

鋼種の異なる座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動

Cyclic elasto-plastic behavior of buckling-restrained braces made of several steel materials

千田耕大*, 藤田将之*, 葛西昭**, 宇佐美勉***, 渡辺直起****

Koudai Senda, Masayuki Fujita, Akira Kasai, Tsutomu Usami and Naoki Watanabe

*学生会員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

**正会員 博士(工学) 名古屋大学 講師 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)

***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)

****正会員 修士(工学) トピー工業(株) (〒441-8510 豊橋市明海町1)

This study is aimed at investigating and comparing differences of cyclic elasto-plastic behavior of buckling-restrained braces (BRBs) in the case of using different materials (structural steel, low-yield-point steel and extremely-low-yield-point steel). Firstly, elasto-plastic behavior of BRBs is investigated by axial cyclic loading test. And then, the validity of the analytical model in which the lateral restraining effect is involved is verified by the experimental results. Moreover, considering the utilization in numerical simulation of structures with installation of BRBs, a simplified analytical model of BRBs which can account for the energy absorption capacity of BRBs is proposed for each material.

Key Words : seismic control, buckling-restrained brace, hardening rule, restoring force characteristic

キーワード: 制震, 座屈拘束ブレース, 硬化則, 復元力特性

1. 緒言

土木構造物の耐震性能向上に関して、わが国では様々な研究が進められている。中でも地震によるエネルギーを吸収・消散する部材を構造物に取り入れ、地震時に大きな損傷を起こさせる部材をその部材に限定させることによって、主構造の損傷を極力少なくする方法(制震構造)が近年注目されている。このエネルギー吸収・消散部材は大地震時には主構造に代わり大きな損傷を受け、地震終了後にその部材のみを補修あるいは交換することを前提として設計される。このような特徴からこの部材はしばしば犠牲部材と呼ばれることがある。この犠牲部材のひとつに座屈拘束ブレース(Buckling-Restrained Brace, 以下BRBと称す)がある。BRBとはブレース材を鋼材やコンクリートなどを用いた拘束材で被覆したものであり、建築分野においてはすでに多くの研究が行われ、施工例も多数見られる¹⁾。土木分野においては、近年研究も進み^{2,3)}、少しずつ施工例がでてきている⁴⁻⁶⁾。BRBは適用が容易で安価であり、また地震後の補修・交換も容易であることから非常に有効であると考えられ、アーチ橋⁷⁻⁹⁾、トラス橋¹⁰⁾など、種々の土木構造物への適用について検討が行われており、BRBが優れた耐震性能を発揮することが確認されている。しかし、このように土木構造物へのBRBの適用を検討していく上で、性能規定を満足するような構造設

計を行うためにもBRB単体の挙動に関する研究は必要不可欠なものであり、著者らもこれまでにSS400を使用したBRBの挙動あるいは要求性能に関する研究を行っている¹¹⁻¹⁴⁾。

BRBは軸方向力によりブレース材が降伏し、塑性変形することでエネルギー吸収を行う部材である。そのため、ブレース材に用いられる鋼材の材料的性質がBRBの変形能に影響を与える。また、主構造より早期に塑性化させるため、設置箇所によっては、普通鋼(SS400鋼)を用いるより、降伏点の低い極軟鋼(低降伏点鋼LY225、極低降伏点鋼LY100)を用いることが推奨される場合がある。また、確実にブレース材を降伏させるということを考えても、降伏応力に関する厳しい狭幅管理がなされており(公称降伏点応力 $\pm 20\text{MPa}$ で、例えばLY225材であれば $205\text{MPa} \sim 245\text{MPa}$)、しかも高い伸び性能(LY100: $\geq 50\%$ 、LY225: $\geq 40\%$)を有している極軟鋼はブレース材に適していると考えられる。そこで本研究では、従来の研究で用いられたSS400に加え、低降伏点鋼LY225及び極低降伏点鋼LY100を用いたブレース材について繰り返し載荷実験により復元力特性を把握する。さらに、大規模な構造物にBRBを設置した場合の構造物全体の数値解析に適用することを考え、それぞれの鋼材を用いたBRBの簡易な復元力モデルを提示する。

2. 実験内容

BRB には、様々な断面構成が考えられる¹⁵⁾。本実験では、図-1 のような断面構成とした。ブレース材にはいずれも図-2 のような平鋼ブレースを採用し、拘束材は図-1(a)に示すような、既製品であるデッキプレート（板厚 4.5mm）を切断して製作し、そこにモルタルを充填したもの（以下、モルタル充填拘束材と称す）と、図-1(b)に示すような、H 型鋼からウェブ部分を切断して製作した T 型の鋼材（以下、T 型拘束材と称す）を使用した。このようにして製作した BRB（ブレース材鋼種 SS400, LY225, LY100）の復元力特性を把握するため、引張・圧縮交番の繰り返し载荷実験を行った。以下、実験供試体、実験内容について詳しく述べる。

2.1 目標性能

土木構造物に設置した BRB には種々の要求性能がある¹¹⁾。本実験ではそれらの内、ブレース材の最大軸ひずみ ε_m 及び累積塑性ひずみ $\Sigma \varepsilon_{pi}$ を取り上げ、それぞれ表-1 のように目標値を設定した。これらの値は、建築の分野あるいは SEAOC/AISC¹⁶⁾ の推奨値を参考に決めた値であるが、鋼アーチ橋の対傾構及び横構に設置した BRB に対しても妥当な値であることが示されている¹⁵⁾。

