# 繰り返し軸力を受ける高機能座屈拘束ブレースと ガセットの面外挙動に関する実験的検討

Experimental study on out-of-plane behavior of high-performance buckling-restrained braces connected with gusset plates under cyclic loading

# 渡辺孝一\*,山口亮太\*\*,吉川瑛人\*\* Koichi Watanabe, Ryota Yamaguchi, Akito Yoshikawa

\*博士(工学),名城大学助教,理工学部建設システム工学科(〒468-8502名古屋市天白区塩釜口) \*\*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(同上)

Recently, required performances for high-performance buckling-restrained brace (BRB) as a structural control device has been examined. The brace connects rigid connections with the core-end is stable under cyclic loading and is effective as an energy dissipation device. But, it is difficult to design connections as a rigid in rotation, and three or four-hinge instability including connection and core-end is concerned. If the brace including connections becomes instable, BRB cannot fulfill its function as energy dissipation devices. Moreover, design method for these brace connections is not established. In this paper, out-of-plane behavior of various types of a gusset plate connections for stable BRB's action has been analysed and discussed.

Key Words: guset-connection, buckling-restrained brace, out-of-plane deformation, cyclic loading キーワード: ガセット継手, 座屈拘束ブレース, 繰り返し載荷, 面外変形

### 1. 緒言

近年、「高機能制震ダンパー」と称して鋼橋のライ フサイクルに渡って取り替え不要な制震ダンパーの 開発が進められている <sup>1)~7)</sup>. このうち, 軸降伏型ダ ンパーの座屈拘束ブレース(以下, BRBと称する) に要求される性能として,(1)BRBの全体座屈の防止, (2) ブレース材の局部変形による耐力低下の防止, (3)ブレース材の必要変形量の確保, (4) ブレース材 の低サイクル疲労防止, (5) 拘束材の強度, (6) BRB と主構造の接合部の強度,が提案されている.これ までに, (1) から(5) については, 文献 1)~7)で検討 されており、実験および解析的な検討結果から、要 求性能を確保するための具体的な照査指針案が「鋼 橋の耐震・制震設計ガイドライン」<sup>8)</sup>に提案される までに至っている.本論文は、(1)~(5)の要求性能 を満たす BRB に対して(6) に関する性能を実験的に 検討したものである.

BRB は例えば図-1 に示すように、アーチ橋端柱と 横梁との接合部筋交いとして設置される.このとき BRB を構成する部材は、ブレース材の周囲を座屈拘 束材で覆っている座屈拘束部と接合部、およびガ セット接合部などに大別される.座屈拘束部はブ レース材が軸圧縮力を受けた際に部材座屈(オイ ラー座屈)を生じても、座屈拘束材によって全体座 屈を防止するように設計されており、軸圧縮を受け



て効率良く塑性変形することで、地震エネルギーを 吸収する. BRB 接合部とガセット接合部は、座屈拘 束部へ軸力を伝える重要な部材であり、これらの接 合部が適切な性能を保有することが BRBの要求性能 を充たす必要条件となる.



図-2 BRB 端部の破壊

これまでBRBの開発のため実施されてきた実験や 解析は主に、ブレースと拘束部材の性能諸元に着目 しており、主構造との接合部を十分に剛な部材とし ている<sup>1)~5)</sup>.図-2(a)に示すように、ブレース接合部に ヒンジが形成されても、両端支持ガセットはブレー スの伸縮方向以外に変形せず2 ヒンジに留まること から、軸圧縮力(あるいは引張力)作用時に BRB が 破壊することはない.しかし、剛性が低いガセット プレートで支持する場合は、図-2(b)、(c)に示すよう に、3 ヒンジあるいは4 ヒンジが形成されて不安定構 造となる.このとき BRB 座屈拘束部は健全であって も、ブレースは伸縮変形しないため、制震部材とし ての機能は失われ、圧縮力に対する剛性は期待でき なくなる<sup>9,10</sup>.

本論文では、ガセットプレート(以下、「ガセット」 と略記する)により接合、支持された BRB 一体構造 が繰り返し軸力を受ける場合の変形性能に関する実 験を行う.主なパラメータは、BRB 端部の接合形式 とガセット補強リブの配置方法である.

