

免震用積層ゴムの経年変化に関する研究

高山峯夫 福岡大学

山上 聡 奥村組技術研究所

加藤直樹 昭和電線デバイステクノロジー

[1] はじめに

免震構造用アイソレータとして最も多く利用されているのは積層ゴムである。積層ゴムの経年変化特性としては、ゴムの劣化とクリープが重要となる。ゴムの劣化に関してはアレニウス式による促進劣化試験により数十年後の特性変化が予測されている。一方、クリープ特性に関しては、加熱促進クリープ試験による方法や常温でのクリープ試験による方法がある。いずれにしろ経年変化特性に関しては、実建物での積層ゴムの劣化特性を追跡調査することが重要となるが、現時点では 20 年程度の劣化データしかない。

福岡大学では、15 年以上にわたり常温でのクリープ試験を継続しており、長期間の詳細なクリープデータを保有している。奥村組の技術研究所管理棟は 1986 年に竣工以来、積層ゴムの劣化特性やクリープ特性に関するデータの蓄積が行われてきている。また、当建物には別置き試験体もあり、定期的に特性試験も実施されている。これらの積層ゴムは昭和電線電纜（現在の昭和電線デバイステクノロジー）社により製造されており、ゴム材料に関する劣化データなどを保有している。

そこで、本研究では、積層ゴムの経年変化特性について、実建物に使用されている積層ゴムの劣化状態の調査やクリープ変形の調査を行い、促進劣化試験による予測の妥当性を検証する。

[2] 別置き試験体の経年変化

奥村組技術研究所に使用されている積層ゴムの仕様は、表 2 の文献 4) として示されているものである。別置き試験体は建物に使用されたものと同じの積層ゴム 4 体を同一環境下に無加力で設置されている。10 年目に積層ゴムの 1 体を切り出しゴム単体の材料試験を実施しており、15 年目の計測以降は 3 体の測定結果となっている。初期値から 20 年目については奥村組技術研究所保有の 2 軸試験機での測定結果、今回の 23 年目については昭和電線保有の 25MN 圧縮せん断試験機での測定結果である。

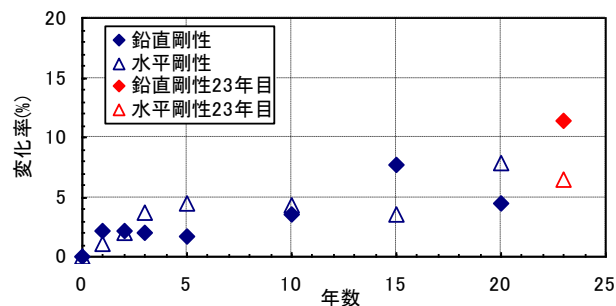


図 1 積層ゴムの剛性の変化

図 1 に水平剛性と鉛直剛性の変化を示す。剛性は徐々に増加してきているものの、20 年目と 23 年目の水平剛性の増加率は 7% 前後となっている。23 年目の水平剛性の測定結果は 20 年目の測定結果とほぼ同じ数値であるのに対して、鉛直剛性については変化率が大きくなっている。これは試験機の剛性の違いや変位計測の位置の違いによる影響が大きいと推定される。

[3] 積層ゴムの内部ゴムの物性評価

福岡大学に保管されていた積層ゴム（G0.45MPa, 500×7-16）の劣化状況を調査した。この試験体は奥村組別置試験体とほぼ同一時期に製造されたもので、建物内において保護ゴム無しで無加力で保管されていたものである。この積層ゴムから図2に示すようにダンベル3号試験片およびせん断試験片を作成した。試験片の引張試験およびせん断試験から積層ゴムの外側に近い試験片ほど、酸化劣化による硬化現象が認められた。

この23年目の保護ゴム無しの積層ゴムの内部ゴム物性評価結果と奥村組での別置試験体による20年経過後の内部ゴム物性評価結果を図3に示す。奥村組別置試験体から切り出した試験片による100%引張モジュラスの変化率は20年目で約6%となっている¹⁾。福岡大学に保管していた試験体の引張応力度は奥村組別置試験体よりも若干高いが、これは保護ゴムの有無によるものと思われる。また、同図には加熱促進劣化試験（経過年数8年=100℃×1日, 40年=100℃×5日, 80年=100℃×10日）による引張試験の結果も一緒に示されている。100%引張応力については加熱促進劣化試験結果と実測の評価結果は良い一致を示している。しかし、200%引張応力、300%引張応力とひずみレベルが大きくなるに従い、その差が大きくなる傾向を示している。これは酸化劣化による硬化からハードニングの影響が大きくなったためと推定される。

