制振木質軸組架構の振動台実験と終局耐震挙動

SHAKING TABLE TEST AND ULTIMATE SEISMIC BEHAVIOR ON PASSIVE CONTROLLED WOODEN FRAME

伊藤 拓海*, 黒川 久瑠美**, 呉 東 航***, 南雲 隆 司****, 平田 春 彦*****

*Takumi ITO, Kurumi KUROKAWA, Dong Hand WU,
Takashi NAGUMO and Haruhiko HIRATA*

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, Seismic response analysis, Equivalent viscous damping factor*

制振, 木質軸組架構, 振動台実験, 復元力特性, 地震応答解析, 等価粘性減衰定数

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。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。これに対して, 著者らは制振構造の研究開発を行っており, 本稿は木質架構用の制振構造を対象とし, その弾塑性応答挙動と制振効果について検討したものである。

ここで, 制振構造の特性や特徴を分類すると, Table 1のように大別される¹⁾。すなわち, 抵抗系(履歴型, 粘性型, 摩擦型), 力学機構(軸抵抗型, せん断抵抗型, 曲げ抵抗型), 材料(金属系, オイル系, など)を軸として分類できる。また, 適用対象の建物規模や構造種別はTable 2のように整理できる。これらに対して, 本研究で提案する制振構造は, Scaling Frame (以降, SF)と呼ばれており, 金属系材料による曲げ抵抗型の履歴ダンパーに分類される。

著者らが提案している制振構造(SF構造)は, Fig.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)を配置し, 斜材で接合して構成する。ここで, ラーメン構造は柱梁

部材の曲げ抵抗機構, プ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。これに対し, SF構造は, 柱梁フレームとSFDフレームの相似関係により, 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。力学原理の詳細は本稿2章で説明する。

本制振構造に関する著者らの先行研究として, 木質軸組架構に対する静的水平載荷実験による検討²⁾を実施している。著者らは, この制振構造の木造住宅や鉄骨造への適用を想定し, 様々な実験的・解析的検討³⁻⁷⁾を進めている。Fig 2のように, SFDの形状や重ね合わせ方を変えることで, 高い力学性能を持つSF構造の実現を目指している。すなわち, 本研究で提案する制振構造は, 木造並びに中低層鉄骨造を対象とし, 対象範囲をTable 1, 2のように想定している。

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を明らかにするとともに, 振動台実験に対して時刻歴応答解析を行い, 実験結果の追跡精度や, 実験結果に対する解析的検討を行い, 終局耐震性能や制振効果を明らかにする。

* 東京理科大学工学部建築学科 准教授・博士(工学)

** 東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻
大学院生・学士(工学)

*** (株)呉建築事務所 代表・博士(工学)

**** ホリー(株) 執行役員開発本部長

***** ホリー(株)構造機材営業部

Assoc. Prof., Dept. of Archi., Faculty of Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr.Eng.
Grad. Stud., Dept. of Archi., Graduate School of Eng., Tokyo Univ. of Science,
B.Eng.

President, WU Building Office Corp., Dr.Eng.

Development Division General Manager, Hory Corporation

Structure Equipment Sales Department, Hory Corporation

Table 1 Summary of passive control devices¹⁾

System	Mechanics		Member
Passive	Energy Dissipation	Viscous Damping	Viscous Damping Member (Viscosity, Oil, Viscoelasticity)
		Plasticity Hysteresis	Plasticity Hysteresis Member (Steel , Lead, Friction)
	Added Mass		Tuned Mass Damper, etc

Table 2 Application of vibration control devices on buildings

Style	Scale	Low	Middle	High	Tall
		10F	15F	25F	
Steel	SRS				
	VCS	SF	SF		
	SIS				
R/C	SRS				
	VCS				
	SIS				
Wooden	SRS				
	VCS	SF			
	SIS				

SRS: Seismic Resistant Structure, VCS: Vibration Control Structure, SIS: Seismic Isolated Structure

