座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動 に関する実験的研究

渡辺直起¹·加藤基規²·宇佐美勉³·葛西昭⁴

 ¹名古屋大学大学院博士課程前期課程 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町) E-mail:watana@sts.civil.nagoya-u.ac.jp
 ²三菱重工業株式会社 広島研究所 (〒730-8642 広島市中区江波沖町 5-1) E-mail:motoki_kato@mhi.co.jp
 ³名古屋大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町) E-mail:usami@civil.nagoya-u.ac.jp
 ⁴名古屋大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町) E-mail:kasai@civil.nagoya-u.ac.jp

本研究は,座屈拘束ブレースの繰り返し載荷実験を通して,その履歴特性に関して実験的に解明したもので ある.さらに,実験結果を利用して,横方向の拘束効果を考慮した解析モデルの妥当性の検証と,履歴特性を 模擬する簡易解析モデルの構築を行った.結果として実験における安定した履歴曲線や,ブレースに高次の変 形モードが現れたことから,座屈拘束ブレースの,圧縮方向及び引張方向に安定した高いエネルギー吸収能力 を立証した.また,簡易解析モデルでは,エネルギー吸収能力の精度を損なうことのないモデルを構築した.

Key Words : buckling-restrained braces ,vibration control systems ,energy absorption ,cyclic elasto-plastic behavior , unbonding material

1. 緒言

我が国では、地震による土木構造物の被害を軽減す るために多くの研究が行われている.特に、土木鋼構 造物の中でも橋梁構造物の耐震分野においては、損傷 を制御する技術に関する研究が、近年新たな活路とし て盛んに行われている¹⁾.この制震構造の多くは、構 造物の内部に地震エネルギーを吸収する装置を設け、 主構造物の損傷を制御し、地震後の残留変形を低減さ せるものである.このような制震構造部材は、地震力 を吸収して主構造の振動を減衰させる働きをすること から一般にダンパーと称され、復元力特性に優れた耐 震要素として建築分野では早くから研究されている¹⁾



図-1 座屈拘束ブレースの例 (アイ・ケイ・ビル)

屈拘束ブレースがある.座屈拘束ブレースは高層ビル などのラーメン構造にブレース材として実用化が進ん



図-4 本実験の座屈拘束ブレースの断面構成図

図-5 ブレース材の全体図

でおり,図-1 がその例である.座屈拘束のない細長 いブレースは,繰り返し圧縮力が作用した場合,曲げ 座屈を生じることで耐荷力が急激に低下し,十分なエ ネルギー吸収を期待することはできない.また,ブレ ースに曲げ座屈に伴う耐力低下が生じないような復元 力特性とさせるため細長比を極端に小さくすると,周 辺の柱に過大な応力が発生し、耐力バランスが崩れ、 設計を煩雑にする.そこで,細長比を小さくすること なく,エネルギー吸収部材として安定した履歴特性を 有し,かつ大きな軸変形にも対応する必要があるとい った要求に対して,モルタルや鋼材などで製作された 拘束材でブレースを覆い,圧縮時の局部座屈と全体座 屈を拘束したブレース, すなわち座屈拘束ブレース (BRB)が有効に用いられる.ブレースの座屈を拘束す ることによって圧縮側に引張側と同様の履歴特性が得 られ,ブレースのエネルギー吸収・消散能力を格段に 向上させることが期待できる.

図-2 は,座屈拘束ブレースの基本構造と挙動を概 念的に示したものであり,図-3 は断面構成例を示し たものである.

本研究は,加藤ら⁵⁾の解析的研究を受けて,座屈拘 束プレースについての繰り返し載荷実験を通して,そ の履歴性能に関して実験的な検討を行い,解析モデル の妥当性を検証すること, さらにブレース材の復元力 特性を構築することを目的としている.

