

伝統的な木造軸組の制震ダンパー補強効果に関する検証実験

Experimental Verification of Effectiveness on Seismic Damper Reinforcement of Traditional Wooden Frame

中治弘行¹・須田 達²・吉富信太³・鈴木祥之⁴・閻 崇兵⁵

Hiroyuki Nakaji, Tatsuru Suda, Shinta Yoshitomi, Yoshiyuki Suzuki and Chongbing Yan

¹ 公立鳥取環境大学教授 環境学部環境学科 (〒689-1111 鳥取県鳥取市若葉台北 1-1-1)

Professor, Department of Environmental Studies, Faculty of Environmental Studies, Tottori University of Environmental Studies

² 金沢工業大学教授 建築学部建築学科 (〒924-0838 白山市八束穂 3-1)

Professor, Department of Architecture, College of Architecture, Kanazawa Institute of Technology

³ 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, Department of Architecture and Urban Design, College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

⁴ 京都大学名誉教授 (〒520-0246 滋賀県大津市仰木の里 7-17-9)

Professor Emeritus of Kyoto University

⁵ 住友ゴム工業株式会社 (〒675-0011 兵庫県加古川市野口町北野 410-1)

Sumitomo Rubber Industries, Ltd.

Horizontal cyclic loading tests were carried out to investigate the effects of visco-elastic dampers installed on a traditional timber frame. One specimen was prepared and tested twice: with two dampers and with four dampers. In the case of four dampers, the final damage was break of column foot joint (*Nagahozo+Komisen*). When the number of dampers is two, the rotation angle of column foot joints is proportional to the deformation angle of the specimen. In the case of four dampers, it is less proportional. As the number of dampers increases, both the restoring force and the damping factor increase.

Keywords: *Static Loading Tests, Traditional Timber Frame, Seismic Damper, Seismic Reinforcement, Damping Factor*

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震以降、木造建物の耐震性能評価法や耐震補強法に関する研究の進展はめざましく、1990 年代後半からは静的加力実験ばかりでなく振動台を用いた動的な実験も増え¹⁾、免震、制震²⁾ 技術を住宅規模の木造建物にも適用しようという研究もある。例えば、荒巻ら³⁾ は安価で設置が簡単な制震ダンパーの開発を目的として静的・動的な実大実験を行っており、伊藤ら⁴⁾ は、鋼材制振ダンパー(本論文では「制震ダンパー」と表記する)付き耐力壁について有限要素法による弾塑性解析と静的加力実験の結果を比較して、ダンパーの有効性を検討している。

2000 年の建築基準法改正以降、木造建物の制震・免震技術の普及が進み、住宅においては鉄筋コンクリート基礎と土台の間に免震ゴムを設置する建物が増えつつある。一方で、伝統的構法による木造建物では土台の下に免震層を設けることが難しいため、柱と横架材の仕口にダンパーを設ける形式による制震に関する研究例⁵⁾ や適用例がある。

これらの研究等でも前提としているように、伝統的構法木造建物の耐震性能を向上させるには、地震応答に伴う慣性力による水平力に抵抗できるよう、耐震要素を増やして復元力を増加させるほか、地震時の応答を低減させるため、例えば、粘弾性体を利用した制震ダンパーなどを付加することで減衰性能を向上させる方法も有効である⁶⁾。

本研究では、柱仕口 2 ヶ所または 4 ヶ所に制震ダンパーを設置した柱スパン 1820 mm の木造軸組について正負繰り返し加力実験を行い^{7),8)}、復元力特性と履歴減衰に対するダンパー個数の影響を確認するとともに、金沢工業大学で実施された振動実験結果⁹⁾ と比較検討するため、各部の変形等を吟味することを目的とする。

2. 実験概要

(1) 試験体

図1に木造軸組試験体の概要を示す。伝統的構法への制震ダンパーの適用可能性を検討するための実験であり、柱仕口は、図2に示すような長ほぞ差し込打ちとして、仕口補強のための金物類は使用していない。使用した制震ダンパーは住友ゴム工業株式会社製で、粘弾性ゴムを金属板で挟み込んだ形式であり、図1のハッチで示すように、柱に対して方杖状に設置するものである。ダンパーの一端を柱側、他端を土台または桁側に合わせ(図3の赤枠)、付属の四角穴ビス(φ5.5、長さ65mm)6本ずつで留め付ける。

