高速炉に適用する厚肉積層ゴムの研究開発 (準実大厚肉積層ゴムを用いた経年特性試験)

渡壁 智祥^{*1}, 山本 智彦^{*2}, 深沢 剛司^{*3}, 岡村 茂樹^{*3}
杣木 孝裕^{*4}, 諸菱 亮太^{*4}, 櫻井 祐^{*5}, 加藤 亨二^{*5}

Research and development of thick rubber bearing for SFR (Aging properties tests of semi full-scale thick rubber bearing)

Tomoyoshi WATAKABE^{*1}, Tomohiko YAMAMOTO^{*2}, Tsuyoshi FUKASAWA^{*3},
Shigeki OKAMURA^{*3}, Takahiro SOMAKI^{*4}, Ryota MOROBISHI^{*4}, Yu SAKURAI^{*5} and Kouji KATO^{*5}

^{*1,*2} Japan Atomic Energy Agency

4002 Narita-cho, Oarai-machi, Higashi-Ibaraki-gun, Ibaraki 311-1393, Japan

^{*3} Mitsubishi FBR Systems, Inc.

2-34-17 Jingumae, Shibuya-ku, Tokyo 150-0001, Japan

^{*4} Obayashi Corporation

2-15-2 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8502, Japan

^{*5} Bridgestone Corporation

1 Kashio-cho, Totsuka-ku, Yokohama, Kanagawa 244-8510, Japan

Received: 15 September 2016; Revised: 26 March 2017; Accepted: 14 May 2017

Abstract

A seismic isolation system composed of a thick rubber bearing and an oil damper has been developed for Sodium-Cooled Fast Reactor. One of the advantages of the isolation system is the use of thick rubber bearings to ensure the longer vertical natural period of a plant, thereby mitigating seismic loads to mechanical components. Characteristics of thick rubber bearings have been confirmed through a series of tests. This paper focused on the aging properties of thick rubber bearings, such as basic mechanical properties and ultimate strength. An aging test of thick rubber bearings was conducted using 1/2-scale (800 mm diameter) and 1/8-scale (200 mm diameter) rubber bearings. Aging of the rubber bearings was reproduced using thermal degradation based on Arrhenius law, in which the target of aging periods was 60 years, plant life time. The hysteresis loops of the thick rubber bearings after aging were obtained through horizontal and vertical static loading tests, and the effects of aging were evaluated by comparison with the initial mechanical properties. In addition, for the purpose of further research, the effect of scale by aging was clarified to compare the mechanical properties between the 1/2-scale and 1/8-scale rubber bearings.

Key words : Sodium-cooled fast reactor, Seismic isolation, Thick rubber bearing, Aging property and breaking test

1. 緒 言

積層ゴムとオイルダンパーから構成される免震装置の高速炉への適用が計画されている。本装置の大きな特徴の一つは、厚肉積層ゴム（一次形状係数 12 程度）を採用していることである。厳しい地震条件下においても原子炉容器等の内部機器の設計を成立させるため、上下固有振動数を通常よりも低下させることによる応答低減を狙いとしている（Kawasaki et al., 2015）。これまでに、著者らは厚肉積層ゴムの縮尺試験体（直径 1600 mm の 1/8～

No.16-00444 [DOI:10.1299/transjsme.16-00444], J-STAGE Advance Publication date: 25 May, 2017

^{*1} 正員, 日本原子力研究開発機構 (〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002)

^{*2} 日本原子力研究開発機構

^{*3} 正員, 三菱 FBR システムズ (株) (〒150-0001 東京都渋谷区神宮前 2-34-17)

^{*4} (株) 大林組 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2)

^{*5} (株) ブリヂストン (〒244-8510 神奈川県横浜市戸塚区柏尾町 1)

E-mail of corresponding author: watakabe.tomoyoshi@jaea.go.jp

1/13 縮尺)を用いた静的加力試験及びクリープ試験により、厚肉積層ゴムの設計成立性を確認するとともに、その設計式を提示した(Yamamoto et al., 2015). また、準実大厚肉積層ゴム(1/2 縮尺)を対象とした静的加力試験を通じて、設計式の実大規模への適用性を示すとともに、線形限界ひずみ等の設計で必要となる基礎データや多様な荷重下における破断特性に関するデータを取得し、厚肉積層ゴムの力学特性を明らかにしてきた(Fukasawa et al., 2015 and Fukasawa et al., 2016). 一般に積層ゴムを実機に適用する場合、供用期間中の経年変化を考慮して建屋支持機能や復元機能の構造健全性を評価することが重要となる。そこで、本報告では、加熱促進劣化により経年を模擬した準実大の試験体を用いて静的加力試験を行い、経年が剛性や線形限界ひずみ等の力学特性に及ぼす影響について述べる。ここでは、プラント供用期間 60 年とその半分の 30 年の経年を模擬した 1/2 縮尺系積層ゴム(直径 800 mm)を用いて水平及び上下方向の静的加力試験を行い、設計で想定する領域から終局もしくはその近傍までの復元力特性データを取得し、これらの結果から力学特性や終局挙動に対する厚肉積層ゴムの健全性を提示する。また、1/8 縮尺系積層ゴム(直径 200 mm)についても同様の試験を行い、経年を模擬した 2 種類の縮尺比の力学特性を比較評価することで、経年状況下におけるスケール効果についても示す。

