

自由振動記録に対する時間領域のモード解析

— 道路橋常時微動観測記録の解析例 —

株式会社バイブラントシステム開発
Vibrant System Development Co., Ltd.

〒207-0014 東京都東大和市南街 5-39-16

TEL (FAX) 042-507-2731

E-mail ando@vsdc.co.jp

URL <http://www.vsdco.jp>

目 次

1. はじめに	1
2. 5 径間ラーメン橋の解析例	1
2-1 固有周波数および減衰定数	3
2-2 加速度波形およびフーリエスペクトル	3
2-3 モード図	9
3. おわりに	10

1. はじめに

現在、1960年代の高度成長期に建設されたインフラの老朽化が社会的な課題となっています。特に道路や鉄道の橋梁は深刻であり、維持管理のために動的特性に基づいた健全性の評価手法に関する研究が多くの研究機関で行われています。

橋梁の場合は、動的特性の調査方法として大型車両に搭載した起振機による載荷実験が多く採用されています。ただ、車両の重量の影響や橋梁間との連成振動のため橋梁自体の同特性を捉えるのは難しいと思われまます。また、重錘による橋脚打撃の方法もありますが、特殊な技術を要する大がかりな試験であり、対象は限られます。

弊社の「時間領域のモード解析^{1) 2) 3) 4)}」は、通常の走行車両を振動源とする橋梁の微動記録を使用して動的特性を明らかにします。微動記録は、車両通過後に計測される記録であり、車両の影響はありません。単に固有周波数の把握のみを目的とするのであれば一点の記録だけで解析可能であり、簡易に実施できます。

時間領域のモード解析は、観測記録より対象系が次の運動方程式に従うことを前提としてモード定数（固有値および固有ベクトル）を求め、系の動的特性を明らかにすることを目的とします。

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = 0$$

ここに、 M 、 C および K は、それぞれ質量、減衰、剛性の行列であり、 $x(t)$ は変位ベクトルです。

モード定数は、最小二乗法に基づいて、上式の理論解（回帰式）と観測記録との間の誤差を評価して求められます。

時間領域のモード解析には次のような特徴があります。

- ① 観測記録より最小二乗法に従い振動系の固有値（固有周波数と減衰定数）および固有ベクトルを求め、周波数特性を明らかにします。振動系の M 、 C および K の情報は必要ありません。
- ② 刺激係数の大きいモードから求められ、複雑な周波数特性を有する系についても容易に解析が可能です。
- ③ 固有値は非線形最小二乗法に従って計算を行いますが、収束性にたいへん優れています。
- ④ インパルス応答の場合は、インパルスハンマによる加振力の作用が消失した後の記録が解析対象となります。

以下に時間領域のモード解析の解析例を紹介します。同解析は動的特性に基づく維持管理手法として活用可能な手法であると考えます。

2. 5径間ラーメン橋の解析例

解析で対象とした橋梁は全長190m（両端のジョイント部間の距離は160m）の5径間ラーメン橋です。図1に概略図を示します。通行車両による常時微動は、10等分したジョイント部間の9ヶ所の分割点において、橋の軸方向（x方向）、軸直角方向（y方向）および上下方向（z方向）の3成分について個別に計測しました。ただし、以下には、3成分の内、良好な観測結果が得られたy成分の解析結果についてのみ紹介します。

図2に解析で使用した道路橋の9地点の加速度記録y成分を示します。解析では車両のジョイント部通過直後の82.55秒から10.24秒間（サンプリング周波数200Hz）の記録を対象としました。

