

実在免震建物の振動実験におけるオイルダンパーの減衰力計測

DAMPING FORCE MEASUREMENT OF OIL DAMPERS USING VIBRATION EXPERIMENT AT BASE ISOLATED BUILDING

金子直人*, 前田理沙*, 飛田潤**, 福和伸夫***, 中村悠太****

Naoto KANEKO, Risa MAEDA, Jun TOBITA, Nobuo FUKUWA and Yuta NAKAMURA

This paper presents a method for directly measuring the force acting on the oil damper installed in an actual base-isolated building, and examines the damping force during vibration experiments in detail. A strain gauge is attached to the shaft of the oil damper, and dynamic strain is measured and converted into force. The target building can be subjected to a free vibration experiment with an initial displacement of 130 mm and a forced vibration experiment with a maximum relative velocity of about 5 cm/s for the seismic isolation layer. As a result, the damping force of the oil damper is consistent with the assumed performance, however, the detailed characteristics are not simple viscous damping such as the speed and the damping force are not proportional. There were also differences between each oil dampers. Some of these characteristics can be expressed by the Maxwell model, which takes stiffness into consideration, but it was also clarified that there are some points to be considered in relation to the internal structure of the oil damper.

Keywords : Base-isolated Building, Oil damper, Free vibration experiment, Forced vibration experiment, Damping force measurement, Modeling of damping characteristics

免震建物, オイルダンパー, 自由振動実験, 強制振動実験, 減衰力計測, 減衰モデル

1. はじめに

大地震時の建物被害軽減、機能維持を図る観点から免震建物の普及が進んでいる。免震建物の設計時には様々な応答計算が行われ、中でも免震層特性に大きく関わる免震装置は重要なファクターである。免震装置は製造時に厳格な製品検査が行われ、その性能が十分に発揮されることを想定して免震建物は設計される。一方で供用中の建物での免震装置の動きは、強震観測された建物応答からの間接的な把握に留まり、個々の免震装置特性の把握は困難な場合が多い。

大地震時の免震建物の応答評価例は数多くあり¹⁾、また振動実験に基づく免震装置特性の継続的な検討は山上ら²⁾の研究がある。これらは応答観測に基づく振動特性の把握が主である。

筆者らは振動実験可能な免震建物である名古屋大学減災館(以下、対象建物)において、免震装置特性の把握を継続的に行ってきた(成澤ら³⁾、鶴生ら⁴⁾)。これらの研究では様々な振動実験結果より、免震層特性について剛性、粘性減衰、摩擦等の要因を区別して評価する手法を検討してきた。本論文では、オイルダンパーの減衰特性について、直接的に計測する手法を導入する。具体的には、オイルダンパーにひずみゲージを貼付して振動実験を行い、動的ひずみを計測することにより、材料特性から作用する減衰力を評価する。

本計測により、検査時に確認された装置の性能が建物設置状態で同様の特性を示すか、また実際の振動状況でのダンパーの挙動などを直接的に把握できる。また、対象建物では自由振動実験や強制振動実験等多様な振動実験が可能であり、条件の相違によるダンパー特性の差を検討できる点が特徴である。

ひずみゲージを用いたオイルダンパーの減衰力の計測には、東北地方太平洋沖地震の地震観測記録を用いた松田ら⁵⁾の研究がある。一方、本論文では複数の振動実験装置を常設した免震建物を対象としており、多様な加振条件で再現性の高い実験を実施できる点に特徴がある。

2. 対象建物の概要と既往の研究

2. 1. 計測体制の概要

対象建物は名古屋大学東山キャンパスに位置し、地上 4 階建て+屋上実験室の RC 造基礎免震建物である。敷地は三角形に近い形状で、建築面積 731 m²、延べ床面積 2898 m²である。設計固有周期は 5.2 s、等価減衰は 30%としている。

対象建物の計測点・免震装置の配置を Fig.1 に示す。Fig.1 左は建物断面図、Fig.1 右は基礎免震層平面図である。計測機器は、建物内

*名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生

**名古屋大学災害対策室 教授 工博

***名古屋大学減災連携研究センター 教授 工博

****名古屋大学減災連携研究センター 受託研究員

Grad Student, Grad School of Environment Studies, Nagoya Univ.

Prof, Disaster Management Office, Nagoya Univ, Dr.Eng.

Prof, Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ, Dr.Eng.

Researcher, Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ.

各箇所の加速度計(8点)に加え、免震層には土圧計(4点)と相対変位計(2点)が設置されている。これらの観測体制を生かし、対象建物では竣工以来多くの振動実験記録・地震観測記録を蓄積している。

免震装置は積層ゴム、オイルダンパー、直動転がり支承(CLB)を採用しており、免震層全体としてほぼ線形弾性の復元力特性である。そのため小規模な力で、かつ繰り返し振動実験が可能である。

2. 2. 振動実験の概要

対象建物では、自由振動実験と強制振動実験の2種類の振動実験が可能である。

自由振動実験は、基礎免震層に常設された油圧ジャッキで上部建物を引いて強制変位を与え、それを開放することで行う。強制変位の最大値は約130 mmである。強制変位を与えるのに要する時間は約30分であり、比較的短時間で繰り返し実験が可能である。

強制振動実験は、免震装置に支えられた屋上実験室を電動アクチュエータで加振することで行う。加振周期を免震実験室の固有周期と一致させて共振増幅することで大振幅の加振を可能にしている。屋上実験室の質量は約410 tであり、上部建物の質量約5600 tに対して約7%に相当する。

2. 3. 対象建物の既往の研究成果

対象建物で行われた既往の研究成果を要約する。静的加力、自由振動実験、強制振動実験を行い、応答記録から免震装置特性を分析する。本節は主に鶴生ら⁴⁾の報告を引用している。

2. 3. 1. 静的加力

ジャッキにより強制変位を与えた際の力-変位の関係から、基礎免震層の水平剛性と摩擦力を推定する。載荷の向きはFig.1中の-X方向である。推定方法は最小二乗法であり、推定結果の傾きが接線剛性、切片が摩擦力に相当する。Fig.2に静的加力時の力-変位の関係を、Table1に実験条件を示す。次の3点を検討項目とし、実験条件は5ケースを用意した。

