

2003年十勝沖地震による釧路市免震建物の地震時挙動



藤堂 正喜^{*1}

松本喜代隆^{*1}

館野 孝信^{*2}

千葉 脩^{*1}

概 要

2003年十勝沖地震時に地震記録が得られた、釧路市に建つ免震建物の挙動について検討した。建物は地上7階地下1階のSRC造ラーメン構造である。当建物の免震装置としては、積層ゴム、鋼棒ダンパー、鉛ダンパーが採用されている。地震観測は免震層を挟む地下階と1階で実施している。結果を以下にまとめる。

- 1) 地階記録の最大速度は約30cm/sであり、作用した地震動は耐震設計におけるレベル1と2の中間の強さであったと考えられる。これは免震建築が建設されるようになって以後、最大級の地震動である。
- 2) 観測記録の1階の最大加速度は地階に対して82% (X) と73% (Y) であり、積分して求めた免震層の最大層間変形は、14.0cm (X) と11.3cm (Y) であった。
- 3) 観測記録に対するシミュレーション解析では、ダンパーに2軸連成を考慮した建物モデルにX-Y同時入力して行った。その結果、免震層の応答変形は観測記録と良く一致し、ダンパーの塑性度は特に大きな量ではなかった。
- 4) シミュレーション解析から、本建物内の震度階級がV弱であり気象庁発表の釧路市のV強よりも小さかったこと、上部構造の層間変形が非常に小さかったと推定した。

Behavior of A Base-isolated Building in Kushiro during The Tokachi-oki Earthquake in 2003

Masanobu TOHDO^{*1}

Kiyotaka MATSUMOTO^{*1}

Takanobu TATENO^{*2}

Osamu CHIBA^{*1}

A great earthquake named as the Tokachi-oki in 2003 hit a base-isolated building in Kushiro. The building is a 7-storey frame structure composed by SRC and has an isolation system which consists of laminated rubbers, steel dampers and lead dampers. An earthquake observation has been performed in this building, seismometers of which are installed at basement floor and 1st floor. We investigated the behavior of the building during the earthquake based on the observed records and simulation analyses. The results are summarized in the followings.

- 1) The intensity of earthquake ground motions observed at the basement with the peak velocity of about 30cm/s seems to be an intermediate level between the Level-1 and -2 input motions for seismic designs and the strongest of ground motions exciting isolated buildings since the beginning of construction.
- 2) The peak accelerations observed at the 1st floor were reduced to 82% and 73% in X and Y directions than those at the basement. The maximum story drifts of the isolation system which means the relative displacement between the basement and 1st floor were evaluated to be 14.0cm (X) and 11.3cm (Y) using displacements obtained by an integration of accelerations.
- 3) Simulation analyses against observed results described above were performed applying a structural model with dampers considering bi-axial effects and X-Y bi-directional input motions. The simulated wave forms of isolation story drifts agreed well with the observed ones and it was recognized that the degree of inelasticity of dampers was not so large.
- 4) As the results of simulation analyses it was estimated that while the announcement by JMA was 5-High in Kushiro, the shaking level of super-structure was 5-Low as the seismic intensity scale and storey drift was so small.

^{*1} 技術研究所 ^{*2} 建築技術営業部

^{*1} Technical Research Institute ^{*2} Engineering Business Department

2003年十勝沖地震による釧路市免震建物の地震時挙動

藤堂 正喜*1

松本喜代隆*1

舘野 孝信*2

千葉 脩*1

1. はじめに

2003年9月26日に十勝沖地震が起こった（マグニチュード7.8、最大震度6弱）。この地震については、苫小牧のオイルタンク火災と関連して長周期地震動の話題があがったが、建築構造に関する重要な経験は、この地域の免震構造建築物が、免震建築が建設されるようになって以後、最大級の地震動を受けたことである。本報告は、建設後に地震観測を行ってきた免震構造である釧路商工信用組合本店の十勝沖地震時挙動について検討したものである¹⁻³⁾。

