

# CLTの四隅に鋼材ダンパーを配置した木質耐震壁の開発

稲井田 直哉 津畑 慎哉 石井 大吾 油野 登梧 田中 初太郎  
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (設計本部) (設計本部)

## Development of a Wooden Seismic Wall with Steel Dampers at the Corners of CLT

Naoya Inaida, Shinya Tsubata, Daigo Ishii, Togo Aburano and Hatsutarō Tanaka

CLT (Cross Laminated Timber)と鉄骨梁との接合部に鋼材ダンパーを設け、大地震時もCLTを損傷させることなく、必要保有水平耐力を適切に抑えられる高靱性なCLT耐震壁を開発した。耐震壁の実大加力試験を行った結果、加力を通して鋼材ダンパーのみで変形が生じ、設計目標通りの靱性に富んだ構造性能となることを確認した。また、鋼材ダンパーの有限要素解析を行い、解析でひずみが集中する箇所と実際の破断箇所が一致することを確認した。

We have developed a seismic wall with steel dampers at the joints between the CLT (Cross Laminated Timber) and steel beams, which can adequately suppress the required horizontal yield strength, without damaging the CLT even during a major earthquake. The result of full-scale load test on the seismic wall confirmed that deformation occurred only at the steel damper and that the structural performance was in accordance with the design target. Also, finite element analysis of the steel damper was carried out, and it confirmed that the strain concentration in the analysis matched the actual fracture point in the full-scale load test.

### 1. はじめに

平成22年に「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が施行されて以来、中大規模建築物に対する木材利用が注目されており、中でもCLTを適用する研究・開発が盛んである。

CLTとは、厚さ30mm程度のひき板を繊維方向が直交するように5~9層ほど積層接着させた大断面のパネル状の木質材料である。他の建築構造用面材と比較して、比強度・比剛性が高い、すなわち同じ強度・剛性を得るために必要な材料重量が小さいことが特徴として挙げられ、周辺部材が受ける鉛直荷重の低減や建物全体重量の低減、施工性の向上に繋がることが期待されている。

CLTと異種構造の併用構法として、鉄骨造にCLTを耐震壁として適用する構法があり、実際に当社でも開発実績がある<sup>1)4)</sup>。ただし、これらの構法の本鋼の接合手法として使用されるLSB(ラグスクリューボルト)接合やGIR(グルードインロッド)接合、鋼板挿入ドリフトピン接合などは、接合部近傍の木部が脆性破壊することによって構造性能が決定するため、接合部は弾性範囲内で設計する必要があることや、二次設計レベルの大地

震を受けると補修が難しいという課題が残されている。

そこで筆者らは、CLT壁と鉄骨梁との接合部に鋼材ダンパーを設け、鋼材ダンパーにエネルギー吸収を負担させることにより、大地震時もCLTを損傷させることなく、必要保有水平耐力を適切に抑えられる高靱性なCLT耐震壁を開発した。

本報では、耐震壁の実大加力試験と鋼材ダンパーの有限要素解析の結果を報告する。

### 2. 開発した耐震壁の概要と設計目標

図-1に耐震壁の概念図を示す。鉄骨梁に入力された水平力は、CLTのロッキング変形を介して鋼材ダンパーに伝達される。本耐震壁のメリットとして、鋼材ダンパーが地震時のエネルギー吸収機構として作用するため、履歴曲線が安定し、鋼材ダンパーの降伏後まで含めた設計がしやすい点が挙げられる。また、鋼材ダンパーの降伏で荷重が頭打ちとなり、周辺部材の損傷も抑制できるため、鋼材ダンパーを交換することで壁の構造性能を回復させることが可能である。

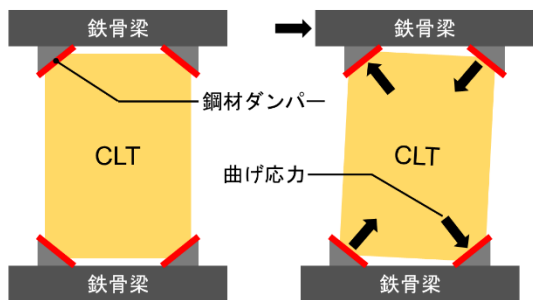


図-1 耐震壁の概念図

今回の開発においては、耐震壁に作用させる設計用荷重を1次設計の地震時で120 kN、2次設計で200 kNとし、160 kN近傍で降伏し始め、200 kN近傍では荷重が一定値となるような荷重-変形角関係を目指した。併せて、靱性を示す構造特性係数  $D_s$  を0.30以下とし、従来の一般的な木質構造耐震壁よりも高靱性とすることを目標とした。

