

二重鋼管型座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動

An analytical study on the cyclic behavior of double-tube type buckling-restrained braces

加藤基規*, 葛西昭**, 馬翔***, 宇佐美勉****

Motoki Kato, Akira Kasai, Xiang Ma and Tsutomu Usami

*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)

***名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻研究生 (〒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)

This study is aimed at investigating the cyclic behavior of buckling-restrained brace (BRB) members of double-tube type. At first, an analytical model for simulating the cyclic behavior of double-tube type BRB is developed. Then a parametric study is carried out for verifying the effect of local buckling occurring in the core (inner) tube. As a result, it is found that local buckling greatly affects the cyclic capacity of double-tube type BRB. Moreover, the cyclic demand for double tube type BRB can be predicted using the radius-thickness ratio parameter.

Key Words : buckling-restrained brace, local buckling, steel tube, cyclic loading, strength, ductility

キーワード：座屈拘束ブレース，局部座屈，鋼管，繰り返し載荷，強度，変形能

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，有益な提示が数多く見受けられる。その内，地震エネルギーを吸収する部材（制震ダンパー）を構造物に設置し，地震後に取り替える構造形式は，定量的な地震エネルギー吸収が期待できるため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予想される。従って，主部材に対して並列的に犠牲的な部材を設け，その部材でエネルギー吸収し，主構造をほぼ弾性域に納める構造（制震構造）をとることで，構造物全体の残留変形を低減できると考えられる。これにより，補修が容易となり，地震後の使用性の観点からも有利な構造である。制震構造に用いるエネルギー吸収部材として履歴型ダンパー（弾塑性変形によってエネルギー吸収を図るダンパー）が建築分野で多くの研究実績があり，施工例も多い^{1)~3)}。土木分野においても，ラーメン橋脚，アーチ橋，トラス橋，吊橋などの耐震性向上に有効であることが実証されつつある^{4)~11)}。履歴型ダンパーは降伏形態により，曲げ降伏型，せん断降伏型，軸力降伏型がある¹²⁾が，本論文では，軸力降伏型の制震ダンパーである座屈拘束ブレースを対象としている。

建築分野におけるブレースは，ラーメン構造に対する斜材が一般的である。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。この点を解消するために，図-1のようにブレース材をモルタルなどの拘束材で覆う座屈拘束ブレースが提案されている。図-2は断面形状例を示している。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ことによって，耐力低下を防ぐだけでなく，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。

座屈拘束ブレースは，建築構造物に対して数多くの研究実績があり，その性能が主として実験的に検証されている^{1)~3)}。しかし，繰り返し弾塑性挙動に関する厳密な解析的研究は見あたらないようである。今後の土木構造物への広範囲かつ多様な適用を考えると，実験的研究に加え，解析的な研究も必要不可欠である。そこで著者らは，座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動を正確に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，変形挙動などを解明してきた¹²⁾。また，座屈拘束ブレースの繰り返し載荷実験を行い，座屈拘束ブレースの弾塑性挙動を実験的な側面から解明するとともに，解析モデルの妥当性の検証を行ってきた^{13),14)}。しかしながら，それらの研究は，モルタル充填型の平鋼ブレースのような，局

部座屈を考慮する必要のないものを想定しており、解析モデルには、はり要素を用いている。座屈拘束ブレースは、前述のように様々な断面があり、中には中空型の十字断面やパイプ断面（図-2）など、比較的薄肉の断面も数多く見受けられる。設計での簡便さを考慮すると、局部座屈の発生は極力避けるのがよいと考えられ、中空型では、要求性能の一つとして局部座屈の防止が加わるこ

とになる。そこで、本研究では局部座屈を考慮する必要がある座屈拘束ブレースの一例として二重鋼管型座屈拘束ブレース（図-2 の中空型の 2 番目の形式）を取り上げ、シェル要素により、その弾塑性挙動を解析できるモデルを作成する。解析結果から、地震外力の大きさ(Demand)に応じて、局部座屈を防ぐために内部鋼管に要求される条件（具体的には、径厚比パラメータの制限）を提案する。なお、パイプ断面を用いた二重鋼管型座屈拘束ブレースについては、桑原ら¹⁵⁾が実験的な研究を行っているが、局部座屈を考慮した挙動の解析的研究は行われていない。

2. 解析概要

2.1 解析モデルの概要

二重鋼管ブレースは図-3 のように、軸力を伝える鋼管（以下、軸力管）を外側から別の鋼管（以下、補剛管）で覆い、座屈拘束させた部材である。図-3 (b) のように、軸力管の横方向のたわみを補剛管が抑制し、座屈現象を拘束する。つまり、二重鋼管における軸力管の挙動は、軸力管－補剛管間の接触問題と捉えることができる。また、鋼管部材はその円筒状の形状から、全体座屈のみならず圧縮载荷時の局部座屈も考慮しなければならない部材である。そこで、本研究では軸力管をモデル化する要素として、局部座屈を表現できるシェル要素を採用した。また、補剛管については、軸力管との接触による横方向の力のみを受け、全体座屈を生じない限りその挙動は極めて単純なものと考えられる。そこで、本研究ではより解析を単純化させるために補剛管は全体座屈を起こさない十分な強度を持つものと想定し、その要素として剛体要素を適用した。本研究で考案した解析モデルの概要を図-4 に示す。

解析モデルは鋼管軸方向の対称性、および断面の対称性より 1/4 モデルとした。軸力管、補剛管共に y 軸方向に同様の初期たわみを仮定し、それらの間には一定の隙間を設けた。また、

