

免震改修建物の改修前後における常時微動計測を用いた動特性評価

Dynamic Characteristics of Seismic Retrofit Building with Base Isolation System before and after Retrofitting using Micro-tremor Measurement

徳武 茂隆 SHIGETAKA TOKUTAKE

白山 貴志 TAKASHI SHIRAYAMA

川島 学 MANABU KAWASHIMA

建築技術部 原田 浩之 HIROYUKI HARADA

本報告は、常時微動計測により免震改修を行った建物の改修前・改修後の振動特性を確認することを目的としている。計測の対象とした建物は、1972年に建てられた地上9階、地下1階のSRC造建物である。建物の1階柱中央に免震装置を設置し、上下階の大梁間にオイルダンパーを併用した免震改修建物である。常時微動計測は、水平、ねじれ、ロッキングについて行い、スペクトル解析を行った。解析の結果、改修後の固有周期は改修前の固有周期に比較して15～30%の伸びが観測された。また、改修後の上部構造の応答の低減や、ねじれ振動の低減なども確認でき、免震改修による効果の一端が確認できた。

キーワード：耐震改修，免震構造，常時微動計測，FFT解析，固有周期

This report describes to confirm dynamic characteristics of the building before and after seismic retrofitting with base isolation system using micro tremor records. The observed building was built in 1972 which has nine-storey and a basement with steel and reinforced concrete structure. The building has isolators in the center of the each column at ground floor, and has oil dampers between ground and first floor. The measurement is implemented for every case, Horizontal, Vertical, Torsional and Rocking. The records were analyzed with FFT and ensemble averaged. As a result, it is confirmed that natural period of the building after seismic retrofitting is increased by 15～30% comparing with the before, and seismic retrofitting with base isolation system reduce upper structural response and torsional vibration response.

Key Words: Seismic Retrofit, Base Isolation, Micro Tremor Record, FFT Analysis, Natural Period

1. はじめに

筆者らは、新築の超高層RC造建築物や免震RC造建築物を対象として、竣工直後の構造性能の把握を目的として常時微動測定を実施してきた^{1),2)}。計測を始めた2008年以降、これまでに10棟を超える建物で計測を行い、そのデータの集積は現在も続けられている。

一方で近年、耐震補強において免震や制振を用いた耐震改修が増えつつあり、当社においても2010年以降、免震を用いた耐震補強の設計及び施工の案件がともに4件（うち設計のみ及び施工のみが1件ずつ）と増えてきている。特に官公庁における耐震補強では、大地震後に建物の機能を維持し、震災後に対策本部などの機能を即座に機能させるよう、免震構法を採用した改修が増えてきている。そこで筆者らは、これらの免震を用いた耐震補

強案件で、超高層建物で採用してきた常時微動測定を用いて、改修前および改修後の建物の振動特性の変化をとらえることを目的に計測を始めている。

本報では、その1つである都内に位置する事務所ビルにおける常時微動測定の分析結果を報告する。

2. 計測対象の建物概要

(1) 既存建物概要

既存建物は東京都中央区にある非常に狭隘な土地に建てられた事務所ビルで、1972年（昭和47年）竣工の他社の施工により建設された、いわゆる旧耐震の建物である。

建物規模は地上9階建てで、1～5階がSRC造、6～9階及び地下階がRC造の建物である。短辺方向は純ラ

ラーメン構造，長辺方向は耐震壁付ラーメン構造で，地下階は4周を壁に囲まれている。長辺方向については9階においてセットバックがある。建物の外観を図-1に，表-1に既存建物の概要を示す。



図-1 既存建物外観写真（中央白い建物）

表-1 建物概要一覧

所在地	東京都中央区
建築年月	1972年6月（昭和47年6月）
建物用途	事務所
建物規模	地上9階，地下1階，塔屋なし
延べ面積	約2,100 m ²
建物高さ	30.95 m
構造種別	SRC造，非充腹形鉄骨（1階～6階梁） RC造（6階柱～R階及び地下）
構造形式	桁行方向 耐震壁付ラーメン構造 梁間方向 ラーメン構造
基礎構造	場所打ちコンクリート杭 （支持層 GL-24 m付近，砂礫層）

