天然ゴム系積層ゴムアイソレータのクリープ試験

CREEP TESTS OF FULL-SCALED LAMINATED RUBBER BEARINGS

森田慶子 ———*1

高山峯夫 ———*2

Keiko MORITA

Mineo TAKAYAMA

*1

*2

The laminated rubber bearing is the most important structural member for seismic isolation system. The basic characteristics of a rubber bearing have been confirmed by the compression test, the compressive shearing test and the creep test. This paper presents the results and the analysis of the creep test for the full scaled laminated rubber bearing under 110kg/cm², 150kg/cm² and 200kg/cm² axial stress at our laboratory. The creep test has been continued for about 2 years. From these results, the maximum creep deformation was about 0.15-0.6% of total rubber thickness.

キーワード:

免震構造, クリープ試験, 積層ゴムアイソレータ

Keywords:

Seismic isolation system, Creep test, Laminated rubber bearing

1. はじめに

免震構造の重要な構造要素である積層ゴムアイソレータは、これまで、圧縮及び圧縮せん断試験等の実大試験によって、その基本性能が把握され、実際の建物に使用されている。積層ゴムの耐久性を考える場合、特に、ゴム層の酸化による経年変化と長期間の軸圧縮力によるクリープ変形に関する検討が重要となる。積層ゴムは構造上、ゴムシートの側面からゴムの酸化が進行し、表面から数mm程度の深さまでしか影響を及ぼさないことが、実際に100年間使用されてきたゴムパッドの検査¹⁾や加熱促進劣化試験²⁾により確認されている。加えて、実際には酸素や紫外線などの外的要因から積層ゴム内部を保護するために被覆ゴムが附加されている為、酸化の影響は更に小さくなる。但し、ゴム物性の経年変化により、積層ゴムの剛性や変形能力などが若干変化することは、設計上考慮されるべきであろう。

積層ゴムアイソレータのクリープ性状の把握については、2種類の天然ゴム系積層ゴムを用いて2年間のクリープ試験(面圧110kg/cm², 150kg/cm²)¹⁾が実施されている。試験結果からは、100年後のクリープ量は数mm以内と予測されており、積層ゴムのクリープ変形は設計上無視できるものと考えられる。又、クリープ試験前後に実施された圧縮・圧縮せん断試験からは、2年間のクリープ試験が積層ゴムの履歴性状に及ぼす影響はほとんど無いという結果²⁾も得ている。しかし、高性能免震建築の実現のためには、より高い面圧下での積層ゴムのクリープ性状を把握しておくことも必要である。そこで、本論では、天然ゴム系積層ゴムの常時面圧200kg/cm²下における約2年間(18,197時間)のクリープ試験結果を示すと共に、面圧110kg/cm², 150kg/cm²下

での既往のクリープ試験結果との比較を行い、面圧や形状の違いによるクリープ挙動への影響について考察を行う。

2. 既往の研究

積層ゴムアイソレータの耐久性に関する文献としては、5)~16)がある。文献5)~12)は実際の建物や橋に用いられた積層ゴムに関する調査研究であり、文献13)~15)は主にゴム材料自体のクリープ特性、疲労試験に関するものである。文献16)は建築の分野ではないが、ヘリコプターのローター用ベアリングとして用いられている積層ゴムの耐久性に関するものである。以下、簡単にその内容を紹介する。

文献5)は、1966年にロンドンのSt. James's Park地下鉄駅の上に建設された建物(Albany Court)に関するものである。この建物の重量は約1300tonで、13個の積層ゴムで支持している。積層ゴムの平面形は長方形で、最大のものは600×500×300mmである。1個の積層ゴムが支持する鉛直荷重は60~200tonである。論文は、主に8年間のクリープ観測の結果と積層ゴムの耐久性について述べている。積層ゴムは、外観上劣化は観察されず、硬度の変化もなかった。クリープは物理的過程と化学的過程に分けて考えることができ、実験により両プロセスの予測式を求めている。物理的過程は時間軸のみ対数で近似(片対数)し、化学的過程は時間軸を線形で近似(線形)している。この予測式と8年間の計測値を比較した結果、予測式と計測値は良い対応を示した。100年後のクリープ量を予測すると約5.4mmとなる。筆者は、ここで用いた積層ゴムは最低100年間は使用に耐え得る、と付け加えている。

文献6)は、1962年に英国に建設の道路橋(Hunts kennel bridge)に使用

*1 福岡大学工学部建築学科 助手
(〒814-80 福岡市城南区七隈8-19-1)

*2 福岡大学工学部建築学科 助教授・工博

*1 Research Assistant, Fukuoka Univ., Faculty of Engineering

*2 Assoc. Prof., Fukuoka Univ., Faculty of Engineering, Dr. Eng.

