

軽量化した座屈拘束ブレースの性能実験

河村洋行¹・宇佐美勉²・葛西昭³・藤田将之⁴

¹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土木工学専攻(〒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 大学院工学研究科土木工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 工修 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)

⁴学生会員 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、土木分野でも、主構造の損傷を制御する制震部材として、建築分野で多くの実績のある金属製の履歴型ダンパーが注目されている^{1),2)}。その中の1つとして座屈拘束ブレース(以下、BRBと称す)が挙げられる。BRBは、中高層ビルなどのラーメン構造に斜材として実用化が進んでおり、図-1がその例である。BRBの基本構成例は図-2に示すとおりで、軸力を受け持つ鋼材(以下、ブレース材と称す)と、モルタルや鋼管などを用いた座屈拘束材(以下、拘束材と称す)で構成されている。また両者の間には、ブレース材に作用する軸力が拘束材に伝わるのを防ぐ目的で、ブレース材にアンボンド材と呼ばれる緩衝剤を塗布する(以下、アンボンド処理と称す)か、あるいは隙間(クリアランス)が設けられる。BRBは、座屈拘束がされていない通常のブレースに比べ、エネルギー吸収能力が格段に高いという利点があるが、ブレース全体の重量が大きくなってしまいうという欠点がある。BRBを鋼アーチ橋などといった土木構造物に適用する場合、建築構造物の場合と比べ必然的に大規模なものになるため、BRBの重量が大きいと、自重によるたわみの影響が大きくなると共に施工性も悪くなる。したがって、BRBの重量を低減することは一つの重要な課題であると言えよう。

本研究では、著者らが従来用いてきた拘束材に比べ重量を大幅に低減した拘束材を新たに提案し、それを用いたBRBの性能実験を実施し、併せて設計条件式を検証することを目的としている。

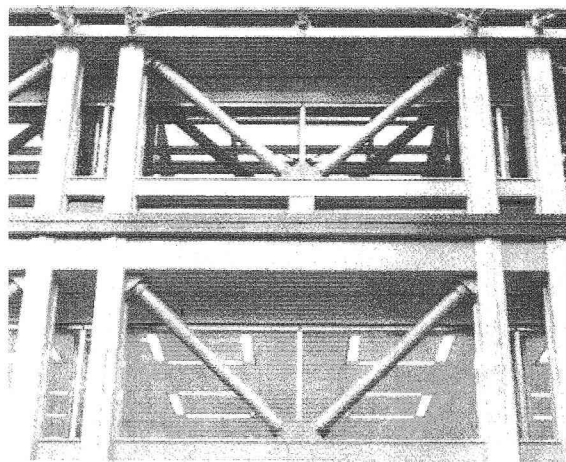


図-1 座屈拘束ブレースの例(アイ・ケイ・ビル)

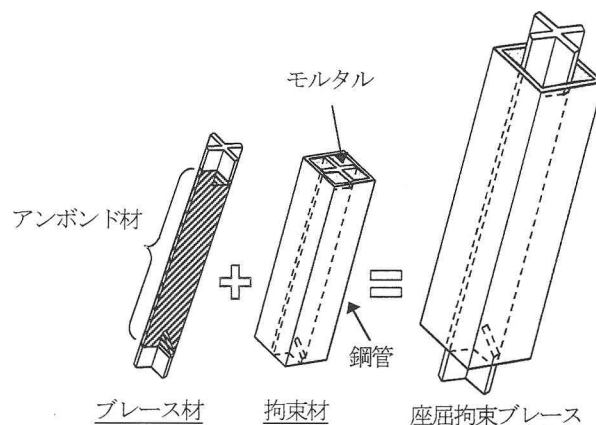


図-2 座屈拘束ブレースの構成例

2. 座屈拘束ブレースの要求性能

BRB(ブレース材と拘束材)に要求される性能には、次のような事項がある^{2),3)}。

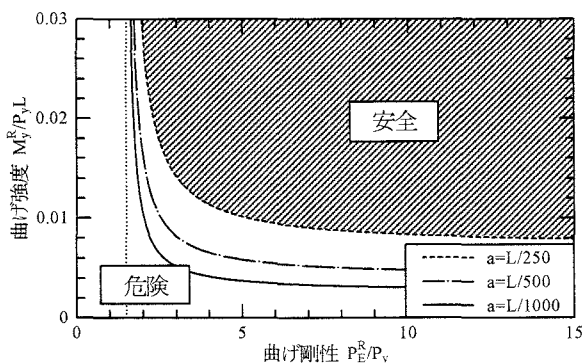


図-3 全体座屈防止条件

- 1) BRB の全体座屈の防止
- 2) ブレース材の局部座屈による耐力低下の防止
- 3) ブレース材の必要塑性率の確保
- 4) ブレース材の低サイクル疲労防止
- 5) 拘束材の強度
- 6) BRB と主構造の接合部の強度

