

竣工後 30 年を経過した免震建物に使用されている 免震装置の性能検証

Performance Verification of Seismic Isolation Devices

Used in a Base-Isolated Building for 30 Years

山上 聡* 上 寛樹* 舟木秀尊* 小山慶樹*

要 旨

竣工後 30 年を経過した免震建物に使用してきた積層ゴムとダンパーを建物から抜き取り、単体での基本特性を確認するとともに、限界性能や残存性能について調査した。その結果、30 年使用した天然ゴム系積層ゴムの水平剛性は、経年による硬化を除き、面圧の違い等による影響はほとんど見られなかった。また、限界性能試験から、水平方向の変形性能は納品時と同等以上を確保しており、30 年を超える実使用を経ても十分な変形能力を有していることが確認できた。鋼棒製ダンパーは、±5cm の繰返し載荷においてこれまで経験した地震等による疲労の影響が見られたものの安定した履歴を有し、十分なエネルギー吸収能力を有していた。

これまで行った建物全体での評価にあわせ、積層ゴムとダンパーの単体試験結果からも、竣工後 30 年を経過した免震装置が必要な変形能力とエネルギー吸収能力を有していることを確認した。

キーワード：天然ゴム系積層ゴム、鋼棒製ダンパー、経年変化

1. まえがき

免震建物の主要構造部材である積層ゴムは、建物に適用され始めてから 30 年程度経っているが、その経年変化に関する実データはなく、熟老化促進試験等による予測値に依存している。そのため、積層ゴムの信頼性確保には、経年変化の長期的な追跡調査と実証データの蓄積が必要である。そこで、本研究では、天然ゴム系積層ゴム（以下、NRB）の経年変化を確かめるために、約 30 年前に竣工した免震建物を対象に、剛性、減衰、クリープ等について、建物を実測し調査している^{1)・2)}。これまで、建物の自由振動実験から評価した積層ゴムの水平剛性は竣工時に比べ 30 年目では 9%大きくなっており、これは設計時の予測の範囲内であることを報告した³⁾。

しかし、当建物での加力実験の水平変形は 10cm（当建物で使用している積層ゴムのゴム総厚に対するせん断変形率 γ で約 100%）までである。そこで本報では、10cm 以上の変形領域において免震装置単体の 30 年後の性能を確認し、実建物での試験条件との整合性を確認するために、建物から積層ゴムとダンパーを抜き取り、それぞれ単独で加力試験を行い、基本性能、限界性能および残存性能について調査した結果を報告する。



写真－1 対象建物

表－1 建物概要

項目	諸元	
評定番号・竣工	BCJ-免2・1986年竣工	
構造	鉄筋コンクリート造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	
軒高	13.75m	
免震装置	積層ゴム	天然ゴム系積層ゴム φ500mm×25基
	ダンパー	鋼棒製ダンパー φ50mm×12基

*技術研究所建築研究グループ

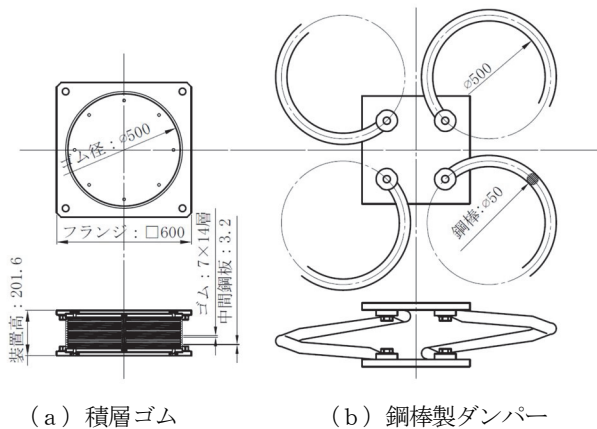


図-1 免震装置概要

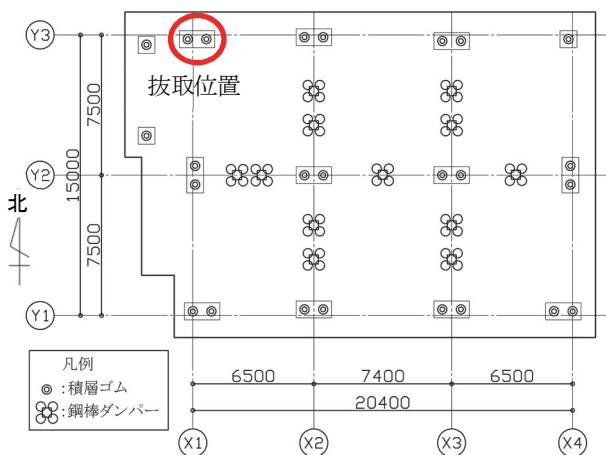


図-2 免震装置の配置

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奥村組技術研究所の管理棟であり、1986年9月に竣工している。対象建物を写真-1に示す。免震装置には、NRBを25基、鋼棒製ダンパーを12基使用している。建物概要を表-1、免震装置概要を図-1、免震装置の諸元を表-2、免震装置の配置を図-2に示す。

