

### 1. はじめに

近年、ダム、橋梁、建築物などの構造物はしだいに大型化しており、構造物が長大化するにつれ、その動特性はより複雑になってきている。さらに日本は地震および台風が頻繁に発生する地帯であるので、その耐震、耐風設計および、維持管理がきわめて重要な課題である。それには構造物の動特性を高い精度で把握することが必要となる。そこで、動特性を把握するための手法として、実測データから動特性を把握する同定解析が重要な手がかりとなっている。

本研究では実際に構造物から振動データを計測し、構造物の振動特性を正確に推定することを目的としている。そのため、まず3階構造の模型(図-1)を対象に自由振動波形の同定解析を行い、その精度を検証した。次に既存の構造物である鶴舞第一歩道橋(図-2)を対象に常時微動波形の同定解析を行った。同定解析にはデータ処理と計測に特化した視覚的な画面構成の仮想計測器ソフトウェア「LabVIEW」を用いた。(図-3)なお、三木<sup>1)</sup>の研究で常時微動データの計測の際にノイズが発生したため、本研究ではデータロガーを使用して計測を行った。



図-1 3階構造モデルの模型

### 2. 振動データ計測の流れ

対象構造物に取り付けられた3つの加速度計からの信号が、加速度計用アンプを通じて出力され、データロガーによりA/D変換、データ収録を行う。収録したデータはコンパクトフラッシュに記録される。そして記録されたデータを「LabVIEW」の同定プログラムに取り込む。本研究では、チャンネル数を3として、模型から自由振動データ、鶴舞第一歩道橋から常時微動データを計測する。計測システムの構成概要を図-4に示す。



図-2 鶴舞第一歩道橋

### 3. 同定の流れ

上記における、集録されたデータにより同定を行う上で、次の主要なデータ処理を行う。

- i) 自由振動データをフーリエ変換し、スペクトル表示した後、バンドパスフィルタによって任意の1次振動数情報を抽出する。そして逆フーリエ変換で1自由度系振動データへ還元する。
- ii) 非線形最小二乗法により曲線適合して、振動特性を推定する。曲線適合には「LabVIEW」に組み込まれたLevenberg-Marquardt法を用いている。

常時微動データの場合は、計測データを相互相関関数に変換し、それを自由振動データとみなして上記のi), ii)の作業を行う。

なお、バンドパスフィルタの範囲は0.8Hzに設定した。

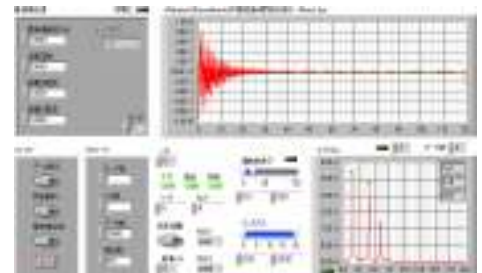


図-3 「LabVIEW」

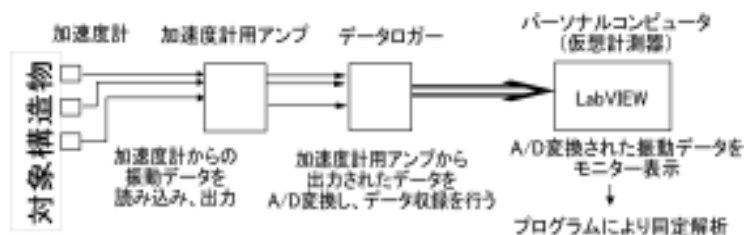


図-4 計測システムの概要

#### 4. 3階構造の模型を対象とした自由振動波形の同定

本実験に用いた模型は図-1に示すような3階建て構造で、4本のアルミ棒を柱として3枚の鉄板をねじで接合し、固定端として支えている。模型の概要を図-5に、各階層の重量、柱の長さ、およびバネ定数を表-1に示す。この模型を対象に自由振動波形の同定を行う。

