

常時微動測定に基づく超高層 RC 造建物の動特性評価

Dynamic Characteristics of Super-High-Rise RC Building Based on Microtremor Records

川島 学 MANABU KAWASHIMA

平田 裕一 YUICHI HIRATA

設計管理部 小田 稔 MINORU ODA

本報は、超高層 RC 造建物 3 棟において行った常時微動測定で得られた記録に基づき、建物の動特性を評価した結果について示したものである。システム同定手法のひとつである部分空間法を用いて、高次モードまで精度よい固有振動数および減衰定数の評価結果を得た。固有振動数の評価結果より、建物は設計での想定よりやや大きな剛性を有していることが分かった。減衰定数は並進 1 次モードで約 1%と推定され、文献に示されている日本建築学会の参考値と同程度であった。

キーワード：超高層建物，RC 造建物，常時微動，高次モード，減衰定数，部分空間法

Dynamic characteristics of three super-high-rise RC buildings are discussed based on measured microtremor records. Accurate eigenfrequencies and damping ratios will be obtained up to higher-order mode by using subspace method which is one of the system identification methods. It is revealed that stiffness of the buildings is slightly larger than designed value by evaluating eigenfrequencies. Damping ratio of translational 1st mode is estimated to be about 1 percent, which may be comparable to the proposed value expressed in AIJ design guideline.

Key Words: Super-High-Rise Building, RC Building, Microtremor Record, Higher-Order Mode, Damping Ratio, Subspace Method

1. はじめに

近年、都市部を中心に、軒高 100m を超える超高層建物が多数建設されている。超高層建物の安全性は時刻歴応答解析によって検証されるため、応答解析モデルの精度の向上やそこで用いられる諸定数の評価は、重要な意味を持つ。しかしながら、建物の動特性についてその機構がすべて明らかとなっている訳ではなく、また建物の減衰等についてはいまだ不明な点が多い。

このような背景のもと、筆者らは、関東で 2008 年から 2009 年にかけて竣工した、当社設計施工の超高層 RC 造住宅 3 棟の微動測定を実施した。本報はその測定結果について報告するものである。

2. 測定対象建物の概要

微動測定の対象は、2008 年から 2009 年に竣工した関東に建つ超高層 RC 造住宅 3 棟である。これらの建物を以下、A 建物、B 建物、C 建物と呼び、表-1、図-1 にそ

の概要を示す。

各建物の基準階は、A 建物、C 建物はそれぞれ正方形と長方形と整形な平面形であるのに対し、B 建物の基準階は図-1 に示すとおり不整形な平面形となっている。構造的な特色として、A、B 建物の一部階に低降伏点鋼制震壁が配されている点、C 建物が免震建物である点が挙げられる。また 3 建物は上部躯体が RC 造ラーメン構造（建物 C の短辺方向に RC 耐震壁が配置されている）であり、柱はフル PCa、梁はハーフ PCa 工法で構成されている。

3. 常時微動測定の概要

常時微動測定は、(株)東京測振の携帯用振動計 SPC-51A（サーボ型速度計）によって行った。測定周波数は 0.2Hz～70Hz、測定レンジは 150 μ cm/s～10cm/s である。サンプリング周波数は 100Hz であり、計測時間は 1 測定 30 分を基準とした。

分析対象とした振動モードは、水平 2 方向および鉛直

表-1 測定対象建物の概要

A建物	B建物	C建物
等価アスペクト比* \approx 3.1	等価アスペクト比* \approx 3.3	等価アスペクト比* \approx 3.8
RC造ラーメン構造		RC造ラーメン+耐震壁

