

繰返し軸力を受ける高機能座屈拘束ブレースを接合する ガセットプレートに関する検討

渡辺孝一¹・吉川瑛人²

¹正会員 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）

²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（同上）

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^{1)~7)}。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」⁸⁾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)に関する保有性能を検討する。

BRBは例えば図-1(a)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、図-1(b)のように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端部接合部、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端部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。

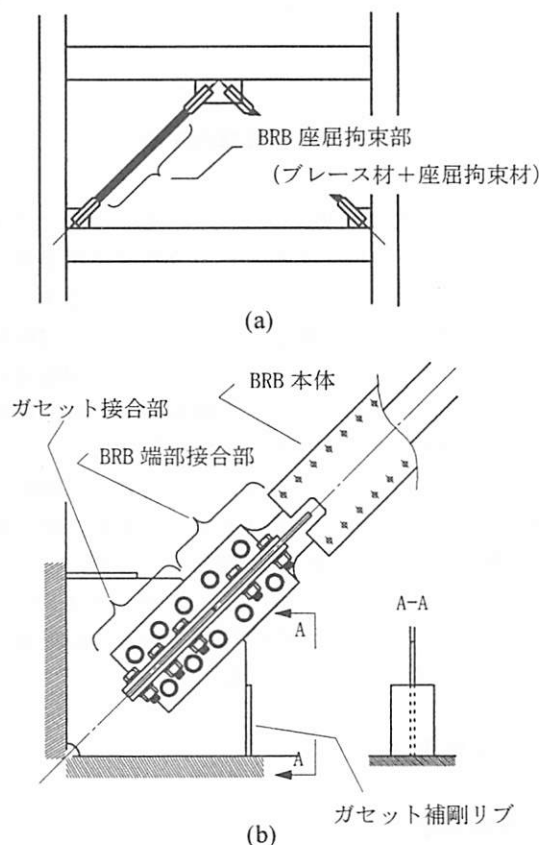


図-1 BRBの設置例と接合端部詳細

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⁷⁾。図-2(a)に示すように、ブレース端部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。

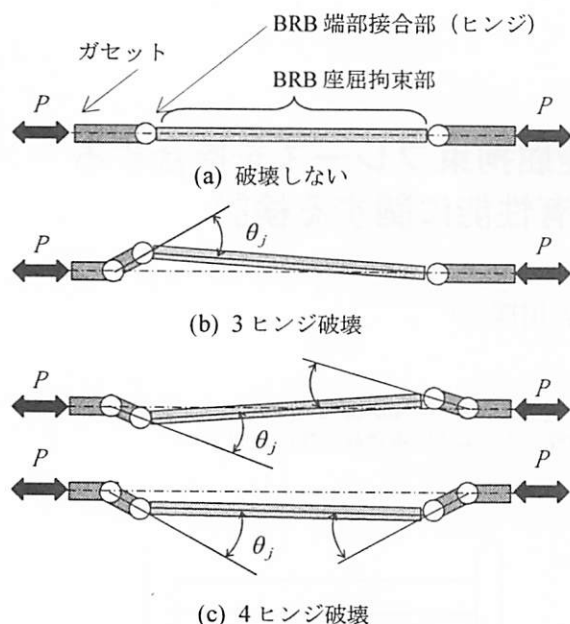


図-2 BRB 端部の破壊

しかし、剛性が低いガセットプレート（以下、「ガセット」と略記する。）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^{9),10)}。

既にガセットにより接合、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結果^{11),12)}については報告しているの、ここでは主な実験結果のみ説明し、ガセットプレートの面外耐力を確保するための補強方法とその効果について解析的検討結果を述べる。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

実験供試体の着目部は、図-3 に示すように BRB 座屈拘束部端部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。ガセットは、一般的にウィングプレートと呼ばれる垂直リブを設置することによってガセットの面外耐力を確保する。しかし、本研究では、ウィ

