

40 年間供用した天然ゴム系積層ゴム支承の経年変化

－別置き積層ゴム支承の調査結果と経年変化予測値の検証－

Aging Characteristics of Natural Rubber Bearings in a Base-Isolated Building after 40 Years of use - Survey Results of a Monitored Specimen and Validation of Long-Term Trend Forecasts for Natural Rubber Bearings -

山上 聡* 舟木秀尊* 洲鎌 星* 安井健治* 小山慶樹**

要 旨

免震構造の設計において、経年による積層ゴム支承の剛性変化は重要な要素である。一方で、設計時に考慮している水平剛性変化率は熱老化試験による予測値であり、実建物で使用されている実証例は少ない。そこで著者らは、実免震建物の竣工 30 年目までの、積層ゴムの水平剛性の経年変化を多角的に調査してきた。本報では、40 年目となる今回の結果を含め、これまでに得られた調査結果を総合的に整理し、建物の調査結果と積層ゴム支承単体での調査結果の整合性について検証した。また、設計時の予測値や既往の予測式を検証し、対象建物における天然ゴム系積層ゴム支承の経年による水平剛性変化率は熱老化試験による予測値と同程度であり、既往の予測式は実測結果に対して安全側の評価となることを確認した。

キーワード：天然ゴム系積層ゴム、経年変化、熱老化試験、予測式

1. はじめに

地震による被害を軽減するために、積層ゴム支承を採用した免震構造がある。免震構造は、構造物を地震の振動から切り離し、構造物自体に大きな力が作用しないようにして、「地震から免れる」という考え方に基いている。近年、積層ゴム支承の研究開発とコンピューター技術の発展による地震応答解析技術の進歩とあいまって、免震構造の実用技術が構築・整備されてきた。

積層ゴム支承には、ゴム材料を用いて長期間建物を支え続ける役割がある。地震時にはそのゴムが、周期 2~4 秒でゴム総厚の 200%程に及ぶせん断変形をすることで、上部構造物の応答を低減する。したがって、免震構造の設計においては、積層ゴム支承の経年による水平剛性の変化は重要な要素である。経年によって水平剛性が増加すると、地震時における上部構造物の応答加速度が増大し、建物の応答特性に影響を及ぼす可能性がある。そこで、積層ゴム支承の実用化にあたっては、水平剛性の経年変化を、ゴムの化学反応速度理論に基づく熱老化試験等により推定した。この試験方法は、ゴム材料としては一般的であるが、実建物において長期に渡り使用し、検証した例はなかった。そのため、実用化初期には、建物に設

置した積層ゴム支承とは別に、別置き積層ゴム支承や縮小試験体、ゴムブロック等をメーカーや建物内で保管し、定期的に性能確認を行っていることが報告されている¹⁾。また、同報告では、積層ゴム支承の経年変化調査に対し、問題点や提案が示され、実免震建物での観測や実大別置き積層ゴム支承での計測が継続的に行われることは、予測法の検証のためにも重要であると述べられている。

日本では、1983 年に積層ゴム支承を用いた免震建物としては日本初となる八千代台免震住宅が完成した。その後、1995 年に発生した兵庫県南部地震を機に免震構造が普及し始め、積層ゴム支承が建築物に適用され始めてから約 40 年が経過した。筆者らは、1986 年に竣工した免震建物を対象として、天然ゴム系積層ゴム支承(以下、NRB)の水平剛性やクリープ特性等に関する追跡調査を継続的に実施している。

その中で、竣工 30 年目には建物を水平載荷し励振させる自由振動実験、静的な加力実験から評価した水平剛性(以下、免震層特性)、および建物から抜き取った NRB(以下、抜取品)の水平剛性を確認し、その経年変化は設計時の熱老化試験による予測値以内であったことを報告した²⁾。本報では、建物外で保管していた別置き NRB、抜取品より得られた水平剛性および免震層特性

