

## FUYO式鉛プラグ挿入型積層ゴム支承の開発

中村佳也      鳥居次夫<sup>\*1</sup>  
佐々木聡      馮徳民<sup>\*1</sup>  
増田圭司

### 概 要

2011年東日本大震災で、免震建物の耐震安全性が非常に高いことが検証された。しかし日本国内で建設される建物のうち免震建物の占める割合はわずかしかない。免震建物を普及させるためには、免震建物を実現する免震装置の多様化と、低価格化が不可欠である。そこで、免震装置の中でも一番効率が高い鉛プラグ挿入型積層ゴム支承を開発し、調達価格の低下を図った。

本報は、開発した FUYO 式鉛プラグ挿入型積層ゴム支承の構成および仕様と、設計のために必要な基本性能、設計式、特性の依存性、耐久性についての実験結果および基準値を報告する。なお、本製品は国内他社製品とほぼ同性能であり、国土交通大臣認定を取得している。

### Development of FUYO Lead Rubber Bearing.

#### Abstract

In the 2011 Great East Japan Earthquake, the earthquake-resistant safety of a base-isolated structure was verified. However, base-isolated structures are rare in Japan. In order to increase the number of base-isolated structures constructed, an increase in the types of base isolation and a reduction in their costs is required. As a result, we have been developed a lead rubber bearing, a type of the isolation device.

This paper details the configuration and specification of a FUYO lead rubber bearing. Furthermore, information required for design (such as basic performance, design formula, dependence properties and durability of the FUYO lead rubber bearing) are investigated experimentally.

キーワード： 免震、積層ゴム、鉛プラグ、性能試験、限界性能、依存性

\*1 (株)高環境エンジニアリング

## §1. はじめに

1995 年阪神大震災、2011 年東日本大震災により、地震の揺れにより多くの建築物および構造物が被害を受けたことは記憶に新しい。来るべき地震に対して多くの建築物の耐震安全性をいかに確保するかが非常に重要であり、その一つの解決手段として、建築物の免震構造化が考えられる。2011 年東日本大震災でも、免震建物の耐震安全性が非常に高いことが検証されている<sup>1)</sup>。しかし日本の免震建物(戸建を除く)は、年間建設数約 200 棟、累積約 3000 棟で、日本国内の建物全体のわずかでしかない<sup>2)</sup>。免震建物の普及のためには、免震建物を実現する免震装置の多様化と、低価格化が不可欠である。そこで、免震装置の中でも一番効率が高い鉛プラグ挿入型積層ゴム支承の開発を行った。

本報は、開発した FUYO 式鉛プラグ挿入型積層ゴム支承の概要および仕様と、設計のために必要な基本性能、設計式、特性の依存性、耐久性についての実験結果および基準値を報告するものである。

## §2. FUYO 式鉛プラグ挿入型積層ゴム支承

### 2.1 製品概要と使用材料

図 1 に FUYO 式鉛プラグ挿入型積層ゴム支承を示す。内部ゴムシートと内部鋼板を積層し上下にフランジを一体化させ、中心に鉛プラグを挿入した構造である。積層ゴムの表面は耐候性に優れた合成ゴムで被覆している。使用材料の仕様を表 1 に示す。

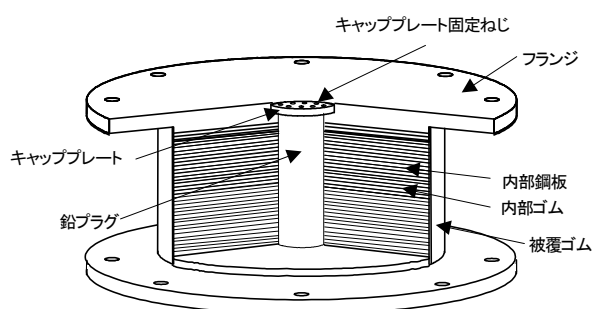


図 1 FUYO 式鉛プラグ挿入型積層ゴム支承

表 1 使用材料の仕様

| 構成要素                     | 材料                                                         |
|--------------------------|------------------------------------------------------------|
| ゴム                       | (内部ゴム) 天然ゴム<br>(被覆ゴム) 合成ゴム                                 |
| 内部鋼板<br>フランジ<br>キャッププレート | SS400 [JIS G 3101:2010]<br>Q235 [GB/T 700-2006]            |
| 鉛プラグ                     | Pb99.99またはPb99.994 [GB/T 469-2005]<br>特種 [JIS H 2105:1995] |

