

東北地方太平洋沖地震における免震・制振建物の効果

観測記録の分析に基づく免震・制振効果の検証

欄木 龍大^{*1}・長島 一郎^{*1}・新居 藍子^{*1}・篠崎 洋三^{*2}・木村 雄一^{*3}・青野 英志^{*3}

Keywords : the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, seismic isolation, seismic retrofit, observation, control effect verification

東北地方太平洋沖地震, 免震, 制振補強, 地震観測, 効果検証

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東北地方から関東地方に渡る広範囲の地域で震度5弱～6強の大きな揺れが観測された。地震動の大きさは、震源に近い仙台では基準法が定める「極めて稀な地震動」に近く、震源から離れた東京でも「稀な地震動」を超えるレベルで、地震動の継続時間も極めて長いものであった。平野部では、超高層建物や石油貯蔵タンクなどに大きな影響を与える長周期地震動が観測された。

当社設計の免震・制振建物においても地震計による記録が得られたので、観測記録の概要と免震・制振効果について報告する。図-1に対象建物のおよその位置を示す。

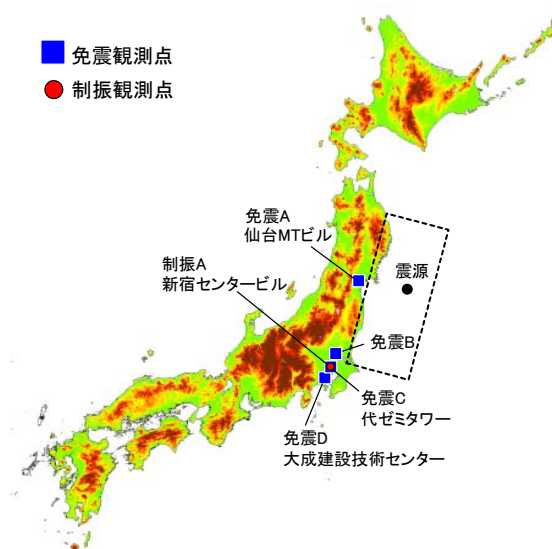


図-1 対象建物の位置
Fig.1 Location of intended buildings

2. 入力地震動の比較

表-1に各建物の基礎位置における計測震度、SI値、最大加速度および最大速度を示す。また、図-2に免震A～D建物の基礎位置における加速度波形を、図-3に速度応答スペクトルとエネルギースペクトルを示す。断層面に近い免震A・B建物では震度5強の揺れを、免震C・D建物でも震度4～5弱の揺れを観測した。地震動の継続時間は極めて長く、5分を超える記録が観測された。免震建物や超高層建物に影響を与える長周期領域(3～5秒)に着目すると、免震A・B建物の地震動は基準法の「極めて稀な地震動」に近く、免震C・D建物の地震動は「稀な地震動」と「極めて稀な地震動」の中間の大きさであった。一方、地震動の入力エネルギー量は、免震B建物で最も大きく、免震A・C・D建物では同程度の大きさであった。

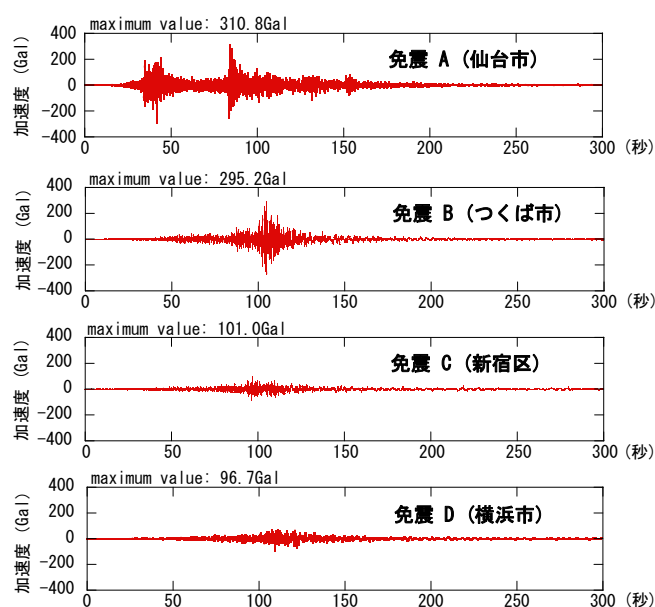


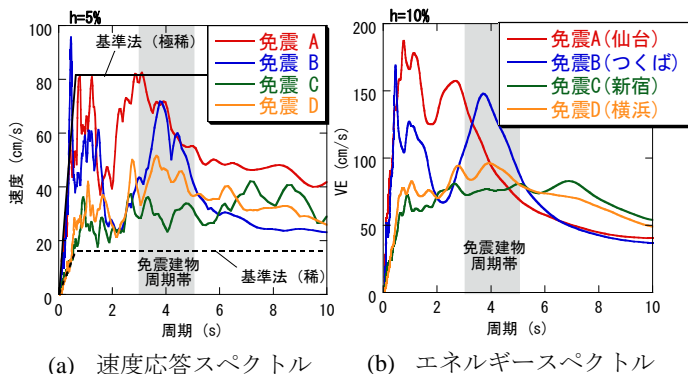
図-2 加速度波形(基礎位置)
Fig.2 Acceleration wave at Pit

