

## (2) 集成材を利用した座屈拘束鋼板ブレースの 実大フレーム実験

伊藤 花恋<sup>1</sup>・田口 孝<sup>2</sup>・清水 啓介<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 矢作建設工業（株）エンジニアリングセンター（〒480-1342 愛知県長久手市茨ヶ廻間 1533-74）  
E-mail : k-itou@yahagi.co.jp

<sup>2</sup>正会員 矢作建設工業（株）エンジニアリングセンター（〒480-1342 愛知県長久手市茨ヶ廻間 1533-74）  
E-mail : t-taguchi@yahagi.co.jp

<sup>3</sup>正会員 矢作建設工業（株）エンジニアリングセンター（〒480-1342 愛知県長久手市茨ヶ廻間 1533-74）  
E-mail : k-shimizu@yahagi.co.jp

筆者らは、木質材料の有効利用および利用者にとって木質特有のぬくもり・温かみや景観性が良いといった観点から、集成材を利用した座屈拘束鋼板ブレースを提案し、縮小試験体を用いた構造実験によって開発を進めてきた。その結果、提案したブレースは全体座屈・局部破壊を防止するとともに、高い変形性能を有することが確認された。本論では実用化に向けたブレースの変形性能の確認等を目的として、実大スケールのブレース試験体を鉄骨フレームに組み込んだ静的繰返し実験を実施した。本実験は集成材からなる拘束材の断面、板幅方向へのボルト補強の有無、拘束材の端部拡幅の有無を実験パラメータとして選出した。その結果、適切な拘束材を選定することで、提案ブレースは鉄骨フレームに組み込んだ状態でも軸ひずみで2.0%以上の高い変形性能を有することが確認された。

**Key Words:** *Buckling-Restrained Brace, Steel Plate, Glued Laminated Timber, Statical Loading Test*

### 1. はじめに

ブレース材は、地震に対して有効に作用するように建物に強度と剛性を持たせる部材であるが、圧縮力が作用したときに座屈が発生するという欠点がある。こうした欠点を解消するために様々な座屈拘束ブレースが提案され実用化されている<sup>1)</sup>。そうした中、筆者らは木質の構造材料である集成材を利用した新しい座屈拘束ブレースを提案してきた<sup>2)</sup>。

これは、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、令和3年には「脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律」に改正され、国の方針として公共および民間を含む一般の建築物において可能な限り木材の利用を目指すことが打ち出されたことに加え、利用者にとって木質特有のぬくもり・温かみや景観性が良いこと、ブレース材自体の自重が軽量となることで構造的・施工的なメリットがあることなどの効果を期待して提案したものである。また、炭素貯蔵・固定効果やSDGsのゴール12およびゴール15に向けた取り組みでもある。

木質材料を鋼材の座屈拘束材として用いる研究は、鋼板に対しスギ、ベイマツといった無垢の木材を充填材として用いる前提でPC鋼棒を用いて接合して補剛するブレース材<sup>3)</sup>や鋼板に対しアカマツ、ヒノキ、カラマツといった集成材を木ネジもしくはボルトと接着剤で接合して補剛するブレース材<sup>4)</sup>などがある。しかし、これらの研究で対象とされている部材は独自で提案されたものであることから、使用した材料、形状、製作方法、実験方法等の条件が異なっており、得られた知見に関して独自性が高い。座屈拘束条件の考え方や検討方法に関しては文献1,6,7,8)などが用いられているが、材料、形状、製作方法、実験方法等の条件が異なった場合においても同等な技術データが得られるとは言い難い。すなわち、木質材料を鋼材の座屈拘束材として用いるブレース材の技術データは、まだまだ少ない状況にある。

そこで本論では、提案した集成材を用いた座屈拘束鋼板ブレースの概要を示すとともに、その構造性能を確認するために実施した、実大スケールのブレース試験体を鉄骨フレームに組み込んで行った静的繰返し実験の概要について示す。さらに、様々な検討を行うことで提案ブレースの実用化に向けた技術データの蓄積を行う。

## 2. 座屈拘束鋼板ブレースの概要

提案する集成材を用いた座屈拘束鋼板ブレース（以下、本ブレース）の概要を図-1に示す<sup>2)</sup>。本ブレースは、鋼板からなる芯材（以下、芯材）の弱軸方向（以下、板厚方向）に、ラミナの接着方向が直交するように配置された二つの集成材からなる拘束材（以下、拘束材）を、芯材を挟み込むように設置したものである。そして、この拘束材の表材と裏材はボルト等によって一体化させることで、拘束材として必要な強度と剛性を持たせている。拘束材の表材と裏材の一体化にボルトを用いる理由は、接着による接合などに比べ、鋼材であることから集成材の長期使用によってひび割れが発生したとしても、長期に亘って拘束材として必要な剛性や耐力を確保できるため、および集成材の割れによって発生する脆性的な破壊を防ぐことができるためである。さらに、ボルトで締め付けることによって、板厚方向の芯材と拘束材間のクリアランスを最小化する目的も含まれている。

## 3. 実大フレーム実験

### (1) 試験体概要

本実験の試験体一覧を表-1に、試験体の形状および寸法を図-2に、代表的な試験体 WB73、WB74 の拘束材端部の詳細を図-3に示す。表・図中の中央部は試験体の芯材の断面が平鋼の部分、端部は芯材の断面が十字となっている部分である。

実験パラメータとしては、「拘束材の断面」、「板厚方向（芯材の強軸方向）へのボルト補強の有無」、「拘束材の端部拡幅の有無」とした。試験体は実大スケール

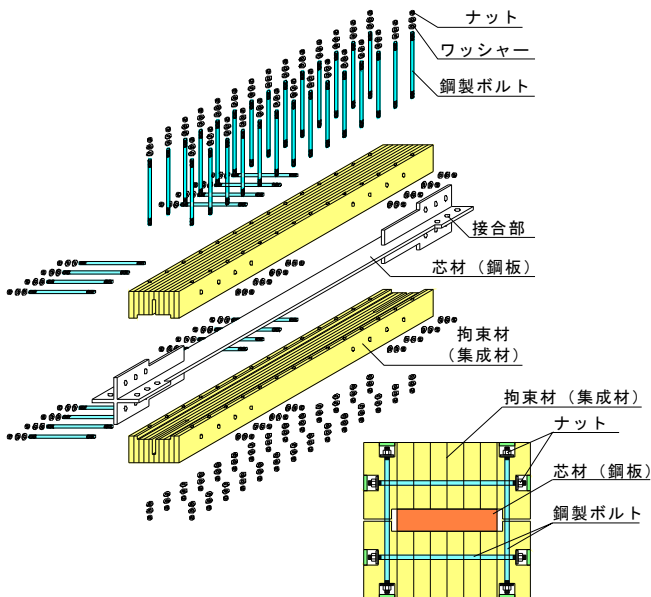
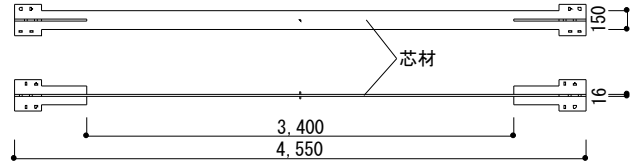