単位は全て[mm]

2. 実験概要

← B

座屈拘束ブレースには種々の要求性能がある.詳細 は文献 6)で述べるが,本実験で採用した断面構成は, 既存のブレースを補強する場合も想定し,**図-4**に示 すような構成とした.ブレース材には平鋼を採用し, 拘束材は既製品であるデッキプレート(Uリブ)を切 断して製作し(以下,ハット材と称す),そこにモルタ ルを充填したものを用いた.軸方向に自由に変位でき るようにアンボンド処理を施したブレース材を拘束材 で両側から挟み込むように装着し,ボルトにより接合 した.断面の厚さが3種類のブレース材に対して供試 体を製作し,引張・圧縮交番の繰り返し載荷実験を行 った.以下,実験供試体,実験方法に関して述べる.

(1) 実験供試体

実験供試体の鋼種は SS400 であり,全体図を図-5 に示す.端部はリブで補強した十字型断面であり,部 材長L (=1355mm)はこの十字断面部分を含まない平板

供試体名	L [mm]	<i>b</i> [mm]	t [mm]	A [mm ²]	λ	b/t	<i>P_y</i> [kN]	δ_y [mm]
BR59-12	1355	100	8.49	851	553	11.8	260	1.94
BR47-10	1355	100	9.78	980	480	10.2	268	1.78
BR39-8	1355	100	11.8	1180	399	8.54	328	1.75

表-1 ブレース材の諸元

表-2 鋼材の材料定数

供試体名	E [GPa]	σ_y [MPa]	Е _у [%]	E _{st} [GPa]	E st [%]	σ_u [MPa]	Е _и [%]	v
BR59-12	213	306	0.143	2.88	1.69	438	28.8	0.291
BR47-10	209	273	0.131	3.70	1.73	422	30.0	0.288
BR39-8	216	278	0.129	4.16	1.88	428	32.4	0.294



図-6 拘束材の概念図

部分(以後,変形部分と称する)の長さである.なお, ブレース材中央部には厚さ12mmの正方形型プレート がすみ肉溶接されているが,これは,拘束材が軸方向 にずれるのを防ぐ目的で設けたものである.

ブレース材の諸元を**表** - 1 に示す **表** - 1 において, *L*:部材長,*b*:断面幅,*t*:部材板厚,*A*:断面積, : 弱軸に関する細長比,*b/t*:幅厚比を意味している.な お,細長比 は,ブレースの弱軸まわりの値である. 供試体名に関しては,BR はブレースを意味し,連続 した数字は順に設計時の細長比及び幅厚比の上2桁を 意味する.*L*,*b*については各供試体とも共通(それぞ れ,1355mmと100mm)であり,板厚のみが供試体に よって異なり,それに伴って細長比,幅厚比が変化す る.

実験で用いたブレース材と同じ鋼材から JIS 1 号試 験片をそれぞれの板厚に応じて3本ずつ製作し,引張 試験を行った.それにより得られた鋼材の材料定数を **表 - 2**に示す.**表 - 2**において,E:ヤング係数, σ_y : 降伏応力, ε_y :降伏ひずみ, E_{st} :初期硬化係数, ε_{st} : 初期硬化ひずみ, σ_u :引張強度, ε_u :破断ひずみ, :ポアソン比である.また,測定した材料定数を用 いて計算したブレース材の変形部分の降伏荷重 $P_{y=\sigma_{y}A}$,降伏荷重時の伸び $\delta_{y}=\varepsilon_{y}L$ を表 - 1 に示す.拘束材は,鋼種 SS400のハット材にモルタルを充填したものを2個用意した.その拘束材の概念図を図 - 6 に示す.この拘束材でアンボンド処理を施したブレース材を両側から挟み込むように装着する.なお,ボルト穴付近には,過度の応力集中を起こさないように補強プレートを装着した.

ブレース材の軸方向変形を拘束しないために,アン ボンド材としてブチルゴム(厚さ1mm)をブレース材 表面に接着した.アンボンド材はブレース材と拘束材 の間に適切な隙間(クリアランス)を確保する役目も 果たす.本実験では,アンボンド材に早川ゴム株式会 社製のサンタックシーラーを適用した.この製品はブ チルゴムを主材としたテープ状のシーリング材であり, 固形のゴムで粘着性があるため,1mm 程度のゴム厚で シールのような貼り付けが可能である.

