

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰り返し劣化挙動
Title(English)	
著者(和文)	石田孝徳
Author(English)	Takanori Ishida
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9509号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:山田 哲,坂田 弘安,山中 浩明,河野 進,篠原 保二
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9509号, Conferred date:2014/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける  
角形鋼管柱の繰り返し劣化挙動

東京工業大学

石田 孝徳



# 目次

## 第1章 序論

- 1.1 研究の背景 .....1
- 1.2 既往の研究と課題 .....2
  - 1.2.1 構面内方向の挙動に関する研究 .....2
  - 1.2.2 2軸曲げ挙動に関する研究 .....3
- 1.3 研究の目的と論文の構成 .....4

## 第2章 一定軸力下で繰り返し軸曲げを受ける角形鋼管柱の劣化域における履歴モデル

- 2.1 はじめに .....9
- 2.2 角形鋼管柱の実験結果に関するデータベース .....10
- 2.3 劣化域における繰り返し履歴挙動 .....11
  - 2.3.1 検討の方針 .....11
  - 2.3.2 拡張骨格曲線 .....13
  - 2.3.3 劣化域における履歴挙動のモデル化 .....18
- 2.4 実験結果との比較による履歴モデルの検討 .....25
- 2.5 まとめ .....32

## 第3章 一定軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し載荷実験

- 3.1 はじめに .....35
- 3.2 平面載荷履歴の設定 .....35
  - 3.2.1 平面載荷履歴の設定の方針 .....35
  - 3.2.2 規則的な平面載荷履歴の設定 .....36
  - 3.2.3 ランダムな平面載荷履歴の設定 .....43

3.3	試験体とパラメーター	44
3.4	実験方法	45
3.5	実験結果	48
3.6	まとめ	58
<b>第4章</b>	<b>一定軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の解析</b>	
4.1	はじめに	61
4.2	水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の解析モデル	61
4.2.1	解析モデルの概要	61
4.2.2	MSモデルの設定の方針	62
4.2.3	要素バネの履歴モデルの設定	64
4.3	実験結果との比較による解析結果の検討	72
4.4	まとめ	85
<b>第5章</b>	<b>変動軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し载荷実験</b>	
5.1	はじめに	87
5.2	試験体とパラメーター	88
5.3	軸力の変動パターンの検討	89
5.3.1	応答解析結果の検討	89
5.3.2	軸力の変動パターンの設定	91
5.4	実験結果	92
5.5	まとめ	102
<b>第6章</b>	<b>変動軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の解析</b>	
6.1	はじめに	105
6.2	履歴モデルの概要	106
6.3	骨格曲線・拡張骨格曲線の設定	107
6.4	繰り返しに対する履歴モデル	108
6.4.1	最大耐力以前の履歴モデル	108
6.4.2	最大耐力以降の履歴モデル	108
6.5	実験結果との比較による解析結果の検討	110
6.6	まとめ	124
<b>第7章</b>	<b>結論</b>	<b>127</b>

付録

付録1 弾塑性要素にモデル化する領域の長さの検証 .....129

付録2 バウシंगाー部・耐力上昇部・除荷部における降伏軸力比の影響 .....131

本研究に関連した発表論文 .....133

謝辞

## 第1章

### 序論

#### 1.1 研究の背景

我が国では、直交する2方向に対して剛性、耐力が等しく、2方向ラーメン構造を容易に設計できるなどの理由から、角形鋼管は鋼構造建築の柱材として多く用いられている。

現行の耐震設計では、強震下において、骨組が梁崩壊形あるいはパネル崩壊形といった全体崩壊形のメカニズムとなるように設計することが原則となっている。一般的な中低層鉄骨造建物に多い冷間成形角形鋼管を柱に用いる場合では、全体崩壊形のメカニズムを実現するために必要な一般的な条件として、柱梁耐力比・柱パネル耐力比が「冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル」<sup>1.1)</sup>に示されている。柱梁耐力比・柱パネル耐力比は、柱にとって不利な条件となる斜め入力の影響や、柱軸力の変動に伴う柱の全塑性モーメントの低下、床スラブとの合成効果による梁の耐力上昇、鋼材の降伏点のばらつきなどを勘案して設定されているものであるが、これらの耐力比により必ずしも全体崩壊形のメカニズムが確実に保証されるわけではなく、柱にとって不利な条件が重なることで柱が塑性化することは十分考えられる。また、柱梁耐力比・柱パネル耐力比の影響因子として考えられるひずみ硬化に伴う梁及びパネルの耐力上昇については考慮されていない。実際、E-ディフェンスで行われた実大4層鉄骨造建物の完全崩壊実験<sup>1.2)-1.4)</sup>では、現行の設計・施工方法により製作された試験体建物が、設計レベル相当と考えられる入力に対しては全体崩壊形のメカニズムを形成し安定した挙動を示したが、設計レベルを大きく上回る入力に対しては崩壊メカニズムが1層における柱崩壊形に移行し、倒壊に至った。また、全体崩壊形のメカニズムにおいても、現在の耐震設計において有利な扱いとなる柱脚を降伏させない設計を行う場合では、1層の柱下端部には塑性ヒンジを形成する。

現在の耐震設計では、設計で想定する最大級の地震入力に対して、構成部材が最大耐力に至らない程度の範囲で耐震性能を発揮することで、安全性を確保するものとなっている。しかし、設計で想定する地震入力は、安全性だけでなくそれを実現するための経済負荷

などを勘案した社会的合意としての下限值であるため、自然現象である地震動のレベルがそれを上回ることは十分考えられる。実際、1995年兵庫県南部地震以降も、2000年鳥取県西部地震、2004年新潟県中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震などで設計レベルを上回る地震動が観測されている。現行の設計では、部材の性能を変形能力の下限值程度で抑えることで想定以上の地震入力に対する安全性を確保しているわけではあるが、設計レベルを超える入力に対して建物が倒壊に至るまでの過程と安全余裕度をどの程度有しているかは明らかとなっていない。

比較的靱性に富むと一般に考えられている鋼構造建築が過大な地震入力を受けて倒壊に至るのは、重力による荷重効果であるP- $\Delta$ 効果と構成部材が最大耐力に至った後に耐力劣化に転じることで層剛性が負となり、これに伴い大きな応答変位が相乗的に発生し、最終的に柱が復元力を喪失して自重を支持できなくなることによる。鋼構造建築を対象とした地震荷重下における倒壊を対象とした研究<sup>1.5)-1.7)</sup>などはこれまでも行われてきたが、2次元の挙動を扱った研究であること、構成部材の履歴モデルは最大耐力以降の劣化挙動が反映されていないか、反映されていたとしても実際の部材の挙動と対応付けられていないものであることから、現実的な結果を得られているのかは曖昧である。また、E-ディフェンスで行われた実大4層鉄骨造建物の完全崩壊実験<sup>1.2)-1.4)</sup>を受けて、立体骨組<sup>1.8)</sup>の解析が行われるようになってきたが、構成部材が最大耐力に至り劣化する大変形領域での3次元挙動に関する実験はほとんど行われていないことから、解析で用いる履歴モデルのキャリブレーションが限られたパラメータについてしか行われていないため、広範な条件に対する鋼構造建築の倒壊挙動の評価には至っていない。従って、鋼構造建築の3次元倒壊挙動を明らかにし、耐震安全余裕度を評価する上で、軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の最大耐力以降の劣化域を含む挙動を表現できるモデルを構築することは重要な課題である。

## 1.2 既往の研究と課題

### 1.2.1 構面内方向の挙動に関する研究

地震力は3次元の外力として作用し、建物は3次元的に挙動することから、柱は軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける。しかしながら、角形鋼管柱は構造性能の異方性が小さいこともあり、これまでは主として構面内方向の挙動に関する研究が行われてきた。

一方向荷重下における局部座屈発生以降の劣化域を含む履歴挙動を扱った研究としては、箱形断面部材の部材実験結果から一定軸力下における劣化域を含む荷重-変形関係をモデル化した加藤ら<sup>1.9),1.10)</sup>の研究がある。また、松井ら<sup>1.11)</sup>は、1軸曲げを受ける角形鋼管柱を対象に、最大耐力までを数値積分による面内解析、最大耐力以降を降伏線理論により荷重-変形関係の解析を行っている。山田ら<sup>1.12)</sup>は、短柱圧縮試験結果を統計的に処理して局部座屈に支配される短柱の劣化挙動をモデル化し、これを数値積分による面内解析において局部座屈が発生すると考えられる領域の圧縮応力下の挙動に適用することで、一定軸力下における角形鋼管柱の荷重-変形関係を劣化域に至るまで予測できることを示してい

る。さらに、変動軸力下で一方向荷重を受ける箱形断面鋼柱部材の劣化域を含む荷重-変形関係についても、降伏軸力比をパラメータとした一定軸力下で一方向荷重を受ける場合の荷重-変形関係の解析結果から、軸力履歴における対応点を結ぶことにより予測できることが示されている<sup>1.13)</sup>。このように、既往の研究により一定軸力の条件だけでなく変動軸力の条件においても、一方向荷重下の局部座屈発生に起因する劣化域を含む挙動を追跡できることが明らかとなっている。

一方、繰り返し曲げを受ける場合の劣化域を含む履歴挙動に関する研究は比較的多く行われているものの、その挙動を捉えることができる一般性のある履歴モデルについては構築されていない。孟ら<sup>1.14)</sup>は、H形断面、箱形断面部材の単調載荷実験及びオンライン実験を行うとともに、部材端の塑性化領域を複数の弾塑性バネとせん断バネからなる弾塑性要素に置き換えた弾塑性ジョイントモデルによる解析を行い、劣化域を含む繰り返し履歴挙動を追跡できることを示しているが、弾塑性軸バネの履歴モデルについては予め単調載荷実験を行いキャリブレーションする必要がある。桑村ら<sup>1.15)</sup>は、軸力が作用しない条件での幅厚比の比較的大きな角形鋼管柱を対象に、単調及び繰り返し載荷実験を行い、それに基づいて局部座屈発生に伴う耐力劣化を考慮した履歴モデルを作成している。Lignosら<sup>1.16)</sup>は、既往の角形鋼管柱の載荷実験に関するデータベースを作成し、それに基づき劣化域を含む履歴挙動を直接モデル化しているが、実験結果と履歴モデルの比較は一部のパラメータについてしか示されていないため、一般性のある履歴モデルであるかは不明である。これらの研究以外においても、角形鋼管柱の繰り返し劣化挙動を捉えるためのモデルが提案されているが<sup>1.17),1.18)</sup>など、広範な条件に適用可能な一般性のある履歴モデルが構築されているとは言い難い。

### 1.2.2 2軸曲げ挙動に関する研究

これまでの2軸曲げを受ける角形鋼管柱の履歴挙動に関する研究では、水平外力の作用方向を変化させた載荷実験<sup>1.11),1.15),1.19)-1.21)</sup>などが行われている。山田ら<sup>1.20)</sup>は、載荷方向をパラメータとして繰り返し載荷実験を行い、局部座屈発生により決まる最大耐力は載荷方向によらずほぼ同じとなり、劣化勾配については鋼管平板部と平行となる方向に載荷した場合の方が鋼管の対角線方向に載荷した場合よりも大きいことを確認している。五十嵐ら<sup>1.21)</sup>は、幅厚比の大きな角形鋼管柱を対象に、軸力が作用しない条件下で繰り返し載荷実験を行い、弾性局部座屈解析との比較を通して実験結果を考察している。

一方、地震荷重下のように、ランダムに水平外力の作用方向が変化する条件での角形鋼管柱の挙動を扱った研究は極めて少ない。杉浦ら<sup>1.22)</sup>は、長方形断面の角形鋼管柱を対象に、円形や正方形といった水平2方向の載荷履歴をパラメータとした繰り返し載荷実験を行い、水平2方向外力が復元力特性、塑性変形能力に及ぼす影響を検討している。陳ら<sup>1.23)</sup>は、3方向変動荷重を受ける箱形断面鋼柱のオンライン実験を行うとともに、実験結果との比較により弾塑性ジョイントモデルによる解析結果の検証をしているが、対象とした部材の幅厚比が小さいこともあり、局部座屈が発生する以前の挙動に関する検討に留まって

いる。

このように、軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の劣化域を含む挙動を追跡できる履歴モデルは構築されておらず、また、履歴モデルのバックデータとなる3次元外力を受ける部材の大変形繰り返し载荷実験についてもほとんど行われていない。

### 1.3 研究の目的と論文の構成

中小規模の鋼構造建築の柱材として多く用いられる冷間ロール成形角形鋼管を対象に、軸方向と水平2方向の複合荷重下における角形鋼管柱の局部座屈発生に起因する劣化域を含む挙動を追跡できるモデルを構築することを本研究の目的とする。

本論文は本章第1章を含め全7章で構成される。

第2章では、3次元荷重下の複雑な挙動をモデル化する上で基本となる、一定軸力下で構面内方向の繰り返し荷重を受ける角形鋼管柱の劣化挙動について検討を行う。そのためにまず、参照できる実験結果の多い既往の角形鋼管柱の構面内方向の载荷実験結果に関するデータベースを構築し、これに基づき、一定軸力下で繰り返し1軸曲げを受ける場合の局部座屈発生以降の劣化域における履歴モデルを構築する。

第3章及び第4章では、構面内挙動から水平2方向挙動へと研究を拡張し、水平2方向挙動に関する研究の第一段階として、一定軸力の条件を対象に、水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の最大耐力以降の劣化域を含む挙動を検討する。

第3章では、解析のキャリブレーションのため、一定軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し载荷実験を行い、局部座屈発生に起因する劣化域を含む挙動に関するデータを得る。また、水平2方向载荷実験の主なパラメーターである水平2方向の载荷履歴の設定方法を述べる。

第4章では、一定軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の劣化域を含む挙動の解析について述べる。解析モデルは、変動軸力の影響を考慮した解析にも適用可能な、塑性化領域の断面を複数の弾塑性軸バネに置き換えたMS(Multi Spring)モデルとし、弾塑性軸バネの履歴モデルを第2章の1軸曲げの条件における局部座屈を伴う角形鋼管柱の劣化挙動のモデルを基に構築する。また、第3章の実験結果と、構築した履歴モデルを適用したMSモデルによる解析結果を比較し、最大耐力以降の劣化域を含む挙動を追跡できるか検証する。

第5章及び第6章では、変動軸力の条件における挙動に研究を展開し、変動軸力下で水

平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の劣化域を含む挙動を検討する。

第 5 章では、解析のキャリブレーションのため、転倒モーメントによる変動軸力を受ける多層骨組の下層部外柱を想定し、変動軸力下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し載荷実験を行い、局部座屈発生に起因する劣化域を含む挙動に関するデータを得る。また、本実験の主なパラメーターである軸力の変動パターンの設定方法について述べる。

第 6 章では、変動軸力下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の劣化域を含む挙動の解析について述べる。変動軸力の影響を反映させるため、一定軸力下の条件における MS モデルの弾塑性軸バネの履歴モデルを修正する。また、第 5 章の実験結果と、修正した履歴モデルを適用した MS モデルによる解析結果を比較し、最大耐力以降の劣化域を含む挙動を追跡できるか検証する。

第 7 章では、各章で得られた研究成果を取りまとめ、本研究の結論として示す。

#### [参考文献]

- 1.1)日本建築センター：2008 年版 冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル，2008
- 1.2)吹田啓一郎，松岡祐一，山田 哲，島田侑子，多田元英，笠井和彦：震動台実験の概要と弾性応答特性 -実大 4 層鉄骨造建物の完全崩壊実験 その 1-，日本建築学会構造系論文集 第 635 号，pp.157-166，2009.1
- 1.3)山田 哲，吹田啓一郎，松岡祐一，島田侑子：震動台実験における弾塑性応答特性と崩壊メカニズムの形成 -実大 4 層鉄骨造建物の完全崩壊実験 その 2-，日本建築学会構造系論文集 第 644 号，pp.1851-1859，2009.10
- 1.4)島田侑子，吹田啓一郎，山田 哲，松岡祐一，多田元英，大崎 純，笠井和彦：震動台実験における倒壊挙動 -実大 4 層鉄骨造建物の完全崩壊実験 その 3-，日本建築学会構造系論文集 第 653 号，pp.1351-1360，2010.7
- 1.5)加藤 勉，秋山 宏：地震時におけるせん断型多層骨組の倒壊条件，日本建築学会論文報告集 第 244 号，pp.33-39，1976.6
- 1.6)小川厚治，黒羽啓明，待鳥賢治，馬淵信一郎：劣化域を考慮した鋼構造物のエネルギー吸収能力の評価基準に関する一考察，日本建築学会構造系論文集 第 492 号，pp.113-119，1997.2
- 1.7)向出静司，元木洗介，北川智也，多田元英：局部座屈による耐力劣化を考慮した多層鋼構造ラーメン骨組の倒壊解析，日本建築学会構造系論文集 第 685 号，pp.579-588，2013.3
- 1.8)堀本明伸，多田元英，玉井宏章，大神勝城，桑原 進，三谷 淳：実大 4 層鉄骨建物の統合化構造解析システムによる立体倒壊解析，構造工学論文集，Vol.55B，pp.277-283，



2009.3

- 1.9)加藤 勉, 秋山 宏, 北沢 進: 局部座屈を伴う箱形断面部材の変形, 日本建築学会論文報告集 第 268 号, pp.71-76, 1978.6
- 1.10)加藤 勉, 秋山 宏, 北沢 進, 桂井史郎: 箱形断面部材の塑性変形能力に関する実験的研究(その 3 冷間成形箱形断面部材の場合), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1309-1310, 1978.9
- 1.11)松井千秋, 森野捷輔, 津田恵吾ほか: 角形鋼管柱の局部座屈後挙動について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1155-1156, 1980.9 / (その 2)日本建築学会中国・九州支部研究報告集, pp.273-276, 1981.3 / (その 3)(その 4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2093-2096, 1981.9 / (その 5), 日本建築学会九州支部研究報告集, pp.241-244, 1982.3 / (その 6), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1365-1366, 1983.9
- 1.12)山田 哲, 秋山 宏, 桑村 仁: 局部座屈を伴う箱形断面鋼部材の劣化域を含む終局挙動, 日本建築学会構造系論文報告集 第 444 号, pp.135-143, 1993.2
- 1.13)山田 哲, 秋山 宏, 桑村 仁: 局部座屈を伴う箱形断面鋼柱部材の変動軸力下における終局挙動, 日本建築学会構造系論文報告集 第 461 号, pp.115-122, 1994.7
- 1.14)孟 令樺, 大井謙一, 高梨晃一: 鉄骨骨組地震応答解析のための耐力劣化を伴う簡易部材モデル, 日本建築学会構造系論文報告集 第 437 号, pp.115-124, 1992.7
- 1.15)桑村 仁, 伊山 潤, 朱 大立: 局部座屈劣化系の地震による倒壊および残留変形, 日本建築学会構造系論文集 第 526 号, pp.169-176, 1999.12
- 1.16)D. G. Lignos, H. Krawinkler and F. Zareian: Modeling of Component Deterioration for Collapse Prediction of Steel Moment Frame, Proc. of Stessa 2009, pp.403-409, 2009.8
- 1.17)山田 稔, 河村 廣, 谷 明勲, 山中耕一: 複曲率交番繰り返し曲げを受ける角形鋼管柱の弾塑性変形ならびに崩壊性状に関する研究(I)日本建築学会近畿支部研究報告集 第 24 号・構造系, pp.381-384, 1984.6 / (II)日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系, pp.1347-1348, 1984.10 / (III)日本建築学会近畿支部研究報告集 第 25 号・構造系, pp.469-472, 1985.5 / (IV)日本建築学会大会学術講演梗概集 C 分冊, pp.679-680, 1985.10 / (V)日本建築学会近畿支部研究報告集 第 26 号・構造系, pp.409-412, 1986.5 / (VI)日本建築学会大会学術講演梗概集 C 分冊, pp.1109-1110, 1986.8
- 1.18)安井信行: 箱形断面柱の局部座屈挙動解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1 分冊, pp.645-646, 2007.8
- 1.19)小島大輔, 齋藤裕一郎, 島田侑子, 山田 哲: 二軸曲げを受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動 その 1. 実験及び有限要素解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.591-592, 2009.8
- 1.20)山田 哲, 島田侑子: 載荷方向を変化させた角形鋼管柱の繰り返し載荷実験、第 13 回日本地震工学シンポジウム、2010.11
- 1.21)五十嵐規矩夫, 佐藤公亮: 冷間成形角形鋼管部材の繰返し二軸曲げ挙動と幅厚比制限, 鋼構造年次論文集 第 20 巻, pp.711-716, 2012.11

- 1.22)杉浦邦征, ウォルター・オヤワ, 渡邊英一: 繰り返し水平 2 方向力を受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動, 第 3 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, 土木学会, pp.97-103, 1999.11
- 1.23)陳 以一, 大井謙一, 高梨晃一: 3 方向変動荷重を受ける箱形断面鋼柱の弾塑性挙動, 日本建築学会構造系論文報告集 第 447 号, pp.139-148, 1993.5

軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰り返し劣化挙動

## 第2章

### 一定軸力下で繰り返し1軸曲げを受ける 角形鋼管柱の劣化域における履歴モデル

#### 2.1 はじめに

柱の履歴挙動に関する研究はこれまでも数多く行われている。履歴挙動の検討方法の一つに、繰り返し荷重下における最大耐力までの挙動を初めて到達する荷重領域の履歴曲線である骨格曲線とバウシンガー部に分解して検討する方法がある<sup>2.1)</sup>など。ここで骨格曲線は一方向荷重下における荷重-変形関係と対応することから、この方法には一義的に部材の変形性能が評価できるという利点がある。この方法に属する研究としては、角形鋼管柱の一般的な最大耐力決定要因である局部座屈に対して、一方向荷重下における荷重-変形関係を最大耐力以降の劣化域も含めて解析する方法が提案されている<sup>2.2)</sup>。また、軸力が極めて小さな場合に限定された研究ではあるが、幅厚比の比較的大きな角形鋼管柱の劣化域における繰り返し履歴挙動に関する検討も行われているものの<sup>2.3)</sup>、軸力が作用する一般的な条件下での劣化域における繰り返し履歴挙動に関する検討はなされていない。

もちろん、劣化域を含む角形鋼管柱の繰り返し履歴挙動に関する研究がこれまで全く行われていない訳ではなく、繰り返し載荷実験結果に基づく履歴挙動のモデル化や<sup>2.4)</sup>、断面を複数の軸バネに置き換えたモデルによる劣化域まで含めた繰り返し履歴挙動の追跡などが行われている<sup>2.5),2.6)</sup>など。しかしながら、骨格曲線とバウシンガー部に分解する方法は、一方向荷重下における荷重-変形関係という一義的に性能が定義できる特性を基本にしているという点で明快であり、この方法の中で軸力が作用する一般的な条件下での劣化域における繰り返し履歴挙動を検討することは、部材の変形能力評価との対応付けという観点で重要な課題である。

第2章では、角形鋼管柱に関する既往の繰り返し載荷実験の結果のデータベースを構築し、これに基づき最大耐力以降の劣化域を含む繰り返し履歴挙動について骨格曲線とバウシンガー部に分解する方法に基づく検討を行い、繰り返し劣化挙動のモデル化を行う。

## 2.2 角形鋼管柱の実験結果に関するデータベース

角形鋼管柱の劣化域における繰り返し履歴挙動を検討するため、既往の部材実験結果のデータベースを構築した。データベースには筆者らがこれまでに行ってきた実験に加え、既往の論文から荷重-変形関係をスキャナーで読み取りデジタル化したものを用いた。データベースの一覧を表 2.1 に、データベースを構成する試験体の幅厚比と降伏軸力比の分布を図 2.2 に示す。データベースでは、試験体に作用する曲げモーメントを、軸力が作用しない場合の全塑性モーメント  $M_p$  で、部材角を  $M_p$  に対応する弾性部材角の計算値  $\theta_p$  でそれぞれ除して整理した。

表 2.1 データベースの一覧

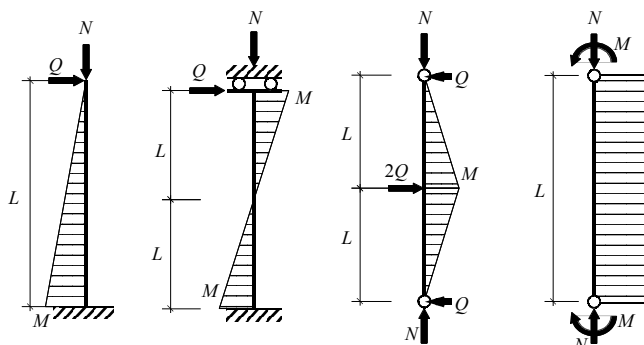
No	試験体名	文献	断面 $D \times D \times t$	幅厚比	$L^*$ (mm)	$L/D$	鋼種	降伏点 ( $N/mm^2$ )	降伏比 (%)	降伏 軸力比	載荷パターン	載荷形式 <sup>*4</sup>
1	繰り返し載荷(1サイクル)	2.7)	□-125×125×4.5	27.8	742	5.9	STKR400	367	84	0.0	漸増変位振幅	(c)
2	繰り返し載荷(2サイクル)	2.7)	□-125×125×4.5	27.8	742	5.9	STKR400	367	84	0.0	漸増変位振幅	(c)
3	0°試験体	2.8)	□-300×300×9	33.3	1443	4.8	BCR295	330	78	0.15	漸増変位振幅	(a)
4	0°漸増試験体	2.9)	□-300×300×9	33.3	1463	4.9	BCR295	330	78	0.14	漸増変位振幅	(a)
5	0°漸減試験体	2.9)	□-300×300×9	33.3	1463	4.9	BCR295	330	78	0.14	漸減変位振幅	(a)
6	Col16inc	2.10)	□-60×60×1.6	37.5	452.5	7.5	STKR400	427	89	0.0	漸増変位振幅	(c)
7	Col16dec	2.11)	□-60×60×1.6	37.5	452.5	7.5	STKR400	427	89	0.0	漸減変位振幅	(c)
8	Col32inc	2.10)	□-60×60×3.2	18.8	452.5	7.5	STKR400	400	87	0.0	漸増変位振幅	(c)
9	Col32dec	2.10)	□-60×60×3.2	18.8	452.5	7.5	STKR400	400	87	0.0	漸減変位振幅	(c)
10	L/D=8.0	2.12)	□-125×125×4.5	27.8	500	4.0	STKR400	436 <sup>*3</sup>	—	0.2	漸増変位振幅	(b)
11	L/D=4.8	2.12)	□-125×125×4.5	27.8	300	2.4	STKR400	436 <sup>*3</sup>	—	0.4	漸増変位振幅	(b)
12	As-delivered Cyclic I	2.13)	□-100×100×3.2	31.3	400 <sup>*2</sup>	∞	STKR400	437	87	0.0	漸増変位振幅	(d)
13	As-delivered Cyclic I	2.13)	□-100×100×4.5	22.2	400 <sup>*2</sup>	∞	STKR400	452	88	0.0	漸増変位振幅	(d)
14	S-3303	2.14)	□-200×200×6	33.3	1265	6.3	STKR400	380	82	0.3	漸増変位振幅	(a)
15	S-3301	2.14)	□-200×200×6	33.3	1265	6.3	STKR400	380	82	0.1	漸増変位振幅	(a)
16	C-9010	2.15)	□-200×200×6	33.3	1344	6.7	STKR400	351	79	0.0	一定変位振幅	(c)
17	C-9020	2.15)	□-200×200×6	33.3	1344	6.7	STKR400	351	79	0.0	一定変位振幅	(c)
18	C-9030	2.15)	□-200×200×6	33.3	1344	6.7	STKR400	351	79	0.0	一定変位振幅	(c)
19	253c	2.16)	□-150×150×6	25.0	750	5.0	STKR400	456	88	0.3	漸増変位振幅	(a)
20	331c	2.16)	□-150×150×4.5	33.3	750	5.0	STKR400	440	88	0.1	漸増変位振幅	(a)
21	335c	2.16)	□-150×150×4.5	33.3	750	5.0	STKR400	440	88	0.45	漸増変位振幅	(a)
22	t=4.5, δa=30	2.6)	□-125×125×4.5	27.8	750	6.0	STKR400	366	82	0.3	一定変位振幅	(b)
23	t=4.5, δa=45	2.6)	□-125×125×4.5	27.8	750	6.0	STKR400	366	82	0.3	一定変位振幅	(b)
24	t=3.2, δa=20	2.6)	□-125×125×3.2	39.1	750	6.0	STKR400	411	87	0.3	一定変位振幅	(b)
25	t=3.2, δa=30	2.6)	□-125×125×3.2	39.1	750	6.0	STKR400	411	87	0.3	一定変位振幅	(b)
26	t=6.0, δa=45	2.6)	□-125×125×6.0	20.8	750	6.0	STKR400	345	78	0.3	一定変位振幅	(b)
27	t=6.0, δa=60	2.6)	□-125×125×6.0	20.8	750	6.0	STKR400	345	78	0.3	一定変位振幅	(b)
28	t=6.0, δa=75	2.6)	□-125×125×6.0	20.8	750	6.0	STKR400	345	78	0.3	一定変位振幅	(b)

\*1 片持梁に置き換えた場合の曲げスパン(図 2.1 参照)

\*2 純曲げ形式の実験であり、試験部長さ(図 2.1 参照)

\*3 短柱圧縮試験結果

\*4 図 2.1 参照 (a)片持梁形式, (b)複曲率曲げ形式, (c)3点曲げ形式, (d)純曲げ形式



(a)片持梁 (b)複曲率曲げ (c)3点曲げ (d)純曲げ

図2.1 载荷条件

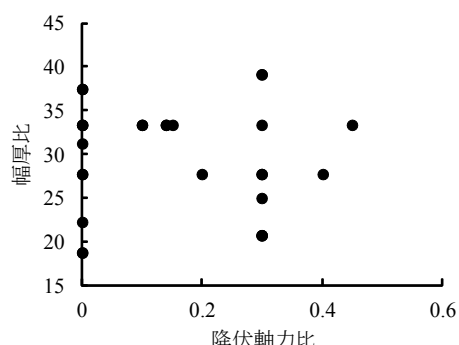


図2.2 幅厚比と降伏軸力比の分布

## 2.3 劣化域における繰り返し履歴挙動

### 2.3.1 検討の方針

繰り返し载荷を受ける鋼部材の履歴挙動について、最大耐力までの挙動については図2.3(1)に示すように、初めて到達する荷重領域の履歴曲線である骨格曲線と繰り返し中の再負荷領域であるバウシंगाー部および弾性除荷部に分解できる<sup>2.1)</sup>。このうち骨格曲線を繋ぎ合わせた累積の履歴曲線は一方向荷重下における荷重-変形関係と対応するという経験則があり<sup>2.17)</sup>、バウシंगाー部については経験した骨格曲線での累積塑性変形と降伏軸力比の関数で表されるバイリニア型の履歴モデルが提案されている<sup>2.1)</sup>。

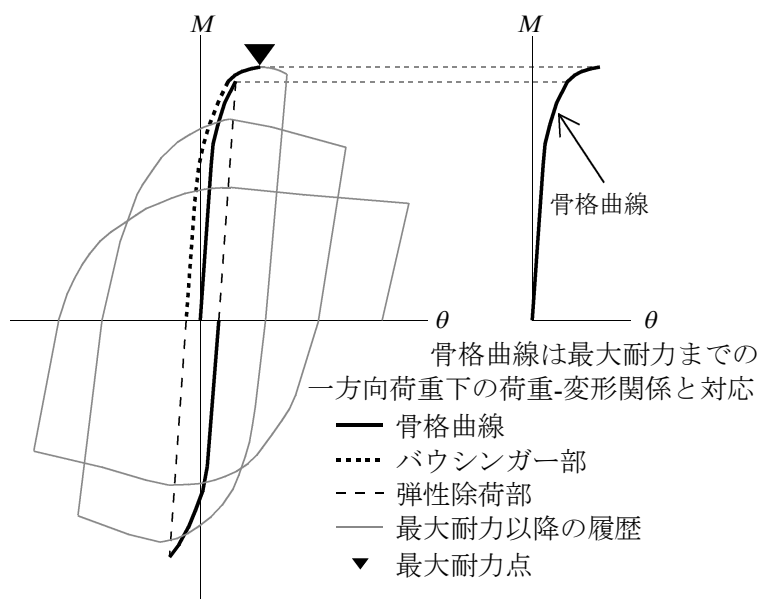
一方、局部座屈発生により決まる最大耐力以降の劣化域を含む鋼部材の履歴挙動全体を見た場合、正負それぞれの荷重領域における半サイクル毎の履歴曲線を順次繋ぎ合わせた累積曲線の包絡線が、一方向荷重下における履歴曲線と対応するという経験則もある<sup>2.18)</sup>など。この経験則を最大耐力以前の挙動に適用するとバウシंगाー部が累積曲線に含まれることになり、前述の最大耐力以前の履歴挙動に関する経験則と対応しない。なお、この経験則の裏付けとなっている実験では、繰り返し载荷を行った試験体における最大耐力に至るまでの累積変形は小さく、累積曲線の大部分が最大耐力以降の挙動となっている。

本研究ではこれら既往の経験則を基に、図2.3(2)に示すように、

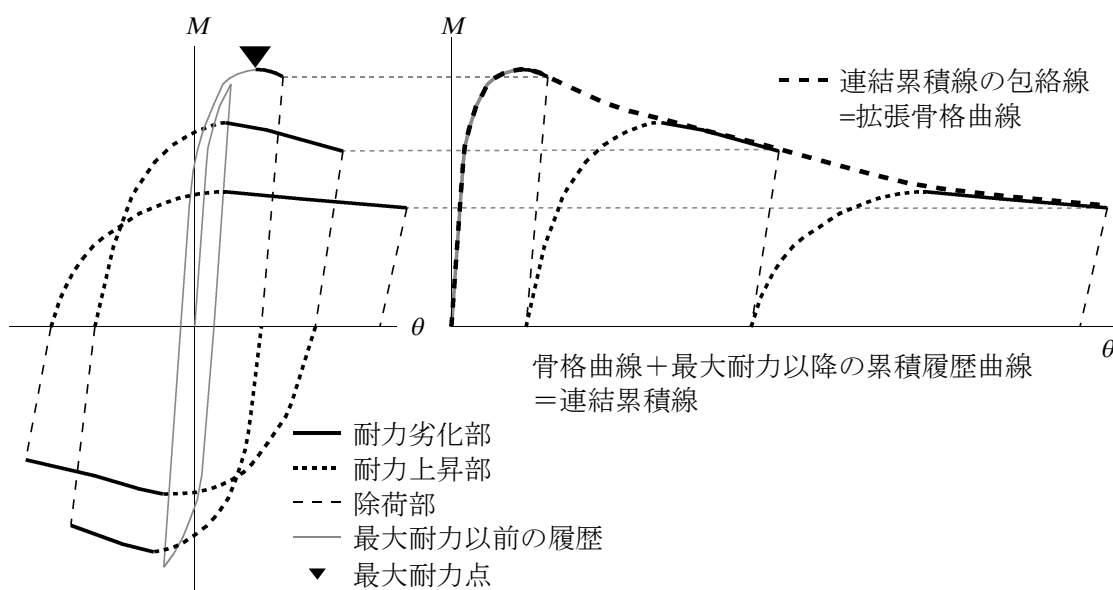
- ①最大耐力までの履歴挙動については骨格曲線を繋ぎ合わせる。
- ②最大耐力以降の履歴挙動については、半サイクル毎の履歴曲線を順次繋ぎ合わせた累積曲線をとる。
- ③①と②を繋ぎ合わせる。本論文ではこれを連結累積線と定義する。
- ④連結累積線の包絡線を拡張骨格曲線と定義する。

とし、拡張骨格曲線が一方向荷重下における荷重-変形関係と対応すると考えて以後の検討を進める。

最大耐力以降の繰り返し履歴挙動については、図 2.3(2)に示すように、正負それぞれの荷重領域における半サイクル毎の履歴曲線を、半サイクルにおけるピーク荷重に到達するまでの領域である耐力上昇部、ピーク荷重以降除荷開始点に至るまでの領域である耐力劣化部、除荷開始点から荷重が 0 となるまでの領域である除荷部に分解する。このうち耐力上昇部については、拡張骨格曲線に復帰するまでの非線形領域と捉える。



(1)最大耐力以前

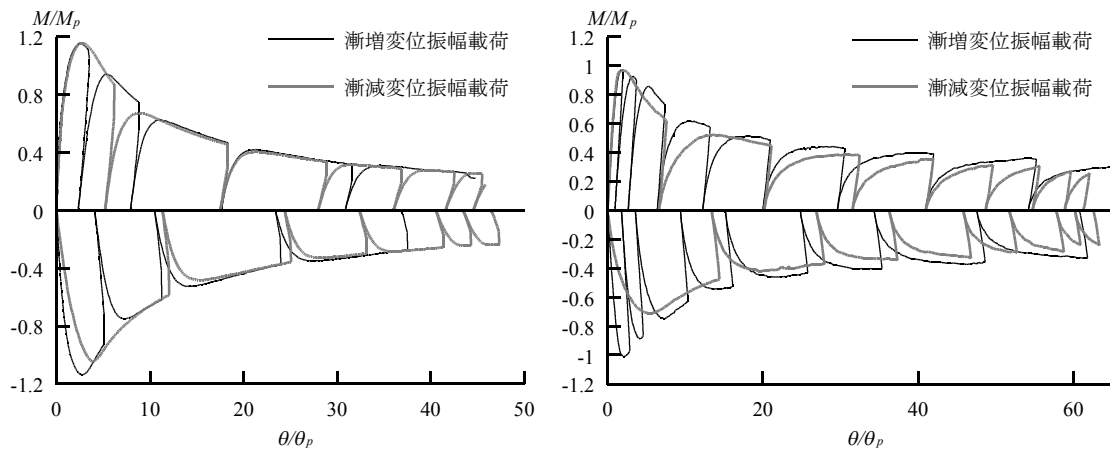


(2)最大耐力以降

図2.3 履歴曲線の分解と骨格曲線・拡張骨格曲線

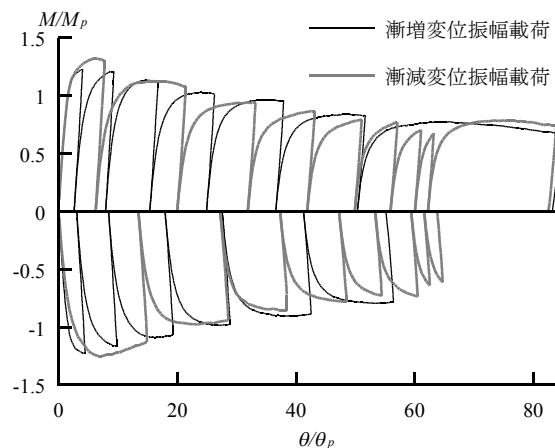
### 2.3.2 拡張骨格曲線

本節ではまず、連結累積線の包絡線である拡張骨格曲線が、载荷履歴以外の条件が同じであれば、载荷履歴によらずほぼ同じ曲線となることを確認する。データベースの実験の中で、漸増変位振幅、漸減変位振幅と载荷履歴をパラメーターとした No.4,5 と No.6,7、No.8,9 について、連結累積線を比較し図 2.4(1)~(3)に示す。いずれの場合も対応は良く、载荷履歴によらず同一の包絡線で代表することができることがわかる。次に、一方向载荷実験も行われている試験体について、拡張骨格曲線のベースとなる連結累積線と一方向载荷の結果と比較し図 2.5(1)~(12)に示す。一方向载荷による荷重-変形関係は、連結累積線の包絡線と対応している。図 2.4(1)~(3)に示した漸減変位振幅载荷の最初の半サイクルも一方向载荷と同じであり、これらも連結累積線の包絡線と対応している。以上より、連結累積線の包絡線である拡張骨格曲線は、一方向载荷を行った場合の荷重-変形関係で代表できることがわかる。



(1)No.4,5 の比較

(2)No.6,7 の比較

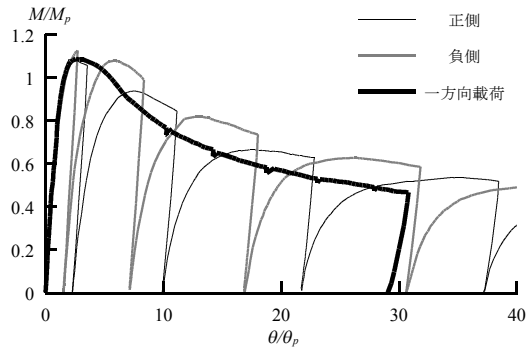


(3)No.8,9 の比較

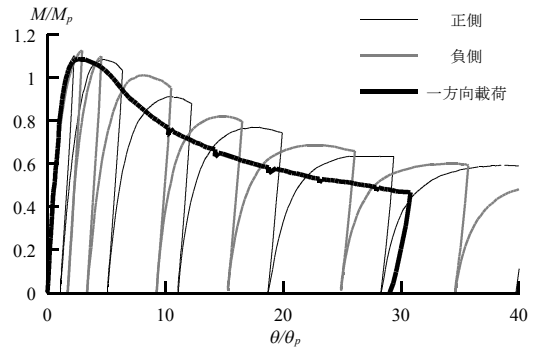
図2.4 载荷履歴についての比較



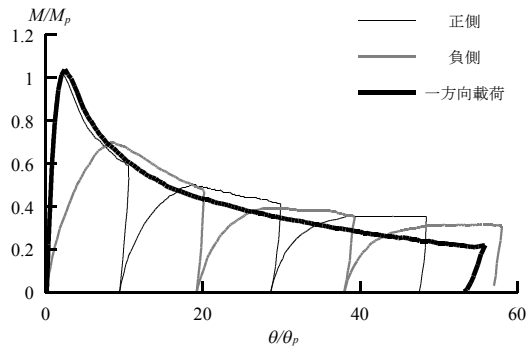
軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰り返し劣化挙動



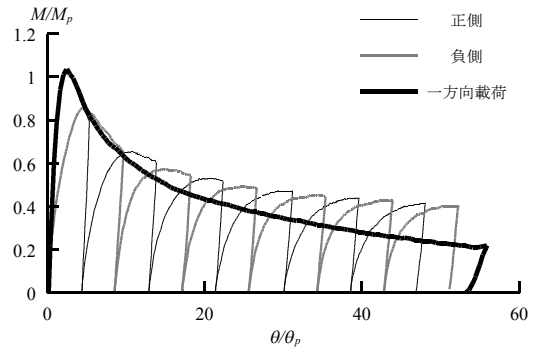
(1)No.1(降伏軸力比 0.0, 幅厚比 27.8)



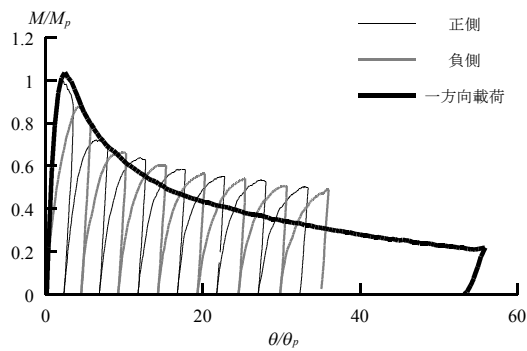
(2)No.2(降伏軸力比 0.0, 幅厚比 27.8)



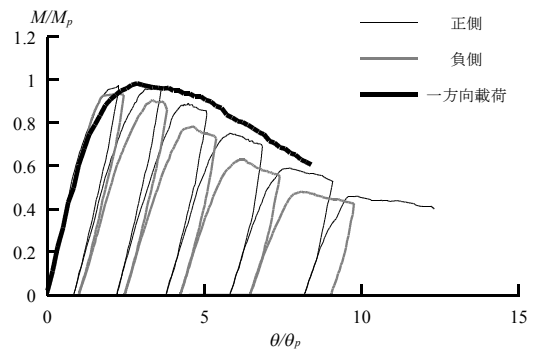
(3)No.16(降伏軸力比 0.0, 幅厚比 33.3)



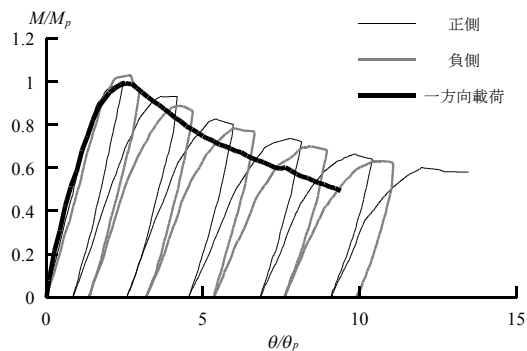
(4)No.17(降伏軸力比 0.0, 幅厚比 33.3)



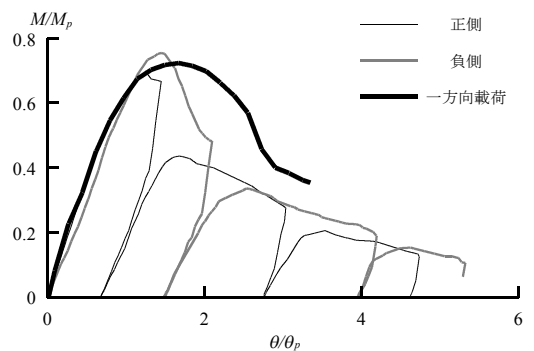
(5)No.18(降伏軸力比 0.0, 幅厚比 33.3)



(6)No.19(降伏軸力比 0.3, 幅厚比 25.0)



(7)No.20(降伏軸力比 0.1, 幅厚比 33.3)



(8)No.21(降伏軸力比 0.45, 幅厚比 33.3)

図2.5 一方向載荷との比較

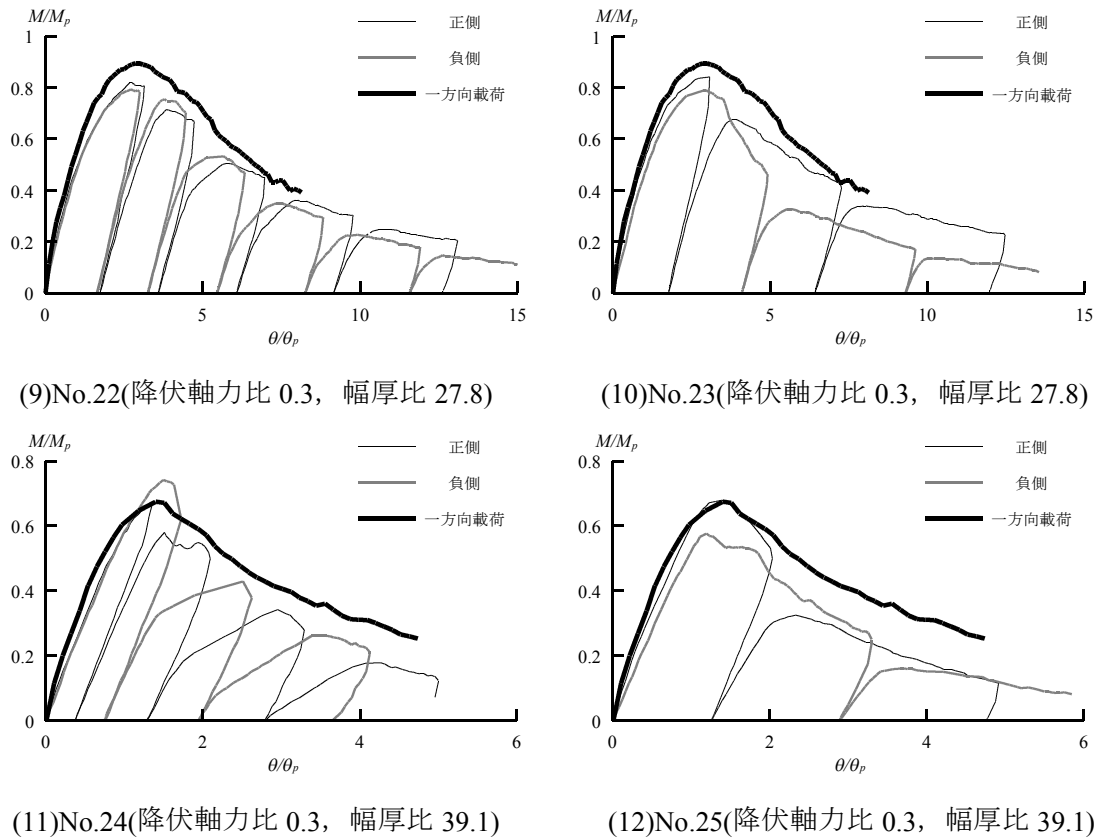


図2.5 一方向載荷との比較(続き)

次に、拡張骨格曲線の予測方法について述べる。繰り返し荷重下における拡張骨格曲線としては、①実験結果に基づきモデル化したものを用いる。あるいは、②一方向荷重下における荷重-変形関係を解析して用いることが考えられる。解析を行う場合においても、有限要素法を用いた解析や極限解析に基づく解析など様々な手法が考えられるが、本研究では文献 2.2)における解析方法に基づき、角形鋼管柱の荷重-変形関係を予測する。この解析方法は、まず図 2.6 に示すように、短柱圧縮試験の結果に基づき、局部座屈が発生した領域における応力度-平均軸歪度関係について、局部座屈発生によって決まる最大耐力点までの歪塑性率  $\mu_0$  と劣化第 1 勾配  $E_{a1}$  および劣化第 2 勾配  $E_{a2}$  で表される劣化挙動をモデル化し、これを数値積分による面内解析<sup>2.19),2.20)</sup>において局部座屈が発生すると考えられる領域の圧縮応力下の挙動に適用することで、一定軸力と一方向曲げを受ける角形鋼管柱の荷重-変形関係を最大耐力以降の劣化域まで予測するものである。

データベースの中から、降伏軸力比と幅厚比の異なる試験体を抽出し、連結累積線と解析結果を比較したものを図 2.7(1)~(6)に示す。図中、黒太実線が文献 2.2)における解析方法による予測結果である。ここで、解析に用いた応力度-ひずみ度関係は、圧縮側については図 2.8 に示すように、既往の冷間ロール成形角形鋼管の短柱圧縮試験結果<sup>2.21)</sup>から黒太実線でモデル化したものを最大耐力までの応力度-ひずみ度関係として用い、引張側については、材料の体積一定の仮定及び真応力度-真ひずみ度関係の引張側と圧縮側での対

称性の仮定の下で、モデル化した圧縮側の応力度-ひずみ度関係を引張側に変換したものをを用いる。解析結果は最大耐力以降ある程度耐力が低下するまでは、連結累積線と良い対応を示しているが、降伏軸力比が小さな場合には、変形が大きな領域で解析結果では劣化第2勾配における剛性のまま復元力を喪失しているのに対し、実験結果の累積曲線では劣化が緩やかとなり、大きな変形能力を示している。文献 2.2)の解析方法は、繰り返し載荷で得られる大きな累積変形までは対応できていない。

これは文献 2.2)では、短柱圧縮試験結果に基づき圧縮応力下の劣化挙動をモデル化しているが、モデル化に用いた試験結果は、最大耐力以降耐力が 2~3 割低下して剛性が安定するあたりまでのものであり、解析結果の検証も一方向載荷実験結果との比較によるためである。一方向載荷実験では、実験装置の可動範囲の制約などにより、繰り返し載荷による累積変形に比べ、かなり小さな変形領域までの実験しかできないことから、大変形領域における検討はできていなかった。そこで本研究では、データベースの実験結果を参考に、文献 2.2)の圧縮応力下における劣化域のモデルに、式(2.1)で表される劣化第3勾配  $E_{d3}$  と、式(2.2)で表される劣化第2勾配から劣化第3勾配への遷移点  $T_2$  を追加した。

$$E_{d3} / E = -0.001 \quad (2.1)$$

$$T_2 / T = 0.9 \quad (2.2)$$

ここで、 $E$  : ヤング率

図 2.6 中にも  $E_{d3}$  と  $T_2$  を追加して示す。図 2.7 中には、解析結果において劣化第3勾配に対応する部分を黒破線で示している。劣化第3勾配を追加したことで、繰り返し荷重を受ける角形鋼管柱の拡張骨格曲線が予測できるようになったと言える。

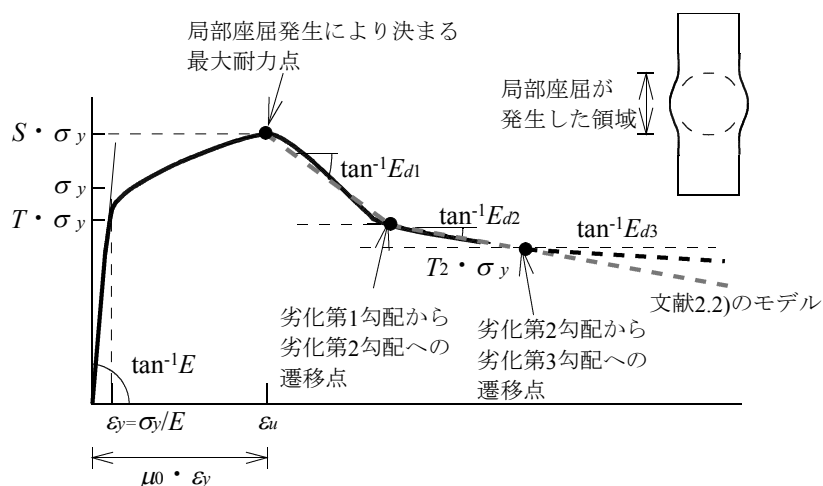
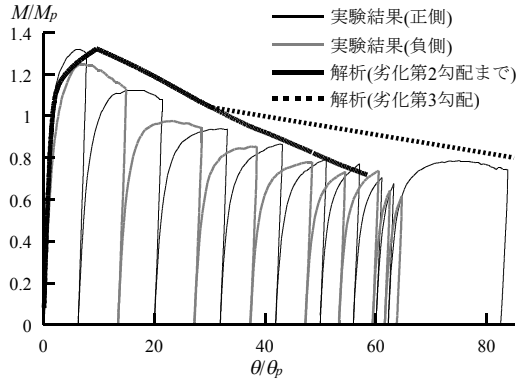
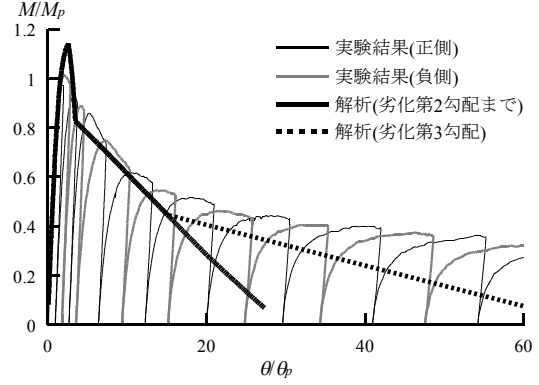


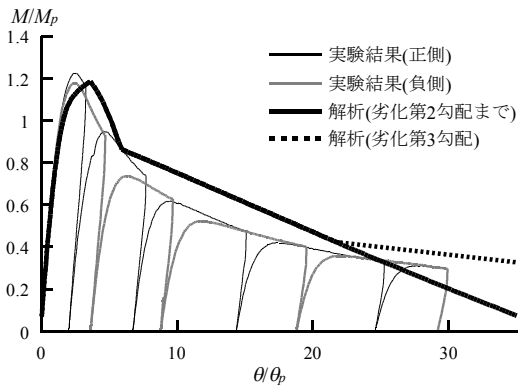
図2.6 短柱の局部座屈が発生した領域における応力度-ひずみ度関係のモデル化



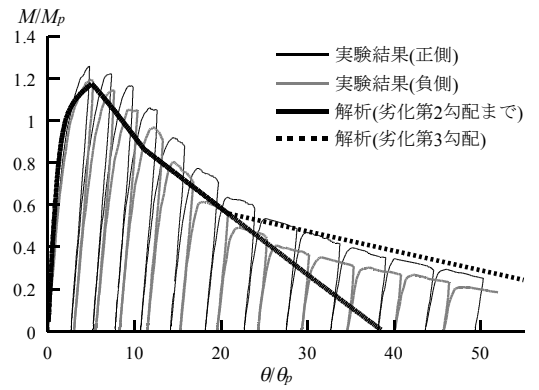
(1)No.9(降伏軸力比 0.0 幅厚比 18.8)



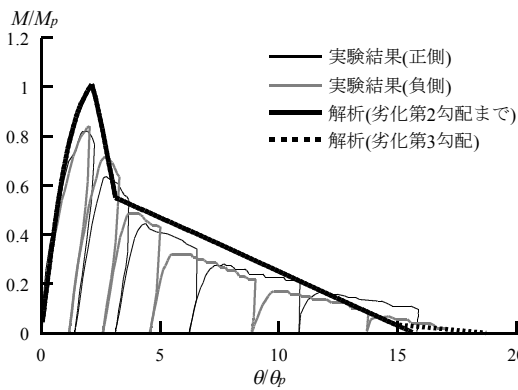
(2)No.6(降伏軸力比 0.0 幅厚比 37.5)



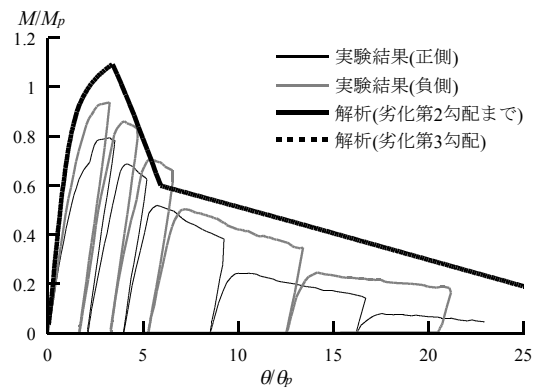
(3)No.3(降伏軸力比 0.15 幅厚比 33.3)



(4)No.26(降伏軸力比 0.3 幅厚比 20.8)



(5)No.14(降伏軸力比 0.3 幅厚比 33.3)



(6)No.11(降伏軸力比 0.4 幅厚比 27.8)

図2.7 一方向荷重下における荷重-変形関係の解析結果と連結累積線の比較

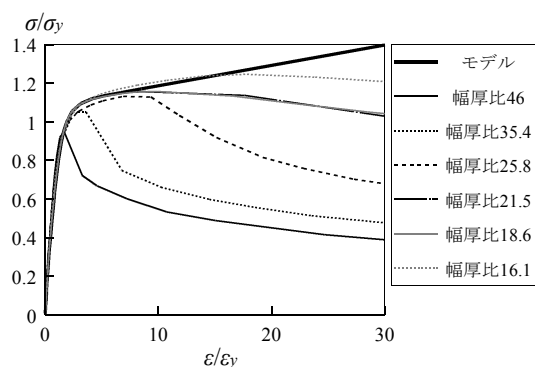


図2.8 圧縮側の応力度-ひずみ度関係と短柱圧縮試験結果<sup>2.21)</sup>

### 2.3.3 劣化域における履歴挙動のモデル化

#### ・モデル化の概要

劣化域における挙動について、負側荷重領域の耐力劣化部から除荷し、正側荷重領域において剛性が負となる部分までを含む比較的振幅の大きな1サイクル分の履歴挙動を例に、図2.9に示す。比較的振幅が大きな半サイクルの履歴は、2.3.1でも述べたように、半サイクルにおけるピーク荷重に到達するまでの領域である耐力上昇部、ピーク荷重以降除荷開始点に至るまでの領域である耐力劣化部、除荷開始点から荷重が0となるまでの領域である除荷部に分解できる。耐力劣化部は2.3.2で検討したように拡張骨格曲線の一部と対応することから、以下では除荷部と耐力上昇部についてモデル化する。ここで、漸増変位振幅载荷などの载荷履歴で行われる一般的な部材実験で得られる履歴曲線は、耐力劣化部まで変形が進行した後に载荷方向が反転する、比較的振幅が大きな場合に対応する。一方、地震時の応答を考えると、耐力上昇部の途中で载荷方向が反転する小振幅での履歴が多く含まれることになる。そこで耐力上昇部における挙動については、比較的振幅が大きい「耐力劣化部で载荷方向が反転する場合」と、比較的振幅の小さい「耐力上昇部の途中で载荷方向が反転する場合」に分け、多くの実験結果が得られている前者について、実験結果に基づくモデル化を行う。実験結果の乏しい後者については、連結累積線の包絡線が拡張骨格曲線と対応することと、比較的振幅の大きな場合の履歴モデルに基づく推定により、モデル化を行う。