### 2. 実験概要

図-3 に BRB 端部を高力ボルトで接合した状態と 塑性ヒンジ位置を例示する.図-3(a)は,BRB 端部が 剛なブラケットで接合される場合であり,BRB 端部 の破壊は発生しにくい.しかし,図-3(b)のようにガ セットを介した接合では,ガセットの面外剛性が十 分でないと,マークで示すようにガセット内部にヒ ンジが形成されて,全体では図-2(b),(c)に示したよ うに破壊する恐れが生じる.そこで,BRB とその接 合部,およびガセットが一体となるブレース構造モ デルを模型化した.この供試体に対して繰り返し軸





図-4 実験供試体(CB-Dタイプ)

力を作用させた場合の挙動を確認し、端部の接合形 式が保有すべき設計条件について、実験と解析を合 わせて検討した.

#### 2.1 実験供試体

実験供試体の着目部は,図-4 に示すように BRB を ガセットで支持するために,添接板を介して高力ボ ルトで摩擦接合した BRB とガセットの一体構造であ る.ブレースの断面弱軸方向と,ガセットの面外方 向を一致させて,BRB 端部の塑性ヒンジ形成による 面外方向の挙動に対して,ガセットの面外剛性の影 響が顕著に表れるような接合とした.本実験では, 添接板の接合形状と,ガセットに設けた補強リブの

曲封床	BRB端部	ガセットPL	添接部の	設計断面積	継手の設計断面2	オイラー荷重	
洪武仲	接合形式	形式	ボルト本数	$(mm^2)$	ガセット面外まわり	ガセット面内まわり	$P_{cr}$ (kN)
CB-P	CB	Р	8	10780	19129672	17925912	99949
CB-H	CB	Н	8	10780	19129672	17925912	99949
CB-D	CB	D	8	10780	19129672	17925912	99949
RB-D	RB	D	4	7620	7259500	17170540	46521

表-1 実験供試体の接合形式と継手の断面性能

※ オイラー荷重は、例えば CB タイプの場合継手部長さ L<sub>j</sub>=595mm (図-5 参照)として 両端単純支持の仮定で計算した。



(a) CB タイプ(十字継手接合)



(b) RB タイプ (リブ付添接板接合)

図-5 BRB 端部の接合形式



(a) P タイプ(リブ補強なし) (b) H タイプ(水平補剛リブ付) (c) D タイプ(斜め補剛リブ付)

図-6 ガセットプレートの形式

配置状況の違いを組み合わせている.以下にそれぞ れの接合部材について説明する.

### 2.2 BRB 端部の接合形式

図-5 に BRB 端部とガセットとの接合形式の違い を示す.図-5(a)は、「CB タイプ」と称し、ブレース 端部にリブを設けた十字継手構造に対して、帯状の 添接板を介してガセットと摩擦接合される形式であ る.図-5(b)はウィングプレートを兼ねたリブ付の添 接板によってガセットと接合する形式であり、これ を「RBタイプ」と呼ぶ.この接合では帯状添接板は 不要である.

2 種類の接合形式ともに,継手の外形サイズは 190mm×190mmの矩形断面であるが,RBタイプの 継手は,BRB側のボルト本数を4本としており,ボ ルトのすべり耐力がBRBの最大軸力を補償可能な最 低必要本数とした<sup>11),12)</sup>.一方,CBタイプのボルト本 数は十字継手を添接板で構成するために必要なボル

 $P_y$  $\delta_{v}$ L R t A 供試体 鋼種 λ (kN)(mm)(mm) (mm)  $(mm^2)$ (mm)983.94 1.96 CB-P 100.30 9.81 288.03 486 285.50 1.96 CB-H 100.57 9.87 992.63 483 SM400A 1375 CB-D 1.96 100.53 9.84 989.22 484 286.49 RB-D 103.00 1005.28 281.91 1.96 9.76 488

表-2 BRB の諸元

※表に示した記号は、図-5および図-8を参照のこと.

表-3 材料試験結果

設計板厚	$\sigma_y$	$\sigma_u$	Ε	$E_{st}$	Е <sub>У</sub>			
(mm)	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(GPa)	%	V		
10	287	439	202	5.56	0.143	0.293		
12	279	436	200	5.48	0.139	0.291		
16	312	447	203	5.10	0.154	0.287		

ト配置から決定されており、摩擦接合に必要なボル ト本数の2倍を配置している.いずれの接合形式も ガセット側のボルト本数を割増して配置し、配置バ ランスとガセット側ですべりの防止に配慮した.図 -5に示した継手断面の設計断面性能を表-1に示す.