2. 建物概要

対象の建物は、釧路市の中心街に位置する事務所である。建物概要を表-1に示す。平面図を図-1に、長辺方向

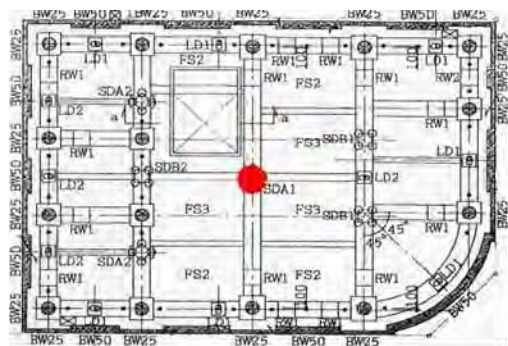


図-1 平面図（●観測点）

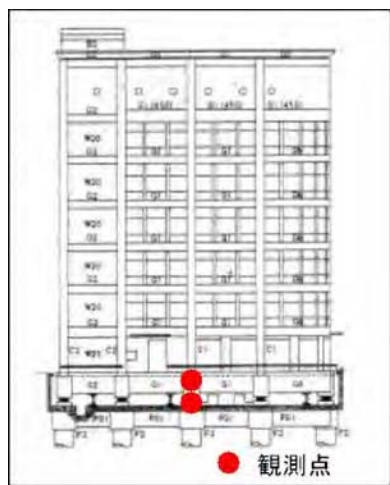


図-2 軸組図（X方向）

表-1 建物概要

用途	事務所
階数	地上7階地下1階
構造	SRC造(下部RC)
基礎構造	場所打ち杭
延床面積	約3894m ²
アイソレーター	天然ゴム系積層ゴム15基
ダンパー	鉛ダンパー11基 鋼棒ダンパー6基

（X方向）の軸組図を図-2に示す。骨組みは耐震壁を有するSRC造ラーメン構造であり、杭基礎は主に砂層からなる表層地盤下GL-45mの泥岩層に支持されている。免震装置はいわゆるRSLシステム（Rubber-Steel-Lead）である。

地震観測は、免震層である地下階床上と1階床下のほぼ中央に加速度計を設置して実施している。

3. 竣工時の静加力実験

1999年の竣工時に、本免震建築の復元力特性等の確認のために静加力実験および常時微動計測を実施した²⁾。

静加力実験は、100tfジャッキ32台を残留変形復元用の反力壁に設置して、振れが生じないように制御しながら実施した。加力は小振幅から最大5cmの変位まで繰り返した。

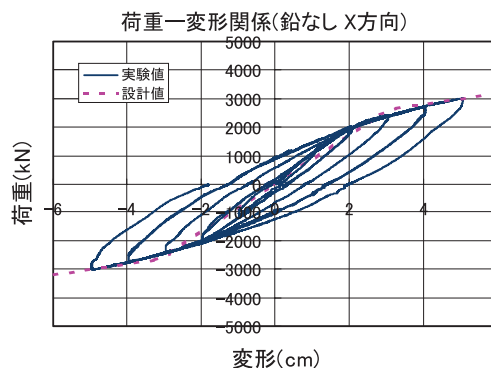


図-3 静加力による荷重－変形関係（鉛ダンパーをはずした状態）

*1 技術研究所

*2 建築技術営業部

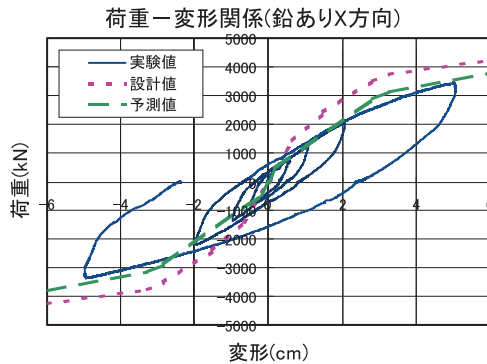


図-4 静加力による荷重－変形関係
(全免震部材を設置した状態)

