

1. はじめに

近年多くの建物に制振装置が適用されるが¹⁾、実建物における制振効果は未だ明確に評価されていない。そのため、2009年にE-Defenseにて「実大5層制振建物振動実験」(建物実験)が行われ、4種制振ダンパーを付加した実大建物での貴重な記録が多数得られた(図1)²⁾。その後、ダンパーの詳細検討を目的として「ダンパー1軸動的加振実験」(装置実験)が行われ、支持部材の変位記録等が詳細に得られた(図2)。本報では、装置実験で得た記録に基づき、粘性・オイルダンパーが持つ特有の性状を定量的に評価する。その上で、設計で重要となる制振建物の層せん断力を適切に評価する手法を示す。

2. ダンパー概要

粘性ダンパーは、ダンパー力が速度の指数乗に比例する非線形粘性ダンパーである。オイルダンパーはダンパー力と速度が線形関係となるが、リリース弁を有するために大振幅ではバイリニア型の履歴となる。充填剤が粘性と剛性をもつため、粘性・オイルダンパー共に図3(a)のように非線形の粘性要素と線形の剛性要素を直列に繋いだ非線形Maxwell体で表される。ここに、 C_d , K_d =内部粘性と内部剛性、 u_d , u_m =粘性要素変形とダンパー変形、 F_d =ダンパー力、 α =指数係数、

表1 粘性ダンパー規格値

	C_d	α	K_d (kN/mm)
①	425kN	49	∞
②	850kN	98	∞
③	1700kN	196	∞

※① D1-3F, D1-4F, D2-3F, D2-4F
 ② D1-1F, D1-2F, D2-1F, D2-2F, D3-3F, D3-4F
 ③ D3-1F, D3-2F

表2 オイルダンパー規格値

	C_d	p	K_d (kN/mm)
①	250kN	3.1	75
②	500kN	6.3	140
③	1000kN	12.5	300
④	1500kN	18.8	430

※① D1-4F, D2-4F リリース速度=64 mm/s
 ② D1-2F, D1-3F, D2-2F, D2-3F, D3-4F
 ③ D1-1F, D2-1F, D3-2F, D3-3F
 ④ D3-1F

$p=2$ 次粘性比である。両ダンパーの履歴を図3(b),(c)に示すが、 K_d の存在ゆえに傾いた履歴となり、 u_{d0} は $F_d=0$ となる時の u_m 、 K_d は F_d が最大となる点の割線剛性となる。 F_d は粘性部速度 \dot{u}_d によって決まり、粘性ダンパーは式(1)、オイルダンパーは式(2)で表される^{3),4)}。

$$F_d = C_d |\dot{u}_d|^\alpha \cdot \text{sgn}(\dot{u}_d) \quad (\text{リリース前}) \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_d = C_d \dot{u}_d \\ F_d = C_d \dot{u}_{dy} + p C_d (\dot{u}_d - \dot{u}_{dy}) \end{cases} \quad (\text{リリース後}) \quad (2a,b)$$

$$u_m = u_d + F_d / K_d \quad (3)$$

ここに、 \dot{u}_{dy} はリリース速度である。以後、「0」が付くものは最大値、「^」が付くものは建物実験でのダンパー軸方向の値を意味する。両ダンパーの規格値を表1,2に示すが、本実験から得た値を後述する。

3. 粘性ダンパーの性能の検討

本章では過去に得た様々な理論式を用いるが、それらは特記無き限り文献3に基づいた式である。

装置実験では、建物実験を模擬した鷹取波載加に加え、様々な振動数、振幅の正弦波載加を行ったが、以後正弦波(周波数 $f=1, 2, 3\text{Hz}$ 、目標 $u_m=0.5, 1.0, 3.0, 6.0, 12.0, 24.0, 36.0\text{mm}$)と、鷹取波(15%, 50%, 100%)載加を検討対象とする。なお、ダンパー最大速度(50kine)を超える組み合わせは対象としない。また、全ての検討をD1-1Fダンパーのみに言及するが、他のダンパーでも同様の傾向が得られた。