されている天然ゴム系積層ゴムに関するものである。406×279×181mmの積層ゴムが32体使用されている。厚さ9.5mmの保護ゴムを有し、硬度(IRHD)は70である。天然ゴム100に対し、カーボンブラックは50である。設計鉛直荷重は70ton($\sigma=62\text{kg/cm}^2$)。論文では、設置後20年経った積層ゴム2体を取り出し、その劣化状態を調査している。圧縮・圧縮せん断試験を実施した結果、鉛直剛性、水平剛性ともに設計値にはほぼ一致した。ゴム素材の化学的検査では、表面付近のゴムの方がより多くの酸素を含んでいたが、これは、現在の製品と同レベルであった。引張強度、破断伸び及び対オゾン抵抗性は外周部のゴムほど小さくなる。しかし、ゴム物性の変化は許容範囲内にあった。従って、薄い試験片での促進劣化試験の結果に基づく耐久性評価は非常に厳しい評価となる場合があるので注意を要すると述べている。以上より、20年間使用されてきた積層ゴムにおいて外周部のみから、ゴムが劣化した証拠が見つかったが、それ以外は設計許容範囲内にあり、十分使用に耐え得るという知見を得ている。

文献7)では、1889年にオーストラリアに建設された陸橋に使用された、防振を目的とした天然ゴム系ゴム・ブロックに関するものである。ゴム・ブロックの大きさは1255×1255×13mmである。30両/hrの鉄道車両が通る条件のもとで、96年間使用されている。調査の結果、ゴムの劣化部分は表面だけであり、その深さは約1.5mm以下であった。その他に重大な劣化が生じた部分は発見できなかった。これは、酸化した表面のゴム層が一種の保護層となり、酸素の侵入を防ぐからである。又、現在のゴムは品質的に数段優れたものになっているので、更に耐久性の向上をはかることが可能であり、100年以上の耐久性は十分確信がもてるとしている。

文献8)はプレキャスト・コンクリート製の橋に使われる積層ゴムに関するものである。全長13.5kmの内、8.4kmの部分が海上を通過している。酸化現象については、文献6)7)と同様に、酸化とオゾンの作用を受けるのはゴムの表面だけで問題がないとしている。海上部分については、水による影響を考慮する必要があるが、ゴムは水をほとんど吸収しない(水の拡散係数 $1.4\times 10^{-6}\text{cm}^2/\text{s}$ 、水の溶解度 $3.3\times 10^{-4}\text{g/cm}^3$)。問題があるとするれば、鉄板とゴムの接着部分であるが、これは保護ゴムにより防止可能である。

文献9)10)は、プレストレストコンクリート鉄道橋梁(鬼怒川橋梁)で約17年間使用されてきた積層ゴム支承について、各種の物性試験を行なったものである。この橋梁に使用されているゴム支承は300×600mmの支持面積を持ち、上下に1mmのステンレス鋼板が接着されたゴム厚10mmのものを2~4枚積層して使用している。圧縮応力度は40~55kg/cm²である。各種の物性試験より引張強さは約15%、伸びは約17%低下しており、せん断弾性率は約13%ほど増加していることが判明したが、初期の目標値を充分満足していることが確認されている。更に疲労試験等により、活荷重による影響を調べたが、劣化には殆ど影響を及ぼさないという結果が得られている。これらの回収したゴムと熱劣化試験の結果から、推定寿命は約85年以上という結果が得られている。

