

制震ダンパーとしての座屈拘束ブレースの要求性能

Required Performances for Buckling-Restrained Braces as a Structural Control Damper

宇佐美勉*, 加藤基規**, 葛西昭***

Tsutomu USAMI, Motoki KATO and Akira KASAI

*フェロー会員 D.Sc. 工博 名古屋大学 教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

**正会員 修士(工学) 三菱重工業株式会社技術本部広島研究所 (〒730-0837 広島市中区江波沖町)

***正会員 修士(工学) 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)

Required performances for buckling-restrained brace (BRB) used as a structural control device are examined. BRBs are now extensively used to control the seismic demand (response) of building structures in Japan. However a few studies have so far been made on BRBs installed in bridge structures. In this paper, an outline of BRBs is first described, followed by a presentation of a numerical model for determining the elasto-plastic cyclic behavior of BRBs. Then, an attempt is made to substantiate the numerical approach by comparing its results with some experimental results. Lastly, a list of six important required performances are presented, some of them being examined numerically. As a result, empirical formulas have been proposed for (a) limit of spacing between the bracing and restraining member and (b) contact force transmitted to the restraining member.

Key words: Buckling-restrained brace, Damper, Required performances, Analysis, Test, Design

キーワード: 座屈拘束ブレース, 制震ダンパー, 要求性能, 解析, 実験, 設計

1 緒言

構造物の耐震性向上の方法は大きく2つに分類されよう。

- 1) 構造的耐震性向上策—耐震構造
- 2) 制震装置設置による耐震性向上策—制震構造

第1の方法は従来から採られてきた耐震構造の考え方で, 新設鋼構造物であれば, 力学的パラメータ値の変更による耐震性能の向上(例えば, 板厚を増して幅厚比または径厚比を小さくする, 補剛材を追加して幅厚比を小さくする, ダイアフラム間隔を密にして補剛材細長比を小さくする, コンクリートを適切な高さまで充填するなど)あるいは構造形態の変更(例えば, アーチ橋の支点をヒンジから固定にする, 支柱をトラス構造からラーメン構造にするなど)がある。また, 既設構造物であれば, 耐震補強としてコンクリートの部分充填, 補剛材の追加設置, 角補強など種々の方策が考えられる。これらの耐震性能向上策は, 補強あるいは構造形態の変更により, 部材・部品の塑性変形性能を高める, あるいは特定の部材・部品に塑性変形を集中させないで構造物内に広く分散させることなどにより, 構造物全体の耐震性能を向上させる方策である。土木鋼構造物分野における耐震性能向上策に関する研究の多くはこの方法であり, 膨大な研究が既に蓄積されている。

第2の方法は, 地震時に大きな損傷を起こさせる部材を, 地震後に取替えまたは補修が容易に出来る2次部材・部品(エネルギー吸収部材と称し, 例えば横構, 対傾構など)に限定し, それ以外の部材・部品の損傷を極力小さくする方法である。エ

ネルギー吸収部材は, 大地震時には大きな損傷を受け, 地震終了後にはその部材のみを取替え・補修する事を意図しているため, しばしば犠牲部材と呼ばれる。また, 時には, エネルギー吸収・消散の目的のために特別に開発された装置(制震ダンパー)を用いることもある。上で述べたような構造物は, 主構造の損傷が小さいため, 一般に地震後の残留変形が小さくなり, また損傷部位が限定されるため補修が容易であるなど, 前述の構造的耐震性向上策に比べ, 地震後の使用性の観点から有利である。かかる構造は, 免震構造を含め, 総括的に制震構造と呼ばれ¹⁾, 建築分野では精力的に研究が行われている日本発の世界的な新技術である。そのため, 我が国における施工例は他国に比べ格段に多い²⁾。制震構造は, 1960年代に, 当時京都大学の教授であった小堀鐸二博士が提唱したのが始まりとされている³⁾が, 現在では, 損傷制御設計の枠組みでの中心的な構造コンセプトとなっている³⁾。一方, 土木分野を見てみると, 免震構造を除いた制震構造に関する研究はまだ揺籃期の状態で, 計画を含めた施工例は1, 2を数えるほどである⁴⁾。

本論文は, 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最も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)の要求性能に関する考察について述べたものである。すなわち, BRBに関する現況の概説, 弾塑性繰返し挙動の解析モデルと結果, 性能実験と復元力特性のモデル化, および種々の要求性能について述べ, その内のいくつかの項目についての解析的な検討結果を述べる。

2. 座屈拘束ブレース(BRB)

2.1 概要

BRBは、建築分野では中・高層ビルに幅広く使用されている⁵⁾。座屈拘束のないブレースは通常細長比が非常に大きいため、軸方向に圧縮力が作用すると座屈現象によって急激に耐力低下を生じる。このため、ブレース材を信頼性のあるエネルギー吸収部材として使用しようとする、設計に多くの労力を必要とする。この欠点を解決するために、図1のようにブレース材をモルタルなどの拘束材で覆い座屈を起こさせないようにしたブレース(座屈拘束ブレース、BRB)が提案されている⁵⁾。ブレースの座屈を拘束することにより、圧縮と引張に同一の履歴特性が得られ、ブレースのエネルギー吸収能力を格段に向上させると共に、復元力特性を単純化させて設計を容易にさせることが可能となる。このような点から建築分野ではBRBは早くから注目され、多くの研究が行われてきた。

BRBは、履歴型ダンパー(履歴減衰によって地震エネルギーを吸収・消散する装置)の一種であり、この方面の研究はJSSCの報告書⁵⁾、和田ら⁹⁾および岩田らの著書⁶⁾に詳しい。土木分野での研究は緒についたばかりであるが、ラーメン橋脚^{7), 8), 9)}、アーチ橋^{4), 10), 11)}、トラス橋^{12), 13)}、吊橋¹⁴⁾等の耐震性向上に有効であることが実証されつつある。降伏形式としては、せん断降伏型、軸降伏型、および曲げ降伏型の3種類があるが、BRBは、軸降伏型の履歴ダンパーである。

2.2 断面構成

BRBは、軸方向力を伝達する鋼材(以下、ブレース材と称す)の横方向のたわみを、鋼管やモルタルから構成される座屈拘束材(以下、拘束材と称す)によって拘束することによって座屈を起こさないようにしたブレースである(図1)。ブレース材にかかる軸力を拘束材に伝えないために、拘束材とブレース材の間には、隙間、もしくは特殊な緩衝材(以下、アンボンド材と称す)を用いている。このように、BRBはブレース材-拘束材間の付着を切る‘アンボンド処理’が施されているため、一般的にアンボンドブレースとも呼ばれている。

BRBは、その適用構造物や適用個所に応じて様々な断面構成を持つ。ブレース材に鋼部材を用いる線材タイプのブレースは、モルタル充填型と中空型に分けられ、断面形状として、矩形、H型、十字形および円形などが使用されている(図2)。BRBは、部材座屈および局部座屈が起こらないように使われるのが基本であるから、圧縮と引張りの挙動はほぼ同一となり、断面積と降伏応力さえ同じであれば挙動は断面形状には無関係になる。

