

木材を用いて座屈拘束をした鉄骨ブレースの開発

南遼太* 中里太亮** 南川貴明*** 長島泰介***

近年、中大規模建築物への木材利用が注目されており、その中には鋼材と木材のハイブリッド建築物も存在する。また、圧縮力が入力されても安定した挙動を示す座屈拘束ブレースが多くの中大規模建築物で用いられている。以上から、本研究では、木材を座屈拘束材に利用した座屈拘束ブレースの開発を目的として構成の提案、実大実験、要素実験を行った。

提案した木質座屈拘束ブレースの実大実験の結果、塑性化部ひずみ 2%までならば圧縮力入力時においても安定した挙動を示すことを確認した。また、要素実験により、木質座屈拘束ブレースの耐久性と破壊モードについて確認した。

キーワード：木鋼ハイブリッド構造、座屈拘束ブレース、制振部材、中大規模木造

1. はじめに

我が国は歴史的に多くの地震災害を経験しており、1923 年の関東大震災を機に、中大規模建築物への木材利用は大きく減少した。その結果、Fig.1 に示すように、日本の建築業の木材利用は小規模建築物が中心となった。しかし、近年、二酸化炭素削減や森林管理等の観点から、建築物へ木材を利用する気運が再び高まっており、特に木材を用いた中大規模建築物の研究、開発が耐震、材料、耐火等の様々な分野でなされている。また、木材を利用した中大規模建築物には、純木造だけではなく、鋼材と木材のハイブリッド建築物も含まれており、現在施工された物件の中にも、多くの割合で存在している。

建築物において、ブレースを配置し、地震力に抵抗することは多く行われており、その中でも、鉄骨ブレースは比較的小さい断面で大きな水平力を負担することが可能で、エネルギー吸収能力に優れている。しかし、地震力が大きくなった時、座屈が生じ、耐力、エネルギー吸収能力とも大きく低減することが知られている。また、一般的な建築物に生じる地震力は、その規模が大きくなるにつれて増大する。そのため、近年、中大規模建築物において、鋼製の芯材を鋼管等で拘束し、座屈の発生を防止した座屈拘束ブレースが多く用いられている。

以上の背景のもと、本研究では、中大規模木造建築物の耐震要素としての利用や、中大規模鉄骨造建築物への木材利用を見据え、木材を座屈拘束材として利用する座屈拘束ブレース（以下、木質座屈拘束ブレース）の開発を行っている。本報では、提案する木質座屈拘束ブレースに関する実大試験体を用いた正負交番載荷試験、及び、その要素実験について報告する。

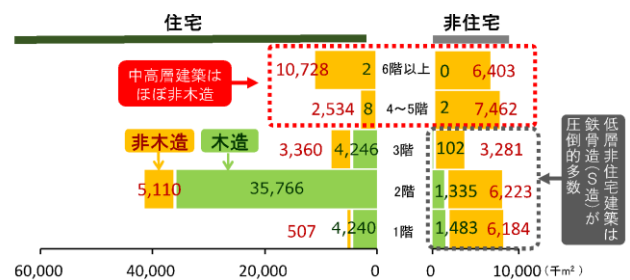


Fig.1 階層別・構造別の着工建築物の床面積 (2018年) 1)

2. 木質座屈拘束ブレース概要

本研究で提案する木質座屈拘束ブレースの鉄骨部分（芯材）は矩形断面の塑性化部と、十字型断面の弾性部に分かれており、ブレースが軸力を受けたとき、断面積の小さい塑性化部のみが降伏する。

本研究で提案する木質座屈拘束ブレースの断面構成図を、Fig.2 に示す。芯材はLVLの座屈拘束材で弱軸方向に挟み込まれている。さらに、座屈拘束材と合板、もう一層のLVLを接着剤、接合具（ボルト、ナット、ラグスクリュー）により一体化しており、これらが、ブレースに圧縮力が加わった際、塑性化部が座屈しようとする横力に抵抗し、ブレースの耐力低減、エネルギー吸収能力の低減を防止する。また、芯材の一部を合板に挿入することで、接着剤による接合部に大きな負荷が生じないように構成しており、芯材に接触する座屈拘束材には塗料を塗布することで、芯材との間の摩擦力を軽減している。

