

# 免震建物における地震観測

## Seismic Observation of Base Isolated Buildings

山上 聡\* 安井健治\* 川井伸泰\*\*

### 要旨

奥村組では技術研究所管理棟をはじめとし、全国 12 ヶ所の免震建物で地震観測を実施している。本報告では、免震建物地震観測網を紹介し、これまでに観測された記録に基づいて、採用されている免震装置の種類や、地震動特性による免震建物の応答性状の違いについて報告する。さらに、観測記録より求めた、免震建物の固有振動数、減衰定数を、設計時に想定した固有振動数、減衰定数と比較した結果、免震層変位が 9 cm まで達した鉛入積層ゴムを用いた免震建物では、ほぼ一致することを確かめた。標準積層ゴムや高減衰積層ゴムを含め、免震装置の大地震時における免震効果を検証するには、今後も観測を続け、記録の蓄積が必要である。

キーワード：地震観測網、免震建物、応答性状、固有振動数、減衰定数

### 1. まえがき

免震構法は、日本では 1986 年に実用化され、1995 年に発生した兵庫県南部地震以降、急速に普及した構造形式である。そのため、免震構法を採用した建物では、地震時における免震装置の性能や建物の応答を検証するために、数多くの建物で地震観測が行われており、大地震時の観測記録も報告されるようになった。

奥村組では、1986 年に日本で最初に実用化した免震建物である技術研究所管理棟（茨城県つくば市）をはじめとし、全国 12 ヶ所で地震観測を実施しており、23 年間で延 830 余りの観測記録を得た。ここでは、これらの観測記録に基づいて、地震時における免震建物の水平方向の応答性状を検討した結果について報告する。

### 2. 免震建物の地震観測

#### 2.1 奥村組の地震観測網

1986 年に免震建物の地震観測を開始した。その後、1995 年の兵庫県南部地震以降に観測網を強化し、現在では、全国 12 ヶ所で観測を実施している。観測地点と観測された地震の震源地、および地震規模を図-1 に示す。震源地の分布を見ると、関東平野から宮城県沖にかけて多く発生している。北海道では、釧路沖での記録が多い。観測建物の概要を表-1 に示す。構造形式（RC 造、S 造、SRC 造）、階数、免震装置の種類が異なる免震建物の挙動を観測できるよう計画している。芦屋(③)

