

2011年東北地方太平洋沖地震における東京湾沿岸の免震構造物の挙動

半澤 徹也 中村 豊 長谷部 雅伸 岡田 敬一 猿田 正明 金子 美香 福喜多 輝
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Dynamic Behavior of Seismic Isolated Buildings on Tokyo Bay Area in the 2011 Tohoku-Pacific Earthquake

by Tetsuya Hanzawa, Yutaka Nakamura, Masanobu Hasebe, Okada Keiichi,
Masaaki Saruta, Kaneko Mika and Akira Fukukita

Abstract

The 2011 Tohoku-Pacific Earthquake that occurred on March 11, 2011 caused devastating damage to the northeast Pacific coast region. Three different types of seismic isolated buildings stand in the grounds of Shimizu Corporation's Institute of Technology in Tokyo. In addition, Shimizu Corporation and Tohoku University jointly built a test building for seismic isolation within the Sendai campus in Miyagi prefecture, which was near the epicenter of the 2011 Tohoku-Pacific Earthquake. The effects of applied seismic isolation methods were verified through the observed earthquake responses of the four seismic isolated buildings subjected to this earthquake. In each of the three seismic isolated buildings in the institute, the observed accelerations on the floors were reduced to about half compared to those on the ground. In the test seismic isolated building in Tohoku University, the observed accelerations on the roof were reduced to about one third compared to those in an adjacent conventional seismically designed building.

概 要

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の際に、免震建物で得られた観測記録を分析した。免震建物のタイプは、柱頭免震、塔頂免震、パーシャルフロート免震、基礎免震の4種類である。前3棟は当社技術研究所に、後1棟は震源により近い東北大学にある。何れの建物でも、建物内で観測された加速度は、地表あるいは隣接する耐震建物で同時に観測された加速度に比べて1/2から1/3に低減されていることが確認された。また、研究所内に建つ3棟については、首都圏における巨大地震を想定したシミュレーション解析を実施して、免震効果を検討した。

§ 1. はじめに

免震構造は、建物と地盤との間にアイソレータを設置して建物の固有振動数を長周期化し、更にダンパーによって高減衰化することで、地震時の応答の低減を図った構造形式である。主架構の耐力や変形性能に期待した耐震構造に比べ、主架構のみならず、内外装材の損傷や家具・設備機器の破損を低減し、建物の機能性の維持、財産の保全という観点からも、優れた構造形式であると認識されている。

一般的な免震構造は、建物の基礎レベルにアイソレータを設置した基礎免震であり、1995年兵庫県南部地震の際にもその効果が確認された。現在では、基礎免震の他に、柱頭部にアイソレータを設置した「柱頭免震」、居室部分を躯体から吊り下げた「塔頂免震」、水の浮力を利用した「パーシャルフロート免震」など

があり、東京都江東区にある清水建設(株)技術研究所には、これら各種免震建物が建設されている。しかし、これらの新しいタイプの免震構造では、稀および極稀な地震による観測記録は得られていない。

本論は、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の際に、研究所内の免震建物で観測された記録を分析したものである。併せて、仙台市内の基礎免震建物(東北大学との共同研究の免震試験建物)も対象とした。更に、首都圏で予想されている巨大地震に対して免震建物の挙動をシミュレーション解析し、その効果について検討した。

§ 2. 地震と観測記録の概要

2011年3月11日14時46分、宮城県沖を震源とするモーメントマグニチュード9.0の地震が発生した。

各地の震度は、宮城県栗原市で震度 7、宮城、福島、茨城、栃木で震度 6 強、岩手から千葉の 8 県で震度 6 弱、青森から静岡の 15 都県で震度 5 強であった。検討対象である東北大学の免震試験建物、江東区の技術研究所と震源の位置関係を図-1 に示す。免震実証建屋の GL-1m での観測記録から求めた計測震度は 5.5 (震度 6 弱)、技術研究所の GL-1m での地盤観測記録から求めた計測震度は 5.1 (震度 5 強) であった。

それぞれの地表で観測された加速度波形と加速度応答スペクトルを図-2 に示す。

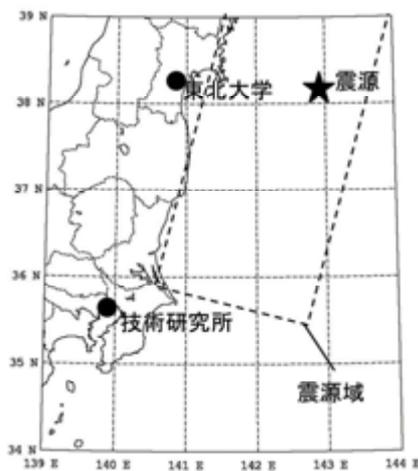


図-1 震源と観測点(東北大学、技術研究所)

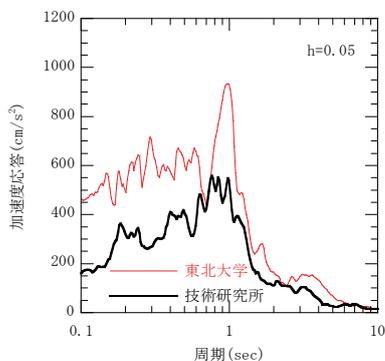
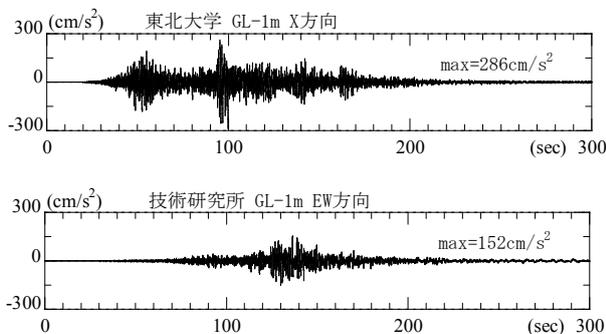


図-2 地表の加速度波形と応答スペクトル

§ 3. 建物の概要

3.1 技術研究所本館(柱頭免震)

技術研究所は第 3 種地盤に立地しており、工学的基盤は GL-39m にある。本館¹⁾は、建物 1 階をピロティとした地上 6 階建て(建築面積 1919m²)である。ピロティは 6 本の RC 独立柱からなり、その上部に鉛プラグ入り積層ゴムを設置して上部構造(S 造)を支持している。独立柱はそれぞれ 4 本の場所打ち鋼管コンクリート拡底杭に支持されている。本館の外観と架構を図-3 に示す。

