

(35) 集成材を利用した座屈拘束鋼板ブレース の基礎的実験

田口 孝¹・清水 啓介²

¹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

²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

ブレース材は、地震時に建物に強度と剛性を持たせる有効な構造部材であるが、圧縮力が作用したときに座屈が発生するという欠点を有する。そこで、木質材料である集成材を利用した座屈拘束ブレースを提案した。提案したブレース材は、鋼板の弱軸方向に二つの集成材を、鋼板を挟み込むように設置したものである。本論では、提案したブレース材の有効性および構造性能を確認するため、多くの試験体に対する静的繰返し実験を実施した。実験の結果、有効な断面設計を行い、有効な実験変数を選択した試験体では、圧縮側でも鋼板の降伏耐力に達するとともに高い変形性能を示し、座屈拘束ブレースとしての性能を有していることが確認された。一方、拘束材に木質材料を用いることによる特有な破壊状況も確認された。

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。そこで、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た¹⁾。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」が施行されたことに加え、近年の環境負荷の低い建設技術の要求や、国産木材の安定供給・流通の促進といった趨勢を受け、提案したものである。さらに、炭素貯蔵効果や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としては、鋼板に対し無垢の木材をPC鋼棒で接合して補剛するブレース材²⁾や角形鋼管の周りに集成材同士を接着剤で一体化して補剛する間柱³⁾、鋼板に対し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⁴⁾、鋼板に対し木質材料を炭素繊維やビスで接合して補剛するデバイス⁵⁾、鋼板に対し集成材をボルトで接合して補剛する耐震補強架構⁶⁾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、使用する材料、形状、製作方法等が異なっており、得られた知見に関しても独自性が高い。そのため、木質材料を鋼材の座屈拘束材として用いる技

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、基礎的な静的繰返し実験の概要および結果を示す。さらに、実験で見知した局所的な破壊形式に対して検討を行うとともに、様々な考察を行うことで実用化に向けた技術データの蓄積を行う。なお、本論は、文献^{1,8,9)}の一部に新たな実験結果や知見を追加し、再構成、加筆したものである。

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¹⁾。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、この拘束材同士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。拘束材同士をボルトで一体化させる意図は、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するため、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ためである。さらに、ボルトで締め付けることによって、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. 静的繰り返し実験

(1) 試験体概要

本実験の試験体一覧を表-1に、代表的な試験体の形状および寸法を図-2および図-3に示す。表中のシリーズとは実験を行った時期が違うことを示しており、その数字が大きくなるほど後の実験であり、様々な改良が加えられている。また、図中A部は試験体の中間部、C部は端部で芯材の断面が十字となっている部分、B部はそれらの中で軸方向のクリアランスが存在する部分である。

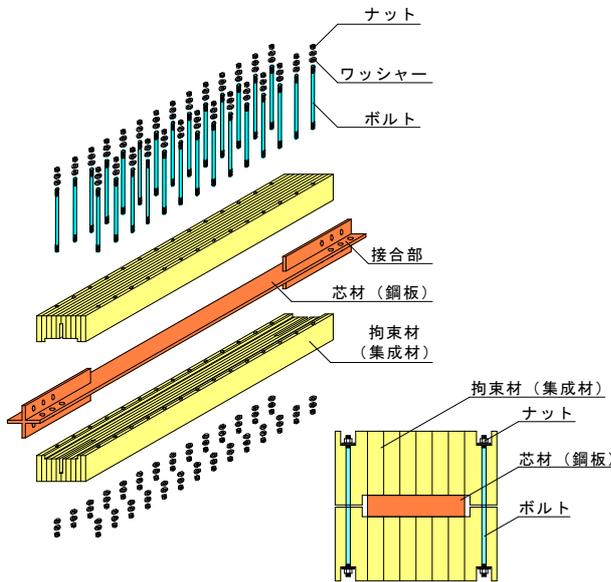


図-1 提案する座屈拘束鋼板ブレース

実験パラメータとしては、拘束材の断面、芯材断面、合計クリアランス量、ボルトの設置量、ダボ筋の有無、ボルトの孔径、テフロンシートの有無、拘束材部材端部の芯材の強軸方向（以下、板幅方向）へのクリアランス幅の有無を採用した。

試験体は、およそ1/2スケールとし、拘束材の長さ、芯材の降伏部の長さは全て同じである。

試験体の拘束材に関しては文献¹⁰¹¹⁾を参考に以下の式により断面設計を行った。

$$M^B = \frac{N_{cu}(a+s)}{1 - \frac{N_{cu}}{N_{cr}^B}} \leq M_y^B \quad (1)$$

$$N_{cu} = d\alpha \cdot N_y \quad (2)$$

$$N_{cr}^B = \frac{\pi^2 \cdot E_B \cdot I_B}{L_B^2} \quad (3)$$

ここで、
 M^B : 拘束材中央の曲げモーメント
 M_y^B : 拘束材の曲げ降伏耐力
 N_{cu} : 芯材の降伏後最大軸力
 a : 芯材の初期たわみ ($=L_B/1000$)
 s : 芯材と拘束材間のクリアランスの合計
 $d\alpha$: 芯材の耐力上昇率
 N_y : 芯材の降伏軸力
 N_{cr}^B : 拘束材のオイラーの座屈荷重
 E_B : 拘束材のヤング係数
 I_B : 拘束材の断面二次モーメント
 L_B : 有効座屈長さ (芯材降伏部長さ)

