

# エネルギー吸収を向上させた木造用座屈拘束ブレースの開発

Development of Buckling Restrained Braces for Wooden Frames with Large Energy Dissipation

吉田競人 栗山好夫

YOSHIDA Keito, KURIYAMA Yoshio

## 1. 序

地震などの水平力に抵抗するための方法は、種々提案されているところであるが、大きく分類すると三種類に分類される。即ち、耐震工法、免震工法そして制震工法である。この中で制震工法は、地震エネルギーを吸収することにより被害を抑制するという原理に基づく工法である。工事費、施工期間など他の工法と比較し、安く早いという特徴があるが、現在のところエネルギー吸収性能が設計に反映されていないため、その長所が知られておらず、これを利用した工法の採用は少ないというのが現状である。座屈拘束ブレース（BRB）はエネルギーを吸収する制震工法の代表的ものであるが木造への転用は図られていない。これは、丸鋼を BRB に転用することが困難なためである。本報告では、これまで提案<sup>1)</sup>した BRB と比較し、よりエネルギー吸収の向上を目的とした丸鋼使用の内部取り付け用 BRB の実験報告である。

## 2. BRB 単体実験概要

### 2.1 BRB 試験体概要

本試験に用いた BRB は、材質 SS400、直径 M6 の転造ねじによる芯ブレースと、炭素管の補剛材から構成されている。直径 M6 の芯ブレースと炭素鋼管の補剛材のみで構成した場合、両者の間隔が大きく、軸力が作用するとブレースに座屈が生じてしまう。これを防止するために芯ブレースの中間に適当な間隔でナットを配置し、その間にアルミ管を配置して座屈長さを調整している。これはナットを取り付ける手間の軽減を図り使用したものである。補剛材の構成は図 1 に示すとおりである。またブレースと木造フレームの金物（厚さ 3.2mm）の取り付け形状は図

2 に、材料特性を表 1 に示す。BRB 単体用試験体名は R6-1, 2, 3 の 3 体である。使用した補剛材の構成は表 2 に掲げてあるように、内管としてアルミ管  $\phi 18 \times 2$  と補剛材として  $\phi 27.2 \times 2.9$  鋼管を重ねて二重鋼管としたものを使用し、木造フレームと金物の取り付けにはコーチスクリュー  $\phi 10$  を 5 本使用した。



図 1 BRB の構成



図 2 BRB 取り付け金物

表 1 材料特性

	BRB 試験体	
	補剛材	芯ブレース
降伏点 (kN/mm <sup>2</sup> )	0.32	0.40
引張強さ (kN/mm <sup>2</sup> )	0.46	0.51
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	177.3	224.4

表 2 補剛材構成

		R6-1	R6-2	R6-3
ブレース材長		L=788mm (座屈有効長 708mm)		
補剛材	内管	$\phi 18 \times 2$ (I=0.33cm <sup>4</sup> )		
	外管	$\phi 27.2 \times 2.9$ (I=1.66cm <sup>4</sup> )		

### 2.2 BRB 単体実験結果

BRB 単体試験体の加力は変形制御とし、軸歪

を 0.1%から 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%まで増大する正負交番繰り返し、それぞれ 3 回の加力サイクルとした。試験体加力図および加力サイクルは図に示すとおりである。その荷重－変位曲線結果を図 4a から 4c に示す。R6－1, 2, 3 は歪度が 1.0%までは安定した履歴を示した。しかし、歪度が 1.5%を過ぎると圧縮荷重が増加する傾向を見せた。R6－1, 2, 3 の最大荷重はそれぞれ、10.43kN、10.41kN、10.44kN の値を示した。R6－1, 2, 3 の破断時歪度は全て 1.5%において生じたが、R6－1, 3 は繰り返し加力が 3 回目の際に破断し、R6－2 は繰り返し加力が 2 回目の際に破断するという違いがあった。

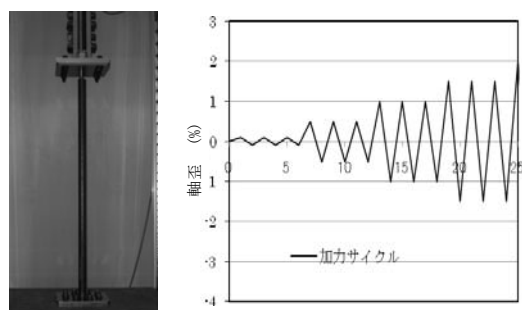


図 3 試験体加力図および加力サイクル

## 2.3 BRB 単体の減衰定数と加速度低減率

BRB の制振効果を検証するために荷重－変位曲線の最大荷重と変位を用い、等価減衰定数をそれぞれ(1)と(4)式より算出した。

$$h_{eq}(\delta_{max}) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{W}{\Delta W} \quad (1)$$

