

(35) 4径間連続上路式PC吊床版橋の振動試験について

住友建設(株)技術研究所 ○正会員 松元香保里  
 静岡県土木部道路維持課 高木 輝章  
 住友建設(株)技術研究所 中井 裕司  
 住友建設(株)土木設計部 正会員 近藤 真一

1. はじめに

吊床版橋は、ドイツのU.Finsterwalderによって1958年に提案され、日本では1969年の大阪万博会場の9号歩道橋で試験的に架設されたのが最初である。その後、我が国の吊床版橋は、形態に軽快さが要求されるゴルフ場の歩道橋や、溪谷に架かる簡易吊橋に替わるPC橋として実績が増えている。最近では2~3径間連続形式の他、3方向分岐形式のものも建設され、構造形式も多様化の傾向を見せている。また、経済性が高く、景観的にも優れていることからさらに長大化、あるいは歩道橋だけではなく道路橋への適用等、今後ますますその発展が期待される橋梁形式である。

静岡県大東町に建設された潮騒橋は、4径間連続上路式PC吊床版橋という上路式と連続形式を組合せた、新しいタイプの吊床版橋であり、完成系での剛性が高く道路橋にも適用可能と考えられるものである。本稿では、潮騒橋で実施した載荷試験の内、起振機による強制振動試験と振動使用性試験について報告する。

2. 試験の目的

潮騒橋は世界で初めて計画された構造形式であるため、静的および動的な構造解析にあたっては、設計段階で詳細な検討がなされているものの、解析による断面力(応力度)、変形、固有振動モード等で代表される構造特性値が、実橋に対してどの程度の精度を持っているかは確認されていない。また、振動特性に大きな影響を及ぼす構造減衰も明らかではない。一方、この形式を本格的な道路橋に適用しようとした場合には、衝撃係数等も明らかにされなければ設計することは困難である。そこで、本橋の基本的な特性の検証を目的として、静的および動的載荷試験を実施した。

3. 潮騒橋の概要

潮騒橋は、一級河川菊川の河口部に架橋された橋長232.0m(支間55.0m+61.0m+61.0m+55.0m)を有する自転車・歩行者専用橋である。上部構造は、吊床版、鉛直材、上床版から構成されており、吊床版のサグ・スパン比は、橋台にかかる水平力をできるだけ小さくしつつ経済性を向上するため、1/10を基本に設定されている。本橋の構造的な特徴としては、構造形式が新しいということの他に、部材の多くがプレキャスト

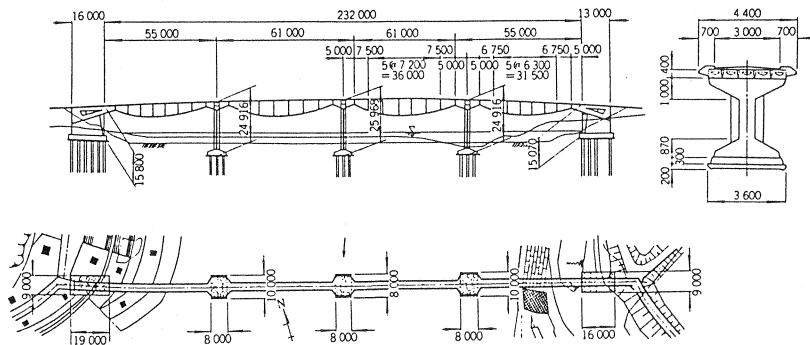
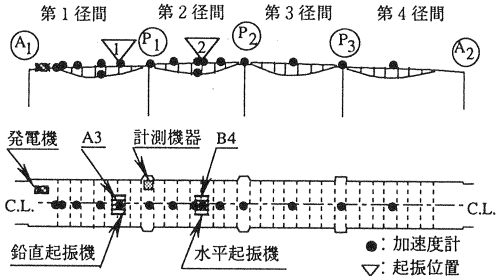
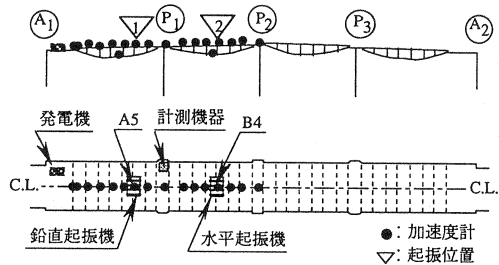