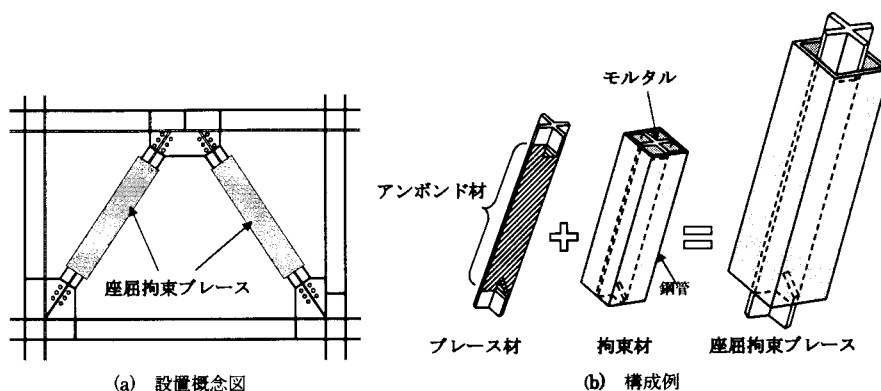


図-1 座屈拘束ブレース

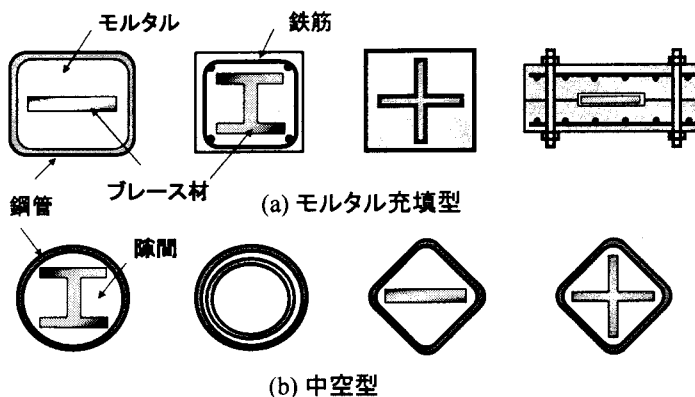


図-2 座屈拘束ブレースの断面構成例

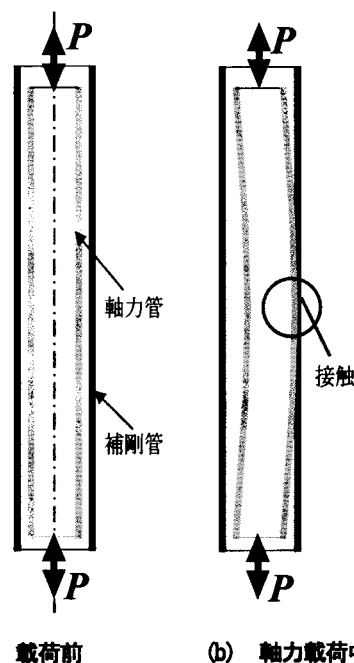


図-3 二重鋼管ブレースの軸圧縮挙動の概念図

載荷点を軸力管上端部中心に設け、軸力管の上端部節点と載荷点が常に同平面上にあるよう、各々剛棒で結ぶ（図-5 参照）。なお、本解析には構造解析用汎用プログラム ABAQUS¹⁶⁾を用い、有限変形解析とした。軸力管には 4 節点 3 次元シェル要素 S4R、補剛管には 4 節点 3 次元剛体要素 R3D4 をそれぞれ使用した。また、上端部で軸力管と載荷点を結ぶ剛棒には 2 節点 3 次元剛体要素 RB3D2 を定義した。なお、軸力管－補剛管間の

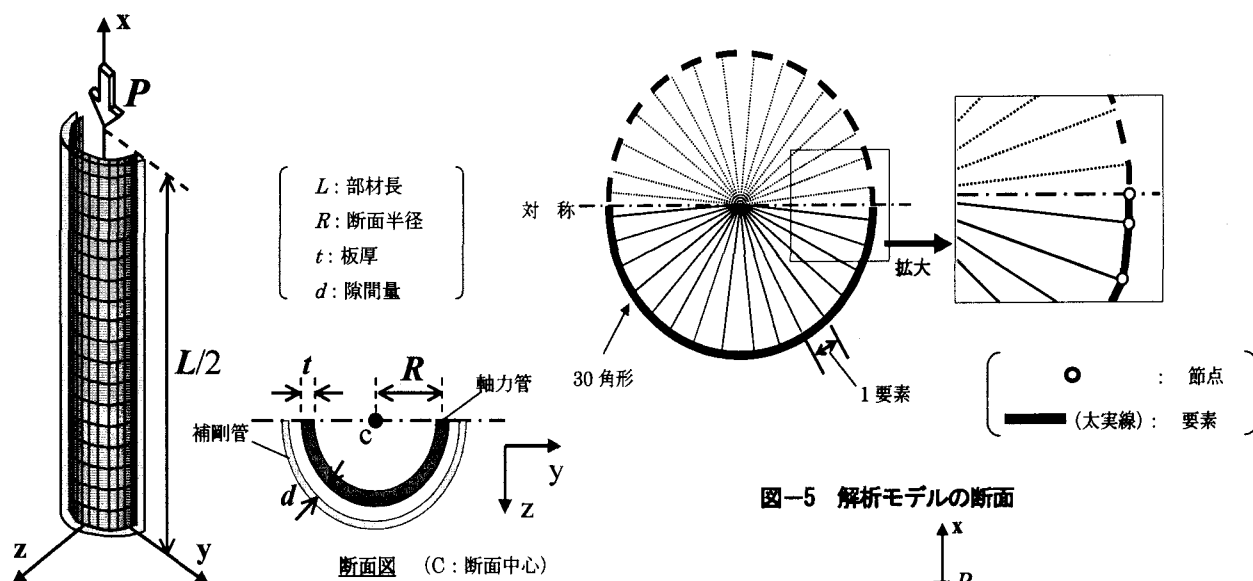


図-4 解析モデルの概要

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。

解析モデルの要素数は、その局所的な挙動を十分に表現できる要素数として、軸力管、補剛管共に、x軸方向に80分割した。また、断面形状は図-5に示すような30角形の擬似的な円とし、それら一辺を一要素分とする。

解析モデルを平面的に示した図を図-6に示す。図は解析モデルの断面を対称に分割する面（以降xy対称面と称す）上の図を模式的に表している。図中の点Cは载荷点を示し、A-A、A-B、B-Bはそれぞれ軸力管上端、xy対称面上の辺、解析モデルの軸方向対称面（以降yz対称面と称す）上の辺を表している。载荷点Cではy軸、z軸方向の変位をそれぞれ拘束、A-A上の節点は载荷点Cを含む平面がx軸、およびy軸周りに回転しないよう定義した。また、B-B上の節点ではyz平面に関する対称性よりx軸方向の変位および、y軸、z軸周りの回転を拘束し、A-B上の節点ではxy平面に関する対称性より、z軸方向の変位および、x軸、y軸周りの回転を拘束した。これら境界条件をまとめたものを表-1に示す。なお、表-1において、 u 、 v 、 w はそれぞれx、y、z軸方向の変位、 θ_x 、 θ_y 、 θ_z はそれぞれx、y、z軸周りの回転を表す。

