

免震建物における積層ゴムの経年変化

ーゴム材料の基本特性ー

Aging Deterioration of Natural Rubber Bearings Installed

in the Base-isolated Building

- Mechanical Properties of Natural Rubber -

舟木秀尊* 山上 聡* 小山慶樹*

要 旨

我が国では免震構造が実用化されてから30年程度しかたっており、免震建物を供用する数十年という長期間にわたる構造性能の評価と耐久性に関しては、まだ十分に実証されていない。その中で、黎明期の实用免震ビルである奥村組技術研究所は、竣工後30年が経過した。本報では、この免震建物から抜き取った積層ゴム並びに抜き取り品と同時に製造された別置試験体から試験片を採取し、ゴム材料の基本物性について調査した。その結果、免震建物において約30年間使用した積層ゴムのゴム物性の経年変化は、設計時に予測した範囲で推移していることを確認した。また、建物内に保管された別置試験体により評価したゴム物性は、実建物で使用された積層ゴムと同等であることを確認した。

キーワード：免震構造、積層ゴム、経年変化、ゴム素材試験

1. まえがき

近年発生した巨大地震において、免震構造の優れた安全性が証明され、その普及に大きな期待が掛けられている。その中で、黎明期の实用免震ビルである写真-1の建物は、竣工後30年が経過した。著者らは、この建物に設置された免震装置に関する様々な実験や計測を、竣工以来、継続して行っている^{1)~3)}。

免震建物の地震時の動的挙動を予測するためには、免震装置の力学特性を適切にモデル化することが重要である。設計では通常、免震装置単体での静的加力実験により得られた力学特性を用いて免震層全体をモデル化する。その上で、免震装置の特性が個々の製造ばらつきや経年変化等により影響⁴⁾を受けることを考慮して設計する。経年変化については、実建物から免震装置を取り出して単体を調査した事例がある^{5)~7)}。本報では、免震建物から抜き取った2基の積層ゴムおよび別置試験体を用いてゴム材料の試験片を製作し、30年経過時におけるゴム材料の基本特性を調査した結果について報告する。

2. 対象建物および免震装置

対象とした免震建物は、茨城県つくば市内に建設され、

1986年9月に竣工した事務所ビル（奥村組技術研究所管理棟、評定番号BCJ-免2、1985年11月14日評定取得）である⁸⁾。建物概要と免震装置を表-1に示す。免震装置には、天然ゴム系積層ゴム25基と、鋼棒製ダンパー12基を使用している。



写真-1 竣工後30年が経過した免震建物

表-1 建物概要と免震装置

項目	諸元	
構造	鉄筋コンクリート造4階 基礎免震	
建築面積	348.18m ²	
延べ床面積	1330.1m ²	
免震装置	積層ゴム	天然ゴム系積層ゴムφ500×25基
	ダンパー	鋼棒製ダンパーφ50×12基 (ループ内径φ500、4本/基)

*技術研究所建築研究グループ

3. 抜き取り品の水平剛性に関する調査

3.1 調査の概要

実際の免震建物に使用されている積層ゴムの経年変化を調査するため、建物から積層ゴム 2基 (NRB-No.12、NRB-No.13) を抜き取り、水平剛性の調査を行った。建物から抜き取った位置を図-1に、圧縮せん断試験の状況を写真-2に示す。建設当時の納品検査と同じ試験機を用いて、2体の積層ゴムの1組で測定することで、水平力が自己釣り合いして試験機の摩擦を考慮せずに評価できる。圧縮せん断試験は、鉛直荷重 1176kN (面圧 6N/mm²) を載荷し、水平変位±200mm の加振を3サイクル実施した。

3.2 試験結果

納品時(1986年)の検査と31年目(2017年)の試験を比較して、積層ゴムの水平荷重と変形の関係を図-2に、積層ゴムの水平剛性を表-2と図-3に示す。試験結果は、NRB-No.12とNRB-No.13の2基分である。また、積層ゴムの水平剛性は、±50、±100、±150mm区間の割線剛性から評価した。約30年間使用した積層ゴムの水平剛性は、納品検査時に比べて水平変位±50mm区間では10%、水平変位±150mm区間では14%高くなった。

