

時間領域のモード解析

— 微動記録による S 造 9 階建て建物の動的特性 —

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. 解析結果	-----	2
2.1 建屋短辺方向	-----	2
2.2 建屋長辺方向	-----	7
3. おわりに	-----	12
参考文献	-----	12

1. はじめに

近年、地震防災システムを兼ねた構造ヘルスマニタリングシステムに対する関心が高まっています。平時においては、観測された記録は建物の維持管理のために使用されますが、地震発生時には、記録から得られる加速度応答や変位応答、層間変形角等の建物の情報を基にして損傷状況の調査・診断が行われるため、建物の継続使用の可否の判断や避難行動等、被災時の初動対応が的確に進むものと考えられます。

建物の健全性については動的特性が明らかになれば更に詳細な検討が可能となります。建物の同特性は固有値および固有ベクトルより把握できますが、老朽化や被災時のダメージによって質量あるいは剛性に变化をきたした場合は、固有値の絶対値（あるいは固有周波数）は減少し、固有ベクトルに形状の変化が現れます。従って、建物のモニタリングデータより求められる固有値や固有ベクトルに変動があれば、その大きさによっては建物内部の構造的な損傷が考えられ、健全性の判定に反映されることとなります。

建物の固有値および固有ベクトルは、地震や微動の観測記録より逆解析的に求めることが可能です。以下にその解析手法の一つである弊社で開発した「時間領域のモード解析¹⁾」による解析例を紹介し、使用した記録は微動記録ですが、建物の場合は地震記録と同様の解析・処理が可能であり、常時監視態勢にある構造ヘルスマニタリングシステムにとって有用なデータであることがわかります。

解析で対象とした構造物はS造9階建ての建物です。微動計測は、建物の一階（1F）と屋上（RF）のそれぞれ中央部で同時に30分間継続して実施しました。そして、平均的な振動特性を得るため、同計測を3回繰り返しました。時間領域のモード解析は、各回の記録（サンプリング周波数50Hz）をデータ数4096個のブロックに分割し、その中から5ブロックを取り出して同時に行い、各回の平均的な固有値および固有ベクトルを計算しました。このとき、運動方程式に関して1Fの記録を建物に対する入力波、RFの記録をその応答と仮定しました。

運動方程式は次のようになります。

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

ここに、 M 、 C および K は、それぞれ質量、減衰、剛性のマトリックスです。また、 $\mathbf{x}(t)$ 、 $\mathbf{f}(t)$ は、変位、外力のベクトルです。

解析より、パラメータである固有値および固有ベクトルが求められ、その結果を使用して、変位 $\mathbf{x}(t)$ 、速度 $\dot{\mathbf{x}}(t)$ 、加速度（回帰式） $\ddot{\mathbf{x}}(t)$ および伝達関数 $T(\omega)$ が次式により解析的に求められます。

$$\mathbf{x}(t) = \sum_r \mathbf{c}_r(\lambda_r, t) \mathbf{u}_r \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_r \mathbf{c}_r(\lambda_r, t) \lambda_r \mathbf{u}_r \quad (3)$$

$$\ddot{\mathbf{x}}(t) = \sum_r \dot{\mathbf{c}}_r(\lambda_r, t) \lambda_r \mathbf{u}_r \quad (4)$$

$$T(\omega) = \sum_r \frac{\omega^2 \mathbf{u}_r^T M \mathbf{I}}{i\omega - \lambda_r} \mathbf{u}_r + \mathbf{I} \quad (5)$$

ここに、 \mathbf{c}_r は第 r 次固有ベクトルの展開係数であり、 λ_r 、 \mathbf{u}_r は、それぞれ第 r 次の固有値、固有ベクトルです。また、 i は虚数単位であり、 \mathbf{I} は単位ベクトルです。固有値 λ_r は、第 r 次固有周波数 f_r と固有減衰定数 h_r とは次のような関係にあります。

$$\lambda_r = -2\pi f_r h_r + i2\pi f_r \sqrt{1 - h_r^2} \quad (6)$$

2. 解析結果

モード解析は、建物の短辺方向と長辺方向の2方向について行いました。

2.1 建物短辺方向

固有周波数と固有減衰定数は表 2.1-1 のようになります。同表の平均値は各回の平均です。減衰定数に多少のバラツキがありますが、良好な結果が得られました。

表 2.1-1 固有周波数と固有減衰定数

次数	固有周波数(Hz)				固有減衰定数(%)			
	1回目	2回目	3回目	平均値	1回目	2回目	3回目	平均値
1	0.96	0.96	0.96	0.96	0.61	0.53	0.55	0.56
2	2.88	2.88	2.88	2.88	1.11	1.16	1.17	1.15

