

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

加藤 基規¹, 宇佐美 勉², 葛西 昭³

¹学生会員 名古屋大学大学院博士課程前期課程 工学研究科土木工学専攻 (〒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 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)

1. 緒言

1995 年の兵庫県南部地震以来, 土木構造物の耐震に関する検討が盛んに行われ, 有益な提示も数多く見受けられる. 特に地震エネルギーを吸収する部材を構造物に取り入れる方法は, 定量的な地震エネルギー吸収が期待でき, 耐震設計の際に非常に有効である. しかし, エネルギー吸収部材を構造物の主部材に直列的に設置すると, そこに損傷が生ずる結果, 構造物全体の残留変形が大きくなることが過去の研究から分かっている. また, 主部材に対して並列に犠牲的な部材を設け, その部材でエネルギー吸収する方法をとることで, 主部材ひいては構造物全体の残留変形を減少できると考えられる. これにより, 地震後の補修が容易となるのは明白である. エネルギー吸収部材として用いられるブレースは, 建築分野では早くから着目しており^{1)~3)}, 土木分野では, 松本・岡野ら^{4), 5)}が, 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の検討を行うなど, にわかに土木構造物に対してもエネルギー吸収部材を設ける考え方が浸透してきている.

建築分野におけるブレースの用いられ方は, 図-1 のようなラーメン構造に対する斜材が一般的であり, 高層ビル等に幅広く使用されている. ブレースはその軸方向に圧縮力を受ける構造であるため, 圧縮時に座屈現象によって耐力低下を生じる. この点を解決するために, 図-2 のようにブレース材をモルタルなどの座屈拘束材で覆う座屈拘束ブレースが提案されている. ここで, (b) は座屈拘束ブレースの構成を概念的に示しており, (c) は断面形状の一例を示している. ブレースの座屈を拘束することは, 単に横方向のたわみを強制的に抑制するだけでなく, 圧縮側に引張側と同様の荷重変形特性を付与し, ブレースのエネルギー吸収能力を向上させ, 履歴特性を単純化させることが可能となる.

座屈拘束ブレースに関する研究は数多く, 吉野・狩野ら¹⁾による研究が国内初である. 現在では,

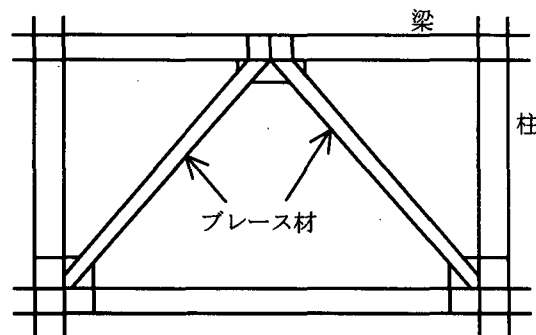


図-1 ブレース材

岩田らによって履歴型ダンパーとしての性能評価が行われ^{2), 3)}, 耐震要素としての具体的な検討を行うに至っている.

本研究で取り扱う座屈拘束ブレースは, 上記に代表されるように, 建築構造物に対して数多くの研究があり, その性能が立証されている. しかし, 土木分野ではいまだその性能を詳細に検証した研究は少なく, 今後, 土木構造物への適用を考える上でこれらの研究は必要不可欠である. そこで筆者らは座屈拘束ブレースの繰返し弾塑性挙動を模擬できる解析モデルを作成し, 座屈拘束ブレースの高いエネルギー吸収能力やその挙動を検証するに至った⁶⁾. そこで, 本研究では座屈拘束ブレースの繰返し載荷実験を通じて, 実験的な側面から弾塑性挙動を解明し, また文献 6) に記載の解析を行うことにより, 解析モデルの妥当性の検証を行う.

