

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：37702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06315

研究課題名(和文) 高減衰ゴムを用いた靱性型高倍率パッシブ制振機構の開発および簡易応答予測法の提案

研究課題名(英文) Development of Passive Response Control Mechanism with High Ductility and Stiffness Using High Damping Rubber and Proposal of Simple Earthquake Response Evaluation Method

研究代表者

古田 智基 (FURUTA, Tomoki)

第一工業大学・工学部・教授

研究者番号：50311056

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、木造住宅の制震構造標準化を目指し、高減衰ゴムを適用したダンパー部と、高靱性を確保するためにゴムのせん断ひずみが100%付近で滑りが生じる機構とを組合せた制震システムを考案し、その性能評価を定量的に検証した。その結果、各種依存性ならびに製造ばらつきを考慮しても、目標とした壁倍率7.0が確保できることを確認した。さらに、地震応答解析を実施した結果、最大層間変位が半減以下になることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This research was conducted to evaluate the seismic performance of a new developed response control mechanism which aims to standardization of response control system for wooden houses. The response control mechanism consists of two cylindrical dampers and a slippage connection. The damper is filled with high damping rubber which is subjected to shear force. Where shear strain of the high damping rubber reaches to about 100%, slippage of the connection occurs to realize high ductility. As a result, it was confirmed that the mechanism has 13.7 kN of allowable shear strength considering some kinds of dependency and manufacturing variation. Furthermore, it was found that response story displacement of a wooden house with the system reduces to under 50% due to earthquake response analysis.

研究分野：耐震工学 制振構造 木質構造

キーワード：木質構造 制振構造 在来軸組構法 高減衰ゴム

### 1. 研究開始当初の背景

構造物の耐震性能を高める方法として、木造住宅向けに様々な制振デバイスが開発・製品化されている。特に、2011年3月に発生した東日本大震災以降、高減衰ゴムを適用したパッシブ型制振デバイスのPRが盛んになっている。しかし、各製品とも建物に適用する際の設計方法が明確になっておらず、適用した場合の効果・評価も非常に曖昧である。すなわち、実際に住む側の目線で見た場合、どのような設計根拠を基にして設置されていて、どのような効果があるのか標準的な指標が全く定まっていない。

申請者らはこれまで、2009年度～2012年度に本研究の準備段階として高減衰ゴムを用いたデバイスに関する基礎的研究（独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究成果展開事業 研究成果最適展開支援プログラム（育成研究）、代表研究者：国立研究開発法人建築研究所 材料研究グループ 山口修由）を実施し、その有用性を確認した。

これまでの研究開発において、高減衰ゴムをパッシブ型制振デバイスに用いることで、最大層間変形角を低減させる効果は確認された。しかし、高減衰ゴムのせん断応力は、せん断ひずみの増加に対して増加し続ける特性があるため、これを用いた制振デバイスを取り付けた軸組の壁倍率を評価すると、塑性率（ $\mu$ ）は小さく、構造特性係数（ $D_s$ ）は比較的大きくなるため、壁倍率の評価は比較的低くなり、実際の応答低減効果に見合っていない。さらに、高減衰ゴムは、せん断ひずみが100%を超えるとハードニングが生じて剛性が急増し、高減衰ゴムが破断する危険性が高まる。このような問題に対応するため、木質構造を対象とした制振デバイスでは、最大層間変形角を設定して、その範囲内で壁量計算を行う方法も提案されている。

### 2. 研究の目的

本研究では、木造住宅の制振構造標準化を目指し、安価でメンテナンスの必要がなく、安定した性能を有し、暴風に対しても効果を発揮する「靱性型高倍率パッシブ制振機構」を提案し、その性能評価を行う。

このデバイスは、大小2つの鋼管を入れ子にして、その間のスペースに高減衰ゴムを充填し、ピストンとシリンダの相対変位を抑制する機構を有している。そして、このデバイスを設置した軸組の変形能力を確保するため、デバイスと軸組とを接合する金物に滑りが生じるように図2.1に示す接合機構を設計し、その性能評価を行う。接合機構に滑り変形を許容することにより、デバイスを取り付け

