

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

A numerical study on cyclic elasto-plastic behavior of buckling-restrained brace members

加藤 基規*, 宇佐美 勉**, 葛西 昭***

Motoki KATO, Tsutomu USAMI and Akira KASAI

*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)

This study is aimed at developing a simple analysis model which can predict the buckling-restrained brace cyclic behavior. For this purpose, its dynamic characteristic and elasto-plastic behavior by analysis under monotonic loading are investigated. Moreover, the result of cyclic loading analysis is compared with an available experimental result. As a result, core plate behavior that the fundamental mode is moved to higher modes owing to contacting with mortar, is simulated and it is found that buckling does not occur. Cyclic loading analysis shows that the brace has stable load-displacement relation in tension field also in compression field and the results are well agreed with experimental results.

Key Words: buckling-restrained brace, unbonded material, elasto-plastic behavior, damper

キーワード: 座屈拘束ブレース, アンボンド材, 繰り返し弾塑性挙動, ダンパー

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が様々な検討されている。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。また、その結果、地震後の補修が容易となる。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していた^{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。

ブレース材は、図-1のようなラーメン構造に対して斜材として用いられるなど、建築分野では高層ビル等に幅広

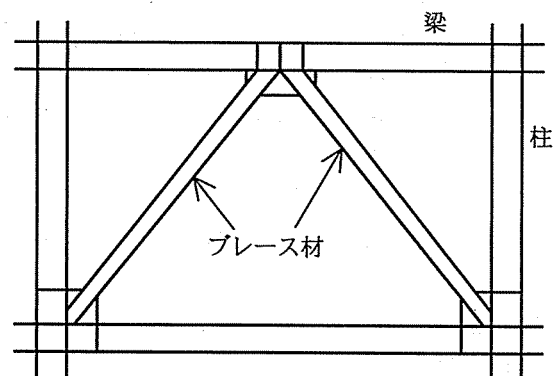


図-1 ブレース材

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を生じる。このため、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。

