

免震防振積層ゴムの開発

Study of Base Isolation System for Railroad Side Buildings

柳 勝幸
Masayuki YANAGI

福田滋夫
Shigeo FUKUDA

加藤直樹
Naoki KATO

青木伸夫
Nobuo AOKI

村松佳孝
Yoshitaka MURAMATSU

五十嵐信哉*
Shinya IGARASHI

鈴木庸介*
Yousuke SUZUKI

建築物の耐震安全性を向上する免震機能と、鉄道振動や騒音を大幅に低減する防振機能を併せもつ、天然ゴム系免震防振積層ゴムを開発した。その製品特性を紹介する。

We developed the natural rubber bearing which had both protection against vibration functions to largely reduce isolation which improved with quakeproof safety and railroad vibration and the noise of the building. In this paper we introduce the characteristics of Base Isolation System for Railroad Side Buildings.

1. はじめに

近年、鉄道の立体交差化や駅改良事業などで都市部の鉄道インフラ近接空間が急増している状況にあって、その活用が注目されている。本研究の目的は、建築物の耐震安全性を向上する免震機能と、鉄道振動や騒音を大幅に低減する防振機能を併せもつ天然ゴム系免震防振積層ゴム（以下免震防振積層ゴム）の実用化を図り、これまで駅隣接建築などで敬遠されてきた事務所、保育所、老健施設、病院、ホテルなどの複合型建築物を実現し、周辺地域の利便性向上や活気ある都市の発展に貢献することである。免震防振積層ゴスを適用した建築物の構造形式としては、鉄道の上下及び周辺の建物基礎もしくは中間層において免震層を設ける一般的な免震建築形式を踏襲している（図1参照）。本報では、免震防振積層ゴムに求められる目標性能ならびに、目標性能の達成に向けた方策を、既開発の直径800 mm、支承荷重1120 kNの免震防振積層ゴムを中心に報告する^{1, 2)}。

2. 基本構造

一般的に鉄道インフラ近接空間を利用した建築物の室内騒音は、空気を媒介して伝わる「空気伝搬音」、列車振動が建物内部に伝わり壁や天井などを振動させて発生する「固体伝搬音」の2つに分類される。空気伝搬音は建物の外壁やサッシュなどの遮音性能を高めることで比較的容易に

防止できる。

一方、固体伝搬音は、仕上げ材がスピーカーのコーンのような働きをして大きな騒音を放射する現象である。すなわち、静粛な鉄道隣接建築を実現するためには固体伝搬音を防ぐ防振性能の確保が大きな課題となる。静粛性を求める従来の高架下建築では、図2に示す浮き構造が多く用いられている。しかしながら、居住空間や執務空間を確保するために十分な防振仕様の採用が難しい場合が多いことや施工的な煩雑さなどの制約から、室内騒音性能の限界は一般事務室レベルに留まっている。一方、これらの問題を解決して鉄道高架下ホテルを実現した吊り免振工法も報告されている³⁾。本報における免震防振積層ゴムを適用した建築物では、吊り免振工法と同様に建物支承部で振動低減を行う。従って、免震防振積層ゴムに求められる防振性能は、吊り免振工法で実測された防振性能⁴⁾に準ずる鉛直方向の固有振動数6～10 Hz以下を目標とした。図3は、鉛振直方向の固有振動数が6 Hzで減衰が3%の免震防振積層ゴムと、鉛振直方向の固有振動数が15 Hzで減衰が3%の一般的な免震積層ゴムの鉛直方向の振動伝達率を比較した結果である。

列車振動が卓越する60 Hzにおける振動伝達率において、免震防振積層ゴムは一般的な免震積層ゴムの約6倍の防振性能になる。免震性能については、支承荷重1120 kNの2階建て建築で免震性能が発揮される周期1.5秒以上で、水平方向の限界ひずみ400%以上（一般的な免震積層ゴムと同等）を目標とした（表1参照）。

