

慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた
制振骨組の振動応答特性

Vibration Response Characteristics of Test Frame Passively
Controlled By Liquid Damper with Inertia Mass Effect

東北工業大学大学院 工学研究科 建築学専攻

船木研究室

畑中 友

慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた制振骨組の振動応答特性

目次

第1章 序論

1.1 研究背景	1
1.2 制振構造の分類	2
1.3 質量効果に関する既往の研究	3
1.4 本論文の目的および構成	5

第2章 慣性質量効果を有する液流ダンパーの抵抗力特性

2.1 ダンパー単体加振試験	7
2.1.1 試験目的	7
2.1.2 試験体概要	7
2.1.3 試験方法	9
2.1.4 計測方法	10
2.1.5 試験結果	11
2.2 ダンパー抵抗力の力学モデル	16
2.2.1 内圧抵抗	16
2.2.2 シール材の抵抗	22
2.2.3 慣性質量効果	22
2.2.4 解析結果と試験結果の比較	23

第3章 1層制振フレームの振動台加振試験

3.1 試験概要	29
3.1.1 試験目的	29
3.1.2 試験体概要	29
3.1.3 試験方法	31
3.1.4 計測方法	31
3.2 試験結果	34
3.3 応答スペクトルを用いたダンパーの振動抑制効果の検証	56

第4章 制振フレームの振動応答解析

4.1 本章の目的	69
4.2 振動系モデルおよび振動方程式	69
4.3 振動応答解析プログラム	70
4.4 解析結果と試験結果の比較	72

第5章 結論	
5.1 本論文での成果	90
5.2 今後の検討課題	92
参考文献	93
謝辞	96

第 1 章 序論

1.1 研究背景

1.2 制振構造の分類

1.3 質量効果に関する既往の研究

1.4 本論文の目的および構成

第1章 序論

1.1 研究背景

建物の構造基準は、大地震の発生によって被害を経験するたびに改正が繰り返されてきた。1978年には宮城県沖地震が発生し、建築物や土木構造物に多くの被害を与えるとともに、ガス、水道、電気、交通、通信などのライフラインの被害など多方面にわたって甚大な被害をもたらした。これを契機に1981年に新耐震設計法が施工され、現在まで耐震設計法の根幹をなしている。新耐震設計法は一次設計、二次設計が導入され、比較的発生頻度の高い中小地震に対して建物がほとんど損傷しないことを、1度は遭遇するかもしれないきわめて稀に発生する大規模地震に対して、倒壊・崩壊を防いで人命を保護することを目的としている。

1995年に発生した兵庫県南部地震では、6,400人余もの人命が失われ、その8割が建物の倒壊などによる圧迫死や窒息死によるものであったが、倒壊するなどといった大きな被害を受けた建物は、1981年以前の旧耐震設計法で設計された建物に多く見られ、新耐震設計法で設計された多くの建物が倒壊などの大きな被害を免れたことから、新耐震設計法の効果が証明される結果となった¹⁾。その一方で、現行の設計法によって建てられる耐震構造は、入力される地震動に対し建物の剛性で耐えるシステムであるため、建物内部の機能を維持することについては非常に難しく、構造被害を免れた場合であっても間仕切壁や方立て壁などの非構造部材や設備機器、電気・ガス・水道などのライフラインに甚大な被害を受けたことによってその機能が失われ、継続的使用が困難となり、結果として不自由な生活を強いられることとなった。これに対し、神戸市に建つ2棟の免震建物は、構造被害を免れただけでなく建物の機能を維持し、地震後も継続的に建物を使用することができたことから、地震に対する建物の安全および機能確保に対する期待が高まり、それ以降の普及につながっている。

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、M9.0、最大震度7を記録するなど広範囲にわたり大きな揺れを観測した。この地震動による被害の多くは兵庫県南部地震同様1981年以前の旧耐震設計法で設計された建物で、耐力不足、垂れ壁・腰壁による短柱のせん断破壊、耐震要素の偏在などが原因で被害を受けているものが多数確認された^{2),3),4)}。現行の耐震設計法を満たさない建物についても、適切な耐震診断・耐震改修が施された建物の多くは被害を免れた。新耐震設計法により設計された建物の場合、軽微なひび割れやコンクリートの剥落などが見られたものの、主体構造に被害がほとんど見られなかったことから、現行の耐震設計法の妥当性が示される結果となった。しかし、兵庫県南部地震と同様に、東北地方太平洋沖地震でも、構造被害を免れた場合であっても天井や壁などの非構造部材の脱落落下、設備機器、電気・ガス・水道などのライフラインに甚大な被害を受けたことによって継続的使用が不可能となる建物や、復旧に遅れが生じている建物が確認され問題となった^{3),4)}。

これまで受けてきた大地震による地震被害の経験に基づき、建物とそれを使用する人々

の安全を守るべく耐震設計手法は発展・進歩が重ねられてきた。また、既存建物で保有する耐震性能が不足する場合であっても、耐震診断を実施し、その結果に基づいて適切な耐震改修を行うことにより、建物が倒壊などの大きな被害から免れることができる。このことから、倒壊・崩壊を防いで人命を保護することを目的とした現行の耐震設計法は、その目的をおおよそ達成している。しかし、構造躯体が安全であった場合でも、非構造部材や設備機器、ライフラインに被害が生じ、その影響によって地震後に建物が継続的に使用することができなくなり、大規模な補修工事が必要となる事例も多数確認されたことから、今後は、大規模地震に対して構造躯体の損傷抑制だけでなく、建物の継続使用を考慮した機能維持をも担保するシステムの構築が喫緊の課題であると考えられる。

1.2 制振構造の分類

制振構造は、動的な外乱により建物に入力されるエネルギーを制振装置に吸収させることによって建物の応答低減を図るものであり、主に図 1.1 のように分類される。

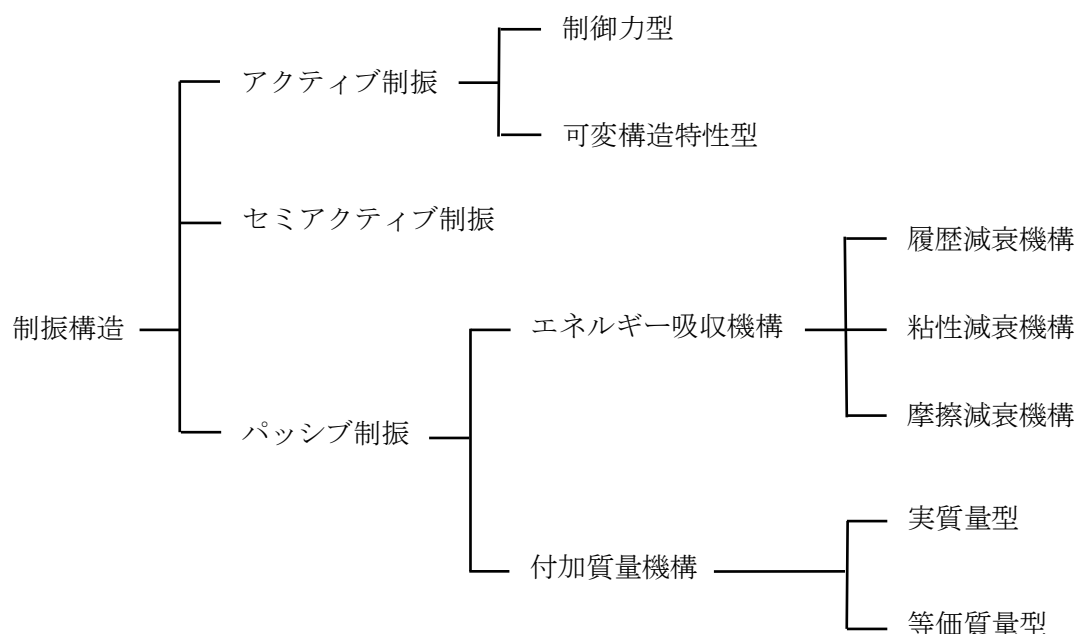


図 1.1 制振構造の分類^{7),8)}

図 1.1 より、制振装置は制御方式の違いからアクティブ制振、セミアクティブ制振、パッシブ制振の 3 つに分類される。アクティブ制振は、コンピュータ制御により効率的に振動制御を行う制御方式で、動的な外乱によって誘発される応答を制御するために力を加える制御力型や、剛性や減衰といった建物の構造特性を変化させる可変構造特性型があげられる。セミアクティブ制振はアクティブ制振とパッシブ制振を組み合わせた複合的な制御方式である。パッシブ制振は動的な外乱を受けることで駆動する外部エネルギーを必要としない受

動的な制御方式で、制御機構によりエネルギー吸収機構と付加質量機構に分けられる。

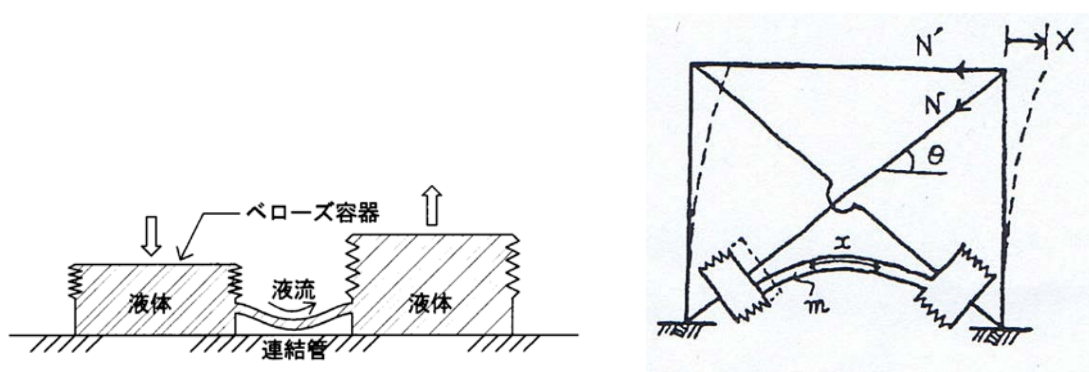
エネルギー吸収機構は、動的外乱による層間変形に対応して制振ダンパーがエネルギーを吸収し、建物に入力するエネルギーを低減させる機構でさらに3つに分類される。履歴減衰機構は変形履歴にともなうエネルギー消費を利用する機構で、鋼材の塑性化によるエネルギー吸収を利用した鋼材ダンパーや、鉛の弾塑性履歴にともなうエネルギー吸収を利用した鉛ダンパーなどがあげられる。粘性減衰機構は速度依存型の粘性抵抗を利用する機構で、油の流体抵抗を利用するオイルダンパーや、高粘性体や粘弾性体のせん断変形によって生じる粘性抵抗を利用する粘性ダンパー、粘弾性ダンパーなどが挙げられる。摩擦減衰機構は摩擦力によるエネルギー消費を利用する機構で、金属板の滑りによって生じる摩擦力を利用する摩擦ダンパーがあげられる。

付加質量機構は、建物の固有周期と一致する付加質点系を付加し、付加質点系を共振させることで建物の振動エネルギーを吸収し、応答低減を図る機構で、実質量型と等価質量型に分けられる。実質量型は、TMDのように建物の振動低減を図るために実質量を利用する機構である。等価質量型は、小さな実質量に対して何らかの増幅機構によって質量を増幅し、増幅された慣性質量を用いて建物の応答低減を図る機構である。

1.3 質量効果に関する既往の研究

質量効果を建築構造物の応答制御に応用した代表的な研究として、山本らによる“振り子とてこを利用した機構”^{例えば 10), 11)}や、井上らによる“ボールねじにより軸方向運動を回転方向の運動に増幅変換する機構”^{例えば 12), 13)}、曾田らによる“リンク式流体慣性ダンパ”^{例えば 14), 15)}等があげられる。これらの中で、“回転増幅機構が結合された粘性マスダンパー”は、近年、実建物を対象とした増幅機構付き粘性減衰装置（減衰こま）として実用化されている。また、より効率的に質量効果を得るために、減衰こまに円筒形の回転付加おもりを付け、外筒を回転させるように改良された粘性マスダンパー¹⁶⁾は、付加おもりの質量効果を実質量の数千倍にも増幅させることが可能で、1台で数千 ton 相当の見かけの付加質量効果を発揮できるものとなっている。

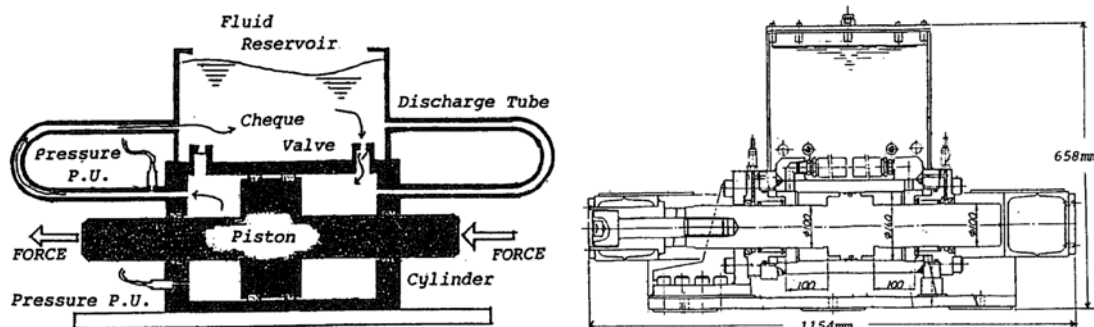
振動系の質点間の変位に応じて運動する補助質量を配置することで建物の応答低減を試みた研究は、1970年代になって前述の山本らや川股らによってはじめられ、川股らは質量ポンプダンパーの提案を行っている。図1.2に示すように質量ポンプダンパーは、ベローズ両端をダイヤフラムで閉じた一対の容器に液体を満たし、両方の容器に設けた小さな円孔を管で連結した形状となっている。内部に満たされた液体の振動液流の質量効果と粘性抵抗による減衰効果を利用したもので、これが建築構造物の固有周期の調整と応答の低減に役立つことを実験によって示した^{例えば 17), 18)}。その後の研究により、構造物に組み込まれた慣性ポンプダンパーは、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^{例えば 19), 20)}。



(a) 質量ポンプダンパーの概念図 (b) フレームに組込んだ質量ポンプダンパー

図 1.2 質量ポンプダンパー

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^{21), 22)}。図 1.3 に乱流ダンパーの概念図を示す。



(a) 乱流ダンパーの概念図

(b) 準実大ダンパー断面図

図 1.3 乱流ダンパー

さらに、川股と船木らは、図 1.4 のように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た。これら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^{例えば 23)}。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^{例えば 24), 25)}。

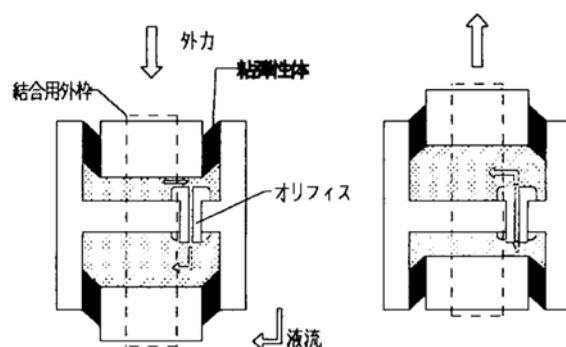


図 1.4 粘弾性物質でシールした乱流ダンパーの概念図

1.4 本論文の目的および構成

これまでに経験してきた大規模地震で、躯体に被害がない場合であっても、建物内部の設備機器や天井や壁などの非構造部材の脱落などの被害により建物機能が失われ、地震後の継続的使用が困難になる事例が多数確認されている^{2), 3), 4)}。病院や学校、市庁舎などの建物機能の損失は、地震後の避難や復旧活動に支障をきたすことから、建物の機能維持も担保するシステムの構築が喫緊の課題である。そのためには、地震エネルギーの吸収能力のみに依存した従来の制振機構では十分でなく、建物の周期特性を調整して、建物に入力される地震エネルギーそのものを低減させることが有効であると考えられる。

近年、慣性質量の効果を利用して建物の応答低減を試みた装置が提案されている。前節に述べたように、これらの研究の多くは、より大きな制振効果を得るためにボールねじ等を用いた増幅機構により付加質量の増幅を図ろうとするものがほとんどであるが、これらの機構は構造が複雑であるため、導入の段階で設置の精度やコスト高の問題が生じるものと考えられる。

そのことから、一対のピストン・シリンダーで構成され粘弾性体により液体のシーリング機構が単純化され、製造および建物への設置が極めて容易なものとなってい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用い、シリンダー間を連結管で接続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もたらし、フレームを長周期化させる仕組みである。本論文は、ここで提案した慣性質量効果を有する液流ダンパーについて、実験および解析的に本機構を有する骨組の振動応答特性を把握し、実建物への適用の可能性を探るものである。

本論文は全 5 章で構成されており、第 1 章では本研究の背景を述べ、制振構造の分類と質量効果に関する既往の研究について示し、本研究の目的と位置付けを示している。

第 2 章では、慣性質量効果を有する液流ダンパーのダンパー単体による正弦波加振試験を行い、得られた結果からダンパーの持つ抵抗力特性を把握する。また、得られた結果が

らダンパーの抵抗力特性の力学モデルの構築を行い、試験結果とモデルによる解析結果の比較からその妥当性を検討する。

第 3 章では、本ダンパーを組み込んだ 1 層縮小フレーム試験体の正弦波加振試験および地震波加振試験を行い、得られた結果からダンパーが発揮する応答低減効果および質量効果がフレームの応答特性に与える影響について確認する。

第 4 章では、第 2 章で構築したダンパーの力学モデルを用いて振動応答解析プログラムを作成し、第 3 章で得られた振動台加振試験結果と作成したプログラムによるシミュレーション結果との比較を行い、解析手法の妥当性について検討する。

第 5 章では、各章で得られた知見を要約し本論文の結論とする。また、今後の検討課題についてまとめる。

第2章 慣性質量効果を有する液流ダンパーの抵抗力特性

2.1 ダンパー単体加振試験

- 2.1.1 試験目的
- 2.1.2 試験体概要
- 2.1.3 試験方法
- 2.1.4 計測方法
- 2.1.5 試験結果

2.2 ダンパー抵抗力の力学モデル

- 2.2.1 内圧抵抗
- 2.2.2 シール材の抵抗
- 2.2.3 慣性質量効果
- 2.2.4 解析結果と試験結果の比較

第 2 章 慣性質量効果を有する液流ダンパーの抵抗力特性

2.1 ダンパー単体加振試験

2.1.1 試験目的

本ダンパーは、ピストンとシリンダーの隙間に充填されたシール材による抵抗に加え、連結管内の液体が高速で運動する際に発生する内圧抵抗と慣性質量効果を建物の応答低減と固有周期の調整に利用するものである。

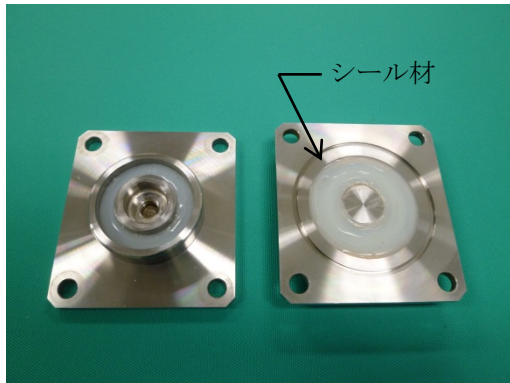
構造物にダンパーを組み込んだ場合の応答特性を理論的に把握するためには、ダンパーの持つ抵抗力特性について明らかにする必要がある。ここでは、ダンパー単体による正弦波加振試験を行い、得られた結果からダンパーの持つ抵抗力特性について明らかにするとともに、ダンパーの抵抗力特性を再現する力学モデルを構築し、試験結果とモデルによる解析結果の比較を行うことにより、その妥当性を検討する。

2.1.2 試験体概要

ダンパー試験体の詳細を写真 2.1 および図 2.1 に示す。ダンパー試験体は一对のピストン部とシリンダーで構成され、相互のシリンダーが細い管で連結された形状となっている。シリンダー内部には液体が封入され、液漏れを防ぐためピストン外周面とピストン外枠内周面との隙間に常温で硬化する 1 液性の RTV シリコーンゴム（信越化学工業株式会社：KE-3498）がシール材として充填されている。内圧によるシリンダーとピストン外枠間からの液漏れを防ぐため、シリンダー上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からの液漏れや連結管の脱落を防ぐために、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, 12mm φ, 長さ 0.5, 1.0, 2.0m）の連結管を用いた。なお、ダンパーの基本的な抵抗力特性の把握を目的としたことから、今回はシリンダー内に充填する液体として、扱いが容易で温度依存性の小さい水道水を用いた。



(a) ダンパー全景

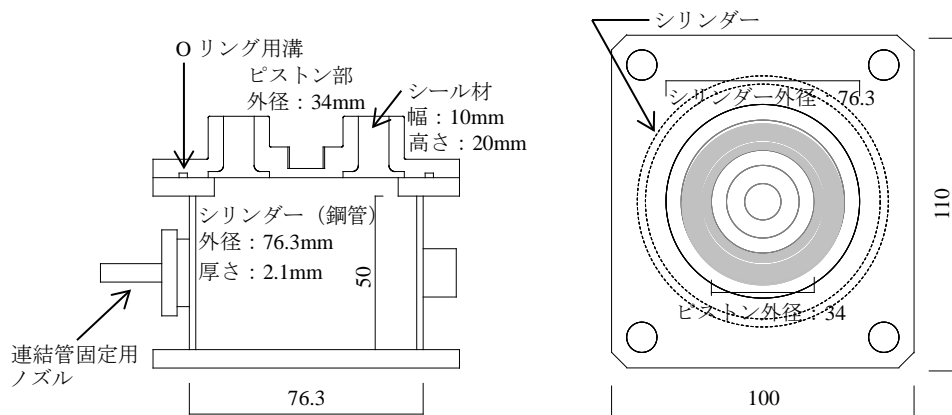


(b) ピストン部



(c) シリンダー

写真 2.1 ダンパー試験体



(a) 断面図

(b) 平面図

図 2.1 ダンパー試験体詳細(単位:mm)

ダンパーの概念を図 2.2 に示す。ダンパーに外力が作用するとシール材はせん断変形し、ピストンとシリンダーとの間の相対変位を許容する。ピストン変位に応じ、シリンダー内

の液体は連結管を通して液体室間を移動する。その際、液体の流速はピストンと連結管の断面積比で増幅され、連結管内の液体が高速で往復運動する。本機構は、連結管内の液体が高速で移動することにより発生する慣性質量効果と圧力損失による内圧抵抗、シール材のせん断変形にともなう粘弾性抵抗を建物の応答低減に利用するものである。

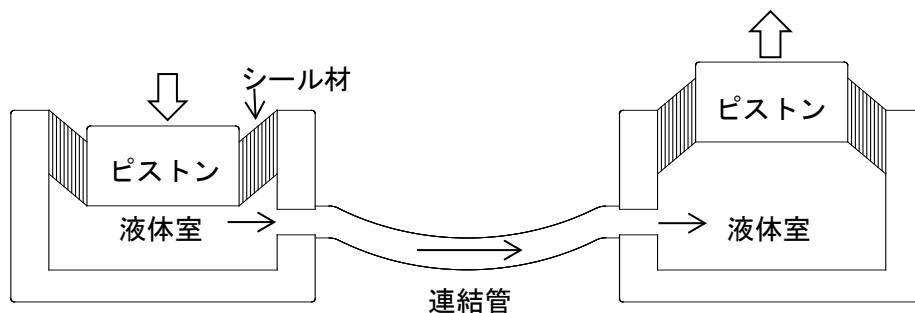


図 2.2 ダンパー概念図

2.1.3 試験方法

本ダンパーを動的アクチュエーター試験機 (INSTRON 8503) に組み込み、正弦波入力による加振試験を行った。写真 2.2 に加振試験の様子を示す。ダンパーは、アクチュエーター上部のクロスヘッドと、下部のピストンロッドの間に、加力用治具とロードセルを介して固定される。目標とする加振振動数と加振振幅をコントロールパネルに入力することにより、コンピューター制御によってピストンロッドが上下方向に変位する。ダンパーの発揮する内圧抵抗と慣性質量効果は連結管形状に依存することから、表 2.1 に示すように、内径と長さの異なる種類の連結管を用いて試験を実施した。加振は表 2.2 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。

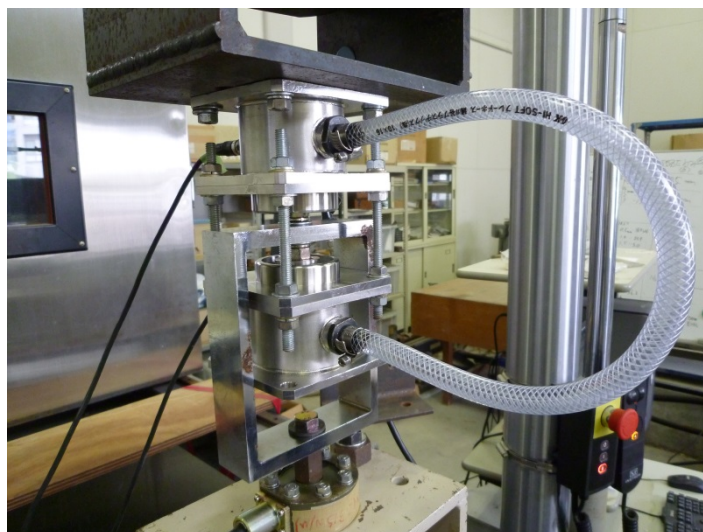


写真 2.2 試験体全景

表 2.1 ダンパー試験体諸元

試験体 ケース	液体の有無	連結管	
		内径(mm φ)	長さ(m)
Case1	無	—	—
Case2	有	8	0.5
Case3	有	8	1.0
Case4	有	8	2.0
Case5	有	10	0.5
Case6	有	10	1.0
Case7	有	10	2.0
Case8	有	12	0.5
Case9	有	12	1.0
Case10	有	12	2.0

表 2.2 加振条件

加振条件 ダンパー諸元	振幅 [mm]	振動数 [Hz]
Case1	0.5, 1.0 1.5, 2.0	0.1, 0.33, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0
Case2 ~ Case10	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

2.1.4 計測方法

加振試験において、ダンパー変位は超ロングレンジタイプレーザー式変位計（以下、レーザー変位計と呼ぶ。）で計測し、ダンパーの抵抗力はロードセル、シリンダー内の圧力は圧力変換機で計測を行った。計測結果は、データ収録用ソフトによってコンピュータにデジタルデータとして収録した。表 2.3 に加振試験で使用した計測機器の一覧を、図 2.3 に計測システム図を示す。

表 2.3 計測機器一覧

品名		型式	製造元
データ収録用 コンピューター	ハード	Type S	SONY
	ソフト	WAVESHOT!	KEYENCE
マルチ入力データ収集システム		NR-500	KEYENCE
		NR-HA08	
		NR-ST04	
レーザー変位計	センサヘッド	LB-300	KEYENCE
	アンプユニット	LB-1200	
ロードセル		LUK-1TBS	KYOWA
圧力変換機		PGL-A-1MP-A	KYOWA

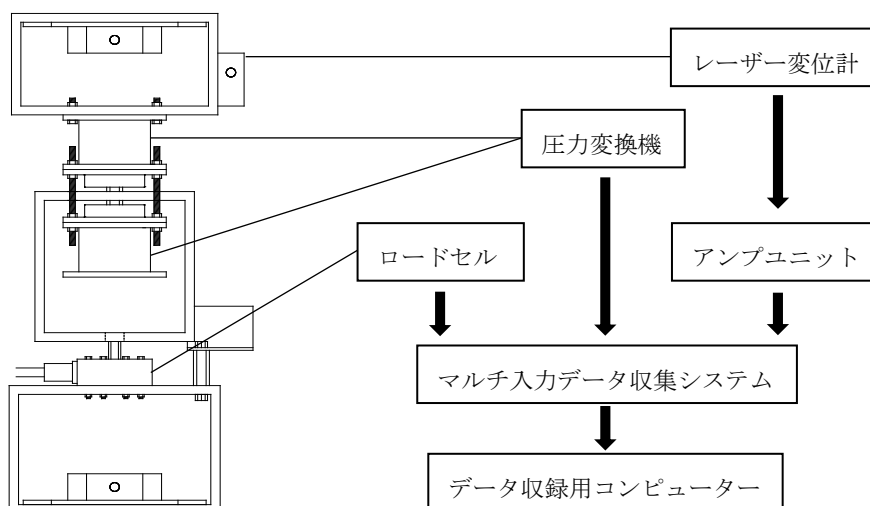


図 2.3 計測システム図

2.1.5 試験結果

シール材として用いた RTV シリコー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加振試験を行って得られた変位 - 抵抗力履歴ループを図 2.4 に示す。図 2.4(a)は加振振幅を固定し、振動数の異なる加振により得られた結果を、(b)は振動数を固定し、振幅の異なる加振試験結果を重ね合わせたものである。これらの結果より、ダンパーの変位 - 抵抗力履歴ループは、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、履歴ループの傾きも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。

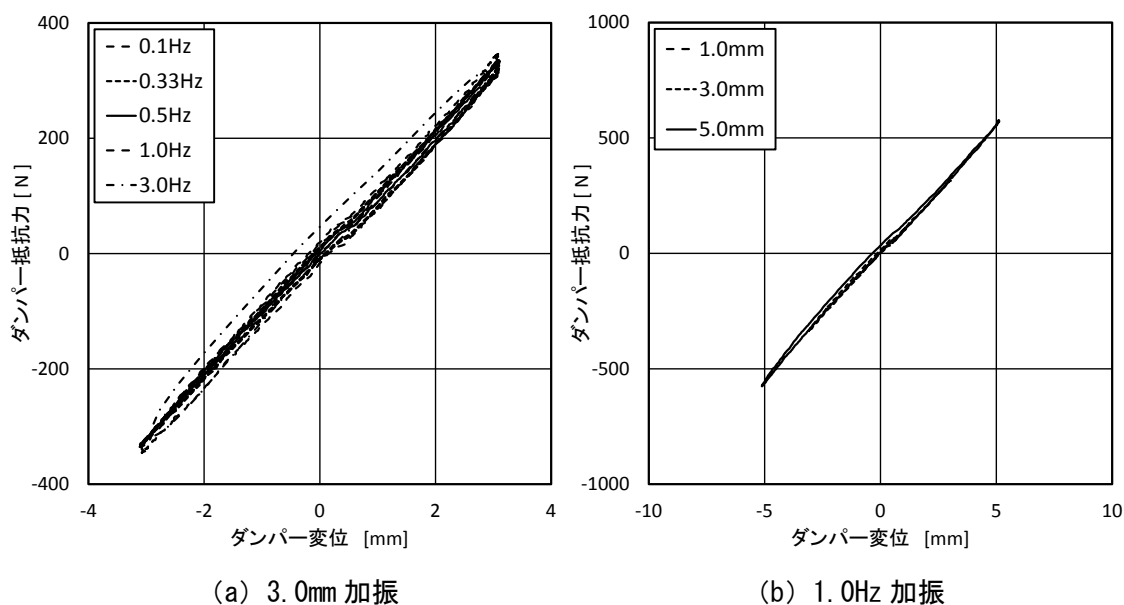
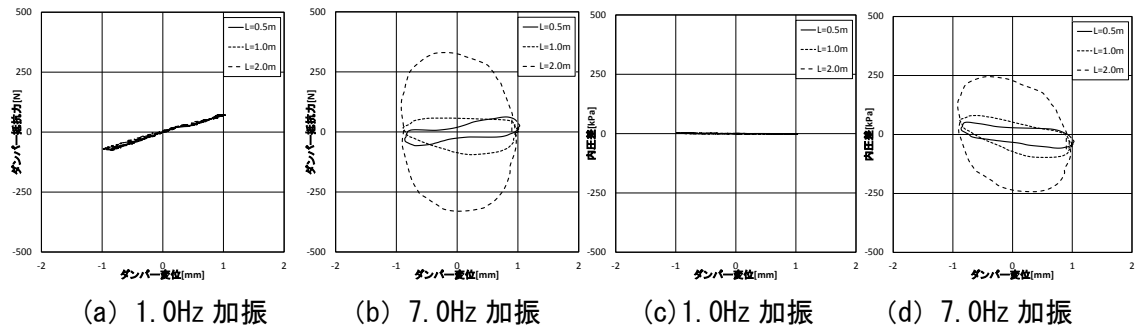


図 2.4 ダンパーの変位 - 抵抗力履歴ループ (Case1: シール材のみ)

次に、シリンダー内に液体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 - 抵抗力履歴ループと、変位 - 内圧差履歴ループを図 2.5～図 2.10 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 2.5～図 2.7 は、連結管内径を 8mm φ、10mm φ、12mm φ とし、長さの異なる連結管を用いた試験体による結果を、図 2.8～図 2.10 は連結管長さを 0.5m、1.0m、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。これらの図は、目標振幅を 0.8mm、振動数を 1.0Hz と 7.0Hz とした正弦波で加振して得られたものである。

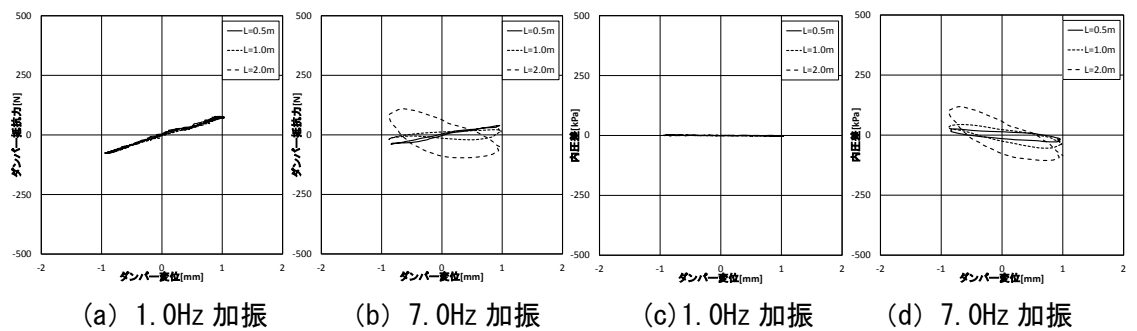
これらの結果、加振振動数が低い領域では、ダンパーの抵抗力は連結管形状の違いによる差はほとんどなく、ほぼ弾性の履歴を描くことがわかる。この原因として、加振振動数が低い場合、内圧による抵抗力がほとんど発生せず、ダンパーの抵抗力に占めるシール材による抵抗力の割合が大きいためと考えられる。加振振動数が高い場合、連結管長さが長くなるほど、また、内径が小さいほど内圧による抵抗力が増大し、履歴ループの描く面積も大きくなることが確認できた。内圧差の履歴ループについても同様の傾向を示すことがわかった。

また、高振動数の加振に対して増大する慣性質量効果により、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。傾きの減少の程度は、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。



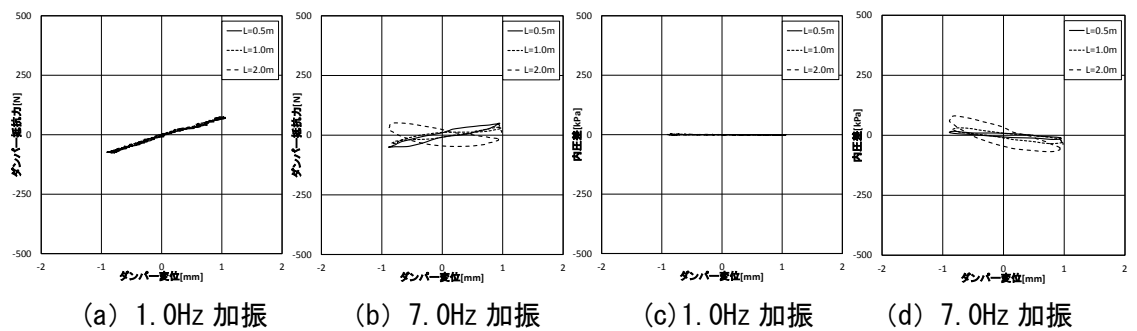
(a) 1.0Hz 加振 (b) 7.0Hz 加振 (c) 1.0Hz 加振 (d) 7.0Hz 加振

図 2.5 ダンパーの履歴ループ (連結管内径 : 8mm φ)



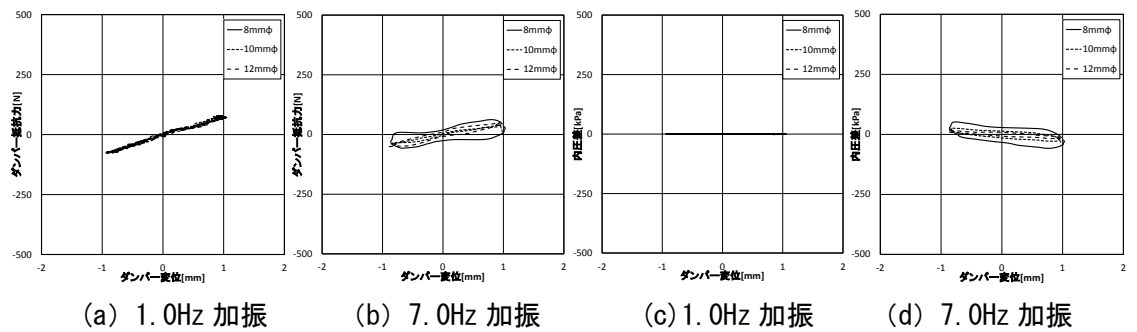
(a) 1.0Hz 加振 (b) 7.0Hz 加振 (c) 1.0Hz 加振 (d) 7.0Hz 加振

図 2.6 ダンパーの履歴ループ (連結管内径 : 10mm φ)



(a) 1.0Hz 加振 (b) 7.0Hz 加振 (c) 1.0Hz 加振 (d) 7.0Hz 加振

図 2.7 ダンパーの履歴ループ (連結管内径 : 12mm φ)



(a) 1.0Hz 加振 (b) 7.0Hz 加振 (c) 1.0Hz 加振 (d) 7.0Hz 加振

図 2.8 ダンパーの履歴ループ (連結管長さ : 0.5m)

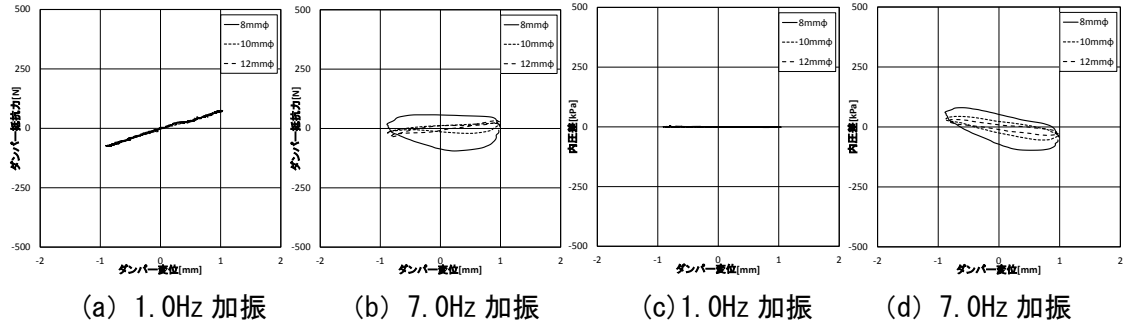


図 2.9 ダンパーの履歴ループ (連結管長さ : 1.0m)

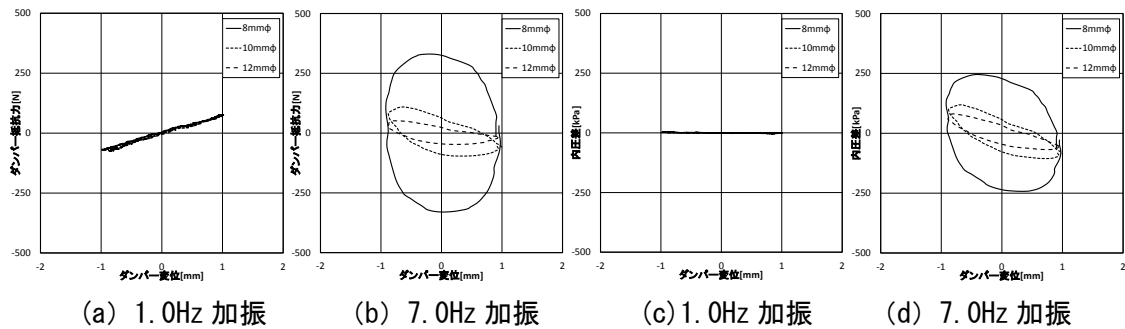


図 2.10 ダンパーの履歴ループ (連結管長さ : 2.0m)

加振試験の結果に基づき、加振振動数毎に変位 - 抵抗力関係をまとめたものを図 2.11 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は、抵抗力は線形的に増大する。これに対し、連結管内の液流による内圧抵抗は、速度振幅の増大に対し非線形的に大きくなる特性を持つことから、高振動数の加振に対して内圧抵抗が増大し、結果としてダンパーの抵抗力は非線形的に大きくなる。