ここで

$W$  :履歴吸収エネルギー

$\Delta W$  :等価剛性による弾性エネルギー

$$\Delta W = \frac{1}{2} k_e \delta_{max}^2 \quad (2)$$

$$k_e(\delta_{max}) = \frac{Q(\delta_{max})}{\delta_{max}} \quad (3)$$

$$F_h = \frac{1.5}{1+10h} \quad (4)$$

等価減衰定数の算定結果を表 3 と図 5 に、加速度低減率の算定結果を表 4 と図 6 に示す。

これをみると、歪度が 0.5%, 1%および 1.5% に対し等価減衰定数はそれぞれ平均でほぼ 20%、35%及び 44%と高い性能を示す結果となった。また、これに伴う加速度低減率も軸歪が 1%を超えると効果が薄れるものの 0.5 から 0.28 に低減された。

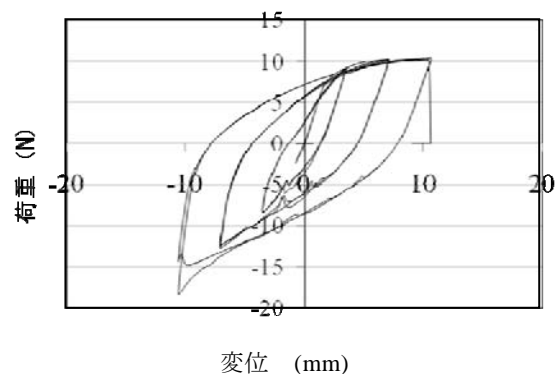


図 4a 荷重－変位曲線 (R6-1)

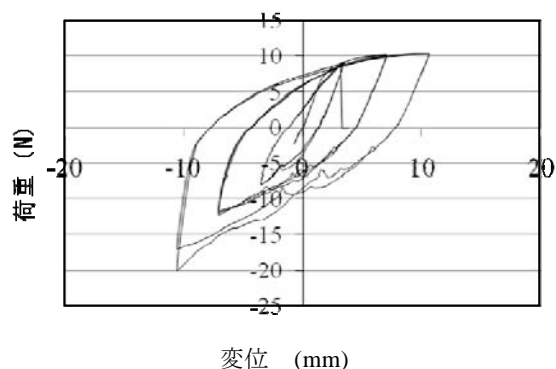


図 4b 荷重－変位曲線 (R6-2)

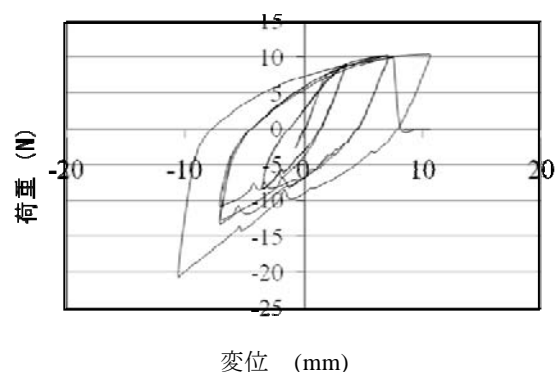


図 4c 荷重－変位曲線 (R6-3)

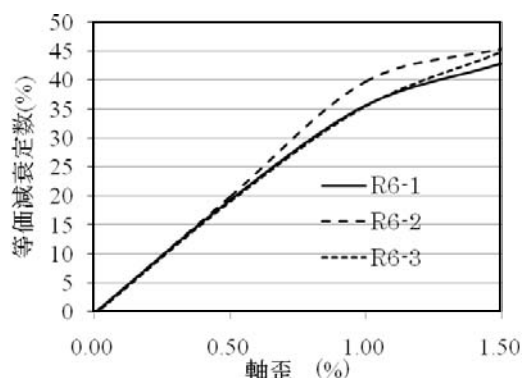


図5 軸歪－等価減衰定数 (BRB 単体)

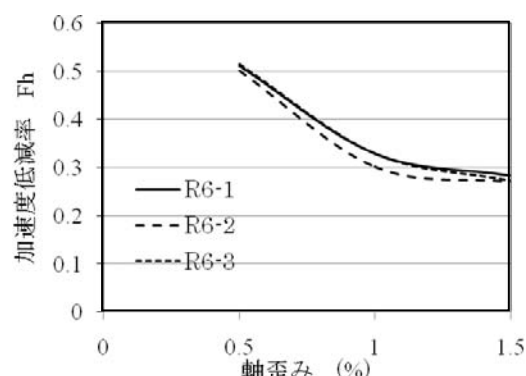


図6 軸歪－加速度低減率 (BRB 単体)

