

履歴減衰型・粘性減衰型ダンパー複合制振構造の性能確認実験

星野 昭雄* 翁 幸久*
 小山 傑*

要 旨

本報告は複合制振構造における履歴減衰型と粘性減衰型ダンパーの特徴を生かした、効果的な設定方法に関する基礎的研究を行ったものであり、履歴減衰型として低降伏点鋼材ダンパー、粘性減衰型としてオイルダンパーをフレーム内に併用した試験体に対して性能確認実験を実施した。実験結果および解析的検討より、特に、以下の項目を抽出した。

複合制振構造の動特性を把握する上で必要となる等価剛性(周期)や等価粘性減衰定数に関して、モデル化と実構造での差異及び留意事項について。

実構造物設計時の基礎資料とすべく、異なる特性を有するダンパーの負担荷重が周辺架構に与える影響について。

1. はじめに

近年、制振装置として履歴減衰型と粘性減衰型、あるいは粘弾性ダンパーなどを併用した複合制振構造が実施されている。研究レベルでは、異なる特性のダンパーを併用した場合の構造物の動特性や応答低減効果の定量的な評価を試みた研究¹⁾²⁾がなされているが、実施設計における各ダンパーの設定は経験的に行われているのが実情のようである。本報告は、複合制振構造における各ダンパーの効果的な設定方法に関する基礎的研究を行ったものであり、強風などに対する小振幅時の居住性向上としてオイルダンパーを、大規模地震など大振幅時の構造的な性能向上のために鋼材ダンパーを設置した併用構造の性能確認実験を実施した。2. 章では実験計画と結果概要について、3. 章ではモデル化と実構造での差異及び留意事項について、4. 章では異なる特性を有するダンパーの負担荷重が周辺架構に与える影響について報告する。

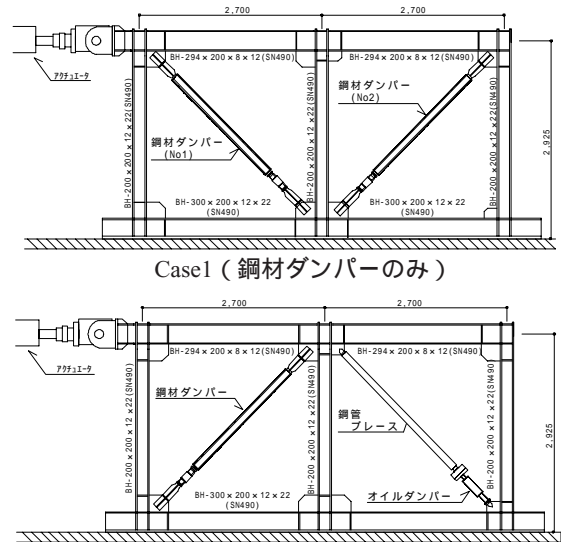


図 - 1 試験体概要

2. 実験計画と結果概要

本章では試験体における各ダンパーの設定方法や、結果の概要について述べる。

2. 1 試験体概要

本実験では、履歴減衰型として角形鋼管で補剛した座屈拘束型の低降伏点鋼材ダンパーを、粘性減衰型としてはオイルダンパーを用い、いずれもフレーム内にブレース状に配置した。Case1は鋼材ダンパーのみで構成、Case2はオイルダンパー併用した試験体であり、高層建物(弾性1次固有周期2sec程度)の中間層を集約してモデル化したものである。図-1に試験体の概要を、写真-1にCase2の試験体を示す。なお、フレームは兼用している。

