

CFT 造建物の振動特性

安藤建設 (株) ○藤本利昭

1. はじめに

実構造物の固有周期ならびに減衰特性の調査結果が、文献 1), 2) にまとめられている。その中で、制振建物についてはコンクリート充填鋼管 (CFT) 造と鉄骨(S)造の分類がされているものの、一般建物については CFT 造の分類がなく、S 造の分類の中に包含されているものと推察される。一方で、近年事務所系の超高層建物の多くに CFT 造が採用されており、CFT 造の設計および解析においては、その振動特性が S 造に近いことから S 造と同様の値 (略算による固有周期 $T=0.03H$, H : 建物高さ, $h=2\%$ の初期剛性比例型減衰など) が用いられることが多い。このように CFT 造建物が増加する中、実際の CFT 造建物の固有周期ならびに減衰定数といった振動特性のデータを蓄積・分析することは重要である。

そこで本報では、免震構造とした CFT 造建物の常時微動測定結果と地震観測結果について報告する。

2. 建物概要

図 1 に対象建物の基準階平面図と断面図を示す。対象建物は、仙台市内に建つ地上 14 階、塔屋 1 階の建物高さが $H=60.75\text{m}$ (軒高 59.55m) の超高層建物であり、上部構造と基礎との間に免震装置を設置している免震構造の事務所建物である。上部構造は冷間成形角型鋼管を用いた CFT 柱+鉄骨梁による純ラーメン構造である。建物の平面形状は、約 $37\text{m} \times 19\text{m}$ の長方形で、立面形状もセットバックのない整形の建物である。基礎は直接基礎で、GL-5.8m の砂礫層にべた基礎として支持されており、上部構造の荷重は免震装置およびマットスラブを介して支持地盤に伝達させている。

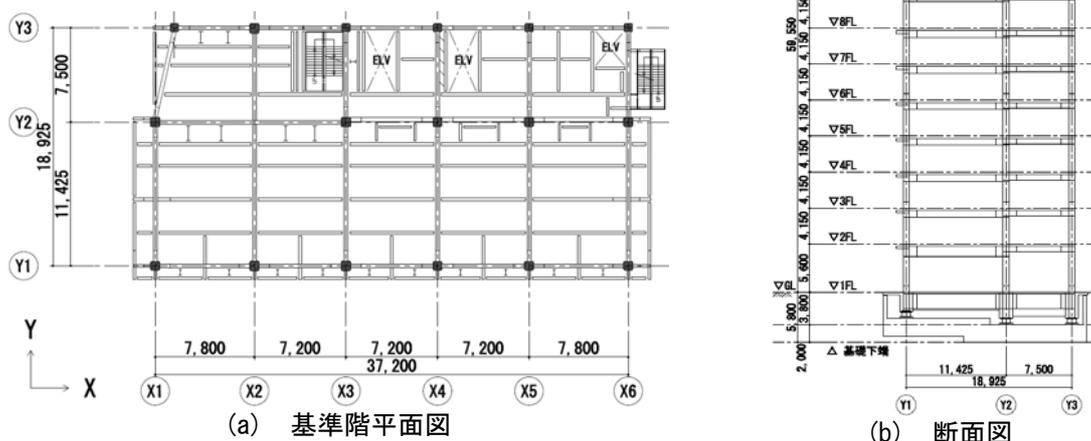


図 1 測定建物

3. 微振動特性

3.1 常時微動測定概要

測定は、建物の竣工時に4台の圧電型加速度計を用いて実施した。測定位置は、免震装置下部(基礎耐圧版上)、1階、7階、最上階(R階)の4フロアにおいてほぼ平面の重心に近い位置で水平2方向(X方向:建物長辺方向、Y方向:建物短辺方向)、鉛直方向(Z方向)の3方向同時測定を行った。なお計測は、データ間隔を0.01秒とし、測定時間は1時間とした。

3.2 測定結果

(a) 固有周期

図2に最上階(R階)の測定結果から求めた水平方向(X、Y)成分のフーリエスペクトルを示す。また表1には設計で用いた1階床固定時の上部構造の固有周期(積載荷重を考慮した場合と無視した場合の2ケース)と図2のフーリエスペクトルから求めた建物の固有周期の測定値を示す。なお、参考のため、躯体完成時(一部仕上げ工事中)に測定した固有周期も併せて示している。竣工時では、躯体完成時に比べ固有周期が若干伸びている。これは、設備機器や仕上げ材による重量の増加と外壁のカーテンウォールや間仕切り壁等の二次部材による剛性の上昇が影響しているものと考えられる。また、設計時の1次固有周期は、積載荷重を考慮した場合X方向1.74秒、Y方向2.09秒に対して竣工時の常時微動測定値は、それぞれ1.37、1.60秒と21%~23%短く、積載荷重を無視した場合(X方向1.58秒、Y方向1.90秒)でも測定値には近づくものの13%~16%短く、これは建物の二次部材が微小振幅レベルの建物剛性に影響したためと推測できる。

