

スケーリング・フレーム構造による制振木造軸組構造の振動台実験と制振効果

伊藤 拓海¹⁾ 黒川 久瑠美¹⁾ 呉 東航²⁾ 南雲 隆司³⁾ 平田 春彦³⁾

Takumi ITO¹⁾, Kurumi KUROKAWA¹⁾, Dong Hand WU²⁾, Takashi NAGUMO³⁾ and Haruhiko HIRATA³⁾

1) 東京理科大学, 2) 呉建築事務所, 3) ホリー

Abstract

A new passive control system called Scaling Frame was suggested by authors. In this study, the ultimate seismic response behavior and response mitigation effect of SF are investigated by shaking table tests on one-story wooden framed test specimen. Herein, four test specimens of various structural types are prepared with SF and structural plywood installed. From the test results, the mitigation effect of SF is confirmed. And also, SF can retain the stable hysteresis behavior even if the structural plywood is collapsed. Furthermore, the seismic vibration characteristics and resistant mechanism are investigated by response analysis.

Keywords: seismic passive control system, wooden frame, shaking table test, restoring force characteristics, inelastic seismic response analysis

1. はじめに

近年、地震による戸建木造住宅の甚大な被害を受けて、制振化、免震化に向けた研究開発が行われている[1]。また、住宅メーカーを中心に、様々な制振・免震装置が開発・商品化され、実用化されている。著者らは、低層木造や中層鉄骨造を対象とした制振構造を研究しており[2]-[8]、本稿は木質架構用の制振構造を対象として、適用性・有効性や、制振効果の実証的な検証を行ったものである。

著者らが提案している制振構造は、図1のように、制振化する構面の柱梁フレームに対し、対角線上に矩形の金属系材料による制振デバイス（以降、SFD (Scaling Frame Device) と呼ぶ)を配置する[2]。ラーメン構造は柱梁部材の曲げ抵抗機構、ブレース構造は筋交いの軸抵抗機構、耐力壁構造は面材のせん断抵抗機構に分類される。SF構造は、柱梁とSFDの相似関係により、水平力を受けた際にSFDの変形が進行しやすく、その塑性曲げ挙動によりエネルギー吸収能力を発揮するものである。

本論文では、この制振構造を木質軸組架構に搭載した場合、動的応答下での耐震性能や終局動的挙動を解明するため、振動台実験を実施し、実証的な検討を行う。さらに、実験結果に基づき、復元力特性や振動特性、応答低減効果を検討する。

2. Scaling Frame 構造の概要

SF構造は、図1のように、柱梁フレームに比例して縮小した矩形のSFD（四隅剛接、または一体成型）を、柱梁フレームの対角線の交点に設け、斜材で連結する構造である。なお、柱梁フレームとSFDの比率を縮小率と呼ぶ。また、図2のように、SFDの形状寸法は様々なものを提案している。

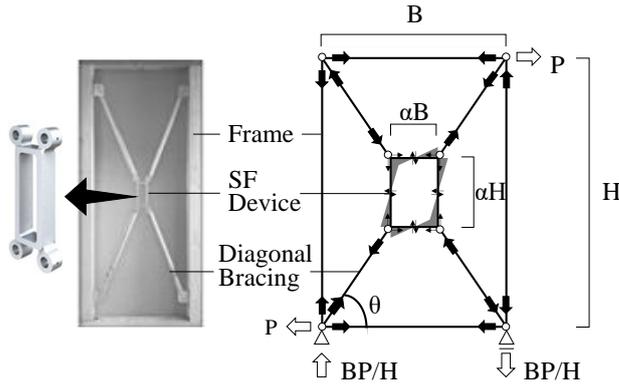


図1 スケーリング・フレーム構造の概要

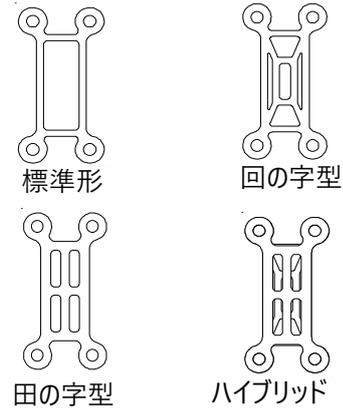


図2 様々な形状・組合せのSF構造

標準形 SF 構造の水平剛性と耐力は、SFD の曲げ耐荷機構に基づいて次式のように求めることができ、縮小率に反比例する[2]。また、SFDが対角線上に配置されることで、柱梁フレームの変形に対してSFDの変形が進行しやすくなり、斜材の圧縮変形が過度にならないことが、実験的に明らかにされている[4]。

標準形 SF 構造の水平剛性：

$$K_{SF} = \frac{12 E I_{SF} L^2 \cos^2 \theta}{\alpha^3 B^2 H^2 (B + H)} \quad (1)$$