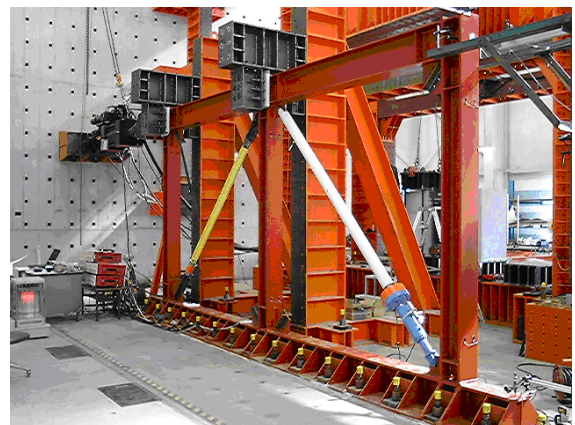


写真 - 1 Case2 試験体

* 技術研究所

2.2 ダンパーの設計方法

2.2.1 ダンパー諸元

各ダンパーの設計方法について述べる。

Case1の鋼材ダンパーは、ダンパーとフレームの水平剛性比を2:1とし、層間変形角1/250において等価粘性減衰定数(以下heqとする)がほぼ最大となるように降伏耐力を設定。

Case2のオイルダンパーは、微小振幅レベルでのheqが約0.03となるよう一次減衰係数を設定。

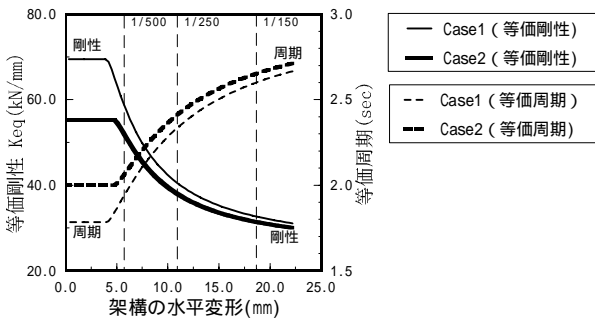
Case2の鋼材ダンパーの降伏耐力はオイルダンパーとの併用で層間変形角1/250においてheqの値がCase1のそれと同等となるように設定。

一般的に鋼材ダンパー設計の際に用いられる最適値(加速度・変位応答低減率などの評価)によるのではなく、架構の性能として「ある変形レベル」における「heq」を既定することにより各ダンパーの設計を行っている。

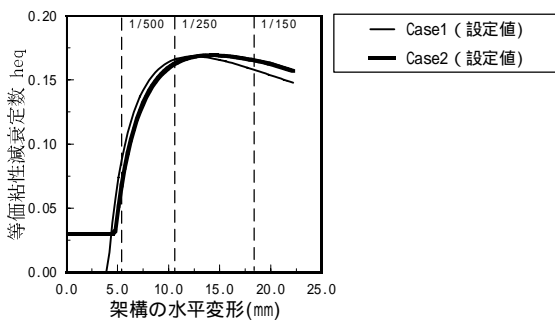
なお、フレームは層間変形角1/100まで弾性範囲内であるように設計している。

実建物において鋼材ダンパーとオイルダンパーを併用することで、鋼材ダンパーのみ設置した場合に対して、強風などに対する微小振幅時の居住性を向上する剛性増加による入力増大や加速度応答を抑制する。鋼材ダンパーの性能発揮や外乱の非正常性による応答変動を小さくする。

以上の効果を付加することを目的としている。



(a) 等価剛性 Keq と 等価周期 Teq



(b) 等価粘性減衰定数 heq

図 - 2 等価剛性と等価粘性減衰定数 (設定値)

表 - 1 ダンパー諸元

実験ケース	ダンパー	鋼種	幅×板厚(軸材)	降伏耐力計算値 Py (kN)
Case1	鋼材ダンパー	LY235	49.7mm×12.0mm	131.2
Case2	鋼材ダンパー	LY235	81.0mm×12.0mm	213.8
		減衰係数 (kN・sec/mm)		最大減衰力 (kN)
	オイルダンパー	一次勾配	二次勾配	110.3
		2.45	0.187	

Pyは静的引張試験結果の0.2%off-set応力度220kN/mm²を鋼材の降伏応力度として用い算出したオイルダンパーの各値は設計特性下限値 リリフ速度36mm/sec.