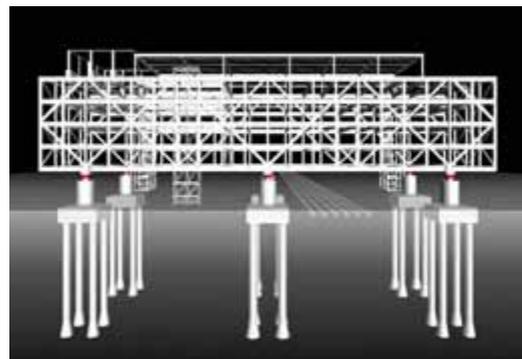


図-3 本館の外観と架構

3.2 安全安震館(塔頂免震)

安全安震館²⁾は RC 造コア部と S 造外周吊りフレームからなる地上 4 階建て(建築面積 9m²(1 階コア部))である。建物中央のコア部の頂部に天然系積層ゴムを設置し、その上部フレームから鋼製ロッドにより 3 層のオフィス部を吊り下げる塔頂免震構造である。積層ゴムは傾斜を付けた 2 段配置となっており、免震周期を調整すると共に、地震時はオフィス部が並進運動するように配慮されている。オフィス部とコア部の間にはオイルダンパーが配置されている。この構造は積層ゴムの傾斜による長周期化で、高い免震効果を実現できる。安全安震館の外観と架構を図-4 に示す。

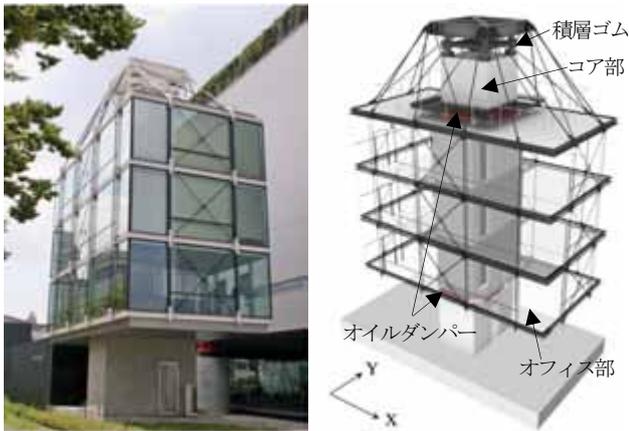


図-4 安全安震館の外観と架構

3.3 風洞実験棟(パーシャルフロート免震)

風洞実験棟³⁾は地下1階、地上2階のRC造(一部S造、建築面積952m²)である。免震ピット内は水で満たされ、建物重量の約1/2を浮力で支え、高減衰積層ゴムが残りの重量を支えている。通常免震構造に比べ免震装置の支持重量が小さいため、装置を小型化できる。貯水槽の側面には、地震によって発生する波のエネルギーを吸収する減衰装置(透水体)が設置されている。風洞実験棟の外観と免震機構を図-5に示す。

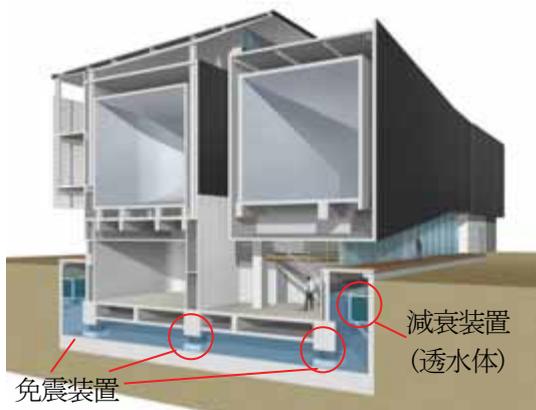


図-5 風洞実験棟の外観と免震機構

3.4 東北大学免震試験建物(基礎免震)

東北大学免震試験建物⁴⁾は、当社と東北大学の共同研究の一環として1986年に建設された日本初の免震実証試験建物である。RC造3階建ての同一規模の建物2棟からなり(建築面積60m²)、それぞれ直接基礎の耐震構造と高減衰積層ゴムで支持された免震構造となっている。建物の外観を図-6に示す。



図-6 東北大学免震試験建物

§ 4. 2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録

4.1 技術研究所本館(柱頭免震)

加速度の観測はピロティ独立柱の柱頭と柱脚、2階、4階、6階で行われている。また、免震層の相対変位を変位計で観測している。各階で得られた最大加速度を図-7に、Y方向の地表と6階の加速度波形を図-8に示す。X方向が長辺方向、Y方向が短辺方向である。加速度計は4階を除き各階とも対角位置2カ所に設置されているので、ここでは各階で平均している。地表での値に比べ、6階の加速度はX方向で52%、Y方向で55%に低減されている。加速度から求めた伝達関数振幅を図-9に示す。最初のピークは約0.5Hzで免震層の周期は約2秒と考えられる。アスペクト比の大きいY方向には3~4Hzにも増幅が見られる。これは建て屋のX軸周りの回転と考えられる。変位計から得られた免震層の軌跡を図-10に示す。最大振幅は約8cmで、装置の性能保証許容変形45cm以下である。次に、上下方向の最大加速度を図-11に示す。積層ゴムの上下で、加速度の顕著な増幅は見られなかった。それに比べ、ロングスパン(20m)の6階梁中央の加速度は他の観測値に比べて大きくなっている。

2階の対角位置に設置された加速度記録を積分して変位を求め、平均の並進量から求めた軌跡を図-12に示す。図にはY方向の変位から求めた鉛直軸周りの最大回転の発生を●点で示しており、回転量は1/4490

rad であった。Y 方向の計測点の間隔は 64m であり、回転による Y 方向の変位差は 1.4cm と小さい。2 階と 6 階の変位の軌跡を重ねて図-13 に示す。両者はほぼ重なっており、最大の層間変形角は X 方向で $1/6780\text{rad}$ 、Y 方向で $1/3477\text{rad}$ である。ピロティの独立柱の柱頭・柱脚の変位について図-14 に示す。対角位置にある 2 つの柱頭の変位はほぼ重なっており、X 方向の差は 1cm、Y 方向の差は 1.5cm 程度である。また、2 つの柱脚の変位はほぼ重なっており、X 方向の差は 0.9cm、Y 方向の差は 1.3cm である。

