微小振幅域における粘性ダンパーの力学特性に関する研究

STUDY ON MECHANICAL CHARACTERISTIC OF VISCOUS DAMPER IN EXTREMELY SMALL EXCITATION

秦 一平 — * 1 阿久戸信宏 — * 2
郭 鈞桓 — * 3

Ippei HATA — * 1 Nobuhiro AKUTO — * 2
Chunhuan KUO — * 3

キーワード：
リアルタイムオンライン応答試験, 粘性ダンパー, 微小振幅,
地震応答特性

Keywords:
Real-time on-line test, Viscous damper, Extremely small excitation,
Seismic response characteristic

This paper presents the seismic response characteristics of viscous dampers in extremely small excitation. Real-time on-line tests were conducted using viscous dampers to examine the influence of sliding resistance force on the extremely small excitation. In addition, the damping characteristics of the viscous dampers are compared with a linear model. This paper shows the importance of accurately modeling the characteristics of viscous dampers in the extremely small excitation.

1. はじめに

1.1 研究背景

制振構造は、構造物に作用する外乱（地震・風）に対して、架構内に設置した制振装置がエネルギーを吸収することで、応答を低減するものである。制振装置の中でも、速度依存型ダンパー（オイルダンパー・粘性ダンパー等）は入力速度に対して安定した減衰特性を有する。また、環境条件や振動数依存性の影響を比較的受けにくいいため、多くの制振構造に利用されている。しかし、機械的な構造上、ピストンとパッキンとの間に生じる摺動抵抗力によって、微小振幅速度域（以下、微小振幅域）においては相対的に摺動抵抗力の影響が大きくなり、所定の減衰特性を発揮しないことが把握されている¹⁾。

既往研究では、大木ら²⁾や高橋ら³⁾によって微小振幅域におけるオイルダンパーもしくは粘弾性ダンパーの検討結果が示されている。しかし、いずれも正弦波加振による検討に留まっており、地震応答特性についても、挙動を明確化するべきである。また、大木らや高橋らの研究結果をもとに深沢ら⁴⁾によって、バイリニア特性を有するオイルダンパーの新たな解析モデルを提案し、試験結果と解析結果の比較を示すことで、その有用性を示している。深沢らは、非定常入力波による検討も行っているが、事前に行った時刻歴応答解析から得られた応答変位波形を用いた試験結果を示している。いずれの既往研究においても、速度依存型ダンパーを用いた解析を行う際には、部材の力学特性を把握し、適切にモデル化することが非常に重要であることが示されている。

また、深沢らの試験結果のように非定常入力波の検討も有効であるが、本来、構造物の地震応答を把握するには時刻歴応答解析に代表されるように、微小な時間間隔において、ある時刻 t_n までの応答状態から時刻 t_{n+1} の応答状態を算出し、地震波継続時間だけ繰り返し応答を求めていくものである。そのため、実際に摺動抵抗力を含んだ速度依存型ダンパーの地震応答特性が時刻歴応答解析上でどのよう

に影響するか、また、その試験結果に対して解析モデルを用いた際の時刻歴応答解析結果の精度を把握することに意義があると筆者らは考えている。

そこで、時々刻々と変動する部材の応答特性を時刻歴応答解析に反映させることが可能なリアルタイムオンライン応答試験システムを用いる。この手法は試験により得られる部材の荷重値（本研究では減衰力）を用いて、時刻歴応答解析を繰り返し行うことで、部材の応答特性を反映させることが可能なシステムである。さらに、試験では検討したい対象構造物内の部材単体のみを用いて実施し、その他のモデル部分は数値解析によって評価するため、実大振動試験のようなコストや労力は要しないことが有意な点である。

1.2 研究目的

以上の研究背景より、本研究では微小振幅域における粘性ダンパーの地震応答特性を明確化することを目的とする。本研究目的を達成するため、リアルタイムオンライン応答試験システムを用いて得られる試験結果と解析結果を比較する。その試験結果より、粘性ダンパーの微小振幅域における摺動抵抗力について把握するとともに、リアルタイムオンライン応答試験の有用性について示す。なお、粘性ダンパーの力学モデルは、機械的特徴がオイルダンパーとほぼ同等であることから、高橋らが提案するモデルを踏襲し、本研究で得られた粘性ダンパーの正弦波加振試験をもとに減衰特性の改良を行った。

