

板バネと粘弾性体を用いた鉄骨仕口制振システムの開発

Passive Control System for Column-Beam Connection Using Bending Plate and Visco-Elastic Material

関谷 英一*¹ 片岡 隆広*¹ 伊藤 真二*² 黒木 安男*¹
Eiichi Sekiya Takahiro Kataoka Shinji Ito Yasuo Kuroki
梶原 健一*³ 小坂橋 裕一*⁴ 小堀 徹*⁴
Kenichi Katagihara Yuichi Koitabashi Toru Kobori

要旨

本報告は、鉄骨系住宅や低層鉄骨造建物の制振システムに関する開発内容をまとめたものである。仕口部分に取付けるダンパーは開口部を塞がず、数多く取付けることにより減衰力を平面的に分散させる利点があるが、鉄骨造建物では仕口部分の変形量が少なく、エネルギー吸収効率が低い。そこで、仕口部分をピン接合とし、適度なバネ（復元力）とダンパー（減衰力）を付加するシステムを開発した。開発したシステムの概要、基本性能、仕口部形状を考慮したダンパー単体試験、実大フレームを用いた振動台実験について述べる。単体試験では10℃におけるダンパーの基本特性を得た。また、振動台実験では本制振システムの応答低減効果を確認した。

キーワード：制振構造 鉄骨造 ピン 板バネ 粘弾性 振動台実験

1. はじめに

近年の制振構造の研究・開発に伴い、構造種別によらず超高層建物から木造住宅に至るまで幅広く制振構造が実用化されている^{1), 2), 3)}。比較的、固有周期の短い低層鉄骨造建物や軽量鉄骨造建物についての応用も同様に進められている。

一般的に、ブレース型や壁型のダンパーは開口部を塞いでしまう点から建築計画上好まれない傾向がある。一方で当社が木造建物用に開発した「仕口ダンパー」^{4), 5)}の様に、柱梁接合部に取り付けるダンパーは、開口を塞ぐことは無く、数多く取付けることで減衰力を平面的に分散させることができる。しかしながら、鉄骨造建物の場合は仕口部の剛性が非常に高いため、ダンパーの変形量が確保され難く、エネルギー吸収効率が低いことが問題点として挙げられる。

そこで、これらの問題を解消するため、仕口部分をピン接合として変形量を確保し、適度なバネ（復元力）とダンパー（減衰力）を付加する制振システムを開発した。本報告では開発した制振システムの概要と基本性能について述べる。

2. 論文の構成

まず、3章にて本制振システムの概要、粘弾性体のエネルギー吸収メカニズム、基本性能について述べ、4章にて板厚の異なる3種類のダンパーの、仕口部形状を考慮した単体試験について述べる。さらに5章にて実大鉄骨フレームを用いた振動台実験について述べる。

3. システムの概要と基本性能

3.1 システムの概要

本制振システムはピン、バネ、ダンパーを一組として構成される。柱梁接合部をピン接合とすることで接合部の変形性能を高め、ダンパー部分に変形を集約させる機構である。

図1(a)に示すように主架構の仕口部をピン接合とし本システムを用いる場合や、図1(b)に示すように剛接合ラーメン架構に間柱をピン接合しダンパーを取付ける場合などが想定され、新築に限らず耐震補強への応用も可能である。また、仕口部をピン接合としているため、設置、交換が容易であり、鋼材やダンパーの再利用も可能である。

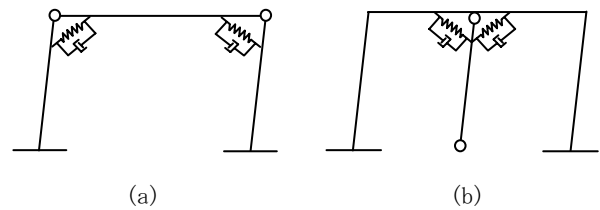


図1 本システムの機構

3.2 ダンパー形状と粘弾性体のエネルギー吸収メカニズム

ダンパーの形状を図2に示す。バネは鋼板を冷間曲げ加工した板バネとし、減衰機能を果たす粘弾性体を板バネと剛体で挟み込む形状である。仕口部の変形に伴い、板バネと剛体の相対変形に粘弾性体が追従し、粘弾性体の圧縮・引張変形によりエネルギーを吸収する。