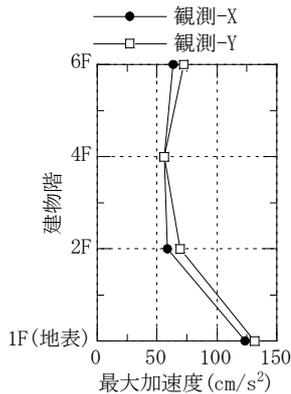


図-7 最大加速度分布

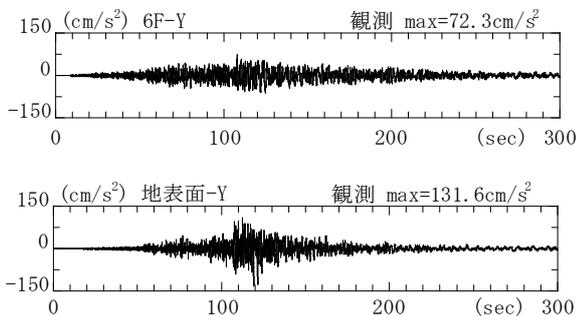


図-8 加速度波形

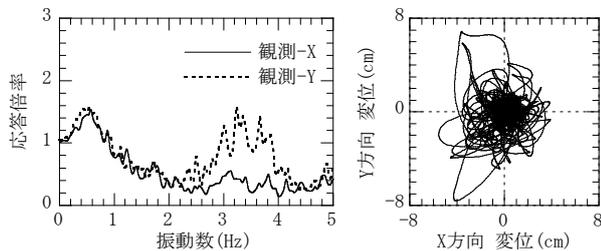


図-9 伝達関数振幅

図-10 免震層の軌跡

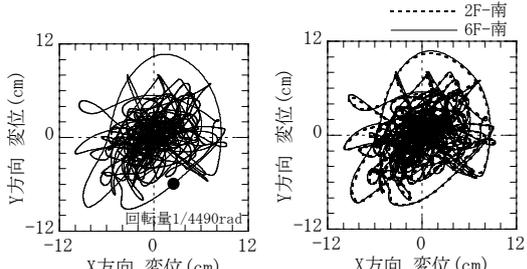


図-12 2階の軌跡

図-13 2階と6階の軌跡

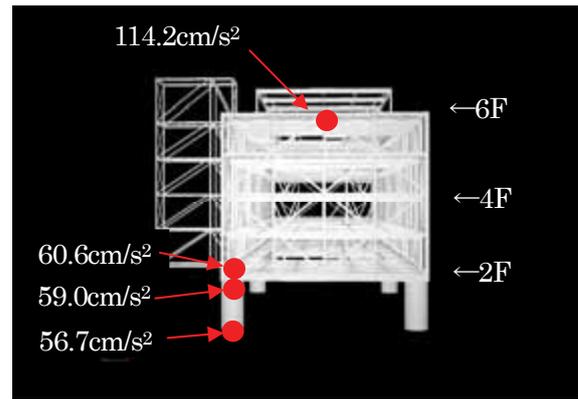


図-11 上下方向の最大加速度分布

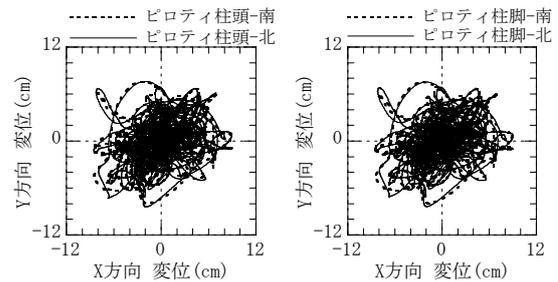


図-14 独立柱頭・柱脚の軌跡

4.2 安全安震館(塔頂免震)

加速度の観測は 1 階(基礎)レベル、コア頂部、免震フレームの中段と上段、オフィス屋上階、オフィス 2 階で行われている。また、2 階のオフィスとコアの相対変位を変位計で観測している。各階で得られた最大加速度を図-15 に、Y 方向の地表とオフィス 2 階の加速度波形を図-16 に示す。X 方向が長辺方向、Y 方向が短辺方向である。地表に比べ、オフィス 2 階の加速度は X 方向で 53%、Y 方向で 32% に低減されている。加速度波形から求めた伝達関数振幅を図-17 に示す。最初のピークは X 方向で 0.28Hz、Y 方向で 0.29Hz で免震層の周期はそれぞれ 3.6 秒と 3.4 秒である。変位計から得られたオフィス 2 階とコア部 2 階の相対変位の軌跡を図-18 に示す。最大振幅は約 8cm である。

次に、上下方向の最大加速度を図-19 に示す。コア部および積層ゴムの上下では、加速度の顕著な増幅は見られなかった。それに比べ、頂部から吊られたオフィス部は、屋上階から 2 階まで、全体的に加速度が大きくなっている。

4.3 風洞実験棟(パーシャルフロート免震)

加速度の観測は掘割底面レベル、地下1階、2階、屋上階で行われている。また、免震層の変位を変位計で観測している。各階で得られた最大加速度を図-20に、Y方向の地表・地下1階の加速度波形を図-21に示す。X方向が長辺方向、Y方向が短辺方向である。地表での値に比べ、居住階である2階の加速度はX方向で73%、Y方向で46%に低減されている。屋上階のY方向で最大加速度が大きくなっているのは、観測部位がRC造躯体から切り替わったS造部材であり、その部分で増幅があったためと考えられる。加速度から求めた伝達関数振幅を図-22に示す。X方向およびY方向の一次固有振動数は0.5Hz(周期2秒)である。加速度の積分から得られた免震層の変位の軌跡を図-23に示す。最大振幅は8cmで、性能保証許容変形46~48cm以下である。

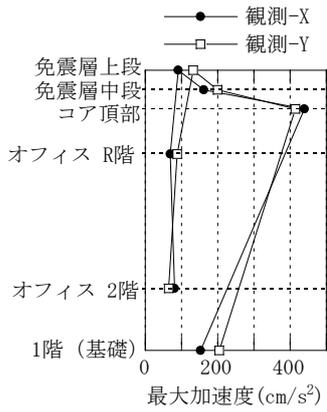


図-15 最大加速度分布

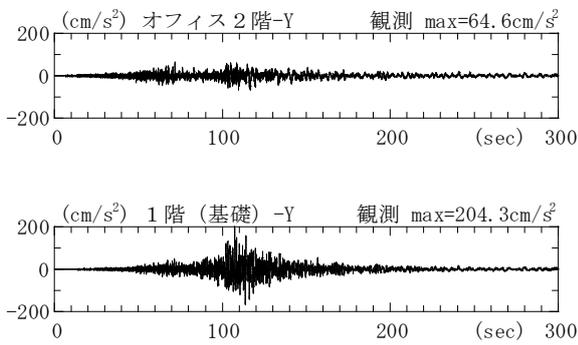


図-16 加速度波形

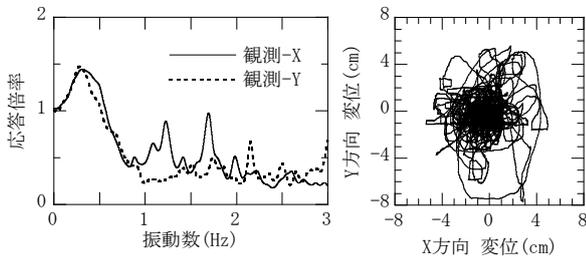


図-17 伝達関数振幅

図-18 相対変位(2F)

