

# リング摩擦ダンパーを用いた高性能制振壁の開発

## Development of High-Performance Dampening Wall Using Ring Friction Damper

佐藤 匠<sup>※1</sup>

Takumi Satou

### 【要旨】

これまで一般住宅などの小規模建築に採用されていた木構造建築物は、材料の入手のし易さや施工性の高さから、大規模空間を要する建築物でも採用される事例が増えてきた。さらに耐火性能の向上や国産材の積極的利用推進の動きを背景に、今後様々な用途の建築物に木構造が採用されると考えられる。ただし、これら木構造の自由度拡大のためには水平力抵抗要素である耐力壁の性能向上が必須となる。高剛性かつ高耐力の耐力壁を用いることで、壁量の少ない自由度の高い空間設計が可能となる。

リング摩擦ダンパーを用いた既製の制振壁は壁倍率 2.3 倍の性能評価となっているが、上記の背景によりさらに高性能の制振壁を実現する必要がある。本報では耐力、剛性共に向上した、さらに高性能な制振壁を開発し、その性能確認試験結果について報告する。またその試験結果から一般的な耐力壁の耐震性能指標の一つとして壁倍率の算出を行う。

【キーワード】 摩擦 ダンパー リング 制振 木構造

### 1. はじめに

昨今、木構造を用いた建築物の適用事例が多様になりつつある。これまでの木構造は断面が小さく、市場流通性の高い木質部材(以下、一般流通材)を利用したものであるため、住宅や事務所空間などの比較的壁量確保が容易で、短スパン架構の建築物が多かった。また娯楽施設などの大規模木構造建築物は大断面集成材を使用して建設されており、全国でも限られた工場のみでしか部材の製作ができないため実例が限られていた。しかし近年の木構造は一般流通材や中断面集成材を組み合わせるにより大スパンのトラス架構が実現可能となった<sup>1)</sup>。そのため工場や倉庫といった大規模空間を要する建築物でも木構造が採用される事例が増えている。これらの木質部材は全国で調達可能で、その特性として現場加工が容易で施工性も高いため、他の構造よりも低コストで建設可能な構造であるという認識が広がりつつある。さらに公共建築物等木材利用促進法の制定により、不特定多数が利用する公共施設にも木構造が検討されるようになった。

しかし大規模空間は設計的に高い自由度を要求されるため、壁量の確保が困難となってきている。木構造として一般的な在来軸組構法は、木柱の柱・梁の接合部に過度な耐力が期待できない。よって地震力や風圧力などの

水平方向の力に対しては、耐力壁を設けて耐力を確保する必要がある。しかし広い空間や大きな開口が必要となる建築物では耐力壁の設置可能箇所が少ないため、耐力壁 1 枚当たりの性能を向上させ、少ない枚数の耐力壁で建物全体の耐震性能を確保する必要がある。そのため例えば CLT(Cross Laminated Timber)を用いた耐力壁<sup>2)</sup>など、より高剛性かつ高耐力の耐力壁の開発が進められている。

著者は過去に制振ダンパーを木構造に対応させた、新しい制振壁の開発に着手してきた。制振ダンパーには木構造の大変形にも追従可能となるよう、長いストロークが設定可能なリング摩擦ダンパー<sup>3)</sup>を採用した。写真-1 および図-1 にリング摩擦ダンパーの構成とその原理について示す。

