

拡張カルマンフィルタによる剛結部損傷を有する2層ラーメン構造の解析

Analysis of Two-story Rigid Frame Structure with Connection Damage by Applying Extended Kalman Filtering

北見工業大学大学院 ○ 学生員 成田美和子 (Miwako Narita)
 北見工業大学 フェロー 大島俊之 (Toshiyuki Oshima)
 北見工業大学 正会員 三上修一 (Shuichi Mikami)
 北見工業大学 正会員 山崎智之 (Tomoyuki Yamazaki)

1. はじめに

我が国では、戦後の高度経済成長期に、社会資本の整備を目的として、多くの橋梁構造物が建設されてきた。これらの構造物は、既に供用後30～40年が経過していることから、徐々に進行する経年劣化や地震や暴風等による天災、また近年の走行車両の増加や大型化による設計時に考慮された以上の走行荷重等によって、何らかの損傷が生じているものが数多く存在しており、近い将来、供用期間を超える構造物が増加することが予想されている。しかし、この時期に建設された橋梁構造物は、現在の社会基盤施設の根底部分を担うものが多く、架け替えあるいは大規模な補修工事による交通遮断や交通制限は社会的にも経済的にも大きな影響を与えることになる。したがって、既存の橋梁構造物において、維持管理により構造物の状態を正しく把握し、何らかの損傷が発見された場合は速やかに適切な補修補強を行うことにより、長寿命化を目指すことが望まれる。以上のような背景から、今後これらの構造物を合理的に維持管理していくために、構造物の健全度診断あるいは何らかの損傷を推定することが重大な課題であると考えられる。

近年、健全度診断および損傷検出に関する研究が数多く報告されている。構造物が損傷した際には剛性が低下し、固有振動数や固有モードが変化する。こうした構造パラメータの変化に着目し、構造物の動特性を計測することにより損傷検出を行う方法が提案されている。これらの方法は、骨組構造の柱部材の断面を変化させることにより損傷をモデル化した実験モデルを用いて損傷検出の可能性を検討されている。

本研究は、構造物の健全状態の推定を行うための基礎的研究である。まず、骨組構造剛結部の拘束状態を変化させることにより健全状態と損傷状態をモデル化し、振動台による加振実験により健全状態と損傷状態の動特性を検討した。また、損傷度の変化による固有振動数と減衰定数の変化の傾向を解析した。

固有振動数や減衰定数の動特性の推定法には、観測波形を周波数領域に変換するスペクトル解析によるハーフパワー法がある。この方法は、そのスペクトル曲線の傾向から動特性を推定するものであり、高次の固有振動数の推定は困難である。そこで、本研究は、観測波形を周波数領域に変換せず、直接時間領域で解析を行い、動特性を求める方法として、拡張カルマンフィルタを用いて動特性の推定を試みた。

2. 実験概要

実験供試体を図-1に示す。加振方向を正面とし、加振直角方向を側面とする。厚さ4mm、幅40mmのアルミニウム板により作製し、各層にスチール板を設置した。剛結部はコーナーアングルを用いて正面、側面の水平部材と垂直部材を剛結するものとし、M4のボルト9本で固定したものを健全状態として、損傷状態は固定しているボルトの本数を5本、3本、1本に減らすことによりモデル化した。

9本のボルトの固定状態を図-2に示す。供試体正面側のボルトの固定状態を一定にして側面側のボルトの固定状態を変化させるCase1, 2と、逆に側面側のボルトの固定状態を一定にして正面側のボルトの固定状態を変化させるCase3, 4とした。

