

# CFT造建物の振動特性

## 地震時挙動と振動特性のモニタリング

藤本 利昭\* 野中 康友\*\* 清水 秀哲\*\*\*

### Vibration Characteristic of CFT Buildings

Earthquake response and monitoring on the vibration characteristics

by Toshiaki FUJIMOTO, Yasutomo NONAKA and Hidenori SHIMIZU

#### Abstract

Earthquake observation was performed for two buildings: a high rise concrete filled steel tube structural (CFT) building with a base isolated system and a high rise CFT building with dampers. This research examined the earthquake response based on the observation record of the earthquake striking these buildings. Furthermore, the micro-tremor measurement and observation record were examined from the small vibration level to the medium-earthquake response level.

#### 要 旨

筆者らは、コンクリート充填鋼管（CFT）を用いた超高層免震建物、超高層制振建物で地震観測を行っている。本報告では、今までに得られた地震観測記録の概要と、それらの記録の中から代表的な観測結果について報告する。更に得られた地震観測記録を基に、これら 2 棟の建物の地震時の応答性状を比較し、地震時挙動の違いについて述べるとともに、竣工後の建物の振動特性の変化について報告する。

キーワード：常時微動／地震観測／地震時応答

#### 1. はじめに

現在、当社では 5 棟の建物を対象に地震観測を継続的に行っている。

それら 5 棟のうち、1991 年に観測を開始した当社技術研究所の第 1 研究棟、第 2 研究棟の 2 棟は、建物規模がほぼ等しく、上部構造の構造形式が RC 造の免震構造と非免震構造の建物であり、2 棟の比較による免震性能の検証を目的に地震観測を行っている<sup>[1]</sup>。

また、当社名古屋支店ビルでは、2008 年に耐震改修を行った際に地震計を設置し、耐震補強（制震補強）後の建物の地震時挙動を検証する目的で、地震観測を行っている<sup>[2]</sup>。

本報で地震観測結果を報告する建物は、2008 年に竣工した CFT 造で免震構造とした建物（以下、免震建物）と、2009 年に竣工した CFT 造で座屈拘束ブレースによる制振構造とした建物（以下、制振建物）の 2 棟である<sup>[2]</sup>。これらの建物は、建設地が宮城県仙台市内で、比較的近接して建設されたこと、大地震の発生が予測されること、更に CFT 造は、近年事務所系の高層建物の多くに採用されているものの、その歴史があまり古くないため、実構造物の振動特性が充分明らかになっていないことなどから地震観測を開始した。