ダンパーの諸元を表 - 1 に、試験体の各水平変形における等価剛性 (以下 Keq)、仮定した等価周期(以下 Teq) と heq を図 - 2 に示す。Keq、heq は鋼材ダンパーの降伏耐力と復元力特性 (ひずみ硬化を考慮した簡易バイリニア) オイルダンパーの減衰係数、線材モデルより算出したフレーム水平剛性をを用い、最小自乗近似による等価線形化手法により概算したものである (設定値と呼称する)。

2.2.2 応答低減率

Case1、Case2の性能を、ダンパーなしの架構に対する加速度応答、変位応答の低減率で表すと図 - 3 のようになる。記号 (●、○) は入力地震動をBCJ-L2とした非線形系の時刻歴応答解析より算出した値、実線は式 - 1 の提案式³⁾より算出した値である。

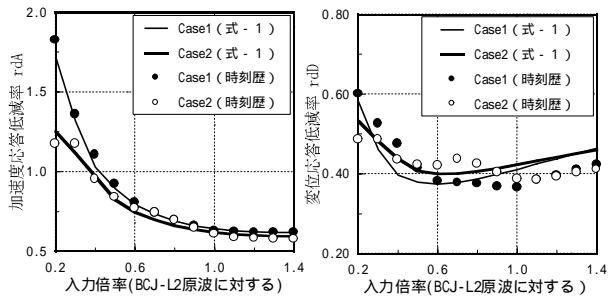


図 - 3 加速度・変位応答低減率

$$Dh = \sqrt{(1+25ho)/(1+25 \times (heq + ho))}$$

$$rdA = Dh \times (To/Teq)$$

$$rdD = Dh \times (Teq/To)$$

式 - 1

To: フレームのみの周期 ho: フレームの内部減衰(0.02)

rdA: 加速度応答低減率 rdD: 変位応答低減率

低減率はダンパーなし架構の応答に対する比率。

周期によらず擬似速度応答スペクトルが一定

Teq と heq は前述した設定値を用いており、提案式で定義されているものとは異なる。

式 - 1 より算出した値と時刻歴応答解析による値は、変位に関しては若干差がみられるが、よく対応している。加速度応答低減率に関して、Case2はCase1に対していずれの入力レベルでも優位である。変位応答低減率に関しては小さい入力レベルにおいては優位であるが、それ以降は同等か若干下回る傾向があることがわかる。

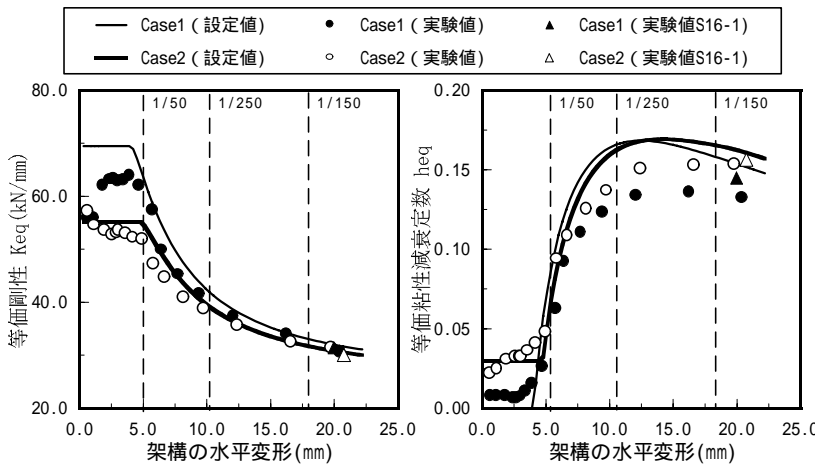


図 - 4 等価剛性と等価粘性減衰定数 (実験値と設定値の比較)

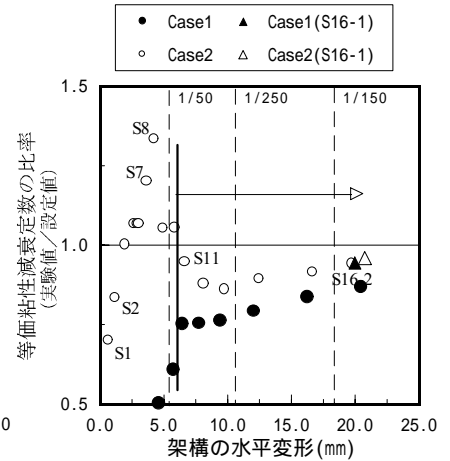


図 - 5 実験値と設定値の比率 (等価粘性減衰定数に関して)