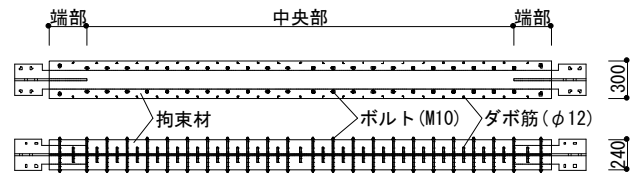
図-1 提案した座屈拘束鋼板ブレース

表-1 試験体一覧

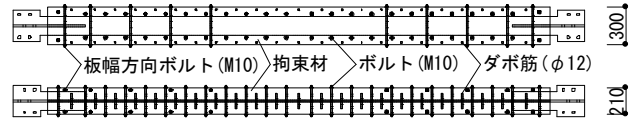
試験体番号	拘束材断面		芯材断面		降伏部長さ $L_s$ (mm)	板厚方向ボルト(M10, $\phi 12$ ) 中央部	ダボ筋( $\phi 12$ )	板厚方向ボルト(M10, $\phi 12$ ) 端部	端部拡幅
	幅 h(mm)	せい h(mm)	幅 w(mm)	厚 t(mm)					
WB71	300	240	150	16	3400	44本@160	4本	46本	あり
WB72	300	210	150	16	3400	44本@160	4本	46本	あり
WB73	300	240	150	16	3400	44本@160	4本	46本	あり
WB74	300	240	150	16	3400	44本@160	4本	46本	なし



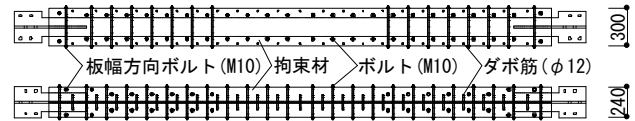
(a) 芯材



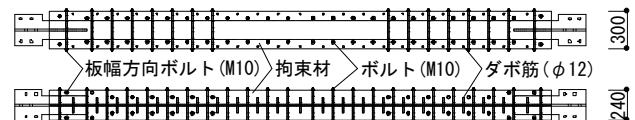
(b) 試験体 WB71



(c) 試験体 WB72



(d) 試験体 WB73

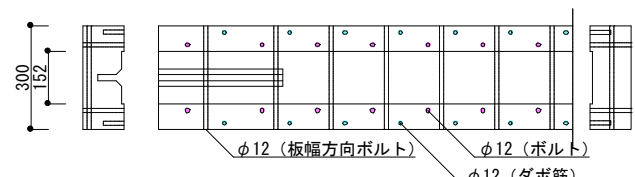


(e) 試験体 WB74

図-2 試験体図



(a) 試験体 WB73 (端部拡幅あり)



(b) 試験体 WB74 (端部拡幅なし)

図-3 拘束材端部詳細図

とし、拘束材長さ、芯材の降伏部長さは全て同じである。

各試験体の締結ボルトには、M10（軸部φ12の鋼材）を用い、拘束材間のせん断力の伝達のためにダボ筋（φ12の鋼材）も併用した。また、試験体WB71以外に関しては既往の研究<sup>9)</sup>を考慮し、板幅方向へのボルト補強（M10、軸部φ12）も行っている。

全ての試験体とも芯材と拘束材の間に、摩擦を軽減する目的でテフロンシートを挟んでいる。

表-1、図-3(a)に示す端部拡幅とは、実際に構造躯体に組み込まれた際に発生すると想定される板幅方向の曲げ変形に対して、拘束材が芯材と接触しないように拘束材の端部にクリアランスを拡幅する形状としたものである。端部拡幅の幅は、板幅方向の曲げ変形の回転中心を芯材幅の2倍の位置と想定して、幾何学的に求めた。

拘束材に関しては文献1)の3.5節(3.5.1)式、(3.5.2)式を参考に断面設計を行った。拘束材の曲げ強度と曲げ剛性の関係を文献6,7,8)を参考に、無次元化して表したものを図-4に示す。ここで、 $m_y^B$ ：無次元化曲げ強度、 $n_y^B$ ：無次元化曲げ剛性である。この結果、全ての試験体の拘束材の断面は、十分な安全域に存在している。

## (2) 使用材料

試験体で使用した鋼材および集成材の材料試験結果を表-2および表-3に示す。鋼材の材料特性は、各鋼材における試験片の平均値を採用した。集成材の材料特性は、文献10)のI. 構造用木材の強度試験法の7章、9章、10章を参考に求めた。

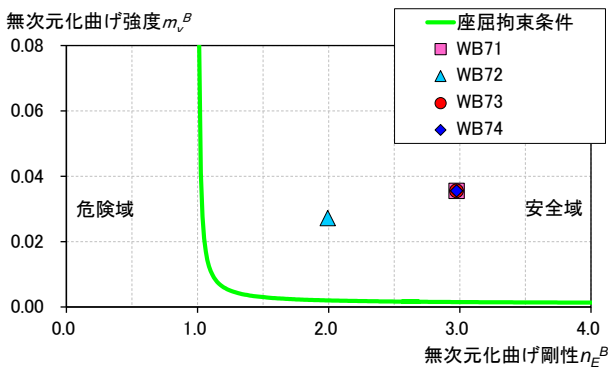


図-4 試験体の曲げ強度と曲げ剛性の関係

表-2 材料試験結果（鋼材）

鋼材	規格	降伏点	引張強さ	ヤング係数	降伏歪	使用箇所
		(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(kN/mm <sup>2</sup> )	(μ)	
PL-16	SS400	282	436	208	1359	芯材
φ12	SS400	327	451	200	1638	M10ボルト

