

常時微動および地震観測に基づく超高層建物の振動特性に関する研究

名古屋大学工学部社会環境工学科建築学コース

福和研究室 波多野智也

1. 研究の背景と目的

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震において、長周期成分を多く含んだ地震動との共振により長時間に及ぶ大きな揺れが発生した超高層建物が見られた。近い将来、南海トラフ巨大地震が発生した際にも、超高層建物が長周期地震動との共振により、建物被害が大きくなる可能性があり、このような共振現象を避ける必要がある。また、特徴的な形状を有する建物は、整形な建物と比較して複雑な振動特性を示すことが予想されるため、その振動特性を把握することは重要である。

そこで本研究では、超高層建物と地盤の常時微動計測や地震観測を行い、固有周期や減衰定数などの把握を目的とする。

2. 対象建物の概要

建物概要を表1に示す。1999年に竣工した地上31階、地下4階、塔屋1階で最高高さ134.5mのS造建物である。短辺方向で13階から建物幅が変化していることが特徴である。平面形状は長辺方向6スパン(54.3m)×短辺方向3スパン(16.2m)の長方形平面を基準階とし、階段やエレベータからなるコア部は平面の西部に位置する片コア形式となっている。架構形式は、7階短辺方向が2層吹抜けであるため、上部外柱の荷重を下部へ円滑に伝達させられるように9,10階の柱を傾斜させている。また、12階以上はH形鋼曲げ柱と梁からなるフィレンディール架構を採用している。

3. 観測体制の概要

常時微動計測は2013年10月7日に実施した。計測配置は、固有周期と減衰定数、建物全体のモード形状の把握、さらには、平面形状の異なるPH階と11階の詳細な振動特性の把握を主目的として微動計測1(図1中○印)と微動計測2(図1中△印)の計2回を行った。微動計測2の計測配置では人力加振実験も行った。また、10月8日～10日にわたって台風接近に伴う計測をPH階西端に1点の微動計を設置し行った(図1中□印)。さらに対象建物では地震計を4点設置し、定常的な地震観測も行われている(図1中☆印)。人力加振実験概要を表2に、観測地震記録を表3に示す。

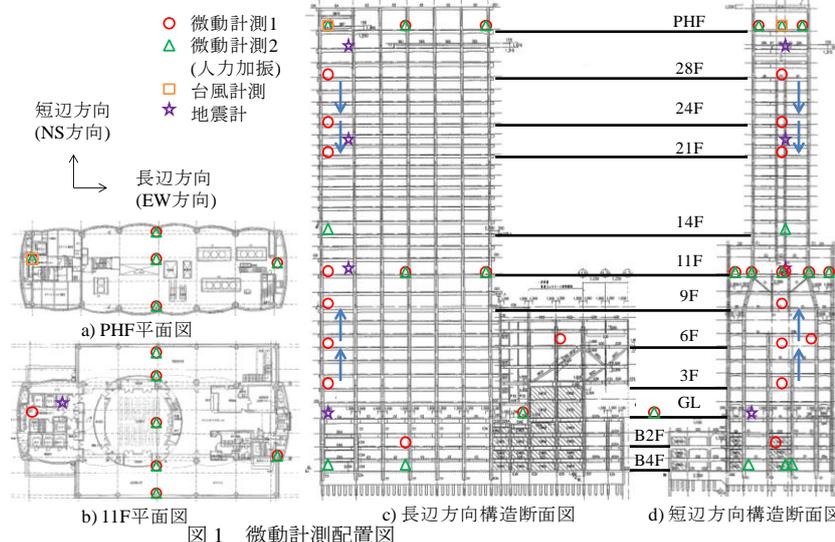


図1 微動計測配置図

表1 建物概要

敷地面積	4604m ²	構造種別	地上：S造(一部SRC造およびCFT)
建築面積	3410m ²		地下：RC造(一部SRC造)
延床面積	61339m ²	平面形式	片コア型
竣工	1999(H11)年	構造形式	地上：ラーメン
階数	地上31階建	基礎種別	地下：耐震壁付ラーメン
	地下4階建		杭基礎
	塔屋1階建		PHC杭Φ700
最高高さ	134.5m		G.L.=44.3m L=23.0m
軒高	132.7m		

表2 人力加振概要

case	加振場所	加振人数	加振方向	加振周期(s)
1	PHF中央	6	長辺1次	2.84
2	PHF中央	6	短辺1次	3.08
3	PHF中央	6	短辺2次	1.35
4	PHF中央	6	長辺2次	1.10
5	PHF中央	6	長辺2次	1.08
6	PHF東端	6	揺れ	2.40
7	PHF東端	6	揺れ	2.35

