

＜研究ノート＞

木造用座屈拘束ブレースの開発

職業能力開発総合大学校 吉田 競人

Development of Buckling-Restrained Braces for Wooden Houses

Keito YOSHIDA

要約

現在木造用に採用されている地震に対する技術は、強度志向の耐震技術が主体であり、高層ビルに多く採用されている、地震エネルギーを吸収する制振技術はあまり採用されていない。しかし、安価で施工が比較的容易な制振技術は今後木造の耐震性を向上させるために必要な技術となる可能性がある。このことから、我々は、制振技術の一つである座屈拘束ブレースを木造用に開発し研究を行ってきた。本報告は、その性能を確認するために行った実験報告である。木造用に開発された本座屈拘束ブレースは、十分なエネルギー吸収を示した。また、この制震部材を取り付けたフレームは、取り付け配置の方法や取り付け金物の強度に改善の余地が見られたものの、それが反映できれば木造用制振部材として十分なエネルギー吸収を有する可能性が示された。

I はじめに

平成 23 年 3 月 11 日午後東北に発生したマグニチュード 9.0 の大地震は、東日本の太平洋沿岸部の各県を中心に広い地域において津波を発生させ、各地域に甚大な被害をもたらした。その被害内容は、津波によるものばかりに関心が向けられているが、地震そのものによる被害が多数報告されている¹⁾ことはあまり知られていないようである。その報告によると地震自体の被害は津波被害に劣らず甚大であり、改めて住宅の耐震性向上の必要性を我々に再認識させる災害であった。

現在の耐震技術は主に、耐震（剛構造と柔構造）、免震（アイソレータ+ダンパ）、制振（パッシブ制御とアクティブ制御）の 3 種類に分類される。本研究が対象とする座屈拘束ブレースは、このうちのパッシブ制御に属し弾塑性ダンパの履歴減衰型（変位型）になる。座屈拘束ブレースは構造物に入力される地震エネルギーを吸収し建物に生じる応答値を低減することを目的としたもので従来はアンボンドブレースと呼ばれ、日本では 1980 年代から現在まで多くの研究がすすめられ、その研究分野の広がりにより 1998 年に米国に紹介され、2003 年連邦政府の緊急管理庁（FEMA）の推奨規準および鋼構造協会（AISC）の耐震設計指針に規準化されるまでに到った²⁾技術である。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

ことから、多くの高層建物のみならず橋梁などにおいても多数利用されているものの、残念ながら木造建築物には利用されていない。この理由のひとつは、エネルギー吸収性能が設計基準に反映されてこなかったため、その長所が知られていないことのほか、座屈を拘束するために使用するアンボンド材であるモルタルが木造にとっては重く、かといってモルタルを使用しない場合、十分な剛性の確保が困難であることによると考えられる。しかし、エネルギー吸収を目的とした安価な制振装置を開発し普及させることは、建築施工や技術に係る者に対する能力開発に繋がるほか住宅購入者に対しては大きな福音になる。このような点を背景とし、木造用座屈拘束ブレースを開発し木構造建築物への耐震補強を図ることを目的にその性能を実験的に確認した。本報告はその実験報告である。

II 座屈拘束ブレース(BRB)実験

1 実験概要

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、炭素鋼管の補剛材から構成されている。BRB 重量を軽減するためにモルタルのアンボンド材を使用しないために、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た。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は同一形状のものを3体行った。試験体名はR6-1、2、3とした。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φ18×2と補剛材としてφ27.2×2.9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φ10、L=65を5本使用した。