* 建物高さ/√(基準階面積)として算定。

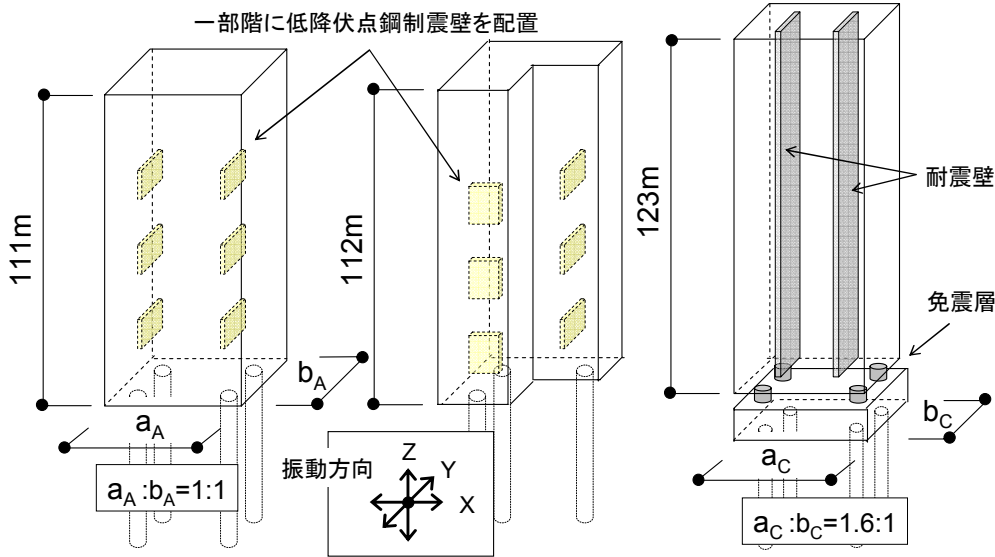


図-1 測定対象建物の概要 (図のスケールは正確ではない)

方向の並進モードと、揺れ・ロッキングの回転モードである。各振動モードの評価にあたっては、以下の方針で計測点を決定した。

- ①並進モード：建物基部（1階または地下階）と建物上層階での同時測定を実施する。測定点数は対象建物によって異なるが、建物頂部の記録は必ず測定する。
- ②回転モード：平面内2点において水平動または鉛直動を同時に測定し、これらの差をセンサー間の距離で除すことで角速度を抽出する。揺れ動の評価では建物頂部、ロッキング動の評価では建物基部の記録を用いる。

ただし、建物によっては、上記の振動モードすべてに関する計測が行われているものではない。表-2に、評価可能な振動モードと、振動データの得られている計測点を示す。

4. スペクトル解析による分析

本章では、各建物の周波数領域における振動特性を把握するために行った波形のスペクトル解析の結果について示す。図-2に、一例として、B建物の建物基部と建物頂部で同時に得られた水平動のランニングスペクトルを示す。スペクトルは暖色が大きな振幅値、寒色が小

表-2 評価可能な振動モードと振動データの得られている計測点

モード	振動方向	計測点	A建物	B建物	C建物
並進モード	水平X	頂部	○	○	○
		中間階**	○	○	○
		基部	○	○	○
	水平Y	頂部	○	○	○
		中間階**	○	×	○
		基部	○	○	○
回転モード	鉛直	頂部	△*	○	○
		中間階**	△*	○	○
		基部	△*	○	○
	ねじれ	頂部	○	○	○
		免震上基礎	—	—	○
		ロッキング	X方向	×	○
Y方向	×		○	○	

* 計測位置の制限により、他の振動モードの成分が含まれている。

** C建物の場合は免震上基礎。

さな振幅値であることを表している。図より、建物基部および建物頂部で得られた波形は時間の経過に対して振幅値、周波数特性が継続時間中に大きく変動せず、ほぼ定常な記録が得られていることが分かる。

図-3に、20秒ごとのスペクトルのアンサンブル平均によって評価した、建物頂部位置での各振動成分のFourier 振幅スペクトルを示す。ただし、水平動（基部、頂部）およびロッキング動のスペクトルはX方向の波形のものを示しており、ねじれ角速度には基準階面積の