(2)実験装置

本実験の実験装置の概略図を図-7 に示す.実験供 試体は基部がピン支持の鉛直柱(ピンからの高さ



図-7実験装置概略図

h=1900 mm)と台座間に45°の角度で設置し,端部は ボルトにより接合した.水平力は容量±350kNのアク チュエーターにより加力した.アクチュエーターによ リ水平方向に載荷することにより,実験供試体には軸 方向荷重 $\sqrt{2}$ H(H=水平力),軸方向変位 $\delta_{H}/\sqrt{2}$ (δ_{H} = 水平変位)が与えられるようになっている.ブレース 材の変形部分の長さは*L*=1355mm ≈ $h/\sqrt{2}$ であるので, 実験供試体の変形部分(平板部分)のひずみは,接合 部の変形を無視すると, $\delta_{H}/\sqrt{2} \div h/\sqrt{2} = \delta_{H}/h$ となり, 柱の回転角にほぼ等しくなる.柱には回転の滑りをよ くするため,剛柱上部のジャッキにより微小な鉛直荷 重を加えた.このジャッキは水平梁にローラー支持さ れており,水平方向に自由に動くことができる.

(3)計測

実験供試体の変形部分の軸方向変位(伸縮量)δは, ブレース材の変形部分(長さLの平板部分)に端部を 固定した細い針金とダイアルゲージ(最小目盛: 1/500mm)によって計測した.実際には,実験供試体 には拘束材があり,変形部分のみの変形の計測は困難 であったため,変形部より少し長め(平板部分に最も 近い接合ボルト間)の変位を計測して代用した.その 他,実験供試体の軸方向ひずみをひずみゲージにより 計測した.

(4) 載荷パターン

実験ではアクチュエーターを実験供試体の軸方向 変位 δ によって制御した.載荷パターンは, $\delta_y \sim 6\delta_y$ までは δ_y ずつ, $6\delta_y \sim 12\delta_y$ までは $2\delta_y$ ずつ, $12\delta_y$ からは $3\delta_y$ ずつの変位増分で,各振幅一回ずつの両側 繰り返し載荷を行った.なお本実験においては, $20\delta_y$ までの載荷を目標とした.すなわち,20.0を軸方向変 形に関する目標塑性率とした.その理由は,接合部を



除いたブレース材の変形部分の軸ひずみ 3.0%(層間変 形角がほぼ 0.03rad.)を目標とする⁷⁾と,本実験ではそ れがおよそ 20 δ_y に相当するからである.実験装置の 容量の制限上,BR59-12供試体は 24 δ_y ,BR47-10供試 体は 21 δ_y ,BR39-8供試体は 15 δ_y までの載荷で実験 を終了した.

3. 実験結果及び考察

(1) 軸方向力 - 軸方向変位関係

実験によって得られた各供試体の軸方向力 - 軸方向



(c) BR39-8

写真-1 実験終了後のブレース材の状況

変位関係を図-8の実線で示す.なお,引張側を正と し,縦軸,横軸をそれぞれ,降伏軸力 P_v ,降伏変位 δ_v で除して無次元化している. 図-8 を見ると,各供試 体とも引張側,圧縮側でほぼ同様な履歴曲線を描いて いる.ただし,引張側と圧縮側の履歴曲線を詳細に検 討すると,完全に対称であるとは言えず,各供試体と も塑性域の勾配(2次勾配)が若干圧縮側の方が大き く,荷重値についても引張側に比べて15%程度大きく なる傾向が見られる.これは,圧縮時にブレース材と 拘束材が接触し,その間に生じた摩擦力がアンボンド 材では完全に除去できなかったためであると考えられ る.アンボンド材は,ブレース材の軸力を拘束材に伝 えないようにするだけでなく,ブレース材と拘束材の クリアランスを均等に保つ役割もあり,座屈拘束ブレ ースが性能を発揮するために重要なものである.一方, ブレース材と拘束材の隙間が大きすぎるとブレース材 の耐力低下を起こすため,上限値を設ける必要がある ⁹⁾.