標準形 SF 構造の降伏時水平耐力：

$$P_y = \frac{4 f_b Z_{SF}}{\alpha H} \quad (2)$$

3. 振動台実験の概要

3.1 実験計画と目的

試験体の設計にあたり、実用化されている SF 構造を有する木質建物の仕様と設計条件に基づいている。試験体の寸法と構成は、1 スパン 0.91m、ねじれないように SF 構造を対象配置する。

また、振動台実験で入力する加振波のプログラムに関しては、近年の地震状況を勘案して次のように設定した。遭遇する可能性の高い中地震あるいは前震、本震として巨大地震、ならびに余震（中～大程度までの 2 段階）を想定した。さらに、終局耐震状態を把握し、建物の継続使用性も検証するための終局レベルの入力波を設定した。

3.2 試験体の構成と使用材料

図 3 に試験体図を示す。本研究の試験体は、平面 1,950×2730mm、階高 2,790mm の 1 層木質軸組架構とした。軸組はスギ製材の土台（105mm×150mm）、柱・床梁（105×105mm）、ベイマツ製材の梁・胴差（105×180mm）で構成し、水平構面には剛床となるように構造用合板（24mm 厚 N75@150）を用いた。また、柱と土台の接合には、ホールダウン金物を用いている。

SFD はアルミニウム（A1050P）より切削加工し、斜材は円形鋼管（STK400）を用いた。SFD と斜材はピン接合とし、斜材と軸組は端部金物で接合した。SFD の縮小率は 8.5% とした。以上の使用材料の機械的性質を表 1 に示す。

試験体は、1) 構造用合板 4 枚からなる PLY4 試験体、2) SF を 4 構面有する SF4 試験体、3) 構造用合板 2 構面と SF2 枚からなる PLY+SF 試験体、また参考として 4) 軸組のみの Frame 試験体、以上 4 体を用意した

(表 2) . 合板と SFD は、図 3 (a)の Y1, Y3 通りに設置した。

積載重量は、振動台の積載重量制限 (4ton) を考慮し、3.3ton の鋼板を試験体屋上に設置した。

以上の試験体に関して、試験体設計時における固有周期、壁倍率、ベースシア係数を表 2 に示す。なお、固有周期は、上述の錘と試験体の設計時に想定した試験体重量を合わせた総重量 3.5ton を用い、汎用構造解析ソフト SNAP より求めた。

3.3 加振プログラム

入力加振波を表 3 に示す。遭遇する可能性の高い中地震として、建築センター波レベル 1 とレベル 2 (以下、BCJ-L1, BCJ-L2) , 本震に相当する巨大地震として 1995 年兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測された波の NS 成分の原波 (以下、JMA-Kobe) を採用した。さらに、余震として BCJ-L2, BCJ-L1 を採用した。その後、終局耐震状態と継続使用性の検証のため、JMA-Kobe を再度採用した。なお、損傷状況や振動特性の変化を検出する目的で、これらの地震波の入力前に、パルスとホワイトノイズ (1~10Hz まで段階的に変化) を入力した。ここで、各入力波の名前において、末尾の○の数値は、同じ入力波の回数を表している。

なお、試験体に甚大な損傷が発生し、倒壊の恐れが高くなった際には、予定の加振を中止した。具体的な経過として、PLY4 試験体では、JMA-Kobe②の加振により合板が大きく損傷し、JMA-Kobe③の加振は中止した。Frame 試験体は、BCJ-L1②により軸組の損傷が甚大となったため、JMA-Kobe①-③の入力を中止した。以上、実際の加振記録を表 3 に示す。

表 1 使用材料の機械的性質

Grade	Yield strength	Tensile strength	Elongation	Parts
A1050P	-	115 N/mm ²	25%	SFD
STK400	366N/mm ²	437 N/mm ²	33%	diagonal

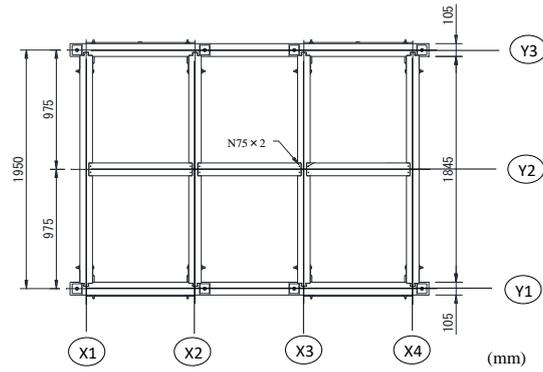
表 2 試験体の概要

Specimen	Mass [ton]	Plywood	SF	Period [s]	Wall magnification	Base shear coefficient
PLY4	3.79	4	-	0.280	2.5	0.48
SF4	3.81	-	4	0.218	2.6	0.50
PLY+SF	3.80	2	2	0.243	2.5, 2.6	0.49
FRAME	3.72	-	-	-	0	-

