

動態観測データに基づく明石海峡大橋の減衰評価

Damping Identification of Akashi Kaikyo Bridge with Bridge Monitoring Data

勝地 弘*, 山田 均**, 楠原栄樹***

Hiroshi Katsuchi, Hitoshi Yamada and Shigeki Kusuhara

*博(工), 横浜国立大学助教授, 大学院工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

**工博, 横浜国立大学教授, 大学院環境情報研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7)

***工修, 本州四国連絡高速道路サプリーダー, 長大橋技術センター (〒651-0088 神戸市中央区小野柄通 4-1-22)

Modal damping of the Akashi Kaikyo Bridge was identified using bridge monitoring data. The data consists of ambient condition data and wind condition data of up to 33 m/s so that not only structural damping but also aerodynamic damping effects could be analyzed. Eigensystem Realization Algorithm method was used to identify modal parameters in which band-pass filtered signal was applied with optimum order of the realized system in this study. The study showed that modal damping for 5 lower modes was successfully identified with low variation and the structural damping is nearly equal or slightly greater than design specification.

Key Words: Akashi Kaikyo Bridge, modal damping, ERA

キーワード: 明石海峡大橋, モード減衰, ERA 法

1. はじめに

明石海峡大橋の建設に際しては, 当時の最大支間長であったハンバー橋 (1,410m) や国内最大支間長であった南備讃瀬戸大橋 (1,100m) を大きく上回る規模であったことから, その耐風安定性の確保に関してはさまざまな検討が行われた。それらの検討を踏まえ, 世界最長の吊橋を建設するための耐風設計要領¹⁾も作成された。特に, 動的安定性を照査するための構造減衰の設定に関しては, それまでの本州四国連絡橋での対数減衰率 0.03 が, ねじれ振動の照査に関しては 0.02 に引き下げられた。これには, それまでに建設された本州四国連絡橋などで実施された実橋振動実験の結果が有力な根拠となっているが, このことは本州四国連絡橋プロジェクトの特筆すべき成果の 1 つである。

現在, 日本においては複数の海峡横断橋や海外では Messina 海峡横断橋など明石海峡大橋を超える規模の長大吊橋計画が進行している。これらの長大吊橋の建設に際しては, 耐風安定性の確保が最大の関心事の 1 つであり, 動的照査における構造減衰設定には議論のあるところである。また, 明石海峡大橋においても, たわみで 0.03, ねじれで 0.02 の構造対数減衰率が設定されているが, 明石海峡大橋では完成時に実橋振動実験が実施されておらず, その構造

減衰の実現値を確認することは明石海峡大橋にとってのみならず, 今後の超長大橋に向けても興味あることである。

明石海峡大橋では, 1998 年の完成以来, 強風などによる橋体応答が観測, 記録されている。これらの観測データを用いて, 著者らはこれまでに強風特性, 橋体の対風応答特性, 振動特性を解析してきた^{2) - 5)}。構造減衰についても, 常時微動データから RD 法を用いて 6 つの低次モードの減衰を同定したが, データ長や近接モードの影響などで同定結果は大きなばらつきを示した⁵⁾。そこで, 本研究では, 多点多自由度同定手法の 1 つである ERA (Eigensystem Realization Algorithm) 法を用いて, ばらつきの少ない同定結果を得るべく, 明石海峡大橋の減衰特性に関して解析を行ったものである。また, 今回は常時微動の極低風速から台風時の強風時までのデータを用い, 空力減衰の影響についても解析を行った。

2. 動態観測データ

本研究では, 明石海峡大橋に設置された動態観測機器 (図-1 参照) のうち, 中央径間 1/2 点 (中央点, 2P より 967m), 3/4 点 (2P より 1,533m) での補剛桁速度 (鉛直成分) の記録を用いた。ねじれ成分に関しては, 補剛桁の両側弦材に速度計が設置されていることから, 両者の差を取

ることで抽出した。また、風の条件として、中央径間 1/2 点近傍での風速データを参照した。

図-2には、例として中央径間 1/2 点で計測された補剛桁振動データ（速度）と風速，風向データの一例を示す。なお，見やすいように鉛直たわみ速度は 200 秒間，ねじれ成分速度は 100 秒間，風速・風向は 600 秒間を示した。風速，風向，速度データは 20Hz でサンプリングされている。表-1 に本研究で解析した観測データを示す。本研究では，構造減衰に加えて，空力減衰の作用についても検討を行う

こととしたため，常時微動データと強風時のデータからなるべく多くの風速レベルをカバーするようデータを選んだ。ここで，常時微動データについては，動態観測システムのトリガー設定（10 分間平均風速が 15m/s 以上になるとデータを自動記録）を解除し計測を行ったものである。なお，本研究では，1 つの解析ケースを 10 分間としているが，データの選定に際しては 10 分間のうちに風速のトレンドや風向の大きな変化がないことを確認している（図-2（4）参照）。

