

座屈拘束ブレースの繰返し弾塑性解析

加藤 基規*, 宇佐美 勉**, 葛西 昭***

*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)
 **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) 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)

本研究は、建築分野で注目されている座屈拘束ブレースを土木構造物の制震部材として適用することを念頭におき、解析的な検討を行ったものである。ブレースが軸方向に引張圧縮の繰返し载荷を受ける際において、座屈拘束材-ブレース間の挙動を表現することのできる解析モデルを構築し、単調载荷解析および繰返し载荷解析によって、種々の検討を行った。その結果、圧縮载荷時に座屈拘束材との接触により、ブレースのたわみ形状が高次モードへと移行する事象を再現でき、引張载荷、圧縮载荷ともに安定した軸方向の荷重-変位関係が得られた。また、既往の実験結果との比較を行い、本解析モデルの妥当性も確認した。

Key Words: buckling-restrained brace, unbonded material, cyclic loading, damper

1. 緒言

1995年の兵庫県南部地震以来、土木分野では構造物の耐震設計に関して、種々の検討がなされている。その中で本研究で取り上げる、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設置すると、そこに損傷が集中する結果、構造物全体の残留変形が大きくなるのが過去の研究から分かっている。従って、主部材以外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、主部材の残留変形を軽減できると考えられる。エネルギー吸収部材としてのブレース材は、建築分野では早くから着目されていた^{1)~13)}が、最近では、松本・岡野ら^{14),15)}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なうなど、土木構造物に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。

ブレースは図-1のようなラーメン構造に用いられる斜材のことをいい、建築分野では高層ビルなどに幅広く使用されている。しかし、ブレースは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が生じる。このために設計時に適切な断面を選択することが難しくなるだけでなく、設計で意図した剛性と耐力をもつ構造物を作り上げることが困難となり耐震設計に多くの労力を必要とする。

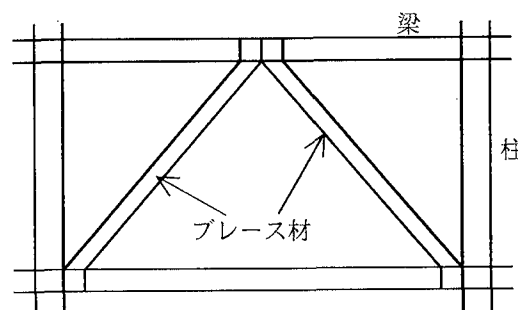


図-1 ブレース材

これらの欠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格段に向上させ、かつ履歴特性を単純化させることが可能となる。このような観点からも前述のとおり建築分野では座屈拘束ブレースに関して数多くの研究が行われている。平鋼ブレースの表面を軟らかいゴムなどで覆い、アンボンド処理して、鉄筋コンクリート壁を座屈補剛する構造形式は吉野・狩野ら¹⁾によって初めて試みられた。同様の合成壁において、大変形振幅の繰返し加力に対して、若林・中村らの実験²⁾は紡錘形の荷重変形挙動の実現に成功した。当初、鉄筋コンクリート壁に内蔵された平鋼ブレースで始められた研究は、藤本・和田ら^{3),4)}および長尾・高橋ら^{5)~8)}