2.2 解析モデルの諸元

本研究で用いた解析モデルの軸力管の諸元を表-2に示す。部材長 L 、半径 R はそれぞれ4000mm、100mmで一定とし、板厚 t のみおのおの变化させた。ここで、半径 R は鋼管中心から板厚中心までの距離を示している。断面2次半径 r は(1)式のように表され、板厚が半径に比べ十分に小さい場合には、板厚はその値にほとんど影響がなく、表に示すようなほぼ同様の断面2次半径、細長比になった。

図-5 解析モデルの断面

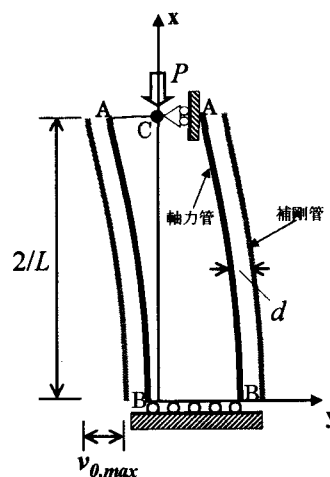


図-6 解析モデル平面図 (x-y対称面)

表-1 境界条件

境界	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
C	0	1	1	0	0	0
A-A	0	0	0	1	1	0
B-B	1	0	0	0	1	1
A-B	0	0	1	1	1	0

(Free : 0, Fix : 1)

$$r = \sqrt{\frac{4R^2 + t^2}{8}} \quad (1)$$

また、表中の記号 R_t は軸力管の径厚比パラメータを示し、式(2)より算出される値である。これは、パイプ断面の局部座屈を考える際に有効なパラメータで、板厚が小さいものほどその値は大きくなる。なお、式中の記号はそれぞれ ν :ポアソン比、 σ_y :降伏応力、 E :ヤング率を表している。

$$R_t = \sqrt{3(1-\nu^2)} \cdot \frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{R}{t} \quad (2)$$

表-2 解析モデルの諸元

板厚 $t(\text{mm})$	径厚比 R/t	径厚比パラメータ R_t	断面2次半径 $r(\text{mm})$	細長比 λ
5	20	0.040	70.7	56.6
4	25	0.050	70.7	56.6
3	33	0.067	70.7	56.6
2	50	0.10	70.7	56.6
1	100	0.20	70.7	56.6

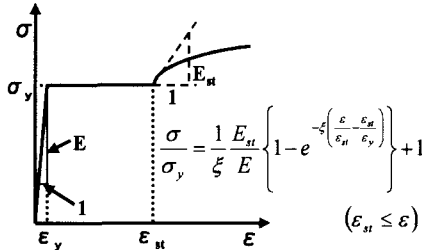


図-7 構成則

表-3 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	235	40	10	200	0.06	0.3

解析モデルには正弦波の初期たわみを y 軸方向に与え、その最大値 $v_{0,max}$ は $L/1000$ と仮定した。また、補剛管は初期段階で隙間量を一定に保つために同様のたわみ形状を与え、軸力管と補剛管が並行するようにした。その軸力管との間の隙間量 d については、5mm で一定とした。

2.3 荷重方法および構成則

解析では図-4 の荷重点を x 軸方向に押すことにより、軸力管のみに強制変位を与える。荷重は変位制御で行い、単調荷重解析では、軸方向変位 δ が $20 \delta_y$ となるまで行い、繰り返し荷重解析では、文献 13) の履歴と同様に漸増の変動変位振幅となる荷重パターンとした。ここで δ_y は軸力管の軸方向降伏変位を示し、目標変位 $20 \delta_y$ は文献 13) と同様に座屈拘束ブレースの必要性能として決定した。

構成則には、図-7 に示す降伏棚およびひずみ硬化域を持つものを用いた。繰り返し構成則は、修正 2 曲面¹⁷⁾を用いた。使用鋼材は SS400 で、材料定数は表-3 の通りである。

3 解析結果及び考察

3.1 単調荷重解析の結果及び考察

(1) 荷重-変位関係

解析より得られた各諸元における荷重-変位関係を図-8 に示す。また、図-9 には $R_t=0.040$ および $R_t=0.067$ の解析結果と、はり要素モデル及び補剛管を設けなかった場合の結果の

(部材長 $L=4000\text{mm}$, 半径 $R=100\text{mm}$, 隙間量 $d=5\text{mm}$)

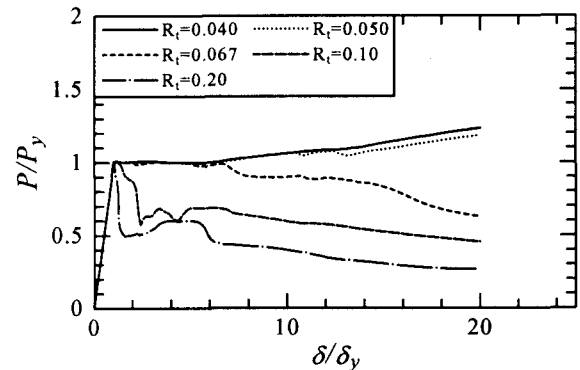
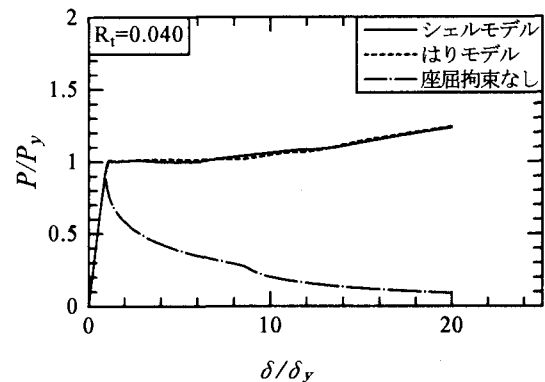
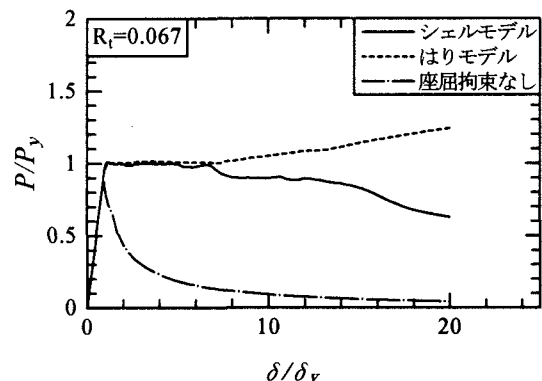