表3 等価減衰定数 (BRB 単体)

軸歪 (%)	試験体 (%)			
	R6-1	R6-2	R6-3	平均
0.5	19.36	19.98	19.12	19.49
1.0	35.60	39.71	35.54	36.75
1.5	42.95	45.42	44.82	44.40

表4 加速度低減率 (BRB 単体)

軸歪 (%)	試験体			
	R6-1	R6-2	R6-3	平均
0.5	0.511	0.500	0.515	0.501
1.0	0.329	0.302	0.329	0.320
1.5	0.283	0.271	0.274	0.276

### 3. 木造フレーム実験

#### 3.1 木造フレーム試験体概要

試験体は新築用としてブレースがフレーム面内に取り付けたタイプ、計3体を制作した。本試験体を使用した木造用フレームの軸組み寸法は幅0.91m、高さ2.73mの1Pタイプと幅1.82m、高さ2.73mの2Pタイプであり、土台、梁、柱か

ら構成されている。内付タイプ試験体のブレース取り付け形状は1Pタイプのものにブレースを2本(試験体名<sub>1</sub>PB2)設置したもの、同様の木造フレームにブレースを3本(試験体名<sub>1</sub>PB3)設置したもの、2Pタイプに方杖のように取り付けしたもの(試験体名<sub>2</sub>PB4)の3種類である。試験体図は図7に示すとおりである。

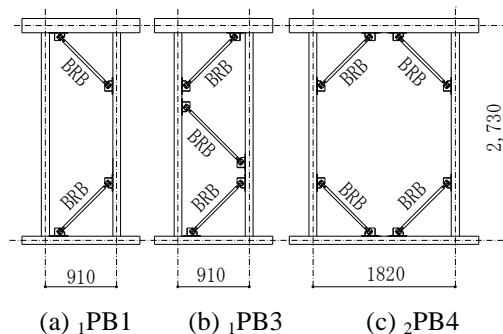


図7 試験体図

#### 3.2 木造フレーム実験結果

実験結果の結果一覧を表5に、荷重－変位曲線を図8aから図8cに、試験体加力前と試験体加力後の写真を図9aから図9cに示す。図10には破壊箇所の写真を示す。1PB2試験体は、履歴特性にスリップ型形状が見られた。最終過程においては、金物の変形が増大しコーチスクリューにせん断破壊が生じ、BRB芯ブレースが破断していた(図10a)。この時の最大荷重は、7.3kNであった。1PB3試験体も同様の挙動を示し、履歴にスリップ形状が見られ、最終過程において金物の取り付けに使用したコーチスクリューにせん断破壊を生じていた。その影響で金物が土台から外れていた。さらに、BRBが破断していた(図10b)。しかし、最大荷重は、先ほどの試験体より大きく8.84kNに達した。一方、2PB4試験体については、これも前述の2体の試験体と同様の挙動を示し、履歴にスリップ形状が見られ、最終過程において金物の取り付けに使用したコーチスクリューにせん断破壊(図10c)が生じると共にBRBの芯ブレースに破断が生じた。最大荷重は9.96kNに達した。1PB2、1PB3と2PB4の全試験体とも、BRB芯ブレースと金物に破断が見られる結果となった。壁倍率は表5に掲げる通り1PB3の試験体が最大値2.0を示し、2PB4の試験体は最低の1.3となった。

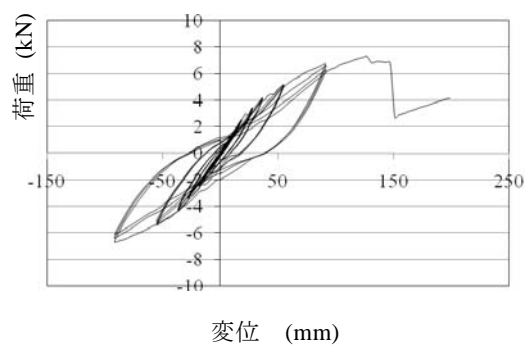


図 8a 荷重－変位曲線 ( $_1$ PB2)

