2020年度（第12回）免震構造・制振構造に関わる研究助成の成果報告

耐力とエネルギー吸収効率を同時かつ効率的に高めたオイルダンパー木質制振壁の開発

松田和浩（名城大学）

１　はじめに

小型のオイルダンパーを住宅の耐震性向上に活用するため、間柱型のようにダンパーを水平に設置し、壁頂部へとダンパー力を伝える制振壁について考える。その際、各部材や接合部(以下、支持材)は引張力により変形しやすく、それによるエネルギー吸収のロスを防ぐことが重要となる。そこで筆者らは、プレストレスで支持材に圧縮力を与え、引張による支持材の変形を防ぐことで、効率よくエネルギー吸収性能を高める制振壁の開発をしている[1)]。これまでは支持材に鋼管や構造用合板を用いてきたが、新たな支持材としてLVLを用いた制振壁を開発し、壁の強制変形実験および木質制振架構の振動台実験により、その動的挙動を把握する。

２　静的載荷実験

２．１　実験計画概要

図1にセットアップを示す。オイルジャッキにより梁に水平方向の強制変位を与えることで載荷する。柱のホールダウン金物は、載荷前のボルト軸力を3kNで管理した。また、面外方向に試験体が変形することを防ぐために、梁に面外拘束を設けている。本研究では、制振壁のダンパー部分を非拘束にした状態Nと、ダンパー部分を拘束した状態Rで実験を行う。ただし、状態Nは本報で報告する3タイプで同様と考え、後述する鋼管タイプでのみ実験を実施した。

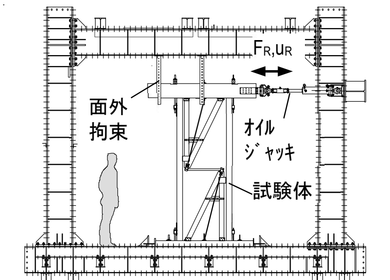


図１　セットアップ

２．２　試験体概要

前年度新たに開発した試験体であるLVLタイプを図2に示す。柱高さは2812.5mm、柱スパンは910mmの1Pの木質制振壁であり、柱、梁、土台には、いずれも強度等級E65-F225のスギを用いている。上下に2本ずつあるテンション材に、テンションをそれぞれ15kN導入する。ダンパーと支持材及びテンション材で共通のピンを用いて接続することで接合部のガタや支持材の曲げ変形を防いでいる。また、支持材が面外へ変形することを防止するために、支持材のダンパー付近に面外拘束を設けている。以上の点は後述の鋼管タイプ、合板タイプで共通である。ただし、この2タイプは2Pである。

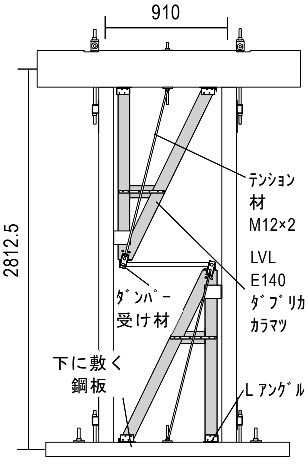


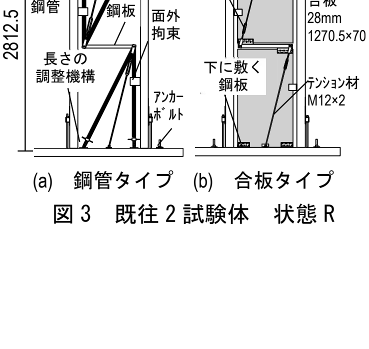
図２　LVL タイプ　状態 R

ブレース材にE140の構造用LVLを用いており、架構に応じたブレース材の寸法を予め設計し、工場で生産することで任意の架構に対応することを想定している。ダンパー受け材をスリット加工されたブレースの中に差し込み、受け材とダンパーの孔にピンを入れることでダンパーとブレースを一体化させている。受け材とブレースにドリフトピンを打ち込むことで受け材とブレースが接触するように設計している。