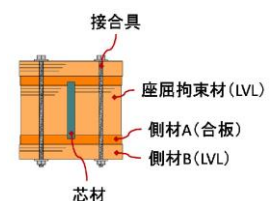


Fig.2 木質座屈拘束ブレース 断面構成図

* 技術本部 技術研究所 防災技術研究室
 ** 建築事業本部 建築技術統括部 建築構造技術部
 *** 住友林業株式会社 筑波研究所

3. 実大実験

3. 1 実験方法

3. 1. 1 試験体概要

Fig. 3 に試験体図を示す。試験体の全長は 4,000mm で、そのうちの 3,200mm を木材で拘束している。木材で拘束されている範囲のうち 2,300mm が塑性化部 (22mm×170mm) で、それ以外が十字断面を持つ弾性部となっている。弾性部の断面積は塑性化部の約 2.5 倍とした。

ボルトは木材に 400mm 間隔で配置し、ボルトの中間にラグスクリューを設置した。

Table 1, 2 に、芯材のミルシート値、塑性化部耐力の計算値を示す。Table 3 に試験体の構成材を示す。

Table 1 芯材ミルシート

材質	-	SN400B
板厚	mm	22
降伏点	N/mm ²	293
引張強さ	N/mm ²	415
伸び	%	35

Table 2 芯材性能値

降伏耐力	kN	1,095
終局耐力	kN	1,552

Table 3 木質座屈拘束ブレース 試験体構成材

部位	名称	規格	寸法・形状(mm)
芯材	建築構造用圧延鋼材	JIS G 3136 (SN400B)	22×170×2,300 (塑性化部)
拘束材	構造用単板積層材	単板積層材の日本農林規格 (ダフリカカラマツ A種 140E 特級)	150×140×3,200
	構造用合板	合板の日本農林規格 (カラマツ 特級2級)	28×306×1,600
側材	構造用単板積層材	単板積層材の日本農林規格 (ダフリカカラマツ A種 140E 特級)	45×310×3,200
	六角ボルト	JIS B 1180	M12×320
拘束具	六角ナット	JIS B 1181	M12
	平座金	JIS B 1256	12.5×40×3.2
	ラグスクリュー	JIS B 1180に適合する炭素鋼	Φ12×110
その他	2液性エポキシ樹脂接着剤	JAI 13-1996	-
	シリコン系撥水塗料	JASS 18 M-307 木材保護塗料 B種に準ずる塗料	-

3. 1. 2 加力方法

Fig. 4 に本試験の載荷装置図を示す。試験体を 40° の角度で柱と梁を模した治具に設置し、載荷梁を通して加力した。加力は塑性化部の軸方向変位で制御するものとし、塑性化部の降伏歪 ϵ_y に対し、0.25 ϵ_y , 0.5 ϵ_y , 1 ϵ_y , 2 ϵ_y を各正負 2 回行い、その後、軸歪 0.5%, 0.75%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5%, 3% を各正負 2 回行う計画とした。

