

観測記録による長大ゲルバートラス橋の動的特性と構造同定

東谷 修¹・金治英貞²・高田佳彦³・小林義和⁴

¹正会員 港大橋耐震補強工事JV（〒559-8559 大阪市住之江区南港北1-7-89）

²正会員 工修 阪神高速道路公団工務部設計課（〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3）

³正会員 工修 阪神高速道路公団大阪建設局設計課（〒559-8559 大阪市住之江区南港北1-14-16）

⁴正会員 工博 (株)ニチゾウテック 技術コンサルティング本部（〒551-0023 大阪市大正区鶴町2-15-26）

1. はじめに

港大橋は阪神高速道路5号湾岸線に位置し、南港～築港を結ぶ、橋長980m、中央支間長510mの長大トラス橋である。

本橋の耐震性向上策としては、レベル2地震時における主構造の損傷制御を目的とした二次部材の履歴ダンパー化や座屈耐力改善のための部材追加等、複数の方法の併用が検討されているが、橋軸方向の地震力に対しては全質量約45,000トンのうち約40%の17,000トン程度を占めるダブルデッキの道路床組と、主構造横桁とをつなぐ床組支承部の免震化が、採用される予定である¹⁾。

床組免震化の特徴は、床組支承の水平剛性および減衰定数を適切に設定することによる、床組部の長周期化と高減衰化であり、本工事では経済比較により、既設の固定・可動支承を全量すべり可動支承に取り替えるとともに、水平剛性調整のためのゴムパッファを各床組に追加する予定である。

床組免震化においては、基本となる現橋の固有周期の把握が重要であり、実橋計測と解析による検証を行った。

2. 固有周期の計測方法

構造物の固有周期計測方法には、起振機を用いたものが一般的であるが、港大橋は大阪湾岸地区の大動脈であり、主構造への機材設置等は困難と考えられる。また、本橋には竣工時に地震計が設置されているが、設置箇所数が少なく、観測データを使った固有モードの検出には十分とはいえない可能性がある。これらのことから、実橋固有周期の計測については地震計観測データの分析を含む、次の2種類の方法を採用した。

(1) 常時微動計測

港大橋に作用する風、地動および一般車両走行による常時微動を加速度計により計測し、時刻歴波形の周波数分析（高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform; FFT)により時間領域から周波数領域に変換する）を行い、固有周期を推定するものである^{2)~6)}。

表-1 計測位置概要

測定箇所	測定方向
中央径間桁 L/4(海側)	橋軸直角水平方向および鉛直方向とし、加速度計を盛り替えて計測。
中央径間桁 L/4(陸側)	
中央径間桁 L/2	
中央径間桁 3L/4	
側径間桁 L/2(大阪側)	橋軸方向
中間橋脚(大阪側)橋軸方向	

(2) 地震計による地震時振動データの解析

港大橋に常時設置されている3箇所の地震計の観測データから、地震応答波形を取得し、周波数分析により固有周期を推定するものである。

3. 常時微動計測

(1) 計測位置

計測位置の概要を表-1に示す。計測位置は図-1（次頁）に示すように、中央径間桁のL/4（海側）・L/4（陸側）・L/2・3L/4、側径間桁L/2（築港側）および主塔（築港側）橋軸方向とした。加速度計は、図-2に示すように、主構造横桁上に鉛直方向あるいは水平方向に配置し、マグネットで設置した。なお、本検討でのL/4、3L/4はゲルバーヒンジ付近を意味し、正確なスパン長Lの1/4点、3/4点を指すのではない。

(2) 計測方法

図-3に計測のダイヤグラムを示す。測定波形はデータレコーダに記録するとともに、パソコンによりA/D変換し、ハードディスクに記録した。記録したデータは周波数分析し、卓越する周波数を確認した。計測条件は以下の通りとした。

- 1) 計測は鉛直方向（橋軸方向）を約2時間、橋軸直角水平方向を約1時間実施した。
- 2) データ解析では、1回あたり100秒（サンプリング周波数10Hz、データ数1024（ $=2^{10}$ ））に区切り、その周波数分析を実施した。

