

建物に設置された積層ゴムの経年変化

安井健治* 早川邦夫* 山上 聡*

1. はじめに

免震構造に用いられる積層ゴムの経年変化は、本構造の実用化が始まって 20 年程度にしか過ぎず、その実態を知るには、長期的な追跡調査を行う必要がある。

本報告では、竣工から約 20 年が経過した免震建物を対象として実施した、積層ゴム経年変化の試験結果について報告する。本試験では、試験機等の影響が小さい実免震建物における、静的加力試験および自由振動試験により、積層ゴムの経年変化を調べている。また、本建物では、竣工以来、強震観測を継続して実施しており、地震時の応答記録を用いて経年変化を検討する。



写真-1 対象建物

2. 対象建物および免震装置

対象となる免震建物は、つくば市内に建設された、当社の技術研究所管理棟（鉄筋コンクリート造 4 階）で 1986 年 9 月に竣工している。対象建物を写真-1 に示す。免震装置は、天然ゴム系積層ゴム 25 個と、鋼棒製ダンパー 12 基を使用している。建物概要と免震装置諸元を表-1 に、免震装置の配置を図-1 に示す。なお、本建物は、2005 年 6 月から 8 月にかけて、リニューアル工事を実施しており、経年時の試験は、工事終了後に実施している。ただし、リニューアル工事に際し免震装置の変更は行っていない。

表-1 建物概要と免震装置

項目	諸元	
構造	鉄筋コンクリート造 4 階	
高さ	15.5m	
建築面積	348.18m ²	
延べ床面積	1,330.1m ²	
軒高	13.75m	
基礎	場所打ちコンクリート杭	
免震装置	積層ゴム	天然ゴム系積層ゴム φ500×25
	ダンパー	鋼棒製ダンパー φ50×12

3. 試験方法

試験は、建物北側に構築された反力体に載荷装置を設置し、油圧ジャッキ（最大荷重：2,000kN）2 台を用いて実施した。加力位置を図-1 に、載荷装置を図-2 に示す。試験に際しては、耐圧盤から各油圧ジャッキ加力点近傍の上部構造に対し変位計を設置し、

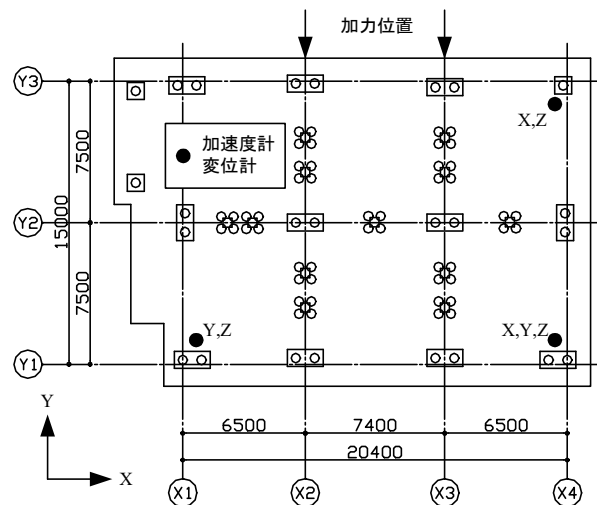


図-1 免震装置配置図

*技術研究所

耐圧盤と上部構造の相対変位を制御した。試験は、竣工時（1986年9月）、経年時（2005年9月）とも、同じ荷重装置を用いて実施している。荷重装置の設置状況を、写真-2に示す。竣工時と経年時における試験条件の差異として、試験時の気温、建物重量等が考えられる。しかし、気温については、試験の実施時期がいずれも8月中旬から9月であり、大きく異なることはない。

3.1 静的加力試験

静的加力試験は、荷重装置をセットした状態で、油圧ジャッキ2台を使用し実施した。加力は、建物が振れないように2台の油圧ジャッキの相対変位を制御し、さらに油圧ジャッキ2台の荷重の合計が、所定の荷重となるよう荷重制御した。目標とした最大荷重は、3,000kN（ダンパー無し）、2,500kN（ダンパー有り）であり、変形は、約100mm（積層ゴムせん断変形率 γ =約100%）を超えないものとした。荷重は、油圧ジャッキに取り付けられた圧力計より、ピストン面積を乗じて求めた。