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

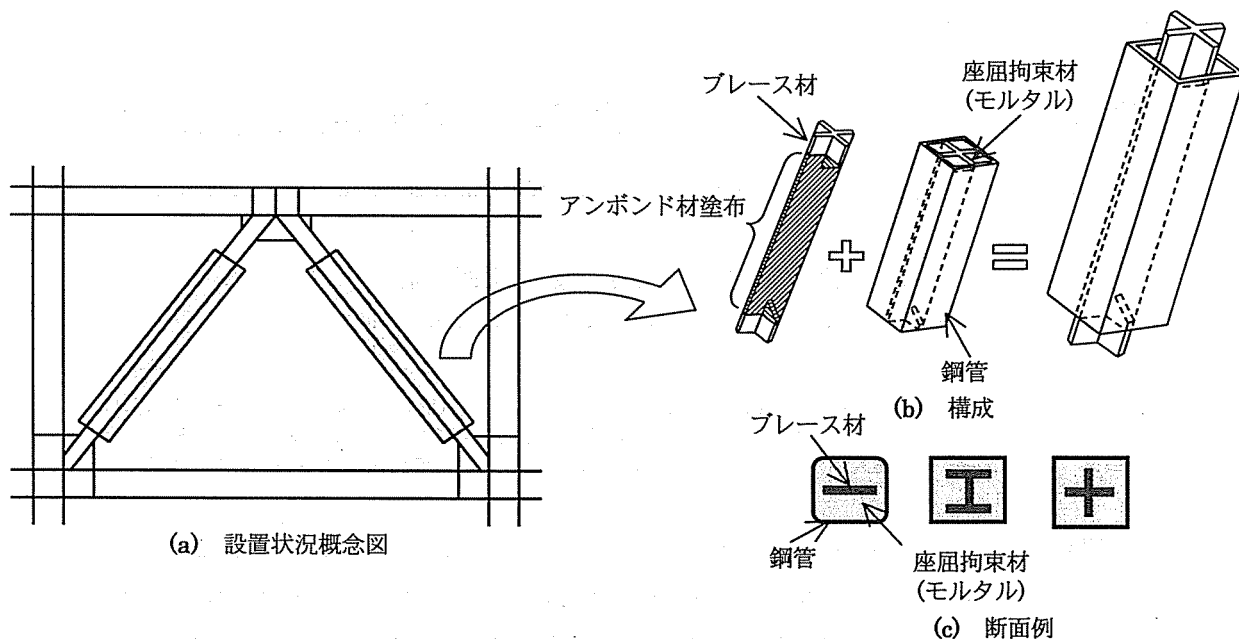


図-2 座屈拘束ブレース

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。このような点から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、大変形振幅の繰り返し加力に対して、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)}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、土木構造物への適用を検討するには、主部材の耐震性能評価を行う上で、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

2.1.1 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ることができる。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、座屈拘束材表面に剛な平壁面を想定し、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。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座屈拘束材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ばね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

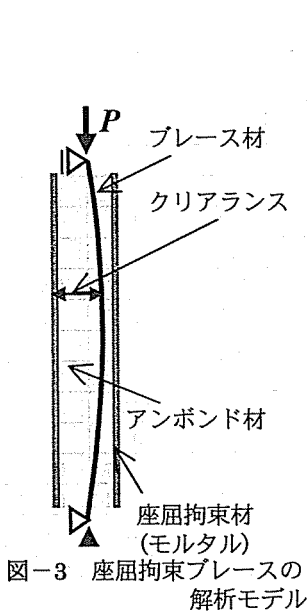


図-3 座屈拘束ブレースの解析モデル

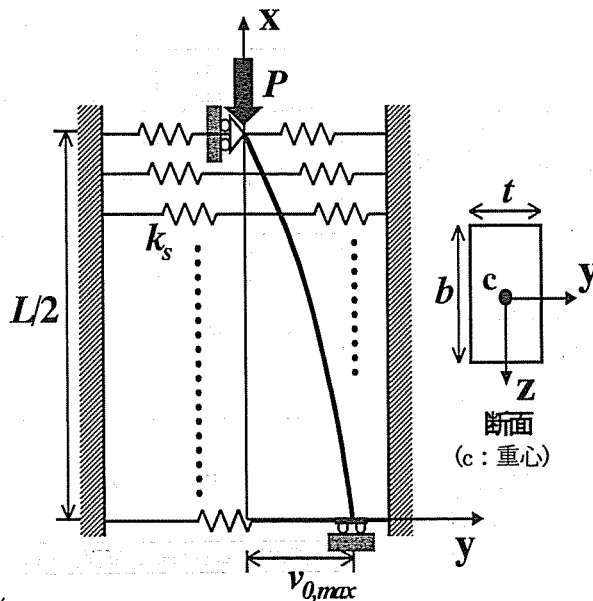


図-4 解析モデルの概要

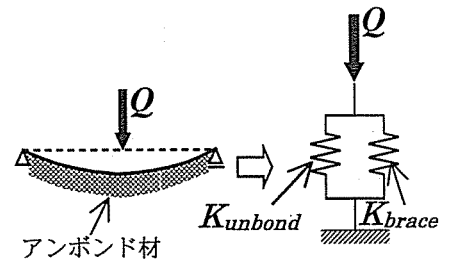


図-5 アンボンド材上の単純ばりのばねモデル

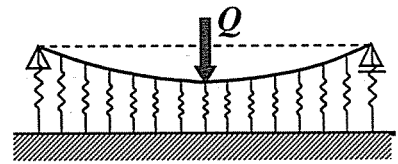


図-6 連続的な弾性支承上のはり

く横せん断変形を許す平面はり要素 B21 を使用し、平鋼ブレースを想定し断面形状は長方形とした。また、剛壁面には 2 節点剛体要素 R2D2 を、ばねとしては、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、節点の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。

2.1.2 アンボンド材のモデル化

本研究ではアンボンド材が、ブレース材と座屈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ばねで模擬する。ここで、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非常に困難である。そこで、本研究でははりの曲げ剛性に対する比をパラメータとして、ばね定数 k_s の算定を行う。