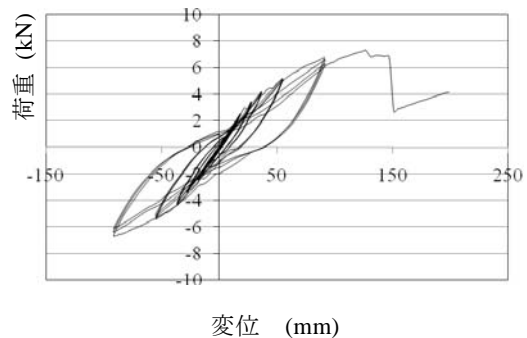


図 8b 荷重－変位曲線 ( $_1$ PB3)

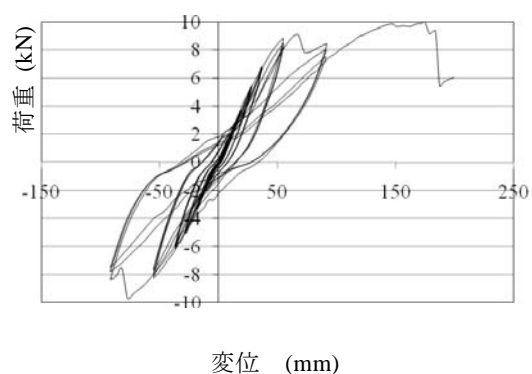


図 8c 荷重－変位曲線 ( $_2$ PB4)

表 5 試験結果一覧

	試験体		
	$_1$ PB2	$_1$ PB3	$_2$ PB4
壁倍率	1.5	2.0	1.3
初期剛性 K (kN/mm)	0.12	0.26	0.19
降伏耐力 $P_y$ (kN)	3.61	5.51	6.39
降伏変位 $\delta_y$ (mm)	31.0	21.1	34.4
終局耐力 $P_u$ (kN)	6.40	8.00	8.92
終局変位 $\delta_u$ (mm)	147.3	91.4	183.4
塑性率 $\mu$	2.68	2.99	3.83
構造特性係数 $D_s$	0.48	0.45	0.39

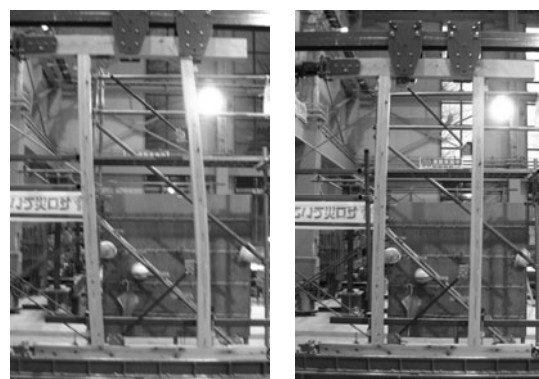


図 9a  $_1$ PB2 試験体実験前 (左) 実験後 (右)



図 9b  $_1$ PB3 試験体実験前 (左) 実験後 (右)

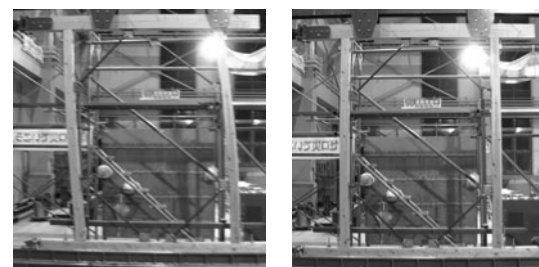


図 9c  $_2$ PB4 試験体実験前 (左) 実験後 (右)



図 10a  $_1$ PB2 破壊状況 図 10b  $_1$ PB3 破壊状況



図 10c  $_2$ PB4 破壊状況



3体の試験体ともブレースの全体座屈は見られなかったことから補剛材剛性は十分であるといえる。また、単体の試験結果ではスリップが見られなかったのに対し、木造フレームの試験体にスリップ形状が見られたのは、取り付け金物の剛性およびコーチスクリューの取り付け本数が不十分であったことが原因であると考えられる。

### 3.3 木造フレームの減衰定数と加速度低減率

木造フレーム実験を通して得られたそれぞれの試験体の減衰定数と加速度低減率の一覧を表6と表7に、変形角－減衰定数と変形角－加速度低減率を図11と図12に掲げる。柱頭、柱脚部のみを補強した<sub>1</sub>PB2と<sub>2</sub>PB4の減衰定数は変形角の進展とともに増大するものの、その割合は減少する傾向を示している。一方中央部分にも補強をしている<sub>1</sub>PB3にこの傾向は見られないことから、木造柱の曲げ剛性の不足により等価減衰定数の増大率が減少したと考えられる。このことから柱部分の剛性の増加および取り付け金物の改良により減衰定数の改善はこれ以上に見込まれると考えられる。