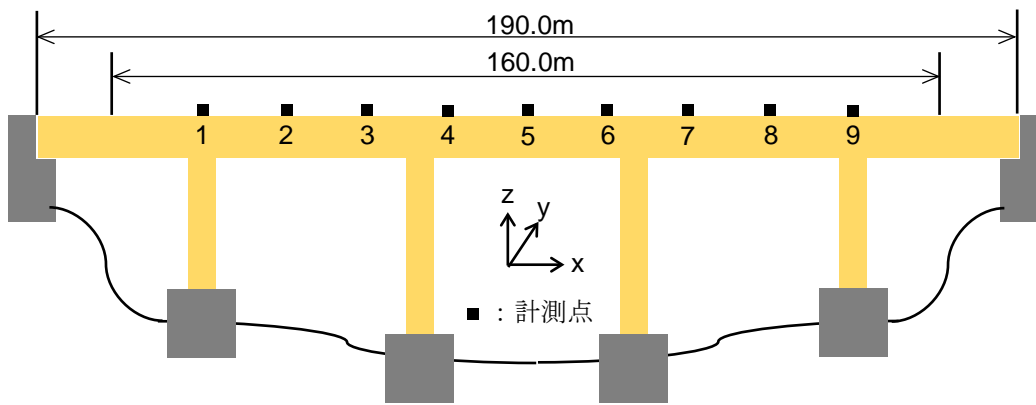


図1 観測対象ラーメン橋

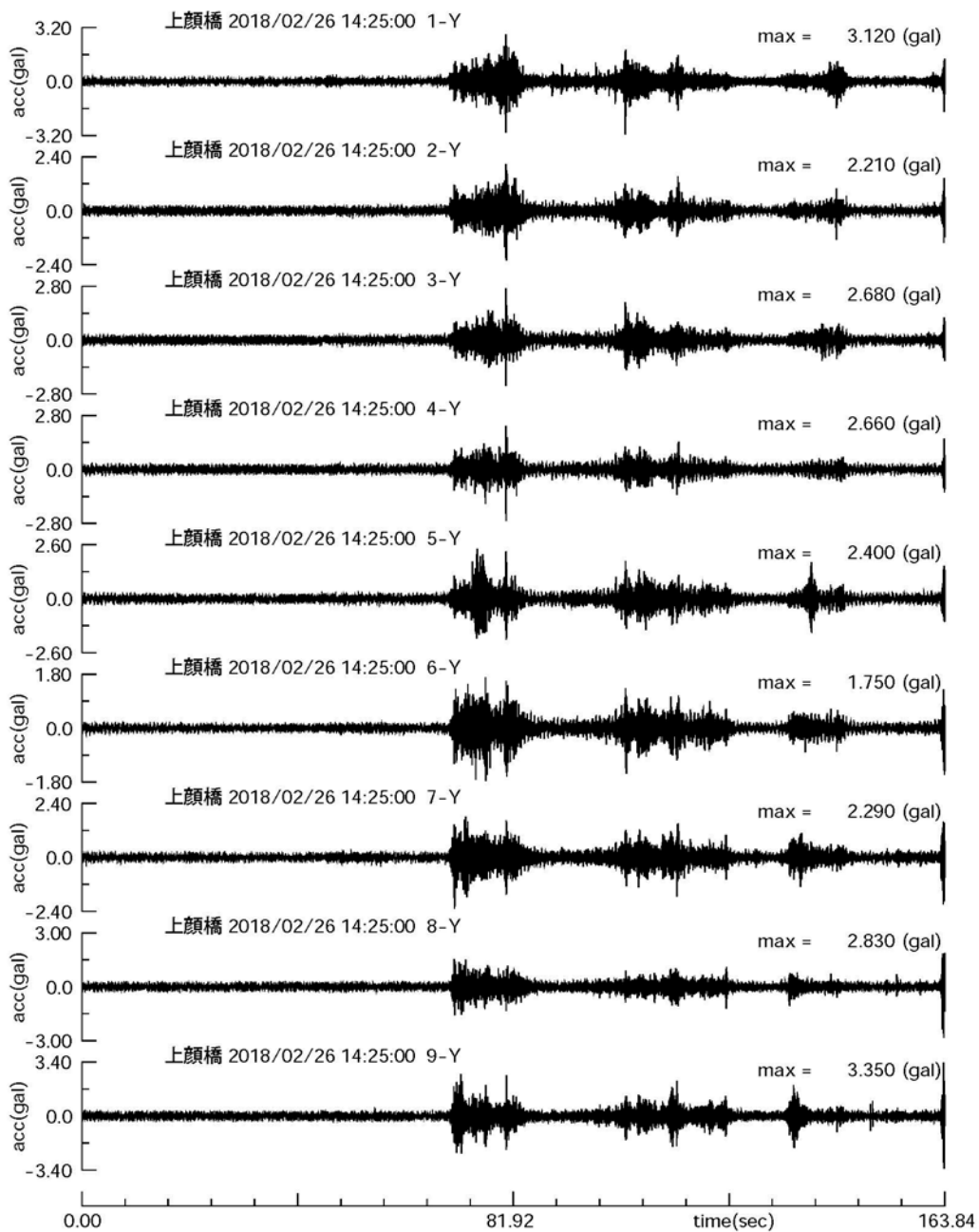


図2 加速度記録

2.1 橋梁の固有周波数および減衰定数

解析より求められたモードは 9 個です。これらモードの固有周波数および減衰定数を表 1 に示します。観測記録は低次の 3 個のモードでほぼ再現されますが、更にわずかな残差を評価して、併せて 9 個のモードが得られました。

表 1 橋梁の固有周波数および減衰定数

モード番号	固有周波数(Hz)	減衰定数(%)
1	1.357	0.48
2	2.960	1.03
3	4.961	2.02
4	6.634	0.41
5	8.429	0.72
6	9.281	0.79
7	9.893	1.34
8	11.180	3.23
9	14.097	1.23

2.2 橋梁の加速度波形およびフーリエスペクトル

解析より求められた 9 個のモードの和による加速度波形と観測記録との比較図および各フーリエスペクトルの比較図をそれぞれ図 3、4 に示します。解析による波形および絶対値と位相の各スペクトルの再現性は良好であり、解析結果は妥当であると判断されます。

橋梁の特徴として、図 4-4、5 のフーリエスペクトルから、橋の中央部の 4y と 5y は第 1 次モードが卓越し、他の点では第 2 次モードが卓越していることがわかります。この違いは図 3 の加速度波形にも現れています。