- 1) 振幅依存性：case1、case3、case5
- 2) 経年変化：case2、case3
- 3) オイルダンパーの有無：case4、case5

1)の振幅依存性について、振幅が大きいくほど接線剛性が小さく、摩擦力が大きい。また、変位138 mm(case1)と80 mm(case5)の剛性と摩擦力の差はそれぞれ4.1%、7.2%である。このことより免震層の振幅依存性が確認できる。

2)について、case2とcase3から約2年4か月間の経年変化が分かる。結果は、接線剛性は6.6%の減少、摩擦力は40.9%の増加となった。しかしcase2は2017年2月時点の結果であり、現在に至るまでのより長期間でみた経年変化の把握も今後必要である。

3)について、オイルダンパーの有無による接線剛性と摩擦力の差はほぼ見られない。

積層ゴム5基の水平剛性の設計値は変位100 mmにおいて12.6 kN/mm(面圧、せん断依存性考慮)であり、case3の接線剛性は設計値より2.8%大きい。また免震層の摩擦は主にCLBが占めると考えられ、その摩擦係数0.0039とCLBの負担軸力4220 tの積から摩擦力は161.5 kNとなる。いずれの条件の摩擦力もこれを上回り(+3.8~48.4%)、エキスパンションジョイント等CLB以外の要因の干渉が考えられる。

2. 3. 2. 自由振動実験

自由振動実験時の、上部建物の質量に加速度を乗じた慣性力と免震層相対変位の関係をFig.3に示し、実験条件をTable2に示す。case3~5は2.3.1と同じである。また、変位の向きはFig.1中のX方向である。ダンパー有りのcase1、4は振動が急激に減衰した。一方で、ダンパー無しのcase2、3、5はいずれの振幅でも履歴の形状が静的加力時の力-変位の関係とよく一致した。

基礎免震層相対変位波形について、自由振動の理論式に基づき固有周期、減衰定数、基礎免震層の摩擦係数の推定を行った結果を



Photo 1 Subject building

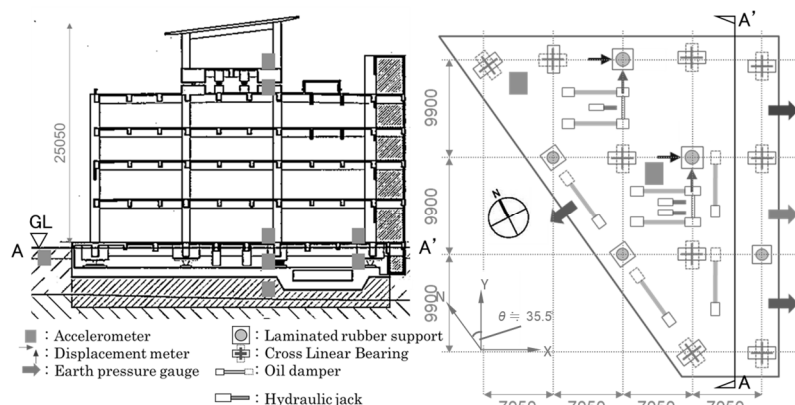


Fig.1 Measuring instruments and isolation devices

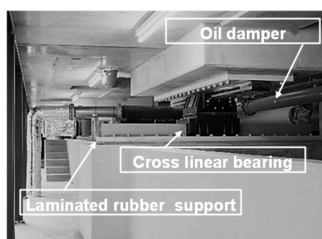


Photo 2 Base-isolation layer

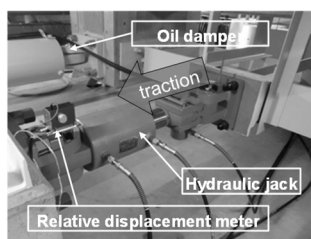


Photo 3 Hydraulic jack



Photo 4 Rooftop laboratory

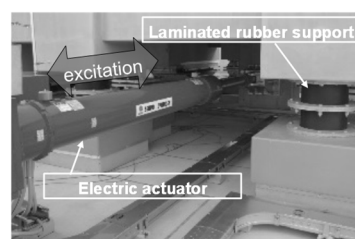


Photo 5 Electric actuator

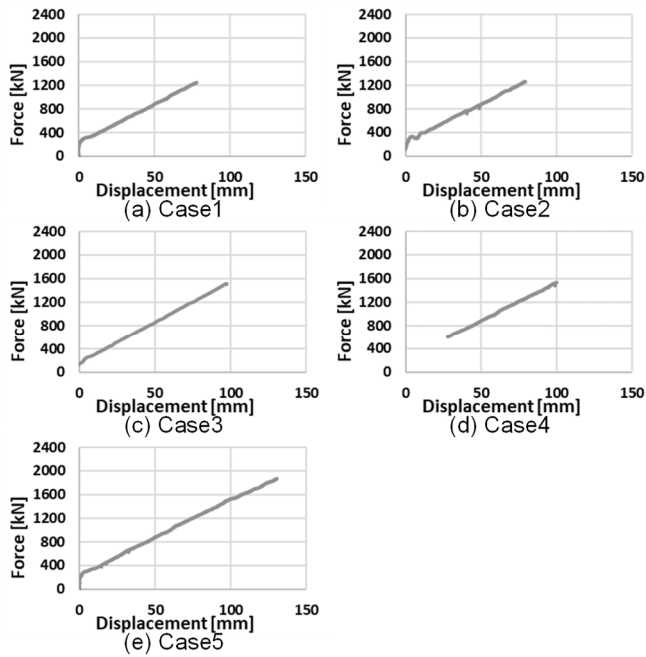


Fig.2 Load-dis. relationship (static loading test)

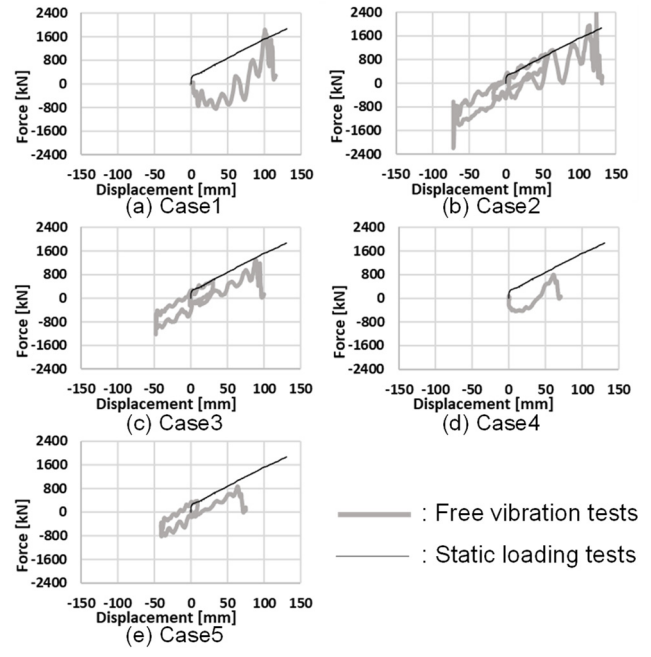


Fig.3 Hysteresis (free vibration tests)