本論文では、上記の要求性能の内、項目 1) の検討を主たる内容としている。以下、項目 1) について若干説明をする。項目 2)～6) に関しては、文献 2)～3) を参照されたい。

ブレース材が圧縮力によってたわみ、拘束材に接触した時に、拘束材の剛性や強度が十分でないと、ブレース材はその所定の変形性能を発揮する前に BRB 全体の面外変形が増大し全体座屈に至ることが予想される。したがって、圧縮側で引張側と同様の履歴特性を与えるためには、拘束材がブレース材と一緒に全体座屈(曲げ座屈)を起こさない条件が必要となってくる。これについては、建築分野で研究があり、次式を満たせば、防止できるとされている¹⁾。

$$M_y^R > \frac{P_{\max}(a+d)}{1 - \frac{P_{\max}}{P_E^R}} \quad (1)$$

ここで、 M_y^R : 拘束材の降伏モーメント、 $P_{\max}$: ブレース材に作用する最大軸力、 P_E^R : 拘束材のオイラー座屈荷重、 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を意味する。ブレース材に作用する最大軸力 $P_{\max}$ をひずみ硬化を考慮し $1.5P_y$ (P_y : ブレース材の降伏軸力) として式(1)を図で表すと、図-3 のようになる。図のように全体座屈条件式は無次元化曲げ剛性=1.5 に漸近するような曲線になり、例えば $a = L/250$ の場合、図の斜線部が全体座屈を起こさない安全域となり、それ以外が危険域となる。また、初期たわみ量により曲線は大きく異なっており、座屈拘束ブレースがどの程度の精

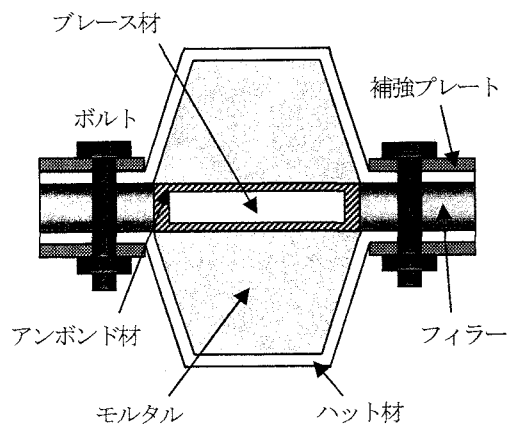


図-4 前論文^{3),4)}での実験供試体の断面構成図

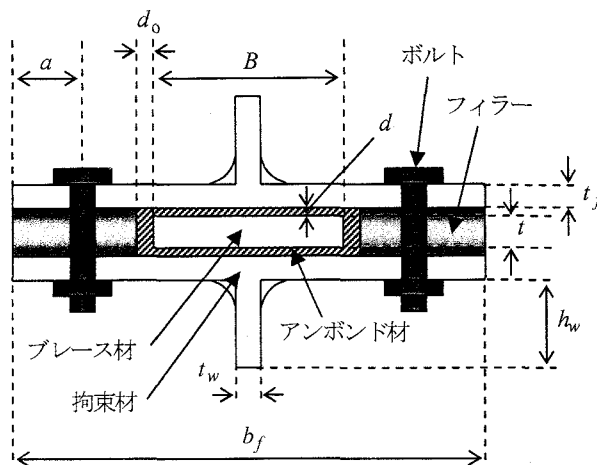


図-5 本論文での実験供試体の断面構成図

度で製作・施工されるか、また自重の影響を設計時に把握しておく必要があるといえる。

3. 実験の概要

現在、建築分野では様々な断面形状を有する座屈拘束ブレースが考案、開発され、実際の構造物に適用されている¹⁾。著者らは、それらの断面構成を参考の上、施工性や既存の構造物への適用性を考慮し、前論文^{3),4)}においては図-4 に示すような断面構成を採用した。ブレース材には平鋼を使用し、拘束材に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、そこにモルタルを充填したものを使用した。また、現地での施工を容易にするため、および大地震後のブレース材の損傷状況の検査を可能にするため、一組の拘束材はボルト接合した。