図-8 荷重-変位関係 (径厚比パラメータの違いによる影響)



(a) $R_t = 0.040$



(b) $R_t = 0.067$

図-9 荷重-変位関係 (はりモデルとの比較)

比較図を示す。なお、ここで言うはり要素モデルとは、文献 12) の全体座屈のみ考慮した座屈拘束ブレースの解析モデルである。図の縦軸、横軸それぞれ軸力管の軸方向荷重 P 、軸方向変位 δ

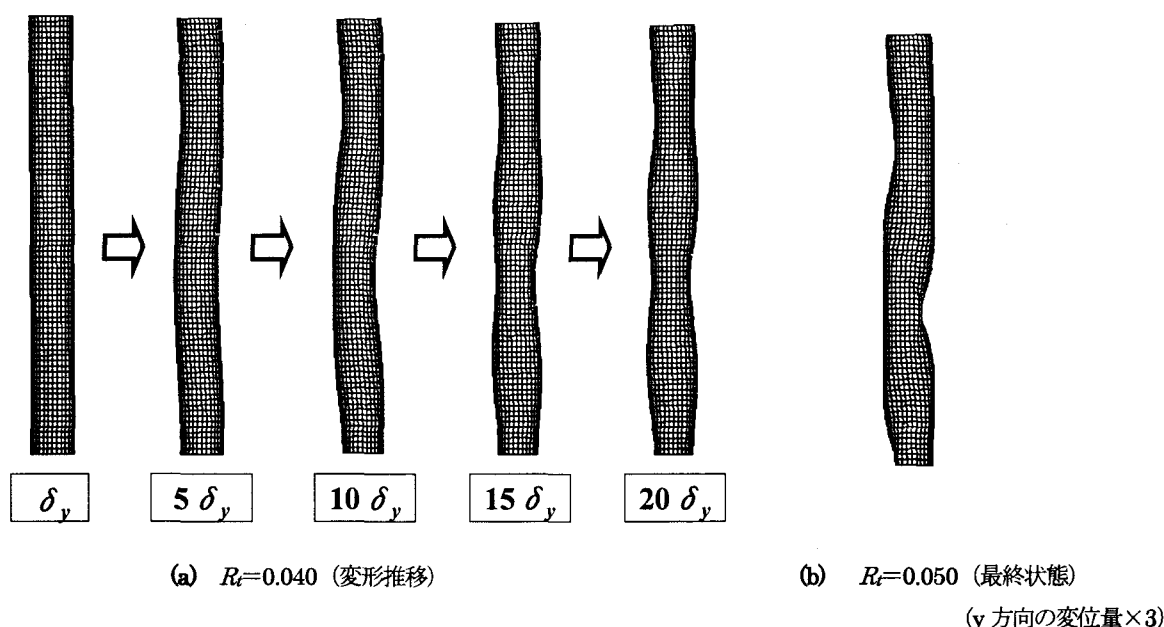


図-10 軸力管の変形状態 (厚肉断面)

を示し、各々降伏荷重 P_y 、降伏変位 δ_y で除し無次元化を行っている。また、図では圧縮側を正としている。

図-9(a)に見られるように比較的厚肉な断面の場合では、耐力低下を起こしておらず、はりモデルでの解析結果とほぼ一致する安定した荷重-変位曲線が得られた。すなわち、これは圧縮側においても引張側と同様の荷重-変位関係が付与できたことを意味し、シェルモデルにおいてもはりモデルと同様、軸力管の横方向のたわみを抑制するという座屈拘束効果が確認できた。これは、補剛管を設けず座屈補剛を行わなかった結果と比較しても明らかである。しかしながら、板厚が小さくなるにつれて解析結果には耐力の低下が見られ、図-9(b)に示されるように $R_t=0.067$ では降伏後しばらくは耐力を保っているが、その後 $6.5 \delta_y$ 付近から大きな耐力低下を引き起こしている。全ての径厚比パラメータについてプロットしてある図-8を見ると、更に板厚の小さい $R_t=0.10, 0.20$ の場合では、降伏後すぐに大きな耐力低下が生じている。これらの耐力低下の挙動は、座屈拘束しなかった場合の結果とは違っており、全体座屈による耐力の低下とは全く異なるものである。すなわち、これらの耐力低下は局部座屈が原因であるといえる。以上のように、本解析モデル (シェルモデル) は厚肉断面の場合、座屈拘束効果による安定した荷重-変位曲線を表現できると共に、薄肉断面の場合に起こる局部座屈による耐力低下を示した。また、図-8 より $R_t \leq 0.05$ であれば、局部座屈は生じないと言える。

(2) 変形状態

前項では荷重-変位関係により、薄肉断面において局部座屈による耐力低下が見られた。そこで、ここでは実際に軸力管がどのような変形をしているか厚肉断面 ($R_t=0.040, 0.050$)、および薄肉断面 ($R_t=0.067, 0.10, 0.20$) の2つの場合に分け、それ

ぞれ考察を行う。

a) 厚肉断面 ($R_t=0.040, 0.050$)

