

実建物で供用している積層ゴムの経年変化

－天然ゴム系積層ゴムのクリープ－

The Aging of Rubber Bearings in an Actual Building

- Creep Characteristics of Natural Rubber Bearing -

山上 聡* 上 寛樹* 舟木秀尊* 小山慶樹*

要 旨

免震建物の主要構造部材である積層ゴムの経年特性として、水平剛性の変化とクリープ変形の把握が重要である。しかし、これらは熱老化促進試験等からの予測によるものが多く、経年特性の信頼性を高めるには追跡調査等による検証が必要である。そこで、筆者らは積層ゴムのクリープ特性を把握するために、実建物（1986年9月竣工）で供用中である天然ゴム系積層ゴムの高さの変化量を竣工以来33年間計測してきた。その結果、天然ゴム系積層ゴムのクリープによる鉛直方向の変化量は33年間で2.5mm程度であり、設計の想定内で推移していることを確認した。

キーワード：天然ゴム系積層ゴム、経年変化、クリープ

1. まえがき

免震構造では、積層ゴムで建物を支持することにより、上部構造物が地震被害から守られている。そのため、積層ゴムについて、地震時の建物の応答に関する力学的特性だけでなく、長期間における耐久性についても正確に把握する必要がある。主要構造材料である積層ゴムには建物の法定耐用年数以上の耐用年数が求められるが、他の構造材料に比べてゴム材料は経年変化が大きいことが知られている。そのため、設計では建物の供用期間における積層ゴムの経年変化（特に、剛性変化やクリープ変形）を考慮するが、その多くは熱老化促進試験等による予測値に基づいている。また、積層ゴムが実建物に適用されて40年弱であり、建物の耐用年数における経年変化量を実証したデータがないため、設計では変化量に余裕を見る必要がある。さらに、設計を合理化するには、予測精度を向上させる必要があり、実建物等の追跡調査による検証が必要とされている。そこで、筆者らは、33年前に竣工した免震建物を対象として、天然ゴム系積層ゴム（以下、NRB）の水平剛性やクリープ変形等の経年変化に関する追跡調査¹⁾を実施してきた。これまでの調査の結果、NRBの水平剛性については、30年で9%高くなっており、これは、設計時の予測の範囲内であることを報告した^{2)~5)}。

一方、免震構造では、上部建物と擁壁頂部等との垂直クリアランスを確保する必要があり、その寸法は、積層ゴムのクリープを考慮して決められる。この場合、ク



写真－1 対象建物

表－1 建物概要

項目	諸元	
竣工	1986年9月	
構造	鉄筋コンクリート造4階 基礎免震	
高さ	15.5m	
建築面積	348.18m ²	
延べ床面積	1,330.1m ²	
軒高	13.75m	
免震装置	積層ゴム	天然ゴム系積層ゴム φ500×25
	ダンパー	鋼棒製ダンパー φ50×12

リープ変形量が、5%程度なら設計上問題ないといわれている⁶⁾。また、建物全体でクリープ変形が均一に生じる場合は建物に与える影響は少ない。しかし、不均一なクリープ変形が過大に生じると、床に不陸が生じたり、梁に余分な応力が生じるなど、建物に悪影響を及ぼす可能性があるため、その変形量を正確に把握する必要がある。

*技術研究所建築研究グループ

弊社では、実建物で供用中である積層ゴムの高さを竣工時から計測してきており、本年度で 33 年分のデータが得られている。そこで、本研究では、そのデータを分析してこれまでのクリープ変形量を把握し、設計値と比較した結果について報告する。

2. 対象建物および免震装置

対象となる免震建物は、つくば市内に建設された奥村組技術研究所の管理棟であり、1986年9月に竣工している。対象建物を写真-1に、建物概要を表-1に示す。免震装置には、NRB25 基と、鋼棒製ダンパー12 基を使用している。免震装置の概略図を図-1、免震装置の諸元を表-2、免震装置の配置を図-2に示す。NRB のゴム径は 500mm、ゴム層は 7mm×14 層でありゴム総厚は 98mm、鉛直・曲げ剛性の指標となる1次形状係数 S1 は 17.1、座屈荷重や水平剛性の指標となる2次形状係数 S2 は 5.1 である。ゴム材料のせん断弾性率 G は 0.44N/mm²相当である。