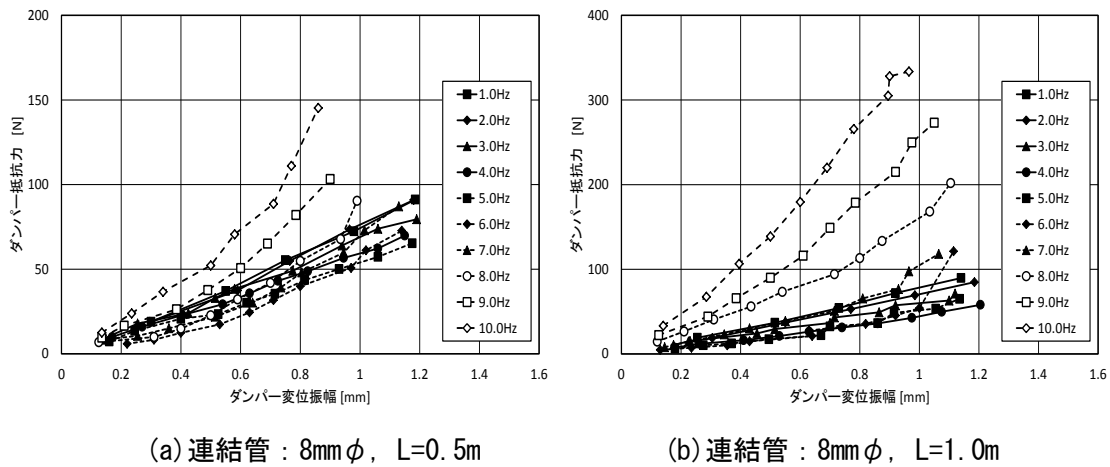
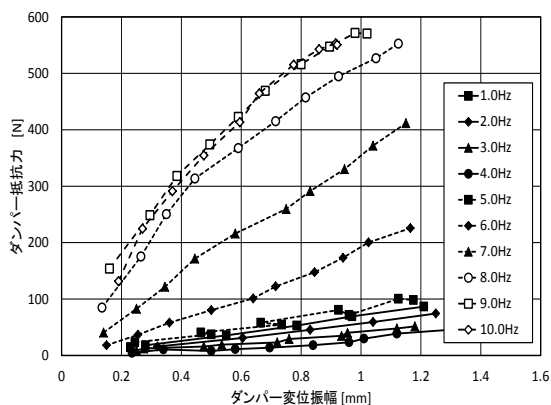
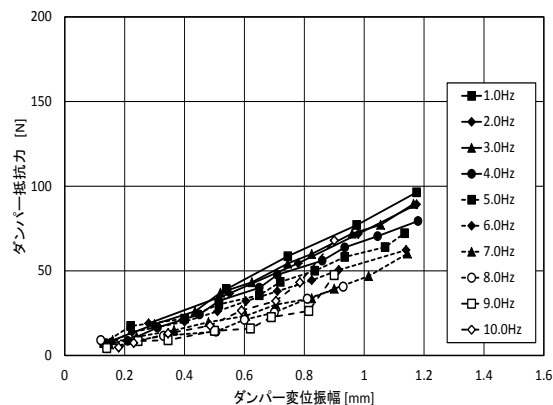


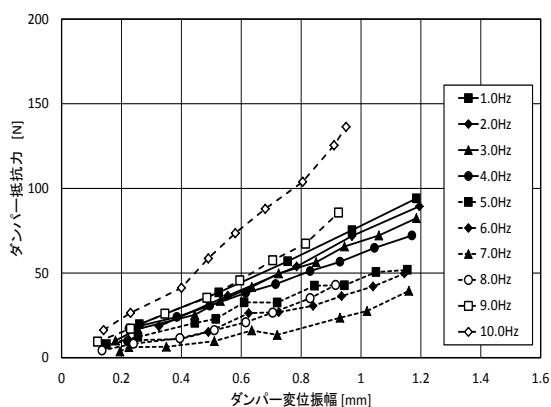
図 2.11 変位 - 抵抗力関係



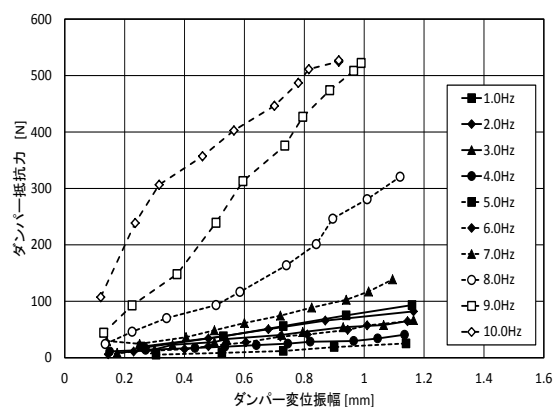
(c) 連結管 : 8mm ϕ , L=2.0m



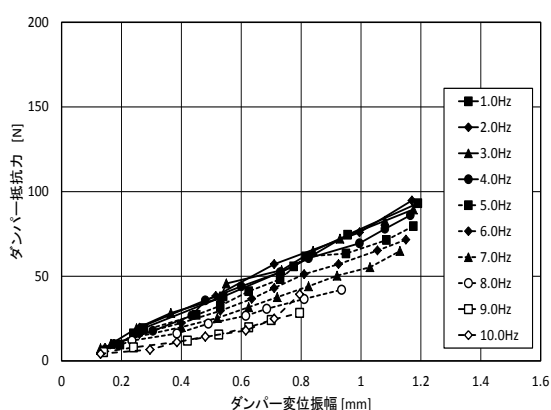
(d) 連結管 : 10mm ϕ , L=0.5m



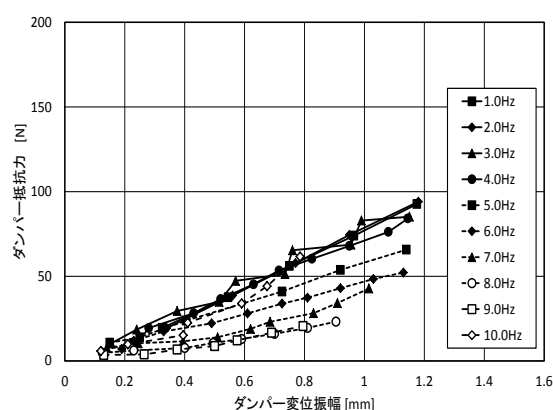
(e) 連結管 : 10mm ϕ , L=1.0m



(f) 連結管 : 10mm ϕ , L=2.0m

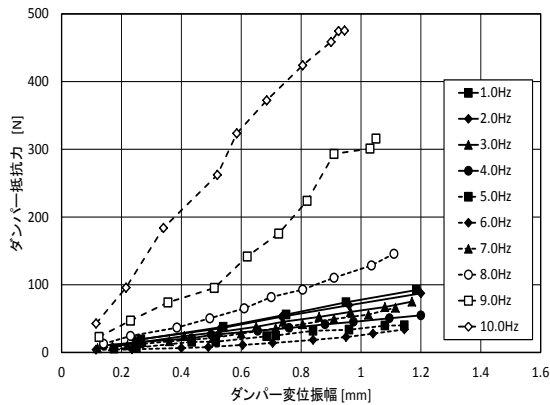


(g) 連結管 : 12mm ϕ , L=0.5m



(h) 連結管 : 12mm ϕ , L=1.0m

図 2.11 変位 - 抵抗力関係 (続き)



(i) 連結管 : 12mm φ, L=2.0m

図 2.11 変位 - 抵抗力関係 (続き)

2.2 ダンパー抵抗力の力学モデル

2.2.1 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し、圧力損失による内圧抵抗が発生する。圧力損失は、図 2.12 に示すように流路形状が急激に変化する急縮小部と急拡大部、連結管内の3箇所で生じる。

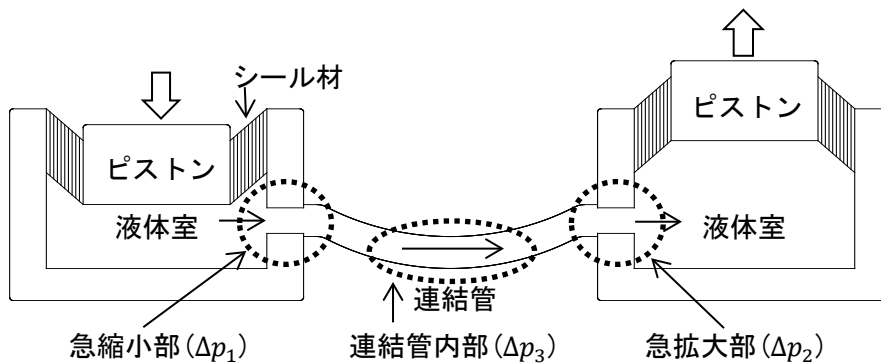


図 2.12 内圧抵抗の発生箇所

急縮小部と急拡大部で生じる圧力損失をそれぞれ Δp_1 、 Δp_2 とすると

$$\Delta p_1 = \zeta \frac{\rho(\beta \cdot \dot{x})^2}{2} \quad (2.1)$$

$$\Delta p_2 = \frac{\rho(\beta \cdot \dot{x})^2}{2} \quad (2.2)$$

と表される。ここで \dot{x} はピストンの速度 (m/sec)、 ρ は液体の密度 (kg/cm^3) である。 ζ は流路形状により定まる係数であり、既往の研究¹⁾により、ここでは0.5とした。また、 β 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 Δp_3 は、管内の乱流抵抗則により、

$$\Delta p_3 = \frac{\rho \cdot L}{2D} u_m^2 \cdot f \quad (2.3)$$

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

$$u_m = \beta \cdot \dot{x} \quad (2.4)$$

となる。また、連結管内のレイノルズ数は

$$Re = \frac{u_m \cdot D}{\nu} \quad (2.5)$$

と表される。ここで、 ν は液体の動粘性係数 (cm²/sec) である。液体は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、 ν を 0.01cm²/sec (20°C) とした。

ダンパーの内圧抵抗 F_f は、(2.1)式～(2.3)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

$$F_f = (\Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3)A \quad (2.6)$$

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(2.1)式、(2.2)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 Δp_1 と Δp_2 を差し引いたものとなる。

内圧差の履歴ループの最大値は、図 2.13 に示すように変位がゼロの点、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。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、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ことから、変位がゼロの点での内圧差の計測値を内圧差の最大値として用いた。図 2.14 に、振動数ごとにプロットした内圧抵抗の内訳を示す。このとき、内圧差の履歴ループが振動数の低い範囲で抵抗力をほとんど発生しないこと、振動数の高い範囲では質量効果により位相差が大きくなることから、内圧差の履歴ループが面積を持ち、かつ位相差の小さい振動数の範囲での結果を示している。

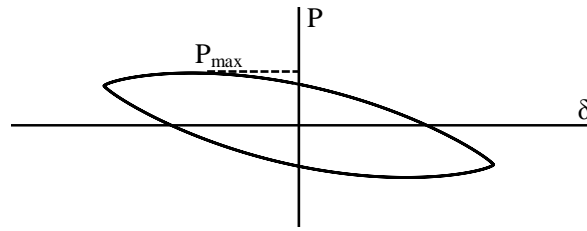


図 2.13 変位-内圧差履歴ループ

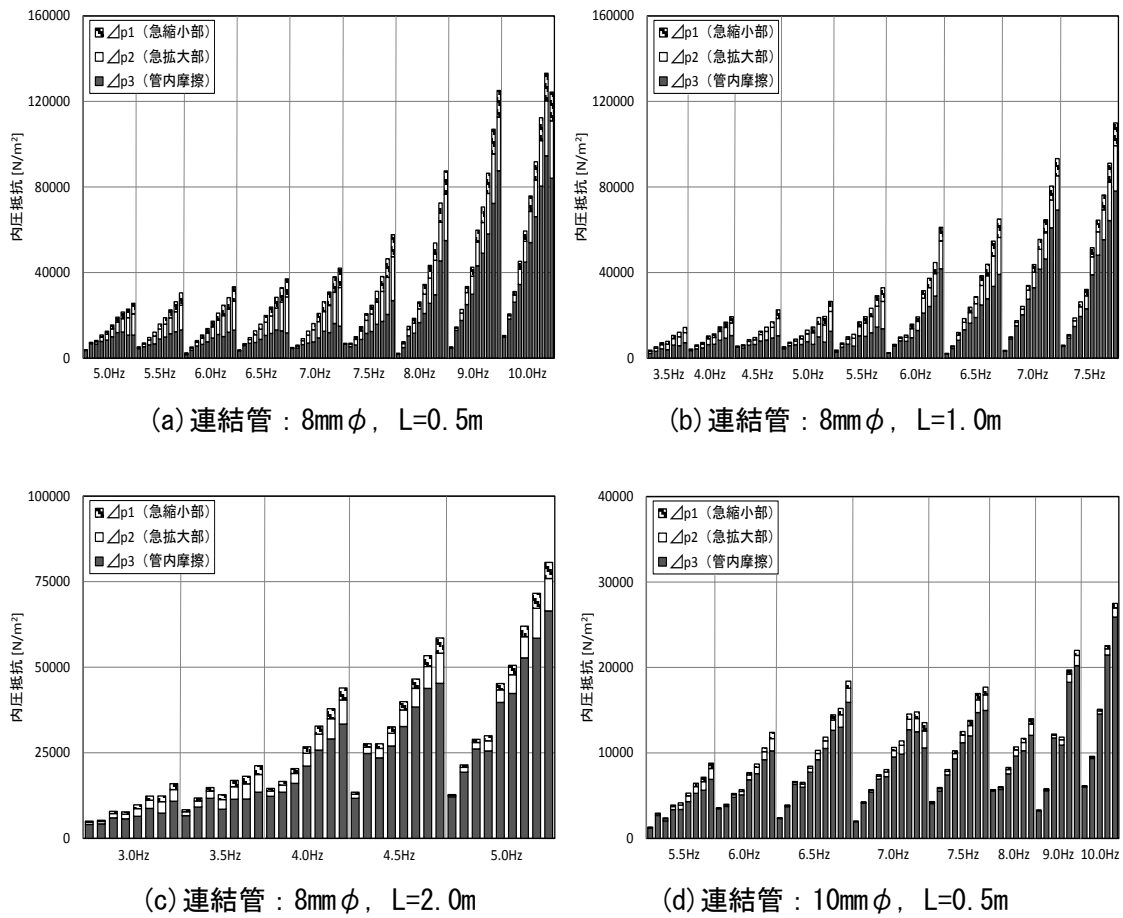


図 2.14 内圧抵抗の内訳

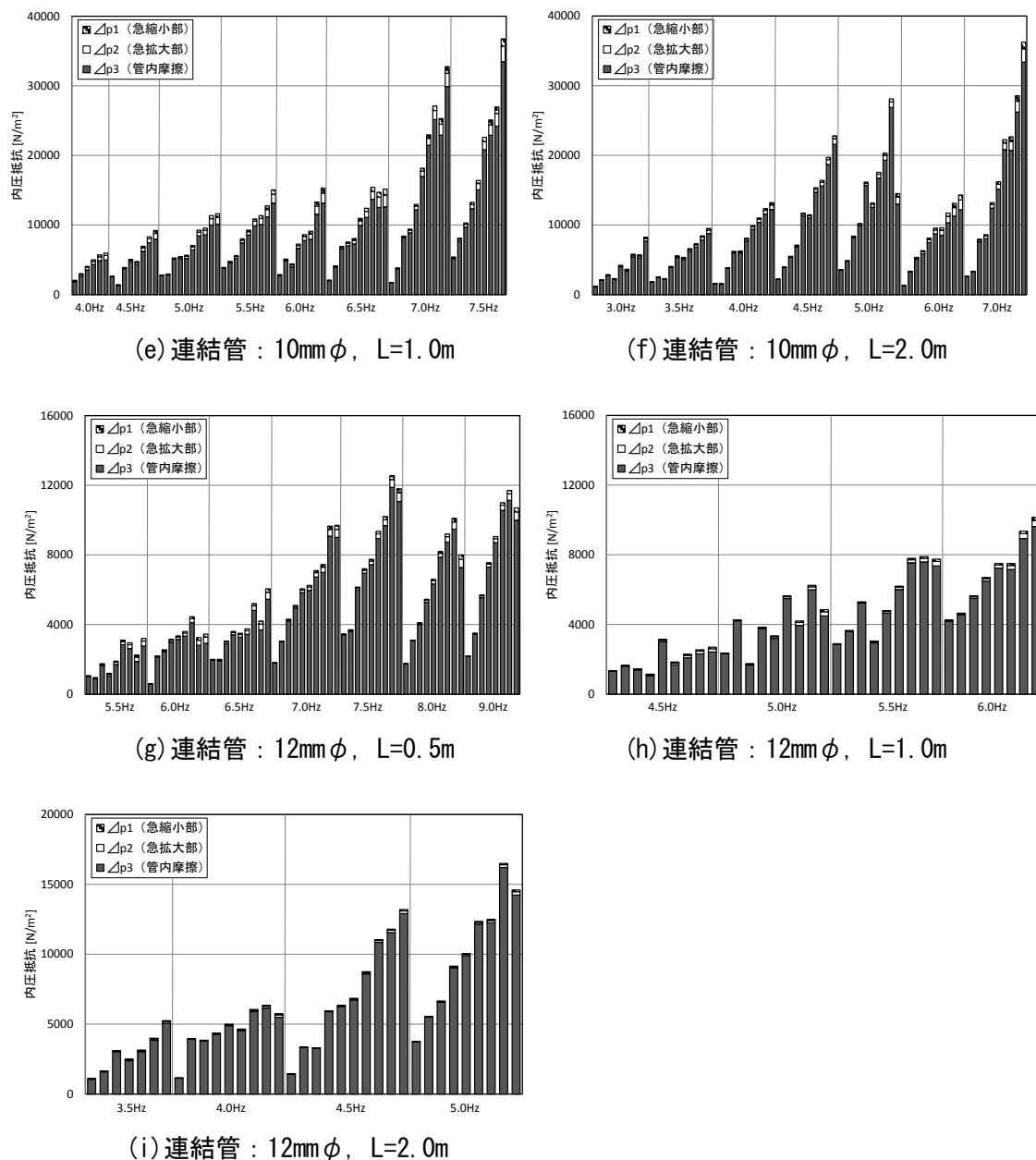
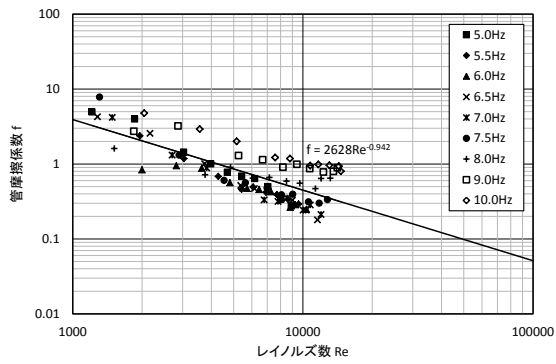


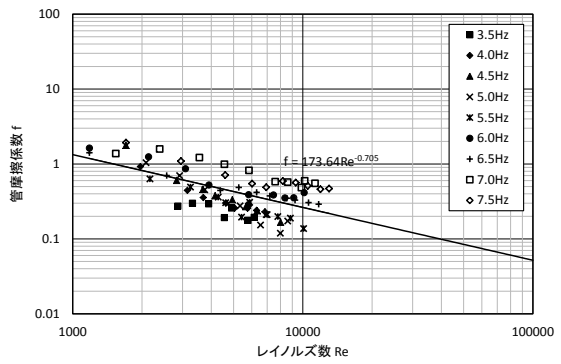
図 2.14 内圧抵抗の内訳 (続き)

これらの結果、管内摩擦による抵抗が内圧抵抗における大部分を占めていることが確認できる。液流による管内摩擦について、(2.3)~(2.5)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 2.15 に示す。

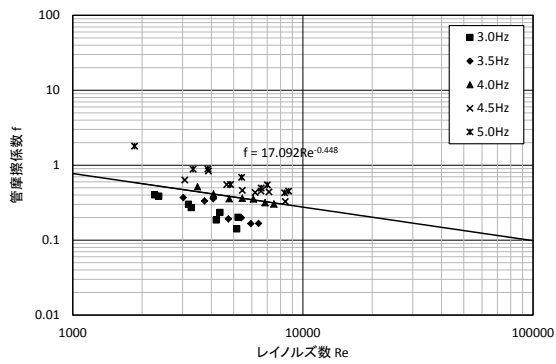
第2章 慣性質量効果を有する液流ダンパーの抵抗力特性



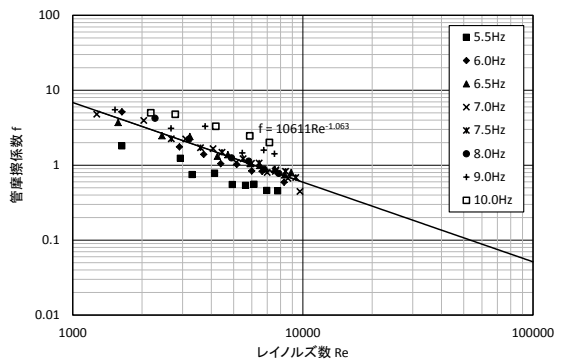
(a) 連結管 : 8mm ϕ , L=0.5m



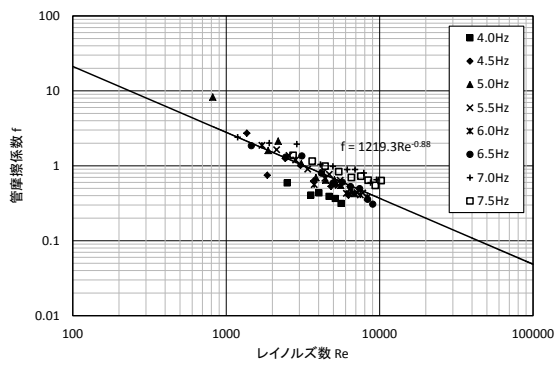
(b) 連結管 : 8mm ϕ , L=1.0m



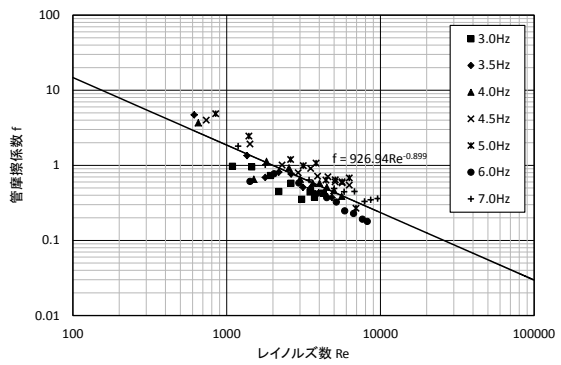
(c) 連結管 : 8mm ϕ , L=2.0m



(d) 連結管 : 10mm ϕ , L=0.5m

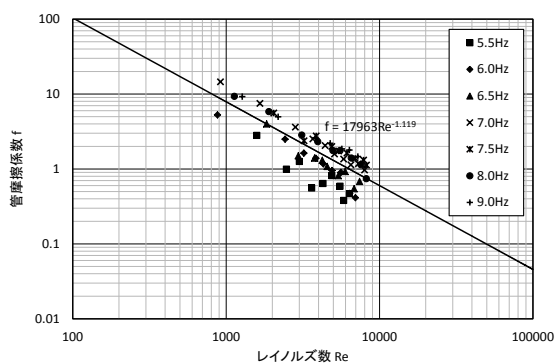


(e) 連結管 : 10mm ϕ , L=1.0m

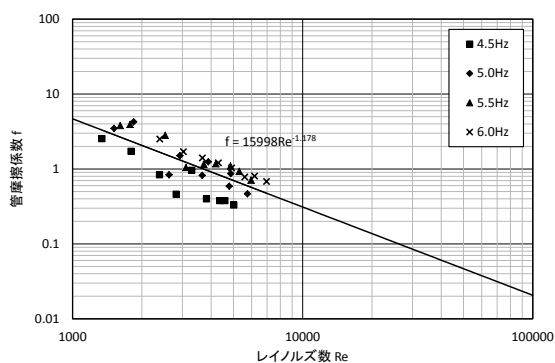


(f) 連結管 : 10mm ϕ , L=2.0m

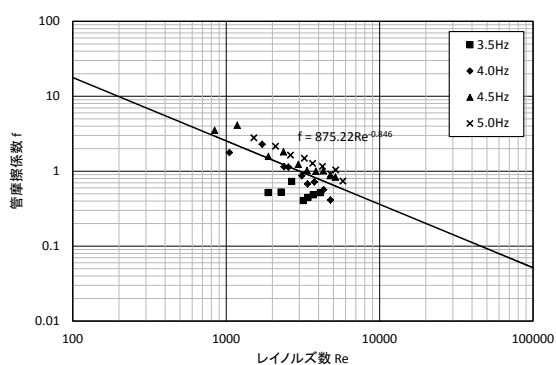
図 2.15 管摩擦係数とレイノルズ数の関係



(g) 連結管 : 12mm ϕ , L=0.5m



(h) 連結管 : 12mm ϕ , L=1.0m



(i) 連結管 : 12mm ϕ , L=2.0m

図 2.15 管摩擦係数とレイノルズ数の関係 (続き)

図 2.15 より、連結管内径 10mm ϕ の場合、管内摩擦の実験式として

$$f = 10611 R_e^{-1.063} \quad (\text{連結管長さ : 0.5m}) \quad (2.7)$$

$$f = 1219.3 R_e^{-0.88} \quad (\text{連結管長さ : 1.0m}) \quad (2.8)$$

$$f = 1219.3 R_e^{-0.899} \quad (\text{連結管長さ : 2.0m}) \quad (2.9)$$

がそれぞれ得られた。(2.7)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 0.937 乗、(2.8)式は 1.12 乗、(2.9)式は 1.101 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(2.3)式に代入することにより算出される。

2.2.2 シール材の抵抗

シール材の抵抗力は、図 2.4 に示したように、加振振幅および加振振動数の変化に対して抵抗力履歴ループの傾きがほぼ一定であること、また、加振振動数が増加すると履歴ループは細い楕円形を示し、ごくわずかなエネルギー吸収能力を有することから、図 2.16 に示すようなばね要素とダッシュポット要素を並列に結合した Kelvin 固体モデルを採用した。その抵抗力 F_s は、モデルに強制される変位を x とした場合、

$$F_s = k_s \cdot x + c_s \cdot \dot{x} \quad (2.10)$$

と表される。ここで、シール材のばね定数 k_s は、液体を充填しない状態のダンパーによる変位 - 抵抗力履歴ループの実験結果から算出した。減衰係数 c_s は、ダンパーの変位 - 抵抗力履歴ループと、後述する 3.2 節の 1 層制振フレームの正弦波加振試験の結果を考慮し算出した。算出したシール材のパラメータを表 2.4 に示す。

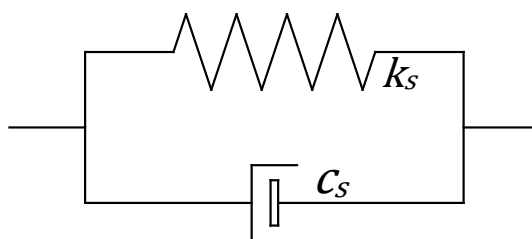


図 2.16 Kelvin 固体モデル

表 2.4 シール材のパラメータ

シール材のばね定数： k_s	シール材の減衰係数： c_s
87N/m	66.9N・sec/m

2.2.3 慣性質量効果

前述の図 2.5～図 2.10 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。後述の 4.2 節より、ダンパーが組み込まれた振動系モデルにおいて、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 β 、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、

$$F_I = -\beta^2 m_a \ddot{x} \quad (2.11)$$

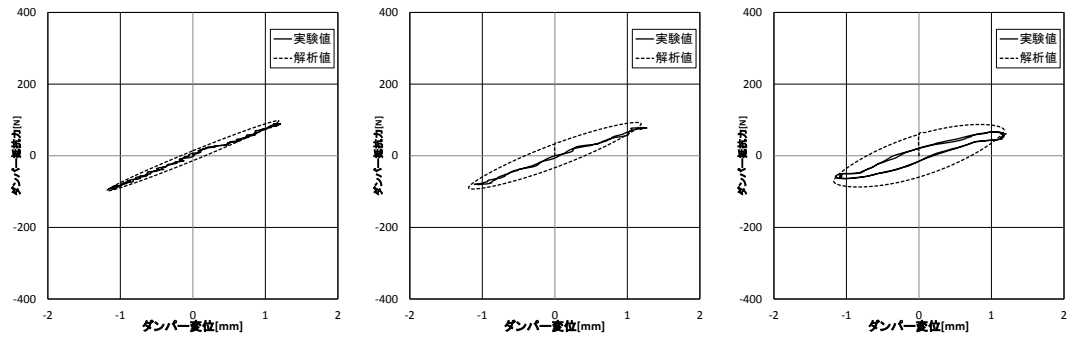
と表される。ここで m_a は連結管内の液体の質量を表している。

2.2.4 解析結果と試験結果の比較

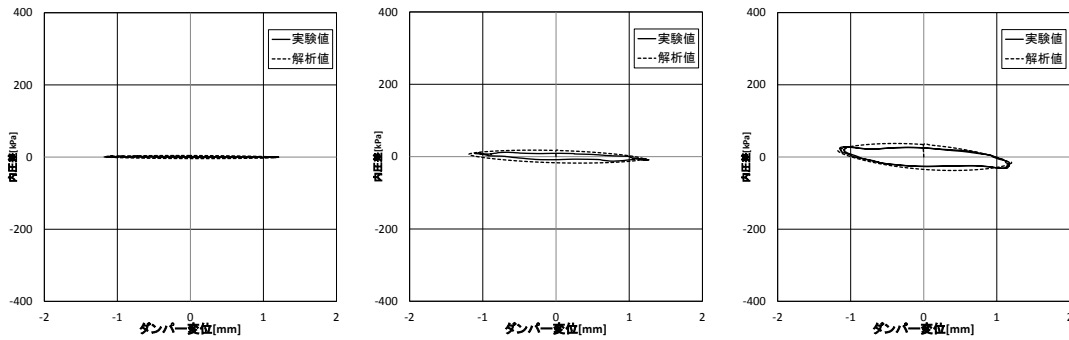
ダンパーの全抵抗 F は、(2.6)式で求められる液流抵抗、(2.10)式および(2.11)式で算出されるシール材による抵抗と慣性質量の和となる。表 2.5 に示した解析パラメータを用い、時間ステップ解析により算出したダンパー抵抗力履歴ループと内圧差履歴ループの解析結果を実験結果と比較したものを図 2.17～図 2.25 に示す。

表 2.5 解析パラメータ

ピストン有効半径： r_p		2.2cm
ピストン有効断面積： A		15.2 cm ²
連結管内径： D		0.8 cm, 1.0cm, 1.2cm
連結管長さ： L		50cm, 100cm, 200 cm
連結管断面積： a		0.503cm ² , 0.785cm ² , 1.131cm ²
断面積比： $\beta(= A/a)$		30.2, 19.3, 13.4
連結管形状		管内摩擦の実験式
内径 [mm ϕ]	長さ [m]	
8.0	0.5	$f = 2628R_e^{-0.942}$
8.0	1.0	$f = 173.64R_e^{-0.705}$
8.0	2.0	$f = 17.092R_e^{-0.448}$
10.0	0.5	$f = 10611R_e^{-1.063}$
10.0	1.0	$f = 1219.3R_e^{-0.88}$
10.0	2.0	$f = 926.94R_e^{-0.899}$
12.0	0.5	$f = 17963R_e^{-1.119}$
12.0	1.0	$f = 15998R_e^{-1.178}$
12.0	2.0	$f = 875.22R_e^{-0.846}$

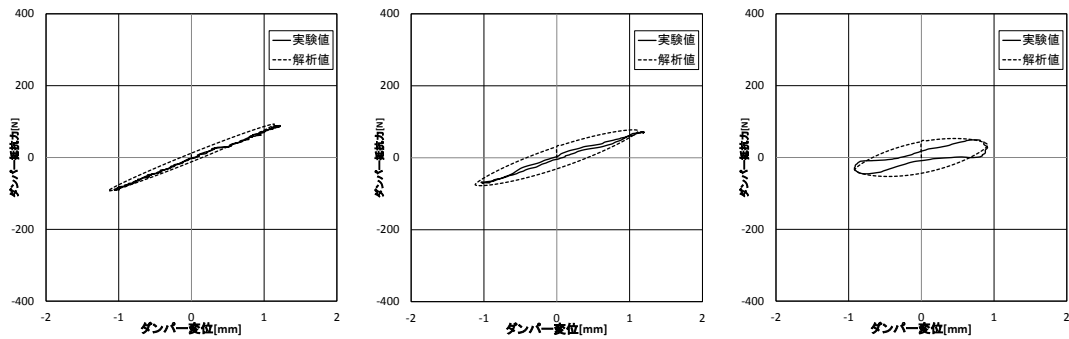


(a) 変位 - 抵抗力履歴ループ(1.0Hz, 3.0Hz, 5.0Hz)

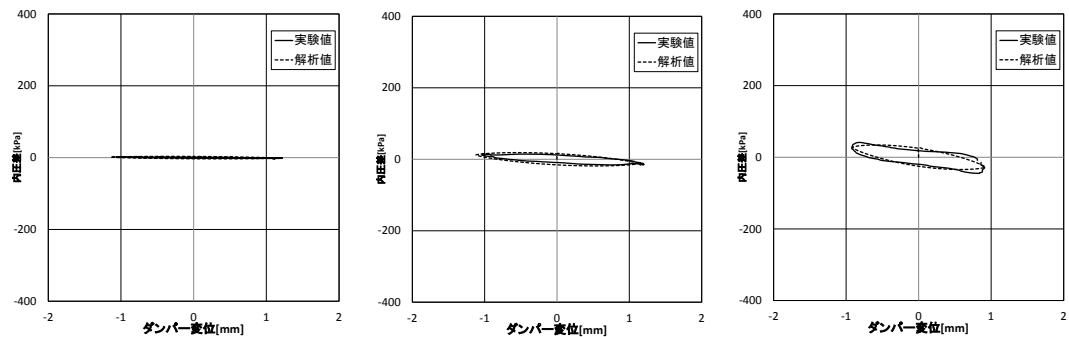


(b) 変位 - 内圧差履歴ループ(1.0Hz, 3.0Hz, 5.0Hz)

図 2.17 解析結果と実験結果の比較 (連結管 : 8mmφ, L=0.5m)

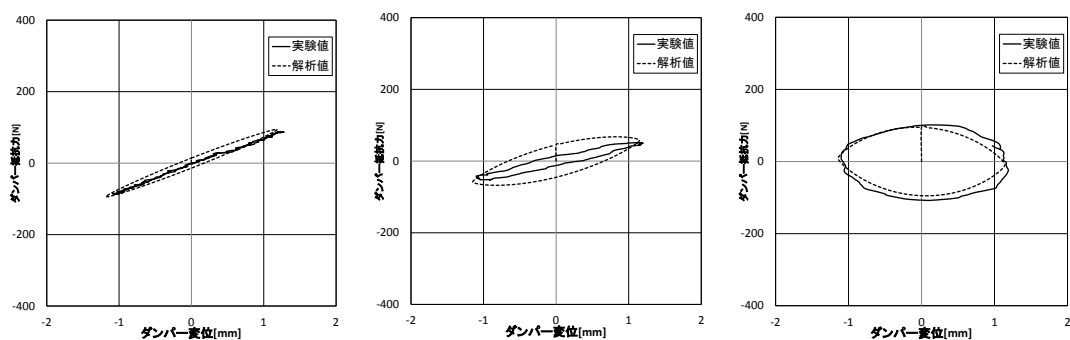


(a) 変位 - 抵抗力履歴ループ(1.0Hz, 3.0Hz, 5.0Hz)

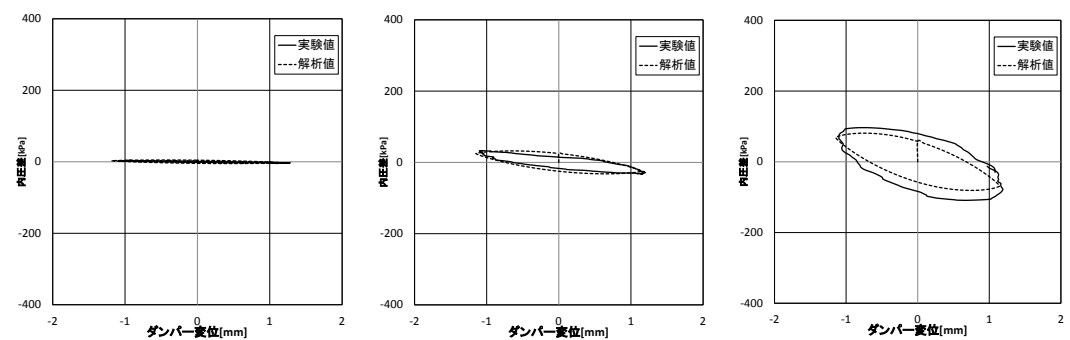


(b) 変位 - 内圧差履歴ループ(1.0Hz, 3.0Hz, 5.0Hz)

図 2.18 解析結果と実験結果の比較 (連結管 : 8mmφ, L=1.0m)

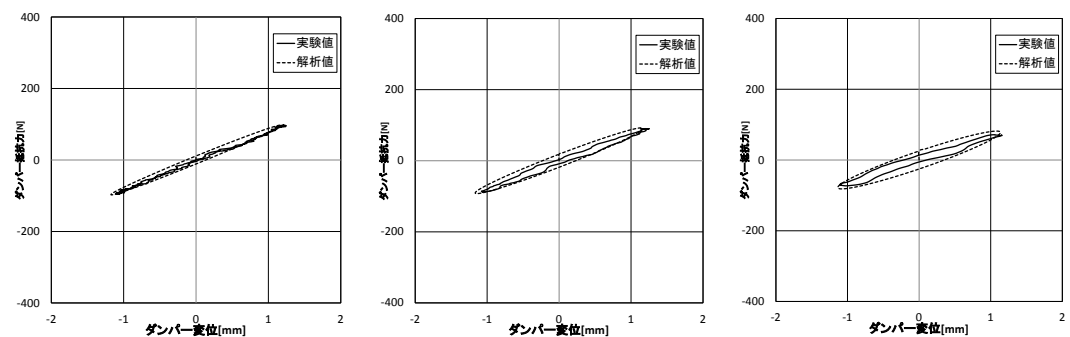


(a) 変位 - 抵抗力履歴ループ (1.0Hz, 3.0Hz, 5.0Hz)

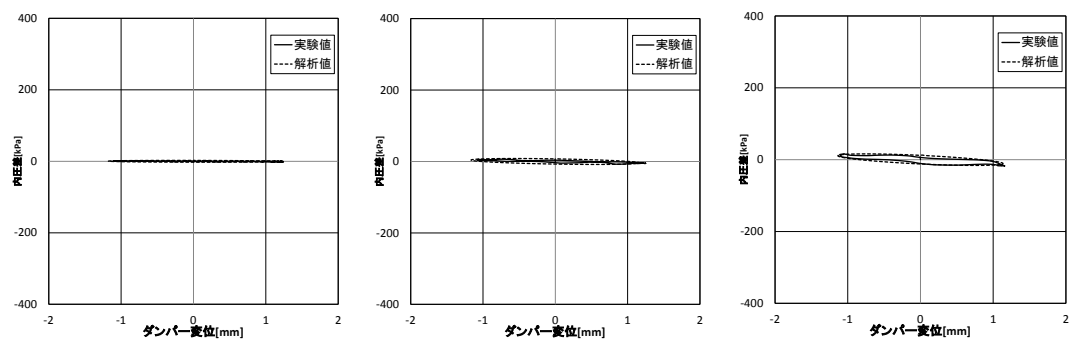


(b) 変位 - 内圧差履歴ループ (1.0Hz, 3.0Hz, 5.0Hz)

図 2.19 解析結果と実験結果の比較 (連結管 : 8mmφ, L=2.0m)

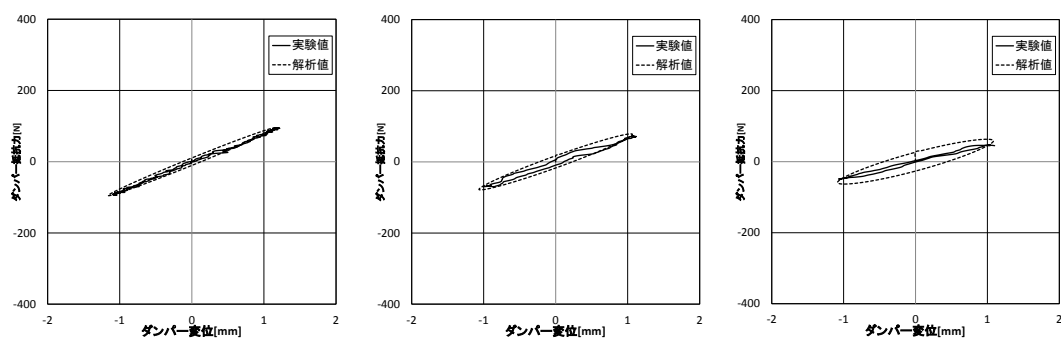


(a) 変位 - 抵抗力履歴ループ (1.0Hz, 3.0Hz, 5.0Hz)