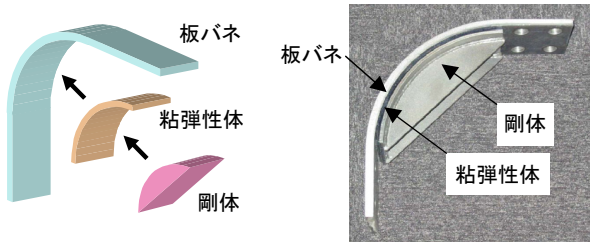


図2 ダンパーの基本機構

粘弾性ダンパーは一般的に粘弾性体のせん断変形によってエネルギーを吸収する機構であるが、本ダンパーは圧縮変形、引張変形、せん断変形が共存する機構である。

粘弾性体の力学特性はその高分子材料の種類、温度、加力振動数、形状（面積・厚さ）によって異なる。図3に、ある条件下における粘弾性体の圧縮・引張変形時の荷重-歪みの関係を示す。引張変形時は歪みが大きくなると剛性が低下する傾向にあり、圧縮変形時は剛性が上昇する傾向にある。

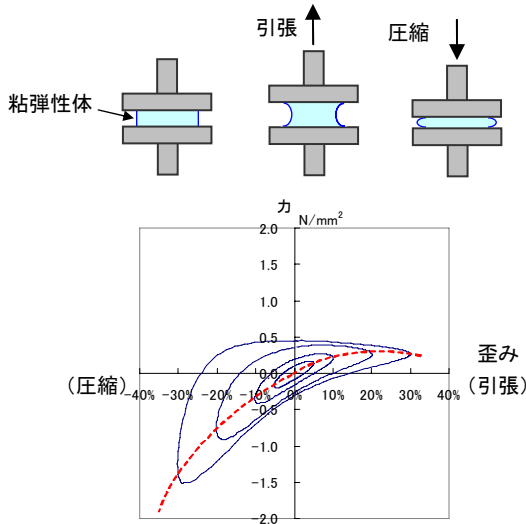
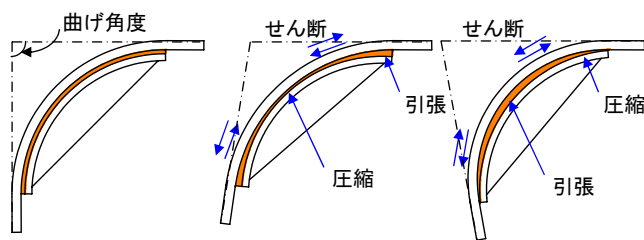


図3 粘弾性体の圧縮-引張性能

図4 a)に示すように外力の加わらない状態の板バネ曲げ角度を90°とすると、板バネ曲げ角度が広がった場合はb)に示すように、粘弾性体の端部が引張変形、中央部が圧縮変形、全体的に若干のせん断変形が生じる。一方、曲げ角度が狭くなった場合にはc)に示すように、粘弾性体の端部が圧縮変形、中央部が引張変形、全体的に若干のせん断変形が生じる。



a) 曲げ角度=90° b) 曲げ角度>90° c) 曲げ角度<90°
図4 粘弾性体の変形

3.3 ダンパーの基本性能

ダンパーの基本特性を把握するために動的ジャッキを用いて加力試験を行った。ダンパーに用いる板バネの形状は、厚さ12mm、幅100mm、曲げ半径R=200mmとし、材質はSN490Bとした。粘弾性体の厚さを5mm、幅を100mmとし、剛体は曲げ加工した鋼板に2枚のリブプレートを溶接して作成した。試験室の気温、粘弾性体の温度は共に約10°Cであった。また、試験治具の形状は図5に示すとおり、ピン-ピン間の長さを600mmとした。入力波は正弦波とし、変形はダンパー取付けボルト位置に設置した接触式変位計により測定し、荷重はアクチュエータのロードセルより測定した。