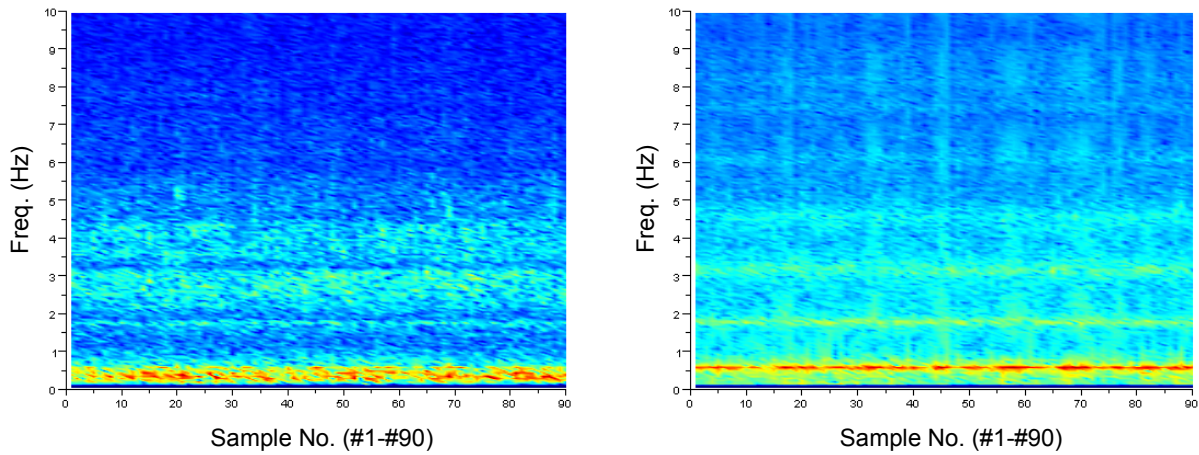


図-2 建物基部（左）と建物頂部（右）のランニングスペクトル

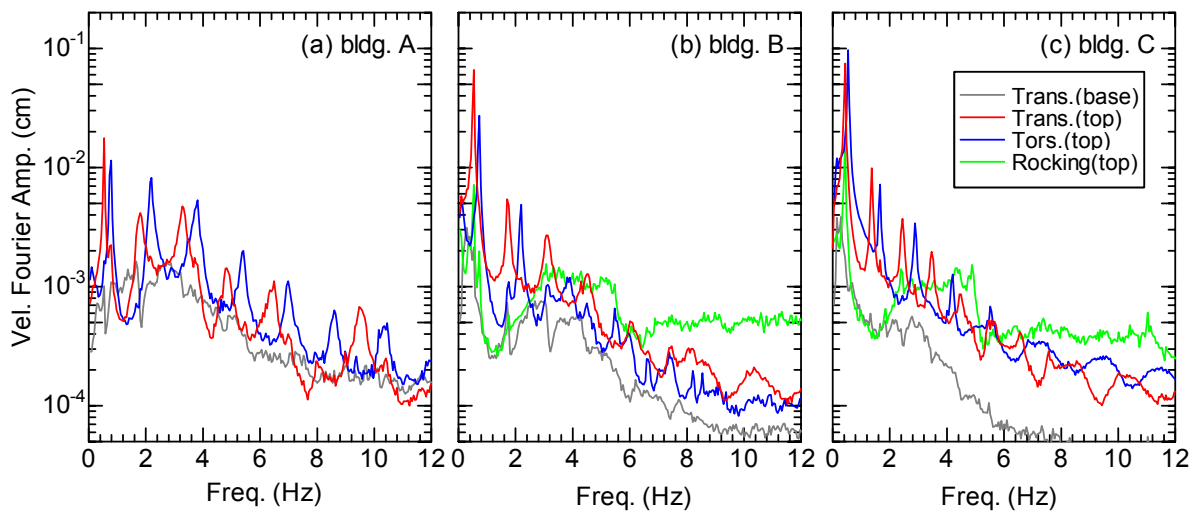


図-3 建物頂部位置での X 方向角モード成分の Fourier 振幅スペクトル

平方根、ロッキング角速度には計測点から建物頂部までの高さを乗じ、速度の次元に変換している。また、頂部の水平動のスペクトルは、基部の水平動およびロッキング動の影響を含んだ絶対応答のスペクトルである。