本報告では、竣工後約 1～2 年間に観測された地震

\* 技術研究所振動基礎研究室

\*\*\* 建築本部構造設計部門

\*\* 建築本部技術部門

観測結果の概要を報告すると共に、建物の振動特性の変化について報告する。

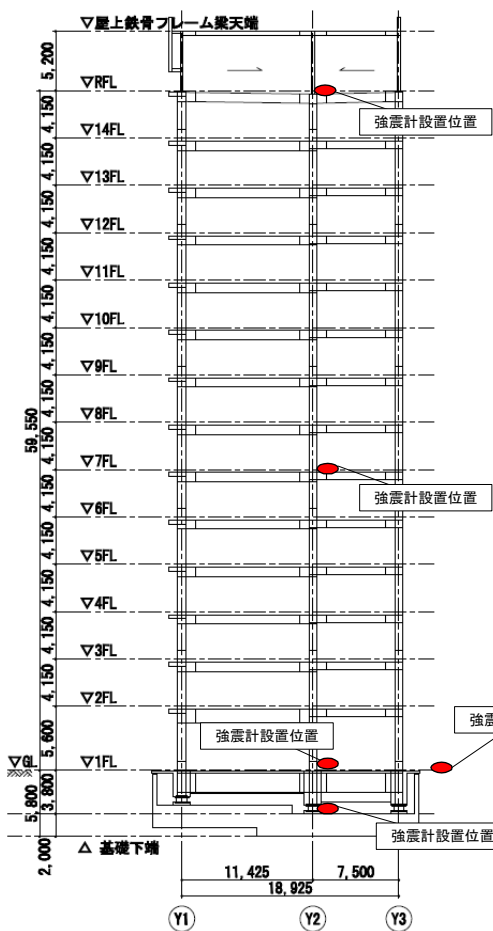
## 2. 地震観測概要

### 2.1 建物および観測概要

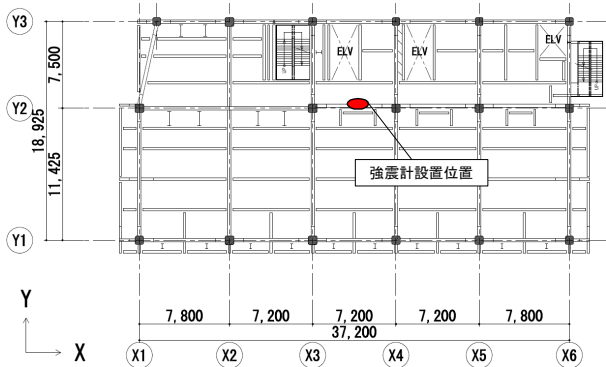
#### a. CFT造免震建物

図1に免震建物の断面図と基準階平面図を示す。免震建物は、仙台市内に建つ地上14階、塔屋1階の

建物高さが H=60.75m(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（鉛入り積層ゴム、17基）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形鋼管を用いた 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 37m×19m 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 の砂礫層にベタ基礎として支持され

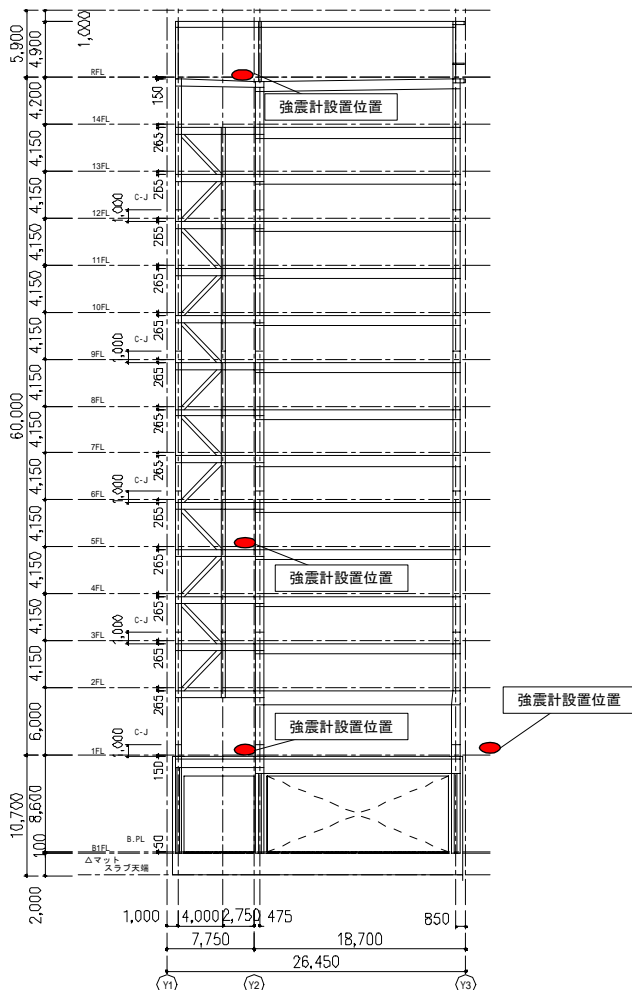


(a) 断面図

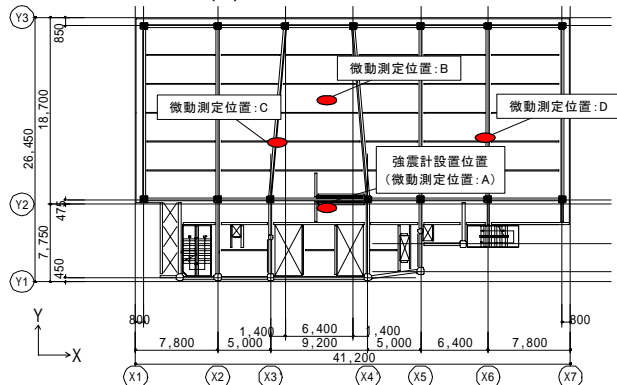


(b) 基準階平面図

図1 CFT造免震建物



(a) 断面図



(b) 基準階平面図

図2 CFT造制振建物

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。

地震計（センサー）は、図 1 中に示す、基礎上（耐圧板上）、免震層上部（1 階）、中間階（7 階）、最上階および地表の 5 箇所に設置している。

### b. CFT 造制振建物

図 2 に制振建物の断面図と基準階平面図を示す。制振建物は、同じく仙台市内に建つ地上 14 階、塔屋 1 階、地下 1 階の建物高さが H=66.093m(軒高 60.193m)の超高層建物であり、地上部の Y 方向のみ制振部材を使用した制振構造の事務所建物である。

上部構造は X 方向が冷間成形角形鋼管を用いた CFT 柱+鉄骨梁による純ラーメン構造、Y 方向が制振ブレース（圧屈拘束ブレース、2 階～13 階の各階に 2 基の合計 24 基）付ラーメン構造である。建物の平面形状は、約 39.6m×25.23m 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-5.7m のシルト岩層にベタ基礎として支持されており、上部構造の荷重はマットスラブを介して支持地盤に伝達させている。