基準となるはりの曲げ剛性は、単純支持ばりの中央 1 点載荷時の曲げ剛性とした。すなわち、基準剛性 K_{brace} は次式で表される。

$$K_{brace} = \frac{48EI}{L^3} \quad (1)$$

ここで、式中の E 、 I はそれぞれブレース材のヤング率、断面二次モーメント、 L は部材長である。また、単純ばりが K_{unbond} の剛性を持つアンボンド材上にあると考えると、単純ばりのたわみ量とアンボンド材の縮む量が等しいため、この構造系は図-5 のように並列ばねとしてモデル化できる。ここでアンボンド材の剛性ははりの剛性の α 倍とすると、 $K_{unbond} = \alpha K_{brace}$ で表すことができ、並列ばねの全体剛性は $(1 + \alpha) K_{brace}$ となる。ゆえにこの際のばねの縮み量 v_1 は式(2)で表され、これがこの単純ばりでの中点のたわみとなる。

$$v_1 = \frac{1}{1 + \alpha} \cdot v_0 \quad (2)$$

ここで、 $v_0 (= Q/K_{brace})$ は、鉛直荷重 Q による単純ばり中央点におけるたわみである。

次にアンボンド材が図-6 に示すようにブレース材を連続的に弾性支持するものと見なすと、単位長さあたりの反力係数を c とし、この構造系は式(3)の微分方程式で支配される。

$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} + cv = 0 \quad (3)$$

上式を中央に集中荷重 Q を受ける状態で解くと式(4)が得られる。

$$v_1 = \frac{QL^3}{16EI\gamma^3} \left[e^\gamma (C_1 \cos\gamma + C_2 \sin\gamma) + e^{-\gamma} (C_3 \cos\gamma + C_4 \sin\gamma) \right] \quad (4)$$

ここで、式(4)中の C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 および γ は、式(5)～(7)で表される。

$$C_1 = -C_3 = \frac{(e^\gamma + e^{-\gamma}) \cos\gamma + (e^\gamma - e^{-\gamma}) \sin\gamma}{4 \left[(e^\gamma + e^{-\gamma})^2 \cos^2\gamma + (e^\gamma - e^{-\gamma})^2 \sin^2\gamma \right]} \quad (5)$$

$$C_2 = C_4 = -\frac{(e^\gamma + e^{-\gamma}) \cos\gamma - (e^\gamma - e^{-\gamma}) \sin\gamma}{4 \left[(e^\gamma + e^{-\gamma})^2 \cos^2\gamma + (e^\gamma - e^{-\gamma})^2 \sin^2\gamma \right]} \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{L}{2} \sqrt{\frac{c}{4EI}} \quad (7)$$

与えられた α に対し式(2)から v_1 を求め、その値に対して式(4)～(7)より c を算出し、 K_{unbond} に相当する剛性を定める。なお、この c は上式を満たすように試行錯誤的に定めた。また、解析上では離散化されたばねによって表現するため、一つのばねが支持する長さを分割数 m を用いて L/m として考え、ばね定数 $k_s = c \cdot L/m$ とした。本研究では $m=40$ と設定し、解析モデルが 1/2 モデルであるため、対称面に用いるばねのみ k_s を半分とした。

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。

2.2.1 解析モデルの諸元

本研究では細長比 λ が 100、200、400 の3つのモデルに対して、それぞれ $\alpha=0$ 、1/2、1/5、1/10 倍となる場合を想定した。ただし、 $\lambda=200$ の場合のみ λ による変形状態の比較を行うため他にも数パターンの剛性比 α を用いた。解析モデルの諸元およびばね定数を表-1に示す。ここで断面幅 b は 90mm、部材長 L は 4000mm で一定とし、 t は板厚を示す。本解析では平鋼ブレースの解析を想定しているが、 $\lambda=100$ の場合断面幅よりも板厚の値が大きくなり強軸方向と弱軸方向が入れ代わる。これは、通常の平鋼ブレースには無い形状となるが、2次元問題であることと、断面

