

# 「木造寺院建築物、特に山門に付属する階段を用いた耐震補強技術の開発」

立命館大学 鈴木祥之・向坊恭介

## ◆ 実験の目的

大規模木造寺院の山門には、上層へ上がるための階段が付属していることがある。例えば、東本願寺御影堂門には、南面および北面に階段が取り付けられている（写真1）。この階段を利用して、基礎-階段、建屋-階段の接合部分（図1）へ制震ダンパーを挿入し、相対変位によるエネルギー消費によって建屋の応答を低減する技術を開発し、本実験によってその効果を検証することを目的とする。

本実験に基づいて開発する階段を活用した技術を応用すれば、美観や利用者の利便性を損なわない耐震補強・耐震改修が可能になると考える。



写真1 東本願寺御影堂門の階段

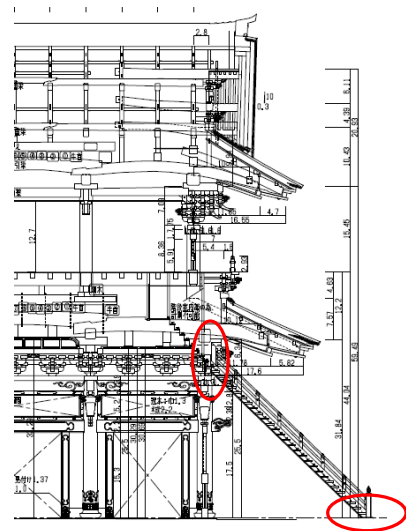


図1 階段の取り付け部分

## ◆ 実験日程

実験期間は平成25年10月28日（月）～11月8日（金）で、具体的な作業内容は下表のとおりである。

表1 実験日程

	10月				11月									
	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日
架台	設置											撤去		
試験体		設置										撤去		
計測			設置	設置	設置						撤去			
加振									加振	加振				

◆ 試験体

1) 軸組

2003 年度の実験に用いられた軸組を再利用した。立面図と伏せ図を図 2、3 に示す。円柱 4 本と牛引梁、土居桁からなる架構で、平面寸法は、柱脚芯々で 1,750mm×1,000mm、桁天までの高さ 2101mm である。部材の断面寸法は、柱が断面  $\phi=147\text{mm}$ 、足固めは長手・短手幅 64mm×成 110mm、短手虹梁は幅 50mm×成 100mm、通肘木は幅 44mm×成 50mm、土居桁は幅 140mm×成 264mm、牛引梁は幅 140mm×成 160mm である。使用樹種は、柱がヒノキ、牛引梁・土居桁がベイマツ、その他の横架材がベイヒバ、雇いほぞ・車知栓・込み栓がカシである。なお、以前の実験でひび割れが入った土居盤は木ねじで開き止めし、柱脚部には割れ止めの鉄輪を取り付けた。