表-3 材料試験結果（集成材）

材種	規格	繊維方向				繊維直交方向		
		圧縮強さ	圧縮ヤング係数	曲げ強さ	曲げヤング係数	曲げ強さ	せん断強さ	めり込み降伏強さ
		(N/mm <sup>2</sup> )	(kN/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(kN/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )
カラマツ	同一等級 E95-F315	44.6	11.4	47.7	11.5	3.0	2.23	8.29

## (3) 実験・計測概要

フレーム実験の加力装置図を図-5に示す。加力は図に示すような門型の加力フレームを用い、上部載荷梁の平行を保ちながら水平油圧ジャッキ2本で水平力を载荷する方法とした。加力は静的正負交番繰返し载荷とし、ブレース軸方向に対して、圧縮側を正载荷側とした。

加力サイクルを表-4に示す。加力は芯材の降伏までは荷重制御とし、軸降伏荷重  $N_y$ （材料試験結果を用いた計算耐力）に対し、 $\pm 1/4N_y$ 、 $\pm 2/4N_y$ 、 $\pm 3/4N_y$ 、 $\pm 4/4N_y$ の4段階の荷重を1サイクルずつ加えることとした。なお、これを水平荷重  $P$ に変換すると  $1/\sqrt{2}$  倍となる。その後は変位制御とし、水平変位  $\delta$ から求まる層間変形角  $R$ を用い  $R = \pm 1/100$ 、 $\pm 1/67$ 、 $\pm 1/50$ 、 $\pm 1/40$ 、 $\pm 1/33$ 、 $\pm 1/29$ の変位で、2サイクルずつの正負交番繰返し加力とした。これをブレース降伏部の軸ひずみに換算すると、それぞれ0.8%、1.2%、1.7%、2.1%、2.5%、2.9%に相当する。

実験における水平荷重  $P$ は2基の水平ジャッキに取り付けたロードセルの合計とした。また、水平変位  $\delta$ は加力梁の端部に取り付けた2台の高感度変位計による計測値から、門型加力フレーム自身の変位成分を除いたものとした。また、ブレース材の軸変形  $\delta_N$ はブレースの接合部間に取り付けた2台の巻込型ワイヤ変位計による計測値の平均値とした。さらに、芯材のひずみ量を主要な位置に貼付したひずみゲージにて計測した。

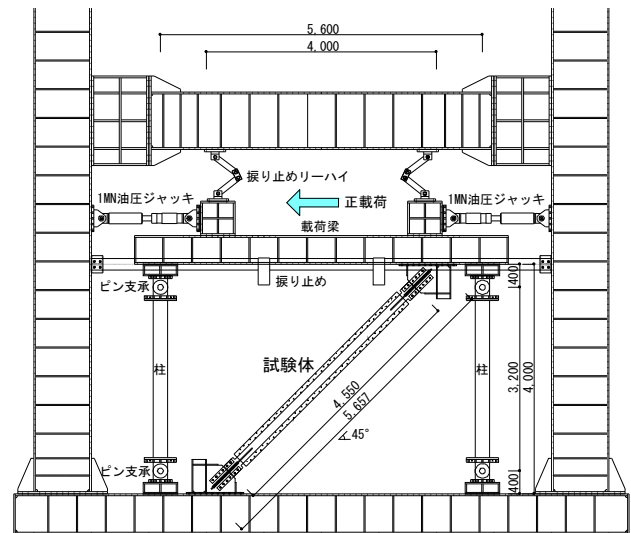


図-5 加力装置

表-4 加力サイクル

制御	荷重制御				変位制御						
	1	2	3	4	5,6	7,8	9,10	11,12	13,14	15,16	
サイクル	$\pm 1/4N_y$	$\pm 2/4N_y$	$\pm 3/4N_y$	$\pm 4/4N_y$	-	-	-	-	-	-	
軸荷重 (kN)	169.3	338.6	507.9	677.2	-	-	-	-	-	-	
水平荷重 (kN)	119.7	239.4	359.1	478.8	-	-	-	-	-	-	
水平変位 (rad.)	-	-	-	-	1/100	1/67	1/50	1/40	1/33	1/29	
水平変位 (mm)	-	-	-	-	40.0	60.0	80.0	100.0	120.0	140.0	
軸変位 (mm)	-	-	-	-	28.2	42.3	56.3	70.3	84.2	98.1	
軸ひずみ (%)	-	-	-	-	0.83	1.24	1.66	2.07	2.48	2.89	

#### 4. 実験結果

##### (1) 軸方向荷重－軸方向変位関係

実験において得られた本ブレースの軸方向に作用した荷重  $N$  を計算耐力（軸降伏荷重） $N_y$  で除したものを縦軸に、軸方向の変位  $\delta_N$  をブレースの塑性区間（ $\approx 3400\text{mm}$ ）で除したものを横軸に表した、軸方向荷重と軸方向変位の関係を図-6に示す。また、実験結果一覧を表-5に示す。なお、ここでは圧縮荷重、圧縮変位が作用する方向を正載荷側としている。図中には、芯材の計算耐力（軸降伏荷重）を示すとともに、最大荷重、拘束材が大きく破断した点、芯材に貼付したひずみゲージのどれか一枚が、最初に降伏ひずみに達した点もプロットしている。