Table 1 Stiffness and frictional force (static loading test)

	Date	Initial disp. [mm]	Oil damper	Stiffness [kN/mm]	Frictional force [kN]
case 1	2017/2/5	138	Off	12.65	239.66
case 2	2014/10/26	100	Off	13.87	168.22
case 3	2017/2/5	100	Off	12.95	237.86
case 4	2017/2/5	80	On	12.73	234.39
case 5	2017/2/5	80	Off	13.17	222.46

Table 2 Estimated parameters with natural periods, damping and friction coefficient

	Initial disp. [mm]	Oil damper	Natural period [s]	Damping	Friction coefficient
case 1	138	On	4.58	0.84	
case 2	138	Off	3.94	0.11	0.0025
case 3	100	Off	3.81	0.10	0.0039
case 4	80	On	4.04	0.82	
case 5	80	Off	3.79	0.14	0.0033

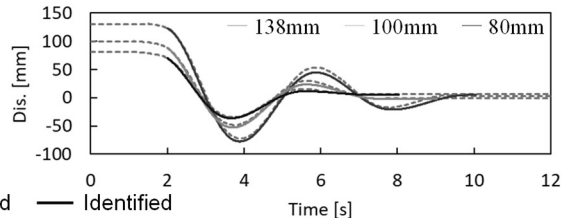
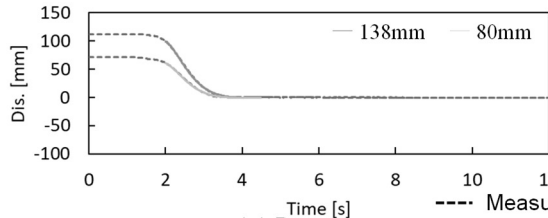


Fig.4 Identified waveform (free vibration tests)

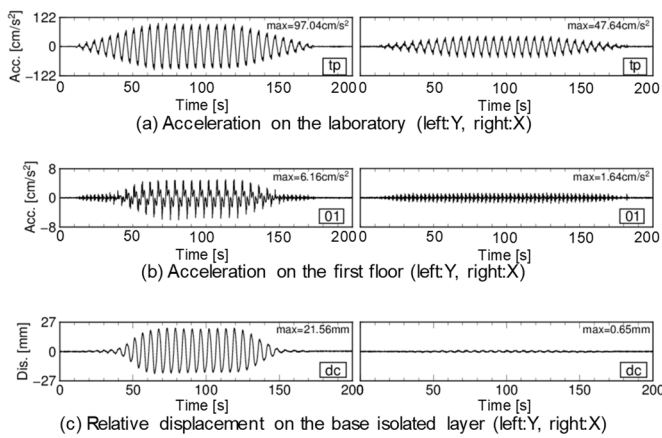


Fig.5 Acceleration and displacement
(forced vibration tests, damper on)

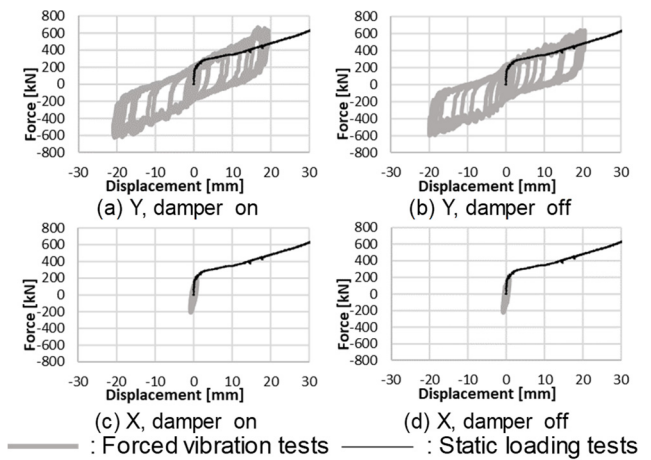


Fig.6 Hysteresis (forced vibration tests)

Fig.4、Table2 に示す。Table2 中の damping は減衰定数、friction coefficient は摩擦係数である。ダンパー有りの場合はオイルダンパーによる減衰が支配的であるため 1 自由度粘性減衰モデル(式(1))を解いた式(2))を、ダンパー無しの場合は CLB の摩擦の影響が強いため CLB による摩擦減衰とその他要因による粘性減衰を組み合わせたモデル(式(3))を解いた式(4))を用いた。式中、 m は建物質量(=5600 t)、 d_0 は初期変位(mm)、 v_0 は初期速度(mm/s)、 t は時間(s)である。推定するパラメータについて、 h は減衰定数(-)、 ω は固有円振動数(s^{-1})、 R は摩擦係数(kN)である。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = 0 \quad (1)$$

$$y(t) = e^{-h\omega t} [d_0 \cos \sqrt{1-h^2} \omega t + \frac{v_0 + h\omega d_0}{\sqrt{1-h^2} \omega} \sin \sqrt{1-h^2} \omega t] \quad (2)$$

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky + \text{sgn}(\dot{y})R = 0 \quad (3)$$

$$y_i(t) = e^{-h\omega(t-t_i)} \left[\left\{ d_i + \text{sgn}(\dot{y}(t-t_i)) \frac{R}{m\omega^2} \right\} \cos \sqrt{1-h^2} \omega(t-t_i) + \frac{v_i + h\omega \left\{ d_i + \text{sgn}(\dot{y}(t-t_i)) \frac{R}{m\omega^2} \right\}}{\sqrt{1-h^2} \omega} \sin \sqrt{1-h^2} \omega(t-t_i) \right] - \text{sgn}(\dot{y}(t-t_i)) \frac{R}{m\omega^2} \quad (4)$$

$$d_i = d_0 \ (i=0), y_{i-1}(t_i) \ (i>0) \quad v_i = v_0 \ (i=0), 0 \ (i>0)$$

Table.2 より、推定された固有周期は設計値より小さく、また振幅が小さいほど小さい結果となった。推定された減衰定数は後述のオイルダンパー減衰力計測結果との比較に用いる。推定された摩擦係数は CLB の摩擦係数の設計値 0.0039 とおおよそ一致した。

