

# 木造建築物の振動計測と立体解析モデルを用いた 連結制震による応答低減効果の検討

Study on connecting seismic control system for wooden building using vibration measurement and three-dimensional analysis model

中西裕也<sup>1</sup>・吉富信太<sup>2</sup>

Yuya Nakanishi and Shinta Yoshitomi

<sup>1</sup>立命館大学大学院 理工学研究科環境都市専攻 博士課程前期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate Student, Ritsumeikan University, Graduate School of Science and Engineering

<sup>2</sup>立命館大学教授 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Architecture and Urban Design

In this paper, the effect of connecting seismic control system for traditional wooden building is examined. The target building is traditional old house with a roof of thatch. In this study, the three-dimensional analysis model of the old house is conducted considering the actual vibration measurement data, and the effect of connecting seismic control system is examined by using conducted 3D models with different damping performance and floor stiffness. As a result, it is shown that the floor stiffness affect the response reduction performance of connecting vibration control system.

**Keywords:** multi-point vibration measurement, three-dimensional frame model, connected vibration control, traditional construction method, wooden building

## 1. はじめに

日本には伝統工法の木造建築が多く存在しており、文化的価値の高い建物の場合、耐震補強が必要な場合にも建物に極力手を加えたくないという要請がある。建物内部に手を加えない制振補強方法として連結制振構法が提案されており、主としてビル建物を想定した定点理論を用いた研究<sup>1)</sup>や固有振動数や減衰定数に関する研究<sup>2)</sup>が行われている。木造住宅に連結制振構法を用いる提案もされているが<sup>3)</sup>、剛床を仮定したモデルを用いて検討されており、柔床的な挙動をする木造建物を対象とした検討は十分ではない。本研究では、大分県中津市に現存する茅葺屋根の古民家を対象として、床剛性と連結制震の効果の関係について解析的に検討を行うことを目的とする。この建物の振動を多点同時計測した結果を参照することで、同建物の剛床立体架構モデルを用いた連結制震構法の予備的な検討を発展させ、柔床特性を実建物に近くなるよう調整した立体架構モデルを用いて、連結制振効果の検討を行う。

## 2. 茅葺古民家の振動計測データと立体架構モデルの比較

### (1) 多点振動計測

振動計測は中津市の古民家を対象とし、図1のように微動計13台と小屋レベルに起震機を設置して行われた(図1,2)。起震機による正弦波、ランダム波、スイープ波の加振の他に、常時微動及び人力による建物の応答を分析した。本建物は小屋レベルに面材がないため、床剛性が極めて小さく柔床的な挙動をする。



写真1 建物外観



写真2 建物内観



写真3 起振機



図1 機器設置位置図

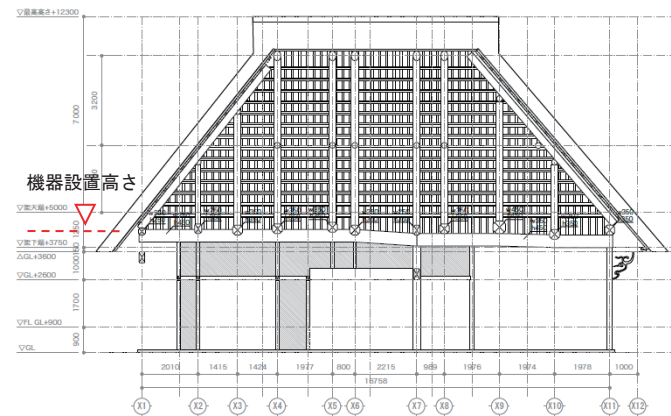


図2 X方向立面図

## (2) 立体架構モデル

古民家の実測調査に基づく予備検討では、構造解析ソフトSNAPを用いて立体架構モデルを作成している。木造建物の主たる耐力要素として土壁や小壁を表すばねや、柱梁の仕口部や天井の交差部分の柔らかさを表現するばねを文献<sup>4)</sup>に基づいて設定している。土壁部分は基準サイズの復元力特性<sup>4)</sup>を、壁の幅に比例、高さに反比例するように性能を調整してばねの特性として与える。仕口についてはほぼその復元力特性<sup>4)</sup>を参考に回転ばね特性を $rz=0.1$ と十分小さい値に設定し、ずれや抜けは生じないものとし、並進方向のばねにはTX、TY、TZ=10000とそれぞれの方向に大きな剛性を与える。