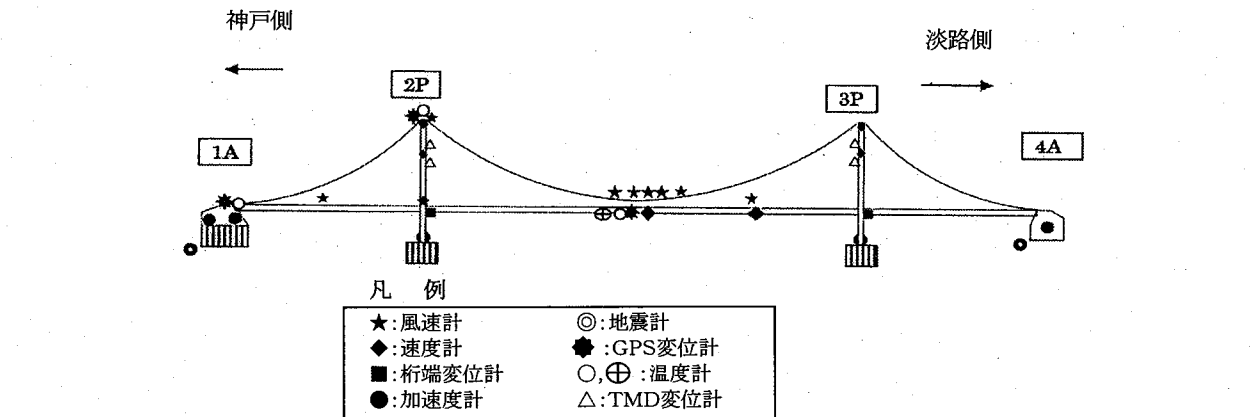
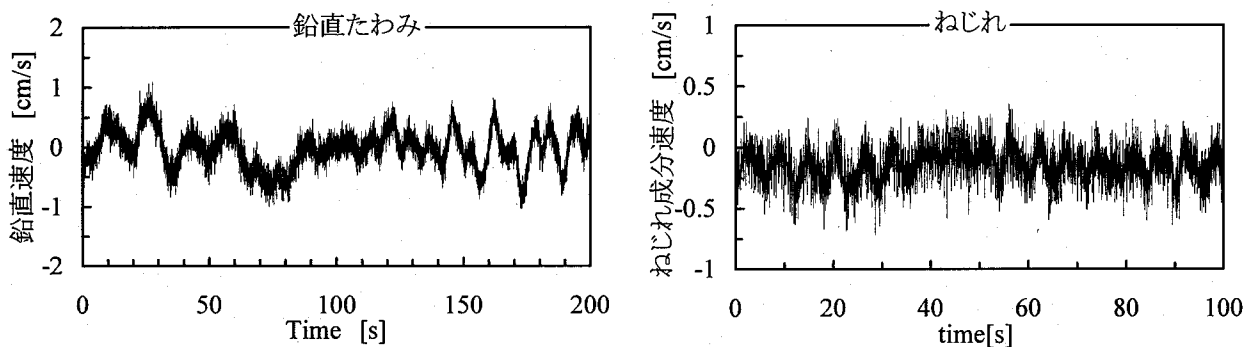
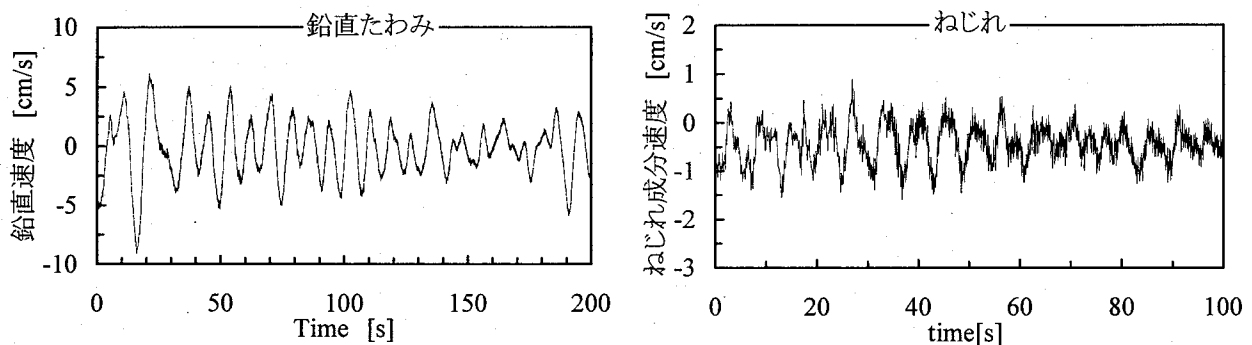