拘束材の曲げ強度と曲げ剛性の関係を文献¹⁰¹¹⁾を参考に、以下の式を用いて無次元化して表したものを図-4に示す。

$$m_y^B = \frac{M_y^B}{N_{cu} \cdot L_B} \quad (4)$$

$$n_E^B = \frac{N_{cr}^B}{N_{cu}} \quad (5)$$

ここで、
 m_y^B : 無次元化曲げ強度
 n_E^B : 無次元化曲げ剛性

表-1 試験体一覧

シリーズ	試験体番号	拘束材断面		芯材断面		降伏部長さ L_g (mm)	合計 クリアランス s (mm)	ボルト配置 (M8, φ9)			ダボ筋 (φ9)	ボルト 孔径 (mm)	座金 外径 (mm)	テフロン シート	その他
		幅 b (mm)	せい h (mm)	厚 t (mm)	幅 w (mm)			A部	B部	C部					
0シリーズ	WB1	150	125	12	90	2000	2	2列×23本@73.3	2列×4本×2箇所	2列×2本×2箇所		9	18	○	
	WB2	150	125	12	90	2000	2	2列×13本@125.7	2列×4本×2箇所	2列×2本×2箇所		9	18	○	
	WB3	150	125	12	90	2000	2		2列×4本×2箇所	2列×2本×2箇所		9	18	○	
1シリーズ	WB11	150	125	12	90	2000	0	2列×7本@190	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所		9	18		2次接着
	WB12	150	125	12	90	2000	1	2列×7本@190	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所		9	18		2次接着
	WB13	150	150	12	90	2000	0	2列×11本@126.7	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所		9	18		2次接着
	WB14	150	150	12	90	2000	1	2列×11本@126.7	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所		9	18		2次接着
	WB15	200	125	12	90	2000	0	2列×6本@217.1	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所		9	18		2次接着
	WB16	200	125	12	90	2000	1	2列×6本@217.1	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所		9	18		2次接着
	WB17	150	125	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所		9	30		2次接着
	WB18	150	150	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所		9	30		2次接着
2シリーズ	WB21	150	125	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所		9	30		
	WB22	150	150	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所		9	30		
	WB23	150	125	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所	40本	9	30		
	WB24	150	150	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所	40本	9	30		
	WB25	150	125	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所		11	30		
	WB26	150	150	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所		11	30		
	WB27	150	125	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所	74本	9	30		
	WB28	150	150	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所		9	30	○	
3シリーズ	WB31	170	130	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所	42本	9	30	○	端部拡幅
	WB32	170	130	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所	74本	9	30	○	端部拡幅
	WB33	170	140	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所	42本	9	30	○	端部拡幅
	WB34	170	140	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所	74本	9	30	○	端部拡幅
	WB35	170	150	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所	42本	9	30	○	端部拡幅
	WB36	170	150	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所	74本	9	30	○	端部拡幅
	WB37	170	150	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所	42本	9	30	○	端部拡幅 2.0%繰返し
	WB38	170	125	9	90	2000	0	2列×17本@90	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所	52本	9	30	○	端部拡幅
	WB39	170	150	16	90	2000	0	2列×8本@160	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所	58本	9	30	○	端部拡幅
	WB35-2	170	150	12	90	2000	0	2列×12本@120	2列×3本×2箇所	2列×1本×2箇所	42本	9	30	○	

