特集

長大吊橋の常時微動モニタリングからの動特性・空力特性の解明 Detection of Unsteady Aerodynamic Forces in a Suspension Bridge from Ambient Vibration Monitoring

藤野 陽三^{*1} 阿部雅人^{*2} 長山智則^{*3} 池田憲二^{*4}
Yozo FUJINO, Masato ABE, Tomonori NAGAYAMA, Kenji IKEDA

1. はじめに

風が構造物、とくに橋梁に及ぼす影響に関する研究の歴史は古い、しかし、何といても、風による振動で落橋したタコマ橋の事故(1940年)が契機となって研究が本格化した面が強い。以来、長大橋の活発な建設にともなう、模型を使った風洞実験による精力的な研究開発調査が行われてきた。

風工学でのもっとも強力な武器である風洞実験のよいところは、ある種の理想化された状態で行われることであり、パラメータをいろいろ変えることが容易なことである。風洞実験により現象への理解が間違いないく格段に深まった。建物やその他の構造物についても基本的には同じであろう。最近では、長大橋の分野において風洞実験で得られた静的・動的空気力と構造解析モデルとを組み合わせ、橋梁の3次元風応答の予測手法もかなり確立し、実際の設計に用いられるような段階に達している。

計算機と数値解析技術の進歩の中で、数値流体解析(CFD)の進歩も著しい。風洞実験では計測できない物理量までもCFDでは計算が可能であり、また可視化が容易というメリットも大きい。また、実験そのものが難しい問題にも、適用することができ、耐風設計や風工学の新しい展開が期待できる。しかし、CFDも常に風洞実験結果との対比において検証されてきたことを考

えると、日々行っている風洞実験やCFDをベースにした耐風設計が定量的な意味でどこまでリアリティに近いかという問いが出てくるのも極めて自然であろう。

言うまでもなく、我々が相手にしているのは、模型よりも何十倍も何百倍も大きい実際の構造物であり、複雑な地形の中で吹く自然風のなかでの振る舞いである。実際の風の中での構造物の挙動を調べ、風洞実験結果と対比し、検証することは、この過程においては新しい問題が発掘される可能性も大きいという意味を含めて、風工学の大きなテーマのひとつと考えてよいであろう。

もちろん、これまでに風により構造物が顕著な振動をした場合を中心に、実際の構造物で計測が行われてきた例もある。最近の例では、東京湾アクアラインの橋梁部が渦励振により大きく振動したが、振幅や振動発生風速範囲に関して風洞実験結果と整合的であることが確認された¹⁾。しかし、これまでの振動計測から得られた知見は概して定性的な範囲に留まっていた面が強かったと思われる。今後はより定量的な検証が望まれている。

地上にある構造物は地盤の揺れや風などで加振され、振幅は常にゆれている。長大橋のようなフレキシブルな構造の常時微動の外乱は風が主であり、常時微動の測定から風力、風が構造物に及ぼす影響(自励空気力)を同定することは原理的には可能である。しかし、設計上問題となるような強風がめった吹くわけではなく、

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻 Ph.D. 教授
Professor, University of Tokyo

^{*2} 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻 Ph.D. 助教授
Associate Professor, University of Tokyo

^{*3} イリノイ大学 (USA) 大学院 土木環境工学科 博士課程 工修
Graduate Student, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA

^{*4} 独立行政法人北海道開発土木研究所 構造部構造室長 工学士
Manager, Hokkaido Research Institute of Public Works

日常風の風では空気力も微小であり、ノイズレベルに隠れ、その検出が困難であることは想像に難くない。また、多くの場合には、風を受ける橋梁などの構造物の動きを測定するわけで、そこから空気力の検出となると、逆解析において構造物というフィルターの特性の同定も同時に行う必要がある。

設計で用いる構造物のモデルと実際に出来上がった構造物との間にはかなりの乖離があると考えるのが自然である。かりにFEMなどを駆使した詳細なモデルを構築したところで、実際の構造物を100%正確にモデル化することは不可能に近い。測定データの中から、構造モデルと空気力も併せて逆解析するプロセスが必要となるわけで、極めて高度な同定・逆解析理論の構築が望まれている。