本建物は、2005年5月から8月(約6900日目)にかけて、内外装および設備機器のリニューアル工事を行ったが、重量の大きな変化はない。また、2017年12月(約11400日目)に、X1-Y3通りのNRB25基を経年変化に関する要素実験のために抜き取り、新規の同等品と交換している。

3. 計測位置と計測方法

積層ゴム高さの計測点を図-3に、計測状況を写真-2に示す。計測対象は25基のNRB全数とし、各NRBのフランジプレート間の四隅の高さを台座に固定したダイヤルゲージを用いて計測し、竣工時からの高さの変化量(以下、変化量、NRBが縮む側を正值とする)と計測時のピット内温度を記録している。

計測時期は、変化量が多いと考えられる竣工後1年間は月1回、変化量が安定してきた2年目以降では年2回(免震層内の温度変化の影響を考慮し、毎年夏、冬の各1回)としている。

4. 計測結果

4.1 個々のNRBのクリープ変化量

個々のNRBのクリープ変化量について、図-4に示す。なお、クリープ変化量は支承四隅の変化量の平均値であり、後述する建物全体での温度補正式を用いて個々のNRBの温度補正を行った。また、経過日数は竣工時(1986年9月19日)を0日とした。個々のクリープ変化量を見ると、外周部にあたる西側のX0通り、南側のY1通り、東側のX4通りは2~3mm程度であるのに対

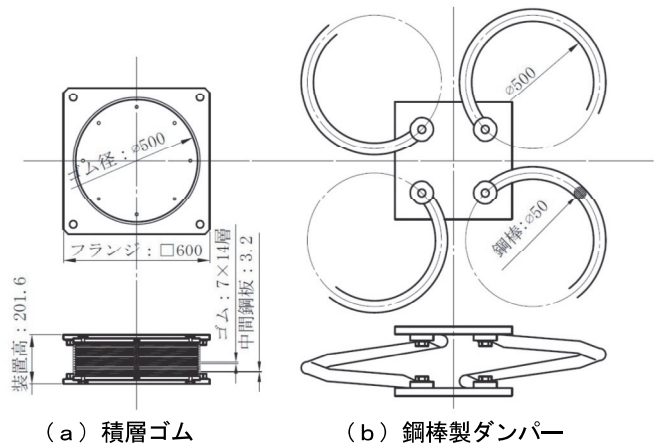


図-1 免震装置概略図

表-2 免震装置諸元

項目		諸元	
種類と型式		天然ゴム系積層ゴム A40-500×7-14	
ゴム特性 (SI単位換算)	硬さ (JISA)	40±3	
	25%応力	0.265±0.098 N/mm ²	
	伸び	600%以上	
	引張強さ	15.7 N/mm ² 以上	
形状	本体ゴム	φ500 t=7mm 14層	
	形状 係数	1次 S1	17.1
		2次 S2	5.1
種類と型式		鋼棒製ダンパー	
鋼棒	材質	S20C (JIS051)	
	形状	ループ状鋼棒 50φ (ループ径 550φ 4本)	