図より、A 建物、B 建物の最も低い振動数の卓越位置では、頂部の水平動の振幅が最も大きい。ほぼ同じ振動数にあるロッキング動の卓越は水平動の約 1 割の振幅であり、やや高振動数側にあるねじれ動の卓越は水平動の半分程度の振幅を有している。これに対して、C 建物ではこれら振動成分の振幅の関係が異なっていて、ロッキング動の卓越は水平動の卓越の振幅の 2 割程度であり、ねじれ動の卓越は水平動の卓越に比べてやや大きな振幅である。なお、建物基部の水平動は地動を含むスウェイ動と解釈できるが、その振幅は頂部の水平動の卓越の 2～4%程度と小さい。

全体にねじれモードの振幅が水平動の振幅に比して大きいのは、常時微動というランダム性の高い入力波動場のために、ねじれ動の入力成分が水平動の入力成分に比

して無視できない大きさであったためと推測される。また、C 建物において特に回転モードの振幅が他の 2 建物に比べて大きい傾向にあるのは、免震構造であるために回転動に関する剛性が比較的小さいためと考えられる。

5. システム同定による動特性評価

(1) 周波数応答関数の推定

建物基部（建物 A、B では 1 階、建物 C では免震下基礎）の波形を入力、建物上層階（建物 A、B では頂部と中間階、建物 C では頂部と免震上基礎）の波形を出力とみなしたときの周波数応答関数の推定値を図-4 に示す。ここでは、建物基部と建物上層階の X 方向水平動を入出力とみなした場合の結果が示してある。周波数応答関数の推定は、以下の 2 式に拠っている¹⁾。

$$H_R(\omega) = \frac{S_{XY}(\omega)}{|S_{XY}(\omega)|} \sqrt{\frac{S_{YY}(\omega)}{S_{XX}(\omega)}}, \quad H_1(\omega) = \frac{S_{XY}(\omega)}{S_{XX}(\omega)} \quad (1)$$