3.2 自由振動試験

自由振動試験は、荷重装置をセットした状態で、油圧ジャッキを用いて上部構造を所定の変位（100mm）移動させた後に、解放ジャッキにより荷重装置を急解放し、上部構造を自由振動させた。

3.3 計測システム

静的加力試験については、各荷重ステップ時に、加力点の相対変位と各油圧ジャッキの圧力を計測し、荷重に変換し計測している。変位、荷重とも、それぞれ

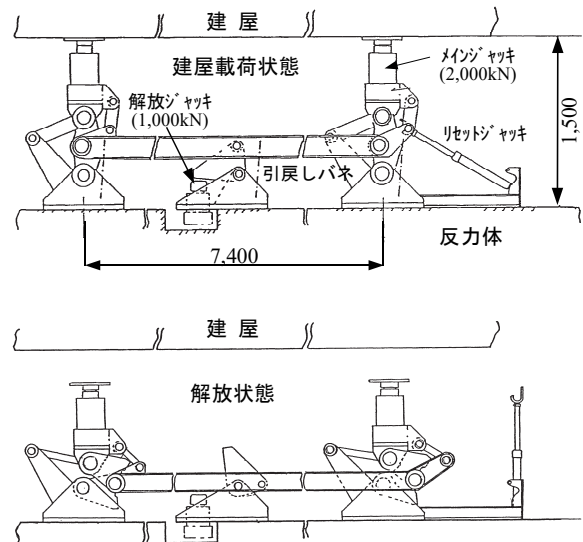


図-2 荷重装置

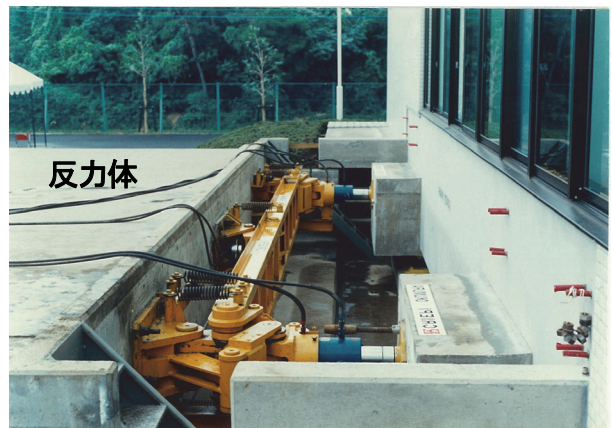


写真-2 荷重状況

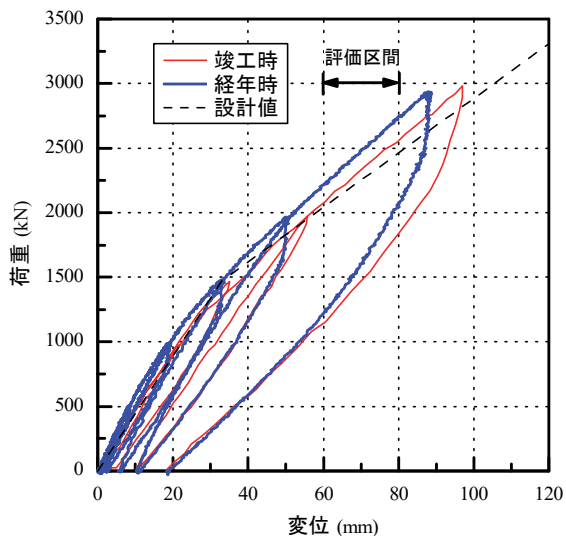


図-3 (a) 静的加力（ダンパー有り）

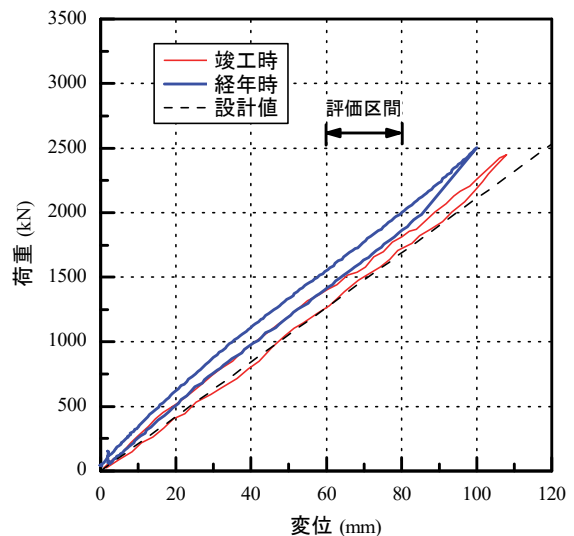


図-3 (b) 静的加力（ダンパー無し）

2加力点の値を平均したものを用いている。

自由振動試験については、加力点の相対変位および加力点上部に設置した加速度計より加速度を、サンプリング周波数 100Hz で収録している。変位、加速度とも、それぞれ2地点の平均を用いる。

4. 試験結果

4.1 静的加力試験

静的加力試験について、ダンパー有りの結果を図-3(a)に、ダンパー無しの結果を図-3(b)に示す。