* 技術本部技術研究所建築研究グループ ** 技術本部技術戦略部

の整合性を検証するとともに、経年による水平剛性の変化率の予測式と比較し、40 年目の調査結果について報告する。

2. 対象建物と免震装置

対象となる免震建物は、1986 年 9 月に竣工した奥村組技術研究所の管理棟（茨城県つくば市）である。建物外観を写真－1 に、建物概要を表－1 に示す。4 階建の鉄筋コンクリート造で基礎免震構造を採用している。免震装置の配置を図－1 に示す。図中には、免震層特性の調査時の載荷位置と NRB を抜き取った位置も併せて示す。免震装置には NRB を 25 基、鋼棒製ダンパーを 12 基使用している。免震装置概要を図－2 に、積層ゴム支承の諸元を表－2 に示す。NRB のゴム径は直径 500 mm、ゴム層は 7 mm×14 層（総厚=98 mm）、1 次形状係数 $S_1=17.1$ 、2 次形状係数 $S_2=5.1$ である。

3. 免震層特性と採取品、別置き NRB の特性比較

3.1 免震層特性の調査

免震層特性の調査時の載荷状況を写真－2 に示す。写真－2 中の図に示すように、建物の外部に構築した反力体に載荷装置を設置している。静的加力および自由振動実験は南北方向の 1 方向について行う。それぞれの実験では、載荷装置に取り付けている 2 基の油圧ジャッキで建物を南へ最大 10cm 移動させる。静的加力実験はこの移動を 3 回繰り返し、これに要する荷重を計測している。一方、自由振動実験では建物を 10cm 移動させた状態で載荷装置を急速に開放し、建物を励振させ、変位の時刻歴を計測している。

竣工時(1986 年)、2 年目、19 年目、30 年目に実施した自由振動実験から得られた水平変位の時刻歴波形を図－3、静的加力実験から得られた荷重変位関係を図－4 に示す。両実験ともに、せん断ひずみ（積層ゴム支承のせん断変形量をゴム層総厚で除した値、以下、 γ ） $\gamma=100\%$ まで行っている。自由振動時の振幅と周期から算出した水平剛性（以下、剛性）と、静的加力時の割線剛性（当該変位における荷重点と原点を結んだ直線の勾配）を比較したものを図－5 に示す。免震層における自由振動時の動的な剛性と、静的加力時の割線剛性の両算定値は良く整合していた。

3.2 建物から抜き取った NRB の調査

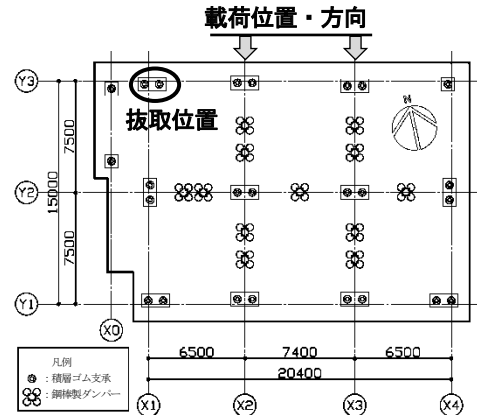
30 年目に、図－1 に示す NRB を建物から 2 基抜き取り、圧縮せん断試験機にて荷重変形関係を確認した。試験機の概要を図－6 に示す。この試験機では、試験機に発生する摩擦力の影響を除去するために NRB を 2 基用いて行うため、結果は 2 基の合計、評価は 2 基の平均となる。実験では、製品検査時に試験データを取ったもの



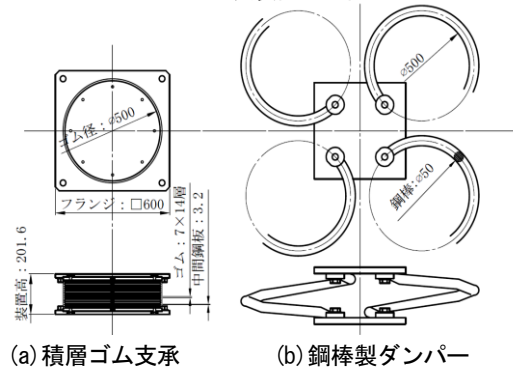
写真－1 建物外観

表－1 建物概要

項目	諸元
竣工年	1986 年
構造	RC 造 4 階 基礎免震
高さ	15.5m
建築面積	348.18m ²
延べ床面積	1,330.1m ²



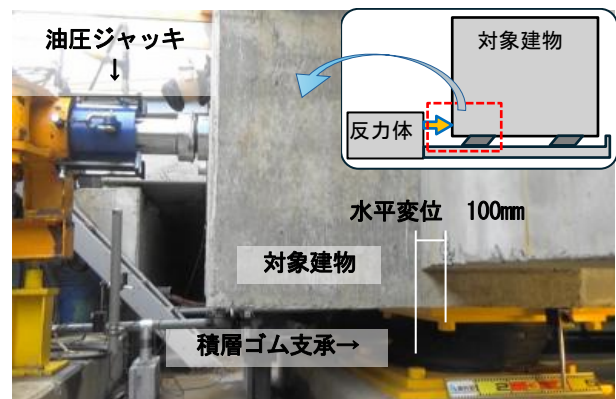
図－1 免震装置の配置 (単位:mm)