NRBのゴム径はφ500mm、ゴム層は7mm×14層(ゴム総厚=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。ゴムのせん断弾性率Gは0.44N/mm²

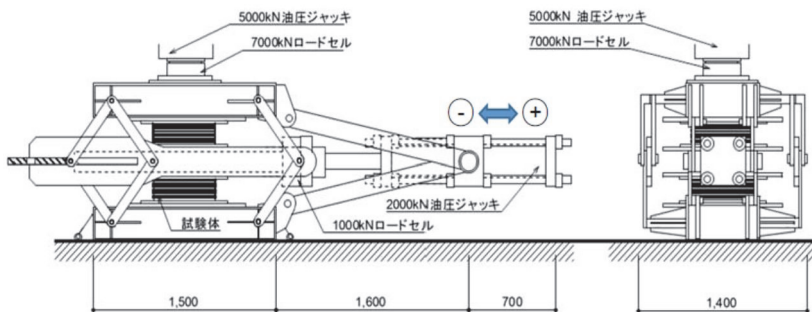


図-3 試験機1の概要

表-2 免震装置の諸元

天然ゴム系積層ゴム		
ゴム特性 (SI単位換算)	硬さ (JISA)	40±3
	25%応力	0.265±0.098 N/mm ²
	伸び	600%以上
	引張強さ	15.7 N/mm ² 以上
形状	本体ゴム	φ500 t=7mm 14層
	形状係数	1次 S1 17.1 2次 S2 5.1

鋼棒製ダンパー		
鋼棒	材質	S20C (JIS051)
	形状	ループ状鋼棒φ50 (ループ内径φ500、4本)

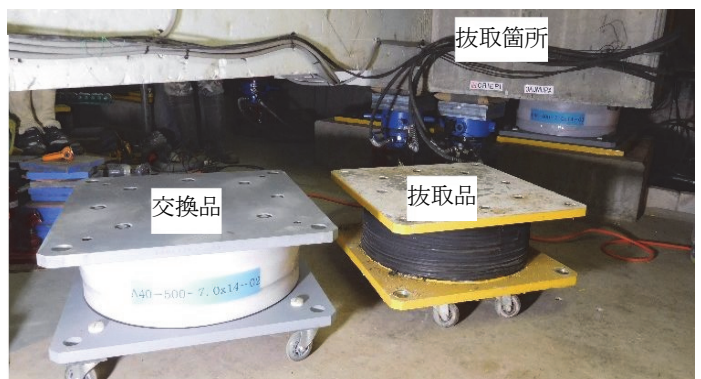


写真-2 積層ゴムの抜取状況

相当で、建設時の納品検査において最大変位 250mm の水平変形試験を全数実施している。

ダンパーは鋼棒製で、内径φ500mmのループ状の鋼棒4本で1基のダンパーが構成されている。なお、鋼棒の直径はφ50mm、材質はS20Cである。

3. 積層ゴムの性能確認

3.1 試験概要

積層ゴムを建物から抜き取り、圧縮せん断試験機にて水平剛性に関する各種依存性(基本性能)と、限界変形性能を調査する。抜取状況を写真-2に示す。基本性能の確認は、建設時の納品検査を行った試験機1(鉛直5MN、水平2MN)で行う。限界変形性能の確認は、試験機1では載荷能力が不足するため、載荷能力の大きい試験機2(鉛直25MN、水平6MN)で行った。

表-3 試験機1での試験パラメータと剛性

ケース	面圧 [N/mm ²]	変形率 γ [%]	保護ゴム	加力方向	剛性* [kN/mm]
1	6.0	100	有	南北	1.03
2					1.02
3				0.92	
4		200	無	東西	0.89
5					0.90

*剛性は試験結果の水平剛性を示す

3.2 基本性能確認試験

a. 試験機概要と試験方法

試験機1の概要を図-3に示す。積層ゴムを2基用いる試験機である。そのため、対象建物から納品検査時と同じ組み合わせとなる2基の積層ゴムを抜き取り（以下、抜取品）試験対象とし、試験結果は2基の平均値として評価する。

試験パラメータを表-3に示す。パラメータは、①面圧（鉛直荷重をゴム断面積で除した鉛直方向の平均応力度）、②変形率、③積層ゴムの外周をカバーしている保護ゴムの有無、および④加力方向とした。ケース1は建物内での設置状態を模擬した条件、ケース4は納品検査時の条件である。納品検査時には、保護ゴムを巻いておらず、面圧は6.0N/mm²とし、水平変形はゴム総厚に対するせん断変形率 $\gamma=200\%$ （約200mm）まで与えた。