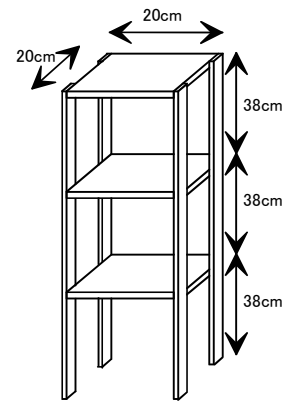


図-5 模型概要

##### i) 自由振動データの計測

計測は、加速度計をおもりの中心に両面テープで固定し、模型の2階のおもりを手で加振させ、その5秒後から2分間の計測を行った。サンプリング間隔は1/240(sec)で28800個のデータを集録した。計測波形の例を図-6に示す。

##### ii) 同定解析

計測したデータから外乱を受けていないと見られる7000点を抜き出して同定解析を行った。また、バンドパスフィルタを通してあるため、逆フーリエ変換の際に生じる波形の変形を考慮して、1自由度系へ抽出した波形の前後端1000点を切り捨てた。同定解析を行うにあたって、固有振動数の初期推定値はフーリエスペクトルをモニターしながら、卓越しているスペクトルのピーク値を与えた。ここでは1.5Hz、4.1Hz、6.0Hz付近のスペクトルが卓越していたので、これらを各モードの初期推定値として与え、曲線適合を行った。

1自由度系に抽出した波形を計測波形、曲線適合した波形を推定波形として図-7に示す。これにより推定された固有振動数とモード形状(推定値)を固有値解析の結果(理論値)と比較する。なお、理論値は表-1を元に計算した。(表-2、図-8~図-10)

その結果、推定値と理論値の誤差は最大で0.089、平均して0.043程度となった。これより1~3階の柱のバネ定数が均一になるように作成できており、さらに正確な計測、解析ができていていると言える。

固有振動数において理論値と推定値の誤差が0.1Hz ~ 0.4Hzという結果となった。いずれのモードにおいても理論値よりも推定値が大きくなった原因として、固定端のL字部材の影響で、設計よりもバネ定数が大きくなったと考えられる。

表-1 模型の詳細

	重量(Kg)	柱の長さ(cm)	バネ定数(N/m)
1階	1.61	38	615
2階	1.61	38	615
3階	1.53	38	615

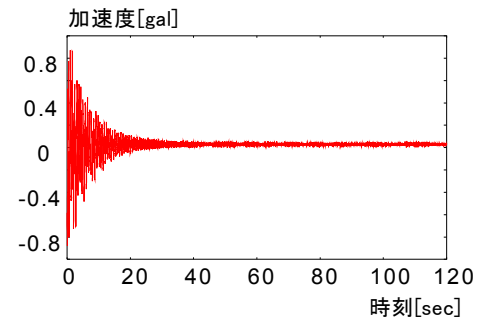


図-6 計測波形例

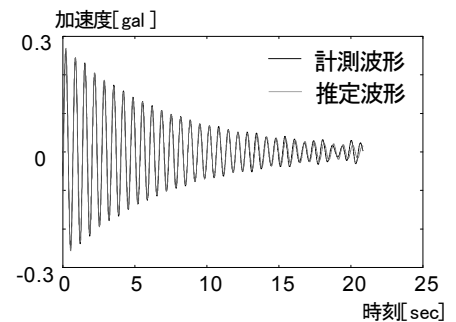


図-7 曲線適合例

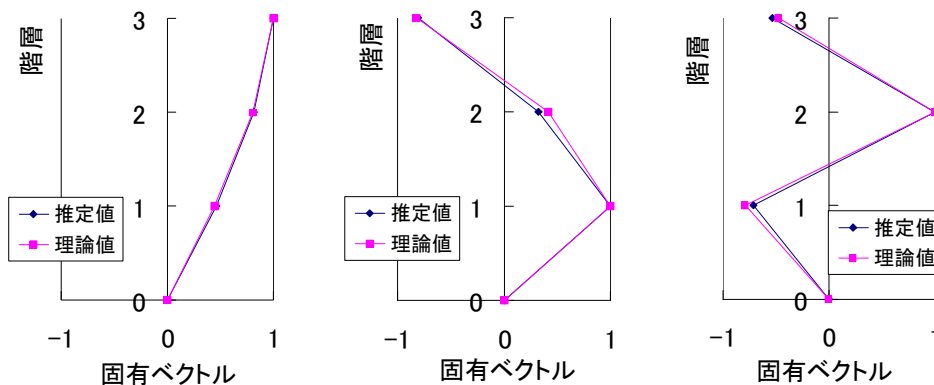


図-8 モード形状(1次) 図-9 モード形状(2次) 図-10 モード形状(3次)