黄色 : 主要な実験パラメータ

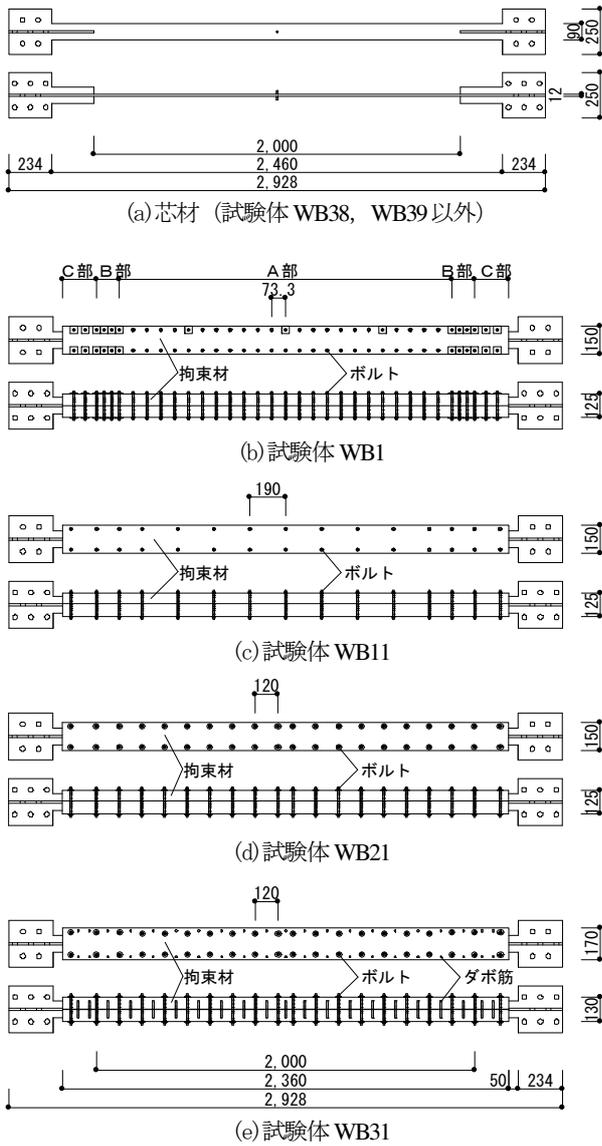


図-2 代表的な試験体

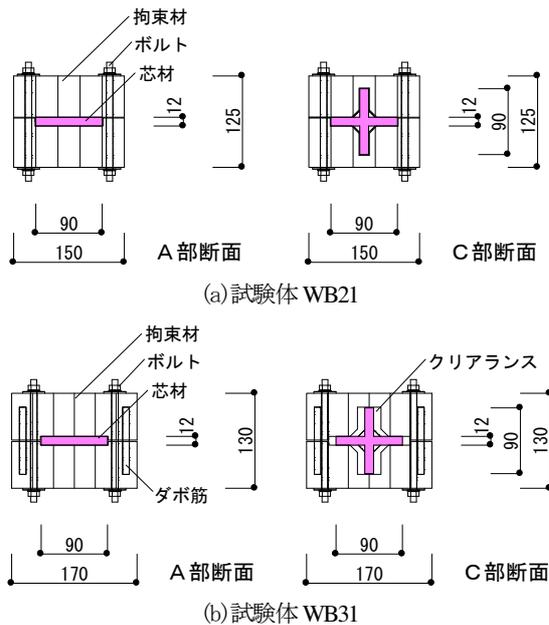


図-3 試験体断面

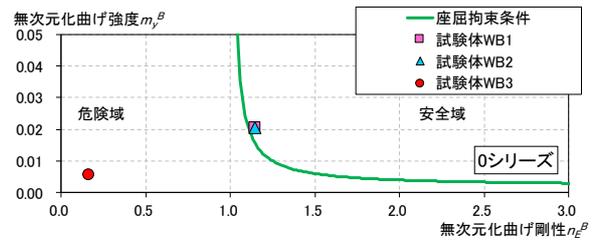
この結果、試験体WB3のみが危険域に存在する試験体であり、他の試験体はすべて安全域に存在している。

芯材と拘束材間の合計クリアランスに関しては、2シリーズ以降、2次接着を止めてボルト（M8、軸部φ9の鋼材）にて締め付ける製作方法に変更したことから設計上はゼロとした。

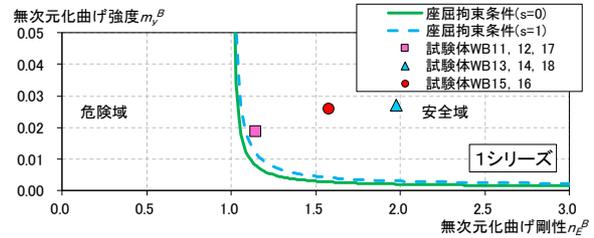
一方、2次接着を止めたことで、拘束材の表材と裏材が一体化しない可能性が生じる。すなわち、二つの部材間に発生するせん断力に対して変形が発生してしまい、芯材に対する拘束効果が不足することが考えられる。そこで、発生すると想定されるせん断力に対する抵抗要素として、ボルト（M8、軸部φ9の鋼材）とダボ筋（φ9の鋼材）を設置した。

0シリーズの実験が終了時に、拘束材が破壊した近傍では座金がめり込む状況が確認された。そこで、1シリーズでは座金の外径をパラメータとして設定するとともに、2シリーズ以降は大きな外径の座金を採用した。

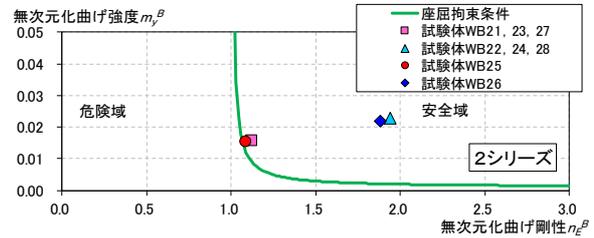
クリアランス管理の観点から、テフロンシートの使用



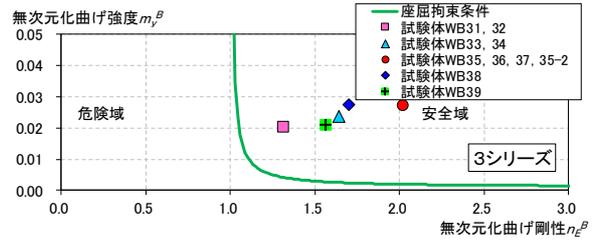
(a)0シリーズ



(b)1シリーズ



(c)2シリーズ



(d)3シリーズ

図-4 試験体の曲げ強度と曲げ剛性の関係

を1シリーズでは採用しなかったが、2シリーズにおいてその効果が確認されたことから、3シリーズでは芯材と拘束材の間にテフロンシートを設置した。

さらに3シリーズでは、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、拘束材と芯材が接触しないように拘束材材端部に板幅方向へのクリアランス拡幅を行った。

(2) 使用材料

試験体で使用した鋼板および集成材の材料試験結果を表-2および表-3に示す。鋼板の材料特性は、試験片の平均値を採用した。集成材の材料特性は、文献¹²⁾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。

(3) 加力概要

加力装置を図-5に示す。加力は逆対称加力装置を用い、鉛直ジャッキ2本で上部加力梁の水平を保ちながら軸力を載荷する方法とした。水平ジャッキは変形を固定しているため、上下変形によって回転分の水平変形が生じることになるが、今回の実験の範囲では微量であることから無視した。加力は本ブレースの軸方向に対して、静的正負交番繰返し載荷とし、圧縮側を正載荷とした。

加力サイクルは芯材の降伏までは荷重制御とし、降伏荷重（計算耐力） P_y に対して4段階の繰返し荷重を加えた。その後は変位制御とし、軸変形量で $\pm 10\text{mm}$ 間隔の変形で、2サイクルずつの正負交番繰返しとした。加力サイクルを表-4に示す。ここで、芯材の降伏部長さは全試験体とも2000mmであることから、 $\pm 20\text{mm}$ が軸ひずみで1.0%に相当する。一方、試験体WB37に関してのみ、荷重制御として $\pm 1/4P_y$ 、 $\pm 4/4P_y$ の2段階の繰返し荷重を加え、その後は変位制御として $\pm 40\text{mm}$ ($\pm 2.0\%$) の変形を試験