一方、建物内での設置状態においては保護ゴムを巻いており、使用面圧は4.5~5.0N/mm²程度と考えられる。また、当建物は、これまで経験した地震時の揺れに加え南北方向にのみ水平変形を与えた加力実験や自由振動実験（ $\gamma=100\%$ 以内）を行ってきた。そこで、ケース1~4では加力方向を建物に設置されていた状態での南北方向とし、ケース5では、繰り返し行った実験の影響を確認するために加力方向を東西方向とした。

表-3には併せて各ケースの実験結果の水平剛性を示している。試験は各ケース3サイクルずつ载荷を行い、水平剛性は履歴の安定する3サイクル目の $\gamma=\pm 100\%$ 時の割線剛性で評価⁴⁾した。

b. 積層ゴムの納品検査時の性能

納品検査時の水平剛性は、 $\gamma=100\sim 150\%$ 間の接線剛性で評価しており、その全数の平均値 \bar{m} は0.80kN/mm、標準偏差 σ は0.024kN/mm、変動係数 $V(=\sigma/\bar{m}\times 100)$ は2.9%であった。個々の水平剛性の平均値に対する最大および最小値の比率は+4.0%、-4.4%であり、その中で抜取品の水平剛性は0.81kN/mm(+1.6%)と平均値に近いものであった。

c. 基本性能確認試験結果

(a) 面圧の影響

面圧の影響を調べるためにケース1と2の荷重変形関係の比較を図-4に示す。試験は建物での設置状態に合わせて保護ゴムのある状態とした。水平剛性は、ケース2（面圧6.0kN/mm²）では1.02kN/mmに対し、ケース1（面圧4.5kN/mm²）では1.03kN/mmと1%程度の上昇であり、面圧の違いによる水平剛性の違いはほとんど見られなかった。

(b) 経験したせん断変形率の影響

積層ゴムの水平剛性は、経験したせん断変形率に影響することが知られている。そこで、経験したせん断変形率の影響を調べるためにケース2と3の荷重変形関係の比較を図-5に示す。水平剛性を比較すると、 $\gamma=$