地震計は、図 2 に示す 1 階床上、中間階（5 階）、最上階および地表の 4 箇所に設置している。

## 3. 観測結果および考察

### 3.1 観測地震概要

観測地震の一覧を表 1 に示す。免震建物では、竣工した 2008 年 4 月から 2010 年 7 月末までの間に 38 の観測記録が、制振建物では、竣工した 2009 年 6 月から 2010 年 7 月末までの間に 12 の観測記録が得られている。

観測された地震記録の地表面における加速度記録から計算した各震度ごとの度数分布を図 3 に示す。これまで観測された 38 の地震のうち、約半数（20）が震度 1 の地震であるが、震度 4 の地震も 3 回記録されており、制振建物でも震度 4 の地震記録が 1 回観測されている。

免震建物ならびに制振建物で、最大加速度を記録した地震の概要を表 2 に示す。免震建物では、2008 年 6 月 14 日に発生した「平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震」で最大加速度を記録した。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。一方、制振建物で最も大きな加速度を記録したのは、2010 年 6 月 13 日に発生した福島県沖を震源とする地震である。この地震では、福

島県で震度 5 弱が観測され、制振建物および免震建物が位置する仙台市内では震度 4 を記録した。

これら 2 つの地震における建物の地表面で観測された記録の加速度応答スペクトルを建築基準法にお

表 1 観測地震一覧

No.	年月日	時分	震源深さ	マグニチュード*	震源地
1	2008/4/17	4:19	166km	5.8	秋田県沿岸南部
2	2008/5/2	14:41	45km	5.1	福島県沖
3	2008/5/8	1:02	60km	6.4	茨城県沖
4	2008/5/8	1:45	51km	7.0	茨城県沖
5	2008/6/2	0:58	46km	4.8	宮城県沖
6	2008/6/14	8:43	8km	7.2	岩手県内陸南部
7	2008/6/14	9:20	7km	5.7	宮城県北部
8	2008/6/14	10:40	7km	4.8	岩手県内陸南部
9	2008/6/14	12:27	10km	5.2	岩手県内陸南部
10	2008/6/14	23:42	6km	4.9	岩手県内陸南部
11	2008/6/16	23:14	7km	5.3	岩手県内陸南部
12	2008/6/18	16:55	12km	4.5	岩手県内陸南部
13	2008/7/5	16:49	50km	5.2	茨城県沖
14	2008/7/19	11:39	32km	6.9	福島県沖
15	2008/7/21	20:30	27km	6.1	福島県沖
16	2008/7/22	17:46	30km	5.5	福島県沖
17	2008/7/24	0:26	108km	6.8	岩手県沿岸北部
18	2008/10/30	0:48	86km	5.1	宮城県沖
19	2008/12/4	8:16	24km	6.1	三陸沖
20	2008/12/20	19:29	0km	6.6	関東東方沖
21	2008/12/21	18:16	0km	6.2	福島県沖
22	2009/1/3	16:13	51km	4.8	福島県沖
23	2009/2/1	6:51	47km	5.8	茨城県沖
24	2009/2/17	9:12	48km	4.9	福島県沖
25	2009/4/21	18:57	45km	5.2	福島県沖
26	2009/4/28	6:37	48km	5.0	茨城県沖
27	2009/6/1	0:33	59km	4.6	福島県沖
28	2009/8/1	18:45	36km	5.0	福島県沖
29	2009/8/9	19:55	333km	6.8	東海道南方沖
30	2009/10/23	10:28	45km	5.0	茨城県沖
31	2009/12/2	15:14	48km	4.9	福島県沖
32	2009/12/19	4:30	45km	4.6	宮城県沖
33	2010/3/13	21:46	78km	5.5	福島県沖
34	2010/3/14	17:08	40km	6.7	福島県沖
35	2010/6/1	13:49	45km	4.8	福島県沖
36	2010/6/13	12:32	40km	6.2	福島県沖
37	2010/6/29	7:24	116km	4.3	岩手県内陸南部
38	2010/7/5	6:56	30km	6.3	岩手県沖

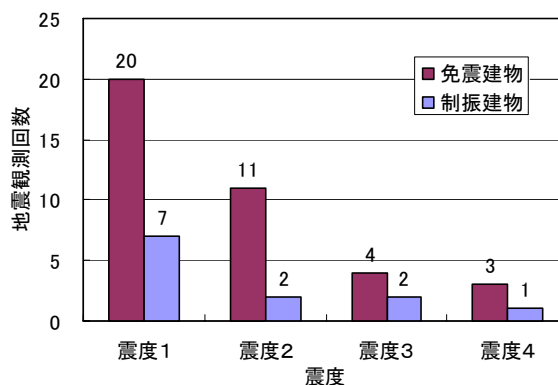


図 3 震度別の度数分布

ける第1種地盤の設計用加速度スペクトルと比較して図4に示す。

免震建物で最大加速度を記録した平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震の記録は、周期帯によっては基準法の稀地震のスペクトルを上回る部分もあるが、若干下回る程度であった。同様に福島県沖を震源とする地震では、全ての周期帯で稀地震のスペクトルを下回る程度の地震であった。