### 3. 実大加力試験

#### 3.1 試験体

図-2に試験体図を示す。試験体は高さ4463 mm×幅2500 mmであり、「CLT壁」と四隅の「鋼材ダンパー接合部」で構成される。

CLTは強度等級Mx60-7-7の異等級構成直交集成板(JAS適合材)を使用する。厚さは210 mm、樹種はスギである。表-1に詳細な仕様を示す。

写真-1に鋼材ダンパー接合部の詳細を示す。鋼材ダンパー接合部は「金物B(2PL-12、1B.PL-40、SN490B)」、「金物W(2PL-12、1B.PL-40、SN490B)」、「鋼材ダンパー(4PL-12、SN490B)」および「鋼製ピン(2-φ22、1-φ28、SNR490B)」で構成される。表-2に鋼材ダンパーの機械的性質を示す。

CLTと金物WはM24の雄ねじ加工を施したLSB(6-φ25、有効長さ400 mm)を用いて接合する。表-3にLSBの仕様を示す。

金物Bと金物Wの2PL-12は、25 mm間隔でB.PL-40に溶接する。2PL-12の間に2枚重ねした鋼材ダンパーを上下線対称に2段、合計4枚を挿入し、鋼製ピンを用いて接合する。

鋼製ピンは、ダンパーの両端の4-φ22.5開孔には4-φ22を、中心の2-φ28.5開孔には2-φ28を使用する。長さは共に120 mmとする。

鋼材ダンパーの形状は、中心開孔への応力集中と早期に破断することを防ぐことで、靱性を確保することを目的として設計した。また、どちらの方向に荷重を受けても構造性能が同じとなるように、上下対称に2段配置する設計とした。

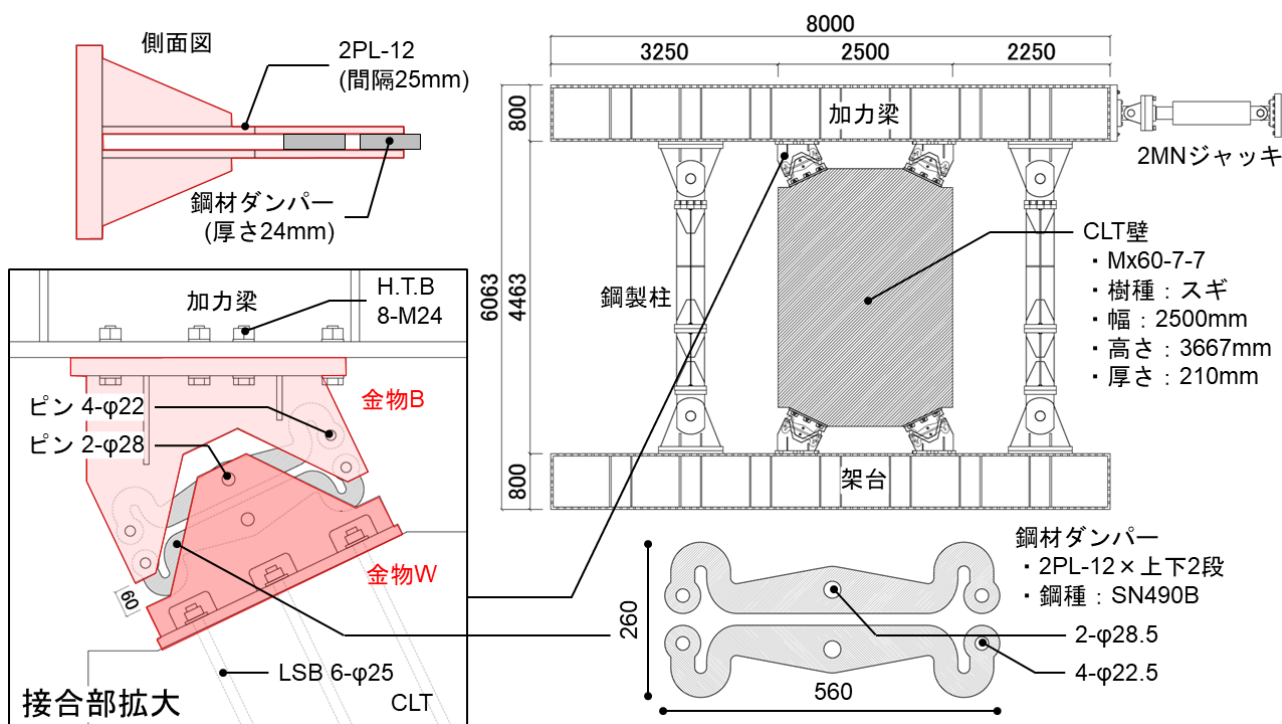


図-2 試験体図



写真-1 鋼材ダンパー接合部の詳細

表-1 CLTの仕様

規格	日本農林規格 JAS3079
品名	異等級構成直交集成板
強度等級	Mx60-7-7 (A種構成)
樹種	スギ
寸法	幅 2500×長さ 3677×厚さ 210 [mm]
接着性能	使用環境 B
接着剤	水性高分子イソシアネート系樹脂 ※幅はぎ接着は行われていない

