

竣工後 30 年経過した免震建物と天然ゴム系積層ゴムの性能検証

Aged Deterioration of the Base-isolated Building and Natural Rubber Bearing after 30 years

三須基規
Motoki MISU

清水美雪
Miyuki SHIMIZU

福田滋夫
Shigeo FUKUDA

加藤直樹
Naoki KATO

山上 聡*
Satoshi YAMAGAMI

上 寛樹*
Hiroki UE

舟木秀尊*
Hidetaka FUNAKI

小山慶樹*
Yoshiki KOYAMA

高山峯夫**
Mineo TAKAYAMA

1980年代に実用化された免震構造は長期的な経年変化の検証が求められている。そこで竣工後30年経過した免震建物に自由振動試験等を実施した後、建物から積層ゴムを抜取って限界変形試験を実施した。

その結果、竣工後30年経過した建物の免震性能の変化は当初の予想範囲内であった。また抜取った積層ゴムの水平方向変形性能は製作時と同等以上で、十分な変形能力を有していることが確認できた。

For demand to tendency of aged deterioration about isolated structure and rubber bearing since 1980's developed, we have tested the performance of the based-isolated building and natural rubber bearing removed from this building.

As a result, aged deterioration of this building is within the range of expectation. In addition, sufficient deformation capability of this rubber bearing has been confirmed.

1. はじめに

ゴムを用いた免震構造は海外で開発され、国内ではまず橋梁分野で実用化された。水平方向の剛性が低く、大変形できる積層ゴムが必要な建築分野では1983年に国内初の免震建物「八千代台住宅」が完成している¹⁾。

その実現に尽力した福岡大学多田研究室は国内の地震動には更に低剛性で大変形できる積層ゴムによる免震構造が必要と判断され、建設会社やメーカーとの共同研究を推進した。

この取り組みの一環として1985年から開発された積層ゴム25体（直径φ500mm、ゴム厚さ7mm×14層）は、福岡大学多田研究室による全数試験で製品性能を確認後、1986年に奥村組技術研究所管理棟に設置された。これが、昭和電線製積層ゴムの第一号納入件名である。

1986年は他にも免震建物が相次いで完成^{2,3)}しているが、研究者と建物設計・施工者とメーカーが建物や積層ゴムの性能を竣工時から継続評価（表1）している例は他に無いため、2017年には第18回日本免震構造協会普及賞を株式会社奥村組と共同受賞している。

本書では一連の活動のうち、2016年に実施した「建物の自由振動試験」と、2017年に実施した「建物に使用された積層ゴムの限界変形試験」について報告する。



図1 奥村組技術研究所管理棟

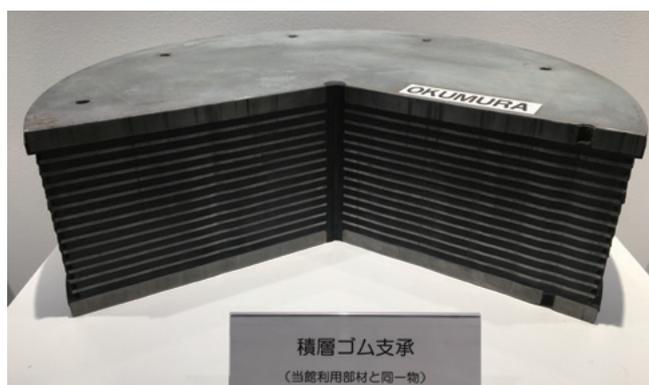


図2 積層ゴムφ500モデル

* 株式会社奥村組

** 福岡大学

表 1 奥村組技術研究所管理棟の評価履歴：着色部が本書

時期	経過年数	評価内容						備考
		建物(図1)の自由振動試験・静的加力試験	積層ゴム(図2)				奥村組	
			建物に使用した製品		同ロット製作の別置試験体			
		奥村組	福岡大学	昭和電線	福岡大学	昭和電線		
1986年	竣工	実施	実施		実施			参考文献4)
1987~1993年	1~7	実施(1年目)					実施	参考文献5)
1997年	11					実施	実施	
2005年	19	実施						参考文献6)
2007年	21				実施			参考文献7)
2010年	24					実施		
2016年	30	実施				実施		参考文献8)
2017~2018年	31	2体抜き取り前後で実施	2体抜き取り、うち1体を限界変形試験					参考文献9)