の免震装置は標準積層ゴムと鋼棒ダンパーおよび鉛ダンパーの組合せ、八王子(⑤)は非線形な復元力を持つ転が

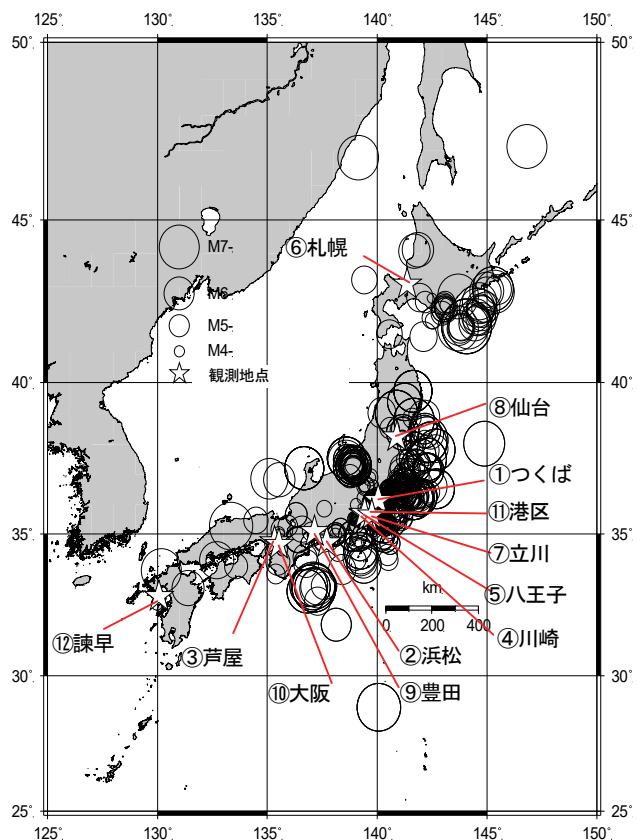


図-1 観測地点と観測された地震の震源地

\*技術研究所 \*\*東日本支社建築設計部

表-1 観測建物の概要

	所在地	構造	階数	免震装置	地震計設置階	観測開始
①	茨城県つくば市	RC造	4階	標準積層ゴム、鋼棒製ダンパー	BS, 1F, 3F, RF	'86.09
②	静岡県浜松市	RC造	6階	標準積層ゴム、鋼棒製ダンパー	BS, 1F	'97.10
③	兵庫県芦屋市	RC造	6階	標準積層ゴム、鋼棒製ダンパー、鉛ダンパー	BS, 1F, RF	'96.07
④	神奈川県川崎市	RC造	14階	鉛入積層ゴム	BS, 1F, 8F, RF	'98.03
⑤	東京都八王子市	RC造	2階	転がり支承、粘性ダンパー	BS, 1F	'98.05
⑥	北海道札幌市	RC造	20階	標準積層ゴム、鉛入積層ゴム	BS, 1F, 7F, 12F, 20F	'02.11
⑦	東京都立川市	RC造	17階	鉛入積層ゴム、転がり支承	BS, 1F, 8F, RF	'03.06
⑧	宮城県仙台市	S造	9階	鉛入積層ゴム、標準積層ゴム	BS, 1F	'06.08
⑨	愛知県豊田市	RC造	14階	鉛入積層ゴム、標準積層ゴム	1F, 2F	'07.01
⑩	大阪府大阪市	RC造	43階	弾性滑り支承、標準積層ゴム オイルダンパー、粘性ダンパー	B1F, 1F, 14F, 29F, 43F	'07.02
⑪	東京都港区	SRC造	9階	高減衰積層ゴム、オイルダンパー	B3F, 1F, 2F, RF	'07.03
⑫	長崎県諫早市	RC造	15階	鉛入積層ゴム、弾性滑り支承	BS, 1F	'07.05

り支承と粘性ダンパーの組合せである。また、立川(⑦)は鉛入積層ゴムと復元力のない転がり支承の組合せである。大阪(⑩)は超高層の免震建物であり、弾性滑り支承、標準積層ゴム、オイルダンパーと風対策用に粘性ダンパーを組み合わせた免震装置である。建物の多くは基礎免震であり、1階床下に免震層を持つ。豊田(⑨)、港区(⑪)の建物は1階柱頭に免震装置を持つ。仙台(⑧)の建物は免震告示による設計である。

### 2.2 観測システム

地震観測には、基本的にサーボ型加速度計を用いた地震計を使用し、トリガーレベルは $1\text{ cm/s}^2$ に設定した。仙台(⑧)、豊田(⑨)、諫早(⑫)には、半導体センサを用いた地震計を使用し、誤作動を防ぐためにトリガーレベルは $3\text{ cm/s}^2$ に設定した。設置場所は免震層の上下を基本とし、可能な限り屋上や中間階にも設置し、建物全体の挙動を観測している。いずれもサンプリング周波数は $100\text{ Hz}$ で記録した。本報告では、免震層下部で観測された加速度記録より算定した計測震度が $0.5$ (震度1)以上のものを対象としている。

## 3. 観測記録の分析

### 3.1 観測記録と入力加速度

各観測地点の震度別記録数を図-2に示す。本報告で示す震度は、免震層下部で観測された加速度記録より算定した計測震度から求めた。観測記録は、震度別割合に示すように震度1、震度2が多く、震度4の観測は全体の約2%であった。最大計測震度は4.4であり、2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震において、仙台(⑧)で観測された。

観測地点からの震央距離と地震規模の関係を図-3に示す。地震規模が大きくなるほど、遠くで発生した地震も観測でき、 $1000\text{ km}$ 以遠で発生したM8クラスの地震で震度1の記録がある。同規模の地震でも震央距離が近いほど、震度が大きくなっており、 $270\text{ km}$ 先のM8クラスの地震は震度4となっている。