### 3.2 免震建物の応答性状

#### a. 平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震

表3に、岩手・宮城内陸地震における免震建物での観測結果の一覧を示す。観測結果では、地表ならびに建物基礎部(耐圧板上)の計測震度の換算値は4.3であり、震度階は4と判定された。観測記録は、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5に建物の高さ方向の最大加速度分布を示す。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。

#### b. 観測記録に基づく免震建物の増幅特性

ここでは、免震建物で観測された38の記録を用いて、免震建物の応答性状を分析する。

図6に最大加速度の比較結果を示す。なお全ての図の横軸は地表面の最大加速度で統一している。

図6(a)は、耐圧板上の最大加速度と地表の最大加速度の比を比較したものであり、地震動の建物への

表2 最大加速度を記録した地震の概要

(a) 免震建物	
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
(b) 制振建物	
発生日時	2010年6月13日12時33分頃
震源地	福島県沖
震央	北緯37.4度, 東経141.8度
震源深さ	約40km
マグニチュード	M: 6.2
震度	震度4(宮城県仙台市青葉区)
最大震度	震度5弱

表3 免震建物の観測結果(2008年6月14日)

	最大加速度一覧(Gal.)			震度分布(換算値)	
	X(長辺)	Y(短辺)	Z(鉛直)	震度階	計測震度
R F	76.4	96.2	107.0	5弱	4.7
7 F	47.6	74.2	70.6	4	4.4
1 F	52.7	80.9	45.1	4	4.3
耐圧板	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

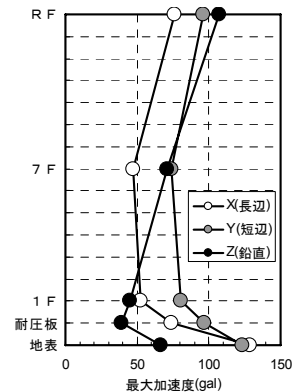
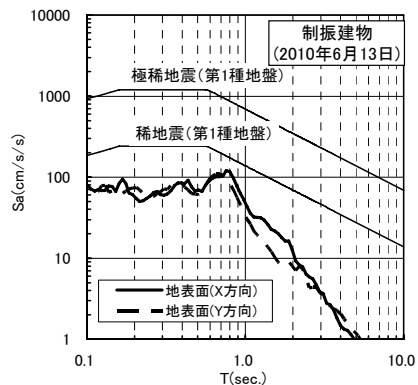
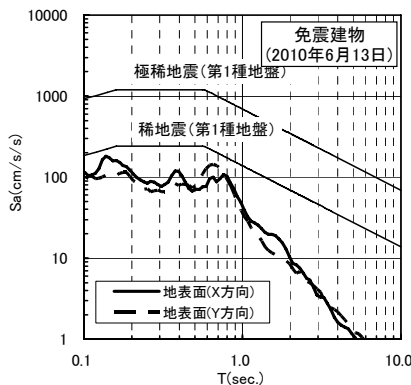
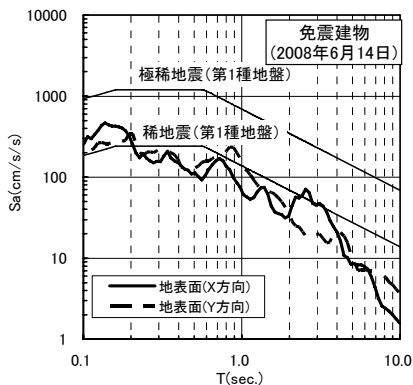


図5 最大加速度の分布(免震建物)



a) 平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震

b) 福島県沖を震源とする地震(2010年6月13日)

図4 地表面の記録の加速度応答スペクトル(h=0.05)

入力損失を表している。図より、最大加速度の大きさ、水平・鉛直方向に関わらず、殆どの地震で耐力板の最大加速度が低減されており、これは基礎の根入れ効果等によるものと考えられる。

図 6(b)は、免震建物最上階 (R 階) と耐力板上の最大加速度の比を比較したものであり、免震層を含む建物全体の増幅率を表している。免震建物最上階における水平最大加速度は、地表面における最大加速度が  $10\text{cm/s}^2$  程度以下の地震では 1~3.5 倍程度の増幅が認められるが、最大加速度が大きくなるに従い増幅は僅かとなる。  $100\text{cm/s}^2$  程度以下の地震では 0.7~2.7 倍程度であり、最大加速度が低減される場合も認められる。更に  $100\text{cm/s}^2$  を超える地震 (平成 20 年岩手・宮城内陸地震の記録) ではほぼ 1.0 であり、最大加速度が殆ど増幅していないことがわかる。

