

2015年度（第7回）免震構造・制振構造に関わる研究助成の成果報告

制振の損傷・応答制御技術を利用した開放的な木質構造の最適化

五十田 博（京都大学生存圏研究所）

1 はじめに

平成 22 年 10 月に「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が施行されるなど、木造建築物は“小規模住宅”にとどまらず、“中大規模非住宅”へと需要が広がっている。一方、2016 年 4 月の熊本地震では震度 7 を観測する前震と本震が連続的に発生し、前震では倒壊は免れたものの 2 波目の本震により倒壊した建築物は少なくなく、今後は、繰り返し発生する地震対策の一つとして制振構造は着目されている。このような背景のもと、本研究では今後需要の拡大が期待される中大規模木造を対象とした制振ダンパーの開発について報告する。まず、中大規模木造の制振構造化の課題と現状を整理した上、開発コンセプトとダンパーの目標性能を報告する。続いて、ダンパー端部の接合金物の要素実験について報告する。

なお、本研究は博士後期課程に在学中の篠原昌寿君（㈱構造計画研究所）に多大の協力を得たことをここに記す。

2 中大規模木造の制振構造の現状と課題

表 1 に高層建築物及び木造住宅と比較した中大規模木造の制振構造の現状と課題を示す。一つ目の課題は「適したダンパーがない？」ことである。高層建物や木造住宅では必要性能に応じてダンパーが選択可能な状況にあるが、中大規模木造の分野は比較的新しく、設計で必要性能もわからず、どのようなダンパーが適しているかわからない。次の課題は「接合部の設計」である。木造の接合部は鉄骨造のように高強度で剛性の高い接合が不可能なため、耐力計算だけでなく、初期ガタの抑制及び、剛性を評価する必要がある。現時点では計算で剛性の概算はできるもののその値のばらつきは大きく、正確な評価は実験が必要である。そのため、木造住宅の分野では、ダンパーと接合部を含めた取付部品がセットとなっており、予め実験を実施し性能を検証している。その他、木造に限った話ではないが、普及を考える上では中低層建物の制振設計法が必要と考える。

表 1 中大規模木造の制振構造の現状・課題

	高層建築物	木造住宅	中大規模木造
ダンパー	あり	あり	必要性能不明
接合部設計	構造設計者が個別設計	ダンパーと接合部を合わせて実験	当面はダンパーに応じた接合金物を実験
制振設計	時刻歴応答解析が基本	壁倍率評価 付加制振	当面は付加制振 将来は静的設計法？

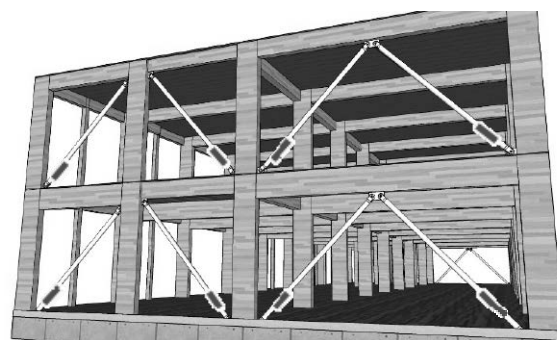


図 1 フレキシブル制振ダンパーの設置イメージ

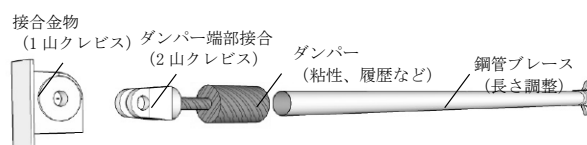


図 2 フレキシブル制振ダンパーの構成

3 開発コンセプト

図 1、図 2 に本開発が目指すフレキシブル制振ダンパーの配置イメージ及び構成図を示す。前述した現状の課題を受け、今後の設計活用の観点から開発方針を以下のように考えた。

- ①事前解析により必要ダンパー減衰力を算定する。
- ②ダンパーに応じた汎用性のある接合金物を設計開発し、要素実験により性能を予め検証する。なお、接合金物はピン接合とし、様々な角度に対応させ、自由な配置設計に配慮する。
- ③接合金物、ダンパー端部接合、長さ調整用の鋼管ブレースをセットとする。ダンパーは粘性及び履歴の 2 種類を想定し、適宜選択可能とする。