観測記録の震央距離と免震層直下の加速度(入力加速

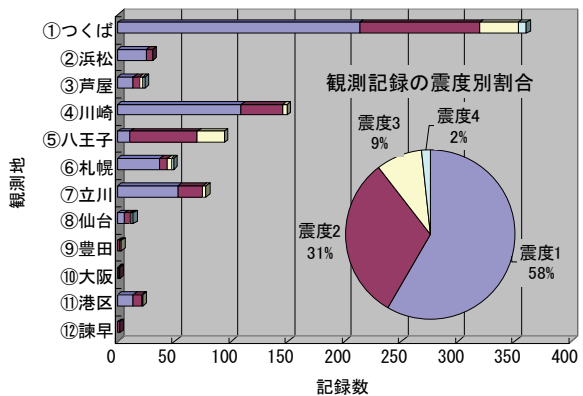


図-2 観測地点の震度別観測記録数と震度別割合

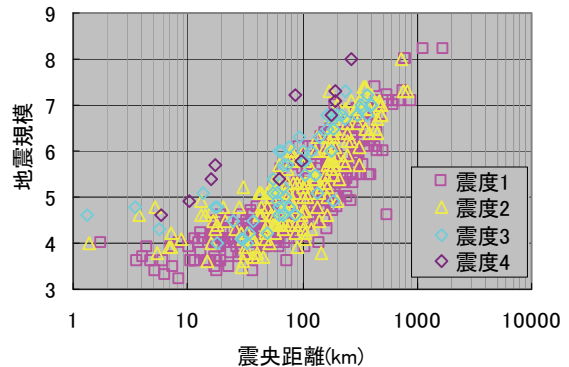


図-3 震央距離と地震規模

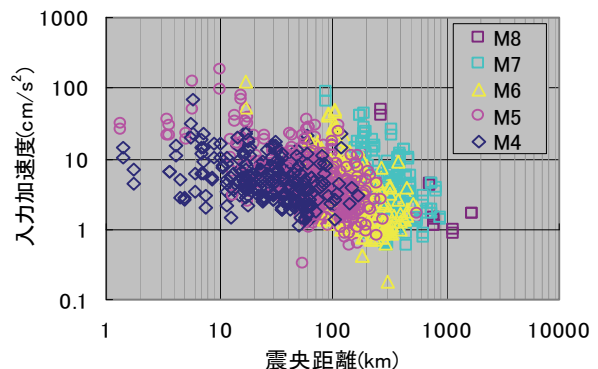


図-4 震央距離と入力加速度

度)の関係を図-4に示す。最大入力加速度は $180\text{ cm/s}^2$ である。同規模の地震における入力加速度は、震央距離が遠いほど小さくなる傾向がみられ、 $20\text{ km}$ 先で発生したM6クラスの記録は $100\text{ cm/s}^2$ に対し $400\text{ km}$ 以遠での

記録は 10cm/s<sup>2</sup>以下となっている。

### 3.2 免震建物の応答

#### a. 分析概要

免震効果の違いを検討するために、免震建物の水平方向の応答性状を比較した。免震装置による復元力特性の違いを考慮し、種類別に①標準積層ゴムを主とする建物、②鉛入積層ゴムを主とする建物、③その他高減衰積層ゴムと転がり支承の建物の3つのグループに分け、免震層上下で観測した、水平2方向の加速度記録を用いた。

#### b. 震央距離と応答加速度倍率

免震効果を、免震層直下の加速度（入力加速度）に対する免震層直上の加速度（応答加速度）の比（加速度応答倍率）で評価する。震央距離と加速度応答倍率の関係を図-5に示す。

標準積層ゴムは、震央距離が 50km 以内の観測では加速度応答倍率はおおむね 1 倍以下である。50km 以上で

は距離が遠くなるほど、加速度応答倍率のばらつきが大きくなる傾向がある。

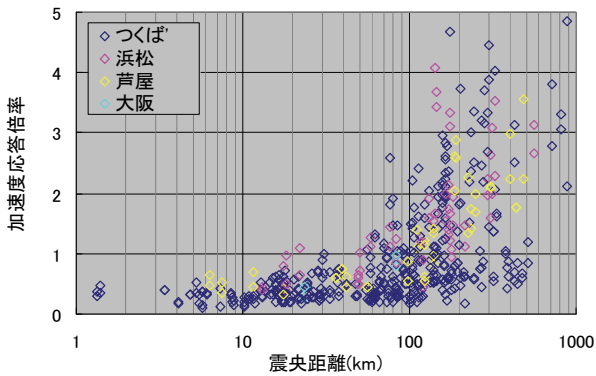
鉛入積層ゴムは、震央距離によらず加速度応答倍率のばらつきが大きく、0.5~3 倍に広がっている。

高減衰積層ゴムの港区(①)は観測期間が2年と短いため観測記録数が少ないが、加速度応答倍率は鉛入積層ゴムの場合と似た傾向を示している。

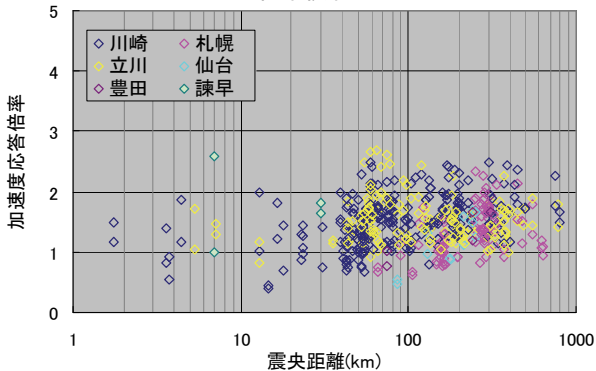
転がり支承の八王子(⑤)は、距離によらず応答加速度倍率は 0.5 倍以下であり、免震効果が大きい。

