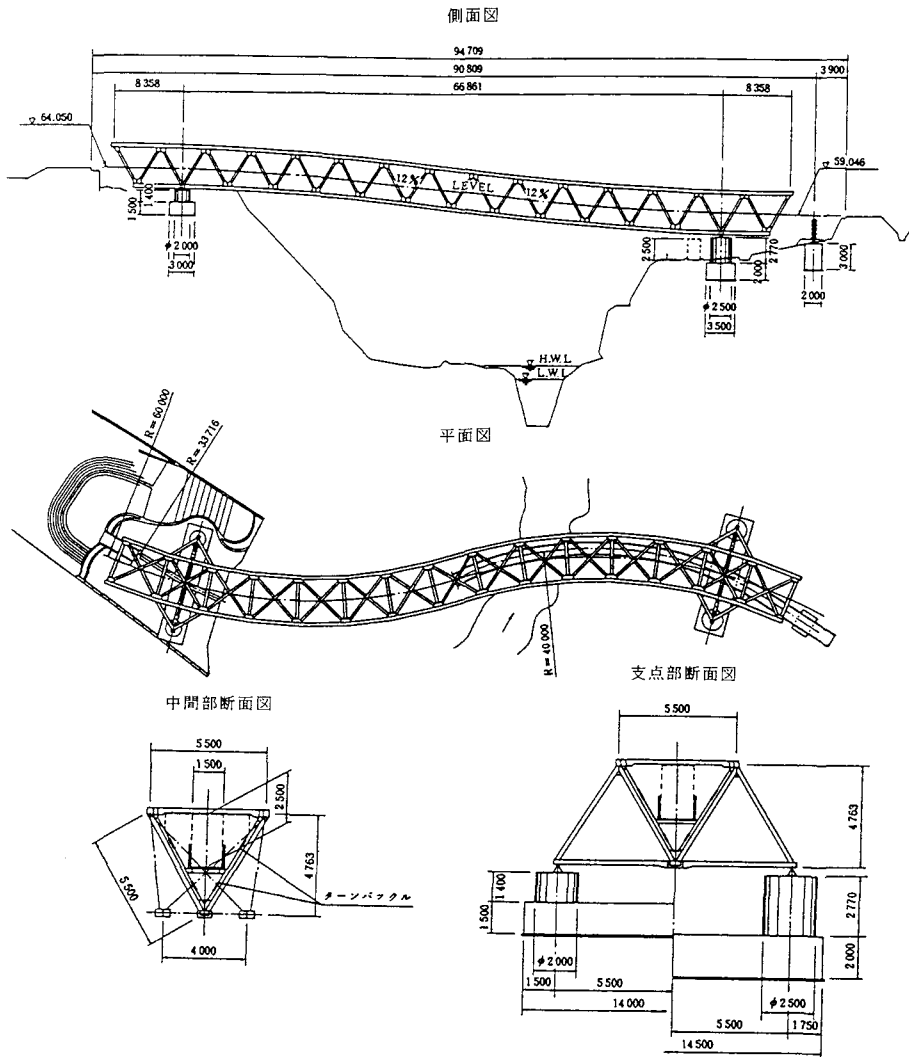


図-1 あやとりはしの一般図

理解できよう。また、表-2より、可動支承部が設計条件通りの挙動を示す場合の1次固有振動数は1.482Hzであり、歩行者が不安感や不快感を感じる固有振動数域（1.5Hz～2.3Hz）を外れていることがわかる。しかしながら、可動支承部を拘束した場合の1次固有振動数は2.128Hzとなっており、歩行者が不快感を感じる固有振動数域（1.5Hz～2.3Hz）に入ることとなる。

ところで、最近の研究³⁾によれば、死荷重が150ton程度を越えるような大規模な歩道橋について振動使用性を検討する際には、可動支承部の水平移動を拘束した場合を想定した方がより現実的であるとの報告がなされている。本橋の死荷重は約200tonであり、上述の研究成果を参考にすれば、振動使用性を対象とした比較的小さな振幅域においては可動支承部の水平移動を拘束した場合を想定する方が適切であると考えられる。したがって、通常の歩行状態では可動支承部が拘束されて1次固有振動数が不快感を感じる固有振動数域に入る可能性が非常に高いものと推定される。また、前述したように、本橋では歩行者が楽しめる程度の振動