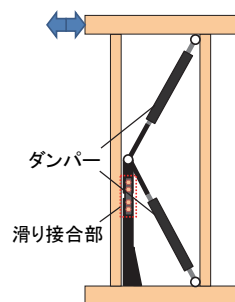


図 2.1 本制振機構

た軸組のせん断力-変形角関係は完全弾塑性型に近くなるため、高い靱性能（塑性率（ $\mu$ ））が得られ、壁倍率も応答低減効果に見合ったものとなる。さらに、この塑性変形能力を有する接合金物で本デバイスを取り付けた軸組に対して、静的および動的載荷実験の実施し、その性能を検証する。

### 3. 研究の方法

#### (1) デバイスのバランス設計（履歴特性の最適化）および試作

目標壁倍率7.0を確保するための軸組の荷重-変位関係を設定し、デバイスの目標性能を設定する。そして、各部の断面設計を行い、試作を実施する。

#### (2) デバイスの性能評価

試作したデバイスの性能を把握するため、デバイス単体の静的加力試験を行う。そして、設定した目標性能を満たしていることを確認する。また、高減衰ゴムの小試験体（試験片）による、温度、振動数、繰り返し加力などに対する依存性を把握する。

#### (3) 接合滑り機構の設計及び性能評価

目標とした軸組の復元力特性を再現するために、滑り摩擦材種、形状、導入軸力を検討する。

静的加力試験により、特性を定量的に評価する。目標復元力特性と試験結果が異なる場合には、原因を調査のうえ、再設計を行い、再度試験を行う。

#### (4) デバイスを設置した木造軸組の静的せん断加力試験

柱間距離が910mmで高さが2730mmの実大木造軸組に本デバイスを設置して静的水平加力試験を行い、デバイスを取り付けた木造軸組の耐震性能および柱の引抜き力の評価を行う。この結果、実質壁倍率7.0を満足しているかを確認する。もし、満足していなかった場合は、デバイスの剛性や取付け角度、デバイス端部と軸組との接合方法を再調整し、再度評価実験を実施する。

#### (5) デバイスを設置した木造住宅の耐震性能評価および応答予測法の提案

静的せん断加力試験で得られたデータを基に、本デバイスを設置した木造軸組の復元力特性モデルを作成し、増分解析および地震応答解析を行う。これにより、本デバイスの制振効果を検証する。

### 4. 研究成果

#### (1) デバイスのバランス設計（履歴特性の最適化）および試作

目標壁倍率7.0を確保するための軸組の荷重-変位関係を図4.1の破線で示す。一点鎖線はこれまでの研究で確認された荷重-変形関係である。この初期剛性を約3倍に、変形性能を2倍にすることで壁倍率7.0の確保が可能になる。そこで、図4.2に示す高減衰ゴムと図4.3に示すバイリニア特性により、図4.1の実線で示した目標バイリニアを目標

スペックとした。

表 4.1 の①～④に示したデバイスの予備的性能試験を実施した結果、剛性がやや低い結果となったため、高減衰ゴムの依存性（特に温度依存性）を考慮しても実質壁倍率 7.0 が確保できるように剛性を約 16kN/mm に設定した図 4.4 及び写真 4.1 に示す筒形ダンパーを試作した。

