

# 実免震建物における免震装置の水平剛性の評価

## Evaluation of the Dynamic Characteristics of the Base-isolation System on the Actual Building

山上 聡\* 舟木秀尊\* 安井健治\*\* 小山慶樹\*

### 要 旨

竣工 30 年目を経過した免震建物を対象に、静的加力実験と自由振動実験を行い、免震層の水平剛性を比較検討した。その結果、自由振動実験から得た水平剛性は、静的加力実験における割線剛性と良い一致を示した。このことから、天然ゴム系積層ゴムと鋼棒製ダンパーを用いた免震建物の動的応答を、静的加力試験で得られた力学特性によって評価することの妥当性が確認できた。さらに、繰り返し変形と、温度変化が天然ゴム系積層ゴムの水平剛性に与える影響について検討した。その結果、繰り返し変形による剛性の変化はほとんど見られなかった。また、温度が高くなると積層ゴムの水平剛性が低下する傾向は、ゴムの材料試験の傾向とほぼ一致していることを確認した。

これらのことから、当初の設計条件の妥当性を確認でき、免震構造は十分な安全性と耐久性を有していることを確認した。

キーワード：積層ゴム、鋼棒製ダンパー、経年変化、繰り返し変形、温度変化

### 1. まえがき

近年発生した巨大地震において、免震構造の優れた地震時安全性が証明され、その普及に大きな期待が掛けられている。しかし、我が国で免震構造が実用化されて 30 年程度であり、免震建物を供用する数十年という長期間にわたる構造性能の評価と耐久性に関しては実証されていない。その中で奥村組技術研究所管理棟は日本初の実用免震ビルとして竣工後 30 年が経過した。免震構造のさらなる普及には、免震構造の性能と長期にわたる信頼性に関するデータの蓄積が重要であるとの認識に立ち、当社では竣工以来、建物と免震装置に関する様々な実験・計測を継続して行っている<sup>1),2),3),4)</sup>。

免震建物の地震時の動的挙動を予測するには、免震装置の力学特性を適切にモデル化することが重要である。設計では通常、免震装置単体での静的加力試験より得られた特性を用いて免震層全体をモデル化する。しかし、実建物での免震装置の動的特性と静的特性とを実測した例は少ない。

そこで、実建物を用いて静的加力実験と自由振動実験を行い、免震装置の変位と荷重および周期の関係から水平剛性を比較検討した。

### 2. 対象建物および免震装置

対象とした免震建物は、つくば市内に建設され 1986 年 9 月に竣工した当社の技術研究所管理棟である。対象



写真-1 対象建物の外観

表-1 建物概要と免震装置

項目	諸元	
構造	RC造4階 基礎免震	
高さ	15.5m	
建築面積	348.18m <sup>2</sup>	
延べ床面積	1,330.1m <sup>2</sup>	
軒高	13.75m	
免震装置	積層ゴム	天然ゴム系積層ゴム φ500×25基
	ダンパー	鋼棒製ダンパー φ50×12基

\*技術研究所建築研究グループ \*\*技術研究所企画・管理グループ

建物外観を写真-1に、建物概要と免震装置を表-1に示す。免震装置には、天然ゴム系積層ゴム 25 基と、鋼棒製ダンパー12 基を使用している。

積層ゴムのゴム径は 500mm、ゴム層は 7mm×14 層であり、ゴム総厚は 98mm、鉛直・曲げ剛性の指標となる 1 次形状係数は 17.1、座屈荷重や水平剛性の指標となる 2 次形状係数は 5.1 である。ゴム材料は G4 相当である。

鋼棒製ダンパーは、4 巻のループ状の鋼棒よりなる弾塑性ダンパーである。鋼棒の直径は 50mm、ループの直径は 550mm、材質は S20C である。

### 3. 実験方法

#### 3.1 実験の概要

建物の外部に構築した反力体に、2 台の油圧ジャッキを取り付けた載荷装置を設置し、静的加力実験と自由振動実験を行った。載荷状況を写真-2に示す。竣工時（1986年）、2 年目（1988年）、19 年目（2005年）、30 年目（2016年）とも、同じ載荷装置を用いて実験を実施している。免震装置の配置と加力位置を図-1に示す。実験は、鋼棒製ダンパーの有無による 2 ケースである。