60mm~80mm の区間で求めた剛性は、ダンパー有りの状態で、竣工時の剛性 25.0kN/mm に対して、経年時の剛性 26.6kN/mm となっている。また、ダンパー無しの状態では、竣工時の剛性 21.3kN/mm に対して、経年時の剛性 22.6kN/mm となっており、いずれも約6%剛性が高くなっている。

各変位における積層ゴムの剛性変化を評価するため、ダンパー無しの試験結果より、ゼロ-正側ピーク加力時の変位-荷重の関係を3次式に近似し、求めた近似式の変位-荷重関係より各変位における剛性を求めた。求めた各変位における積層ゴムの剛性を図-4に示す。各変位における剛性は、経年時が高くなっている。図-5には、各変位における竣工時と経年時の剛性の比率を示す。60mm 付近の比率は、比較的小さいが、変位が大きくなるにつれて、大きくなる傾向にある。0~100mm 間で平均すると約6%高くなっている。

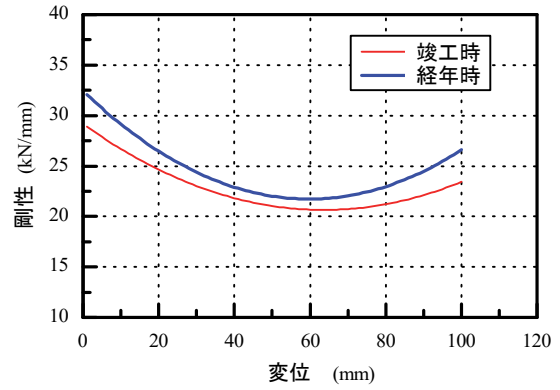


図-4 剛性 (ダンパー無し)

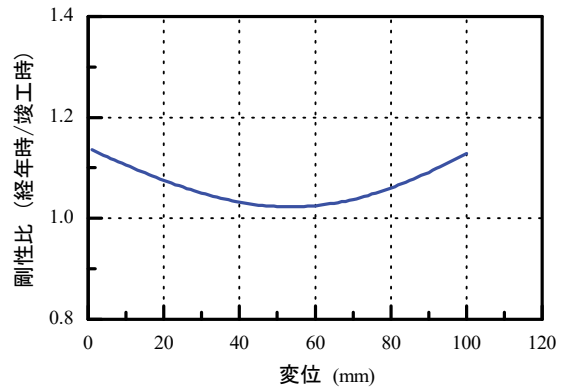


図-5 剛性比 (ダンパー無し)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (1)$$

T : 周期、m : 建物質質量、k : 積層ゴムの剛性

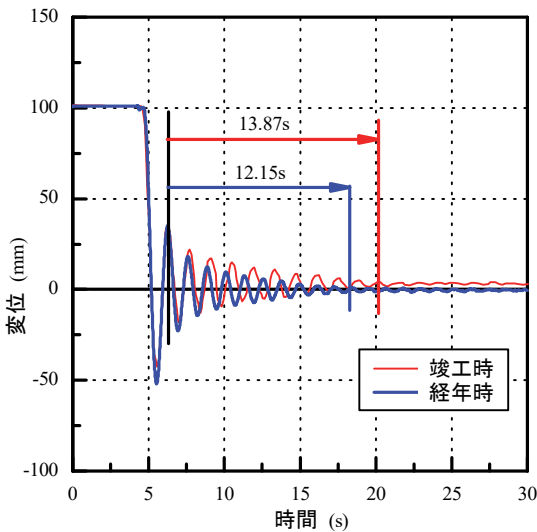


図-6(a) 自由振動試験 (ダンパー有り)

