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

EVALUATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE BASE- ISOLATION SYSTEM ON THE ACTUAL BUILDING

舟木秀尊 — * 1 小山慶樹 — * 1
山上 聡 — * 1

Hidetaka FUNAKI — * 1 Yoshiki KOYAMA — * 1
Satoshi YAMAGAMI — * 1

キーワード：

免震建物, 積層ゴム, 鋼棒製ダンパー, 静的加力実験,
自由振動実験

Keywords:

Base-isolated building, Natural rubber bearing, Steel bar damper,
Static loading test, Free vibration test

Free-vibration experiments and static loading experiments were conducted on a 30-year-old base-isolated building in order to evaluate and compare the measured horizontal stiffness of the base-isolation systems obtained from the two experiments. As a result, the horizontal stiffness results obtained from the free vibration experiment showed good agreement with the secant stiffness results obtained from the static loading experiment. This confirms the validity of evaluating the dynamic response of a building seismically isolated by means of natural rubber bearings and steel bar dampers in terms of mechanical properties observed in a static loading test.

1. はじめに

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。しかし、我が国において免震構造が実用化されてから30年程度の歴史であり、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、黎明期の実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。免震構造のさらなる普及には、免震構造の性能と長期にわたる信頼性に関するデータの蓄積が重要であるとの認識に立ち、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。さらに、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)}。これに対し、実建物を用いて免震層全体の動的特性と静的特性を実測した例は少ない。本報では、実建物を用いて静的加力実験と自由振動実験を行い、免震層の変位と荷重および周期の関係から水平剛性を評価した。あわせて、積層ゴムと鋼棒製ダンパーを取り出し、免震装置単体の経年変化を調査した。

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。積層ゴムのゴム径は500mm、ゴム層は7mm×14層であり、ゴム総厚は98mmである。また、1次形状係数は17.1、2次形状係数は5.1であり、ゴム材料のせん断弾性率は0.43N/mm²である。鋼棒製ダンパーは、4巻のループ状の鋼棒よりなる鋼製弾塑性ダンパーである。鋼棒の直径は50mm、ループの直径は550mmであり、材質はS20Cである。

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
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基
	ダンパー	鋼棒製ダンパー φ50×12基

本稿は日本建築学会大会学術講演会¹¹⁾において発表した内容を加筆・修正したものである。

¹⁾ ㈱奥村組
(〒300-2612 茨城県つくば市大砂387)

¹¹⁾ Okumura Corporation

3. 免震建物を対象とした実験

3.1 実験の概要

建物の外部に構築した反力体に、2 台の油圧ジャッキを取り付けた載荷装置を設置し、静的加力実験と自由振動実験を行った。免震装置の配置と加力位置を図 1 に示す。実験パラメータは、鋼棒製ダンパーの有無による 2 ケースである。実験では、耐圧盤と上部構造の相対変位および静的加力実験における油圧ジャッキの荷重を計測した。載荷装置を図 2 に、載荷状況を写真 2 に示す。竣工時（1986 年）、2 年目（1988 年）、19 年目（2005 年）、30 年目（2016 年）とも、同じ載荷装置を用いて実験を実施している。

水平剛性に影響を及ぼす経年変化以外の要因として、建物重量の変化と温度条件の違いが挙げられる。建物重量の変化は、これまで大規模な改修を行っていないことから軽微と考えた。温度条件の違いは、影響を極力取り除くために過去の実験と実施時期を合わせた。

3.2 静的加力実験

静的加力実験は、油圧ジャッキを用いて建物を片押しで加力し、所定の荷重に達したところで徐々に除荷する方法とした。その際、免震装置の変形量は 100mm（積層ゴムせん断変形率 $\gamma \approx 100\%$ ）を超えないものとした。加力において、最大荷重の目標値を 3000kN（ダンパーあり）および 2500kN（ダンパーなし）とした。