2. 積層ゴムの経年特性

2・1 経年要因

高速炉は供用期間として 60 年を予定しており、積層ゴムの経年特性を事前に把握しておくことは重要である。一般的に積層ゴムの経年変化の要因としては、以下のとおり熱劣化、オゾンや紫外線などの高エネルギー源による劣化及び酸化劣化に分類される。

(1) 熱劣化: 熱劣化は、ゴムに熱エネルギーが供給されることで、ゴムの分子鎖の切断又は架橋が発生し、ゴムの物性が変化する。

(2) 高エネルギー源による劣化: オゾンや紫外線等の高エネルギー源による劣化は、ゴム表面に劣化層が形成され、ゴム変形時のクラックの原因となる。

(3) 酸化劣化: 酸化劣化は、酸素がゴム表面近傍に侵入することでゴムの硬化等の影響を及ぼす。

高エネルギー源による劣化は、ゴム表面が主で、体積の多くを占めるゴム内部への影響は限定的とされている。また、積層ゴムには外周部に耐候性に優れた被覆ゴムが取り付けられており、高エネルギー源が内部のゴムに直接的に影響を及ぼすことを防止している。積層ゴムが設置される環境を考えた場合、積層ゴムは免震層などの閉ざされた空間に配置されるため、オゾンや紫外線などの高エネルギー源による劣化の影響は他の要因と比較して相対的に小さくなる。一方、熱劣化は、積層ゴムの使用温度では劣化の進行は緩やかであるが、ゴム全域で進行するため、性能への影響は他の劣化要因に比べて大きいとされている。酸化劣化については、被覆ゴムにより対策されているものの、空気雰囲気での使用環境を考えると、劣化の要因となり得る。よって、ここでは、熱劣化と酸化劣化が経年変化の主要因と想定する。

2・2 経年方法

本試験では、ISO 22762-1 (Elastomeric seismic—protection isolators)及び JIS K 6410-2 (建築免震用積層ゴム支承)で規定される促進劣化方法として、次式に示すアレニウス則を用いて促進劣化の条件を設定した (ISO, 2010 and JIS, 2015)。

$$\frac{t_1}{t_2} = \exp \left[\frac{E(T_1^{-1} - T_2^{-1})}{R} \right] \quad (1)$$

ここで、 E は活性化エネルギー、 R は気体定数、 T_1 は使用温度、 T_2 は熱老化温度、 t_1 は使用期間、 t_2 は熱老化期間である。本論文の静的加力試験で用いる経年を模擬した試験体は、式(1)に基づき経年 30 年、経年 60 年となる熱老化期間を求め、この期間を満足するように恒温槽で加熱した積層ゴムである。上式によれば、恒温槽の温度を 80℃一定とした場合、経年を模擬するために要する期間は、経年 30 年で 51.1 日、経年 60 年で 102.3 日となる。

この熱老化期間の算定には、使用温度 T_1 を 20°C 、熱劣化温度 T_2 を 80°C とし、表1に示す条件を用いた。なお、ここで用いた基準温度 80°C は、JIS K 6410-2（建築免震用積層ゴム支承）で定められている温度範囲から、試験実施工程を考慮して設定した。

Table 1 Arrhenius equation parameters for calculating aging time.

E [J/mol]	7.70×10^4
R [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	8.3145
Days of a year	365.24

3. 静的加力試験

3・1 試験体

本試験では、縮尺比を2種類（1/2, 1/8）、経年数を3種類（0年, 30年, 60年）とした。水平及び上下方向の終局挙動を含む経年特性変化を把握するため、それぞれの条件で2基の試験体を用意した。試験体は実大積層ゴム（直径1600mm）に対して長さが1/2, 1/8となるように表2に示す相似則を用いて製作した。表3には縮尺試験体の寸法と実大寸法の比較を、図1には1/2縮尺試験体の概要を示す。1/2縮尺積層ゴムは、式(2)及び(3)に示す実大の一次形状係数 S_1 （直径に対するゴム一層当たりの厚さ）と二次形状係数 S_2 （直径に対するゴム層の総厚さ）を保持して縮尺比を1/2とする直径800mmの試験体である。ゴムの単層厚さは15.5mm、内部鋼板厚は8.8mmとなる。ゴムの積層数は10層で実大積層ゴムとの違いはない。なお、ここで適用する相似則に基づくと、試験時における面圧（ -5.0 MPa ）は実大と同一となる。ここで、面圧の符号「-」と「+」は、各々圧縮面圧と引張面圧を意味する。1/8縮尺積層ゴムは、縮尺比を1/8とする、直径200mmの試験体である。本試験体は実大積層ゴムに対して長さが1/8となるように1/2縮尺積層ゴムと同様の相似則に基づき製作した。ゴムの単層厚さは3.88mm、内部鋼板厚は2.3mmでゴムの積層数は10層であり、試験時における面圧は実大と同じ -5.0 MPa となる。

