

2011年東北地方太平洋沖地震による免震建物の振動特性変化

斎藤 知生
(技術研究所)

Changes in Dynamic Characteristics of a Seismically Isolated Building Caused by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

by Tomoo SAITO

Abstract

Monitoring data obtained at a seismically isolated building in Tokyo during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake are analyzed to investigate the changes in the modal parameters of the building, which are generally used as global soundness indices in structural health monitoring, in correspondence with the response amplitude of the building. The modal parameters are identified using AR models from each short segment of the record every ten seconds. The AR model orders are selected appropriately by the Bayesian framework. The results show that the natural frequency decreases as the response increases and then regains its value as the response fades, where the value at the end is lower than that at the beginning. The modal identification is also conducted for daily monitoring data, which are two minute microtremor response time histories recorded twice a day, showing that the reduction of the natural frequency is not temporary. This indicates that it is feasible to predict the amplitude of the building response during a severe earthquake from microtremor observation before and after the earthquake.

概要

都内に建つ免震建物の2011年東北地方太平洋沖地震による振動特性の変化を明らかにした。地震応答モニタリングデータから、各モードの固有振動数及び減衰定数をARモデルを用いて10秒毎に推定し、準連続的にそれらの変化を評価した。その際、ARモデルの次数はベイズモデル選択手法により適切に決定された。同定の結果、応答が大きくなるに従い固有振動数の低下及び減衰定数の増大が認められ、また、地震終了時の固有振動数は開始時より低く留まっていた。更に、日常モニタリングデータである、1日2回計測される常時微動記録からも評価を行ったところ、地震後の固有振動数の低下は一時的でないことが明らかになった。このことは地震前後の微動観測によって建物の経験した応答の大きさがある程度推定できる可能性を示唆している。

§ 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、首都圏の多くの建物もそれまでに経験したことのない大きさの応答を生じた。本論文では、東京都に位置する免震建物のモニタリング記録を用いて、一般的にグローバルな健全性指標として用いられるモーダルパラメタ、特に固有振動数及び減衰定数が、同地震継続中及び地震前後でどのように変化したかを明らかにする。

近年、リスクマネジメントへの意識の高まりから、建物への構造ヘルスマニタリングシステムの導入が増えてきている。また、モニタリングデータを用いた診断技術についても多くの研究が行われ、主にシステム同定手法により建物の剛性やモーダルパラメタの変化を推定することにより健全性を評価するアプローチが

採用されている¹⁻⁵⁾。

一方で、それら研究の多くは建物の地震応答を対象としており、日常的な常時微動を継続的にモニタリングしている例は比較的少ない。研究的にも、常時微動データから建物の健全性を評価する試みは未だ僅かである⁶⁻⁹⁾。

しかし、日常データによる診断は、地震応答データによる評価の信頼性を支える重要な役割を担う。そこで本論文では、地震応答記録と、8年間以上にわたり蓄積されている日常データ(常時微動定時観測記録)との双方を用いて、東北地方太平洋沖地震による建物特性の変化を詳細に検討する。また、同定モデルの合理的な選択手法や、対象振動モードの抽出手法、動特性への温度・応答振幅の影響とその補正手法等についても議論する。



図-1 対象建物と構造ヘルスマニタリングシステムの概要

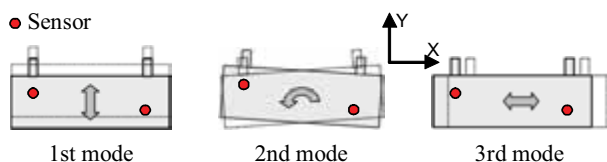


図-2 評価対象の基本モード

§ 2. 建物とシステムの概要

評価対象は東京都江東区に立地した、地上6階、延床面積9066 m²、軒高26.8 mの免震建物で、1階のピロティ部分に設けた6本のRC造ピア柱の上に各1基ずつ鉛プラグ入り積層ゴムを配置し、その上に2階から5階までの4層からなるS造メガトラスと6階部分のペントハウスが載る。

建物には加速度計・変位計・温度計等の各種センサが設置され、構造ヘルスマニタリングシステムを構成している⁷⁾。建物の概要とシステムの構成を図-1に示す。システムでは、1) 日常データ: 1日2回(0時・12時)計測される2分間の常時微動波形、2) イベントデータ: 地震時等に加速度振幅をトリガとして記録される応答波形、の2種類のデータを収集している⁹⁾。2011年東北地方太平洋沖地震では、連続した980秒間のイベントデータが得られた。また、日常データは2003年の建物竣工以来、8年間以上にわたる記録が蓄積されている。

§ 3. 振動特性の評価手法

3.1 モーダルパラメタの推定

既往の研究より、本建物には図-2に示す3つの基本モードが存在することが確認されており¹⁰⁾、本論

文でもこれらに対応したモーダルパラメタ(固有振動数・減衰定数)を評価の対象とする。

モーダルパラメタが変化する様子を評価するため、まず記録から20秒間のフレームを取り出し、そのデータから同定されるモーダルパラメタをフレーム中央の時刻に対応させる。そのフレームを10秒ずつ移動させて準連続的に値の変化を評価する。