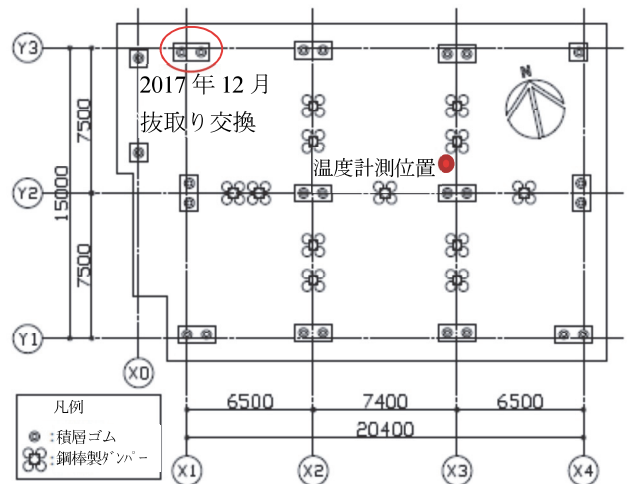


図-2 免震装置の配置

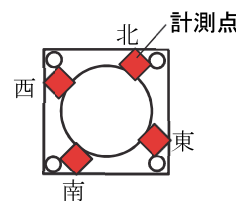


図-3 NRBの計測点

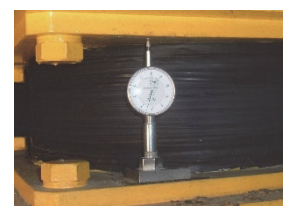


写真-2 計測状況

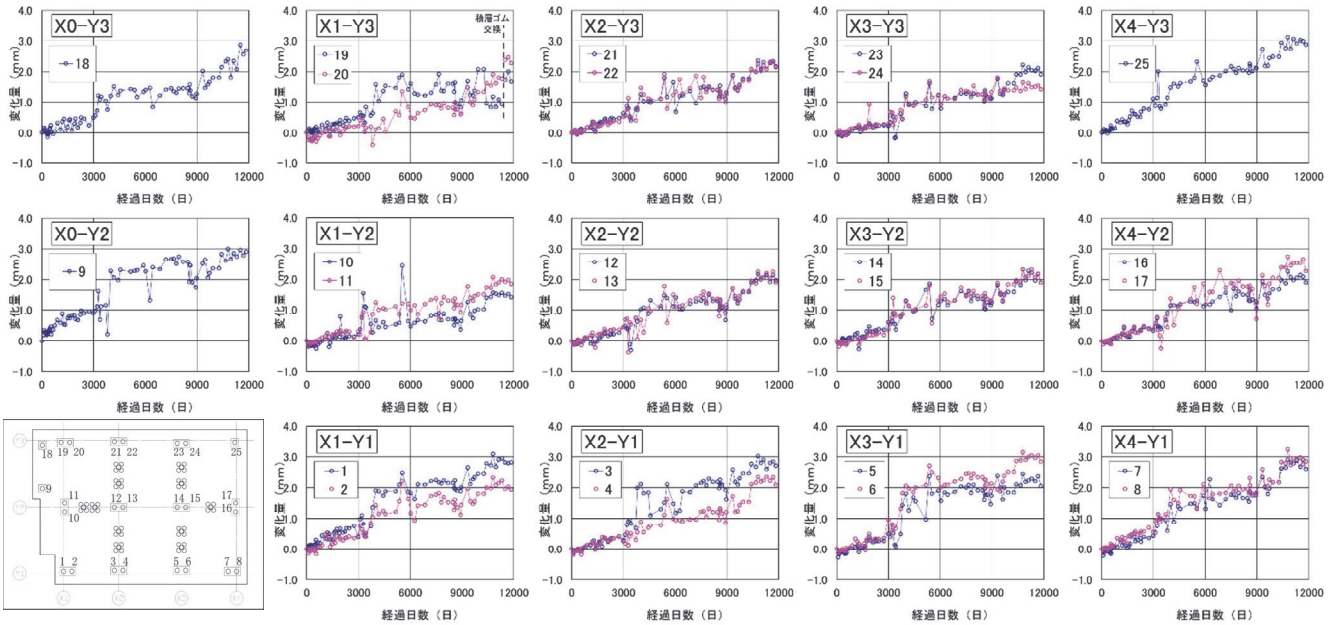


図-4 NRBの配置と単体のクリープ変化量

表-3 設計軸力とクリープ変化量

積層 ゴム	設計軸力 N	鉛直剛性 Kv	負担軸力 N2	面圧*	変化量 (mm)
	(kN)	(kN/mm)	(kN)	Mpa	
1	1586.0	1190.7	756.6	3.85	2.82
2		1305.4	829.4	4.22	1.94
3	1839.7	1177.0	949.5	4.84	2.71
4		1103.5	890.2	4.53	2.11
5	1866.9	1267.1	945.2	4.81	2.06
6		1235.8	921.8	4.69	2.84
7	1593.5	1367.1	830.7	4.23	2.62
8		1255.4	762.8	3.89	2.86
9	712.2	1348.5	712.2	3.63	2.90
10	1794.6	1188.7	863.5	4.40	1.41
11		1281.8	931.1	4.74	1.84
12	2395.9	1258.3	1214.5	6.19	1.96
13		1224.0	1181.4	6.02	1.90
14	2187.3	1162.3	1051.6	5.36	1.90
15		1255.4	1135.8	5.78	1.90
16	1618.0	1190.7	773.0	3.94	1.90
17		1301.4	844.9	4.30	2.27
18	712.2	1276.9	712.2	3.63	2.68
19	1388.7	1253.4	668.5	3.40	1.67
20		1350.4	720.2	3.67	2.27
21	1738.2	1168.2	767.1	3.91	2.16
22		1478.8	971.1	4.95	2.14
23	1493.0	1322.0	752.9	3.83	1.91
24		1299.5	740.1	3.77	1.42
25	1123.7	1306.3	1123.7	5.72	2.88
平均		1262.75	882.00	4.49	2.20