同様に図 6(c)は、建物 1 階と耐力板上の最大加速度の比を比較したものであり、免震層の増幅率を表している。1 階における水平最大加速度は、地表面における最大加速度が  $20\text{cm/s}^2$  程度以下の地震では 1~2 倍程度となっているが、それを上回る地震ではほぼ 1.0 を中心に分布しており、最大加速度が低減されているケースが多くなっている。

一方で図 6(d)は、建物最上階と 1 階の最大加速度の比を比較したものであり、免震建物上部構造 (CFT 造) の増幅率を表しているが、1 階に対して最上階の水平最大加速度は、1~2.5 倍程度の増幅となっており、地表面の最大加速度の大小による影響は顕著ではない。

以上のことから、免震建物の最大応答加速度の増幅特性は免震層の影響が大きく、地表面の最大加速度が大きくなるほど減少する。つまり入力加速度が大きくなるほど、免震装置による応答低減効果が顕著になるといえる。

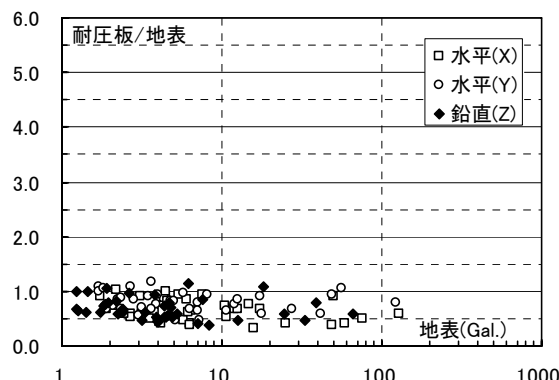
一方、図 6(a)~(d)には、上下方向の増幅特性も示しているが、上下方向の増幅率は加速度の大小による影響はあまり顕著ではなく、耐力板の最大加速度に対し、最上階で平均 3 倍の増幅が認められた。

### 3.3 制振建物の応答性状

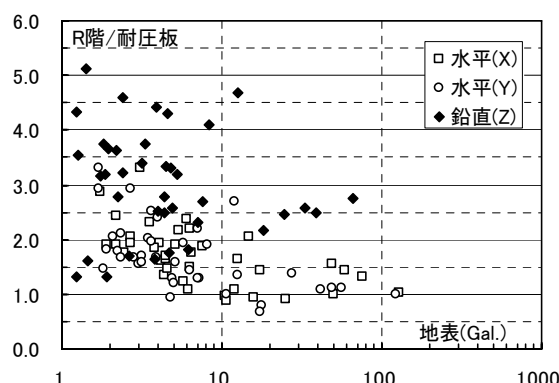
#### a. 福島県沖を震源とする地震 (2010 年 6 月 13 日)

表 4 に制振建物の観測結果の一覧を免震建物と比較して示す。これら 2 棟の観測結果では、地表面の計測震度の換算値は 3.6 および 3.7 であり、震度階は 4 と判定された。