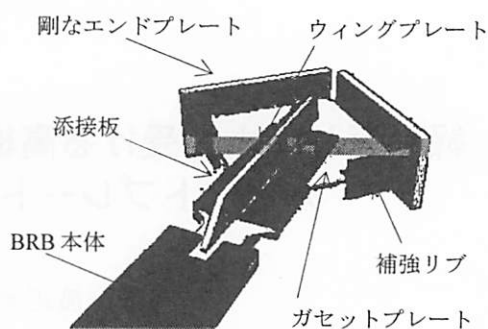


図-3 BRB 端部接合部の部材構成

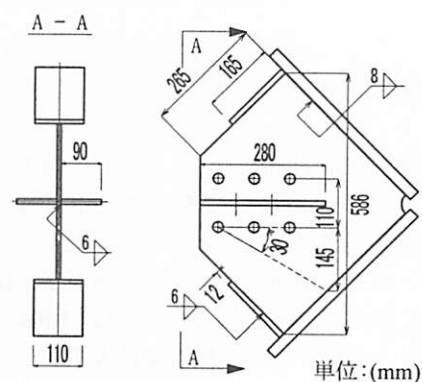


図-4 ガセットプレート形状

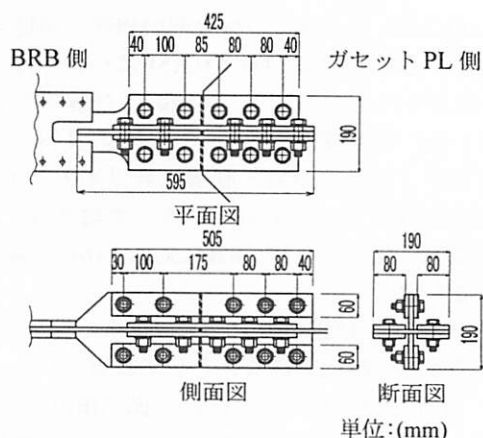


図-5 ガセットプレートの形式

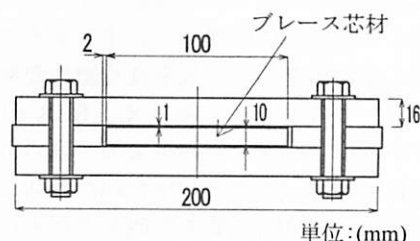


図-6 BRB 断面

表-1 BRB の性能諸元

供試体	鋼種	L (mm)	B (mm)	t (mm)	A (mm ²)	λ	P_y (kN)	δ_y (mm)
CB-P	SM400A	1375	100.30	9.81	983.94	486	288.03	1.96
CB-D			100.53	9.84	989.22	484	286.49	1.96

□ L : ブレース長さ, t : ブレース板厚, A : ブレース断面積 (記号は図-6 参照のこと)

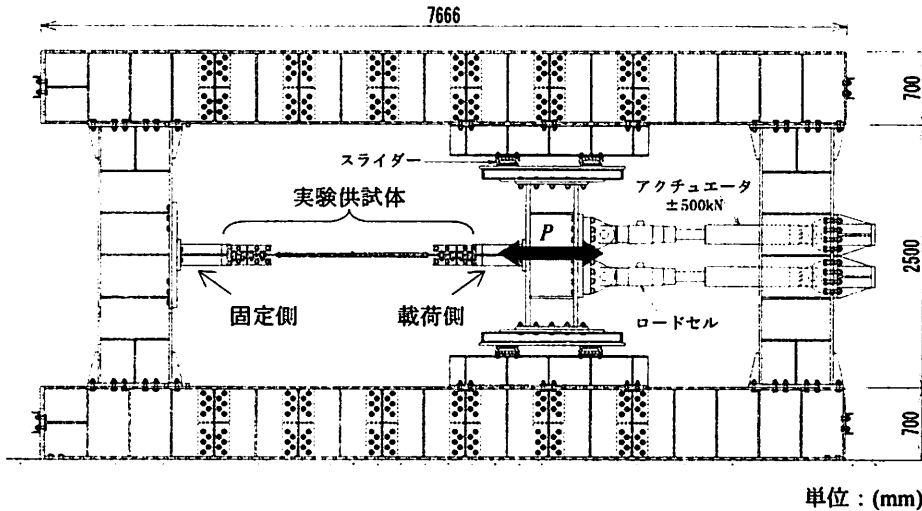


図-7 載荷装置

ングプレート形状を変更せず、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⁹⁾、(2)リブの局部座屈を防ぐ¹³⁾、(3)継手のボルト接合などの空間的な施工性に配慮する¹⁴⁾、などを考慮して試行的にリブサイズを決定した。ガセット板厚 10mm に対して、リブは板厚 12mm、サイズは高さ 165mm、幅は 110mm である。図-4 にガセット形状を示す。図中の補強リブを設置したモデルを CB-D タイプとし、補強リブがないモデルを CB-P と呼ぶ。