体の耐力が低下するまで繰り返し行った。

(4) 計測概要

実験では、軸力 P を2基の鉛直ジャッキに取り付けたロードセルの合計にて、軸方向変形 δ を試験体の接合部間に取り付けた2台の高感度変位計の平均にて計測した。また、芯材の各所のひずみ量を貼付したひずみゲージにて計測した。変位計の計測位置を図-5中に、ひずみゲージの貼付位置を図-6に示す。

4. 実験結果

(1) 荷重-軸変形関係

代表的な試験体の軸力 P と軸変形 δ の関係を図-7に示す。なお、ここでは圧縮荷重、圧縮変形を正載荷側として示している。さらに図中には、芯材の計算耐力（降伏荷重）も示すとともに、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。また、実験結果一覧を表-5に示す。表中、芯材降伏の欄が空白である箇所は実験中に芯材に貼付したひずみゲージが拘束材と接触し、繰返し変形することで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、拘束材の断面の大小に関わらず、図-4において曲げ強度と曲げ剛性の関係が安全域にある全ての試験体において、圧縮側で芯材が降伏し、計算耐力に達す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性能を有していることが確認された。

0シリーズの「試験体WB1, WB2, WB3」の結果から、拘束材の表材と裏材を一体化させるボルトの必要性が確認された。

表-2 材料試験結果（芯材）

シリーズ	鋼材	規格	降伏点 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	降伏歪 (μ)
0シリーズ	PL-12	SS400	307	452	185	1663
1シリーズ	PL-12		322	474	199	1616
2シリーズ	PL-12		310	465	187	1661
3シリーズ	PL-12		310	465	187	1661
	PL-9		294	426	204	1446
	PL-16		290	450	206	1411

表-3 材料試験結果（集成材）

シリーズ	材種	縦横方向		縦横直交方向		直交方向		めり込み 降伏強さ (N/mm^2)
		圧縮強さ (N/mm^2)	圧縮ヤング係数 (kN/mm^2)	曲げ強さ (N/mm^2)	曲げヤング係数 (kN/mm^2)	曲げ強さ (N/mm^2)	曲げヤング係数 (kN/mm^2)	
0シリーズ	カラマツ	48.9	10.8	58.0	10.6	-	-	2.92
1シリーズ		48.8	11.2	55.8	11.1	2.96	0.41	2.43
2シリーズ		49.7	11.5	46.2	10.7	5.05	0.37	2.89
3シリーズ		40.0	9.1	47.7	9.6	4.65	0.33	2.11

表-4 加力サイクル

サイクル	1	2	3	4
荷重制御	$\pm 1/4P_y$	$\pm 2/4P_y$	$\pm 3/4P_y$	$\pm 4/4P_y$
サイクル	5.6	7.8	9.10	11.12
変位制御 (軸ひずみ)	$\pm 10\text{mm}$	$\pm 20\text{mm}$	$\pm 30\text{mm}$	$\pm 40\text{mm}$
	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%
				2.5%
				3.0%
				3.5%

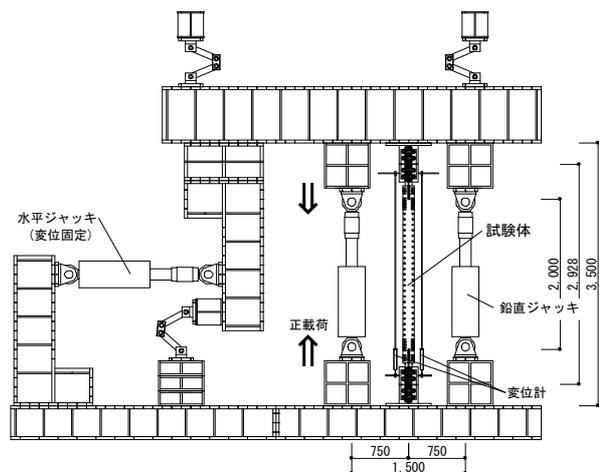


図-5 加力装置

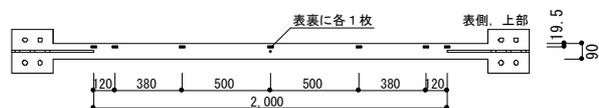


図-6 芯材のひずみゲージ貼付位置

1シリーズでは、0シリーズの結果を考慮して2次接着を行っている。その結果、「試験体 WB11, WB13, WB15」, 「試験体 WB12, WB14, WB16」, 「試験体 WB17, WB18」を比較すると拘束材の断面二次モーメントの大きな試験体の方が、変形性能が良い。また、「試験体 WB11, WB12」, 「試験体 WB13, WB14」, 「試験体 WB15, WB16」を比較するとクリアランスが小さい試験体の方が、変形性能の良いことが確認された。更に、「試験体 WB11, WB17」, 「試験体 WB13, WB18」を比較すると座金の外径を大きくし、ボルトの配置も密とした方が変形性能は良い。

2シリーズでは、製作性を考慮して2次接着を行っていない。その結果、「試験体 WB21, WB22」, 「試験体 WB23, WB24」を比較すると拘束材の断面の大きな試験体の方が、変形性能が良い。また、「試験体 WB21, WB23, WB27」, 「試験体 WB22, WB24」を比較するとダボ筋が入った試験体の方が変形性能の良い傾向がある。ただし、ダボ筋を約2倍に増やしたとしても性能は向上するとは限らない結果が得られた。さらに、「試験体 WB25, WB26」のように、ボルトの孔径の大きな試験体では変形性能が著しく低い。「試験体 WB22, WB28」を比較すると、テフロンシートを挿入した試験体では高い変形性能を示す結果となった。