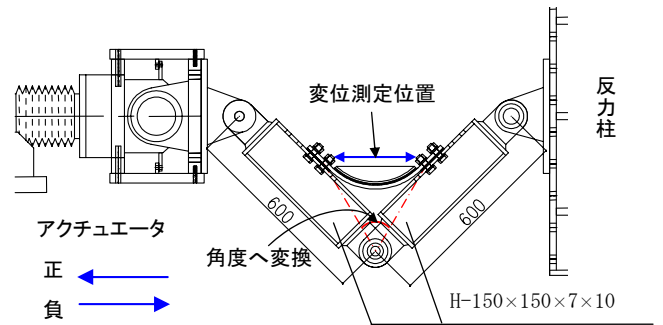


図5 加力試験の概要

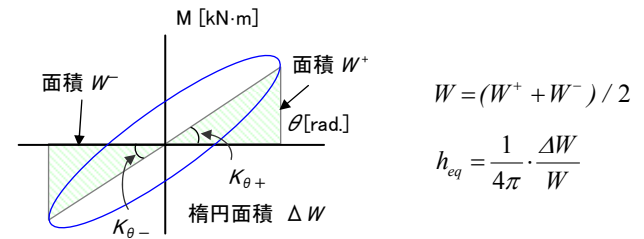


図6 力学特性の評価方法

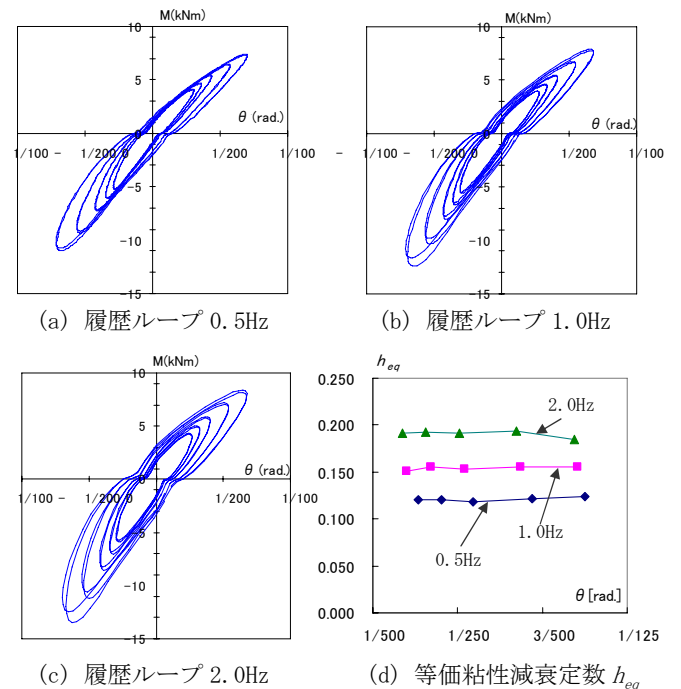


図7 加力試験結果

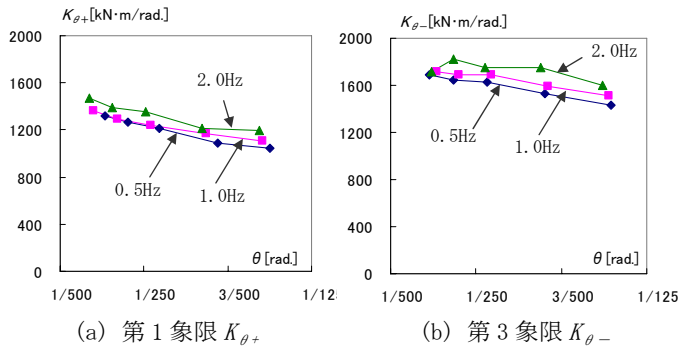


図8 貯蔵回転剛性 K_{θ}

図7の(a)~(c)に0.5Hz, 1.0Hz, 2.0Hzにおける履歴ループを示す。ダンパーの力学特性の評価方法は図6の通りとする。(d)には等価粘性減衰定数 h_{eq} を、図8の(a), (b)に貯蔵回転剛性 K_{θ} を示す。(a)は第1象限(角度が広がる側)の剛性 $K_{\theta+}$ 、(b)は第3象限(角度が狭まる側)の剛性 $K_{\theta-}$ である。

以上より、第1象限より第3象限の貯蔵回転剛性が大きく、いずれも回転角が大きくなるに従い貯蔵回転剛性は低下し、等価粘性減衰定数は、振動数が高い方が大きく、回転角には殆ど依存しない安定した結果が得られた。

4. ダンパー単体試験

4.1 単体試験の概要

板バネと粘弾性体から構成されるダンパーをピン接合の仕口部に取付けることを想定して加力試験を行った。試験の概要と試験結果について示す。

4.1.1 試験の目的

開発した制振システムの適用例を図9に示す。ダンパーは(a)に示すような柱梁接合部、または、(b)に示すような間柱の頭部に設置する例が挙げられる。これらの取付け形状を考慮した試験治具を用いて加力試験を行い、ピン、剛性(板バネ)、減衰(粘弾性体)によるシステムの力学特性を把握することを目的とする。

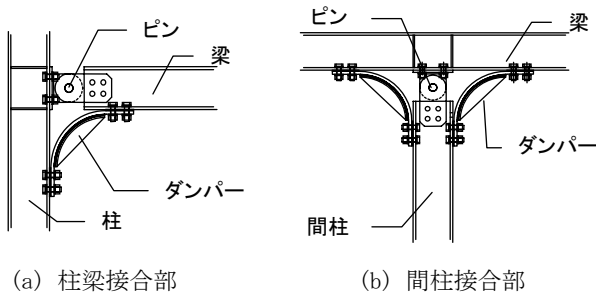


図9 ダンパーの設置例

4.1.2 ダンパーの形状

試験に用いるダンパーの形状を図10に示す。板バネ厚さ $t=12\text{mm}$ および $t=9\text{mm}$ 試験体の曲げ半径は 200mm 、材質は SN490B、 $t=4.5\text{mm}$ 試験体の曲げ半径は 150mm 、材質は SS400