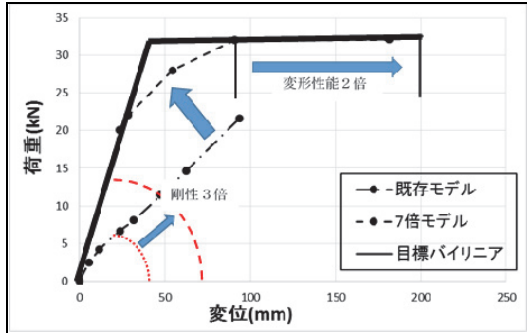


図 4.1 軸組の荷重 - 変位関係

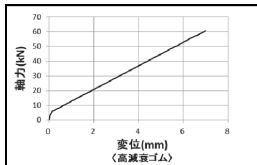


図 4.2 高減衰ゴムの荷重 - 変位関係

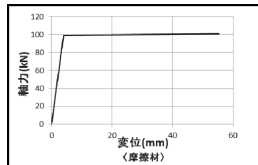


図 4.3 バイリニア特性

表 4.1 デバイス形状・剛性

No.	外筒内径 (mm)	内筒外径 (mm)	ゴム厚さ (mm)	ゴム長さ (mm)	せん断ひずみ 100%時設計耐力 (kN)	設計剛性 (kN/mm)
既存デバイス	39.6	27.2	6.2	240.0	16.7	2.7
1: 細径仕様	75.0	65.0	5.0	243.0	42.8	8.6
2: 太径仕様	83.0	70.0	6.5	293.0	56.3	8.7
3: 細径仕様	75.0	65.0	5.0	162.0	28.5	5.7
4: 太径仕様	83.0	70.0	6.5	196.0	37.7	5.8
壁倍率 7.0 用筒形ダンパー	75.0	65.0	5.0	500.0	81.5	16.3

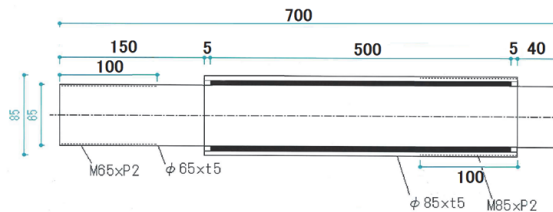


図 4.4 壁倍率 7.0 を確保するダンパー



写真 4.1 筒形ダンパー写真

(2) デバイスの性能評価

各試験体に使用したゴムは同じものであり、せん断剛性  $G=0.8\text{N/mm}^2$  である。加振パラメータは、表 4.2 に示す 7 とおりとし、各加振は正負 4 回繰り返した。

図 4.5 に代表的ダンパーの荷重 - 変位関係、図 4.6 に各試験体の最大変位時における割線剛性と等価粘性減衰定数 ( $H_{eq}$ ) を示す。いずれも、3 回目のループの値である。剛性は、目標よりやや低い値であり、 $H_{eq}$  は最大で 25% 程度である。比較的小さい振幅での加振においては、治具に若干の滑りが生じたため、 $H_{eq}$  は概して小さめの評価 (値) となった。

表 4.2 加振パラメータ

No.	振幅 (mm)	周波数 (Hz)	最大速度 (mm/sec)	想定変形角 (rad)
1	6.0	静的加力		1/67
2	1.0	3.0	18.8	1/400
3	2.0	2.0	25.1	1/200
4	4.0	1.5	37.7	1/100
5	6.0	1.0	37.7	1/67
6	9.0	0.67	37.9	1/50 以上
7	12.0	0.5	37.7	1/50 以上

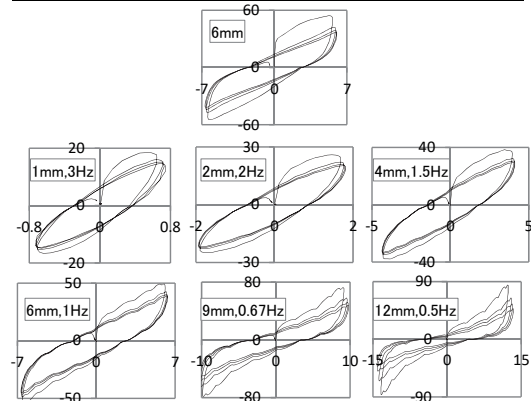


図 4.5 ダンパーの荷重 (kN) - 変位 (mm) 関係

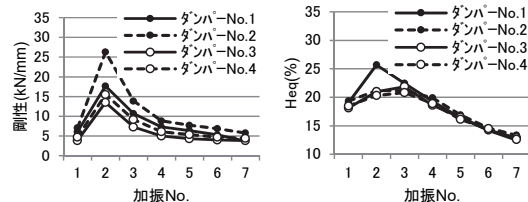


図 4.6 各ダンパーの剛性と等価粘性減衰定数

(3) 接合滑り機構の設計及び性能評価

実験に使用した摩擦材の材質は、アルミ材の A2017, A1050、ステンレス材の SUS304、無酸素銅の 4 種類である。各々の摩擦材の形状は、外径 60mm, 内径 20mm, 厚さ 2mm である。

写真 4.2 及び写真 4.3 に示す実験治具により、摩擦材の検討を行った。写真 4.2 の摩擦材を挟み込む固定治具と、写真 4.3 の摩擦材に応力を与える引張治具の表面にはステンレス材を溶接により貼付している。試験装置の全容を写真 4.4 に示す。