なお、本開発では対象とする構造躯体の架構形式を木質ラーメン構造とした。木材はヤング係数が低く、接合部の剛性も低い。木質ラーメン構造は弾性領域も比較的長いいため、地震エネルギーをダンパー

に集中させやすく、躯体の損傷制御の観点から合理的な組み合わせである。一方で、一般の木造の耐力要素は初期から非線形性が強いいため、ダンパーを性能の良い耐力要素として使うことも考えられるが、その際は両者の変形性能の違いに留意した上で適用も可能と考える。

4 要求されるダンパー減衰力

前述した課題として中大規模木造に必要なダンパー減衰力が不明である。そこで、図3～図5に示す4Fモデル(耐火)¹⁾、3Fモデル(準耐火)、2Fモデル(耐火要求なし：以下その他)、3つの木造オフィスビルを想定し、時刻暦応答解析により要求されるダンパー減衰力を求める。表2に各モデルの想定規模を記載する。いずれも平面プランは同様とし、事務所スペースの大空間を確保するため、木質ラーメン構造とし、プランニング上影響を与えない外壁構面にブレース型ダンパーを配置することを想定した。元の建物の耐震性能として縦軸の層せん断力を建物重量で除して基準化した骨格曲線を図6に示す。この特性は一般的な木質ラーメン構造を想定し、 $C_0=0.2$ の外力に対して層間変形角 $1/150\text{rad}$ となる1次剛性を有し、保有耐力を $D_s=0.5$ 相当としたバイリニア型とし、各階の性能を A_i 分布に応じて割増した。また、復元力特性はスリップ型とし、内部粘性減衰は初期剛性比例型 2%とした。

ダンパーは、オイルダンパーと摩擦ダンパーの2種類を想定し、ダンパー降伏荷重 Q_{dy} と、支持材剛性 K_b の2つをパラメータとしたケーススタディを実施した。ここでは紙面の都合上、設定したクライテリア $1/75\text{rad}$ を概ね満足したケースとして図3～図5に示すように降伏荷重 $150\text{kN} \sim 50\text{kN}$ のダンパーを配置したケースについて掲載する。なお、水平方向に換算した各層のダンパー降伏荷重の合計は1次設計用せん断力 ($C_0=0.2$) と同程度であり、支持材剛性は主架構剛性に対して 2.5 倍程度の剛性を設定したことになる。

入力地震動は、標準的な観測地震動として EL CENTRO, TAFT, HACHINOHE の3波を選定した。また、建築基準法施行令第82条の5第五号、および平12建告第1457号第10第1項に基づく第二種地盤の加速度応答スペクトルを目標とした告示波とし、位相特性を JMA 神戸波、乱数2種類とした。合計6波のレベル2相当を入力した。なお、告示波

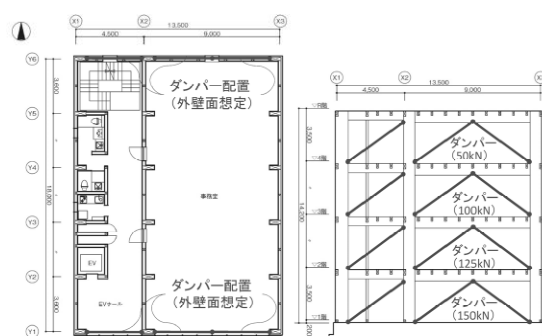


図3 4Fモデル(耐火)¹⁾

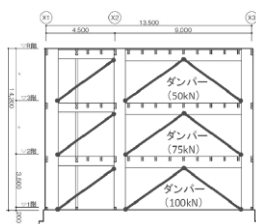


図4 3Fモデル(準耐火)

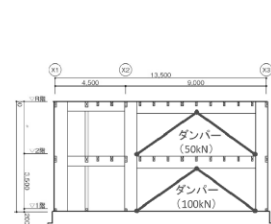


図5 2Fモデル(その他)