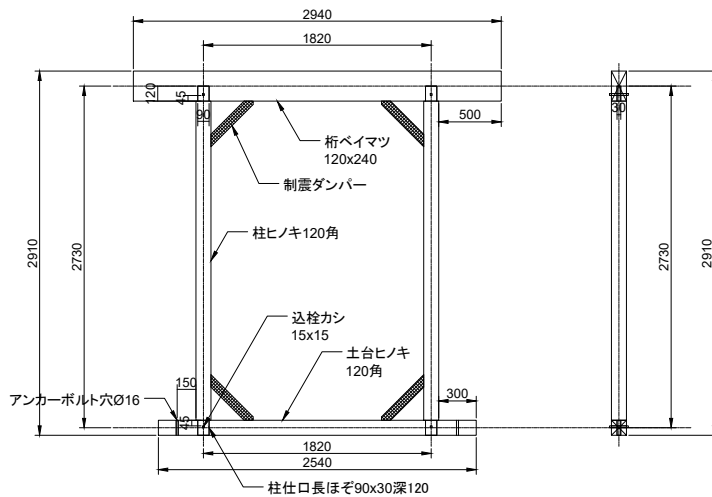


図1 試験体概要(ダンパー4)

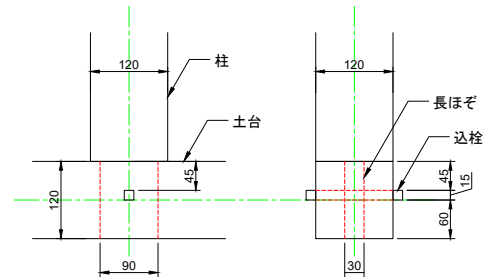


図2 柱仕口詳細

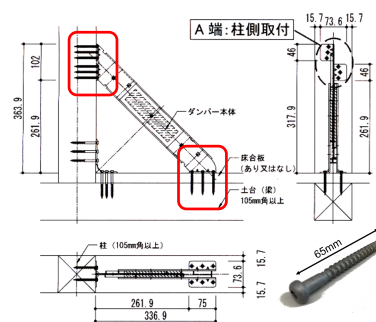


図3 ダンパー設置要領(設置要領書による)

試験体は1体であり、ダンパーを柱上部にのみ2個設置したもの(ダンパー2)について見かけの変形角が $1/90$ radまで実験を行って目立った損傷がないことを確認後、同じ軸組試験体に柱脚部にも2個追加したもの(ダンパー4)について $1/20$ rad変形まで実験を行った。ダンパー2試験体の製作は池田住研(株)(鳥取県倉吉市)に依頼し、2022年10月14日に施工した。ダンパー2試験体からダンパー4試験体へのダンパーの追加は、2022年12月26日に筆頭著者が行った。試験体高さ H は土台桁間の心々距離で2730 mm、試験体長さ L は柱の心々距離で1820 mmである。試験体に用いた樹種および寸法は、柱はヒノキ120 mm角、桁はベイマツ120 mm×240 mm、土台はヒノキ120 mm角、込栓はカシ15 mm角である。

(2) 実験時期

制震ダンパー付木造軸組の静的加力実験は、2022年12月に公立鳥取環境大学建築構造実験室において行った。静的加力実験を実施した日程を表1に示す。

実験で使用した制震ダンパーに用いられる粘弾性ゴムは温度の影響を受ける可能性がある。図4に、実験実施日の本学敷地内での外気温の推移を示す。2022年12月23日の実験中の鳥取県鳥取市での気温は $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 、12月26日の実験中の気温は $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ であった。実験室には空調設備がないため、実験室の室温も外気温と同様であった。

(3) 実験方法

電動アクチュエータ(THK社製、容量100 kN、ストローク800 mm)を用いた繰り返し面内せん断加力実験を行った。繰り返しの目標変形は、桁部の水平変位 d_1 を試験体の高さ H で除した見かけの変形角 γ が、 $1/480$ rad、 $1/240$ rad、 $1/120$ rad、 $1/90$ rad、 $1/60$ rad、 $1/45$ rad、 $1/30$ rad、 $1/20$ radとなるように設定し、それぞれを3回繰り返すよう