表-1 解析モデルの諸元

λ	P_y (kN)	P_σ (kN)	t (mm)	α	c (MPa)	k_s (N/mm)
100	3120	2510	138.6	0	0	0
				1/10	0.158	7.92
				1/5	0.317	15.9
				1/2	0.746	39.8
200	1560	315	69.3	0	0	0
				1/10	0.0198	0.990
				1/5	0.0397	1.98
				1/2	0.0995	4.98
				1	0.200	10.0
				10	2.27	113
400	779	39.3	34.6	0	0	0
				1/10	0.00247	0.124
				1/5	0.00494	0.247
				1/2	0.0124	0.620

*部材長 $L=4000$ mm, 断面幅 $b=90$ mm, ブレース材の分割数 $m=40$

形状が長方形であり、ブレース材の断面2次モーメントに幅が影響を及ぼさないことから、解析上 $\lambda=100$ を実現させるモデルとして採用し、他の細長比と同様、断面厚方向にたわみを与えた。

また、アンボンド材の厚さは岩田らの研究⁹⁾を参考に1mmで一定とした。初期たわみ v_0 は正弦波で与え、初期たわみの最大値 $v_{0,max}$ はアンボンド材厚さの半分の値、0.5mmとした。

2.3 荷重方法および構成則

本解析では図-6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-7に示すとおりである。

単調荷重の際の構成則には、図-8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17)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¹⁸⁾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、細長比 $\lambda=200$ 、剛性比 $\alpha=1/10$ の解析結果を図-9

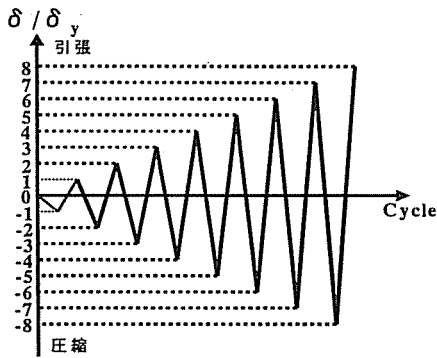


図-7 繰り返し載荷パターン

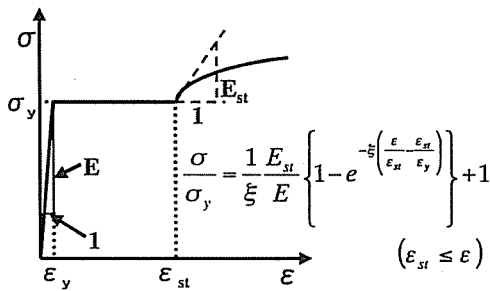


図-8 構成則

表-2 解析モデルの材料定数

鋼種	σ_y (MPa)	E/E_{st}	ϵ_{st}/ϵ_y	E (GPa)	ξ	ν
SS400	250	40	10	205	0.06	0.3

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ある。ただし、引張解析の結果は引張側を正としている。

図-9 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。また、図-10 の荷重-ブレース材たわみ関係で、座屈荷重に達する前に壁面による座屈拘束を確認することができ、 α を大きくすることで壁面に達する荷重 P も大きくなることがわかった。ここで、 $\alpha=0$ のとき、壁面にあたるまでは座屈拘束なしと同様の挙動を示すはずであるが、それらに多少の差が確認できる。これは、接触問題における数値解析上必要とする減衰の影響による。以上のような座屈を拘束した結果は $\lambda=100, 200, 400$ の全ての場合で得られており、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。

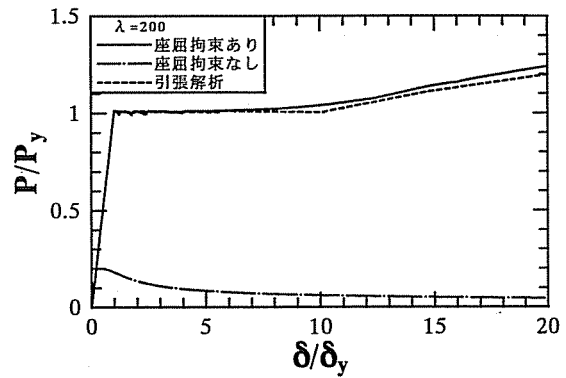


図-9 荷重-変位関係 (単調載荷)