2.1.1 1回目の観測記録を使用したときの建物屋上 RF の加速度波形と伝達関数

解析より求められた加速度波形および伝達関数をそれぞれ図 2.1.1-1、図 2.1.1-2 に示します。双方とも再現性は良好です。

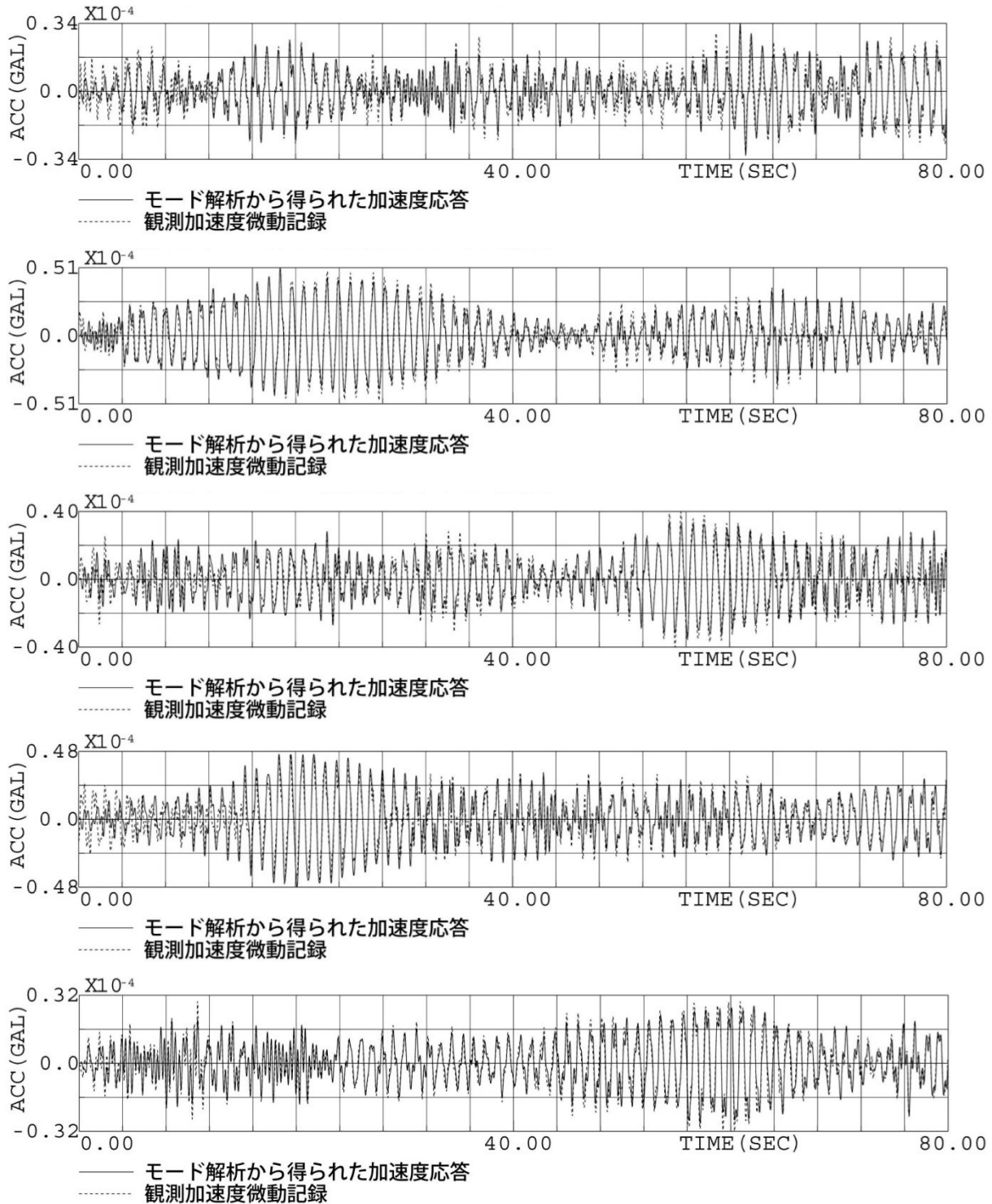