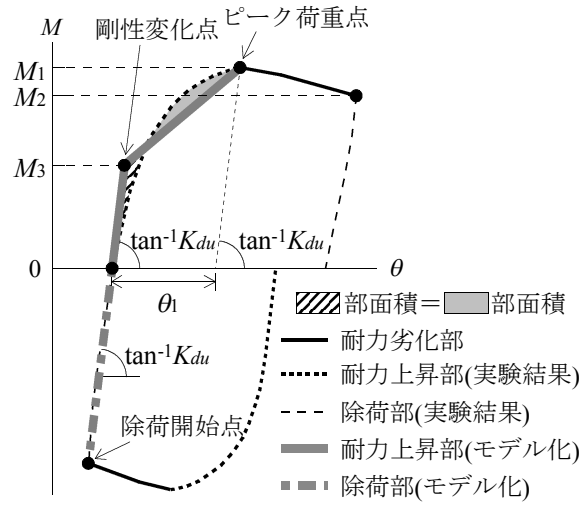


図2.9 劣化域における1サイクルの履歴

・ 除荷部のモデル化

劣化域における除荷剛性は、変形の進展に伴い低下する。本研究では、除荷部での挙動は線形であると仮定して、劣化域における除荷剛性の低下をモデル化する。最大耐力以降の各半サイクルでの除荷開始点と荷重が 0 となるときの点を直線で繋いだときの除荷部の剛性  $K_{du}$  を弾性剛性  $K_e$  で除した  $K_{du}/K_e$  について、図 2.10 に示す骨格曲線における累積塑性変形量  $\sum|\theta_s|$  と除荷開始点に至るまでに経験した最大耐力以降の劣化域での累積変形量  $\sum|\theta_d'|$  の和  $\sum|\theta_s| + \sum|\theta_d'|$  との関係で整理し、 $\sum|\theta_s| + \sum|\theta_d'|$  を軸力が作用しない場合の全塑性モーメントに対応する弾性部材角の計算値  $\theta_p$  で除した上で図 2.11 に示す。本研究では、 $K_{du}/K_e$  を基準化等価幅厚比  $\alpha_e$  と  $(\sum|\theta_s| + \sum|\theta_d'|)/\theta_p$  の関数で式(2.3)で表すことにする。

$$K_{du} / K_e = \frac{1}{(-0.01 / \alpha_e + 0.03) \cdot (\sum|\theta_s| + \sum|\theta_d'|) / \theta_p + 1} \quad (2.3)$$

なお、基準化等価幅厚比  $\alpha_e$  は式(2.4)で表される。

$$\alpha_e = \frac{(1+k^2)}{2} \varepsilon_y (D/t)^2 \quad (2.4)$$

ここで、

$k$  : 軸力を考慮したときの全塑性状態において、ウェブの中で圧縮応力を受ける面積の割合

$\varepsilon_y$  : 降伏ひずみ度(降伏応力度  $\sigma_y$  をヤング率  $E$  で除した値)

$D$  : 断面幅

$t$  : 板厚

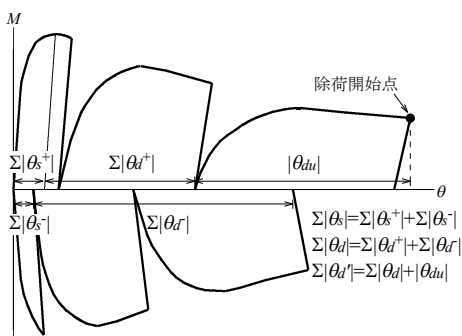


図2.10 除荷開始点に至るまでの累積変形量

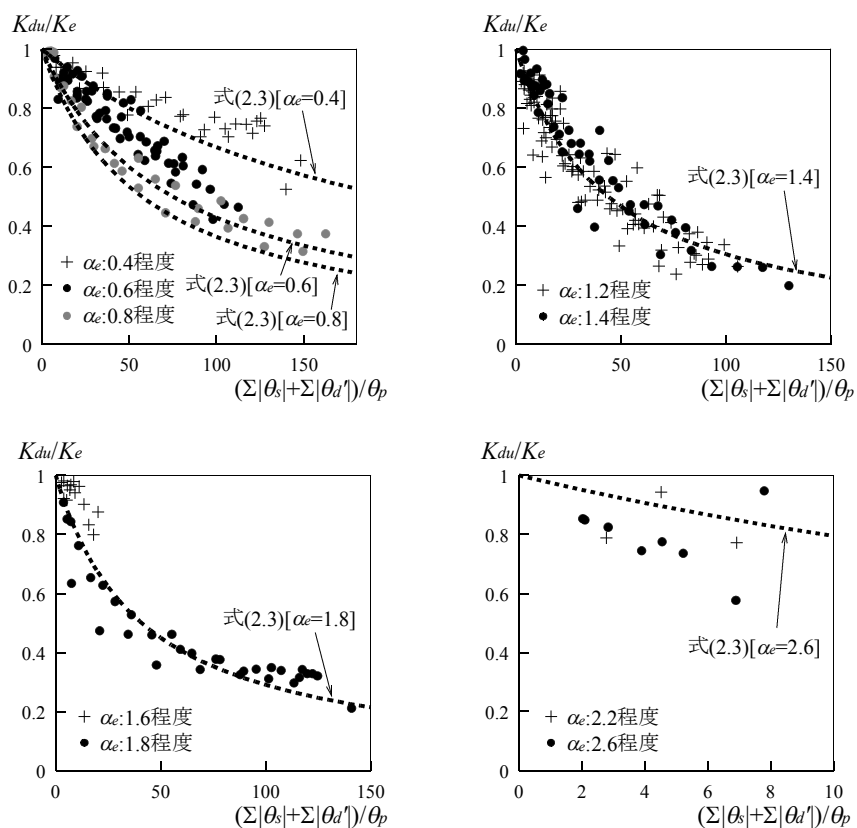


図2.11 劣化域における除荷剛性

・ 耐力劣化部で荷重方向が反転する場合

耐力上昇部では塑性変形が生じるため、耐力上昇部での塑性変形量と対応する拡張骨格曲線での耐力低下に応じて、前サイクルでの除荷開始点より低い荷重がピーク荷重となる。そこでまず、耐力上昇部における塑性変形量について検討する。最大耐力以降の各半サイクルでの耐力上昇部の塑性変形量 $|\theta_i|$ と、骨格曲線における累積塑性変形量  $\Sigma|\theta_i|$ と最大耐力以降それまでに経験した劣化域での累積塑性変形量  $\Sigma|\theta_{d'}|$ の和  $\Sigma|\theta_i| + \Sigma|\theta_{d'}|$ との関係を、いずれも  $\theta_p$  で除した上で図 2.12 に示す。 $|\theta_i|$ と  $\Sigma|\theta_i| + \Sigma|\theta_{d'}|$ の関係にはばらつきが見られる

が、本研究では式(2.5)で表すことにする。

$$|\theta_1| = 0.1 \left( \frac{1 - N/N_y}{1 + N/N_y} \right) \cdot (\Sigma|\theta_s| + \Sigma|\theta_d|) \quad (2.5)$$

ここで、 $N/N_y$  : 降伏軸力比

次に、耐力上昇部をバイリニア型にモデル化する。バイリニア型のモデルを規定する変数のうちピーク荷重  $M_1$  については、前サイクルの除荷荷重と耐力上昇部での塑性変形量、拡張骨格曲線の関係で決まる。また、耐力上昇部の初期剛性は、除荷部との連続性から除荷剛性とする。剛性変化点については、図 2.9 に示すように、バイリニア型のモデルで吸収するエネルギーと、実験結果での耐力上昇部で吸収するエネルギーが一致するときの荷重を  $M_3$  とし、 $M_3$  と半サイクルにおけるピーク荷重  $M_1$  との比率  $M_3/M_1$  をモデル化する。 $M_3/M_1$  と、骨格曲線における累積塑性変形量  $\Sigma|\theta_s|$  と最大耐力以降それまでに経験した劣化域での累積塑性変形量  $\Sigma|\theta_d|$  の和  $\Sigma|\theta_s| + \Sigma|\theta_d|$  との関係を示す。図 2.13 に示す。 $M_3/M_1$  についてもばらつきが見られるが、式(2.6)で表すことにする。

$$M_3/M_1 = 0.6 \quad (2.6)$$

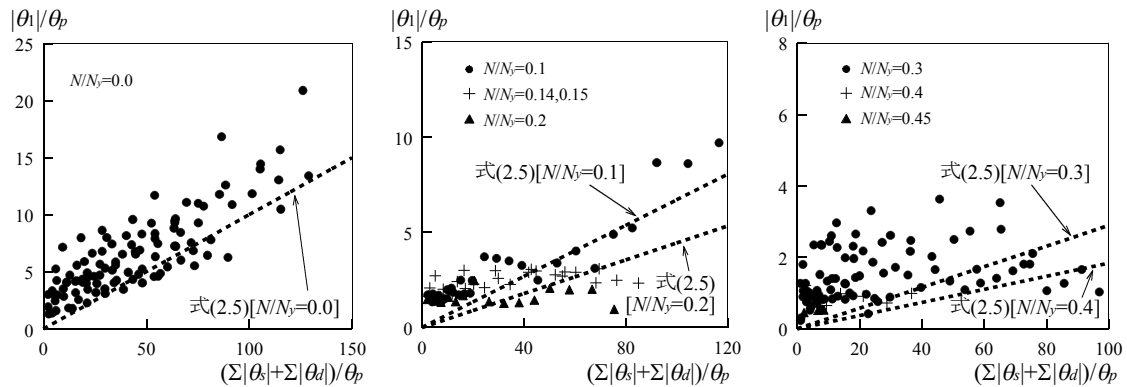


図2.12 耐力上昇部における塑性変形量

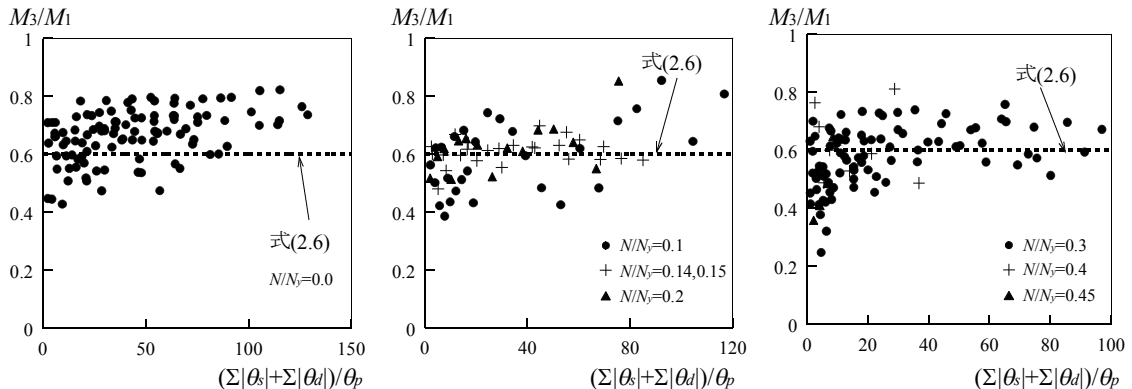


図2.13 バイリニア型にモデル化した場合の耐力上昇部における剛性変化点



#### ・耐力上昇部の途中で荷重方向が反転する場合

ここまでの検討では、耐力上昇部の途中で荷重方向が反転する場合、さらには耐力上昇部の範囲で繰り返し履歴を受ける場合といった、比較的小さな振幅に対してどのような履歴挙動を示すかと言うことは検討できていない。データベースにおいて、大きな振幅の後に小さな振幅が現れるものは、漸減振幅の試験体(No.5,7,8)のみと少ないことから、実験結果に基づくモデル化は困難である。本研究では、連結累積線の包絡線が拡張骨格曲線と対応することに基づき塑性変形量に応じて拡張骨格曲線への復帰点が設定できることに加え、耐力上昇部から除荷し反対側の荷重領域で拡張骨格曲線への復帰点に向かう挙動を、耐力劣化部で荷重方向が反転する場合の履歴モデルに基づき仮定することで、以下のように履歴モデルを構築した。

①除荷開始から再び正側もしくは負側の拡張骨格曲線に復帰するまでに繰り返し塑性変形した場合には、正側においては除荷開始から再び拡張骨格曲線に復帰するまでの負側の累積塑性変形量に応じて拡張骨格曲線への復帰点を、負側においては同じく除荷開始から再び拡張骨格曲線に復帰するまでの正側の累積塑性変形量に応じて拡張骨格曲線への復帰点を移動する。

②耐力上昇部の範囲で繰り返し履歴を受ける場合、比較的小さな振幅で繰り返すため、除荷剛性の低下の進展は小さいと考えられる。そこで、耐力上昇部で荷重方向が反転する場合の除荷剛性については、前回の耐力劣化部から除荷開始したときの除荷剛性を用いることとし、耐力上昇部の範囲での繰り返し履歴において除荷剛性は一定とする。

③除荷後の反対側の荷重領域における初期剛性については、耐力劣化部で荷重方向が反転する場合と同様に、除荷部との連続性から除荷部における剛性を用い、拡張骨格曲線への復帰点に向かう剛性変化点については、式(2.7)を援用し、拡張骨格曲線への復帰荷重の60%の荷重に至った点を剛性変化点とする。

履歴モデルの概要を図 2.14(1)~(4)に示す。なお、推定によるモデル化の妥当性については、次節における実験結果と履歴モデルの比較において、少ない例ではあるが検討を行う。

#### (1)A-B間を中心とする挙動

まず、耐力劣化部から除荷を開始するところから始める。除荷開始点を A 点とし、A 点での荷重を  $M_2$  とする。(ここでは負側から正側の挙動を例に説明する)除荷を開始してからの挙動は、耐力劣化部から除荷を開始する場合にあたり、図 2.14(1)に示すように、A 点と耐力上昇部での剛性変化点 B の間では除荷剛性  $K_{du}$  で線形挙動し、区間 A-B で正側に変形が進行して B 点に達すると、耐力上昇部における塑性変形量  $\theta_1$  分変形が進んだ点である拡張骨格曲線への復帰点 C を指向する。ここで、B 点の荷重  $M_3^+$  は C 点の荷重を  $M_1^+$  とすると、式(2.6)より  $M_3^+=0.6M_1^+$  である。除荷剛性  $K_{du}$  は式(2.3)で与えられ、 $\theta_1$  は、降伏軸力比とそれまでの拡張骨格曲線に相当する累積塑性変形により式(2.5)で与えられる。一方、区間 A-B で負側に変形が進展し再び A 点に達すると、負側の拡張骨格曲線に復帰す

る。ここまでは、耐力劣化部で載荷方向が反転する場合においてモデル化された部分である。

(2)D-E 間を中心とする挙動

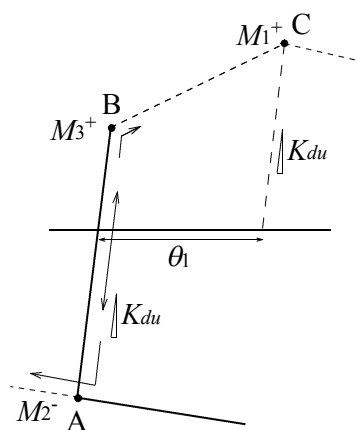
次に 図 2.14(2)に示すように、耐力上昇部の塑性域である B-C 間において、塑性変形が  $\Delta\theta_d$  進行した点 D で変形の進展方向が反転する場合を考える。負側で拡張骨格曲線に復帰する点を F、その荷重を  $M_2'$  としたとき、荷重が  $M_3' = 0.6M_2'$  となる点を E とする。区間 D-E においては除荷剛性  $K_{du}$  で線形挙動するものとし、負側に変形が進展し E 点に達すると負側の拡張骨格曲線への復帰点 F を指向し、正側に変形が進展し D 点に達すると再び正側の拡張骨格曲線への復帰点 C を指向するものとする。ここで、負側の拡張骨格曲線への復帰点 F は、除荷開始点 A からそのまま塑性変形が  $\Delta\theta_d$  進展した場合に到達する点を F'、F' 点での荷重を  $M_2'$  として、A 点と同じ変位で荷重が  $M_2'$  となる点とする。

(3)G-H 間を中心とする挙動

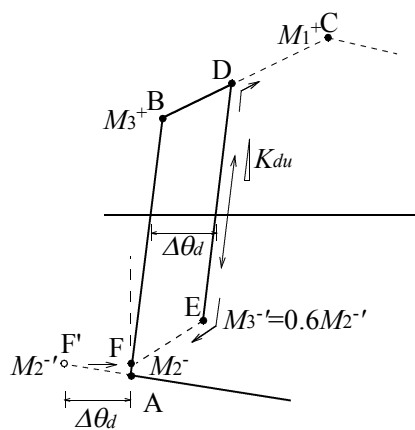
さらに、区間 E-F において塑性変形が  $\Delta\theta_d$  進行した点 G で変形の進行方向が反転すると、図 2.14(3)に示すように、正側で拡張骨格曲線に復帰する点を I、I 点の荷重を  $M_1''$  としたとき、荷重が  $M_3'' = 0.6M_1''$  となる点 H との間で除荷剛性  $K_{du}$  で線形挙動するものとする。I 点は F 点同様、負側に塑性変形が  $\Delta\theta_d$  進行した分だけ C 点より拡張骨格曲線への復帰点をずらした点とする。区間 G-H において正側に変形が進行し H 点に達すると正側の拡張骨格曲線への復帰点 I を指向し、負側に変形が進行し G 点に達すると再び負側の拡張骨格曲線への復帰点 F を指向するものとする。

(4)J-K 間を中心とする挙動

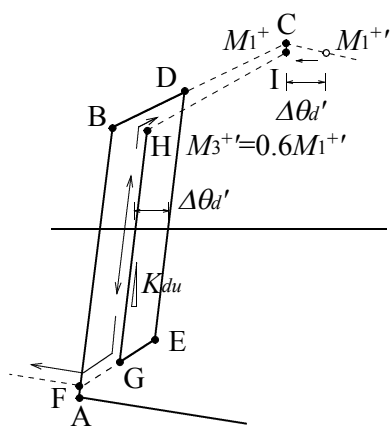
図 2.14(4)には除荷開始から再び正側もしくは負側の拡張骨格曲線に復帰するまでにさらに繰り返し塑性変形した場合の例として、区間 H-I から再び除荷した場合について示す。負側で拡張骨格曲線に復帰する点を L、その荷重を  $M_2''$  とすると、除荷開始点 J と荷重が  $M_3'' = 0.6M_2''$  となる点 K の間では除荷剛性  $K_{du}$  で線形挙動するものとする。負側の拡張骨格曲線への復帰点 L は、除荷開始点 A からそのまま塑性変形が  $\Delta\theta_d + \Delta\theta_d''$  進展した場合に到達する点を L'、L' 点での荷重を  $M_2''$  として、A 点と同じ変位で荷重が  $M_2''$  となる点とする。区間 H-I において負側に変形が進展し K 点に達すると負側の拡張骨格曲線への復帰点 L を指向し、正側に変形が進展し I 点に達すると再び正側の拡張骨格曲線への復帰点 I を指向するものとする。



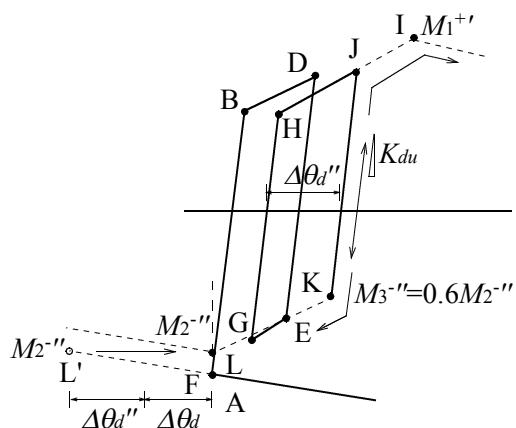
(1)A-B間を中心とする挙動



(2)D-E間を中心とする挙動



(3)G-H間を中心とする挙動



(4)J-K間を中心とする挙動

図2.14 耐力上昇部の途中で荷重方向が反転する場合の履歴モデル

## 2.4 実験結果との比較による履歴モデルの検討

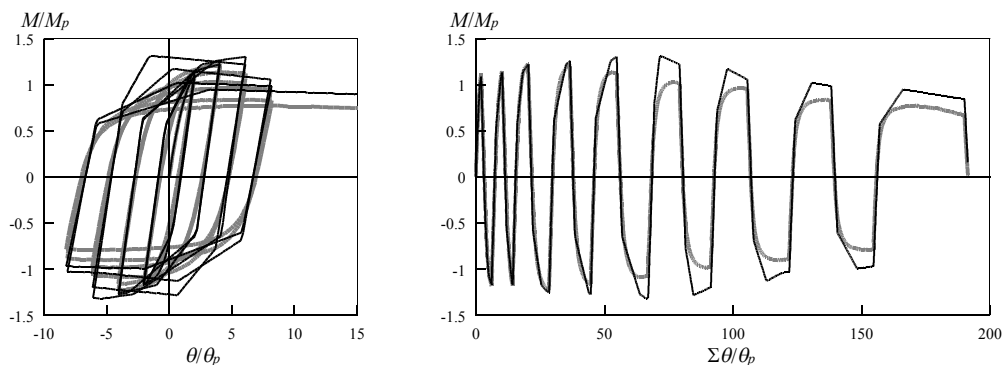
一定軸力のもとで繰り返し载荷を受ける角形鋼管柱の局部座屈発生によって決まる最大耐力以降の劣化域を含む履歴挙動について、①拡張骨格曲線については 2.3.2 で提案した劣化第3勾配まで考慮した解析による結果を用い、②正負いずれかで最大耐力に到達するまでの履歴については文献 2.1)のモデルを、③正負いずれかで最大耐力に到達した以降は 2.3.3 で提案したモデルを適用することで、载荷初期から復元力を喪失するまでの履歴モデルが構築できる。本節では、このようにして構築した履歴モデルについて、データベースの実験結果との比較検討を行う。

データベースの実験結果の内、拡張骨格曲線の解析方法の適用範囲外となる純曲げの条件で行われた2体(No.12,13)を除く26体の実験結果について、同じ変位履歴を与えた履歴モデルと比較し、軸力が作用しない場合の全塑性モーメント  $M_p$  と  $M_p$  に対応する弾性部材角の計算値  $\theta_p$  でそれぞれ除した曲げモーメント-部材角関係を図 2.15 に示す。また、曲げモーメント-部材角関係だけでは履歴曲線が重なり詳細な検討が困難であることから、横軸に累積部材角をとって展開した曲げモーメント-累積部材角関係も併せて図 2.15 に示す。図中、灰実線は実験結果、黒実線は履歴モデルである。

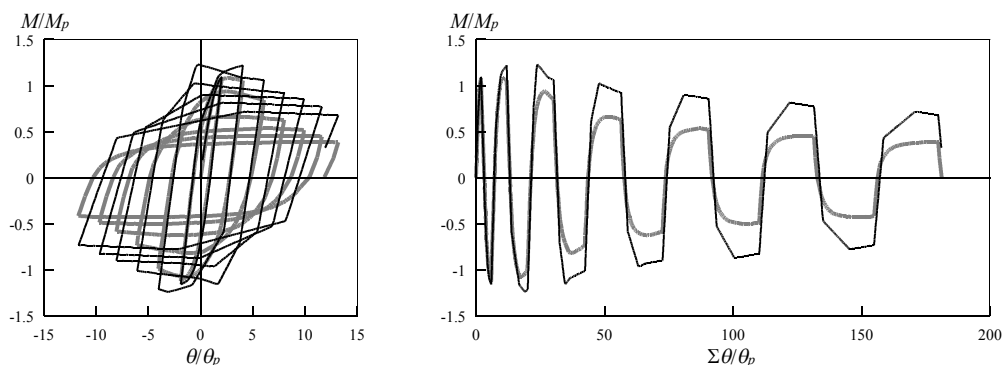
全体的に見ると、2.3.2 における拡張骨格曲線の予測精度と 2.3.3 での劣化域における履歴モデル構築時のデータのばらつきによる誤差は見られるものの、最大耐力以降徐々に耐力を失っていく繰り返し劣化挙動が概ね良好に捉えられている。なお、比較的降伏軸力比の高い場合に対応が良くないものが多いが、降伏軸力比が低い場合でも対応が良くない場合もある。例えば降伏軸力比 0.1~0.2 で幅厚比 33.3、漸増変位振幅载荷の条件で実験が行われた試験体では、No.3,4 は対応が良いが No.20 は対応が良くない。No.20 については局部座屈の影響が小さく除荷剛性が弾性剛性と近くなると考えられる载荷初期においても除荷剛性の対応が良くない。同様に、他の実験結果と履歴モデルの対応が良くないものについても、载荷初期から除荷剛性の対応が良くないことから、実験における境界条件などに原因があると思われる。しかし、载荷初期における除荷剛性の対応が良い場合については実験結果と履歴モデルの対応は良いことから、履歴モデルは妥当であると考えられる。

また、2.3.3 において構築した耐力上昇部の途中で载荷方向が反転する場合の履歴モデルについて、耐力上昇部の途中で载荷方向が反転する No.5,7,9 の曲げモーメント-累積部材角関係の後半部分における対応を見ると、No.7 についてはそれまでの履歴も含め対応はあまり良くないが、No.5,9 については、耐力上昇部で繰り返す場合の対応は良く、さらに、No.9 では耐力上昇部で繰り返した後に拡張骨格曲線に復帰する場合についても構築した履歴モデルは実験結果と良い対応を示しており、数は少ないが、構築したモデルが妥当であることを示す結果が得られている。

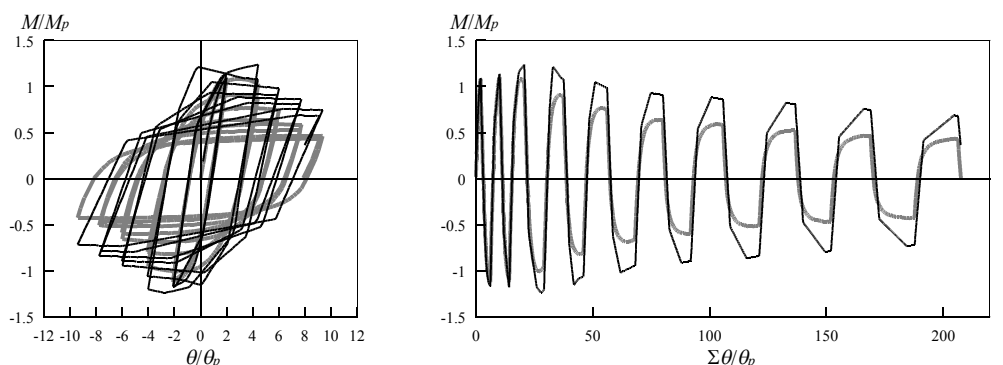
軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰返し劣化挙動



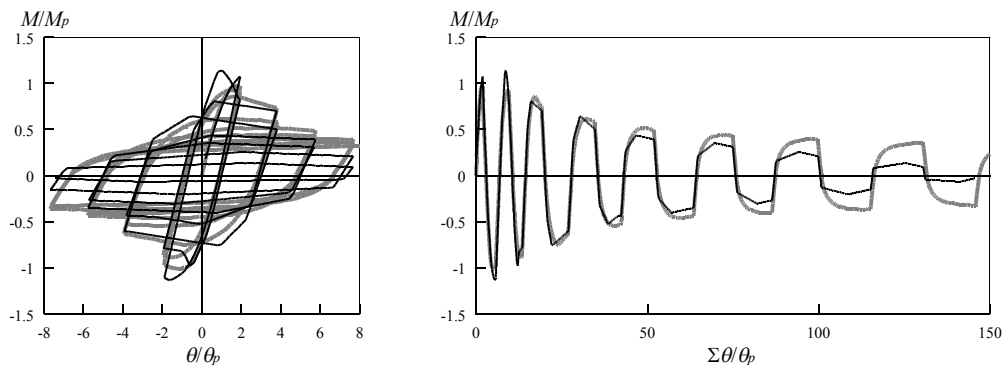
No.8, 幅厚比 18.8, 降伏軸力比 0.0, 漸増変位振幅荷重



No.1, 幅厚比 27.8, 降伏軸力比 0.0, 漸増変位振幅荷重

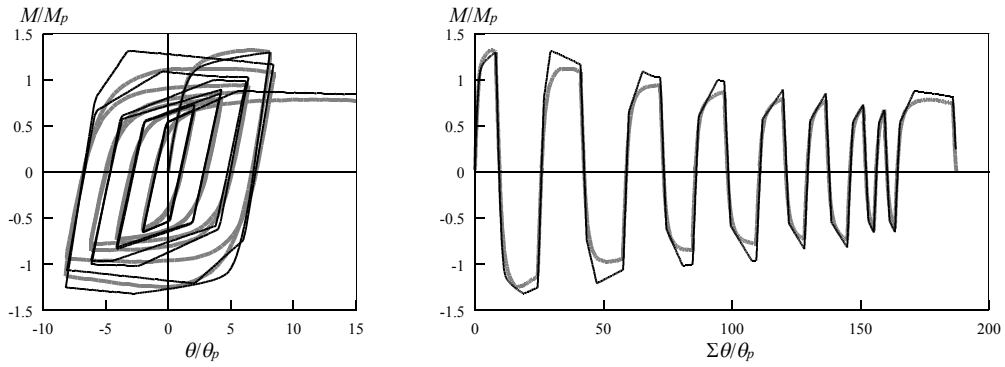


No.2, 幅厚比 27.8, 降伏軸力比 0.0, 漸増変位振幅荷重

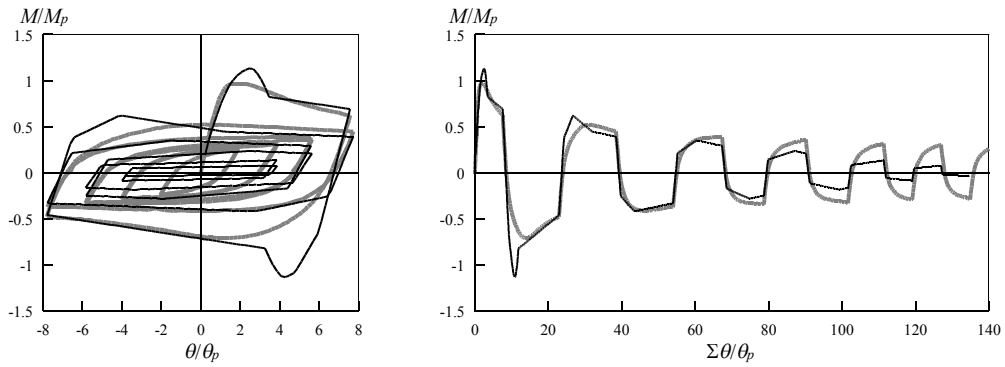


No.6, 幅厚比 37.5, 降伏軸力比 0.0, 漸増変位振幅荷重

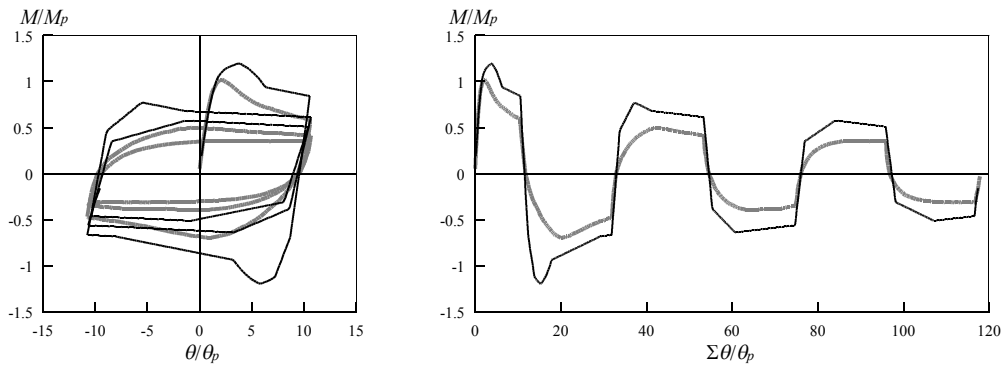
図2.15 実験結果と履歴モデルの比較



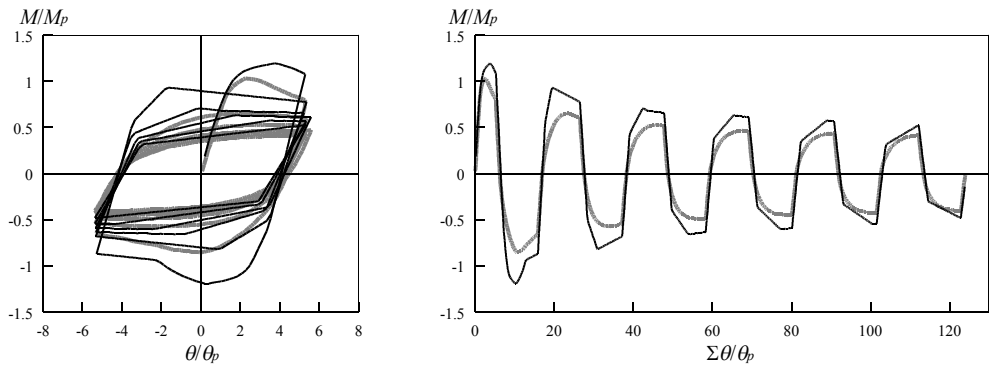
No.9, 幅厚比 18.8, 降伏軸力比 0.0, 漸減変位振幅載荷



No.7, 幅厚比 37.5, 降伏軸力比 0.0, 漸減変位振幅載荷



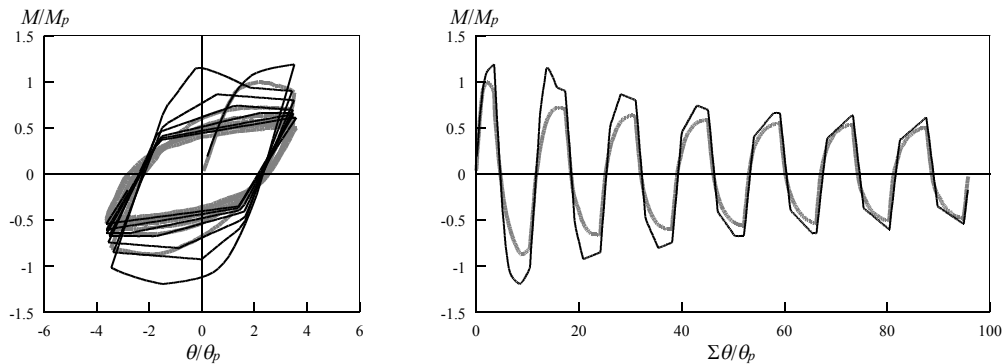
No.16, 幅厚比 33.3, 降伏軸力比 0.0, 一定変位振幅載荷



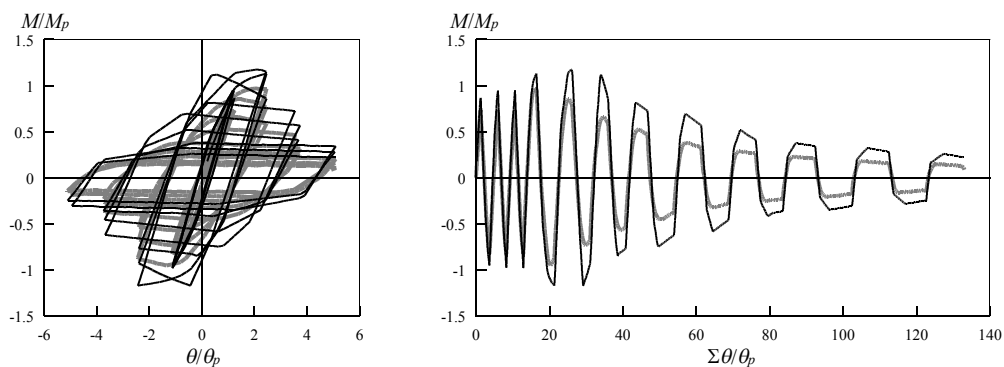
No.17, 幅厚比 33.3, 降伏軸力比 0.0, 一定変位振幅載荷

図2.15 実験結果と履歴モデルの比較(続き)

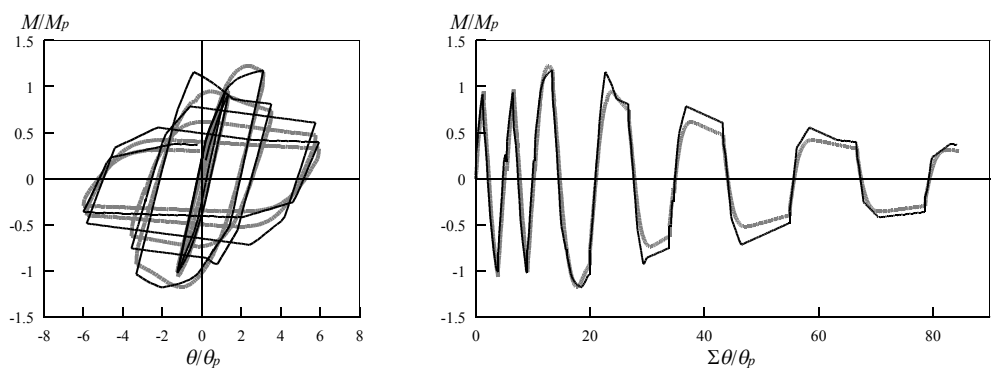
軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰返し劣化挙動



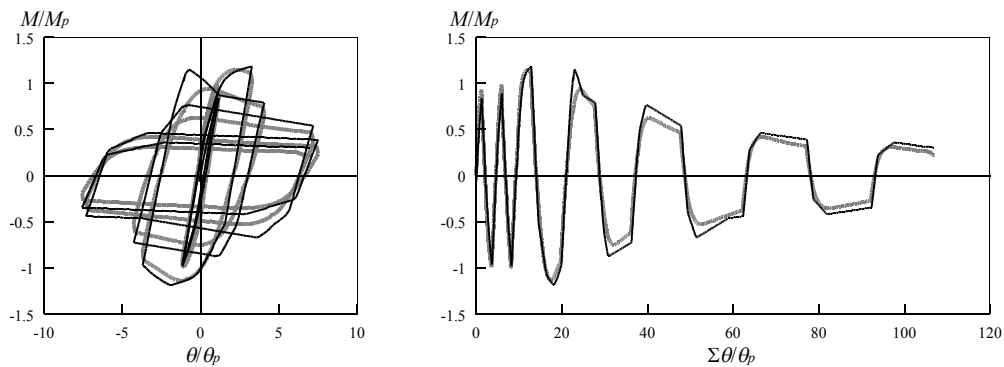
No.18, 幅厚比 33.3, 降伏軸力比 0.0, 一定変位振幅荷重



No.10, 幅厚比 27.8, 降伏軸力比 0.2, 漸増変位振幅荷重

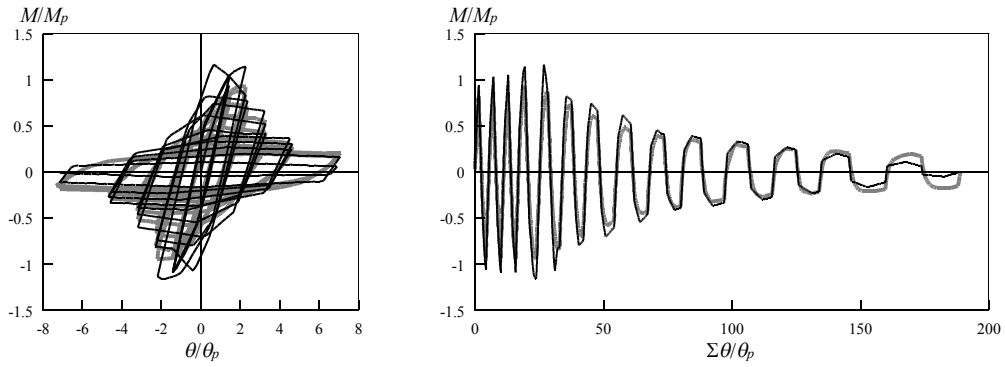


No.3, 幅厚比 33.3, 降伏軸力比 0.15, 漸増変位振幅荷重

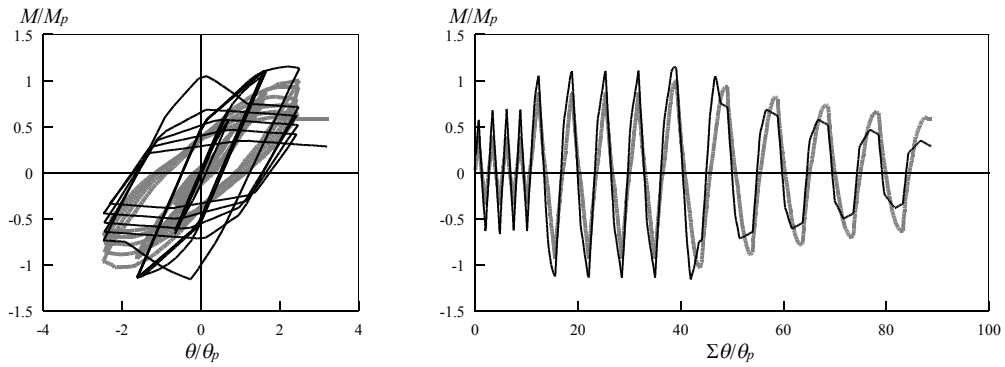


No.4, 幅厚比 33.3, 降伏軸力比 0.14, 漸増変位振幅荷重

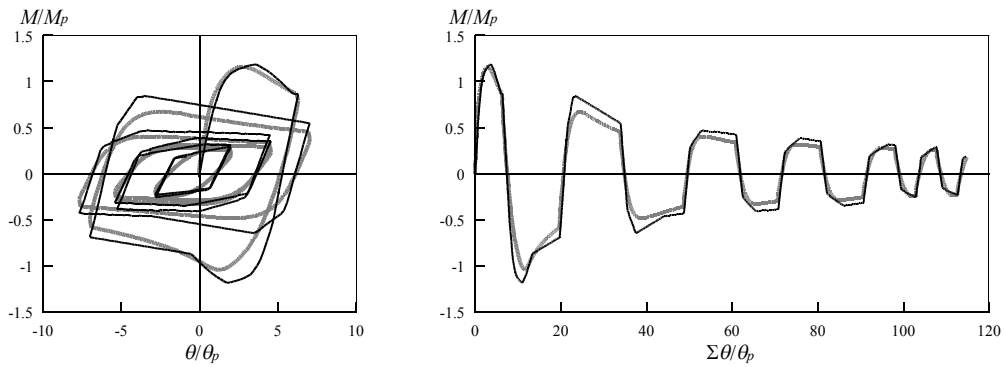
図2.15 実験結果と履歴モデルの比較(続き)



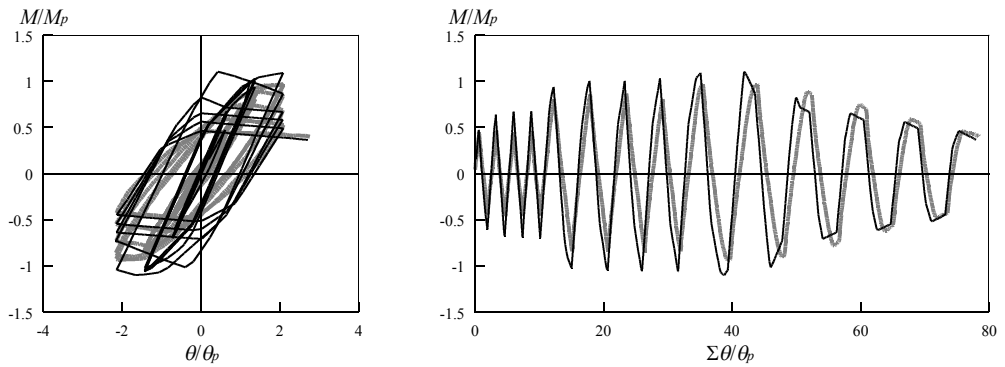
No.15, 幅厚比 33.3, 降伏軸力比 0.1, 漸増変位振幅載荷



No.20, 幅厚比 33.3, 降伏軸力比 0.1, 漸増変位振幅載荷



No.5, 幅厚比 33.3, 降伏軸力比 0.14, 漸減変位振幅載荷

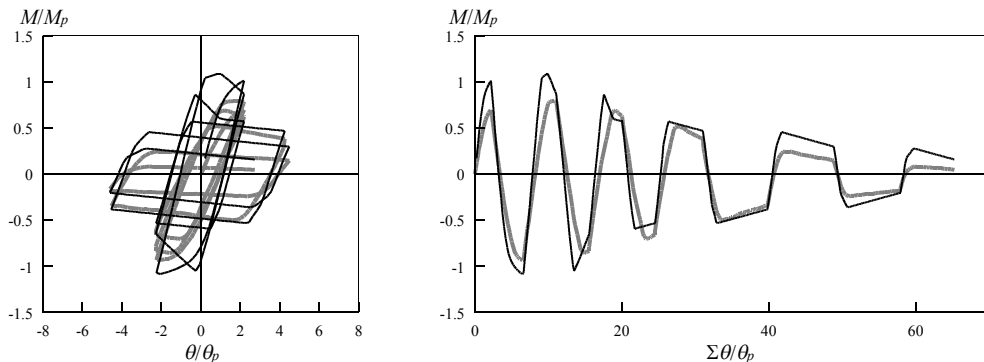


No.19, 幅厚比 25.0, 降伏軸力比 0.3, 漸増変位振幅載荷

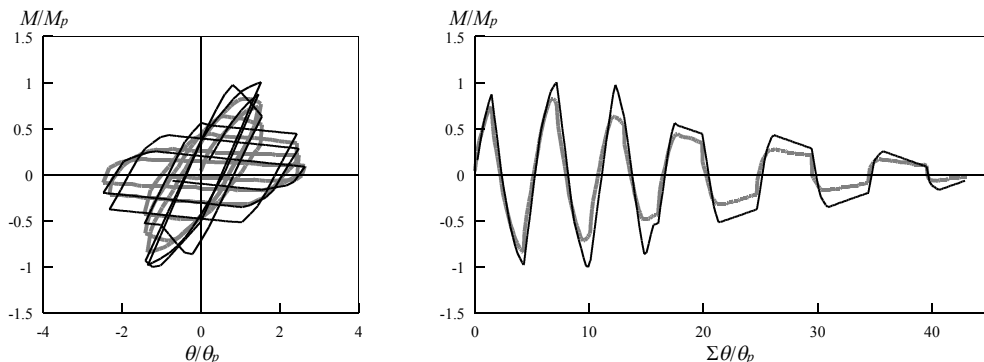
図2.15 実験結果と履歴モデルの比較(続き)



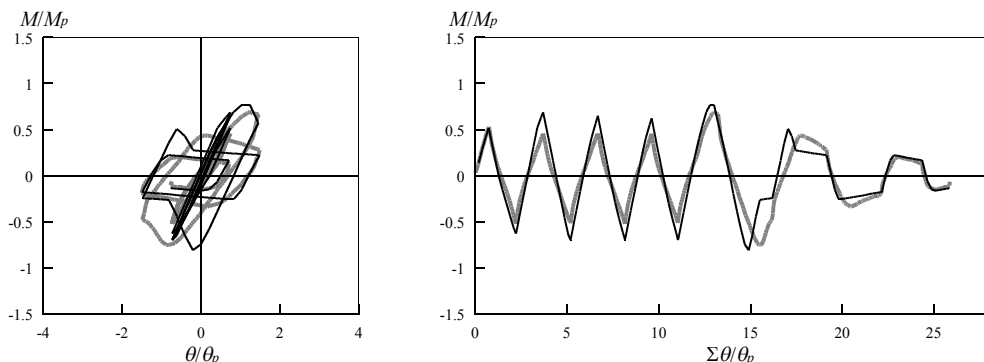
軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰返し劣化挙動



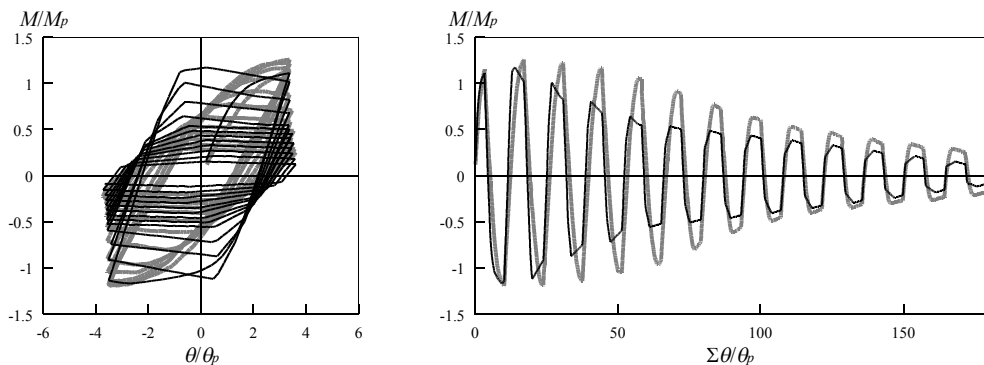
No.11, 幅厚比 27.8, 降伏軸力比 0.4, 漸増変位振幅載荷



No.14, 幅厚比 33.3, 降伏軸力比 0.3, 漸増変位振幅載荷

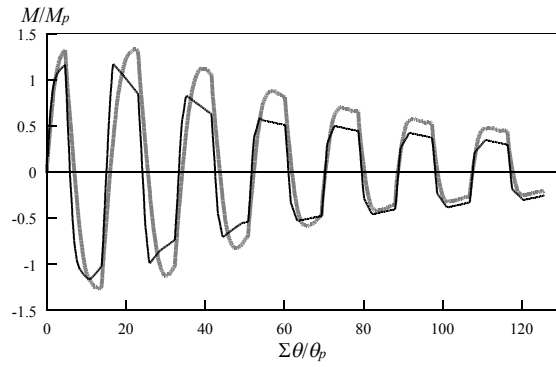
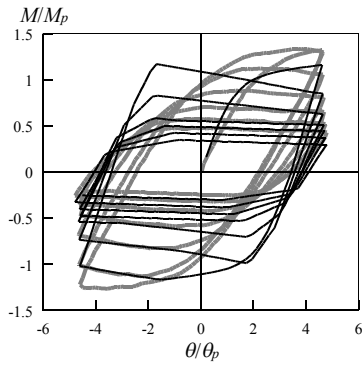


No.21, 幅厚比 33.3, 降伏軸力比 0.45, 漸増変位振幅載荷

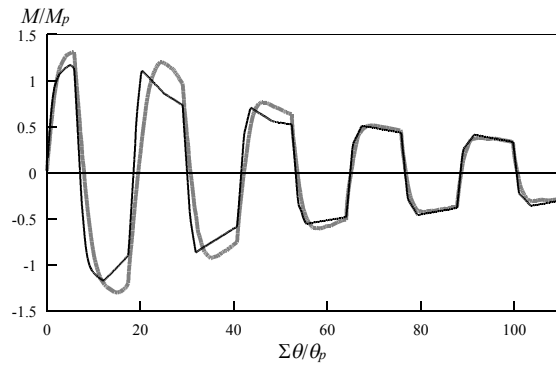
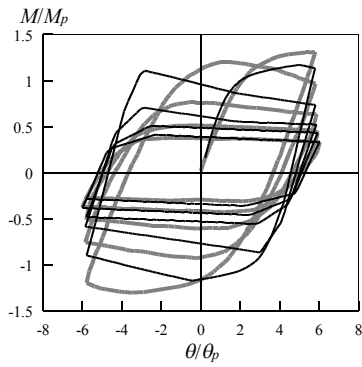


No.26, 幅厚比 20.8, 降伏軸力比 0.3, 一定変位振幅載荷

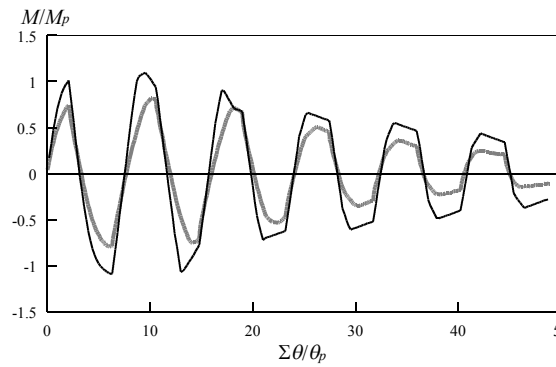
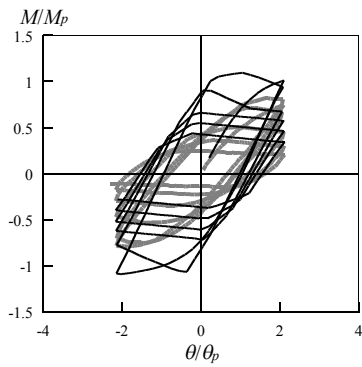
図2.15 実験結果と履歴モデルの比較(続き)



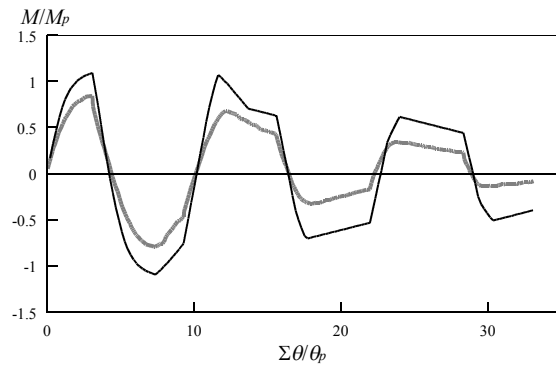
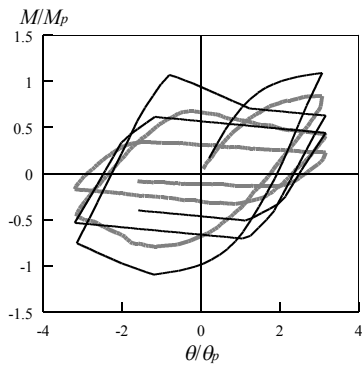
No.27, 幅厚比 20.8, 降伏軸力比 0.3, 一定変位振幅載荷



No.28, 幅厚比 20.8, 降伏軸力比 0.3, 一定変位振幅載荷

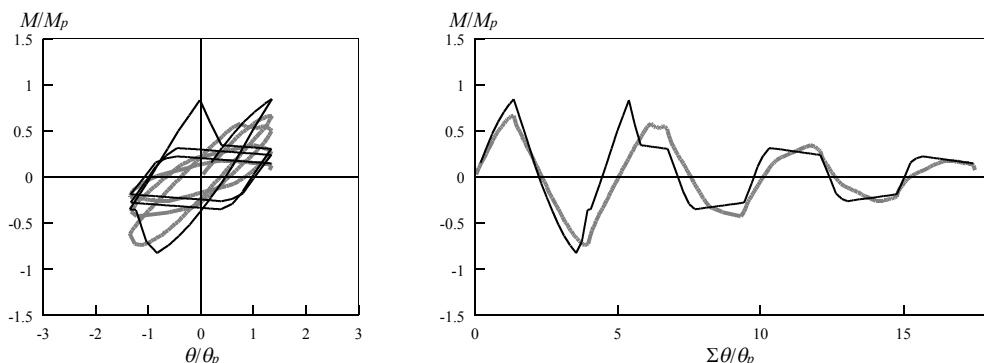


No.22, 幅厚比 27.8, 降伏軸力比 0.3, 一定変位振幅載荷

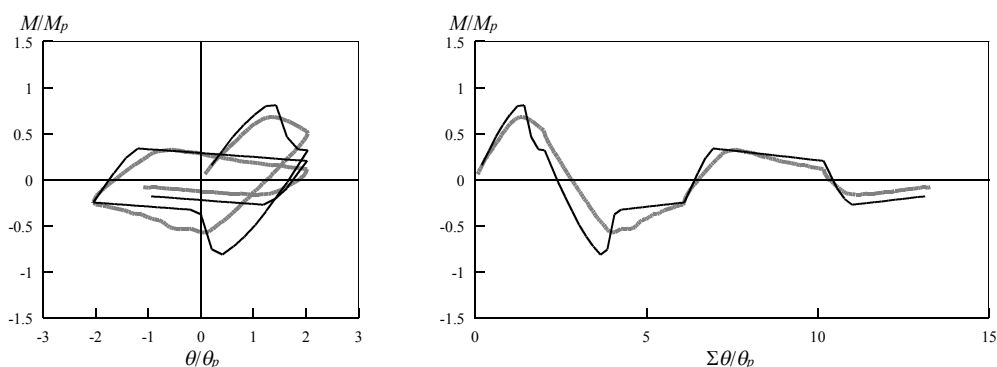


No.23, 幅厚比 27.8, 降伏軸力比 0.3, 一定変位振幅載荷

図2.15 実験結果と履歴モデルの比較(続き)



No.24, 幅厚比 39.1, 降伏軸力比 0.3, 一定変位振幅載荷



No.25, 幅厚比 39.1, 降伏軸力比 0.3, 一定変位振幅載荷

図2.15 実験結果と履歴モデルの比較(続き)

## 2.5 まとめ

第2章では、まず、一定軸力下で繰り返し曲げを受ける角形鋼管柱について、筆者らがこれまでに行ってきた実験<sup>2.7)-2.11)</sup>に既往の論文<sup>2.6),2.12)-2.16)</sup>からスキャナーで読み取りデジタル化した荷重-変形関係を加えた部材実験結果のデータベースを構築した。データベースは、一定軸力下で漸増変位振幅、一定変位振幅あるいは漸減変位振幅の載荷履歴で繰り返し載荷実験が行われた、28体の実験結果により構成される。データベースに含まれる実験の範囲は、幅厚比で18.8~39.1、降伏軸力比で0.0~0.45である。

次に、データベースの荷重-変形関係を用いて、最大耐力以降の劣化域を含む繰り返し挙動について、骨格曲線とバウシinger部に分解する方法による検討を行い、最大耐力以降の劣化域における履歴挙動のモデル化を行った。履歴モデルは、一方向載荷を受けた場合の荷重-変形関係と対応する拡張骨格曲線と、繰り返しに対する履歴モデルの組み合わせで構築される。

一方向載荷を受けた場合の荷重-変形関係と対応する拡張骨格曲線については、文献2.2)の一定軸力のもとで一方向曲げを受ける荷重-変形関係の解析法により予測した。ただし、文献2.2)で用いた圧縮応力下における劣化挙動のモデルでは、繰り返し載荷による大きな累積変形までは予測できなかったことから、劣化第1勾配と劣化第2勾配の2つの勾配でモデル化した劣化挙動に、大変形領域に対応した劣化第3勾配を追加し、従前のモデルで