表-2 鋼材ダンパーの機械的性質

鋼種	降伏点	引張強さ	伸び
SN490B	385 N/mm <sup>2</sup>	554 N/mm <sup>2</sup>	27.1 %

表-3 LSBの仕様

直径	外径Φ25、内径Φ20
長さ	全長 490 mm、有効長さ 400 mm
雄ねじ部	M24 転造ねじ、長さ 60mm
鋼種	S45C

### 3.2 加力方法

『CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル (2016年版)』<sup>9)</sup>記載の方法を参考に加力を行う。加力梁および架台に両端ピンの鋼製柱を取り付けた門型の加力フレーム内に試験体を配置し、正負

交番繰り返し加力を行う。加力スケジュールは、3.4節に示すせん断変形角が 1/600、1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50 rad.にて正負各3回の加力を繰り返し、1/30 rad.にて正負各1回の加力を繰り返す。その後、正方向に押し切り加力を行い、 $P_{max}$  到達後に  $0.8 \times P_{max}$  まで荷重が低下する点、せん断変形角が 1/15 rad.となる点、もしくはいずれかの接合部で金物 B と金物 W が接触する点で加力を終了する。

### 3.3 計測項目

図-3に計測計画を示す。

計測項目はジャッキ荷重  $P_1$  [kN]、加力梁-架台の水平方向の相対変位  $\delta_1$  [mm]、金物 B-金物 W の対角方向の相対変位  $\delta_2$  [mm]、加力梁-金物 B の水平方向の相対変位  $\delta_3$  [mm]、金物 W-CLT の対角方向の相対変位  $\delta_4$  [mm]、金物 W-CLT の対角直交方向の相対変位  $\delta_5$  [mm]とする。

$P_1$  と  $\delta_1$  はジャッキが押しとなる方向を正方向とし、 $\delta_2$  から  $\delta_5$  は標点同士が離れる方向を正方向とする。

### 3.4 評価方法

加力梁-架台の水平方向の相対変位  $\delta_1$  [mm]を鉛直方向の標点間距離 4463 [mm]で除した値をせん断変形角  $\theta$  [rad.]とする。また、式(1)から対角



方向の力  $P_2$  [kN] を算出する。得られる  $P_1-\theta_1$  関係と  $P_2-\delta_2$  関係の履歴曲線に対して、『鋼構造建築物の構造性能評価法』<sup>9)</sup>記載の方法で骨格曲線を抽出する。さらに、抽出した骨格曲線に対して前述の文献<sup>9)</sup>に記載されている方法で完全弾塑性置換処理を行い、構造性能を評価するための特性値(初期剛性  $K$ 、降伏荷重  $P_y$ 、降伏変位  $\delta_y$ 、終局荷重  $P_u$ 、終局変位  $\delta_u$ 、構造特性係数  $D_s$ )を得る。

$$P_2 = P_1 / (2 \cos 64^\circ) \quad (1)$$

### 3.5 試験結果

#### 3.5.1 加力状況

±1/30 rad. サイクルまでは、写真-2 に示すような鋼材同士の摩擦音と鋼材ダンパーの黒皮の剥離は確認されたものの、鋼材ダンパー含む全ての部材で損傷は目視では確認されなかった。その後、押し切り加力の最中に、+1/26 rad. 付近で S2 接合部の外側の鋼材ダンパー2 枚の中心開孔付近が破断したことで荷重が低下し、その後+1/19 rad. 付近で写真-3 のように同位置の金物 B と金物 W が接触したため、加力を終了した。

加力全体を通して、加力梁-金物 B の水平方向



(左) 写真-2 鋼材ダンパーの黒皮の剥離  
(右) 写真-3 金物 B と金物 W の接触(S2)

の相対変位  $\delta_3$ (HTB の滑り)の最大値は 0.06 mm、金物 W-CLT の対角方向の相対変位  $\delta_4$ (LSB の引き抜け)の最大値は 0.28 mm、金物 W-CLT の対角直交方向の相対変位  $\delta_5$ (LSB の滑り)の最大値は 0.20 mm であった。

#### 3.5.2 履歴曲線と骨格曲線

図-4 に  $P_1-\theta_1$  関係の履歴曲線、図-5 に  $P_2-\delta_2$  関係の履歴曲線を示す。また、図-6 に  $P_1-\theta_1$  関係の履歴曲線から抽出した骨格曲線および 3.4 節に示した評価方法によって得られた完全弾塑性置換処理曲線、図-7 に  $P_2-\delta_2$  関係の履歴曲線から抽出した骨格曲線を示す。各接合部で  $\delta_2$  に大きな差は確認されなかったため、図-5 と図-7 の  $\delta_2$  は各接合部の計測値を平均した。