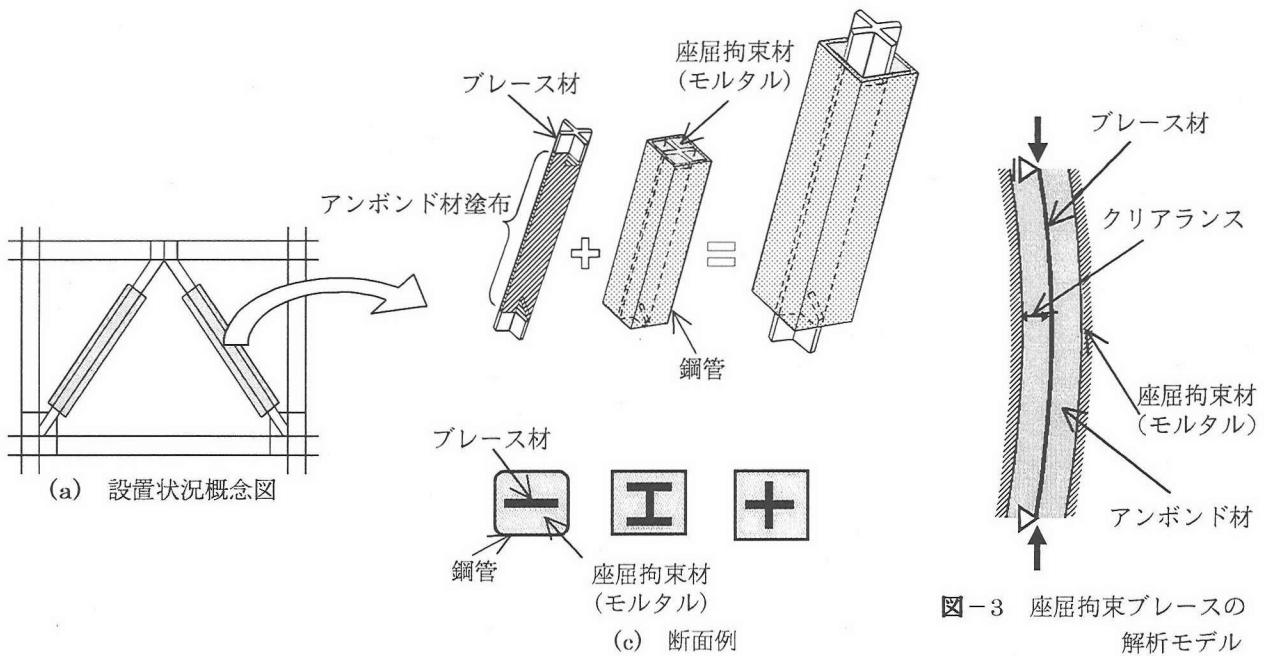


図-2 座屈拘束ブレース

の研究に見られるような線材としての座屈拘束ブレース構造へと発展している。現在では、岩田らによって履歴型ダンパーとしての性能評価がなされる^{9),10)}など、耐震要素として大きな躍進を遂げている。

本研究で取り扱う座屈拘束ブレースは、上記のような数多くの実験的研究で性能が立証されているものの、解析的研究に関しては佐伯・岩松らの弾塑性挙動解析^{11),12)}などいくつかの解析による研究例に限られており、解析によりその詳細まで再現したものはあまり報告されていない。また、土木構造物への適応を検討するには、主部材の耐震性能評価を行なう上で、解析による挙動予測は必要不可欠である。そこで、本研究では座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動を再現できる簡易な解析モデルを構築し、繰り返し弾塑性挙動を数値解析的に解明することを試みた。

2. 解析概要

2.1 解析モデルの概要

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、座屈拘束材に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-座屈拘束材間の接触問題としてとらえられる。また、多くの座屈拘束ブレースはブレース材の周りにアンボンド材を塗布し、カバーとなる鋼管等とブレース材の間に、モルタルなどの座屈拘束材を充填するという