表3 観測地震記録

eq	発生日時	震源地	Mj	最大加速度(gal)		
				長辺方向	短辺方向	上下方向
1	2013/4/13	淡路島	6.3	3.7	7.5	3.6
2	2013/8/3	遠州灘	5.1	2.7	4.0	6.2

4. 微動記録に基づく振動特性

4.1 固有周期と減衰定数

常時微動1回目のPH階と11階の西端で得られた記録から求めた速度フーリエスペクトルを図2に示す。図2より長辺方向、短辺方向ともに長周期帯域に多くのピークが確認できる。上下方向のピークが水平方向のピークと同じ周期帯域に現れていることから、曲げ変形が卓越していることが確認できる。また対象とするモードにバンドパスフィルタを施し、RD法を用いて生成した自由振動波形に1自由度系の自由振動波形でフィッティングを行い、推定した固有周期と減衰定数を表4に示す。固有周期に関しては、短辺方向が長辺方向の6%程度大きくなっている。長辺方向では減衰定数が1%を上回っているが、短辺方向では減衰定数が1%弱となっており、長辺方向が短辺方向より高い値を示している。

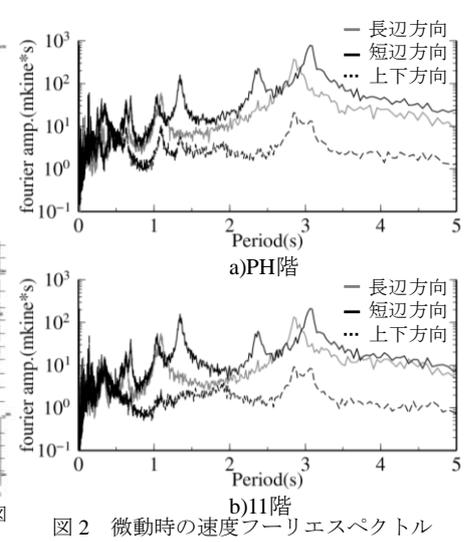


図2 微動時の速度フーリエスペクトル

4.2 モード形状の推定

常時微動計測の記録を用い、モード形状の推定を行った。対象とするモードにバンドパスフィルタを施し、得られた波形において PH 階の値が最大となる時刻と同時刻の値を各階で読み取り、PH 階の値が 1 となるように基準化してプロットしている。図 3 にモード形状の推定結果を示す。なお、1 次モードの PH 階と 11 階の上下動は 10 倍している。

1 次モードにおいて上下動の傾きに注目すると、11 階の傾きが長辺方向では小さく、短辺方向では大きい。このことから、長辺方向ではせん断変形が、短辺方向では曲げ変形が卓越していることが推測される。PH 階では両方向ともに傾きが見られ、高層階では建物幅に関係なく曲げ変形が含まれることが考えられる。2 次モードにおいては長辺方向と短辺方向で同じような階に腹が見られる。このことから、2 次モードでは建物幅に依存するような有意な違いはないものと思われる。また、短辺方向の両モードで共通して 11 階では内側が外側より大きく挙動しており、外側の挙動が内側に付随していることが見られる。

5. 人力加振記録に基づく振動特性

人力加振実験によって PH 階中央で得られた自由振動波形の一例とその波形のフィッティング結果を図 4 に示す。推定された固有周期と減衰定数を表 4 に示す。微動時より 1 次モードに関しては固有周期と減衰定数ともに大きくなっており、振幅依存性が確認できる。