最近では種々のセンサーが開発され、その精度の向上、コストの低下も著しい。計測機器の進歩で比較的簡単に非常に多くのセンサーを、それもワイヤレスで配置することが可能な時代が訪れるようとしている。膨大な量のデータの蓄積や処理も情報技術の進展とともに、一昔前では想像もつかなかったことが可能になりつつある。モニタリングと呼ばれるこの分野の今後の発展は大いに期待できる状況にあり、実際の構造物の、実際の外乱のもとでの挙動から、外力、構造特性を把握するモニタリングは同定・逆解析理論の進歩とともに、リアリティのある構造工学、風工学の構築という新しいテーマにつながると思っている²⁾。

ここでは、上述したような思いの中で筆者らが最近実施した、長大吊橋の常時微動計測と動特性の同定、橋桁に作用する空気力の逆解析による抽出について紹介したい^{3),4)}。

2. 橋梁構造物の動特性の同定に関する既往の研究と課題

これまでも橋梁振動計測とその性能評価への応用については数多くの実施例があり、また実計測データに基づいた研究もなされてきた⁵⁾⁶⁾。田中ら⁷⁾、山口ら^{8),9)}の研究では、強制振動の実験結果から動的特性の振幅依存性を具体的に伸縮装置や支承の摩擦として説明しており、吉田ら¹⁰⁾、貝戸ら¹¹⁾、Chaudharyら¹²⁾は、さらにそれを発展させて免震橋の定量的性能評価に結び付けている。しかしながら、実構造物で計測された動的特性に基づいて、構造物の特性や荷重特性を定量的に同定・逆解析した例は希少である。その理由としては、①信頼性の高い逆解析には高次モードを高精度

で同定する必要があるが、それには高精度の計測器を高密度で配置する必要がある、②実構造物は、局所的な摩擦や損傷の影響で複素モード形を有する非比例減衰系となっている場合が多いが、既存の同定手法は実数のモード形を有する比例減衰系（例えば、Rayleigh減衰など）を仮定している¹³⁾、③既存手法は近接モードの影響を取り込めない場合が多い、④モデル化の誤差のため、逆解析の前提となる構造物の初期状態を表す基準モデル自体に信頼性がない場合が多い、⑤土木構造物では供用中の加振実験が難しいため、不確定な環境・荷重条件の影響を受ける常時微動計測などのノイズの高いデータを扱わざるを得ない、などの技術的問題を挙げることが出来る。そのうち、①については、近年の計測・情報処理技術の進展によりハードウェア的解決法が開発されつつある^{14),15)}。ここで紹介するのは、②～⑤の問題に対する系統的な解決法を構築・提案することを目的として行ったものである。

なお、長大吊橋は多くの近接したモードを有しており、また、支承部分の非線形性や空力減衰のため非比例減衰となる代表的構造物である。そのため、Golden Gate橋の常時微動解析を行った研究^{16),17)}では、常時微動のスペクトルからのモードの特定を行い、FEM解析によるモード特性と比較しているが、近接モードの分離に難があり、また、高次モードの同定には成功していない。

3. 解析の流れ

ここでは、常時微動計測結果から、まず構造物の動特性、特に高次までのモード特性を同定し、その結果から、構造物（吊橋の桁）に作用する空気力（自励空気力）を逆解析により求めるプロセスをとる。

常時微動波形から自由振動に相当する波形を生成する手法としては、Random Decrement (RD)法¹⁸⁾と相関関数を利用する方法とが挙げられる。これら2つの手法の導出方法は異なるがしばしば等価である。Vandiver¹⁹⁾は線形系にゼロ平均の定常ランダム外力が作用する場合、RD法により得られる応答 Random decrement signature が自己相関関数の定数倍であることを証明した。さらに外力が白色雑音である場合には自己相関関数が自由振動応答に一致するため、相関関数とRD法のいずれによっても自由応答を推定することができる。自己相関関数は高速フーリエ変換を利用することで、短時間で計算できるという利点がある。

自由振動応答からモード特性を同定する手法としては、Ibrahim Time Domain (ITD)法²⁰⁾とEigen-system

Realization Algorithm (ERA)²⁾とが挙げられる。ITD法を一般化したものがERA法と言える。ここでは、RD法とITD法を組み合わせた方法(ITD法と称する)と自己相関関数とERA法を組み合わせた方法(ERA法)の2つの方法を適用する。ITD法あるいはERA法によるモード同定法は、直接モード特性を同定するため、自由度や構造モデルが不明な場合にも容易に適用可能である利点を有する実用的な手法である。また、振動数応答曲線を利用する振動数領域での同定方法では振動数が近接するモードの同定が一般に難しいが、これらの手法は、時間領域の波形を直接用いるため、近接モードが存在する場合であってもそのままの形で