一方、建物の設計時に、熱老化促進試験から積層ゴムの経年変化を予測している。この予測値と試験結果を比較したものを図-4に示す。NRB-No.12とNRB-No.13

の水平剛性の変化率は、設計時の予測値と概ね対応している。また、異なる試験の比較となるが、建物を100mm変形させた自由振動実験⁹⁾より評価した積層ゴム(25基)の水平剛性は、竣工から30年が経過して9%程度高くなったのに対し、NRB-No.12とNRB-No.13の圧縮せん断試験から得られた水平剛性の変化率は、それよりも僅かに大きい値となった。

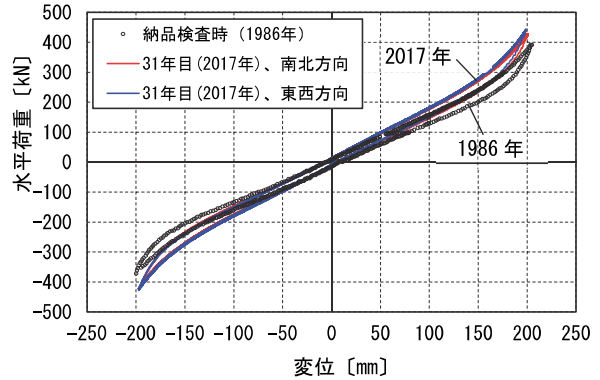


図-2 積層ゴムの水平荷重と変形
～ 納品時と31年目の比較 ～

表-2 積層ゴムの水平剛性

製品	経過年数 [年]	水平剛性 [kN/mm]		
		±50mm区間	±100mm区間	±150mm区間
NRB-No.12	0	0.879	0.793	0.796
NRB-No.13	31	0.967 (10%)	0.889 (12%)	0.905 (14%)

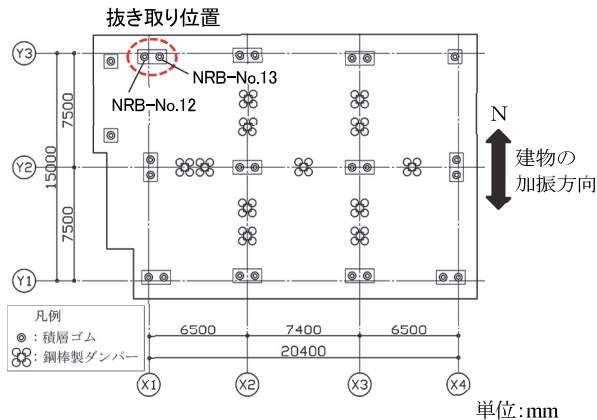
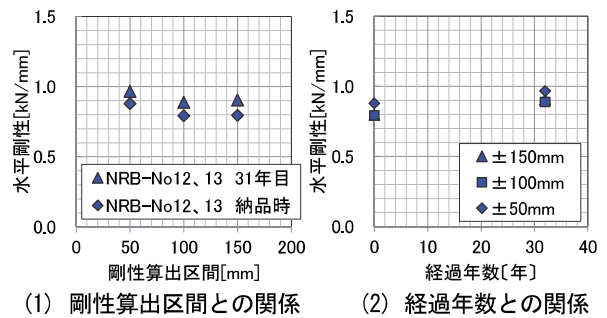


図-1 免震部材の配置



写真-2 圧縮せん断試験の状況



(1) 剛性算出区間との関係 (2) 経過年数との関係

図-3 納品検査時と31年目の水平剛性

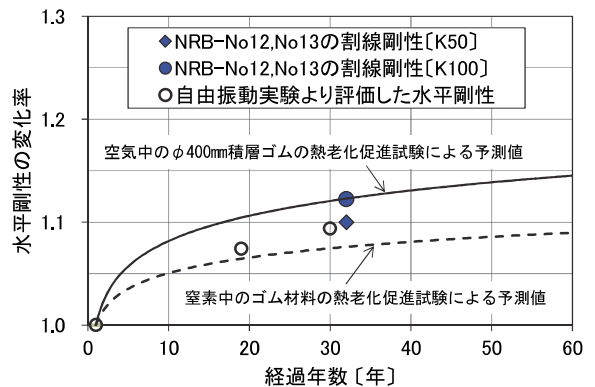


図-4 水平剛性の変化率

4. 建物から抜き取った積層ゴムの物性調査

4.1 調査の概要

建物から抜き取った積層ゴムより試験片を採取し、ゴム物性を測定した。この建物は2基の積層ゴムで1本の柱を支持する構造であり、経年変化の調査にあたって建物から抜き取られた2基(図-1参照)のうちの1基(NRB-No.13)をゴム物性の調査に使用した。NRB-No.13の諸元を表-3に示す。ゴムのせん断弾性率(G)は0.44N/mm²相当で、被覆ゴムは後巻き型である。