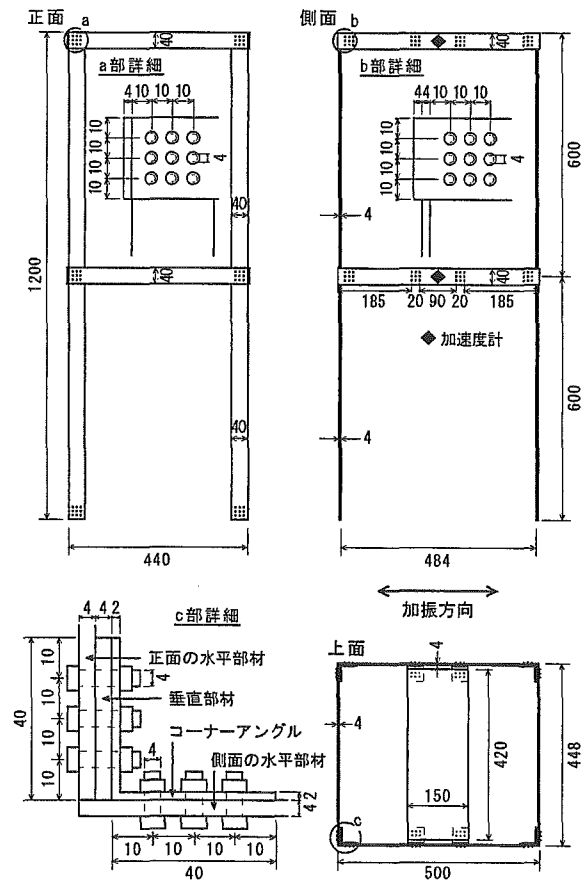


図-1 実験供試体

それぞれの Case に対して、振動台による不規則加振実験を行い、振動台の加速度と各層側面中央部の加振方向の加速度を測定した。計測するときのサンプリング周期は 0.01sec(100Hz)とし、計測時間は 40sec とした。

3. 実験結果

各層で得られた加速度データからスペクトル解析によるハーフパワー法で固有振動数と減衰定数を求めた。結果を表-1 に示す。この結果は、各層の加速度データから各次振動の固有振動数、減衰定数を求め、それを平均化したものを示している。

Case1, 2 では側面側の固定ボルト本数の減少による固有振動数の変化は小さい。Case3, 4 では正面側の固定ボルト本数の減少とともに固有振動数が小さくなっている。これより、固有振動数の変化は、今回の実験供試体では加振方向側面のボルトの固定状態より加振直角方向側面の固定状態が大きく影響していることがわかる。

減衰定数については、値にばらつきがあり、明確な傾向が得られないが、1次振動の減衰定数について、Case2, 3, 4 で固定ボルト本数が 9本のとときと比べて 1本になると値が大きくなる結果となった。2次振動の減衰定数でも、同様の結果となり、また、Case4 では固定ボルト本数が 3本のとときと比べて 1本になると若干値が小さくなっているが、Case2, 4 から損傷度が大きくなるに連れてほぼ減衰定数が大きくなる結果となった。

表-1 実験結果

| 固定ボルト本数 | 1次固有振動数(Hz) | | | |
|---------|-------------|--------|--------|--------|
| | Case1 | Case2 | Case3 | Case4 |
| 9本 | 2.1363 | 1.9332 | 2.1363 | 2.1315 |
| 5本 | 2.1466 | 1.9316 | 2.0997 | 2.0868 |
| 3本 | 2.1326 | 1.9339 | 2.0992 | 2.0562 |
| 1本 | 2.1315 | 1.8609 | 1.9332 | 1.8609 |
| 固定ボルト本数 | 2次固有振動数(Hz) | | | |
| | Case1 | Case2 | Case3 | Case4 |
| 9本 | 5.6954 | 5.1292 | 5.6954 | 5.6987 |
| 5本 | 5.7000 | 5.1277 | 5.5682 | 5.5626 |
| 3本 | 5.7002 | 5.1334 | 5.4977 | 5.4874 |
| 1本 | 5.6987 | 5.1252 | 5.1292 | 5.1252 |