2.2 実験供試体

本実験ではブレース材に用いる鋼種を SS400, LY225, LY100 の 3 種類とした。ブレース材の全体図を図-2 に示す。端部は実験装置に設置するために十字型断面となっており、部材長 L (1355mm) はこの十字型断面部分を含まない平型断面部分の長さである（以下、変形部分と称す）。ブレース材の中央部には丸棒 (SS400, LY100 は正方形型プレート) を溶接してあるが、これは载荷時に拘束材とブレース材がずれるのを防ぐためのものである。

各鋼種のブレース材の諸元を表-2 に示す。表-2 において、 L ：部材長、 b ：断面幅、 t ：断面厚、 A ：断面積、 λ ：細長比を意味している。なお、細長比 λ は、ブレースの弱軸まわりの値である。供試体名については、鋼種名をそのまま用いることとし、载荷パターンによって LY225 と LY100 は (A), (B) と区別した。また、実験供試体と同じ鋼材から JIS1 号試験片を製作し、引張試験を実施した。その結果を表-3 にまとめる。表-3 において E ：ヤング率、 σ_y ：降伏応力、 ε_y ：降伏ひずみ、 E_s ：初期硬化係数、 ε_s ：初期硬化ひずみ、 σ_u ：引張強度、 ε_u ：破断ひずみ、 ν ：ポアソン比を示す。引張試験結果から、LY225, LY100 はいずれも SS400 に比べ降伏応力が小さく、破断ひずみ ε_u が 40% 以上と優れた伸び能力を持っていることが分かる。また、

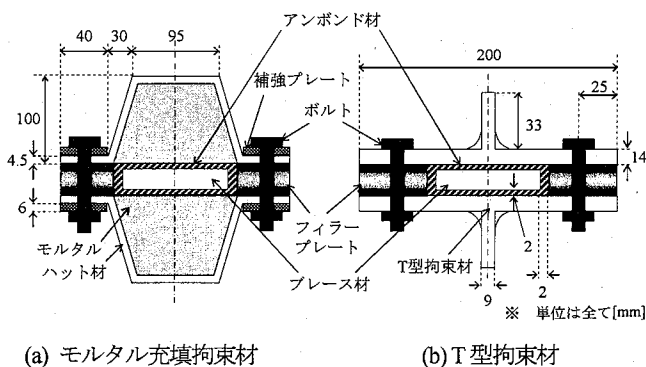


図-1 供試体断面図

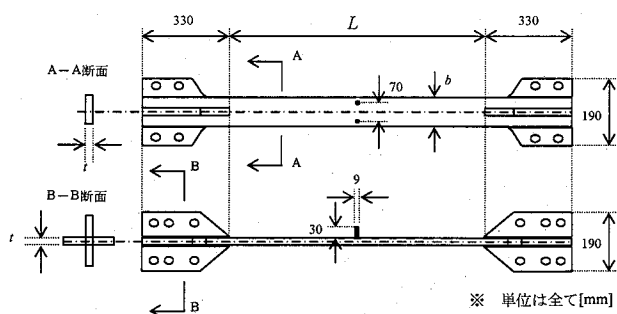


図-2 ブレース材の全体図

表-1 要求性能の目標値

	SS400	LY225	LY100
最大軸ひずみ ε_m		0.03	
塑性率 $\varepsilon_m / \varepsilon_y$	25.5	26.7	66.7
累積塑性ひずみ $\Sigma \varepsilon_{pi}$		0.24	
累積塑性ひずみ倍率 $\Sigma \varepsilon_{pi} / \varepsilon_y$	204	213	533

SS400 では 235MPa 以上という降伏点応力の下限が規定されているだけであるのに対し、LY225, LY100 は降伏点の管理が厳しく、公称値から $\pm 20\text{MPa}$ 以内と規定されている。本実験の引張試験においても、LY225, LY100 は規定内の降伏応力であったが SS400 の降伏応力は 306MPa となった。なお、測定した材料定数から算出したブレース材の変形部分の降伏荷重 $P_y = \sigma_y A$ 、降伏変位 $\delta_y = \varepsilon_y L$ を表-2 に合わせて示す。

拘束材は、SS400, LY100 には図-1(a)のようなハット材にモルタルを充填したものを用い、LY225 には図-1(b)のような鋼種 SS400 の T 型拘束材を用いた。供試体は、ブレース材 (図-2) に 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) を塗布し、その両側から拘束材を挟みこむように装着し、ボルトで接合した (図-1)。アンボンド材はブレース材の軸方向変形を拘束されるのを防止できるとともに、ブレース材と拘束材の間に適切な隙間 (クリアランス) を確保することができる。

2.3 実験装置

本実験の実験装置の概略図を図-3 に示す。なお、ブレース

表-2 ブレース材の諸元

供試体名	鋼種	L [mm]	b [mm]	t [mm]	A [mm ²]	λ	P_y [kN]	δ_y [mm]	拘束材
SS400	SS400	1355	100	8.49	851	553	260	1.94	モルタル充填
LY225(A)	LY225	1355	99.8	10.2	1020	461	228	1.64	T 型
LY225(B)	LY225	1355	99.7	10.4	1032	454	230	1.64	T 型
LY100(A)	LY100	1355	100	10.0	1006	467	90.5	0.594	モルタル充填
LY100(B)	LY100	1355	100	9.94	994	472	89.5	0.594	モルタル充填