モデルでは8種類の梁を使用し、天井部分の梁のモデル化の際には断面寸法(mm)が450×450、250×250、350×350、250×350、150×150、250×450の6種類の梁を使用する。天井の梁は途中で大きさが変わることがあるため、詳しい再現のため途中で梁の大きさを変えている(図3、図4)。柱は断面寸法(mm)が100×100、135×135、160×156、240×240、300×300、205×205の6種類を使用する。前述したように耐力要素として土壁が挿入されており、土壁の荷重は改修前の耐震性能評価を基に $1.60\text{kN/m}^2$ を設定している。また、木造を表現するために立体架構モデル上で柱や梁に使われる材料はヒノキを想定してヤング係数は $9000\text{N/mm}^2$ に、せん断弾性係数は $8000\text{N/mm}^2$ とする。

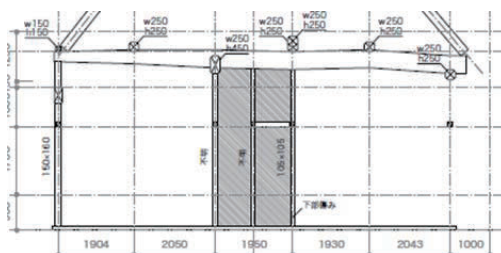


図3 X3通り断面図



図4 X3通り断面図 (モデル)

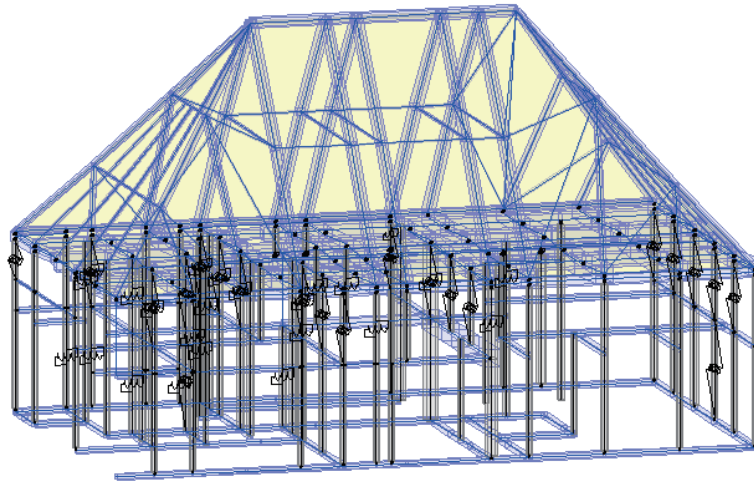


図5 立体架構モデル

### (3) 実測データと立体架構モデルの振動性状の比較

予備検討で用いた立体架構モデルの妥当性を実測との比較で検証する。高振動数成分まで特徴を抽出しやすいため、起震機に短辺方向のスweep波を入力したときの応答を比較する。

図6はそれぞれの固有振動数に近い振動数のスweep波に対する実測と解析の伝達特性（起震機加速度に対する応答加速度）を図化したものである。実測は柔床的な挙動であるのに対し、解析モデルでは剛床的な挙動をしている。図7は実測と解析の伝達特性をグラフ化したものである。実建物の加速度伝達関数で高振動数で多くのピークがみられるのは、柔床的な挙動をする建物の特徴である。実測の固有振動数が2.5(Hz)であるのに対して、解析モデルは1.5(Hz)であり、固有振動数に違いが見られる。また、柔床的な挙動に対応する高振動数領域での伝達特性の違いも見られる。