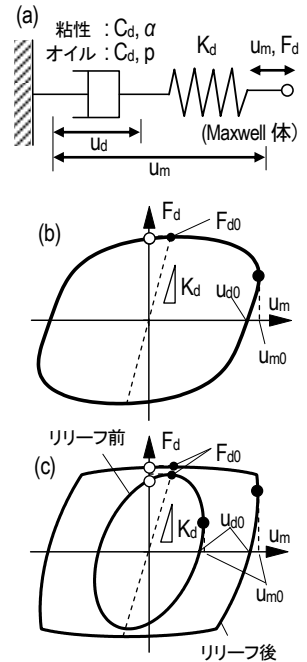


図3 (a)ダンパーモデル詳細図、(b)粘性ダンパー履歴図、(c)オイルダンパー履歴図

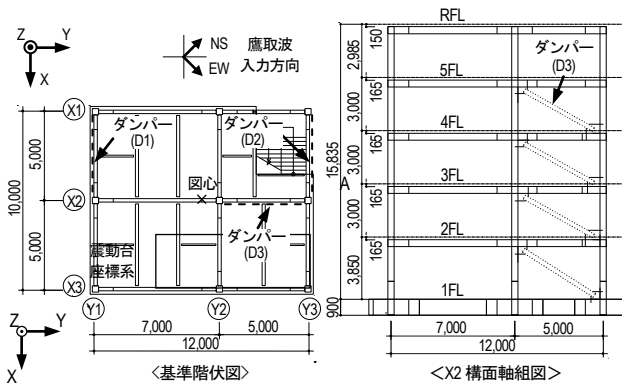


図1 建物実験の試験体概要

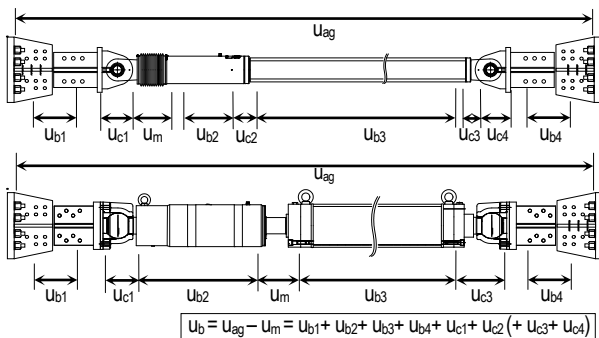


図2 装置実験計測図(上段:粘性ダンパー、下段:オイルダンパー)

3.1 粘性要素の振幅依存性の考察

図4に正弦波載加での F_d-u_m 関係の実験値を示すが、特に小振幅において $\alpha = 1$ の線形粘性ダンパーの履歴に近い楕円挙動となった。確認のため、規格値(表1)を諸元としてダンパーモデル(図3(a))で解析を行ったが、特に小振幅で実験結果を精度良く再現できなかった。以上の背景から、粘性要素である C_d, α は振幅依存すると考え、その定量的な評価を行う。なお、ここでは K_d も評価の対象とした。

正弦波載加の F_d-u_m 関係履歴から $F_{d0}, u_{d0}, u_{m0}, E_d$ が得られるので(図3(b)), C_d, α, K_d は次式で求まる³⁾。ここに、 $E_d=1$ サイクルでのエネルギー吸収量である。

$$\alpha = -\frac{1}{0.24} \log \left(\frac{E_d}{4F_{d0}u_{d0}} \right), \quad C_d = \frac{F_{d0}}{(\omega u_{d0})^\alpha}$$

$$K_d = \frac{C_d \omega^\alpha}{u_{d0}^{1-\alpha}} \left[\left(\frac{u_{m0}}{u_{d0}} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} - 1 \right]^{1+\alpha} \quad (4a-c)$$

求めた C_d, α, K_d の精度検証のため、正弦波載加で得た u_m を入力波としてダンパーモデル(図3(a))にて解析を行った。図4に実験との比較、図5に C_d, α, K_d と u_{d0} の関係を示す。解析により実験を高精度に再現でき、 C_d, α の振幅依存性を確認した。図5より C_d-u_{d0} 関係は1次関数を、 $\alpha-u_{d0}$ 関係は対数関数を関係式としたが、この関係が鷹取波載加で適応可能か後述する。