LVLタイプとの比較対象として、既往の2種類の試験体を図3に示す。

鋼管タイプは支持材が鋼管で構成され、ねじで長さの調整を行う。この部分は圧着力だけで固定されている。

合板タイプは支持材に用いる針葉樹構造用合板を現場でカットすることで架構に応じた寸法に調整することを想定している。合板と横架材をL字



(a)　鋼管タイプ　(b)　合板タイプ

図３　既往２試験体　状態 R

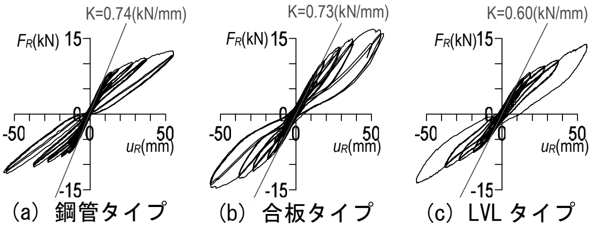
の鋼板にビスを打つことで、合板を固定している。また、合板が横架材に局所的にめり込むことを防ぐため、合板と横架材の間には鋼板を敷いている。

２.３　静的載荷実験結果

２.３.１　荷重変形関係

図 4 に各タイプの状態 R での荷重変形関係を示す。合板タイプは合板が座屈したため 1/30 rad.の途中で、LVL タイプは治具の破壊を懸念したため 1/50 rad.の 1 サイクル終了後に実験を終了した。

いずれの試験体も載荷が進むごとに、支持材が横架材から離間することで剛性が徐々に低下していくものの、想定しているダンパー荷重である 6kN の範囲内では線形挙動を示し、制振壁として十分な剛性を得た。また、ここに 1/450 rad.の時の割線剛性を初期剛性と定義すると、LVL タイプは初期剛性が各 2 タイプより低いものの、載荷に伴う各層間変形角での割線剛性の低下が比較的緩やかであった。これは合板同様に支持材と横架材をビスで固定していることが理由に挙げられる。



（a）鋼管タイプ　（b）合板タイプ　（c）LVL タイプ

図 4　各タイプの荷重－変形関係（状態 R）

２.３.２　支持材の軸力の釣り合い

LVL タイプでは、テンション材に加え、支持材にもキャリブレーションを行った上で、それらの軸力を歪ゲージで計測した。以下では、プレテンションを加えた時点の支持材及びテンション材の軸力を基準とする。

図 5 に、ダンパー力が 6.0kN の時の支持材及びテンション材の軸力の分布を示す。支持材と横架材のなす角を θ、テンション材のなす角を φ、上部の支持材及びテンション材の軸力を N_1, N_2, N_3、下部の軸力を N_1', N_2', N_3'、ダンパー力を $\hat{F}_d$ と定義すると、接点 P_1, P_2 における水平方向、鉛直方向の力のつり合い式から

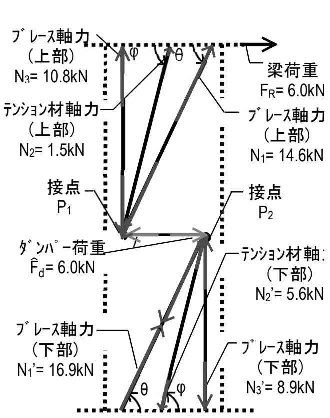


図 5　1 回目+1/450rad 時の支持材の軸力

以下の式を得る。

$$\text{水平方向：} N_1\cos\theta + N_2\cos\varphi = -\hat{F}_d \qquad (1)$$

$$\text{鉛直方向：} N_2\sin\varphi + N_3 = -N_1\sin\theta \qquad (2)$$

N_1'～N_3'についても同様である。

想定するダンパー荷重 6kN までの接点 P_1, P_2 の鉛直方向、水平方向の力のつり合いの推移を図 6 に示す。これは、水平方向においては式(1)の、鉛直方向においては式(2)の右辺を縦軸に、左辺を横軸に取ったものである。

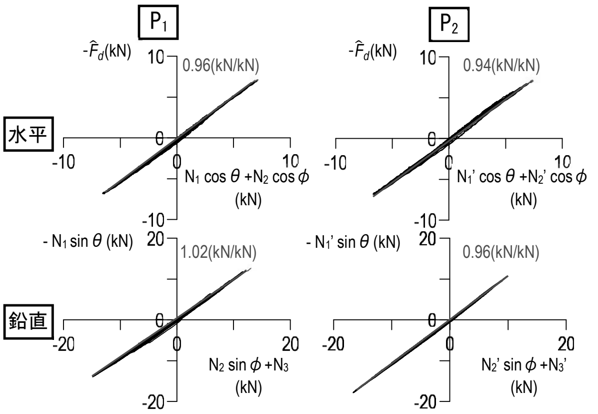


図 6　各接点における水平、鉛直方向の軸力のつり合い

図 6 より、合力に 0.2～0.6 程の誤差が生じるものの、P_1、P_2 の鉛直方向、水平方向それぞれで式(1)及び式(2)の右辺と左辺が概ね同じ値をとることから、支持材及びテンション材の軸力のつり合いが取れていることが確認できる。