* 株式会社 竹中工務店

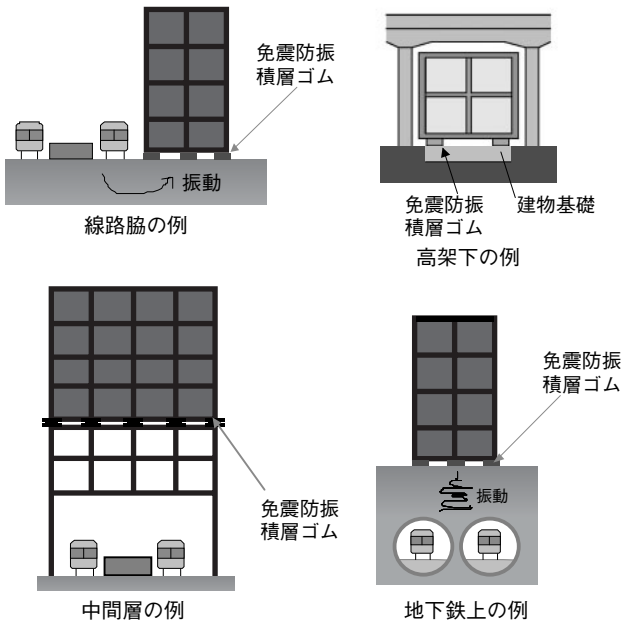


図1 免震防振積層ゴムを適用した建築イメージ

表1 各ゴム支承性能と免震防振積層ゴムの目標性能

機能	防振性能 (鉛直剛性)	免震性能 (水平剛性)
防振ゴム	微振動の低減 (機械・交通振動など)	柔 (f=5~10 Hz程度)
免震積層ゴム	地震応答の低減	硬 (f=15 Hz以上)
免震防振積層ゴム	上記2つの性能を両立	柔: 防振ゴム相当 (f=6~10 Hz程度) 硬: 免震ゴム相当 (f=0.67 Hz以上)