また、重量として鋼製錘 6tof を牛引き梁へボルトで固定した。軸組と鋼製錘、後述するダンパーを考慮した質点系重量は 63.3kN であった。

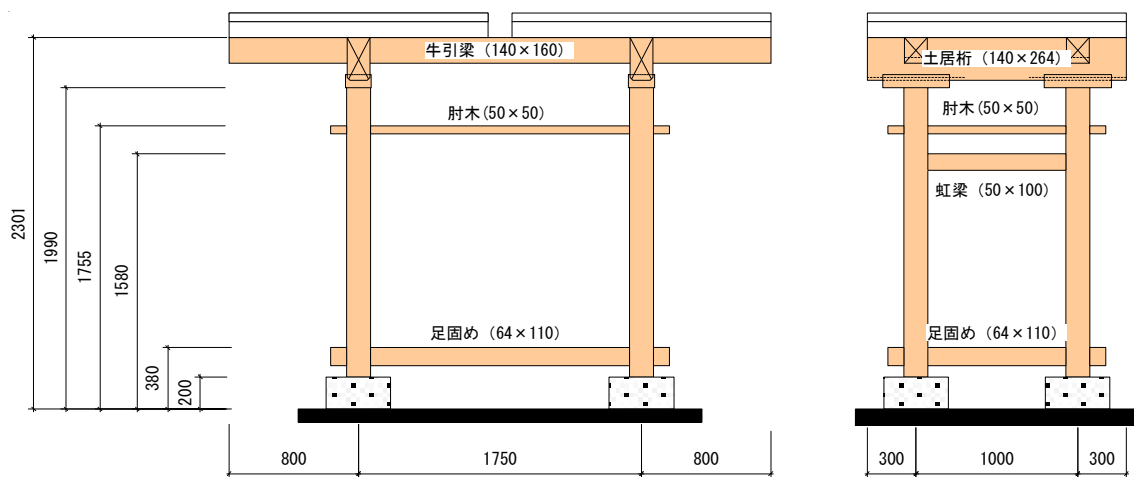


図 2 試験体軸組立面図

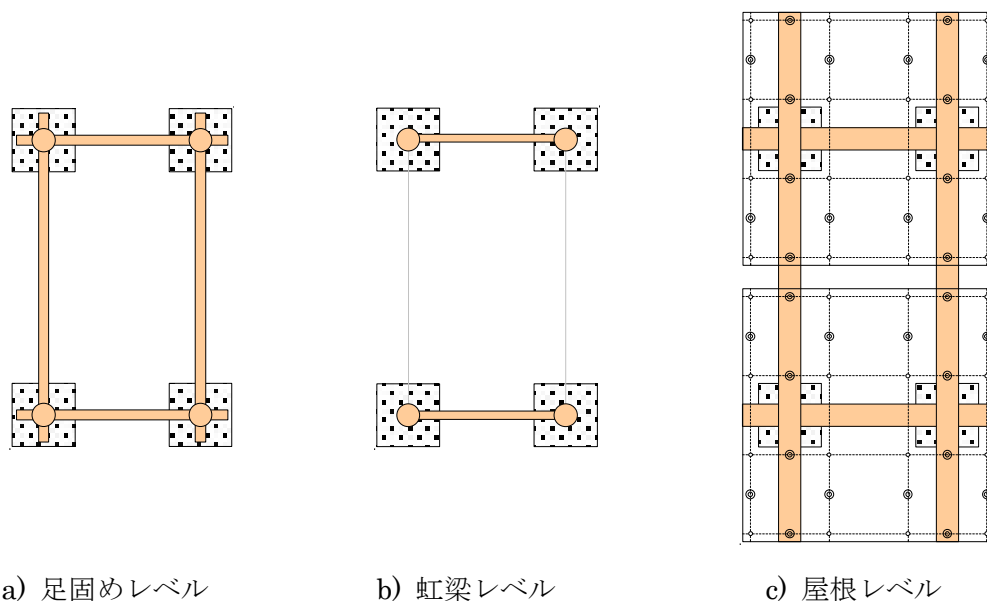


図 3 試験体軸組伏せ図

## 2) 階段およびダンパー

試験体軸組の短辺方向に両側から階段を設置し、振動台-階段、軸組-階段の接合部分にゴムダンパーを挿入した。試験体全体の模式図を図4、5に示す。ゴムダンパーは、水平剛性の調整および接合部分の安定性のため、小さなピースを平面的に4または6箇所並べ、2または3段積みユニットとした。上部ダンパーは、柱頭に追加した長押へボルトで留めつけた。また、下部ダンパーは階段の軸方向のみ変位するようにガイドのための治具を取り付けた。