### 2.2 製品シリーズと寸法仕様

本製品は、ゴム総厚さ 200mm のシリーズ(H=200 シリーズ)と、2 次形状係数 5( $S_2=5$  シリーズ)の 2 種類がある。表 2 に、寸法および係数の仕様を示す。内部ゴムのせん断弾性率は  $0.392\text{N/mm}^2$  で、ゴム外径の範囲は、600mm～1100mm である。本製品の特徴は、①フランジ一体型とし装置高さを抑えている、②性能向上を図るため内部鋼板の厚さを 4.5mm に統一している、③鉛径/ゴム外径の範囲を 0.15～0.25、最大 0.25 としている、ことである。

表 2 寸法・係数値の仕様

(a) H=200 シリーズ

| せん断弾性率 G (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.392       |      |      |      |      |      |
|-------------------------------|-------------|------|------|------|------|------|
| ゴム外径寸法 D (mm)                 | 600         | 700  | 800  | 900  | 1000 | 1100 |
| ゴム一層厚さ tr(mm)                 | 5.0         | 5.0  | 5.7  | 6.0  | 7.0  | 7.0  |
| 内部鋼板厚さ ts(mm)                 | 4.5         | 4.5  | 4.5  | 4.5  | 4.5  | 4.5  |
| ゴム総厚さ hr (mm)                 | 200         | 200  | 200  | 204  | 203  | 203  |
| 1 次形状係数 S1                    | 30.0        | 36.0 | 35.1 | 37.5 | 35.7 | 39.3 |
| 2 次形状係数 S2                    | 3.00        | 3.50 | 4.01 | 4.41 | 4.93 | 5.42 |
| 鉛径 Dp/ゴム外径 D                  | 0.15 ~ 0.25 |      |      |      |      |      |

(b)  $S_2=5$  シリーズ

| せん断弾性率 G (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.392       |      |      |      |      |
|-------------------------------|-------------|------|------|------|------|
| ゴム外径寸法 D (mm)                 | 600         | 700  | 800  | 900  | 1000 |
| ゴム一層厚さ tr(mm)                 | 4.0         | 5.0  | 6.0  | 6.0  | 7.0  |
| 内部鋼板厚さ ts(mm)                 | 4.5         | 4.5  | 4.5  | 4.5  | 4.5  |
| ゴム総厚さ hr (mm)                 | 120         | 140  | 162  | 180  | 203  |
| 1 次形状係数 S1                    | 37.5        | 35.0 | 33.3 | 37.5 | 35.7 |
| 2 次形状係数 S2                    | 5.00        | 5.00 | 4.94 | 5.00 | 4.93 |
| 鉛径 Dp/ゴム外径 D                  | 0.15 ~ 0.25 |      |      |      |      |

## §3. 基本性能および限界性能

### 3.1 基本性能

鉛直および水平方向の基本性能(特性)を調べるため、基本性能試験を実施した。基本性能試験結果の一例を図 2 に示す。図 2(a)は圧縮試験結果で、基準面圧 $\pm 30\%$ の圧縮荷重を 4 サイクル作用させた。鉛直荷重と鉛直変位の関係(3 サイクル目)から鉛直剛性  $K_v$  を評価する。図 2(b)は圧縮せん断試験結果で、基準面圧の圧縮荷重を作用させた状態で、水平方向に規定歪を 4 サイクル与えた。得られる水平荷重と水平変位の関係の 3 サイクル目から、2 次剛性(降伏後剛性)  $K_a$ 、切片荷重(降伏荷重)  $Q_a$  を評価する。図 2(b)には、評価した 2 次剛性と切片荷重を用い、バイリニアモデルと BRO モデル<sup>3)</sup>とで水平荷重—水平変位関係を求めた結果を合わせて示す。BRO モデルは実験結果を非常に良く表現できており、設計では BRO モデルを用いる。