### 2.3 ガセットの設計と補強

ブレースの鋼種が SS400 材の場合, BRB の設計軸 カNとすると,終局耐力  $N_u$ は,ひずみ硬化等による 上昇分を考慮して,公称降伏応力  $\sigma_y$  (235Mpa)とブ レース断面積から算定される軸力の約 2 倍と仮定す ることができる<sup>1)</sup>.よって, $N_u = 2 \sigma_y A = 470$ kN と なる.ガセット断面は,この終局耐力  $N_u$  に対して許 容応力以下となるように設計する.

現行の設計法では軸力に対してのみ照査すること から、本実験で使用するガセット形状の場合、図-6(a) に示すように、ガセットの有効断面積  $A_{ga}$ は、軸力の 分配方向 30 度とすると、有効幅 145×2+110=400mm, 板厚 10mm から  $A_{ga}$ =4000mm<sup>2</sup>となる.許容圧縮応力  $\sigma_a$  (140Mpa)とすれば、表-1 に示した添接継手の断面 を含め、ガセットの設計軸力  $N_{ga} = \sigma_a A_{ga} = 560$ kN>  $N_u$ を満足する.

前掲した図-3(a)のように剛な接合形式で得られる 曲げ剛性を確保する方法として、一般的にはウィン グプレートと呼ばれる垂直リブを設置してガセット の面外剛性を確保する.しかし、本研究ではウィン グプレートの形状や配置を変更せず、端部リブ設置 による補強を考える.現在、ガセットの補強に関し て、端部リブや水平リブを設置する場合の明確な規 定がない.そこで、試行的に、(1)ガセット面上のウィ ングプレートと同等以上の断面を確保し、十分な面 外剛性を確保する、(2) リブの局部座屈を防ぐ<sup>11)</sup>、(3) 継手のボルト接合などの空間的な施工性に配慮する、 などを考慮して試行的にリブサイズを決定した.

図-6 にガセットの形式を示す. 図-6(a)の「P タイ プ」は、ガセットに補剛リブを設けない標準的な形



図-7 ブレース断面構成

式である. 図-6(b)は P タイプのガセットに対して BRB の軸力方向の断面補強のために水平リブを添加 した形式で,「H タイプ」と称する. リブの配置位置 については,高力ボルト締付けに必要な施工空間の 制約を考慮して決定している. 図-6(c)は,ガセット の面外剛性を確保することを目標としたリブの配置 形式であり「D タイプ」と称する.

### 2.4 ブレースと座屈拘束部材

次に, BRB 座屈拘束部の断面および, 拘束部材内 部のブレース材の諸元を図-7 に示し, 実測した値か ら算定した断面性能を表-2 に示す.本論文で用いた BRB は, 僅かな断面サイズの違いがあるが, 全ての 供試体で同一として扱う.前述のように,本論文で は,宇佐美らが実施した実験供試体諸元<sup>1)</sup>を参考に設 計し, BRB の支持端部が剛な接合条件下では, BRB の全体座屈に対して十分な安全率が確保されている.

以上のようなBRB 接合部およびガセットの実験供 試体を組み合わせて実験を行った.実験供試体の全 体を図-8 に示す.なお,供試体については,「CB-P」 のように,「継手のタイプ記号」と「ガセットのタイ プ記号」を組み合わせて表記する.

### 2.5 材料試験結果と鋼材の表面処理

実験に先立ち実験供試体と同一ロットから採取した鋼材から JIS 1A 号試験片を製作して,引張試験により材料試験結果を得た.材料試験結果を表-3 に示す.表に示した公称板厚 10mm は,ブレースおよびガセットに適用されている.12mm は BRB 拘束材の



7666 00 スライタ ..... クチュエー - 4 実験供試体  $\pm 500$ kN Pि 2500  $\square$ 固定側 載荷側 ドヤル 17 00 : 单位:(mm)

図-8 実験供試体と端部載荷治具(供試体 CB-P)

図-9 載荷装置

面外隙間を確保するスペーサーに適用され,16mmは 拘束部材用である.

ブレースおよびガセットの表面処理は、ショット ブラストによって全面荒面処理されている.供試体 組立前に表面粗さを表面粗さ計(Mitutoyo サーフテス ト:SJ-301)で数点無作為に計測し、その結果、最大 高さ荒さ  $R_z$ =54.5µm,算術平均粗さ  $R_a$ =11.51µm が得 られた.よって、継手の添接面は適切な摩擦が得ら れると判断し、高力ボルトの設計軸力算定に必要な 摩擦係数は 0.45 を仮定した<sup>12)</sup>.

