

# 免震建物の維持管理に関する研究（その1）

——実免震建物の積層ゴムの経年変形状について——

中村 嶽 岡田 宏  
(本社 リニューアルセンター)

## Study on Maintenance Method for Base-isolated Building (Part 1)

——Deformation Characteristics of Natural Rubber Bearings in Actual Base-isolated Building——

Takashi Nakamura Hiroshi Okada

### Abstract

Rubber bearings in base-isolated buildings deform vertically and horizontally. Vertical deformation is caused by expansion/contraction effects due to temperature changes and by creep due to the long-term axial load of the superstructure. Horizontal deformation is caused by external forces such as winds and earthquakes. Monthly measurements of the temperature of a base-isolation system at the High Technology R&D Center in Obayashi Technical Research Institute and deformation of its natural rubber bearings using multi-micrometer have been made since 1986 to determine the influence of time on deformation as well as to improve maintenance management. Furthermore, hourly high-precision automatic measurements of deformation and temperature have been made since 1993 using newly-developed laser-displacement sensors and thermocouples. Vertical deformations and creep in the rubber bearings, and lateral deformations of the base-isolation system were estimated on the basis of these measurements. This system using laser-displacement sensors proved to have great advantages over the manual maintenance system.

### 概 要

免震システムの主要装置である積層ゴムには、気温変化に伴う膨張・収縮と長期の上部構造の荷重によるクリープの鉛直方向変形が生じると共に、風や地震等の外力による水平方向変形が生じる。積層ゴムの経年変化および維持管理に関するデータを得る目的で、1986年に大林組技術研究所内に建設された免震建物（ハイテク R&D センター）を対象に、免震システム部の気温とマルチマイクロメータによる天然ゴム系積層ゴムの変形計測を、ほぼ月1回の割合で約10年間継続して行っている。また、1993年からはレーザ変位計と熱電対を用いて、免震システムの変形と気温の1時間ごとの高精度な自動計測を実施している。これらの計測データを基に、積層ゴムの鉛直方向の気温による高さ変化量およびクリープ量の算定と、免震システムの水平方向の変形について検討を行った。また、今回開発したレーザ変位計による免震システムの維持管理手法の優位性および適用性を確認した。

### 1. はじめに

ここ最近実用化された免震建物においては、免震システムの主要装置として、積層ゴムが主に用いられている。これら免震建物においては、将来にわたり確実に免震機能を発揮し、建物の安全性を保持するように、免震システムの維持管理が建築センターの免震評定で義務づけられている。この維持管理には、おおむね半年ごとに実施する通常点検、竣工時の初期値を始めとした定期点検、およびある規定以上の大きさの地震入力や火災などの発生時に実施される臨時点検がある。定期検査や臨時検査には積層ゴムの変形やばね定数の検査項目があり、それ

ぞれ判定規準が設定されている。免震システムの維持管理上の問題点としては、実免震建物の事例増加は見られるが、建設されてまだ歴史が浅いため、積層ゴムの経年変化に関する維持管理データの蓄積が少ないことが挙げられる。

免震建物の積層ゴムには、鉛直方向に、日々および年間の気温変化に伴う膨張・収縮による高さ変化と長期の上部構造の鉛直荷重によるクリープ等の変形が生じる。また、水平方向に、風や地震等の外力による変形が生じる。この積層ゴムの変形に関するデータは免震建物の維持管理での計測により蓄積され始めているが、クリープに関するデータは少なく、小型の積層ゴムの加熱劣化促

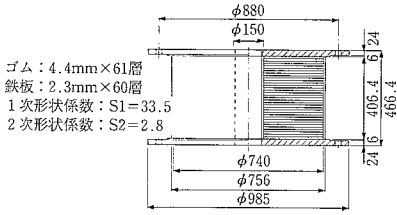


図-1 積層ゴム

表-1 ゴム基本配合

成分	重量 (%)
天然ゴム	68
カーボンブラック	18
加硫剤	2
その他 加硫促進剤 老化防止剤	12

表-2 ゴム基本物性

硬度 (JISA)	20%応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	破断伸び (JISK) (%)	引張強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )	せん断係数 G (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 E (kgf/cm <sup>2</sup> )
40±55	3.4±1	>500	>200	5.6	11.5