なお、設計式(設計基準値)を、それぞれ以下に示す<sup>4)</sup>。

$$K_V = \frac{E_{CB} \cdot A}{h_r} \quad \dots(1)$$

$$K_d = \frac{G \cdot A}{h_r} + \frac{G_p \cdot A_p}{h_r} \quad \dots(2)$$

$$Q_d = \sigma_{pb} \cdot A_p \quad \dots(3)$$

ここで、

$$E_{CB} = \frac{(1 + 2\kappa S_1^2) \cdot E_0 \cdot E_B}{(1 + 2\kappa S_1^2) \cdot E_0 + E_B} \quad \dots(4)$$

$G$  : ゴムのせん断弾性率(N/mm<sup>2</sup>)、 $A$  : 積層ゴム受圧面積(mm<sup>2</sup>)、 $E_B$  : ゴムの体積弾性率(N/mm<sup>2</sup>) [=1960<sup>4)</sup>]、 $E_0$  : ゴムの縦弾性率(N/mm<sup>2</sup>) [=1.44]、 $\kappa$  : ゴムの補正係数 [=0.85<sup>4)</sup>]、 $S_1$  : 積層ゴムの1次形状係数、 $h_r$  : 積層ゴムのゴム総厚さ(mm)、 $G_p$  : 鉛の見かけのせん断弾性率 [=0.588]、 $A_p$  : 鉛プラグの断面積(mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_{pb}$  : 鉛のせん断降伏応力度(N/mm<sup>2</sup>) [=8.33]。

図 3 に、本製品 38 体の特性値の実験値と設計基準値との比の結果を頻度分布で示す。ばらつきの基準値として、鉛直剛性は±20%、2 次剛性および切片荷重は±15%を設定しているが、すべて基準値以内に収まっていることが確認できる。

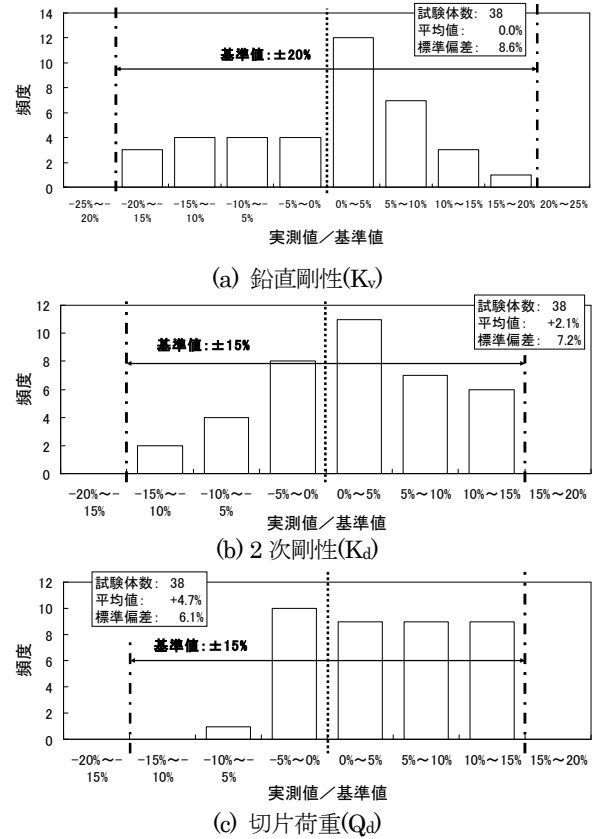


図 3 基本性能試験結果のまとめ

### 3.2 圧縮限界性能

本製品の圧縮限界性能として、図 4 に示す、せん断歪に応じて圧縮限界応力を低減させるような圧縮限界性能線を規定する。図中右下がりの直線は、次式で表す。

$$\sigma(\gamma) = \sigma_{cr} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\alpha_c \cdot S_2} \cdot \gamma \right) \quad \dots(5)$$