それに対し、今回は図-5 に示すような断面構成を採用した。ブレース材には従来と同様に平鋼を使用し、拘束材には T 形断面(ウェブ高さ h_w が零の平形を含む)を使用した。この新しい拘束形式の採用により、本拘束材は

表-1 ブレース材の諸元

L [mm]	B [mm]	t [mm]	A [mm ²]	λ	B/t	P_y [kN]	δ_y [mm]
1355	100	10.0	1000	469	10.0	279	1.81

表-2 ブレース材の材料定数

E [GPa]	σ_y [MPa]	ε_y [%]	E_{st} [GPa]	ε_{st} [%]	σ_u [MPa]	ν
210	279	0.133	4.19	1.58	428	0.287

表-3 各供試体の断面諸量

供試体名	拘束材寸法 [mm]					隙間量 [mm]		ボルト		
	b_f	t_f	h_w	t_w	a	d	d_o	D_B [mm]	c [mm]	B_y [kN]
F10W0-d1-6	200	10.2	0	0	25	1	6	10	50	33.7
F14W0-d2-2	201	13.7	0	0		2	2			
F14W15-d2-2	201	13.8	15.8	9.22		2	2			
F14W31-d1-6	201	13.7	32.6	9.13		1	6			
F14W31-d1-2	201	13.7	32.6	9.13		1	2			

前論文の拘束材に比べ4割ほど重量を低減することができた。本実験では以上のような断面構成の座屈拘束ブレースに対し、ブレース材と拘束材の隙間量、および拘束材の寸法が異なる5種類の供試体を用意し、それぞれに対し正負交番の繰り返し載荷実験を行いその性能・挙動を調べた。

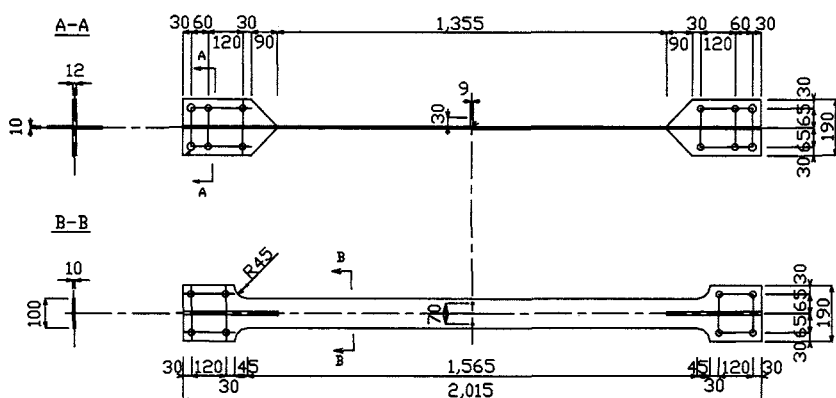


図-6 ブレース材の全体図(単位は mm)

3.1 実験供試体

(1) ブレース材

ブレース材にはSS400 よりなる平鋼を用いた。図-6に、ブレース材の全体図を示す。ブレース材はすべて同一寸法で、部材長 L (十字形断面を含まない平形断面部の長さ)は1,355mm, 板幅 B は100mm, 板厚 t は10mmで製作した。ブレース材の諸元を表-1に示す。ここで、 A :断面積, λ :弱軸に関する細長比, P_y :降伏軸力, δ_y :軸方向降伏変位を意味する。また、ブレース材の製作に用いた同じ鋼材からJIS 1号試験片を3本製作し、引張試験を行ったのでその平均値を表-2に示す。ここで、 E :ヤング率, σ_y :降伏応力, ε_y :降伏ひずみ, E_{st} :初期ひずみ硬化係数, ε_{st} :ひずみ硬化開始点ひずみ, σ_u :引張強度, ν :ポアソン比を意味する。なお、ブレース材端部は座屈拘束材より露出する