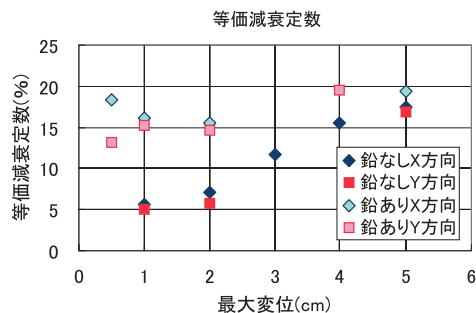


図-5 静加力実験による等価粘性減衰定数

まず鉛ダンパーをはずした積層ゴム＋鋼棒ダンパーの状態で加力した。荷重－変形関係の結果を図-3に示す。次に、鉛ダンパーも設置した実際の状態で加力した。結果を図-4に示す。

構造設計に適用した各免震装置の復元力特性から求めた免震層の骨格曲線（設計値）を実験結果に併記して図-3と図-4に示す。積層ゴム＋鋼棒ダンパーの場合、鋼棒降伏後の変形領域も設計値は実験結果と良く一致している。図-4の実際の状態の場合、降伏後の設計値による骨格曲線は、実験結果を上回っている。これは設計に適用した鉛ダンパーの復元力が地震応答解析を対象とした速度依存性を考慮したものであるのに対して、実験が静的であることによる。そこで、鉛ダンパーの復元力特性を静的実験に対応するように修正して求めた骨格曲線（予測値）を図-4に併記する。これと実験値は良く対応している。

静加力の繰り返し実験によって得られた図-3と図-4の履歴ループ面積から等価減衰定数 h_{eq} を求めた結果を図-5に示す。鉛ダンパーをはずした状態の h_{eq} は、小振幅でも何らかの摩擦等による影響と考えられる5%程度あり、鋼棒の降伏後（降伏変位約3cm）徐々に増加して変位4cm程度以上では15%に達している。一方、鉛ダンパーも設置した実際の状態での h_{eq} は、鉛ダンパーの強非線形性のために小変位でも15%程度の減衰量があり、小地震から効力を発揮することが分かる。

