

鋼種の違いに着目した座屈拘束ブレースの繰返し弾塑性挙動

渡辺直起¹・宇佐美勉²・葛西昭³・藤田将之⁴・千田耕大⁵

¹学生会員 名古屋大学大学院環境学研究科博士課程前期課程都市環境学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²フェロー会員 D.Sc. 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 博士(工学) 名古屋大学助手 大学院工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

⁴学生会員 名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

⁵名古屋大学工学部社会環境工学科社会資本工学コース(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

1. 緒言

近年、我が国における土木鋼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盛んに行われている¹⁾。これは、制震装置の設置による耐震性向上策をめざしたものであるが、制震装置として、地震エネルギーを吸収するために開発された、制震ダンパーを用いることがしばしばある。こうした部材を主部材以外の2次部材(地震後に取り替えや補修が容易にできる部材)に設け、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構造は、一般に制震構造と呼ばれ、建築分野では早くから研究されている技術である^{1)~3)}。

本研究は、適用が容易で安価であることから、土木鋼構造物の制震ダンパーとして多く用いられる可能性の高い座屈拘束ブレース(Buckling-restrained brace, 以下BRBと略称する)の性能に関して、実験的および解析的に考察したものである。BRBは、図-1に示すように中・高層ビル等のラーメン構造に斜材として用いられるなど、建築分野で幅広く実用化されている。基本構成は、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ものであるが、ブレースが降伏し、塑性変形することでエネルギー吸収を行うため、ブレース材に用いられる鋼材の機械的性質(降伏点など)がBRBの変形能に多大な影響を与える。

名古屋大学では、鋼種の異なるブレース材を用いたBRBの繰返し載荷試験を実施し、その性能に関して検討を行ってきた。普通鋼(SS400材、以下SS400と略称する)を用いたブレース材については、拘束材として、鋼管にモルタルを充填したもの(後述)を用い、安定した履歴特性を有することを確認している⁴⁾。また、極低降伏点鋼(JFE-LY100材、以下LY100と略称する)を用いた場合について、前述の拘束材を用い、安定した履歴特

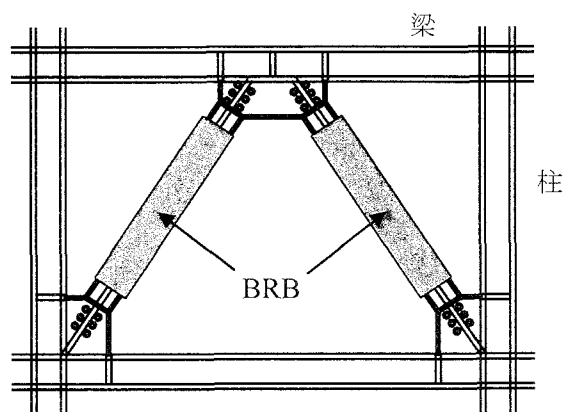


図-1 BRBの設置概念図

性が確認されている⁵⁾。しかし、低降伏点鋼(JFE-LY225材、以下LY225と略称する)を用いた場合については、まだ検討されていない。

本研究では、ブレース材に新たにLY225を用いた場合の繰返し載荷試験を実施し、復元力特性を把握する。そしてSS400、LY100を用いた場合の実験結果を参照し、それらの復元力特性を模擬できる、簡易な解析モデルを構築することを目的としている。

2. 実験概要

BRBは、適用する構造部や位置に応じて、様々な断面構成を有する¹⁾。また、種々の要求性能が検討されている⁶⁾が、本実験においては、既存のブレースを補強する場合等の施工性や適用性を考慮し、図-2に示すような2種類の断面構成を採用している。ブレース材にはともに平鋼を使用し、拘束材には図-2(a)のように、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、ハット材と称する)、そこにモルタルを充填したものと、図-2(b)のように、鋼種がSS400のH型鋼からウェ