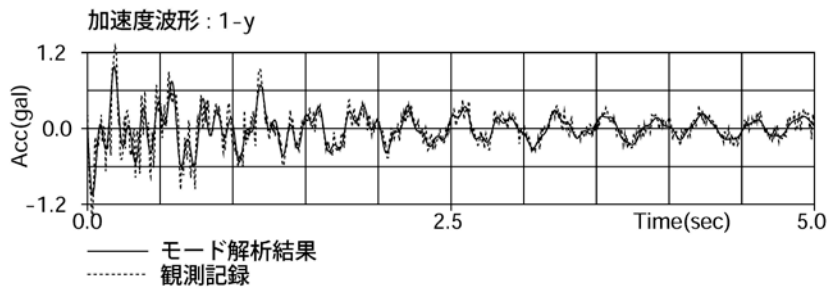


図 3-1 計測点 1y の加速度波形の比較図

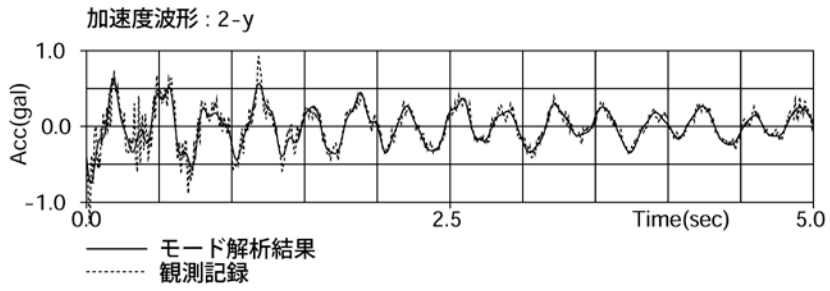


図 3-2 計測点 2y の加速度波形の比較図

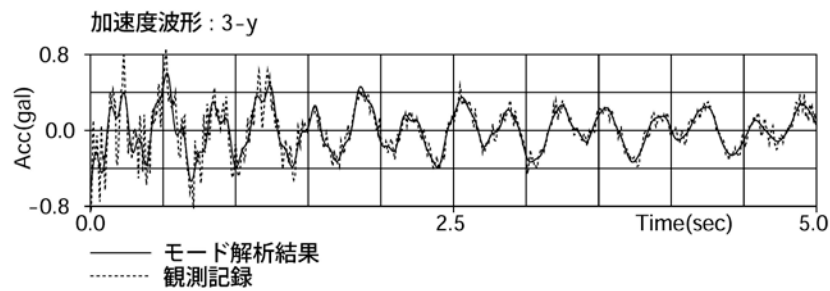


図 3-3 計測点 3y の加速度波形の比較図

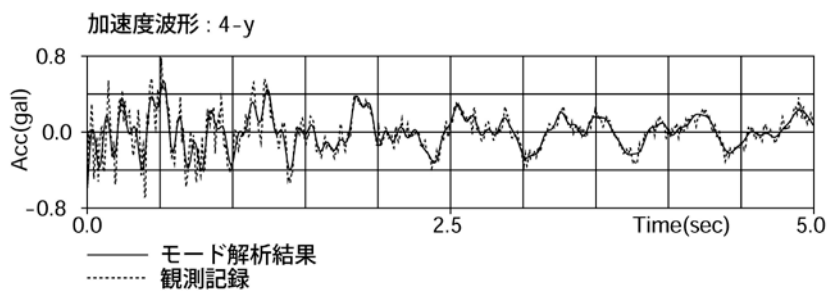


図 3-4 計測点 4y の加速度波形の比較図

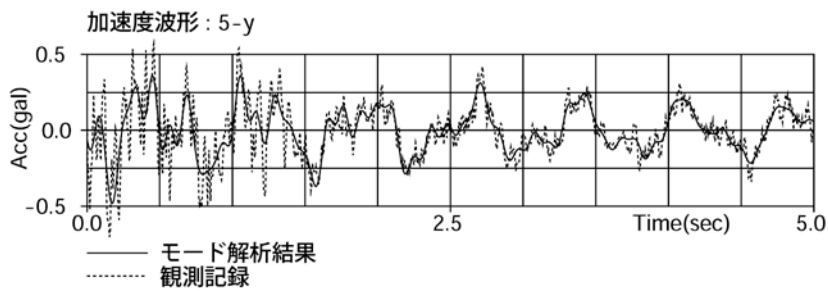


図 3-5 計測点 5y の加速度波形の比較図

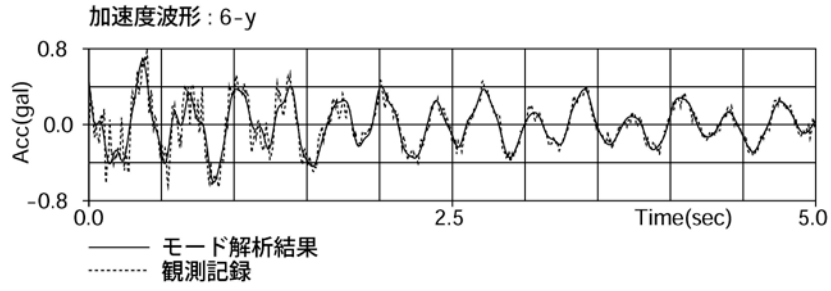


