

鋼製およびアルミニウム合金製 BRB を斜材に持つ

鋼トラス構造の耐震性能比較実験

今瀬 史晃¹・宇佐美 勉²・舟山 淳起³

¹学生会員 名城大学大学院理工学研究科建設システム工学専攻修士課程
(〒468-8502名古屋市天白区塩釜口)

²フェロー会員 名城大学教授 理工学部建設システム工学科 (同上)

³正会員 八千代エンジニアリング株式会社
(〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12)

1. 緒言

橋梁の耐震性能向上策として座屈拘束ブレース(以下 BRB と略称)の設置は非常に有効であるとされており、これまで多くの研究が行われてきた^{1),29-33)}。しかし、BRB に関する研究の多くは BRB 単体の性能実験^{1),2)}または BRB を設置した橋梁モデルの数値解析的研究^{3),4)}で、実際に鋼橋モデルに制震ダンパー(本研究では BRB)を設置して耐震実験を行った例はほとんど無かった⁵⁾。そこで著者らは、鋼製 BRB を斜材に持つ鋼トラス構造モデルを製作して繰り返し載荷実験を行い、耐震性能向上効果を調べてきた⁶⁾。

アルミニウム合金製 BRB(以下アルミ製 BRB と略称)はアルミニウム合金の特徴である、軽量であることや耐食性が良好である等の利点があり更なる BRB の高性能化が可能であると考え、宇佐美らによって研究が行われている⁷⁾。本研究では、ここで提案されている様なアルミ製 BRB の縮小サイズ供試体を鋼トラス構造モデルの斜材に設置して繰り返し載荷実験を行った。アルミニウム合金製 BRB は、端部リブの取り付けに溶接を使用せずボルト接合を用いており芯材にはまったく溶接を使用していない構造となっている。鋼製 BRB、アルミ製 BRB を斜材に持つトラス構造の耐震性能向上効果を比較した。

2. 実験概要

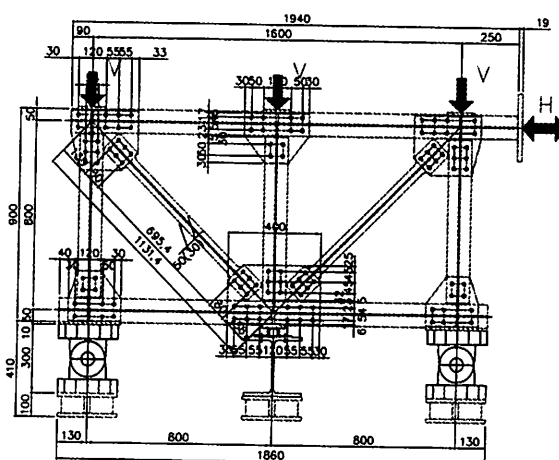


図-1 実験供試体

(1) 実験供試体

実験供試体は図-1 に示すような鋼製平面トラス構造(骨組線で測った高さ 800mm、長さ 1,600mm)で、2 体の供試体を製作して実験を行った。トラス構造は両端基部が回転支持、中央基部がローラー支持された 2 次不静定構造である。3 体の鉛直ジャッキにより均等な一定鉛直荷重 V が各鉛直部材軸線上に載荷され、上弦材軸線方向に繰り返し水平荷重 H が載荷されている。鉛直荷重 V の大きさは、鉛直材の降伏軸力の 20% に設定した。ただし、左右の鉛直材の軸力は鉛直荷重 V より 10%程度小さい。鉛直荷重は死荷重、水平荷重は地震力(慣性力)を想定している。

比較に用いる供試体の一覧を表-1 に示す。上下弦材および鉛直材には H 型鋼 (H100x100x6x8 で材質は SS400) を弱軸回りに使用した。供試体 BRB-Cy は鋼製 BRB を斜材に持つ供試体で、供試体 BRB-AL-Cy はアルミ製 BRB を斜材に持つ供試体である。鋼製 BRB の形状は文献 6) に示されており、アルミ製 BRB の形状を図-2 (a), (b), (c), (d) に示す。両 BRB の芯材であるブレース材は、PL60x10 となっている。鋼製 BRB はブレース材および拘束材には 10mm 厚の SM400 鋼板を使用し、両端部に補剛リブおよびガセット接合用の平板 (共に 10mm 厚) が溶接されている。アルミ製 BRB は鋼製 BRB のブレース材および拘束材と違いはないが材質は調質アルミ合金 A6061S-T6 を使用した。ただし、アルミ製 BRB は文献 7) の知見より、端部リブ溶接支端部から亀裂が発生すると考えられるため、端部リブとなる図-2(d) に示す取り付け金具をブレース材端部に挟む様にボルト接合することで、端部リブの取り付けに溶接を使用しない構造を採用している。ブレース材と拘束材の間はブレース材面外方向 (図-2(c) の上下方向) および面内方向 (図-2(c) の左右方向) に、ブレース材が変形できるように 1mm の隙間量が設けられている。BRB の組み立ては、まずブレース材の平行部に隙間量分のアンボンド材 (1mm 厚のブチルゴム) を接着し、ブレース材を一对の拘束材で挟み込むように装着し、供試体の長さ方向に