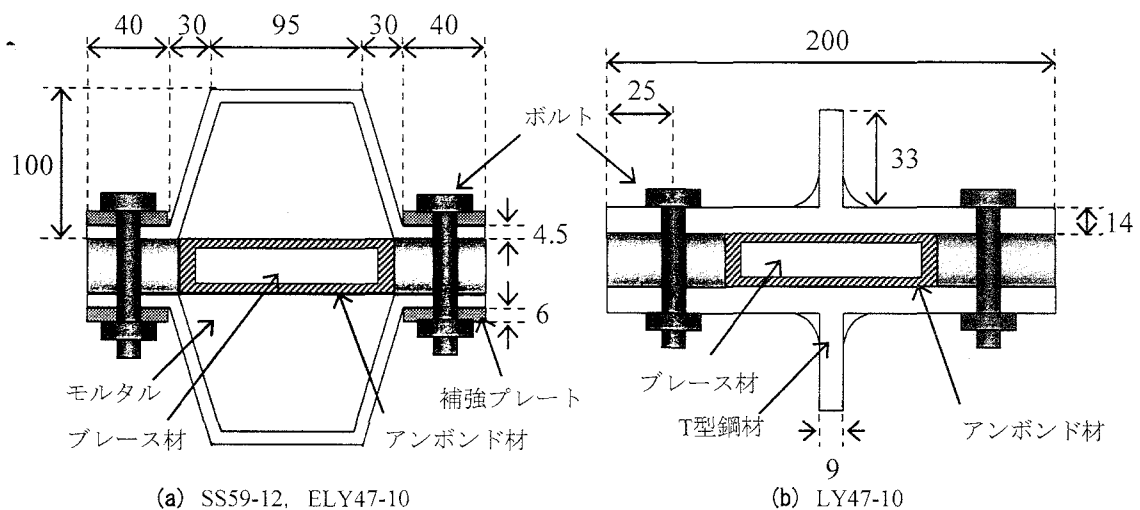


図-2 本実験のBRBの断面構成図

表-1 ブレース材の諸元

供試体名	L [mm]	b [mm]	t [mm]	A [mm ²]	λ	b/t	P_y [kN]	δ_y [mm]
SS59-12	1355	100	8.49	851	553	11.8	260	1.94
LY47-10		99.8	10.2	1020	461	9.77	228	1.64
ELY47-10		100	10.0	1006	467	10.0	90.5	0.594

表-2 鋼材の材料定数

供試体名	E [GPa]	σ_y [MPa]	ε_y [%]	E_{st} [GPa]	ε_{st} [%]	σ_u [MPa]	ε_u [%]	ν
SS59-12	213	306	0.143	2.88	1.69	438	28.8	0.291
LY47-10	184	223	0.121	1.96	2.60	315	40.3	0.285
ELY47-10	205	90.0	0.0439	3.12	0.433	249	45.8	0.306

ブの部分切断・研削し製作した、T型の鋼材⁷⁾を用いた。また、軸方向に自由に変位できるように、ブレース材にはアンボンド材を用い、一組の拘束材はボルト接合した。以下、実験供試体、実験方法に関して述べる。

(1) 実験供試体

本実験で用いたブレース材の全体図を図-3に、諸元を表-1に示す。図-3のように、ブレース材の端部は、実験装置への設置上リブで補強した十字型断面としており、部材長 L はこの十字断面部分を含まない平板部分(以後、変形部分と称する)の長さである。表-1において、 L : 部材長、 b : 断面幅、 t : 部材板厚、 A : 断面積、 λ : 弱軸まわりの細長比、 b/t : 幅厚比、 P_y : 降伏軸力、 δ_y : 軸方向降伏変位を意味している。供試体名に関しては、SSはSS400、LYはLY225、ELYはLY100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。また、実験で用いたブレース材と同じ鋼材からJIS1号試験片を製作し、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、 ν : ポアソン比である。

拘束材は、SS59-12、ELY47-10には図-2(a)の鋼種SS400のハット材にモルタルを充填したものを用い、LY47-10には図-2(b)のT型鋼材を用いている。また、ブレース材の軸方向変形を拘束しないために、ブレース材には、1mm厚のブチルゴムを主材としたテープ状のシーリング材(以下、アンボンド材と称する)を両面に施し、ボルトにより接合した。なおアンボンド材には、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。

(2) 実験装置

本実験の実験装置の概略図を図-4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 $h=1900$ 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。水平力はアクチュエーターにより加力し、柱には回転の滑りをよくするため、剛柱上部のジャッキ