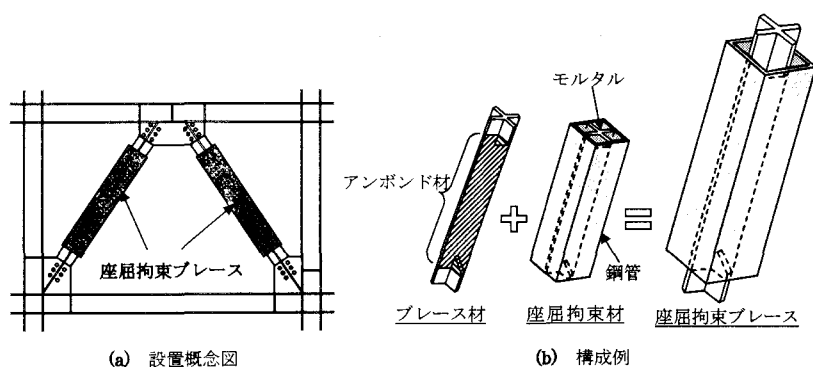


図1 座屈拘束ブレース

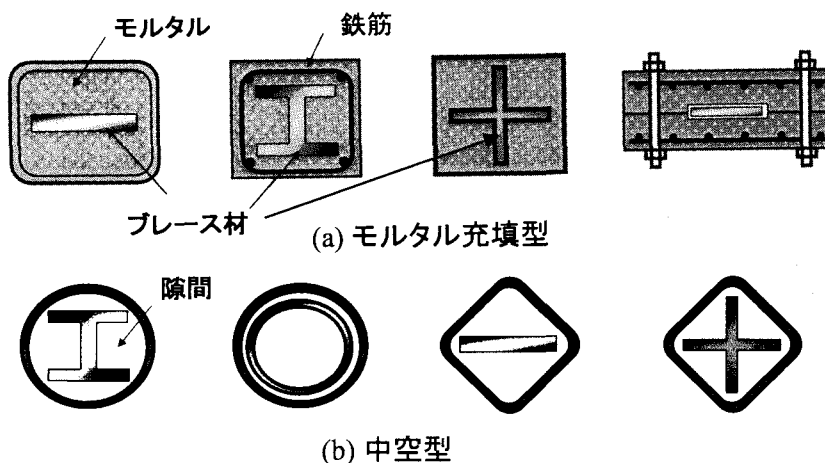


図2 座屈拘束ブレースの断面例

アンボンド材にはエポキシ樹脂の上にシリコン系樹脂を重ね塗布したものやシリコン系の塗料を塗布したもの、VMテープや発泡スチロール、厚さが0.15~0.2mmのポリエチレンフィルムシートを二重に巻きつけたものなどが用いられている⁵⁾。

2.3 ブレース材の使用材料

BRBは、取り替え可能であるが、一般に長期間使用されるものであるため、その素材には次のような性能が要求される：1) 安定した履歴特性を持ち、高いエネルギー吸収能を持つ、2) 変形能力が大きい、3) 低サイクル疲労強度が大きい、4) 高い耐久性を持つ、5) 製作が容易で安価である、6) 取り替えが容易に出来る。

BRBは、設計の容易さを考えると、前述のように座屈(局部座屈、部材座屈)は極力避けるように設計するのがよい。素材としては、上述の要件を満たすものとして鋼材が最も多く用いられ、鋼種として、普通鋼(SS400鋼)、低降伏点鋼(降伏応力235 N/mm²クラス)、極低降伏点鋼(降伏応力100 N/mm²クラス)などの低い降伏点強度の鋼が使用される。これは、大地震に対して、ブレース材の降伏を容易に起こさせるためである。ただし、降伏を確実に起こさせるためには、降伏点のバラツキを狭い範囲に収まるように制御された鋼材の使用が望ましい。

3. 座屈拘束ブレースの繰返し弾塑性挙動

3.1 解析モデルの概要

BRBは、ブレース材が拘束材内の隙間で変形するように拘束されている。従って、拘束材自身が座屈しないように設計されたブレース材の挙動は、ブレース材-拘束材間の接触問題としてとらえることができる¹⁵⁾。本研究では、拘束材の座屈は生じないものとし、拘束材を剛な平壁面に置き換え、クリアランスがなくなる程度にブレース材の初期たわみを仮定することとした。解析モデルは2次元の両端単純支持柱モデルを考え、対称性から図3に示す1/2モデルとした。この解析モデルでは拘束材表面を滑らかな剛壁面で表現し、アンボンド材を有限個のばねでモデル化している。本解析には構造解析汎用プログラムABAQUSを用いた。ブレース材の断面形状は矩形とし、Timoshenkoはり理論に基づく平面はり要素(B21)、剛壁面には2節点剛体要素R2D2を、ばねとしては2節点ばね要素SPRING2を使用した。なお、接触解析にはABAQUSに導入されている有限すべり接触を定義した。これはLagrangeの未定乗数法に基づいている。

柱は40個の等長のはり要素に分割し、剛体要素は、はり要素と同じ間隔で分割し、節点がはり要素の節点と柱軸に直角方向(y軸方向)に平行に並ぶように定義した。ばね要素は、はり要素と同一のx座標の剛体要素の節点間を結ぶよう定義し、y軸方向のみ力が働くよう設定した。また境界条件は上端の節点でy軸方向の変位のみを拘束、下端の節点ではモデルの対称条件から、z軸周りの回転およびx軸方向の変位を拘束した。なお、z軸方向は紙面に垂直な方向である。

3.2 アンボンド材のモデル化

アンボンド材は、ブレース材と拘束材との付着を抑制するだけでなく、ブレース材がたわむ際の抵抗となることを想定し、そのブレース材のたわみに対する抵抗特性を複数の離散化ばね(ブレース材の長さ方向に片側41個のばね)で模擬した。アンボンド材には塗料や接着テープなど非常に薄い膜状のものが使用されているためその剛性には不明な点が多く、正確なばね定数を与えることは困難である。そこで、本研究ではブレース材の曲げ剛性(ブレース材を単純支持ばりと考え、その中央1点載荷時の曲げ剛性 $k_{brace} = 48EI/L^3$)を基準にし、アンボンド材の剛性を $K_{unbond} = \alpha k_{brace}$ としてばね定数 k_s の算定を行った。 α は定数で、ここでは、1/10と仮定した。 α の値の敏感度およびばね定数 k_s の決め方については前論文¹⁵⁾を参照されたい。

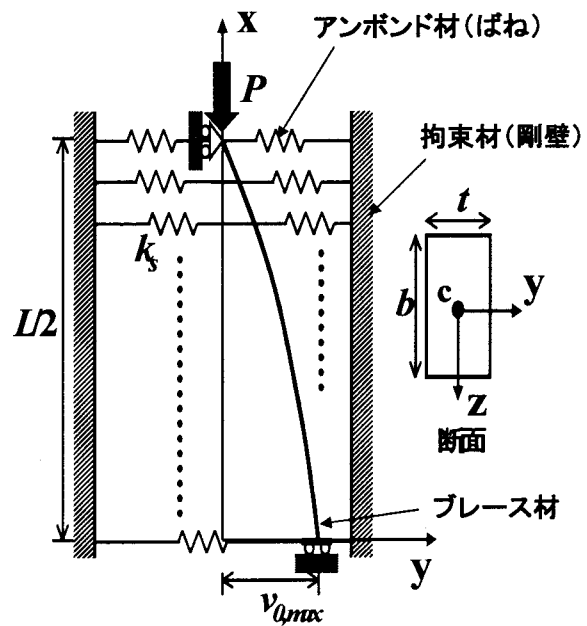


図3 解析モデル (1/2モデル)

表1 解析モデルの諸元 (b=90mm, L=4000mm)

λ	t [mm]	α	k_s [N/mm]	P_y [kN]	δ_y [mm]
100	139	1/10	79.2	3120	4.88
200	69.3	1/10	0.990	1560	4.88
400	34.6	1/10	0.124	779	4.88
800	17.3	1/10	0.0155	390	4.88