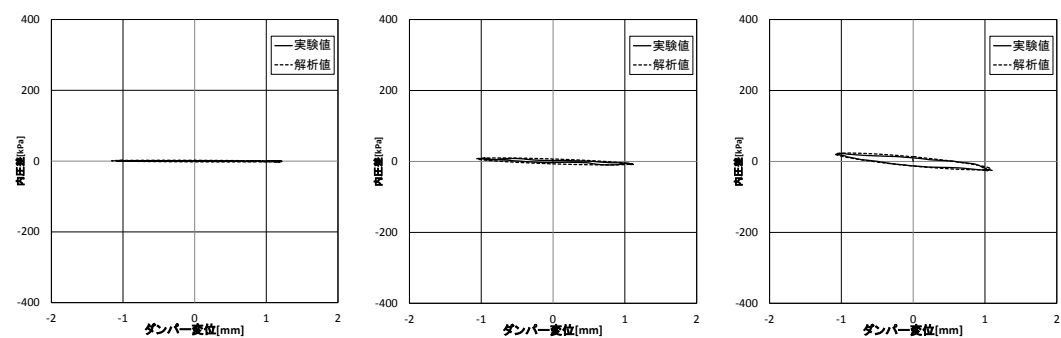


(b) 変位 - 内圧差履歴ループ (1.0Hz, 3.0Hz, 5.0Hz)

図 2.20 解析結果と実験結果の比較 (連結管 : 10mmφ, L=0.5m)

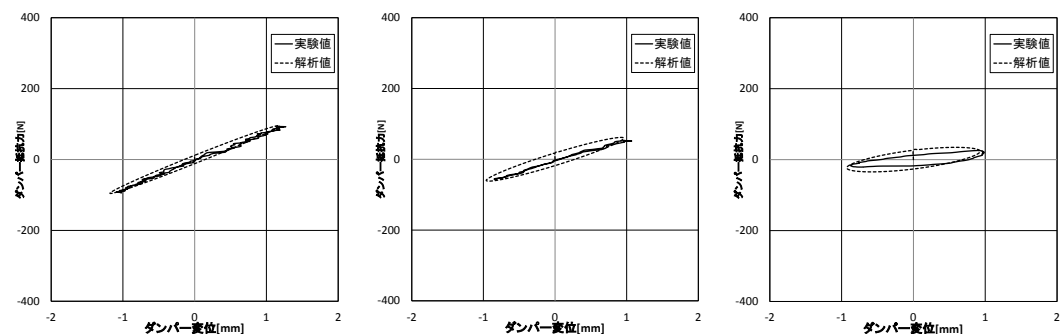


(a) 変位-抵抗力履歴ループ(1.0Hz, 3.0Hz, 5.0Hz)

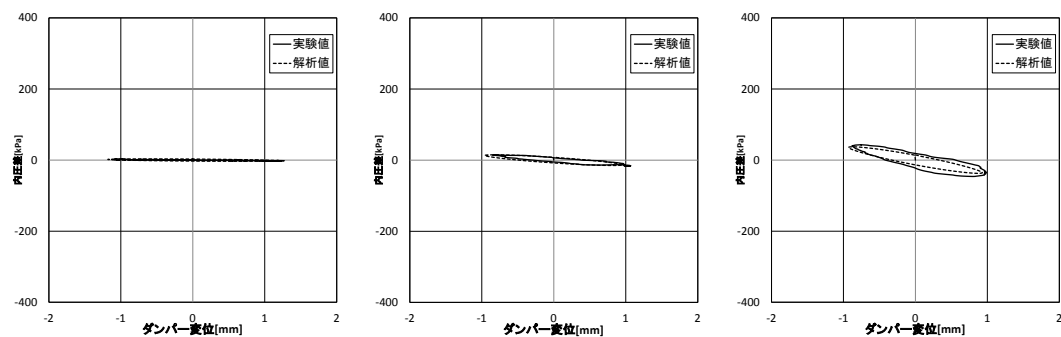


(b) 変位-内圧差履歴ループ(1.0Hz, 3.0Hz, 5.0Hz)

図 2.21 解析結果と実験結果の比較 (連結管 : 10mmφ, L=1.0m)

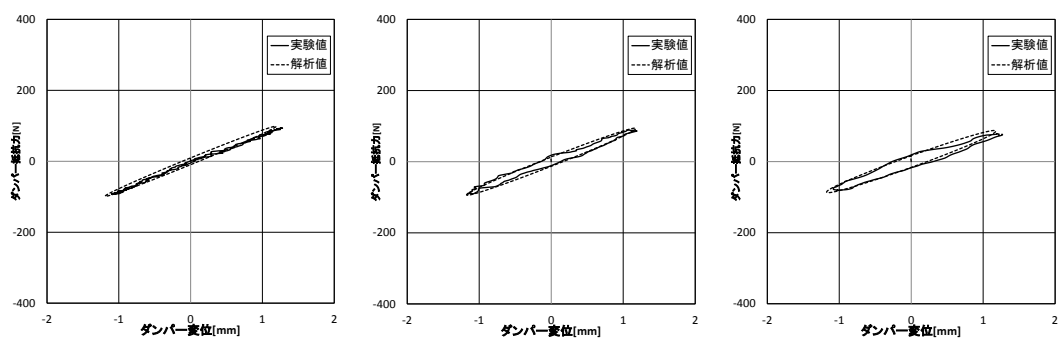


(a) 変位-抵抗力履歴ループ(1.0Hz, 3.0Hz, 5.0Hz)

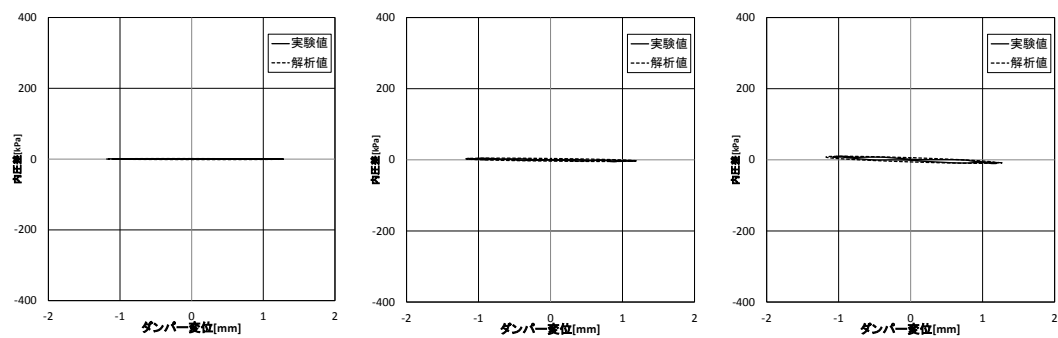


(b) 変位-内圧差履歴ループ(1.0Hz, 3.0Hz, 5.0Hz)

図 2.22 解析結果と実験結果の比較 (連結管 : 10mmφ, L=2.0m)

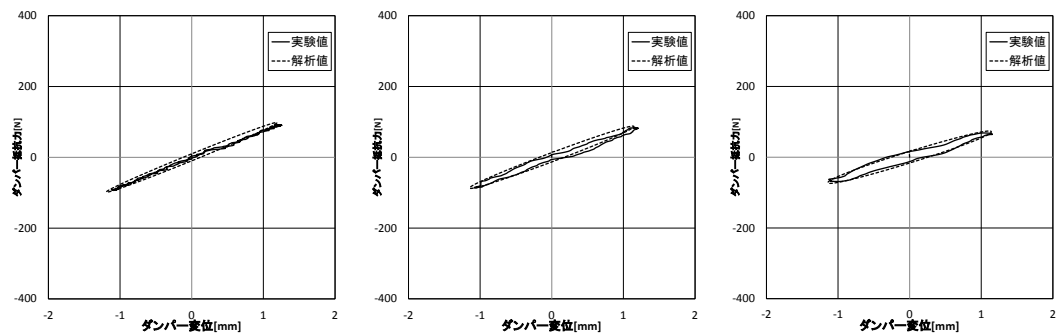


(a) 変位 - 抵抗力履歴ループ (1.0Hz, 3.0Hz, 5.0Hz)

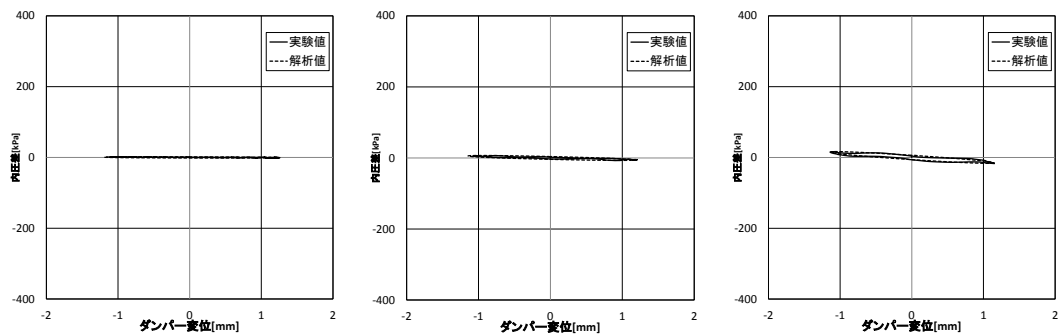


(b) 変位 - 内圧差履歴ループ (1.0Hz, 3.0Hz, 5.0Hz)

図 2.23 解析結果と実験結果の比較 (連結管 : 12mmφ, L=0.5m)



(a) 変位 - 抵抗力履歴ループ (1.0Hz, 3.0Hz, 5.0Hz)



(b) 変位 - 内圧差履歴ループ (1.0Hz, 3.0Hz, 5.0Hz)

図 2.24 解析結果と実験結果の比較 (連結管 : 12mmφ, L=1.0m)

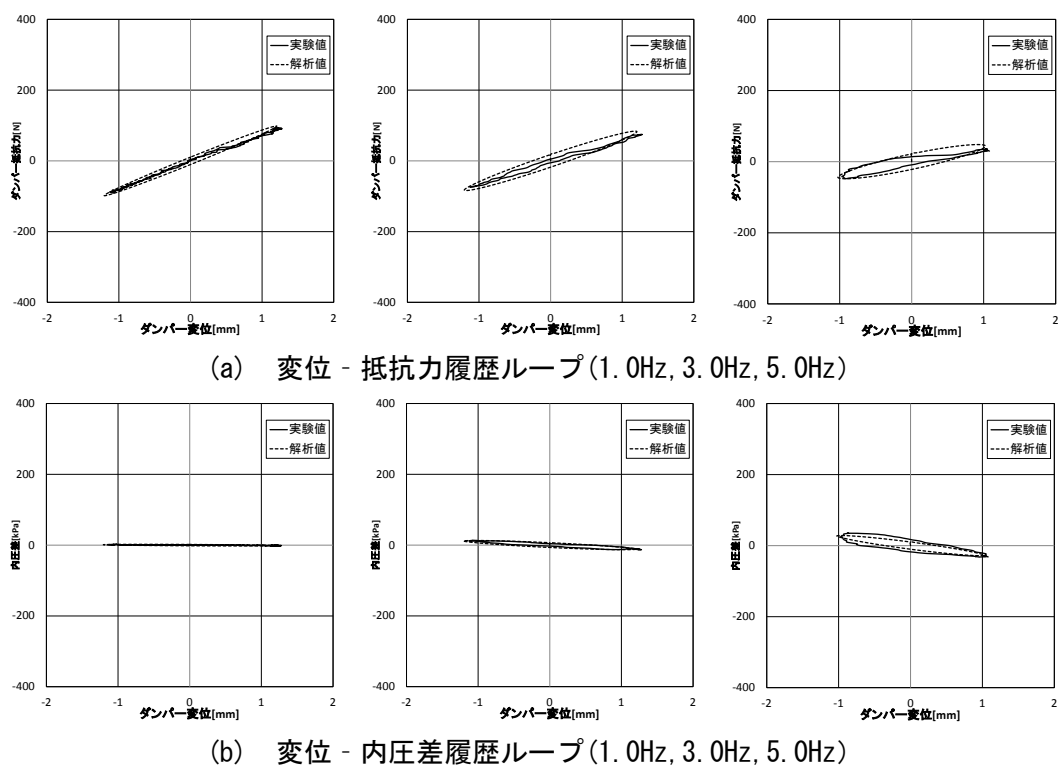


図 2.25 解析結果と実験結果の比較 (連結管 : 12mmφ, L=2.0m)

シリンダー内に液体を封入したダンパーの場合、試験結果に示したように、抵抗力履歴ループの形状に歪みがみられた。これは、強制的に加振を行うことによって連結管内に激しい液流が生じ、それにより連結管が大きく動くことによって安定した流路が確保できなかったことによるものと考えられる。本論では、液流に起因する内圧抵抗は、流路形状が大きく変化する部分と連結管内の圧力損失により発生するものとし、それぞれを既往の理論式と実験結果に基づき、算出した管内摩擦の実験式から求める手法を採用した。本手法による解析の結果は、実験値にみられた履歴ループの歪みを十分に再現することはできないものの、その特性や最大値等について概ね良い一致を示していることが確認できた。

連結管内の液流による質量効果について、本論で後述する本機構を組み込んだ 1 質点振動系モデルから、その効果は連結管内の液体質量に対して β^2 倍に増幅されて作用すると仮定した。その結果、連結管形状や入力条件の違いによる見掛け上の履歴ループの傾きの減少の度合いを表現することができた。

第3章 1層制振フレームの振動台加振試験

3.1 試験概要

- 3.1.1 試験目的
- 3.1.2 試験体概要
- 3.1.3 試験方法
- 3.1.4 計測方法

3.2 試験結果

3.3 応答スペクトルを用いたダンパーの振動抑制効果の検証

第3章 1層制振フレームの振動台加振試験

3.1 試験概要

3.1.1 試験目的

第2章で示した慣性質量効果を有する液流ダンパーを組み込んだ1層の縮小フレーム試験体を用い、正弦波および地震波加振試験を行い、ダンパーの発揮する質量および応答低減効果が、フレームの応答特性に与える影響について確認する。

3.1.2 試験体概要

写真3.1に、振動台加振試験に用いたフレーム試験体の全景を、図3.1に形状・寸法を示す。試験体は、幅500mm、奥行き440mm、厚さ8mmの鉄板を、4枚のアルミ板（幅100mm、高さ500mm、厚さ4mm）で支持したものである。図示のとおり、ダンパーは鉄板の中央に固定したダンパー固定用治具の先端に横向きに取り付けられる。ダンパーは、バットレスを介して振動台に固定され、フレームの水平変位に伴って生じる固定用治具と基礎梁の水平方向の相対変位によって駆動される。フレームに組み込んだダンパーの諸元については、第2章の表2.1と同じである。ダンパーの諸元をあらためて表3.1に示す。

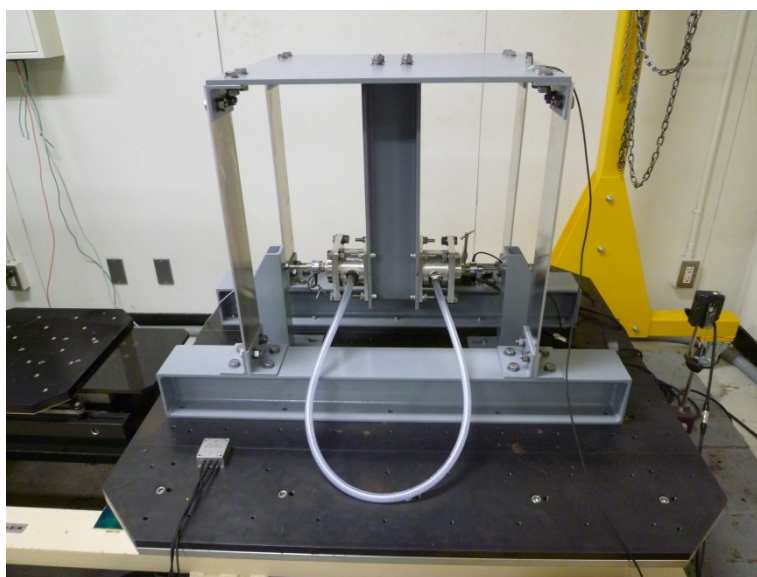


写真3.1 試験体全景

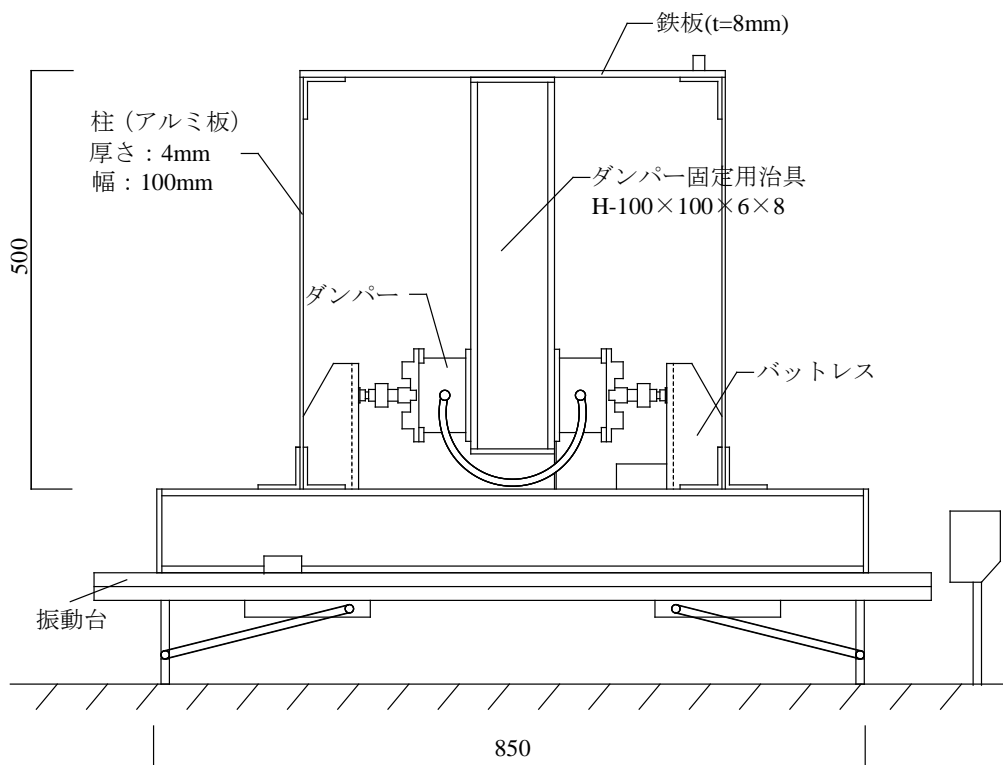


図 3.1 1層フレーム試験体 (単位: mm)

表 3.1 ダンパー試験体諸元

試験体 ケース	ダンパーの有無	液体の有無	連結管形状	
			内径(mm φ)	長さ(m)
Case1	無	—	—	—
Case2	有	無	—	—
Case3	有	有	8	0.5
Case4	有	有	8	1.0
Case5	有	有	8	2.0
Case6	有	有	10	0.5
Case7	有	有	10	1.0
Case8	有	有	10	2.0
Case9	有	有	12	0.5
Case10	有	有	12	1.0
Case11	有	有	12	2.0

3.1.3 試験方法

ダンパーが発揮する応答低減効果、および質量効果によるフレームの応答と固有振動数の変化を確認するため、ダンパーを組み込んだ1層フレーム試験体による正弦波加振試験を行った。フレーム試験体を1m×1mの小型振動台の上に基礎梁を介して固定し、2.0Hzから15.0Hzまで変化させた1方向の正弦波により加振した。加振レベルは50gal、100gal、150galの3種類を設定し、振動台の最大加速度が設定値となるように調整し加振した。

次に、複数の観測地震波を入力した加振試験を行い、実地震に対するダンパーの応答低減および質量効果の有効性の確認を行った。試験に用いた地震波を表3.2に示す。試験に用いた振動台は、地震波の種類により制御できる加振レベルが異なる。そのため、試験では表3.2に示すように制御可能な加振レベルの最大を大レベルとし、中レベル、小レベルを設定して加振を行った。

表 3.2 入力地震波一覧

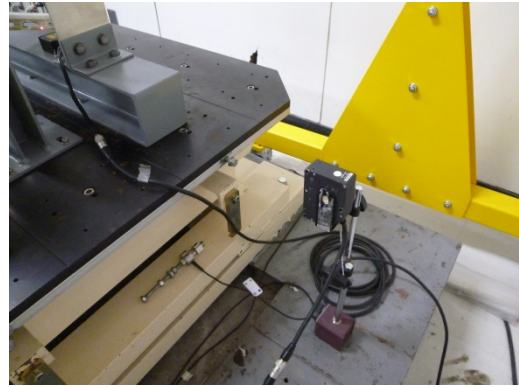
入力地震波名称	地震名称 観測点	最大加速度 [gal]	目標入力加速度[gal]		
			小	中	大
El Centro NS 波	1940年 Imperial Valley 地震 エルセントロ変電所 NS 成分記録	341.70	24.8	53.8	82.7
八戸 EW 波	1968年十勝沖地震 八戸港湾 EW 成分記録	180.23	10.0	21.7	33.4
神戸 NS 波	1995年兵庫県南部地震 神戸海洋気象台 NS 成分記録	818.01	26.2	56.7	87.3

3.1.4 計測方法

試験では、振動台上と振動台の外側に設置したレーザー式変位計でフレームの相対変位と振動台の変位を、フレーム鉄板上と振動台上に設置した加速度計によりフレームの応答加速度と振動台加速度を計測した。また、ダンパーのピストンに連結したロードセルでダンパーの抵抗力を、シリンダー側面に取り付けた圧力計でシリンダーの内圧をそれぞれ測定した。写真3.2に各機器の計測状況を、表3.3に使用した計測機器の一覧を、図3.2に計測システム図をそれぞれ示す。



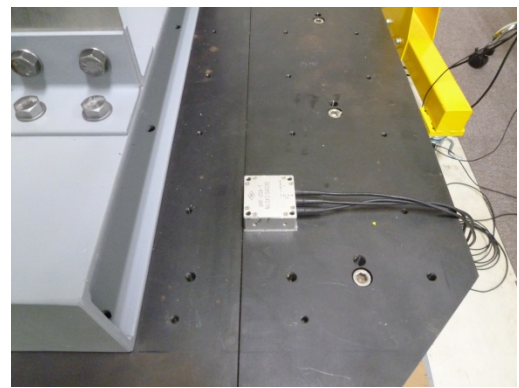
(a) レーザー変位計 (フレーム)



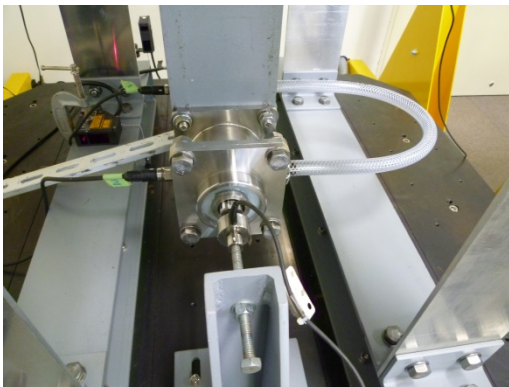
(b) レーザー変位計 (振動台)



(c) 加速度計 (フレーム)



(d) 加速度計 (振動台)



(e) ロードセル



(f) 圧力変換機

写真 3.2 使用計測機器

表 3.3 計測機器一覧

品名		型式	製造元
データ収録用 コンピューター	ハード	Type S	SONY
	ソフト	WAVESHOT!	KEYENCE
マルチ入力データ収集システム		NR-500	KEYENCE
		NR-HA08	
		NR-ST04	
レーザー変位計 (フレーム)	センサヘッド	LB-080	KEYENCE
	アンプユニット	LB-1100	
レーザー変位計 (振動台)	センサヘッド	LB-300	KEYENCE
	アンプユニット	LB-1200	
加速度計 (フレーム)		ARF-10A	東京測器研究所
加速度計 (振動台)		ARF-20A-T	
ロードセル		LUK-1TBS	KYOWA
圧力変換機		PGL-A-1MP-A	KYOWA

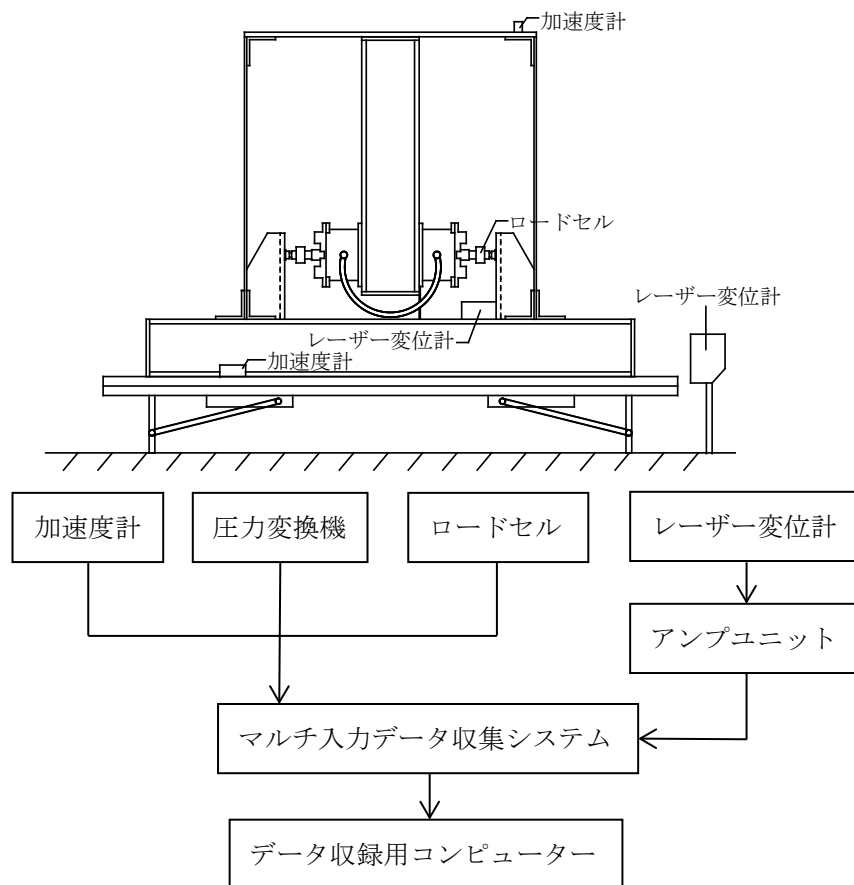
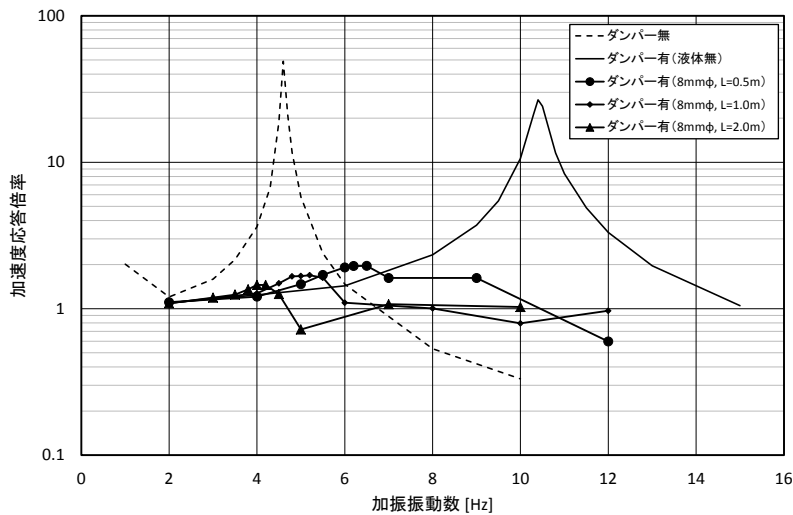


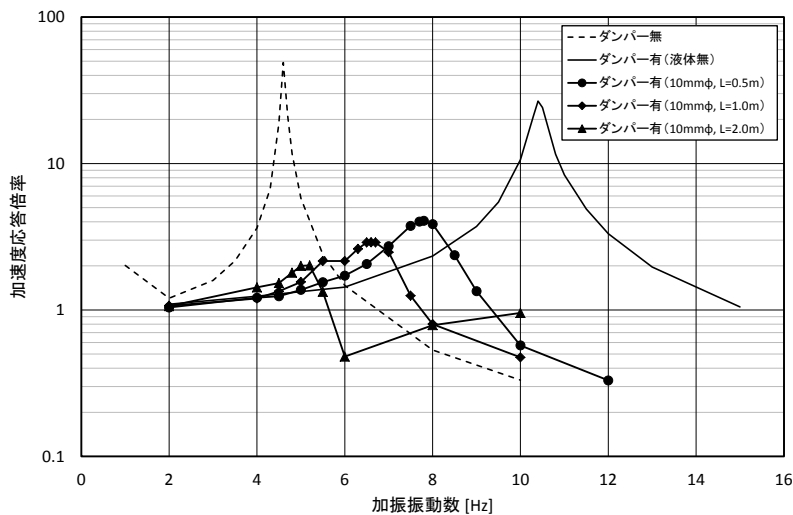
図 3.2 計測システム図

3.2 試験結果

正弦波加振試験を行って得られた共振曲線の代表的な例を図3.3～図3.5に示す。図3.3、図3.4は振動台の加速度振幅を50galに設定し、連結管内径を8mmφ、10mmφ、12mmφとして長さの異なる連結管を用いた場合の結果と、連結管長さを0.5m、1.0m、2.0mとして内径の異なる連結管を用いた場合の結果を重ね合わせたものである。図3.5は、連結管内径を10mmφとして振動台加速度を50gal、100gal、150galに設定して加振し、得られた共振曲線を重ね合わせたものである。

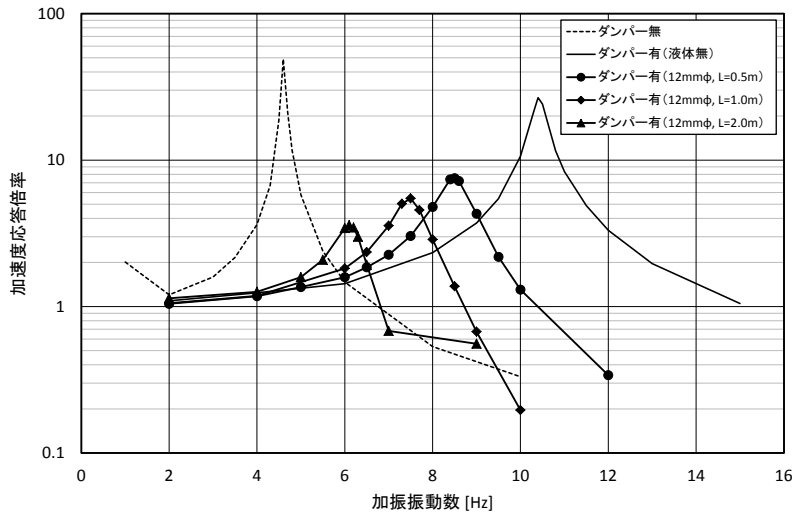


(a) 振動台加速度:50gal, 連結管内径 8mmφ



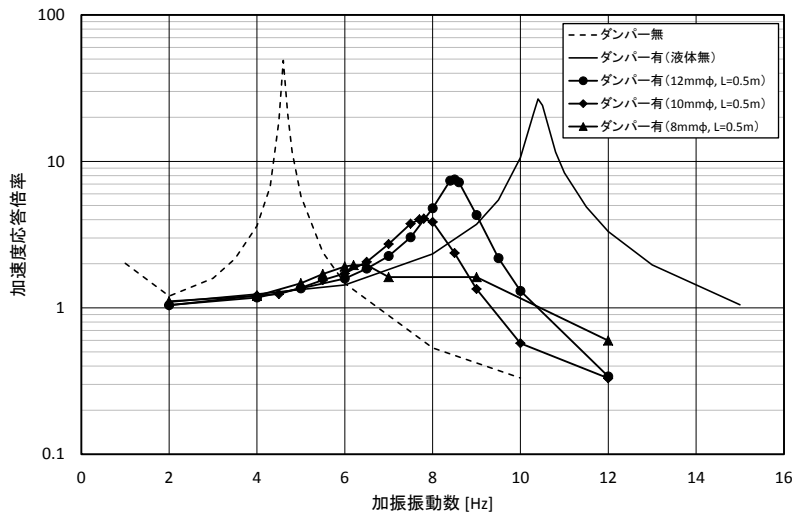
(b) 振動台加速度:50gal, 連結管内径 10mmφ

図3.3 共振曲線(連結管内径別)



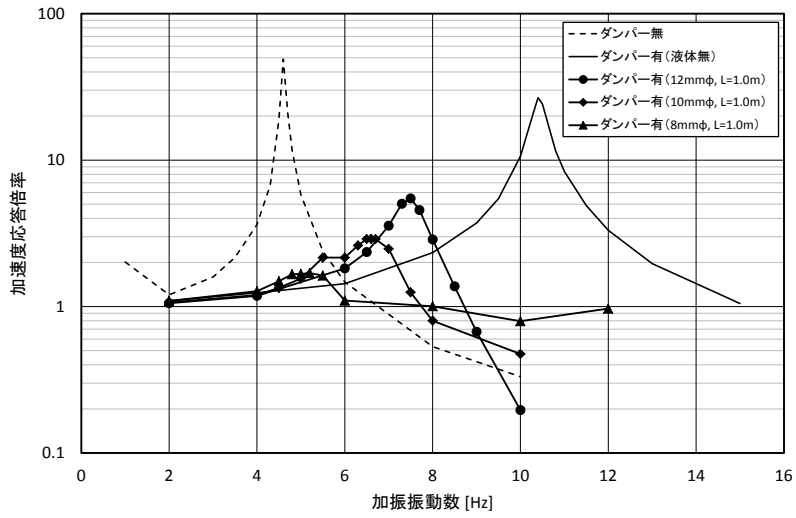
(c) 振動台加速度:50gal, 連結管内径 12mmφ

図 3.3 共振曲線 (連結管内径別: 続き)

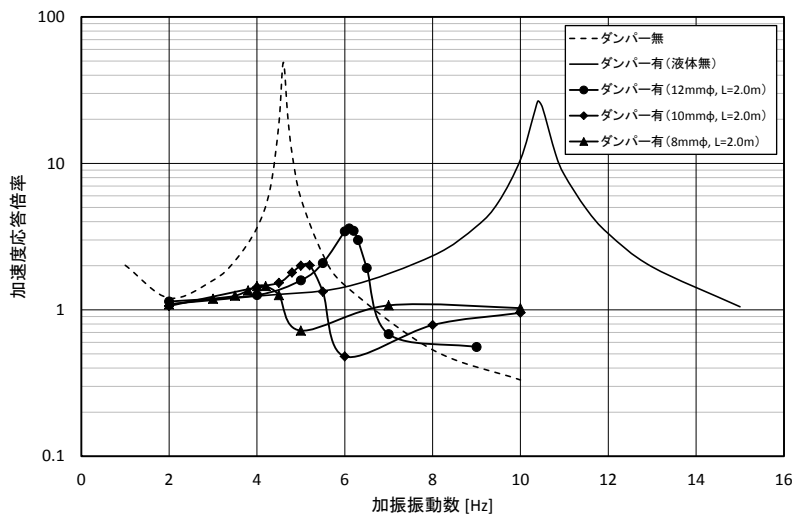


(a) 振動台加速度:50gal, 連結管長さ 0.5m

図 3.4 共振曲線 (連結管長さ別)



(b) 振動台加速度:50gal, 連結管長さ 1.0m



(c) 振動台加速度:50gal, 連結管長さ 2.0m

図 3.4 共振曲線 (連結管長さ別: 続き)

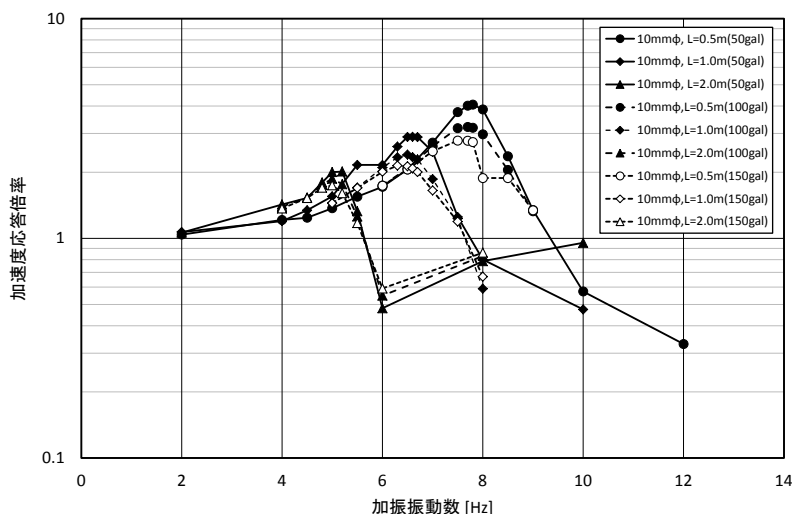


図 3.5 共振曲線（連結管内径 10mmφ）

これらの結果、ダンパーの付かないフレームの固有振動数は 4.6Hz となる。これに、液体を封入しない状態のダンパーを組み込んだ場合、固有振動数は 10.4Hz に上昇し、共振点における加速度応答倍率は低減している。これは、ピストンとシリンダーの間にシール材として充填された RTV シリコンゴムのばね作用により剛性が大きくなることと、加振振動数が増加するとごくわずかにエネルギー吸収する特性によるものと考えられる。

シリンダー内に液体を封入したダンパーを組み込んだ場合、固有振動数はシリンダー内の液体が連結管を流れてシリンダー間を移動する際に発生する質量効果によって小さくなる。質量効果は連結管の形状に依存し、連結管内の液体の質量が大きいほど、また、連結管を流れる液体の流速が速いほど増大する。図 3.3 に示すように、連結管内径が等しい場合、連結管が長いほど固有振動数が小さくなることが確認できる。また、図 3.4 に示すように、連結管長さが等しい場合、内径が小さいほど管内の流速が速くなるため質量効果が増大し、固有振動数が小さくなる。また、共振点における応答倍率は、連結管内の液体の運動に伴う内圧抵抗により低減する。さらに、図 3.5 に示すように、入力加速度が大きいほど連結管内の内圧抵抗の増加により応答倍率が低減することを確認した。

液体が封入されていない状態のダンパーを組み込んだ場合のフレームの固有振動数は、10.4Hz であるからフレームの質量は $K/m = \omega^2$ より

$$M_F = K/\omega^2 = K/(2\pi \times 10.4)^2 = K/4269.99 \quad (3.1)$$

と求められる。Case11（連結管形状：内径 12mmφ，長さ 2.0m）の液体を封入したダンパーを組み込んだ場合、フレームの固有振動数は 6.1Hz であるから

$$M'_F = K/\omega^2 = K/(2\pi \times 6.1)^2 = K/1468.99 \quad (3.2)$$

となる。ここで(3.1)式と(3.2)式の K は、シール材の影響も含めたフレームの水平剛性を表しており、この場合は共通の値となる。これらの結果より、ダンパーが組み込まれたフレームの見掛け上の質量は、実際のフレームの質量の2.9倍に増加したことになり、この場合のフレームの質量（以降、等価質量 M_E とする。）は 82.3kg となる。共振曲線から求めた各フレームの固有振動数に基づいて算出した等価質量 M_E と、連結管内の液体の質量を比較した結果を表 3.4 に示す。これらの結果、連結管内の液体の質量に比例して等価質量も大きくなることがわかる。フレームの等価質量から実質量を差し引いた分が管内液流による質量効果となり、連結管内径が 12mm ϕ の場合、液体質量が約 240 倍に増幅してフレームに作用したことになる。これは、連結管内の液体の質量を、ピストンの有効断面積に対する連結管の断面積の比を 2 乗倍したものにほぼ等しい。

表 3.4 振動台加振試験結果一覧（振動台加速度：50gal）

試験体ケース	連結管形状		固有振動数 [Hz]	フレーム 実質量 M_F [kg]	フレーム 等価質量 M_E [kg]	連結管内 液体質量 m_a [kg]	$\frac{(M_E - M_F)}{m_a}$
	内径 [mm ϕ]	長さ [m]					
Case1	—	—	4.6	28.3	—	—	—
Case2	—	—	10.4	28.3	—	—	—
Case3	8	0.5	6.5	28.3	72.4	0.025	1764
Case4	8	1.0	5.2	28.3	113.2	0.050	1698
Case5	8	2.0	4.0	28.3	191.3	0.100	1630
Case6	10	0.5	7.8	28.3	50.4	0.039	567
Case7	10	1.0	6.6	28.3	70.2	0.078	537
Case8	10	2.0	5.2	28.3	113.2	0.157	541
Case9	12	0.5	8.5	28.3	42.4	0.057	247
Case10	12	1.0	7.5	28.3	54.4	0.113	231
Case11	12	2.0	6.1	28.3	82.3	0.226	239