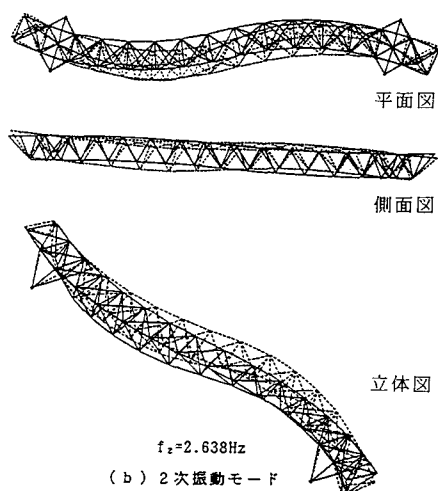
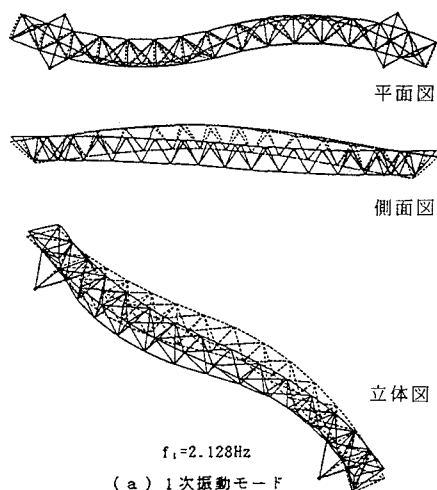


表 - 2 固有振動解析結果

振動次数	解 析 値 (Hz)	
	設計条件	可動支承部の 水平移動拘束
1 次	1.482	2.128
2 次	2.539	2.638
3 次	3.263	3.514

が誘起されることを設計時から期待しているが、歩廊部は主構部から吊り下げられ揺れ易い構造になっていることから、歩行者が楽しめる程度以上の不安感を感じるような振動が誘起されることも危惧された。そこで、供用開始にあたり、振動実験を実施して歩行者によって誘起される振動の程度を把握することとなった。

3. 振動実験

(1) 測定方法と測定位置

橋梁の振動試験法にも種々の方法があるが、本橋では最も簡単に実施できる人力加振法を採用することとした。実験では本橋の固有振動数と構造減衰および歩行時と走行時に誘起される振動振幅に着目し、以下に示す8種類のケースについてそれぞれ振動加速度を測定した。なお、測定にはサーボ型加速度計を使用し、図-3に示すように主構部では支間のL/4点、L/2点、3L/4点に、また、歩廊部ではL/2点、3L/4点にそれぞれ加速度計を配置するものとした。

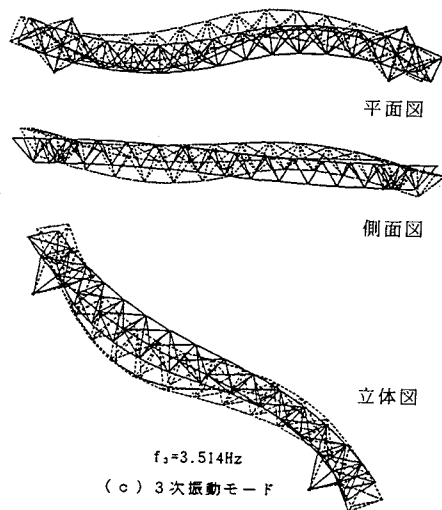


図 - 2 固有振動解析結果
(可動支承部の水平移動を拘束)

- 1) 1人歩行 (約2歩/sec)
- 2) 2人歩行 (1m間隔で約2歩/sec)
- 3) 3人歩行 (1m間隔で約2歩/sec)
- 4) 8人歩行 (1m間隔で約2歩/sec)
- 5) 1人走行 (約3.1m/sec)
- 6) 2人走行 (約3.1m/sec)
- 7) 1人ジャンプ
- 8) 4人屈伸