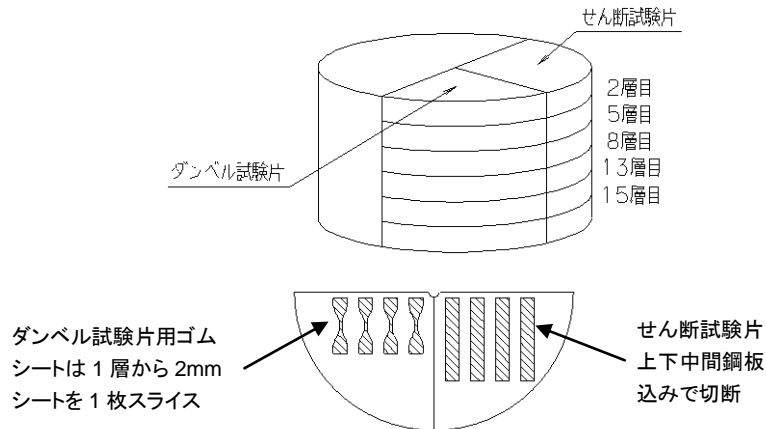


図2 試験片採取位置

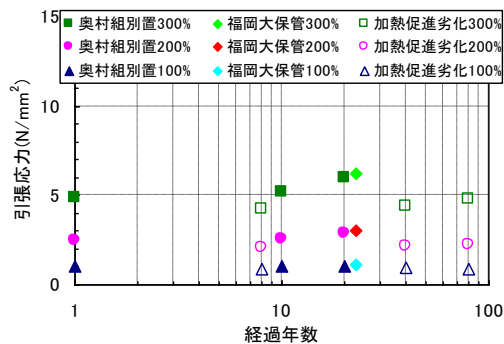


図3 各引張応力値と加熱促進劣化試験結果との比較

[4] クリープ率の推定

福岡大学で継続しているクリープ試験では、実験室内の門型の鋼製フレーム内に油圧ジャッキ、ロー

ドセル、試験体を設置し、油圧ポンプにより一定圧縮荷重を載荷している。人工的な温度調整は行わず、実際に使用されている免震層とほぼ同じ環境としている。試験体は表 1 に示す天然ゴム系積層ゴムの 3 体で、被覆ゴムは付加されていない。500×7-14 と 445×4-25 試験体は 2 年間のクリープ試験のみで、500×3.75-26 試験体は試験面圧を 20MPa とし、1994 年 8 月から試験を開始し、現在も継続中である。約 15 年を経過した試験体のクリープ量は、0.41mm 程度と非常に小さい。

表 1 クリープ試験体の諸元

試験体名	直径	ゴム厚	層数	S ₁	S ₂	試験面圧	せん断弾性係数 G	60 年後の推定クリープ量 (線形近似)
500×3.75-26	500mm	3.75mm	26	33.3	5.1	20 MPa	0.45 MPa	1.70mm
500×7-14	500	7	14	17.9	5.1	11	0.425	11.60mm
445×4-25	445	4	25	27.2	4.5	15	0.526	8.25mm

S₁:1 次形状係数, S₂:2 次形状係数

文献 2)~4)では、実際の免震建物で 11 年半~約 20 年間観測された積層ゴムのクリープ量に基づいた推定クリープ率が示されている。表 2 は各文献の積層ゴムの概要である。これらの文献に示された結果と表 1 の試験体によるクリープ試験の結果を図 4 に示す (図中に文献番号で表記)。同図は、近似式により求めた 60 年後の推定クリープ率 (全ゴム層厚に対するクリープ量の比率) と 1 次形状係数 S₁ の関係を示している。同図から S₁ が大きくなるに伴い鉛直剛性が硬くなり、クリープ率が小さくなる傾向が見られる。実免震建物でのクリープ率は、S₁ が小さいほどクリープ試験の回帰曲線より低めの値を示している。文献 4) の結果は設計面圧が 5MPa 前後と低いことがさらに差が開いていると考えられる。又、面圧の大小にかかわらず、S₁ が大きい積層ゴムほどクリープ率が小さくなっている。

文献 5) にはクリープ率の予測式が示されている。

$$\text{クリープ率 (\%)} = 17.2 \times \frac{\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{0.619}}{\left(\frac{G}{G_0}\right) \times S_1^{1.02}} \times \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{0.568} \quad (1)$$

ここで、 σ : 面圧, σ_0 : 基準面圧 (10MPa), G : せん断弾性係数, G_0 : 基準せん断弾性係数 (0.39MPa),
S₁ : 1 次形状係数, Y : 期間 (年), Y_0 : 基準年 (1 年)