図-1 一般図

ト化されており多数の接合部を有すること、一部にヒンジ構造接合部を有すること、および、上床版端部と橋台の接合部に鉛直および水平ゴム支承を有すること等が挙げられる。また、本橋は上部構造は対称であるものの下部構造が対称ではない。これらの構造的な複雑さのために、解析上の動的特性は高感度となっている。なお、基礎形式は橋脚、橋台ともに杭基礎である。本橋の一般図を図-1に示す。



(a) 橋軸直角方向加振



(b) 鉛直および橋軸水平方向加振

4. 強制振動試験

4-1 試験方法

本試験は、共振曲線、固有振動モード等の基本的な振動特性の把握を目的としたものである。水平起振機として不平衡重錐反転式3tf起振機を、鉛直起振機として偏心重量式15tf実橋起振機を橋面上に設置し、1.0Hz~6.0Hzまで、共振点近傍は0.01Hz刻みで、その他は刻みを粗くして橋軸直角、鉛直、橋軸水平の3方向に不連続掃引正弦加振を行い、各振動数、各測点における応答加速度を、応答特性1.0Hz以上のサーボ型加速度計で計測した。起振機および加速度計の設置位置を図-2に示す。計測はサンプリング間隔100Hzで、30Hzのローパスフィルターをかけることにより行った。本試験の計測システムを図-3に示す。得られた応答加速度値は、起振力1tfに対する応答値に換算して共振曲線を求めた。

4-2 試験結果および考察

試験結果を表-1に示す。表-1には、併せて行った減衰自由振動試験より得られた対数減衰率を示す。試験結果より、橋軸直角方向および鉛直方向とも各モードの振動数が接近し、試験を実施した1.0~6.0Hzの間でも多くの振動モードが存在している。これは、

- ①橋軸直角方向の水平4次モードで、P2を中心とした対称、逆対称の2つのモードがあること。
- ②たわみ振動において、第1径間と第2径間が連成する振動モードで、P1中心とした対称、逆対称の2つのモードがあること
- ③計測機器の配置の関係で試験では確認できなかったが、解析上P2を中心とした対称、逆対称のモードが存在すること等