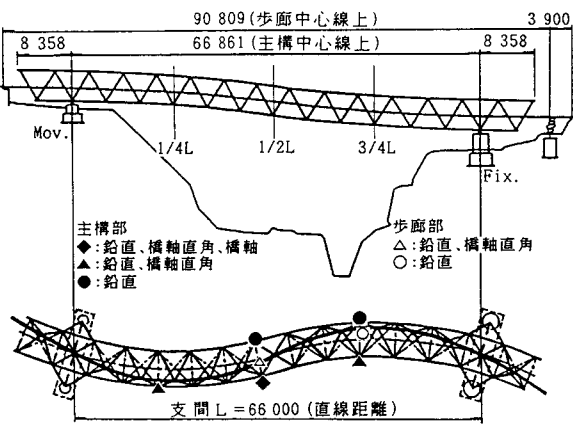


図-3 測定位置

(2) 振動特性の実測結果

人力加振で得られた振動応答を、データ個数が1024、サンプリングタイムが0.0833秒なるもとでFFTによりスペクトル解析した。歩廊部のL/4点で約95kgfの試験者がワンジャンプ加振した場合のパワースペクトルを一例として図-4に示す。一般にはパワースペクトルのピークを与える振動数がそれぞれ固有振動数に対応することになることから、図-4より、1次、2次および3次の固有振動数はそれぞれ2.128Hz、2.376Hz、3.740Hzであると測定された。なお、3Hz付近にもピークが認められるが、これは歩廊部卓越モードに対応するものである。固有振動解析結果によれば、1次固有振動数は可動支承部が設計条件通りの挙動を示す場合が1.482Hz、可動支承部の水平移動を拘束した場合が2.128Hzであり、測定値は後者の結果と一致していた。これは、2章で述べたように人力による加振程度では可動支承が設計条件通りの

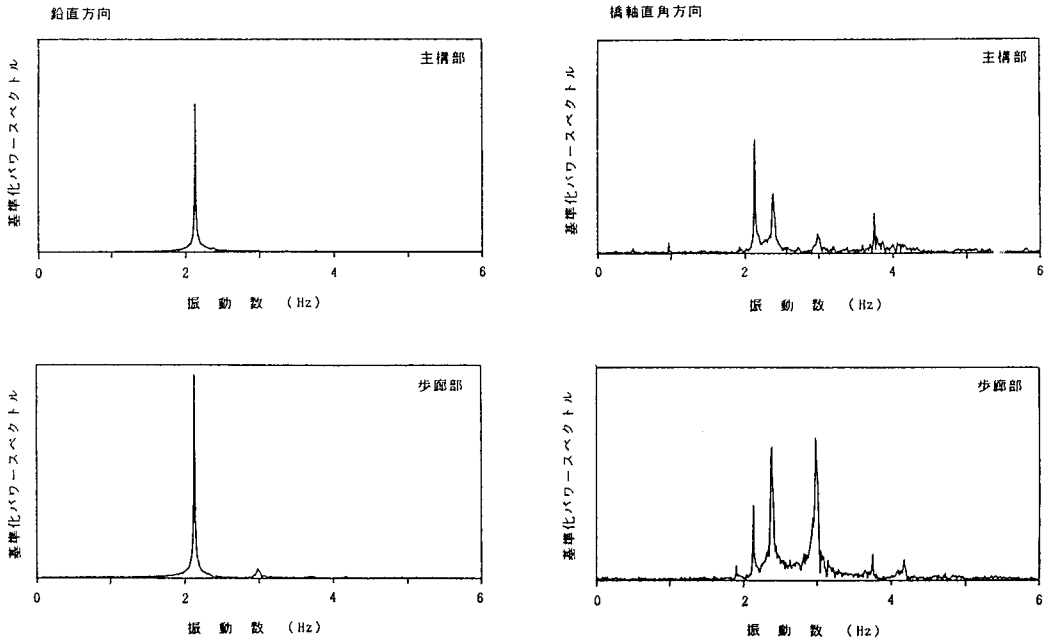


図-4 パワースペクトルの一例 (歩廊部L/4点でのワンジャンプ試験)

挙動を示さなかったことに起因するものである。その結果、当初から予想していたように、1次固有振動数は歩行者が不快感を感じる固有振動数域内（1.5Hz～2.3Hz）に入っており、振動使用性に対する詳細な検討が必要と判断された。