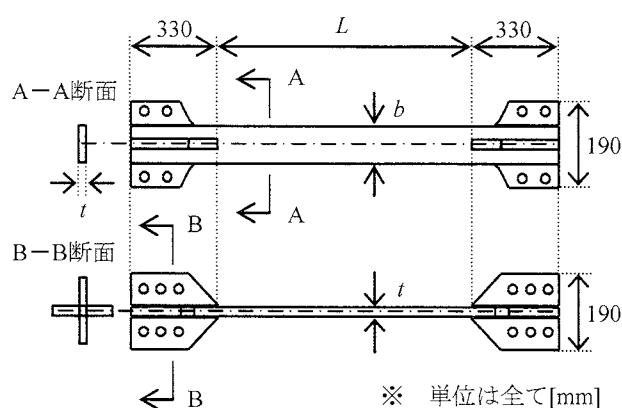


図-3 ブレース材の全体図

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) 載荷パターン

本実験では、アクチュエーターを実験供試体の軸方向変形 δ によって制御し、引張・圧縮交番の両側繰り返し载荷（引張側を正とする）を行った。SS59-12 および LY47-10 の载荷パターンは、図-5 のように $0.5\delta_y$ から開始し、 $\delta_y \sim 6\delta_y$ 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 $3\delta_y$ ずつ漸増させていく。ELY47-10 については、折り返しの変位を図-5 の3倍とし、 $1.5\delta_y$ から開始し、 $3\delta_y \sim 18\delta_y$ までは $3\delta_y$ ずつ、 $18\delta_y \sim 36\delta_y$ までは $6\delta_y$ ずつ、 $36\delta_y$ からは $9\delta_y$ ずつ漸増させていく。また、ブレース材の目標塑性率については、建築分野の指標⁸⁾を参考に、3.0%軸ひずみ相当変位としている。接合部を除いたブレース材の変形部分の軸ひずみ 3.0%は、本実験で用いた SS400 では約 $23\delta_y$ 、LY225 では約 $25\delta_y$ 、LY100 では約 $70\delta_y$ に相当する。なお、実験装置の容量の制限上、SS59-12 は $24\delta_y$ 、LY47-10 は $25\delta_y$ の4回までの载荷、ELY47-10 は $63\delta_y$ までの载荷で実験を終了した。

3. 実験結果及び考察

(1) 軸方向力—軸方向變位關係

実験によって得られた各供試体の軸方向力-軸方向変位関係を図-6 に示す。なお、引張側を正とし、縦軸、横軸をそれぞれ、降伏軸力 P_y 、降伏変位 δ_y で除して無次元化している。図-6 には、ブレース材をはり要素、拘束材を表面がなめらかな剛体要素でモデル化した解析モデルによる結果も併せて示す。本解析モデルでは、ブレース材の諸元、材料定数をすべて実験値と同様としているが、詳細は文献9)を参照されたい。図-6を見ると、圧縮時のブレース材と拘束材との接触により、圧縮側荷重値がやや大きくなる傾向が見られるものの、各供試体

