

超高層 RC 建物の振動特性の経時的変動について

仲野健一^{*1}・境 茂樹^{*1}・加藤貴司^{*1}・伊藤隆之^{*2}・田沼毅彦^{*3}

本稿では、兵庫県神戸市中央区に建つ超高層 RC 建物において、長期間にわたって収集した地震観測記録を整理・分析して得られた新たな知見を報告する。地震毎の建物固有振動数の経時的変動を整理した結果、1次固有振動数の長期的な変動は小さいこと、相対的に2次、3次の高次になるにつれてその変動の量およびばらつきは大きくなること、建物屋上（RF）と1階（1F）およびGL-29mのフーリエ振幅スペクトル比を用いた比較から、入力地震動の卓越周期によって、建物の1次固有振動数が変化することがわかった。また、ランニングフーリエ振幅スペクトル比の検討結果はARXモデルを用いて推定した地震時の1次固有振動数に対応することがわかった。

キーワード：地震観測、超高層 RC 建物、固有振動数、経時的変動、ARX モデル

1. はじめに

近年、建物の健全性を評価するための手段として、常時微動計測もしくは地震観測を通して得られた地震動記録（微動記録）を用いた構造ヘルスマニタリング（以下、SHM）に関する研究が盛んに行われている^{例えば1), 2), 3), 4)}。SHMは、地震や台風などの自然災害による構造モデルの固有振動数（剛性）や減衰定数などの変化を捉え、建物構造躯体の損傷の程度を診断することを目的としている技術で、以前から様々な分野で取り組まれている。

筆者らにおいても以前から建物での地震観測を進めており、2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録を含めて、非常に重要な地震記録を得ている^{5), 6), 7), 8)}。これらのデータを用いて、SHMへの展開や構造設計に役立てることが我々に問われている。地震は今後も発生すると考えられるため、継続的に地震を観測し記録していくことが必要である。

本稿では、長期間にわたる超高層 RC 建物での地震観測で収録された地震動記録から推定した、建物振動特性の経時的変動を分析することで得られた知見を報告する。

2. 建物概要および観測システム

対象建物（以下、本建物と呼ぶ）は、兵庫県神戸市中央区に建つ地上33階、地下1階、塔屋3階の建物で、軒高98.457m、最高部高さ108.557mの共同住宅であり、2000年に竣工した。基準階の平面形状は、北東面と南西面を1スパン切りかいた正方形に近い形状である。構造形式は、主体構造が鉄筋コンクリート造の純ラーメン構造で、地

下階は鉄筋コンクリート造の耐震壁併用ラーメン構造である。基礎は根入れ深さ7mでマットスラブとすることで剛性を確保し、杭は場所打ちコンクリート杭（ベノト併用拡底アースドリル杭工法）としている。図-1に示すように、本敷地の地盤構成は、ボーリング調査の結果から、GL-3.8mまで埋土層、以下GL-13.0m程度まで礫混じり砂または砂層となり、それ以深のGL-23.0m程度までは粘土、砂、砂礫の互層となり、GL-23.0m以深で礫混じり砂または砂層となっている。GL-16m以深のほとんどの層でN値が50以上であり、PS検層結果からGL-23mでせん断波速度 $V_s = 380\text{m/s}$ 程度となっている。なお杭先端はGL-29mの砂礫層に支持させている。なお、構造設計用解析モデル（基礎固定モデル）の固有値解析による本建物の1次固有周期はNS, EW方向ともに1.59秒（0.63Hz）である。