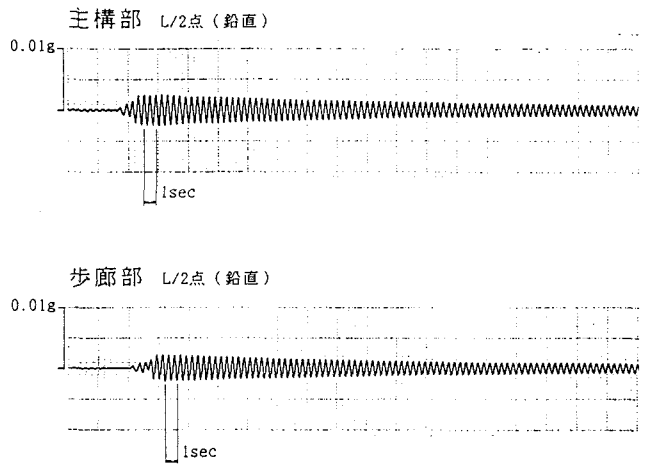
歩廊部のL/2点で試験者1人がワンジャンプ加振した場合に得られた減衰自由振動波形を図－5に示す。算定した1次振動の構造対数減衰率 δ を、他の一般的な歩道橋の値と比較して表－3に示す。表－3からわかるように、斜張橋⁴⁾や吊橋⁵⁾ならびに吊床版橋⁶⁾のような減衰が小さいと考えられる吊形式歩道橋でも少なくとも0.03程度以上の構造対数減衰率を有しているのに対し、本橋の1次振動モードの構造対数減衰率は $\delta=0.007$ 程度と吊形式歩道橋と比較しても非常に小さい。これは、歩廊部がトラス主構部から吊り下げられた揺れ易い構造になっていることに主として起因するものと考えられる。

4．使用性に対する検討

（1）歩廊部での最大速度実効値と使用性
代表例として、8人歩行時と1人、2人走行時にそれぞれ誘起された歩廊部L/2点での鉛直方向と橋軸直角方向の加速度応答波形を図－6に示す。振動に対する使用性を評価する場合には振動速度の実効値を対象とすれば良いことが知られており、小堀・梶川⁷⁾によれば、歩行者が振動を感じ始め

るのは、応答速度の実効値が0.42cm/sを越えたときで、歩行者の最頻歩調による応答速度の実効値が0.85cm/sを越えるとよく振動を感じ、1.7cm/sを越えると多くの人が少し歩きづらいつと感じるときれ、さらには、2.7cm/sを越えるとはほとんどの人が大いに歩きづらく感じるとされている。そこで、加速度値を積分して速度値に変換し、2秒間の速度実効値を計算した。歩廊部L/2点での最大速度実効値を表－4にまとめる。なお、本橋では鉛直方向成分と橋軸直角方向成分がそれぞれ誘起されていたことから、表－4には鉛直方向成分と橋軸直角方向成分を合成した最大速度実効値も記している。

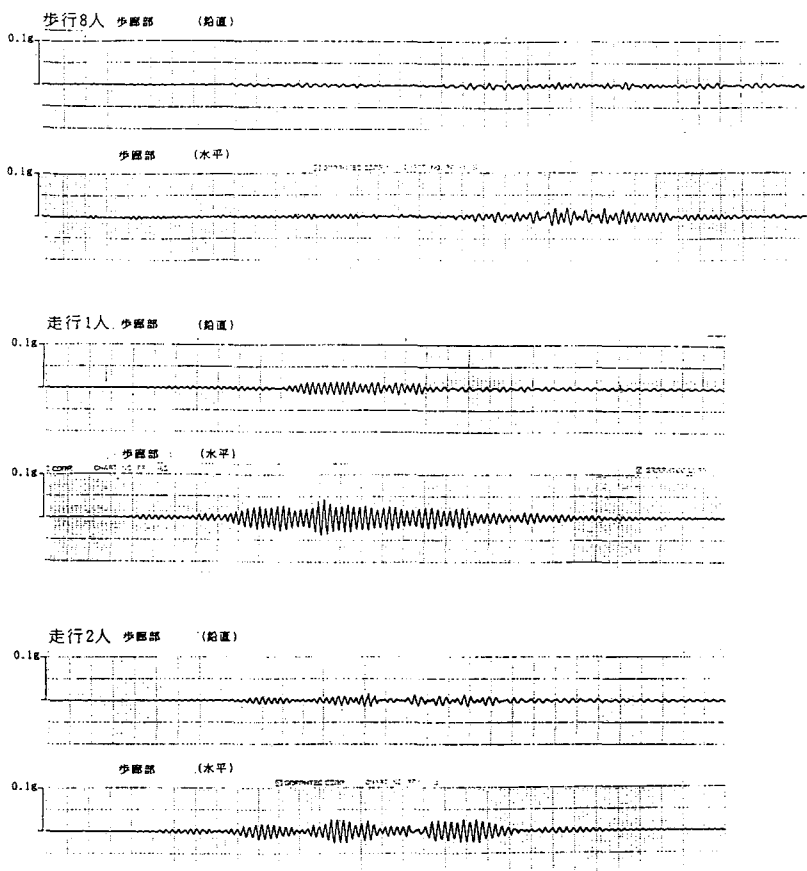
表－4より、歩行時状態においては歩行人数の増加とともに最大速度実効値が増加しているものの、8人歩行時においても合成成分の最大速度実効値は0.8cm/s以下であり、よく感じる程度の振動しか誘起されていないことがわかる。また、走行時においては歩行時に比べ幾分大きな振動が誘起されているものの、1人および2人走行時とも合成成分の最大速度実効値は1.6cm/s以下であり、多くの人が少し歩きづらいつと感じる