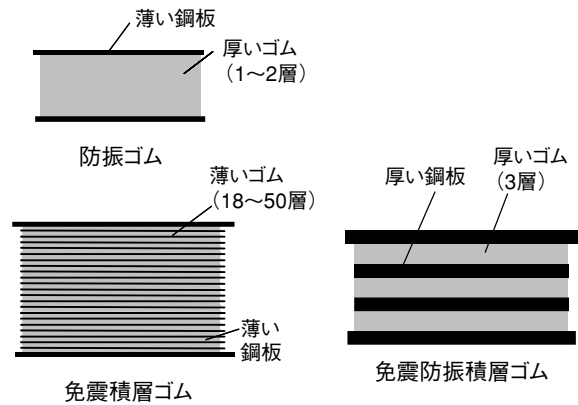


図4 各ゴム支承の形状

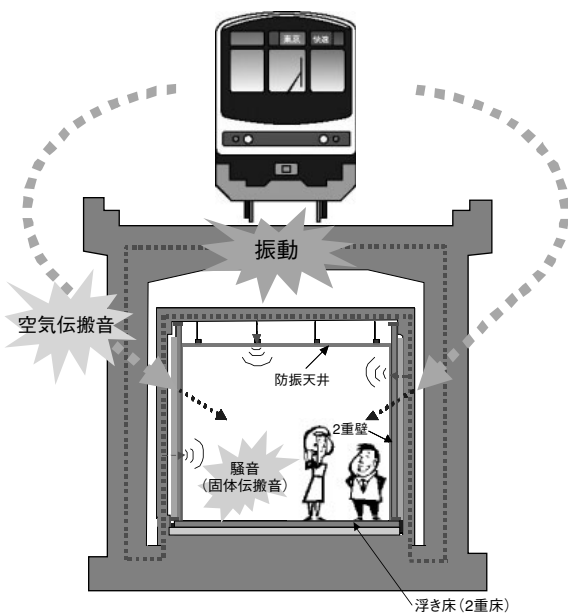


図2 高架下浮き構造物

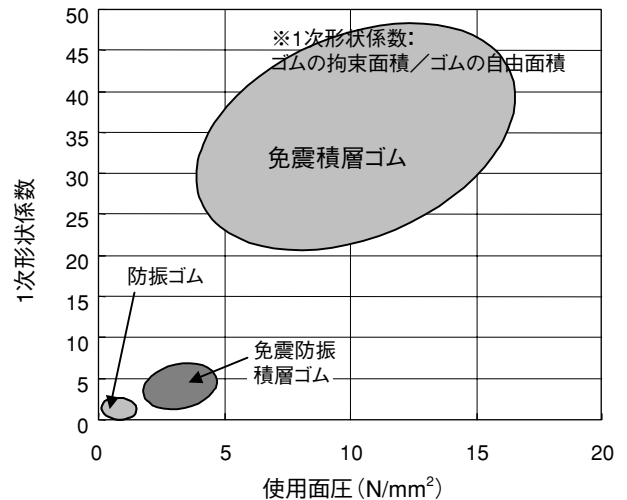


図5 各ゴム支承の1次形状係数と使用面圧

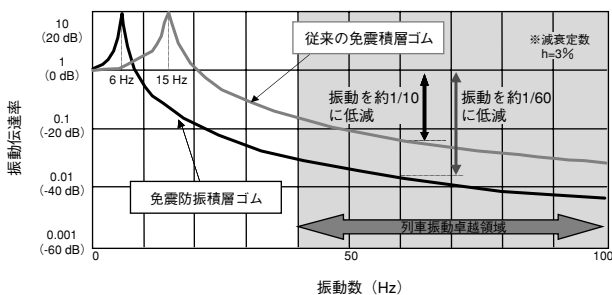


図3 各積層ゴムの振動伝達率

3. 免震防振積層ゴム開発の方策

これまでゴム支承は、一見して形が違う防振ゴムと免震積層ゴムの2タイプに機能分化している(図4参照)。ゴムの形状的特徴として防振ゴムは、1次形状係数が3程度以下で、層数1~2程度が一般的である。免震積層ゴムは、1次形状係数が30程度以上、層数30前後、中間鋼板は4 mm前後の薄いものが大半である。一方、使用面圧と1次形状係数に着目すると、防振ゴムは1次形状係数が小さく低面圧、免震積層ゴムは1次形状係数が大きく高面圧になる(図5参照)。

すなわち、これまでの防振ゴムと免震積層ゴムでは、1次形状係数、使用面圧、ゴム層数を相反する方向に開発することで機能の違いを明確化していたため、両者の間に活用されない領域が存在していた。免震性能と防振性能の両立を目的とした本開発では、この領域の積極的な活用を図った。

[具体的な方策]

防振性能については、目標値である鉛直方向の固有振動数6~10 Hz以下を満足するため、1次形状係数を4~6程度（ゴム1層あたり40~50 mm）の3層構造にすることで鉛直方向の柔軟性を高めた。免震性能については、目標値である水平方向の限界ひずみ400%以上を満足するため、中間鋼板をゴム1層と同程度の40~50 mmと厚くし、曲げ変形の抑制と局所的な応力集中の緩和を図った。また、中間鋼板を厚くすることは、加硫成形時の熱分布を均一化し、製品全体で均質かつ優れたゴム物性の確保に寄与すると考えた。面圧については、積層ゴムの座屈荷重に対する安全性の確保および、15~20%の圧縮ひずみを上限とする既往の防振ゴム設計法⁵⁾を踏まえ、基準面圧を2~5 N/mm²以上とした。ゴム材料については、鉄道振動などの微小振幅に対するひずみ依存性による剛性増加を小さくするため、カーボンブラックの少ない天然ゴムを採用した。