既存建物に対して行われた耐震診断では，耐震診断判定指標 I_s の最低値が短辺方向0.367，長辺方向0.712， C_{TUD} の最低値は長辺方向0.59，短辺方向0.29であり，壁量の多い長辺方向は I_s 値が基準となる指標（ $I_s \geq 0.6$ ）を満足しているものの，短辺方向ではほぼすべての階で耐震強度が不足し，耐震改修が必要とされた。

（2）耐震補強設計の概要

先に示したとおり，既存建物は地下階を有する建物であり，さらに建物外壁面と敷地境界との距離は約50cm程度と非常に小さく，建物周囲に免震クリアランスを十分に確保できない。そのため，地震時の免震層の変形を抑えつつ免震の機能を発揮するように，免震層にダンパーを併用したレトロフィット構法を採用して耐震改修を

行っている。具体的には，剛強な地下をそのまま利用し，建物1階の柱中央に免震装置を設置して2階から上階の地震力を低減し，地震力を減らすことにより，下部構造への負荷も減らす改修計画とした。設計では，極めて稀に発生する地震動入力に対して免震層（1階）の最大変形量を30cm以下と設定している。

本建物の免震装置より上部の短辺方向アスペクト比は3.0程度であることから，建物の転倒を抑えて免震装置にかかる引抜力を最小限とするために，免震機能をより向上させて上部建物にかかる地震力と転倒モーメントの低減を図る必要があった。そのため，耐震改修に主眼をおき，免震層の風に対するトリガー機能を外し，免震及び復元機能に天然ゴム系積層ゴム免震装置を，減衰機能にオイルダンパーを採用して，免震性能の向上を計ることとした。なお，天然ゴム系積層ゴムの採用は上述の免震機能の確保とともに，既存躯体への付加応力が小さくなるように配慮している。

図-2に既存建物の基準階平面図を，図-3に既存建物の断面図を，図-4に改修建物の免震装置及び減衰装置配置図を示す。また，設計における改修前建物と改修後建物の固有周期一覧を表-2，3に示す。なお，改修後における固有周期の積層ゴム剛性は天然ゴム系積層ゴムを採用しているため，歪みレベルに依らず一定となる。

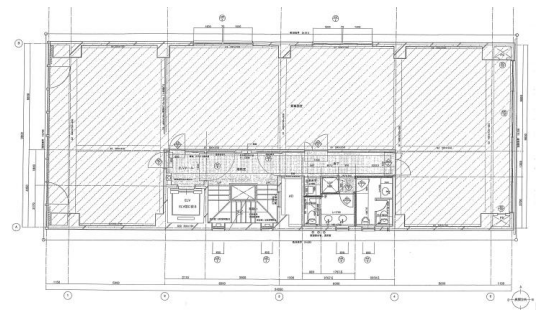


図-2 既存建物基準階平面図

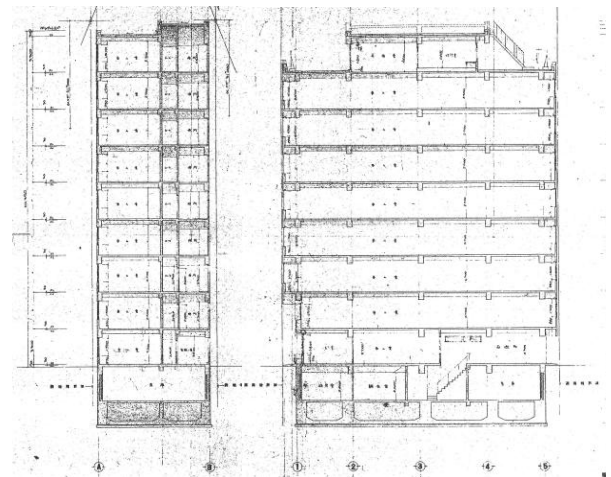


図-3 既存建物断面図

凡例	符号	装置呼び名	基数	備考
	NR1500	NR1-50004, 0-74, 0-128	4	環層ゴム支床
	NR1600	NR1-60003, 5-76, 0-192	4	環層ゴム支床
	NR1700	NR1-70003, 5-76, 0-192	2	環層ゴム支床
	QLB133	QLB133 (十字型)	1	連動転がり支床
	DP	DS3100700-E-1	4	オイルダンパ