試験体全景およびダンパーの状況を写真2～10に示す。

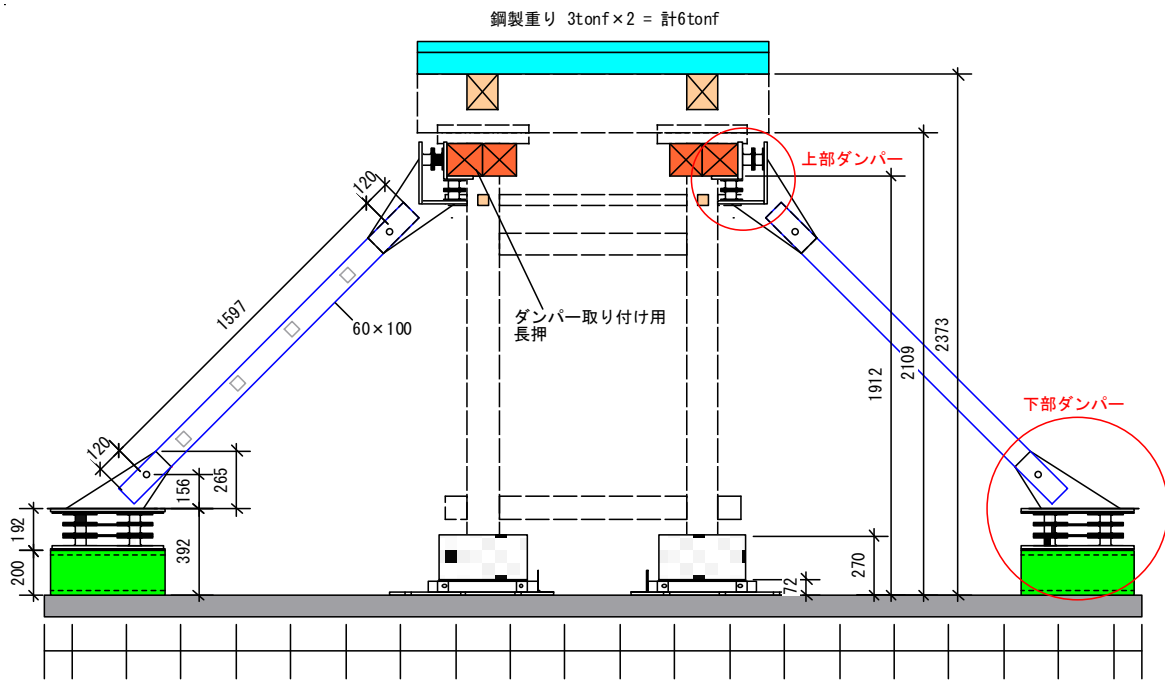


図4 試験体短辺方向模式図

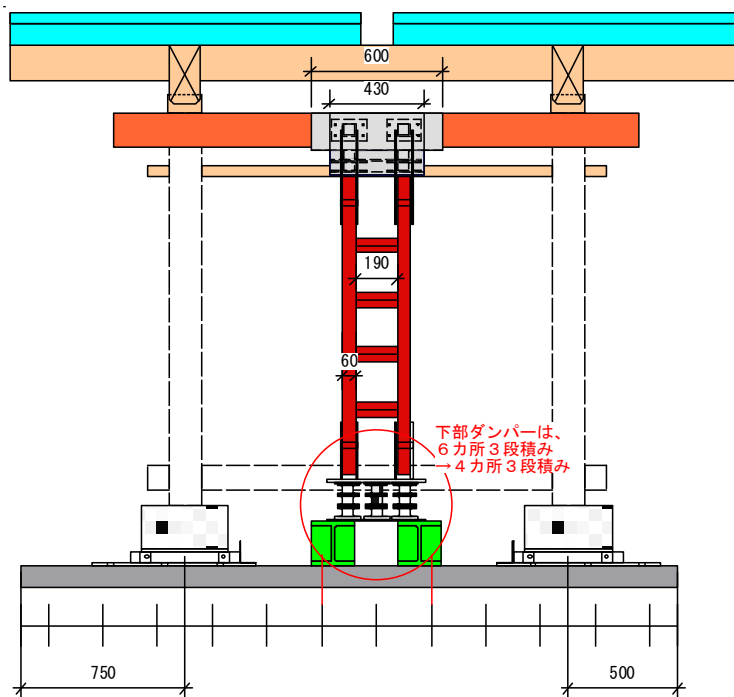


図5 試験体長辺方向模式図

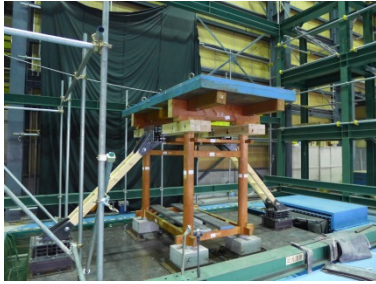


写真2 試験体全景1



写真3 試験体全景2

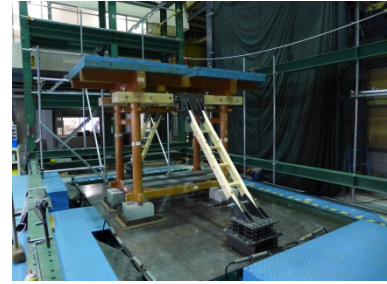


写真4 試験体全景3

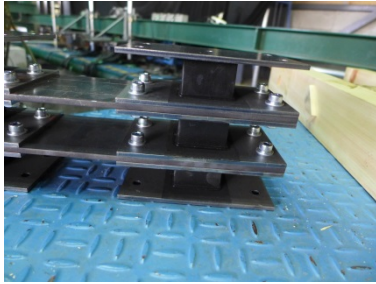


写真5 ゴムダンパー

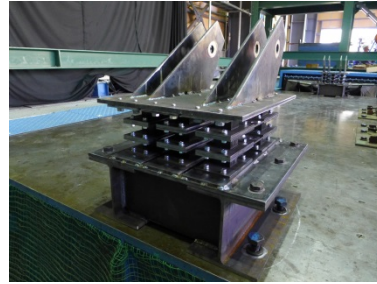


写真6 下部ダンパー

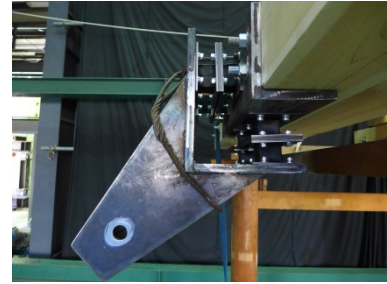


写真7 上部ダンパー



写真8 下部ダンパーのガット1



写真9 下部ダンパーのガット2



写真10 長押との取合い部

#### ◆ 加振計画

入力波として、正弦波 0.5Hz、1Hz、1.5Hz、兵庫県南部地震で記録された JMA 神戸波 NS 成分、花折断層想定波を用いた。それぞれ、加速度振幅を調整して入力した。また、振動特性を把握するためのホワイトノイズ波加振を振幅  $10\text{cm/s}^2$  で適宜実施した。

加振1日目では、まず、上部ダンパー（4箇所×2段積み）、下部ダンパー（6箇所×3段積み）で実験を行った後、下部ダンパーを4箇所×3段積みに変更した。加振2日目では、階段およびダンパーを撤去し、まず、長押のみを残した状態で実験し、その後、長押を撤去した。実施した加振の一覧を表2に示す。なお、試験体短辺方向を X 方向、長辺方向を Y 方向としている。

表2 実施加振一覧

入力波	PGA [gal]	階段補強有り						階段補強無し			