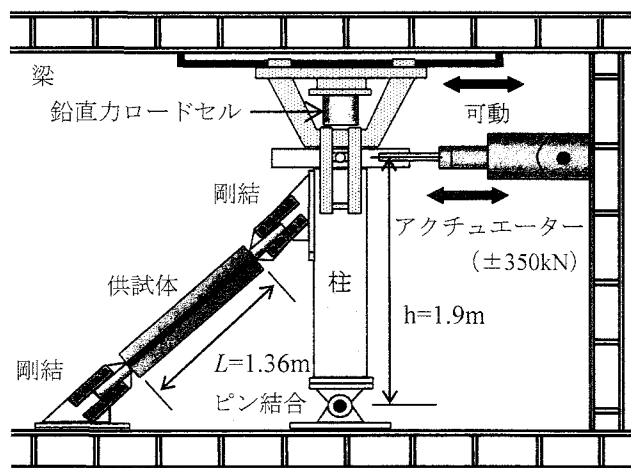


圖-4 實驗裝置概略圖

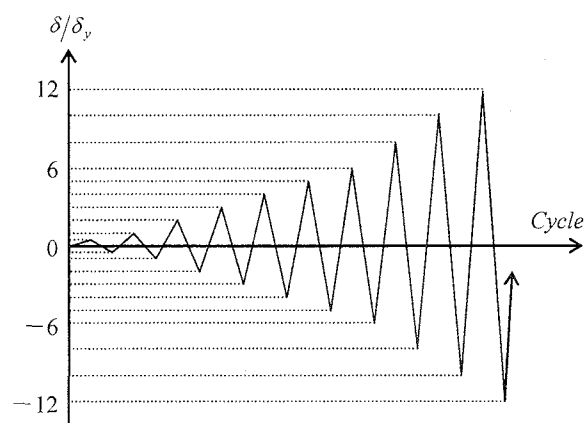


図-5 載荷パターン

とも引張側，圧縮側でほぼ同様な，安定した履歴曲線を描いている．LY225 や LY100 を用いた場合には，SS400 に比べ降伏点が低いことから，早期に塑性化およびエネルギー吸収を発生させることができる．また，低降伏点鋼は，降伏点の変動幅が狭く管理されている（ $\pm 20\text{MPa}$ ）ことや，伸び性能においても優れているなど，BRB のような制震ダンパーに適している点が挙げられる．

解析結果を見ると、SS59-12 については、実験値とよく一致しているが、LY47-10、ELY47-10 については、本解析モデルに用いている構成則が、SS400、SM490、SM570 鋼材の繰返し挙動を模擬するために名古屋大学において開発された修正 2 曲面モデル¹⁰⁾であるため、実験値と差が生じているが、全体としては大きく精度を損なうことはないと思われる。

(2) 供試体の変形状況

実験終了後のブレース材の厚さ方向の変形状態を写真-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。圧縮時にも耐力が低下することなく安定した復元力特性が得られるのは、ブレース材のたわみが一定量より小さく拘束され

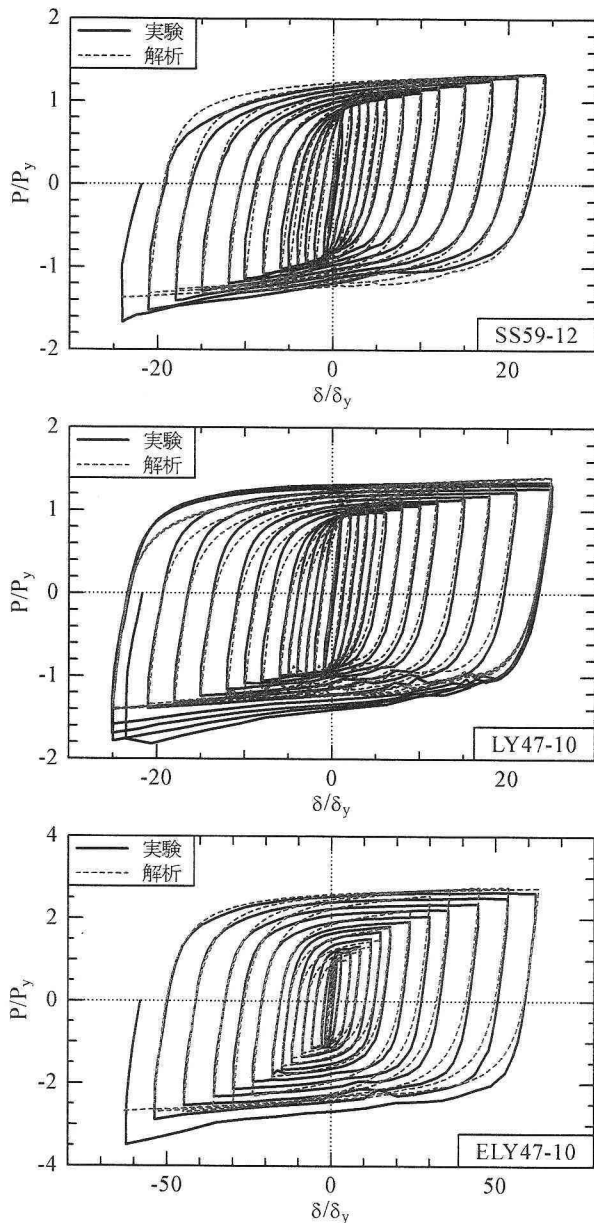


図-6 各供試体の荷重-変位関係

ているからであり、ブレースと拘束材の隙間量の制限が重要であることが分かる。

4. BRB の復元力モデル

BRB を設置した大規模な構造物の地震応答解析には、BRB の復元力特性を模擬した、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 BRB 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ため、BRB をトラス要素でモデル化し、実験供試体と同じ諸元および材料定数を用いた解析を行った。構成則として、バイリニア型移動硬化則と、混合硬化則の 2 種類のモデルを用いた。

