

支間 40 m を超える歩道橋の実振動特性

MEASURED VIBRATION CHARACTERISTICS OF PEDESTRIAN BRIDGES WITH SPAN LENGTH OVER 40 METERS

田 中 信 治^{*} 加 藤 雅 史^{**} 鈴 木 森 晶^{***}
 By Shinji TANAKA, Masafumi KATO, Moriaki SUZUKI

The natural frequencies of pedestrian bridges depend mainly on the span length of the bridge. It is desirable to remove the values of those frequencies outside the range from 1.5Hz to 2.3Hz.

In this paper, the vibration characteristics of various pedestrian bridges with span length over 40 meters were measured in the field and were calculated assuming several analytical condition, the following conclusions are obtained:

- (1) Under the usual usage condition of large scale pedestrian bridges the movable supports do not move in the longitudinal direction.
- (2) The vibration serviceability is affected not only by the bridge natural frequency but also by values of its mass and stiffness relative to man exciting force which have great effects upon the vibrational amplitude.

Keywords : pedestrian bridge, vibration characteristics, amplitude

1. まえがき

昭和34年6月、愛知県西春日井郡に道路を跨ぐ日本で一番最初の横断歩道橋が完成した。その後、約20年余りの間に約9000箇所の横断歩道橋が日本全国いたるところに建造され、現在約1万橋に至っている。横断歩道橋の建設箇所数を時代の流れに沿って示したものを図-1に示す。その間、横断歩道橋の設計において、まず昭和42年に立体横断施設設置要領¹⁾が制定され、その後昭和54年に立体横断施設技術基準²⁾(以下基準と略す)が制定され現在でも効力を発している。しかし高度経済成長が終わり安定成長期に入った今日では、全国各所で見られた画一的な横断歩道橋の新設は図-1からも判るように急激に減少してきている。その反面、幅員の狭い道路橋に並行して架けられるかなり長支間の歩道橋(側道橋と呼ぶ)、河川や鉄道・高速道路によって分断されている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の短縮するための歩道橋(人道橋と呼ぶ)、公園、団地、広場、ゴルフ場等や自転車専用道路の一環として設けられる、シンボルの要素を含んだ歩道橋(遊歩道橋と呼ぶ)など道路を横断する以外の目的で架けられる歩道橋の新設が増えてきている。

歩道橋は人が歩く構造物であることから、人が歩くことによって不快感を感じてはならない。そのために

* 正会員 中部復建(株) 設計第1部 (〒466 名古屋市昭和区福江1-1805)
 ** 正会員 工博 九州東海大学助教授 工学部土木工学科 (〒862 熊本市大江町渡鹿223)
 *** 学生会員 名古屋大学大学院 土木工学専攻 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

20年位前から多くの研究者によっていろいろな研究が行われ、歩道橋の基本的な鉛直たわみ振動を人間の一般的な歩調（2 Hz前後）^{3) 4) 5)} から避けることが望まれるようになった。その結果基準において、設計段階における歩道橋の1次または2次の固有振動数が1.5～2.3 Hzを避けるよう定められた。しかしながら、一般に橋梁の固有振動数はその剛性EIの平方根に比例し質量Mの平方根に反比例する。そのため基本的にはスパンが40mを越えるような歩道橋は、この基準に示されている値を避けることは難しいことになる。

筆者らはこれまでも、いろいろな歩道橋の振動測定と解析を行い、文献6)においては固有振動数の解析値と実測値の検討を行い、文献7)においては、ある1つの橋梁の例ではあるが、支承条件によって固有振動数が大きく変化することを述べてきた。

そこで本論文では、支間40m以上の歩道橋を対象とし、これらの歩道橋の固有振動数、支承の実挙動、実振幅を測定し、実振動特性についていろいろな検討を行ったのでここに報告する。

2. 振動測定

2. 1 対象橋梁

本研究では、歩行者の歩調と共振して歩行者に不快感を与えるような固有振動数を避けることが難しいとされている40mを越える支間長を有し、一般的な構造形式の桁橋を10橋選んで対象とした。内訳は一般的な単純鋼I桁のいわゆる横断歩道橋4橋、鋼床版箱桁の歩道橋3橋、RC床版を有する歩道橋3橋である。これら10橋の内、基準設定以前に架けられた歩道橋はA～D歩道橋の4橋であり、それ以外の6橋はすべて基準設定以降に架けられた比較的新しい橋梁である。対象とした橋梁の種類、形式等の諸元を表-1に示す。この表で断面2次モーメントと剛性は、上部工の代表断面の値を示している。