50mm 間隔で片側 12 本の 10.9 等級 M10 高力ボルト (保証荷重=48.1kN) で接合した。両 BRB の全体座屈に対する安全係数は $v_F \geq 3.0$ で、過去の研究¹⁾から生じない設計となっている。

表-1 の ℓ は骨組長 (格点間距離)、 ℓ' は斜材の連結高力ボルト群の重心間距離、 r は部材中央部 (平行部) 断面の弱軸回りの断面 2 次半径 (芯材のみ) である。連結高力ボルト群の重心間距離は、道路橋示方書²⁾に定められているガセットにより弦材に連結された腹材の有効座屈長に相当する。

供試体の格点は板厚 8mm の 2 枚のガセットを介して F10T 高力ボルト (M16) で摩擦接合されている。ガセット板厚、高力ボルト本数は道路橋示方書⁸⁾の基準を満たすように設計した。

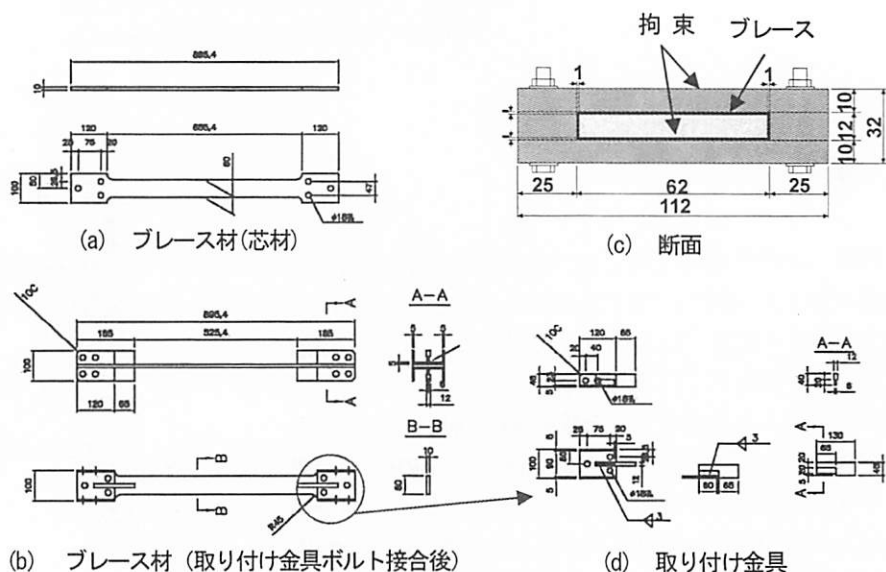


図-2 アルミニウム製 BRB 形状

表-1 実験供試体の一覧

供試体名	上下弦材・鉛直材		斜材				载荷パターン
	断面・部材長	ℓ/r	断面・部材長	ℓ/r	ℓ'/r	材質	
BRB-Cy	H100x100x6x8 (弱軸回り) $A=2,100\text{mm}^2$ $r=25.2\text{mm}$	32.4	BRB: PL60x10 $A_D=600\text{mm}^2$ $r=2.89\text{mm}$ $=1,130\text{mm}$ $=725\text{mm}$	391	269	SM400	Cyclic
BRB-AL-Cy	$=800\text{mm}$					A6061S-T6	

Note: ℓ =骨組長, ℓ' =連結高力ボルト群の重心間距離, A =上下弦材・鉛直材断面積, A_D =斜材断面積,
 b =フランジ幅, r =弱軸回りの断面 2 次半径

(2) 実験装置

写真-1 に本実験の実験装置を示す。 荷重フレームは 梁・柱をボルト接合によって剛結した自定式構造のため、 実験目的に合わせた組換えにより多様な荷重形式に対応できる。 圧縮 1000kN、 引張 500kN の荷重が可能なサーボアクチュエータ 2 基は、 デジタル変位計と 32bitCPU を搭載したコントローラによる 1/100mm の高精度な変位制御が可能である。 垂直に設置された剛な柱には上下端にスライドが設置されており、 水平に可動することによりこの剛柱に剛結されている供試体に 2 本のアクチュエータの合計荷重 H が与えられるようになっている。 供試体と剛柱の間のロッドには 2 個のヒンジが挿入されて供試体の上下を吸収出来るようになっている。 供試体と剛柱は 2 個のヒンジを介して接合されており、 供試体の上下による荷重の偏心を防いでいる。 実験供試体の水平方向変位 Δ をモニターし、 2 本のアクチュエータの合計水平荷重 H を制御した。 3 機の鉛直ジャッキが固定された鋼梁はスライドによって自由に水平方向に移動出来るため、 供試体の水平移動に追従することが可能となっている。 上弦材の 3 ヶ所の格点では、 面外変形、 面外倒れを起こさないように拘束してある。 基部にはローラー支承、 回転支承を設けている。