3.3 解析モデルの諸元

本研究で用いた解析モデルの主な諸元を表1に示す。ブレース材の幅 b は90mm、部材長 L は4,000mmで一定とし、板厚 t を変化させて、弱軸回りの細長比 λ を100, 200, 400, 800と変化させてある。また、 $\alpha=1/10$ 倍となる場合のばね定数 k_s 、降伏軸力 $P_y = A\sigma_y$ 、降伏軸方向変位 $\delta_y = L\sigma_y/E$ も表に示されている。アンボンド材の厚さおよびブレース材と拘束材の隙間量は1mmで一定とした。初期たわみ v_0 は半波の正弦曲線を与え、初期たわみの最大値 $a=v_{0max}$ はアンボンド材厚さの半分の0.5mmとした。

3.4 載荷方法および構成則

本解析では図3の解析モデルにおける上端点を載荷点として軸方向に強制変位を与える変位制御法により、単調圧縮載荷および繰返し載荷の2パターンの解析を行った。繰返し載荷は、引張り・圧縮等軸方向変位振幅の両振り載荷で行い、増分

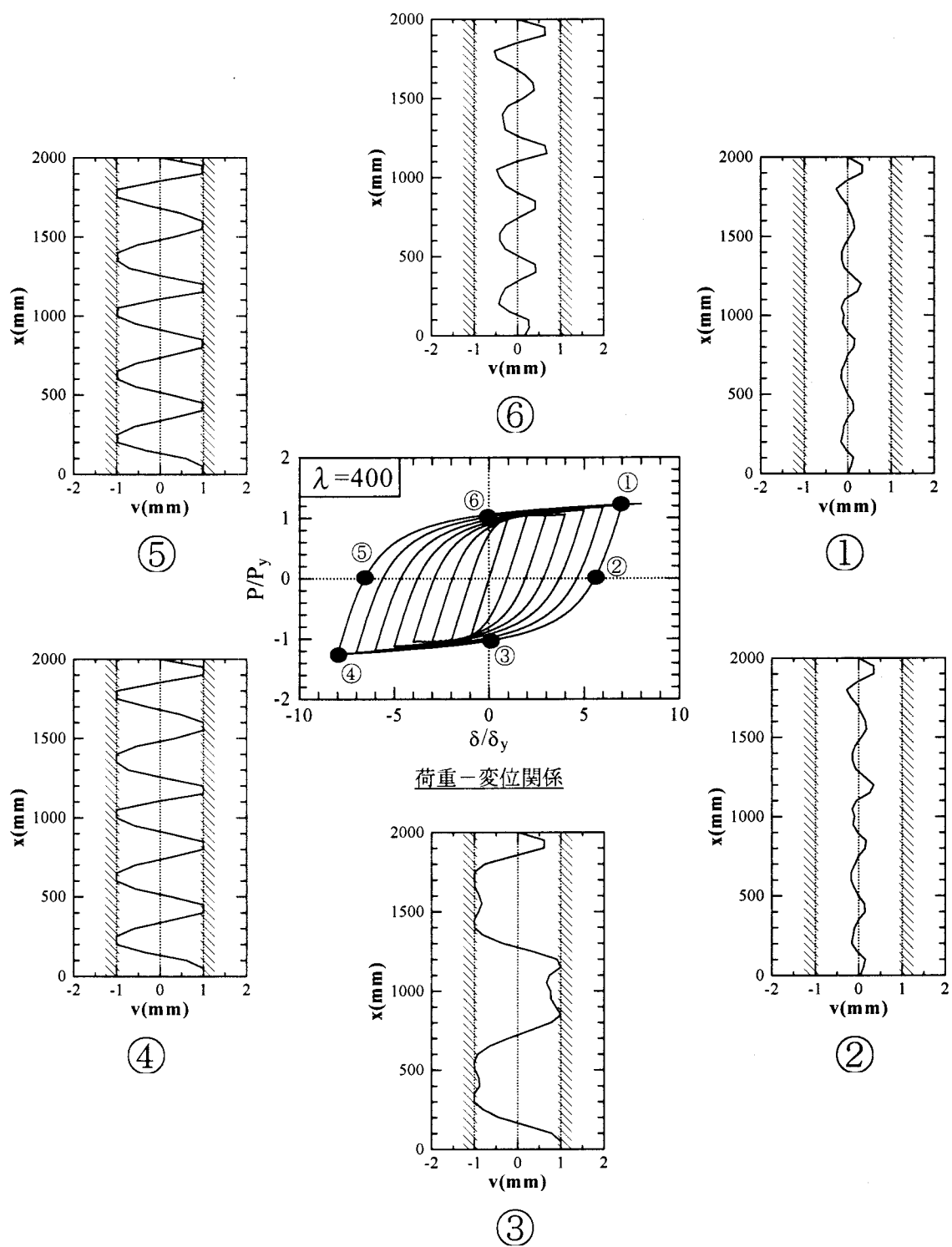


図5 繰り返し載荷時の1ループの変形モードの変化

量は降伏変位 δ_y とした。繰り返し数は各変位1回である。単調載荷の際の構成則には、図4に示すような降伏棚およびひずみ硬化域を持つ応力-ひずみ関係を用いた。使用した鋼材はSS400で、その材料定数は図中にまとめられる。また、繰り返し載荷解析の構成則には名古屋大学で開発された修正2曲面モデル¹⁶⁾を用いた。

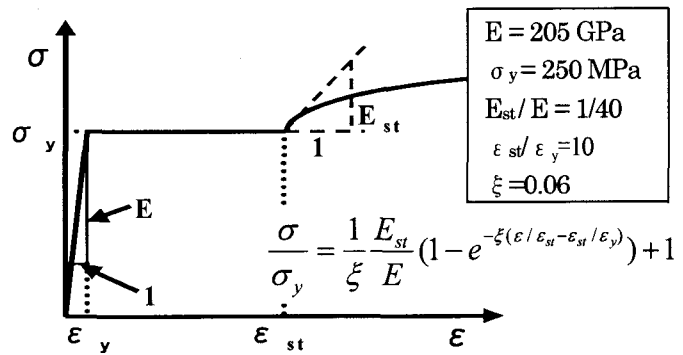


図4 応力-ひずみ関係

3.5 解析結果—ブレース材の挙動

単調増大および繰り返し載荷時の座屈拘束効果およびブレース材の弾塑性挙動については前論文¹⁵⁾で述べた。そこで得られた主要な知見は以下のようである。

- 1) ブレース材は、拘束材との隙間で非常に高次のたわみモードで変形し、ブレース材の圧縮時の軸方向変位は、主としてたわみによってもたらされる。
- 2) 細長比の大きなブレース材ほど高次のモードに移行しやすく、アンボンド材の剛性はブレース材の挙動に大きく影響しない。
- 3) 圧縮時の軸方向荷重(P)-軸方向変位(δ)関係は、単調圧縮載荷および繰り返し載荷とも、引張り時のそれにほぼ等しい。

ここでは、補足的な解析結果として、繰り返し載荷時の1サイクル($\delta = 7\delta_y \rightarrow -8\delta_y \rightarrow 8\delta_y$)の間のブレース材 ($\lambda = 400$) の挙動の変化を見てみる(図5)。状態①で最大引張力を加えたにかかわらず残留たわみを残したブレース材は、再度圧縮されることにより、再び高次モードで横たわみ変形を起こす(②, ③, ④)。単調載荷の場合は、徐々に高次モードに移行していったが、繰り返し載荷の場合は、初めから高次モードへ移行する。これは引張り時に残っていた微小な残留たわみが要因である。このように、ブレース材は一度圧縮されると大きな塑性変形を生じるため、引張られてもたわみが残留し、再び圧縮される際には高次モードから変形し始める。すなわち、再圧縮時には高次モードへの移行がスムーズに起こる。以上のように、繰り返し載荷においてブレース材が高次モードで変形することは、後述の実験においても得られている現象である。