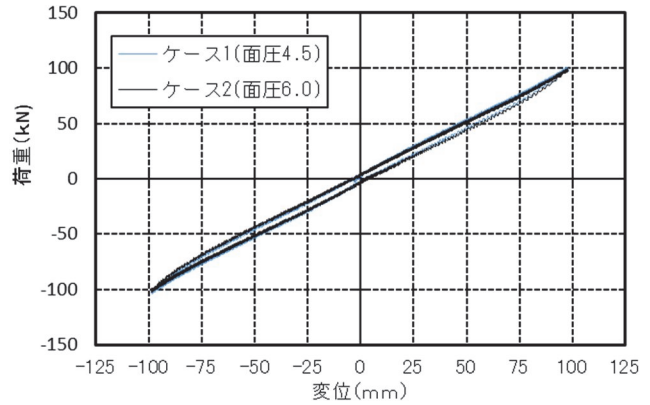


図-4 面圧の影響の比較

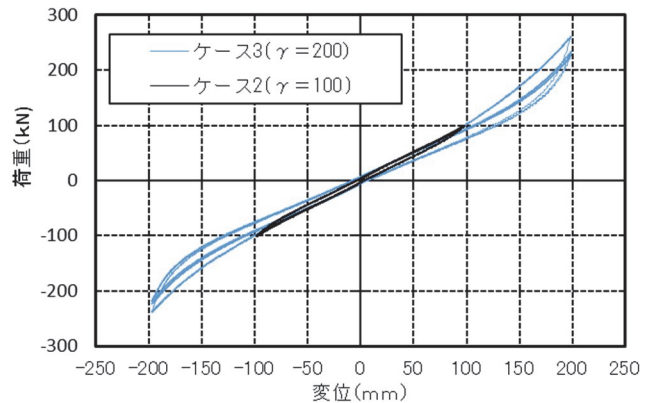


図-5 最大せん断変形率の影響の比較

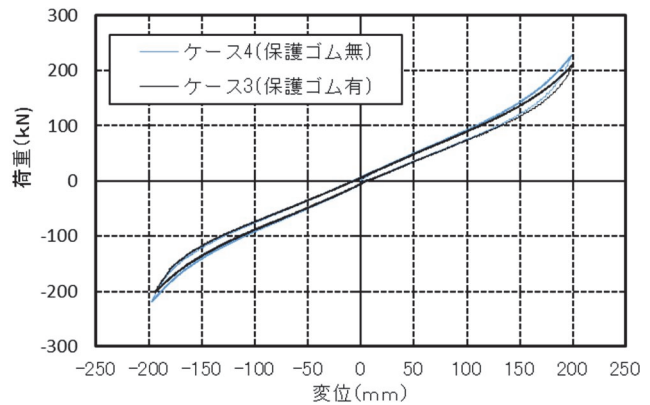


図-6 保護ゴムの影響の比較（3サイクル目）

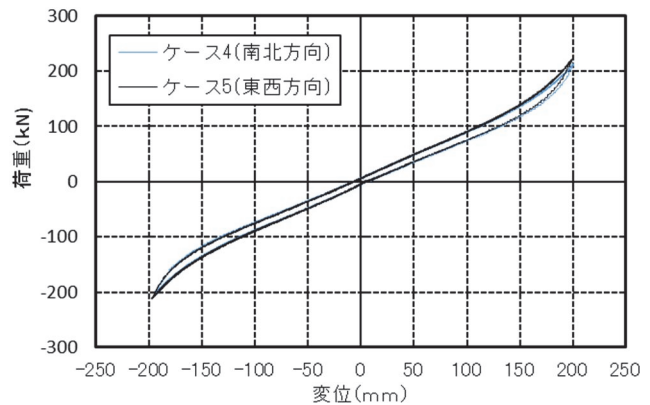


図-7 加力実験の影響の比較

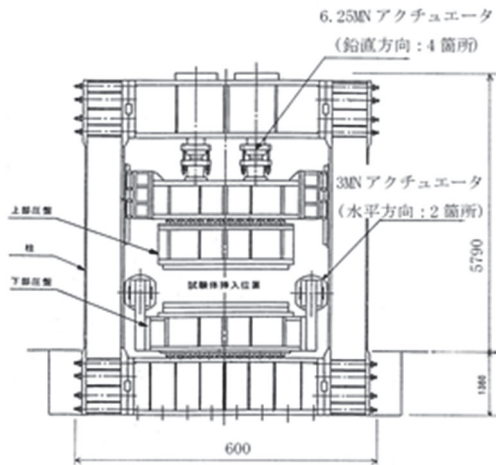


図-8 試験機2の概略図

表-4 試験機2での载荷履歴

面圧 [N/mm ²]	せん断変形率 γ [%]	せん断変位 [mm]	速度 [mm/s]	繰返
6	±100	± 98	5	3
	±153	±150		
	±200	±196		
	±250	±245	3	
	±300	±294		
	±350	±343		
	±400	±392		

100%までのケース2では1.02kN/mmに対し、 $\gamma=200\%$ まで変形したケース3では0.92kN/mmと約11%程度低下していたが、設計では $\gamma=200\%$ における3サイクル目の安定した値を用いている。

(c) 保護ゴムの影響

保護ゴムの影響を調べるためにケース3と4の荷重変形関係の比較を図-6に示す。水平剛性を比較すると、ケース3(保護ゴム有)の場合、1サイクル目は1.01kN/mm、3サイクル目は0.92kN/mmであった。ケース4(保護ゴム無)の場合、1サイクル目は0.94kN/mm、3サイクル目は0.89kN/mmであった。保護ゴムの影響は、1サイクル目では約7%程度あったが、3サイクル目で約3%程度となった。これは、1サイクル目で保護ゴムが緩んだためであり、その後の影響は小さい。設計では大地震時には緩むことを想定している。

(d) 加力実験の影響

これまで30年間、建物の静的加力実験や自由振動実験(2016年は10cmを約30回)は南北方向のみに行ってきた。そのため、地震時(30年間で震度5以上は5回程度、最大変形約8cm)のランダムな方向への変形とは別に、南北方向は東西方向に比べ特定の繰り返し変形を多く受けている。その影響を把握するために、加力方向の違うケース4と5の荷重変形関係の比較を図-7に示す。ケース4(南北方向)の水平剛性は0.89kN/mmに対し、ケース5(東西方向)は0.90kN/mmと約1%程度の違いであり、加力実験等による繰り返し変形の影響はほとんど見られなかった。