ため図-6のような十字形断面とし、この部分で同様の形状をした実験装置の治具とボルト接合を行った。

(2) 拘束材

拘束材は、ウェブ高さ(h_w)を3種類、フランジ厚(t_f)を2種類変化させて曲げ剛性を変化させた。さらにブレース材と拘束材の面外方向および面内方向の隙間量を変化させ、計5種類の座屈拘束ブレース供試体を製作した。供試体の諸量を表-3に示す。図-5、表-3において、 b_f :フランジ幅, t_w :ウェブ厚, a :ボルト孔中心からフランジ端部までの縁端距離, d :ブレース材と拘束材の面外方向隙間量, d_o :ブレース材と拘束材の面内方向隙間量, D_B :ボルト径, c :供試体長さ方向のボルト間隔, B_y :ボルトの保証荷重(降伏

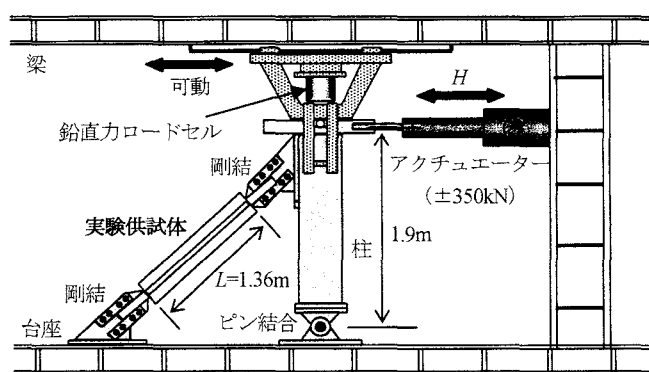


図-7 実験装置の概略図

荷重)を意味する。また、供試体名に関しては、Fのあとの数字は拘束材のフランジ厚、Wのあとの数字は拘束材のウェブ高さ、dのあとの数字は順にブレース材と拘束材の面外方向、面内方向の隙間量を意味する。なお、板厚 t_f が10mmの平形タイプの拘束材は鋼種がSS400の平鋼から製作し、その他の拘束材は鋼種がSS400のH形鋼からウェブの部分进行切断・研削し製作した。

(3) アンボンド材

アンボンド材には、早川ゴム株式会社製のサンタックシーラーを使用した。同材料は、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にブレース材に貼り付けることが可能である。

3.2 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 $h=1900\text{mm}$)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 $\pm 350\text{kN}$ 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 $L=1355\text{mm} \approx h/\sqrt{2}$ 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

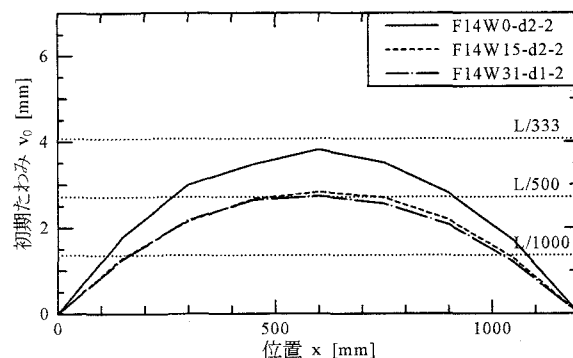


図-8 拘束材の初期たわみ

由に動くことができる。

3.3 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位 δ によって制御し、引張圧縮交番の漸増繰り返し載荷を行った。載荷パターンは、 $0.5\delta_y$ から開始し、次に $1\delta_y \sim 6\delta_y$ までは $1\delta_y$ 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、実験装置の容量の制限上、 $21\delta_y$ までの載荷で実験を終了した。

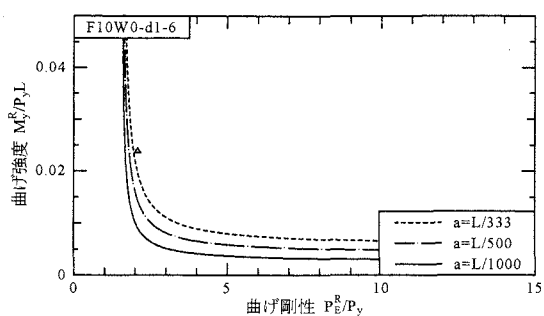
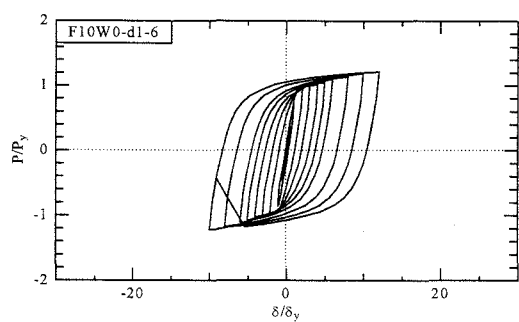
4. 実験結果及び考察

