

積層ゴムの経年変化

Aged Deterioration of Natural Rubber Bearing

安井健治* 早川邦夫* 山上 聡*

要 旨

免震構法を採用して建設した技術研究所管理棟の積層ゴムを竣工以来 20 年にわたり追跡調査してきた。積層ゴムの鉛直変位量は免震層の環境温度に依存し、伸縮を繰り返しているものの、クリープ量は設計時に考慮された範囲内で推移している。同一環境下に放置した別置き積層ゴム試験体を用いて鉛直剛性および水平剛性を測定した結果、いずれも剛性の変化は小さく、経年変化は、設計時に想定した範囲内で推移している。また、別置き積層ゴム試験体からゴム部位およびゴム-鉄板部の接着部位を切り出し、ゴム部位については引張試験を、ゴム-鉄板部についてはせん断試験を実施した。いずれの結果もゴムの経年変化は設計時に考慮した範囲内に収まっていることを確認した。

キーワード：積層ゴム、経年変化、クリープ、ゴム素材試験

1. まえがき

積層ゴムの長期にわたる経年変化については、ゴムの化学反応速度理論に基づく加熱促進試験により、その性状を推定している。加熱促進試験は、積層ゴムを 80℃前後の温度条件で一定期間加熱し、加熱後の特性変化をアレニウスの理論に基づき、加熱期間を常温に換算した期間での特性の変化とみなす方法である。加熱促進試験にしても低温で長期間行うことが望ましいが、現状では高温で短期間の加熱促進試験が行われている。

免震構造の主要構造部材である積層ゴムは、採用からまだ歴史が浅く、自然環境下での経年変化のデータは、免震構造が採用されて 10 年経過時の報告^{1),2)}は見られるもののその数は少ない。また加熱促進試験との関係も必ずしも明確となっていない。

当社では、積層ゴムの経年変化に関するデータを得るために、1986 年 9 月に竣工した技術研究所管理棟の積層ゴムの経年変化を 20 年にわたり調査してきた。本報告は、種々の追跡調査のうち建物に設置された積層ゴムのクリープ量と別置き積層ゴムの剛性変化に関する報告である。

2. 免震建物の概要

対象とした免震建物は、鉄筋コンクリート造 4 階建てで免震部材は天然ゴム系積層ゴムと鋼棒ダンパーで構成

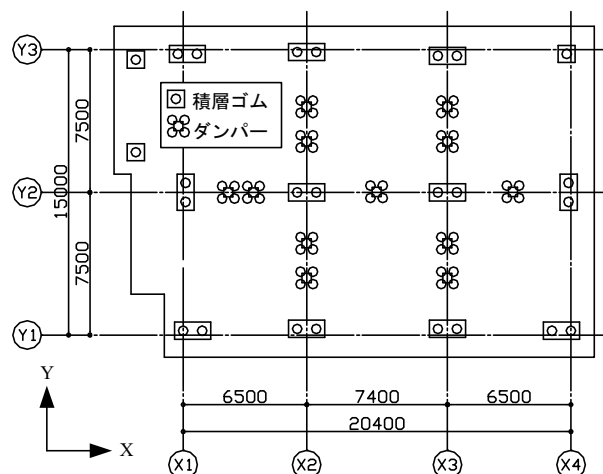


図-1 積層ゴムの配置

表-1 積層ゴムの諸元

項目		諸元
形状	ゴム直径	500mm
	ゴム厚さ	7mm×14層
	一次形状係数(S1)	17.9
	二次形状係数(S2)	5.1
物性	ゴム硬度	40
	せん断弾性率(G)	0.43MPa
	使用面圧	4.9MPa
配合	天然ゴム	55%
	カーボン	18%
	加硫剤など	27%

*技術研究所

されている。建物重量は約 2,250t で図-1に示すように 25 個の積層ゴムで支持されている。積層ゴム 1 個当りの平均面圧は 4.5MPa である。使用した積層ゴムは、直径 500mm、ゴム層厚 7mm、ゴム層数 14 層で表面に保護ゴムを被覆している。積層ゴムの諸元を表-1に示す。