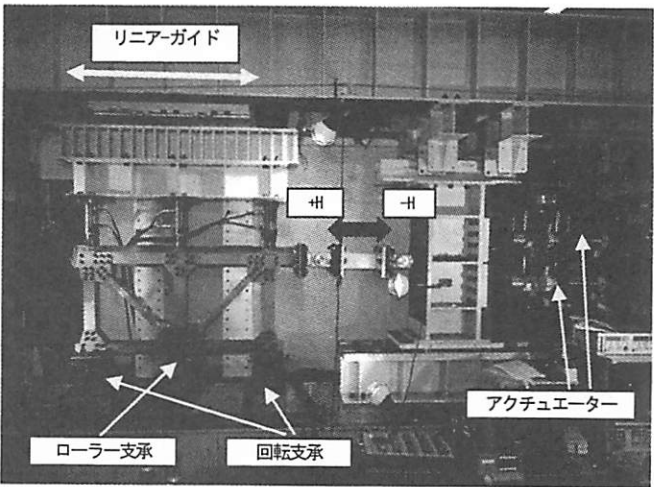


写真-1 実験全景

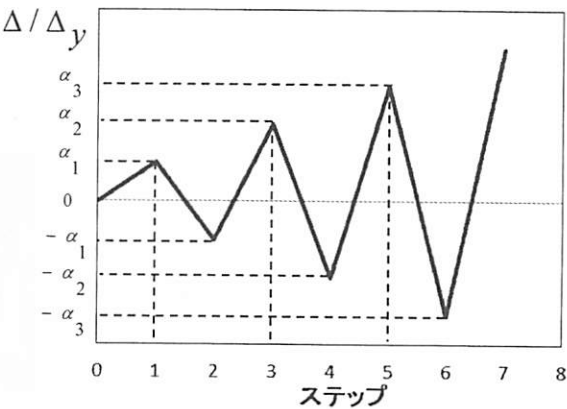


図-3 荷重パターン

(3) 荷重プログラム

荷重プログラムは漸増変位振幅荷重とし、 図-3 に示す荷重パターンとした。 初期の段階では各トラスの降伏変位 Δ_y を基準に $\alpha_i \cdot \Delta_y$ の変位増分で荷重し、 その後、 荷重が安定してきてからは損傷状況に応じて変位増分を変更して荷重を行った。 BRB-Cy は $\alpha_i=1, 2, 3, 4, 5.5, 7, 9.5, 12, 14.5$ である。 BRB-AL-Cy は比較のため BRB-Cy と同じ分の変位を与える。 繰り返し数は各変位一回である。

3. 実験結果

(1) 材料定数

BRB-Cy の材料定数は文献) に示されている。 JISI 号引張試験より求められた、 部材の材料定数を表-3 に示す。 ここに、 E : ヤング係数、 σ_y : 降伏応力、 ϵ_y : 降伏ひずみ、 σ_u : 引張強さ、 ϵ_u : 伸び、 ν : ポアソン比である。

(2) 水平荷重 - 水平変位履歴関係 (H - Δ 履歴曲線) と 損傷の進展

実験から得られた各供試体の水平荷重 - 水平変位関係

表-2 材料定数

部位	材質	板厚 [mm]	E [GPa]	σ_y [MPa]	ϵ_y [%]	E_s [GPa]	ϵ_s [%]	σ_u [MPa]	δ_u [%]	ν
フランジ	SS400	7.6	210	314	0.149	2.22	2.47	452	28.4	0.285
ウェブ	SS400	5.7	207	300	0.145	2.72	2.35	447	27.9	0.284
ガセット	SS400	8.0	209	289	0.138	2.46	2.54	425	27.5	0.288
鋼 BRB	SM400	10	206	279	0.12	2.9	1.8	436	28.9	0.320
アルミ BRB	A6061S-T6	10	69.0	278	0.614			296	10.6	0.318

($H-\Delta$ 関係) を図-4 に、また、実験終了後の全体写真とガセットプレートを取り外した後の損傷状態を写真-2, 3 に示す。水平変位 Δ は左方向に変位した場合を正としている (写真-1 参照)。図中には水平変位の折り返し点で試験機を止めて肉眼で観察した部材・部位の損傷も示してある。