#### c. 入力加速度と応答加速度

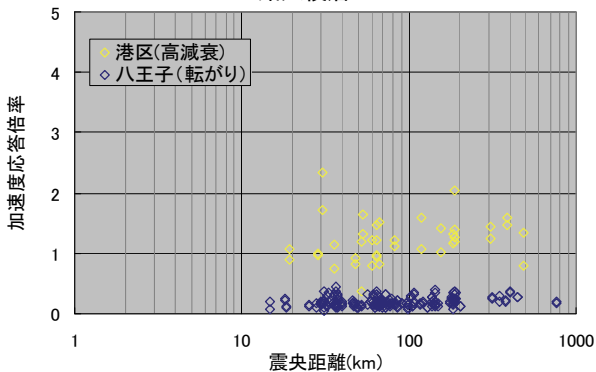
免震装置の種類により、震央距離と加速度応答倍率の関係は異なり、標準積層ゴムでは、震央距離によりばらつきが見られた。一方、図-4において、入力加速度は、震央距離が遠くなるほど小さくなる傾向があった。そこで、入力加速度と応答加速度の大きさの関係を図-6に示す。図中には入力加速度と応答加速度が 1:1 となる線



a 標準積層ゴム

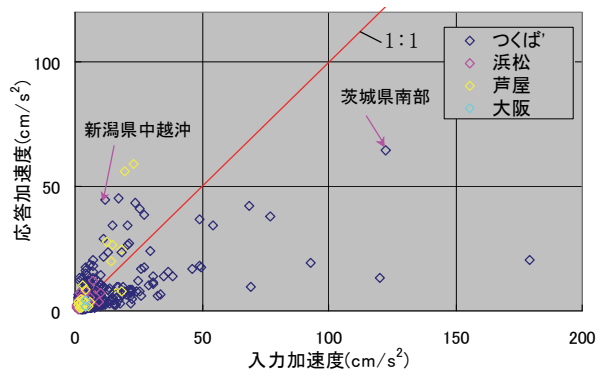


b 鉛入積層ゴム

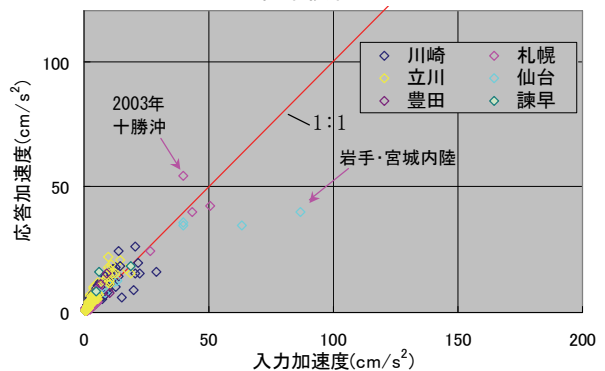


c 高減衰積層ゴム、転がり支承

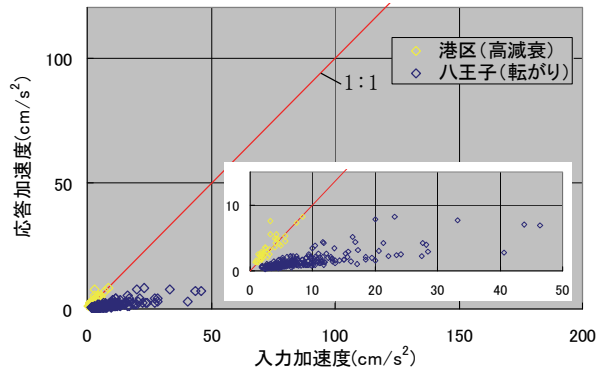
図-5 震央距離と加速度応答倍率



a 標準積層ゴム



b 鉛入積層ゴム



c 高減衰積層ゴム、転がり支承

図-6 入力加速度と応答加速度

を示す。

標準積層ゴムは、入力加速度が  $30\text{cm/s}^2$  以上になると応答加速度は低減されているが、 $30\text{cm/s}^2$  以下では応答加速度が入力加速度より大きくなる場合がある。

