

シーソーシステムを用いた制振構法の適用に関する実験的研究

Experimental Study on Practical Application of Vibration Control Method with Seesaw System

免制震技術部 平田 裕一 YUICHI HIRATA

免制震技術部 川島 学 MANABU KAWASHIMA

免制震技術部 原田 浩之 HIROYUKI HARADA

構造物の振動特性を改善し、サステナブルな構造物を実現するために、著者らはパッシブ制振システムであるシーソーシステムの開発を進めてきた。これまでに、小型模型実験や地震応答解析を行い、シーソーシステムの有効性を確認している。本論はシーソーシステムの実現性を確認するために行った実大規模の振動実験を報告するものである。実験結果より、本システムは実大規模の構造物においても減衰定数を適切に増加させており、十分実用化可能であることが示された。また本実験の3次元フレームモデルによるシミュレーション解析は実験結果を適切に説明しており、解析方法の妥当性も確認している。

キーワード：シーソーシステム、パッシブ制振、減衰定数、振動実験、周波数応答

In order to improve the vibration characteristics of structures and make them sustainable, a seesaw system, which is one of passive vibration control systems, has been developed. So far, small model tests and seismic response analyses have been conducted to examine the effectiveness of the seesaw system. This paper reports a full-scale test conducted to reveal the feasibility of the proposed system. The test results showed that this system raised the damping factor appropriately even in a full-scale structure and was sufficiently feasible. In addition, the simulation analysis using the 3D frame model of this test showed the test results properly, and the validity of that analysis method was confirmed.

Key Words: Seesaw system, Passive vibration control system, Damping factor, Vibration Test, Frequency response

1. はじめに

近年、持続的な社会を実現するために、サステナブルな構造物が求められている。サステナブルとは、資源を長い期間維持し、環境に負荷をかけないようにしながら利用していくことである。このため、通常の構造物のように大地震時における建物の破壊や倒壊を防ぐような必要最低限の性能だけでは十分でなく、その耐震安全をさらに向上させながら、中小地震時において構造物内の資産を守り、地震後に継続的に使用できることが必要である。構造物にこのような機能を持たせるためには、大地震時に構造躯体が塑性化等による永久変形を生じない方がよい。また構造躯体の損傷部位を限定し、構造躯体はできるだけ弾性状態を維持することが望ましい。

これまでの設計では、大地震時に人命を守ることと経済的に合理的であることを同時に満足させるために、構造躯体の損傷を許容しながら、構造物の耐力および変

形性能を確保することが行われてきた。しかしながらこのような設計思想は、サステナブルな構造物の要求性能を満足させる方法として必ずしも十分なものとは思われない。地震エネルギー入力を構造躯体の損傷により消費するのではなく、エネルギー吸収部材と呼ばれる制振ダンパーによって吸収させる制振構造の考え方が、近年改めて注目されている所以である。制振構造は、一般にアクティブ制振システムとパッシブ制振システムに分類される。大地震時において構造物の安全性を向上させるシステムは、主にパッシブ制振システムが用いられている。パッシブ制振システムは、通常、構造物の各層に制振ダンパーを配置することにより地震等の外乱のエネルギーを吸収する。ただし、このような各層に配置する方法は、建築計画上大きな制約を受けることがある。また十分な減衰性能を確保するために制振ダンパーの数量が多くなり、必ずしも経済的ではない。

本論では、これらの問題に対応し得る新しいパッシ

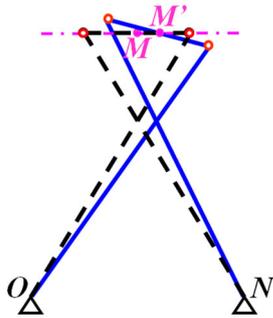
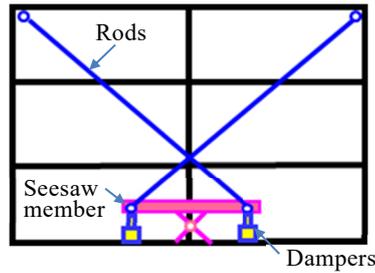
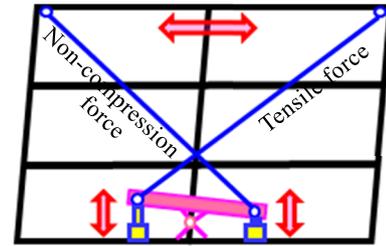