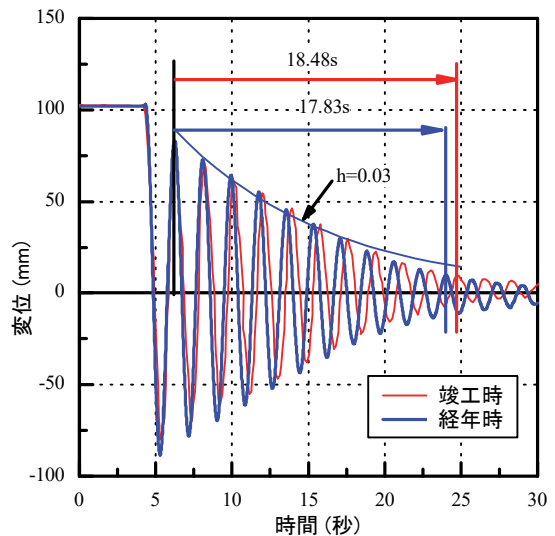


図-6(b) 自由振動試験 (ダンパー無し)

試験方法が異なるため直接比較できるものではないが、竣工後、約 10 年で実施した別置き積層ゴムの特性確認試験¹⁾では、積層ゴムの水平剛性の変化は、5%以内となっている。

4.2 自由振動試験

自由振動試験の結果（振れ成分を除去）について、ダンパー有りの状態を図-6 (a)に、ダンパー無しの状態を図-6 (b)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を用いて周期を評価する。ダンパー有りの場合、竣工時では、13.87 秒であったが、経年時には、12.15 秒となっており、約 12%短くなっている。ダンパー無しの場合、竣工時には、18.48 秒であったが、経年時には 17.83 秒となり、約 4%短くなっている。

ダンパー有りの状態における周期の変化は、積層ゴムの剛性変化に加え、変位が小さな状態における、鋼棒製ダンパーの効き具合が異なっていることが原因と考えられる。

積層ゴムの剛性変化を評価するため、ダンパー無しの状態において、免震建物を 1 質点の振動系とし、(1) 式における積層ゴムの剛性のみが変化すると仮定すると、自由振動 10 回繰り返し時の積層ゴムの変位、約 9cm から 2cm までの区間で、積層ゴムの剛性は、平均して約 7%高くなっている。

各変位レベルにおける、積層ゴムの剛性の変化を評価するために、各サイクルにおける周期と振幅を、図-7 のように求める。ダンパー無しの試験結果を用いて、1/2 サイクル毎に周期を評価したものを図-8 に示す。各振幅(a)における周期(T)は、振幅が小さくなるにつれて、周期も短くなる傾向にある。竣工時と経年時の各振幅における周期の比率は、ややばらつきが見られるものの概ね 4%程度短くなっており、(1) 式における、積層ゴムの剛性の変化として評価すると約 7%硬くなっている。

1/2 サイクル毎に全振幅を用いて評価した対数減衰率を図-9 に示す。変位 60mm 以上ではおおよそ $h=0.02$ 程度、それ以下では振幅が小さいほど減衰が大きくなる傾向にあり 20mm 程度では $h=0.04$ 程度と評価される。竣工時と経年時では、ほぼ同じ性状であり大きな変化はみられない。図-6 (b)には 10 サイクルの範囲における各ピークで評価した対数減衰率 $h=0.03$ を示す。