表-3 ブレース材の材料定数

鋼種	E [GPa]	σ_y [MPa]	ε_y [%]	E_{st} [GPa]	ε_{st} [%]	σ_u [MPa]	ε_u [%]	ν
SS400	213	306	0.143	2.88	1.69	438	28.8	0.291
LY225	184	223	0.121	1.96	2.60	315	40.3	0.285
LY100	205	90	0.044	3.12	0.433	249	45.8	0.306

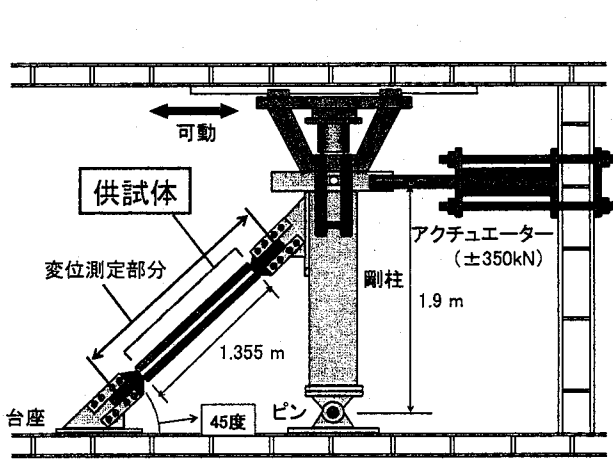


図-3 実験装置概略図

材が拘束材で被覆されるのは供試体部材長 L の区間であり、図中ではそれを模式的に表している。実験供試体を台座とピン支持柱の間に 45 度の角度でボルト接合により剛結する。この際、供試体はブレース材の弱軸方向が荷重装置の面内になるようにし、アクチュエーターの荷重が全て供試体に伝達されるよう面外方向に偏心しない設置とした。ピン支持柱は、実験装置面内に自由に回転できるようになっている。ピン支持柱が回転し易くなるように、鉛直力ロードセルにより柱軸方向に一定の荷重 (35kN) を加えた。この鉛直力ロードセルは梁と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。本実験では、アクチュエーターにより荷重をし、ピン支持柱を回転させ、供試体に軸方向の変位を与えた。なお、本実験で使用したアクチュエーターの最大荷重は 350kN である。

2.4 計測方法

本実験では、ブレース材の十字断面部分にダイヤルゲージ(最小目盛 1/500mm)を設置し、供試体の軸方向変位(振幅量) δ

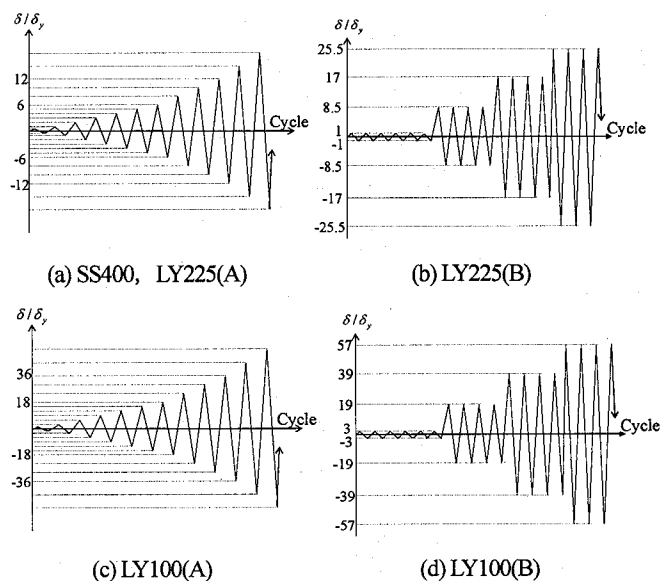
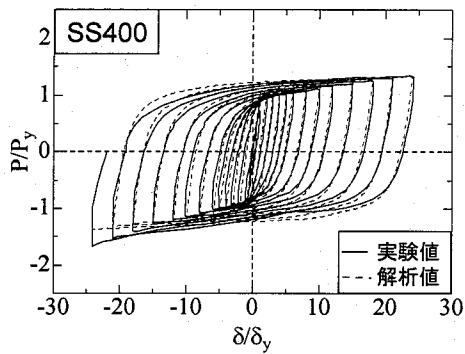


図-4 荷重パターン

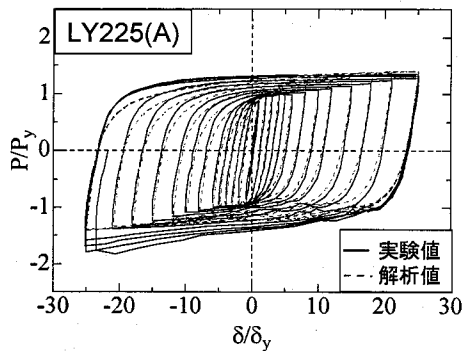
を、細い針金を供試体両端に渡して計測した。供試体の変形部分は拘束材で被覆されており、変形部分に直接変位計を設置しての計測は不可能であったため、十字断面部分からの変位で代用した。