適用可能なのが特徴である。

高次までのモード特性をこれらの方法により同定したあと、得られた動特性に基づいて構造特性を逆解析する手法が必要となる。この部分については、特に④の問題を念頭に、構造モデルに依存せずに、かつ非比例減衰系を扱うことの出来る手法を新たに考案した³⁾。さらに、非比例減衰系に対して反復計算を要しない逆解析法を開発し⁴⁾、その方法の適用結果も示す。

なお、本稿では、混乱を避けるため、計測データから振動モード特性を求める操作を同定、振動モード特性から剛性や減衰などの物理的パラメータを求める操作を逆解析と呼んでいる。

Fig. 1 白鳥大橋全景 (室蘭市)

Fig. 2 白鳥大橋一般図 (3径間2ヒンジ補剛吊橋)

Fig. 3 測点配置

4. 白鳥大橋における常時微動モニタリング

白鳥大橋は、北海道室蘭市の湾口にかかる主径間720[m]の鋼箱桁吊橋 (Fig. 1) であり、1998年に供用を開始している²²⁾。Fig. 2に一般図を示す。供用に先立ち、加振器を用いた強制振動実験と、10日間にわたる常時微動計測が、桁の鉛直たわみ、ねじれ振動を主な対象として1998年6月に実施された。

これまで、本州四国連絡橋など、わが国の大型橋梁では、供用に先立ち加振装置による振動実験が数多く行われてきた。しかし、系統的な常時微動計測が行われた例は筆者らの知る限りない。これまでの振動実験の目的が、固有振動数と併せて、振幅の大きなところでの減衰を測定する目的であったためである。そのため、加速度計 (もしくは速度計) の数は普通、数個多くて10個であった。

今回の測定においては、できるだけ密度の高いデータをとるという視点に立ち、①多点計測 (計測点数総計40点 鉛直方向計測19点)、②計測周波数が高い (100Hz)、③長時間連続計測 (100時間以上) にある。また、スパン中央点での風向・風速も同時に計測されている。計測の詳細は、文献²³⁾を参照されたい。

なお、本橋は湾口にあり、その地形と橋軸関係から橋軸直角方向に吹く風が多く、また風が頻繁に吹く場所であるため、10日間という計測期間ではあったが、風速15m/sに達する風のもとでの応答データを得るこ

とができた。

計測された鉛直加速度振幅のRMS値と、橋軸直角方向の10分間平均風速には、Fig. 4に示すような明瞭な対応が見られた。このことは、吊橋や斜張橋のようなフレキシブルで減衰の低い構造物の常時微動は、橋桁に作用する風によるものが支配的と考えてよいということを示している。

Fig. 4 径間中央での15分間平均風速と桁鉛直加速度応答

5. 常時微動データからの振動モード特性の同定

風が主たる要因である常時微動レベルには種々の風の影響を受け、自励空気力の影響も現れているはずである。これを分析するためには、動特性、すなわち振動モード特性が風速によりどのような変化するかをまず調べる必要がある。

常時微動データからの自由減衰応答の作成は、前述のように、はじめに RD 法を用いた。RD 法の概念は、平均が 0 となる理想的なランダム外力を想定して、応答を時間軸上で多数重ね合わせ平均することで、ランダム応答成分を消去するというものである。したがって、ノイズレベルが高いデータに対しても、計測時間ならびに重ね合わせ数を十分に大きくすることで適用できる可能性を有する手法である。建設系の分野においては、田村ら²⁴⁾によって適用が試みられてきた。ただし、田村らの方法は、建築物など近接モードを持たない構造物を対象に、バンドパスフィルターと併用して適用するものであるため、ここでは、多自由度形を前提とした手法を用いた。詳細は文献 3 に譲る。

吊橋の常時微動には、当然、風や振幅の影響が考えられる。そこで、同定・逆解析を行うにあたり、計測結果を振幅毎のデータに区分した。具体的には、Table 1 に示すように加速度 RMS 値を基に、応答レベルを 10 のランクに区分した。