BRB-Cy : $\Delta=+18\text{mm}$ 近辺で右回転支承上のベースプレート

(BP), $\Delta=-18\text{mm}$ 近辺で左回転支承上の BP の浮き上がり変形が観察され、水平変位の増大ごとに変形が進行していった。 $\Delta=$

$+38\text{mm}$ に向かうループで微少な荷重低下が見られたが、その後も

安定した紡錘形の履歴曲線を描

いており、大きなエネルギー吸収

が得られている。BRB 斜材の曲げ座屈変形等の

損傷は見られなかった。 $\Delta=+38\text{mm}$ のループの

荷重低下およびその後の除荷域でのピンチング

現象は、下弦材および鉛直材の最先端ボルト穴

の変形およびその後の破断発生によるものであ

って BRB 斜材の損傷によるものではない。

写真-2(a) は実験終了時 ($\Delta=+58\text{mm}$) での供

試体の変形状態を示す。写真-2(b), (c) は実験終

了後にガセットを取り外した状態で下弦材左

右端でのボルト穴の支圧破壊状態を示し、写真

-2(d) は、右回転支承上の BP の浮き上がり変形

および下弦材と BP の溶接に生じた亀裂を示す。

写真-2(e) は実験終了後に BRB の拘束材を取り

去った後での左斜材ブレース材の変形状態を示

す。BRB 単体の要素実験⁶⁾で見られたような、

拘束材の隙間でのブレース材の高次の変形モー

ドが観察される。

BRB-AL-Cy : $\Delta=-22\text{mm}$ 付近で左 BP と下弦

材溶接部に微少な亀裂が生じ、 $\Delta=38\text{mm}$ 付近で

右側にも同様の損傷が生じた。その後、変位が

進むにつれ BP 付近の損傷が進展していき、 Δ

$=48\text{mm}$ 付近で左 BRB 下端部露出部に局部座屈

が発生し (写真-3(a))。同じループの $\Delta=+25\text{mm}$

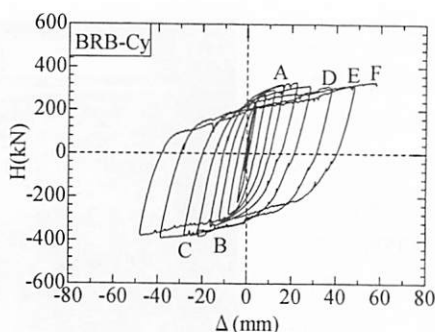
付近で局部座屈発生位置に亀裂が発生し、急激

な荷重低下が生じた。両斜材には曲げ座屈変形

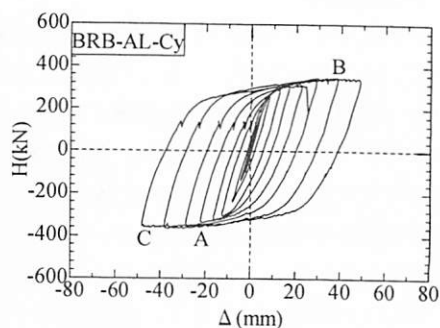
等の損傷は見られず、右斜材には局部座屈は生

じなかった。この供試体の最大荷重は BRB-Cy

とほぼ同じであり、BRB-Cy に見られた下弦材

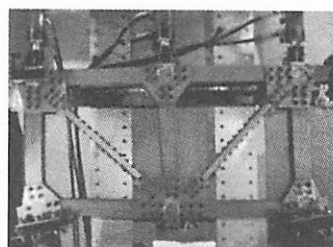


A	右ベースプレート浮き上がり変形
B	左ベースプレート浮き上がり変形
C	下弦材左下側ボルト穴亀裂
D	下弦材左上側ボルト穴変形 下弦材右下側ボルト穴亀裂
E	下弦材左上側ボルト穴破断
F	右鉛直材右側ボルト穴変形