Fig.1 Conceptual Diagram of SF Structure

Fig.2 Various type and combination of SFD

2. Scaling Frame 構造の概要

SF 構造は、Fig.1 に示すように、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。木質建物において実用化されている SF 構造のディテールを Fig 3 に示す。なお、柱梁フレームと SFD の比率を縮小率と呼ぶ。

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力学的に求めることができ、縮小率に反比例する（補遺 A に示す）。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⁾（補遺 B に示す）。

SFD の要素試験結果⁴⁾の一例を Fig.4 に示す. 同図のように, 縮小

Fig.3 Detail of SF Structure

Fig.4 Load-displacement Relation Curve of SFD⁴⁾

率が小さいほど剛性，耐力が大きくなり，紡錘型の履歴挙動を示すことが確認できる。

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、試験体の寸法と構成、耐力は、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。すなわち、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。

以上の方針に対して、実験計画を以下に詳述する。

3.2 試験体の構成と使用材料

Fig.5に試験体図を示す．本研究の試験体は，平面 $1,950 \times 2730\text{mm}$ ，階高 $2,790\text{mm}$ の1層木質軸組架構とした．軸組はスギ製材の土台（ $105\text{mm} \times 150\text{mm}$ ），柱・床梁（ $105 \times 105\text{mm}$ ），ベイマツ製材の梁・胴差（ $105 \times 180\text{mm}$ ）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，SFDを有する木質建物用に実用化されているホルダウン

金物を用いている。なお、このアンカーボルトは、埋込み深さによって短期許容引張耐力が定められており、本試験体では36.1kNとなる。また、加振前のボルトは手締めとし、加振中の締め直しは行っていない。なお、振動台と試験体のボルトレイアウトの関係から、Fig.5のように、桁行構面の内側2本の柱は、振動台とホールダウン金物を直接接合していない。しかし、実験中の斜材軸力の実験データに相違がなく、実験で観察された挙動から、接合条件の違いによる影響はなく、十分な反力が得られていたものと考えられる。なお、ホールダウン金物の許容引張耐力相当の荷重に対し、土台は十分な曲げ耐力を有していることを、計算により確認している。

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Table 3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（Table 4）。合板とSFDは、Fig.5 (a)のY1, Y3通りに設置した。

試験体の積載重量は、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固定して設置した。

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 Table 4 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 Table 5 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

Fig.5(a) Floor Plan of Test Specimen (unit: mm)

(b-1) PLY4

(b-2) SF4

(b-3) PLY+SF

(b-4) Frame

Fig.5(b) Elevation of Test Specimen (unit: mm)

Table 3 Mechanical Properties of Members

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

Table 4 Summary of Test Specimen

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	-

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 Table 5 に示す。

3.4 計測計画

計測図を Fig.6 に示す。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 実験経過と観察された損傷状況

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 Fig.7、ならびに損傷発生、その後の損傷状況の記録を Table 5 に示す。

PLY4 試験体において、JMA-Kobe①入力時に合板が大きく損傷し、その後 BCJ-L2 で合板の損傷が進行し、軸組接合部に損傷が確認された。これに対し、SF4 試験体では、BCJ-L1①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-L1①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-Kobe①入力時と同程度であった。

4.2 実験結果

実験結果について、ホワイトノイズ入力における実験結果より、固有周期を求め、結果を Fig.8 に示す。なお、PLY4 試験体の BCJ-L1①入力前のホワイトノイズ入力では、計測データに不備があり、結果が得られなかった。水平荷重一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 Fig.9, 10 にそれぞれ示す。応答振幅に対する最大層間変形角の推移を Fig.11、入力エネルギーと SFD の塑性吸収エネルギーの関係を Fig.12 に示す。なお、SFD の塑性吸収エネルギーは、斜材のひずみゲージから求めた斜材軸力から、SFD による水平力を求めて算出している。さらに、文献⁸⁻¹⁰⁾に基づき、等価粘性減衰定数を算出し、ここでは一例とし JMA-Kobe①、JMA-Kobe②の結果を Fig.13 に示す。