3.3 自由振動実験

自由振動実験は、油圧ジャッキにより免震層の相対変位が 100mm

となるように強制変形させ、図 2 に示す載荷装置の解放ジャッキにより瞬時に開放し、上部構造を自由振動させた。

3.4 免震層の水平剛性（積層ゴム+鋼棒製ダンパー）

a. 静的加力実験

鋼棒製ダンパーが有る状態での静的加力実験から得られた荷重と変位の関係を図 3 に示す。ここでは竣工から 2 年後の 1988 年の実験データを初期とした。実験値と併せて設計値を示しており、初期剛性は $K_1=4459\text{kN/mm}$ 、2 次剛性は $K_2=2107\text{kN/mm}$ 、降伏荷重は $\sigma_y=1308\text{kN}$ である。静的加力実験から評価した水平剛性は、設計値と概ね一致することを確認した。鋼棒製ダンパーが降伏する 30mm 以降の 2 次剛性については、竣工後ほとんど変化が見られない。水平剛性を詳細に調べるため、荷重と変形の関係の包絡線から求めた各変位における割線剛性を図 4 に示す。19 年目、30 年目において、積層ゴムと鋼棒製ダンパーで構成される免震層全体の割線剛性は、変位が 40mm 以下と小さい場合には僅かに大きくなるものの、それ以降の変形では概ね同じとなった。

写真 2 載荷状況

図 1 免震装置の配置と加力位置

図 2 載荷装置

図 3 荷重と変位の関係（ダンパーあり）

図 4 各変位における割線剛性（ダンパーあり）

b. 自由振動実験

自由振動実験より得られた変位の時刻歴波形を図5に示す。初期サイクルを除く自由振動10回の繰り返しに要した時間は、2年目の12.06秒に対し、19年目は12.15秒と長くなり、30年目は11.66秒と3.4%短くなった。19年目が長くなった要因として、鋼棒製ダンパーの取付けボルトの固定度が低かったこと等が考えられるが、免震層全体として周期特性に大きな変化は見られない。各変位レベルにおける免震装置の水平剛性を評価するために、図6のように1/2サイクルごとにおける周期と振幅を求め、各振幅（変位）における周期をプロットしたものを図7に示す。この方法で求めた周期は、微小振幅の範囲にばらつきが見られるものの、2年目に対して19年目と30年目の経年による変化は殆ど見られない。

c. 静的加力実験と自由振動実験による剛性の比較

図7に示した周期に対して、上部構造の質量を2150tと仮定して剛性に換算したものを、静的加力実験結果（図4）と合わせて図8に示す。自由振動実験と静的加力実験から求めた剛性は、各変位で良い対応を示している。免震建物の変位と周期の関係は、静的加力実験から得られる免震装置の剛性により評価できることを確認した。

3.5 積層ゴムの水平剛性（鋼棒製ダンパーなし）

a. 静的加力実験

積層ゴムのみの静的加力実験における荷重と変位の関係を図9に示す。竣工時に比べて19年目と30年目の積層ゴムの剛性は高くなっている。竣工時から19年目にかけての剛性の変化に対して、19年目から30年目の変化が小さいことから、経年変化が鈍化していると考えられる。図9の包絡線から求めた各変位における積層ゴムの割線剛性を図10に示す。変位60mmまでは剛性が小さくなり、60mm以降は高くなっている。竣工時と19年目、および竣工時と30年目の

図5 変位の時刻歴波形（ダンパーあり）

図6 周期と振幅の評価

割線剛性の比を求めて、変位0～100mm間で平均すると、19年目の剛性は竣工時から8.7%高くなったのに対し、30年目では竣工時から9.7%高くなった。

図7 周期の変化（ダンパーあり）

図8 割線剛性の比較（ダンパーあり）

図9 荷重と変位の関係（ダンパーなし）

図10 各変位における積層ゴムの割線剛性（ダンパーなし）

b. 自由振動実験

自由振動実験における変位の時刻歴波形を図 11 に示す。ダンパーありと同様に自由振動 10 回繰り返しに要した時間は、竣工時の 18.48 秒に対して 19 年目では 17.83 秒となり、3.5% 短くなった。そして今回 30 年目では 17.67 秒となり、竣工時から 4.4% 短くなった。建物質量は変わらないと仮定して積層ゴムの水平剛性の変化率を求めると、19 年目では 7.4% 高く、30 年目では 9.4% 高くなっており、これは静的加力実験の結果と概ね一致している。積層ゴムの水平剛性の変化を評価するため、変位の時刻歴波形から図 6 の方法で求めた各振幅の周期を図 12 に示す。変位に依存して周期が変わる傾向があり、19 年目と 30 年目の各振幅における周期は、竣工時から概ね 4% 程度短くなっている。

2016 年 11 月に積層ゴムのみの状態で初期変位を 10cm 与えた自由振動実験を繰り返し行った。8 日間で 1 日に 2~5 回、合計 29 回の

図 11 変位の時刻歴波形(自由振動実験)