図-1 動態観測機器の配置

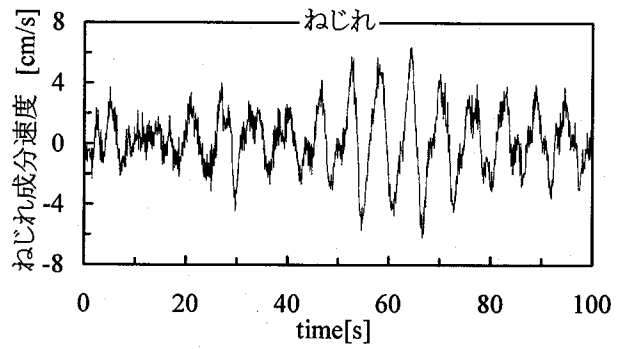
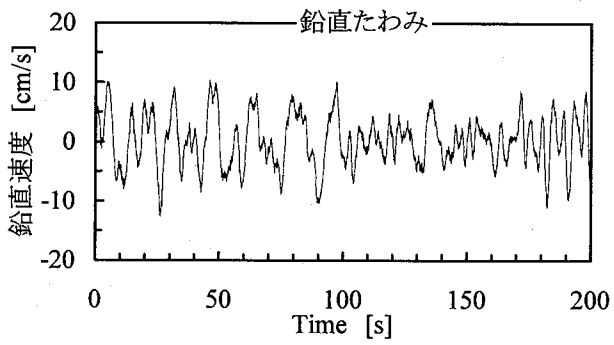


(1) 中央径間 1/2 点桁速度：平均風速 0.7 m/s

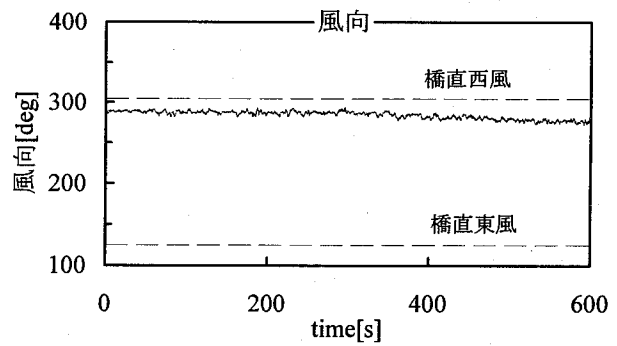
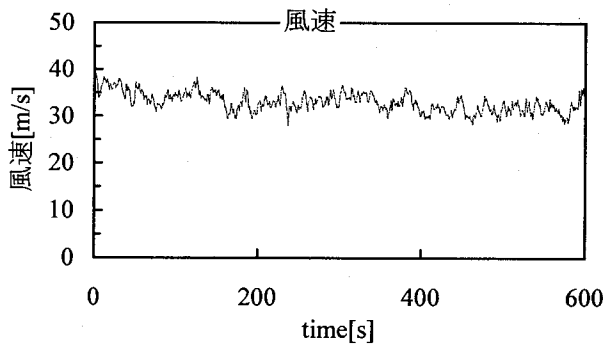


(2) 中央径間 1/2 点桁速度：平均風速 15.0 m/s

図-2 計測波形の一例



(3) 中央径間 1/2 点析速度：平均風速 33.1 m/s



(4) 中央径間 1/2 点近傍の風速，風向：平均風速 33.1m/s

図-2 (続き) 計測波形の一例

表-1 解析ケース

No.	観測年月日	観測時間	平均風速 (m/s)	備 考
1	2002/02/01	10:40-10:50	0.7	トリガー解除
2	2002/02/01	11:00-11:10	2.3	トリガー解除
3	2002/02/01	22:20-22:30	3.1	トリガー解除
4	2002/02/01	11:50-12:00	3.9	トリガー解除
5	2002/02/01	13:10-13:20	5.1	トリガー解除
6	1999/02/03	6:30-6:40	14.4	季節風
7	1999/02/03	7:50-8:00	15.0	季節風
8	1999/01/29	1:50-2:00	16.6	季節風
9	1999/02/03	6:50-7:00	18.1	季節風
10	1999/01/07	5:10-5:20	19.6	季節風
11	1999/12/07	0:00-0:10	20.1	季節風
12	1998/09/22	13:53-14:03	26.2	台風7号
13	1998/09/22	14:33-14:43	28.4	台風7号
14	1998/09/22	14:03-14:13	32.0	台風7号
15	1998/09/22	14:13-14:23	33.1	台風7号