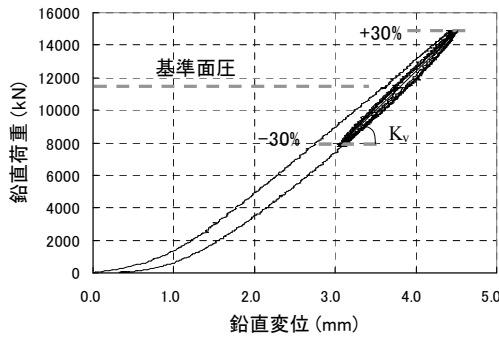
ここで、 $\alpha_{cr}$  は圧縮限界強度で、せん断歪ゼロで圧縮荷重を作用させたときの破断応力であり、次式より算出する。

$$\sigma_{cr} = G \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{8 \cdot (1 + 2\kappa S_1^2) \cdot [G/E_B]}} \quad \dots(6)$$

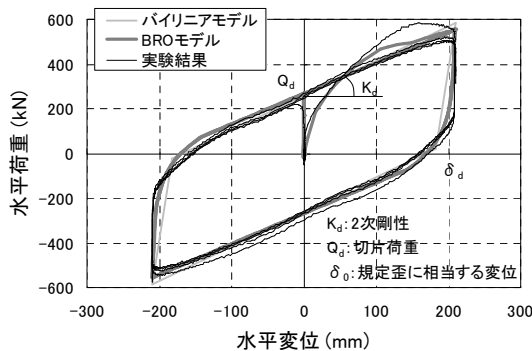
$S_2$  は 2 次形状係数、 $\alpha_c$  は次式のように  $S_2$  により 1.0～1.21 の値をとる割り増し係数である。

$$\alpha_c = \begin{cases} 1.0 & (S_2 < 3.5) \\ 0.14 \cdot (S_2 - 3.5) + 1.0 & (3.5 \leq S_2 < 5.0) \\ 1.21 & (5.0 \leq S_2) \end{cases} \quad \dots(7)$$

さらに、圧縮限界性能線の圧縮応力は圧縮限界強度の 0.8 倍を上限とし、せん断歪は 400%を上限とする。



(a) 圧縮試験 ( $\sigma = \sigma_0 \pm 30\%$ )



(b) 圧縮せん断試験 ( $\sigma = \sigma_0$ ,  $\gamma = \pm 100\%$ )

図 2 基本性能試験結果 ( $\phi 1000$ [ $S_2=5$  シリーズ])