各ランク区分毎に、RD 法を用いて“自由減衰応答”を作り、時間領域における ITD 法によりモード特性を同定した。RD 法を適用するにあたっては、応答 RMS 値の 0.8 倍値を閾値 a_0 として設定し、各ランク区分毎に 5000 個のデータ重ね合わせを行った²⁵⁾。得られた“

自由振動波形”の例を Fig. 5 に示す。

モード毎の自由減衰応答の線形和で表現し、固有値問題を解くことによってモード特性を同定する、具体的には固有値問題に帰着させる Ibrahim Time Domain 法 (ITD 法)²⁰⁾に基づいてモード特性を同定した。その結果、鉛直たわみについて 19 次モードまでの同定が実現された。表-2 には、ランク 5 の振幅レベルについて同定した結果を示してある。表-2 には、併せて強制加振実験で観測された固有モード振動数との比較を示す。良好な対応が見られる。また、得られたモード形の例を Fig. 6 に示す。

また、Fig. 7 に、1 次モードと 2 次モードの固有振動数および減衰比の振幅依存性（風速依存性）を示してある。同定結果のばらつきを評価するために、同定にあたっては Bootstrap 法²⁶⁾を適用し、図中に、平均値を○で、標準偏差分のばらつき 1σ 値を×で示した。振動数、減衰とも小さいばらつきで同定されていることがわかる。

Fig. 7 において、固有振動数と減衰の振幅依存性が認められる。減衰はかなり明確に、振幅とともに増加している。固有振動数については、振幅依存性はわずかであるが、振幅（すなわち風速）とともに減少している。

Table. 2 同定された鉛直モード特性の一例 風速 8.0(m/s)の場合

次数	振動数 (Hz)			減衰比 ξ	
	ERA 法	ITD 法	強制加振実験結果	ERA 法	ITD 法
1	0.128	0.130	0.129	0.0175	0.0216
2	0.151	0.152	0.149	0.0093	0.0135
3	0.220	0.221	0.218	0.0068	0.0068
4	0.323	0.326	0.317	0.0054	0.0147
5	0.441	0.442	0.435	0.0048	0.0158
6	0.570	0.578	0.568	0.0040	0.0319
7	0.723	0.734	0.719	0.0039	0.0481
8	0.889	0.914	0.906	0.0036	0.0662
9	1.08	1.10		0.0038	0.1141
10	1.29	1.34		0.0066	0.0893
11	1.52	1.55		0.0055	0.0711
12	1.76	1.80		0.0008	0.0722
13	2.02	2.05		0.0059	0.0602
14	2.30	2.31		0.0048	0.0593
15	2.58	2.57		0.0040	0.0357
16	2.88	2.83		0.0074	0.0812
17	3.20	3.16		0.0030	0.0517
18	3.51	3.50		0.0045	0.0881
19	3.82	3.82		0.0048	0.1264
20	4.12			0.0066	
21	4.50			0.0071	
22	4.75			0.0111	
23	5.57			0.0012	

Table. 1 振幅別ランク区分一覧

Rank	加速度応答 RMS 値 [cm/sec ²]	15 分間平均風速 [m/sec]
rank1	0.0693	4.0792
rank2	0.1262	4.8998
rank3	0.2765	6.5967
rank4	0.4503	8.2156
rank5	0.6042	8.6838
rank6	0.8856	10.2514
rank7	1.1205	10.6994
rank8	1.3558	11.3556
rank9	1.5743	11.9051
rank10	2.0699	12.9688

加速度[cm/sec²]

(a) 常時微動

加速度[cm/sec²]

(b) RD 法適用後

Fig. 5 RD 法によって得られた自由振動波形

モード振幅

(a) 鉛直 1 次モード

モード振幅

(b) 鉛直 19 次モード

Fig. 6 同定されたモード形の例 Fig

固有振動数[Hz]

減衰比

Fig. 7 モード振動特性の振幅依存性 (○: 平均値, ×: 1σ 値)

流れの中で物体が振動すれば、回りの流れを変化させるため、物体の動きに依存する力（自励空気力）、すなわち変位に比例した空力剛性、速度に比例した空力減衰が物体に作用する。風洞実験²⁷⁾により別途求められている、鉛直振動に対する空力剛性・空力減衰によれば、固有振動数・減衰比ともに風速（Fig. 7 においては桁の RMS 応答）の増加に伴い、増加することになっている。Fig. 7 に示した減衰のほうは風速とともに増加しているが、固有振動数は若干ではあるが低下しており、風洞実験の結果とは整合しない。