2.5 荷重パターン

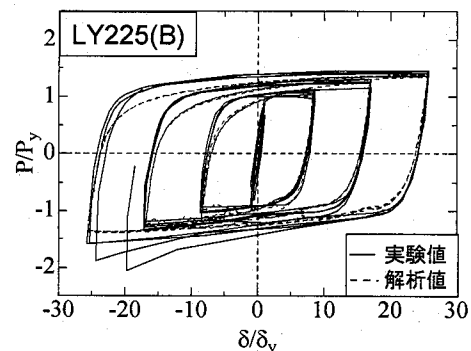
本実験では、アクチュエーターを実験供試体の軸方向変位 δ で制御し、引張圧縮交番の両側繰り返し荷重を行う。本実験の荷重パターンを図-4 に示す。なお、図-4 中の(a)は SS400, LY225(A), (b)は LY225(B), (c)は LY100(A), (d)は LY100(B)の荷重パターンを示している。(b), (d)については SEAOC/AISC の基準を参考にして決定したもので¹⁰⁾、後述する混合硬化則に用いるパラメータ算出に利用することを目的としている。(a)では $0.5\delta_y$ から開始し、次に $1\delta_y$ から $6\delta_y$ までは $1\delta_y$ ずつ、 $6\delta_y$



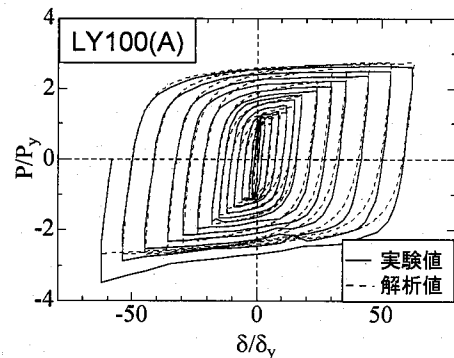
(a) 漸増繰り返し(SS400)



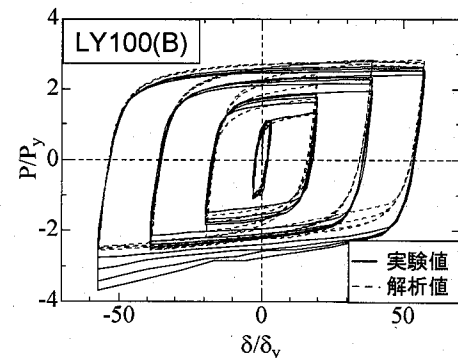
(b) 漸増繰り返し(LY225(A))



(c) SEAOC/AISC を参考にしたパターン(LY225(B))



(d) 漸増繰り返し(LY100(A))



(e) SEAOC/AISC を参考にしたパターン(LY100(B))

図-5 軸方向力-軸方向変位関係

から $12\delta_y$ 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. (b) では $1\delta_y$ を 6 回載荷し, 次に $8.5\delta_y$, $17.0\delta_y$, $25.5\delta_y$ を 4 回ずつ載荷する. (c) では, (a) の折り返し点の変位を 3 倍にして, $1.5\delta_y$ から開始し, $3\delta_y \sim 18\delta_y$ までは $3\delta_y$ ずつ, $18\delta_y$ から $36\delta_y$ 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. (d) では $3\delta_y$ を 6 回載荷し, 次に $19\delta_y$, $39\delta_y$, $57\delta_y$ を 4 回ずつ載荷する. なお, プレース材の要求性能の一つは表-1 に示すように, 軸ひずみ 3% であり, 本実験ではこの要求性能を目標として載荷を行う. 要求性能に相当する変形量は SS400 では $21.0\delta_y$, LY225 では $24.8\delta_y$, LY100 では $68.4\delta_y$ であるが, 実験装置の性能上, SS400 は $24\delta_y$, LY225(A) は $25\delta_y$, LY225(B) は $25.5\delta_y$, LY100(A) は $63\delta_y$, LY100(B) は $57\delta_y$ までの載荷で実験を終了した.

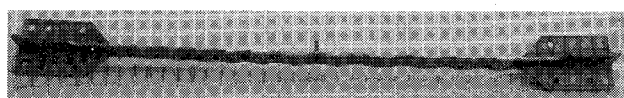
3. 実験結果と考察

3.1 軸方向力-軸方向変位関係

図-5 に本実験により得られた各供試体の軸方向力-軸方向変位関係を示す. 図-5 において引張側を正とし, 縦軸, 横軸をそれぞれ降伏荷重 P_y , 軸方向降伏変位 δ_y で無次元化してある. 図-5 には, プレース材を, はり要素, 拘束材を表面が滑らかな剛体要素でモデル化した解析モデル(はり要素モデル)¹⁴⁾ による数値解析結果も合わせて示す. 図-5 を見ると, 実験では, 圧縮時にプレース材が拘束材に接触し, 摩擦力が発生するため, 荷重値がやや大きくなっているものの, いずれの供試体

表-4 累積塑性ひずみ倍率

	SS400	LY225(A)	LY225(B)	LY100(A)	LY100(B)
目標値	204	213	213	553	553
実験値	468	468	768	1214	1840



(a) SS400



(b) LY225(A)



(c) LY100(A)

写真-1 ブレース材の変形状況

についても、圧縮側で引張側と同様の履歴を描いており、安定した履歴曲線となった。LY225 材はひずみ硬化の影響が SS400 材と同程度であるが、LY100 材はひずみ硬化の影響が非常に大きく、最終ループでの荷重は降伏荷重の 2.5 倍程度に達する。また、各供試体とも要求性能の軸ひずみ 3.0% 付近まで載荷することができ、安定した履歴特性が得られた。ただ、圧縮側では引張側に比べ若干荷重にばらつきが生じている。これは圧縮時にブレースに高次モードの変形が発生し、次のモードの変形へ移行する瞬間に荷重が不安定な状態になっていることが原因であると考えられる¹⁴⁾。