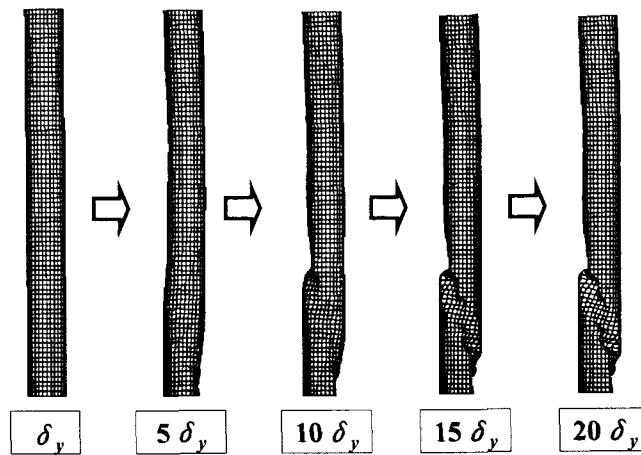
図-10 にそれぞれ解析より得られた軸力管の変形状態を示す。(a)は $R_t=0.040$ の変形の推移、(b)は $R_t=0.050$ の最終形状である。なお、ここではy軸方向 (たわみ方向) の変位を3倍に拡大している。

まず、今回最も厚肉であった $R_t=0.040$ の変形の推移に着目をする。軸力管は載荷後、補剛管に接触し、しばらくは補剛管に沿って変形を行う。その後、はり解析の際にも見られたような高次モードへ変形し、最終的には図に見られるような、軸力管の左右がほぼ対称に波打つ、くびれがあるような形状に変形した。これらの変形には、目立った局所的な変形は見られず、変形状態からもその安定した荷重-変位関係が推察できる。また、 $R_t=0.050$ の場合には、全体が緩やかな高次モードを示すように変形し、モード波形の谷になる部分で若干局所的な変形が進んでいる。よって、今後更に載荷が進んだ場合は大きな局部座屈が予想され、荷重-変位関係では大きな耐力低下は見られないことから、 $R_t=0.050$ のモデルは局部座屈発生のほぼ境界に位置すると思われる。

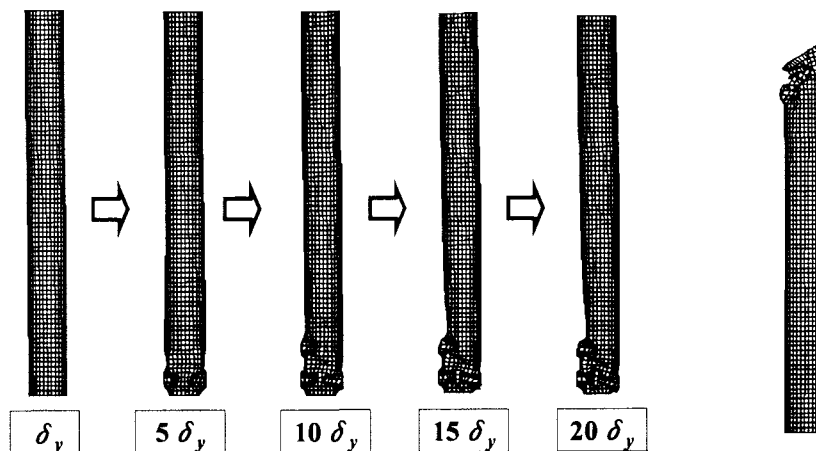
b) 薄肉断面 ($R_t=0.067, 0.10, 0.20$)

図-11 にそれぞれ解析より得られた軸力管の変形状態を示す。(a)、(b)は $R_t=0.067, 0.10$ の変形の推移、(c)は $R_t=0.20$ の最終形状である。なお、ここではy軸方向 (たわみ方向) の変位を2倍に拡大している。

まず、 $R_t=0.067$ の場合に着目をする。図のように軸力管は厚肉断面の時と同様、高次モードへ移行しようとする。しかし、 $R_t=0.050$ の際にも見られたようなモード波形の谷になる部分で局所的な変形が起こり、荷重-変位関係においても徐々に耐



(a) $R_t=0.067$ (変形推移)



(b) $R_t=0.10$ (変形推移)

(c) $R_t=0.20$ (最終形状)

(y 方向の変位量×2)

図-11 軸力管の変形状態 (薄肉断面)

力の低下が起こっている。最終的には局所座屈部分が繋がるように変形し、斜めに管がずれるような状態に変形した。

一方、 $R_t=0.10$ の場合には、塑性後、一気に局所的な変形が生じ、著しい耐力低下を引き起こす。その後、局所座屈部分の両端が補剛管に接触するため、変形が抑制され、一時的に耐力が上昇するが、また新たな局所座屈がその上部に発生し再度耐力を低下させる。最終的には、軸力管中央部のみが大きく局所座屈したような状態に変形する。また、 $R_t=0.20$ の場合は、局所座屈の発生箇所が端部に移行したところが違うものの、局所座屈の進展状況は同様な推移であった。なお、端部は水平方向への移動は拘束されているものの回転成分の拘束はないため、極端に薄肉な場合は、 $R_t=0.20$ のときのように全体的に変形することなく、まず端部での変形が生じてしまい、これが進展していくため、その他のような中央部で局所座屈とはならなかったと考えられる。

3.2 繰り返し載荷解析の結果及び考察

本節では、繰り返し載荷解析を通じて、二重鋼管ブレースの弾塑性挙動を探る。解析モデルおよび解析に関する諸条件は全て単調載荷解析と同様である。ただし、比較的厚肉な場合の解析例を追加している。解析ケースを表-4 にまとめる。

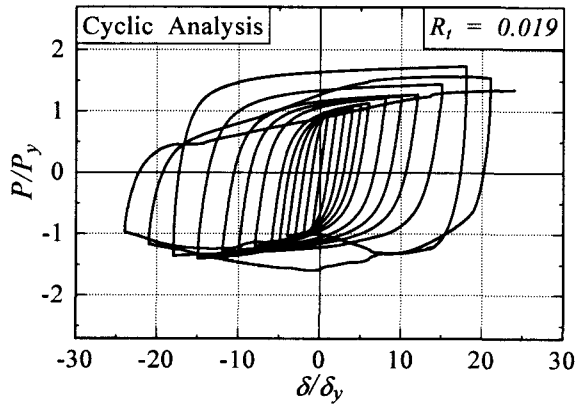
(1) 荷重-変位関係

各解析ケースの軸荷重-軸変位関係を図-12 に示す。(a) が比較的厚肉な場合であり、(d) に向かうにつれて徐々に薄肉な断面を有している。図-12(a) を見ると、非常に安定した履歴ループを描いているのが分かる。15 δ_y を超えたあたりから、挙動に変化が現れ、まず、引張側の荷重が上昇する。そして、圧縮側となる 18 $\delta_y \rightarrow -18\delta_y$ の載荷経路の際に荷重の増大が確認され、次ループ圧縮側で大きな耐力低下を呈することとなる。この時点で局所的な変形が生じている。なお、変形図について