表 1 実験日程

試験体	実験日時
ダンパー 2	2022 年 12 月 23 日 10:40~12:10
ダンパー 4	2022 年 12 月 26 日 10:40~14:30

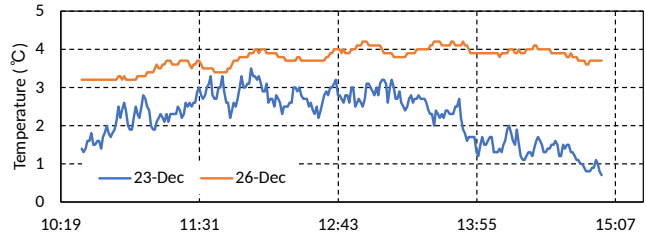


図 4 実験日時の気温の推移



写真 1 ダンパー 2 試験体の設置状況



写真 2 柱脚ほぞの折損 (ダンパー 4 試験体)

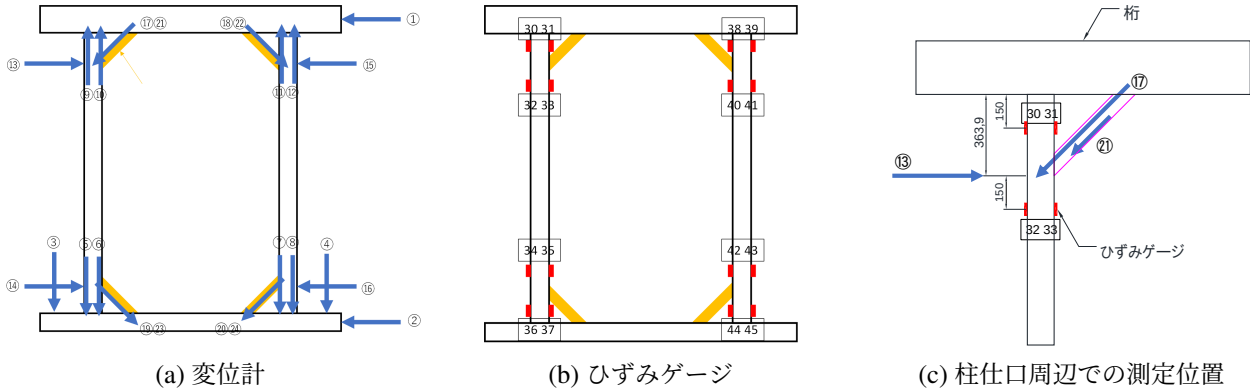


図 5 測定箇所

に変形制御で加力した。変形 0 から所定の目標変形に到達するまでの時間が約 90 秒になるよう、小変形から大変形にかけて加力速度を 0.06~1.52 mm/s と増加させた。鉛直荷重を作用させない無載荷式とした。M16 の Z マークアンカーボルト等で土台の浮き上がりと水平移動を拘束した。

実験中はアクチュエータのストローク (= d_1 とみなす)、桁と土台の水平方向の変位 (d_1 , d_2)、柱仕口の抜けならびにダンパー設置位置での柱の水平変位の計測、柱頭、柱脚およびダンパー付近に検長 10 mm のポリエステル箔ゲージを貼付して柱材軸方向のひずみ計測を行った。図 5 に測定箇所、表 2 に測定内容と測定機器、写真 1 に実験装置への試験体の設置状況をそれぞれ示す。変位計 17~20 は柱と横架材の間でダンパーに沿う方向の変位を測定し、変位計 21~24 はダンパーそのものの伸び縮みを測定した。測定内容のうち、変位計 23 と 24 は、ダンパー 4 試験体でのみ測定した。写真 1 で、左方向への変形を正とした。表 2 に示す (株) 東京測器研究所製の変位計およびひずみゲージを同社の静的データロガー TDS-530、同スイッチボックス IHW-50G に接続し、同社の計測ソフト TDS-7130v2 を用いて 6 秒毎のインターバル計測を行った。計測の都度、写真 1 のような正面からの全景を定点撮影した。

ダンパー 2、ダンパー 4 のいずれの実験でも、実験前には、ダンパーが方杖状に作用することで柱あるいはほぞの折損を引き起こすことが予想された。ダンパー 4 試験体については、1/10 rad まで加力予定であったが、写真 2 に示すように、1/20 rad 変形の 2 回目正方向加力時に右柱脚部で仕口ほぞが折損したため、そこで実験を終了した。

表 2 測定内容と用いた機器等 ((株) 東京測器研究所製)