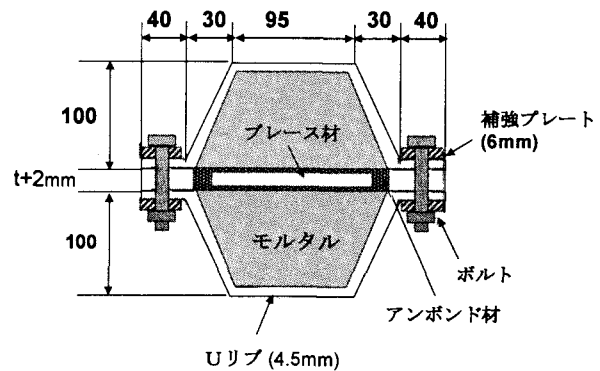
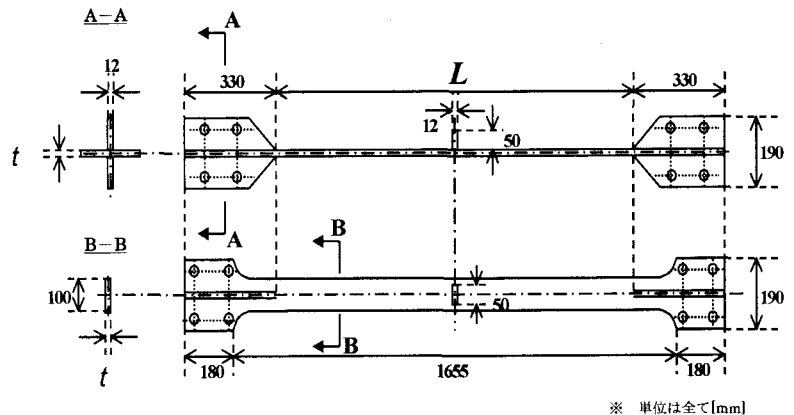


図6 座屈拘束ブレースの断面



※ 単位は全て[mm]

図7 実験供試体 (ブレース材)

4 実験による検証

4.1 実験の概要

実験の詳細は別報^{17), 18)}で述べたのでここでは概要についてのみ述べる。

本実験で採用した座屈拘束材は、既存のブレース材(横構, 対傾構等)を補強する, 施工を容易にする, 地震後の損傷度検査を可能にすることなどを考慮して, 図6に示すようなボルト接合断面とした。ブレース材には平鋼を採用し, 一对の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,

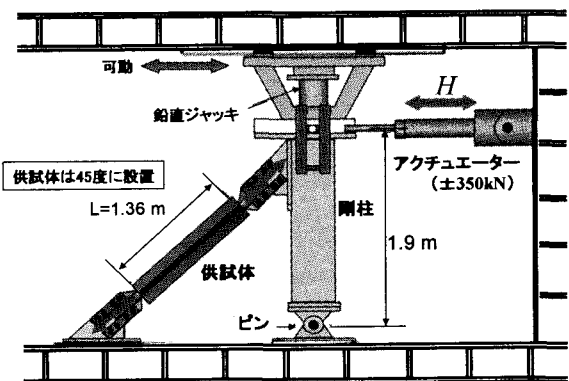


図8 実験装置

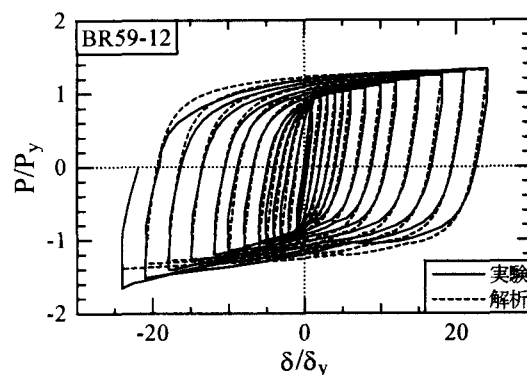
そこにモルタルを充填したものを用いた。ブレース材が軸方向に自由に変位できるようにアンボンド処理(1mm厚のブチルゴムをブレース材両面に接着)を施したブレース材を拘束材で両側から挟み込むように装着し、ボルトにより接合した。従って、ブレース材と拘束材の名目上の隙間量は1mmである。断面の厚さが異なる3種類のブレース材に対して供試体を製作し、引張・圧縮交番の繰り返し载荷実験を3体行った。

ブレース材の鋼種はSS400で、全体図を図7に示す。端部はリブで補強した十字型断面で、部材長 L (=1360mm)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。ブレース材の諸元および材料定数を表2に示す。変形部分の幅 b は一定(100mm)で、板厚を変えて細長比を変えている。ここで、 A は断面積、 λ は弱軸に関する細長比である。

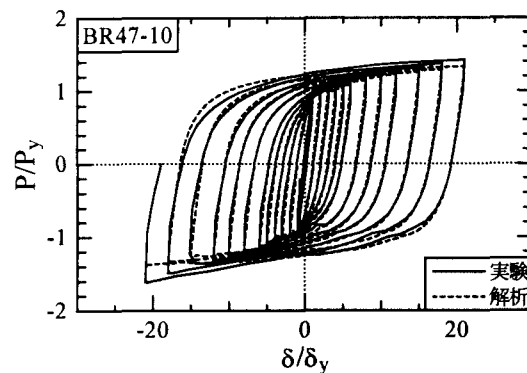
実験装置を図8に示す。実験供試体は基部がピン支持の鉛直柱(ピンからの高さ $h=1.9\text{m}$)と台座間に 45° の角度で設置し、端部はボルトにより接合した。水平力は容量 $\pm 350\text{kN}$ のアクチュエーターにより加力した。アクチュエーターにより水平方向に载荷することにより、実験供試体には軸方向荷重 $\sqrt{2}H$ (H =水平力)、軸方向変位 $\delta/\sqrt{2}$ (δ =水平変位)が与えられるようになっている。ブレース材の変形部分の長さは $L=1.36\text{m} \approx h/\sqrt{2}$ あるので、実験供試体の変形部分(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。

実験供試体の変形部分の軸方向変形(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ヤルゲージ(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。

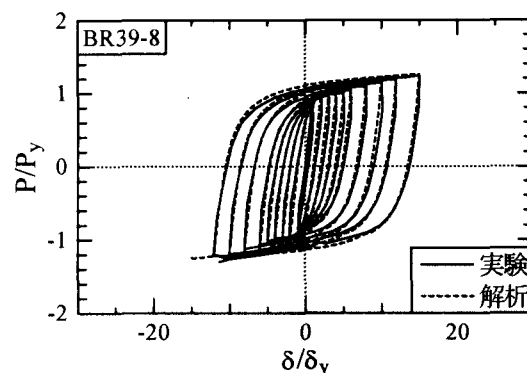
载荷は実験供試体の軸方向変形 δ によって制御した。载荷



(a) BR59-12



(b) BR47-10



(c) BR39-8

図9 実験と解析の比較

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载荷を行った。なお本実験においては、

表2 供試体の諸元および材料定数 ($L=1360\text{mm}$, $b=100\text{mm}$)

供試体名	t (mm)	A (mm ²)	λ	P_y (kN)	δ_y (mm)	E [GPa]	σ_y [MPa]	E_{st} [GPa]	ε_{st} [%]	Poisson 比
BR59-12	8.49	851	553	260	1.94	213	306	2.88	1.69	0.291
BR47-10	9.78	980	480	268	1.78	209	273	3.70	1.73	0.288
BR39-8	11.8	1180	399	328	1.75	216	278	4.16	1.88	0.294

SS400 材に対してほぼ 3%のひずみに対応する $20\delta_y$ 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。