試験体WB25, WB26に関してはボルト用鋼材の外径φ9に対し、その孔径がφ11と大きな試験体である。そのため、拘束材の表材と裏材が一体化できず、材間で生じるせん断力に対して変形が発生することで芯材に対する拘束効果が不足し、全体座屈が発生したと考えられる。したがって、拘束材の表材と裏材は強固に一体化する必要があると言え、これは0シリーズの結果とも対応する。

ダボ筋を採用した試験体WB23はWB21に比べて変形性能の良い傾向が見られるが、ダボ筋をより多く入れた試験体WB27であっても、その効果は変わらない。このことから、必要なダボ筋の量さえ採用すれば、十分な拘束効果を得られるものと考えられる。

テフロンシートを採用した試験体WB28は採用していない試験体WB22と比べ、変形性能は向上しているにも関わらず最大荷重が45kN程度低い結果となった。これは、テフロンシートによって芯材と拘束材の間での摩擦が軽減され、拘束材に伝達していた応力が減少したためと考察される。したがって、拘束材に過剰な力が作用することを防ぐ理由からも採用するべきと考えられる。

3シリーズでは、実際に構造躯体に組み込まれることを想定して、拘束材が芯材と接触しないように部材端部に板幅方向へのクリアランス拡幅を行っている。その結果、「試験体 WB31, WB33, WB35」を比較すると、これまでと同様に拘束材の断面の大きな試験体の方が、変形性能が良い。しかし、「試験体 WB32, WB34, WB36」

を比較すると必ずしも断面が大きい方が、変形性能が良いといった結果は得られなかった。また、「試験体 WB31, WB32」, 「試験体 WB33, WB34」, 「試験体 WB35, WB36」を比較すると拘束材の断面が小さい試験体ではダボ筋が入った試験体の方が変形性能は良い傾向を示すが、拘束材の断面が大きな場合はその効果は見

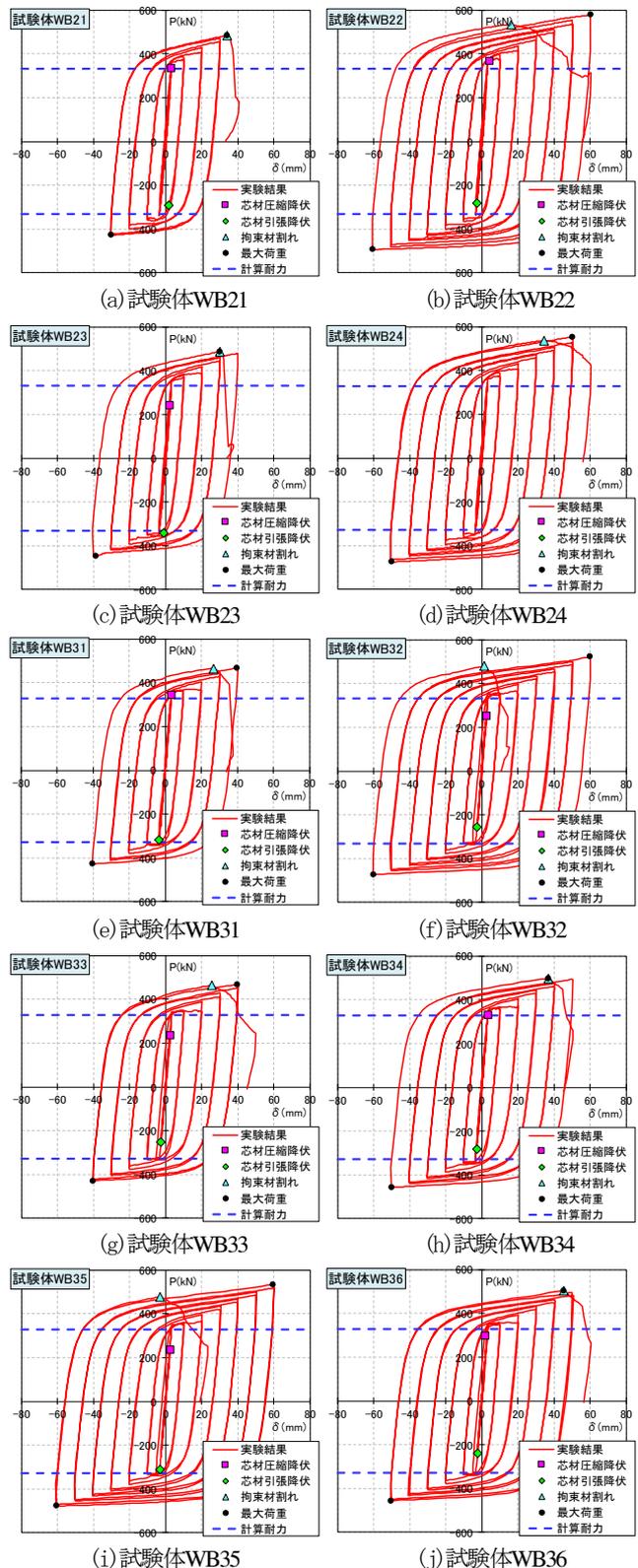


図-7 荷重-軸変形関係

られなかった。2.0%の軸ひずみでの繰返し試験を行った「試験体 WB37」では、2.0%を6周するとした十分な変形性能を示した。図-4において曲げ強度と曲げ剛性の関係が同様な値であり、芯材の板厚を変更した「試験体 WB33, WB34, WB38, WB39」を比較すると、芯材厚が薄い試験体の方が変形性能の良い結果が得られた。一方、部材端部の拡幅をパラメータとした「試験体 WB35, WB35-2」を比較すると、拡幅処理を施したとしても変形性能の低下は少ないことが確認された。

(2) 試験体の損傷状況

代表的な試験体の実験時終了後の状況と、解体した際の芯材と拘束材の状況を写真-1に示す。写真の右側が実験時の試験体の上部となっている。また、試験体名の次の()内には試験体の向きを示している。さらに、写真-2に試験体WB18の板厚方向への局部座屈と拘束材の破壊状況(局部破壊)を、写真-3に試験体WB22の板幅方向への局部座屈と拘束材の破壊状況を示す。