進試験データ<sup>1)</sup>や短期間の実験室レベルでの積層ゴムクリープ試験データ<sup>2),3)</sup>が提供されている程度である。

ここでは積層ゴムの経年変化および耐久性の評価と維持管理に関するデータを得る目的で、国内で最も早期に建設された免震建物 (ハイテク R&D センター: 東京都清瀬市の当社技術研究所内に1986年8月31日竣工) に関して、約10年間にわたる免震システム部の気温と天然ゴム系積層ゴムの変形を測定した結果について報告する。この積層ゴムの変形測定は、ほぼ毎月一回の割合で、マルチマイクロメータを用いた手作業により実施している。また、1993年からはレーザ変位計と熱電対を用いた1時間ごとの高精度な自動計測を開始し、より精密な計測データの蓄積を行っている。これらの計測データを基に算定した積層ゴムの気温による高さ変化量およびクリープ量の比較を行うと共に、風や地震等の外力による免震システムの水平方向の変形について検討を行った。また、今回開発したレーザ変位計による免震システムの維持管理手法の優位性および適用性を確認した。

## 2. 免震システムの概要

本免震建物は RC 造 5 階建てで、免震システムは天然ゴム系積層ゴムと鋼棒ダンパーおよび中小地震時の減衰を確保する摩擦型の補助ダンパーで構成されている<sup>4)</sup>。図-1 に積層ゴムの概要を示す。また、表-1 に積層ゴムのゴム基本配合を、表-2 にゴム基本物性を示す。図-2 に本免震建物の免震システムの配置と積層ゴムの設計軸力を示す。積層ゴムの平均軸力は約 200 tf で、その面圧は 50 kgf/cm<sup>2</sup>弱である。

## 3. 免震システムの変形測定方法と測定結果

### 3.1 従来の手作業による計測

積層ゴムの鉛直方向の変形は、1986年8月20日 (積層ゴムの初期高さを零と設定) よりほぼ1カ月ごとに、マルチマイクロメータを用いて14個の各積層ゴムの NS 方向 2 点のフランジ間の高さを計測し、同時に免震層の中央位置の気温を温度計の目読みにより測定している。

積層ゴムの水平方向変形は、後述のレーザ計測との比較データを得る目的で、1993年8月18日より、ほぼ一月ごとの手作業による積層ゴムの高さ計測と一緒に、傾斜計による積層ゴムの水平方向変形測定を行っている。