3. ERA 法による減衰評価

著者らは、既に RD (Random Decrement) 法を用いて明石海峡大橋の構造減衰の同定を行っているが、結果としては、同定された減衰値に比較的大きなばらつきが認められた⁵⁾。RD 法においては、長時間の不規則振動データを短時間データに区切り、それを重ね合わせることで不規則振動成分を打ち消し、自由振動成分を抽出する。したがって、一般的には長時間のデータを用いるほど、安定した結果が得られる反面、実橋観測においては長時間にわたって風特性の定常性が保たれるか否かの問題が生じる。既往の研究では、このことも考慮し、観測時間中に極力、平均風速、風向変化のないデータ（結果的に 100 分間のデータ）を抽出して解析したが、結果は先に述べたとおりであった。

明石海峡大橋では、補剛桁の応答として、中央径間 1/2 点と 3/4 点の 2 点のデータを観測しており、今回はより安定した減衰同定値を得ることを目的として、多点多自由度同定法の 1 つである ERA 法^{6), 7)}を用いることとした。ERA 法においては、まず橋桁の振動を状態方程式で表現し、観測データから構成されるハンケル行列を特異値分解し、系の最小次数を決定する。次に、その最小次数で系を再構築し、状態行列を固有値解析することで固有振動数、モード減衰を同定するものである。以下に、ERA 法の理論について簡単に説明する。

自由度 n の線形・時不変の離散時間系での動システムは、状態方程式と観測方程式を用いて次のように表わせる。

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (1)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (2)$$

ここで、 x は状態ベクトル ($n \times 1$)、 u は入力ベクトル ($m \times 1$)、 y は出力ベクトル ($p \times 1$) であり、行列 A 、 B 、 C はそれぞれ ($n \times n$)、($n \times m$)、($p \times n$) となる。また、この系のインパルス応答は、次のように表される。

$$Y(k) = CA^{k-1}B \quad (3)$$

次に、行列 $Y(k)$ を ($r \times s$) だけ並べた次のような一般化ハンケル行列を考える。

$$H_{rs}(k-1) = \begin{bmatrix} Y(k) & Y(k+l_1) & \Lambda & Y(k+l_{s-1}) \\ Y(j_1+k) & Y(j_1+k+l_1) & \Lambda & Y(j_1+k+l_{s-1}) \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ Y(j_{r-1}+k) & Y(j_{r-1}+k+l_1) & \Lambda & Y(j_{r-1}+k+l_{s-1}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 j_i ($i=1, \Lambda, r-1$) と l_i ($i=1, \Lambda, s-1$) は任意の整数である。

次に、式 (3) を最小の次元で満たす行列 A 、 B 、 C を求

めるために、行列 $H_{rs}(0)$ の特異値分解を行う。

$$H_{rs}(0) = V_r W_s = PDQ^T \quad (5)$$

ここで、行列 P ($rp \times n$) と行列 Q ($ms \times n$) はいずれもその列が互いに直交し、 D はその対角要素に特異値 d_1, d_2, Λ, d_n (> 0) を持つ対角行列である。系の次数 N は、測定ノイズやモデル化誤差、剰余成分の影響などを考慮して決める必要がある。このとき、システムの最小実現は次のように与えられる。

$$\bar{A} = D^{-1/2} P^T H_{rs}(1) Q D^{-1/2} \quad (6)$$

$$\bar{B} = D^{1/2} Q^T E_m \quad (7)$$

$$\bar{C} = E_p^T P D^{1/2} \quad (8)$$

ここで、 E_p^T 、 E_m^T は、 0_p 、 I_p をそれぞれ p 次の零行列、単位行列とすると、それぞれ次のように表される。

$$E_p^T = \begin{bmatrix} I_p & 0_p & \Lambda & 0_p \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$E_m^T = \begin{bmatrix} I_m & 0_m & \Lambda & 0_m \end{bmatrix} \quad (10)$$

次に、行列 $\bar{A}$ の固有値解析を行うことにより、系の固有値 λ 、固有ベクトル Ψ を得ることができる。このとき、モード円振動数 ω と減衰比 ξ は次のように求められる。

$$\omega = \frac{1}{\Delta t} \sqrt{\text{Re}(\ln \lambda)^2 + \text{Im}(\ln \lambda)^2} \quad (11)$$

$$\xi = \frac{-\text{Re}(\ln \lambda)}{\sqrt{\text{Re}(\ln \lambda)^2 + \text{Im}(\ln \lambda)^2}} \quad (12)$$

ここで、 Δt はデータのサンプリング間隔である。

本研究では、ハンケル行列に用いる自由振動波形として、中央径間補剛桁の 1/2 点と 3/4 点での速度データの自己相関関数および相互相関関数の 3 成分とした。すなわち、 $Y(k)$ は (3×1) のサイズとなる。また、1 ケース 10 分間のデータ（総数 12,000 個）を用いているが、予備検討と計算機能力から、ハンケル行列のサイズは ($r=8000 \times s=800$) とした。