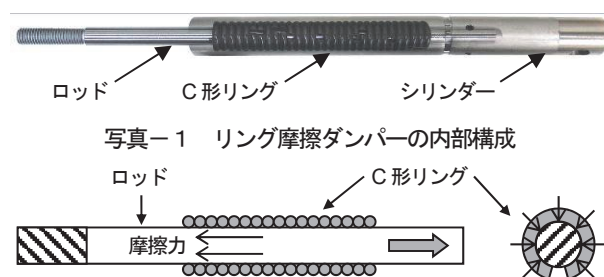


写真-1 リング摩擦ダンパーの内部構成

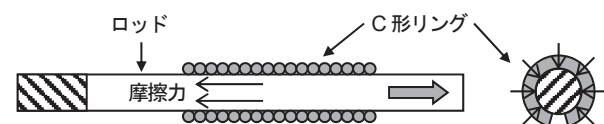


図-1 リング摩擦ダンパーの原理

1. 建築事業本部 耐震ソリューション部 耐震技術 G



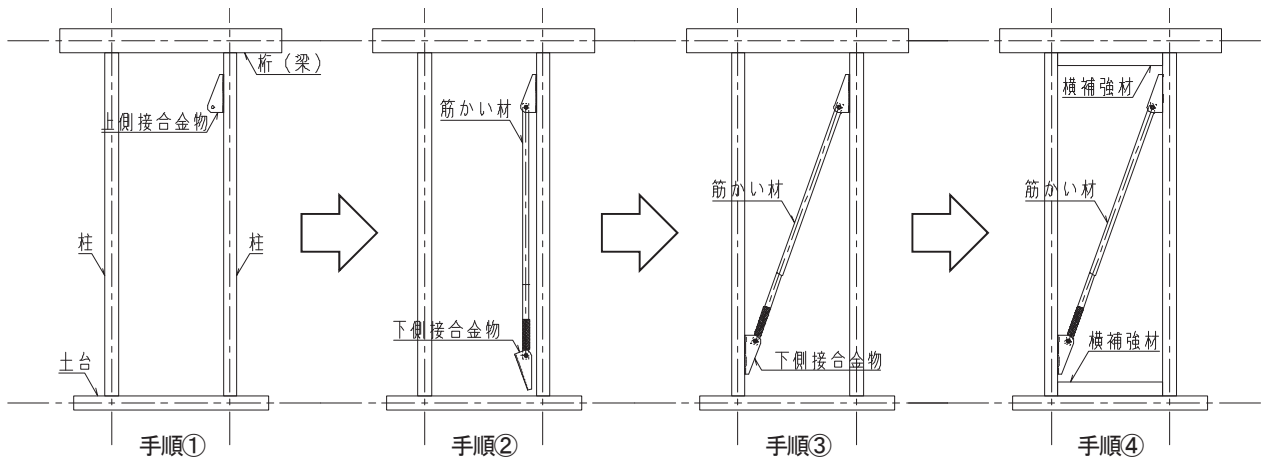


図-4 施工手順

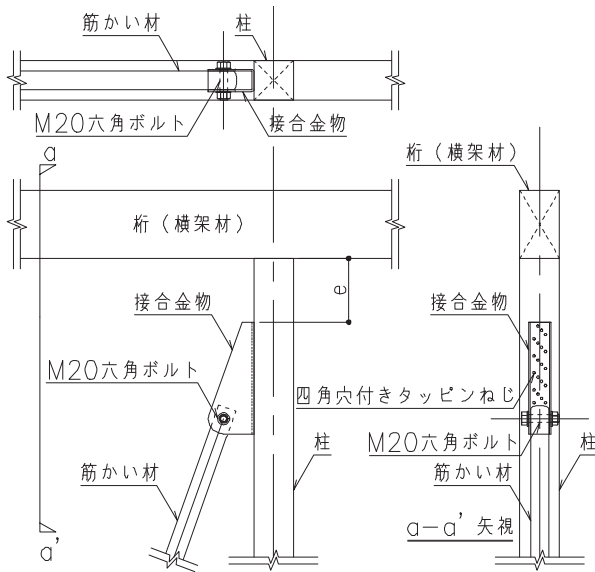


図-5 接合金物施工図

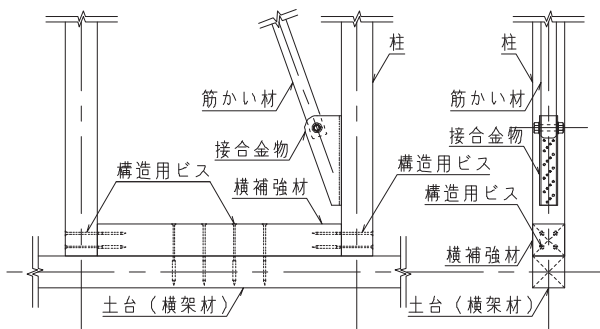


図-6 横補強材施工図

決定される。また点検が容易となるように摩擦ダンパーが下側になるよう取付ける。上下点対称に取り付ける接合金物は四角穴付きタッピンねじを用いて木枠架構内側に取り付ける。上下横架材と柱接合部に設置する横補強材は木質部材であり、原則として柱と同断面とする。筋かいを取り付けるための接合金物は上下それぞれの横架材から同じ離隔距離  $e$  を設けて設置することで、枠内中央に筋かい材を配置させる。これにより筋かい材の設置角度  $\theta$  は  $70^\circ$  程度となる。施工手順を図-4に示す。施工前に接合金物の取付位置や構造ビスの打ち込み位置な

どはあらかじめマーキングを行う。まず上側接合金物を柱側面に取り付ける(手順①)。次に筋かい材と上側接合金物を六角ボルトにてピン接合させ、設置前の下側接合金物を筋かい材下側に同様にピン接合させる(手順②)。下側接合金物をもう一方の柱側面に当て、上下の離隔距離が同じであることを確認した後、下側接合金物を柱側面に設置する(手順③)。最後に上下の横補強材を構造用ビスによって取り付ける(手順④)。また枠内に間柱等設置する場合には、間柱にあらかじめ切り欠き等を設けて、筋かい材との干渉を防ぐ。