橋梁一般図

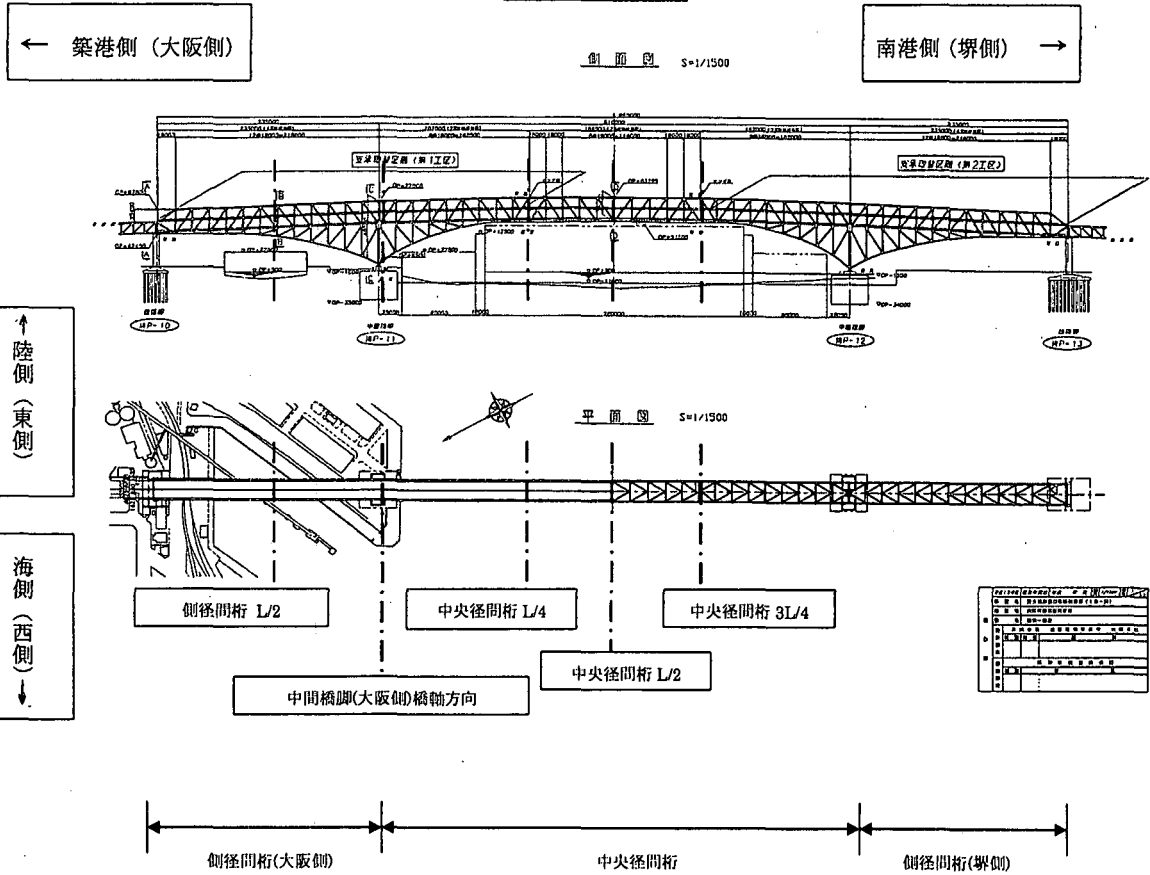


図-1 計測位置図

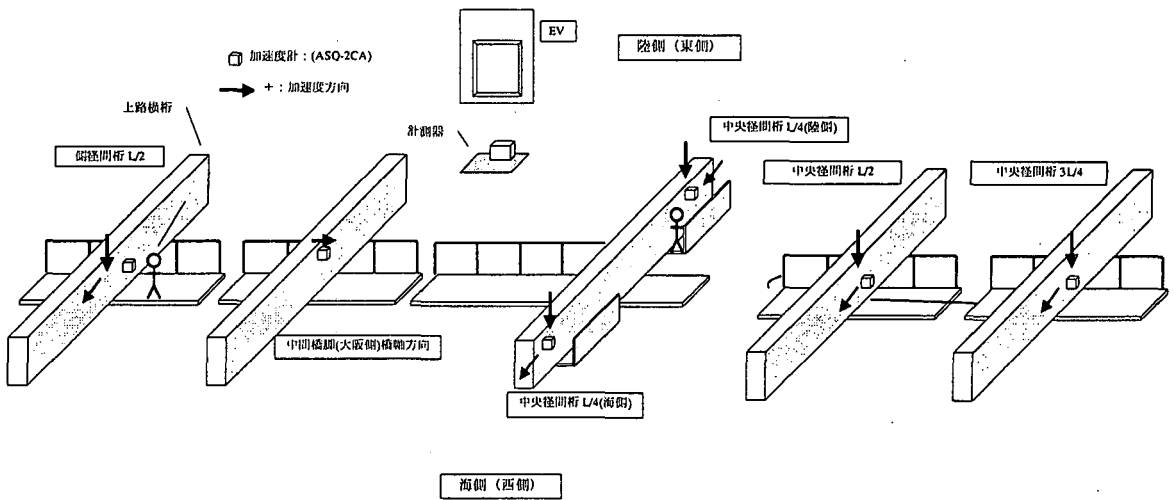


図-2 計測概要

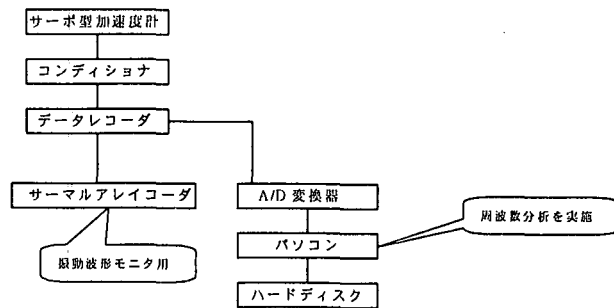


図-3 計測のダイアグラム

表-3 固有振動数一覧（実測値および解析値）

単位:Hz

No.	振動モード	常時微動計測値		固有値解析結果		
		平均値	現橋モデル	ゲルバー部 準連続化	ゲルバー部完 全連続化	
1	橋軸直角1次 (比率)	0.24 (1.04)	0.23 (1.00)	0.23 (1.01)	0.26 (1.13)	
2	橋軸直角2次 (比率)	0.39 (1.33)	0.30 (1.00)	0.31 (1.03)	0.52 (1.74)	
3	橋軸鉛直1次 (比率)	0.48 (1.58)	0.30 (1.00)	0.48 (1.60)	0.48 (1.59)	
4	築港側 端橋脚卓越	—	0.32	—	—	
5	南港側 端橋脚卓越	—	0.33	—	—	
6	橋軸鉛直2次 (比率)	0.54 (1.48)	0.36 (1.00)	0.54 (1.48)	0.51 (1.41)	
7	橋軸直角3次 (比率)	0.56 (1.05)	0.53 (1.00)	0.54 (1.02)	0.54 (1.01)	
8	橋軸直角4次 (比率)	0.59 (1.09)	0.54 (1.00)	0.55 (1.02)	0.55 (1.02)	
解析モデル条件		ゲルバー・ピン (アイバー・ピン)	回転自由	回転拘束	回転自由	
		ゲルバー 固定支承	回転自由	回転拘束	回転自由	
		ゲルバー 可動支承	回転・変位自由	回転・変位拘束	回転・変位自由	
		ゲルバー部 上下弦材	不連続	不連続	連続化(剛結)	

(3) 計測結果