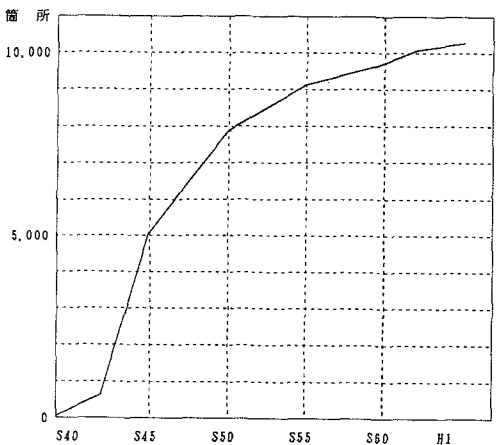


図-1 横断歩道橋の設置箇所数

表-1 対象橋梁の諸元

種 類	形 式	スパン (m)	幅員 (m)	断面2次 モーメント : I (cm ⁴)	剛 性 EI : (kgf・cm ²)	死荷重 (tf)	振 動 測 定		
							固有振 動 数	支承 挙 動	振動 振幅
A	一般歩道橋	単純鋼床版I桁	40.86	1407120	2.9550×10^{12}	30.40	○		○
B	一般歩道橋	単純鋼床版I桁	41.50	1615000	3.3915×10^{12}	31.52	○		○
C	一般歩道橋	単純鋼床版I桁	43.50	1534000	3.2214×10^{12}	32.14	○		○
D	一般歩道橋	単純鋼床版I桁	42.20	1700000	3.5700×10^{12}	31.55	○		
E	一般歩道橋	単純鋼床版箱桁	42.00	6000000	12.6000×10^{12}	68.46	○		○
F	人 道 橋	単純鋼床版箱桁	54.30	9840000	20.6640×10^{12}	172.06	○	○	○
G	一般歩道橋	単純鋼床版箱桁	46.95	1640000	3.4440×10^{12}	42.26	○		
H	進 歩 道 橋	単純合成鋼版箱桁	48.55	6600000	12.2760×10^{12}	161.82	○	○	○
I	側 道 橋	3 径間連続板桁	46.00	5400000	9.8464×10^{12}	110.61	○		
J	側 道 橋	4 径間連続板桁	40.75	7220000	13.4290×10^{12}	70.56	○		

2. 2 測定方法

対象とした橋梁の内、通常の振動測定（固有振動数および振動モード）は全ての橋梁で行い、支承の挙動については、基準設定以後に架けられた比較的大規模な橋梁の内、測定が物理的に可能なF人道橋とH遊歩道橋について測定を行った。また使用性に着目し、A・B・C・E歩道橋、F人道橋およびH遊歩道橋の6橋について振動振幅を測定した。各測定項目を表-1にまとめて示す。

橋梁の振動測定にはいろいろな加振方法があるが⁸⁾、固有振動数・振動モードの測定では、歩道橋の規模などに合わせて、常時微動法、人力加振法、砂袋落下法の3種類のうち適切な加振方法を組み合わせて行った。測定は動電型速度計、サーボ型加速度計およびひずみゲージ型加速度計を用いて、スパンの1/4点・1/2点・3/4点に設置して測定した。また振動時の支承の挙動については図-2に示すように支承部に高感度変位計を設置して支承の水平橋軸方向移動、回転変位を測定した。一方振動振幅に関しては次に示す7種の歩行あるいは走行状態の振動を測定した。

- 1) 1人共振歩調歩行
- 2) 2人共振歩調歩行
- 3) 1人2Hz歩行
- 4) 2人2Hz歩行
- 5) 1人走行
- 6) 2人走行
- 7) 5人ランダム歩行

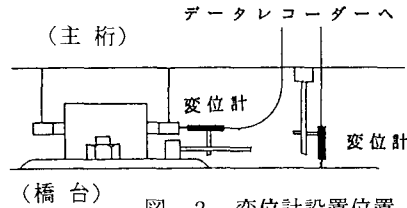


図-2 変位計設置位置

なお、共振歩調歩行とはそれぞれの1次固有振動数に相当する歩調での歩行を意味している。共振歩調歩行及び2Hz歩行では、事前にメトロノームをその振動数で動かして、その音を録音しておき、歩行者がテープレコーダを持って再生したその音に合わせて歩行した。