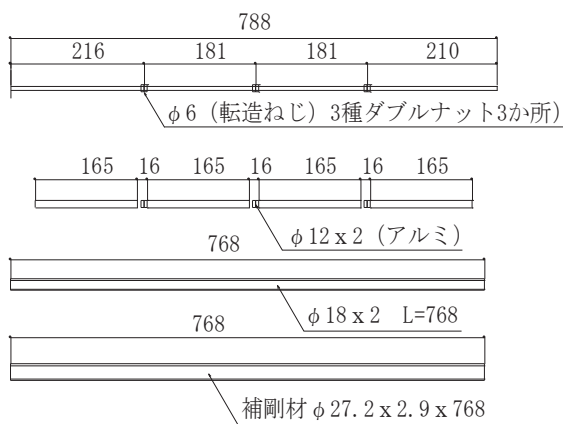


図1 BRBの構成

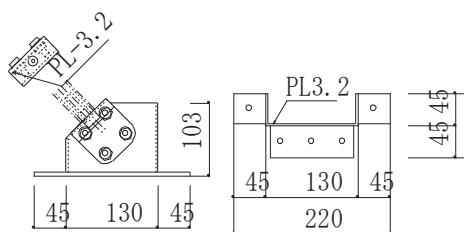


図2 BRB取り付け金物

表1 材料特性

	BRB 試験体	
	補剛材	芯ブレース
降伏点 (kN/mm ²)	0.32	0.40
引張強さ (kN/mm ²)	0.46	0.51
ヤング係数 (kN/mm ²)	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)		
内管	φ18×2 (I=0.33cm ⁴)		
外管	φ27.2×2.9 (I=1.66cm ⁴)		

2 試験方法

試験機は tensilon を使用し、試験体両端を PL-9 の取り付けプレートに溶接により取り付けられた L=40 のナットにブレースを挿入し固定度を確保した (図3参照)。BRB 試験体の加力の変形制御とし、軸方向歪を 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試験とした。加力サイクルはそれぞれ3回とした。試験体加力図および加力サイクルを図3に示す。

3 実験結果

図4a から 4c は荷重-変位曲線の実験結果である。R6-1、2、3 試験体は全て歪度が 1.0%までは圧縮、引張りとも耐力に差がなく剛性もほぼ等しく、スリップも見られないなど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 となった。また破断時歪度は全て 1.5%において生じたが、R6-1 と 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を生じた。

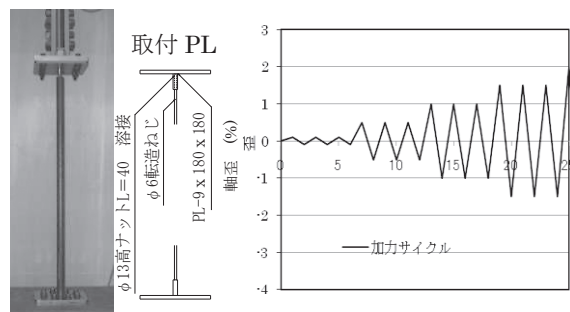


図3 試験体加力図および加力サイクル

4 BRB 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 $Q(\delta_{max})$ と最大変位 δ_{max} を用い、等価線形化法³⁾に基づき等価減衰定数 $h_{eq}(\delta_{max})$ をそれぞれ(1)式と(4)式より算出した。

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

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

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

$$F_h = \frac{1.5}{1+10h_{eq}(\delta_{max})} \quad (4)$$

ここで、

- W : 1 サイクルの履歴吸収エネルギー
- ΔW : 等価剛性による弾性エネルギー
- $k_e(\delta_{max})$: 等価剛性
- F_h : 加速度低減係数

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はば 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。

III 木造フレーム実験

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。本試験体に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。木材樹種は柱と土台が 105mm 角の杉、梁は 105mm×180mm ベイ松である。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 $_1$ 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 $_1$ 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 $_2$ PB4)の 3 種類である。試験体図は図 7 に示すとおりである。

2 試験方法

BRB を取り付けした木造フレームの試験方法は「木造軸組み工法住宅の許容応力度設計⁴⁾」に示されている木造軸組み耐力壁の試験方法に準じ、無載荷柱脚固定式とした。また、加力方法は油圧アクチュエーターによる同一正負履歴 3 回の交番繰り返し加力とし、繰り返しは見かけのせん断変形角が 1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50 の変形角にて行い、その後引張方向で破壊まで加力をおこなった。

3 実験結果

実験結果の一覧を表 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 ($\delta=200\text{mm}$ 、 $1/13.7\text{rad}$) 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。 $_1$ PB2 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 芯ブレースと接合金物の取付部分が破損した(図 10a)。この時の最大荷重は、7.3kN であった。 $_1$ PB3 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