4.2 試験片の形状と採取位置

a. ダンベル試験片

ダンベル試験片の採取位置を図-5(3)に示す。上から8層目(以下、層数は全て上からの位置を示す)のゴムの2mm厚にスライスして図-6(1)に示すダンベル試験片(ダンベル状3号形: JIS K 6251)を18個採取し、積層ゴムの中心と外側および建物の自由振動実験時の加振方向と加振直交方向で、ゴムの硬さ(デュロメータタイプA: JIS K 6253)や引張特性を比較した。

b. せん断試験片

せん断試験片の採取位置と座標原点を図-5(1)~(3)に示す。4層目、6層目、8層目のゴムとその上下の中間鋼板を切り出して、図-6(2)に示す、せん断試験片を34個採取した。その際の採取位置は、積層ゴムの中心側と外周側並びに建物の自由振動実験時の加振方向と加振直交方向で、ゴムのせん断特性を比較できるように選んだ。

c. ゴムシート

ゴムシートの採取位置を図-5(4)に示す。13層目のゴムの470mm×40mmに切り出して、積層ゴムの中心と外周側のゴム硬さ(国際ゴム硬さM法: JIS K 6253)を比較した。なお、中心と外周側から50mmまでは2.5mm間隔で、その他は5mmまたは10mm間隔で測定した。

4.3 測定結果

a. ダンベル試験片によるゴムの硬さと引張特性

8層目の硬さ、100%変形時の引張応力、切断時引張応力、切断時伸びの測定結果を図-7に示す。硬さ、切断時引張応力、切断時伸びについては、建物設計時のゴム物性の製作基準値を併せて示している。また、横軸は座標原点からの距離(図-5参照)を示している。硬さは、設計時の製作基準値より大きくなり、中心孔側よりも外周側が僅かに大きくなる傾向が見られた。引張応力は、外周側(座標原点0mmから30mmおよび455mm以上の位置)が他の測定点に比べて15%~25%程度大きくなっている。切断時引張応力は、設計時の製作基準値より大きくなっているが、切断時伸びは、設計時の値より小さくなる箇所があった。

b. せん断試験片によるせん断特性

せん断試験片による4層目、6層目、8層目の100%せ

表-3 NRB-No.13の諸元

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 (JIS HA)	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	S ₁ : 17.1 S ₂ : 5.1

