

【東日本大震災 調査報告 1】

## 東北地方太平洋沖地震における関東地域の免制震建物の挙動

Dynamic Behavior of Response-Controlled Buildings in the Kanto Region during the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

川島 学 MANABU KAWASHIMA

鈴木 亨 TORU SUZUKI

構造設計ディビジョン 徳武 茂隆 SHIGETAKA TOKUTAKE

東北地方太平洋沖地震における関東地域に建つ3棟の免制震建物の挙動を、当社の運用する地震観測システムで収録した記録に基づき報告する。入力地震動のレベルは、最大速度17~18cm/s、疑似速度応答スペクトル30cm/s以上であり、対象建物が過去に経験した中で最大であった。観測記録に基づく振動特性の同定およびシミュレーション解析による検証を通じて、免制震技術による応答低減効果、後揺れの抑制効果などの有効性が明らかとなった。

キーワード：東北地方太平洋沖地震、地震観測、免震、制震、システム同定、シミュレーション解析

Dynamic behavior of three seismic-controlled buildings subjected to strong motion records observed in operating earthquake observation systems is demonstrated. Input motions for the buildings reached to 17-18 cm/s as peak velocity and over 30cm/s as pseudo velocity response, which have the largest intensity among previously experienced earthquakes. Effectiveness of response-controlled technology such as maximum response reduction and reducing vibration amplitude in coda phase are verified through both vibration identification of the buildings and vibration simulation analysis.

**Key Words:** The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, earthquake observation, Seismic isolated building, vibration controlled building, system identification, vibration simulation analysis

### 1. はじめに

平成23年東北地方太平洋沖地震は、 $M_w=9.0$ という我が国の観測史上最大の規模であり、破壊開始点より遠く離れた関東地域においても、広い範囲で震度5弱~震度6弱の地震動が観測された。当社では、過去に設計・施工に携わった建物に地震観測システムを設置して運用を続けており、複数の地点で東北地方太平洋沖地震時の記録を収録している。

一般に動的解析による設計が必要とされる超高層建物や免制震建物にとって、実観測記録に基づき、設計の妥当性および構造性能を明らかにすることは極めて重要である。

中でも、免制震建物においては、建物に設置される装置の特性から応答振幅への依存性が大きく、大振幅の強震記録による性能の検証が強く望まれてきたが、実際そのような記録が観測された例は少ない。当社の運用する免制震建物を対象とした地震観測システムにおいて以前に得られている記録も、比較的小振幅のものが多く、

免制震効果の定量的な把握は困難であった。

このような中、東北地方太平洋沖地震時の記録は、これらの免制震建物の建設後、最も大きな振幅の揺れに見舞われたことを示すものであった。また、建物へ入力となって作用した地震力は、建築基準法に基づく告示に定められる「稀に発生する地震動」のレベルを超え、我々が設計時に考慮する地震力に達していた。本報告では、大振幅時の免制震建物の振動記録に基づき、これらの建物の地震時挙動について報告する。観測された記録の分析を通じ、これらの建物の応答制御効果を抽出するとともに、シミュレーション解析により制震効果の検証を行うことが目的である。

### 2. 分析対象建物と強震観測の概要

本報において分析の対象とするのは、関東地域の東京湾沿いの地域にある3棟の免制震建物である。表-1に、対象建物の概要を示す。

A 建物は、1995年に竣工した鉄骨造の免震建物である。

表-1 分析対象建物の概要

	A建物	B建物	C建物
構造特色	基礎免震	中間階免震(免震改修)	制震
竣工年	1995年	1999年(補強前1967年)	1999年
階数	地上5階, 地下2階	地上10階, 地下階なし	地上24階, 地下2階
建物用途	事務所	事務所, 宿舎	事務所, 共同住宅
軒高	22.5m	29.9m	95.2m
平面形	64.0m×48.6m	44.1m×31.5m	41.8m×29.0m
構造種別	S造	1~5階SRC造, 6~10階RC造	地下SRC造, 地上S造
架構形式	純ラーメン構造	耐震壁付きラーメン構造	純ラーメン構造
基礎形式	直接基礎	杭基礎	直接基礎
免制震装置	天然ゴム系積層ゴム +鉛ダンパー・摩擦ダンパー	天然ゴム系積層ゴム +粘性制震壁	粘性制震壁

免震装置は天然ゴム系積層ゴムであり、免震層の減衰性能は、履歴型の鉛ダンパーおよび摩擦ダンパーにより付加する計画となっている<sup>1)</sup>。B建物は、1960年台に建設された地上10階建ての鉄筋コンクリート造(下層階は鉄骨鉄筋コンクリート造)の建物を、2階部分を免震化することにより改修した建物であり、改修工事の完了は1999年である<sup>2), 3), 4)</sup>。短辺方向であるY方向の一部構面には、耐震壁が配置されている。免震装置は天然ゴム系積層ゴムとし、免震層に粘性制震壁を設置することにより、中間階免震のクライテリアとなる変形量の低減を図っている。A建物、B建物ともに免震構造であるが、新築と改修、主架構がS造とRC造、減衰機構が履歴系と粘性系と、それぞれ異なった特色がある。

C建物は、1999年に竣工した鉄骨造地上24階建ての制震高層建物である。同建物では、地震時の構造安全性に加え、強風時の居住性の向上を目的として、粘性制震壁が設置されている<sup>5), 6)</sup>。