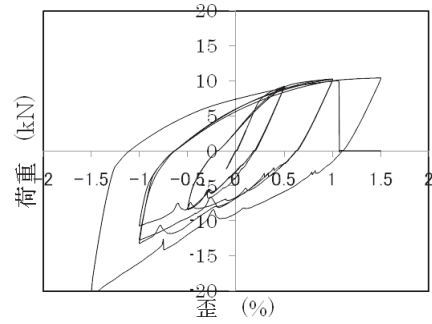


図 4a 荷重-変位曲線 (R6-1)

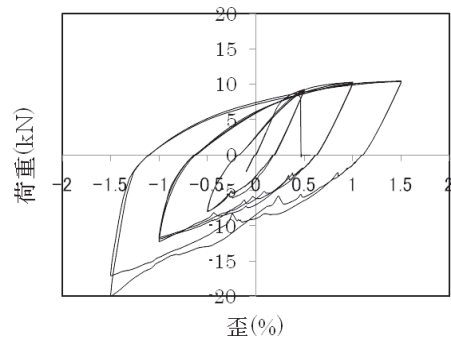


図 4b 荷重-変位曲線 (R6-2)

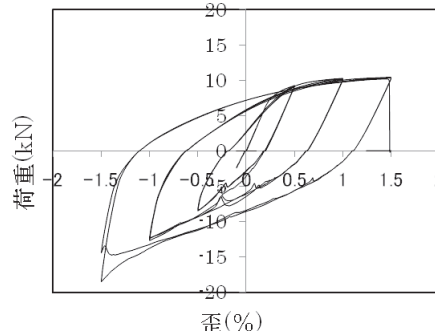


図 4c 荷重-変位曲線 (R6-3)

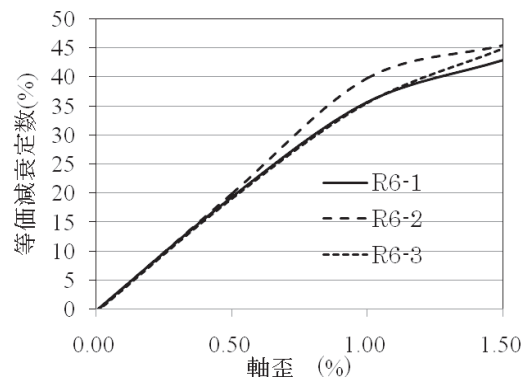


図 5 軸歪-等価減衰定数 (BRB)

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「木造軸組み工法住宅の許容応力度設計⁴⁾」に基づき、実験結果から短期許容せん断耐力を算定した。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。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材剛性は十分であるといえる。また、BRB 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。

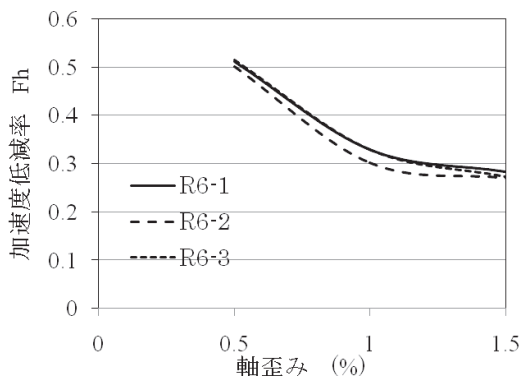


図 6 軸歪－加速度低減率 (BRB)

表 3 等価減衰定数 (BRB)

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)

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

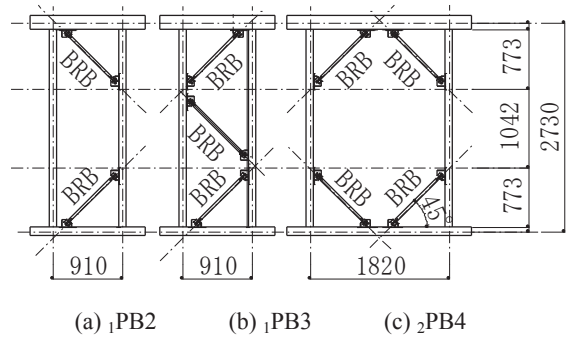


図 7 試験体図

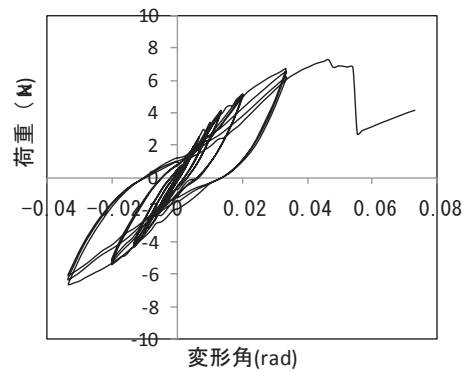


図 8a 荷重－変位曲線 (₁PB2)

