高速炉に適用する厚肉積層ゴムの研究開発 (縮尺試験体を用いた載荷試験に基づく設計式の構築)

深沢 剛司^{*1}, 岡村 茂樹^{*1}, 山本 智彦^{*2}, 川崎 信史^{*3}
稲葉 学^{*4}, 杣木 孝裕^{*4}, 鮫島 祐介^{*5}, 正木 信男^{*6}

Research and development of thick rubber bearing for SFR (Design formulas for thick rubber bearing based on static loading test utilized scale model)

Tsuyoshi FUKASAWA^{*1}, Shigeki OKAMURA^{*1}, Tomohiko YAMAMOTO^{*2},
Nobuchika KAWASAKI^{*3}, Satoru INABA^{*4}, Takahiro SOMAKI^{*4},
Yusuke SAMEJIMA^{*5} and Nobuo MASAKI^{*6}

^{*1} Mitsubishi FBR Systems, Inc.

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

^{*2,3} Japan Atomic Energy Agency

4002 Narita-Cho, O-arai-Machi, Higashi-Ibaraki-Gun, Ibaraki 311-1393, Japan

^{*4} Obayashi Corporation

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

^{*5} Bridgestone Corporation

1-6-6 Yaesu, Chuo-ku, Tokyo 103-0028, Japan

^{*6} Bridgestone Corporation

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

Received: 10 February 2017; Revised: 9 June 2017; Accepted: 2 July 2017

Abstract

This paper describes design formulas and creep characteristics for thick rubber bearing applied to the Sodium-cooled Fast Reactor, which are based on the static loading test and creep test using scale models. The thick rubber bearing, which has a rubber layer roughly two times thicker in comparison with conventional rubber bearings, has been developed by the authors to ensure seismic safety margins for components by reducing the seismic response for the reactor building in the horizontal direction and vertical direction. The static loading tests using a scale model with parameter of first shape factor were conducted to investigate the applicability of proposed design formulas. Moreover, an estimation of creep characteristics due to aging is important issue because the rubber layer of thick rubber bearing which satisfies the design requirement for SFR is larger than conventional rubber layer. The creep test was preformed to estimate the creep characteristics using a scale model. From the above results, the thick rubber bearing is sufficiently rational for use as isolation system for SFR.

Key words : Seismic isolation, Thick rubber bearing, Design formulas, Creep

1. 緒 言

次世代炉である高速炉 (Sodium-cooled Fast Reactor) は、熱効率を向上させるために冷却材にナトリウムが使用され、軽水炉と比べて高温・低圧で運転される。そのため、機器の熱応力の緩和を目的として、機器設計では軽水炉と比べて相対的に薄肉構造となっている。これは機器に生じる熱応力低減の観点からは好ましいが、耐震性確保の観点からは不利となる。したがって、高速炉における機器設計では、熱荷重と地震荷重を両立させることが課題となる。高速炉では、原子炉建屋や機器に作用する地震荷重の低減を目的として免震装置の適用が検討さ

No.17-00050 [DOI:10.1299/transjsme.17-00050], J-STAGE Advance Publication date : 13 July, 2017

^{*1} 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)

^{*2} 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)

^{*3} 正員, 日本原子力研究開発機構

^{*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 (〒103-0028 東京都中央区八重洲 1-6-6)

^{*6} 正員, フェロー, (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: tsuyoshi_fukasawa@mfbf.mhi.co.jp

れている(平田 他, 1997)(Okamura et al., 2011).

高速炉の設計検討では, 東北地方太平洋沖地震(2011 年)の観測記録および既設プラントの基準地震動(S_s 地震動のターゲットスペクトル)を基に設定された模擬地震動が利用されている. このターゲットスペクトルの最大速度は, 水平方向の免震実効周期近傍で 2.4 m/s (図 1 参照)となっている. Kawasaki らは, この地震動を用いて高速炉の耐震成立性上クリティカルとなる原子炉容器の座屈に着目した地震応答解析結果から, その耐震裕度を確保するために必要な免震装置仕様として, 免震装置の水平方向および上下方向の固有周期を各々 3.0 秒以上および 0.125 秒以上 (8.0 Hz 以下)とする必要があることを示している(Kawasaki et al., 2015). この仕様を具現化する免震装置として, 積層ゴム系免震支承(以下, 積層ゴムと称す)の適用が想定されているが, その形状や試験に基づく力学特性については提示されていない.

日本における積層ゴムの開発は, 1980 年代から研究が開始され(藤田 他, 1984), 近年では一般建築物をはじめとして多くの構造物に適用されるようになった. 特に, 1995 年の兵庫県南部地震で積層ゴムを適用した免震構造物の効果が確認されてから, 試験研究や施工実績が急増した. これらの積層ゴムの仕様および試験方法の実態を踏まえて, 要求特性や品質基準の確保を目的として 2011 年(2015 年に改訂)に JIS K 6410 (以下, JIS K 6410 は 2015 年に改訂されたものを意味する)が制定された. 原子力施設向けの免震構造設計技術指針としては, 2000 年に原子力発電所免震構造設計技術指針(JEAG 4614, 2000)が制定されている. その後, 2006 年に見直された発電用原子力施設に関する耐震審査指針の反映を図るとともに, 2000 年以降の知見を取り入れながら 2013 年に JEAG 4614 (JEAG 4614, 2013)が改訂された(以下, JEAG 4614 は 2013 年に改訂されたものを意味する). この改訂により, 構造性能の取得項目の多くが JIS K 6410 を引用するように改められた.

高速炉で要求される免震周期を積層ゴムで実現させようとした場合, JIS K 6410 で規定される積層ゴムや JEAG 4614 の設計例で示される積層ゴムと比べて, ゴム一層あたりの厚さを 2 倍以上とする必要があり, その形状は JIS K 6410 で対象とする範囲外となる(以下, この積層ゴムを厚肉積層ゴムと称す). そのため, 高速炉に用いる厚肉積層ゴムは, 載荷試験を通じて力学特性等を把握したうえで, これらの規格や指針を準用する必要がある.

JIS K 6410 で対象とする形状(一次形状係数 S_1 : $20 \sim 60$)の研究は数多く実施されているが, 厚肉積層ゴムに関する研究は極めて少ない. そのうち, 厚肉積層ゴムの高速炉への適用検討が矢花らによって行われている(矢花, 松田, 2000). この研究では, 縮尺試験体を用いた載荷試験を行い, 一般的な積層ゴムと比べて圧縮剛性が面圧に依存することを指摘し, この影響を見掛けの縦弾性係数に反映させた設計式を提示している. 一般に積層ゴムは弾性エネルギーを発現させるために, その製造工程(加硫工程)でゴム層に入熱が行われる. この工程におけるゴム層への均一な入熱を行うために厚肉積層ゴム等では中心孔が設けられている. 一方, 厚肉積層ゴムに限らず中心孔が圧縮剛性に影響を及ぼすことが確認されている(柳 他, 1998)(松田, 矢花, 1999). 矢花らが提示した圧縮剛性は, 中心孔の形状を一次形状係数に反映させているものの, 中心孔を設けたことで受圧面積に作用する鉛直荷重の影響が見掛けの縦弾性係数に考慮されていない(矢花, 松田, 2000). また, 一般的な積層ゴム形状を対象とした JIS K 6410-1 でも中心孔の径や二次形状係数 S_2 (直径とゴムの総厚との比)が剛性等に影響を及ぼすことが示されているが, 圧縮剛性の算出式にはこれらの影響は反映されていない.

