

伝統的木造建物の特徴を考慮した粘弾性ダンパーの適用設計

Application Designs of Visco-elastic Damper Considering Characteristics of Traditional Wooden Building

三須基規
Motoki MISU

加藤直樹
Naoki KATO

佐藤信夫*
Nobuo SATO

花里利一**
Toshikazu HANAZATO

内田龍一郎***
Ryuichiro UCHIDA

荻原幸夫****
Yukio OGIWARA

坂本 功*****
Isao SAKAMOTO

神社仏閣に代表される伝統的木造建物には柱と梁の接合方法や木材のめり込み等、鉄骨造やコンクリート造に無い構造的な特徴がある。既存建物の改修では歴史的重要度に応じた制約もあり、汎用の耐震補強製品の適用が難しい。

粘弾性体は加振速度に応じて弾性が変化するので、長期間に渡って生じる変位に追従しながら地震時に所定の性能を発揮できる。この材料特性を活かした粘弾性ダンパーを設計製作して、伝統的木造建物の接合部のめり込みやガタを吸収しながら地震力を低減できる新しい振動制御技術の実現に貢献した。

Traditional wooden buildings have features and restrictions not found in steel and concrete structures, such as connection of columns and beams. Furthermore, it is difficult to apply general reinforcing products in the renovation. Visco-elastic damper can reduce seismic force while absorbing long-term displacement due to velocity dependence of material. The dampers considering material properties have contributed to the realization of new vibration control technologies for slip at connections of traditional wooden building.

1. はじめに

神社仏閣は、特性や形状が規格化された材料による住宅より高層または大空間の伝統的木造建物が多く、その挙動の定量評価は難しい。例えば五重塔は江戸時代以前に建立された現存 22 基中、修理記録から詳細が分かった 12 基は震度 6 以上と推定される地震に 16 回遭遇して、うち 7 回 (5 基) で傾斜や後述する頂部の部分被害を受け、記録に残るだけでも平均すると 60 年に 1 度は修理されている¹⁾。一方で地震によって倒壊したという史料は残されていないので、五重塔は相応の構造安全性を有し、継続的な修理でその性能を維持している木造建物と言える。

また文化財に指定された木造建物のうち室内に大空間を有する本堂は、歴史的背景や用途等から大幅な建物構造の変更や追加工が難しい²⁾。そのため構造安全性を定量評価しながら最新の地震対策技術を効果的に適用する取り組みや、今後の維持管理を考慮した改修技術が求められている。

現在、松井建設株式会社は三重大学花里研究室他と共同で、古来から継承された伝統的木造建物の特徴を活かした制振構造の実用化に取り組んでおり、当社は用途や制約に応じて粘弾性ダンパーの設計・製作を担当している。

そこで本論文では、伝統的木造建物の制振構造に必要な粘弾性体材料特性の評価結果と、新築五重塔及び既存本堂に設置された粘弾性ダンパーの製品設計について報告する。

2. 伝統的木造建物と粘弾性ダンパーの特徴

2.1 伝統的木造建物の特徴

伝統的木造建物の主な特徴や制約を以下に示す。

〈新築建物〉

- ・時間経過に伴って、柱や梁の接合部で自重による鉛直変位の漸増 (クリープ) が進行する可能性がある

〈既存建物〉

- ・伐採時の丸太形状を活かした梁の場合、その断面寸法や形状が一様とは限らない
- ・文化財は歴史的経緯や意匠への配慮が必要で、例えば開口部への耐震壁の設置や追加工等が極めて難しい

〈新築・既存共通〉

- ・接合部で木材に「めり込み」が起きると水平加振時に変位原点付近でスリップ (ガタ) が生じる場合がある

* 松井建設株式会社

** 三重大学

*** 内田建築構造コンサルタント

**** 元 株式会社田治見エンジニアリングサービス

***** 東京大学

2.2 粘弾性ダンパーの概要

粘弾性ダンパーは粘性と弾性を併せ持つ粘弾性体を鋼板に接着させ、図1のせん断変位時に粘弾性体が発生する荷重で振動低減と剛性補強を得る製品である。ここで図中「長さ方向」と「幅方向」を、伝統的木造建物のクリープ等の長期使用時の変位方向と地震力の作用方向に合わせて設置すれば、接合部のガタ等を吸収しながら地震力を低減できると考えられる。