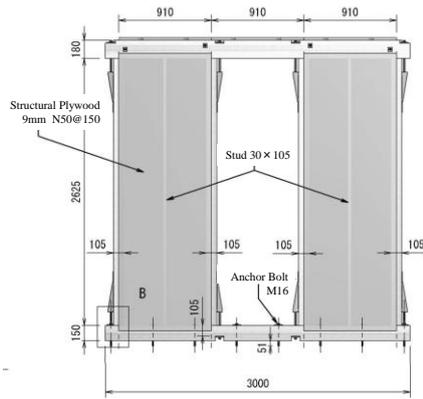
表 3 加振プログラムと実験経過

Step	Frame	PLY4	SF4	PLY+SF
1.BCJ-L1①	4		1	1
2.BCJ-L1②	4		1	1
3.JMA-Kobe①	-	2	1	1,2,3
4. BCJ-L2	4	2,4	1	1,2,3
5.BCJ-L1③	-	2,4	1	1,2,3
6.JMA-Kobe②	-	2,4	1	1,2,3
7.JMA-Kobe③	-	-	1	1,2,3

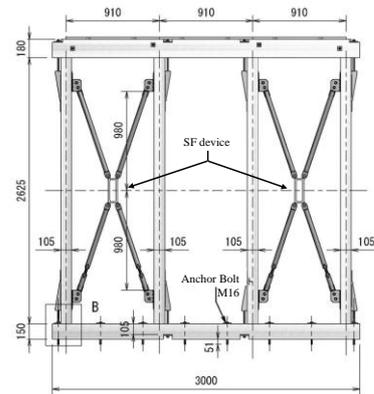
-: not complied with, WN: white noise, 1: SF yield,
2: damage of nail, 3: damage of hole down hardware,
4: damage of framework



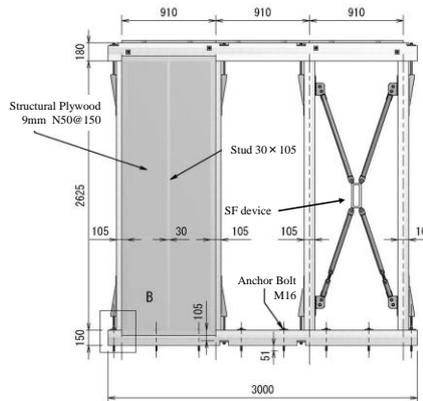
(a) 平面図



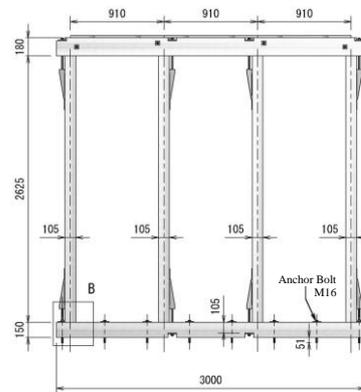
(b) PLY4 試験体の立面図



(c) SF4 試験体の立面図



(d) PLY+SF 試験体の立面図



(e) Frame 試験体の立面図

図3 試験体の平面図と立面図 (単位: mm)

3.4 計測計画

振動台の床面と試験体屋上に加速度計を設置し、基礎と屋上の加速度を測定した。巻込み式変位計を計測フレームに取り付け、梁に設置し、土台との相対水平変位を計測した。SFDの復元力を求める目的で、斜材にひずみゲージを添付した。

4. 実験結果と考察

4.1 実験経過と損傷状況

振動台実験では、1) 構造用合板と釘の損傷、2) SFD の曲げ降伏、3) ホールダウン金物の損傷、4) 軸組接合部の損傷、以上4つの損傷が観察された。観察された損傷状況の一例を図4、ならびに損傷発生、その後の損傷状況の記録を表3に示す。

PLY4 試験体において、JMA-Kobe①入力時に合板が損傷し、その後 BCJ-L2 で損傷が進行し、軸組接合部に損傷が確認された。SF4 試験体では、BCJ-L1 ①入力時から SFD の塑性変形が確認され、全加振波入力後も軸組に損傷は見られなかった。PLY+SF 試験体では、SF4 試験体と同様に、BCJ-L1 ①入力時から SFD の塑性変形が生じた。JMA-Kobe①入力時に合板の損傷が生じるものの、PLY4 試験体の JMA-Kobe①入力時と比較し、損傷が小さく抑えられていた。その後、SFD の損傷・合板の損傷は進行したが、軸組の損傷は確認されなかった。また、合板の損傷については、JMA-Kobe③加振後も、PLY4 試験体の JMA-Kobe ①入力時と同程度であった。



(a) SFD yielding



(b) Damage of nail

図4 試験体の損傷状況

4.2 実験結果

ホワイトノイズ入力の実験結果より固有周期を求め、結果を図5に示す。水平荷重－層間変形角関係の履歴曲線と累積変形曲線について、一例として JMA-Kobe①、BCJ-L2、JMA-Kobe②を図6、7に示す。応答振幅の最大層間変形角の推移を図8、入力エネルギーと SFD の塑性吸収エネルギーの関係を図9に示す。SFD の塑性吸収エネルギーは、斜材のひずみから斜材軸力を求め、SFD による水平力を求めて算出している。