$$S_1 = \frac{(D - D_0)}{4t_r} \quad (2)$$

$$S_2 = \frac{D}{H} \quad (3)$$

ここで、 D はゴムの直径、 D_0 は中心孔の直径、 H はゴム全層の厚さ、 t_r はゴム1層の厚さである。

試験体の加熱促進劣化は、図2に示すとおり恒温槽（幅4000mm×奥行3000mm×高さ2600mm）内に無負荷状態で計4基の積層ゴムを平面に配置して行われた。恒温槽内及び積層ゴムの温度管理については、図3に示すように恒温槽内及び各試験体の表面に熱電対を設置し、恒温槽内の温度を計測・管理した。2・2項で示した通り、恒温槽内の温度を 80°C 一定とし、所定の期間で加熱促進劣化させた。温度については、JIS K 6410-2に基づきその温度の管理範囲を $\pm 2^\circ\text{C}$ となるように管理した。経年60年試験体の表面での温度計測の結果を図4に示す。実際の試験体表面での温度は約 79°C であったため、劣化期間を再計算し、経年30年で55日程度、経年60年で110日程度に修正した。

Table 2 Similarity law.

Dimension	Half-Scale model	Full Scale model
Length	$L_s = L_f / 2$	L_f
Stiffness	$K_s = K_f / 2$	K_f
Frequency	$f_s = \sqrt{2} f_f$	f_f
Mass	$M_s = M_f / 2^2$	M_f
Force	$F_s = F_f / 2^2$	F_f
Stress	$P_s = P_f$	P_f

Fig. 1 Configuration of Half-scale test.

Table 3 Specifications for rubber bearings. 1/2-scale and 1/8-scale specimens were prepared for the tests.

	Full-scale	1/2-scale	1/8-scale
Horizontal period [s]	3.40	2.41	1.20
Vertical frequency [Hz]	7.5	10.5	21.3
Rubber outer diameter [mm]	1600	800	200
Rubber inner diameter [mm]	80	55	10
Rubber thickness [mm]	31.0	15.5	3.88
Number of rubber layers	10	10	10
Total rubber thickness [mm]	310	155	38.8
Primary shape factor	12.26	12.02	12.24
Secondary shape factor	5.16	5.16	5.15
Design stress [MPa]	-5.0	-5.0	-5.0

Fig. 2 1/2-scale test specimens in constant temperature bath.

Fig. 3 Thermo couples positions in constant temperature bath.

Fig. 4 Measurement temperature in constant temperature bath (1/2-scale test specimens). A constant temperature bath was controlled to a constant 80°C within a $\pm 2\%$ error based on JIS K 6410-2. Because the average of temperature was 79°C at the surface of the specimens, duration of aging promotion was modified by the conversion of 79°C.

3・2 試験方法

試験は2軸試験機を用い、規定面圧下で圧縮せん断载荷、あるいは上下1方向载荷を実施した。試験機は試験体容量に応じて変更され、1/2縮尺試験体の試験に使用した50 MN 载荷試験機を代表して図5に示す。本試験では、以下5項目に着目して水平方向及び上下方向の特性を取得した。

- (1) 設計領域での水平・上下方向の剛性
- (2) 設計領域での水平・上下方向の減衰定数
- (3) 水平・上下方向のスケルトンカーブ（破断を含む）
- (4) 水平方向の線形限界とハードニング領域での挙動（破断を含む）
- (5) 上下方向の引張降伏までの挙動、降伏強度と降伏後の挙動（破断領域まで）

準備した6種類の試験体に対して、表4に示す全15ケースの载荷を実施した。試験条件のパラメータは、入力波形、载荷方向、载荷振幅及び面圧である。試験時の面圧については、設計面圧（-5 MPa）と基準地震動下での変化として想定される圧縮面圧（-10 MPa）の2種類とした。水平方向の载荷試験では、せん断ひずみ γ を100%，150%（1/8縮尺では200%）及び400%の3種類とした。せん断ひずみ100%，150%（1/8縮尺では200%）については、4サイクルの载荷を2種類の面圧下（-5 MPa，-10 MPa）で行い、剛性及び減衰に関するデータを取得した。その後、設計面圧下（-5 MPa）にて単調载荷により、+400%のせん断ひずみを与えて破断までのスケルトンカーブに関するデータを取得した。载荷試験に用いる入力波形として、繰返し载荷では三角波を、単調载荷ではランプ波を用いた。上下方向の载荷試験では、オフセットせん断ひずみを0%として、設計面圧（-5 MPa）を基準に、-5 MPa $\pm$ 50%，-5 MPa $\pm$ 100%の2種類の上下ひずみにて、各々4サイクルで载荷し、剛性及び減衰に関するデータを取得した。その後、引張方向に単調载荷させて、終局までのスケルトンカーブ（剛性、引張降伏応力）に関するデータを取得した。なお、1/8縮尺試験体の一部の試験では、破断に至らなかった。

Fig. 5 Test apparatus 50MN for static loading of the 1/2-scale test specimens.