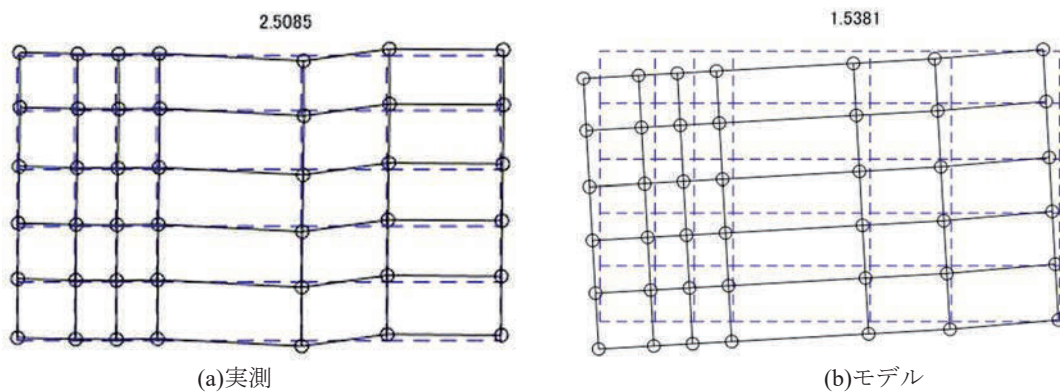


図6 振動挙動（伝達関数）

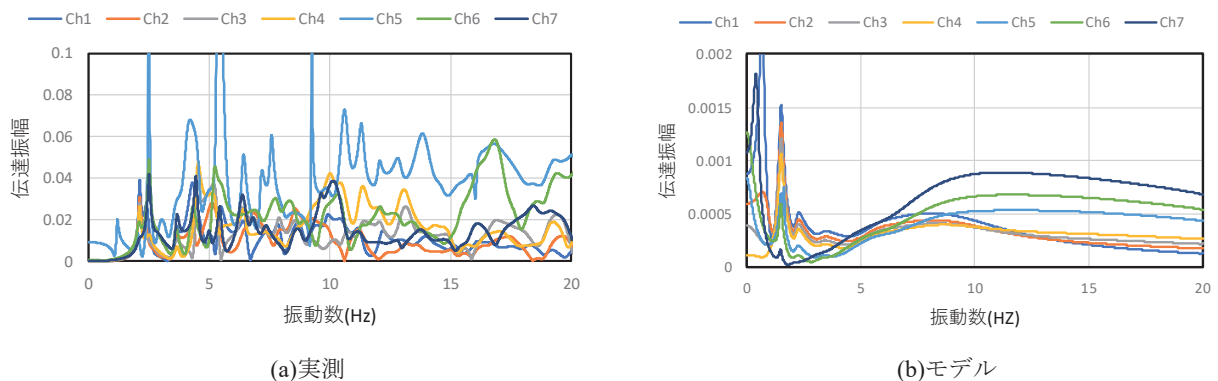


図7 短辺方向伝達関数



### 3. 立体解析モデルの再現性の向上

#### (1) 立体架構モデルの調整

前節の結果から、予備検討で用いた立体架構モデルでは木造建物の柔床の挙動を再現できていないといえる。本研究では、実際の木造建物の接合部分の柔らかさによる柔床的な挙動を表現できる解析モデルを構築して、そのモデルを用いて連結制振構法の効果を検討するため、図6、7の実測による伝達特性を参考にして、振動特性が類似するようにモデルの接合部分に設置したばね等に以下の調整を施す。いずれも剛床的な挙動をする要因について、剛性を低くすることで柔床的な挙動となることを期待するものである。

- ① 既往のモデルには主に天井の梁の交差部分にばねが入れているが、天井部分以外の梁と柱の交差部分にばねを加える。
- ② 屋根と梁の接合部分を表現するために、屋根と梁の間にばねを加える。
- ③ 実測の挙動に近づけるため、ばねの値を調整する。既往のモデルの固有振動数が、実建物の固有振動数よりも小さかったことから、既往ではばねのねじれに対する剛性 ( $\text{kNm/rad}$ ) は $r_x, r_y=61.48$   $r_z=0.1$ だったが、 $r_x, r_y=20000$   $r_z=100$ に値を変更した。



