

# 伝統木造軸組建物にエネルギー吸収デバイスを付加したときの応答低減効果の検討

## A Study on Improving Earthquake Resistance by Adding Energy Absorbing Devices to Traditional Wooden Frame Buildings

B. 構造 -2. 構造 -7. 木質構造

限界耐力計算 等価線形化法 エネルギー吸収

傾斜復元力 柱 - 貫仕口

正会員

○小出 孟\*

Koide Hajime

同

藤川 大輝\*\*

Fujikawa Daiki

同

井戸田秀樹\*\*\*

Idota Hideki

### 1. 序論

エネルギー吸収によって木質構造の耐震性を向上させるデバイスは現在多数提案されている。しかし、住宅のような在来軸組木造建築に比べ、文化的価値の高い伝統建築に採用する場合には、意匠上の制約などから設置が困難とされる場合が多い。

これまで柱脚に各種ダンパーを付加したもの<sup>1)3)</sup>や、小角材を柱の側面に取り付け有効めり込み面積を増大させたもの<sup>4)</sup>、鉄棒による楔の抜け出しを拘束したもの<sup>5)</sup>など数々の補強方法が提案されてきている。筆者らはこれまでに柱脚部<sup>6)</sup>、柱 - 貫仕口<sup>7)</sup>に付加するデバイスを提案してきた。

これらのデバイスを用いた建物の耐震性能を評価する場合、デバイス単体の性能に加え、建物要に設置可能なデバイス数と、建物全体のエネルギー吸収性能の度合を把握しておくことが重要である。本研究では、提案されているデバイス<sup>6)7)</sup>を対象とし、鐘楼と本堂という異なる耐震要素で構成される伝統建築における耐震性向上の度合について検討する。

### 2. 伝統木造軸組と提案したエネルギー吸収デバイス

#### 2.1 柱脚に取り付ける柱脚デバイス

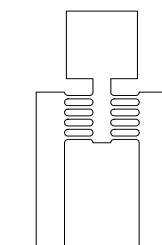
伝統木造軸組で用いられる太径柱には重心が柱幅を超えない範囲では抵抗力を発揮し、それ以上の変形ではP-A効果を進める幾何学的な傾斜復元力という特性が存在する(図1(b))。傾斜復元力の繰返し履歴性状は逆行型であり、エネルギー吸収は発現しない。

これに対し筆者らは、傾斜復元力発現柱の柱脚に付加することでエネルギー吸収を行うとともに大変形時における復元力の向上を目的とした、図1(a)のような鋼板にスリット状の開孔を設けたエネルギー吸収デバイスを提案した。図1(c)は提案デバイスの繰返し引張試験の結果であり、履歴性状より柱の変形に追従することでエネルギー吸収をすることを確認した。

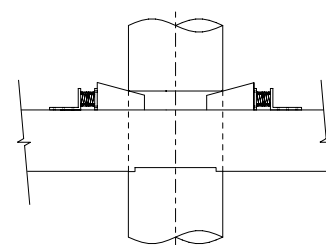
#### 2.2 柱 - 貫仕口に取り付けるばね楔

柱 - 貫仕口は、通し貫をはじめ、楔、差し鴨居仕口などの要素が組み合わさった複雑なものまで多様に存在する。その繰返し履歴性状は木質特有の進行スリップ型である。また、繰返し荷重が加わると楔の抜け出しが生じ、復元力が生じない状態となる。

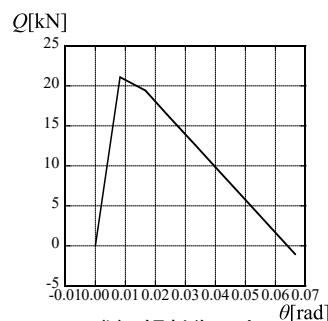
これに対し羽生田らは、図2(a)のような楔の小口にデバイスを取り付けたばね機構を提案し、図2(b)の復