本建物の観測システムでは、建物および周辺地盤に加速度センサーを合計5台配置している。建物内では1階

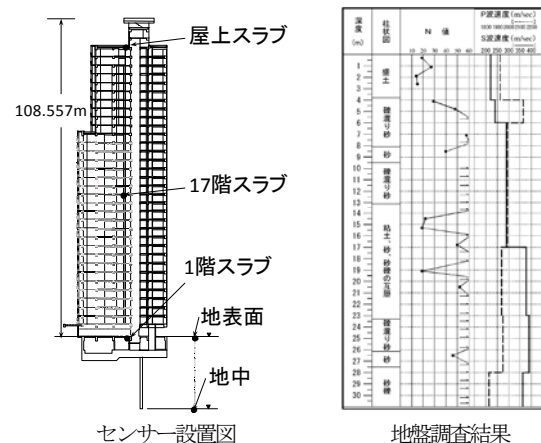


図-1 センサー設置位置および地盤ボーリング調査結果

*1 建築研究第一部 *2 構造設計部 *3 都市再生機構

スラブ下 (1F), 17 階スラブ下 (17F), および屋上スラブ下 (RF) の剛心位置に, 建物から 12m ほど離れた周辺地盤には, 地表面 (GL-1.5m) および杭底の先端レベル (GL-29m) にそれぞれ設置している。サンプリングは 100Hz, トリガー前の収録時間は 10 秒, トリガー終了後の記録時間は 60 秒に設定している。なお, 地震計の設置方向は建物の構面方向に合わせ, X 方向が東西方向 (EW), Y 方向が南北方向 (NS) にほぼ一致している。

3. 観測された地震の概要

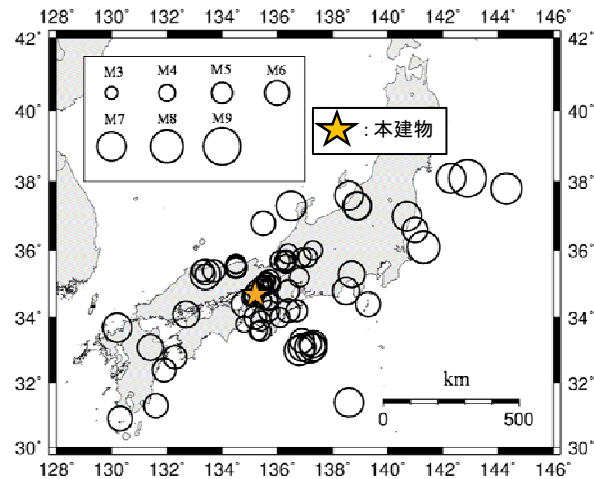
本建物の観測システムで収集された地震動記録は, 2000 年の竣工後から現在までで, 87 イベント×15Ch (設置されている 5 台の加速度センサーは水平 2 成分・上下 1 成分の合計 3 成分をそれぞれ持つ) の計 1305 波形にも上る。なお, 地震そのものをイベントという言葉で表現し, 地震の揺れを地震動と表現している (以下同様)。図-2 (a) に本建物で観測された地震の震央位置 (白抜き丸印) と本建物の位置 (星印) の関係を, 図-2 (b) に地表面 (GL-1.5m) で観測された水平最大加速度値の頻度分布を示す。

図-2 (a) をみれば明らかなように, 本建物で観測された地震の多くは本建物から半径約 200km 程度の範囲内で発生したものである。一方で, 東北地方沿岸や九州地方付近等の比較的震央距離の長い地震の観測記録がいくつか得られている。観測された地震の総数は 87 イベントであり, 図-2 (b) 上図の地表面 (GL-1.5m) 加速度で言えば, その内最大加速度が 8gal 以下のものが 75 イベントで全体の 86% と支配的であり, 8gal より大きいものが 12 イベントで全体の 14% と少なく, この地域では最大加速度の大きい地震動 (8gal 以上) を受ける頻度は相対的に少ないことがわかる。一方で, 図-2 (b) 下図の建物屋上 (RF) での最大応答加速度でみると, 2.5 - 8gal が 52 イベントと支配的でありその頻度分布に違いがみられる。なお, これまで被った地震での建物屋上 (RF) の最大応答加速度で最大のものは, 2000 年鳥取県西部地震の約 106gal である。

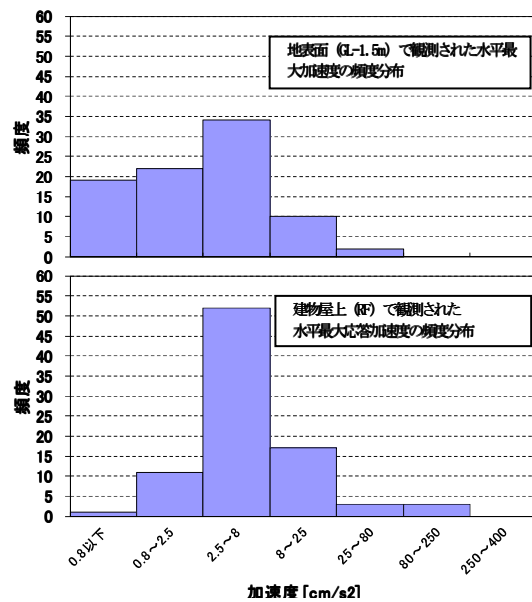
4. 建物振動特性の経時的変動

4.1 上部構造の固有振動数の経時的変動

図-3 に, 本建物屋上階 (RF) と 1 階 (1F) で観測された地震動記録から推定した上部構造の 1 次 - 3 次固有振動数の経時的変動を示す。左縦軸は通常と読み方が反転しており上の数字ほど低振動数である。これらの固有振動数は 1F に対する RF のフーリエ振幅スペクトル比のピーク振動数を機械的に読み取ることで求めている。1F