は対応できていなかった大変形領域も含め、繰り返し荷重を受ける角形鋼管柱の拡張骨格曲線を予測できるようにした。

劣化域における繰り返し履歴挙動については、半サイクル毎の挙動を、①ピーク荷重に到達するまでの領域である耐力上昇部、②ピーク荷重以降除荷開始点に至るまでの領域である耐力劣化部、③除荷開始点から荷重が0となるまでの領域である除荷部に分解してモデル化した。なお、耐力劣化部は拡張骨格曲線の一部と対応することから、一方向荷重を受けた場合の荷重-変形関係の解析結果を用いた。除荷部については、データベースに基づき、劣化域における除荷剛性の低下をモデル化した。耐力上昇部については、①比較的振幅が大きく耐力劣化部で荷重方向が反転する場合と②比較的振幅が小さく耐力上昇部で荷重方向が反転する場合に分け、まず多くの実験データが得られている耐力劣化部で荷重方向が反転する場合についてデータベースに基づきバイリニア型にモデル化し、耐力上昇部の途中で荷重方向が反転する場合については、耐力劣化部で荷重方向が反転する場合のモデルを参考にバイリニア型のモデルを設定した。

モデル化した劣化域での履歴挙動を、既往の研究<sup>2.1)</sup>で提案されている最大耐力以前の履歴モデルと組み合わせ、一定軸力下で繰り返し曲げを受ける角形鋼管柱の荷重初期から復元力を喪失するまでの履歴モデルとして構築し、データベースを構成する降伏軸力比、幅厚比、荷重履歴の異なる実験結果と比較したところ、大変形領域に至るまで繰り返し劣化挙動を概ね良好に捉えられていることを確認した。

#### [参考文献]

- 2.1)秋山 宏, 高橋 誠: 鋼構造剛接骨組の耐震性に及ぼすバウシンガー効果の影響, 日本建築学会構造系論文報告集 第418号, pp.49-57, 1990.12
- 2.2)山田 哲, 秋山 宏, 桑村 仁: 局部座屈を伴う箱形断面部材の劣化域を含む終局挙動, 日本建築学会構造系論文報告集 第444号, pp.135-143, 1993.2
- 2.3)桑村 仁, 伊山 潤, 朱 大立: 局部座屈劣化系の地震による倒壊および残留変形, 日本建築学会構造系論文集 第526号, pp.169-176, 1999.12
- 2.4)D. G. Lignos, H. Krawinkler and F. Zareian: Modeling of Component Deterioration for Collapse Prediction of Steel Moment Frame, Proc. of Stessa 2009, pp.403-409, 2009.8
- 2.5)孟 令樺, 大井謙一, 高梨晃一: 鉄骨骨組地震応答解析のための耐力劣化を伴う簡易部材モデル, 日本建築学会構造系論文報告集 第437号, pp.115-124, 1992.7
- 2.6)山田 稔, 河村 廣, 谷 明勲, 山中耕一: 複曲率交番繰り返し曲げを受ける角形鋼管柱の弾塑性変形ならびに崩壊性状に関する研究 (I)日本建築学会近畿支部研究報告集 第24号・構造系, pp.381-384, 1984.6 / (II)日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系, pp.1347-1348, 1984.10 / (III)日本建築学会近畿支部研究報告集 第25号・構造系, pp.469-472, 1985.5 / (IV)日本建築学会大会学術講演梗概集 C 分冊, pp.679-680, 1985.10 / (V)日本建築学会近畿支部研究報告集 第26号・構造系, pp.409-412, 1986.5

- ／(VI)日本建築学会大会学術講演梗概集 C 分冊, pp.1109-1110, 1986.8
- 2.7)石田孝徳, 焦 瑜, 島田侑子, 山田 哲:繰返し曲げを受ける角形鋼管柱の劣化挙動  
その 1 三点曲げ実験による基礎的検討, 日本建築学会関東支部研究報告集 I,  
pp.457-460, 2010.3
- 2.8)赤澤資貴, 伊藤陽介, 島田侑子, 松岡祐一, 山田 哲, 吹田啓一郎:実大鉄骨建物完全崩壊実験のための部材試験 その 3 柱部材の繰返し載荷試験, 日本地震工学会大会  
2007 梗概集, pp.218-219, 2007.11
- 2.9)山田 哲, 島田侑子:載荷方向を変化させた角形鋼管柱の繰返し載荷実験, 第 13  
回日本地震工学シンポジウム, pp.2868-2873, 2010.11
- 2.10)石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲:角形鋼管柱の繰返し劣化挙動に関する検討, 第 13  
回日本地震工学シンポジウム, pp.2874-2881, 2010.11
- 2.11)島田侑子, 赤澤資貴, 伊藤陽介, 松岡祐一, 山田 哲, 吹田啓一郎:鋼構造小型立  
体骨組の崩壊挙動に関する振動台実験, 日本建築学会構造系論文集 第 620 号,  
pp.125-132, 2007.10
- 2.12)北 芳男, 辻 文三:冷間成形角形鋼管柱の弾塑性挙動, 日本建築学会大会学術講  
演梗概集 C 分冊, pp.1305-1306, 1991.9
- 2.13)五十嵐定義, 辻岡静雄, 矢島 悟, 杉山茂徳:冷間成形角形鋼管断面の弾塑性曲げ  
挙動に関する実験的研究(その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系,  
pp.1351-1352, 1984.10
- 2.14)倉田真宏, 中島正愛, 吹田啓一郎:固定柱脚を想定した角形鋼管柱の大変形繰返し  
載荷実験, 日本建築学会構造系論文集 第 598 号, pp.149-154, 2005.12
- 2.15)朱 大立, 伊山 潤, 高田啓一, 桑村 仁:鋼部材の繰返し履歴曲線と単調載荷  
曲線の関係 その 2 座屈する場合, 1997 年度日本建築学会関東支部研究報告集 構造  
系, pp.89-92, 1998.3
- 2.16)津田恵吾, 松井千秋:一定軸力下で水平力を受ける角形鋼管柱の耐力, 日本建築学  
会構造系論文集 第 512 号, pp.149-156, 1998.10
- 2.17)加藤 勉, 秋山 宏:鋼構造部材の耐力(その 4), 日本建築学会論文報告集 第 151  
号, pp.15-20, 1968.9
- 2.18)加藤 勉, 秋山 宏, 帯 洋一:局部座屈を伴う H 形断面部材の変形, 日本建築学  
会論文報告集 第 257 号, pp.49-57, 1977.7
- 2.19)加藤 勉, 秋山 宏, 内田直樹:鋼構造部材の耐力(その 1), 日本建築学会論文報告  
集 第 119 号, pp.22-30, 1966.1
- 2.20)山田 稔, 坂恵一巳, 田所敏幸, 白川 潔:軸圧を受ける H 形鋼柱の弾塑性曲げ変  
形性状に関する研究 (I:一方向載荷時における曲げモーメント曲率関係並びに曲げ  
変形性状), 日本建築学会論文報告集 第 127 号, pp.8-14, 1966.9
- 2.21)邱 榮政, 山田 哲, 桑村 仁, 秋山 宏:冷間成形角形鋼管の保有性能の研究 そ  
の 1 短柱圧縮実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C 分冊, pp.1275-1276, 1992.8

## 第3章

### 一定軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し載荷実験

#### 3.1 はじめに

地震荷重下では建物には水平2方向の外力が作用することから、柱は2軸曲げを受ける。角形鋼管柱は直交する2方向について剛性、耐力が等しく、他の方向についても断面性能があまり変化しないことから、これまでは主として構面内挙動に関する研究が行われてきた<sup>3.1)-3.3)</sup>など。2軸曲げを受ける角形鋼管柱については、水平外力の作用方向を変化させて行った実験<sup>3.4),3.5)</sup>などが行われているが、地震荷重のようにランダムに水平外力の作用方向が変動するような場合に関する研究は少ない<sup>3.6),3.7)</sup>など。

第3章では、水平外力の作用方向が変動する条件における角形鋼管柱の終局挙動に関する研究の端緒として、一定軸力の条件下で水平2方向の繰り返し外力を受ける角形鋼管柱の載荷実験を行い、局部座屈発生に起因する劣化域を含む、水平2方向外力下における履歴挙動を検討する。本章ではまず、水平2方向の地震入力を受ける鋼構造多層骨組の弾塑性応答解析を行い、応答変位オービットを分析し、水平2方向繰り返し載荷実験に用いる載荷履歴(以下、平面載荷履歴と呼ぶ)を設定する。設定した平面載荷履歴を用いて角形鋼管柱の水平2方向繰り返し載荷実験を行い、一定軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱が復元力を喪失するまでの挙動を検討する。

#### 3.2 平面載荷履歴の設定

##### 3.2.1 平面載荷履歴の設定方針

水平2方向載荷実験を行う上では、平面載荷履歴を設定する必要がある。既往の部材レベルでの水平2方向載荷実験では、実験中に得られる部材の履歴を応答解析に取り込み、得られた応答に基づき次のステップの載荷を行うオンライン応答実験<sup>3.7),3.8)</sup>などや、円形、正方形などの規則的な平面載荷履歴を用いた実験<sup>3.6),3.9),3.10)</sup>などが行われている。オンライン応答実験では、地震応答解析に基づく現実的な平面載荷履歴により制御することが可能

であるが、地震応答であるが故に平面載荷履歴が複雑なものとなるだけでなく、入力波と解析モデルの組み合わせごとに異なったものとなり、得られる荷重-変形関係も複雑となるため、部材の基本的な復元力特性を検討するには適していないと考えられる。また、得られた結果の一般性を検証する上では、様々な入力波と解析モデルについて実験を行う必要があるが、それは容易ではない。一方、円形、正方形などの規則的な平面載荷履歴を用いることは、部材の復元力特性を把握する上で明快であり、平面載荷履歴以外のパラメータの影響を検討する上でも有効であるが、これらの平面載荷履歴と地震時における建物の応答との関係は不明である。

そこで本研究では、まず、水平2方向の地震入力を受ける多質点せん断系の弾塑性応答解析を行い、得られた応答変位オービットの分析に基づき、建物の応答を踏まえた規則的な平面載荷履歴を設定する。また、規則的な平面載荷履歴は地震応答のランダムな挙動を概括的に表現したものであり、得られた結果の一般性を検証する上では、いくつかの地震荷重下の建物の応答を模したランダムな平面載荷履歴による実験も必要であることから、水平2方向の地震入力を受ける多質点せん断系の弾塑性応答解析結果に基づくランダムな平面載荷履歴についても設定する。

### 3.2.2 規則的な平面載荷履歴の設定

#### ・解析モデルとパラメーター

水平2方向の地震入力を受ける多質点せん断系の解析では、図3.1に示すMSS(Multiple Shear Spring)モデル<sup>3.11)</sup>を用いた。このモデルは平面内に等間隔の角度に配置した等しい特性を有するせん断バネにより層の挙動を表し、質点を挟んで上下方向に連結することで、各層においてそれぞれ水平2方向の自由度を有する多質点せん断系となっている。我が国の鋼構造建築に多く用いられる角形鋼管の構造性能の異方性は小さいことから、このモデルを使用する。ここで、MSSモデルは分割数が多いほど剛性・耐力の方向性は小さくなるが、事前に検討した上で本研究での分割数は16とした。

応答解析の諸元を表3.1に示す。重量及び階高は各層一定で、それぞれ1000kN、4mとし、ベースシヤール係数は0.5、降伏層間変形角は0.005とした。解析モデルの作成にあたり、降伏層せん断力係数分布として最適降伏せん断力係数分布<sup>3.12)</sup>を用いた上で、降伏層間変形角に応じた各層の弾性剛性を設定したが、解析において1層が損傷集中層となるように、2層以上は弾塑性判定を行わず弾性に留めた。また、層の復元力特性は完全弾塑性型とし、MSSモデルを構成するせん断バネに分解した。なお、層の復元力特性として、1軸曲げを受ける角形鋼管柱の局部座屈発生に起因する劣化挙動を反映した復元力特性を用いることも考えられるが、水平2方向入力下における適用性は明らかとなっていないことから、本研究では採用しなかった。解析モデルに関するパラメーターは、層数(3層、9層)、P- $\Delta$ 効果の考慮の有無とし、これらの組み合わせで4つのモデルについて検討した。ここで、P- $\Delta$ 効果については負の剛性効果<sup>3.13)</sup>として考慮した。

入力波は、1940年 Imperial Valley 地震 El Centro 記録(継続時間 53.76 秒：以下、El Centro

波)、1952年 Kern County 地震 Taft 記録(継続時間 54.38 秒:以下、Taft 波)、1968年十勝沖地震八戸港湾記録(継続時間 120.0 秒:以下、八戸波)、1995年兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録(継続時間 30.0 秒:以下、神戸波)、2011年東北地方太平洋沖地震仙台管区気象台記録(継続時間 180.0 秒:以下、仙台波)の5波を用いた。ここで、部材の終局挙動を検討する実験に用いる平面載荷履歴を構築するという意図から、解析では入力加速度に係数を掛け、ある程度大きな応答レベルでの変位オービットとして、1層の最大応答変位が塑性率で5~10程度となる場合の変位オービットを求めた。

表3.1 応答解析諸元

重量	1000kN (各層一定)
階高	4m (各層一定)
ベースシヤール係数	0.5
降伏層間変形角	0.005
復元力特性	完全弾塑性型
層数	3層(1次固有周期0.57s), 9層(1次固有周期0.91s)
P-Δ効果	考慮有, 考慮無
入力波	El Centro波, Taft波, 八戸波, 神戸波, 仙台波

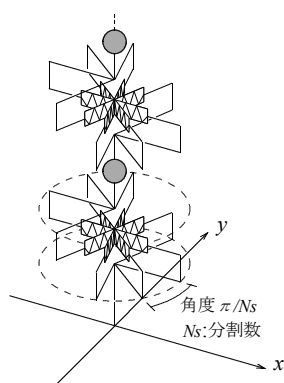


図3.1 MSS モデル

・検討対象とする変位オービットの抽出方法

応答解析から得られた1層質点の変位オービットから振幅の大きな半サイクル分のオービットを5つ抽出し、それらの検討に基づき規則的な平面載荷履歴を設定する。以下に、検討対象とする半サイクル分のオービットの抽出方法を述べる。

まず、図 3.2(1)に示すように、x、y 方向の変位履歴を半サイクルごとに分解する。このとき、小さな反転を伴いながら振幅が漸増する場合は一つの区間として扱う。ある区間において極大値・極小値がそれぞれ漸増しながら振幅が大きくなる場合を例に述べると、図 3.2(2)-a に示すように、変位の向きが反転する区間②③における振幅  $\Delta ②③$  が、漸増する区間の始点である極小点①と終点である極大点④における振幅  $\Delta ①④$  の 10%未満である場合は、区間①④を一つの区間として捉える。また、図 3.2(2)-b に示すように、変位の向きが反転する区間②'③'の振幅  $\Delta ②'③'$  が、漸増する区間の始点である極小点①'と終点である極大点④'における振幅  $\Delta ①'④'$  の 10%以上となる場合については、区間①'②'、区間②'③'、区間③'④'の各半サイクルに分解する。

次に、図 3.3 に示すように、分解した x、y 方向それぞれの各半サイクル分のオービットについて、2 点間の距離が最も長くなる線分 AA'の長さ、半サイクル分のオービットから線分 AA'に垂線を引いたときに最も長くなる線分 BB'の長さを求める。そして、線分 AA'の長さ、線分 BB'の長さの 2 倍を比較し、このうち長くなる方を長軸(長軸の長さを



la)、短くなる方を短軸(短軸の長さを lb)とする。

最後に、分解した x、y 方向それぞれの各半サイクル分のオービットのうち、la の長いもの上位 5 つを検討対象として抽出する。ここで、図 3.4 に示すように、la の長い上位 5 つの半サイクル分のオービットのうち、抽出区間のステップが x、y 方向で重なる場合には、la の長い方向を抽出区間として、短い方向については抽出区間から除外する。

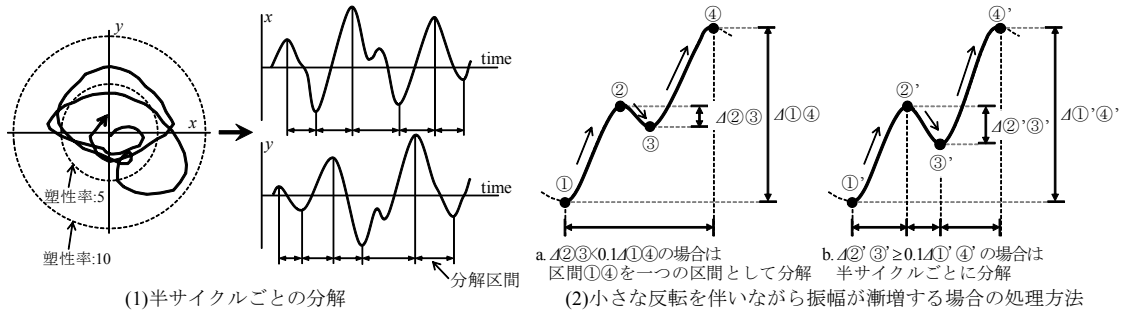


図3.2 変位オービットの半サイクルごとの分解

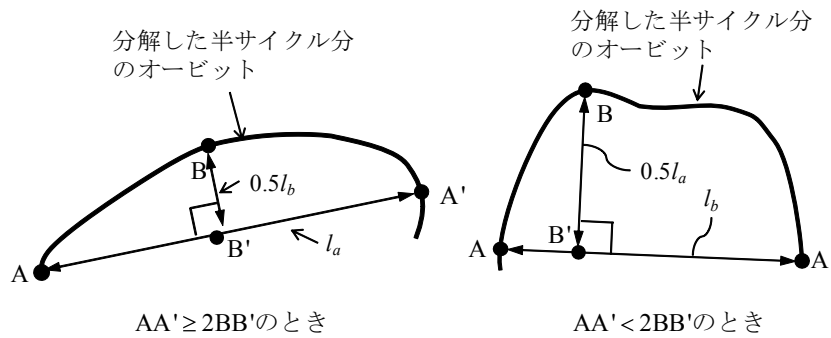


図3.3 分解した半サイクル分のオービットの長軸と短軸

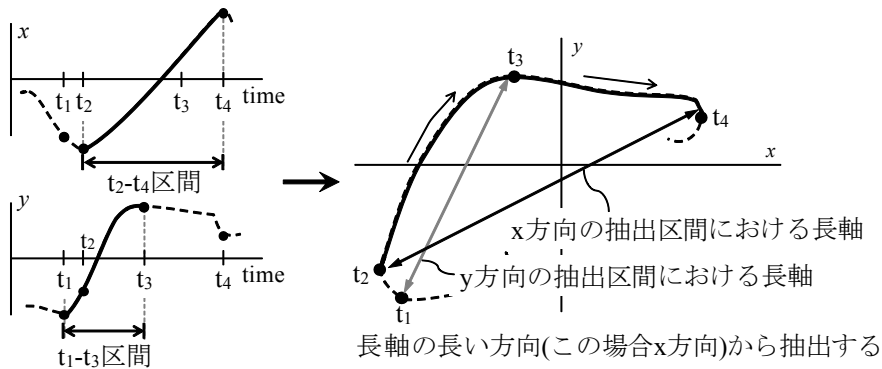


図3.4 半サイクル分のオービットの抽出ステップが x,y 方向で重なる場合

・変位オービットの検討

[抽出したオービットの概形]

1 層質点の変位オービットと検討対象として抽出した半サイクル分のオービットを併せて図 3.5 に示す。いずれの変位オービットも、抽出した半サイクル分のオービットの形状

は半楕円状あるいは直線状となることが多いことがわかる。そこで、規則的な平面載荷履歴を楕円形から構成することとする。

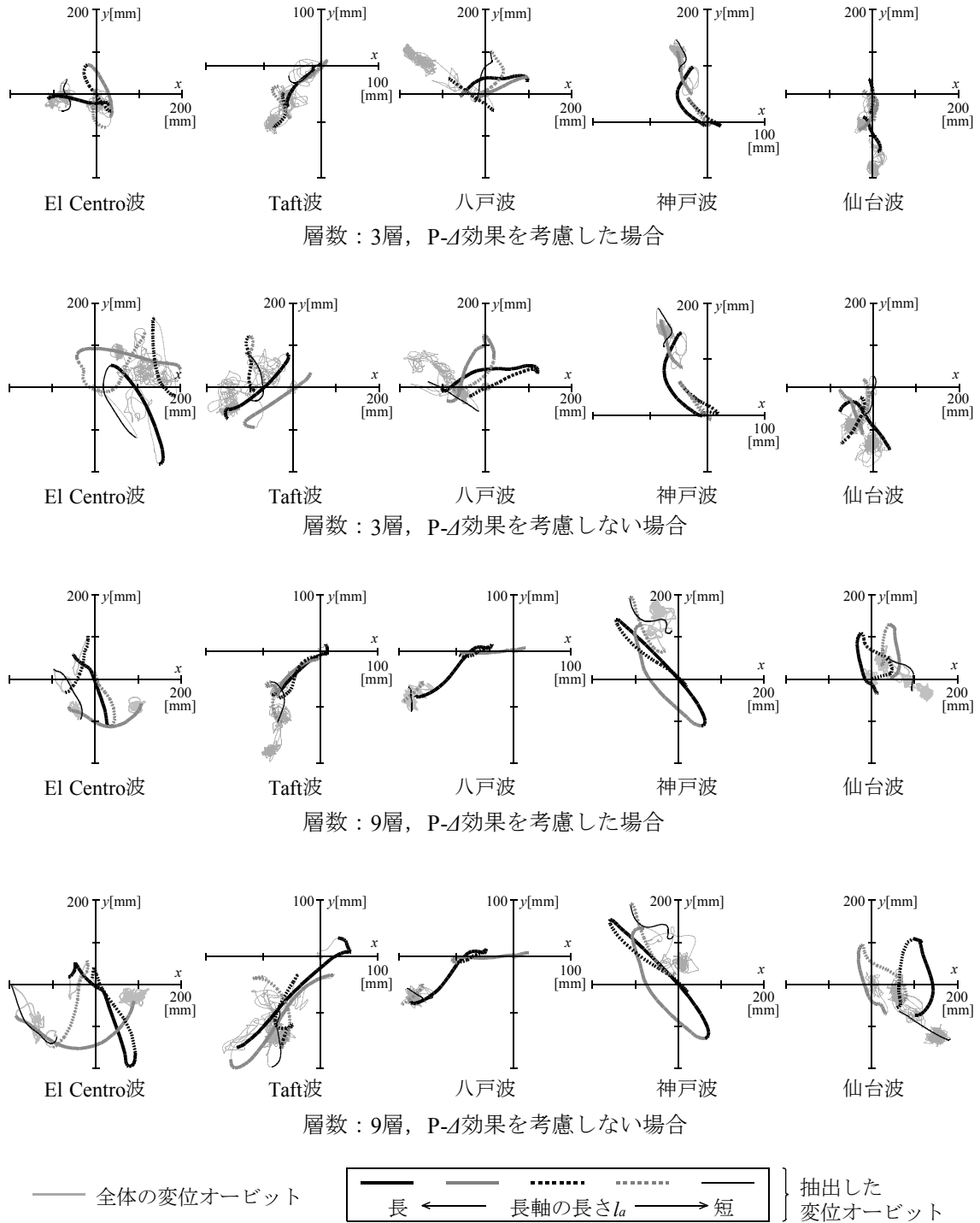


図3.5 1層質点の変位オービットと抽出したオービット

[抽出した半サイクル分のオービットのモデル化の方針]

解析結果から抽出した5つの半サイクル分のオービットを対象に、以下に述べる4つのパラメーター  $\theta_{Ep}$ 、 $la/la,max$ 、 $lb/la$ 、回転方向を分析し、半サイクル分のオービットをどのようにモデル化するかを検討する。

まず、図 3.6(1)に示す入力主方向に対する長軸の角度  $\theta_{Ep}$  に基づき、平面載荷履歴における主軸に対して楕円の長軸をどの程度傾けるかを検討する。ここで、入力主方向は、入力波の解析モデルの1次固有周期における、減衰10%の一質点弾性系への総エネルギー入力<sup>3,12)</sup>が最大となる方向として定義する。また、 $-90^\circ \sim 90^\circ$ の範囲の角度で  $\theta_{Ep}$  を整理することとし、長軸が入力主方向に対して時計回りに傾いている場合を正、反時計回りに傾いている場合を負とする。

次に、図 3.6(2)に示すように、一つの解析結果から抽出した5つの半サイクル分のオービットのうち、最大となる長軸の長さ  $la,max$  とそれ以外の半サイクル分のオービットの長軸の長さ  $la$  の比率を長軸の収縮率  $la/la,max$  として、これに基づき、平面載荷履歴における変位振幅をどのように変化させるか検討する。

また、図 3.6(3)に示すように、長軸の長さ  $la$  と短軸の長さ  $lb$  の比率  $lb/la$  から、平面載荷履歴における楕円率を検討する。

最後に、図 3.6(4)に示すように、5つの半サイクル分のオービットのなかで、支配的な応答となる最も長軸の長い半サイクル分のオービットの回転方向と同一方向回転となる場合がどの程度あるかに基づき、平面載荷履歴における回転方向を検討する。

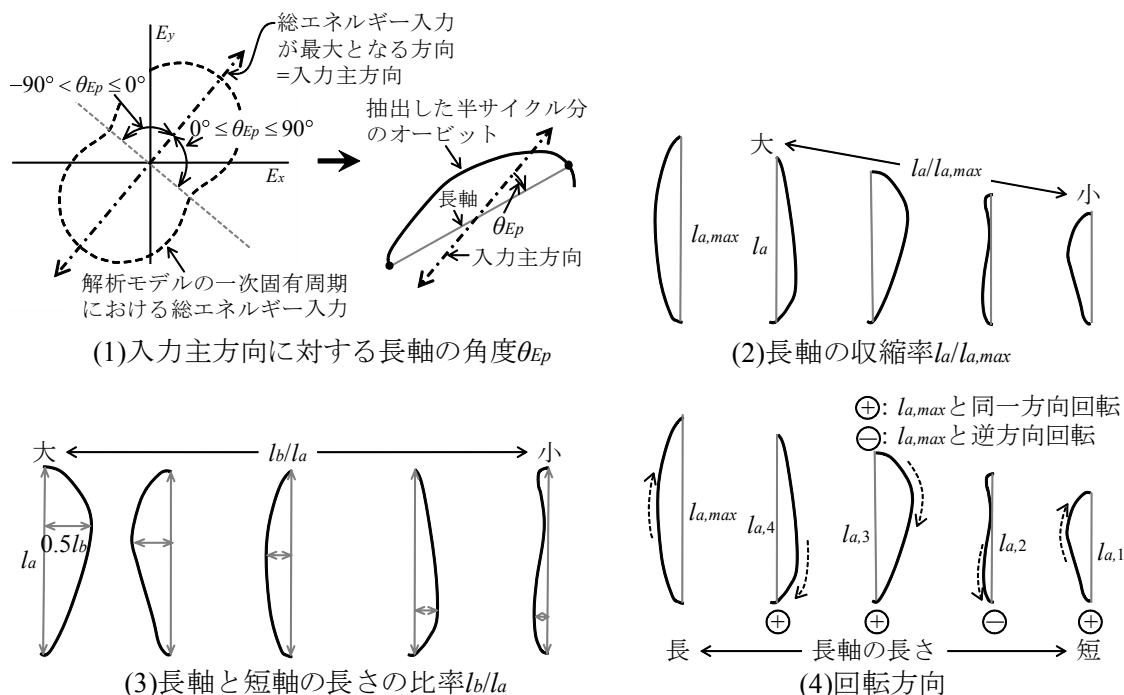


図3.6 平面載荷履歴を規定するパラメーター

[抽出した半サイクル分のオービットのモデル化]

0°を中心に30°を階級幅とした、入力主方向に対する長軸の角度  $\theta_{Ep}$  のヒストグラムを図3.7に示す。抽出した半サイクル分のオービットの長軸は入力主方向を向いていることが多く、全体の80%が-45°~45°の範囲に分布し、また、全体の47%が-15°~15°の範囲に分布していることがわかった。本研究では、-45°~45°の範囲における各階級の比率を1:2:1にモデル化する。そこから、平面載荷履歴では、楕円の長軸を平面載荷履歴の主軸に対して各階級の中央値である-30°、0°、30°傾けることとする。即ち、楕円の長軸の角度を-30°とした載荷を1回、0°とした載荷を2回、30°とした載荷を1回として計4回の載荷を一つのセットとして、これを振幅を変動させて繰り返し行うことにより平面載荷履歴を構成することとする。

次に、入力主方向に対する長軸の角度  $\theta_{Ep}$  のヒストグラムの各階級における長軸の収縮率  $l/l_{l,max}$  の内訳を図3.8に示す。度数が比較的大きな-45°~45°の範囲における各階級において、長軸の収縮率  $l/l_{l,max}$  は長軸の角度  $\theta_{Ep}$  によらず概ね同様の分布となっている。そこで平面載荷履歴では、上述の一つのセットにおける各角度の楕円の振幅は同一として、振幅の変動のさせ方はそれぞれの角度における楕円で同様に変動させるものとする。

入力主方向に対する長軸の角度  $\theta_{Ep}$  のヒストグラムの各階級における長軸と短軸の長さの比率  $l_b/l_a$  の内訳を図3.9に示す。-45°~45°の範囲での各階級において、長軸と短軸の長さの比率  $l_b/l_a$  は0~0.4が多くを占めており、その中でも特に0.2~0.4が多い。そこで、平面載荷履歴においては、楕円率は0.3で一定とする。

一つの解析結果から抽出した5つの半サイクル分のオービットのなかで、長軸の最も長い半サイクル分のオービットの回転方向に対して同一方向回転または逆方向回転になる場合を判別する。各長軸の長さを系列として、同一方向回転あるいは逆方向回転となる場合の個数を図3.10に示す。長軸の長さが短いものについては逆方向回転する場合も多くなるが、支配的な応答となる長軸の長さが長い半サイクル分のオービットについては概ね同一方向に回転することが多い。そこで、平面載荷履歴における回転方向は一定とする。

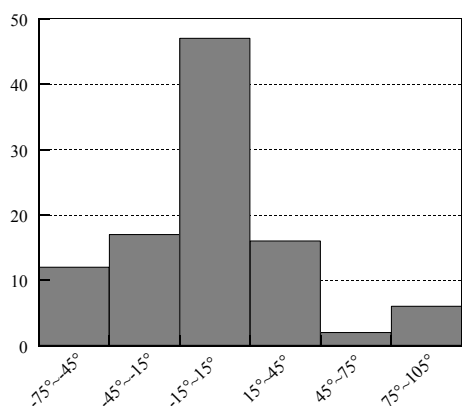


図3.7 入力主方向に対する長軸の角度  $\theta_{Ep}$  のヒストグラム

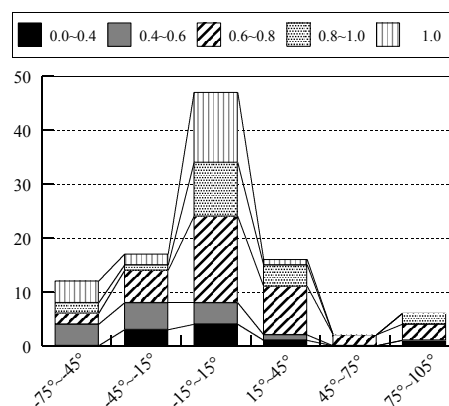


図3.8 長軸の収縮率  $l/l_{l,max}$  の内訳

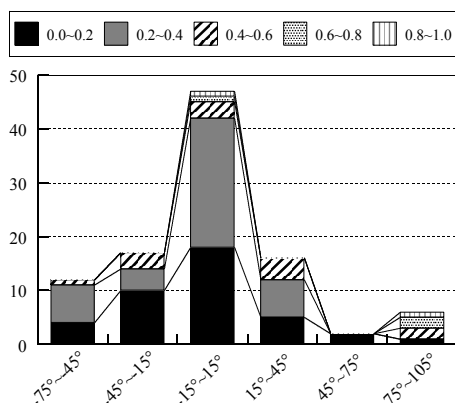


図3.9 長軸と短軸の長さの比率  $l_b/l_a$  の内訳

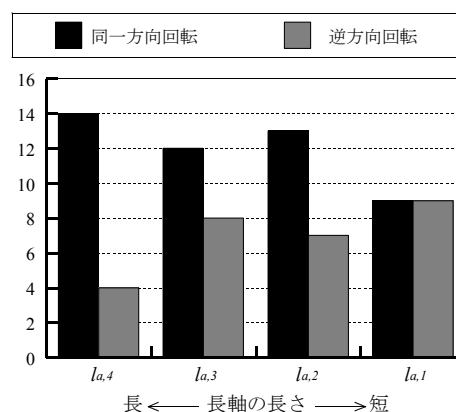


図3.10 回転方向の検討

### ・規則的な平面載荷履歴の提案

以上のモデル化に基づき設定した規則的な平面載荷履歴の概形を図 3.11(1)に示す。規則的な平面載荷履歴は以下のように構成する。

- 1.任意に設定した平面載荷履歴の主軸に対する楕円の長軸の角度を $-30^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ とした3つの楕円から構成する。また、それぞれの角度に対する載荷回数は、 $-30^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ がそれぞれ1:2:1の比率となるようにする。
- 2.楕円率は0.3で一定とする。
- 3.変位振幅は楕円の長軸の長さで制御することとし、部材の繰返し曲げ試験で一般に行われているように、基準とする変形量の2の倍数ずつ振幅を漸増させるものとする<sup>3,14</sup>。
- 4.回転方向は一定とする。

次に、載荷順序の概要を図 3.11(2)に示す。載荷順序は長軸の角度 $0^\circ \rightarrow +30^\circ \rightarrow 0^\circ \rightarrow -30^\circ$ の順とし、以下に述べるステップ①~④(載荷開始時はステップ①を加える)を1セットとして、1セット完了ごとに振幅を漸増させるものとする。

ステップ①：載荷開始時は、原点 O から平面載荷履歴の主軸方向に向かって、長軸の角度が $0^\circ$ の楕円に至る点 A まで載荷する。

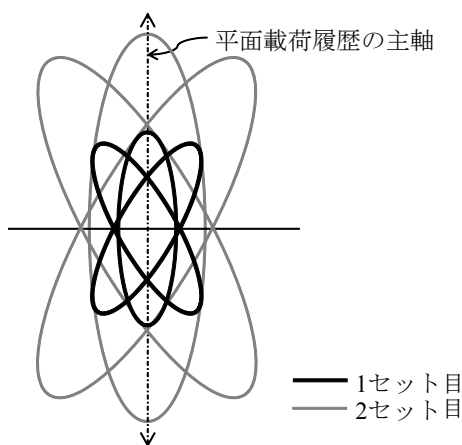
ステップ②：点 A から時計回りに楕円状に載荷して1周を超えたのち、次のステップの楕円(長軸の角度が $+30^\circ$ )に緩やかに移行できる交点 B まで載荷する。

ステップ③：点 B から長軸の角度が $30^\circ$ の楕円状に載荷して1周を超えたのち、次のステップの楕円(長軸の角度が $0^\circ$ )に緩やかに移行できる交点 C まで載荷する。

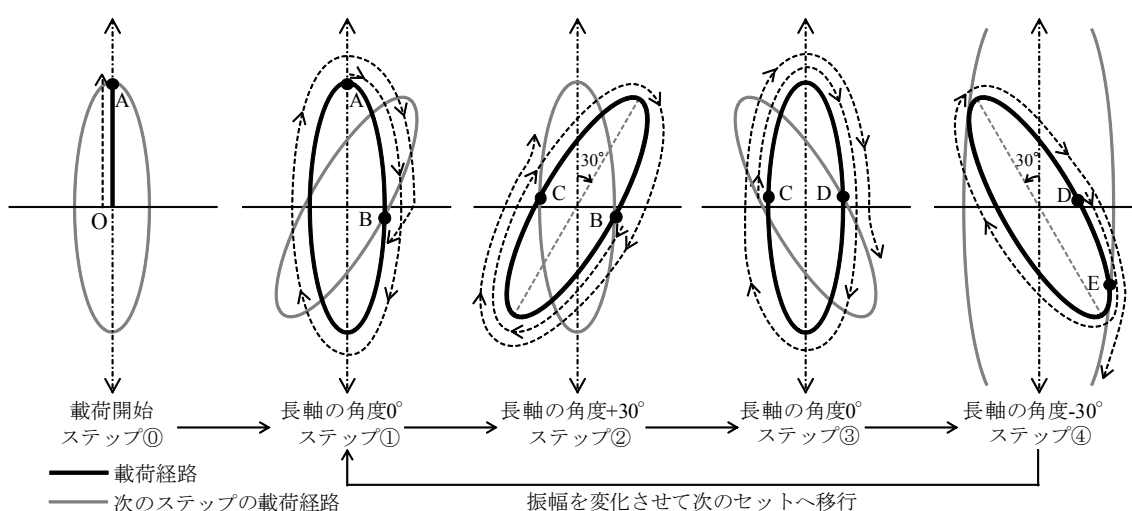
ステップ④：ステップ②と同様に点 C から長軸の角度 $0^\circ$ の楕円状に載荷して1周を超えたのち、次のステップの楕円(長軸の角度が $-30^\circ$ )に緩やかに移行できる交点 D に至るまで載荷する。

ステップ⑤：点 D から1周を超えたのち、振幅を変化させた次のセットの楕円(長軸の角度が $0^\circ$ )との交点 E まで載荷する。

2セット目以降はステップ①~④を同様に繰り返して載荷を行う。



(1)平面載荷履歴の概形



(2)載荷順序の概要

図3.11 規則的な平面載荷履歴

### 3.2.3 ランダムな平面載荷履歴の設定

ランダムな平面載荷履歴は、水平2方向の地震入力を受ける多質点せん断系の弾塑性応答解析より得られる1層質点の変位オービットに基づいて設定する。解析モデルは規則的な平面載荷履歴を構築する際に用いた1層損傷集中型のMSSモデルとした。ここで、ベースシャー係数は0.5、降伏層間変形角は0.005、層数は9層とし、P-Δ効果を考慮した。層の復元力特性については完全弾塑性型とした。

本解析における入力波は、繰り返し数は少ないものの大きな振幅で急激に損傷を受けるような応答となる直下型地震と、比較的小さな振幅での繰り返しにより徐々に損傷が累積していくような応答となる海溝型地震を代表し、神戸波と仙台波の2波を用いた。ここで、部材の最大耐力以降の劣化域を含む挙動を検討するための実験に用いる平面載荷履歴を設定するという意図から、解析では入力加速度に係数を掛け、ある程度大きな応答レベルでの変位オービットとして、1層の最大応答変位が塑性率で、3.3節で述べる幅厚比が22.2

の試験体に用いる解析については 10 程度、幅厚比が 33.3 の試験体に用いる解析については 8 程度となる場合の応答を求めた。また、実験では、解析結果の 1 層質点の変位オービットから振幅の小さな部分を間引いた上で平面載荷履歴として用いた。

### 3.3 試験体とパラメーター

試験体には、建築構造用冷間ロール成形角形鋼管(BCR295)□-200×200×9(幅厚比 22.2)、□-200×200×6(幅厚比 33.3)を用いた。試験体形状を図 3.12 に示す。試験体両端には、実験装置に接続するためのエンドプレート(削り出し後の板厚 33mm)が溶接されている。鋼管平板部から切り出した JIS1A 号試験片による素材引張試験結果を図 3.13 及び表 3.2 に示す。

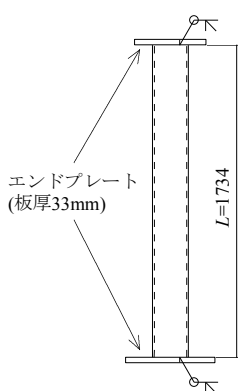


図3.12 試験体形状

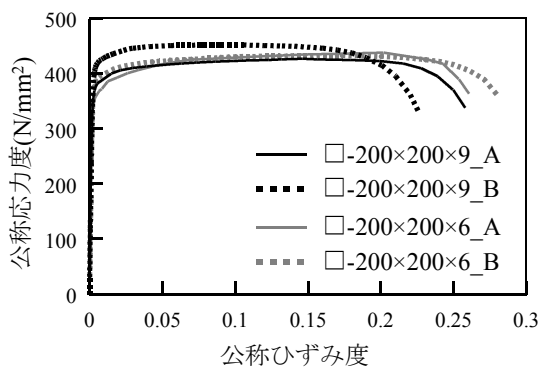


図3.13 素材引張試験結果

表3.2 素材引張試験結果一覧

ロット	降伏応力度 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	降伏比 %	破断伸び %
□-200×200×9_A	375	427	88	27
□-200×200×9_B	411	452	91	23
□-200×200×6_A	351	438	80	28
□-200×200×6_B	385	433	89	27

本実験のパラメーターは、幅厚比、降伏軸力比、平面載荷履歴である。実験パラメーターの一覧を表 3.3 に、平面載荷履歴の概要を図 3.14 に示す。降伏軸力比は、0.2 あるいは 0.4 の 2 種類とした。平面載荷履歴は、3.2 節で設定した規則的な平面載荷履歴とランダムな平面載荷履歴を用いる。規則的な平面載荷履歴については、平面載荷履歴の主軸方向を鋼管平板部に対して 0° あるいは 45° とした 2 種類を設定した。ここで、規則的な平面載荷履歴の変位振幅は、1 セットごとに  $2\theta_{pc0}$  ( $\theta_{pc0}$  は 0° 方向に荷重した場合の軸力を考慮した全塑性モーメントに対応する弾性部材角の計算値) ずつ漸増させることとした。ランダムな平面載荷履歴については、前述の神戸波または仙台波を入力した多質点せん断系の応答解析結果から得られる 1 層質点の変位オービットを用いた。

表3.3 実験パラメーターの一覧

試験体名	ロット	幅厚比	降伏軸力比	平面載荷履歴*		
CB00_0.2_22	□200×200×9_A	22.2	0.2	(1)		
CB45_0.2_22				(2)		
CB00_0.4_22			0.4	(1)		
CB45_0.4_22				(2)		
CB_KB_0.2_22	□200×200×9_B	22.2	0.2	(3)		
CB_SD_0.2_22				(5)		
CB00_0.2_33	□200×200×6_A	33.3	0.2	(1)		
CB45_0.2_33				(2)		
CB00_0.4_33			0.4	(1)		
CB45_0.4_33				(2)		
CB_KB_0.2_33			□200×200×6_B	33.3	0.2	(4)
CB_SD_0.2_33						(6)

\*図3.14 参照

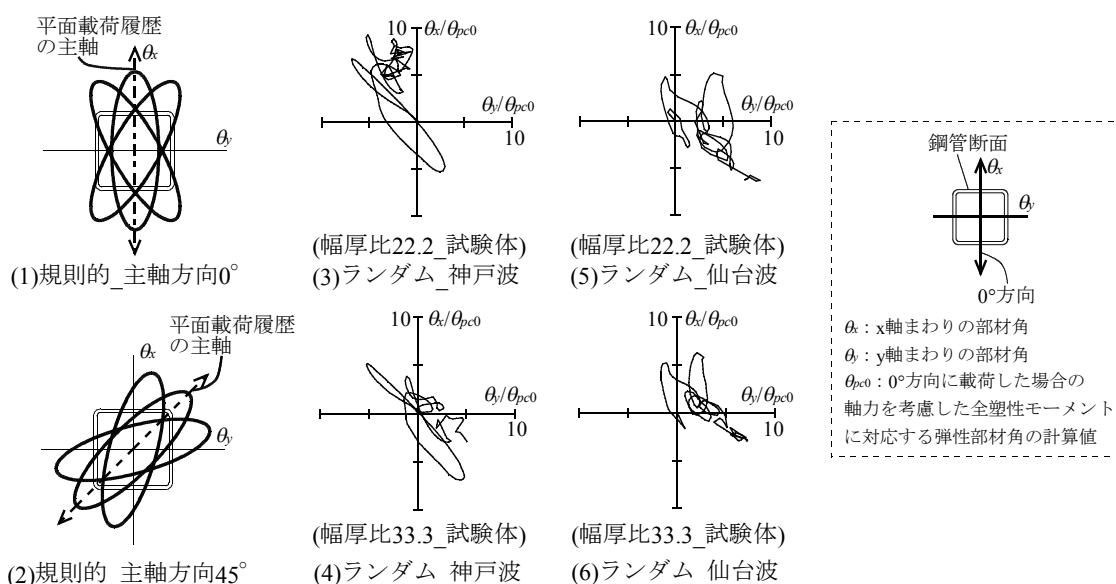


図3.14 平面載荷履歴の概要

### 3.4 実験方法

セットアップを図3.15(1),(2)及び写真3.1に示す。試験体の上端は反力治具に固定され、下端は水平面内に移動可能な加力治具に固定されている。水平荷重は加力治具を介して接続される2台の油圧式ジャッキ(水平ジャッキ)により作用させ、鉛直荷重は反力治具を介して接続される3台の油圧式ジャッキ(鉛直ジャッキ)により作用させた。載荷は、まず鉛直ジャッキにより所定の軸力を作用させた後、一定軸力の条件で水平ジャッキにより繰り返し載荷を行った。このとき、逆対称曲げの載荷条件となるように、鉛直ジャッキを制御して反力治具を水平に保った。この実験装置によって試験体に作用する荷重と試



験体の変形状態を図 3.16 に示す。試験体に作用する荷重については、各ジャッキに設置した 2 分力計により水平 2 方向の外力および軸力を計測し、試験体の変形については、水平変位および鉛直変位を変位計により計測した。試験体に作用するせん断力、軸力および反曲点位置を試験体材長の中央と仮定したときの曲げモーメント、部材角は式(3.1)~(3.7)で求められる。

$$Q_x = F_{ew\_x} + F_{ns\_x} \quad (3.1)$$

$$Q_y = F_{ns\_y} + F_{ew\_y} \quad (3.2)$$

$$N = N_n + N_s + N_e + F_{rms\_v} + F_{rew\_v} \quad (3.3)$$

$$M_x = Q_y(L - \delta_v) / 2 + N \cdot \delta_y / 2 \quad (3.4)$$

$$M_y = Q_x(L - \delta_v) / 2 + N \cdot \delta_x / 2 \quad (3.5)$$

$$\theta_x = \tan^{-1} \{ \delta_y / (L - \delta_v) \} \quad (3.6)$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \{ \delta_x / (L - \delta_v) \} \quad (3.7)$$

ここで、

$L$  : 試験体材長(1734mm)

$\delta_x$  : x 方向の層間変形

$\delta_y$  : y 方向の層間変形

$\delta_v$  : 軸方向変形

$\theta_x$  : x 軸まわりの部材角

$\theta_y$  : y 軸まわりの部材角

$F_{ns\_x}$  : 水平ジャッキ(NS 方向)による x 方向の外力

$F_{ns\_y}$  : 水平ジャッキ(NS 方向)による y 方向の外力

$F_{ew\_x}$  : 水平ジャッキ(EW 方向)による x 方向の外力

$F_{ew\_y}$  : 水平ジャッキ(EW 方向)による y 方向の外力

$Q_x$  : x 方向のせん断力

$Q_y$  : y 方向のせん断力

$N_n$  : 鉛直ジャッキ(N 側)による鉛直方向の外力

$N_s$  : 鉛直ジャッキ(S 側)による鉛直方向の外力

$N_e$  : 鉛直ジャッキ(E 側)による鉛直方向の外力

$F_{rms\_v}$  : 反力梁(NS 方向)による鉛直方向の外力

$F_{rew\_v}$  : 反力梁(EW 方向)による鉛直方向の外力

$N$  : 軸力

$M_x$  : 試験体の材端に作用する x 軸まわりの曲げモーメント

$M_y$  : 試験体の材端に作用する y 軸まわりの曲げモーメント

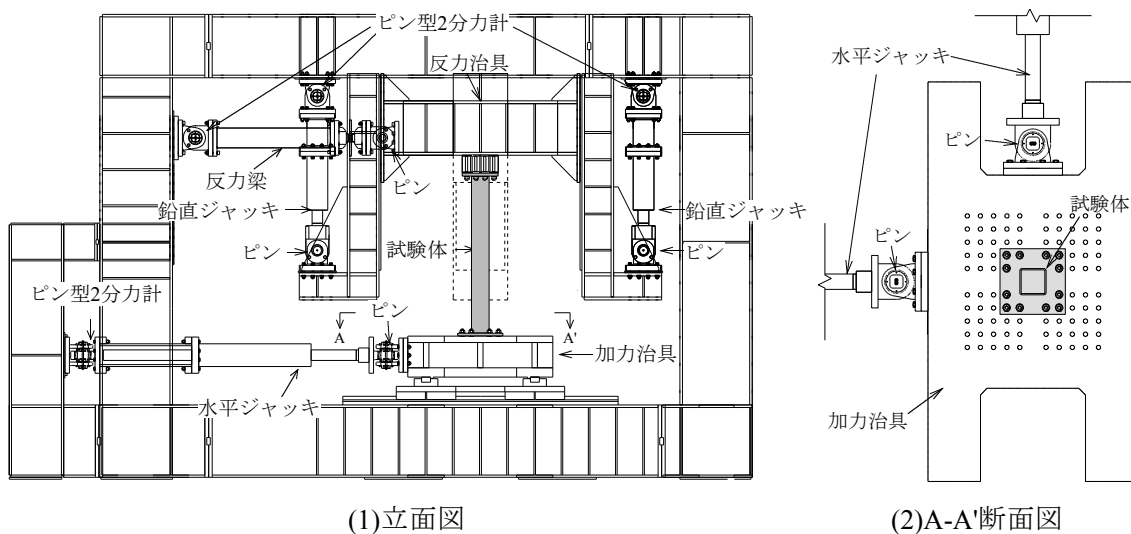


図3.15 セットアップ

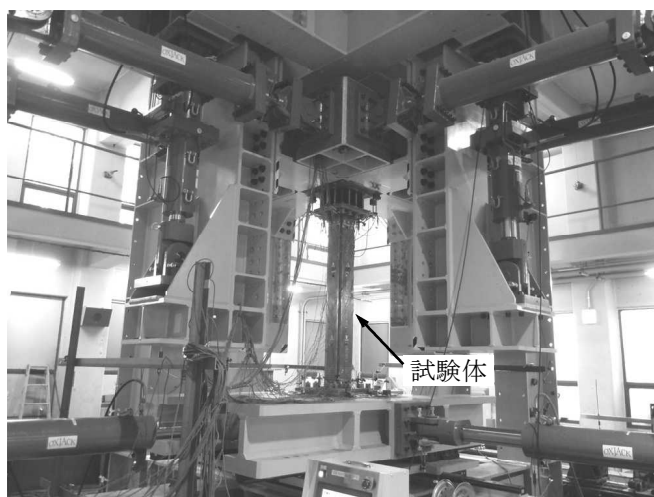


写真3.1 セットアップ状況

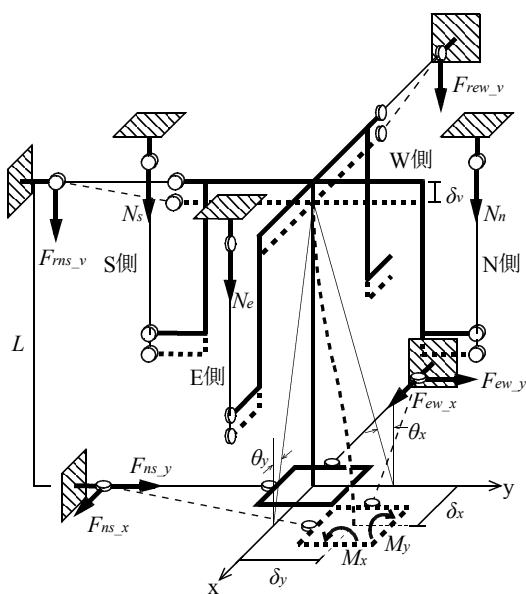


図3.16 試験体に作用する荷重と変形状態

### 3.5 実験結果

各試験体の最大耐力の決定要因は局部座屈であった。局部座屈の発生状況を写真 3.2 に例示する。荷重は、試験体が水平方向の復元力を喪失し軸力を保持できなくなるまで行うことを原則としたが、規則的な平面荷重履歴で荷重した試験体のうち、降伏軸力比が 0.2、幅厚比が 22.2 の試験体(CB00\_0.2\_22,CB45\_0.2\_22)については、局部座屈波が試験体を固定している治具に接触しそうになったため、接触する直前で荷重を中止した。また、ランダムな平面荷重履歴により荷重した試験体については、いずれの試験体も所定の平面荷重履歴を終了後も水平方向の復元力を保持していたため、その後は原点から所定の平面荷重履歴において最大変位となる方向と平行となる方向への一方向荷重を行い、復元力を喪失するまで荷重を行った。ここで、CB\_KB\_0.2\_22 試験体については、所定の平面荷重履歴を終了した後の一方向荷重の途中で、鋼管角部の溶接止端部における延性亀裂を起点に脆性的に破断したため、荷重を終了した。また、CB\_SD\_0.2\_22 試験体については、所定の平面荷重履歴終了後の一方向荷重の途中で鋼管角部の溶接止端部において延性亀裂の発生を観察し、その後も継続して荷重したところ延性的に破断したため、荷重を終了した。なお、反曲点位置は試験体に貼付した 1 軸ひずみゲージにより試験体材長のほぼ中央であることを確認している。試験体材端に作用する x 軸まわり、y 軸まわりの曲げモーメント-部材角関係および荷重オービット、変位オービットを、0° 方向に荷重した場合の軸力を考慮した全塑性モーメント  $M_{pc0}$  と、 $M_{pc0}$  に対応する弾性部材角の計算値  $\theta_{pc0}$  でそれぞれ除した上で図 3.17(1)~(12)に示す。各図中において、各点に付してある番号はそれぞれ、①：合成モーメント  $\sqrt{M_x^2 + M_y^2}$  が最大となる点、②：x 軸まわりの曲げモーメントが最大となる点、③：y 軸まわりの曲げモーメントが最大となる点、④：ランダムな平面荷重履歴による試験体において、所定の平面荷重履歴を終了した点を示す。また、図中の黒実線は合成モーメントが最大値に至るまでの挙動、灰破線はそれ以降の挙動を表す。

#### ・実験経過

試験体ごとに各軸まわりで最大耐力に達した時点と、合成モーメントが最大値に達した時点に着目し実験経過を述べる。



写真3.2 局部座屈の発生状況(CB00\_0.2\_22)

[CB00\_0.2\_22]

主軸方向を  $0^\circ$ 、幅厚比を 22.2、降伏軸力比を 0.2 とした試験体(CB00\_0.2\_22)では、長軸を  $4\theta_{pc0}$  としたセットの最初に長軸を主軸方向に向けた楕円において、まず合成モーメントが最大値に達し、その直後に  $x$  軸まわりの曲げモーメントが最大値となった。 $x$  軸まわりの曲げモーメントが最大値となったのは、楕円の履歴で  $x$  軸まわりの部材角が最大となる頂点の近くである。この時点で、局部座屈の発生が観察されている。その後、同じセットの長軸を主軸から  $-30^\circ$  傾けた楕円をおよそ半周載荷したあたりで、 $y$  軸まわりの曲げモーメントが最大値となった。

[CB45\_0.2\_22]

主軸方向を  $45^\circ$ 、幅厚比を 22.2、降伏軸力比を 0.2 とした試験体(CB45\_0.2\_22)では、まず平面載荷履歴における 1 セット目、即ち長軸を  $2\theta_{pc0}$  としたセットにおいて長軸を主軸から  $-30^\circ$  傾けた楕円で  $x$  軸まわりの部材角が最大となるあたりで  $x$  軸まわりの曲げモーメントが最大値となった。この時点では、局部座屈の発生は観察されていない。次に長軸を  $4\theta_{pc0}$  としたセットにおいて、最初に長軸を主軸方向に向けた楕円における長軸方向の頂点あたりで合成モーメントが最大値に達した。この時点で、局部座屈の発生も観察されている。その後、このセットでの  $y$  軸まわりの部材角が最大となる点まで載荷したあたりで、 $y$  軸まわりの曲げモーメントが最大値となった。

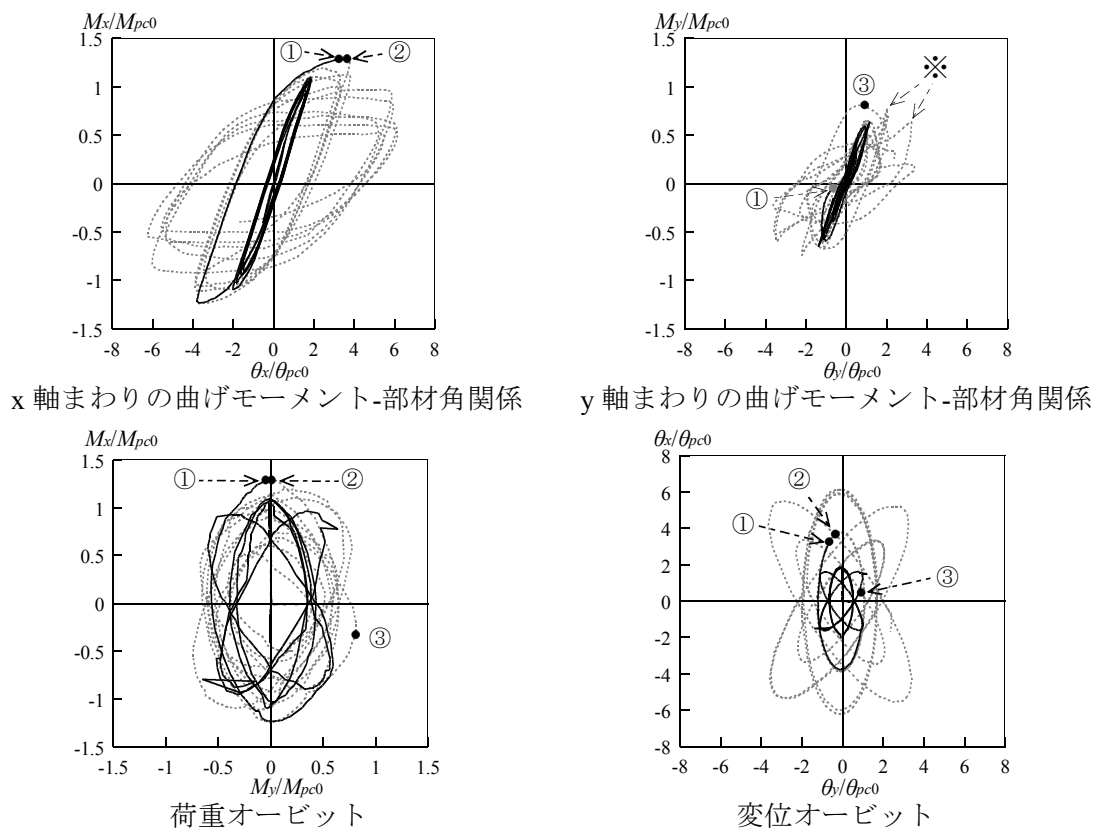
[CB00\_0.4\_22]

主軸方向を  $0^\circ$ 、幅厚比を 22.2、降伏軸力比を 0.4 とした試験体(CB00\_0.4\_22)では、まず長軸を  $2\theta_{pc0}$  としたセットで、長軸を主軸から  $-30^\circ$  傾けた楕円で  $y$  軸まわりの部材角が最大となるあたりで  $y$  軸まわりの曲げモーメントが最大値となった。この時点では、局部座屈の発生は観察されていない。次に長軸を  $4\theta_{pc0}$  としたセットの最初に長軸を主軸方向に向けた楕円において、長軸方向の頂点の手前で  $x$  軸まわりの曲げモーメントと合成モーメントが同時に最大値に達した。局部座屈の発生が観察されたのもこの時点である。