4. 2003年十勝沖による地震観測結果

本建物は竣工時から地震観測を実施している。

2003年十勝沖地震時にも貴重な記録が観測できた。

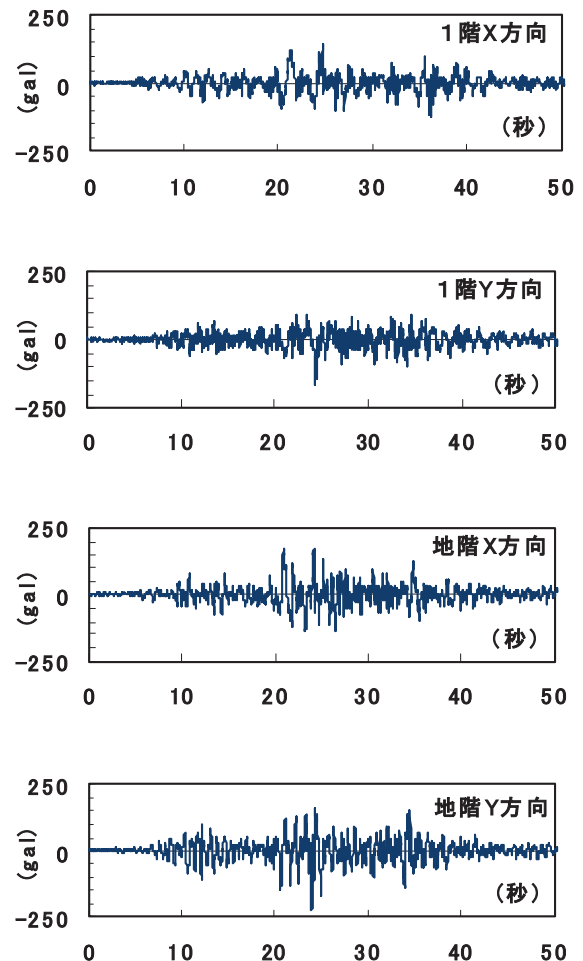


図-6 2003年十勝沖地震で観測した加速度記録

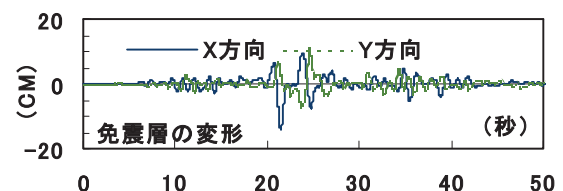


図-7 観測記録による免震層の層間変形波形

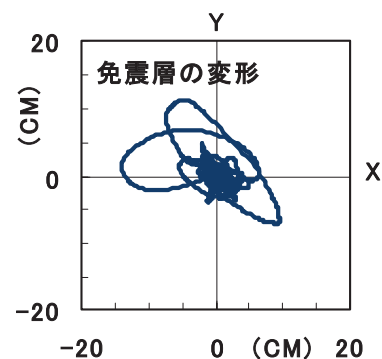


図-8 観測記録による免震層の奇跡

免震層を挟む、地下階と1階における観測加速度波形を図-6に示す。これらの最大加速度は次のとおりである。

1階： 141gal (X)、162gal (Y)

地階： 173gal (X)、222gal (Y)

地階に対する1階最大加速度の比率は、82% (X) と73% (Y) である。なお地階記録の最大速度は、33cm/s (X) と28cm/s (Y) である。

免震層の変形レベルをみるために、加速度記録をローカット振動数0.1Hzでローカットした積分から変位波形を求めた後に、1階と地階の変位の差分によって免震層の層間変形を算出した。その層間変形波形を図-7に、変形軌跡を図-8に示す。大きな変形は、波形の20秒ぐらいから2回程度生じている。X方向より反時計回り約45度の方向が北なので、図-8から本建物の免震層は東西方向に大きく変形したことになる。

免震層の最大変形は次のとおりである。

14.0cm (X)、11.3cm (Y)

ベクトル最大値はほぼX方向の14.1cmである。

ここで本建物が受けた地震動の強さをみておく。本建物の比較的近隣にKnet (HKD077) が設置されている。最大速度は35cm/s (NS) と40cm/s (EW) である。この本地震による敷地周辺における自由地盤の地震動に相当するKnet記録による応答スペクトルpSvを地階記録とともに図-9に示す。pSvが約80cm/sである周期1秒程度以上では両者は同等である。1秒以下の差には相互作用効果の影響が考えられる。これらから本建物に作用した地震動レベルは、設計における使用性検証のレベル1と安全性検証のレベル2との中間の強さであったと考えられる。

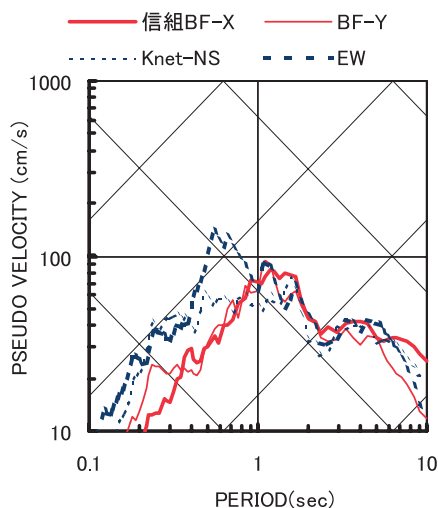


図-9 本建物地階記録とKnet記録による
応答スペクトル (h=5%)

5. シミュレーション解析

上記、十勝沖地震による対象免震建物の挙動を詳細に把握するために、シミュレーション解析を実施した。

解析モデルの上部構造は、設計の際と同じ数値によるせん断系多質点モデルである。免震層については、設計時のモデル³⁾と異なり、2軸連成⁴⁾を考慮できるように鋼棒ダンパーと鉛ダンパーのX-Y軸平面における降伏曲

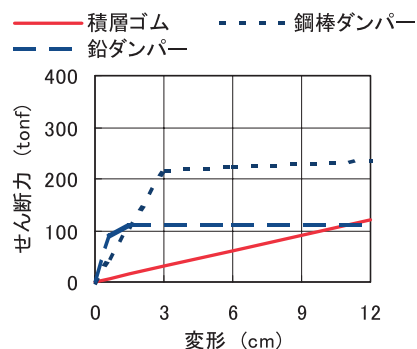


図-10 免震装置の復元力特性 (骨格曲線)