### 2.6 実験装置と載荷方法

供試体の軸力載荷に用いる実験装置は、名城大学内に設置されている大型構造実験フレームおよび、静的油圧サーボジャッキシステムである.載荷能力はジャッキ合計±1000kN、ジャッキストロークは500mmである.ジャッキは1本あたり荷重分解性能0.5kN、変位分解精度0.01mmである.制御載荷フレームおよび実験供試体の設置概要を図-9に示す.

実験供試体は、フレームの固定側と載荷側に接合 される.載荷側はジャッキシリンダの伸縮によって 円滑に滑動させることが可能である.実験はジャッ キストロークを変位で制御し、目標変位を与えなが



写真-1 変位計設置状況

らブレースの降伏変位  $\delta_y$  (=ブレースの軸部長さ 1375mm×平均降伏ひずみ  $\varepsilon_y$ =0.143)を基準に圧縮・ 引張の両側繰り返し変動ひずみ振幅の漸増載荷を 行った.実験開始は引張荷重の載荷からスタートし て,弾性範囲内で数回両側載荷を行った後, $\delta/\delta_y$ =8 までは  $1\delta_y$  ごとに変位を増分させ, $\delta/\delta_y$ =8 以後は  $2\delta_y$ の変位増分により,目標変形性能  $\delta/\delta_y$ =20<sup>11</sup>まで載荷 を行った.

本実験ではブレース材の軸力方向の伸縮量,ガ セットと拘束材の面外方向の変位等を逐次計測し, データ集計を行った.測定状況をを写真-1に示す.





(a) CB-P





(c) CB-D





(b) CB-H









供試体	引張側最大		圧縮側最大		破壊直前		具效的な破壊の出泊	
	$P/P_y$	$\delta/\delta_y$	$P/P_y$	$\delta/\delta_y$	$P/P_y$	$\delta/\delta_y$	取於印记400级01人亿	
CB-P	0.96	1.91	- 0.76	- 0.98	- 0.77	- 0.62	4ヒンジ形成による破壊	
CB-H	0.97	1.52	- 0.95	- 1.74	- 0.93	- 0.96	3ヒンジ形成による破壊	
CB-D	1.50	25.01	- 1.77	-25.15	1.47	15.76	破壊せず	
RB-D	1.08	8.29	- 1.18	- 7.53	- 1.16	- 6.47	3ヒンジ形成による破壊	

表-4 繰り返し載荷実験から得られた変形性能

# 3. 実験結果

### 3.1 軸方向荷重-変位関係

図-10(a)~(d)に各供試体の荷重-変位曲線と,実験 終了時の状況を示した写真を合わせて示す. 履歴曲 線のグラフ中に示した P/P<sub>y</sub>, δ/δ<sub>y</sub>の値は破壊直前の最 大荷重を発現した位置における荷重と変位の無次元 化量を示している.

図-10(a)に示す標準的な供試体 CB-P の履歴では, 載荷初期段階から, 圧縮時の荷重増加に比例してガ セットの面外方向のたわみが生じた. そこで, 図-11 に CB-P と CB-H の荷重-ガセット面外たわみ関係を 示す.

図の横軸は載荷側ガセットの面外たわみの実測値  $\delta_g$ であり,図-8に示した変位計の測定結果から得ら れたものである.この図から,赤い実線で示した CB-Pでは, $P/P_{y}$ =-0.77,面外たわみが $\delta_g$ =5.2付近か らガセットの面外のたわみが急増し,軸力はほぼ一 定であるにもかかわらず,ガセットの面外変形は急 激に増大していることがわかる.このように,ガセッ トの急激な面外変形がわずかに先行し,その動きに 引き摺られるように,BRB拘束部材端部が屈曲して 破壊に至った.最終的には図-10(a)の写真で示すよう に全体で4つの塑性ヒンジが発生して破壊し,特に 載荷側のブレース端部で著しい屈曲変形が見られた. ガセット内に生じた塑性ヒンジは、写真-2の破線部 (冒頭図-3(b)で示した赤ライン)に示すウィングプ レートの端部で発生した.

