

免震装置の信頼性

茂木正史

免震構法を採用した建物の積層ゴムを建設以来20年にわたり調査し、積層ゴムのクリープ量は設計時に考慮した範囲内で推移していること、建物と同一環境下に保存した積層ゴムの鉛直剛性および水平剛性の経年変化が設計時に想定した範囲内であることを確認した。また、同建物で使用されている鋼棒ダンパーについて疲労破壊試験結果からダンパーが破断する地震波の回数を予測し、マイナー則を用いれば破断の予測が可能であることを実験で確認した。この方法で、東北地方太平洋沖地震におけるダンパーの疲労損傷度を算定し、10回程度と同規模の地震に耐えられるとの予測を得た。

キーワード：積層ゴム、ダンパー、クリープ、ゴムの劣化、鋼材の疲労損傷、マイナー則

1. はじめに

我が国初の実用的免震建物として1986年9月に竣工した技術研究所研究管理棟は、建設以来、遠方から直下までの様々な場所で発生した地震に対して免震効果を発揮してきた。建物の免震装置は積層ゴムと鋼棒ダンパーで構成されている。免震建物の信頼性を保つにはそれらの長期的な健全性の確保が必要である。

積層ゴムの長期にわたる経年変化の予測には、ゴムの化学反応速度理論に基づく加熱促進試験が適用されている。しかし、免震構造の主要構造部材である積層ゴムの歴史は浅く、自然環境下での経年変化のデータは、免震構造が採用されて10年経過時までの報告¹⁾は見られるもののその数は少ない。さらに、加熱促進試験との関係も必ずしも明確になっていない。そこで、積層ゴムの経年変化を把握するために、当免震建物に採用した積層ゴムの経年変化を20年にわたり調査してきた。その竣工後20年目までの結果は積層ゴムの経年による剛性変化は設計時に見込んだ範囲内であった。

また、建物に採用されている4巻のループ状の鋼棒弾塑性ダンパー（以下鋼棒ダンパー）については、実用化の過程で実験や解析が実施され、その力学的特性が明らかになっている²⁾。しかし、建物の維持管理には鋼材の疲労に関する信頼性を確認しておくことが重要であり、疲労特性の把握を目的とした実験的研究を実施した。その結果、鋼棒ダンパーの疲労寿命がマイナー則³⁾により予測できることを確認した。さらに、

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震で受けた損傷度を算定し、同規模の地震の今後の発生に対しても信頼性を有していることを確認した。

本報告では上述した免震装置の信頼性に関する観測結果と実験結果を紹介する。

2. 免震建物の概要

免震建物は、鉄筋コンクリート造4階建てで免震装置は天然ゴム系積層ゴムと鋼棒ダンパーで構成されている。建物重量は約2,250tで図-1に示すように25個の積層ゴムで支持され、12台の鋼棒ダンパーが配置されている。積層ゴムの諸元を表-1に、鋼棒ダンパーの諸元を表-2に示す。

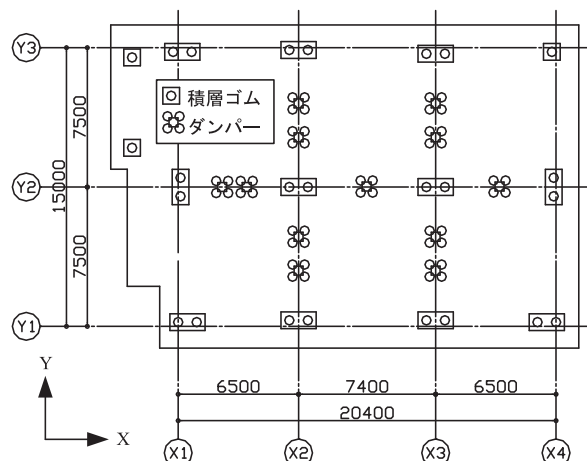


図-1 積層ゴムと鋼棒ダンパーの配置

表一 積層ゴムの諸元

形状	ゴム直径	500 mm
	ゴム厚さ	7 mm × 14 層
物性	ゴム硬度	40
	せん断弾性率	0.43 Mpa
	使用面圧	4.9 Mpa
配合	天然ゴム	55%
	カーボン	18%
	加硫剤など	27%