		下部ダンパー 6箇所		下部ダンパー 4箇所(1日目)		下部ダンパー 4箇所(2日目)		長押有り		長押無し	
		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
正弦波1Hz	10		○	○	○			○	○		○
	25	○	○	○	○	○	○	○	○		○
	50	○		○				○	○		○
	75	○				○		○			
正弦波1.5Hz	10					○					
	25					○					
正弦波0.5Hz	25										○
正弦波1Hz 2方向	X:10, Y:10		○		○						
	X:25, Y:25		○		○						
	X:50, Y:25		○		○		○				
JMA神戸波NS	50			○		○		○			
	100			○		○		○			
	150			○		○		○			
	200					○		○			
花折想定波	50			○		○					
	100			○		○					
	125					○					

◆ 1次卓越振動数

ホワイトノイズ波加振で得られた1次卓越振動数を図6に示す。X方向で見ると、ダンパーを取り付けた状態で約2Hz、ダンパー無しで約1.5Hzであった。下部ダンパーの量を6箇所から4箇所へ変更してもあまり影響は見られなかった。

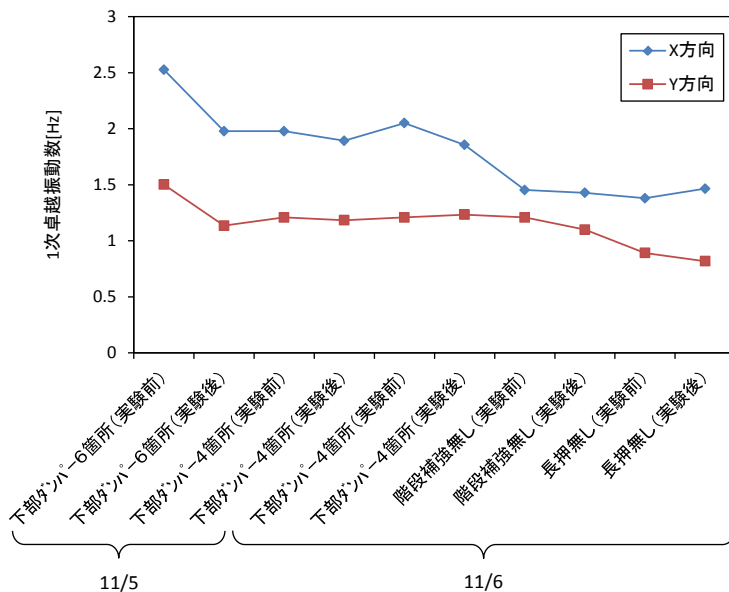


図6 1次卓越振動数の推移

◆ 実験結果

1) ダンパーの有無による最大応答の比較

ダンパー補強の有無による応答の差を図7～9に示す。ダンパー補強によって、最大応答変形角が低減され、耐力が増大していることが認められる。

PGA [Gal]	最大層間変形角[rad]		低減率
	ダンパー有	補強無し	
50	0.0082	0.0144	57%
100	0.0232	0.0324	72%
150	0.0361	0.0474	76%
200	0.0447	0.0583	77%

