

アングルブレースの座屈拘束ブレース化に関する実験的研究

篠田将旭¹・渡辺孝一²・児玉佳大³

¹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 愛知県名古屋市天白区塩釜口）

²博士（工学），名城大学准教授，理工学部建設システム工学科（同上）

³矢作建設工業株式会社（〒461-0004 名古屋市東区葵三丁目）

1. 諸言

兵庫県南部地震（1995）を始め，新潟県中越沖地震（2007）等の大地震時にアーチ橋，トラス橋等の横構あるいは対傾構の部材座屈，あるいはガセットプレート損傷の発生が顕在化するようになった。地震発生後の橋梁全体の機能保持という見方をすれば，ブレース材などの2次部材がヒューズとしてダメージを吸収したために，橋梁主構造の致命的な損傷を免れたという考え方もできる¹⁾。しかしながら，破断や座屈損傷したブレースは取り替えが必要となるなど，橋梁の長期使用，地震時の早期復旧対応を考慮すれば，ブレースに地震時のエネルギー吸収性能や変形性能を付加することは非常に有効な手段と言える。

近年，既設橋梁の耐震性能向上を目指して，H形鋼を制震ブレース化した研究報告¹⁾があるが，アングルに対しても，適切に制震ブレース化することが可能であれば，様々な形状のブレースに対する適用範囲の幅を広げることができる。アングルは規格製品のため安定した形状，品質が得られることから目的に応じた設計，製作が容易である。しかし，偏心曲げモーメントが作用するなどの弱点も考えられる。道路橋示方書²⁾では，引張山形鋼の有効断面積は，ガセットに連結されない脚の1/2を無効とするように規定されている。つまり，H型鋼や平鋼と比較して力学的に不利な条件を持つ。また，ブレースの全体座屈を防止するための，拘束部材の断面もやや複雑な組み合わせが必要となるなど，解決すべき課題は多い。

そこで本研究では，2本の山形鋼を1枚のガセットの両側に取り付けることで全純断面積が有効となる構造を採用した。この場合，部材の重心線と連結

位置が一致していないため，ガセット面に平行な軸直角方向には偏心が生じるが，ガセットと山形鋼との間にかなりの摩擦があることを考えて，偏心の影響を無視できる²⁾。座屈拘束ブレース化については，形鋼を利用することで，構成する部品数を減らしたアングルの制震ブレースを提案する。また，制震ブレースに要求される変形性能を確保するために，アングル端部，ボルト接合部の補強構造とガセット形状の提案を行う。

2. 実験概要

本研究では，アングルをブレース化するための必要な検討の流れとして，アングルと主構造ガセット接合部に関する細部検討を行い，その後，全体座屈を防止するための拘束部材を添加して，制震ブレースとしての変形性能を実験的に検討した。

(1) 実験供試体

実験供試体は目的に合わせて4台製作した。実験供試体の一覧を表-1に示す。表に示した供試体S1，S2と供試体S3，S4は実験の実施時期と載荷方法が異なるため，供試体S1，S2を1次実験，供試体S3，S4を2次実験として区別する。供試体と固定用治具とを一体化したものを，図-1,2に示す。

供試体として適用した等辺山形鋼は，(75mm×75mm×6mm)の規格材を背面背合わせにして一体化し，その両端はガセットプレートを挟み込むように高力ボルトで接合する構造とした。

表-1のうち，拘束部材を添加しない供試体をS1，S2，拘束部材によってBRB化を図ったものをS3，S4とした。

表-1 実験供試体の種類

供試体	実験時期	接合部 ボルト本数	接合部 補強	拘束材	ブレース材端部 露出部の補強
S1	1次	3	無	無	無
S2	1次	3	有	無	無
S3	2次	4	有	有	無
S4	2次	4	有	有	有

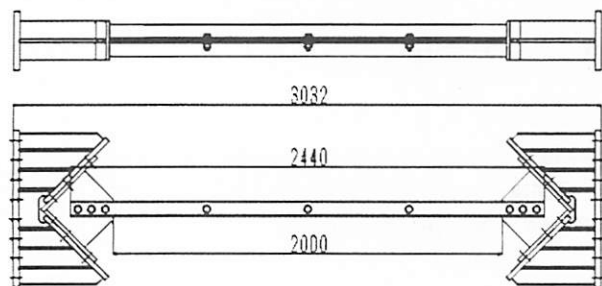


図-1 供試体 S1(無補強)

供試体 S2(ブレース端部補強有り)

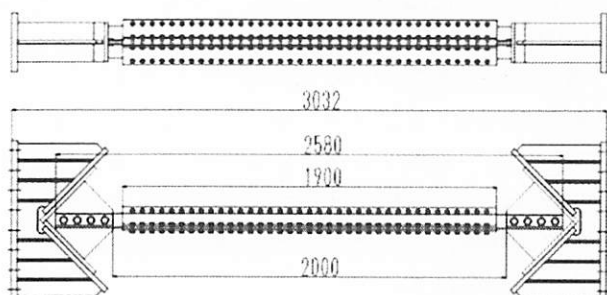


図-2 供試体 S3(端部露出部なし)