傾斜計による積層ゴムの水平方向変形測定は、各積層ゴムの EW (X 方向) および NS (Y 方向) 方向の 4 点の

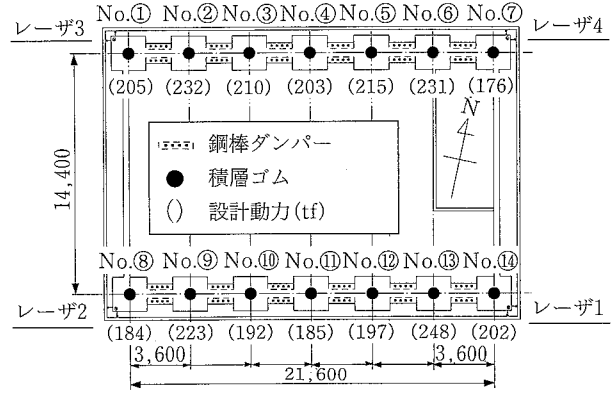


図-2 免震システムの配置

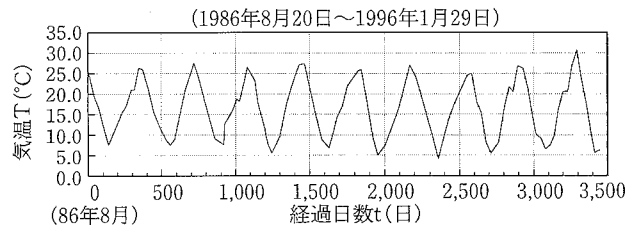


図-3 気温変化

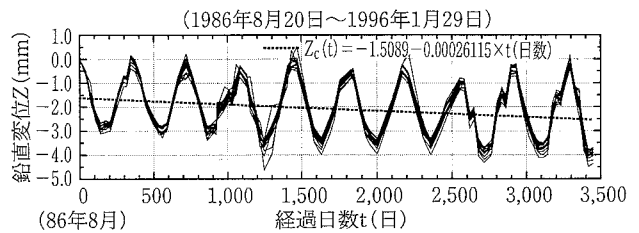


図-4 積層ゴム高さの変化

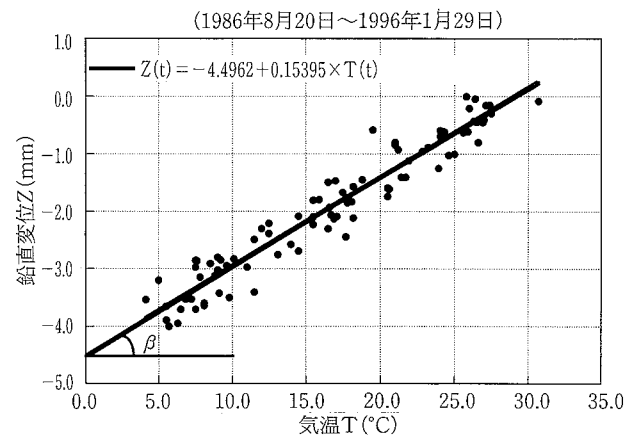


図-5 積層ゴム高さとの関係

上下フランジ間の鉛直よりの傾き  $\theta$  を傾斜計で測定し、X および Y 方向の平均の傾き  $\theta_x, \theta_y$  を求め、上下フランジ間高さ  $L$  を掛けて積層ゴムの水平変位  $X=L \times \tan\theta_x, Y=L \times \tan\theta_y$  を算出し、X 方向と Y 方向変位の自乗和の平方根により積層ゴムの水平変形量  $\delta h=(X^2+Y^2)^{1/2}$  を求めている。

3.2 レーザ変位計による計測

1993年8月より免震システムの経時変化を計測するために、図-2の免震層にレーザ変位計および熱伝対を設置し、上部建物の4隅の水平XYおよび鉛直Z方向の変位量と免震層中央部の気温を1時間ごとに計測しデータロガーに収録している。レーザ変位計の仕様は、水平方向(X, Y成分)の測定範囲は200~400mm( $\pm 100$ mm)で分解能50 $\mu$ m、鉛直方向(Z成分)の測定範囲は35~45mm( $\pm 5$ mm)で分解能2 $\mu$ mである。データのサンプリング時間を1時間としているため、強風や地震時の免震システムに生じる動的な変位の計測はできないが、免震システムの残留変形の計測は可能である。

4. 免震システムの変形状

4.1 積層ゴムの鉛直方向変形

4.1.1 手作業による計測結果 1986年8月20日から1996年1月29日までの約10年弱の期間にわたる手作業による計測結果について述べる。図-3に計測時の気温を示す。約10年間の免震層の気温変化は約25 $^{\circ}$ Cで最高気温は30.7 $^{\circ}$ C、最低気温は4.1 $^{\circ}$ C、平均気温は16.5 $^{\circ}$ Cである。図-4に14個の各積層ゴムNS方向2点の平均の高さの変化(鉛直変位)を示す。積層ゴム高さ変化は気温変化による伸縮が主で、年間約4mmでゴム総厚( $l=4.4$ mm $\times 61$ 層=268.4mm)の1.5%に達する。

図-4の積層ゴム高さ変化(初期値を零と設定)には経過日数と共に沈下(クリープ)の傾向が見られ、回帰分析により求めた線形回帰方程式を同図に示す。この線形回帰曲線の勾配を用い、かつ積層ゴムの初期高さを零としてクリープ算定近似式(1)を得る。

$$Z_c(t) = 0.00026115 \times t (\text{経過日数}) \quad \dots\dots(1)$$

式(1)で算定した1996年1月29日(経過日数3,449日)現在の積層ゴムのクリープ量  $Z_c$  は0.9mm(ゴム総厚の0.34%)と算定され、年間の温度変化による高さ変化より小さな値となる。また、60年後(経過日数21,900日)のクリープ量  $Z_c$  は5.7mm(ゴム総厚の2.1%)と推定される。

図-3の気温と図-4の積層ゴムの高さ変化には大きな相関が見られる。以下では気温と積層ゴムの高さ変化の関係より、積層ゴムの温度伸縮を評価し、温度補正を行って積層ゴムのクリープ量を算定する。

図-5に測定した全期間の気温  $T(t)$  を X 軸に、全積層ゴムの平均高さ  $Z(t)$  を Y 軸にプロットした関係を示す。積層ゴム高さとは線形関係を示し、求めた線形回帰曲線の勾配を積層ゴムの温度伸縮係数  $\beta$  (mm/ $^{\circ}$ C)と定義すると、 $\beta$  は約0.15 mm/ $^{\circ}$ Cとなる。図-