2. 実験概要

(1) 実験計画

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. 本実験ではそれらの断面構成を参考にし, また施工性や既存の構造物への適用性を考慮し, 図-3 に示すような断面構成を有する座屈拘束ブレースを使用した. ブレース材には建築分野で頻繁に使用されている平鋼ブレースを, また拘束材に

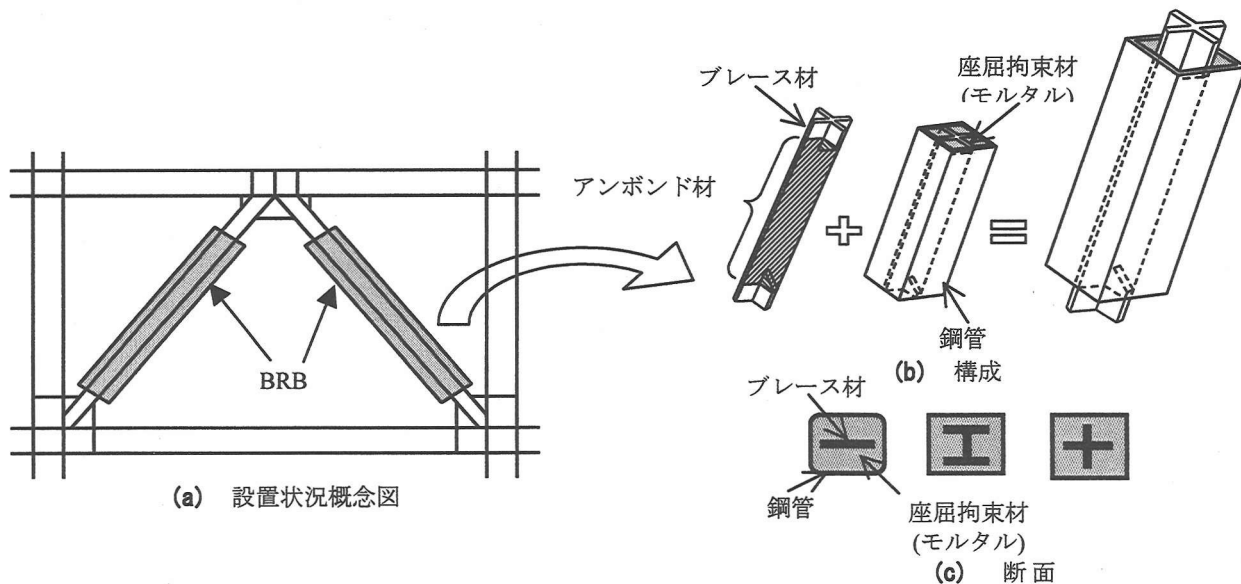


図-2 座屈拘束ブレース (BRB)

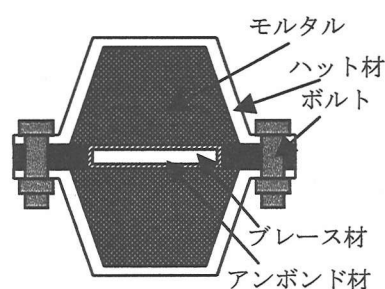


図-3 本実験の座屈拘束ブレースの断面構成図

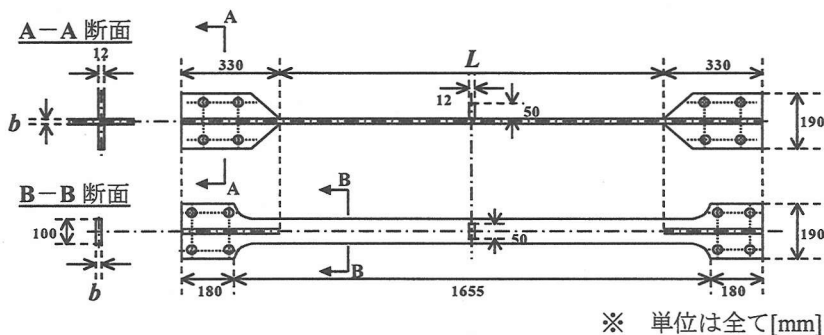


図-4 ブレース材全体図

表-1 ブレース材の諸元

供試体名	部材長 $L(\text{mm})$	板幅 $b(\text{mm})$	板厚 $t(\text{mm})$	断面積 $A(\text{mm}^2)$	細長比 λ	幅厚比 b/t
BR59-12	1355	100	8.49	851	553	11.8
BR47-10	1355	100	9.78	980	480	10.2
BR39-8	1355	100	11.8	1180	399	8.54