継手形状は図-5 に示すように、断面外形 190mm × 190mm の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高力ボルトで摩擦接合される形式とし、ボルトは M20 サイズを継手片側 8 本使用して、十分な摩擦接合強度を確保した¹⁴⁾。添接板を含めた継手の設計断面積は約 10780mm² である。

次に、BRB 座屈拘束部の断面を図-6 に示し、実験した値から算定した断面性能を表-1 に示す。この実験で用いた BRB は、宇佐美らが実施した実験供試体諸元⁷⁾を参考に設計しており、BRB 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。

ブレースの鋼種が SS400 材の場合 BRB の設計軸力 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 σ_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。簡略すると $N_u = 2 \sigma_y A \approx 470\text{kN}$ となる⁷⁾。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、図-4 に示すようなガセット形状の場合、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 $145 \times 2 + 110 = 400\text{mm}$ 、板厚 10mm から $A_{ga} = 4000\text{mm}^2$ となる。圧縮許容応力 σ_a (140Mpa) とすれば、ガセットの設計軸力 $N_{ga} = \sigma_a A_{ga} = 560\text{kN} > N_u$ を満足する。

以上のような BRB 端部継手に対して、ガセットの端部補強リブの有無に着目した実験供試体による比較実験を行った。

(1) 実験装置と載荷方法

実験供試体の設置状況および装置の全体を図-7 に示す。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

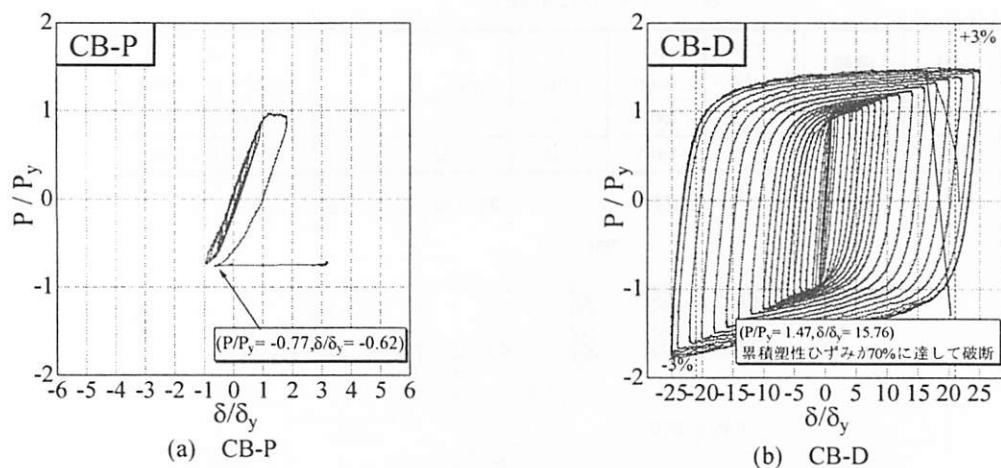


図-8 荷重-変位関係

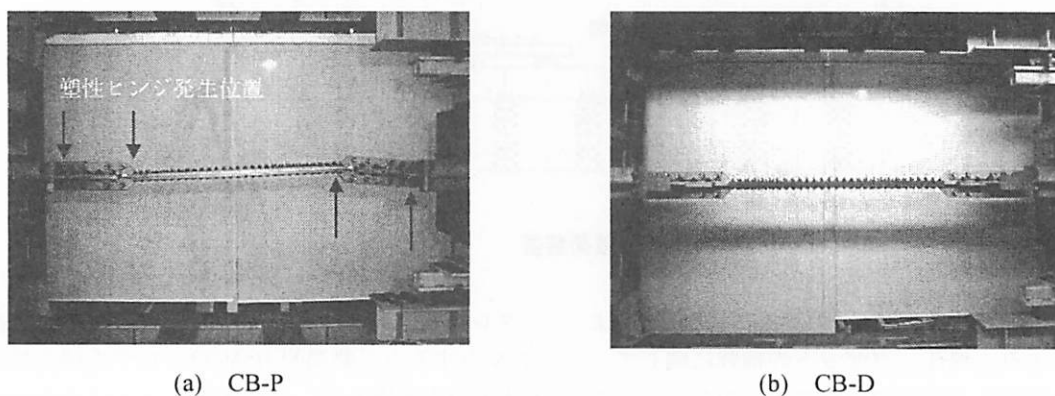


図-9 実験後状況 (全体)