4.2. 実験結果及び考察

(1) 軸方向荷重—軸方向変位曲線

実験によって得られた各供試体の軸方向力(P)—軸方向変位(δ)関係を図9の実線で示す。図において引張側を正とし、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。BR39-8 についてはアクチュエーターの容量の関係で目標塑性率(20.0)まで載荷出来なかったが、他の供試体は目標値を越えるところまで載荷して実験を終えた。

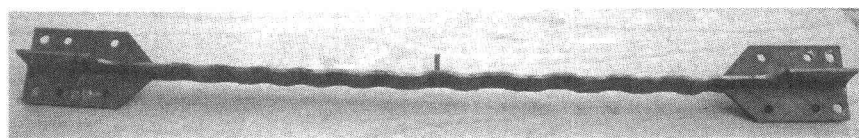
各供試体とも引張、圧縮側でほぼ同様な紡錘形の履歴曲線を描いており、拘束材は最終段階まで機能し、優れたエネルギー吸収能力を発揮していることが分かる。ただし、引張側と圧縮側の履歴曲線を詳細に検討すると、完全に同一であるとは言えず、各供試体とも塑性域の勾配(2次勾配)が若干圧縮側の方が大きくなっている。これは、圧縮時にブレース材と拘束材が接触し、その間に生じた摩擦力がアンボンド材では完全に除去できなかったためであると考えられる。アンボンド材は、ブレース材の軸力を拘束材に伝えないようにするだけでなく、ブレース材と拘束材のクリアランスを均等に保つ役割もあり、BRB が性能を発揮するために重要なものである。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。これについては後述する。

(2) 供試体の変形状況

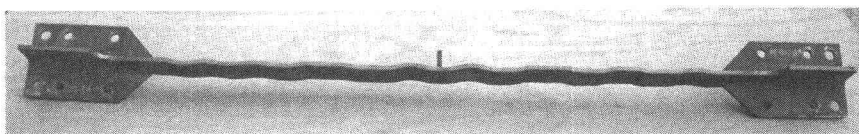
実験終了後のブレース材の変形状態を写真1に示す。これらより、ブレース材の軸方向変位は、主として大きさを制限された高次モードのたわみ(横方向変位)によって引き起こされていることが分かる。圧縮時にも安定した復元力特性が得られ、大きなエネルギー吸収能力を有するのはブレース材のたわみが一定量より小さく拘束されているからであり、ブレースと拘束材の隙間量の制限が重要であることが分かる。たわみモード波数は細長比が大きいほど大きくなっている。

(3) 解析結果との比較

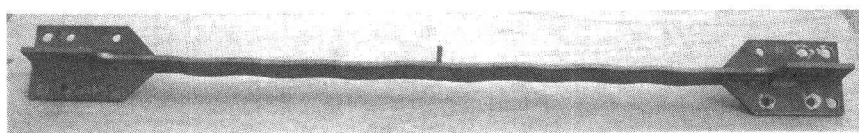
全実験供試体の軸方向力—軸方向変位関係について、本解析モデルによる解析結果と実験結果とを比較したものが図9である。初期たわみは、最大値を 0.5 mm (アンボンド材厚の 1/2) として、半波の正弦曲線と与えた。両者の履歴曲線は若干の差はあるもののほぼ一致しており、本解析モデルが BRB の弾塑性挙動を精度良く再現できるものであることが分かる。圧縮側で実験の荷重が解析結果の荷重を上回るが、これは、解析モデ



(a) BR59-12



(b) BR47-10



(c) BR39-8

写真1 実験終了後のブレース材

ルではブレース材と拘束材の間に摩擦を考慮していないためである。

(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。文献¹⁸⁾では、そのような観点から、図9の解析結果を基に復元力モデルの検討を行った。その結果、2次勾配を1次勾配の1/60とするバイリニアを骨格曲線とした、移動硬化則モデルによって図9の解析結果を十分な精度で模擬できることが分かった。

5. 座屈拘束ブレースの要求性能

座屈拘束ブレース(ブレース材と拘束材)がその機能を果たすためには種々の性能が要求される。ここでは、それらをまとめ、その内の若干の項目について検討を加える。なお、本章の解析は全て3. で述べたモデルおよび構成則を用いて行った。

5.1 座屈拘束ブレースの全体座屈の防止

ブレース材は拘束材と一緒に全体座屈(曲げ座屈)することがあってはならない。全体座屈の防止条件については、建築の分野で多くの研究があり、次の条件を満たせば、防止できるとされている⁴⁾。

$$M_y^R \geq \frac{\nu P_y (a + d)}{1 - \frac{\nu P_y}{P_E^R}} \quad (1)$$

ここに、 M_y^R —拘束材の降伏モーメント、 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、 a —BRB 中央部の初期たわみ(拘束材とブレース材の初期たわみは同一とする)、 d —

拘束材とブレース材の隙間量、 ν =安全係数である。式(1)は、ブレース材の軸力 νP_y によるブレース材中央の付加(P - d)モーメント(右辺)が、拘束材の降伏モーメント(左辺)を越えないという条件を表す。

式(1)の適用にあたっては次のことに配慮する必要がある。

- 1) ブレース材の強度は降伏軸力 P_y としているが、実際にはひずみ硬化のため P_y の1.5倍近くに達する場合がある(図9参照)。
- 2) BRBは曲げ剛性が小さいため、初期たわみには自重の影響を含める必要がある。
- 3) ブレース材端部はガセットを介して主構造に接合されるため、接合構造によっては軸力が偏心してブレース材に作用する場合がある。

上記1)の影響および降伏応力のバラツキなど他の要因による安全性の低下をカバーするため、安全係数は、例えば $\nu=2.0$ 程度の値が考えられる。また、3)に対しては、偏心量を e として、式(1)右辺の atd を $at+e+d$ に置き換えることが考えられる。

上記の影響をすべて考慮した全体座屈防止条件は、3. で述べた解析を発展させ、ブレース材と拘束材を一体とした解析が必要で、これについては現在検討中である。

なお、実験で用いた拘束材は、条件式(1)に対してかなり安全側にある。

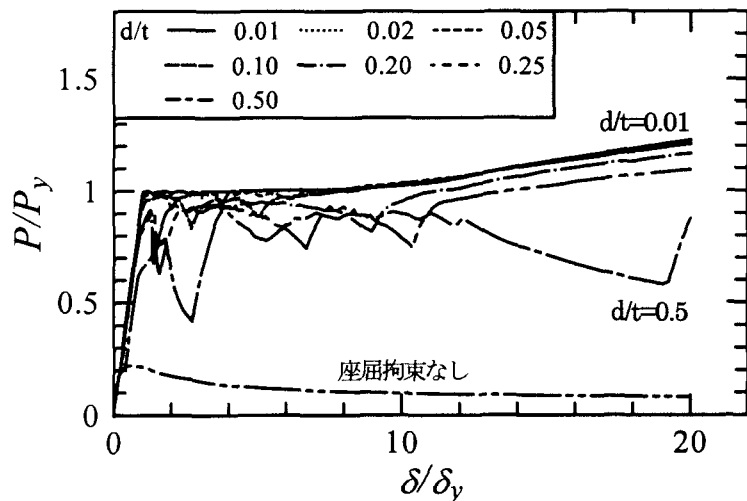


図10 隙間量による荷重—変位関係の変化

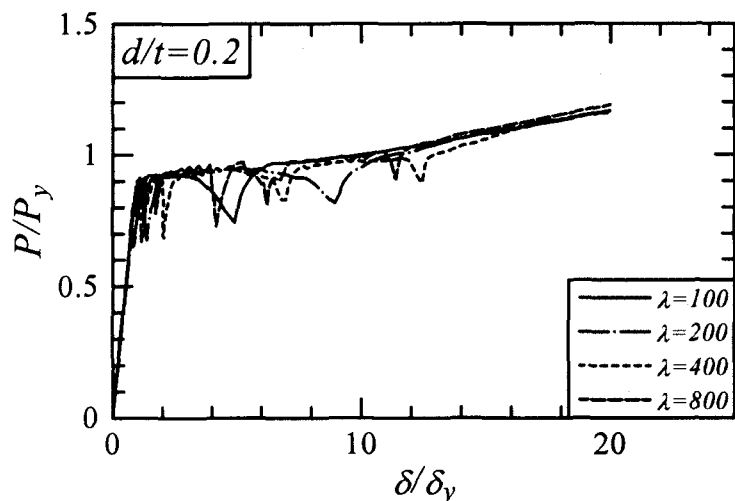


図11 細長比の影響 ($d/t=0.2$)