同定にはフレームの切り出しに伴う誤差¹¹⁾を生じず短いデータからも精度の良い推定が可能な、次式で表されるARモデルを用いる。

$$A(z)y(t) = e(t) \quad (1)$$

ここで、 y は出力、 e は正規白色雑音、 A は時間遅れ演算子 z^{-1} の多項式

$$A(z) = 1 + \sum_{j=1}^{n_a} a_j z^{-j} \quad (2)$$

n_a はモデル次数である。

モデル係数 $\theta = [a_1 \cdots a_{n_a}]^T$ の出力データ $\mathcal{D} = \{y(t) | t = k\Delta t, k = 1, \dots, N\}$ に基づく最尤推定量 $\hat{\theta}_L$ は最小2乗法によって推定される。ここで、 Δt はサンプリング間隔、 N はデータ個数。 j 次モードの固有振動数と減衰定数はモデル係数の推定値から次式によって求められる¹²⁾。

$$f_j = \frac{|\log p_j|}{2\pi\Delta t} \quad (3)$$

$$h_j = \frac{-\log |p_j|}{2\pi f_j \Delta t} \quad (4)$$

ここで、 p_j は $A(z) = 0$ の根(システムの極)である。

3.2 モデル次数の決定

AR等の多項式モデルを適用する際に常に問題となるのがモデル次数の決定方法であるが、ここでは、ベイズの定理によるモデルクラス選択手法¹³⁾を用いる。まず候補となる複数のARモデルクラス(ある次

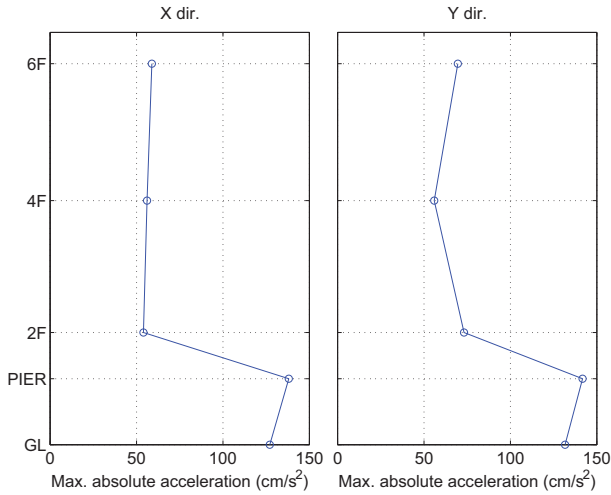


図-3 最大絶対加速度の分布

数の AR モデルの集合) の組 $M = \bigcup M_d$ を考える。それぞれの M_d がある次数 n_d を持つ AR モデルの集合 $M(n_d)$ に対応する。出力データ D に基づくモデルクラス M_d の事後確率は、ベイズの定理により下記のように表される。

$$P(M_d | D, M) = \frac{p(D | M_d) P(M_d | M)}{p(D | M)} \quad (5)$$

周辺化尤度 $p(D | M_d)$ は D に基づく M_d の「エビデンス」とも呼ばれ、下記で表される。

$$\begin{aligned} EV(M_d | D) &= p(D | M_d) \\ &= \int p(D | \theta, M_d) p(\theta | M_d) d\theta \quad (6) \end{aligned}$$

各モデルクラスの事前確率が等しければ、エビデンスが事後確率の比率を決定することがわかる。もし M_d が D の下でグローバルに同定可能 (事後確率分布が単峰) であり、データ数 N が大きければ、エビデンスはラプラスの漸近近似を用いて次式でよく近似できる¹⁴⁾。

$$EV(M_d | D) \approx \frac{p(D | \hat{\theta}_L, M_d) p(\hat{\theta}_L | M_d) (2\pi)^{Np/2}}{\det [H(\hat{\theta}_L)]^{1/2}} \quad (7)$$

ここで、 $H(\hat{\theta}_L)$ は $\hat{\theta}_L$ における対数尤度のヘッセ行列、 N_p はパラメータ数である。これにより評価されるエビデンスを最大化する次数を選択する。

3.3 評価対象モードの抽出

同定されたモデルには次数の半分の数のモードが対応しており、その中から評価対象とするモードを抽出する必要がある。必ずしも固有振動数の最も低いモードがそれらに対応するとは限らないので注意したい。

同定モデルに対応する全てのモードから評価対象モードを抽出する手順は以下の通りである。まず最初の記録における最適次数 AR モデルの評価結果から抽

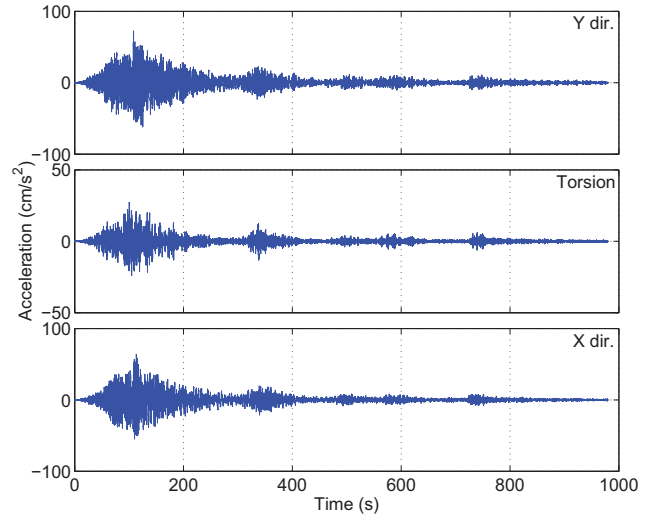


図-4 各モードに対応するシステム出力

出すべき主要モードを決定し、それらモーダルパラメータの同時確率分布及び各モード毎の同時確率分布を求める。次の記録からは、推定された全てのモードの推定値の組に対し、前出の各モード毎の同時確率分布を用いて尤度を計算し、それを最大とする組を当該モードの推定値として抽出する。全ての主要モードを抽出した後で、それらモーダルパラメータの同時確率分布を評価し、ベイズの定理によって一つ前の同時確率分布を更新する。この手順を順次繰り返すことによって、評価対象モードを自動的に抽出していくことができる¹³⁾。