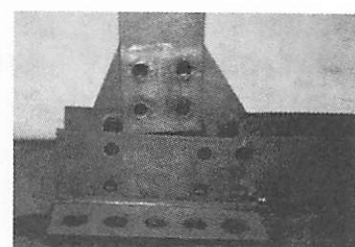


A	左ベースプレートと 下弦材溶接部亀裂
B	右ベースプレートと 下弦材溶接部亀裂
C	左ブレース材下端部 露出部局部座屈

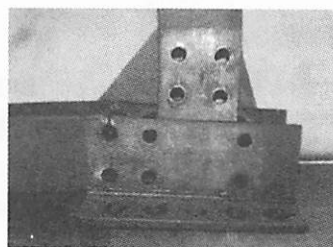
図-4 水平荷重-水平変位関係と損傷箇所



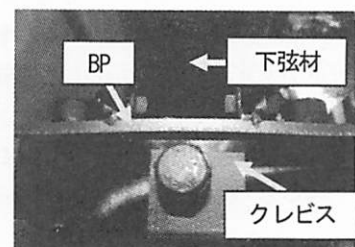
(a) $\Delta=+58\text{mm}$



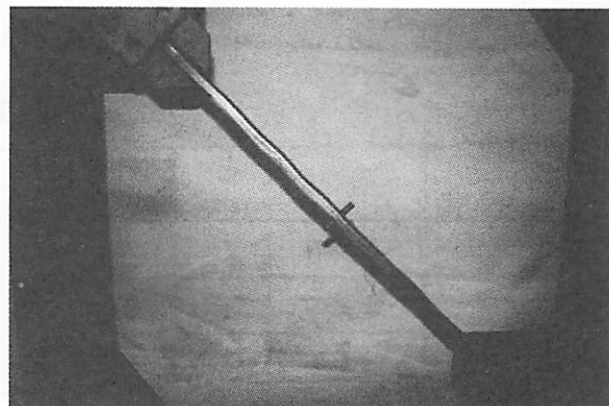
(b) ボルト穴の支圧破壊(下弦材左)



(c) ボルト穴の支圧破壊(下弦材右)



(d) BP の浮き上がり(右回転支承)



(e) 実験終了後のブレース材の変形状態(拘束材除去後)

写真-3 BRB-Cy の損傷状況

ガセット接合部のボルト穴の亀裂、破断などの大きな損傷は見られなかったため、斜材に亀裂が発生するまでは、荷重低下、除荷域でのピンチング現象は見られず、より安定した紡錘型の履歴曲線を示している。

写真-3(b)は実験終了時 ($\Delta=+58\text{mm}$) での供試体の変形状態を示す。写真-3(c)は実験終了後に BRB の拘束材を取り去った後の右斜材ブレース材の変形状態を示す。BRB-Cy に比べ実験終了時の変位が小さく残留変形が少ないにも関わらず同程度のブレース材の高次の変形モードが観察される。

(3) BRB の平均応力 σ - 平均ひずみ ε 関係

BRB のブレース材に作用する軸力 P をブレース材断面積 ($A_D=600\text{mm}^2$) で除した平均応力 σ 、および BRB 取り付け格点の軸方向相対変位 δ をブレース材端部リブ先端間距離 ($\ell_{\text{brace}}=525\text{mm}$) で除した平均ひずみ ε 関係を図-5(a), (b) に示す。ブレース材の軸方向変位はブレース材端部リブに固定した一対のダイヤルゲージで測定することを試みたが、計測が不十分であったため、格点間の相対的軸方向変位 δ を用い、ブレース材取り付け部 (ガセット部からブレース材リブ先端まで) の変形を無視してブレース材変形部 (リブ先端間距離 ℓ_{brace}) の平均ひずみ ε を算定した。変形を無視した部分の変形は弾性域に留まると考えられるため、大きな塑性変形が生ずるブレース材変形に比べれば小さいと考えられる。さらに、ブレース材に作用する軸力 P を正確に求めるのは困難であるので、水平荷重 H から格点をピンと考えた弾性トラス理論で求めた次式から算定した。

$$P = \frac{H(1 - \beta) - 2\beta V}{\sqrt{2}} \quad (\text{引張}) \quad (1)$$

$$P = \frac{-H(1 + \beta) - 2\beta V}{\sqrt{2}} \quad (\text{圧縮}) \quad (2)$$

ここで、

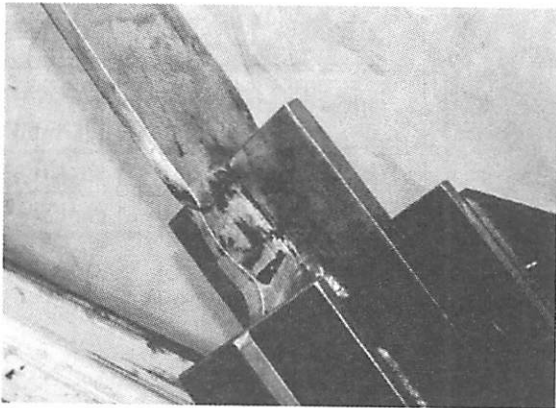
$$\beta = \frac{\alpha}{2(\alpha + \sqrt{2})}$$