積層ゴムを設計する際, 上記のせん断剛性や圧縮剛性に加えて建屋の供用期間中のクリープひずみを推定し, これを踏まえて積層ゴムの設計面圧を設定する必要がある. 一般的な積層ゴム形状を対象としたクリープひずみの評価としては, 森田らによって, 一次形状係数 S_1 が 33.3 の形状を対象にクリープ試験が実施され, 一次形状係数が小さい(厚肉)ほどクリープひずみが大きくなることを指摘している(森田 他, 2010). また, 松田らによって, 同一形状の縮尺試験体を用いて圧縮面圧(建屋の支持荷重によって生じる面圧, 以下これを基準面圧と称す)を変数とする試験から, 基準面圧の増加とともにクリープひずみが大きくなることを指摘している(松田, 矢花, 1998). このように, 厚肉積層ゴムは通常の積層ゴムよりも供用期間中のクリープひずみの影響が有意となる傾向にあり, その影響の支配因子である一次形状係数や基準面圧の選定が重要となる. 厚肉積層ゴムを対象としたクリープ試験としては, 松田らにより縮尺試験体を用いた試験結果からクリープ予測式が提示されているが, その対象としている形状や基準面圧は限定的である(松田, 矢花, 2000). そのため, 高速炉の機器設計の要求を満たす積層ゴム形状と基準面圧を対象に, 供用期間のクリープひずみを検証する必要がある.

そこで, 本論文では, 中心孔を有する厚肉積層ゴムの設計式を提案し, 一次形状係数や中心孔を変数とする縮尺試験体を用いた載荷試験を通じてその適用性を検討する. また, 基準地震動で想定される応答を上回る荷重下

での载荷から座屈発生等の構造不安定の有無を把握するとともに、この結果から、設計成立性が見通せる一次形状係数と基準面圧を選定する。さらに、選定された一次形状係数や基準面圧を代表させた試験体を対象にゴム層厚の厚肉化がクリープに及ぼす影響を評価し、これらを踏まえて厚肉積層ゴムの設計成立性について検証した結果について述べる。

2. 厚肉積層ゴムの設計式

2・1 設計要求

高速炉の設計検討では、2種類の地盤条件（軟質地盤、硬質地盤）を対象に、図1に示す水平・上下方向の基準地震動のターゲットスペクトル（解放基盤面）が設定されている。原子炉建屋の地震応答解析では、このターゲットスペクトルを満足する模擬地震動（時刻歴波形）が用いられている。この地震動に対する積層ゴムの主な設計要求は以下となる。

(1) せん断剛性（水平方向の固有周期）：一般的な免震構造物と同様に、水平方向の地震力の低減が可能なせん断剛性とする。すなわち、厚肉積層ゴムの水平方向の固有周期は原子炉建屋の支持荷重（以下、基準荷重と称す）に対して、3.0秒以上を確保する。なお、せん断剛性および以下に述べる圧縮剛性は高速炉の耐震成立性上クリティカルとなる原子炉容器の座屈評価を満足するものとなっている（Kawasaki et al., 2015）。

(2) 圧縮剛性（上下方向の固有周期）：上下方向の地震力の低減を図るため、一般的な積層ゴム（JIS K 6410で適用範囲とする一次形状係数 S_1 が20～60）より圧縮剛性を低剛性なものとする。すなわち、厚肉積層ゴムの上下方向の固有周期は基準荷重に対して、0.125秒以上（固有振動数8.0 Hz以下）を確保する。

(3) せん断ひずみの線形限界：せん断ひずみの線形限界は、基準地震動で生じる応答変位に対して2倍以上の安全裕度を確保する。免震層に導入される減衰装置の減衰容量を調整することで応答変位の低減を図るが、免震建屋と非免震建屋を繋ぐ配管の耐震成立性の観点から基準地震動で生じる応答変位は350 mm以下としている。そのため、安全裕度を考慮した厚肉積層ゴムのせん断ひずみの線形限界（応答変位）は700 mm以上となる。

(4) 配置性（直径）：原子炉建屋内には重量構造物が複数配置されるため、これを含めた原子炉建屋の重量は一般建築物と比べて大きくなる。重量構造物を積層ゴムで支持する場合、基準面圧を一般的に使用される範囲として多くの基数を用いるか、あるいは一基あたりの基準面圧を高くすることで、その基数を抑制する対応が考えられる。前者は積層ゴム基数の増加となり、免震層の積層ゴムの配置性に悪影響を及ぼす。後者は使用する積層ゴムの基数の低減が図れるものの、高面圧下に伴う積層ゴムのクリープに悪影響を及ぼす恐れがある。そのため、免震層内の配置性の向上を目的として、比較的小さな基準面圧でも積層ゴム一基あたりの支持荷重を確保できるように厚肉積層ゴムの直径は日本国内で製造可能な最大クラスの1600 mmとする。

(5) クリープ（基準面圧）：基準面圧は配置性およびクリープひずみを配慮したものとする。厚肉積層ゴムは、一層あたりのゴムが厚いため、一般的な積層ゴムと比べてクリープひずみが相対的に大きくなることが予想される。森田らは、一次形状係数 S_1 が33.3～17.9の積層ゴム形状を対象としたクリープ試験により、一次形状係数が小さくなるにつれて、クリープひずみが大きくなることを指摘している（基準面圧は $S_1 = 33.3$ で20 MPa, $S_1 = 17.9$ で11 MPa）。また、松田らは、同一の縮尺形状（直径150 mm）の積層ゴムを対象に3水準の基準面圧（2.45 MPa, 4.9 MPa および 9.8 MPa）を用いてクリープひずみを評価し、この結果から基準面圧が増すにつれて大きくなることを確認している。これらの既往知見を踏まえると、厚肉のゴムで、かつその基準面圧を大きくすると供用期間中のクリープの影響が有意となる。ただし、低面圧とした場合、クリープひずみの抑制は期待できるものの、積層ゴム一基あたりの支持荷重が基準面圧に比例して低下することから、これを補うために積層ゴムの基数が増加することとなり免震層内の配置性に悪影響を及ぼすこととなる。よって、ここでの厚肉積層ゴムの基準面圧は、クリープひずみの抑制と免震装置の配置性に留意して4 MPa～8 MPa程度を範囲とし、これらの基準面圧は、後述の载荷試験とクリープ試験を踏まえて設定する。

(6) 座屈発生の回避：設計基準地震動で想定される荷重およびこれを上回る荷重下での座屈発生を回避し、建屋支持機能を確保する。厚肉積層ゴムはゴムの総厚が増加（二次形状係数 S_2 が低下）することから、一般的な積層ゴム形状と比較して相対的に座屈が誘発されやすい形状となる。そのため、基準地震動で想定される荷重やこれを上回る荷重下でも履歴ループに負勾配が生じることなく、建屋支持機能を確保可能な形状とする。

Fig. 1 Response spectrum of design basis ground motion of the SFR.