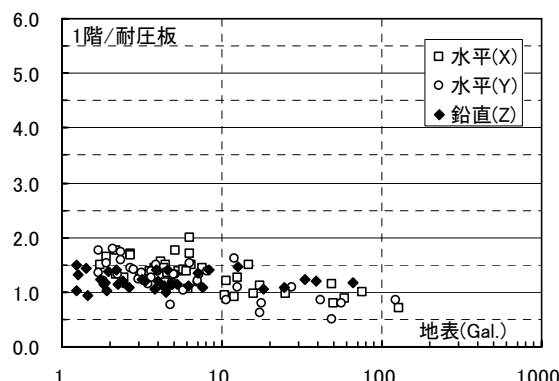
図 7 に建物の高さ方向の最大加速度分布を示す。



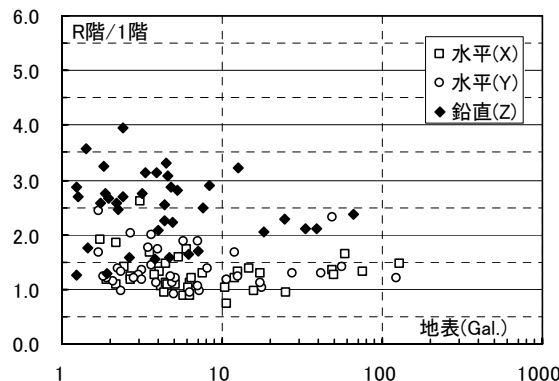
(a) 地表面と耐力板の最大加速度の関係



(b) 耐力板と R 階の最大加速度の関係



(c) 耐力板と 1 階の最大加速度の関係



(d) 1 階と R 階の最大加速度の関係

図 6 免震建物の最大加速度比

鉛直方向の最大加速度は、2つの建物でほぼ同程度の値であり、鉛直方向の地震時応答は、免震、制振に関わらず、ほぼ同様の傾向を示している。一方水平方向の最大加速度に関しては、地表面の最大加速度が、制振建物に比べ免震建物で大きいにもかかわらず最上階の最大加速度は、免震建物の値が小さくなっていることから、免震装置による応答低減効果が認められる。このことは、図4(b)に示したように、2010年6月13日の地震は、建築基準法の稀に発生する地震動のスペクトルを下回っており、制振建物の短辺方向(Y方向)に設置した制振ブレースがエネルギーを吸収するほどのレベルに達していなかったためと考えられる。

**b. 観測記録に基づく制振建物の増幅特性**

ここでは、制振建物で観測された12の記録を用いて、制振建物の応答性状を分析する。

図8に最大加速度の比較結果を示す。なお全ての図の横軸は地表面の最大加速度で統一している。

図8(a)は、建物1階の最大加速度と地表の最大加速度の比を比較したものである。図より、地表面における最大加速度の大きさによる差異は認められない。水平方向に関しては、1階の最大加速度は地表面の最大加速度と同等であり、鉛直方向に関しては、1階の最大加速度が地表面の最大加速度に比べ若干低減される傾向がある。

図8(b)は、1階の最大加速度と建物最上階(R階)の最大加速度の比を比較したものであり、建物全体の増幅率を表している。制振建物最上階における水平最大加速度は、X方向(制振ブレース無し)、Y方向(制振ブレース有り)共に1~3倍程度、鉛直方向が2~3倍程度の増幅が認められ、バラツキが大きいものの地表の最大加速度の大きさによる差異は認められなかった。このことは、既に述べたように現時点での観測記録では、制振ブレースはエネルギー吸収をしていないことを裏付けるものと推測される。

**3.4 計測震度に関する考察**

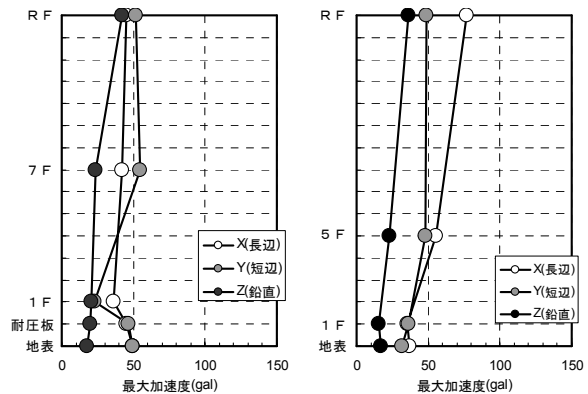
建物の所有者や居住者といった一般のユーザーに地震の大きさや被害を説明する場合、「震度」による説明が必要になる場合がある。そこで建物各部で観測された加速度波形から気象庁の方法により算定した計測震度の換算値を地表面の計測震度と比較して図9に示す。

図9(a)の免震建物では、地表面の計測震度に対し、

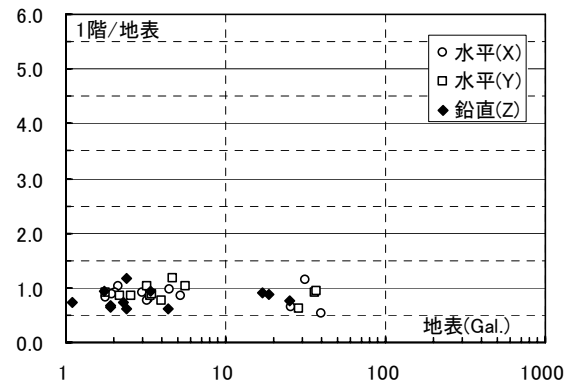
表4 免震・制振建物の観測結果

		最大加速度一覧(Gal.)			震度分布(換算値)	
		X(長辺)	Y(短辺)	Z(鉛直)	震度階	計測震度
免震建物	R F	45.0	51.9	42.4	4	4.0
	7 F	42.0	54.4	23.8	4	4.0
	1 F	36.1	22.6	20.7	4	3.7
	耐圧板 地表	45.2	46.6	19.7	4	3.6
制振建物	R F	48.9	76.7	36.4	4	4.3
	5 F	48.2	55.3	22.5	4	4.1
	1 F	35.9	35.2	15.6	4	3.6
	地表	31.8	37.2	17.1	4	3.6