| 固定ボルト本数 | 1次振動の減衰定数 | | | |
|---------|-----------|--------|--------|--------|
| | Case1 | Case2 | Case3 | Case4 |
| 9本 | 0.0121 | 0.0125 | 0.0121 | 0.0110 |
| 5本 | 0.0152 | 0.0120 | 0.0112 | 0.0164 |
| 3本 | 0.0108 | 0.0127 | 0.0108 | 0.0149 |
| 1本 | 0.0110 | 0.0162 | 0.0125 | 0.0162 |
| 固定ボルト本数 | 2次振動の減衰定数 | | | |
| | Case1 | Case2 | Case3 | Case4 |
| 9本 | 0.0047 | 0.0052 | 0.0047 | 0.0042 |
| 5本 | 0.0042 | 0.0054 | 0.0047 | 0.0051 |
| 3本 | 0.0043 | 0.0056 | 0.0045 | 0.0059 |
| 1本 | 0.0042 | 0.0058 | 0.0052 | 0.0058 |

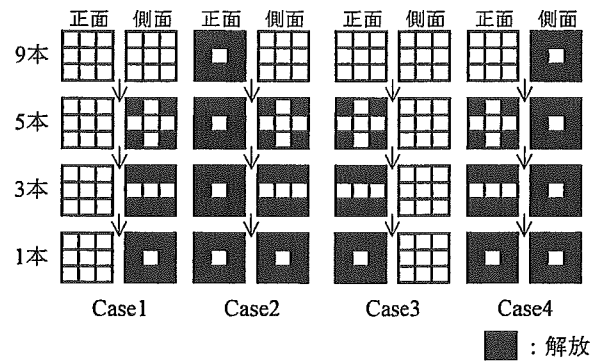


図-2 ボルトの固定状態

4. 拡張カルマンフィルタを用いた動特性の推定

拡張カルマンフィルタは、以下に示す非線形連続型状態方程式と非線形離散型観測方程式を基本式としている。

$$dX_t/dt = f(X_t, t) + G_t w_t$$

$$y_{t_k} = h(X_{t_k}, t_k) + v_{t_k}$$

X_t, X_{t_k} : 連続型, 離散型状態ベクトル

y_{t_k} : 観測ベクトル

w_t : システム雑音ベクトル

v_{t_k} : 観測雑音ベクトル

G_t : 変換行列

そして、初期の状態推定値 X_0 および任意の初期の真の値と誤差共分散値 P_0 を与えて、漸化的に状態ベクトルの最適推定値 $\hat{X}(t_k|t_k)$ を求めるアルゴリズムである。

本解析では、拡張カルマンフィルタのアルゴリズムを基本とした EK-WGI 法を用いて動特性の推定を行った。EK-WGI 法はこの拡張カルマンフィルタアルゴリズムを用いて得られる継続時間 t_s 時の $\hat{X}(t_s|t_s)$, $P(t_s|t_s)$ の値を初期値として与え、再び拡張カルマンフィルタアルゴリズムを繰り返す方法である。そして、このグローバルな繰り返しにおいて、評価値を用いて最適推定値の判断をするものである。なお、各グローバルな繰り返し時の初期値として用いる $P(t_s|t_s)$ の値は、重み W を付加している。本解析で用いた評価値 γ_1 を以下に示す。

$$q_{1k} = y_{1k} - h_1(\hat{X}(t_k|t_k), t_k)$$

$$\gamma_1 = \left(\sum_{k=1}^S q_{1k}^2 \right) / \left(\sum_{k=1}^S y_{1k}^2 \right)$$

y_{1k} : 観測量

$h_1(\hat{X}(t_k|t_k), t_k)$: 推定観測量

S : 観測データ総数

次に、多自由度系として状態方程式に組み込んだ j 次の運動方程式を以下に示す。

$$\ddot{\xi}_{ij} + 2\beta_j \omega_j \dot{\xi}_{ij} + \omega_j^2 \xi_{ij} = -p_{ij} \ddot{x}_0$$