2・2 設計式

一般的なゴム層厚を有する積層ゴムのせん断剛性および圧縮剛性の算出方法は JIS K 6410-1 に示されている。この規格で適用範囲とする積層ゴムの形状は、一次形状係数 S_1 が 20～60、二次形状係数 S_2 が 3～10 としている。

上述した高速炉で要求される仕様（水平・上下の固有周期）を確保するためには、一次形状係数 S_1 および二次形状係数 S_2 は、各々 10 程度および 5 程度とする必要がある。よって、一次形状係数 S_1 がその適用範囲から外れることから、せん断剛性や圧縮剛性は载荷試験を通じて評価する必要がある。厚肉積層ゴムを対象とした既往研究として、矢花らは、ゴム層厚の厚肉化による圧縮剛性への影響を見掛けの縦弾性係数に圧縮応力を反映させ、これを設計式として提案している（矢花，松田，2000）。一方，上述のとおり厚肉積層ゴムは，その製造工程上，中心孔が必要となる。この中心孔が圧縮剛性等に影響を及ぼすことが実験的検討（松田，矢花，1999）により確認されているが，圧縮剛性の算出式には中心孔の形状が一次形状係数のみで表現されており，中心孔を設けたことによる受圧面積に作用する鉛直荷重の影響は考慮されていない。また，一般的な積層ゴム形状を対象とした既往研究（柳 他，1998）や JIS K 6410-1 も同様である。

そこで，本研究で対象となる厚肉積層ゴムのせん断剛性と圧縮剛性を以下のとおり提案する。なお，設計式の提案にあたっては，JIS K 6410-1 で示されるせん断剛性と圧縮剛性の算出の利便性を活かしたものとする。

厚肉積層ゴムのせん断剛性 K_H は次式として与える。

$$K_H = G \cdot \frac{A}{n \cdot t_r} \quad (1)$$

G : せん断弾性係数

A : 有効面積

n : ゴムの層数

t_r : ゴム 1 層の厚さ

圧縮剛性 K_V は中心孔の径を考慮したものとして，次式を提案する。

$$K_V = \frac{A}{n \cdot t_r} \cdot E_{AP} \quad (2)$$

$$E_{AP} = \frac{E_C \cdot E_\infty}{E_C + E_\infty} \quad (3)$$

ここで、中心孔が無い場合の見掛けの縦弾性係数 E_C は以下となる。縦弾性係数 E_C は、体積変化による縦弾性係数の変動を考慮するため、積層ゴムを構成するゴム両端面を拘束していない場合の縦弾性係数 E_0 と、ゴム両端面を拘束した場合の縦弾性係数 ($2 \cdot S_1^2 \cdot E_0$) をゴム硬度で与えられる係数 κ で補正し、これらの縦弾性係数を足し合わせることで求められる。すなわち、縦弾性係数 E_C は次式のとおり JIS K 6410-1 で示されているものとなる。

$$E_C = E_0 \cdot (1 + 2 \cdot \kappa \cdot S_1^2) \quad (4)$$

- E_{AP} : 圧縮性を考慮した見掛けの縦弾性係数
 E_C : 見掛けの縦弾性係数
 E_∞ : ゴムの体積弾性係数
 E_0 : ゴムの縦弾性係数
 κ : ゴム硬さによる見掛けの縦弾性係数に関する補正係数
 λ : 中心孔の補正係数
 S_1 : 一次形状係数 $(D - D_0) / 4t_r$
 S_2 : 二次形状係数 $D / (n \cdot t_r)$
 D : ゴムの直径
 D_0 : 中心孔の直径

一方、JIS K 6410-1 で与えられている見掛けの縦弾性係数 E_C には、中心孔の径が一次形状係数として反映されているが、中心孔を設けたことによって受圧面積に作用する鉛直荷重の影響が見掛けの縦弾性係数に考慮されていない。そのため、ここではゴム両端面を拘束した場合の縦弾性係数 ($2 \cdot S_1^2 \cdot E_0$) に中心孔を設けたことによる鉛直荷重の影響を反映させる。JIS K 6410-1 で与えられる見掛けの縦弾性係数 E_C を用いて中心孔の形状を陽に与えるため、この形状を係数 λ としておくと次式となる。

$$E_C = E_0 \cdot (1 + 2 \cdot \kappa \cdot \lambda \cdot S_1^2) \quad (5)$$

円形の積層ゴム形状を対象に、ゴム両端面を拘束した場合の圧縮変形によりゴム内部に生じる圧力について考えると、ゴム内部に生じる圧力 p はゴムの半径 r および圧縮ひずみ ε を用いて次式で与えられる。

$$\frac{d^2 p}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dp}{dr} = - \frac{4E_0}{t_r^2} \varepsilon \quad (6)$$

上式の一般解として圧力は、

$$p = A \ln r + B - \frac{E_0}{t_r^2} r^2 \varepsilon \quad (7)$$

となる。中心孔を有する積層ゴム形状の場合、上式の積分係数 A , B は、ゴムの半径 ($D/2$) および中心孔の半径 ($D_0/2$) のとき $p=0$ として求められる。よって、中心孔を有する圧力は次式として与えられる。

$$p(r) = \frac{E_0}{4t_r^2} \cdot \varepsilon \cdot \left[\frac{(D^2 - D_0^2) \ln(2r/D_0)}{\ln(D/D_0)} - (4r^2 - D_0^2) \right] \quad (8)$$

また、受圧面積に作用する荷重を求めるため、上式の圧力 $p(r)$ を用いて、中心孔の径を考慮のうえ積分により受圧面積に作用する荷重 P を求めると次式となる。

$$P = 2\pi \int_{\frac{D_0}{2}}^{\frac{D}{2}} p(r) \cdot r \cdot dr = 2 \cdot S_1^2 \cdot E_0 \cdot A \cdot \varepsilon \cdot \frac{\left\{ D^2 + D_0^2 - \left[(D^2 - D_0^2) / \ln(D/D_0) \right] \right\}}{(D - D_0)^2} \quad (9)$$