水平剛性に影響を及ぼす経年変化以外の要因として、建物重量の変化と温度条件の違いが挙げられる。重量の変化は、竣工後大規模な改修を行っていないため軽微と考えた。温度の影響を極力除くために実験の実施時期を合わせた。また、気温の影響を把握する目的で、今回の実験では気温の異なる時期に実験を実施した。

#### 3.2 静的加力実験

静的加力実験は、油圧ジャッキを用いて建物を片押しで加力し、所定の荷重に達したところで徐々に除荷する方法とした。このとき、免震装置の変形が約 100mm（積層ゴムのせん断変形率 $\gamma=100\%$ ）を超えないこととし、最大荷重の目標値を 3000kN（ダンパーあり）、2500kN（ダンパーなし）とした。

#### 3.3 自由振動実験

自由振動試験は、油圧ジャッキにより建物に所定の変形 100mm を与え、載荷装置の解放ジャッキにより瞬時に開放し、上部構造を自由振動させた。

### 4. 実験結果

#### 4.1 免震層の水平剛性（積層ゴム+鋼棒製ダンパー）

##### a. 静的加力実験

鋼棒製ダンパーが有る状態での静的加力実験から得られた荷重と変位の関係を図-2に示す。竣工時の実験データに精度上の問題があるため、ここでは 2 年後の 1988 年に実験したものを初期とした。同図には併せて設計値を示しており、初期剛性  $K_1=4459\text{kN/mm}$ 、2 次剛性  $K_2=2107\text{kN/mm}$ 、降伏荷重  $\sigma_y=1308\text{kN}$  である。