2. 3 振動特性の実測結果

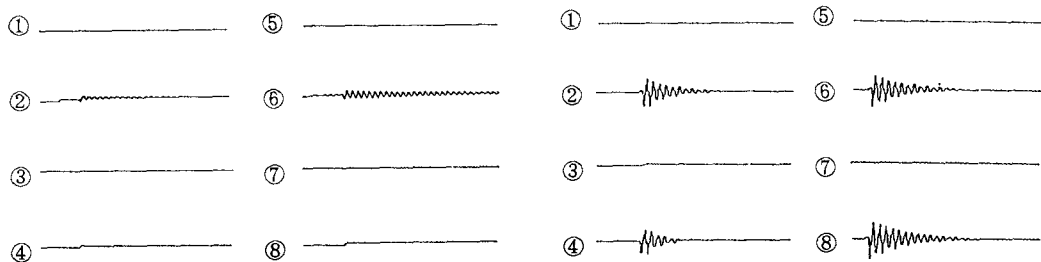
各加振法により得られた測定データをデータレコーダーに記録し大型計算機によってデータ解析した。固有振動数については、解析して得られたパワースペクトルのピークを示す振動数が各チャンネル、各ケース間の測定データに多少のばらつきがあるのでそれらの値を平均して求めた。実測結果として表-2に示すように1次、2次の固有振動数が得られた。振動モードはスペクトルの大きさと各測定点間の位相差から求めて模式的に図化したものである。

支承の挙動の測定結果の一例を図-3に示す。図は砂袋落下法による加振時の各支承部の水平橋軸方向移動および回転変位の測定波形である。

一方、振動振幅については測定結果の1例として、3橋の代表的な速度波形を図-4に示す。この図における測定位置はスパン中央であり、測定方向は鉛直方向である。振動振幅の評価法には種々の方法が考えられるが、ここでは速度実効値を用いることにした。速度実効値は文献9)と同様に速度波形の2秒間の実効値とした。測定

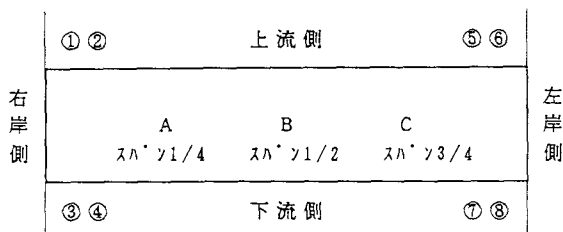
表-2 測定結果

橋 名	1 次		2 次	
	振動数	モード	振動数	モード
A 歩道橋	2.27 Hz		8.22 Hz	
B 歩道橋	2.17 Hz		7.87 Hz	
C 歩道橋	1.99 Hz		7.29 Hz	
D 歩道橋	2.07 Hz		7.75 Hz	
E 歩道橋	2.81 Hz		---	
F 人道橋	1.65 Hz		5.08 Hz	
G 歩道橋	6.95 Hz		8.11 Hz	
H 遊歩道橋	1.48 Hz		5.08 Hz	
I 側道橋	1.87 Hz		3.85 Hz	
J 側道橋	2.43 Hz		2.95 Hz	



F 人道橋

H 遊歩道橋



- ① 右岸上流側橋軸方向
- ② 右岸上流側回転方向
- ③ 右岸下流側橋軸方向
- ④ 右岸下流側回転方向
- ⑤ 左岸上流側橋軸方向
- ⑥ 左岸上流側回転方向
- ⑦ 左岸下流側橋軸方向
- ⑧ 左岸下流側回転方向