図 2.1.1-1 建屋屋上 RF の加速度波形の比較図

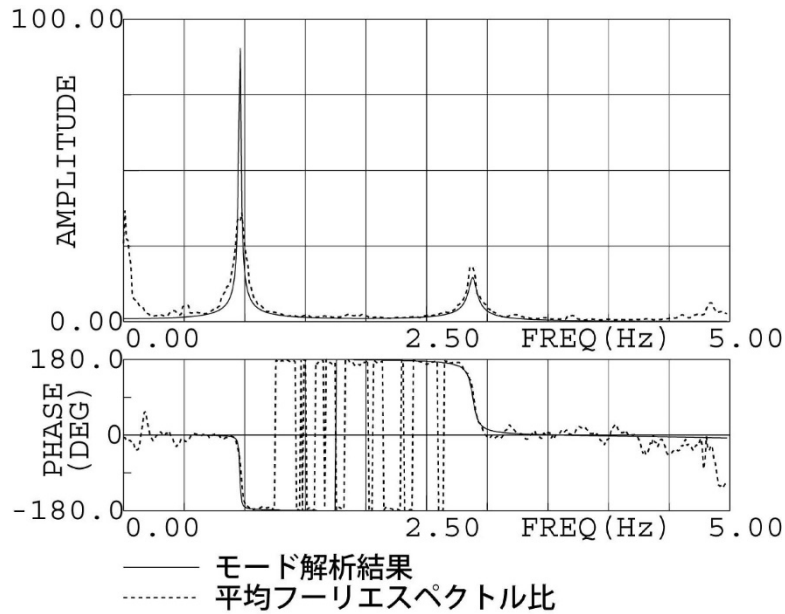
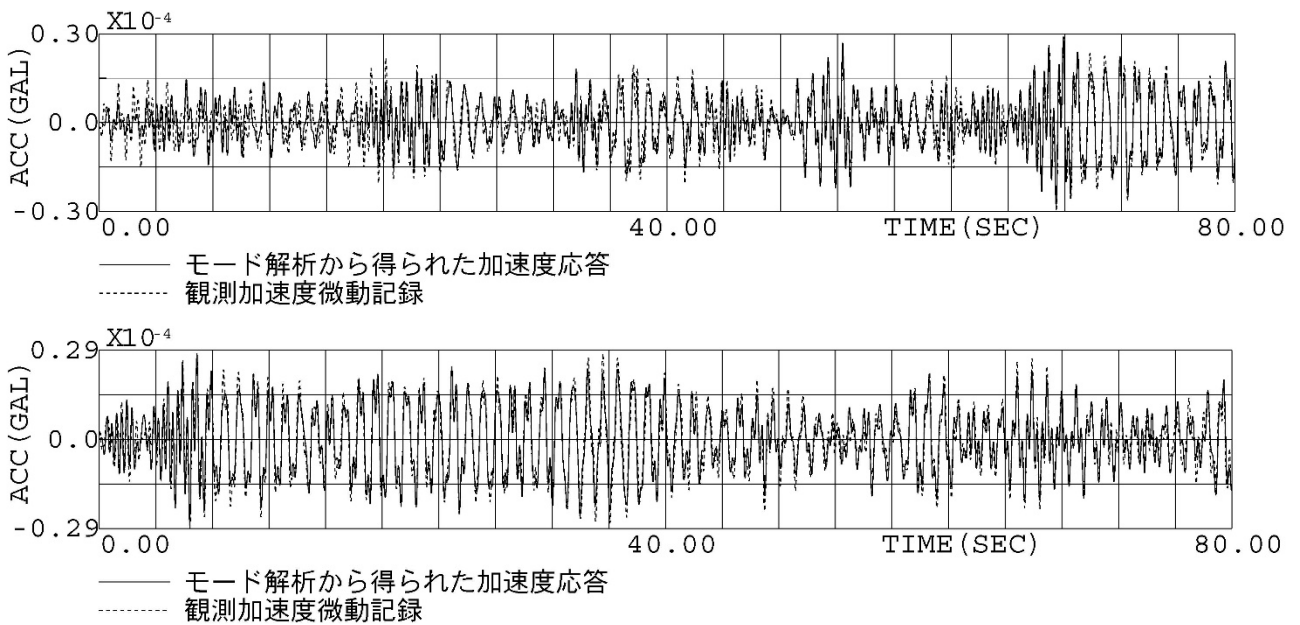