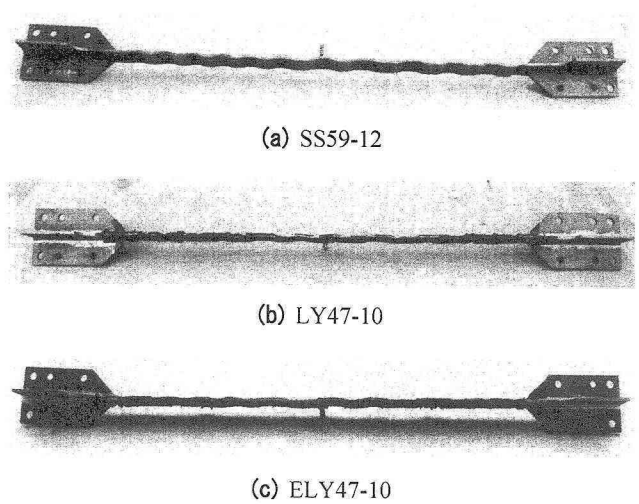


写真-1 ブレース材の変形状況

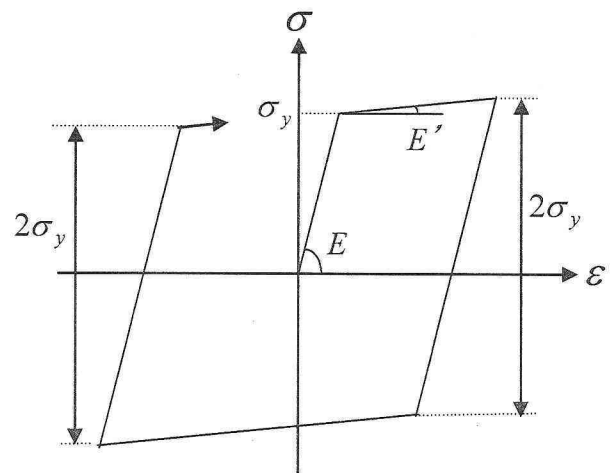


図-7 バイリニア型移動硬化則の概念図

(1) 構成則

a) バイリニア型移動硬化則

バイリニア型移動硬化則は、図-7 のように降伏後の応力-ひずみ関係を近似したモデルである。2 次勾配 E' は、SS59-12、LY47-10 は $E/60$ (E : 弾性勾配)、ELY47-10 は $E/40$ を用いた。これは、実験より得られた軸方向力-軸方向変位曲線の降伏後の勾配の近似より得られたものである。本解析はトラス要素を用いているので、軸方向力-軸方向変位関係は、応力-ひずみ関係に相似となる。以下、本構成則を用いたモデルをバイリニアモデルと称する。

b) 混合硬化則

混合硬化則は、弾性域の増加、硬化係数の低減による影響の両方を考慮可能なモデルである。混合硬化則を用いるためには、等方硬化や移動硬化に関するパラメータを算出する必要がある。ここでは、混合硬化則に用いる各パラメータに関しては、文献 5) を参考に算出している。以下、本構成則を用いたモデルを混合硬化モデルと称する。