加振試験で得られた変位 - 慣性力履歴ループを図 3.6～図 3.10 に示す。また、変位 - 慣性力関係の最大変位と、その時の慣性力の大きさの傾き（見掛け上の剛性）を求めた結果の一覧を表 3.5 に示す。ここで示す慣性力は、計測したフレームの応答加速度にフレームの実質量を乗じたものである。図は、各試験体に対して振動数の異なる加力を行って得られた代表的な例で、それぞれ共振点および共振点前後の加振振動数における結果を示している。

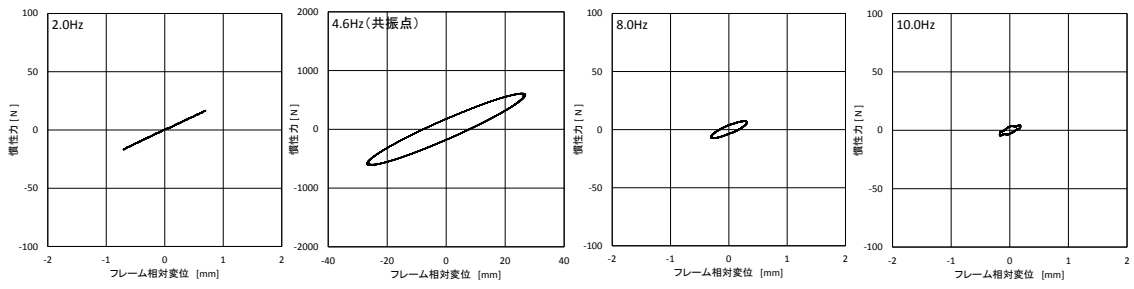


図 3.6 変位 - 慣性力履歴ループ (Case1 : ダンパー無)

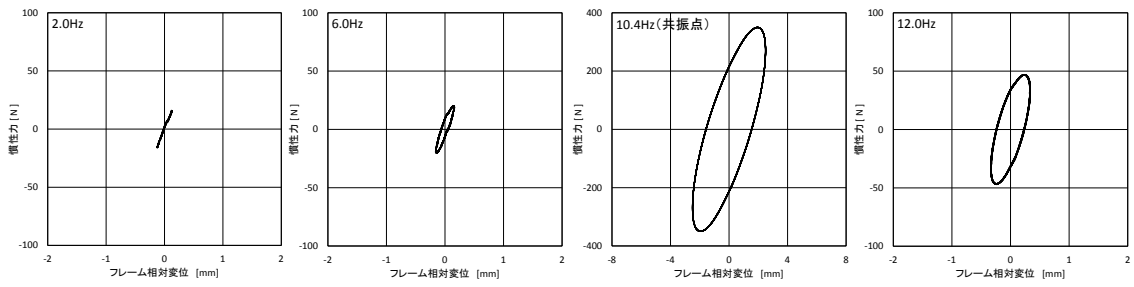
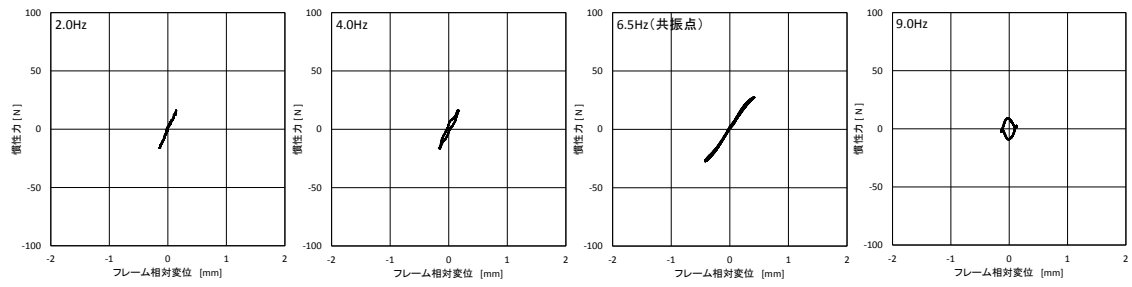
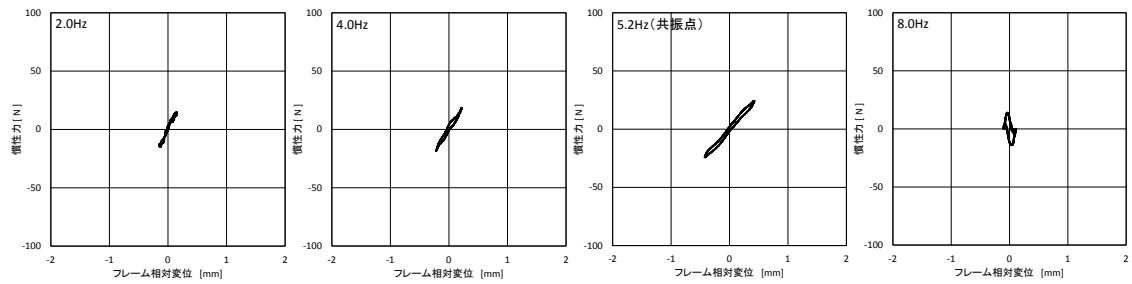


図 3.7 変位 - 慣性力履歴ループ (Case2 : 液体なしダンパー付)

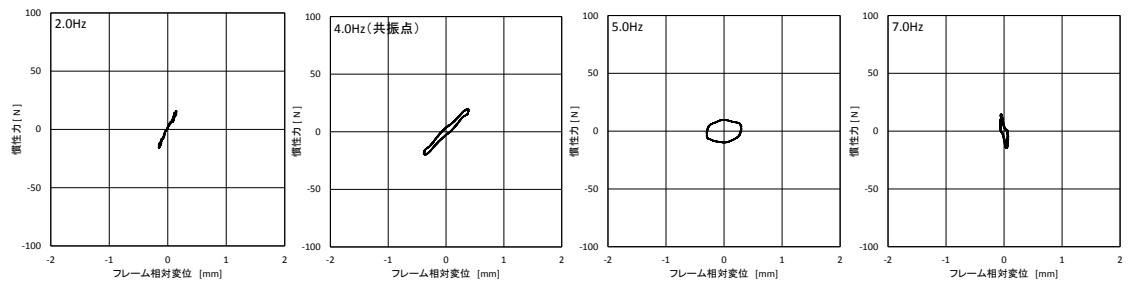
第3章 1層制振フレームの加振試験



(a) Case3 (連結管長さ : L=0.5m)

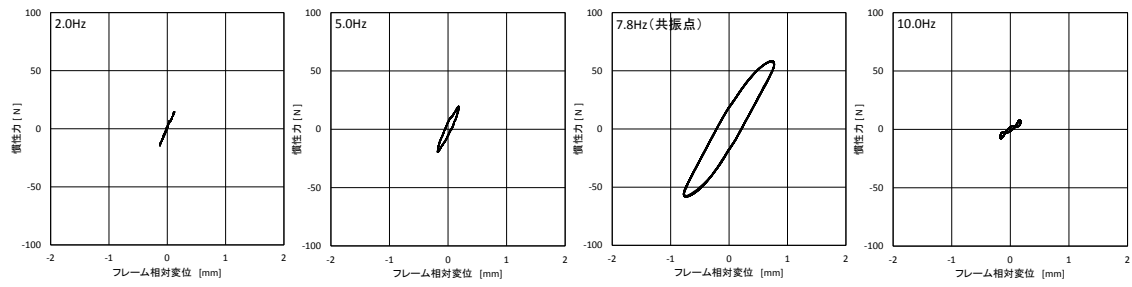


(b) Case4 (連結管長さ : L=1.0m)

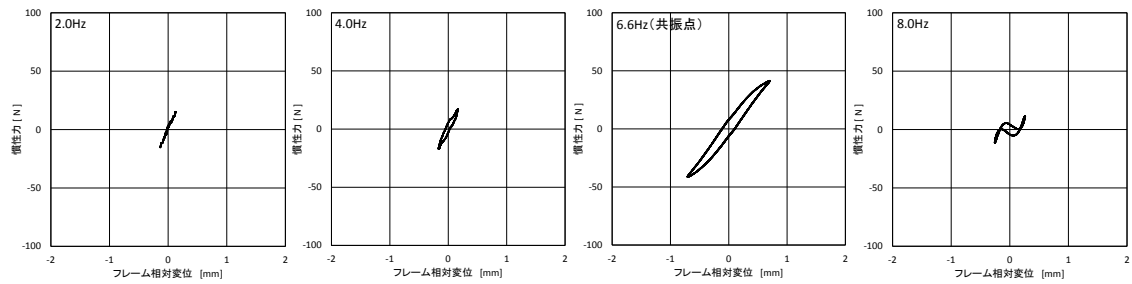


(c) Case5 (連結管長さ : L=2.0m)

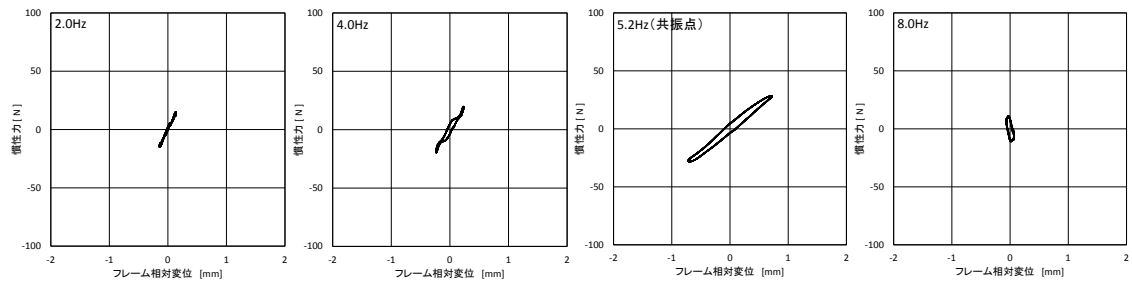
図 3.8 変位 - 慣性力履歴ループ (連結管内径 : 8mmφ)



(a) Case6 (連結管長さ : L=0.5m)

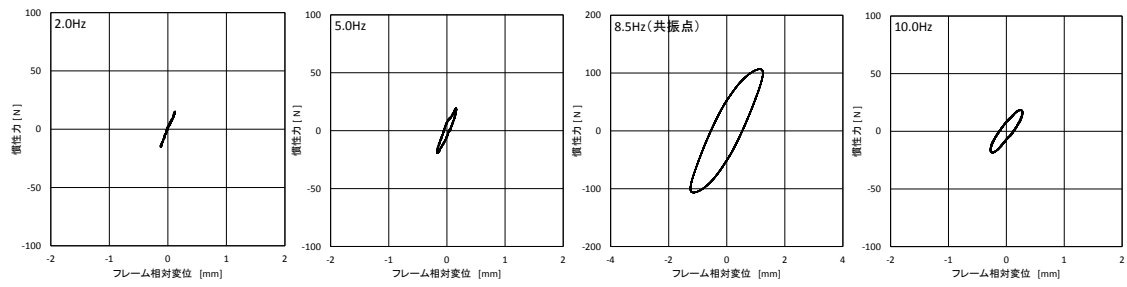


(b) Case7 (連結管長さ : L=1.0m)

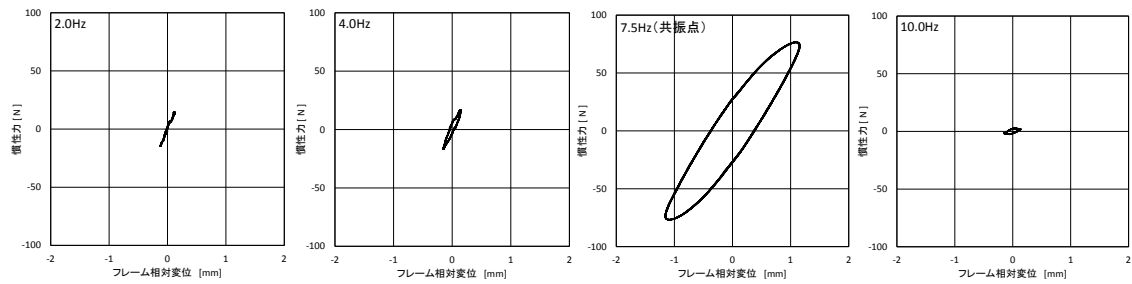


(c) Case8 (連結管長さ : L=2.0m)

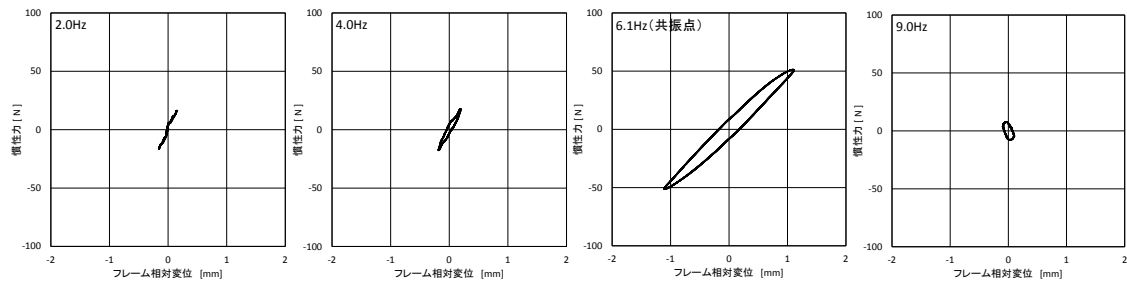
図 3.9 変位 - 慣性力履歴ループ (連結管内径 : 10mmφ)



(a) Case9 (連結管長さ : L=0.5m)



(b) Case10 (連結管長さ : L=1.0m)



(c) Case11 (連結管長さ : L=2.0m)

図 3.10 変位 - 慣性力履歴ループ (連結管内径 : 12mmφ)

表 3.5 フレーム試験体の見掛けの剛性 (単位: N/mm)

Case1	23.07 (2.0Hz)	21.88 (4.6Hz)	20.92 (8.0Hz)	19.95 (10.0Hz)
Case2	117.23 (2.0Hz)	111.42 (6.0Hz)	109.06 (10.4Hz)	107.65 (12.0Hz)
Case3	96.45 (2.0Hz)	88.16 (4.0Hz)	64.00 (6.5Hz)	-6.90 (9.0Hz)
Case4	92.37 (2.0Hz)	78.34 (4.0Hz)	56.24 (5.2Hz)	-17.22 (8.0Hz)
Case5	97.05 (2.0Hz)	48.66 (4.0Hz)	10.28 (5.0Hz)	-62.58 (7.0Hz)
Case6	110.75 (2.0Hz)	94.68 (5.0Hz)	71.05 (7.8Hz)	44.77 (10.0Hz)
Case7	108.09 (2.0Hz)	94.96 (4.0Hz)	58.56 (6.6Hz)	42.06 (8.0Hz)
Case8	102.30 (2.0Hz)	84.31 (4.0Hz)	38.74 (5.2Hz)	-78.63 (8.0Hz)
Case9	116.19 (2.0Hz)	104.41 (5.0Hz)	79.77 (8.5Hz)	61.82 (10.0Hz)
Case10	108.84 (2.0Hz)	96.34 (4.0Hz)	64.28 (7.5Hz)	11.22 (10.0Hz)
Case11	97.88 (2.0Hz)	88.55 (4.0Hz)	45.19 (6.1Hz)	-43.71 (9.0Hz)

※ 表中の () 内の数値は加振振動数

※ 表中の太字 (網掛け) はフレーム試験体の共振点

これらの結果、ダンパーの付かないフレームの剛性は、加振振動数の違いによる差はほとんど見られず、ほぼ一定の値を示している。また、液体が封入されていないダンパーが組み込まれたフレームの場合、ダンパーが無いフレームと比較してシール材の影響により剛性が大きくなるが、その値はほぼ一定であることが確認された。いずれのケースも楕円に近い形状の履歴ループを描く。液体が封入されたダンパーが組み込まれたフレームの場合、加振振動数が高くなるほど、また、同じ加振条件下では連結管が長いほど質量効果が大きくなるために剛性が小さくなる傾向を示している。

ダンパーの変位 - 抵抗力履歴ループの代表的な例を図 3.11～図 3.14 に示す。これらの図は、図 3.7～図 3.10 と対応する加振条件の結果を示している。

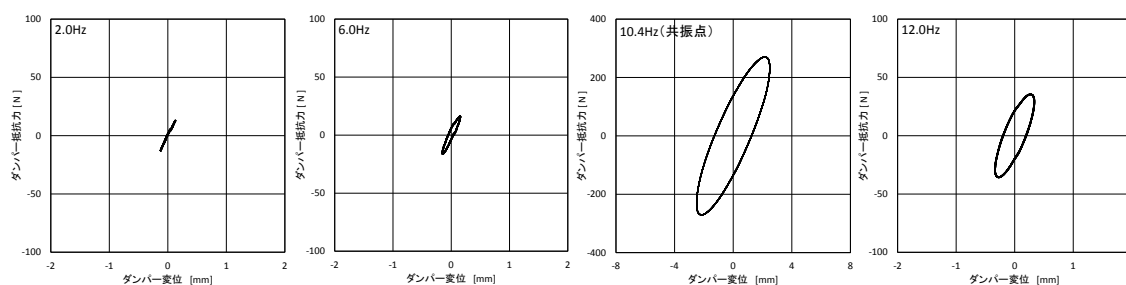
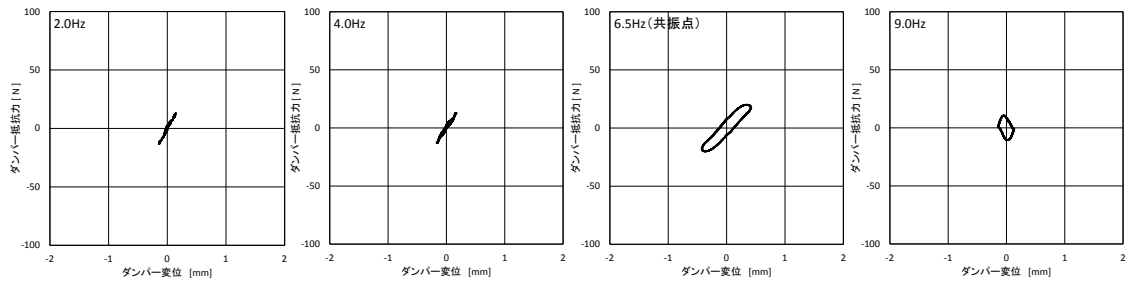
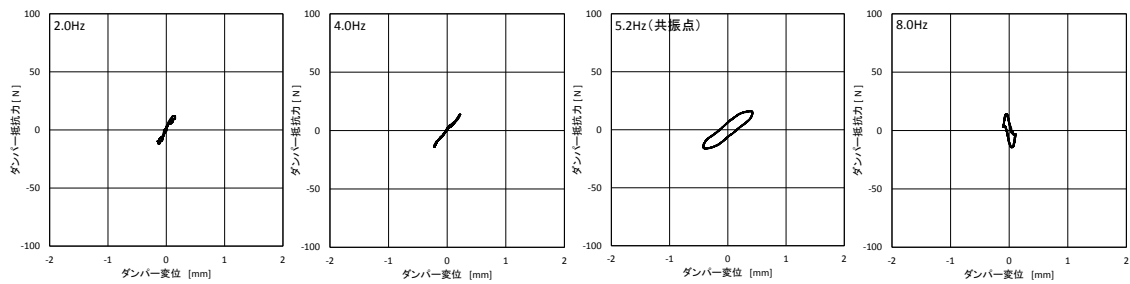


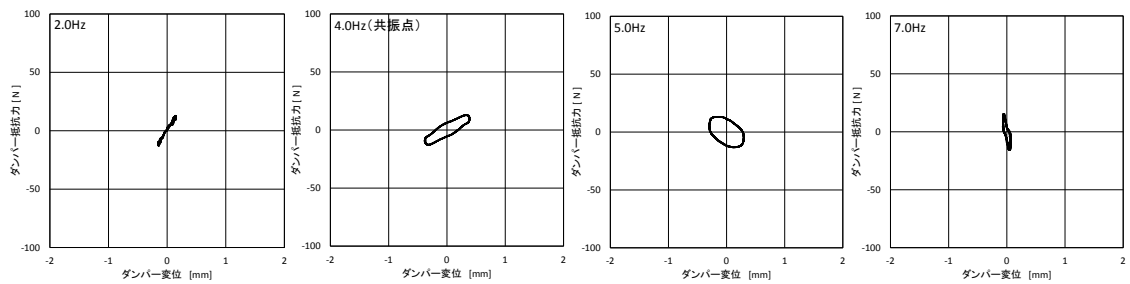
図 3.11 変位 - 抵抗力履歴ループ (Case2: 液体なしダンパー付)



(a) Case3 (連結管長さ : L=0.5m)

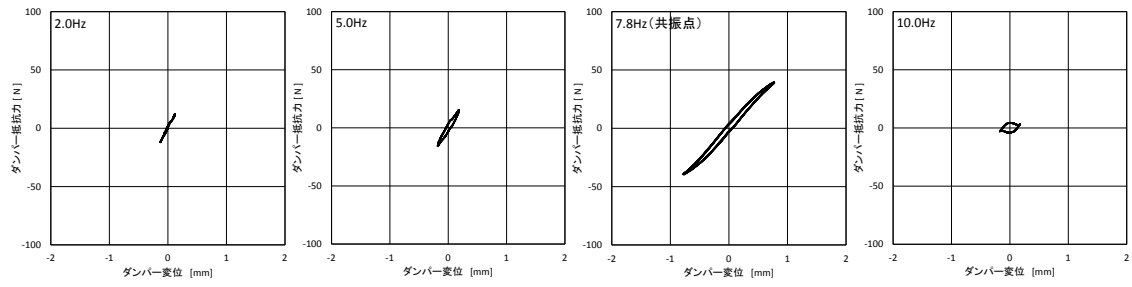


(b) Case4 (連結管長さ : L=1.0m)

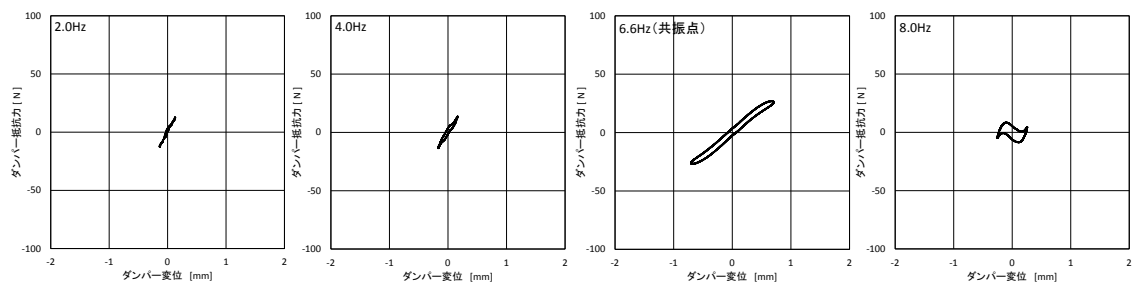


(c) Case5 (連結管長さ : L=2.0m)

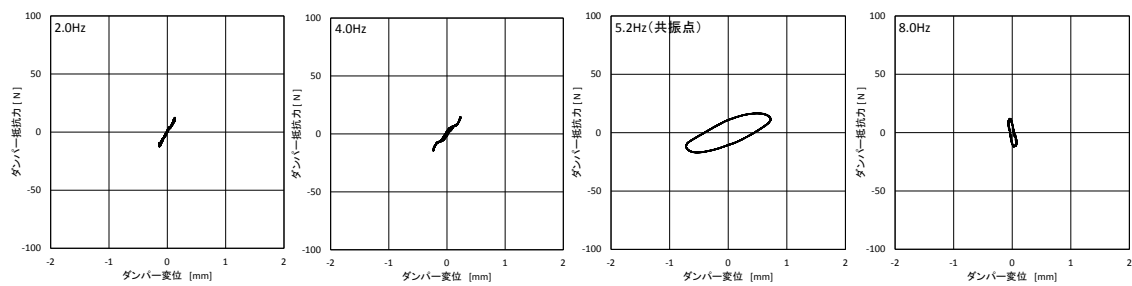
図 3.12 変位 - 抵抗力履歴ループ (連結管内径 : 8mmφ)



(a) Case6 (連結管長さ : L=0.5m)

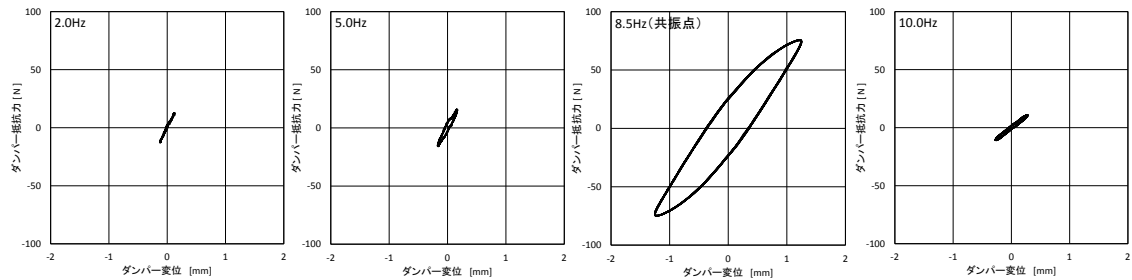


(b) Case7 (連結管長さ : L=1.0m)

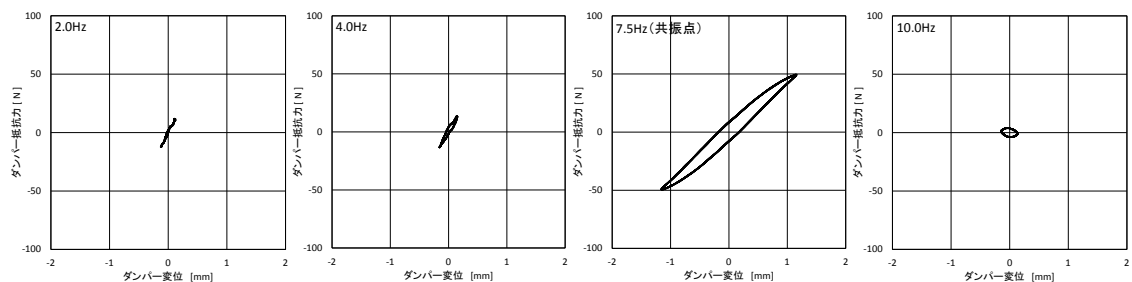


(c) Case8 (連結管長さ : L=2.0m)

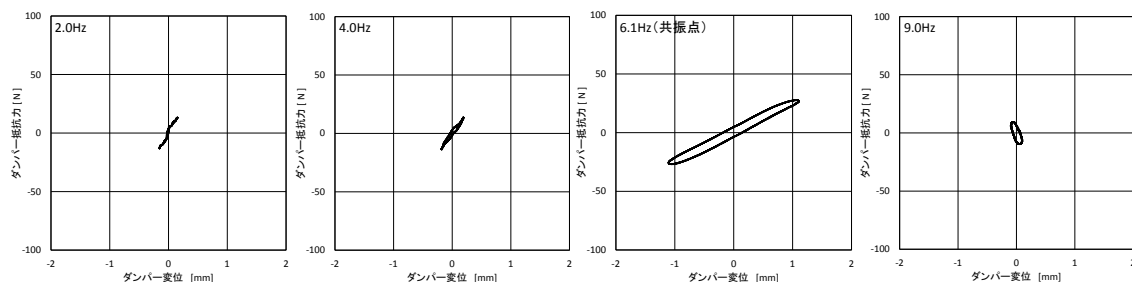
図 3.13 変位 - 抵抗力履歴ループ (連結管内径 : 10mmφ)



(a) Case9 (連結管長さ : L=0.5m)



(b) Case10 (連結管長さ : L=1.0m)



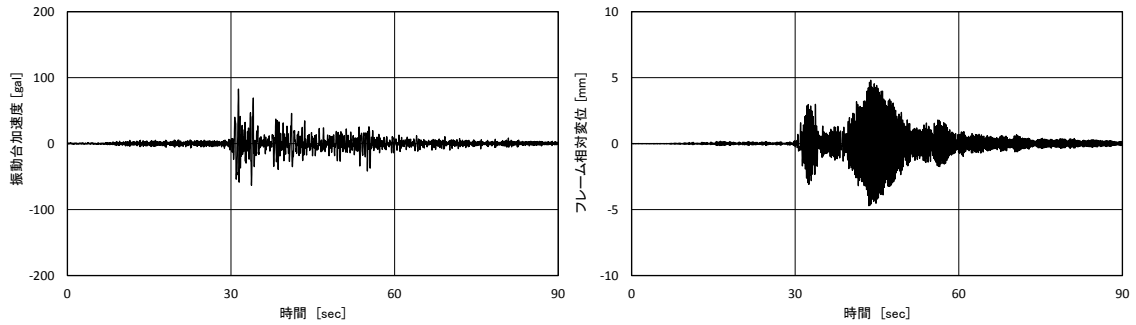
(c) Case11 (連結管長さ : L=2.0m)

図 3.14 変位 - 抵抗力履歴ループ (連結管内径 : 12mmφ)

これらの結果、液体が封入されていないダンパーの場合、加振振動数の違いによる履歴ループの傾きの差はほとんど見られず、いずれのケースも楕円に近い履歴形状を描くことが確認された。液体が封入されたダンパーの場合、図 3.8～図 3.10 と同様に、加振振動数が高くなるほど、また、同じ加振条件下においては連結管が長いほど質量効果が大きくなるため、履歴ループの傾きが小さくなる傾向を示している。また、高振動数領域では抵抗力履歴ループの傾きは負になることがわかる。ダンパー付きフレームは、シーリング材のばね作用により剛性が大きくなるが、質量効果が作用することにより、フレーム全体の剛性を小さくしていると考えられる。

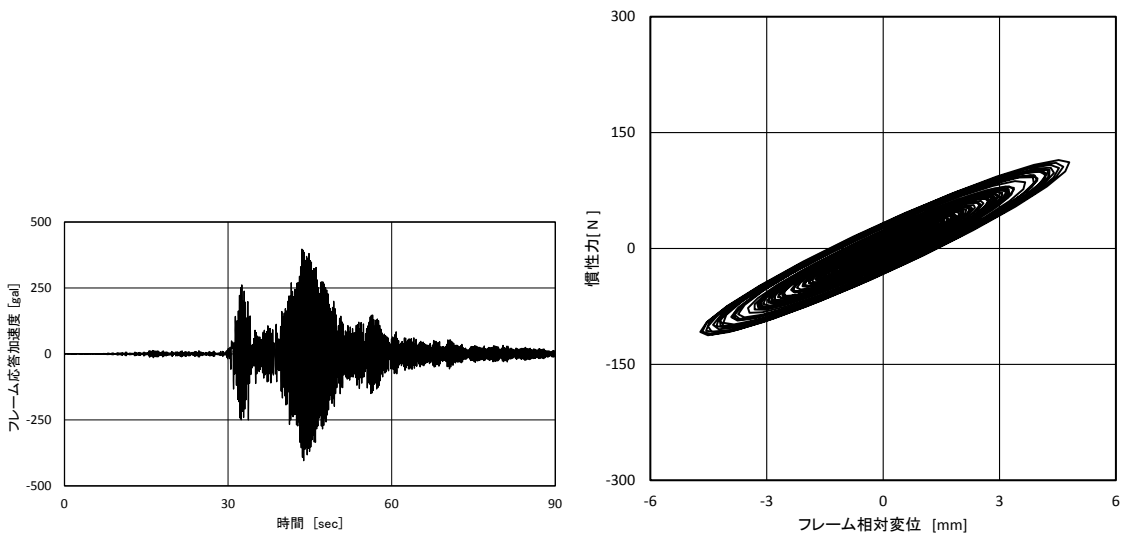
地震波加振試験を行って得られた結果の代表的な例を図 3.15～図 3.20 に、地震波ごとの結果の一覧を表 3.6～表 3.8 にそれぞれ示す。図は地震波ごとに得られたフレームのみとダ

ンパーを設置したとき（Case7：内径 10mm φ，長さ 1.0m）の振動台加速度、フレーム相対変位、フレーム応答加速度、ダンパー抵抗力の時刻歴波形と、変位 - 慣性力履歴ループ、変位 - ダンパー抵抗力履歴ループを示している。



(a) 時刻歴波形：振動台加速度

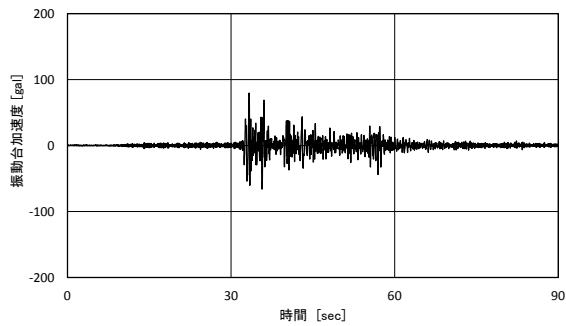
(b) 時刻歴波形：フレーム相対変位



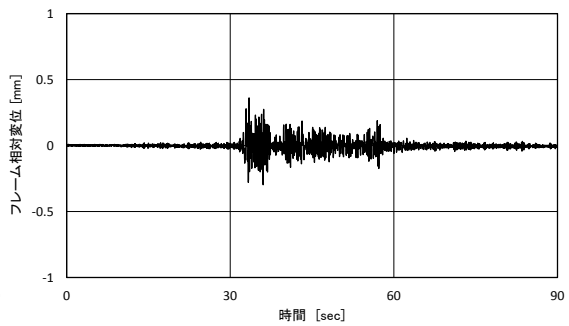
(c) 時刻歴波形：フレーム応答加速度

(d) 変位 - 慣性力履歴ループ

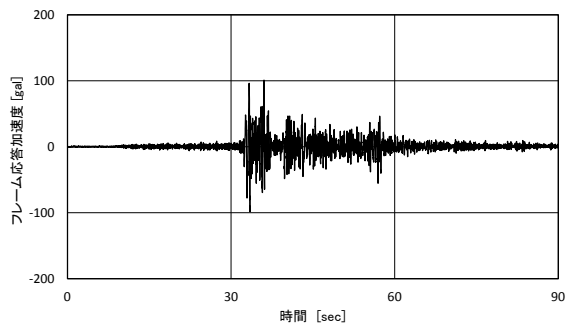
図 3.15 地震波加振結果 (El Centro NS 波, Case1)



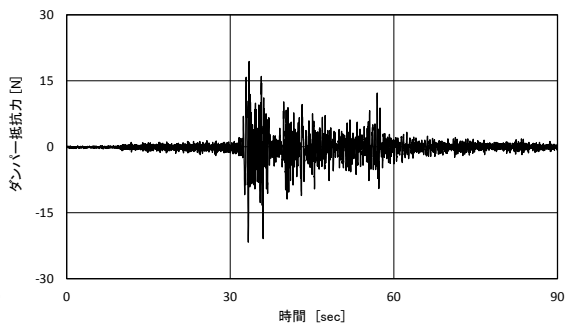
(a) 時刻歴波形：振動台加速度



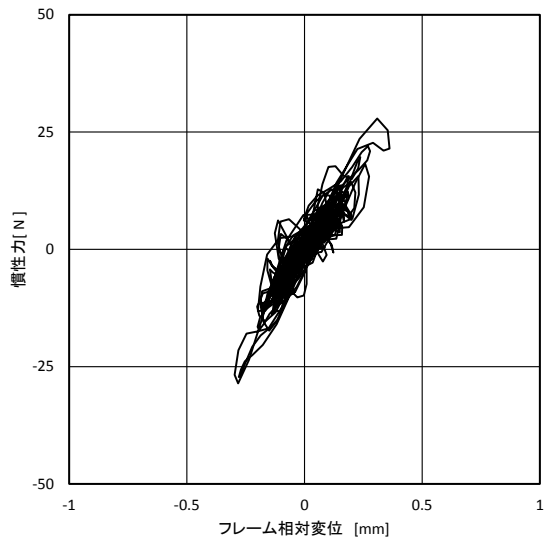
(b) 時刻歴波形：フレーム相対変位



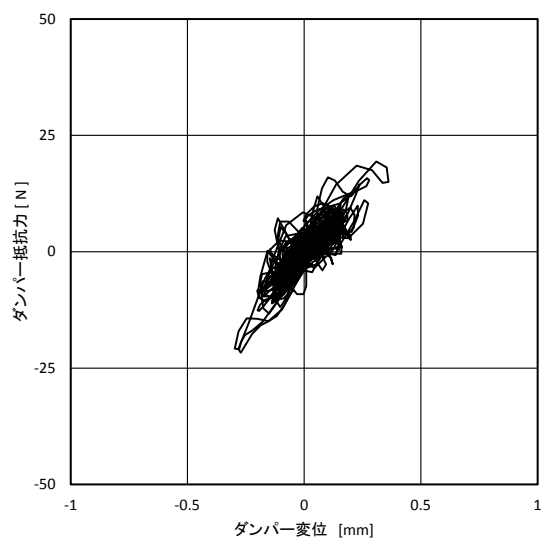
(c) 時刻歴波形：フレーム応答加速度



(d) 時刻歴波形：ダンパー抵抗力

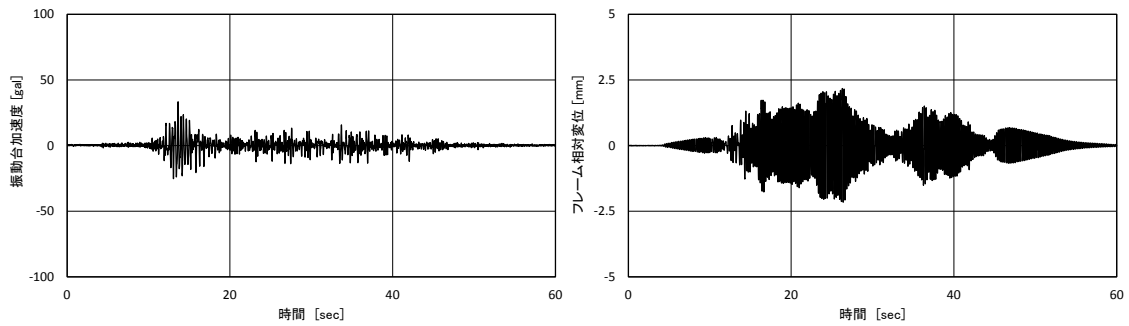


(e) 変位 - 慣性力履歴ループ



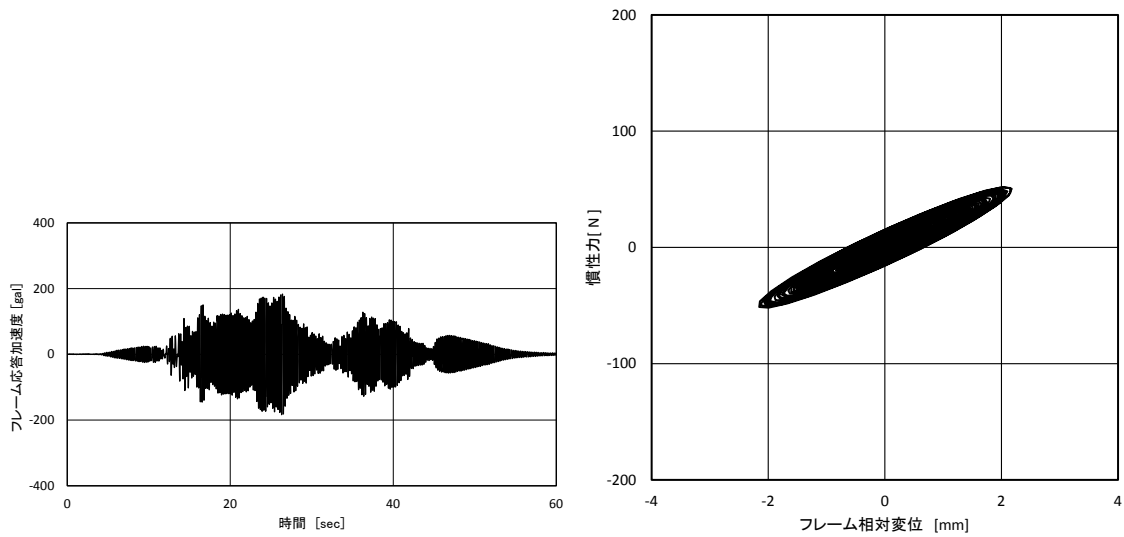
(f) 変位 - 抵抗力履歴ループ

図 3.16 地震波加振結果 (El Centro NS 波, Case7)