3・3 試験の評価方法

評価項目の水平及び上下方向の剛性・減衰定数、線形限界及び引張降伏応力の算定方法を、図6～9に示す。剛性及び減衰定数については、水平上下各々の方向の応力ひずみ関係から算定した。JIS K 6410-2に基づき、応力ひずみ曲線の傾きを剛性 K_h とし（図6）、減衰定数 h_{eq} については、弾性ひずみエネルギーとヒステリシスエネルギーの比率から算定した（図7）。なお、これらの算定には、一定ひずみの繰返し载荷による荷重変位データの中で特性が安定する第3サイクル目を使用した。水平方向の線形限界及び上下方向の引張降伏応力はJEAG4614-2013を基に以下の通り求めた（原子力規格委員会，2013）。水平方向の線形限界ひずみについては、せん断ひずみ0%から100%を範囲とする等価剛性を求め、これを1.2倍とする傾きと応力ひずみ関係との交点をせん断ひずみの線形限界とした（図8）。上下方向については、応力ひずみ曲線の初期のひずみ領域の傾きから等価剛性を求め、これに1%オフセットを施した直線とスケルトンカーブの交点を引張降伏応力とした（図9）。

Table 4 Loading program.

Test No.	Specimens	Loading conditions	Axial stress	Shear Strain
1	1/2-scale: 0 year 30 years 60 years	Horizontal cyclic (4) ^{*1}	-5 MPa	±100 %
2		Horizontal cyclic (4)	-10 MPa	±100 %
3		Horizontal cyclic (4)	-5 MPa	±150 %
4		Horizontal monotonic	-5 MPa	0 %→Until breaking
5		Vertical cyclic (4)	-5 MPa±50 %	0 %
6		Vertical cyclic (4)	-5 MPa±100 %	0 %
7		Tensile monotonic	-5 MPa→Until breaking	0 %
8	1/8-scale: 0 year 30 years 60 years	Horizontal cyclic (4)	-5 MPa	±100 %
9		Horizontal cyclic (4)	-5 MPa	±200 %
10		Horizontal cyclic (4)	-10 MPa	±100 %
11		Horizontal cyclic (4)	-10 MPa	±200 %
12		Horizontal monotonic	-5 MPa	+400 %
13		Vertical cyclic (4)	-5 MPa±50 %	0 %
14		Vertical cyclic (4)	-5 MPa±100 %	0 %
15		Tensile monotonic	-5 MPa→Until breaking	0 %

*1: Number of cycle is shown in brackets.

Fig. 6 Method for calculating stiffness. The linear slope K_h of the hysteresis loop is defined as the stiffness of the rubber bearing.

Fig. 7 Method for calculating damping ratio. Damping ratio h_{eq} is calculated by the ratio of equivalent potential energy (area of hatching W_e) and hysteresis energy (area of hysteresis loop ΔW).

Fig. 8 Method for calculating linear limit in horizontal direction. The linear limit strain is defined by the intersection between the skeleton curve and $1.2 \times K_h$.

Fig. 9 Method for calculating yield stress in vertical direction. The tensile yield stress is defined by the intersection between the skeleton curve and the 1% strain offset line of linear stiffness.

4. 試験結果

4・1 準実大積層ゴム

1/2 縮尺積層ゴム（直径 800 mm）の試験結果を表 5 に、また経年前後の特性の比較を図 10～図 12 に示す。水平剛性は、せん断ひずみ 100 %において経年 30 年と経年 60 年はともに促進劣化をさせる前に同一の試験体で取得された剛性と比べて+6 %程度増加し、経年による明瞭な差はない。面圧を-5 MPa から-10 MPa に増した場合でも、剛性増加率の明瞭な差は見られなかった。上下剛性についても、経年 30 年と経年 60 年ではいずれも+7 %程度の増加がみられ、その剛性の増加割合は水平剛性とほぼ同等となった。

水平減衰定数は、-26 %～+11 %の変動が見られた。上下減衰定数は、経年 30 年では変動がないが、経年 60 年では 0～-10 %の変化が見られた。減衰については、全体的に経年により減少する傾向が見て取れる。減衰定数は 1 ループの履歴面積を弾性エネルギーにて除して算定しているため、経年による剛性の増加が一つの要因と考えられる。

せん断破断ひずみは、経年 30 年では 371 %、経年 60 年では 361 %となり、経年が増すにつれて減少傾向にあった。経年 0 年と経年 60 年を比較した場合、その低下割合は 10 %程度であった。これからの試験で得らえた経年下における復元力の骨格曲線には、座屈発生で見られるような急激な荷重の低下は見られない。そのため、上記経年下にて、設計で想定される応答を上回る変位（113%程度）が生じたとしても、厚肉積層ゴムの建屋支持機能及び復元機能が確保され、設計で想定される応答に対して十分な裕度をもって破断にいたることを確認した。引張降伏応力は、経年 30 年と経年 60 年でおおよそ 2 MPa となった。この値は経年前（経年 0 年）の引張降伏応力と同程度であり、経年による引張降伏応力への影響は小さかった。引張破断ひずみは、経年の増加とともに、低下傾向にある。引張破断ひずみは経年 0 年では 284 %、経年 30 年では 264 %、経年 60 年では 259 %となり、経年 0 年から経年 60 年の低下割合は 9 %程度となる。一方、経年による引張破断応力の低下はほとんど認められなかった。