変位	位置	変位計	ひずみ	位置	ひずみゲージ
1	桁水平	※ 1	30	左柱上左	PFL-10-11
2	土台水平	CDP-50	31	左柱上右	PFL-10-11
3	土台左	CDP-50	32	左柱上ダンパー下左	PFL-10-11
4	土台右	CDP-50	33	左柱上ダンパー下右	PFL-10-11
5	左柱脚左	CDP-100	34	左柱下ダンパー上左	PFL-10-11
6	左柱脚右	CDP-100	35	左柱下ダンパー上右	PFL-10-11
7	右柱脚左	CDP-100	36	左柱下左	PFL-10-11
8	右柱脚右	CDP-100	37	左柱下右	PFL-10-11
9	左柱頭左	CDP-50	38	右柱上左	PFL-10-11
10	左柱頭右	CDP-50	39	右柱上右	PFL-10-11
11	右柱頭左	CDP-50	40	右柱上ダンパー下左	PFL-10-11
12	右柱頭右	CDP-50	41	右柱上ダンパー下右	PFL-10-11
13	左柱上ダンパー	DP-1000DS	42	右柱下ダンパー上左	PFL-10-11
14	左柱下ダンパー	DP-1000DS	43	右柱下ダンパー上右	PFL-10-11
15	右柱上ダンパー	DP-1000DS	44	右柱下左	PFL-10-11
16	右柱下ダンパー	DP-1000DS	45	右柱下右	PFL-10-11
17	左上ダンパー外	DP-1000DS	※変位計の測定精度は以下の通り ・ CDP-50: 0.005 mm ・ CDP-100: 0.01 mm ・ DP-1000DS: 0.1 mm		
18	右上ダンパー外	DP-1000DS			
19	左下ダンパー外	DP-1000DS			
20	右下ダンパー外	DP-1000DS			
21	左上ダンパー内	CDP-50			
22	右上ダンパー内	CDP-50			
23	左下ダンパー内	CDP-50			
24	右下ダンパー内	CDP-50	ダンパー 4 試験体のみ		

※ 1 電動アクチュエータのストロークを計測

3. 実験結果

(1) 荷重変形関係

図 6 に、実験で得られた各試験体の荷重変形関係を示す。グラフ横軸の変形角は (1) 式を用いて求めた見かけの変形角 γ (rad) とした。ここで、 d_1 は桁の水平変位 (mm)、 d_2 は土台水平変位 (mm)、 H は試験体高さ (mm) である。ダンパー 4 試験体では $1/30$ rad を超える変形で柱脚の折損が見られたが、 $1/30$ rad 以下の範囲では柱脚の引き抜き量はせいぜい 3 mm 程度であり、見かけの変形角と真の変形角の差は 0.002 rad に満たないので、以下では柱脚の引き抜き量を差し引いた真の変形角ではなく、見かけの変形角を扱うこととする。

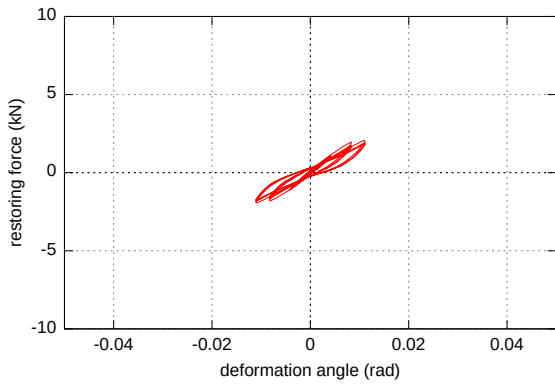
$$\gamma = \frac{d_1 - d_2}{H} \quad (1)$$

図 6 の荷重変形関係から第 1 象限において $1/480$ rad から $1/90$ rad もしくは $1/20$ rad までの各折り返し変形点での復元力を結んだ骨格曲線を図 7 に示す。骨格曲線での最大荷重は、ダンパー 2 試験体では $1/90$ rad 時に 2.02 kN、ダンパー 4 試験体では $1/30$ rad 時に 5.25 kN ($1/90$ rad 時に 2.75 kN) であった。この木造軸組の復元力について加算則を仮定すると、軸組の復元力にダンパー個数に応じた復元力の増加分を加えたものである。例えば、 $1/90$ rad 時のダンパー 1 個分の復元力への寄与は、 $(2.75 - 2.02)/2 = 0.365$ kN であると推定できる。