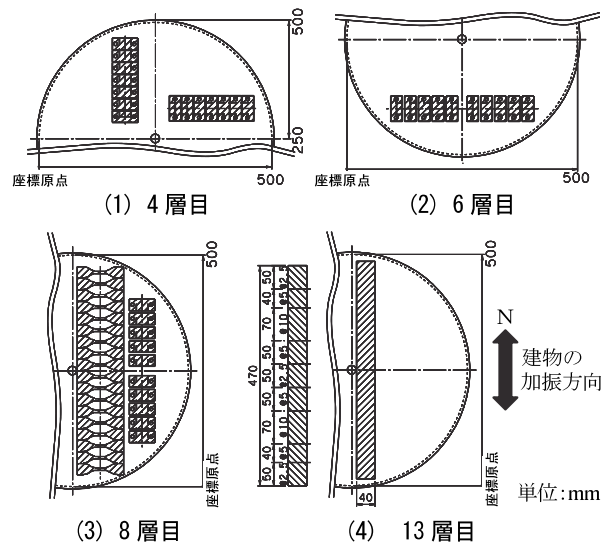


図-5 試験片の採取位置と座標原点

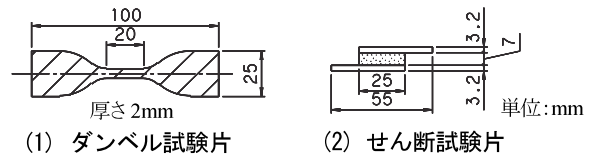


図-6 試験片形状

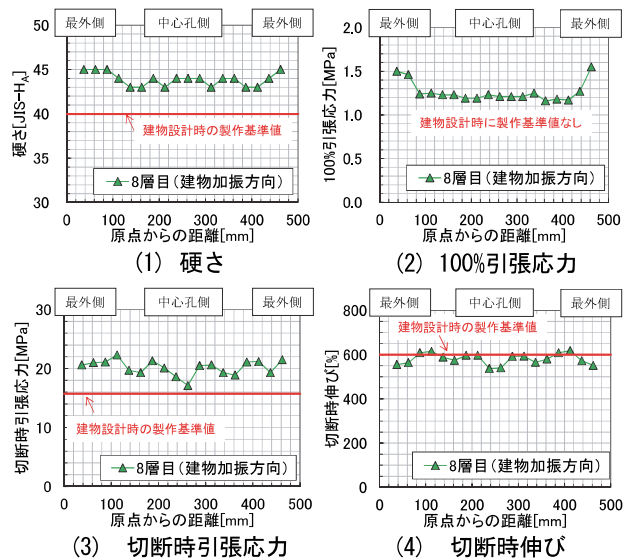


図-7 ダンベル試験片の測定結果

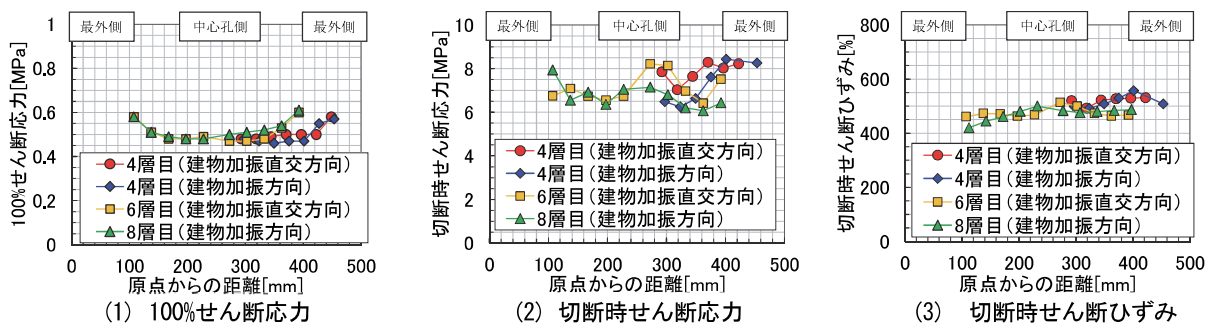


図-8 せん断試験片の測定結果

せん断応力、切断時せん断応力、切断時せん断ひずみの測定結果を図-8に示す。100%せん断応力と切断時せん断ひずみは、試験片を採取した層の違いと建物の自由振動実験時における加振方向の違いによる顕著な差は見られなかった。また、100%せん断応力は、各層において外周側が大きくなっている。切断時せん断応力については、測定位置によるばらつきが大きくなっている。これは、試験片の形状には多少のばらつきがあり、その影響が含まれていると考えられる。

c. ゴムシートの国際ゴム硬さ分布

13層目から切り出したゴムシートについて、国際ゴム硬さの測定結果を図-9に示す。ダンベル試験片を対象とした8層目と同様に、外周側（座標原点0mm～30mmおよび440mm～470mm）のゴム硬さが大きくなった。外周側ゴムが硬くなる傾向は、8層目より13層目が顕著であるが、測定方法の違いが影響した可能性もある。

5. 別置試験体と抜き取り品の比較

5.1 調査の概要

別置試験体は、対象建物に使用したものと同時期に製造された積層ゴムであり、同一環境下になるように建物内で保管されていたものである。黎明期の免震建物では、別置試験体による定期的な試験が行われている¹⁰⁾。本調査は、別置試験体からゴム材料の試験片を採取してゴム物性を測定した。また、別置試験体は2016年（30年目）に試験を行ったが、抜き取り品の試験を2017年（31年