図-5-1, 図-5-2 (次頁) に周波数分析結果の一例を示す。なお, 計測した加速度波形には 2Hz のローパスフィルタを施してある。図-5-3, 図-5-4 には周波数分析結果で得られた卓越周波数における加速度振幅を, 対応すると思われる振動モード図にプロットした。プロットした各測定点における値は, その位相差を確認し各々プロットしてある。図から, 各卓越周期における振幅は各固有振動モードにほぼ一致しており, それぞれの固有振動数と考えてよいものと思われる。表-3 に固有振動数の一覧を示す。ここで, 上表の橋軸鉛直方向とは橋軸方向および鉛直方向を含む面内方向を指す。また, 比率は現橋モデル解析値を基準値としている。

- 1) 表から, 振動モードの No.1, 7, 8 の 3 モードは, 実測値と現橋モデル解析値がほぼ近似しているが, No.2, 3, 6 の 3 モードは, 実測値が現橋モデル解析値に比べて 30~60% 高めとなっている。一方, ゲルバー部を準連続化した解析結果と実測値は No.3, 6 でほぼ一致している。実測値は, ゲルバー部を完全連続化した解析結果よりも準連続化した解析結果に近い値となっている。準連続化モデルとは, 現橋モデル (図-4-1, 図-4-2 参照) で自由となっているゲルバー部のピンの回転, 支承の変位を拘束したモデルである。完全連続化モデルとは, ゲルバー部上下弦材をダミー部材で剛結したモデルである (図-4-3 参照)。なお, 現橋解析モデルでは, ゲルバー部のダミー部材はモデル化していない。
- 2) このことから, 一般車両走行時のような微小振動時には, 本橋のような巨大質量のゲルバー橋ヒンジ部は, ピンの静摩擦等に起因して回転・変形が拘束されているものと考えられる。
- 3) ゲルバーヒンジ部の地震時の挙動については, 別方法により別途検証が必要であると考えられ

アイバー・ピン(現橋解析モデル:回転自由) アイバー
(準連続化モデル:回転拘束)

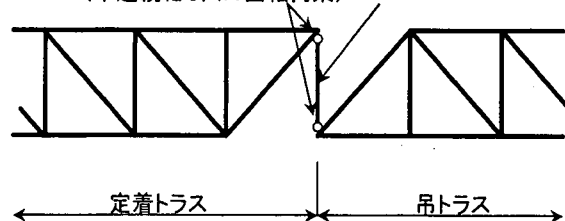


図-4-1 主構側面モデル図
[ゲルバー・ピン(アイバー・ピン)のモデル化]

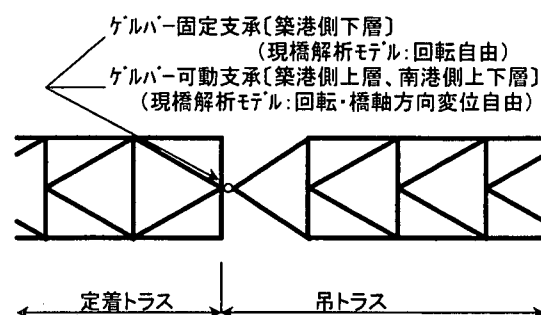


図-4-2 主構平面図
[ゲルバー固定・可動支承のモデル化]