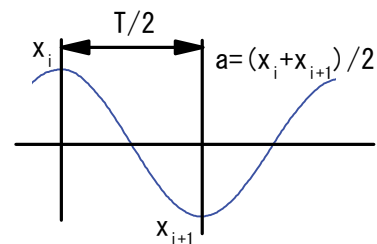


図-7 周期と振幅の評価

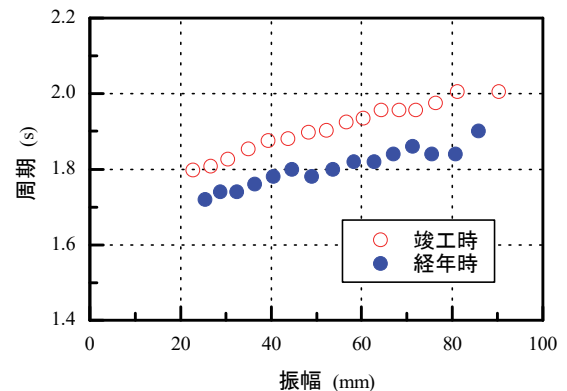


図-8 周期の変化（ダンパー無し）

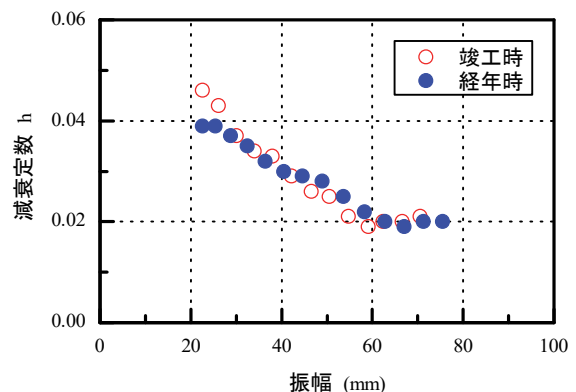


図-9 減衰の変化（ダンパー無し）

6. 強震観測

本建物では 1986 年の竣工以来、強震観測を継続して実施している。1 階加速度計と免震層変位計配置を図-1 に併せて示す。サンプリング周波数は、100Hz である。当初は、耐圧盤上の加速度記録が、震度 1 程度以上の記録を対象とし、計測された加速度の最大値が 1.0cm/s^2 以上の記録を対象としていたが、記録数が 100 を超えた、1994 年以降、1998 年までの期間は、処理する観測記録の対象を震度 4 相当以上とし、耐圧盤上で計測された加速度の最大値が 24cm/s^2 以上としている。そのため、この期間は、建物の応答が比較的

大きい場合の記録となる。また、1998年後半から、収録システム故障のため、一時観測を中断している。1999年に計測点数を縮小し、収録システムを更新したが、観測機器等に変更はなく、それ以降は、再び耐圧盤上の加速度記録より算定した震度階が1以上のものを対象として観測している。

観測開始以来、2005年9月までの期間に、対象となった地震記録は、234記録であった。各地震の震央位置を図-10に示す。これまで観測した記録で最も大きく建物が応答したのは千葉県東方沖地震(1987.12.17)で、その時計測された免震層の最大変位は、29mmであり、設計上は、鋼棒製ダンパーの弾性領域である。そこで、観測記録を用い、免震建物の固有振動数の変化を求めることにより、免震層の変化(積層ゴムの剛性変化)を検討する。対象とする期間は、建物の供用が始まった後(1986年10月)よりリニューアル工事前(2005年6月)までであり、その間、人員の増減はあったものの、建物質量に比すれば大きな変化は無い。

各観測記録の耐圧盤加速度記録と1階応答加速度記録(振れ成分除去)より求めた、フーリエ・スペクトル比より1次固有振動数を求めた。フーリエ・スペクトル算定に際してはバンド幅0.2HzのParzen Windowを用いて平滑化処理を行った。図-11に観測年月日と求めた固有振動数を、また、直近の気象台(土浦)における月平均気温を併せて示す。固有振動数の変化は気温との相関があり、温度が低くなるにつれて振動数が大きくなる傾向が見られる。また、全期間を通じてみれば、竣工後、年月が経過するにつれて、振動数が大きくなる傾向が見られる。