接合金物の形状およびその施工図を図-5に示す。接合金物は2枚のガセットプレートによるコの字型の形状をしており柱側面に四角穴付きタッピンねじにより留め付ける。20本の四角穴付きタッピンねじを使用して強固に取付けることにより、応力発生時の接合金物の柱部材からの浮き上がりやズレを抑えている。筋かい材は2枚のガセットプレート間に設置してピン接合させるので、偏心することなく筋かい材を取付けることができる。木質部材による片筋かい材は1枚のガセットプレートを片側から取付けるL字型形状が一般的であるが、この場合、筋かい材に圧縮応力が生じた際に面外方向に座屈破壊する可能性がある<sup>3)</sup>。図-5のように偏心することなく筋かい材を取付けることで、大きな圧縮力が筋かい材に生じても面外方向への座屈やはらみが生じにくい。

また上下横架材と柱の接合部は横補強材により補強を行う。これは接合金物が柱のみに取付けるため、柱頭および柱脚に大きなせん断力が生じ、一般的な柱の接合方法(例えばほぞ接合)では耐力が不足する可能性が高いためである。横補強材による補強施工図を図-6に示す。横補強材は長さ200mmの構造用ビスを用いて取付ける。まず上下それぞれの横架材と横補強材を構造用ビスを一系列に配置して留め付け一体化を図る。次に柱頭および柱脚の枠外側面から構造用ビスを横補強材小口面に向かって4本打込み留め付ける。これにより、柱接合部に対して、枠内方向にせん断力が生じた際には横補強材が、枠

外方向にせん断力が生じた際には横補強材木口面に打ち込んだ構造用ビスがせん断力の一部を負担する。

### 3. 性能確認試験

前章にて説明した本制振壁について、その性能指標値の一つとして壁倍率等による評価を行うため、性能確認試験<sup>⑨</sup>を行った。表-1に使用した木部材の断面寸法および樹種を示し、表-2に試験体形状を示し、図-7に試験体図を示す。

試験体は木枠架構内に筋かい材1本を設置した1構面タイプとし、変動係数を算定するため同じ形状のものを3体用意した。図-7のような横架材間内法距離2650mm

表-1 試験体木材の断面寸法および樹種

部位	断面寸法	樹種
柱	105 × 105	すぎ
桁	105 × 180	べいまつ
土台	105 × 105	すぎ
横補強材	105 × 105	すぎ

表-2 試験体形状寸法

	形状寸法[mm]
試験体名	No. 1/No. 2/No. 3
柱芯間隔	910
横架材間内法寸法(h)	2650
横架材間距離(H)	2792.5
HD金物	高耐力ホールダウンHi