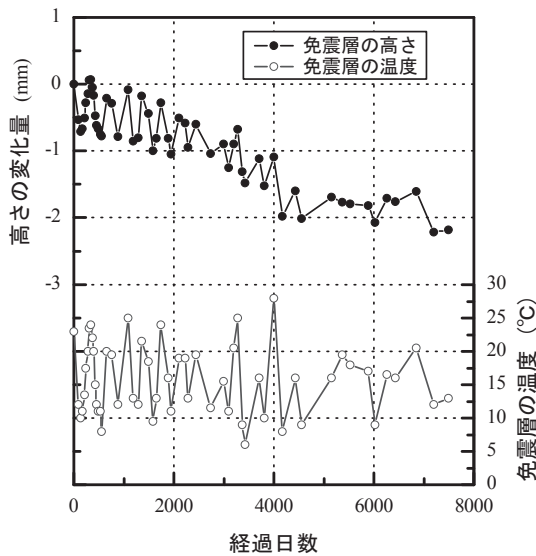
表二 鋼棒ダンパーの諸元

部材	形状	材質
ロッド	φ70, R285	SCM415
ベースプレート	PL45 × 530 × 530	SM490A
固定金物	PL30 × 30 × 60	SS400

3. 積層ゴムの経年変化

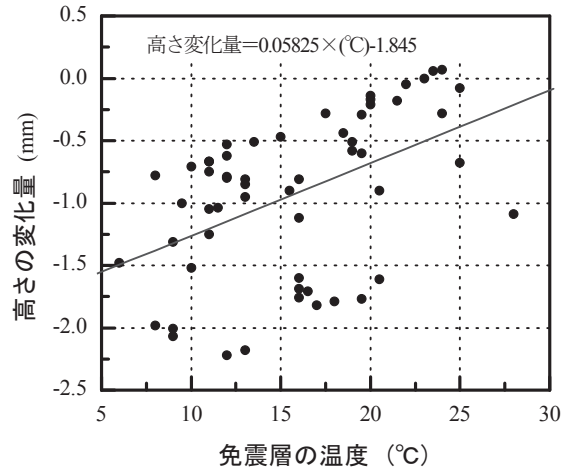
(1) 積層ゴムのクリープ量

竣工後の経過日数と積層ゴム全 25 基の高さの変化量の平均値（免震層の高さ）を図一2に示す。併せて測定日の免震層の温度を示す。積層ゴムの高さは、上下ベースプレートの四隅にガラス板を貼り付け、ダイヤルゲージを用いてその間隔を測定した。積層ゴムの高さの変化量は、ばらつきがみられるものの、経過日数に伴い高さが低くなる傾向が見られる。また、そのばらつきは温度に大きく依存していることがわかる。



図一2 免震層の高さの変化量と温度変化

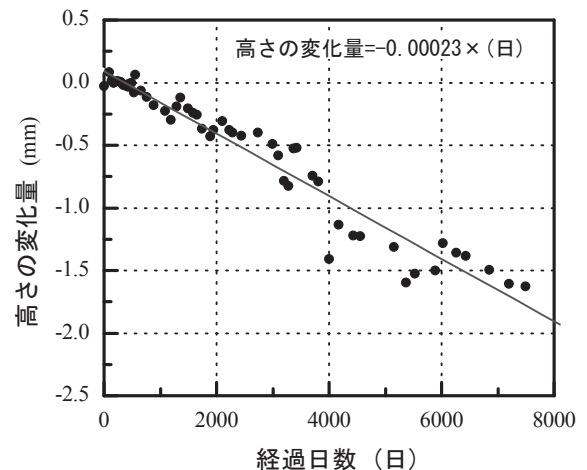
そこで免震層の温度と高さの変化量の平均値の関係を図一3に示す。温度が高くなると高さの変化量が増大する、つまり積層ゴムの高さが高くなる傾向が見



図一3 免震層の温度と高さの変化

られる。積層ゴムの高さの変化量と免震層の温度の関係を1次近似すると温度補正係数は+0.05825 mm/°Cとなる。これは夏季と冬季とで免震層の温度差が5℃から30℃までの25℃あるとすれば、積層ゴムの高さの変化量が約1.5 mm生じることになり、免震層の高さ変化にはクリープによる高さの変化の他に免震層の温度差による変化も大きく影響している。