5.2 ブレース材の座屈による耐力低下の防止

これは、ブレース材に過度の座屈変形に伴う耐力低下を起こさせないための要求性能である。ブレース材と拘束材の間の隙間量が大きすぎると、その間で座屈変形が進行してしまい耐力低下を起こすことになる。特に、ブレース材の周辺をモルタルなどで拘束せず、鋼管内に挿入した形式(図2の中空型)については、ブレース材の局部座屈(パイプの場合はシェルとしての座屈、十字形断面の場合はねじり座屈)が問題になる。二重鋼管方式のBRBに関する研究は別の機会に述べるとし、ここでは、本研究で採用したアンボンド型平鋼ブレース材の隙間量に関する一考察について述べる。

図10に、種々の隙間量 d (=アンボンド材厚)を有するブレース材の単調増大軸方向圧縮時の荷重—変位曲線を示す。ブレース材の細長比は $\lambda=200$ で、初期たわみの最大値は $a=L/1000$ とし、表1のモデルを使用している。図には拘束材が無い場合の結果も示されている。図10より、隙間量とブレース材の板厚の比 d/t が大きいものは、大きな荷重変動が見られることが分かる。荷重の変動は次のようなメカニズムによって起こると考えられる。軸方向変位量を徐々に大きくするとブレース材が壁面にあたり、その接触面が成長しある程度大きくな

るまで、荷重は上昇する。その後、接触面の中央付近が壁面から離れ始め(図5の③のモードから④のモードへ移行するとき、 $x=500, 1,000, 1,500\text{mm}$ 辺りのブレース材の変形挙動)この瞬間解析上は荷重が低下し始める。離れ始めた面が再び反対側の面に接触する瞬間まで荷重は低下し、接触後、荷重が上昇し始める。以降、この動作はモードが移行する際に繰り返される。上記、荷重の低下・上昇は飛移り座屈現象に類似しており、隙間量が大きいほど顕著に表れる。

さらに、図10によると、隙間量が大きくなるにつれて、最終変形近辺($20\delta_y$)の軸方向荷重は小さくなる傾向があることが分かる。これは隙間量が大きいほど軸方向力により発生する付加的な曲げモーメントが大きくなり、軸方向荷重が小さくても軸方向変形が生じるためである。最終変形時($20\delta_y$)の軸方向荷重を具体的に見ていくと、 $d/t=0.01$ のときに $1.22P_y$ であったのに対し、 $d/t=0.20$ のときは $1.17P_y$ ($d/t=0.01$ のときの96%)であり、 $d/t=0.25$

のときは $1.09P_y$ ($d/t=0.01$ のときの89%)であった。すなわち、 d/t が0.20から0.25のときに大きく低下すると言える。そこで本研究では、95%以上の荷重を保持している $d/t=0.2$ を隙間量の制限値と定めた：

$$d/t \leq 0.2 \quad (\text{平鋼}) \quad (2)$$

上の結果は $\lambda=200$ に対して得られたものであるが、ブレース材の長さの影響を調べるため、 $d/t=0.20$ について $\lambda=100\sim 800$ の解析を行った。得られた荷重－変位関係を図11に示す。これらの図より d/t が一定ならば、細長比を変化させてもほぼ同じような荷重－変位関係を示すことがわかる。すなわち、荷重－変位関係に影響を及ぼすパラメータは d/t であると見なし得ようと考えられる。

以上は平鋼ブレースに対して得られた結論であるが、これを一般化させるために、この制限値を d/r (r =ブレース材弱軸回りの断面二次半径)で表すと、 $t = \sqrt{12}r$ であるので、次のようになる。

$$d/r \leq 0.7 \quad (\text{一般断面}) \quad (3)$$

この式を、隙間量の制限値の提案式とする。この式が他の断面に対しても適用できるかどうかを確認するために、パイプ断面 ($L=4000\text{mm}$, 外径=52.5mm, 厚さ=52.5mm) およびH型断面 ($L=4000\text{mm}$, フランジ幅=100mm, フランジ厚=5mm, ウェブ高=100mm, ウェブ厚=5mm)を、 $d/r=0.693$ として解析した結果を矩形断面の結果と比較した。結果は省略するが、各断面形状共に耐力低下率がほぼ一致していることが分かった²⁴⁾。これにより断面形状に関係なく、 d/r が決まればその荷重－変位関係はほぼ一樣になると考えられる。すなわち、 d/r は隙間量を決定する際に有効なパラメータで、式(2),(3)は隙間量の制限値の提案式として適切であることが分かった。

表3に本実験で行われた実験供試体の設計時の断面2次半径 r および d/r を示す。表に示されるように、すべての試験体の隙間量は制限値内の値である。

5.3 座屈拘束ブレースの必要塑性率の確保

BRBの必要塑性率は、ブレース材に付与すべき限界の塑性率 (Capacity) δ_u / δ_y であり、拘束材の設計とも関連する。これについては、多くの土木鋼構造物の地震応答解析を行い、応答塑性率 (Demand) を算定して決定する必要がある。本論文では、建築構造物での上限値と考えられる20.0 (SS400材に対して3%程度の軸ひずみで、層間変形角がほぼ0.03radに相当)としている。レベル2地震動を受ける鋼アーチ橋の対傾構および横構の一部に使用したBRBの応答塑性率を調べた最近の文献²⁶⁾によれば、20.0は、ほぼ適切な値としている。今後は更に広範囲

表3 実験供試体の d/r

供試体	r [mm]	d/r
BR59-12	2.45	0.40
BR47-10	2.82	0.35
BR39-8	3.41	0.29

表4 ひずみ振幅と破断繰返し数

片側軸ひずみ振幅 $\Delta \varepsilon / 2$	0.0075	0.015	0.03	0.05
破断繰返し回数 N_f	208	50	12	4

表5 実験供試体の累積疲労損傷度

供試体名	疲労損傷度 D
BR59-12	0.36
BR47-10	0.21
BR39-8	0.091

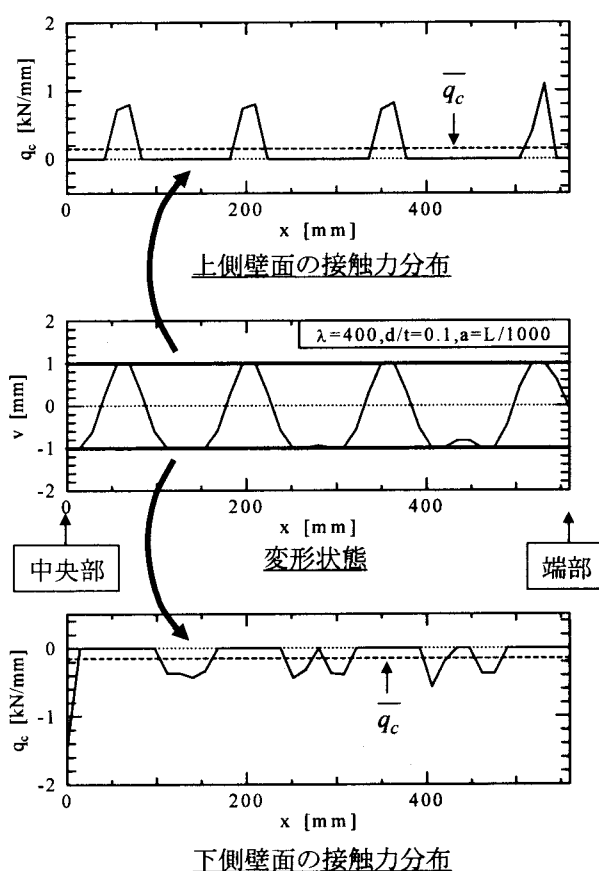


図12 接触力の分布 (BR59-12, 最終変形状態)