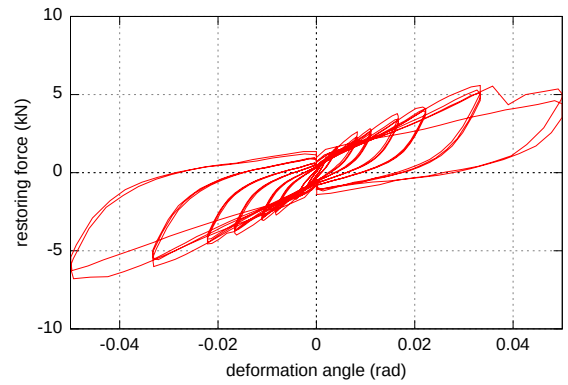
(2) 接合部の挙動

見かけの変形角と柱仕口の回転角の関係を図 8 に示す。初期不正を補正しておらずその分の差はみられるものの、ダンパー 2 試験体 (図 8a) では、ダンパーのない柱脚の回転角が見かけの変形角と同様であるのに対して、ダンパーが付いている仕口の回転角には履歴面積があり、ダンパーの影響があることがわかる。

ダンパー 4 試験体の柱脚部ではほぞの折損が発生したことについて、坂田ら¹⁰⁾によれば、長ほぞ差し込釘打ち接合

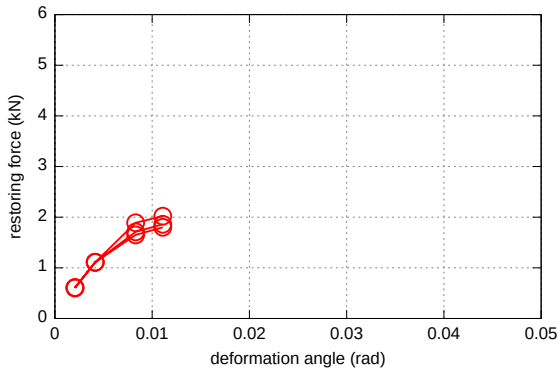


(a) ダンパー 2

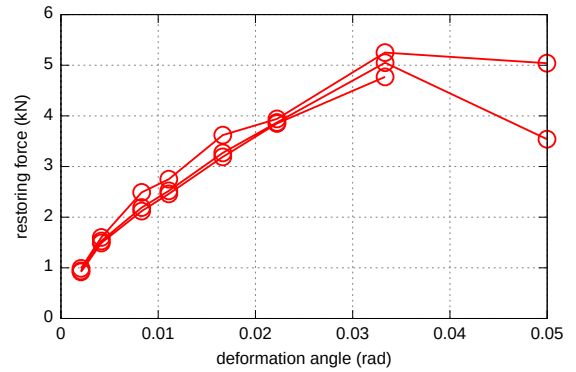


(b) ダンパー 4

図 6 復元力特性

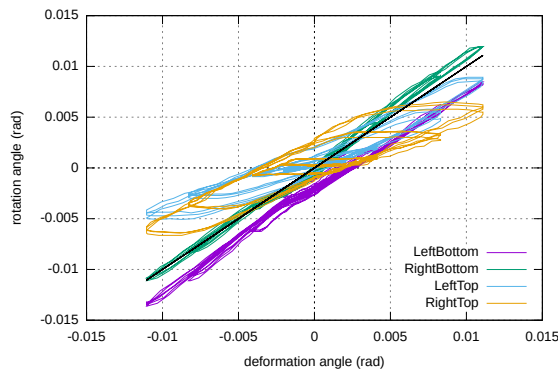


(a) ダンパー 2

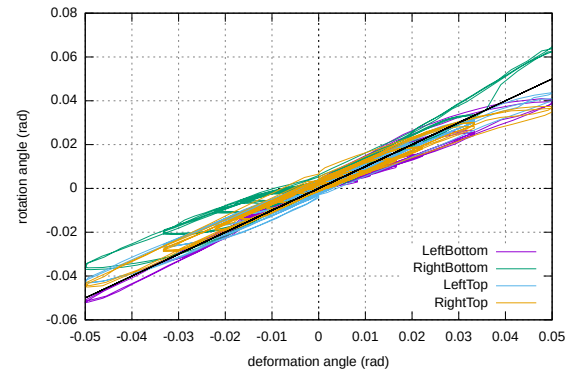


(b) ダンパー 4

図 7 骨格曲線



(a) ダンパー 2



(b) ダンパー 4

図 8 柱仕口の回転角

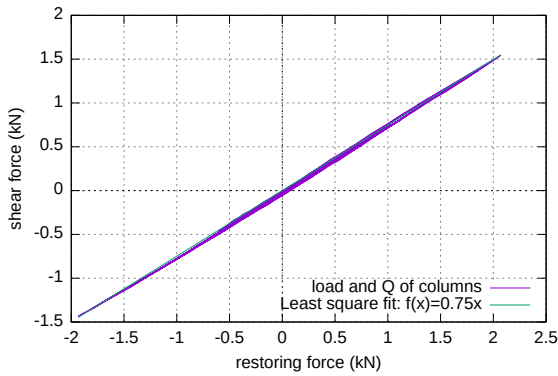
部はおよそ 3 kNm の曲げモーメントで損傷する例が示されている。本実験について、次節で述べる方法で図 5 の 44、45 のひずみゲージから得られた最大曲げモーメントは 2 kNm に満たないが、ダンパー補強の影響で増加した 1/30 rad 時の復元力 5.6 kN に応じた柱脚の引き抜き力 8.4 kN ($= 5.6 \times 1.5$) の影響もあったのだろうと考える。

(3) 柱のせん断力

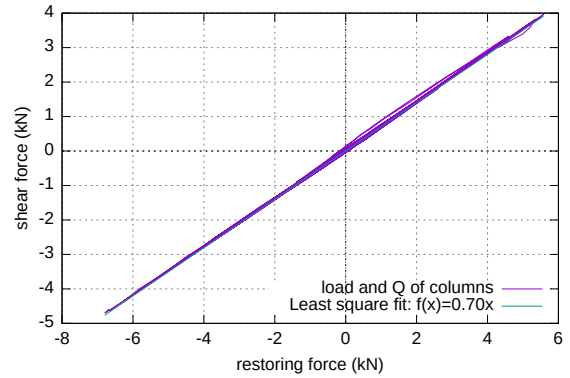
ダンパーは方杖状に作用するので、柱の曲げ変形に影響する。実験後に柱 (ヒノキ、120 角、 $I = 120^4/12 \text{ mm}^4$) の 4 点曲げ実験を行って曲げヤング係数 E (GPa) を求めたところ、図 1 の左側の柱が 12.01 GPa、右側の柱が 12.31 GPa であった。柱の材軸方向で測定したひずみから曲率、例えば、図 5b のひずみゲージ 30 と 31 から $\kappa = (\epsilon_{30} - \epsilon_{31})/120$ (mm^{-1}) および曲げモーメント $M = EI\kappa$ (kNm) を各ひずみ測定位置について算定し、左右柱の負担せん断力の和 Q