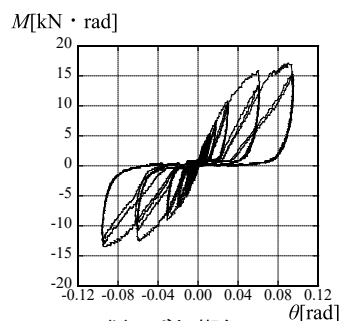
(a) 柱脚デバイス



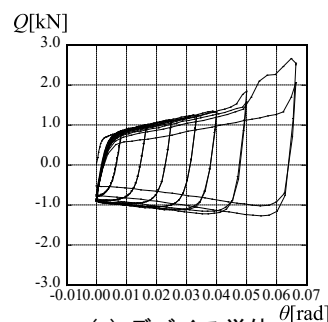
(a) ばね楔



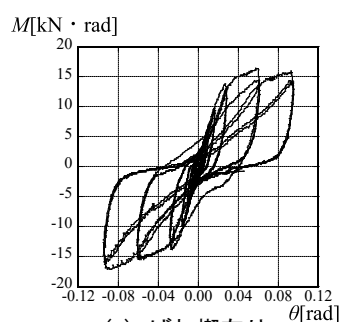
(b) 傾斜復元力



(b) ばね楔無し



(c) デバイス単体



(c) ばね楔有り

図1 柱脚

図2 柱 - 貫仕口

\* 名古屋工業大学大学院工学専攻 博士前期課程

\*\* 亀山建設(株) 修士(工学)

\*\*\* 名古屋工業大学大学院工学専攻 教授・工博

Graduate Student, Nagoya Institute of Technology.

Kameyama Construction, Mr. Eng.

Prof., Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

元力特性を、図2(c)のような紡錘型となった復元力特性へと改善することを示した。

### 3. 等価線形化法の適用

各デバイスのダンパーとしての性能を把握するために、等価線形化法により、等価粘性減衰定数を算出した<sup>8)</sup>。

#### 3.1 等価剛性の算出方法

等価剛性は傾斜復元力を含む全耐震要素の復元力合計における各変形角の最大点の割線剛性とした最大点剛性法で算出した。

#### 3.2 等価粘性減衰定数の算出方法

ポテンシャルエネルギー  $W$  と等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  は図3中の式によって算出した。消費エネルギー  $\Delta W$  に関しては、柱脚デバイス、柱-貫仕口に関しては実際の実験結果の履歴面積により求め、傾斜復元力を除いた他の耐震要素に関してはモデルとなる復元力を参考に図3中の式によって近似的に算出した。その結果を図4に示す。これを見ると貫やその他既存の耐震要素に対しデバイスやばね楔は高い減衰性能を持っていることが分かる。柱脚デバイスが大変形時に下がっているのは、算出の際1サイクルの消費エネルギー  $\Delta W$  を1ループ目と2ループ目の平均から求めたが、提案したデバイスの形状寸法であると  $1/20\text{rad}$  あたりから1ループ目に比べ2ループ目は耐力が下がっていたからであると考えられる。ばね楔の方も若干下がっているのは同様の理由であると考えられる。

#### 3.3 等価線形化法における必要スペクトルの算出

本研究では簡易的に図5に示すような、開放工学的基盤上で与えられる  $h = 5\%$  における加速度スペクトルに対し図6の式のように、表層地盤による加速度増幅率  $G_s$  や周期や有効質量等に応じた調整係数  $p$ 、 $q$ 、振動の減衰による加速度の低減率  $F_h$  を乗じることで各減衰定数に応じた加速度スペクトル  $S$  を求めた。

### 4. 鐘楼を対象とした限界耐力計算による性能評価

寺社建築のうちの一つに比較的小規模な鐘楼がある。鐘楼には柱の傾斜復元力と柱-貫仕口のみで耐震要素が構成されている。ゆえに本研究のような傾斜復元力と柱-貫仕口の改善が建物の耐震性能に対し大きく効果を発揮するのではないかと考える。鐘楼は図7のような平面寸法で、腰貫、飛貫、頭貫が各柱に接合されているものを想定した。それぞれの貫の耐力は通し貫ではなく大入れで計算し、頭貫は柱上部から差し込まれているため適宜調整し減じた。

