

〔研究論文〕

## 慣性質量効果を有する液流ダンパーの抵抗力特性

船木 尚己<sup>1)</sup>, 畑中 友<sup>2)</sup>, 藤田 智己<sup>3)</sup>

### Damping Force Characteristics of Liquid Flow Damper with Inertia Mass Effect

Naoki FUNAKI<sup>1)</sup>, Tomoyuki HATANAKA<sup>2)</sup>, Tomomi FUJITA<sup>3)</sup>

#### Abstract

In order to reduce seismic response of buildings effectively, the authors have been developing a passive control system for building frames using new type of liquid damper which has inertia mass effect. In the present paper, the basic characteristics of resisting force of the liquid flow damper are made clear by harmonic excitation test using reduced scale test specimen. Also, theoretical model for liquid flow and viscoelastic resistance are provided based on the excitation test results. To verify the validity of the constructed theoretical model, the excitation test results are compared with those of the corresponding to analysis results.

#### 1 はじめに

本研究は、地震時における構造物の振動応答を抑制する制振装置として、筆者らが新たに提案した“慣性質量効果を有する液流ダンパー”について、ダンパー単体による正弦波加振試験の結果に基づき、ダンパーの発揮する抵抗力および慣性質量効果の特性を把握し、実建物への適用の可能性を探るものである。

振動系の質点間の変位に応じて運動する補助質量を配置することで建物の応答低減を試みた研究は、1970年代になって川股らによってはじめられた。川股は、細管内の振動液流の慣性および粘性抵抗を利用した“質量ポンプ”の概念を発表し、これが建築構造物の固有周期の調整と応答の低減に役立つことを実験によって示した<sup>1)</sup>。その後の研究により、構造物に組み込まれた慣性ポンプダンパーは、極めて大きな有効質量をもつ動吸振器として作用し、幅広い振幅および周波数領域のもとの振動制御に威力を発揮することを解析と実験により明らかにした<sup>2)</sup>。また、実大の1/2縮尺を想定した準実大のダンパー単体による加振実験を行った結果、微小振幅領域より管内に強い非線形性を特徴とする乱流現象が発生することがわかり、このダンパーの名称を“乱流ダンパー”と改め、それが建物の応答制御に有効であることを確認した<sup>3)</sup>。

---

1) 東北工業大学 工学部 建築学科, Department of Architecture, Tohoku institute of Technology

2) 東北工業大学大学院 工学研究科 建築学専攻 博士後期課程, Graduate School of Engineering, Tohoku Institute of Technology

3) 仙台高等専門学校 建築デザイン学科, Department of Architectural Design, Sendai National College of Technology

さらに、川股と船木らは、液圧のシールの役割を、ピストンとシリンダーの隙間に充填した粘弾性体に担わせ、在来のオイルダンパーのもつシーリング機構の複雑さを改良した“粘弾性物質でシールした乱流ダンパー”を提案した。本ダンパーの実建物への適用の可能性を探るべく、これまでに縮小フレーム試験体による振動台加振試験やダンパー単体による加力実験などを行い、実地震に対する本機構の有効性について確認してきた。また、ダンパーの抵抗力特性を精度よく再現するための力学モデルを、シール材の粘弾性抵抗と液流の内圧抵抗に関してそれぞれ構築し、これらの力学モデルを組み込んだ振動方程式を導き、時刻歴応答解析により本機構を有する骨組の応答特性について明らかにした<sup>4</sup>。これらの成果を受けて、準実大の3層試験建屋による加力実験および地震観測を実施し、本システムの実地震に対する有効性について証明した<sup>5</sup>。

筆者らは、一対のピストン・シリンダーで構成する前述の粘弾性物質でシールした乱流ダンパーの機構を利用し、シリンダー間を細い管で連結した新しいシステムを提案した。これにより、従来のシール材による粘弾性抵抗と液流による内圧抵抗に加え、連結管内を高速で運動する液体がフレームに慣性質量効果を与える機構となる。本報においては、ダンパー単体の正弦波加振試験を行って得られた結果に基づき、本ダンパーの抵抗力特性を把握するとともに、ダンパーの抵抗力特性を再現する力学モデルを構築し、モデルによる解析の結果を試験結果に照らして、その妥当性について検討することを主な目的とする。