4. 製品構造

ゴム外径φ800 mm製品の詳細構造を表2および図6に示す。また参考としてφ1100製品の構造を表2に示す。

表2 ゴム外径φ800 mm, φ1100 mm製品の詳細構造

項目	免震防振積層ゴム ゴム外径φ800 mm	免震防振積層ゴム ゴム外径φ1100 mm
ゴム材料G	G=0.29 N/mm ²	G=0.29 N/mm ²
ゴム外径D (mm)	φ800	φ1100
ゴム内径d (mm)	φ80	φ80
ゴム層	41.9 mm×3層	46.4 mm×3層
ゴム総高さ ntr (mm)	125.7	139.2
1次形状係数S ₁	4.3	5.5
2次形状係数S ₂	6.4	7.9
中間鋼板	40 mm×2枚	45 mm×2枚
圧縮限界強度 (N/mm ²)	8.6	13.6
基準面圧σ ₀ (N/mm ²)	2.25	3.5
鉛直剛性 (×10 ³ kN/m)	173	474
水平剛性 (×10 ³ kN/m)	1.15	1.97
水平固有周期 (sec)	2.0	2.6

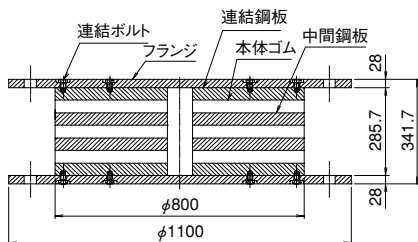
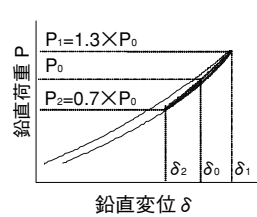


図6 φ800製品の詳細構造

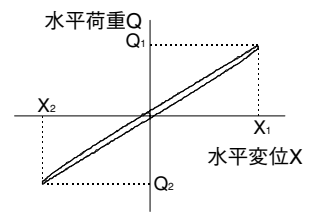
5. 基本特性

基本特性の鉛直剛性、水平剛性の算出方法を図7、図8に示す。また表3にφ800試験体の基本性能試験結果を、図9、図10に鉛直剛性、水平剛性測定時の荷重-変位関係を示す。鉛直剛性および水平剛性はほぼ設計値通りの値を得た。また、荷重-変位関係はほぼ線形であった。これらの静的な剛性測定結果から算出した鉛直固有振動数および水平固有周期は表3に示すように開発目標の範囲内であった。



$$\text{鉛直剛性 } K_V = \frac{P_1 - P_2}{\delta_1 - \delta_2}$$

図7 鉛直剛性の算出方法



$$\text{水平剛性 } K_H = \frac{Q_1 - Q_2}{X_1 - X_2}$$

図8 水平剛性の算出方法

表3 基本性能試験結果

項目	設計値 [開発目標]	試験結果		
		No1	No2	No3
鉛直剛性 (×10 ³ kN/m)	173 ± 20%	170 (0.0%)	178 (+0.3%)	171 (-0.1%)
水平剛性 (×10 ³ kN/m)	1.15 ± 15%	1.17 (+0.2%)	1.26 (+9.6%)	1.17 (+0.2%)
鉛直固有振動数 (Hz)	[6~10]	6.1	6.3	6.2
水平固有周期 (sec)	[1.5以上]	2.0	1.9	2.0

・試験結果欄の()内の数値は設計値偏差を示す。

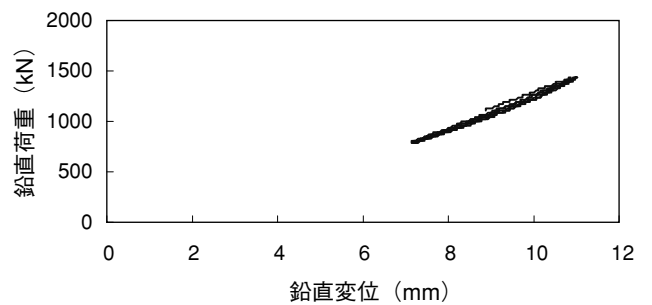


図9 鉛直荷重-鉛直変位関係 (No.1)