の土木鋼構造物に対する解析を実施して適切な値を決定する必要がある。

5.4 ブレース材の低サイクル疲労防止

ブレース材は、繰り返し作用する大きな塑性変形を受けるため低サイクル疲労による破断に対する配慮も必要な場合がある。これについても、建築分野で既に研究が行われており、前田ら^{19,20)}および中村ら^{21,22)}は、実大 BRB 材の軸方向交番荷重試験（正負等振幅）を行い、BRB の疲労性能を求めている。実験（鋼材は、SN400B および LYP100）により得られた、ブレース材の局部的ではない nominal な軸ひずみ振幅 $\Delta \varepsilon$ と破断繰り返し数 N_f の関係を式(4) に示す。

$$N_f = 0.0394 \times \Delta \varepsilon^{-2.04} \quad (4)$$

多数の異なるひずみ振幅範囲 $\Delta \varepsilon_i$ ($i=1 \sim n$) による累積疲労損傷度 D は、式(4)に Miner 則を適用して算定可能である²⁴⁾。式(4)より、ブレース材の片側軸ひずみ振幅 ($\Delta \varepsilon/2$) と破断繰り返し数の関係は表 4 のようになる。この表から分かるように、低サイクル疲労強度はかなり高く（本論文で設定した、必要塑性率に相当する軸ひずみ 3.0%で 12 回の繰り返し）、通常、塑性率の要求性能（片側軸ひずみ振幅 3%）を満足すれば低サイクル疲労については考慮する必要がないようである。ちなみに実験供試体の累積疲労損傷度を式(4)を用いて、文献 24)の方法によって計算すると表 5 のようになる²³⁾。

5.5 拘束材の強度

ブレース材は、拘束材の内部で高次のモードで変形するため、拘束材にはブレース材から接触力が作用しそれがフープ応力となり、ボルトは引張力を受けることとなる。これについては引張ボルト接合の設計式が準用できるものと思われる。ここでは、接触力がどの程度の大きさになるかを数値計算から求めてみる。

図 12 は $\lambda=400$, $d/t=0.1$, $a=L/1,000$ のブレース材の最終変形状態 (20 δ_p)、および上下の壁面に生じる接触力（ばねの反力）分布を示している。分布接触力 q_c は接触圧 (kN/mm²) にブレース材の幅を乗じた、拘束材に作用する単位長さあたりの接触力を示し、図の横軸は BRB 中央部 ($x=0.0$) からの座標値である。ばね剛性が小さいため、接触力はブレース材が壁面に接触するところのみで大きな値を示している。分布接触力は大きさや形状がブレース材の諸元によって大きく変動するため、ここでは分布接触力の各壁における平均値（分布接触力の各壁における積分値を壁の長さで除した量） $\bar{q}_c$ によって接触力を評価する。

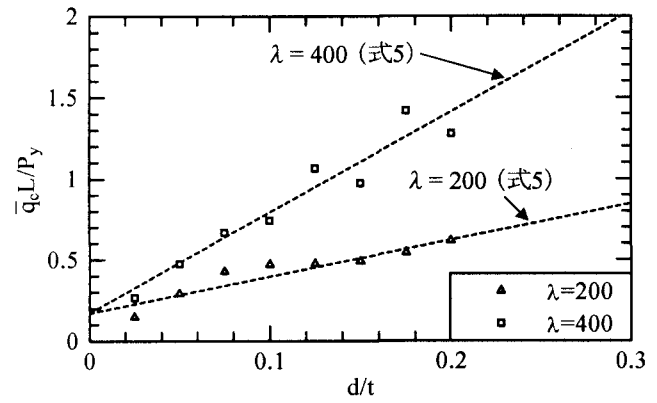


図 13 d/t と接触力の関係

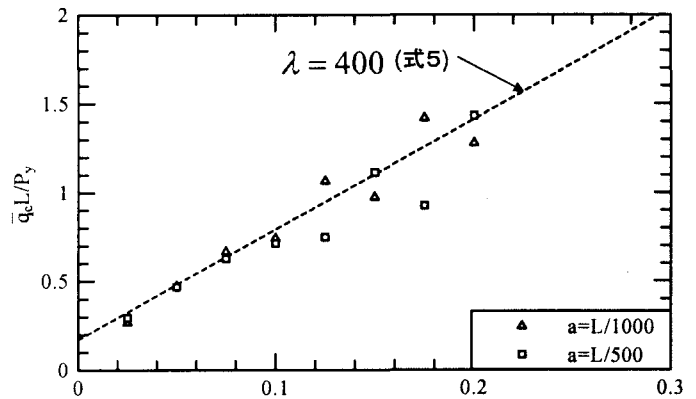


図 14 接触力に及ぼす初期たわみの影響

以降、平均値 $\bar{q}_c$ を単に接触力として、その推定式をパラメトリック解析によって算定することを試みる。図 13 は、細長比 $\lambda=L/r$ を 200, 400 と固定したときの接触力に及ぼす隙間量 d/t の影響を示す。図の縦軸は接触力 $\bar{q}_c$ に部材長 L を乗じた全接触力をブレース材の降伏軸力 P_y で除して無次元化した量である。この図より、次式で示される接触力の推定式と適用範囲を導いた。

$$\frac{\bar{q}_c \cdot L}{P_y} = \left(0.0198 \frac{L}{r} - 1.71 \right) \cdot \frac{d}{t} + 0.171 \quad (\text{平鋼}) \quad (5)$$

ただし、 $d/t \leq 0.2$, $L/r \leq 550$

$$\frac{\bar{q}_c \cdot L}{P_y} = \left(0.00572 \frac{L}{r} - 0.494 \right) \cdot \frac{d}{r} + 0.171 \quad (\text{一般断面}) \quad (6)$$

ただし、 $d/r \leq 0.7$, $L/r \leq 550$

また、図 14 は、ブレース材および拘束材の初期たわみの影響を見るために、 $a = L/1000$ 、 $L/500$ の 2 つのケースで $d/t = 0.025 \sim 0.2$ まで変化させて接触圧の比較したものである。ただし、 $\lambda = 400$ としている。図から初期たわみによる影響は非常に小さいことが分かる。

5.6 座屈拘束ブレースと主構造の接合部の強度

一般に BRB は主構造に剛接合され、接合部には軸力だけではなく曲げモーメントも作用する。従って、BRB と主構造の接合部を設計する際には、軸力により生じる応力だけではなく、曲げによる応力も同時に考慮しなければならない。通常、接合部はリブによって補強されているため、ブレース材接合部を剛と仮定して接合部に作用するモーメントを求め、それとブレースの降伏軸力によって接合部が降伏しない条件より接合部の設計を行う。具体的な算定式は文献 4) に詳しい。