図-1 近似直線運動



(a) 無変形状態



(b) 変形状態

図-2 シーソーシステム

ブ制振システム（以下、シーソーシステムと記す）を提案するものである。このシーソーシステムは以下の利点がある。

- ①各層に設置する制振ダンパーの数量を大幅に低減できる。
- ②取付け部材が過大にならない。
- ③制振ダンパー単体の特性が有効に引き出せる。

これまで、シーソーシステムの特性を把握するために、静的加力実験、模型振動実験、解析方法の検討を行ってきた^{1)~3)}。本論は、シーソーシステムを実大規模の鉄骨フレームに設置した場合の振動特性を周波数応答実験により検証するものである。実験結果とシミュレーション解析結果より本システムの有効性が示されている。

2. システムの概要

(1) 近似直線運動

シーソーシステムの利点は、近似直線運動を活用することにより得られる。近似直線運動の概念図を図-1に示す。これはチェビシェフの近似直線運動機構を応用したものであり、端点をピン支持した2本のロッド材を交差させ、その反対側の端点に両端ピンの水平材を取り付けることで構成される。このメカニズムは、4点ピン接合であるため不安定構造である。水平材が水平方向に運動するとき、水平材は、その中央点を中心に回転運動が生じる。微小変形を仮定した場合、幾何学的な関係より、この中央点は鉛直方向に運動することなくほぼ水平のみに運動する。このような水平材の動きが近似直線運動と呼ばれている。

(2) シーソーシステムの構成

シーソーシステムの基本的な構成を図-2に示す。図は3層の構造物にシーソーシステムを適用した場合である。図-2(a)は変形していない状態を、図-2(b)は変形後の状態を表している。図より、シーソーシステムは、

3つの構成要素から成り立っている。

第1の要素は、構造物の上部から斜めに掛け渡される2本のロッド材である。ロッド材が複数層を横切ることにより各層の変形の合計量をシーソー機構の梁部材（以下、シーソー部材と記す）に伝達する。各層の中間において仮想的切断面を考えるとその断面でのロッド材の軸力が等しいことから、各層の仮想断面位置に同じ水平力が同時に加わることになる。このことより、構造物の振動状態として水平1次モードが支配的な場合、制振ダンパーを各層に設置する場合の効果が、1か所に設置する制振ダンパーで処理できることになり、制振ダンパー設置数の制約を受けにくい。

第2の要素は、中央部がピン支持されたシーソー部材である。ロッド材に連結したシーソー部材の回転運動により、構造物の水平変形がシーソー部材端部の鉛直変形に変換される。このとき、近似直線運動の働きによりピン支持点の鉛直力はあまり大きくならない。構造物が右側に変形した場合、シーソー部材の左端は鉛直上向きに、右端は鉛直下向きに動くため、微小変形の仮定が成り立つ変形領域では、ロッド材はほぼ剛体的に運動し、大きな圧縮力が生じない。通常、複数層にブレース材を掛け渡す場合、圧縮力に対して座屈させないように部材断面を剛強に設計する必要があるが、本システムでは圧縮力が生じにくいことからロッド材の断面を大きくする必要がない。

第3の要素は、シーソー部材の端点に配置される鉛直方向の制振ダンパーである。この制振ダンパーが地震等の外乱のエネルギーを吸収し構造物に減衰性能を付与する。制振ダンパーはシーソー部材の端点に配置されることにより、制振ダンパー単体の特性に近い性能が得られる。この性質は、一方のロッド材に引張力が生じるとき、シーソー部材の回転によりもう一方のロッド材がほとんど圧縮されていないことに起因するものである。ロッド材が圧縮されていないため、構造物の振動が反転したときにロッド材の圧縮変形を解除する必要がない。すなわ

ち構造物の振動が反転した瞬間にロッド材に引張力を生じさせることができるため、制振ダンパー単体の特性に近いものが得られる。

なお、本シーソーシステムは、主体構造物に対して併設されるものである。このため、構造物の種類に関わらず減衰性能を向上させる手法として適用可能である。

3. 振動実験

(1) 実験方法

本シーソーシステムが実大規模の構造物に対して有効に機能することを確認するために、構造物の頂部に起振機を設置した周波数応答実験を実施した。

図-3 に実大規模の構造物を想定した試験体の軸組図を示す。図-4 は試験体の R 階の平面図であり、図-5 は 2 階の平面図である。試験体は 3 層の鉄骨構造物である。長辺方向はスパン長 5m の 2 スパン、短辺方向はスパン長 5m の 1 スパンである。柱はすべて共通に箱型断面 (□-250×250×9) であり、全体で 6 本である。梁も各階共通に H 型断面 (H-300×150×6.5×9) である。階高は 1 階が 3.3m, 2,3 階が 3m であり、全高 9.3m である。