試験体 WB71 は、-3 サイクル目 ( $3/4P_y$ ) で芯材が引張降伏し、+4 サイクル目 ( $4/4P_y$ ) で圧縮降伏した。その後、+11 サイクル目（軸ひずみ 2.1%）の途中で圧縮側の最大荷重を示すとともに、拘束材の下部部分から上部にかけて板幅方向に大きく破断して荷重が低下した。試験体 WB72 は、-3 サイクル目 ( $3/4P_y$ ) で芯材が引張降伏し、+4 サイクル目 ( $4/4P_y$ ) で圧縮降伏した。その後、+12 サイクル目（軸ひずみ 2.1%）で最大荷重を示し、次の+13 サイクル目（軸ひずみ 2.5%）の加力中に、拘束材の下部部分が大きく破断して荷重が低下した。試験体 WB73 は、-3 サイクル目 ( $3/4P_y$ ) で芯材が引張降伏し、+4 サイクル目 ( $4/4P_y$ ) で圧縮降伏した。その後、+13 サイクル目（軸ひずみ 2.5%）で最大荷重を示し、次の+14 サイクル目（軸ひずみ 2.5%）の加力中に、拘束材の下部部分が破断して荷重が低下した。荷重の低下が少なかったことから+15 サイクル目（軸ひずみ 2.9%）も加力を継続したが、途中で試験体中央部が大きく破断して大きく荷重が低下した。試験体 WB74 は、-3 サイクル目 ( $3/4P_y$ ) で芯材が引張降伏し、+4 サイクル目 ( $4/4P_y$ ) で圧縮降伏した。その後、 $\pm 16$  サイクル目（軸ひずみ 2.9%）で最大荷重を示し、次の+17 サイクル目（軸ひずみ 2.9%の3回目）の加力中に、上部部分に亀裂が生じるとともに拘束材のボルト接合面が開くことで荷重が低下した。

この結果、全ての試験体とも実験パラメータに関係なく、圧縮側・引張側で芯材が降伏し、計算耐力に達することが確認された。また、「板幅方向へのボルト補強」を行った試験体 WB72, WB73, WB74 では軸ひずみで  $2.0\% \times 2$  周以上の変形性能を有していることが確認された。よって、本ブレースは座屈拘束ブレースとしての最低限の性能、すなわち、軸方向に圧縮降伏するまで全体座屈が発生せず、繰返し軸力下で圧縮側と引張側がほぼ対称な荷重－変位関係が得られるといった性能を有していることが確認された。

「拘束材の断面」が実験パラメータとなる試験体 WB72 と WB73 に関しては、板幅方向ボルトの本数も異

表-5 実験結果一覧

試験体番号	載荷方向	最大荷重			芯材降伏			拘束材破断			確認できた圧縮軸ひずみと繰返し回数
		サイクル	荷重 (kN/kN)	変位 (%)	サイクル	荷重 (kN/kN)	変位 (%)	サイクル	荷重 (kN/kN)	変位 (%)	
WB71	正	11	1.35	1.39	4	0.90	0.13	11	1.35	1.39	1.5% $\times 2$ 周
	負	-10	-1.27	-1.58	-3	-0.70	-0.10				
WB72	正	12	1.46	1.97	4	0.95	0.15	13	1.43	1.71	2.0% $\times 2$ 周
	負	-12	-1.35	-2.00	-3	-0.55	-0.07				
WB73	正	13	1.49	2.38	4	0.97	0.14	14	1.43	1.33	2.4% $\times 1$ 周
	負	-13	-1.38	-2.40	-3	-0.57	-0.08				
WB74	正	16	1.68	2.79	4	1.01	0.15	17	1.66	2.50	2.8% $\times 2$ 周
	負	-16	-1.48	-2.77	-3	-0.73	-0.10				

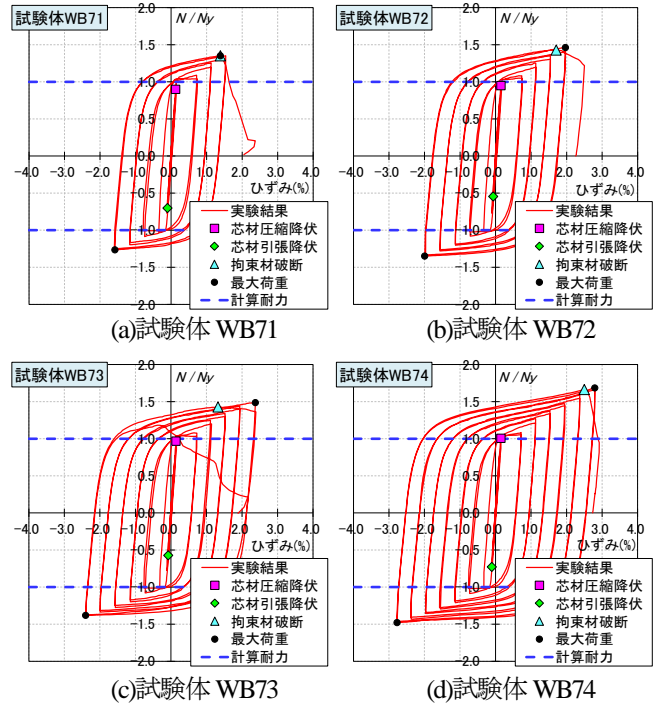


図-6 軸方向荷重－軸方向変位の関係

なっていることから定量的な比較は難しいが、断面の大きな試験体 WB73 の方が変形性能は良い。「板幅方向へのボルト補強の有無」が実験パラメータとなる試験体 WB71 と WB73 を比較すると、明らかにボルト補強した試験体 WB73 の方が変形性能は良い。さらに、拘束材破断後の耐力低下も緩やかとなっており、補強の効果が表れている。「拘束材の端部拡幅の有無」が実験パラメータとなる試験体 WB73 と試験体 WB74 を比較すると、明らかに端部拡幅の無い試験体 WB74 の方が変形性能は良い。よって、本提案ブレースに対しては、板幅方向の曲げ変形に対して拘束材端部のクリアランスを拡幅するといった処置は、ブレースの変形性能を低下させる可能性が高く、不必要であると考察される。

##### (2) 試験体の損傷状況

実験時終了時の試験体の状況と、試験体を解体した際の芯材と拘束材の状況を写真-1 と写真-2 に示す。写真-2 では右側が実験時の試験体の上部側となっている。さらに、板幅方向へ破壊した試験体 WB73, 板厚方向へ局部座屈と局部破壊した試験体 WB74 の芯材と拘束材の変形状況を写真-3 に示す。

この結果、試験体 WB71, WB72, WB73 は板幅方向への局所的な曲げ座屈によって拘束材が損傷していることが分かる（板幅方向への破壊）。これは、板厚方向への拘束材の断面は十分であったが、板幅方向への曲げ変形に対して拘束材端部のクリアランスを拡幅するといった処置が曲げ変形を誘発させ、板幅方向への押出力を増加させたために発生したものと考えられる。一方、試験体 WB74 は、芯材の上部において板厚方向への局部座屈が発生しており、その座屈波によって拘束材が押し出される形で破壊が発生している（局部破壊）。詳細に観察す