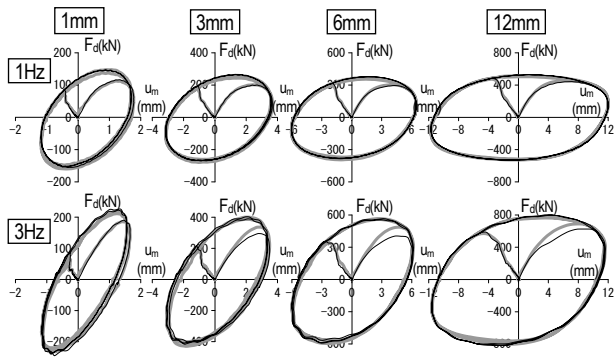


図4 正弦波入力における F_d-u_m 関係履歴の実験と解析の比較(粘性ダンパー)

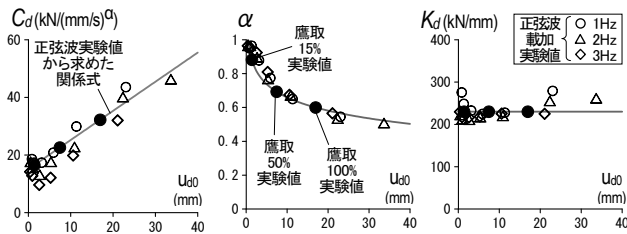


図5 装置実験から求めた C_d, α, K_d と u_{d0} の関係(粘性ダンパー)

3.2 ガタが減衰効果に及ぼす影響の考察

粘性ダンパーのピン接合部にはガタが存在することを装置実験より確認したが、この影響により減衰効果を低下させる可能性がある。ここでは、ガタの存在が及ぼす影響を定量的に評価する。

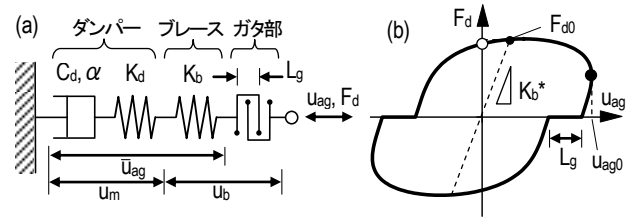


図6 付加系モデル(ガタを考慮した)の (a) モデル詳細図、(b) 定常状態での F_d-u_{aq} 関係の模式図(粘性ダンパー)

ガタを考慮したダンパー全体を表す付加系モデルを図6(a)に、定常状態での履歴を図6(b)に示す。ここに、 K_b =ブレース剛性、 \bar{u}_{ag} =ガタを除く付加系変形、 L_g =ガタ長さ、 $K_b^* = K_d$ と K_b の直列体剛性である。なお、粘性ダンパーの K_b は引張、圧縮側で異なり、それぞれ $K_b^{(+)}, K_b^{(-)}$ とするが、以後 K_b はこれらの平均を表す。

定常状態においてガタのない理想状態よりガタ長さだけダンパー変形量が減少すると考えれば、 u_{d0}, E_d は次式の如く表せる³⁾。

$$u_{d0} = \frac{1 + (\alpha^{0.65} - 1) \left(\frac{K_d}{K_b^*} \right)^{0.5\alpha} \bar{u}_{ag0} \geq 0, \quad K_d = \frac{C_d \omega^\alpha}{\bar{u}_{ag0}^{1-\alpha}}$$

$$E_d = 4e^{-0.24\alpha} C_d \omega^\alpha u_{d0}^{1+\alpha} \quad \bar{u}_{ag0} = u_{ag0} - \frac{L_g}{2} \quad (5a-d)$$

上式より、任意の u_{ag0} に対して定常状態での u_{d0}, E_d を算出できる。なお、 C_d, α, K_d は図5に示す関係式から、 K_b, L_g は図7に示す手法で算出した。図8(a)に付加系変形に対する粘性変形の比(実効変形比)、図8(b)に E_d の計算と実験の比較を示すが、ガタを考慮した計算が実験とほぼ一致した。図8(a)より大振幅でガタの有無に関わらず実効変形比が高いが、小振幅ではガタのない理想状態でも低下し、ガタがある場合さらに低下する。また、その傾向は高振動数ほど顕著である。図8(c)より、振動数に関わらず低振幅でエネルギー吸収量が著しく低下する傾向が分かる。