図 12 各振幅における周期の変化

図 13 繰り返し前後での変位波形の比較

実験を行った。途中、静的加力実験を 7 回行っている。1 回の自由振動実験による累積変形は約 1.9m であり、29 回の合計で約 55m となる。自由振動実験における 1 回目と 29 回目の時刻歴変位波形を重ねて図 13 に示す。今回、実験を行ったせん断変形率 100% の範囲において、天然ゴム系積層ゴムの繰り返し変形による水平剛性の変化は殆ど見られなかった。

4. 免震装置単体を対象とした実験

4.1 実験概要

単体の免震装置を対象として経年変化を調査するため、対象建物から免震装置を取り外し(写真 3)、加力実験を行った。単体実験の対象は、積層ゴム 2 基と鋼棒製ダンパー 12 基(全数)とした。

4.2 積層ゴムの圧縮せん断実験

積層ゴムの圧縮せん断実験は、鉛直荷重 1200kN を与えた状態で最大振幅±200mm の水平加力を 3 サイクル繰り返した。建設当時に実施された圧縮せん断実験と比較するため、同じ試験機を使用して実験条件を合わせた。実験は、当時と同様に、積層ゴム 2 基を加振ベッドの上下に取り付けて加力する方法とした。その際、積層ゴムは、当時の実験と同じ組み合わせとなる 2 基を用いた。

免震建物の実験が 25 基の積層ゴムを対象としているのに対し、単体実験は抜き取った 2 基による評価となる。また、積層ゴム出荷時の製品検査における積層ゴム 2 基毎の水平剛性は、別置き試験体を含む 29 基の水平剛性の平均値に対し、最大値が+4.0%、最小値が-4.4%である。今回の単体実験における 2 基の積層ゴムは、水平剛性が製品検査における 29 基の平均値に近いものを使用した。

圧縮せん断実験の状況を写真 4 に示す。また、竣工時(1986 年)と

写真 3 積層ゴムの入れ替え工事の状況

写真 4 圧縮せん断実験の状況

図 14 積層ゴムの水平荷重と変形（竣工時と 30 年目）

30 年目（2017 年）の実験を比較して積層ゴムの水平荷重と変形の関係を図 14 に示す。ここでは、3 サイクル目の結果を示している。30 年目の積層ゴムの剛性比は、せん断変形率 100%の割線剛性により評価すると竣工時から 12.2%高くなっている。一方、免震建物を対象とした実験と同様に、割線剛性の比を求めて変位 0～100mm 間で平均すると剛性比は竣工時から 9.2%高い結果となり、建物全体での評価とほぼ一致した。積層ゴムの外周表面には、外部劣化因子⁹⁾からゴム材を保護するために被覆ゴムが巻かれている。今回 30 年目の調査では、被覆ゴムの有無をパラメータとして実験を行った。被覆ゴムの有無に着目すると、変形が 150mm よりも小さい範囲では水平剛性への影響は殆ど見られず、それを超えると水平剛性は僅かに高くなった。なお、3. の免震建物を対象とした実験は、積層ゴムの被覆ゴムの巻いた状態で実施しているが、せん断変形率 100%の範囲であり、被覆ゴムの水平剛性への影響は小さかったと考えられる。

4.3 鋼棒製ダンパーの単体実験

実建物で 30 年間使われた鋼棒製ダンパーの基本特性や残存性能を確認するために、静的加力と動的繰返し加力の実験（写真 5）を行った。試験体は、建設当時から展示品として保存されていた鋼棒製ダンパー 1 基（No.0：劣化なし）と対象建物の免震層から抜き取った 12 基（No.1～No.12：劣化あり）である。

静的加力実験は、No.0～No.12 の全数（4 巻ループの試験体）を対象とし、振幅 $\pm 10, 20, 50, 100, 150$ mm を各 1 回の漸増加力により実施した。実験結果の一例として、展示品（No.0）と抜き取り品（No.1～12）の履歴特性を重ね合わせて図 15 に示す。展示品と比較して、実際の免震建物に使用されている鋼棒製ダンパーの履歴特性に、経年による剛性低下は見られなかった。