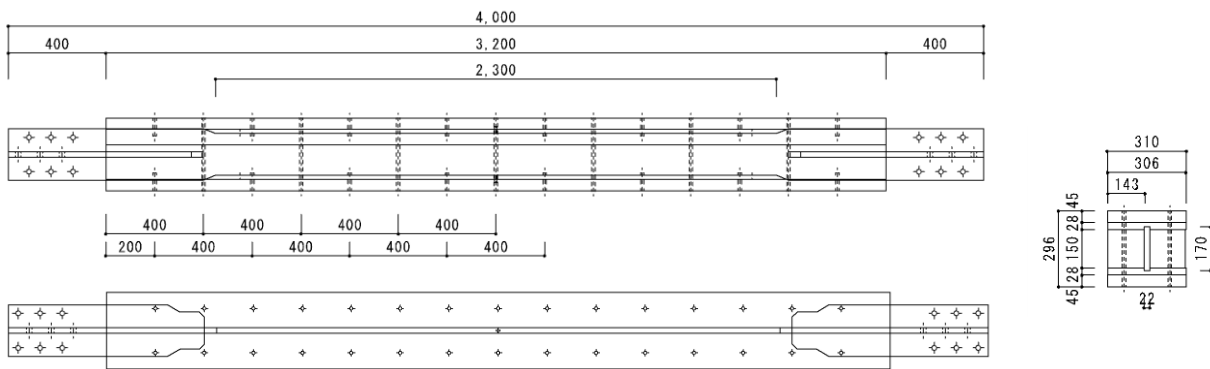


Fig. 3 木質座屈拘束ブレース 試験体図

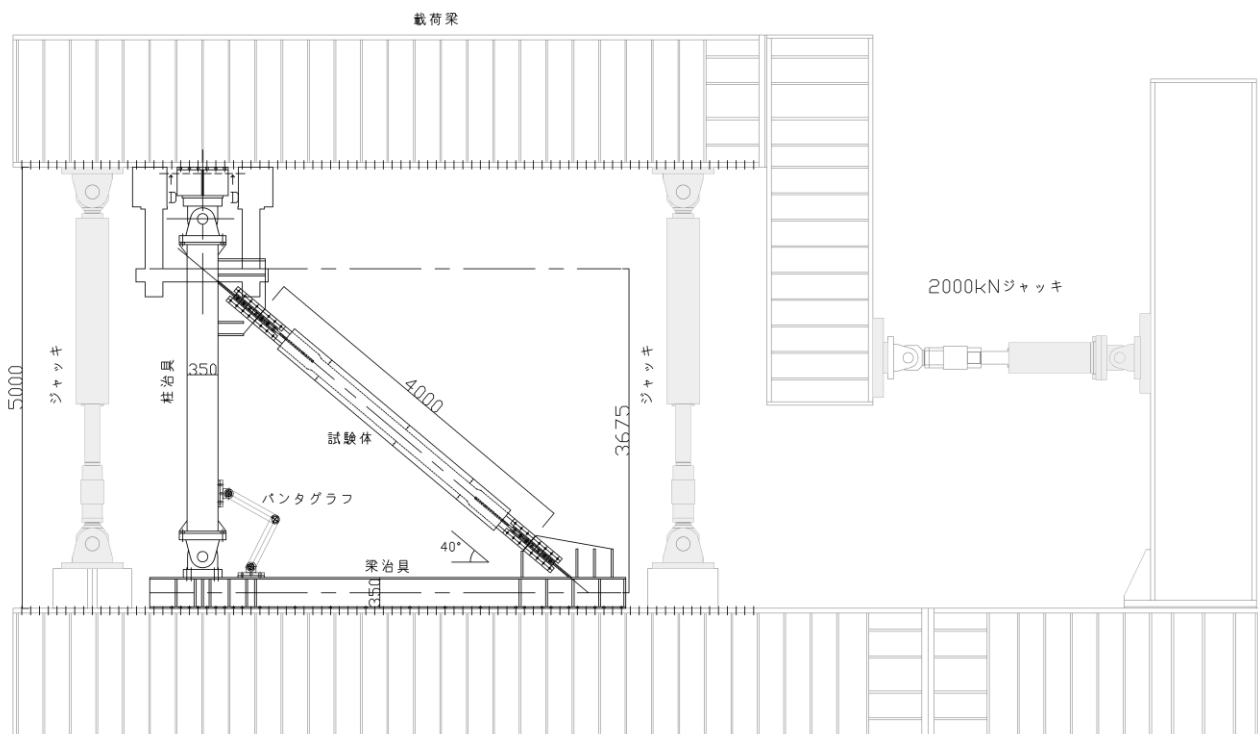


Fig. 4 実大実験 載荷装置図

3. 2 実験結果

3. 2. 1 正負交番載荷試験結果

Fig. 5に、正負交番載荷試験結果を示す。Fig. 5の横軸は塑性化部の軸歪を、縦軸は Table 2 に示した降伏耐力に対する軸力の比を示している。また、グラフにおける正側が引張時、負側が圧縮時を表す。Table 4に、正負交番載荷実験結果から得られた、試験体の特性値を記す。ここに、実験における降伏時は、試験体の軸剛性が初期剛性の3分の1となる時点とした。また、累積塑性エネルギー吸収量の計算は、荷重が低下するサイクルの1サイクル前までの履歴ループを用いて算出した。