ここで、各支持材の軸力の変動を予測する。支持材の剛性方程式から、N_1, N_3 は、$\hat{F}_d$ と各部材の軸剛性 $k_{(1)}, k_{(2)}, k_{(3)}$ を用いて次式のように表せる。

$$N_1 = -k_{(1)}\alpha(\cos\theta - \beta\sin\theta)\hat{F}_d \qquad (3)$$

$$N_3 = k_{(3)}\alpha\beta\hat{F}_d \qquad (4)$$

ここで

$$\alpha = \frac{1}{k_{(1)}\cos^2\theta + k_{(2)}\cos^2\varphi - \beta(k_{(1)}\cos\theta\sin\theta + k_{(2)}\cos\varphi\sin\varphi)}$$

$$\beta = \frac{k_{(1)}\cos\theta\sin\theta + k_{(2)}\cos\varphi\sin\varphi}{k_{(1)}\sin^2\theta + k_{(2)}\sin^2\varphi + k_{(3)}}$$

図 7 にダンパー荷重レベル内での、各支持材の軸力 N_n の理論値及び計測値とダンパー力 $\hat{F}_d$ との関係を示す。図 7 より、$\hat{F}_d$ と各支持材軸力は線形関係を保って推移しており、プレテンションの低下に伴い軸力が徐々に増加するものの、その挙動は理論値とほぼ一致するため、理論による軸剛性で支持材の軸力を概ね評価できることがわかった。また、後述する振動台実験でも同様の結果を得た。なお、N_3'の傾きが理論値よりやや緩やかであるのは、載荷前から

支持材に入っていた亀裂(図 8)によって軸剛性が低下したためであると考えられる。

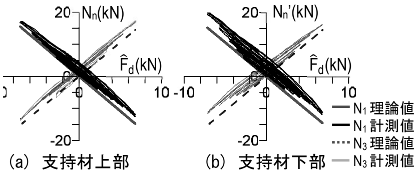


図７　支持材軸力の理論値と計測値の比較

図８　支持材下部の亀裂

２.４　状態 N/R 評価法

LVL タイプにおいて、状態 N と状態 R の実験結果と、別途実施したダンパー単体の強制変形実験の結果を用いて状態 N/R 評価[2), 3)]を行い、制振壁の履歴を予測した。ダンパー単体実験の結果と作成した履歴をそれぞれ図 9 と図 10 に示す。

ダンパー力は最大で 6kN であり、いずれの試験体もその範囲内では、線形弾性で挙動しているため、制振壁の履歴としては剛性低下が発生せず、安定した履歴を描いている。

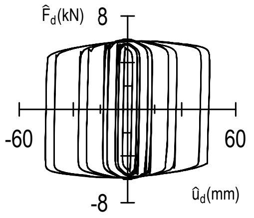


図９　ﾀﾞﾝﾊﾟｰ単体実験結果

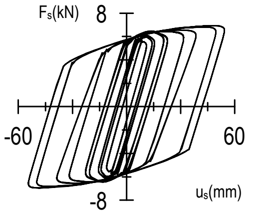


図 10　制振壁の履歴予測結果

３.　振動台実験概要

３.１　試験体概要

本報で比較検討する 2 種類の試験体を図 11 に示す。どちらも 3P の木質架構で、両外はパーティクルボードの耐力壁としており、両面で計 4 枚まで張ることができる。釘本数により壁倍率を調整しており、耐力のみの方は壁倍率 2.9 相当を 3 枚、壁倍率 2.5 相当を 1 枚配置した。耐震＋制振は中央に配置する制振壁の負担耐力 6kN を考慮し、壁倍率 2.9 相当を 1 枚、壁倍率 2.5 相当を 2 枚とすることで、両者の見かけの耐力が約 20kN となるようにした。すなわち、耐震のみは(2.9 × 0.91 × 1+2.5 × 0.91 × 2) × 1.96= 19.98kN、耐震＋制振は(2.9×0.91×3+2.5×0.91×1) ×1.96+6.0=20.09kN である。