複雑な振動特性を有することに起因していると思われる。加振方向ごとの個々の振動特性を以下にまとめる。

1) 橋軸直角方向

共振曲線および固有振動モード図を図-4に示す。な

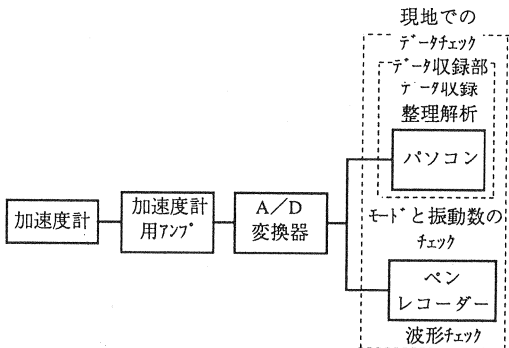


図-3 計測システム

表-1 強制振動試験結果

次数	振動数 (Hz)		対数減衰率	減衰定数	振動方向	振動モード
	加振試験	常時微動				
1	1.64		0.11	0.018	橋軸直角	水平1次
2	1.73	1.71	0.07	0.011	橋軸直角	水平2次
3	1.90	1.91	0.04	0.006	鉛直	たわみ2次 (第2径間)
4	2.14	2.14	0.07	0.011	橋軸直角	水平逆対称4次
5	2.18	2.20	0.04	0.006	鉛直	たわみ2次 (第1径間)
6	2.79	2.79	0.06	0.010	橋軸直角	水平5次
7	2.83	2.86	0.04	0.006	鉛直	たわみ3次 (第2径間)
8	3.51	3.52	0.06	0.010	鉛直	たわみ3次 (第1径間)
9	3.73	3.81	0.05	0.008	橋軸直角	水平対称4次
10	3.93	3.93	0.07	0.011	橋軸直角	水平逆対称6次
11	4.04	4.05			鉛直	たわみ逆対称3次 (連成)
12	4.66	4.64	0.04	0.006	鉛直	たわみ4次 (第2径間)
13	4.74	4.79	0.07	0.011	橋軸直角	水平7次
14	5.16				鉛直	たわみ対称3次 (連成)
15	5.58	5.59	0.06	0.010	鉛直	たわみ4次 (第1径間)

お、固有振動モード図の縦軸は、各モードの最大加速度値で無次元化してある。橋軸直角方向の振動では、7種の水平振動モードが確認された。9次 (3.78Hz) および10次 (3.93Hz) モードの応答値は大きく (最大で約 200gal/tf)、予備解析からも同様な傾向が認められている。しかし、これらは 4 Hz 付近と比較的高い振動数であるため、変位量に換算すると最大でも 3.5mm/tf 程度とさほど大きな値ではない。

2) 鉛直方向

共振曲線および固有振動モード図を図-5に示す。鉛直方向では8種のたわみ振動モードが確認されたが、スパンのたわみ1次モードの発現を見ることはできなかった。この原因として、本橋は形状的な特性上スパン中央の見かけの剛性が高いため、ここを振動の腹とするたわみ1次モードは生じ難かったものと考えられる。固有振動数に関しては各径間で異なるものとなった。固有振動モードは2つのタイプに分類することができる。1つは固有振動数が支配的な径間だけが共振振動するモードであり、もう1つはスパン長の異なる径間同士(第1径間と第2径間)が連成振動するモードである。各径間とも3次モードあるいは5次モード(たわみ2次モード)、および7次モードあるいは8次モード(たわみ3次モード)の振動数が極めて卓越しており、特に起振機を据えた第1径間では、5次モード (2.27Hz) で最大 850gal/tf (変位量で約 42mm/tf) の加速度が確