2. 3. 3. 強制振動実験

Fig.5 に強制振動実験時の上部建物の加速度と免震層相対変位を示す。Y 方向の結果より、屋上実験室の絶対加速度が 50 cm/s^2 を超える辺りから建物本体の応答が増大している。この時の加振力は約 200 kN であり、Table1 の免震層摩擦力とおおよそ対応している。一方で X 方向は屋上実験室の絶対加速度が 50 cm/s^2 を超えておらず、上部建物の応答は増大していない。自由振動実験時の、上部建物の質量に加速度を乗じた慣性力と免震層相対変位の関係を Fig.6 に示す。Y 方向は摩擦力と剛性が、X 方向は摩擦力が静的加力結果とよく対応する。

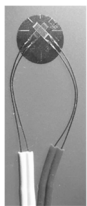


Photo 6 Strain gauge

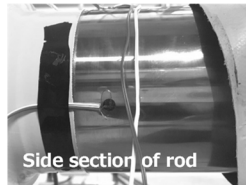


Photo 7 Strain gauges installation on oil damper rod

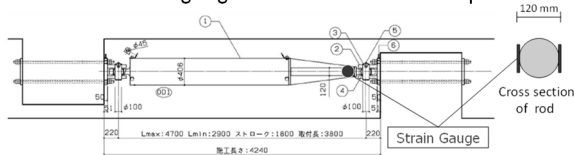


Fig.8 Strain gauges stacking position

Fig.7 4 gauge-method

3. オイルダンパーの減衰力計測

3. 1. 計測の概要

2.3 で述べた既往の研究では、免震層の応答に各免震装置が与える影響を分離して評価した。その発展として本論文ではオイルダンパーの計測を行った。そのため本章以降では減衰力の計測結果のみの分析に重点を置いた。なお、減衰力の計測結果に加えてオイルダンパーなしでの実験結果を用いることで積層ゴムや CLB を加味した、総合的な減衰の評価は今後の課題である。

本論文では、基礎免震層のオイルダンパー 8 基全てにひずみゲージを貼り付け振動実験を行うことで、ダンパーの復元力を計測する。なお、8 基のダンパーはすべて同一仕様の製品である。

ひずみゲージは(株)東京測器研究所のものを使用した。計測対象はオイルダンパーロッドの軸ひずみである。測定方法には感度が高く、温度変化の影響が抑えられ、またノイズの影響も少ない 4 ゲージ法とした(Fig.7)⁶⁾。貼り付け位置は、振動実験時にひずみゲージがシリンダーと接触しないこと、加えてオイルダンパーの自重による曲げひずみの影響を受けにくいことの 2 点に留意し、基礎側ピンに近い位置のロッド部分とした(Fig.8)。

計測された軸ひずみ ε からダンパーの減衰力 P を求める際には、以下の式(5)、(6)を用いる。ここで、 E は鋼材ヤング係数(=205 kN/mm^2)、 A はロッド断面積(=11309.7 mm^2)である。

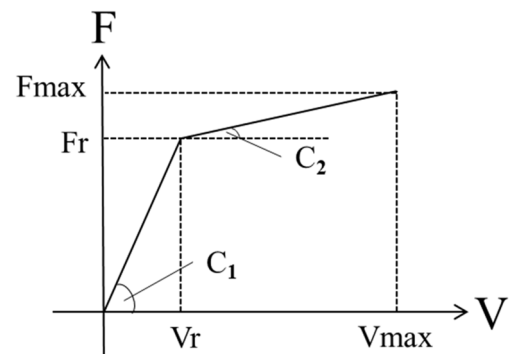
$$\sigma = E\varepsilon \quad (5)$$

$$P = A\sigma = AE\varepsilon \quad (6)$$

3. 2. オイルダンパーの設計値

計測対象オイルダンパーについて、対象建物の設計図書に記載された設計値を Fig.9 に示す。速度に比例した減衰力を発揮し、速度の大きさに応じた 2 段階の減衰係数を持つ。

対象建物の振動実験における最大速度は約 0.09 m/s である。したがって本論文の考察は減衰係数 C_1 の範囲に対応する。また当該ダンパー製造時、製造者の提示する性能保証範囲は 0.1 m/s 以上であり、本論文の考察はその範囲外となる。



Relief vel. V_r [m/s]	Relief force F_r [kN]	Damping coefficient C_1 [kN/(m/s)]
0.32	800	2500
Limit vel. V_{max} [m/s]	Maximum force F_{max} [kN]	Damping coefficient C_2 [kN/(m/s)]
1.5	1000	169.5

Fig.9 Design value of oil damper

3. 3. 計測体制

本論文の分析は、主に次の3種を用いて行う。1つ目は計測対象ダンパー(Fig.10に示す番号を振り以下OD ~ と表記)の減衰力、2つ目は2箇所の変位計(Fig.10中のdc、dn)から得られる免震層相対変位(計測はX、Yの2方向)、3つ目はその変位を微分して得られる免震層相対速度である。

今回の計測ではダンパー単体の軸方向変位を直接計測していない。そのためダンパー単体の変位或いは速度は、各ダンパーから最も近い位置の相対変位計の変位或いは速度で代用する。具体的な対応について、OD①・②にはdnのX方向、OD③・④にはdcのX方向、OD⑤・⑥にはdcのY方向、OD⑦・⑧はdcの計測値をN方向に成分分解したものを用いる。変位は、ダンパーの伸側を正とする。

3. 4. 実験内容

X方向は強制振動実験に加え、振幅を変えた自由振動実験(130 mm, 80 mm, 50 mm)を、Y方向は強制振動実験をそれぞれ行った。Fig.4の(a)よりダンパー設置時の自由振動実験は非振動的な一方向の変位であり、ダンパーの伸側或いは縮側のうち片方の特性のみが分かる。一方でFig.5より強制振動実験は振幅は小さいが繰り返し変位のため、ダンパーの両側の特性が分かる。