建物の応答変位(振れ成分除去)と固有振動数の関

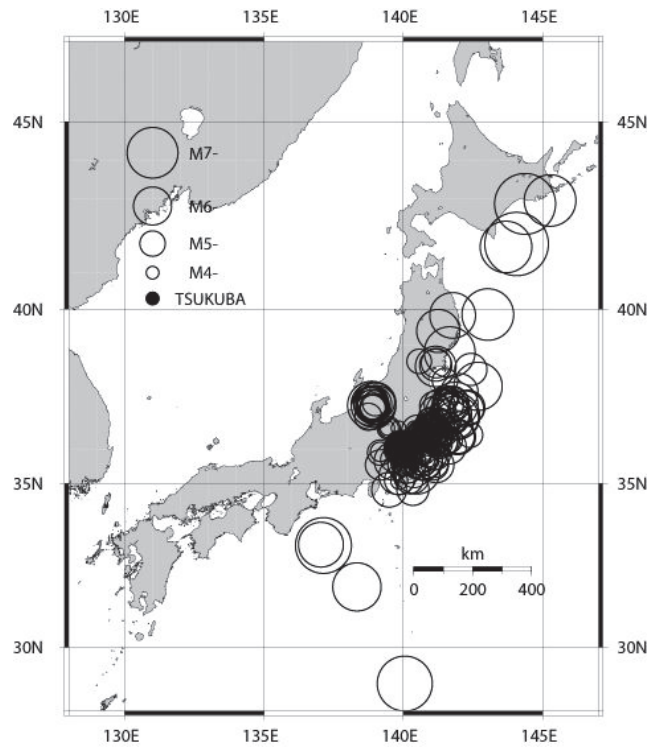


図-10 観測地震(1986年-2005年)