A建物~C建物内に設置されている強震計(赤丸印)の配置を、図-1に建物の平面図、立面図とともに示している。設置されている強震計は全て加速度計であり、サンプリングは100Hzである。以後、図中に示す方向を(X, Y, Z)と呼ぶことにする。立面図の強震計位置には、計測されている振動方向を括弧書きで記している。総計測成分の数は、A建物、B建物、C建物でそれぞれ9成分、12成分、18成分である。A建物、B建物においては、免震効果の検証を目的として、免震層の上下および建物最上階に強震計が設置されている。一方、制震建物であるC建物では、建物基部から最上階の5箇所に強震計を配置し、建物高さ方向の振動分布を捉えることを目的とした配置となっている。

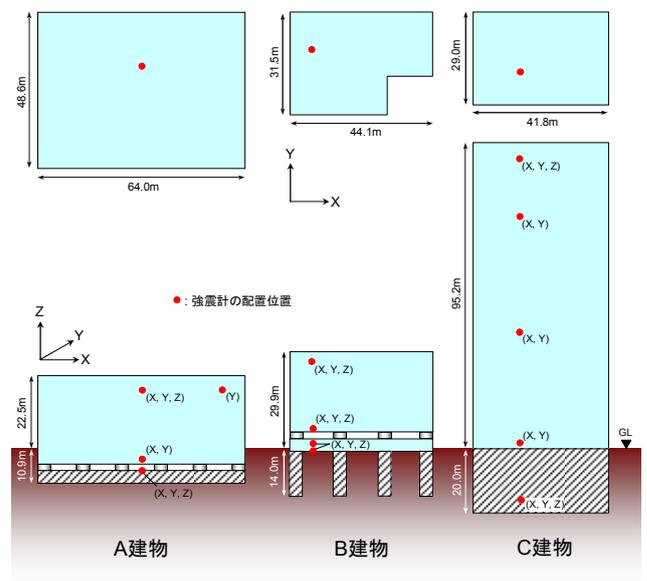
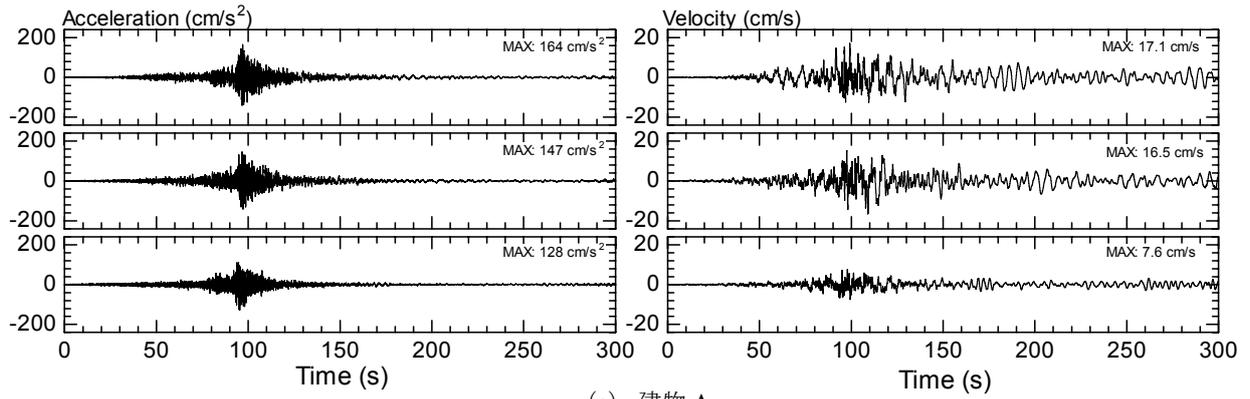


図-1 平面図(上)、立面図(下)と強震計の配置

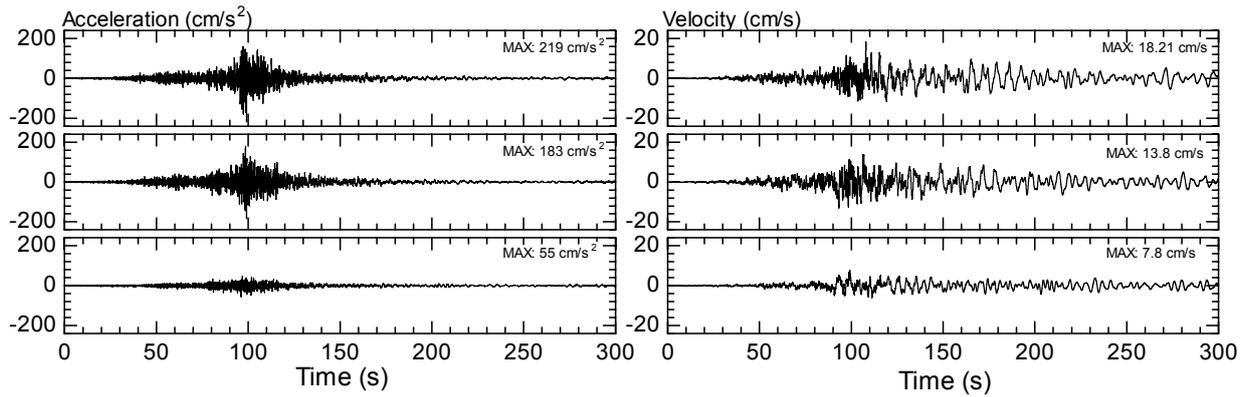
### 3. 入力地震動の特性

図-2に、建物基部(建物A:下基礎, 建物B:1階, 建物C:地下2階)において観測された加速度波形, およびそれらを数値的に積分して求めた速度波形を示す。これらの波形は、分析対象建物への入力地震動である。ここで、数値積分は周波数領域において行い、0.1Hz以下の成分をローカットした。C建物においては、主要動前の時間帯の記録が欠損しているが、最大振幅となる部分は捉えられている。