解析結果を見ると、SS400 は実験値とよく一致している。LY225、LY100 に関しては、使用した構成則が SS400、SM490、SM570 鋼材の挙動を模擬するために名古屋大学で開発された修正 2 曲面モデル¹⁷⁾に、測定された材料定数を用いて解析したため、実験値との差が多少生じているが、全体として大きく精度を損なうことはない。

3.2 累積塑性ひずみ

実験から算出した各ブレース材の累積塑性ひずみ倍率を表-4 に示す。表-4 を見ると、全ての実験で目標値を大きく上回っており、要求性能を満足している。

3.3 供試体の変形状況

実験後のブレース材の変形状況を写真-1 に示す。写真-1

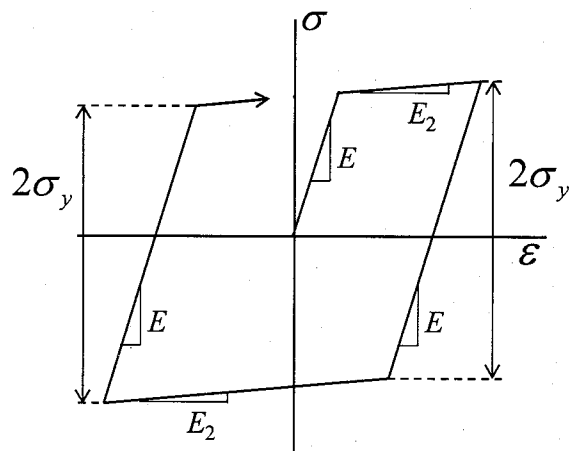


図-6 バイリニア型移動硬化則の概念図

を見ると、ブレース材が座屈を生じており、拘束材で変形を制御されていたために高次モードに発達しているのが確認できる。また、いずれの供試体もブレース材全体に均等に高次モードが発達し、さらにブレース材中央付近ではブレース材がくびれている。ブレース材の軸方向変位は主にこの高次モードによるたわみによって引き起こされていることがわかる。圧縮時に耐力低下を起こすことなく、安定した復元力特性が得られるのは、拘束材でブレース材の面外方向のたわみが拘束されているためであり、ブレース材と拘束材の隙間量の管理の重要性がわかる。

4. 数値解析による BRB の復元力特性の再現

BRB を設置した大規模な構造物の地震応答解析を行うためには、ブレース部分の復元力特性を簡易に再現できる復元力モデルが必要となる。本解析では実験結果を用いて簡易な復元力モデルの検討を行った。解析では BRB の変形部分を 2 節点平面トラス要素 1 要素でモデル化し、各パラメータは実験と同様の値を用いた。構成則としてはバイリニア型移動硬化則及び混合硬化則を用いた。なお、以下での解析結果と実験結果との比較は SS400、LY225(A)、LY100(A)について行う。

4.1 構成則

4.1.1 バイリニア型移動硬化則

バイリニア型移動硬化則は図-6 に示すような応力-ひずみ関係を持つ。降伏後の 2 次勾配 E_2 は、SS400、LY225 は $E/60$ 、LY100 については $E/40$ を用いた。これは、繰り返し載荷実験から得られた結果を参考に、降伏点と目標性能（3%軸ひずみ）に

最も近くまで載荷した点とを直線で結んで算出した勾配を近似したものである。

4.1.2 混合硬化則

本研究で用いる混合硬化則¹⁸⁾は、1990年にLemaitre, Chabocheら¹⁹⁾によって提案されたモデルで、2つの数式により構成されている。

まず1つ目は、等方硬化性（弾性域の広がり）を表現する式として、

$$\sigma_y' = \sigma_{y0} + \Delta\sigma_y^s [1 - \exp(-\beta \bar{\epsilon}^{pl})] \quad (1)$$

で表される。ここで、 σ_y' = 現時点における弾性域の大きさ（降伏応力）、 σ_{y0} = 初期の弾性域の大きさ（降伏応力）、 $\Delta\sigma_y^s$ = 弾性域の最大変化量、 β = 材料パラメータである。但し、

$$\Delta\sigma_y^s = \frac{\sigma^s - \sigma_{y0}}{2} \quad (2)$$

で表され、 σ^s = 定常状態まで広がった際の弾性域の大きさである。式(1)は、弾性域の広がりを相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^{pl}$ の指数関数としたものである。材料パラメータ σ_{y0} 、 $\Delta\sigma_y^s$ 、 β を、本研究では付録の方法により同定することとした。

続いて、移動硬化性を表現する式として、

$$\dot{\alpha} = E_0 \frac{1}{\sigma_y} (\sigma - \alpha) \dot{\bar{\epsilon}}^{pl} - \gamma \alpha \dot{\bar{\epsilon}}^{pl} \quad (3)$$

で表される。ただし、一般応力（3次元応力）状態で表現されていることに注意されたい。ここで、 α = 背応力（応力空間上での弾性域の中心）、 E_0 = 移動硬化則における硬化係数、 σ = 現応力、 γ = 材料パラメータであり、速度による表現をしている。本式は一軸応力状態では、弾塑性領域において現応力と背応力との差が弾性域の大きさとなることより、

$$\dot{\alpha} = E_0 \dot{\bar{\epsilon}}^{pl} - \gamma \alpha \dot{\bar{\epsilon}}^{pl} \quad (4)$$