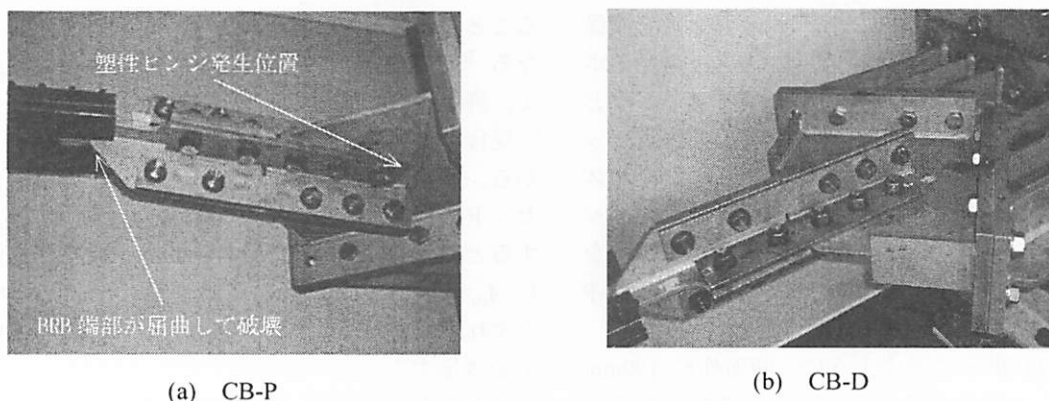


図-10 実験後状況 (端部ガセット)

解性能 0.5kN, 変位分解精度 0.01mm である。

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ら表-1 に示したブレースの降伏荷重 P_y に対する降伏変位 δ_y (=ブレースの軸部長さ 1375mm×平均降伏ひずみ $\epsilon_y=0.143\text{mm}$) 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 $\delta/\delta_y=20$ まで載荷を行った。

(1) 実験結果

図-8(a), (b)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_y , δ/δ_y の値は破壊直前

の最大荷重を発生した位置での荷重と変位の無次元化量を示している。

ガセットにリブがない場合、図-8(a)に示すように、 $P/P_y = -0.77$, $\delta/\delta_y = -0.62$ という载荷の初期段階でガセットの面外のたわみが増加し、その結果、軸方向耐力が失われて BRB 端部が破壊した。ガセットの面外変形に引き摺られるように、BRB 拘束部材端部が屈曲し、最終的には図-9(a)に示すように全体で 4 つの塑性ヒンジが発生して破壊に至った。特に载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、図-10(a)の点線ラインに示すウィングプレートの端部に発生した。

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 は、図-8(b)に示すように、高性能 BRB としての変形性能を十分に発揮しており、補強リブによって、ガセットの面外剛性が確保されていることが実験で明らかになった。最終的には、累積塑性変形⁷⁾は 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。非常に大きな塑性変形を伴う繰返し载荷実験後も、BRB の外観は図-9(b)に示すように無損傷であり、図-10(b)のようにガセットにも目立った損傷はみられなかった。

3. 解析検討

(1) 解析目的

BRB 端部を接合したガセットに対して、面外方向に変形し、崩壊する外力として限界モーメントを考える。実験結果で示した BRB 端部ガセットプレートの破壊状況から、図-11 に示すような回転ヒンジを定義する。BRB 端部の継手部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、ガセット単独の面外剛性と比較すると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、ガセットプレート内部の回転ヒンジを中心として継手アームが変形する面外変形 δ_g と軸力で与えられる曲げモーメントを考える。評価の指標には面外変形量 δ_g と継手長さ L_j の関係から回転角 θ_g を算出して用いる。なお、ここではガセットプレー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。