4. 計測結果

4. 1. 自由振動実験

自由振動実験(X方向加振)の減衰力計測結果について述べる。分析対象はX方向のOD①~④、N方向のOD⑦・⑧でありY方向のOD⑤・⑥には減衰力がほぼ発生していないことを確認している。自由振動実験は1方向の変位であり、OD①~④は引張りひずみ(減衰力は正)、OD⑦・⑧は圧縮ひずみ(減衰力は負)が生じる。

4. 1. 1. 時刻歴変化

Fig.11に強制変位130 mmの自由振動実験時の変位(上段)、速度(中段)、減衰力(下段)を示す。約1秒時点のジャッキ開放から2秒程度で急速に変位が収まり、その際の最大速度は89.6 mm/sである。また同条件実験を複数回行い、減衰力特性の再現性を確認している。

すべてのダンパーについて速度の発生に対し減衰力の発生が遅れており、Fig.9に示すような速度に比例した減衰力を発揮できていないことが分かる。またダンパー個々で最大減衰力、減衰力発生

タイミングに差がある。最大速度付近で減衰力も最大となっているがOD②だけはその傾向が異なり、より大きく遅れている。最大速度以降の減衰力減少過程では目立った差は見られない。なお、OD⑦・⑧は加振方向に平行ではないため、変位が小さくX方向の4本に比べ減衰力が小さくなっている。

4. 1. 2. 減衰力-速度の関係

Fig.12に減衰力-速度の関係を示し、Fig.9に示した減衰係数の設計値も併せて示した。また、Fig.12には次の2点を考察するため複数の条件の実験結果を示す。1点目は経年変化の影響であり、同振幅(初期変位130 mm)の条件で2018年度の結果と2019年度の結果を示す。2点目は振幅依存性であり、2019年度実施の初期変位130 mm、80 mm、50 mmの結果を示す。

速度と減衰力は左回りのループを描く(Fig.12中の矢印)。これはFig.11で述べた通り、速度の発生に対し減衰力の発生が遅れるためである。最大減衰力以降の傾きは減衰係数の設計値とおおよそ一致した。特に、ダンパーが伸側のOD⑦・⑧は非常によく一致した。

経年変化について、どのダンパーについても影響は小さいことが分かる。本計測は今後も継続していく予定であるため、将来的にはより長期間で見た経年変化を明らかにできる。

振幅依存性について、ループの大きさは違うが最大減衰力以降の傾きは一致している。また、減衰力が立ち上がる速度は振幅によって異なる。振幅が小さい、或いは減衰力発生が遅いダンパーは最大減衰力が小さく、ループがつぶれる形になっている。

4. 1. 3. 減衰力-変位の関係

Fig.13に減衰力-変位の関係を示す。横軸は上部建物を引き終わった時点をとし、そこからの変位量としている。初期変位が異なる場合もおおよそ同じ変位量で減衰力が発生している。また、ダンパーによりその変位量は異なる(OD②は40 mm程度、その他は10 mm程度)。よって、減衰力は各ダンパー固有の変位量を超えたとき発生すると考えられる。この原因は、松田らの研究と同様に端部のガタやダンパーの内部気泡と考えられる。これらについては、今後実施予定である出荷検査用試験機を用いたオイルダンパーの単体加振にて多様な加振を行うことで、より詳細な考察を行う。

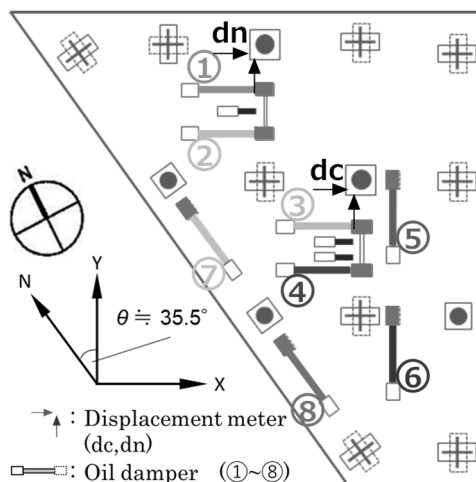


Fig.10 Oil damper location and number

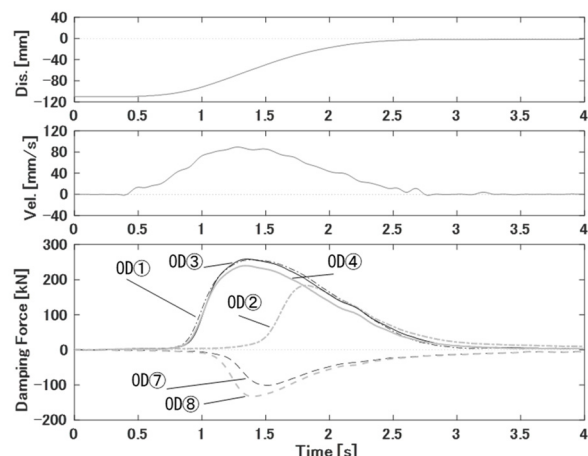


Fig.11 Damping force of each oil damper with relative dis. and vel. (free vibration tests)

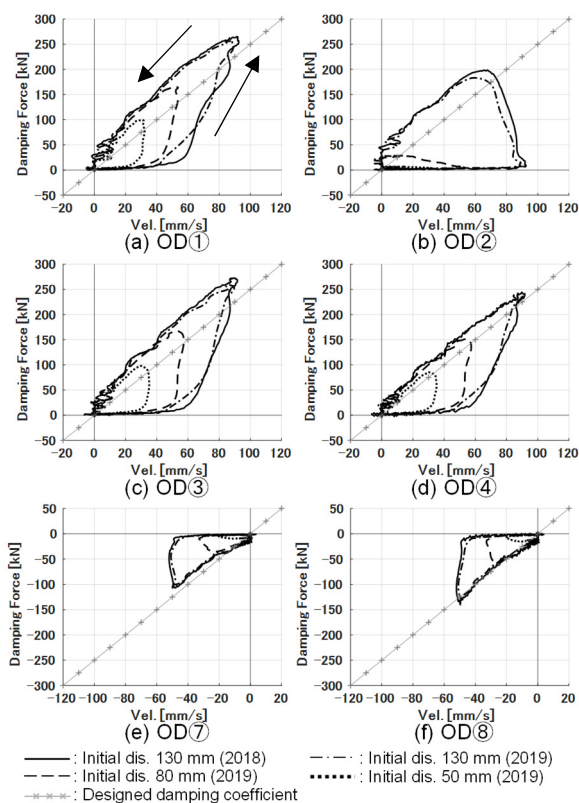


Fig.12 Relationship of damping force and relative vel. (free vibration tests)