§ 4. 地震継続中の振動特性変化

4.1 免震の効果

まず、建物の免震性能を検証するため、地表及びセンサ設置階の応答絶対加速度の絶対値の最大値を X・Y の各方向毎に図-3 に示す。図-2 に示された両翼のセンサのうち、左側のものの値を用いている。図-3 で「PIER」と示されているのがピア柱上の応答で、この位置と2階との間に免震装置が設置されている。これを見ると、地表の絶対加速度に比べ、免震層上の応答は約 2/5~1/2 に低減されており、免震性能が極めて効果的に発揮されたことがわかる。

なお、免震層の最大変形は X 方向 55 mm・Y 方向 76 mm で、設計許容変形 500 mm に比べるとまだかなり小さい。

4.2 振動特性の変化

確実に全ての基本モードを抽出するため、AR モデルの出力として、1次モードには図-2 に示した6階

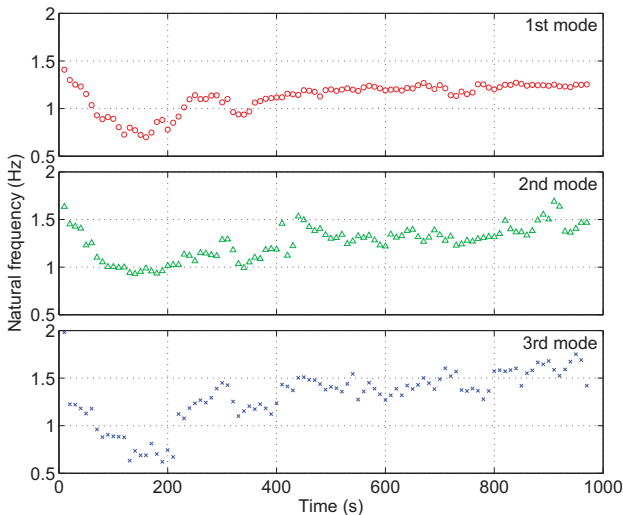


図-5 固有振動数の推定値

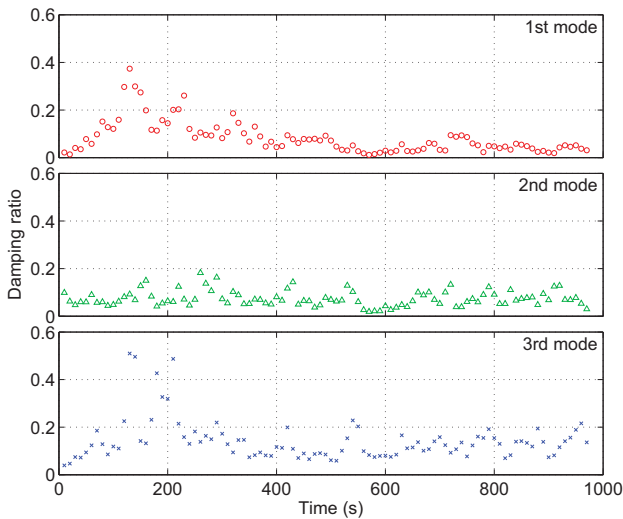


図-6 減衰定数の推定値

床に設置された両センサ Y 方向の平均を、2 次モードには両センサ Y 方向の差の半分を、3 次モードには両センサ X 方向の平均をそれぞれ用いた。これらの時刻歴波形を図-4 に示す。

これら出力を用いて同定された固有振動数及び減衰定数の地震継続中における変化を図-5 及び図-6 にそれぞれ示す。

固有振動数について見ると、全てのモードにおいて、応答が大きくなるに従い固有振動数の低下が認められる。これは主に積層ゴムの履歴特性に起因すると考えられる。特に並進モードである 1 次・3 次の低減率が大きい。減衰定数についても、応答が大きくなるに従い値が大きくなっている。これは主に積層ゴムの変形が増すに伴い鉛プラグの減衰効果が発揮されたことに対応すると考えられる。ここでも特に 1 次・3 次の値が大きくなっている。