文献11)では、橋梁用ベアリングについて設計の概要、製造上の問題、耐久性に関して幅広く著者の見解が述べられている。ベアリング用のゴム材料としては、天然ゴムとクロロプレンゴムを取り上げ、特に天然ゴムの特性の優位性を強調している。最後に筆者は、正しく設計され、適切に配合された天然ゴム橋梁ベアリングは、少なくとも100年間は有効に機能すると確信している、と結んでいる。

文献12)は、イギリスのLincoln市にある道路橋Pelham Bridgeに、約40年間使用された積層ゴムに関する調査研究結果である。製造時において鉛直剛性及び水平剛性に関する試験が実施されたとの記録が残っているが、その詳細データは不明である。613×410mmの支持面積を持ち、ゴム硬度70、せん断弾性係数 $G=14\text{kg/cm}^2$ のゴム材料が使用され、設計支持荷重は100ton(面圧43kg/cm²)である。年平均気温は9.2℃である。ゴム素材試験結果より、ゴム層の酸化は表面から50mm程度迄で、それより深い位置での物理特性はほぼ一定値を示すことが確認された。積層ゴムの試験結果より、水平剛性及び破断変位は設計値にはほぼ対応しており、ほとんど変化は見られていない。

文献13)14)は、鉄板により拘束されたゴムシートの疲労破壊に関する研究であり、ゴムの疲労亀裂の伝搬特性、繰返し回数との関係、クラック面の顕微鏡写真等によりクラックの成長に関する調査結果が述べられている。

文献15)は、引張応力状態におけるゴムのクリープに関する研究である。試験片は厚さ1mm、幅4~8mm、長さ5~15cmである。一定荷重をかけた状態から、荷重を0に戻して同じ荷重を繰返し与えた場合よりも、荷重は完全に0に戻さず、一定荷重値を中心に±10%程度の変動範囲で繰返し載荷を行った場合の方が、クリープ量は約1/2と少なくなることが示され、載荷方法が及ぼす影響が検討されている。

文献16)は、天然ゴムを使用したヘリコプター用ベアリングの開発に関する文献である。このベアリングには、高い圧縮応力度(350~700kg/cm²)に対する抵抗性と、せん断変形状態での2000万~3000万回にも及ぶ疲労に対する寿命が要求される。1972年から、ヘリコプターのローター用の開発が進められ、現在実用化されている。ベアリングの大きさは、直径10cm程度のもので、薄いゴム層(0.7~2mm厚)と鉄板(ゴム層と同様の厚さ)の互層構造となっている。これにかかる荷重は40ton程度であるが、圧縮応力度は500kg/cm²となる。

以上の文献調査から、ゴムの劣化は周辺部だけに留まり、中央部分はほぼ健全な状態を保持すること、クリープ量についてもそれほど過大とはならず徐々に一定値に収束することが予想される。従って、積層ゴムは十分な耐久性を有しているものと判断できる。しかし、我々が対象としているような積層ゴムのクリープ性状については、厳密には未確認であるため、実物の積層ゴムを用いたクリープ試験を実施している。

3. 試験体

使用した試験体の概要を表1、ゴムの基本配合を表2に示す。ゴム配合は試験体によって異なるが、天然ゴムが大部分を占めている。積

表1 積層ゴムアイソレータの概要

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	計測期間	計測時間
500×3.75-26	500mm	3.75mm	26	33.3	5.1	200 kg/cm ²	4.50 kg/cm ²	1994.8.24~1996.9.20	18,197 時間
500×7-14	500	7	14	17.9	5.1	110	4.25	1987.10.27~1989.10.30	17,300
445×4-25	445*	4	25	27.2	4.5	150	5.26		

*保護ゴム層の厚さ5mmを含む S₁:1次形状係数, S₂:2次形状係数

層ゴムの直径は 500mm 程度、2 次形状係数 $S_2 \approx 5$ 程度であり、各 1 体を使用した。445×4-25 試験体のみ被覆ゴム一体型で、他は鋼板露出型の積層ゴムである。図 1 に、500×3.75-26 試験体を示す。