図 3-6 計測点 6y の加速度波形の比較図

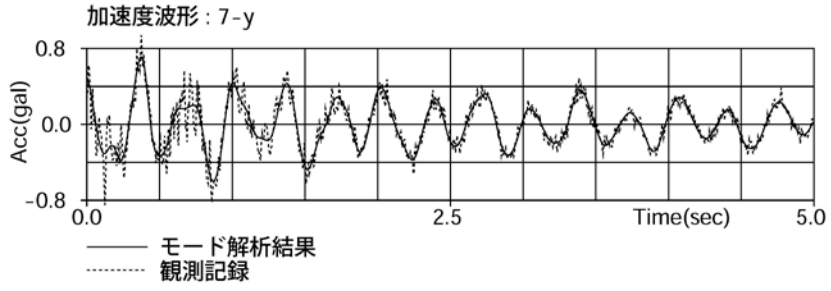


図 3-7 計測点 7y の加速度波形の比較図

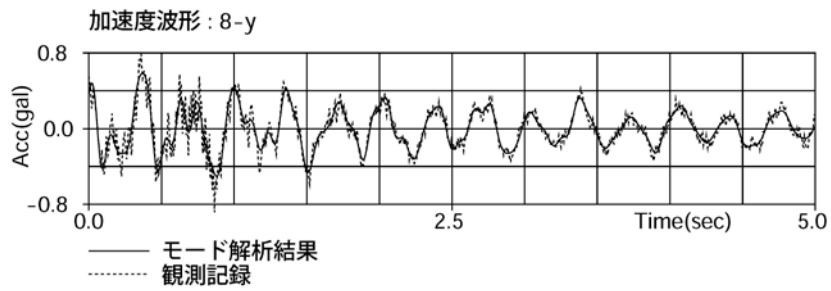


図 3-8 計測点 8y の加速度波形の比較図

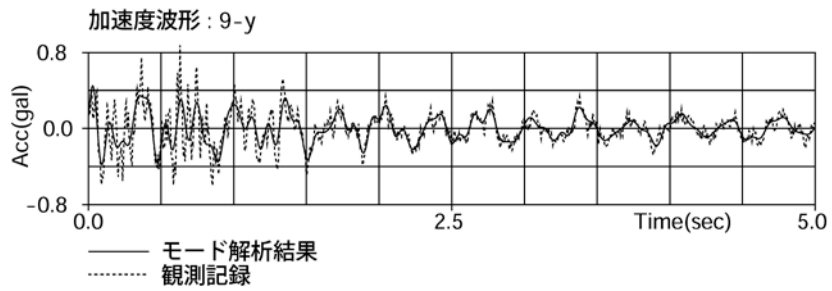


図 3-9 計測点 9y の加速度波形の比較図

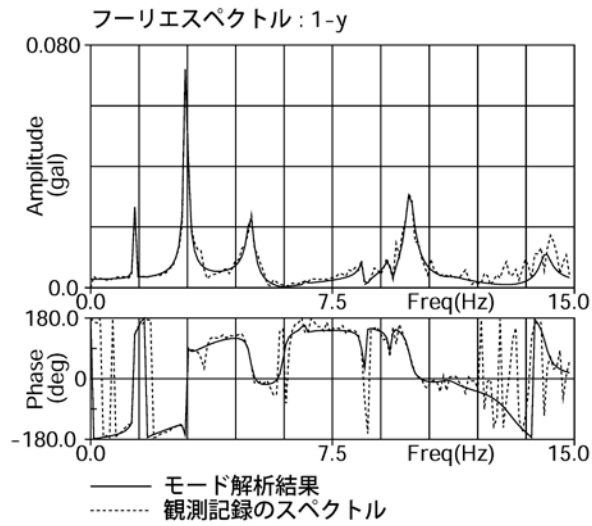


図 4-1 1y のフーリエスペクトルの比較図

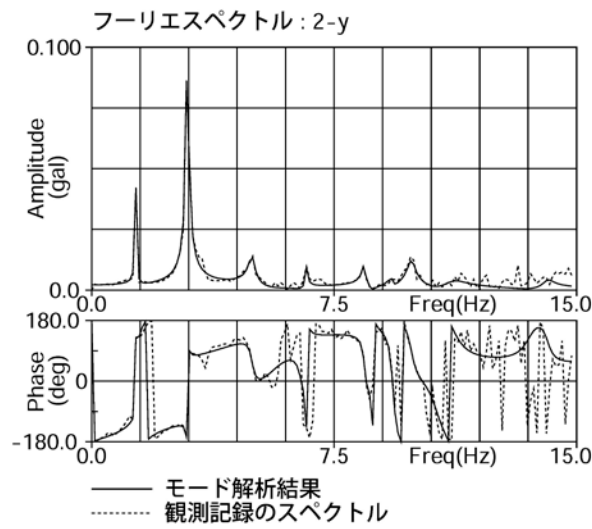


図 4-2 2y のフーリエスペクトルの比較図