図-3 座屈拘束ブレースの解析モデル

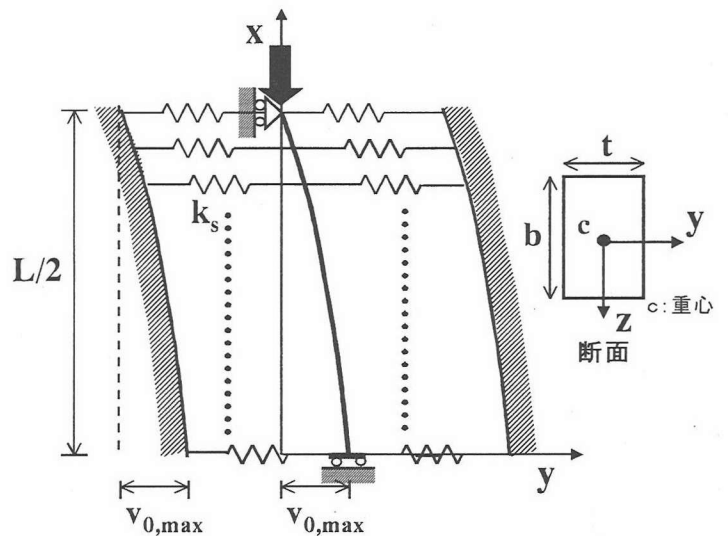


図-4 解析モデルの概要

製作過程から、座屈拘束材とブレース材とのすき間（クリアランス）はブレース材の初期たわみと密接な関係があると考えられる。本研究ではアンボンド材の剛性がモルタルなどの座屈拘束材の剛性に比べ非常に小さいことから、座屈拘束材表面を剛な壁面と想定し、ブレース材の初期たわみ形状に沿うように仮定した。その解析モデルは、図-3に示すような2次元の単純ばりモデルを考案し、対称性から図-4に示す1/2モデルとした。この解析モデルではモルタル表面を剛体で表現し、ブレース材のたわみ方向に対するアンボンド材の抵抗特性を有限個のバネでモデル化している。なお、本解析には構造解析用汎用プログラムABAQUS¹⁶⁾を用いた。ブレース材にはTimoshenkoのはり理論に基づく横せん断変形を許す平面はり要素B21を

表-1 解析モデルの諸元

$L(\text{mm})$	$b(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	$d(\text{mm})$	$P_y(\text{kN})$	$P_{cr}(\text{kN})$
4000	90	69.3	1.0	1560	315

表-2 解析モデルの材料定数

鋼種	σ_y (MPa)	E/E_{st}	$\varepsilon_{st}/\varepsilon_y$	E (GPa)	ξ	ν
SS400	250	40	10	205	0.06	0.3

使用する。断面形状は平鋼ブレースを想定し長方形とした。また、剛壁面には2節点剛体要素 R2D2 を、ばねには一定の方向のみに働く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。

はり要素は等間隔に 40 要素に分割し、剛体要素ははり要素と同様の間隔で分割し節点かはり要素の節点と図の x 軸方向に平行に並ぶように定義した。ばね要素はそれら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。

2.2 解析モデルの諸元

本解析では単調荷重および繰り返し荷重の2種類の解析を行った。本節ではそれら二つの解析に用いた解析モデルの諸元を示す。

本研究では、細長比 $\lambda = 200$ となるモデルを用いて解析を行った。解析モデルの諸元および降伏荷重 P_y 、座屈荷重 P_{cr} を表-1 に示す。ここで L 、 b 、 t はそれぞれ部材長、断面幅、断面厚を示し、アンボンド材の厚さ d に関しては岩田らの研究^{9),10)}を参考にした。また、初期たわみ v_0 は正弦波で与え、初期たわみの最大値 $v_{0,max}$ を $L/4000$ から $L/200$ の間で各々変化させた。

アンボンド材の剛性はブレース材の剛性との比で与えた。その算定についての詳細は文献(17)に示す。本解析ではアンボンド材の剛性がブレース材の剛性に対し 1/10 倍となるよう設定し、バネ定数 k_s を決定した。

2.3 荷重方法および構成則

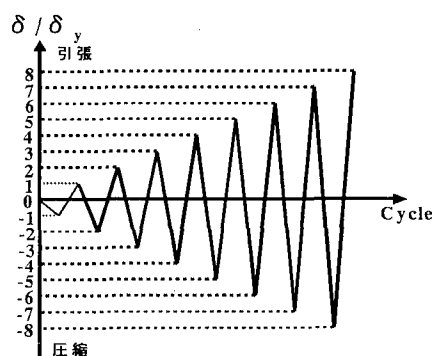


図-5 繰り返し荷重パターン

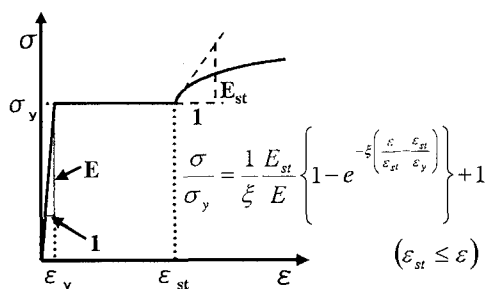


図-6 構成則

本解析では図-4 の解析モデルにおける上端点を荷重点として x 軸方向に強制変位を与える変位制御法により、軸圧縮を行った。荷重方法は単調荷重、繰り返し荷重の2パターンを行い、繰り返し荷重パターンについては図-5 に示すとおりである。