4. 試験方法

写真 1 に試験状況を示す。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。500×3.75-26 試験体は試験フレーム内に 1 体のみ設置し 400ton(面圧 200kg/cm²)を載荷した。500×7-14 試験体及び 445×4-25 試験体は 2 体重ねて 225ton(面圧 110 kg/cm², 150kg/cm²)を載荷した。圧縮荷重の変動率は 3%以内であった。試験の実施に際しては、実際に使用される環境を想定して、人工的な温度調整を行っていない。試験体の鉛直変形量は、各試験体の取付フランジ間に高感度型変位計 4 台を設置して計測している。本報中の鉛直変形量は 4 点で計測された値の平均値である。圧縮荷重はロードセルにより計測し、試験体付近での気温及び、試験体ゴム層の表面から深さ約 1cm の位置での温度(ゴム表面温度)は熱電対により計測している。計測は 1 時間毎に約 2 年間行っている。

5. 試験結果

図 2～図 3 に設定圧縮荷重を載荷した直後からの鉛直変形量の変化および外気温の変化を示す。同図の鉛直変形量は積層ゴムフランジ間の相対変形量であり、積層ゴムが膨張するときは小さな値をとる。鉛直変形量には外気温の変化に伴って、積層ゴムが膨張・膨張を繰り返している状況が現れている。ゴム表面温度も外気温の変動にほぼ一致している。この鉛直変形量の計測値には、圧縮荷重や温度の変動による影響が含まれるため、(1)式により補正を行った。(1)式中の温度補正係数 α は、荷重の変動補正を行った鉛直変形量とゴム表面温度の関係(図 4)から求めた。500×3.75-26 試験体は、全計測期間中の温度勾配が一定であった。500×7-14, 445×4-25 試験体の場合には 5 つの

表 2 ゴムの基本配合(重量%)

試験体名	天然ゴム	カーボンブラック	加硫剤	その他
500×3.75-26	76	14	3	7
500×7-14	55	18	3	24
445×4-25	68	18	2	12

図 1 500×3.75-26 試験体

写真 1 クリープ試験状況

図 2 鉛直変形量と外気温の変化 (500×3.75-26試験体)

図 3 鉛直変形量と外気温の変化 (500×7-14, 445×4-25試験体)

期間に分かれて温度勾配が表れているため、それぞれの期間について温度補正係数 α を求めた。表3に求めた温度補正係数を示す。

$$y = y' - \Delta P / K_{v(ex)} - \Delta T \cdot \alpha - y_0 \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 y ：クリープ量(mm)， y' ：鉛直変形量(mm)

y_0 ：鉛直変形量の初期値(mm)

ΔP ：初期設定圧縮荷重からの変化量(ton)

$K_{v(ex)}$ ：圧縮試験より得られた鉛直剛性(ton/mm)

500×3.75-26：213.5ton/mm

500×7-14：119.4ton/mm

445×4-25：130.3ton/mm

ΔT ：ゴム表面温度の初期値からの温度差(℃)

α ：荷重の変動補正を行った鉛直変形量とゴム表面温度の関係から得られた補正係数(mm/℃)

(1)式に基づいて求めたクリープ量を図5に示す。500×3.75-26試験体は、500×7-14、445×4-25試験体に比べて面圧が高いにもかかわらず、0.15mm以内と最も小さな値を示した。これは、500×3.75-26試験体のゴム配合では、天然ゴムがゴム素材の約76%程度を占め、添加剤等

が非常に少なくなっているのに加え、1次形状係数が大きいいため鉛直剛性が高く、見かけ上硬くなったためにクリープ量が小さく抑えられたものと考えられる。図6～図9には、クリープ試験開始から以後、外気温の変動が小さい午前6時のデータのみを抽出し、時間軸を線形軸(線形)および対数軸(片対数)とした場合のクリープ量の変化を示す。図中には、2400時間(100日)以降のデータを用いて、最小自乗法により求めた予測式も示す。予測式に基づいて求めた50年後、100年後の推定クリープ量を表4に示す。クリープの予測式の違いにより予測値には10倍近い差が生じている。時間軸を線形とした場合は、対数

表3 温度補正係数 α (mm/℃)