4.1 拘束材の初期たわみ

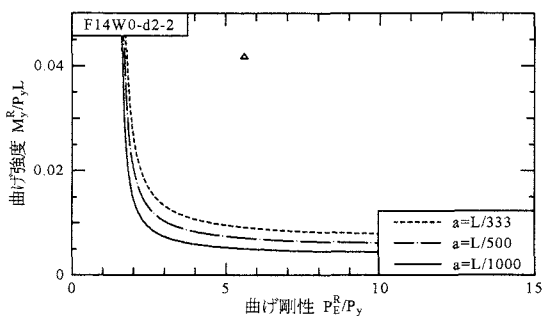
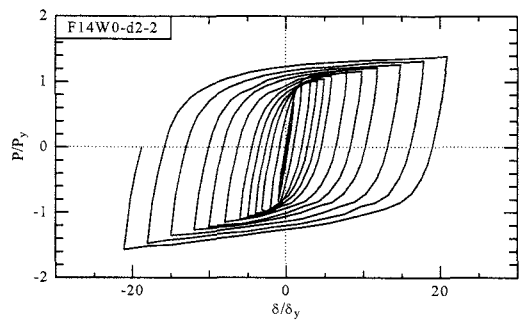
F14W0-d2-2, F14W15-d2-2, F14W31-d1-2の3種類の供試体に関しては、実験開始前に拘束材の初期たわみを計測したので、その結果を図-8に示す。この図から、各供試体の最大初期たわみは、拘束材がT形タイプであるF14W15-d2-2, F14W31-d1-2に関しては $L/500$ 程度、平形タイプ($h_w=0$)であるF14W0-d2-2に関しては $L/333$ 程度ということが分かる。拘束材の最大初期たわみは、BRBの全体座屈防止条件式(1)に影響を及ぼすので、その値の把握はBRBの設計上必要不可欠である。したがって、今回得られた $L/500$, $L/333$ という値は、BRBの全体座屈防止条件において、有効な指標になると考えられる。

4.2 軸方向荷重－軸方向変位関係

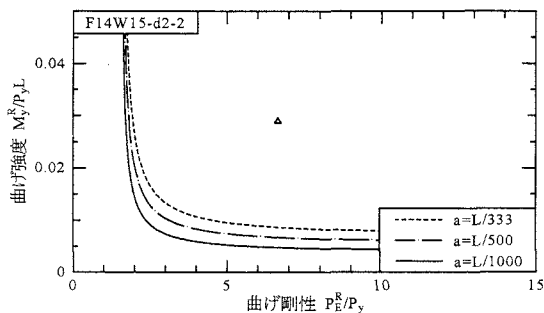
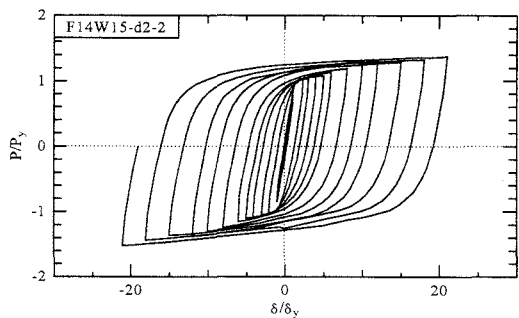
図-9に、本実験より得られた各供試体の軸方向荷重－軸方向変位関係、および全体座屈防止条件式(1)に対して $P_{\max} = 1.5P_y$ とした場合の各供試体の位置を示した図を示す。荷重－変位関係の図において、縦軸、横軸はそれぞれ軸方向荷重 P 、軸方向変位 δ をとり、そ