図 2.1.1-2 建屋屋上 RF の伝達関数の比較図

2.1.2 2回目の観測記録を使用したときの建物屋上 RF の加速度波形と伝達関数

解析より求められた加速度波形および伝達関数をそれぞれ図 2.1.2-1、図 2.1.2-2 に示します。双方とも再現性は良好です。



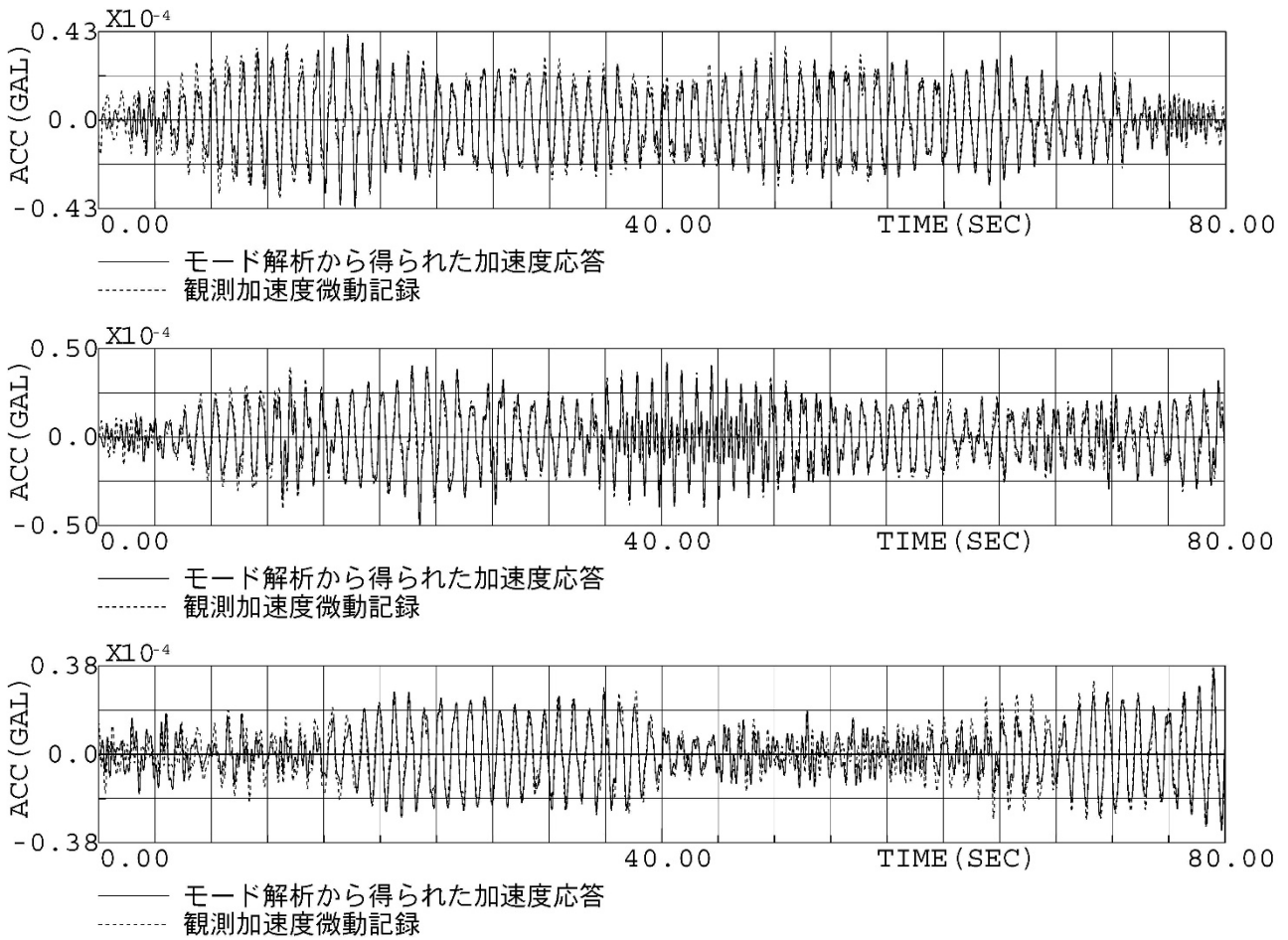


図 2.1.2-1 建屋屋上 RF の加速度波形の比較図

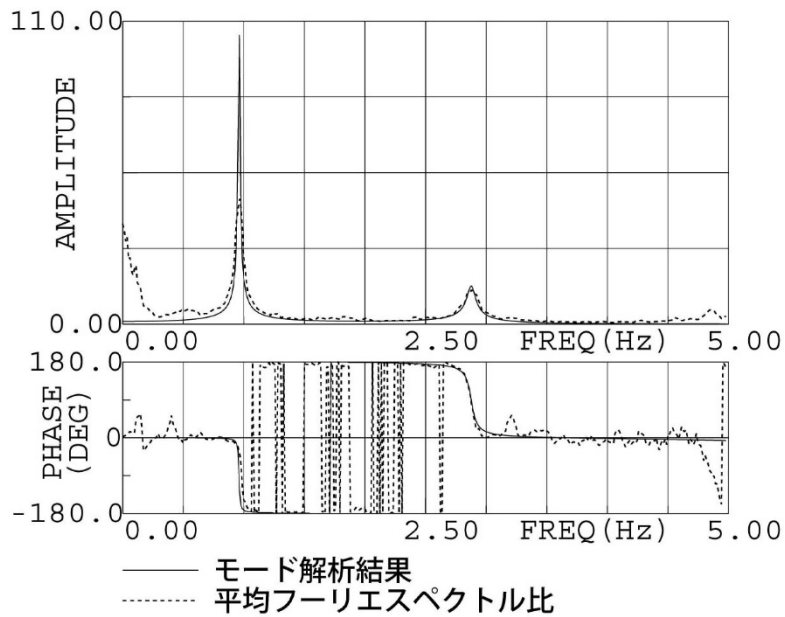


図 2.1.2-2 建屋屋上 RF の伝達関数の比較図

2.1.3 3回目の観測記録を使用したときの建物屋上 RF の加速度波形と伝達関数

解析より求められた加速度波形および伝達関数をそれぞれ図 2.1.3-1、図 2.1.3-2 に示します。双方とも再現性は良好です。

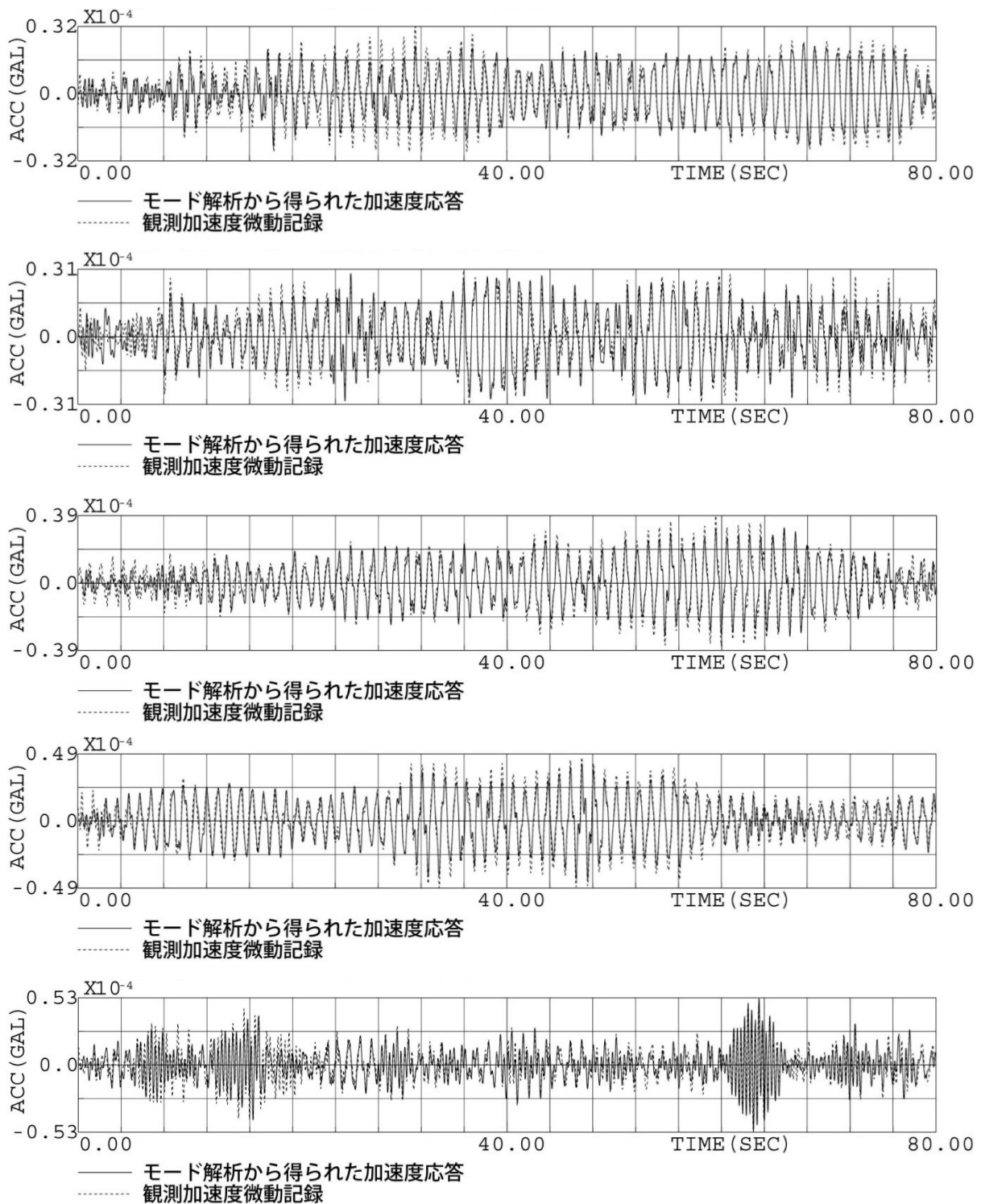