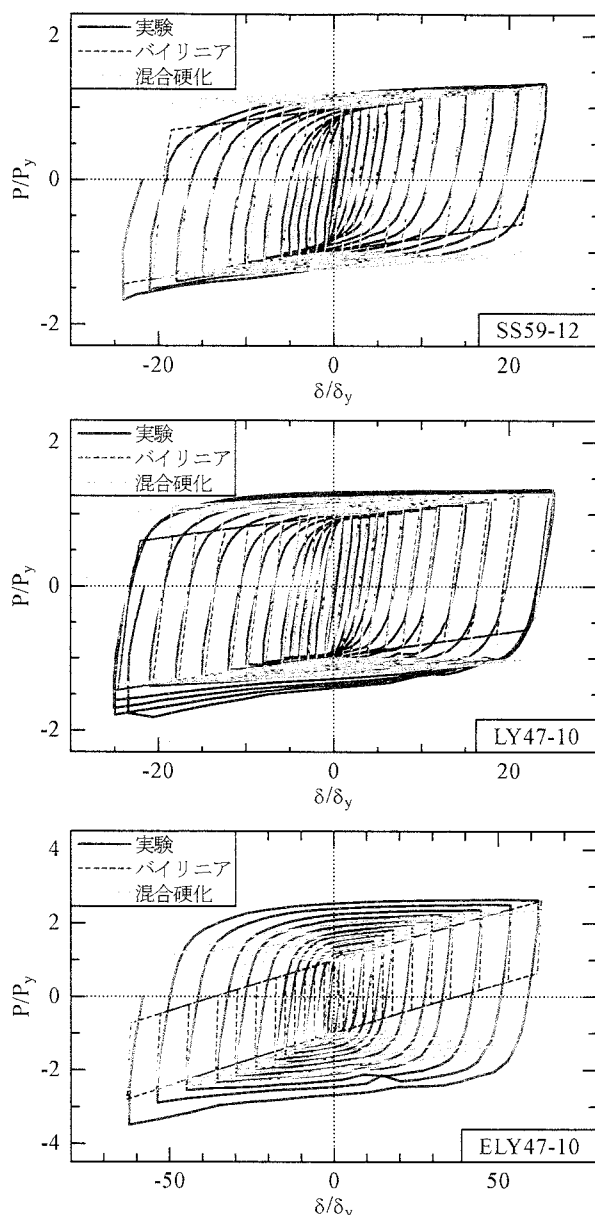


図-8 荷重－変位関係の比較

(2) 軸方向力－軸方向変位関係の比較

解析により得られた各モデルの軸方向力－軸方向変位関係を、実験と比較したものを図-8に示す。実線、点線、破線はそれぞれ実験、バイリニアモデル、混合硬化モデルを示している。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いが、除荷曲線はモデル間で差が現れている。特にバイリニアモデルは、バウシinger効果が考慮されていない為、差が最も顕著に現れている。混合硬化モデルは、この効果が考慮されているものの、特に ELY47-10 に関しては、実験の履歴を精度良く模擬できるとは言い難い。

(3) エネルギー吸収量の比較

エネルギー吸収量は、図-9に示すように、軸方向力－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つけ、面積 A_i の和により求めた。

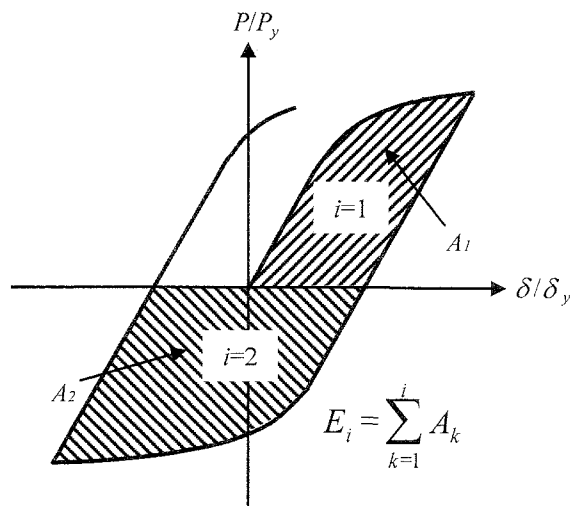


図-9 ステップ数 i と累積エネルギー吸収量 E_i の定義

表-3 累積エネルギー吸収量の比較

	SS59-12 [kNm]	LY47-10 [kNm]	ELY47-10 [kNm]
実験	225	174	120
バイリニア	219	162	66.0
混合硬化	246	180	98.7

つまり、履歴曲線で囲まれる面積の累積値に相当する値である。なお、ステップ数の定義は、図に示すとおりである。

各モデルの累積エネルギー吸収量を比較したものを表-3に、その履歴を図-10に示す。表-3において太線で囲まれた値は、実験値との差が少ない方を示している。前掲の履歴曲線では、各モデルと実験値との間には差が生じていたが、累積エネルギー吸収量で見ると、SS59-12では、バイリニアモデル、LY47-10では混合硬化モデル、ELY47-10では、混合硬化モデルを用いた場合、実験結果とほぼ一致する値が得られた。ただし、LY47-10については、バイリニアモデルを用いた場合についても、ほぼ一致している。このように、エネルギー吸収量の観点では、トラス要素を用いる方法によっても、鋼種に応じた適切な構成則を用いることによって、BRBの応答を精度良く再現することが可能であると考えられる。