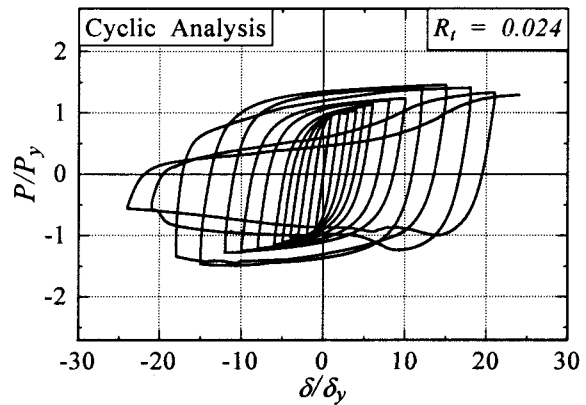
表-4 解析モデルの諸元 (繰返し載荷)

板厚 $t(\text{mm})$	径厚比 R/t	径厚比パラメータ R_t	断面2次半径 $r(\text{mm})$	細長比 λ
10	10.0	0.019	70.7	56.6
8	12.5	0.024	70.7	56.6
5	20.0	0.040	70.7	56.6
3	33.3	0.067	70.7	56.6

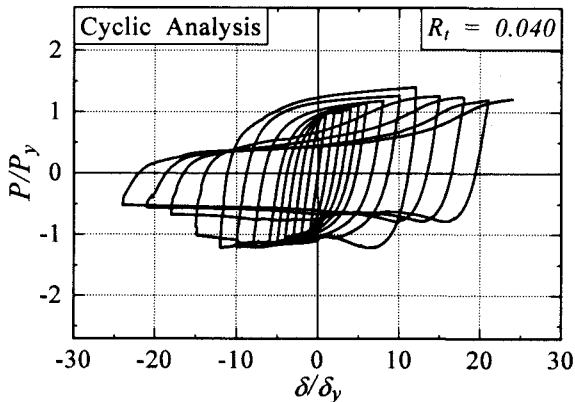
(部材長 $L=4000\text{mm}$, 半径 $R=100\text{mm}$, 隙間量 $d=5\text{mm}$)



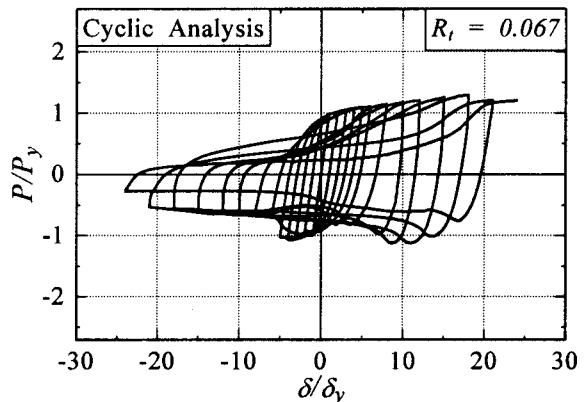
(a) $R_t=0.019$ のとき



(b) $R_t=0.024$ のとき



(a) $R_t=0.040$ のとき



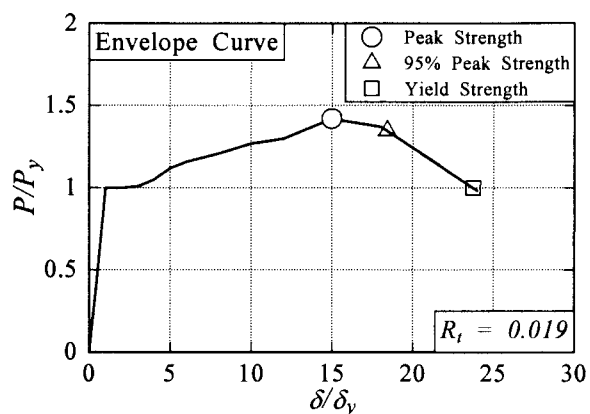
(b) $R_t=0.067$ のとき

図-12 荷重-変位関係 (繰返し載荷)

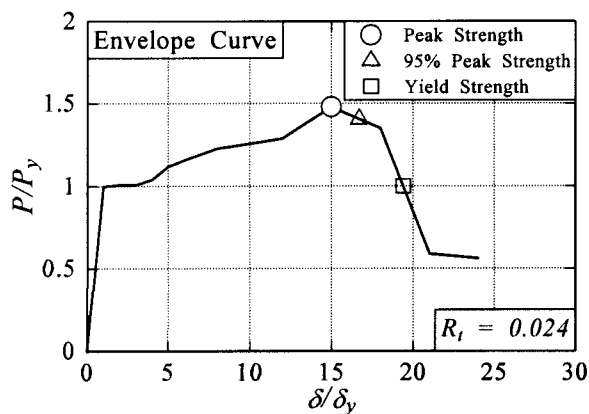
は後述する。(b)、(c)も履歴の途中までは比較的(a)と同様の傾向を有している。10 δ_y のループを超えたあたりから、(a)とは挙動が異なり、履歴ループの面積が小さくなる傾向が読みとれる。詳細に見ていくと、圧縮側に載荷したところ、ピークとなる荷重を迎えたあと、徐々に荷重が低下しながら圧縮側の変形が進む。折り返し時に引張側の弾性的な挙動範囲は小さく、その荷重を保ちながら大きな変形が生じ、変位0を超えたあたりから、硬化が始まるループとなっている。これでは、圧縮引張の安定した挙動とは言えず、座屈拘束ブレースとして用いる際には注意が必要となる。(d)では、6 δ_y のループを超えたあたりから同様の現象が生じており、安定した履歴ループの範囲が小さい。