供試体 S4(端部露出部補強有り)

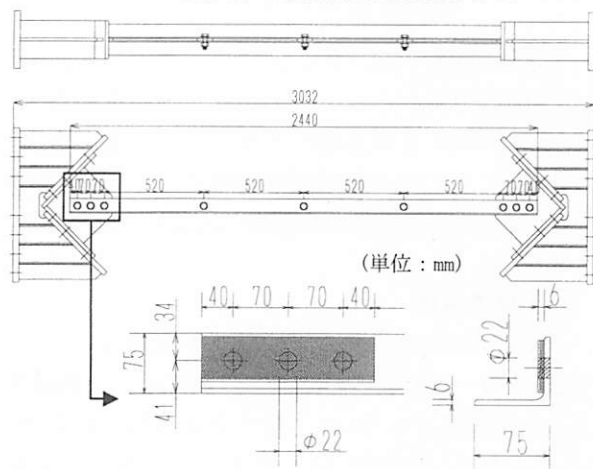


図-3 ブレース端部の補強図

表-2 ブレース材の設計

断面及び鋼種	L-75×75×6(SS400)		
細長比L/r	87	断面2次半径 r (mm)	23
断面積A(mm ²)	872.7	部材長L(mm)	2440
許容圧縮力P _{ca}	$\sigma_{cag} = 1200000/6700 + (L/r)^2 = 84.1 \text{ N/mm}^2$ $P_{ca} = 84.1 \times 872.7 \times 2 = 146.8 \times 10^3 \text{ N}$ (軸部)		
許容引張力P _{ta}	$P_{ta} = 140 \times 872.7 \times 2 = 244.4 \times 10^3 \text{ N}$ (接合部)		
	$P_{ta} = 140 \times 737.7 \times 2 = 206.6 \times 10^3 \text{ N}$		

表-3 接合部の設計

使用ボルト	M20 (F10T) 摩擦接合
許容ボルト力 F _b	F _b = 38.9 × 10 ³ N (ボルト1本当たり)
使用ボルト本数	n = P _{ta} / (F _b × 2) = (244.4 × 10 ³) / (38.9 × 10 ³) = 3

1次実験として、使用した供試体 S1, S2 は図-3 に示すようにガセット接合部の端部補強の有無に着目したものである。一般的にブレースは心材部とガセットとの接合部が同一断面であるため、引張方向に軸力を作用させた場合、ボルト孔欠損があるガセット接合部でボルト軸力が抜けると部材の端抜け現象により破壊が生じる。そこで、ブレース端部接合部に於て板を溶接し、補強をすることで接合部での損傷を軽減する効果を検証した。

供試体 S3, S4 は、1次実験による接合端部の補強効果を踏まえて、座屈拘束材を添加した供試体である。既往の論文では、ブレース材端部露出部は、露出長さによっては露出部で座屈する可能性があるとして報告している¹⁾。そこで、供試体 S3, S4 で端部露出部補強構造の違いについて着目した。この細部構造については、4. (1)で詳しく述べる。

(2) 実験供試体の設計

a) ブレース材、接合部の設計

アングルの部材長および、接合ボルト本数に適用した設計式を表-2 に示す。本実験で使用したアングルは、2次部材のブレースとして設計し、弾性軸力の範囲で全体座屈を防止するため、細長比は、道路橋示方書²⁾の規定にならい 150 未満を目標として決定した。また、表-2 に示す許容圧縮力および許容引張力は、道路橋示方書に従い決定した。

接合部設計について、ブレース部材への作用力と部材の全強の 75% の大きい方の力に対して設計する必要がある。本実験の供試体では塑性変形によりエネルギー吸収を期待する部材であるため、作用力はブレース材の全強に等しいものとし、1次実験の使用ボルト本数は表-3 に示すようにブレース材の許容引張力(244.4kN)を用いて決定した。2次実験についてはボルトのすべりに対し安全側に評価し、1列増やすこととした。