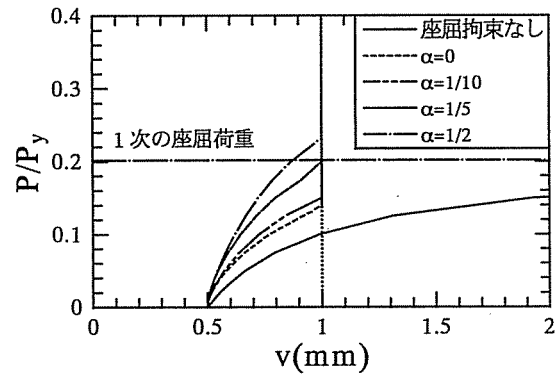


図-10 荷重-ブレース材たわみ関係

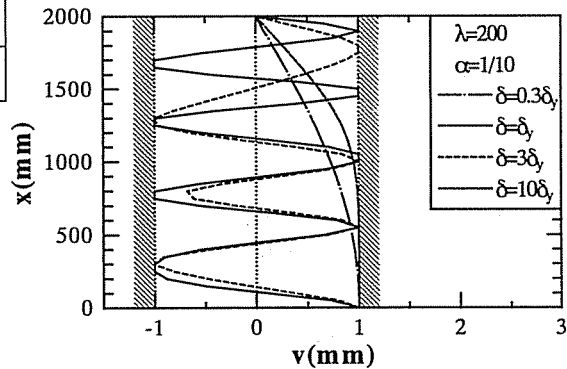
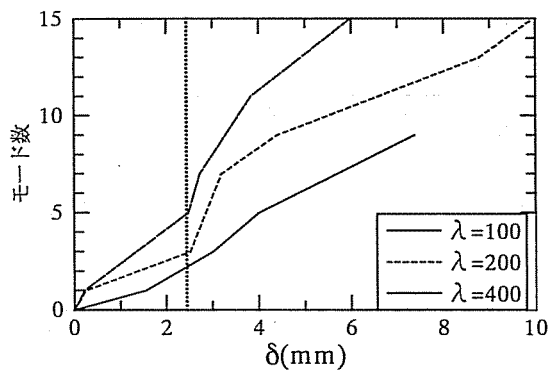


図-11 ブレース材の変形状態 (単調載荷)

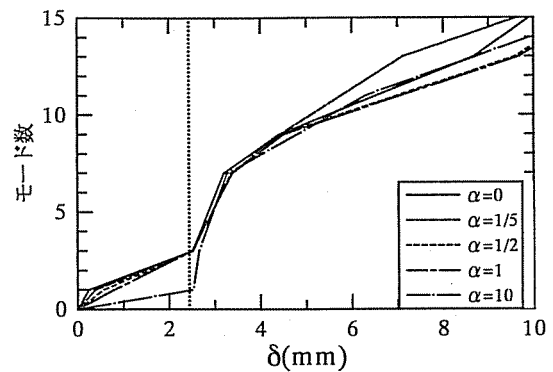
3.1.2 変形状態

単調載荷解析の変形状態の例として、細長比 $\lambda=200$ 、剛性比 $\alpha=1/10$ の変形の様子を図-11 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-12(a)には $\alpha=1/10$ とした時の細長比 λ の違いによる変形状況の比較を、図-12(b)には $\lambda=200$ とした時の剛性比 α の違いによる変形状況の比較を示す。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-13 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-11 からわかるようにブレース材は壁面に接触後、し