$$p_{ij} = u_{ij} \delta_j$$

$$z_i = \sum_{j=1}^n \xi_{ij}$$

ω_j : j 次の固有円振動数

β_j : j 次のモード減衰

\ddot{x}_0 : 入力加速度

δ_j : j 次の刺激係数

u_{ij} : j 次の i 質点での固有ベクトルの要素

p_{ij} : j 次の i 質点での刺激係数

z_i : i 質点での応答変位

この状態方程式を用いて、まず、1 自由度系の状態方程式等において、任意の初期条件から動特性を推定する。次に 2 自由度系に状態方程式等の拡張を行った後、1 次の推定された動特性を固定し、2 次のみの推定を行う。そして、この 2 次の推定結果と 1 次の推定結果を初期条件として、再び 2 自由度系の 1 次、2 次の推定を行う。このような手順により、順次状態方程式等を重ね合わせ、初期条件を推定しながら各次数の動特性を推定した。

5. 推定結果

拡張カルマンフィルタに必要な任意の初期条件は表-2 に示す値を用いた。また、各グローバルな繰り返し時の重み W は 10.0 とし、観測方程式に付加するノイズの分散値 $R(t_k)$ は 0.01 とした。観測データは、入力データは振動台の加速度データ、出力データは各層の加速度データとし、計測開始時から 5sec までのサンプリング周期 0.01sec の 500 個のデータを用いて解析を行った。

本解析では、解析可能な自由度数まで順次状態方程式等を重ね合わせて解析を行った。解析可能な自由度数まで拡張させて解析を行う解析モデルを多自由度系モデルとする。この多自由度系モデルの推定結果と比較するため、解析モデルを図-2 に示す 2 自由度系モデルであるとした場合の推定結果、つまり多自由度系モデルの解析において、2 自由度系まで拡張を行った時点で得られた値をまとめた。2 自由度系モデルの推定結果、多自由度系モデルの 1 次および 2 次振動の推定結果およびハーフパワー法による結果の比較を図-3 に示す。なお、この結果は、Case1 の固定ボルト本数 9 本の状態から 5 本、3 本、1 本、Case2 の 9 本、5 本という順に示しており、 x 軸の 2 桁の数值は、1 桁目の数值は供試体正面側の固定ボルト本数を、2 桁目の数值は供試体側面側の固定ボルト本数を示している。

1 次固有振動数については、2 自由度系モデルと多自由度系モデルの結果は非常に近い値となり、ハーフパワー法による結果と比較して小さい値となった。2 次固有振動数については、多自由度系モデルの結果とハーフパワー法による結果が比較的近い値となり、2 自由度系モデル

の結果は大きい値となった。1 次および 2 次固有振動数とともに、ハーフパワー法と同様に側面側の固定ボルト本数の減少による固有振動数の変化は小さく (Case1, 2)、正面側の固定ボルト本数の減少とともに固有振動数が小さくなる傾向が得られた (Case3, 4)。

1 次振動の減衰定数については、2 自由度系モデルと多自由度系モデルの結果に大きな違いはなく、他の状態に比べて側面側の固定ボルト本数が 1 本になると値が大きくなる結果となった (Case2, 4)。しかし、ハーフパワー法による結果とは大きく異なる値となった。2 次振動の減衰定数については、2 自由度系モデルと多自由度系モデルの結果にほぼ同様の傾向が見られるが、損傷度の変化による傾向は得られず、値はハーフパワー法による結果も含めて、それぞれが大きく異なる結果となった。

次に、2 自由度系モデルと多自由度系モデルの推定結果の評価値を図-4 に示す。2 自由度系モデルより多自由度系モデルの値が小さくなる結果となり、多自由度系モデルの方が最適に推定されている結果となった。また、2 自由度系モデルの 2 次振動の減衰定数の推定結果と同様の傾向が見られる。これより、2 自由度系のモデルの評価値が大きい値となった原因に 2 次振動の減衰定数の推定結果が大きく関わっているのではないかと考えられる。