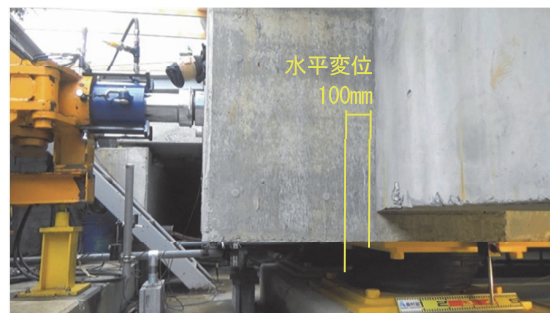


写真-2 載荷状況

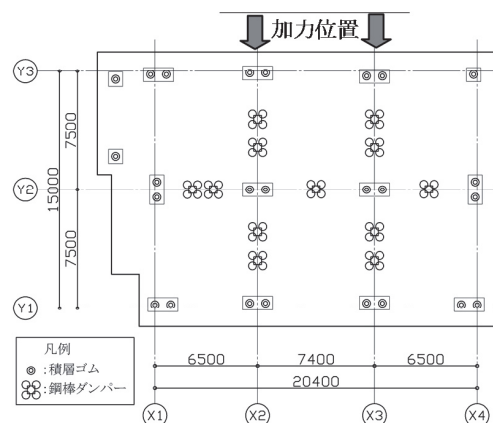


図-1 免震装置の配置

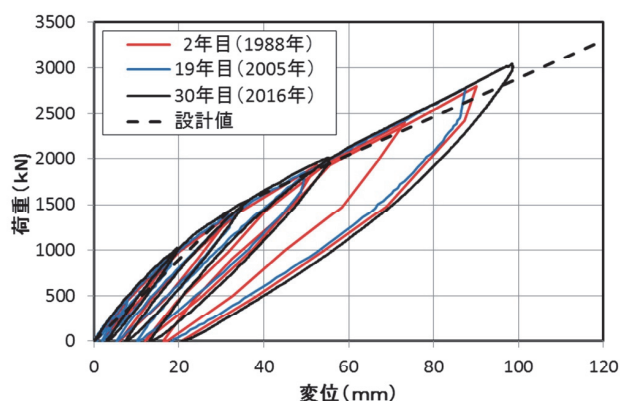


図-2 荷重と変位の関係（ダンパーあり）

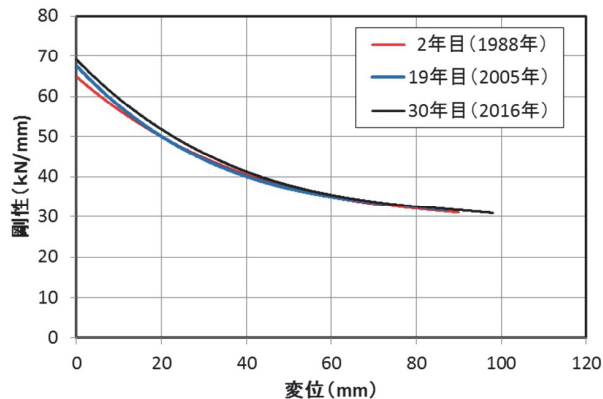


図-3 各変位における割線剛性（ダンパーあり）

図から静的加力実験の剛性と設計値はほぼ一致していることが確認された。鋼棒製ダンパーが降伏する 30mm 以降の 2 次剛性については、竣工後ほとんど変化は見られない。水平剛性を詳細に調べるため、荷重と変形の関係の包絡線から各変位における割線剛性を求め、図-3 に示す。19、30 年目において積層ゴムと鋼棒製ダンパーで構成される免震層全体の水平剛性に大きな変化は見られなかった。

b. 自由振動実験

自由振動実験より得られた変位の時刻歴波形の比較を図-4 に示す。初期変位の影響を除くため、初期サイクルを除く自由振動 10 回繰り返しに要した時間は、2 年目が 12.06 秒に対し、19 年目は 12.15 秒と長く、30 年目は 11.66 秒と 3.4% 短くなっている。19 年目が長くなった要因としては、鋼棒製ダンパーの固定度が低かったことが考えられるが、免震装置としての周期特性に大きな変化は見られない。各変位レベルにおける、免震装置の剛性の変化を評価するために、1/2 サイクルごとにおける周期と振幅を求め、各振幅（変位）における周期をプロットしたものを図-5 に示す。振幅が小さくなるにつれて周期は短くなっている。また、微小振幅の範囲ではばらつきはあるものの、2 年目に比べ 19 年目、30 年目と経年による変化は見られない。

c. 静的加力実験と自由振動実験による剛性の比較

図-5 に示した周期に対して、建物質量を 2,150t と仮定して剛性に変換したものを、静的加力実験結果（図-3）と合わせて図-6 に示す。自由振動実験と静的加力実験から求めた剛性は各変位で良く一致しており、建物の変位と周期の関係は、免震層を構成する免震装置の静的加力試験から得られる割線剛性により評価できることが確認できた。

4.2 積層ゴムの水平剛性

a. 静的加力実験

積層ゴムだけの静的加力実験における荷重と変位の関係を図-7 に示す。竣工時に比べ 19 年目、30 年目は剛性が高くなっている。

図-7 における包絡線から求めた各変位における割線剛性を図-8 に示す。変位が大きくなるにつれて剛性は小さくなる傾向にある。竣工時から 19 年目にかけては全体的に剛性が高くなっているが、19 年目から 30 年目への変化は少ない。

各変位における竣工時と 19 年目の剛性比、および竣工時と 30 年目の剛性比を図-9 に示す。変位が大きくなるにつれて剛性比は小さくなっている。剛性比を変位 0~100mm 間で平均すると、19 年目において竣工時から 8.7% 大きくなったのに対して、30 年目では竣工時から 9.7% 大きくなっている。