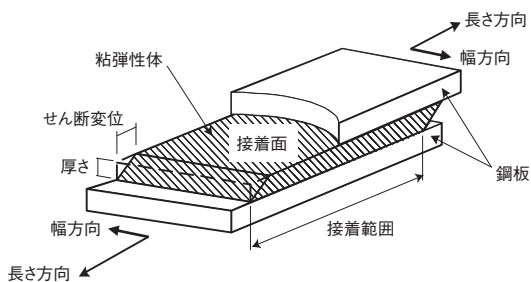


図1 せん断変位時の粘弾性体

2.3 初期変位が粘弾性体の特性に与える影響の検証

昭和電線製ジェン系粘弾性体SDM-1³⁾が所定のせん断変位を受けた状態で地震力を与えられた時の挙動を評価するため、図2の試験体にせん断ひずみ25%相当の初期変位-1.25mmを与える前後で振動数0.5Hz、ひずみ振幅±50%及び±100%の正弦波を5サイクル加振した。また初期変位を与えてから95秒後までのせん断荷重を5~10秒間隔で記録した。試験条件を表1、試験結果⁴⁾を図3に示す。

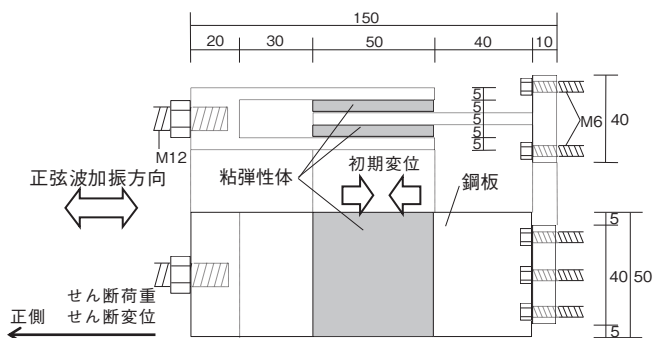
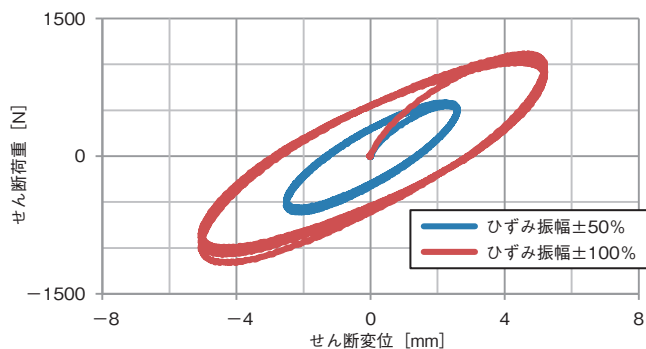


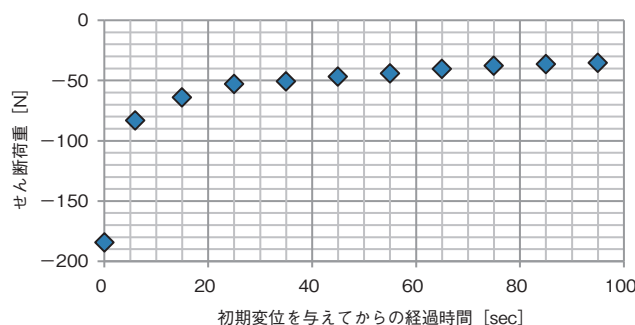
図2 試験体：単位 mm

表1 試験条件

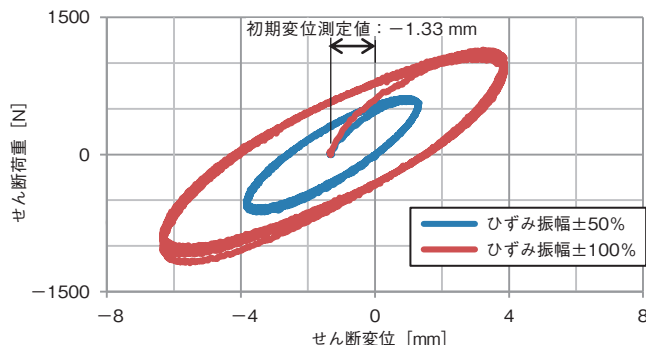
試験順序・項目	初期		正弦波加振		
	ひずみ [%]	変位 [mm]	振動数 [Hz]	ひずみ [%]	変形 [mm]
① 初期変位を受けない時の特性	0	0	0.5	± 50	± 2.5
② 初期変位を受けない時の特性				± 100	± 5.0
③ 初期変位を与える			-	-	-
④ 初期変位を与えて5分後の特性	-25	-1.25	0.5	± 50	± 2.5
⑤ 初期変位を与えて5分後の特性				± 100	± 5.0
⑥ 初期変位を与えて6時間後の特性				± 50	± 2.5
⑦ 初期変位を与えて6時間後の特性				± 100	± 5.0