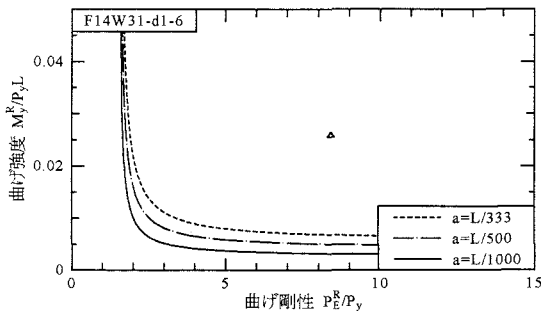
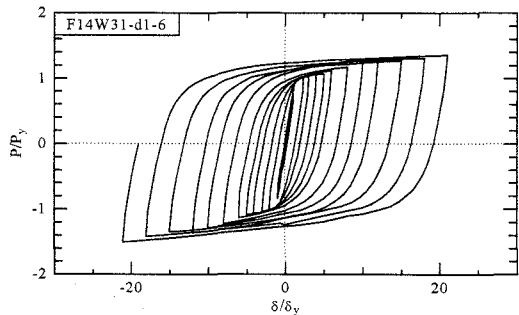
(a) F10W0-d1-6



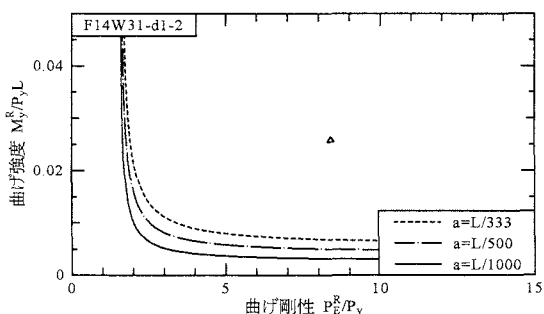
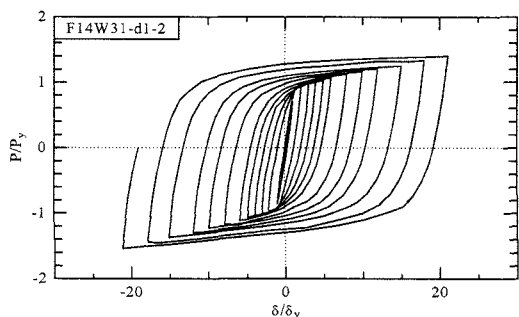
(b) F14W0-d2-2



(c) F14W15-d2-2



(d) F14W31-d1-6



(e) F14W31-d1-2

図-9 各供試体の荷重-変位関係及び曲げ強度-曲げ剛性関係

れぞれブレース材の降伏荷重 P_y ，降伏変位 δ_y で除し無次元化している．また，図では引張側を正として示している．平形タイプ ($h_w = 0$) である (a) F10W0-d1-6 では $\delta = 12\delta_y$ のサイクルで耐力が急激に低下し，それ以上载荷が出来なくなった．この耐力低下の要因は，写真-1 に示すように，拘束材がブレース材と一緒に全体座屈を起こしたためである．一方，その他の供試体に関しては，拘束材がブレース材と一緒に全体座屈を起こすことはなく，従来の実験で見られたような^{3),4)}，圧縮側も引張り側と同じ形状の紡錘形の履歴曲線が得られている．図-9 から分かるように，いずれの供試体も全体座屈防止条件において安全側に位置していたが，(a) F10W0-d1-6 のみ境界線付近に位置している．実際には，自重による初期たわみへの影響，ブレース材と拘束材の面外方向隙間量の偏り，ブレース材-拘束材間の摩擦などといった様々な要因より，全体座屈補剛条件の境界線は安全側の方へ移行する可能性がある．そのため，境界線付近に位置していた F10W0-d1-6 のみ全体座屈に至ったと考えられる．したがって，BRB の全体座屈防止条件式(1)においては，十分な余裕を見越す必要があると考えられる．これについては，現在，ブレース材と拘束材の一体解析を実施中であり，その結果を基に，式(1)にどの程度の余裕を持たせるべきかを決定していく予定である．

4.3 隙間量による影響

写真-2 は，実験終了後における各供試体のブレース材の変形状態を示したものである．各供試体上の写真はブレース材の幅方向，下の写真は厚さ方向の変形状態を示している．(c) F14W31-d1-6 と (d) F14W31-d1-2 には，これまでの実験^{3),4)}で見られた高次のモードの面外(厚さ方向)変形は見られない．その代わり，面内方向(幅方向)に“蛇行”変形をし，特に前者は顕著である．これらの供試体では，面外方向の隙間量が 1mm と小さく，ブレース材が面外に変形出来なかったために，面内方向に蛇行変形したものである．(c) F14W31-d1-6 は，(d) F14W31-d1-2 より面内方向隙間量が大きかった(前者は 6mm，後者は 2mm)ため，面内変形が顕著に現れている．これまでの実験^{3),4)}でも，面外方向の隙間量は 1mm で設計してあったが，従来はブレース材との接触面にモルタルを用いていたため，隙間量の管理が今回ほど厳密に出来ていなかった(収縮等により大きくなっていった)，あるいはモルタルの部分的な損傷のためにブレース材が面外に変形出来た，等の理由で高次の面外変形モードが現れたものと思わ