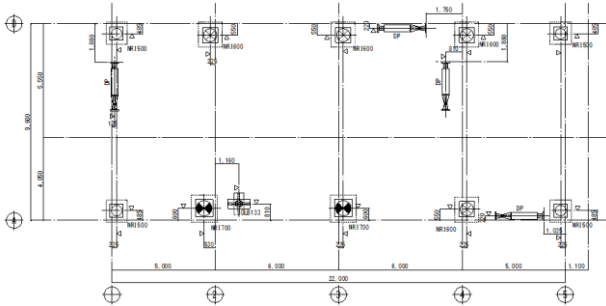


図-4 免震装置及び減衰装置配置図

表-2 改修前建物の設計固有周期一覧 (sec (Hz))

モード	短辺方向 (X方向)	長辺方向 (Y方向)
1次	0.675 (1.482)	0.216 (4.634)
2次	0.273 (3.666)	0.083 (12.08)
3次	0.176 (5.678)	0.052 (19.29)

※ () 内は振動数を示す。

表-3 改修後建物の設計固有周期一覧 (sec (Hz))

モード	短辺方向 (X方向)	長辺方向 (Y方向)
1次	3.757 (0.266)	3.719 (0.269)
2次	0.417 (2.400)	0.136 (7.370)
3次	0.224 (4.464)	0.068 (14.75)

※ () 内は振動数を示す。

なお、本建物の改修計画については、耐震改修促進法に基づく耐震改修計画の認定に際して、一般財団法人日本建築センターの「耐震診断評定委員会」の技術審査を経て評定書を受領している（評定番号：BCJ-耐震診断-126）。

3. 常時微動計測の概要

常時微動測定は、耐震改修工事の「改修前」と「改修後」にそれぞれ行った。改修前は2013年9月6日の改修設計前の現地調査時に、改修後は2016年1月16日の改修工事完了後に行った。

改修前、改修後どちらの測定も㈱東京測振社の携帯用振動計SPC-51A（サーボ型加速度計）により行い、測定周波数は0.2～70Hz、測定レンジは150μ～10cm/sとしている。サンプリング周波数は100Hzであり、計測時間は1回の測定について30分を基準とした。

計測は、短辺及び長辺方向の水平2方向と上下方向、

さらに建物のねじれ及びロッキングについて調べるための計測を7ケースに分けて行った。ピックアップの配置位置は、改修前の水平及び上下については6chを使用し、9, 2, 1, B1階の建物中心位置に近いところとした。また、ねじれ及びロッキングについては9, 1, B1階において短辺及び長辺方向に腕を伸ばした形で、可能な限り建物平面の端部にて計測を行った。なお、改修後については免震層のねじれ及びロッキングの影響を確認するために、チャンネル数を増やして8chを使用し、2階での計測を追加している。図-5にピックアップの配置位置の概念図を示す。