4.2.1 振動特性

Fig.8 の結果より、BCJ-L1①など入力が小さく試験体が損傷する

Table 5 Vibration Program and Collapse Mode

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

Fig.6 Setup and Location of Sensors

Fig.7 Collapse Mode during Shaking Table Tests

前の固有周期は、Table 4 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が確認できる。

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、Figs.9,10より各試験体の復元力特性について検討する。

Figs.9 (a),10(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、Fig.11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。

Figs9, 10の結果より、SFDを有する試験体では、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。

なお、PLY+SF試験体では、ピンチング挙動も確認できる。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

Fig. 8 Transition of Natural Period

Fig. 9 Test Results of Hysteresis Loops of Restoring Force - Story Drift

Fig. 10 Cumulative Story Drift Curve of Test Results

Fig. 11 Transition of Maximum Story Drift

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ものである。ここで、PLY+SF 試験体に関して、Figs.9 (a), 10 (a)の JMA-Kobe ①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ことが確認できる。

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 Figs.9 (b), 10 (b)の結果より、荷重が小さくなっていることが確認できる。これらの比較より、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。

以上より、PLY+SF の試験体において、合板が損傷するとスリップ挙動を呈し、耐力が低下するが、SFD が耐荷要素として抵抗し、合板が損傷した後も安定した復元力特性を示すことが確認できる。このことから、終局状態において SFD が耐荷要素として有効に機能していることが考えられる。なお、SFD を有する試験体では、JMA-Kobe①以降に残留変形が生じ、JMA-Kobe③入力後の終局状態では大きな残留変形が生じるが、2 度の終局状態の入力を経験しても、SFD の復元力特性により、倒壊に至るような甚大な損傷は防止できている。さらに、PLY4 試験体と比較して、初期の入力から終局状態に至るまでの応答を低減し、PLY+SF 試験体では、合板の損

傷を抑制する効果が確認できる。

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。

4.2.3 SFD のエネルギー吸収量

Fig.12 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 入力前までは、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。

4.2.4 等価粘性減衰定数と制振効果

Fig.13 より、SF4 試験体と PLY+SF 試験体では、層間変形角の増加に伴い、等価粘性減衰定数も増加する傾向が確認できる。このことから、SFD を用いた試験体は、塑性化後も安定した制振効果が期待できる。これに対して、PLY4 試験体では、層間変形角の増加に伴う等価粘性減衰定数の増加は見られず、JMA-Kobe①入力時に発生した合板の釘のせん断損傷により、その後の地震波入力時にスリップ挙動が表れ、JMA-Kobe②入力時において層間変形角が増大した。

5. 地震応答解析による終局耐震挙動の検討

5.1 地震応答解析の概要

前章では、実験結果より各試験体の復元力特性や終局耐震性能、

制振構造としての SFD の効果を検討した。特に、復元力特性は、実験で観察された試験体の耐荷要素の損傷状況と対応しており、妥当なものと考えられる。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

前章の実験結果より、本稿の試験体は、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¹¹⁾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、Fig.14 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

Fig.12 Energy Absorption of SF and Frame

(a) PLY4-specimen

(b) SF4-specimen

(c) PLY+SF-specimen

Fig.13 Test Results of Equivalent Viscous Damping Factor

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¹²⁾、合板と軸組は Bilinear+Slip モデル¹³⁾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。

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 Fig.15 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 Fig.16 に示す。なお、JMA-Kobe ②において、PLY4 試験体の応答解析では、最大耐力から 50%以上低下したため、参考として応答解析の途中までの結果を示している。

Fig.9 と Fig.15 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、Fig.16 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。なお、残留変形については、実験結果の傾向を追跡できていないが、本稿では、SFD の効果に関して、主として最大応答や弾塑性挙動の追跡性を検証することを目的としている。

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。

5.4 等価粘性減衰定数に関する解析的検討

地震応答解析結果から、等価粘性減衰定数を求めた。一例として JMA-Kobe①、JMA-Kobe②の解析結果を Fig.17 に示す。また、この解析結果において、各応答振幅から等価粘性減衰定数を算出し、層間変形角との関係を Fig.17 に併せて示す。