ところで、ERA 法は、先に述べたように多自由度同定法であり、1 回の解析で複数モードの情報を得ることが可能である。しかしながら、解析を進めていくうちに、特に減衰に関しては必ずしも安定した結果が得られず、同一モードに対する減衰同定値のばらつきが必ずしも小さくないこと、次数の違いによっても同定値が影響を受けることなどが判明した。そこで、本研究では、まず着目するモードのみをバンドパスフィルター (Butterworth, 通過帯域幅

0.01Hz, 次数3) によって抽出し, 次にそのフィルター処理された波形を用いて自己相関関数, 相互相関関数を求め, ある特定モードの自由振動波形を ERA 法によって解析した。さらに, 次数の決定に際しても, 次数を変化させて着目モードのモード振幅が最大となる次数(ケースにより異なるが, 概ね 20 程度)を選定し, その次数を使って固有振動数, 減衰を同定した。このことは, 多自由度同定法の ERA 法の本来の主旨に反するものであるが, 本研究では対象とするモードが限られており, また, ばらつきの少ない同定結果を得る目的としては, 有効な方法と言える。

また, 事前の予備検討で ERA 法に適用する自由振動波形として, 相関関数ではなく, RD 法による減衰波形を用いた解析も行ったが, 同定された減衰のばらつきは RD 法単独による結果⁵⁾とそれほど変わらなかった。

4. 明石海峡大橋の固有振動数, 減衰特性

まず, 図-3 に ERA 法による固有振動数の同定結果を示す。鉛直対称1次(VS1), 同逆対称1次(VA1), 同対称2次(VS2), ねじれ対称1次(TS1), 同逆対称1次(TA1)の5つのモードについて示す。また, 図中には既往の研究成果⁵⁾である RD 法による固有振動数を実線で示している。ただし, RD 法は平均風速が 5m/s 以下のデータで算出したものであるが, 比較のため図中には全風速領域を直線で示している。固有振動数は RD 法の場合と同様に非常にばらつきの小さな同定結果が得られている。また, ねじれモードは風速の増大とともに, 非定常空気力の作用と思われるわずかな振動数の低下が見られる。例えば, ねじれ対称1次モードについて見ると, 平均風速 26 - 33 m/s のグループの同定振動数は, 同 0 - 5 m/s のグループに比べると約 1.5% 低下しているが, 明石海峡大橋大型風洞試験で計測された対応する低減率は約 3% である⁸⁾。また, 表-2 には既往の RD 法による同定結果, 別途行われた固有値解析

結果との比較を示す。本研究(ERA 法)の結果は, 固有振動解析結果ともよく一致しているが, ねじれ対称1次, 同逆対称1次モードについては, 10%程度高くなっている。RD 法による結果もこの2モードに関しては, 同様に固有振動解析結果より 10%程度高くなっている。この原因については, 固有振動解析におけるトラス補剛桁のねじれ剛性評価などに課題があると推察されるが, 詳細は今後の検討が必要である。

次に, 減衰の同定結果を図-4 に示す。モード毎に平均風速との関係で示した。また, 図中には大型風洞試験で計測されたモード減衰(VS1, VS2, TS1)⁸⁾を合わせて示した(細実線)。さらに, 明石海峡大橋耐風設計要領で規定する対数構造減衰率, 鉛直 0.03, ねじれ 0.02 を太実線で示した。既往の RD 法による結果では減衰の同定値は大きなばらつきを示したが, 本研究での同定値はばらつきが小さく安定した結果を得ることが出来ている。表-3 には本研究で同定されたモード減衰(5 ケース)と既往の研究の RD 法による結果(18 ケース)の最大値, 平均値, 最小値を比較した。既往の RD 法では常時微動データを用いているため, 表-3 には平均風速が 5m/s 以下での結果を示した。これからも本研究での同定結果は非常にばらつきが小さいことが判る。これは, 先に述べたモード毎にフィルタリング処理を施した信号をもとに ERA 法を適用し, さらに次数の決定に際しても着目モードの振幅が最大となるようにしたことが効果的であったと考えられる。

ところで, 本研究での同定された減衰は, 図-4 に示すように全体的に風速の増大に対しても変化が少ないことが特徴的である。鉛直モードの場合, 準定常理論によれば空力減衰の付加によって風速の増大に伴って減衰が増大することが示されるが, 本同定結果では大型風洞試験の結果とも異なり, 風速の増大に伴って空力減衰の付加がほとんど見られない。ただし, 大型風洞試験とは減衰を算出した振幅の違いもあり, 同一座標での比較が出来ないことも