(a) 時刻歴波形：振動台加速度

(b) 時刻歴波形：フレーム相対変位



(c) 時刻歴波形：フレーム応答加速度

(d) 変位 - 慣性力履歴ループ

図 3.17 地震波加振結果（八戸 EW 波, Case1）

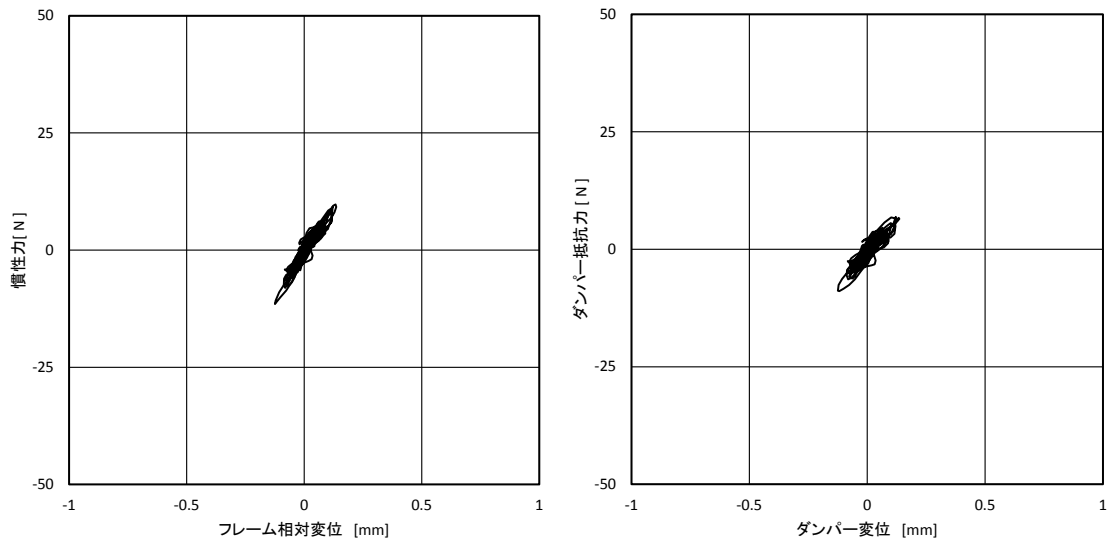
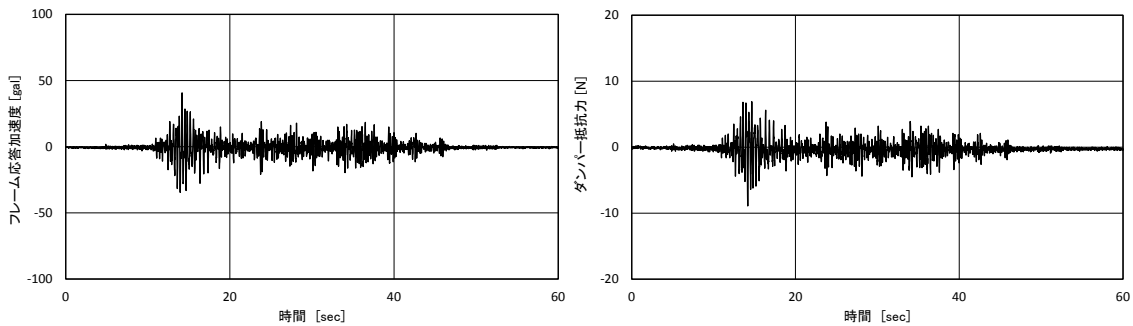
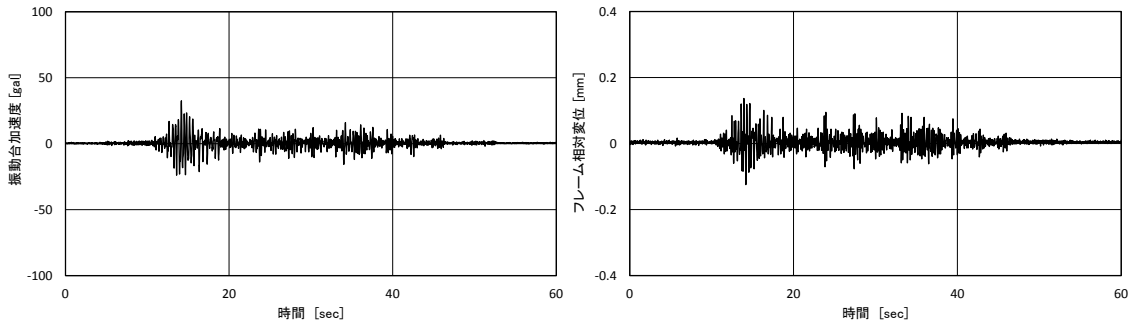
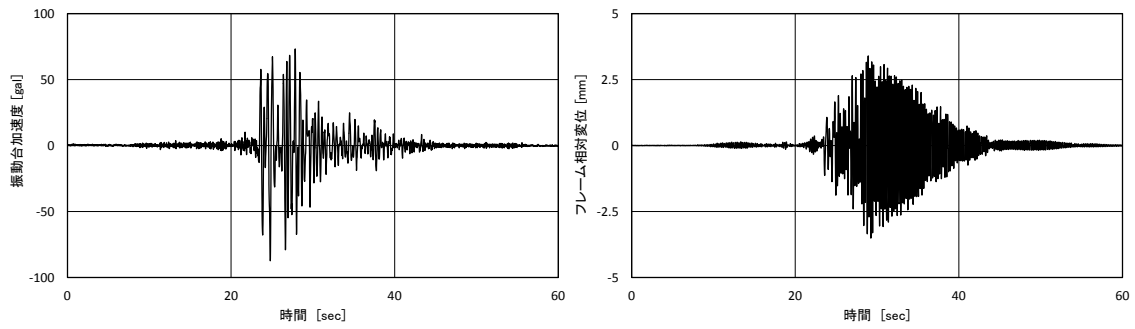
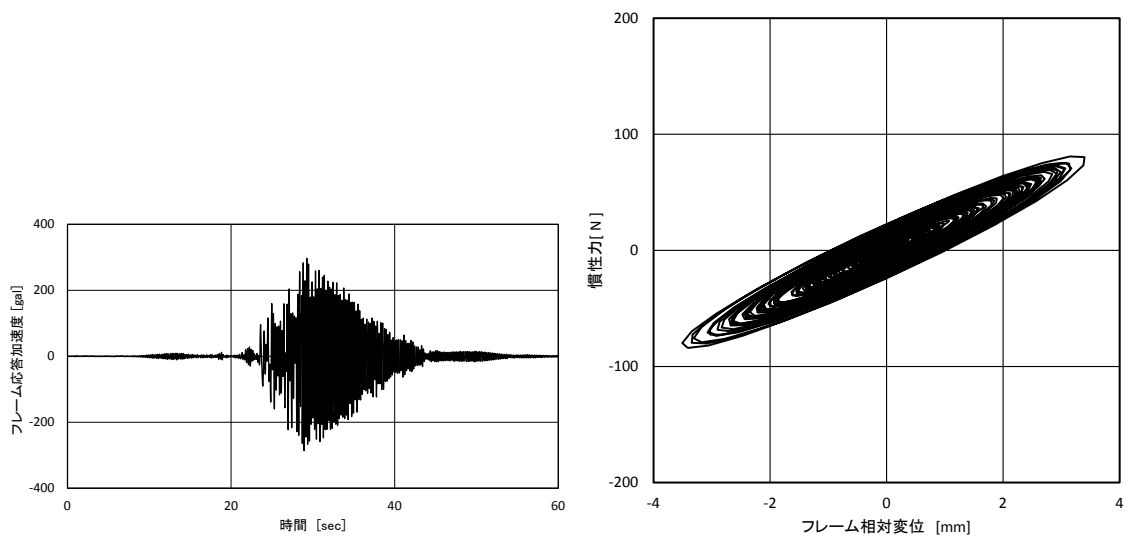


図 3.18 地震波加振結果（八戸 EW 波, Case7）



(a) 時刻歴波形：振動台加速度

(b) 時刻歴波形：フレーム相対変位



(c) 時刻歴波形：フレーム応答加速度

(d) 変位 - 慣性力履歴ループ

図 3.19 地震波加振結果（神戸 NS 波, Case1）

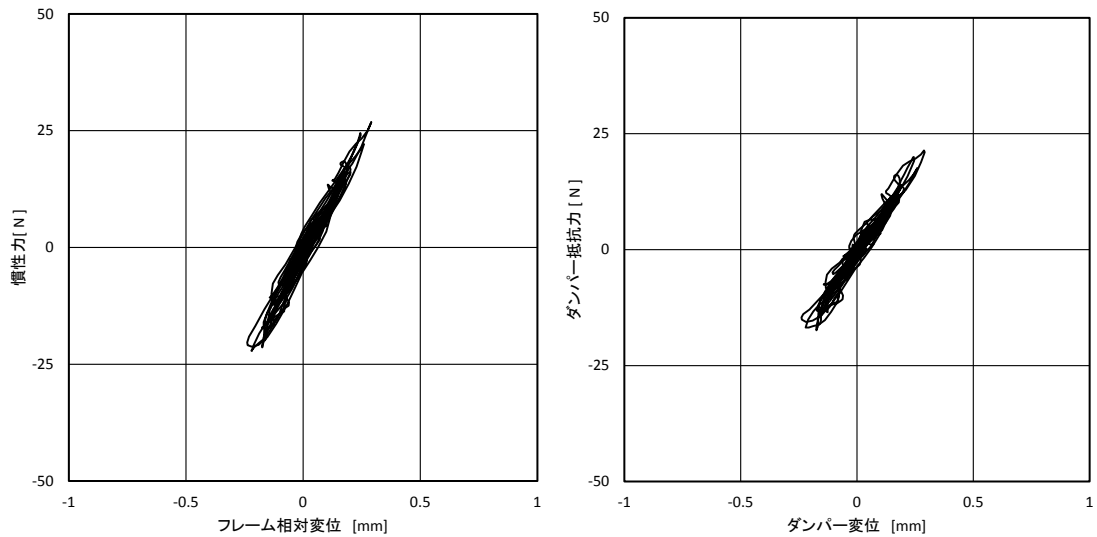
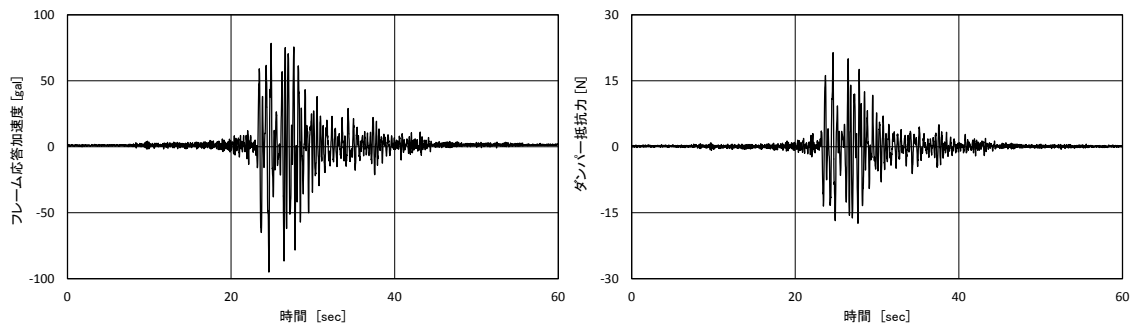
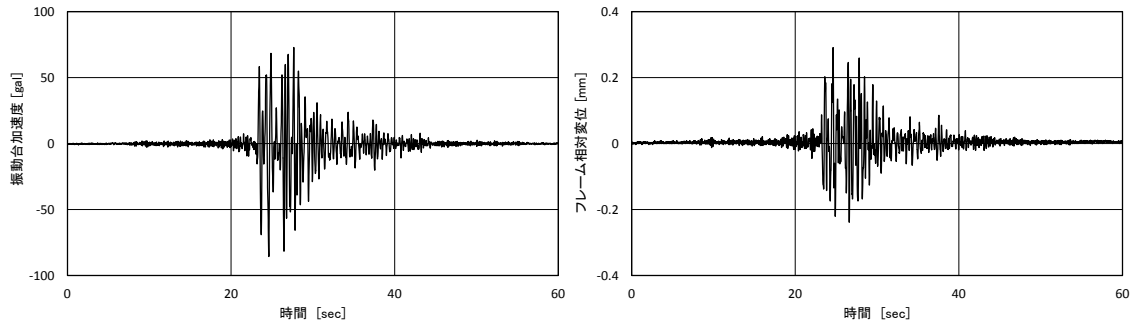


図 3.20 地震波加振結果（神戸 NS 波, Case7）

表 3.6 実験結果一覧 (El Centro NS 波)

試験体 ケース	加振 レベル	最大振動台加速度 [gal]	最大応答加速度 [gal]	最大応答変位 [mm]	ダンパー抵抗力 [N]	加速度 応答倍率
Case1	大	82.7	404.5	4.79	—	4.89
Case3	小	24.6	34.2	0.13	7.0	1.39
	中	52.0	63.1	0.23	13.4	1.21
	大	83.4	97.6	0.35	21.0	1.17
Case4	小	24.3	32.8	0.14	7.5	1.35
	中	50.6	60.4	0.25	13.4	1.19
	大	81.0	95.5	0.35	20.5	1.18
Case5	小	25.0	35.4	0.14	9.3	1.42
	中	50.4	55.1	0.27	16.1	1.09
	大	79.6	89.8	0.36	23.9	1.13
Case6	小	23.4	46.6	0.17	9.6	1.99
	中	51.0	77.0	0.27	16.0	1.51
	大	81.9	95.0	0.39	22.9	1.16
Case7	小	25.7	36.0	0.15	7.6	1.40
	中	49.7	68.0	0.25	13.6	1.37
	大	79.5	101.0	0.36	21.7	1.27
Case8	小	23.4	31.5	0.16	7.3	1.35
	中	53.3	59.2	0.25	13.5	1.11
	大	86.1	91.5	0.35	21.6	1.06
Case9	小	24.1	41.7	0.14	9.5	1.73
	中	50.8	86.0	0.26	18.1	1.69
	大	81.8	137.3	0.42	28.7	1.68
Case10	小	25.1	43.6	0.17	8.9	1.74
	中	50.6	78.8	0.26	16.1	1.56
	大	80.9	116.7	0.41	23.6	1.44
Case11	小	24.9	38.1	0.16	7.5	1.53
	中	51.1	71.7	0.32	13.4	1.40
	大	81.1	107.9	0.46	20.9	1.33

表 3.7 実験結果一覧 (八戸 EW 波)

試験体 ケース	加振 レベル	最大振動台加速度 [gal]	最大応答加速度 [gal]	最大応答変位 [mm]	ダンパー抵抗力 [N]	加速度 応答倍率
Case1	大	33.4	183.7	2.17	—	5.50
Case3	小	9.5	11.2	0.06	2.7	1.18
	中	19.0	29.1	0.12	5.8	1.53
	大	30.2	44.2	0.16	9.0	1.46
Case4	小	8.6	11.4	0.06	2.3	1.33
	中	21.7	22.9	0.11	5.4	1.06
	大	31.8	33.1	0.14	8.1	1.04
Case5	小	8.7	10.3	0.04	2.7	1.18
	中	20.0	24.0	0.11	5.4	1.20
	大	31.4	35.4	0.15	7.9	1.13
Case6	小	7.8	12.4	0.04	2.3	1.59
	中	21.4	25.9	0.09	5.5	1.21
	大	33.0	39.6	0.14	8.6	1.20
Case7	小	8.0	10.8	0.04	2.4	1.35
	中	20.7	26.2	0.09	5.9	1.27
	大	32.5	40.7	0.14	8.9	1.25
Case8	小	8.9	9.5	0.06	2.2	1.07
	中	19.5	24.0	0.11	5.0	1.23
	大	30.2	35.5	0.15	7.8	1.18
Case9	小	8.9	11.3	0.03	2.5	1.27
	中	21.1	33.8	0.10	7.0	1.60
	大	30.9	51.4	0.15	10.7	1.66
Case10	小	7.6	11.9	0.05	2.4	1.57
	中	19.8	33.2	0.11	6.9	1.68
	大	28.5	44.0	0.16	9.3	1.54
Case11	小	8.6	13.2	0.06	2.5	1.53
	中	21.1	25.9	0.13	5.0	1.23
	大	30.4	38.9	0.18	7.4	1.28

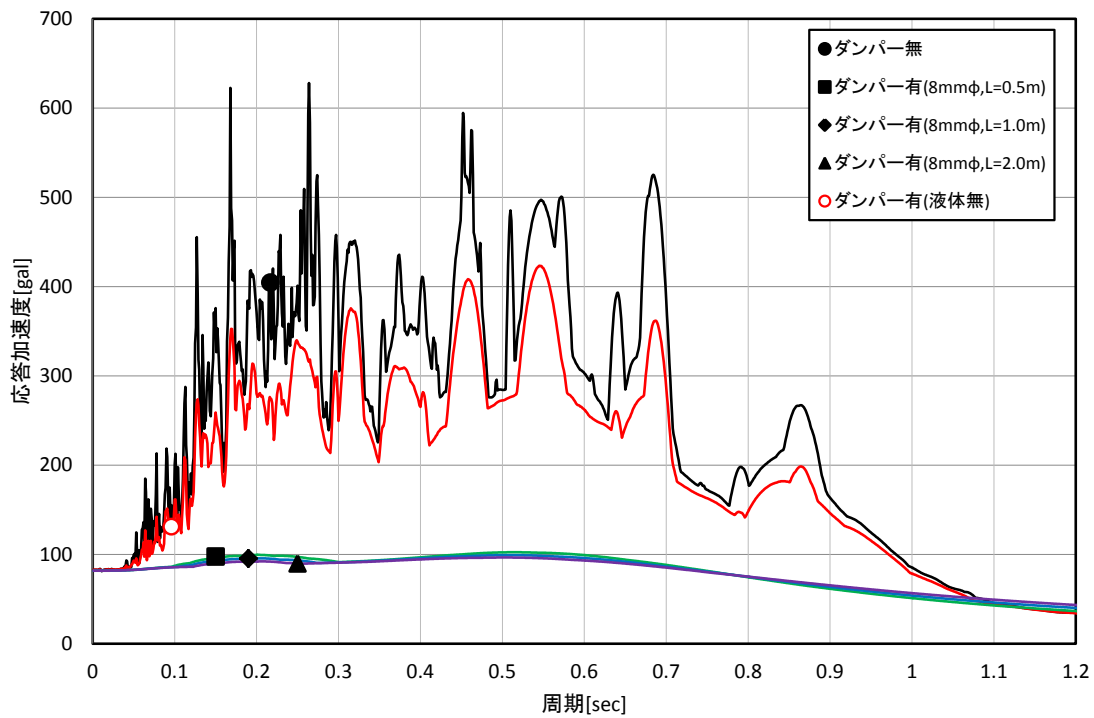
表 3.8 実験結果一覧（神戸 NS 波）

試験体 ケース	加振 レベル	最大振動台加速度 [gal]	最大応答加速度 [gal]	最大応答変位 [mm]	ダンパー抵抗力 [N]	加速度 応答倍率
Case1	大	87.3	297.2	3.39	—	3.40
Case3	小	23.4	30.8	0.12	6.4	1.32
	中	53.2	58.3	0.20	12.9	1.10
	大	84.8	94.3	0.29	21.0	1.11
Case4	小	22.7	27.2	0.09	5.7	1.20
	中	53.0	57.7	0.18	13.5	1.09
	大	85.6	88.6	0.29	20.1	1.04
Case5	小	22.3	27.3	0.14	5.5	1.22
	中	54.1	56.5	0.27	13.3	1.04
	大	85.3	88.4	0.37	20.3	1.04
Case6	小	23.5	27.0	0.10	6.0	1.15
	中	52.0	60.1	0.19	13.6	1.16
	大	83.0	97.1	0.28	21.7	1.17
Case7	小	23.4	29.3	0.10	6.5	1.25
	中	52.7	61.2	0.18	13.2	1.16
	大	85.6	95.0	0.29	21.4	1.11
Case8	小	23.3	27.7	0.10	5.8	1.19
	中	54.5	57.2	0.22	13.1	1.05
	大	87.5	90.6	0.32	20.7	1.04
Case9	小	23.3	33.7	0.10	7.5	1.45
	中	53.1	60.3	0.19	13.5	1.14
	大	84.7	94.6	0.29	21.8	1.12
Case10	小	23.9	28.6	0.11	6.4	1.20
	中	51.7	69.1	0.22	15.1	1.34
	大	84.3	109.2	0.34	23.6	1.30
Case11	小	21.4	27.1	0.10	5.7	1.27
	中	55.1	61.1	0.20	13.6	1.11
	大	88.3	94.6	0.30	21.3	1.07

これらの結果、各地震波におけるダンパーの付かないフレームのみの加速度応答倍率は3.0～5.0倍になる。ダンパーを組み込むことにより、いずれのケースにおいても加速度応答倍率は1/3程度まで低下していることから、ダンパーの発揮するシール材の抵抗と内圧抵抗、質量効果による効果を確認することができた。

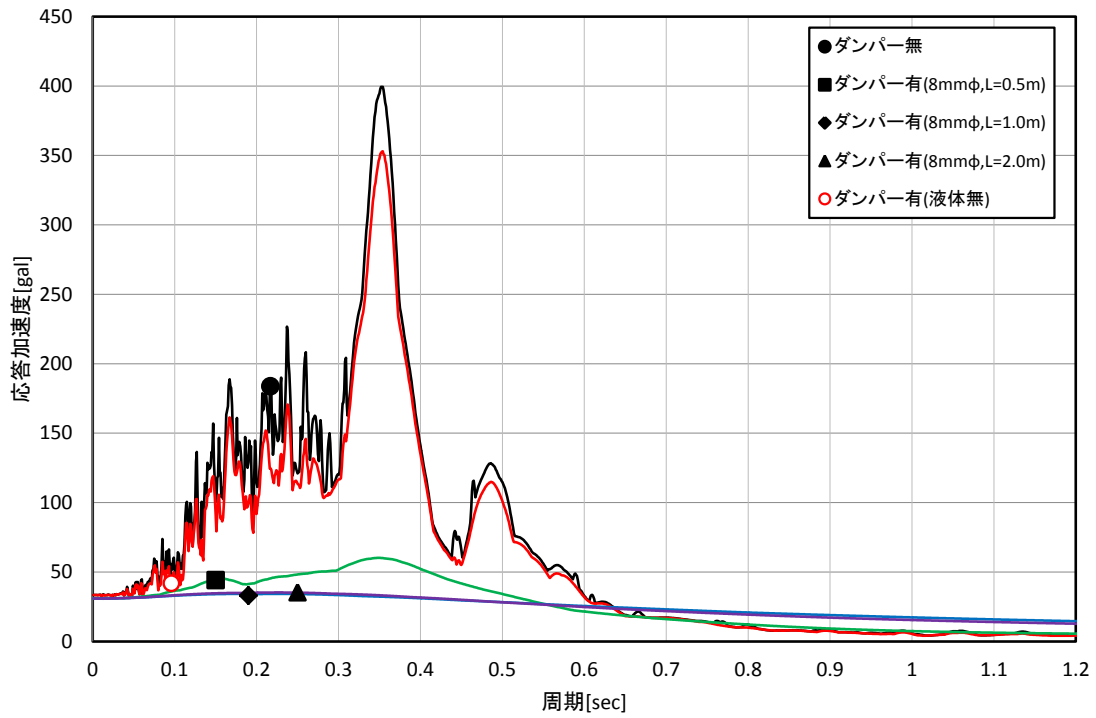
3.3 応答スペクトルを用いたダンパーの振動抑制効果の検証

ここでは、振動特性の異なる地震動に対し、ダンパーの発揮する抵抗力と質量効果がフレームの応答低減に与える影響について応答スペクトルに基づいて検証する。はじめに、実験で得られた各ケースの最大応答加速度と固有周期の関係を、減衰定数 h をパラメータとした入力地震波の加速度応答スペクトル上にプロットし、その点と一致するスペクトルから各ケースの減衰定数（以降、等価減衰定数 h_{eq} とする。）を求めた。各地震波の大レベルでの加速度応答スペクトルを図 3.21～図 3.23 に示す。このとき、Case2（シール材のみ）については加振試験を行っていないため、その最大応答加速度は第 4 章で後述する振動応答解析プログラムを用いて算出した。得られた各ケースの等価減衰定数 h_{eq} を表 3.9～表 3.11、図 3.24 に示す。

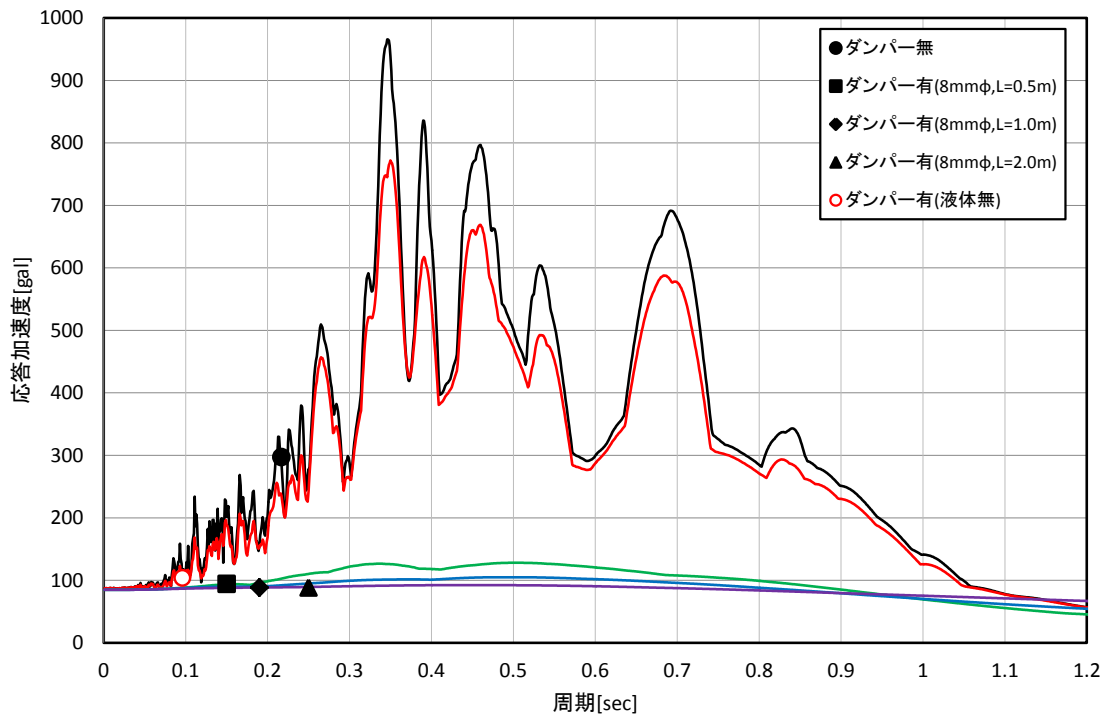


(a) El Centro NS 波

図 3.21 加速度応答スペクトル（連結管内径 8mmφ）

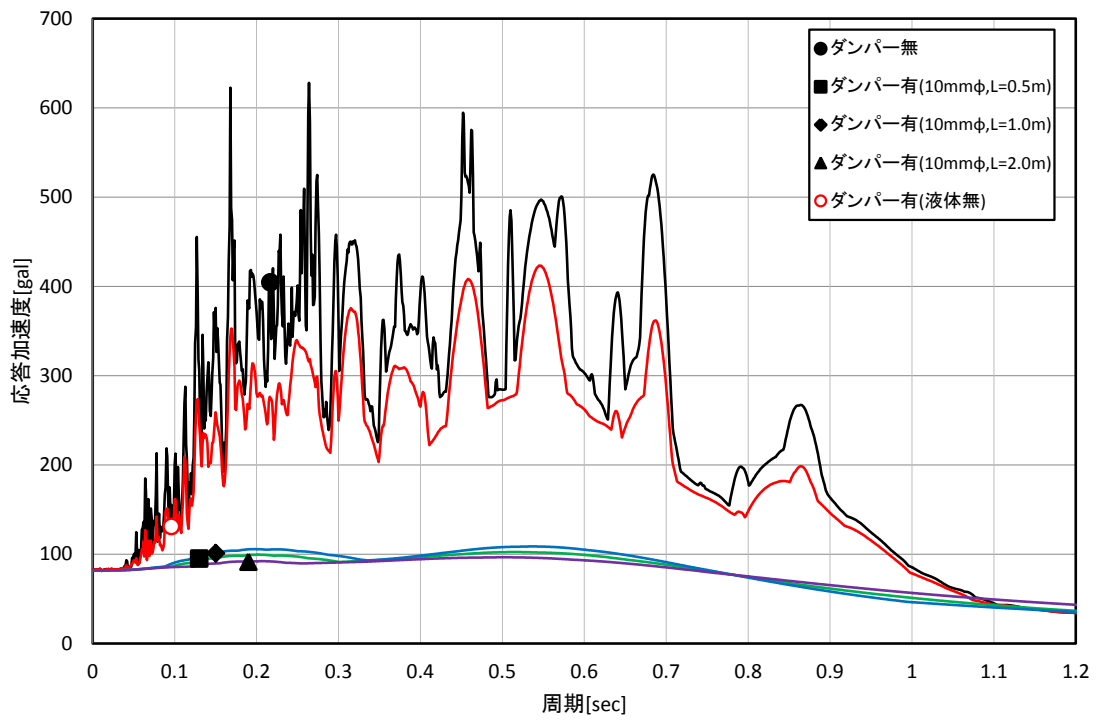


(b) 八戸 EW 波

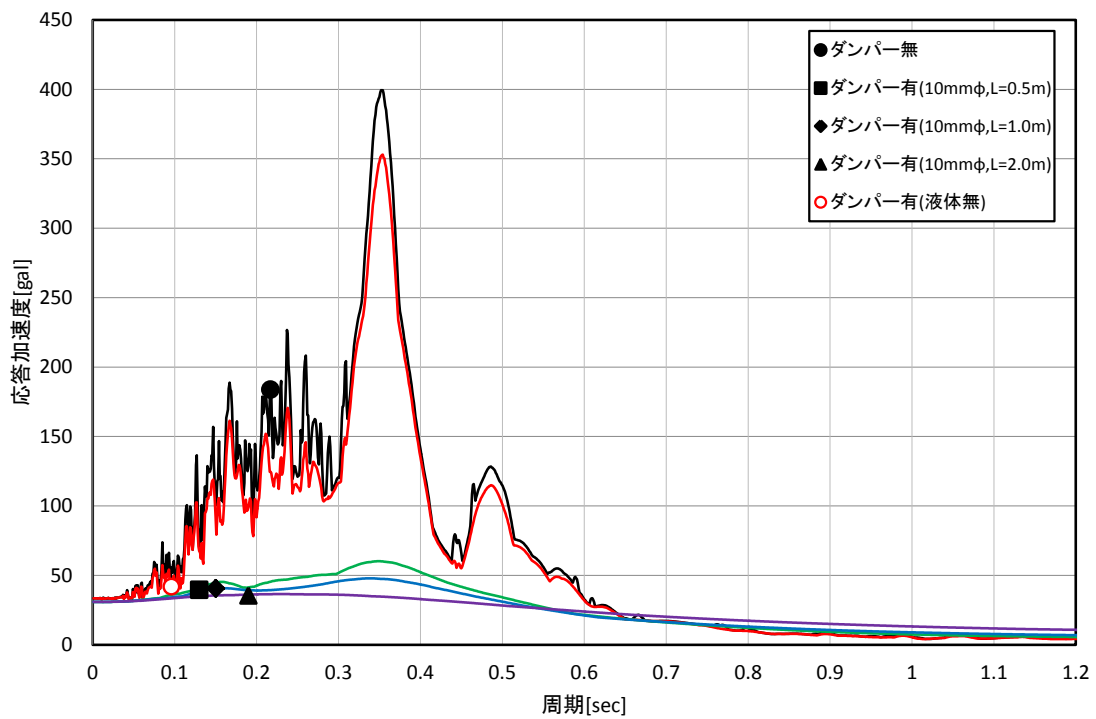


(c) 神戸 NS 波

図 3.21 加速度応答スペクトル (連結管内径 8mmφ : 続き)

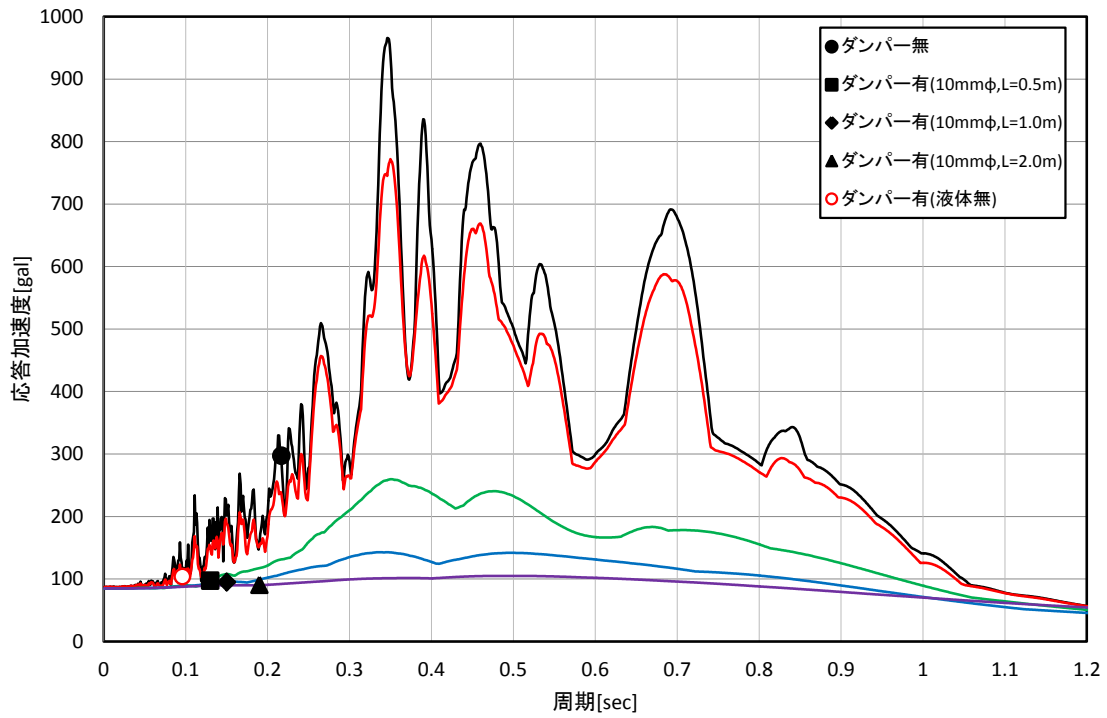


(a) El Centro NS 波



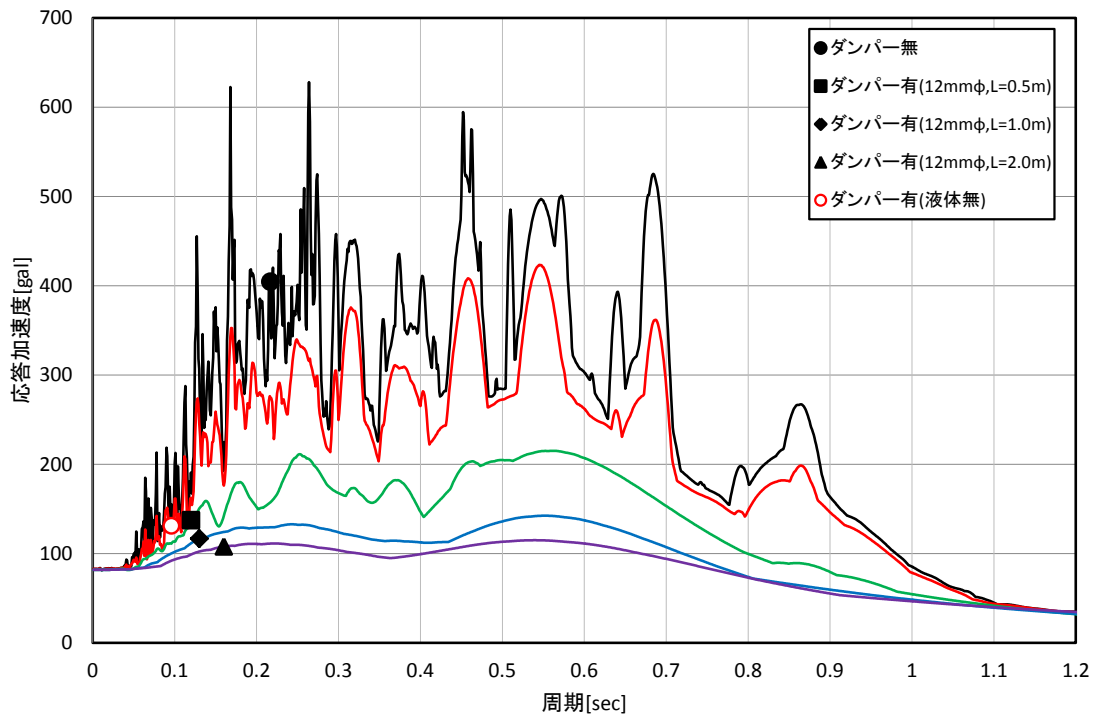
(b) 八戸 EW 波

図 3.22 加速度応答スペクトル (連結管内径 10mmφ)



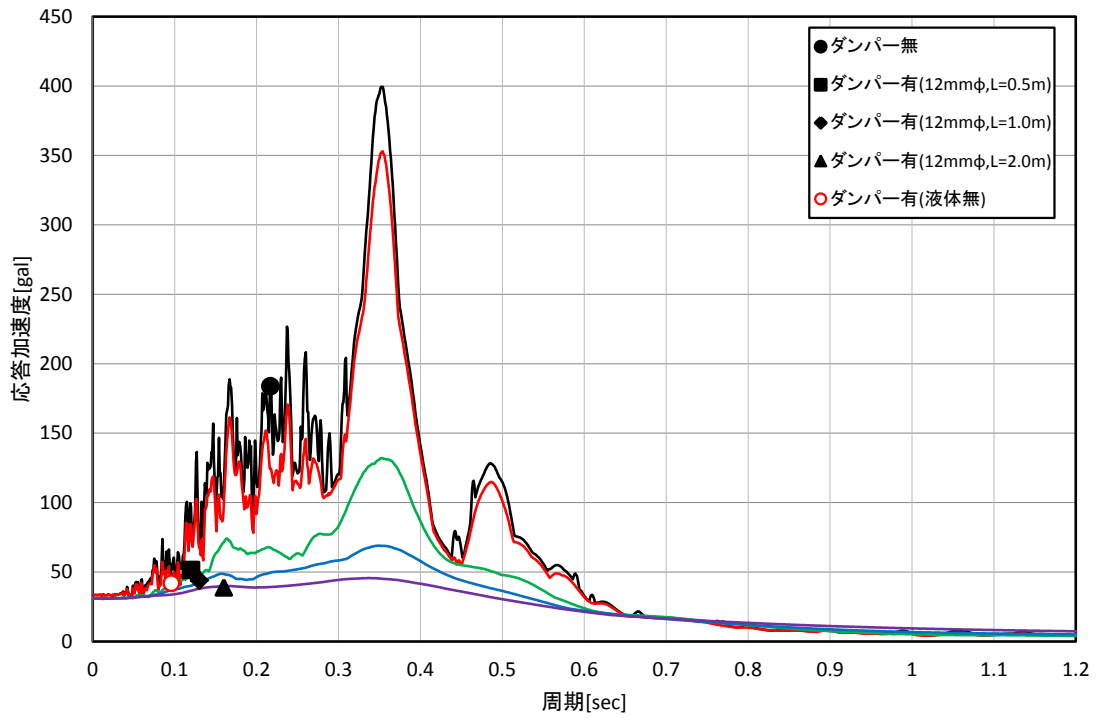
(c) 神戸 NS 波

図 3.22 加速度応答スペクトル (連結管内径 10mm φ : 続き)

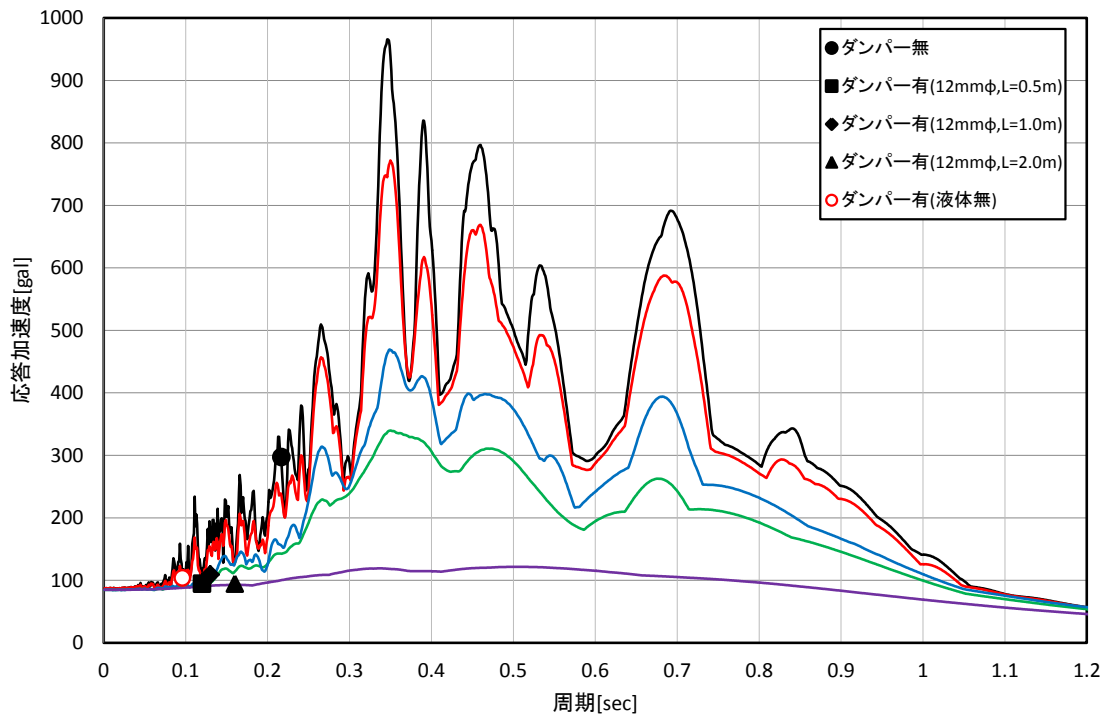


(a) El Centro NS 波

図 3.23 加速度応答スペクトル (連結管内径 12mm φ)