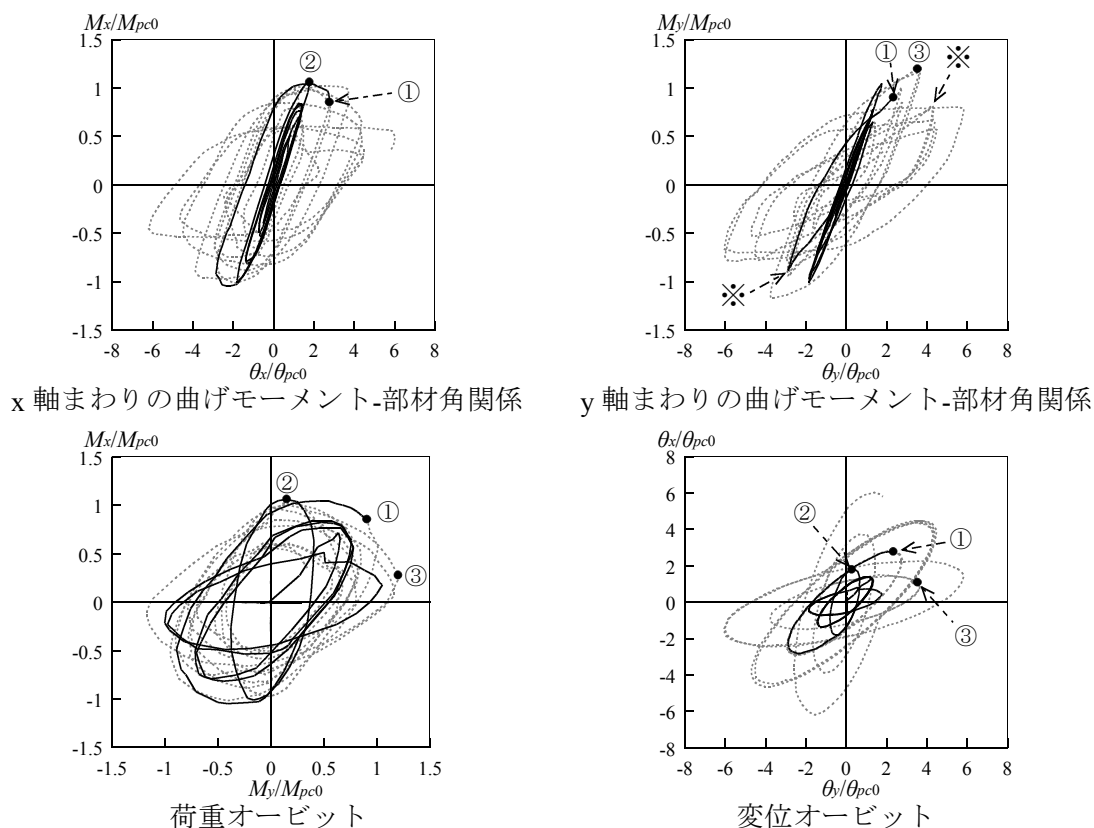
[CB45\_0.4\_22]

主軸方向を  $45^\circ$ 、幅厚比を 22.2、降伏軸力比を 0.4 とした試験体(CB45\_0.4\_22)では、まず長軸を  $2\theta_{pc0}$  としたセットにおいて、長軸を主軸から  $-30^\circ$  傾けた楕円で  $x$  軸まわりの部材角が最大となるあたりで  $x$  軸まわりの曲げモーメントが最大値となった。この時点では、局部座屈の発生は観察されていない。次に長軸を  $4\theta_{pc0}$  としたセットの最初に長軸を主軸方向に向けた楕円において、長軸方向の頂点の手前で合成モーメントが最大値に達した。この時点で、局部座屈の発生も観察されている。その後、このセットでの  $y$  軸まわりの部材角が最大となる点まで載荷したあたりで、 $y$  軸まわりの曲げモーメントが最大値となった。

軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰返し劣化挙動

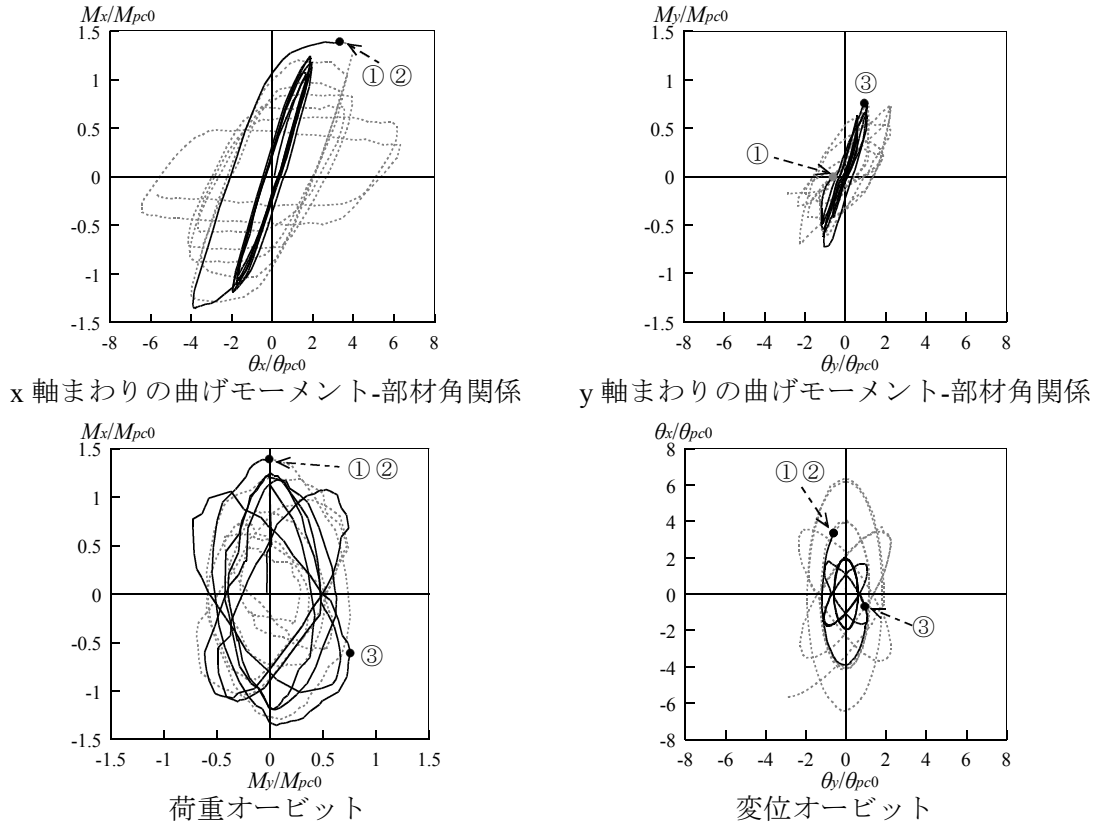


(1)CB00\_0.2\_22

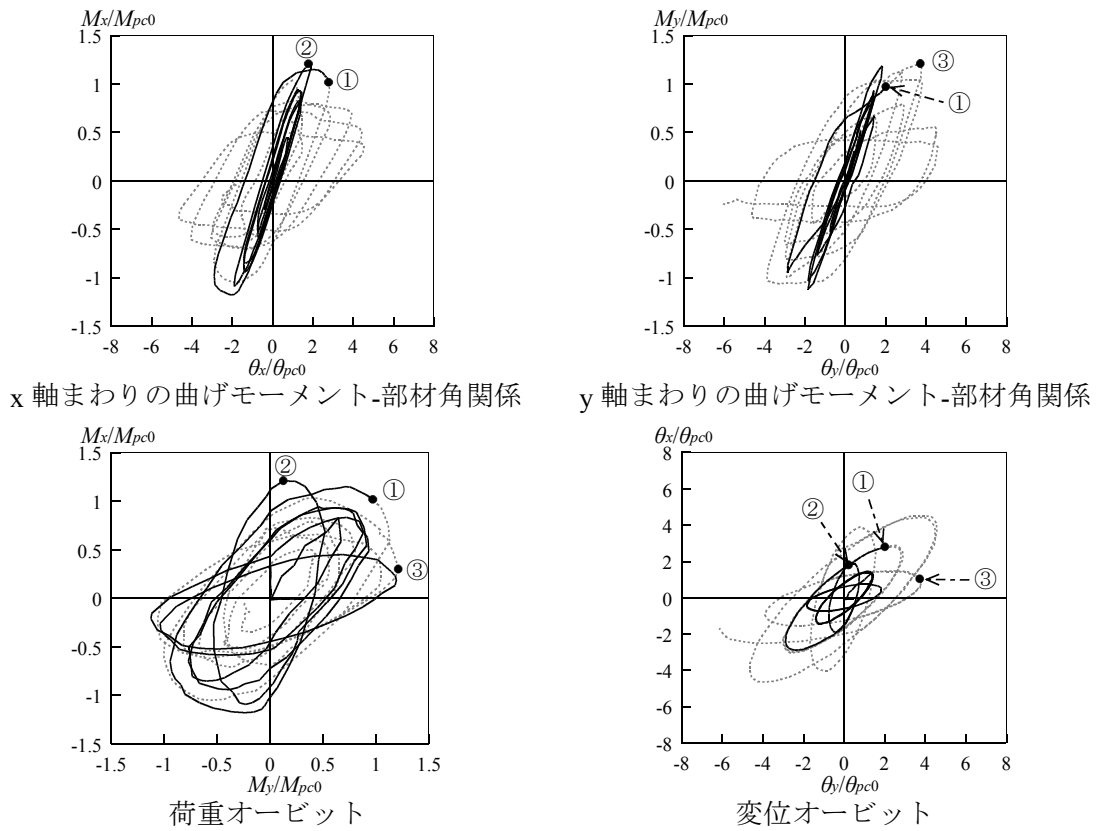


(2)CB45\_0.2\_22

図3.17 実験結果



(3)CB00\_0.4\_22



(4)CB45\_0.4\_22

図3.17 実験結果(続き)

[CB\_KB\_0.2\_22]

神戸波を入力波とした平面載荷履歴で、幅厚比を 22.2、降伏軸力比を 0.2 とした試験体 (CB\_KB\_0.2\_22) では、部材角が x 軸まわりで  $4\theta_{pc0}$ 、y 軸まわりで  $-5.5\theta_{pc0}$  となったあたりで、合成モーメントと y 軸まわりの曲げモーメントは最大値となった。また、この時点で局部座屈の発生が観察された。その後、およそ半サイクル載荷し、x 軸まわりの部材角が負側で最大となるあたりで、x 軸まわりの曲げモーメントは最大値となった。また、所定の平面載荷履歴を終了した後の一方向載荷において、図中\*で付した時点で、鋼管角部の溶接止端部における亀裂を起点に脆性的に破断した。

[CB\_SD\_0.2\_22]

仙台波を入力波とした平面載荷履歴で、幅厚比を 22.2、降伏軸力比を 0.2 とした試験体 (CB\_SD\_0.2\_22) では、載荷開始時から 1.5 サイクル程度載荷し、x 軸まわりの部材角がピーク値となった時点で、合成モーメントと x 軸まわりの曲げモーメントは最大値となった。また、この時点で局部座屈の発生が観察された。その後、およそ半サイクル載荷し、部材角が x 軸まわりで  $1\theta_{pc0}$ 、y 軸まわりで  $3\theta_{pc0}$  となるあたりで、y 軸まわりの曲げモーメントは最大値となった。

[CB00\_0.2\_33]

主軸方向を  $0^\circ$ 、幅厚比を 33.3、降伏軸力比を 0.2 とした試験体 (CB00\_0.2\_33) では、楕円の長軸を  $2\theta_{pc0}$  としたセットで最初に長軸を主軸方向に向けた楕円において、合成モーメントと x 軸まわりの曲げモーメントが同時に最大値に達した。合成モーメント及び x 軸まわりの曲げモーメントが最大値となったのは、楕円の履歴で x 軸まわりの部材角が最大となる頂点の近くである。局部座屈の発生を観察したのもこの時点である。その後、同じセットの長軸を主軸から  $-30^\circ$  傾けた楕円をおよそ半周載荷したあたりで、y 軸まわりの曲げモーメントは最大値に達した。

[CB45\_0.2\_33]

主軸方向を  $45^\circ$ 、幅厚比を 33.3、降伏軸力比を 0.2 とした試験体 (CB45\_0.2\_33) では、楕円の長軸を  $2\theta_{pc0}$  としたセットで長軸を主軸から  $+30^\circ$  傾けた楕円で y 軸まわりの部材角が最大となるあたりで合成モーメント及び y 軸まわりの曲げモーメントが最大値となった。この時点で、局部座屈の発生を観察した。その後、同じセットの長軸を主軸から  $-30^\circ$  傾けた楕円をおよそ半周載荷したあたりで、x 軸まわりの曲げモーメントは最大値に達した。

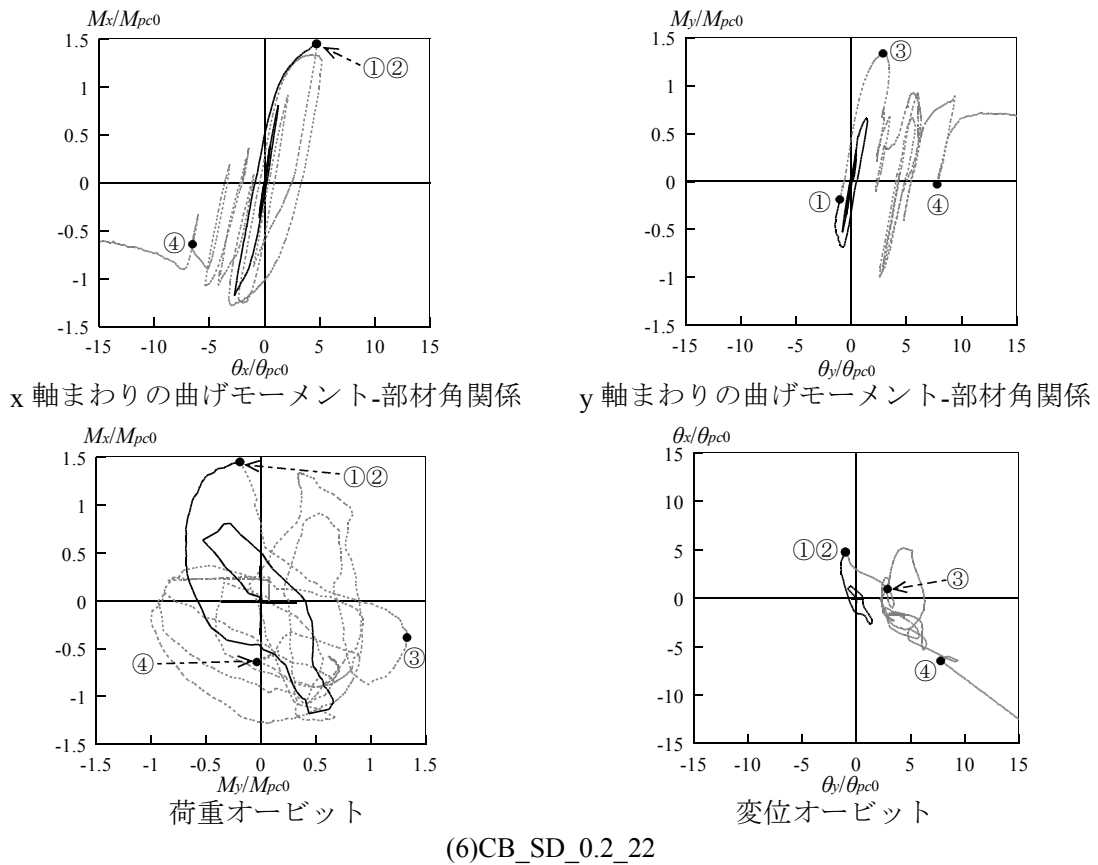
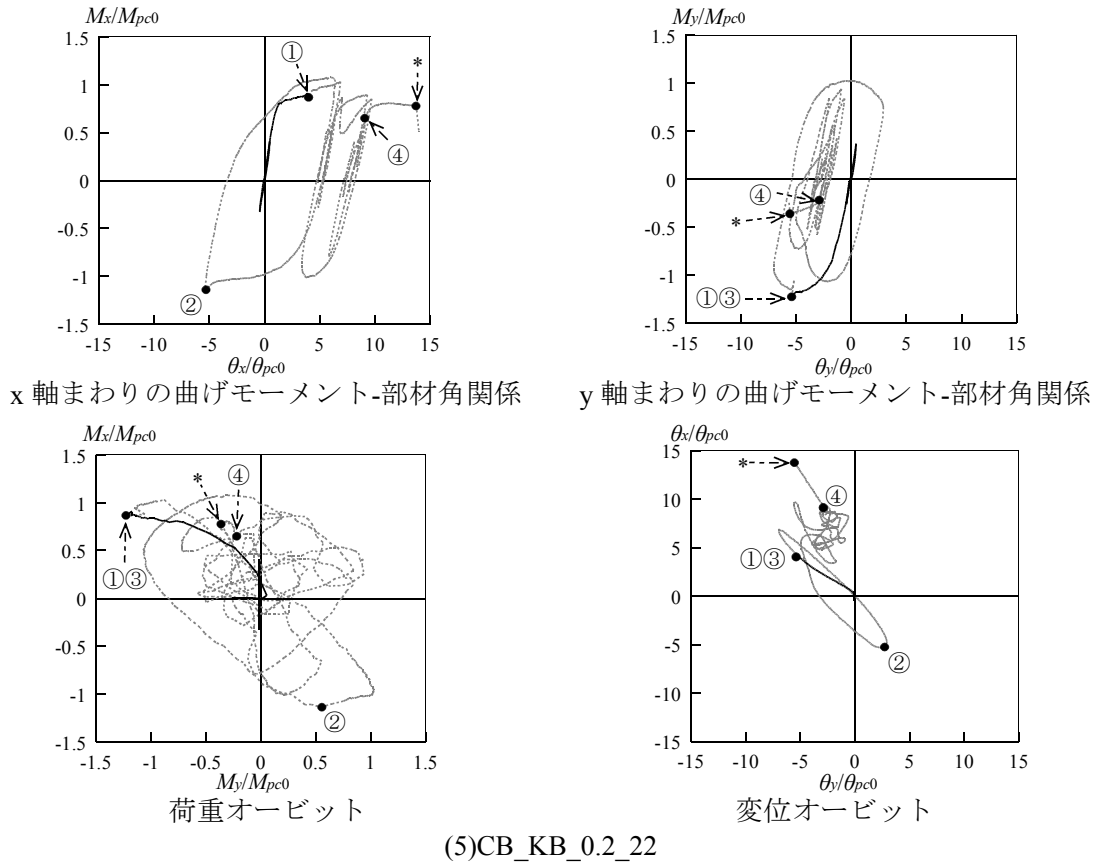
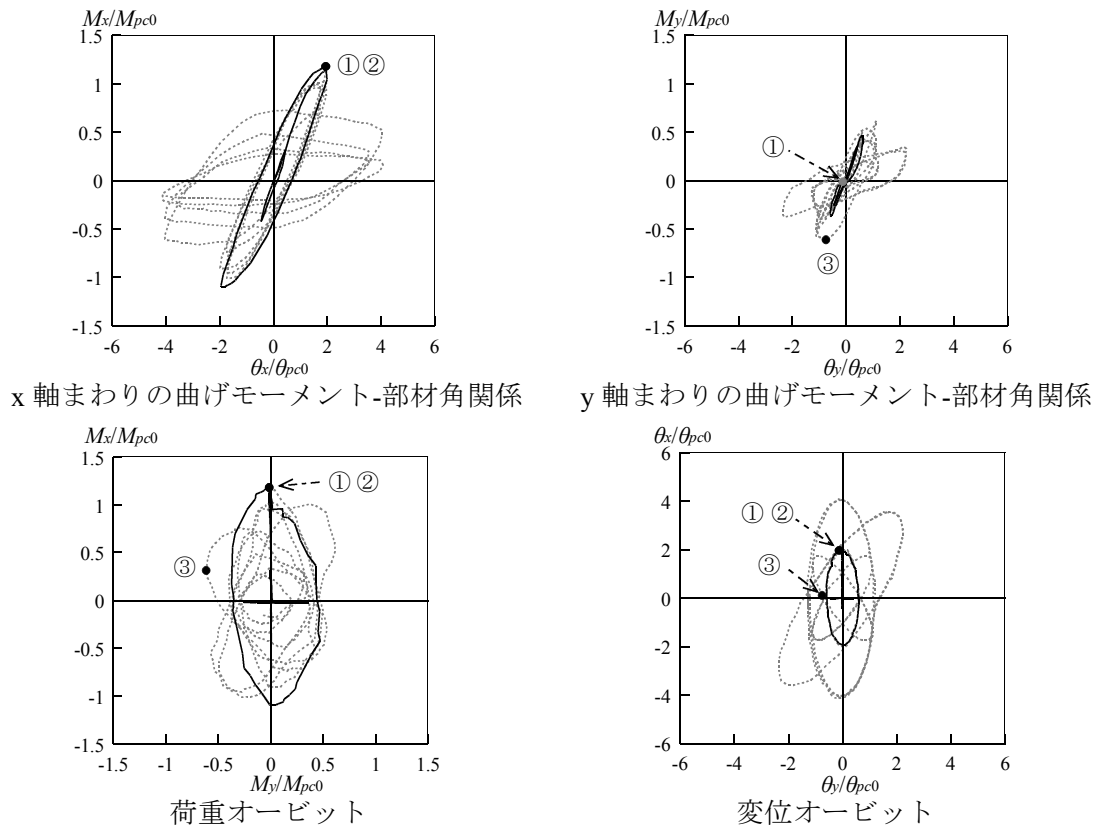


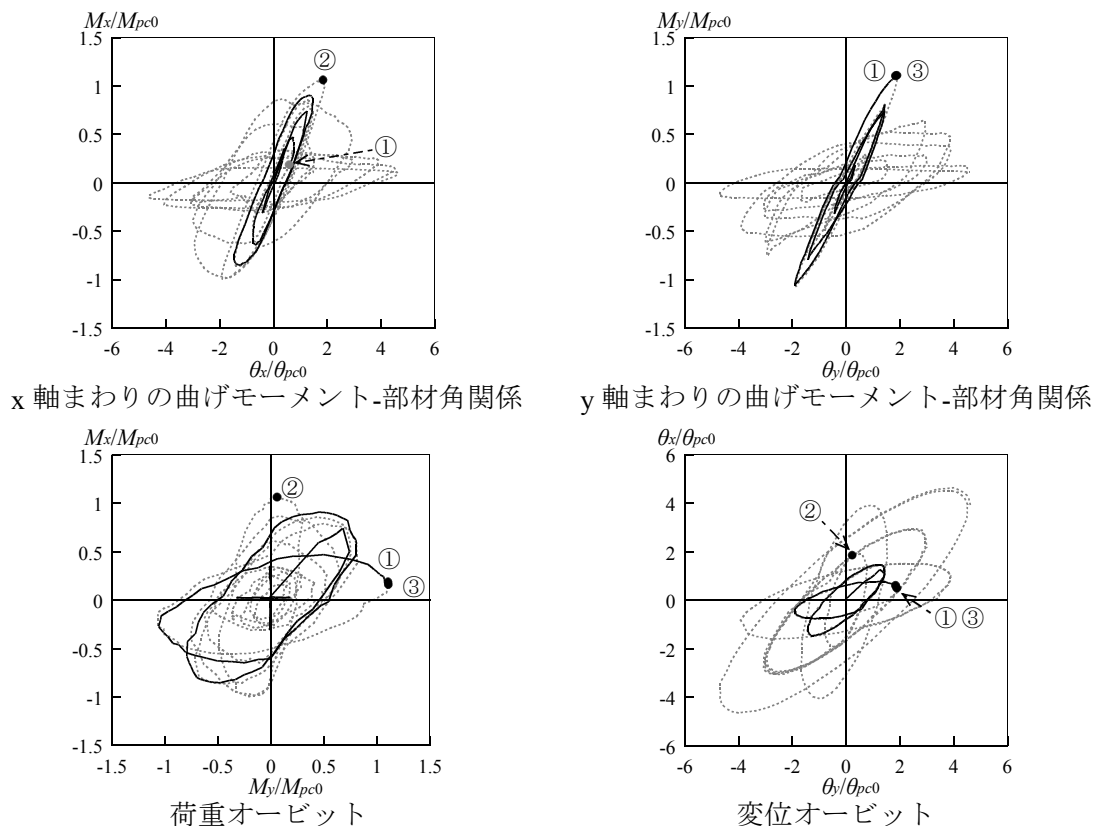
図3.17 実験結果(続き)



軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰返し劣化挙動



(7)CB00\_0.2\_33



(8)CB45\_0.2\_33

図3.17 実験結果(続き)

[CB00\_0.4\_33]

主軸方向を  $0^\circ$ 、幅厚比を 33.3、降伏軸力比を 0.4 とした試験体(CB00\_0.4\_33)では、楕円の長軸を  $2\theta_{pc0}$  としたセットで最初に長軸を主軸方向に向けた楕円において、x 軸まわりの部材角が最大となるあたりで合成モーメントと x 軸まわりの曲げモーメントが同時に最大値に達した。局部座屈の発生を観察したのもこの時点である。その後、このセットでの y 軸まわりの部材角が最大となる点まで載荷したあたりで、y 軸まわりの曲げモーメントが最大値となった。

[CB45\_0.4\_33]

主軸方向を  $45^\circ$ 、幅厚比を 33.3、降伏軸力比を 0.4 とした試験体(CB00\_0.4\_33)では、楕円の長軸を  $2\theta_{pc0}$  としたセットで最初に長軸を主軸方向に向けた楕円を半周載荷したあたりで、合成モーメントは最大値に達した。局部座屈の発生を観察したのもこの時点である。また、同じセットで最初に長軸を主軸方向に向けた楕円を 1 周載荷したあたりで、x 軸まわりの曲げモーメントは最大値となった。その後、同じセットで長軸を主軸から  $+30^\circ$  傾けた楕円で y 軸まわりの部材角が負側でピーク値となるあたりで、y 軸まわりの曲げモーメントは最大値に達した。

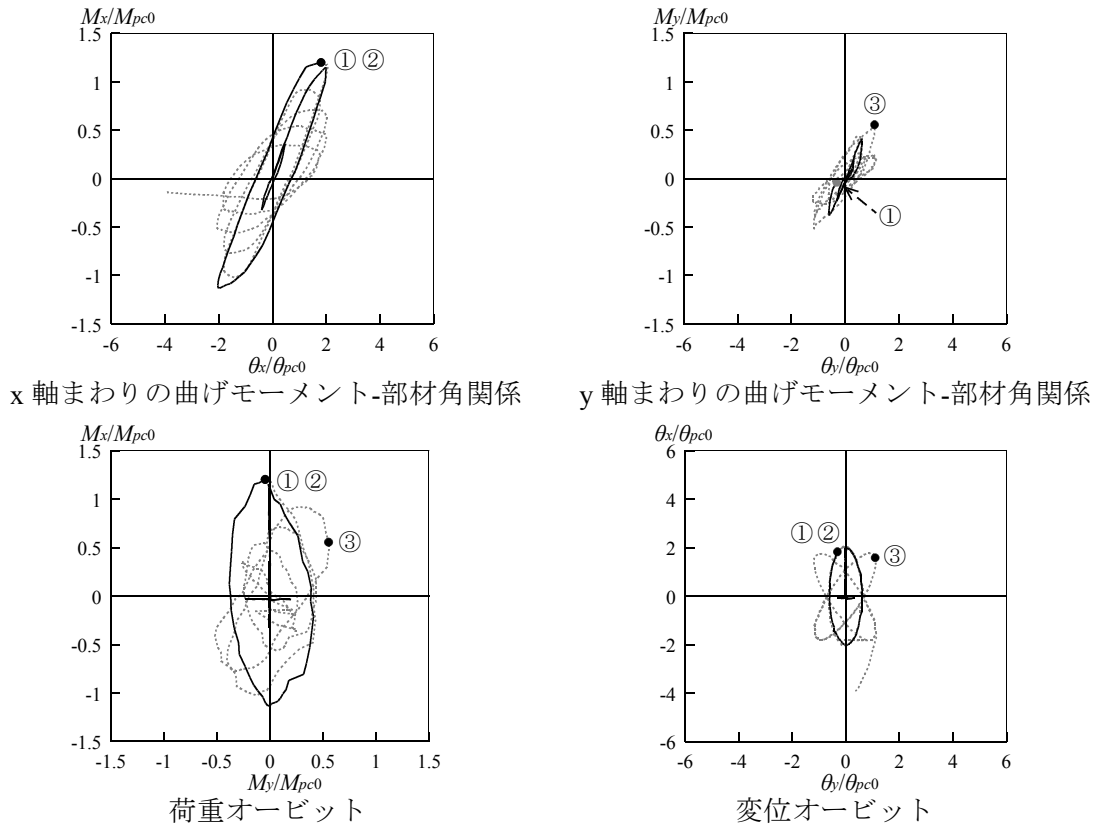
[CB\_KB\_0.2\_33]

神戸波を入力波とした平面載荷履歴で、幅厚比を 33.3、降伏軸力比を 0.2 とした試験体(CB\_KB\_0.2\_33)では、部材角が x 軸まわりで  $2\theta_{pc0}$ 、y 軸まわりで  $-2.5\theta_{pc0}$  に到達したあたりで、合成モーメントと、x 軸まわり、y 軸まわりの曲げモーメントは最大値となった。局部座屈の発生が観察されたのもこの時点である。

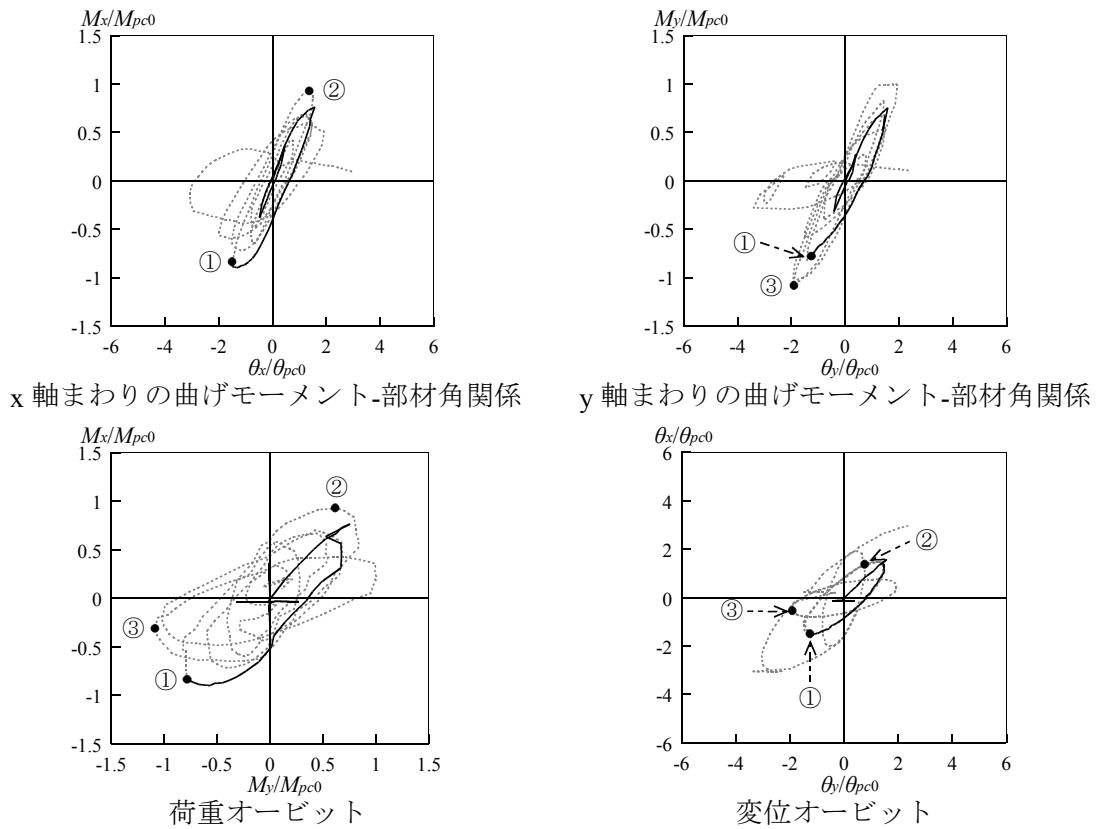
[CB\_SD\_0.2\_33]

仙台波を入力波とした平面載荷履歴で、幅厚比を 33.3、降伏軸力比を 0.2 とした試験体(CB\_SD\_0.2\_33)では、部材角が x 軸まわりで  $2.5\theta_{pc0}$ 、y 軸まわりで  $-1.5\theta_{pc0}$  となるあたりで、合成モーメントと x 軸まわりの曲げモーメントは最大値となった。また、局部座屈の発生が観察されたのもこのあたりである。その後、およそ半サイクル載荷したあたりで、y 軸まわりの曲げモーメントは最大値となった。

軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰返し劣化挙動

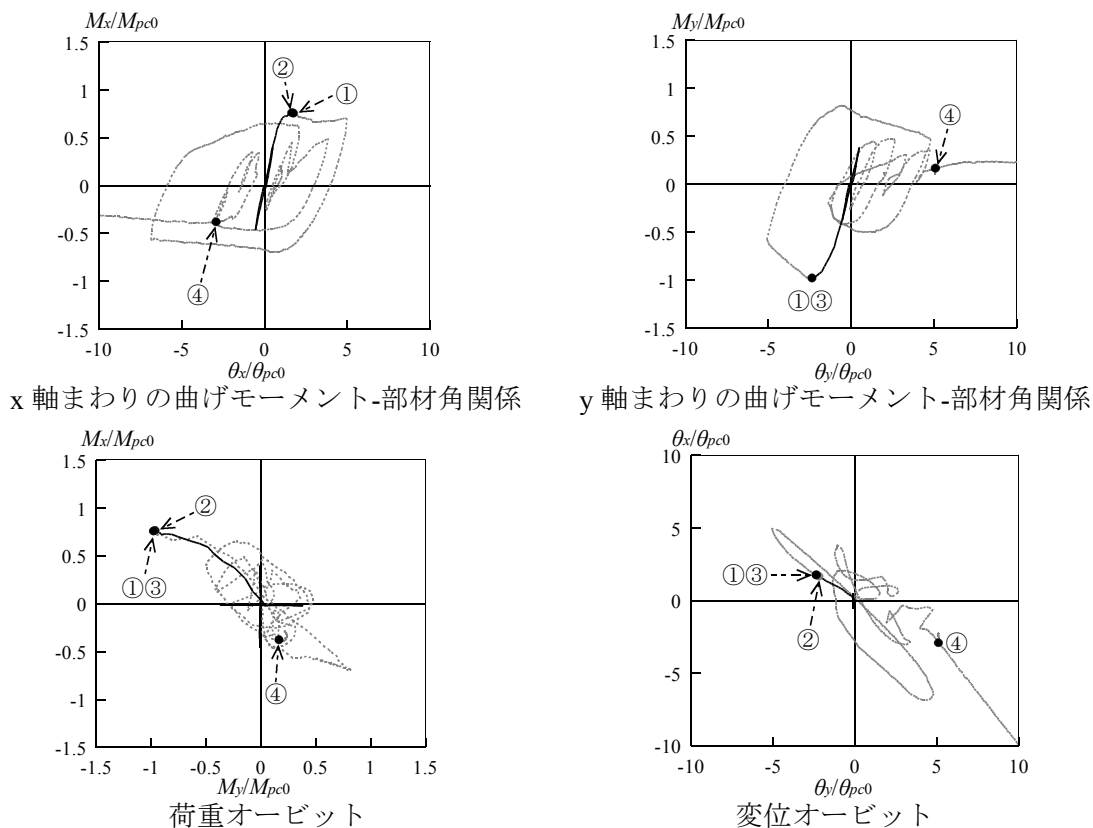


(9)CB00\_0.4\_33

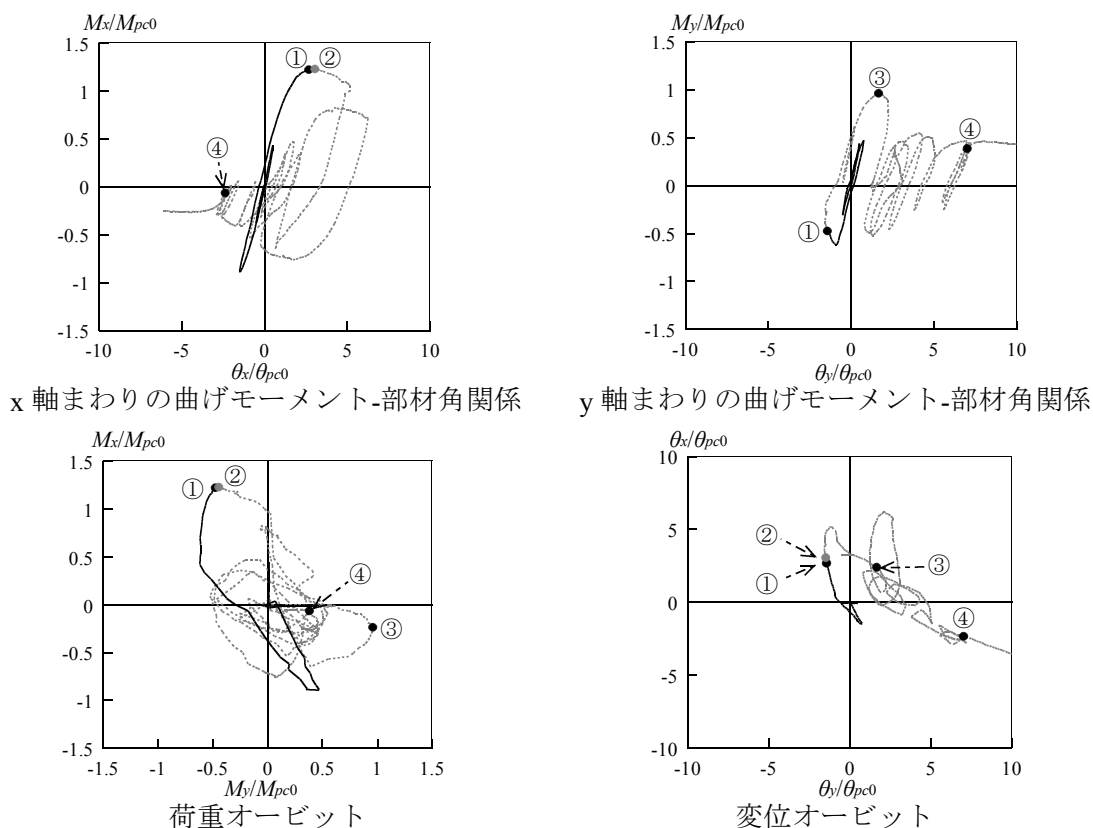


(10)CB45\_0.4\_33

図3.17 実験結果(続き)



(11)CB\_KB\_0.2\_33



(12)CB\_SD\_0.2\_33

図3.17 実験結果(続き)

### ・履歴挙動の検討

各軸まわりでの履歴曲線については、例えば、規則的な平面載荷履歴で、平面載荷履歴の主軸方向を $0^\circ$ 、幅厚比を22.2、降伏軸力比を0.2とした試験体(CB00\_0.2\_22)では、大きな振幅での変位履歴を受けるx軸まわりの履歴曲線は、これまで一般的に実験が行われている $0^\circ$ 方向に繰り返し荷重を受ける場合と同様に紡錘形の履歴曲線となったが、振幅の小さなy軸まわりでは、図3.17(1)中※印で示したあたりのように、一部のサイクルで変形が大きくなると剛性が高くなるという、紡錘形とは異なる挙動が見られた。変形が大きくなると剛性が高くなる挙動は、y軸まわりの曲げモーメントが上昇しピーク値に近づくところで、x軸まわりの曲げモーメントが大きく除荷する場合に見られた。直交方向であるx軸まわりの除荷に伴い、断面の一部が塑性域から弾性的に除荷することで全体の剛性が上昇したと考えられる。x軸まわりの挙動でこのような現象が見られなかったのは、x軸まわりの曲げモーメントが上昇しピーク値に近づくところでは、y軸まわりの曲げモーメントが除荷するとしてもわずかであり、さらに、y軸まわりの曲げモーメント自体小さいことから、断面内で除荷に転じる部分も小さく、全体の挙動に与える影響が小さかったためと考えられる。また、規則的な平面載荷履歴で、平面載荷履歴の主軸方向を $0^\circ$ 、幅厚比を22.2、降伏軸力比を0.2とした試験体(CB45\_0.2\_22)においても、x軸まわりとyまわりで同程度の振幅で載荷されるが、x軸まわりの履歴曲線は主軸を $0^\circ$ とした場合のx軸まわりの履歴曲線同様に紡錘形の形状となったが、y軸まわりでは、図3.17(2)中※印で示したあたりのように、一部のサイクルで変形が大きくなると剛性が高くなる挙動が見られた。主軸を $45^\circ$ とした場合においても変形が大きくなると剛性が高くなる挙動は、y軸まわりの曲げモーメントが上昇しピーク値に近づくところで、x軸まわりの曲げモーメントが大きく除荷する場合に見られた。また、x軸まわりの挙動でこのような現象が見られなかったのは、x軸まわりの曲げモーメントが上昇しピーク値に近づくところではy軸まわりの曲げモーメントも上昇過程にあり、剛性が高くなる挙動が見られた場合と同様の応力条件にはなっていないことによる。このように、平面載荷履歴の回転方向の影響により、一部のサイクルで変形が大きくなると剛性が高くなるという $0^\circ$ 方向に繰り返し荷重を受ける場合とは異なる履歴挙動が見られた。

### 3.6 まとめ

水平2方向の繰り返し外力下での角形鋼管柱の終局挙動に関する研究の端緒として、一定軸力の条件下で水平2方向の繰り返し外力を受ける角形鋼管柱の載荷実験を行い、局部座屈発生に起因する劣化挙動を含む履歴挙動を検討した。

実験に先立ち、水平2方向の地震入力を受ける多質点せん断系の応答解析結果に基づき、規則的な平面載荷履歴及びランダムな平面載荷履歴を設定した。規則的な平面載荷履歴は大きさの等しい3つの楕円のセットで構成する。1つのセットでは楕円の長軸と平面載荷履歴の主軸との角度と周回数を変化させることとし、長軸と主軸との角度を $-30^\circ$ としたものを1回、長軸と主軸との角度を $0^\circ$ としたものを2回、長軸と主軸との角度を $30^\circ$ とし

たものを1回とする。ここで各楕円の楕円率は0.3、回転方向は一定とする。また、変位振幅は楕円の長軸の長さで制御することとし、1セットごとに基準とする変形量の2の倍数ずつ振幅を漸増させるものとする。ランダムな平面載荷履歴は、応答解析結果より得られる1層質点の変位オービットから小振幅成分を除いたものを用い、入力波については、直下型地震と海溝型地震を代表し、神戸波と仙台波の2波とした。

平面載荷履歴、降伏軸力比、幅厚比をパラメーターとした角形鋼管柱の載荷実験を行い、一定軸力下で水平2方向繰り返し外力を受ける角形鋼管柱について、最大耐力以降の劣化域も含めた履歴挙動に関するデータを得た。実験で得られたx軸まわり、y軸まわりの履歴挙動においては、平面載荷履歴の回転方向の影響により、一部のサイクルで変形が大きくなると剛性が高くなるという、これまで実験が行われている0°方向に繰り返し載荷を受ける場合とは異なる履歴挙動が見られた。また、局部座屈の発生が観察されたあたりで、水平2方向の合成モーメント $\sqrt{M_x^2 + M_y^2}$ は最大値に達していた。

#### [参考文献]

- 3.1)加藤 勉, 秋山 宏, 北沢 進: 局部座屈を伴う箱形断面部材の変形, 日本建築学会論文報告集 第268号, pp.71-76, 1978.6
- 3.2)山田 哲, 秋山 宏, 桑村 仁: 局部座屈を伴う箱形断面鋼部材の劣化域を含む終局挙動, 日本建築学会構造系論文報告集 第444号, pp.135-143, 1993.2
- 3.3)津田恵吾, 松井千秋: 一定軸力下で水平力を受ける角形鋼管柱の耐力, 日本建築学会構造系論文集 第512号, pp.149-156, 1998.10
- 3.4)松井千秋, 森野捷輔, 津田恵吾, 大宅一浩: 角形鋼管柱の局部座屈後挙動について(その3, 1軸曲げ、2軸曲げ挙動), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系分冊, pp.2093-2094, 1981.9
- 3.5)山田 哲, 島田侑子: 載荷方向を変化させた角形鋼管柱の繰り返し載荷実験, 第13回日本地震工学シンポジウム, pp.2868-2873, 2010.11
- 3.6)杉浦邦征, ウォルター・オヤワ, 渡邊英一: 繰り返し水平2方向力を受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動, 第3回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, 土木学会, pp.97-103, 1999.11
- 3.7)陳 以一, 大井謙一, 高梨晃一: 3方向変動荷重を受ける箱形断面鋼柱の弾塑性挙動, 日本建築学会構造系論文報告集 第447号, pp.139-148, 1993.5
- 3.8)谷口英武, 高梨晃一, 田中 尚: 2方向水平地震動を受ける構造物の電算機-試験機オンライン応答解析 2方向水平地震動を受けるH形鋼柱の弾塑性応答性状(II), 日本建築学会論文報告集 第326号, pp.36-46, 1983.4
- 3.9)高梨晃一, 谷口英武, 田中 尚: 定軸力下で任意方向の繰り返し水平力を受けるH形鋼柱の弾塑性挙動 - 2方向水平地震動を受けるH形鋼柱の弾塑性応答性状第I報 -,

日本建築学会論文報告集 第 323 号, pp.59-70, 1983.1

- 3.10)藤井俊二, 伊藤 勝, 青山博之, 梅村 魁: 二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の実験的研究, 日本建築学会関東支部研究報告集 構造系, pp.53-56, 1974.3
- 3.11)和田 章, 広瀬景一: 2 方向地震動を受ける無限均等ラーメン構造の弾塑性応答性状, 日本建築学会構造系論文報告集 第 399 号, pp.37-47, 1989.5
- 3.12)秋山 宏: 建築物の耐震極限設計 第 2 版, 東京大学出版会, 1987
- 3.13)秋山 宏: 鋼構造剛接骨組の耐震性におよぼす P- $\Delta$  効果の影響, 日本建築学会論文報告集 第 340 号, pp.11-16, 1984.6
- 3.14)建築研究所, 日本鉄鋼連盟: 鋼構造建築物の構造性能評価試験法に関する研究 委員会報告書, 2002.4

## 第4章

### 一定軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の解析

#### 4.1 はじめに

第3章では、地震荷重下のように水平外力の作用方向が変動する条件における角形鋼管柱の終局挙動に関する研究の端緒として、水平2方向の地震入力を受ける鋼構造多層骨組の弾塑性応答解析結果に基づき平面載荷履歴を設定し、これを用いて一定軸力の条件で水平2方向繰り返し載荷実験を行い、角形鋼管柱の局部座屈に起因する劣化域を含む挙動に関するデータを得た。第4章では、第3章での実験結果を用いて解析のキャリブレーションを行い、一定軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の局部座屈に起因する劣化域を含む挙動を追跡するモデルを構築する。解析モデルは、変動軸力の影響を考慮した解析にも適用可能な、塑性化領域の断面を複数の弾塑性軸バネに置き換えたMS(Multi Spring)モデル<sup>4.1)</sup>に、第2章で構築した1軸曲げの条件における局部座屈を伴う角形鋼管柱の劣化挙動のモデルに基づき構築した履歴モデルを適用したものとする。第3章で行った実験結果と、MSモデルによる解析結果を比較し、一定軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の最大耐力以降の劣化域を含む挙動を追跡できるか検証する。

#### 4.2 水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の解析モデル

##### 4.2.1 解析モデルの概要

解析モデルはMS(Multi Spring)モデル<sup>4.1)</sup>(図4.1)とする。MSモデルは、部材の弾性挙動を部材中間部に設置した弾性要素により表現し、部材端の弾塑性挙動を部材端に集約して設置した物理的な長さの無い複数の弾塑性軸バネ(以下、個々の弾塑性軸バネを要素バネと呼ぶ)からなる弾塑性要素により表現する。MSモデルは、軸力および2軸曲げを考慮した挙動を簡単に表現することができ、変動軸力下で水平2方向外力を受ける場合の挙動についても適用性があることが報告されている<sup>4.2)</sup>など。また、このモデルは骨組の応答解析にも簡単に適用できることから、立体骨組の応答解析の柱部材のモデルとして有効な解



析モデルといえる。4.2 節では、一定軸力の条件における挙動を対象に、MS モデルの要素バネの履歴モデルを、第 2 章で構築した 1 軸曲げの条件における角形鋼管柱の局部座屈に起因する劣化域を含む履歴挙動のモデルに基づき構築する。

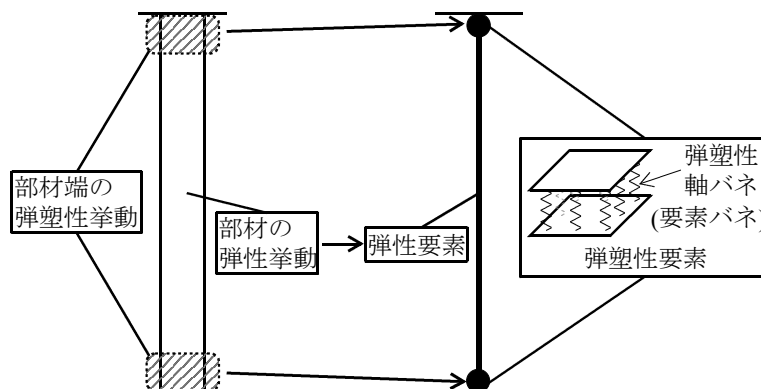


図4.1 MSモデル

#### 4.2.2 MSモデルの設定の方針

(1)MS モデルのバネは逆対称曲げを受ける部材に基づき設定する。

(2)弾塑性要素では、図 4.2 に示すように、断面を 16 分割し、各分割断面の断面積を要素バネに与え、各要素バネを分割断面の重心位置に配置する。要素バネの復元力特性を完全弾塑性型としたときの弾塑性要素と文献 4.3)による箱形断面の軸力と 2 軸曲げの全塑性耐力相関関係の比較を図 4.3 に示す。図中、 $M_x$ 、 $M_y$  はそれぞれ、x 軸まわり、y 軸まわりの曲げモーメントであり、 $M_{p0}$  は  $0^\circ$  方向に載荷したときの軸力が作用しない条件における全塑性モーメントである。断面を 16 分割した弾塑性要素は箱形断面の全塑性耐力相関関係を近似できていることがわかる。

(3)MS モデルでは、弾塑性要素は物理的な長さを持たないモデルとなっているが、要素バネの剛性を設定するには、弾塑性要素にモデル化する領域の長さ  $L_{ms}$  を設定する必要がある。そこで本研究では、一定軸力下で曲げを受ける角形鋼管柱の局部座屈発生により支配される最大耐力と全塑性耐力の比を勘案して、塑性化領域を材長の 10%と仮定する。このとき、曲率分布を、断面を 2 フランジモデル、材料特性をバイリニア型とし、曲げモーメントが材長に沿って線形変化すると仮定して略算的に求めると、図 4.4(1)に示すようになる。ここで、MS モデルでは、部材の塑性変形を回転変形として弾塑性要素に集約させており、また、弾塑性要素の回転角は要素内で一定である。このことから、本研究では、塑性化領域における曲率分布を図 4.4(2)に示すように一定とし、この部分の長さ  $0.05L$  を弾塑性要素にモデル化する領域の長さ  $L_{ms}$  とする<sup>付録1</sup>。

(4)要素バネの履歴モデルは、第2章で構築した1軸曲げの条件における角形鋼管柱の局部座屈に起因する劣化域を含む履歴挙動のモデルに基づき構築する。

(5)弾性要素は、曲げ、せん断および軸方向変形を考慮し、いずれも常に弾性とする。ここで、弾性要素の弾性剛性は、部材全長の弾性剛性から弾塑性要素としてモデル化する部材端部における弾性変形の影響を除いた剛性を与える。

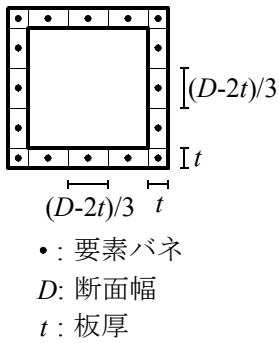


図4.2 断面の分割

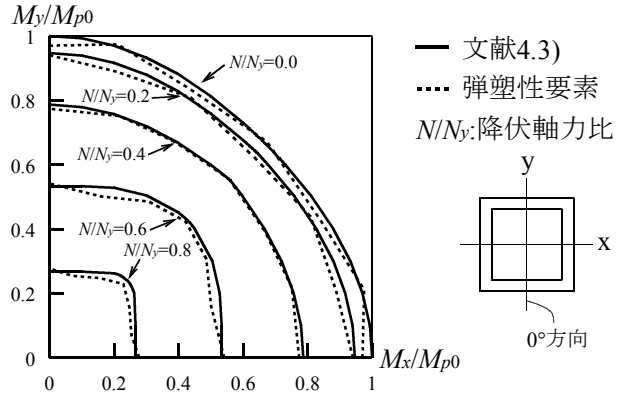
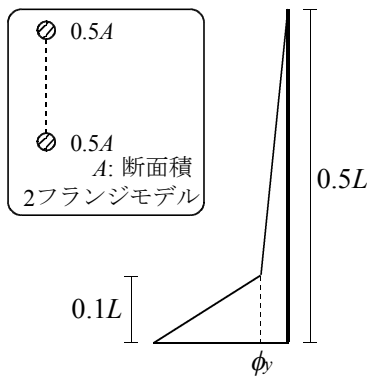
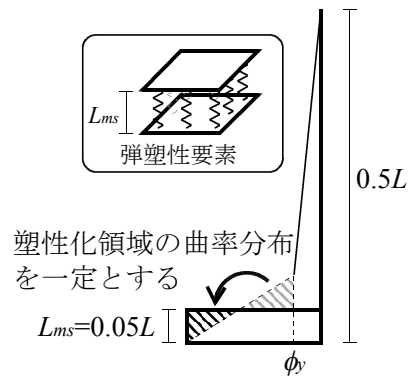


図4.3 全塑性耐力相関関係



(1)曲率分布の仮定



(2)塑性化領域の曲率分布のモデル化

図4.4 弾塑性要素にモデル化する領域の長さ  $L_{ms}$

### 4.2.3 要素バネの履歴モデルの設定

#### ・要素バネの履歴モデルの概要

本解析における要素バネの履歴モデルは、局部座屈の発生によって決まる最大耐力に至るまでは、圧縮側、引張側ともに、図 4.5(1)に示すように、一方向荷重を受ける鋼部材の荷重-変形関係に対応する骨格曲線、バウシンガー部、弾性除荷部から構成する<sup>4.4)</sup>。また、局部座屈の発生で決まる最大耐力に至った後の履歴モデルについては、第 2 章で構築した局部座屈を伴う角形鋼管柱の劣化域における履歴モデルに基づき、図 4.5(2)に示すように、圧縮側については、拡張骨格曲線に対応する耐力劣化部、耐力上昇部、除荷部から構成し、引張側については、最大耐力以前と同様の履歴モデルとして、骨格曲線、耐力上昇部、除荷部から構成する。

#### ・骨格曲線と拡張骨格曲線の設定

圧縮側の要素バネの最大耐力以前の骨格曲線として、図 4.6 に示す冷間ロール成形角形鋼管の短柱圧縮試験<sup>4.5)</sup>からモデル化した応力度-ひずみ度関係を用いる。引張側の骨格曲線については、材料の体積一定の仮定および真応力度-真ひずみ度関係の引張側と圧縮側での対称性の仮定の下で、モデル化した圧縮側の応力度-ひずみ度関係を引張側に変換したものをを用いる。

圧縮側の最大耐力以降の拡張骨格曲線については、第 2 章で構築した角形鋼管柱の局部座屈の発生に起因する劣化挙動のモデルに基づき設定する。第 2 章では、短柱の局部座屈発生によって決まる応力上昇率  $S$  と劣化第 1 勾配  $E_{d1}$  および劣化第 2 勾配  $E_{d2}$ 、劣化第 1 勾配から劣化第 2 勾配への遷移点  $T$ 、劣化第 2 勾配から劣化第 3 勾配への遷移点  $T_2$  で表される劣化挙動のモデル<sup>4.6)</sup>に、大変形領域に対応した劣化第 3 勾配  $E_{d3}$  及び劣化第 2 勾配から劣化第 3 勾配への遷移点  $T_2$  を追加し、これを局部座屈が発生した領域における圧縮応力下の応力度-ひずみ度関係として適用することで、一定軸力下で一方向曲げを受ける角形鋼管柱の劣化域を含む荷重-変形関係を解析している。MS モデルにおける要素バネの圧縮側の最大耐力以降の拡張骨格曲線についても同様に、図 4.7 に示すように、応力上昇率  $S'$  と劣化第 1 勾配  $E_{d1}'$  および劣化第 2 勾配  $E_{d2}'$ 、劣化第 3 勾配  $E_{d3}'$ 、劣化第 1 勾配から劣化第 2 勾配への遷移点  $T'$ 、劣化第 2 勾配から劣化第 3 勾配への遷移点  $T_2'$  からなるモデルとする。ここで、文献 4.6)の最大耐力以降の劣化域における一方向荷重下の荷重-変形関係の解析では、最大耐力規定点位置における圧縮縁の応力度に対応する短柱の劣化剛性を、局部座屈領域を代表する剛性として圧縮応力下の領域内全域に適用することで劣化域における荷重-変形関係を求めている。一方、MS モデルでは、各要素バネが経験した変形量に従って各々の剛性を設定するため、短柱圧縮試験結果に基づく劣化域における応力度-ひずみ度関係のモデルを、MS モデルの要素バネの劣化挙動のモデルとして直接用いて劣化域における荷重-変形関係を求めることはできない。ただし、実現象として劣化第 1 勾配、劣化第 2 勾配に対応する履歴の変化がみられることから、本研究では、第 2 章の解析より得られる一方向荷重下の荷重-変形関係とのキャリブレーションに基づき、要素バネの最大耐力以降の劣化域におけるモデルを設定する。