*面圧＝負担軸力／ゴム層断面積

■ : 外周部積層ゴム ■ : 内側、北側積層ゴム

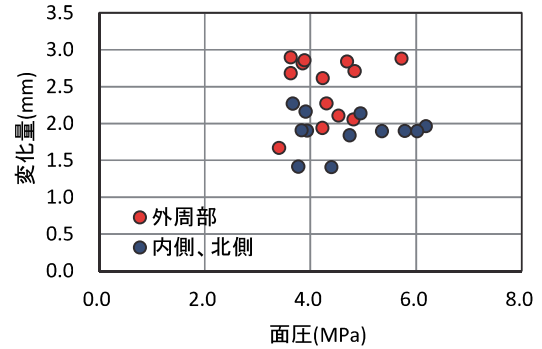


図-5 面圧とクリープ変化量の関係

し、中側、北側は1.5～2mm程度であった。スパン間の最大傾斜は、大きく見ても1/2000程度であり、クリープ変形が建物に悪影響を及ぼす程の差は生じていない。そこで、個々の負担軸力とクリープ変化量について調べた結果を、表-3に示す。当建物では、ほとんどの場所で、1つの柱の下に2基のNRBが配置されている。そこで、各柱位置の設計軸力を製品検査時の鉛直剛性の比で配分し、個々の負担軸力と面圧を求めた。当建物におけるNRBの面圧とクリープ変化量の関係を図-5に示す。個々のNRBの面圧は3.40～6.19MPa、クリープ変化量は1.41～2.90mmであった。当建物で使用されている面圧の範囲では、クリープ変化量との関係に有意な関係は見られなかった。この検討は設計軸力に基づく簡易検討であり、クリープの進行による装置高さの変化で軸力が再配分され面圧が変動していることが予想されるので、現時点で詳細な評価はできないが、比較的低面圧で使用している本建物においてはクリープ変形と面圧の有意な関係は見られなかった。

4.2 建物全体でのクリープ変化量

全NRBの変化量の平均値(以下、平均変化量)と計

測時の免震層内の温度を時系列で図-6に示す。なお、図中の赤丸で示した、2009年11月(約8400日目)と2013年12月(約10000日目)にはダイヤルゲージの交換と、フランジプレートの塗装をそれぞれ行った関係で、計測値が不連続となったため、この2か所については後のデータを前のデータに一致させて扱うこととする。