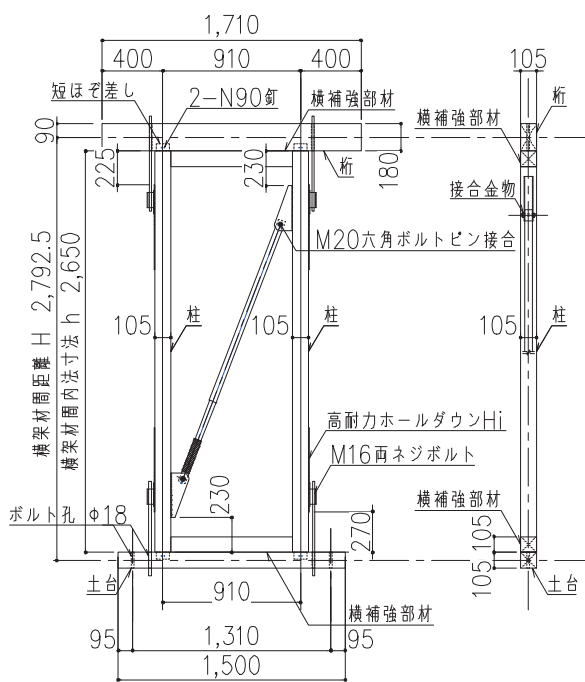


図-7 試験体図

の場合、接合金物の離隔距離  $e$  は上下横架材から230mmとすることで筋かい材を中心に配置することができる。柱頭柱脚は上下横架材に短ほぞ差し(30×90 深さ45mm)によって接合し、N90釘2本によって留め付けた。

試験は文献6に則り、無載荷式の静的加力試験とした。桁は面外方向の変位を拘束した後、加力ジャッキを取付け、土台は試験体下部の治具に固定した。変位計測は桁および土台に水平方向の変位計を取付け、その変位の差分を見掛けのせん断変形とみなした。また両側の柱には鉛直方向の変位計を設置し、柱の浮上りを計測した。載荷方法としてはせん断変形角による制御とし、せん断変形角がそれぞれ1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50radとなるまで正負交番の繰り返し載荷を、各3回ずつ行った。その後正方向にせん断変形角が1/15radに達するまで加力した。各載荷ステップとせん断変形角の関係を図-8に示す。

また使用した摩擦ダンパーについては筋かい材に内蔵する前に単体での静的載荷試験により摩擦荷重の確認を行っている。摩擦ダンパー単体の摩擦荷重確認試験結果を図-9に示す。