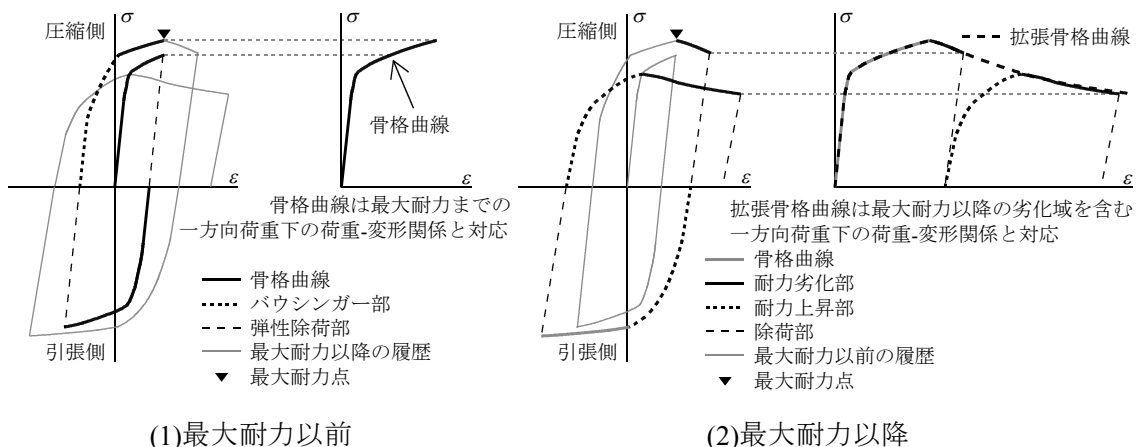


図4.5 履歴曲線の分解と骨格曲線・拡張骨格曲線

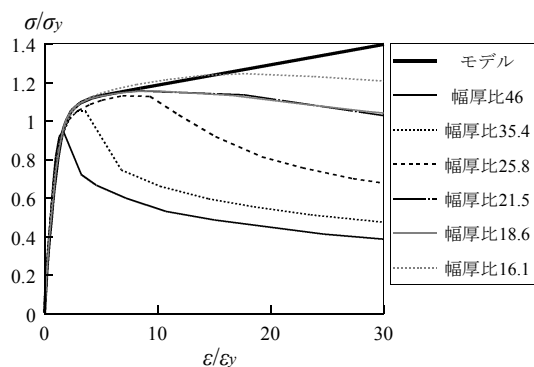


図4.6 圧縮側の応力度-ひずみ度関係と短柱圧縮試験結果<sup>4,5)</sup>

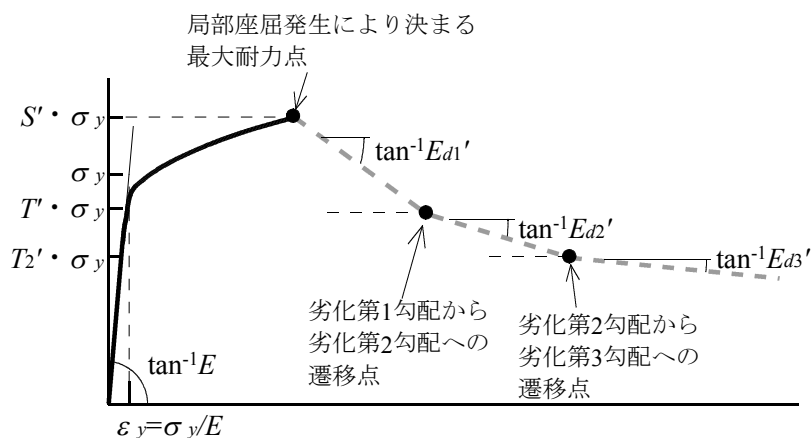


図4.7 要素バネの最大耐力以降の劣化域における応力度-ひずみ度関係のモデル化

(1)応力上昇率  $S'$

文献 4.6)の角形鋼管柱の劣化域を含む荷重-変形関係の解析では、固定端から局部座屈波の半波長の位置(固定端から断面幅の 4 割の位置)を最大耐力規定点とし、最大耐力規定点の圧縮縁における応力度が短柱圧縮結果に基づき予測される最大圧縮応力度に達したときに、最大耐力に至るとしている。一方、MS モデルでは、弾塑性要素を部材端に集約して設置していることから、最大耐力規定点における応力上昇率  $S$  を部材端に換算した値を要素バネの応力上昇率  $S'$  とする。本研究では、要素バネの応力上昇率  $S'$  を、曲げモーメントが材長に沿って線形変化すると仮定して、式(4.1)で表すことにする。

$$S' = S / (1 - 0.8D / L) \quad (4.1)$$

ここで、

$D$  : 断面幅

$L$  : 材長

(2)劣化勾配

劣化第 1 勾配  $E_{d1}'$ 、劣化第 2 勾配  $E_{d2}'$ 、劣化第 3 勾配  $E_{d3}'$  については、第 2 章の解析より得られる一方向荷重下の荷重-変形関係と、MS モデルを用いた解析より得られる荷重-変形関係を対比させて、試行錯誤により劣化勾配を求めてモデル化する。ここで、解析パラメーターの範囲は、降伏軸力比  $N/N_y$  を 0.0~0.45、幅厚比  $D/t$  を 16.7~41.7、材長  $L$ (逆対称曲げとしたときの曲げスパン)と断面幅の比  $L/D$  を 6~16.7 とした。まず、劣化第 1 勾配  $E_{d1}'$  をヤング率  $E$  で除した  $E_{d1}'/E$  と基準化等価幅厚比  $\alpha_e$  の逆数との関係を図 4.8(1)に示す。ここで、基準化等価幅厚比  $\alpha_e$  は、式(4.2)で表される。

$$\alpha_e = \frac{(1+k^2)}{2} \varepsilon_y (D/t)^2 \quad (4.2)$$

ここで、

$k$  : 軸力を考慮したときの全塑性状態において、ウェブの中で圧縮応力を受ける面積の割合

$\varepsilon_y$  : 降伏ひずみ度(降伏応力度  $\sigma_y$  をヤング率  $E$  で除した値)

$t$  : 板厚

本研究では、劣化第 1 勾配を式(4.3)で表すことにする。

$$E_{d1}' / E = -0.0024L / D \cdot \alpha_e^{1.6} \quad (4.3)$$

次に、劣化第2勾配  $E_{d2}'$  をヤング率  $E$  で除した  $E_{d2}'/E$  と基準化等価幅厚比  $\alpha_e$  の逆数との関係を図 4.8(2)に示す。 $L/D$  ごとに比較すると、 $E_{d2}'/E$  は  $1/\alpha_e$  によらず概ね一定であることがわかる。本研究では、劣化第2勾配を式(4.4)で表すことにする。

$$E_{d2}'/E = -0.0004L/D \quad (4.4)$$

最後に、劣化第3勾配をヤング率で除した  $E_{d3}'/E$  と基準化等価幅厚比  $\alpha_e$  の逆数との関係を図 4.8(3)に示す。 $E_{d3}'/E$  は、劣化第2勾配と同様に、 $L/D$  ごとに比較すると、 $1/\alpha_e$  によらず概ね一定であることがわかる。本研究では、劣化第3勾配を式(5)で表すことにする。

$$E_{d3}'/E = -0.00005L/D - 0.0003 \quad (4.5)$$

### (3)劣化勾配の遷移点

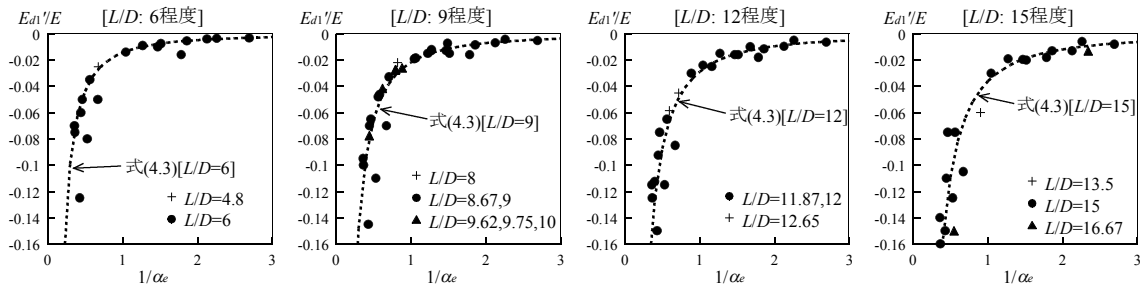
要素バネの劣化第1勾配と劣化第2勾配の遷移点  $T'$  および劣化第2勾配と劣化第3勾配の遷移点  $T_2'$  については、第2章の解析より得られる一方向荷重下の荷重-変形関係とのキャリブレーションに基づき設定する。ここで、劣化勾配の遷移点のモデル化を行うにあたっての解析パラメーターは、劣化勾配のモデル化に用いたものと同じである。図 4.9(1)に解析結果の曲げモーメント-部材角関係から抽出した劣化第1勾配と劣化第2勾配の遷移点における荷重  $M_T$  を最大耐力  $M_u$  で除した  $M_T/M_u$  と、基準化等価幅厚比  $\alpha_e$  との関係を示す。本研究では、 $M_T/M_u$  を要素バネの劣化第1勾配と劣化第2勾配の遷移点  $T'$  と応力上昇率  $S'$  の比率  $T'/S'$  として用いることとし、式(4.6)で表すことにする。

$$T'/S' = -0.2\alpha_e + 0.95 \quad (4.6)$$

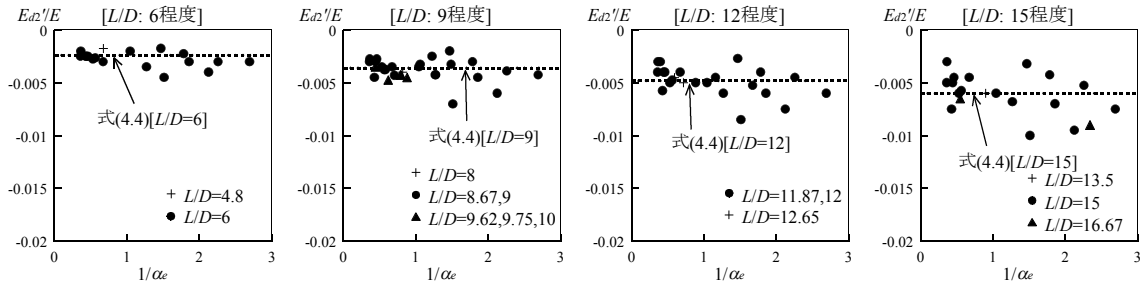
次に、解析結果の劣化第2勾配と劣化第3勾配の遷移点における荷重  $M_{T2}$  を劣化第1勾配と劣化第2勾配の遷移点における荷重  $M_T$  で除した  $M_{T2}/M_T$  と、基準化等価幅厚比  $\alpha_e$  との関係を図 4.9(2)に示す。本研究では、 $M_{T2}/M_T$  を要素バネの劣化第2勾配と劣化第3勾配の遷移点  $T_2'$  と劣化第1勾配と劣化第2勾配の遷移点  $T'$  の比率  $T_2'/T'$  として用いることとし、式(4.7)で表すものとする。

$$T_2'/T' = -0.3\alpha_e + 0.9 \quad (4.7)$$

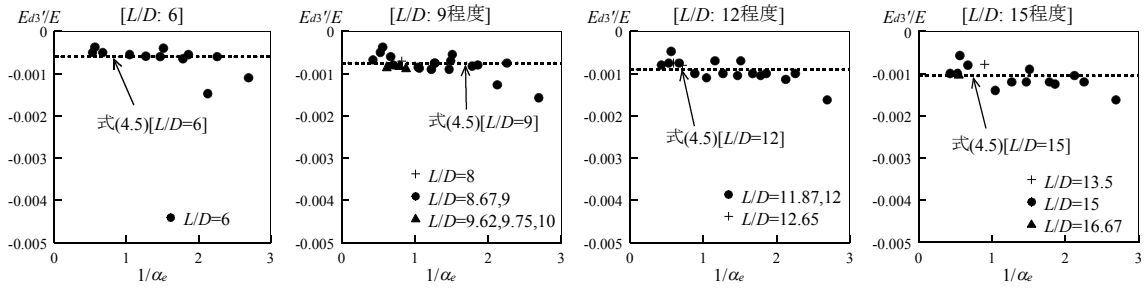
軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰り返し劣化挙動



(1)  $E_{d1}'/E-1/\alpha_e$  関係

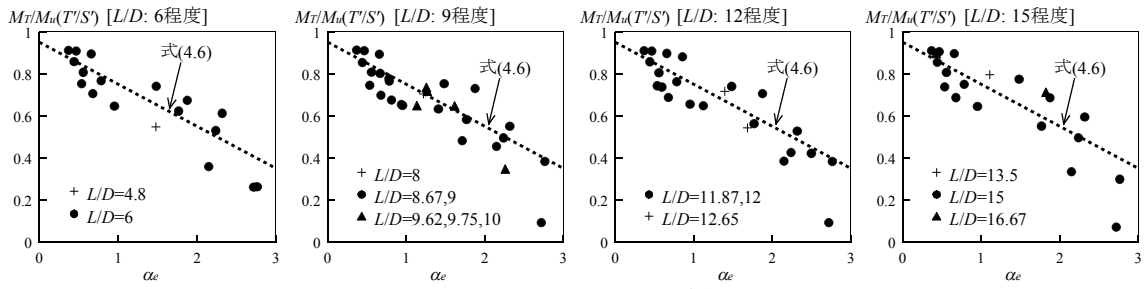


(2)  $E_{d2}'/E-1/\alpha_e$  関係

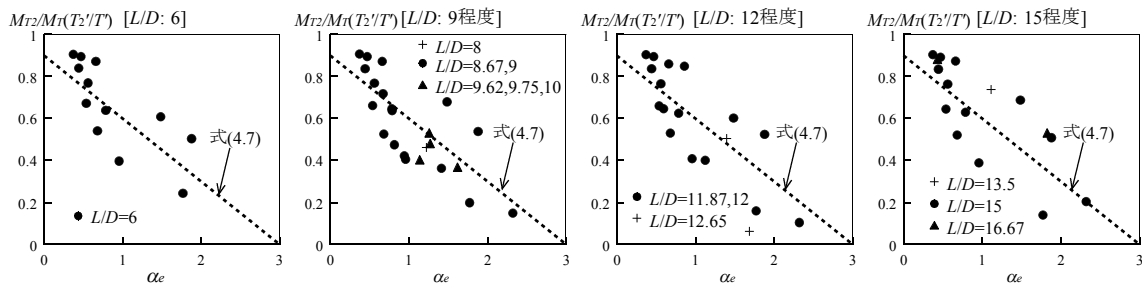


(3)  $E_{d3}'/E-1/\alpha_e$  関係

図4.8 劣化勾配のモデル化



(1)  $M_T/M_u(T'/S)-\alpha_e$  関係



(2)  $M_{T2}/M_T(T2'/T)-\alpha_e$  関係

図4.9 劣化勾配の遷移点のモデル化

### ・繰返しに対する履歴モデル

最大耐力以前のバウシंगाー部については、秋山・高橋によるバイリニア型のモデル<sup>4.4)</sup>を用いる。

最大耐力以降の繰返しに対する履歴モデルについては、第2章で構築した劣化域における履歴モデルを援用する。ここで、第2章で構築した最大耐力以降の履歴則では、拡張骨格曲線への復帰点は耐力上昇部での塑性変形量に応じて前サイクルでの除荷開始点より低い荷重となるが、このモデルは部材の曲げモーメント-部材角関係をモデル化したものである。一方、MSモデルの要素バネは材軸方向の荷重と変形の関係で表され、部材の曲げ挙動を表すものではないことから、本研究では、最大耐力以降の引張側の履歴則については、引張側では圧縮側での局部座屈の影響による耐力の低下は生じないものとし、最大耐力以前と同様に、前サイクルの骨格曲線からの除荷開始点における応力を骨格曲線への復帰点における応力とした上で、第2章で構築した繰返し劣化挙動のモデルを適用する。構築した最大耐力以降の繰返しに対する履歴モデルの概要を図4.10(1)~(5)に示す。

#### [拡張骨格曲線において載荷方向が反転する場合]

拡張骨格曲線において載荷方向が反転する場合の挙動を図4.10(1)に示す。拡張骨格曲線からの除荷開始点をA点とする。A点から耐力上昇部における剛性変化点Bに至るまでの区間A-Bは、除荷剛性 $E_{du}$ で線形に挙動し、区間A-Bにおいて引張側にひずみが進展しB点に達すると、耐力上昇部における塑性ひずみ量 $\epsilon_1$ と前サイクルの引張側の骨格曲線からの除荷開始時における応力 $\sigma_2$ より求まる骨格曲線への復帰点Cを指向する。ここで、耐力上昇部における塑性ひずみ量は、降伏軸力比と、それまでに経験した最大耐力に至るまでの骨格曲線と最大耐力以降の累積塑性ひずみ量の関数で与えられ、耐力上昇部での剛性変化点の応力 $\sigma_3$ は骨格曲線への復帰点における応力 $\sigma_2$ の60%となる。また、除荷剛性 $E_{du}$ は、基準化等価幅厚比とA点に至るまでに経験した最大耐力までの骨格曲線と最大耐力以降の累積ひずみ量の関数で与えられる。一方、区間A-Bで圧縮側にひずみが進展し再びA点に達すると、拡張骨格曲線に復帰する。

#### [骨格曲線において載荷方向が反転する場合]

まず、拡張骨格曲線上のA点で載荷方向が反転し、その後、引張側にひずみが進展し、骨格曲線上のD点において再び載荷方向が反転した場合の挙動を図4.10(2)に示す。D点と耐力上昇部における剛性変化点Eの間は除荷剛性 $E_{du}'$ で線形に挙動し、区間D-Eで圧縮側にひずみが進展しE点に達すると、拡張骨格曲線への復帰点Fを指向する。ここで、拡張骨格曲線への復帰点は、A点と同じ応力の拡張骨格曲線上のA'点から、耐力上昇部の塑性ひずみ量 $\epsilon_1'$ 分移動したF点となる。一方、区間D-Eで引張側にひずみが進展し再びD点に達すると、骨格曲線に復帰する。

次に、図4.10(3)に示すように、圧縮側の耐力上昇部における塑性域である区間E-Fにおいて、塑性ひずみが $\Delta\epsilon_d$ 進展した点Gで載荷方向が反転し、その後、引張側の骨格曲

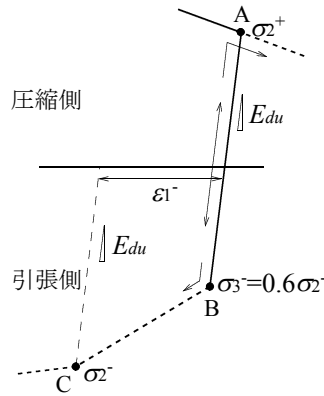


線に至るまでひずみが進展した後に、再び荷重方向が反転した場合の挙動について述べる。骨格曲線からの除荷開始点 I から耐力上昇部における剛性変化点 J に至る区間 I-J は、除荷剛性  $E_{du}$  で線形に挙動し、耐力上昇部の剛性変化点 J に達すると、拡張骨格曲線への復帰点 K を指向する。ここで、拡張骨格曲線への復帰点は、拡張骨格曲線上の A' 点から耐力上昇部での塑性ひずみ  $\varepsilon_1^+$  及び  $\Delta\varepsilon_d$  分移動した K' 点での応力  $\sigma_1^+$  を拡張骨格曲線への復帰点における応力として、区間 I-J において応力が 0 となる点から耐力上昇部での塑性ひずみ  $\varepsilon_1^+$  分塑性ひずみが進展した K 点となる。一方、区間 I-J で引張側にひずみが進展し再び I 点に達すると、骨格曲線に復帰する。

[耐力上昇部において荷重方向が反転する場合]

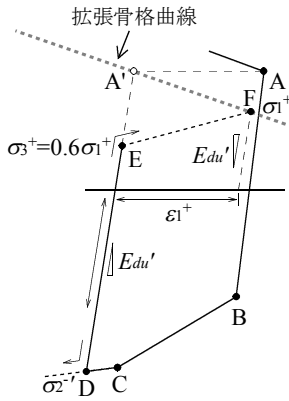
まず、拡張骨格曲線上の A 点で荷重方向が反転し、その後、引張側の耐力上昇部において塑性ひずみが  $\Delta\varepsilon_d$  進展した L 点で再び荷重方向が反転する場合の挙動を図 4.10(4) に示す。L 点から圧縮側の耐力上昇部における剛性変化点 M に至るまでの区間 L-M は、前回の拡張骨格曲線から除荷開始したときの除荷剛性である  $E_{du}$  で線形に挙動し、引張側にひずみが進展し再び L 点に達すると骨格曲線への復帰点 C を指向し、圧縮側にひずみが進展し耐力上昇部における剛性変化点 M に達すると拡張骨格曲線への復帰点 N を指向するものとする。ここで、拡張骨格曲線への復帰点 N は、前回の拡張骨格曲線からの除荷開始点 A から、ひずみが  $\Delta\varepsilon_d$  進展する場合に到達する点を N' 点、N' 点での応力を  $\sigma_1^{+'}$  としたとき、A 点と同じひずみで応力が  $\sigma_1^{+'}$  となる点とする。

次に、圧縮側の耐力上昇部の塑性域において荷重方向が反転し、その後、引張側の耐力上昇部における塑性域である区間 P-C において塑性ひずみが  $\Delta\varepsilon_d$  進展した Q 点で再び荷重方向が反転したときの挙動を図 4.10(5) に示す。Q 点から圧縮側の耐力上昇部における剛性変化点 R に至るまでの区間 Q-R は、前回の拡張骨格曲線から除荷開始したときの除荷剛性である  $E_{du}$  で線形に挙動するものとする。このとき、引張側にひずみが進展し Q 点に達すると骨格曲線への復帰点 C を指向し、圧縮側にひずみが進展し耐力上昇部における剛性変化点 R に達すると拡張骨格曲線への復帰点 S を指向するものとする。拡張骨格曲線への復帰点 S は、前回の拡張骨格曲線からの除荷開始点 A から、ひずみが  $\Delta\varepsilon_d' + \Delta\varepsilon_d$  進展する場合に到達する点を S' 点、S' 点での応力を  $\sigma_1^{+'}$  としたとき、A 点と同じひずみで応力が  $\sigma_1^{+'}$  となる点とする。

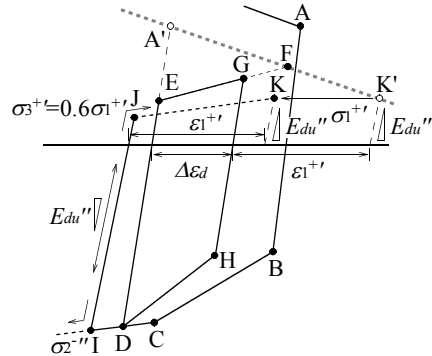


(1)A-B間を中心とする挙動

拡張骨格曲線において荷重方向が反転する場合

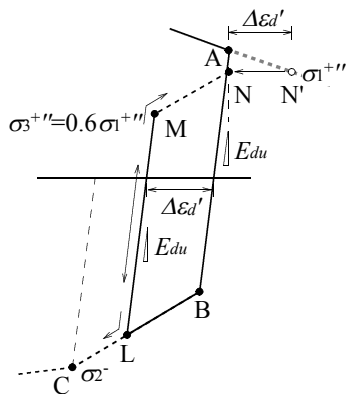


(2)D-E間を中心とする挙動

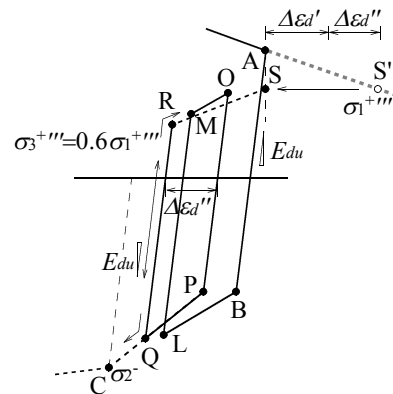


(3)I-J間を中心とする挙動

骨格曲線において荷重方向が反転する場合



(4)L-M間を中心とする挙動



(5)Q-R間を中心とする挙動

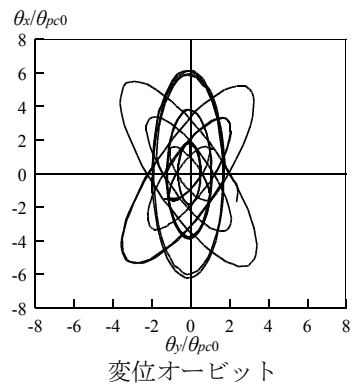
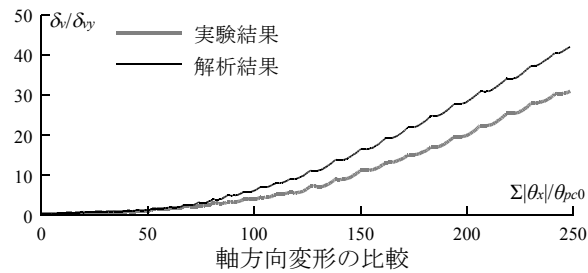
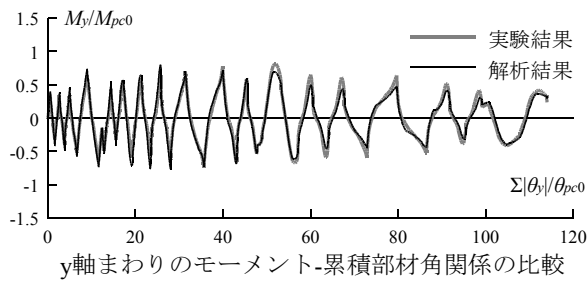
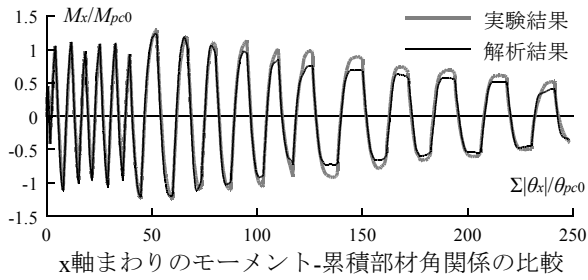
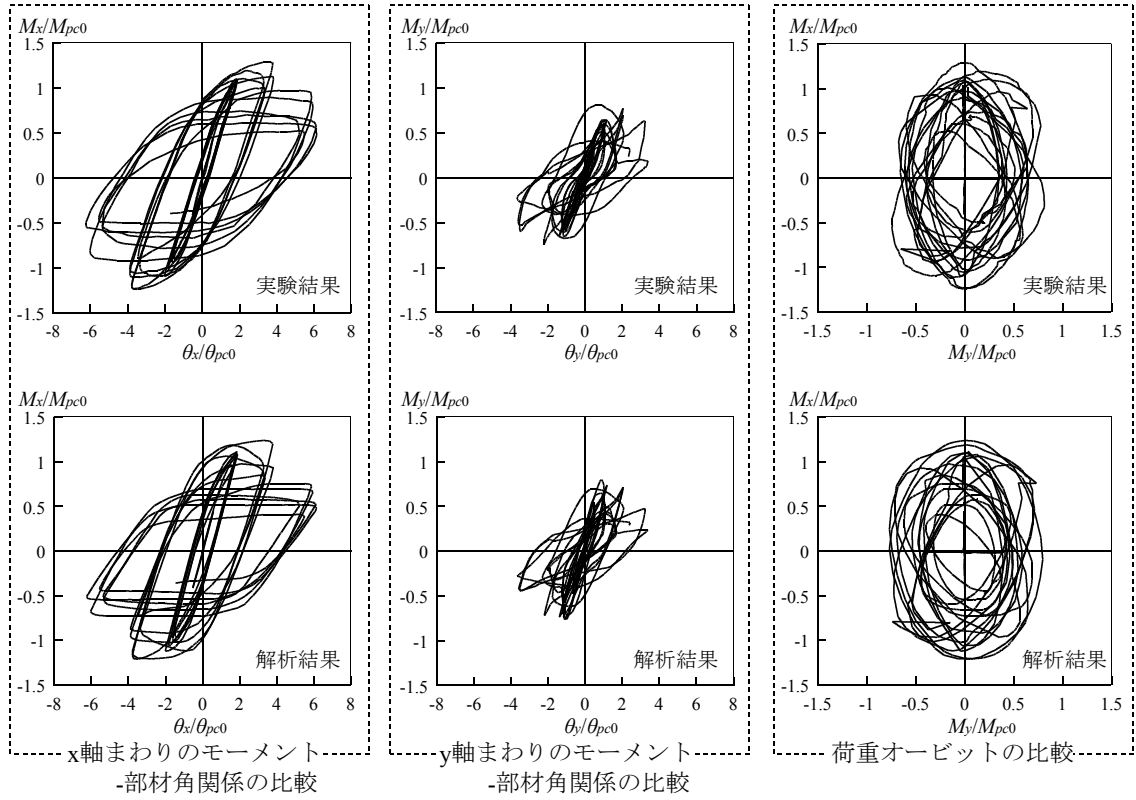
耐力上昇部において荷重方向が反転する場合

図4.10 最大耐力以降の繰り返しの履歴モデル

### 4.3 実験結果との比較による解析結果の検討

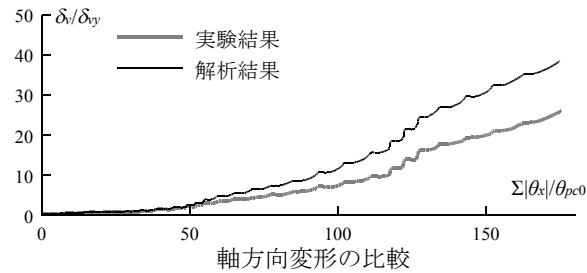
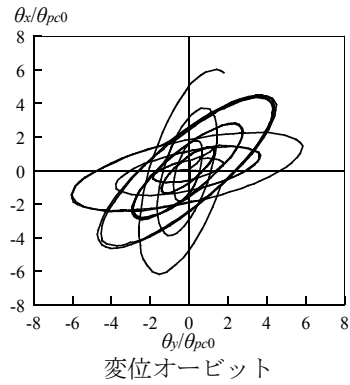
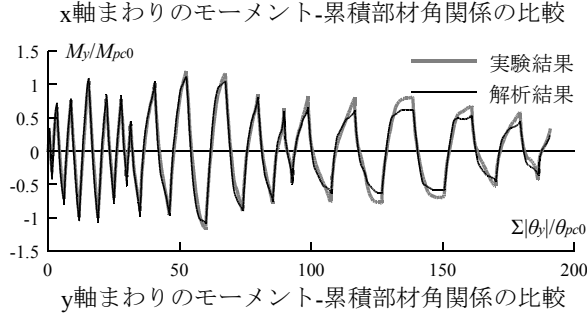
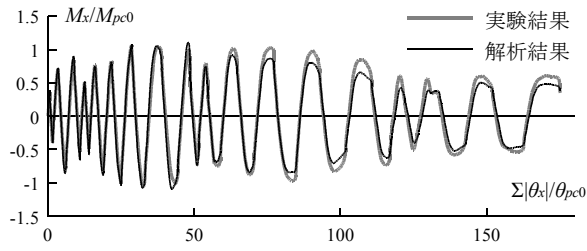
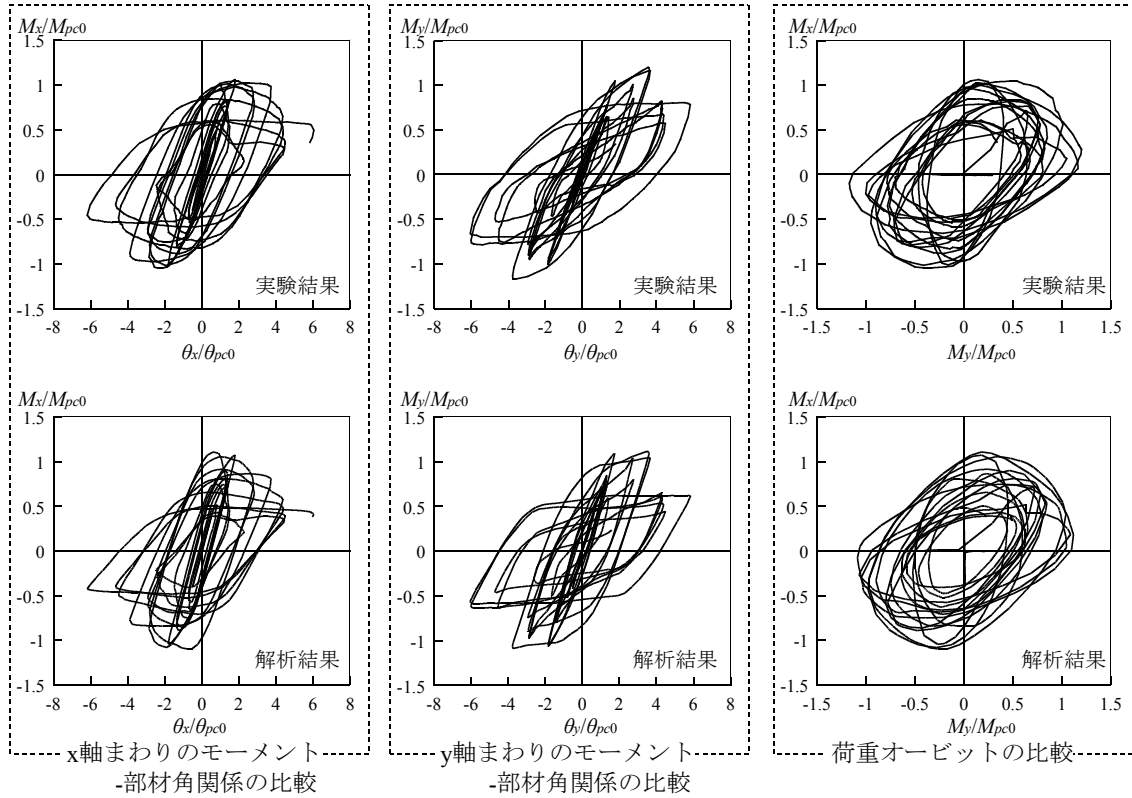
構築した履歴モデルを適用した MS モデルによる解析結果と第 3 章における実験結果を比較し、一定軸力下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の最大耐力以降の劣化域を含む挙動を追跡できるか検証する。実験結果と同じ変位履歴を与えた MS モデルによる解析結果と実験結果との比較を、曲げモーメントと部材角については  $0^\circ$  方向に荷重した場合の軸力を考慮した全塑性モーメント  $M_{pc0}$  と、 $M_{pc0}$  に対応する弾性部材角の計算値  $\theta_{pc0}$  で、軸方向変形  $\delta_x$  については降伏軸変形の計算値  $\delta_{y0}$  でそれぞれ除した上で図 4.11(1)~(12)に示す。ここで、ランダムな平面荷重履歴で幅厚比を 22.2 とした試験体(CB\_KB\_0.2\_22, CB\_SD\_0.2\_22)については、所定の平面荷重履歴を終了した後の一方向荷重の過程において、鋼管角部の溶接止端部に発生した延性亀裂が進展し、脆性的あるいは延性的に破断した。このため、一方向荷重の過程では破断による断面欠損の影響を受けていると考えられることから、所定の平面荷重履歴を終了するまでの挙動を比較する。また、各試験体において、実験結果の弾性剛性(実験結果の弾性剛性は、所定の平面荷重履歴による荷重を行う前に実施した振幅を  $0.5\theta_{pc0}$  程度とした予備荷重時の除荷剛性から求めた)は計算値の 8 割程度であった。これは、試験体両端に溶接されたエンドプレート等の変形の影響によるものと考えられる。そこで、解析の弾性剛性が実験結果と対応するように、MS モデルの弾性要素の曲げ剛性及びせん断剛性に係数を掛けた上で解析を行った。

x 軸まわり、y 軸まわりの履歴曲線を比較すると、いずれの試験体についても、最大耐力以降の劣化域に至るまで解析結果は実験結果と良好に対応していることがわかる。また、軸方向変形についても、最大耐力以降の劣化域に至るまで、解析結果は実験結果を精度良く追跡できている。さらに、荷重オービットについても実験結果と解析結果は対応している。第 2 章の局部座屈に起因する劣化域を含む履歴挙動のモデルに基づき構築した履歴モデルを MS モデルの要素バネに適用することで、一定軸力下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の劣化域を含む挙動を精度良く追跡できることを確認した。



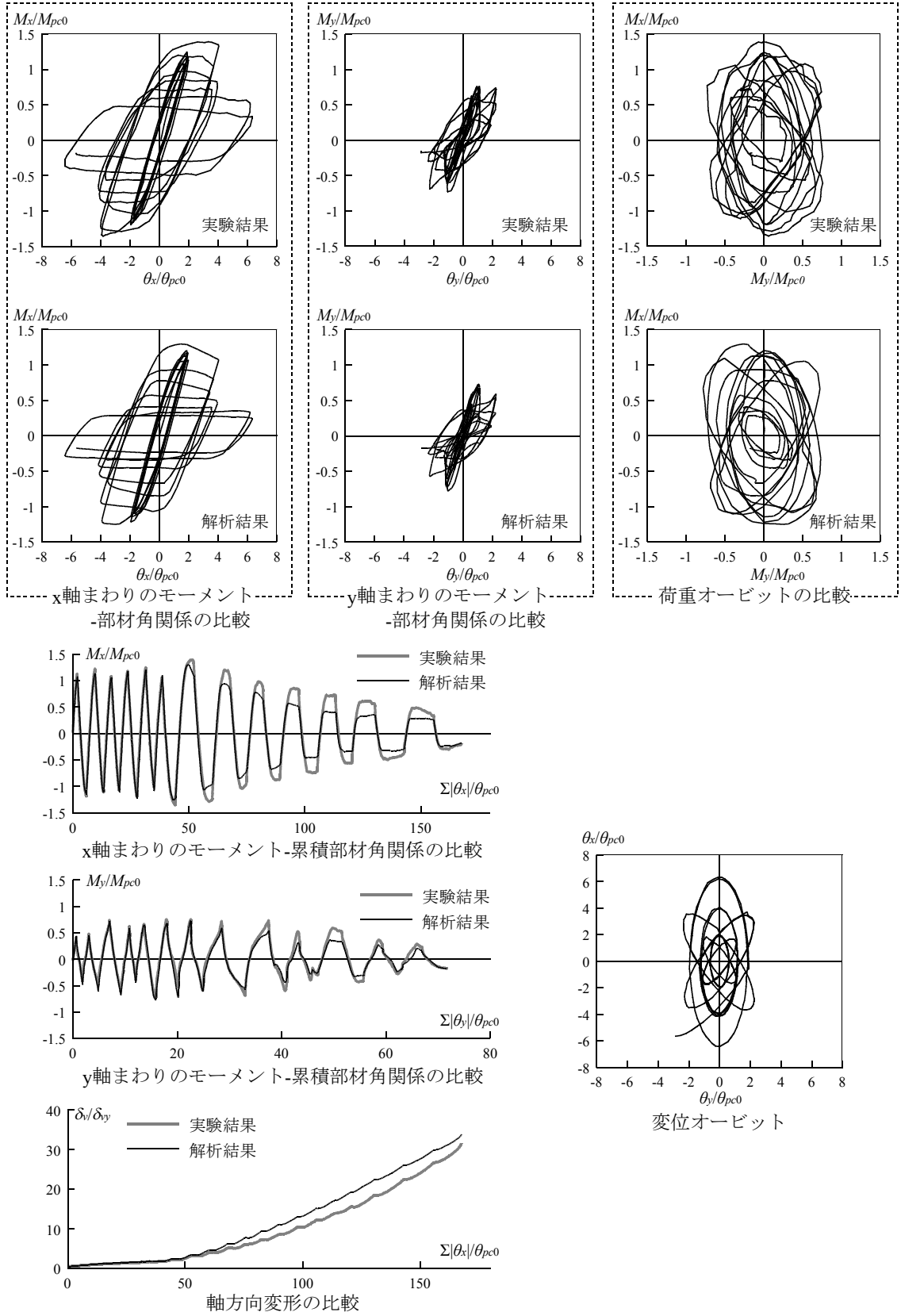
(1)CB00\_0.2\_22

図4.11 実験結果と解析結果の比較



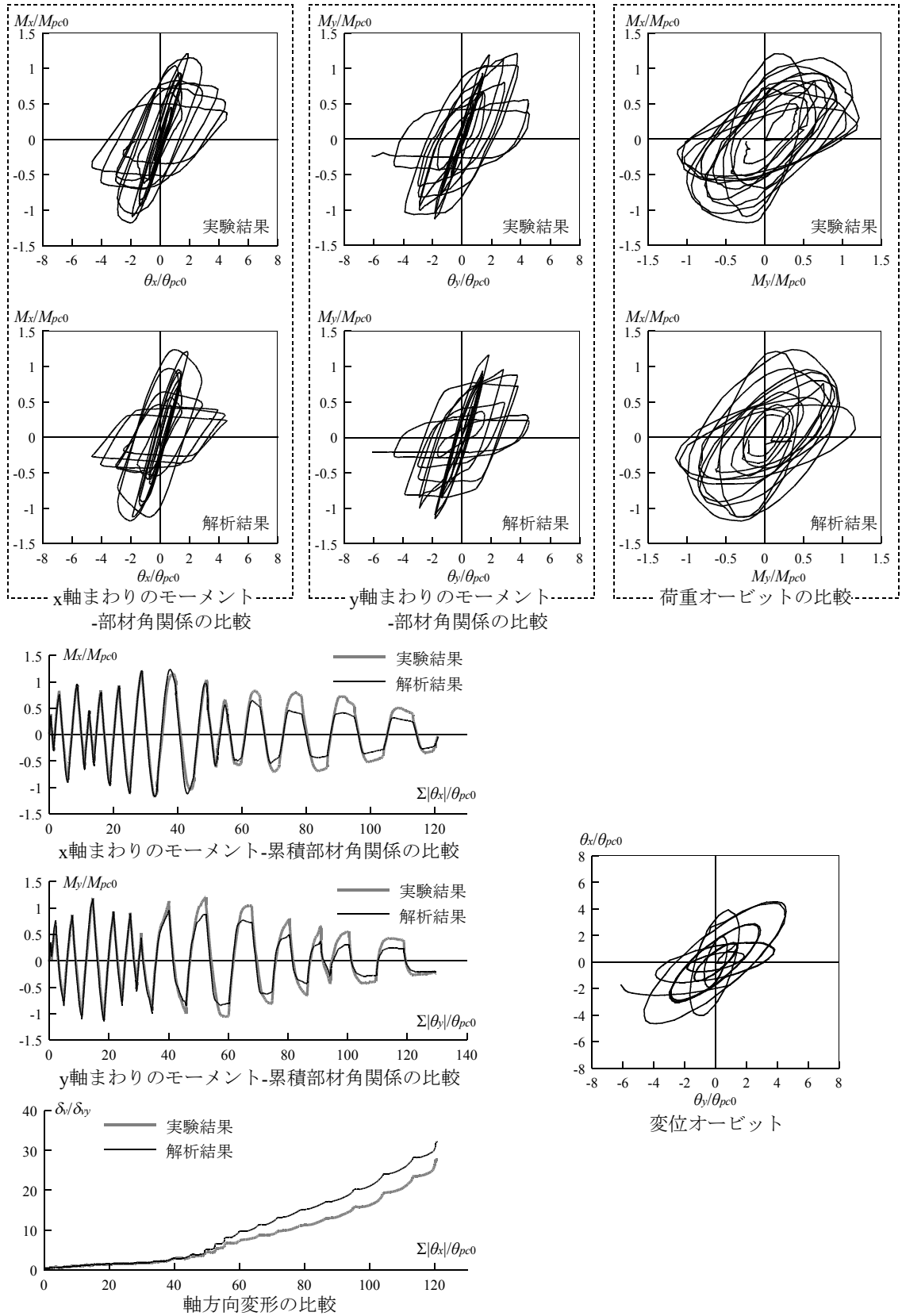
(2)CB45\_0.2\_22

図4.11 実験結果と解析結果の比較(続き)



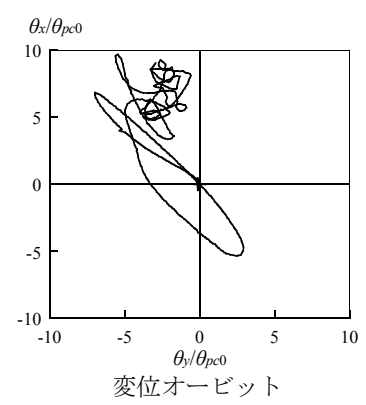
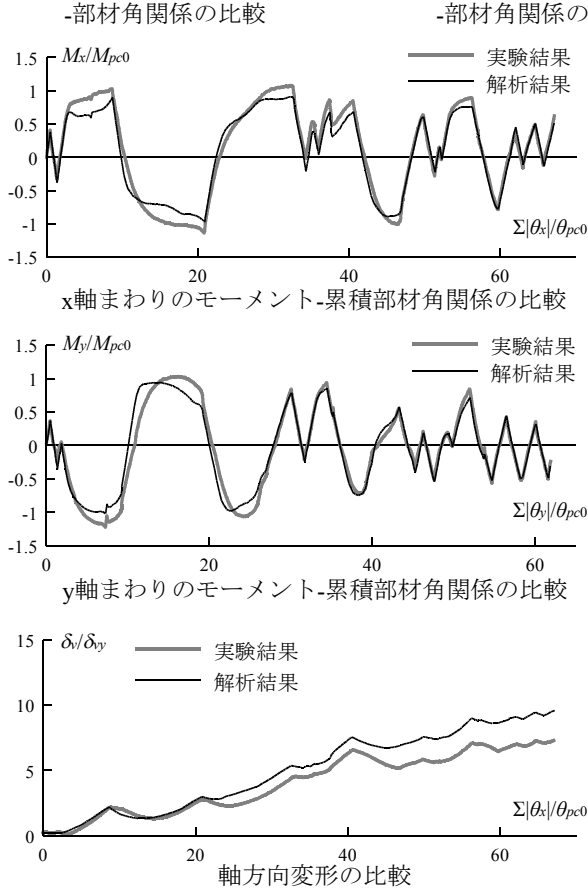
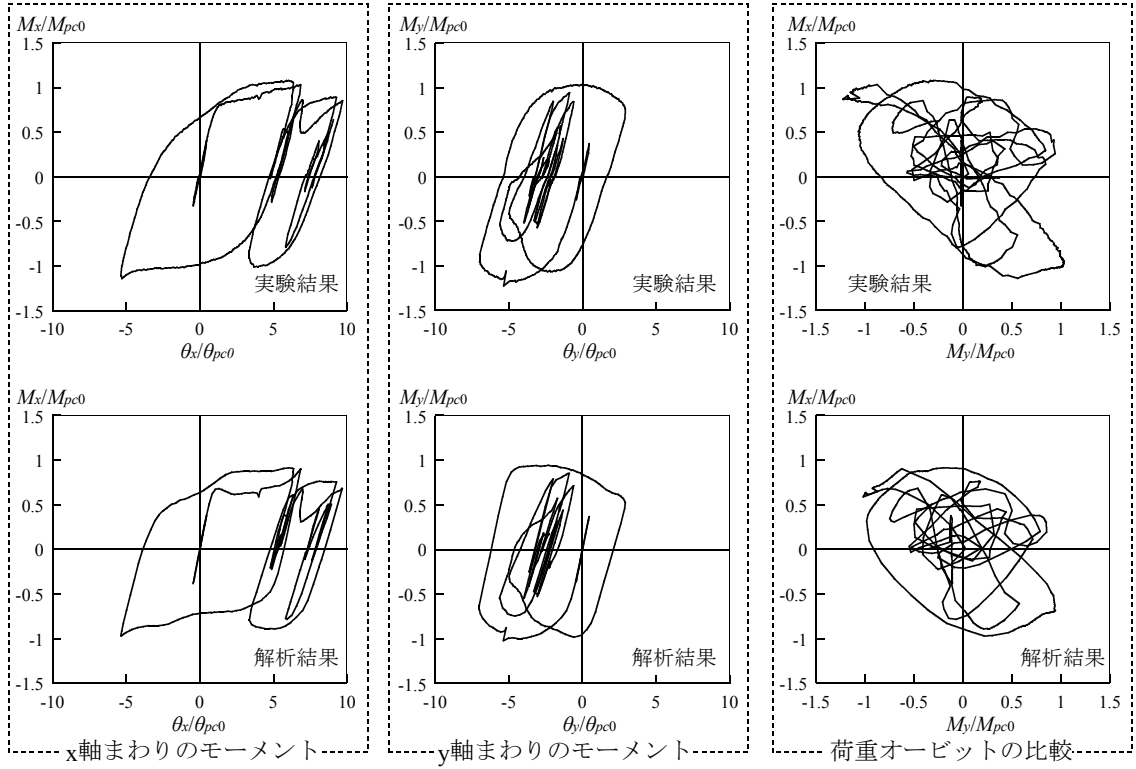
(3)CB00\_0.4\_22

図4.11 実験結果と解析結果の比較(続き)



(4)CB45\_0.4\_22

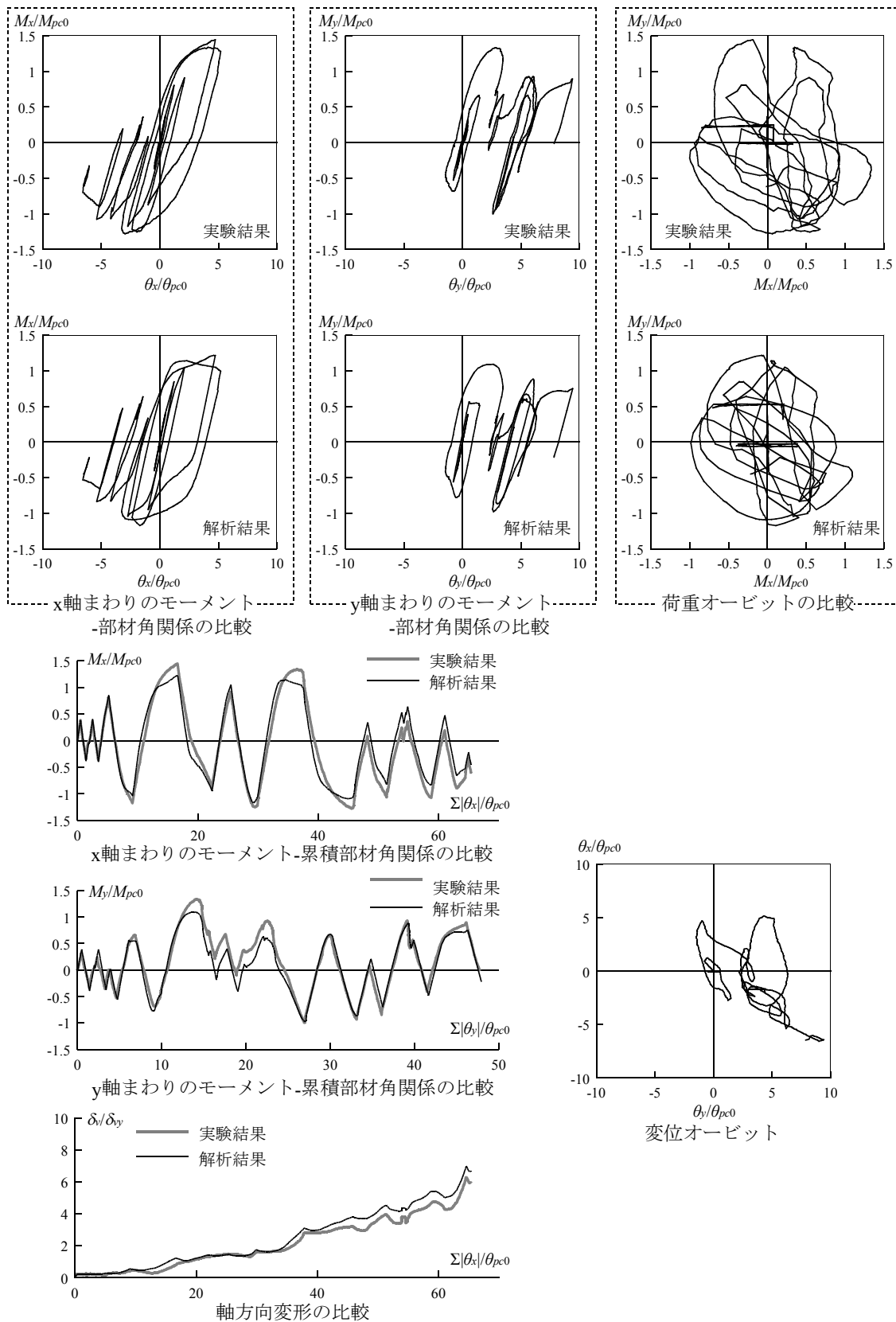
図4.11 実験結果と解析結果の比較(続き)



(5)CB\_KB\_0.2\_22

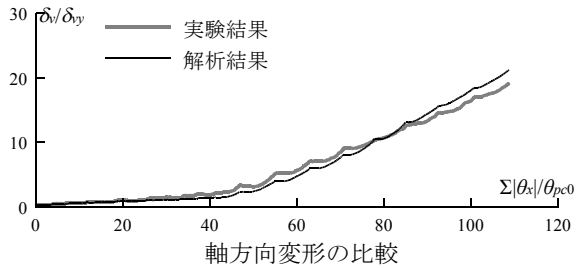
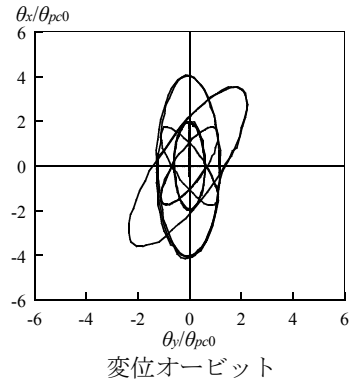
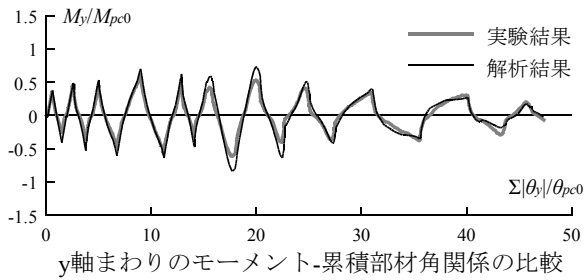
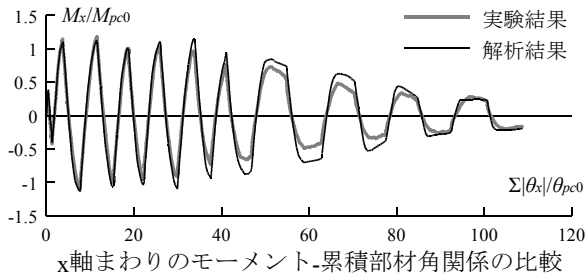
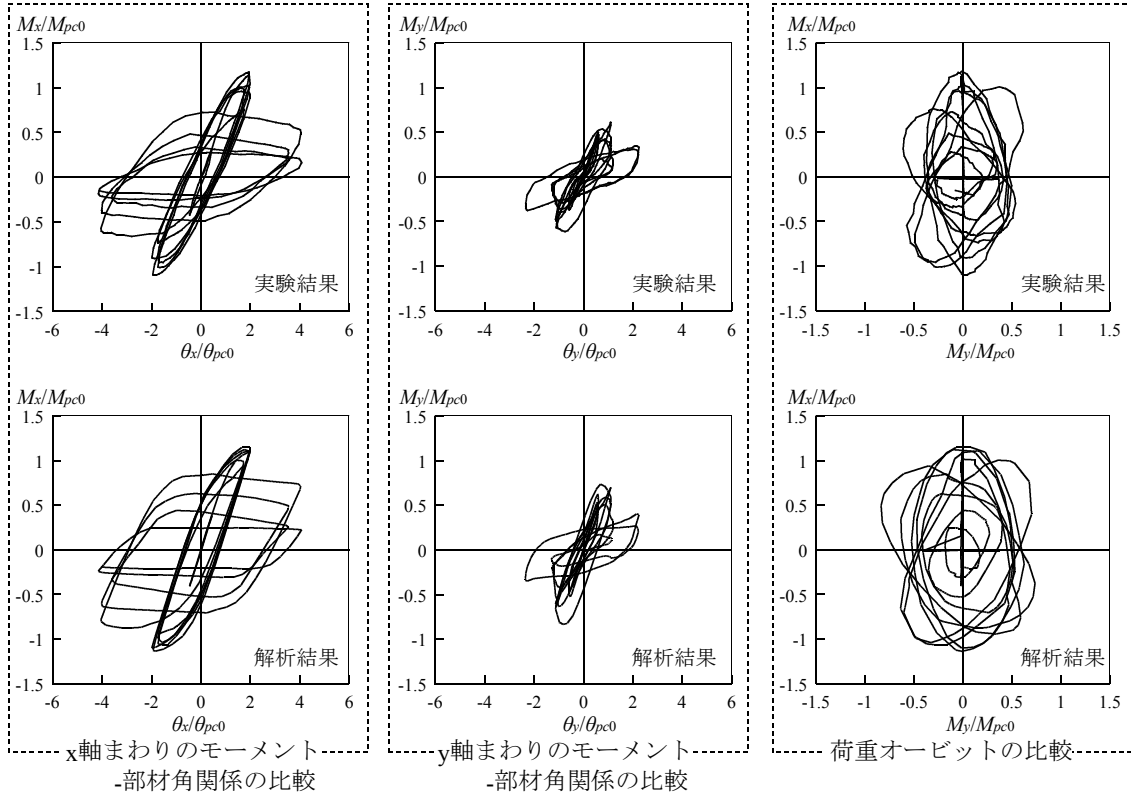
図4.11 実験結果と解析結果の比較(続き)





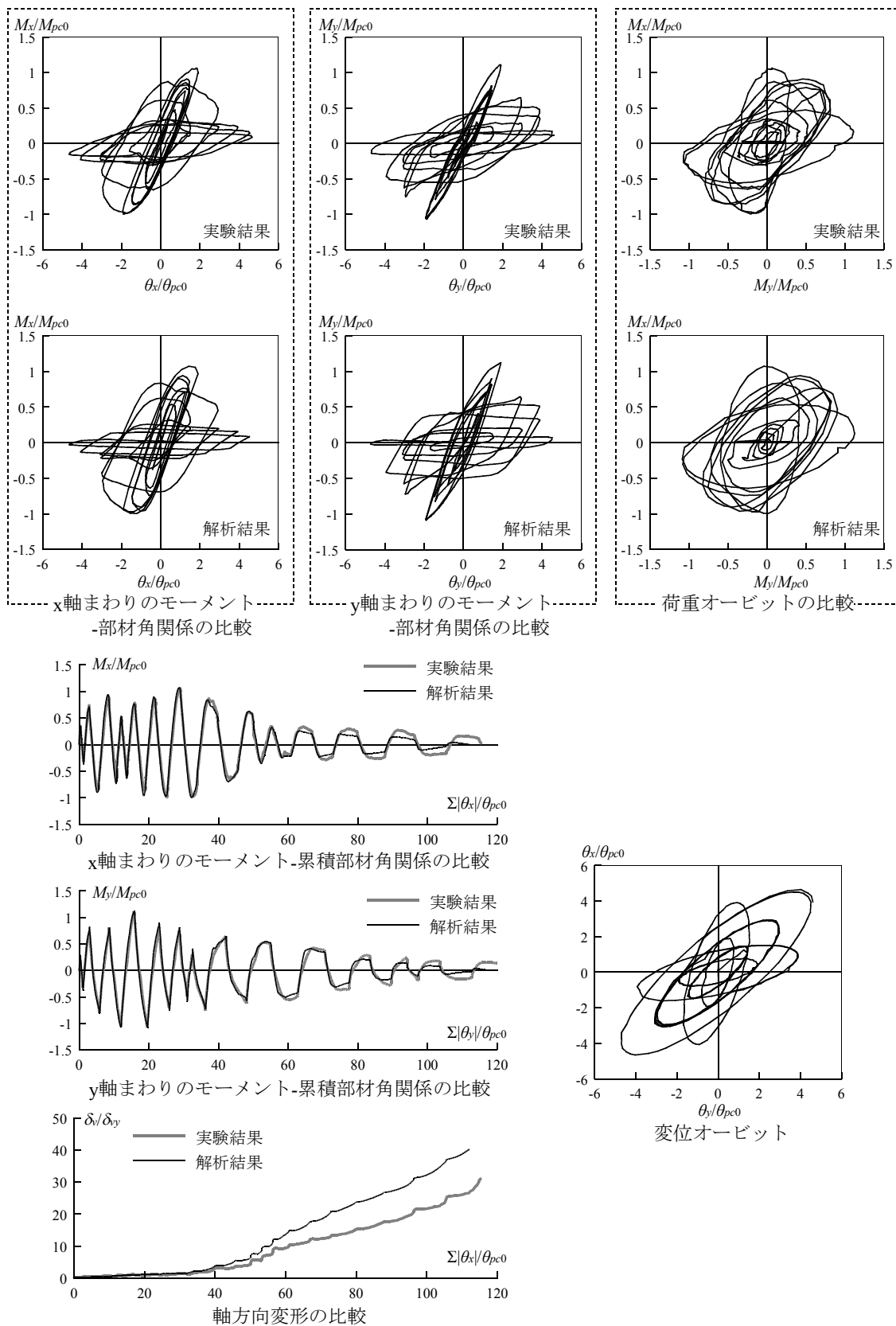
(6)CB\_SD\_0.2\_22

図4.11 実験結果と解析結果の比較(続き)