本試験体は倉庫建物を想定している。このため、各層の質量として約 28.2t の敷鉄板を設置することにより模擬した。各階の床面には、面内水平剛性を確保するために水平ブレースを配置している。なお図-3,4,5 は本システムを 1 階に設置した例であり、ロッド材は R 階に掛け渡されている。ロッド材は径 38mm の高張力鋼である。また加振時のねじれの影響を少なくするために短辺方向の外側 2 構面に鉛直ブレースを配置した。

図-6 に実験システムのイメージ図を示す。R 階に起振機 (最大起振力 7,840N, 可動部質量 1,250kg, 最大振幅 100mm(p-p)) を 2 台設置し、2 台を同期させて長辺方向に正弦波加振を行った。

写真-1 に実験状況を、写真-2 にシーソー部材と制振ダンパーを示す。本ダンパーは速度依存型のものである。図-7 に本ダンパーの力学モデルと諸元をまとめる。

写真-1 より、ロッド材の交差部には、クロスターンバックルを用いて、交差するロッドの軸心を同一の鉛直面内に位置するようにしている。シーソー部材は長辺方向外構面に各 1 台、合計 2 台設置している。1 台のシーソー部材に 2 台の制振ダンパーを設置した。なお制振ダンパーを設置した全ての実験ケースにおいてその設置台数は同じである。

写真-2 より、制振ダンパーの加力中心は、シーソー部材の支持点から 500mm の位置に設けた。ロッド材には、自重によるたわみを除去するために張力 (約 40kN)

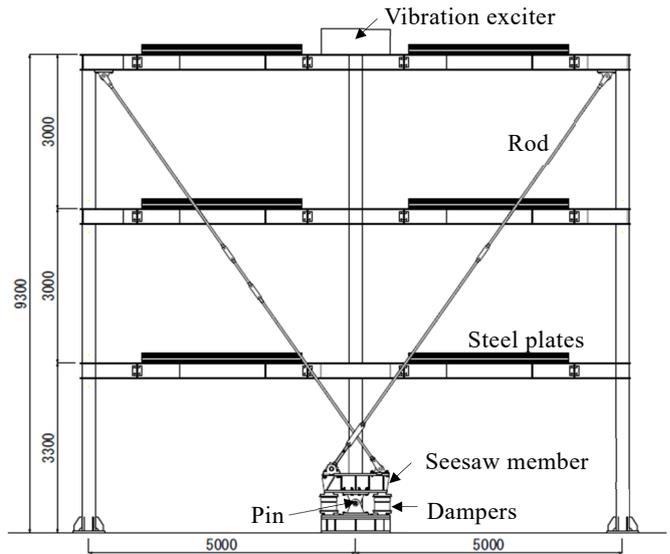


図-3 試験体軸組図

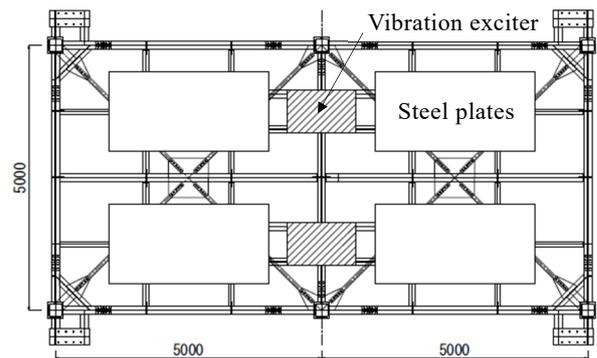


図-4 試験体平面図 (RF)

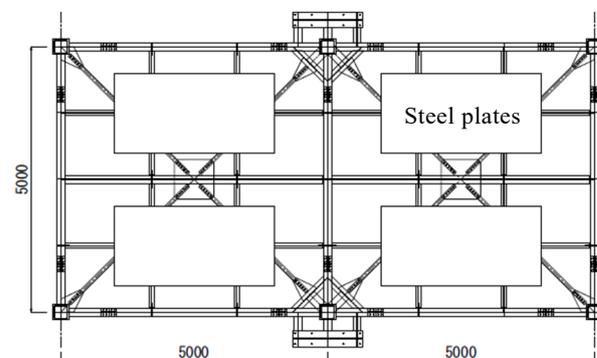


図-5 試験体平面図 (2F)