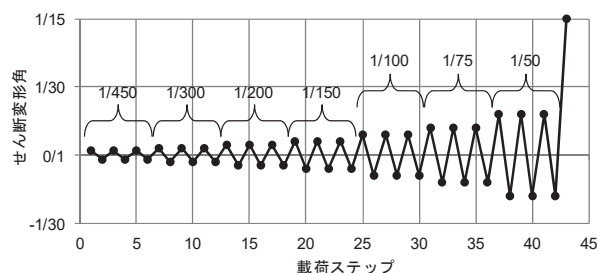


図-8 各載荷ステップのせん断変形角

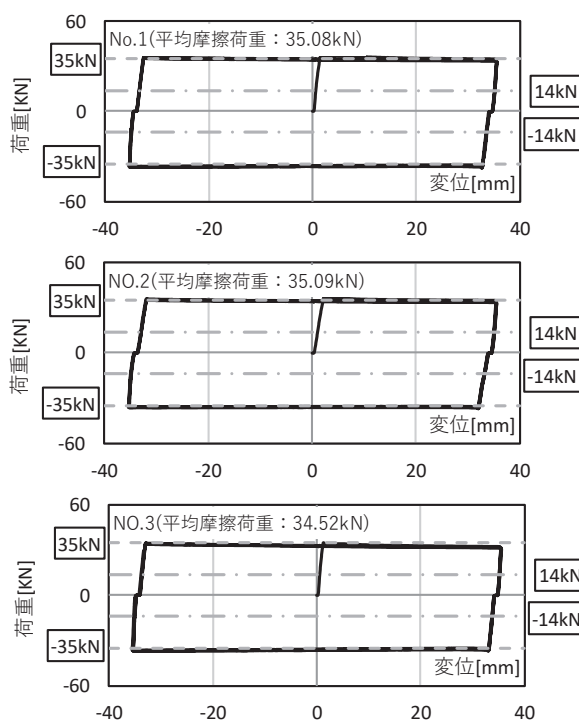


図-9 摩擦ダンパー単体の摩擦荷重確認試験結果

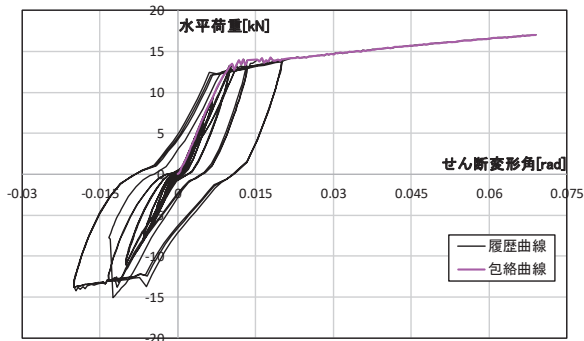
3体の摩擦荷重の平均値は34.9kNであり、全ての摩擦ダンパーが設計摩擦荷重35kNに対し、±2%以内の摩擦荷重であることを確認している。

#### 4. 壁倍率による評価

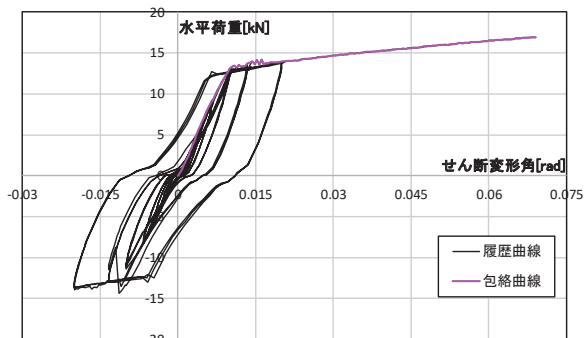
試験結果と壁倍率等を用いた性能評価結果を示す。静的加力試験によって得られた各試験体の水平耐荷重-せん断変形角の履歴曲線と包絡曲線を図-10に示す。3体とも安定した履歴曲線を描いており、また摩擦ダンパーにより大きな履歴面積を得ていることがわかる。水平荷重が0kN付近において、履歴曲線がスリップしているが、これはM20六角ボルトのピンのガタによるものであり、四角穴付きタッピンねじの抜けは確認できなかった。また柱の鉛直変形については、最大で3.85mmの浮上がりが生じた。