である。板バネの幅は 100mm 、粘弾性体の厚さは 5mm で共通である。また、剛体は厚さ 6mm の鋼板に厚さ 4.5mm のリブ鋼板2枚を溶接したものとした。

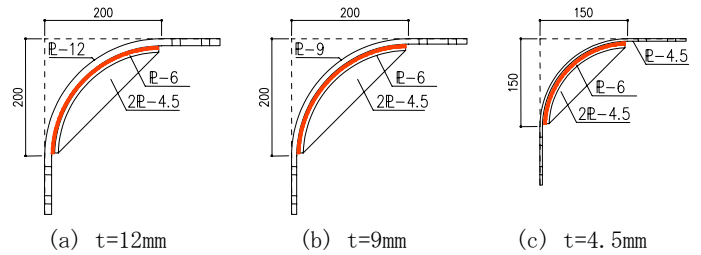


図10 ダンパーの形状

4.1.3 試験装置の概要

加力試験は当社技術研究所(つくば市)にて行った。試験概要図を図11に示す。試験時の気温は約 10°C であった。柱・梁に相当する治具は H 型鋼 $\text{H-150}\times\text{150}\times\text{7}\times\text{10}$ とし、図11の A, B の2箇所にてダンパーを取付けられる形状とした。仕口部のピンは中ボルト M24 とし、ピンのガタを微小にするため、ボルト孔径をボルト径 $+0.2\text{mm}$ で加工した。

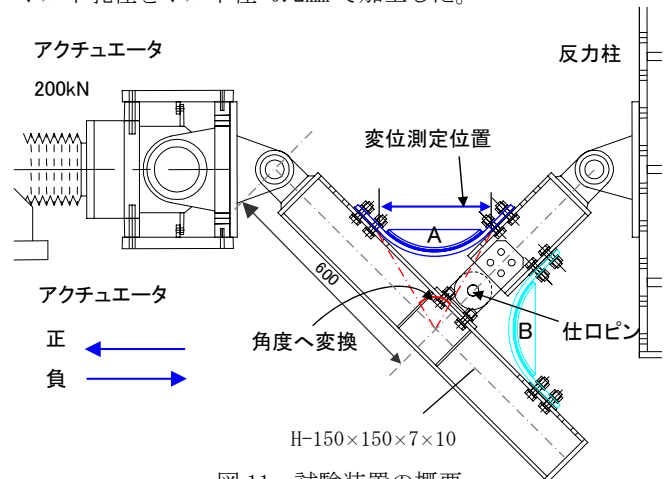


図11 試験装置の概要

4.1.4 入力および試験パラメータ

入力は図12に示すような正弦波とし、試験パラメータは、振動数を 0.5Hz , 1.0Hz , 2.0Hz 、目標振幅を、柱・梁部材芯の角度 θ' が $1/200$, $1/175$, $1/150$, $1/120$, $1/100$, (1.0Hz のみ $1/75$, $1/60$) 相当とし、変位入力とした。

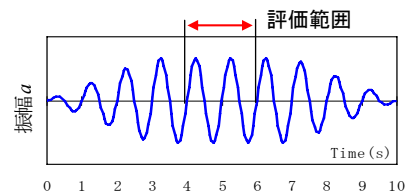


図12 入力波形

4.2 ダンパー単体試験結果

試験結果にて表記する回転角 θ は目標振幅に対する回転角 θ' ではなく、ダンパー取付けボルト位置で接触式変位計にて測定された値を柱・梁部材芯の交点を中心とした回転角に

換算した値とする。また、ダンパーをAのみに取付けた場合の履歴ループの形状が原点に対し点対称ではないが、A、Bに2箇所を取付けた場合は点対称であることを確認したため、試験結果では図13に示すように、Aのみに取付けた場合の履歴ループaを、原点を中心に180度回転させたものbと足し合わせ、1/2倍し、1基当たりに換算した値を示す。図14に履歴ループ、貯蔵回転剛性 K_θ 、等価粘性減衰定数 h_{eq} を示す。また、表1には試験結果一覧を示す。