図-3 各支承の変位計波形

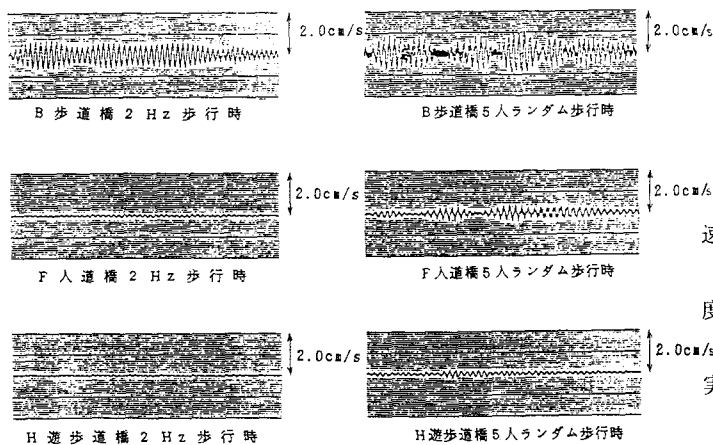


図-4 振動振幅の速度波形

表-3 速度実効値の最大値 単位 (cm/s)

橋梁名	共振歩調歩行		2 Hz 歩行		走行		ランダム歩行
	1人	2人	1人	2人	1人	2人	
A	3.752	4.716	0.909	1.365	1.202	3.456	1.142
B	0.884	2.546	0.884	2.546	0.735	1.185	0.955
C	2.784	3.262	2.784	3.262	0.734	1.086	2.961
E	3.094	5.436	0.138	0.237	4.025	4.304	0.288
F	0.835	1.209	0.100	0.192	0.103	0.170	0.243
H	0.188	0.456	0.056	0.103	0.140	0.341	0.175

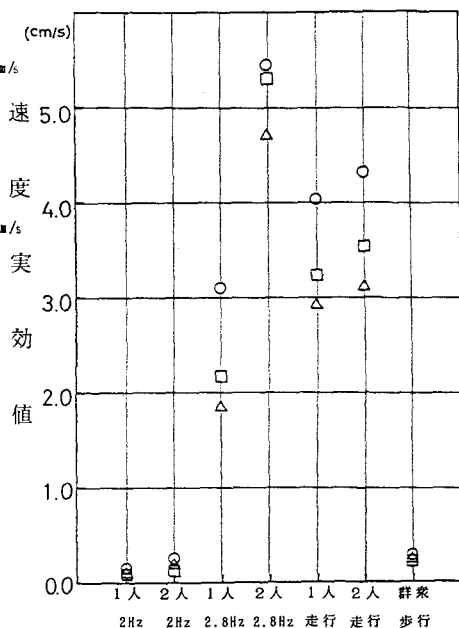


図-5 E 歩道橋の速度実効値

した速度波形と加速度波形それぞれから速度実効値の最大値を求めたが、両者の結果多少の差がみられた。そこで速度波形から求めた速度実効値の方が加速度波形から求めた値よりも多少大きかったこと、また加速度波形からの算定では読み取った値を正弦波と見なして一度積分する操作をしていることから、ここでは速度波形から求めた値を測定結果として採用した。ただし、共振状態で速度計の限界振幅を越えたケースについては加速度波形より算定した。対象とした橋梁の内E歩道橋の各測定点での、各測定ケースの速度実効値を図-5に示す。図中の△、○、□はそれぞれ、各測定点（1/4点、1/2点、3/4点）での速度実効値の最大値を示しており、これからも判るように、支間中央での値が最大となっている。このことは振動振幅を測定した全橋梁のすべてのケースについても同様の結果が得られた。各橋梁の最大速度実効値を表-3にまとめて示す。

3. 固有振動数に対する検討

3. 1 固有値解析のモデル化

測定した歩道橋について以下に示す4ケースについて2次元固有値解析を行った。境界条件としては、主桁側面が水平な場合の低次の曲げ固有振動数は、支点が橋軸方向に可動か固定かには影響されず回転条件に大きく影響される⁶⁾。そこで、この解析では構造解析で一般に使用される一端は固定支承（回転のみ自由）、他端は可動支承（水平橋軸方向と回転が自由）とした。G歩道橋については通常の橋梁形式とは異なり、完全な固定アーチとなっているため、実際の境界条件と一致するよう両端とも完全固定として解析した。なお、RC床版をもつ歩道橋の剛性は文献⁶⁾に示した方法によって評価した。