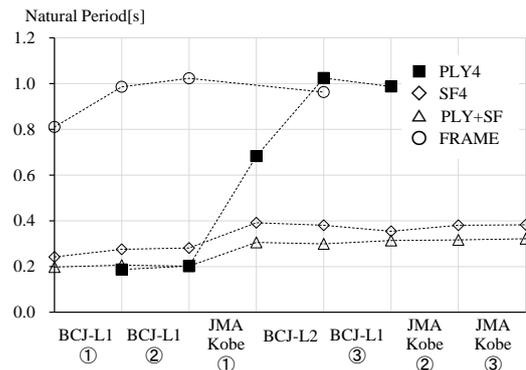


図5 固有周期の推移

4.2.1 振動特性

図5の結果より、BCJ-L1①など入力が小さく試験体が損傷する前の固有周期は、表2に示す試験体設計時の固有周期と概ね一致していることが確認できる。また、各試験体の損傷が進むと固有周期が大きくなることを確認できる。

PLY4 試験体について、JMA-Kobe①で合板が損傷した後、Frame 試験体の固有周期に近づいていることが確認できる。このことから、合板が抵抗要素として機能しなくなったことが考えられる。

SFD を有する試験体では、JMA-Kobe①入力後から終局レベル (JMA-Kobe②、③) に至るまで、固有周期が大幅に上昇することなく 0.3~0.4 秒を示している。このことから、SFD が抵抗要素として機能していたことが考えられる。

4.2.2 履歴曲線と復元力特性

ここでは、図6、7より各試験体の復元力特性について検討する。

図6(a)、7(a)の結果より、PLY4 試験体では、JMA-Kobe①においてスリップ挙動が確認できる。これにより、図

8と合わせて、SFDを有する試験体と比較して応答変位が大きくなる様子が確認できる。

図6、7の結果より、SF4試験体は安定した紡錘型の挙動を示し、PLY+SF試験体では合板の損傷で現れるスリップ挙動が抑えられ、紡錘型に近い履歴挙動が確認できる。また、SF4試験体の結果において、わずかにスリップが見られるが、これはSFDと斜材のボルトクリアランスに起因したものと考えられ、いわゆる合板が損傷した際に見られるスリップ挙動とは異なる。PLY+SF試験体に関して、図6(a)、7(a)のJMA-Kobe①入力時の結果より、入力初期で高い荷重を示し、その後荷重が低下しているが、紡錘型の履歴挙動を示している。さらに、JMA-Kobe①の後で弾塑性応答挙動を示したBCJ-L2入力による図6(b)、7(b)の結果より、荷重が小さくなっている。これらより、地震動の前半で合板が損傷して荷重が低下したものの、SFDによる耐荷機構により安定した履歴曲線を示したと考えられる。

著者らは、耐震部材（合板）と制振部材（SFD）を有するPLY+SFの組合せを標準と考えている。SFDの効果として、地震入力の小さな範囲では合板の損傷を抑制し、地震入力の大きな範囲では建物全体の甚大な被害を抑制する性能を有しているものと判断される。