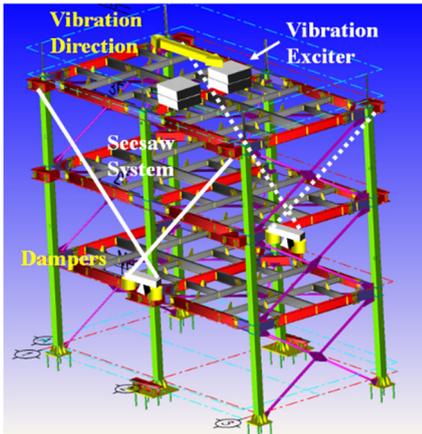


図-6 実験システム



写真-1 実験状況



写真-2 シーソー部材と制振ダンパー

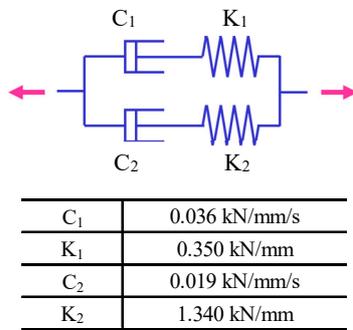


図-7 制振ダンパーの力学モデルと諸元

表-1 実験パラメータ

Dampers	Seesaws	Rods	Tension	Case	Acceleration of the exciter			
					0.05G	0.1G	0.15G	0.2G
Without	1F	1-3F	160 μ	BF1R	○			
	1F	1-RF	170 μ	BF1L	○			
	1F	1-RF	340 μ	BF1L2	○			
	2F	—	—	BFRN	○			
With	1F	1-3F	160 μ	GB1R	○	○		○
	1F	1-RF	170 μ	GB1L	○	○		○
	1F	1-RF	340 μ	GB1L2	○	○		○
	2F	2-RF	160 μ	GB2R	○	○	○	

を導入した。たわみが除去できていることは目視により確認している。またそのときのロッド材の軸ひずみを管理し、張力を2倍にした場合も実験している。

図-7 より、本制振ダンパーに使用されている材料は比較的線形性が強く、周波数依存性を有するため、解析には4要素モデルを用いた。

なお、本シーソーシステムは、適用する制振ダンパーの種類には基本的には影響しない。従って速度依存型ダンパーだけでなく、変位依存型ダンパーに対しても適用可能である。

実験のパラメータを表-1 に示す。表より、実験パラメータは、制振ダンパーの有無、シーソー部材の設置位置、ロッド材の掛け渡し形式、ロッド材の軸ひずみ、起振機の入力加速度である。

図-8 は、シーソー部材とロッド材の設置位置の模式図を示している。図中の(a)～(f)は表-1 の Case 名に対応している。図-8 は、Case 名毎に、表-1 の Seesaws 欄に示すシーソー部材の設置階 (1F,2F) と Rods 欄に示すロッド材の掛け渡し階 (1-3F,1-RF,2-RF) を図示してい

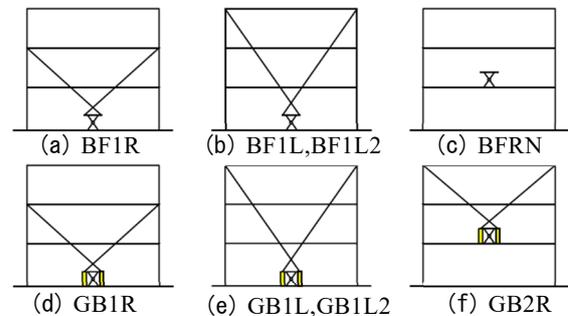


図-8 シーソー部材とロッド材の設置位置



写真-3 起振機設置状況

る。写真-3は、R階に設置した起振機である。計測項目は、各階の振動方向の加速度、変位およびロッド材の軸ひずみである。

(2) 実験結果

図-9 にベアフレームの周波数応答曲線を示す。横軸が加振周波数であり、縦軸がR階の水平変位である。また表-2 に各周波数応答曲線から $1/\sqrt{2}$ 法で評価した減衰定数をまとめて示す。

図-9 より、ベアフレームの固有周期はいずれのケースも約 1.5Hz である。図-9 (a),(b) より、頂部の応答変位は約 25mm である。この値は層間変形角 R で評価すると約 1/360 であり、フレームの弾性限内の値である。これに対して、図-9 (c) は約 23mm であり、図-9 (a),(b) と比較してやや小さく、図-9 (d) は約 28mm と若干大きい。図-9 (c) はロッド張力を 2 倍にしているためにロッド材の上端のピン支持部の摩擦が大きくなり、応答量がやや小さくなったと思われる。また、図-9 (a),(b),(c) は、シーソー部材が 1 階に設置されており、シーソー部材の質量の影響がない。図-9 (d) はシーソー部材が 2 階に設置されているため、加振時にシーソー部材の質量が外力として作用し、頂部変位がやや大きくなっていると思われる。また表-2 より、ベアフレームの減衰定数は約 0.43~0.5% である。