b. 自由振動実験

自由振動実験における変位の時刻歴波形を図-10 に

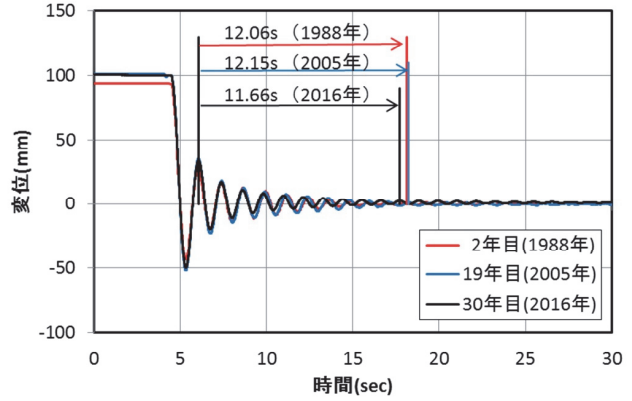


図-4 変位の時刻歴波形（ダンパーあり）

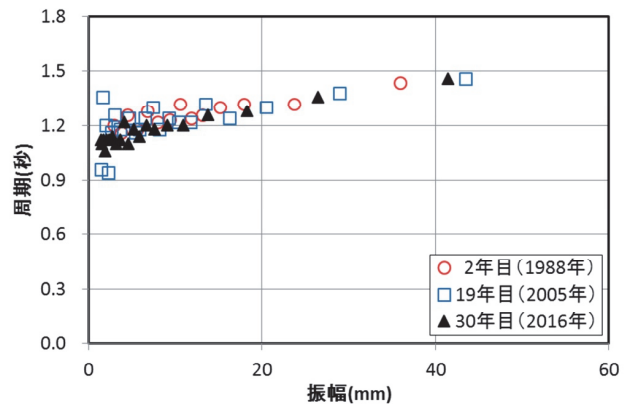


図-5 周期の変化（ダンパーあり）

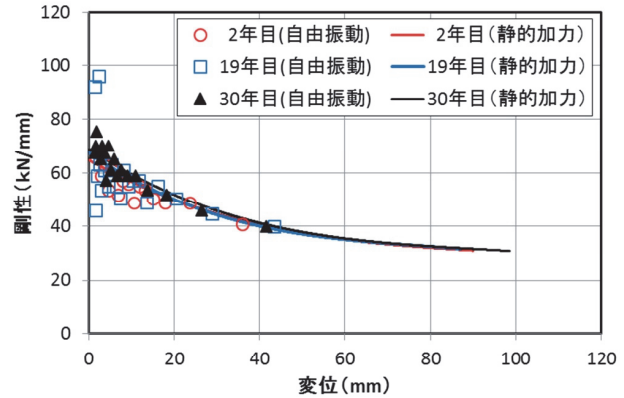


図-6 剛性の比較（ダンパーあり）

示す。ダンパーありと同様に自由振動 10 回繰り返しに要した時間は、竣工時が 18.48 秒であったが、19 年目では 17.83 秒となり、3.5% 短くなっていた。今回 30 年目では 17.67 秒となり、竣工時から 4.4% 短くなっている。建物質量は変化しないと仮定して積層ゴムの水平剛性の変化率を算出すると、19 年目では 7.4% 高く、30 年目では 9.4% 高くなっており、静的加力実験の結果とほぼ一致している。

積層ゴムの剛性の変化を評価するために、図-10 から求めた各変位における周期を図-11 に示す。変位に依存して周期が変わる傾向が見られ、19 年目と 30 年目の各振幅における周期は、竣工時から概ね 4% 程度短く

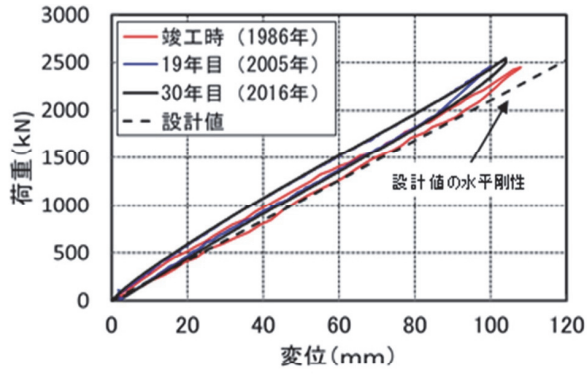


図-7 荷重と変位の関係 (ダンパーなし)

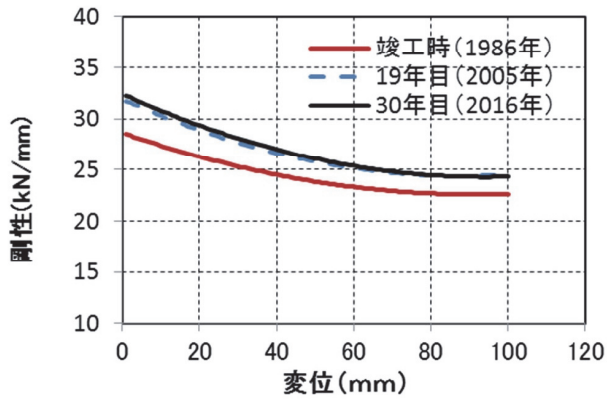


図-8 各変位における割線剛性 (ダンパーなし)

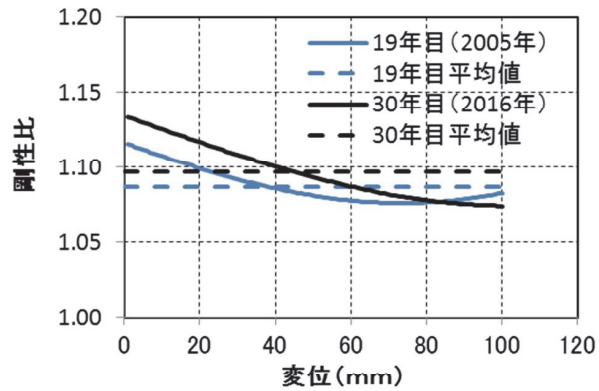


図-9 竣工時に対する剛性比 (ダンパーなし)