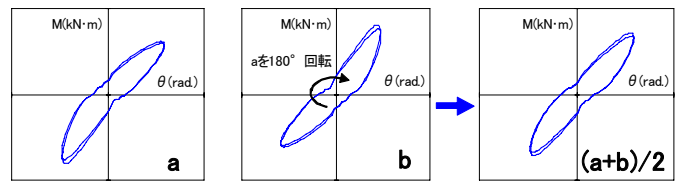


図13 試験結果の評価方法

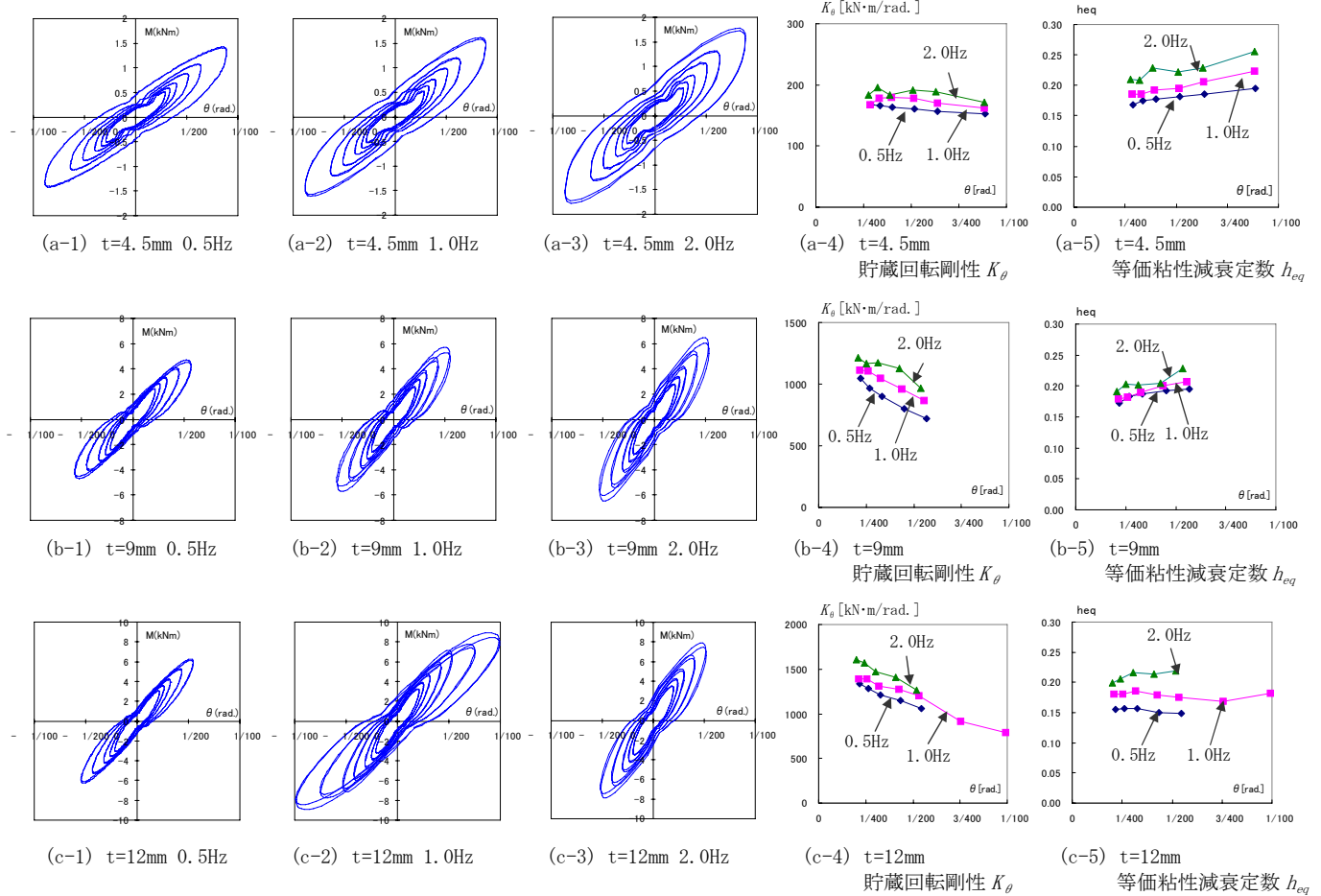


図14 実験結果一覧（履歴ループ、貯蔵回転剛性、等価粘性減衰定数）（10°C）

表1 実験結果一覧（10°C）

f	t=4.5, 曲げ半径150mm									t=9, 曲げ半径200mm									t=12, 曲げ半径200mm									
	0.5Hz			1.0Hz			2.0Hz			0.5Hz			1.0Hz			2.0Hz			0.5Hz			1.0Hz			2.0Hz			
θ'	K_θ	h_{eq}	θ	K_θ	h_{eq}	θ	K_θ	h_{eq}	θ	K_θ	h_{eq}	θ	K_θ	h_{eq}	θ	K_θ	h_{eq}	θ	K_θ	h_{eq}	θ	K_θ	h_{eq}	θ	K_θ	h_{eq}	θ	
1/200	167	0.17	1/344	168	0.19	1/351	184	0.21	1/361	1048	0.17	1/456	1116	0.18	1/464	1217	0.19	1/484	1333	0.16	1/461	1389	0.18	1/474	1609	0.20	1/503	
1/175	166	0.17	1/297	178	0.19	1/303	196	0.21	1/309	968	0.18	1/375	1107	0.18	1/384	1168	0.20	1/401	1280	0.16	1/381	1395	0.18	1/393	1572	0.21	1/413	
1/150	163	0.18	1/249	179	0.19	1/253	183	0.23	1/258	902	0.19	1/301	1048	0.19	1/308	1174	0.20	1/321	1212	0.16	1/307	1308	0.19	1/315	1472	0.22	1/330	
1/120	161	0.18	1/193	178	0.20	1/194	192	0.22	1/197	804	0.19	1/221	959	0.20	1/228	1126	0.20	1/237	1152	0.15	1/230	1279	0.18	1/235	1408	0.21	1/244	
1/100	158	0.19	1/156	170	0.21	1/157	189	0.23	1/158	724	0.19	1/176	869	0.21	1/180	971	0.23	1/187	1061	0.15	1/183	1206	0.17	1/187	1270	0.22	1/193	
1/75	153	0.20	1/113	162	0.22	1/113	172	0.26	1/113												914	0.17	1/133					
1/60																						795	0.18	1/101				

