

# 常時微動測定に基づく TAC.T OFFICE の振動性状

耐震改修前後の性状比較と簡易測定手法の検証

栗栖 藍子\*<sup>1</sup>・廣石 恒二\*<sup>1</sup>・谷 翼\*<sup>1</sup>・欄木 龍大\*<sup>2</sup>

Keywords : existing building, ambient vibration measurement, seismic retrofit, seismic observation, natural frequency

既存建物, 常時微動測定, 耐震改修, 地震観測, 固有振動数

## 1. はじめに

実測に基づく建物の振動特性把握方法として、常時微動測定は多く用いられている(例えば<sup>1)</sup>)。既存建物においては、経年変化を含めた実状の振動性状、特に、建物全体の詳細な立体挙動を実測により把握することで、より効果的な制震補強や耐震補強の方法が提案できるなど、振動測定データの活用が期待される。

大成建設技術センターTAC.T OFFICE(本館)では、継続的に地震観測が行われている<sup>2)</sup>ほか、耐震改修工事が実施される前後に常時微動測定を行い、詳細な振動性状を調査した。本稿では、得られた耐震改修前後の振動性状と耐震改修の効果、および地震観測記録にみられる耐震改修の効果について報告する。

また、常時微動測定の簡易化について検討した結果も併せて報告する。これは、多点による建物全体の詳細な常時微動測定を行う場合には、多数のセンサーと多数の長尺のケーブルが必要となり、運搬や設置が大がかりで、コストや時間がかかるため、省力化を目的として、少数のセンサーで実施する方法(部分移動測定)<sup>3)</sup>について、検証したものである。

## 2. 建物概要

大成建設技術センターTAC.T OFFICEは、横浜市に建つ、地下1階地上4階建てのRC造の事務所建物で、1979年に竣工、2007年に全面改修<sup>4)</sup>が行われ、2021年には耐震改修工事が施された。

平面形状は、図-1に示すように長辺(東西)方向が約90m、短辺(南北)方向が約12mと細長く、2か所に階段(コア)をもち、コアを境に、西側部分、中央

部分、東側部分と分けられる。2007年の全面改修時より、1~4階の中央部分に増床箇所や、2階床と4階床に吹き抜け箇所が存在する。2021年の耐震改修工事では、1階に1か所、2~4階に2か所ずつ、計7箇所の木材利用耐震構法<sup>5)</sup>による耐震壁 T-WOOD®BRACE が入り、2~4階において各階1か所ずつ中央部の外壁開口が閉鎖された。