鉛入積層ゴムは、入力加速度が  $50\text{cm/s}^2$  以下のとき、応答加速度はばらつきがあるものの、入力加速度と同程度であり、免震効果が小さい。 $50\text{cm/s}^2$  以上の入力加速度に対しては、応答加速度は入力加速度より小さくなっており、免震効果が大きい。

高減衰積層ゴムの記録は、図中の拡大図に示すように  $10\text{cm/s}^2$  以下であり、入力加速度と応答加速度はほぼ同じである。

転がり支承の八王子(⑤)は、入力加速度が小さい領域から応答加速度は小さく、免震効果が大きい。この建物は転がり支承を使用しており、微小振幅時から免震周期が 4.3 秒と長く、更に、粘性ダンパーを採用しているため、微小振幅時から減衰性能を発揮するためと考えられる<sup>1)</sup>。

### 3.3 免震層の応答と入力地震動

免震効果は、入力地震動の特性により異なることが知

られている<sup>2)</sup>。

観測記録の多いつくば(①)において、地震規模が M5 以上の記録を対象に、図-6 a 中に示す免震効果が大きい記録と、小さい記録の2つの入力地震動の特性を調べた。

免震効果が大きい、茨城県南部地震の、応答スペクトルを図-7 a に示す。2004 年 10 月に近方で発生した地震(地震規模 5.7、震央距離 17km、計測震度 3.9)である。図中に示す固有周期は、観測記録の入力加速度と応答加速度から求めた伝達関数により評価した。入力地震動は、建物固有周期より短周期側の、0.3 秒付近にピークを持っており入力加速度が大きく、免震効果が大きかったと考えられる。

免震効果が小さい、新潟県中越沖地震の応答スペクトルを図-7 b に示す。2007 年 7 月 16 日に遠方で発生した地震(地震規模 6.8、震央距離 203km、計測震度 3.9)である。入力地震動は、建物固有周期より長周期側の、3 秒付近にピークを持っており、入力加速度が小さく、免震効果が小さいと考えられる。

## 4. 免震層の挙動と設計モデルの比較

### 4.1 免震層変位

免震層の挙動を確かめるために、免震層の変位を求め、応答加速度、固有振動数、減衰定数との関係を、設計と比較した。免震層の変位は、免震層上部と下部の加速度記録から、10 秒以上の長周期成分を除き、積分して求めた。

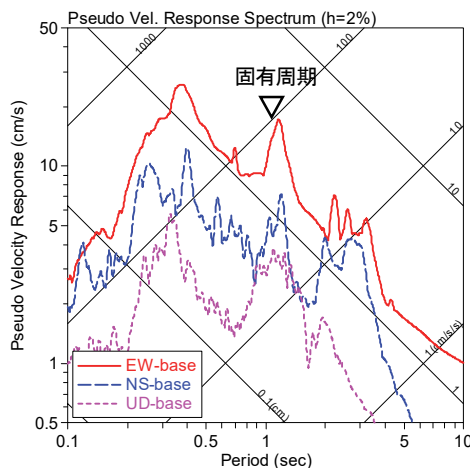
標準積層ゴムと鉛入積層ゴムについては、比較的大きな入力加速度記録が得られた2つの建物を対象とした。

### 4.2 免震層変位と応答加速度

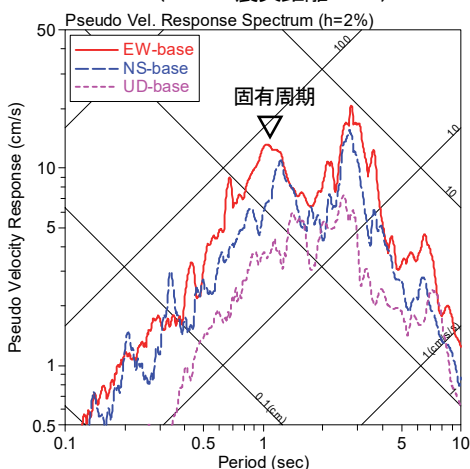
免震層の変位と応答加速度の関係を図-8 に示す。免震層の変位と応答加速度の関係は、応答加速度に建物質量を乗じた慣性力を荷重と仮定すると、免震装置の復元力特性にほぼ対応する。図中に、設計に用いた免震層の復元力を慣性力と仮定し、建物質量で除して算出した応答加速度を示す。標準積層ゴムの復元力特性はバイリニアとし、鉛入積層ゴムと高減衰積層ゴムの復元力特性には、歪依存型バイリニアを用いた。高減衰積層ゴムの復元力特性は、ゴム層厚に対し変位 10%以上となる範囲を示す。