$$\alpha = \frac{A_D}{A} \quad (3), (4)$$

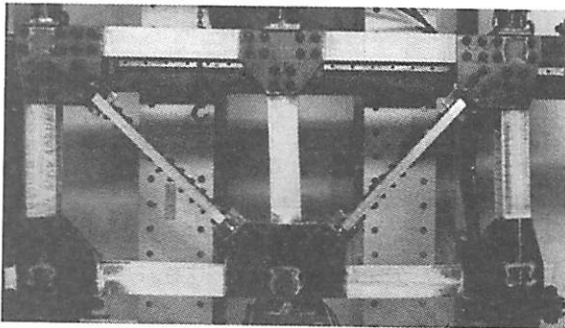
$$\alpha = 600 / 2100 = 0.286$$

$$\beta = 0.084 \quad \text{である。}$$

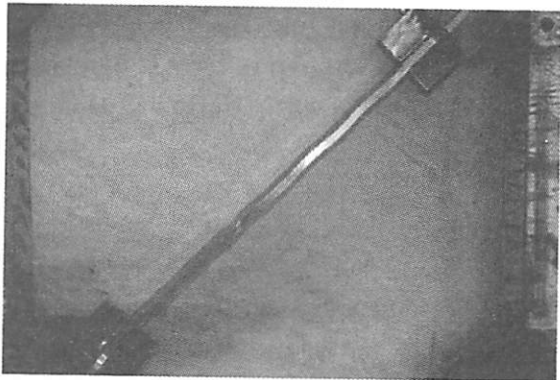
これらの図から分かるように、鋼製 BRB に比べアルミ製 BRB は剛性が低いため、より大きな軸方向変形が生



(a) 左 BRB 下端部露出部の局部座屈



(b) $\Delta=24\text{mm}$



(c) 実験終了後のブレース材の変形状態(拘束材除去後)

写真-4 BRB-AL-Cy の損傷状況

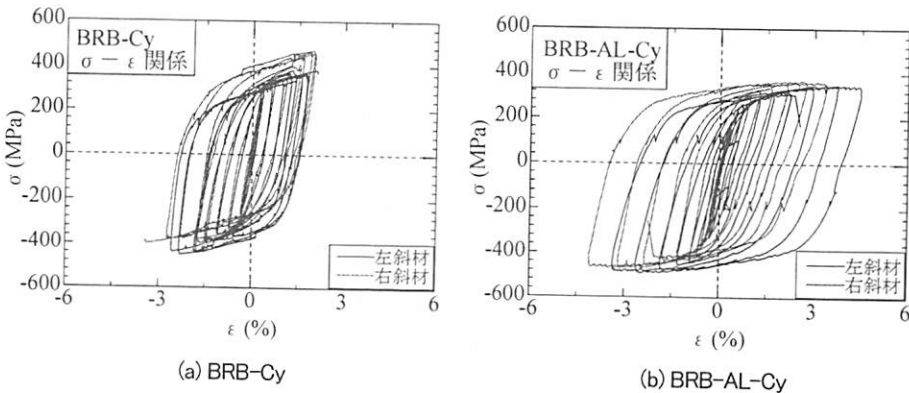


図-5 ブレース材の平均応力-平均ひずみ関係

表-3 材料定数

供試体	Δ_{95} [mm]	$\Sigma E_{(H-\Delta)}$ [kN・m]	$\Sigma E_{(P-\delta)}$ [kN・m]		斜材が受け持つ エネルギーの比率
			左	右	
BRB-Cy	53.5	116	34.9	36.3	0.61
BRB-AL-Cy	48.0	127	40.7	38.7	0.63

じ、その結果、より大きなエネルギー吸収が得られている。

(5) エネルギー吸収量

$H-\Delta$ 履歴曲線が囲む面積の和は水平力によるトラス構造の履歴吸収エネルギー量を表す。構造の終局状態に至るまでの累積吸収エネルギー量 ΣE が大きければ、耐震性能が優れていると言える。ここでは水平荷重が最大値の 5%だけ低下した点 (95%荷重点) を終局状態と定義した。

表-3 は、終局変位、累積エネルギー吸収量および、ブレース材の累積エネルギー吸収量を示す。変形能は BRB-Cy の方が高いが、累積エネルギー吸収量は BRB-AL-Cy の方が、終局変位が少ないにもかかわらず 1.21 倍と大きかった。ブレース材の累積エネルギー吸収量も BRB-AL-Cy の方が大きかった。即ち、アルミ製 BRB は、損傷が BRB に集中するため、同一断面の鋼製 BRB より制震ダンパーとして好ましい性能を有することが分かった。

4. 解析的研究

梁要素を用いた複合非線形解析により実験供試体の弾塑性挙動を求める。解析では、局部座屈、接合部ボルト穴の損傷、BP の浮き上がり変形は考慮出来ないが、部材の曲げ座屈の影響は考慮出来る。BP の浮き上がり変形の影響については、文献) を参照されたい。

使用した解析モデルの概要は次のようである (図-6 参照)：1) 部材長は骨組長とし、格点は骨組線の交点とする。2) ガセットプレートの影響は、その厚さを部材連結部の最先端ボルト位置から格点までの部材のフランジ厚に加える。図-6 の太実線の部分がガセットの影響を考えた部材である。3) 格点はすべて剛結とする。4) 下弦材の格点が回転支承のヒンジの位置から上方 210mm にある影響 (支承のオフセットの影響) はその間を剛棒要素で結ぶことで考慮する。