## 2 ダンパー概要

本報で対象としたダンパー試験体の詳細を図1に示す。ダンパー試験体は一対のピストン部とシリンダーで構成され、相互のシリンダーを細い管で連結した形状となっている。シリンダー内に封入された液体をシールするため、ピストン外周面とピストン外枠内周面との隙間には、常温で硬化する1液型のRTVシリコンゴムが充填されている。内圧による液漏れを防ぐために、シリンダー端部とピストン外枠が接する部分にはOリングを設置している。また、シリンダーと連結管の結合部からの液漏れを防ぐために、連結管はタケノコ型ノズルを介してシリンダー側面に取り付けられている。連結管の形状により、ダンパーの発揮する内圧抵抗と質量効果が異なるため、ここでは形状の異なる9種類（内径：8, 10, 12 mmφ、長さ0.5, 1.0, 2.0 m）の連結管を用いた。なお、シリンダー内に充填した液体は水道水を用いた。

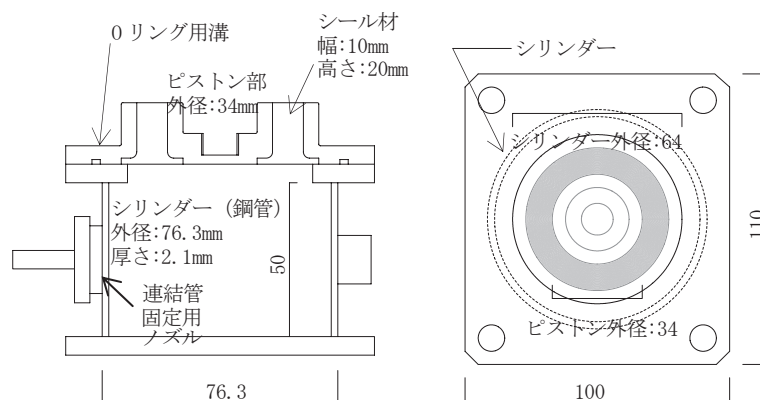


図1 ダンパー試験体詳細（単位：mm）

### 3 ダンパーの抵抗力特性

#### 3.1 ダンパー単体の加振試験

ダンパーの抵抗力特性を把握するために、ダンパー単体による正弦波加振試験を行った。加振試験は、写真1に示すようにダンパー試験体を動的アクチュエータに設置し、アクチュエータのピストンロッドに結合した両ピストンに上下方向の正弦波を与える方法で行った。加振は表1に示すとおり、振動数と振幅を変化させた正弦波を入力した。

表1 加振条件

振幅 [mm]	振動数 [Hz]
0.2 ~ 1.0	0.33, 0.5, 1.0, 2.0, 2.5
0.1 ~ 1.0	3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5 6.0, 7.0, 7.5, 8.0, 9.0, 10.0

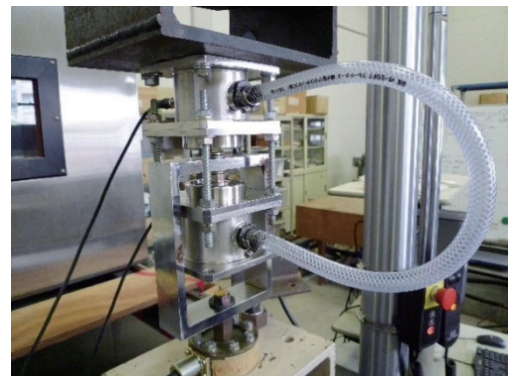
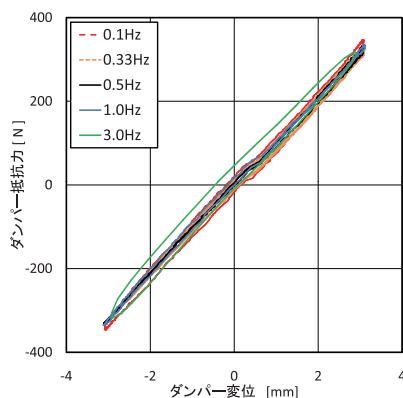