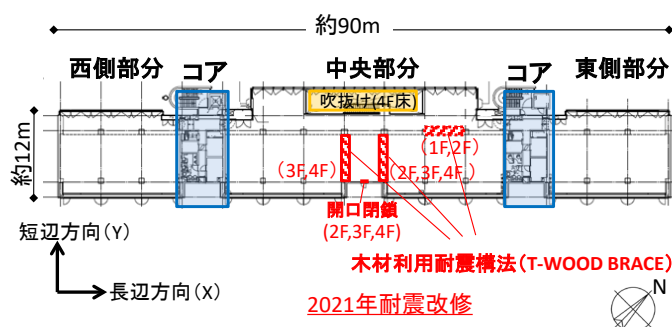


図-1 基準階平面と耐震改修箇所  
Fig.1 Plan of standard floor

## 3. 常時微動測定による振動性状

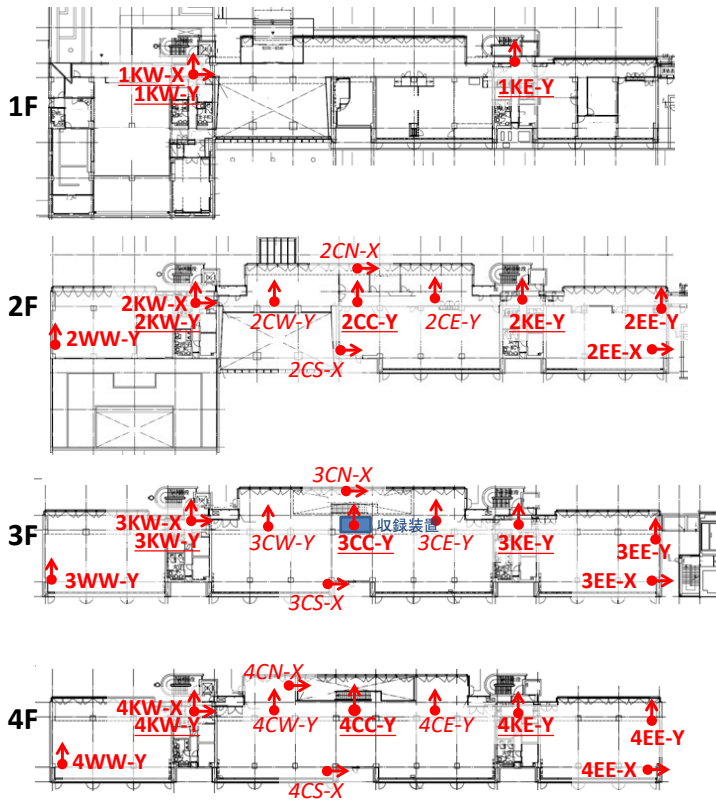
### 3.1 測定概要

常時微動測定を、耐震改修前の2017年3月、耐震改修後の2021年10月に実施した。改修前後で、測定項目や測定点配置が同条件となるようにし、いずれも多点同時の測定を、センサー数の制約から2ケースに分けて実施した。測定点配置を図-2に示す。1ケースあたり24測点、うち12測点は2ケースで共通とし、合計36測点(長辺方向13測点、短辺方向23測点)の計測とした。ケース1は全体挙動の把握、ケース2は中央部分の挙動を詳細に把握する配置としている。測定は、

\*1 技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室

\*2 技術センター イノベーション戦略部 技術開発戦略室

サーボ型速度計（東京測振製 VSE-11）24 台を用いた速度測定とし、サンプリング振動数は 100Hz、各ケースの測定時間は 60 分間とした。



【測定点凡例】  
**太字下線**: ケース1,2共通測定点 **太字**: ケース1測定点 **斜字**: ケース2測定点

図-2 測定点配置  
 Fig.2 Measurement point arrangement

### 3.2 耐震改修前後の振動性状

#### 3.2.1 伝達関数と卓越振動数

各測定点で得られた時刻歴データをフーリエ変換し、1階の測定点 1KW-X（長辺方向）、1KW-Y（短辺方向）に対する各測定点のフーリエスペクトルの振幅比（以降、伝達関数とよぶ）を求めた。改修前後の伝達関数を図-3 に示す。長辺方向において、改修前に 3.3Hz でみられた卓越振動数が、改修後には 3.6Hz と高くなっている。短辺方向でも、改修前に 3.5Hz、4.2Hz、5.4Hz でみられた卓越振動数が、改修後には 3.8Hz、4.4Hz、5.6Hz と、高くなっている。

#### 3.2.2 短辺方向の振動性状

改修前後の振動モード形状の比較を図-4 に示す。同図では、短辺方向の振動モード形状として、伝達関数から各卓越振動数における振幅比（ピーク値）をひろい、中央の測定点 CC を 0 とする測定位置を横軸座標としてプロットした。縦軸の振幅比の正負は、位相差よ

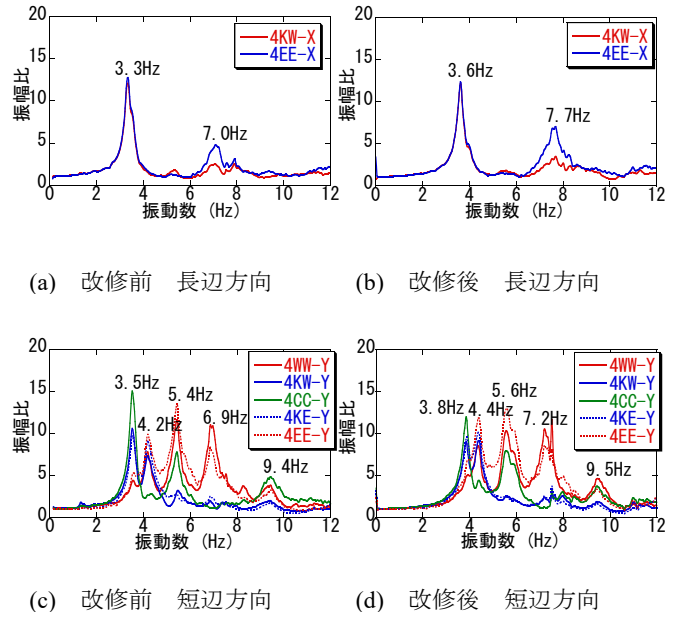


図-3 4階/1階の伝達関数  
 Fig.3 Transfer functions of the 4<sup>th</sup> floor to the 1<sup>st</sup> floor