次に、図-10(b)に CB-H の結果を示す.弾性範囲内 では CB-P と類似した履歴曲線となったが, 圧縮荷重  $\delta/\delta_y$ =-1.5 の載荷を終え,  $\delta/\delta_y$ =-2 に向かって圧縮の途 中, ガセットの面外方向のたわみが増え, *P/P*<sub>y</sub>=-0.96 の圧縮荷重時点で, 耐荷力が上昇しなくなった.荷 重が上昇しない状態で,変形が $\delta/\delta_y$ =-1.5 付近まで進 行した.最後は,ブレース端部に屈曲が発生し載荷 不能となったため除荷した.崩壊状況は写真に示す よう3つのヒンジが発生しているが, CB-P と折れ曲 がり方向が反転した崩壊状況となった.ガセットに 設置した水平リブについては目視による損傷は確認 されなかったが,ガセットは水平リブとともに大き く面外に変形して崩壊した.

続いて、図-10(c)に CB-D の結果を示す.載荷開始 から $\delta/\delta_y$ =-3.0 までの圧縮時は圧縮荷重の増加と比例 してガセットの面外変形が最大で 2mm 程度生じた. その後は、変形を増加させても安定した履歴曲線が



図-11 荷重-面外たわみ



写真-2 崩壊状況(CB-P)

得られ,ガセットの急激な面外変形は発生しなかった.目標変位の $\delta/\delta_y$ =-20まで繰り返し載荷を終えたが目視による損傷は見つからなかった.そこで, $\delta/\delta_y$ =±25まで変形を増加し, $\delta/\delta_y$ =±25の変位で繰り返し載荷を継続した.最終的に 5回目の $\delta/\delta_y$ =+25(引張側)に向かって載荷途中, $\delta/\delta_y$ =+16.93付近から荷重が低下した.最後は $\delta/\delta_y$ =+18.12でブレース材が拘束材内部で破断したため実験を終了した.

最後に RB-D の結果を図-10(d) に示す.  $\delta/\delta_{y=-7}$ までは CB-P や CB-H と比較すると安定した履歴が得られた.しかし目標変位, $\delta/\delta_{y=-8}$ に向かって圧縮の途中, $\delta/\delta_{y=-6.47}$ の時にリブ付き添接板の先端部において,写真-3,写真-4に示すように折れ曲がりの圧縮側は、ブレースに押しつけられるように、引張側は



写真-3 崩壊状況(RB-D)



写真-4 崩壊状況(RB-D)

ブレース材から離れるように面外方向に変形した. その変形に引き摺られるように、載荷側ガセットの 面外方向のたわみが急激に増加した.最終的には、 図-10(d) に示すようにブレース材端部で屈曲し、全 体では3つのヒンジが形成されて崩壊した.ガセッ ト端部に設置した斜め補強リブに損傷はみられな かった.

以上のような各実験供試体の荷重-変位の履歴か ら得られる変形性能の集計結果を表-4 に示す.ガ セットに補強リブを設けない CB-P は最も変形性能 に乏しく、水平リブを添加した CB-H もほぼ同程度 の変形性能であることが確認された.いずれも BRB の目標変形を満たすことはできなかった.また、斜 めリブを添加した RB-D は CB-P や CB-H と比較すれ ば、 $\delta/\delta_y = \pm 6$ 程度の塑性変形性能を期待できるが、 目標変形性能の  $\delta/\delta_y = \pm 20$  に到達することができず、 BRB の端部接合構造としては不適合という結果が得 られた.なお、ボルト接合について、RB-D を含め全 ての供試体で、摩擦が切れて継手にすべりが生じる ような現象は確認されなかった.

一方,ガセット端部を斜めリブで補強し,BRB端 部を十字継手とした CB-D との BRB 一体構造では, 高性能 BRB としての変形性能を十分に保有している ことが示された.高性能 BRB が保有すべき変形性能 の一つである,累積塑性変形<sup>1)</sup>については細かく触れ ないが,最終的に 1.405 という十分な累積塑性変形に 達した後,材料引張強度に達して破断した.



図-12 解析モデルの例 (CB-P タイプ)



図-13 ガセットの初期たわみ



図-14 ガセット内部の回転ヒンジ

#### 3.2 FEM 解析による崩壊条件の検討

ガセットの面外変形性能を数値解析的に検討する ため,FEM 解析を行った.解析に使用した汎用有限解 析プログラムは,DIANA ver.9.3<sup>14)</sup>である.解析モデ ルの一例を図-12 に示す.解析はブレース軸力方向に 圧縮荷重を載荷させ,ガセットの面外変形に着目し て行った.モデルに適用した要素は,4節点曲面シェ ル要素である.例示した CB-P の場合,節点数 4860, 要素数 4602 である.幾何学的な形状は設計値とし, 板厚については実測した平均値を採用した.