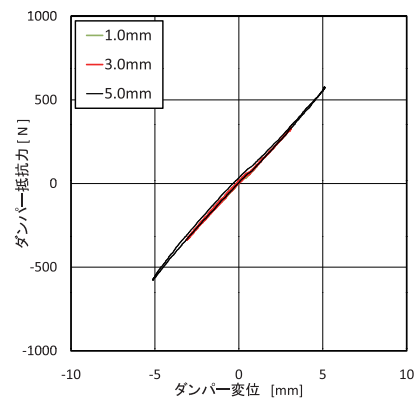
写真1 試験体全景

#### 3.2 試験結果

シール材として用いたRTVシリコンゴムの抵抗力特性を把握するため、シリンダー内に液体を充填しない状態で試験を行った。その結果、ダンパーの変位-抵抗力履歴ループは、図2に示すとおり、加振条件の違いにかかわらずほぼ弾性の挙動を示すことがわかった。また、加振振幅、振動数の変化に対して、履歴ループの傾きはほぼ一定となること、振動数が高くなると履歴ループは細い楕円の形状を示すことが確認された。



(a) 3.0mm加振



(b) 1.0Hz加振

図2 ダンパーの変位-抵抗力履歴ループ（シール材のみ）

次に、シリンダー内に液体（水道水）を充填したダンパーによる加振試験を行って得られた、ダンパーの変位-抵抗力履歴ループの代表的な例を図3に、変位-内圧差履歴ループ

プを図4に示す。ここで示す内圧差は、各シリンダーで計測された内圧の差を表している。図は、連結管内径を8mmφとし、長さの異なる連結管を用いた試験体による結果と、連結管長さを2.0mとして内径の異なる連結管を用いた試験の結果をそれぞれ重ね合わせたものである。これらの結果、連結管が長くなるほど、また、内径が小さいほど内圧による抵抗力が増大し、履歴ループの描く面積も大きくなることが確認できた。また、内圧差の履歴ループについても同様の傾向を示すことがわかった。さらに、連結管内の液流により生じる質量効果により、抵抗力および内圧差履歴ループの傾きが小さくなることが確認された。傾きの減少の割合は、連結管内径が小さいほど、また、連結管長さが長くなるほど大きくなる傾向を示す。

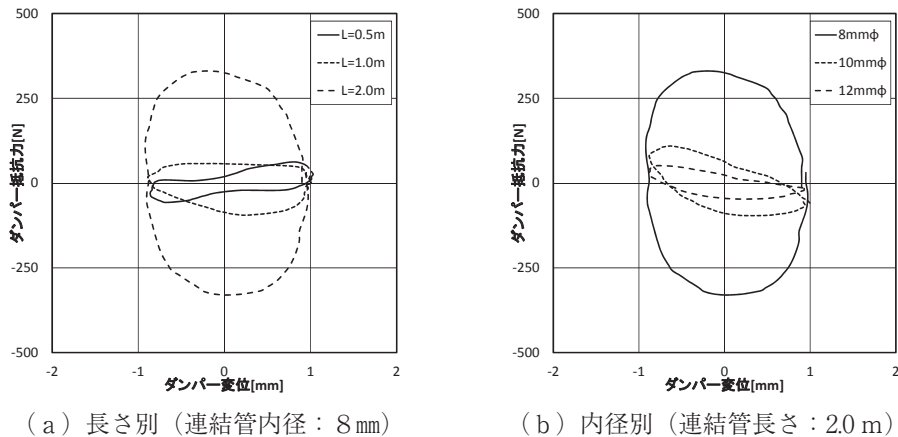


図3 ダンパーの変位-抵抗力履歴ループ (加振振動数: 7.0Hz)