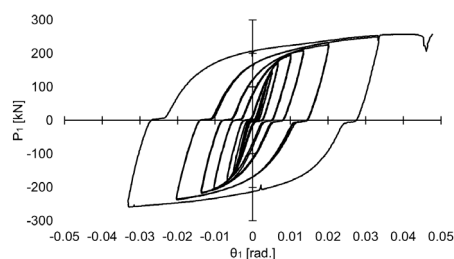


図-4  $P_1-\theta_1$  関係の履歴曲線

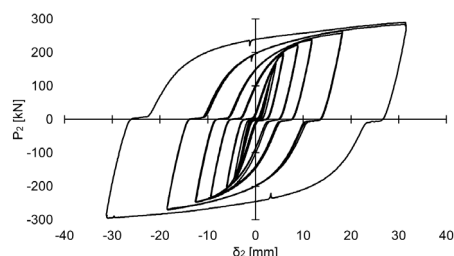


図-5  $P_2-\delta_2$  関係の履歴曲線

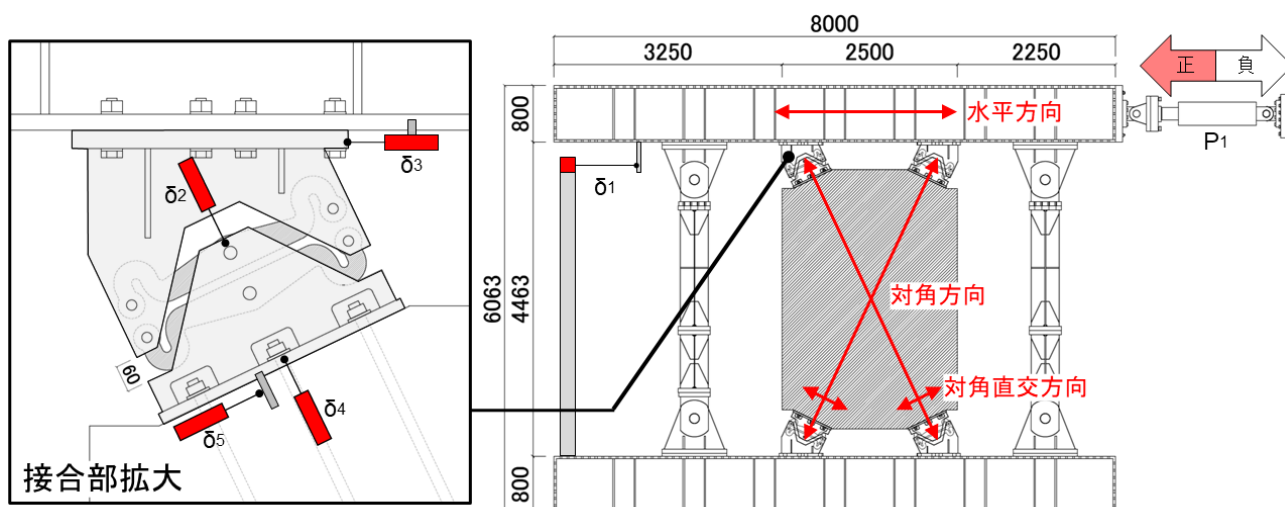


図-3 計測計画

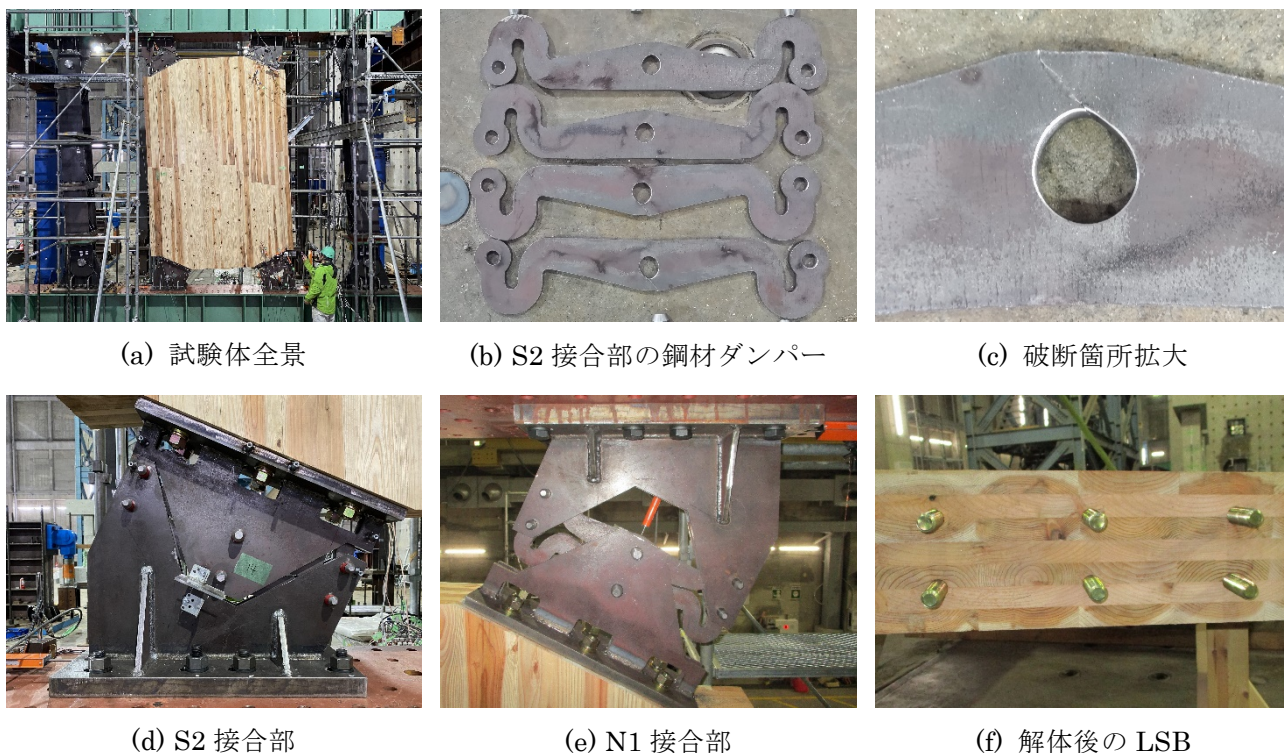


写真-4 終局性状

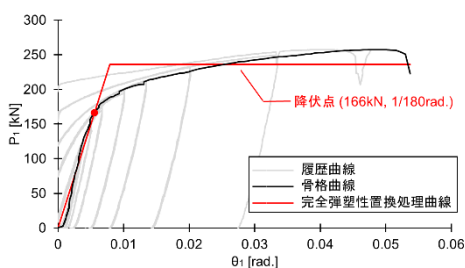


図-6  $P_1-\theta_1$  関係の骨格曲線及び完全弾塑性置換処理曲線

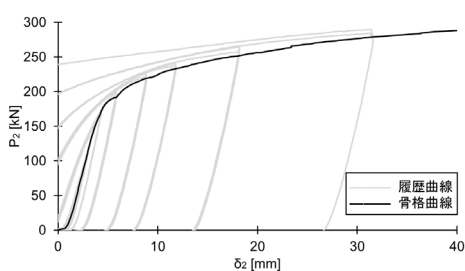


図-7  $P_2-\delta_2$  関係の骨格曲線

### 3.5.3 終局性状

写真-4 に加力中と終局時の試験体性状を示す。

3.5.1 項にて述べたように、+1/26 rad.付近で S2 接合部の鋼材ダンパーの開孔①近傍が破断したことで荷重が低下し始め、+1/19 rad.付近で終局を迎えた。また、試験終了後に試験体を解体して確認したところ、CLT、金物 B、金物 W、鋼製ピン、加力梁と金物 B を接続する HTB、金物 W と CLT を接続する LSB に損傷は見られなかった。

### 3.5.4 特性値

表-5 に、 $P_1-\theta_1$  関係の骨格曲線に対して完全弾塑性置換処理を行うことで得た特性値の一覧を示す。

表-5 特性値