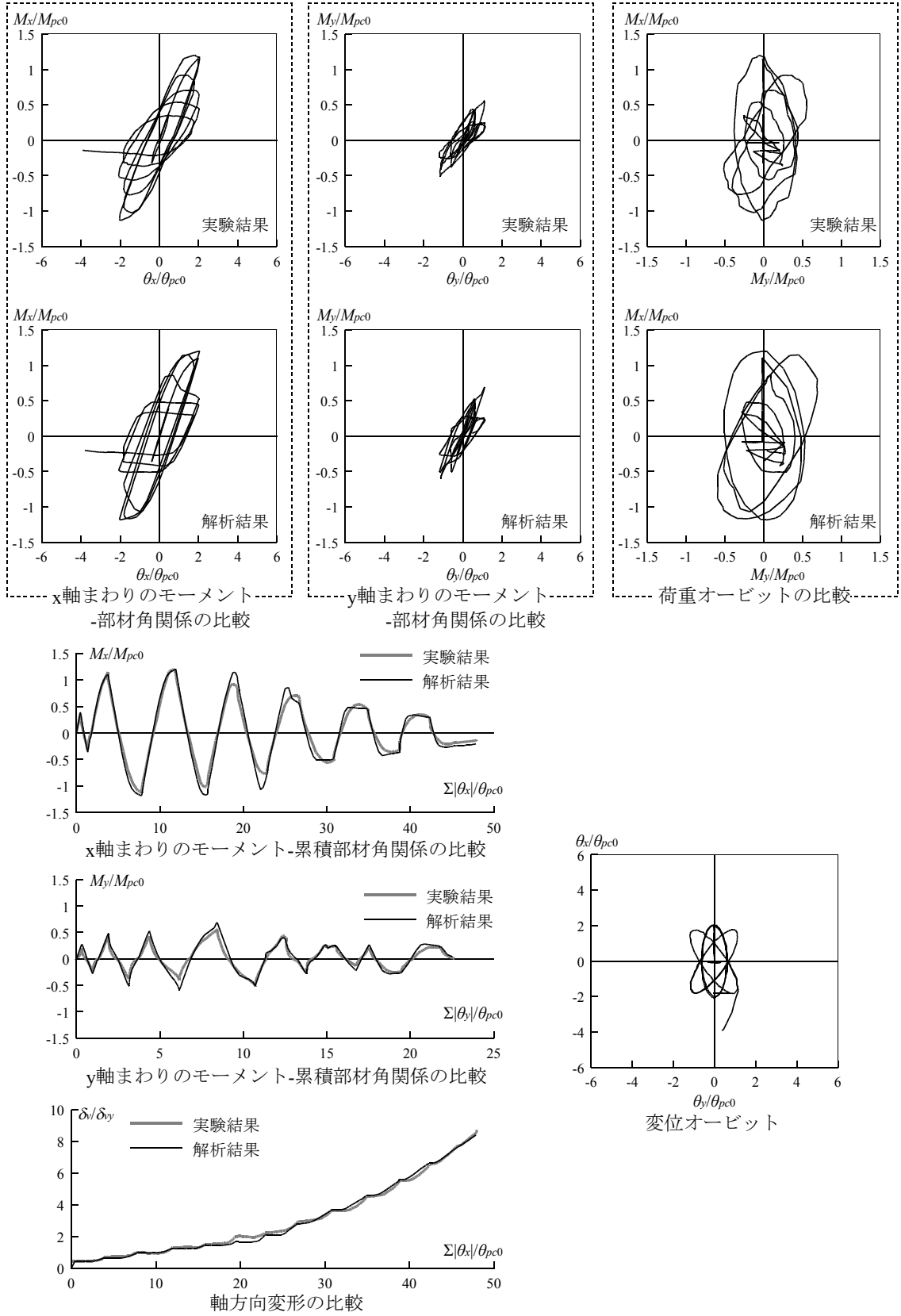
(7)CB00\_0.2\_33

図4.11 実験結果と解析結果の比較(続き)



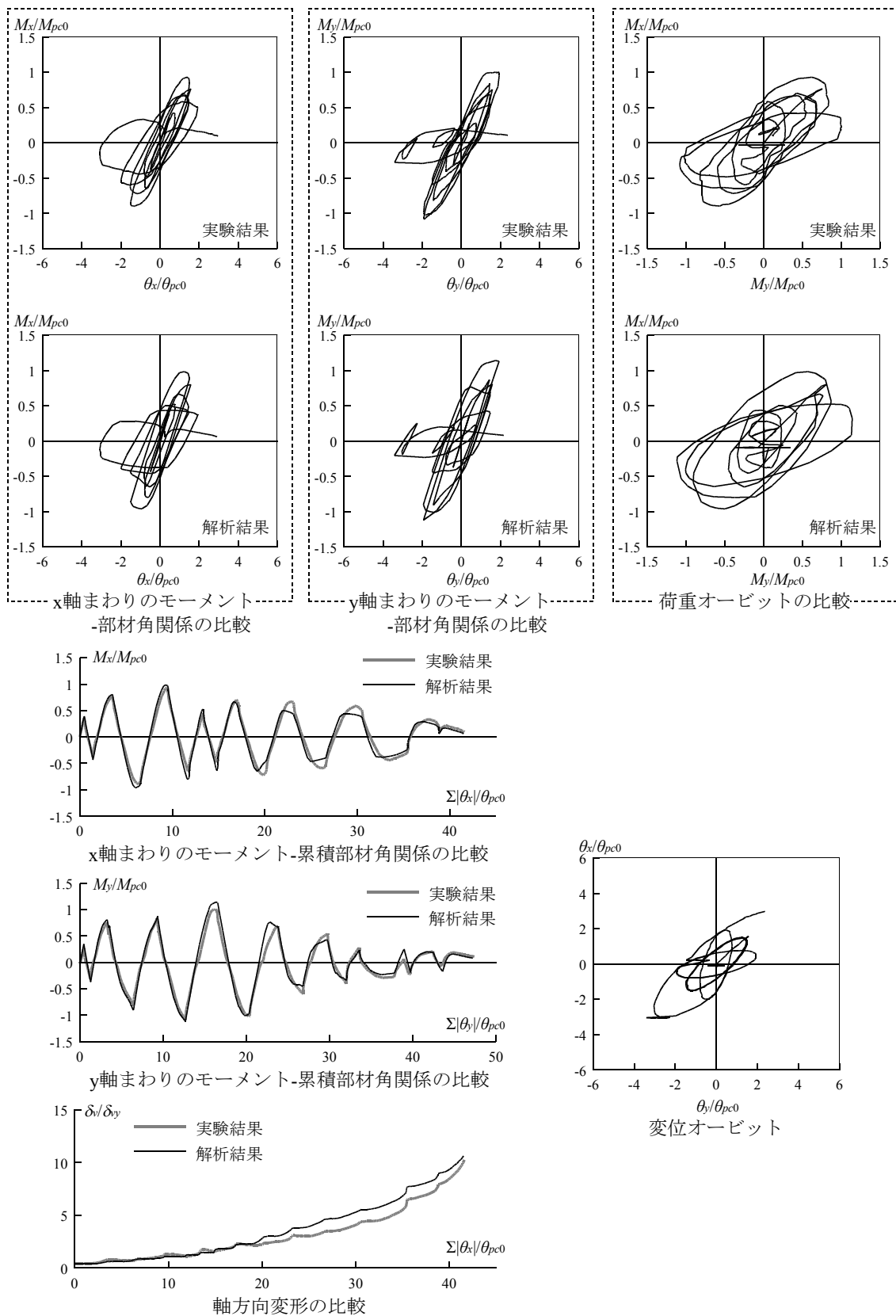
(8)CB45\_0.2\_33

図4.11 実験結果と解析結果の比較(続き)



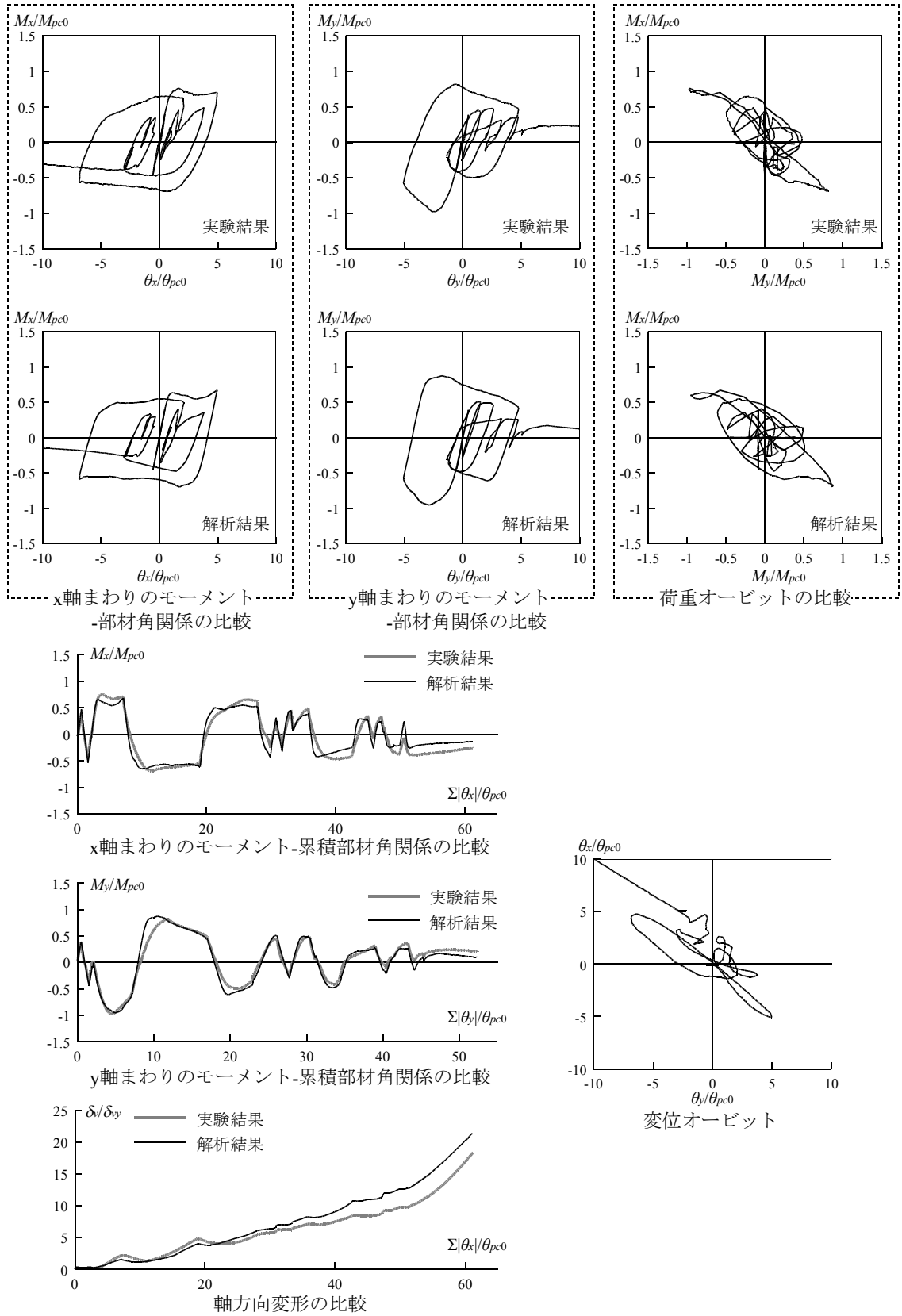
(9)CB00\_0.4\_33

図4.11 実験結果と解析結果の比較(続き)



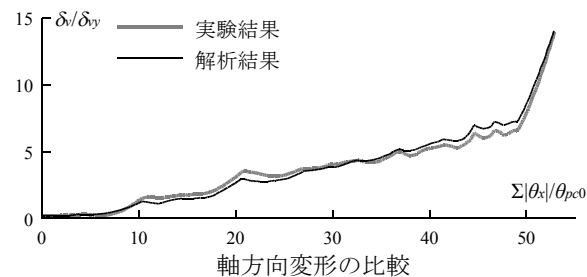
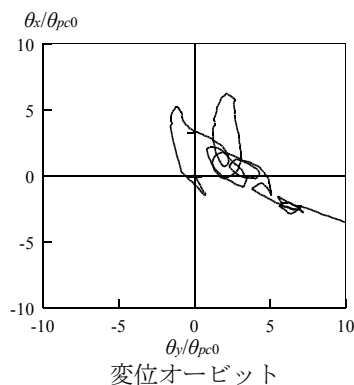
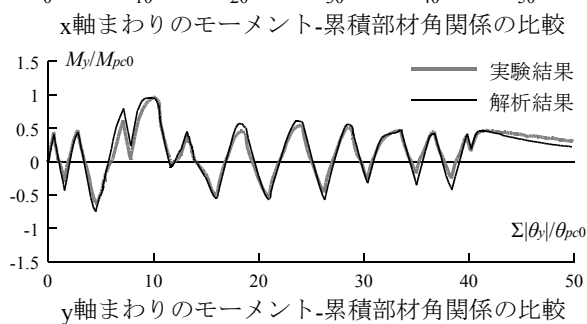
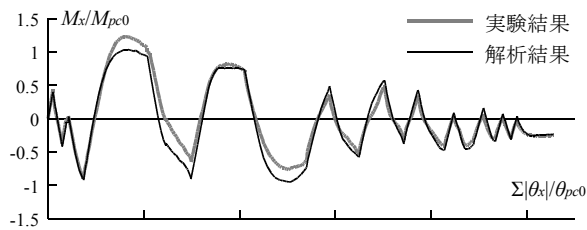
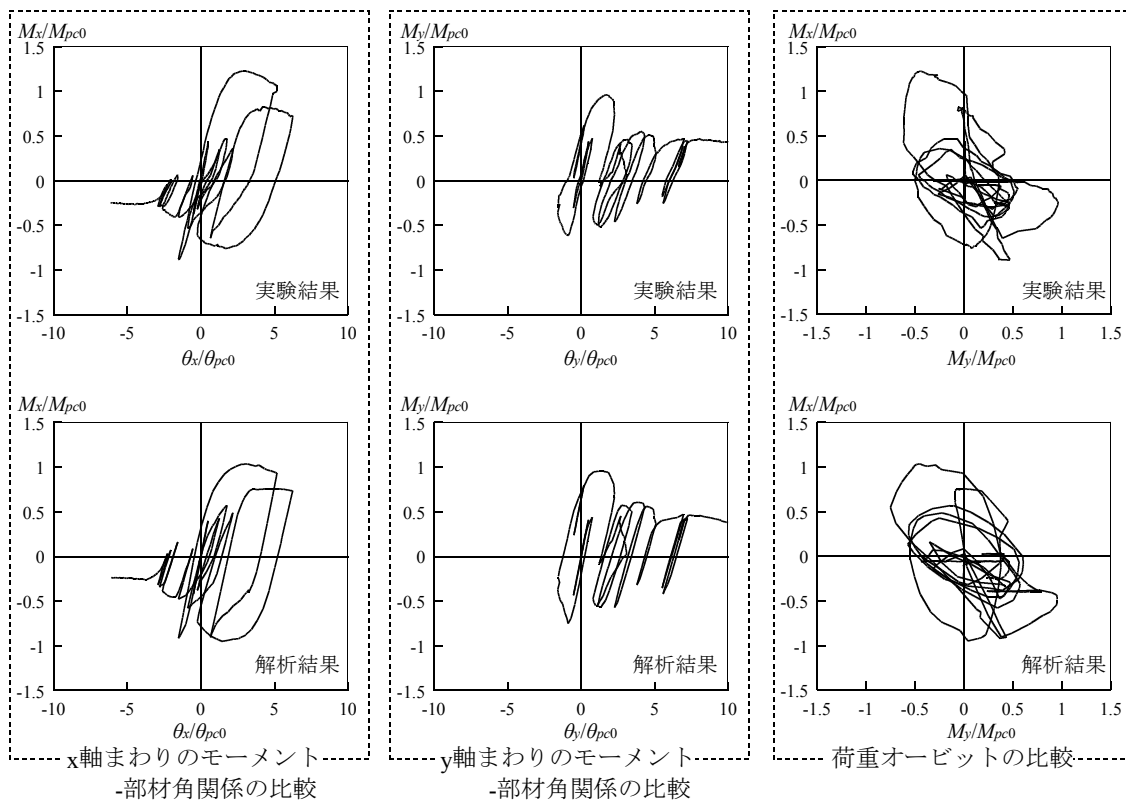
(10)CB45\_0.4\_33

図4.11 実験結果と解析結果の比較(続き)



(11)CB\_KB\_0.2\_33

図4.11 実験結果と解析結果の比較(続き)



(12)CB\_SD\_0.2\_33

図4.11 実験結果と解析結果の比較(続き)

#### 4.4 まとめ

第4章では、一定軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の局部座屈に起因する劣化域を含む挙動を追跡するモデルを構築した。解析モデルは、MS(Multi Spring)モデルとし、MSモデルの要素バネの履歴モデルを、第2章で構築した1軸曲げの条件における局部座屈を伴う角形鋼管柱の劣化挙動のモデルに基づき構築した。要素バネの履歴モデルは、局部座屈の発生で決まる最大耐力に至るまでは、圧縮側、引張側ともに、一方向荷重下の荷重変形関係に対応する骨格曲線、バウシンガー部、弾性除荷部から構成し、局部座屈の発生で決定する最大耐力に至った後は、圧縮側については、拡張骨格曲線に対応する耐力劣化部、耐力上昇部、除荷部から構成し、引張側については、最大耐力以前と同様の履歴モデルとして、骨格曲線、耐力上昇部、除荷部から構成した。圧縮側の拡張骨格曲線は、短柱圧縮試験結果に基づく劣化域における平均応力度-ひずみ度関係のモデルをベースとして、局部座屈発生により決定する応力上昇率  $S'$ 、劣化第1勾配  $E_{a1}'$ 、劣化第2勾配  $E_{a2}'$ 、劣化第3勾配  $E_{a3}'$ 、劣化第1勾配と劣化第2勾配の遷移点  $T'$ 、劣化第2勾配と劣化第3勾配の遷移点  $T_2'$  からなるモデルとした。

第3章で行った実験結果と、構築した履歴モデルを適用したMSモデルによる一定軸力下で水平2方向の繰り返し外力を受ける角形鋼管柱の解析結果の比較を行い、局部座屈に起因する劣化域を含む挙動を追跡できるか検証した。降伏軸力比を0.2または0.4、幅厚比を22.2または33.3、平面載荷履歴を規則的またはランダムとしたいずれの試験体について、解析結果は局部座屈発生以降の劣化域に至るまで実験結果の履歴曲線を精度良く捉えていた。また、軸方向変形についても、最大耐力以降の劣化域まで解析結果は実験結果と良好に対応していた。

#### [参考文献]

- 4.1) S.S.Lai, G.T.Will, and S.Otani: Model for Inelastic Biaxial Bending of Concrete Members, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.110, No.ST11, pp.2563-2584, 1984.11
- 4.2) 李 康寧, 小谷俊介, 青山博之: 3軸変動力を受ける鉄筋コンクリート柱の解析モデル, 構造工学論文集 Vol.33B, pp.169-178, 1987.3
- 4.3) 井上一郎, 吹田啓一郎: 建築鋼構造—その理論と設計, 鹿島出版会, 2007
- 4.4) 秋山 宏, 高橋 誠: 鋼構造剛接骨組の耐震性に及ぼすバウシンガー効果の影響, 日本建築学会構造系論文報告集 第418号, pp.49-57, 1990.12
- 4.5) 邱 榮政, 山田 哲, 桑村 仁, 秋山 宏: 冷間成形角形鋼管の保有性能の研究 その1 短柱圧縮実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C分冊, pp.1275-1276, 1992.8
- 4.6) 山田 哲, 秋山 宏, 桑村 仁: 局部座屈を伴う箱形断面部材の劣化域を含む終局挙動, 日本建築学会構造系論文報告集 第444号, pp.135-143, 1993.2



軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰り返し劣化挙動

## 第5章

### 変動軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し載荷実験

#### 5.1 はじめに

地震荷重下では、多層骨組の下層部外柱には水平2方向の外力と転倒モーメントに伴い変動する軸力が作用する。これまでの角形鋼管柱の変動軸力下での挙動を扱った研究<sup>5.1),5.2)</sup>などの多くは構面内方向への挙動を対象としている。山田ら<sup>5.1)</sup>は、軸力の変動が局部座屈発生以降の劣化挙動に及ぼす影響に着目し、軸力の変動パターンをパラメーターとした箱形断面鋼柱部材の単調載荷実験を行うとともに、変動軸力下での劣化域を含む荷重-変形関係の予測を行っている。山崎ら<sup>5.2)</sup>は、幅厚比が比較的小さな箱形断面鋼部材の変動軸力下での繰り返し載荷実験を行うとともに、弾塑性ジョイントモデルによる解析を行い、変動軸力が復元力特性に及ぼす影響を検討している。一方、変動軸力下で水平外力の作用方向がランダムに変動する条件での挙動を対象とした研究<sup>5.3)</sup>はほとんど行われていない。陳ら<sup>5.3)</sup>は、箱形断面鋼柱のオンライン実験を行うとともに、実験結果との比較により弾塑性ジョイントモデルによる解析結果の検証をしているが、対象とした部材の幅厚比が小さいこともあり、局部座屈が発生する以前の挙動の検討に留まっている。このように、変動軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の実験データは少なく、また、局部座屈発生以降の劣化挙動を扱った研究は行われていない。

変動軸力下での角形鋼管柱の劣化域を含む3次元挙動を追跡するモデルを構築することを目的として、本章では、解析のキャリブレーションのため、転倒モーメントによる変動軸力を受ける多層骨組の下層部外柱を想定した、変動軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し載荷実験を行い、局部座屈発生に起因する劣化域を含む挙動に関するデータを得る。また、実験に先立ち、水平2方向外力を受ける鋼構造多層骨組の弾塑性応答解析結果の検討に基づき、軸力の変動パターンを設定する。

## 5.2 試験体とパラメーター

試験体には、建築構造用冷間ロール成形角形鋼管(BCR295)□-200×200×9(幅厚比 22.2)、□-200×200×6(幅厚比 33.3)を用いた。試験体形状を図 5.1 に示す。試験体両端には実験装置に接続するためのエンドプレート(削り出し後の板厚 33mm)が溶接されている。鋼管平板部から切り出した JIS1A 号試験片による素材引張試験結果を図 5.2 及び表 5.1 に示す。

本実験のパラメーターは幅厚比、軸力の変動幅及び平面荷重履歴である。実験パラメーターの一覧を表 5.2 に、平面荷重履歴の概要を図 5.3 に示す。軸力については、初期軸力を降伏軸力比  $N/N_y$  で 0.2 として、軸力の変動幅を降伏軸力比で  $\pm 0.2$  程度あるいは  $\pm 0.4$  程度となる 2 種類とした。ここで、軸力は圧縮を正、引張を負とする。また、平面荷重履歴については、第 3 章で提案した楕円状のオービットからなる規則的な平面荷重履歴と、MSS モデル<sup>5.4)</sup>を用いた水平 2 方向入力を受ける多質点せん断系の応答解析結果に基づくランダムな平面荷重履歴を用いる。本実験では、規則的な平面荷重履歴の主軸方向を、鋼管の平板部に対して  $0^\circ$  あるいは  $45^\circ$  となる 2 種類を設定した。ここで、規則的な平面荷重履歴の変位振幅は、1 セットごとに  $2\theta_{p0}$  ( $\theta_{p0}$  は  $0^\circ$  方向に荷重した場合の軸力が作用しない条件での全塑性モーメントに対応する弾性部材角の計算値) ずつ漸増させることとした。また、ランダムな平面荷重履歴は、第 3 章と同じ、完全弾塑性型の復元力特性を有する 9 質点系に、神戸波あるいは仙台波の水平 2 方向成分を入力した応答解析結果の 1 層質点の変位オービットから小振幅成分を除いたものを用いた。ここで、解析では入力加速度に係数を掛け、1 層の最大応答変位が塑性率で 10 程度となる場合の応答を求めている。

実験方法は第 3 章と同様であり、逆対称曲げの荷重条件で、試験体に所定の軸力と、変位制御による水平 2 方向外力を作用させた。

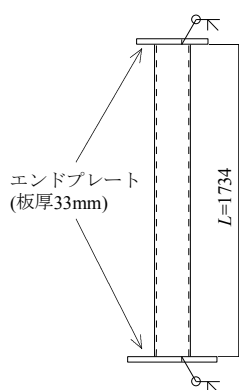


図5.1 試験体形状

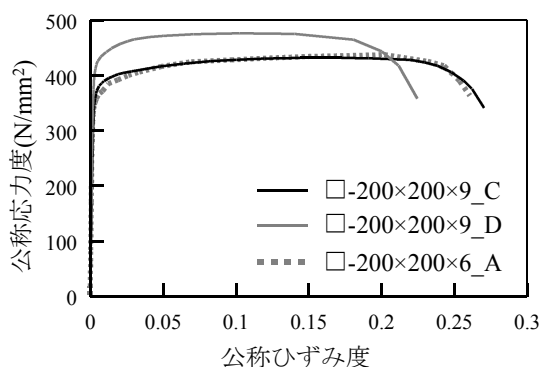


図5.2 素材引張試験結果

表5.1 素材引張試験結果一覧

ロット	降伏応力度 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	降伏比 %	破断伸び %
□-200×200×9_C	367	432	85	27
□-200×200×9_D	420	477	88	24
□-200×200×6_A	351	438	80	28

表5.2 実験パラメーターの一覧

試験体名	ロット	幅厚比	降伏軸力比	平面載荷履歴*	
VB00_0.2±0.2_22	□200×200×9_C	22.2	初期軸力：0.2 軸力変動幅：±0.2	(1)	
VB45_0.2±0.2_22				(2)	
VB_KB_0.2±0.2_22	□200×200×9_D			(3)	
VB_SD_0.2±0.2_22				(4)	
VB00_0.2±0.2_33	□200×200×6_A	33.3	初期軸力：0.2 軸力変動幅：±0.4	(1)	
VB45_0.2±0.2_33				(2)	
VB00_0.2±0.4_22	□200×200×9_C	22.2		初期軸力：0.2 軸力変動幅：±0.4	(1)
VB45_0.2±0.4_22					(2)
VB_KB_0.2±0.4_22	□200×200×9_D		(3)		
VB_SD_0.2±0.4_22			(4)		
VB00_0.2±0.4_33	□200×200×6_A	33.3		(1)	
VB45_0.2±0.4_33				(2)	

\*図 5.3 参照

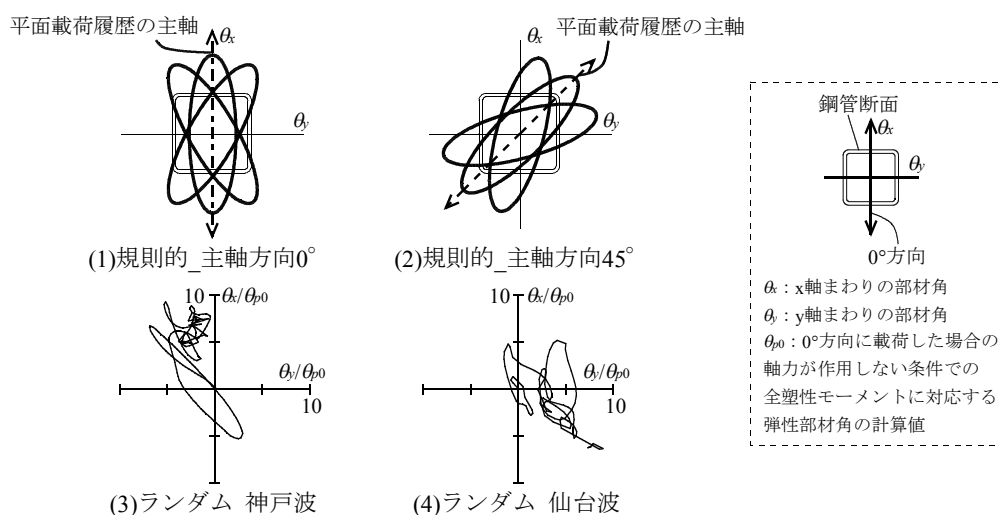


図5.3 平面載荷履歴の概要

### 5.3 軸力の変動パターンの設定

#### 5.3.1 応答解析結果の検討

本研究では、第3章で行ったMSSモデルを用いた水平2方向入力を受ける多質点せん断系の応答解析結果に基づき、軸力の変動パターンを設定する。応答解析の諸元を表5.3に示す。これらの応答解析結果から1層における転倒モーメントを求め、図5.4に示す骨組モデルを想定し、側柱と隅柱に作用する転倒モーメントによる付加軸力を算出した。1層のx方向の側柱に作用する軸力とx方向の層せん断力の関係及び隅柱に作用する軸力と45°方向に投影した層せん断力の関係を、軸力を降伏軸力 $N_y$ で除した上で図5.5に例示する。ここで、1層の柱に作用する初期軸力は降伏軸力比で0.2とした。側柱、隅柱に作用する軸力と、それぞれ対応する投影方向の層せん断力は概ね線形関係にある。また、例示以外の結果についても同様の結果であった。

表5.3 応答解析諸元

重量	1000kN (各層一定)
階高	4m (各層一定)
ベースシヤール係数	0.5
降伏層間変形角	0.005
復元力特性	完全弾塑性型
層数	3層(1次固有周期0.57s), 9層(1次固有周期0.91s)
P-Δ効果	考慮有, 考慮無
入力波	El Centro波, Taft波, 八戸波, 神戸波, 仙台波

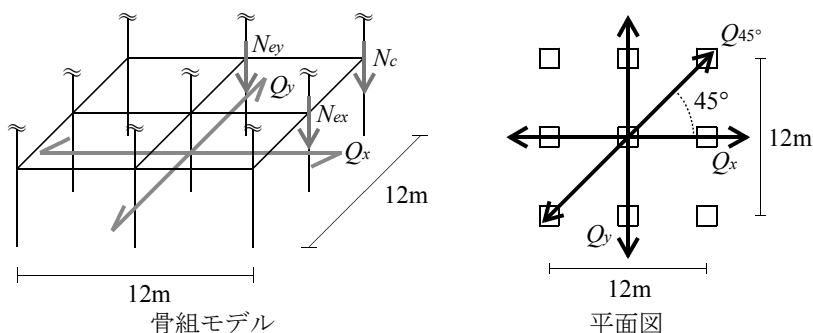


図5.4 骨組モデル

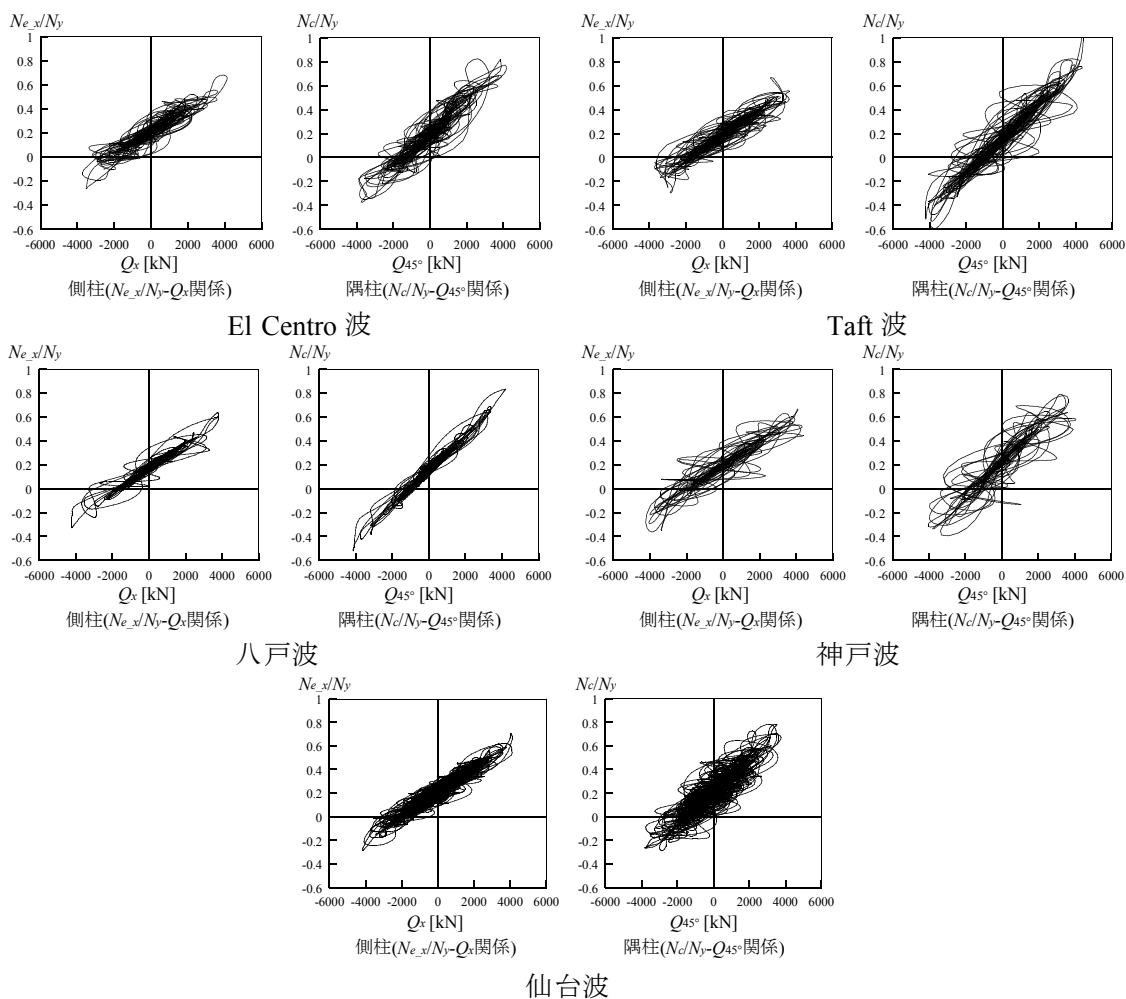


図5.5 第1層における柱の軸力と層せん断力の関係(層数9層, P-Δ効果考慮)

### 5.3.2 軸力の変動パターンの設定

層せん断力と外柱に作用する軸力は概ね線形関係となること、また、転倒モーメントに伴う軸力変動による外柱の耐力の増減は軸力増加側と軸力減少側で相殺され、層における荷重-変形関係は一定軸力下である中柱の荷重-変形関係と大略的に対応するものと考え、本研究では図 5.6 に示すように、一定軸力下の柱に作用するせん断力と外柱に作用する軸力の変動パターンに線形関係が成り立つものとして、一定軸力下での荷重(せん断力)-変形関係と、軸力と変形の関係が対応するように軸力の変動パターンを設定する。ここで、主軸方向を  $0^\circ$  とした規則的な平面載荷履歴を用いた試験体とランダムな平面載荷履歴を用いた試験体については、 $0^\circ$  方向の荷重-変形関係と対応するように軸力履歴を設定し、主軸方向を  $45^\circ$  とした規則的な平面載荷履歴を用いた試験体については、 $45^\circ$  方向に投影した荷重-変形関係と対応するように軸力履歴を設定した。なお、一定軸力下の荷重-変形関係として、幅厚比が 33.3 の試験体については、第 3 章で行った、本実験の試験体と同一ロットで、降伏軸力比が 0.2、同一の平面載荷履歴による実験結果を用いた。また、幅厚比が 22.2 の試験体については、このような同一の条件による実験結果がないことから、降伏軸力比を 0.2 とし、本実験と同一の変位履歴を入力した、文献 5.5) の MSS モデルによる一定軸力下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の劣化域を含む荷重-変形関係の解析結果を用いた。

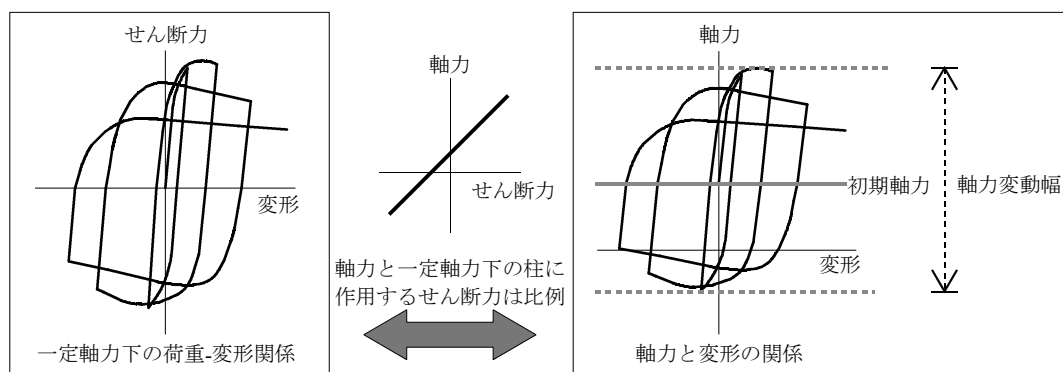


図5.6 軸力の変動パターン

## 5.4 実験結果

全試験体において、最大耐力の決定要因は局部座屈であった。局部座屈の発生状況を写真 5.1 に例示する。荷重は、規則的な平面荷重履歴で荷重した試験体のうち、VB00\_0.2±0.4\_22 試験体と幅厚比が 33.3 の試験体については、水平方向の復元力を喪失し軸力を保持できなくなるまで荷重を行った。その他の試験体(VB00\_0.2±0.2\_22, VB45\_0.2±0.2\_22, VB00\_0.2±0.4\_22)については、荷重中に局部座屈波が試験体を固定している治具に接触しそうになったため、接触する直前で荷重を中止した。また、ランダムな平面荷重履歴により荷重した試験体については、所定の平面荷重履歴を終了した後は、原点から所定の平面荷重履歴において最大変位となる方向と、平行となる方向への一方向荷重を行い、復元力を喪失し軸力を保持できなくなるまで荷重した。ここで、仙台波を入力した平面荷重履歴の試験体(VB\_SD\_0.2±0.2\_22, VB\_SD\_0.2±0.4\_22)については、所定の平面荷重履歴終了後の一方向荷重の途中で鋼管角部に亀裂の発生を観察し、その後も続けて荷重したところ、延性的に破断したため、荷重を終了した。試験体材端に作用する x 軸まわり、y 軸まわりの曲げモーメント-部材角関係、荷重オービット、変位オービット、軸力履歴を、0° 方向に荷重した場合の軸力が作用しない条件での全塑性モーメント  $M_{p0}$  と、 $M_{p0}$  に対応する弾性部材角の計算値  $\theta_{p0}$  で除した上で図 5.7(1)~(12)に示す。ここで、各図中において、各点に付してある番号はそれぞれ、①局部座屈の発生を観察した点、②合成モーメント  $\sqrt{M_x^2 + M_y^2}$  が最大となる点、③ランダムな平面荷重履歴による試験体において、所定の平面荷重履歴を終了した点を示す。また、図中の黒実線は局部座屈の発生を観察する以前の挙動、灰破線はそれ以降の挙動を表す。

### ・実験経過

各試験体ごとに局部座屈の発生を観察した時点と、合成モーメントが最大値に達した時点に着目し実験経過を述べる。

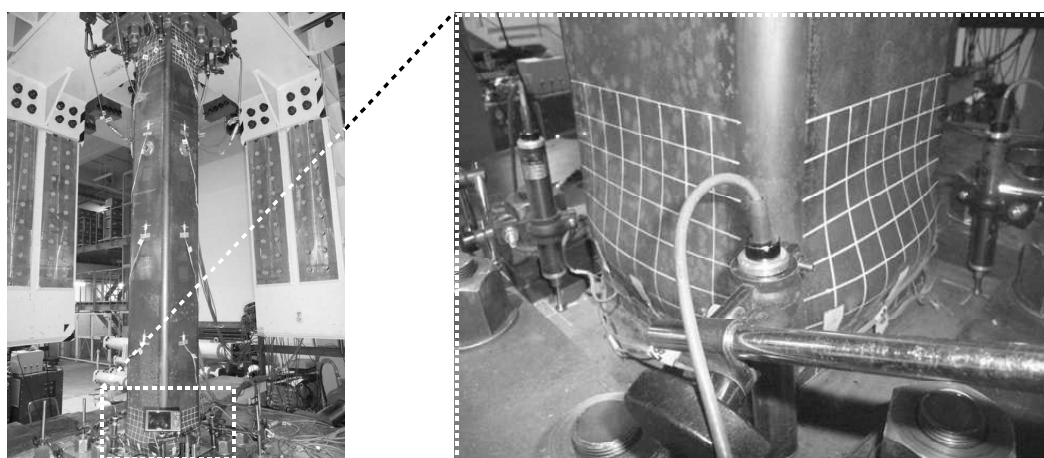


写真5.1 局部座屈の発生状況(VB00\_0.2±0.2\_22)

[VB00\_0.2±0.2\_22]

主軸方向を  $0^\circ$ 、降伏軸力比の変動幅を  $\pm 0.2$ 、幅厚比を 22.2 とした試験体(VB00\_0.2±0.2\_22)では、長軸を  $4\theta_{p0}$  としたセットで、最初に長軸を主軸方向に向けた楕円において、x 軸まわりの部材角が正側でピーク値となるあたりで、局部座屈の発生を観察した。このときの降伏軸力比は 0.39 であった。次に、同じ最初に長軸を主軸方向に向けた楕円において、x 軸まわりの部材角が負側でピーク値となるあたりで、合成モーメントは最大値に達した。このときの降伏軸力比は 0.02 であった。

[VB45\_0.2±0.2\_22]

主軸方向を  $45^\circ$ 、降伏軸力比の変動幅を  $\pm 0.2$ 、幅厚比を 22.2 とした試験体(VB45\_0.2±0.2\_22)では、長軸を  $4\theta_{p0}$  としたセットで、最初に長軸を主軸方向に向けた楕円载荷において、x 軸まわりの部材角が正側で最大となるあたりで、局部座屈の発生を観察した。このときの降伏軸力比は 0.40 であった。次に、同じセットで、長軸を  $+30^\circ$  方向に向けた楕円载荷において、y 軸まわりの部材角が負側で最大となるあたりで、合成モーメントが最大値に達した。このときの降伏軸力比は 0.08 であった。

[VB00\_0.2±0.4\_22]

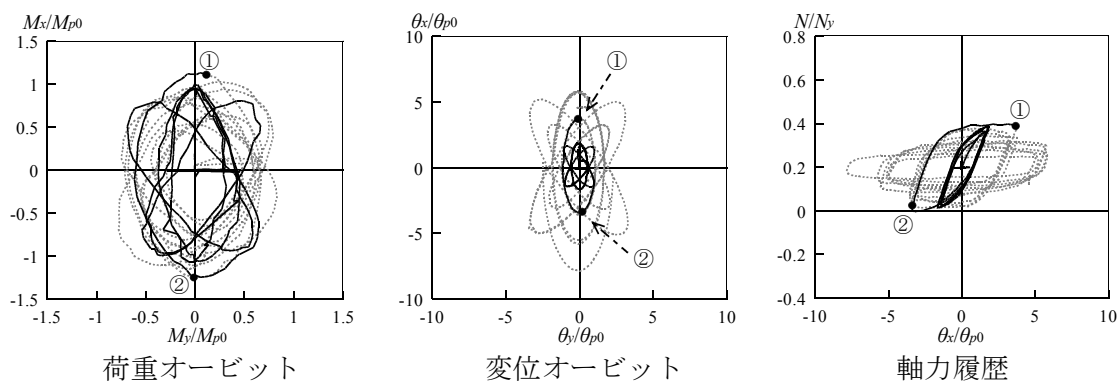
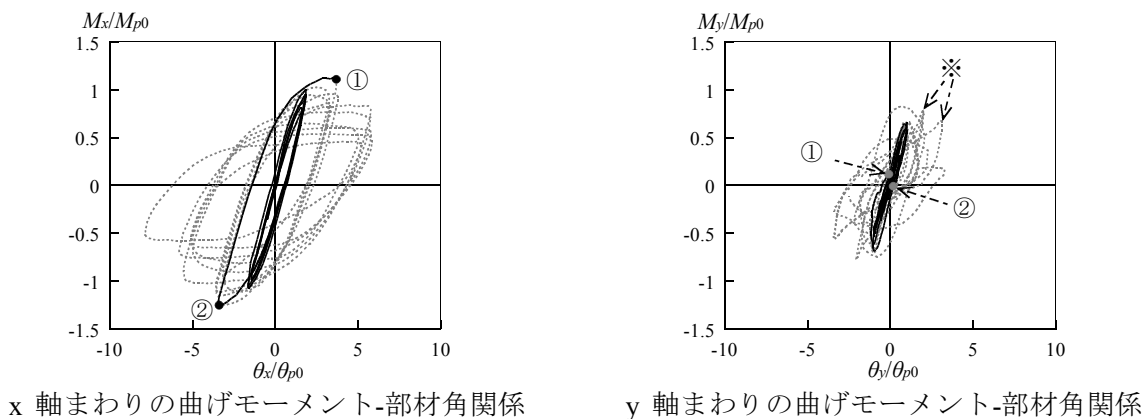
主軸方向を  $0^\circ$ 、降伏軸力比の変動幅を  $\pm 0.4$ 、幅厚比を 22.2 とした試験体(VB00\_0.2±0.4\_22)では、長軸を  $4\theta_{p0}$  としたセットで、最初に長軸を主軸方向に向けた楕円载荷において、x 軸まわりの部材角が正側で最大となる手前で、局部座屈の発生を観察した。このときの降伏軸力比は 0.59 であった。次に、同じ最初に長軸を主軸方向に向けた楕円において、x 軸まわりの部材角が負側でピーク値となるあたりで、合成モーメントは最大値に達した。このときの降伏軸力比は -0.17 であった。

[VB45\_0.2±0.4\_22]

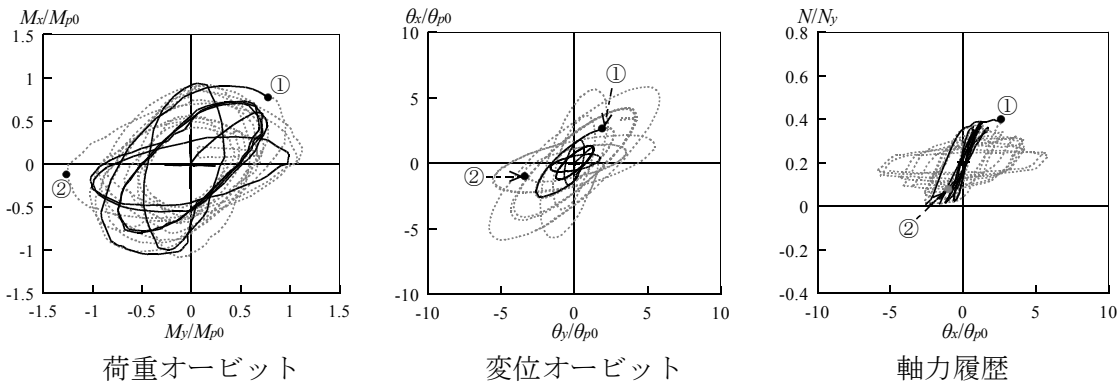
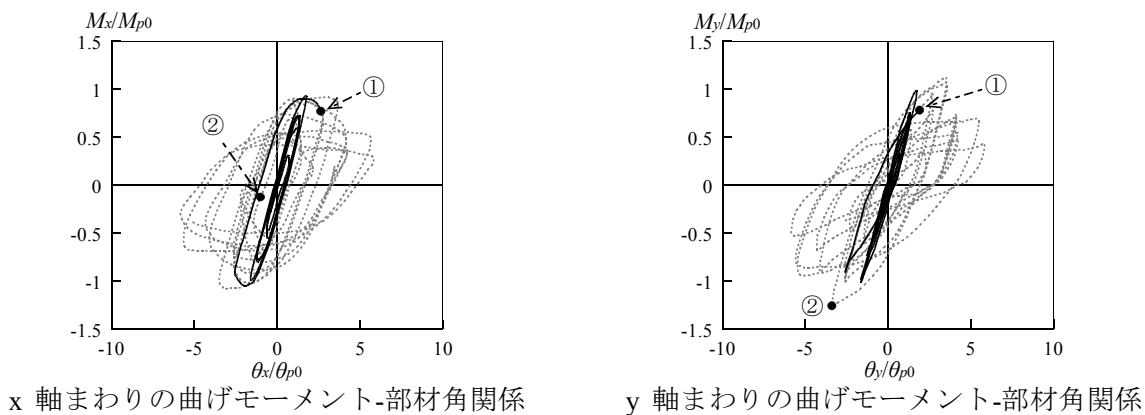
主軸方向を  $45^\circ$ 、降伏軸力比の変動幅を  $\pm 0.4$ 、幅厚比を 22.2 とした試験体(VB45\_0.2±0.4\_22)では、長軸を  $4\theta_{p0}$  としたセットで、最初に長軸を主軸方向に向けた楕円载荷において、x 軸まわりの部材角が正側で最大となるあたりで、局部座屈の発生を観察した。このときの降伏軸力比は 0.58 であった。その後、このセットでの長軸を  $+30^\circ$  方向に向けた楕円载荷において、y 軸まわりの部材角が負側で最大となる頂点の近くにおいて、合成モーメントが最大値に達した。このときの降伏軸力比は 0.00 であった。



軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰返し劣化挙動

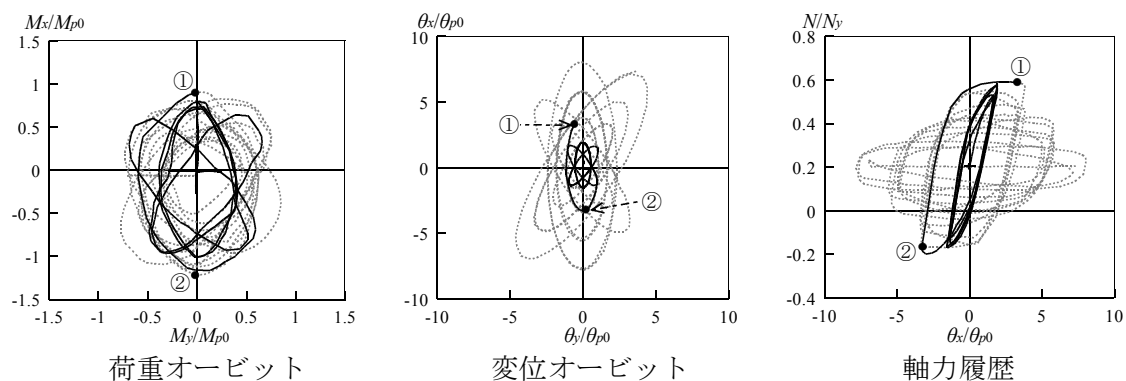
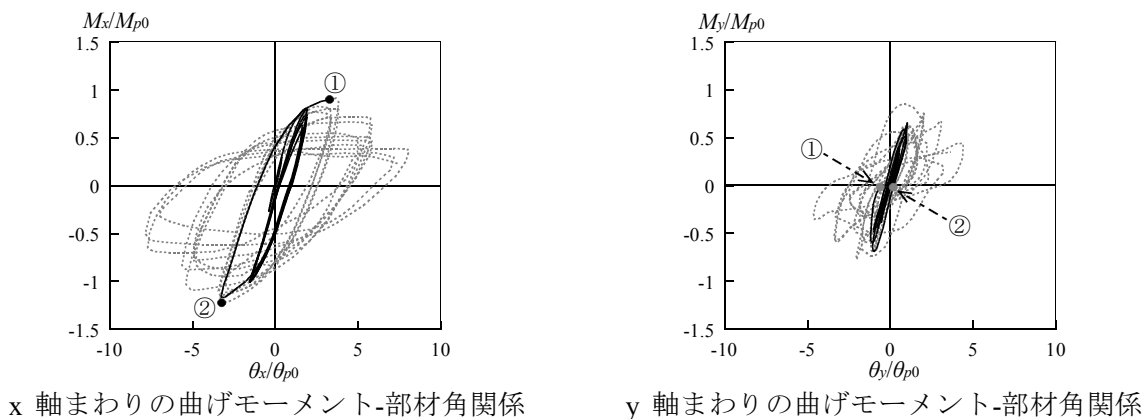


(1)VB00\_0.2±0.2\_22

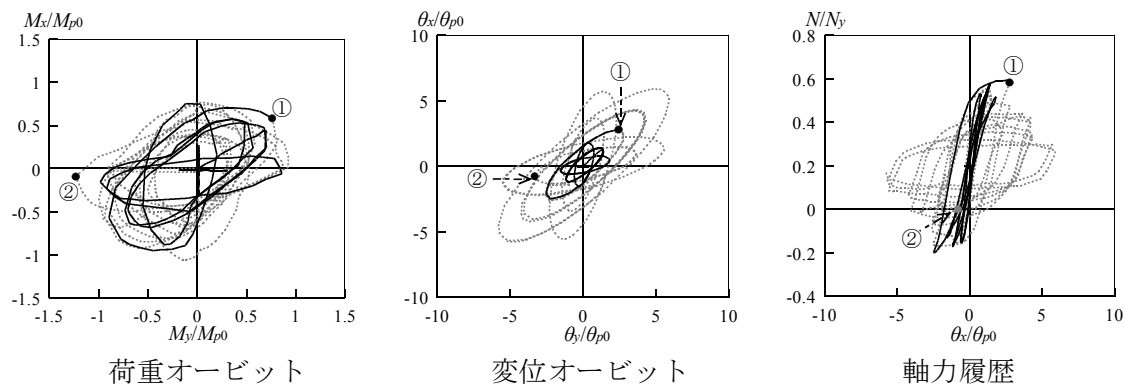
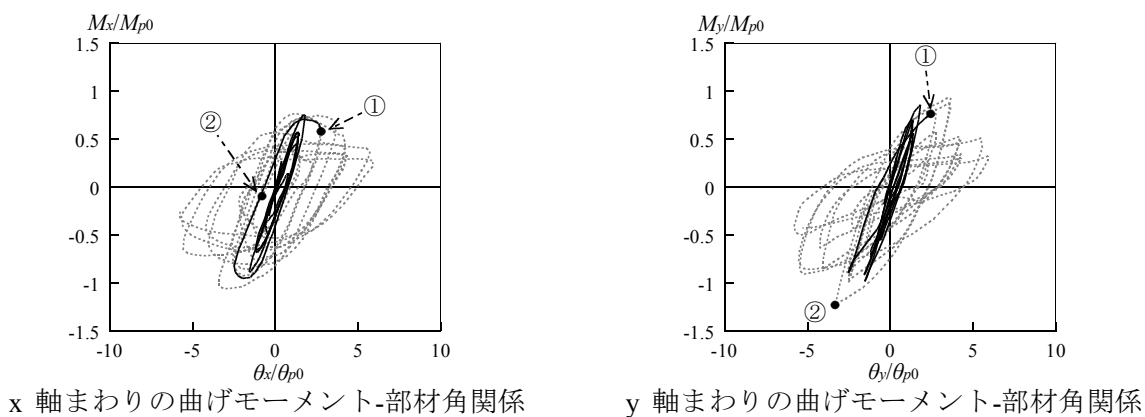


(2)VB45\_0.2±0.2\_22

図5.7 実験結果



(3)VB00\_0.2±0.4\_22



(4)VB45\_0.2±0.4\_22

図5.7 実験結果(続き)

[VB\_KB\_0.2±0.2\_22]

神戸波を入力波とした平面載荷履歴で、降伏軸力比の変動幅を  $\pm 0.2$ 、幅厚比を 22.2 とした試験体(VB\_KB\_0.2±0.2\_22)では、x 軸まわりの部材角が  $2.5\theta_{p0}$ 、y 軸まわりの部材角が  $-3\theta_{p0}$  となるあたりで、局部座屈の発生を観察した。このときの降伏軸力比は 0.29 であった。その後、変形が進展し、x 軸まわりの部材角が  $4\theta_{p0}$ 、y 軸まわりの部材角が  $-5\theta_{p0}$  となるあたりで、合成モーメントは最大値に達した。このときの降伏軸力比は 0.29 であった。

[VB\_SD\_0.2±0.2\_22]

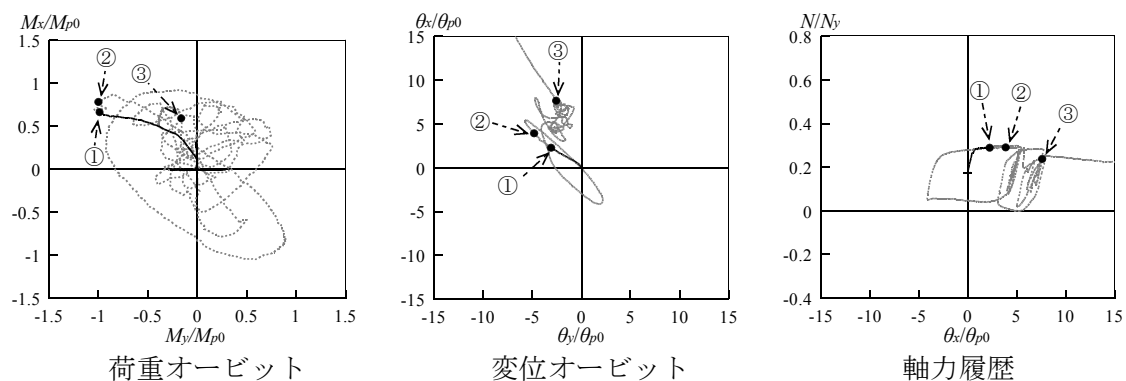
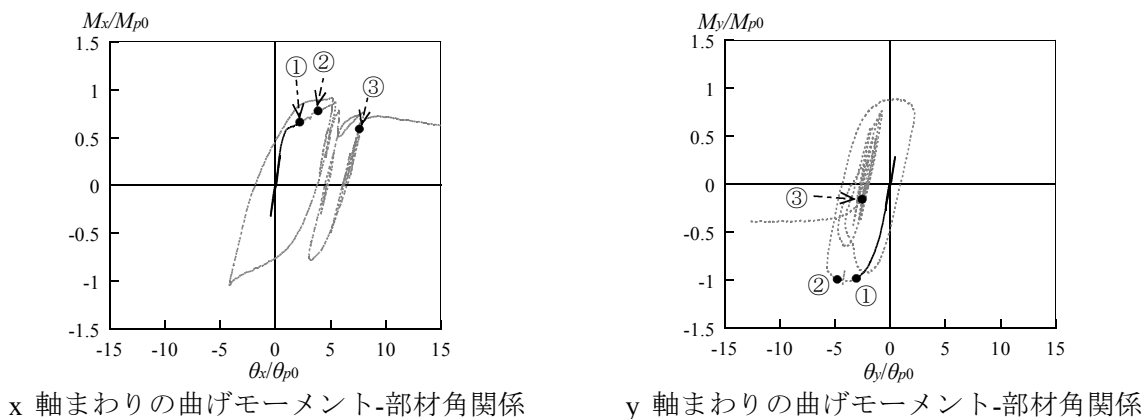
仙台波を入力波とした平面載荷履歴で、降伏軸力比の変動幅を  $\pm 0.2$ 、幅厚比を 22.2 とした試験体(VB\_SD\_0.2±0.2\_22)では、載荷開始時から 1.5 サイクル程度載荷し、x 軸まわりの部材角が  $2.5\theta_{p0}$ 、y 軸まわりの部材角が  $-1\theta_{p0}$  となるあたりで、局部座屈の発生を観察した。このときの降伏軸力比は 0.35 であった。その後、x 軸まわりの部材角が  $-2\theta_{p0}$ 、y 軸まわりの部材角が  $4.5\theta_{p0}$  となるあたりで、合成モーメントは最大値に達した。このときの降伏軸力比は 0.03 であった。