		500×3.75-26	500×7-14	445×4-25
1 勾配		-0.0492296		
5 勾配	1～2357 時間		-0.0549451	-0.0561798
	2358～6143		-0.0467290	-0.0510204
	6144～10990		-0.0561798	-0.0574713
	10991～14848		-0.0490196	-0.0518135
	14849～17300		-0.0564972	-0.0591716

図4 ゴム表面温度と荷重補正後の鉛直変形量の関係

図5 クリープ量の変化

図6 クリープ量の予測(線形)

図7 クリープ量の予測(片対数)

図8 クリープ量の予測(線形)

図9 クリープ量の予測(片対数)

軸を用いた場合に比べて厳しい評価となるが、500×3.75-26 試験体では100年後の推定クリープ量でも3mm程度の値である。図10に線形近似式により求めた50年後及び100年後の推定クリープ率(=推定クリープ量/全ゴム層厚)と1次形状係数 S_1 の関係を示す。2次形状係数 $S_2 \div 5$ 、面圧 100~200kg/cm² の条件で試験を行った500×3.75-26、500×7-14、445×4-25 試験体の結果を用いて求めた回帰曲線も図中に示す。1次形状係数 S_1 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。同図には、文献 17)~19) に示された実免震建物で約10年間観測された積層ゴムのクリープ量に基づいた60年後の推定クリープ率(図中には文献番号で表記)も示す。各文献の積層ゴムの概要を表5に示す。実免震建物での観測結果は、特に S_1 が小さいほど、回帰曲線より低めの値を示している。これは、本試験の面圧に比べ、使用されている平均面圧が50kg/cm² 前後と低いこと、及び、観測期間の差などによる予測式の精度の差によるものと考えられる。又、面圧の大小にかかわらず、 S_1 が大きい試験体ほどクリープ率が小さくなっており、本試験結果と同様の傾向を示している。これより、クリープ率の大きさは、ある面圧の範囲内では、面圧に関係なく S_1 によって決定されると考えられる。

経年変化によるクリープ量を予測するための方法には、本論中で使用した様な線形近似や、時間軸を対数軸とした片対数近似として扱う方法のほかに、時間軸とクリープ量を対数軸とした両対数軸で近似する方法も用いられている。図11には、500×3.75-26 試験体について3通りの方法で近似されたクリープ予測式と実験値の比較を示す。線形

表4 予測式による推定クリープ量 (mm)

時間軸	試験体	50年後	100年後
線形軸 (線形)	500×3.75-26	1.60	3.19
	500×7-14	9.71	19.41
	445×4-25	6.89	13.78
対数軸 (片対数)	500×3.75-26	0.18	0.20
	500×7-14	1.14	1.27
	445×4-25	0.76	0.86

図10 推定クリープ率と1次形状係数の関係

表5 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	ゴム厚	層数	中心孔	S_1	S_2	平均面圧	観測期間	計測方法	推定クリープ量*	近似方法
17	740mm	4.4mm	61	150mm	33.5	2.8	50 kg/cm ²	約8年間	マイクロメータ	4.97mm(1.9%)	線形
								14ヶ月	レーザー変位計	7.48mm(2.8%)	
18	670	6	23	50	25.8	4.86	56.5	約10年間	—	4.5mm(3.3%)	両対数
19	500	7	14	—	17.9	5.1	45		ダイヤルゲージ	4.3mm(4.4%)	線形

*60年後の推定クリープ量, ()内はクリープ率 S_1 :1次形状係数, S_2 :2次形状係数

図11 クリープ予測式の比較

図12 クリープ予測式の比較(100年間)

近似・片対数近似のクリープ予測式は図6～図7に示したものを使用し、両対数近似のクリープ予測式は、前述した様に2400時間(100日)以降のデータを用いて最小自乗法により求めたものである。 $(0.00045253 \times \text{時間}^{0.5374})$ 同図より片対数近似の推定クリープ量が最も大きくなる期間もあるが、15000時間以降は(線形近似) > (両対数近似) > (片対数近似) の順で大きくなっている。図12は、図11で用いたクリープ予測式を100年間について示したものである。同図より、線形近似によるクリープ予測式が当然のことながら、最も厳しい評価を与えることが分かる。既往の研究にもみられる様に、クリープの進行はある程度の年数を経て緩和されるのではないかと考えられるが、この傾向をつかむためには、より長期間にわたる観測が必要であると考えられる。