表-2 固有振動数

固有振動数(Hz)	
推定値	理論値
1.51	1.42
4.18	3.95
6.03	5.67

## 5. 鶴舞第一歩道橋を対象とした構造特性の推定

ここでは、既存の構造物である鶴舞第一歩道橋を対象に常時微動データの計測を行った。鶴舞第一歩道橋は全長 42 m、二径間の鋼製歩道橋である。概略図及び計測点 1~9 を図-11 に示す。

### i) 常時微動データの計測

計測の際、加速度計は等間隔に、歩道橋の手すりの下部に設置した。なお、測点 9 に関しては、手すりがなかったため、柱の上から歩道橋中央方向に 68 cm ずれている。サンプリング間隔 1/240 (sec)、サンプリング継続時間 5(min) で 72000 個のデータの計測を 3 回行った。鉛直方向、橋軸直角方向（水平方向）、橋軸方向の振動を計測し、鉛直方向に関しては、南側と北側両方の手すり部分で計測を行った。計測波形を図-12 に示す。鶴舞第一歩道橋は、大きな交差点に位置しているため交通量の変動により歩道橋の応答が増減している事が分かる。

### ii) 同定解析

解析は 72000 個×3 回のデータの中から 10000 点を抜き出して行う。なお、固有振動数、モード形状の値は、この操作を 5 回繰り返し、その平均値をとっている。曲線適合例を図-13 に示す。これにより、推定された固有振動数、モード形状を表-3、図-14~図-21 に示す。

鉛直方向については 5 ヶ所に卓越したスペクトルが見られた。5 つのモードのうち 4.1Hz、5.9Hz、9.9Hz はねじれモード、6.8Hz、8.5Hz はたわみモードであった。ねじれ 1 次、水平 1 次、橋軸 1 次の固有振動数がほぼ一致しており、連成している可能性がある。また、ねじれ 3 次、水平 2 次の固有振動数も一致しており、同様のことが言える。固有ベクトルの標準偏差は、最大 0.051 で平均では 0.030、固有振動数の標準偏差は最大 0.048 で平均では 0.028 であり、安定して同定できていると言える。曲線適合に

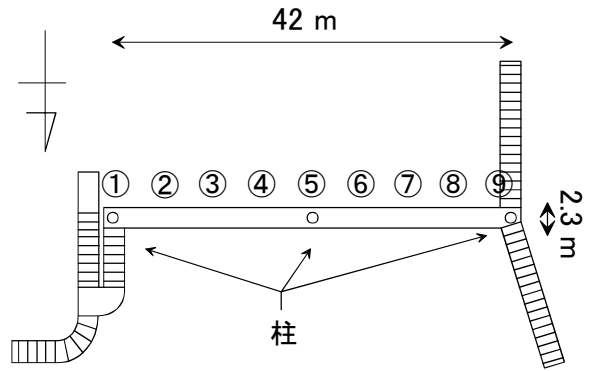


図-11 鶴舞第一歩道橋概略

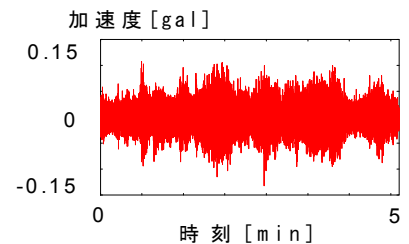


図-12 計測波形例

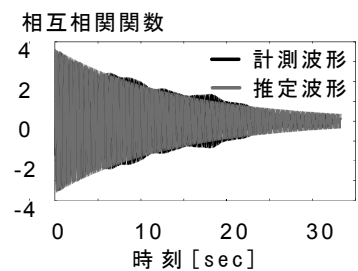


図-13 曲線適合例

表-3 固有振動数

	固有振動数 (Hz)
ねじれ1次	4.13
ねじれ2次	5.91
ねじれ3次	9.91
たわみ1次	6.86
たわみ2次	8.53
水平1次	4.14
水平2次	9.94
水平3次	13.10
橋軸1次	4.12