図－2 免震装置概要

表－2 積層ゴム支承の諸元

ゴムの特性	材質	天然ゴム
ゴムの特性	硬さ (JISA)	40±3
	25%応力	0.265±0.098 N/mm ²
形状	本体ゴム	φ500 t=7mm 14層
	形状係数	1次 $S_1=17.1$ 、2次 $S_2=5.1$



写真－2 載荷状況

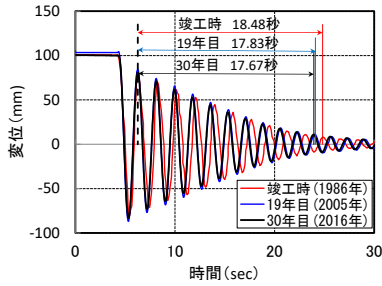


図-3 変位の時刻歴波形

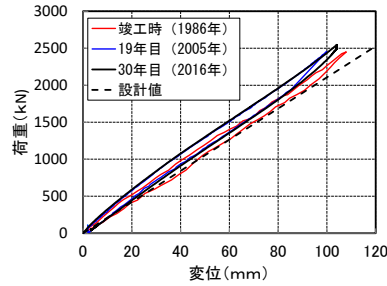


図-4 荷重変位関係

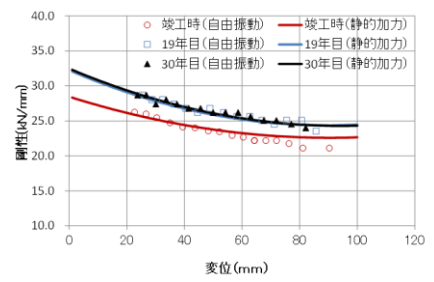


図-5 剛性の比較

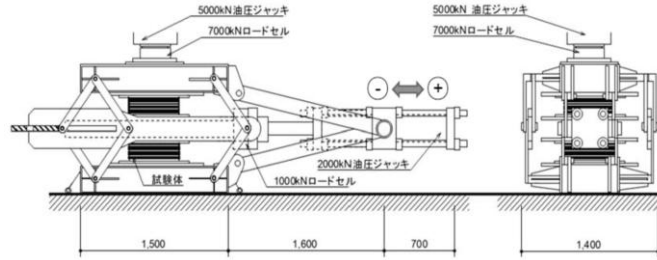


図-6 試験機の概要

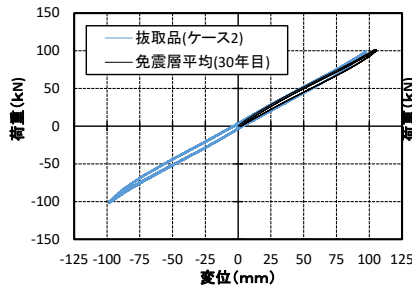
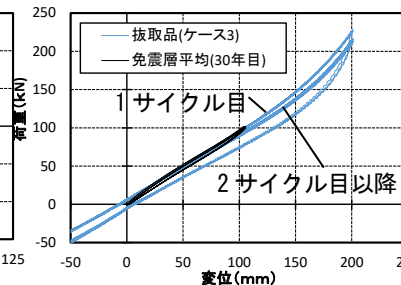
(a) 抜取品 $\gamma = \pm 100\%$ (b) 抜取品 $\gamma = \pm 200\%$