($\lambda = L/r$, r : 断面 2 次半径)

はハット型のプレート（以下、ハット材と称す）にモルタルを充填したものをそれぞれ使用した。図-3 のようにアンボンド処理した平鋼ブレースを拘束材で挟み込み、それらをボルト接合で固定する。

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 3 種類の板厚を持つ平鋼ブレースを用意し、それぞれに対し圧縮引張の繰り返し载荷試験を行いその性能を検証した。

(2) 実験供試体

a) ブレース材

本実験で使用した平鋼ブレースの全体図を図-4 に示す。また、各供試体のブレース材の諸元及び引

張試験より得られた材料定数をそれぞれ表-1、表-2 に示す。表-2 において、 E : ヤング率, 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。

なお、図-4 のようにブレース材中央部には板厚 12mm の正方形のプレートを設けているが、このプレートは拘束材のずれ落ちを防ぐもので、これにより拘束材との一体化を保持させた。また、ブレース材端部は十字型断面とし、同様の形状をした実験装置の治具とボルト接合を行う。なお、表-1 におけるブレース材の部材長 L は端部の十字型断面部を含まない平形断面部を示す。

表-2 ブレース材の材料定数

供試体名	E [GPa]	σ_y [MPa]	ε_y [%]	E_{st} [GPa]	ε_{st} [%]	σ_u [MPa]	ε_u [%]	ν
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