積層ゴムの高さの変化量に前記の温度補正係数を用いて温度補正を行った。補正後の経過日数と高さの変化量の関係を図一4に示す。ややばらつきが残るものの、経過日数が増加するにつれて積層ゴムの高さが線形的に低くなっている様子がうかがえる。線形近似により高さの変化量を推定すると、測定した20年間で約-1.7mm、60年後を推定すると約-5.0mmとなる。本建物の計画時に実験室の加熱促進試験結果を対数近似して、60年後のクリープ量を3 mm（積層ゴム高さの約3%）と推定したが、それより大きくなった。しかし、設計で考慮したクリープ量は積層ゴム高さの15%（15 mm）であり、この値で鉛直クリアランスを設計しているため問題はない。



図一4 経過日数と免震層の高さの変化量

(2) 積層ゴムの剛性

積層ゴムの剛性変化を積層ゴム試験体で測定した。積層ゴム試験体は、免震建物に使用したものと同一の積層ゴムで、建物に使っている積層ゴムと同一環境下になるよう免震層に4個保存している。建物建設時に性能確認試験を行った圧縮・せん断試験機を用いて試験を行った。試験は建物竣工1年、2年、3年、5年、10年、15年目、20年目に実施した。

鉛直剛性を求めるための圧縮試験は2軸試験機の油圧ジャッキを用いて0~2,942 kN (300 tonf:設計荷重の3倍)までの荷重を3回繰り返し行った。図-5に初期値、5年、10年、15年経過時および20年経過時の鉛直変位-鉛直荷重曲線を示す。鉛直剛性は3回目の履歴曲線の設計荷重(1,373 kN:140 tonf)の±40%である824 kN (84 tonf)と1,922 kN (196 tonf)の割線剛性から求めている。図-5の履歴曲線には大きな変化は見られず、表-3に示す鉛直剛性の平均値の変化率は8%以内の変化にとどまっている。

水平剛性を求めるための圧縮せん断試験は油圧ジャッキで設計荷重1,373 kN (140 tonf)を鉛直荷重した状態で、加振機により±150 mm、平均加振速度

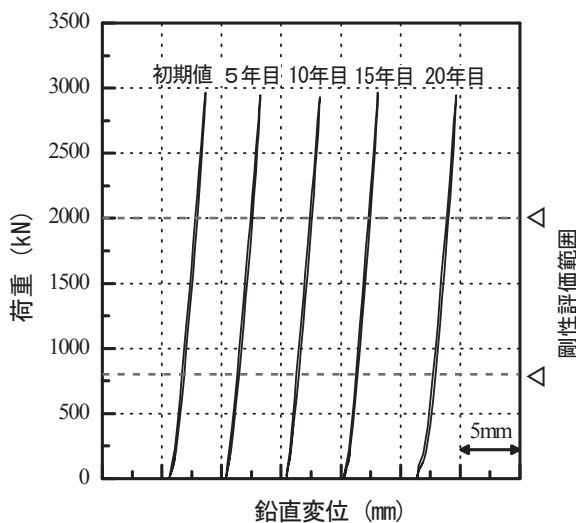


図-5 圧縮試験

表-3 積層ゴムの剛性一覧 (平均値)

	計測年月	鉛直剛性 (kN/mm)	変化率 (%)	水平剛性 (N/mm)	変化率 (%)
初期値	'87.02	1058	-	848	-
1年目	'88.01	1080	2.1	857	1.1
2年目	'89.02	1081	2.2	865	2.0
4年目	'91.02	1079	2.0	879	3.7
5年目	'92.11	1076	1.7	886	4.5
10年目	'97.03	1096	3.6	884	4.2
15年目	'02.03	1139	7.7	878	3.5
20年目	'07.01	1105	4.4	915	7.9

2 mm/secの正弦波加振を3回行った。図-6に初期値、5年、10年、15年および20年経過時の水平荷重-水平変位曲線を示す。水平剛性の算定方法は初期実験時に定め、3回目の履歴曲線の90 mmと140 mmの割線剛性の正負の平均値としている。履歴曲線には大きな変化やゴムの異常は見られず、表-3に示すように水平剛性の平均値の変化率は8%以内にとどまっている。なお、免震建物をジャッキで10 cm押し込んだ後にそのジャッキを解放する自由振動実験を建物竣工時と20年経過時に実施した⁴⁾。これによって得られた各振幅における周期は20年の経過で約4%短くなった。また、免震建物を1質点の振動系として積層ゴムの水平剛性変化を算出すると、初期値に比べて20年経過時は約7%硬くなっている。