図-7 抜取品と免震層平均の荷重変位関係の比較

表-3 抜取品の試験パラメータ

ケース	面圧 [N/mm ²]	せん断ひずみ γ [%]
1	4.5	± 100
2	6.0	
3	6.0	± 200

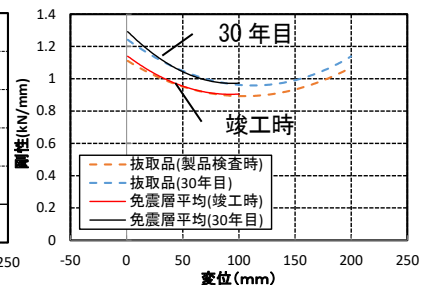


図-8 抜取品と免震層平均の水平剛性の比較

と比較するため、同じ NRB の組み合わせとなるものを建物から抜き取った。試験は表-3に示す2つのパラメータについて行った。NRB に付加する単位当たりの鉛直荷重（以下、面圧）の水準は、実建物での1基当たりの平均値の4.5N/mm²と製品検査時の6.0N/mm²とし、せん断ひずみの水準は建物での免震層特性調査時の $\gamma = \pm 100\%$ と製品検査時の $\gamma = \pm 200\%$ とした。ケース1が建物に使用されている状態を模した条件、ケース3がNRB 製品検査時の条件となる。試験は各ケースのそれぞれのせん断ひずみにおいて3サイクル行った。

抜取品と建物の静的加力実験結果の比較を図-7に示す。建物の静的加力実験の結果は、総NRB数25基で除した平均値（以下、免震層平均）である。ケース1、2における面圧の違いによる影響はほとんど見られなかったため、図-7(a)にはケース2のみを示す。免震層平均の荷重変位関係は、同図に示すように最大せん断ひずみ $\gamma_{\max} = 100\%$ までの抜取品と良好に一致していた。ケース3の $\gamma_{\max} = 200\%$ までの抜取品との比較を図-7(b)に示す。図は免震層での調査結果と比較するためプラス側の結果を示す。免震層平均は、抜取品での繰り返しの影響のない1サイクル目と良く一致していた。抜取品と免震層平均の水平剛性の比較を図-8に示す。抜取品はケース3における1サイクル目を示している。免震層平均と抜取

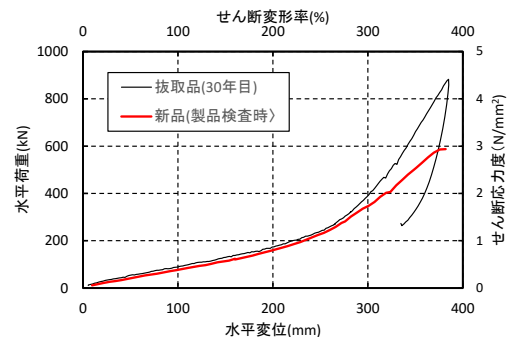


図-9 終局耐力の比較

品の水平剛性とその変化は良好に一致しており、抜取品は建物に設置した NRB の平均的な特性を示すことを確認した。

抜取品については、別の圧縮せん断試験機にてせん断ひずみの限界性能を確認した。製品検査時の限界性能試験において、表-2と同じ型式で面圧 6.0N/mm² の試験から得られている荷重変形率関係との比較を図-9に示す。30年目に抜き取ったNRBの試験結果では、 $\gamma = 300\%$ 以降に急激な剛性増大が見られたが、新品時と同等の $\gamma = 370\%$ という変形能力を維持していることが明らかとなった。

3.3 別置き NRB の調査

建物に実使用されている NRB とは別に、建物外に保管した別置き NRB (以下、別置き) の 1986 年（製品検査

時)、2007 年(21 年目)、2016 年(30 年目)における水平方向の荷重変位関係を図-10 に示す。別置きは 3 体(それぞれ No.2、3、4 とする)あり、それらは免震建物と同じ敷地内の倉庫で保管している。倉庫内は免震層に比べて温度変化は大きい、直射日光は当たらない環境である。