解析1 主要部材だけが剛性と質量に関与しているものとして解析した場合。

解析2 主要部材の他に地覆や高欄等も剛性および質量に関与しているものとして解析した場合。

解析3 解析1の場合に加えて地覆や高欄等の重量が質量に関与しているものとして解析した場合。

解析4 解析2の場合に加えてその他の化粧板等の重量が質量に関与しているとして解析した場合。

3. 2 固有値解析結果

以上のようにモデル化を行い、10橋の固有振動数について解析した結果を表-4に示す。また表には設計時の値（または簡略式による値）も示してある。なお解析には解析1から解析4の中で適切と思われるものを複数選んで行った。この結果より、解析1よりも解析2、解析3、解析4の方がより厳密といえる。しかし解析1でも実測値のおよそ10%以内の差で一致した。

表-4 固有振動数の解析結果（単位Hz）

橋 名	設計値	解析1	解析2	解析3	解析4	実測値
A 歩道橋	1.85	2.27	2.31	---	2.24	2.27
B 歩道橋	1.91	1.99	2.09	---	2.03	2.17
C 歩道橋	1.72	1.90	1.99	---	1.94	1.99
D 歩道橋	1.96	2.24	---	2.02	---	2.07
E 歩道橋	2.36	2.83	---	2.78	---	2.81
F 人道橋	1.29	1.69	1.70	---	1.64	1.65
G 歩道橋	6.23	6.24	7.38	---	7.11	6.95
H 遊歩道橋	1.26	1.66	---	1.63	---	1.48
I 側道橋	1.89	2.00	---	1.99	---	1.87
J 側道橋	1.10	2.37	2.46	---	2.43	2.43

3. 3 固有振動数と支間の関係

今から約20年位前から歩道橋の振動使用性が問題となり、多くの研究者や技術者によって測定や評価が行われてきた。時代の流れと共に、歩道橋の構造形式も通常の単純I桁から連続桁、PC桁、アーチ橋、斜張橋、最近では吊床版橋とさまざまであるが、今回測定を行った歩道橋も含めて、これまでに実測結果が報

告されている一般的な桁橋27橋の歩道橋の支間長と固有振動数の実測値との関係を示すと図-6のようになる。図中では基準設定以前に架けられた歩道橋と設定以後に架けられた歩道橋を区別しているが、基準設定以前の方が固有振動数が低く、剛性が小さいことがうかがえる。なお、基準設定以後に建設された歩道橋の固有振動数が支間50m近くで設定以前の歩道橋の場合とほぼ同じになっているが、これは固有振動数が2Hz前後となることを避けるために固有振動数を低くするように設計されているためと考えられる。これより、最小二乗法で基本固有振動数F(Hz)と支間長L(m)の関係を求めると以下のようなものである。

$$F = 4.96 - 0.067 \cdot L$$

(基準設定以前に建造)

$$F = 7.06 - 0.11 \cdot L$$

(基準設定以後に建造)