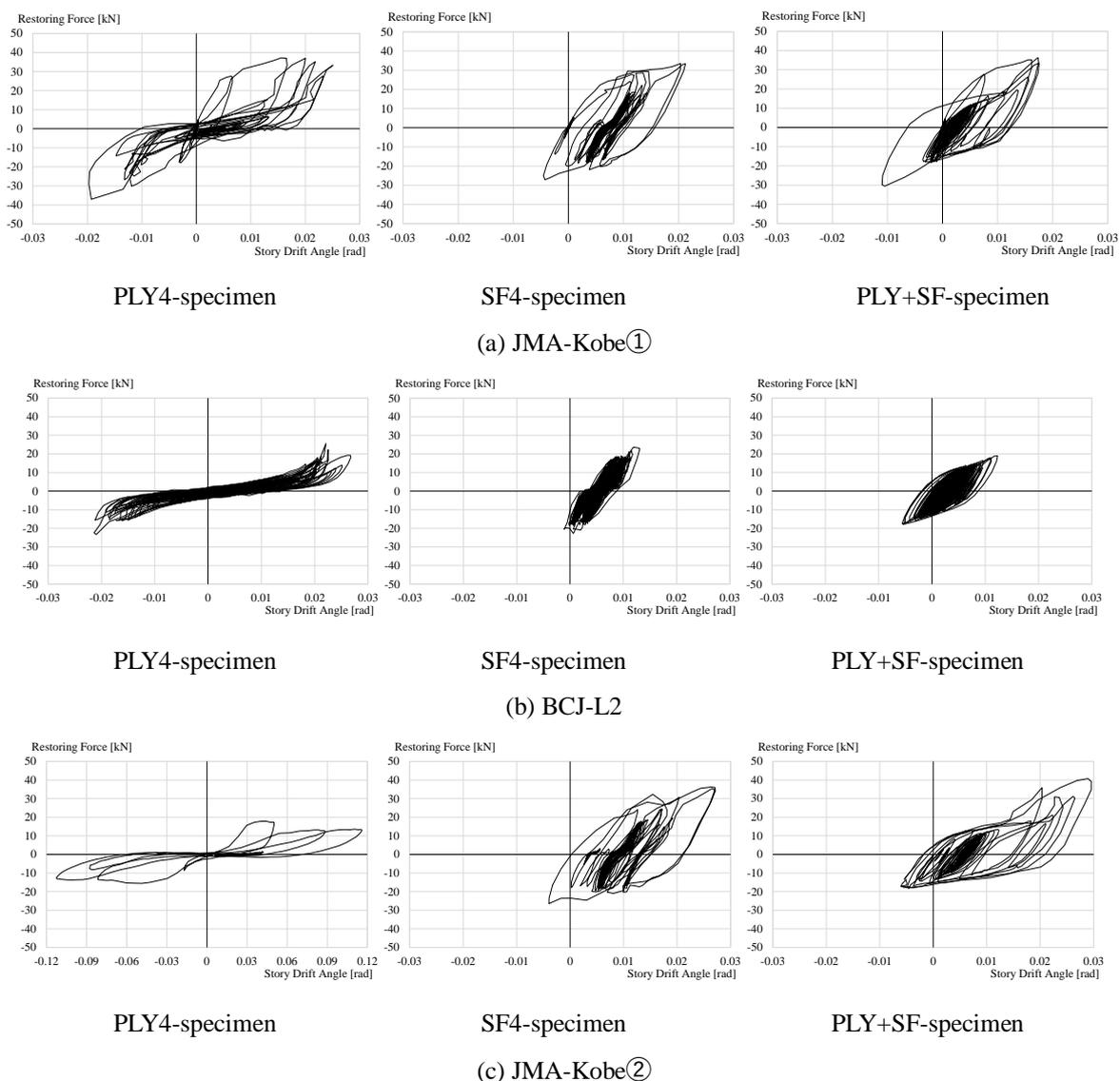
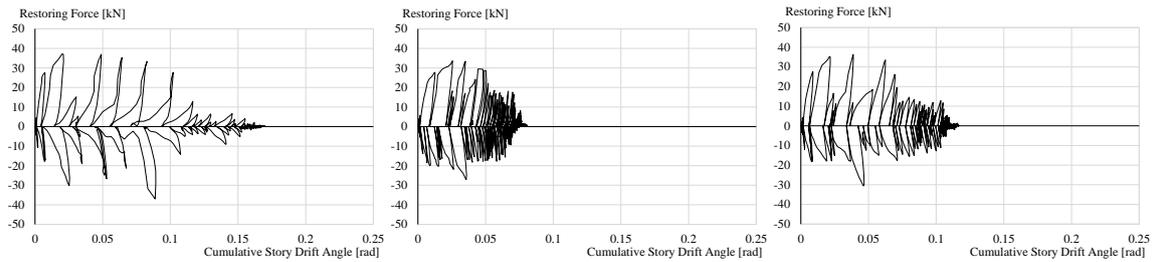