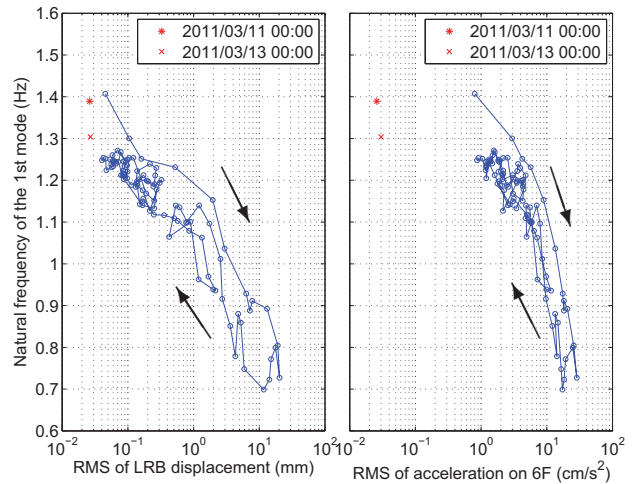


図-7 応答振幅に対する固有振動数の変化

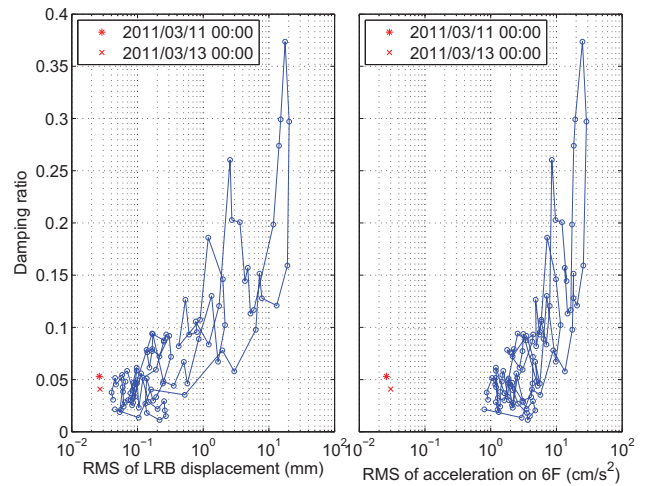


図-8 応答振幅に対する減衰定数の変化

応答の大きさによる固有振動数及び減衰定数の変化を詳細に調べるため、1 次の固有振動数及び減衰定数と免震層の変位及び 6 階の絶対加速度の RMS 値との関係を図-7 及び図-8 に示す。これらの図には、地震前後の日常データ（常時微動記録）から評価した固有振動数及び減衰定数についてもそれぞれ併せて示している。日常データの詳細については次章で述べる。

まず、図-7 を見ると、応答が大きくなるに従い急激に低下した固有振動数は、応答が小さくなる過程でも暫く低い値を保ち、その後低下した時の軌跡よりも下方で値を上昇させ、応答が収まった時点では初期値よりも低い値になっていることがわかる。常時微動からの評価結果でも、地震後の固有振動数は地震前に比べ約 6% 低下している。

一方、図-8 を見ると、応答が大きくなるに従い減衰定数は急激に増大するが、応答が収まる際の軌跡は増大時の軌跡と明確には区別できず、応答が収まった時点での値は初期値とほぼ同じである。また、常時微

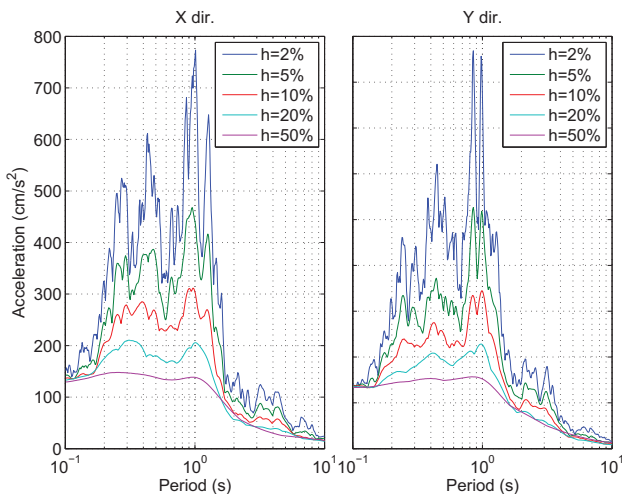


図-9 応答スペクトル

動からの評価結果でも、地震の前後であまり変化は見られない。

建物振動特性の変化を入力の前周波数特性との関係から見るため、図-9にX・Y各方向の地動入力の加速度応答スペクトルを示す。これを見ると入力1 Hz付近とそれより短周期の成分に強いパワーを持っており、逆にそれより長周期になると急激にパワーを減少させていることがわかる。これを建物の振動特性変化と対比して考えると、固有周期が伸びて応答スペクトルのピークを避けると同時に、減衰定数が増大することにより応答が抑制され、全体として大きな効果が得られたことがわかる。

§ 5. 日常データによる特性変化分析

5.1 モーダルパラメタの評価

振幅レベルが微小な常時微動記録である日常データを用いた解析には、図-2に示す両センサのうち、アンプへの分岐を通して高解像度の信号が得られる左翼側の加速度計で収録された常時微動波形を用いた。センサ位置が端部に寄っているため、振れモードである2次の成分はほぼY方向のみに含まれる。そこで、1次・2次モードの推定にはY方向の波形を、3次モードの推定にはX方向の波形をそれぞれ用いることとした。

推定された固有振動数及び減衰定数の推定値を、竣工から現在に至るまでの8年以上の期間に対して、それぞれ図-10及び図-11に示す。合理的なモデル次数選択手法を適用したことにより、全ての記録に対して適切なモーダルパラメタの推定が行われている。また、1~3次のモードも全て自動的に正しく抽出することに成功している。

図-10を見ると、2011年東北地方太平洋沖地震が発生した3月11日を境にして、全てのモードで固有振動数がそれまでの変動の範囲を越えて低下していることがわかる。また、推定値のばらつきも地震前に比べ大きくなっている。

また、図-11を見ると、減衰定数は地震前に比べ地震後の方が大きくなる傾向にあり、推定値のばらつきもやはり大きくなっている。

5.2 固有振動数の日常の変動要因とその補正

図-10を見ると、地震前後での変化とは別に、固有振動数の推定値はほぼ年周期で増減を繰り返していることがわかる。極大・極小のピークがそれぞれ冬・夏に対応していることから、この変動は気温の季節変化に関係していると考えられる。

そこで、固有振動数を気温との関係で示したのが図-12である。但し、地震による変化の影響と区別するため、地震前の推定値のみを表示している。これを見ると固有振動数は全てのモードで気温と強い相関を持ち、気温が高くなるほど固有振動数は低くなるという関係を持つことがわかった。

同様の分析を応答の振幅との関係についても行った。固有振動数を応答加速度のRMS値との関係で示したのが図-13である。一般に固有振動数は振幅が大きくなるほど低くなる傾向を持つが¹⁵⁾、図-13を見ると、この建物の場合、3次では一般と同様の傾向であるが、1次では逆に振幅が大きくなるほど固有振動数は高くなり、2次では振幅との相関があまり見られないという結果となった。