ると「めり込み破壊」が発生したものと想定される。また、芯材を注視すると、高次の座屈波が発生している。写真-2 の芯材の変形状況によると、芯材厚  $t$  が 16mm の試験体に対し座屈波長は 210mm 程度であり、芯材厚のおよそ 13 倍となっている。後述の式(2)の座屈波長  $L_p$  は、文献 1)にも示されるように計算するとおおむね  $L_p \approx 10 t$  (160mm) となることから、今回の結果と比較的に良く対応した結果となっている。



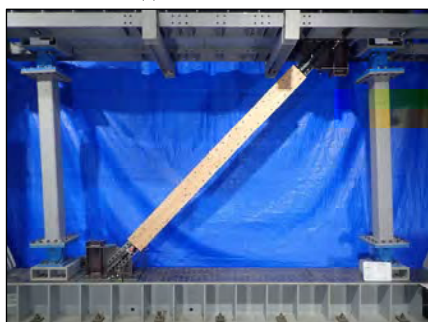
(a)試験体 WB71



(b)試験体 WB72

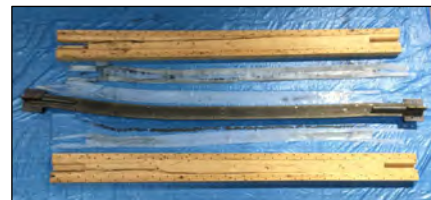


(c)試験体 WB73



(d)試験体 WB74

写真-1 実験終了時の試験体の状況



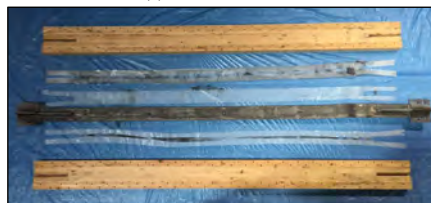
(a)試験体 WB71



(b)試験体 WB72



(c)試験体 WB73



(d)試験体 WB74

写真-2 加力後の試験体状況（右側が上部側）



(a)試験体 WB73

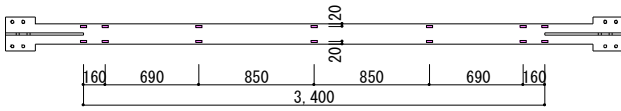


(b)試験体 WB74

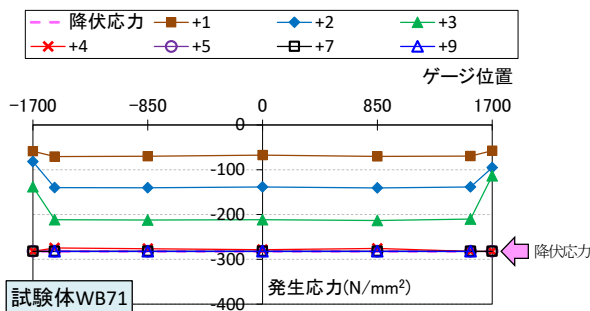
写真-3 芯材と拘束材の変形状況

### (3) 芯材の発生応力

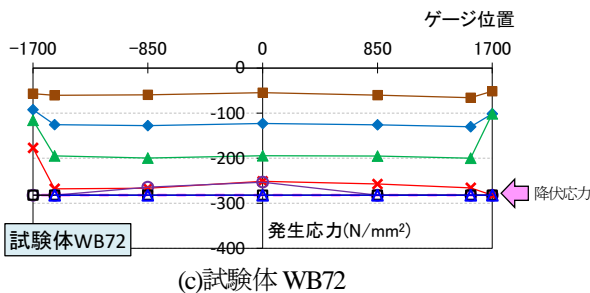
実験時の正載荷（圧縮）時に計測された、各サイクルにおける芯材に発生した圧縮応力を図-7に示す。ここで、芯材の応力の値は、図-7(a)に示す貼付位置（裏表とも）の4枚のひずみゲージの平均値を用い、材料試験結果を用いて芯材の応力-ひずみ関係を完全バイリニアにモデル化して求めたものである。また、芯材が圧縮降伏した以降は降伏応力の値で示している。図の横軸はひずみゲ



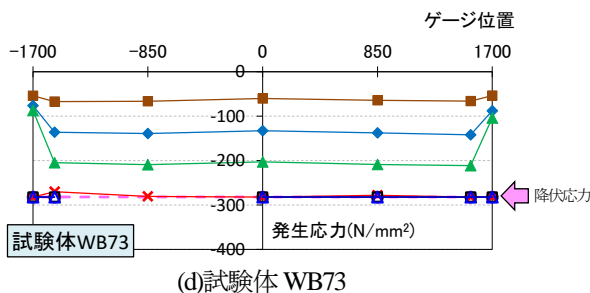
(a)ひずみゲージ貼付位置



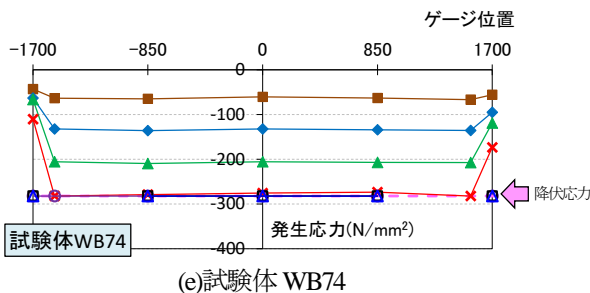
(b)試験体 WB71



(c)試験体 WB72



(d)試験体 WB73



(e)試験体 WB74

図-7 各サイクルにおける芯材の発生応力

ージを貼付した位置に対応している。図中、5 サイクル以降の応力の値が示されていない箇所はひずみゲージが損傷してデータが取得できなかったところである。

この結果、全ての試験体とも、最も端部（中心から±1700mm）の結果を除き、サイクルの増加とともに芯材の応力は一様に増加している。従って、全ての試験体とも、板厚方向に対して十分な曲げ強度や曲げ剛性を有する拘束材によって、全体座屈が発生するのを防ぎ、芯材が軸方向全体に渡って一様な圧縮応力を発生させることができたとと言える。よって、本ブレースは4(1)節に示したように座屈拘束ブレースとしての最低限の性能を有しているものと考察できる。なお、最も端部のひずみゲージの値に関しては、加力フレームからの曲げが作用する箇所であること、接合部として芯材断面が平鋼から十字断面へと変化した箇所であることなどから、計測値が小さかったものと考察される。