なっている。

c. 静的加力実験と自由振動実験による剛性の比較

自由振動実験から得られた剛性と静的加力実験から得られた各変位における割線剛性を比較し図-12に示す。自由振動実験と静的加力実験から求めた剛性は各変位で良く一致しており、建物の変位と周期の関係は、免震層を構成する免震装置単体の静的加力試験から得られる割線剛性により評価できることが確認できた。

4.3 鋼棒製ダンパーの水平剛性

鋼棒製ダンパーの特性を比較するために4.1のa.で求めた積層ゴムと鋼棒製ダンパーの割線剛性から4.2のa.で求めた積層ゴムの割線剛性を減じ、鋼棒製ダン

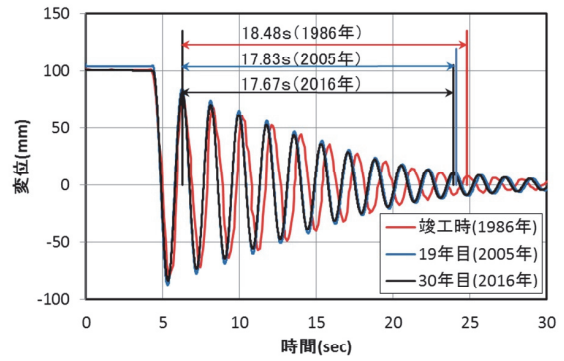


図-10 変位の時刻歴波形 (ダンパーなし)

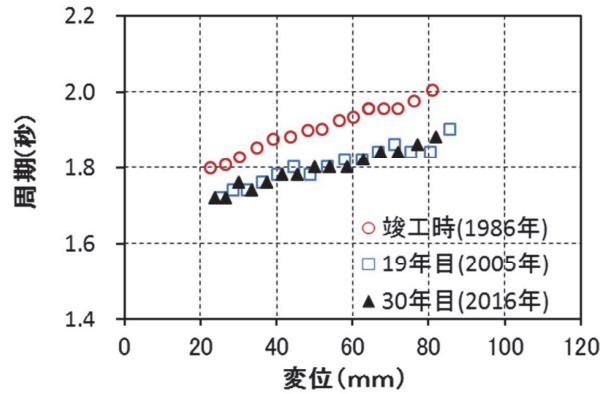


図-11 周期の変化 (ダンパーなし)

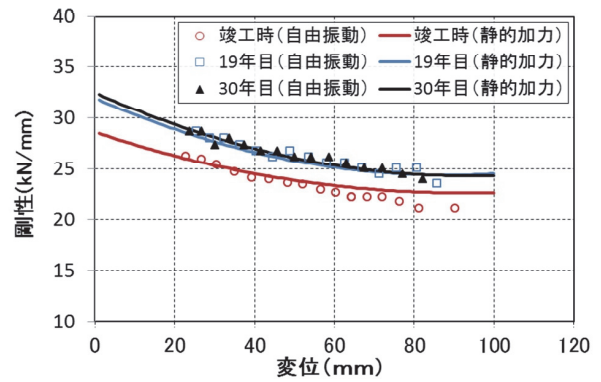


図-12 剛性の比較 (ダンパーなし)

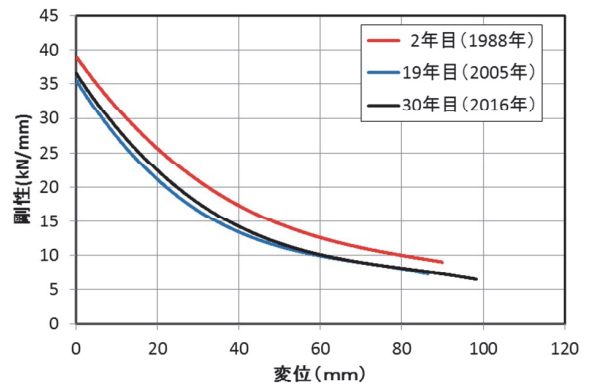


図-13 各変位における割線剛性 (ダンパーのみ)

パーのみの割線剛性として図-13に示す。竣工時に比べ、経年時は4kN/mm程度小さくなっている。要因としては実験や地震応答における繰り返し変形による耐力低下が考えられるが、詳細については今後調査する。