一方、減衰定数について同様に、気温との関係を図-14に、応答振幅との関係を図-15に、それぞれ示すが、いずれも明確な相関は見られなかった。

モーダルパラメタを建物の健全性を判断する指標の一つとして用いようとする場合、温度や(弾性領域における)応答振幅の影響は排除されることが望ましい。そこで、以下のように、固有振動数から温度及び応答振幅の影響を取り除くように補正することを試みた。まず、建物の経年変化の影響を極力除くため、各モードの固有振動数を1年毎の区間(地震以前)に区切り、各区間での平均値からの偏差で表す。次に次式の回帰式を各モード毎に適合させ、最小2乗法によって回帰係数を求める。

$$\Delta f = \alpha_1 T + \alpha_2 \log_{10} R + \alpha_3 \quad (8)$$

ここで Δf は固有振動数の偏差、 T は温度(°C)、 R は応答加速度振幅のRMS値(cm/s^2)、 α_j ($j = 1, 2, 3$)は推定する回帰係数である。適合の結果を、温度に対して図-16に(応答振幅は平均値)、応答振幅に対して図-17に(温度は平均値)、それぞれ示す。固有振

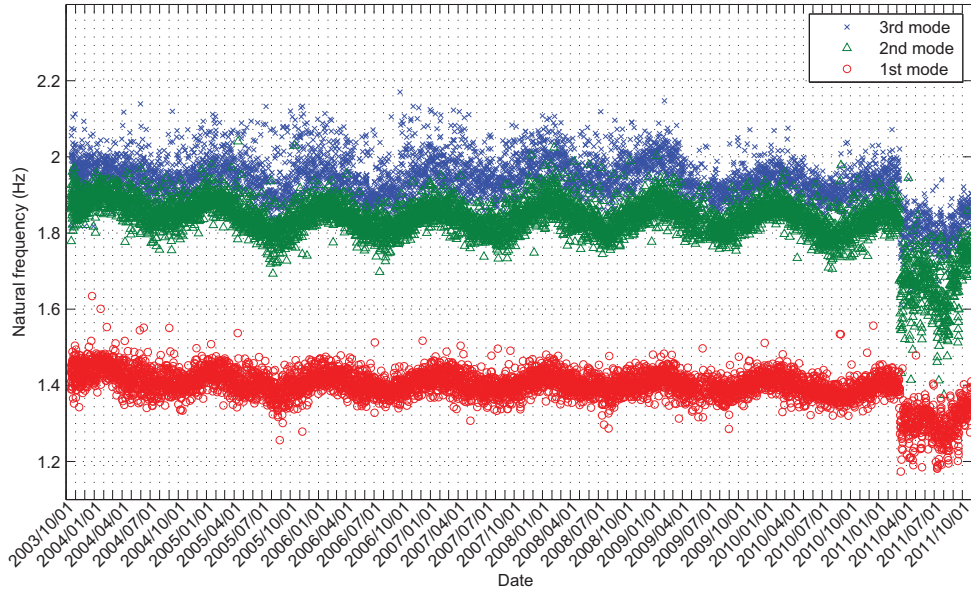


図-10 固有振動数の経年変化

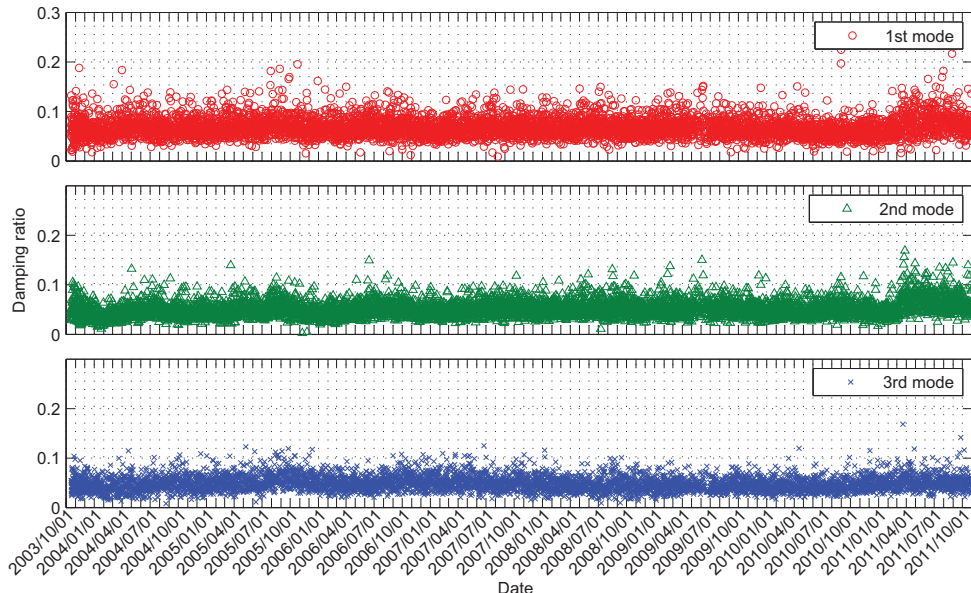


図-11 減衰定数の経年変化

動数データは両因子によってよく回帰されていることがわかる。回帰係数の推定値は Table 1 の通りである。

ここで得られた回帰係数を用いて、各モード毎に、固有振動数 f を、気温 $T_0=20$ (°C)、応答振幅 $R_0=0.05$ (cm/s²) の場合と等価な値 f_c に次式により補正した。

$$f_c = f - \alpha_1(T - T_0) - \alpha_2 \log_{10}(R/R_0) \quad (9)$$

補正された固有振動数の推定値を図-18 に示す。

気温変化による年周期の変動が消滅し、応答振幅に依存するばらつきが除かれたことにより、固有振動数の長期間にわたる逡減傾向を持ったトレンドと、東北地方太平洋沖地震による不連続的な低下、そしてその後の時間の経過によるある程度の回復などが明確にわ