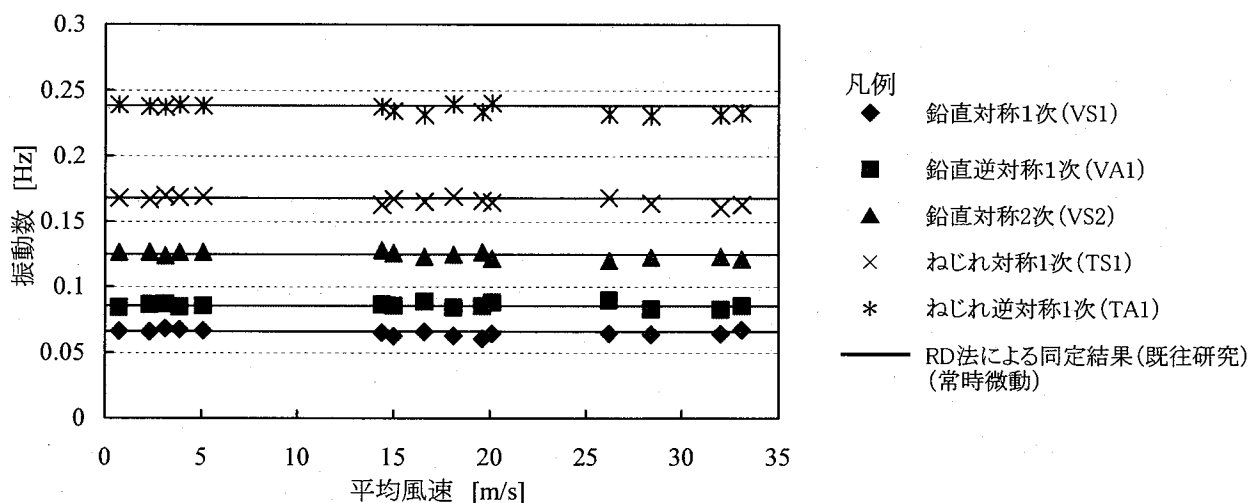


図-3 固有振動数の同定結果

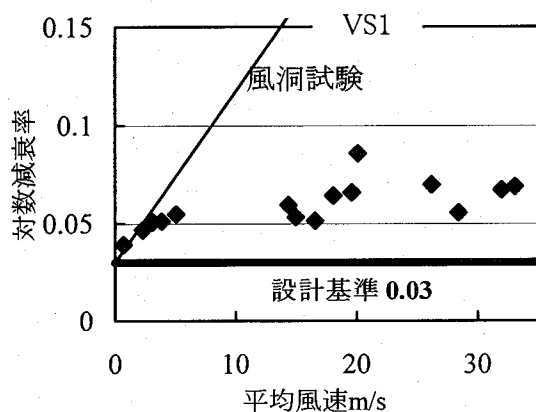
あり、さらなる検討が必要である。また、耐風設計要領の規定値との比較においては、概ね規定値を上回る結果となっている。同定値に若干のばらつきはあるものの、明石海峡大橋の場合には設計で想定した構造減衰がほぼ確保されていると判断される。ただし、規定値と比べるとほぼ同じか、十分に上回っているとは言えないため、今後の超長大吊橋の耐風安定性を議論する際には、その構造減衰の設定に関して注意が必要と思われる。

さらに、図-5にはERA法で得られたモード振幅をモ

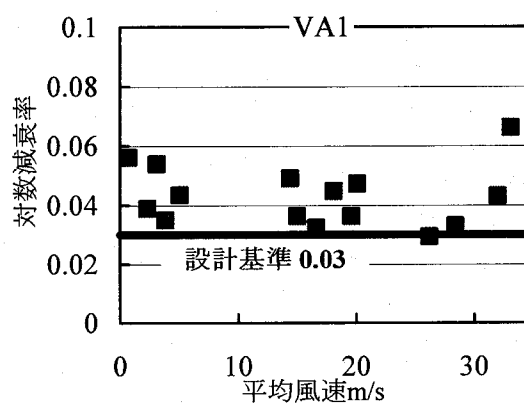
ード毎に示す。図中の線は固有値解析で得られたモード振幅値である。なお、いずれも中央径間に相当する部分のみを示している。また、同定値のモード振幅は、対称モードの場合は1/2点での振幅を、逆対称モードの場合は3/4点での振幅を解析値に合わせて示した。鉛直対称2次モードを除いて、同定値と解析値はよい一致を見ることが出来る。同定値が2ヶ所のみであるため、判断は難しいが、鉛直対称2次モードの差については、今後の検討が必要である。