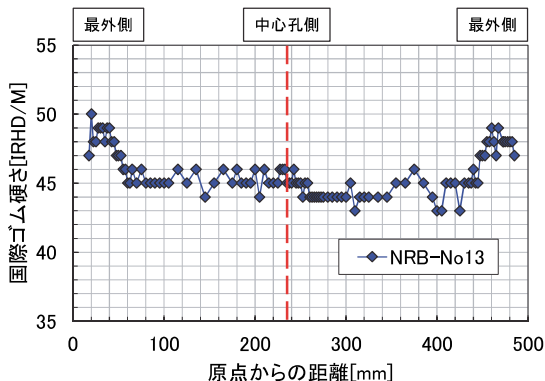


図-9 国際ゴム硬さの分布

目)に実施しており、両者のゴム物性を比較した。

5.2 別置試験体の仕様

別置試験体は、抜き取り品と同一仕様の積層ゴム（4体）である。長期荷重に相当する面圧6.9N/mm²をPC鋼棒により載荷して保管され、継続調査に使用してきた。

図-10に示すように、別置試験体のうち1体を1997年に1/2、2007年に1/4、2016年に1/4の上半分をカットしてゴムの試験片を採取し、ゴム物性の経年変化を調査した。なお、切断後の積層ゴムは、再び保護ゴムを巻き直して建物内に保管した。

5.3 試験片の採取位置

試験片の採取位置を図-11に示す。2007年は2、7、11層目、2016年は2、4、7層目から試験片を採取した。ダンベル試験片は、各層を上下2枚にスライスして2mmのゴムシートにした後に採取した。せん断試験片は、ゴム上下の中間鋼板を切り出して採取した。試験片には多少の製作誤差があり、試験結果はこの影響を含んでいる。

5.4 ゴム物性の測定結果

a. ダンベル試験片の測定結果

1986年の初期値と、1997年、2007年、2016年に測定したゴムの硬さ、100%引張応力、切断時引張応力、切

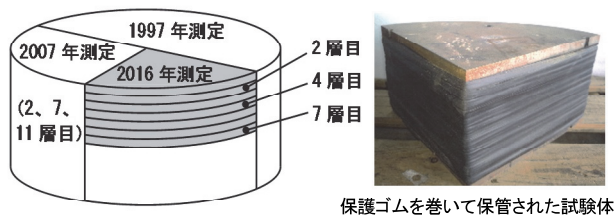


図-10 別置試験体の切断状況

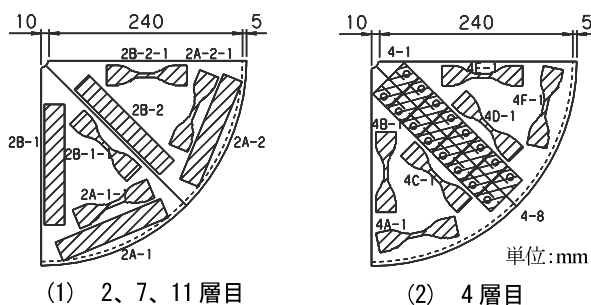


図-11 試験片の採取位置

断時伸びを図-12 に示す。経年に伴って試験結果のばらつきが大きくなっている。ゴムの硬さと 100%引張応力は緩やかに増加し、切断時引張応力と切断時伸びは概ね低下する傾向を示した。また、別置試験体と抜き取り品を比較すると、ゴムの硬さ、切断時引張応力、切断時伸びは抜き取り品が大きく、100%引張応力については両者の差は無かった。

b. せん断試験片の測定結果

1986年の初期値と、1997年、2007年、2016年に測定したゴムの切断時せん断応力、切断時せん断ひずみを図-13 に示す。実験結果は、ダンベル試験片と同等の傾向であるが、中間鋼板との接着状態を含んだ評価であるため、試験片のばらつきが大きくなったと考えられる。

6. まとめ

竣工後 30 年が経過した免震建物を対象に、抜き取った積層ゴム並びに抜き取り品と同時に製造された別置試験体から試験片を採取し、ゴム材料の基本物性を調査した結果、以下の知見を得た。

- i. 対象建物の自由振動実験より評価した積層ゴムの水平剛性は30年で9%程度高くなったのに対し、抜き取り品の試験から得られた水平剛性の変化率

は、それよりも大きい値となった

- ii. ゴムの硬さ、引張・せん断応力の経年変化は、積層ゴムの外周から中心に向かって約 30mm の範囲で大きくなる傾向が見られた
- iii. 免震建物において、約 30 年間使用した積層ゴムのゴム物性は、設計時に予測した範囲で推移している
- iv. 免震建物の別置試験体により評価したゴム物性の経年変化は、建物で使用された積層ゴムと概ね同等と考えられる