初期剛性 $K$	7.82 kN/mm
降伏荷重 $P_y$	166 kN
降伏変位 $\delta_y$	25 mm (+1/180 rad.)
終局荷重 $P_u$	236 kN
終局変位 $\delta_u$	240 mm (+1/19 rad.)
構造特性係数 $D_s$	0.28

### 3.5.5 考察

前項までに示す試験結果から得られた知見と考察を示す。 $P_2-\delta_2$  関係(接合部の荷重変形関係)は鋼材特有の紡錘型となり、それに伴い  $P_1-\theta_1$  関係(耐震壁全体の荷重変形角関係)も同様の紡錘型となり、エネルギー吸収性能に富んだ履歴であることを確認した。

降伏耐力  $P_y$  は 166 kN、終局耐力  $P_u$  は 236 kN、構造特性係数  $D_s$  は 0.28 となり、荷重変形関係の形状含め、概ね設計目標通りの靱性に富んだ構造性能となった。図-8 に試験結果と設計目標の比較を示す。



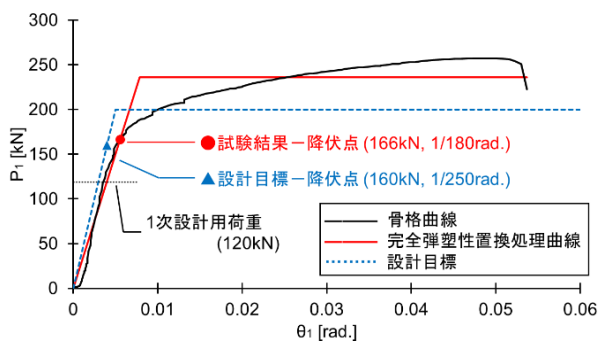


図-8 試験結果と設計目標

終局時まで鋼材ダンパー以外での損傷が見られなかったことと、HTBの滑り、LSBの引き抜け、LSBの滑りが十分に小さかったことから、設計目標通り、鋼材ダンパーのみに変形を負担させることができたと考えられる。

#### 4. 鋼材ダンパーの挙動に関する検討

実大加力試験では、鋼材ダンパーの構造性能が耐震壁全体の構造性能に対して支配的になることを確認した。その一方で、加力中の鋼材ダンパーの詳細な挙動を確認することまではできなかったため、有限要素解析による検討を行う。