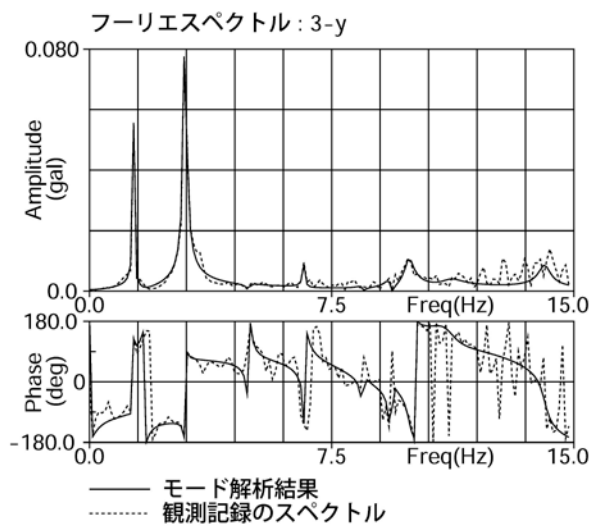


図 4-3 3y のフーリエスペクトルの比較図

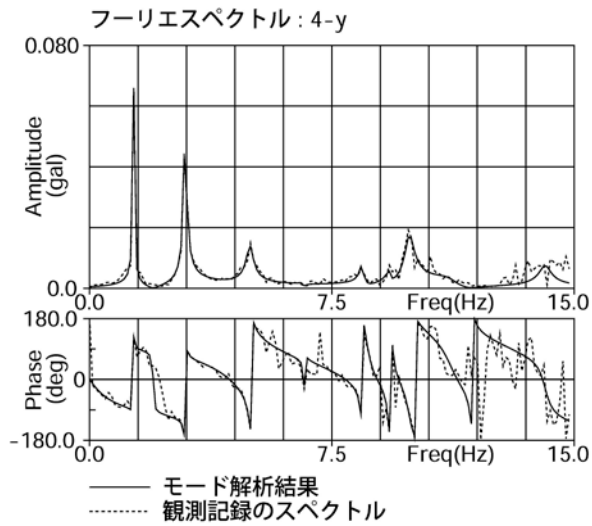


図 4-4 4y のフーリエスペクトルの比較図

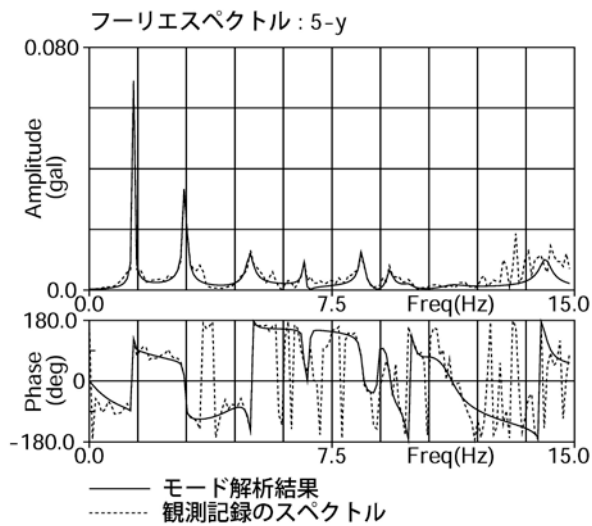


図 4-5 5y のフーリエスペクトルの比較図

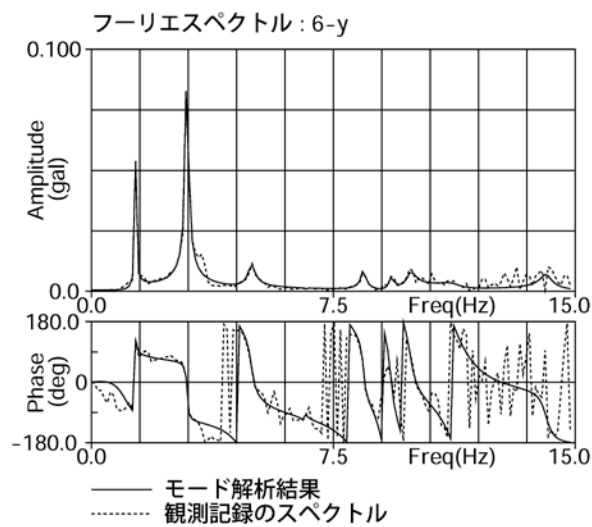


図 4-6 6y のフーリエスペクトルの比較図

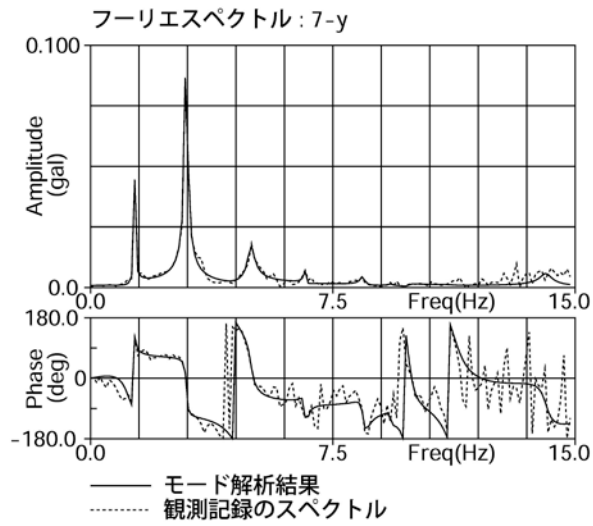


図 4-7 7y のフーリエスペクトルの比較図

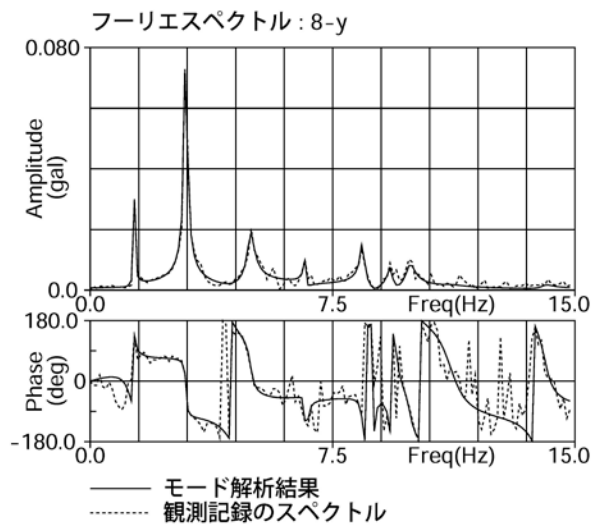