図3に軒高と1次固有周期との関係を文献2)~4)に示されたCFT建物と比較して示す。本建物は、S造建物の既往のデータの平均値($T_1=0.02H$)や他のCFT建物に比べ固有周期が若干長い、S造の略算値($T_1=0.03H$)に比べて小さい値である。

(b) 振動モード

図4に、設計時のX、Y両方向のモード図(1~3次)に、振幅スペクトルと位相スペクトルを基に

求めた結果をプロットして示す。中間階での測定点が7階のみであるため測定による全体のモード系は確認できないが、ほぼ設計でのモード系に一致することが推察され、更に多点で測定を行えば常時微動測定結果から振動系が確認できるものと考えられる。

(c) 減衰定数

建物の減衰定数は、文献1)を参考にRD法により推定した。RD波形は、1時間の波形データを用いて、各次のピーク周波数を中心としたバンドパスフィルターを掛けた常時微動波形を作成して求めた。

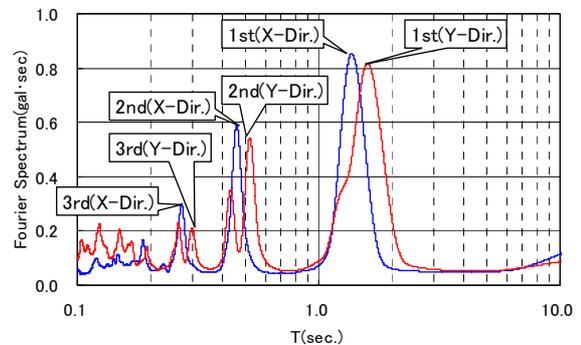


図2 フーリエスペクトル(竣工時)

表1 建物固有周期一覧(単位:秒)

方向	計算値(1階床固定)		測定値		
	積載あり	積載なし	躯体完成時	竣工時*	
X方向 (長辺)	1次	1.74	1.58	1.32	1.37 (1.17%)
	2次	0.58	0.52	0.45	0.46 (1.43%)
	3次	0.35	0.30	0.25	0.27 (1.85%)
Y方向 (短辺)	1次	2.09	1.90	1.55	1.60 (0.79%)
	2次	0.70	0.63	0.52	0.52 (0.95%)
	3次	0.41	0.35	0.29	0.30 (1.76%)

*: ()内の値は減衰定数 h

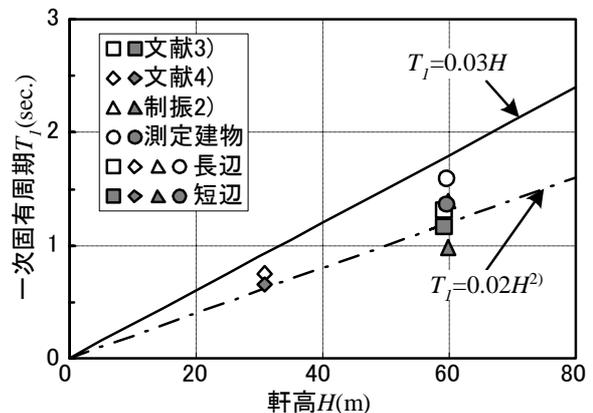


図3 軒高と一次固有周期との関係

RD法により推定した本建物の減衰定数を表1に示す。1次固有振動数における減衰は、X方向（長辺）が $h=1.17\%$ 、Y方向（長辺）が $h=0.79\%$ であり、時刻歴応答解析で一般に慣用されている鉄骨造の減衰 $h=2.0\%$ に比べ小さい値であった。

軒高 H と1次減衰定数 h_1 との関係を図5、短・長辺両方向の1次減衰定数 h_{1S} 、 h_{1L} の関係を図6にそれぞれ示す。図中にはS造建物の近似式²⁾を実線で示している。本建物の1次減衰定数はS造の平均値に比べ若干小さいが、ほぼ高さの等しいCFT造と同等であった。

4. 地震時の応答

本建物が竣工した2008年4月から約2ヶ月経過した6月14日に「平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震」の地震が観測された。地震の概要を表2に、観測結果の一覧を表3に示す。