を(2)式で求めて載荷荷重 P を比較したところ、図9に示すように、 $Q/P \approx 0.7$ であった。構造力学に基づけば、誤差のほとんどない理想的な測定が行われていれば Q/P は1であることが予想できるが、本実験では様々な誤差があったと考える。ここで、 L_c は上のダンパー下部(図5bでひずみ32、33あるいは40、41の測定位置)から下のダンパー上部(同じく34、35あるいは42、43の測定位置)までの柱の長さで $L_c = 1522.2$ mm である。

$$Q = \frac{\text{左柱上ダンパー下の } M + \text{左柱下ダンパー上の } M}{L_c} + \frac{\text{右柱上ダンパー下の } M + \text{右柱下ダンパー上の } M}{L_c} \quad (2)$$



(a) ダンパー 2



(b) ダンパー 4

図9 柱せん断力と載荷荷重の比較

(4) 柱の変形

柱の変形について、ダンパーによる柱の水平変位の拘束状況を検討した。図10に示すように、柱頭の水平変位 d_1 = 桁の水平変位、柱脚の水平変位 d_2 = 土台の水平変位として、柱が曲がらずに傾いた場合のダンパー設置位置での柱の水平変位を d_U 、 d_L とすると、(3)式が成り立つ。ここで、 $H = 2730.0$ mm、 $h_1 = 483.9$ mm、 $h_2 = 423.9$ mm、 $h_3 = 1822.2$ mm である。

$$\gamma = \frac{d_1 - d_2}{H} = \frac{d_U - d_2}{h_2 + h_3} = \frac{d_L - d_2}{h_2} \quad (3)$$

$$d_U = \gamma(h_2 + h_3) + d_2$$

$$d_L = \gamma h_2 + d_2$$

図11に、柱の水平変位の比較を示す。横軸は(3)式で算定した d_U あるいは d_L (算定値)、縦軸は図5の⑬~⑯に示した柱の水平変位(測定値)である。ULは左柱の上部⑬、LLは左柱の下部⑭、URは右柱の上部⑮、LRは右柱の下部⑯の変位⑯である。原点を通る直線で近似したときその傾きが1であれば、算定値は測定値と等しく、柱が曲がらずに変形していると判断できる。ダンパー2試験体では近似曲線の傾きがほぼ1.0であり、柱がほとんど曲がらずに変形している一方、ダンパー4試験体では特に柱下部の変形(LL、LR)について近似直線の傾きが1に比べて10%以上小さく、ダンパーの方杖効果により柱の水平変位が抑制される傾向を測定できた。