試験は、図-6 に示した試験機を用いて 3 サイクルの繰り返し载荷を行った。また、製品検査時の結果は、実建物に使用している、別置きと同ロットの NRB(NRB-A、B、C)との組み合わせで行った試験の結果である。そのため、直接の比較は出来ないが、製品検査における別置きを含む 3 ケースの平均剛性は 0.79 kN/mm であり、建物に設置したものを含む全平均値と同程度(±0.9%)であった。また、製品検査時および 21 年目は水平変形 ±200 mm ($\gamma = \pm 200\%$) までの試験を行ったが、30 年目は別置きの試験時にゴムに亀裂が生じないよう水平変形 ±150 mm ($\gamma = \pm 150\%$) で試験を行った。なお、図-10 では各荷重変位関係を比較しやすいよう、21 年目を中心に製品検査時を +200kN、30 年目を -200kN、さらに各試験ケースを ±50kN オフセットして示してある。荷重変位関係を比べると、製品検査時および 21 年目は、繰り返し依存性により 2 サイクル目以降の荷重の低下が見られるが、その変化は 21 年目のほうが小さい。また、30 年目は水平変位が短く、2 サイクル目以降の荷重の低下があまり見られない。これは、2 サイクル目以降は経験した最大変形の影響を受けるが、30 年目は 150mm と小さいこと、経年変化の影響により、1 サイクル目と 2 サイクル目の差も小さくなったことが原因と考えられる。

別置きと採取品との荷重変位関係の比較を図-11 に示す。両者の荷重変位関係は概ね一致しており、1 サイクル目より 3 サイクル目のほうが荷重は小さいが、竣工時に対する経年時の傾きの変化(経年変化)は 3 サイクル目のほうが大きい。3 サイクル目の剛性の比較を図-12 に示す。別置きと採取品の各変位における剛性とその変化の傾向は概ね一致しており整合性が確認できた。

以上の検証結果から、免震層平均と採取品、別置きの水平剛性の整合性を確認できた。また、別置きによって実建物に設置された NRB の水平剛性の経年変化を評価できる可能性を確認した。

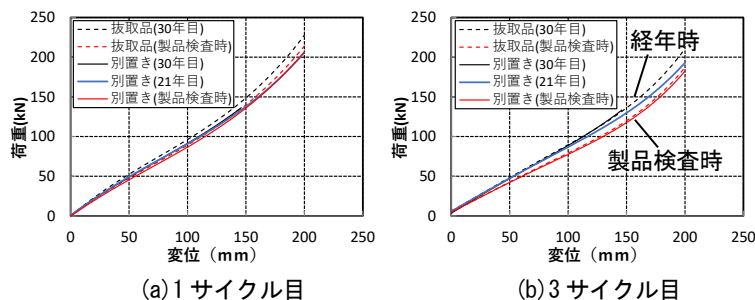


図-11 別置きと採取品の荷重変形関係の比較

4. 経年による剛性変化率の予測値の検証

せん断ひずみ $\gamma = 100\%$ における免震層平均、採取品および別置きの剛性変化率を、設計時の熱老化試験による予測値と比較したものを図-13 に示す。図中に示す熱老化試験①は、NRB の酸化劣化を把握するために、 $\phi 400$ mm の NRB を空气中で加熱し剛性を測定した結果($\gamma_{\max} = 250\%$)、熱老化試験②はゴム材料の温度劣化による特性変化を把握するために、せん断試験片を窒素中で加熱し剛性を評価した結果である。

建物での静的加力実験や自由振動実験の結果に比べ採取品や別置き(NRB 単体)の変化率が大きい理由は、異なる最大せん断ひずみ($\gamma_{\max}$)での繰り返し载荷による影響と考えられる。ゴムの剛性は、経験した最大せん断ひずみの繰り返し载荷により、2 サイクル目以降は低下することが知られている³⁾。3 章に示す各調査では、その最大せん断ひずみが大きいほど 2 サイクル目以降の剛性低下率は大きく、また、経年によりその低下率は小さくなる傾向にあった。そのため、 $\gamma_{\max} = 200\%$ の性能検査を行った採取品や別置きによる NRB 単体の剛性変化率は、試験条件の近い熱老化試験①の結果と同程度であったと考えられる。

積層ゴムの経年による剛性変化に関する主な研究として、伊藤らによるゴム材料の熱老化試験の研究結果⁴⁾をもとに、栗田らが円形の積層ゴムにおける水平剛性経年変化の予測式を提案⁵⁾している。これを基に日本免震