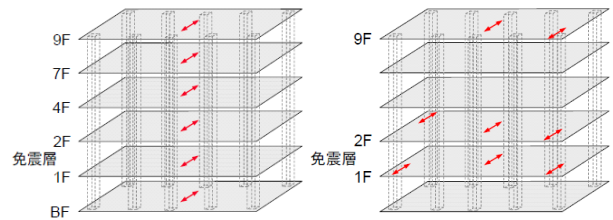


図-5 ピックアップの配置図と方向

なお、本報では水平及び上下動、ねじれに関する計測結果について報告する。ロッキングに関する計測結果については別途報告予定である。

4. スペクトル解析による分析

測定したデータの分析は、周波数応答関数にて建物の振動特性を確認することとする。周波数応答関数の推定は下式により評価する³⁾。

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

ここに、 $S_{XX}(\omega)$ は入力のパワースペクトル、 $S_{YY}(\omega)$ は出力のパワースペクトル、 $S_{XY}(\omega)$ は入出力のパワースペクトルを示している。式(1)による周波数応答関数の推定を20秒ごとに分割した記録のアンサンブル平均により推定している。

(1) 水平及び上下方向に対する計測結果

水平及び上下動の9階と1階との周波数応答関数を改修前後について並べて図-8～13に示す。なお、計測結果の一例として短辺方向のスペクトルとそのアンサンブル平均を図-6, 7に示す。また、これらの周波数応答関数から読み取った固有周期の一覧を表-4に示す。

この結果より、改修前に比較して改修後はすべての方向

で15~20%程度免震化により固有周期が伸びていることが分かる。改修前の設計解析モデルの固有周期と計測結果との比較を見ると、計測の方が若干周期の伸びた結果が観測されている。これは、設計モデルによる固有値は