(a) 地震震央位置と本建物位置



(b) 水平最大加速度の頻度分布

図-2 本建物で観測された地震および地震動について

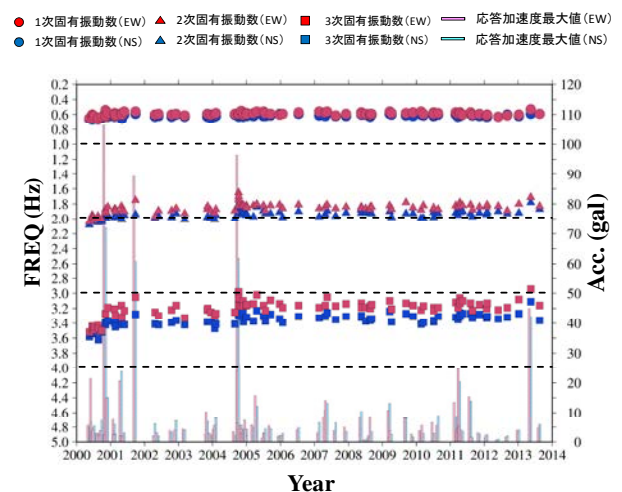


図-3 建物屋上 (RF) で観測された最大加速度と固有振動数の経時的変動 (○は 1 次固有振動数, △印は 2 次固有振動数, □印は 3 次固有振動数; 赤色は EW 方向, 青色は NS 方向)

に対するRFのフーリエ振幅スペクトル比は、1) 各イベントで得られた地震観測記録の加速度時刻歴波形の中立軸を補正した後バンドパスフィルター(0.1 - 25.0Hz)をかけ、2) FFTによりフーリエ振幅スペクトルを算出し、3) バンド幅0.2HzのParzen ウィンドウをかけて平滑化処理を施し、4) RFのスペクトルを1Fのもので割ることで推定した。

図-4は図-3の一次固有振動数付近を拡大したもので、図を見れば、1次固有振動数はNS、EW方向とも0.5 - 0.7Hzの範囲に収まっていること(平均値はNS方向で0.59Hz、EW方向で0.62Hz)、NSに比べてEW方向の固有振動数が小さい(固有周期が長い)こと、RFの最大応答加速度が約40galを超えた場合に固有振動数が大きく低下する(1割程度)がその後平均的な値に回復していることがわかる。

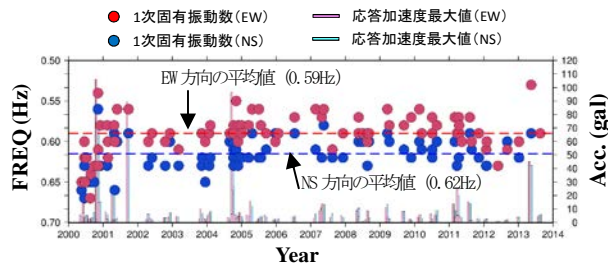


図-4 建物屋上(RF)で観測された最大加速度と固有振動数の経時的変動(1次固有振動数付近を拡大)

図-4をみれば、1次固有振動数に比べて、2次、3次固有振動数は経時的変動が大きく、それぞれのばらつきも高次になるにつれて大きいことがわかる。また、最大応答加速度と固有振動数の低下がよく対応していることも確認できる。

表-1に、1 - 3次固有振動数のばらつきを標準偏差σで示す。表を見ればわかるように、1次、2次、3次と高次モードになるにつれて、そのばらつきが大きくなっている。このばらつきの有力な原因として、ピーク振動数読み取りによる影響や、入力される地震動の振幅依存によるものの2点が考えられる。