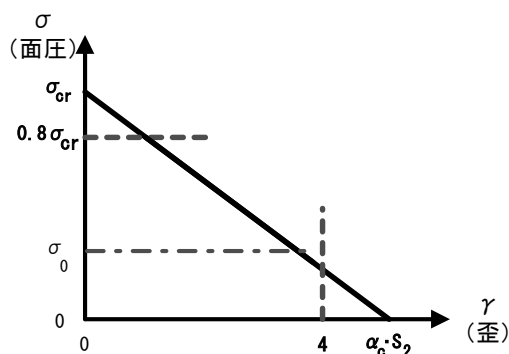


図 4 圧縮限界性能

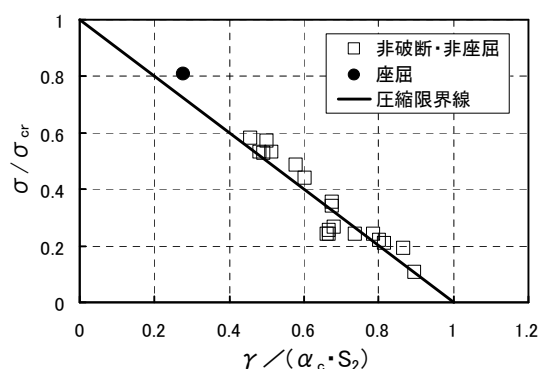
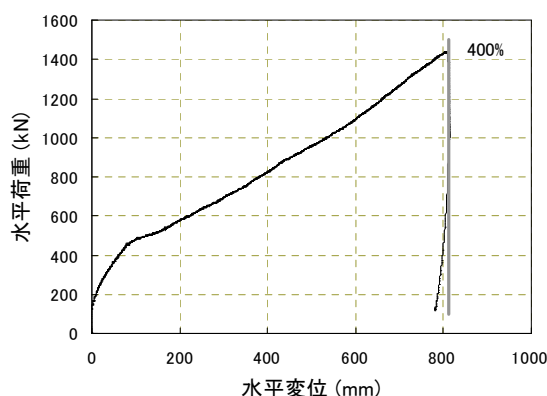


図 5 圧縮限界性能確認試験結果

表 3 に、本製品の圧縮限界性能の基準値を示す。使用時の推奨面圧である基準面圧は、圧縮限界強度の 0.2～0.3 倍で設定している。さらに表中には、規定歪、面圧ゼロ時および基準面圧時での限界歪の基準値も示す。

規定した圧縮限界性能の妥当性を確認するため、圧縮限界性能線近傍の条件（圧縮応力、せん断歪）で圧縮せん断試験を実施し、座屈および破断の有無を確認した。図 5 に試験結果を示す。縦軸は  $\sigma/\sigma_{cr}$ 、横軸は  $\gamma/(\alpha_c \cdot S_2)$  である。図中、非座屈および非破断を確認した実験結果を□印、座屈および破断を確認した実験結果を●印で示す。図から、規定した限界性能線以内では破断および座屈現象は見られず、限界性能線が妥当であることを確認した。なお、直径 600～1000mm（S<sub>2</sub>シリーズ）、直径 900,1000mm（H=200 シリーズ）については、 $\gamma=400\%$  で非破断を確認している。

図 6 に、圧縮限界性能の確認試験結果の一例として直径 1000mm 試験体（H=200 シリーズ）の、圧縮応力  $\sigma=20\text{N/mm}^2$ 、せん断歪  $\gamma=400\%$  [812mm] の試験結果を示す。図6(a)は水平荷重－水平変位関係で、破断および座屈現象は見られず安定した履歴関係を示している。



(a) 水平荷重－水平変位関係



(b) せん断歪 400%時変形状況

図 6 圧縮限界性能確認試験結果  
(φ1000[H=200 シリーズ]、 $\sigma=1.33\sigma_0$ 、 $\gamma=400\%$ )

表 3 圧縮限界性能の基準値

(a) H=200 シリーズ

| ゴム外径寸法 D (mm)                             | 600  | 700  | 800  | 900  | 1000 | 1100 |
|-------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 圧縮限界強度 $\alpha_{cr}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 31.6 | 41.3 | 47.4 | 54.6 | 59.0 | 69.2 |
| 面圧 0 時限界歪 $\alpha_c \cdot S_2$ (%)        | 300  | 350  | 429  | 498  | 592  | 656  |
| 基準面圧 $\alpha_0$ (N/mm <sup>2</sup> )      | 6    | 8    | 10   | 12   | 15   | 15   |
| $\alpha_0/\alpha_{cr}$                    | 0.19 | 0.19 | 0.21 | 0.22 | 0.25 | 0.22 |
| 規定歪 $\gamma_0$ (%)                        | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 基準面圧時限界歪 $\gamma_2$ (%)                   | 243  | 265  | 339  | 388  | 400  | 400  |