単調荷重の際の構成則には、図-6 に示すような降伏棚およびひずみ硬化域を持ち、降伏後の応力-ひずみ関係が文献(18)と同様のものを用いた。具体的には仮定した鋼材は SS400 で、表-2 にまとめられる。また、繰り返し荷重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¹⁹⁾を用いた。

3 解析結果および考察

3.1 単調荷重解析の結果および考察

3.1.1 荷重-変位関係

単調荷重解析により得られた荷重-変位関係の例として、初期たわみの最大値 $v_{0,max} = L/1000$ の解析結果を図-7 に示す。図では圧縮側を正とし、縦軸、横軸はそれぞれ降伏荷重 P_y 、降伏時の軸方向変位 δ_y で除し無次元化したものとする。同図には単調に引張力を与えた際の解析結果、および壁面がなく座屈拘束しない場合の解析結果も示している。ただし、引張解析の結果は引張側を正としている。

図-7 からわかるように、座屈拘束がない場合は降伏前に座屈現象により、耐力低下が生じている。一方、今回考

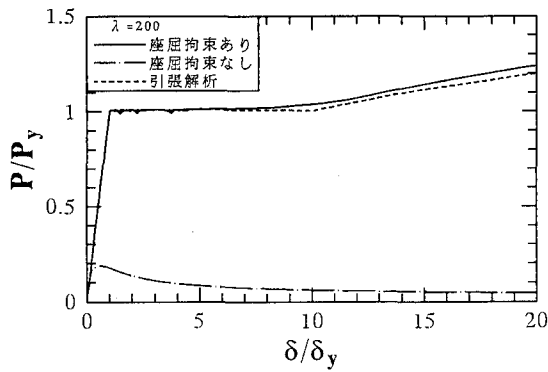


図-7 荷重-変位関係(単調載荷)

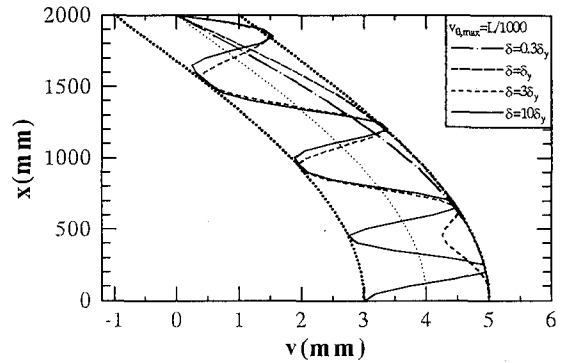


図-8 ブレース材の変形状態(単調載荷)

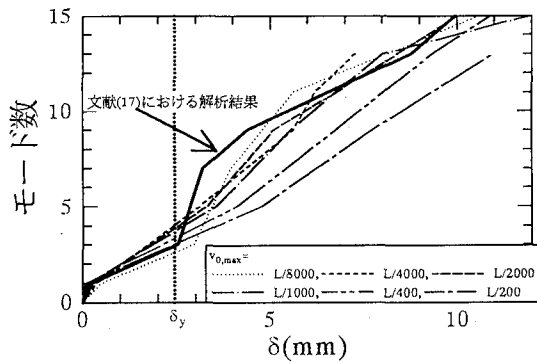


図-9 モード推移の状況

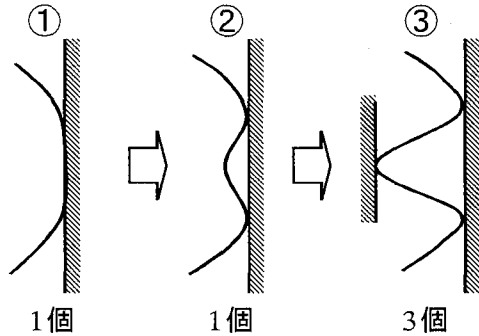


図-10 モード数の定義

案した壁面を用いたモデルでは、 $P/P_y=1$ に達すると降伏し、引張側とほぼ同様な曲線を描いた。以上のような座屈を拘束した結果は他の初期たわみを設定した際にも得られており、今回考案した解析モデルは単調載荷解析において、圧縮時の座屈現象を拘束し、安定した解が得られると言える。