Fig. 5 から、本試験体の最大軸力は引張側で降伏耐力(計算値)の1.38倍、圧縮側で1.5倍程度となっていることがわかる。このことと履歴ループ形状から、木材が芯材の座屈を拘束し、ブレースの耐力とエネルギー吸収能力を向上させていることがわかる。ここで、引張側に対して圧縮側の最大軸力が大きいのは、圧縮力が加わると、芯材が膨らむことに起因する摩擦力が発生するためである。また、Table 4において、圧縮側の最大軸力がTable 2で示す計算値よりも大きい値となっていることも、同様の理由によるものと考えられる。

Fig. 5 より、本試験体は塑性化部の軸歪 2%まで、エネルギー吸収量に富む紡鐘型の履歴ループを描いていることがわかる。しかし、引張側において塑性化部の軸歪 2.5%を経験した後、圧縮側の軸歪 0.65%程度の時点で大きく軸力が低下した。このことから、本木質座屈拘束ブレースは2%の塑性化部軸歪までしか安定した性能を得られないと考えられる。

Table 4 では、本試験体の初期剛性、及び、降伏耐力が概ね計算値と等しい値となっており、本木質座屈拘束ブレースの設計上の特性値を計算によって求めることが出来ることがわかる。また、塑性率は10.6、累積塑性変形倍率は52.2という結果となった。

3. 2. 2 試験体破壊形式

本試験において、圧縮側 2%ひずみのサイクル時に、Photo. 1の赤枠で示すような、座屈拘束材繊維方向に伸びる亀裂が木材端部に生じた。ただし、その際は荷重の低下は生じなかったため、そのまま試験を続行した。

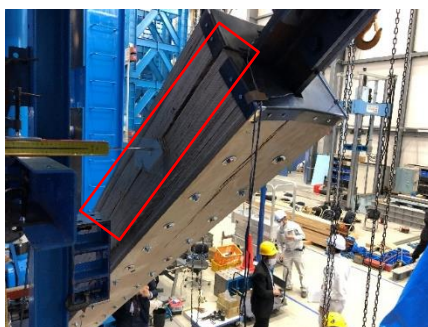


Photo. 1 圧縮側 2%ひずみサイクル時 試験体破壊状況写真

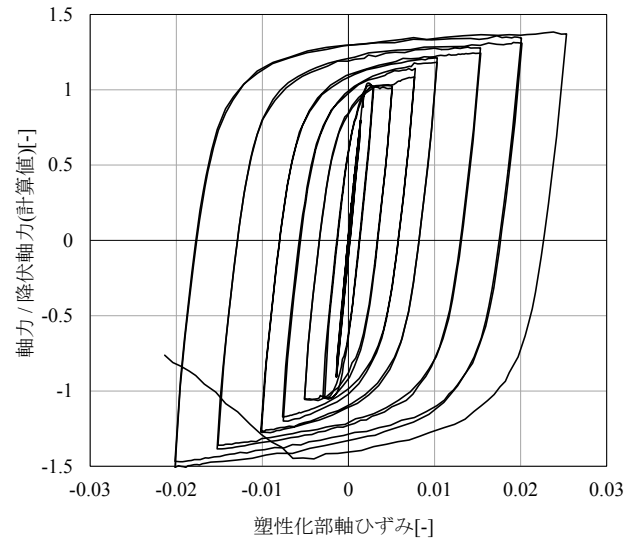


Fig. 5 正負交番載荷試験結果

Table 4 試験体 特性値

初期剛性	実験値	kN/mm	278.7
	計算値	kN/mm	253.4
	実験値/計算値	-	1.10
降伏耐力	正側(引張)	実験値	kN 1082.8
		計算値	kN 1095.8
	負側(圧縮)	実験値/計算値	- 0.99
		実験値	kN -1045.6
	計算値	kN -1095.8	
	実験値/計算値	- 0.95	
最大軸力	正側(引張)	kN	1516
	負側(圧縮)	kN	-1652
塑性率	降伏変位	mm	4.36
	最大変位	mm	46.33
	塑性率	-	10.6
累積塑性変形倍率	累積塑性エネルギー吸収量	kN・mm	246454
	累積塑性変形倍率	-	52.2

2%ひずみのサイクル後、さらに荷重を続けたとき、2.5%ひずみのサイクル一回目において、Photo. 2の赤枠で示すように合板にせん断破壊が生じ、座屈拘束材が面外方向にはらみだした。また、せん断破壊の発生と同時に、前述の通り、大きく軸力が低下した。