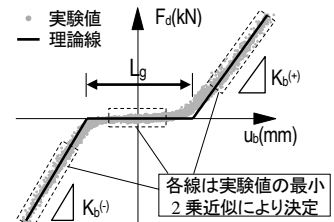


図7 ブレース剛性、ガタ長さの決定法(粘性ダンパー)

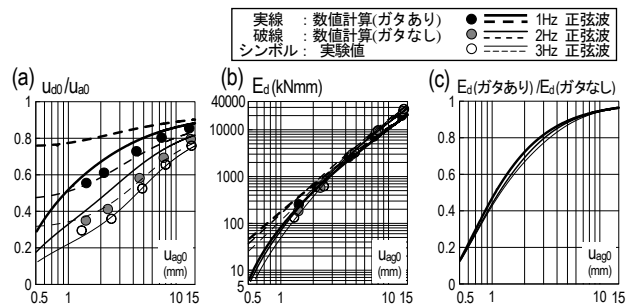


図8 正弦波入力での (a) 粘性変形比、(b) 履歴エネルギー吸収量、(c) エネルギー吸収比の数値計算、解析の比較(粘性ダンパー)

3.3 鷹取波解析による評価の妥当性の検証

本節では鷹取波載加での解析で精度検証を行う。鷹取波はランダム波である為、図5に示した関係式により C_d, α, K_d を決定するには u_{d0} が必要だが、粘性変形最大値を u_{d0} とすることで近似的に関係式を適用できるとした(図5の黒丸)。表3に決定した値を示す。

まず、装置実験で得た u_m を入力とし図3(a)に示したダンパーモデルでの解析を行う。表3に示した実験値に加え、規格値でも解析を用い、併せて実験結果と比較を行う。結果を図9に示すが、規格値での解析に対し実験値による解析精度が非常に高い。 F_{d0}, E_d の実験値に対する解析値の比を表3に示したが、規格値を用いても正確な評価ができないことは明らかである。

次に、装置実験で得た u_{ag} を入力とし図6(a)に示した付加系モデルでの解析も行った。図示しないが、実験値による解析により精度良く実験を再現できた。

表3 鷹取波入力での解析モデルの諸元と解析結果(粘性ダンパー)

鷹取波	正弦波載加から決定した値								解析(規格値)/実験結果		解析(実験値)/実験結果	
	C_d	規格値との比	α	規格値との比	K_d	$K_b^{(+)}$	$K_b^{(-)}$	L_g	F_{d0}	E_d	F_{d0}	E_d
15%	16.5	0.17	0.88	2.32	230	206	257	0.64	2.15	3.81	1.03	0.96
50%	22.6	0.23	0.69	1.82					1.27	1.88	0.97	0.98
100%	32.2	0.33	0.60	1.58					1.11	1.46	1.02	1.02

※ C_d の単位は $\text{kN}/(\text{mm/s})^2$, $K_b, K_b^{(+)}, K_b^{(-)}$ の単位は kN/mm , L_g の単位は mm である。

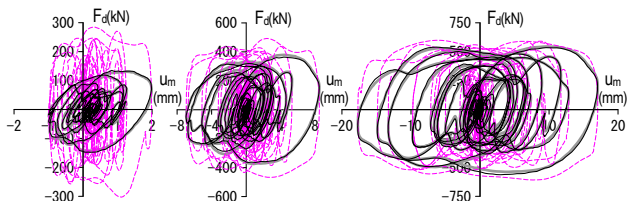


図9 鷹取波入力における F_d - u_m 関係履歴の実験と解析の比較(粘性ダンパー、左から鷹取15%, 50%, 100%)

4. オイルダンパーの性能の検証

本章では過去に得た様々な理論式を用いるが、それらは特記無き限り文献4に基づいた式である。

検討対象とした載加は粘性ダンパーと同様だが、ダンパー最大速度(30kine)を超えるものは対象としない。また、全検討をD1-1Fダンパーのみに言及するが、他のダンパーでも同様の傾向を得た。