図－5 減衰自由振動波形（歩廊部L/2点での1人ジャンプ試験）

表－3 構造減衰の比較

	形 式	振 動 モ ー ド	構 造 対数減衰率
新陽CC歩道橋	斜張橋	たわみ1次	0.107
雪 吊 橋	斜張橋	たわみ1次	0.043
		たわみ2次	0.050
川 崎 橋	斜張橋	たわみ1次	0.032
		たわみ2次	0.045
熱田記念橋	吊 橋	たわみ1次	0.065
		たわみ2次	0.053
鳥山城CC歩道橋	吊床版橋	たわみ1次	0.030
		たわみ2次	0.047
あやとりはし	トラス	たわみ1次	0.007



図－6 歩廊部L/2点での応答波形

程度の振動が誘起される結果となっている。

以上の結果より、本橋は走行時状態においては幾分大きな振動が誘起されるものの、「歩行者が振動を楽しめるような歩道橋にする」という思想のもとで設計・架設されていることを考慮すれば、上述の振動も本橋にとってはほぼ適切な範囲内にあるものと考えられた。

表－4 歩廊部での最大速度実効値

		最大速度実効値 (cm/s)					
		歩行時				走行時	
		1人	2人	3人	8人	1人	2人
歩廊部	鉛 直	0.175	0.259	0.421	0.537	0.810	0.841
	水 平	0.190	0.204	0.338	0.589	1.342	1.255
	合 成	0.258	0.330	0.540	0.797	1.568	1.511

(2) シミュレーション解析結果との比較

本橋ではシミュレーション解析を実施して振動使用性に対する検討も実施している。そこで、ここでは解析手法の概要を述べるとともに実測値との対比結果について報告する。

1) 解析手法

歩行者が通行する場合の歩道橋の振動方程式は次式で表される。

$$[M] \{\ddot{y}\} + [C] \{\dot{y}\} + [K] \{y\} = \{F\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ歩道橋の質量、減衰、剛性を表すマトリックス、 $\{y\}$ は節点変位を表すベクトル、 $\{F\}$ は節点外力ベクトルである。また、添字 $\cdot$ は時間に関する1回微分を表す。モード重畳法を適用すれば、歩道橋の各節点におけるたわみは以下のように展開できる。

$$\{y\} = \sum \{\Phi\}_i \cdot q_i = [\Phi] \cdot \{q\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\{\Phi\}_i$ は第*i*次固有振動モードを表すベクトル、 $[\Phi]$ はモーダルマトリックス、 $\{q\}$ は一般化座標 q_i を成分とするベクトルである。

ところで、 $[I]$ を単位マトリックスとした場合、モーダルマトリックス $[\Phi]$ を、

$$[\Phi]^T \cdot [M] \cdot [\Phi] = [I] \quad \dots\dots\dots (3)$$

となるように正規化しておけば、式(1)は以下のように変形される。

$$\begin{aligned} \{\ddot{q}\} + 2[h][\omega]\{\dot{q}\} + [\omega^2]\{q\} &= [\Phi]^T \cdot \{F\} \\ &= [\Phi]^T \sum \{F_0 \cos \omega_0 t\} \{\psi(t)\} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\text{ここに、}\{\psi(t)\} = \{0; \dots\dots\dots; \psi_k; \psi_{k+1}; 0; \dots\dots\dots; 0\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