- ε : 圧縮ひずみ
 p : 圧力
 r : 半径
 A, B : 積分係数

この荷重 P によって生じる圧縮ひずみ ε から求められる縦弾性係数とゴム両端面の拘束下における縦弾性係数との釣合関係は次式として与えられる．なお，次式の両辺はゴム硬度によって決まる係数 κ で補正したものとなっている．

$$2 \cdot \kappa \cdot \lambda \cdot S_1^2 \cdot E_0 = \kappa \cdot \frac{P}{A \cdot \varepsilon} \quad (10)$$

式(10)に上式で得られた P を代入すると，

$$2 \cdot \kappa \cdot \lambda \cdot S_1^2 \cdot E_0 = 2 \cdot \kappa \cdot S_1^2 \cdot E_0 \cdot \frac{\left\{ D^2 + D_0^2 - \left[(D^2 - D_0^2) / \ln(D/D_0) \right] \right\}}{(D - D_0)^2} \quad (11)$$

となり，これを中心孔の形状係数 λ について解くと次式を得る．

$$\lambda = \frac{\left\{ D^2 + D_0^2 - \left[(D^2 - D_0^2) / \ln(D/D_0) \right] \right\}}{(D - D_0)^2} \quad (12)$$

したがって，本提案式による圧縮剛性は，式 (12) の中心孔の形状係数 λ を式 (5) に代入することで，中心孔の径を考慮した見掛けの縦弾性係数 E_c が与えられ，これを用いて式 (2) と式 (3) で求められる．なお，積層ゴムに中心孔が無い場合，中心孔の形状係数 λ は 1 となり，JIS K 6410-1 で与えられる見掛けの縦弾性係数 E_c と一致する．また，体積変化による縦弾性係数の変動を考慮せずに非圧縮性（ポアソン比：0.5）を仮定した場合，Kelly が示した縦弾性係数と一致する（Kelly, 1993）．

2・3 設計式諸元の設定

厚肉積層ゴムの設計式に用いる諸元を設定するため，1/8 縮尺試験体（直径 200 mm）を用いて，一次形状係数 S_1 ，ゴム 1 層の厚さ t_r および中心孔の直径 D_0 を変数とする載荷試験を行った．ここでは，この試験結果を基に設計式に用いる諸元を設定する．

2・3・1 試験体

載荷試験に用いる試験体は，図 2 に示す直径 (D) 200 mm を有する厚肉積層ゴムを対象に，一次形状係数 S_1 ，ゴム 1 層の厚さ t_r および中心孔の直径 D_0 を変数として，表 1 のとおり 8 水準の変数を割り当てた．この試験では，各水準に 2 基の試験体を割り付け，計 16 基の試験体を用いて載荷試験を実施した．ここで製作した積層ゴムの一次形状係数 S_1 は，8 から 14 で，いずれの試験体も JIS K6410 の適用範囲外となる．本試験体には，せん断弾性係数が 0.539 MPa（せん断ひずみ γ 100 % 載荷時）を有する天然ゴムを用いた．

(a) Configuration of thick rubber bearing.

(b) Experimental setup for thick rubber bearing.

Fig. 2 Thick rubber bearing.

Table 1 Dimensions of thick rubber bearing used for static loading test.

Test No.	D (mm)	D_0 (mm)	t_r (mm)	n	S_1	S_2
A1	$\frac{1}{2}$	40	5.0	8	8.0	5.0
A2	$\frac{1}{2}$		4.0	10	10.0	
A3	$\frac{1}{2}$		3.33	12	12.0	
A4	$\frac{1}{2}$		2.86	14	14.0	
A5	$\frac{1}{2}$	20	4.0	10	11.3	
A6	$\frac{1}{2}$		3.33	12	13.5	
A7	$\frac{1}{2}$	60	4.0	10	8.8	
A8	$\frac{1}{2}$		3.33	12	10.5	

2・3・2 載荷試験装置および載荷方法

本試験では、図3の2軸の載荷試験機（最大圧縮荷重：1000 kN，最大せん断荷重：±200 kN）を用いて、圧縮せん断載荷試験と圧縮載荷試験を行った。載荷条件は以下となる。

圧縮せん断載荷試験では、基準面圧 σ を 4.0 MPa，6.0 MPa，8.0 MPa の3水準として、各面圧下でせん断ひずみ γ を ±100 %，±200 % とする3サイクルの載荷を行った。

圧縮載荷試験では、面圧 6.0 MPa を基準に、この面圧を ±3.6 MPa で変動させた載荷を3サイクル実施した。なお、圧縮載荷試験では、せん断ひずみ γ は 0% とした。

これらの載荷試験の後、基準地震動で想定される応答を上回る荷重下での履歴特性を把握するため、せん断ひずみ γ を ±300 %，±400 % とし、これらのせん断ひずみ下で3サイクルの載荷を行う。この試験では、面圧 σ を 6.0 MPa と 12 MPa の2水準とした。このうち面圧 6.0 MPa については A1-1～A8-1 の試験体を、面圧 12 MPa については A1-2～A8-2 の試験体を割り付けた。

載荷試験では、水平方向と上下方向の各々の荷重と変位を計測した。

Fig. 3 Test machine for static loading test.

2・3・3 載荷試験結果

圧縮せん断載荷試験および圧縮載荷試験で得られた履歴特性の一例を図4に、試験で得られた履歴ループを基に算出したせん断剛性と圧縮剛性を表2に示す。なお、各剛性は、3サイクル目の履歴ループを用いて最大・最小の荷重とその変位関係から算出し、基準温度として 20 °C の状態に温度補正を施したものとした。

圧縮せん断載荷試験と圧縮載荷試験で得られた履歴特性は、図4に示すように安定した履歴ループを描き、このせん断ひずみと圧縮応力の領域下では各々の荷重－変位関係が線形特性となっている。せん断剛性 K_H についてみると、各々の同一形状における剛性の比率は、 $\gamma = \pm 100 \%$ では最大値および最小値が各々 2.0 % 程度および 0.6 % 程度、 $\gamma = \pm 200 \%$ では最大値と最小値が各々 4.0 % 程度と 0.0 % 程度となった。圧縮剛性 K_V については、誤差率の最大値は 3.0 %，最小値は 0.0 % 程度となった。この結果から、中心孔の径 (D_0/D が 0.1～0.3) やゴム層厚の変化（一次形状係数 S_1 を 14.0～8.0 まで）によらず、せん断剛性と圧縮剛性に有意な個体差はみられず、同一形状下でのこれらの再現性が高いことが確認された。

次に、中心孔が圧縮剛性に及ぼす影響についてみると、中心孔の径が増すにつれて圧縮剛性が低下する。本試験では、中心孔の大きさとして直径比 (D_0/D) が 0.1～0.3 までを対象としているが、直径比 0.1 の圧縮剛性を基準とした場合、直径比 0.3 の圧縮剛性の低下率はおおよそ 40 % となる。よって、圧縮剛性の設計式構築にあたっては、中心孔の形状を反映させる必要がある。本設計式では、上述のとおり式 (5) でこの影響が考慮されている。なお、上式で与えた設計式と試験結果との整合性は「2・3・4 諸元の設定」で述べる。

図5に基準地震動の応答を上回るせん断ひずみ ($\gamma = \pm 300 \%$ ，±400 %) 下における履歴ループを、図6にせん断ひずみ $\gamma = \pm 400 \%$ 時の積層ゴムの変形を示した。せん断ひずみ γ が 300 % を上回ると、一般的な積層ゴム形状と同様に明瞭なハードニングがみられるが、履歴ループには乱れはなく安定した履歴特性となった。また、基準

Fig. 4 Shear strain-shear force curve and vertical strain-compressive force curve for thick rubber bearing.