この地震では、岩手県奥州市、宮城県栗原市において震度6強が記録され、仙台市内においても震度4~5強が観測されている。本建物での観測結果では、地表ならびに建物基礎部（耐圧版上）の計測震度の換算値は4.3であり、気象庁震度階は4と判定された。

観測記録は、表3に示すように地表では水平方向で120galを越える加速度が記録されているが、基礎部における最大加速度は100galを下回っており、加速度が低減されていることが確認できる。

図7に建物の高さ方向の最大加速度分布と、加速度記録から積分して求めた最大相対変位の分

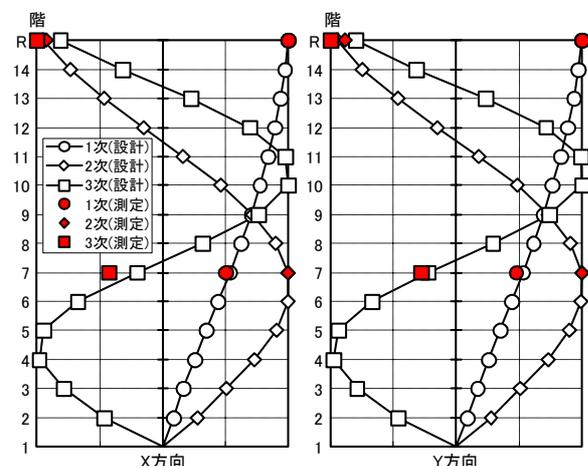


図4 モード図の比較

布を示す。鉛直方向の加速度は、基礎部に対し最上階で約3倍に増幅しているが、水平方向の加速度は、基礎部に対して1階、7階では減少しており、最上階でも基礎部と同等になっていることから、免震装置による応答低減効果が見て取れる。

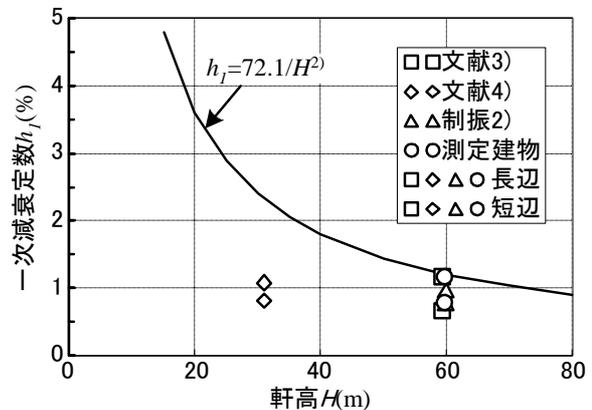


図5 軒高と一次減衰定数との関係

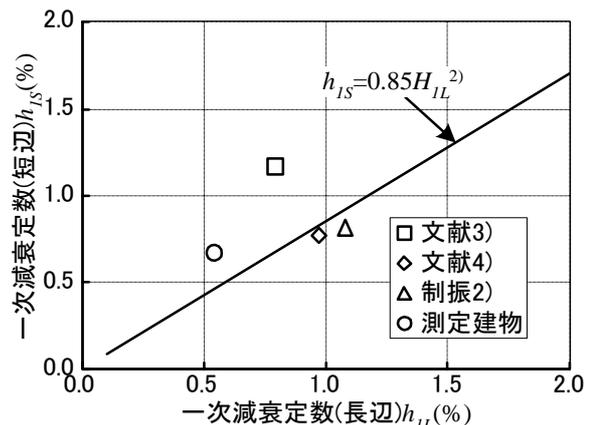


図6 両方向の一次減衰定数の関係

表2 地震の概要

発生日時	2008年6月14日8時43分
震源地	岩手県内陸南部
震央	北緯39度01.7分 東経140度52.8分
震源深さ	8km
マグニチュード	M:7.2
震度	震度4(宮城県仙台市青葉区)
最大震度	震度6強

表3 建物各部の観測結果

	最大加速度一覧(Gal.)			震度分布(換算値)※	
	X (長辺)	Y (短辺)	Z (鉛直)	気象庁 震度階	計測 震度
R階	76.4	96.2	107.0	5弱	4.7
7階	47.6	74.2	70.6	4	4.4
1階	52.7	80.9	45.1	4	4.3
耐圧版	73.7	96.6	38.9	4	4.3
地表	128.7	123.2	66.4	4	4.3

※：気象庁の方法により換算した値

一方相対変位の分布を見ると、免震層の最大変位は約 1cm であり、この値は免震層に設置したけがき板の記録と一致していた。また上部構造の相対変位は 3~4cm 程度であり、変形角は約 1/2000 ~ 1/1500 程度に収まっていることが確認された。