ガセットプレートとブレース材の接合には強度等級F10Tの高力ボルトを使用した。ボルト1本当たりのすべり耐力F_bは式(1)によって算出した。

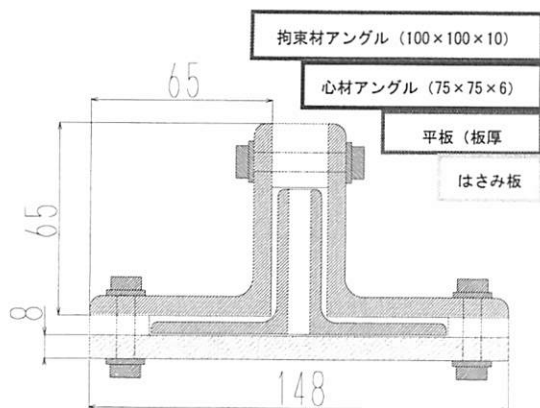


図-4 座屈拘束材断面

$$F_b = 1/\nu \cdot \mu \cdot \alpha \cdot \sigma_{yb} \cdot A_e \quad (1)$$

ここに、 ν =安全率(1.7)、 μ =すべり係数(=0.4 と仮定)、 α =降伏点に対する比率(0.75)、 σ_{yb} =ボルトの降伏応力(=900N/mm²)、 A_e =ボルトの有効断面積(=245mm²)である。これらの値より算出されるボルト 1 本当たりのすべり耐力は $F_b=38.9$ kN となる。締め付けボルト軸力は、設計軸力の 1 割増しの 182kN を目標とし、トルクレンチを用いて軸力を導入した³⁾。

b) 拘束材の設計

2 次実験で使用する座屈拘束材の詳細を図-4 に示す。本実験では出来るだけ規格の形鋼を用いて、単純な組み立てで出来るように拘束材を検討した。その結果、制震ブレース心材である背合わせしたアングルを、さらに覆うように一回りサイズの大きな (100×100×10) のアングルと板厚 9mm の拘束板により全体を拘束するような構造を試行的に採用した。

拘束材は、ブレース材の自由な伸縮を妨げないことと、ブレース材の全体座屈を防止するために必要な剛度を持たせることが重要である。制震ブレース材を伸縮させるために、アングルの全面にアンボンド材(1mm 厚のブチルゴム)を貼り付け、塑性変形に必要な空間を確保しつつ、ゴムの柔軟性によってブレース材の軸方向の伸縮を拘束しないようにした。またブレースの両端は高機能 BRB の変形性能 3% を確保するため、余裕を持って 5% の伸縮量を確保できるように、拘束材から両端 50mm ずつ露出させることで、拘束部材長さを決定した。

BRB の全体座屈を防止するための拘束材剛度の設計について示す。文献4)、5)では次式(2)の安全係数 ν_F を用いた全体座屈防止条件式が与えられている。

$$\nu_F \equiv \frac{1}{\frac{P_Y}{P_E^R} + \left(\frac{P_Y L}{M_Y^R} \right) \cdot \frac{a+d+e}{L}} \geq 3.0 \quad (2)$$

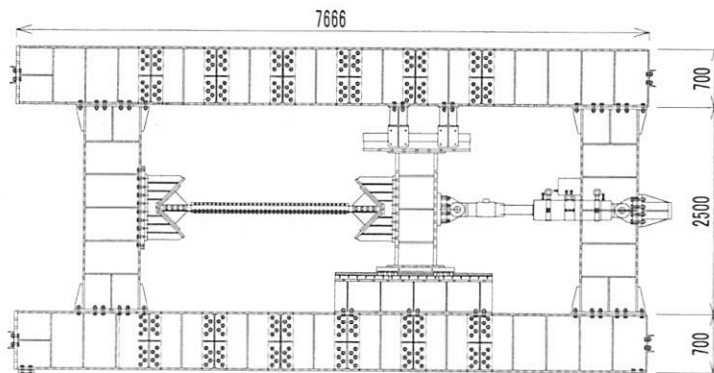


図-5 実験装置

ここに、 P_Y =ブレース材の降伏軸力、 P_E^R =拘束材のオイラー座屈荷重、 L =ブレース材の長さ、 M_Y^R =拘束材の降伏曲げモーメント、 a =拘束材中央の初期たわみ、 d =ブレース材と拘束材の隙間量、 e =軸圧縮力の偏心量である。式(2)は、文献4)、5)の形状を対象として提案された設計式であるが、本研究ではこれをアングルの強軸、弱軸方向に対して照査し、安全側の数値を適用した。

式(2)の適用にあたっては、全て公称値(材料定数)、設計値(寸法)を与え、 $a=L/1000$ 、 $d=1$ mm、 $e=0$ とした。照査の結果、安全係数は16.36が得られ、座屈を防止するために必要とされる3.0に比べて過大であるが、拘束部材に適用する適当なサイズのアングルが見あたらないことから、採用することとした。

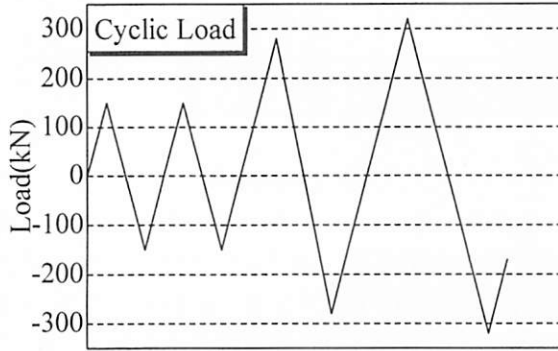
なお、拘束材はブレース材の座屈を拘束するため、十分強固に組み立てられている必要がある。拘束部材の組立に必要なボルト強度と配置については、十分に検討されていないため、本論文では文献4)、5)に示されている長方形断面のBRBの例を参考にし、サイズM10の高力ボルトによって、経験的にボルト配置を決定した。なお、ボルトの締め付けトルクは特に決定せず、手締めで可能な範囲で締め付けた。