(b) S<sub>2</sub>=5 シリーズ

| ゴム外径寸法 D (mm)                             | 600  | 700  | 800  | 900  | 1000 |
|-------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| 圧縮限界強度 $\alpha_{cr}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 61.9 | 59.0 | 56.3 | 61.9 | 59.0 |
| 面圧 0 時限界歪 $\alpha_c \cdot S_2$ (%)        | 605  | 605  | 593  | 605  | 592  |
| 基準面圧 $\alpha_0$ (N/mm <sup>2</sup> )      | 15   | 15   | 15   | 15   | 15   |
| $\alpha_0/\alpha_{cr}$                    | 0.24 | 0.25 | 0.27 | 0.24 | 0.25 |
| 規定歪 $\gamma_0$ (%)                        | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 基準面圧時限界歪 $\gamma_2$ (%)                   | 400  | 400  | 400  | 400  | 400  |

### 3.3 引張限界性能

本製品の引張性能を確認するため、直径 600mm 試験体（S<sub>2</sub>=5 シリーズ）を用いて、ゴムせん断歪 100%相当の水平変位を与えた状態で鉛直方向の引張試験を行った<sup>5)</sup>。図 7 に、引張応力－引張歪関係の例を示す。引張応力が大きくなるほど剛性が小さくなる。原点と面圧 0.392N/mm<sup>2</sup> の点を結ぶ直線（引張剛性）を引張歪で 1% オフセットし、その直線が応力－歪曲線と交わった点を引張線形限界強度とする。

図 9 から求めると  $1.12\text{N/mm}^2$  であった。従って、この結果から本製品の引張限界強度を  $1.0\text{N/mm}^2$  に設定する。

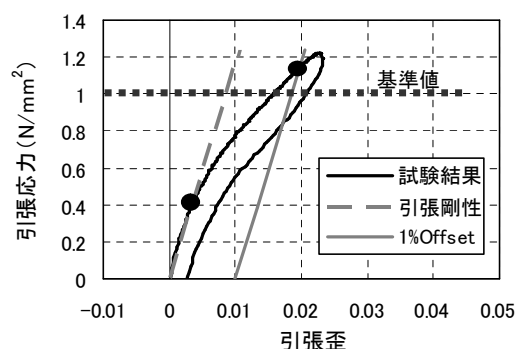


図 7 引張試験結果

#### §4. 特性の変化（各種依存性、経年変化）

##### 4.1 温度依存性

直径 600mm 試験体 ( $S_2=5$  シリーズ) 3 体を用いて、試験体を低温恒温槽に入れ試験体温度を  $-10, 0, 20, 30, 40^\circ\text{C}$  の 5 段階に変化させて、3.1 に示した圧縮せん断基本試験 (基準面圧、 $\pm 100\%$  せん断歪) を行い、2 次剛性と切片荷重を評価した。20°C での試験結果を基準として求めた結果を図 8 に示す。温度が上昇するほど特性値が低下する傾向にあり、温度依存性を有する。鉛入り積層ゴムの特性の温度依存式として、文献 6) に示されている式 (8) を図中に併せて示す。式 (8) の依存式と試験結果の対応は良いことから、本製品の特性の温度補正に式 (8) を使用する。

$$K_d(t) = K_d(t_0) \cdot \exp[-0.00271 \cdot (t - t_0)] \quad \dots(8)$$

$$Q_d(t) = Q_d(t_0) \cdot \exp[-0.00879 \cdot (t - t_0)]$$

ここで、 $t$  : 任意の温度、 $t_0$  : 基準温度 ( $=20^\circ\text{C}$ )

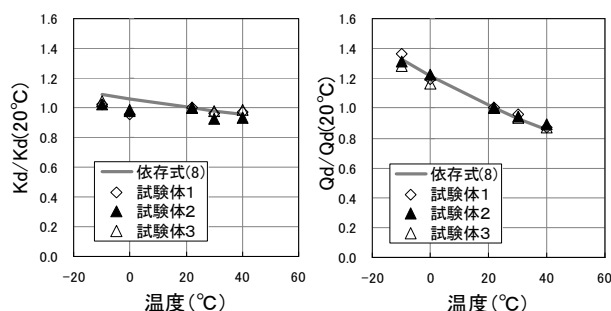


図 8 温度依存性試験結果

##### 4.2 経年変化

直径 600mm 試験体 ( $S_2=5$  シリーズ) 2 体を用いて、熱老化試験機で  $100^\circ\text{C} \times 240$  時間放置し、 $20^\circ\text{C} \times 60$  年相当の経