解析は全て構造解析用汎用コード Abaqus version 6.7 を使用した。BRB を除く全ての部材は、Timoshenko はり理論に基づく平面はり要素 (要素番号 B31) でモデル化した。BRB については拘束材のある中央部 565mm (図-2

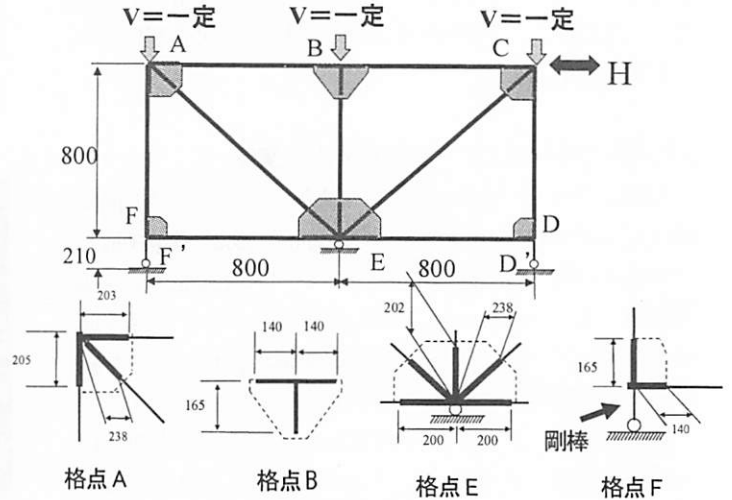


図-6 解析モデル

参照) はトラス要素 (要素番号 T3D2), その他の部分は他の供試体モデルと同様、梁要素を用いた。BRB を除く全ての斜材は、格点間で 20 分割 (平行部を 12 分割、両端部をそれぞれ 4 分割) し、BRB は中央部を 1 分割 (トラス要素), 端部は他の斜材と同様 4 分割した。上下弦材、鉛直材はすべて 10 分割した。用いた構成則 (応力-ひずみ関係) は、バイリニア移動硬化則 (2 次勾配は $E/100$) である。材料定数は表-2 の材料定数を用いた。

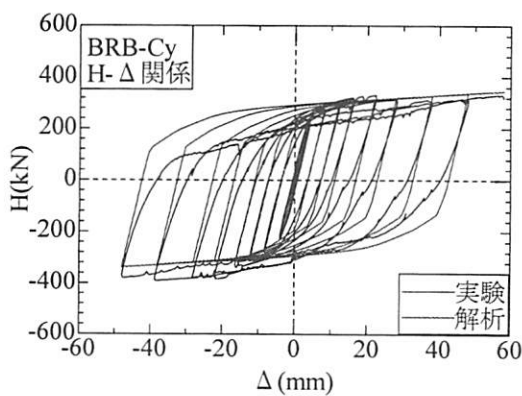
解析は、一定の鉛直荷重の元で、載荷点 C の水平変位を制御する変位増分法を用いた。

(1) 実験と解析結果の比較

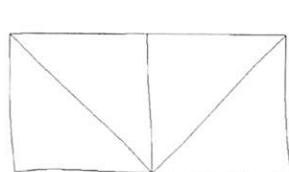
実験と解析の比較は、(a) $H-\Delta$ 履歴曲線および (b) 骨組みの変形図によって示す。

BRB-Cy (図-7)：大変位になると回転支承上 BP の浮き上がり変形、溶接部の亀裂、下弦材および鉛直材のボルト穴の変形および破断等の損傷が生ずるため、解析値は、必ずしも全領域に渡って実験値を良く模擬しているとは言えない。しかし、上記の損傷が顕在化する前の変位の領域では、解析値は実験値の傾向を正しく捉えていると言える。

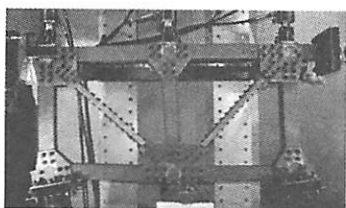
BRB-AL-Cy (図-8)：大変形になっても下弦材ボルト穴の変形などの大きな損傷が見られなかったため、除荷領域に置いても解析は実験結果を比較的よい精度で模擬できている。



(a) $H-\Delta$ 履歴関係



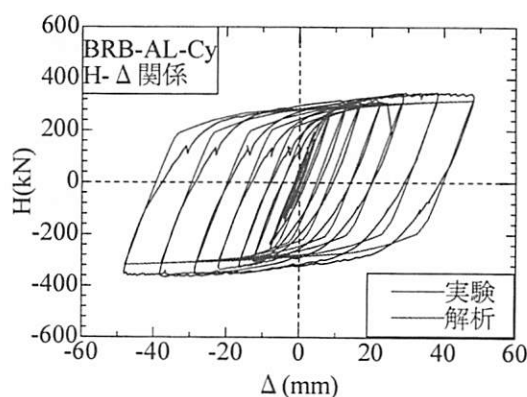
解析



実験

(b) 変形 ($\Delta=58\text{mm}$)