標準積層ゴムは、免震層変位と応答加速度の関係はほぼ線形に対応している。つくば(①)の免震層変位の最大値は 2.2cm であり、鋼棒製ダンパーの降伏変位の 3.3cm に達していない。

鉛入積層ゴムは、免震層変位の最大値は 9.2cm であり、2003 年 9 月 26 日に発生した十勝沖地震のときに、札幌(⑥)で観測された。しかし、記録の多くは、免震層変位が 1mm 以下であり、ほとんど変形してない。そのため、



a 2004年10月6日茨城県南部 (M5.7 震央距離 17km)



b 2007年7月16日新潟県中越沖 (M6.8 震央距離 203km)

図-7 ①つくばで観測された地震の応答スペクトル

応答加速度は入力加速度とほぼ等しかったと考えられる。免震層変位が大きくなると、応答加速度はほぼ設計と対応している。

高減衰積層ゴムは、免震層変位が2mm以下であり、免震層がほとんど変形していない。

### 4.3 免震層変位と固有振動数

免震層変位と固有振動数の関係を図-9に示す。固有振動数は、免震層直下と直上の加速度記録から伝達関数から評価した。図中に、設計に用いた免震層の復元力特性から求めた、各変位における等価剛性と、建物質量から算出した振動数を示す。

標準積層ゴムのつくば(①)は、記録は設計よりやや高めであるが、変位が大きくなるにつれて設計に近づく傾向にある。

鉛入積層ゴムは、固有振動数は変位が大きくなるにつれて低くなる傾向がみられ、2cmあたりから、設計

と一致してくる。

高減衰積層ゴムは、ばらつきがあるものの、変位が大きくなるにつれて設計に近づく傾向にある。

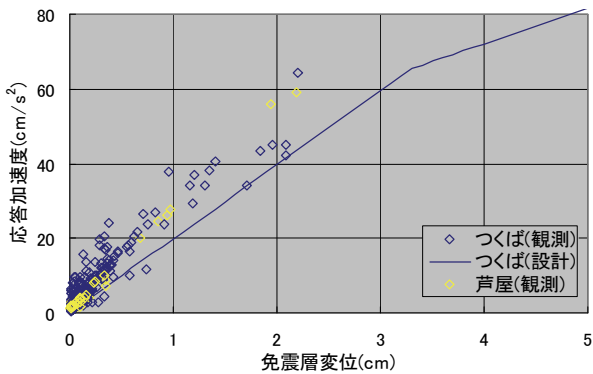
### 4.4 免震層変位と減衰定数

免震層変位と減衰定数の関係を図-10に示す。減衰定数  $h$  は、伝達関数  $H(\omega)$  の応答倍率を表す式(1)により、固有振動数 ( $\omega_0$ ) における加速度応答倍率 ( $\omega = \omega_0$  のとき) から評価した。

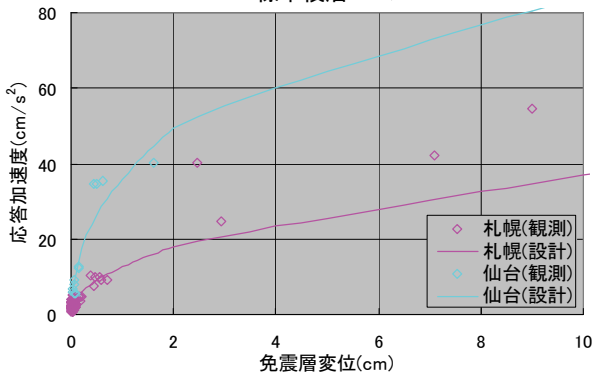
$$|H(\omega)| = \sqrt{\frac{1 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2}{\{1 - (\omega/\omega_0)^2\}^2 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2}} \quad (1)$$