写真4 屋根と梁の接合部

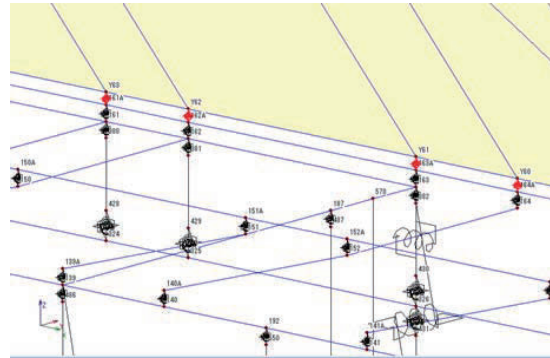


図8 接合部のスプリング

#### (2) 調整後の再現性

図9は調整を施したモデルの固有振動数付近の振動を与えたときの挙動を示したもので、図10は伝達特性をグラフ化したものである。図6と比較すると、調整後のモデルの方が既往のモデルより柔床を再現できている。また、調整後のモデルの固有振動数は $2.4(\text{Hz})$ であり、図7、10から固有周期が実建物に近づいていることが分かる。以上のことから、今回のモデルのほうが、既往のモデルよりも実際の挙動を再現できているといえる。実測と解析モデルで固有周期や、伝達振幅の定量的な差が見られるため、より精度を高めるにはさらに荷重や建物の剛性の変更などが必要である。

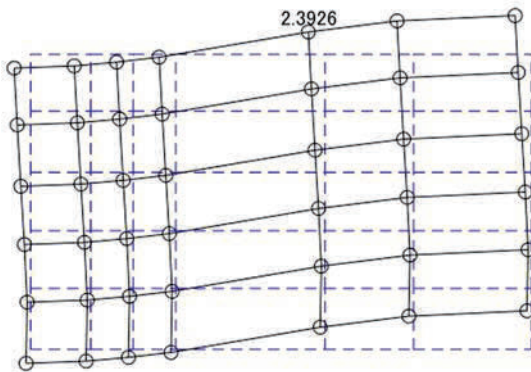


図9 振動挙動（調整後）

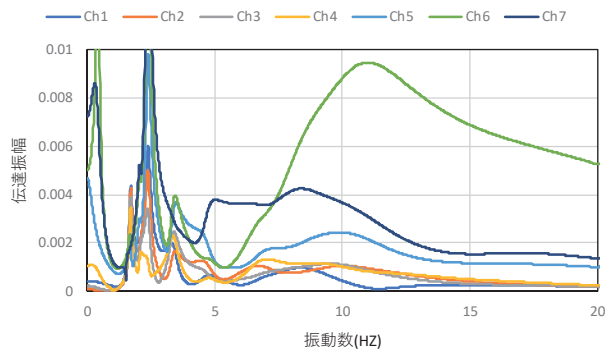


図10 短辺方向伝達関数（調整後）

#### 4. 連結制振構法による応答低減効果の検討

図11、12の赤枠で示す二本のコンクリートの連結柱を建物外部に設け、建物と連結ダンパーで連結し、減衰係数 $C_e$ を0.2、2、40、80(kNs/m)に変化させた場合の応答低減効果を確認する。図13~16はX1、Y1の交点を原点として、X、Y方向地震時の各通りの最大変位と応答低減率のモデル調整前後比較を示す。なお、調整前のモデルを剛床モデル、調整後のモデルを柔床モデルとして、地震波はEl Centro 1940 NSを使用する。

図13、14より、剛床モデルでは変位が通りに関して直線的に変化するのに対し、柔床モデルでは直線的ではないことがわかる。また、連結制振を用いた場合、剛床モデルでは全体的に応答が減少しているが、柔床モデルではX方向の揺れに対してはダンパーと連結している端部の片側が、Y方向の揺れに対しては連結している両端の応答が大きく減少し、非連結部分の応答は連結部分ほど低減しないことがわかる。これはX方向の揺れに対しては寄棟屋根の妻側がトラス構造としてある程度変形拘束効果があるのに対して、Y方向の揺れに対しては平側が台形のためトラスによる変形拘束効果が期待できないためだと考えられる。

図15、16には各モデルの応答低減率を示す。なお、ここでの応答低減率はダンパー連結時の応答を、非連結時の応答で除したものである。剛床の場合はダンパーの減衰係数を増やすと応答が単調に減少せず、ダンパー量の増加に伴い応答が増えることもある。連結制振ではダンパー量が増大して取付RC柱が相対的に柔になるとダンパーの効率が低下するため、RC柱剛性も含めた適切なダンパー量の導入が必要である。また剛床の場合、応答低減率が1を超える箇所もあるが、剛床の荷重伝達により偏心によるねじれ挙動が低減され応答の小さな構面の荷重負担が増えるためである。柔床の場合、非連結部分の応答低減効果が小さいため、連結制振によって建物全体の応答を下げるには床の補強による床剛性の向上が必要だと考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では既往の木造茅葺小屋の振動計測に基づいて、実際の柔床的挙動を再現するために接合部のスプリングを調整した立体架構モデルを構築した。また、その構築したモデルを用いて連結制振の地震時応答低減効果について検討した。柔床の場合は連結部分の応答は低減されるが非連結部分の応答が低減せず、連結制震によって全体的な応答低減効果を得るには床を補強して剛床とする必要があるといえる。