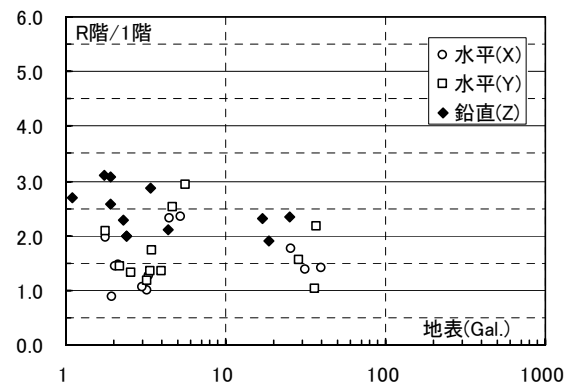
※：気象庁の方法により換算した値



(a) 免震建物 (b) 制振建物  
図7 最大加速度の分布



(a) 地表面と建物1階の最大加速度の関係

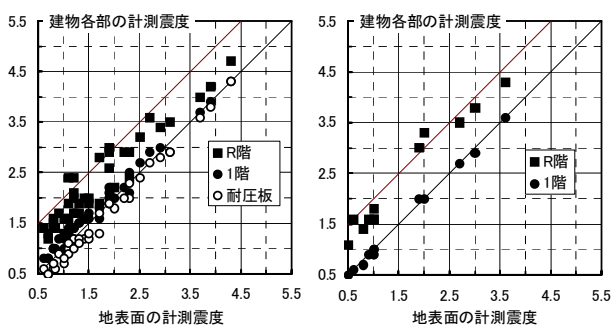


(b) 1階とR階の最大加速度の関係

図8 制振建物の最大加速度比

耐圧板の計測震度は 0.1 程度小さくなっている。また建物の 1 階では計測震度が平均で 0.1 程度大きくなるが、地表面の計測震度が 3.5~4.5 の場合、1 階の計測震度は地表面とほぼ等しい。同様に建物の最上階では計測震度が平均で 0.5 程度大きくなるが、地表面の計測震度が 3.5~4.5 の場合、1 階の計測震度は地表面の 1.1 倍程度である。このことから、免震建物では気象庁震度階で 4 程度の地震になると、地表面とほぼ同じ震度階になることになる。

一方、図 9(b)の制振建物では、地表面の計測震度に対し、1 階の計測震度は地表面の計測震度の大小に関わらず地表面とほぼ等しい。しかしながら、建物の最上階では計測震度が平均で 0.7 程度大きくなっている。このことは、地表面において気象庁震度階が 4 程度以下の地震においては、建物の最上階では、地表面の震度階より 1 大きい震度階になる場合が多いことを表している。



(a) 免震建物 (b) 制振建物  
図 9 建物各部と地表面の計測震度の比較

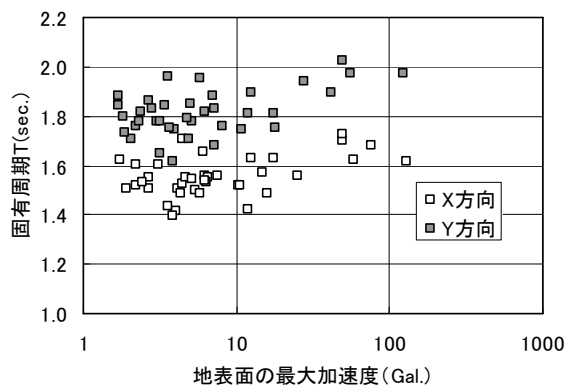
### 3.5 固有周期に関する考察

#### a. 地震時の固有周期の変化

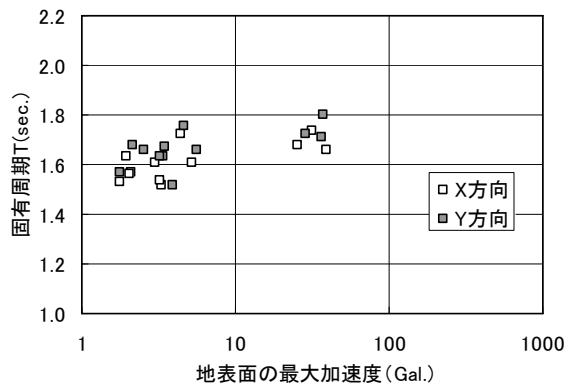
観測された建物最上階の加速度記録を基に地震時の固有周期を検討した。建物の固有周期は最上階の加速度波形のフーリエスペクトルから推定した。

図 10 に各地震時の 1 次固有周期と地表面の最大加速度との関係を示す。図 10(a)の免震建物、(b)の制振建物ともに地表面の最大加速度が大きくなるにつれて固有周期が長くなる傾向が認められる。