図 2.1.3-1 建屋屋上 RF の加速度波形の比較図

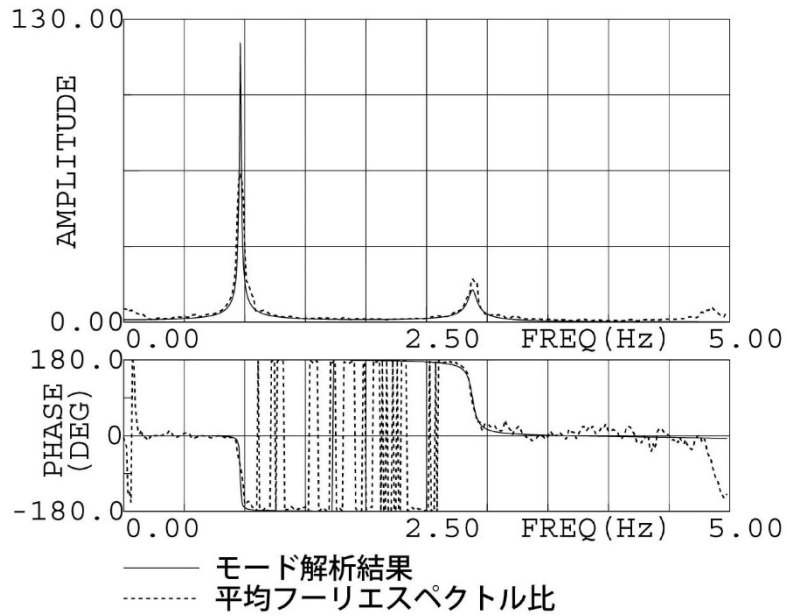


図 2.1.3-2 建屋屋上 RF の伝達関数の比較図

2.2 建物長辺方向

固有周波数と固有減衰定数は表 2.2-1 のようになります。同表の平均値は各回の平均です。短辺方向と同様に良好な結果が得られました。固有周波数は、表 2.1-1 の短辺方向に比較してわずかに小さいです。また、減衰定数は短辺方向とは異なり、第一次と二次ではほぼ同値です。

表 2.2-1 固有周波数と固有減衰定数

次数	固有周波数(Hz)				固有減衰定数(%)			
	1回目	2回目	3回目	平均値	1回目	2回目	3回目	平均値
1	0.91	0.91	0.91	0.91	0.60	0.48	0.59	0.56
2	2.70	2.70	2.70	2.70	0.66	0.67	0.66	0.66