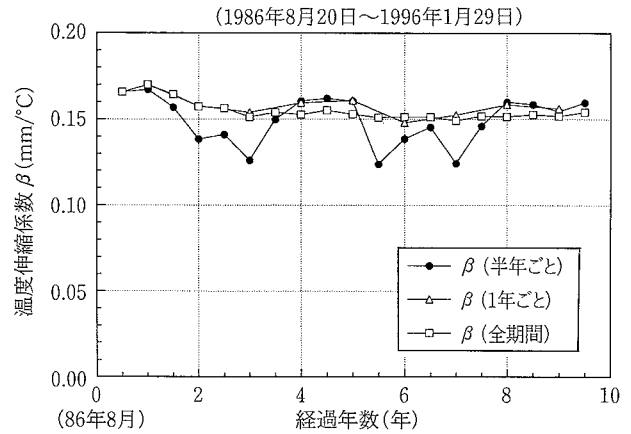


図-6 温度伸縮係数  $\beta$  の経年変化

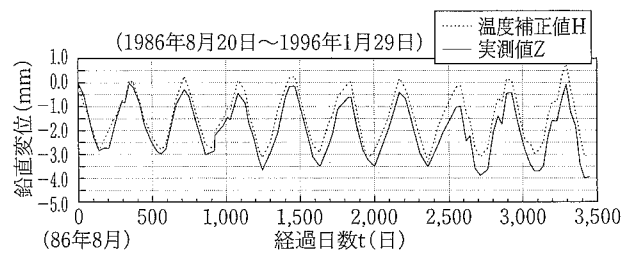


図-7 積層ゴム高さの推移

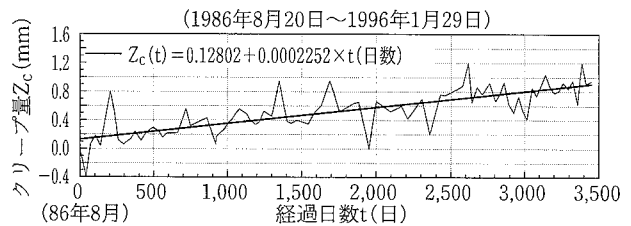


図-8 積層ゴムのクリープ量

6に、測定期間を温度の高い8月と低い2月の半年ごと、1年ごとおよび全期間と変えた場合の気温と全積層ゴムの平均の高さより求めた  $\beta$  を示す。半年ごとの  $\beta$  は経年で若干のばらつきが見られるが、平均の  $\beta$  はおおむね0.15 mm/ $^{\circ}$ C程度になり、経年による  $\beta$  の変化は無視しうる。

積層ゴムの見掛けの線膨張係数  $\alpha'$  は、内挿鉄板の線膨張係数 ( $\alpha_s=12 \times 10^{-6}/^{\circ}$ C) が小さいので鉄板部分の伸縮は考慮せず、 $\beta$  を積層ゴムのゴム総厚  $l$  で除した式(2)で求める。 $\beta=0.15$  mm/ $^{\circ}$ Cのとき、ゴム総厚  $l=268.4$  mmより  $\alpha'$  は  $5.6 \times 10^{-4}/^{\circ}$ Cとなる。

$$\alpha' = \beta / l \quad \dots\dots(2)$$

初期値を零とした気温変化  $\Delta T(t)$  による積層ゴムの温度補正高さ  $H(t)$  は式(3)で求める。

$$H(t) = \beta \times \Delta T(t) \quad \dots\dots(3)$$

積層ゴムのクリープ量  $Z_c(t)$  は、 $H(t)$  と実測の積層ゴム高さ  $Z(t)$  の差となり式(4)で求める。

$$Z_c(t) = H(t) - Z(t) \quad \dots\dots(4)$$

図-7に、図-6の通年の  $\beta=0.154$  mm/ $^{\circ}$ Cを用いて、

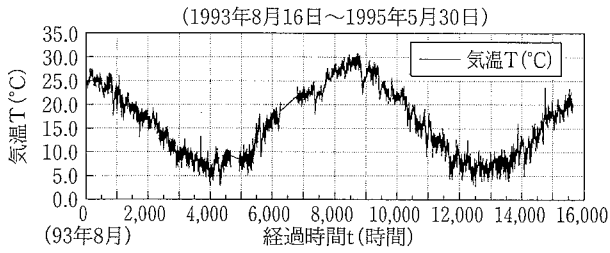


図-9 気温変化 (熱電対)

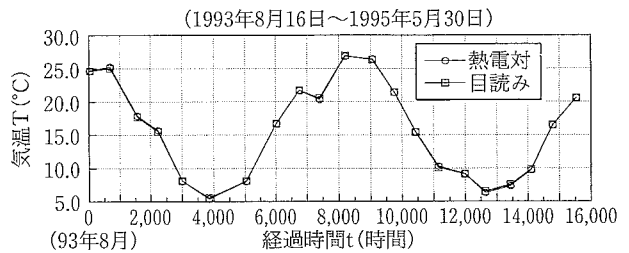


図-11 気温の比較 (目読みと熱電対)