表2 想定した木造オフィスの規模と重量

	4Fモデル (耐火)	3Fモデル (準耐火)	2Fモデル (その他)
階数	4階建て	3階建て	2階建て
高さ[m]	$3.5 \times 4 = 14.0$	$3.5 \times 3 = 10.5$	$3.5 \times 2 = 7.0$
延べ床面積[m ²]	$250 \times 4 = 1000$	$250 \times 3 = 750$	$250 \times 2 = 500$
建物重量	屋根: 2.8 床: 4.3	屋根: 2.6 床: 3.7	屋根: 2.2 床: 3.2

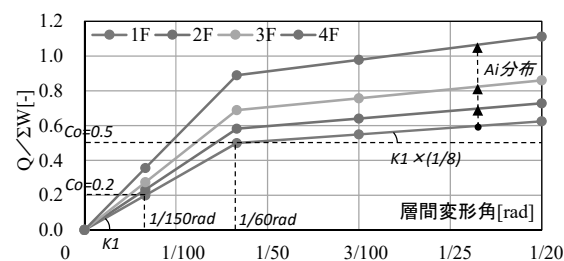


図6 基準化した骨格曲線(例: 4Fモデル)

は平12建告第1457号第4項に基づく低層建物に対する補正係数 p を考慮し、2Fモデル 0.85、3Fモデル 0.90、4Fモデル 0.95 を乗じている。

解析結果として最大応答層間変形角を図7に示す。非制振はいずれも $1/75\text{rad}$ を超える結果に対して、ダンパーを付加した制振モデルは、摩擦の一部の地震動によって多少クライテリアを超える場合があるものの、概ね $1/75\text{rad}$ 以内であることが確認できる。以上のような検討で求めたダンパー性能案を表3に示す。3タイプ程度のラインナップをそろえることで、低層～中層、中規模～大規模まで幅広い

建築物に対してバランス良くダンパーを配置することが可能と考えられる。

5 汎用性のあるダンパー端部の接合部

図8にダンパーの配置例と必要となる接合金物のイメージを示す。汎用性の観点から、ダンパーとセットでかつ、任意の角度に適用できるピン接合を考えた。接合金物の形状は柱梁接合部の SingleType と、梁中間接合部の DoubleType の2タイプである。SingleType は床合板やモーメント抵抗接合具との干渉を避け、施工性に配慮し柱設置を選定した。DoubleType は交点に生じるせん断力を鋼材で負担できる一体型を選定した。接合金物の目標性能と接合する木材を表4に示す。提案したダンパー性能に応じて、Low、Middle、High の3タイプを設定した。目標耐力はダンパーリリース荷重に安全率1.33～1.40を乗じた数値とし、目標剛性はケーススタディより得られた支持材剛性($K_b=2.5K_i$)を用いて、ダンパー端部の接合金物に必要な剛性を逆算することで定めた。接合する木材はLowを住宅規格の中断面集成材に適用させ、Middle、Highは今後整備が期待される幅150,180mm、部材せい450,600mmの大断面集成材を想定した²⁾。樹種はヤング係数が比較的小さいスギへの適用を考慮した。

6 接合金物の要素試験

6.1 試験体概要

前述した接合金物の想定のもとプロトタイプとして Single-MiddleType を設計製作し、要素試験を実施した。図9にプロトタイプの試験体を示す。接合金物は球面軸受けを用いたピン接合とし、25度～65度の角度領域に対してダンパーが設置可能なように予め設計した。引張力・圧縮力に対しては雌ネジ加工付きラグスクリューボルト(以下、LSB)φ25、せん断力に対しては主に鋼製ダボに期待し、目標荷重に対して短期許容耐力以内となるように設計した。LSBは計算により耐力・剛性を評価し、ダンパー端部は高剛性が必要であることから、弾性限耐力 P_a を最大荷重 P_{max} の45%として安全側に設計した。初期ガタの抑制にはドリフトピン仕様とエポキシ樹脂仕様の2ケースを想定したが、エポキシ樹脂仕様は樹脂の充填が不十分であったため本報では説明を省略する。使用した木材は対称異等級構成集成材スギE65-F225、部材幅は180mm、部材せいは450mmとした。