Fig.13 と Fig.17 より、実験結果と解析結果は概ね対応していることが確認できる。これより、SFD を有する木質架構の等価粘性減衰

Fig. 14 Skelton Curve Model of Each Resistant Members

Fig. 15 Analytical Results of Hysteresis Curve

Fig. 16 Comparison of Restoring Force Behavior of Each Resistant Member

Fig. 17 Analytical Results of Equivalent Viscous Damping Factor

は、本稿の解析法、すなわち合板と SFD の復元力特性モデルにより、評価することが可能であると考えられる。

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。

さらに、本稿の検討により、以下の結論を得た。

4. 実験結果より、各試験体の等価粘性減衰定数を求めた。SFD を有する試験体では、層間変形角の増加に伴い、等価粘性減衰定数が増加する傾向を示す。このことから、SFD を用いた試験体は、塑性化後も制振効果が期待できる。
5. 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。
6. 解析モデルに基づき等価粘性減衰定数を求め、解析結果は実験結果と概ね対応していることを示した。これより、SFD を有する木質架構の等価粘性減衰は、合板と SFD の復元力特性モデルにより、評価することが可能である。

謝辞

本研究の振動台実験は、UR 都市機構技術研究所にて実施し、関係者より多大なご助言とご協力を得ました。また、谷慎一郎君、島田誓也君、高橋武大君、府川直人君（本学・元大学院生）、阿津英明君、北朴木茉奈さん、島田稜子さん（本学大学院生）に振動台実験のご協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

補遺 A：SF 構造の水平剛性と耐力

SF 構造が水平力を受けると、SFD は Fig.1 のような応力分布になる。この曲げモーメント図に基づき、仮想仕事法の原理より水平剛性と降伏時耐力は次式で表される。

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

$$\text{降伏時耐力: } P_y = \frac{4 f_b Z_{SF}}{\alpha H} \quad (2)$$

ここで、 E, I_{SF}, Z_{SF}, f_b ：SFD のヤング係数、断面2次モーメント、断面係数、曲げ降伏応力度、 B, H, L ：柱梁フレームの幅、高さ、対角線長さ、である。

補遺 B：SF 構造の斜材軸力

SF 構造の水平載荷試験結果⁴⁾における斜材軸力と層間変位の関係を Fig.B-1 に示す。これより、小変形領域では SF の伸び側と短縮側の斜材軸力はほぼ等しいが、大変形領域において短縮側の斜材軸力が低下する様子が確認できる。

さらに、本実験における各加振波の最大応答時の斜材ひずみを Fig.B-2 に示す。これより、大変形領域において、短縮側の斜材軸力が低下していることが確認できる。

Fig. B-1 Relation of axial force - story drift of diagonal brace⁴⁾

Fig. B-2 Maximum axial force of diagonal brace under shaking test

参考文献

- 1) パッシブ制振構造 設計・施工マニュアル第 3 版, 日本免震構造協会, 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バイ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 I, pp.353-356, 2016.3
- 4) 齋藤真美, 谷慎一郎, 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, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.529-532, 2014.2
- 5) 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, 構造 III, pp.1189-1190, 2014.9
- 6) 阿津英明, 島田誓也, 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 3, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.525-528, 2015.3
- 7) 山口界堂ほか: 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 4, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.433-436, 2016.3
- 8) 小原勝彦, 宮澤健二: 実大振動実験における履歴特性に関する研究, 構造工学論文集, vol.47B, pp.341-348, 2001.3
- 9) 穴吹拓也, 佐野剛志ほか: 縮小 20 層 RC 造建物試験体の長周期地震動による震動実験 その 4 各層の応答性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.673-674, 2013.8
- 10) 梅森浩, 馬場章子ほか: 実大振動台実験に基づく木質系耐力壁構造の耐震性能に関する研究, 構造工学論文集, vol.55B, pp.171-178, 2009.3
- 11) 佐藤利昭, 肥田剛典, 加藤淳ほか: 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
- 12) 白井佑樹, 下田裕介, 伊藤拓海: 繰返し載荷を受ける H 形鋼梁の耐力と変形能力のデータベース その 3, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.109-112, 2011.2
- 13) 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, No.579, pp.79-85, 2004.5