3. 積層ゴムのクリープ量

3.1 測定方法

積層ゴムのクリープ量を、技術研究所管理棟に設置された積層ゴムの高さの変化量から推定した。積層ゴムの高さの測定方法は、上下ベースプレートの四隅にガラス板を貼り付け、ダイヤルゲージを用い、上下ベースプレートの間隔を測定した。計測点は全 25 基の積層ゴムそれぞれにつき 4 箇所計 100 点で、同時に積層ゴムが設置されている免震層の環境温度も測定した。測定は建物が竣工した 1986 年 9 月より 2007 年 3 月までの約 20 年間 (7496 日) に渡り、竣工後 1 年半までは毎月、その後 10 年目までは 3 ヶ月毎、20 年目までは、年 2 回程度の計測を実施している。積層ゴムの高さの変化量は、上下ベースプレート間をダイヤルゲージで測定した 1 回目の測定値 (初期値) と 2 回目以降の測定値との差として求めた。なお変化量の符号については積層ゴムの高さが高くなる方向を正とした。

3.2 測定結果

経過日数と積層ゴム全 25 基の高さの変化量の平均値を図-2に示す。併せて測定日の免震層の温度の変化を示す。積層ゴムの高さの変化量は、ばらつきがみられるものの、経過日数に伴い高さが低くなる傾向が見られる。また、そのばらつきの推移をみると高さの変化量は免震層の温度に大きく依存していることがわかる。

そこで免震層の温度と高さの変化量の平均値の関係を図-3に示す。温度が高くなると積層ゴムの高さが高くなる傾向が見られる。積層ゴムの高さの変化量と免震層の温度の関係を 1 次近似式により求めると温度補正係数は $+0.05825\text{mm}/\text{C}$ となる。これは夏季と冬季とで免震層の温度差が 5C から 30C までの 25C あるとすれば、積層ゴムの高さの変化量が約 1.5mm 生じることになるため、クリープによる高さの変化の他に免震層の温度差による変化も大きな要因となっていると推測される。

3.3 クリープ量の評価

積層ゴムの高さの変化量に前記の温度補正係数を用いて温度補正を行った。補正後の経過日数と高さの変化量の関係を図-4に示す。ややばらつきが残るものの経過日数が増加するにつれて積層ゴムの高さが線形的に低くなっている様子がうかがえる。線形近似により高さの変化量を推定すると、測定した 20 年間で約 -1.7mm 、60 年後を推定すると約 -5.0mm となる。本建物の設計に当たってのクリープ量の推定には実験室の加熱促進試験を対数近似して、60