境界条件は実験供試体の支持条件に合わせ、ガ セットの周辺節点を完全固定とした.初期たわみと して、載荷点位置にガセットの面外方向に対して垂 直に初期変位 $\delta_{g0}$ を1mmから4mmの範囲で与えた. この変位はBRBをガセットと接合し一体化した際に BRBの死荷重がBRBの継手先端に作用して弾性変 形する値とBRBの面外隙間量を考慮して決定したも のであるが、実際のガセットに対しては、図-13に示 すように、取り付け直角度に相当する.例えば、  $\delta_{g0}$ =1mmの場合でガセットの突出長さ $h_r$ に対して、 1/560程度となり、最大4mmの場合で1/140程度と なる.ガセットは橋梁など構造物の中で非常に部品 数の多い部材であり、厳密な施工精度の要求は困難 であるので比較的大きめの値を仮定した.

解析に用いる構成則は完全弾塑性モデルとし,降 伏応力,ヤング率などは,材料試験結果を考慮した. 求解はニュートンラプソン法を用い,材料非線形と 幾何学的非線形性を考慮して,変位増分によって推 定した.実験では,繰り返し軸力載荷を行っている が,解析では継手部分モデルに対する単調圧縮の Pushover解析で評価した.

### 3.3 軸力とガセットプレートの面外変形

BRB 端部を接合した補強されないガセットについ て、面外方向に変形して崩壊する場合の外力として 限界モーメントを定義する.写真-2で示した破壊状 況を考慮し,図-14に示すような回転ヒンジを定義す る.BRB 端部の継手は複数の添接板によって構成さ れ、高力ボルトによって一体化していることから、 ガセット自身の面外剛性と比較して十分な曲げ剛性 を有する.本論文では継手先端を荷重作用点として、 ガセット内部の回転ヒンジを中心に変形する面外変 形 $\delta_g$ と軸力 P で与えられる面外曲げモーメントを考 える.評価の指標には面外変形量 $\delta_g$ と継手長さ $L_j$ の 関係から回転角 $\theta_g$ を算出して用いる.なお、ここで はガセットの面外回転角が継手部の回転角と一致す るものとする.

図-15 に CB-P の解析モデルについて,継手から軸 圧縮力が与えられた場合の,ガセット荷重 P(kN)と載



荷軸方向のひずみ  $\varepsilon_l$ の関係を示す.軸ひずみは,継 手長さ 595mm に対する圧縮変位である.図中には初 期たわみ 1/140の弾性比例限界を,降伏荷重 $P_y$ =147, 最大荷重を終局荷重 $P_u$ =199kN として示している.

初期たわみの与え方が大きいほど初期剛性が小さくなる傾向が顕著に現れている.また,たわみの大きさに関係なく圧縮ひずみが 600µ 以内で最大荷重に到達して,その後荷重が低下する結果が得られているが,いずれの最大荷重も,BRB の設計荷重 N(=470kN)より相当低いことがわかる.この結果を分析するために,軸圧縮力が作用する時のガセットの面外方向の変形挙動に注目する.

図-16 に軸力とガセットの面外変形をプロットした結果を示す.初期たわみが大きい場合,載荷の初期段階から面外変形が生じていることがわかる.一方で,初期たわみを厳しく制限するほど,軸力に対する面外変形は小さくなり,初期たわみ 1/140 モデルが降伏荷重に達する時点で,面外変形が $\delta_g$  =6.20mmの時,初期たわみ 1/560 のモデルでは面外変形が1.2mm程度と,1/4以下の変位に留まることがわかる.しかし,初期たわみの大きさによらず,比例限度を超えると荷重とともに面外変形が大きく進行して,初期たわみ 1/140 の場合で最大荷重到達時に $P_y$ =199kN, $\delta_g$ =15.11mmに達する.この変形挙動は,継手部材と一体化されたガセットの面外変形による座屈破壊とみられる.この現象は初期たわみが小さいほど鋭敏である.

これらの解析結果は、ガセットとその端部をモデ ル化して軸力を与える解析を行う場合、初期たわみ の与え方が軸圧縮に対する最大荷重や、ガセットの 面外変形に大きく影響することを示している.そこ で、実験結果と比較して、初期たわみの定量的な値 について検討を行う.