(3) 実験装置

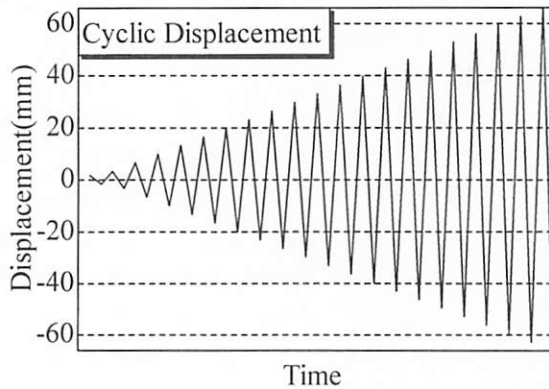
本実験は名城大学の高度制震実験・解析研究センターにて実施した。実験装置は、図-5に示すように、加力1000kN (引張・圧縮) の静的油圧アクチュエータを使用した。供試体を接合する中央のリニアガイドは、供試体の上下方向の変位を拘束しつつ、一端はアクチュエータと接合されており、アクチュエータのストローク500mmの範囲で、水平に円滑に移動するように設計されている。従って、供試体に対して、両端上下方向の変位を拘束した状態で、水平方向に軸力を作用させることが可能である。

表-4 材料試験結果

test plate		P_y (kN)	P_u (kN)	A (mm ²)	σ_y (Mpa)	σ_u (Mpa)	E (GPa)	ε_y	ν
1次実験	ブレース材	72.17	102.70	244.35	295.33	420.26	190.98	0.00155	0.28
2次実験	ブレース材	66.95	106.22	227.07	294.84	467.78	207.28	0.00138	0.33
	拘束材	116.68	171.87	400.71	291.17	428.91	197.86	0.00147	0.28

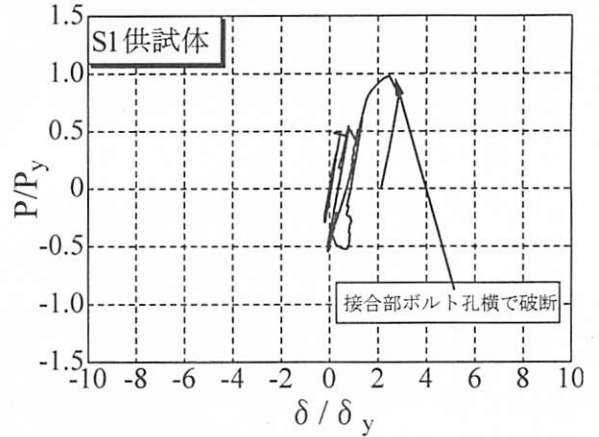


(a) 荷重制御 (1次実験)

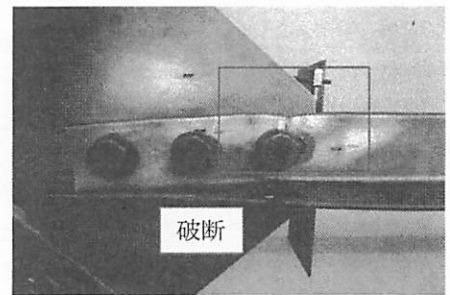


(b) 変位制御 (2次実験)

図-6 載荷パターン



(a) 荷重-変位曲線



(b) 端部破壊状況

図-7 供試体 S1 実験結果

(4) 載荷方法

荷重載荷方法は 1 次実験と 2 次実験で異なる。1 次実験ではブレース材に対し、接合ボルト周辺の挙動に着目するため、荷重制御によって行った。載荷パターンを図-6 (a) に示す。

設計降伏荷重の半分を引張、圧縮ともに 2 回作用させ、次に設計ボルトすべり耐力を少し上回る荷重を作用させた。その後は降伏荷重の 1 割ずつ荷重を漸増させた。

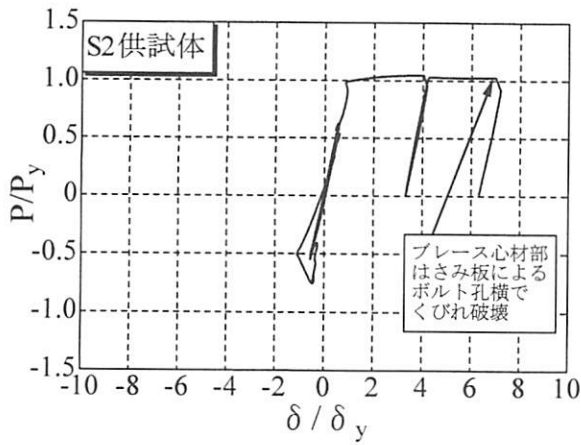
2 次実験では変位制御によって載荷した。載荷パターンは図-6 (b) に示すように、ブレース材の降伏変位 δ_y を基準として最初に $0.5\delta_y$ から始め、次からは $1.0\delta_y$ ずつ変位を増分して、各振幅で圧縮・引張両側に1回の繰り返し漸増載荷とした。降伏変位 δ_y は2.5に示す材料試験より得られた降伏ひずみ ε_y にブレース心材部の長さ L を乗じて算出した。