## 5. 積層ゴムの水平剛性に影響するその他の要因

### 5.1 繰り返し変形の影響

2016年11月に積層ゴムのみで初期変位を10cm与えた自由振動実験を繰り返し行った。8日間で1日に2回~5回、合計29回の実験を行った。途中、静的加力実験を7回行っている。1回の自由振動実験による累積変形は約1.9mmであり、29回の合計で約55mmとなる。

自由振動実験における1回目と29回目の変位波形を

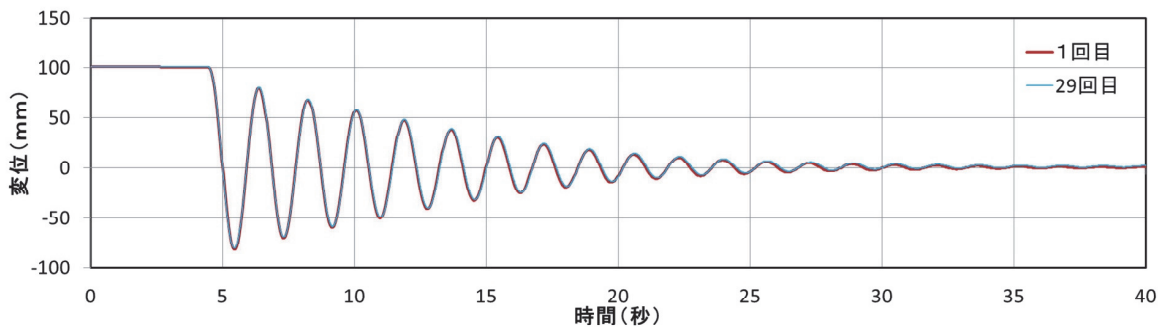


図-14 繰り返し前後での変位波形の比較

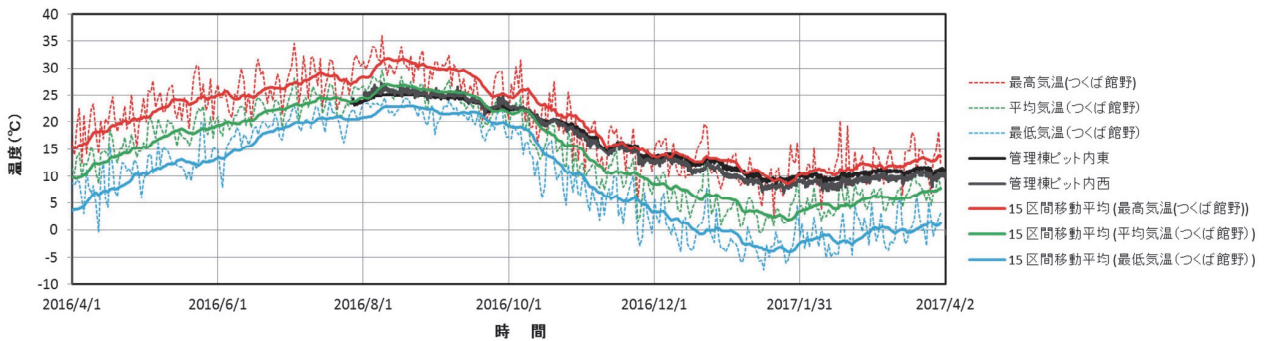


図-15 ピット内の温度と外気温の比較

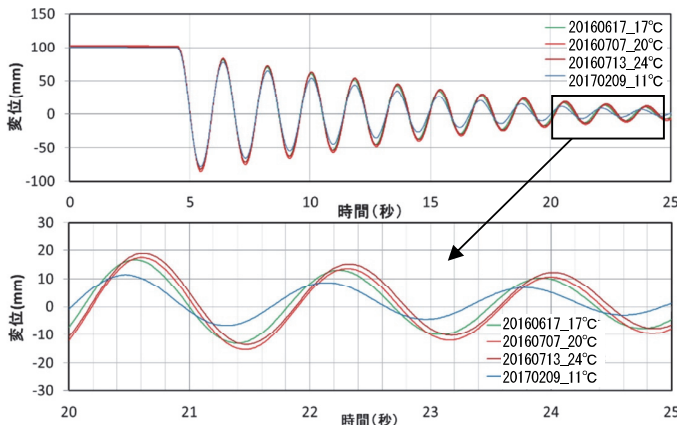


図-16 温度の違いによる比較

重ねて図-14に示す。今回実験を行ったせん断変形率100%の範囲では、天然ゴム系積層ゴムの繰り返し変形による剛性変化はほとんど見られなかった。

### 5.2 温度変化の影響

#### a. 免震ピット内の温度変化

温度変化の影響を把握するために免震ピット内の温度を計測し、外気温と比較したものを図-15に示す。免震ピット内の温度計測は2016年8月1日から2017年3月31日まで10分おきに行い、外気温はピット内気温の推定に一般性を持たせるため、最寄りの気象観測所のデータを用いた。ピット内の実測データと外気温の移動平均を比較した結果、当建物のピット内の温度は、夏期は平均気温、冬期は最高気温で変化していた。

#### b. 自由振動実験結果の比較

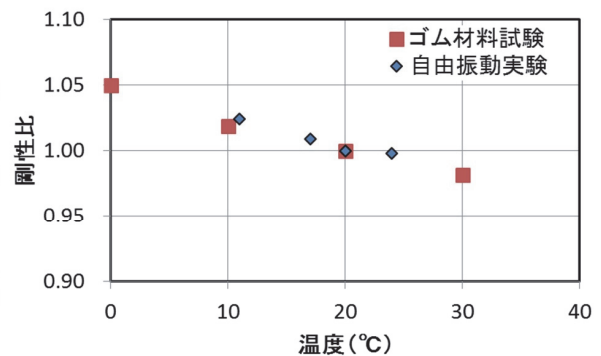


図-17 温度による剛性の変化率

積層ゴムの水平剛性に及ぼす温度の影響を確認するために、ピット内温度が 11℃、17℃、20℃、24℃のときの自由振動実験で得られた変位の時刻歴波形を図-16 に示す。また、4.2 の b. と同様に初期サイクルを除く自由振動 10 回繰り返して要した時間を基に、20℃を基準とした剛性の変化率を図-17 に示す。温度が低いほど剛性が大きくなっており、24℃から 11℃まで-13℃の温度変化に対し剛性は+2.6%程変化している。