(2) 解析パラメータ

ガセットプレートの面外挙動に与える影響として、繰返し軸力作用する際の面外方向の初期たわみが重要であるが、実験の場合でも BRB 両端を固定す

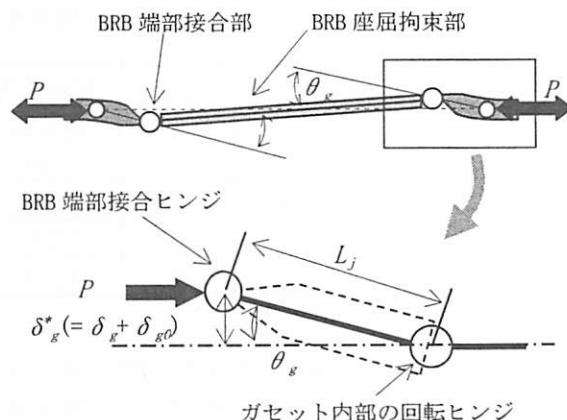


図-11 軸力と面外変形の関係

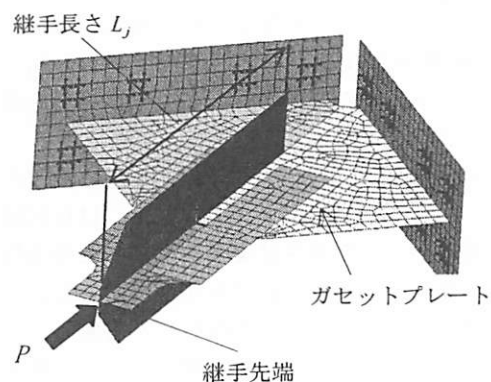


図-12 解析モデルの例 (CB-P タイプ)

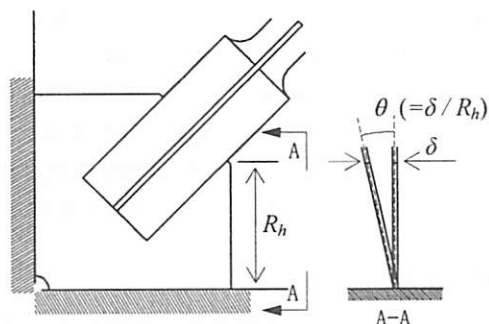


図-13 ガセットの直角度

るような供試体では、据え付け前後における初期たわみの測定は大変困難である。そこで、ガセット面外方向の初期たわみの大きさを変化させたモデルを作成し、実験結果との比較を行うことで、妥当な初期たわみの定量的検討を行った。解析モデルを図-12に示す。

初期たわみとして载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 δ_{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

表-2 限界曲げモーメントの比較

解析モデル		解析結果			実験結果			$\frac{M_u)_{FEM}}{M_u)_{EXP}}$
		$P_u)_{FEM}$ (kN)	$\delta_{gu)_{FEM}}$ (mm)	$M_u)_{FEM}$ (kN・M)	$P_u)_{EXP}$ (kN)	$\delta_{gu)_{EXP}}$ (mm)	$M_u)_{EXP}$ (kN・M)	
ガセットの取付直角度								
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

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 に示すような直角度に相当する。例えば、 $\delta_{go}=1\text{mm}$ の場合でガセットの突出長さ R_h 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。据え付け精度がより高い場合はガセットの面外変形に対して、初期の偏心荷重が小さくなることから、実用上も安全側となる。

解析で定義した材料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。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。求解は材料非線形と幾何学的非線形性を考慮してニュートンラプソン法を用い、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、解析では継手端部モデルに対する単調圧縮の Pushover 解析で評価した。解析に使用した汎用有限解析プログラムは、DIANA ver.9.3¹⁵⁾である。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。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。

(3) 解析結果

表-2 に解析結果を実験結果と比較して示す。表中に示した M_u 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_u と、面外変形 δ_{gu} の積によって算定されている。表中の解析結果について、最大荷重 P_u は初期たわみの値によって実験結果を 89%~112%の範囲で推定しており、面外変形量 δ_{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を高め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。