Fig. 5 Shear strain-shear force curve for thick rubber bearing under shear strain $\pm 300\%$ and $\pm 400\%$.

Fig. 6 Deformation against shear loading for thick rubber bearing ($\gamma = \pm 400\%$).

Table 2 Experimental results of shear stiffness and compressive stiffness.

Test No.		D (mm)	D_0 (mm)	t_r (mm)	n	S_1	S_2	K_H (kN/mm)		K_V (kN/mm)	
								$\pm 100\%$	$\pm 200\%$		
A1	1	200	40	5.0	8	8.0	5.0	0.356	0.372	134.2	
	2							0.354	0.372	134.2	
A2	1			4.0	10	10.0		0.375	0.387	183.0	
	2							0.380	0.393	185.2	
A3	1			3.33	12	12.0		0.392	0.398	244.2	
	2							0.391	0.399	245.2	
A4	1			2.86	14	14.0		0.401	0.406	311.9	
	2							0.405	0.409	312.7	
A5	1		20	4.0	10	11.3		0.399	0.402	226.6	
	2							0.405	0.419	233.6	
A6	1			3.33	12	13.5		0.416	0.423	305.7	
	2							0.414	0.421	306.0	
A7	1			60	4.0	10		8.8	0.343	0.364	142.8
	2								0.344	0.364	141.5
A8	1				3.33	12		10.5	0.361	0.375	189.6
	2								0.355	0.370	189.2

面圧 σ が 6.0 MPa から 12.0 MPa に高くなると、履歴ループを囲む面積が大きくなるものの、座屈発生に伴う負勾配や履歴ループの乱れは認められない。したがって、本結果は、基準地震動で想定される応答を上回るせん断ひずみ下においても原子炉建屋の支持機能が確保できることを示唆するものである。

次に、せん断ひずみの線形限界について考察する。JEAG4614によれば、せん断ひずみの線形限界は単調載荷の試験結果に基づき評価されることとなっている。本試験は3サイクルの繰返し載荷試験であるため、ここでは、暫定的にせん断ひずみ $\gamma = \pm 300\%$ の試験結果を用いて、せん断ひずみの線形限界を確認する。なお、せん断ひずみの線形限界は、JEAG4614に基づき以下の手順で算出する。①せん断ひずみ 100%におけるせん断剛性を算出する。②算出されたせん断剛性を 1.2 倍する。③1.2 倍したせん断剛性とせん断力の交点を求める。この交点をせん断ひずみの線形限界として定義する。この方法で算出した面圧 6.0 MPa の場合（全 6 ケース）のせん断ひずみの線形限界の平均値は 230 % となった。ここで得られたせん断ひずみの線形限界は参考扱いとなるが、一次形状係数 S_1 を 8 から 14 とした場合、この範囲で一次形状係数 S_1 がせん断ひずみの線形限界に有意な影響を及ぼすものではないことが確認された。

2・3・4 諸元の設定

はじめに、せん断剛性に適用する諸元について述べる。せん断剛性は式 (1) で与えられる。これに用いる設計諸元はせん断弾性係数 G を除き、積層ゴムの形状やゴムの積層数によって既知となる。そこで、上記の試験を基に一次形状係数 S_1 とせん断弾性係数 G の関係を整理し、式 (1) に適用するせん断弾性係数 G を設定する。面圧 σ を変数とする一次形状係数 S_1 とせん断弾性係数 G の関係は図 7 となる。一次形状係数 S_1 が 10~14 および圧縮

応力 σ が 4.0 MPa～6.0 MPa とした場合、一次形状係数によらず、せん断弾性係数は 0.5 MPa を上回る。一方、一次形状係数 S_1 が 8 程度の場合や面圧 σ が 8.0 MPa の場合、せん断弾性係数は 0.5 MPa を下回る。これは、相対的にゴム層厚や面圧の増加により、ゴム層に生じる支配変形モードがせん断変形モードから曲げ・せん断の重量変形モードに移行することで、せん断弾性係数が低下するものと考えられる。よって、一次形状係数 S_1 が 10 以上で、かつ基準面圧 σ が 6.0 MPa 以下であれば、せん断弾性係数は一定値として扱えるが、 S_1 が 10 を下回る場合にはせん断弾性係数を一定としては扱えない。以上を踏まえ、一次形状係数 S_1 が 10～14 を有する厚肉積層ゴムのせん断弾性係数は 0.539 MPa とする。

Fig. 7 Relationship between first shape factor and shear modulus under shear strain 200 %.

次に、圧縮剛性の諸元設定について述べる。圧縮剛性の算出にあたっては、圧縮性を考慮した見掛けの縦弾性係数 E_{AP} を構成するゴムの見掛けの縦弾性係数 E_c とゴムの体積弾性係数 E_∞ を設定する必要がある。 E_{AP} は式 (3) に示すとおり、 E_c と E_∞ の直列ばねの関係で与えられることから、これを式展開すると次式を得る。

$$\frac{1}{E_c} + \frac{1}{E_\infty} = \frac{1}{E_{AP}} \quad (13)$$

上式の E_c に式(5)を代入すると次式となる。

$$\frac{1}{E_0 \cdot (1 + 2 \cdot \kappa \cdot \lambda \cdot S_1^2)} + \frac{1}{E_\infty} = \frac{1}{E_{AP}} \quad (14)$$

一次形状係数が異なる積層ゴムの圧縮剛性から、 $1 / (1 + 2 \cdot \kappa \cdot \lambda \cdot S_1^2)$ と $1/E_{AP}$ の関係で整理すると図 8 となる。このプロットを一次関数の回帰直線で近似すると、直線の勾配および切片は各々 $1/E_0$ および $1/E_\infty$ に対応することから、この関係を用いることで E_0 と E_∞ が設定できる。以上の手順で算出した結果を表 3 に示す。

Fig. 8 Relationship between $1 / (1 + 2 \cdot \kappa \cdot \lambda \cdot S_1^2)$ and $1 / E_{AP}$.