2. 建物の自由振動試験

開発時から積層ゴムの使用期間は60年以上が想定されたので、奥村組技術研究所管理棟(茨城県つくば市)は建物の性能を評価できる構造で設計・施工されている。

油圧ジャッキで建物を水平方向に100mm変形させた状態(図3, 図4)から急速解放する自由振動試験の結果(図5), 30年経過した積層ゴムの水平剛性は竣工時に対して約9%増加していた。建物を水平方向に0~100mm×3サイクル加振させる静的加力試験から得られた水平剛性からも、積層ゴムの経年変化は開発時にゴム材料の熱老化試験結果から予測された性能変化率17%以内で推移していることが確認された(図6)。

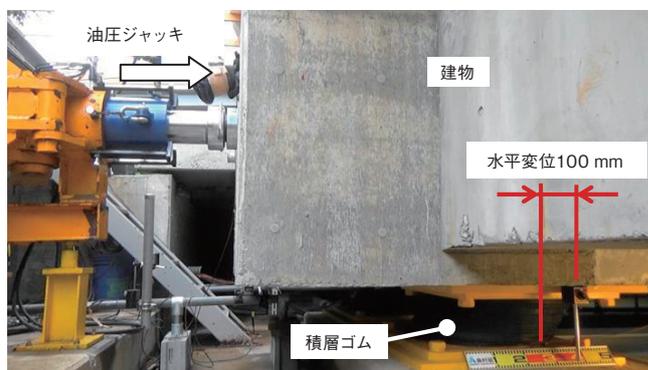


図4 油圧ジャッキによる加力状態

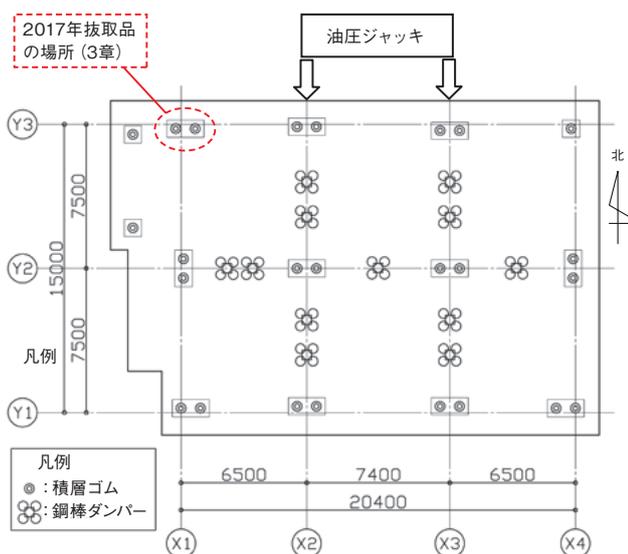


図3 積層ゴム及び鋼棒ダンパー配置図

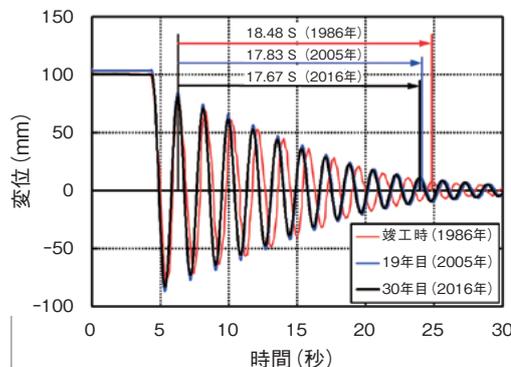


図5 自由振動試験の変位時刻歴波形

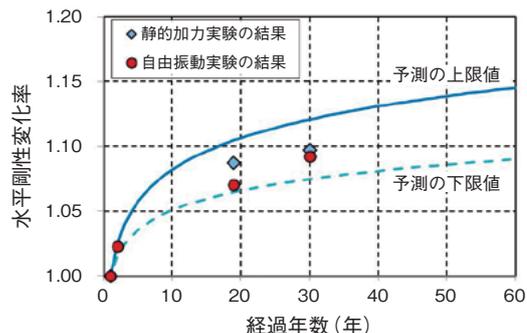


図6 開発時の予測と測定値の比較

3. 積層ゴムの抜取り評価

当時の昭和電線製積層ゴムは、現在より形状係数 S1 と天然ゴムの重量比が小さい（表 2）ので酸化劣化しやすい可能性がある。今後も建物の検証を継続できるように当時のゴム材料配合を復元した積層ゴムを 2 体新規製作して図 3 の位置に示す積層ゴム 2 体と交換した（図 7）。

表 2 昭和電線製積層ゴム仕様