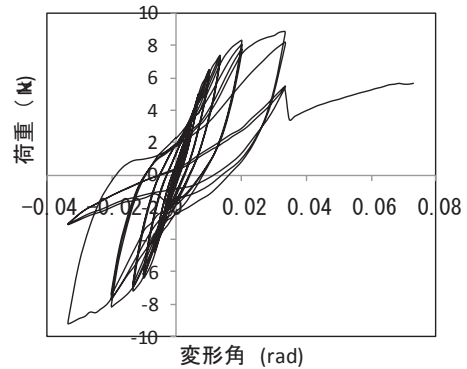


図 8b 荷重－変位曲線 (₁PB3)

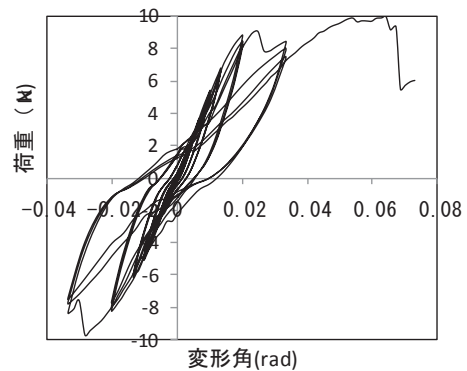


図 8c 荷重－変位曲線 (₂PB4)

4 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、柱脚部にBRBを取り付けた₁PB2と₂PB4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BRBを取り付けた₁PB3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BRBを全体に取り付けない場合は、柱部分の剛性の増加および取り付け金物の木造との接合性能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。