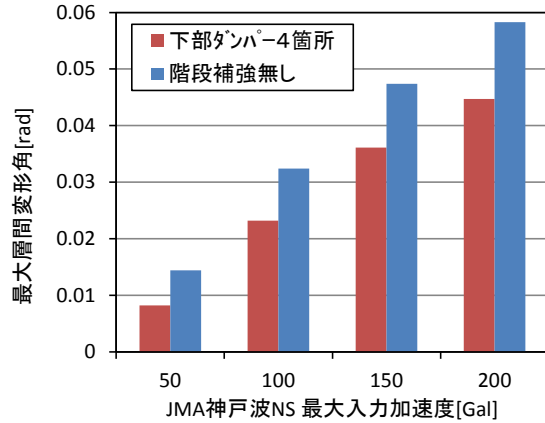


図7 JMA 神戸波加振における最大層間変形角の比較

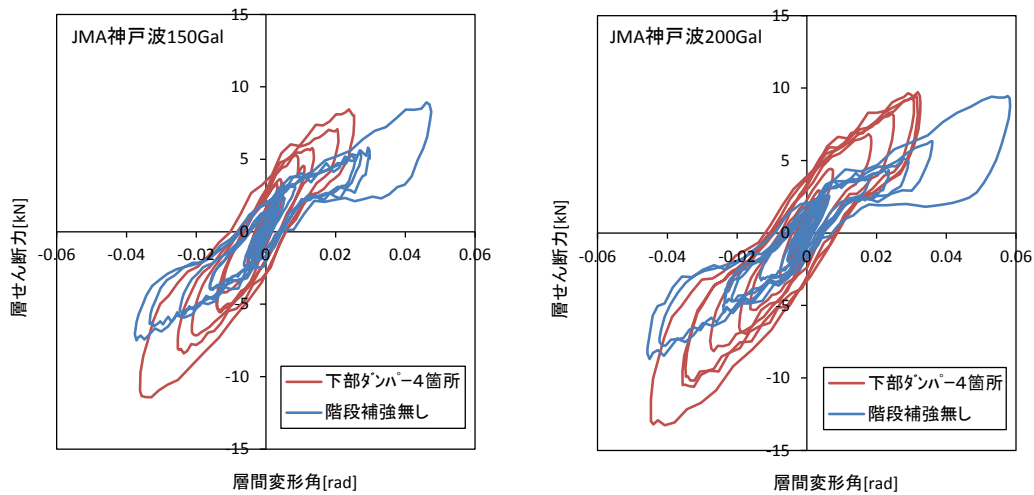


図8 JMA 神戸波加振における履歴曲線のダンパーの有無による比較1

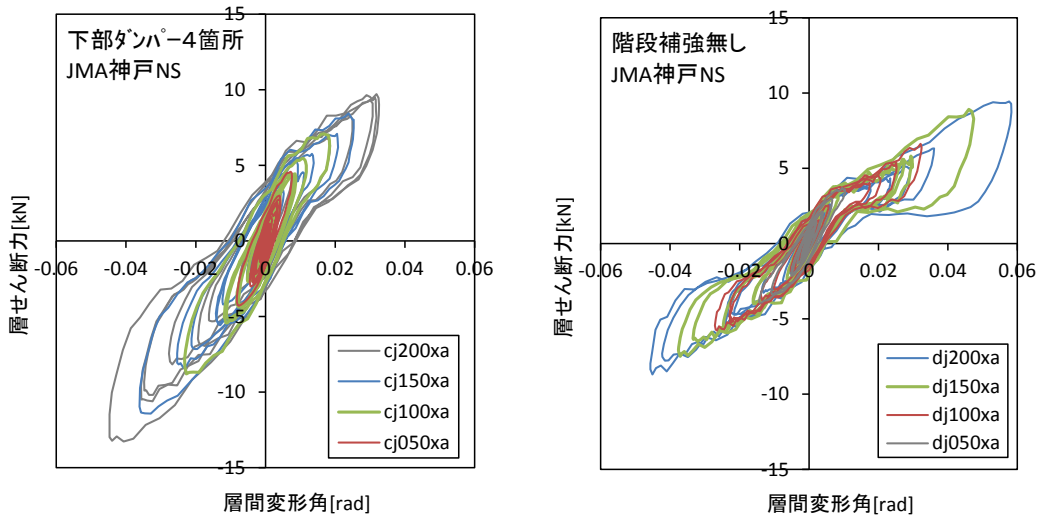


図9 JMA 神戸波加振における履歴曲線のダンパーの有無による比較2

次に、復元力包絡線の比較を図10に示す。各1方向加振において、最大せん断力および最小せん断力を記録した点をプロットした。X方向の結果から下部ダンパー4箇所と6箇所を比較すると、1/100rad以下の小変形域では差が見られないが、1/30rad程度の大変形域では耐力に差が見られる。

一方、Y方向の結果からは、ダンパーの有無よりも長押の有無の方が耐力への寄与が大きかったことが読み取れる。直径147mm、高さ1,791mmの柱に対して長押のせいが150mmと比較的大きかったことが影響していると考えられる。正弦波1Hz、Y方向加振の履歴曲線の比較を図11に示す。なお、図6より、Y方向の微小変形域での1次卓越振動数は1Hz前後であり、1/50rad以上の中・大変形域ではより長周期化していることに留意する必要がある。