以上の破壊状況から、本試験体は、2%ひずみサイクル時に木材端部に亀裂が生じたことで、その付近の座屈拘束材の拘束効果が小さくなり、芯材の座屈が進行、その後、合板でせん断破壊が生じたものと考えられる。



Photo. 2 圧縮側 2.5%ひずみサイクル時 試験体破壊状況写真

4. 要素実験

4.1 減圧加圧剥離試験

4.1.1 試験目的

木質座屈拘束ブレースは、前述の通り、座屈拘束材と合板、もう一層の LVL を接着剤にて固定している。そのため、雨水等に曝された場合の接着性能を確認する必要がある。そこで、「単板積層材の日本農林規格」²⁾に準じ、減圧加圧剥離試験を行った。

4.1.2 試験概要

本試験に用いる試験体を Fig. 6 に示す。また、Table 5 に試験体の構成要素を示す。本試験では、4 体ずつ別のロットの材料で構成した合計 8 体の試験体を作成した。

本試験では、試験体を室温の水中に浸せきし、0.085Mpa の減圧を 5 分間、0.51±0.03MPa の加圧を 1 時間行う。この処理を 2 回繰り返した後、試験体を水中から取り出し、70±3℃の恒温乾燥機に入れ、質量が試験前の 100~110% の範囲になるように乾燥する。以上の処理の終了後、試験体の接着層の剥離を観察する。また、試験体作成時、接着剤養生期間は 1 週間とした。

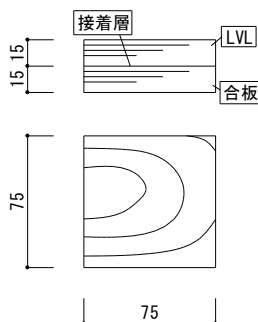


Fig. 6 減圧加圧剥離試験 試験体図

Table 5 減圧加圧剥離試験 試験体構成材

名称	規格	寸法・形状
構造用単板積層材	単板積層材の日本農林規格 (ダフリカカラマツ A種 140E 特級)	15mm × 75mm × 75mm
構造用合板	合板の日本農林規格 (カラマツ 特級2級)	15mm × 75mm × 75mm
2液性エポキシ樹脂接着剤	JAI 13-1996	450g/m ²

4.1.3 試験結果

減圧加圧剥離試験後の試験体 1 体の写真を Photo. 3 に示す。Photo. 3 より、試験体の接着層に剥離が生じていないことがわかる。これは、8 体すべての試験体で同様の結果となった。以上から、提案する木質座屈拘束ブレースの接着層の耐久性が確認された。



Photo. 3 減圧加圧剥離試験後写真

4.2 ブロックせん断試験

4.2.1 試験目的

木質座屈拘束ブレースでは、大きな圧縮力が作用した時、芯材に弱軸方向の高次座屈が生じ、座屈拘束材と合板に芯材弱軸方向の横力が生じる。その際、その横力による接着層の破壊は許容していない。そこで、接着層の耐力を確認するため、ブロックせん断試験²⁾を行った。

4.2.2 試験概要

本試験に用いる試験体を Fig. 7 に示す。また、Table 6 に試験体の構成要素を示す。本試験では、9 体ずつ別のロットの材料で構成した合計 18 体の試験体を作成し、そのうち 9 体で試験を行った。そのうち、4 体は前節で行った減圧加圧処理を施し、雨水等に曝された場合を想定した。

本試験では、恒温恒湿条件下で、試験体に曲げモーメントが生じないように接着層にせん断力を与え (1.0mm/min)，その際の試験体の挙動を確認する。また、試験体作成時、接着剤養生期間は 1 週間とした。