### 3.4 限界曲げモーメントの推定

表-5 に解析結果を実験結果と比較して示す.表中 に示した M<sub>u</sub>は,前述した初期たわみを考慮した面外 変形に対応するガセットの限界曲げモーメントであ り,解析および実験によって得た最大軸圧縮荷重 P<sub>u</sub>

解析モデル			解析結果		実験結果			M	
		$P_{u)FEM}$	$_{M} \delta_{gu)FEM} M_{u)FEM} P_{u)EXP}$		$P_{u)EXP}$	$\delta_{gu)EXP}$ $M_{u)EXP}$		$\frac{M_{u)EXP}}{M_{wEEM}}$	
ガセットの初期たわみ		(kN)	(mm)	(kN·M)	(kN)	(mm)	(kN•M)	III U)FEM	
CB-P	1/560	247.8	11.29	2.80	221.8	14.90	3.30	1.18	
	1/280	228.3	12.55	2.87				1.15	
	1/140	199.3	15.11	3.01				1.10	
СВ-Н	1/560	298.2	9.13	2.72	266.2	10.97	2.92	1.07	
	1/280	270.9	10.69	2.90				1.01	
	1/140	230.1	12.92	2.97				0.98	
4 4									

表-5 限界曲げモーメントの比較



図-17 曲げモーメントー回転角

と、面外変形  $\delta_{gu}$  の積によって算定されている.実験 結果の面外変形量は、前掲の図-11 に示したガセット の面外変形の測定結果を荷重作用位置に換算した値 で与えている.モデル CB-P の場合は、 $\delta_g$ =5.20mm で あるから、測定位置 220mm と継手長さ 595mm の関 係より、換算変位量は 5.20×(595/220)=14.90mm とな る.なお、この換算関係は数値解析でも成り立つこ とを確認している.

CB-P について,最大荷重  $P_u$ は実験結果を 89%~ 112%の範囲で推定しており,面外変形量  $\delta_{gu}$ は,76%~101%の範囲で推定している.限界曲げモーメント については,初期たわみが 1/140 の場合で 110%であ り,やや実験結果より低めに評価しているが,初期 たわみを厳しく制限するほど安全側の推定結果が得 られている.一方,CB-Hでは,初期たわみが 1/280 の場合,限界曲げモーメントは誤差 1%の推定結果を 与え,1/140 では実験結果よりわずかに高めの推定結 果となっているが,解析は概ね良好な推定をしてい ることがわかる.

### 3.5 曲げモーメントー回転角

初期たわみを 1/140 として推定した場合の軸力と 変形の関係を面外耐力  $M_g$ と回転角  $\theta_g$ で整理して, 解析結果を実験結果と比較すると図-17 のようであ る. 図中には表-5 に示した限界曲げモーメント  $M_u$ を同時に示す. 図-17(a)の CB-P について,曲げモーメントと回転 角の解析結果は実験結果と概ね一致している.また, 図-17(b)の CB-H は面外剛性をわずかに低めに推定 しているが,限界モーメントまでの挙動は概ね模擬 している.これらの比較検討によって,継手部先端 の面外変形と軸力から誘導した回転角 *θ*gと面外耐力 で,ガセットの崩壊までの挙動が推定可能であるこ とがわかる.

#### 3.6 ガセット面外補強の必要条件

BRB をガセットに接合する場合,接合部に求めら れる要求性能について考察する.本実験結果から明 らかなようにガセットに補強リブを添加せず,十分 な面外剛性を確保しない場合,ガセットは継手部と 一体となって面外変形を生じる場合があるため,ブ レース構造は3または4つのヒンジを形成して崩壊 する.従って,高性能BRBの要求性能を満たすため に,BRB 接合部およびガセットに求められる性能は 以下のようである.

- 本実験の標準供試体のように、面外耐力が小さいガセットにブレースを接合した場合は、大きな面外変形が生じて破壊に至る場合がある.従って、端部リブによって、ガセットの面外耐力を高める必要がある.
- 2) 具体的には、BRBの設計軸力と継手先端の面外 たわみの積から算定される回転曲げモーメント

に対して,ガセットの限界曲げモーメント*M*<sub>u</sub>が それを上回るような補強を施す.

 ガセットが受ける面外曲げモーメントは継手長 さL<sub>i</sub>がモーメントの腕の長さとなって作用する ため、継手長さL<sub>i</sub>は出来る限りコンパクトにする ことがガセットを補強する上で有利となる.