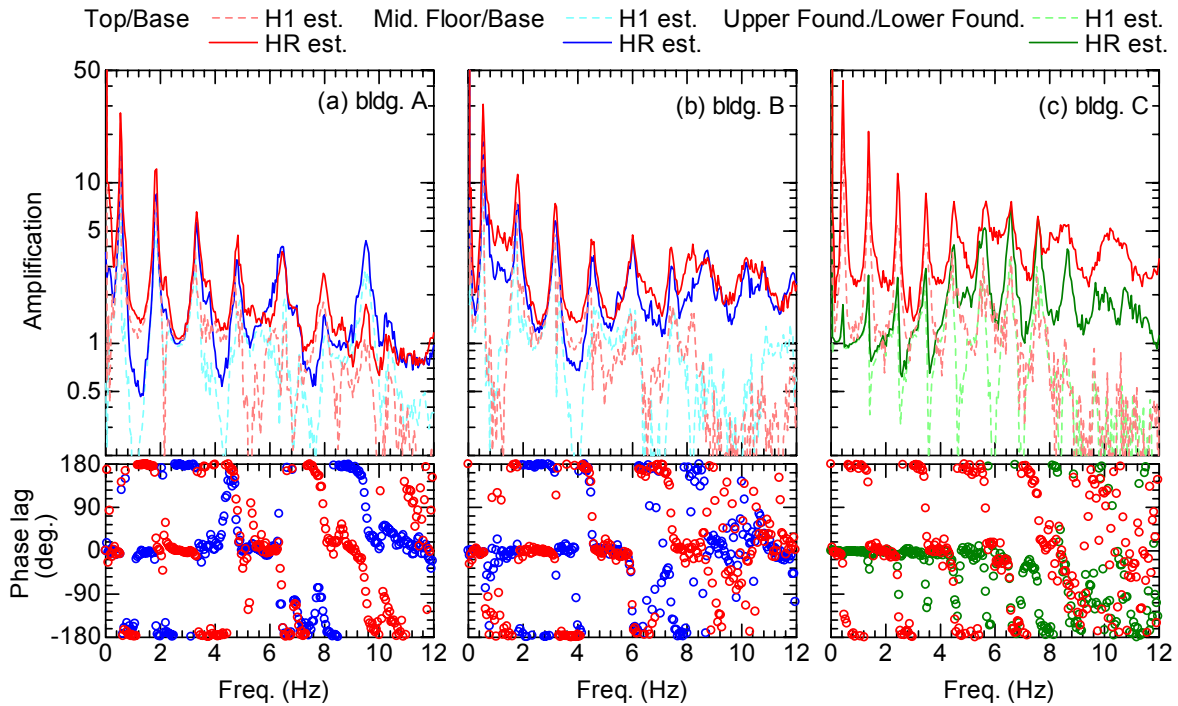


図-4 周波数応答関数の推定値 (上: 振幅, 下: 位相差)

ここに、 $S_{XX}(\omega)$ = 入力のパワースペクトル、 $S_{YY}(\omega)$ = 出力のパワースペクトル、 $S_{XY}(\omega)$ = 入出力のクロススペクトルであり、図中の実線が $H_R(\omega)$ の推定値を、破線が $H_1(\omega)$ の推定値を表している。

図より、周波数応答関数の振幅にはピークが観察され、対応する振動数で基部と上層階の位相差が急変している。このような傾向は、基部から地動が入力した場合のせん断型振動モデルの動特性と調和的である。これより、建物基部の波形を入力、建物上層階の波形を出力とみなすことができるものと考えられる。

C 建物の周波数応答関数の形状より、最も低い振動数の卓越位置において建物頂部の変形に対する免震層の変形の割合は小さいことが分かり、その値を計算すると約 2% である。本稿において取り上げた常時微動という微小な振幅域において、免震層の変形が大きく卓越することは観察されなかった。

(2) 動特性の評価方法

本報では、建物の動特性の評価にあたり、システム同定手法として部分空間法³⁾を採用する。部分空間法は、数値的な安定性や多入出力系への適用の容易さといった利点を有しているため、今後その利用がさらに広まると思われるシステム同定手法である。本稿では、水平・鉛直並進モードの同定では、建物基部の記録を入力、建物上層階の記録を出力として、MOESP 法³⁾のアルゴリズムを用い、ねじれモードの同定には、建物頂部の記録のみに平衡確率実現に基づくアルゴリズム³⁾を用いる。

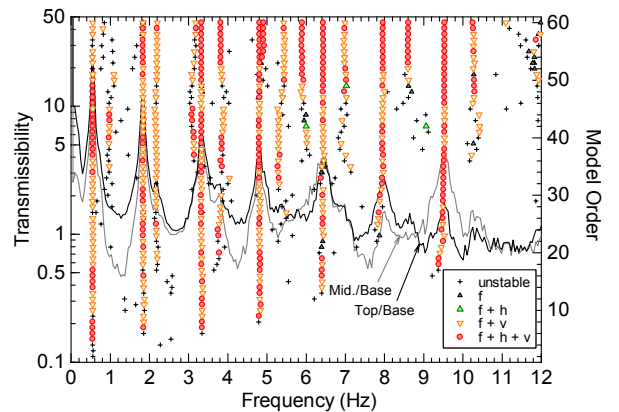


図-5 Stabilization diagram⁴⁾の一例 (f: 固有振動数, h: 減衰定数, v: MAC が安定と判定された極)