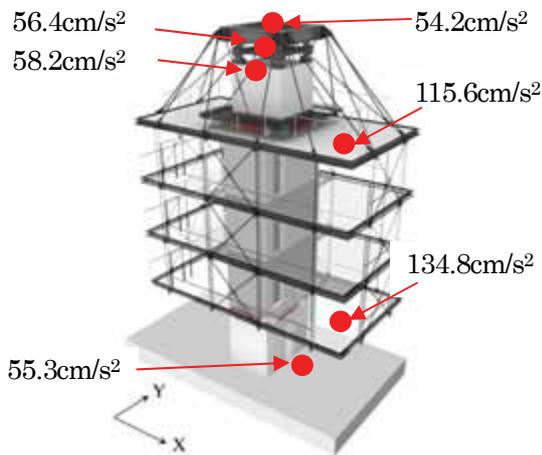


図-19 上下方向の最大加速度分布

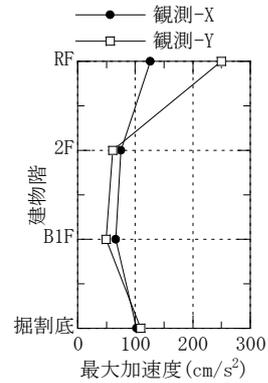


図-20 最大加速度分布

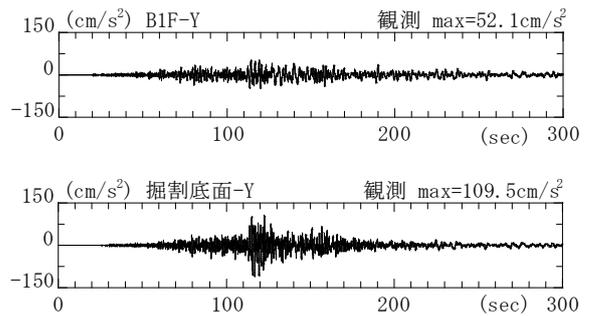


図-21 加速度波形

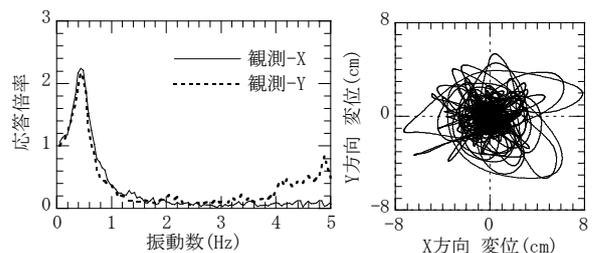


図-22 伝達関数振幅

図-23 相対変位(2F)

4.4 東北大学免震試験建物(基礎免震)

加速度の観測は基礎レベル、1階、3階(免震建物のみ)、屋上階で行われている。また、免震層の変位を変位計で観測している。各階で得られた最大加速度を耐震構造と比較して図-24に、X方向の地表・屋上階の加速度波形を耐震構造と比較して図-25に示す。2棟が横並びになる方向がY方向である。基礎での値に比べ、居住階である3階の加速度はX方向で94%、Y方向で75%と大きくは低減されていない。本建物は初期の免震建物であり、免震構造としては比較的周期が短いためであると考えられる。ただし、隣接する耐震構建造物と比較すると、屋上階の加速度はX方向で49%、Y方向で30%と大きく低減されている。加速度波形から求めた伝達関数振幅を耐震構造と比較して図-26に示す。免震構造の1次固有振動数はX方向で0.6Hz、免震周期は約1.7秒と考えられる。免震層の変位の軌跡を図-27に示す。最大振幅は約12cmで、性能保証許容変形36cm以下である。

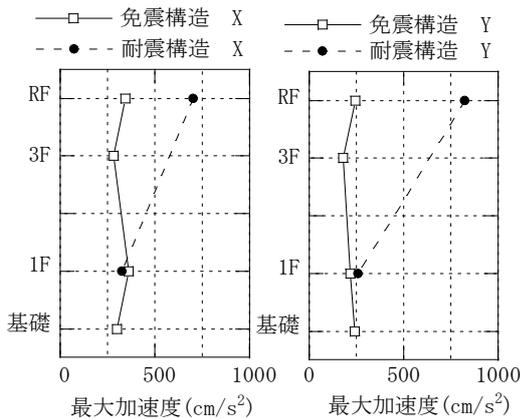


図-24 最大加速度分布

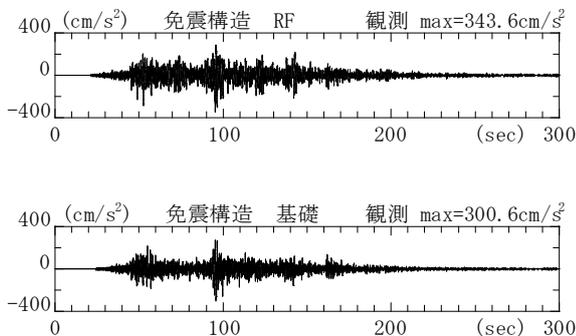


図-25(a) 加速度波形

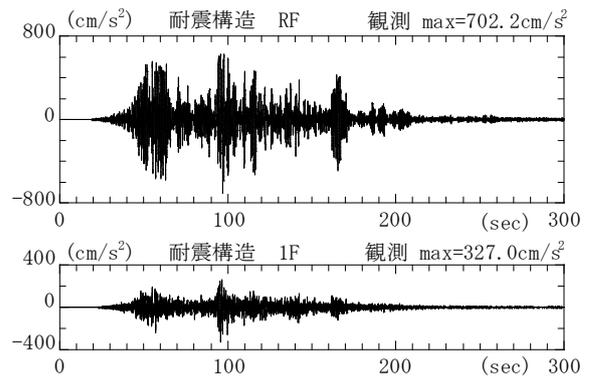


図-25(b) 加速度波形

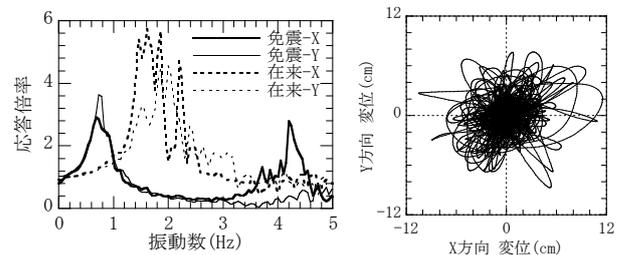


図-26 伝達関数振幅

図-27 相対変位(2F)