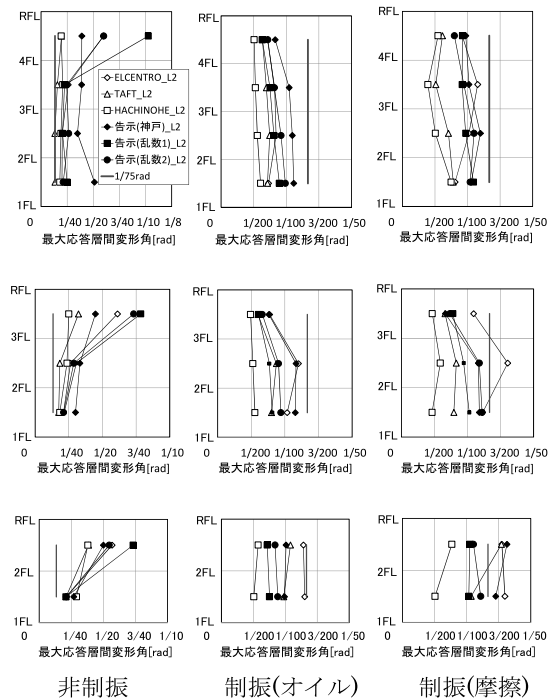


図7 最大応答層間変形角

表3 中大規模木造に要求されるダンパー性能(案)

ダンパー種類	オイルダンパー		摩擦ダンパー
	リリース荷重[kN]	リリース速度[cm/s]**	降伏荷重[kN]
High	150	7.5	150
Middle	100	7.5	100
Low	50	7.5	50

※中低層のため比較的低めのリリース速度となる

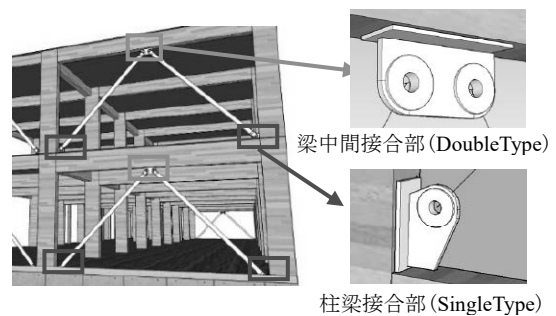


図8 必要となる接合金物イメージ

表4 接合金物の目標性能と接合する想定木材

種類		目標性能		想定木材(最小断面)		
		耐力[kN]	剛性[kN/mm]	幅[mm]	せい[mm]	樹種・強度
Single/Double	High	200	61	180	600	対称異等級構成スギE65-F225
	Middle	135	39	150	450	
	Low	70	19	120	300	

6.2 加力方法及び計測位置

加力概要及び計測位置を図 10、表 5 に示す。加力は荷重制御の正負交番繰返載荷とし、21.8 度加力と、45.0 度加力の 2 ケースとした。21.8 度加力は目標荷重 135kN までを 1 サイクル実施した。加力後に設置治具を交換の上、接合金物のボルトを締めなおし、45 度加力を目標荷重 135kN まで 3 サイクル実施、その後引張破壊まで加力した(図 11)。

計測はロードセルの荷重、接合金物と木材の相対変位として図 12 に示す(a)加力方向(b)引張/圧縮方向(c)せん断方向の成分を計測した。

6.3 試験結果

図 13 に各方向の荷重変形関係を示す。ここで、荷重は各方向成分に分解した値とした。(a)加力方向に着目すると、21.8 度加力、45 度加力ともに目標荷重 135kN を満足することが確認できた。また、135kN 時の割線剛性は 21.8 度加力 450kN/mm、45 度加力 130kN/mm となり、いずれの方向も目標剛性 39kN/mm を十分に満足した。なお、微小ではあるがスリップ性状が確認された。これは主に鋼製ダボと木材とのクリアランスによるせん断方向が影響していると考えられる(図 13(c))が、その変形量は 135kN の荷重に対して 1mm 以内と僅かであり、フレームに配置した際の影響は少ないと考えられる。写真 1 に 45 度加力時の破壊性状を示す。球面軸受け接合部の溶接部が加力方向の荷重 245kN 時に破断し、荷重が急激に低下した。