*1 技術センター建築技術研究所防災研究室
*2 設計本部構造Ⅱ群統括
*3 設計本部構設計画グループ

表－1 地震動（基礎位置）の最大値

Table 1 Maximum response at Pit

		計測震度 (震度階)	SI値 (cm/s)	最大加速度 (Gal)	最大速度 (cm/s)
免震A	仙台市	5.3 (5強)	74.1	310.8	41.6
免震B	つくば市	5.3 (5強)	63.3	295.2	23.3
免震C	新宿区	4.4 (4)	29.3	101.0	14.0
免震D	横浜市	4.5 (5弱)	39.7	96.7	15.9
制振A	新宿区	4.8 (5弱)	34.3	142.1	14.6



図－3 スpektrルの比較

Fig.3 Comparison of spectrum

3. 制振建物の効果

3.1 制振A建物（新宿センタービル）

3.1.1 建物概要

東京都新宿区に建つ新宿センタービルは、1979年竣工、S造、地上54階、地下4階、高さ223mの超高層建物である（写真－1）。長周期地震動対策として、変位依存型オイルダンパー（写真－2）を用いたT-RESPO構法¹⁾を適用し、2009年に制振補強工事を完了した（2010年日本建築学会賞受賞）。T-RESPO構法は、既存の構造体に過度の負担を与えずに、建物の減衰性能を向上することが可能である。15階から26階、28階から39階の各フロアに、Y（短辺）方向に8基、X（長辺）方向に4基の計288基のダンパーが設置されている。建物の1次周期はX（長辺）方向が5.4秒、Y（短辺）方向が6.5秒である。

写真－1 新宿センタービル
Photo 1 Shinjuku Center Building写真－2 ダンパー
Photo 2 Oil damper

3.1.2 観測結果

表－2に東北地方太平洋沖地震の観測結果を示す。

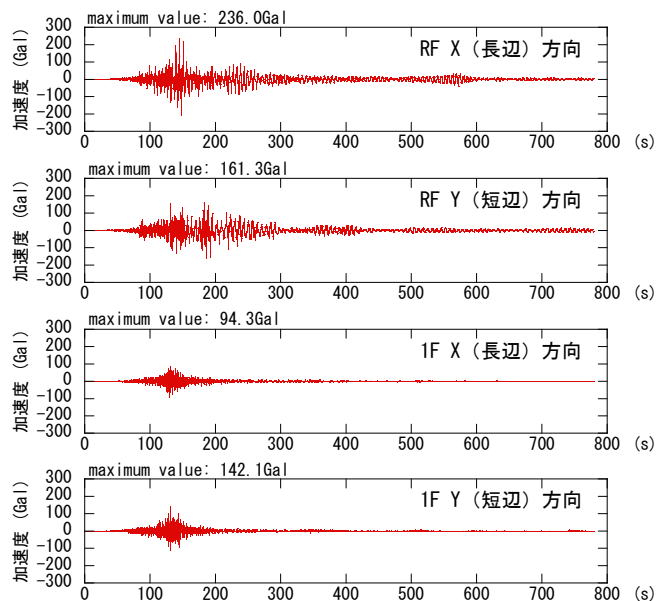
図－4に加速度波形を、図－5に最上階の1階に対する相対変位波形を示す。建物の最大加速度は最上階のX（長辺）方向で236.0Gal、最大変位は最上階のY（短辺）方向で54.2cm、最大変位を建物高さで割った平均の層間変形角は1/399であり、柱・梁などの主要な構造体に損傷はないものと判断される。

地震後にダンパーの抜き取り点検（23台）を実施した結果、傷やさび、塗装剥がれ、油漏れ等の異常がないことが確認された（写真－3）。また、ピストンロッド部の油あとを目視し、ダンパーの最大変形を計測した（写真－4）。表－3に計測結果を示す。

表－2 震度と最大応答値（新宿センタービル）

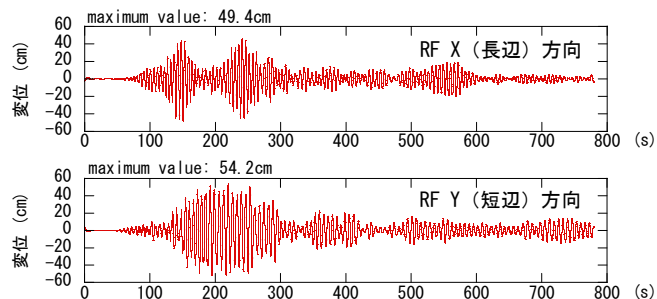
Table 2 Seismic intensity and maximum response

	震度階 (計測震度)	最大加速度 (Gal)		最大変位 (cm)	
		X (長辺)	Y (短辺)	X (長辺)	Y (短辺)
RF	－	236.0	161.3	49.4	54.2
28F	－	112.7	171.3	26.3	33.3
1F	5弱 (4.5)	94.3	142.1	－	－



図－4 加速度波形

Fig.4 Acceleration wave



図－5 変位波形（最上階）

Fig.5 Displacement wave

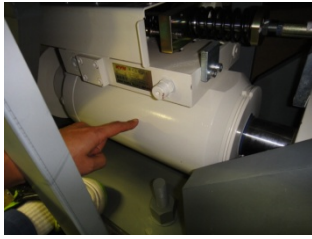


写真-3 ダンパー点検
Photo 3 Check of damper

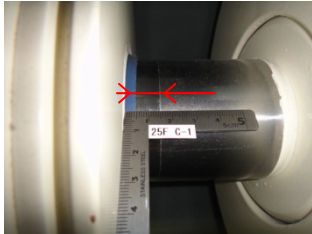


写真-4 ダンパー変形計測
Photo 4 Measurement of damper

表-3 ダンパー最大変形
Table 3 Displacement of damper

階	X (長辺)	Y (短辺)
39F	4mm	8mm
37F	6mm	7mm
34F	6mm	11mm
32F	-	8mm
29F	6mm	11mm
28F	6mm	-
25F	8mm	15mm
23F	6mm	8mm
21F	8mm	11mm
19F	6mm	9mm
17F	6mm	12mm
15F	8mm	5mm