となる。本式は、右辺第1項が、線形Ziegler硬化則（一般的な移動硬化則）であり、第2項が背応力の大きさに応じて、背応力の相当塑性ひずみに対する勾配を減ずるための項（再帰項と称す）である。特に、 $\gamma = 0$ は移動硬化則を、 $E_0 = 0$ 、かつ、 $\gamma = 0$ は等方硬化則を示す。また、定常状態では、 $\dot{\alpha} = 0$ となるので、背応力の極限值 α^s は、 $\alpha^s = E_0 / \gamma$ で与えられる。本式においても材料パラメータである E_0 、 γ は付録の方法で同定した。

本構成則の一軸状態における応力-ひずみ関係の概念図は図-7に示すとおりである。なお、本研究で用いた材料パラメータの同定結果を、表-5にまとめる。

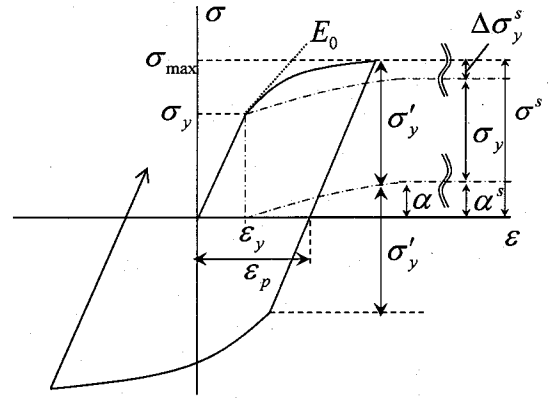


図-7 混合硬化則の概念図

表-5 混合硬化則で用いるパラメータ

鋼種	$\Delta\sigma_y^s / \sigma_y$	β	E/E_0	γ
SS400	0.416	0.953	85.3	29.6
LY225	0.330	1.52	32.4	123
LY100	0.808	6.44	8.38	339

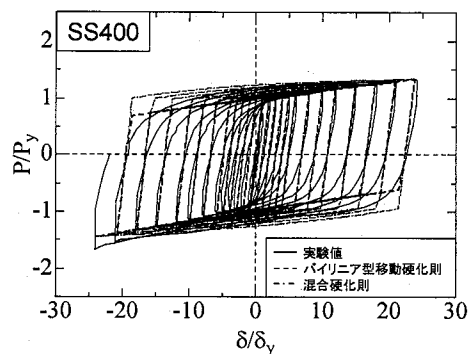
4.2 解析結果と考察

4.2.1 軸方向力-軸方向変位関係

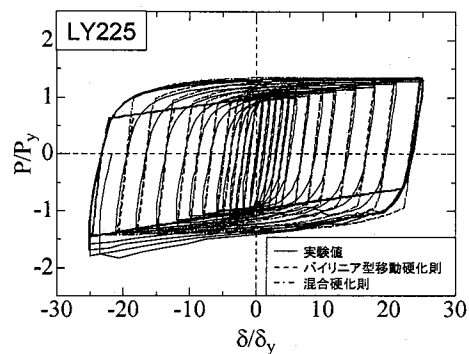
各モデルの解析結果と実験結果について荷重-変位関係を比較したものを図-8に示す。図-8において縦軸を P_y 、横軸を δ_y で無次元化している。図-8から、履歴を比較してみると、いずれの構成則を用いた場合においても、特に塑性域の挙動に差が見られる。特にバイリニア型移動硬化則を用いた場合はパウジンガー効果が考慮されていないことで、大きく差が生じている。混合硬化則ではこの効果が考慮されているものの、実験結果をはり要素モデルほど精確には模擬できていない。このように、トラス要素を用いた解析モデルではBRBの履歴を精確に模擬することは難しく、実験値とはある程度誤差がある。

4.2.2 エネルギー吸収量

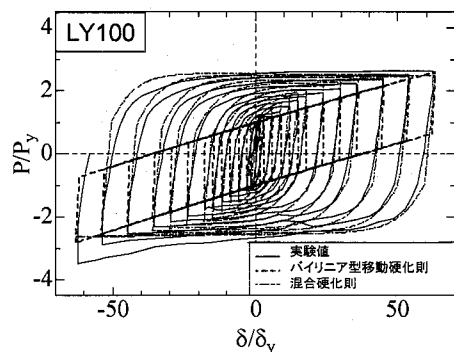
エネルギー吸収量は、図-9に示すように軸方向力-軸方向変位関係において、変位振幅の小さいものから半サイクル数の番号をつけ、面積 A_i の和より求めた。解析結果と実験結果についてエネルギー吸収量を比較する。図-10に解析結果と実験結果の半サイクル毎のエネルギー吸収量を比較したもの、表-6に要求性能まで載荷した時点での累積エネルギー吸収量を示す。表-6において太線で囲っているものは実験値に近かった方を示している。図-10において横軸には半サイクル数をとっており、縦軸はエネルギー吸収量を $P_y \delta_y / 2$ で無次元化している。4.2.1で述べたように、履歴曲線では実験と解析とでは差が見られたが、累積エネルギー吸収量で見ると、SS400、LY225