設計時にばらつきを含めて60年後の剛性変化を30%以内と想定しており、これまでの実測結果より想定範囲内に収まると予測できる。

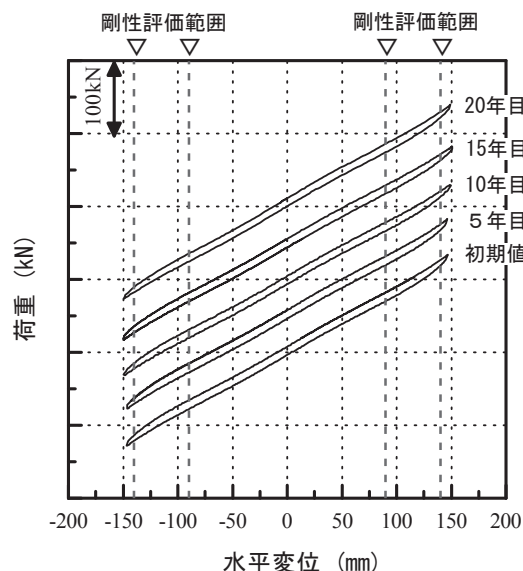


図-6 圧縮せん断試験

4. 鋼棒ダンパーの疲労特性

(1) 試験概要

図-7に試験体と加力方向を示す。鋼棒ダンパーの諸元は表-2に示した。鋼棒ダンパーとして実際に使われるのは図-7(a)に示す4巻ループの製品であるが、試験では図-7(b)に示す1巻ループの試験体を用いた。加力方向は図に示した耐力が最大となる中心方向と最少となる接線方向である。鋼棒ダンパーの疲労曲線を得るために動的繰り返し加力を行った。振幅をそれぞれ3, 5, 7.5, 16.5, 27 cmに固定してダンパーが破断するまで加力し、破断までの繰り返し数を求めた。最大速度が50 kineとなるように加力周波数を調

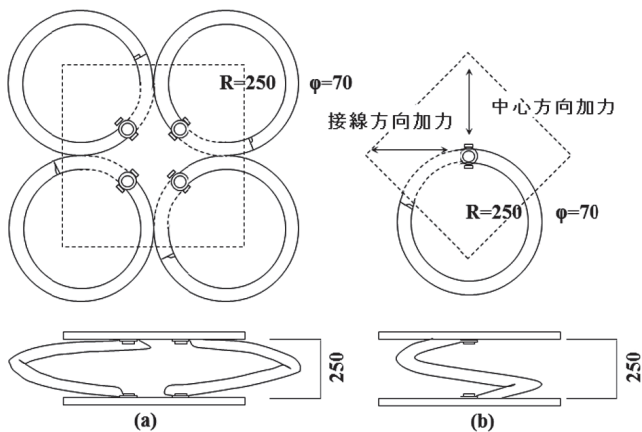


図-7 試験体と加力方向

整した。次にマイナー則で地震波によるダンパーの破断が予測できるか検証するために地震破を用いたランダム波加力をダンパーが破断するまで繰り返した。加力には当免震建物を対象に地震応答解析を実施して得られた応答波を用いた。解析に用いた地震波は、八戸 EW25 kine, 50 kine そしてエルセントロ NS50 kine である。図-8 にランダム波の変位時刻歴を示す。