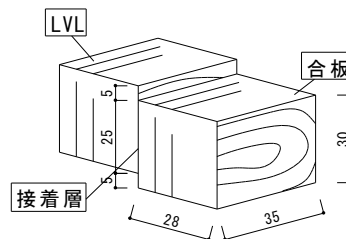


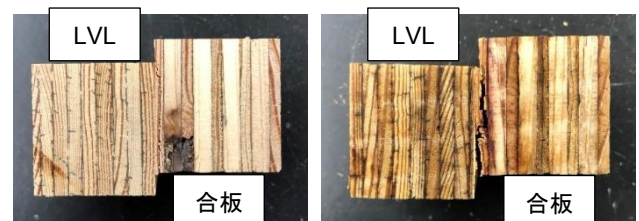
Fig. 7 ブロックせん断試験 試験体図

Table 6 ブロックせん断試験 試験体構成材

名称	規格	寸法・形状
構造用単板積層材	単板積層材の日本農林規格 (ダフリカカラマツ A種 140E 特級)	28mm × 35mm × 30mm
構造用合板	合板の日本農林規格 (カラマツ 特級2級)	28mm × 35mm × 30mm
2液性エポキシ樹脂接着剤	JAI 13-1996	450g/m ²

4.2.3 試験結果

ブロックせん断試験について、減圧加圧処理を施した試験体と施していない試験体の試験後写真を Photo. 4 に示す。Photo. 4 から、試験体は接着層ではなく、合板のせん断破壊によって壊れていることがわかる。これは、一部 LVL で破壊したものがあつたものの、9 体全てで同様の結果となった。以上から、提案する木質座屈拘束ブレースの接着層が十分な耐力を有していることが確認された。



(a) 減圧加圧処理無し (b) 減圧加圧処理有り

Photo. 4 ブロックせん断試験後写真

4.3 座屈拘束部要素試験

4.3.1 試験目的

前述のように、木質座屈拘束ブレースでは、大きな圧縮力が作用した時、芯材に弱軸方向の高次座屈が生じ、木部に芯材弱軸方向の横力が生じる。そこで、横力を受けた際の木部の挙動を確認するため、実際の木質座屈拘束ブレースを模擬した試験体の引張せん断試験を行った。

4.3.2 試験概要

本試験の試験体図及び載荷装置図を Fig.8 に示す。また、Table 7 に試験体の構成要素を示す。本試験では、Fig.8 に示すように、木質座屈拘束ブレースを模して接着した合板と LVL に、鋼板を介してせん断力を加える (0.05mm/s) ことで、木質座屈拘束ブレースにおける鋼板座屈時の木部の挙動を再現する。木質座屈拘束ブレースにはボルト挿入部とラグスクリュー挿入部があるため、接着方法は接着剤とボルト、接着剤とラグスクリュー、比較のために何も挿入せず接着剤のみ接合した試験体で試験を行った。試験体名と試験体数を Table 8 に示す。

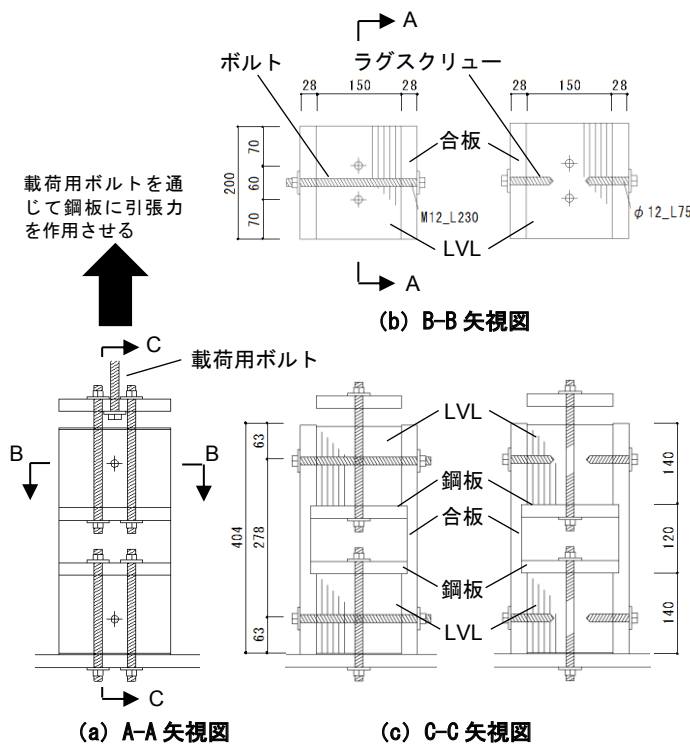


Fig.8 座屈拘束部要素試験 試験体・載荷装置図

Table 7 座屈拘束部要素試験 試験体構成材

名称	規格	寸法・形状
構造用単板積層材	単板積層材の日本農林規格 (ダブルカラマツ A種 140E 特級)	150mm × 140mm × 200mm
構造用合板	合板の日本農林規格 (カラマツ 特類2級)	28mm × 404mm × 200mm
2液性エポキシ樹脂接着剤	JAI 13-1996	450g/m ²
六角ボルト・ナット・座金	JIS B 1180, JIS B 1181, JIS B 1256	M12-230mm
ラグスクリュー	JIS B 1180規定に適合する炭素鋼	φ 12-75mm