温度10°Cにおける試験結果より、 K_θ は、振動数が高いほど、板厚が厚いほど大きな値となり、 h_{eq} は振動数が高いほど大きな値となった。t=4.5mmでは、回転角によらず K_θ がほぼ一定であるが、t=9, 12mmでは回転角が大きくなるにつれて K_θ が低下し、t=12mm, 1.0Hz, $\theta'=1/75, 1/60$ では大きく K_θ が低下

していることが確認された。これは、板バネの塑性化が原因であると考えられる。また、3章で示した試験結果よりダンパーの変形量が若干小さいが、仕口部ピン位置が異なることが原因であると考えられる。なお、本試験では粘弾性体の剥がれは確認されず接着性の問題は生じなかった。

5. 実大フレームの振動台実験

5.1 振動台実験の概要

仕口部に板バネと粘弾性体からなるダンパーを設置した鉄骨仕口制振システムの基本的な応答低減効果を確認するため、実大のダンパーを組み込んだ1層鉄骨フレームモデルを用いた振動台実験を行った。

実験は当社技術研究所の3次元振動台(テーブル3m×3m、最大搭載重量 10ton、最大変位±150mm(X, Y)、±100mm(Z)、最大速度 ±75cm/s(X, Y)、±50cm/s(Z)、最大加速度 ±1.0G(X, Y, Z))を用い、加振方向はX方向のみとした。

図 15 に試験体フレームを示す。試験体は1層1スパンの鉄骨フレームである。柱、土台および大梁は H150×150×7×10 を用い、柱梁仕口部および柱脚をピン接合とした。柱梁仕口部に図 10(a) で示した板バネ厚さ $t=12\text{mm}$ 、曲げ半径 200mm の形状のダンパーを4組(1構面あたり2組×2構面)設置した(以下ダンパーモデルと称す)。試験体は上記のダンパーモデルに加え、粘弾性体による応答低減効果を確認するためにダンパーの代わりに板バネのみを設置した板バネモデルの2種類とした。写真1に板バネおよびダンパーの設置状況を示す。ダンパーを設置した試験体フレームの固有振動数は2~3Hz程度を目標とし、約1.5tonfの重り(H400を2本)を大梁上に小梁を介して設置した。図 15 にセンサー配置を示す。振動台上の入力加速度(1X)およびR階加速度(RX)はサーボ型加速度計(リオン LS-10C、測定範囲±3000 cm/s^2)によって測定した。また、振動台外部の固定点から振動台絶対変位(L1)およびR階絶対変位(L2)をレーザー変位計(キーエンス LB-1000、測定範囲±100mm)によって測定し、L2とL1の差分を試験体フレームの層間変位とした。ダンパーモデル実験中の振動台付近の気温は16°Cであった。

表 2 に実験ケースを示す。実験は、①常時微動、②自由振動、③地震波入力の種類実施した。自由振動実験では、小振幅域でのダンパーの減衰性能を把握するために、ハンマー(質量3.2kg)による衝撃加振を行った。地震波は、図 16 に示す告示波(位相: TOHOKU-U)を用い、10~300 cm/s^2 の6段階の入力レベルを設定した。

表 2 実験ケース

		入力レベル
①常時微動		0.1 cm/s^2 程度
②自由振動	ハンマー加振(質量3.2kg)	-
③地震波入力	告示波(位相: TOHOKU-U)	10, 20, 50, 100, 200, 300 cm/s^2