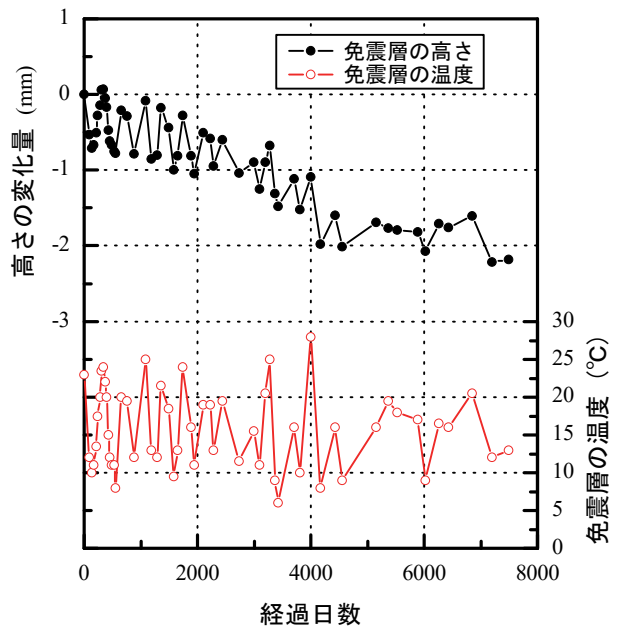


図-2 免震層の高さの変化量と温度変化

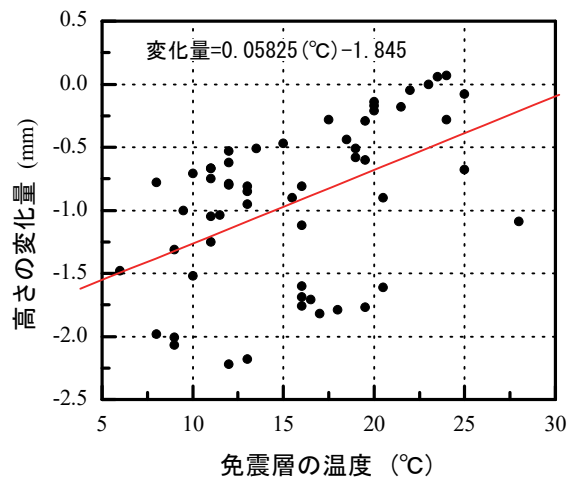


図-3 免震層の温度と高さの変化

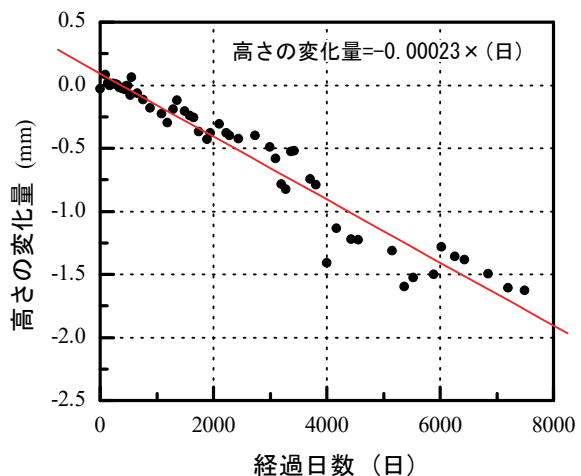


図-4 経過日数と免震層の高さの変化量

年後のクリープ量を3mm（積層ゴム高さの約3%）と推定しており、それより大きく推定される結果となっているが、本建物の設計では、クリープ量として積層ゴム高さの15%（15mm）を考慮して、鉛直クリアランスを設計しているため問題はない。

4. 別置き試験体の経年変化

4.1 試験概要

別置き積層ゴム試験体は、技術研究所管理棟に使用したものと同一のゴム直径500mmの積層ゴム4個を同一環境下になるよう免震層に放置している。試験は、技術研究所保有の2軸試験機を用いて行った。この試験機は、本建物建設時に実施した別置き積層ゴム試験体の性能確認試験において使用したもので、試験機による結果の差異は小さいと考えられる。試験に際しては積層ゴムの保護ゴムを取りのぞいて圧縮試験、圧縮せん断試験を行い、試験終了後は再び保護ゴムを巻き直して免震層に放置している。なお同様の試験を建物竣工後1年、2年、3年、5年、10年、15年目にも実施している。

各試験は2軸試験機に積層ゴムをセットし、圧縮試験を行った後、引き続き圧縮せん断試験を行った。圧縮試験は5,880kN（600tonf）油圧ジャッキを用いて行い、圧縮せん断試験は、油圧ジャッキで所定の鉛直荷重を載荷した状態で、加振機（最大荷重980kN（100tonf）,最大ストローク±300mm）を用いて変位制御の水平加振を行った。鉛直荷重は油圧ジャッキの圧力変換器（PCH-500K：日本特殊測器）で、水平荷重は加振機に内蔵された荷重計（LUK-200TBS：共和電業）で計測した。また、鉛直変位は試験体の四隅を変位計（CDP-25：東京測器）で、水平変位はスライドベッドに取り付けた変位計（DLT-500B：共和電業）と加振機に内蔵された変位計（LP-750FX：緑測器）で計測した。

4.2 圧縮試験

圧縮試験は2軸試験機の油圧ジャッキを用いて0～2,942kN（300tonf：設計荷重の3倍）までの荷重を3回繰り返して行った。図-5に代表1体の履歴曲線のうち、初期値、5年、10年、15年経過時および20年経過時の鉛直変位—鉛直荷重曲線を並べて示す。鉛直剛性は3回目の履歴曲線の設計荷重（1,373kN：140tonf）の±40%の824kN（84tonf）と1,922kN（196tonf）の割線剛性から求めている。図-5からは履歴曲線には大きな変化は見られず、表-2に示す鉛直剛性の平均値の変化率は8%以内の変化にとどまっている。

4.3 圧縮せん断試験

圧縮せん断試験は油圧ジャッキで設計荷重1,373kN（140tonf）を鉛直載荷した状態で、加振機により±150mm、平均加振速度2mm/secの正弦波加振を3回行った。図-6に圧縮試験結果と同様に代表1体の履歴曲線