#### 4.1 解析条件

Femap with Simcenter Nastran (Version 2021.2)を使用して、1対の鋼材ダンパーをモデル化する。図-9に作成したモデルを示す。

メッシュ分割は、1次三角形シェル要素(厚さ24mm、メッシュサイズ7.5)を用いる。

材料物性値は、耐震壁試験にて使用した鋼材ダンパーの材料試験に基づいてマルチリニアモデルとする。図-10に材料物性値の詳細を示す。

境界条件は、鋼製ピンとの接触を模して、開孔を構成するノードのうち上(もしくは下)5個を開孔中心ノードと剛体連結し、剛体の端部同士はRZのみフリーとする。両ダンパーの開孔②中心ノードを拘束し、RZのみフリーとする。

荷重条件は、両ダンパーの開孔①中心ノードにY方向50mmの強制変位を与える。

解析タイプは静的非線形とし、材料非線形と幾何非線形を考慮する。

#### 4.2 評価方法

両ダンパーの荷重の合計  $P_a$  [kN]を縦軸に、開孔①のY軸方向変位  $\delta_a$  [mm]を横軸に取り、 $P_a - \delta_a$  関係で評価を行う。

また、耐震壁が特定変形角にある時の  $P_2$  を求め、 $P_2 = P_a$  として鋼材ダンパーに発生するミーゼス相当ひずみの分布を求める。

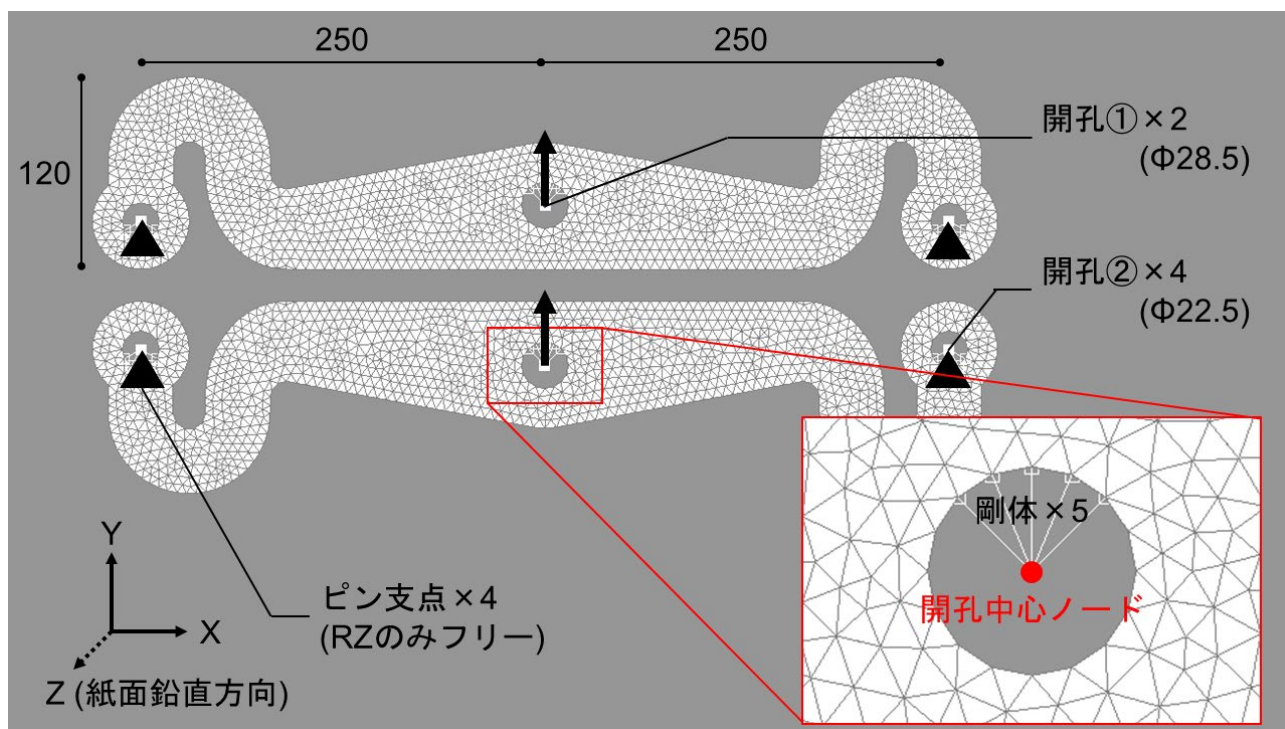


図-9 作成したモデル

### 4.3 解析結果

#### 4.3.1 履歴曲線

図-11 に解析より得られた  $P_a - \delta_a$  関係の履歴曲線を示す。実大加力実験で得られた  $P_2 - \delta_2$  関係(接合部の荷重変形関係)の履歴曲線と、履歴曲線から抽出した骨格曲線も併せて示す。