(b) 八戸 EW 波



(c) 神戸 NS 波

図 3.23 加速度応答スペクトル (連結管内径 12mmφ : 続き)

表 3.9 等価減衰定数 h_{eq} (El Centro NS 波)

試験体ケース	最大応答加速度 [gal]	等価減衰定数 h_{eq} [%]
Case1 (フレームのみ)	404.5	0.3
Case2 (シール材のみ)	131.1	1.0
Case3 (8mm ϕ 、L=0.5m)	97.6	40.0
Case4 (8mm ϕ 、L=1.0m)	95.5	50.0
Case5 (8mm ϕ 、L=2.0m)	89.8	55.0
Case6 (10mm ϕ 、L=0.5m)	95.0	45.0
Case7 (10mm ϕ 、L=1.0m)	101.0	38.0
Case8 (10mm ϕ 、L=2.0m)	91.5	55.0
Case9 (12mm ϕ 、L=0.5m)	137.3	6.0
Case10 (12mm ϕ 、L=1.0m)	116.7	20.0
Case11 (12mm ϕ 、L=2.0m)	107.9	33.0

表 3.10 等価減衰定数 h_{eq} (八戸 EW 波)

試験体ケース	最大応答加速度 [gal]	等価減衰定数 h_{eq} [%]
Case1 (フレームのみ)	183.7	0.4
Case2 (シール材のみ)	41.8	0.8
Case3 (8mm ϕ 、L=0.5m)	44.2	20.0
Case4 (8mm ϕ 、L=1.0m)	33.1	95.0
Case5 (8mm ϕ 、L=2.0m)	35.4	80.0
Case6 (10mm ϕ 、L=0.5m)	39.6	20.0
Case7 (10mm ϕ 、L=1.0m)	40.7	30.0
Case8 (10mm ϕ 、L=2.0m)	35.5	65.0
Case9 (12mm ϕ 、L=0.5m)	51.4	6.0
Case10 (12mm ϕ 、L=1.0m)	44.0	16.0
Case11 (12mm ϕ 、L=2.0m)	38.9	33.0

表 3.11 等価減衰定数 h_{eq} (神戸 NS 波)

試験体ケース	最大応答加速度 [gal]	等価減衰定数 h_{eq} [%]
Case1 (フレームのみ)	297.2	0.3
Case2 (シール材のみ)	103.8	0.8
Case3 (8mm ϕ 、L=0.5m)	94.3	30.0
Case4 (8mm ϕ 、L=1.0m)	88.6	50.0
Case5 (8mm ϕ 、L=2.0m)	88.4	90.0
Case6 (10mm ϕ 、L=0.5m)	97.1	10.0
Case7 (10mm ϕ 、L=1.0m)	95.0	25.0
Case8 (10mm ϕ 、L=2.0m)	90.6	50.0
Case9 (12mm ϕ 、L=0.5m)	94.6	6.0
Case10 (12mm ϕ 、L=1.0m)	109.2	3.0
Case11 (12mm ϕ 、L=2.0m)	94.6	33.0

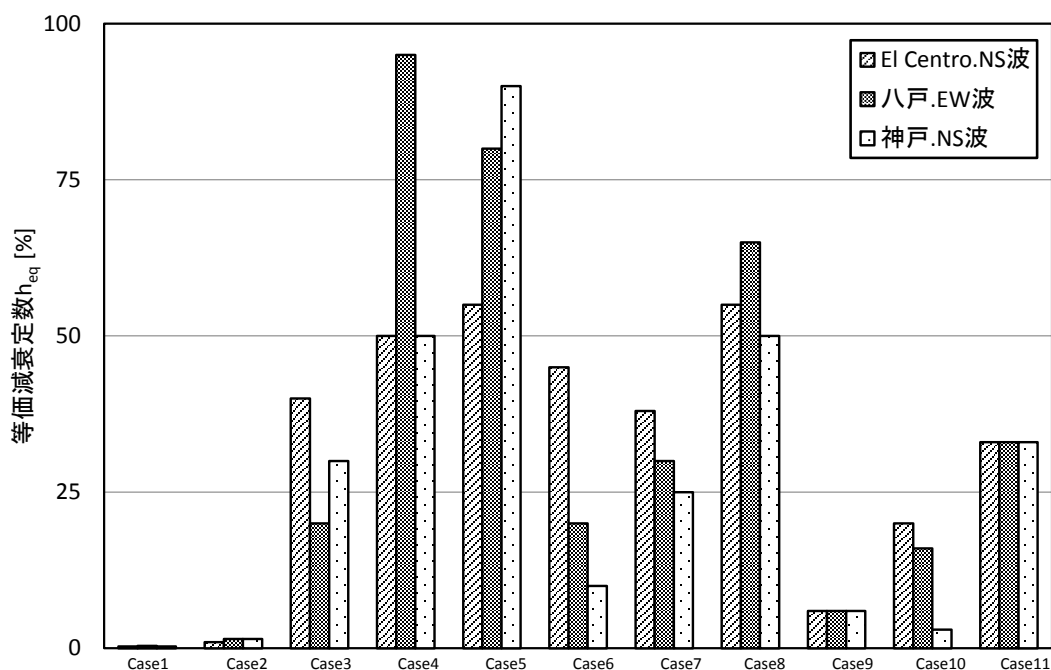
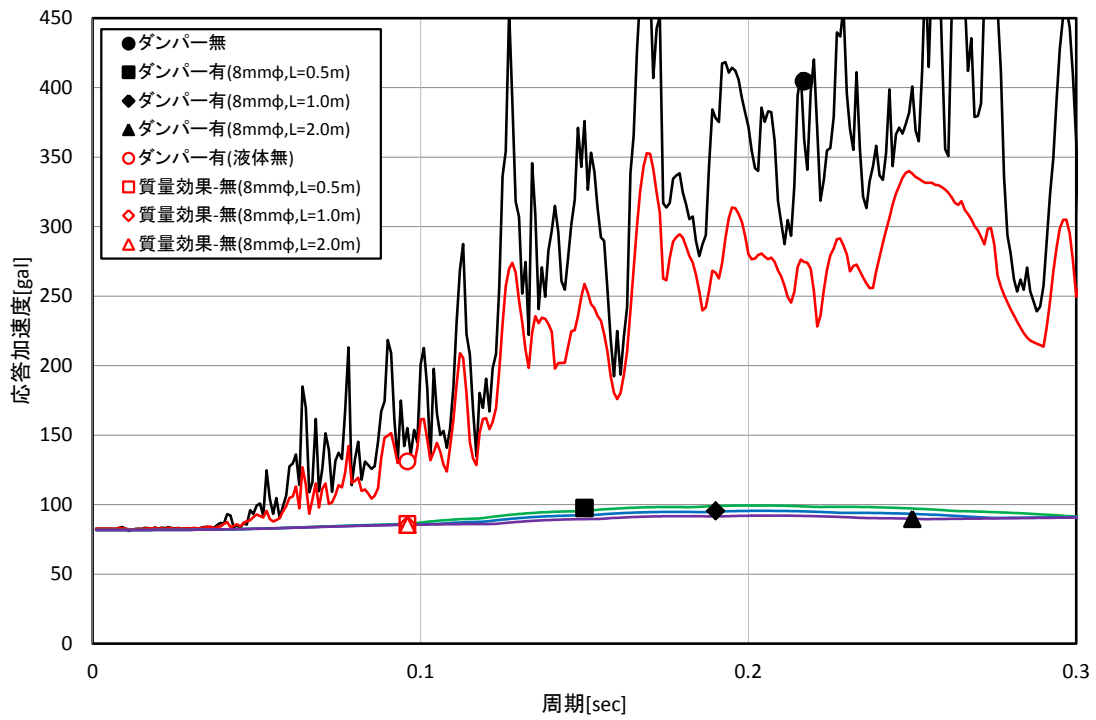


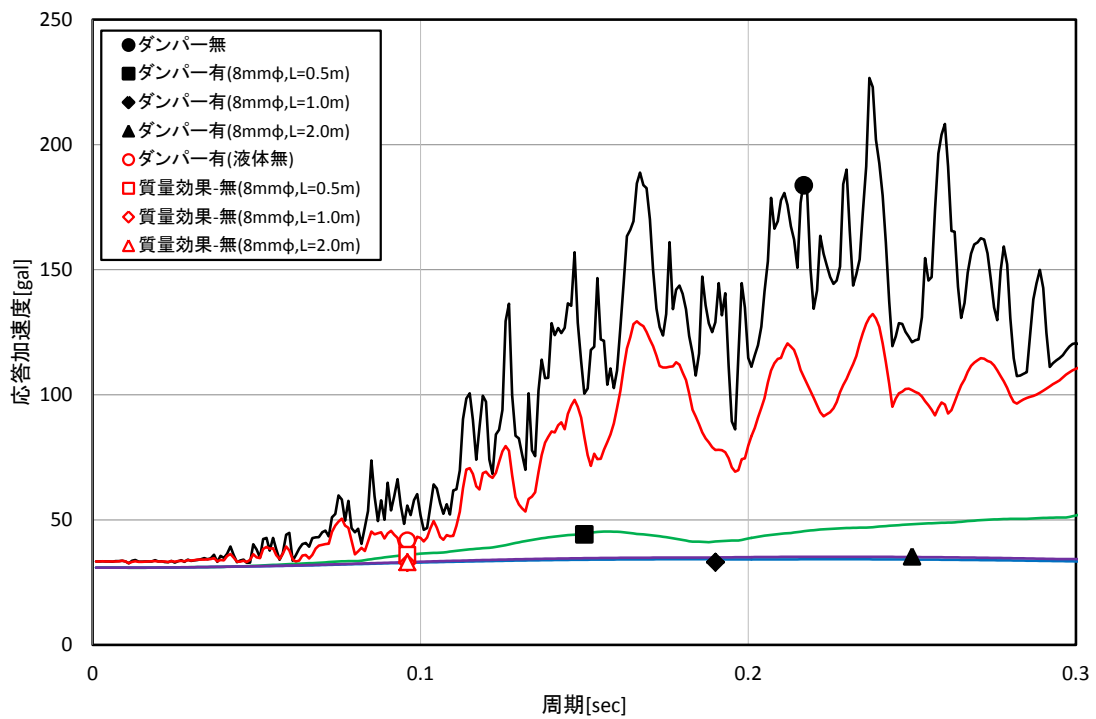
図 3.24 等価減衰定数 h_{eq}

これらの結果、等価減衰定数 h_{eq} は連結管の形状に依存し、概ね連結管の長さが長いほど、また、連結管内径が細いほど大きな値を示す傾向があることを確認した。また、入力地震動の違いについて、ケースごとに傾向が異なり、これらについてはより詳細な検証が必要であることがわかった。

次に、ダンパーの発揮する質量効果による振動特性の変化が、フレームの応答に与える影響を確認するため、先に示した入力地震波の加速度応答スペクトル上に実験結果から推定した値を重ね合わせ、実験値と比較したものを図 3.25～図 3.27 に、推定値の最大応答加速度を表 3.12～表 3.14 に示す。このとき、推定値の固有周期はダンパーの質量効果を見做し、シール材の剛性が付加されたフレームの固有周期に等しいと仮定した。また、内圧とシール材により生じる減衰力は実験値と等しく、表 3.9～表 3.11 に示した各ケースの等価減衰定数 h_{eq} は変化しないと仮定した。

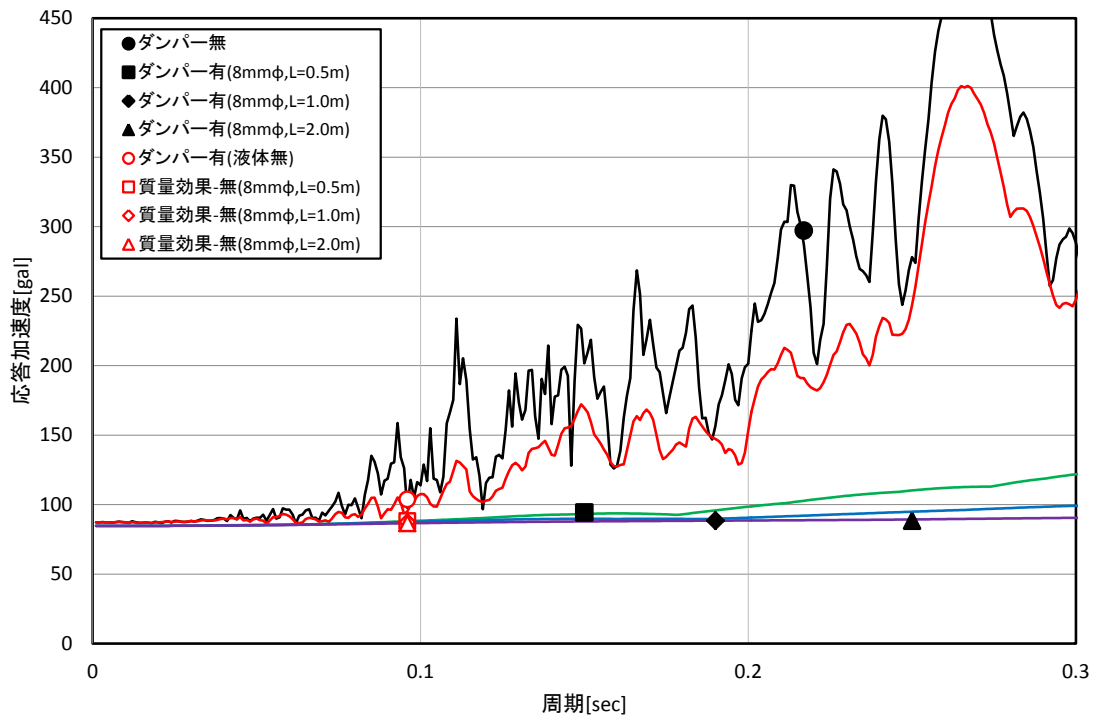


(a) El Centro NS 波



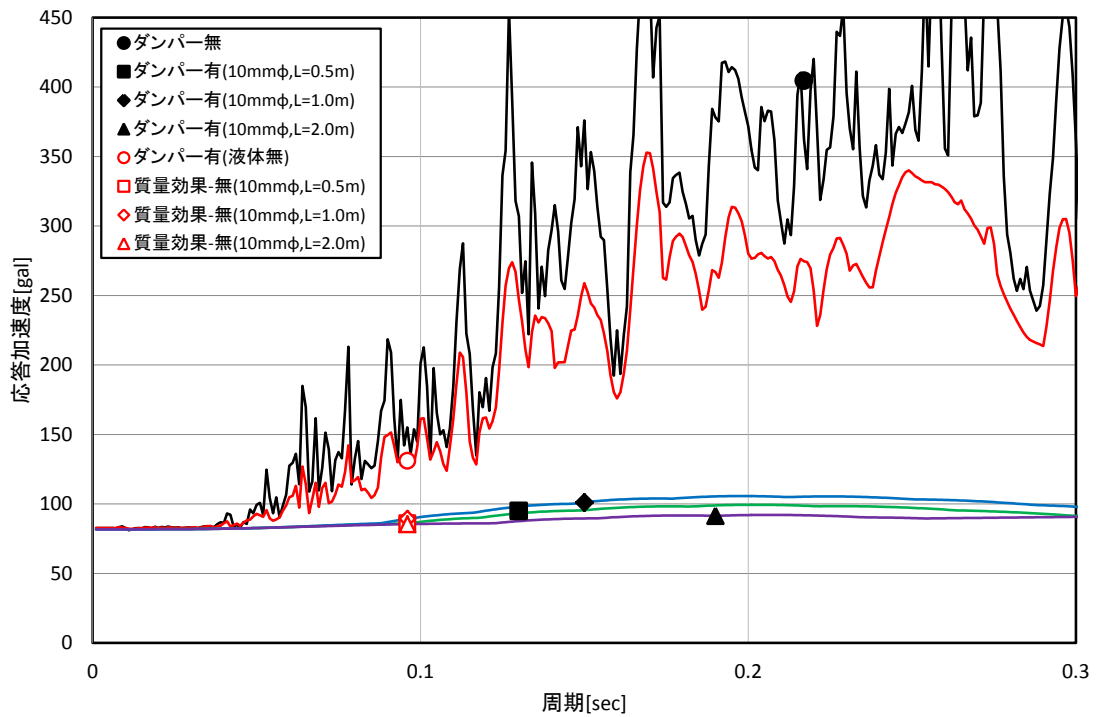
(b) 八戸 EW 波

図 3.25 加速度応答スペクトル (連結管内径 8mmφ)



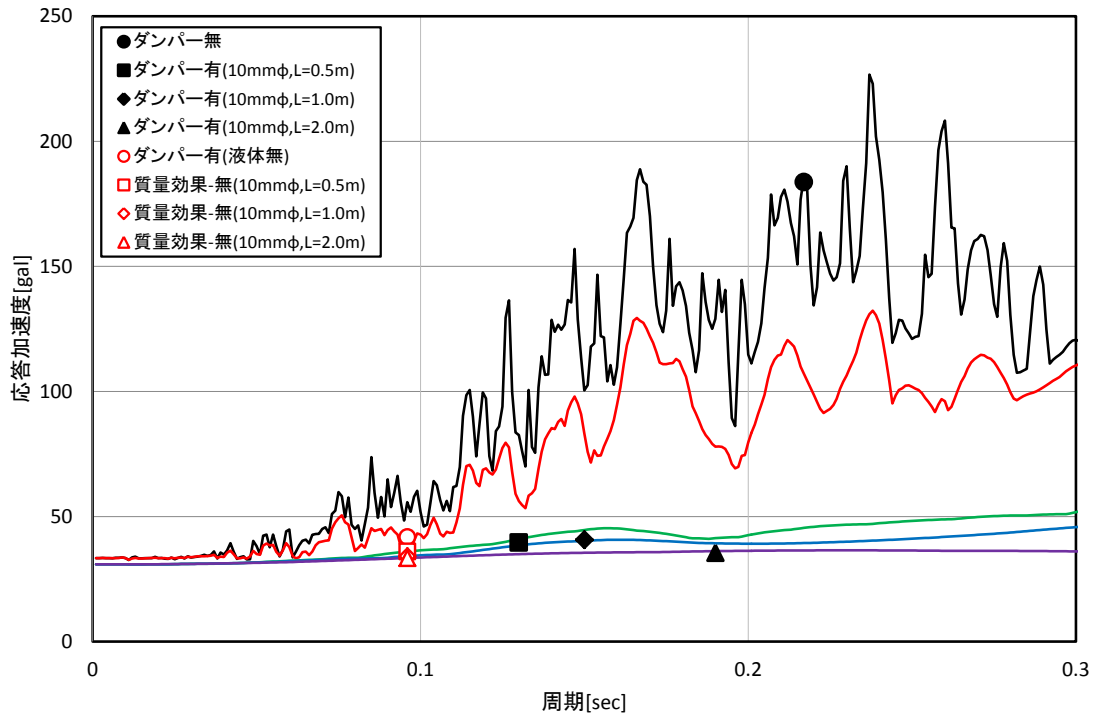
(c) 神戸 NS 波,

図 3.25 加速度応答スペクトル (連結管内径 8mmφ : 続き)

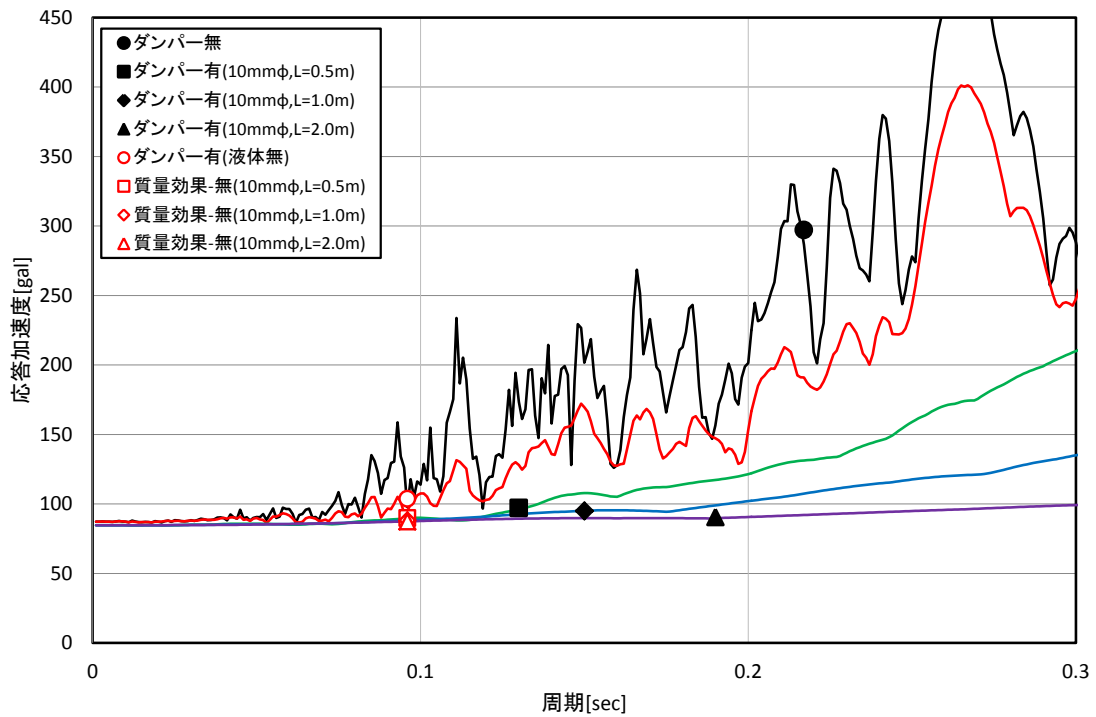


(a) El Centro NS 波

図 3.26 加速度応答スペクトル (連結管内径 10mmφ)

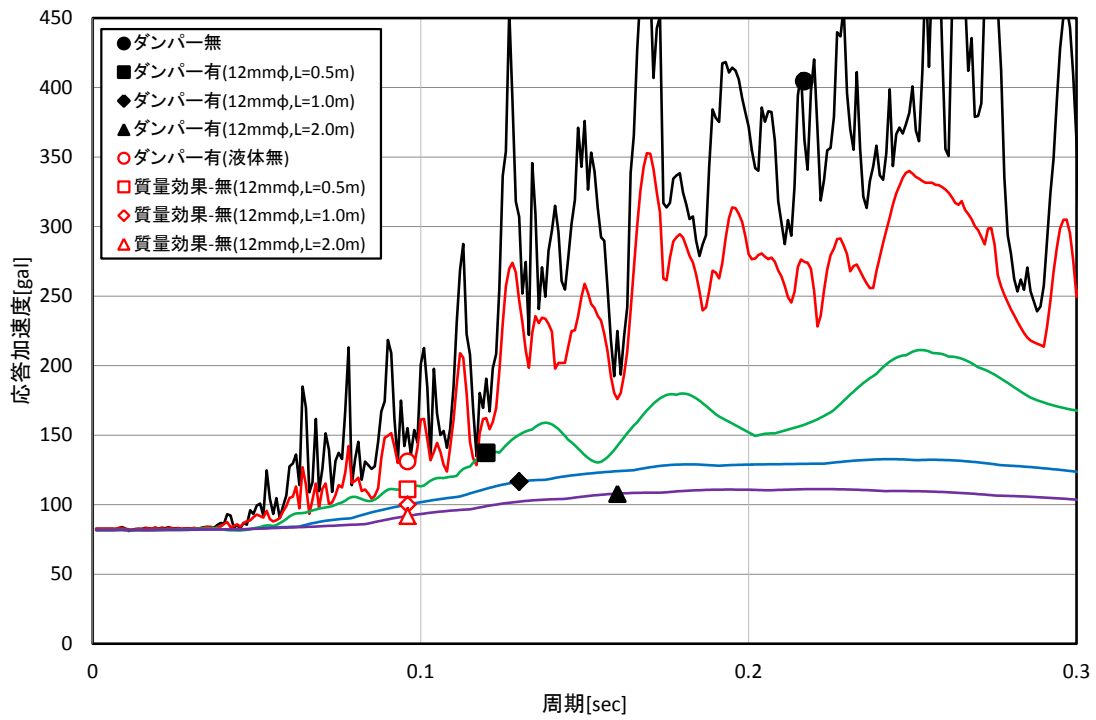


(b) 八戸 EW 波

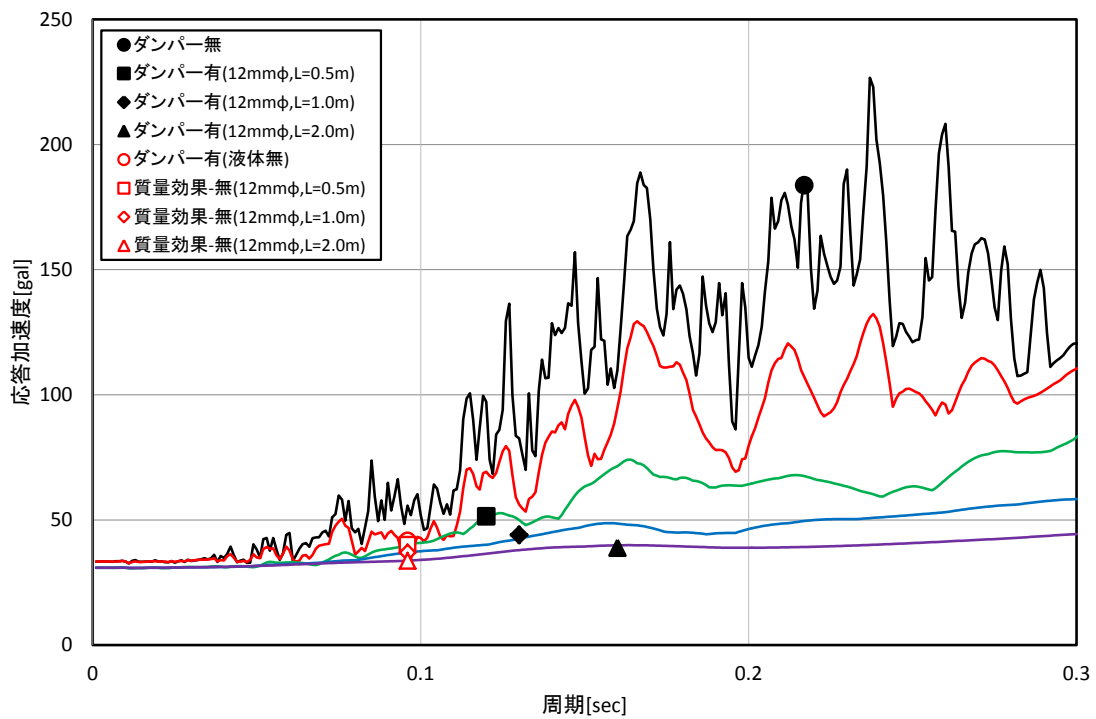


(c) 神戸 NS 波

図 3.26 加速度応答スペクトル (連結管内径 10mmφ : 続き)

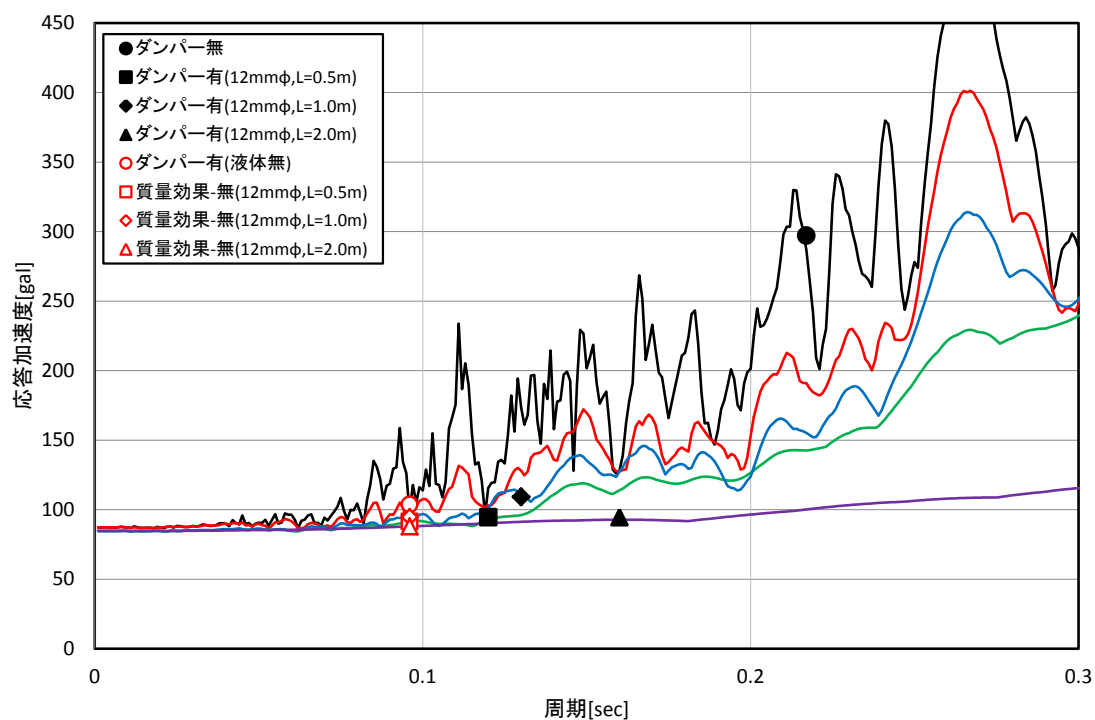


(a) El Centro NS 波



(b) 八戸 EW 波

図 3.27 加速度応答スペクトル (連結管内径 12mmφ)



(c) 神戸 NS 波

図 3.27 加速度応答スペクトル (連結管内径 12mm φ : 続き)

表 3.12 最大応答加速度 (El Centro NS 波)

試験体ケース	最大応答加速度 [gal]		実験値/推定値
	実験値	推定値	
Case1 (フレームのみ)	404.5	—	—
Case2 (シール材のみ)	131.1	—	—
Case3 (8mm φ、L=0.5m)	97.6	86.1	1.13
Case4 (8mm φ、L=1.0m)	95.5	85.8	1.11
Case5 (8mm φ、L=2.0m)	89.8	85.5	1.05
Case6 (10mm φ、L=0.5m)	95.0	86.1	1.10
Case7 (10mm φ、L=1.0m)	101.0	89.3	1.13
Case8 (10mm φ、L=2.0m)	91.5	85.5	1.07
Case9 (12mm φ、L=0.5m)	137.3	111.0	1.24
Case10 (12mm φ、L=1.0m)	116.7	100.1	1.17
Case11 (12mm φ、L=2.0m)	107.9	91.9	1.17

表 3.13 最大応答加速度（八戸 EW 波）

試験体ケース	最大応答加速度 [gal]		実験値／推定値
	実験値	推定値	
Case1（フレームのみ）	183.7	—	—
Case2（シール材のみ）	41.8	—	—
Case3（8mmφ、L=0.5m）	44.2	36.1	1.22
Case4（8mmφ、L=1.0m）	33.1	32.8	1.01
Case5（8mmφ、L=2.0m）	35.4	33.1	1.07
Case6（10mmφ、L=0.5m）	39.6	36.1	1.10
Case7（10mmφ、L=1.0m）	40.7	34.2	1.19
Case8（10mmφ、L=2.0m）	35.5	33.4	1.06
Case9（12mmφ、L=0.5m）	51.4	40.1	1.28
Case10（12mmφ、L=1.0m）	44.0	37.0	1.19
Case11（12mmφ、L=2.0m）	38.9	33.7	1.15

表 3.14 最大応答加速度（神戸 NS 波）

試験体ケース	最大応答加速度 [gal]		実験値／推定値
	実験値	推定値	
Case1（フレームのみ）	297.2	—	—
Case2（シール材のみ）	103.8	—	—
Case3（8mmφ、L=0.5m）	94.3	88.1	1.07
Case4（8mmφ、L=1.0m）	88.6	87.5	1.01
Case5（8mmφ、L=2.0m）	88.4	86.6	1.02
Case6（10mmφ、L=0.5m）	97.1	89.8	1.08
Case7（10mmφ、L=1.0m）	95.0	88.3	1.08
Case8（10mmφ、L=2.0m）	90.6	87.5	1.04
Case9（12mmφ、L=0.5m）	94.6	91.5	1.04
Case10（12mmφ、L=1.0m）	109.2	94.8	1.15
Case11（12mmφ、L=2.0m）	94.6	88.0	1.08

これらの結果より、フレームに付加されるダンパーの減衰力が大きいこと、これに加え入力地震動に対して各ケースの固有周期が短周期領域にあることから、質量効果による振動特性の変化がフレームの応答に与える影響について、その効果が十分に発揮されなかったことが確認された。しかしながら、応答スペクトルを用いることにより、想定した入力地震動に対するフレームの応答予測が可能となり、本機構を導入する際の最適設計法を構築できるものとする。

第4章 制振フレームの振動応答解析

- 4.1 本章の目的
- 4.2 振動系モデルおよび振動方程式
- 4.3 振動応答解析プログラム
- 4.4 解析結果と試験結果の比較

第4章 制振フレームの振動応答解析

4.1 本章の目的

ダンパーを組み込んだフレームの振動応答特性を解析的に検討するため、数値積分による時刻歴応答解析を行う。本論では、前述のダンパーを組み込んだ1層制振フレーム試験体を対象に振動系モデルを構築し、振動方程式を導く。それについて、MATLABによる時刻歴応答解析プログラムを作成し、第3章で示した1層制振フレームによる振動台加振試験の結果を解析による結果と比較し、得られた結果に基づき解析手法の妥当性について検討することを目的とする。

4.2 振動系モデルおよび振動方程式

本ダンパーの抵抗力要素は、連結管内を液体が流れる際に発生する内圧抵抗とシール材による粘弾性抵抗、および連結管内の液体が高速で移動することによって発生する慣性質量効果を合わせたものになる。ダンパーが組み込まれた1層フレームに地動外力が作用した場合、振動系モデルは図4.1のように表される。

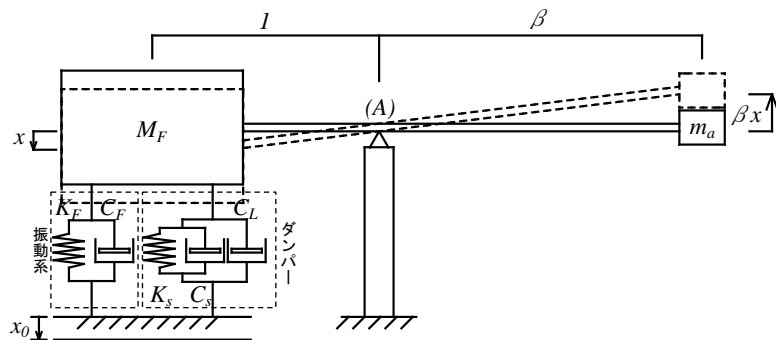


図 4.1 振動系モデル

振動方程式は、支点(A)周りのモーメントの釣り合いにより

$$(M_F + \beta^2 m_a) \ddot{x} + C_F \dot{x} + K_F x = -M_F \cdot \ddot{x}_0 - (F_s + F_f) \quad (4.1)$$

と導かれる。ここで、 M_F と C_F 、 K_F は、それぞれフレームの質量と減衰係数、水平剛性を示す。また、右辺第2項の F_s と F_f は、それぞれシール材と液流による抵抗力を示す。図4.1に示したダンパーの要素のうち、 K_s と C_s はシール材の抵抗力を表し、第2章の(2.10)式に対応する。また、 C_L は内圧抵抗による減衰係数を示し、

$$C_L = \frac{F_f}{\dot{x}} \quad (4.2)$$

によって表わされる。 m_a は連結管内の液体の質量、 β はピストンの有効断面積 A と連結管の

断面積 a の比で

$$\beta = A/a \tag{4.3}$$

と表される。 \ddot{x}_0 は地動加速度を示している。

(4.1)式において、

$$\bar{M} = M_F + \beta^2 m_a \tag{4.4}$$

とおいた場合、 \bar{M} が有効質量であり、(4.4)式の右辺第2項の $\beta^2 m_a$ は連結管内の液体による質量効果を示している。これは、管内で運動する液体の見掛け上の質量が、管内液体の実際の質量(m_a)に対して断面積比の2乗に比例した質量効果が発揮されることを示している。

4.3 振動応答解析プログラム

地震動のような不規則な外乱を受ける構造物の振動応答を解析するためには、微小な時間間隔毎に振動方程式を数値的に積分し、解を定めていく数値積分法が用いられる。本論においては、一般の微分方程式の順次計算による数値解析法の一つである Runge-Kutta 法を用いて、MATLAB により解析プログラムを作成した。ここでは、Kutta の4次精度公式を参照し、(4.1)式に対応する公式として導いたものを次式に示す。

$$x_n = x_{n-1} + \Delta t \cdot \dot{x}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{6} (L_0 + L_1 + L_2) \tag{4.5}$$

$$\dot{x}_n = \dot{x}_{n-1} + \frac{1}{6} (L_0 + 2L_1 + 2L_2 + L_3) \tag{4.6}$$

$$\ddot{x}_n = -P \cdot \dot{x}_n - Q \cdot x_n - R \cdot \ddot{x}_{0n} - S \cdot DF_{n-1} \tag{4.7}$$

$$DF = F_s + F_f \tag{4.8}$$

$$\left. \begin{aligned} P &= C_F / M_F + \beta^2 m_a \\ Q &= K_F / M_F + \beta^2 m_a \\ R &= M_F / M_F + \beta^2 m_a \\ S &= 1 / M_F + \beta^2 m_a \end{aligned} \right\} \tag{4.9}$$

$$L_0 = -\Delta t(P \cdot \dot{x}_{n-1} + Q \cdot x_{n-1} + R \cdot \ddot{x}_{0n-1} + S \cdot DF_{n-2}) \quad (4.10)$$

$$L_1 = -\Delta t\left\{P \left(\dot{x}_{n-1} + \frac{L_0}{2}\right) + Q \left(x_{n-1} + \frac{\Delta t \cdot \dot{x}_{n-1}}{2}\right) + R \cdot \ddot{x}_{0n-\frac{1}{2}} + S \cdot DF_{n-\frac{3}{2}}\right\} \quad (4.11)$$

$$L_2 = -\Delta t\left[P \left(\dot{x}_{n-1} + \frac{L_1}{2}\right) + Q\left\{x_{n-1} + \frac{\Delta t}{2} \left(\dot{x}_{n-1} + \frac{L_0}{2}\right)\right\} + R \cdot \ddot{x}_{0n-\frac{1}{2}} + S \cdot DF_{n-\frac{3}{2}}\right] \quad (4.12)$$

$$L_3 = -\Delta t\left[P(\dot{x}_{n-1} + L_2) + Q\left\{x_{n-1} + \Delta t \left(\dot{x}_{n-1} + \frac{L_1}{2}\right)\right\} + R \cdot \ddot{x}_{0n} + S \cdot DF_{n-1}\right] \quad (4.13)$$

ここで、質点の応答変位 x 、速度 \dot{x} 、加速度 \ddot{x} 、およびダンパーの抵抗力 DF 、地動加速度 \ddot{x}_0 の添字 n 、 $n-1$ 、 $n-\frac{3}{2}$ 、 $n-2$ は離散時間解析におけるステップを表し、 n が次ステップとなる。作成した解析プログラムのフローチャートを図4.2に示す。