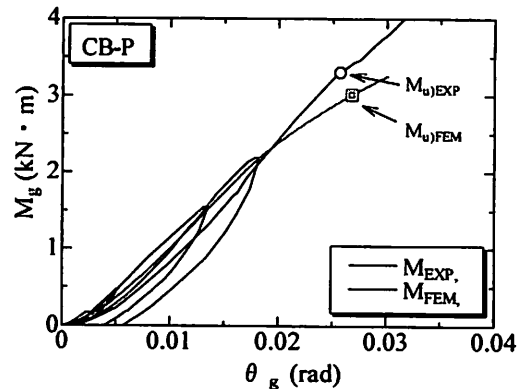


図-14 曲げモーメントー回転角

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回転角 θ_g と曲げモーメント M_g で評価して、解析結果を実験結果と比較すると図-14 のようである。回転角と曲げモーメントの解析結果は実験結果と概ね一致している。継手部先端の面外変形と継手長さから誘導した回転角 θ_g は、ガセットの限界回転モーメントの推定に適用可能であることがわかる。

3. 補強効果の検討

(1) パラメトリック解析

実験結果からガセット端部にリブ補強を施すことで、高い変形性能を保持することを確認した。この結果を受け、ガセットの面外変形性能を高める方策の1つとして、リブ設置による補強効果の検討をさらに進める。

本研究で対象とするガセットのリブ補強モデルの一例を示す。ガセットの一边は実験供試体に合わせ 413mmとした。リブを設置する突出部の長さは、265mmである。ガセットの板厚は板厚10mmとした。解析パラメータの補強リブの高さは、ガセット端部に溶接によって取り付けることを想定したもので、リブの厚さ12mm、リブの全幅110mm（ガセット中

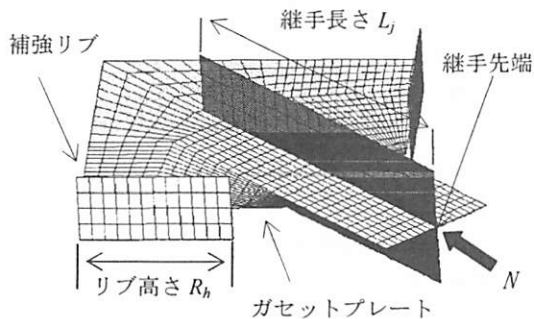


図-15 パラメトリック解析モデル

心から面外方向へ突出高さ55mm)を一定として、リブ高さ R_h を0mm(補強なし)～265mm(突出部全長)まで適当な間隔で変化させた全10ケースである。

解析の材料定数としてヤング率200GPa, ポアソン比0.3を定義した。鋼材の降伏応力はSS400材の降伏応力相当 $\sigma_y=235\text{N/mm}^2$ を定義し, 構成則は完全バイリニア型とした。初期たわみは先の実験結果の検証で示したようにリブ突出部の直角度が1/140程度を想定した一様の面外たわみを与えた。

(2) 解析結果

図-16には, 軸力 N とガセットの面外変位 δ_g との関係を示す。軸力は, リブなしモデルの最大荷重 $N_{uj0}=257\text{kN}$ で無次元化している。なお, 記号の添数字はリブの設置比率(%)を示す。リブサイズが大きいくほど, 最大軸力 N_u (図中の○印)は大きくなり, 最大軸力時の面外たわみは逆に小さくなる。実験モデルに近い, $R_h=165\text{mm}$ では最大荷重が N_0 の2.3倍であるから $N_{uj100}=590\text{kN}$ となり, 2.で前述したBRBの設計軸力を満足することも確認できる。

次に, 図-16の結果を, 荷重と面外変形の関係で計算される曲げモーメント($M_g=N \cdot \delta_g$)と, ガセットの回転角 θ_g でまとめたものを図-17に示す。最大軸力 N_u に対応する曲げモーメントを限界曲げモーメント M_{gu} と定義すると, 補強なしのガセットでは回転角 $\theta_g=0.013(\text{rad})$ で $M_{gu0}=1.66(\text{kN} \cdot \text{m})$ となり, この時の面外剛性を K_g と定義すれば $K_{g0}=127.7(\text{kN} \cdot \text{m})$ となる。

リブを設置することによって例えば $R_h=265\text{mm}$ の場合, $M_{gu100}=2.81(\text{kN} \cdot \text{m})$ となって耐力は1.7倍となり, 面外剛性は $K_{g100}=321.9(\text{kN} \cdot \text{m})$ より, リブ無しの場合の2.5倍が得られることがわかる。しかし, リブ補強による面外曲げ耐力に着目すると, 高さが83mm以上(ガセット突出長さの30%以上)であれば約1.5倍の一定の耐力となり, それ以上のリブサイズでも大きな変化がないことがわかる。