[VB\_KB\_0.2±0.4\_22]

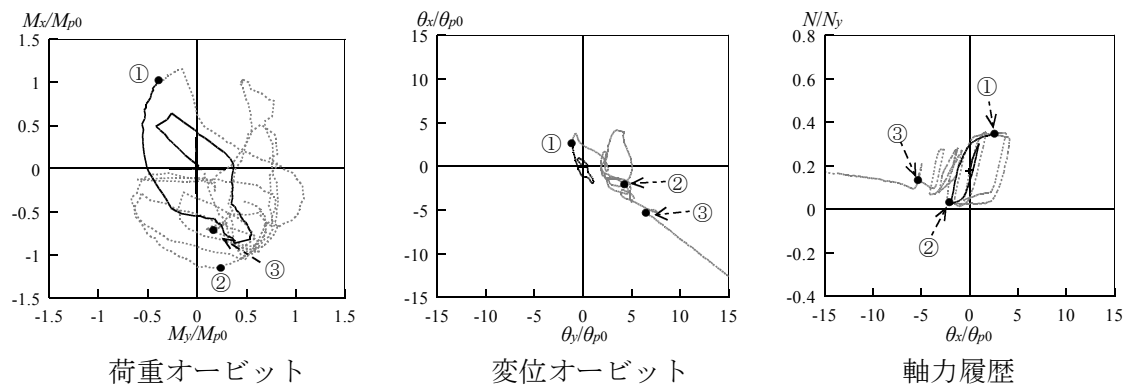
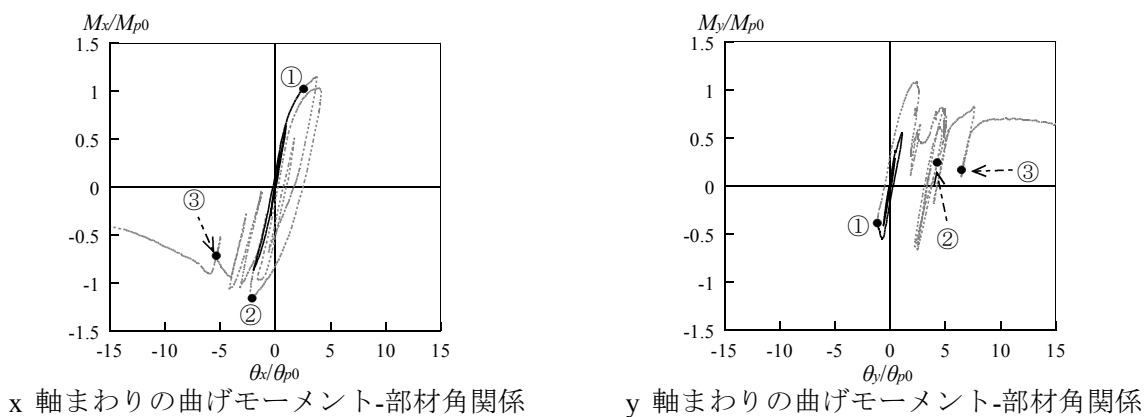
神戸波を入力波とした平面載荷履歴で、降伏軸力比の変動幅を  $\pm 0.4$ 、幅厚比を 22.2 とした試験体(VB\_KB\_0.2±0.4\_22)では、x 軸まわりの部材角が  $2\theta_{p0}$ 、y 軸まわりの部材角が  $-2.5\theta_{p0}$  となるあたりで、局部座屈の発生を観察した。このときの降伏軸力比は 0.4 であった。その後およそ半サイクル載荷し、x 軸まわりの部材角が  $-3.5\theta_{p0}$ 、y 軸まわりの部材角が  $2\theta_{p0}$  となるあたりで、合成モーメントは最大値に達した。このときの降伏軸力比は  $-0.06$  であった。

[VB\_SD\_0.2±0.4\_22]

仙台波を入力波とした平面載荷履歴で、降伏軸力比の変動幅を  $\pm 0.4$ 、幅厚比を 22.2 とした試験体(VB\_SD\_0.2±0.4\_22)では、載荷開始時から 1.5 サイクル程度載荷し、x 軸まわりの部材角が  $2.5\theta_{p0}$ 、y 軸まわりの部材角が  $-1\theta_{p0}$  となるあたりで、局部座屈の発生を観察した。このときの降伏軸力比は 0.51 であった。その後、x 軸まわりの部材角が  $-4\theta_{p0}$ 、y 軸まわりの部材角が  $5\theta_{p0}$  となるあたりで、合成モーメントは最大値に達した。このときの降伏軸力比は  $-0.04$  であった。



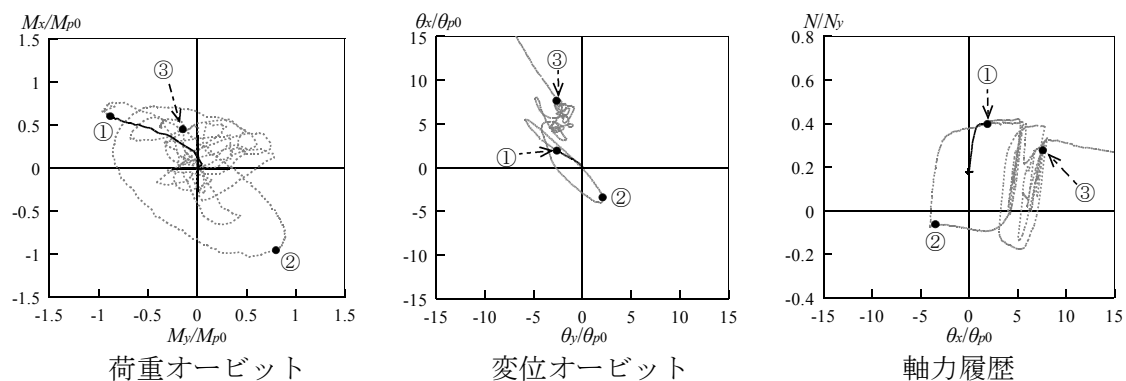
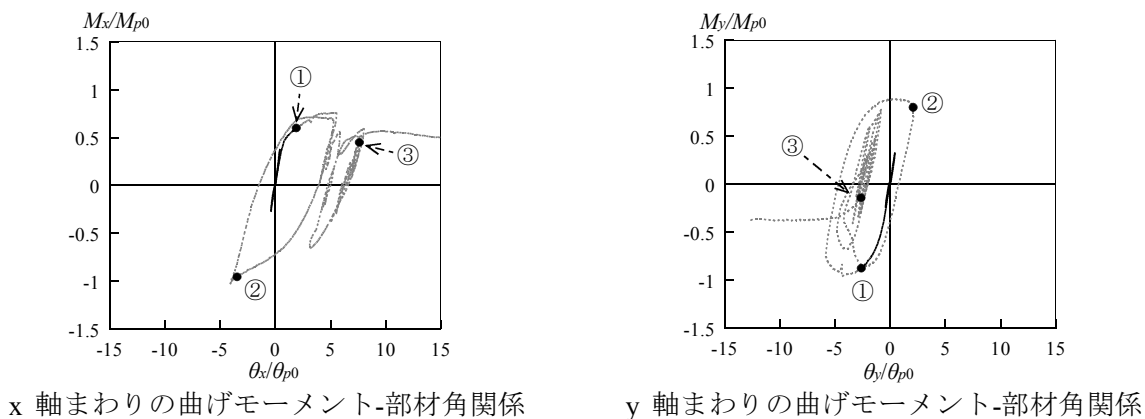
(5)VB\_KB\_0.2±0.2\_22



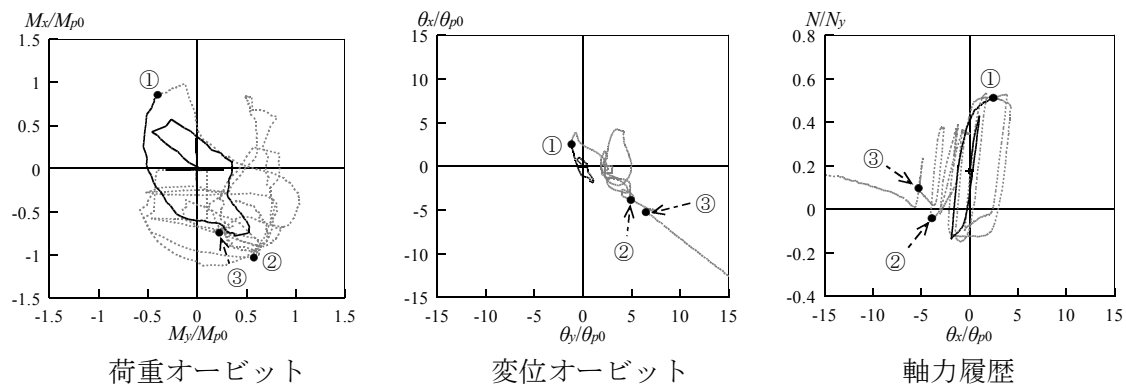
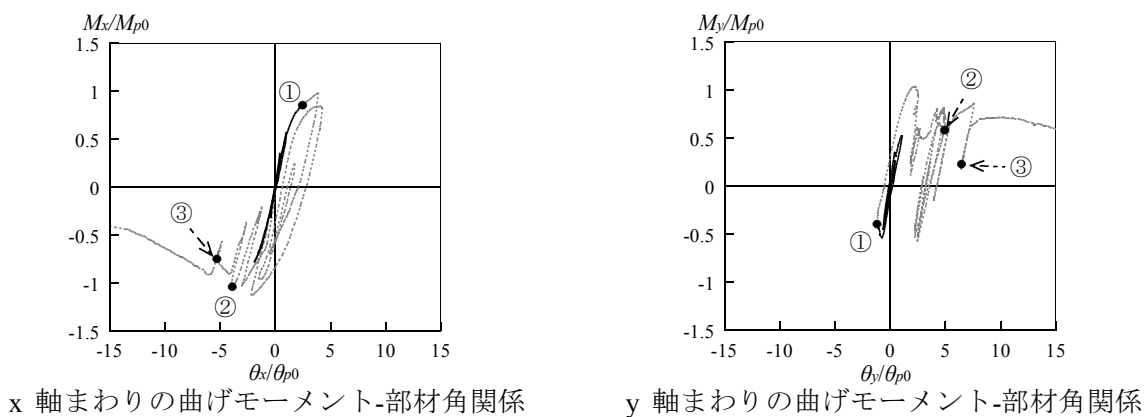
(6)VB\_SD\_0.2±0.2\_22

図5.7 実験結果(続き)

軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰り返し劣化挙動



(7)VB\_KB\_0.2±0.4\_22



(8)VB\_SD\_0.2±0.4\_22

図5.7 実験結果(続き)

[VB00\_0.2±0.2\_33]

主軸方向を 0°、降伏軸力比の変動幅を ±0.2、幅厚比を 33.3 とした試験体 (VB00\_0.2±0.2\_33)では、長軸を  $2\theta_{p0}$  としたセットで、最初に長軸を主軸方向に向けた楕円载荷において、x 軸まわりの部材角が負側で最大となるあたりで、合成モーメントが最大値に達した。このときの降伏軸力比は 0.01 であった。その後、次に、同じ最初に長軸を主軸方向に向けた楕円において、x 軸まわりの部材角が正側で最大となるあたりで、局部座屈の発生を観察した。このときの降伏軸力比は 0.40 であった。

[VB45\_0.2±0.2\_33]

主軸方向を 45°、降伏軸力比の変動幅を ±0.2、幅厚比を 33.3 とした試験体 (VB45\_0.2±0.2\_33)では、長軸を  $2\theta_{p0}$  としたセットで、最初に長軸を主軸方向に向けた楕円载荷において、x 軸まわりの部材角が正側で最大となるあたりで、局部座屈の発生を観察した。このときの降伏軸力比は 0.39 であった。その後、同じセットでの長軸を+30° 方向に向けた楕円载荷において、y 軸まわりの部材角が負側で最大となるあたりで、合成モーメントが最大値に達した。このときの降伏軸力比は 0.04 であった。

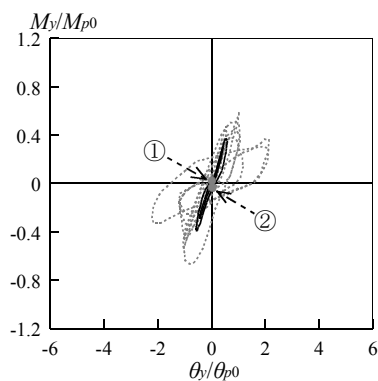
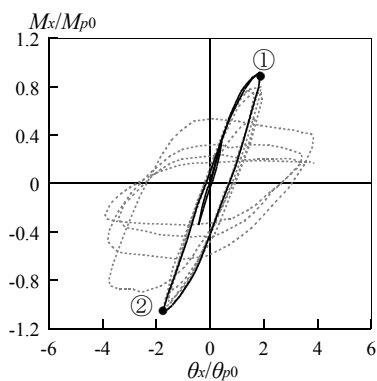
[VB00\_0.2±0.4\_33]

主軸方向を 0°、降伏軸力比の変動幅を ±0.4、幅厚比を 33.3 とした試験体 (VB00\_0.2±0.4\_33)では、原点から 1 セット目の最初の楕円に至るまでの主軸方向への载荷において、x 軸まわりの部材角が  $1.5\theta_{p0}$  となるあたりで、局部座屈の発生を観察した。このときの降伏軸力比は 0.53 であった。その後、長軸を  $4\theta_{p0}$  としたセットで、最初に長軸を主軸方向に向けた楕円载荷において、x 軸まわりの部材角が負側で最大となるあたりで、合成モーメントは最大値に達した。このときの降伏軸力比は 0.00 であった。

[VB45\_0.2±0.4\_33]

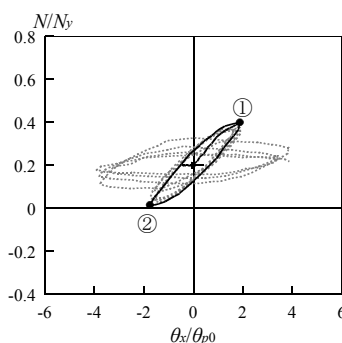
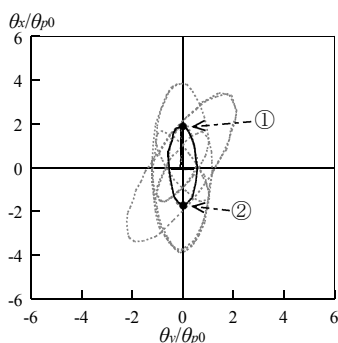
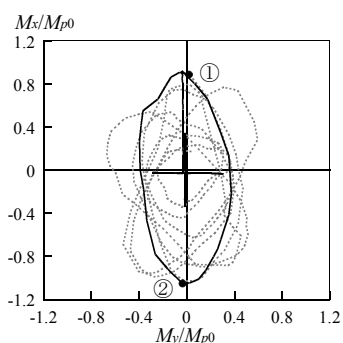
主軸方向を 45°、降伏軸力比の変動幅を ±0.4、幅厚比を 33.3 とした試験体 (VB45\_0.2±0.4\_33)では、原点から 1 セット目の最初の楕円に至るまでの主軸方向への载荷において、x 軸まわり及び y 軸まわりの部材角が  $1.2\theta_{p0}$  となるあたりで、局部座屈の発生を観察した。局部座屈の発生を観察した。このときの降伏軸力比は 0.54 であった。その後、長軸を  $4\theta_{p0}$  としたセットで、最初に長軸を主軸方向に向けた楕円载荷において、x 軸まわりの部材角が負側で最大となるあたりで合成モーメントは最大値に達した。このときの降伏軸力比は-0.13 であった。

軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰り返し劣化挙動



x 軸まわりの曲げモーメント-部材角関係

y 軸まわりの曲げモーメント-部材角関係

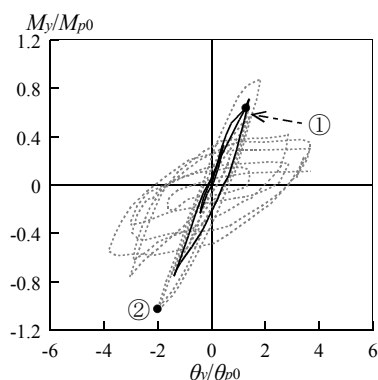
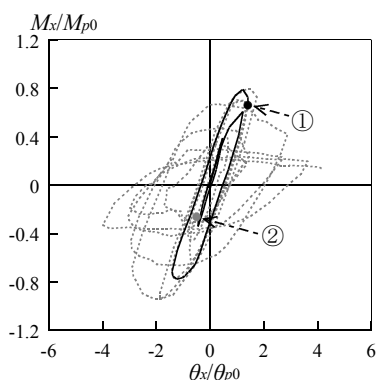


荷重オービット

変位オービット

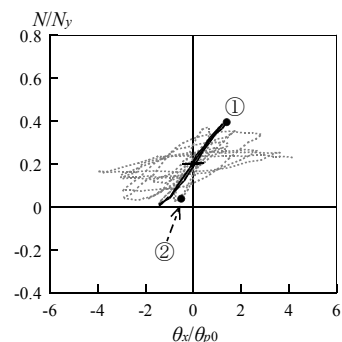
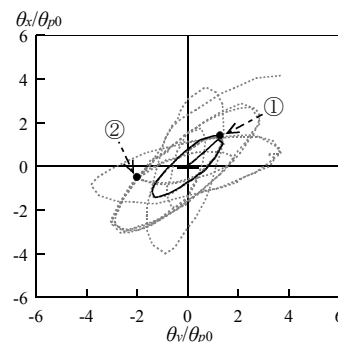
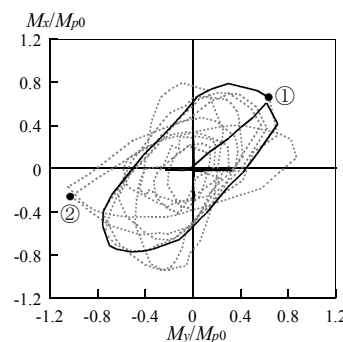
軸力履歴

(9)VB00\_0.2±0.2\_33



x 軸まわりの曲げモーメント-部材角関係

y 軸まわりの曲げモーメント-部材角関係



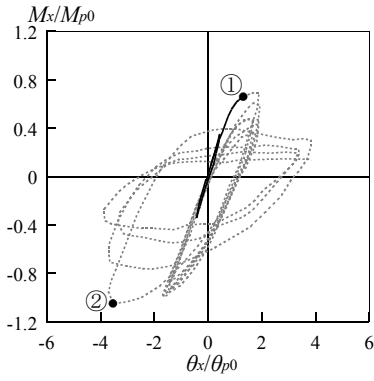
荷重オービット

変位オービット

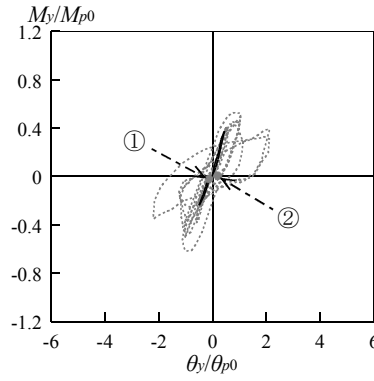
軸力履歴

(10)VB45\_0.2±0.2\_33

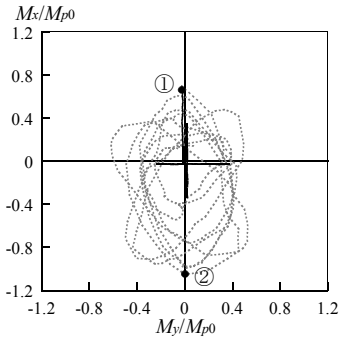
図5.7 実験結果(続き)



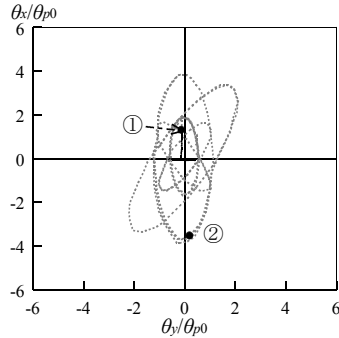
x 軸まわりの曲げモーメント-部材角関係



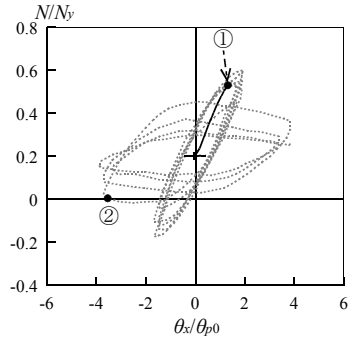
y 軸まわりの曲げモーメント-部材角関係



荷重オービット

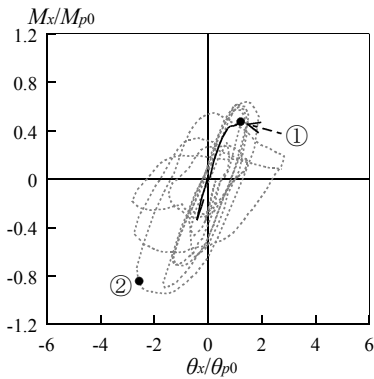


変位オービット

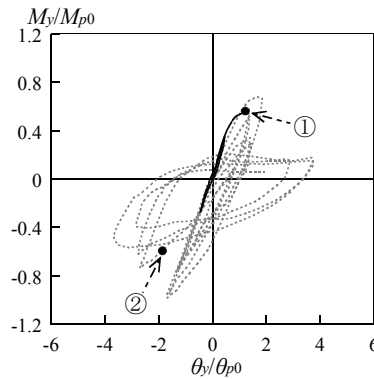


軸力履歴

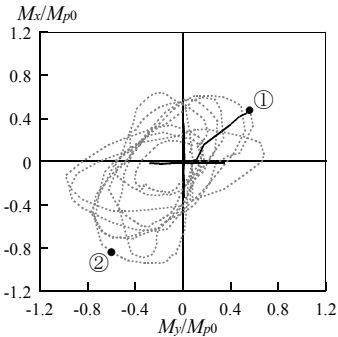
(11)VB00\_0.2±0.4\_33



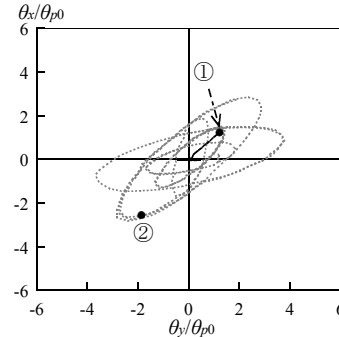
x 軸まわりの曲げモーメント-部材角関係



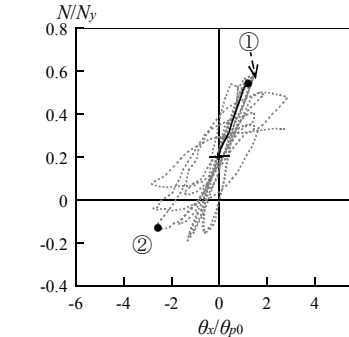
y 軸まわりの曲げモーメント-部材角関係



荷重オービット



変位オービット



軸力履歴

(12)VB45\_0.2±0.4\_33

図5.7 実験結果(続き)



#### ・履歴挙動の検討

各軸まわりでの履歴挙動については、例えば、規則的な平面載荷履歴で、平面載荷履歴の主軸方向を $0^\circ$ 、幅厚比を22.2、軸力変動幅を $\pm 0.2$ とした試験体(VB00\_0.2 $\pm$ 0.2\_22)では、大きな振幅での変位履歴を受けるx軸まわりの履歴曲線についてはこれまで一般的に実験が行われている $0^\circ$ 方向に繰り返し載荷を受ける場合と同様に紡錘形の履歴曲線となったが、振幅の小さなy軸まわりでは、図5.7(1)中※印で示したあたりのように、一部のサイクルで変形が大きくなると剛性が高くなるという、紡錘形とは異なる挙動が見られた。これは、第3章で考察したように、直交方向で大きく除荷したことにより、断面の一部が塑性域から弾性的に除荷することにより生じた現象であると考えられる。

また、規則的な平面載荷履歴で、主軸方向を $0^\circ$ 、幅厚比を22.2、軸力変動幅を $\pm 0.4$ とした試験体(VB00\_0.2 $\pm$ 0.4\_22)についてx軸まわりの履歴曲線を見ると、正側荷重領域の耐力は負側荷重領域より小さい。これは、正側荷重領域では、作用軸力が負側荷重領域より大きいため全塑性耐力が相対的に小さくなること、及び、圧縮軸力が大きい正側荷重領域では局部座屈発生により決まる最大耐力は小さく、局部座屈後の耐力劣化の度合いは大きくなるためと考えられる。

#### 5.5 まとめ

変動軸力下での角形鋼管柱の劣化域を含む3次元挙動を追跡するモデルを構築することを目的として、本章では、解析のキャリブレーションのため、転倒モーメントによる変動軸力を受ける多層骨組の下層部外柱を想定し、変動軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し載荷実験を行い、局部座屈発生に起因する劣化域を含む挙動に関するデータを得た。実験パラメータは、軸力変動幅、幅厚比、平面載荷履歴であり、軸力については初期軸力を降伏軸力比で0.2、軸力変動幅については降伏軸力比で $\pm 0.2$ 程度または $\pm 0.4$ 程度とし、幅厚比については22.2または33.3、平面載荷履歴については規則的またはランダムとした。また、実験に先立ち、軸力のパターンを水平2方向入力を受ける多質点せん断系の弾塑性応答解析結果に基づき設定した。本研究では、一定軸力下の柱に作用するせん断力と外柱に作用する軸力の変動パターンに線形関係が成り立つものとして、一定軸力下での柱のせん断力-変形関係と、軸力と変形の関係が対応するように軸力の変動パターンを設定した。

#### [参考文献]

- 5.1)山田 哲, 秋山 宏, 桑村 仁: 局部座屈を伴う箱形断面鋼柱部材の変動軸力下における終局挙動, 日本建築学会構造系論文報告集 第461号, pp.115-122, 1994.7
- 5.2)山崎真司, 見波 進: 変動軸力と繰返し水平力を受ける鋼柱の弾塑性挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集 第519号, 95-102, 1995.5
- 5.3)陳 以一, 大井謙一, 高梨晃一: 3方向変動荷重を受ける箱形断面鋼柱の弾塑性挙動,

日本建築学会構造系論文報告集 第 447 号, pp.139-148, 1993.5

5.4)和田 章, 広瀬景一: 2 方向地震動を受ける無限均等ラーメン構造の弾塑性応答性状,  
日本建築学会構造系論文報告集 第 399 号, pp.37-47, 1989.5

5.5)山田 哲, 石田孝徳, 島田侑子: 一定軸力下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の  
繰り返し载荷実験, 日本建築学会構造系論文集 第 683 号, pp.203-212, 2013.1

軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰り返し劣化挙動

## 第6章

## 変動軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の解析

## 6.1 はじめに

変動軸力下で水平2方向外力を受ける部材の挙動を追跡する解析モデルの一つとして、塑性化領域を複数の弾塑性軸バネに置き換えたMS(Multi Spring)モデル<sup>6.1)</sup>がある。これまでに、鉄筋コンクリートの部材を対象とした研究ではあるが、3軸変動荷重を受ける柱についてMSモデルを用いて解析を行い、実験結果との比較からMSモデルが変動軸力と水平2方向外力を受ける場合の履歴挙動を追跡できることが示されている<sup>6.2)</sup>。一方、第4章では、MSモデルの要素バネに、第2章で構築した1軸曲げの条件における局部座屈を伴う角形鋼管柱の劣化挙動に関するモデルに基づき構築した履歴モデルを適用し、一定軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の挙動を劣化域に至るまで追跡できることを示した。しかし、このモデルにより変動軸力下における局部座屈発生以降の劣化域を含む挙動を解析する場合、局部座屈発生により決まる最大耐力及び劣化挙動を表す要素バネの履歴モデルは降伏軸力比により変化するため、一定軸力の条件のように履歴モデルを一義的に規定できないことから、要素バネの履歴モデルを変動軸力の条件に対応できるように修正する必要がある。

本章では、変動軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の劣化域を含む挙動の解析に対応できるようにするため、第4章で構築した一定軸力の条件における要素バネの履歴モデルを修正する。また、第5章で行った、転倒モーメントによる変動軸力を受ける多層骨組の下層部外柱を想定した、変動軸力と水平2方向の繰り返し外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し载荷実験結果と、修正した履歴モデルを適用したMSモデルによる解析結果を比較し、変動軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の劣化域を含む挙動を追跡できるか検証する。

## 6.2 履歴モデルの概要

変動軸力と水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の解析では、第4章のMSモデル(図6.1)を用いる。MSモデルの要素バネの履歴モデルは、局部座屈発生で決まる最大耐力に至るまでは、圧縮側、引張側ともに、図6.2(1)に示すように、一方向荷重下の荷重-変形関係に対応する骨格曲線、バウシンガー部、弾性除荷部から構成する。また、最大耐力以降については、図6.2(2)に示すように、圧縮側については、拡張骨格曲線に対応する耐力劣化部、耐力上昇部、除荷部から構成し、引張側については、最大耐力以前の履歴モデルと同様のモデルとして、骨格曲線、耐力上昇部、除荷部から構成する。なお、変動軸力下の挙動を対象に解析を行う場合、第4章で構築した要素バネの履歴モデルを規定するパラメータの一つである降伏軸力比が時々刻々と変化することから、一定軸力の条件で設定した履歴モデルは直接適用できない。そこで本研究では、要素バネの履歴モデルを変動軸力の条件に適用するため、以下の修正を施した。

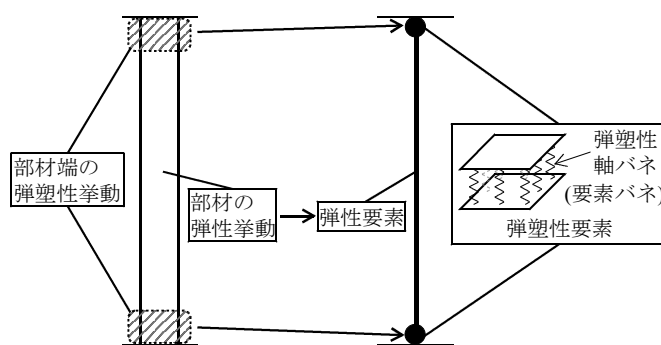
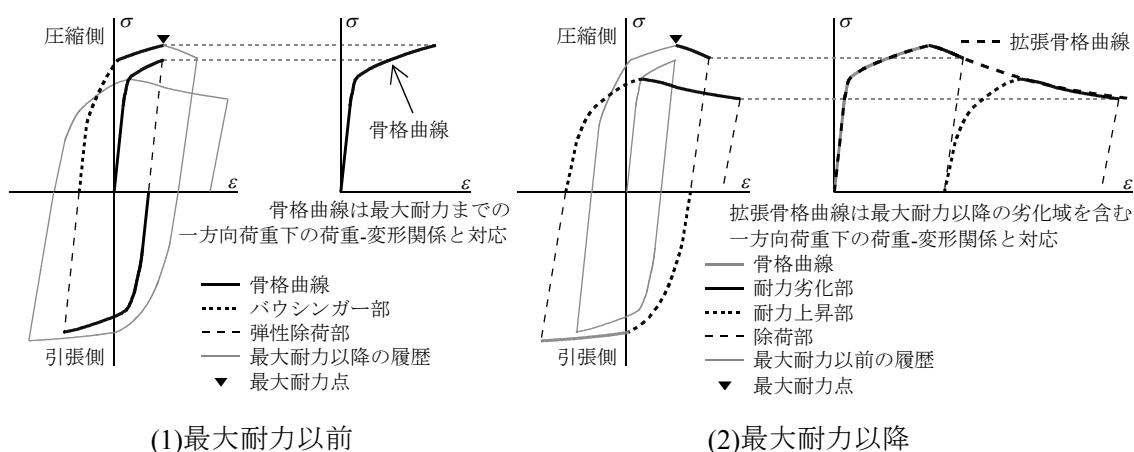


図6.1 MSモデル



(1)最大耐力以前

(2)最大耐力以降

図6.2 履歴曲線の分解と骨格曲線・拡張骨格曲線

### 6.3 骨格曲線・拡張骨格曲線の設定

圧縮側の要素バネの最大耐力以前の骨格曲線については、第4章と同様に、冷間ロール成形角形鋼管の短柱圧縮試験<sup>6.3)</sup>からモデル化した応力度-ひずみ度関係を用い、引張側の骨格曲線については、これを材料の体積一定の仮定の下で引張側に変換したものをを用いる。

局部座屈発生により決まる圧縮側の最大耐力点及び最大耐力以降の拡張骨格曲線は、降伏軸力比により変化する。ここで文献 6.4)において、変動軸力下で一方向荷重を受ける箱形断面鋼部材の局部座屈発生に起因する劣化域を含む荷重-変形関係は、降伏軸力比をパラメーターとした一定軸力下で一方向荷重を受ける場合の荷重-変形関係の解析結果から、軸力履歴における対応点を結ぶことにより予測できることが示されている。本研究では、この予測方法を参考に、図 6.3 に示すように、変動軸力下での要素バネの履歴は、経験した拡張骨格曲線での累積ひずみに応じて、各ステップでの降伏軸力比に対応する一定軸力下の拡張骨格曲線上を移動するものとして、拡張骨格曲線においてひずみが進展する場合の履歴挙動を以下のようにモデル化する。

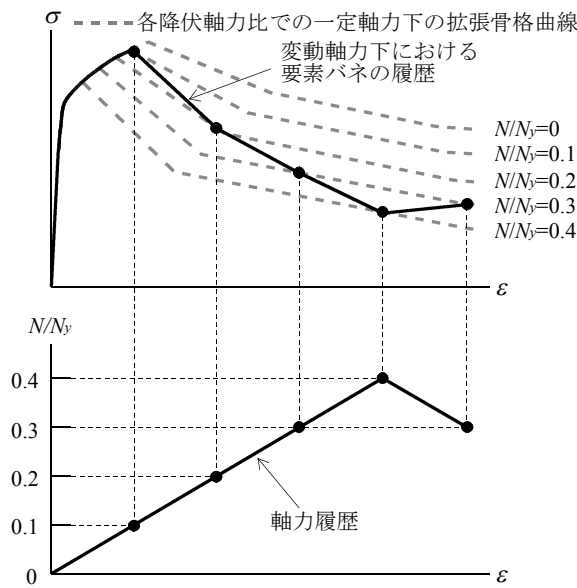


図6.3 変動軸力下における拡張骨格曲線の概念

まず図 6.4(1)に示すように、 $i$  ステップにおいて拡張骨格曲線上の A 点にある場合を考える。ここで  $i$  ステップでの瞬間剛性  $E_i$  が与えられており、 $i$  ステップから  $i+1$  ステップまでの微小なひずみ増分  $\Delta\epsilon_i$  に対する剛性変化を無視すると、応力は  $i$  ステップでの瞬間剛性  $E_i$  に応じて変化し、 $i+1$  ステップでは B 点に移動する。軸力変動が無く剛性変化も小さければ誤差はあまり生じないが、この過程で軸力が変動すると、B 点は  $i+1$  ステップでの軸力に応じた拡張骨格曲線上からずれることになる。軸力変動によるずれについては、次ステップの計算に用いる  $i+1$  ステップでの瞬間剛性  $E_{i+1}$  の設定において修正を加える。

$i+1$  ステップの瞬間剛性  $E_{i+1}$  については、図 6.4(2)に示すように、 $i+1$  ステップでの降伏

軸力比に応じた一定軸力下での拡張骨格曲線上において、拡張骨格曲線の累積ひずみが B 点( $i+1$  ステップ)から  $i$  ステップでのひずみ増分  $\Delta\varepsilon_i$  だけ進展した点を B' 点として、B 点から B' 点を指向する剛性をとるものとする。このようにして、1 ステップごとに軸力変動による影響の誤差を修正していく。また、増分を十分小さくすることで、誤差が大きくなるようにしないようにする。

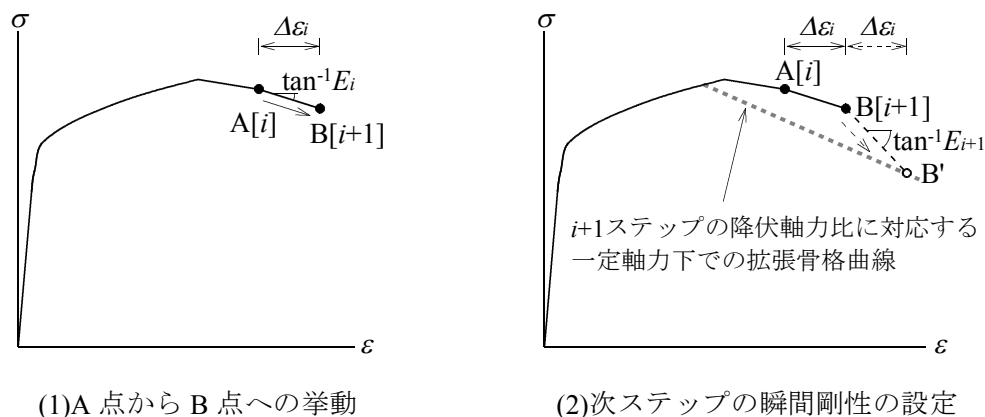


図6.4 拡張骨格曲線においてひずみが進展する場合の挙動

## 6.4 繰り返しに対する履歴モデル

### 6.4.1 最大耐力以前の履歴モデル

最大耐力以前のバウシंगाー部については、秋山・高橋によるバイリニア型のモデル<sup>6.5)</sup>を用いるが、このモデルは一定軸力下の挙動に関するものであり、バウシंगाー部の2次剛性は経験した骨格曲線での累積塑性変形量と降伏軸力比の関数で与えられる。ここで、曲げ圧縮を受ける冷間ロール成形角形鋼管の局部座屈発生により決まる最大耐力までの骨格曲線における変形は比較的小さく、バウシंगाー部の塑性変形量はそれほど大きくならないため、軸力の違いによるバウシंगाー部の形状の違いもそれほど大きくはならない(付録2)。本研究では、バイリニア型のモデルの2次剛性を規定する降伏軸力比として、略算的に、変動軸力下での軸力の平均値と言える初期軸力に対応する降伏軸力比を用いる。

### 6.4.2 最大耐力以降の履歴モデル

#### ・耐力上昇部

最大耐力以降の耐力上昇部については、第4章の一定軸力下の挙動に関するバイリニア型のモデルを採用する。本研究では、バイリニア型モデルの2次剛性を規定するパラメーターのうち、降伏軸力比の影響を受ける①「耐力上昇部の塑性ひずみ量」及び②「拡張骨格曲線への復帰点」を以下のように設定する。

## ①耐力上昇部の塑性ひずみ量

耐力上昇部の塑性ひずみ量は、経験した最大耐力以前の骨格曲線及び最大耐力以降の劣化域での累積塑性ひずみ量と降伏軸力比の関数で与えられる。なお、軸力変動に伴う耐力上昇部での塑性ひずみ量の変化が履歴挙動全体に及ぼす影響は、誤差分が拡張骨格曲線において吸収されることもあり、あまり大きくない<sup>付録2)</sup>。そこで、耐力上昇部の塑性ひずみ量を規定する降伏軸力比として、最大耐力以前のバウシンガー部と同様に、初期軸力に対応する降伏軸力比を用いる。

## ②拡張骨格曲線への復帰点

一定軸力下での圧縮側の拡張骨格曲線への復帰点は、一定軸力に応じた降伏軸力比での拡張骨格曲線上において、それまでに経験した拡張骨格曲線における累積塑性ひずみ量から耐力上昇部の塑性ひずみ量分移動した点となる。一方、変動軸力下では、拡張骨格曲線への復帰点に至るときの降伏軸力比は未知であることから、第4章の一定軸力の条件におけるモデルを直接用いることはできない。ここで、転倒モーメントにより外柱に作用する変動軸力が層せん断力に比例すると仮定すれば、前サイクルの拡張骨格曲線からの除荷開始点における降伏軸力比と拡張骨格曲線への復帰点に到達するときの降伏軸力比はそれほど大きく変化しないと考えられることから、拡張骨格曲線への復帰点における降伏軸力比として、前サイクルの拡張骨格曲線からの除荷開始点での降伏軸力比を仮定する。変動軸力下での拡張骨格曲線への復帰点は、仮定した降伏軸力比に対応した一定軸力下での拡張骨格曲線上において、経験した拡張骨格曲線での累積塑性ひずみ量から耐力上昇部の塑性ひずみ量分移動した点とする。ここで、仮定した降伏軸力比に基づき設定した拡張骨格曲線への復帰点に達したときの実際の降伏軸力比と仮定した降伏軸力比の誤差に伴う拡張骨格曲線上のずれについては、6.3節で述べた拡張骨格曲線においてひずみが進展する場合と同様に、拡張骨格曲線への復帰点に至った次のステップの瞬間剛性の設定において修正する。

## ・除荷部

最大耐力以降の除荷部については、第4章の一定軸力下の挙動に関する除荷剛性のモデルを援用する。劣化域における除荷剛性は、経験した最大耐力以前の骨格曲線及び最大耐力以降の劣化域での累積ひずみ量と、降伏ひずみ度、幅厚比、降伏軸力比から算定される基準化等価幅厚比の関数で与えられる。なお、軸力変動に伴う除荷剛性の低下の割合の変化が履歴挙動全体に及ぼす影響はそれほど大きくないことから<sup>付録2)</sup>、除荷剛性のモデルを規定するパラメーターに含まれる降伏軸力比についても、初期軸力に対応する降伏軸力比を用いる。



・履歴モデルの概要

上述の修正を加えた繰り返しに対する劣化域における履歴モデルの概要を図 6.5 に示す。ここでは、劣化域において拡張骨格曲線上の A 点で荷重方向が反転し、その後、引張側にひずみが進展し、骨格曲線上の B 点において再び荷重方向が反転した場合の挙動を例に説明する。B 点と耐力上昇部の剛性変化点 C の間は線形に挙動し、区間 B-C で圧縮側にひずみが進展し C 点に達すると、拡張骨格曲線への復帰点 D を指向する。一方、区間 B-C で引張側にひずみが進展し再び B 点に達すると、骨格曲線に復帰する。ここで、拡張骨格曲線への復帰点は、A 点と同じ応力の、前サイクルの拡張骨格曲線からの除荷開始点における降伏軸力比に応じた一定軸力下の拡張骨格曲線上の点を A' 点とすると、A' 点から耐力上昇部の塑性ひずみ量  $\epsilon_1$  分移動した D 点となる。また、 $\epsilon_1$  は初期軸力に応じた降伏軸力比とそれまでに経験した最大耐力に至るまでの骨格曲線及び劣化域での累積塑性ひずみ量により与えられる。

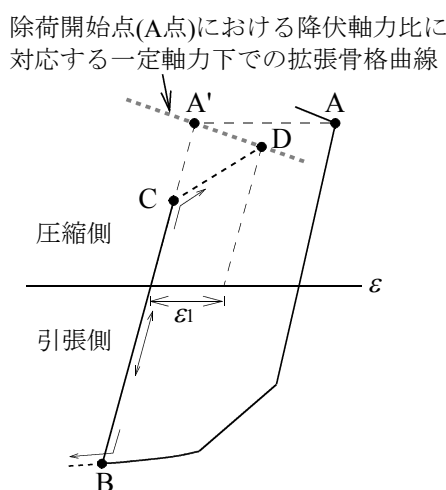


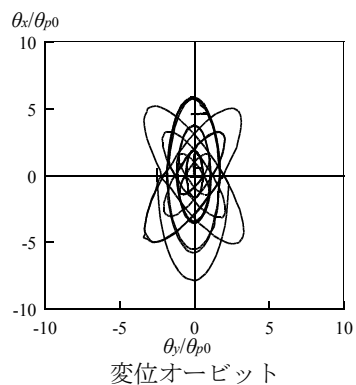
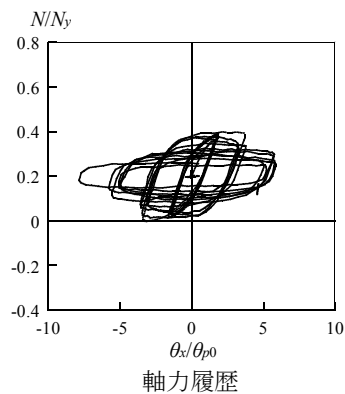
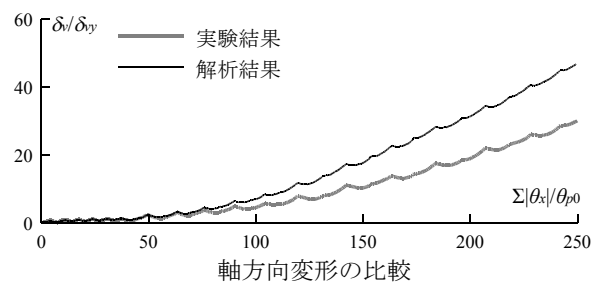
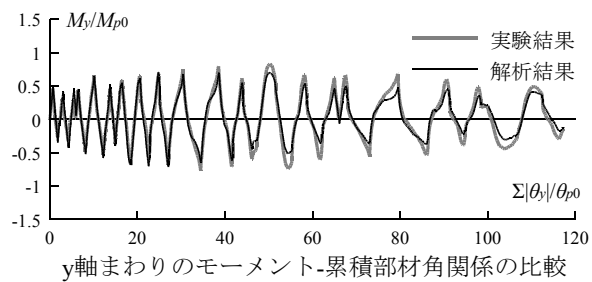
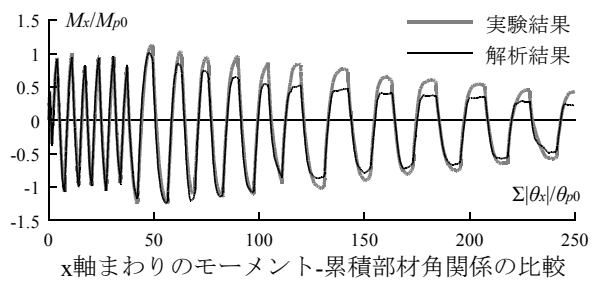
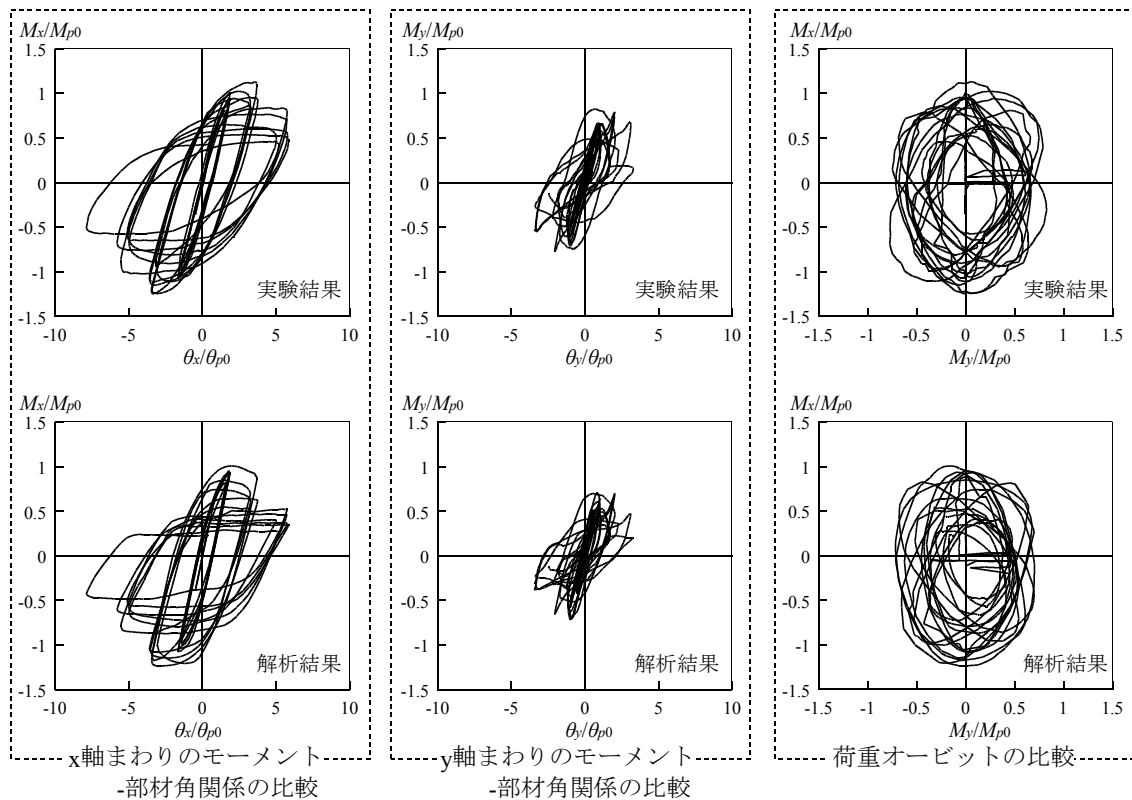
図6.5 繰り返しに対する劣化域における履歴モデルの概要

6.5 実験結果との比較による解析結果の検討

6.5 節では、第 5 章で行った変動軸力下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し荷重実験結果と、修正した履歴モデルを適用した MS モデルによる解析結果を比較し、履歴モデルの妥当性を検証する。実験結果と同じ変位履歴及び軸力履歴を入力した MS モデルによる解析結果と実験結果との比較を、曲げモーメントと部材角関係については、 $0^\circ$  方向に荷重した場合の軸力が作用しない条件での全塑性モーメント  $M_{p0}$  と、 $M_{p0}$  に対応する弾性部材角の計算値  $\theta_{p0}$  で、軸方向変形  $\delta_y$  については降伏軸変形の計算値  $\delta_{yV}$  でそれぞれ除した上で図 6.6(1)~(12)に示す。ここで、所定の平面荷重履歴終了後の一方向荷重の過程で延性的に破断した試験体(VB\_SD\_0.2±0.4\_22,VB\_SD\_0.2±0.4\_22)については、一方向

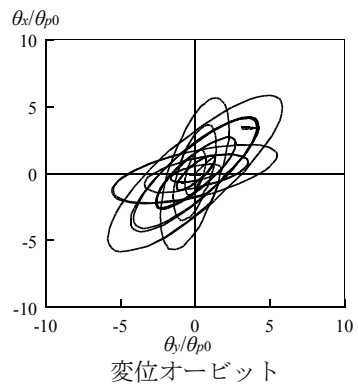
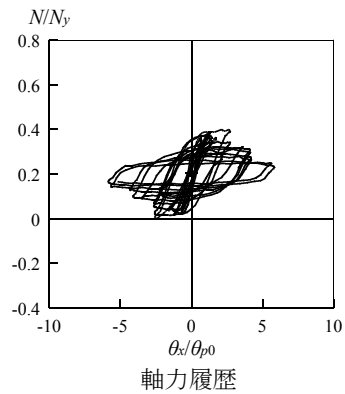
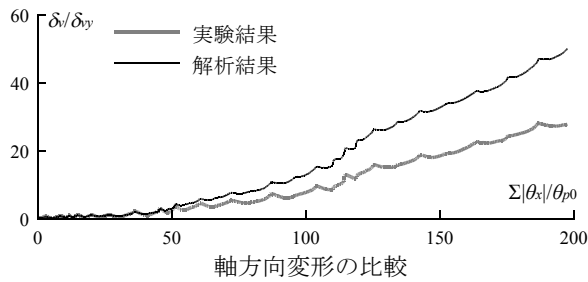
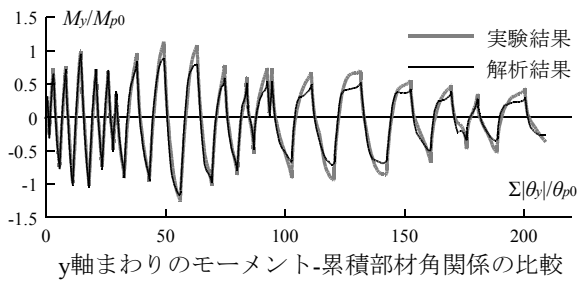
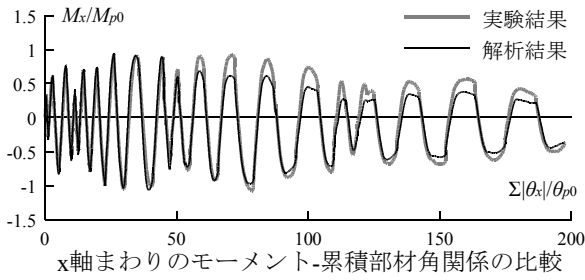
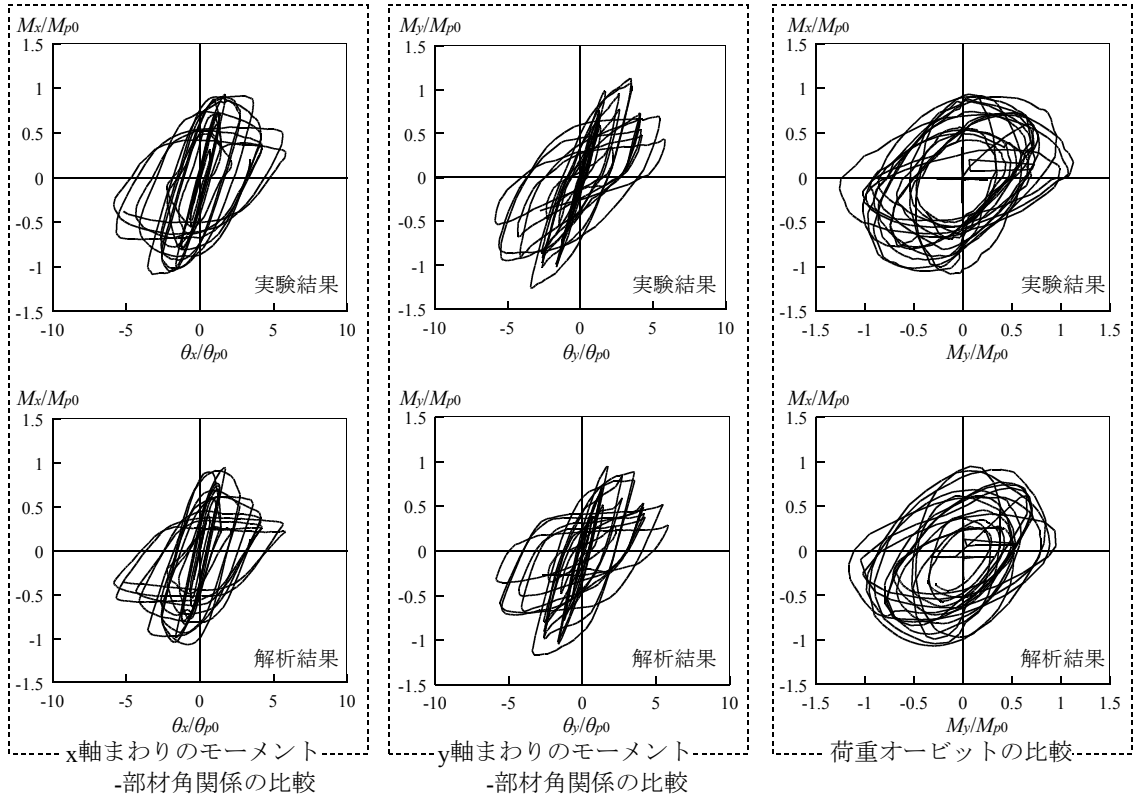
載荷の過程において亀裂の進展による断面欠損の影響を受けていると考えられることから、所定の平面載荷履歴を終了するまでの挙動を比較する。また、各試験体において、実験結果の弾性剛性(実験結果の弾性剛性は、所定の平面載荷履歴による載荷を行う前に実施した振幅を  $0.5\theta_{p0}$  程度とした予備載荷時の除荷剛性から求めた)は計算値の 8 割程度であった。これは、試験体両端に溶接されたエンドプレート等の変形の影響によるものと考えられる。そこで、解析の弾性剛性が実験結果と対応するように、MS モデルの弾性要素の曲げ剛性及びせん断剛性に係数を掛けた上で解析を行った。

全体的に見ると、いずれの軸力の変動幅、幅厚比、平面載荷履歴においても、実験結果と解析結果の各軸まわりの曲げモーメント-部材角関係、荷重オービット及び軸方向変形は最大耐力以降の劣化域に至るまで追跡できていることがわかる。ここで、6.4 節でモデル化した変動軸力下での履歴モデルについて検討する。局部座屈が発生するまでに複数回の繰り返し荷重を受けた幅厚比を 22.2 とし、規則的な平面載荷履歴により載荷した試験体(VB00\_0.2±0.2\_22,VB45\_0.2±0.2\_22,VB00\_0.2±0.4\_22,VB45\_0.2±0.4\_22)の履歴曲線について比較すると、実験結果と解析結果は対応している。また、局部座屈発生以降の劣化域における挙動についても、除荷を開始したときから剛性が負となる領域に達するまでの履歴曲線はいずれの試験体においても対応していることから、変動軸力下での繰り返しに対する履歴モデルは妥当であると言える。第 4 章の一定軸力の条件における MS モデルの要素バネの履歴モデルを、変動軸力の条件に適用できるように修正することで、変動軸力下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の局部座屈発生に起因する劣化域を含む挙動を追跡できることがわかった。