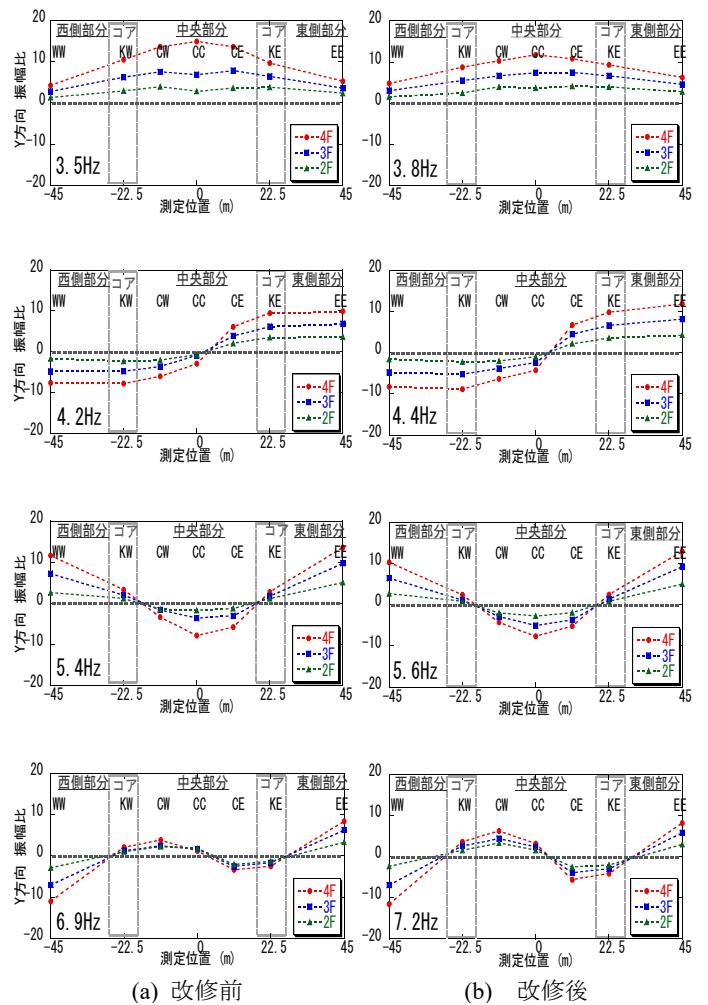


図-4 平面的な振動モード  
 Fig.4 Planar mode shapes

り同位相か逆位相かのみを判断して決定している。短辺方向では、中央部の振幅が大きい1次振動モード(改修前3.5Hz, 改修後3.8Hz), 中央部分のねじれ振動モード(改修前4.2Hz, 改修後4.4Hz), コアを節にして東西部分と中央部分が逆位相で振動するモード(改修前5.4Hz, 改修後5.6Hz), 東西で逆位相に振動するモード(改修前6.9Hz, 改修後7.2Hz), など複数の振動モードがみられた。

同様に伝達関数のピーク値による、高さ方向の振動モードを、短辺方向1次振動モード(改修前3.5Hz, 改修後3.8Hz)について図-5に示す。改修前に4階の中央部分(4CC-Y)で大きかった振幅が、改修後に低減していることが確認できる。