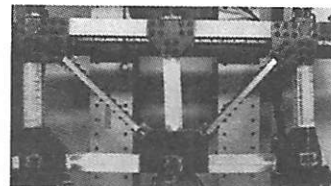
図-7 実験と解析の比較 (BRB-Cy)



(a) $H-\Delta$ 履歴関係



解析



実験

(b) 変形 ($\Delta=24\text{mm}$)

図-8 実験と解析の比較 (BRB-AL-Cy)

5. 結言

格点部がガセットを介して摩擦接合用高力ボルトで接合された鋼製の剛結平面トラス模型に、一定鉛直荷重と繰り返し水平荷重が作用する状態で実験を行い(写真-1)、鋼製 BRB を斜材に設置した供試体とアルミ製 BRB を斜材に設置した供試体の耐震性能を比較した。

さらに、実験トラス構造をモデル化し解析を行った。格点は剛結とし、ガセットの影響は部材のフランジ厚を増すことで考慮した。解析は梁要素を用いているため、局部座屈および接合部のボルト周辺の損傷は考慮できないが、部材座屈の影響は考慮することが出来る。構成則はバイリニア移動硬化則を用いた。

本研究のまとめと結論および今後の研究課題は以下のようになる。

- 1) 鋼製 BRB を斜材に持つ供試体は、変位が進行していくと支承部周辺の下弦材ボルト穴に損傷が生じ亀裂、破断と破壊が進行していく。そして、破壊により荷重低下が発生する。
- 2) アルミ製 BRB を斜材に持つ供試体は、BRB 下端部露出部の局部座屈によって急激な荷重低下が生ずる。ガセット接合部の損傷は軽微である。
- 3) アルミ製 BRB を斜材に持つ供試体は、変形能では鋼製 BRB を斜材に持つ供試体に比べ劣っているが、累積エネルギー吸収量は 1.21 倍と大きくなった。これ

は、鋼製 BRB に比べアルミ製 BRB は剛性が低いため、より大きな軸方向変形が生じ、その結果、より大きなエネルギー吸収が得られている。即ち、アルミ製 BRB は、損傷が BRB に集中するため、同一断面の鋼製 BRB より制震ダンパーとして好ましい性能を有することが分かった。

- 4) 今回の様な梁要素を用いた解析では接合部ボルト穴の損傷など考慮出来ないため、損傷の著しかった鋼製 BRB を斜材に持つ供試体では、実験値を正確に模擬することは出来なかった。
- 5) しかし、アルミ製 BRB を斜材に持つ供試体は、格点周辺の部材・部位に大きな損傷が生じなかったため、比較的实验値を正確に模擬することが出来た。

謝辞

本研究は、文部科学省の科学研究費(基盤研究(B)、研究代表者:宇佐美 勉)および、科学技術振興機構(JST)のプロジェクト「橋梁構造の大地震被害予測技術の高度化と制震技術の開発(研究代表者:宇佐美 勉)」の助成を受けて実施されたものである。

参考文献

- 1) 宇佐美勉, 佐藤 崇, 葛西 昭: 高機能座屈拘束ブレースの開発研究, 構造工学論文集, 土木学会 Vol.55A, pp.719-729, 2009.3

- 2) 宇佐美勉, 加藤基規, 葛西昭, 河村洋行: 制震ダンパーとしての座屈拘束ブレースの要求性能, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.50A, pp.527-538, 2004.3.
- 3) 野中哲也, 宇佐美勉, 吉野広一, 坂本佳子, 鳥越卓志: 上路式構アーチ橋の大地震時弾塑性挙動及び耐震性向上に関する研究, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.31-49, 2003.4.
- 4) 葛漢彬, 日沖堅治, 宇佐美勉: 鋼アーチ橋に設置した座屈拘束ブレースの応答値, 土木学会地震工学論文集, 土木学会, 2005.8.
- 5) 宇佐美勉, 斉藤直也, 舟山純起, 野中哲也, 廣住教士, 菅付紘一, 渡辺孝一: 繰返し水平荷重を受ける鋼製剛結トラスの破壊実験と解析, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.57A, pp. pp.500-512, 2011.3
- 6) 今瀬ら: BRBによる鋼製剛結トラスの耐震性向上効果, 構造工学論文集Vol.58A, 2012.3.
- 7) 舟山淳起: アルミニウム合金製BRBの低サイクル疲労特性, 構造工学論文集Vol.58A, 2012.3.
- 8) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 鋼橋編, 丸善, 1966.