また、本論文では、粘性ダンパーの縮小試験体を用いる。前述した通り摺動特性が及ぼす地震応答特性への影響を明確化することに重点を置くため、実大ダンパーでは微小振幅域は数ミリ程度であるが、試験体スケール、リアルタイムオンライン応答試験上の制御および計測精度を鑑みて、本論文では、正弦波加振試験と摺動特性の分析結果より摺動特性が顕著に生じる振幅域（ダンパー入力速度 ± 0.05[m/s]以下）を微小振幅域と定義する。

¹⁾ 日本大学理工学部建築学科 教授・博士（工学）
〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台3丁目11-2)

²⁾ 日本大学理工学部建築学科 助手・修士（工学）

³⁾ 日本大学理工学部建築学科 技手・修士（工学）

¹⁾ Prof., Dept. of Architecture, College of Science and Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

²⁾ Research Assistant, Dept. of Architecture, College of Science and Technology, Nihon Univ., M. Eng.

³⁾ Assistant Engineer, Dept. of Architecture, College of Science and Technology, Nihon Univ., M. Eng.

2. リアルタイムオンライン応答試験システム

2.1 概要

本試験システムは、数学的に履歴則のモデル化が困難である複雑な部材の要素を部材試験により取得し、数値解析を行う演算用コンピュータにオンラインでフィードバックする操作を地震波継続時間だけ繰り返し行い、部材試験と数値解析を混合して同時並行で進めるものである（図1参照）。本試験システムは以下の5つで構成されている。「①：動的载荷可能な油圧アクチュエータと試験体」、「②：目標変位・減衰力をアナログ値・デジタル値に変換するD/A、A/D変換器」、「③：油圧アクチュエータを制御し、減衰力を計測する制御装置」、「④：試験全体の操作を行う操作用コンピュータ」、「⑤：時刻歴応答解析を行い、目標変位を算出する演算用コンピュータ」を用いる。

本試験の流れとしては、まず、演算用コンピュータ内で時刻歴応答解析を行い、第1ステップの応答変位（目標変位）を算出する。次に、算出した応答変位（目標変位）に到達するまで油圧アクチュエータを用いて試験体を加力する。そして、応答変位（目標変位）に到達した時の応答値（計測荷重・計測変位）を計測する。計測された減衰力を演算用コンピュータにフィードバックし、その減衰力と前ステップまでの応答値の関係から第2ステップの時刻歴応答解析を行う。再度算出された応答変位（目標変位）に到達するまで試験体を加力する。このフローを時刻歴応答解析の刻み時間間隔 10[msec]で制御をする。なお、本試験システムの制御遅延時間は5[msec]であるが、加振周期は 2.0[s]であり制御遅れの影響は十分に小さいと考えられる。

2.2 数値積分法

本試験システムの時刻歴応答解析で用いる数値積分法は、衝撃加速度法（Newmarkの β 法 $\beta = 0$ ）を用いる。解析に用いる応答変位は解の安定のため、計測変位ではなく、目標変位を用いることとする。なお、衝撃加速度法は、2ステップ前までの応答変位を必要とするため、第1ステップは線形加速度法（Newmarkの β 法 $\beta = 1/6$ ）を用いることとする。そのため、第1ステップにおいては、5章に後述する粘性ダンパーの力学特性をモデル化した際のパラメータを用いる。また、解析プログラム内に制御誤差の補正処理は導入していない。

3. 試験計画

本試験に用いる粘性ダンパーの断面詳細図を図2に示し、セットアップ図を図3に示す。本試験で用いる粘性ダンパーの仕様を表1に示す。動的载荷が可能な性能を有した油圧アクチュエータ（最大加力： ± 400 [kN]，最大ストローク： ± 200 [mm]，最大速度： 1.0 [m/s]）を使用する。油圧アクチュエータの先端と反力部材側はピン接合としており、粘性ダンパーに曲げ応力が導入されないことに留意している。また、油圧アクチュエータの先端部は台座を用いて鉛直方向に支持しており、台座の上にPTFEシートを敷くことで摩擦の影響を取り除いている。さらに、ダンパーに作用する軸方向力は筒形ロードセル（ ± 200 [kN]）によって計測し、試験時の粘性ダンパーの入力変位、上下振れ、左右振れを変位センサによって計測している。また、粘性ダンパー外壁中央部の温度をK型熱電対により計測する。なお、粘性ダンパー部の上下、左右振れについては、後述する正弦波加振試験結果およびリアルタイムオンライン応答試験結果より影響のない結果であったため、紙面の都合上割愛する。