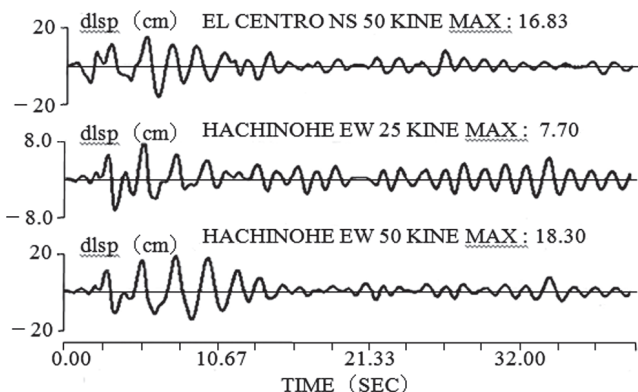


図-8 ランダム波の変位時刻歴

(2) 試験結果

図-9, 10 に鋼棒が破断するまで繰り返し加力した際の水平荷重, 水平変位履歴曲線を示す。図より水

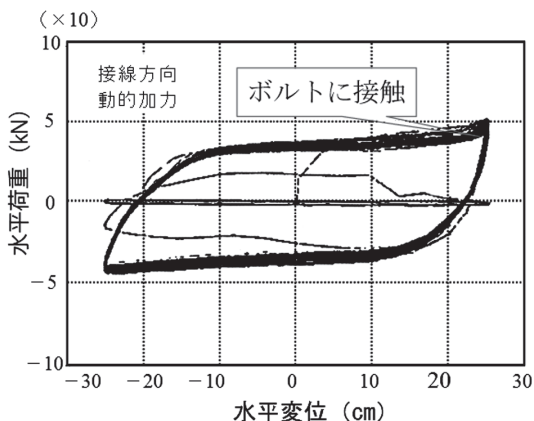


図-9 水平変位と水平荷重 (動的・接線方向)

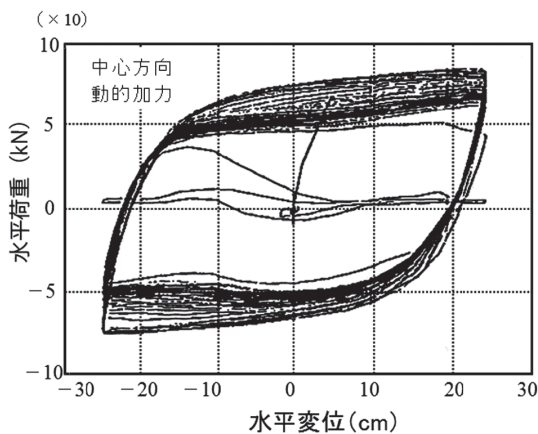


図-10 水平変位と水平荷重 (動的・中心方向)

平荷重はサイクル数の増加に従って小さくなる傾向を示す。水平荷重の低下率の平均は接線方向加力で14.5%, 中心方向加力で17.4%である。

(3) 疲労特性

図-11 に1巻ループ試験体の振幅と破断までの繰り返し回数との関係を回帰曲線, 回帰式とともに示す。接線方向加力の破断までの繰り返し回数は, 振幅5 cmで2,241回, 振幅27 cmで80回であり, 中心方向加力では, 振幅5 cmで1,287回, 振幅27 cmで35回である。接線方向の同振幅で破断までの繰り返し数は中心方向の約2倍である。また試験データは $y = ax^b$ の式で良く回帰できる。

表-4 に鋼棒が破断するまでランダム波で加力し

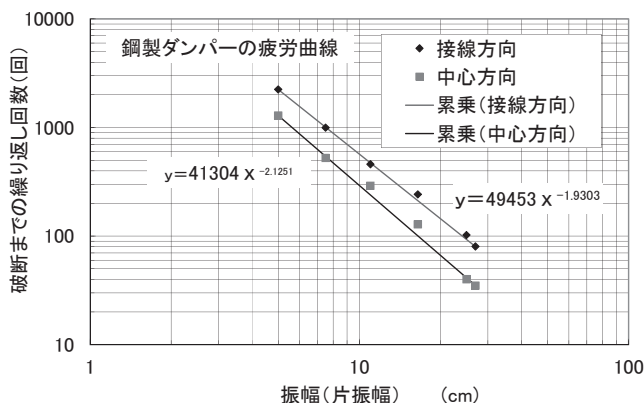
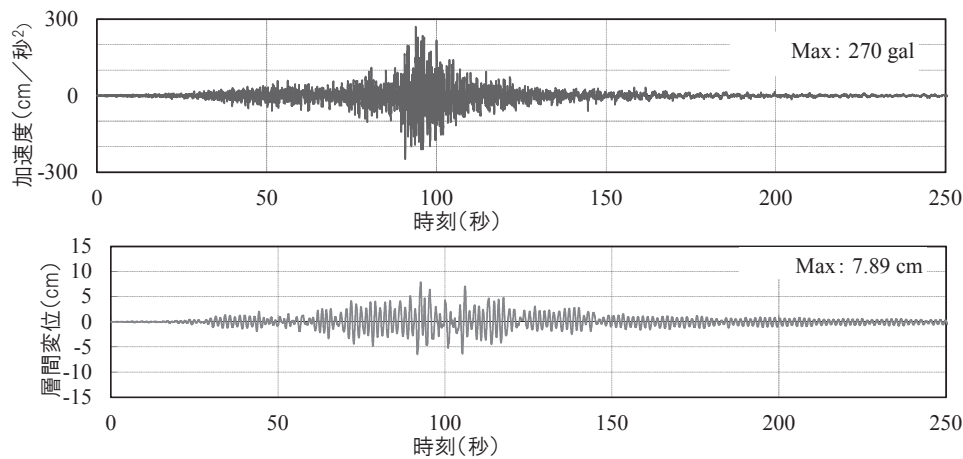