#### 4.3.2 ひずみ分布

図-12 にミーゼス相当ひずみ分布の変遷を示す。凡例の最大値は(e)  $\theta_1 = 1/150 \text{ rad.}$ までは 0.2% とし、(f)  $\theta_1 = 1/100 \text{ rad.}$ 以降は 5.0% とする。

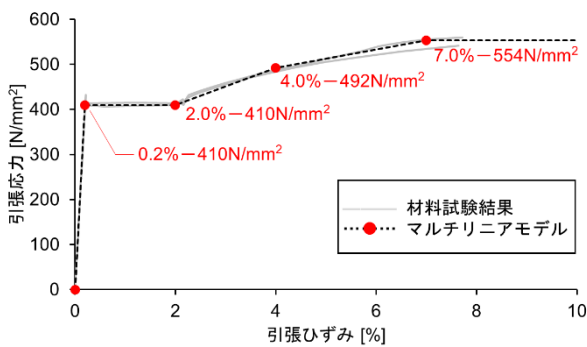


図-10 材料物性値の詳細

#### 4.3.3 考察

前項までに示す解析結果から得られた知見と考察を示す。

図-11 より、試験結果( $P_2 - \delta_2$  関係)と解析結果( $P_a - \delta_a$  関係)を比較すると、試験結果には初期スリップが生じている。また、試験結果の方が降伏前の 1 次剛性がやや低いものの、降伏後の 2 次剛性は概ね一致しており、曲線の全体的な形状も概ね一致している。

試験で生じた初期スリップ量はおおよそ 1 mm であり、これは開孔①( $\phi 28.5$ )と  $\phi 28$  鋼製ピンのクリアランス量(0.5 mm)と開孔②( $\phi 22.5$ )と  $\phi 22$  鋼製ピンのクリアランス(0.5 mm)の和に一致する。