項目		1986 年当時 A40-500 × 7-14	現在の例 R40-500-3.75 × 26
形状係数	1 次 S1	17.1	20 ~ 40
	2 次 S2	5.1	3.5 以上
ゴム物性	せん断弾性率 [N/mm ²]	規定無し	0.44
	硬さ (JIS A)	40 ± 3	40 ± 5
	低伸長 25% 応力 [N/mm ²]	0.26 ± 0.098	規定無し
	100% 引張応力 [N/mm ²]	規定無し	0.9 ± 0.2
	切断時伸び [%]	600 以上	
切断時引張応力 [N/mm ²]	15.7 以上		
重量比 [%]	天然ゴム	55	75
	カーボンブラック	18	15
	加硫剤	3	10
	その他	24	

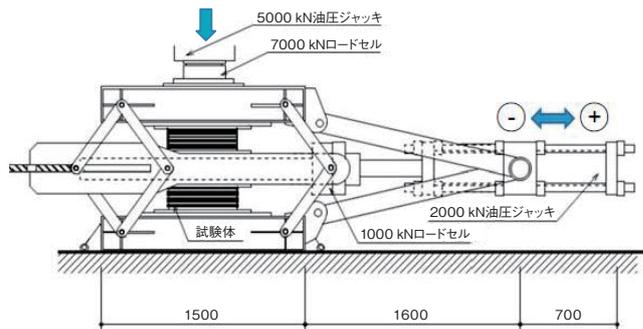


図 8 福岡大学所有試験機

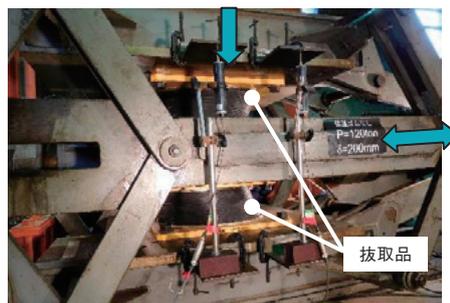


図 9 福岡大学所有試験機での試験状況

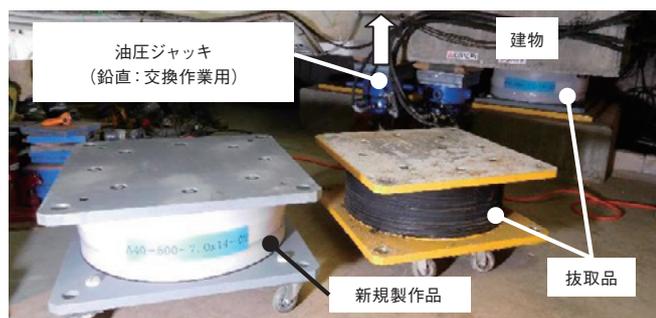


図 7 積層ゴムの交換

3.1 同一試験機での基本性能評価

建物からの採取品 2 体を、1986 年納入時と同じ福岡大学所有試験機（図 8）を用いて、同様に 2 体 1 セット（図 9）で基本性能を測定した。この 2 体は 1986 年納入時と同じ組み合わせで測定している。加振条件は鉛直荷重 1176 kN（= 建物の設計荷重：面圧 6 N/mm²），せん断変形率 ± 100% と ± 200% を建物南北方向に 3 サイクル加振して得られた荷重の 1/2 値を採取品 2 体の平均値とする。