図 13 には終局近傍での積層ゴムの変形状況を、図 14 には積層ゴムの破断面を示す。経年を模擬した積層ゴムの破断は、水平上下共にゴム層で生じ、接着面の剥がれによるものではなく、経年前と同様であることを確認した。水平方向の载荷試験では、せん断方向の強制変位が主要な荷重となる。破損様式は、積層ゴムの変形時に応力集中が顕著と思われるフランジとゴムの境界部分を起点としたゴムのせん断破断であり、その破断面には明瞭な凹凸はなく均一な形状であった。上下方向の载荷試験では、引張破断によって終局に至った。引張方向の破断面については、引張大変形に追従する過程で局所的に内部ゴムが破断することによって生成されたボイドの跡が断面全体に確認された。

Fig. 10 Hysteresis loop of 1/2-scale test specimens under horizontal loading, Test No. 1: (a) Comparison between non-aging and aging 30 years, (b) Comparison between non-aging and aging 60 years.

Fig. 11 Hysteresis loop of 1/2-scale test specimens under vertical loading, Test No. 6: (a) Comparison between non-aging and aging 30 years, (b) Comparison between non-aging and aging 60 years.

Fig. 12 Comparison of skeleton curve(1/2-scale): (a)Horizontal direction, Test No. 4, (b)Vertical direction, Test No. 7.

Table 5 Aging properties of 1/2-scale rubber bearings.

Evaluation respects	Test specimen		Test No.	Design value
	30 years	60 years		
Horizontal				
Stiffness [kN/mm]	1.821	1.899	1	1.74
	1.939 (1.06)	2.002(1.05)		
	1.678	1.758	2	
	1.799(1.07)	1.884(1.07)		
	1.738	1.798	3	
1.841(1.06)	1.907(1.06)			
Damping ratio	0.025	0.030	1	0.02
	0.019(0.76)	0.022(0.74)		
	0.030	0.033	2	
	0.033(1.11)	0.037(1.10)		
	0.025	0.028	3	
0.024(0.93)	0.025(0.89)			
Linear limit [%]	242	242	4	226
	240(0.96)	224(0.92)		
Breaking strain [%]	403	403	4	-
	371(0.92)	361(0.90)		
Vertical				
Stiffness [kN/mm]	1113	1110	5	1104
	1186(1.07)	1189(1.07)		
	1055	1034	6	
1106(1.05)	1054(1.02)			
Damping ratio	0.024	0.024	5	0.02
	0.024(1.00)	0.024(1.00)		
	0.024	0.025	6	
	0.023(0.99)	0.022(0.90)		
Tensile yield stress [MPa]	2.0	2.0	7	-
	2.0(0.98)	2.1(1.03)		
Tensile breaking strain [%]	284	284	7	-
	264(0.93)	259(0.91)		

*The upper line shows the properties of non-aging test specimens, and the ratio against non-aging is shown within the bracket.

Table 6 Aging properties of 1/8-scale rubber bearings.

Evaluation respects	Test specimen		Test No.	Design value
	30 years	60 years		
Horizontal				
Stiffness [kN/mm]	0.438	0.437	8	0.435
	0.511(1.17)	0.522(1.19)		
	0.436	0.436	9	
	0.532(1.22)	0.551(1.26)		
	0.383	0.385	10	
	0.448(1.17)	0.457(1.19)		
0.413	0.417	11		
0.507(1.23)	0.527(1.26)			
Damping ratio	0.023	0.023	8	0.02
	0.021(0.91)	0.022(0.96)		
	0.026	0.026	9	
	0.023(0.88)	0.024(0.92)		
	0.032	0.032	10	
	0.026(0.81)	0.027(0.84)		
0.031	0.031	11		
0.026(0.84)	0.026(0.84)			
Linear limit [%]	244	244	12	226
	246(1.01)	244(1.00)		
Breaking strain [%]	400(- -)	395(- -)	12	-
Vertical				
Stiffness [kN/mm]	301	291	13	286
	358(1.19)	359(1.24)		
	277	272	14	
321(1.16)	319(1.17)			
Damping ratio	0.027	0.026	13	0.02
	0.027(0.99)	0.032(1.24)		
	0.023	0.024	14	
	0.025(1.05)	0.027(1.12)		
Tensile yield stress [MPa]	2.0	2.0	15	-
	2.2(1.09)	2.2(1.12)		
Tensile breaking strain [%]	270(- -)	128(- -)	15	-

*The upper line shows the properties of non-aging test specimens, and the ratio against non-aging is shown within the bracket.

Fig. 13 Deflection of test specimen near breaking: (a) Horizontal loading, (b) Vertical loading.

Fig. 14 Breaking surface of test specimen: (a) Horizontal loading, (b) Vertical loading. All breaking occurred at the rubber layer and not at the boundary between the rubber and the steel plate.