動的繰返し加力は、静的加力実験で使用した 4 巻ループの試験体（No.0, No.7）から 1 巻ループを各 2 個ずつ取り出して実施した。振幅を ± 5 cm（加力周波数 0.05Hz）と ± 20 cm（加力周波数 0.01Hz）に固定し、鋼棒製ダンパーが破断するまで加力を繰返して回数を

a) 静的漸増加力 b) 動的繰返し加力
写真 5 加力実験の状況

図 15 静的加力（4 巻ループ試験体）の履歴特性

a) 抜き取り品 ± 50 mm 加力時 b) 抜き取り品 ± 200 mm 加力時
図 16 動的繰返し加力（1 巻ループ試験体）の履歴特性

図 17 振幅と破断までの繰返し回数

求めた。動的繰返し加力の履歴特性を図 16 に、振幅と破断までの繰返し回数を図 17 に示す。振幅 ± 5 cm における破断までの繰返し回数は、展示品の 1273 回に対し、抜き取り品が 761 回であった。抜き取り品の鋼棒製ダンパーは、小振幅の領域において多くの地震や加力実験を経験しており、展示品よりも早く疲労破断したと考えられる。

5. 経年変化の予測値との比較

本免震建物を設計する際、積層ゴムの水平剛性等の経年変化について、ゴムの化学反応速度理論に基づく熟老化促進試験¹⁰⁾により、その性状を推定している。この試験は、積層ゴムを促進温度 80～100℃程度で一定期間加熱し、加熱後の特性を経年後の特性とみなす方法である。その際の経年時間は、アレニウスの理論に基づき、加熱条件を環境温度での経過時間に換算して評価される。積層ゴムは、ゴムと鋼板が積層された構造であることから、酸素によるゴムの劣化は積層ゴム表面で発生し、内部まで進行しないと考えられる。そのため、本免震建物の設計時には、空気中における積層ゴム（ $\phi 400$ ）と、酸素に触れない積層ゴム内部のゴム層を想定した窒素中におけるゴム材料の熟老化促進試験を実施している。

竣工時、19 年目、30 年目における静的加力実験と自由振動実験から得られた積層ゴムの剛性変化率と、設計時の熱老化促進試験より得られた環境温度 20℃における経年変化の予測値を図 18 に示す。免震建物の静的加力実験と自由振動実験から評価した積層ゴムの水平剛性の変化率は、設計当時の熱老化促進試験により予測した範囲内で推移していることがわかる。設計時に想定した積層ゴムの耐久目標は 30 年であり、供用中の交換も考えている。積層ゴムの耐用年数は、水平剛性（設計値±30%）、鉛直剛性（設計値±30%）、変形能力（25cm 以上）、鉛直変位量（15mm 以下）のいずれか 1 つが設計許容値を超えた時と定義されている。今回の追跡調査から、約 30 年間使用した積層ゴムの諸特性は、設計許容値の範囲内であった。

図 18 竣工時に対する経年時の剛性変化率

6. まとめ

竣工後 30 年が経過した免震建物を用いて、静的加力実験と自由振動実験を実施した。併せて、建物から取り出した積層ゴムと鋼棒製ダンパーの単体実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 免震建物を加力した実験の範囲において、積層ゴムと鋼棒製ダンパーで構成される免震層全体の水平剛性に、大きな変化は見られなかった。
- (2) 積層ゴムのみが設置された免震建物の実験によれば、積層ゴムの水平剛性は、変位 0～100mm 間で平均すると、竣工時から 9.4～9.7%程度硬くなっている。
- (3) 天然ゴム系積層ゴムは、せん断変形率 100%の範囲において、繰り返し変形（29 回の自由振動実験と途中 7 回の静的加力実験）による剛性の変化は殆ど見られなかった。
- (4) 免震建物の変位と周期の関係は、免震装置の静的加力実験から得られる割線剛性により評価できる。
- (5) 1986 年に竣工した実免震建物において、積層ゴムの水平剛性は熱老化促進試験により予測した範囲内で推移しており、積層ゴムと鋼棒製ダンパーを合わせた免震層全体の水平剛性は経年による変化が殆ど見られなかった。

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。その直後に、静的加力実験と自由振動実験を実施しており、このデータを踏まえて、今後も追跡調査を継続していく。

謝辞

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きました。ここに記して感謝の意を表します。

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
- 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) 濱口弘樹, 長谷川完, 大武義人:「積層ゴム支承被覆ゴムの長期劣化による化学特性変化」, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 725 号, pp.1081-1089, 2016.7
- 10) 日本ゴム協会及び日本免震構造協会,「改訂版 設計者のための建築免震用積層ゴム支承ハンドブック」, p.189, 2017
- 11) 山上 聡, 舟木秀尊, 安井健治, 小山慶樹, 三須基規, 高山峯夫:「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, 構造 II, pp.937-938, 2017.8

[2018 年 2 月 7 日原稿受理 2018 年 4 月 2 日採用決定]