#### 4.1 特性値

デバイスの効果を検証する上で、4つのケースにわけ

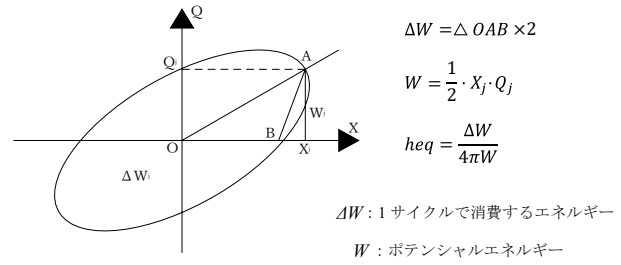


図3 等価粘性減衰定数の導出方法

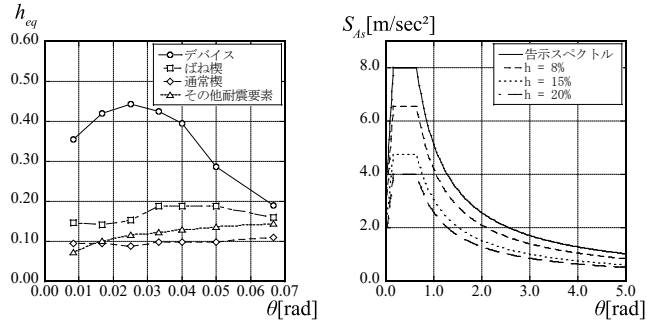


図4 等価粘性減衰定数

図5 加速度スペクトルの低減

稀に発生する地震動:  $S_{Ad} = A_{nd} \cdot G_s \cdot F_h \cdot p \cdot q \cdot Z$   
 極稀に発生する地震動:  $S_{As} = A_{os} \cdot G_s \cdot F_h \cdot p \cdot q \cdot Z$   
 振動の減衰による加速度の低減率:  $F_h = 1.5 / (1 + 10h)$   
 $Z$ : 施工令第88条第1項に規定するZの値

図6 スペクトルの式

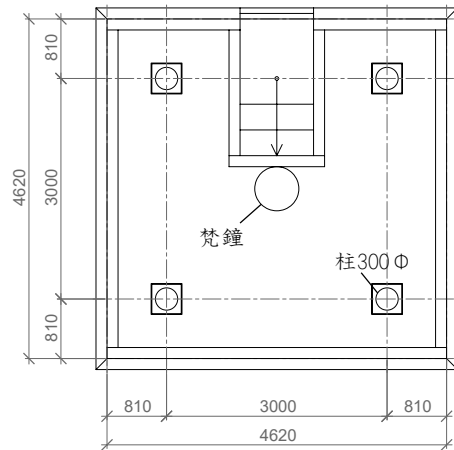


図7 鐘楼の平面図 (mm)