表 3 目標荷重時の割線剛性

目標荷重時割線剛性[kN/mm]	加力方向		引張/圧縮方向	せん断方向
	実験値	目標値	実験値	実験値
Single-MiddleType	130	39	570	65

5 まとめ

以上、中大規模木造に要求されるダンパー性能を事前解析により提案した。また、プロトタイプとして製作したダンパー接合金物の要素試験を実施し、所定の耐力及び剛性を有することを確認した。今後

はオイルダンパー及び摩擦ダンパーを製作し、動的フレーム試験等により性能を検証予定である。

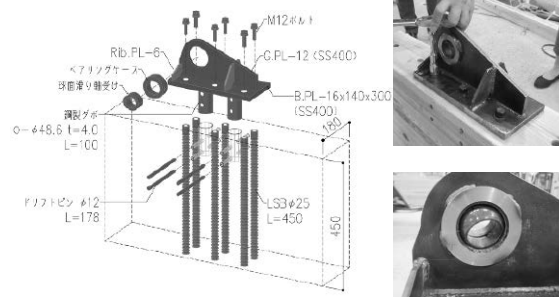


図 9 Single-MiddleType(ドリフトピン仕様)試験体

表 5 加力内容

加力ケース	初期ガタ対応	加力角度	備考
加力①	ドリフトピン (φ12)	21.8 度 (4 寸勾配)	Single-MiddleType 目標荷重まで載荷
加力②		45.0 度 (10 寸勾配)	Single-MiddleType 破壊荷重まで載荷

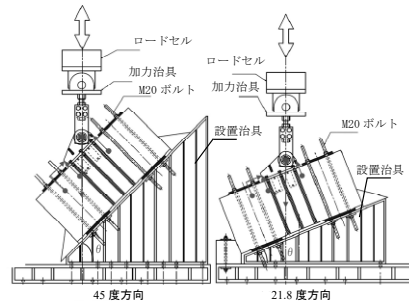


図 10 加力方法

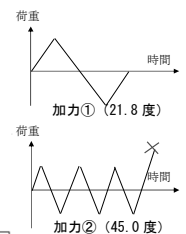


図 11 加力サイクル

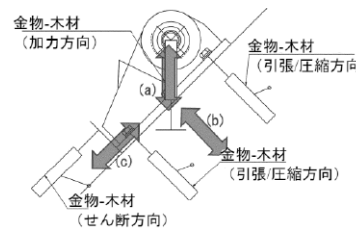


図 12 変位測定方向



写真 1 溶接部破断

【参考文献】

- 1) 株式会社建築技術：建築技術、No.772、pp.95-97、2014.5
- 2) 中層大規模木造設計情報整備委員会(2013)『中層大規模木造構造設計データ集』

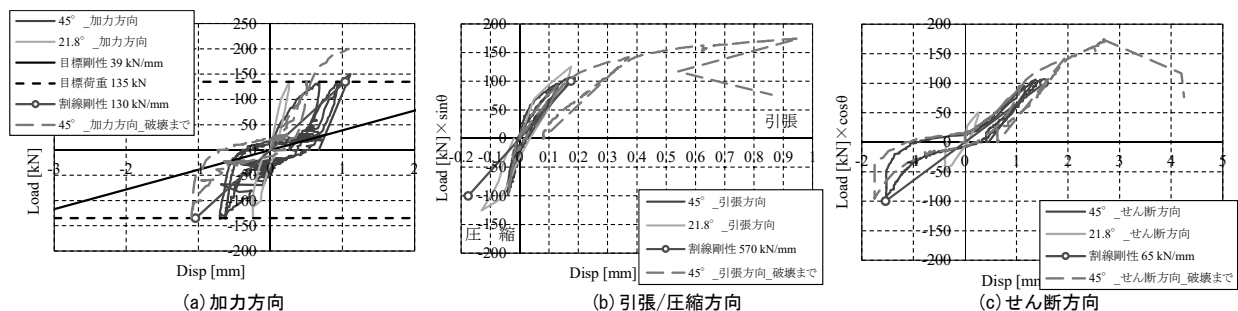


図 13 Single-MiddleType 荷重変形関係