システム同定において大きなモデル次数を設定した場合、物理的な極と数値計算上現れる極を峻別することが必要である。ここでは、モデル次数を 2 次から 60 次まで変動させて作成した stabilization diagram⁴⁾ (以下では S. D. と略記する) に基づき安定な極を抽出する。安定な極の判定基準としては、モデル次数を p から $p+1$ へ変動させたときの固有振動数、減衰定数の変動が 1%、5% 以内、および式 (2) で定義される MAC (Modal Assurance Criterion) の値が 0.98 以上であることとした。

$$MAC_{(p, p+1)} = \frac{|\{\varphi_j^{(p)}\}^H \{\varphi_j^{(p+1)}\}|^2}{\{\varphi_j^{(p)}\}^H \{\varphi_j^{(p)}\} \cdot \{\varphi_j^{(p+1)}\}^H \{\varphi_j^{(p+1)}\}} \quad (2)$$

ここに、 $\{\varphi_j^{(p)}\}$ はモデル次数が p のとき同定された j 次

の複素モードベクトル, $\{ \bullet \}^H$ はベクトル $\{ \bullet \}$ のエルミート転置を表している。なお, 定義式(2)より MAC は 0 以上 1 以下の実数値となる。

一例として, 図-5 に A 建物の水平 X 方向並進モードを同定する際に作成された S. D.を示す。図中には, 前節で示した周波数応答関数 $H_R(\omega)$ の推定値が重ねて示されている。図より, 安定な極と周波数応答関数のピーク位置との対応が確認できる。

(3) 動特性の評価値

表-3 に, 同定された水平, 鉛直の並進モードおよび振れモードの固有振動数と減衰定数を示す。表中の値は, 安定と判定された極による評価値の平均値と標準偏差である。ただし, C 建物では免震層を含む全体系の動特性の評価値が示されている。

表より, 1 次固有振動数は, 水平並進モードで 0.38Hz ~ 0.55Hz であるのに対し, 鉛直並進モードで 3.74Hz ~ 4.93Hz と 10 倍程度の値となっている。振れモードの 1 次固有振動数は 0.54Hz ~ 0.76Hz であり, 水平並進モードの 1.4 倍程度である。水平並進モードの固有振動数は, 設計時に想定された値と比べて 1 割程度大きな値である。

減衰定数については, 水平並進モードの 1 次で 0.7 ~ 1.5%程度であり, 文献 2)に示されている居住性評価のための設計用減衰定数(標準値 1.0%, 推奨値 0.8%)にほぼ対応している。鉛直並進モードの 1 次の減衰定数は 3.67% ~ 7.25%と大きく, 振れモードの 1 次の減衰定数では, A 建物, B 建物で 0.3%台と小さな値が得られている。

6. 動特性の評価結果と慣用値との比較

(1) 建物高さとの固有振動数の関係

一般に, 固有振動数 f と建物高さ H の関係は, $f^{-1} = \alpha H$ という比例関係で近似して評価することが行われている。同定値より求めた比例定数 α の値を, 文献 2)の回帰式のものと比較して表-4 に示す。

比例定数 α の評価結果は, 水平並進の 1 次の場合, A, B 建物では $\alpha = 1.63 \times 10^{-2}$, 1.69×10^{-2} と文献 2)に示された値 $\alpha = 1.5 \times 10^{-2}$ と比べてやや大きい。これに対して C 建物では, $\alpha = 1.88 \times 10^{-2}$, 2.16×10^{-2} と値が大きい。全体的に値がやや大きいのは, 高強度コンクリートを使用しているため, 柱・梁の断面が一般の建物に比べて小さいことなどが考えられる。C 建物の値が大きいのは, 免震建物であり, 回帰式で対象としている建物と構造形式が異なるためと思われる。なお, ねじれモードについても, 比例定数 α は既往の回帰式のものより値が大き

表-3 建物動特性の同定結果

(a) 水平並進モード(X 方向)