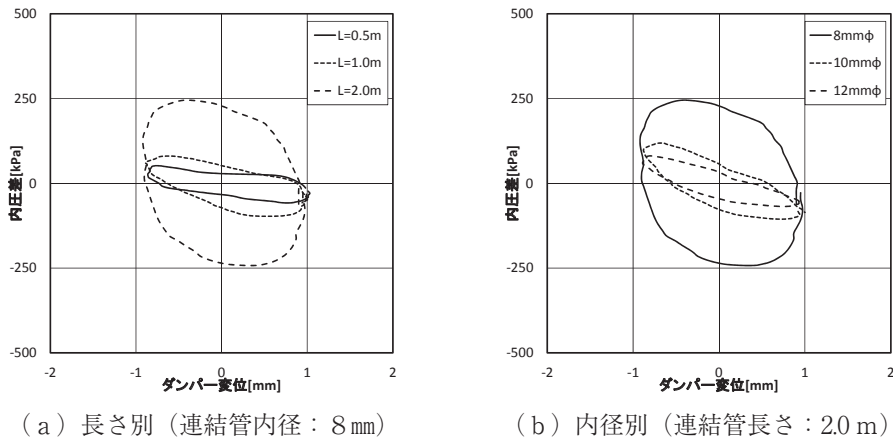
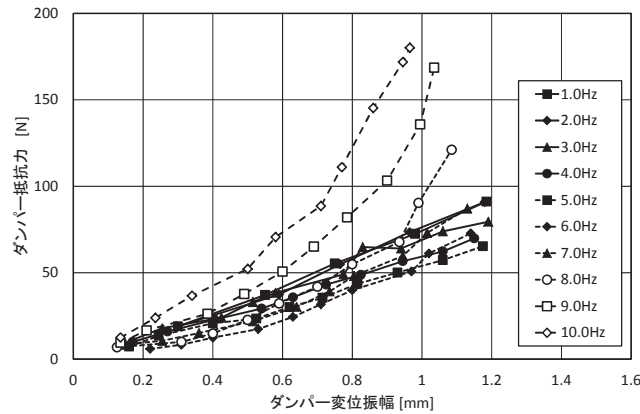


図4 ダンパーの変位-内圧差履歴ループ (加振振動数: 7.0Hz)

加振試験の結果に基づき、加振振動数毎にダンパーの変位-抵抗力関係をまとめた代表的な例を図5に示す。これらの結果、変位振幅の増大にともない、加振振動数が低い範囲において抵抗力は線形的に増大するのに対し、加振振動数が高くなるほど抵抗力は変位振幅の増大に対して非線形的に大きくなる特性を持つことがわかる。これは、高振動数、大振幅の加振に対して連結管の液流による内圧抵抗が増大するためと考えられる。


 図5 ダンパー変位 - 抵抗力関係（連結管：8 mm  $\phi$ ，L = 0.5 m）

### 3.3 ダンパー抵抗の力学モデル

#### (1) 内圧抵抗

シリンダー内に封入された液体は、ピストンに与えられた強制変位によって連結管を通過してシリンダー間を移動する。その際、圧力損失による内圧抵抗が発生する。圧力損失は、流路形状が急激に変化する急縮小部と急拡大部、それに加えて連結管内の3箇所が生じる。急縮小部と急拡大部で生じる圧力損失をそれぞれ  $\Delta p_1$ 、 $\Delta p_2$  とすると

$$\Delta p_1 = \zeta \frac{\rho (\beta \cdot \dot{x})^2}{2} \quad (1)$$

$$\Delta p_2 = \frac{\rho (\beta \cdot \dot{x})^2}{2} \quad (2)$$

と表される。ここで  $\dot{x}$  はピストンの速度 (m/sec)， $\rho$  は液体の密度 ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ ) である。 $\zeta$  は流路形状により定まる係数であり、既往の研究<sup>6</sup>により、ここでは0.5とした。また、 $\beta$  はピストンの有効断面積  $A$  と連結管の流路断面積  $a$  の比 ( $A/a$ ) を表している。ピストンの有効断面積を算出する際、ピストンと共に液体を押し出すシール材の部分も含め、ピストンの中心からシール材のせん断厚さの半分までの距離をピストンの有効半径  $r_p$  とした。