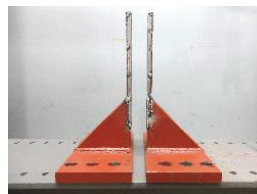


写真 4.2 固定治具



写真 4.3 引張治具



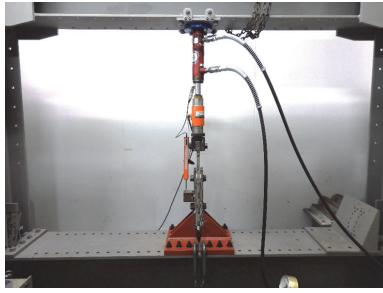


写真 4.4 実験装置

準備荷重で実施した高軸力下における摩擦挙動は、荷重が安定せず設計で適用できる範囲ではなかった。そこで、高力ボルトのトルクを 150Nm に抑え、ボルト軸力が安定するように皿バネを設置し、本荷重を実施した。

① アルミ材 A2017

荷重-変位関係を図 4.7 に示す。試行荷重では原点付近で荷重が上昇する特性となったが、効力ボルトの締め付けトルクを 150Nm に下げ、皿バネを設置したことにより、安定した滑り挙動が得られた。

② ステンレス材 SUS304

荷重-変位関係を図 4.8 に示す。試行荷重では変位が大きくなるに連れて荷重が上昇する特性となったが、皿バネを設置したことにより、安定した滑り挙動が得られた。試行荷重の荷重上昇は、ステンレス材の傷、ならびに治具表面のステンレス版の傷によりボルト軸力が上昇したためと推測されたが、今回の安定挙動は、皿バネの設置により安定したボルト軸力が維持できたためである。

③ 無酸素銅

荷重-変位関係を図 4.9 に示す。試行荷重においても安定した挙動であったが、皿バネを設置したことにより、さらに安定した挙動が得られた。

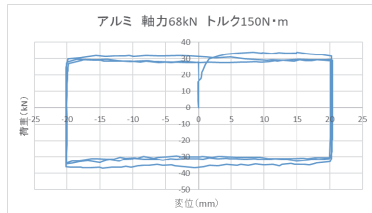


図 4.7 荷重-変位関係 (A2017)

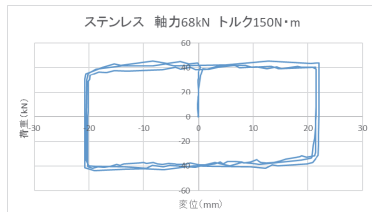


図 4.8 荷重-変位関係 (SUS304)

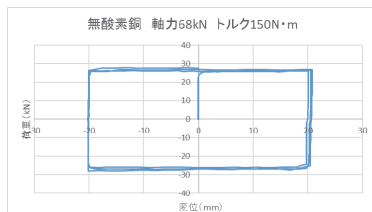


図 4.9 荷重-変位関係 (無酸素銅)

(4) デバイスを設置した木造軸組の静的せん断加力試験

① R=1/30rad までの繰り返し載荷

桁への水平力の荷重スケジュールは、真の変形角 (R) 1/300, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50, 1/30rad でそれぞれ正負3回繰り返しとした。写真 4.5 に実験の状況を示す。図 4.10 は、荷重-真の変形角関係であり、1/150rad 時の荷重は 9.8kN であった。これは、壁倍率 5.5 に相当する。上下のダンパーそれぞれの軸力-変位関係を図 4.11 に示す。上下ダンパーの剛性には差があり、剛性の低い下側のダンパーに変形が集中したことで、目標の剛性が得られなかった。

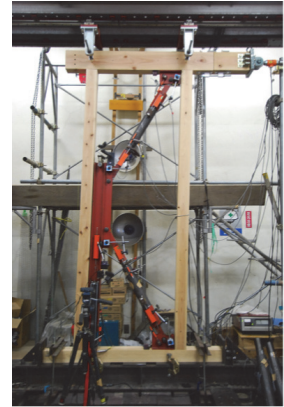


写真 4.5 載荷状況

図 4.12 は、H 形鋼柱の摩擦接合部の軸力-変位関係である。R=1/30rad 変形時のため変位量は小さいが、およそ 100kN で滑りが生じていることが分かる。これより、高力ボルトに適用したトルクは適切であったといえる。