4.1 粘性要素の速度依存性の考察

規格値(表2)を諸元としてダンパーモデル(図3(c))で解析を行ったところ、特に小振幅で実験結果を精度良く再現できなかった。そこで、 C_d, K_d を実験から得る手法を示し、その精度検証を行う。なお、 p, \dot{u}_{dy} は規格値を用いたが、これら規格値を用いた解析により実験を精度良く評価できたことを先に述べる。

正弦波載加の F_d - u_m 関係履歴から F_{d0}, u_{d0}, u_{m0} が得られるので(図3(c))、次式により C_d, K_d が求まる⁴⁾。なお、リリーフ時は F_d の変化が小さく K_d を評価しにくいので、リリーフ前後で K_d は一定であるとし、リ

リーフ前の平均をリリーフ後の K_d とした。

$$C_d = \frac{F_{d0}}{\omega u_{d0}}, \quad K_d = \frac{C_d \omega}{\sqrt{(u_{m0}/u_{d0})^2 - 1}} \quad (\text{リリーフ前})$$

$$C_d = \frac{F_{d0}}{\dot{u}_{dy} + p(\omega u_{d0} - \dot{u}_{dy})} \quad (\text{リリーフ後}) \quad (6a-c)$$

以上にして求めた C_d, K_d の精度検証のため、実験で得た u_m を入力としてダンパーモデル(図3(a))で解析を行い、実験結果との比較を行った。図10にそれらの比較、図11に C_d, K_d と粘性部速度 \dot{u}_{d0} ($= \omega u_{d0}$) の関係を示す。解析により実験を再現でき、約2kine以下で C_d が小さくなることを確認した。

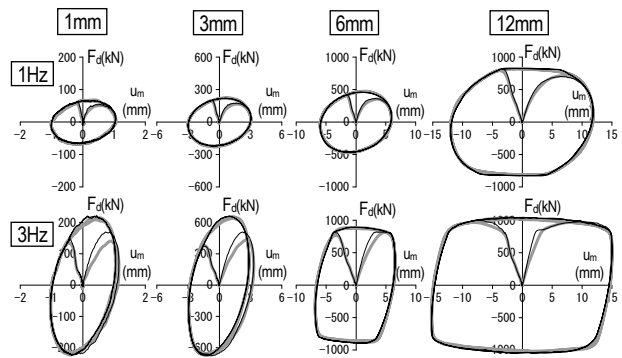


図10 正弦波入力における F_d - u_m 関係履歴の実験と解析の比較(オイルダンパー)

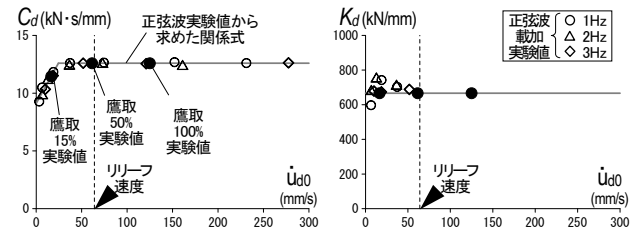


図11 装置実験から求めた C_d, K_d と \dot{u}_{d0} の関係(オイルダンパー)

4.2 数値計算によるダンパー性能の検証

以上示した性状に基づき、計算によりダンパー性能の検証を行う。まず、 u_{ag0} は次式の如く表せる⁴⁾。

$$u_{ag0} = \sqrt{1 + \lambda^2} \cdot u_{d0}, \quad \lambda = \frac{C_d \omega}{K_b} \quad (\text{リリーフ前})$$

$$u_{ag0} = \frac{\mu_a}{\mu_d} \sqrt{1 + \lambda^2} \cdot u_{d0} \quad (\text{リリーフ後}) \quad (7a-c)$$