表-2 固有振動数の同定結果 (Hz) と RD 法, 解析値との比較

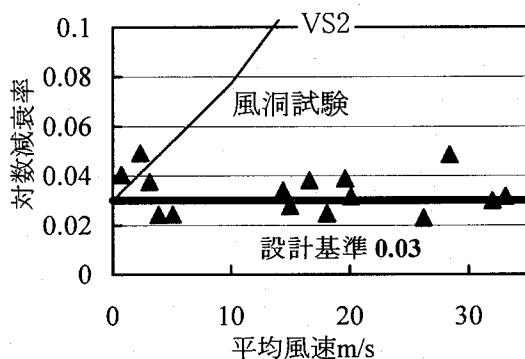
	VS1	VA1	VS2	TS1	TA1
ERA (Hz)					
[1] 0 - 5 m/s	0.067	0.086	0.126	0.168	0.238
[2] 14 - 20 m/s	0.064	0.086	0.125	0.166	0.236
[3] 26 - 33 m/s	0.065	0.085	0.122	0.164	0.232
RD (Hz)	0.066	0.086	0.125	0.168	0.238
固有値解析 (Hz)	0.064	0.084	0.121	0.150	0.208
ERA[1] / RD	1.011	1.000	1.008	1.002	1.001
ERA[1] / 解析	1.045	1.019	1.042	1.123	1.145



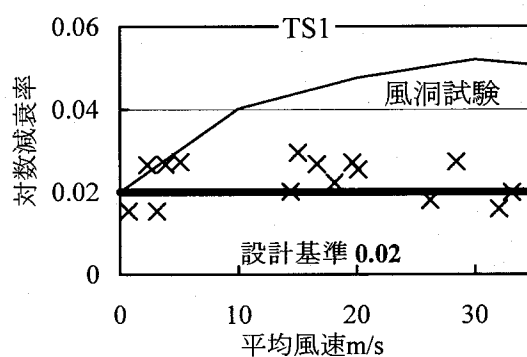
(1) 鉛直対称1次モード



(2) 鉛直逆対称1次モード

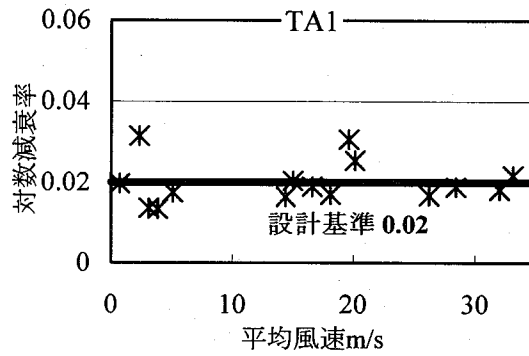


(3) 鉛直対称2次モード



(4) ねじれ対称1次モード

図-4 モード減衰の同定結果と風洞試験計測値, 基準値との比較

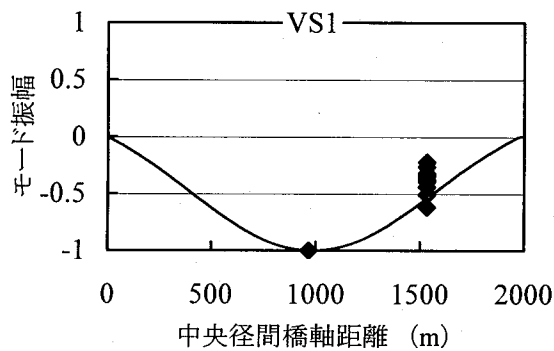


(5) ねじれ逆対称1次モード

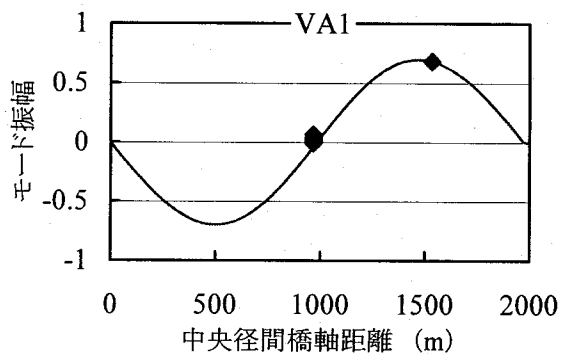
図-4 (続き) モード減衰の同定結果と風洞試験計測値, 基準値との比較

表-3 ERA 法と RD 法によるモード減衰 (対数減衰率) 同定の比較

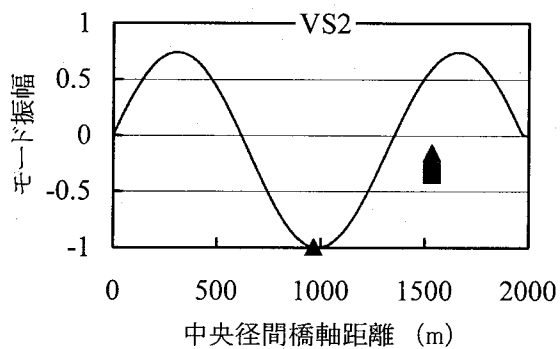
		VS1	VA1	VS2	TS1	TA1
ERA	max	0.055	0.056	0.049	0.027	0.031
	[0-5 m/s]					
	mean	0.049	0.045	0.035	0.022	0.019
	min	0.039	0.035	0.024	0.015	0.013
RD	max	0.148	0.077	0.097	0.042	0.065
	mean	0.071	0.046	0.047	0.024	0.035
	min	0.007	0.025	0.014	0.008	0.011
ERA / RD [mean]		0.690	0.978	0.745	0.917	0.543