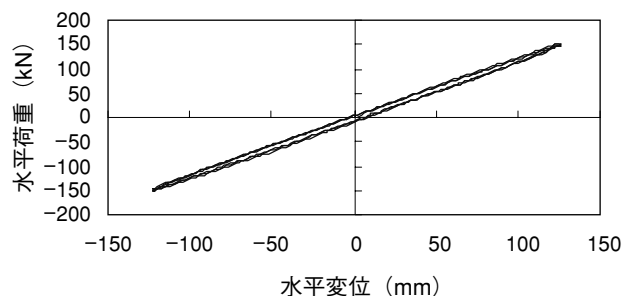


図10 水平荷重-水平変位関係 (No.1)

6. 水平特性の依存性

せん断ひずみ $\gamma = \pm 100\%$ における水平剛性の面圧依存性を図11に示す。横軸は各試験面圧 σ と基準面圧 σ_0 の比率を示し、縦軸は基準面圧 σ_0 で測定された水平剛性に対する各試験面圧 σ における水平剛性の比率を示す。同様に基準面圧 σ_0 で測定した水平剛性のひずみ依存性を図12に示す。横軸は各試験のせん断ひずみ γ を示し、縦軸は基準面圧 σ_0 における $\gamma = \pm 100\%$ の水平剛性に対する各せん断ひずみ γ での水平剛性の比を示す。図中には表4に示すゴム外径 $\phi 600$ mmの免震積層ゴム（以下RB600）の結果を併せて示している。 $\phi 800$ 試験体の面圧による水平剛性の変化率はRB600に比べ小さくなっている。このことから免震防振積層ゴムの基準面圧 σ_0 は、免震積層ゴムと比較して水平剛性に与える影響が少ない設定となっている。一方ひずみ依存性はRB600とほぼ同等な傾向を示している。図13は $\phi 800$ 試験体の $\gamma = \pm 100\%$ における荷重-変位関係を示す（荷重をオフセットして表示）。面圧 $\sigma = 1.125 \sim 4.50$ N/mm² ではほぼ線形な荷重-変位関係となり、圧縮限界強度を超える $\sigma = 9.0$ N/mm² においても復元力を維持していることを確認した。図14は $\gamma = \pm 400\%$ までの荷重-変位関係を示す。 $\phi 800$ 試験体は $\gamma = 300\%$ 程度までほぼ線形な荷重-変位関係を有することを確認し、 $\gamma = 400\%$ においても座屈・破断は認められなかった。