一方で、調整後のモデルと実建物では高振動時の増幅や伝達振幅の値に違いがみられたため、剛性や荷重の値を調整する必要がある。また、調整後のモデルはY方向の揺れに対しては連結している両側の応答が大きく減少し、X方向の揺れに対しては片側の応答だけが大きく減少した。このことから屋根による拘束が揺れに与える影響について検討する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 蔭山満・安井譲・背戸一登：連結制振の基本モデルにおける連結バネとダンパーの最適解の誘導，日本建築学会構造系論文集 第529号，97-104，2000年3月
- 2) 満田衛資・大淵充紀・辻聖晃・竹脇出：連結制振構法を用いた建物の固有振動および減衰に関する基本特性，日本建築学会構造系論文集 第79巻 第696号 pp.227-236, 2014年2月
- 3) 服部梨紗・辻聖晃：鋼製独立柱とのダンパー連結による木造住宅の耐震性能向上法（2階補強と併用する場合の設計手順），鋼構造論文集，第24巻第94号，pp.23-34，2017.6
- 4) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：伝統工法を生かす木造耐震設計マニュアル，学芸出版社,2004

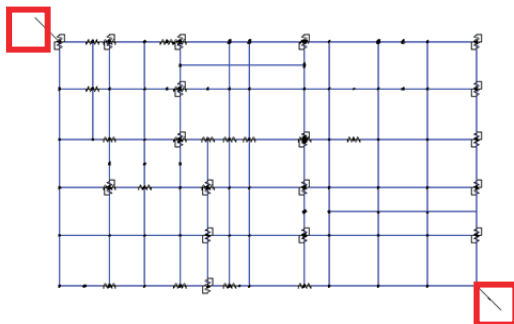


図11 平面図（モデル）

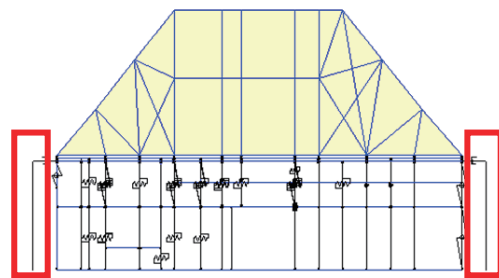
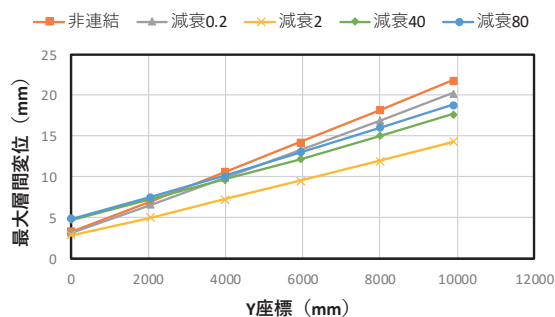
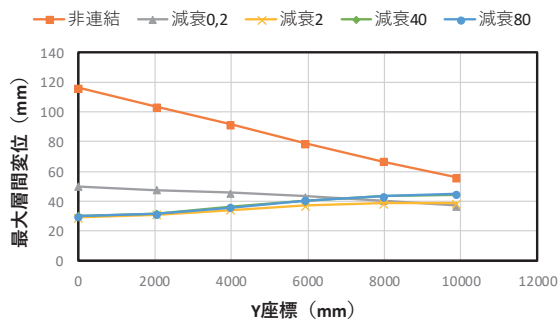