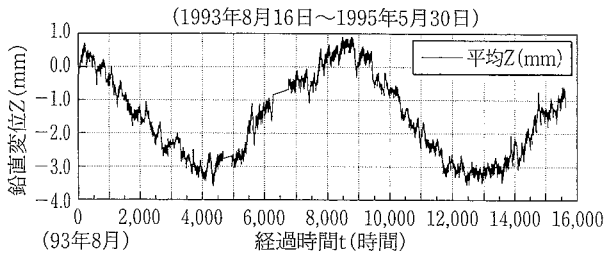


図-10 高さ変化 (レーザ計測)

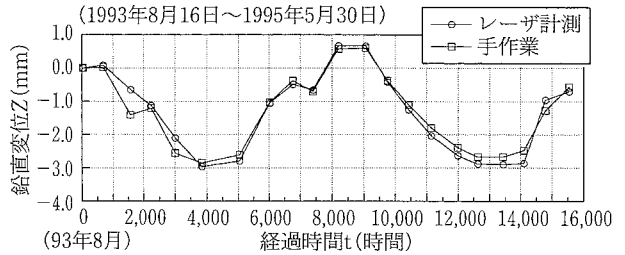


図-12 積層ゴム高さの比較 (手作業とレーザ計測)

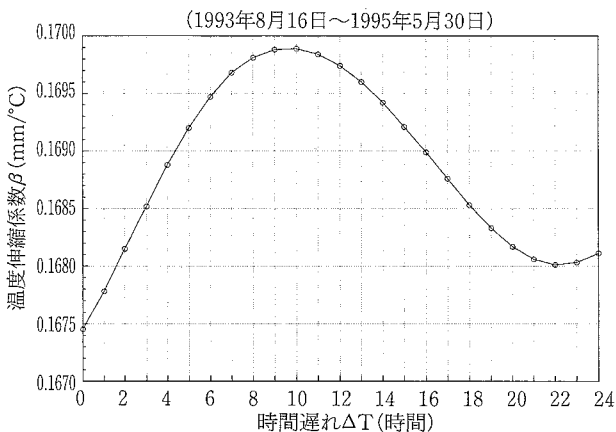


図-13 気温変化の時間遅れと温度伸縮係数  $\beta$

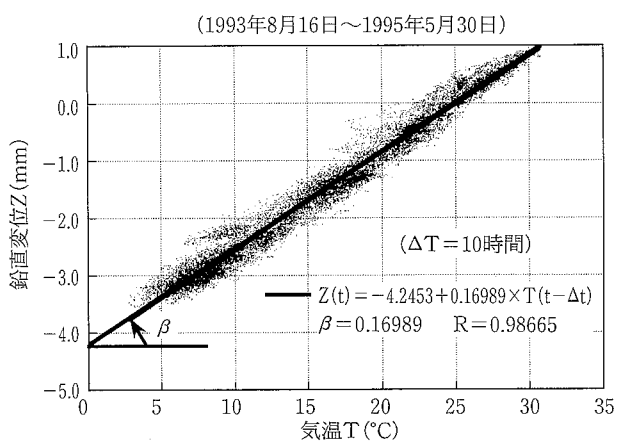


図-14 温度伸縮係数  $\beta$  ( $\Delta T = 10$ 時間)

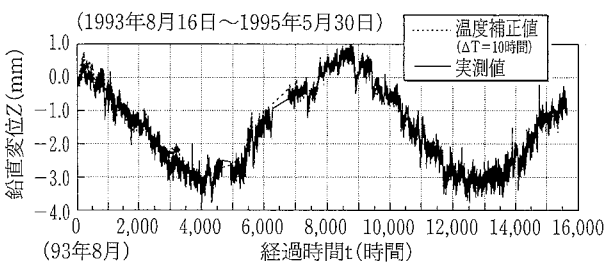


図-15 積層ゴム高さの推移 (温度補正值と実測値)

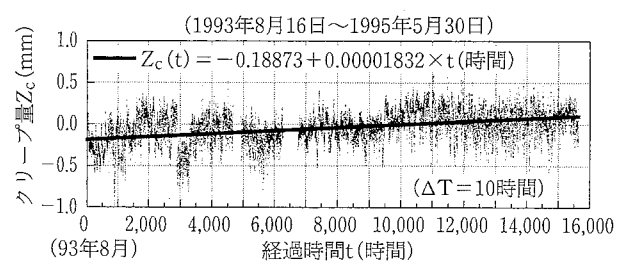


図-16 積層ゴムのクリープ量 (レーザ計測)