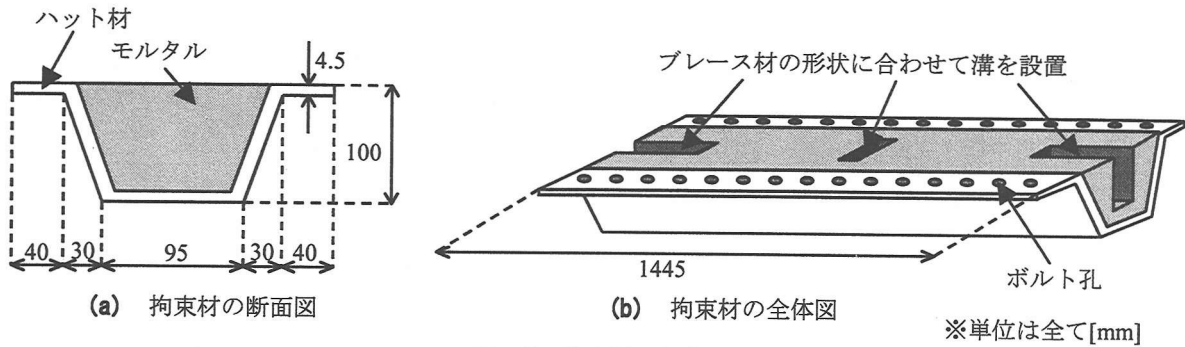


図-5 拘束材の概念図

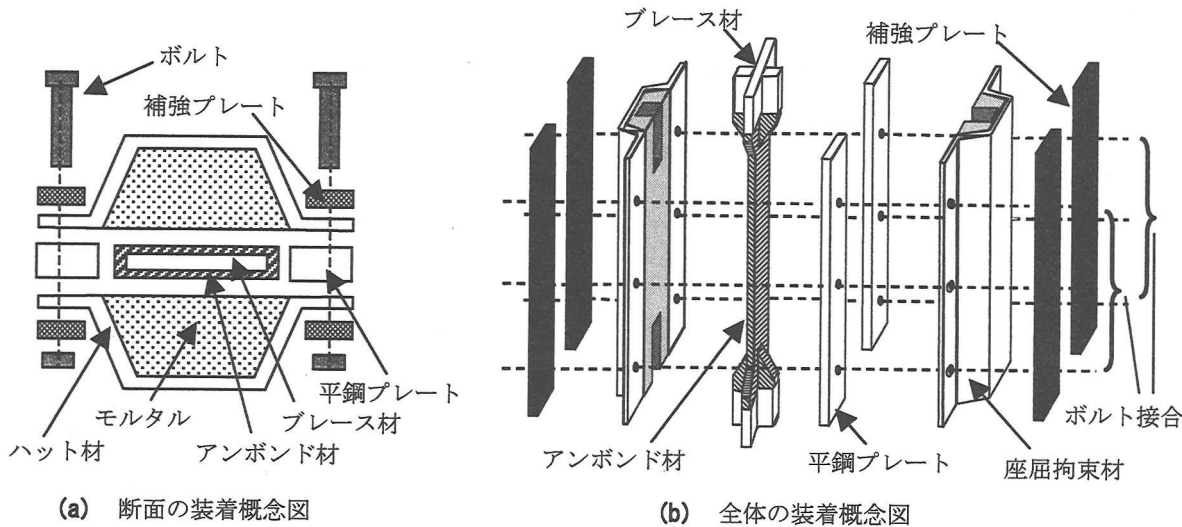


図-6 座屈拘束材の装着概念図

b) 座屈拘束材

座屈拘束材の概念図、及び座屈拘束材の装着状況をそれぞれ図-5、図-6に示す。図-5のようにハット材にモルタルを充填したものを2つ1組とし、これらでブレース材を挟み込むことで座屈拘束材とする。拘束材の接合方法には施工上の利便性を考慮しボルト接合とし、同様のボルト孔を設けた平鋼プレートを両座屈拘束材間に設けることにより、ブレース材を挟む為に生じる隙間を補っている。また、ボルト孔周辺には座屈拘束効果による応力が集中すると考えられるため、図-6のような補強プレートで更に挟み込むような構造とした。

拘束材に使用したモルタルは、水と砂の容量がおおよそ1:2で配合されている1:2モルタル(C450

モルタル)を、ボルトには10.9等級M10ボルトをそれぞれ使用した。

c) アンボンド材

座屈拘束ブレースはそのブレース材に伝わる軸力を座屈拘束材に伝えないために、その間に隙間やアンボンド材と呼ばれる緩衝材を設ける必要がある。本実験では構造上均一な隙間を設けることは非常に困難であるため、アンボンド材を設ける方法を採用した。