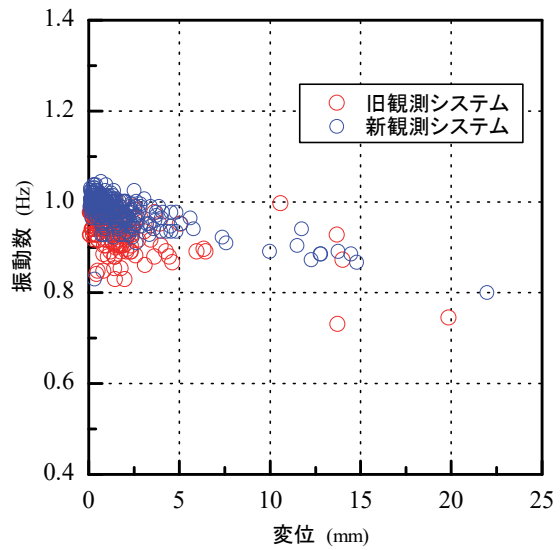


図-12 変位-振動数

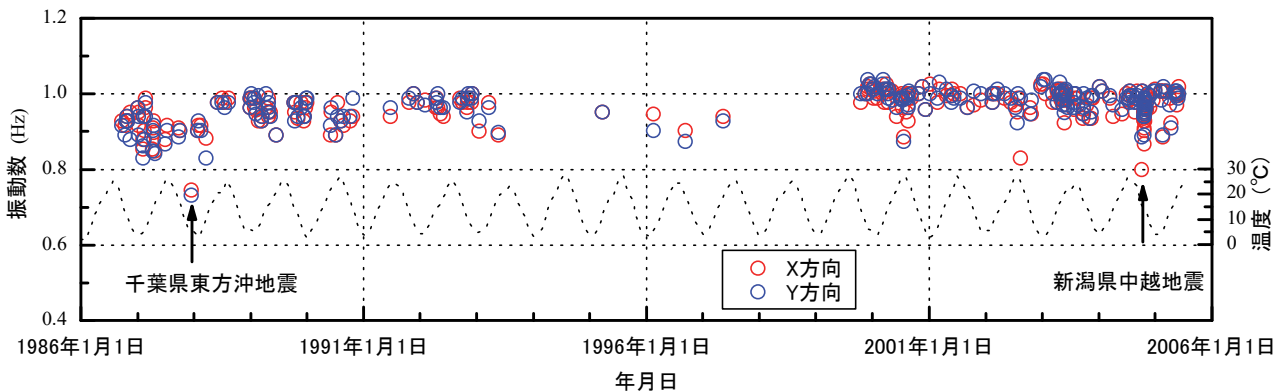


図-11 固有振動数と気温

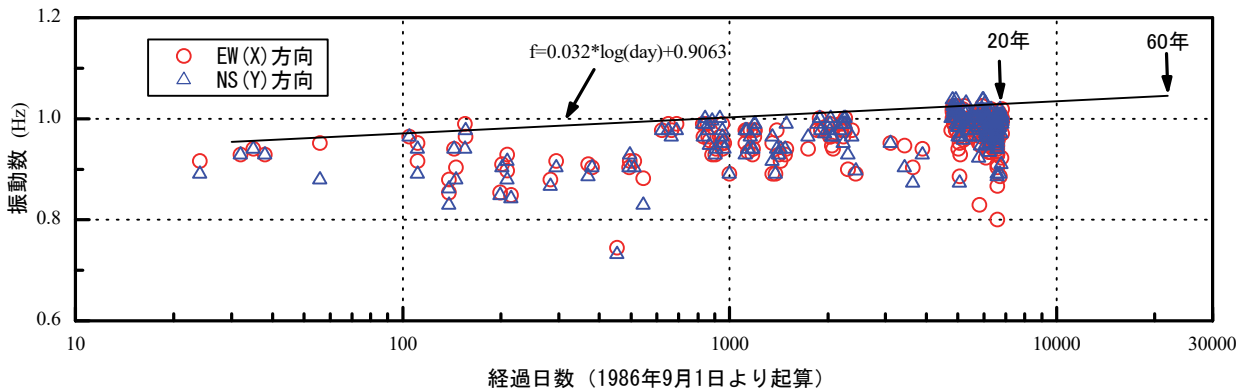


図-13 竣工後の経過日数と固有振動数

係を図-12 に示す。免震建物の固有振動数は、建物の応答変位が大きくなれば、小さくなる傾向にある。また、1998 年まで旧収録システムでの観測記録と、1999 年以降の収録システムとの観測記録を比較すると、新しい収録システムで観測された記録の振動数が、やや大きい傾向にある。図-13 には、1986 年9月1日からの経過日数を対数軸にとった場合を示す。経過日数が大きくなるにつれて、振動数が高くなる傾向がよくわかる。そこで、観測の対象が大きな記録となっている1994年から1998年までの期間を除き、各年の観測記録の中で最も振動数が大きかった記録を抽出し、対数軸上で近似式を求め、その推移を検討する。抽出された記録における免震層の変位はいずれも2mm以下であった。求まった対数近似式を(2)式に示す。

$$\text{振動数 (Hz)} = 0.032 \times \log(\text{経過日数}) + 0.9063 \quad (2)$$

対数近似した場合、固有振動数は、初期の変動を除くため、1年経過時と20年経過時を比較すると4.2%高くなっており、60年経過時には5.8%高くなると推定される。自由振動試験と同様に、免震層の剛性のみが変化したものとし、建物を1質点と仮定すると、その剛性は、20年で8.6%、60年で11.7%、堅くなると推定される。ちなみに設計時には、60年で20%の硬化を想定している。

6. まとめ

供用期間が、約20年経過した免震建物を対象として、静的加力試験および自由振動試験を実施した。また、継続して実施してきた強震観測の記録を用いて、免震層の水平剛性の経年変化について検討した。これらの結果を纏めると、以下の通りである。

- i) 静的加力試験および自由振動試験によれば、積層ゴムの水平剛性は6～7%程度硬くなっている(100mm程度の変形時)
- ii) 自由振動試験によれば、減衰性能に大きな変化は、無かった
- iii) 強震観測記録を用いた検討では、約20年間で、免震層の水平剛性は8～9%程度硬くなったと評価される(2mm以下の変形時)

7. あとがき

実免震建物における静的加力試験、自由振動試験および強震観測記録より、免震層の経年変化を評価することができたのは、有意義であった。本建物は、日本で最初に実用化された免震建物であり、今後も引き続き検討を続ける予定である。

謝辞

強震観測記録は、(財)電力中央研究所との共同研究「免震建屋地震観測」による。記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 早川他「積層ゴムの経年変化」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 569-570、1997年9月