2.3 加振方法

加振方法としては動的アクチュエータにより正弦波強制変位を与えた。加振スケジュールを表 - 2 に示す。与えた変位振幅(アクチュエータのストローク)は0.9mm ~ 22mm であり、加振は漸増繰返しではなく各振幅ごとに加振を終了した。表 - 2 に示すように、S1 S10、S16-1、S11 S16-2と途中最大振幅を経験後、再度中振幅から大振幅までの加振を行った。

表 - 2 加振スケジュール

加振名	S1	S2	S5	S6	S7	S9	S10	S16-1	
水平変位(mm)	0.9			3.6			6.9	22.2	
層間変形角	1/3086			1/771			1/402	1/125	
加振周波数 f(Hz)	Case1	0.5Hz						Case2	
	Case2	0.5Hz						0.377	
加振名	S11	S12	S13	S14	S15	S16-2			
水平変位(mm)	7.8	9.3	11.1	14.1	18.6	22.2			
層間変形角	1/356	1/299	1/250	1/197	1/149	1/125			
加振周波数 f(Hz)	Case1	0.5Hz							
	Case2	0.455	0.435	0.417	0.400	0.385	0.377		

2.4 実験結果の概要

実験から得られた架構のKeqとheqを図 - 4 に、実験値と設定値との比率を図 - 5 に示す。図 - 4 の実線は上述した設定値であり、記号で記したものが実験値である。実験値はアクチュエータの加振力と変位振幅の測定値を用い最小自乗法によりKeqと等価減衰係数Ceqを算出した。なお、heqは表 - 2 に示す加振周波数fを用い式 - 2 により算出した。

$$heq = \pi \times f \times Ceq / Keq \quad \text{式 - 2}$$

図 - 4 よりKeqと比較しheqは一部設定値との差が大きいところが見られる。図 - 5 のCase2に関してS1、S2といった小振幅レベル、S7、S8といった鋼材ダンパーの弾性・塑性の境界近傍で20 ~ 30%と差が大きくなっている。また、矢印で図示したS11以降で評価した場合、Case1

と比較しCase2の実験値は設定値に対する変動が若干小さいことがわかる。

図 - 6 にCase2のS16-2加振における等価線形化した加振力 - 水平変形の履歴図を示す。等価粘性減衰定数で約0.13という大きな履歴型減衰を有する非線形の復元力特性を精度よく等価線形化できていることがわかる。

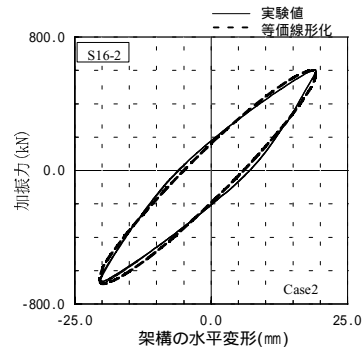


図 - 6 履歴図 (実験値と等価線形化)

本章では実験計画と結果の概要を述べた。試験体設計時に性能設定した等価粘性減衰定数に関して実験値と比較的大きな差があるが、その差異に関する要因は次章で述べる。

3. 動特性の評価

本章では、実験結果の考察を行い、適切な数値解析モデルを用いることによって実験時のダンパー単体および架構全体の動特性を評価できることを示す。

3.1 実験結果の考察

図 - 7 は、ダンパー負担力と架構の水平変形の履歴を描いたもので、試験体設計時に設定した値(2.章参照)と実験値とを比較している。図中、太実線で示す履歴が実験値であり、細実線は設定値を示す。

図 - 7 (a)(b)により、微小振幅時のエネルギー吸収を主目的としたオイルダンパーは、設定値とほぼ同等の減衰力を発揮しているのがわかる。しかしながら、減衰力が正負反転する近傍で実験値は、若干の勾配を持ったスリップをしている。この影響で、履歴面積で表されるエネルギー吸収量は、設定値に対して60%~80%程度に低下していることがわかる。また、図 - 7 (c)に示すように、小振幅時の鋼材ダンパーにおいてもこの傾向は同様である。