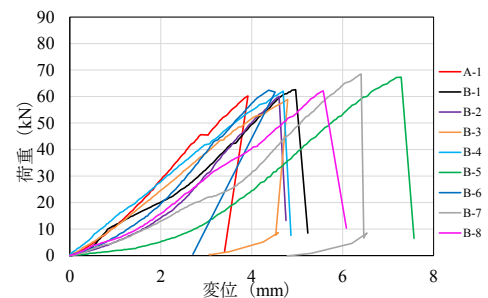
Table 8 座屈拘束部要素試験 試験体

試験体名	接合形式	試験体数
A-1	接着剤のみ	1
B-1~B-8	接着剤+ボルト	8
C-1~C-8	接着剤+ラグスクリュー	8

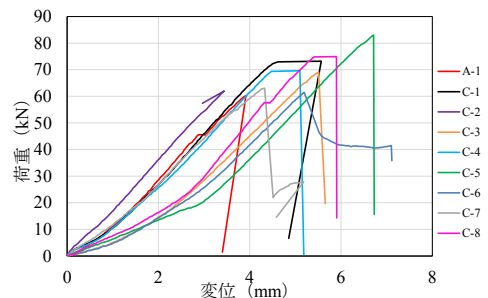
4.3.3 試験結果

Fig.9 に座屈拘束部要素試験の荷重-変位関係図を示す。Table 9 に試験の結果から得られた各試験体の特性値を記す。Fig.9 と Table 9 から、接着剤のみで LVL と合板を接合した試験体と、接着剤とボルトで接合した試験体は概ね同様の挙動を示していることがわかる。一方、接着剤とラグスクリューで接合した試験体と比較すると、ラグスクリューを挿入した試験体のほうが剛性、耐力とも高くなっていることがわかる。これは、ボルトが径よりも大きい孔に挿入されているため、補強効果が発揮される前に木材がせん断破壊したのに対し、ラグスクリューは木材に直接挿入されているため、補強効果が早期から発現したと考えられる。

次に、試験体の破壊形式に着目すると、全ての接着方式の試験体において、Photo.2, Photo.4 に示したような実大試験と同様の合板でのせん断破壊が生じた。一部の試験体において合板の引張破壊が生じたが、それらは引張力が生じる位置に節があったことが原因と考えられる。



(a) A-1, B-1~B-8 比較



(b) A-1, C-1~C-8 比較

Fig.9 荷重-変位関係

Table 9 座屈拘束部要素試験 試験体特性値

試験体名	最大耐力 kN	最大変位 mm	初期剛性 kN/mm	破壊モード	最大耐力平均値 kN	初期剛性平均値 kN/mm
A-1	60.24	3.92	8.37	せん断破壊	60.24	8.37
B-1	62.58	4.97	8.69	せん断破壊		
B-2	60.07	4.60	8.34	せん断破壊		
B-3	58.87	4.79	8.18	せん断破壊		
B-4	62.02	4.69	8.61	せん断破壊		
B-5	67.29	7.29	9.35	せん断破壊		
B-6	62.39	4.37	8.67	引張破壊		
B-7	68.52	6.41	9.59	せん断破壊		
B-8	62.16	5.57	8.63	せん断破壊		
C-1	73.20	5.57	10.17	せん断破壊	69.55	9.66
C-2	62.01	3.44	8.61	引張破壊		
C-3	69.06	5.51	9.62	せん断破壊		
C-4	69.63	5.10	9.67	引張破壊		
C-5	83.06	6.71	11.54	せん断破壊		
C-6	61.46	5.19	8.54	せん断破壊		
C-7	63.04	4.33	8.76	せん断破壊		
C-8	74.90	5.90	10.40	せん断破壊		