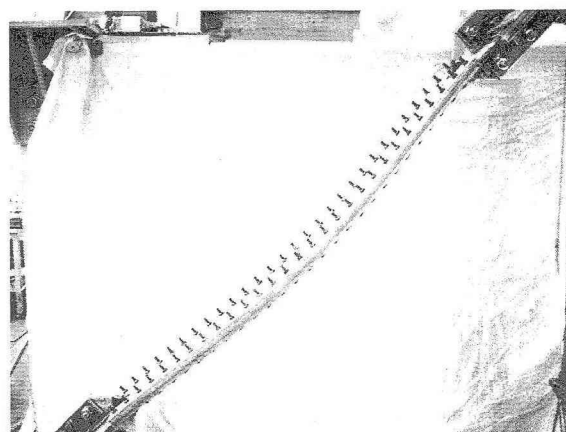


写真-1 F10W0-d1-6 の全体座屈状況

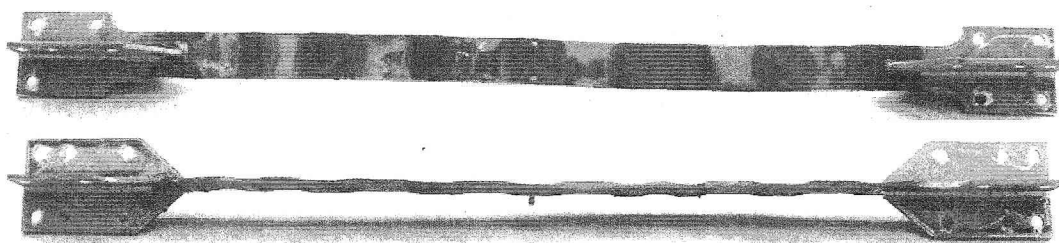
れる．

一方，面外方向の隙間量を 2 倍の 2mm とした (a) F14W0-d2-2，および (b) F14W15-d2-2 は，これまでの実験と同様，顕著な高次面外変形モードが現れている．但し，面内方向にも微小であるが蛇行変形が見られる．

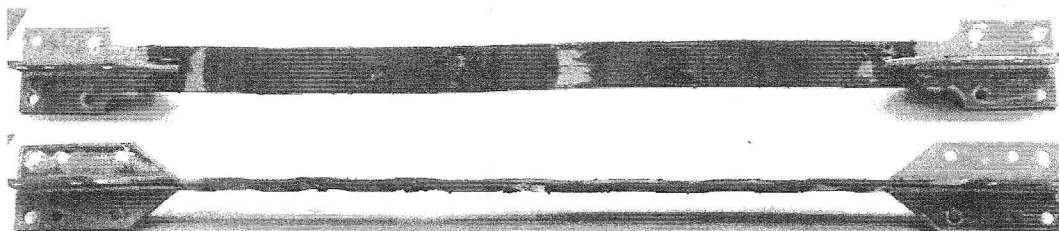
条件式(1)は，ブレース材と拘束材の面外全体座屈の防止の条件である．従って，この条件式を設計で使用することを前提にするならば，ブレース材は，面内変形を極力小さくし，面外変形のみ起こるように拘束材を設計するのが理想的であろう．その意味で，(a) F14W0-d2-2，(b) F14W15-d2-2 の 2 体のような変形を起こさせる方が理想的である．従って，ブレース材と拘束材の隙間量を設定する際には，面内方向に関してはできるだけ小さくし，面外方向に関してはある程度の隙間量を確保する必要があると考えられる．最適な隙間量に関しては，現在数値解析によって検討している³⁾．