表-1 固有振動数のばらつき

		平均値(Hz)標準偏差σ	
1次固有振動数	NS	0.62	0.02
	EW	0.59	0.02
2次固有振動数	NS	1.94	0.05
	EW	1.86	0.07
3次固有振動数	NS	3.35	0.09
	EW	3.20	0.12

4.2 杭底を含む観測記録から推察される杭-建物系としての振動特性

本建物では杭底(GL-29m)レベルの地中にも加速度セン

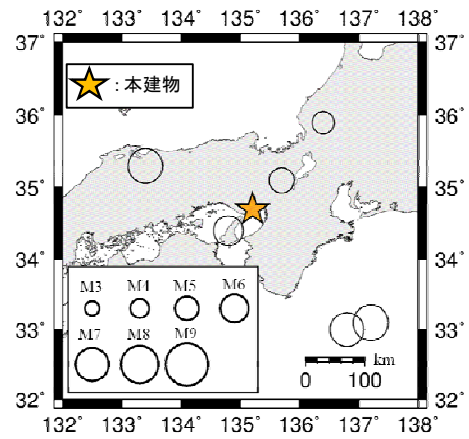
サーを設置しており、建物屋上(RF)の観測波形とのフーリエ振幅スペクトル比をとれば杭-建物系としての大まかな傾向を把握でき、今後の杭-建物系の相互作用を考慮した解析のための基礎資料となる。

表-2に、杭-建物系としての大まかな傾向を把握するため、対象とする地震リストを示す。対象としたのは、EQ5の福井県嶺北地震を除き、建物屋上(RF)での最大応答加速度が大きかったEQ1 - EQ6までの6イベントである(EQ5の福井県嶺北地震では、建物応答は小さいものの、大きな固有振動数の低下がみられる)。表中ではイベント発生順に並べている。

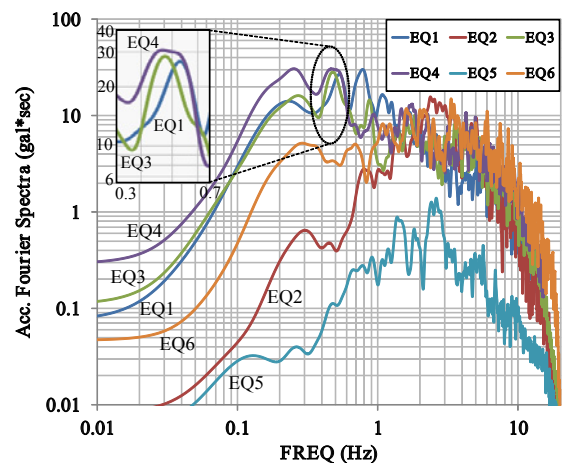
表-2 対象地震リスト

図中記号	発生日時	地震名	緯度	経度	震源深さ(km)	M _j
EQ1	2000/10/6/13:30	鳥取県西部	35.271	133.352	9.0	7.3
EQ2	2001/8/25/22:21	京都府南部	35.149	135.663	8.0	5.1
EQ3	2004/9/5/19:07	紀伊半島南東沖	33.033	136.798	37.6	7.1
EQ4	2004/9/5/23:57	東海道沖	33.138	137.141	43.5	7.4
EQ5	2004/10/5/8:33	福井県嶺北	35.933	136.378	12.4	4.8
EQ6	2013/4/13/5:33	淡路島付近	34.419	134.829	14.8	6.3

図-5(a)に対象イベントと本建物の位置関係を示し、図-5(b)に地表面(GL-1.5m)加速度のフーリエ振幅スペクトルを示す。図を見れば、EQ1, EQ3, EQ4は、本建物