4・2 1/8 縮尺積層ゴム

1/8 縮尺積層ゴム（直径 800 mm）の試験結果を表 6 に示す。水平剛性は、せん断ひずみ 100 % 下で経年により +17 % ~ +19 % の剛性増加となった。今回の条件下においては、面圧の違いによる差異は認められなかった。上下剛性は、概ね +16 % ~ +24 % の増加となった。この剛性増は水平剛性とほぼ同等の傾向であった。水平減衰定数は -10 % ~ -20 % 程度減少した。一方、上下方向の減衰については、経年によって増加する傾向が見られた。

経年 0 年の試験では、試験機が載荷能力を超えたため、水平及び上下方向の破断までのデータを取得できなかった。よって、表 6 には経年後の結果のみを示す。結果から、引張破断ひずみは、経年の増加とともに減少することを確認した。経年 60 年（引張破断ひずみ 128 %）では、経年 30 年（引張破断ひずみ 270 %）の半分程度に低下した。一方で、引張破断応力は、経年 30 年で 5.5 MPa、経年 60 年で 5 MPa となり経年による差異は小さかった。経年により剛性が増加したことで、経年 60 年の引張応力は相対的に小さな引張ひずみで破断応力に至ったものと考えられる。尚、水平方向については、経年 30 年では破断に至らなかったため、試験で確認された最大ひずみの 400 % を破断ひずみとして表に示している。これに対し経年 60 年ではせん断ひずみ 395 % となり、せん断破断ひずみにおいても経年による低下が確認された。

以上に示す通り、1/8 縮尺の試験データは、1/2 縮尺のものと比べて、経年特性の変化が全体的に大きい傾向にあった。このスケール効果の要因については、5.2 にて後述する。

5. 考 察

5・1 経年による基本特性の変化

上述した試験結果から、剛性については、水平及び上下方向ともに経年 0 年から 30 年までの変化率が相対的に大きく、その後 30 年から 60 年までの剛性の増加は小さいことが分かる。即ち、経年による積層ゴムの剛性の変化は経過年数とともに小さくなるものと考えられる。これは、5・2 に示す通り、劣化の初期においては、空気中の酸素に触れる表面近くのゴム領域で剛性上昇の要因となる酸化が進行するが、時間の経過とともに酸化の反応速度が緩やかになったためと考えられる。

本試験で得られた剛性の変化率について一般的な積層ゴムと比較する。浜口らは、実際の免震建物から積層ゴムを取り出して一般的な積層ゴムの経年変化特性について調査している（浜口他, 2009）。本結果によると、約 20 年経過した場合に水平剛性は約 12 % 増加したという結果が示されている。本試験で確認した厚肉積層ゴムの経年 30 年で 6 % 程度という結果は、一般の積層ゴムと比べて特段の差異はないと考えられる。経年数が多いにも関わらず変化率が小さい理由は、文献で使用された積層ゴムサイズの（直径 670 mm）と比べて本試験体サイズ（直径 800 mm）の方が大きく、5・2 に示すスケール効果が一因と考えられる。

スケルトンカーブの形状については、図 12 に示す通り、水平上下ともに経年の影響を受けずに応力とひずみの関係を保持しており、特異な傾向の変化はなく、線形限界についても顕著な低下は見られなかった。破断ひずみが減少する傾向については、剛性が大きいほど早く破断応力にいたるため、経年によって剛性が増加したことによって相対的に小さなひずみで破断に至ったと考えられる。経年 30 年から経年 60 年までの破断ひずみの変化率は経年 0 年から経年 30 年までのそれと比較して小さく、この傾向は剛性の変化率と同様であった。

5・2 経年におけるスケール効果

免震性能への影響を考える上で重要度の高いパラメータである水平及び上下方向の剛性について、試験体縮尺サイズと経年による変化率の関係を整理して図 15 に示す。この結果が示す通り、直径が大きい積層ゴム程、剛性の変化は小さかった。

試験体サイズによる剛性変化の差異、即ちスケール効果が表れた理由としては、試験体を劣化促進する過程で起こった温度と酸素の関係が影響を及ぼしているものと考えられる（加藤他, 1996）。恒温槽内は空気雰囲気であるため、時間とともに空気中の酸素がゴム表面より内部に拡散し、この酸素とゴムが反応して剛性変化（硬化）が生じたものと考えられる。ゴム内部への酸素の拡散は温度に依存し、温度が一定であれば侵入深さは同じとなるため、直径の大きな積層ゴムほど酸素の影響は小さくなる。酸素による積層ゴム表面からの影響深さを仮に 10 mm とした場合、直径 200 mm と直径 800 mm は表面から 10 mm の領域におけるゴムが剛性向上に寄与する。両