鉛直 1 次モードの位相特性（中央スパン部分のみ）を見たのが Fig. 8 である。図に示すように、モード形の位相特性は振幅とともに大きく変化している。振幅（風速）のランク 1 から 5 では、振幅が大きくなるにつれて位相差が減少するが、ランク 6 から 10 では振幅の

増加に伴い位相差が増加する傾向にある。振幅が小さいときは中央スパンの桁の端部付近でのみ明瞭な位相ずれが見られるが、振幅が大きくなるにつれて全体の挙動に影響を及ぼすことがわかる。これらは、固有モードが非比例モード（非古典的モード）であることを示している。小さい振幅で、桁の端部付近で位相変化が大きいのは、端部にある支承や伸縮継目が影響していると考えるのが自然であろう。

次に、常時微動の自己相関関数と ERA 法を組み合わせ、モード特性を同定した。まず常時微動応答データから自由振動波形を得るため 2 時間ごとの計測データについて相関関数を推定した。Fig. 9 に風速 13.7m/s 時の常時微動計測データとそれから導かれた自由振動波形を示す。基準点 s は $z8$ から $z17$ （Fig. 3 参照）までの 10 点に設定し、それぞれのケースで相関関数を求

Fig. 8 鉛直 1 次モードの位相の振幅依存性

Fig. 9 原波形と相関関数によってえられた自由振動波形

めた。つまり2時間ごとのデータについて19点の自由振動波形を、基準点を変えて10組作成した。続いてこの自由振動応答波形に対してERA法を適用した。

このようにして23次まで白鳥大橋のモード特性を同定することに成功した。表-2には、平均風速8m/sにおいて得られた固有振動数とモード減衰を示してある。Fig. 10には同定されたモード形の例を示す。ITD法とERA法による結果を比較すると、固有振動数には良好な対応が見られるが、減衰比についてはITD法と

比べてERA法による同定値のほうがかなり小さくなっている。この原因として、推定した自由振動波形およびERA法で用いるハンケルマトリックスの次数の大きさ、ノイズの扱いの違いなどが考えられるが、今後詳細な検討が必要と考えている。

なお、ERA法では、各モードの動特性を得たときの初期モード振幅のレベルが同時に情報として得られる。表-2にはそれを載せている。例として基準点がz17, z11の場合の値を絶対値で示したが、高次モードの加

無次元モード振幅

主塔(4P)からの距離(m)

(a) 鉛直1次モード

主塔(4P)からの距離(m)

(b) 鉛直23次モード

Fig. 10 ERA法によって得られたモード形の例

固有振動数(Hz)

(a) 鉛直1次モード

減衰比(ξ)

(b) 鉛直2次モード

(d) 鉛直2次モード

Fig. 11 振動数、減衰比の振幅依存性

Fig. 12 1次モード形計測点 z6 における振幅, 位相の振幅レベル依存性

速度振幅が非常に小さいことが理解できるであろう。常時微動において励起されるのはほとんどが低次モードであり, 高次モードの占める割合は極めて少ない。小さい振幅の応答しか出ていなくとも, データの質がよく, 適切な手法を選べば, 高次モード動特性の同定が不可能ではないということである。

ERA 法により同定されたモード特性と桁の加速度応答 RMS (風速) を調べたのが Fig. 11 である。ここでも, 振幅 (風速) レベルの増加に対して固有振動数はわずかに減少し, 減衰は増加している。また, Fig. 8 に示したようなモード形の位相の振幅レベル依存性が ERA 法の結果においても確認された。

Fig. 12 には, 主塔脇の計測点 z6 における 1 次モード形振幅と, 桁中央の計測点 z17 との振幅比と位相差の振幅レベルによる変化を示す。小振幅時は明らかに, 桁の端部付近ではモード振幅が小さい。振幅が増加するとこれらはすぐに解消し, 位相差は再び徐々に大きくなる傾向が確認できる。この局所的な現象が加速度応答 RMS が 0.2cm/s^2 以下の小振幅時におきており, このことから, 摩擦の発生が予想される桁端部の支承, 伸縮継目との関係をうかがわせている。なお, モード振幅にばらつきが見られるのは, モード形ベクトルの大きさが 1 となるように基準化しているためにモード形全体の変化や推定誤差が z6 のモード振幅に反映しているためと考えている。