3.1.2 変形状態

単調載荷解析の変形状態の例として、初期たわみの最大値 $v_{0,max}=L/1000$ とした際の変形の様子を図-8 に示す。図には軸方向変位 δ が降伏時の変位 δ_y の 0.3, 1, 3, 10 倍となった際のたわみ方向の変形状態を示す。また、図-9 には $v_{0,max}$ の違いによる変形状況の比較を示す。図-9 には同時に文献(17)で考案した壁面に初期たわみを設けないモデルを用いた際の変形状態も示す。モード数は壁面に接触した面の数で定義した。ここで、面の数は図-10 のように壁面から浮き上がった点が完全に逆側の壁面に接触した時、増加したと考える。

図-8 からわかるようにブレース材は壁面に接触後、しばらくは壁面に沿って変形するが、ある程度載荷が進行すると次々と高次のモードへ推移していく。その動きは塑性後特に顕著で、その差は $\delta = \delta_y$ と $\delta = 3\delta_y$ の変形状況にはっきり表れている。なお、高次モードへの推移の状況を示したのが図-9 である。図-9 より初期たわみが大きい

ものでは、若干モードの進行が遅くなる傾向が見られる。しかし、その差は小さく、全体的にはほぼ同様な変形状態を示している。また、壁面にたわみが無い場合とほぼ同様の結果を示しており、初期たわみがブレース材の変形状態に与える影響は小さいといえる。

3.2 繰り返し載荷解析の結果および考察

3.2.1 荷重-変位関係

$v_{0,max}=L/1000$ の解析結果を図-11 に示す。ここで図-11(b)は壁面がなく横方向のたわみを拘束しなかった場合の結果である。また、図では引張側を正とし、縦軸、横軸ともに単調載荷解析と同様の無次元化をしている。

図-11(b)からわかるように壁面を設けなかったモデルでは、圧縮力を加えた場合、座屈現象を起こしてしまい引張力のみ受け持つ状態となっている。逆に図-11(a)の壁面を設けた場合のモデルでは、座屈現象が拘束され圧縮側も引張側と類似した履歴曲線を描いている。従って、今回考案した解析モデルが圧縮側に引張側と同様の荷重-変位特性を与えることができることを確認した。

3.2.2 変形状態

次に繰り返し載荷解析時のブレース材の挙動について、 $v_{0,max}=L/1000$ における軸方向変位 δ が降伏変位 δ_y の 3,

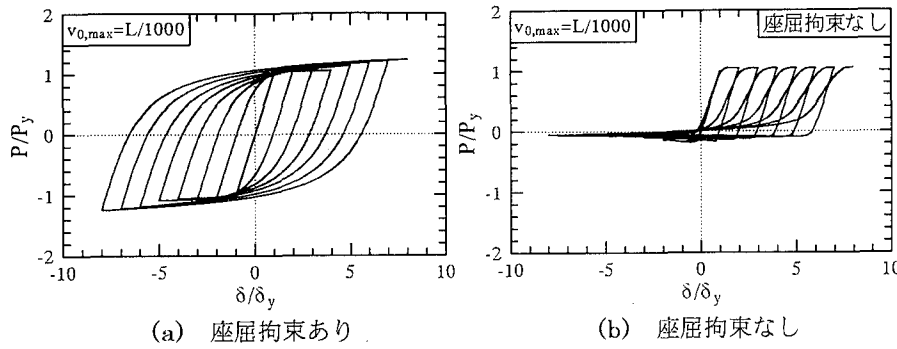


図-11 荷重-変位関係 (繰返し載荷)