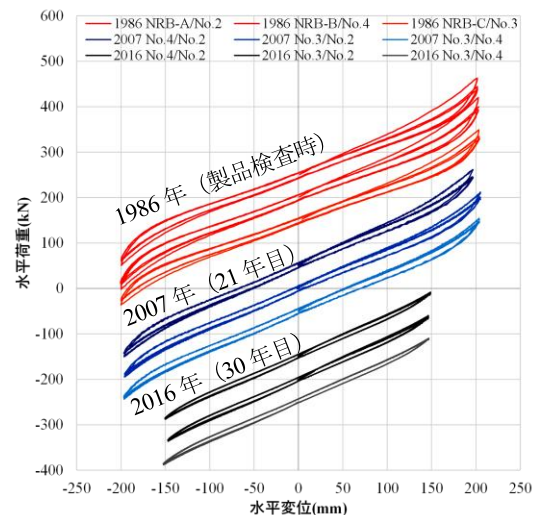


図-10 別置きの荷重変位関係

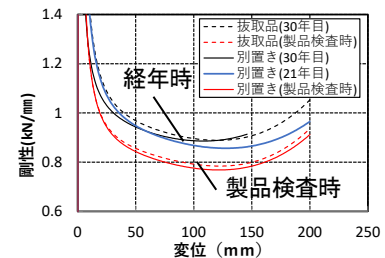


図-12 別置きと採取品の剛性比較(3 サイクル目)

構造協会(以下、JSSI)から提案された予測式(1)⁶⁾を図-13に併せて示す。

$$\frac{K_h}{K_{h0}} \cong 1 + (1 - k_s \rho) \Delta f_i + k_s \rho \Delta f_s \quad (1)$$

ここで、 K_{h0} 、 K_h ：それぞれ経年変化前後の水平剛性
 k_s ：形状、サイズによる剛性変化率
 ρ ：被覆ゴムと酸化深さの係数
 Δf_i ：温度劣化による変化率
 Δf_s ：酸化劣化による変化率

(1)式中、第1項は初期値で1とし、第2項が温度劣化分、第3項が酸化劣化分の足し合わせとなっている。JSSI 予測式の温度劣化分は熱老化試験②と、酸化劣化分は熱老化試験①と同程度あるが、累加することで、剛性変化率が大きく評価される。対象建物の実測値と比較した結果、JSSI 予測式は経年による剛性変化を安全側に評価することを確認した。

5. 40 年目の調査結果

5.1 自由振動実験

対象建物は、2026 年に竣工から 40 年目を迎える。そこで、免震建物の 40 年目の剛性変化を確認するため、自由振動実験による経年変化の調査を実施した。自由振動実験の方法は、3.1 節と同様である。調査はこれまで 9 月に実施してきたが、今回は気温が 9 月にほぼ近い 6 月に実施した。各調査年における自由振動波形の比較を図-14に示す。自由振動実験における 10 波周期は 30 年目(2016 年)より短くなっているが、その間隔は 19 年目から 30 年目よりも大きい。この要因として、31 年目(2017 年)に行った NRB2 基の交換による剛性の変化や、33 年目(2019 年)に行った対象建物の大規模改修工事による建物の重量減少の影響、調査時の気温の影響などが考えられる。30 年目から 40 年目の間に行った自由振動実験の結果を図-15に示す。

経年による水平剛性の変化を評価するには、上記の影響を補正する必要がある。そこで、5.2 節に NRB の交換の影響について、5.3 節に改修工事による影響について考察し、5.4 節にそれぞれの影響を考慮した水平剛性の変化を示す。なお、評価にあたっては振幅の影響が小さくなるように、振幅 80~40mm 程度の範囲の 5 波を用いた。表-4に各計測時における免震層内温度と 5 波の周期、剛性の温度補正係数を示す。剛性の温度補正は、30 年目の調査結果をもとに $-0.2\%/^{\circ}\text{C}$ とし、 25°C を基準とした。

5.2 積層ゴム支承の交換による剛性変化

前述の 3.2 節に示した抜取品と交換した新品 2 基の NRB の荷重変位関係を図-16に示す。交換品の傾きは、抜取った NRB より小さく剛性が低い。30 年目の調査で、 $\gamma=100\%$ までの建物の実験結果と特性が近い 1 サイクル目に着目し、変位 40mm から 80mm における割線剛性の