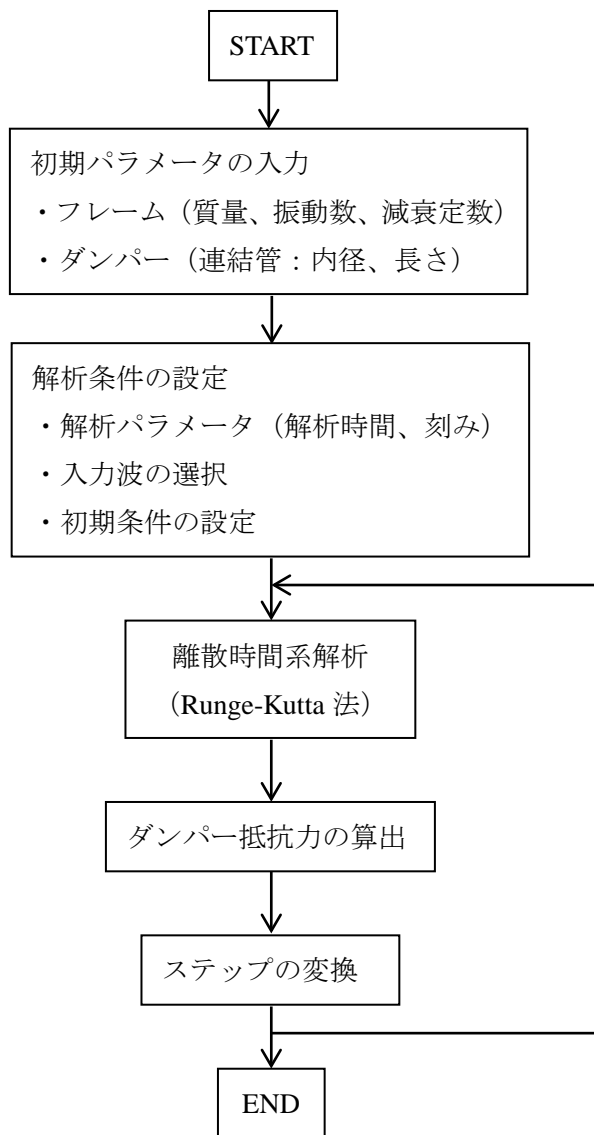


図4.2 振動応答解析プログラムのフローチャート

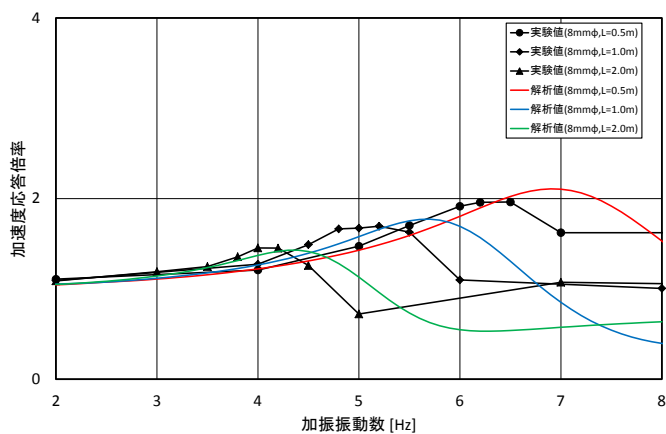
4.4 解析結果と試験結果の比較

前章までに示した一連の試験により求めたフレームとダンパーのパラメータを表 4.1 に示す。

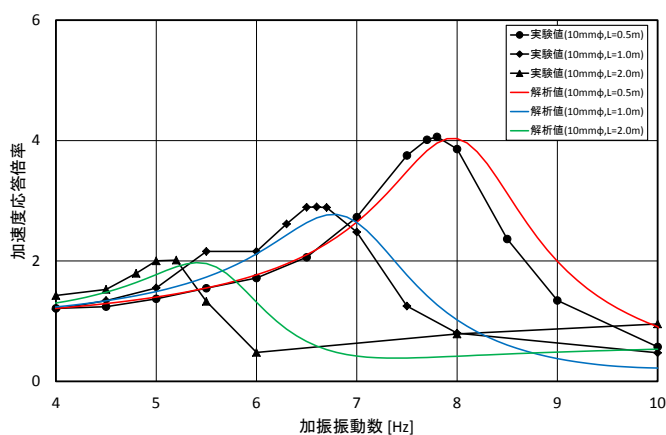
表 4.1 解析パラメータ

フレームのパラメータ		
質量： M_F	28.285 kg	
固有振動数	4.6 Hz	
減衰定数： h_F	1.02 %	
ダンパーのパラメータ		
ピストン有効半径： r_p	2.2cm	
ピストン有効断面積： A	15.2 cm ²	
連結管内径： D	0.8 cm, 1.0cm, 1.2cm	
連結管長さ： L	50cm, 100cm, 200 cm	
連結管断面積： a	0.503cm ² , 0.785cm ² , 1.131cm ²	
断面積比： $\beta(= A/a)$	30.2, 19.3, 13.4	
ダンパー抵抗力のパラメータ		
シール材	ばね定数： k_S	87 N/m
	減衰係数： c_S	66.9N・sec/m
管内摩擦の実験式	8mm ϕ	L=0.5m $f = 2628R_e^{-0.942}$
		L=1.0m $f = 173.64R_e^{-0.705}$
		L=2.0m $f = 17.092R_e^{-0.448}$
	10mm ϕ	L=0.5m $f = 10611R_e^{-1.063}$
		L=1.0m $f = 1219.3R_e^{-0.88}$
		L=2.0m $f = 926.94R_e^{-0.899}$
	12mm ϕ	L=0.5m $f = 17963R_e^{-1.119}$
		L=1.0m $f = 15998R_e^{-1.178}$
		L=2.0m $f = 875.22R_e^{-0.846}$
時間刻み	0.0001sec	

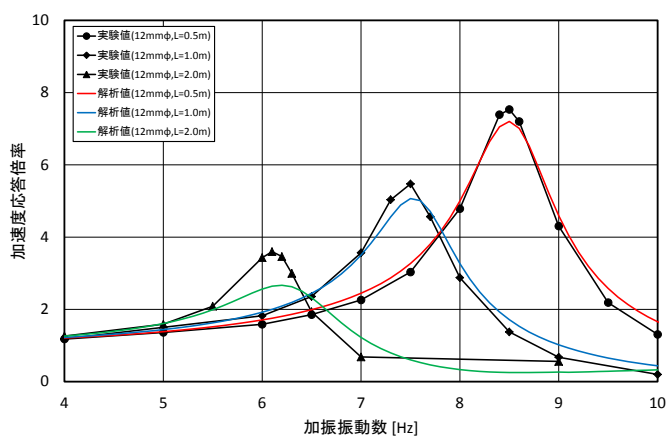
第3章に示した正弦波加振試験結果と、表 4.1 に示したパラメータを用いて行った解析の結果を比較する。解析に用いた初期条件は $t = 0$ で応答変位、速度ともにゼロとし、数サイクルの加振後、応答が定常状態になったことを確認し、それを定常応答とみなした。解析結果と実験結果の比較を行った代表的な例として、振動台の加速度を 50gal に設定して加振した場合における連結管内径別の共振曲線を図 4.3 に、フレーム相対変位、ダンパー抵抗力の時刻歴波形、および共振点とその前後の変位 - 慣性力履歴ループ、変位 - 抵抗力履歴ループを図 4.4～図 4.12 に示す。また、表 4.2 に、各共振点におけるダンパー変位振幅とダンパー荷重振幅の実験値と解析値を比較したものを示す。



(a) 連結管内径 : 8mm ϕ

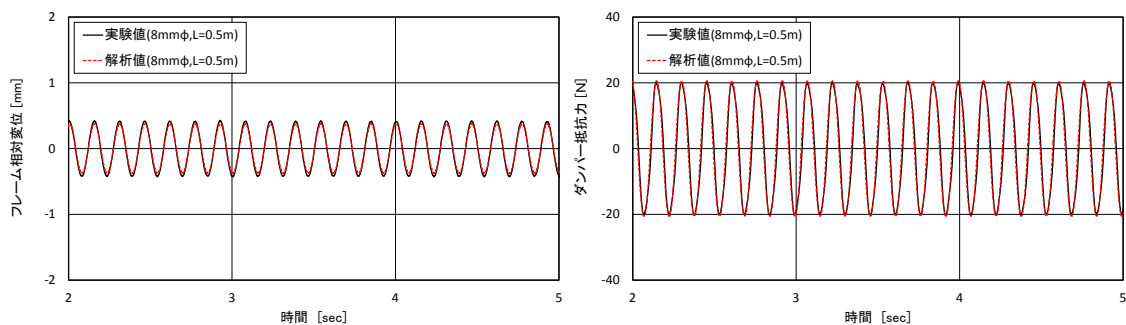


(b) 連結管内径 : 10mm ϕ



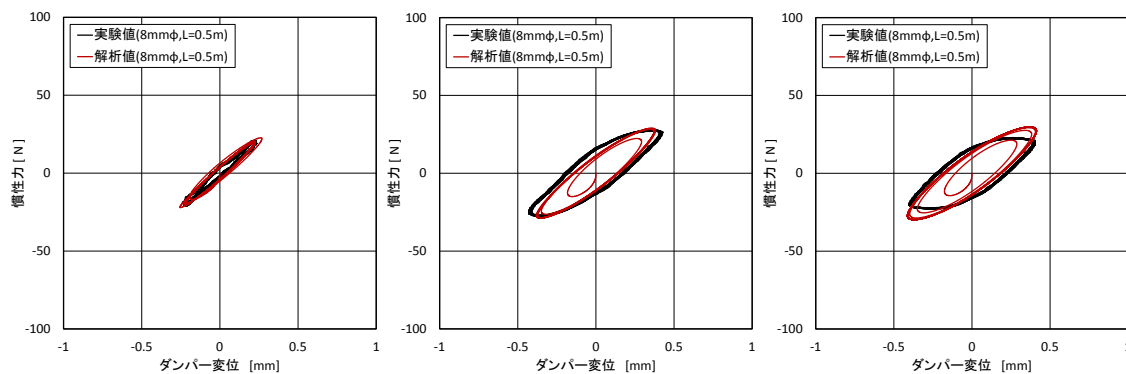
(c) 連結管内径 : 12mm ϕ

図 4.3 解析結果と実験結果の比較 : 共振曲線

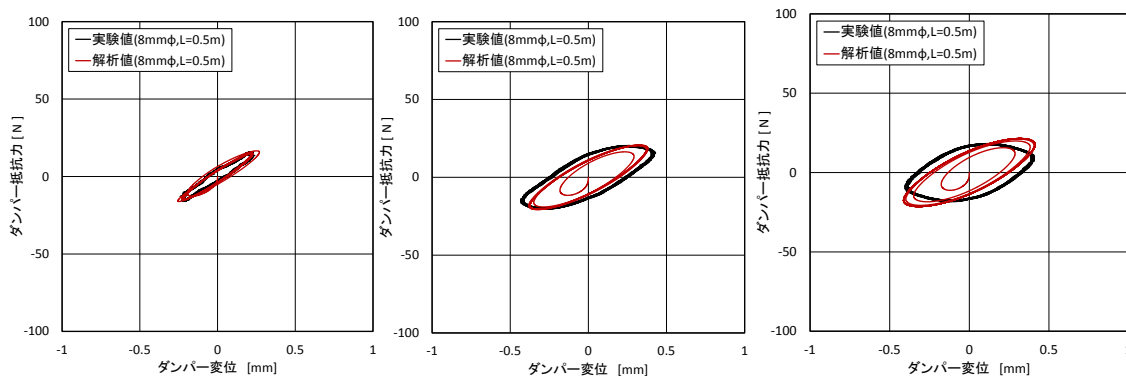


(a) 時刻歴波形：フレーム相対変位

(b) 時刻歴波形：ダンパー抵抗力

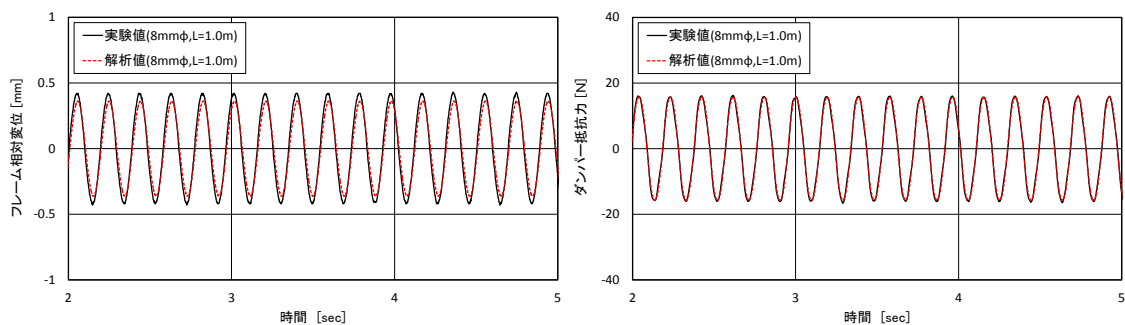


(c) 変位 - 慣性力履歴ループ (5.0Hz, 6.5Hz, 7.0Hz)



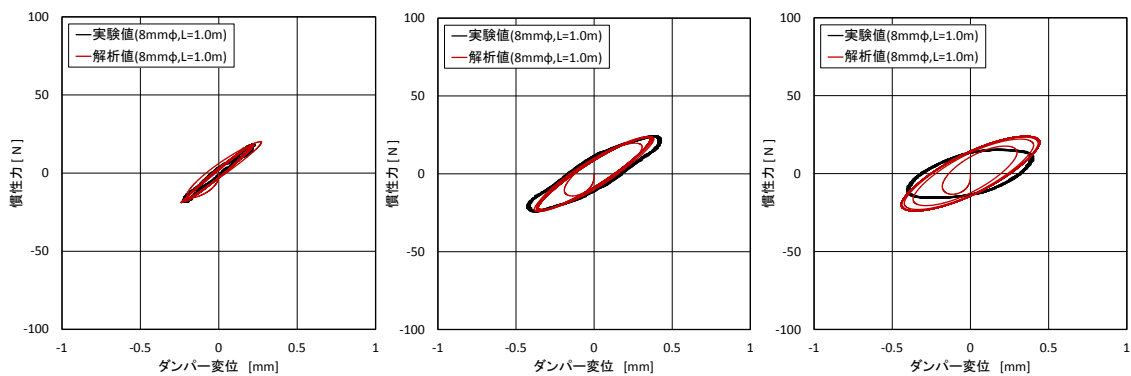
(d) 変位 - 抵抗力履歴ループ (5.0Hz, 6.5Hz, 7.0Hz)

図 4.4 解析結果と実験結果の比較 (内径：8mmφ, 長さ：0.5m)

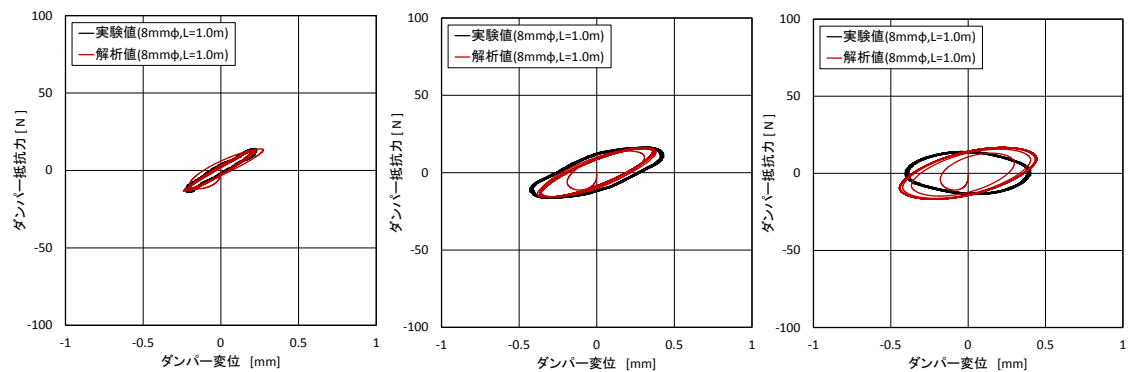


(a) 時刻歴波形：フレーム相対変位

(b) 時刻歴波形：ダンパー抵抗力

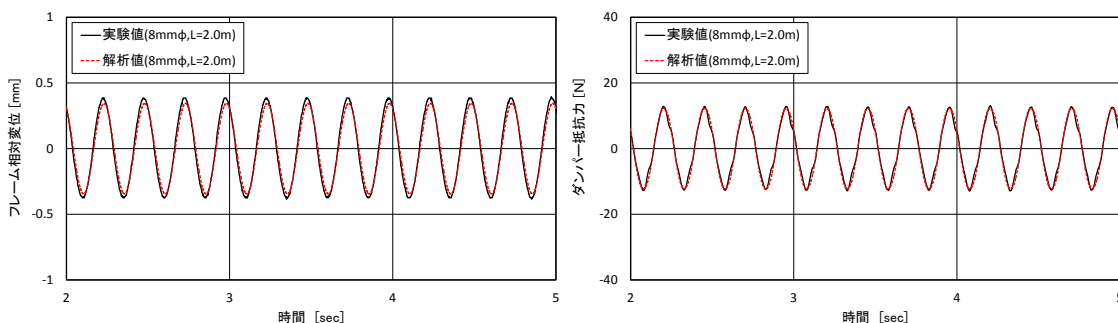


(c) 変位 - 慣性力履歴ループ (4.0Hz, 5.2Hz, 6.0Hz)



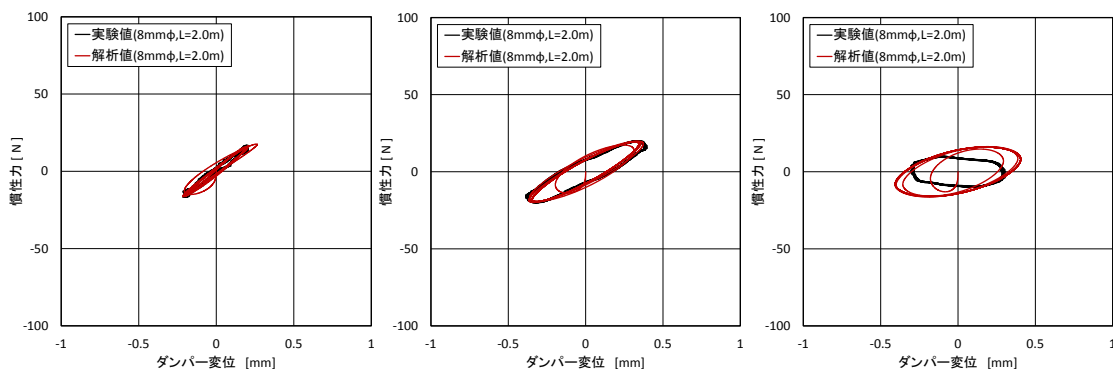
(d) 変位 - 抵抗力履歴ループ (4.0Hz, 5.2Hz, 6.0Hz)

図 4.5 解析結果と実験結果の比較 (内径：8mmφ、長さ：1.0m)

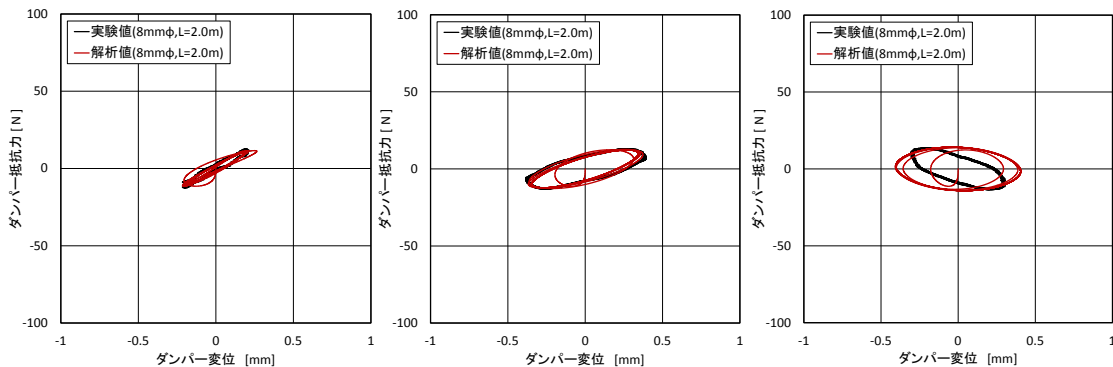


(a) 時刻歴波形：フレーム相対変位

(b) 時刻歴波形：ダンパー抵抗力

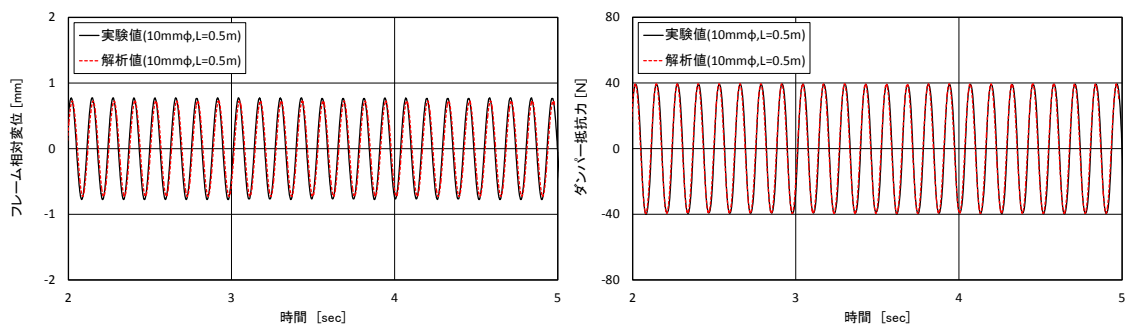


(c) 変位 - 慣性力履歴ループ (3.0Hz, 4.0Hz, 5.0Hz)



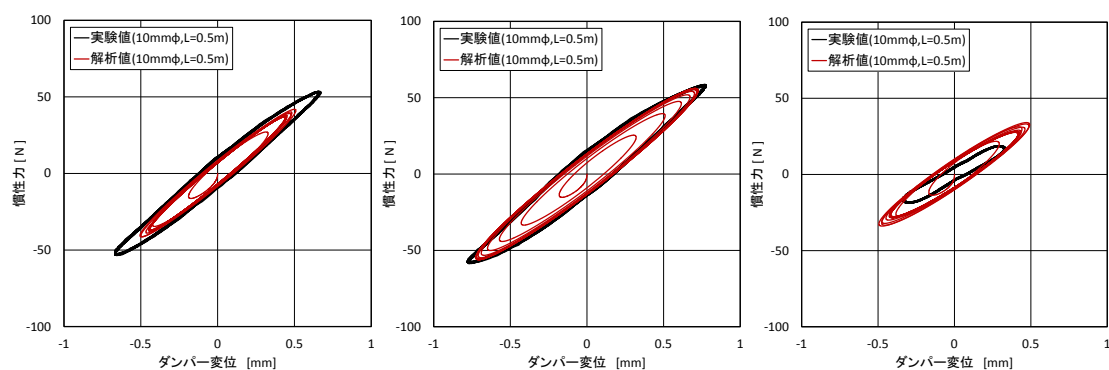
(d) 変位 - 抵抗力履歴ループ (3.0Hz, 4.0Hz, 5.0Hz)

図 4.6 解析結果と実験結果の比較 (内径：8mmφ，長さ：2.0m)

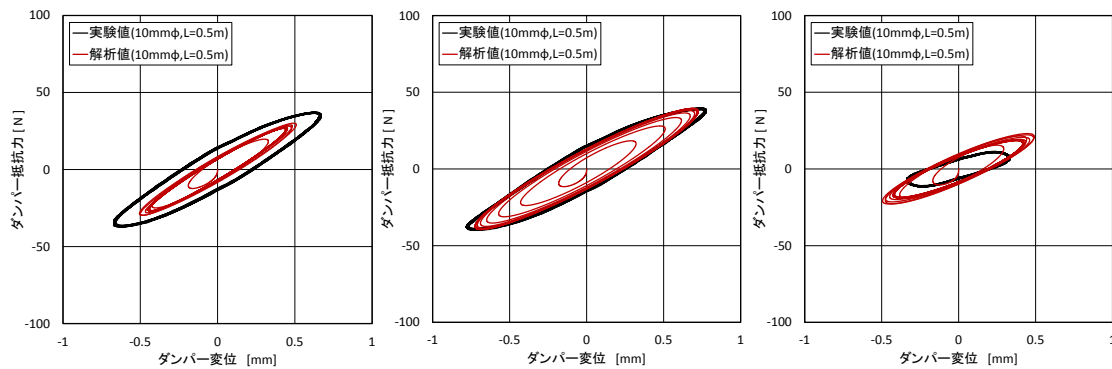


(a) 時刻歴波形：フレーム相対変位

(b) 時刻歴波形：ダンパー抵抗力

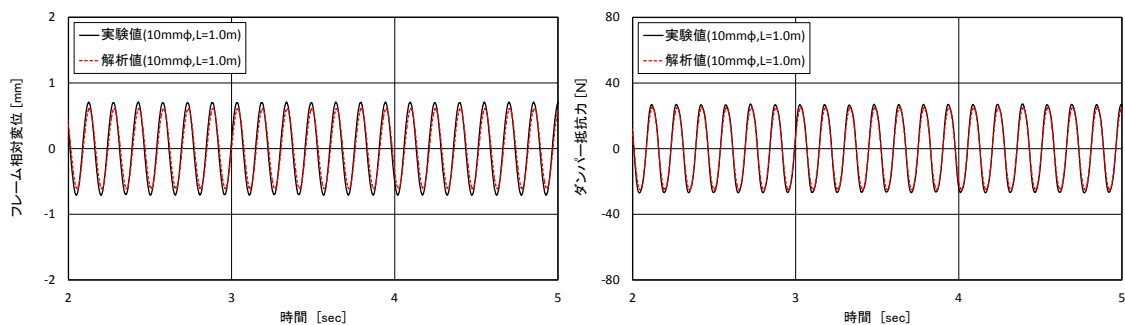


(c) 変位 - 慣性力履歴ループ (7.0Hz, 7.8Hz, 9.0Hz)



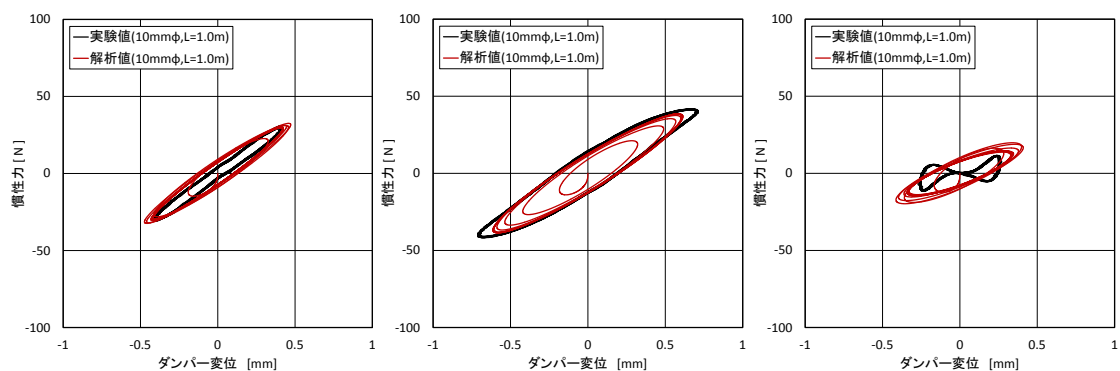
(d) 変位 - 抵抗力履歴ループ (7.0Hz, 7.8Hz, 9.0Hz)

図 4.7 解析結果と実験結果の比較 (内径 : 10mmφ, 長さ : 0.5m)

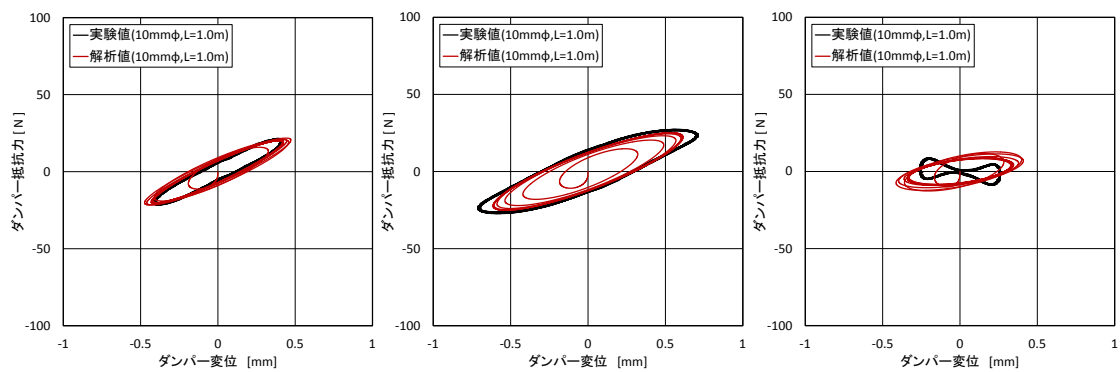


(a) 時刻歴波形：フレーム相対変位

(b) 時刻歴波形：ダンパー抵抗力

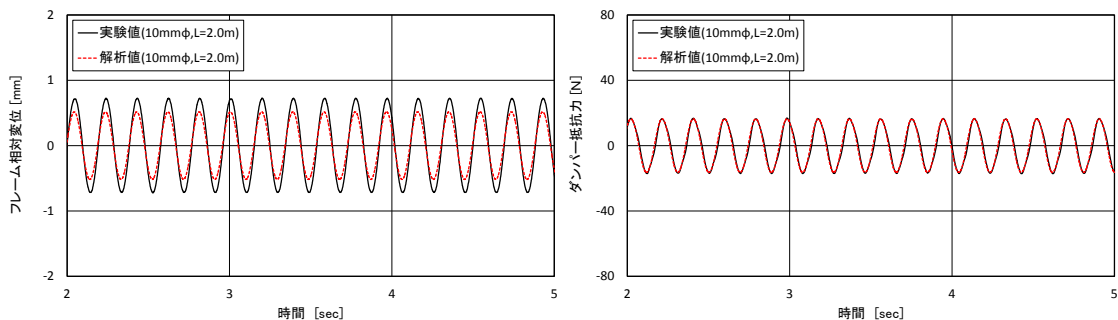


(c) 変位 - 慣性力履歴ループ (6.0Hz, 6.6Hz, 8.0Hz)



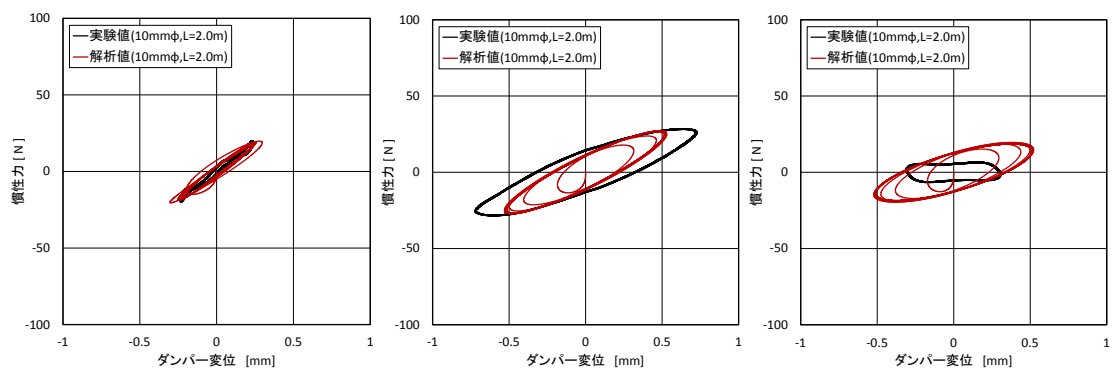
(d) 変位 - 抵抗力履歴ループ (6.0Hz, 6.6Hz, 8.0Hz)

図 4.8 解析結果と実験結果の比較 (内径：10mmφ，長さ：1.0m)

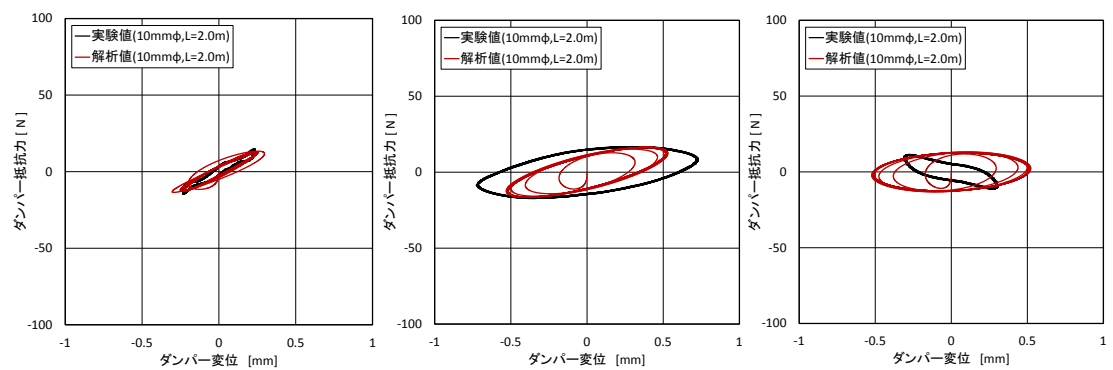


(a) 時刻歴波形：フレーム相対変位

(b) 時刻歴波形：ダンパー抵抗力

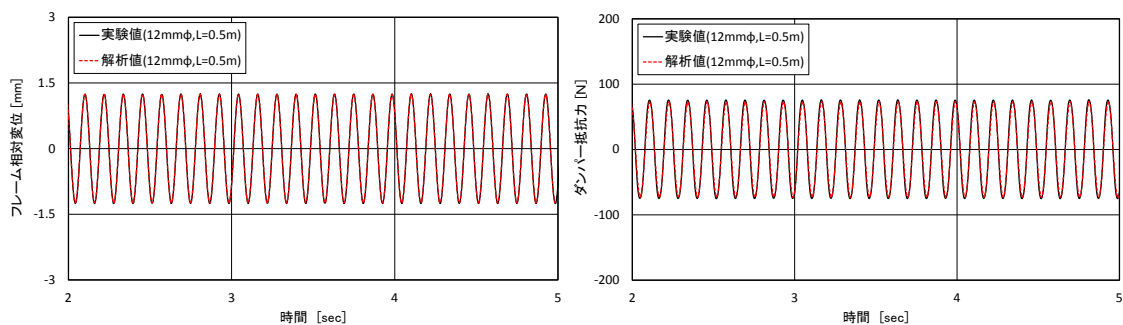


(c) 変位 - 慣性力履歴ループ(4.0Hz, 5.2Hz, 6.0Hz)



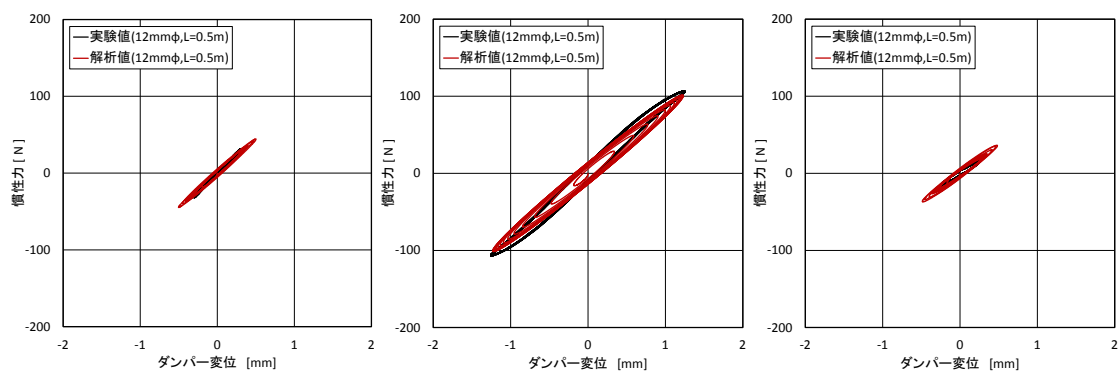
(d) 変位 - 抵抗力履歴ループ(4.0Hz, 5.2Hz, 6.0Hz)

図 4.9 解析結果と実験結果の比較 (内径：10mmφ，長さ：2.0m)

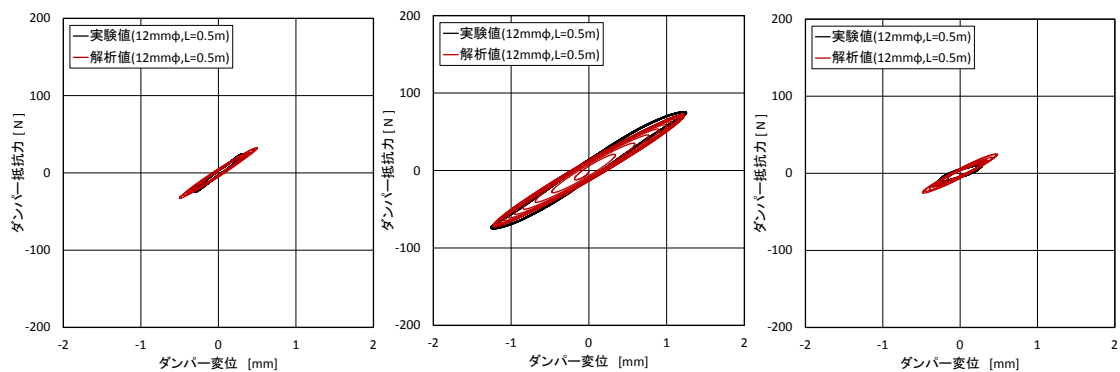


(a) 時刻歴波形：フレーム相対変位

(b) 時刻歴波形：ダンパー抵抗力

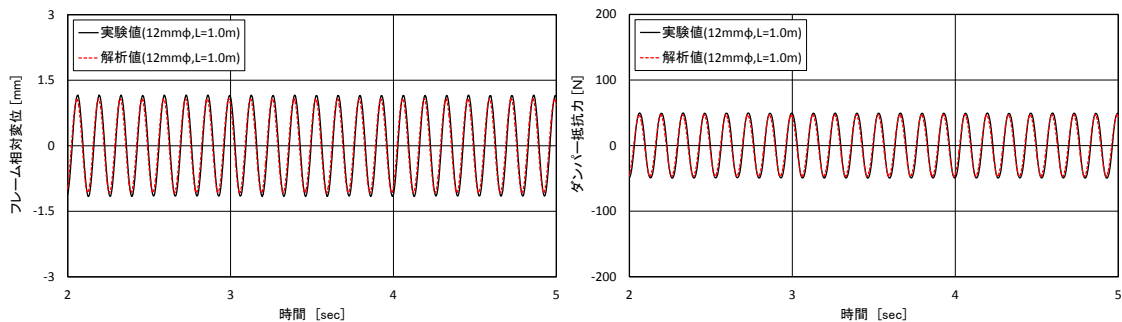


(c) 変位 - 慣性力履歴ループ (7.0Hz, 8.5Hz, 10.0Hz)



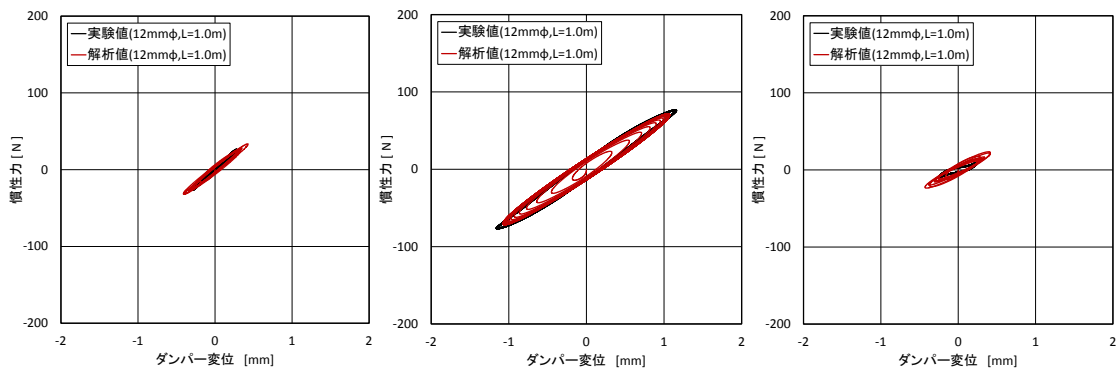
(d) 変位 - 抵抗力履歴ループ (7.0Hz, 8.5Hz, 10.0Hz)

図 4.10 解析結果と実験結果の比較 (内径：12mmφ，長さ：0.5m)

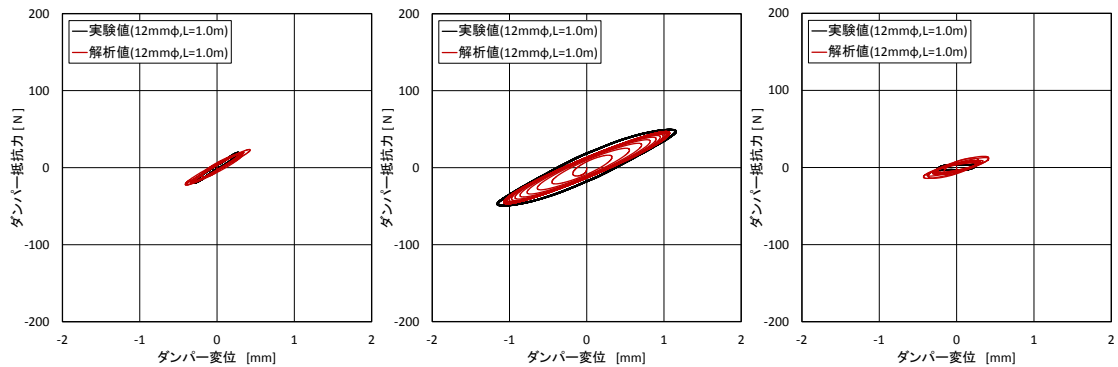


(a) 時刻歴波形：フレーム相対変位

(b) 時刻歴波形：ダンパー抵抗力

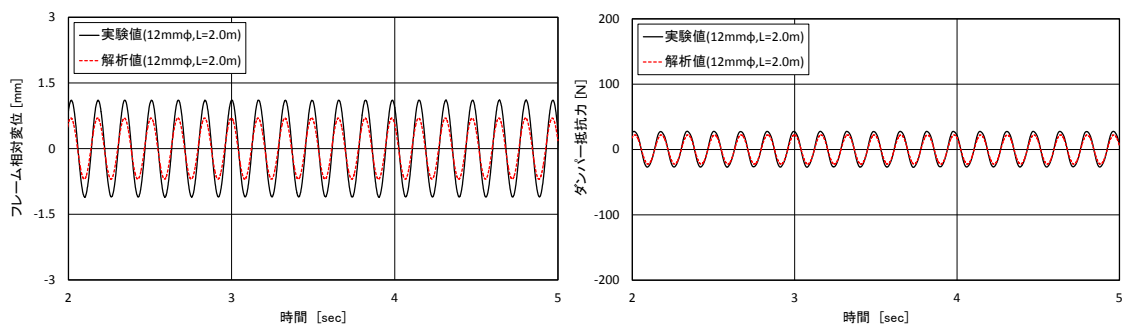


(c) 変位 - 慣性力履歴ループ (6.0Hz, 7.5Hz, 9.0Hz)