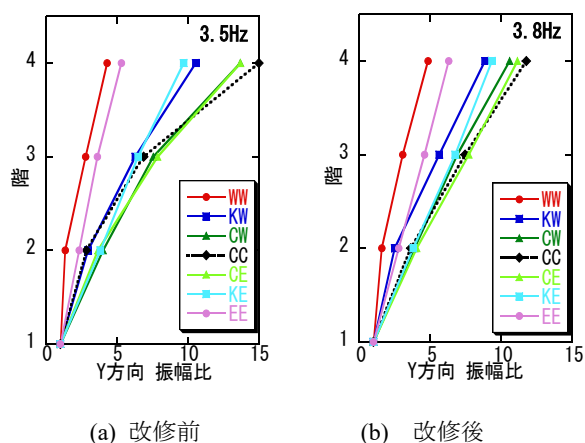


図-5 高さ方向の振動モード  
Fig.5 Elevational mode shapes

## 4. 地震観測記録による耐震改修前後の比較

### 4.1 地震観測概要

TAC.T OFFICE では、隣接して建つ免震建物の竣工時(1988年)から、継続して地震観測が実施されている。当初は免震建物との応答値比較を目的として、観測点は建物端部に2点のみであったが、2018年より、中央部分も含めた複数点での観測を行っている。2018年以降の地震観測点配置を図-6に示す。中央部の1~4各階(中央2階観測点は2022年観測開始)と、東側コア部4階の計5か所に3成分(XYZ)の加速度計が設置されている。

2018年以降の地震観測点配置を図-6に示す。中央部の1~4各階(中央2階観測点は2022年観測開始)と、東側コア部4階の計5か所に3成分(XYZ)の加速度計が設置されている。

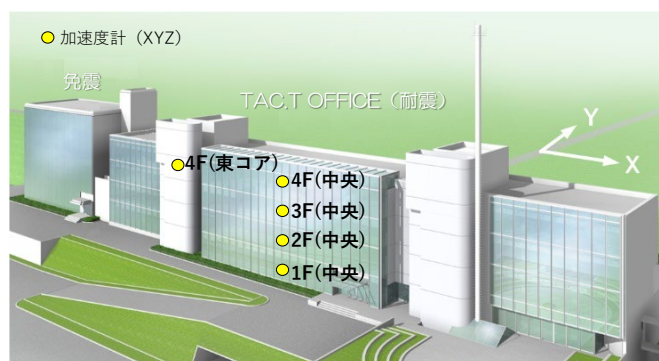


図-6 地震観測点配置  
Fig.6 Seismic observation point

### 4.2 耐震改修前後の地震応答性状比較

観測地震のうち、耐震改修前後でそれぞれ1階の計測震度が2程度の地震について、応答性状を比較した。対象とした地震の諸元を表-1に、各地震での建物応答値を表-2と表-3に示す。

改修前の地震は、2019年6月24日に観測された、房総半島南部を震源とする地震で、1階の計測震度は1.9、4階中央部短辺方向で観測された最大加速度は25.5Galであった。改修後の地震は、2021年12月3日に観測された、山梨県東部・富士五湖を震源とする地震で1階の計測震度は1.8、4階中央部短辺方向の最大加速度は15.1Galであった。改修前後の観測記録について、最大加速度分布を図-7に、最大変位分布を図-8に、伝達関数を図-9に示す。

短辺方向について最大変位を改修前後で比較すると、改修前には、中央部の変位分布が3階部分で折れ曲がり、1-3階間の変形に対して3-4階間の変形が大きいものに対して、改修後は、変位分布が直線に近くなり、1-3階間の変形と3-4階間の変形の差が小さくなっている。最大加速度分布にも同様の傾向がみられる。また、伝達関数にみられる卓越振動数は、長辺方向1次で、改修前3.2Hzが改修後3.4Hz、短辺方向1次で、改修前3.5Hzが改修後3.7Hzと、いずれも改修後に高くなっている。地震観測記録においても常時微動測定結果と同様の変化を確認した。

表-1 地震の諸元

Table 1 Earthquake specifications

	発生日時	震源	M
改修前	2019/6/24 9:11	房総半島南部	5.2
改修後	2021/12/3 6:37	山梨県東部・富士五湖	4.8

表-2 改修前の観測記録 (2019年6月24日)  
Table 2 Seismic observation record before renovation

	計測震度	最大加速度 (Gal)			最大変形角(rad)	
		X	Y	Z	X	Y
4F(東コア)	2.7	13.6	21.6	9.0		
4F(中央)	2.9	11.2	25.5	19.9	1/5960	1/4865
3F(中央)	2.4	9.6	15.6	16.0	1/26960	1/25708
1F(中央)	1.9	8.0	8.8	6.3		

表-3 改修後の観測記録 (2021年12月3日)  
Table 3 Seismic observation record after renovation

	計測震度	最大加速度 (Gal)			最大変形角(rad)	
		X	Y	Z	X	Y
4F(東コア)	2.5	12.8	10.8	5.3		
4F(中央)	2.6	11.3	15.1	4.1	1/8439	1/9387
3F(中央)	2.3	7.5	10.0	4.3	1/21487	1/22553
1F(中央)	1.8	3.5	4.1	2.9		