図1 リアルタイムオンライン応答試験概要

表1 粘性ダンパー諸元

最大減衰力	90[kN]
最大速度	1.0[m/s]
ストローク	± 60 [mm]
ロッド内径	80[mm]

図2 粘性ダンパー断面詳細図

図3 セットアップ図

4. 正弦波加振試験

正弦波加振試験条件を表 2 に示す。各試験ケースのダンパー力とダンパー入力変位関係 (F_d - X_d 関係)、ダンパー力とダンパー入力速度関係 (F_d - V_d 関係) を図 4 に示す。なお、本論文では減衰特性や摺動特性を含む粘性ダンパーの減衰力をダンパー力と呼称する。

得られた正弦波加振試験結果の最大変位付近に着目すると、摺動特性が明確に表れていることが確認できる。また、ピストンが圧縮する際の摺動特性が、伸び方向の摺動特性よりも大きい傾向にあることが分かる。

表 2 正弦波加振試験条件

No.	周期 [s]	最大 入力速度 [m/s]	最大 入力変位 [mm]	载荷 サイクル
Case1	2.0	0.05	15.71	6
Case2		0.10	31.42

図 4 正弦波加振試験によるダンパー特性

5. 力学モデルの作成

5.1 概要

前章で示した正弦波加振試験結果をもとに、図 5 に示すダンパー力が線形特性を有する力学モデル (Model-I) と、以降に示す図 7 の高橋らが提案する摺動抵抗力 F_f と作動油の圧縮剛性 k_d を考慮した力学モデル (Model-II) の 2 種類を作成する。モデル化の際には正弦波加振試験の 3 サイクル目を抽出する。この時、Model-I はダンパー力を線形特性として仮定するため、摺動特性を無視し、等価な粘性減衰として評価することとする。なお、比較的簡便かつ精度を有した力学モデルを作成するため、正弦波加振から得られた圧縮・伸び方向での摺動特性の違いを力学モデルでは考慮しないこととする。

5.2 線形特性を有する粘性ダンパーの力学モデル

図 5 に Model-I の力学モデルおよび減衰特性を示す。粘性ダンパ

一の等価粘性減衰係数 c_{eq} を決定する式を(1)式に示す。この式は、正弦波加振試験によって得られた 3 サイクル目のダンパー力とダンパー入力速度関係より、各最大値の交点を結ぶ直線から決定する等価な減衰係数を仮定したものである。なお、 $F_{d,max}$ および $F_{d,min}$ は正負の最大ダンパー力を示し、 $V_{d,max}$ および $V_{d,min}$ は正負の最大ダンパー入力速度を示している。

算出した等価粘性減衰係数 c_{eq} を用いた力学モデルと正弦波加振試験結果との比較を図 6 に示す。なお、算出した等価粘性減衰係数 c_{eq} を各図中に併記している。算出した等価粘性減衰係数 c_{eq} の値は各試験条件において同等であることが分かるが、微小振幅域における摺動特性との明確な相違が確認できる。