連結管内を流れる流体の圧力損失  $\Delta p_3$  は、管内の乱流抵抗則により、

$$\Delta p_3 = \frac{\rho \cdot L}{2D} u_m^2 \cdot f \quad (3)$$

と表される。ここで  $L$  は連結管長さ (m)， $D$  は連結管内径 (mm)， $f$  は管摩擦係数， $u_m$  は連結管内を流れる流体の平均流速 (m/sec) を示している。連結管内の液流の平均速度  $u_m$  は

$$u_m = \beta \cdot \dot{x} \quad (4)$$

となる。また、連結管内のレイノルズ数は

$$Re = \frac{u_m \cdot D}{\nu} \quad (5)$$

と表される。ここで $\nu$ は液体の動粘性係数 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ ) である。本報で示した実験は、前述のとおり水道水を用いており、液体の温度は実験時の室温と等しいと仮定し、 $\nu$ を $0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$  ( $20^\circ\text{C}$ ) とした。

ダンパーの内圧抵抗 $F_f$ は、(1)～(3)式によって算出される圧力損失の和に、ピストンの有効断面積を乗じた

$$F_f = (\Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3) A \quad (6)$$

によって求められる。流路形状の変化によって発生する圧力損失が、それぞれ(1)、(2)式から得られると仮定した場合、管内摩擦による圧力損失は、実験で得られた内圧抵抗から $\Delta p_1$ と $\Delta p_2$ を差し引いたものとなる。

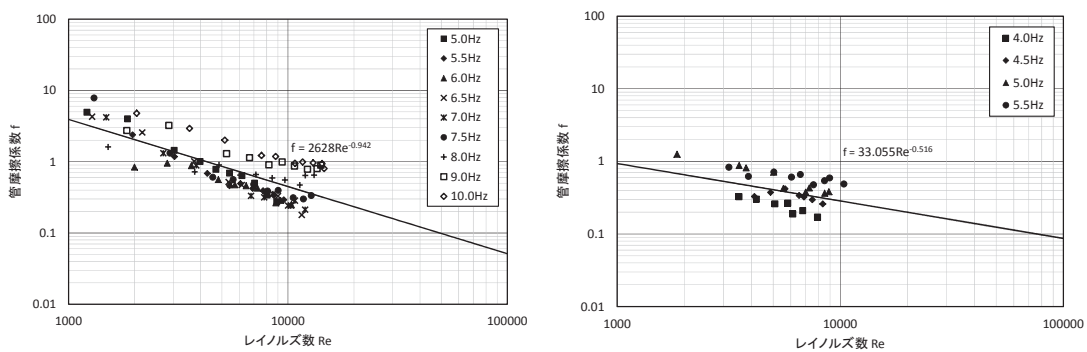
図4に示すように、内圧差の履歴ループの最大値は変位がゼロの点、すなわち速度が最大となる点を過ぎてから現われ、速度と内圧差の間に位相差が生じることが確認された。一般的には、液流による内圧差は傾きのないループを描き、その最大値は速度が最大となる点で生じる。実験で得られた内圧差の履歴ループにみられた位相差は、液流による質量効果によるものととらえ、液流による管内摩擦については、変位がゼロの点での内圧差の計測値に基づき、(3)～(5)式より管摩擦係数とレイノルズ数の関係式を導いた。それらの結果を図6に示す。

図6より、管内摩擦の実験式として

$$f = 2628R_e^{-0.942} \quad (\text{連結管内径：} 8\text{mm } \phi, \text{ 長さ：} 0.5\text{ m}) \quad (7)$$

$$f = 33.055R_e^{-0.516} \quad (\text{連結管内径：} 8\text{mm } \phi, \text{ 長さ：} 2.0\text{ m}) \quad (8)$$