## 5. 考察

### (1) 局部破壊の検討

本ブレースでは芯材に板厚方向への局部座屈が発生することで、拘束材である集成材部分において局部的な破壊（局部破壊）といった現象が生じることが分かっており<sup>11,12,13</sup>、今回も試験体WB74にて発生した。そこで、文献1, 6)を参考に式(1)により計算される面外押出力に対して、図-8に示すような拘束材のせん断、曲げ、めり込み破壊に対する検討を行う。

$$P_{rd} = \frac{4(s + v_p \varepsilon_t t)}{L_p} N_{cu} \quad (1)$$

ここで、

- $P_{rd}$  : 面外への押出力
- $s$  : 芯材と拘束材の間のクリアランスの合計
- $v_p$  : 塑性時ポアソン比 (=0.5)
- $\varepsilon_t$  : 最大引張時の塑性軸ひずみ
- $t$  : 芯材の板厚
- $L_p$  : 座屈波長 (式(2)による)
- $N_{cu}$  : 芯材の降伏後最大軸力

$$L_p = \pi t \sqrt{\frac{0.05E}{3\sigma_y}} \quad (2)$$

ここで、

- $L_p$  : 座屈波長
- $t$  : 芯材板厚
- $E$  : 芯材のヤング係数
- $\sigma_y$  : 芯材の降伏点

式(1)によって算出される押出力  $P_{rd}$  およびせん断破壊、曲げ破壊、めり込み破壊といった板厚方向の局部破壊に関する検討結果を表-6 に示す。表中、検討結果の値が 1.0 以下の場合に破壊の可能性があることを示している。ここで、計算方法等は文献 11,12,13)を参照のこと。また、計算に用いた曲げ強さ、せん断強さ、めり込み降伏強さは表-3 に示す材料試験結果の値を用いた。

この結果、今回の試験体は全て、局部破壊に対して余裕のある試験体となっている。一方、試験体 WB74 にて局部破壊が発生した理由としては、実験にて繰返し加力

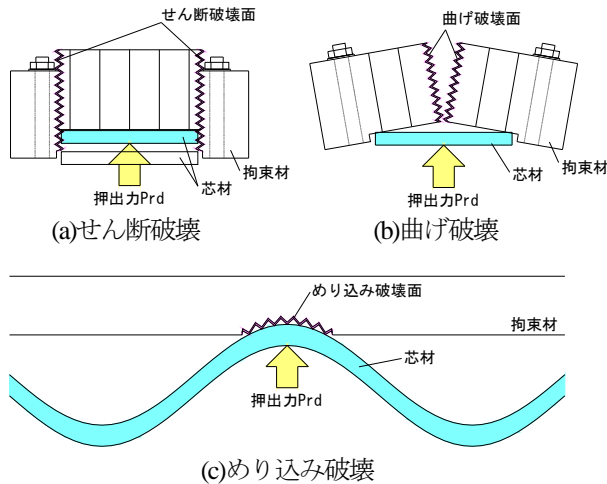


図-8 局部破壊 (板厚方向)

表-6 局部破壊の検討結果 (板厚方向)

試験体番号	拘束材の厚さ $t_r$ (mm)	座屈波長 $L_p$ (mm)	面外への押出力 $P_{rd}$ (kN)	集成材のせん断耐力 $Q_v$ (kN)	発生モーメント $M$ (kN・mm)	集成材の曲げ耐力 $M_u$ (kN・mm)	集成材のめり込み耐力 $C_v$ (kN)	検討結果		
								せん断	曲げ	めり込み
								$Q_v/P_{rd}$	$M_u/M$	$C_v/P_{rd}$
WB71	112.0	176.1	3.8	56.0	109	711	19.9	14.71	6.50	5.23
WB72	97.0	176.1	3.8	42.0	109	462	19.9	11.03	4.22	5.23
WB73	112.0	176.1	3.8	56.0	109	711	19.9	14.71	6.50	5.23
WB74	112.0	176.1	3.8	56.0	109	711	19.9	14.71	6.50	5.23

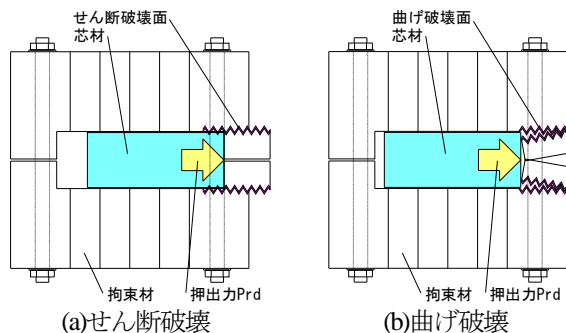


図-9 局部破壊 (板幅方向)

表-7 局部破壊の検討結果 (板幅方向)

試験体番号	拘束材の厚さ $t_r$ (mm)	座屈波長 $L_p$ (mm)	面外への押出力 $P_{rd}$ (kN)	集成材のせん断耐力 $Q_v$ (kN)	発生モーメント $M$ (kN・mm)	集成材の曲げ耐力 $M_u$ (kN・mm)	集成材のめり込み耐力 $C_v$ (kN)	検討結果		
								せん断	曲げ	めり込み
								$Q_v/P_{rd}$	$M_u/M$	$C_v/P_{rd}$
WB71	74.0	1650.5	8.9	24.4	18	205	19.9	2.75	11.55	2.24
WB72	74.0	1650.5	8.9	24.4	18	205	19.9	2.75	11.55	2.24
WB73	74.0	1650.5	8.9	24.4	18	205	19.9	2.75	11.55	2.24
WB74	74.0	1650.5	8.9	24.4	18	205	19.9	2.75	11.55	2.24

を加えることで、局部的に拘束材に芯材がめり込み、それによってクリアランスが徐々に大きくなることで押出力が増加 (式(1)において  $s$  が大きくなることで  $P_{rd}$  が大きくなる) し、それを繰り返すことで破壊したものと考察される。また、こうした局部破壊は、拘束材に集成材を用いていることによる本ブレース特有の破壊形式と考えられることから、実用化段階では、本節で示したような検討が必要と考えられる。