(2) 強度及び変形能

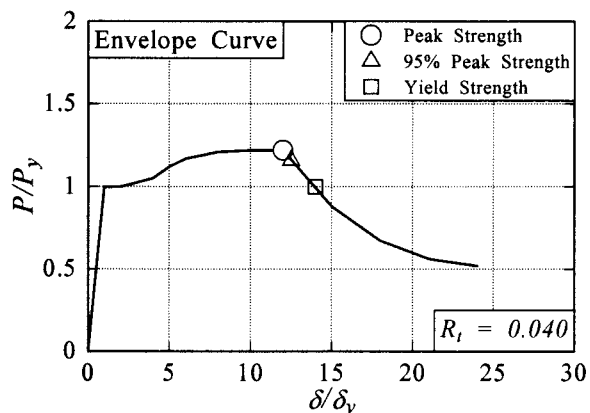
図-13は、図-12にある履歴ループより得られた圧縮側の包絡線をプロットしたものである。同図にはピーク荷重時を丸印で、95%まで耐力低下した点を△印で、ピーク後に降伏荷重まで耐力低下した点を四角印でプロットしてある。この図より、径厚比パラメータが大きいくほど、すなわち、薄肉になるほど、強度および変形能が小さくなることが分かる。特に、20 δ_y を必要性能と見なした場合、ピーク後の降伏荷重まで利用するとして $R_t \leq 0.024$ で条件を満足することになる。得られた結果を変形能の観点からまとめたものが、図-14である。同図は、縦軸は変形能を示し、横軸は径厚比パラメータを示している。この図より、径厚比パラメータが大きくなるほど、変形能が小さく



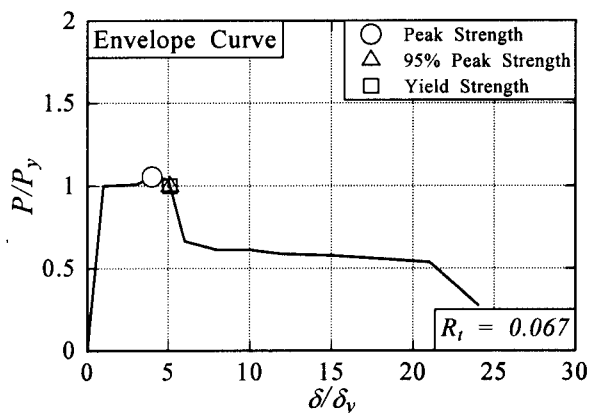
(a) $R_t = 0.019$ のとき



(b) $R_t = 0.024$ のとき



(a) $R_t = 0.040$ のとき



(b) $R_t = 0.067$ のとき

図-13 履歴曲線から得られた包絡線

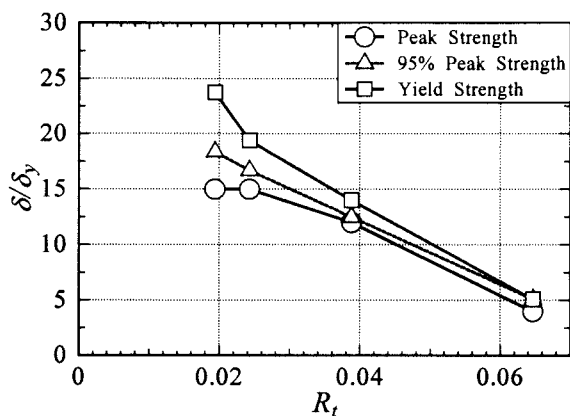


図-14 変形能-径厚比パラメータ関係

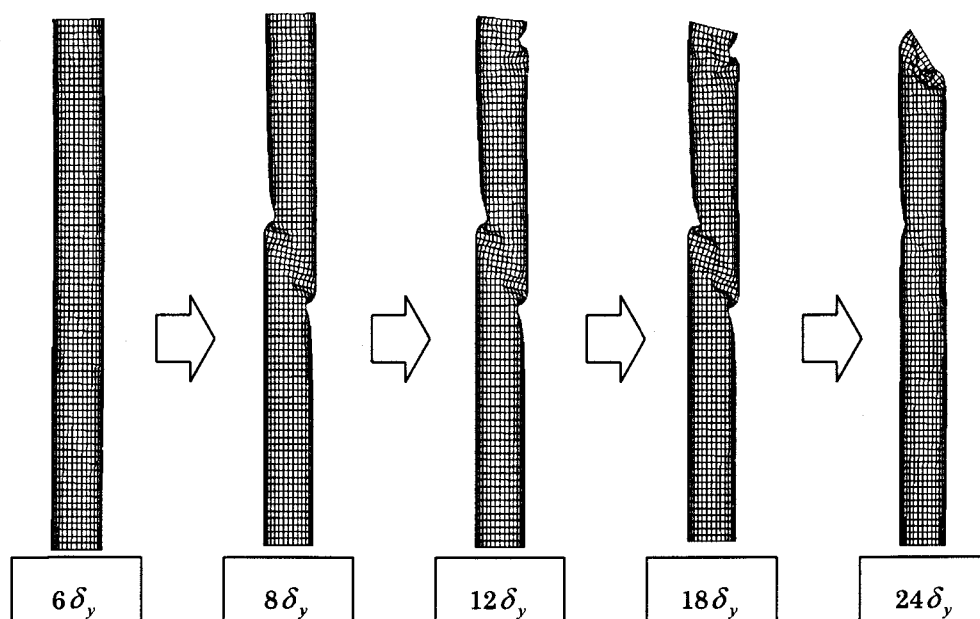
なることが読み取れる。また、この図を線形補完することによって、二重鋼管ブレースの所定の変形能に必要な径厚比パラメータを算定したものが表-5 である。この表より、本研究で対象とした二重鋼管型座屈拘束ブレースの必要性能が与えられれば、必要径厚比パラメータが求められる。ただし、隙間量を一定にするなどの諸条件に関するパラメトリック解析が完備されていないため、その点への留意は必要である。