(a) SS400



(b) LY225



(c) LY100

図-8 荷重-変位関係

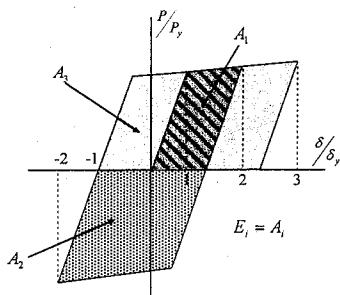
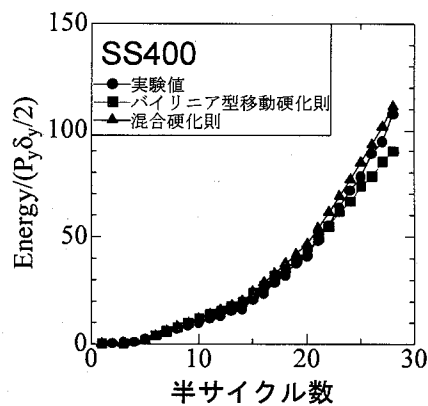
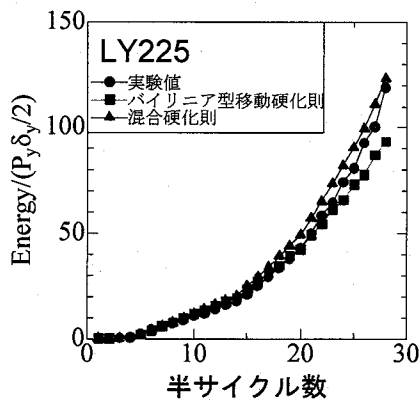


図-9 半サイクル数とエネルギー吸収量の定義

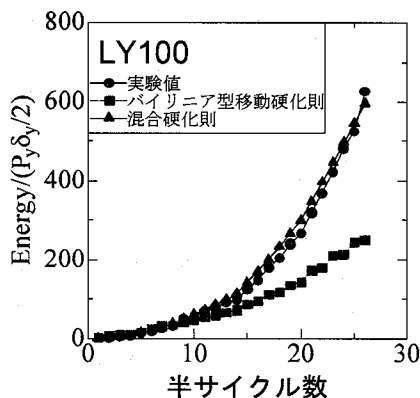
はバイリニア型移動硬化則、LY100 は混合硬化則を用いた場合には、実験結果にほぼ一致する結果が得られた。このように、トラス要素を用いても、鋼種に応じた適切な構成則を用いることで BRB の応答を比較的精度良く模擬することが可能であると



(a) SS400



(b) LY225



(c) LY100

図-10 エネルギー吸収量

考えられる。

以上の結果から、ブレースの性能に関してはトラス要素を用いた簡易モデルでも比較的精度良く模擬することができるため、BRB を設置した構造物の応答解析を行う際に、これらのモデルを使用することができると考えられる。使用する上で BRB の復元力モデルとして推奨される構成則は、鋼種が SS400, LY225 の場合はバイリニア型移動硬化則、LY100 の場合は混合硬化則である。但し、LY100 についてはひずみ硬化が著しく、硬化係数の低減も大きいなど、塑性域の挙動が複雑であるため、混合硬化則を用いても若干誤差を大きく含むことを考慮する必要がある。

表-6 エネルギー吸収量の最終値

	実験	バイリニア型	混合硬化則
SS400	225	219	246
LY225	174	162	192
LY100	120	66	127

5. 結言

本研究では普通鋼 SS400, 低降伏点鋼 LY225, 極低降伏点鋼 LY100 を用いた BRB の繰り返し載荷試験を行い, その挙動について実験的に検証を行った。また, 材料特性の違いに着目し, 各鋼種の BRB の履歴を解析的に模擬することを試みた。さらに, 非常に簡易なトラス要素モデルで BRB の復元力特性を模擬することを検討し, それぞれの鋼種の場合に適切な復元力モデルを決定した。以下に, 本研究から得られた結果をまとめて示す。

- (1) 全鋼種とも BRB は, 引張, 圧縮側で同様の履歴を示し, 安定した復元力特性を発揮することを確認した。
- (2) 構造物に BRB を設置した場合の構造物全体の応答解析を行う上で, BRB の復元力特性を比較的簡易でありながら精度良く再現可能なトラス要素を用いる復元力モデルについて検討した。その結果, プレース材に使用する鋼種が SS400, LY225 の場合はバイリニア型移動硬化則, LY100 の場合は混合硬化則が適用できることが判った。
- (3) 実験及び解析から各鋼種の BRB の特徴は, 次のようにまとめられる。

SS400

BRB は要求性能を満足しており, また, 解析による予測も比較的容易であるが, 降伏点にばらつきがあるので, 大地震時に確実に塑性化させるため, 前もって降伏点を引張試験などで把握する必要がある。構成則は, 2 次勾配が E/60 のバイリニア型移動硬化則が適用できる。

LY225

BRB は要求性能を満足している。また, 降伏点の管理が厳しくされており, BRB を確実に降伏させるには適している。また, 降伏後の挙動は SS400 とほぼ同一で解析による予測も容易である。構成則も SS400 と同じバイリニア型移動硬化則が適用できる。

LY100

BRB は要求性能を満足しており, 降伏点の管理も厳しくされているが, 降伏後のひずみ硬化の影響が大きく, 解析による降伏後の挙動の予測がやや難しい。構成則については, 移動硬化則は不向きで, 混合硬化則など, より複雑な構成則が必要である。

以上の考察より, 設計の確実性, 及び解析モデルの簡易性などを考慮すると, プレース材には低降伏点鋼 (LY225) の使用が推奨される。

付録 混合硬化則におけるパラメータの同定

パラメータの算出には, 同一ひずみ振幅のもとで得られた定常サイクル試験の結果を用いる必要があるが, 本実験では定常サイクル試験を行っていないため, LY225, LY100 については定変位繰り返し試験の LY225(B), LY100(B)の実験結果, SS400 については, 定変位繰り返し試験を行っていないので漸増載荷試験の SS400 の結果を用いることとした。これらの実験結果からパラメータを算出した。