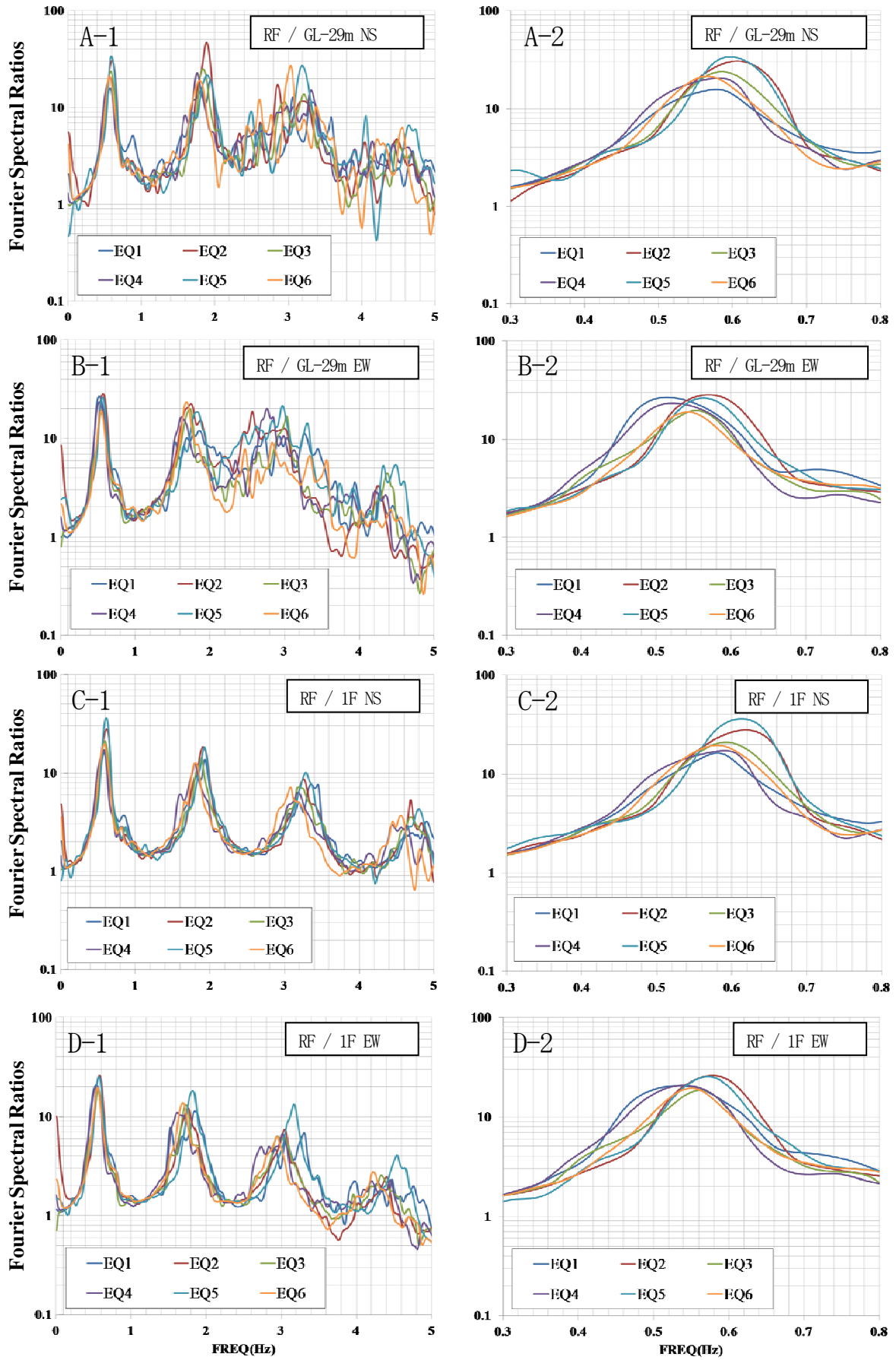


(a) 対象地震と本建物の位置関係



(b) 対象地震の地表面での加速度フーリエ振幅スペクトル(EW方向)

図-5 対象地震と本建物の関係と対象地震の地表面(GL-1.5m)でのフーリエ振幅スペクトルの比較



(1) 0 - 5Hz

(2) 0.3 - 0.8Hz

図-6 観測された複数の地震波形のフーリエ振幅スペクトル比 (RF/1F および RF/-29m)

設計モデルの1次固有振動数(0.63Hz)付近の長周期成分で振幅が大きいこと、EQ6でも長周期成分が若干大きめであることがわかる。図-5(b)の本建物の1次固有振動数に近い部分を拡大すると、EQ1とEQ4はそこに近いところで似通っているが、EQ3は他2つより低い振動数でピークを持つことがわかる。