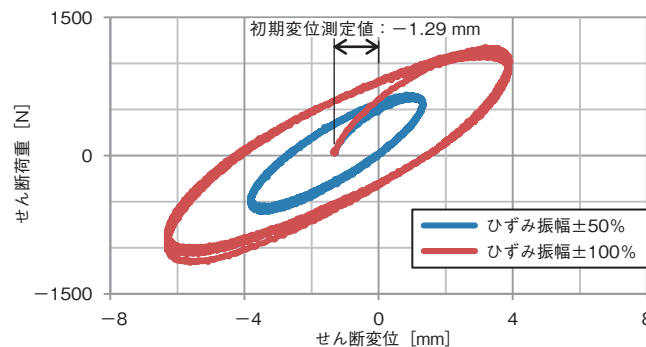
(a) 試験順序①②：初期変位前のせん断荷重-変位関係



(b) 試験順序③：せん断荷重の経過時間変化



(c) 試験順序④⑤：初期変位5分後のせん断荷重-変位関係



(d) 試験順序⑥⑦：初期変位6時間後のせん断荷重-変位関係

図3 試験結果

せん断荷重-変位関係は初期変位前の試験順序①②と、初期変位を与えた後の試験順序④⑤で殆ど変化しなかった。初期変位を与えた直後のせん断荷重-184 Nは図3 (b) のとおり時間経過に伴う応力緩和で約1/5に相当する-35 Nまで減少した。試験順序⑥⑦でも同様のせん断荷重-変位関係を描いていたので、初期変位で発生したせん断荷重は数十秒で応力緩和したまま安定したと考えられる。

正弦波加振3サイクル目の材料特性を定量評価するため図4の等価剛性 K_{eq} と減衰係数 C_{eq} を算出した結果を図5に示す。ひずみ25%相当の初期変位はこれらに殆ど影響を与えなかった。粘弾性体は分子鎖がランダムに折り畳まれた高分子材料なので接着面に並行する方向は等しくせん断変位である。従って、もし正弦波加振直交方向に初期変位を与えても同様の挙動を示すと推定される。