(a) λ の違いによる比較



(b) α の違いによる比較

図-12 モード推移の状況

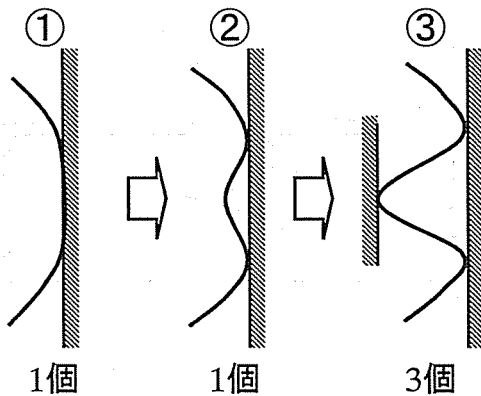


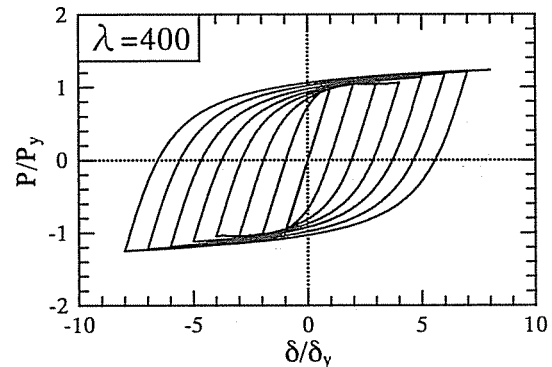
図-13 モード数の定義

ばらくは壁面に沿って変形するが、ある程度荷重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-12である。図-12(a)では細長比 λ が大きいものほど高次モードへ移りやすいことを示しており、剛性比 α に関しては図-12(b)より $\alpha \leq 1$ の時はモードの推移状況も等しく、全てがほぼ同様の変形状態を示した。ただし、 $\alpha = 10$ の際には降伏後に初めて壁面に接触し、座屈現象をばねそのものによって拘束したことになる。しかし、実際に使われるアンボンド材の剛性はブレース材の曲げ剛性に比して非常に小さいので、不明な点はあるものの $\alpha \leq 1$ の範囲内の解析で十分であろう。ゆえに、アンボンド材の剛性はブレース材の変形状態にそれほど大きな影響を与えないと言える。

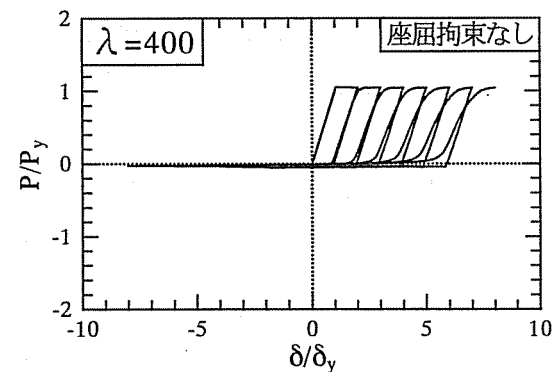
3.2 繰り返し荷重解析の結果および考察

3.2.1 荷重-変位関係

$\lambda = 400$ の解析結果を図-14に示す。ここで図-14(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



(a) 座屈拘束あり

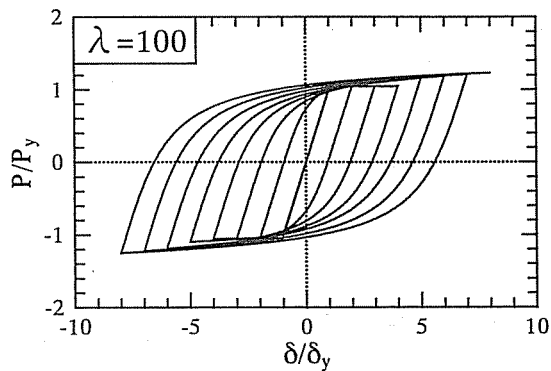


(b) 座屈拘束なし

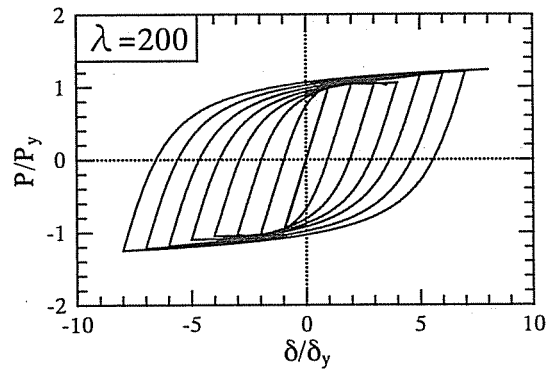
図-14 荷重-変位関係 (繰り返し荷重)