水平耐力-せん断変形の履歴曲線から得られた正方向の包絡曲線に着目すると、いずれの試験体も1/100rad前後のせん断変形角が生じた際に剛性が変化し、ダンパーが

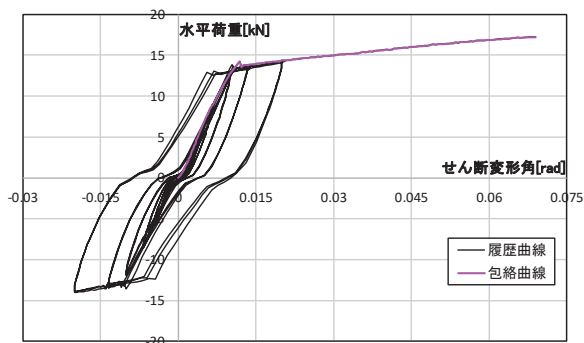
摺動を始めたのがわかる。次に得られた包絡曲線から文献6に則って壁倍率を算定する。短期基準せん断耐力 $P_0$ は、最大耐力や降伏耐力などを評価した4つの評価式を用いて算出し、その最小値を採用することとしている<sup>6)</sup>。試験結果から $P_0$ は、3体とも塑性率を用いた評価式で決定された。なお $P_0$ は9.7kNとなり、壁倍率に変換すると5.4倍という値を得た。また木構造の耐震診断における精密診断法1では耐力壁の基準耐力および基準剛性を診断時に用いている<sup>7)</sup>。それに準拠して本耐力壁の基準耐力および基準剛性を算定すると10.7kN/m、1483.5kN/rad./mとなった。表-3に算定した各種性能指標値を示す。なお摩擦ダンパーは文献3および文献8において周波数依存性や温度依存性についての確認を行い、摩擦ダンパーの耐久性が十分にあることを確認した。よって本報では低減係数を考慮せずに壁倍率を算定している。また比較のため、文献4にある既製の制振壁についても示す。摩擦ダンパー、接合金物および木枠架橋接合部の改良により剛性、耐力ともに2倍程度の性能向上が確認できた。



(a) No. 1



(b) No. 2



(c) No. 3

図-10 各試験体の水平耐荷重-せん断変形角

表-3 制振壁の各種性能指標値

	本制振壁	従来の制振壁 <sup>4)</sup>
壁倍率	5.4	2.3
基準耐力[kN/m]	10.7	4.5
基準剛性[kN/rad./m]	1483.5	727.7

#### 5. 必要制振壁量の概算方法の提案

前章において本制振壁の試験結果から壁倍率や壁倍率や基準耐力などの性能指標値を算出した。よって壁量計算や耐震補強の検討には表-3の数値を参考にして、建物の耐震性能の確認や、引抜防止金物の選定を行うことが可能である。しかし制振建物として大きな減衰効果を期待する場合には、一定以上の制振壁を設置する必要がある。本章では、制振建物を実現させるために最低限必要な制振壁の量を概算により算出する方法を提案する。ただし提案する方法はあくまで概算であり、建物の耐震性を保証するものではない。制振効果を検証するには、明確な設計クライテリアを設定した上で、時刻歴応答解析ソフトを用いて確認するなど、特別な検討を行う必要がある。

必要制振壁量算出のための条件を以下に示す。

- ①建物自体の必要壁量が地震力により決定する。
- ②建物の存在期間中、稀に発生する地震を想定する。
- ③建物各層に生じる水平力の内、30%以上を制振壁が負担する。

これらの条件から、必要制振壁量  $N_i$  の算出式を(1)式のように提案する。

$$N_i = \sum W_i \times A_i \times C_0 \times \beta / P_0 \quad (1)$$

$\sum W_i$  : 検討対象である  $i$  層から上の層重量の合計  
 $A_i$  : 外力分布  
 $C_0$  : 標準せん断力係数  
 $\beta$  : 検討対象とする制振壁の水平力負担率  
 $P_0$  : 短期基準せん断耐力

$\sum W_i$ については建築基準法施行令第 84 条および第 85 条などを参考にして各階の固定荷重と地震用積載荷重を算出して求める。 $C_0$ は条件②より $C_0 = 0.2$ とする。ただし建物の靱性が低い場合などには $C_0 = 0.3$ を採用する。

(1)式のうち $\sum W_i \times A_i \times C_0$ は  $i$  層に生じる地震力を想定している。一般的に地震力算出の際は、この他に振動特性係数  $R_t$ 、地域係数  $Z$  を考慮するが、提案式はあくまで概算式であるため、ここではどちらも安全側の数値として 1.0 を採用している。また条件①により、(1)式は地震力による水平力のみを考慮しているが、桁行方向の建物長さが長い場合などには風圧力による水平力が大きくなる可能性もある。そのような場合には地震力 $\sum W_i \times A_i \times C_0$ を風圧力に読み替えて検討することも可能である。