このような特徴を持つ粘弾性体を伝統的木造建物に適用すれば、木材のめり込みや接合部のガタには柔らかく追従しながら地震力には所定の特性を発揮できると考えられる。

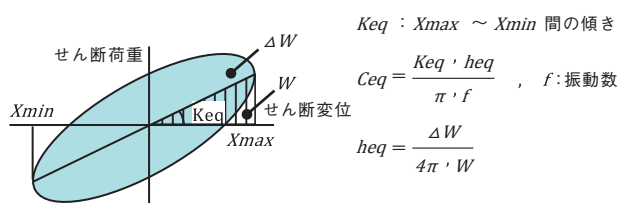


図4 等価剛性 K_{eq} , 減衰係数 C_{eq} 算出方法

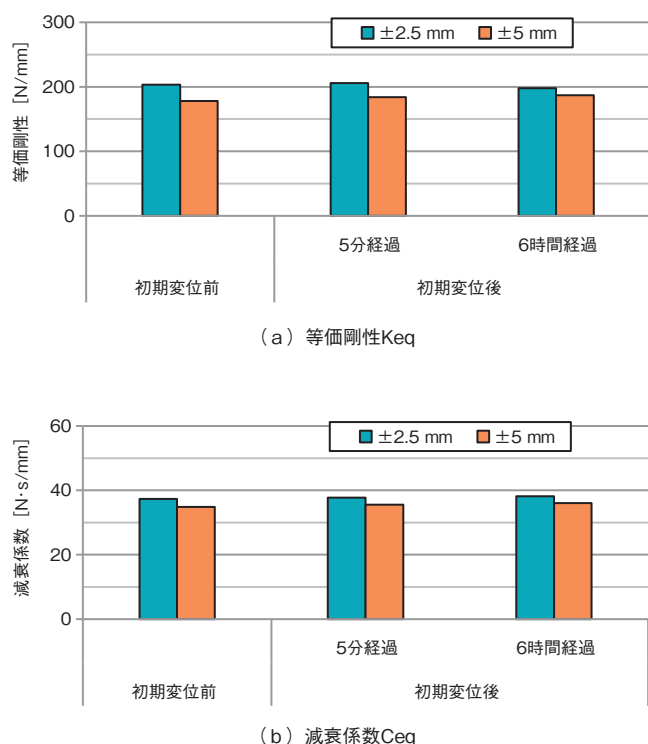


図5 等価剛性 K_{eq} , 減衰係数 C_{eq} 算出結果

3. 適用事例

3.1 新築五重塔への製品設計・製作内容

東長寺(福岡県福岡市)五重塔は2011年3月の竣工後、設計時の地震応答解析結果や、2014年3月伊予灘地震及び2016年3月熊本地震の観測結果等が報告されている^{5), 6)}。五重塔の構造的な挙動についてはこれらに譲り、ここでは粘弾性ダンパーへの要求事項と製品設計について述べる。

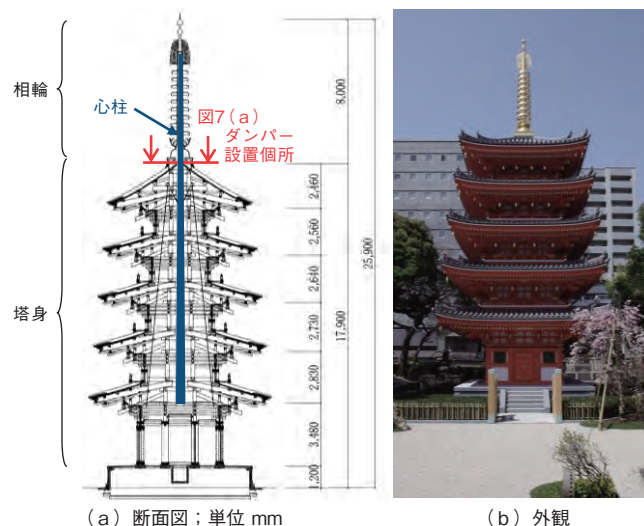


図6 東長寺五重塔^{4), 5)}

前掲1章「頂部の部分被害」には図6の相輪(そうりん)と呼ばれる部分が地震で塔身(とうしん)に接触して変形・損傷した場合が含まれる。そのため相輪と塔身を守るために限られた空間へ相応の減衰と剛性を発揮するダンパーを4方向に設置する必要があった。更にダンパーはクリープと呼ばれる自重による鉛直変位の漸増に追従しながら水平方向の地震力を低減できることが求められた。

そこで粘弾性ダンパーを下記内容で設計・製作した^{5), 7)}。

- ・粘弾性体を図7に示す縦向き2層形状として鉛直方向にもせん断変位できる形状とした。
- ・粘弾性体接着部分以外の各部品をボルト接合として、設置位置に応じて施工時に調節できる形状とした。
- ・粘弾性ダンパーと取付金物はピン接合として水平方向に自在に変形・回転できるようにした。
- ・ピンは頭部直径が大きくなるように切削加工をして、粘弾性ダンパーと取付金物の取り付け孔を重ねて上から落とし込むことで脱落しない形状とした。
- ・更にピンの下部に脱落防止用の止め輪をはめ込んで、もし心柱と塔身間の鉛直変位が大きくなっても粘弾性ダンパーは外れない構造とした。
- ・鋼材、ボルト、ピン類の材質は全てステンレスとして長期使用時の発錆対策とした。

東長寺五重塔に設置された粘弾性ダンパーを図8に示す。なお竣工後に観測を継続していたクリープは想定範囲内で推移していた⁸⁾ので、今後の地震時に所定の機能を発揮できると考えられる。

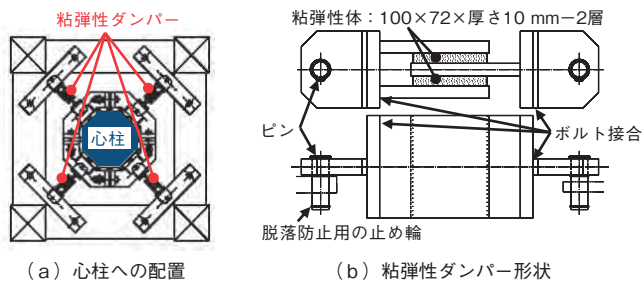


図7 五重塔用粘弾性ダンパー 4), 5), 7)