図 4-8 8y のフーリエスペクトルの比較図

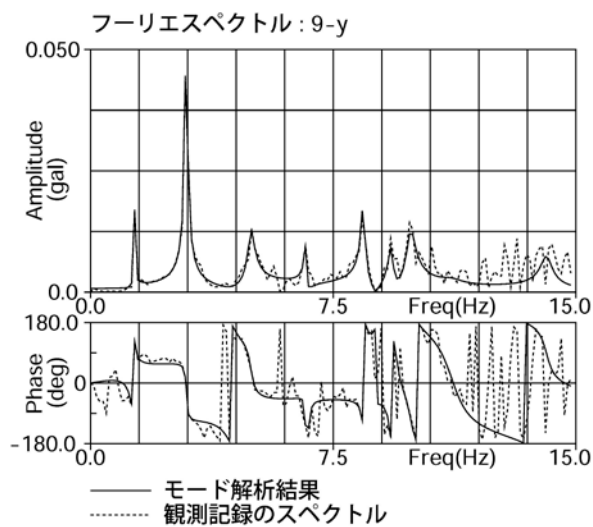


図 4-9 9y のフーリエスペクトルの比較図

2.3 橋梁のモード図

解析より求められた固有ベクトルは図 5 のようになります。次数毎に 1y を基準にして最大値を 1.0 に正規化して描いています。第 1 次から 3 次は曲げモードであり、第 4 次以降はねじり等のモードになります。第 1 次と 2 次の固有ベクトルの形状には 2.2 で指摘した内容が見られます。即ち、各次で正規化をしているため大きさの比較は直接できませんが、第 1 次モードが卓越する橋の中央部の 4y と 5y は第 2 次モードの節に当たるためこのモードが抑えられ、他の点については第 2 次モードの方が卓越していることがわかります。