4. 2. 強制振動実験

強制振動実験はX、Y両方向可能だが、最大変位はY方向の約30 mmに対しX方向が約15 mmと小さい。そのため振幅の大きいY方向の結果を主に用いる。同一ダンパーで自由振動実験時と強制振動実験時を比較する目的で、Fig.14にのみX方向を用いた。加振全体は70 s程度だが、そのうち振幅が十分に大きくなった10 sを切り出した。全体として自由振動実験と同様な次の特性がみられた。

- 1) 速度の発生に対し減衰力の発生が遅れる
- 2) ダンパー個々で最大減衰力、減衰力発生時の変位に差がある
- 3) 最大減衰力以降の減衰力-速度関係は減衰係数設計値に近い

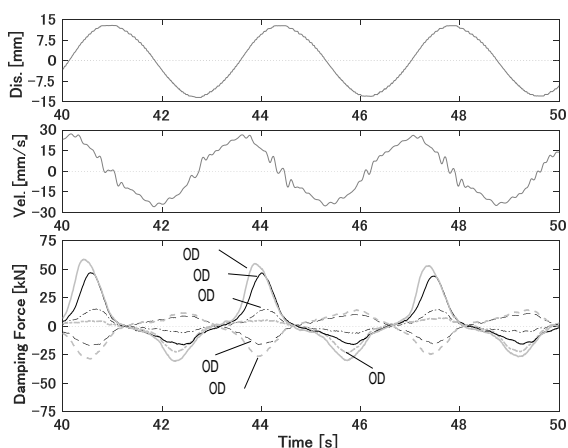


Fig.14 Damping force of each oil damper with relative dis. and vel. (forced vibration tests in the X direction)

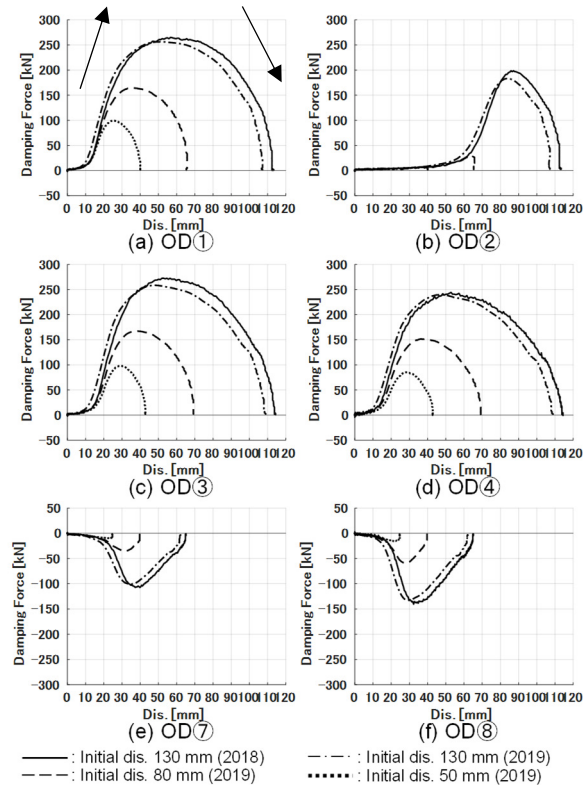


Fig.13 Relationship of damping force and relative dis. (free vibration tests)

4. 2. 1. 時刻歴変化

強制振動実験時の変位(上段)、速度(中段)、減衰力(下段)をFig.14(X方向)、Fig.15(Y方向)に示す。どちらの図でも1)の現象は、速度波形が0付近になる際の減衰力波形に表れている。

Fig.14の減衰力の挙動を、自由振動実験時と比較する。自由振動実験時と同じ方向(OD ~ は正側、OD⑦・⑧は負側)の特性について、ほぼ同値の減衰力だったOD ~ の中でOD がOD より減衰力が6割程度小さくなる等、挙動のばらつきがみられた。また自由振動実験時と違う方向では、OD②がODの減衰力を上回った。このことよりODとOD②の減衰力の大きさについて、減

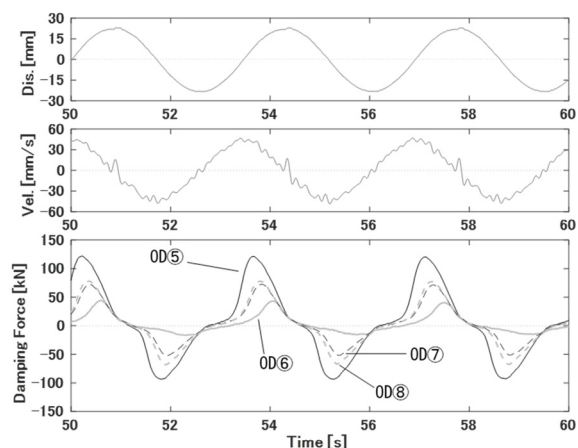


Fig.15 Damping force of each oil damper with relative dis. and vel. (forced vibration tests in the Y direction)

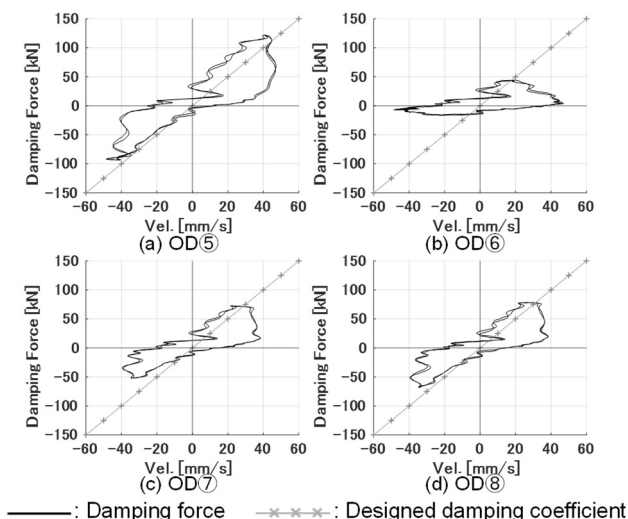


Fig.16 Relationship of damping force and relative vel. (forced vibration tests in the Y direction)