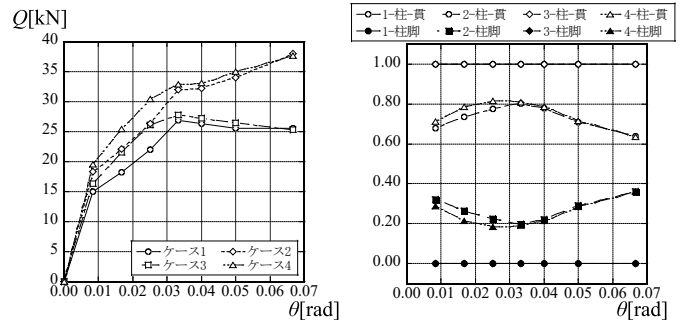


図8 ケース毎の復元力

図9 耐力の分担率

て検証を行う。ケース1から4は、従来、柱脚デバイス付加、ばね楔付加、両デバイス付加というモデルにしている。図8ケース3、4を見ると変形角1/120~1/30radではばね楔の影響が大きく、ケース2、4を見るとそれ以降の大変形時では柱脚デバイスが効いていることがわかる。そのことは図9ケース2、4の分担率の変化を見ても同様の傾向である。これは、大変形にかけて柱脚デバイスの復元力が張力場で上昇してく一方で、ばね楔は進行スリップ型で復元力の増加が見られないからだと考える。図10に鐘樓の減衰定数を示す。3章の等価粘性減衰の結果を各耐震要素の復元力による分担率から建物全体の減衰定数  $h$  を求めた(図10中式)。15%程度のケース1がケース4では25%程度まで改善されていることがわかる。またケース2、3で1/35rad付近ではばね楔と柱脚デバイスの上下が逆転していることから、同時に用いるとより安定した減衰定数を保持できるのではないかと考える。また本研究で用いた柱脚デバイスは施工上圧縮がかかった際効果を発揮しないと仮定し、圧縮が負荷された場合にも効くような施工方法、デバイス形状が提案できれば、柱脚デバイスの分担率も向上し建物全体の減衰性能も改善すると考える。今後その点については検討が必要である。

#### 4.2 応答値

表1に各ケースにおける応答値を示す。これより柱脚デバイス、ばね楔いずれかを付加することで変形の応答は低減されることが確認された。特に極稀な地震動では安全限界1/20radを超えない範囲に収めることができ、大変形領域での応答低減にも期待できることがわかった。低減率や加速度の上昇率については6章で述べる。

### 5. 本堂を対象とした限界耐力計算による性能評価

図11のような耐震要素が貫や傾斜復元力以外にも多数存在する比較的大規模な本堂についての検討を行う。傾斜復元力は太径柱でかつ柱頭柱脚の納まりが柱の剛体回転を許す場合であれば発現するため、本モデルでは図中に示す8本の柱が傾斜復元力の発現柱として想定する。本研究ではこれら8本全てに取付け、梁間方向の応答について検討することにした。また偏心等を無視し、8本以下での応答の比較も検討した

#### 5.1 特性値

4.1と同様に4つのケースで考察する。図12より大変形時にて復元力の低下が抑えられている点で傾斜復元力の改善による効果が確認できる。図13より微小変形時で柱-貫仕口の分担率が上昇し、大変形にかけて柱脚部もその値をあげ、安全限界付近では合わせて30%程度はこの2つの耐力要素が担っている。図14より減衰定数はケー

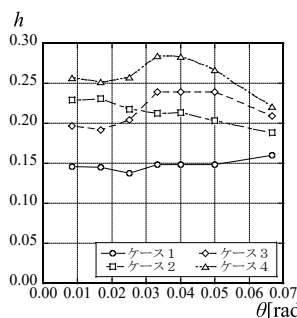


図10 減衰定数

$$h = h_0 + \frac{\sum heq_i \cdot Q_i}{\sum Q_i}$$

$Q_i$ : 各耐震要素の復元力

$h_0$ : 5%の粘性減衰

表1 応答値(鐘樓)

|      | 応答変形角(rad) |        | 応答加速度(m/sec <sup>2</sup> ) |        |
|------|------------|--------|----------------------------|--------|
|      | 稀な地震動      | 極稀な地震動 | 稀な地震動                      | 極稀な地震動 |
| ケース1 | 1/216      | 1/16   | 1.17                       | 3.58   |
| ケース2 | 1/353      | 1/30   | 0.87                       | 4.45   |
| ケース3 | 1/283      | 1/31   | 0.97                       | 3.88   |
| ケース4 | 1/408      | 1/45   | 0.81                       | 4.04   |

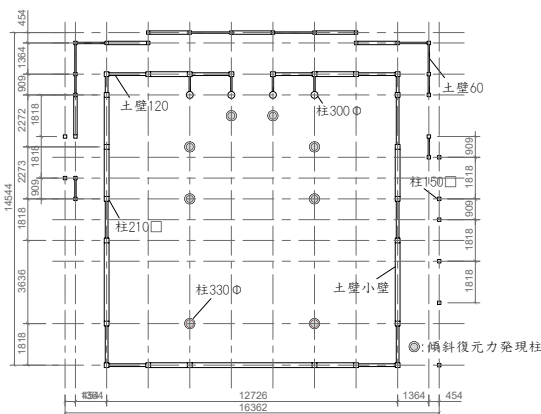


図11 本堂の図面(mm)