表6 等価減衰定数（フレーム）

	変形角 (rad)	試験体		
		<sub>1</sub> PB2	<sub>1</sub> PB3	<sub>2</sub> PB4
等価減衰定数 $h_e$ (%)	1/200	4.24	6.39	3.79
	1/150	4.98	7.79	4.68
	1/100	7.15	11.03	6.53
	1/75	8.00	12.00	7.87
	1/50	11.13	14.43	8.96
	1/30	11.99	19.30	10.34

表7 加速度低減率（フレーム）

	変形角 (rad)	試験体		
		<sub>1</sub> PB2	<sub>1</sub> PB3	<sub>2</sub> PB4
加速度低減率 $F_h$	1/200	1.05	0.92	1.09
	1/150	1.00	0.84	1.02
	1/100	0.87	0.71	0.91
	1/75	0.83	0.68	0.84
	1/50	0.71	0.65	0.79
	1/30	0.68	0.89	0.74

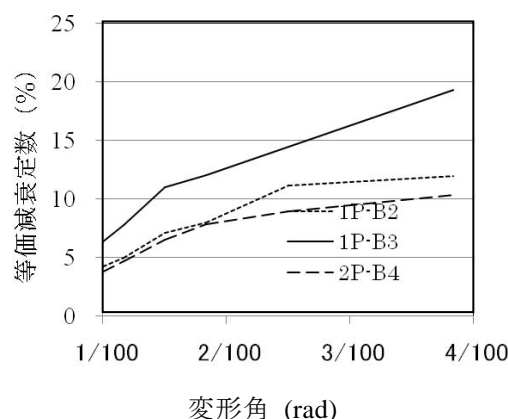


図11 変形角－等価減衰定数

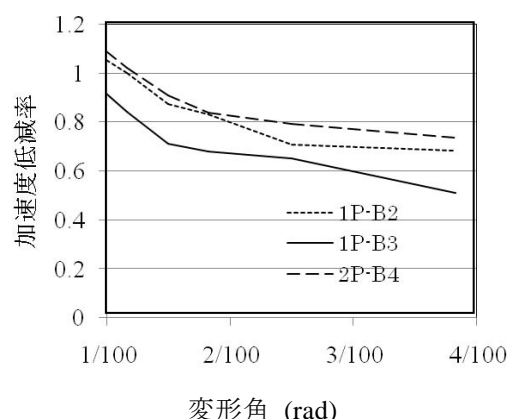


図12 変形角－加速度低減率

## 4. まとめ

木造住宅用座屈拘束ブレース（BRB）のエネルギー吸収向上を目的としたブレースの開発を行い、実験を通して検証した結果、以下の知見が得られた。

- (1) アルミ管をナットの一部として使用したBRBは、軸歪が0.5%程度で等価減衰定数がおおよそ20%、加速度低減率0.5と優れたエネルギー吸収性能を示した。
- (2) 木造フレーム実験を通し座屈拘束ブレースが全体座屈を生じなかったことから補剛材剛性は十分であった。
- (3) 取り付け金物の性能が不十分なためにフレームの履歴特性がスリップ形状を示した。
- (4) BRBを柱頭から柱脚まで取り付けるタイプの試験体は壁倍率において1Pタイプで

2.0、変形角  $1/100\text{rad}$  で減衰定数  $h_e$  が 11%、加速度低減率  $F_h$  が 0.71 と柱頭、柱脚のみを補強した場合と比較し高い性能を示した。

- (5) 柱頭、柱脚部のみを補強した試験体の減衰定数は変形角の進展とともに増大するものの、その割合は木造柱の曲げ剛性に影響される。
- (6) 木造用 BRB 自体は高いエネルギー吸収性能を示していることから、取り付け金物の改善を行うことにより、スリップ履歴の改善が行われより高い性能を有する BRB になりうる可能性が示された。

## 参考文献

- 1) 吉田、栗山：「座屈拘束ブレース（BRB）を使用した木造フレームの耐震補強」、職業能力開発総合大学校東京校紀要第 24 号、PP37-42、2009 年 3 月
- 2) 吉田、他：「鉄筋コンクリート補剛材によるアンボンドブレースの必要剛性に関する研究」日本建築学会論文報告集 No. 521、PP141-147、1999 年 7 月
- 3) 吉田、他：「有限要素法によるアンボンドブレースの接触解析（その 1 芯ブレース突起による不均一性がモードの分岐に及ぼす影響）」、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1、構造 III、PP875-876、2006
- 4) 吉田、栗山：「座屈拘束ブレースを利用した耐震補強方法の開発」、職業能力開発総合大学校東京校紀要第 25 号、PP63-66、2010 年 3 月