サイズの剛性向上に及ぼすゴムの保有体積について考えると、直径が小さい 200 mm のほうが酸化劣化にて硬化したゴムの保有体積は大きくなる。したがって、この保有体積が積層ゴムの剛性に影響を及ぼしているものと思われる。以上より、サイズの小さい積層ゴムほど酸素の影響を受け易くなり、1/8 縮尺積層ゴムの剛性変化が 1/2 縮尺積層ゴムよりも大きくなったと考えられる。この結果は、経年特性の予測を行う際には、直径が小さい積層ゴムにて試験を行えば保守側の結果を示すことを意味している。一方で、経年の予測精度の向上には、大きな試験体を用いて評価する必要があると言える。変化率が最大で 7% と小さいことを考慮すると、1/2 縮尺試験体は上記の影響によらず実機の経年特性について良い推定ができるものと考えられる。なお、本試験を通じて、1/2 縮尺と 1/8 縮尺とで剛性に差異が認められるものの、同じ縮尺比での水平と上下方向の剛性の変化率はほぼ同等であった。よって、積層ゴムサイズによらず、経年変化に伴う極端な異方性は示さないことを確認した。

Fig. 15 Relationship between stiffness and diameter of rubber bearing. Variation of mechanical properties in 1/8-scale was larger than that of 1/2-scale probably by the influence of oxidation.

5・3 経年による地震応答への影響

実機に近い 1/2 縮尺試験体で、経年 60 年で 6% 程度（水平方向）の剛性増が確認された。また、経年 0 年に対してハードニング開始のひずみ（線形限界）が経年とともに減少し、経年 60 年の線形限界については、224% となった。この経年変化が原子炉建屋の地震応答に及ぼす影響を確認するため、時刻歴応答解析を実施した。

図 16 に示す原子炉建屋レイアウトを対象に、各床の重量を集中質量として考慮した梁モデルによりモデル化した。免震構成要素の特性については、積層ゴムの非線形ばね（図 17(a)）、オイルダンパーをばねとダッシュポットから成る Maxwell モデル（図 17(b)）により表現した。図 17(a)に示す積層ゴムの初期剛性 K_h は経年前を 1.49×10^6 kN/m、経年後を 1.57×10^6 kN/m とした。経年前の剛性は目標免震周期の 3.4 s となるように設定し、経年後の剛性は経年前の剛性に本試験で確認された剛性の変化を考慮して設定した。Maxwell モデルのパラメータはそれぞれ剛性 K_d を 9.88×10^6 kN/m、減衰係数 C_d を 4.94×10^5 kN・s/m とした。これらのパラメータは、オイルダンパー一基あたりの特性を基に、基準地震動に対する免震建屋の応答変位が目標値の 0.35 m 以下となるように収斂計算により設定した。尚、応答変位の目標値は、免震建屋と非免震建屋を繋ぐ渡り配管の耐震成立性及び厚肉積層ゴムの設計上の許容限界の確保の観点から決定した。

図 18 には、経年 60 年を想定した場合の原子炉容器据付位置での水平床応答曲線を拡張した設計用床応答曲線と比較して示す。なお、これらの床応答曲線は減衰定数 $h=0.01$ で得られた応答値を入力地震動の最大加速度で正規化したものである。本結果から、主要機器の周期帯である 0.2 秒～0.3 秒近傍での応答増幅は確認されなかった。加えて、設計時に考慮している固有周期の $\pm 10\%$ 拡張は、経年 60 年後の応答をほぼ包絡するものとなっている。また、地震応答時に発生する積層ゴムのせん断ひずみは約 110% であった。試験結果より、線形限界は 224% であるので、線形限界までには 2 倍程度の余裕があり、設計時に見込んだものと同様の余裕を経年後も確保出来ることを確認した。

Fig. 16 Analytical model. Example of SFR was modeled as lumped mass model. Characteristic of rubber bearing was modeled by non-linear spring, and that of oil damper was modeled by Maxwell model composed of spring and dashpot in series.

Fig. 17 Parameters of the isolation system: (a) Analysis model of thick rubber bearing, (b) Analysis model of oil damper.

Fig. 18 Comparison between design (non-aging) and aging of 60 years in the normalized acceleration (horizontal response acceleration/input ground motion) at the reactor vessel position. The entire response spectrum after aging of 60 years was within the broadening spectra by the design response.

6. 結 言

厚肉積層ゴムの特性変化に係る因子のひとつである経年特性に着目し、経年 30 年及び 60 年相当の経年模擬試験体を 2 種類の縮尺 (1/2, 1/8) を対象に製作・試験した。これらの試験体を用いて経年が力学特性 (剛性, 減衰, 線形限界ひずみ及び破断ひずみ等) に及ぼす影響を静的加力試験にて評価した。その結果以下の知見を得た。

(1) 経年変化によって剛性の増加及び破断ひずみの低下を確認した。変化の割合は、経年 30 年までの変化割合が相対的に大きく、経年 30 年以降の変化割合は小さくなっており、経年が力学特性に及ぼす影響は経過年数とともに緩慢となることを確認した。なお、経年状況下における破断ひずみは、基準地震動で想定される応答に対して十分な裕度を有しており、経年による破断ひずみの低下が免震化された建屋内に設置される機器等の設計に有意な影響を及ぼすものではない。