Fig. 9 Relationship between S_1 and E_{AP} .

Table 3 Specification for design formula.

Shear modulus of rubber	G	0.539	MPa
Young's modulus of rubber	E_0	2.82	MPa
Bulk modulus of rubber	E_∞	1200	MPa
Correction factor for apparent Young's modulus according to hardness	κ	0.80	

また、ゴム硬さによる見掛けの縦弾性係数に関する補正係数 κ については、本厚肉積層ゴムのゴム硬度 (IRHD) の測定結果が 46~47 であったことから、この結果を基に Lindley によって提示されたゴム硬度と見掛けの縦弾性係数に関する補正係数 κ の相関関係を用いて、厚肉積層ゴムの見掛けの縦弾性係数に関する補正係数 κ は 0.80 とした (Lindley, 1974)。

以上の結果を基に、一次形状係数 S_1 と圧縮性を考慮した見掛けの縦弾性係数 E_{AP} を、試験結果と設計式で得られる結果で整理すると図 9 となる。本設計式に表 3 に示す諸元を与えることで、中心孔の径や一次形状係数によらず、試験結果と設計式で得られる見掛けの縦弾性係数 E_{AP} が良く整合する。本設計式で与えられる圧縮剛性と試験結果の圧縮剛性を比較したものとして、図 10 には試験体の設計値と試験値の圧縮剛性比 (設計値 / 試験値) を、図 11 には中心孔の径と設計値との関係を整理した。これらの図には、JIS K 6410-1 および矢花らの文献で示される圧縮剛性の算出式を用いて、上述の手順で E_0 と E_{AP} を同定し、これによって得られた圧縮剛性を併記している (矢花, 松田, 2000)。本設計式を用いることにより、一次形状係数や中心孔の径等の形状によらず試験結果と良く対応する。特に、図 11 のように中心孔の径を大きくしても設計値と試験値の整合性が低下することはない。また、矢花らは見掛けの縦弾性係数 E_c に面圧を考慮した設計式を提案しているが (矢花, 松田, 2000)、本試験で対象とした厚肉積層ゴムのように一次形状係数が 8 から 14 であれば、これを考慮しなくても試験値と良く対応することが確認された。

次に、本設計式で得られるせん断・圧縮剛性と試験結果との誤差率について述べる。これらの誤差率を表 4 にまとめた。せん断剛性については、一次形状係数 S_1 が 10 を下回る場合 ($S_1 = 8.8, 8.0$) の誤差率は一次形状係数 S_1 が 10~14 と比較して相対的に大きく、誤差率の平均値と最大値は、各々-11.8%と-12.9%程度となった。これは、図 7 で示したように一次形状係数 S_1 が 10 を下回る場合、せん断弾性係数が低下する傾向を示すが、設計式ではせん断弾性係数 G を一定値で与えていることに起因する。一方、一次形状係数 S_1 が 10 を上回る場合、試験値と設計値の剛性が整合する傾向を示し、それらの誤差率の平均値と最大値は、各々-4.0%と-7.9%となった。なお、せん断剛性の算出式には、中心孔の形状を陽に取り入れていないが、ゴムの外径と中心孔の径の比 (D/D_0) が 0.3 程度まではせん断剛性に有意な影響は認められない。圧縮剛性については、中心孔の径が大きくなっても、これに伴って誤差率が大きくなることはなく、中心孔の径と誤差率の相関は認められない。誤差率の平均値および最大値は各々-0.6%および-4.9%となった。

以上の結果を用いて、本設計式の適用性を考える。積層ゴムの仕様を規定する JIS K 6410-1 では、せん断剛性

Fig. 10 Comparison of design formula for test results.

Fig. 11 Applicability of design formula for inner diameter.

Table 4 Error ratio of shear stiffness and compressive stiffness with respect to experimental value and design value.

Test No.	D (mm)	D_0 (mm)	tr (mm)	n	S_1	S_2	Shear Stiffness Error Ratio	Compressive Stiffness Error Ratio
A1	1	200	5.0	8	8.0	5.0	-12.4 %	2.5 %
	2						-12.9 %	2.5 %
A2	1		4.0	10	10.0		-7.7 %	-2.8 %
	2						-6.5 %	-1.7 %
A3	1		3.33	12	12.0		-3.6 %	-1.8 %
	2						-3.9 %	-1.4 %
A4	1		2.86	14	14.0		-1.2 %	1.9 %
	2						-0.2 %	2.2 %
A5	1		4.0	10	11.3		-4.8 %	-4.9 %
	2						-3.4 %	-2.0 %
A6	1		3.33	12	13.5		-0.8 %	-1.0 %
	2						-1.3 %	-0.9 %
A7	1		4.0	10	8.8		-11.0 %	0.5 %
	2						-10.7 %	-0.5 %
A8	1		3.33	12	10.5		-6.4 %	-0.6 %
	2						-7.9 %	-0.8 %

および圧縮剛性の誤差率は、各々20 %および30 %を許容している。これに基づく、誤差率は小さく、本設計式は十分な精度を有している。したがって、厚肉積層ゴムのせん断剛性には式 (1) を、圧縮剛性には式 (2)、式 (3) および式 (12) を用いて表3の諸元を与えることで、JIS K 6410-1 で要求される精度を満足する見通しが得られた。また、厚肉積層ゴムの形状として、一次形状係数 S_1 を10以上、基準面圧を6 MPa以下とすることで設計式との整合性は十分確保され、かつ安定した復元力特性が得られることが明らかとなった。

なお、本試験では直径200 mmの試験体を用いて剛性を評価したが、実機では直径1600 mm程度の厚肉積層ゴムの想定している。そのため、より実機に近いサイズを用いて、本設計式の適用性を確認する必要があるといえよう。

3. クリープ試験による設計成立性の評価

厚肉積層ゴムのゴム一層あたりのゴムの厚さは一般的な積層ゴムに比べて2倍以上となることから、この形状を対象とするクリープへの影響を把握する必要がある。上記の載荷試験結果から、一次形状係数を10以上、基準面圧を6 MPa以下とすることで設計要求を満足することがわかった。そこで、これらの形状と基準面圧が建屋供用期間中のクリープひずみに及ぼす影響を把握するために、上記の載荷結果を代表する形状と基準面圧を1水準選定してクリープ試験を実施した。本試験では、同一形状の4基の縮尺試験体を用いて、5616時間の載荷から得られたクリープひずみのデータを用いて60年後のクリープひずみを推定する。

3・1 クリープ試験方法

3・1・1 試験体

クリープ試験に用いる1/13縮尺試験体の主要形状を表5に示す。本試験体は、2章(2. 厚肉積層ゴムの設計式)で設計成立性が確認された一次形状係数 S_1 (10から14)と基準面圧(4 MPaから6 MPa)を対象に、これらの平均値(一次形状係数 S_1 : 12, 基準面圧: 5.0 MPa)を用いることによって、載荷試験で構造健全性が確認された厚肉積層ゴムの形状と基準面圧を代表させた。なお、二次形状係数 S_2 については、その値が4.1となり載荷試験で用いたものと比べて小さいが、これはゴム層の占有率が相対的に大きいことを意味し、クリープひずみを評価するうえでは安全側の評価となる。

Table 5 Specification of thick rubber bearing used for creep test.