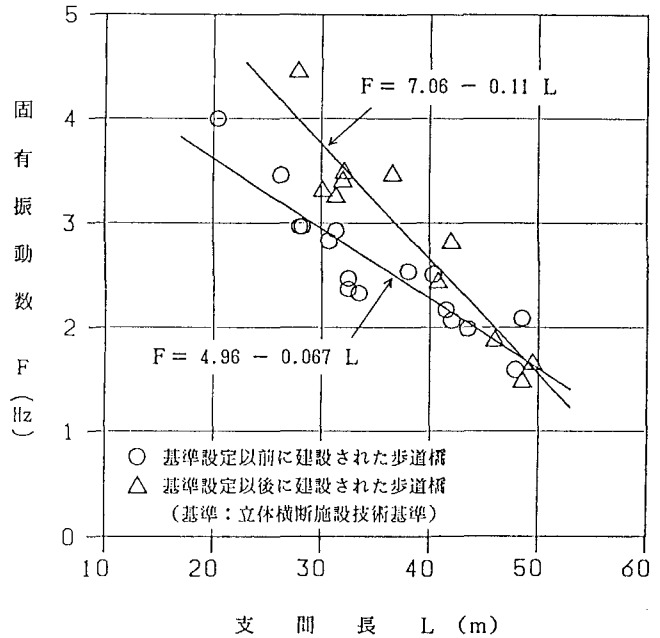


図-6 支間長と固有振動数

4 支承の挙動の検討

筆者らは文献7)によって、アーチ形状を有した大規模な歩道橋における支承の実挙動を測定し、通常の使用状態における使用性を検討する場合は、両端とも固定支承(ヒンジ)で解析することを提案した。今回支承挙動を測定した2橋もアーチ形状こそ有していないが、通常の歩道橋に比してかなり死荷重も大きく、そのため支承も通常の道路橋と同形式の標準支承板支承を採用している。図-3の波形から判るように、回転方向には振動しているのに対して橋軸方向にはほとんど動いていない。つまり可動支承が橋軸方向に動いていないことを示している。見方を変えればこの現象は当然のことかもしれない。通常、設計で用いる可動支承は次に示す橋軸方向の変化(一般的には常時に起こらない変化)を吸収する役割を持っている。1)主桁の温度変化。2)活荷重満載等による主桁のたわみ。3)地震等による上部工の水平移動。このような発想で設計、製作された構造物に対して、人間がある程度乗ったり、走ったり、跳んだりして動くとは考えにくい。まして今回対象とした歩道橋は、死荷重だけでも160tfを越えており、1支承に加わる鉛直力は40tfを越えている。また現場の伸縮継手を考えれば、その遊間がきれいに空いているとは考えにくい。以上のことを考慮すると、ある程度大規模な歩道橋は通常の使用状態では、可動支承は橋軸方向には動かないと判断できる。

今回のF人道橋、H遊歩道橋は全死荷重が172tfと162tf程度であり、共に4個の標準支承板支承で支えられている。この死荷重と設計活荷重を考慮すると、支承としては75tfの標準支承板支承を採用していることになる。また文献7)で対象とした橋梁もこれと同規模であり、これら3橋の支承の実挙動から推測すると、概ね死荷重が150tfを越えるような大規模な歩道橋の使用性の検討を行うときは、支点は両端固定(ヒンジ)として考えた方が、より現実的である。

5. 振幅の検討

振幅を測定した6橋の速度実効値の最大値を文献10)に基づいて、振動の感じかたを次の4つのカテゴリに分類したものを表-5に示す。

速度実効値 = 0.42 cm/s
.....振動を感じ始める50%値
速度実効値 = 0.85 cm/s
.....大いに振動を感じる50%値
速度実効値 = 1.70 cm/s
.....少し不快を感じる50%値
速度実効値 = 2.70 cm/s
.....大いに不快を感じる50%値

表-5 速度実効値からの検討

橋梁名	構造形式	共振歩調歩行		2Hz歩行		走行		ランダム歩行
		1人	2人	1人	2人	1人	2人	5人
A	単純鋼床版1桁	×	×	△	△	△	×	△
B	単純鋼床版1桁	×	×	△	×	○	△	△
C	単純鋼床版1桁	×	×	×	×	○	△	×
E	単純鋼床版箱桁	×	×	○	○	×	×	○
F	単純鋼床版箱桁	○	△	○	○	○	○	○
H	単純合成鋼箱桁	○	○	○	○	○	○	○

○ : 速度実効値が0.42 cm/s以下 振動を感じない
○ : 速度実効値が0.42 cm/s以上 振動を感じ始める
△ : 速度実効値が0.85 cm/s以上 大いに振動を感じる
× : 速度実効値が1.70 cm/s以上 少し不快を感じる
×× : 速度実効値が2.70 cm/s以上 大いに不快を感じる

この表からも判るように、基準設定以前に架けられ
たA・B・C歩道橋は共振歩行時はもとより、2Hz歩行、ランダム歩行においても大いに振動を感じるかそれ以上の不快領域に入っている。事実、実測においても観測者のだれもが不快感を感じていたし、共振歩行時には歩道橋の側面から見ていると、振幅が目に見えて大きなものであった。一方基準設置以後に架けられた3橋については、2Hz歩行およびランダム歩行において、使用性に全く問題がない。これらのことは基準が示している使用性の照査を忠実に守った結果と言えよう。一方この3橋の共振歩行時に着目すると、E歩道橋では不快領域に入っているが、他の2橋はそれほどでもない。この原因として以下の2点が考えられる。

- 1) E歩道橋は基準設置以前の歩道橋に比べると、不快固有振動数を避けるために断面形状を箱桁にし剛性をかなり大きなものになっている傾向がある。そのため固有振動数は2.81Hzとなり人の走行歩調とほぼ一致している。逆にF、Hの歩道橋の固有振動数は1.5 Hzより下げる傾向があった。そこで共振時の測定では前者は走行に近い状態となり、後者はゆっくり歩行の状態であった。このため、共振歩行時の状態が異なること、および加振力の大きさにも差が生じたと考えられる。
- 2) E歩道橋の死荷重は68tf、F、Hのそれは150tf を越えており、この死荷重の差が共振時の振幅の差に大きく影響していると考えられる。