次に、制振補強の効果を解析的に検証する。ここでは、ダンパーを多く設置した Y（短辺）方向の結果を示す。解析モデルは、54 質点の曲げせん断モデル（線形）を用いた。応答解析は 10 次のモード重畳法で行い、1～3 次モードの減衰比には、観測記録より同定した補強前と補強後の減衰比（表-4）を用い、4 次モード以上の減衰比は 3 次モードと同じ値とした。入力地震動は、1 階で記録した東北地方太平洋沖地震の加速度波形を用いた。

図-7 に各階の最大変形と最大加速度の解析値をダンパー有り無しで比較して示す。また、図-8 に最上階の変位波形（解析結果）を、ダンパー有り無しで比較して示す。最上階の最大変形は、ダンパー無しが 76.4cm、ダンパー有りが 60.8cm（観測結果は 54.2cm）となり、応答が約 20% 低減している。最大加速度についても、ダンパー無しが 220.3Gal、ダンパー有りが 184.1Gal（観測結果は 161.3Gal）となり、応答が約 20% 低減していることから、制振効果が確認された。また、図-7 より、最上階の解析値と観測値は良く対応していることがわかる。CD-ROM に応答解析結果のアニメーションを掲載する（図-9）。揺れ幅を 50 倍に強調して表現しており、新宿センタービルの揺れ方と制振効果が良くわかる。

表-4 補強前後の減衰比

Table 4 Damping ratio of building (before or after retrofitting)

	X(長辺)方向			Y(短辺)方向		
	周期 (s)	減衰定数 (%)		周期 (s)	減衰定数 (%)	
		補強前	補強後		補強前	補強後
1次	5.4	1.55	1.89	6.5	1.26	2.72
2次	1.8	0.77	2.67	2.0	1.57	2.88
3次	1.0	1.92	2.29	1.0	1.99	2.51

補強前は2004年新潟県中越地震、補強後は2011年東北地方太平洋沖地震の分析結果

3.1.3 制振効果の検証

モード解析型 ARX モデル²⁾を用いて、補強前と補強後に得られた観測記録から建物のモード減衰比を同定し、ダンパーによる付加減衰を評価する。1 階加速度波形を入力、最上階および 28 階加速度波形を出力とする 1 入力 2 出力系の ARX モデルを構成し、各方向 1～3 次のモード減衰比を評価した。

図-6 に 1 次のモード減衰比を、最大加速度振幅に対してプロットして示す。また、表-4 に 2004 年新潟県中越地震（補強前）と 2011 年東北地方太平洋沖地震（補強後）の評価結果を比較して示す。補強後の減衰比は、補強前と比較して全てのモードで増加しており、ダンパーによる付加減衰が確認できた。1 次モードの減衰比は、ダンパーの設置により Y（短辺）方向で 1.3% から 2.7% に、X（長辺）方向で 1.6% から 1.9% に増加している。

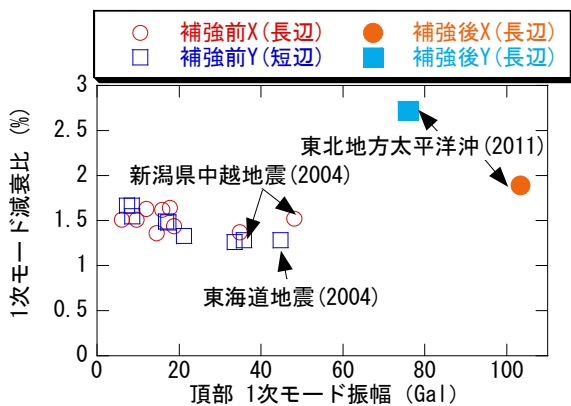


図-6 1 次モード減衰比の同定結果

Fig.6 Identified result of damping ratio of 1st vibration mode

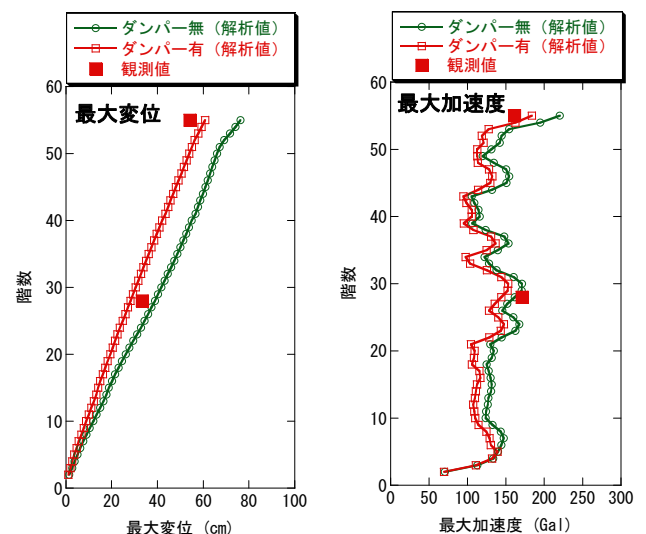
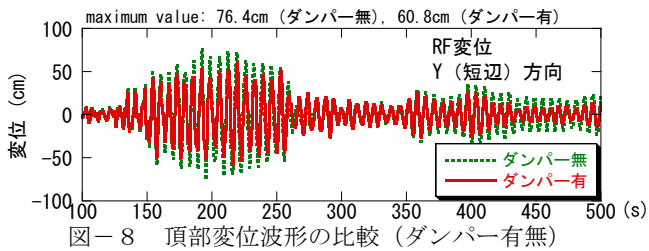
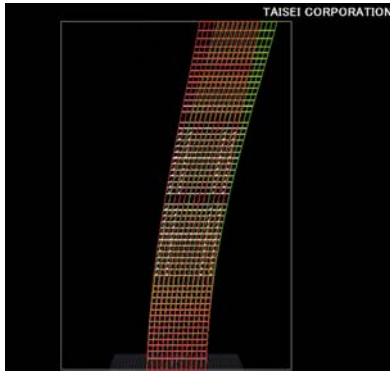