5.7 補足

以上述べてきた座屈拘束ブレースの要求性能に関する内容の多くは建築構造の実績を基にしたものである。それらは参考になるところが多いが、今後は土木構造物に特有な面を洗い出して要求性能を精査する必要がある。これについてはまだ十分まとまっていないが、本文中に述べたことに加え、次のような項目に対するさらなる研究が必要と考えられる。

- 1) 土木構造物に用いられる BRB は必然的に大型になることが予想され、自重の影響が大きくなり、また施工性も悪くなる。従って、軽量化した BRB の開発が必要となる。
- 2) 大地震後のブレース材の損傷の検査、或いは BRB の取り替えなどが容易に出来る構造の開発が望まれる。そのために、部材集成あるいは主部材との取り付けにボルト接合は必須である。
- 3) 土木構造物の BRB は建築構造物より厳しい環境で使用されるため、腐食に対する配慮。アンボンド材の劣化などに対する配慮が必要である。

6. 結言

本研究では、将来、土木鋼構造物（特に橋梁）の制震ダンパーとして頻繁に使用されるであろう座屈拘束ブレース (BRB) の概要、弾塑性繰返し挙動を求めるための解析モデル、性能実験、および要求性能について述べた。要求性能は 6 項目取り上げ、その内、ブレース材と拘束材の隙間量の制限値ならびに拘束材の設計に必要なブレース材から拘束材に伝達される接触力の推定式を数値解析から導いた。本研究で得られた結論をまとめると以下になる。

- 1) ブレース材は、拘束材との隙間で非常に高次の横たわみモードで変形し、ブレース材の圧縮時の軸方向変位は主としてたわみによってもたらされることが、解析および実験から確認された。

- 2) 細長比の大きなブレース材ほど高次のモードに移行しやすく、残留変形も高次のモードになることが解析及び実験から確認された。
- 3) 圧縮時の軸方向荷重 (P) — 軸方向変位 (δ) 関係は、単調圧縮載荷および繰返し載荷とも、引張り時のそれにほぼ等しいことが解析および実験から確認された。
- 4) 解析結果は、実験結果と良く一致し、解析モデルの妥当性が実証された。
- 5) SS400 からなる座屈拘束材の復元力特性として、2 次勾配を 1 次勾配の $1/60$ とするバイリニアールを骨格曲線とした移動硬化則モデルが適用できる¹⁹⁾。
- 6) ブレース材と拘束材の隙間量 d が大きすぎるとブレース材の耐力低下が起こり、荷重—変位特性が不安定になる。それを防止する条件として、式 (2) あるいは式 (3) を提案した。
- 7) ブレース材の軸方向変位で表した BRB の必要塑性率として暫定的に $\delta_u / \delta_y = 20.0$ を設定した²⁵⁾。これについては今後多くの橋梁の地震応答解析を実施して応答塑性率を求め、それを上回る値として決定されるべきである。
- 8) ブレース材の低サイクル疲労は、通常、7) の必要塑性率を満足すれば考慮する必要がないと考えられる。
- 9) ブレース材から拘束材に伝達される接触力は、 d/r (r = ブレース材の弱軸回りの断面 2 次半径) に左右され、その最大値は式 (5) あるいは式 (6) によって推定できる。これは、拘束材およびボルトの設計に必要とされる。

前論文¹⁸⁾で求めた座屈拘束ブレース材の復元力特性 (4.2 節) を基に現在アーチ橋、トラス橋、斜張橋の耐震性向上に関する研究を行っている⁴⁾。結果は順次報告していきたい。

謝辞

実験に際し種々アドバイスを頂いた神奈川大学建築学科の岩田衛教授に感謝する。

参考文献

- 1) 小堀鐸二：制震構造，鹿島出版，1993.6
- 2) Spencer Jr., B.F. and Nagarajaiah, S.: State of the Art of Structural Control, J. of Struct. Eng., ASCE, Vol.129, No.7, pp. 845-856, July, 2003.
- 3) 和田章・岩田衛・清水敬三・阿部重孝・河合広樹：建築物の損傷制御設計，丸善，1998.7.
- 4) JSSC：土木鋼構造物の動的耐震性能照査法と耐震性向上策，日本鋼構造協会，鋼橋の性能照査型耐震設計法検討委員会（委員長：宇佐美勉），2003.10.
- 5) JSSC・鋼材倶楽部：履歴型ダンパー付骨組の地震応答性状と耐震設計法，1998.9
- 6) 岩田衛・竹内徹・藤田正則：建築鋼構造のシステム化，鋼構造出版，2001.2.
- 7) 松本信之，岡野素之，在田浩之，曾我部正道，涌井一，大内一，高橋泰彦：鋼製ダンパー・ブレースを有する RC 鉄道高架橋の耐震性能，構造工学論文集 Vol.45A，

- pp.1411-1422.
- 8) 松本信之, 曾我部正道, 岡野素之, 涌井一, 大内一: 鋼製ダンパー・ブレースを用いた鉄道高架橋の振動性状改善に関する研究, 構造工学論文集 Vol.46A, pp.547-554.
 - 9) 宇佐美勉・葛西昭・伊藤雅也・Chusilp, P.: BRBを用いた制震ダンパーの簡易設計法に関する基礎的研究, 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.385-392, 2003.1.
 - 10) 井上幸一・明神久也・増田伊知郎・中出収: 軸力降伏型鋼製ダンパーを適用した鋼橋の耐震性向上法, 第5回地震時保有耐力法に基づく橋梁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.43-50, 2002.1.
 - 11) 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, 2003.4.
 - 12) 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, 2003.1.
 - 13) 野中哲也・宇佐美勉・坂本佳子・岩村真来樹: 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, 2003.3.
 - 14) 大塚久哲・楠田広和: 吊橋の幾何学的非線形を考慮した地震応答解析および耐震性向上策の検討, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.521-530, 2003.3.
 - 15) 加藤基規, 宇佐美勉, 葛西昭: BRB 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, 2002.3
 - 16) Shen, C., Mizuno, E., Usami, T. (1993): 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. 7
 - 17) 加藤基規, 宇佐美勉, 葛西昭: BRB の繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究, 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, pp.345-350, 2003.1
 - 18) 渡邊直起・加藤基規, 宇佐美勉, 葛西昭: BRB の繰り返し弾塑性挙動と復元力特性に関する実験的研究, 土木学会地震工学論文集, 2003.12.
 - 19) 前田泰史, 中村博志, 竹内徹, 中田安洋, 岩田衛, 和田章: 実大アンボンドブレースの疲労性能 (その 1: 実験計画と結果概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 構造 III, pp.813-814, 1999.9.
 - 20) 前田泰史, 中田安洋, 岩田衛, 和田章: 軸降伏型履歴ダンパーの疲労特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 503 号, pp. 109-115, 1998.1.
 - 21) 中村博志, 前田泰史, 竹内徹, 中田安洋, 岩田衛, 和田章: 実大アンボンドブレースの疲労性能 (その 2: 実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 構造 III, pp.815-816, 1999.9.
 - 22) 中村博志・前田泰史・竹内徹・中田安洋・岩田衛・和田章: 実大アンボンドブレースの疲労性能 (その 2: 実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 構造 III, pp. 815-816, 1999.9.
 - 23) 加藤基規: BRB の弾塑性挙動, 名古屋大学提出修士論文, 名古屋大学工学研究科土木工学専攻, 2003.3
 - 24) 日本鋼構造協会: 土木鋼構造物の性能設計ガイドライン, pp. 138-140, JSSC, 2001.10
 - 25) 日沖堅治・葛 漢彬・宇佐美勉: 鋼アーチ橋に設置した制震ブレースの Demand, 第7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. 213-220, 2004.1
 - 26) 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. 169-176, 2004.1

(2003 年 9 月 12 日受付)