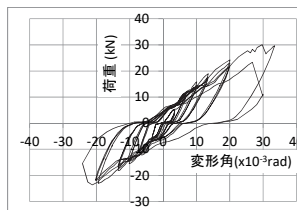


図 4.10 荷重-変位関係

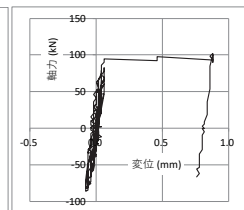


図 4.12 摩擦接合部の軸力-変位関係

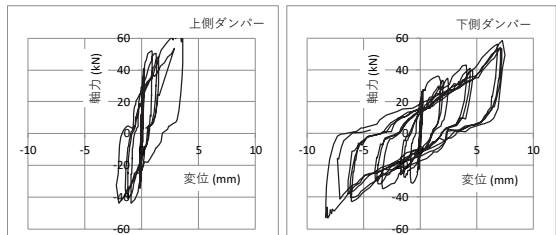


図 4.11 上下ダンパーの軸力-変位関係

② R=1/15rad を目標とした一方向載荷

H 形鋼柱に圧縮力が作用する方向のみの一方向載荷を行った。この実験には、剛性の高いダンパーのみを用いた。

荷重-真の変形角関係を図 4.13 に示す。真の R=1/150rad 時の荷重は 10.1kN であり、これは壁倍率 5.7 に相当する。上下のダンパーそれぞれの軸力-変位関係を図 4.14 に示す。この実験でも目標の剛性が得られていないが、上下ダンパーの初期剛性の違いによるものであった。

設計で目標とした上下ダンパーの軸力-変位関係を図 4.14 に赤線で示す。下側ダンパーは目標

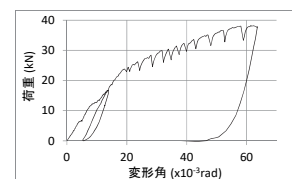


図 4.13 荷重-変形角関係

性能が得られているが、上側のダンパーの初期剛性が低いことが分かる。

図 4.15 は、H 形鋼柱の摩擦接合部の軸力-変位関係である。この実験においても、約 100kN で滑りが生じており、滑り始めの荷重については、安定しているといえる。その後、変位が大きくなるにつれて荷重が上昇しており、それに伴い、ダンパーの軸力と変位も増加した。変形角が  $R=1/30\text{rad}$  を超えると、写真 4.6 のように、桁側の金物が桁にめり込み始めたため、層間変位 174mm ( $R=1/15.7$ ) で载荷を中止した。摩擦材がすべり面に固着しており、このことで、荷重が上昇したものと考えられる。摩擦接合部での荷重の上昇による軸組の損傷が顕著であり、摩擦接合部の荷重の上昇を回避することが必要といえる。この摩擦接合部における荷重上昇は、(3)では確認されなかった。

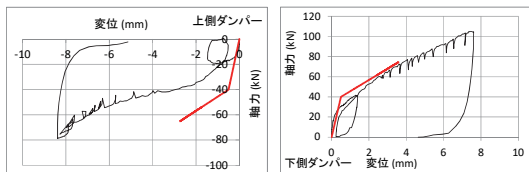


図 4.14 各ダンパーの設計値との比較 (赤線：設計値、黒線：実験値)

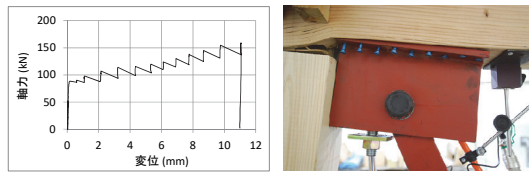


図 4.15 軸力-変位関係 写真 4.6 めり込み

(5) デバイスを設置した木造住宅の耐震性能評価および応答予測法の提案

① 増分解析による壁倍率の評価

ダンパーが所定の剛性であるとして増分解析を実施し、壁倍率を評価した。解析モデルを図 4.16 に示す。ダンパーおよび摩擦接合部の軸力-変位関係は、実験結果を基に、図 4.17 及び図 4.18 のように設定した。