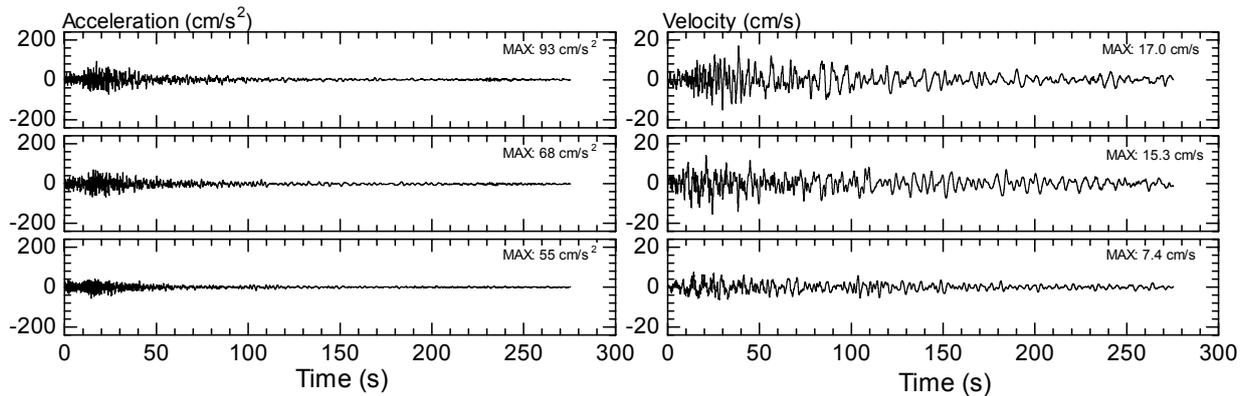
水平方向の加速度は最大で219cm/s<sup>2</sup>であり、振幅の大きな時間帯は60秒間ほどである。C建物では最大値が100cm/s<sup>2</sup>に満たず、他の2建物と比べて値が小さいが、基礎の埋込が大きく、有効入力動が低減していることが推定される。水平方向の最大速度は、3建物において同



(a) 建物 A



(b) 建物 B



(c) 建物 C

図-2 建物基部での加速度波形 (左) と速度波形 (右)