(5) 材料試験

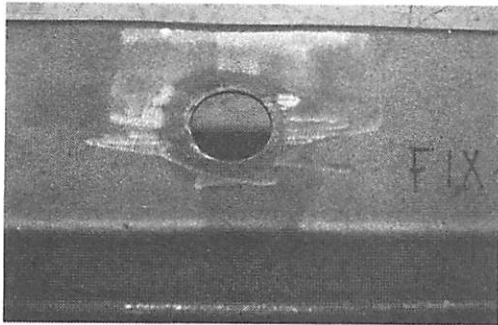
実験に先立ちブレース材、および拘束材の材料定数を決定するために材料試験を行った。試験結果を表-4に示す。引張試験片はブレース材アングル、ガセットプレートおよび拘束材アングルから3本ずつ採取し、結果は平均値を示している。

3. 実験結果

実験より得られた軸方向荷重 P と軸方向変位 δ の履歴曲線と供試体の損傷状況を図-7~図-10に示す。軸方向荷重および軸方向変位は、それぞれブレース材の全断面降伏軸力 P_y および降伏時の軸方向変位 δ_y で無次元化している。以下にそれぞれの供試体の履歴挙動、破壊状況を説明する。

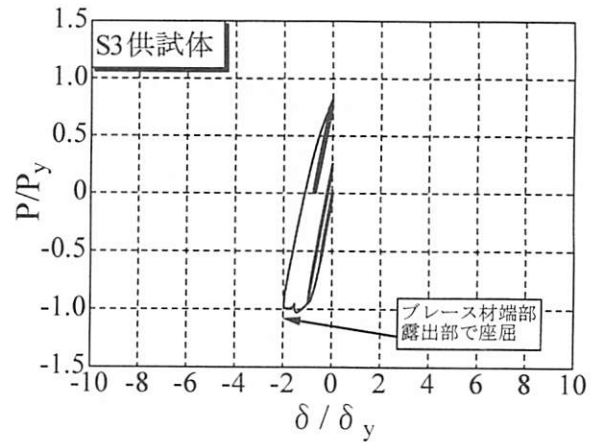


(a) 荷重-変位曲線

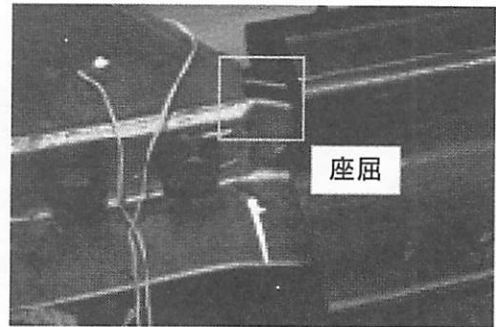


(b) はさみ板ボルト孔付近の破壊

図-8 供試体 S2 実験結果



(a) 荷重-変位曲線



(b) 拘束部材露出部での局部座屈

図-9 供試体 S3 実験結果

(1) 供試体S1

供試体S1の荷重-変位曲線を図-7(a)に示す。実験を開始し、 $P/P_y=0.49$ 、 $\delta/\delta_y=0.44$ に達したところで接合部にてボルトのすべりが発生した。その後も実験を継続し、圧縮側 $P/P_y=-0.54$ 、 $\delta/\delta_y=-0.08$ に達したところでアングルブレースの全体座屈が生じた。その後引張側に荷重し、 $P/P_y=0.98$ 、 $\delta/\delta_y=2.47$ に達したところで図-7(b)に示すように、接合部第一ボルト横にて破断が生じ荷重が低下したため除荷し、実験終了とした。この結果から、設計荷重を上回る圧縮軸力に対してはブレースの全体座屈が生じ、その後、引張軸力を作用させることで、座屈形状は復元されるものの、最終的にはボルト孔による部材の断面欠損部において、破壊が先行することが確認された(6)-9)。