同様の方法によって、試験体 WB71, WB72, WB73 において発生した板幅方向への破壊に対して、図-9 に示すような拘束材のせん断、曲げ破壊を想定し検討を行った。検討結果を表-7 に示す。

この結果、板幅方向への破壊に関しても、今回の試験体は全て、余裕のある試験体となっている。一方、試験体 WB71, WB72, WB73 にて局部破壊が発生した理由としては、板幅方向への曲げ変形に対して拘束材端部のクリアランスを拡幅するといった処置が、板幅方向への押出力を増加させるといった良くない影響として働いたために発生したものと考えられる。

## (2) 初期剛性

軸方向荷重と軸方向変位から得られる本ブレースの軸方向の初期剛性と、芯材の断面積とヤング係数から得られる計算による軸方向の初期剛性の関係を図-10 および表-8 に示す。ここでは、弾性範囲内である 3 サイクル目 ( $3/4P_y$ ) の実験結果を用いた。

この結果、全試験体とも比較的良い対応が見られたが、計算値より実験結果の方が 6~9% 程度高い軸剛性を示した。この理由としては、テフロンシートを挿入することにより摩擦係数を軽減しているものの、芯材と拘束材をボルトで密着させていることで、多少は拘束材に軸力が伝達しているためと考えられる。

## (3) 累積塑性変形倍率

各試験体の変形性能を評価するために、累積塑性変形倍率を用いて検討を行う。各試験体の荷重と累積塑性変形倍率の関係を図-11 に、累積塑性変形倍率を表-9 に示す。図の縦軸は計算耐力 (軸降伏荷重)  $N_y$  で除し、横軸は降伏変形  $\delta_{Ny}$  で除している。ここで、累積塑性変形倍率の値は、図中に●印で示した拘束材が破断し圧縮側の荷重低下が発生したサイクルの除荷時の値とした。

この結果、4(1)節と同様に試験体 WB74 の変形性能が最も良く、図-6 に示した軸方向荷重と軸方向変位の関係よりも明確に変形性能が分かりやすい結果となった。

「拘束材の断面」が実験パラメータとなる試験体 WB72 と WB73 に関しては、板幅方向ボルトの本数も異なっていることから定量的な比較は難しいが、断面の大きな試験体 WB73 の方が変形性能は良い。「板幅方向へ

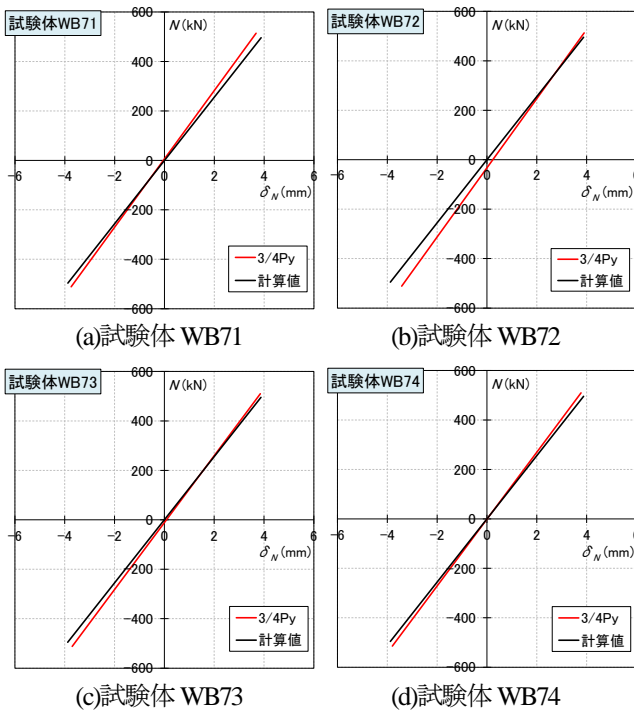


図-10 軸方向の初期剛性の比較

表-8 軸方向の初期剛性の比較

試験体番号	実験結果	計算値	実験結果 / 計算値
	(kN/mm)	(kN/mm)	
WB71	138.1	127.94	1.08
WB72	139.8	127.73	1.09
WB73	135.4	127.74	1.06
WB74	135.2	127.89	1.06

のボルト補強の有無」が実験パラメータとなる試験体 WB71 と WB73 を比較すると、明らかにボルト補強した試験体 WB73 の方が変形性能は良い。こうした結果から、板幅方向へのボルト補強は行った方が良いと考察される。「拘束材の端部拡幅の有無」が実験パラメータとなる試験体 WB73 と WB74 を比較すると、明らかに端部拡幅の無い試験体 WB74 の方が変形性能は良い。この結果、本提案ブレースに対しては、板幅方向の曲げ変形に対して拘束材端部のクリアランスを拡幅するといった処置は、ブレースの変形性能を低下させる可能性が高く、不必要であると考察される。

## 6. まとめ

本論では、提案した集成材を利用した座屈拘束鋼板ブレースについて、実大スケールのブレース試験体をフレームに組み込んだ静的繰返し実験を実施し、「拘束材の断面」、「板幅方向へのボルト補強の有無」、「拘束材の端部拡幅の有無」について検討・考察を行った。本研究によって得られた知見を以下に示す。