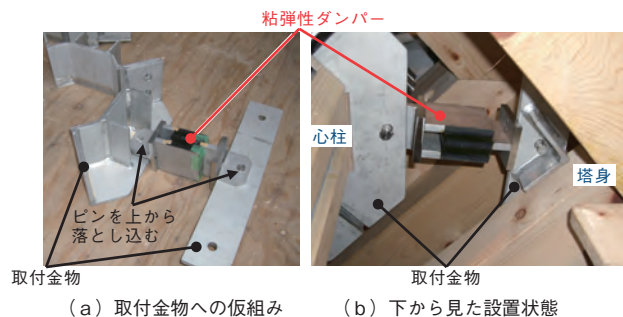


図8 東長寺五重塔への設置状態

3.2 既設本堂への製品設計・製作内容

長念寺（神奈川県川崎市）本堂は1824年に建立され、1923年関東地震で受けた被害の復興工事を経て1990年に川崎市の市重要歴史記念物に指定された。近年では屋根の葺き替えや基礎補強等が実施され、併せて粘弾性ダンパー設置工事も実施され、2017年に竣工した。こちらも本堂の地震応答解析や振動測定結果は報告されている⁹⁾ので同様に粘弾性ダンパーへの要求事項と製品設計について述べる。

前掲1章のとおり本堂の室内に耐力壁を設置できないので、図9(a)着色部に示す小屋裏（こやうら）と呼ばれる空間の、天井板の上に位置する梁に粘弾性ダンパーを設置することとした。しかし設置位置の梁の直径や断面形状等を事前に測定した結果に合わせてダンパーを個別に設計・製作する必要がある。更に文化財なので梁への加工や、荷重の集中によるめり込みを避ける必要があった。

そこで粘弾性ダンパーを下記内容で設計・製作した^{9), 10)}。

- ・ダンパーは小屋裏の外周部に沿って図9(c)赤線の20箇所に分散設置した。
- ・事前に測定した設置位置寸法から図10に示す長さ調整ブレースは12種類製作（8箇所で共用）して、粘弾性ダンパー片端にボルト接合して計20体とした。
- ・粘弾性ダンパーは20体とも共通の横向き2層形状としてテフロン部品を四隅に組み込むことで、粘弾性体の厚さを維持しながら長さ調整ブレースの重量を支持してスムーズにせん断変位できる構造とした。
- ・ダンパーと取付金物はピン接合として水平方向に自在に変形・回転できるようにした。なお隣接する梁間の鉛直変位差は小さいと予想されたことや強度からピンは六角ナットで固定した。また長さ調整用ブレースの片端に球面軸受を組み込んで、粘弾性体に曲げまたはねじり変形が与えられないようにした。
- ・ゴムシートを巻いた梁を取付金物で挟んで通しボルトと六角ナットで締め付けることで、取付金物の回転やガタ、梁へのめり込みを防いだ。
- ・粘弾性ダンパー、長さ調整用ブレース、取付金物等の材質は前掲3.1節と同様に全てステンレスとした。