以上の結果をまとめると、トラス要素を用いたBRBの復元力モデルとして推奨される構成則は、SS400に対してはバイリニア型移動硬化則、LY225、LY100に対しては混合硬化則である。なお、LY225については、両構成則とも精度良く模擬されたが、混合硬化則は、各パラメータの算出を要するなど、モデルがやや複雑である。従って、より簡易に適用可能なバイリニア型移動硬化則による代用も可能である。

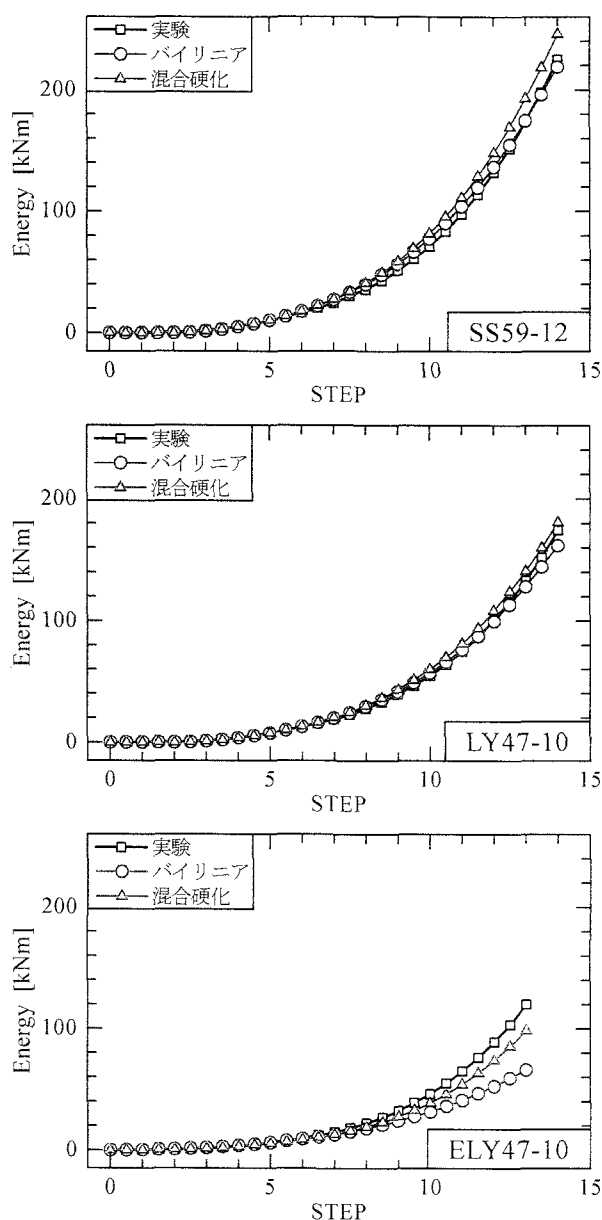


図-10 各供試体の荷重-変位関係

5. 結言

BRBに関する繰り返し載荷試験および解析を行い、鋼種の違いによる影響について考察した。得られた結論は以下のように要約できる。

- 1) 鋼種の異なるBRBの繰り返し載荷試験を行い、各供試体とも圧縮側においても引張側と同様な、安定した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) 実験により得られた履歴特性より、BRBの簡易な復元力モデルを構築し、ブレース材にSS400を使用した場合はバイリニア型移動硬化則、LY225、LY100を使用した場合は混合硬化則を推奨した。なお、LY225

については、バイリニア型移動硬化則による代用も可能である

参考文献

- 1) 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Ⅱ，pp.921-922，2000.
- 3) 岩田衛，村井正敏，加藤貴志，小林秀雄，和田章：座屈拘束されたブ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Ⅱ，pp.923-924，2000.
- 4) 渡辺直起，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実験的研究，土木学会地震工学論文集，2003.
- 5) 藤田将之，河村洋行，宇佐美勉，葛西昭：極低降伏点鋼を用いた座屈拘束ブレースの弾塑性挙動に関する研究，第59回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.411-412，2004.
- 6) 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，土木学会構造工学論文集 Vol.50A，2004.
- 7) 河村洋行，宇佐美勉，葛西昭，藤田将之：軽量化した座屈拘束ブレースの性能実験，第7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，2004.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.23-33，1933.