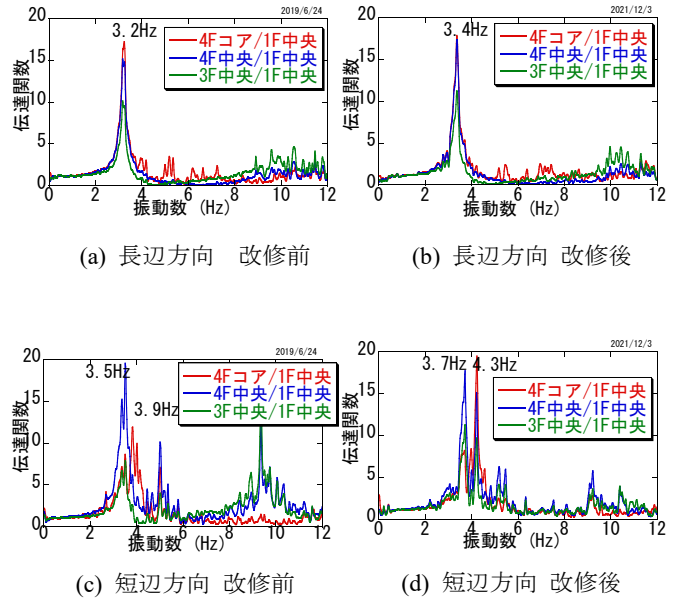


図-9 地震時の伝達関数  
Fig.9 Transfer functions during earthquake

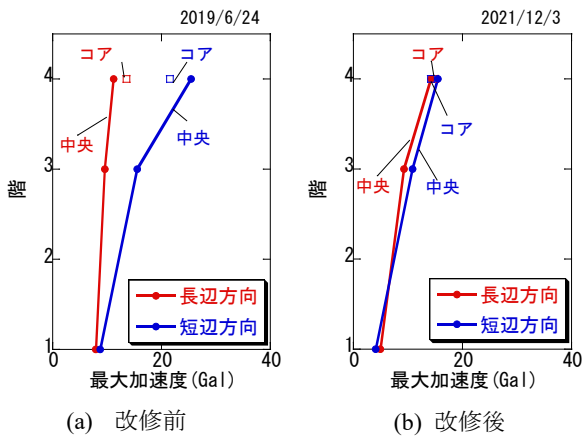


図-7 最大加速度分布  
Fig.7 Peak floor acceleration

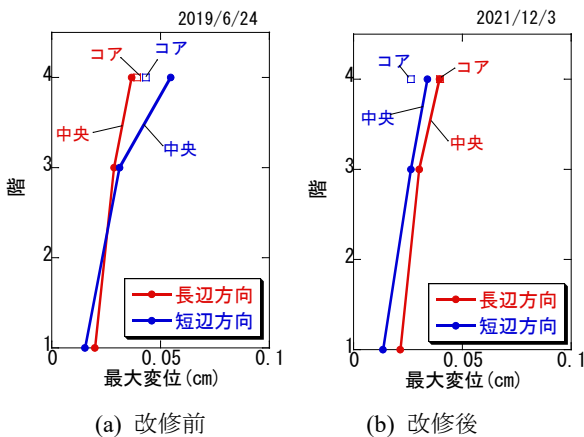


図-8 最大変位分布  
Fig.8 Peak floor displacement

## 5. 測定簡易化 (部分移動測定) の検証

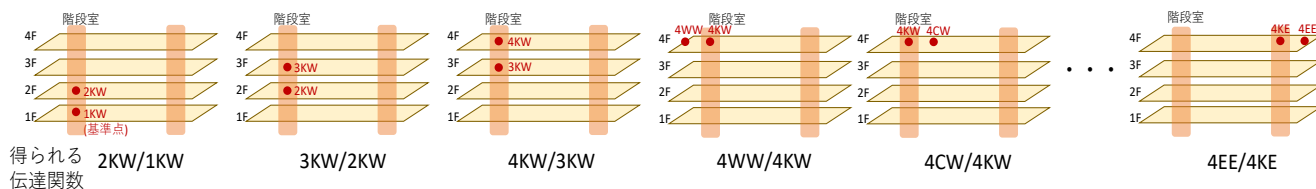
### 5.1 部分移動測定の概要

建物全体挙動を把握するための常時微動測定においては、センサー数の削減、測定の簡易化を目的として、全体の同時測定ではなく、隣接する2点の測定を1点ずつずらしながら行う方法 (部分移動測定) を提案している<sup>2)</sup>。図-10に示すように、隣接する上下階、同フロア上など、部分ごとに少数点の測定 (部分測定) を、1点ずつ重なるようにずらしながら行う。同図中の表記2KW/1KWは、測点1KWに対する測点2KWの伝達関数を表す。得られた部分ごとの伝達関数を順に掛け合わせることで、中間の測点の特性が相殺され、基準点に対する各測点の伝達関数が求まる。測定回数は増えるが、多数のセンサーや大がかりな配線作業が不要となるため、準備も含めた測定全体に要する時間とコストを大幅に削減することができる。例えば、今回実施した24台のセンサーによる多点同時の常時微動測定では、事前準備を含めた測定にかかる工数 (10人日程度) を、部分移動測定により約1/5 (2人日程度) に削減できると見込まれる。

### 5.2 検証方法と検証結果

#### 5.2.1 検証方法

耐震改修前後に実施した常時微動測定データを用いて、部分移動測定を模擬し、卓越振動数や振動モード形の把握が可能か検証を行った。部分移動測定では、



—基準点(1KW)に対する4階測点(4WW,4KW,4CC,4EE)の伝達関数の算出例—

$$\begin{aligned}
 (4WW/1KW) &= (2KW/1KW) \times (3KW/2KW) \times (4KW/3KW) \times (4WW/4KW) \\