2.2.1 1回目の観測記録を使用したときの建物屋上 RF の加速度波形と伝達関数

解析より求められた加速度波形および伝達関数をそれぞれ図 2.2.1-1、図 2.2.1-2 に示します。双方とも再現性は良好です。

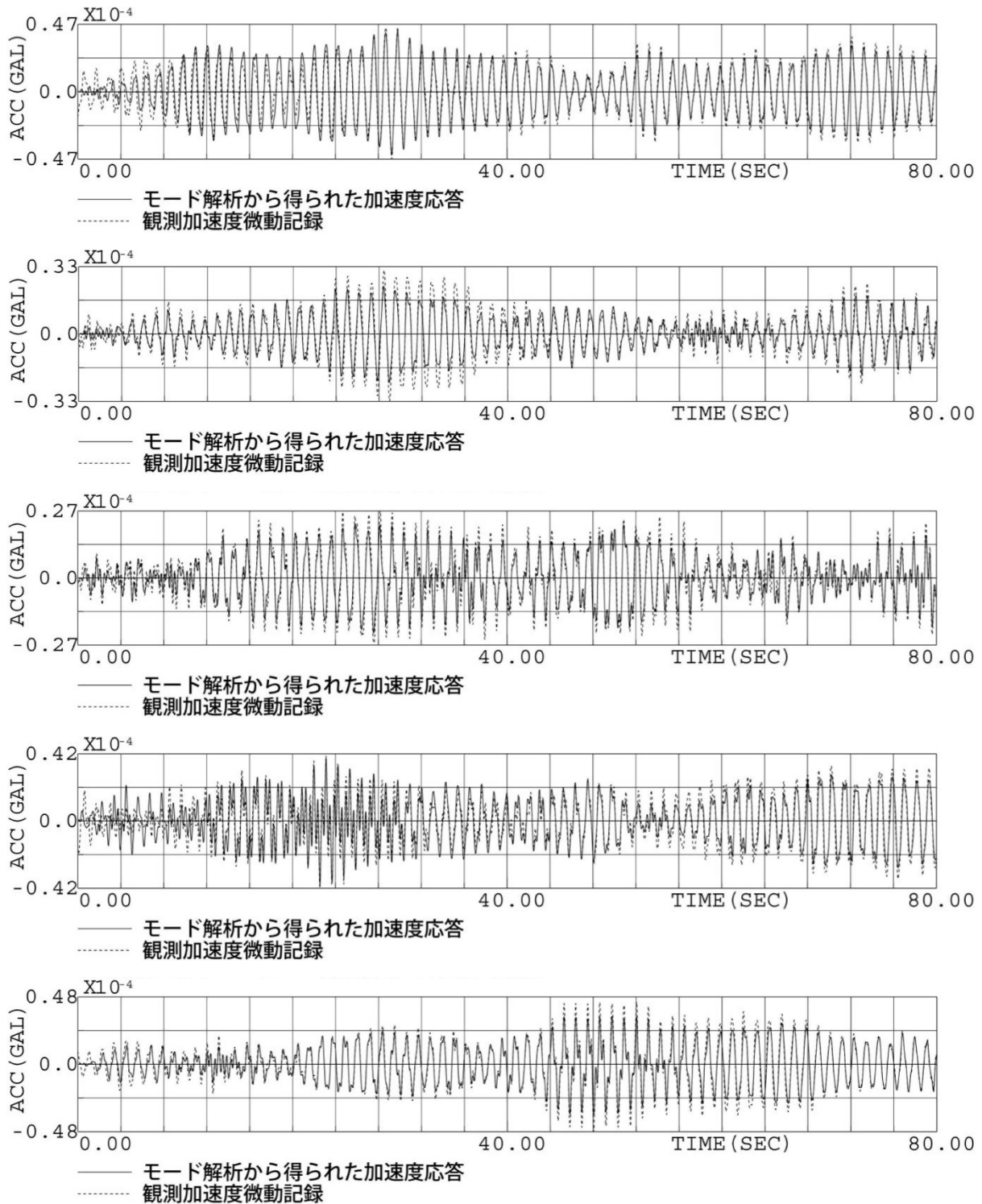


図 2.2.1-1 建屋屋上 RF の加速度波形の比較図

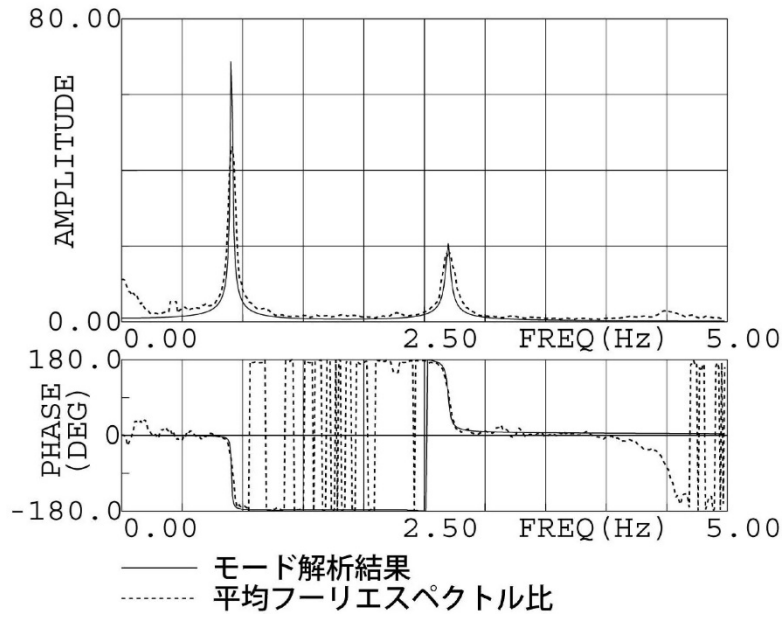
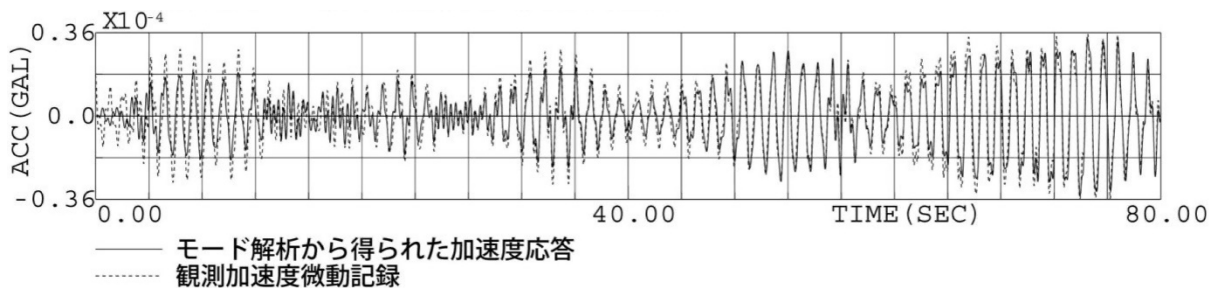
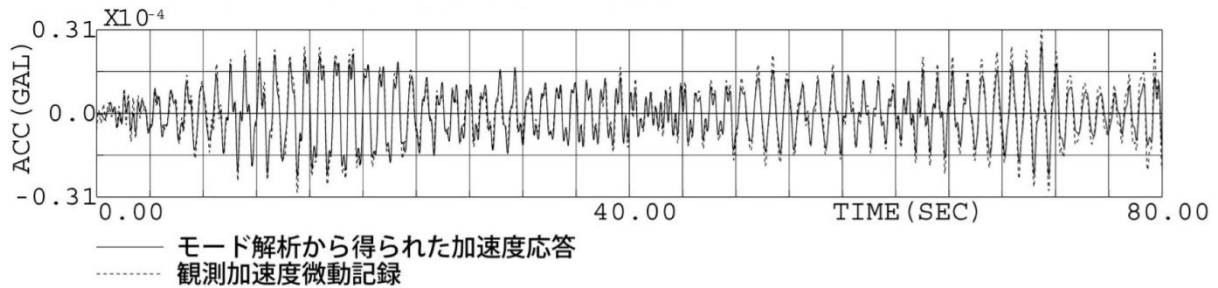