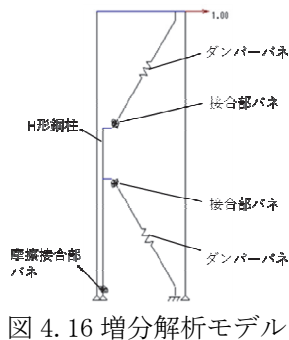


図 4.16 増分解析モデル

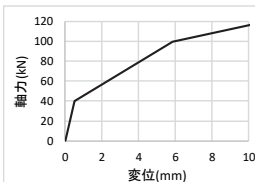


図 4.17 ダンパーの荷重-変位関係

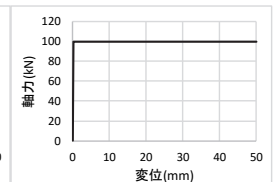


図 4.18 摩擦接合部の荷重-変位関係

増分解析で得られた荷重-変形角関係を図 4.19 に示す。この荷重-変形角関係を用いて壁倍率を算定した結果を表 4.3 に示す。施工性などやばらつきによる低減係数 (0.85、

0.95) を乗じて、8 程度の壁倍率が得られることを確認した。

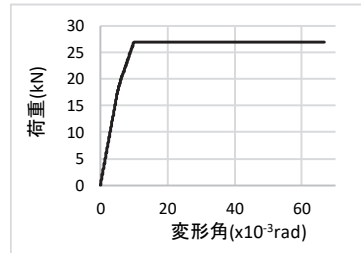


図 4.19 増分解析による荷重-変形角関係

表 4.3 壁倍率の算定

Py (kN)	17.4
2/3Pmax (kN)	18.0
P <sub>(1/150rad)</sub> (kN)	20.9
0.2Pu/Ds (kN)	21.6
最小値 (kN)	17.4
壁倍率	9.77
壁倍率×低減率 (0.85×0.95)	7.89

② 解析モデルの作成・地震応答解析の概要

地震応答解析によって、本システムを設置した木造住宅の地震応答低減効果を検証する。想定した 2 階建の木造住宅の諸元を表 4.4 に示す。耐震補強が必要な、壁量充足率が最低限の 1.0 の建物であるが、非構造部材の水平耐力への寄与も考慮し、壁量充足率が 1.5 となるように、筋かいの量を設定した。

各層の層せん断力-層間変位関係を図 4.20 に示す。図 4.21 に示した解析モデルに、1995 年の兵庫県南部地震で観測された地震波 (JMA Kobe NS) と、応答加速度が 1G となる 2 次設計用の人工地震波 (BCJ L2) を入力し、応答変位を求めた。なお、粘性減衰は、解析モデル全体に 5% を適用した。

表 4.4 解析で想定した 2 階建木造住宅の諸元

	床面積 (m <sup>2</sup> )	重量 (kN)	たすき掛け筋かい数(P)	壁量充足率
1 階	50	98.6	5.98	1.5
2 階	40	55.9	2.47	1.5

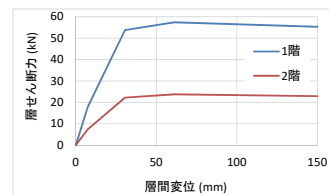


図 4.20 層せん断力-層間変位関係

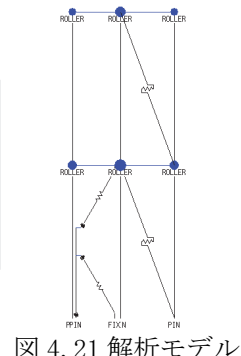


図 4.21 解析モデル

③ 解析結果

図 4.22 に、本システム非設置の 1 階の層せん断力-層間変位関係を示す。

BCJ L2 波では、最大層間変位は 36mm ( $R=1/76\text{rad}$ ) であり、JMA Kobe NS 波では 168mm ( $R=1/16\text{rad}$ ) である。JMA Kobe NS 波

では、耐力壁は剛性を失い、倒壊と判定される状態である。

次に、この建物の1階に2基の本システムを設置したときの1階の層せん断力-層間変位を図4.23に示す。ダンパーの剛性については、所定の性能があるものと仮定した。BCJ L2波では、最大層間変位が16mm ( $R=1/171rad$ )に、JMA Kobe NS波では30mm ( $R=1/91rad$ )に大きく低減した。