本解析で解析可能な自由度数は、データにより違いがあり、平均して 4 自由度程度であった。3 自由度以上の推定結果については値に大きなばらつきがあった。これは、1 次、2 次振動が卓越するために、精度良く推定することが困難であったとも考えられるが、2 自由度系モデルに比べて多自由度系モデルの評価値が小さいことから、推定が必ずしも 3 次、4 次と順に推定されるとは限らないため、データによって推定される次数に違いがあったのではないかと考えられる。

表-2 初期条件

$$x_{1j} = \xi_{ij}, x_{2j} = \dot{\xi}_{ij}, x_{3j} = \beta_j, x_{4j} = \omega_j, x_{5j} = p_{ij}$$

| | x_{1j} | x_{2j} | x_{3j} | x_{4j} | x_{5j} |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| X_0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 20.0 | 0.0 |
| P_0 | 1.0 | 1.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |

$$R=0.01, W=10.0$$

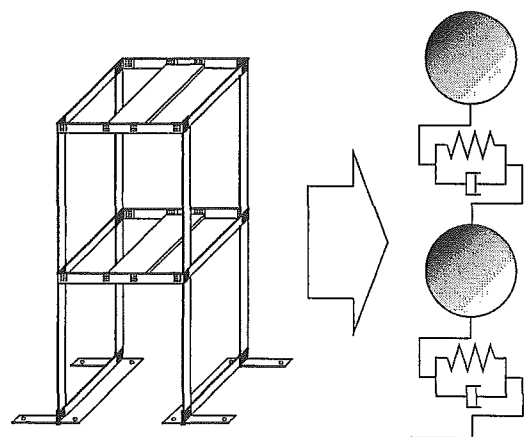
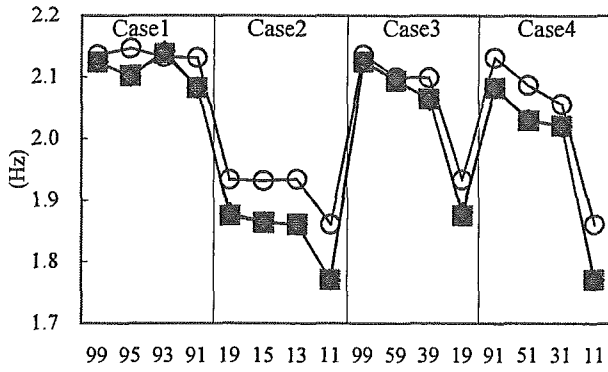
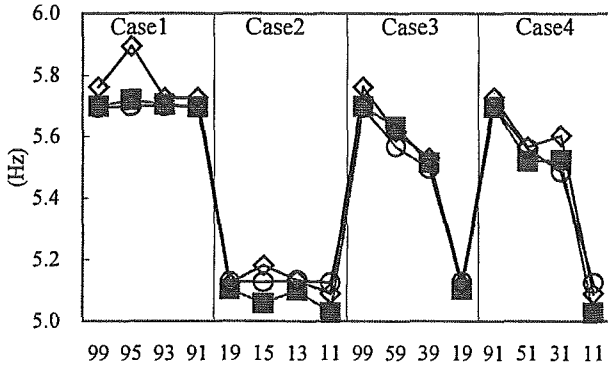