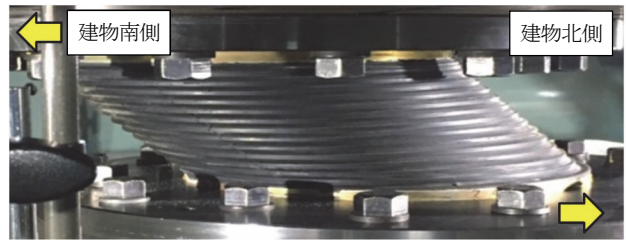


写真-3 せん断変形率 $\gamma=\pm 300\%$ 加力時の積層ゴム

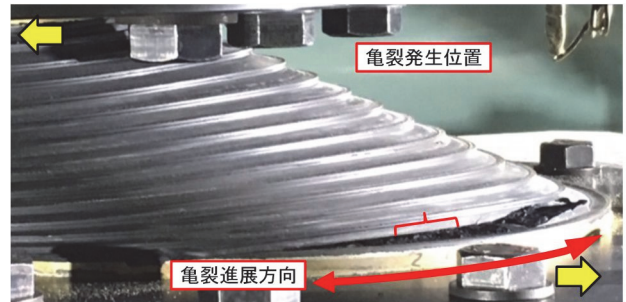


写真-4 せん断変形率 $\gamma=\pm 400\%$ 加力時の積層ゴム

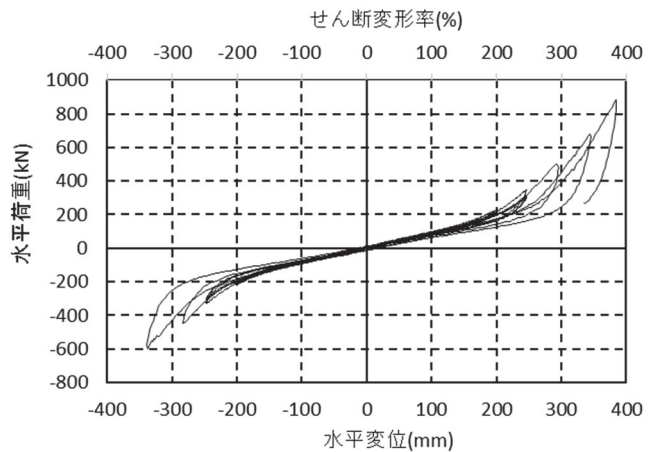


図-9 積層ゴムの荷重変形関係

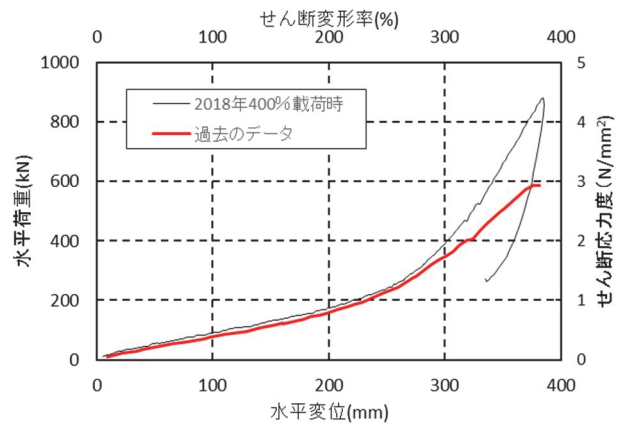


図-10 積層ゴムの終局耐力の比較

3.3 限界変形性能確認試験

a. 試験機の概要と試験方法

試験機2の概略図を図-8に示す。水平方向には2基、鉛直方向には4基のアクチュエータを有しており、荷重は各方向のロードセルの合計値、変位は各方向の変位計の平均値を用いる。積層ゴムに取り付けられている既設

のフランジプレートは、建物での使用状態以上の加力を行う限界変形性能を確認するには剛性が低いため、剛性の高い試験用フランジに交換した。加力方向は、建物に設置されていた時の南北方向とする。この時、NRBの上フランジが建物南側に相対変形する方向を荷重・変位の正側とする。実験パラメータを表-4に示す。鉛直荷重は建物の設計荷重 1176kN に相当する面圧 6.0N/mm²、水平加力はゴム総厚に対するせん断変形率 $\gamma = \pm 100\% \sim \pm 400\%$ の変位を与える。

b. 限界変形性能確認試験結果

試験中の積層ゴムの外観を写真-3と写真-4に、水平荷重-水平変位関係を図-9に示す。試験時の気温は 15~16℃である。 $\gamma = \pm 300\%$ までは、ゴムに異常は認められなかった。 $\gamma = \pm 350\%$ 加力時に最下層で加力方向に対し 45° 方向の付近に亀裂は発生したもの、水平荷重は増加を継続し履歴曲線に異常は見られなかった。また、試験機の軸力は安定して作用していることから、この時点においても軸力保持能力は維持されていた。 $\gamma = \pm 400\%$ 加力でも同様の傾向が継続されていたが、亀裂がさらに進展したことから、この時点を終局と判断し試験を中止した。なお、亀裂は写真-4に示した対面側にも同様に発生しており、そこから外周方向に沿って進展していた。また最上層の加力直交位置付近にも軽微な亀裂が発生していた。

過去に実施された破断試験⁵⁾において、型式と面圧が同じ試験体から得られている荷重変形関係と今回の $\gamma = 400\%$ 載荷時の比較を図-10に示す。今回の試験結果では製造時と同等の $\gamma = 370\%$ という変形能力を維持していることが明らかとなった。ただし、300%以降の急激な剛性増大については、詳細な検証が必要である。

3.4 建物での静的加力実験との比較

建物の上部構造を片押しして免震層を南北方向に変形させた静的加力で得られた荷重変形関係と、抜取品の荷重変形関係を用い、両者における水平剛性とその経年変化を比較する。この時、建物の静的加力で得られた結果は積層ゴム 25 基の平均値（以下、建物平均）とする。