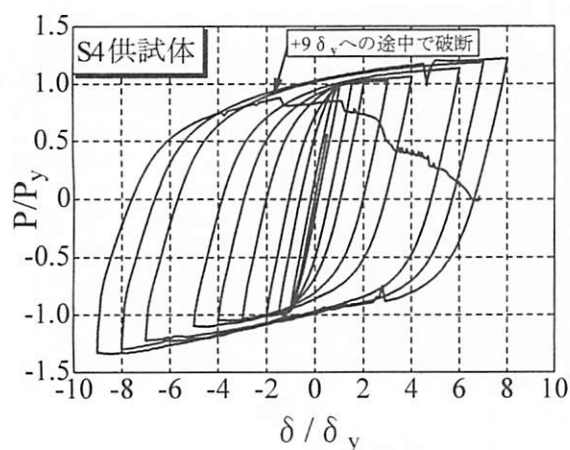
(2) 供試体S2

供試体S2は、ブレース端部接合部をあて板補強した供試体である。荷重-変位曲線を図-8(a)に示す。実験中の挙動は、まず $P/P_y=0.59$ 、 $\delta/\delta_y=0.51$ に達したところで接合部にてボルトのすべりが発生した。その後、引張側 $P/P_y=-0.75$ 、 $\delta/\delta_y=-0.46$ に達したところでアングルブレースの全体座屈が生じた。その後さ

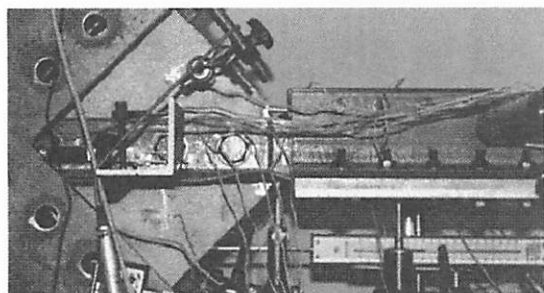
らに引張側に荷重を荷重し $P/P_y=1.05$ 、 $\delta/\delta_y=4.02$ に達したところで図-8(b)に示すようにブレース心材部、でアングルの背合わせを保持するための、はさみ板を固定するボルト孔付近でのくびれ破壊が生じて耐力が上昇しなくなったため除荷し実験を終了した。この結果から、ブレース端部をあて板補強することでガセットプレート接合部での破壊を回避させることができた。よって制震ブレース心材部に破壊を移行させることができた。

(3) 供試体S3

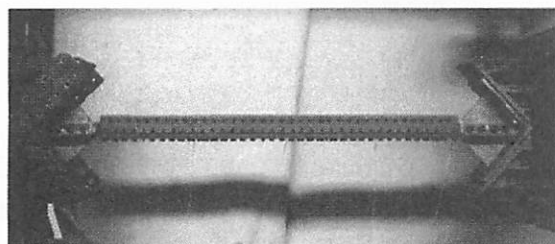
供試体S3の荷重-変位曲線を図-9(a)に示す。実験を開始して間もなく圧縮軸力作用時に図-9(b)に示すようにブレース材端部露出部で変形が生じた。その後実験を継続し $-2\delta_y$ に向かう途中で $P/P_y=-1.77$ 、 $\delta/\delta_y=-0.99$ に達したところで露出部での変形が顕著化し荷重低下を引き起こしたため実験終了とし、除荷した。座屈拘束材を取り付けることにより生じるブレース材端部の露出部は圧縮軸力が作用する時に先行して破壊が生じるため、制震ブレースとしての機能を発揮させるためにはこの露出部を補強することが必要不可欠であることを確認した。



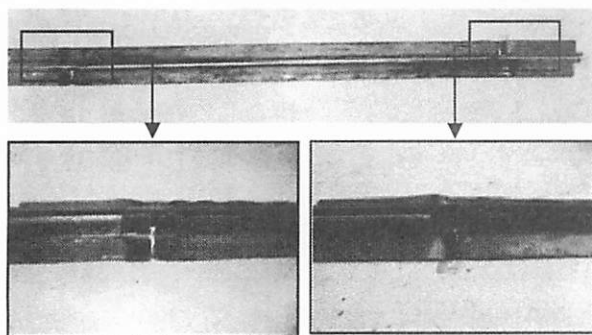
(a) 荷重-変位曲線



(b) 拘束材端部露出部の局部座屈



(c) 実験終了後状況



(d) ブレース端部の破壊状況

図-10 供試体 S4 実験終了後

(4) 供試体 S4

供試体 S4 の荷重 - 変位曲線を図-10(a)に示す。履歴型ダンパーによく見られる紡錘形の履歴曲線を描き、塑性変形履歴によるエネルギー吸収・消散がなされており、座屈拘束材はブレース材の全体座屈を拘束する機能を発揮していることが分かる。実験を

開始して間もなくブレース材とガセットプレートの接合部フランジにて図-10(b)に示すように局部座屈が生じた。しかし、局部座屈による耐荷力低下は見られず、安定していたため実験を続行した。