図12 立面図（モデル）

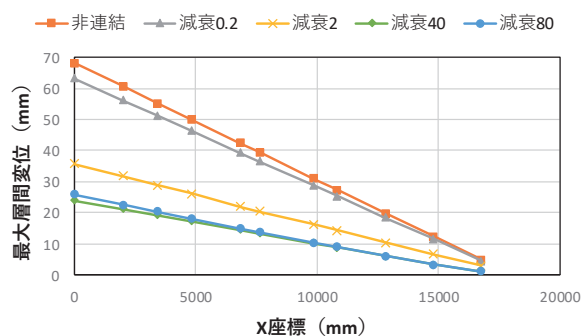


(a) 剛床モデル

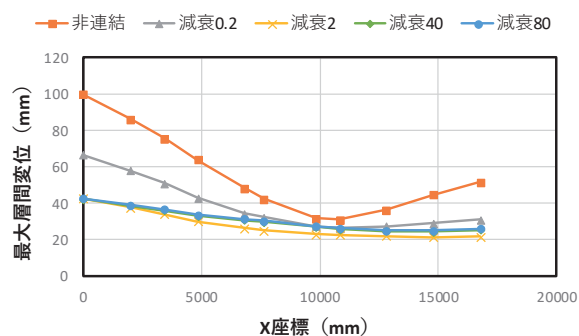


(b) 柔床モデル

図13 モデル調整前後の最大応答比較 (Elcentro X方向入力時)

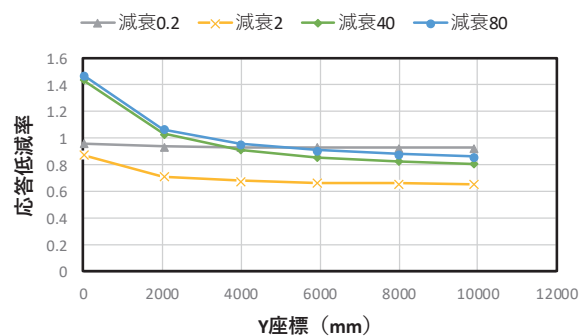


(a) 剛床モデル

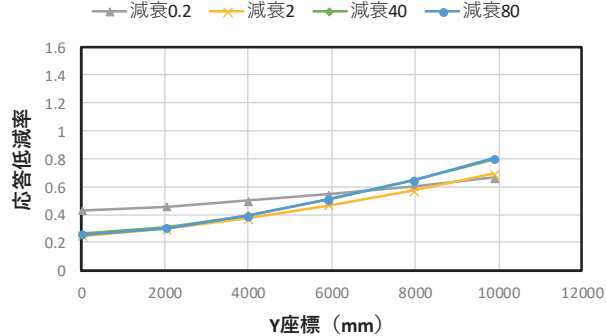


(b) 柔床モデル

図14 モデル調整前後の最大応答比較 (Elcentro Y方向入力時)

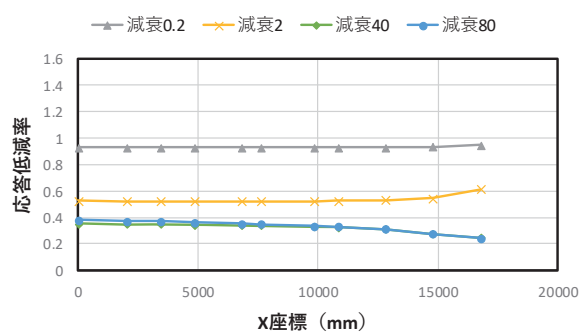


(a) 剛床モデル

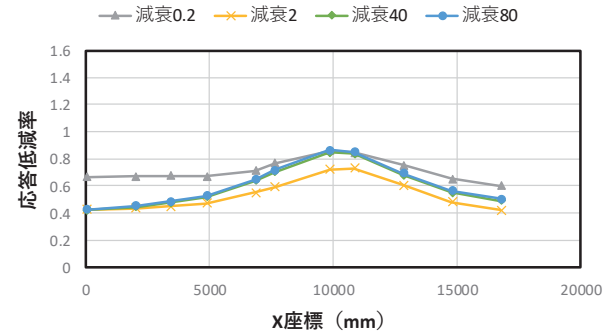


(b) 柔床モデル

図15 モデル調整前後の応答低減率比較 (Elcentro X方向入力時)



(a) 剛床モデル



(b) 柔床モデル

図16 モデル調整前後の応答低減率比較 (Elcentro Y方向入力時)