図6 履歴曲線の実験結果

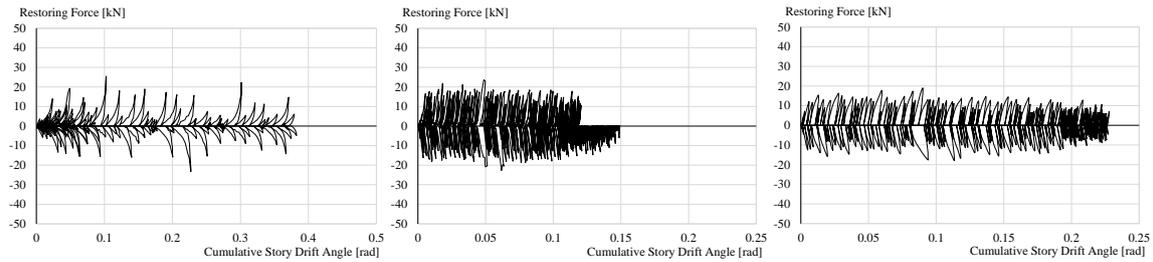


PLY4-specimen

SF4-specimen

PLY+SF-specimen

(a) JMA-Kobe①

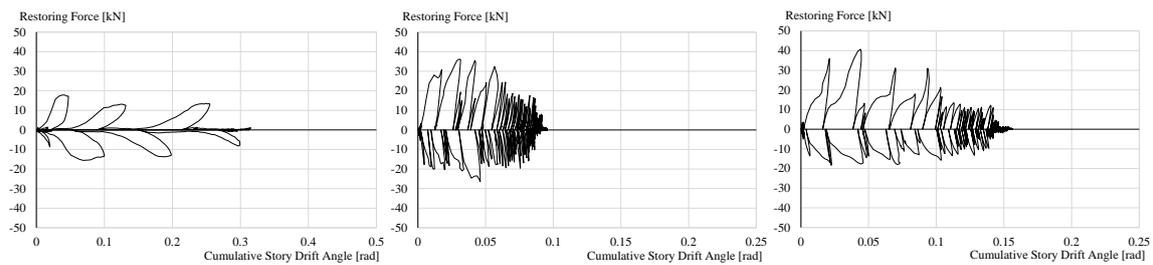


PLY4-specimen

SF4-specimen

PLY+SF-specimen

(b) BCJ-L2



PLY4-specimen

SF4-specimen

PLY+SF-specimen

(c) JMA-Kobe②

図7 累積変形曲線の実験結果

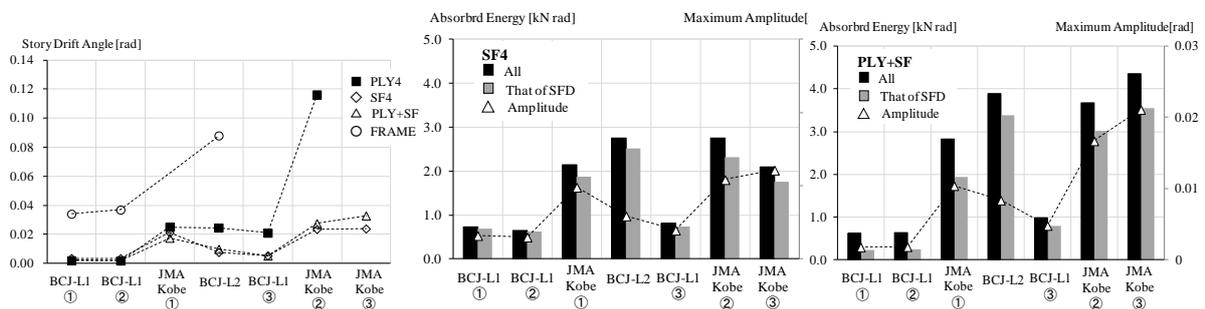


図8 最大応答振幅の推移

(a) SF4-specimen

(b) PLY+SF-specimen

図9 塑性吸収エネルギーの内訳

4.2.3 SFDのエネルギー吸収量

図9の結果より、SF4試験体では、SFDが負担するエネルギー吸収量は、終局入力レベルまで80%前後で安定した値を示していることが確認できる。しかし、PLY+SF試験体は、合板が損傷するBCJ-L2入力前では、合板の

寄与が大きく SFD の負担は 30%程度であったが、JMA-Kobe①により合板が損傷した後は SFD の寄与が増し、70%前後と負担が大きくなっている。以上より、合板と SFD を併用することで、合板が損傷した後も SFD が耐荷要素として機能していることが確認できる。

5. 時刻歴応答解析による終局耐震挙動の解析的検討

5.1 時刻歴応答解析の概要

本章では、SFD を有する木質軸組架構に対し、地震応答解析による追跡精度の検討を行い、地震応答解析手法の適用性や有効性を検討する。これにより、実験で観察された崩壊モードや弾塑性挙動の主たる耐荷要素や復元力特性を検討し、終局動的挙動に関する解析的検討を試みる。

5.2 解析モデルと解析条件

実験結果より、主として構造用合板、SFD が水平耐荷要素として機能しており、振動台実験ではその代表的な復元力特性が確認された。そこで、既往論文[9]に基づき、実験結果より各耐荷要素の復元力特性をモデル化する。

各試験体の実験結果の包絡曲線を抽出し、加算則により各耐荷要素の骨格曲線を求め、図 10 に示す。実験結果より求めた各耐荷要素の骨格曲線より、復元力モデルとして SFD は Tri-linear 型、合板と軸組は Bilinear 型とする。なお、合板の骨格曲線の耐力劣化域は、最大耐力の 50%に達するまでとする。また、各耐荷要素の履歴則として、SFD は スケルトン・シフトモデル[10]、合板と軸組は Bilinear+Slip モデル[11]を採用する。

振動解析モデルは、以上の復元力特性モデルの並列系による 1 質点系とした。地震応答解析の積分法は平均加速度法、時間刻み 0.01 秒とし、減衰定数は 2%とした。

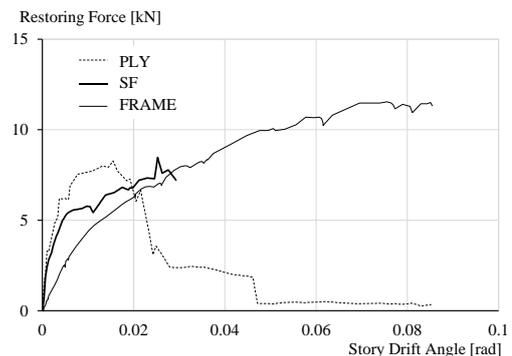


図 10 耐荷要素の骨格曲線

5.3 解析結果と考察

地震応答解析を行い、一例として JMA-Kobe①、JMA-Kobe②の解析結果を図 11 に示す。さらに、実験では検出・分離が困難であった SFD と構造用合板のそれぞれの弾塑性挙動を、解析結果より求め、一例として JMA-Kobe①の結果を図 12 に示す。