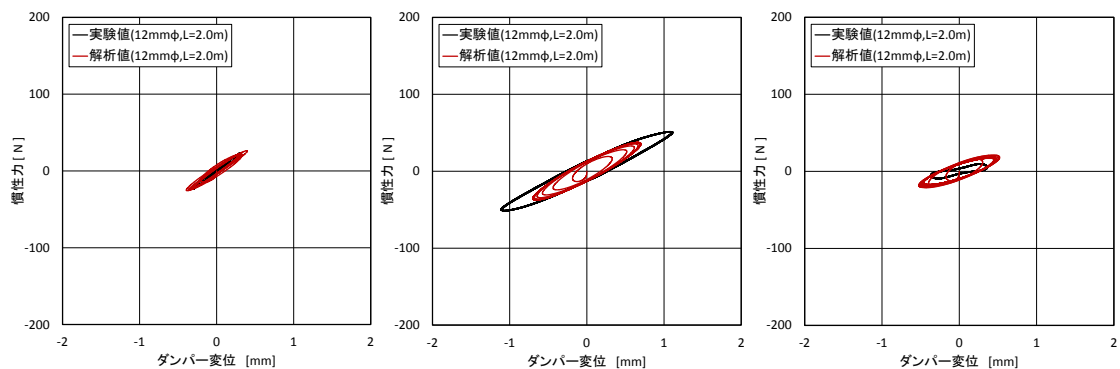
(d) 変位 - 抵抗力履歴ループ (6.0Hz, 7.5Hz, 9.0Hz)

図 4.11 解析結果と実験結果の比較 (内径 : 12mmφ, 長さ : 1.0m)

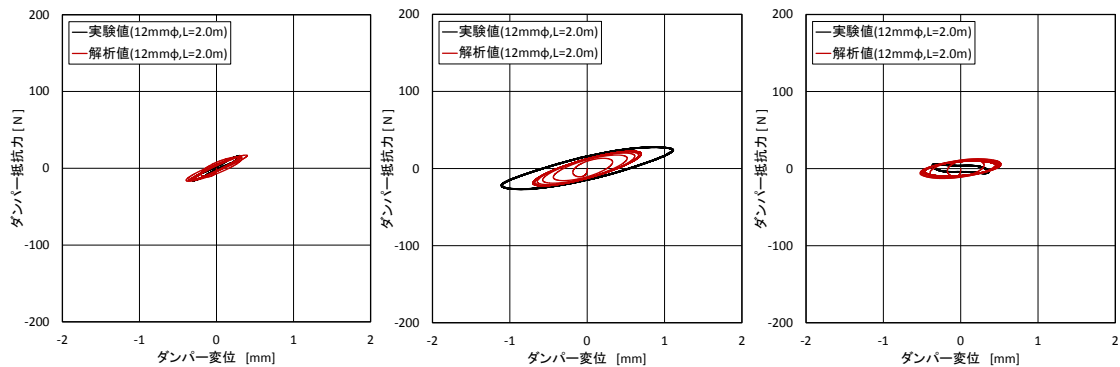


(a) 時刻歴波形：フレーム相対変位

(b) 時刻歴波形：ダンパー抵抗力



(c) 変位 - 慣性力履歴ループ (5.0Hz, 6.1Hz, 7.0Hz)



(d) 変位 - 抵抗力履歴ループ (5.0Hz, 6.1Hz, 7.0Hz)

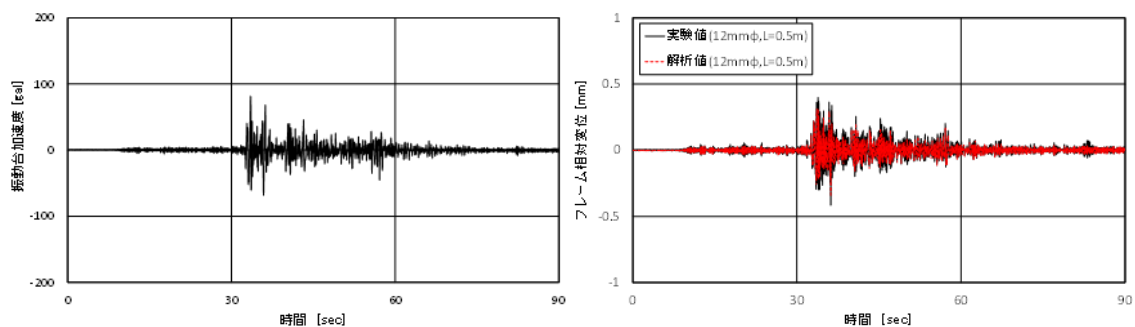
図 4.12 解析結果と実験結果の比較 (内径：12mmφ，長さ：2.0m)

表 4.2 正弦波加振試験と解析値の比較

試験体 ケース	加振振動数 [Hz]	ダンパー変位 [mm]		ダンパー抵抗力 [N]	
		実験値	解析値	実験値	解析値
Case3	6.5	0.43	0.38	20.45	20.77
Case4	5.2	0.43	0.38	16.55	16.14
Case5	4.0	0.40	0.37	13.20	12.71
Case6	7.8	0.79	0.72	39.90	39.41
Case7	6.6	0.71	0.61	27.35	25.12
Case8	5.2	0.73	0.53	17.15	16.51
Case9	8.5	1.26	1.19	75.65	70.12
Case10	7.5	1.16	1.03	49.85	45.05
Case11	6.1	1.12	0.70	27.65	22.36

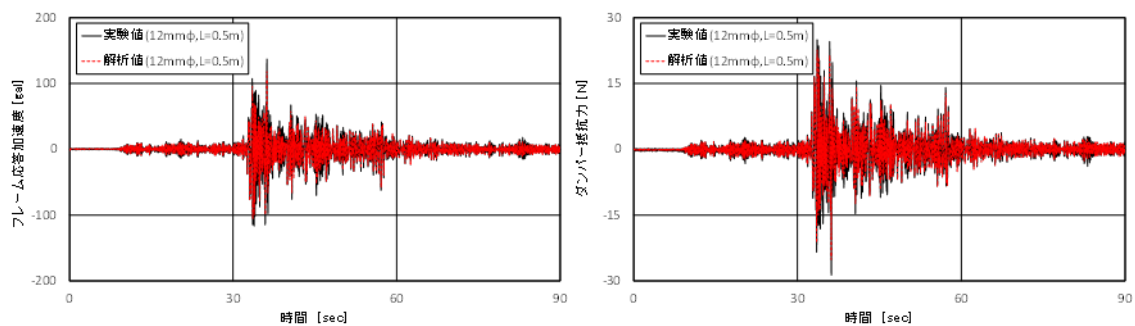
これらの結果、質量効果による固有振動数の減少と連結管内の液体の運動に伴う内圧抵抗による応答倍率の低減を、ここで提案した解析により比較的精度よく再現できることが確認された。また、変位 - 慣性力履歴ループ、変位 - 抵抗力履歴ループも比較的精度よく再現されており、振動数が高くなるほど剛性が小さくなる傾向も表現できていることが確認された。

次に、第3章の地震波加振試験で得られた結果と解析結果の比較を行う。解析で使用した入力地震波は、地震波加振試験で得られた振動台加速度データを用いた。代表的な例として Case9 (内径 12mm ϕ 、長さ 0.5m) について、解析による結果を実験結果と比較したものを図 4.13～図 4.15 に示す。また、地震波加振ごとに実験結果と解析結果で最大応答値を比較したものを表 4.3～表 4.5 に示す。



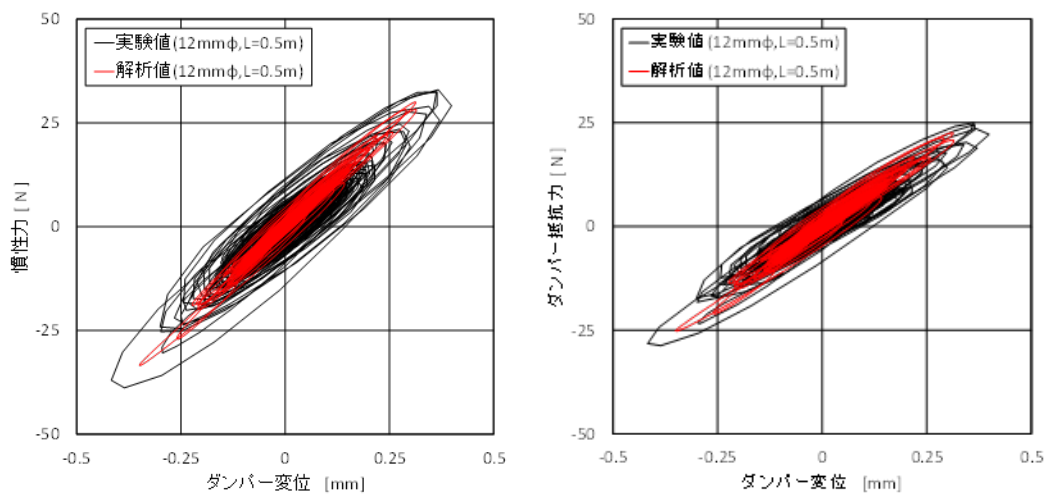
(a) 時刻歴波形：振動台加速度

(b) 時刻歴波形：フレーム相対変位



(c) 時刻歴波形：フレーム応答加速度

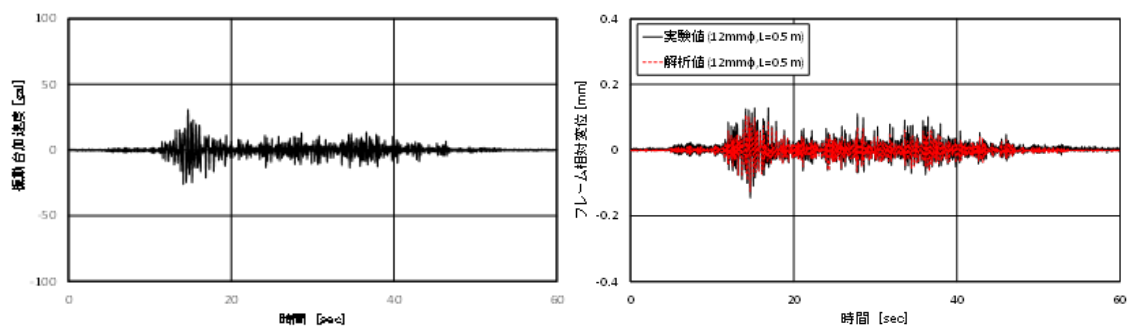
(d) 時刻歴波形：ダンパー抵抗力



(e) 変位 - 慣性力履歴ループ

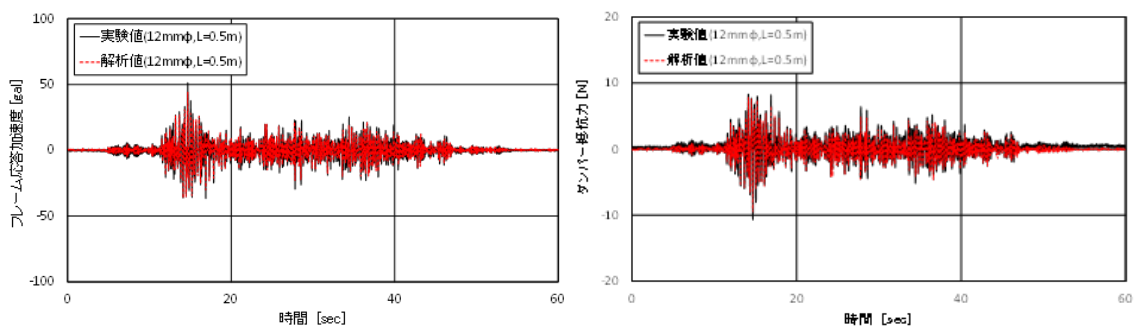
(f) 変位 - 抵抗力履歴ループ

図 4.13 解析結果と実験結果の比較 (El Centro NS 波, Case9)



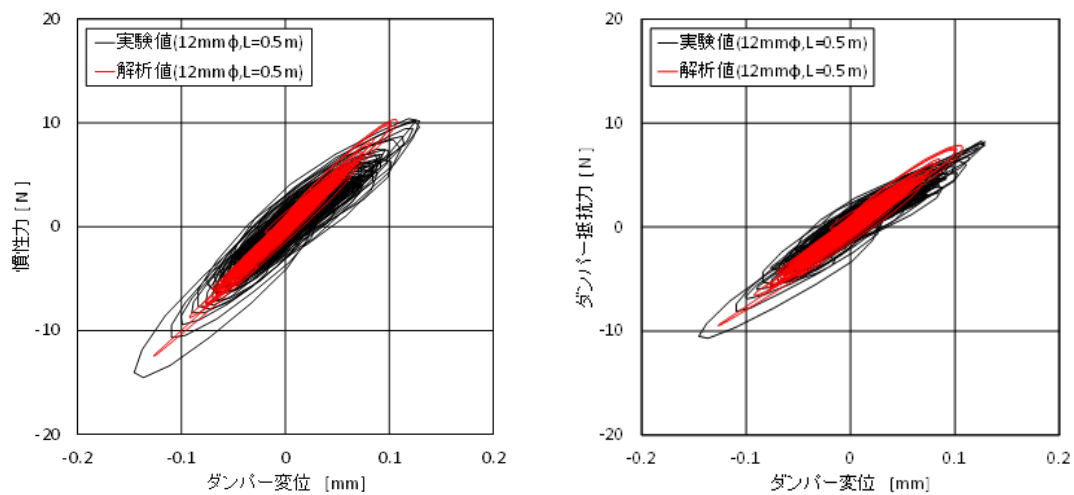
(a) 時刻歴波形：振動台加速度

(b) 時刻歴波形：フレーム相対変位



(c) 時刻歴波形：フレーム応答加速度

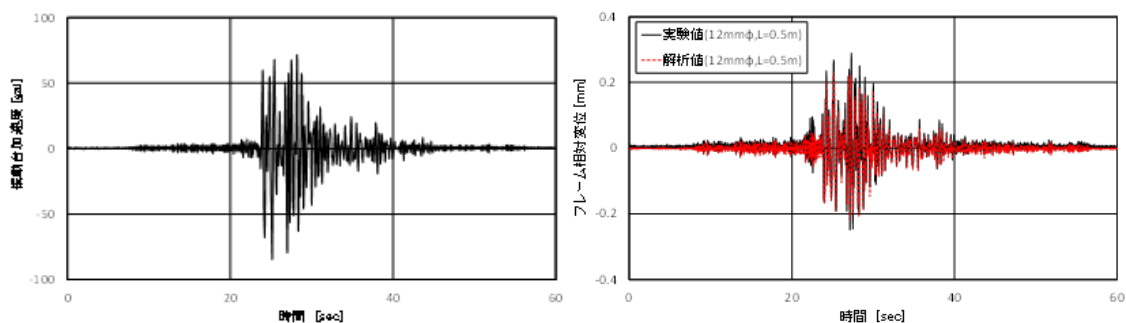
(d) 時刻歴波形：ダンパー抵抗力



(e) 変位 - 慣性力履歴ループ

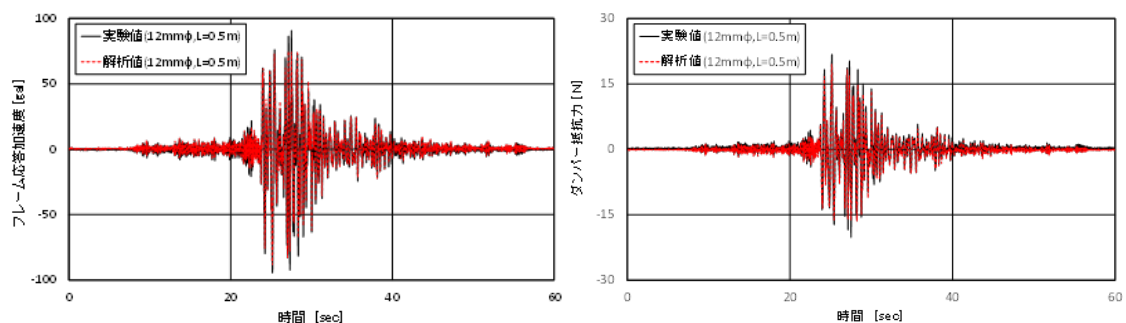
(f) 変位 - 抵抗力履歴ループ

図 4.14 解析結果と実験結果の比較 (八戸 EW 波, Case9)



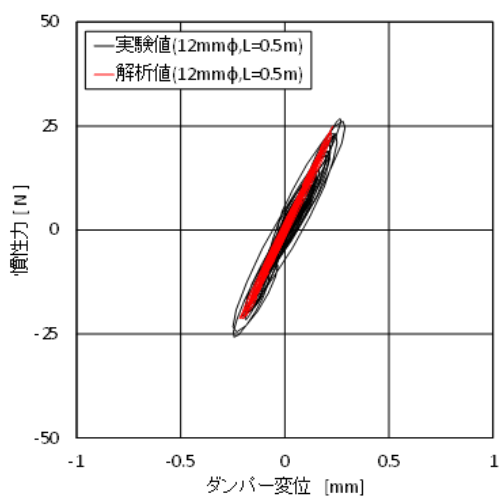
(a) 時刻歴波形：振動台加速度

(b) 時刻歴波形：フレーム相対変位

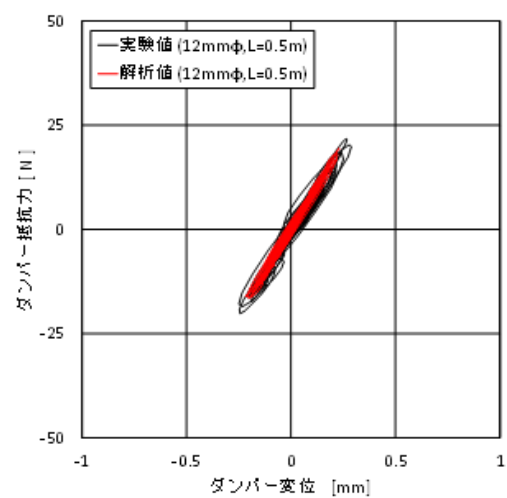


(c) 時刻歴波形：フレーム応答加速度

(d) 時刻歴波形：ダンパー抵抗力



(e) 変位 - 慣性力履歴ループ



(f) 変位 - 抵抗力履歴ループ

図 4.15 解析結果と実験結果の比較 (神戸 NS 波, Case9)

表 4.3 地震波加振試験結果と解析の比較 (El Centro NS 波)

試験体 ケース	加振 レベル	最大応答加速度 [gal]		最大応答変位 [mm]		ダンパー抵抗力 [N]		加速度 応答倍率	
		実験値	解析値	実験値	解析値	実験値	解析値	実験値	解析値
Case3	小	34.2	37.8	0.13	0.12	7.0	7.8	1.39	1.54
	中	63.1	65.3	0.23	0.22	13.4	13.5	1.21	1.26
	大	97.6	96.0	0.35	0.32	21.0	19.8	1.17	1.15
Case4	小	32.8	32.9	0.14	0.12	7.5	6.5	1.35	1.35
	中	60.4	60.5	0.25	0.24	13.4	12.3	1.19	1.20
	大	95.5	91.3	0.35	0.35	20.5	19.3	1.18	1.13
Case5	小	35.4	26.1	0.14	0.14	9.3	5.6	1.42	1.04
	中	55.1	51.6	0.27	0.23	16.1	11.1	1.09	1.02
	大	89.8	80.7	0.36	0.34	23.9	17.7	1.13	1.01
Case6	小	46.6	37.6	0.17	0.11	9.6	8.0	1.99	1.61
	中	77.0	69.3	0.27	0.21	16.0	14.6	1.51	1.36
	大	95.0	101.4	0.39	0.31	22.9	21.6	1.16	1.24
Case7	小	36.0	38.9	0.15	0.14	7.6	7.8	1.40	1.51
	中	68.0	65.1	0.25	0.23	13.6	13.1	1.37	1.31
	大	101.0	95.7	0.36	0.34	21.7	19.2	1.27	1.20
Case8	小	31.5	31.8	0.16	0.14	7.3	6.0	1.35	1.36
	中	59.2	60.6	0.25	0.27	13.5	12.2	1.11	1.34
	大	91.5	89.2	0.35	0.41	21.6	19.6	1.06	1.04
Case9	小	41.7	41.2	0.14	0.12	9.5	8.8	1.73	1.71
	中	86.0	74.3	0.26	0.22	18.1	15.8	1.69	1.46
	大	137.3	118.3	0.42	0.35	28.7	25.2	1.68	1.45
Case10	小	43.6	41.2	0.17	0.14	8.9	8.5	1.74	1.64
	中	78.8	73.2	0.26	0.24	16.1	15.0	1.56	1.45
	大	116.7	105.2	0.41	0.35	23.6	21.6	1.44	1.30
Case11	小	38.1	32.9	0.16	0.12	7.5	6.5	1.53	1.32
	中	71.7	61.8	0.32	0.23	13.4	12.8	1.40	1.21
	大	107.9	96.1	0.46	0.34	20.9	20.1	1.33	1.18

表 4.4 地震波加振試験結果と解析の比較（八戸 EW 波）

試験体 ケース	加振 レベル	最大応答加速度 [gal]		最大応答変位 [mm]		ダンパー抵抗力 [N]		加速度 応答倍率	
		実験値	解析値	実験値	解析値	実験値	解析値	実験値	解析値
Case3	小	11.2	11.7	0.06	0.04	2.7	2.5	1.18	1.23
	中	29.1	24.9	0.12	0.08	5.8	5.3	1.53	1.31
	大	44.2	37.5	0.16	0.11	9.0	8.0	1.46	1.24
Case4	小	11.4	11.3	0.06	0.05	2.3	2.3	1.33	1.31
	中	22.9	27.5	0.11	0.12	5.4	5.4	1.06	1.27
	大	33.1	40.7	0.14	0.16	8.1	8.2	1.04	1.28
Case5	小	10.3	7.9	0.04	0.05	2.7	1.9	1.18	0.91
	中	24.0	21.2	0.11	0.12	5.4	4.5	1.20	1.06
	大	35.4	31.8	0.15	0.17	7.9	7.0	1.13	1.01
Case6	小	12.4	10.5	0.04	0.03	2.3	2.3	1.59	1.35
	中	25.9	28.2	0.09	0.08	5.5	6.1	1.21	1.32
	大	39.6	42.6	0.14	0.12	8.6	9.2	1.20	1.29
Case7	小	10.8	9.7	0.04	0.04	2.4	2.0	1.35	1.21
	中	26.2	27.5	0.09	0.09	5.9	5.7	1.27	1.33
	大	40.7	41.3	0.14	0.13	8.9	8.7	1.25	1.27
Case8	小	9.5	11.6	0.06	0.05	2.2	2.3	1.07	1.30
	中	24.0	23.3	0.11	0.10	5.0	4.6	1.23	1.19
	大	35.5	34.1	0.15	0.14	7.8	6.7	1.18	1.13
Case9	小	11.3	11.5	0.03	0.03	2.5	2.5	1.27	1.29
	中	33.8	28.8	0.10	0.09	7.0	6.1	1.60	1.36
	大	51.4	44.1	0.15	0.13	10.7	9.5	1.66	1.43
Case10	小	11.9	10.7	0.05	0.03	2.4	2.3	1.57	1.41
	中	33.2	25.3	0.11	0.07	6.9	5.4	1.68	1.28
	大	44.0	36.6	0.16	0.11	9.3	7.8	1.54	1.28
Case11	小	13.2	10.4	0.06	0.05	2.5	2.1	1.53	1.21
	中	25.9	29.8	0.13	0.12	5.0	5.8	1.23	1.41
	大	38.9	43.9	0.18	0.17	7.4	8.6	1.28	1.44

表 4.5 地震波加振試験結果と解析の比較（神戸 NS 波）

試験体 ケース	加振 レベル	最大応答加速度 [gal]		最大応答変位 [mm]		ダンパー抵抗力 [N]		加速度 応答倍率	
		実験値	解析値	実験値	解析値	実験値	解析値	実験値	解析値
Case3	小	30.8	26.5	0.12	0.08	6.4	5.7	1.32	1.13
	中	58.3	57.3	0.20	0.16	12.9	12.5	1.10	1.08
	大	94.3	92.4	0.29	0.25	21.0	20.2	1.11	1.09
Case4	小	27.2	28.2	0.09	0.10	5.7	5.7	1.20	1.24
	中	57.7	56.6	0.18	0.19	13.5	12.2	1.09	1.07
	大	88.6	90.5	0.29	0.28	20.1	19.7	1.04	1.06
Case5	小	27.3	27.2	0.14	0.11	5.5	5.1	1.22	1.22
	中	56.5	53.7	0.27	0.22	13.3	12.1	1.04	0.99
	大	88.4	83.7	0.37	0.32	20.3	19.1	1.04	0.98
Case6	小	27.0	29.7	0.10	0.09	6.0	6.4	1.15	1.26
	中	60.1	53.7	0.19	0.14	13.6	11.9	1.16	1.03
	大	97.1	88.2	0.28	0.24	21.7	19.4	1.17	1.06
Case7	小	29.3	29.2	0.10	0.09	6.5	6.1	1.25	1.25
	中	61.2	60.7	0.18	0.18	13.2	13.0	1.16	1.15
	大	95.0	99.0	0.29	0.29	21.4	21.2	1.11	1.16
Case8	小	27.7	26.4	0.10	0.09	5.8	5.5	1.19	1.13
	中	57.2	55.4	0.22	0.18	13.1	12.3	1.05	1.02
	大	90.6	89.7	0.32	0.29	20.7	19.8	1.04	1.03
Case9	小	33.7	32.8	0.10	0.10	7.5	7.0	1.45	1.41
	中	60.3	56.3	0.19	0.15	13.5	12.4	1.14	1.06
	大	94.6	88.3	0.29	0.23	21.8	19.5	1.12	1.04
Case10	小	28.6	25.3	0.11	0.07	6.4	5.4	1.20	1.06
	中	69.1	55.9	0.22	0.16	15.1	12.1	1.34	1.08
	大	109.2	92.1	0.34	0.25	23.6	20.0	1.30	1.09
Case11	小	27.1	28.3	0.10	0.10	5.7	5.7	1.27	1.32
	中	61.1	61.8	0.20	0.19	13.6	13.2	1.11	1.12
	大	94.6	98.3	0.30	0.31	21.3	21.0	1.07	1.11

これらの結果、解析で得られた各応答波形は、地震波加振試験結果で得られた波形を比較的精度よく再現していることが確認された。また、変位 - 慣性力履歴ループ、変位 - 抵抗力履歴ループの解析結果は、実験結果の履歴ループよりも小さいループを描くが、全体的にループの形状を正しく再現していることが確認された。解析で得られた各最大値は、実験で得られた各最大値よりも小さい値を示す傾向がみられた。

第5章 結論

5.1 本論文での成果

5.2 今後の検討課題

参考文献

謝辞

第 5 章 結論

5.1 本論文での成果

これまでに筆者らが実施してきた、2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震で被災した宮城県内の学校建物の被害調査により、躯体に被害がない場合であっても、建物内部の設備機器や天井材の落下などの被害により建物機能が失われ、地震後の継続的使用が困難になった事例が多数あることを確認した。そこで、本論文では、建物の機能維持も担保する新たな制振システムとして「慣性質量効果を有する液流ダンパー」を提案し、本システムの実建物への適用の可能性を探ることを目的として、実験と解析の両面からその有効性について明らかにした。

以下に本論文の各章で得られた内容を要約し、結論とする。

第 2 章「慣性質量効果を有する液流ダンパーの抵抗力特性」では、ダンパーの発揮する抵抗力と慣性質量効果の特性を把握することを目的として、ダンパー単体による正弦波加振試験の結果を示すとともに、得られた結果に基づき、その履歴特性を再現する力学モデルを構築した。

加振試験結果から、液漏れを防ぐために充填したシール材の抵抗力は、加振振幅および加振振動数の変化に対して抵抗力履歴ループの傾きがほぼ一定であること、また、加振振動数が増加すると履歴ループは細い楕円形を示し、ごくわずかなエネルギー吸収能力を有することを確認した。シリンダー内に液体を封入した場合の抵抗力履歴ループは、加振振動数が低い領域ではシール材による抵抗力の割合が大きく、連結管形状の違いにかかわらず内圧による抵抗力がほとんど発生しないため、ほぼ弾性の履歴を描くことを確認した。これに対し、加振振動数が高い領域では、連結管の長さが長くなるほど、また、内径が小さくなるほど連結管内の内圧抵抗が増大し、履歴ループの描く面積も大きくなることを確認した。さらに、高振動数の加振に対して増大する質量効果により、抵抗力および内圧差履歴ループの傾きが小さくなったが、その傾きの減少の程度は連結管の形状に依存し、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結果となった。

加振試験により得られた結果に基づき、ダンパーの抵抗力特性を再現する力学モデルを作成した。内圧抵抗は流路形状が急激に変化する急縮小部と急拡大部、連結管内の 3 箇所が生じるものと考え、それぞれを既往の理論式と実験結果に基づき算出した管内摩擦の実験式から求める手法を提案した。シール材の抵抗力は、ばね要素とダッシュポット要素を並列に結合した Kelvin 固体モデルを採用し、ループの傾きと形状の再現を試みた。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ことから、ダンパーを組み込んだ 1 質点振動系モデルの力学的原理により、その効果は連結管内の液体質量に対して β^2 倍に増幅すると仮定した。構築した力学モデルによる解析の結果を試験結果と比較した場合、実験値にみられた履歴ループの歪みを十分に再現することはできなかったものの、その特性や最大値等について概ね良い一致を示すこ

とを確認した。

第3章「1層制振フレームの振動台加振試験」では、ダンパーを組み込んだ1層縮小フレーム試験体による振動台加振試験を行って得られた結果に基づき、ダンパーが発揮する応答低減効果および質量効果がフレームの応答特性に与える影響について検証した。

正弦波加振試験の結果、シリンダー内に液体を封入したダンパーを組み込むことにより、質量効果によってフレームの固有振動数が小さくなることを確認した。また、共振点における応答倍率は、連結管内の液体の運動に伴う内圧抵抗により低減することなどを確認した。

加振試験で得られた変位 - 慣性力関係、変位 - 抵抗力関係において、フレームに液体が封入されたダンパーが組み込まれた場合、加振振動数が高くなるほど、また、同じ加振条件下では連結管が長いほど質量効果が大きくなるため、フレームの見掛け上の水平剛性が小さくなる傾向を示した。ダンパー付きフレームは、シール材のばね作用により剛性が大きくなるが、質量効果が作用することによりフレーム全体の剛性が小さくなることを確認した。

地震波加振試験の結果、振動特性の異なる各観測地震波に対し、ダンパーを組み込むことによりフレームの応答が低減したことから、ダンパーによる応答抑制効果を確認した。応答スペクトルを用いてダンパーの発揮する抵抗力と質量効果がフレームの応答低減に与える影響について検証した結果、ダンパーの発揮する減衰力は連結管形状に依存し、概ね連結管が長いほど、また、内径が細いほど大きくなることを確認した。さらに、実験結果から推定した値を用いて、質量効果による振動特性の変化がフレームの応答に与える影響について確認した。その結果、フレームに付加されるダンパーの減衰力が大きいこと、これに加え入力地震動に対して各ケースの固有周期が短周期領域にあることから、その効果を十分に確認できなかった。しかしながら、応答スペクトルを用いることにより想定した入力地震動に対するフレームの応答予測が可能であることを示した。

第4章「制振フレームの振動応答解析」では、第2章で構築したダンパーの力学モデルを適用した振動応答解析プログラムを作成し、第3章で得られた振動台加振試験結果と、作成したプログラムによるシミュレーション結果との比較を行い、解析手法の妥当性についての検討を行った。

シミュレーションの結果と正弦波加振試験結果を比較すると、得られた共振曲線において解析結果はダンパーが発揮する抵抗力による応答倍率の減少と、質量効果に起因する固有振動数の変化を比較的精度良く再現できることを確認した。また、作成した解析プログラムの結果は、振動数が高くなるほど質量効果によって剛性が小さくなる傾向を正しくとらえており、実験で得られた変位 - 慣性力履歴ループ、変位 - 抵抗力履歴ループについても比較的精度よく再現した。

シミュレーション結果と地震波加振試験結果を比較した場合、シミュレーション結果は実験値に対して過大評価する傾向を示したものの、各地震波加振試験結果で得られた波形を概ね再現できることを確認した。また、変位 - 慣性力履歴ループ、変位 - 抵抗力履歴ループは実験結果の履歴ループよりも小さいループを描いたが、全体的にループの形状を正しくとらえられることがわかった。

以上の結果より、考案した慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた 1 層フレーム試験体の振動応答特性が、ダンパー単体による加振試験、1 層フレーム試験体による振動台加振試験と時刻歴応答解析により明らかとなり、得られた知見から実建物への適用の可能性を示すことができたと思われる。

5.2 今後の検討課題

本ダンパーを実用化するための今後の検討課題について示す。

本論では、ダンパーの基本的な抵抗力特性の把握を目的としたことから、シリンダー内に充填する液体は、扱いが容易で温度依存性の小さい水道水を用いた。より効率の良い応答抑制効果を得るためには、粘度や密度の高い液体を用いて内圧抵抗や質量効果を増大させることが考えられる。

また、ダンパー単体の加振試験において、シリンダー内に液体を封入したダンパーの抵抗力履歴ループの形状に歪みが見られた。これは連結管内を高速で往復運動することによって生じる液流の乱れの度合いに依存するものと考えられる。効率の良い、かつ安定した履歴特性を得るためには、使用する液体の種類や連結管に使用する素材や形状などについて検討する必要がある。

ここで構築した数値解析プログラムにより、ダンパーの働きによる応答倍率の減少と固有振動数の変化を比較的精度良く再現できることを確認したものの、連結管が長いほど、また、連結管内径が小さいほど実験値と解析値の差が大きくなる傾向を示すことが明らかとなった。その要因として、高い内圧によってシール材が外側にはらみだすような変形が生じ、その結果、実際にピストンとシール材が押し出す液体の量が、本論で定義した有効半径により算出した結果と差異が生じたためと考えられ、より高い精度で解析を行うためには、シール材による変形がもたらす影響を考慮した力学モデルを再構築する必要があると思われる。

参考文献

第1章

- 1) 柴田明德：最新耐震構造解析第3版，森北出版，1981
- 2) 日本建築学会：東日本大震災合同調査報告書（建築編1 鉄筋コンクリート造建築物），丸善出版，2015.5
- 3) 畑中友：東北地方太平洋沖地震における耐震診断および耐震改修の有効性と使用不可建物の被害分析，東北工業大学大学院平成25年度修士学位論文，2014.3
- 4) 畑中友，鈴木敦司，藤田智己，船木尚己：東北地方太平洋沖地震における学校建物の機能被害とその要因分析，コンクリート工学年次大会2014，Vol.36，pp.961-966，2014.7
- 5) 小堀鐸二：制振構造－理論と実際－，鹿島出版，1993.9
- 6) 清水建設免制振研究会：耐震・免震・制震のわかる本，彰国社，2000.2
- 7) 寺本隆幸：耐震・免震・制振構造の位置づけ，建築雑誌，Vol.112，No.1414，1997.11
- 8) 北村春幸：制振構造の基本，建築技術，2016年5月号，pp.82-85
- 9) 日本免震構造教会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル，2003.10
- 10) 山本鎮男，永井雄一，川田叡治：振り子とてこ作用を応用した球形タンクの免震装置，圧力技術，第13巻，第5号，pp.11-19，1975
- 11) 藤波健剛，山本鎮男：振り子とてこ機構を付与した動吸振器による制振，日本機械学会論文集（C編），57巻，538号，pp.52-57，1991.6
- 12) 新垣忠志，黒田栄二，有馬文昭，井上豊，馬場研介：ボールネジを用いた制震装置の開発（その1 制震チューブ・制震ディスクの性能試験），日本建築学会技術報告集，第8号，pp.239-244，1999.6
- 13) 新垣忠志，黒田栄二，有馬文昭，井上豊，馬場研介：ボールネジを用いた制震装置の開発（その2 制震チューブの減衰性能とその評価法），日本建築学会技術報告集，第9号，pp.265-270，1999.12
- 14) 曾田五月也，田中義輝，瀬戸純平，谷敬成：流体の慣性質量を利用したパッシブ負剛性ダンパに関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，21419，pp.837-838，2012.9
- 15) 曾田五月也，渡井一樹，瀬戸純平，矢島遥：リンク式流体慣性ダンパの高性能化に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，21404，pp.807-808，2014.9
- 16) 井上範夫，五十子幸樹：建築物の変位制御設計 地震に対する免震・長周期建物の設計法，丸善出版株式会社，2012.12
- 17) 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
- 18) 川股重也，米田護，半谷裕彦，金沢京子：耐震ダンパーに関する研究 - 第2報 起振実験および振動台実験 - ，生産研究，第25巻，第11号，pp.499-503，1973.11
- 19) 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

- 20) 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 2) 起振実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2231, pp.859-860, 1973.10
- 21) 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
- 22) 守研二, 川股重也, 阿部良洋, 大沼正昭: 乱流ダンパーによる構造物の振動制御 その (2) 1 質点系における制振効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2357, pp.713-714, 1993.9
- 23) 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
- 24) 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
- 25) 康在完, 船木尚己, 川股重也: 乱流ダンパーを用いた実大制振試験建屋の振動応答解析, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.48B, pp.531-536, 2002.3

第 2 章

- 1) 田古里哲夫, 荒川忠一: 流体力学, 東京大学出版会, 1989.5
- 2) W.フリューゲ (堀幸夫訳): 粘弾性学, 固体のシリーズ 1, 培風館, 1973
- 3) 船木尚己: 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特性, 東北工業大学大学院平成 10 年度博士学位論文, 1999.3
- 4) 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, 第 78 号, pp.41-44, 2015.6
- 5) 畑中友, 船木尚己: 慣性質量効果を有する液流ダンパーの抵抗力特性 (その 1) ダンパー単体の加振試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21338, pp.675-676, 2015.9
- 6) 船木尚己, 畑中友: 慣性質量効果を有する液流ダンパーの抵抗力特性 (その 2) 抵抗則の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21339, pp.677-678, 2015.9

第 3 章

- 1) 船木尚己: 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特性, 東北工業大学大学院平成 10 年度博士学位論文, 1999.3
- 2) 船木尚己, 畑中友: 慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた 1 層制振フレームの振動応答特性 (その 1) フレーム試験体の振動台加振試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21130, pp.259-260, 2016.8

第 4 章

- 1) 船木尚己：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特性，東北工業大学大学院平成 10 年度博士学位論文，1999.3
- 2) 畑中友，船木尚己：慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた 1 層制振フレームの振動応答特性（その 2）時刻歴応答解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，21131，pp.261-262，2016.8

謝辞

本論文は、筆者が東北工業大学大学院工学研究科建築学専攻博士（後期）課程に在籍中の研究成果をまとめたものです。東北工業大学准教授船木尚己先生には、学部、大学院を通して6年半にわたりご指導いただきました。本研究に取り組むにあたり、船木先生には終始変わらぬ丁寧なご指導と多方面にわたる有意義なアドバイスをいただただけでなく、研究に取り組みやすい環境を整えていただきました。心より厚く御礼申し上げます。

東北工業大学教授薛松濤先生には、大学院博士（前期）課程1年次から指導教員としてご指導いただき、博士論文では主査として本論文をまとめるにあたり、貴重なご意見をいただきました。心より感謝申し上げます。

東北工業大学教授大沼正昭先生、同教授堀則男先生には、博士論文の副査として本論文をまとめるにあたり、貴重なご意見をいただきました。心より感謝申し上げます。

仙台高等専門学校准教授藤田智己先生には、研究に対しての指導、アドバイスだけでなく、船木研究室、大学院の先輩として、多方面にわたり大変貴重なご助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

NK PLANNING 大本義直氏には、惜しみない激励と、多方面に渡る貴重なアドバイスをいただきました。心より感謝申し上げます。

東北工業大学客員研究員澁谷陽氏には、大学院生活を送る上で大学院の先輩として公私にわたり貴重なご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

本論文の実験を行うにあたり、船木研究室の多くの後輩に協力いただきました。心より感謝いたします。

最後に、筆者のわがまを許し、大学、大学院と長い間暖かく応援し、支えてくれた家族に心から感謝いたします。

2017年3月

畑中 友