まず、建物静的加力実験で得られた荷重変形関係と、加力条件の近いケース 2 の荷重変形関係を比較した結果を図-11に示す。抜取品の荷重変形関係の平均は建物平均とよく一致しており、抜取品が建物の平均的な荷重変形関係を示していることを確認した。

次に、2016年の建物平均と、ケース 4（納品検査時の試験条件）を比較した結果を図-12に示す。建物での荷重変形関係の平均は 1 サイクル目であり、抜取品の試験機による試験結果の 1 サイクル目と建物の平均を比較するとよく一致している。

最後に、抜取品の納品時と経年時の 1 サイクル目の割線剛性を算定し、建物平均と比較したものを図-13に示す。抜き取った NRB の水平剛性については、納品時、

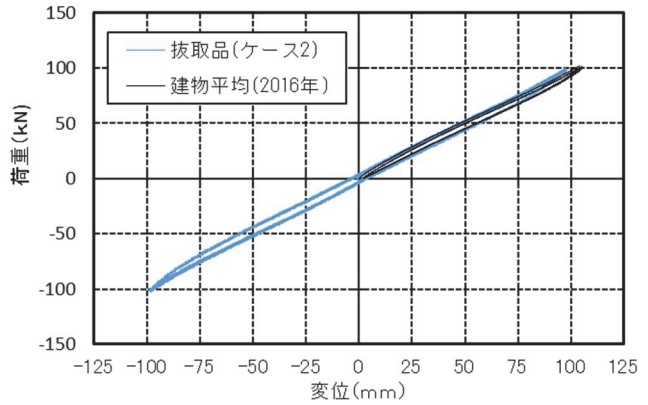


図-11 積層ゴムの復元力特性の比較（保護ゴム有）

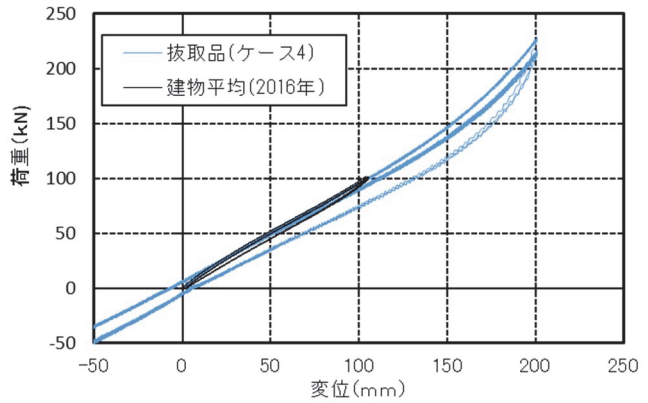


図-12 積層ゴムの復元力特性の比較（保護ゴム無）

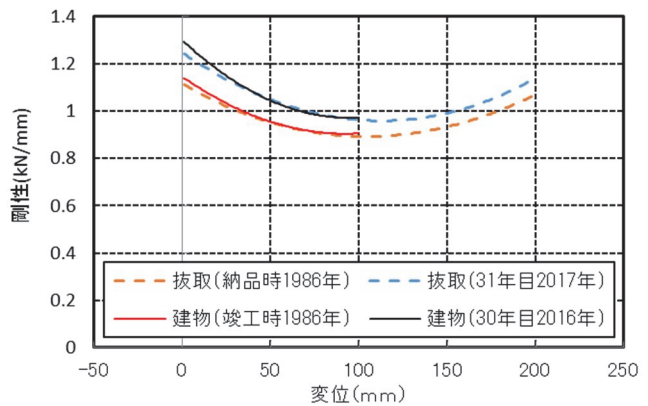


図-13 水平剛性の比較

経年時とも建物全体と単体での静的加力試験の結果が良い一致を示したことから、両試験の整合性が確認できた。

4. 鋼棒製ダンパーの性能確認

4.1 鋼棒製ダンパーの試験概要

実建物で 30 年間使われた鋼棒製ダンパーは、これまで多くの地震や加力実験を経験してきた。これまで経験した変形は、加力実験や自由振動実験の 10cm が最大で、地震時では 3cm 程度が数回で最大で 8cm 程度であった。そこで、鋼棒製ダンパーの荷重変形関係や疲労破壊に対する残存性能を確認するために、静的加力と繰返し加力