図-7 Y 方向の最大応答値の比較（ダンパー有無）

Fig.7 Comparison of maximum response (with or without damper)

図-8 頂部変位波形の比較 (ダンパー有無)
Fig.8 Comparison of displacement (with or without damper)図-9 応答結果のアニメーション
Fig.9 Screen shot of animation of response

4. 免震建物の効果

4.1 免震 A 建物 (仙台 MT ビル)

4.1.1 建物の概要

宮城県仙台市に位置する仙台 MT ビルは、1999 年竣工、RC+S 造、地上 18 階、地下 2 階、高さ 84.9m の日本初の超高層免震建物である (写真-5)。天然ゴム系積層ゴム支承と弾性すべり支承を併用したハイブリッド TASS 構法が適用されている³⁾。免震層は、1 階床下に位置し、建物中央部に弾性すべり支承 10 基、外周部に積層ゴム支承 26 基を配置している。免震層降伏 (すべり発生) 後の周期は 5.4 秒である。上部建物の 1 次周期は X (短辺) 方向が 1.9 秒、Y (長辺) 方向が 2.0 秒である。

写真-5 仙台 MT ビル
Photo 5 Sendai MT Building

4.1.2 観測結果

表-5 に建物加速度と免震層から上部の建物変形の最大値を示す。図-10 に加速度波形を示す。免震層の上下の最大加速度を比較すると、X 方向で 310.8Gal (ピット) → 173.0Gal (1 階)、Y 方向で 225.8Gal (ピット) → 142.9Gal (1 階) と、X 方向で約 56%、Y 方向で約 63% にまで低減されている。けがき盤で記録された免震層の最大変位は約 23cm であった。参考として、

加速度波形を積分して求めた免震層変位のリサージュを図-11 に示す。上部建物の最大変位を建物高さで割った平均層間変形角は、1/411 と小さな値であった。

表-5 震度と最大応答値 (仙台 MT ビル)

Table 5 Seismic intensity and maximum response

	震度階 (計測震度)	最大加速度 (Gal)		建物最大変位 (cm)*	
		X (短辺)	Y (長辺)	X (長辺)	Y (短辺)
18F	-	193.8	188.6	15.5	16.0
10F	-	156.9	155.0	13.0	9.1
1F	-	173.0	142.9	0.0	0.0
免震層					
Pit	5強 (5.3)	310.8	225.8	-	-

* 免震層より上部の相対変形

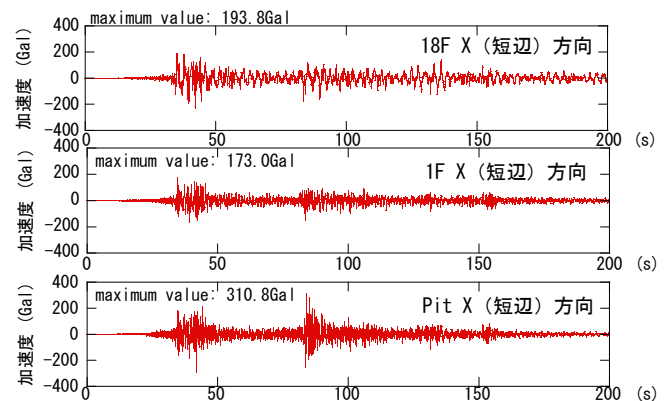


図-10 加速度波形 (X 方向)

Fig.10 Acceleration wave

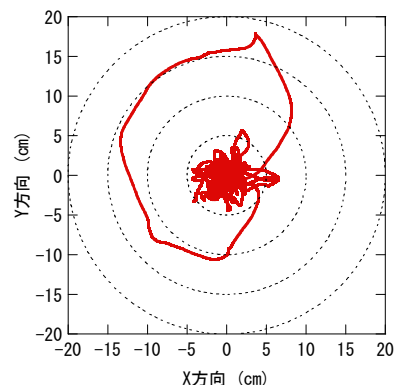


図-11 免震層のリサージュ

Fig.11 Lissajous figure

4.1.3 免震効果の推定

図-12 に仙台 MT ビルの最大加速度値を、非免震モデルの解析結果と比較して示す。非免震モデルは、免震層を固定した 18 質点モデル (線形) とし、10 次のモード重畳法により応答解析を行った。モード減衰比は各次 3% とした。図-13 に観測された 18 階の加速度波形を非免震の解析結果と比較して示す。

建物頂部の最大加速度は、X 方向が 326.7Gal (非免震) → 193.8Gal (免震)、Y 方向が 363.1Gal (非免震) → 188.6Gal (免震) であり、非免震の場合に比べて、X 方向で約 60%、Y 方向で約 52% にまで低減しており、免震効果が明瞭に見られた。