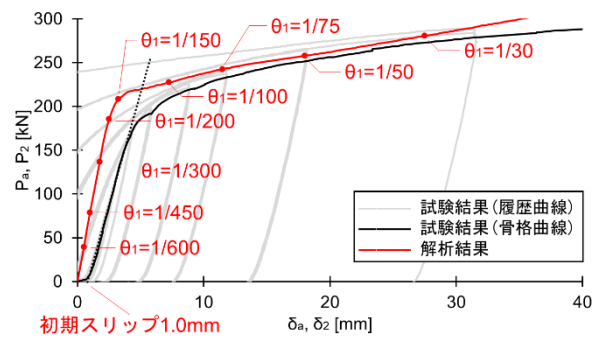


図-11  $P_a - \delta_a$  関係

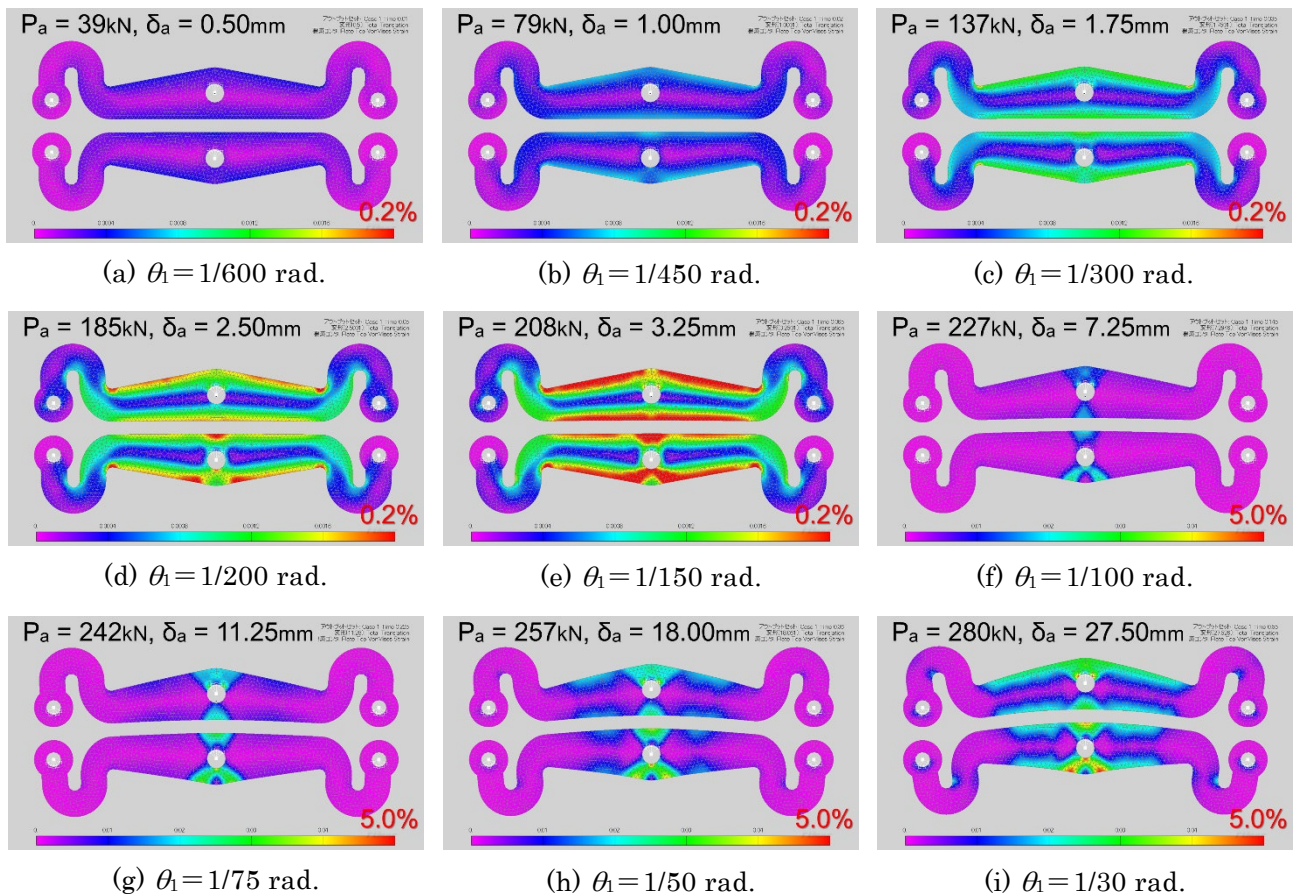


図-12 ミーゼス相当ひずみの分布の変遷

そのため、初期スリップの原因は、開孔と鋼製ピンに設けたクリアランスであると考えられる。

試験では  $\delta_2$ (ダンパーの変形)を金物 B と金物 W の相対変位と等しいと仮定して計測している。この時、鋼材ダンパーの厚さ(12 mm×2 枚重ね)と、金物の厚さ(2PL-12)が等しいことから、特に金物 B の開孔①近傍でも支圧変形が生じていることが推測されるため、試験結果の方が解析結果より初期剛性が低くなったと考えられる。

図-12 の  $P_a-\delta_a$  関係とひずみ分布の変遷から、鋼材ダンパーは初期段階では全体で抵抗し、ダンパーへの入力荷重が 200 kN になるあたりから下段ダンパーの開孔①近傍にもひずみが大きくなり始め、降伏に至る。その後は、同位置でハの字状にひずみが集中して進行する。本ひずみ集中は、実大加力試験の鋼材ダンパーで確認したせん断破断と位置と方向が一致する。図-13 に比較の結果を示す。このことから、鋼材ダンパーの開孔①近傍が繰り返し荷重を受けたことによって、最終的に破断に至ったと考えられる。

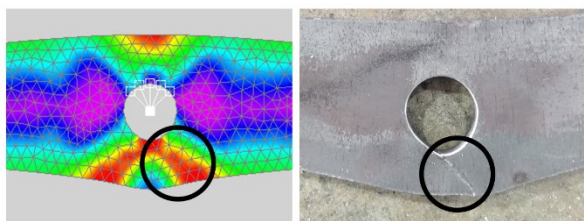


図-13 ひずみ集中箇所と破断箇所の比較

## 5. まとめ

CLT と鉄骨梁との接合部に鋼材ダンパーを設け、鋼材ダンパーにエネルギー吸収を負担させることによって、大地震時も CLT を損傷させることなく、必要保有水平耐力を適切に抑えられる高靱性な CLT 耐震壁を開発し、性能の検証を目的とした実大加力試験を行った。また、鋼材ダンパー単体の有限要素解析を行い、接合部の挙動を検証した。得られた知見を以下にまとめる。

- 耐震壁の荷重変形角関係と特性値は、設計目標通りとなった。
- 加力を通して鋼材ダンパーで変形が卓越し、終局時まで CLT に損傷は見られなかった。
- 鋼材ダンパーの荷重変形関係と、鋼材ダンパーに生じるひずみ分布についてについて、解析結果と試験結果は概ね一致した。

## <参考文献>

- 1) 河内武, 津畑慎哉, 貞広修, 木村誠, 濱智貴, 小林研治: “CLT を利用した高耐力耐震壁の開発(その 1)(その 2)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.239-242, 2017
- 2) 河内武, 津畑慎哉, 貞広修, 木村誠, 濱智貴: “CLT を利用した高耐力耐震壁の開発(その 3)(その 4)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.443-446, 2018
- 3) 河内武, 津畑慎哉, 貞広修, 木村誠, 南博之: “CLT を利用した高耐力耐震壁の開発(その 5)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.719-720, 2019
- 4) 津畑慎哉, 下錦田聡志, 貞広修, 木村誠: “CLT と鋼材ブレースで構成されるハイブリッド CLT 耐震壁の開発(その 1)(その 2)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.387-390, 2023
- 5) CLT 設計施工マニュアル編集委員会: “CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル”, 日本住宅・木材技術センター, 2016
- 6) 建築研究所: “鋼構造建築物の構造性能評価法”, 日本鉄鋼連盟, 2002