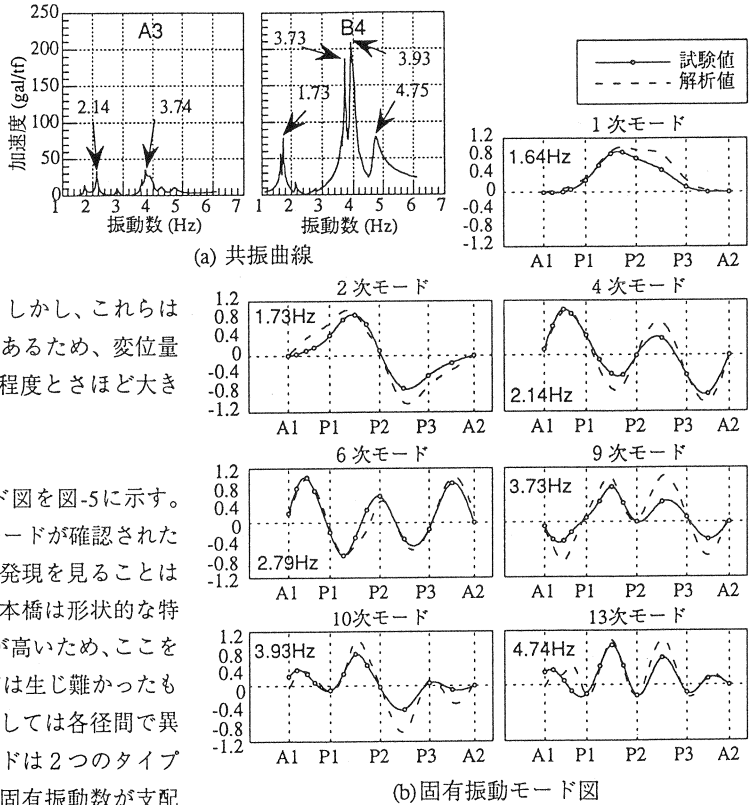


図-4 橋軸直角方向の振動特性

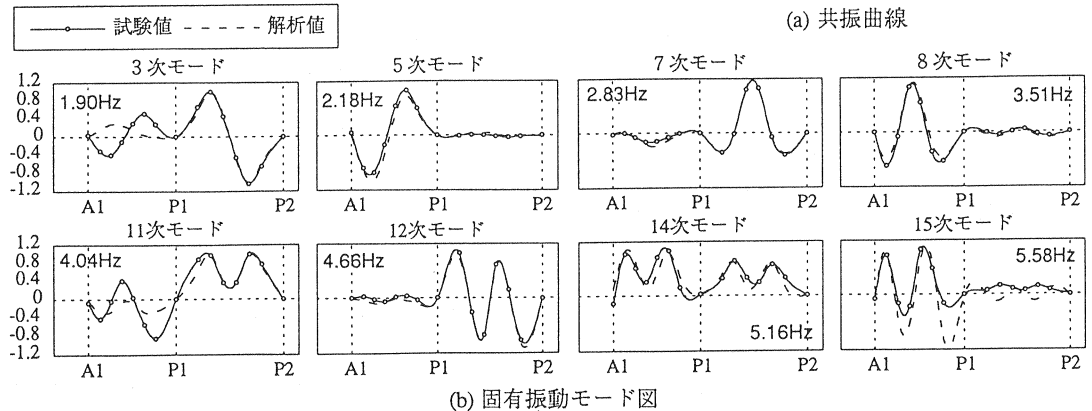


図-5 鉛直方向の振動特性

認されている。鉛直方向の振動特性として2Hz以下の比較的  
低い振動数において、振動モードはほとんど存在しないが、  
2~4Hzにかけて多くの振動モードを持ち、これらは共振時に  
おける応答値も大きいという傾向が見られる。

3) 橋軸水平方向

共振曲線を図-6に示す。橋軸水平方向に加振した場合は、  
連成して生じた鉛直方向の振動が卓越した。1tf当たりの応答  
値は連成して生じたものであること、および、加振点異なる  
ことから、鉛直方向加振の場合の20分の1程度であった。  
鉛直方向加振の結果と比較すると、同じ方向の共振曲線であ  
るので卓越振動数は等しいが、応答値の面ではやや異なる性  
状を示している。鉛直方向加振の場合は、たわみ2次および3  
次モードに相当する2~3Hzの振動モードの応答値が大きい。  
一方、橋軸水平方向加振の場合は、4Hz以上の比較的高い振  
動数のモードで、相対的な応答値が大きくなる傾向が認めら  
れる。

以上より、試験対象とした1.0~6.0Hzの間で15種の振動  
モードを確認した。2Hz以下では1次モードおよび2次モー  
ドが存在するのみで、その応答値も他のモードに比べて小さ  
い。一方、2~5Hzにおいて多くの固有振動数を持ち、起振  
力1tf当たりの応答値も大きいという特徴が認められた。