衰力の正側では OD が、負側では OD ②が大きい結果となり、ダンパーの伸側と縮側で特性が異なると考えられる。この原因はダンパーの内部構造に起因すると考えられ、詳細は今後検討していく。

Fig.15 について、分析対象は Y 方向の OD ・、N 方向の OD ・ であり、X 方向の OD ・ は減衰力がほぼ発生していないことを確認済みである。X 方向と同様に個々の特性差が見られ、N 方向の 2 本の減衰力特性は似通っているが、Y 方向の 2 本は OD の方が減衰力が大きい。

4. 2. 2. 減衰力-速度関係

Fig.16 に減衰力-速度の関係を示す。自由振動実験と異なり同一ダンパーで伸縮両側の特性を把握できるが、伸側と縮側でループ形状が違うことが分かる。また伸側の傾きの方が設計値とよく一致しており、伸側と縮側で特性が違うことが考えられる。

4. 2. 3. 減衰力-変位関係

Fig.17 に減衰力-変位の関係を示す。Fig.16 同様、伸側と縮側でループ形状が異なり減衰力発生時の変位も異なる。同じ方向の 2 本のループ形状を比べると、OD⑦・⑧では類似しているが、OD ・ ではかなり異なる。

5. 計測結果の検討

4 章で述べた減衰力計測結果について考察を加えるとともに、建物応答との比較やダンパーのモデル化の検討を行う。

5. 1. 計測結果の考察

4 章で示したように、オイルダンパーは従来の設計で考えられるような単なるダッシュポットではなく、より複雑な特性となっている。振幅の小さい範囲では一定変位まで減衰力が発生しないため、中小規模地震の検討では減衰力が十分ではない振幅領域を考慮すべきである。またダンパー個々で減衰力発生タイミングや最大減衰力が異なることもあり、免震層へじれの影響を考慮した製品ばらつきの検討が必要であると考えられる。

このようなダンパー単体の特性に関しては、オイルダンパーの内部構造の把握が重要である。減衰力発生が遅れや個々の特性差を生じさせるダンパー内部要因が解明できれば、設計時のモデルや製品

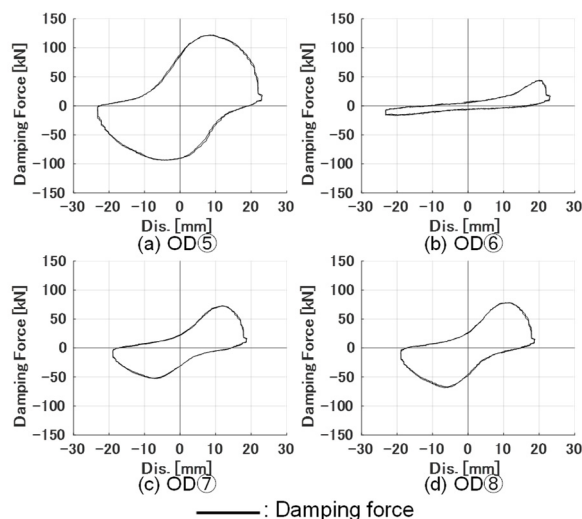


Fig.17 Relationship of damping force and relative dis. (forced vibration tests in the Y direction)

ばらつき等をより実情に合わせることができる。この検討は前田らが報告しており、ダンパーの適切なモデル化は課題である。

また 4 章の各特性を生じるダンパー以外の要因として計測手法によるものや、施工時にダンパーを設置する際の取り付け誤差等が考えられる。この検証については、今後実施予定である出荷検査用試験機を用いたオイルダンパーの単体加振に行う。

5. 2. 計測結果と建物応答の、減衰係数を用いた比較

計測結果と建物応答、設計値の減衰係数を比較する。

Fig.18 に自由振動実験時(強制変位 130 mm、80 mm)の X 方向減衰力の合力と速度の関係を示す。減衰力の合力は、各ダンパーの減衰力の X 方向成分を求め足し合わせた。減衰係数計測値は、減衰力最大値と原点を通る直線の傾きとする。これを、自由振動実験の固有周期、減衰定数の推定結果より求めた減衰係数推定値に加え、設計図書より求めた減衰係数設計値と比較する。ここでは建物応答を代表する値として、上記のように求めた減衰係数推定値を用いる。

減衰係数推定値は Table2 よりダンパー分の減衰定数 h (=ダンパー有無の差)を求め式(7)で減衰係数 c に換算する。 M は上部建物質量(=5600 t)、 k は Table.1 の接線剛性(case1 又は case5)である。

$$c = 2h\sqrt{Mk} \quad (7)$$

減衰係数設計値は、全ダンパーが Fig.9 の設計値通りの減衰係数(=2.5 kN/(mm/s))と仮定した際の X 方向減衰係数である。N 方向の速度は X 方向の $\cos\theta$ (0.58、 θ は Fig.10 参照)倍であり、発生する軸方向減衰力の X 方向成分(= $\cos\theta$ 倍)が寄与する。よって 4.67(=(4+2($\cos\theta$)²)本分の減衰係数であり、11.68 kN/(mm/s)である。

Table3 に算出結果を示す。計測値の推定値に対する割合は、130 mm で+1.7%、80 mm で-8.2%であり、設計値に対する割合は 130 mm で+7.0%、80 mm で-8.2%となり、全て±10%以内となった。よって計測結果は建物応答、設計値とよく整合していると言える。

なお Fig.18 のような速度に比例しない特性を持つダンパーの減衰特性を表現するには、ダンパーの剛性を含めた等価減衰係数を用いることが考えられる。本節では減衰力の最大値のみに着目し、剛性を考慮せず減衰係数のみを用いた簡易な比較に留まった。そのため、より詳細な比較は今後の課題である。

5. 3. Maxwell-Model との比較

Fig.12 や Fig.16 のような速度に対し減衰力が遅れる系は、ダッシュポットにばねを直列結合した Maxwell-Model の持つ特徴である。また現行のオイルダンパー性能試験も Maxwell-Model を基に行われている。そこで Fig.19 で計測結果と Maxwell-Model によるシミュレーション結果を比較する。本項では Maxwell-Model が実測とどの程度合うかの確認が目的であるため、減衰力・速度の関係のピークからおおよその減衰係数を求め(減衰力の最大値と原点を通る直線の傾きであり、図中(a)は 2.91 kN/(mm/s)、(b)は 2.82 kN/(mm/s))、モデルの剛性は設計値(21.4 kN/mm)とした。