ここに、 μ_d はリリーフ率、 μ_a は付加系リリーフ率である⁴⁾。また、 E_d は次式で表される⁴⁾。

$$E_d = \pi C_d \omega u_{d0}^2 \quad (\text{リリーフ前})$$

$$E_d = \left[1 + \frac{2(1-p)}{\pi} \left\{ \frac{\sqrt{\mu_d^2 - 1}}{\mu_d^2} - \cos^{-1} \left(\frac{1}{\mu_d} \right) \right\} \right] \pi C_d \omega u_{d0}^2 \quad (\text{リリーフ後}) \quad (8a-c)$$

式(2),(7),(8)より任意の u_{d0} に対して定常状態での u_{ag0}, F_{d0}, E_d が算出できる。図12に \dot{u}_{d0} ($= \omega u_{d0}$) に対する実効変形比、 F_{d0}, E_d の計算と実験の比較を示すが、計算で実験値を評価できた。図12(a)より、低振動数ほど実効変形比が高く、リリーフ速度以上または低速

度領域で実効変形比が増加する傾向が確認できる。また、図 12(b),(c)より、リリース速度以上で F_{d0} , E_d が相対的に増加しにくい傾向も評価できた。

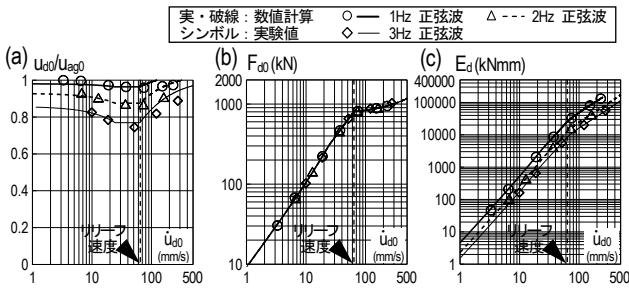


図 12 正弦波入力での (a) 粘性変形比、(b) 最大ダンパー力、(c) 履歴エネルギー吸収量の数値計算、実験の比較 (オイルダンパー)

4.3 鷹取波解析による評価の妥当性の検証

本節では鷹取波入力による解析で検証を行う。鷹取波はランダム波であるため、図 11 に示した関係式を用いて C_d , K_d を決定するには \dot{u}_{d0} が必要である。そこで、次式で示すダンパー速度を \dot{u}_{d0} とすることで、近似的に関係式を適用できるとした (図 11 の黒丸)。

$$\dot{u}_{d0} = 0.7u_{d0}\omega, \quad \omega = 2\pi/T \quad (9a,b)$$

ここに、 T = 制振試験体の 1 次周期である。0.7 を掛けたのは、ランダム波であることを考慮するための低減係数であり、これにより 15% 鷹取波での解析精度が向上した。表 4 に決定した値を示す。

実験で得た u_m を入力とし、図 3(a) に示したダンパーモデルでの解析を行う。表 4 に示した実験値に加え、規格値でも解析を用い、実験結果と比較を行う。結果を図 13 に示すが、規格値での解析に対し実験値での解析精度が高い。また、 F_{d0} , E_d の実験結果に対する解析の比を表 4 に示すが、実験値での解析のほうがより正確に近いことも確認できる。

表 4 鷹取波入力での解析モデルの諸元と解析結果 (オイルダンパー)

鷹取波	正弦波加から決定した値				解析(規格値) / 実験結果		解析(実験値) / 実験結果	
	C_d	規格値との比	K_d	K_b	F_{d0}	E_d	F_{d0}	E_d
15%	11.46	0.917	667	501	1.015	1.066	0.996	1.044
50%	12.59	1.008			0.936	0.926	1.010	1.037
100%	12.59	1.008			0.992	0.923	1.002	1.012

※ C_d の単位は $\text{kN}/(\text{mm/s})$, K_d , K_b の単位は kN/mm であり、 $p=0.067$, $u_b=64\text{mm/s}$ である。

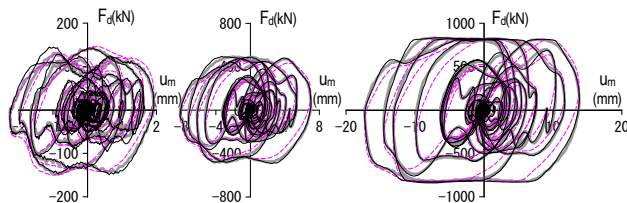


図 13 鷹取波入力における F_d - u_m 関係履歴の実験と解析の比較 (オイルダンパー、左から鷹取 15%, 50%, 100%)