と、計測の方が若干周期の伸びた結果が観測されている。これは、設計モデルによる固有値は

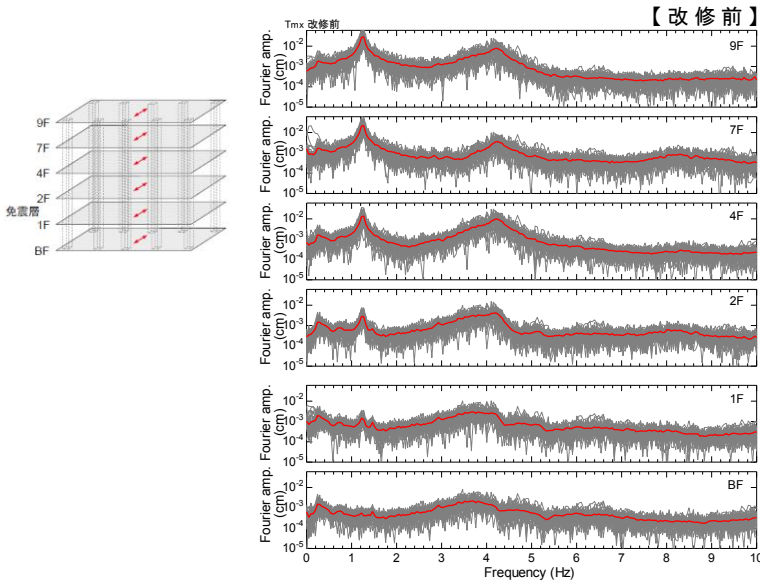


図-6 アンサンブル平均の結果（短辺方向）

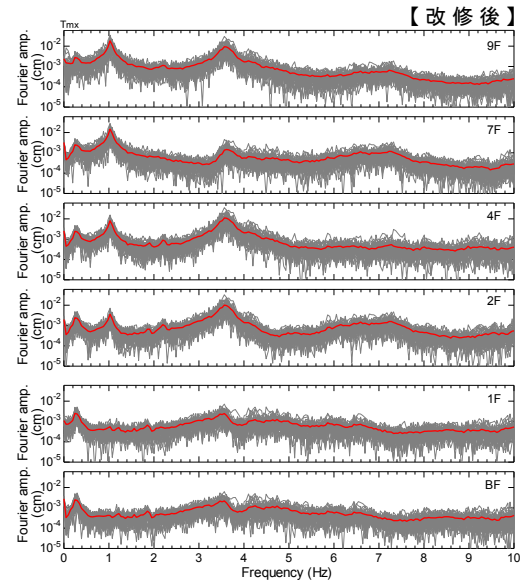


図-7 アンサンブル平均の結果（短辺方向）

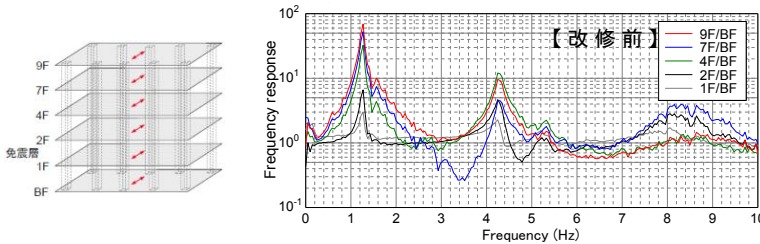


図-8 周波数応答関数（短辺方向）

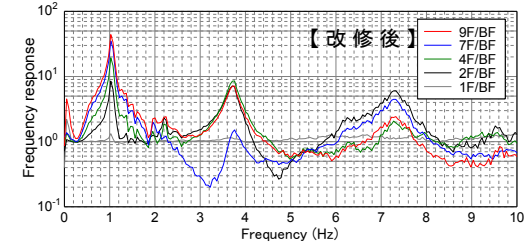


図-9 周波数応答関数（短辺方向）

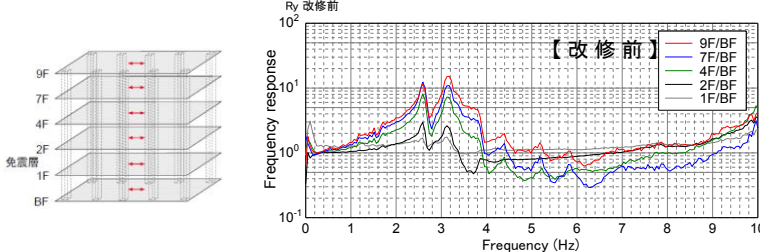


図-10 周波数応答関数（長辺方向）

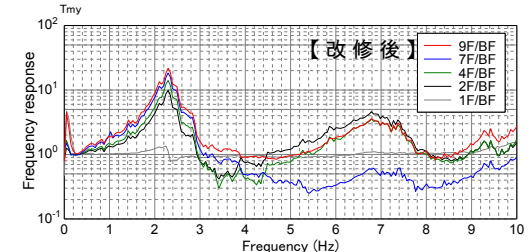


図-11 周波数応答関数（長辺方向）

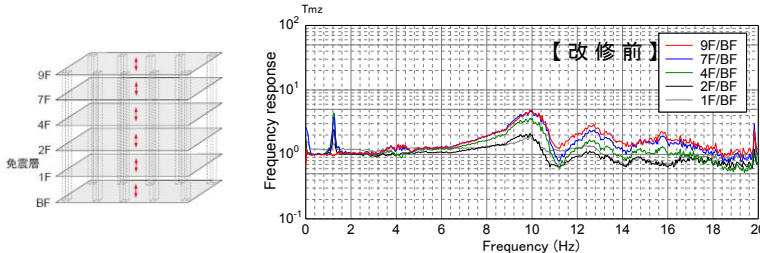


図-12 周波数応答関数（上下方向）

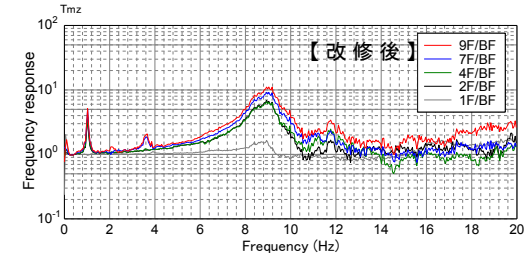


図-13 周波数応答関数（上下方向）

表-4 常時微動計測より確認された固有周期一覧 (sec (Hz))