(2)供試体の変形状況

実験終了後のブレース材の変形状態を**写真**-1 に示 す.これらより,ブレース材の軸方向変位は,大きさ を制限された高次モードのたわみ(横方向変位)によ って引き起こされていることが分かる.圧縮時にも安 定した復元力特性が得られ,大きなエネルギー吸収能 力を有するのはブレース材のたわみが一定量より小さ く拘束されているからであり,ブレースと拘束材の隙



図-9 解析モデルの概要

間量の制限が重要であることが分かる.たわみモード 波数は細長比が大きいほど大きくなっている. BR59-12 は最も高次なモードで変形しているが,全体 から見ると左半分の方がやや細かい変形が現れている. これは,アンボンド材の効果がブレース材の左右で異 なり,それに伴い圧縮時に生じる摩擦力にも若干の差 が生じたなどの要因が考えられる.

(3)解析結果との比較

加藤ら⁵⁾により構築された座屈拘束ブレースの解析

モデル	使用要素	構成則	<i>L</i> [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>t</i> [mm]
T-Bi	トラス	バイリニア型移動硬化則 (<i>E</i> 2= <i>E/60 ; E</i> 2=2 次勾配)		100	8.49
T-2sm	トラス	修正2曲面モデル	1355		
B-2sm	はり (拘束効果あり)	修正2曲面モデル			

表-3解析モデル

モデルは,ブレース材の挙動をブレース材と拘束材間 の接触問題と考え,対称性を考慮して図-9に示すよ うな初期たわみを有する単純支持柱モデルを用いた. ブレース材にはせん断変形を考慮した平面はり要素を 使用し, 拘束材は表面がなめらかな剛壁とし, アンボ ンド材は,有限個のばね(バネ定数 k,)によりモデル 化されている.詳細については文献 5),8)を参照され たい.なお,前掲の図-8には,全実験供試体の軸方 向力 - 軸方向変位関係について , 加藤らの解析モデル による解析結果もプロットされており,実験結果との 比較が可能である .初期たわみは ,最大値を 0.5mm(ア ンボンド材厚の 1/2)として,半波の正弦曲線で与え た.なお,諸材料定数は,各実験供試体の引張試験の 値を用いている.両者の履歴曲線は若干の差はあるも ののほぼ一致しており,加藤らによる解析モデルが座 屈拘束ブレースの弾塑性挙動を精度良く再現できるも のであることが分かる. 圧縮側で実験結果と解析結果 で多少差が現れている.これは,実験ではブレース材 と拘束材の間に摩擦力が生じるために荷重値が多少高 くなる傾向にあるが,解析モデルでは摩擦力を考慮し ていないため 荷重値に差が生じたものと考えられる. BR39-8 を除く2体の実験結果は、圧縮時の最終ループ では解析結果と若干差が出ている (実験の荷重の方が 大きい)ことが見受けられる.拘束材の全体図で示し たように,拘束材端部にはブレース材の形状に合わせ て溝が設けてあり、ブレース材と装着した後に、ブレ ース材の部分と拘束材のモルタル部分が接触しないよ うに隙間が設けてあるが,圧縮側の最終サイクル時に ブレース材十字断面部が拘束材のモルタル部分に接触 したため,実験の荷重が大きく出たものと思われる.

4. ブレース材の復元力特性

前述の解析モデルは,ブレース本体の挙動をなるべ く忠実に解析するために考案された解析モデルである が,複雑な構造物の地震応答解析には,より簡易な復 元力モデルが必要である.そこで,本実験により得ら れた座屈拘束ブレースの履歴特性を模擬することので





きる簡易な復元力モデルを構築する.ブレース材をト ラス要素によってモデル化した解析モデルと,はり要 素によってモデル化した解析モデルを対象とする.各 解析モデルの名称,使用要素,構成則,諸元をまとめ て表-3に示す.