が得られた。(7)式は、連結管内を流れる液体の圧力損失が連結管内の平均流速に対して1.058乗、(8)式は1.484乗に比例することを意味している。連結管内の圧力損失は、実験結果に基づいて導かれた管内摩擦の実験式を(3)式に代入することにより算出される。



(a) 連結管：8 mm  $\phi$ ，L = 0.5 m

(b) 連結管：8 mm  $\phi$ ，L = 2.0 m

図6 管摩擦係数とレイノルズ数の関係

## (2) シール材の抵抗

シール材の抵抗力に関しては、加振振幅および加振振動数の変化に対してループの傾きはほぼ一定であること、また、高振動数領域でごくわずかにエネルギー吸収能力を有することから、それを速度に比例する粘性減衰と仮定し、

$$F_s = k_s \cdot x + c_s \cdot \dot{x} \tag{9}$$

とした。ここで、シール材のばね定数  $k_s$  と減衰係数  $c_s$  は、液体を充填しない状態で行った実験で得られたダンパーの変位-抵抗力履歴ループの結果から求めた。

(3) 慣性質量効果

図3および図4に示すように、液体が連結管内を高速で運動することによって発生する慣性質量効果により、履歴ループの傾きは小さくなる。ダンパーが組み込まれた振動系モデル<sup>7</sup>において、液流に起因する質量効果はピストンの有効断面積と連結管の流路断面積の比  $\beta$ 、および連結管内の液体の質量に依存することから、その慣性力を  $F_I$  とすると、

$$F_I = -\beta^2 m_a \ddot{x} \tag{10}$$

と表される。ここで  $m_a$  は連結管内の液体の質量を表している。

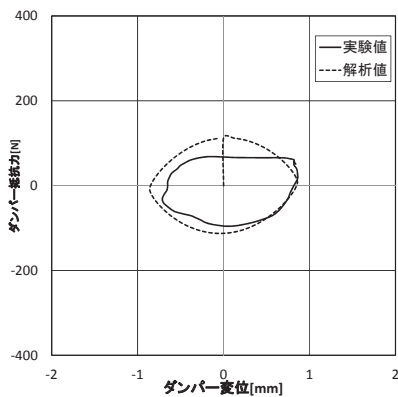
(4) 解析結果

ダンパーの全抵抗  $F$  は、(6) 式で求められる液流抵抗、(a) および (10) 式で算出されるシール材による抵抗と慣性質量の和となる。表2に示した解析パラメータを用い、時間ステップ解析により算出したダンパー抵抗力と内圧差履歴ループの解析結果と実験結果と比較した一例を図7および図8に示す。

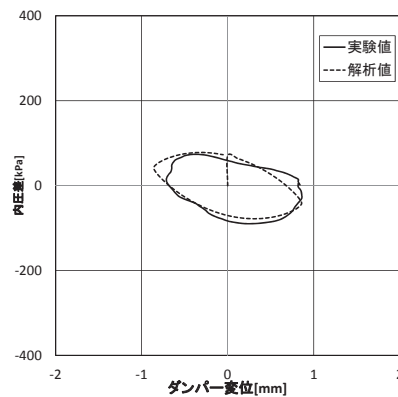
これらの結果、解析によって得られた結果は、加振試験で得られたダンパー抵抗力と内圧差履歴ループを比較的精度よく再現していることが確認された。

表2 解析パラメータ

ピストン有効半径： $r_p$	2.2 cm
ピストン有効断面積： $A$	15.2 cm <sup>2</sup>
連結管内径： $D$	0.8 cm
連結管長さ： $L$	50 cm (図7) 200 cm (図8)
連結管断面積： $a$	0.503 cm <sup>2</sup>
断面積比： $\beta (= A/a)$	30.2
管内摩擦の実験式	$f = 2628R_e^{-0.942}$ (図7) $f = 33.055R_e^{-0.516}$ (図8)
シール材のばね定数： $k_s$	83 N/m
シール材の減衰定数： $h_s$	3.8%