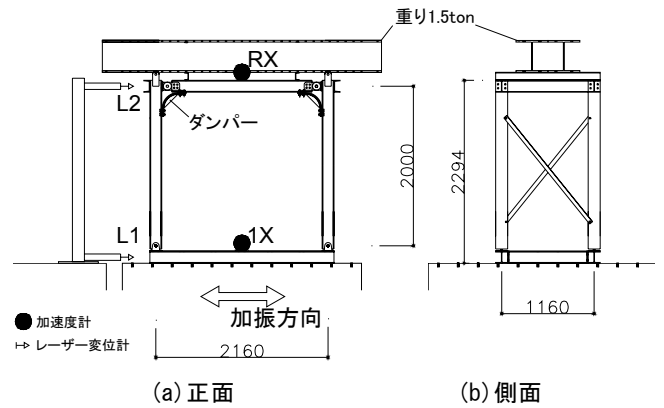


図 15 試験体フレーム

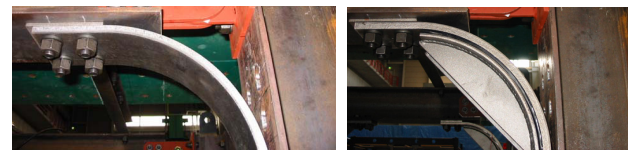


写真 1 ダンパー設置状況(左:板バネ、右:ダンパー)

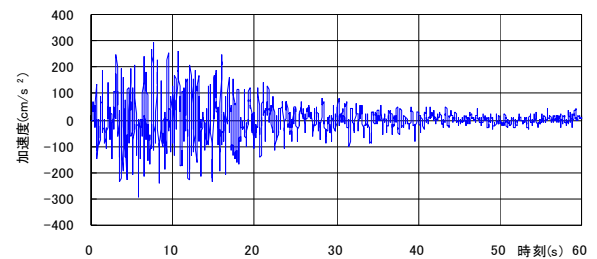


図 16 入力地震波(告示波(位相: TOHOKU-U))

5.2 実験結果

5.2.1 常時微動測定および自由振動実験

図 17 に常時微動の伝達関数を、図 18 に衝撃加振による自由振動波形を示し、表 3 にこれらの結果から推定した試験体フレームの固有振動数および減衰定数を示す。

常時微動時の伝達関数は、板バネモデルでは減衰の小さいシャープなピークを示しているが、ダンパーモデルではそれに比べ、粘弾性体による剛性増、減衰増によりピーク振動数がやや高振動数側にシフトし、かつ、ピーク値が小さく、形がなだらかになっている。ルート2分の1法によって推定したこの時の減衰定数は板バネモデル 2.0%に対して、ダンパーモデル 6.3%であり、常時微動レベルでも粘弾性体による減衰効果で約 4%減衰定数が大きくなっている。常時微動時より振幅レベルが大きい衝撃加振時の自由振動波形においても、板バネモデルに比べダンパーモデルの減衰定数が約 4%程度大きい。

なお、常時微動時に比べて衝撃加振時の方が板バネ、ダンパーモデル共に 5%程度減衰定数が増加しているのは、主に仕口部の摩擦が寄与しているものと思われる。

5.2.2 地震波入力実験

図 19 に地震波入力時の RF 応答加速度の波形例を示し、図 20 に RF 最大応答加速度および板バネモデルに対するダンパーモデルの加速度低減率を示す。10~20cm/s²の入力レベルから加速度低減効果が現れており、板バネモデルに対してダンパーモデルの最大応答加速度は 7~8 割に低減されている。また、50~300cm/s²の入力レベルでは最大応答加速度はさらに 6~7 割に低減されている。図 21 に地震波入力時の層間変形角および板バネモデルに対するダンパーモデルの層間変位低減率を示す。入力加速度 10~300cm/s²の範囲で、板バネモデルに対してダンパーモデルの層間変位は 5~6 割に低減されており、入力レベルによらない良好な層間変位低減効果を示している。

5.3 振動台実験のまとめ

柱梁仕口部に板バネと粘弾性体からなるダンパーを設置した実大 1 層鉄骨フレームの振動台実験を行い、本制振システムの基本的な性能として以下の結果を得た。1) 常時微動レベルの微小振幅域において板バネモデルに対するダンパーモデルの減衰定数は約 4%増加する。2) 地震波入力時に、板バネモデルに対するダンパーモデルの最大応答加速度は 6~7 割、層間変位は 5~6 割に低減される。

表 3 固有振動数、減衰定数

加振方法	試験体	固有振動数 (Hz)	減衰定数 (%)		層間変位 (mm)	層間変形角 (rad)
			推定方法	減衰率		
常時微動	板バネ	2.95	2.0	1/√2法	0.06	1/ 32443
	ダンパー	3.32	6.3		0.07	1/ 27778
衝撃加振	板バネ	2.48	7.7	対数減衰率	0.44	1/ 4545
	ダンパー	3.03	11.7		0.24	1/ 8333