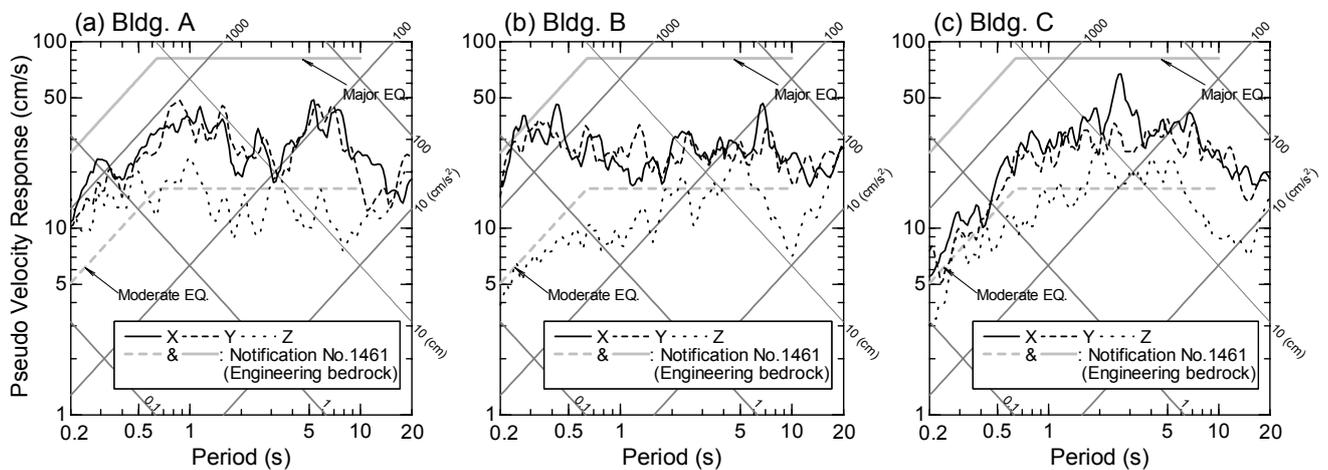


図-3 建物基部波形の擬似速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

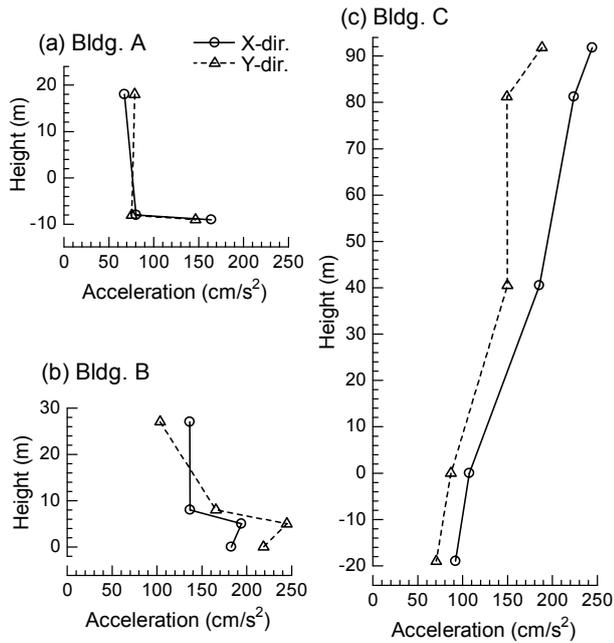


図-4 最大加速度分布

程度で 17~18cm/s である。速度波形には、振幅が最大となった後に長周期かつ継続時間の長い後続波が観察され、これは関東地方の深部地盤構造により生成された波群と考えられる。波形より計算される計測震度は、A 建物と B 建物では 4.9、C 建物では 4.4 である。

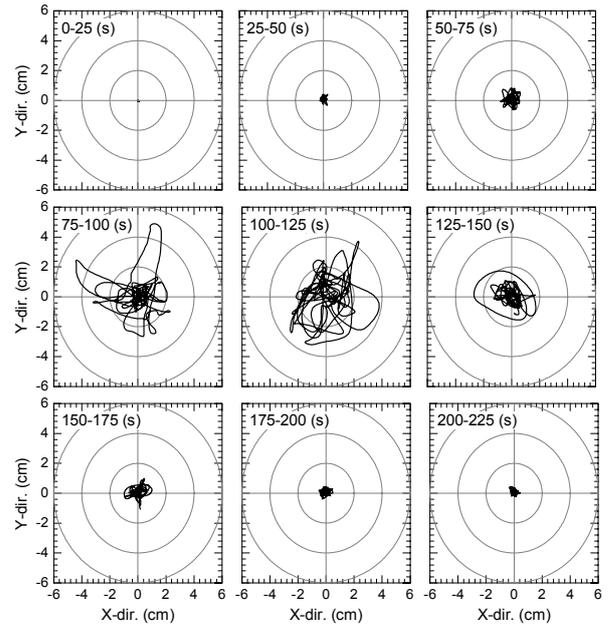
建物基部の波形より計算した擬似速度応答スペクトル(減衰定数 5%)を図-3 に示す。水平方向のスペクトルには、A 建物では 1 秒と 6 秒、B 建物では短周期帯と 6 秒、C 建物では 2~3 秒に卓越が見られるが、速度一定領域における平均的な値は 30cm/s 程度であり、建物による入力レベル差はほとんどない。同図中には、平成 12 年建設省告示 1461 号に定められる工学的基盤位置での設計用値を同時に示している。水平方向のスペクトルは、全周期帯において稀に発生する地震動(modulate EQ.)を超え、極めて稀に発生する地震動(major EQ.)に至らない程度の入力レベルである。

#### 4. 分析対象建物の振動性状

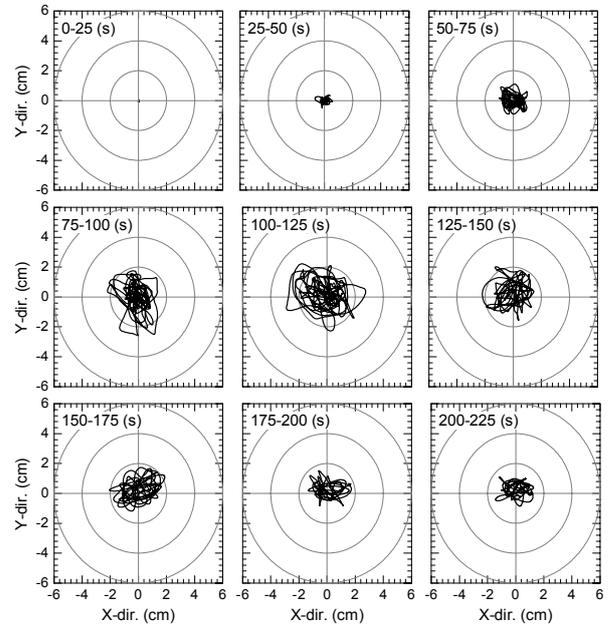
##### (1) 最大加速度分布

図-4 は、観測された最大加速度を、1 階床レベルを規準とした強震計設置位置の高さに対してプロットして示したものである。

基礎免震である A 建物では、免震層において加速度が半分程度に低減している。中間階免震である B 建物では、入力動に対して 2 階床で加速度の増幅が見られるが、免震層において 2/3 程度に加速度が低減し、免震層より上部での加速度の増幅は見られない。これより、免震建物



(a) A 建物



(b) B 建物

図-5 免震層の変位軌跡

における最大加速度の低減効果が確認される。

制震建物である C 建物では、X、Y 方向ともに建物内で加速度が増幅し、最上階においては、最大加速度は建物基部の約 2 倍の値となっている。同建物の制震効果の定量的な評価については、5 節においてシミュレーション解析による検証を試みる。

##### (2) 免震層の挙動

免震建物である A 建物、B 建物について、免震層を挟む 2 つの強震計の絶対変位の差として免震層の相対変位を算定し、水平 2 方向の変位軌跡を図-5 に示す。図は、