図 - 7 (d)~(f)に示す中・大振幅時の鋼材ダンパーに関しては、安定した復元力特性は維持されているものの、バイリニアである設定値に対して、実験値はなだらかな曲線を有する特性がある。この曲線部分においてエネルギー吸収量が大幅に低下しており、設定値の60%~80%程度の値となっている。

図 - 7 (g)(h)からは、中・大振幅時のオイルダンパーに関しては、設定値とほぼ同等な減衰力・エネルギー吸収性を発揮しているのがわかる。

3.2 等価粘性減衰定数 heq の差異

各ダンパー負担力が正負反転する際に見られるスリップは、オイルダンパー取付け軸受部と鋼材ダンパー端部に設置したロードセルなどに付随するメカニカルギャップによるものと思われる。 heq の設定値と実験値の小振幅時の差異については、このメカニカルギャップによる履歴面積の減少が支配的であると考えられる。

また、鋼材ダンパーの履歴に見られる曲線部分は、鋼材

のパウシinger効果などによる軟化現象であると推測される。 heq の中・大振幅時の設定値と実験値の差異は、設計時に仮定した復元力特性と、履歴軟化部を有する実験値の復元力特性の違いによるものである。

なお、この軟化現象は、正弦波による繰返し加振、および最大振幅(S16-1)を経験させた後、再び中振幅から大振幅への加振を行う実験スケジュールによって、顕著となったと考えられる。

3.3 等価剛性の差異

等価剛性に関しての設定値と実験値との差は、上述したメカニカルギャップ、および取付け部の剛性評価に起因するものであると思われる。

3.4 数値解析モデル

実験時のダンパーおよび架構の動特性を評価し得る適切な数値解析モデルの作成を意図し次のようなモデル化を行った。

架構は線材モデルとし、鋼材ダンパーはダンパー部 K_{DS} と取付け部 K_{TS} の直列バネ、オイルダンパーはダッシュポット C_{DO} とバネ K_{TO} を直列としモデル化した。解析モデルの概念図を図 - 8に示す。ここで、前述した設定値と実験値の差の要因を反映させるため、

オイルダンパーと鋼材ダンパーの取付け部のバネは、メカニカルギャップを考慮した非線形バネとした。鋼材ダンパー部の復元力特性のモデル化は、S10まではバイリニアモデル、S11以降は軟化域を評価するためにRamberg-Osgoodモデルを簡易的に用いた(Ramberg指