この結果、表-5に示す結果のように、試験体WB11やWB18では局部破壊、試験体WB21では全体座屈、試験体WB31やWB22では板幅方向への座屈による破壊によって終局に達する結果となっている状況が分かる。

5. 考察

(1) 局部破壊の検討

本ブレースでは、写真-2に示すような芯材が板厚方向へ局部座屈することで、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)が生じる現象が得られた。これは、文献²⁷⁾でも報告されている。そこで、文献¹⁰⁾¹¹⁾を参考に式(6)により計算される押出力に対して、図-8に示す拘束材のせん断、曲げ、めり込み破壊に対する検討を行う。

$$P_{rd} = \frac{4(s + v_p \epsilon_t t)}{L_p} N_{cu} \quad (6)$$

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)
 ϵ_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
 N_{cu} : 芯材の降伏後最大軸力

式(6)によって算出される押出力およびせん断破壊、曲げ破壊、めり込み破壊といった局部破壊に関する検討結果を表-6に示す。ここで、せん断破壊面は図-8(a)に示す芯材が押し出す2面であると考え、その幅は芯材が接触した箇所から45°で応力が広がると想定して、せん断耐力を定めた。一方、曲げ破壊は、拘束材断面にお

表-5 実験結果一覧(正載荷側)

試験体番号	計算耐力		最大荷重		芯材降伏		最大荷重 / 計算耐力	破壊形式	確認できた圧縮軸ひずみと繰返し数
	荷重 (kN)	荷重 (kN)	変形 (mm)	荷重 (kN)	変形 (mm)	荷重 (kN)			
WB1	324	336	9.2	248	2.6	1.04	局部破壊	0.5%×2周	
WB2	325	343	4.9	209	0.7	1.05	局部破壊	0.5%×2周	
WB3	323	194	2.3	179	2.6	0.60	全体座屈	達せず	
WB11	341	431	21.8	316	3.3	1.26	局部破壊	1.0%×3周	
WB12	341	374	8.3	350	3.7	1.10	局部破壊	0.5%×2周	
WB13	341	516	35.7	329	3.4	1.51	局部破壊	1.5%×3周	
WB14	342	383	17.1	259	2.7	1.12	局部破壊	1.0%×1周	
WB15	341	449	29.9	240	1.0	1.32	局部破壊	1.5%×1周	
WB16	341	396	16.5	358	3.8	1.16	局部破壊	0.5%×2周	
WB17	341	529	40.1	308	3.0	1.55	局部破壊	2.0%×2周	
WB18	341	553	34.9	323	3.5	1.62	局部破壊	2.5%×1周	
WB21	331	483	34.0	336	3.1	1.46	全体座屈	1.5%×3周	
WB22	330	577	60.3	368	4.4	1.75	板幅方向への破壊	3.0%×1周	
WB23	330	495	30.1	244	2.3	1.47	全体座屈	2.0%×1周	
WB24	329	554	50.4	308	3.0	1.68	板幅方向への破壊	2.5%×2周	
WB25	327	384	7.2	319	3.0	1.17	全体座屈	0.5%×2周	
WB26	329	417	20.0	344	3.2	1.27	全体座屈	1.0%×2周	
WB27	329	486	40.0	317	2.0	1.48	全体座屈	2.0%×1周	
WB28	329	532	60.2	278	1.4	1.62	全体座屈	3.0%×2周	
WB31	327	467	39.7	344	3.5	1.43	板幅方向への破壊	2.0%×1周	
WB32	330	521	60.0	252	2.5	1.58	板幅方向への破壊	3.0%×1周	
WB33	328	467	39.7	236	2.5	1.43	板幅方向への破壊	2.0%×2周	
WB34	327	495	36.9	330	3.3	1.52	板幅方向への破壊	2.5%×1周	
WB35	328	532	59.5	236	2.4	1.62	板幅方向への破壊	3.0%×2周	
WB36	328	503	45.6	297	1.8	1.53	板幅方向への破壊	2.5%×3周	
WB37	330	491	40.7	284	2.9	1.49	板幅方向への破壊	2.0%×6周	
WB38	233	366	28.0	241	3.3	1.57	板幅方向への破壊	2.5%×2周	
WB39	413	610	27.0	292	2.3	1.48	板幅方向への破壊	2.0%×1周	
WB35-2	327	556	62.9	220	2.4	1.70	板幅方向への破壊	3.0%×3周	

△: 計測できていない箇所



(a) 試験体WB11 (正面, 右側) : 局部破壊



(b) 試験体WB21 (正面, 右側) : 全体座屈



(c) 試験体WB31 (正面, 左側) : 板幅方向への破壊

写真-1 試験体の芯材と拘束材の状況

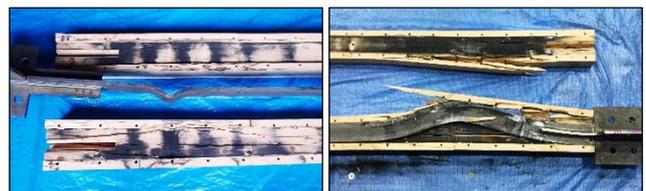


写真-2 板厚方向への

局部座屈と拘束材の破壊状況
(試験体WB18)

写真-3 板幅方向への

局部座屈と拘束材の破壊状況
(試験体WB22)

るボルト位置を支点と仮定し、芯材からの押出力を分布荷重として発生モーメントを計算した。めり込み耐力は、文献¹¹⁾を参考にめり込み幅を芯材厚 t と仮定し、めり込

み幅と芯材幅で求まるめり込み面積に、めり込み降伏強さを掛けて計算した。座金のめり込み耐力は、ボルト2本で押出力に抵抗するとして座金2か所分の合計として求めた。ここで、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を用いた。