§ 5. シミュレーション解析

5.1 技術研究所本館(柱頭免震)

本節では観測記録を用いたシミュレーションを行う。本館の解析モデルの概要を図-28に示す。モデルは7質点の等価せん断ばねモデルであり、中間階の免震層においては6台の鉛プラグ入り積層ゴム^{5),6)}を各位置に剛な梁要素で結んで配置し、上部建物の並進と回転を考慮している。減衰は建て屋の1次固有振動数に対してX方向1%、Y方向8%の初期剛性比例型である。解析の結果を観測記録と比較して、最大加速度の分布を図-29に、6階の長辺(X)方向および短辺(Y)方向の加速度波形を図-30にそれぞれ示す。解析は本震の観測記録をよく再現している。また、加速度波形から求めた1階(地表)に対する6階の伝達関数を図-31に示す。応答倍率がピークとなる振動数は、Y方向の3~4Hzの増幅を含め、概ね観測記録と整合している。

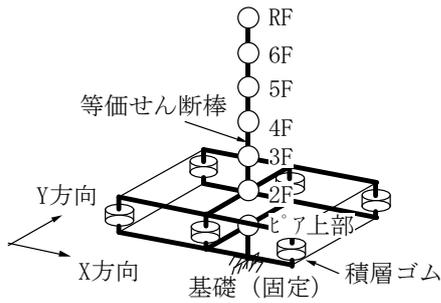


図-28 解析モデル

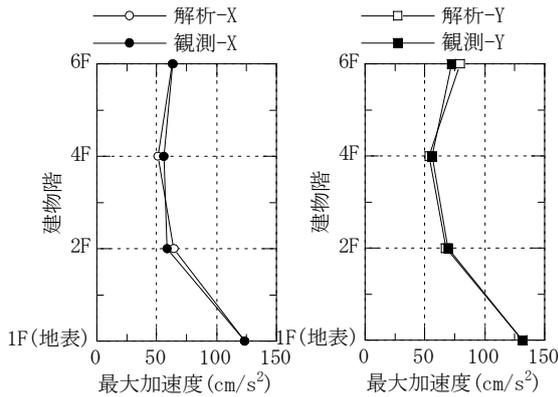


図-29 最大加速度分布の比較

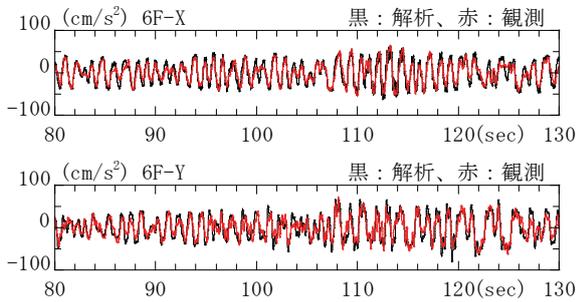


図-30 加速度波形(6階)の比較

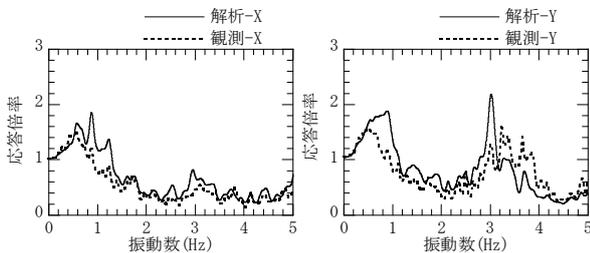


図-31 6階/基礎の伝達関数振幅の比較

5.2 安全安震館(塔頂免震)

安全安震館の解析モデルの概要を図-32に示す。主架構は梁要素により構成されている弾性の基礎固定モデルで、天然系積層ゴムは線形要素、オイルダンパーは減衰係数を速度に対してバイリニア型でモデル化した。構造減衰はコア部の1次固有振動数に対して0.5%の初期剛性比例型である。解析の結果を観測記録と比較して、最大加速度の分布を図-33に、オフィス部2階の長辺(X)方向および短辺(Y)方向の加速度波形を図-34に示す。解析はX方向の2階を除いて、本震の最大加速度の観測記録をよく再現している。X方向2階の加速度波形を拡大して見ると、最大値は13Hz程度の高周波成分で発生している。また、加速度波形から求めた1階に対するコア頂部と2階の伝達関数を図-35に示す。1次のピークは概ね観測記録と整合しているが、1~2Hzの成分は表せていない。