$$c_{eq} = \frac{|F_{d,max} - F_{d,min}|}{|V_{d,max} - V_{d,min}|} \quad (1)$$

(a) 力学モデル

図 5 線形特性を有する粘性ダンパーの力学モデルの概要

図 6 線形特性を有する粘性ダンパーの力学モデル

5.3 摺動特性を有する粘性ダンパーの力学モデル

正弦波加振試験結果より、摺動特性が顕著に確認できるため摩擦モデル（完全バイリニア型モデル）を作成する。まず、摩擦特性部分を抽出し、作成した摩擦モデルの吸収エネルギー量 ΔW_f を全体の吸収エネルギー量 ΔW から差し引いた残りのエネルギー量 ΔW_d を減衰性能が負担すると仮定する。この際、正弦波加振試験結果のダンパー力とダンパー入力速度関係より、ある速度が入力されると所定の減衰性能が発揮されることが確認されたため、図 7 のような減衰特性を有するモデル化を作成する。この時、2 次減衰係数 c_2 と線形型モデルの等価粘性減衰係数 c_{eq} を同一とし、リリース速度 $V_{d,y} = 0.03[\text{m/s}]$ と設定した。この時、ダンパーエネルギー量 ΔW_d を満足する 1 次減衰係数 c_1 を、設定している 2 次減衰係数 c_2 とリリース速度 $V_{d,y}$ の関係から決定する。なお、空気の影響を考慮しない圧縮剛性 k_d を考慮し、本研究では、オイルの体積弾性係数 k_0 を $1.65 \times 10^3 [\text{MPa}]$ と設定した。(2) 式中に示す A はピストン受圧面積 $[\text{mm}^2]$ 、 V_c はオイルの初期容積 $[\text{mm}^3]$ を表す。初期容積 V_c はロッド内径と受圧面積から算出している。

図 8 に試験結果に対する力学モデルの比較を示す。作成した力学モデルは、等価粘性減衰系として算出した吸収エネルギー量 ΔW に対して、Case1 は摩擦モデルの吸収エネルギー量の割合は 60.9 [%]、Case2 では 31.1 [%] となり、摺動特性が支配的な状態 (Case1) と、減衰特性が支配的な状態 (Case2) であることが確認できた。

6. リアルタイムオンライン応答試験

6.1 概要

本章では、5 章で作成した 2 種類の粘性ダンパーの力学モデルとリアルタイムオンライン応答試験の比較を行う。試験条件を表 3 に示す。解析モデルは 1 質点系せん断型モデルとして、5.2 節で算出した各試験条件において算出した等価粘性減衰をもとに、固有周期 2.0[s]、粘性減衰定数 $h = 0.1$ となる質量およびせん断剛性を決定する。入力地震動は日本建築センター模擬波 BCJ-L2 とパルス性地震動 JMAKOB-NS を用い、時刻歴応答解析結果の最大応答速度が 0.05[m/s]、0.10[m/s]、0.20[m/s] となるように地震波倍率を調整する。なお、Case3 については JMAKOB-NS のみとし、数値解析を行う際は、最大速度 0.10[m/s] を対象に作成した力学モデルを用いる。

6.2 評価方法

本研究では再現性を定量的に評価するため、相関係数 ρ と RMS を用いる⁵⁾。それぞれの算出式を (3) 式と (4) 式に示す。なお、式中に示す A_i 、 B_i は時刻歴波形データ、 μ_A 、 μ_B は波形データの平均値、 N はデータ数である。相関係数 ρ は時刻歴波形の位相遅れを評価するのに適しており、RMS は時刻歴波形の全体的な応答の絶対量を評価することに適している。本研究では以下の 2 項目を評価対象とする。

- ① リアルタイムオンライン応答試験システムの精度
- ② 力学モデルの精度

①については、1 質点系せん断型モデルを対象としたリアルタイムオンライン応答試験結果から得られる各ステップの目標変位 (図 1 に示す x) と計測変位 (図 1 に示す x') を評価対象とする。なお、算出したそれぞれの RMS より、目標変位に対する計測変位の比 (RMS 比) を算出し、1.0 に近いほど精度が高いことを定量的に評価する。

(a) 力学モデル

(b) $F_d - X_d$ 関係

(c) $F_d - V_d$ 関係

図 7 摺動特性を有する粘性ダンパーの力学モデルの概要

(a-1) $F_d - X_d$ 関係 (0.05[m/s])

(a-2) $F_d - V_d$ 関係 (0.05[m/s])

(b-1) $F_d - X_d$ 関係 (0.10[m/s])

(b-2) $F_d - V_d$ 関係 (0.10[m/s])

図 8 摺動特性を有する粘性ダンパーの力学モデル

$$k_d = \frac{k_0 \cdot A^2}{V_c} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (A_i - \mu_A)(B_i - \mu_B)}{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (A_i - \mu_A)^2} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (B_i - \mu_B)^2}} \quad (3)$$

$$RMS[X] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2} \quad (X = A, B) \quad (4)$$