年をさせた。促進熱老化前後で、3.1 に示した圧縮せん断基本試験を行った。図 9 に、試験前後の水平荷重－水平変位関係を比較して示す。ほとんど変化がなく、60 年経過後の特性は、2 次剛性で  $+4 \sim +5\%$ 、切片荷重で  $+1 \sim +4\%$  の変化であった。この結果から本製品の経年変化の基準値を、2 次剛性  $+10\%$  以下、切片荷重  $+5\%$  以下に設定する。

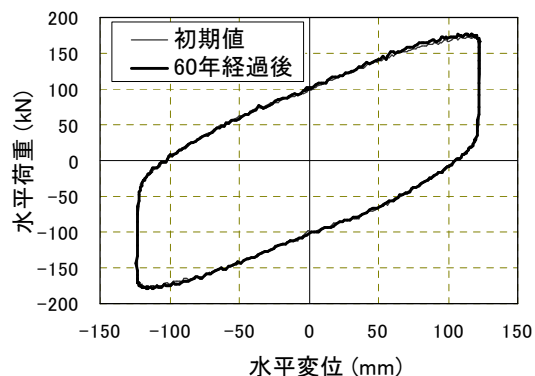


図 9 経年変化試験結果

##### 4.3 クリープ歪

直径 600mm 試験体 ( $S_2=5$  シリーズ) 2 体を用いて、基準面圧に相当する圧縮荷重を 1330 時間 (約 55 日) 载荷し、鉛直変形量を計測した。試験結果を図 10 に示す。この試験結果に基づいて 60 年後のクリープ変形およびクリープ歪を推定すると、3.4mm (2.8%), 3.8mm (3.2%) となった。これらの結果から、本製品のクリープ歪の基準値は 8% にする。

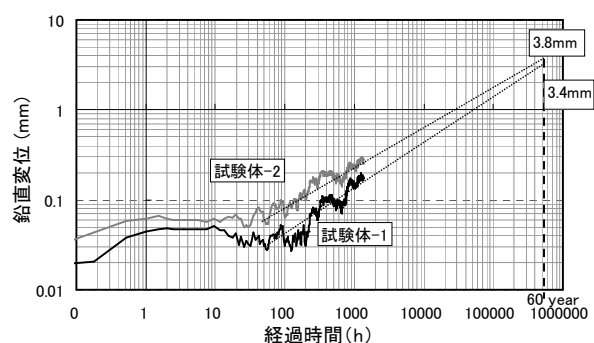


図 10 クリープ試験結果

##### 4.4 歪依存性

基準面圧に相当する圧縮荷重を作用させた状態で、せん断歪を 50%, 100%, 150%, 200% に変化させて圧縮せん断試験を行った。試験結果を図 11 に示す。図 11(a) は、せん断歪 100% 時の 2 次剛性、切片荷重を基準値としてその比を縦軸に、せん断歪を横軸にとり示している。この図から、2 次剛性はせん断歪が大きくなると低下する傾向があり、切片荷重はせん断歪の大きさに関係なくほぼ一定値である

ことが分かった。この傾向を式(9),(10)に示す依存式で表し、図 11(a)に併せて示す。

$$K_d(\gamma) = C_{Kd}(\gamma) \cdot K_{d100} \quad \dots(9)$$

$$C_{Kd}(\gamma) = \begin{cases} 0.779 \cdot \gamma^{-0.43} & (\gamma < 0.25) \\ \gamma^{-0.25} & (0.25 \leq \gamma < 1.0) \\ \gamma^{-0.12} & (1.0 \leq \gamma) \end{cases}$$