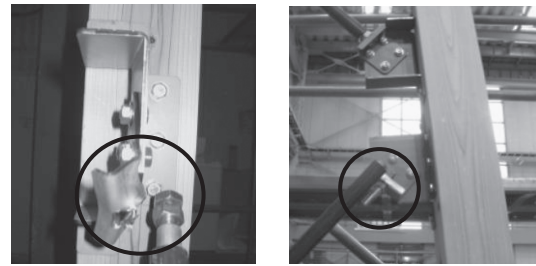


図10a ₁PB2 破壊状況 図10b ₁PB3 破壊状況

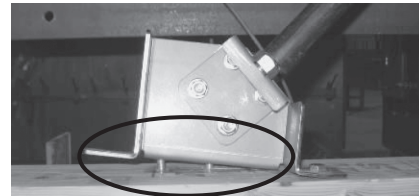


図10c ₂PB4 破壊状況

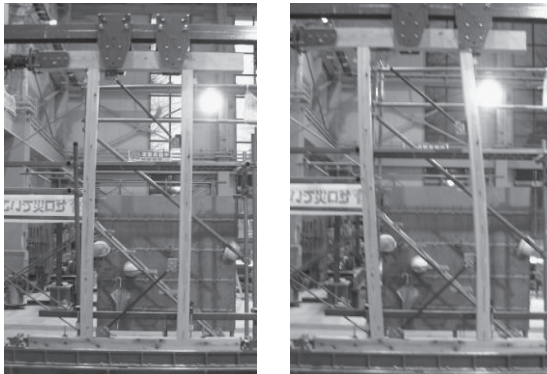


図9a ₁PB2 試験体実験前(左) 実験後

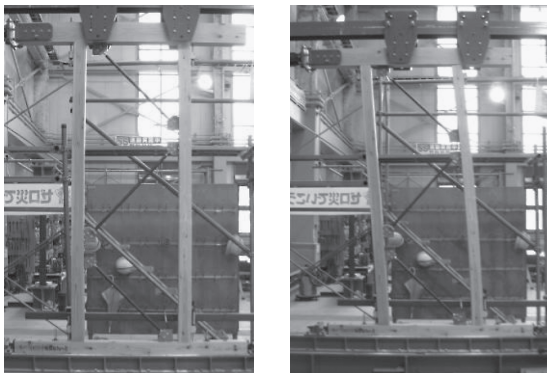


図9b ₁PB3 試験体実験前(左) 実験後



図9c ₂PB4 試験体実験前(左) 実験後

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 Py (kN)	3.61	5.51	6.39
降伏変位 δy (mm)	31.0	21.1	34.4
終局耐力 Pu (kN)	6.40	8.00	8.92
終局変位 δu (mm)	147.3	91.4	183.4
塑性率 μ	2.68	2.99	3.83
構造特性係数 Ds	0.48	0.45	0.39

表6 等価減衰定数 (木造フレーム)

	変形角 (rad)	試験体		
		₁ PB2	₁ PB3	₂ PB4
等価減衰定数 he (%)	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 (木造フレーム)

	変形角 (rad)	試験体		
		₁ PB2	₁ PB3	₂ PB4
加速度低減率 Fh	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

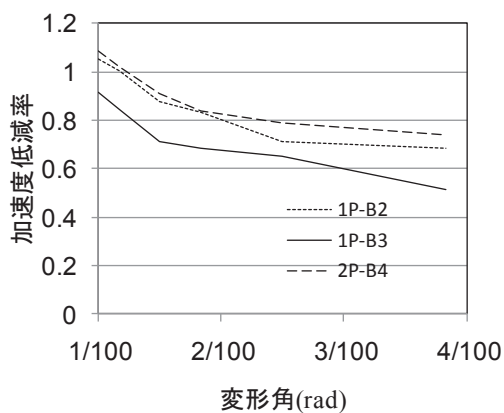
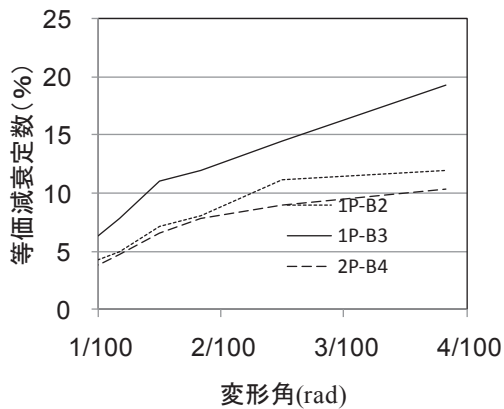


図 12 変形角—加速度低減率

IV まとめ

木造住宅用座屈拘束ブレース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) アルミ管によりナットを取り付ける手間の軽減を図った 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 1/100rad 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、柱脚部のみに BRB を取り付け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) 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、BRB を全体に取り付けられない場合は、柱部分の剛性の増加を行うことや、取り付け金物の性能の改良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) 国土交通省 国土技術政策総合研究所、独立法人建築研究所、「平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震調査研究(速報)」、平成 23 年 5 月
- (2) 日本建築学会 構造委員会、「鋼構造制振技術の現状と設計指針への期待(鋼構造における制振のこれから)、2006 年日本建築学会大会 パネルディスカッション資料、2006 年 9 月、pp.1-52
- (3) 日本建築学会：「免震構造設計指針」、5.4.4、等価線形化法に基づく第 1 層の応答予測、1993 年
- (4) 財団法人住宅・木材技術センター編：「木造軸組み工法住宅の許容応力度設計」、平成 14 年
- (5) 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 2 4 号、pp.37-42、2009 年 3 月
- (6) 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、pp.141-147、1999 年 7 月
- (7) 吉田、栗山「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、pp.875-876、2006
- (8) 吉田、栗山「座屈拘束ブレースの座屈と分岐」、2008 実践研究発表会、2008 年 9 月、pp.41-42
- (9) 栗山、吉田「座屈拘束ブレースのための有限要素法による非線形問題」、実践教育ジャーナル、2008 年 12 月、pp.74-77

本研究は、職業能力開発総合大学校東京校紀要第 26 号に掲載された「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」を加筆したものである。