また、同時期に製造された積層ゴムから切り出したゴム材料のせん断試験を 2016 年に行った。材料試験は 0℃~30℃の範囲で行っており、20℃を基準とした試験結果を併せて同図に示す。水平剛性に及ぼす温度の影響について自由振動実験と材料試験の結果はよく一致しており、積層ゴムの水平剛性に及ぼす温度変化の影響は、ゴムの材料試験結果により評価できることを確認できた。

## 6. まとめ

免震建物を用いて静的加力実験と自由振動実験を行い、次のことが明らかになった。

- i. 静的加力実験と自由振動実験から得られた免震装置の水平剛性を比較し、免震建物の変位と周期の関係は、免震装置の静的加力試験から得られる割線剛性により評価できることを確認した
- ii. 天然ゴム系積層ゴムは、せん断変形率 100%の範囲においては、繰り返し変形による水平剛性の変化は、ほとんど見られなかった
- iii. 積層ゴムの水平剛性に及ぼす温度変化の影響は、ゴムの材料試験結果により評価できることを確認した

## 7. あとがき

本研究は、30 年前に日本で最初に実用化された免震建物を対象として実施している免震装置の経年変化に関する追跡調査の一環であり、これまでの検討で当初の設計条件の妥当性を確認でき、免震構造は十分な安全性と耐久性を有していることを確認した。今後は積層ゴムのクリープ変形や鋼棒製ダンパーの繰り返し変形における特性変化等について、引き続き検討を進める予定である。

本研究の遂行に当たり、共同研究者である福岡大学の高山峯夫教授と昭和電線ケーブルシステム社のご助力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

### 【参考文献】

- 1) 安倍 勇、大塚 将、佐藤幸雄、原田 治、田中宏和、「免震構造の設計と信頼性の実証」、奥村組技術研究年報、No.13、1987
- 2) 安井健治、早川邦夫、山上 聡、「建物に設置された

積層ゴムの経年変化」、奥村組技術研究年報、No.32、2006.7

- 3) 安井健治、早川邦夫、山上 聡、「積層ゴムの経年変化」、奥村組技術研究年報、No.33、2007.7
- 4) 舟木秀尊、安井健治、山上 聡、小山慶樹、「免震建物に設置された積層ゴムの経年変化」、奥村組技術研究年報、No.42、2016.9