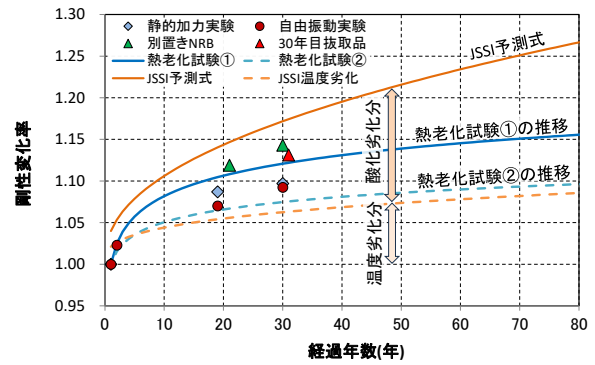


図-13 剛性変化率の実験値と予測値との比較

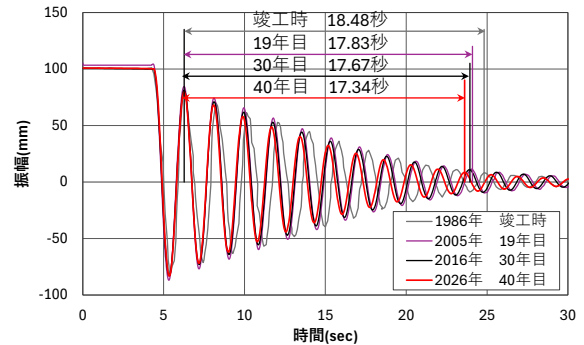


図-14 自由振動波形の比較

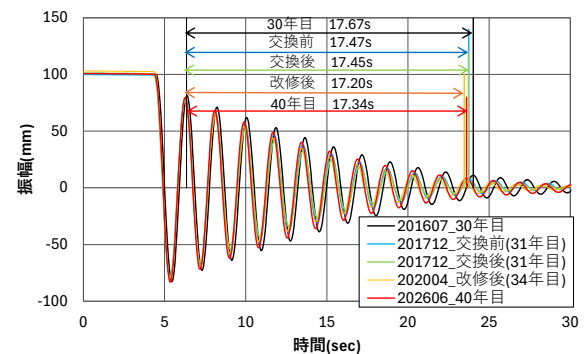
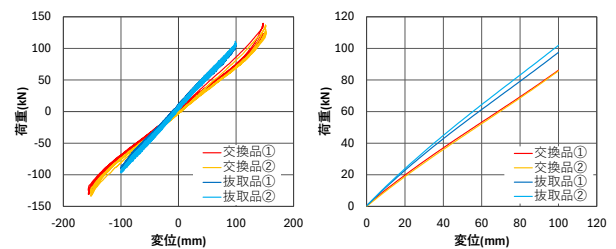


図-15 30 年目から 40 年目の自由振動波形

表-4 5 波の周期と免震層内温度、温度補正係数

調査時期	免震層内温度(°C)	5 波周期(s)	剛性の温度補正係数(25°C)
1986 年 竣工時	25	9.54	1.0
2005 年 19 年目	25	9.09	1.0
2016 年 30 年目	22	9.04	0.994
2017 年 交換前	12	9.00	0.974
2017 年 交換後	11	9.02	0.972
2020 年 改修後	14	8.88	0.978
2026 年 40 年目	22	8.90	0.994



(a) 全サイクル (b) 1 サイクル目

図-16 交換した NRB の荷重変位関係

平均値を比較すると、交換品が 0.88kN/mm に対し、抜取品は 1.05kN/mm であった。抜取品は建物の全体の平均的な特性を示していたことを考慮すると、25 基中 2 基の剛性が 0.84 倍になっており、全体の水平剛性は交換前の 0.987 倍になったことになる。建物を 1 質点系モデルと仮定すると、固有周期は約 1.006 倍に増加すると推定される。

交換前後における自由振動実験の結果を比較した変化率を表-5に示す。建物における自由振動実験の結果から得られた剛性変化率は 0.994~0.996 で、交換前後の NRB 単体試験より算定した変化率 0.987 より、約 0.8% 小さくなった。

5.3 建物の改修工事による影響

33 年目（2019 年）に行った改修工事では、EV の新設による躯体の一部撤去や太陽光パネルの設置による屋上仕様の変更があったため、設計上の躯体重量が 22,025kN から 21,575kN と、0.980 倍になった。周期は約 0.990 倍に短縮されると推定される。

改修前後における自由振動実験の結果を比較したものを表-6に示す。自由振動実験の結果から得られた重量変化率は 0.963~0.969 で、設計値から算定した変化率 0.980 より約 1.5% 小さくなった。