25 秒ごとに分割して示しており、図中の同心円は 1 目盛りが 2cm である。なお、数値積分は 3 章と同様の方法により周波数領域を介して行った。

A 建物では、収録の開始から 75 秒～100 秒の時間帯において免震層の変形が拡大し、最大で 5cm 程度の相対変位が生じている。その後、ほぼ一定の振幅で振動が継続するが、収録開始より 125～150 秒の間に免震層の変形は即座に収束する。一方、B 建物においては、免震層の変形の増大と減少が緩やかであり、最大の相対変位は 3cm 程度と A 建物に比べて小さい。

このように両建物において免震層の挙動に違いが見られるのは、設置されている減衰装置の特性の差によるものと考えられる。すなわち、A 建物では摩擦ダンパーと履歴系ダンパーによる減衰機構であり、建物に生じる慣性力が一定値を越えた時間帯に限定し減衰効果を発揮する。一方、B 建物に設置されている減衰装置は粘性系のダンパーであり、比較的小さな入力レベルにおいても減衰効果を発揮し、さらに最大変形を抑制する効果についても確認されたといえる。

### (3) 振動特性の評価

分析対象建物の基本的な振動特性である、固有周期、減衰定数を評価する。本報では、多入力・多出力系の同定問題への適用性に特色がある部分空間法<sup>7)</sup>を用い、建物基部の記録を入力、上層階の記録をすべて出力として、X、Y 方向を独立に扱う。モデル次数の決定にあたっては、次数を変動させて同定した極の振る舞いを観察することにより、安定な極が評価される次数を選定した<sup>8)</sup>。

振動特性の評価は、観測波形を、(1) 主要動前、(2) 主要動、(3) 後揺れの 3 区間に分割し、それぞれの区間について同定を行う。なお、C 建物では、(1) 主要動前の区間の記録が欠損しているため、(2) と (3) のみ結果を示す。

図-6 に、スペクトル解析により推定した周波数応答関数の絶対値を黒線、灰波線で示す。また、同図中の赤線、青線は、同定された状態空間モデルより計算した伝達関数の絶対値である。入出力記録の組は図中に凡例で示してある。図より、同定された数理モデルが、周波数領域において観測記録と整合していることが確認できる。

図-7 には、同定した固有周期、減衰定数の値を、(1) 主要動前、(2) 主要動、(3) 後揺れの 3 区間について示している。ただし、共役極は 2 次の振動系を構成するため、ここでの減衰定数は粘性減衰のそれとして同定され、評価区間の等価粘性減衰定数に相当するものと解釈する。A 建物では、(1) 主要動前の区間から (2) 主要動の区間にかけて周期が約 1 秒から 1.5 秒程度に伸長し、減衰定