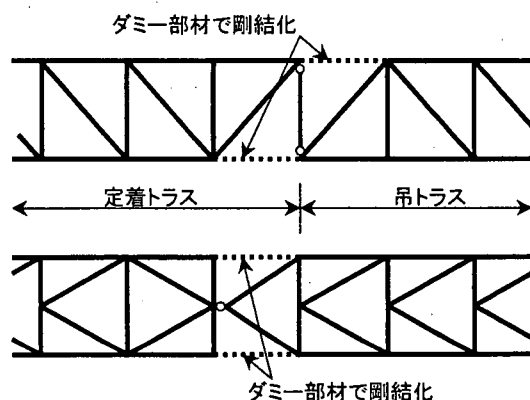


図-4-3 主構側面・平面図
[ゲルバー部完全連続化のモデル化]

る。これについては, 地震計観測データの分析により確認を試みることにした。

- 4) 主構支承（端支点：ピンローラー, 中間支点：ピン）のピン回転を拘束した場合についても固有値解析を実施したが, この影響は微小であり, 現橋モデルの解析結果と同様の結果であった。

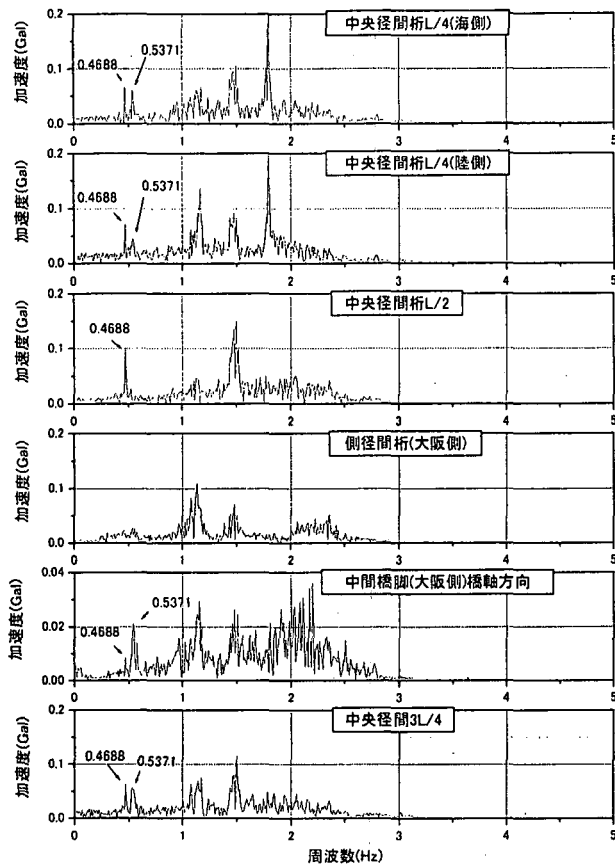


図-5-1 周波数分析結果（鉛直1回目）

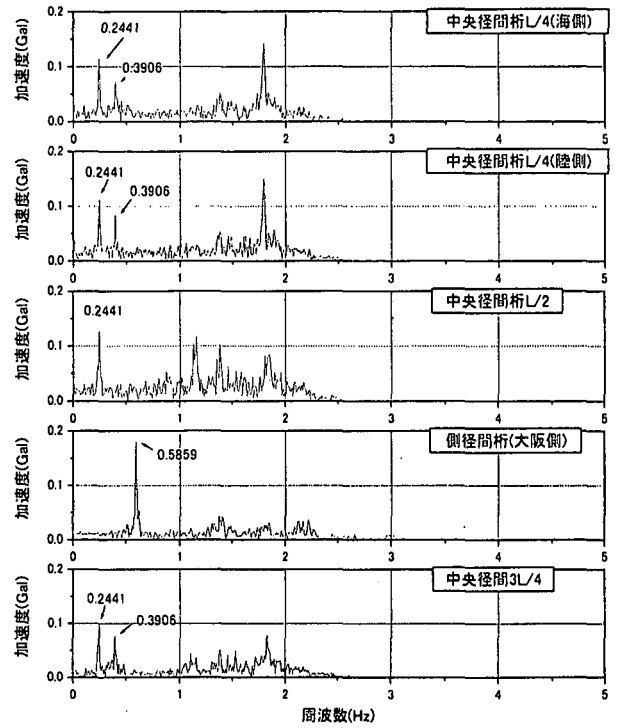


図-5-2 周波数分析結果（水平1回目）

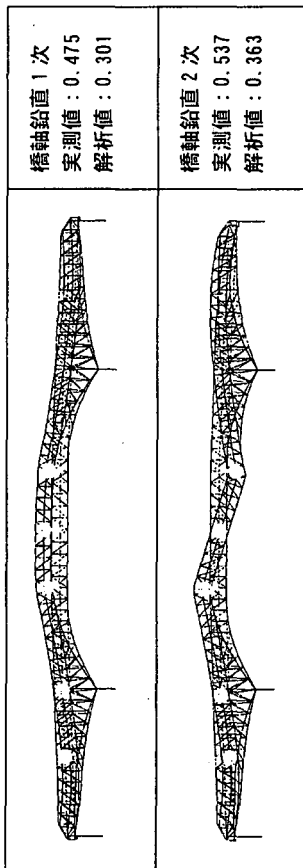


図-5-3 鉛直・橋軸方向モード図
(1回目計測値)