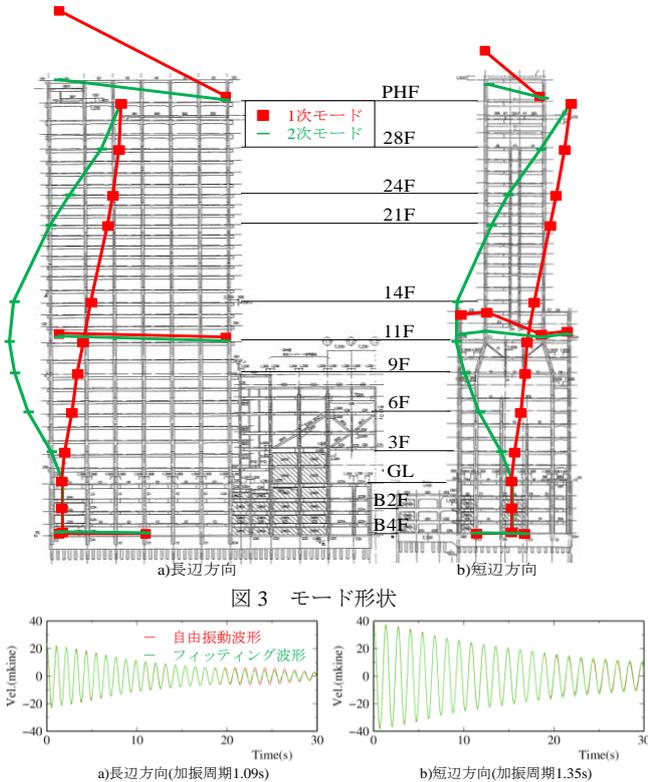


図 3 モード形状

図 4 人力加振による自由振動波形とフィッティング波形

表 4 記録別の固有周期、減衰定数

	常時微動		人力加振		強風時		eq1		eq2		
	長辺	短辺	長辺	短辺	長辺	短辺	長辺	短辺	長辺	短辺	
1次	固有周期(s)	2.86	3.03	2.94	3.13	2.94	3.13	3.33	3.45	3.03	3.23
	減衰定数(%)	1.32	0.85	1.41	1.23	2.76	1.23	3.97	2.53	3.80	2.10
2次	固有周期(s)	1.10	1.35	1.10	1.53	-	-	1.25	1.52	1.18	1.41
	減衰定数(%)	1.43	1.01	1.34	0.96	-	-	3.76	2.94	3.96	3.86

6. 台風記録に基づく振動特性

台風計測によって得られた記録のうち、風速が最も大きかった時間帯(以下、強風時)と風速が最も小さかった時間帯(以下、微風時)からそれぞれ 2 時間を切り出して分析を行う。なお、強風時の平均風速は 8 m/s であり、微風時の平均風速は 1.7 m/s である。微動時と同様に推定した、固有周期と減衰定数を表 4 に示す。強風時は微動時より固有周期は約 3%、減衰定数は 1.5~2 倍程度大きくなっている。

7. 地震記録に基づく建物の固有周期と減衰定数

収録された地震記録のうち最大応答値の大きい eq1 の加速度波形を図 5 に示す。1 階の波形に対して 30 階では応答が大きく増幅し、継続時間が長くなっていることがわかる。また、30 階と 1 階の伝達関数とフィッティング結果を図 6 に、固有周期と減衰定数を表 4 に示す。地震時は微動時より固有周期と減衰定数ともに大きくなっている。また、微動記録、人力加振記録、台風記録、地震記録から推定した固有周期、減衰定数と最大速度の関係を図 7 に示す。最大速度の増加に伴って、固有周期と減衰定数が大きくなる傾向がある。

8. 結論と今後の課題

今回の研究により、対象建物の固有周期と減衰定数を概ね推定でき、振幅依存性を確認できた。一方、特に地震記録においては、減衰定数の推定値に大きくばらつきが見られた。減衰定数の推定に関してはさらなる検討が必要である。

モード形状の推定に関しては、水平成分と上下成分に着目することによって、モード別に建物幅の違いによるモード形状の特徴が確認された。

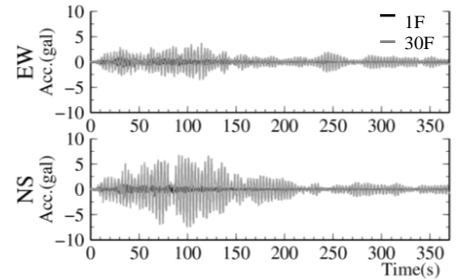


図 5 地震時の加速度波形

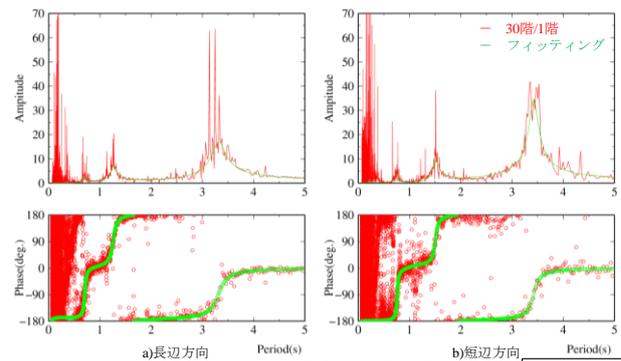


図 6 地震時の伝達関数

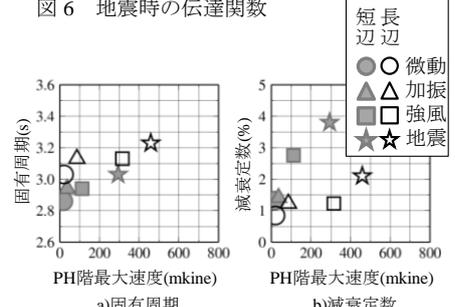


図 7 最大速度と固有周期、減衰定数