は荷重分配係数ベクトル⁸⁾で、 ψ_k と ψ_{k+1} は任意の節点間にある集中荷重をそれらの節点反力に逆比例分配する係数である。時間の経過とともに歩行者が移動することから $\psi(t)$ は時間の関数となる。また、 $[h]$ 、 $[\omega]$ 、 $[\omega^2]$ は、 h_i と ω_i を第*i*次固有振動モードの構造減衰定数および固有円振動数とすると、それぞれ h_i 、 ω_i 、 ω_i^2 を対角要素とするマトリックスとなる。さらに、 ω_0 は歩行者の歩調(歩/秒)を f_0 とした場合に $\omega_0 = 2\pi f_0$ と表されるものであり、 F_0 は外力振幅(歩行者の体重×歩行衝撃力比)である。

したがって、式(4)を逐次積分すれば、歩行者が通行する場合の歩道橋の動的応答を計算することができる。

2) 解析結果と考察

振動使用性の解析的検討にあたり、ここでは簡単のため、本橋を立体の梁モデルに置換することとした。また、固有振動解析では、実橋試験結果を考慮し、可動支承部の水平移動を拘束するものとした。梁モデルに対する固有振動解析結果を図-7に示す。なお、実橋における主構部卓越モードの1次振動数が2.128Hz、2次振動数が2.376Hz、3次振動数が3.740Hzであったことから、固有振動解析にあたっては剛性を若干修正し、解析値が実測値とはば一致するように努めている。

前述したように、本橋では種々のケースについて歩行実験を実施しているが、ここでは体重95kgfの試験者が1人走行した場合に着目する。数値解析にあたっては、3次モードまでに着目し、それぞれの振動モードの構造減衰定数を0.114% (構造対数減衰率では0.007) とし、主構部L/2点における鉛直方向の速度応答を算出するものとした。また、解析では衝撃力比 α が必要となるが、ここでは図-8⁹⁾を参考にして $\alpha=1.05$ なる値を採用した。速度応答波形の解析結果を図-9に示す。解析で得られ

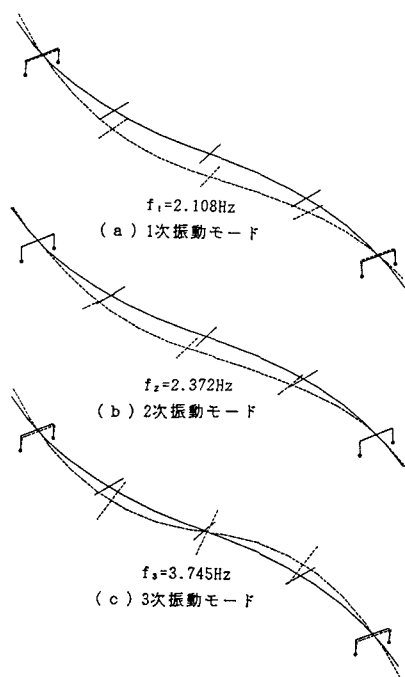


図-7 立体梁モデルに対する固有振動解析結果
(可動支承部の水平移動を拘束)

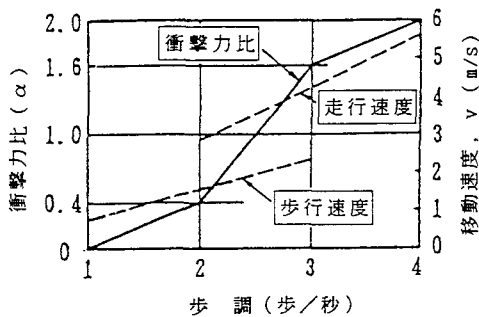


図-8 衝撃力と移動速度⁹⁾

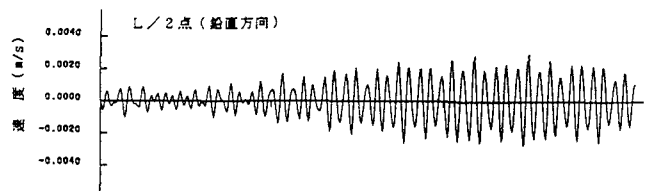


図-9 一人走行時における速度応答
(3L/4点付近まで走行した場合の解析波形)