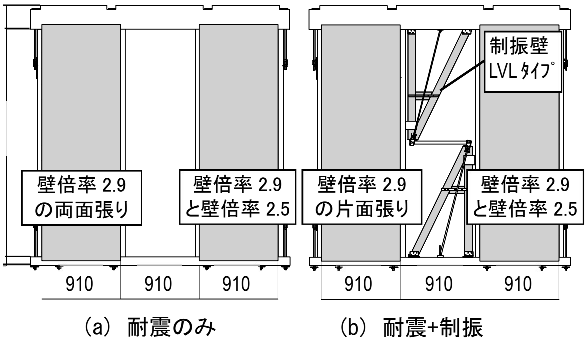


図 11　試験体
※()内の数値は裏面の壁の壁倍率

３.２　実験計画概要

写真 1 に加振する 1 層木質架構を示す。慣性力用の錘が固定された 1 層木質架構に前述の 2 試験体をそれぞれ組み込み、振動台に地震動を入力する。総 2 階建 30 坪の住宅における 1 階の地震用重量を 60kN とし、各試験体の標準層せん断力係数 C_0 の値が 0.333 になるように錘の質量を調整した。

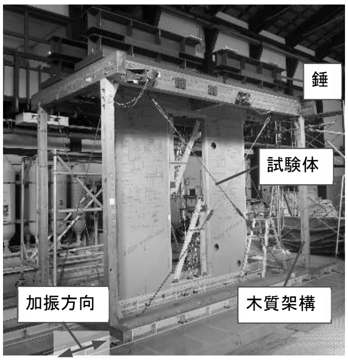


写真１　加振する木質架構

入力地震動として BSL 波の 45%と 91%を用い、これを交互に入力する。耐震要素のみの架構は 1 回、制振壁を導入した架構(以下、本制振架構)は 3 回交互に加振した後、45%を入力した。

３.３　実験結果

３.３.１　層せん断力－層間変形関係

図 12 に各架構の層せん断力 Q－層間変形 u の関係を示す。

耐震要素のみの架構は 91%を経験した後に再び 45%を経験すると、剛性が顕著に低下した。一方で本制振架構は、加振が進むごとに徐々に剛性が低下していくものの、BSL45%の波が入力されたときは層せん断力－変形関係がいずれもバイリニアの履歴を描いている。以上から、本制振壁を木質架構に導入することで、耐力の劣化を抑えられ、且つ応答を低減できることがわかる。

また、図 13 に本制振壁に取り付けたダンパーの荷重 F_d－変形 u_d 関係を示す。

本ダンパーの荷重の想定の最大値 6kN を超えた、8kN 近い値においても履歴の形状が大きく崩れておらず、最大荷重以上の荷重に対してもある程度の性能を維持することがわかった。

３.３.２　エネルギー吸収量

図 14 に、加振 1 回目から 3 回目までの架構及びダンパーのエネルギー吸収量の時刻歴を示す。

図 14 より、載荷を重ねるごとにダンパーのエネルギー吸収量が増加し、架構のエネルギー吸収量に対する割合が徐々に高くなっていることがわかる。これは、架構が損傷しエネルギー吸収性能が低下する分をダンパーが補うためだと考えられる。

３.３.３　平均等価減衰

各試験体を導入した架構の減衰を評価するため、平均等価減衰 h_s を導出する。地震終了時の地動がなした全仕事が等価な粘性減衰のなした全仕事と等しいとしたとき、平均的な等価減衰 h_s は

$$h_s = \int_0^t a_0\, v\,dt \,/\, 2\omega_e \int_0^t v^2 dt \qquad (5)$$

で求まる。

ここで $\omega_e = 2\pi\sqrt{k_e/m}$、$k_e$：最大変形時の等価剛性

式(5)から求まる平均等価減衰 h_s と最大層間変形 u_{max} の関係を図 15 に示す。図 15 から、h_s は耐震要素のみの架構では最大で 0.15 程度だが、本制振架構では 1 回目の加振では約 0.14 となるものの、それ以降は 0.25～0.45 の間の値をとり、加振が進むごとに大きくなる。