積層ゴム 25 体で支持された建物を複数回静的加力して、得られた荷重を 1/25 倍して積層ゴム 1 体あたりの水平方向荷重 - 変位関係 1 サイクル分として比較したものを図 10 に示す。採取品の 1 サイクル目は建物の静的加力から得た荷重 - 変位関係に殆ど重なった。ゴムの大変形に伴う応力低下（Mullins 効果）で 2 サイクル目以降は荷重が下がるため、各 1 サイクル目を同じ方法で竣工時と比較したものを図 11 に示す。採取品は竣工時も経年変化後も建物を支持する積層ゴム 25 体の平均的な性能を有すると考えられる。

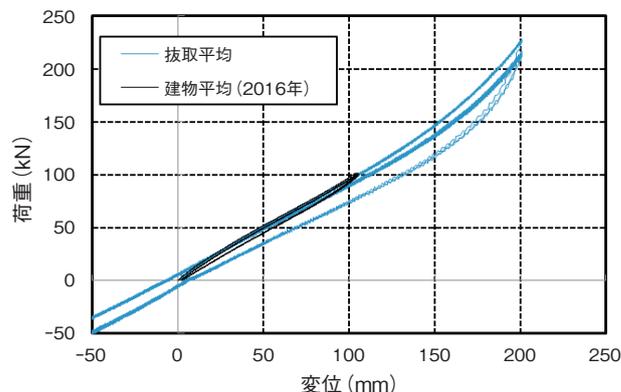


図 10 建物の静的加力試験と採取品を積層ゴム 1 体あたりの水平方向荷重 - 変位関係で比較した結果

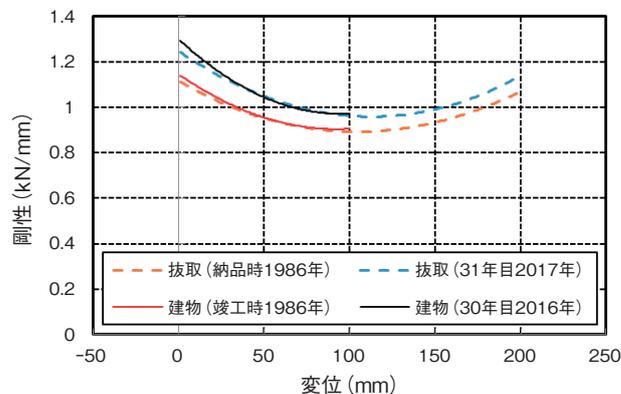


図 11 建物の静的加力試験と採取品の水平剛性を竣工時と比較した結果

3.2 限界変形試験

抜取品の1体を、昭和電線所有 25MN 試験機 (図 12) を用いて建物南北方向に加振して限界変形性能を確認した。加振条件を表 3、せん断変形時の外観を図 13 ~ 図 14、水平方向荷重 - 変位関係を図 15 に示す。

せん断変形率 ± 300% 以降の正負変位 250 mm ~ 280 mm 間の水平荷重の変動は試験機とフランジ間が滑ったためゴムに異常は認められなかった。またせん断変形率 ± 350% 加振時でゴム表面に亀裂が発生したものの荷重 - 変位関係に影響を与えず水平荷重は増加を続けており、支承能力に問題は無いと判断して試験を継続した。せん断変形率 ± 400% 加振でも同様の傾向が継続されたが、安全確保及び今後の評価のため破断させず途中で試験を中止した。

過去に実施された型式と鉛直面圧が同じ当社積層ゴムの一方向加振破断試験¹⁰⁾から読み取り SI 単位換算したせん断応力との比較を表 4 に示す。抜取品のせん断応力が若干増加したのは経年変化によるものと推定される。しかし、それでも十分な変形能力を有していたと言える。