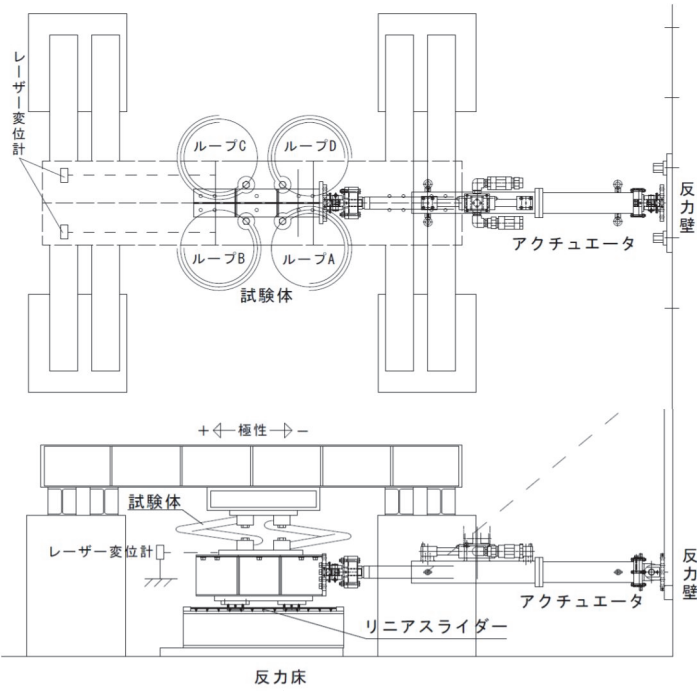


図-14 鋼棒製ダンパーの試験機の概要

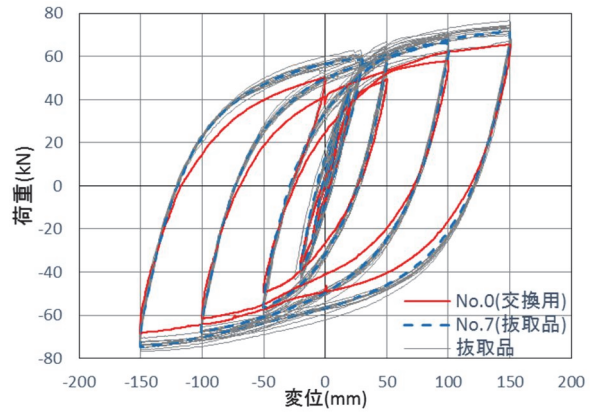
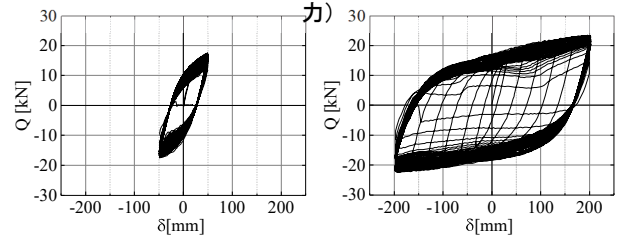


図-15 鋼棒製ダンパーの荷重変形関係（静的加力）



a) 抜取品±50mm 加力時 b) 抜取品±200mm 加力時

図-16 鋼棒製ダンパーの荷重変形関係（繰返し加力）



(a) 静的漸増加力



(b) 繰返し加力

写真-5 加力実験の状況

の実験を行った。試験体は、建設当時から交換用として保存されていた鋼棒製ダンパー1基（No.0、以下、交換用という）と対象建物の免震層から抜き取った12基（No.1～No.12、以下、抜取品）である。

試験装置を図-14に、試験状況を写真-5に示す。静的加力実験は、No.0～No.12の全数（4ループで1組の試験体）を対象とし、振幅±10、20、50、100、150mmを各1回の漸増加力により実施した。繰返し加力実験は、静的加力実験で使用した13組の試験体のうち交換用1組と抜取品の代表1組からループ形状が整形な1ループを各2体ずつ取り出して実施した。2組の試験