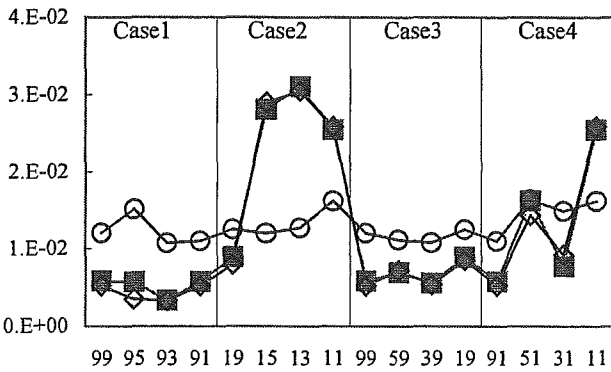
図-2 2 自由度系モデル



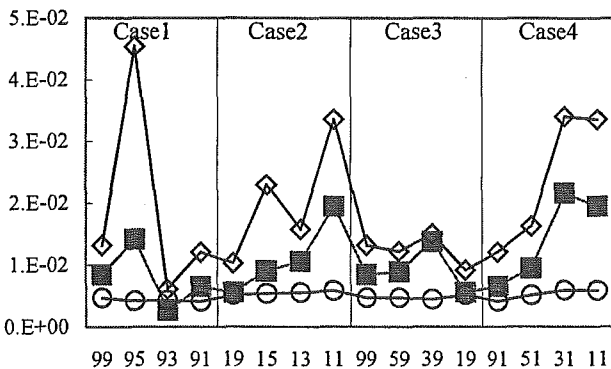
(1) 1次固有振動数



(2) 2次固有振動数



(3) 1次振動の減衰定数



(4) 2次振動の減衰定数

◇: 2自由度系モデルの推定結果
 ■: 多自由度系モデルの推定結果
 ○: ハーフパワー法による結果

図-3 推定結果の比較

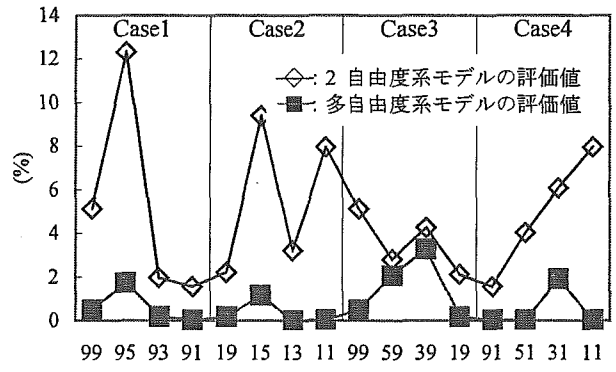


図-4 評価値

6. まとめ

本研究では、2層ラーメン構造剛結部のボルトの解放により損傷をモデル化し、健全状態と損傷状態の動特性の変化を検討し、拡張カルマンフィルタを用いた動特性の推定を試みた。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 拡張カルマンフィルタを用いて推定された固有振動数は、2自由度系モデルにおいても、多自由度系モデルにおいても、ハーフパワー法による結果と同様の傾向が得られた。
- (2) 拡張カルマンフィルタを用いることにより、高次の動特性の推定が可能であり、損傷度の変化による高次の動特性の変化の傾向を解析できる可能性があると考えられる。

参考文献

- 1) 近藤一平, 濱本卓司: 振動台実験のランダム応答データを用いた多層建築物の損傷検出, 日本建築学会構造系論文集, 第473号, pp.67-74, 1995.
- 2) 遠藤龍司, 百里富美子, 登坂宣好: 拡張 Kalman フィルタと実験モード解析を用いたフレーム構造模型の構造損傷同定, 構造工学論文集, Vol.46B, pp.27-33, 2000.
- 3) 松井邦人, 栗田哲史, 新延泰生, 山本和也: 非繰返し型同定手法の適用性に関する検討, 応用力学論文集, Vol.2, pp.1-8, 1999.
- 4) 星谷勝, 斉藤悦郎: 拡張カルマン・フィルターを用いた同定問題の各種振動系への応用, 土木学会論文報告集, 第339号, pp.59-64, 1983.
- 5) 星谷勝, 斉藤悦郎: 線形多自由度系の動特性の推定, 土木学会論文集, 第344号, I-1, pp.289-298, 1984.
- 6) 星谷勝, 斉藤悦郎: 建設技術者のためのデータ解析と応用, 鹿島出版会, 1991.
- 7) 橋梁振動研究会: 橋梁振動の計測と解析, 技報堂出版, 1993.
- 8) 土木学会: 橋梁振動モニタリングのガイドライン, 構造工学シリーズ10, 2000.