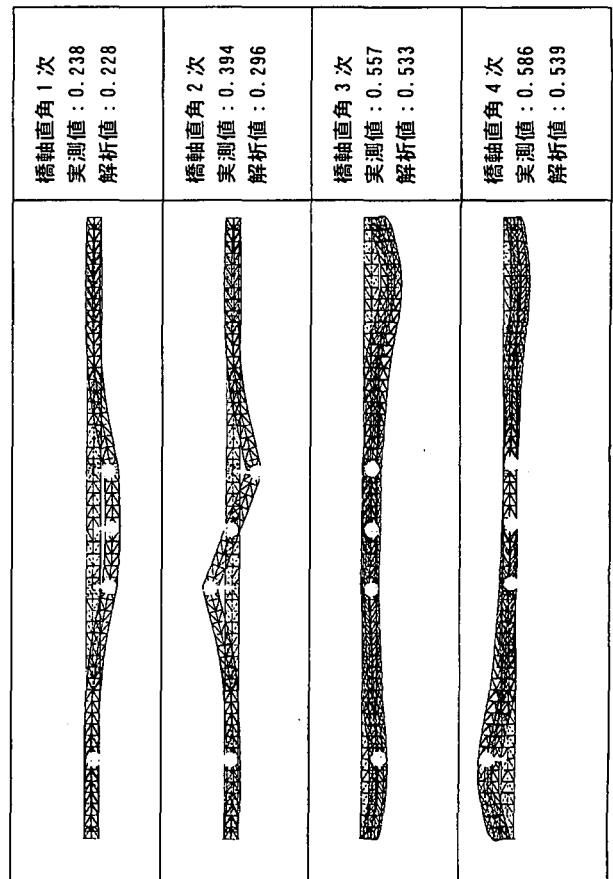


図-5-4 橋軸直角水平方向モード図
(1回目計測値)

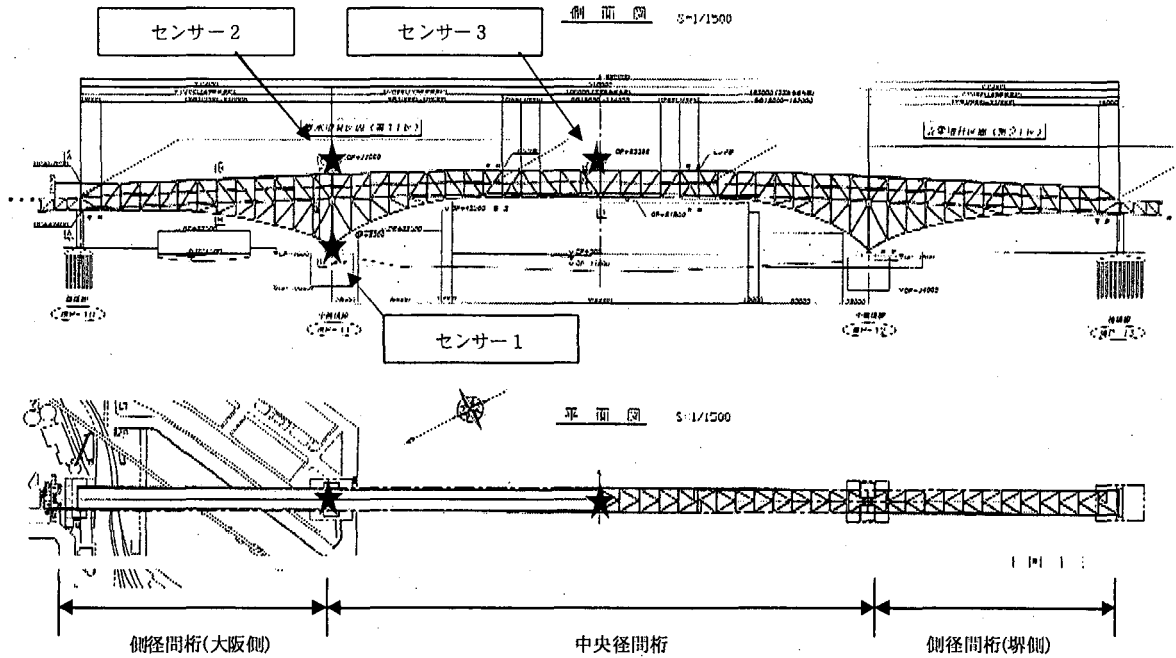


図-6 地震計設置位置図

4. 地震計による観測データの分析

(1) データの概要と周波数分析条件

常時微動計測では、地震時の挙動を反映した固有周期が検出されたとはいえないため、本橋に設置されている地震計の観測データの分析を併せて行うものとした。

分析対象としては、港大橋に設置されている地震計で観測された、平成12年10月6日の鳥取県西部地震時の地震応答波形とした。当地震による港大橋周辺での観測震度は、震度4である。

以下に、データの内容等を示す。

a) データの内容：

センサー1～3の3方向(X,Y,Z方向)加速度、速度、変位；計27成分

b) センサーの位置(図-6参照)：

センサー1：岸P-1-22(湾P-11橋脚基礎天端、観測局舎下)