４.　おわりに

支持材に LVL を用い、かつポストテンションを導入した木質オイルダンパー制振壁の強制変形実験および振動台実験を実施した。以下にまとめる。

・状態 R の荷重変形関係はダンパー荷重レベル内で線形に挙動し、制振壁として十分な剛性を得た。

・接合部接点における支持材の軸力のつり合いを確認した。また、支持材の軸力変動の理論値を導出し、理論値と計測値を比較したところ、両者は概ね一致していた。

・状態 N/R 評価により得た履歴は、剛性低下のない安定したものとなった。

・提案した制振壁を入れた木質架構の動的特性およびエネルギー吸収性能を把握した。

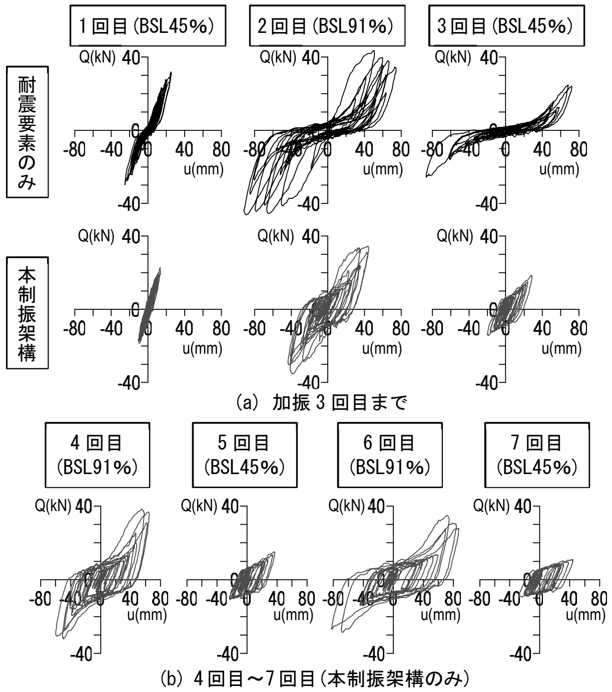
謝辞　本研究を実施するにあたり、名城大大学院生の坂本遼君、千博産業株式会社の方々にご協力いただきました。ここに記して深く感謝申し上げます。

参考文献

1) 坂本遼,金森主馬,松田和浩,上野浩志:プレストレスで支持材を補強したオイルダンパー木質制振壁の開発 その1 状態NおよびR の静的強制変形実験,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp489.-490, 2020.9

2) 笠井和彦, 岩崎啓介 :様々な形式の制振構造における自由度縮約法と水平バネ系への変換法, 日本建築学会構造系論文集, 第 605 号, pp.37-46, 2006.7

3) 笠井和彦,山崎義弘,大木洋司,坂田弘安:方杖型ダンパーを持つ木質架構の動的挙動と簡易評価法,日本建築学会構造系論文集,第 664 号, pp.1109-1118, 2011.6



(a) 加振 3 回目まで

(b) 4 回目～7 回目(本制振架構のみ)

図 12　層せん断力－層間変形関係

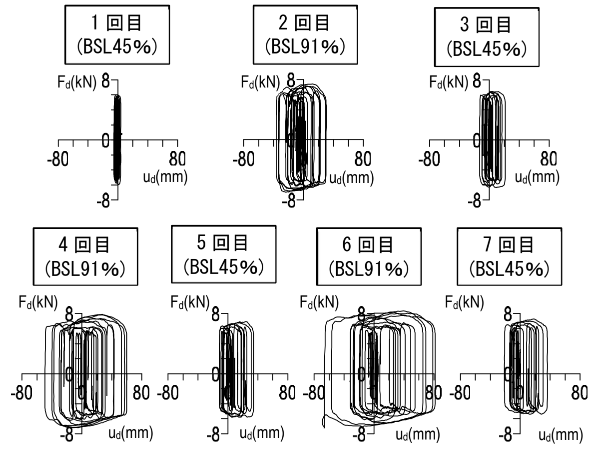


図 13　ダンパー荷重－変形関係

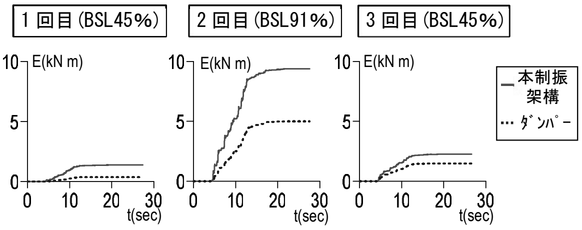
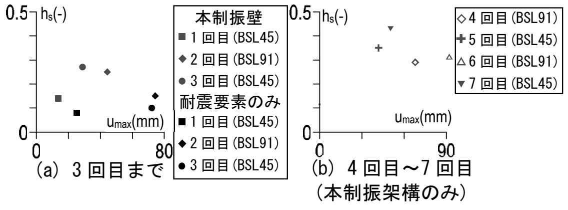


図 14　エネルギー吸収量の時刻歴の比較



(a) 3 回目まで　(b) 4 回目～7 回目(本制振架構のみ)

図 15　平均等価減衰と最大層間変形