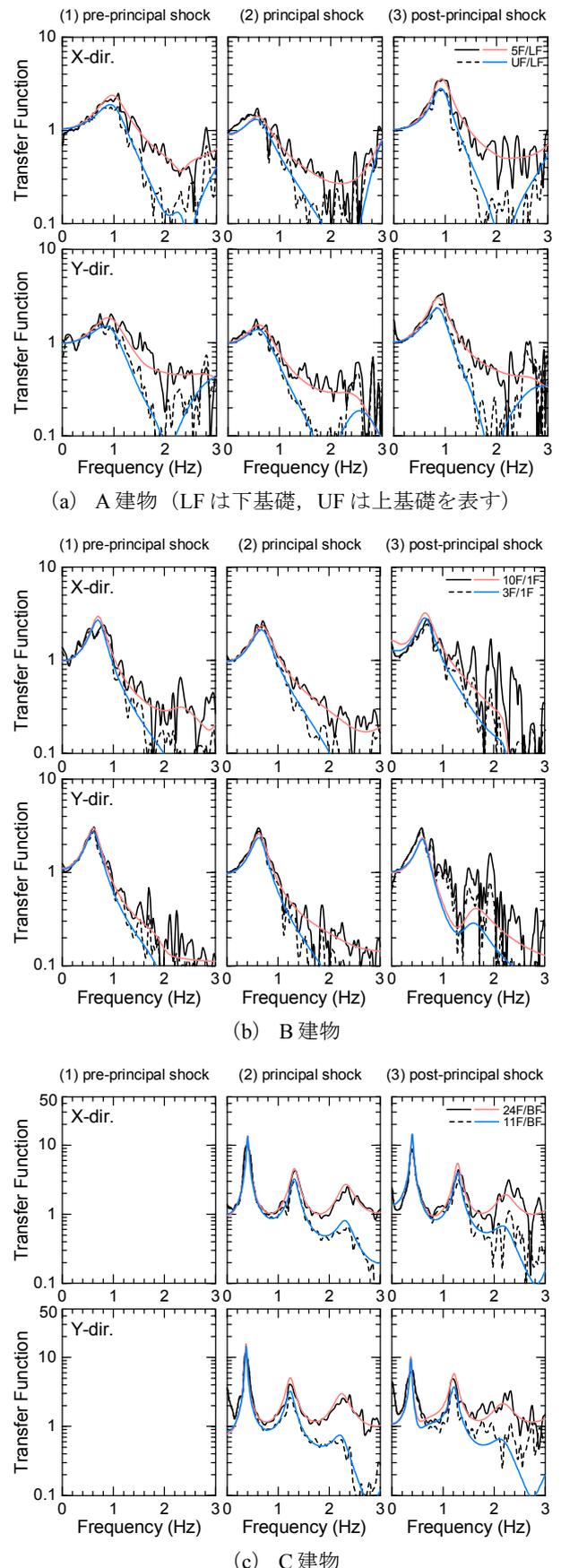


図-6 周波数応答関数の推定値と同定されたモデルによる伝達関数の絶対値

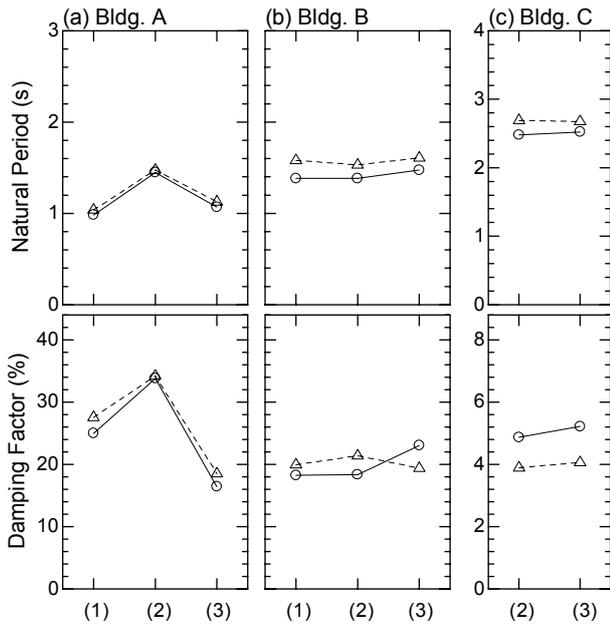


図-7 固有周期と減衰定数の同定値

(1) 主要動前, (2) 主要動, (3) 後揺れ部分を表す

数は 25%から 35%へ増加する。その後、主要動が収まった後の区間 (3) において、周期、減衰定数は共に減少する。この傾向は主に、(2) 主要動の区間において摩擦ダンパーが効果を発揮していることを示唆する。B 建物においては、応答継続時間を通して固有周期は約 1.5 秒、減衰定数は 20%程度のほぼ一定値を示しており、入力レベルによる顕著な特性変化は見られない。C 建物は、固有周期は X 方向で 2.5 秒、Y 方向で 2.8 秒程度であり、(2) 主要動と (3) 後揺れの間での差は見られず、構造体は弾性域にあるものと推定される。(1) 主要動区間での減衰定数は、X 方向で 4.7%、Y 方向で 3.8%と評価された、これは、通常の鉄骨造高層建物と比べて大きな値であり<sup>9)</sup>、粘性制震壁による付加減衰効果がうかがわれる結果である。

## 5. シミュレーション解析による制震効果の検証

### (1) 解析モデル

以上に述べてきたように、A 建物、B 建物の免震効果については、強震記録より明瞭に抽出することができた。

本節では、C 建物の制震効果について、シミュレーション解析を通じた検証を試みる。ここでは、建物長辺方向である X 方向を解析対象とする。

シミュレーション解析は、C 建物の高層評定時に応答解析を実施したモデル（以下、設計モデル）を、以下に述べるように、部分的に修正したモデル（以下、解析モデル）によって行う。解析には、(株)構造計画研究所の

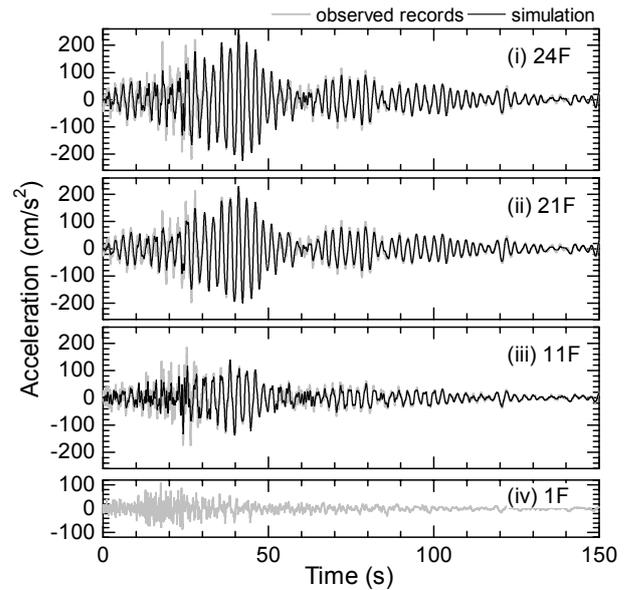


図-8 シミュレーション解析の結果と観測記録との比較

質点系解析プログラム RESP-M/II を用いる。

解析モデルは 24 質点等価曲げせん断型とし、地階部分を含まないモデルとする。したがって、モデルへの入力波としては、上部構造への有効入力動となる 1 階床位置での観測波を用いる。各層の剛性については、解析モデルの 1 次周期が観測値と整合するように、設計モデルの剛性値を分布形は変化させずに係数倍し、各階重量は設計モデルの数値を用いる。なお、固有周期の同定結果には、主要動における周期の伸長が見られなかったため、解析は初期剛性を用いた弾性解析とする。