表 3 リアルタイムオンライン応答試験条件

No.	地震波	最大速度 [m/s]	固有周期 [s]	粘性減衰定数 [-]
Case1	BCJ-L2 JMAKOB-NS	0.05*	2.0	0.1
Case2		0.10*		
Case3		0.20*		

*最大速度 0.20[m/s] で実施する試験は JMAKOB-NS のみとする。

②については、リアルタイムオンライン応答試験より得られた各時刻歴応答結果と、2種類の力学モデルを用いて得られる時刻歴応答解析結果のそれぞれの RMS を算出し、試験結果に対する数値解析結果の比を算出し、①と同様に評価する。

また、いずれの項目においても比較対象の時刻歴応答波形から相関係数 ρ を算出し、評価結果を示す。相関係数 ρ が 1.0 に近似するほど位相遅れのない結果であることを評価する。

6.3 リアルタイムオンライン応答試験システムの精度

図 9 にリアルタイムオンライン応答試験の目標変位と計測変位の時刻歴応答波形の比較を示す。また、(3)式と(4)式から算出した相関係数 ρ と RMS 比を図の下部にそれぞれ併記している。相関係数 ρ と RMS 比ともに 1.0 に近似しているため、本研究で用いているリアルタイムオンライン応答試験システムの精度が高いことが確認できる。RMS 比が 1.0 よりやや大きい結果は、目標変位に対して計測変位が、全体的にオーバーシュートしていることが原因であると考えられる。また、(a) Case1_B CJ-L2 と比較して (b) Case3_JMAKOB E-NS のような短時間に大きな振幅が発生する場合、油圧アクチュエータを制御する影響から最大応答付近では慣性力によりやや大きくオーバーシュートする。過度なオーバーシュートが発生した場合、時刻歴応答が抑制される傾向⁶⁾を示すが、本試験結果からはそのような傾向が見られないため、問題ない範囲での制御誤差であると判断した。

(a) Case1_B CJ-L2

(b) Case3_JMAKOB E-NS

図 9 目標変位と計測変位の時刻歴波形

(c-1) $F_d - X_d$ 関係 (Model-II) (c-2) $F_d - V_d$ 関係 (Model-II)

図 10 Case1_B CJ-L2 の試験結果

(c-1) $F_d - X_d$ 関係 (Model-II) (c-2) $F_d - V_d$ 関係 (Model-II)

図 11 Case3_JMAKOB E-NS の試験結果

6.4 力学モデルの精度

図 10 に Case1_B CJ-L2, 図 11 に Case3_JMAKOB E-NS のリアルタイムオンライン応答試験結果および、それぞれの力学モデルを有する数値解析結果の比較を示す。Case1_B CJ-L2 の場合、撓動特性が支配的であるため、減衰特性が明確には現れない。そのため、Model-I のように、等価な粘性減衰係数を用いた場合と比較して、 $F_d - X_d$ 関係や $F_d - V_d$ 関係からも分かるように応答特性に顕著な違いが確認できる。また、完全バイリニア型にモデル化した撓動特性は地震動による複雑な弾塑性応答の影響により応答速度 0 付近で履歴を描くことが分かる。一方で、Case3_JMAKOB E-NS の場合、Case1_B CJ-L2 と比較して相対的に撓動特性の影響が小さくなり、減衰特性が支配的な応答性状を示していることが確認できる。だが、いずれの力学モデルにおいても、最大速度におけるダンパー力の上昇は再現できていないことが分かる。図 12 に示すダンパー力の時刻歴応答波形では、撓動特性が支配的な条件下の Case1 において撓動特性を考慮していない Model-I は、時刻歴応答、相関係数および RMS 比の全てにおいて顕著な違いが表れている。そのため、いずれの結果においても Model-I と比較して撓動特性を考慮した Model-II のダンパー力の時刻歴波形の再現性が向上している。なお、圧縮・伸び方向の撓動特性の違いを考慮していないものの、地震応答特性は比較的精度よく追従していること、また、リアルタイムオンライン応答試験結果においても、圧縮・伸び方向での明確な違いは見られないことが確認できる。