免震建物では、入力加速度の増大による免震装置の剛性低下が、固有周期が伸びた一因であると推察される。一方の制振建物では、制振ブレースが弾性範囲に留まっていると推測されることから、外壁のカーテンウォールや間仕切り壁等の二次部材の影響が振幅レベルにより異なり、微小振幅レベルの建物剛性に大きく影響するものと推測される。よって、免震建物においても制振建物と同様の二次部材の影

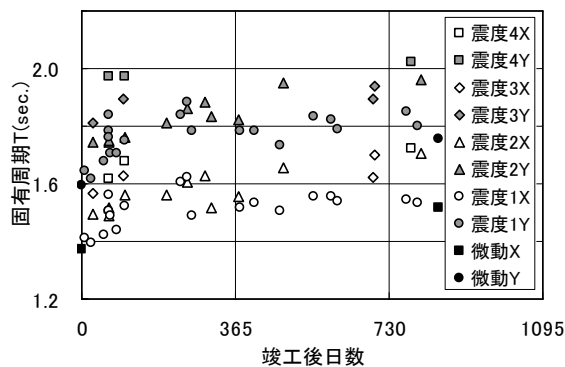


(a) 免震建物

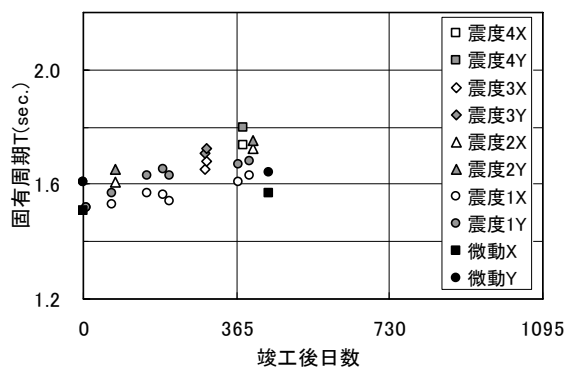


(b) 制振建物

図 10 地表面最大加速度と固有周期との関係



(a) 免震建物



(b) 制振建物

図 11 固有周期の経過時間による変化

響が含まれているものと考えられる。

**b. 固有周期の経時変化**

図 11 に建物の竣工後日数と固有周期の関係を示す。なお、地表面の震度により、表示を分類している。同図からも地表面の震度が大きくなると固有周期が長くなる傾向が認められるが、各震度階毎に見た場合でも、時間の経過と共に固有周期が伸びていることがわかる。

図中には、表 5 に示す建物竣工時<sup>[2]</sup>と直近（2010年 8 月）に実施した常時微動測定による固有周期も示している。なお 2010 年 8 月の固有周期は、地震計の手动トリガー機能を用いて強制的に観測した加速度波形を基にフーリエスペクトルから求めた値である。

常時微動測定による固有周期からもわかるように、時間の経過に伴い、固有周期が伸びていることが確認できる。

これらの要因としては、積載荷重の増加が考えられるが、数度の地震を経験したことによる二次部材接合部の緩み等も原因の一つとして考えられそうである。

**表 5 常時微動測定による建物の 1 次固有周期一覧**

方 向	免震建物の 1 次固有周期 T (秒)		
	計算値 (基礎固定)	測定値	
		竣工時	2010 年 8 月
X 方向(長辺)	1.740	1.372	1.517
Y 方向(短辺)	2.094	1.596	1.753
方 向	制振建物の 1 次固有周期 T (秒)		
	計算値	測定値	
		竣工時	2010 年 8 月
X 方向(長辺)	1.806	1.508	1.571
Y 方向(短辺)	1.836	1.610	1.639

**4. まとめ**

以上、ほぼ同規模の免震建物と制振建物について継続的に行っている地震観測結果の概要と、応答特性について報告した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 観測地震は、最大で震度 4、地表面の最大加速度で 100cm/s<sup>2</sup> 程度の地震であるが、免震建物では水平動に対しては、加速度が大きくなるほど応答の低減効果が顕著となる傾向が認められた。
- 2) 制振建物では、制振ブレースが塑性化するほどの地震を経験していないことから、今後の観測結果が期待される。
- 3) 建物の固有周期は、最大加速度の大小により変化し、また時間の経過と共に伸びる傾向が認められた。

今後も、更に地震観測を継続して実施すると共に、地震観測データを活用し、分析を進める予定である。

**参考文献**

[1] 藤本利昭, 根本恒, ハッ繁公一: 免震構造物の地震観測報告 その 1 観測システムおよび観測結果の概要, 安藤建設技術研究所報, Vol.10, pp.9-18, 2004

[2] 藤本利昭, 清水秀哲, 野中康友, 小林和義: 地震観測建物の微動特性と観測概要, 安藤建設技術研究所報, Vol.15, pp.11-21, 2009