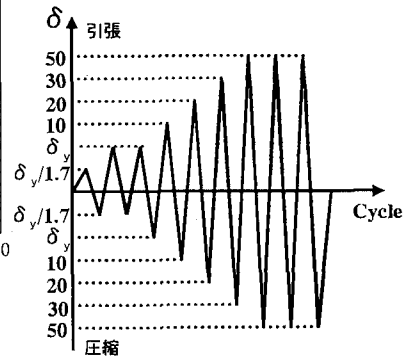


図-13 比較解析の載荷パターン

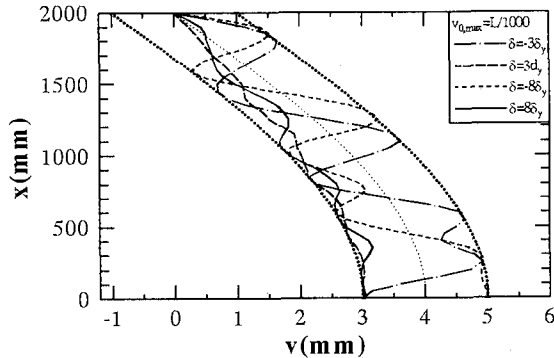


図-12 ブレース材の変形状態 (繰返し載荷)

-3, 8, -8 倍となった際の変形状態を図-12 に示す。図より圧縮時には単調載荷と同様に高次モードの変形状態を示している。また、引張載荷の折り返し点においては左側の壁面に接触し、残留的なたわみが生じている。これは、圧縮時に局所的な塑性変形が生じたことによる。このように、繰返し載荷においてブレース材形状が高次モードへ変形することは、岩田らの実験^{9),10)}でも確認されており、今回考案した解析モデルは繰返し載荷時においても、その挙動を再現できたといえる。

3.2.3 既往の実験結果との比較

現在報告されている実験結果と、今回考案した解析モデルを用いた解析結果との比較を行うために、1995年に行われた佐伯・前田らの実験¹³⁾と同様な諸元の解析モデルを用いた解析を行った。解析モデルの諸元を表-3に、載荷パターンを図-13に示す。ただし、初期たわみの最大値 $v_{0,max}$ は部材長の $1/1000$ となるよう設定した。

解析により得られた荷重-変位関係を図-14に示す。図には同時に佐伯・前田らの実験結果における包絡線を示す。

解析結果は折り返し点の多少のずれはあるものの、実験結果と非常に類似した紡錘形の履歴曲線となった。このずれはブレース材とモルタル間にある微小な摩擦など多くの要因があると考えられる。しかし、全体的にはほぼ実験結果と同様の結果が得られており、この解析モデルが妥当であることが示された。

表-3 解析モデルの諸元 (佐伯・前田らによる実験)

L (mm)	b (mm)	t (mm)	α	c (N/mm ²)	k_s (N/mm)
4340	250	36	1/10	0.00556	0.302

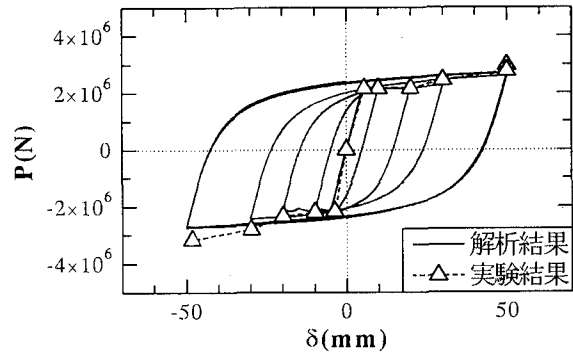


図-14 解析結果と実験結果との比較

4 結言

本研究の主目的は、座屈拘束ブレースの弾塑性挙動を再現できる簡易な解析モデルを構築し、その解析モデルにより繰返し弾塑性挙動を把握することであった。得られた結果は以下のように要約できる。

- (1) 単調載荷解析において、座屈現象が壁面によって拘束され、非常に高次のモードが発生することが確認でき、引張側とほぼ同様の荷重-変位関係が得られた。
- (2) 単調載荷解析におけるブレース材の変形状態の考察から、初期たわみの大きさはブレース材の挙動に大きく影響しないことが確認された。
- (3) 繰返し載荷解析においても、単調載荷解析と同様に、圧縮載荷に対してはブレース材が高次のモードで変形していく様子が再現でき、引張載荷時には残留変位が確認できた。また、引張側と圧縮側がほぼ同様な、安定した荷重-変位履歴が得られた。