表-5 径厚比パラメータの限界値

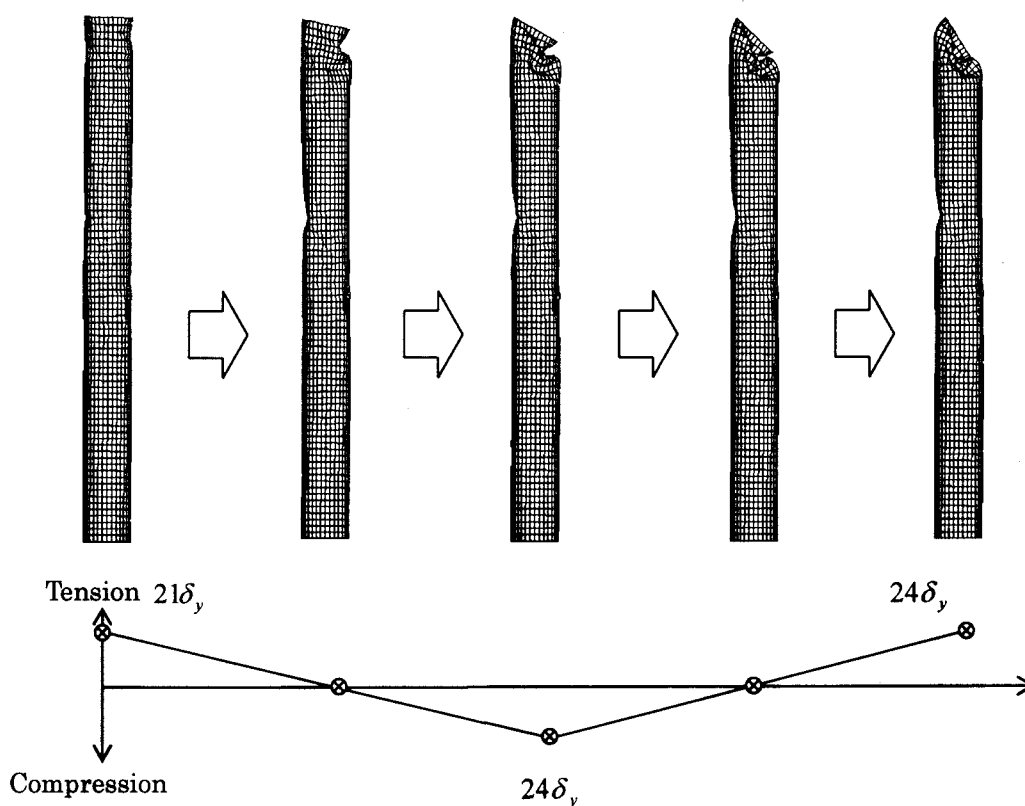
Demand (δ_u/δ_y)	R_t		
	最大荷重時	95%荷重時	ピーク後の 降伏荷重時
15	0.0358	0.0303	0.0243
10	0.0505	0.0476	0.0451
5	0.067	0.067	0.0612

(3) 変形状履歴

本節では、繰返し載荷で特徴的であった解析ケース ($R_t = 0.067$) についての変形図を図-15 にまとめる。図-15(a) は変位の増大に伴う変形状態を示したものであり、(b) は最終ループの変形の推移を示したものである。単調載荷である図-11(a) と比較すると、モデル中央にあるねじれに近い形状を示す局部座屈はどちらの載荷状態でも生じているが、単調載荷では $10\delta_y$ から発生し始めているのに対し、繰返し載荷では、 $8\delta_y$ 程度から発生している。さらに、繰返し載荷では、 $12\delta_y$ 以降からモデル上部に発生している局部座屈が単調載荷時と異



(a) 各ループの圧縮側折り返し点における変形図



(b) 最終ループにおける変形状態の推移

図-15 変形図 ($R_f=0.067$ の例)

なる点である。繰り返し荷重であるので、圧縮時の塑性変形は引張時にある程度は解消され、局部座屈の進展したところだけが、次ループの圧縮時に大きく変形することになるため、 $24\delta_y$ 付近までくると、端部の変形のみが生じるようになる。そして、強度低下の大きな要因はこの端部の局部座屈と考えられる。なお、最終ループの推移を詳細に見てみると、最初に生じたモデル中央部に見られた局部座屈よりも上部の局部座屈での変形が

卓越的であることが読みとれる。

4. 結言

本研究では、二重鋼管型座屈拘束ブレースを解析対象とし、内部鋼管（ブレース材）に局部座屈の考慮できるシェル要素を用い、外部鋼管を剛壁とした解析モデルを提案し、単調増大荷

重および繰り返し荷重に対して、ブレース材の局部座屈変形ならびに塑性領域の進展状況を解析的に解明した。板厚に関するパラメトリックスタディーを行い、径厚比パラメータ（式(2)）が二重鋼管型座屈拘束ブレースの強度と変形能に及ぼす影響について考察し、最後に、ブレース材に局部座屈が発生しない径厚比パラメータの制限値を求めた。

本研究で得られた結論を要約すると以下になる。

- 1) 全てのモデルにおいて大きな局部座屈変形は降伏後に生じた。
- 2) 厚肉断面鋼管 ($R_f=0.040, 0.050$) ブレースの場合には、矩形断面ブレースと似たような変形挙動を示し、外部鋼管内（拘束材内）において高次モードで変形する。
- 3) 比較的薄肉な鋼管ブレースの場合 ($R_f=0.067$) には、高次モードで変形するものの、モード波形の谷になる部分で局所的な座屈変形が起こり、徐々に耐力を失っていく。
- 4) 非常に薄肉な鋼管ブレースの場合 ($R_f=0.10, 0.20$) には、降伏後一気にブレース材中央や端部で大きな局部座屈を生じ、大きな耐力低下が起きる。
- 5) 二重鋼管型座屈拘束ブレースの内部鋼管に要求される径厚比パラメータの制限値を表-5 のように提案した。

参考文献

- 1) 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，日本鋼構造協会，1998.9.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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.
- 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.
- 6) 宇佐美勉，葛西昭，伊藤雅也，Chusilp, P.: 座屈拘束ブレース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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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, 2002.3.
- 13) 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，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.
- 14) 渡邊直起，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.
- 15) 桑原進，多田元英，米山隆也，今井克彦：二重鋼管の補剛性能に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第445号，pp.151-158, 1993.
- 16) Hibbit, Karlson and Sorensen, Inc.: ABAQUS User's Manual, Version 6.3, 2003.
- 17) 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.

(2003.9.12 受付)