本節のシミュレーション解析では、建物に設置されている粘性制震壁のモデル化が肝要となる。本報では、減衰力が速度のべき乗に比例して低下する傾向を表現する実験式<sup>10)</sup>を用い、粘性制震壁の特性を解析モデルに取り入れる。粘性制震壁の温度および振動数に関する依存性を表す係数は、粘性体の温度を 20°C、振動数を観測記録より同定した 1 次モードの値とする。また、建物の全体曲げ変形は、各層に配置した装置への有効な入力とならないことが知られている。そこで、文献 11)を参考とし、低速度領域における減衰係数に各層のせん断変形と全体変形との比の自乗を乗じることで、この効果を考慮することとする。構造減衰については、一次モードに減衰定数 1%を与える剛性比例型減衰とした。

### (2) 観測記録のシミュレーション

図-8 に、シミュレーション解析を行った結果について、強震計が設置された階の加速度波形を観測記録とともに示す。なお、最下段の 1 階の観測記録は解析モデルへの入力波であり、参考のために示したものである。

図より、入力加速度の大きい10~30秒の間においては、解析結果は観測記録に見られる大きな振幅の数サイクルが表現できていないものの、40秒前後の建物上層部の応答が最大となる区間では両者はほぼ一致している。60秒以降の後揺れの時間帯においても解析結果と観測記録はよく対応しており、本シミュレーション解析により観測記録がほぼ再現されているといえる。

なお、解析結果と観測記録との間に見られた相違点は、当該時間帯に到達した短周期成分の卓越する入力動により励起された、高次振動モードの影響によるものと推測される。

### (3) 制震効果の検証

地震時の制震効果の検証は、本節において構築した解析モデル（以下、制震モデル）と、粘性制震壁を取り除いたモデル（以下、フレームモデル）の解析結果を比較することによって行う。

フレームモデルによるシミュレーション解析より得られた加速度応答波形を、制震モデルの解析値と共に図-9に示す。フレームモデルの解析結果は、制震モデルに比して大きな加速度応答となり、粘性制震壁による加速度応答値の抑制効果が確認される。また、フレームモデルの解析結果では、長周期地震動に特有の後続波によって長時間にわたり大きな振幅の応答が継続し、最上階においては  $200\text{cm/s}^2$  程度以上の応答が約1分間続いている。これに対し、制震モデルの応答値はすばやく収束し、後続波による後揺れが効果的に低減される結果となっている。図-10は、制震モデルならびにフレームモデルのシミュレーション解析で得られた最大応答値を比較したものである。ここでは、最大加速度、層間変形角、せん断力係数の値を示している。制震モデルの解析結果は、いずれの指標に着目しても、フレームモデルの7割程度の値となっている。層間変形角の最大値は、制震モデルにおいて約1/220、フレームモデルでは約1/157である。

続いて、振動エネルギーの観点から制震効果を検証する。地震時の建物へのエネルギー入力  $E$  は、弾性運動エネルギー  $W_e$ 、構造減衰による吸収エネルギー  $W_h$ 、制震要素による吸収エネルギー  $W_D$  の和となる<sup>12)</sup>。図-11は、シミュレーション解析の結果をエネルギーの時刻歴で表したものである。(a) 制震モデルでは、粘性制震壁が応答開始時より効果的にエネルギーを吸収している。最終的に、粘性制震壁による吸収エネルギーは、総入力エネルギーの78%に達する。一方、(b) フレームモデルの結果では、構造減衰によるエネルギー吸収能が小さいため、投入されるエネルギーは弾性運動エネルギーに転化され、長い時間振動が続くことが分かる。