(4) 佐伯・前田らによる実験¹³⁾との比較から、今回考案した解析モデルは実験とほぼ同様な荷重-変位特性をもつことが確認された。

なお、本研究では座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動を解析的に再現するにとどまったが、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、ブレースの性能を規定するパラメータの決定や、土木構造物への適用方法、構造システム全体に対する耐震性能評価などである。これらが完備されることによって、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, 1971.11.
- 2) 若林寛, 中村武, 榎原章雄, 森菌哲郎, 横山浩明: 繰返し水平力を受ける絶縁ブレース内蔵 PC 壁板の弾塑性性状に関する実験的研究(その1), (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp.1041-1044, 1973.10.
- 3) 藤本盛久, 和田章, 佐伯英一郎, 渡辺厚, 人見泰義: 鋼管とモルタルにより座屈補剛されたブレースの研究 その1, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp.1339-1340, 1988.3.
- 4) 藤本盛久, 和田章, 佐伯英一郎, 渡辺厚, 人見泰義: 鋼管コンクリートにより座屈を拘束したアンボンドブレースに関する研究, 構造工学論文集, Vol.34B, pp.249-258, 1988.10.
- 5) 長尾直治, 御野孝二, 松本裕二, 高橋茂治: アンボンドブレースの耐震性能に関する実験的研究(その1~4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp.1329-1336, 1988.10.
- 6) 長尾直治, 高橋茂治, 御野孝二, 結城俊二: アンボンドブレースの耐震性能に関する実験的研究(その5~7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp.1501-1506, 1989.10.
- 7) 長尾直治, 高橋茂治: 角鋼管を鉄筋コンクリートで被覆したアンボンドブレースの弾塑性性状(その1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第422号, pp.105-115, 1990.9.
- 8) 長尾直治, 高橋茂治: 角鋼管を鉄筋コンクリートで被覆したアンボンドブレースの弾塑性性状(その2), 日本建築学会構造系論文報告集, 第422号, pp.45-56, 1991.4.
- 9) 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, 2000.9.
- 10) 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, 2000.9.
- 11) 佐伯英一郎, 前田泰史, 岩松浩一, 和田章: 有限要素法によるアンボンドブレースの弾塑性解析と実験結果の比較, 日本建築学会構造系論文集, 第484号, pp.111-120, 1996.6.
- 12) 佐伯英一郎, 前田泰史, 岩松浩一, 和田章: フレームに組み込みこまれたアンボンドブレースの弾塑性挙動解析, 日本建築学会構造系論文集, 第489号, pp.95-104, 1996.11.
- 13) 佐伯英一郎, 前田泰史, 中村秀司, 緑川光正, 和田章: 実大アンボンドブレースに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第476号, pp.149-158, 1995.10.
- 14) 松本信行, 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, 1999.3.
- 15) 松本信行, 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, 2000.3.
- 16) Habbit, Karlsson & Sorensen, Inc.: ABAQUS User's Manual, Version 5.8, Vol. I - III, 1998.
- 17) 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 (投稿中)
- 18) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計 WG (主査: 宇佐美勉): 鋼橋の耐震設計のための新技術, 1996.
- 19) Shen, C, Mizuno, E, Usami, T: A Generalized Two-Surface Model for Structural Steel under Cyclic Loadin, Structural Eng./Earthquake Eng., Proc. of JSCE, Vol.10, No.2, pp.59s-69s, 1993.7.

(2001年12月7日受付)

Cyclic elasto-plastic analysis of buckling-restrained brace members

Motoki KATO, Tsutomu USAMI and Akira KASAI

In this paper, numerical study is carried out to apply buckling-restrained members, which are paid much attention to in the architectural field, as damping members of civil engineering structures. For this purpose, a simple analysis model, which can predict behavior of restrained brace members under cyclic axial loading, is developed and various investigations are carried out using this model. The analytical results show that, owing to connecting with restraining part under compression, the buckling deformation of the member is shifted to that of higher mode. As a result, stable load-displacement relationship covering both tension and compression stages is obtained. Moreover, the validity of the analysis model is confirmed comparing with the past experimental results.