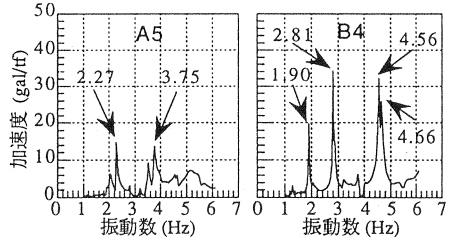
5. 振動使用性試験

5-1 試験方法

本試験は、供用に当たり歩行者らが感じるとる振動を定量的  
に測定し、その結果をもとに本橋の使用性を照査することを  
目的としている。測定は第2径間を対象に行った。試験水準は  
歩速、歩行者数、歩行形態とし、歩行者の歩速は、2Hz近傍  
、駆け足、および鉛直方向固有振動数近傍(1.90Hz、2.85Hz)  
、歩行者数は、単独、2名、4名、8名、16名の連行歩行、歩  
行形態は、2列行進、密集隊列とした。以上のパラメータを組  
合せ、振動使用性の評価を行った。歩行形態の模式図を図-7  
に、試験水準の一覧を表-2に示す。歩行者の歩速を合わせる  
ケースでは、メトロノームでリズムをとって歩速を調整した。  
なお、歩行者18名の平均体重は66.7kgfで、その標準偏差は  
8.2kgfであった。測定項目は鉛直方向加速度とし、試験対象  
径間の第2径間に限定して計測機器を配置した(図-8)。測定  
は強制振動試験と同じシステムを用いて、サンプリング間隔  
100Hzで、30Hzのローパスフィルターをかけることにより  
行った。

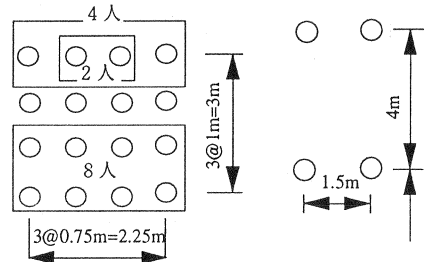
5-2 試験結果および考察

振動使用性を評価する場合、応答加速度の他、応答速度や  
応答速度の実効値(RMS値)が対象となることから、計測され  
た応答加速度を積分して応答速度を求め、速度振幅の最大値  
を中心とした2秒間の実効値を得た。これらの値と、振動使  
用性に関して提案されている幾つかの指標と比較し、本橋に  
おける振動使用性について評価検討を行った。



(a) 共振曲線 (鉛直方向)

図-6 橋軸水平方向の振動特性



(a) 密集隊列

(b) 2列行進

図-7 歩行形態

表-2 振動使用性試験の試験水準

歩速	歩行形態	1人	2人	4人	8人	16人
ランダム歩行	2列行進	R01	R02	R04	R08	R16
	2列行進	RR01	RR02	RR04	RR08	RR16
1.90hz歩行	密集隊列	W19001	W19002	W19004	W19008	W19016
2.00hz歩行	密集隊列	W20001	W20002	W20004	W20008	W20016
2.85hz歩行	密集隊列	W28501	W28502	W28504	W28508	W28516

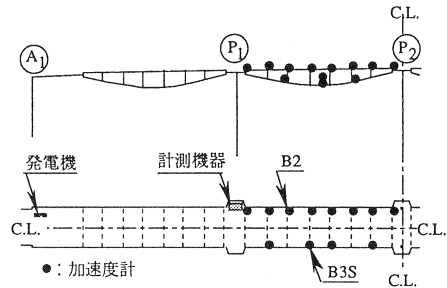


図-8 計測機器配置図 (振動使用性試験)

測点B2およびB3Sにおける応答速度の実効値と加振振動数の関係を図-9に示す。図中の点線は、既往の研究より得られている振動限度値を表わしており、応答速度の実効値0.85cm/secは、弛緩した立位において「振動を明らかに感じる」の50%値であり、応答速度の実効値1.70cm/secは、歩行位において「少し歩きにくい」の50%値である。

1名が歩行(走行)した場合、最頻歩調2歩/秒では最大0.55cm/sec(RMS値)であり、「振動を明らかに感ずる」の50%値を超えることはなかったが、共振歩調となる1.90Hzまたは2.85Hzでは、それぞれ最大1.55cm/sec、1.33cm/sec(共にRMS値)に達し、「少し歩きにくい」と感じる程度の振動が観測された。特に、2.85Hz歩行ではいずれのケースも「振動を明らかに感ずる」の50%値を超える結果となった。