かるようになった。

なお、前章の図-7 における日常データからの同定結果については、気温と応答振幅がなるべく近い記録を選んだ上で補正無しの値を示している。

5.3 特性の統計量と入力地震動との関係

温度と応答振幅の補正によってかなりの変動が除かれた後にも、推定誤差によってある程度の幅のばらつきは残される。このばらつきの大きさを定量的に評価することは、推定値の信頼性を判断する上で非常に重要である。そこで、補正された固有振動数の 30 日移動平均と移動標準偏差を評価した。

また、固有振動数の統計量の長期的な変化とその建

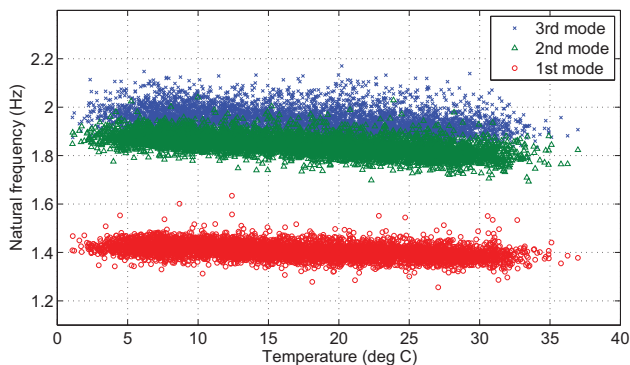


図-12 固有振動数と気温との関係

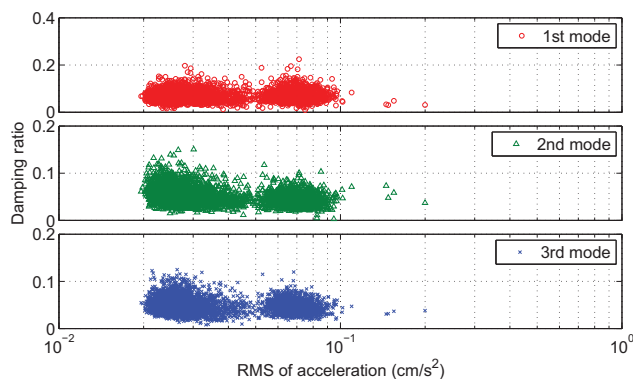


図-15 減衰定数と応答振幅との関係

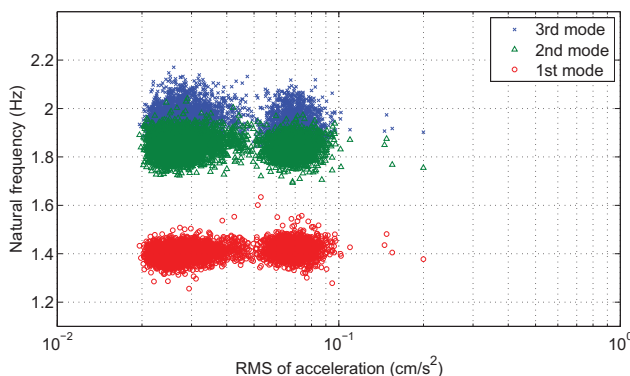


図-13 固有振動数と応答振幅との関係

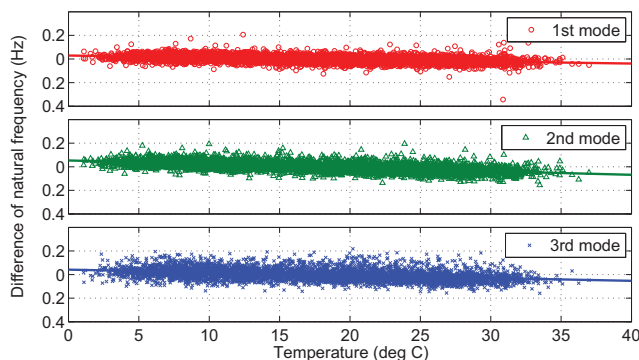


図-16 気温に対する回帰式の適合結果

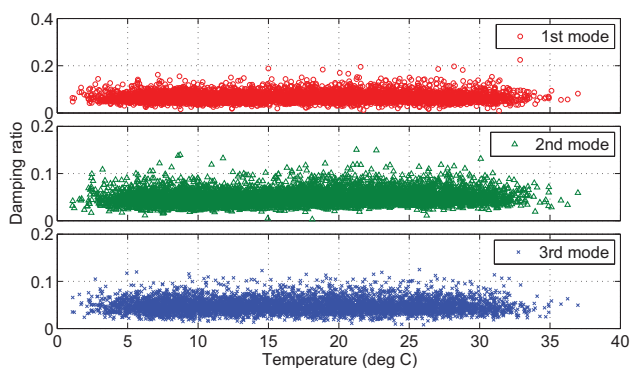


図-14 減衰定数と気温との関係

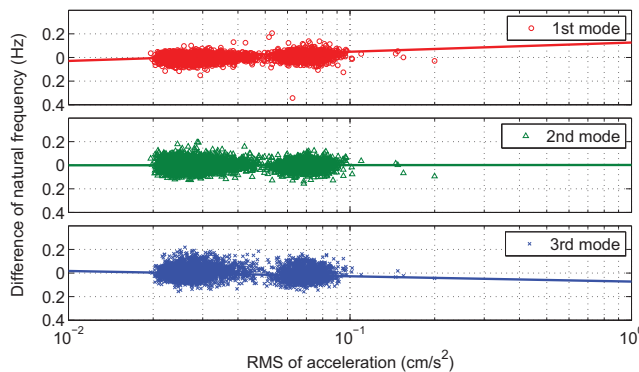


図-17 応答振幅に対する回帰式の適合結果

表-1 回帰係数の推定値

mode	1st	2nd	3rd
α_1 (10^{-3} Hz/deg)	-1.943	-3.742	-2.862
α_2 (10^{-2} Hz)	4.743	0.465	-2.749
α_3 (10^{-1} Hz)	1.021	0.721	0.105