表4.5に最大層間変位の一覧を示す。応答変位の時刻歴を図4.24に示す。本システムによって、建物に剛性および減衰が付加された結果、大地震時でも倒壊しないレベルに耐震性能が向上したことが分かる。

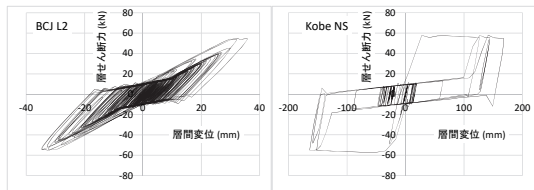


図 4.22 非設置の層せん断力-層間変位関係

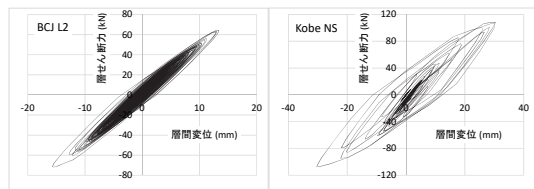


図 4.23 設置の層せん断力-層間変位関係

表 4.5 最大層間変位の一覧

	BCJ L2	JMA Kobe NS
本システム 設置前	36mm (1/76rad)	168mm (1/16rad)
本システム 設置後	16mm (1/171rad)	30mm (1/91rad)

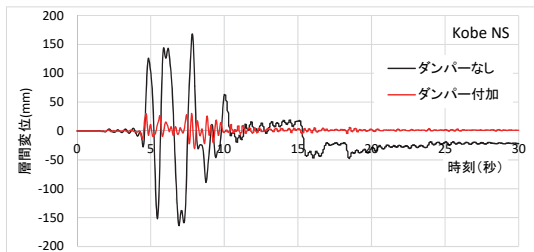
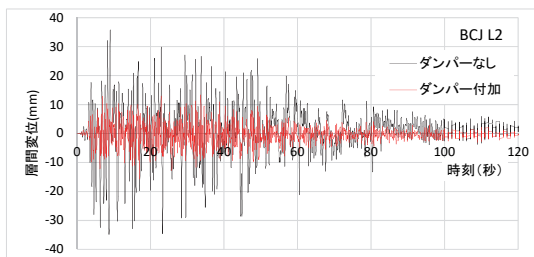


図 4.24 応答層間変位の時刻歴

## (6) 総括

本研究により、以下の知見を得た。

- 温度等の依存性ならびに製造ばらつきを考慮して、剛性を増加させたダンパーを再度試作し、ダンパーの特性を確認した結果、壁倍率7.0が確保できる目標値通りの剛性であることを確認した。

- 高靱性を確保する手段として、滑り挙動に着目し、その挙動を安定させるための皿ばねを適用した要素実験を実施した結果、挙動の安定性向上が確認できた。そこで、この滑り挙動を適用した本制振機構の静的せん断加力実験を再度実施し、各種依存性ならびに製造ばらつきを考慮しても、目標壁倍率の7.0が確保できることを確認した。

- 本制振機構が設置された、壁量充足率が1.5である木造住宅について地震応答解析を実施した結果、BCJ L2波では最大層間変位は16mm ( $1/171rad$ )に、JMA Kobe NS波では30mm ( $1/91rad$ )になることを確認した。これは、本ダンパーがない場合の44%と18%に相当する。

本ダンパーは高い壁倍率を有するため、実際の建物に取り付ける際には、軸組への取り付け部などでの剛性低下が生じないように工夫が必要である。今後は、本ダンパーの実用化のため、軸組への取り付け方法や基礎への緊結方法などの検討を行う予定である。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1件)

- ① 新原剛、古田智基、中尾方人、高減衰ゴムを用いた靱性型高倍率パッシブ制振機構の開発 その1ダンパーと滑り接合部の加力実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、2016、pp.410-411

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古田 智基 (FURUTA, Tomoki)  
第一工業大学・工学部・教授  
研究者番号：50311056

### (2) 研究分担者

中尾 方人 (NAKAO, Masato)  
横浜国立大学・大学院都市イノベーション  
研究院・特別研究教員  
研究者番号：60323937

### (3) 連携研究者

山口 修由 (NAMAGUCHI, Nobuyoshi)  
国立研究開発法人建築研究所  
研究者番号：10370701