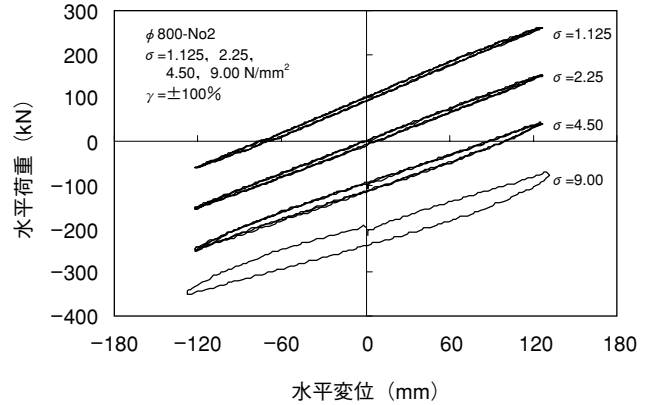


図13 面圧依存性試験結果

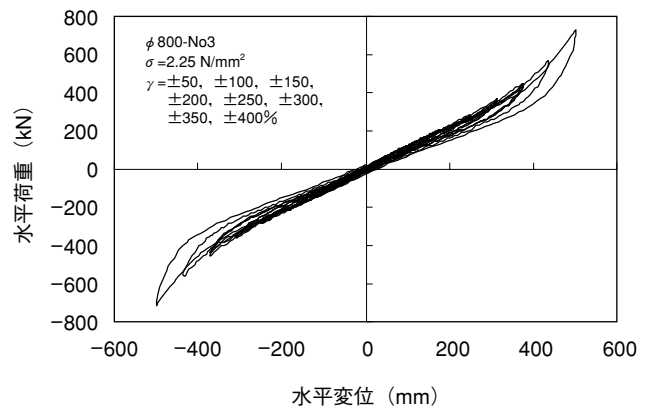


図14 ひずみ依存性試験結果

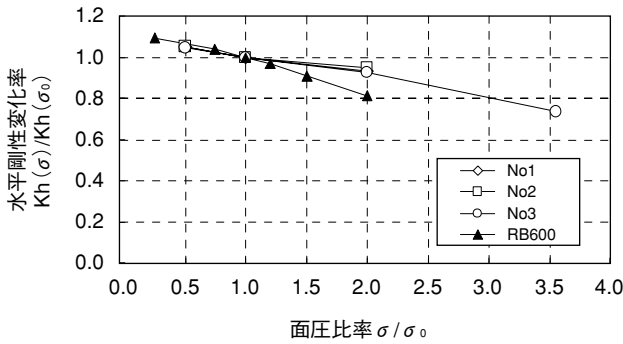


図11 水平剛性の面圧依存性

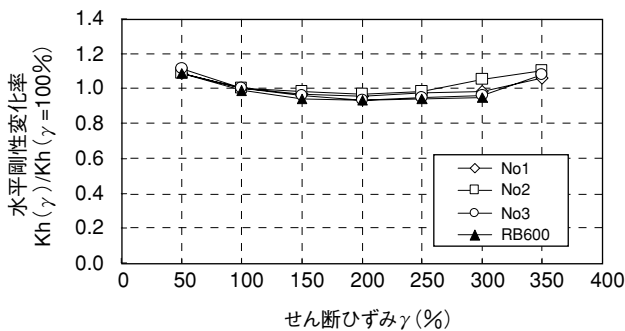


図12 水平剛性のひずみ依存性

表4 比較試験体諸元

項目	免震防振用		免震用	
	$\phi 800$	$\phi 520$	RB600	RB500
ゴム材料G	天然ゴム G=0.29 N/mm ²			
ゴム外径/内径 (mm)	800/80	520/52	600/30	500/20
ゴム厚 (mm) × 層数	41.9 × 3	27.2 × 3	4.5 × 26	3.75 × 26
S ₁ / S ₂	4.3/6.4	4.3/6.4	31.7/5.1	32.0/5.1
圧縮限界強度 σ_B (N/mm ²)	8.6	8.6	49	49
基準面圧 σ_0 (N/mm ²)	2.25	2.25	10	10

7. 水平特性の限界性能

$\phi 800$ 試験体で実施した高面圧または高せん断ひずみでの圧縮せん断試験では座屈および破断は発生しなかった。今回の試験で実施した面圧-せん断ひずみの最大値の条件を図15に示す。横軸は水平変形量 δ をゴム外径Dで除した変形率、縦軸は試験面圧 σ を圧縮限界強度（以下 σ_B ）で除した荷重載荷率を示す。なお式1⁶⁾ から算出した $\phi 800$ 試験体の σ_B は 8.6 N/mm² である。図中にはRB600で実施した高せん断ひずみ試験条件も併せて示した。免震積層ゴ

ムの安定限界変形の下限值として図15の破線が提案されている⁶⁾⁷⁾。

今回の評価で免震防振積層ゴムでも免震積層ゴムと同様に安定限界変形の下限値を適用できることを確認した。

$$\sigma_B = \zeta \cdot G \cdot S_1 \cdot S_2$$

$$\zeta = \pi \sqrt{\frac{k}{8(1+2kS_1^2G/E_b)}} \quad S_1 = \frac{D-d}{4t_r} \quad S_2 = \frac{D}{nt_r} \quad (\text{式1})^6$$

k : ゴムの硬度に応じた補正係数 E_b : 体積弾性係数 (N/mm²)