D (mm)	D_0 (mm)	tr (mm)	n	S_1	S_2
120	12	1.6	13	12.0	4.1

3・1・2 試験機と試験方法

ゴム層厚の厚肉化によるクリープへの影響を把握するため、本試験では JIS K 6410-2 に基づきクリープ試験を行った。ここで得られた試験結果から、同規格の推定式を用いて求めたクリープひずみと一般的な積層ゴム形状で得られたそれとを比較することで、ゴム層厚の厚肉化がクリープに及ぼす影響を確認する。

クリープ試験に用いた試験装置を図 12 に示す。本試験装置はテコ型重力試験機（テコ比：1:50）で、重りを調整することで基準面圧が調整可能となる。クリープを推定するための基準面圧は 5.0 MPa とした。基準面圧の載荷時間については、JIS K 6410-2 で要求される載荷時間 1000 時間以上を満足させるものとして、ここでは 5616 時間とした。また、載荷中の試験体温度は $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ として管理した。

試験では、図 12 に示すように計 4 基の積層ゴムを 2 基 1 組として直列に組合せて試験機に設置し、基準面圧 5.0 MPa で載荷することで、各々の積層ゴムの鉛直変位を計測した。鉛直変位は、各試験体に取り付けた 2 箇所の変位計から計測した平均変位を用いた。なお、本論文では鉛直変位を積層ゴムの総ゴム厚で除したものをクリープひずみと定義し、このクリープひずみを用いて評価する。

なお、計測間隔は以下のとおりとした。載荷開始 0～24 時間については 1 分間隔で、載荷開始 24～48 時間については 30 分間隔で、載荷開始 48 時間以降については 60 分間隔で計測した。

3・2 クリープ試験結果と評価結果

クリープ試験結果として試験体 4 基のクリープ曲線を併記したものを図 13 に、クリープ曲線とこの回帰線を図 14 に示した。クリープ曲線は、片対数プロットあるいは両対数プロットが使われるが、両対数プロットの方がより大きなクリープを示すとされているため、安全側の評価として両対数プロットとしている。図 14 に示した回帰線は、JIS K 6410-2 の方法に基づき、測定期間の 1/2 から 1000 時間以上までのクリープ試験結果に最小二乗法を用いて両対数関係で一次回帰線を求めたものである。ある時間 t のクリープひずみ ε_{cr} は、係数 α と β からなる一次回帰線として次式で与えられる。なお、式 (15) は JIS K 6410-2 で採用されているクリープひずみの推定式である。

Fig. 12 Creep testing machine.

Fig. 13 Results of creep test for thick rubber bearing.

Fig. 14 Results of creep test for thick rubber bearing.

Table 6 Estimate of the creep at 60 years.

Specimen No.	α	β	t	$\mathcal{E}_{cr}$ (%)
1	0.0512	0.287	60 year	2.3
2	0.0422	0.305		2.4
3	0.0336	0.327		2.5
4	0.0362	0.321		2.5

$$\varepsilon_{cr} = \alpha \times t^{\beta} \quad (15)$$

各試験体の結果から求めた係数 α , β および供用期間 60 年のクリープひずみは表 6 となる。供用期間 60 年のクリープひずみの推定値 (4 基) は, 最大値で 2.5 %, 平均値で 2.4 % となる。ここで得られた結果を既往の知見と比較する。中村らは, 実建物に設置された一次形状係数 S_1 が 33.5 を有する積層ゴム (直径 740 mm) のクリープひずみを 8 年程度観測し, その観測記録から供用期間 60 年のクリープひずみを推定している (中村 他, 1998)。このクリープひずみの推定では, 基準面圧および環境温度は, 各々 5.0 MPa および 25 °C であり本クリープ試験の条件と類似したものとなっている。中村らの観測記録に基づく 60 年後のクリープひずみの推定値は 3 % 程度としている。また, このクリープひずみが免震性能に及ぼす影響は小さく, 維持管理上も問題ないとしている。この推定値は本試験結果から得られた推定値とほぼ一致する。したがって, 積層ゴムの一次形状係数 S_1 が一般的なものと比較して小さくても, 一次形状係数 S_1 を 12 程度とし, その基準面圧を 5.0 MPa とすれば, 供用期間 60 年後のクリープひずみは, 一般的な積層ゴム形状で生じるクリープひずみと同程度が見込めることが明らかとなった。

4. 結 言

本論文では, 厚肉積層ゴムを製造する上で必要となる中心孔の形状を考慮した設計式を提案した。この適用性を確認するため, 一次形状係数や中心孔の径を変数とする 1/8 縮尺試験体を用いた載荷試験を行い, 既往研究成果で与えられる設計式と比較評価した。さらに, 載荷試験により構造健全性が確認された一次形状係数および面圧を対象に, これを代表させた 1/13 縮尺試験体によるクリープ試験から, 供用期間 60 年のクリープひずみを推定した。これらの検討結果は以下のとおり要約される。

- (1) 厚肉積層ゴムの設計式: 載荷試験結果を基に, これらの設計値と試験値の整合性を検証した結果, 厚肉積層ゴムのせん断剛性は一次形状係数 S_1 を 10 以上とすると設計値と試験値は良く対応する。これらの平均誤差率は 4.0 % (最大誤差率は 7.9 %) となった。また, 圧縮剛性については, 圧縮剛性の算出式に中心孔の形状を反映させたことにより, 中心孔の径によらず, 平均誤差率は 0.6 % (最大誤差率は 4.9 %) で試験値と良好に一致した。本論文で提示した設計式を用いることにより, 一次形状係数 S_1 が 10~14 程度を有する厚肉積層ゴムのせん断剛性および圧縮剛性が実用上十分な精度で得られる見通しを得た。なお, 一次形状係数 S_1 が 8 程度とした場合でも, 圧縮応力を 6.0 MPa 程度とすれば, せん断剛性の誤差率は JIS K 6410 の許容値を満足するが, この一次形状係数の領域では, せん断弾性係数 G が低下傾向にあるため, 本設計式の適用にあたっては注意を要する。
- (2) 厚肉積層ゴムの構造健全性の見通し: 基準地震動で想定される地震応答を上回る荷重下においても, 座屈発生はみられず, また安定した履歴特性が得られた。
- (3) 厚肉積層ゴムのクリープ: 一次形状係数 S_1 を 12 程度とし, その基準面圧を 5.0 MPa とすれば, 供用期間 60 年後のクリープひずみは, 一般的な積層ゴム形状で生じるクリープひずみと同程度を見込めることが確認された。