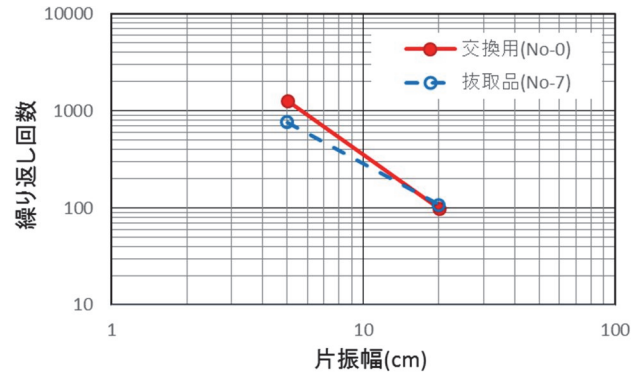


図-17 鋼棒製ダンパー破断までの繰返し回数

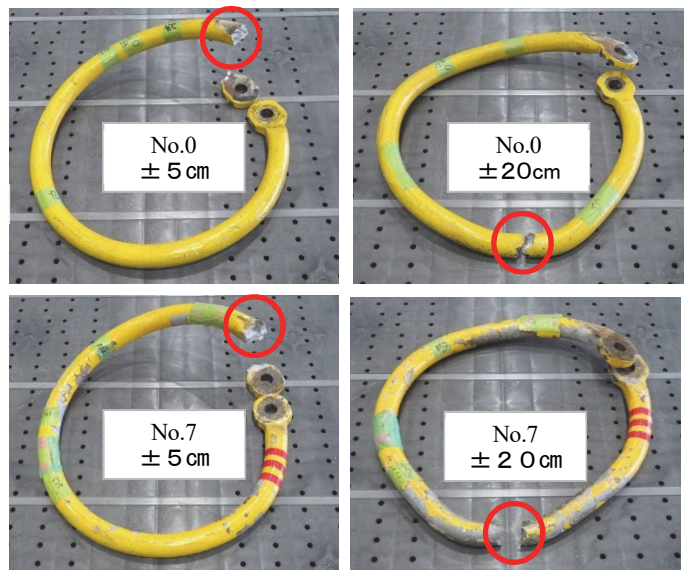


写真-6 破断後の鋼棒製ダンパーと破断位置 (○)

体から取出した1体のループについては、振幅を±5cm(加力周波数 0.05Hz)、もう1体のループは、±20cm(加力周波数 0.01Hz)に固定し、鋼棒製ダンパーが破断するまでの加力回数を求めた。

4.2 鋼棒製ダンパーの試験結果

静的加力試験の結果を図-15に示す。図は交換用(No.0)と抜取品(No.1~12)全数の荷重変形関係を重ね合わせて示してある。実際の免震建物に使用してきた鋼棒製ダンパーに、経年による剛性低下は見られず、交換用と変わらない荷重変形関係を確認できた。

交換用のNo.0と、抜取品の中で平均的な履歴であったNo.7を対象に2ループずつ取り出し、破断するまで繰り返し加力を行った。繰り返し加力の荷重変形関係を図-16に、振幅と破断までの繰り返し回数を図-17に、破断位置を写真-6に示す。破断までの繰り返し回数は、振幅±5cmでは交換用の1273回に対し、抜取品が761回であったが、振幅±20cmにおいてはどちらも100回程度であった。一方、破断位置は振幅によって異なり、±5cmではボルトで固定する付け根付近で、±20cmではループの中間部で最外端となる部分で破断した。

抜取品の鋼棒製ダンパーは、これまで10cm以下の領域にて繰り返し変形をしており、その影響で±5cmの繰り返しでは抜取品は交換用よりも早く疲労破断したと考えられる。一方、±20cmでは疲労の影響は少なく、破断までの繰り返し回数は同程度であった。これらのことから、これまで経験した中小地震や行ってきた実験が小振幅での疲労損傷に影響を及ぼしているものの、大地震時に対するエネルギー吸収能力は十分残存していると考えられる。変形量によって破断位置が異なる点については、今後FEM解析等を用いて検証していく予定である。

5. まとめ

竣工後、約30年経過した免震建物から抜き取ったNRBと鋼棒製ダンパーについて、次のことを確認できた。

NRBについて

- i. 水平剛性における面圧の違いの影響は1%程度と小さかった
- ii. 保護ゴムの影響は3%程度と小さかった
- iii. せん断変形率200%を与えた水平剛性は1サイクル目に対し3サイクル目では6%程度低下したが想定範囲内であった
- iv. 建物での特定方向への加力実験による影響は見られなかった
- v. 30年経過したNRBは水平剛性については建物での試験と同様に健全性を維持しており、限界変位については経年の影響は見られず納品時と同等の $\gamma=370\%$ 以上の変形性能が確認された

vi. 建物での加力試験と積層ゴム単体試験の結果は良好一致を示し、両試験の整合性が確認できた
鋼棒製ダンパーについて

- i. 静的加力実験では抜取品は安定した荷重変形関係を示した
- ii. 繰り返し加力実験では、小振幅においてこれまでの実験等による疲労の影響が見られたが、大振幅においては交換用と変わらない残存性能を確認できた

これらのことから、積層ゴムと鋼棒製ダンパーの単体試験の結果によっても、竣工後30年を経過した免震建物は必要な安全性と耐久性を有していることを確認した。

6. 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と30年間使用してきた免震装置の健全性を確認できた。今後は、積層ゴムの別置き試験体や材料の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) 安井健治、早川邦夫、山上 聡、「免震建物に設置された積層ゴムの経年変化」、日本建築学会技術報告集、第24号、pp.167-170、2006.12
- 2) 山上 聡、舟木秀尊、安井健治、小山慶樹、三須基規、高山峯夫、「竣工後30年経過した免震建物に設置された天然ゴム系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.937-938、2017.8
- 3) 山上 聡、舟木秀尊、安井健治、小山慶樹、「実免震建物における免震装置の水平剛性の評価」、奥村組技術研究年報、No.43、2017.9
- 4) 日本免震構造協会、「設計者のための建築免震用積層ゴム支承ハンドブック(第2版)」、p.83、2017
- 5) 日本建築学会、「免震構造設計指針(第1版)」、p.46、1989