式(3)で求めた気温変化による積層ゴムの温度補正高さ  $H(t)$  と実測の積層ゴム高さ  $Z(t)$  の推移を示す。

図-8 に、式(4)を用い、図-7 の  $H(t)$  と  $Z(t)$  の差より求めた積層ゴムのクリープ量  $Z_c(t)$  および線形回帰によるクリープ量算定式(5)を示す。

$$Z_c(t) = 0.12802 + 0.0002252 \times t (\text{経過日数}) \quad \dots(5)$$

式(5)による1996年1月29日現在での積層ゴムのクリープ量  $Z_c$  は約0.9 mm (ゴム総厚の0.34%) と算定され、60年後のクリープ量  $Z_c$  は約5.1 mm (ゴム総厚の1.9%) と推定される。

4.1.2 レーザ変位計による計測結果 ここでは1993年8月16日から1995年5月30日までの期間のレーザ変位

計による計測結果について述べる。図-9に熱電対により計測した気温を示す。免震層の気温変化は約25°Cで最高30.8°C, 最低2.8°C, 平均気温は16.0°Cである。図-10に鉛直方向レーザ変位計4台の平均で求めた積層ゴム高さの変化を示す。積層ゴム高さの変化量は約4mmになる。

1993年8月16日から1995年5月30日までの期間でほぼ1カ月ごとの従来の手作業による計測値と毎時計測のレーザ測定値の比較を行って見た。図-11に温度計の目読みと熱電対の気温の比較を示す。また、図-12にマルチマイクロメータを用いた手作業とレーザ計測による積層ゴム高さの比較を示す。図-11の測定温度は良く一致しているが、図-12の積層ゴムの高さ測定には若干の差が見られる。これはマルチマイクロメータの使い方や読み方の個人差によるものと考えられるが、両者はほぼ対応していることが判る。

積層ゴムは気温の変化に伴って伸縮するが、気温変化が積層ゴム内部に伝導して伸縮するにはある程度の時間を要する。したがって、ある時刻に同時に測定した気温と積層ゴム高さには時間遅れがあり、当然図-9の免震層の気温変化と図-10のレーザ計測による免震層の高さ変化にも日変化での時間遅れがある。図-9の気温データを0時間から1時間ずつ最大24時間まで遅らした時の気温データと図-10の免震層の高さ変化との関係を回帰分析して求めた線形回帰曲線の勾配すなわち温度伸縮係数 $\beta$ を図-13に示す。時間遅れを補正しない $\Delta t=0$ 時間では $\beta=0.167\text{ mm}/^\circ\text{C}$ で線形相関係数 $R=0.972$ が得られ、 $\Delta t=10$ 時間の時間遅れ補正により最大の $\beta=0.170\text{ mm}/^\circ\text{C}$ で $R=0.987$ が得られる。積層ゴムの見掛けの線膨張係数 $\alpha'$ は、式(2)より、 $\Delta t=0$ 時間の $\beta=0.167\text{ mm}/^\circ\text{C}$ で $\alpha'=6.22\times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ が、 $\Delta t=10$ 時間の $\beta=0.170\text{ mm}/^\circ\text{C}$ で最大の $\alpha'=6.33\times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ が得られ、いずれも手作業による計測結果より大きな値が得られる。

図-15に、式(6)により求めた $\Delta t=10$ 時間の $\beta=0.170\text{ mm}/^\circ\text{C}$ を用いたときの初期値を零とした気温変化 $\Delta T(t-\Delta t)$ による積層ゴムの温度補正高さ $H(t)$ を示す。

$$H(t) = \beta \times \Delta T(t - \Delta t) \dots\dots\dots(6)$$

図-16に、 $\Delta t=10$ 時間の $\beta=0.170\text{ mm}/^\circ\text{C}$ のときの積層ゴムの温度補正高さから実測値を引いて求めた積層ゴムクリープ量 $Z_c$ と線形回帰による各クリープ量算定式(7)を示す。

$$\begin{aligned} Z_c(t) &= -0.18873 + 0.00001832 \times t(\text{経過時間}) \\ &= -0.18873 + 0.00043968 \times t(\text{経過日数}) \dots\dots(7) \end{aligned}$$

これより1993年8月16日(竣工7年目)から1995年5月30日現在の約2年間の積層ゴムのクリープ量 $Z_c$ は約0.10mm(ゴム総厚の0.04%)と算定され、竣工60年後の推定クリープ量 $Z_c$ は8.32mm(ゴム総厚の3.1%)と、手作業による計測結果の予測値より大きな値を得る。