5. 制振建物の最大層せん断力の予測法

ダンパー性能の新たな知見をもとに、制振建物でのダンパー力水平成分 Q_d , 層せん断力 Q_s の予測を行う。

粘性ダンパー付建物での Q_d , Q_s は式(10)により算出できる³⁾。また、文献 4 よりオイルダンパー付建物での Q_d , Q_s は次式の α を 1 としたものに等しい⁴⁾。すなわちいずれも次式から求まる^{3), 4)}。

$$Q_d = C_d (\omega \dot{u}_{d0})^\alpha \cos \theta$$

$$Q_s = \sqrt{\left(\hat{K}'_a \dot{u}_{a0} + \frac{Q_f}{\cos \theta} \right)^2 + \alpha \left(\hat{K}''_a \dot{u}_{a0} \right)^2} \cdot \cos \theta \quad (10a,b)$$

ここに、 θ = ダンパー取付角度、 Q_f = 架構の層せん断力、 K'_a , K''_a = 付加系貯蔵剛性、損失剛性である。

この理論を建物実験に適応させることで、評価の精度検証を行う。各ダンパーの性能に基づき、建物実験での層間変形角に対する Q_d , Q_f , Q_s の予測式を作成し、実験最大値と比較した(図 14)。このとき、 Q_f は 15% 鷹取波での架構せん断力と層間変形の関係から得た弾性剛性の実験値、 ω は試験体の 1 次固有角振動数とした。なお、架構の曲げや軸変形の影響により付加系変形と層間変形から求めたダンパー軸方向変形が等しくならぬが、これらの変形差を加味できる弾性バネをダンパーに直列に設け、付加系の一部として扱うことで簡易に評価した。結果 Q_d , Q_s 共に加振レベル問わず実験結果を精度良く評価でき、 Q_d , Q_f , Q_s の最大値を位相差も考慮して正確に評価できたといえる。

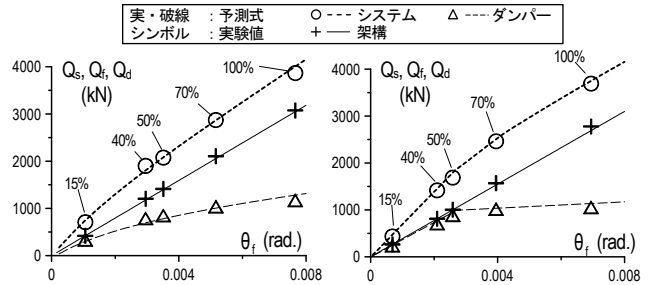


図 14 建物実験の 1 層 Y 方向での各鷹取波加振におけるダンパー、架構、システムの負担せん断力 (左: 粘性ダンパー、右: オイルダンパー)

6. まとめ

粘性・オイルダンパーの性能を実験から定量的に評価し、解析により精度検証を行った。粘性ダンパーでは粘性要素の振幅依存性、ガタの影響を解明し、オイルダンパーでは粘性要素の速度依存性を明らかにした。また、最大層せん断力の予測法を示し、建物実験結果を高精度に予測できることを示した。

【参考文献】

- 1) 本免震構造協会 (JSSI) : パッシブ制振構造設計・施工マニュアル 第 2 版, 2005.9
- 2) 笠井和彦, 引野剛ほか: 実験の全体概要および非制振状態での応答性状 3次元震動台による実大5層制振鋼構造建物の実験研究 その1, 日本建築学会構造系論文集, 第663号, pp.997-1006, 2011.5
- 3) 笠井和彦, 鈴木陽, 大原和之: 減衰力が速度の指数乗に比例する粘性ダンパーをもつ制振構造の等価線形化手法, 日本建築学会構造系論文集, 第574号, pp.77-84, 2003.12
- 4) 笠井和彦, 西村忠宗: 減衰力が速度にパイレニア的に比例するオイルダンパーをもつ制振構造の等価線形化手法, 日本建築学会構造系論文集, 第583号, pp.47-54, 2004.9