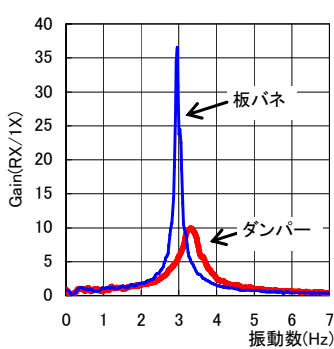


図 17 常時微動の伝達関数 (RX/1X)

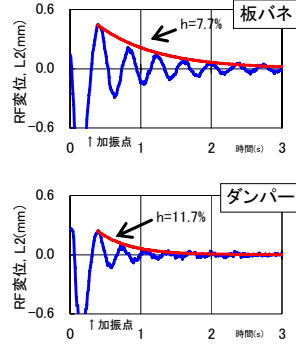


図 18 自由振動波形

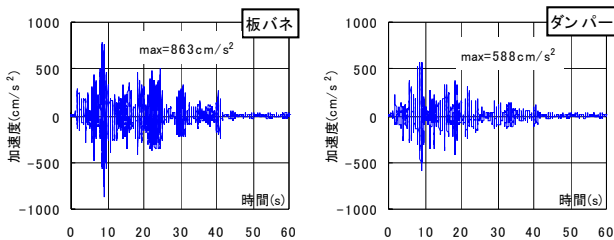


図 19 RF 応答加速度時刻歴波形例 (300cm/s²入力)

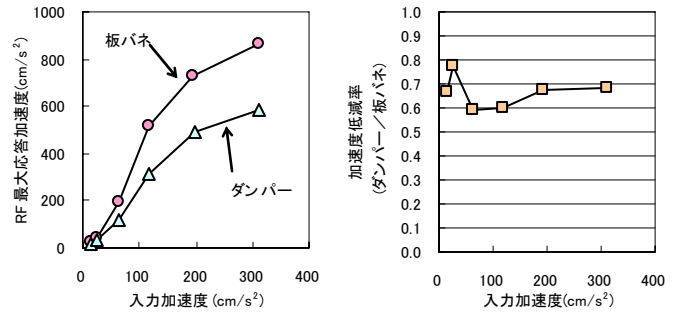


図 20 地震波入力時の最大応答加速度

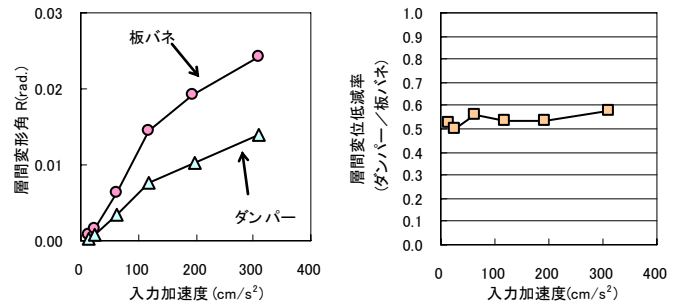


図 21 地震波入力時の最大層間変位

6. まとめ

- ピン、バネ、ダンパーを組み合わせた制振システムの開発を行い、その概要を示した。ダンパーには板バネと粘弾性体を用い、加力試験により環境温度約 10℃における基本特性を得た。
- 仕口部のピン形状を考慮したダンパーの単体試験より、10℃におけるダンパーに力学性状を確認した。異なる温度における実験は実施しておらず、今後の課題とする。
- 実大 1 層鉄骨フレームの振動台実験により、本制振システムの基本的な応答低減効果として、最大応答加速度は 6~7 割、層間変位は 5~6 割低減されることを確認した。

参考文献

- 1) 日本建築構造技術者協会：応答制御構造設計法, 2000. 12
- 2) 日本建築構造技術者協会：JSCA 応答制御構造事例集, 2005. 6
- 3) 日本建築構造協会：パッシブ制振構造設計施工マニュアル, 2005. 9
- 4) 鈴木祥之、木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル, 学芸出版社, 2004. 3
- 5) 樫原健一・河村廣：木造住宅の耐震設計 リカレントな建築を目指して, 技報堂出版, 2007. 3

謝辞 本報告は(株)日建設計と(株)鴻池組の共同研究成果の一部である。関係者各位に感謝の意を表します。本実験で使用したダンパーの製作にあたり、三和テック(株)にご協力いただきました。ここに記して御礼申し上げます。

本システムは「構造材の接合部構造およびばね・粘弾性複合型ダンパー」として特許取得済である。(特許第 3836122 号)