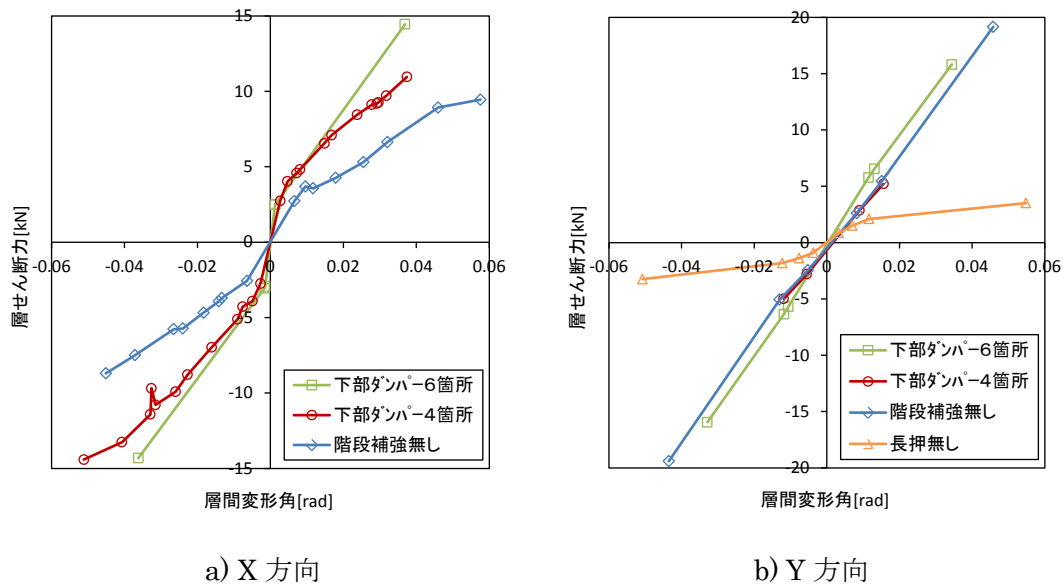


図10 復元力包絡線の比較

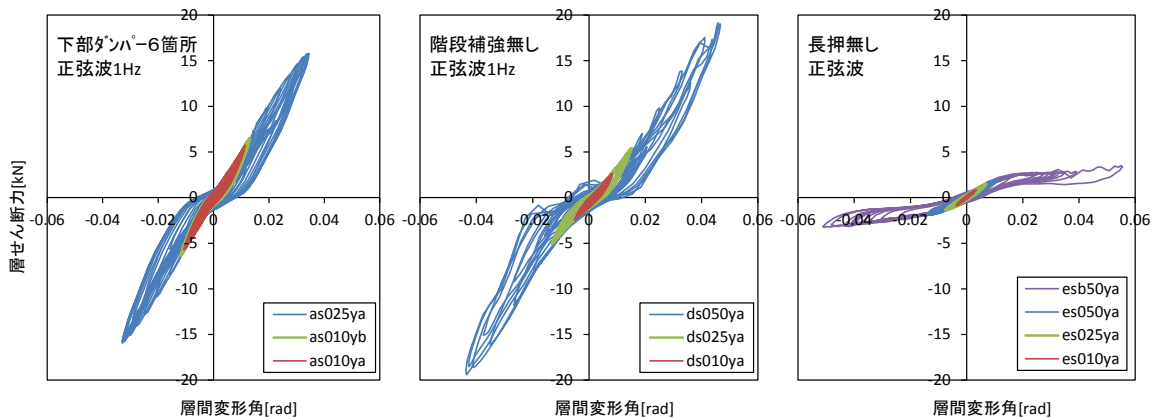


図11 正弦波 Y 方向加振における履歴曲線の比較

## 2) 等価粘性減衰定数の比較

正弦波加振における履歴曲線のループ面積から算出した等価粘性減衰定数を図 1 2 に示す。ただし、横軸はそれぞれの 1 ループでの最大層間変形角である。試験体軸組が元来有する減衰性能とダンパーの減衰性能を併せて評価していることになる。X 方向加振の結果を見ると、ダンパーの有無に関わらず振幅依存性が見られるが、約 1/50rad 以降は比較的安定しており、図中の網掛け部分の平均値で、無補強の場合 12.5%、4 箇所 17.5%、6 箇所 22.6%であった。