図 12 ダンパー力の時刻歴応答波形

7. まとめ

本論文では、微小振幅域における粘性ダンパーの力学特性に着目し、リアルタイムオンライン応答試験を用いた地震応答評価と、解析モデルの再現性について比較を行った。以下に、得られた知見を示す。

- ・ 微小振幅域において機械的構造上生じる揺動特性は地震応答特性に影響を与える。そのため、揺動特性を考慮した力学モデルで応答評価を行うことが非常に重要であり、等価な減衰係数を用いたモデルでは地震応答特性が異なることを確認した。
- ・ 本論文で示す揺動特性を考慮した力学モデルは、最大速度におけるダンパー力の上昇を再現できていないものの、一定の精度を有する結果を得ることが確認できた。
- ・ 本論文では、縮小試験体の粘性ダンパーを用いて各試験および検討を実施した。そのため、作成した力学モデルの精度についてより詳細に検討するためには、実大ダンパーによる試験も実施しデータを検討する必要がある。

参考文献

- 1) 一般財団法人 日本免震構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル 第3版，2013。
- 2) Y. Ooki, K. Kasai, O. Takahashi : Performance of Velocity-Dependent Dampers under Extremely Small Responses, Journal of Structural Engineering, Vol.50 B, pp.601-609, 2004. (in Japanese)
大木洋司，笠井和彦，高橋治：微小振幅における速度依存型ダンパーの性能について，日本建築学会構造工学論文集，Vol.50B, 2004。
- 3) O. Takahashi, Y. Sekiguchi, Y. Tsuyuki, Y. Matsuzaki, T. Fujita : Research about The Analysis Model of Oil Damper under Extremely Small Excitation, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.71, No.602, pp.103-110, 2006.(in Japanese)
高橋治，関口洋平，露木保男，松崎育弘，藤田隆史：微小振幅下のオイルダンパーの力学モデルに関する研究，日本建築学会構造系論文集，第602号，pp.103-110，2006。

- 4) T. Fukasawa, S. Okamura, T. Somaki, T. Miyagawa, T. Yamamoto, T. Watakabe, R. Morobishi, S. Fujita : An Analytical Model for Oil Damper Focused on High Frequency and Extremely Small Excitation Study on vertical oil damper applying to three - dimensional seismic isolation system, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.83, No.754, pp.1777-1787, 2018.(in Japanese)
深沢剛司，岡村茂樹，柚木孝裕，宮川高行，山本智彦，渡壁智祥，諸菱亮太，藤田聡：高振数・低振幅に着目したオイルダンパーの解析モデルに関する検討 3次元免震装置に適用する上下オイルダンパーの検討，日本建築学会構造系論文集，第83巻，第754号，pp.1777-1787，2018。
- 5) S. Yoshida, H. Fujitani, Y. Mukai, M. Ito : REAL TIME HYBRID TESTS OF SEMI-ACTIVE CONTROL USING SHAKING TABLE Proposal and verification of test method for mid-story isolated buildings, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.81, No.729, pp.1821-1829, 2016.(in Japanese)
吉田昇平，藤谷秀雄，向井洋一，伊藤麻衣：振動台を用いたセミアクティブ制御のリアルタイム・ハイブリッド実験 中間階免震構造を対象とした実験手法の提案と検証，日本建築学会構造系論文集，第81巻，第729号，pp.1821-1829，2016。
- 6) Shin, K, Satoshi, M, Katsuji, A : Liquefaction Phenomenon of Sand Layers by Using On-Line Computer Test Control Method, Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering Soils and foundations, Vol.30, No.3, pp.174-184, 1990。
日下部伸，森尾敏，有本勝二：オンライン地震応答実験による2層砂地盤の液状化挙動，土質工学会論文報告集，Vol.30, No.3, pp.174-184，1990。
- 7) 山上哲哉，秦一平，阿久戸信宏，溝口晴紀：微小振幅域におけるオイルダンパーの地震応答特性に関する研究 その1. リアルタイムオンライン応答試験概要およびモデル化，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅱ，pp.887-888，2020。
- 8) 溝口晴紀，秦一平，阿久戸信宏，山上哲哉：微小振幅域におけるオイルダンパーの地震応答特性に関する研究 その2. リアルタイムオンライン応答試験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅱ，pp.889-890，2020。

[2020年10月5日原稿受理 2020年12月2日採用決定]