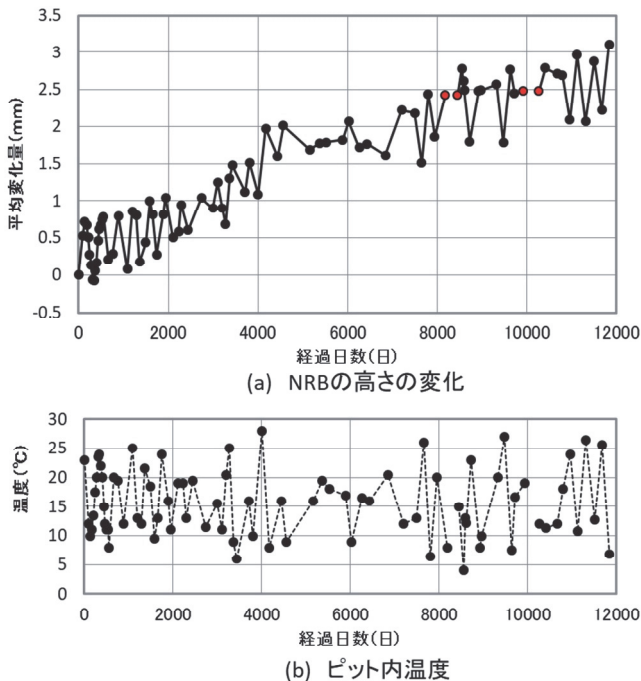


図-6 クリープの平均変化量とピット内温度

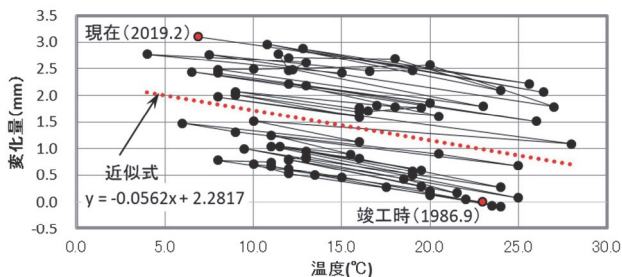


図-7 クリープの平均変化量と温度の関係

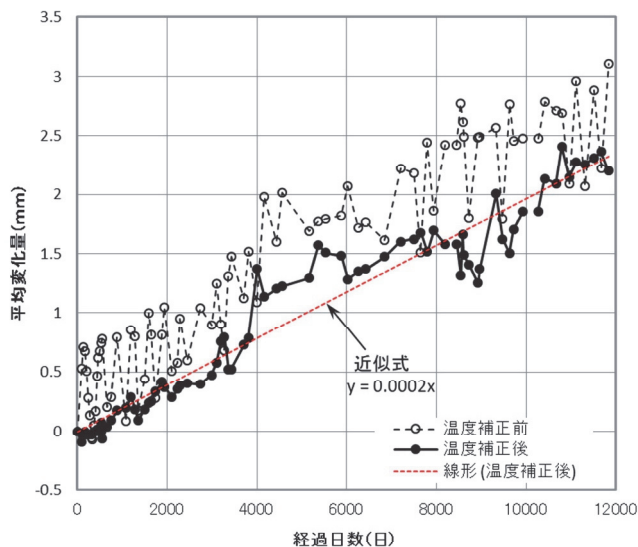


図-8 温度補正前後のクリープ変化量の比較

平均変化量は増減しながらも、長期的には増加している傾向がみられ、その増減の仕方はピット内温度の上下に対応していることから、計測値にはクリープ変形によるものと温度変化によるものが含まれていることが分かる。そこで、温度変化の影響を取り除くために、温度と平均変化量の関係について調べた結果を図-7に示す。温度による平均変化量を線形として近似すると、温度と平均変化量の関係は $-0.0562\text{mm}/^\circ\text{C}$ であった。これを用いて、平均変化量に対して 20°C に温度補正を行って温度変化の影響を取り除いたうえで初期値を0とした。温度補正前後のクリープ変化量の比較を図-8に示す。経過日数と温度補正後のクリープ変化量の関係を線形として近似式を求めると、 $0.0002\text{mm}/\text{日}$ であり、33年間(約12000日)での平均変化量は約 2.4mm である。

積層ゴムのクリープ量の予測については様々な研究がなされているが、長期の予測を行うことは難しいとされている。ここでは、いくつかの予測方法で推測した変化量と実測値とを比較し、図-9に示す。本建物の設計時点では、80年(約29200日)後のクリープ変化量を 400ϕ の積層ゴムの熱老化促進試験等の結果から予測しており、その値は 3mm 程度である。また、文献⁷⁾では、クリープ変化量について式(1)が提案されており、それによると80年後の計算値は 6mm 程度となる。計測値と比べると、現在のクリープ変化量は(1)式による計算値を下回っている。

$$\text{クリープ変化量}(\text{mm}) = \frac{t}{100} \times 17.2 \times \frac{\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{0.619}}{\left(\frac{G}{G_0}\right) \times S_1^{1.02}} \times \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{0.568} \quad (1)$$

- ここに、 t : ゴム総厚(98mm)
- σ : 面圧(4.48MPa)
- σ_0 : 基準面圧(10MPa)
- G : せん断弾性係数(0.44MPa)
- G_0 : 基準せん断弾性係数(0.39MPa)
- S_1 : 1次形状係数(17.9)
- Y : 期間(年)
- Y_0 : 基準年(1年)