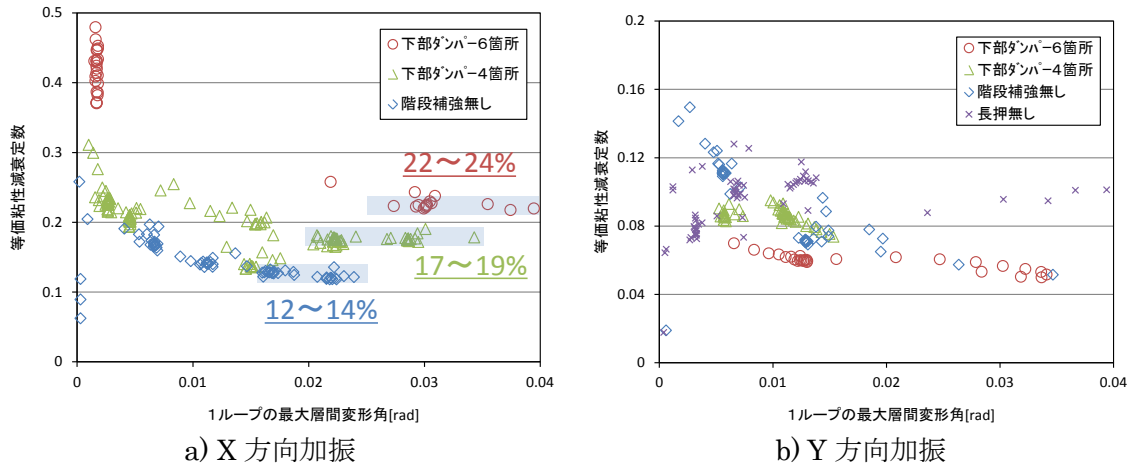


図 1 2 履歴面積から求めた等価粘性減衰定数の比較

## 3) 履歴消費エネルギーによる比較

履歴減衰による消費エネルギーに関する結果を図 1 3、1 4 に示す。ダンパー量とともに消費エネルギーが増大していることが分かる。

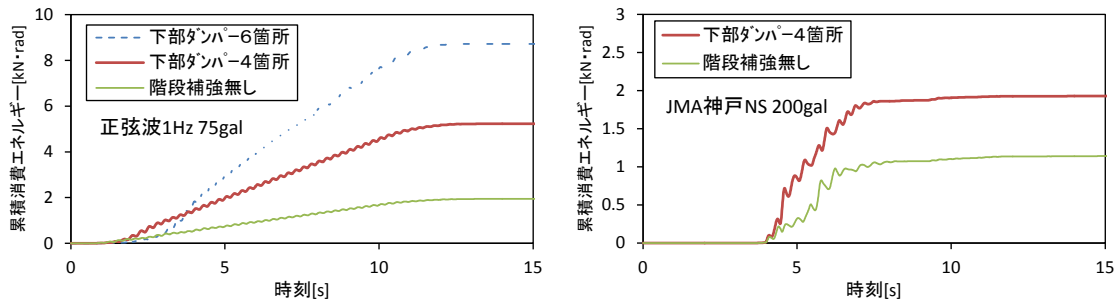


図 1 3 累積消費エネルギーの時刻歴の比較

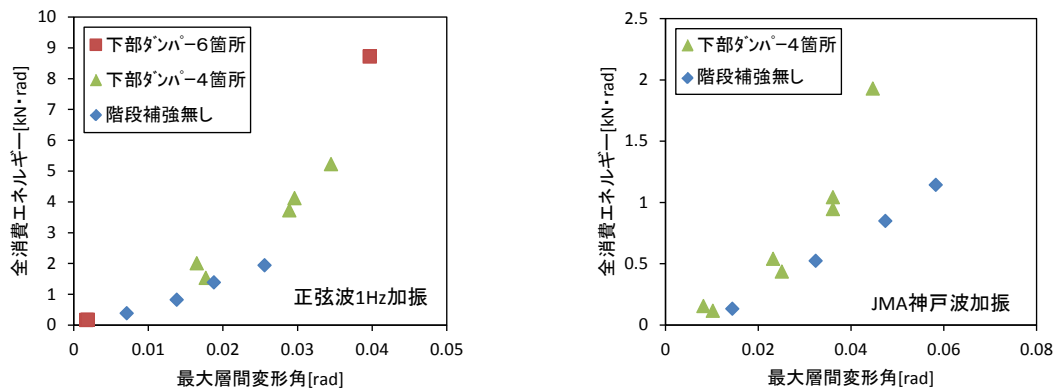


図 1 4 全消費エネルギーの比較



#### 4) 層間変位とダンパーの水平変位

X方向加振において、軸組の層間変位と下部ダンパーの水平変位の対応関係を図15に示す。層間変位に対して、下部ダンパーの水平変位はおおよそ0.5倍になっており、残りは上部ダンパー部分の変位となっていることが分かる。上部ダンパーと長押の間では、水平変位・鉛直変位・回転変形(図11)が複雑に組み合わせられて生じることが実験観察およびビデオ映像より明らかになっている。