- 全ての試験体とも実験パラメータに関わらず、全体座屈することなく圧縮側・引張側ともに芯材の降伏および計算耐力に達するとともに対称な荷重-変位関係が

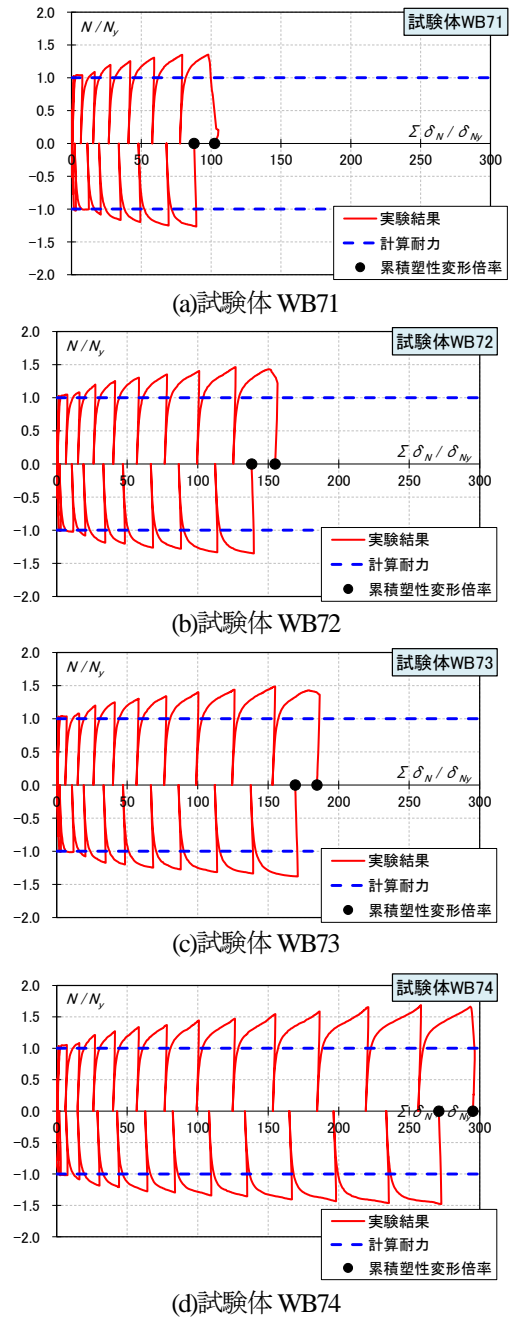


図-11 荷重-累積塑性変形倍率の関係

表-9 累積塑性変形倍率

試験体番号	累積塑性変形倍率		
	正載荷側 (圧縮)	負載荷側 (引張)	合計
WB71	102.4	87.7	190.1
WB72	154.8	138.2	293.0
WB73	184.5	169.1	353.7
WB74	295.1	270.9	566.0

得られ、座屈拘束ブレースとしての最低限の性能を有している。よって、適切な拘束材の断面が設計されていると考察される。

- 拘束材の断面の効果に関しては、板幅方向ボルトの本数も異なっていることから定量的な比較は難しいが、断面の大きい方が変形性能は良い。
- 板幅方向（芯材の強軸方向）へのボルト補強に関して

は、変形性能に補強の効果が見られることから、補強は行った方が良い。

- 構造躯体に組み込まれた際に発生すると想定される板幅方向の曲げ変形に対して、拘束材が芯材と接触しないように拘束材端部のクリアランスを拡幅するといった処置は、本提案ブレースに対しては変形性能を低下させる可能性が高いことから不必要である。
- 板幅方向へのボルト補強を行った試験体に関しては、変形性能として軸ひずみの2.0%×2周以上を有する。
- 試験体の破壊としては、ブレース端部における板幅方向への局所的な曲げ座屈によって拘束材が破壊する試験体と板厚方向への局部座屈による局部破壊の試験体が存在する。
- 全ての試験体とも、芯材には軸方向全体に渡って一律な応力が発生しており、座屈拘束ブレースとしての性能を有している。
- 全ての試験体とも、実験で得られた軸方向の初期剛性は、計算による初期剛性と比較的良く対応する。

**謝辞：**本研究を進めるにあたり、ガル建築コンサルタント 加藤三晴氏には、多大なご助言、ご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針，pp.73-82，2018.
- 2) 芳賀裕司，田口孝，清水啓介，近藤龍哉，加藤三晴：集成材を利用した座屈拘束鋼板ブレースの開発（その1～3），日本建築学会大会学術講演梗概集，Vol.C1，pp.1535-1540，2019.
- 3) 渋谷麻里，吉敷祥一，山田哲：座屈拘束ブレースの補剛性能に関する研究（その1），日本建築学会大会学術講演梗概集，Vol.C1，pp.873-874，2004.
- 4) 山本義徳，吉田文久，中川学：木質材料を座屈拘束材とした鋼ブレースの繰返し載荷実験（その1～2），日本建築学会大会学術講演梗概集，Vol.C1，pp.741-744，2018.
- 5) 吉田文久，中川学，藪田智裕，西拓馬，阿辺山健大：木集成材で座屈拘束した平鋼ブレースの繰返し載荷実験（その1～2），日本建築学会大会学術講演梗概集，Vol.C1，pp.995-998，2019.
- 6) T. Takeuchi and A. Wada：Buckling-Restrained Braces and Applications，Japan Society of Seismic Isolation，pp.11-24，2017.
- 7) 日本鋼構造協会，鋼材倶楽部：履歴型ダンパー付骨組の地震応答性状と耐震設計法，pp.69-71，1998.
- 8) 井上一朗：建築鋼構造の理論と設計，pp.3-38 - 3-48，2003.
- 9) 清水啓介，田口孝，加藤三晴：集成材を利用した座屈拘束鋼板ブレースの開発（その9～10），日本建築学会大会学術講演梗概集，Vol.C1，pp.1245-1248，2022.
- 10) 日本住宅・木材技術センター：構造用木材の強度試験マニュアル，pp.8-17，2011.
- 11) 清水啓介，田口孝，近藤龍哉，加藤三晴：集成材を利用した座屈拘束鋼板ブレースの実験的研究，第13回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集，土木学会・日本建築学会，pp.44-53，2019.
- 12) 田口孝，清水啓介：集成材を利用した座屈拘束鋼板ブレースの基礎的実験，第14回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集，日本建築学会・土木学会，pp.35.1-35.8，2021.
- 13) 田口孝，清水啓介：集成材を利用した座屈拘束鋼板ブレースの軸方向加力実験，構造工学論文集，日本建築学会，Vol.68B，pp.21-32，2022.

(Received August 25, 2023)

## FULL-SCALE FRAME EXPERIMENT OF THE BUCKLING-RESTRAINED STEEL-PLATE BRACES USING GLUED LAMINATED TIMBER

Karen ITOH, Takashi TAGUCHI and Keisuke SHIMIZU

A brace is an effective structural member against earthquakes that gives the buildings strength and stiffness. However, it has the weakness that buckling occurs when a compressive force is applied. Therefore, we proposed a new buckling-restrained steel-plate brace using glued laminated timber.

In this paper, we show an overview of the proposed brace. Then, to confirm its structural performance, a static loading test was conducted on four full-scale specimens. Test results confirmed that the proposed brace has excellent deformation performance. In addition, various considerations were made on the test results. Various findings were obtained from the tests, and technical data for practical use was accumulated.