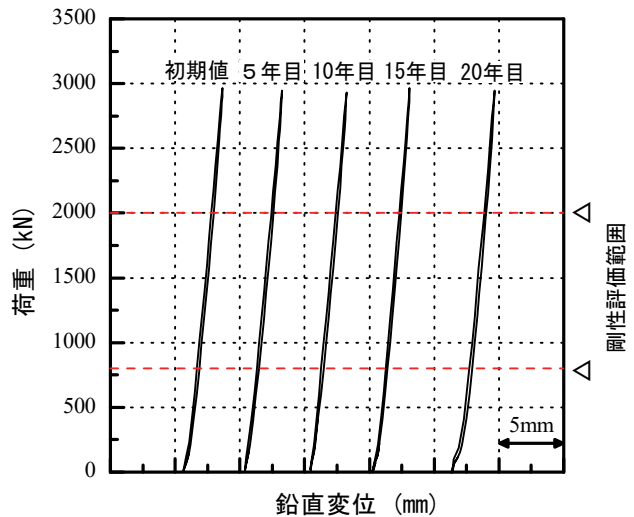


図-5 圧縮試験 (No. 2)

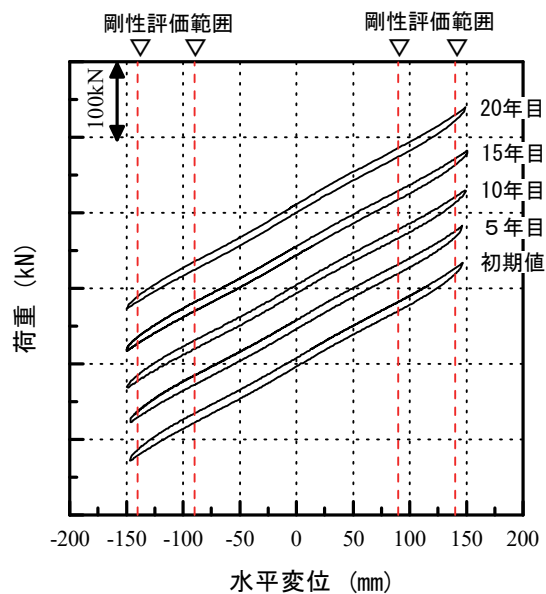


図-6 圧縮せん断試験 (No. 2)

表-2 積層ゴムの剛性一覧 (平均値)

	計測年月	鉛直剛性 (kN/mm)	変化率 (%)	水平剛性 (N/mm)	変化率 (%)
初期値	'87.02	1058	-	848	-
1年目	'88.01	1080	2.1	857	1.1
2年目	'89.02	1081	2.2	865	2.0
4年目	'91.02	1079	2.0	879	3.7
5年目	'92.11	1076	1.7	886	4.5
10年目	'97.03	1096	3.6	884	4.2
15年目	'02.03	1139	7.7	878	3.5
20年目	'07.01	1105	4.4	915	7.9

の初期値、5年、10年、15年経過時および20年経過時の水平荷重—水平変位曲線を示す。水平剛性は3回目の履歴曲線の90mmと140mmの割線剛性の正負の平均値としている。履歴曲線には圧縮試験同様に大きな変化やゴムの異常は見られず、表-2に示す水平剛性の平均値も8%以内の変化にとどまっている。

しかし、鉛直剛性では15年目より20年目、水平剛性では、5年目より10年目、15年目の方が小さくなっており、経年劣化により年々ゴムが硬くなっているだけではなく、試験機本体の経年変化、特にスライドベッドの摩擦力の変化や測定日の気温のばらつきによるもの等も考えられる結果になっている。そこで、剛性変化の性状を把握するため圧縮せん断試験の3回目の履歴曲線を正負それぞれ4次式に近似して、そこから得られた変位—荷重曲線より接線剛性を求めた。図-7に水平変位と接線剛性の関係を示す。接線剛性は変位10cm付近から増加傾向にあり、変位15cm近傍ではハードニング現象が顕著に現れている。積層ゴムの圧縮せん断試験から水平剛性を評価する場合、3回目の履歴曲線を用いている。これはゴム材料を繰り返し载荷することによって剛性が低下し、3回目以降は履歴が安定することから3回目の履歴曲線で評価するようにしていることによる。しかしながら、ハードニング領域では履歴の安定が3回目以降になることがあるといわれており、水平剛性の評価が試験毎に異なり、同一条件になっていないことも考えられる。そこで水平剛性を接線剛性の比較的安定した変位振幅の小さい5cm、10cmにおける接線剛性として評価した。その結果を表-3に示す。経過日数に従い剛性が高くなる傾向にあり、5cmでは3%程度、10cmでは6%以内の変化にとどまっている。剛性変化を長期にわたって追跡調査する場合、設計で考慮した剛性で評価するのではなく、試験条件が変化してもある程度対応できる安定した領域での剛性評価、試験時の気温を考慮する必要があると思われる。