図中に、設計に用いた免震層の復元力特性から求めた、各変位における等価減衰定数を示す。

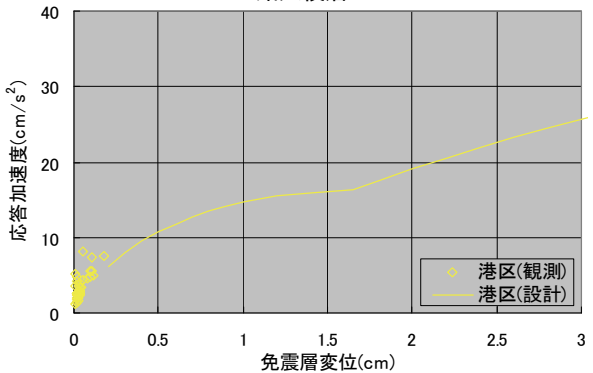
標準積層ゴムと鋼棒製ダンパーの組合せであるつくば(①)は、ダンパーが降伏する前において減衰定数0.02~0.03の減衰性能があり、設計に用いる標準積層ゴムの



a 標準積層ゴム

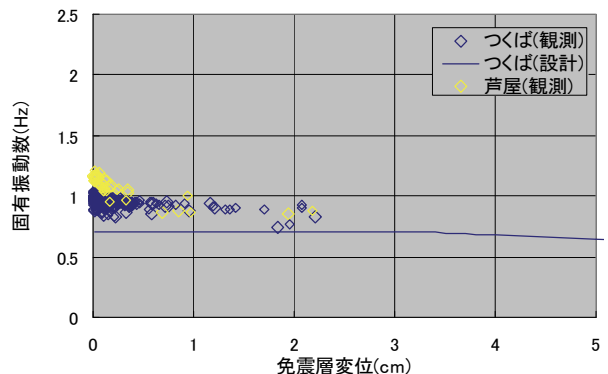


b 鉛入積層ゴム

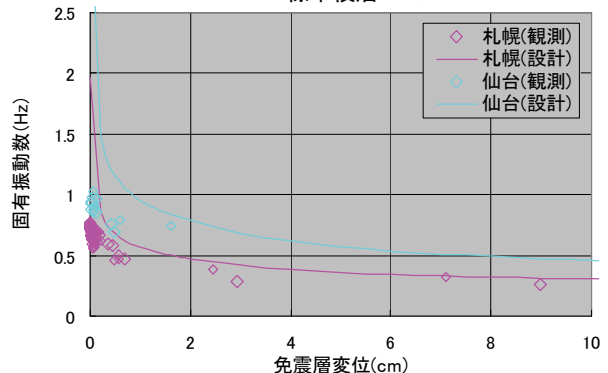


c 高減衰積層ゴム

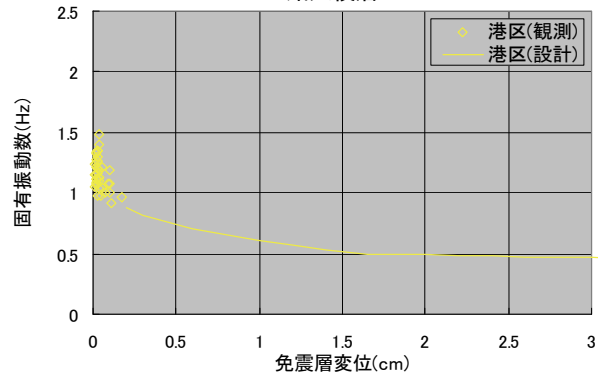
図-8 免震層変位と応答加速度



a 標準積層ゴム



b 鉛入積層ゴム



c 高減衰積層ゴム

図-9 免震層変位と固有振動数

減衰定数と良く対応している。鉛ダンパーを合わせ持っている芦屋②は、免震層変位が小さい領域から、減衰定数 0.1 と大きい。

鉛入積層ゴムは、降伏耐力にいたるまでは徐々に減衰定数は増加し、降伏耐力に至った後は、塑性変形が進む

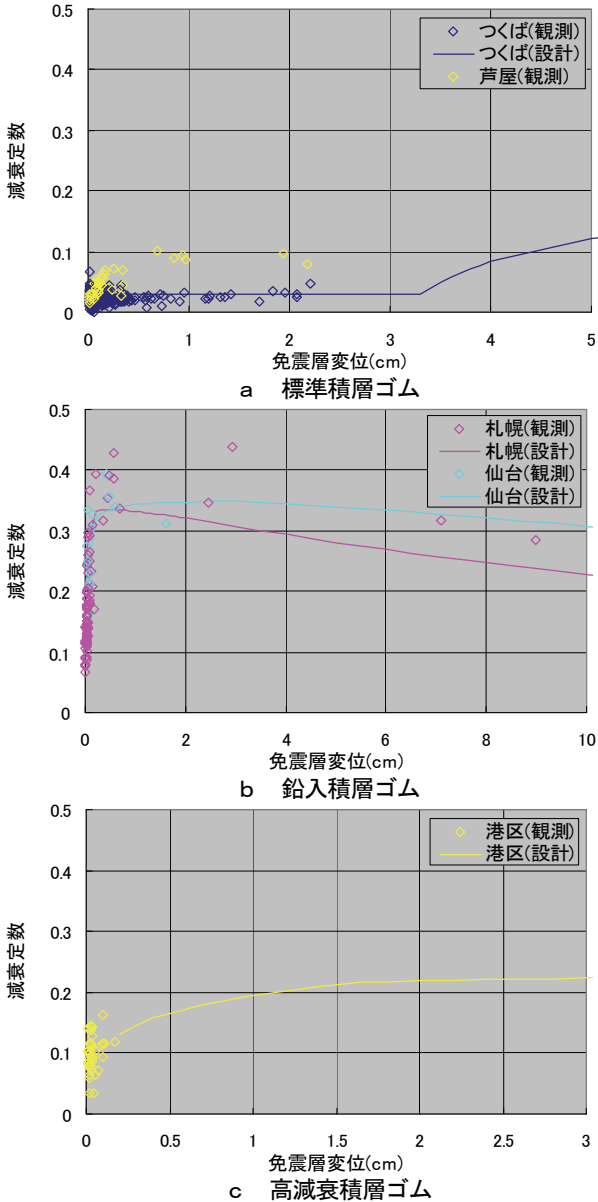


図-10 免震層変位と減衰定数

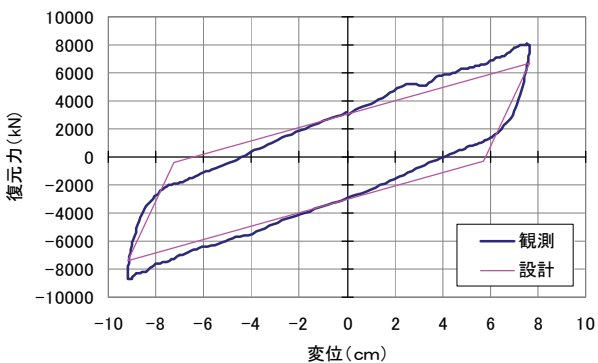


図-11 免震層変位と復元力

に連れて、相対的に減衰定数は減少している。変位の小さい領域から減衰定数が大きい。免震層上下の伝達関数から評価した減衰定数は、免震層の復元力モデルから評価したものより、大きな評価となっている。これは、免震層直上の応答加速度のみによる評価では、免震層の復元力を十分に評価できていないためと考えられる。

高減衰積層ゴムは、変位が小さくばらつきがあるが、標準積層ゴムに比べ減衰定数が大きい。