(a) 変位-抵抗力履歴ループ



(b) 変位-内圧差履歴ループ

図7 解析結果と実験結果の比較 (連結管：8 mm  $\phi$ ，L = 0.5 m，9.0Hz 加振)

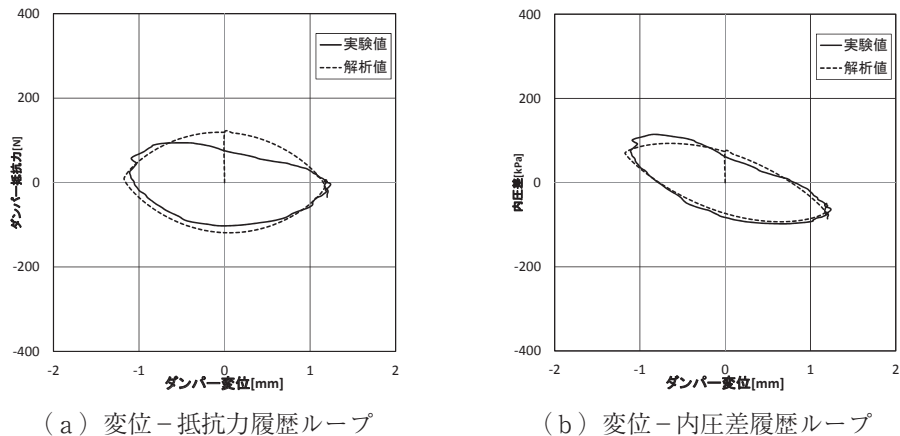


図8 解析結果と実験結果の比較 (連結管: 8 mm  $\phi$ , L = 2.0 m, 5.0Hz)

#### 4 まとめ

本報では、筆者らが提案した慣性質量効果を有する液流ダンパーについて、ダンパー単体による正弦波加振試験を行って得られた結果に基づき、ダンパーの抵抗力特性について把握した。また、加振試験の結果から圧力損失による内圧抵抗を算出する計算式を導き、ダンパー抵抗の力学モデルを構築した。力学モデルによる解析と加振試験の結果と比較を行った結果、構築したモデルは加振条件や連結管形状の違いによる抵抗力の差異を比較的精度よく再現できることを確認した。

#### 謝辞

本研究は、東北工業大学地域連携センターの地域・産学連携プロジェクト研究（地域連携研究）の助成を受け、実施された。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1 川股重也, 米田護, 半谷裕彦: 耐震ダンパーに関する研究 - 第1報 自由振動試験および起振実験 -, 生産研究, 第25巻, 第3号, pp.130-135, 1973.3
- 2 川股重也, 半谷裕彦, 米田護, 金沢京子: 制振機構に関する研究 その1) 原理および自由振動試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2230, pp.857-858, 1973.10
- 3 川股重也, 大沼正昭, 早川幸孝, 牧田敏郎: 乱流ダンパーによる構造物の振動制御 その(1) ダンパーの抵抗則, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2356, pp.711-712, 1993.9
- 4 船木尚己, 川股重也: 粘弾性物質でシールした乱流ダンパーを用いた制振骨組の振動応答解析, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.46B, PP.357-364, 2000.3
- 5 Naoki Funaki, Jaewoan Kang, Shigeya Kawamata: Vibration Response of a Three-storied Full-scale Test Building Passively Controlled by Liquid Dampers Sealed by Viscoelastic Material, Transactions of the 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Paper No. K17/2, 2001.8
- 6 田古里哲夫, 荒川忠一: 流体力学, 東京大学出版会, 1989.5
- 7 畑中友, 船木尚己: 慣性質量効果を有する液流ダンパーの単体加振試験による抵抗力特性の検討, 日本建築学会東北支部研究報告集, Vol.78, PP.41-44, 2015.6