さらに、試験機による影響を検討するため、竣工後、19年目に実施した管理棟の静的加力試験結果³⁾と比較検討する。管理棟の静的加力試験は、管理棟と管理棟北側に設置された反力体の間に油圧ジャッキ(最大荷重:2,000kN)2台を設置し、ジャッキの変位を0mm-100mm-0mmと制御した片押し試験の静的加力試験である。水平荷重は、ジャッキ内臓の圧力変換機により求めている。得られた水平荷重の25分の1としたものを積層ゴム1基当たりの荷重として比較検討する。管理棟の静的加力試験は、1サイクルのみの片押し試験であったので、圧縮せん断試験結果の履歴の内1サイクル目正側の荷重—変位の関係を図-8に併せて示す。ちなみに静的加力試験による経年変化も19年間で約8%程度剛性が大きくなったとの評価結果であった。両者は概ね一致しているものの、管理棟の静的加力試験では70mm以降でハード

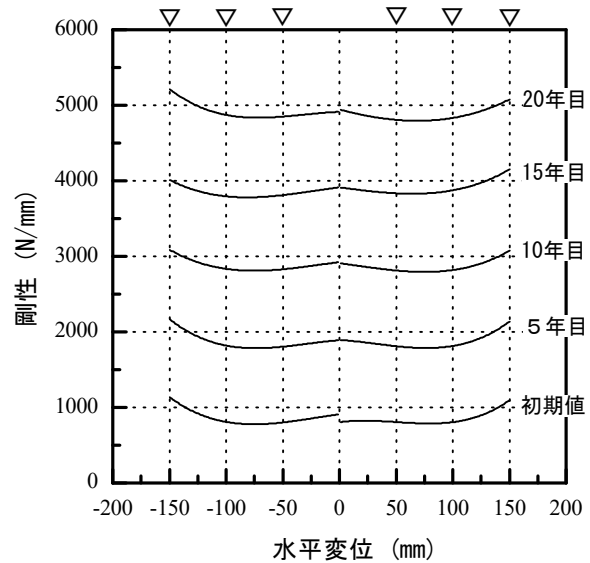


図-7 近似式による剛性評価 (No. 2)

表-3 圧縮試験 (No. 3)

	変位5cm		変位10cm		変位15cm	
	剛性 (N/mm)	変化率 (%)	剛性 (N/mm)	変化率 (%)	剛性 (N/mm)	変化率 (%)
初期値	803.8	-	806.9	-	1116.4	-
5年目	807.6	0.5	816.5	1.2	1154.1	3.4
10年目	821.0	2.1	826.6	2.4	1080.8	-3.2
15年目	822.8	2.4	834.4	3.4	1080.9	-3.2
20年目	828.5	3.1	852.3	5.6	1146.7	2.7