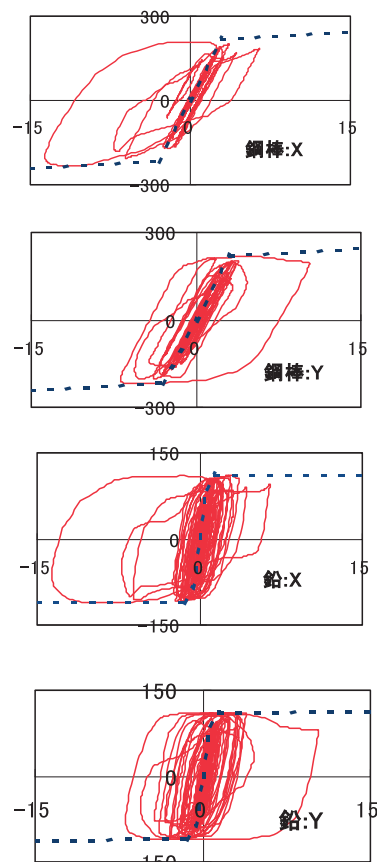


図-11 シミュレーションによる鋼棒・鉛
ダンパーの復元力-変形関係

面が等方性の円となるMSSモデル (Multi-shear spring) を採用した。従って、地震応答解析は地下階のX・Y方向観測記録を同時入力する、X-Y連成解析である。積層ゴムを含む免震装置の骨格曲線を図-10に示す。鋼棒・鉛ダンパーは1軸のみに加力された状態での関係である。履歴特性は、鋼棒ダンパーがNormal bi-linear、鉛ダンパーがNormal Tri-linearである。

地震応答解析結果から、鋼棒・鉛ダンパーについてX軸とY軸それぞれでみた場合の復元力-変形の履歴ループを図-11に示す。図-10の骨格曲線を破線で併記する。2軸連成の影響は、鋼棒ダンパーのX軸正側最大変形、鉛ダンパーの正側最大変形付近によく表れている。X方向の絶対変形が最大の-14cm付近をみると、復元力が1

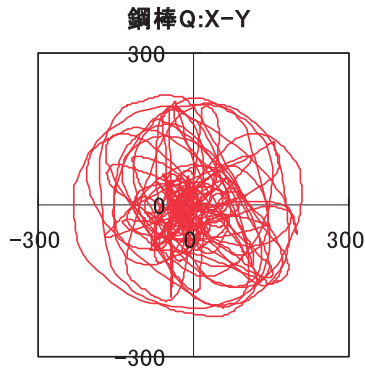


図-12 鋼棒ダンパーのX-Y平面復元力軌跡

表-2 ダンパーの塑性度

ダンパー	方向	最大塑性率	累積塑性変形倍率
鋼棒	X軸	4.5	20
	Y軸	3.4	18
鉛	X軸	20.4	274
	Y軸	15.5	307

軸加力状態の骨格曲線よりも下回っていることから分かるように、Y方向応答の影響によってベクトル反力が降伏曲面に達していることから、X軸方向の復元力は骨格曲線を下回っている。このことは、図-12に示す、降伏曲面が円となる鋼棒ダンパーのX-Y平面における復元力の軌跡から認めることができる。これらの2軸連成の関係は応答に影響している。

ダンパーの塑性度をみるために、シミュレーション解析結果から最大塑性率と累積塑性変形倍率を求めた。これらの量は図-11のX軸とY軸の履歴ループから定めることとし、基準変形は鋼棒ダンパーと鉛ダンパーそれぞれの1軸骨格曲線の降伏変形と第1折れ点変形とした。これらは、2軸連成として定めていることから累積塑性変形の定義に合致する変形域を厳密に定めることが困難なので、ここでは履歴における接線剛性が初期剛性の50%以下となる応答変形域から累積塑性変形を算定した。結果を表-2に示す。この結果から最大塑性率での等価繰返し回数を求めると、鋼棒ダンパーは1.4回と1.9回、鉛ダンパーは3.5回と5.3回であり、塑性度として大きな量ではないことが分かる。