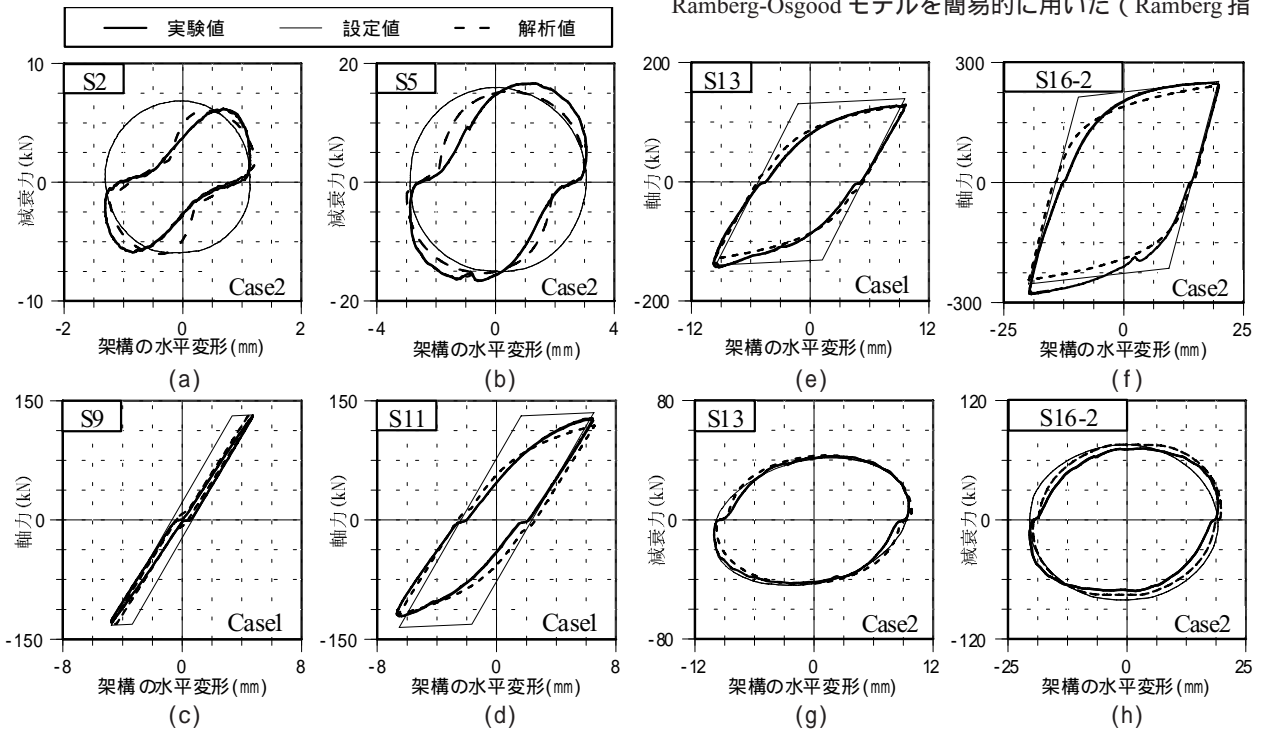


図 - 7 ダンパー負担力と水平変形の履歴図

数・係数は、Case1、Case2ともに、各振幅にわたって同一値を固定して採用した。

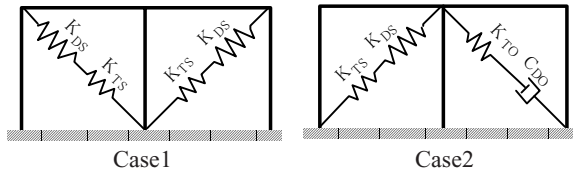


図 - 8 数値解析モデルの概念図

3.5 解析結果と実験結果の比較

数値解析モデルによる解析結果を、図 - 7 に鎖線で示す。図 - 9 には加振力と架構水平変形の履歴を示す。

これらの図から、メカニカルギャップおよび鋼材ダンパーの履歴軟化部を考慮したモデル化により、解析値と実験値はよく対応していることがわかる。但し、図 - 7 (e)(f)において、+側(引張側)の最大負担力がほぼ一致しているのに対し、-側(圧縮側)の最大負担力が実験値の方が若干大きめに出現していることがわかる。図 - 9 においても同様であり、これは今回の数値解析モデルには反映していない、鋼材ダンパーにおける補剛鋼管と低降伏点軸材の間で発生する摩擦力の影響と思われる。なお、Case2の方が差が大きめに出現するのは、Case2で用いている鋼材ダンパーがCase1に対して、約2倍程度大きい断面を採用していることによるものと思われる。