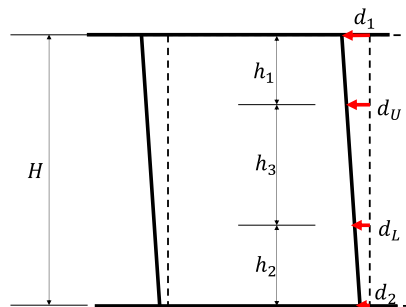
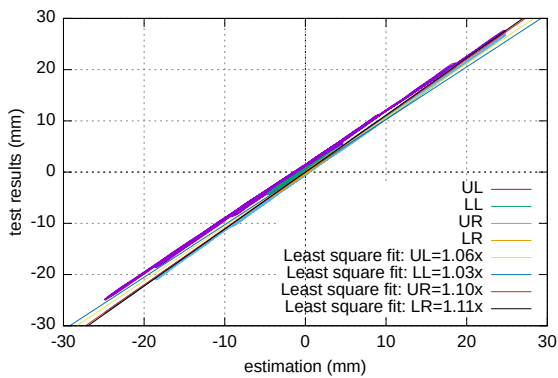
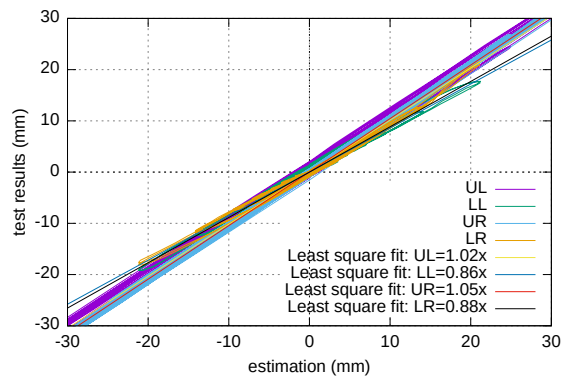


図10 柱が曲がらずに変形すると d_1 、 d_U 、 d_L 、 d_2 は線形関係にある



(a) ダンパー 2



(b) ダンパー 4

図 11 柱の変形

(5) 減衰性能

図 6 の荷重変形関係から各繰り返し変形ループでの履歴面積 (図 12 の ΔW) を算定し、(4) 式で各ループに対する履歴減衰定数を求めた。得られた減衰定数を表 3 および図 13 に示す。

$$h = \frac{\Delta W}{4\pi W} \quad (4)$$

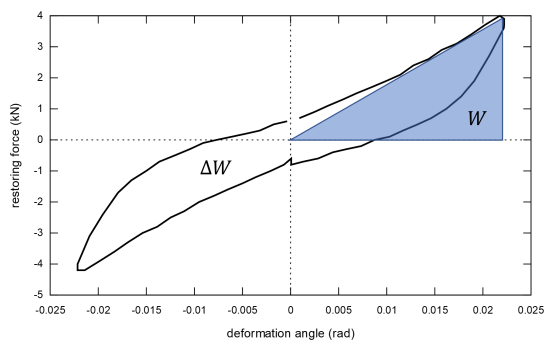


図 12 履歴減衰の考え方

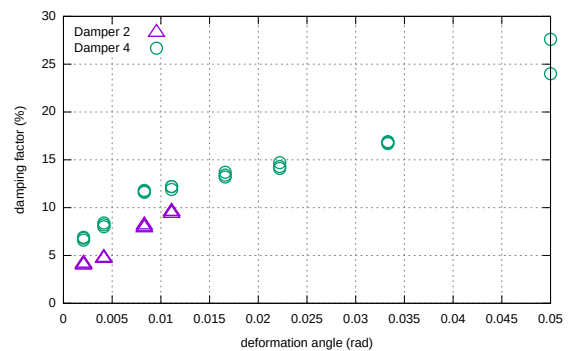


図 13 減衰定数

表 3 履歴減衰定数 (%)

(a) ダンパー 2

変形角 (rad)	1 回目	2 回目	3 回目
1/480	4.2	4.0	4.1
1/240	4.8	4.7	4.7
1/120	7.9	8.0	8.2
1/90	9.4	9.6	9.6