7. あとがき

本報告は、実建物に設置され、30 年が経過した免震装置の経年変化に関する追跡調査の一環である。積層ゴム (2 基/1 架台) を取り出した箇所には、当時の製品を復元した積層ゴムを新たに設置した。今後は、限界変形性能の確認実験¹⁾に使用した抜き取り品 (NRB-No.12) を対象に試験片を採取し、ゴム物性に関するデータ分析をさらに進める予定である。

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助力をいただいた。ここに感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 青柳 栄、松田泰治、塩尻弘雄、大塚 将、安倍 勇、原田 治、「免震構造物の地震時挙動に関する研究(その 1、2)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I、pp.755-758、1987.10
- 2) 早川邦夫、安井健治、野口 聡、「積層ゴムの経年変化」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II、pp.569-570、1997.9
- 3) 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
- 4) 日本建築学会、「免震構造設計指針」、丸善、p.75、2013
- 5) 浜口弘樹、相沢 寛、鮫島祐介、菊地隆志、鈴木重信、芳沢利和、「約 20 年間使用した積層ゴムの経年変化調査」、日本建築学会技術報告集、第 30 号、pp.393-398、2009.6
- 6) 森 清隆、境 茂樹、樋口匡輝、加藤貴司、「25 年間使用した鉛プラグ入り積層ゴムの各種依存性確認試験(その 1、2)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II、pp.933-936、2017.8
- 7) 谷 佑馬、鈴木重信、鴨下直登、濱口弘樹、「約 30 年間使用した積層ゴムの経年変化(その 1、2)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II、pp.943-946、2017.8

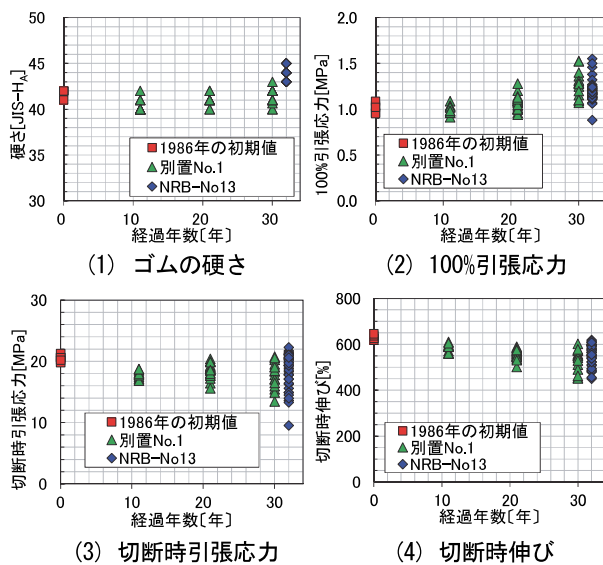


図-12 ダンベル試験片の測定結果

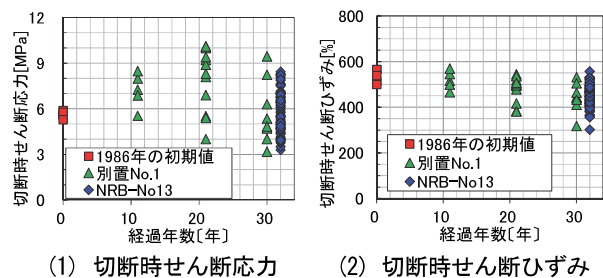


図-13 せん断試験片の測定結果

- 8) 日本建築センター、「ビルディングレター 日本建築センター性能評価シート」、pp.155-156、1987.3
- 9) 舟木秀尊、小山慶樹、山上 聡、「1986年に竣工した実免震建物における免震装置の水平剛性の評価」、日本建築学会技術報告集、第24巻、第58号、pp.979-984、2018.10
- 10) 森田慶子、高山峯夫、「免震用積層ゴムアイソレータの経年変化調査の実態把握」、日本建築学会技術報告集、第19巻、第41号、pp.31-35、2013.2
- 11) 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、2018.9