## 4. 結言

BRB とその接合部,およびガセットが一体となる ブレース構造モデルを模型化した供試体に対して繰 り返し軸力を作用させ,面外変形に対する安定性の 検証実験を行った.また,接合形式とガセットのリ ブ補強等を組み合わせた供試体の実験結果から,効 果的な接合方法とガセットの補強効果を実験結果で 示し,面外変形によって破壊したモデルについて, 数値解析的に検討した.以下に本研究で得られた結 論をまとめる.

- 全体座屈しない、適切な断面性能が確保された BRBであっても、ガセットを介して接合した場合、 ガセットの面外剛性が不足すると3つまたは4つ のヒンジを形成して崩壊することを実験的に明 らかにした。
- 2) ガセット内にBRBの軸力作用方向に水平リブを 追加した供試体は,無補剛のガセットと同等の変 形性能に留まった.従って,本実験供試体の水平 リブ設置方法では補強効果が得られないことを 明らかにした.
- 3) BRB端部継手とガセットをリブ付きの添接板で 一体接合する形式は,BRBの接合側端部で破壊し, 高性能BRBに求められる変形性能を十分に満た すことができなかった.
- 4) ガセットの端部に斜め方向リブを設置して補強 することで、高機能BRBの変形性能を十分に発揮 するガセットの面外剛性が確保されることを明 らかにした。
- 5) ガセットの初期たわみを定義し、その初期たわ みが1/140の場合、実験結果とよく一致すること を確認した.
- 6) ガセットとBRBの接合継手部をモデル化し、ガ セットが軸力を受けて、面外方向に急激に変形す る挙動をFEM解析によって再現した. さらに、 ガセット内の回転ヒンジを仮定し、面外曲げモー メントと、回転角の関係が実験結果と概ね一致す ることを示した.
- 7) ガセットの面外耐力として,限界曲げモーメントを定義し,FEM解析結果と実験結果と比較することで,その妥当性を明らかにした.

### 謝辞

本研究は、平成19年度文部科学省私学助成ハイテ クリサーチセンター整備事業で名城大学に設置され た「高度制震実験・解析研究センター」の助成を受 けて実施されたものである. 高機能制震ダンパーの 開発研究は、同センターの主要な研究課題として現 在も続行中である.

### 参考文献

- 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,土木学会構造工学論文集 Vol.55A, pp.527-538, 2009.3.
- 2) 佐藤崇,宇佐美勉,葛西昭:高機能座屈拘束ブレースの性能実験,第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集,土木学会地震工学委員会, pp.51-58,2008.1.
- 3) 宇佐美勉:高機能制震ダンパーの研究開発,第 10回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐 震設計に関するシンポジウム講演論文集,2007.2.
- 宇佐美勉,渡辺直起,河村洋行,葛西昭,織田 博孝:制震ダンパーとしての座屈拘束ブレースの 全体座屈,土木学会構造工学論文集Vol.52A, pp37-48,2006.3.
- 5) 千田耕大,藤田将之,葛西昭,宇佐美勉,渡辺 直起:鋼種の異なる座屈拘束ブレースの繰り返し 弾塑性挙動,構造工学論文集 Vol.52A, pp339-347,2006.3.
- 6) 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、2005.8.
- 7) 宇佐美勉,加藤基規,葛西昭:制震ダンパーとしての座屈拘束ブレースの要求性能,土木学会構造工学論文集Vol.50A,pp527-538,2004.3.
- 8) 宇佐美勉編著,日本鋼構造協会編:鋼橋の耐震・ 制震設計ガイドライン,技報堂出版,2006.9.
- 9) 竹内徹,山田哲,北川まどか,鈴木一弁,和田 章:構面外剛性の低い接合部による接合された座 屈拘束ブレースの座屈安定性,日本建築学会構造 系論文集,第575号,pp.121-128,2004.
- 10) 木下智裕, 聲高裕治, 井上一郎, 飯谷邦祐:接 合部を含む座屈拘束ブレースの構面外座屈防止 条件, 日本建築学会構造系論文集, 第621号, pp.141-148,2007.
- 11) 日本道路協会:道路橋示方書(I共通編・鋼橋 編)・同解説,丸善,平成14年4月
- 12) 土木学会鋼構造委員会 高力ボルト摩擦継手の 設計法に関する調査検討委員会:高力ボルト摩擦 接合継手の設計・施工・維持管理指針(案),丸 善,2006.12.
- 13) 土木学会:鋼構造物設計指針,丸善,平成9年版.
- 14) JIPテクノサイエンス株式会社: DIANA9ユーザー マニュアル, 平成17年9月.
  (2009 年 9 月 24 日受付)

-521-