① σ_{y0} , $\Delta\sigma_y^s$, β の決定

初期降伏応力 σ_{y0} は材料の引張試験データを用いる。

本研究では, 実験結果より再載荷時における降伏点の読みが初期降伏応力と同じであるとみなし (図-A1 参照), 各サイクルの折り返し点における応力 σ を用いて, 折り返し点における弾性域の大きさ σ_y' は,

$$\sigma_y' = \frac{1}{2} \left(|\sigma| + |\sigma_{y0}| \right) \quad (5)$$

と表す。従って各サイクルの折り返し点における弾性域の大きさと相当塑性ひずみのデータより式(1)に対して非線形最小二乗法を適用して, $\Delta\sigma_y^s$, β を算出する。

② E_0 , γ の決定

あるループ (本研究では, 安定している最終ループとする。但し, LY225(B)では, 最後の 2 サイクルでの圧縮側の荷重が不安定であったため, 25.5 δ_y の 2 サイクル目の圧縮から 3 サイクル目の引張のループとした) において, 降伏時に塑性ひずみをゼロとみなすように式(4)を積分すると

$$\alpha = \frac{E_0}{\gamma} \left\{ 1 - \exp(-\gamma \epsilon^{pl}) \right\} + \alpha_1 \exp(-\gamma \epsilon^{pl}) \quad (6)$$

である。ここで, ϵ^{pl} は当該ループの降伏時にゼロである塑性ひずみ, α_1 は当該ループの降伏時の背応力である。上記より当該ループ各点における弾性域の大きさは算出可能であるので, その結果より (ϵ^{pl}, α) の組み合わせを実験結果から得ておき, 式(6)に対して非線形最小二乗法を適用して E_0 , γ を算出

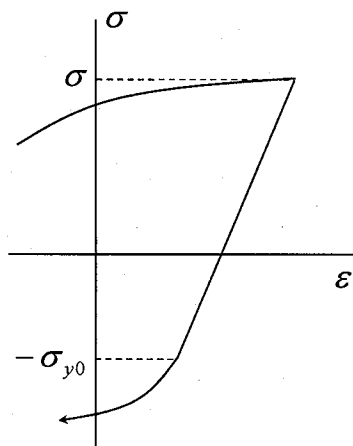


図-A1 初期降伏応力

する。

謝辞

実験供試体の鋼材を提供していただいた JFE エンジニアリング(株)に深謝する。

参考文献

- 1) 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，1998.
- 2) 日本鋼構造協会：土木鋼構造物の動的耐震性能照査法と耐震性向上策，鋼橋の性能照査型耐震設計法検討委員会，耐震設計部会（委員長，宇佐美勉），2003.10.
- 3) Tsutomu Usami, Zhihao Lu, Hanbin Ge : A seismic upgrading method for steel arch bridges using buckling-restrained braces, EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, Vol.34, pp.471-496, 2005.
- 4) 日経コンストラクション：橋の制震，変革期の防災技術，日経コンストラクション，2005.1.14.
- 5) 金治英貞，浜田信彦，石橋照久，尼子元久，渡邊英一：長大橋レトロフィット用座屈拘束ブレースの構造提案と弾塑性挙動，構造工学論文集，Vol.51A, pp.859-870, 2005.3.
- 6) 前野裕文，片桐英喜，葛西昭，長山秀昭，今井誠：座屈拘束ブレースを用いた橋梁上部構造の耐震性能に関する研究，構造工学論文集，Vol.51A, pp.871-878, 2005.3.
- 7) 森下邦宏，井上幸一，川島一彦，阿比留久徳，平井潤，本田誠：ダンパーブレースを組み込んだ上路アーチ橋部分構造の動的地震応答実験，土木学会論文集，No.766, I-68,

pp.277-290, 2004.

- 8) 宇佐美勉，葛漢彬，日沖堅治，路志浩，河野豪：制震ダンパーによる鋼アーチ橋の耐震性向上—橋軸直角方向地震動に対する検討—，土木学会論文集，No.766, I-68, pp.245-261, 2004.
- 9) 野中哲也，宇佐美勉，坂本佳子，岩村真樹：上路式鋼トラス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，構造工学論文集，Vol.49A, pp.531-542, 2003.
- 10) 福田智之，川島一彦，渡邊学歩：ブレースダンパーによる鋼製アーチ橋の地震応答の低減効果，構造工学論文集，Vol.51A, pp.847-858, 2005.3.
- 11) 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，Vol.50A, pp.527-538, 2004.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 加藤基規，宇佐美勉，葛西昭：座屈拘束ブレースの繰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.
- 15) 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.
- 16) SEAOC/AISC : Recommended Buckling-Restrained Brace Frame Provisions, Structural Engineers Association of California/American Institute Steel Construction, 2001.11.
- 17) Shen Chi, Mizuno Eiji, Tsutomu Usami : A Generalized Two-Surface Model for Structural Steel under Cyclic Loading, Structural Eng. / Earthquake Eng., Proc. of JSCE, Vol.10, No.2, pp.59s-69s, 1993.
- 18) ABAQUS : User's Manual, Version 6.4, Vol. I ~ III, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., 2003.
- 19) Jean Lemaitre, Jean-Louis Chaboche : Mechanics of Solid Materials, Cambridge University Press, 1990.

(2005年9月10日受付)