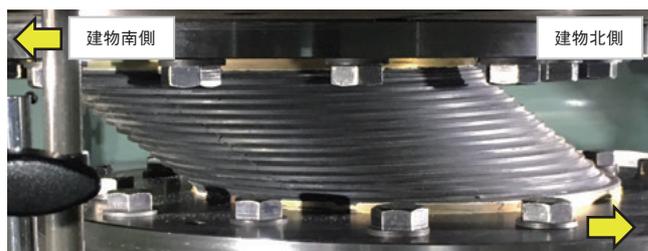


図 13 せん断変形率 ± 300% 加振時の外観

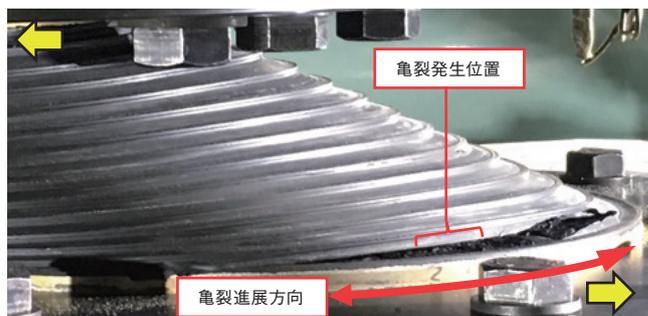


図 14 せん断変形率 ± 400% 加振時の外観

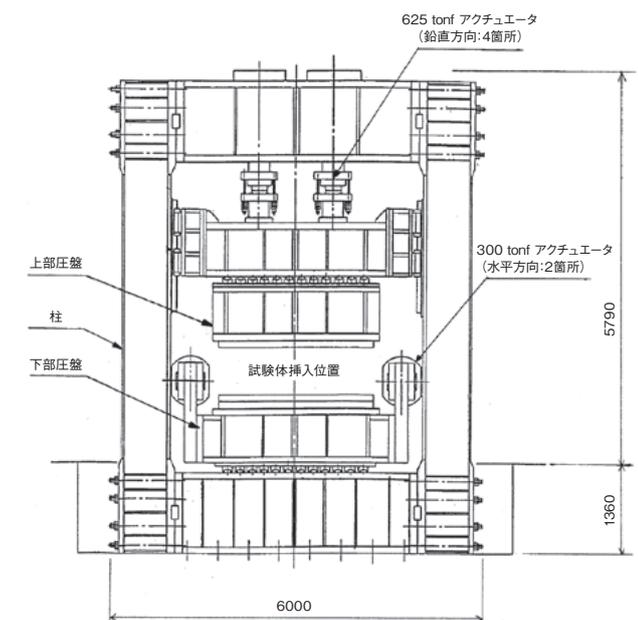


図 12 昭和電線所有 25MN 試験機

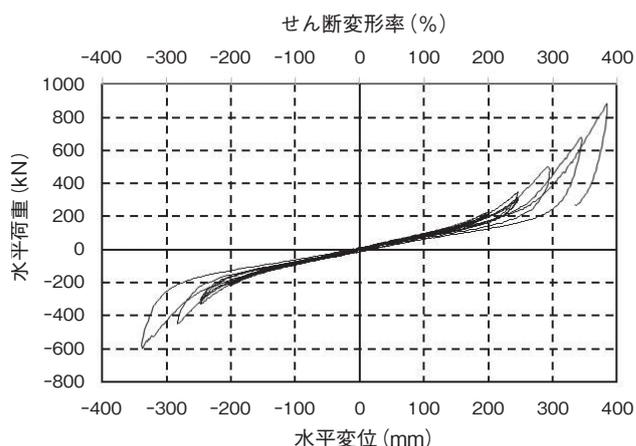


図 15 水平方向荷重 - 変位関係

表 4 過去の一方向破断試験との比較

せん断変形率 [%]	せん断応力 [N/mm ²]	
	過去の一方向加振破断試験 ¹⁰⁾	今回の引取品 ± 400% 加振時
+ 100	約 0.4	0.47
+ 350	約 2.8	2.83
+ 360 ~ + 370	約 3.1 (破断)	3.16 ~ 3.50