 (4KW/1KW) &= (2KW/1KW) \times (3KW/2KW) \times (4KW/3KW) \\
 (4CC/1KW) &= (2KW/1KW) \times (3KW/2KW) \times (4KW/3KW) \times (4CW/4KW) \times (4CC/4CW) \\
 (4EE/1KW) &= (2KW/1KW) \times (3KW/2KW) \times (4KW/3KW) \times (4CW/4KW) \times (4CC/4CW) \times (4CE/4CC) \times (4KE/4CE) \times (4EE/4KE)
 \end{aligned}$$

図-10 部分移動測定の概要  
Fig.10 Outline of sequential partial measurement

各部分ごとの測定を異なる時間に実施するため、取得した同時測定データを時刻歴上で分割し、各時間帯に2点の部分測定を実施すると想定して検証を行った。部分測定1回あたりの測定時間は過去の事例<sup>3)</sup>から同程度の固有振動数の建物の高さ方向の振動モードが把握可能であった200秒間とした。どの時間帯にどの測定を行ったかの組み合わせは、掛け合わせるすべてが異なる時間帯になることを条件に、ランダムな組み合わせを10通りずつ設定した。掛け合わせて得られた伝達関数と振動モードを同時測定のものと比較した。

5.2.2 検証結果

部分移動測定を模擬して得られた、10通りの1階基準点(1KW)に対する4階(4KW, 4CC, 4EE)の短辺方向の伝達関数を、耐震改修後について同時測定の結果とともに図-11に示す。基準点から遠い端部の測点(4EE)において、高次振動モードでばらつきがみられるものの、コア(4KW)や中央部(4CC)では、概ね同時測定と一致する伝達関数が得られ、卓越振動数も一致している。部分移動測定による伝達関数からピーク値をひろい得られた平面的な1次振動モードを、同時測定のものと比較して図-12に示す。部分移動測定により、同時測定と同様の振動モード形状をとらえられている。中央部(CC)の高さ方向の1次振動モード形状を、耐震改修前後で比較して図-13に示す。部分移動測定の結果から、改修前後の振動モード形の変化を確認できる。なお、部分移動測定のシミュレーション結果にみられるばらつきは、部分測定1回あたりの測定時間を長くすることや、伝達関数の掛け合わせ回数を減らすことで小さくなり、把握精度が向上することを確認している<sup>6)</sup>。