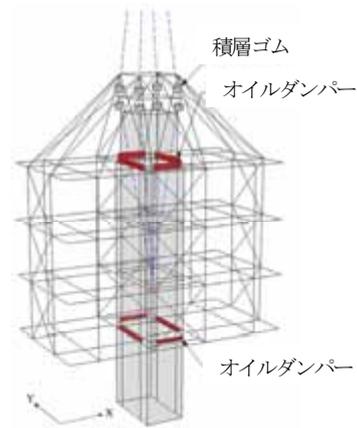


図-32 解析モデル

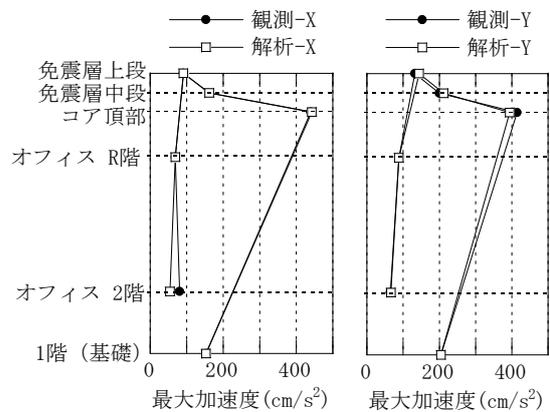


図-33 最大加速度分布の比較

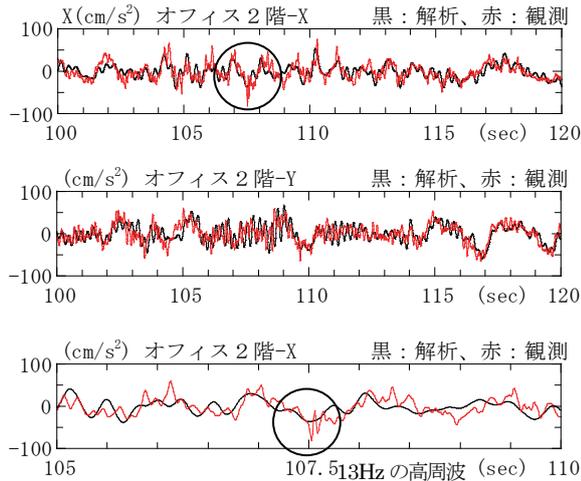


図-34 加速度波形(コア頂部と2階)の比較

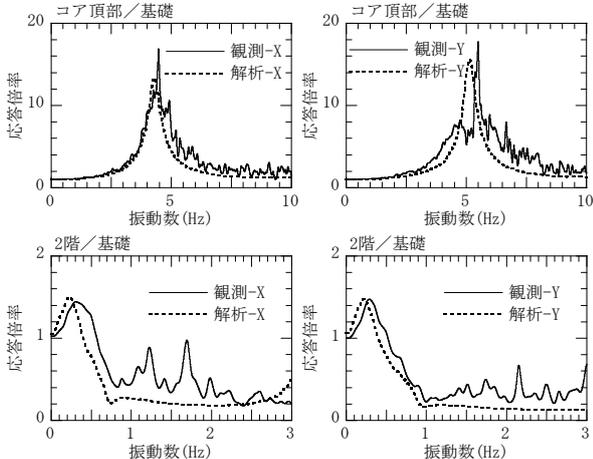


図-35 コア頂部(上)および2階(下)／基礎の伝達関数

5.3 風洞実験棟(パーシャルフロート免震)

風洞実験棟の解析モデルは、図-36 に示すように、掘割内の水の挙動と透水体によるエネルギー吸収効果を考慮できる数値モデルを用いた。本モデルの特徴は、地震動による建物応答と掘割内の水の動きの相互作用を考慮することができる点にある。高減衰積層ゴムの剛性については等価線形化した値を設定している。解析の結果を観測記録と比較して、最大加速度の分布を図-37 に、地下1階における長辺(X)、短辺(Y)方向の加速度波形を図-38 に、掘割底面に対する地下1階の伝達関数を図-39 に示す。伝達関数の応答倍率は、解析が観測に比べてやや大きくなっているが、概ね観測記録と良好な一致が見られる。

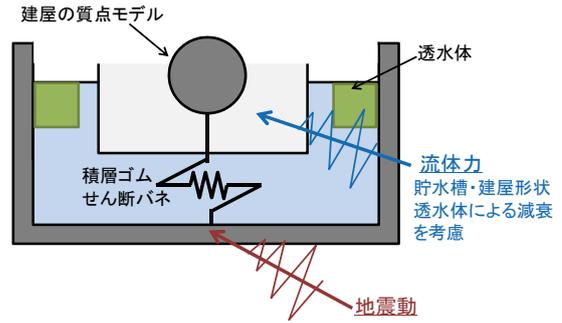


図-36 解析モデル

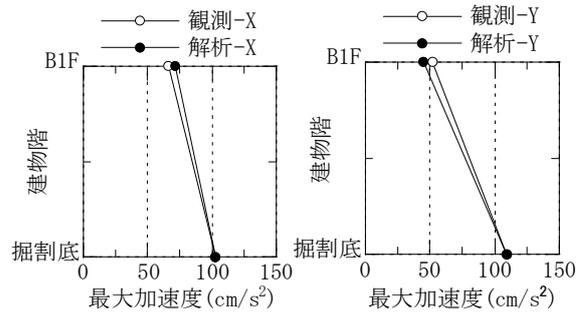


図-37 最大加速度分布の比較

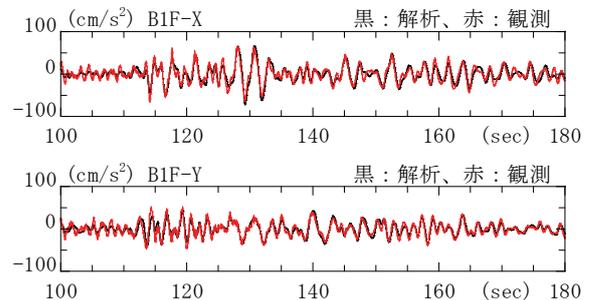


図-38 加速度波形(地下1階)の比較

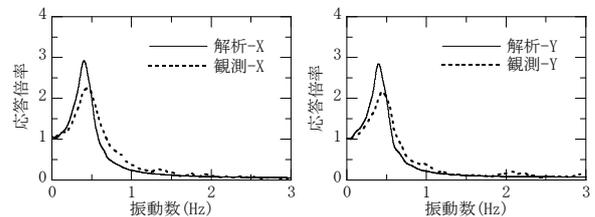


図-39 コア頂部および2階／基礎の伝達関数の比較

§ 6. 首都圏の巨大地震に対する挙動予測

本節では、首都圏における巨大地震を想定した入力地震動を設定し、前節の解析モデルを用いたシミュレーション解析を行い、3棟の免震建物の挙動について検討する。

6.1 想定地震

首都圏に大きな揺れをもたらすと考えられる地震の内、**図-40**に示すように、相模トラフから沈み込むプレート上面を震源とするプレート境界型地震(関東地震)と首都直下地震(東京湾北部地震)を対象にした。それぞれの地震について、技術研究所の敷地における工学的基盤波^{8),9)}から地表面波を作成し、建物モデルへの入力とした。地表面で推定された加速度波形と加速度応答スペクトルを**図-41**、**図-42**に示す。

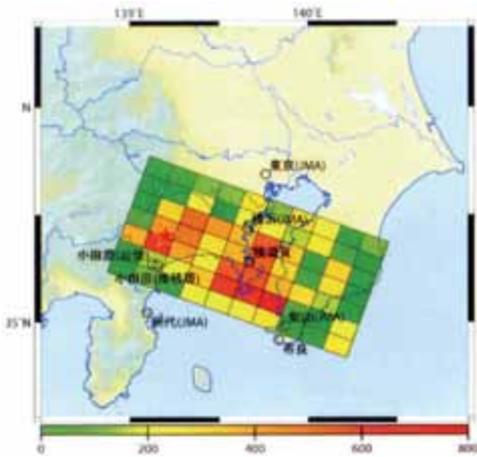


図-40 想定断面(上: 関東地震, 下: 東京湾北部地震)
(文献8), 9)より引用、加筆)