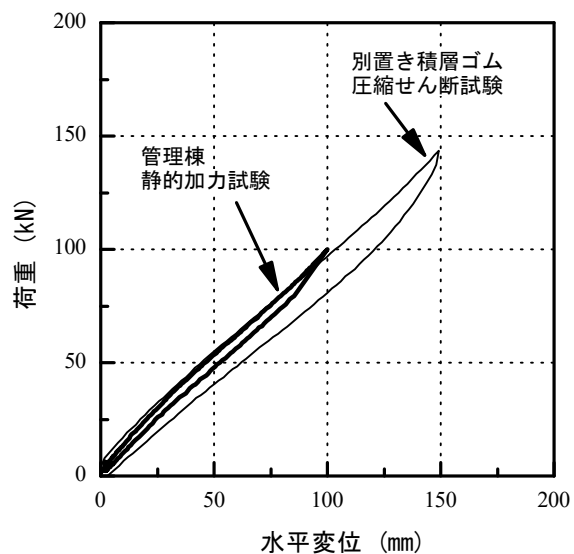


図-8 圧縮せん断試験と静的加力試験

ニングの傾向が見られており、また履歴面積等にやや差異が見られる。これらは、試験方法の違いによるものと推測される。

5. ゴム単体の経年変化

5.1 試験概要

1997 年、建物竣工後 10 年経過時に、別置き積層ゴムの試験実施後にゴム単体の経年変化を調べるため 4 個の試験体のうちの 1 体 (No.1 試験体) から、その 1/2 をカットし、引張試験片、せん断試験片を製作し経年変化を調べた。その後、残りの積層ゴム 1/2 については、保護ゴムで被覆し放置した。竣工後 20 年が経過した 2007 年に、残りの試験体を更に 1/2 にカットし同じく引張試験片とせん断試験片を製作し 20 年経過時におけるゴム単体の経年変化を調べた。ゴム試験片の採取位置を図-9、図-10 に示す。各試験片は、それぞれ 2、7、11 層目から採取し、比較的の外周部に当る A 試験体と中央部に位置する B 試験体を採取した。

5.2 引張試験

ゴム単体の引張試験は加硫ゴム物理試験法 (JISK6301) により、図-11 に示すダンベル 3 号試験片を用い、引張速度 500mm/min で行った。また、同一の試験片でスプリング式硬さ計 (JIS A 形) を用いた硬度試験も行った。

引張試験の結果を表-4 に示す。試験結果は、各試験片の平均値を示す。初期値 (実施年 1985 年) については、同一時期に別途に製作した積層ゴムから切り出した 20 片の試験の平均値である。10 年目には、ゴムの硬度は若干低下しているが、20 年目の試験では、やや硬くなっており大きな変化はない。

引張応力については、+6%~+22%変化しており、ひずみが大きくなるほど変化率が大きくなる傾向が見られる。破断伸びの変化率は-11%、破断強度の変化率は-8%であった。いずれも部位別の変化率は、中央部がやや大きい結果となっている。

5.3 せん断試験

試験片は図-12 に示すように金属板とゴムが一体となった試験片でゴムのせん断応力とゴムと金属板の接着力が同時に計測できるようになっている。ゴム-金属板のせん断接着試験は 4,900N (500kgf) アムスラー型引張試験機を用い、引張速度 20mm/min で行った。破断時の判定は JIS によりゴムの破断 (R)、ゴムと接着剤間の破断 (RC)、接着剤の破断 (CP)、金属と接着剤間の破断 (M) に分類されている。

試験結果を表-5 に示す。表中の初期値とは、同一時期に製作した積層ゴムから切り出した 25 片の試験の平均値である。せん断接着力は初期値に比べ大きくなっているのは、剥離状態がゴム切れを生じており、引張試験

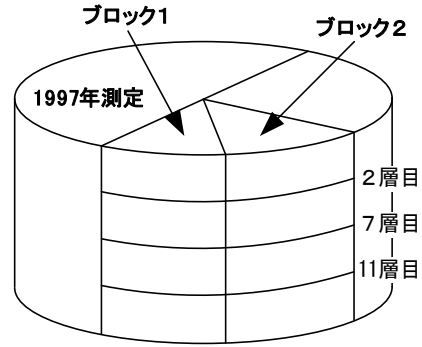


図-9 ゴム試験片の採取位置

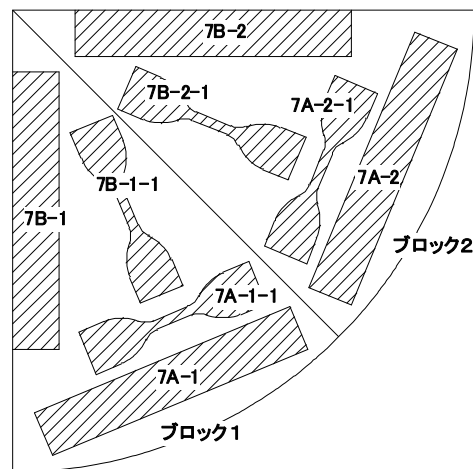


図-10 ゴム試験片の採取位置 (7 層)