長念寺本堂に設置された粘弾性ダンパーを図11に示す。こちらも地震観測を実施しているので、今後はダンパーの設置効果を検証できると考えられる。

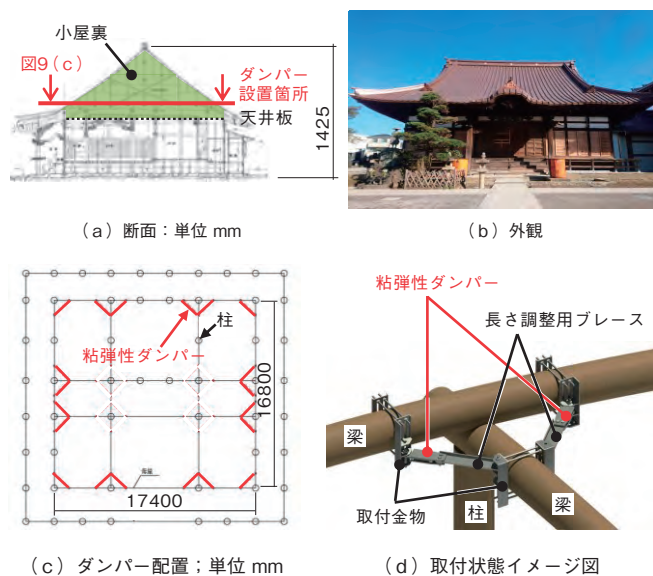


図9 長念寺本堂⁹⁾

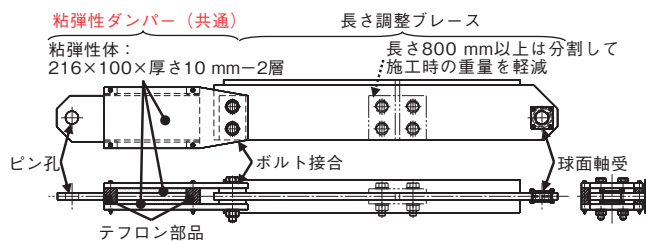


図10 本堂用粘弾性ダンパーと長さ調整ブレース⁹⁾

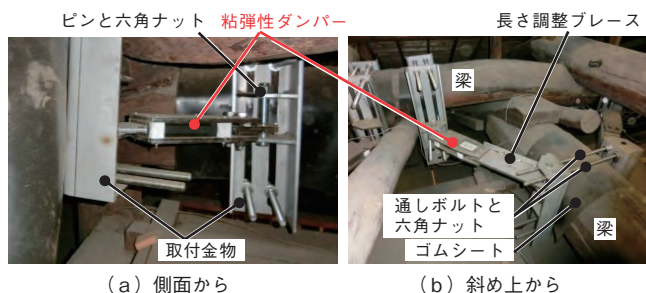


図11 長念寺本堂への設置状態

4. ま と め

研究者や建物設計・施工者と共同で、柱や梁の接合部における長期使用時に発生する変位に追従しながら地震力を低減できる粘弾性ダンパーを設計・製作した。その結果、新築五重塔や既存本堂の制振構造の実現に貢献できた。

しかし伝統的木造建物の挙動は未解明の部分があるので今後も地震観測結果から検証を進める予定である。

謝 辞

東長寺の藤田紫雲住職と長念寺の小林泰善住職には建設工事に格別のご配慮を頂きました。また粘弾性ダンパー設計に必要な伝統的木造建物の構造解析では元 株式会社アーク情報システムの田中規子氏、東長寺の振動測定では福岡大学高山峯夫教授、測定・解析作業では福岡大学高山研究室と三重大学花里研究室の学生諸氏に多大なご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 濱島正士, 他: 五重塔のはなし, 建築資料研究社 (2010)
- 2) 佐藤信夫: 粘弾性ダンパーを水平方向に付加した伝統的木造建物の制振補強に関する研究, 三重大学学位論文 (2020)
- 3) 曾田五月也, 他: 建築用高性能粘弾性ダンパーの開発, 昭和電線レビュー, Vol. 48, No. 2, pp. 96-102 (1998)
- 4) Hanazato, T., et al: Seismic Design and Construction of a Traditional Timber-Made Five-Storied Pagoda by Applying Coupled Vibration Control, 15th World Conference on Earthquake Engineering (2012)
- 5) 佐藤信夫, 他: 木造五重塔の心柱の応答制御技術, 日本建築学会技術報告集, 第24巻, 第57号, pp. 619-624 (2018)
- 6) 大村祐樹, 他: 心柱に制振工法を用いた伝統的木造五重塔の地震時挙動 - 2016年4月14日熊本地震による観測記録 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 595-596 (2019)
- 7) 木造多重塔の制振構造, 特許第5263843号
- 8) 佐藤信夫, 他: 伝統構法による新築木造五重塔の鉛直変位の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 287-288 (2016)
- 9) 佐藤信夫, 他: 水平構面に粘弾性ダンパーを付加した木造本堂の制振技術, 日本地震工学会論文集, 20巻, 第4号, p.4_38-4_55 (2020)
- 10) 伝統木造建物の水平構面制振補強方法, 特許第6095017号

昭和電線ケーブルシステム(株)
三須 基規 (みす もとき)
免震制振部 技術課
免震製品設計・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
加藤 直樹 (かとう なおき)
免震制振部長

松井建設株式会社
佐藤 信夫 (さとう のぶお)
博士 (工学)
技術部 技術課

三重大学
花里 利一 (はなざと としかず)
工学博士
大学院 工学研究科 建築学専攻 教授

内田建築構造コンサルタント
内田 龍一郎 (うちだ りゅういちろう)
博士 (工学)

元 株式会社田治見エンジニアリングサービス
荻原 幸夫 (おぎわら ゆきお)

東京大学
坂本 功 (さかもと いさお)
工学博士
名誉教授