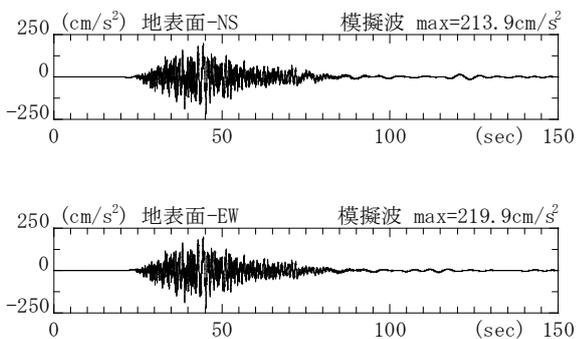


図-41(a) 加速度波形(関東地震)

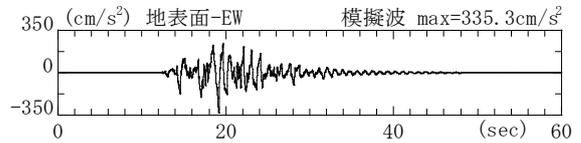
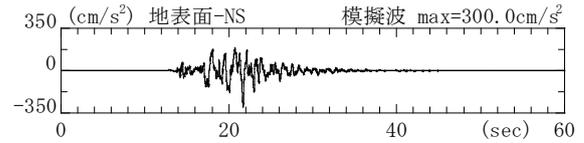


図-41(b) 加速度波形(東京湾北部地震)

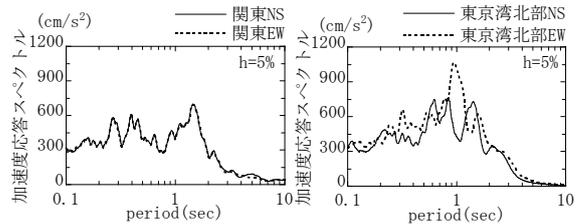


図-42 加速度応答スペクトル

6.2 技術研究所本館(柱頭免震)

技術研究所本館の解析による最大加速度の分布を**図-43**に、Y方向の6階の加速度波形を**図-44**に示す。いずれの地震に対しても、上部構造の最大加速度は地表に比べて1/4~1/3程度に低減している。また、地表に対する6階の伝達関数を**図-45**に示す。免震層の変位は、関東地震で長辺(X)方向19cm、短辺(Y)方向16cm、東京湾北部地震で長辺(X)方向24cm、短辺(Y)方向31cmとなっている。東北地方太平洋沖地震の場合より大きく変形したために、免震装置の等価剛性が小さくなり、伝達関数に見られる免震周期も3~5秒程度に長周期化している。このため、東北地方太平洋沖地震の場合より最大加速度の低減率が大きくなっている。

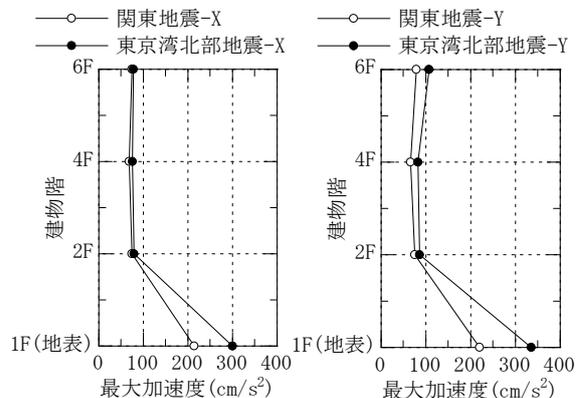


図-43 最大加速度分布

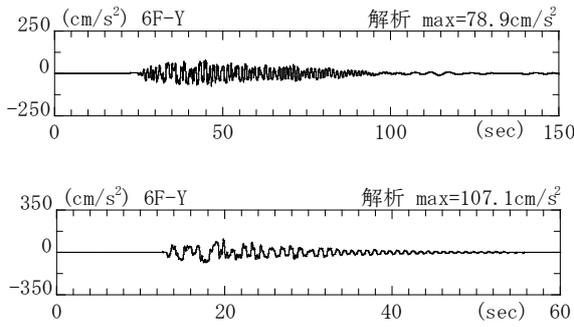


図-44 6階の加速度波形(上：関東地震、
下：東京湾北部地震)

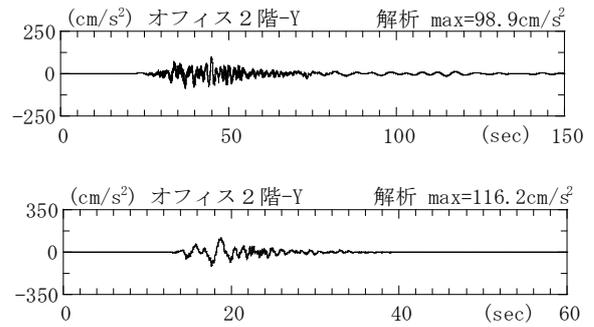


図-47 6階の加速度波形(上：関東地震、
下：東京湾北部地震)

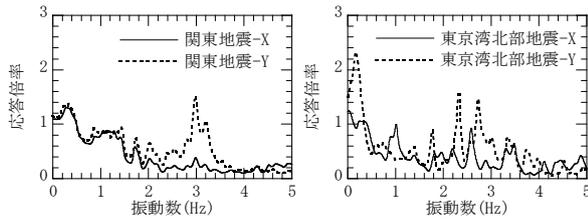


図-45 伝達関数振幅

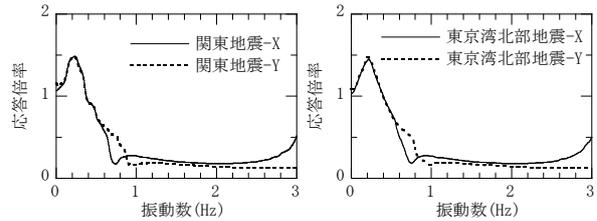


図-48 伝達関数振幅

6.3 安全安震館(塔頂免震)

安全安震館の解析による最大加速度の分布を図-46に、Y方向の2階の加速度波形を図-47に示す。いずれの地震に対しても、上部構造の最大加速度は地表に比べて1/2~1/3程度に低減している。また、地表に対する6階の伝達関数を図-48に示す。オフィス2階とコア部の相対変位は、関東地震で長辺(X)方向16.9cm、短辺(Y)方向15.5cm、東京湾北部地震で長辺(X)方向21.6cm、短辺(Y)方向24.7cmとなっている。東北地方太平洋沖地震の場合より応答は大きい、天然系積層ゴムはほぼ線形の特性を持っており、伝達関数には固有周期の変動はない。