物が経験した地震との関係について検討するため、構造ヘルスマニタリングシステムに記録された全地震記録から、建物基部での水平方向の入力加速度ベクトルの最大絶対値を抽出した。

両者を併せて図-19に示す。これを見ると、東北地方太平洋沖地震以前では、 50 cm/s^2 程度の最大地

動加速度を記録した地震の場合を含め、標準偏差の幅と比較して明らかな程の固有振動数の低下を直接招いたものはなかったことがわかる。これに対して約 150 cm/s^2 程度の最大地動加速度を持つ東北地方太平洋沖地震の後には、それまでの標準偏差の数倍の幅で平均値が低下しており、明らかな因果関係を見ることができ。また、地震後は標準偏差の幅が地震以前に比べ大きくなっていることも特徴である。平均値で見ると、地震直後で7~9%低減した各モードの固有振動数は地震発生の約6ヶ月後から回復傾向にあり、約8ヶ月後の時点では地震前より4~5%低い値となっている。

このことは、比較的大きな地震動を経験した影響が、

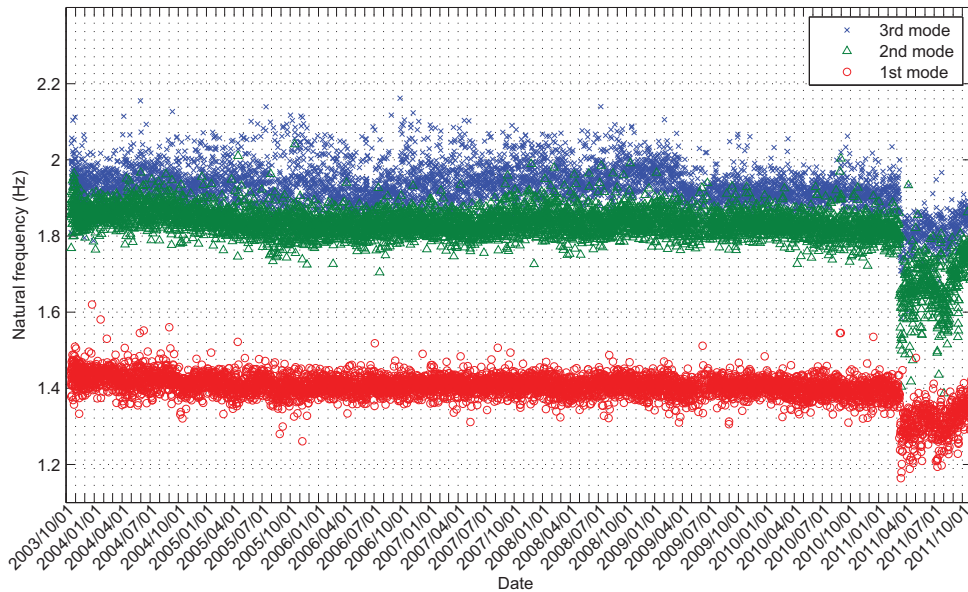


図-18 補正された固有振動数の経年変化

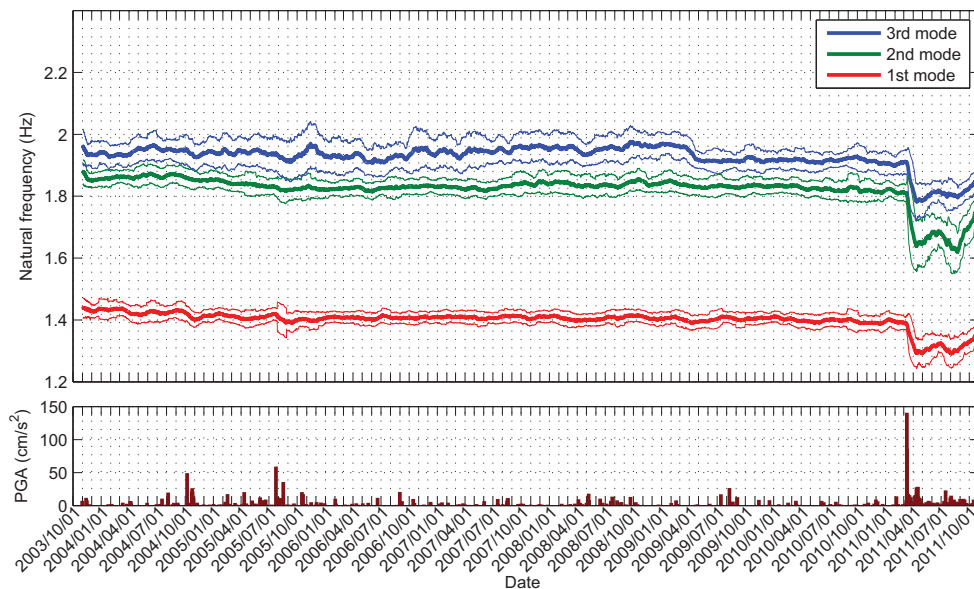


図-19 補正された固有振動数の1ヶ月移動平均・移動標準偏差と記録された地震の最大地動加速度

地震後のかなりの期間、建物の微動レベルの振動特性に残存していることを示しており、地震前後の常時微動測定による特性値の変化から、その建物の経験した地震動や応答の大きさがある程度推定できる可能性を示唆している。