水平力負担率 $\beta$ は条件③より 0.3 以上の値を採用する。 $\beta \geq 0.3$ は過去に制振補強が行われた実例から概ねの値として暫定的に決定している。ただし、これらの実例は鉄筋コンクリート造や鉄骨造を主な対象としたものである。そのため、 $\beta$ の最低値については今後様々な制振補強建物を調査し、詳細な検討を行う必要がある。また留意すべき点として、木構造建物には通常の壁量計算に用いられる耐震壁の他、品確法における住宅性能表示の際に評価される準耐力壁が存在する。さらに耐震性能評価時には考慮されることのないサイディングや石膏ボード等の内外装材にも、ある程度の耐力があることが報告されている<sup>9)</sup>。これら木構造の予備耐力が大きな建物の場合には $\beta$ を十分大きな値に設定する必要がある。

必要制振壁量  $N_i$  は各層および各方向ごとに算出し、また制振壁の配置については四分割法や偏心率の計算により偏りのない配置となるよう確認を行う。

**Summary** Conventionally wooden construction has been used for small buildings, such as general residences. Wood is also increasingly being used for buildings with large spaces because of the ready availability of wood and its high constructability. In addition, the use of wood in construction is expected to increase in the future due to improvements made in fire resistance and the trend to promote utilization of domestic timber. It should be noted, however, that performance improvement of load bearing walls and horizontal force resistance elements are essential in expanding the use of wooden structures that afford a high degree of freedom. The use of high-rigidity and high-capacity bearing walls will enable the design of spaces with fewer walls and higher degrees of freedom.

Existing damping walls using ring friction dampers are evaluated as magnifying wall performance 2.3 times. Damping walls with much higher performance are required. This paper reports on the development of damping walls providing higher performance with improved bearing capacity and rigidity, and the results of performance confirmation tests. From the test results, wall magnification is calculated as one of the indices of the seismic resistance of general bearing walls. This paper also proposes a simple method of calculating minimum requirements for damping wall quantity.

**Key Words** : Friction, Damper, Ring, Controlled structures, Wooden

## 6. まとめ

本報ではリング摩擦ダンパーを用いた高性能制振壁について、その詳細について説明し性能確認のための静的載荷試験について述べた。試験結果から本制振壁の壁倍率は 5.4 倍相当となり、既製の制振壁と比べて 2 倍程度の性能向上を確認できた。ただし本報における各種性能指標値については、低減係数を 1.0 と仮定したあくまで参考値であり、実際の設計適用時には注意が必要である。

### 【参考文献】

- 1) 日本工業規格 : JIS A 3301 木造校舎の構造設計標準, 2015.
- 2) 国土交通省 : 告示第 611 号, 2016.
- 3) 斎藤誠, 他 4 名 : リングバネを用いた摩擦ダンパーの開発 その 2, その 3, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造 II, pp.865-868, 2012.9.
- 4) 佐藤匠, 他 5 名 : 木構造に適用させたリング摩擦ダンパーの国土交通省大臣認定による壁倍率の取得, とびしま技報 No64, pp. 37-42, 2016.
- 5) 五十田博, 他 2 名 : 2 つ割と 3 つ割り筋かいを持つ木造住宅の振動台実験 - 木造建物の地震時挙動に関する研究 その 5 -, 日本建築学会構造系論文集第 701 号, pp. 969-975, 2014.
- 6) 木造の耐力壁及びその倍率性能試験・評価業務方法書, ハウスプラス確認検査株式会社, 2008.
- 7) 木造住宅の耐震診断と補強方法 例題編・資料編, 一般財団法人日本建築防災協会 国土交通大臣指定耐震改修支援センター, pp.144-145, 2015.
- 8) 斎藤誠, 他 4 名 : リングバネを用いた摩擦ダンパーの開発 その 4 累積滑り量試験および微小振動試験, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.875-876, 2013.
- 9) 松田 和浩, 他 3 名 : 財産保持に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 : その 22 繰返し水平力を受ける在来軸組木造住宅の挙動に対する内外装材の影響, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.427-428, 2008.