しかしながら、歩道橋を人が走って渡る可能性は十分考えられ、E歩道橋のように、固有振動数が2 Hz前後から離れていても、人の走行時の歩調に近い場合には、かなり共振することが今回の測定でも明らかとなった。このように歩道橋の固有振動数が3 Hz近い場合には注意することも必要と考えられる。

これらのことを総合的に判断すると、歩道橋の構造的、耐震性という点を十分に満足しているならば、ある程度大規模な歩道橋の固有振動数は、主要部材だけでなく高欄や地覆等の剛性を考慮して解析を行えば、不快固有振動数の下限値を下回った方が、使用性において問題が少ないと言えよう。この場合のある程度大規模な歩道橋とは今回対象としたF人道橋やH遊歩道橋の規模と言えよう。

6. 結 語

以上のように今回対象とした10橋の歩道橋について振動特性、支承の実挙動、振幅等の測定を行い以下の結論が得られた。

- 1) 基準設定以前と以後の歩道橋には明らかに剛性の違いがあり、以前の歩道橋は固有振動数が低く剛性が小さい。以後の歩道橋も支間が50m近くになると基準を守るために固有振動数を低くする傾向がある。

2) 大規模な歩道橋(概ね死荷重が150 tfを超え、道路橋と同形式の支承を採用している歩道橋)の、通常の使用状態では可動支承は橋軸方向には動かない。またこの規模の歩道橋は、共振歩行時においても使用性に対して問題が少ない。

3) 基準設置以前に架けられた支間40mを超えるような横断歩道橋は、速度実効値から使用性に対する検討を行った結果、通常の歩行、走行状態で大いに振動を感じるかそれ以上の不快領域に入る。

4) 速度実効値の値は、その橋梁の剛性、質量の大きさによりかなり異なる。このことは、剛性、質量の大きさによって歩道橋の振動使用性の評価がある程度可能であることを示唆していると考えられる。

筆者らはこれまでもいろいろな橋梁の振動測定を行ってきたが、今回対象としたFやHの歩道橋は、本当に歩道橋なのかと思われるぐらい頑丈な橋梁であった。時代が進むにつれて、このような規模の大きい歩道橋の建設は増加する傾向があり、規模が大きくなっても車が通らないから歩道橋であり、その設計においては基準に拘束されることになる。しかしある程度規模の大きい歩道橋については、通常の使用状態では揺れにくいと判断される。今後はどの程度の規模なら揺れにくいかを、数値解析も含めて検討を行っていくつもりである。

最後に吉田康史氏(現・JR東海)をはじめ、振動実測時に名古屋大学の学生として協力していただいた諸兄に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：立体横断施設設置要領・横断歩道橋設計指針解説、1967年
- 2) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説、丸善、1979年
- 3) 牛尾正之、南条正洋：歩道橋の振動に関する諸問題、日立造船技報、33巻3号、pp. 28-33、1972年8月。
- 4) 松本嘉司、佐藤秀一、西岡 隆、塩尻弘雄：歩行者の特性を考慮した歩道橋の動的解析に関する研究、土木学会論文報告集、No. 205、pp. 63-70、1972年8月。
- 5) 小堀為雄、梶川康男、城戸隆良：振動感覚を考慮した歩道橋の設計、橋梁と基礎、8巻12号、pp. 23-29、1974年12月。
- 6) 田中信治、加藤雅史：歩道橋の固有振動数の測定と解析による検討、構造工学論文集、Vol. 36A、pp. 671-678、1990年3月。
- 7) 田中信治、加藤雅史、鈴木森晶：河川歩道橋の設計と実測に基づく振動特性の検討、構造工学論文集、Vol. 37A、pp. 929-936、1991年3月。
- 8) 加藤雅史、島田静雄：橋梁実測振動特性の統計解析、土木学会論文報告集、No. 311、pp. 49-58、1981年7月
- 9) 梶川康男、津村直宜、角本周：P C 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。
- 10) 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、No. 230、pp. 23-31、1974年10月。

(1991年9月30日受付)