以上より、高精度なレーザ変位計を用いた継続的な測定により免震システムの積層ゴムの鉛直変形のモニタリングが可能で、気温変化と積層ゴムの高さ変化との時間

遅れの評価を行って、積層ゴムの気温による高さ変形量とクリープ量の評価ができることが確認された。

4.1.3 積層ゴムの温度伸縮とクリープ量の検討 手作業の計測データより求めた本積層ゴムの温度伸縮係数 $\beta$ は約 $0.15\text{ mm}/^\circ\text{C}$ となり、この $\beta$ を積層ゴムのゴム総厚 $l$ で除して求めた天然ゴム系積層ゴムの見掛けの線膨張係数 $\alpha'$ は $5.6\times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ を得た。レーザ計測データの解析により、気温変化と積層ゴム高さ変化には10時間の時間遅れがあることが確認され、この時間遅れを補正して求めた精度の高い $\beta$ は約 $0.17\text{ mm}/^\circ\text{C}$ 、 $\alpha'$ は $6.3\times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ を得た。

手作業の計測データより求めた積層ゴムのクリープ算定式(1)と、温度補正を行って求めた積層ゴムのクリープ算定式(5)による、約10年経過した現在の本積層ゴムの推定クリープ量は同程度の0.9mm(ゴム総厚の0.34%)と算定される。式(1)は約10年間にわたる多くの測定データより求められたものであり、通常の免震建物では、積層ゴムのクリープ量は定期点検時の計測データに温度補正を行って求める必要がある。また、手作業のクリープ算定式(5)およびレーザ計測のクリープ算定式(7)による60年後の本積層ゴムの推定クリープ量は5.1~8.3mm(ゴム総厚の2~3%)程度となり、この結果より本免震建物においては、クリープの積層ゴムの耐久性や維持管理における問題は少ないと考えられる。

## 4.2 免震システムの水平方向変形

免震システムの本格的な水平方向変形の測定は、1993年8月16日より開始したレーザ計測により行っている。このレーザ計測との比較データを得る目的で、1993年8月18日よりほぼ1カ月ごとに、傾斜計を用いた個々の積層ゴムの手作業の水平方向変形測定を行っている。

4.2.1 手作業による計測結果 図-17に、1993年8月18日から1995年5月26日までの期間において、手作業による計測で求めた積層ゴム全体平均のX方向とY方向の水平変位の時系列データを示す。これによれば、X方向の最大全体変位は0.7mm程度で、Y方向の最大全体変位は-1.9mm程度となる。

### 4.2.2 レーザ変位計による計測結果

(1) 水平方向変形の時系列データ 1993年8月16日から1995年5月30日の期間において、レーザ計測で得た4測点のX, Yデータを平均して求めた免震層の中央位置のX方向水平変位 $X_c$ を図-18に、Y方向水平変位 $Y_c$ を図-19に示す。免震システムの水平変形は主に風外力によるものと考えられ、図-18のX方向最大水平変位は0.6mm程度、図-19のY方向最大水平変位は2mm程度であり、風の受圧面積が大きなY方向の変形が大きくなっている。

図-17の傾斜計による積層ゴムの水平変形の計測結果の平均値はおおむねレーザ計測データの平均値と対応しているが、個々の積層ゴムの計測値については数mm程度のばらつきが見られ、測定精度はレーザ計測が優れている。

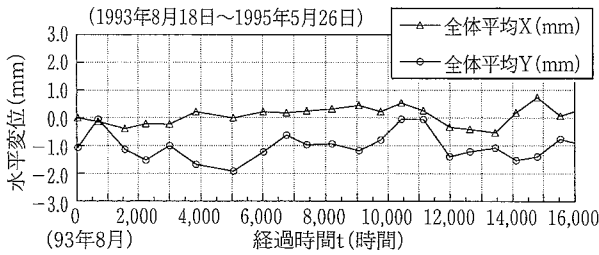


図-17 積層ゴムの水平変位量 (手作業)

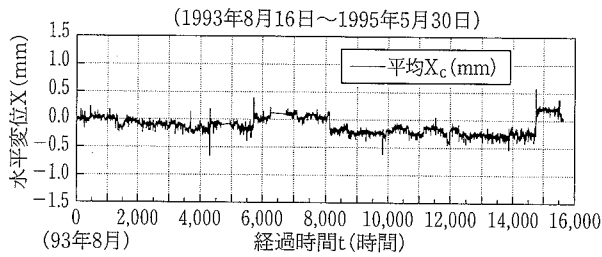


図-18 免震層の X 方向水平変位 (レーザ計測)

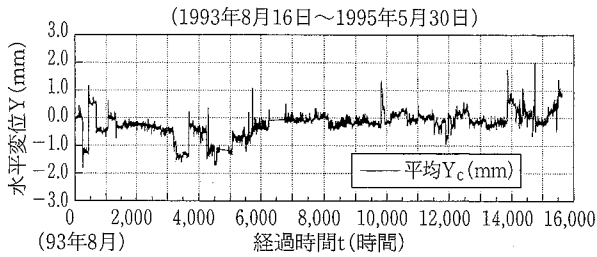


図-19 免震層の Y 方向水平変位 (レーザ計測)