5.4 40 年目の剛性変化率

NRB の交換による剛性低下と、建物の改修工事による建物重量の低減を考慮して自由振動実験の周期を補正し、経年による剛性変化率を推定した。図-17(a)に温度影響を非考慮とした場合、図-17(b)に温度影響を考慮した場合を示す。温度影響を非考慮とした場合のほうが剛性変化率は大きく 40 年目では 1.12 倍となる。

剛性変化率が大きい温度影響を非考慮とした場合の 5 波周期を用いて推測した剛性変化率と、熱老化試験による予測値との比較を図-18に示す。従来の 10 波周期での評価時より変化率は大きい傾向を示した。また、温度が低い時期に自由振動実験を行った NRB 交換後と建物改修後の剛性変化率はやや大きい傾向にある。しかし、経年による剛性変化の推移は熱老化試験による予測値をほぼ下回っており、設計当初の予測の範囲内で推移していることを確認した。

6. まとめ

竣工から 40 年を迎えた免震建物を対象に、これまで行った積層ゴム支承の水平剛性に関する調査結果を、条件変化や新たな知見を考慮し、40 年目と合わせて検証し、次のことがわかった。

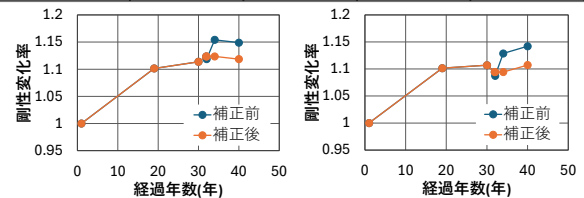
- i. 抜取品と別置きの水平剛性の経年変化は概ね一致し、実建物で使用されている NRB の水平剛性の経年変化は別置き NRB で評価が可能であることを確認した

表-5 交換前後での変化率

温度の影響	5 波周期(s)			剛性変化率
	交換前	交換後	変化率	
非考慮	9.00	9.02	1.002	0.996
考慮	9.12	9.15	1.003	0.994

表-6 改修前後での変化率

温度の影響	5 波周期(s)			重量変化率
	改修前	改修後	変化率	
非考慮	9.02	8.88	0.9845	0.969
考慮	9.15	8.98	0.9815	0.963



(a) 温度影響非考慮 (b) 温度影響考慮

図-17 補正前後の剛性変化率

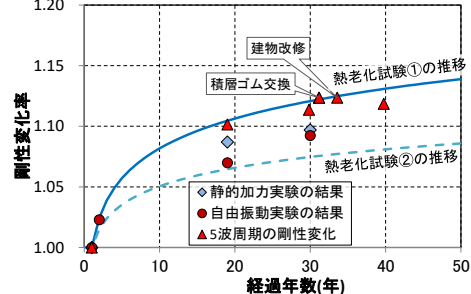


図 18 経年による剛性変化率の推移（温度補正無）

- ii. NRB の水平剛性の経年変化は、40 年経過時点においても設計時の熱老化試験による予測範囲内にあり、NRB の長期耐久性が確認された

なお、40 年目調査結果の詳細については、現在分析を進めている。

【参考文献】

- 森田慶子、高山峯夫、「免震用積層ゴム支承アイソレータの経年変化調査の実態把握」、日本建築学会技術報告集、第 19 巻、第 41 号、pp.31-35、2013
- 山上 聡、安井健治、舟木秀尊、小山慶樹、洲鎌星、三須基規、清水美雪、高山峯夫、森田慶子、「実建物で使用されている天然ゴム系積層ゴムの経年変化に関する研究」、日本建築学会構造系論文集、第 90 巻、第 836 号、pp.1167-1176、2025
- 森下善広、角田克彦、「架橋ゴムの応力-ひずみ曲線の基礎知識」、日本ゴム協会誌、第 94 巻、第 4 号、2021
- 伊藤義人、佐藤和也、顧 浩声、山本吉久、「橋梁用天然ゴムの長期劣化予測に関する基礎的研究」、土木学会論文集、No.801/I-73、pp.185-196、2005
- 伊丹十夢、栗田 哲、飯山かほり、「中心孔を有する天然ゴム系積層ゴム支承の水平剛性経年変化予測に関する研究」、日本建築学会大会学術講演梗概集、21269、2013
- 積層ゴム別置き試験体の特性調査委員会、JSSI 第 9 回技術報告会