表 - 3の諸元において *L*,*b*,*t* は実験供試体 BR59-12 の諸元と同様とした.また,材料定数は同実験供試体 の材料定数を用いた.

T-Biの構成則は,バイリニア型の応力-ひずみ関係 を有し,降伏後の2次勾配 E2は弾性域での勾配 Eの 1/60を用いた.これは,実験より得られた軸方向荷重

軸方向変位曲線の降伏後の勾配の平均値より得られたものである. T-Biはトラス要素であるので,軸方向荷重 軸方向変位関係は,応力 ひずみ関係に相似となる.

T-2sm,B-2smの構成則は繰り返し弾塑性挙動を精緻 に再現できる修正2曲面モデル⁹⁾である.T-2sm はト ラスモデルであるため,T-Biと同様,応力 ひずみ関 係に相似となる.B-2sm は,加藤ら⁵⁾による前述の解 析モデルである.

解析により得られた各モデルの荷重 - 変位関係を 比較したものを図 - 10 に示す. 実線, 点線, 破線は それぞれ T-Bi, T-2sm, B-2sm を示している.履歴ルー プの折り返し点荷重については, 各モデルで差はほと んどなく, よく一致しているが, 除荷曲線はモデル間



で差が現れる.これは,バウシンガー効果の影響であ り,この効果が最も顕著に現れるのが,2曲面モデル の応力 ひずみ関係に相似な T-2sm,次に部分的にこ の効果が現れるはり要素を用いた B-2sm である.T-Bi には,バウシンガー効果は考慮されていないので,除 荷曲線は最も硬くなっている.

次に,各モデルの累積エネルギー吸収量 E_i(履歴曲 線で囲まれる面積の累積値)を比較したものを図-11 に示す.軸方向荷重 軸方向変位曲線において,変位 振幅の小さいものからハーフサイクルの番号を図-12 のようにつけ,面積 A_iの和を求めた.ステップの 定義は図に示すとおりである.図-10の履歴曲線では, 用いる構成則や要素によって差が生じていたが,図-11 の累積エネルギー吸収量で見るとほとんど差がな い.従って,エネルギー吸収量の観点では,T-Bi,T-2sm のような,トラス要素を用いる方法によっても,ブレ ース材の応答を再現することが可能であると言えよう.

座屈拘束ブレースを解析でモデル化する時には,次 のような使用方法が推奨される.

- ブレース材のみの厳密な挙動を知りたい場合:加藤 ら⁵によるモデルを使用.
- ブレースを設置した小規模な構造物の応答を知りたい場合:座屈現象の起こりえないトラス要素を用いる.ただし,材料構成則は修正2曲面モデルを使用.
- 3) ブレースを装着した大規模な(節点数の多い)構造 物の応答を知りたい場合:座屈現象の起こりえない トラス要素を用いる.ただし,材料構成則は,2次 勾配を第1勾配の1/60とした移動硬化型のバイリ ニアモデルを使用.



図 - 12 ステップiと累積エネルギー吸収量Eiの定義

5. 結言

BRB に関する実験と解析から得られた結論は以下のように要約できる.

- BRB の繰り返し載荷実験から,圧縮側においても 引張側と同様な履歴特性を得ることができ,その高 いエネルギー吸収能力を確認した.
- 2) ブレース材の軸方向変位は、大きさを制限された高 次のモードの横方向変位によって引き起こされる ことが分かった.
- 3) BRB の解析モデルによる結果と実験による結果を 比較したところ 両者の履歴特性は類似したものと なり 解析モデルが座屈拘束ブレースの実験を再現 できるものであることを立証した.
- 4) 実験および解析で得られた履歴特性より BRB の復元カモデルを構築した.その結果,SS400 鋼材の BRB に対してはバイリニアーモデル(第2 勾配= 第1 勾配/60)の移動硬化則で模擬できることが分かった.

なお,本研究では座屈拘束ブレースについての繰り 返し載荷実験を通して実験的・解析的な検討を行った が,今後土木構造物への適用法を検討するには,さら に多くの研究が必要である.今後の課題は,以下のよ うな項目がある.