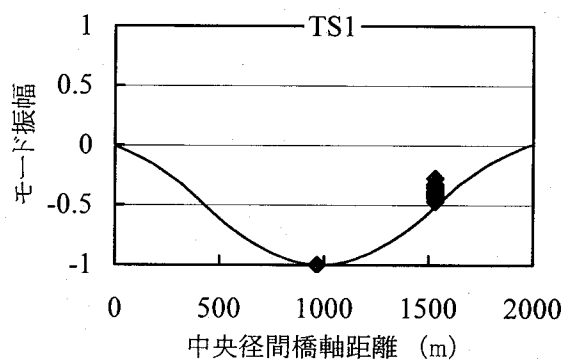
(1) 鉛直対称1次モード



(2) 鉛直逆対称1次モード

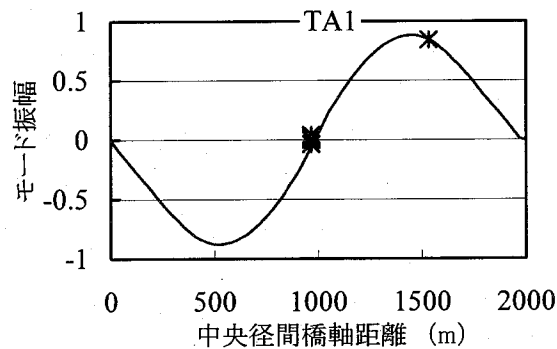


(3) 鉛直対称2次モード



(4) ねじれ対称1次モード

図-5 モード振幅の同定結果と解析値との比較



(5)ねじれ逆対称1次モード

図-5 (続き) モード振幅の同定結果と解析値との比較

5. まとめ

明石海峡大橋の橋体応答データから ERA 法を用いて、5つの低次モードの減衰特性の同定を行った。以下に本研究で得られたおもな結果を示す。

- (1) 原波形にフィルタリング処理を施し、単一モードの信号とした後に ERA 法を適用し、さらにモード振幅を最大とするよう次数の決定を行った結果、既往の RD 法による同定結果と比較して、極めて安定した減衰の同定結果を得ることができた。
- (2) 固有振動数に関しては、既往の RD 法による結果とほぼ同じ結果を得た。また、固有振動解析結果ともほぼ一致したが、ねじれモードに関しては 10% 程度高めとなった。
- (3) 減衰に関しては、極めてばらつきの小さな同定結果を得ることができたが、たわみモードにおいても風速の増大による空力減衰の付加がほとんどない結果となった。
- (4) 同定された減衰は、明石海峡大橋耐風設計要領で規定する値を概ね上回る結果を得た。ただし、規定値と比べるとほぼ同じか、十分に上回っているとは言えないため、今後の超長大吊橋の耐風安定性を議論する際には、その構造減衰の設定に関して注意が必要と思われる。

謝辞

本研究での ERA 法による解析は、神奈川県庁、中川洋君（研究当時、横浜国立大学大学院生）にご協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団：明石海峡大橋耐風設計要領，1990。
- 2) 勝地弘，多田和夫，北川信：動態観測結果に基づく長大橋の耐風設計に関する考察，土木学会論文集，No.543/I-36，pp.163-173，1996。
- 3) Toriumi, R., Katsuchi, H. and Furuya, N.: A Study on Spatial Correlation of Natural Wind, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 87, pp.203-216, 2000。
- 4) Miyata, T., Yamada, H., Katsuchi, H. and Kitagawa, M.: Full-scale Measurement of Akashi-Kaikyo Bridge during Typhoon, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90, pp.1517-1527, 2002。
- 5) 勝地弘，宮田利雄，山田均，秦健作，楠原栄樹：常時微動データによる明石海峡大橋の固有振動特性，構造工学論文集，Vol.50A，土木学会，pp.637-646，2004。
- 6) Juan, J.N., Pappa, R.S.: An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction, *J. of Guidance, Control and Dynamics*, Vol.8, No.5, pp.620-627, 1985。
- 7) 長山智則，阿部雅人，藤野陽三，池田憲二：常時微動計測に基づく非比例減衰系の非反復構造逆解析と長大吊橋の動特性の理解，土木学会論文集 No.745/I-65，pp.155-169，2003。
- 8) 本州四国連絡橋公団，海洋架橋調査会：平成3年度本州四国連絡橋の海洋架橋技術に関する調査研究，耐風委員会報告書，1992。

(2005年9月10日受付)