6. 橋桁構造特性の逆解析による自励空気力の抽出

モード形の位相より, 小振幅時, 大振幅時にそれぞれ位相差が大きく, 非比例減衰系であることがわかつ

Fig. 13 逆解析の概念モデル

た。この原因は, 構造系を考えると, 支承部分・伸縮装置部分の摩擦の影響と, 橋桁の空力剛性・減衰の影響が主要なものであると推測される。

そこで, これらの影響を Fig. 13 に模式的に示すように桁両端の付加減衰, 付加剛性および桁に沿って一様に分布する付加減衰, 付加剛性としてモデル化し, 同定されたモード特性を用いてこれらの値を逆解析することとした。図中の梁状の構造物が初期構造を模式的に表したものである。支点付近の集中バネ k_1' , ダッシュポット c_1' が支承の, 分布バネ k_2' , ダッシュポット c_2' が空気力の, 等価剛性・等価減衰を表しており, 逆解析により求める物理パラメータである。支承, 伸縮装置は付加回転減衰, 付加回転剛性としてモデル化されるべきであるが, 桁の変位が微小であることから Fig. 13 のように鉛直変位に対する減衰, 剛性としてモデル化した。

同定されたモード特性から逆解析するにあたりモード形は測定点が存在しない桁のおよそ半分の情報を欠いているため直接用いることができない (Fig. 4)。モード形は対称, 逆対称いずれかを仮定し桁全体のモード形に拡張した。桁の対称性に加えて質量の一樣分布も仮定している。ケーブルに作用する運動依存の空力減衰, 空力剛性は橋桁に比べ 1 オーダー小さいことから逆解析から得られる空力減衰, 空力剛性は橋桁の値を代表するものと考えた。

逆解析の方法は, 非比例減衰系を対象に, 上記のパラメータ (剛性, 減衰) を最小二乗法で逆解析する新しく開発した方法³⁾とマトリックスをベクトルに変えて反復計算を必要としない方法^{4), 28) 29) 30)}を用いた。前者の方法では, 各応答振幅 (風速) ランクでモード形状, 固有振動数, モード減衰の二乗誤差を最小にする基準で, パラメータが最適化される。

前者の方法では同定された1次モードのみ、後者の方法では3次モードまでを考慮して逆解析を実施した。最初の方法で同定した空力剛性・減衰の変化、支承剛性・減衰の変化をそれぞれ Fig. 14, 15 に示す。Fig. 14 には、風洞実験で得られた揚力から算定される空力剛性・減衰の値を併せて示している。本方法で同定されるのは、モード質量で正規化された剛性の相対変化であるので、基準として採用したランク5の空力剛性・空力減衰を0とし、変化分を示した。空力剛性についてはばらつきはあるものの、定性的な傾向は一致している。空力減衰については定量的にも良好な一致が見られる。

Fig. 15 には、同様に相対的な支承部分の剛性と減衰を示した。図中点線で示したのは、クーロン摩擦を仮定した場合に想定される各振幅における等価剛性と等価減衰の変化の様子である。振幅に伴い剛性・減衰と

も低下するクーロン摩擦の傾向が現れている。

第二の非反復法により逆解析した結果を Fig. 16, 17 に示した。図には比較のために、最小二乗法で求めた結果 (Fig. 14, 15) の結果 (○印) もあわせて示してある。この方法によって逆解析した空力減衰、空力剛性も、いずれもばらつきがかなりあるものの、風洞実験結果と同様に振幅 (風速) の増加とともに増加する傾向を示しており、整合的といえよう。支承・伸縮継目については、摩擦力と考えると振幅の増加とともにクーロン摩擦の等価減衰は増加、等価剛性は減少することが予想されるが³¹⁾、逆解析から得られた結果もこれに整合的である。特に Fig. 12 で見られた小振幅時の局所的な位相差とモード振幅の低下からは支承、伸縮装置が滑動していないことが推測されるが、得られた等価減衰、等価剛性の小振幅時の変化はこの推測に定性的に一致している。最小二乗法による逆解析の結果