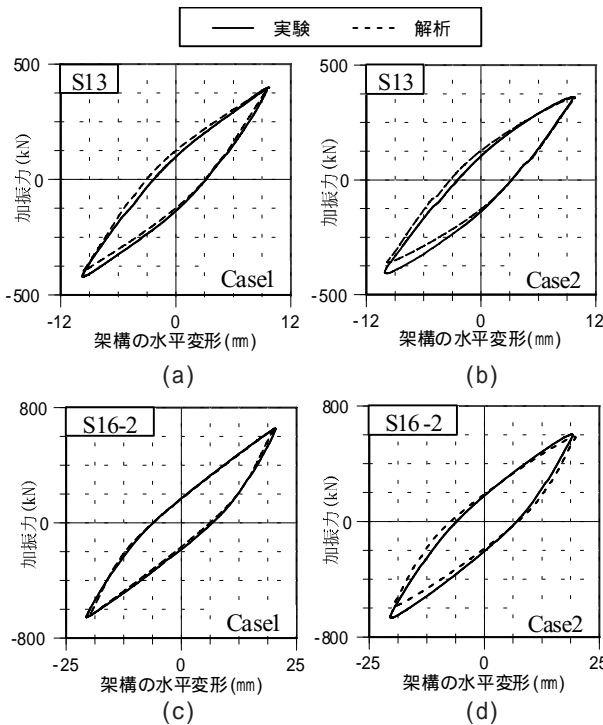


図 - 9 加振力と水平変形の履歴図

図 - 10 には、等価剛性 K_{eq} について、解析値と実験値を併せてプロットした。図 - 10 (b)のCase2で多少の差が見られるのは、上述した摩擦力の存在により、実験値の剛性が高めに出現しているためと考えられる。

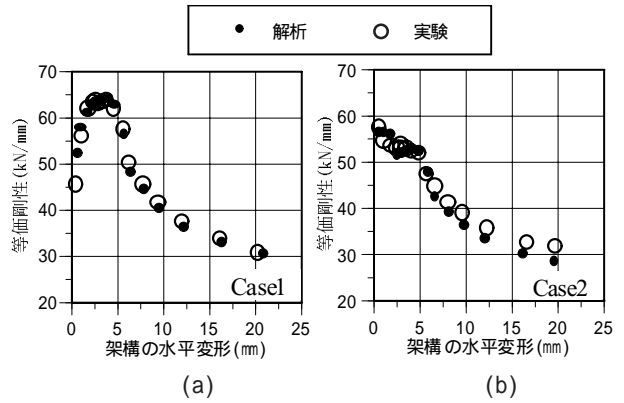


図 - 10 等価剛性 K_{eq}

図 - 11 に示すのは等価粘性減衰定数 heq の解析値と実験値である。Case1の水平変形6mm前後で差異が見られるが、解析値はよく実験値と対応していることがわかる。

なお、水平変形6mm前後は、鋼材ダンパー軸材の弾性・塑性境界近傍であり、鋼材の降伏耐力のパラッキなどを要因とする設定値との差は、ダンパーの剛性比が高い(Case1)ほど大きく出やすくなると考えられる。

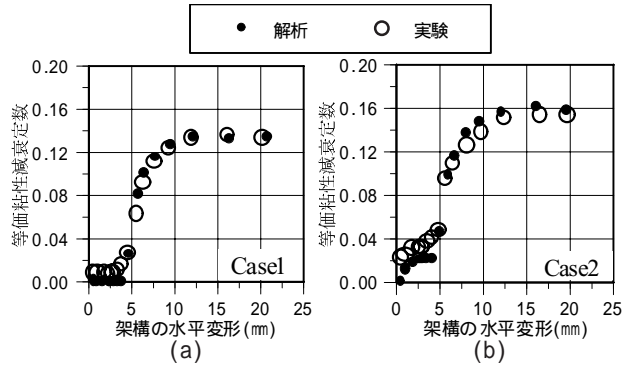


図 - 11 等価粘性減衰定数 heq

本章では、適切な数値解析モデルを作成することにより、実験時の動特性を評価できることを示した。モデル化と実構造の差異について考察を行い、以下の事項を得た。

- ・ダンパーの取付け軸受部などのメカニカルギャップはダンパーのエネルギー吸収量を減少させる原因となり、微小振幅レベルほど、期待されるダンパーの性能に対する影響は大きくなる。
- ・鋼材ダンパーの軸材の降伏変形近傍では、精度良い動特性の評価は困難であり、不確定要素を多く含むことに留意する必要がある。

4. ダンパー負担荷重が周辺架構に及ぼす影響

制振要素を組み込んだ建物を設計する場合、一般的には制振部材の最大負担荷重を周辺架構に働く付加荷重として構造安全性を確認する。しかし異種ダンパーが周辺架構に作用する荷重は、それぞれのダンパーが負担する荷重に位相差が存在するため、単に両者の最大荷重を累加することは実際の性状にそぐわないと考えられる。