図-10 にシーソーシステムを設置した場合の周波数応答曲線を起振機の入力加速度をパラメータとして重ねて示す。また表-2 に $1/\sqrt{2}$ 法で評価した減衰定数をまとめる。

図-10 (a) は、1 階にシーソー部材を設置し、ロッド材を 3 階に掛け渡した場合である。図-10 (a) より、共振周波数は、制振ダンパーの設置によりベアフレームより若干高くなり、入力レベルが大きくなるにともないベアフレームの周波数に近づいている。ただし、本制振ダンパーは粘性的性質が強いため、制振ダンパー設置による周波数の変動は比較的小さかった。応答量としては、入力加速度 0.05G の場合、頂部変位はベアフレームの 25mm から 6mm に低減している。表-2 より、減衰定数はベアフレームの 0.47% から 2.09% に増大している。入力加速度を 2 倍 (0.1G) にした場合の頂部変位は約 12.5mm であり、減衰定数は 1.84% である。また入力加速度を 4 倍 (0.2G) にした場合の頂部変位は約 31mm であり、減衰定数は 1.42% である。この値はベアフレームの 0.05G 入力時頂部変位が 25mm であることと比較して若干超過する程度に留まっている。本システムの挙動は、4 倍 (0.2G) をやや下回る入力加速度に対してベアフレームと同等と考えられる。

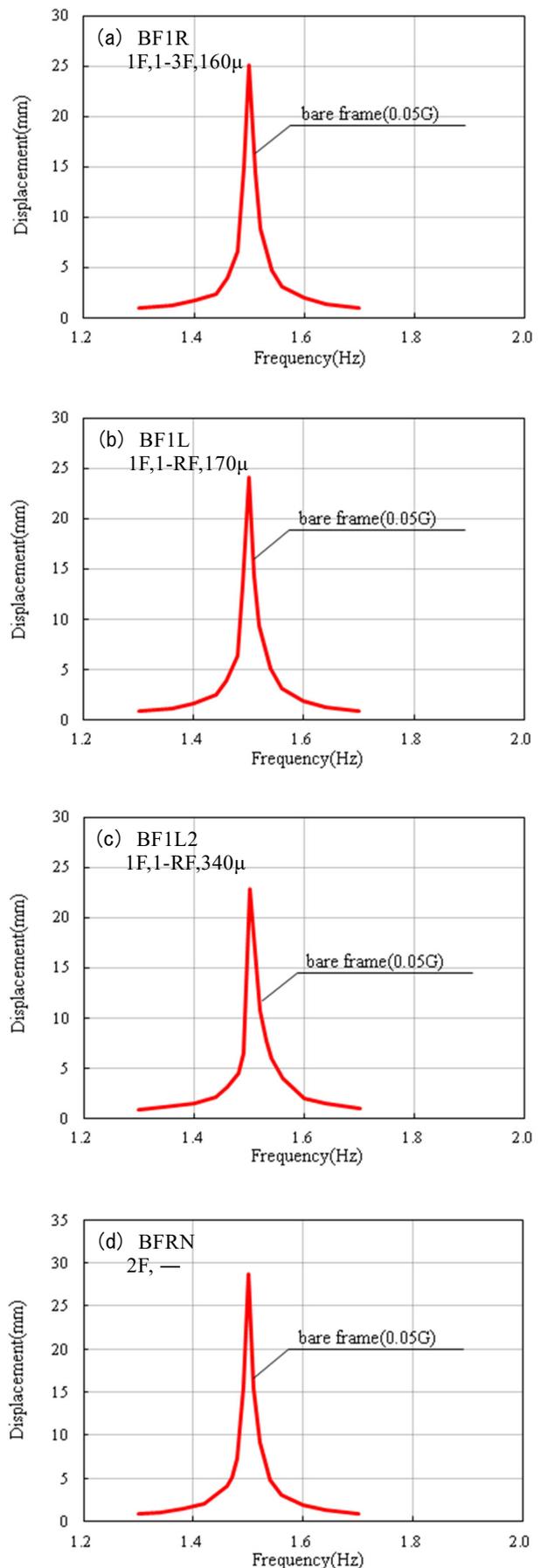


図-9 ベアフレームの周波数応答曲線

表-2 減衰定数一覧

Dampers	Seesaws	Rods	Tension	Case	Damping factors(%)			
					0.05G	0.1G	0.15G	0.2G
Without	1F	1-3F	160 μ	BF1R	0.47			
	1F	1-RF	170 μ	BF1L	0.46			
	1F	1-RF	340 μ	BF1L2	0.50			
	2F	—	—	BFRN	0.43			
With	1F	1-3F	160 μ	GB1R	2.09	1.84		1.42
	1F	1-RF	170 μ	GB1L	2.56	2.06		1.82
	1F	1-RF	340 μ	GB1L2	2.80	2.33		1.97
	2F	2-RF	160 μ	GB2R	1.42	1.08	0.93	