Fig. 14 空力特性の変化

Fig. 15 支承構造特性の変化

は全体にばらつきが少ないものの、支承・伸縮継目の小振幅域での結果 (○印)にはやや疑問が残る。

以上のように、空力寄与分と支承・伸縮継目寄与分に分けて剛性と減衰を同定することに成功した。定量的な整合性を確認するまでには至っていないが、定性的に想定される変化の傾向とは一致した。定量的な整合性まではいけなかった理由としては、支承、伸縮装置の特性が完全にはクーロン摩擦系ではないこと、風速が一点計測であること、風向が必ずしも厳密に橋軸直角方向で一定していないこと、Fig. 10,11 からわかるように、支承の剛性・減衰の値が相対的に大きいため、支承部分の同定精度の誤差が空力逆解析に大きく影響を及ぼすこと、などが考えられる。

なお、大気温度の変化による動特性の変化も考えられるが、測定期間が10日に限られており、気温の変化がさほど大きくなかったことから、今回の計測では、温度による有意な動特性の変化は認められなかった³²⁾。

7. 終わりに

計算結果や実験結果が数値で示されると、とかく我々はそれを信じてしまう傾向にある。これは極めて危険であると思う。リアリティのある風工学とは、理論あるいは屋内実験の結果を実際の現象と常に対峙して進めることであると理解したい。

相対空力減衰(Ns/kgm)

(a)空力減衰の変化

相対空力剛性(N/kgm)

(b)空力剛性の変化

Fig. 16 空力特性の変化

本稿で対象とした常時微動記録は、微小でかつランダムな、正しくノイズのような応答ではあるが、リアルワールドで起きている現象であることは紛れもない事実であり、真実はそこにあるのである。その常時微動データから、精度の高い多点計測と精緻な同定解析により、高次モードまで同定可能であることを示めすことが出来た。おそらく、常時微動記録から20次を超えるモードの特性までが同定できたのは世界で初めてのことでないかと思う。さらに、新たに開発した逆解析技法により、桁に作用する、それこそ極めて微小な自励空気力を捕まえることが出来た。もちろん完璧な出来ではなく、今後の課題も非常に多い。しかしそれでも、ゴミのような応答記録からここまで出来るような時代になったことを驚くのである。

モニタリングは、橋梁や建物をはじめとする社会基盤施設の維持管理において重要な課題であり、世界的にも大きな関心を集めている。その発展・実用化のためには、継続的かつ高密度なデータ収集とそれに伴える高度な逆解析技術の開発を両輪の輪として進展させる必要がある。今回、白鳥大橋で行われたような計測がより長時間にわたって、いろいろなところで実施されることを強く希望したい。

相対支承減衰(Ns/kgm)

(a)支承等価減衰の変化

相対支承剛性(N/kgm)