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程度の厚さでブレース材に貼り付けることが可能である。

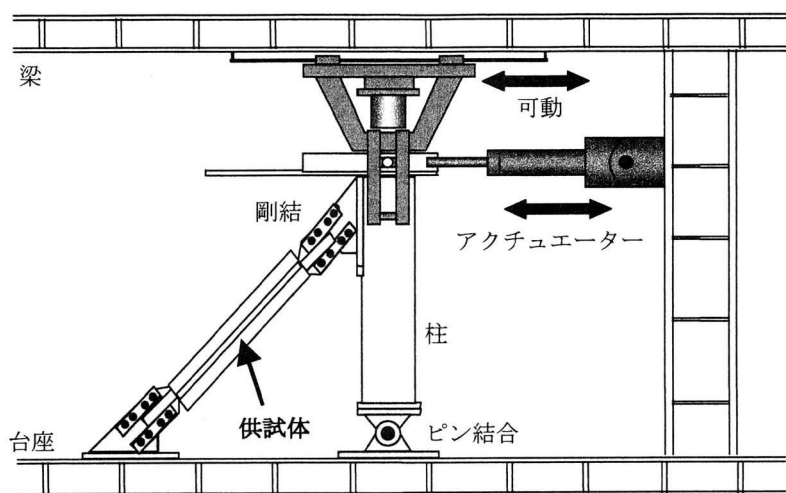


図-7 実験装置概略図

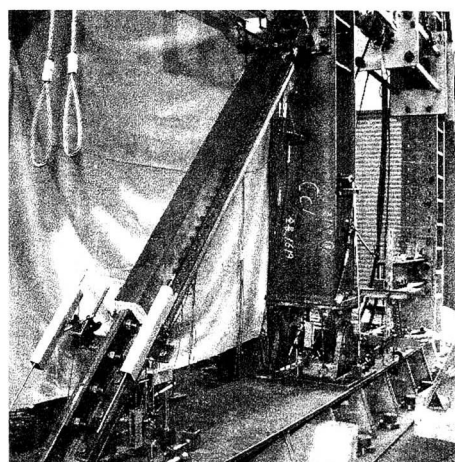


写真-1 実験風景

(3) 実験装置

本実験の実験装置の概略図, および実際の状況をそれぞれ図-7, 写真-1 に示す。

実験供試体をピン支持柱と台座間に 45° の角度で設置し, アクチュエーターが水平方向に変位することでピン支持柱が回転し, 実験供試体に軸方向の変位を与える。供試体は弱軸方向が面内になるよう設置し, 下端部は台座と, 上端部はピン支持柱とボルト接合により剛結した。また, アクチュエーター加力が全て供試体に伝達されるよう偏心のないよう設置した。

(4) 載荷パターン

本実験ではアクチュエーターを供試体の軸方向変位 δ によって制御をした。載荷は引張圧縮交番の漸増繰り返しで行い, その載荷パターンを図-8 に示す。

各供試体とも $0.5 \delta_y$ から開始し, 次に $1 \delta_y \sim 6 \delta_y$ までは 1 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。載荷は実験装置の性能上, BR59-12 試験体は $-24 \delta_y$ まで, BR47-10, BR39-8 試験体についてはそれぞれ $-21 \delta_y$, $-15 \delta_y$ まで載荷を行った。なお, 最終ループは圧縮側目標変位まで載荷した後に荷重が 0 となるまで除荷することで終了とした。

3. 実験結果

(1) 荷重-変位関係

図-9 に本実験より得られた各供試体の荷重-変位関係を示す。図は引張側を正とし, 縦軸, 横軸それぞれ降伏荷重, 降伏時の軸方向変位で除し無次

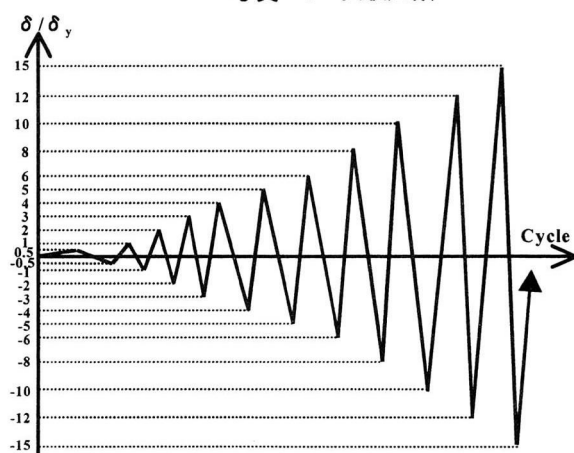


図-8 載荷パターン

元化したものをとる。

図のように全ての供試体において引張側, 圧縮側ともに非常に安定した荷重-変位曲線を描いている。圧縮側において座屈現象による荷重低下は見られず, 引張側とほぼ同様の履歴曲線が得られている。これにより, 今回考案した座屈拘束法により圧縮側に引張側と同様の荷重-変位特性を与えられたことが確認できた。なお, 圧縮側の荷重が多少ながら引張側に比べ大きく出ているのは, 圧縮時のブレース材と座屈拘束材の接触による摩擦などの要因が考えられる。

(2) 変形状態

実験終了後, 供試体から座屈拘束材を取り外したものを写真-2 に示す。

写真からわかるように, ブレースにほぼ均一に波形が並ぶような, 非常に高次のモード形状を呈している。特に細長比が大きく, 高サイクルまで載荷した BR59-12 試験体では変形が顕著に表れている。これにより, ブレース材は圧縮時に座屈拘束材内部