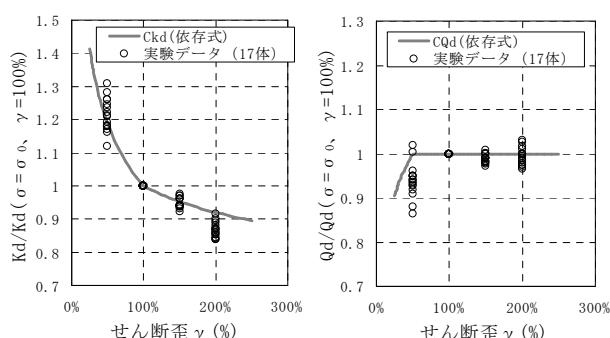
$K_{d100}$  : せん断歪 100%での 2 次剛性

$$Q_d(\gamma) = C_{Qd}(\gamma) \cdot Q_{d100} \quad \dots(10)$$

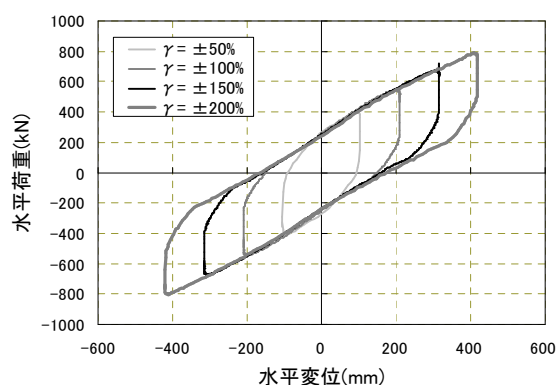
$$C_{Qd}(\gamma) = \begin{cases} 2.036 \cdot \gamma^{0.41} & (\gamma < 0.1) \\ 1.106 \cdot \gamma^{0.145} & (0.1 \leq \gamma < 0.5) \\ 1.0 & (0.5 \leq \gamma) \end{cases}$$

$Q_{d100}$  : せん断歪 100%での切片荷重

実験結果は、式(9),(10)の歪依存式と概ね一致している。図 11(b)に、直径 1100mm 試験体(H=200 シリーズ)でせん断歪を変えた時の水平荷重—水平変位関係を示す。せん断歪が変化しても安定した履歴特性を示している。



(a) 歪の大きさと特性値変化の関係



(b) 水平荷重—水平変位関係

図 11 歪依存性確認試験結果

## §5. おわりに

FUYO 式鉛プラグ挿入型積層ゴム支承を開発した。基本性能試験を実施し、特性値(鉛直剛性、2 次剛性、切片荷重)の実験結果と設計式(基準値)とがほぼ対応していることを確認した。また、温度変化、経年変化による特性への影響、クリープ歪、せん断歪の大きさによる特性値の変化を実験で確認し、基準値および設計式を得た。

なお、本製品は国内他社製品とほぼ同性能であった。これらの実験結果および基準値を元に、本製品は、国土交通大臣認定を取得した(MVBR-0451)。

## 参考文献

- 1) 日本免震構造協会：東北地方太平洋沖地震に対する応答制御建築物調査報告書、2012.1.
- 2) 日本免震構造協会：免震建築物の計画推移、2012.6.
- 3) D. FENG etc., “A New Analytical for the Lead Rubber Bearing”, 12WCEE, paper No.0203, 2000.
- 4) D. FENG etc., “Performance Test Study on Chinese G4 Lead Rubber Bearings”, 13WCEE (Vancouver, B.C., Canada), No.676, 2004.
- 5) 可児長英他：天然ゴム系、高減衰型、鉛プラグ入り積層ゴムのオフセットせん断—引張特性試験（その 1～3）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.559-564、1999.
- 6) 長谷川治他：LRB の温度特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.511-512、1997.



中村 佳也

## ひとこと

“免震”という言葉は、一昔前に比べて一般に浸透したが、“免震建物”はまだ多くは無い。免震技術の開発に関わることにより、“免震建物”の普及に貢献できたらと思う。