本章では、静的解析値と実験から求めた部材の最大応力とを比較することにより、ダンパーが周辺架構に及ぼす影響について確認した。

4.1 実験結果

図 - 12 に歪みゲージ値より求めた中柱軸力、ロードセルより測定した鋼材ダンパーとオイルダンパーの負担荷重の中柱の軸方向力換算値を示す。鋼材ダンパー負担荷重による中柱軸力がオイルダンパーの負担荷重との位相差により相殺、累加される様子がわかる。

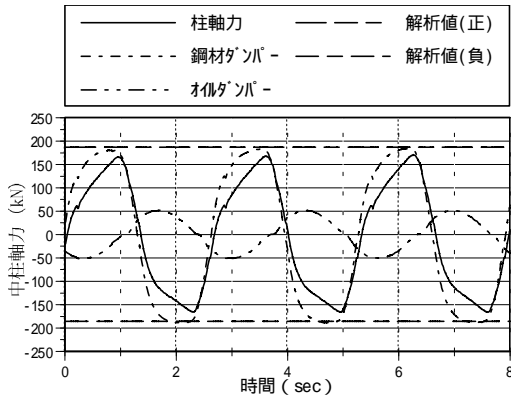


図 - 12 中柱軸力変動 (Case2 S16-2)

4.2 解析方法

2次元弾性応力解析プログラムを使用した。オイルダンパーおよび鋼材ダンパーの最大負担荷重を、線材モデルとしたフレームの節点追加荷重として、アクチュエータの最大加振力を外力として作用させた。両ダンパーの負担荷重を考慮したケースとオイルダンパーを考慮しない2ケースで応力解析を行った。

4.3 解析結果との比較

表 - 3 に示すように本実験においてはオイルダンパーを考慮しない方が実験値とよく対応する。ここで興味深

表 - 3 中柱応力解析値と実験値との比較

	解析値		実験値
	オイルダンパ - 考慮	オイルダンパ - 考慮なし (鋼材ダンパーのみ)	
N(kN)	251	187	176
M(kN・m)	190	175	174
Q(kN)	184	170	168

いのは図 - 12にも示されるよう、鋼材ダンパーのみの最大荷重値より実際の柱軸力の最大荷重が低下していることである。これはオイルダンパーの取付けブレースが剛性をもつことによる位相差の影響であると考えられる。実構造において鋼材ダンパーのみの最大荷重値よりどの程度累加あるいは低減されるかは、各ダンパー特性、外乱の非正常性などによるため、定量的な評価は難しいが今後の課題としたい。

5. まとめ

モデル化と実構造との差異や留意事項の抽出を主目的に複合制震構造の性能確認実験を行った。本報では、適切なモデル化により実構造の挙動を評価できることを確認し、以下の事項を得た。

オイルダンパーの性能をより微小振幅レベルから十分に発揮させるには、取付け部の機構を含む設置方法が重要であり、また性能評価の際にはメカニカルギャップなどの影響を考慮する必要がある。

鋼材ダンパーの軸材の降伏変形近傍では、精度良い動特性の評価は現状困難であり、この変形レベル付近で構造性能クライテリアなどを設定した場合には、その評価に注意を要する。

中柱応力に関して、鋼材ダンパーとオイルダンパーの負担荷重に位相差があるため、鋼材ダンパー負担荷重のみによる最大応力値よりも実際の応力値が低減される可能性がある。

[謝辞]

本実験に際しご協力頂きました、日本鋼管株式会社:廣田実氏、下川弘海氏、カヤバ工業株式会社:関係各位様にお礼申し上げます。

[参考文献]

- 1)石丸 辰治他「パッシブ型制震振構造物の動特性と応答予測 (その1、その2)」-1998年日本建築学会大会学術講演梗概集
- 2)小野、黄、和田「履歴ダンパーと粘性ダンパーを組込んだ高層建物の動的性質」-1996年日本建築学会大会学術講演梗概集
- 3)渡辺 厚「等価線形化手法」-1996年11月日本建築学会 (動的外乱に対する設計の展望)