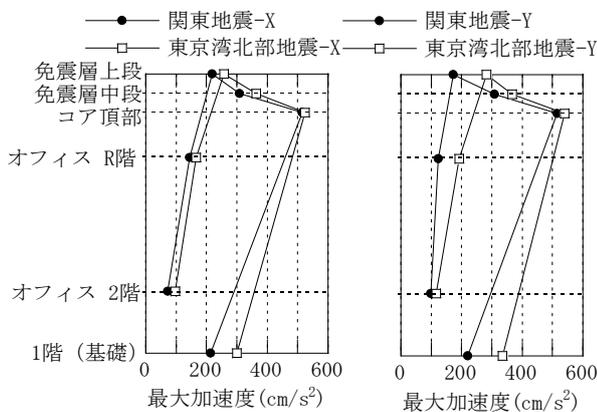


図-46 最大加速度分布

6.4 風洞実験棟(パーシャルフロート免震)

風洞実験棟の解析による最大加速度の分布を図-49に、Y方向の地下1階の加速度波形を図-50に示す。いずれのケースも、掘割底面(地盤)に対して加速度が約1/3に低減されている。図-51に掘割底面に対する地下1階の伝達関数を示す。免震周期は約3秒(0.3Hz)である。免震層の変位は、関東地震で長辺(X)方向18cm、短辺(Y)方向16cm、東京湾北部地震で長辺(X)方向37cm、短辺(Y)方向28cmとなっており、東北地方太平洋沖地震の場合より大きく変形したために、免震装置の等価剛性が小さくなり、免震周期も長周期化している。このため、本館の場合と同様に、東北地方太平洋沖地震に比べて最大加速度の低減率が大きい。

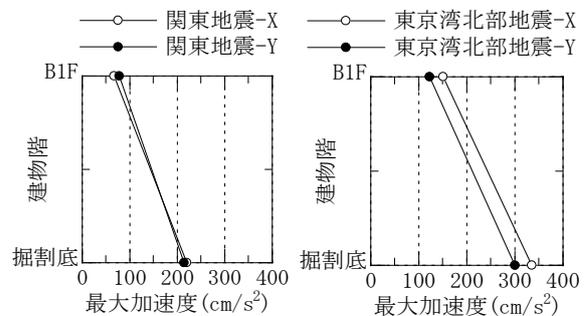


図-49 最大加速度分布

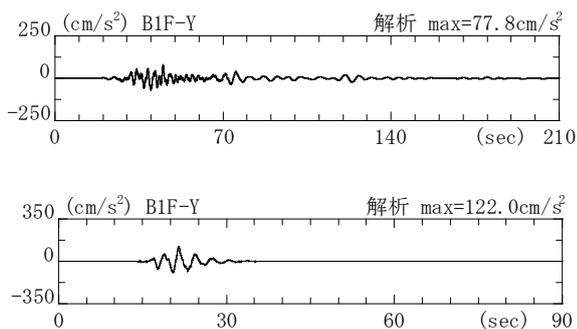


図-50 地下1階の加速度波形(上：関東地震、
下：東京湾北部地震)

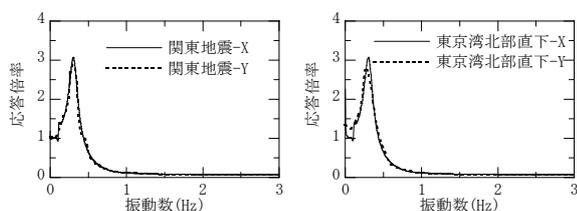


図-51 伝達関数振幅

§ 7. おわりに

本論では、東北地方太平洋沖地震において、東京都

江東区の清水建設技術研究所の敷地内にある複数の免震建物および仙台市に建つ免震試験建物で得られた観測記録により、これらの免震建物の挙動を分析した。

免震建物のタイプは柱頭免震、塔頂免震、パーシャルフロート免震、基礎免震である。何れの建物も、建物内で観測された水平加速度は、地表あるいは隣接する耐震建物の加速度に比べて 1/2 から 1/3 に低減されていた。

また、上下方向の応答については、積層ゴムの上下で特段の加速度の増加は見られなかったが、柱頭免震建物ではロングスパンの梁での増幅が、塔頂免震では頂部から吊られたオフィス部全体での増幅が見られた。

更に、首都圏での2つの巨大地震を想定し、これらの免震建物の挙動を推定した。鉛プラグ入り積層ゴムおよび高減衰積層ゴムを有する免震建物では、変位の増大により等価剛性が低下し、最大加速度がより低減する結果となった。

謝辞

本検討にあたり、関東地震および東京湾北部地震の工学的基盤波に対する地表面波は、本社建築事業本部木村匠主査に作成して頂きました。末筆ながら感謝申し上げます。

<参考文献>

- 1) Y. Nakamura, T. Saito, K. Tamura: A seismic isolated long-span overhanging urban infrastructure, *Journal of Disaster Research*, Vol.4, No 3, pp.192-198, 2009.
- 2) Y. Nakamura, M. Saruta, A. Wada, T. Takeuchi, S. Hikone, T. Takahashi: Development of the core-suspended isolation system, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.40, pp.429-447, 2011.
- 3) M. Saruta, T. Ohyama, T. Nozu, M. Hasebe, T. Hori, H. Tsuchiya, N. Murota: Application of a partially-floating seismic isolation system, *10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations Control of Structures*, Istanbul, Turkey, 2007.
- 4) M. Saruta, H. Watanabe, M. Izumi: Proof test of base-isolated building using high damping rubber bearing, *Trans. of the 10th International Conference on SMiRT*, Vol.K2, pp.631-636, 1989.
- 5) 菊地 優：鉛プラグ入り積層ゴムの復元力モデルに関する研究，日本建築学会大会，1997年9月
- 6) 菊地 優，北村佳久，太田雅己：鉛プラグ入り積層ゴムの復元力特性に関する一考察，日本建築学会大会，1999年9月
- 7) 長谷部雅伸・大山巧・野津剛：パーシャルフロート免震構造に関する研究 その5 掘割側面に設置した透水体による減衰性能の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)、pp.361-362、2004.
- 8) 松島信一、渡辺基史、壇一男、佐藤俊明、宮腰淳一：1923年関東地震による首都圏での広域広帯域強震動予測、日本建築学会技術報告集、第13巻、第26号、pp.447-450、2007年12月。
- 9) 中央防災会議：首都直下地震対策専門調査会(第12回)資料、平成16年11月17日。
<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/shutochokka/12/index.html>
(2011年4月20日現在)