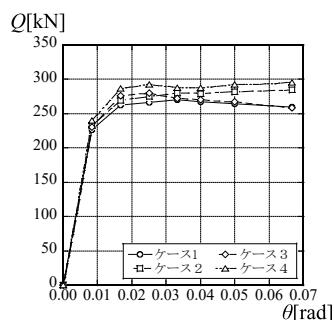


図12 ケース毎の復元力

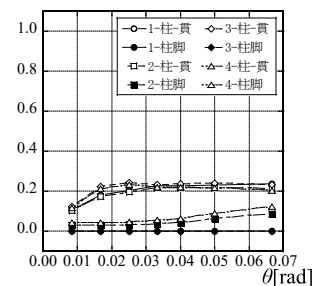


図13 耐力の分担率

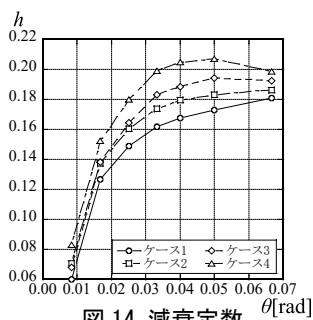


図14 減衰定数

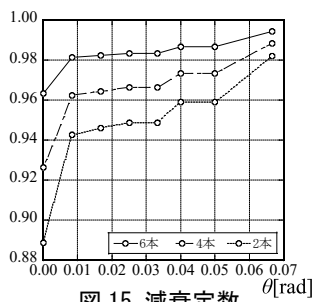


図15 減衰定数

ス1では18%に対しケース4では20%程度確保できている。図15はケース2における柱の本数別の減衰定数を示す。本数に比例して低下していることがわかる。また小変形時ではその低下率が大きい、大変形時では小さくなる。

## 5.2 応答値

表2にケース別の応答値、表3に柱の本数別の応答値を示す。表2を見ると対象としたモデルの応答が、ケース1の時点で損傷限界、安全限界を超えていない、いずれかのデバイスを付加することで応答が低減されていることが分かる。また、表3の応答値よりデバイスを取り付ける柱の本数を変化させることで応答値の低減が比例的にあることから、取り付けるデバイスの性能から適宜本数の調整が容易であることが確かめられた。

## 6. 本堂と鐘楼での応答の相違

建物の持つ全耐震要素に対して占める割合の異なる鐘楼と本堂の応答を比較する。図16(a)を見ると、稀な地震動に対しては本堂の応答低減率が10%前後なのに対して鐘楼では25~45%程度の低減効果を示すこととなった。また(b)より極稀な地震動に対しては本堂が10~25%なのに対し、鐘楼では45~65%となり高い低減効果を示した。これは鐘楼でのデバイス分担率が100%なのに対して、本堂では最大でも30%であったことによる。例えば本堂でも土壁など他の耐震要素を少なくし、各デバイスの耐震要素の分担率を上げれば、減衰性能の向上以外にも、意匠的な自由度が向上することも考えられる。

図17で等価剛性の上昇率を示す。分担率の大きい鐘楼の方が上昇率が高く、等価周期を短くし応答加速度を上げる。このことは図18の極稀な地震動でも観察される。特に鐘楼の場合、梵鐘が取り付けすることで固有周期が短くなるという報告もあり<sup>9)</sup>、崩壊形が建物全体の横転やズレの場合もあるため、デバイスの取り付けに関しては剛性の変化も精度良く評価することが重要である。

## 7. 結論

本稿では、以下の知見が得られた。

鐘楼、本堂いずれにおいてもデバイス付加により柱-貫仕口、傾斜復元力を改善すると応答値の低減になる。その効果は両デバイスを付加したときで、本堂では最大で25%程度、鐘楼では65%程度の応答値の低減がある。

### 【参考文献】

- 1) 濱田航平、花里利一、内田龍一郎、佐藤信夫、坂本功、三須基規：伝統的木造建物の柱脚部制振に関する研究、日本建築学会大会学術演説梗概集、2020.9
- 2) 魚津忠弘、石垣秀典、石丸辰治：伝統構法で建てられた鐘楼の耐震改修について、日本建築学会大会学術演説梗概集、2007.8