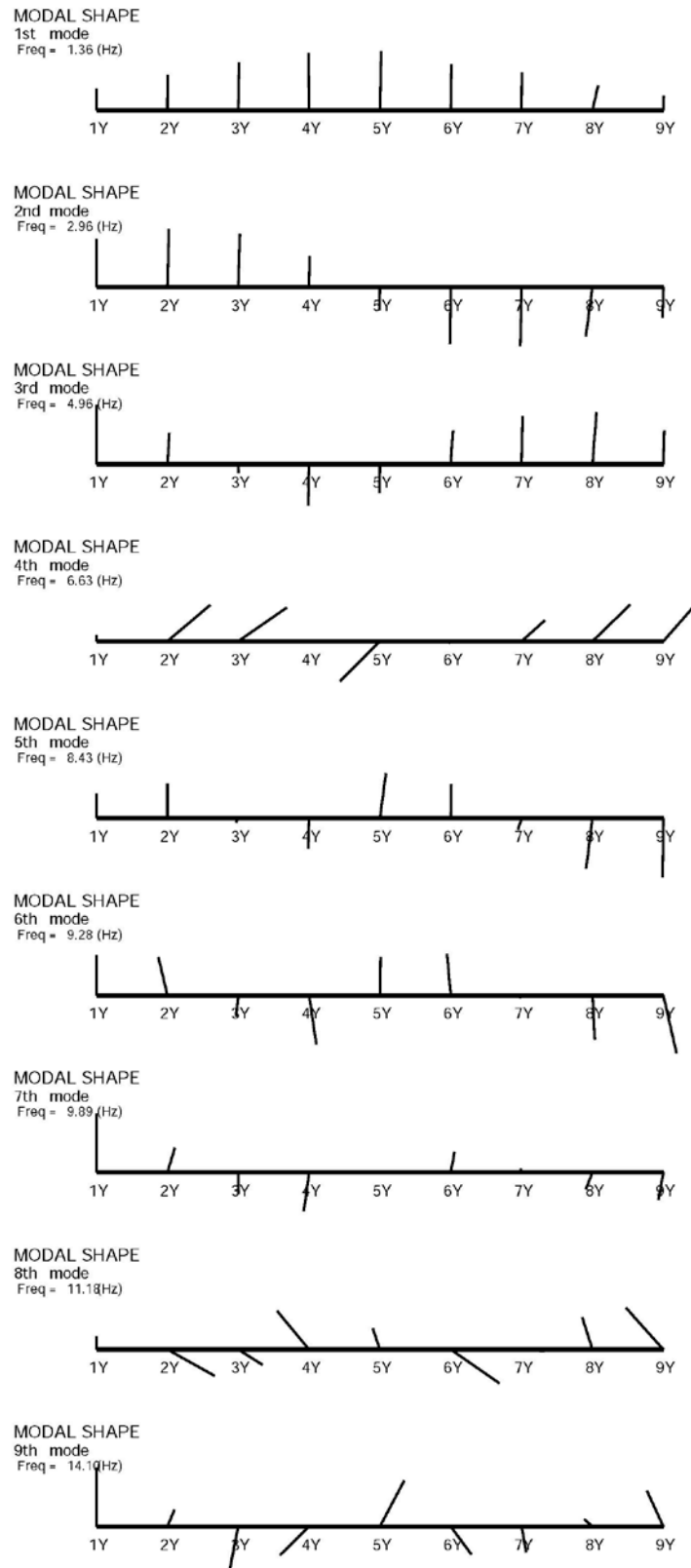


図 5 モード図

3. おわりに

時間領域のモード解析より、一端が固定されている一般の建物とは異なり、複雑な振動性状を示す橋梁の主要なモードの曲げモードが明らかになりました。これより、経過年数に伴う振動特性の変化が把握され、健全性診断の信頼性が向上するものと考えます。また、老朽化や被災時に見られる質量および剛性の変動は、時間領域のモード解析結果を参照して数値モデル同定解析¹⁾を行うことにより検討可能であり、通行車両を振動源とする方法は、動的特性に基づく維持管理手法として有効であると考えます。そして、同方法は、交通の妨げになることはありません。コストも抑えられ、作業時間の短縮が期待される効率的な方法と言えます。

参考文献)

- 1) 安藤幸治・岩楯敞広：時間領域のモード解析による振動系の動的特性の同定とその適用、土木学会論文集、No.450/I-20、pp.151～160、1992.7
- 2) 安藤幸治，岩楯敞広，小田義也：数値モデル同定解析手法とその適用，機械学会年次大会，2011.9
- 3) 岩楯敞広，内藤伸幸，安藤幸治、小田義也：東北地方太平洋地震による逗子地域の表層地盤の地震応答特性，土木学会論文集 A1 特集号地震工学論文集 Vol.33，2014.6
- 4) 安藤幸治，岩楯敞広：時間領域のモード解析とその適用，土木学会年次大会，2018.8
- 5) 安藤幸治，岩楯敞広：数値モデル同定解析手法とその適用，機械学会年次大会，2017.9