4. 4 要素試験考察

以上の要素試験の結果から、本研究で提案する木質座屈拘束ブレースは、鋼板に高次の座屈が発生した際、安定して合板のせん断破壊により破壊することがわかった。この破壊モードは実大実験の破壊モードと一致している。

座屈拘束部要素試験の結果から、LVLと合板はラグスクリューを挿入することで、耐力と剛性を向上することが出来ることがわかった。鋼構造制振設計指針³⁾によると、座屈拘束ブレースの座屈拘束材に、鋼板の座屈により生じる横力は座屈波形の振幅が大きくなるほど大きくなる。そのため、座屈拘束材の耐力だけでなく剛性も向上させることで木質座屈拘束ブレースの性能を向上させることが出来ると考えられる。ここで、ボルトは挿入しても座屈拘束材の耐力や剛性を大きく向上させることが出来ないことがわかったが、木質座屈拘束ブレースの作成時、LVLと合板の接着において材料を抑え込む役割を持っているため、必要であると考えられる。

5. まとめ

本報では、木材を座屈拘束材に利用した座屈拘束ブレースの提案、実大実験、要素試験を行った。以下にその知見を示す。

- ・木材を座屈拘束材に利用した木質座屈拘束ブレースの構成を提案した。
- ・座屈拘束ブレースの実大の正負交番載荷実験を行った。その結果、座屈拘束材の効果により、塑性化部ひずみ2%程度までならば、圧縮時においても引張時と同様の耐力とエネルギー吸収能力を示すことを確認した。
- ・木質座屈拘束ブレースの座屈拘束材に用いるLVLと合板の接着部について、接着剤の耐久性を確認するために減圧加圧剥離試験を行い、雨水等に曝されても座屈拘束材の接着部の剥離が生じないことを確認した。

- ・木質座屈拘束ブレースの拘束材に利用しているLVLと合板の接着部について、接着剤のせん断耐力を確認するため、ブロックせん断試験を行い、合板とLVLに対して接着剤が十分な耐力を持っていることを確認した。
- ・木質座屈拘束ブレースの拘束材と鋼板を模擬した試験体を用いて、鋼板が高次モードで座屈した際の座屈拘束材の挙動を確認した。その結果、木質座屈拘束ブレースの鋼板に高次モードの座屈が生じた際は、合板が先行してせん断破壊することが確認された。また、ラグスクリューをLVLと合板に挿入することで、座屈拘束材のせん断耐力と剛性を向上することが出来ることがわかった。

今回の実験では、木質座屈拘束ブレースの最大耐力を1000kN程度に定めて実大実験を行った。また、塑性化部ひずみは2%程度が上限という結果となった。一般的な鉄骨造建築物に適用される座屈拘束ブレースにはさらに大きい耐力と塑性化部変位が求められることも多いため、今後は、ブレース耐力の増加、及び、塑性変形能力の向上を目指し、検討を行う。

謝辞

本研究は住友林業株式会社と株式会社熊谷組との協業の中の研究開発分科会、構造・技術サブワーキンググループにおいて、中大規模木造建築物実現のための新技術開発の一環として実施した。ここで、ご協力、助言を頂いた関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/genjo_kadai/index.html, 林野庁, 森林・林業・木材産業の現状と課題
- 2) 単板積層材の日本農林規格, 農林水産省
- 3) (一社) 日本建築学会, 鋼構造制振設計指針 (2014年版)

Development of Buckling-Restrained Braces Using Timber

Ryota MINAMI, Taisuke NAKAZATO, Takaaki MINAMIKAWA and Taisuke NAGASHIMA

Abstract

In recently, demand for large-scale structures using timber has emerged, and some of them are timber-steel hybrid structures. Buckling-Restrained Braces, which don't buckle even when compressed, are used in many large-scale structures. From the background, in this study, Buckling-Restrained Braces using timber as a buckling restraint material are developed by proposing a configuration, conducting full-scale experiments, and conducting elemental tests. Full-scale experiments of the proposed Buckling-Restrained Brace showed that the brace behaved stably under compressive force input up to 2% strain. And elemental tests showed the durability and failure modes of the proposed Buckling-Restrained Brace.

Key words: Timber-Steel Hybrid Structure, Buckling-Restrained Braces, Energy Dissipation Devices, Large-Scale Wooden Structures