表2 応答値（本堂）

|      | 応答変形角(rad) |        | 応答加速度(m/sec <sup>2</sup> ) |        |
|------|------------|--------|----------------------------|--------|
|      | 稀な地震動      | 極稀な地震動 | 稀な地震動                      | 極稀な地震動 |
| ケース1 | 1/159      | 1/27   | 1.62                       | 2.54   |
| ケース2 | 1/172      | 1/30   | 1.54                       | 2.65   |
| ケース3 | 1/168      | 1/31   | 1.55                       | 2.59   |
| ケース4 | 1/187      | 1/35   | 1.46                       | 2.75   |

表3 応答値

|    | 応答変形角(rad) |        | 応答加速度(m/sec <sup>2</sup> ) |        |
|----|------------|--------|----------------------------|--------|
|    | 稀な地震動      | 極稀な地震動 | 稀な地震動                      | 極稀な地震動 |
| 8本 | 1/172      | 1/30   | 162.66                     | 279.90 |
| 6本 | 1/169      | 1/30   | 164.60                     | 277.47 |
| 4本 | 1/165      | 1/29   | 166.62                     | 274.71 |
| 2本 | 1/162      | 1/28   | 161.96                     | 271.83 |

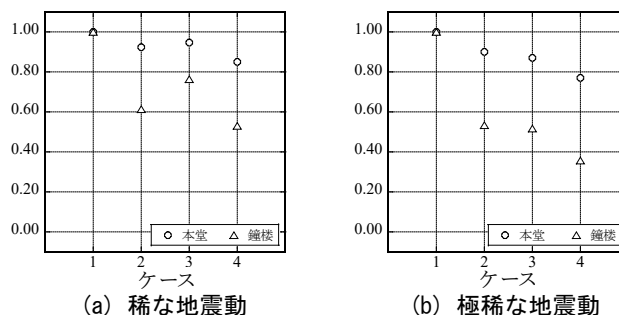


図16 応答の低減率

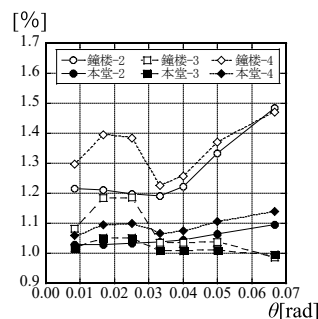


図17 等価剛性上昇率

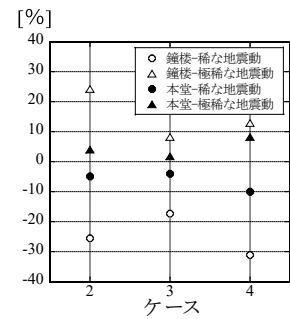


図18 応答加速度上昇率

- 3) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：『伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル-限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法-』、学芸出版社、2008.12
- 4) 吉田拓也、古川忠稔、堀内征弘：柱-貫接合部のモーメント抵抗性能の向上に関する研究-楔および小角材を用いた各種の補強方法の効果検証-、日本建築学会東海支部研究報告集、pp.365-368,2014.2
- 5) 楠寿博、木林長仁、伊藤正：貫接合部の曲げ性能実験と性能向上のための一つの試み、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造-III、pp.505-510、2009.7
- 6) 小出孟、藤川大輝、井戸田秀樹：鋼製ダンパーを用いた伝統木造軸組における傾斜復元力の改善、日本建築学会東海支部研究報告集、2021.2
- 7) 羽生田善将、藤川大輝、井戸田秀樹、小野徹郎：楔に新たな機構を付与した伝統木造寺社建築の柱-貫仕口の提案、日本建築学会論文集、pp.343-353、2020.3
- 8) 柴田明徳：『最新耐震構造解析』、森北出版、1999.3
- 9) 宮高芳信、森山敏行、西川英佑、西澤英和：伝統的な木造鐘楼の振動性状に関する実験的研究、日本建築学会東支研究報告集、2006.9