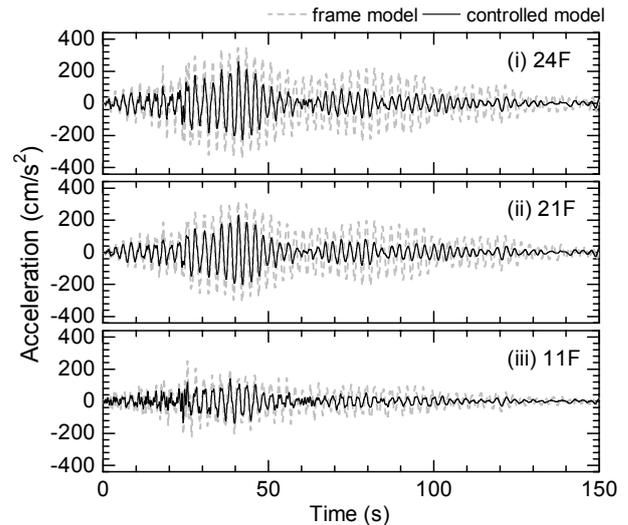


図-9 制震モデルとフレームモデルとの波形比較

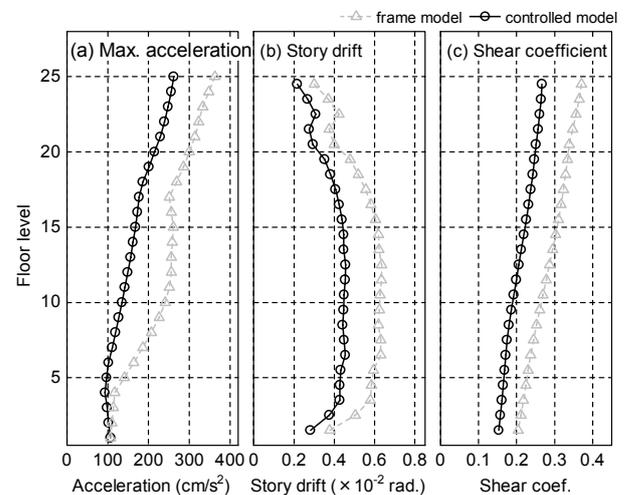


図-10 シミュレーション解析で得られた最大応答値

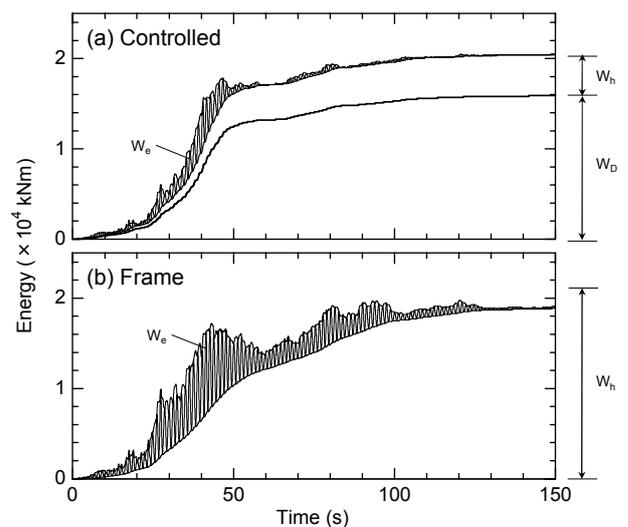


図-11 エネルギー入力、エネルギー吸収の時刻歴

## 6. まとめ

本報においては、東北地方太平洋沖地震時に収録された強震記録の分析を通じ、免制震建物の地震時挙動について述べた。対象建物は、当社の運用する地震観測システムを設置している、関東地域の東京湾沿いの地域に建つ2棟の免震建物と1棟の制震建物である。以下に、分析の結果得られた主要な知見をまとめる。

- ① 建物への入力となって作用した地震力は、建築基準法に基づく告示の「稀に発生する地震動」のレベルを超えており、対象建物の建設後最大のものであった。また、関東地域の深部地盤構造の影響による、長い継続時間の長周期の揺れが観測された。
- ② 免震建物であるA建物、B建物では、免震効果により上部建物での最大加速度が1/2～2/3に低減された。免震層の最大変位は、A建物では約5cm、B建物では約3cmであった。
- ③ 免震層に設置された減衰装置の特性による、地震時挙動の違いが抽出された。すなわち、履歴系の摩擦ダンパーが設置されたA建物では、上部建物に作用する地震力の大きな時間帯に変形が拡大し、固有周期が伸長するとともに減衰定数が増大する。一方、粘性系のダンパーが設置されたB建物では、応答振幅によらず一定の減衰効果を発揮し、固有周期は応答の継続時間中に変動しない。
- ④ 鉄骨造の制震建物であるC建物では、観測記録より減衰定数が4～5%程度と同定され、粘性制震壁の設置による減衰定数の増加がみられた。また、シミュレーション解析の結果、観測記録は精度良く再現され、解析モデルの妥当性が確認された。
- ⑤ 粘性制震壁の設置により、C建物の最大応答値は7割程度に抑えられ、また、長周期地震動に特有の大振幅の後揺れが効果的に低減されていることが、シミュレーション解析により検証された。粘性制震壁のエネルギー吸収量は全地震入力エネルギーの78%に達していると推定された。

謝辞：本報をまとめるにあたり、3建物の所有者各位には格別のご配慮をいただきました。ここに深謝いたします。

## 参考文献

- 1) 山本 裕, 寺元隆幸, 北村春幸, 野路利幸：免震建物の設計と振動実験, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2 分冊, pp.571-572, 1995
- 2) 河井慶太, 他：複合型免震レトロフィット構法の開発(その1)～(その5), 日本建築学会学術講演梗概集, B-2 分冊, pp.619-628, 1999
- 3) 石津 均, 古橋 剛：九段郵便局・九段宿舍の免震レトロフィット, MENSHEIN, No.26, 1999.11
- 4) 郵政事業庁施設情報部監修：郵政施設の免震・制震建築, pp.62-73, 2001
- 5) 世良信次, 早川 昇, 宮崎光生, 西村幸洋：粘性制震壁を用いた高層建築物の設計(その1：制震構造の設計耐震性能), 日本建築学会学術講演梗概集, B-2 分冊, pp.879-880, 1998
- 6) 世良信次, 早川 昇, 小倉 裕：粘性制震壁を用いた高層建築物の設計(その2：粘性減衰制震壁の性能試験), 日本建築学会学術講演梗概集, B-2 分冊, pp.989-990, 1999
- 7) 片山 徹：システム同一部分空間法からのアプローチ, 朝倉書店, 2002
- 8) 川島 学, 永野正行, 鹿嶋俊英, 井口道雄：高密度地震観測記録に基づく中層SRC造建物の立体振動モードの評価, 日本建築学会学術講演梗概集, 2011(掲載予定)
- 9) 日本建築学会編著：建築物の減衰, 日本建築学会, 2000
- 10) 鈴木利哉, 鈴木 亨, 岡田泰秀：粘性制震壁の粘性減衰力評価の整合性検証, 三井住友建設技術研究所報告, 第1号, pp.101-108, 2003
- 11) 石井正人, 北村春幸, 小坂橋裕一, 森 伸之, 和田 章, 笠井和彦：粘弾性型制振部材を適用した構造骨組の地震応答評価に関する研究 その2. 制振部材の実効変位に着目した解析モデルの検討, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2 分冊, pp.1013-1014, 1999
- 12) 秋山 宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999