図 6 と図 11 の比較より、スリップ性状に差があるものの、各試験体の応答振幅や履歴挙動を精度良く追跡できていることが確認できる。さらに、図 12 の解析結果より、PLY+SF 試験体では、合板の損傷によるスリップ性状が顕著に表れているが、SFD による紡錘型の挙動により、全体として安定した履歴挙動を示している。

以上より、各耐荷要素の復元力特性と履歴則は、木質構造ならびに鉄骨構造の解析モデルを用いることで、実験結果を追跡することができる。さらに、実験結果の弾塑性挙動、すなわち合板のスリップとピンチング、SFD の紡錘型の履歴挙動は、解析結果と対応しており、解析手法が妥当であることが確認できる。また、PLY+SF 試験体では、合板が損傷した後も安定した履歴曲線を示したが、これは SFD の高い塑性変形能力によるものであることが確認された。

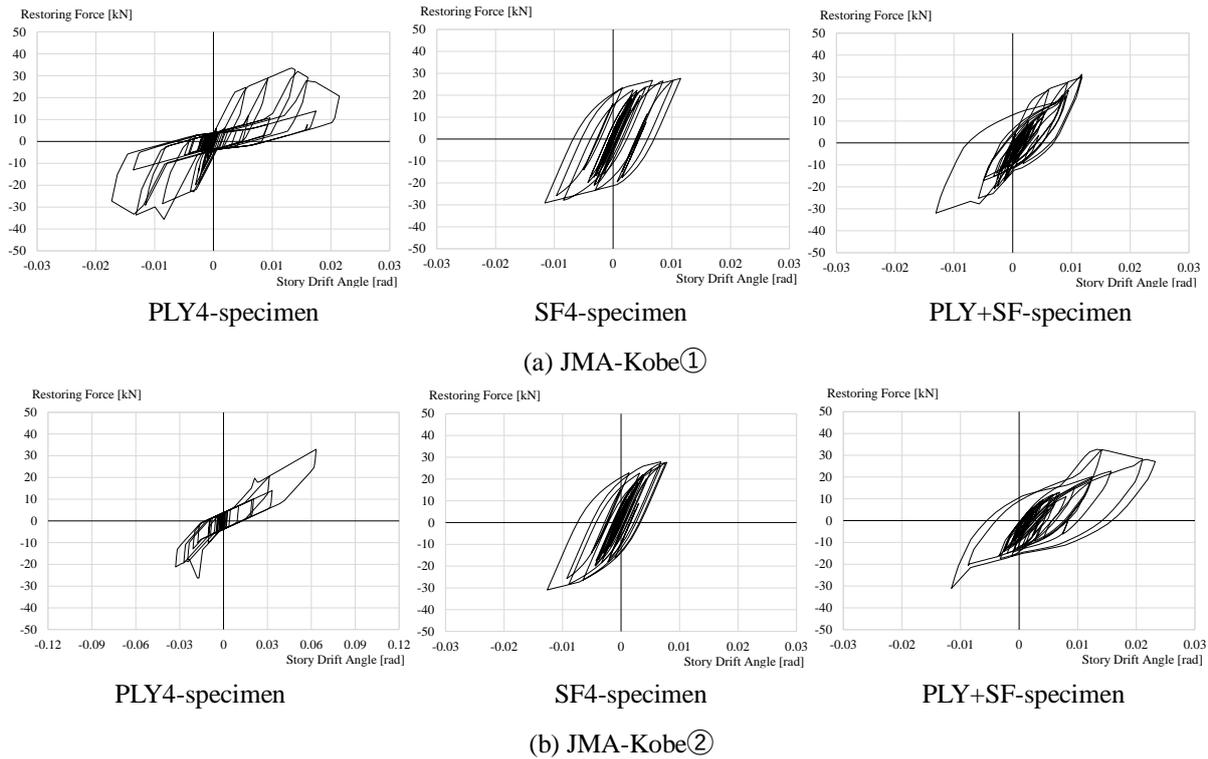


図 11 地震応答解析結果の全体の履歴曲線

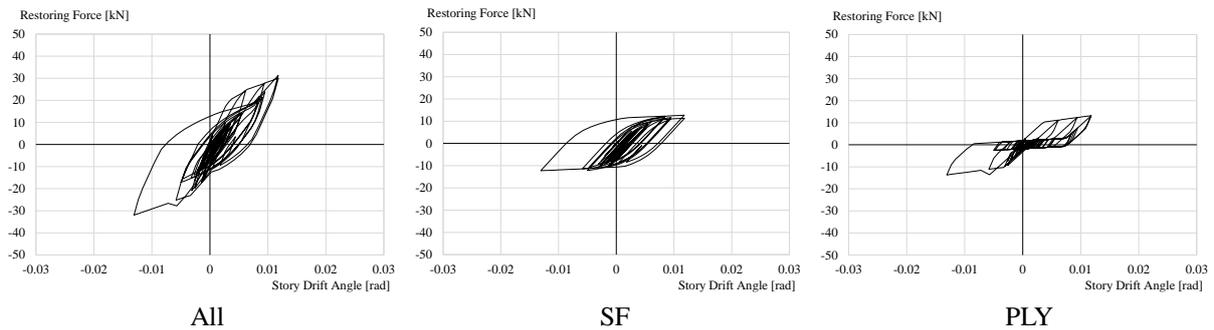


図 12 地震応答解析結果の各耐荷要素の履歴曲線 (PLY+SF-specimen, JMA-Kobe①)