次数	固有振動数 (Hz)			減衰定数 (%)		
	A	B	C	A	B	C
1	0.55	0.54	0.43	1.47	0.71	0.73
	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.05)	(0.18)	(0.03)
2	1.84	1.79	1.38	0.85	0.91	0.70
	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.12)	(0.03)	(0.11)
3	3.33	3.19	2.45	1.49	0.93	1.13
	(0.01)	(0.00)	(0.00)	(0.16)	(0.02)	(0.17)
4	4.81	4.53	3.47	1.35	1.61	0.83
	(0.01)	(0.00)	(0.00)	(0.16)	(0.12)	(0.03)
5	6.52	5.99	4.51	1.60	4.22	1.62
	(0.22)	(0.01)	(0.01)	(0.31)	(0.08)	(0.23)

(b) 水平並進モード(Y 方向)

次数	固有振動数 (Hz)			減衰定数 (%)		
	A	B	C	A	B	C
1	0.55	0.54	0.38	0.70	1.25	0.95
	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.15)	(0.04)	(0.04)
2	1.81	1.80	1.37	0.63	1.03	0.94
	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.04)	(0.02)	(0.11)
3	3.30	3.20	2.67	1.69	0.99	1.04
	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.21)	(0.04)	(0.02)
4	4.74	4.56	4.01	1.29	2.09	1.46
	(0.00)	(0.01)	(0.01)	(0.23)	(0.15)	(0.06)
5	6.37	—	5.35	1.76	—	1.86
	(0.01)	—	(0.05)	(0.15)	—	(0.16)

(c) 鉛直並進モード

次数	固有振動数 (Hz)			減衰定数 (%)		
	A	B	C	A	B	C
1	4.76	4.93	3.74	3.67	7.25	4.99
	(0.02)	(0.00)	(0.01)	(0.89)	(0.88)	(0.89)
2	10.39	7.71	6.81	1.71	2.29	1.61
	(0.35)	(0.02)	(0.20)	(0.33)	(0.13)	(1.08)
3	17.82	13.33	12.06	1.05	1.12	1.32
	(0.57)	(0.10)	(0.01)	(0.27)	(0.22)	(0.27)

(d) ねじれモード

次数	固有振動数 (Hz)			減衰定数 (%)		
	A	B	C	A	B	C
1	0.76	0.72	0.54	0.39	0.33	0.81
	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.02)	(0.02)	(0.03)
2	2.18	2.20	1.65	2.08	1.66	1.09
	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.02)	(0.13)	(0.01)
3	3.78	—	2.89	2.93	—	0.92
	(0.07)	—	(0.00)	(0.40)	—	(0.05)

* 各次数について, 平均値と標準偏差(括弧入り)が示してある。

なっており、水平並進モードとほぼ同様の傾向がみられている。

(2) 高次モードの動特性の傾向

1次固有振動数に対する高次の固有振動数の比（以下、振動数比と記す）を、モード次数を横軸にとり図-6に示す。図には、参考として1次元連続体の非減衰せん断振動の理論値 ($f_s / f_1 = 2s - 1$, s =モード次数)⁵⁾も重ねて示している。図より、振動数比は水平並進モード、ねじれモードともにモード次数とほぼ線形関係にあることが分かる、せん断振動の理論値と比較すると、並進モードでは実測から得られた振動数比がやや大きく、ねじれモードでは両者はほぼ等しい。C建物の短辺(Y)方向の傾向が他と異なっているのは、短辺方向に耐震壁が配されていることによる構造特性の違いの影響と思われる。

図-7に、水平並進モードとねじれモードについて、固有振動数と減衰定数の関係を示す。ここでは、表-2中には紙幅の関係で示さなかった高次モードの評価値について、同定が安定して行われたモードに関するものをすべて示している。図より、減衰定数の値が振動数・モード次数に対して変動するのが認められるが、建物および振動モードの種類によってその傾向は異なっている。

水平並進モードの減衰定数は、大局的にみると、1次モードに相当する0.5Hz前後で1%程度の値であったものが、振動数の増加とともに漸増する傾向にあるが、必ずしも単調増加しているものではない。それぞれの建物のX、Y方向で評価された減衰定数はおおむね類似した振動数・モード次数に対する依存傾向を示している様子も観察され、図-7にそれぞれの建物固有の減衰特性が表れている可能性が示唆される。