(b)支承等価剛性の変化

Fig. 17 支承構造特性の変化

謝 辞

解析に用いた白鳥大橋の常時微動計測データは国土交通省北海道開発局が実施した同橋の振動実験の一環として得られたものである。多くの測点数、比較的長期間の微動計測という費用と時間のかかる計測が行えたのは、北海道開発局の相馬和則氏、西本聡氏、渋谷元氏（当時室蘭建設部）、佐藤昌志氏（当時 開発土木研究所構造研究室長）、三田村浩氏のほか坂本良文氏（新日本製鉄）、測定を担当したタケル技術コンサルタントの努力が大きい。ここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 吉田好孝, 藤野陽三, 時田秀往, 本田明弘: 東京湾アクアライン橋梁部鋼箱桁橋に発現した渦励振とその特性, 土木学会論文集, No.633, pp.103-117, 1999.
- 2) 藤野陽三: 風工学の新しい発展に向けての 3 つの私見, 日本風工学会誌, No.83, pp.54, 2000.
- 3) 阿部雅人, 藤野陽三, 長山智則, 池田憲二: 常時微動計測に基づく非比例減衰系の構造同定と長大吊橋への適用例, 土木学会論文集, No. 689/I-57, pp261-274, 2001.
- 4) 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, 投稿中.
- 5) 岩本正巳, 阿部雅人: 損傷・構造同定, 橋梁振動コロキウム'97 論文集, pp45-54, 1997.10
- 6) Abe, M.: Structural monitoring using vibration measurement - current practice and future -, in Artificial Intelligence in Structural Engineering, Ian Smith, ed, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1454, pp.1-18, Springer, 1998.
- 7) 田中淳之, 淵田政信, 岩屋勝司: 大鳴門橋振動実験の報告, 本四技報, No.36, pp.30-37, 1985.12
- 8) 山口宏樹, 高野春夫, 小笠原政文, 下里哲弘, 加藤真志, 岡田淳: 鶴見つばさ橋の振動試験による動的特性の同定, 土木学会論文集, No.543/I-36, p247-258, 1996.
- 9) 山口宏樹, 高野春夫, 小笠原政文, 下里哲弘, 加藤真志, 加藤久人: 斜張橋振動減衰のエネルギー的評価法と鶴見つばさ橋への適用, 土木学会論文集, No543/I-36, pp.217-227, 1996.
- 10) 吉田純司, 阿部雅人・藤野陽三: 1995 年兵庫県南部地震における阪神高速湾岸線松の浜免震橋の地震時挙動と免震効果の検証, 土木学会論文集, No.626, pp.37-50, 1999
- 11) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三: 不確定性を考慮した非比例減衰系の同定と構造物の性能評価への応用, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.45A, pp701-712, 1999.
- 12) Chaudhary, M. T. A., Abe, M., Fujino, Y. and Yoshida, J.: System identification of two base-isolated bridges using seismic records, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.126, pp.1187-1195, 2000.
- 13) 長松昭男: モード解析, 培風館, 1985.
- 14) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 依田秀則: レーザー常時微動計測手法の構築と構造物の損傷検出への応用, 土木学会論文集 (掲載許可済).
- 15) 岡林隆敏, 山森和博, 田丸康広, 吉村徹: 可搬型振動計測システムによる構造物の振動特性推定, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.327-337, 1998.
- 16) Abdel-Ghaffar, A.M., and Housner, G. W.: Ambient Vibration Test of Suspension Bridge, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, pp.983-999, 1978.
- 17) Abdel-Ghaffar, A.M., and Scanlan, R.H.: Ambient Vibration Studies of Golden Gate Bridge, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, pp.463-499, 1985.
- 18) Cole, H.A.: On-line Failure Detection and Damping Measurement of Aerospace Structures by Random Decrement Signatures, NASA CR-2205, 1973.
- 19) Vandiver, J. K., Dunwoody, A. B., Campbell, R. B., and Cook, M. F.: A Mathematical Basis for the Random Decrement Vibration Signature Analysis Technique, Journal of Mechanical Design, pp.303-308, 1982.
- 20) Ibrahim, S. R., and Mikulcik, E. C.: A Method for the Direct Identification of Vibration Parameters From the Free Response, Shock and Vibration Bulletin 47, 1977.
- 21) Juang J.N., Pappa R.S.: An Eigensystem Realization Algorithm For Modal Parameter Identification And Model Reduction, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 8, No. 5.,

pp620-627, 1985

- 22) 西本聡, 前川務, 山地健次, 東康弘: 白鳥大橋補剛桁の設計・製作, 橋梁と基礎, pp.23-32, 1996.
- 23) 新山惇, 佐藤昌志, 池田憲二, 菅原登志也, 佐藤浩一: 白鳥大橋の固有振動数評価に関する常時微動観測法の適用性, 構造工学論文集, 土木学会, Vol47A, pp.469-478, 2001.
- 24) 田村幸雄, 佐々木淳, 佐藤民夫, 高坂隆一: R D 法による強風時の構造物の減衰評価, 第 12 回風工学シンポジウム論文集, pp.303-308, 1992.
- 25) 長山智則: 非比例減衰を考慮した長大吊橋の構造同定, 東京大学卒業論文, 2000.
- 26) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三: 不確実性に起因する振動特性変化の定量化とその有意性検定手法の提案, 土木学会論文集, No.682, pp.399-414, 2001.
- 27) 北海道開発局室蘭開発建設部: 白鳥大橋上部工耐風検討業務報告書, 1986.
- 28) Cha, P.D., de Pillis, L.G.: Model Updating by Adding Known Masses, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 50, pp.2547-2571, 2001
- 29) 阿部雅人, 藤野陽三, 長山智則, Vu-manh, H: 振動計測に基づく非比例減衰系の非反復損傷同定法, 応用力学論文集, Vol5, 2002
- 30) Hong, V.M., Abe, M., Fujino, Y.: A Non-Iterative Approach in Vibration-Based Damage Detection for a Damped Mechanical System, AIAA Journal (投稿中).
- 31) 柴田明德: 最新耐震構造解析, 森北出版, 1997
- 32) 梶村徹: 長径間吊橋の常時微動試験に基づく構造モニタリング手法の確立, 東京大学卒業論文, 1999