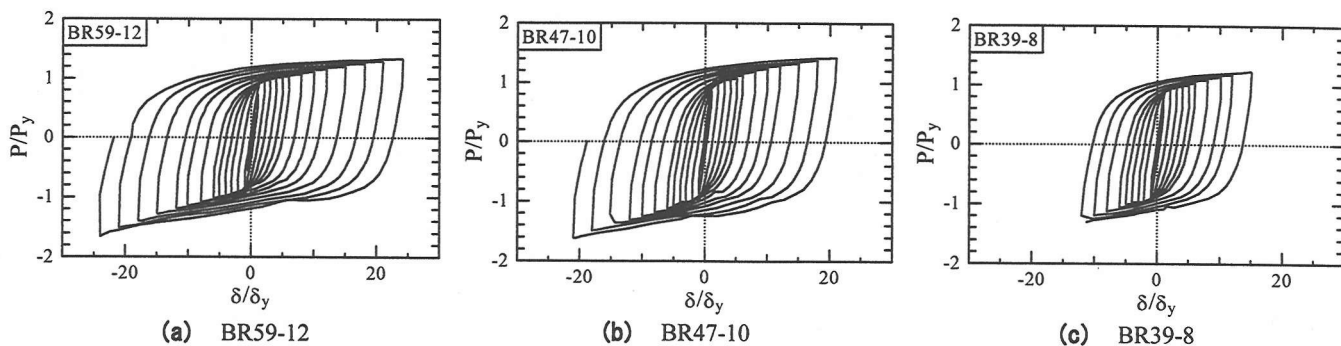


図-9 荷重-変位関係

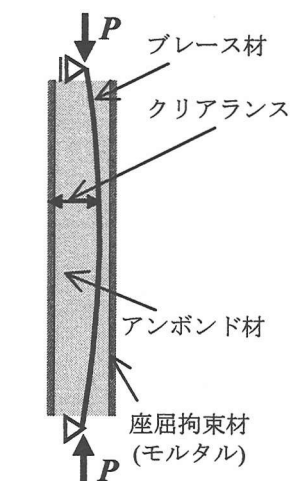


図-10 単純ばりモデル

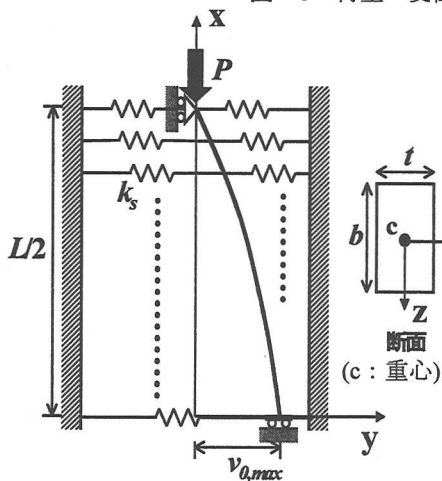


図-11 解析モデルの概要

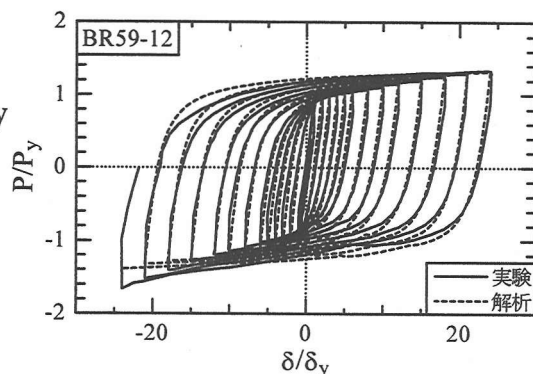


図-12 荷重-変位関係の比較図

で、座屈拘束材との接触によりたわみを拘束され、次々と高次のモードへ変形していくことがわかる。また、このような高次モードの変形状態から、ブレース材全体にわたってエネルギー吸収していることが示され、その高いエネルギー吸収能がうかがえる。