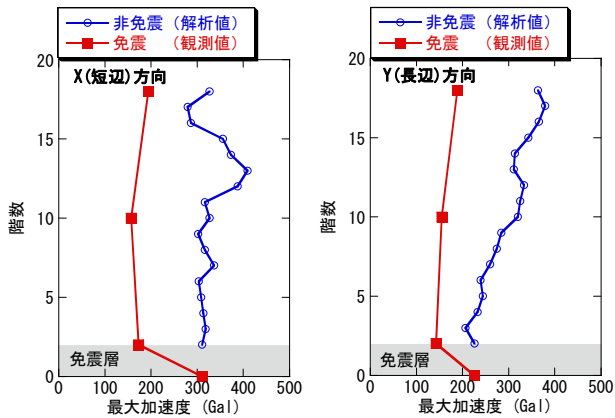


図-12 免震と非免震の最大加速度分布の比較
Fig.12 Comparison of maximum acceleration

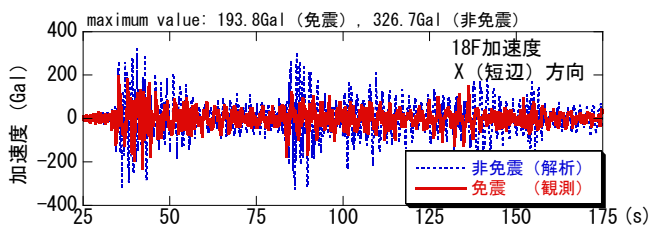


図-13 免震と非免震の頂部加速度波形の比較 (X 方向)
Fig.13 Comparison of acceleration (with or without isolation)

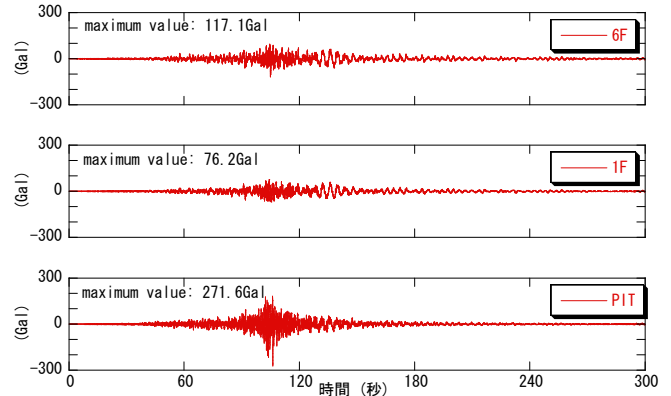


図-14 加速度波形 (X 方向)
Fig.14 Acceleration wave

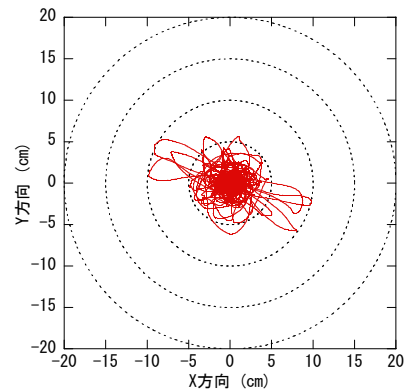


図-15 免震層のリサーチ
Fig.15 Lissajous figure

4.2 免震 B 建物 (つくば市)

4.2.1 建物の概要

茨城県つくば市に建つ研究施設で、2008 年竣工、S 造地下 1 階、地上 6 階建、高さ 31.0m である。免震層は、天然ゴム系積層ゴム支承 67 基、弾性すべり支承 40 基、オイルダンパー 36 台からなる。

4.2.2 観測結果

表-6 に建物加速度と免震層から上部の建物変形の最大値を示す。図-14 に加速度波形を示す。免震層の上下の最大加速度を比較すると、X (長辺) 方向で 271.6Gal (ピット) → 76.2Gal (1 階)、Y (短辺) 方向で 295.2Gal (ピット) → 100.7Gal (1 階) と、X 方向で約 28%、Y 方向で約 34% にまで低減されている。図-15 に免震層変位のリサーチを示す。免震層の最大変形は、約 10cm であった。上部建物の平均層間変形角は、1/1192 と小さな値であった。

表-6 震度と最大応答値 (免震 B 建物)
Table 6 Seismic intensity and maximum response

階	震度階 (計測震度)	最大加速度 (Gal)		建物最大変位 (cm)*	
		X (長辺)	Y (短辺)	X (長辺)	Y (短辺)
6F	-	117.1	110.0	2.6	1.8
1F	-	76.2	100.7	0.0	0.0
免震層					
ピット	5強 (5.2)	271.6	295.2	-	-

*免震層より上部の相対変形

4.2.3 免震効果の推定

設計用モデルから免震層を固定した非免震モデルを作成し、非免震の場合の地震応答解析を行った。図-16 に最大加速度分布の免震 (観測値) と非免震 (解析値) の比較を示す。建物頂部の最大加速度は、X 方向が 431.8Gal (非免震) → 117.1Gal (免震)、Y 方向が 635.1Gal (非免震) → 110.0Gal (免震) であり、非免震の場合の解析値に比べて X 方向で約 27%、Y 方向で約 17% に低減しており、免震効果が明瞭に見られた。