なお、500×3.75-26試験体については、現在もクリープ試験を継続中(約3年間)であり、2年間以降のクリープ性状も、本論中の結果と同様の傾向を示している。

6. まとめ

2次形状係数 $S_2 \approx 5$ の天然ゴム系積層ゴムアイソレータ3種類を用い、約2年間のクリープ試験を行った結果、以下の知見が得られた。

- ① クリープ率は1次形状係数 S_1 が大きいほど小さくなる傾向が認められる。 $S_1=33$ 程度の500×3.75-26試験体では、100年後の最大推定値でもクリープ率は約3%と非常に小さい。
- ② 面圧が100～200kg/cm²程度までの範囲では、クリープ量は面圧に関係なく S_1 に依存する傾向が認められた。
- ③ ゴム物性の違いがクリープ性状に与える影響、クリープ予測式の算出方法等については今後更に検討を行いたいと考えている。

謝 辞

1987年から実施した試験は、日本建築学会免震構造小委員会アイソレータ・ダンパー・グループのご協力により行われた実験研究であり、試験装置及び試験体を提供して頂いた。又、1994年から実施した試験は、(株)日建設計 桐原英秋氏及び動力炉・核燃料開発事業団 瓜生満氏のご協力によるものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針，1993年版
- 2) 高山峯夫他：実大 Isolator に関する実物実験(その6)，日本建築学会中国・九州支部研究報告集，構造系，第8号，1990年3月

- 3) 多田英之他：実大 Isolator に関する実物実験(その3)，日本建築学会九州支部研究報告集，構造系，第29号，1986年3月
- 4) 多田英之他：免震構造に関する実物実験(その10)，日本建築学会大会学術講演梗概集，B 構造Ⅱ，1986年8月
- 5) C.J.Derham, R.A.Waller：Luxury without Rumble, The Consulting Engineer, July 1975
- 6) A.Stevenson, A.R.Price：A Case of Elastomeric Bridge Bearings After 20 years Service, SP94-6
- 7) A.Stevenson：Longevity of Natural Rubber in Structural Bearing, Plastics and Rubber Proceeding and Applications, Vol.5, No.3, 1985
- 8) Chin Funk Kee：Some Considerations in Design of Natural Rubber Bearings for the Penang Bridge, Journal of Natural Rubber Research Vol.1, No.1, March 1986
- 9) 宇佐美民雄，渡辺正夫他：ゴム支承の耐久性に関する研究(第1報)，日本ゴム協会誌，第54巻 第3号，1981年
- 10) 宇佐美民雄，渡辺正夫他：ゴム支承の耐久性に関する研究(第2報)，日本ゴム協会誌，第55巻 第12号，1982年
- 11) P.B.Lindley：天然ゴム橋梁ベアリング，日本ゴム協会誌，第48巻 第2号，1975年
- 12) 藤田隆史他：FBR 免震設計に関する研究 その6～その8，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 構造Ⅱ，1996年9月
- 13) A.Stevenson：Fatigue Crack Growth in High Load Capacity Rubber Laminates, Rubber Chemistry and Technology, Vol.59 1985
- 14) P.B.Lindley, A.Stevenson：Fatigue Resistance of Natural Rubber in Compression, Rubber Chemistry and Technology, Vol.55, 1981
- 15) C.J.Derham, A.G.Thomas：The Creep of Rubber under Repeated Stressing, PAP Meeting Rubber Division American Chemical Society, Vol.110th No.65 1976
- 16) P.T.Herbst：Natural Rubber as a Bearing Material for Rotary Wing Aircraft Applications, NRPA 3rd Rubber in Engineering Conference, 1973
- 17) 中村嶽他：免震建物の維持管理に関する研究(その1)，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 構造Ⅱ，1995年8月
- 18) 東野雅彦他：10年間使用した積層ゴムの経年変化に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 構造Ⅱ，1997年9月
- 19) 早川邦夫他：積層ゴムの経年変化，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 構造Ⅱ，1997年9月

[1997年6月20日原稿受理 1997年9月1日採用決定]