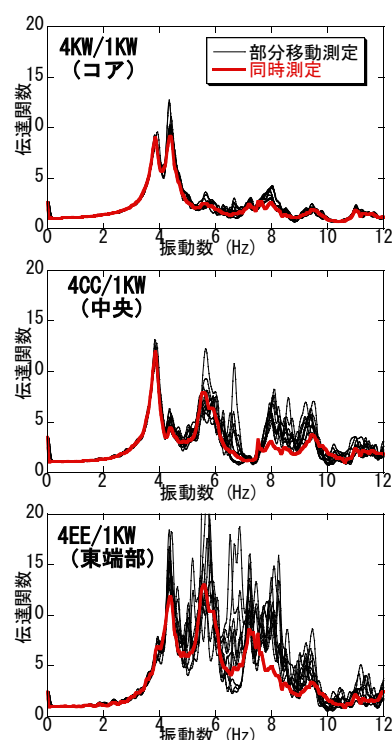


図-11 部分移動測定による伝達関数  
Fig.11 Transfer functions by sequential partial measurement

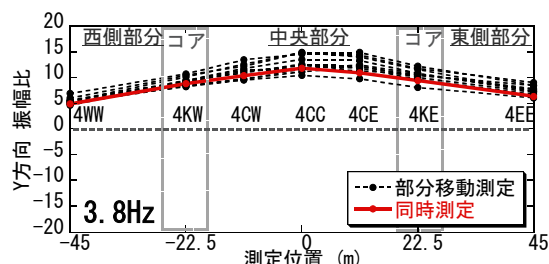


図-12 部分移動測定による平面的な1次振動モード  
Fig.12 Primary mode shape by sequential partial measurement

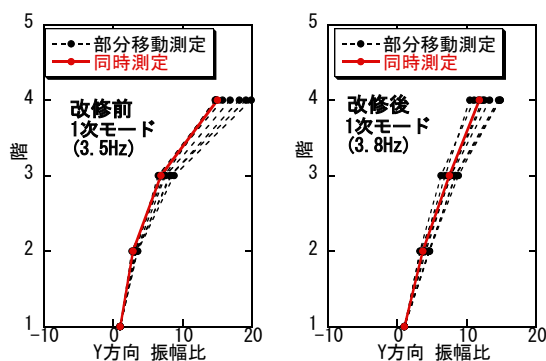


図-13 部分移動測定による中央部高さ方向1次振動モード  
Fig.13 Primary mode shape by sequential partial measurement

## 6. まとめ

大成建設技術センターTAC.T OFFICEにおいて、耐震改修前後の振動性状を、常時微動測定および地震観測記録から比較した。耐震改修前後で実施した建物全体の詳細な常時微動測定結果より、短辺方向において、吹き抜けのある中央部で振幅の大きい振動モードがみられたほか、複数の平面的な振動モードがみられた。改修前後で比較すると、改修後は固有振動数が1割ほど上がっていること、改修前に大きかった中央部の振幅が比較的減し、耐震改修により振動が抑えられていることを確認した。耐震改修前後の地震観測記録か

らも、同様の傾向を確認した。

また、多点同時で大きくなりとなる常時微動測定を、簡易に実施する手法（部分移動測定）について検証を行った。多点同時の測定データを用いて、部分移動測定シミュレーションを行ったところ、同様の卓越振動数と振動モードが得られ、手法の有効性を確認した。

## 参考文献

- 1) 栗田哲, ほか9名: 2011年東北地方太平洋沖地震を経験した建物の微動測定に基づくモード特性(その1~その7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.549~562, 2012.
- 2) 新居藍子, 欄木龍大, 長島一郎, 篠崎洋三, 木村雄一, 青野英志: 建物における地震・風観測モニタリングシステムの開発と適用, 大成建設技術センター報, 第44号, 07, 2011.
- 3) 栗栖藍子, 欄木龍大, 日比野浩, 坂本成弘, 長島一郎: 常時微動の部分移動測定による建物振動性状の評価, 日本建築学会技術報告集, 23巻54号, pp.441-446, 2017.
- 4) 関政晴, 篠崎洋三, 加藤美好: 大成建設技術センター本館リニューアル, 大成建設技術センター報, 第40号, 01, 2007.
- 5) 加藤圭, 成原弘之, 森田仁彦: 木材を補剛材に利用した鉄骨系耐震補強構法の開発, 大成建設技術センター報, 第52号, 27, 2019.
- 6) 栗栖藍子, 欄木龍大, 日比野浩, 廣石恒二, 柳坂祥希, 谷翼: 常時微動測定による既存建物の振動性状評価その2 部分移動測定手法の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.857~858, 2022.