シミュレーション結果と観測記録を比較する。図-13はシミュレーションによる免震層の層間変形軌跡である。図-8と比較すると、観測記録のX軸正方向でピーク変形となるところで差がみられる(やや位相ずれがある)が、それ以外は良く対応している。免震層の層間変形の時刻歴波形を比較して図-14に示す。軌跡で述べたようにX軸正方向の24秒付近でやや差があるものの、絶対最大変形である21.5秒の-14cm付近はもとより残留変形とも関係する後続のやや小さな応答の時刻における波形など全体に両者は良く合っているといえる。

免震層をはさんで上部構造に当たる1階のフーリエスペクトルを図-15に示す。2Hz以下の免震建物の卓越振

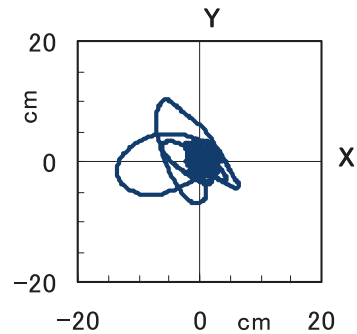


図-13 シミュレーションによる免震層の軌跡

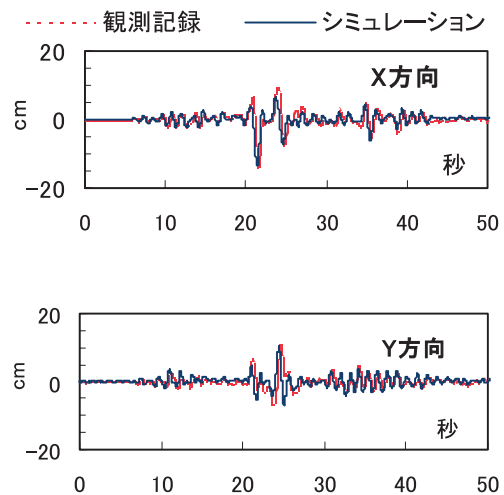


図-14 観測記録とシミュレーションによる免震層層間変形の比較

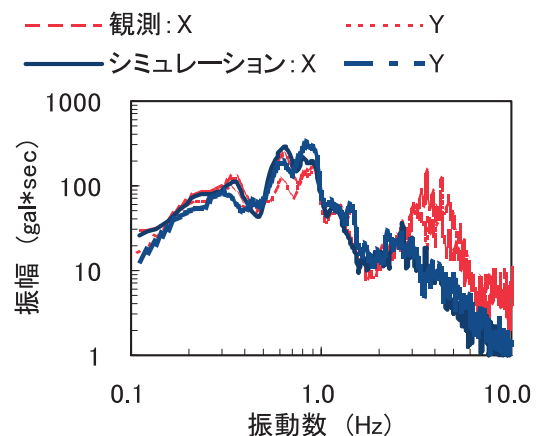


図-15 1階における観測記録とシミュレーションによるフーリエスペクトルの比較

動数領域の対応は良い。一方、高振動数では観測記録の4Hz付近にピークが見られるが、シミュレーション結果にはない。免震建物では1次振動数が特に卓越するのが通常であり、観測記録の4Hz付近にピークが表れた理由は、今後、検討すべき課題である³⁾。