歩行者数の増加と応答速度の実効値の関係を図-10に示す。その結果、4名以上で共振歩調に合わせて行進すると、「少し歩きにくい」の50%値を超える大きな振幅が観測されるようになるが、必ずしも人数と比例的に振幅が増加するわけではない。特に、ランダム歩行およびランダム走行では、最大振幅は4名歩行(走行)の場合に生じており、歩行者数の増加に伴い振動振幅の増加する共振歩調の場合と異なる結果となっている。これは、歩行形態の違いに起因していると考えられる。各固有振動モードは、振動モードの腹となる位置に固有振動数に近い入力作用すると、より振動が励起されやすくなる。歩行者数16名の場合の進行方向の列長は、密集隊列では3mであるのに対し2列行進では28mとなり、これは試験対象径間のほぼ半分に対応する。従って、2列行進という歩行形態では、歩行者数が増加すると、より振動を励起す

る位置への载荷だけでなく、反対に振動を抑止する様な位置への载荷も加わるため、全体としての振動振幅は小さくなったものと思われる。

一般に人間の歩行は平均歩調で2歩/秒、標準偏差で0.18~0.20歩の生起分布に従い、走行では平均3歩/秒<sup>2)</sup>といわれている。本橋の場合、3次モードが1.90Hzに、7次モードが2.85Hzに存在することから、歩行および走行の歩調とこれらの振動モードが共振振動することが懸念された。図-11にランダム歩行およびランダム走行におけるスペクトル図を示す。なお、スペクトル値は、各試験ケースにおける最大値で無次元化してある。これより歩行者数が少ない場合は、入力振動数(歩行および走行のリズム)や、測点において励起されやすい振動モード等様々な振動モードが生じているが、歩行者数が増えるとランダム歩行では3次モードが、ランダム走行では7次モードが卓越してくることがわかる。従って、本橋を歩行者が歩行した場合は3次モード(1.90Hz)で、走行した場合には7次モード(2.85Hz)で共振振動しやすいといえる。

各種照査法<sup>3)</sup>に基づき、本橋の使用性を比較・検討した結果を表-3に示す。これによると、最頻歩調2歩/

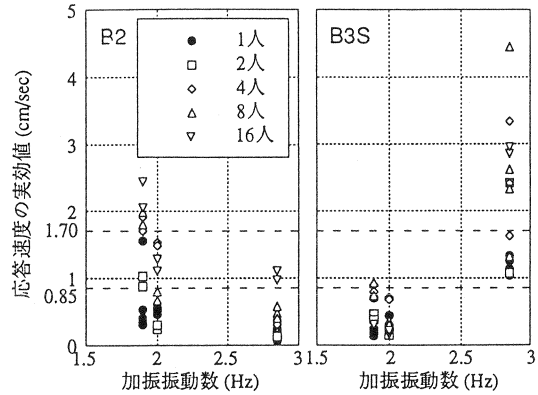


図-9 振動数と振動振幅

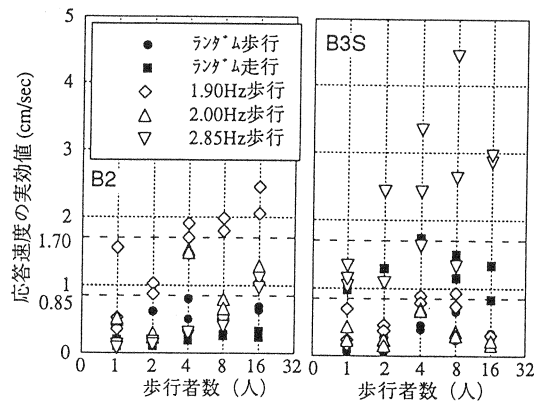


図-10 歩行者数と振動振幅

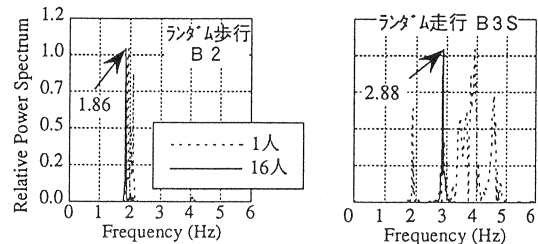


図-11 スペクトル図

秒1名の時の許容値をわずかに超えているが、計測データのばらつき等を考慮すると、ほぼ許容値程度と判断される。この指標における限度の内容は「感じない」としてあるが、0.55cm/sec (RMS値) という