4. 解析結果との比較

(1) 解析モデル

座屈拘束ブレースはブレース材がアンボンド材間で変形し、座屈拘束材と接触することにより座屈現象を拘束している。つまり座屈拘束ブレースにおけるブレース材の挙動は、ブレース材-座屈拘束材の接触問題と捉えることができる。そこで、本研究では座屈拘束材表面を剛な壁面と想定し、図-10のような2次元の単純ばりモデルを考案した。この単純ばりモデルを基に作成した解析モデルの概要を図-11に示す。解析モデルは対称性より1/2モデルとし、ブレース材には平面はり要素を、剛壁面には剛体要素を適用している。また、アンボンド材はブレース材がたわむ際の抵抗となることを考慮し、その抵抗特性を有限個のばね要素で模擬した。

その他解析についての詳細な事項については文献6)を参照されたい。

以上のような解析モデルを用い、実験結果との比較のため、BR59-12試験体と同様の諸元で繰り返し載荷解析を行った。なお、解析には構造解析用汎用プログラムABAQUSを使用した。

(2) 荷重-変位関係の比較

荷重-変位関係の比較図を図-12に示す。図では実線、破線それぞれ実験結果、解析結果を示している。

図が示すように、解析より得られた荷重-変位関係は引張側、圧縮側がほぼ一致しているような安定した紡錘形の履歴曲線を描いている。実験結果と比較しても荷重値、ループ形状共に非常に類似しており、本解析モデルが座屈拘束ブレースの荷重-変位特性を精度よく表せることが示された。また、これにより本解析モデルの妥当性が検証された。

(3) 変形状態の比較

解析より得られたブレース材の変形状態を図-13に示す。

図より解析においても高次のモード形状の変形



写真-2 ブレースの変形状態 (BR59-12)

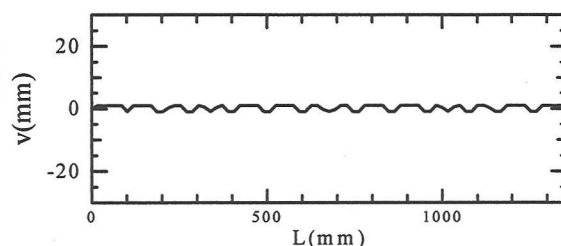


図-13 解析より得られた
ブレース材の変形状態

が見られる。写真-2に示されている実験後の変形状態と比較すると、波形形状、モード数など違いはあるものの、たわみが拘束されることにより次々と高次モードへ変形していく様子は表現されている。このように、本解析モデルでも実験と同様、ブレース材全体にわたる変形を表現できるに至った。

5. 結論

本研究の主目的は、座屈拘束ブレースの繰り返し載荷実験によりその性能を実験的に検証すること、ならびに文献 6)において作成した解析モデルの妥当性を検証することであった。得られた結果は以下のように要約できる。

- ① 座屈拘束ブレースの繰り返し載荷実験により、全ての供試体において引張、圧縮ともに安定した荷重－変位関係が得られ、その高いエネルギー吸収能力が示された。また、これにより本研究で適用した座屈拘束材の高い座屈拘束効果が検証できた。
- ② 実験終了後のブレース材の変形状態から、ブレース材は圧縮時に座屈拘束材によって座屈現象を拘束され、次々とモードを移行していき、最終的に非常に高次のモードへ変形していく様子が推察できた。
- ③ 実験結果と解析結果との比較から、本解析モデルはブレース材が高次のモードへ変形していく様子が模擬でき、更に実験とほぼ同様の荷重－変位特性を表現できることが確認できた。また、これにより本解析モデルの妥当性が検証できた。

なお、本研究では平鋼ブレースをブレース材とした座屈拘束ブレースの実験的・解析的な検討にとどまったが、実際の土木構造物に適用するには、まだ様々な課題を残している。例えば二重鋼管など局部座屈を考慮する必要がある部材の性能評価や、構造システム全体に対する耐震性能評価が挙げられる。これらが完備されることにより、性能照査型設計法への導入が可能となるであろう。

参考文献

- 1) 吉野次彦, 狩野芳一, 桑原達夫, 宗村美貞: ブレース入耐力壁の実験的研究(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp.403-404, 1971.
- 2) 岩田衛, 村井正敏, 加藤貴志, 小川秀雄, 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, 小川秀雄, 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) 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, 1999.
- 5) 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, 2000.
- 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.