#### 4.5 復元力からの減衰定数評価

免震層上下の伝達関数から評価した減衰定数は、設計に用いた減衰定数より大きな評価となっていた。そこで、上部構造の観測点が多い札幌⑥の記録を用いて、免震層の復元力を求め、復元力特性から減衰定数を評価し比較した。復元力は、1、7、12、20F で観測された加速度記録を線形補間し、各階の質量に乗じて得られた慣性力の和から求めた。十勝沖地震において、免震層変位が最大のときの、変位と復元力の関係を図-11 に示す。

観測記録から得られた変位と復元力の関係を評価した減衰定数は 0.22 であり、設計に用いた減衰定数 0.24 とほぼ一致した。

#### 5. まとめ

地震観測記録を分析し、次のことがわかった。

- i. 免震建物の免震効果（加速度低減効果）は、入力地震動の特性により異なる
- ii. 大きく変形した観測記録における免震層の挙動は、ほぼ設計通りであった
- iii. 微小変位における減衰定数は、鉛入積層ゴムが最も大きく、つづいて、高減衰積層ゴム、標準積層ゴムであった

#### 6. あとがき

これまで多くの観測記録を得ることができた。また、一部の建物では観測記録を用いて、設計モデルの妥当性が検証できた。しかし、記録のほとんどが震度3以下の小地震であり、多くの建物において地震時の挙動を確認するには至っていない。大地震時における免震効果を検証するには、今後も免震建物の地震観測を継続し、記録を蓄積する必要がある。

#### 【参考文献】

- 1) 平野 晋、大塚 将、川井伸泰、舟木秀尊、「建物免震システム (E R S) の開発」、奥村組技術研究年報 No.24, pp.49-54
- 2) 安倍 勇、大塚 将、石井敏之、安井健治、原田治、「免震構造の設計と信頼性の実証 (第2報)」、奥村組技術研究年報 No.14, pp.79-84