次に、これまでの実測結果の傾向をもとに線形で推移するとすれば、80年後は 6mm と倍程度になる。

最後に、式(1)に倣い、経過日数のべき乗で近似式を求めると、クリープ変化量は式(2)で表わされ、80年後は 5.3mm 程度となった。

$$\text{クリープ変化量}(\text{mm}) = 0.0003537 \times x^{0.9351} \quad (2)$$

ここに、 x : 経過日数(日)

以上の結果から、当免震建物に使用しているNRBの80年後のクリープ変化量は 6mm 程度となり、設計時のクリアランスの 15mm より十分小さいと予測され、問題ないと考えられる。

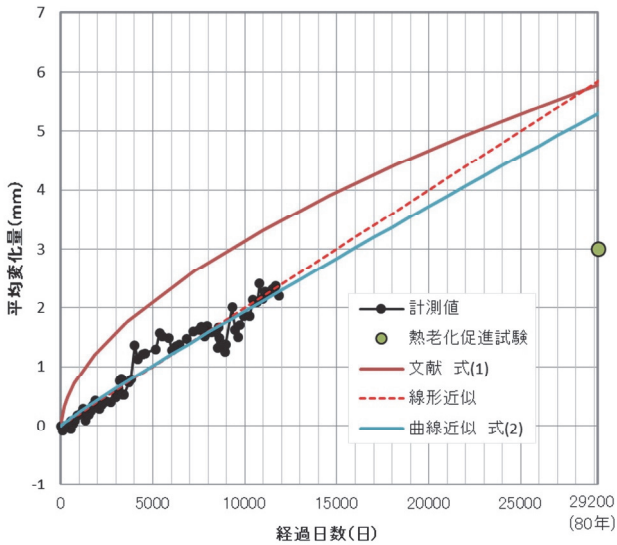


図-9 クリープの計測値と推定手法による比較

5. まとめ

33年間実建物で供用しているNRBのクリープ変化量の計測の結果、次のことが分かった。

- i. 個々のNRBのクリープ変化量について、配置場所による差が見られたが、建物に影響を及ぼすほどではなかった
- ii. NRBの高さの変化は、温度変化による影響を受けており、その変化量は $-0.0562\text{mm}/^\circ\text{C}$ であった
- iii. 33年間(約12000日)でのクリープ変化量は、約2.4mm(ゴム総厚の2.4%)であった
- iv. NRBの計測結果から推定した80年後のクリープ変化量は6mm(ゴム総厚の6%)程度となり、設計時の予測値より大きめとなったが、設計では余裕を見ており許容される範囲内であった

これらのことから、クリープ変形が建物に与える影響は小さく、竣工後33年を経過した免震建物が必要な安全性と耐久性を有していることを確認した。

6. あとがき

本研究は、1986年に日本で最初に実用化された免震建物を対象として実施している免震装置の経年変化に関する追跡調査の一環であり、これまでの検討で当初の設計条件の妥当性と30年以上使用してきた免震装置の健全性を確認できた。今後も引き続き計測を継続し、免震建物の経年変化に関する知見を蓄積していく予定である。

本研究の遂行にあたり、共同研究者である福岡大学の高山峯夫教授と昭和電線ケーブルシステム社のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 安井健治、早川邦夫、山上 聡、「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、2006.12
- 2) 舟木秀尊、安井健治、山上 聡、小山慶樹、「免震建物に設置された積層ゴムの経年変化」、奥村組技術研究年報、No.42、pp.91-94、2016.9
- 3) 山上 聡、舟木秀尊、安井健治、小山慶樹、「実免震建物における免震装置の水平剛性の評価」、奥村組技術研究年報、No.43、pp.81-86、2017.9
- 4) 山上 聡、上 寛樹、舟木秀尊、小山慶樹、「竣工後30年を経過した免震建物に使用されている免震装置の性能検証」、奥村組技術研究年報、No.44、pp.77-83、2018.9
- 5) 舟木秀尊、山上 聡、小山慶樹、「免震建物における積層ゴムの経年変化」、奥村組技術研究年報、No.45、pp.97-102、2019.9
- 6) 日本ゴム協会免震用積層ゴム委員会、「免震建築用積層ゴムと環境・耐久性」、免震用積層ゴム委員会技術報告、pp.II-3、平成18年3月31日
- 7) 日本ゴム協会、日本免震構造協会、「改訂版 設計者のための建築免震用積層ゴム支那ハンドブック」(第2版)、pp.206-217、2017年