図-10(b)は、1階にシーソー部材を設置し、ロッド材をR階に掛け渡した場合である。図-10(b)より、入力レベル 0.05G の場合、頂部変位は 5mm である。またこの時の減衰定数は、表-2より 2.56%である。入力加速度を2倍にした場合の頂部変位は約 10mm であり、減衰定数は 2.06%である。また入力加速度を4倍にした場合の頂部変位は約 23mm であり、減衰定数は 1.82%である。ロッドを3階に掛け渡した図-10(a)と比較して、各入力レベルに対して、頂部変位は低減し、減衰定数が増大した。

図-10(a)は、ロッドが3階に掛け渡されているため、1階から3階の2層分の相対変位に対して本システムが機能する。これに対して、図-10(b)は、1階からR階にロッドが掛け渡されるため、相対変位が3層分となる。ロッドの角度は図-10(b)の方が鉛直に近づくので水平分力は小さくなるが、相対変位が大きいため応答特性が改善していると考えられる。これは各層に設置する従来の制振構造に対して、ロッド材を多層に掛け渡すことによって、制振ダンパーを有効活用できることを示している。

図-10(c)のシーソー部材とロッド材は図-10(b)と同じ位置であるが、ロッド材の張力を2倍にした場合である。図-10(b)と図-10(c)の比較より、応答特性はほぼ同様の傾向になった。本実験ではロッド材の自重によるたわみを除去するように、ロッド材の軸ひずみをモニターしながら張力を導入している。この値が2倍程度変動しても応答特性に大きな相違は見られなかった。

図-10(d)は2階にシーソー部材を設定し、ロッド材をR階に掛け渡した場合である。このケースでは相対変位は2階と3階の2層分である。図-10(a)との比較より、図-10(d)の頂部変位がやや大きくなっている。これはシーソー部材を2階の梁から突き出した片持ち梁の上に設置しているため、この梁の変形量が制振ダンパーの変位量を小さくしたためと思われる。なお本実験では、2階の梁に図-5に示すような斜材(火打ち材)による補強をしている。中間層に本システムを設置する場合には