(2) 2 種類のスケール間で剛性や破断ひずみ等の差異が見られた。経年の予測精度を向上するためには、実機に近いサイズの試験体を用いることが重要であり、1/2 縮尺試験体は実機の経年特性を予測するのに十分な大きさであると思われる。また、1/8 縮尺試験体については、1/2 縮尺試験体と比べて、剛性増や破断ひずみの低下割合が大きくなるため、この縮尺試験体を用いた評価は設計の観点からは保守側の評価へとつながるものの、剛性の変化等は実機に比べて過度に保守側の結果を与える恐れがあることに注意が必要である。

(3) 2 種類の縮尺のうち、実機に近い 1/2 縮尺試験体では、経年 30 で 6 % 程度の剛性増がみられたが、この剛性変化が原子炉建屋の応答に及ぼす影響は軽微であり、従来から機器設計等で考慮されている床応答曲線の振幅に概ね包絡されることを地震応答解析により確認した。また、厚肉積層ゴムは基準地震動で想定される応答に対して経年後も十分な構造健全性が確保されることを確認した。

謝 辞

本論文は、経済産業省からの受託事業である「平成 27 年度高速炉等技術開発」の一環として実施した成果である。

文 献

- Fukasawa, T., Okamura, S., Yamamoto, T., Kawasaki, N., Hirofumi, T., Moriizumi, E., Sakurai, Y. and Masaki, N., Development on rubber bearings for sodium-cooled fast reactor: Part 3 – Ultimate properties of a half scale thick rubber bearings based on breaking test, Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference (2016), PVP2016-63397.
- Fukasawa, T., Okamura, S., Yamamoto, T., Kawasaki, N., Somaki, T., Sakurai, Y. and Masaki, N., Development on rubber bearings for sodium-cooled fast reactor: Part 2 – Fundamental characteristics of half-scale rubber bearings based on static test, Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference (2015), PVP2015-45263.
- 浜口弘樹, 相沢寛, 鮫島祐介, 菊池隆志, 鈴木重信, 芳沢利和, 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 (2009), pp.393–398.
- ISO 22762-1, Elastomeric seismic-protection isolators(2010).
- JIS K 6410-2, 建築免震用積層ゴム支承-第 2 部: 試験方法(2015).
- 加藤朝朗, 大場政章, 米田玄次, 広谷勉, FBR 免震設計に関する研究 その 7 約 40 年前の積層ゴムの経年変化調査 (ゴム素材の引張り試験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1996), 21570.
- Kawasaki, N., Yamamoto, T., Fukasawa, T. and Okamura, S., Parametric design study about seismic isolation system for fast reactor JSFR, Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference (2015), PVP2015-45165.
- 原子力規格委員会, 原子力発電所免震構造設計技術指針 JEAG 4614-2013, 一般社団法人日本電気協会 (2013).
- Yamamoto, T., Kawasaki, N., Fukasawa, T., Okamura, S., Somaki, T., Samejima, Y. and Masaki, N., Development on rubber bearings for sodium-cooled fast reactor: Part 1 – Examination plan, Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference (2015), PVP2015-45249.

References

- Fukasawa, T., Okamura, S., Yamamoto, T., Kawasaki, N., Hirotsu, T., Moriizumi, E., Sakurai, Y. and Masaki, N., Development on rubber bearings for sodium-cooled fast reactor: Part 3 – Ultimate properties of a half scale thick rubber bearings based on breaking test, Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference (2016), PVP2016–63397.
- Fukasawa, T., Okamura, S., Yamamoto, T., Kawasaki, N., Somaki, T., Sakurai, Y. and Masaki, N., Development on rubber bearings for sodium-cooled fast reactor: Part 2 – Fundamental characteristics of half-scale rubber bearings based on static test, Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference (2015), PVP2015–45263.
- Hamaguchi, H., Aizawa, S., Samejima, Y., Kikuchi, T., Suzuki, S. and Yoshizawa, T., A study of aging effect on a rubber bearing after about twenty years in use, AIJ journal technology and design, Vol. 15, No.30 (2009) , pp.393–398.
- ISO 22762–1, Elastomeric seismic-protection isolators (2010).
- JIS K 6410–2, Elastomeric seismic-protection isolators for buildings–Part 2: Test methods (2015) (in Japanese).
- Kato, A., Ohba, M., Yoneda, G. and Hirotsu, T., Study on structural design for seismic isolated FBR plant: Part 7 – Aging characteristics of about forty year old laminated rubber bearings (Tensile test results of dumbbell test pieces), Summaries of technical papers of annual meeting architectural institute of Japan (1996), 21570.
- Kawasaki, N., Yamamoto, T., Fukasawa, T. and Okamura, S., Parametric design study about seismic isolation system for fast reactor JSFR, Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference (2015), PVP2015–45165.
- The Nuclear Standards Committee of JEA , Seismic Design Guidelines for Base-Isolated Structures of Nuclear Power Plant, JEAG 4614–2013, The Japan Electric Association (2013) (in Japanese).
- Yamamoto, T., Kawasaki, N., Fukasawa, T., Okamura, S., Somaki, T., Samejima, Y. and Masaki, N., Development on rubber bearings for sodium-cooled fast reactor: Part 1 – Examination plan, Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference (2015), PVP2015–45249.