図-6に、対象地震におけるRF/1FおよびRF/GL-29mのフーリエ振幅スペクトル比を示す。各図タイトルで-(ハイフン)右横の2はそれぞれの1次固有振動数付近を拡大した図を意味している。図-6(2)をみれば明らかに、RF/GL-29mだけでなくRF/1Fにおいても、EQ1やEQ4のような長周期が卓越する地震によって、フーリエ振幅スペクトル比の1次固有振動数が低下していることがわかる(EW方向では約0.6Hzが約0.5Hzに低下)。また、EQ3とEQ4は地震の規模や震源位置に近いイベントではあるが、フーリエ振幅スペクトル比の1次固有振動数は異なっている。このことから、入力される地震動の特性によって、建物の固有振動数が変化することを念頭に置いた上で、建物振動特性を把握していくことが重要だと考えられる。

4.3 ARXモデルによる地震時の上部構造の固有振動数の推定

図-7に、上部構造の地震時の1次固有振動数の経時的変動を示す。表-3の中から発生時期の異なる3つのイベントを対象とした(図-7(a)はEQ1、図-7(b)はEQ3、図-7(c)はEQ6)。それらは図-6での1次固有振動数の変動が大きいEW方向のものである。上記1次固有振動数を、本建物の1Fの時刻歴波形を入力、RFのものを出力として設定し、10秒間のデータを用いて、0.01秒分ずつデータをずらしながらARXモデルを用いて推定した。灰色の実線は、各イベントにおいて、1Fに対するRFでの相対変位時刻歴波形振幅の絶対値をとったもので、赤色の丸印は各時刻(0.01秒ごと)における推定された固有振動数である。

図をみれば明らかのように、各イベントにおいて固有振動数は振幅値がある程度大きくなると低下すること、その低下した振動数は、時間が経過すると(振幅値が小さくなると)、また上昇し回復する傾向を持つことがわかる。図-7(a)、(b)のEQ1とEQ3では相対変位振幅が約2-3cm程度で固有振動数の低下が見られ、図-7(c)のEQ6では1cm程度でも見られる。なお、減衰についても検討しているがそのばらつきは固有振動数に比べてはるかに大きい。

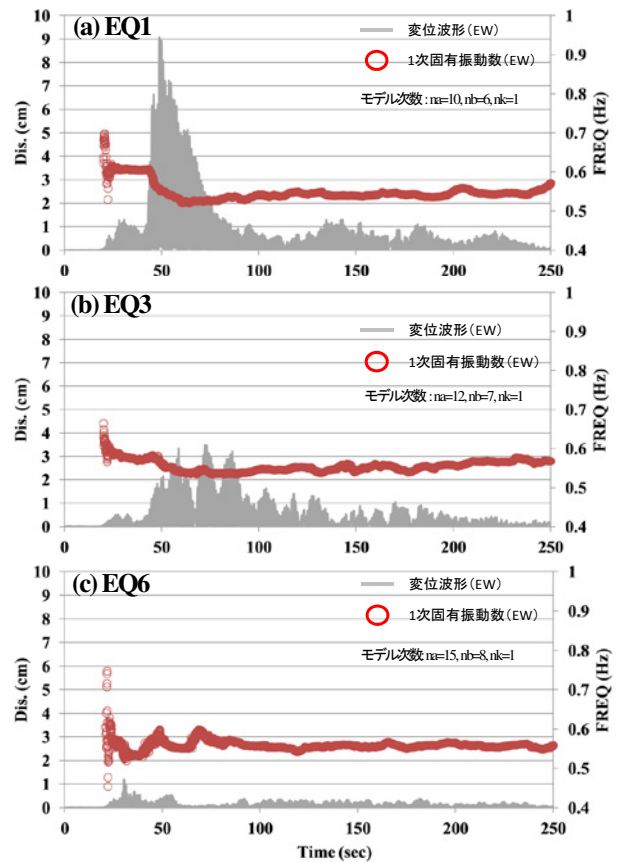


図-7 ARXモデルによる地震時の1次固有振動数の経時的変動

4.4 ランニングスペクトル比による固有振動数の推定

図-8に、前節と同じ各イベントに対してランニングスペクトルを計算し、その比をとることにより計算したランニングスペクトル比(RF/1F)を下段に示す(図-8(a)はEQ1、図-8(b)はEQ3、図-8(c)はEQ6)。ただし、ランニングスペクトルの計算には、加速度時刻歴波形(EW方向)の5秒間毎のデータを用いており、1Fに対するRFの相対変位時刻歴波形(上段)を併せて示している。