図-11 振幅と破断までの加力回数

表-4 ランダム波加力試験結果

加振方向	入力波	最大変位 (cm)	破断までの波数	累積疲労損傷率
接線方向	八戸 25 kineEW	7.70	239	0.967
	八戸 50 kineEW	18.30	67	1.108
	エルセントロ 50 kineNS	16.83	68	0.944
中心方向	八戸 25 kineEW	7.70	141	0.870
	八戸 50 kineEW	18.30	27	0.827



図一 12 東北地方太平洋沖地震における免震層下部加速度と免震層の変位

た結果を示す。破断までの波数の最小は、中心方向、八戸 50 kine 相当入力で 27 波，最大は、八戸 25 kine 相当入力時の 239 波であった。加力波には各地震波による免震ビルでの応答波を用いており，これより，当ダンパーは代表的な地震波の繰返しに対して十分な健全性を有していると考えられる。

つぎに，マイナー則による鋼棒ダンパーの疲労損傷度評価結果を示す。図一 11 の疲労破断の回帰式に示すようにダンパーの疲労特性は次のように表せる³⁾。

$$\delta \cdot Nf^a = b \quad (1)$$

δ : 振幅， Nf : 破断に至る繰返し回数

マイナー則による累積疲労損傷度 $DK(n)$ を式 (2) に示す。

$$DK(n) = \sum_{i=1}^k n_i / Nf_i = \sum_{i=1}^k \{ (\delta_i / b)^{1/a} \times n_i \} i \quad (2)$$

n_i : 変位 δ_i で繰り返した回数

Nf_i : 破断までに必要と想定される繰返し数

なお，本検討における波形計数法はヒステリシスループによる。表一 4 に各ランダム波加力における累積疲労損傷度を示す。破断時の累積疲労損傷率はほぼ 1 となっており，累積疲労損傷度が 1.0 に達したとき破断が発生すると定義するマイナー則が成り立っており，マイナー則は地震入力を繰返し受けるダンパーの疲労破断の予側に有効であると判断できる。

(4) 東北地方太平洋沖地震による損傷度

東北地方太平洋沖地震において当免震建物は免震層下部で最大加速度 270 gal (震度 5 強)，最大変位 8 cm を記録し，免震効果による加速度低減率は 46% であった。図一 12 に地震時の免震層下部の加速度履

表一 5 東北地方太平洋沖地震による損傷度

加振方向	入力波	最大変位 (cm)	疲労損傷率
接線方向	東北地方	7.89	0.0681
中心方向	太平洋沖地震 NS		0.1144

歴と免震層の変位履歴を示す。この変位で受けたダンパーの疲労損傷度をマイナー則にしたがって算定した結果を表一 5 に示す。ダンパーは中心方向で同規模の地震に約 10 回まで耐えられると予測できる。

5. おわりに

1986 年に建設された免震建物 (奥村組技術研究所 研究管理棟) において，免震装置の長期信頼性を検討し，設計で想定した建物の耐用年数に対して安全であるとの結果が得られた。今後も免震構法の高性能化に加えて，その長期信頼性を評価する技術の向上に取り組みでいきたい。

JICMA

《参考文献》

- 1) ㈱日本ゴム協会「設計者のための免震用積層ゴムハンドブック」, 理工図書, 2000.1
- 2) 長谷川他, 「大容量ダンパーの基本性状に関する研究」, 日本建築学会大会梗概集, 1990.10
- 3) Miner, M. A, Cumulative Damage in Fatigue, Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics, 1945
- 4) 安井他, 「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, 2006.12

【筆者紹介】

茂木 正史 (もてき まさふみ)
 ㈱奥村組
 技術研究所
 建築研究課長