しかし、 $-9\delta_y$ に到達し $+9\delta_y$ に向かう途中 $P/P_y=0.87$ 、 $\delta/\delta_y=-1.57$ に達したところで拘束材内部でブレース材の破断が生じ、大きく荷重が低下したため実験終了とした。実験終了後の全体状況を図-10(c)に示す。拘束材の全体座屈やガセットプレートの面外変形は発生していないことが確認できる。また、拘束材内部のブレースの破断状況を図-10(d)に示す。

4. 考察

1次実験と2次実験により、アングルをブレース化するためには、ガセットとボルト接合部の補強および、拘束部材の取り付けを工夫する必要があることを確認した。特に文献1)でも、形鋼を制震ブレース化するために、拘束部材とブレースの露出部について、補強の必要性を指摘している。

本論文では、この露出部の補強についてアングル本体を補強することが、部材の断面形状から困難であるため、取り付けガセットを工夫することで、この問題点を解消した。

(1) ブレース材端部露出部の補強

座屈拘束材を取り付けたブレース材端部には引張および圧縮荷重を受けた時に伸縮するための露出部が必要である。本実験で使用した S3, S4 供試体には、ブレース材両端にそれぞれ 50mm ずつの露出部を設けた。文献1)にも記載されているように軸降伏型ダンパーにおいてこのブレース材端部の露出部は大きな弱点であり補強を施さないとブレース材端部にヒンジが形成され、圧縮荷重を受けた時にブレース材の面外方向に屈曲し、致命的な荷重低下を引き起こすことが確認されている。これは、前景の図-9(b)に示した通りである。

そこで本実験では図-11に示すように、ガセットプレートの端部に板厚 12mm の板を突出するように溶接し、ガセットプレートから座屈拘束材までの空間に「制震ブレース内面の拘束部材」を設けた。この部材により、拘束部材とブレース露出部の弱点部を補強する対策を施した。

その結果、载荷の初期段階でブレース材端部での局部座屈変形は見られたものの、露出部でのブレースおよびガセットプレートの面外方向への変形はな

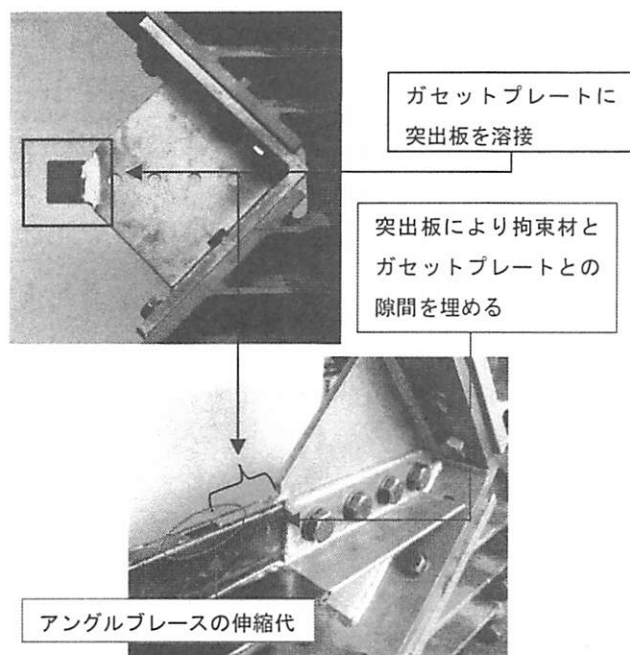


図-11 突出板とアングルの設置関係(拘束材を外した)

く、安定した履歴曲線を得ることが出来た。この補強方法は、幾何学的に複雑なアングルに対する拘束部材を設置する上で、非常に単純で、かつ効果が期待できる構造であったと考えられる。

(2) 端部ボルト接合部の補強効果

a) ボルト設計数量の評価

ボルトのすべり耐力は、ボルト本数および接合方法が2面摩擦接合であることから算定した。実験結果では、設計すべり耐力を越えたところでボルトのすべりが発生した。よって、設計上のボルトすべり耐力は余裕のない状態であったことがわかる。しかし、供試体S3, S4はボルト本数を増加することで、すべりに対して安定した挙動を得ることができた。

しかし、本実験のように制震ダンパーとして使用されるブレースは弾性軸力を上回り、塑性域まで軸力が作用することから、ボルト本数を算出する上で、許容引張応力 σ_a (140N/mm²)ではなく、ブレース材の軸力を全強として算出し、かつ、安全側に余裕を見て多めに配置することが良いと推察される。

b) あて板補強の効果

あて板補強により、ボルト孔をアングルに設けることで生じる、アングルの断面欠損を補う効果が期待でき、ボルト孔近傍で生じるはし抜け破壊を回避することが可能である。あて板により、ボルト軸力が確実に伝達されアングルとガセットの摩擦接合が安定することも推察されるが、この点については細部の検討が必要である。