5. 結言

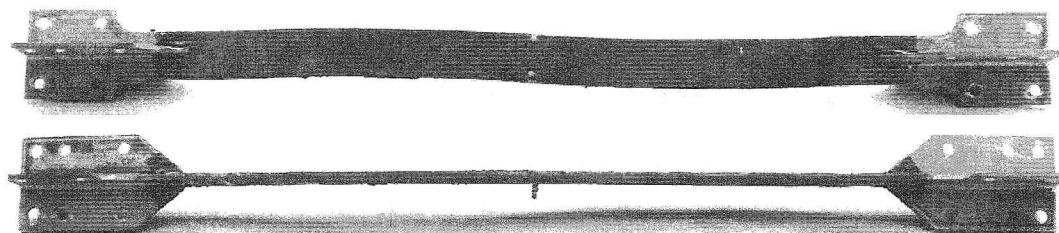
履歴型ダンパーの一種である座屈拘束ブレース (BRB) の拘束材に関して，著者らが従来用いていたものに比べ重量を低減した新しい形式を考案し，その挙動について実験的に検討した．検討項目は，1) BRB の全体座屈防止条件式(1)の妥当性，2) ブレース材と拘束材の間の隙間量の大きさによる BRB の挙動の変化，である．そのため，拘束材のフランジ厚とウェブ高さを変化させて拘束材の曲げ剛性を変化させた供試体，および隙間量を変化させた供試体総計 5 体を製作し，繰り返し引張り・圧縮実験を実施した(図-7)．得られた結果を以下にまとめる．



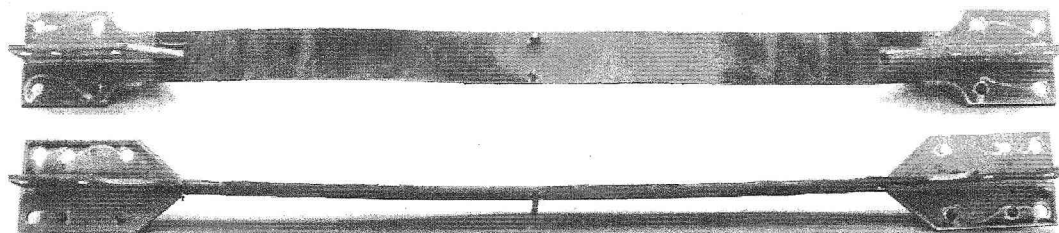
(a) F14W0-d2-2



(b) F14W15-d2-2



(c) F14W31-d1-6



(d) F14W31-d1-2

写真-2 実験終了後のブレース材の変形状況 (F10W0-d1-6 は除く)

- ① 新しい拘束形式として、T 形鋼材(ウェブのない平形タイプを含む)を用いボルト接合する形式を採用した(図-5)。これにより、従来の拘束材(図-4)に比べ重量を 4 割程度低減することができた。
- ② 拘束材の最大初期たわみは、T 形タイプは $L/500$ 程度、平形タイプは $L/333$ 程度であった。
- ③ 全体座屈防止条件式(1)に対して余裕を持って設計した F10W0-d1-6 以外の 4 体の供試体には BRB には全体座屈は起こらなかった。
- ④ しかし、全体座屈防止条件式に対してぎりぎり設計した供試体 (F10W0-d1-6) は、目標塑性率 (20.0) の半分程度の変形時に全体座屈崩壊を起こした(写真-1)。
- ⑤ 従って、実際の設計時には、式(1)に対して十分の余裕を持って拘束材の設計を行う必要がある。特に、大型の BRB では自重による初期たわみが大きくなる可能性があるため、注意が必要である。
- ⑥ ブレース材と拘束材の隙間量の違いにより、ブレース材の挙動は大きく影響を受ける。即ち、ブレース材は、拘束材間で変形が拘束されるので、たとえブレース材の強軸直角方向でも隙間量が多い方向に変形が生ずる。
- ⑦ 式(1)を BRB の全体座屈防止条件式として設計を行うことを前提にすると、ブレース材と拘束材の隙間量を設定する際は、面内方向に関してはできるだけ小さくし、面外方向に関してはある程度の

隙間量を確保する必要がある。

なお、本研究では実験的な面から BRB の設計法および挙動について検討したが、解析的な面からの検討は現在検討中である。全体座屈防止条件式における安全係数および最適な隙間量などに関しては解析的研究が終了した時点で提案したい。

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) 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：土木鋼構造物の動的耐震性能照査法と耐震性向上策，平成 15 年 10 月
- 3) 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，構造工学論文集に登載予定.
- 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，地震工学論文集，土木学会，2003.12.
- 5) 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.
- 6) 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.