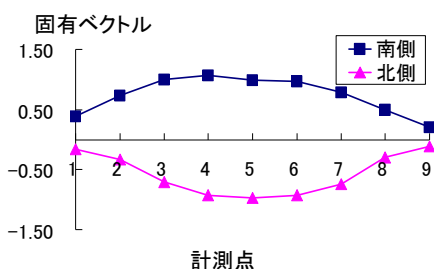


図-14 モード形状(ねじれ 1 次)

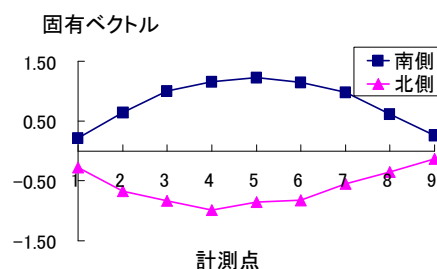


図-15 モード形状(ねじれ 2 次)

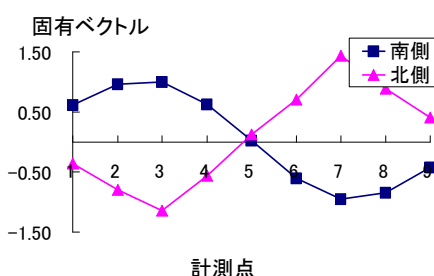


図-16 モード形状(ねじれ 3 次)

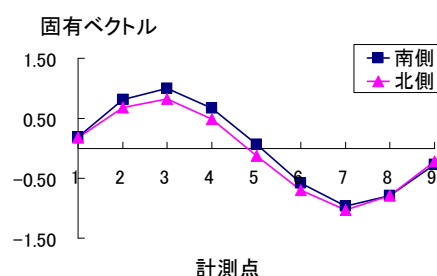


図-17 モード形状(たわみ 1 次)

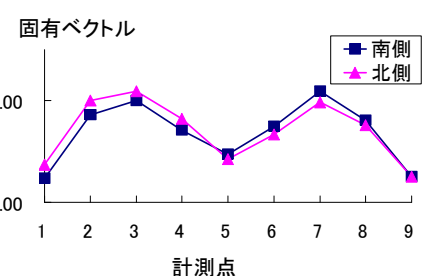


図-18 モード形状(たわみ 2 次)

については、ねじれ3次、水平3次において隣接したスペクトルの影響で1自由度波形への抽出が難しく誤差が生じた。その他のモードでは精度よく曲線適合ができた。

### iii) 構造特性の推定

現在の鶴舞第一歩道橋の詳細な設計図がなく、固有値解析が難しいため、モデル化した鶴舞第一歩道橋（図-22）において、同定により推定した振動特性と一致するようにパラメータを与え、随時固有値計算を行った。（表-4）なお、パラメータを与える上で、まず梁の単位重量を680kgとして固定した。表-5、図-23、図-24にはモデル化した鶴舞第一歩道橋から求めた固有振動数、モード形状の値を理論値とし、同定解析によって求めたデータを推定値として比較している。

モード形状、固有振動数ともに理論値と推定値を一致させることができた。ただ、測点9において推定値が理論値より0.1程大きい。原因としては、計測点がずれているためだと考えられる。また  $K_1$ 、 $K_3$  の値が小さくなったのは、計測位置が梁の中央ではなく、手すりの下部だったため、2次元モデルとの差が生じたということが考えられる。梁の剛性については、過去の鶴舞第一歩道橋の設計図では、 $EI$  が  $2.5 \times 10^6$  となっており入力パラメータと近い値であった。