図をみれば明らかのように、1)相対変位振幅が大きいほど高いスペクトル振幅を持つこと、2)S波部分(もしくはP波部分)が到達すると本建物の1次固有振動数より低い振動数のスペクトル振幅が大きくなること、3)相対変位振幅が小さくなる150秒付近からスペクトル振幅が広い振動数範囲で大きくなることわかる。上記の内、2)はARXモデルによる推定や観測フーリエスペクトル比に対応する結果であり、3)は1Fでの入力地震動がほとんど無いため、広帯域でスペクトル比が大きくなっていると考えられる。

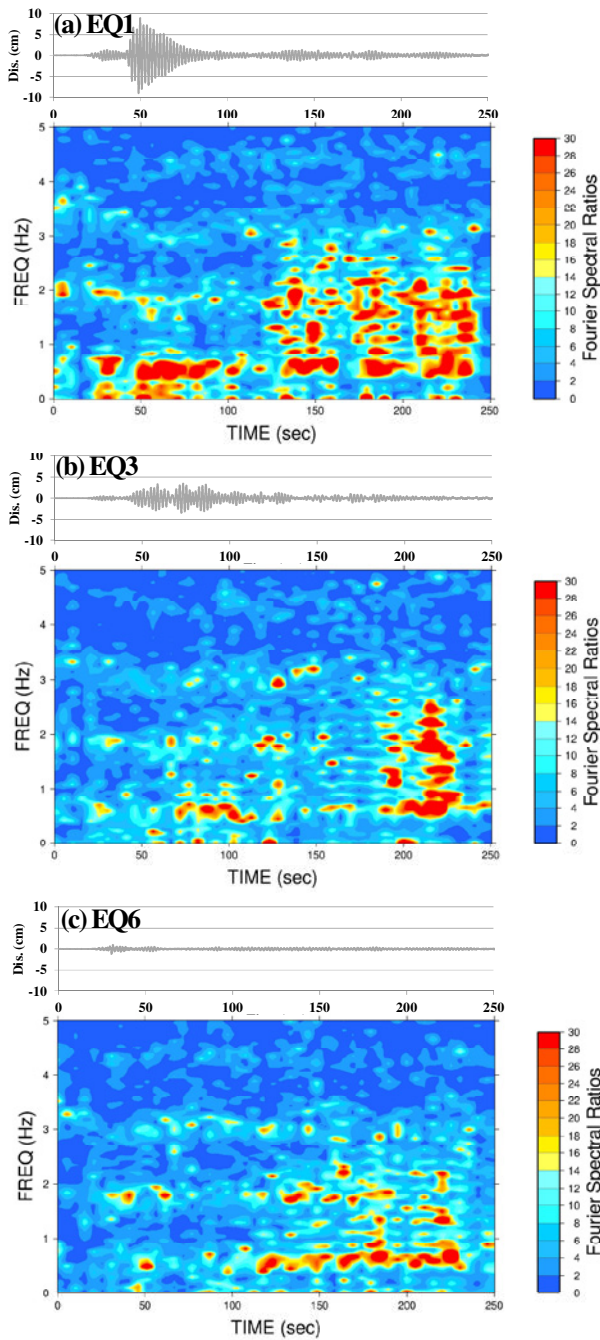


図-8 ランニングスペクトル比

- 1) 経時的な固有振動数の変動はEW方向で大きく、1次固有振動数に大きな経時的変動はみられないが、高次になるにつれてその変動の量およびばらつきが大きくなることがわかった。
- 2) 2000年鳥取県西部地震や2004年紀伊半島南東沖地震のような1次固有振動数に近い成分が卓越する地震動が入力された際、本建物の1次固有振動数は低下し長周期化していたことがわかった。
- 3) ARXモデルを用いた固有振動数の経時的変動の検討により、各イベントにおいて振幅値がある程度大きくなると固有振動数は低下し、時間が経過するとまた上昇し回復する傾向にあることがわかった。その固有振動数の低下は、当初大きな振幅(図-7(a)のEQ1と図-7(b)のEQ3では約2-3cm程度)でないと見られないが、その後のイベントでは小さな振幅(図-7(c)のEQ6では1cm程度)でもその低下が見られることがわかった。
- 4) ランニングスペクトル比による固有振動数の検討において、地震動が入力された時間帯で本建物の1次固有振動数より長周期域で大きなスペクトル比が見られ、ARXモデルに対応する結果が得られた。