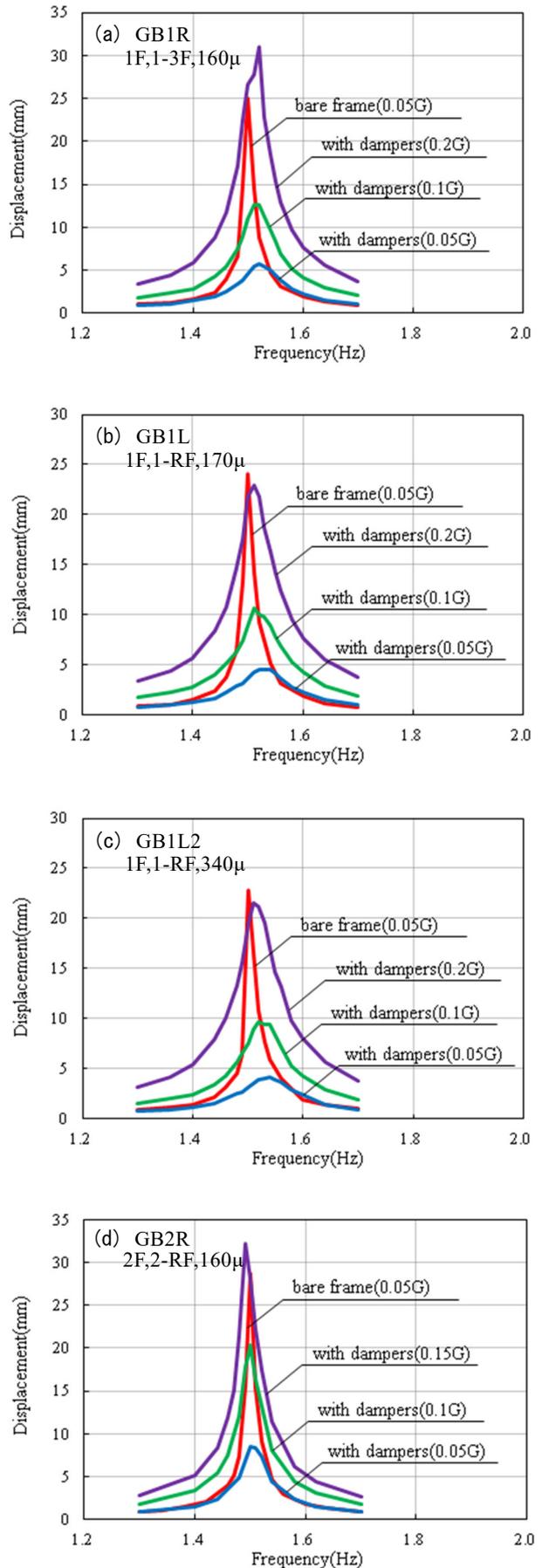
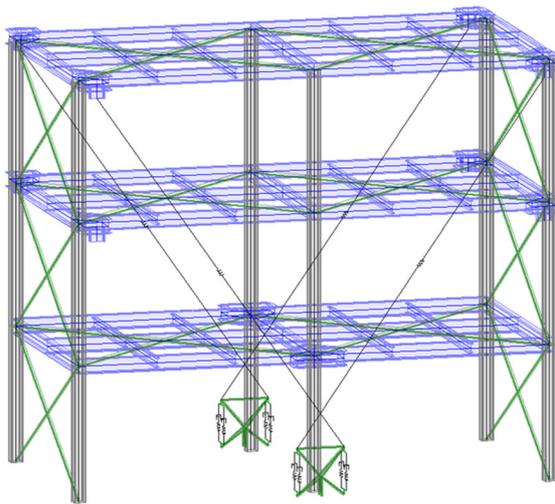
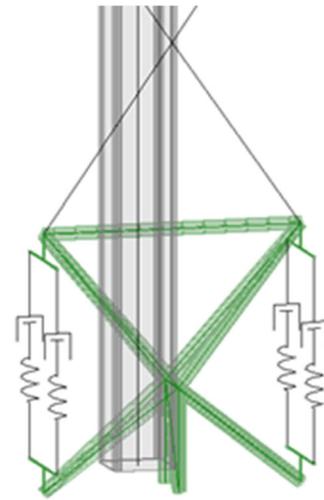


図-10 シーソーシステムの周波数応答曲線



(a) シーソーシステム組み込み時のモデル



(b) シーソー部材と制振ダンパー

図-11 解析モデル

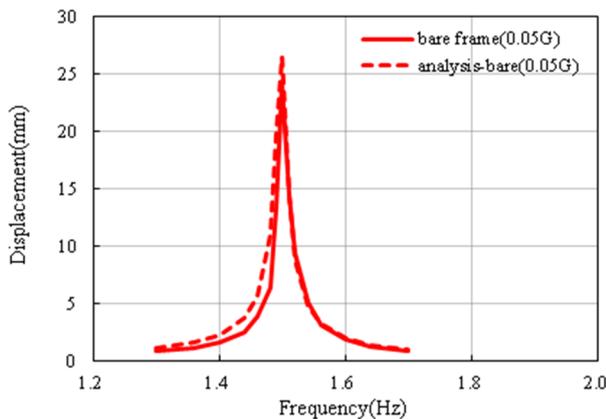


図-12 ベアフレームの解析結果 (BF1L)

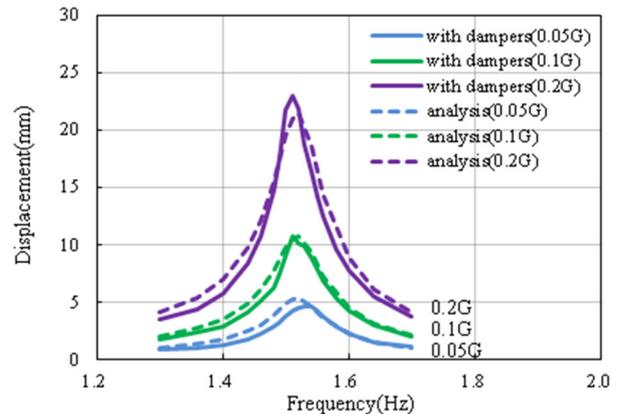


図-13 シーソーシステムの解析結果 (GB1L)