モード	改修前			改修後		
	短辺方向 (X方向)	長辺方向 (Y方向)	上下方向 (Z方向)	短辺方向 (X方向)	長辺方向 (Y方向)	上下方向 (Z方向)
1次	0.787 (1.27)	0.317 (3.15)	0.100 (9.98)	0.980 (1.02)	0.437 (2.29)	0.111 (8.97)
2次	0.234 (4.27)	— (—)	— (—)	0.267 (3.74)	0.147 (6.79)	— (—)
3次	0.120 (8.30)	— (—)	— (—)	0.137 (7.28)	— (—)	— (—)

※ () 内は振動数を示す。

初期の弾性剛性による固有値解析結果であり、実際に計測した建物は竣工後に何度か中小地震による揺れを経験しているため、軽微なクラックの発生やなじみなどにより若干周期が延びているものと思われる。改修後の固有周期については、表-3に示した改修建物の設計固有周期と比較して非常に短周期の値となっている。これは、本計測が常時微動計測であるため、積層ゴム免震装置及びオイルダンパーの微小振幅領域でのバネ性による影響であると考えられる。

また、どの方向の計測結果においても、改修前の周波数応答関数では2階から9階にかけて徐々に増幅が大きくなってきているのに対して、改修後の周波数応答関数では2階から9階にかけて徐々に増幅していく様子は見られない。これは、建物の免震化による効果が確認できていた点であり、免震階における応答の増幅により上階での増幅が抑えられていることを示している。

なお、改修前Y方向の周波数応答関数において、最初のピークが2.57Hz付近に確認できるが、これは次に述べるねじれの固有周期が表れているものと考えられる。

(2) ねじれに対する計測結果

ねじれに対する計測は建物端部にて水平動を図り、端部の計測器設置位置の距離から下式により平面のねじれ回転角を算出した。

$$\theta = \frac{V_{X1}-V_{X2}}{L_Y} = \frac{V_{Y1}-V_{Y2}}{L_X} \quad (2)$$

ねじれに関する9階と1階との周波数応答関数を改修前後について並べて図14～17に示す。また、これらの周波数応答関数から読み取った固有周期の一覧を表-5に示す。なお、改修後については免震階の直上階である2階と1階との周波数応答関数も併記する。

この結果より、ねじれの固有周期についても改修前に比較して改修後は20～30%程度の周期の伸びが観測されており、改修前・改修後それぞれの計測方向毎のピーク位置には大きな差異がないため、各階平面が剛床により回転していることが分かる。

また、改修前に比較して、改修後の応答倍率は特に1次周期周辺では比較的小さい値となっており、免震改修により免震階よりも上階におけるねじれの増幅が抑えられていることが分かる。

なお、改修前のねじれの固有周期が2.6～2.7Hzであることから、先に示した水平動の長辺方向における最初のピークがねじれによる固有周期であると確認できる。

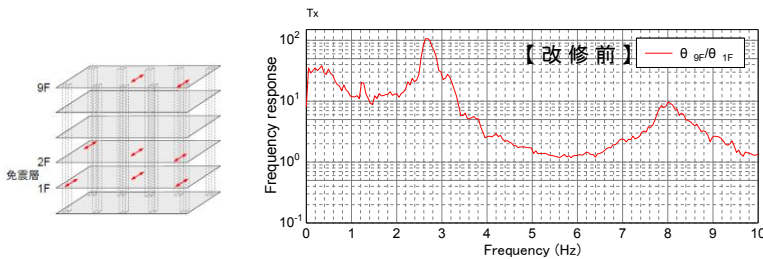


図-14 周波数応答関数 (ねじれ)

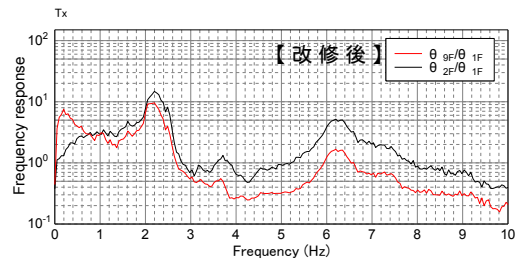


図-15 周波数応答関数 (ねじれ)