図 2.2.1-2 建屋屋上 RF の伝達関数の比較図

2.2.2 2回目の観測記録を使用したときの建物屋上 RF の加速度波形と伝達関数

解析より求められた加速度波形および伝達関数をそれぞれ図 2.2.2-1、図 2.2.2-2 に示します。双方とも再現性は良好です。



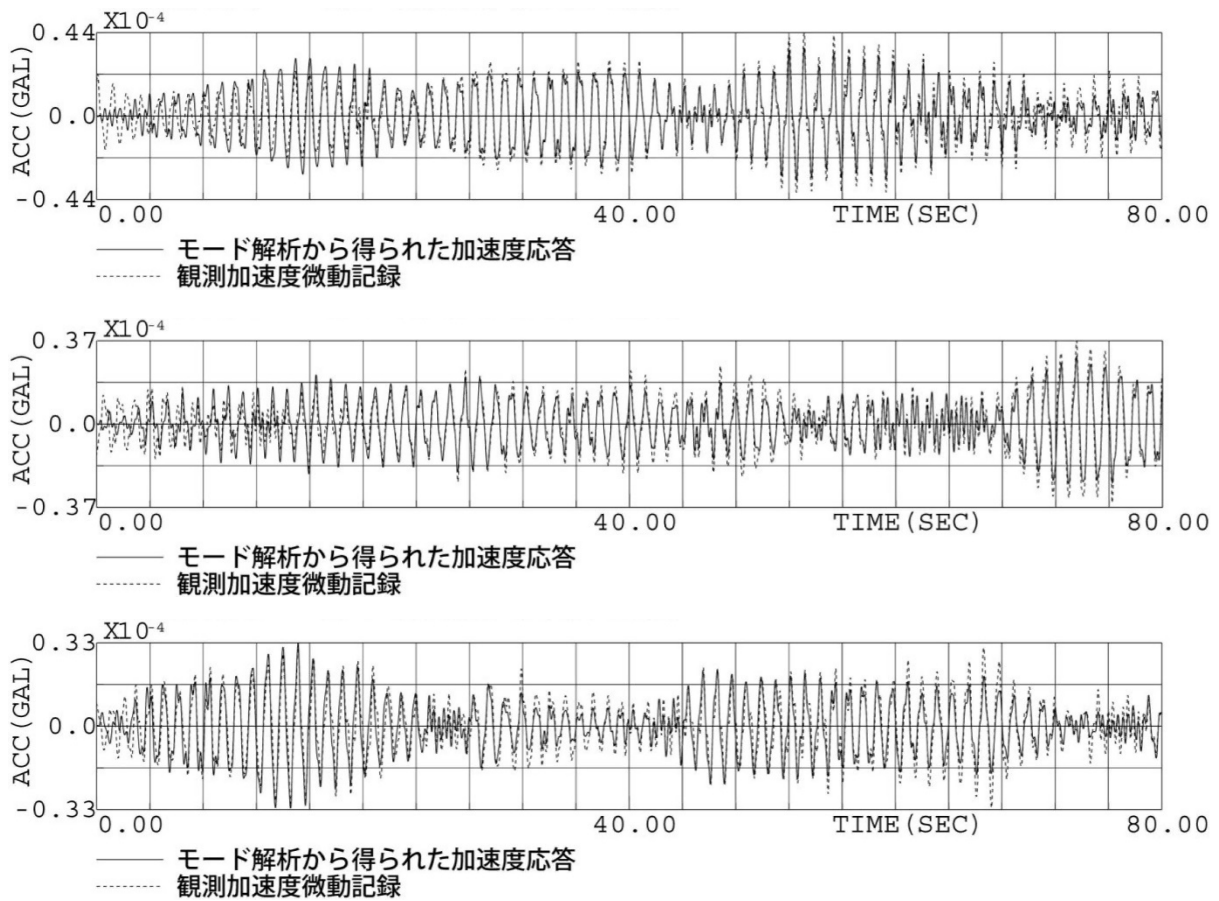


図 2.2.2-1 建屋屋上 RF の加速度波形の比較図

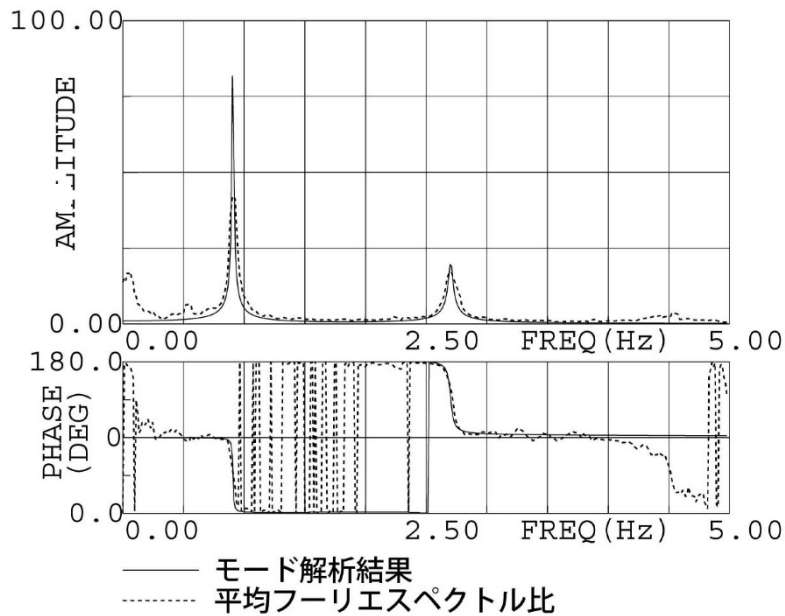


図 2.2.2-2 建屋屋上 RF の伝達関数の比較図

2.2.3 3回目の観測記録を使用したときの建物屋上 RF の加速度波形と伝達関数

解析より求められた加速度波形および伝達関数をそれぞれ図 2.2.3-1、図 2.2.3-2 に示します。双方とも再現性は良好です。

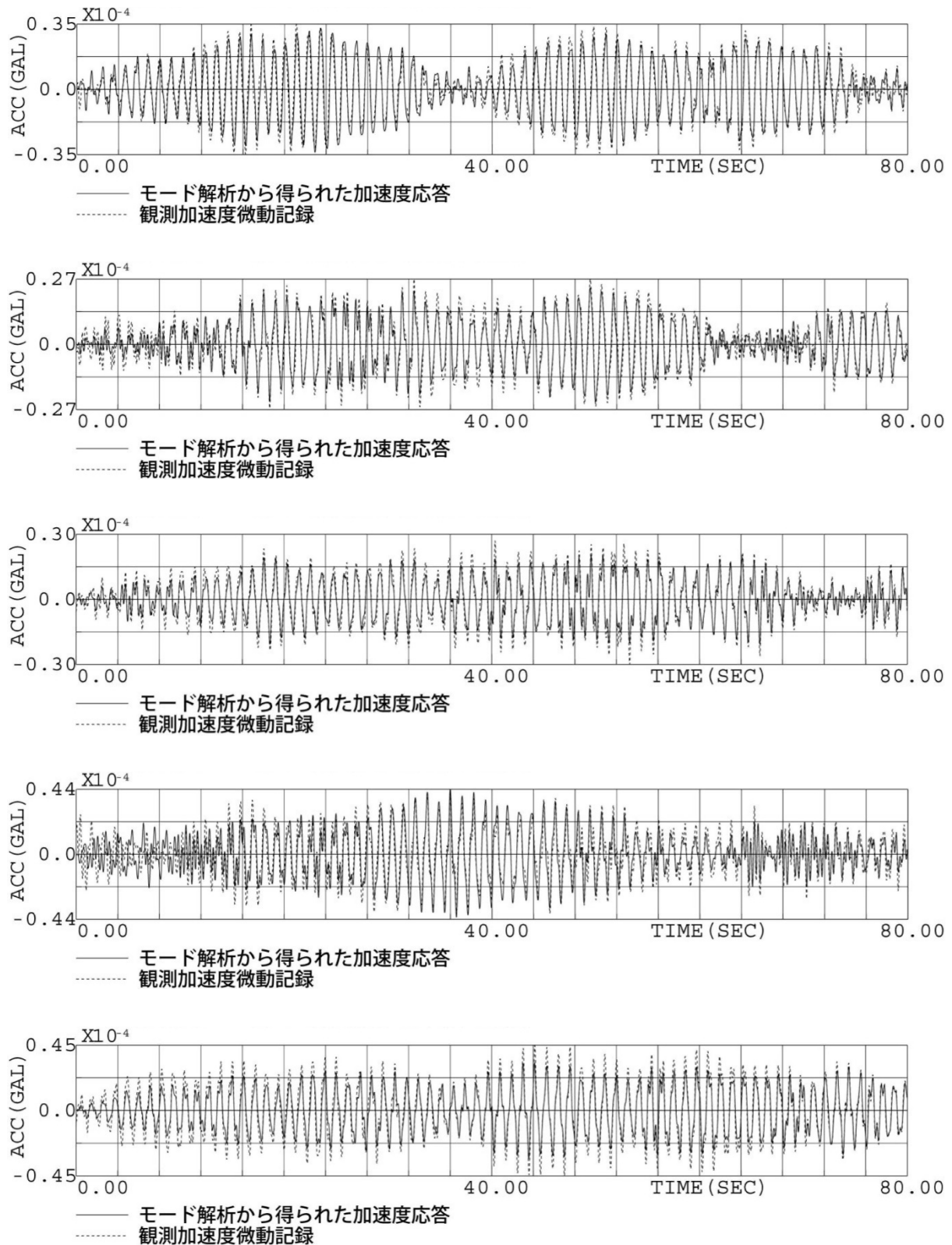


図 2.2.3-1 建屋屋上 RF の加速度波形の比較図

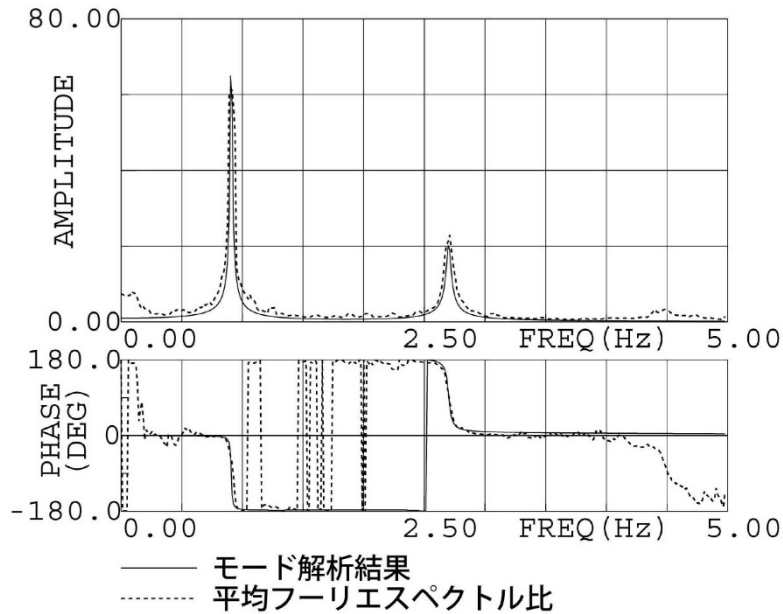


図 2.2.3-2 建屋屋上 RF の伝達関数の比較図

3. おわりに

建物の動的特性について微動記録より良好な結果が得られました。対象とした建物については、短辺、長辺ともに同様のモード構成であることがわかりました。また、双方の第一次モードは、その刺激係数が第二次モードの同係数に比較して約 10 倍の大きさであり、応答に対して支配的であると言えます。

微動記録は変位振幅が中小地震に比較して 1/100 以下であり、解析結果に見られるように、減衰定数は非常に小さい値になります。ただ、建物の減衰定数は中小地震でも比較的小さいため、モニタリングシステムで建物の一部のフロアを観測対象外とする場合、予め常時微動を計測して固有ベクトルを把握しておけば、それらフロアの地震時応答の計算は可能であり、ほぼ本来の値が得られます。ただし、著しい被害を受けた場合は難しいです。

以上より、建物の常時微動記録は、地震記録と同様に、構造ヘルスマニタリングシステムにとって有用なデータであることがわかりました。固有値に変化が見られた場合は、数値モデル同定解析¹⁾より、剛性低下箇所の特定や剛性低下量の推定が可能です。

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