このような設置位置における補強を適切に考慮する必要があると考えられる。

4. 数値解析

(1) 解析モデル

図-11(a)に本実験に関する解析モデルを示す。試験体フレームの解析モデルは、3次元の立体フレームモデルである。解析モデルは1階からR階にロッド材を掛け渡した場合を例示している。各層の質量は柱梁接合部の節点位置に集中荷重として与えた。

図-11(b)はシーソー部材と制振ダンパーを拡大して示している。シーソー部材は剛性が大きいことから、トラス材により剛体挙動をする三角形を構成することでモデル化した。図-11(b)の上側の逆三角形がシーソー部材の梁に対応する。この逆三角形の下端がシーソー部材

のピン機構に対応する。また図-11(b)の下側の三角形はシーソー部材のピン機構を支持するために設けている。シーソー部材は、このピン支持位置で自由に回転することができる。

制振ダンパーの解析モデルは、図-7に示した4要素モデルを鉛直向きに配置している。ベアフレームの減衰定数は、実験結果を参考に $h=0.5\%$ の剛性比例型で与えた。なお、振幅レベルが小さい場合のベアフレームの周波数応答曲線は、実験精度の限界により測定できていない。制振ダンパー設置時の解析では応答変位が小さくなるので、フレームの減衰定数は変化していることが考えられる。しかしながらその評価が困難であるので、ここでは制振ダンパー設置時においてもフレームの減衰定数として同じ値を用いることとした。また、本実験では、ロッドの張力が解除されていないことから、ロッド材は引張と圧縮の両方向に効くトラス材としてモデル化して

いる。

加力方法は、周波数毎に起振機設置位置に正弦波加振力を外力として与えている。

(2) 解析結果

図-12 にベアフレームの実験結果 (BF1L) と解析結果を重ねて示す。図より、解析結果と実験結果は概ね良い対応を示している。このことより、ベアフレームの減衰定数 $h=0.5\%$ はほぼ妥当な評価と考えられる。

図-13 に1階にシーソー部材を設置し、ロッド材をR階に掛け渡した場合 (GB1L) の解析結果と実験結果を入力加速度をパラメータとして重ねて示す。図より、入力レベルが小さい場合には解析結果が若干大きく、入力レベルが大きくなると解析結果が小さくなる傾向が見られるものの、解析結果と実験結果は概ね良好な対応を示している。この差は、振幅レベルに応じたロッド材等の摩擦の影響やフレームの減衰定数の違いなどによると考えられる。各接合部のピンの摩擦係数を小さくすることによって解析結果はより整合すると思われる。

5. まとめ

本シーソーシステムを実大規模の構造物に適用した周波数応答実験およびそのシミュレーション解析より、以下の点が確認された。

- ①本システムは実大規模の構造物に対しても適切に機能し、構造物に減衰定数を付加することが可能である。
- ②ロッド材を多層に掛け渡す場合、同じ制振ダンパー量に作用する相対変位が増大するため、応答変位が低減し減衰定数が増大することが確認された。ロッド材を多層に掛け渡すと経済的に有利と思われる。
- ③ロッド材の自重によるたわみを除去する程度の張力をロッド材に導入する場合、張力が2倍程度変動しても応答特性に大きな影響は与えなかった。
- ④シーソー部材を2階に設置した場合、1階に設置した場合と比較して応答変位がやや大きくなり、減衰定数の増大量が小さくなった。これはシーソー部材を取り付ける位置の構造躯体の変形により制振ダンパーの変位が小さくなったためと思われる。中間階に設置の場合は、適切な補強を行うことが望ましい。
- ⑤本論の解析モデルにより実験結果を概ねシミュレーションできており、本システムを適切に評価できると考えられる

今後は本解析モデルを用いた実施物件の設計的検討を実施するとともに、取り付け部のディテールや取り付け部材の補強方法等に関する改良を検討する予定である。

謝辞：本研究は、広島大学田川浩教授との共同研究として行ったものです。ここに心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Kang, J.D., Tagawa, H. : “Seismic performance of steel structures with seesaw energy dissipation system using fluid viscous dampers”, Engineering Structures, Vol.56, pp.431-442, 2013.
- 2) Tagawa, H., Gao, J. : “Evaluation of vibration control system with U-dampers based on quasi-linear motion mechanism”, Journal of Constructional Steel Research, Vol.70, pp.213-225, 2012.
- 3) Tagawa, H., Yamanishi, T., Takaki, A., Chan, R.W.K. : “Cyclic behavior of seesaw energy dissipation system with steel slit dampers”, Journal of Constructional Steel Research, Vol.117, pp.24-34, 2016.