(2) 風および地震による水平方向変形 本免震建物のレーザ計測期間中に観測された強風および地震による免震システムの変位記録の例を以下に示す。

図-20は1994年9月30日の台風9426号(観測最大瞬間風速24.08 m/sec)<sup>5)</sup>のときの免震層の中央位置の水平変位オービットを示す。風によりY方向に約1.5 mmの変位が生じている。図-21は1994年10月4日午後10時23分の北海道東方沖地震(M 8.1, 東京震度3)のときの免震層の中央位置の水平変位オービットを示す。地震によりY方向に約0.5 mmの残留変位が生じている。以上より高精度なレーザ変位計を用いた計測により、風および地震により生じる免震システムの水平変形のモニタリングが可能であることが確認された。

## 5. まとめ

過去10年間の実免震建物の積層ゴムの鉛直変形の計測より積層ゴムの変形性状を把握し、積層ゴムの温度変化による伸縮量とクリープ量の算定方法を提案した。積層ゴムの気温による高さの変化は大きく、年間の約25℃の気温変化によって積層ゴム高さは約4 mm変化するので、積層ゴムのクリープ評価には温度補正が必要である。計測データより算定した積層ゴムの温度伸縮係数 $\beta$ の経年変化は見られず、0.15 mm/℃程度で、そのときの積

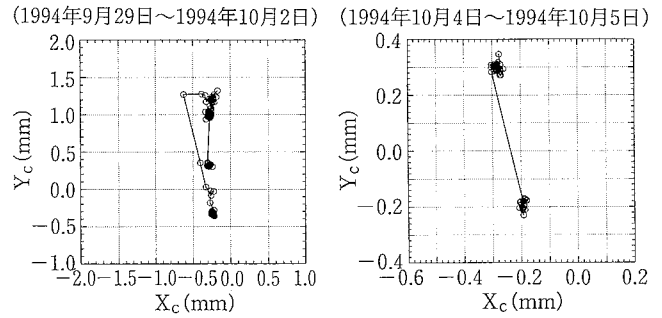


図-20 強風による免震層の水平変位オービット

図-21 地震による免震層の水平変位オービット

層ゴムの見掛けの線膨張係数 $\alpha'$ は $5.6 \times 10^{-4}/\text{℃}$ となる。気温変化による積層ゴム高さを実測の積層ゴム高さの差より積層ゴムのクリープ量算定式(5)を求めた。本積層ゴムの約10年間でのクリープ量は0.9 mm(ゴム総厚の0.34%)程度、60年後のクリープ量は5.1 mm(ゴム総厚の2%)程度と推定される。

高精度なレーザ変位計の自動計測により、免震システムの変形の日変化がとらえられ、気温変化と積層ゴム高さ変化には10時間の時間遅れがあることを確かめた。この時間遅れを補正して求めた $\beta$ は0.17 mm/℃で $\alpha'$ は $6.3 \times 10^{-4}/\text{℃}$ となる。同様な手法により求めたクリープ量算定式(7)による60年後の積層ゴムクリープ量は8.3 mm(ゴム総厚の3%)程度と推定され、手作業による結果より大きな値を得た。

免震システムの水平変形の計測においても、レーザ計測が従来の手作業による計測よりも優位であり、今後の免震建物の維持管理手法としての適用が期待される。

今後さらにこれらの計測を継続しながら、積層ゴムのクリープ量および変形性状を調べると共に、積層ゴムの剛性の経年変化に関する検討を進める予定である。

## 参考文献

- 1) 武田寿一編, 構造物の免震・防振・制振 技報堂出版, p. 54~55, p. 121~142, (1988)
- 2) 多田, 他: 免震構造に関する実物実験(その18) Isolatorのクリープ実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 387~388, (1988)
- 3) 多田, 他: 免震構造に関する実物実験(その19) Isolatorのクリープ実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 483~484, (1989)
- 4) 武田, 他: 構造物の免震に関する研究(その3) -ハイテク R&D センターの設計概要と性能確認のための実験と観測について-, 大林組技術研究所報, No. 36, p. 83~93, (1988)
- 5) 伊藤, 他: 台風9426号の風観測と免震建物の振動応答 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 297~298, (1995)
- 6) 中村, 他: 免震建物の維持管理に関する研究(その1: 実免震建物の積層ゴム高さの経年変化), 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 621~622, (1995)