観測記録のフーリエスペクトルから建物の卓越周期を求めたところ、免震装置を含めた建物全体の固有周期は 1.725 秒 (X 方向), 1.962 秒 (Y 方向), 上部構造のみの固有周期は 1.591 秒 (X 方向), 1.791 秒 (Y 方向) であり、常時微動測定結果 (表 1 参照) に比べ周期が伸びていることが確認できた。

5. 建物の固有周期の経年変化

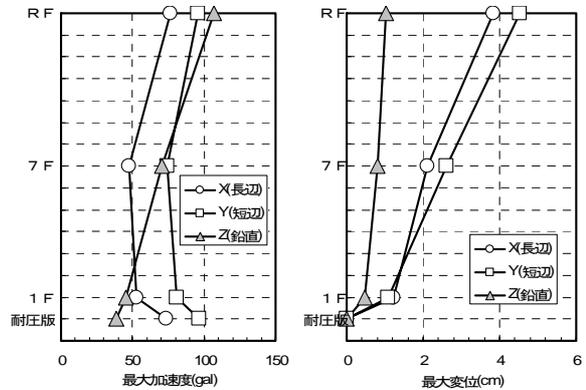
建物完成後の固有周期の変化を調べるため、設置した地震計を用いて常時微動測定を行った。常時微動により求めた固有周期を表 1 に示した建物の固有周期の計算値と躯体完成時ならびに竣工時の固有周期、2008 年 6 月 14 日の岩手・宮城内陸地震時の固有周期と併せて表 4 に示す。

表 4 の 2008 年 5 月 9 日の測定値は、建物完成後、ほぼ居住者が入居し積載荷重が載った状態の固有周期と考えられ、2009 年 9 月 29 日の測定結果は、岩手・宮城内陸地震を含む地震 (図 8 参照) を経験した後の固有周期と考えられる。同表から固有周期が僅かながら長周期化していることがわかる。ただし、これらの値に比べ、岩手・宮城内陸地震時の固有周期が最も長く、加速度レベルにより固有周期が異なるものと考えられる。

6. まとめ

実際の CFT 造建物を対象に、常時微動観測と地震観測結果について報告した。測定結果から、

振動のレベルにより、観測される固有周期や減衰定数が変化することが確認でき、今後は、地震観測データを活用し、二次部材の影響等を含めて、検討を行う予定である。



(a) 最大加速度分布 (b) 最大相対変位分布
図 7 加速度及び相対変位の分布

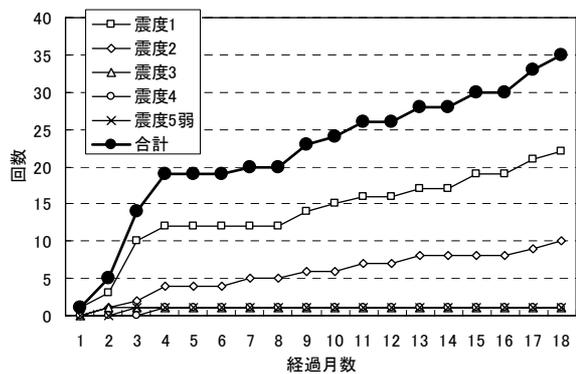


図 8 建物が経験した地震回数

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物の減衰，2000
- 2) 日本建築学会：シンポジウム 建築物の減衰性能評価手法の高度化と耐震・耐風設計，2007.11
- 3) 田村幸雄，他：15 階建て CFT 柱オフィスビルの動特性の推定 その 1 常時微動と FDD 法による動特性の同定，2002 年，B-2 分冊，p.979
- 4) 内山晴夫，他：神奈川大学 23 号館 (免震棟) および新 1 号館の振動実験 — その 4. 新 1 号館の振動実験結果，2001 年，B-2 分冊，p.81

固有周期一覧

方 向		計算値 (1 階床固定)		常時微動測定値						地震時	
		積載あり	積載なし	躯体完成		2008/5/9		2009/9/29		2008/6/14	
				上部構造	上部構造	上部構造	免震含む	上部構造	免震含む	上部構造	免震含む
X 方向 (長辺)	1 次	1.74	1.58	1.32	1.37	1.43	1.51	1.49	1.45	1.59	1.73
	2 次	0.58	0.52	0.45	0.46	0.47	0.50	0.50	0.50	-	-
Y 方向 (短辺)	1 次	2.09	1.90	1.55	1.60	1.59	1.65	1.64	1.59	1.79	1.96
	2 次	0.47	0.63	0.52	0.52	0.54	0.56	0.57	0.57	-	-