ねじれモードの減衰定数は、A建物では1次モードで0.3%台の小さな値が評価され、2、3次モードで一旦増加するが、さらに高次モードとなると減少に転じる。B建物では高次モードの同定値が安定しなかったため示していないが、1、2次モードの傾向はA建物とよく似ている。C建物の場合は、6Hz付近にある5次モードまで減衰定数は約1%の一定値をとっている。

7. まとめ

本報では、超高層RC造住宅3棟において行った常時微動測定で得られた記録に基づき、建物の動特性を評価した結果について示した。また、文献2)に示されている実測に基づいた回帰式との比較を示すとともに、高次モードの固有振動数、減衰定数の傾向についての考察を行った。

表-4 建物高さ固有振動数の関係

	水平並進モード				ねじれモード				
	回帰式	A	B	C(X)	C(Y)	回帰式	A	B	C
1	1.50	1.63	1.69	1.88	2.16	1.10	1.18	1.26	1.49
2	0.40	0.49	0.51	0.59	0.59	—	0.41	0.41	0.49
3	0.23	0.27	0.29	0.33	0.30	—	0.24	—	0.28

* 表中に示したのは、比例定数 α の100倍の値である。

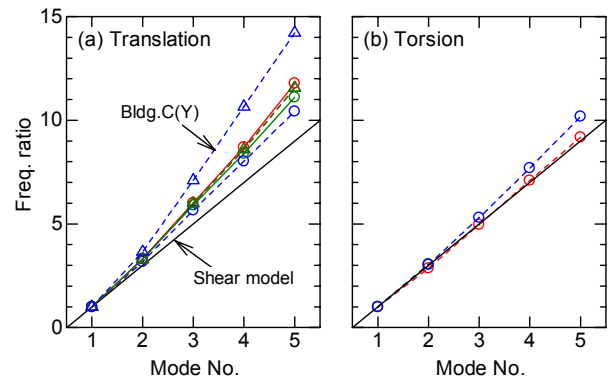


図-6 高次固有振動数とモード次数の関係

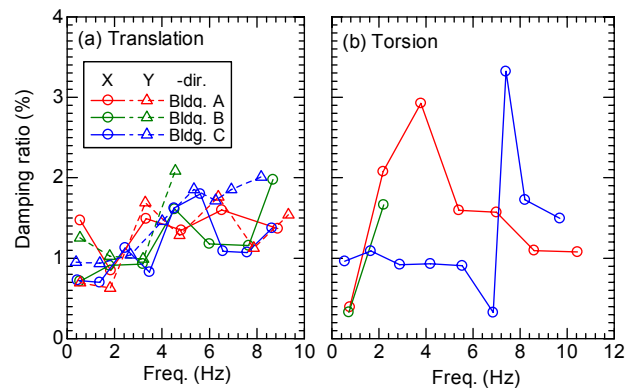


図-7 固有振動数と減衰定数の関係

3棟という限られた建物に対する検討結果を本報では示したが、他の建物での測定記録を加えることにより、より一般的な知見を得る必要がある。さらに、減衰定数の振動数・モード依存性に関しては未だ不明な点が残っている。これらの点について、さらに検討を続ける予定である。

参考文献

- 1) 理論地震動研究会編: 地震動 その合成と波形処理, 鹿島出版会, 1994
- 2) 日本建築学会: 建築物の減衰, 2000
- 3) 片山 徹: システム同定一部分空間法からのアプローチ, 朝倉書店, 2004
- 4) Peeters, B., and De Roeck, G.: Stochastic System Identification for Operational Modal Analysis: A Review, *J. Dyn. Sys., Meas., Control*, ASME, 123, 659-667, 2001
- 5) 柴田明徳: 最新耐震構造解析, 森北出版, 1981