これらの知見を元に、杭-建物の相互作用を考慮した応答解析等で観測記録を再現できる範囲を把握することや入力される地震動の特性によって異なる建物の1次固有振動数のばらつきを考慮するなど、実態に則した地盤モデルおよび建物構造モデルの設定の在り方を今後検討し、構造設計に反映させていきたい。また、相互作用を含めた地震観測システムや長期モニタリングシステムを導入する等、SHMの推定精度を高めると共に、継続的な地震観測を行うことで建物振動特性の経時的変動に関する知見を今後も蓄積していきたい。

謝辞:一部の図の作成にはGMT (Generic Mapping Tools)⁹⁾を使用しています。

5. まとめ

本建物における地震観測は2000年の竣工当初からスタートし、2014年の現在も実施中である。その期間に得られた地震記録(トリガーにかかったもの)は87イベント×15Chの計1305波形にもなる。本稿では、それらの記録から推定される建物振動特性としての固有振動数の経時的変動について示し、6イベント(地震規模や建物応答値が大きなものを中心に選定)に絞った上で、より詳細な建物振動特性について検討した。これらをまとめると以下ようになる。

参 考 文 献

- 1) 上林宏敏, 大西良広, 林康裕: 2004年9月紀伊半島南東沖地震の観測記録に基づく大阪平野の超高層建築物の振動特性, 日本建築学会技術報告集, 第31号, pp. 679-685, 2009年10月.
- 2) 川島学, 永野正行, 鹿嶋俊英, 井口道雄: 長期間に亘る地震観測記録より観察される建物動特性の変化と回帰推定式による予測精度, 第13回日本地震工学シンポジウム, G014-Fri-AM-2, 2010年, pp. 1530-1537.
- 3) 上林宏敏, 永野正行: 超高層建物の強震観測記録に基づく増幅特性と動特性評価, 日本建築学会技術報告集, 第19巻, 第42号, 2013年6月, pp. 435-440.

- 4) 山本健史, 永野正行, 保井美敏, 肥田剛典, 田沼毅彦, 渡辺一弘: 軟弱地盤に建つ超高層 RC 造集合住宅の地震応答評価と被害との対応 -2011 年東北地方太平洋沖地震時の強震記録に基づく検討-, 日本建築学会技術報告集, 第 19 巻, 第 42 号, pp. 447-452, 2013 年 6 月 .
- 5) 境茂樹, 加藤貴司, 伊藤隆之, 今津彰: 神戸市中央区に建つ高層集合住宅における地震観測, ハザマ研究年報, 2000 年 .
- 6) 境茂樹, 加藤貴司, 伊藤隆之, 小田聡: 神戸市中央区に建設された杭支持高層建物の地震観測, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造 II, 21155, 2002 年 8 月 .
- 7) 境茂樹, 加藤貴司, 伊藤隆之, 大和田文雄: 神戸市中央区に建つ高層集合住宅地震観測 - 中小地震観測記録による振動特性 -, ハザマ研究年報, 2003 年 .
- 8) 境茂樹, 加藤貴司, 伊藤隆之, 木村匡: 神戸市中央区に建つ高層集合住宅における地震観測 - (その 3) 2004 年 9 月 5 日紀伊半島南東沖地震の観測結果とシミュレーション解析 -, ハザマ研究年報, 2006 年 .
- 9) Wessel, P. and W. H. F. Smith. : New, improved version of the Generic Mapping Tools released, EOS Trans. AGU, 79, 1998, p. 579.

Dynamic Properties of High-Rise RC Building in Earthquake Motions and Aging

Kenichi NAKANO, Shigeki SAKAI, Takashi KATO, Takayuki ITO and Takehiko TANUMA

This study reports new knowledge from long-term observations of earthquake motions for dynamic properties of the high-rise RC building in earthquake motions and aging. We found first natural frequencies were stable in the long term, and, the second and third natural frequencies were scattered. The Fourier spectral ratios (RF/GL-29m and RF/1F) showed that first natural frequencies changed by each earthquake motion that had different properties. According to estimation for first natural frequencies in earthquake motions by the ARX model, we can be said that first natural frequencies have tendencies to recover the values of themselves as time passes, and, lower as the building ages even though relative displacement amplitudes at RF with respect to 1F of earthquake motions are low. Furthermore, we investigated the running-spectral ratios (RF/1F) in earthquake motions, and found that spectral ratios tended to augment in the low-frequency range with increasing the amplitude of earthquake motions. This trend has good agreement with that of the ARX model.