一方、式(6)中の L_p は座屈波長であり、以下の式(7)によって計算されるが、この値は文献¹⁰⁾にも示されるようにおおむね $L_p \approx 10t$ となる。写真-2に示した座屈波を計測すると、おおむね110~130mm ($\approx 10t=120\text{mm}$)となっており、よく対応した結果が得られている。

$$L_p = \pi t \sqrt{\frac{0.05E}{3\sigma_y}} \quad (7)$$

ここで、
 L_p : 座屈波長
 t : 芯材の板厚
 E : 芯材のヤング係数
 σ_y : 芯材の降伏点

表-6の結果、0, 1シリーズの試験体では局部破壊の可能性があり、もしくは発生する可能性が高い試験体が多い。一方、2, 3シリーズでは全ての試験体とも局部破壊に対して余裕のある試験体となっている。これは、2, 3シリーズの試験体では2次接着を行わず、ボルトにて締め付けクリアランスがゼロとなるような製作方法に変更したことから計算による押出力が小さくなったためである。この結果は、表-5に示した実験結果とも良く対応している。すなわち、0, 1シリーズの試験体では局部破壊が発生したことで、拘束材としての曲げ剛性や曲げ強度は十分であったにも関わらず、大変形までの変形性能が得られなかったものと考察される。

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、実用化段階では、この局部破壊に対する検討が必要と言える。

表-6 局部破壊の検討結果

シリーズ	試験体番号	面外への押出力		発生モーメント		集成材の曲げ耐力		集成材のめり込み耐力		座金のめり込み耐力		
		L_p (mm)	P_{cr} (kN)	M (kN・mm)	M_u (kN・mm)	C_u (kN)	C_{u1} (kN)					
0シリーズ	WB1	119.3	34.7	18.0	563	84	8.7	3.1	0.52	0.15	0.25	0.09
	WB2	119.3	34.7	18.0	563	84	8.7	3.1	0.52	0.15	0.25	0.09
	WB3	119.3	34.7	18.0	563	84	8.7	3.1	0.52	0.15	0.25	0.09
1シリーズ	WB11	121.1	2.0	15.5	33	89	8.7	3.1	7.63	2.70	4.29	1.52
	WB12	121.1	18.9	15.2	308	87	8.7	3.1	0.80	0.28	0.46	0.16
	WB13	121.1	2.0	23.1	33	162	8.7	3.1	1.38	4.91	4.29	1.52
	WB14	121.1	18.9	22.8	308	159	8.7	3.1	1.20	0.52	0.46	0.16
	WB15	121.1	2.0	15.5	58	89	8.7	3.1	7.63	1.53	4.29	1.52
	WB16	121.1	18.9	15.2	545	87	8.7	3.1	0.80	0.16	0.46	0.16
	WB17	121.1	2.0	15.5	33	89	8.7	10.4	7.63	2.70	4.29	5.11
	WB18	121.1	2.0	23.1	33	162	8.7	10.4	11.38	4.91	4.29	5.11
2シリーズ	WB21	119.4	2.0	18.5	33	152	10.3	12.3	9.15	4.63	5.12	6.09
	WB22	119.4	2.0	27.5	33	276	10.3	12.3	13.64	8.42	5.12	6.09
	WB23	119.4	2.0	18.5	33	152	10.3	12.3	9.15	4.63	5.12	6.09
	WB24	119.4	2.0	27.5	33	276	10.3	12.3	13.64	8.42	5.12	6.09
	WB25	119.4	2.0	18.5	33	152	10.3	12.3	9.15	4.63	5.12	6.09
	WB26	119.4	2.0	27.5	33	276	10.3	12.3	13.64	8.42	5.12	6.09
	WB27	119.4	2.0	18.5	33	152	10.3	12.3	9.15	4.63	5.12	6.09
	WB28	119.4	2.0	27.5	33	276	10.3	12.3	13.64	8.42	5.12	6.09
3シリーズ	WB31	119.4	2.0	14.7	33	159	8.5	10.1	7.28	4.86	4.21	5.02
	WB32	119.4	2.0	14.7	33	159	8.5	10.1	7.28	4.86	4.21	5.02
	WB33	119.4	2.0	17.3	33	203	8.5	10.1	8.57	6.20	4.21	5.02
	WB34	119.4	2.0	17.3	33	203	8.5	10.1	8.57	6.20	4.21	5.02
	WB35	119.4	2.0	20.1	33	255	8.5	10.1	9.96	7.77	4.21	5.02
	WB36	119.4	2.0	20.1	33	255	8.5	10.1	9.96	7.77	4.21	5.02
	WB37	119.4	2.0	20.1	33	255	8.5	10.1	9.96	7.77	4.21	5.02
	WB38	96.0	1.3	14.2	21	151	6.4	10.1	10.97	7.19	4.92	7.82
	WB39	172.8	2.4	19.0	39	233	11.3	10.1	7.89	5.98	4.72	4.22
	WB35-2	119.4	2.0	20.1	33	255	8.5	10.1	9.96	7.77	4.21	5.02

(2) 断面余裕度との関係

式(1)の関係を変換すると、次の式(8)の関係が得られる。ここで、左辺は拘束材の曲げ剛性、右辺は必要曲げ剛性を表している。

$$E_B \cdot I_B \geq \frac{N_{cu} \cdot L_B^2}{\pi^2 \left\{ 1 - \frac{N_{cu}(a+s)}{M_y^B} \right\}} \quad (8)$$