SHAKING TABLE TEST AND ULTIMATE SEISMIC BEHAVIOR ON PASSIVE CONTROLLED WOODEN FRAME

Takumi ITO *, *Kurumi KUROKAWA* **, *Dong Hand WU* ***,
Takashi NAGUMO **** and *Haruhiko HIRATA* *****

* Assoc. Prof., Dept. of Archi., Faculty of Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr.Eng.

** Grad. Stud., Dept. of Archi., Graduate School of Eng., Tokyo Univ. of Science, B.Eng.

*** President, WU Building Office Corp., Dr.Eng.

**** Development Division General Manager, Hory Corporation

***** Structure Equipment Sales Department, Hory Corporation

A various type of seismic passive control system has been developed on many countries with frequent earthquakes. And also, these are categorized from the viewpoint of structural system, resistant mechanism, material, etc. as shown Tables 1, 2. Herein, a new passive control system called Scaling Frame (abbreviated SF) has been suggested as shown in Fig.1. In our previous studies of SF structures, the fundamental resistant characteristics are investigated experimentally as shown in Fig.2, and the analytical method of SF structures which is adopted on steel frames has been proposed.

In this study, the ultimate seismic response behavior and response mitigation effects of SF on wooden structures 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 as shown in Fig.3 (a), (b). And the input wave are assumed as follows; 1) foreshocks to investigate the standard seismic performance, 2) main shocks to estimate the ultimate seismic response behavior, 3) aftershocks to analyze the fail-safe mechanism of SF structures, and 4) mega earthquake input to study the ultimate limit state of test frame specimens.

From the test results (Figs.9, 10, 11, 12), the following behaviors are observed;

In case of test specimen which consists of plywood only, the slip behavior and deterioration of restoring force are generated (see Figs.9, 10). And also, the response story drift becomes large after main shocks input because the plywood does not resist.

On the other hands, in case of test specimen with SFD installed, the stable hysteresis loop is observed (see Figs.9, 10). And the residual restoring force is obtained after main shocks input. Furthermore, it is observed that good plastic energy absorption of SFD is presented during ultimate seismic response (see Figs.9, 10).

From these observations, SFD has good seismic resistant performance from the point of seismic mitigation effects and plastic energy absorption. Furthermore, SFD becomes fail-safe element after the plywood is experienced under severe damage.

The equivalent viscous damping factor is calculated from the test results, and it is clarified that the SF structure has high damping factor during ultimate state (see Fig.13).

Next, the analytical studies are performed to investigate the ultimate seismic response behavior and the accuracy of dynamic response analytical method. The skeleton curves of each member (frame, plywood and SFD) are extracted from the envelop curves of test results (see Fig.14). And from the observation of test results, each restoring force characteristics model can be summed from the summation rule. The response analysis is performed, and the results are compared with test results, the accuracy of analysis method is concerned (see Figs.9, 15). And also, the fail-safe mechanism during seismic response is presented analytically (see Fig.16).

Finally, the analytical results of equivalent viscous damping factor are calculated by use of above analytical method. From the comparison analytical results and test results (see Figs.13, 17), it shows good agreement with each other.

So then, the main conclusions of this paper are as follows: The specimen by use of only plywood shows the slip on hysteresis loop and the larger response displacement because of damage of plywood. However, the specimens with SF device installed don't show the above results after even plywood damage. Therefore, installing SF device shows equable hysteretic behavior, and mitigation effects of SF structure after plywood does not function as seismic resistant element during ultimate state. And also, the accuracy of response analysis method can be presented.

(2016年4月10日原稿受理, 2016年11月22日採用決定)