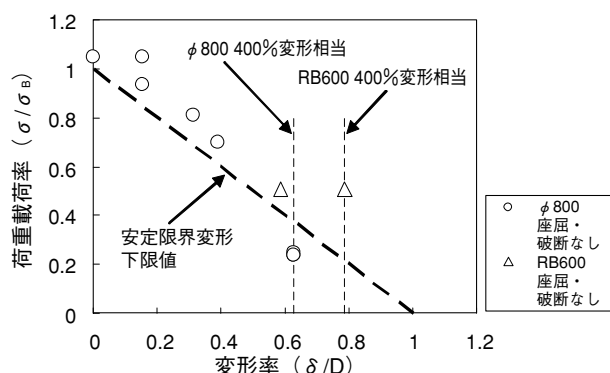


図15 限界性能試験結果

8. 長期耐久性 (クリープ特性)

免震積層ゴムには鉛直荷重を長期間支持する間に製品高さの低下が進行するクリープ現象が発生する。φ520試験体(表4参照)を用いて基準面圧2.25 N/mm²下のクリープ試験を実施した。結果を図16に示す。また比較のためRB500(表4参照)の面圧12.5 N/mm²での試験結果も併せて示す。φ520試験体のクリープ変位はRB500に比べ若干変動が大きいものの顕著な差が無いことを確認した。

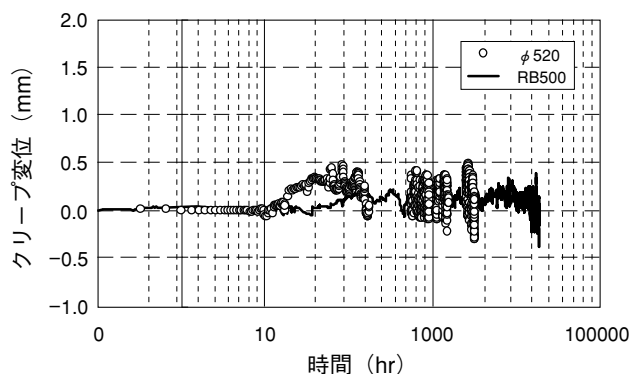


図16 クリープ試験結果

まとめ

免震防振積層ゴムの適用対象建物, 製品構造および製品特性について実験結果を交え紹介した。

免震防振積層ゴムは地震対策, 振動対策に有効な免震部材であり, 今後より多くの免震建物へ採用されることを期待する。

参考文献

- 1) 五十嵐, 鈴木他: 免震防振積層ゴムの開発 (その1~4), 日本建築学会大会 (九州), 2007
- 2) 五十嵐, 鈴木他: 免震防振積層ゴムの開発 (その5~7), 日本建築学会大会 (中国), 2008
- 3) 石橋他: 高い静粛性を実現した吊り免振工法による高架下ホテルの設計・施工, コンクリート工学 Vol. 42 No. 7, 2004
- 4) 五十嵐他: 吊り免振工法による鉄道高架下建物に関する研究 (その3), 日本建築学会大会 (北海道), 2004
- 5) 社団法人 日本鉄道車輛工業会発行, 改定新版 防振ゴム, 現代工学社, 昭和50年
- 6) 「免震構造設計指針」, 日本建築学会, 2001年改訂 P33
- 7) 高山峯夫他, 多田英之監修 P73: 4秒免震への道, 理工図書, 2007

昭和電線デバイステクノロジー(株)

柳 勝幸 (やなぎ まさゆき)

免制震制音ユニット 免制震部 技術課 主査

免震装置の開発および設計に従事

昭和電線デバイステクノロジー(株)

福田 滋夫 (ふくだ しげお)

免制震制音ユニット 免制震部 製造課長

免震装置の製造に従事

昭和電線デバイステクノロジー(株)

加藤 直樹 (かとう なおき)

免制震制音ユニット 免制震部 技術課長

免震装置の開発および設計に従事

昭和電線デバイステクノロジー(株)

青木 伸夫 (あおき のぶお)

免制震制音ユニット 免制震部長

昭和電線デバイステクノロジー(株)

村松 佳孝 (むらまつ よしたか)

免制震制音ユニット長

株式会社 竹中工務店

五十嵐信哉 (いがらし しんや)

先進構造エンジニアリング本部

株式会社 竹中工務店

鈴木 庸介 (すずき ようすけ)

先進構造エンジニアリング本部