(b) ダンパー 4

変形角 (rad)	1 回目	2 回目	3 回目
1/480	6.6	6.8	6.9
1/240	8.0	8.2	8.4
1/120	11.6	11.8	11.7
1/90	11.9	12.2	12.2
1/60	13.7	13.4	13.2
1/45	14.7	14.3	14.1
1/30	16.8	16.7	16.9
1/20	24.0	27.6	-

ダンパーの数が増えることで、1/90 rad までの小さい変形領域でも減衰定数が増大し、また、変形が大きくなるにつれて減衰定数が増大することがわかる。同一変形では、繰り返し加力による減衰定数の変化は小さい。ダンパー 4 の 1/20 rad 時の減衰定数 h が 24.0~27.6% と大きいのは、右柱脚での長ほぞ折損の影響と考える。

4. まとめ

柱仕口を長ほぞ差し込打ちとした柱スパン 1820 mm の木造軸組について、制震ダンパーを 2 または 4 つ設置して正負繰り返し静的加力実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- ダンパーの数が增多することで復元力および減衰定数が向上するので、制震ダンパーの設置が有効である。
- 同一変形での減衰定数は、ほぼ一定である。
- ダンパーの方杖効果により、特に柱脚において、柱の変形が抑制される。
- 最終的な破壊がほぞ仕口の折損であった。ダンパー補強により復元力が向上するにつれて、試験体形状により生じるほぞ周辺の引き抜き力や曲げモーメントが増大することが影響したと考えられる。

木造軸組の耐震性能の向上に制震ダンパーの設置が有効であることが確認できた一方で、次のような問題点が残った。振動実験結果⁹⁾との比較を進めつつ、今後も実大実験による検証を続ける必要がある。

- 伝統的構法だからできるだけ金物補強は避けたいが、このダンパーを使うには、接合部に相応の強度を確保する必要がある。あるいは
- このダンパーでの補強が過剰であるならば、ダンパーの強度・剛性を下げることも考える必要がある。

謝辞: 本研究では住友ゴム工業株式会社の協力のもと、制震ダンパーを試験体に取り付けた静的加力実験が実施されました。実験実施にあたり、公立鳥取環境大学環境学部ならびに鳥取大学大学院工学研究科の学生諸君の協力を得ました。また、図 4 に示した気温について、公立鳥取環境大学環境学部重田祥範准教授から観測記録の一部の提供を受けました。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 坂本功他: JR 鷹取波加振による軸組構法木造住宅の実大振動実験 (その 1-その 8), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.153-168, 日本建築学会, 1997 年
- 2) 例えば、耐震・免震・制震の違い, <https://www.homelabo.co.jp/select/difference01.html>
- 3) 荒巻真二・岩下義隆・柴山英和・鳥野清・八杉貴雄: 木造住宅用制震ダンパーの開発, 構造工学論文集.B, No.52, pp.195-205, 日本建築学会, 2006 年
- 4) 伊藤正暁・石川浩一郎・岡本公宏・若島嘉朗・園田里見: 木造建築物に用いる鋼材制振ダンパーの減衰性能と形状設計, 日本建築学会北陸支部研究報告集, No.53, pp.167-170, 日本建築学会, 2010 年
- 5) 岩佐裕一・檜原健一・野島千里・志摩好宣: 伝統木造軸組の実大振動実験 (その 16): 仕口タイプ粘弾性ダンパーによる耐震補強, 学術講演梗概集. C-1, 構造 III, pp.183-184, 日本建築学会, 2001 年
- 6) 伝統的構法木造建築物設計マニュアル編集委員会: 伝統的構法のための木造耐震設計法 石場建てを含む木造建築物の耐震設計・耐震補強マニュアル, 学芸出版社, 2019 年
- 7) 中治弘行他: 静的加力実験に基づく伝統木造建物の制震ダンパー補強に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集第 46 巻, 2023 年
- 8) 中治弘行他: 伝統的な木造軸組の制震ダンパー補強に関する実験研究, 日本建築学会大会 (近畿), 2023 年 (投稿済)
- 9) 須田達他: 振動台実験に基づく伝統木造建築物の制震ダンパー補強に関する研究, 2022 年度日本地震工学会大会, 2022 年
- 10) 坂田弘安, 山崎義弘, 宇田川洋隆, 大橋好光: 曲げせん断を受ける長ほぞ差し込打ち接合部の力学的挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 671, pp.45-54, 日本建築学会, 2012 年