これらに加えて、階段とダンパー治具間での遊びも寄与していると考えられる。以上より、層間変位がそのまま下部ダンパーへ伝達せずに変位のロスが生じていると推察されるが、一方で、上部ダンパーが圧縮・引張あるいは回転に伴う曲げにより、履歴減衰を生じていると考えられるため、結果としてダンパー効果は少なくとも50%以上であると言える。

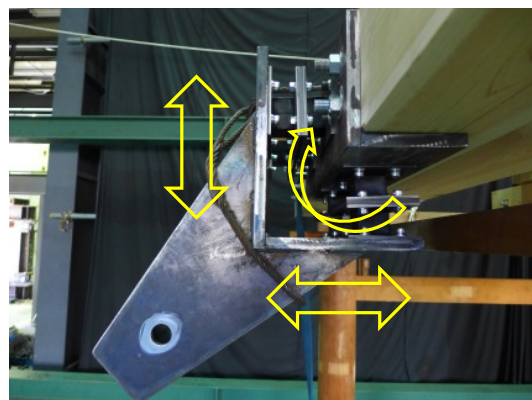
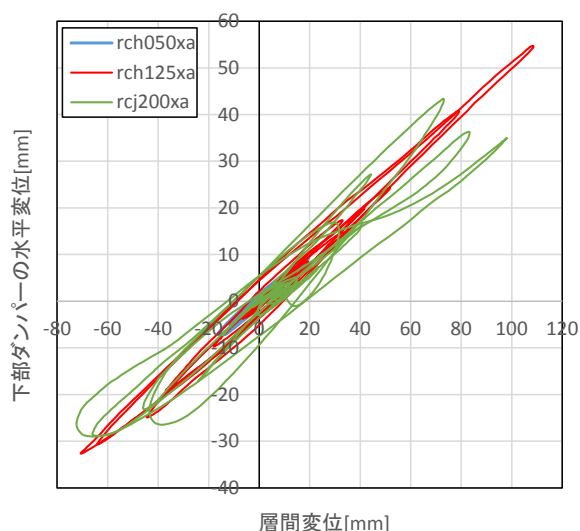


図15 層間変位と下部ダンパーの水平変位

写真11 上部ダンパーの変形成分

#### ◆ まとめ

伝統木造山門に取り付く階段を利用した制震補強法について、振動台実験によって効果を検証した。階段の軸方向の振動に対しては、ダンパーが十分有効に働き、制震効果が見られることを実証した。一方、階段と直交する方向の振動に対しては、取り付け治具を改良するなど今後検討が必要である。