(3) 制震ダンパーとしての変形性能

拘束部材を添加した2次実験結果より、アングルブレースの変形性能について考察する。供試体S3の変形性能^{4),5)}は $\varepsilon_u=0.014$ であり、累積塑性変形^{4),5)}は $CID_{lim}=0.13$ であった。なお累積塑性変形は、軸方向荷重Pと軸方向変位 δ の履歴曲線から求められる軸方向変位の塑性成分の絶対値の総和であり、ここではブレース材の長さLで除して平均ひずみで求めている。BRBの性能照査法および宇佐美らが提案しているこれらの算定については、文献1)を参考されたい。本実験の供試体S4の変形性能は高機能制震ダンパーの目標性能には及ばないものの、座屈拘束材を取り付けていないアングルブレース(供試体S1, S2)の変形性能に比べれば、座屈に対する変形性能が格段に向上されており、アングルを制震ブレース化する一つの方向性を示したと思われる。なお、本研究で適用した拘束部材は形鋼を組み合わせた結果、やや過剰な断面となった。そのため重量が大幅に増加し、拘束部材組立に必要なボルト本数が増加するなど、課題が残された。今後、軽量化と組立方向の簡略化によって、さらに制震ダンパーとしての性能向上を図る必要がある。

5. まとめ

本研究は、偏心曲げモーメントにより力学的に不利な特徴を持つアングルを、背合わせに配置することでその弱点を解消し、座屈拘束ブレース化したものである。

本論文では、既設ブレース材(横構、対傾構など)を取り替えることなく、それに座屈拘束材を設置することによりBRBの機能を付与させた供試体の基礎的な性能実験結果について述べた。実験は既設ブレースとして等辺山形鋼部材、座屈拘束材として山形鋼と平板をボルト接合して組み立てた拘束材を使用した。座屈拘束材は宇佐美らの既往研究に基づいて設計し、ガセット接合部は道路橋示方書を参考に設計した。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- 1) 座屈拘束材の設計については、式(2)を適用した。結果、ブレース材の全体座屈を防止することができた。
- 2) 接合部のボルトのすべり耐力はいずれの供試体も実験値が設計値を上回っており、設計値は安全側に評価されていることを確認した。しかし、制震ダンパーとして使用するブレースの接合部の設計では、ブレース材の全強に対して本数を算定することが望ましいと考えられる。

- 3) 1次実験の結果より，本実験で使用したブレースは引張軸力が作用する時，ガセットプレートとの接合のためのボルト孔欠損部近傍で破壊が生じる．これは，ブレース材端部にあて板を溶接し，補強を施すことで回避することができる．
- 4) ブレース材が軸方向に自由に伸縮し変形性能を確保するために拘束材から露出した部分が存在する．圧縮軸力が作用する場合，その部部位で局部座屈する可能性があるため十分な配慮が必要である．本研究では，ガセットにと突出板を取り付け，内部拘束板を設けることで，局部座屈による耐力低下を防止し，制震ブレースとしての変形性能を発揮させることを示した．
- 5) 本研究で採用した座屈拘束部材は，文献4)，5)に採用されている拘束材に比べ，部材数およびボルト本数が多く，重量が増加した．今後，拘束部材を改良することで，軽量化を図り，さらに制震ブレースとしての性能を向上させる検討が必要である．
- 6) CT形鋼などにおいても軸力の偏心を抑える構造を採用し，ガセットとの連結構造に留意すれば，座屈拘束ブレース化が可能であると言える．

6.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．

参考文献

- 1) 織田博考，宇佐美勉：既設H形ブレース材の制震ダンパー化に関する基礎的実験，構造工学論文集，Vol.56A，pp.499-510，2010.3.
- 2) 日本道路教会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，2002.3
- 3) 土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案)
- 4) 宇佐美勉，渡辺直起，河村洋行，葛西 昭，織田博考：制震ダンパーとしての座屈拘束ブレースの全体座屈，構造工学論文集，Vol.52A，pp.37-48，2006.3.
- 5) 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，Vol.55A，pp.719-729，2009.3.
- 6) 河野蒼之，吉野雅之，宇田川邦明，山田隆夫：高力ボルト接合された山形鋼筋違い材の破断形式と破断耐力（その1：実験の概要と結果），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.881-882，1999.9.
- 7) 河野蒼之，吉野雅之，宇田川邦明，山田隆夫：高力ボルト接合された山形鋼筋違い材の破断形式と破断耐力（その2：破断耐力の推定式），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.883-884，1999.9.
- 8) 河野蒼之，吉野雅之，宇田川邦明，山田隆夫：高力ボルト接合された山形鋼筋違い材の破断形式と破断耐力（その3：ボルト孔配置の幾何学的条件を考慮した破断耐力の推定），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.889-890，1999.9.
- 9) 宇野暢芳，竹内一郎，井上一郎：高摩擦係数を有する高力ボルト摩擦接合部の有効断面積に関する研究（その2：複数本ボルト接合部の引張載荷実験と有効断面積の評価），日本建築学会構造系論文集，No.533，pp.183-189，2000.7.