## 6. 結論

本研究では実際に構造物から振動データを計測し、構造物の振動特性を正確に推定することを目的としている。模型を対象にした自由振動波形の同定により、その精度を検証した。その結果、同定解析と固有値解析の結果がほぼ一致し、同定プログラムの精度が確認できた。鶴舞第一歩道橋を対象とした常時微動波形の同定では固有振動数、モード形状ともに安定した解析ができたと言える。ただ、スペクトルが隣接している時はバンドパスフィルタの範囲を考える必要がある。構造特性の推定については、モデル化または、計測方法に改善の必要がある。

### 参考文献

- 1) 三木英二：「LabVIEW」による振動データ計測及び振動数領域における振動モード特性の同定(名古屋工業大学修士論)2005

表-5 固有振動数

固有振動数 (Hz)	たわみ1次モード		たわみ2次モード	
	理論値	推定値	理論値	推定値
	6.88	6.86	8.51	8.53

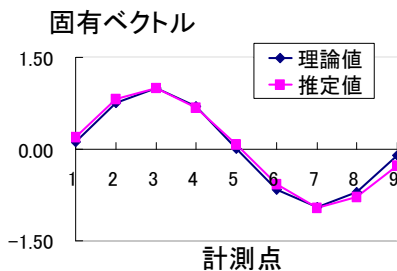


図-23 モード形状の比較(たわみ1次)

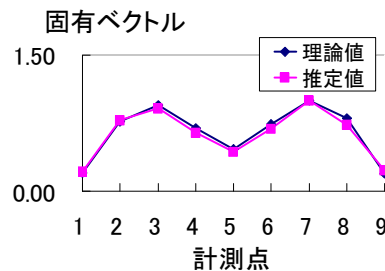


図-24 モード形状の比較(たわみ2次)

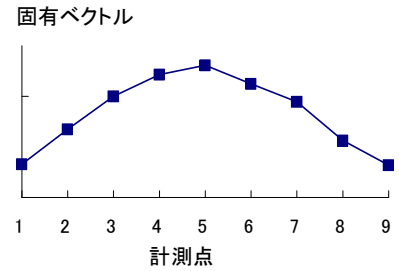


図-19 モード形状(水平1次)

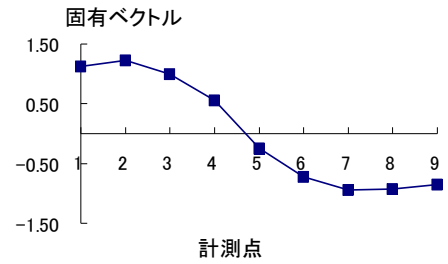


図-20 モード形状(水平2次)

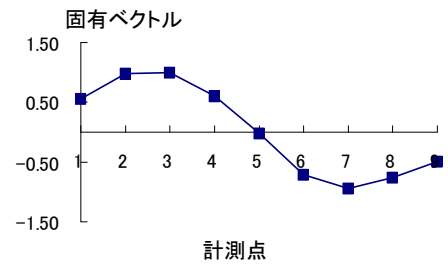


図-21 モード形状(水平3次)

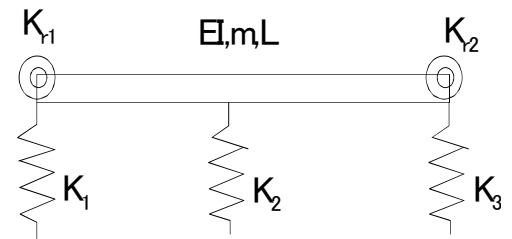


図-22 モデル化した鶴舞第一歩道橋

表-4 入力パラメータ

入力パラメータ	値
$K_1$ (kN/mm)	50
$K_2$ (kN/mm)	78
$K_3$ (kN/mm)	55
$K_{r1}$ (kN·mm/rad)	$10 \times 10^6$
$K_{r2}$ (kN·mm/rad)	$20 \times 10^6$
$EI$ (kN·m <sup>2</sup> )	$2.8 \times 10^6$
$m$ (kg)	680
$L$ (m)	42