表 3 限界変形試験加振条件

鉛直方向 面圧 [N/mm ²]	水平方向			
	せん断変形率 [%]	せん断変位 [mm]	速度 [mm/s]	サイクル
6	± 100	± 98	5	3
	± 153	± 150		
	± 200	± 196		
	± 250	± 245	3	1
	± 300	± 294		
	± 350	± 343		
	± 400	± 392		

4. ま と め

竣工後 30 年経過した免震建物に自由振動試験等を実施した結果、その経年変化は当初の予想範囲内であった。

建物から抜取った積層ゴム 2 体の水平剛性平均値は、建物の静的加力試験結果と同等と考えられる。また 1 体に限界変形試験を実施したところ、製作時と同等以上の十分な変形能力を有していることが確認された。

今後もゴム材料の特性評価等を実施して、積層ゴムの経年変化の研究を継続する予定である。

謝 辞

この「竣工後 30 年経過した免震建物の自由振動試験」は 2016 年 11 月に一般公開され、テレビ等のメディアにも免震構造の長期使用を検証した結果として紹介されました。

事例が殆ど無かった時期に、免震建物の設計とその実現に尽力された株式会社東京建築研究所殿や奥村組及び当社の先輩方が数十年後を見据えた取り組みをされたため貴重なデータを測定できました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 例えば一般社団法人日本ゴム協会及び一般社団法人日本免震構造協会編：「改訂版 設計者のための建築免震用積層ゴム支承ハンドブック」(2017)
- 2) 谷 佑馬，他：「約 30 年間使用した積層ゴムの経年変化（その 1～その 2）」，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.943～946 (2017)
- 3) 長弘健太，他：「竣工後 30 年を経過した LRB の経年変化」，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1001～1002 (2018)
- 4) 例えば多田英之，他：「免震アイソレータの開発」，昭和電線電線レビュー，Vol.36，No.1，pp.109～119 (1986)
- 5) 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，pp.596～570 (1997)
- 6) 安井健治，他：「免震建物に設置された積層ゴムの経年変化」，日本建築学会技術報告集，第 24 号，pp.167～170 (2006)
- 7) 柳 勝幸，他：「天然ゴム系積層ゴムの経年変化に関する研究」，昭和電線レビュー，Vol.59，No.1，pp.68～72 (2012)
- 8) 山上 聡，他：「竣工後 30 年経過した免震建物に設置された天然ゴム系積層ゴムの経年変化」，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.937～938 (2017)
- 9) 山上 聡，他：「竣工後 30 年経過した免震建物から採取した天然ゴム系積層ゴムの性能検証（その 1～その 2）」，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.997～1000 (2018)
- 10) 日本建築学会：「免震構造設計指針（第 2 版）」，p.309 (1993)

昭和電線ケーブルシステム(株)
三須 基規 (みす もとき)
デバイスユニット 免制震部 技術・品質保証課 主査
免制震製品の設計・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
清水 美雪 (しみず みゆき)
デバイスユニット 免制震部 技術・品質保証課 主査
免震製品の設計・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
福田 滋夫 (ふくだ しげお)
デバイスユニット 免制震部 技術・品質保証課長

昭和電線ケーブルシステム(株)
加藤 直樹 (かとう なおき)
デバイスユニット 免制震部長

株式会社奥村組
山上 聡 (やまがみ さとし)
技術研究所 建築研究グループ 主任研究員

株式会社奥村組
上 寛樹 (うえ ひろき)
技術研究所 建築研究グループ長

株式会社奥村組
舟木 秀尊 (ふなき ひでたか)
技術研究所 建築研究グループ 構造チームリーダー

株式会社奥村組
小山 慶樹 (こやま よしき)
技術研究所 建築研究グループ 主任研究員

福岡大学
高山 峯夫 (たかやま みねお)
工学博士
工学部 建築学科 教授