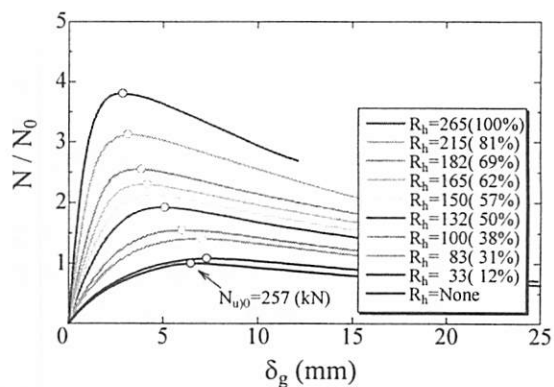


図-16 軸力-面外変形

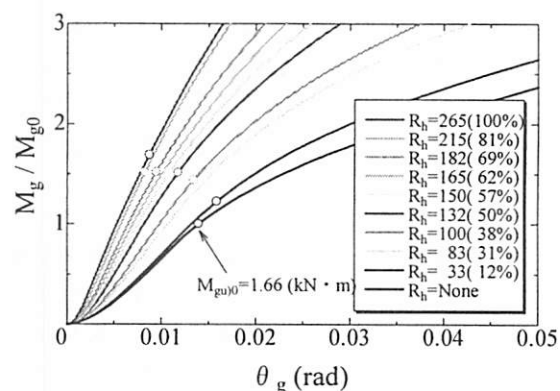


図-17 曲げモーメント-回転角

以上の解析結果から, 補強リブを考慮する場合は, リブ高さをガセット突出長さの30%ガセット以上確保すること, および, BRBの設計軸力が図-16で示された最大荷重を下回ることが, BRBの設計軸力を伝達可能なガセットの必要条件であると言える。

4. 結論

BRBとその端部接合部, およびガセットが一体となったブレース構造をモデル化した供試体に対して繰り返し軸力を作用させ, ガセットの挙動に関する検証実験を行った。そして, ガセットのリブ補強を施した供試体の実験結果を示し, BRBの高い変形性能を発揮させるガセットの補強効果を確認した。さらに, ガセットの面外変形によって破壊した供試体について, FEM解析で破壊過程を検証し, パラメトリック解析で補強リブの効果に関する追加検討結果を示した。以下に本研究で得られた結論をまとめる。

- 1) 全体座屈に対して安全な断面性能を確保したBRBをガセットを介して接合した場合, ガセットプレー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) 補強しないガセットが面外方向に変形して破壊する場合、ガセット内のウィングプレート端部で塑性ヒンジが形成されることを実験的に示した。
- 3) ガセットプレー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面外剛性が確保されることを明らかにした。
- 4) ガセットおよび継手部を部分モデル化し、単調圧縮によるPushover解析を行った。その結果、面外曲げモーメントと、ガセット内の回転ヒンジによる面外回転角の関係をj用いて実験供試体の挙動を推定できることを示した。
- 5) ガセットの初期たわみの定義として、突出長さに対する直角度を仮定し、1/140程度が適当であることを示した。
- 6) ガセットの面外変形と軸力から、限界曲げモーメントを定義し、解析によって実験結果を推定可能であることを示した。さらに、パラメトリック解析によって、補強リブの効果を検討し、本論文で示したガセット形状の場合、ガセット突出長さの30%以上を確保することで、補強をしないガセットの1.5倍の面外曲げ耐力を得ることを示した。

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

- 1) 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.
- 2) 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返し弾塑性挙動、構造工学論文集Vol.52A, pp339-347, 2006.3.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 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、登高裕治、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) 山口亮太、渡辺孝一：繰返し軸力を受ける座屈拘束ブレース材の接合部補強に関する実験的研究、第64回年次学術講演会講演概要集, I-125, pp.49-50, 2009.9.
- 12) 渡辺孝一、山口亮太、吉川瑛人：繰返し軸力を受ける高機能座屈拘束ブレースと端部ガセットの面外挙動に関する実験的検討、土木学会構造工学論文集Vol.56A, 2010.3.(掲載予定)
- 13) 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
- 14) 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.
- 15) JIPテクノサイエンス株式会社：DIANA9ユーザマニュアル、平成17年9月