ここで、式中の記号は3.1節による。

左辺の曲げ剛性を右辺の必要曲げ剛性で除した安全率を断面余裕度と定義する。各試験体の累積塑性変形倍率（正載荷側と負載荷側の和）と断面余裕度の関係を図-9に示す。図中の記号は、表-5に示した破壊形式（■：局部破壊、●：全体座屈、▲：板幅方向への破壊）で分類し、塗り潰した記号は圧縮側の軸ひずみで2.0%以上の結果が得られた試験体、塗り潰していない記号は2.0%未満の結果が得られた試験体である。

この結果、圧縮軸ひずみで2.0%以上の結果が得られた試験体は、破壊形式の違いに関係なく累積塑性変形倍率で150以上の値を示し、かつ、断面余裕度は1.0以上となっている。ただし、断面余裕度が1.0以上であり、全体座屈であっても変形性能が悪かった試験体（2.0%未満、記号：○）は、ボルト径の大きな試験体WB25、WB26や拘束材の断面が小さくダボ筋を用いていない試験体WB21である。式(8)による断面余裕度は図-4の関係を表していることから、局部破壊を防止し、拘束材の表材と裏材の一体化を図れば、断面余裕度が1.0以上あれば十分な変形性能を発揮できるものと考察される。

また、この図は右肩上がりの傾向を示しており、十分な断面余裕度を有することで、さらに高い変形性能を発揮できるものと考えられる。

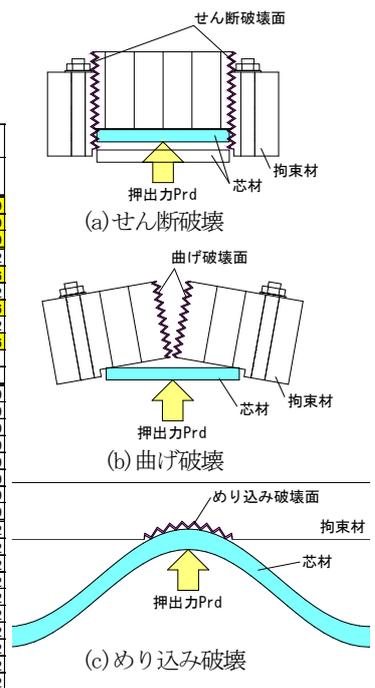


図-8 局部破壊

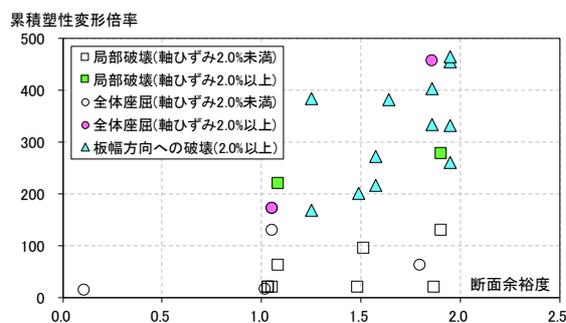


図-9 累積塑性変形倍率と断面余裕度の関係

6. まとめ

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構造性能を確認するために基礎的実験を実施した。本研究によって得られた知見を以下に示す。

- 1) 拘束材である集成材の断面を適切に設計することで、座屈拘束ブレースとしての性能を発揮できる。
- 2) 本ブレースの特性として、「拘束材の断面二次モーメントが大きい試験体の方が変形性能は良い。」、「クリアランスが小さい試験体の方が変形性能は良い。」、「座金の外径を大きくし、ボルトの配置も密とした方が変形性能は良い。ただし、ボルトの孔径の大きな試験体では変形性能が著しく低い。また、ダボ筋が入った試験体の方が変形性能の良い傾向が見られる。」、「テフロンシートを挿入した試験体では高い変形性能を示す。」、「芯材の幅厚比が大きい試験体の方が変形性能は良い。」、「部材端部に板幅方向へのクリアランス拡幅を行った試験体であっても変形性能の低下は少ない。」ことが確認された。
- 3) 本実験で得られた局部破壊といった破壊形式は、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ものであることから、実用段階では検討が必要である。
- 4) より十分な曲げ強度や曲げ剛性を有する拘束材を用いることによって、さらに高い変形能力を有するブレースとなる可能性がある。

謝辞：本研究を進めるにあたり、元工学院大学 近藤龍哉博士（工学）、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) 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
- 2) 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, 2004.8
- 3) 加藤圭, 成原弘之, 森田仁彦, 安田聡: 角形鋼管を集成材により補剛したハイブリッド部材に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 Vol.C1, pp.939-940, 2016.8
- 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, 2018.9
- 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, 2019.9
- 6) 成原弘之, 加藤圭, 森田仁彦: 木材を補剛材に利用した鉄骨系耐震補強構法の開発 (その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 Vol.C1, pp.991-994, 2019.9
- 7) 伊藤万里, 鈴木公平, 中尾貞治, 津之下睦, 間野明人, 宮田雄二郎: 木質ラーメン構造を対象とした座屈拘束ブレースの開発 (その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 Vol.C1, pp.363-366, 2020.9
- 8) 深津尚人, 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4~5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.C1, pp.1343-1346, 2020.9
- 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6~8), 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.C1, pp.1311-1316, 2021.9
- 10) 日本建築学会: 鋼構造座屈設計指針, pp.73-82, 2018.2
- 11) T. Takeuchi and A. Wada: Buckling-Restrained Braces and Applications, Japan Society of Seismic Isolation, pp.11-24, 2017.10
- 12) 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, 2011.3

(Received September 10, 2021)

FUNDAMENTAL TEST OF THE BUCKLING-RESTRAINED STEEL-PLATE BRACES USING GLUED LAMINATED TIMBER

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, in order to confirm its structural performance, a statical loading test was conducted on a specimen of about 1/2 scale. The outline of the test and the test results are shown. 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.