果である。また、図では引張側を正とし、縦軸、横軸ともに単調荷重解析と同様の無次元化をしている。

図-14(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-14(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。また、図-15に示した $\lambda = 200$ および100の解析でも同様の安定した荷重-変位履歴を描いた。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-変位特性を与えられることを確認した。



(a) $\lambda = 100$



(b) $\lambda = 200$

図-15 荷重-変位関係

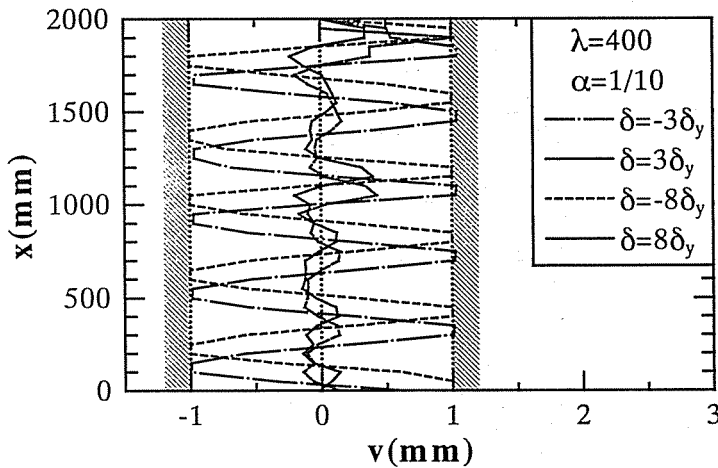


図-16 ブレース材の変形状態 (繰り返し荷荷)

3.2.2 変形状態

次に繰り返し荷荷解析時のブレース材の挙動について、 $\lambda = 400$ における軸方向変位 δ が降伏変位 δ_y の 3, -3, 8, -8 倍となった際の変形状態を図-16 に示す。図より圧縮時には単調荷荷と同様に高次モードの変形状態を示している。また、引張荷荷の折り返し点において、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、繰り返し荷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り返し荷荷時においても、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、荷荷パターンを図-17 に示す。ただし、初期たわみの最大値 $v_{0,max}$ はアンボンド材厚さの半分値、剛性比 $\alpha = 1/10$ と

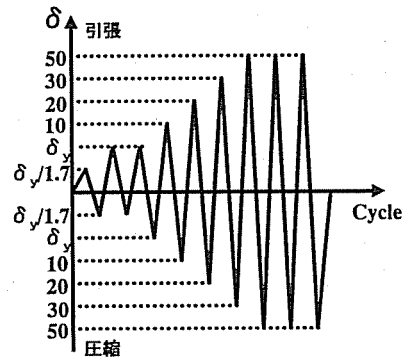


図-17 比較解析の荷荷パターン

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

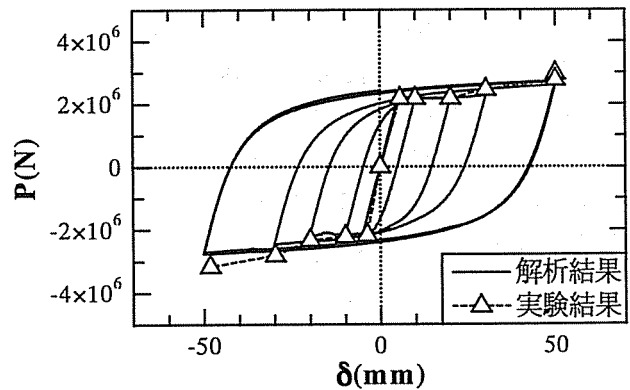


図-18 解析結果と実験結果の比較

した。

解析により得られた荷重-変位関係を図-18 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。

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り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、細長比が大きいものほど高次のモードへ移行しやすく、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ことが確認された。
- (3) 繰り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) 若林實, 中村武, 梶原章雄, 森園哲郎, 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.1339-1342, 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, 御厨孝二, 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, 御厨孝二, 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, 1999.3.
- 15) 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, 2000.3.
- 16) Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.: ABAQUS User's Manual, Version 5.8, Vol. I-III, 1998.
- 17) 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.
- 18) Shen, C, Mizuno, E, Usami, T: 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, 1993.7.

(2001年9月14日受付)