以上の結果から, 厚肉積層ゴムの構造健全性の確保およびクリープひずみの抑制が可能な一次形状係数と基準面圧は各々 12 以上および 5 MPa 以下となる。

今後, 厚肉積層ゴムの設計式およびクリープひずみの信頼性を向上させるため, より実機 (直径 1600 mm) に近いサイズを対象に載荷試験等を実施し, 検証を行う予定である。

謝 辞

本論文は経済産業省からの受託事業である「発電用高速炉等技術開発」の一環として実施した成果である。末筆ながらここに記して感謝の意を表します。

文 献

藤田 隆史, 藤田 聡, 芳沢 利和, 積層ゴムによる重量機器の免震支持: 第 1 報, 実大免震支持装置についての基礎実験, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 50, No. 454 (1984), pp. 933-942.
平田和太, 矢花修一, 金澤健司, 松田昭博, 3 次元免震システムの導入による高速増殖炉の設計合理化効果, 電力

- 中央研究所 研究報告書, 報告書番号 U97001 (1997).
- 日本工業規格, 建築免震用積層ゴム支承—第1部:仕様, JIS K 6410-1 (2015).
- 日本工業規格, 建築免震用積層ゴム支承—第2部:試験方法, JIS K 6410-2(2015).
- 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.
- Kelly, J. M., Mechanics of rubber bearings for seismic and vibration Isolation, Wiley (2011), p. 23.
- Lindley, P. B., Engineering design with natural rubber, Malaysian rubber producers' research association (1974).
- 松田 昭博, 矢花 修一, 建屋3次元免震用積層ゴムの開発: その2 天然ゴム系厚肉積層ゴムのクリープ特性試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1998), pp.529-530.
- 松田 昭博, 矢花 修一, 建屋3次元免震用積層ゴムの開発: その3 厚肉積層ゴムの力学特性に与える中心孔径と中間鋼板厚の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1999), pp.555-556.
- 松田 昭博, 矢花 修一, 積層ゴムのクリープに関する研究: その1 厚肉積層ゴムのクリープ特性と数値シミュレーション, 電力中央研究所 研究報告書, 報告書番号 U99060 (2000).
- 森田 慶子, 山上 聡, 高山 峯夫, 安藤 勝利, 免震構造用天然ゴム系積層ゴムアイソレータのクリープ実験: 面圧 20MPa 下での約 15 年間の試験結果について, 日本建築学会九州支部研究報告, Vol. 49 (2010), pp. 189-192.
- 中村 嶽, 鈴木 哲夫, 岡田 宏, 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, No. 6 (1998), pp. 23-26.
- 原子力規格委員会編, 原子力発電所免震構造設計技術指針 JEAG 4614-2000, 一般社団法人日本電気協会 (2000).
- 原子力規格委員会編, 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).
- Okamura, S., Kamishima, Y., Negishi, K., Sakamoto, Y., Kitamura, S. and Kotake, S., Seismic Isolation Design for JSFR, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 48, No. 4 (2011), pp. 688-692.
- 矢花 修一, 松田 昭博, 建屋3次元免震用厚肉積層ゴムの設計法に関する提案, 電力中央研究所 研究報告書, 報告書番号 U99061 (2000).
- 柳 勝幸, 高山 峯夫, 西川 一郎, 高山 桂一, 永井 正弘, 天然ゴム系積層ゴムの性能に関する実験的研究: その6 中心孔が性能へ及ぼす影響について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1998), pp.535-536.

References

- Fujita, T., Fujita, S. and Yoshizawa, T., An aseismic base isolation system using laminated rubber bearings for heavy mechanical and/or electrical equipment: 1st Report, Experimental study on full-sized isolation device, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 50, No. 454 (1984), pp. 933-942 (in Japanese).
- Hirata, K., Yabana, S., Kanazawa, K. and Matsuda, A., Effects of applying three-dimensional seismic isolation system on the seismic design of FBR., CRIEPI Research Report, No. U97001(1997) (in Japanese).
- Japanese Industrial Standards, Elastomeric seismic-protection isolators for buildings - Part 1: Specifications, JIS K 6410-1 (2015) (in Japanese).
- Japanese Industrial Standards, Elastomeric seismic-protection isolators for buildings - Part 2: Test methods, JIS K 6410-2 (2015) (in Japanese).
- 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.
- Kelly, J. M., Mechanics of rubber bearings for seismic and vibration isolation, Wiley (2011), p. 23.
- Lindley, P. B., Engineering design with natural rubber, Malaysian Rubber Producers' Research Association (1974).
- Matsuda, A. and Yabana, S., Development of laminated rubber bearings for three dimensional seismic isolated structures: Part 2 creep tests of natural rubber bearings with thick rubber sheets, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan (1998), pp. 529-530 (in Japanese).
- Matsuda, A. and Yabana, S., Development of laminated rubber bearings for three dimensional seismic isolated structures: Part 3 effect of center hole size and insert plate thickness on mechanical properties of natural rubber bearings with thick rubber layers, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan (1999), pp. 555-556 (in Japanese).
- Matsuda, A. and Yabana, S., A study on creep properties of laminated rubber bearings: Part 1 creep properties and numerical simulations of thick rubber bearings, CRIEPI Research Report, No. U99060(2000) (in Japanese).

- Morita, K., Yamagami, S., Takayama, M. and Ando, M., Long term performance of laminated rubber bearings for the seismic isolation system, Proceedings of the Architectural Institute of Japan Kyusyu Chapter Architectural Research Meeting, Vol. 49 (2010) , pp. 189-192 (in Japanese).
- Nakamura, T., Suzuki, T. and Okada, H., Aging characteristics of natural rubber bearings in actual base-isolated building, Journal of Technology and Design, Architectural Institute of Japan , No. 6 (1998), pp. 23-26 (in Japanese).
- Nuclear Standards Committee of JEA , Seismic design guidelines for base-isolated structures of nuclear power plant, JEAG 4614-2000, The Japan Electric Association (2000) (in Japanese).
- 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).
- Okamura, S., Kamishima, Y., Negishi, K., Sakamoto, Y., Kitamura, S. and Kotake, S., Seismic isolation design for JSFR, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 48, No. 4 (2011), pp. 688-692.
- Yabana, S. and Matsuda, A., Development of design method of thick rubber bearings for three-dimensional base isolation, CRIEPI Research Report, No. U99061(2000) (in Japanese).
- Yanagi, M., Takayama, M., Nishikawa, I., Takayama, K. and Nagai, M., Experimental study on natural rubber bearings : Part 6 the influences of the center hole on performance of natural rubber bearings , Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan (1998), pp. 535-536 (in Japanese).