6. 結び

本研究では、金属系材料による曲げ抵抗系の履歴型の制振ダンパーを提案し、木質架構に設置した制振構造を対象にして、振動台実験を実施した。実験結果の分析を行い、終局耐震挙動時の耐荷機構や復元力特性を明らかにし、振動特性についても検討した。さらに、地震応答解析を行い、実験結果の追跡精度や耐荷要素について検討を行った。

本稿の検討により、以下のことを確認した。

- 1) 実験結果より求めた固有周期より、試験体に損傷が生じる前の固有周期は、試験体設計時に想定した固有周期と概ね一致した。その後、試験体に損傷が生じると固有周期が変化し、特に、構造用合板が損傷した試験体では剛性の低下により、固有周期が大きくなった。一方、SFDを有する試験体では、終局レベルに至るまで、固有周期は大幅に上昇することなく、SFDが抵抗要素として機能していた。
- 2) 弾塑性挙動と復元力特性の検討より、構造用合板のみを有する試験体では、合板の損傷によりスリップ挙動を示すが、SFDを有する試験体では、終局レベルにおいても紡錘型の履歴挙動を示す。なお、SFDと構造

用合板を併用した試験体では、構造用合板の損傷によりピンチングや耐力低下が確認されるものの、履歴挙動としては紡錘型を示す。

- 3) SFD と試験体全体の塑性吸収エネルギーを求めた。SF4 試験体では、終局レベルまで SFD が負担するエネルギー吸収量は 80% 前後で、安定した値を示した。PLY+SF 試験体は、合板が損傷する BCJ-L2 入力前では、合板の寄与も大きく SFD の負担は 30% 程度であったが、JMA-Kobe①により合板が損傷した後は SFD の寄与が増し、70% 前後と負担が大きくなった。
- 4) さらに、SFD を有する木質軸組架構に対して地震応答解析を行った。実験結果との比較により、この解析手法により実験結果の弾塑性挙動を追跡できることを示した。さらに、解析結果より各耐荷要素の弾塑性挙動を抽出し、弾塑性挙動について解析的検討を行った。結果として、構造用合板が損傷後の SFD の有効性が示された。

参考文献

- [1] 例えば、日本免震構造協会編：パッシブ制振構造 設計・施工マニュアル第 3 版，2007.7
- [2] 呉東航編著：「よくわかる住まいの耐震・制振工法」住まいの学校 2012.12
- [3] 伊藤拓海ほか：スケーリング・フレーム構造を有するツープайフォー工法による木造制振架構の水平載荷試験，日本建築学会関東支部研究報告集，2015.2
- [4] 伊藤拓海ほか：スケーリング・フレーム構造を有するツープайフォー工法による木造制振架構の水平載荷試験，日本建築学会関東支部研究報告集，2015.2
- [5] 齋藤真美，谷槇一郎，伊藤拓海，呉東航：スケーリング・フレーム構造の鉄骨構造物への適用性と制振効果に関する研究（その 1），関東支部研究報告集 I，pp.529-532，2014.2
- [6] 齋藤真美，伊藤拓海ほか：スケーリング・フレーム構造の鉄骨構造物への適用性と制振効果に関する研究（その 2），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp.1189-1190，2014.9
- [7] 阿津英明，島田誓也，ほか：スケーリング・フレーム構造の鉄骨構造物への適用性と制振効果に関する研究（その 3），2014 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I，pp.525-528，2015.3
- [8] 山口界堂，他：スケーリング・フレーム構造の鉄骨構造物への適用性と制振効果に関する研究（その 4），2015 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I，pp.433-436，2016.3
- [9] 佐藤利昭，肥田剛典，加藤惇，他：木造住宅用制振装置の性能評価—振動台実験による加算則の検証と動特性評価—，日本建築学会技術報告集、第 45 号、pp.539-544、2014.6
- [10] 白井祐樹，下田裕介，伊藤拓海：繰返し塑性振幅を受ける H 形鋼梁の耐力と変形能力のデータベース（その 3），関東支部研究報告集 I，pp.109-112，2011.2
- [11] 荒木康弘，腰原幹雄，大橋好光，坂本功：木造住宅の地震応答解析のための復元力モデルに関する研究，日本建築学会構造系論文集、pp.79-85、2004.5