(1)式による 60 年後のクリープ率と図 4 のクリープ率を比較したのが図 5 である。表 2 に示された文献の推定クリープ率と(1)式の予測値はほぼ同じ傾向を予測するものの (図中の黒マーク)、表 1 の試験結果に基づいた推定クリープ率との対応はあまり良くない (図中の白マーク)。特に面圧 σ が 20MPa の場合はクリープ率を過大に予測している。(1)式の適用範囲は $\sigma=2\sim 15\text{MPa}$ とされており、今後も実験や観測の継続に基づいたクリープの研究が求められる。

表 2 実免震建物に使用されている積層ゴムアイソレータの概要

文献	直径(内径)	ゴム厚	層数	S ₁	S ₂	せん断弾性係数 G	平均面圧	観測期間	計測方法	60 年後の推定クリープ量	近似方法
2	740mm (150)	4.4mm	61	33.5	2.8	0.56MPa	5 MPa	11 年半	マイクロメータ	5.88mm	線形
								2 年半	レーザー変位計	3.94mm	
3	670(50)	6	23	25.8	4.86	0.56	5.54	約 20 年	—	4.11mm	両対数
4	500	7	14	17.9	5.1	0.425	4.9		ダイヤルゲージ	5.04mm	線形

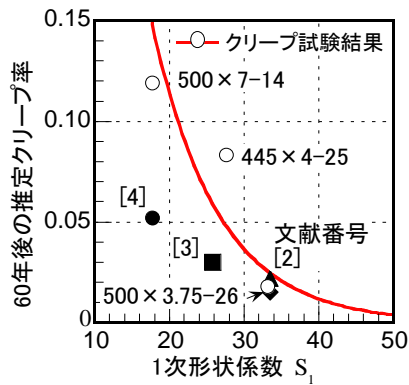


図4 推定クリープ率と S_1 の関係

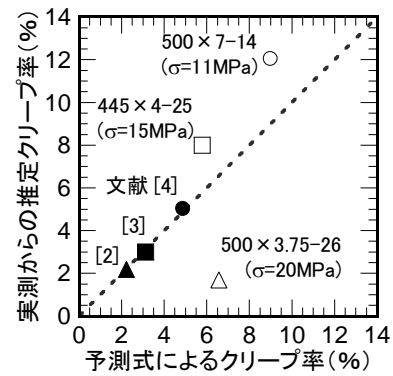


図5 推定式による 60 年後のクリープ率と
実測クリープ率の関係

[5] まとめ

本研究では約 23 年前に製作された天然ゴム系積層ゴムの経年劣化の状況を把握し、加熱促進劣化試験との比較を行った。促進劣化試験により積層ゴムの劣化程度をほぼ予測できると考えられるものの、更なる検証が必要である。またクリープ率については実験室での 15 年にわたる計測と実建物での観測結果から、特に積層ゴムの形状や面圧がクリープに及ぼす影響が大きいことがわかった。面圧 20MPa でのクリープ率は非常に小さいレベルとなっている。なお、ここで紹介した研究成果については文献 6) にも詳しい。

本研究の一環で実施した積層ゴムの経年変化に関するアンケート調査は紙面の関係で別の機会に詳しく報告したい。文献 7) では平成 9 年に実施した別置き試験体についてのアンケート調査の結果が示されている。この時点では多くの別置き試験体が設置されていたことがわかる。今回、免震構造協会の会員を対象に実施したアンケート結果（回答は 27 社で回収率は 3 割程度）では、別置き試験体を設置しているとの回答が 6 割程度（17 社/27 社）あったものの、3 割以上はメーカーに委託という回答であった。さらにクリープ特性などの調査を実施したことがあるとの回答は 2 割弱（5 社/27 社）であった。

積層ゴムの経年変化特性については、実建物や実製品での観測が必要であり、できるだけ多くの実建物で観測が実施される、あるいは継続されることが望まれる。

参考文献

- 1) 安井ほか：積層ゴムの経年変化, 奥村組技術研究年報, No.33, 2007
- 2) 中村ほか：実免震建物の積層ゴムの経年変化に関する検討, 日本建築学会技術報告集, 第 6 号, pp.23-26, 1998
- 3) 浜口ほか：約 20 年間使用した積層ゴムの経年変化調査, 日本建築学会技術報告集, Vol.15, No.30, pp.393-398, 2009
- 4) 安井ほか：積層ゴムの経年変化, 奥村組技術研究年報, No.33, pp.71-76, 2007
- 5) 日本ゴム協会：免震用積層ゴム委員会技術報告書—免震建築用積層ゴムと環境・耐久性—, 平成 18 年 3 月
- 6) 柳, 開発, 森田ほか：天然ゴム系積層ゴムの経年変化に関する研究（その 1）～（その 2）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, 2010.9
- 7) 別置き試験体整備 WG：別置き試験体に関するアンケート結果報告, Menshin, No.23, pp.44-47, 1999.2