- 本実験では SS400 の平鋼ブレースを使用したが, 降伏点が小さく、優れた伸び性能を有する低降伏点 鋼など,様々な鋼種について実験を行い,同時に復 元力特性の構築を行う.
- (2) 座屈拘束ブレースに関する次のような要求性能⁶⁾ について,研究を行う.
 - a) 座屈拘束ブレース材の全体座屈の防止
 - b) ブレース材の座屈による耐力低下の防止

- c) ブレース材の必要塑性率の確保
- d) ブレース材の低サイクル疲労防止
- e) 拘束材の強度
- f) 座屈拘束ブレース材と主構造の接合部の強度
- (3) 座屈拘束ブレースを実際の土木構造物に適用した 場合の具体的な設計法と効果^{10,11,12} について検 討を行う.

参考文献

- 社団法人 日本鋼構造協会:履歴型ダンパー付骨組の地震 応答性状と耐震設計法,pp. 66-81,1998.
- 2) 岩田衛,村井正敏,加藤貴志,小林秀雄,和田章:座屈 拘束されたブレースを用いた履歴型ダンパーの性能評価 実験(その1:実験計画),日本建築学会大会学術講演梗 概集,C構造,pp.921-922,2000.
- 3) 岩田衛,村井正敏,加藤貴志,小林秀雄,和田章:座屈 拘束されたプレースを用いた履歴型ダンパーの性能評価 実験(その2:実験結果),日本建築学会大会学術講演梗 概集,C構造, pp.923-924,2000.
- 4) 長尾直治,高橋茂治:角鋼管を鉄筋コンクリートで被覆したアンボンドブレースの弾塑性性状(その1:繰り返し加力実験),日本建築学会構造系論文報告集,第422号, pp.105-115,1990.
- 5) 加藤基規,宇佐美勉,葛西昭:座屈拘束ブレースの繰り 返し弾塑性挙動に関する数値解析的研究,構造工学論文

集, Vol.48A, pp. 641-648, 2002.

- 6) 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,構造工学論文集に投稿中.
- 7) 岩田衛:座屈拘束ブレースを用いた履歴型ダンパーの性 能比較実験,鉄構技術, Vol.14, NO.157, pp. 34-42, 2001.
- 2) 加藤基規:座屈拘束ブレースの弾塑性挙動,名古屋大学 工学研究科土木工学専攻修士論文,2003.
- 9) Shen.C , Mizuno.E , Usami.T : A Generalized Two-Surface Model for Structural Steel under Cyclic Loading , Structural Eng . / Earthquake Eng . , Proc . of JSCE , Vol.10 , No.2 , pp. 23-33 , 1993 .
- 10) 金治英貞, 鈴木直人, 美濃智広: 長大トラス橋の損傷制 御構造における履歴型ダンパー最適構造と配置に関する 基本検討,第6回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造 物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. 377-384, 2003.
- 野中哲也・宇佐美勉・吉野広一・坂本佳子・鳥越卓志:
 上路式鋼アーチ橋の大地震時弾塑性挙動および耐震性向
 上に関する研究,土木学会論文集,No.731/I-63,pp. 31-49,
 2003.
- 12) 宇佐美勉,河野豪,葛漢彬,日沖堅治,路志浩:制震ダンパーによる鋼アーチ橋の耐震性向上,土木学会論文集 に投稿中.

(2003.6.30 受付)

Experimental Study on Cyclic Elasto-Plastic Behavior of Buckling-Restrained Braces

Naoki WATANABE, Motoki KATO, Tsutomu USAMI and Akira KASAI

This study is aimed at investigating seismic performances of buckling-restrained braces. Firstly, an experiment on buckling-restrained braces under cyclic axial loading is curried out. As a result, it is found that cyclic behaviors of the braces are stable both in tension and compression regions. And development of the restraining member has yielded satisfactory performances. Moreover, it is observed that the numerical results from the established analytical model are close to the experimental results. Finally, a simplified analytical model accounting for high energy absorption capacity of buckling-restrained braces is developed.