表-3 各種振動許容値と試験結果の比較

方法	荷重状態	振動許容値	試験値	限度の内容	可否
Leonard	多数の歩行者	31 gal	16 gal	Uncomfort	○
小堀・梶川・城戸	2歩/秒1名	0.42 cm/sec	0.55 cm/sec	感じない	×
BS 5400	共振歩調1名	69 gal	35 gal	Tolerance	○
Wheeler	2歩/秒または共振歩調1名	2.4 cm/sec	1.68 cm/sec	Unpleasant	○

値は、「振動を明らかに感ずる」の50%値以下である。従って、一般的な歩調で1名の歩行者が歩行した場合、わずかに振動を感じる程度のもと考えられ、使用上の不都合が生じることは無いものと思われる。その他、共振歩調での歩行および密集隊列での歩行においては、振動許容値を十分満足している。これらの指標に基づき本橋の使用性を評価すると、通常の使用状態においては、歩行者が不快と感じたり、不安感を抱くような振動レベルに達することは無いものと考えられる。

また、多人数による共振歩調において、「少し歩きにくい」の50%値を超える結果も得られている。しかし、本橋の性格上このような多人数で、しかも密集隊列という歩行形態で用いられる可能性は少ないと考えられ、大きな問題とはならないであろう。最頻歩調においては、いずれのケースでも「少し歩きにくい」の50%値を超える振幅は観測されていない。一方、通常の使用状態に近いと思われるランダム歩行の最大振幅は0.81cm/sec (RMS値) であり、「振動を明らかに感ずる」の50%値を超えていない。ランダム走行の最大振幅も1.74cm/sec (RMS値) で「少し歩きにくい」と感じる程度の振動であった。

以上より、本橋が一般的な歩行形態で用いられる場合、特に問題となるような振動レベルに達することは無いものと思われる。

## 6. まとめ

4径間連続上路式PC吊床版橋「潮騒橋」において実施した、起振機による強制振動試験と振動使用性試験から得られた知見を以下にまとめる。

- ①強制振動試験より、橋軸直角方向および鉛直方向とも各モードの振動数が接近し、試験を実施した1.0～6.0Hzの間でも多くの振動モードが存在していることが確認された。
- ②橋軸直角方向では、9次モード(3.78Hz)および10次モード(3.93Hz)が卓越し、応答値は最大加速度で約200gal/tf(変位量で約3.5mm/tf)であった。
- ③鉛直方向では、各径間とも3次モードあるいは5次モード(たわみ2次モード)、および7次モードあるいは8次モード(たわみ3次モード)が卓越した。特に、5次モード(2.27Hz)では最大加速度で約850gal/tf(変位量で約42mm/tf)の応答となった。
- ④振動使用性試験結果を各種照査法により照査した結果、振動許容値をほぼ満足しており、通常の使用状態において、歩行者が不快と感じたり、不安感を抱くような振動レベルに達することは無いと判断できる。

最後に、本載荷試験を実施するにあたり、建設省土木研究所構造橋梁部構造研究室、並びに地震防災部耐震研究室にご指導を頂いた他、機材を借用致しました。ここに、謝意を表わします。また、試験の計画および実施に際して、貴重なご指導、ご助言を下さいました多くの方々に深謝申し上げます。

## 【参考文献】

- 1) 小堀、梶川：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、1974.10
- 2) 梶川：振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査法に関する考察，土木学会論文報告集第325号、pp.23～33、1982.9
- 3) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，pp476～478、1985.10
- 4) 橋梁振動研究会：橋梁振動の計測と解析，1993.10