センサー2：岸P-1-22(湾P-11橋脚上、トラス上弦材、桁中心)

センサー3：岸S-1-21(中央径間中央、トラス上弦材、桁中心)

c) X,Y,Z方向：

X：橋軸方向、Y：橋軸直角方向、Z：鉛直方向

d) サンプル周波数：100Hz

e) データ総数：13301個(133.01秒)

FFTは、16384(=2¹⁴)個のデータで実施

f) 最大加速度：

センサー1：X：約20gal、Y：約13gal、Z：約7gal

センサー2：X：約30gal、Y：約60gal、Z：約40gal

センサー3：X：約100gal、Y：約70gal、Z：約100gal

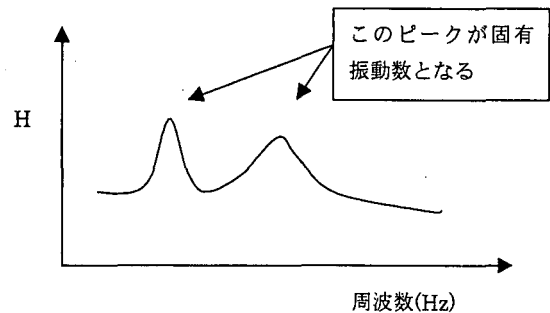


図-7 周波数応答関数の模式図

(2) 擬似的周波数応答関数の算出と固有振動数の推定

地震計観測データを周波数分析した結果、卓越周波数は検出されたものの、地震波そのものの卓越周波数を検出している可能性も考えられた。

このため本検討においては、観測データが線形振動系の応答であると考えて、以下の手法を用いて港大橋の固有振動数の検出を行った。

まず、港大橋の湾P-11橋脚基礎天端(センサー1)における観測波形については、地震入力に対する基礎天端の応答(出力)ではあるが、基礎天端の振動振幅は橋梁上部工のそれに比べて小さいため(振動モードの縦距が小さい)、この基礎天端で観測された振動加速度を橋梁上部工への入力と考える。

次に、基礎天端(センサー1)の加速度を入力とし、センサー2、3で得られる加速度波形を出力として周波数応答関数 $H(\omega)$ を求める。

$$H(\omega) = F_o(\omega) / F_i(\omega) \quad (1)$$

ここに、 $F_o(\omega)$ ：出力のフーリエ変換

$F_i(\omega)$ ：入力のフーリエ変換

フーリエ変換には周波数方向 5 点の移動平均による平滑化を施している。

この周波数応答関数 $H(\omega)$ は、その振動系の振動特性（固有振動数、固有振動モード、減衰特性）により定まるものであり、例えば 2 自由度振動系の周波数応答関数を、横軸を周波数として模式的に示せば、図-7（前頁）のようになる。

図-8-1～図-8-3 に周波数応答関数を示す（図中では応答倍率と表記）。

図-8-1 より、Y（橋軸直角）方向では、0.22Hz と 0.55-0.56Hz などが卓越している。

Z（鉛直）方向においては、図 8-2 においてセンサー 2 / センサー 1 では明瞭なピークは認められず、応答倍率はほぼ 1 を示している。これは、センサー 1, 2 の配置位置は、湾 P-11 橋脚の基部と天端であり、両者は鉛直方向に同じ振動挙動をしていることを示している。一方、センサー 3 / センサー 1 では、0.35Hz, 0.40Hz, 0.48Hz, 0.57Hz など比較的多くの卓越ピークが認められる。これは、支間中央（センサー 3 の配置位置）では、基礎天端の入力に対応し各種固有振動成分が励起されることを示している。ただし、4. (1) f) で示したように、鉛直方向における入力（センサー 1 Z）は 1X, 1Y 方向のそれに比べて小さく、入力としては小さ過ぎる可能性もある。ここで、固有振動モード（解析値）形状を考えると、本橋の鉛直振動モードは必ず X（橋軸）方向の挙動を伴うことから、X 方向加速度を鉛直方向出力の入力と考えて、鉛直方向出力（センサー 3 Z）を入力（センサー 1 X）で除した場合を図-8-4（次頁）に示す。図から得られる卓越周波数は 0.23Hz, 0.34Hz, 0.39Hz, 0.55Hz 等となり、図-8-2 で不明瞭であった 0.5Hz 以下の範囲での卓越周波数が明確となった。

図-8-2 で得られた卓越周波数 0.48Hz は図-8-4 で激減しているが、これは、センサー 1Z（鉛直）方向の入力は小さいが、センサー 1X（橋軸）方向の入力が比較的大きいためセンサー 3Z（鉛直）方向に生じた強制振動成分であるためと推測される。

以上の結果を総括して、表-4（次頁）に固有振動数と推定される卓越周波数をまとめる。本推定は本来、固有振動モードなども考慮して行うべきであるが、測定点数が少ないため、ここでは固有振動数解析結果を基にそれに近い卓越周波数を採用したものである。