シミュレーション結果と計測結果について、ダンパーの伸びる方向(速度が正)は近い挙動となるが、それに比べ縮む方向(速度が負)は両者の差は大きい。このことから伸縮各方向で減衰力特性が異なる可能性がある。なお減衰力の小さい範囲でモデルと一致しない部分は Maxwell-Model で表現されないダンパーの内部構造に起因する可能性がある。今後は最小二乗法等を用いたパラメータ同定や、摩擦要素を追加するなど適当なモデルの検討も実施する。

6. 結論

振動実験の環境を備えた実在の免震建物において、オイルダンパーに作用する力を直接計測できる手法を導入した。多様な加振条件における減衰力の計測を行い、その特徴を考察した。本論文で得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 8 基のオイルダンパーのシャフトにひずみゲージを貼付し、動的ひずみを計測して、材料特性から力に変換する方法とした。得られた値について、対象建物の応答特性等から求めた減衰力とお

おむね整合することを確認できた。また同条件実験を複数回繰り返し、減衰力特性の再現性も確認した。

- 2) 最大初期変位 130 mm の自由振動実験、免震層の最大相対速度 4cm/s 程度の強制振動実験を行い、相互に整合する結果が得られた。特に減衰係数について、減衰力の最大値ではオイルダンパーの小振幅時の性能に対応する値が得られた。また、1 年程度の間隔を置いた計測から経年変化や環境条件の影響を検討したが、大きな差は見られなかった。
- 3) オイルダンパーの変位・速度と減衰力の関係より、減衰力の発生が速度に対して遅れる傾向がみられ、単純な粘性減衰モデルとは異なる特性が認められた。この挙動はオイルダンパーの押し側と引き側で若干異なり、オイルダンパー相互にもある程度の差がみられることがあった。振幅依存性についても確認した。
- 4) 上記の特性について、粘性減衰と剛性を考慮した Maxwell-Model で検討し、過渡特性がある程度表現できることを確認した。一方で Maxwell-Model のみでは説明できない特性も表れた。

以上の結果は、免震建物の構造設計において、応答評価の際に用いられるオイルダンパーの特性のモデル化に影響する可能性もある。また実建物における運用条件下での特性という意味でも今後の検討につながる内容と考えられる。さらに、実際の挙動を考慮した製品の試験方法の向上などにも展開する可能性がある。

対象建物では、オイルダンパー 8 基(すべて同一)を、本論文の計測後に同じ仕様の新品のダンパーに交換して計測を継続している。また交換したオイルダンパーについて出荷検査用試験機を用いた単体加振実験も予定されており、それらの比較によりさらなる検討を行う予定としている。

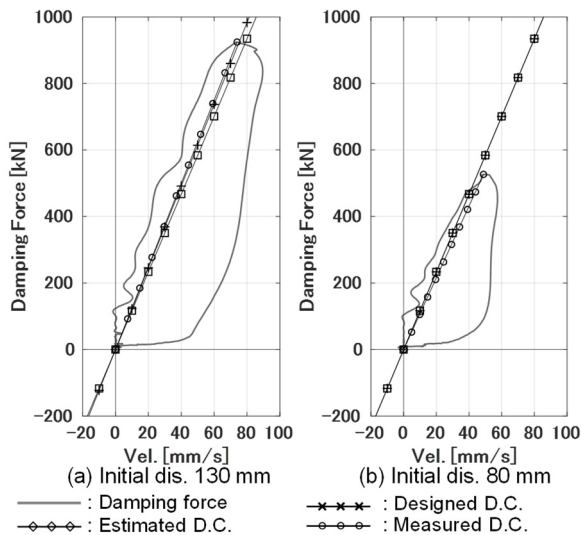


Fig.18 Relationship of damping force and relative vel. with 3 damping coefficients (D.C.:damping coefficient)

Table 3 Damping coefficients (designed, estimated and measured)

Initial disp. [mm]	Designed D.C. [kN/(mm/s)]	Estimated D.C. [kN/(mm/s)]	Measured D.C. [kN/(mm/s)]
138	11.68	12.29	12.50
80		11.68	10.79

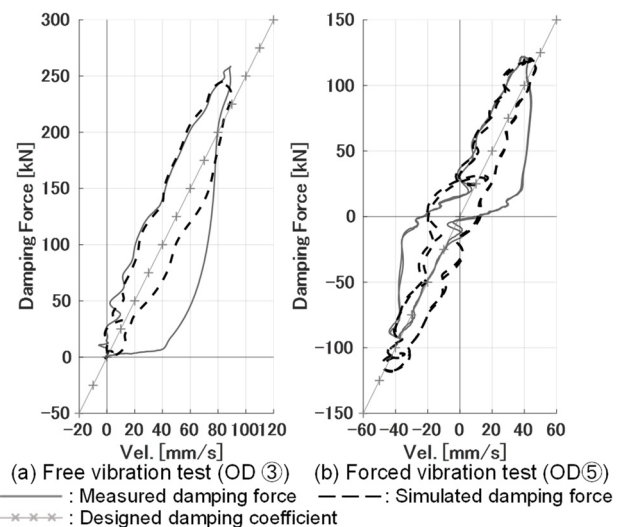


Fig.19 Relationship of damping force and relative vel. (measured and simulated by Maxwell-Model)

謝辞

本論文の一部は成澤健太氏(現東海旅客鉄道)、鶴生明穂氏(現東邦ガス)によるものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本免震構造協会：応答制御建築物調査委員会報告書、2012 年
- 2) 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 2017 年
- 3) 成澤健太、福和伸夫、飛田潤：実在免震建物を利用した振動実験環境の構築、構造工学論文集 Vol. 63B 2017 年
- 4) 鶴生明穂、飛田潤、福和伸夫：免震建物を活用した多様な振動実験・計測、日本地震工学シンポジウム 2018 年
- 5) 松田和浩、笠井和彦：東北地方太平洋沖地震における観測記録を用いた超高層免震建物の動的挙動に関する研究、日本建築学会構造系論文集 2014 年、10 月
- 6) 株式会社東京測器研究所、WEB カタログ (2020 年 9 月にアクセス)
<https://www.tml.jp/knowledge/webcatalog.html>
- 7) 前田理沙、金子直人、中村悠太、飛田潤、福和伸夫：免震・制振オイルダンパーの減衰性能評価実験、日本建築学会大会学術講演梗概集 2020 年