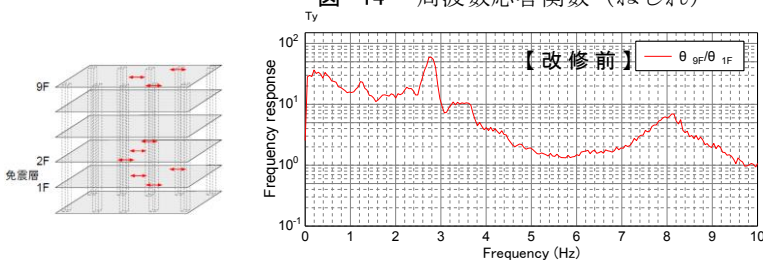


図-16 周波数応答関数 (ねじれ)

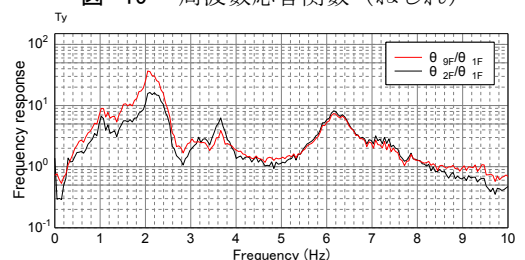


図-17 周波数応答関数 (ねじれ)

表-5 改修前の設計固有周期一覧 (sec (Hz))

モード	改修前		改修後	
	ねじれ (短辺方向計測)	ねじれ (長辺方向計測)	ねじれ (短辺方向計測)	ねじれ (長辺方向計測)
1次	0.376 (2.66)	0.366 (2.73)	0.459 (2.18)	0.478 (2.09)
2次	0.125 (8.01)	0.123 (8.12)	0.161 (6.20)	0.162 (6.16)

※ () 内は振動数を示す。

5. まとめ

免震を用いた耐震改修が行われた9階建て鉄骨鉄筋コンクリート造建物を対象に、耐震改修による振動特性の変化を確認する目的で、改修前・改修後において常時微動測定を行い、以下に示すことが分かった。

- ①改修前・改修後の常時微動計測の結果より、改修後には建物固有周期が15～20%程度伸びていることが確認でき、微小振幅における計測結果ではあるものの、耐震改修前後の振動特性の変化を捉えることにより免震改修の効果を確認できた。
- ②2階から9階にかけての応答倍率をみると、改修前には徐々に振幅の増幅が見られたが、改修後は免震階である1階より上階においては、1階に対してほぼ一定の増幅であった。このことから免震改修の効果を確認できている。
- ③ねじれ振動に関しても水平動と同様に、改修前に比較して改修後は20～30%程度の周期の伸びが観測された。
- ④ねじれ振動については、改修前よりも改修後の方が応答倍率が小さく、免震改修によりねじれの振動に対する増幅が小さくなっていると考えられる。

以上より、常時微動計測により免震を用いた耐震改修の改修効果は、微小振幅のレベルでも十分に確認できることが分かった。また、今後も更なるデータの蓄積により、免震改修建物の構造設計に資する基礎的なデータとして、十分に活用できるデータになると考えられる。

なお、本報告は計測結果の水平動やねじれ振動等、一部についての検討報告であり、今後ロッキング等の振動特性の把握や、設計解析モデルへの既存建物の振動特性のフィードバック等について検討を行っていく予定である。

謝辞：本建物の改修前・改修後の計測に当たり、株式会社ランドビジネス様にご理解とご協力いただきました。また、改修後の計測においては当社作業所にご協力いただきました。ここに記してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 平田裕一, 小田稔, 川島学; 常時微動測定に基づく超高層RC造建物の動特性評価(その1)(その2), 日本建築学会学術講演梗概集B-II, pp.724-727,2009.8
- 2) 平田裕一, 鈴木亨, 小田稔, 徳武茂隆, 川島学; 常時微動測定に基づく超高層RC造建物の動特性評価(その3), 日本建築学会学術講演梗概集B-II,

pp.1007-1008,2010.9

- 3) 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