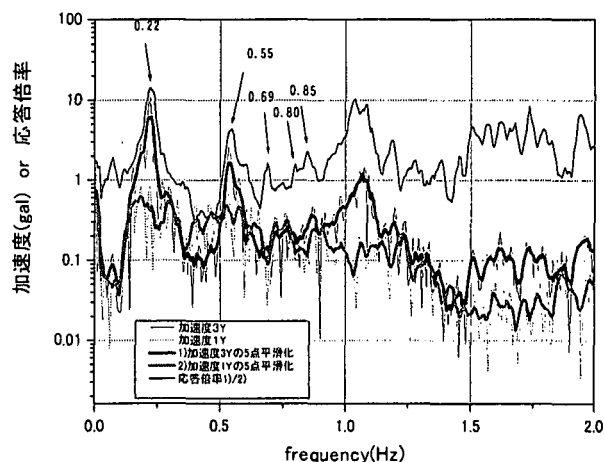


図-8-1 Y方向（センサー3／センサー1）

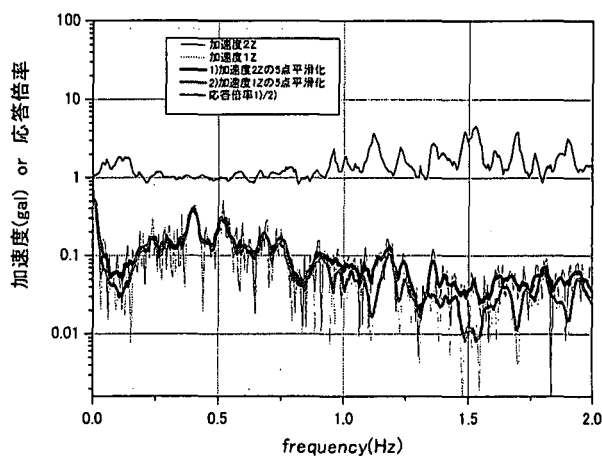


図-8-2 Z方向（センサー2／センサー1）

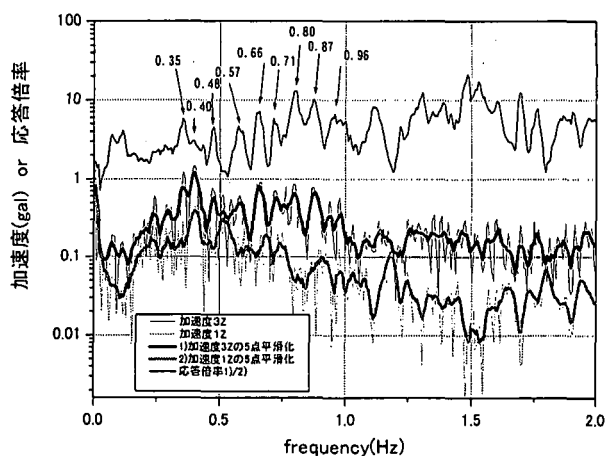


図-8-3 Z方向（センサー3／センサー1）

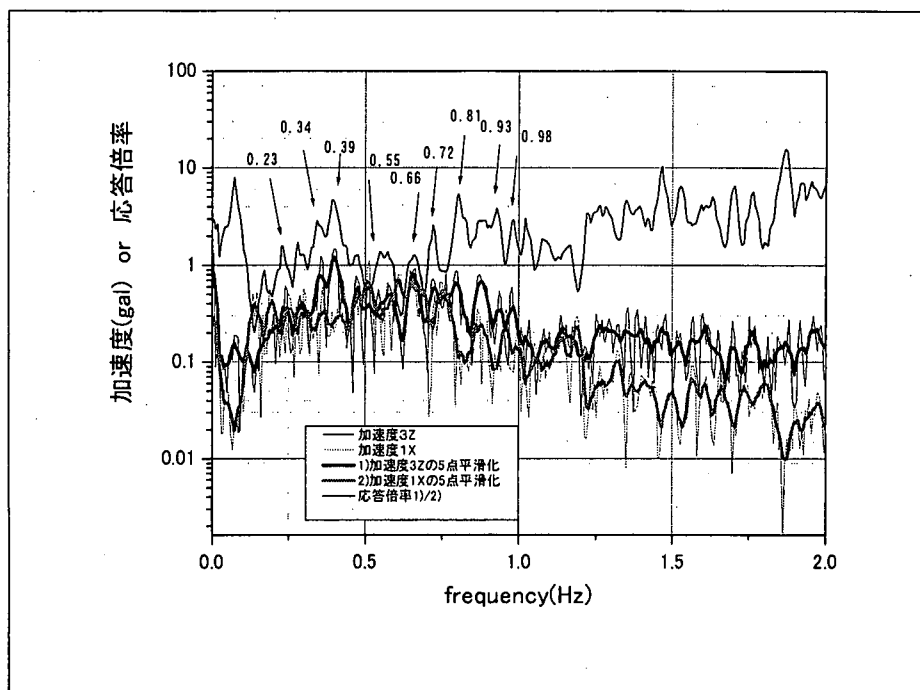


図-8-4 Z方向（センサー3Z／センサー1X）

表-4 固有振動数一覧

単位:Hz

No.	振動モード	地震計 観測値	常時微動 計測値	固有値解析結果		
		平均値	平均値	現橋モデル	ゲルバー部 準連続化	ゲルバー部 完全連続
1	橋軸直角1次	0.23	0.24	0.23	0.23	0.26
	(比率)	(1.01)	(1.04)	(1.00)	(1.01)	(1.13)
2	橋軸直角2次	—	0.39	0.30	0.31	0.52
	(比率)	—	(1.33)	(1.00)	(1.03)	(1.74)
3	橋軸鉛直1次	0.34	0.48	0.30	0.48	0.48
	(比率)	(1.13)	(1.58)	(1.00)	(1.60)	(1.59)
4	築港側 端橋脚卓越	—	—	0.32	—	—
5	南港側 端橋脚卓越	—	—	0.33	—	—
6	橋軸鉛直2次	0.39	0.54	0.36	0.54	0.51
	(比率)	(1.07)	(1.48)	(1.00)	(1.48)	(1.41)
7	橋軸直角3次	0.55	0.56	0.53	0.54	0.54
	(比率)	(1.03)	(1.05)	(1.00)	(1.02)	(1.01)
8	橋軸直角4次	—	0.59	0.54	0.55	0.55
	(比率)	—	(1.09)	(1.00)	(1.02)	(1.02)
解析モデル条件		ゲルバー・ピン (アイバー・ピン)		回転自由	回転拘束	回転自由
		ゲルバー 固定支承		回転自由	回転拘束	回転自由
		ゲルバー 可動支承		回転・変位 自由	回転・変位 拘束	回転・変位 自由
		ゲルバー部 上下弦材		不連続	不連続	連続化 (剛結)

- 1) 表-4 から、No.1 橋軸直角 1 次、No.7 橋軸直角 3 次の固有振動数については、地震時の時刻歴応答波形から得られる固有振動数と、先の一般車両走行時の常時微動測定で得られる固有振動数とが、ほぼ等しくなっている。
- 2) No.3 橋軸鉛直 1 次、No.6 橋軸鉛直 2 次では、地震時の固有振動数がかなり低くなり、ゲルバー部準連続化モデルよりも現橋モデルの解析値に比較的近い値となっている。