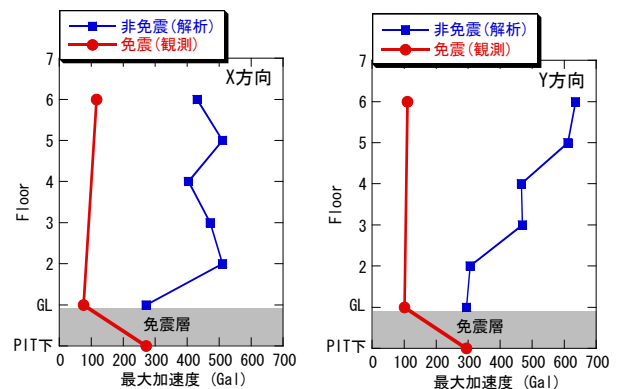


図-16 免震と非免震の最大加速度分布の比較
Fig.16 Comparison of maximum acceleration

4.3 免震C建物（代ゼミタワー）

4.3.1 建物の概要

東京都新宿区に位置する代ゼミタワーは、2008 年竣工、RC+S 造、地上 26 階、地下 3 階、高さ 134m の超高層免震建物である（写真－6）。天然ゴム系積層ゴム支承と可変減衰オイルダンパーからなる超高層としては世界初のセミアクティブ免震システムが採用されている⁴⁾（写真－7）。可変減衰ダンパーは 2 種類の減衰係数を有しており、地震時には建物の揺れが最小となるようにコンピュータで減衰係数を逐次切り換える。免震層は、地下 1 階床下に位置し、積層ゴム支承 55 基とオイルダンパーを各方向に 12 台配置している。免震建物の周期は 5.5 秒である。上部建物の 1 次周期は X（短辺）方向が 2.8 秒、Y（長辺）方向が 2.9 秒である。



写真－6 代ゼミタワー
Photo 6 Yozemi tower



写真－7 可変減衰ダンパー
Photo 7 Variable oil damper

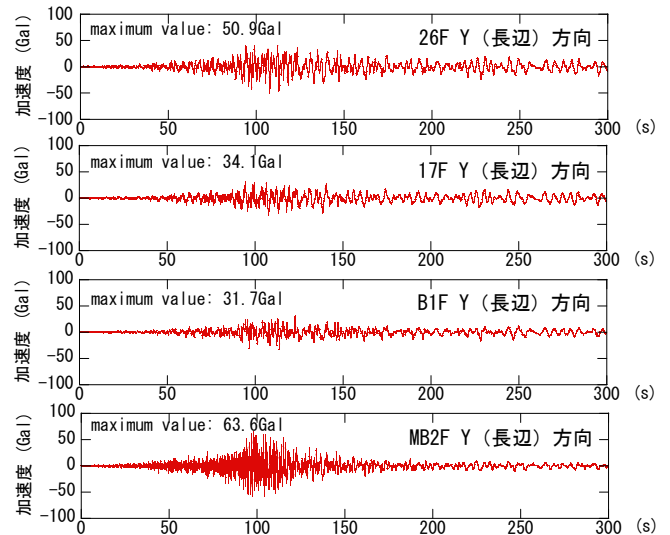
4.3.2 観測結果

表－7 に建物加速度と免震層から上部の建物変形の最大値を示す。図－17 に加速度波形を示す。免震層の上下の最大加速度を比較すると、X（短辺）方向で 97.7Gal（MB2F）→29.2Gal（B1F）、Y（長辺）方向で 63.6Gal（MB2F）→31.7Gal（B1F）と、X 方向で約 30%、Y 方向で約 50%にまで低減されている。また、図－18 に免震層の変位波形を、図－19 に変位のリサージュを示す。免震層の最大変位は約 10cm である。上部建物の最大変位を建物高さで割った平均層間変形角は 1/1136 と非常に小さな値であった。

表－7 震度と最大応答値（代ゼミタワー）
Table 7 Seismic intensity and maximum response

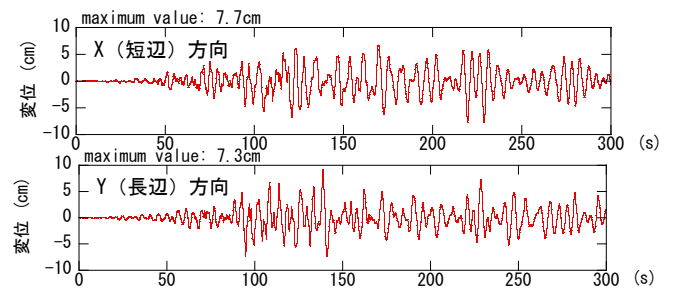
	震度階 (計測震度)	最大加速度 (Gal)		建物最大変位 (cm)*	
		X (短辺)	Y (長辺)	X (長辺)	Y (短辺)
26F	-	46.1	50.9	11.8	8.3
17F	-	66.0	34.1	9.7	5.9
B1F	-	29.2	31.7	0.0	0.0
免震層					
MB2F	4 (4.4)	97.7	63.6	-	-

* 免震層より上部の相対変形



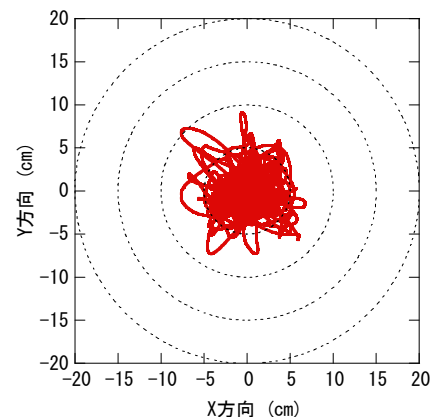
図－17 加速度波形（Y 方向）

Fig.17 Acceleration wave



図－18 免震層の変位波形

Fig.18 Displacement wave of isolation floor



図－19 免震層リサージュ

Fig.19 Lissajous figure

4.3.3 免震効果の推定

図－20 に、各階（Y 方向）の最大変形値と最大加速度値を免震と非免震で比較して示す。解析モデルは擬似立体のフレームモデル（線形）を用いた。図－21 に観測された建物頂部の加速度波形を非免震の解析結果と比較して示す。建物頂部の最大加速度は、X（短辺）方向が 119.3Gal（非免震）→46.1Gal（免震）、Y（長辺）方向が 191.4Gal（非免震）→50.9Gal（免震）であり、非免震の場合の解析値に比べて X 方向で