本建物では1階以上には観測計器を設置していないので、上部における挙動をシミュレーション結果から推定

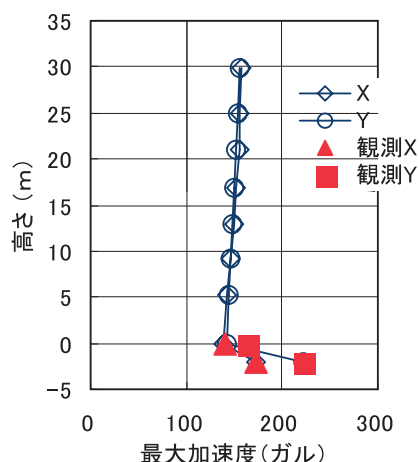


図-16 シミュレーションによる最大加速度分布

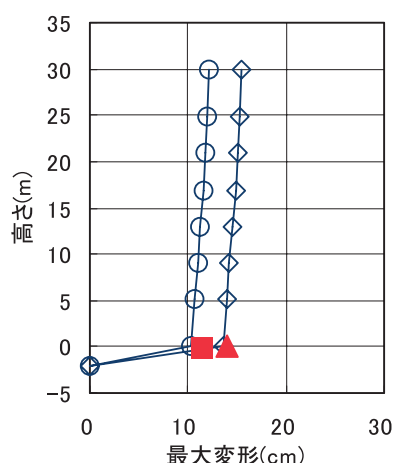


図-17 シミュレーションによる最大変位分布

する。最大加速度分布と最大変位分布（地階に対する相対変位）を図-16と図-17に示す。最大加速度は、1階で図-15の傾向からシミュレーション結果が観測記録よりもやや小さいが、建物上部では200gal以下であったと推定できる。震度階級はV弱であり、気象庁発表の釧路市のV強よりも小さい。最大変位から上部構造の層間変形は非常に小さかったと推定できる。これらの結果は、地震後の調査で、構造躯体には何らの被害もなく事務機器等にも影響がなかった状況と合致する。

6. まとめ

2003年十勝沖地震時に地震記録が得られた、釧路市に建つ免震建物の挙動について検討した。建物は地上7階地下1階のSRC造ラーメン構造である。当建物の免震装置としては、積層ゴム、鋼棒ダンパー、鉛ダンパーが採用されている。地震観測は免震層を挟む地下階と1階

で実施している。結果を以下にまとめる。

- 1) 地階記録の最大速度は約30cm/sであり、それをやや上回る近隣のKnetデータからも判断して、作用した地震動は耐震設計におけるレベル1と2の中間の強さであったと考えられる。これは免震建築が建設されるようになって以後、最大級の地震動である。
- 2) 観測記録の1階の最大加速度は地階に対して82% (X) と73% (Y) であり、積分して求めた免震層の最大層間変形は、14.0cm (X) と11.3cm (Y) であった。
- 3) 観測記録に対するシミュレーション解析では、ダンパーに2軸連成を考慮した建物モデルに地下階記録をX-Y同時入力して行った。その結果、免震層の応答変形は観測記録と良く一致し、ダンパーの塑性度は特に大きな量ではなかった。
- 4) シミュレーション解析から、本建物内の震度階級がV弱であり気象庁発表の釧路市のV強よりも小さかったこと、上部構想の層間変形が非常に小さかったと推定した。

なお、竣工時に行った最大5cmの変位までの繰り返しによる静加力実験から、ダンパーの降伏後までの荷重-変形関係が設計時のモデルと良く一致すること、履歴吸収エネルギーによる等価粘性減衰定数が十分大きいことが分かっている。

地震後の当建物調査から、構造躯体には何らの被害もなく事務機器等にも影響がなかったことが分かっている。上記のシミュレーション結果と併せ考えると、当免震建物は、2003年十勝沖地震時に耐震設計における要求性能を十分に発揮したといえる。

謝辞

本研究をまとめる機会を与えて下さいました釧路信用組合の関係各位、および当地震観測に基づく共同研究により有意義なご意見をいただいている北海道日建設計の関係各位に心から御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 藤堂、関：2003年十勝沖地震による釧路信用組合本店の観測記録、MENSIN, No43, (社) 日本免震協会, 2004.2
- 2) 松本、関、羽沢、藤堂、千葉：釧路市に建つ免震建物の静加力試験と2003年十勝沖地震時の動的挙動、(その1) 竣工時における静加力実験と常時微動測定、日本建築学会大会梗概集 (北海道)、2004.8
- 3) 石丸、関、羽沢、藤堂、松本：釧路市に建つ免震建物の静加力試験と2003年十勝沖地震時の動的挙動、(その2) 観測記録と建物の動的特性、日本建築学会大会梗概集 (北海道)、2004.8
- 4) 日本建築学会編：多次元入力地震動と構造物の応答、1998.1