- 3) 橋軸鉛直 1 次の地震時固有振動数は、現橋モデルによる固有値解析結果と比較して、約 13% 高い値となっている。この差を単純に剛度差に置き換えると 28% となり、実橋と解析モデルの剛度の誤差のみとは考えられない。
- 4) 橋軸鉛直モードの観測値と解析値の差の究明には、この挙動に影響のある水平軸周りの回転機能を有するピン、すなわちゲルバーピンの挙動を解明する必要があると考えられる。
- 5) 今回使用した地震計観測データの振動時間は 2 分間程度であり、この中には強振動から微小振動まで含まれており、地震力作用期間中もゲルバーピンは外力の大きさに応じて回転機能の開放状態と拘束状態を繰り返していた可能性も考えられる。
- 6) 実際の挙動の解明には、一地震だけでなく、複数の地震観測データの分析が必要であると考えられる。

5. まとめ

港大橋の現橋固有周期の把握を目的として、常時微動計測、地震計観測データの分析、および立体モデルによる固有値解析を行った結果、下記の見解、課題が得られた。

- ・ 橋軸直角方向モードは、常時微動計測結果、地震計観測データの分析結果、固有値解析結果ともほぼ整合性がとれており、実橋の固有周期が確認されたといえる。
- ・ 橋軸鉛直方向モードについては、常時微動計測結果と地震時観測データの分析結果に差が見られた。常時の挙動はゲルバーヒンジ部が拘束状態であると仮定した場合に、解析値との整合が得られたが、地震時については、解析的検証が未だ十分には得られていない。耐震補強設計へのフィードバック方法に一考が必要であるとともに、これらの差の検証が今後の課題である。

6. 謝辞

本検討は、阪神高速道路・港大橋耐震補強工事（13-1-湾）（13-2-湾）において実施されたものである。検討にご協力頂いた関係者各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団湾岸管理部、(株)建設技術研究所：港大橋耐震補強検討業務（13-湾）報告書、2002.3.
- 2) 藤原、玉越、植田、南條、小林：生口橋完成系実橋振動実験、土木学会年次学術講演会論文集 I-163、1992.9
- 3) 江原、森、植田、南條：天保山大橋の振動実験、土木学会年次学術講演会論文集 I-459、1992.9
- 4) 小田桐、萩原、渡辺、米田、町田、葛西：4 径間連続鋼床版箱桁ラーメン橋（有明西運河橋）の実橋振動実験、土木学会年次学術講演会論文集 I-580、1994.9
- 5) 萩原、小田桐、竹内、大垣、広瀬：レインボーブリッジ振動実験、土木学会年次学術講演会論文集 I-585、1994.9
- 6) 下里、黒川、岡田、小林：鶴見つばさ橋実橋振動実験、土木学会年次学術講演会論文集 I-505、1995.9