なお、東北地方太平洋沖地震後の固有振動数の低下は、免震層の変形により上下境界部の仕上材等の固着が切れ動きやすくなったことによると考えられる。それによって摩擦を受けながら動く部分が増えたことで減衰定数の増大も説明できる。また、約半年後からの固有振動数の回復傾向については、頻発する余震によって緑が切れた状態が保たれていた境界部が、余震の収束に伴って再び固着し始めたことによるのではな

いかと推察される。

§ 6. まとめ

都内に建つ免震建物の2011年東北地方太平洋沖地震による、地震継続中及び地震前後の振動特性変化について、それぞれ地震応答記録及び日常的な定時常時微動記録を用いて明らかにした。

地震継続中については、980秒間の応答記録から10秒毎に、それぞれY方向・揺れ・X方向に対応する1~3次モードの固有振動数及び減衰定数をARモデルを用いて推定し、準連続的にそれらの変化を評価し

た。その結果、以下の点が明らかになった。

- 全てのモードにおいて、応答が大きくなるに従い固有振動数の低下及び減衰定数の増大が認められ、その変化率は特に並進モードである1次・3次で大きかった。
- 応答の増大と共に急激に低下した1次モードの固有振動数は、応答が小さくなる過程でも暫く低い値を保ち、その後低下した時の軌跡よりも下方で値を上昇させ、応答が収まった時点では初期値よりも低い値に留まっていた。
- 減衰定数については、地震開始時と終了時、及び地震の前後で値に大きな変化は見られなかった。
- 固有振動数と減衰定数の変化を入力の変答スペクトルと対比することにより、長周期化と減衰の増加の双方が高い応答低減性能に寄与したことがわかった。

地震前後の変化については、建物竣工以来8年間以上にわたり1日2回記録された常時微動加速度応答波形から、同じく3次までのモーダルパラメータを推定した。その結果、以下の点が明らかになった。

- ベイズの定理を応用したモデル次数選択及びモード抽出手法を用いることにより、全ての記録に対して3次までのモードが適切に推定された。
- 同定された固有振動数に対して気温及び応答振幅の影響を除く補正を行ったところ、長期間にわたる遷減傾向を持ったトレンドと、東北地方太平洋沖地震による不連続的な低下及びその後の回復傾向が明確にわかるようになった。
- 東北地方太平洋沖地震の前後で各モードの固有振動数は7~9%の低下を示したが、それ以前のより入力小さな地震では明らかな固有振動数の低下を直接招いたものはなかった。
- 地震前後の常時微動測定による特性値の変化から、その建物の経験した地震動や応答の大きさある程度推定できる可能性が示唆された。

今後は日常データと地震観測記録を両輪として一体的に分析を行い、日常データを用いた特性変化の評価結果と地震動や建物応答の大きさとの定量的関係について検討していきたい。

<参考文献>

- 1) C. Loh and I. Tou. A System Identification Approach to the Detection of Changes in Both Linear and Non-linear Structural Parameters. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 24, pp. 85-97, 1995.
- 2) 中村充, 竹脇出, 安井譲, 他. 限定された地震観測記録を用いた建築物の剛性と減衰の同時同定. 日本建築学会構造系論文集, No. 528, pp. 75-82, 2000.2.
- 3) J. L. Beck, S. K. Au, and M. W. Vanik. Monitoring Structural Health Using a Probabilistic Measure. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 16, pp. 1-11, 2001.
- 4) 斎藤知生. システム同定による建築物の確率論的損傷評価. 日本建築学会構造系論文集, No. 557, pp. 93-100, 2002.7.
- 5) T. Saito, S. Mase, and K. Morita. A probabilistic approach to structural damage estimation. *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 12, No. 3-4, pp. 283-299, 2005.
- 6) J. F. Clinton, S. C. Bradford, T. H. Heaton, and J. Favela. The Observed Wander of the Natural Frequencies in a Structure. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, pp. 237-257, 2006.
- 7) T. Saito and M. Shiraishi. Probabilistic estimation of fluctuations in the dynamic characteristics of a seismically isolated building. *Proceedings of the 10th International Conference on Application of Statistics and Probability in Civil Engineering*, 2007.
- 8) 金澤健司. コンクリート系建物の固有振動数の日変動メカニズムの解明. 日本建築学会構造系論文集, No. 612, pp. 63-71, 2007.2.
- 9) T. Saito and M. Shiraishi. Health diagnostics of a seismic isolated building using changes in its dynamic characteristics. *Proceedings of the 5th World Conference on Structural Control and Monitoring*, 2010.
- 10) 白石理人, 岡田敬一, 斎藤知生. 免震建物に導入した構造モニタリングシステム (その2:対象建物の動特性評価). 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 (2), pp. 777-778, 2004.
- 11) 斎藤知生, 神田順. 構造物のシステム同定における推定値の確率論的誤差評価. 日本建築学会構造系論文集, No. 534, pp. 41-48, 2000.8.
- 12) 斎藤知生. モード解析型多入力多出力 ARX モデルを用いた高層建物のシステム同定. 日本建築学会構造系論文集, No. 508, pp. 47-54, 1998.6.
- 13) T. Saito and J. L. Beck. Bayesian model selection for ARX models and its application to structural health monitoring. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 39, pp. 1737-1759, 2010.
- 14) J. L. Beck and K. V. Yuen. Model Selection Using Response Measurements: Bayesian Probabilistic Approach. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 130, pp. 192-203, 2004.
- 15) 建築物の減衰. 日本建築学会, 2000.