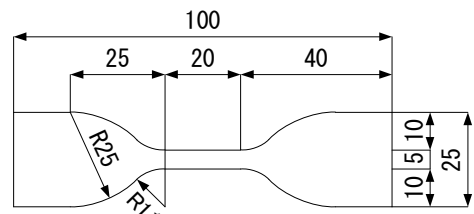


図-11 ダンベル 3 号試験片

表-4 引張試験結果

実施年	部位	硬さ (JIS A形)	引張応力 (N/mm ²)			破断伸び (%)	破断強度 (N/mm ²)
			100%	200%	300%		
初期値	平均値	42	1.01	2.44	4.86	630	20.20
10年目 (1997)	外周部	41	0.99	2.51	5.18	583	17.75
	中央部	40	1.01	2.55	5.21	587	17.95
	平均値	40	1.00	2.53	5.20	585	17.85
	変化率	-4.8%	-1.0%	3.6%	6.9%	-7.1%	-11.7%
20年目 (2007)	外周部	41	1.05	2.79	5.80	568	18.71
	中央部	41	1.08	2.94	6.10	550	18.49
	平均値	41	1.07	2.87	5.95	559	18.60
	変化率	-2.3%	5.9%	17.6%	22.4%	-11.2%	-7.9%

からも見られる高ひずみ域でのゴムの硬化に起因しているものと思われる。せん断接着力は内周部、外周部に大きな差はない。一方、積層ゴムの変形能力に関するせん断変形率の変化は、比較的小さく-9%程度であった。せん断変形率については、外周部の変化率がやや大きい結果となった。

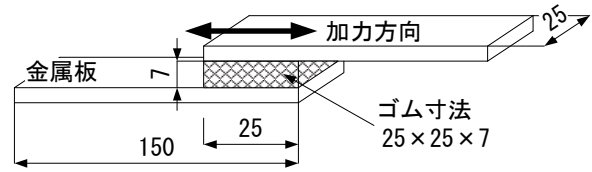


図-12 せん断試験片

6. まとめ

積層ゴムの経年変化を 20 年にわたり追跡調査した結果、建物に取り付けた実積層ゴムの 20 年経過したクリープ量は 1.7mm と小さく、年間で見ると温度変化による積層ゴムの高さの変化量と同程度である。60 年後のクリープ量は実験室の加熱促進試験から推定した対数近似での 3mm に対し、線形近似により 5mm 程度の値になっているが、設計で考慮している 15mm 以下の範囲内に留まっている。

免震層に放置した同一の別置き試験体の剛性変化を調査した結果、積層ゴムの剛性変化は設計で採用した剛性で比較しても 8%以内にとまっている。この傾向は、2006 年に実施した建物を用いた静的加力試験結果における経年変化とほぼ同じであった。水平剛性の比較的安定した領域で水平剛性を評価すると 6%以内の変化になり、経年変化は小さい。ちなみに設計時には、積層ゴムの剛性について±30%の変動を考慮している。

また、別置き積層ゴム試験体から採取したゴム単体の引張試験結果では、ひずみレベルが大きくなるにつれて引張応力の経年変化が大きくなることが分かった。但し、破断強度については-8%程度であった。ゴム-金属板によるせん断試験結果ではせん断接着力が+42%、せん断変形率が-9%であった。設計時には、積層ゴムの水平変形性能 25cm (せん断変形率 250%) 以上としている。

7. あとがき

積層ゴムの経年変化は、当初設計で考慮した範囲内で推移している。経年変化を評価する尺度や同一条件の試験を再現することは困難であるが、免震構造の主要部材である積層ゴムの信頼性確保のため、引き続き追跡調査を行っていきたい。

【参考文献】

- 1) (社)日本ゴム協会「設計者のための免震用積層ゴムハンドブック」、理工図書、2000.1
- 2) 早川他「積層ゴムの経年変化」、奥村組技術研究所年報、No.23、1997.7
- 3) 安井他「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、2006.12

表-5 せん断試験結果

実施年	部位	せん断接着力 (N/mm ²)	せん断変形率 (%)	剥離状態			
				R	RC	CP	M
初期値	平均値	5.63	527	100	0	0	0
10年目 (1997)	外周部	7.07	508	100	0	0	0
	中央部	8.33	558				
	平均値	7.65	533				
	変化率	35.9%	1.1%				
20年目 (2007)	外周部	8.05	462	100	0	0	0
	中央部	7.95	498				
	平均値	8.00	480				
	変化率	42.1%	-8.9%				

剥離状態	符号
ゴム部の破断	R
ゴム部と接着剤間の破断	RC
接着剤間の破断	CP
金属と接着剤間の破断	M