た最大速度応答値を $1/\sqrt{2}$ として算出した最大速度実効値は 0.207cm/s であり、実測結果である 0.328cm/s よりも若干小さくなる結果が得られたが、これは解析においてトラス主構部をモデル化した1本の梁上を試験者が走行すると仮定したこと、また、試験者による橋軸直角方向の加振力を無視したことが主たる要因と考えられる。しかしながら、立体梁モデルを用いた簡易な計算にも係わらず、解析結果は実測結果と比較的良好に対応しており、振動使用性の検討に対するシミュレーション解析の有用性が示されているものと言える。

5. まとめ

本文は、S字形曲線トラス歩道橋である“あやとりはし”の振動実験結果とその使用性について検討したものである。得られた主要な結果を以下にまとめる。

(1) 振動実験の結果、本橋の1次の固有振動数は 2.128Hz 、2次の固有振動数は 2.376Hz であると測定された。固有振動解析結果によれば、1次固有振動数は可動支承部が設計条件通りの挙動を示す場合が 1.482Hz 、可動支承部の水平移動を拘束した場合が 2.128Hz であり、測定値は後者の結果と一致していた。したがって、本橋では、通常の使用状態において可動支承部の水平移動が拘束されているものと考えられる。

(2) 1次固有振動モードの構造対数減衰率 δ は $\delta=0.007$ 程度であり、斜張橋や吊橋ならびに吊床版橋のような吊形式歩道橋の値と比較して極めて小さい。

(3) 振動実験の結果、歩行時状態においては歩行人数の増加とともに最大速度実効値が増加しているものの、8人歩行時においても鉛直方向と橋軸直角方向の合成成分の最大速度実効値は 0.8cm/s 以下であり、歩廊部にはよく感じる程度の振動しか誘起されていなかった。また、走行時状態においては1人および2人走行時とも合成成分の最大速度実効値は 1.6cm/s 以下であり、多くの人が少し歩きづらいと感じる振動が誘起される結果となっていた。しかしながら、本橋は観光拠点となるように「歩行者が振動を楽しめるような歩道橋にする」という思想のもとで設計・架設されていることから、上述の振動も本橋にとってはほぼ適切な範囲内にあるものと考えられる。

(4) 本橋を立体の梁モデルに置換し、シミュレーション解析を実施して1人走行時における主構部L/2点での速度応答値を計算するとともに、振動実験で得られた実測値との比較を試みた。その結果、トラス主構部をモデル化した1本の梁上を試験者が走行すると仮定したこと、また、試験者による橋軸直角方向の加振力を無視したこと等に起因し、解析値と実験値には若干の差異はあったものの、両者の結果は比較的良好に対応しており、振動使用性の検討に対するシミュレーション解析の有用性を示すことができた。

歩道橋の設計にあたっては、今後ますます振動使用性に対する検討が重要な設計項目になっていくものと考えられる。S字形曲線トラス歩道橋である“あやとりはし”の振動実験結果とその使用性について論じた本文が、歩道橋の振動使用性について検討する実務技術者にとって有用な資料となれば幸いである。最後に、本実験の実施にあたり貴重な御助言をいただきました、金沢大学・梶川康男教授に心より感謝致します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：立体横断施設基準・同解説，1979年1月．
- 2) 水木 彰・鴨野一夫・村山武文・上田高司・上農 勇・杉山清高：あやとりはしの設計・製作・架設，川田技報，Vol.11，pp.81~85，1992年1月．
- 3) 田中信治・加藤雅史・鈴木森晶：支間40mを超える歩道橋の実振動特性，構造工学論文集，Vol.38A，pp.773~780，1992年3月．
- 4) 勝俣 徹・三田周平：新陽カントリー倶楽部歩道橋の載荷試験および使用性試験，橋梁と基礎，Vol.24，pp.39~43，1990年6月．
- 5) 村瀬勝美・早川高明・奥嶋 猛・小沢一誠・加藤雅彦：熱田記念橋の振動試験，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集，pp.756~757，1990年9月．
- 6) 梶川康男・津村直宜・角本 周：PC吊床版歩道橋の振動とその使用性，構造工学論文集，Vol.36A，pp.685~695，1990年3月．
- 7) 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10月．
- 8) 小松定夫・川谷充郎：斜張橋の自動車走行による動的応答と衝撃係数に関する研究，土木学会論文報告集，第275号，pp.13~28，1978年7月．

(1992年9月21日受付)