約 39%, Y 方向で約 27%に低減しており, 十分な免震効果が見られた。



写真-8 大成建設技術センターJ棟
Photo 8 Taisei Technology Center Annex J

表-8 震度と最大応答値

Table 8 Seismic intensity and maximum response

階	震度階 (計測震度)	最大加速度 (Gal)			最大変位 (mm)	
		X	Y	Z	X	Y
RF	-	142.7	144.9	113.1	-	-
1F	-	117.6	124.7	52.4	-	-
免震層					37.3	40.5
ピット	5弱 (4.5)	96.7	77.2	38.3	-	-

階	震度階 (計測震度)	最大加速度 (Gal)	
		X	Y
RF	-	273.6	209.5
1F	5弱 (4.5)	96.0	91.3

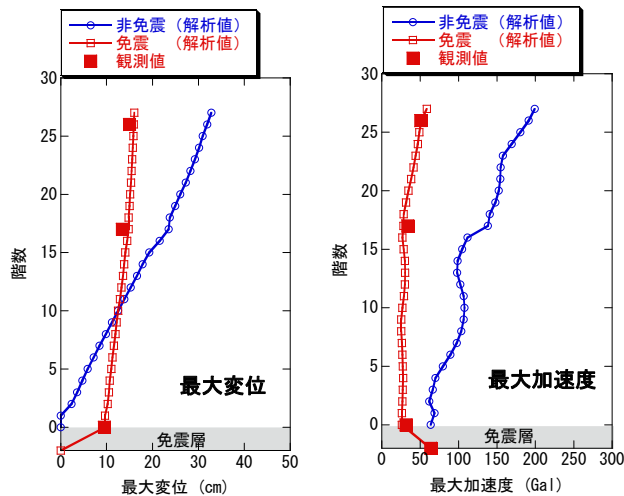


図-20 免震と非免震の最大応答値の比較 (Y 方向)

Fig.20 Comparison of maximum response

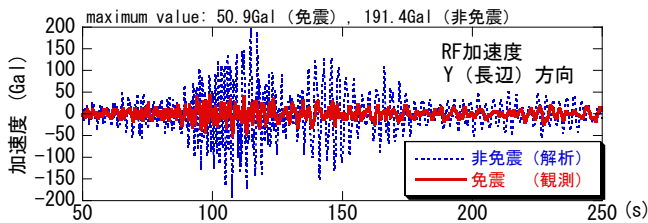


図-21 免震と非免震の頂部加速度波形の比較 (Y 方向)

Fig.21 Comparison of acceleration (with or without isolation)

4.4 免震D建物 (技術センターJ棟)

4.4.1 建物の概要

横浜市戸塚区に建つ大成建設技術センターJ棟は, 1988年竣工, RC造4階建て, 日本で初めてすべり支承を使用したTASS (Taisei Shake Supression) 構法による免震建物である⁵⁾ (写真-8)。基礎部分の免震層には, 弾性すべり支承が各柱の下に8基, クロロプレンゴム製の水平ばねが各隅に2基ずつ (合計8基) 設置されている。設計周期は弾性時は1.2秒, すべり時は5秒である。J棟に隣接して, 耐震建物である本館 (1979年竣工, RC造地下1階地上4階建て) が建っている。J棟竣工以来, J棟および本館で地震観測を実施しているが, 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震以前にはすべり支承のすべりが生じる地震は経験していない。

4.4.2 観測結果

表-8にJ棟および本館の記録の最大値と震度を, 図-22に加速度波形を示す。また, 図-23に免震層変位波形を, 図-24に変位のリサージュを示す。免震層の最大変形は4cm程度で, 支承では1cm程度のすべりが生じていた。

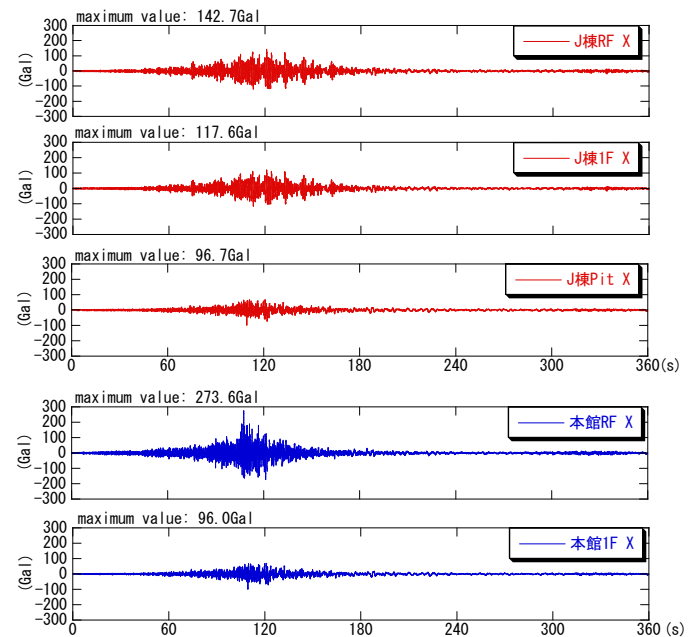


図-22 加速度波形 (X 方向)

Fig.22 Acceleration wave

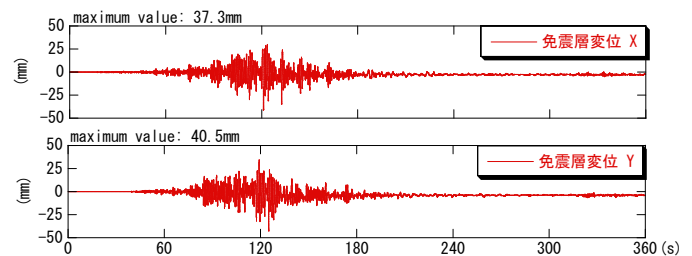


図-23 免震層変位波形

Fig.23 Displacement of isolation floor

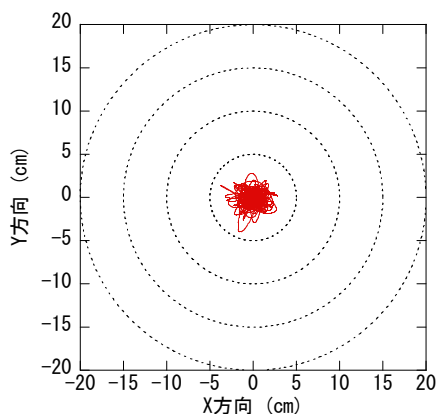


図-24 免震層のリサーチ
Fig.24 Lissajous figure

4.4.3 免震効果の検証

図-25にJ棟と本館の最大加速度分布の比較を示す。また、図-26に加速度波形の主要動付近を比較して示す。同程度の高さとなる頂部同士を比較すると、J棟の最大加速度値は本館の約52%(X方向)と約69%(Y方向)と小さく、免震の効果を確認された。

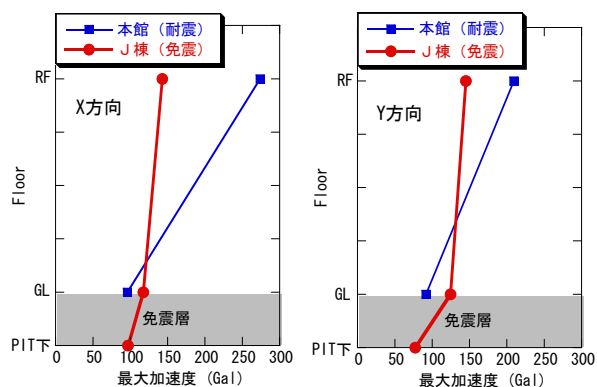


図-25 最大加速度分布の比較(免震と耐震)
Fig.25 Comparison of maximum acceleration

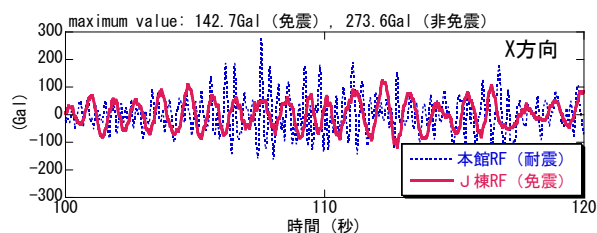


図-26 建物頂部加速度波形の比較(免震と耐震)
Fig.26 Comparison of acceleration wave

5. まとめ

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、当社設計の多くの免震・制振建物で観測記録が得られた。長周期地震動に対する制振補強構法を適用した新宿センタービルと、仙台市、つくば市、新宿区に建つ3棟の免震建物と大成建設技術センターの免震建物について、記録の分析とシミュレーション解析を実施した結果、いずれの建物でも免震・制振効果が確認された。新宿センタービルでは、減衰の増加と約20%もの応答低減が確認され、長周期地震動に対する補強効果が実証された。仙台市、つくば市、新宿区の免震建物では、頂部の最大加速度は地表に比べて40～85%に低減され、大きな免震効果が確認された。また、技術センターの免震建物でも、隣接する耐震建物に比べて、頂部の最大加速度が50～70%に低減され、免震効果が実証された。

今回の大震災でも優れた性能を発揮した信頼性が高い免震、制振システムを、今後も様々な用途の建物に適用していく予定である。

謝辞

効果の検証に際して、森トラスト(株)、学校法人高宮学園および新宿センタービル管理(株)所有の観測データを使用させて頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 青野英志, 木村雄一, 細澤治, 吉村智昭, 安田聡: 既存超高層建物の長周期地震動対策技術, 大成建設技術センター報, Vol.44, 2011.
- 2) 斉藤知生: モード解析型多入力多出力ARXモデルを用いた高層建物のシステム同定, 日本建築学会構造系論文集, Vol.508, pp.47-54, 1998.6
- 3) 寺嶋知宏, 小室努, 中島徹, 欄木龍大: 2003年5月26日宮城県沖の地震における仙台MTビルの挙動, 日本建築学会学術講演梗概集B-2, pp.261-262, 2004.
- 4) 篠崎洋三, 細澤治, 藤山淳司, 長島一郎, 欄木龍大: 連層耐震壁を有する超高層免震建物の設計, 日本建築学会学術講演梗概集B-2, pp.327-328, 2008.
- 5) 長島一郎, 松原正安, 河村壮一, 他: すべり支承を用いた免震構法その1-8, 日本建築学会学術講演梗概集B, 1987-1988.