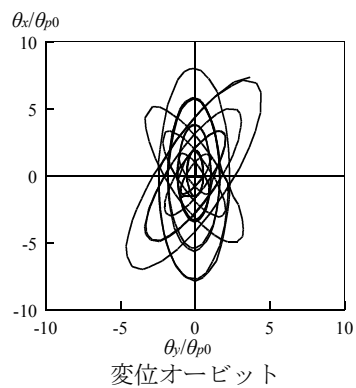
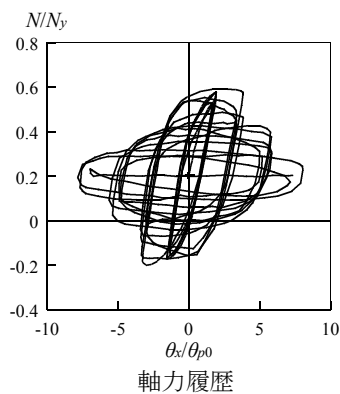
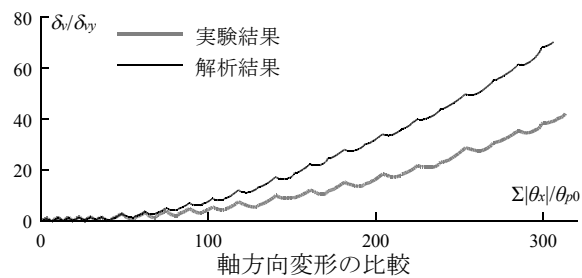
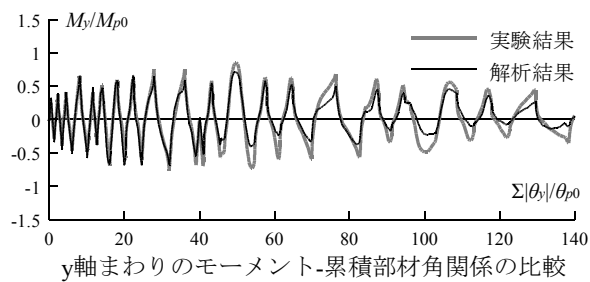
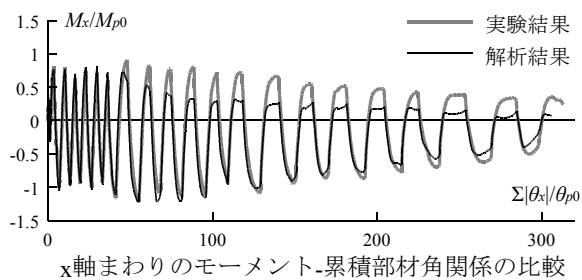
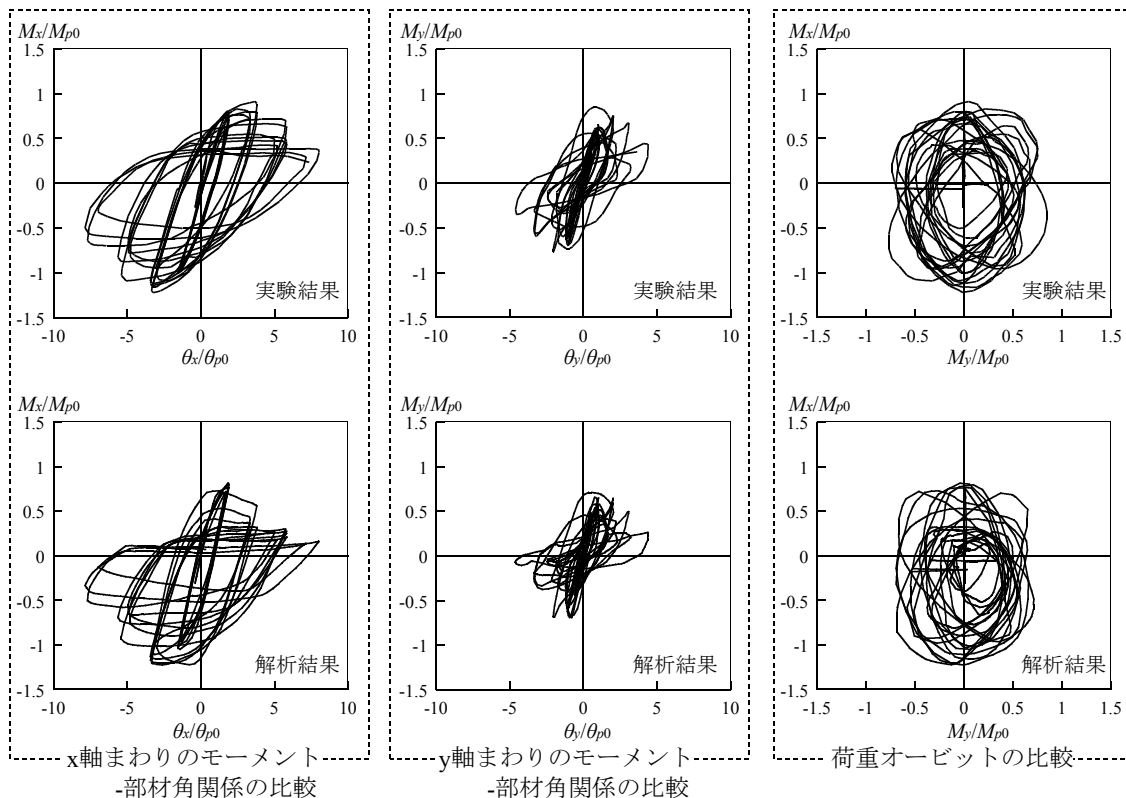
(1)VB00\_0.2±0.2\_22

図6.6 実験結果と解析結果の比較



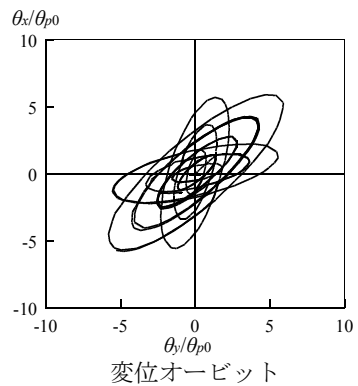
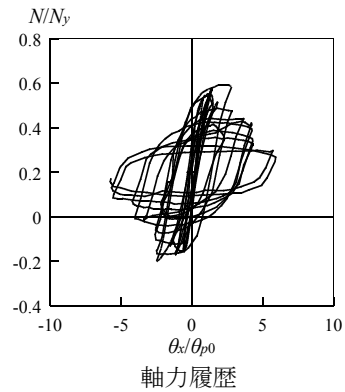
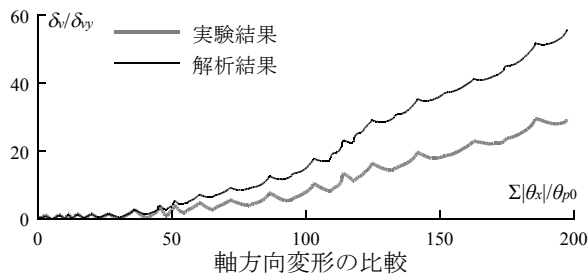
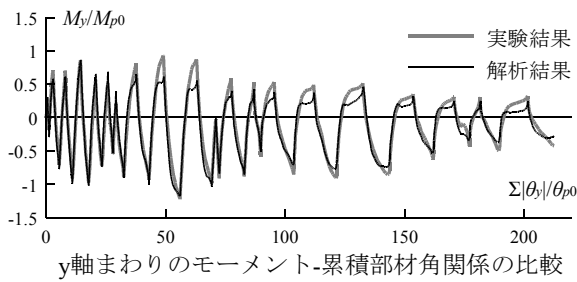
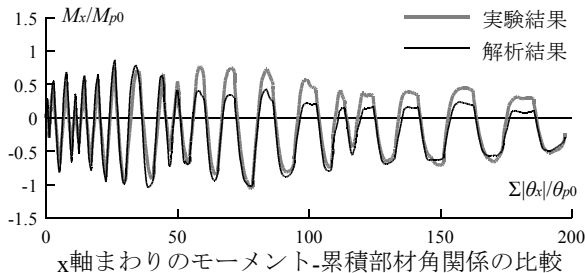
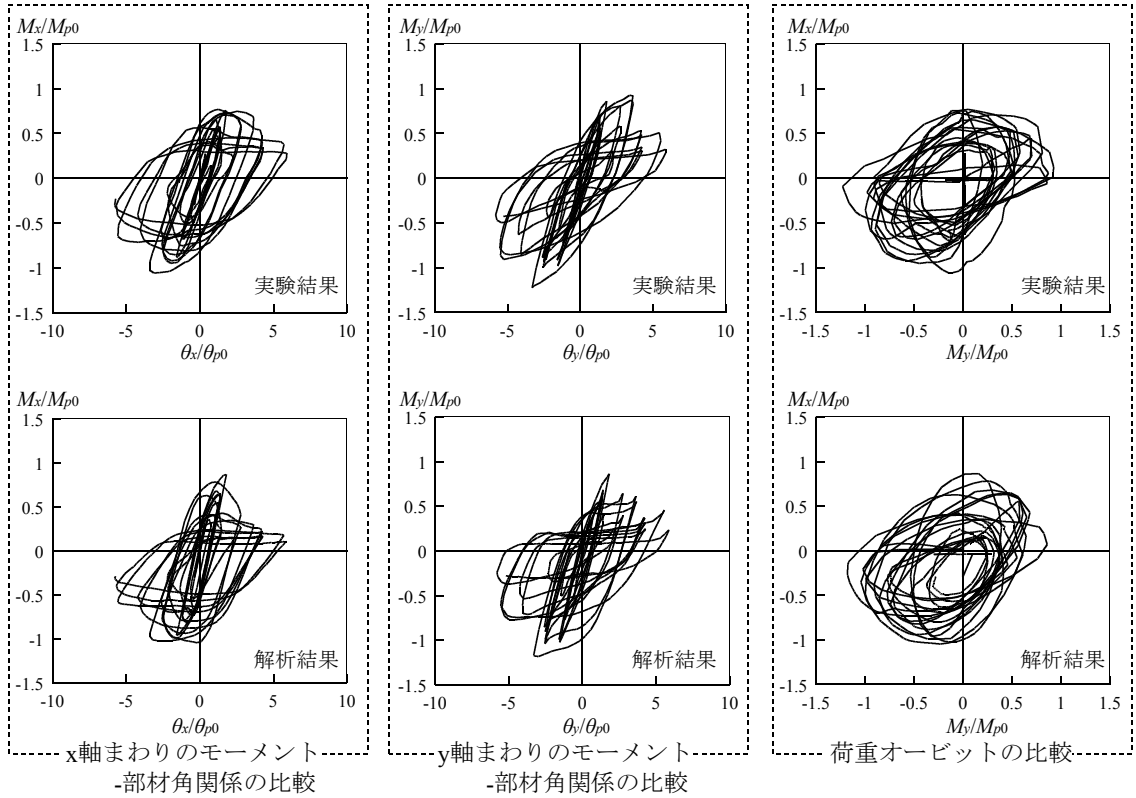
(2)VB45\_0.2±0.2\_22

図6.6 実験結果と解析結果の比較(続き)



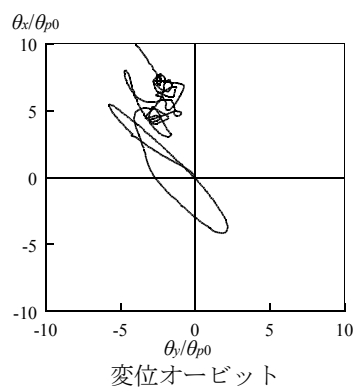
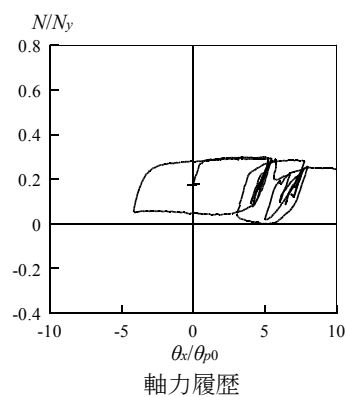
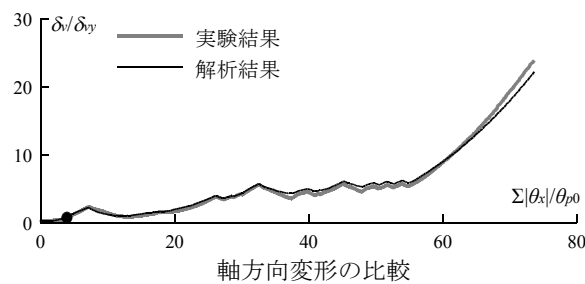
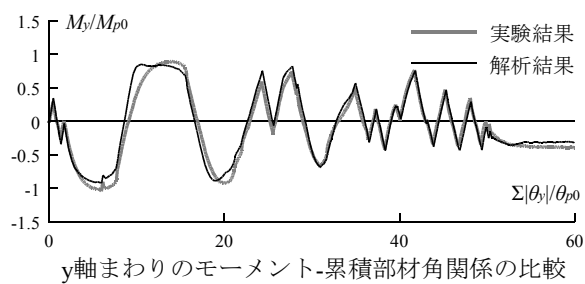
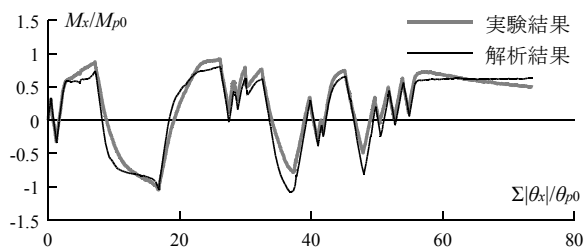
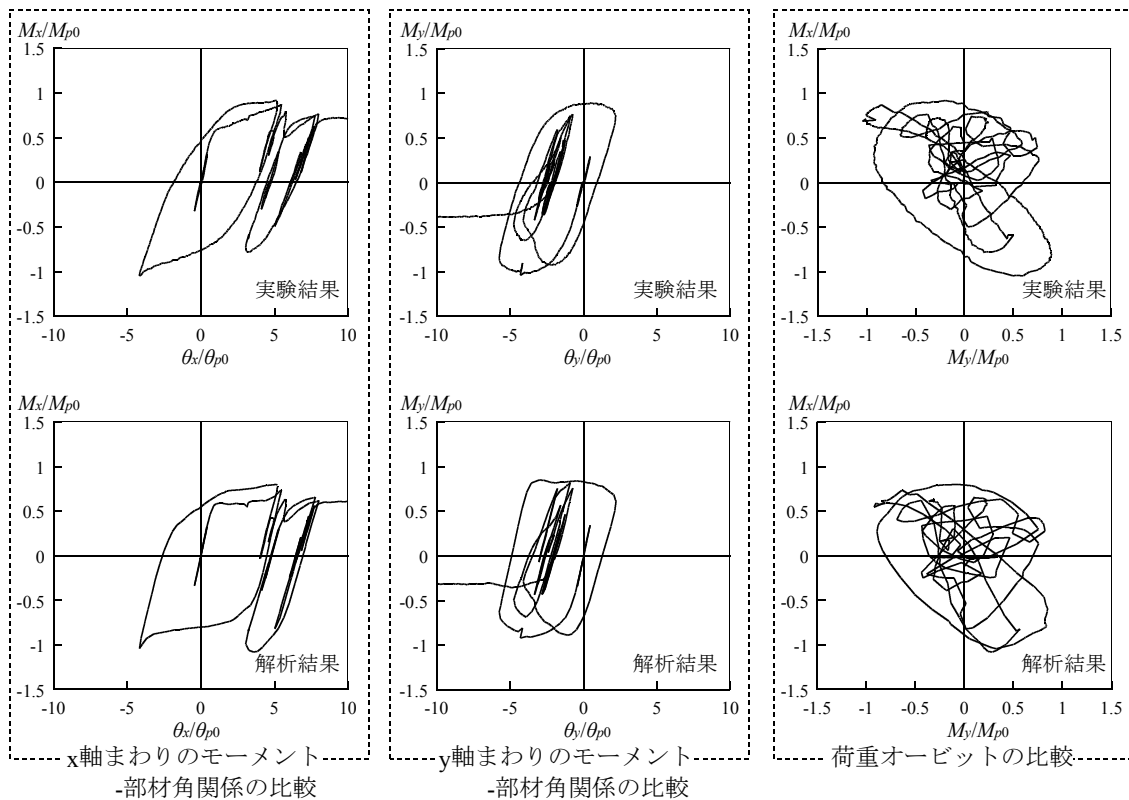
(3)VB00\_0.2±0.4\_22

図6.6 実験結果と解析結果の比較(続き)



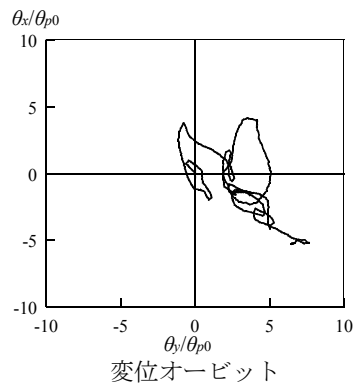
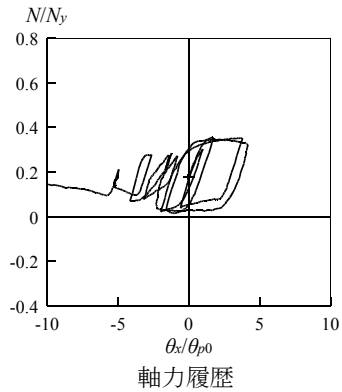
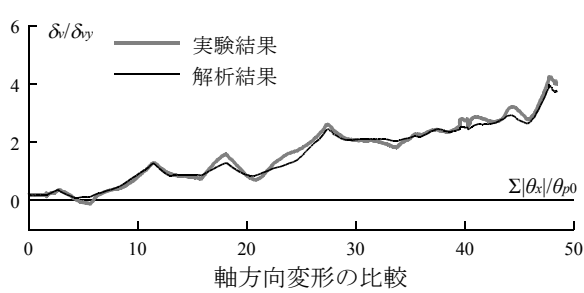
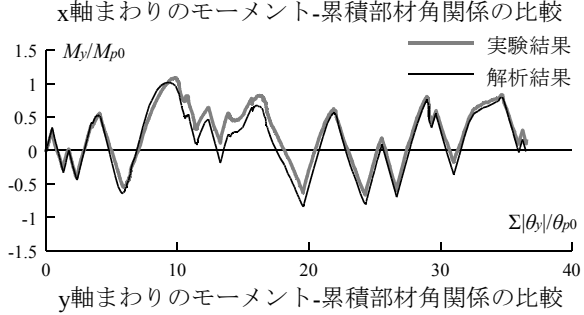
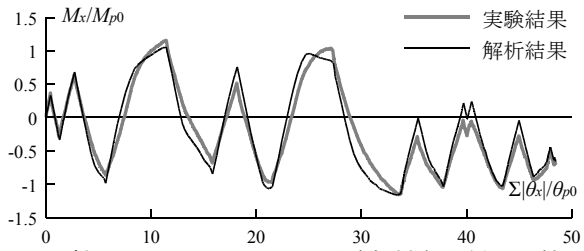
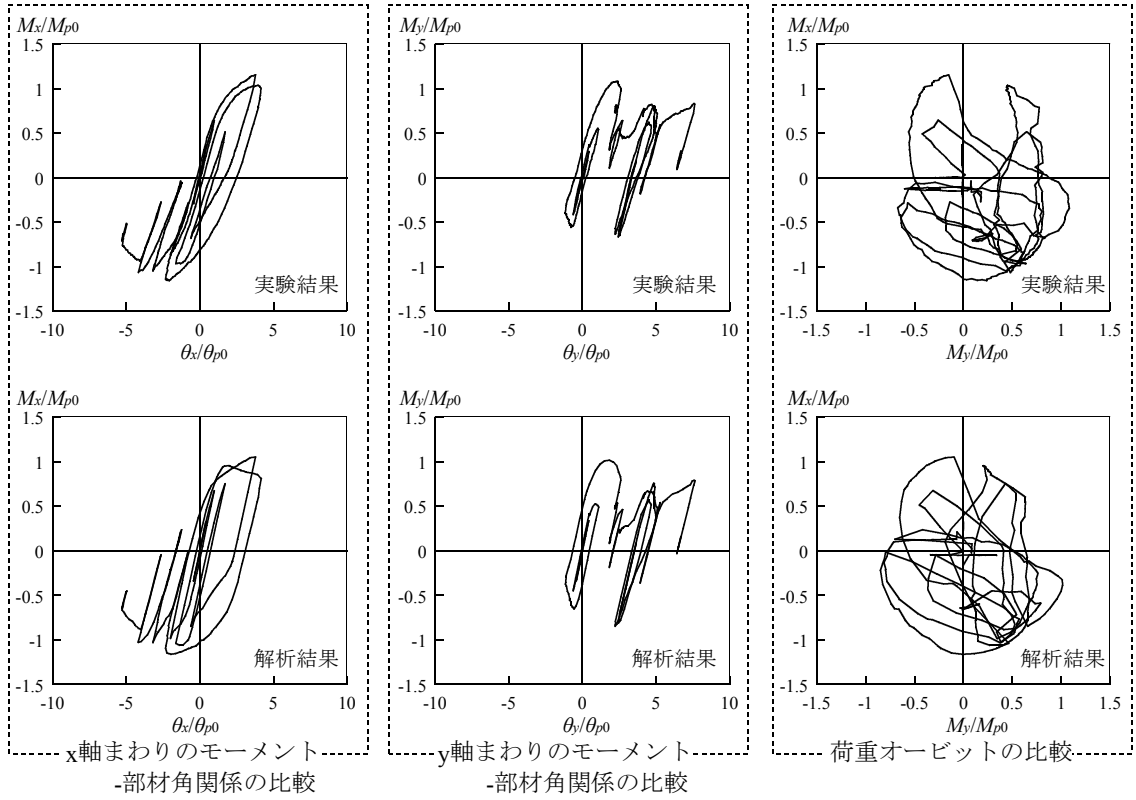
(4)VB45\_0.2±0.4\_22

図6.6 実験結果と解析結果の比較(続き)



(5)VB\_KB\_0.2±0.2\_22

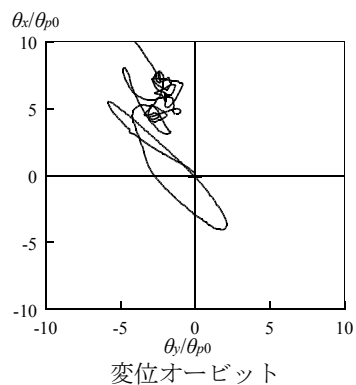
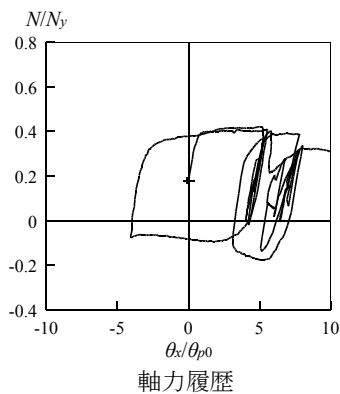
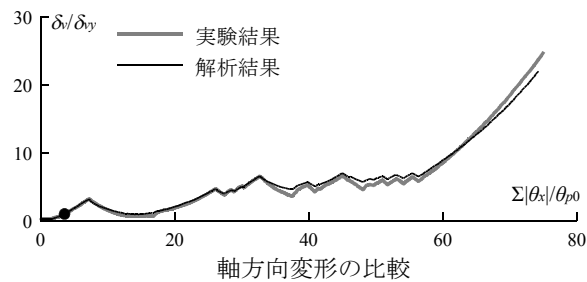
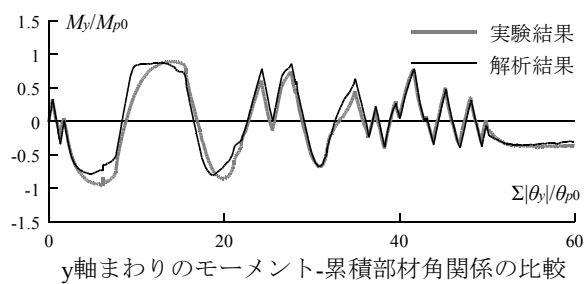
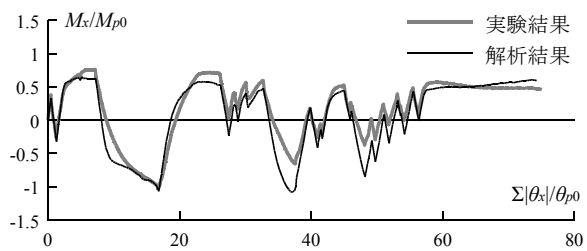
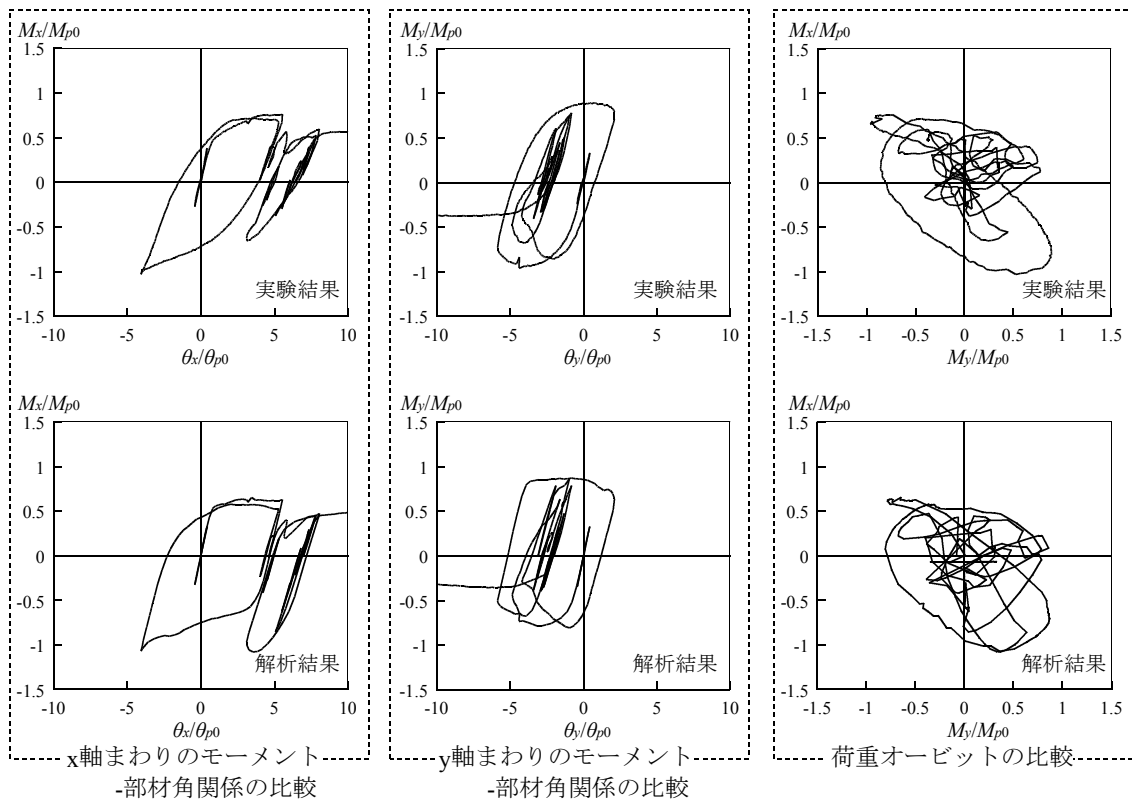
図6.6 実験結果と解析結果の比較(続き)



(6)VB\_SD\_0.2±0.2\_22

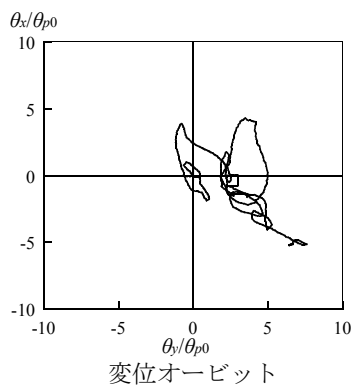
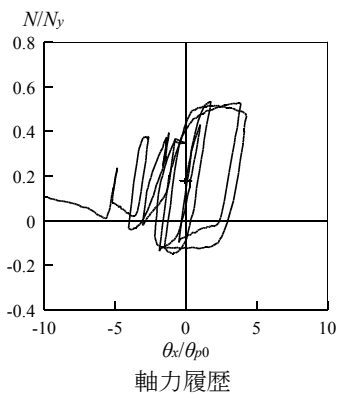
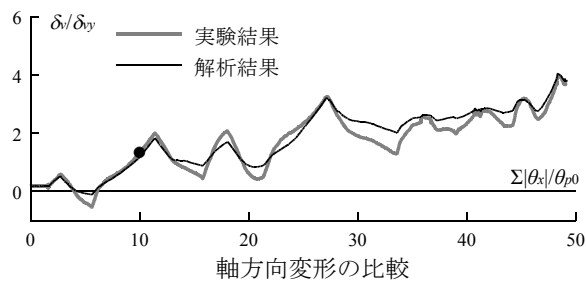
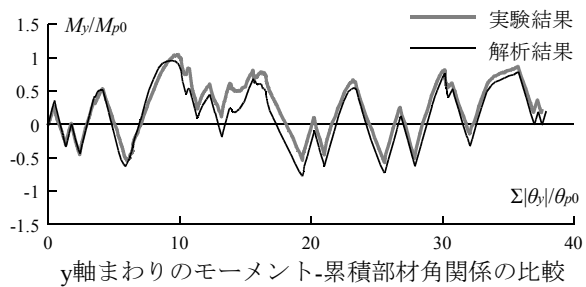
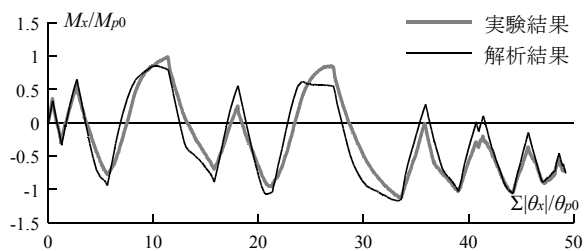
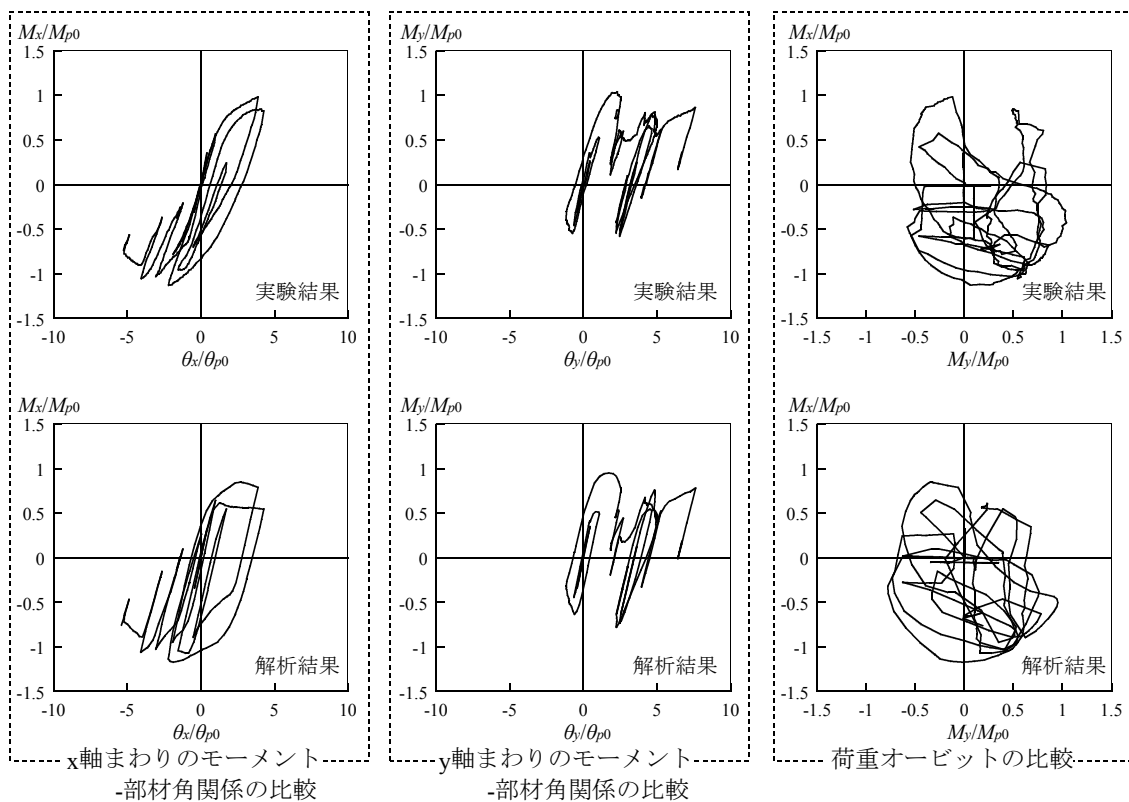
図6.6 実験結果と解析結果の比較(続き)





(7)VB\_KB\_0.2±0.4\_22

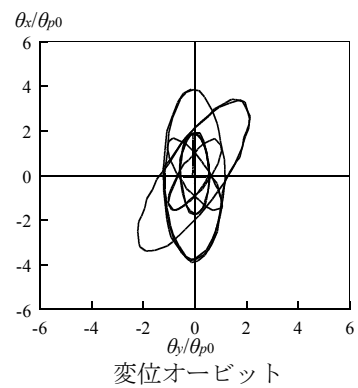
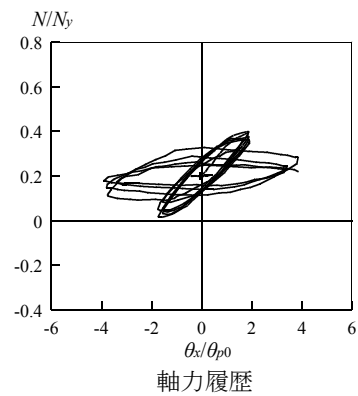
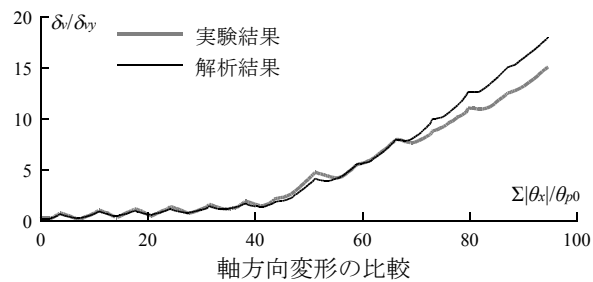
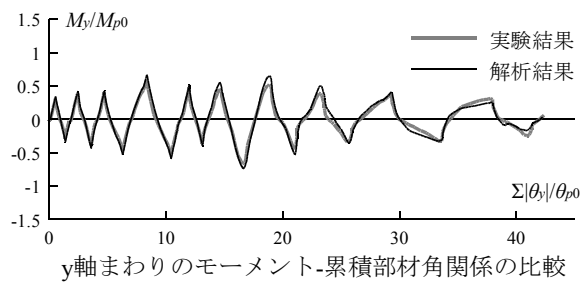
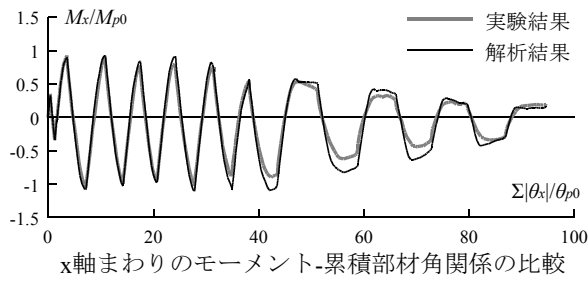
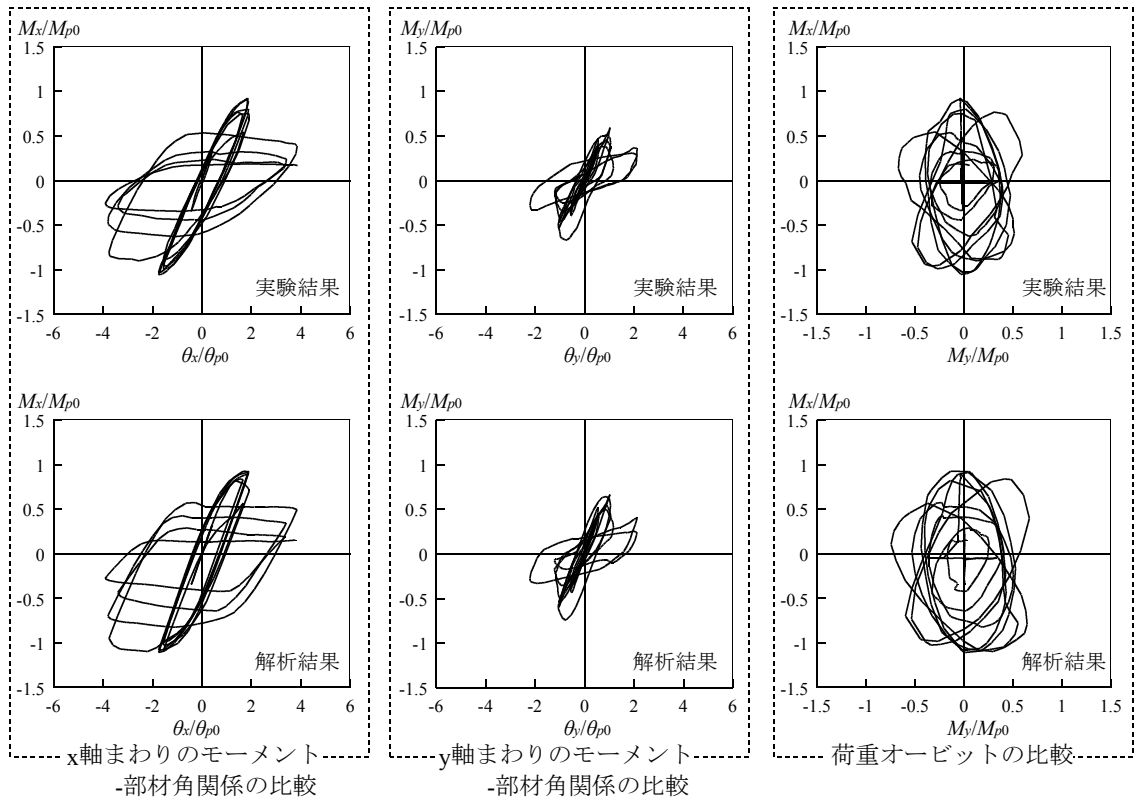
図6.6 実験結果と解析結果の比較(続き)



(8)VB\_SD\_0.2±0.4\_22

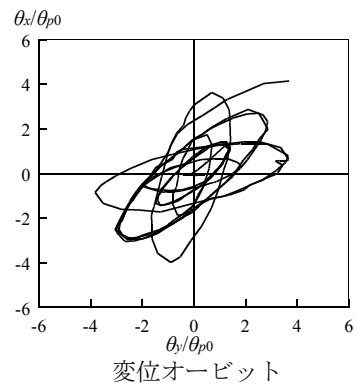
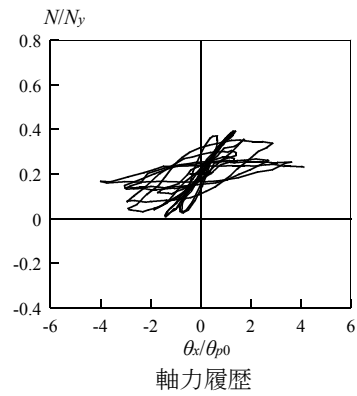
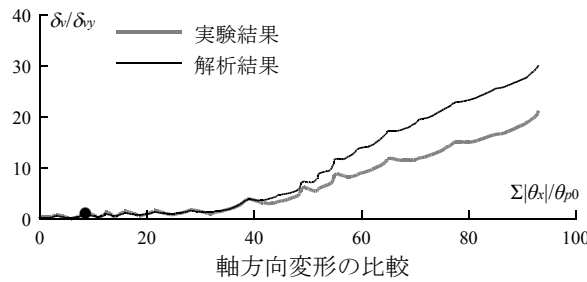
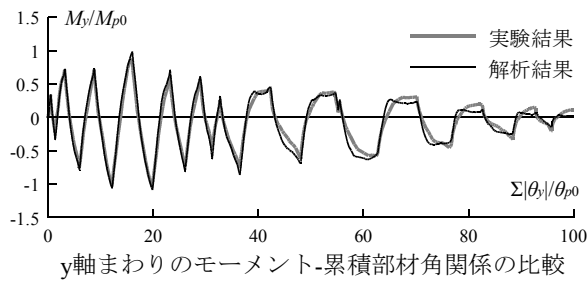
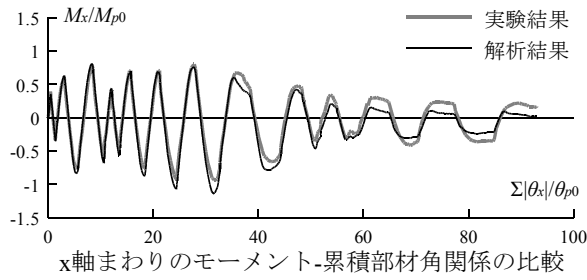
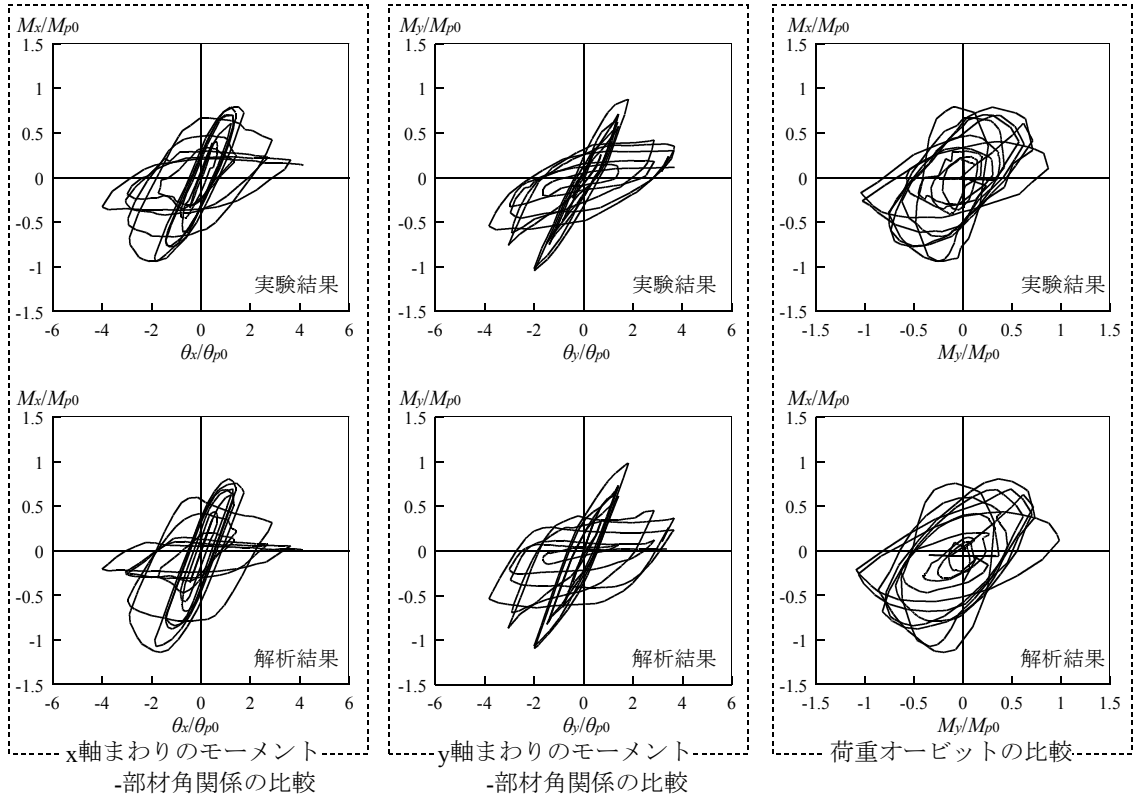
図6.6 実験結果と解析結果の比較(続き)

軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰り返し劣化挙動



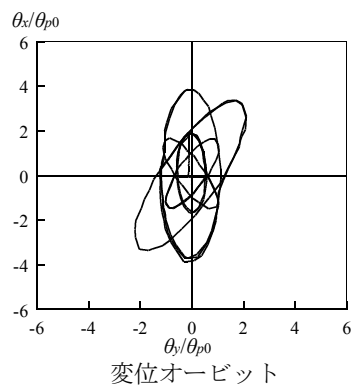
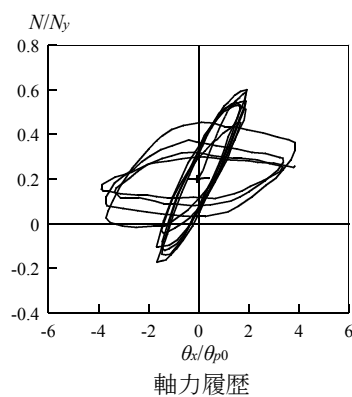
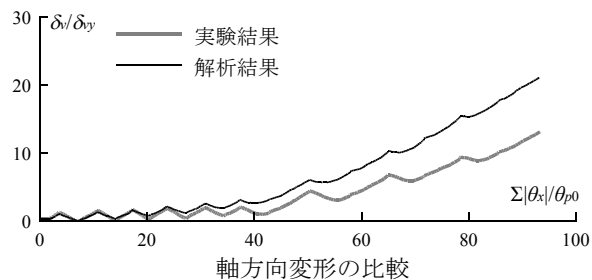
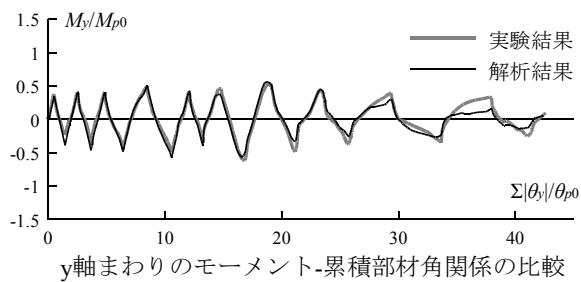
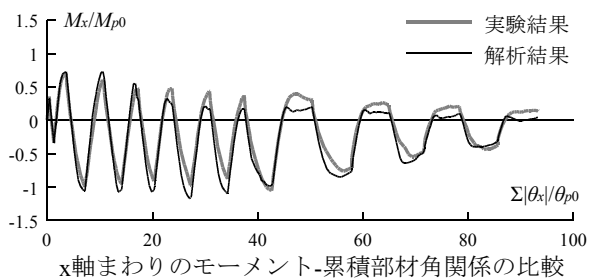
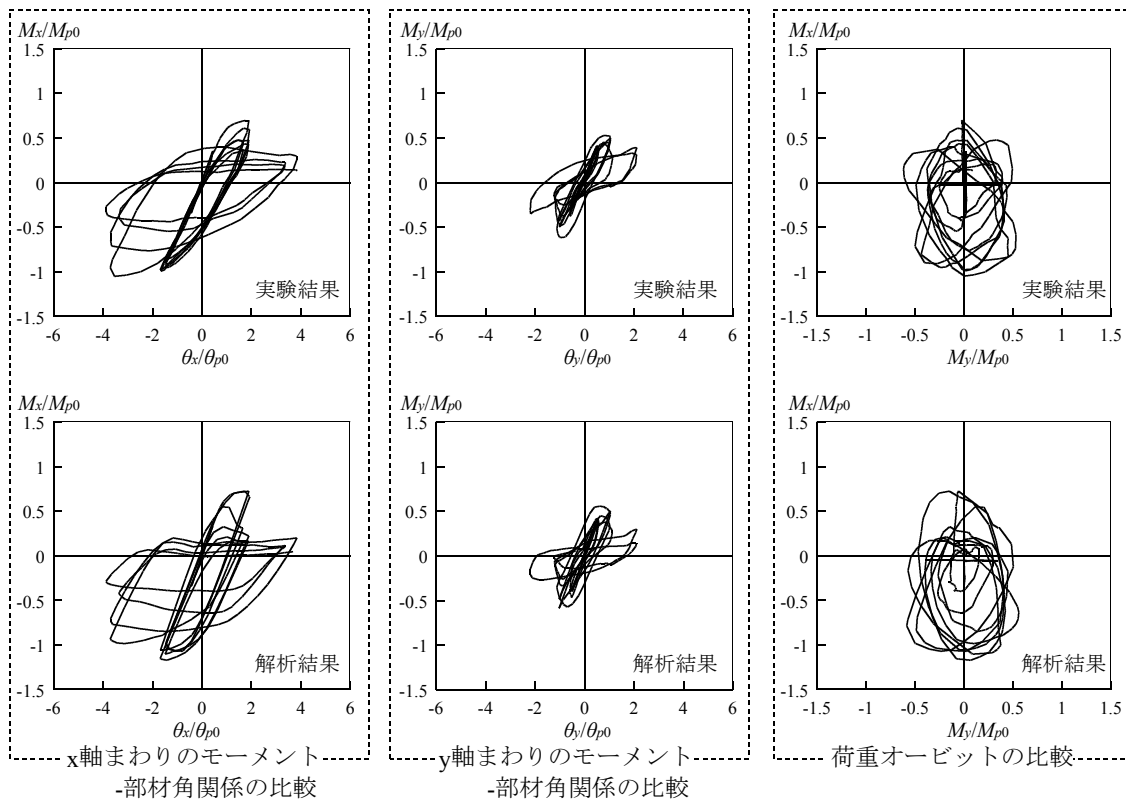
(9)VB00\_0.2±0.2\_33

図6.6 実験結果と解析結果の比較(続き)



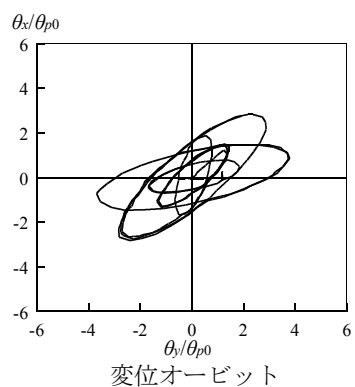
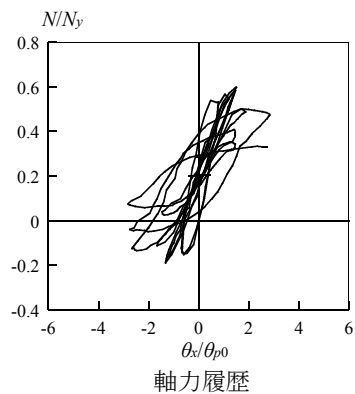
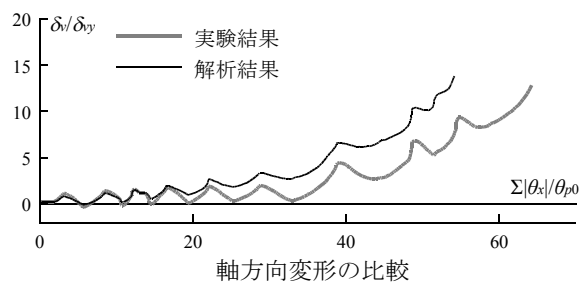
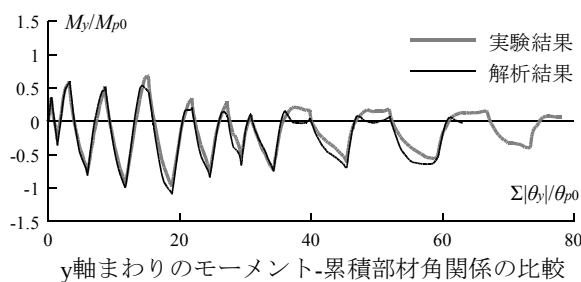
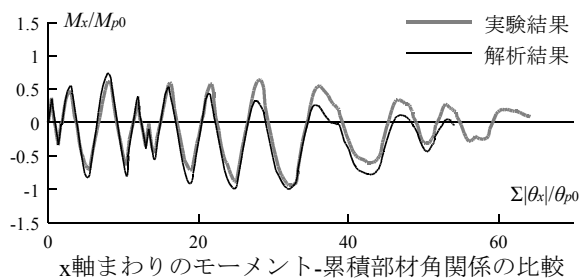
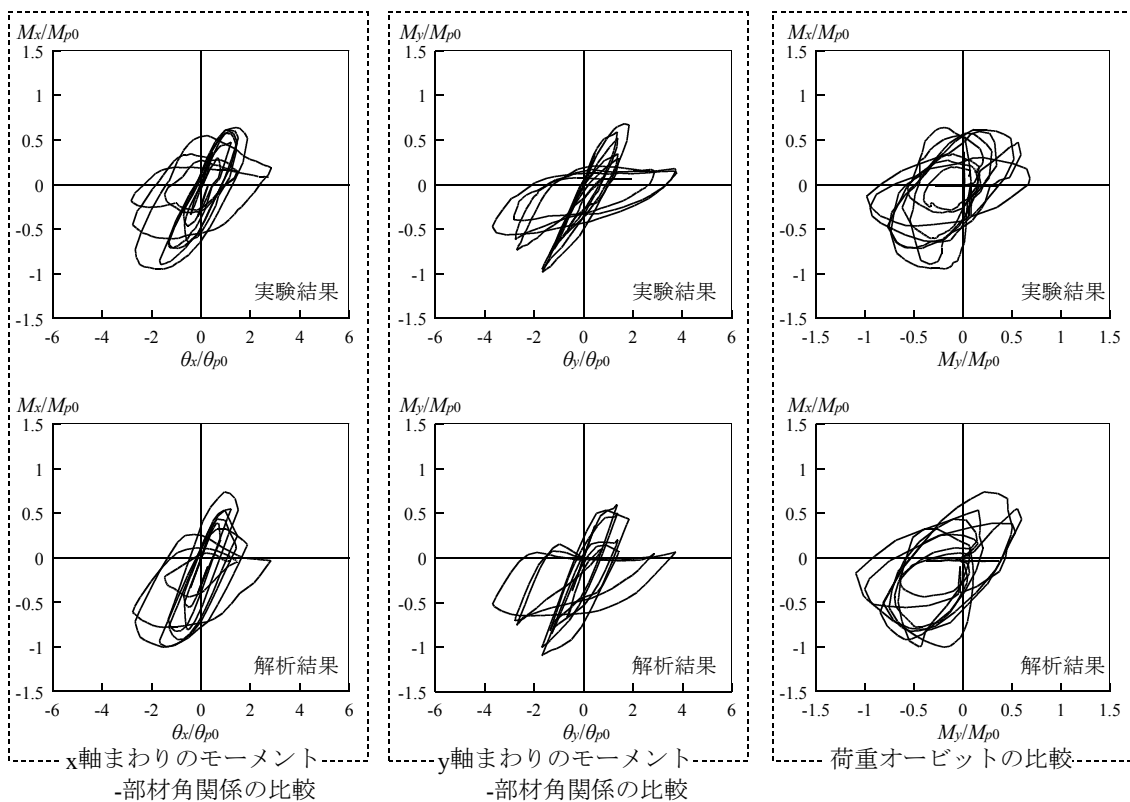
(10)VB45\_0.2±0.2\_33

図6.6 実験結果と解析結果の比較(続き)



(11)VB00\_0.2±0.4\_33

図6.6 実験結果と解析結果の比較(続き)



(12)VB45\_0.2±0.4\_33

図6.6 実験結果と解析結果の比較(続き)

## 6.6 まとめ

本章では、変動軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の局部座屈発生に起因する劣化域を含む挙動の解析に対応できるようにするため、第4章の一定軸力の条件におけるMSモデルの要素バネの履歴モデルを修正した。要素バネの履歴モデルの修正点を以下に要約する。

(1) 拡張骨格曲線においてひずみが進展する場合、要素バネの履歴はそれまでに経験した拡張骨格曲線の累積ひずみに応じて、各ステップでの降伏軸力比に対応する一定軸力下の拡張骨格曲線上を移動するものとした。

(2) 繰り返しに対する履歴モデルについては、以下のようにモデル化した。最大耐力以前のバウシंगाー部については、秋山・高橋による一定軸力下の挙動に関するバイリニア型のモデル<sup>6.4)</sup>を援用した。バイリニア型モデルの2次剛性は降伏軸力比により変化するが、本研究では、バイリニア型モデルを規定する降伏軸力比として、略算的に、変動軸力下での軸力の平均値と言える初期軸力に対応する降伏軸力比を用いた。最大耐力以降の履歴モデルについては、第4章の一定軸力下の挙動に関するモデルを援用し、第4章の劣化域における履歴モデルのうち、降伏軸力比の影響を受ける「耐力上昇部の塑性ひずみ量」、「拡張骨格曲線への復帰点」及び「劣化域における除荷剛性」を次のようにモデル化した。「劣化域における除荷剛性」及び「耐力上昇部の塑性ひずみ量」を規定する降伏軸力比として、初期軸力に対応する降伏軸力比を用いた。「拡張骨格曲線への復帰点」については、前サイクルの拡張骨格曲線からの除荷開始点における降伏軸力比に応じた拡張骨格曲線上において、経験した拡張骨格曲線での累積ひずみ量から耐力上昇部の塑性ひずみ量分移動した点とした。

第5章で行った変動軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し載荷実験結果と、修正した履歴モデルを適用したMSモデルによる解析結果との比較を行った。初期軸力を降伏軸力比で0.2とし、軸力を一定軸力下の柱に作用するせん断力に比例するように変動させ、その変動幅を降伏軸力比で $\pm 0.2$ 程度または $\pm 0.4$ 程度、幅厚比を22.2または33.3、平面載荷履歴を規則的またはランダムとしたいずれの試験体について、実験結果とMSモデルによる解析結果の各軸まわりの曲げモーメント-部材角関係及び軸方向変形は局部座屈発生以降の劣化域に至るまで対応していることを確認した。

### [参考文献]

- 6.1) S.S.Lai, G.T.Will, and S.Otani: Model for Inelastic Biaxial Bending of Concrete Members, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.110, No.ST11, pp.2563-2584, 1984.11
- 6.2) 李 康寧, 小谷俊介, 青山博之: 3軸変動力を受ける鉄筋コンクリート柱の解析モデル, 構造工学論文集 Vol.33B, pp.169-178, 1987.3
- 6.3) 邱 榮政, 山田 哲, 桑村 仁, 秋山 宏: 冷間成形角形鋼管の保有性能の研究 その1

短柱圧縮実験，日本建築学会大会学術講演梗概集 C 分冊，pp.1275-1276，1992.8

6.4)山田 哲，秋山 宏，桑村 仁：局部座屈を伴う箱形断面鋼柱部材の変動軸力下における終局挙動，日本建築学会構造系論文集 第 461 号，pp.115-122，1994.7

6.5)秋山 宏，高橋 誠：鋼構造剛接骨組の耐震性に及ぼすバウシンガー効果の影響，日本建築学会構造系論文報告集 第 418 号，pp.49-57，1990.12



軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰り返し劣化挙動

## 第7章

### 結論

本研究では、中小規模の鋼構造建築の柱材として多く用いられる冷間ロール成形角形鋼管を対象として、角形鋼管柱の3次元大変形繰り返し実験を行い、実験結果とのキャリブレーションに基づき、軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の局部座屈発生に起因する劣化域を含む履歴挙動を追跡するモデルを構築した。各章で得られた研究成果を以下に示す。

#### 第2章 一定軸力下で繰り返し1軸曲げを受ける角形鋼管柱の劣化域における履歴モデル

既往の角形鋼管柱の繰り返し載荷実験結果のデータベースを構築し、それに基づき、3次元荷重下の複雑な挙動をモデル化する上で基本となる、一定軸力下で繰り返し1軸曲げを受ける角形鋼管柱の繰り返し劣化挙動の履歴モデルを構築した。本研究では、最大耐力以降の劣化域を含む挙動について、骨格曲線とバウシンガー部に分解する方法による検討を行い、最大耐力以降の劣化域における履歴挙動のモデル化を行った。履歴モデルは、一方向載荷を受けた場合の荷重-変形関係と対応する拡張骨格曲線と、繰り返しに対する履歴モデルの組み合わせで構築した。履歴モデルによる履歴挙動をデータベースを構成する降伏軸力比、幅厚比、載荷履歴の異なる実験結果と比較したところ、大変形領域に至るまで繰り返し劣化挙動が捉えられていることを確認した。

#### 第3章 一定軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し載荷実験

平面載荷履歴、降伏軸力比、幅厚比をパラメーターとした一定軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し載荷実験を行い、局部座屈発生以降の劣化域を含む挙動に関するデータを得た。平面載荷履歴については、水平2方向入力を受ける多質点せん断系の弾塑性応答解析から得られる1層質点の変位オービットに基づき、振幅の大きな変位オービットをモデル化することで構築した楕円状の変位オービットから構成される規則的な

平面載荷履歴と、応答解析結果の変位オービットを用いたランダムな平面載荷履歴の2種類を設定した。

#### 第4章 一定軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の解析

一定軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の解析を行い、第3章で行った実験結果との比較によりその妥当性を検証した。解析モデルは塑性化領域の断面を複数の弾塑性軸バネで置き換えたMS(Multi Spring)モデルとし、弾塑性軸バネの履歴モデルを第2章の1軸曲げの条件における局部座屈を伴う角形鋼管柱の劣化挙動に関するモデルに基づき構築した。MSモデルによる解析結果と、第3章で行った実験結果との比較を行い、降伏軸力比を0.2または0.4、幅厚比を22.2または33.3、平面載荷履歴を規則的またはランダムとしたいずれの試験体について、各軸まわりの曲げモーメント-部材角関係及び軸方向変形は局部座屈発生以降の劣化域に至るまで良好に対応していることを確認した。

#### 第5章 変動軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し載荷実験

転倒モーメントによる変動軸力を受ける多層骨組の下層部外柱を想定し、軸力の変動幅、平面載荷履歴、幅厚比をパラメーターとした変動軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し載荷実験を行い、局部座屈発生に起因する劣化域を含む挙動に関するデータを得た。また、実験に先立ち、軸力のパターンを水平2方向入力を受ける多質点せん断系の弾塑性応答解析結果に基づき設定した。本研究では、一定軸力下の柱に作用するせん断力と外柱に作用する軸力の変動パターンに線形関係が成り立つものとして、一定軸力下での柱のせん断力-変形関係と、軸力と変形の関係が対応するように軸力の変動パターンを設定した。

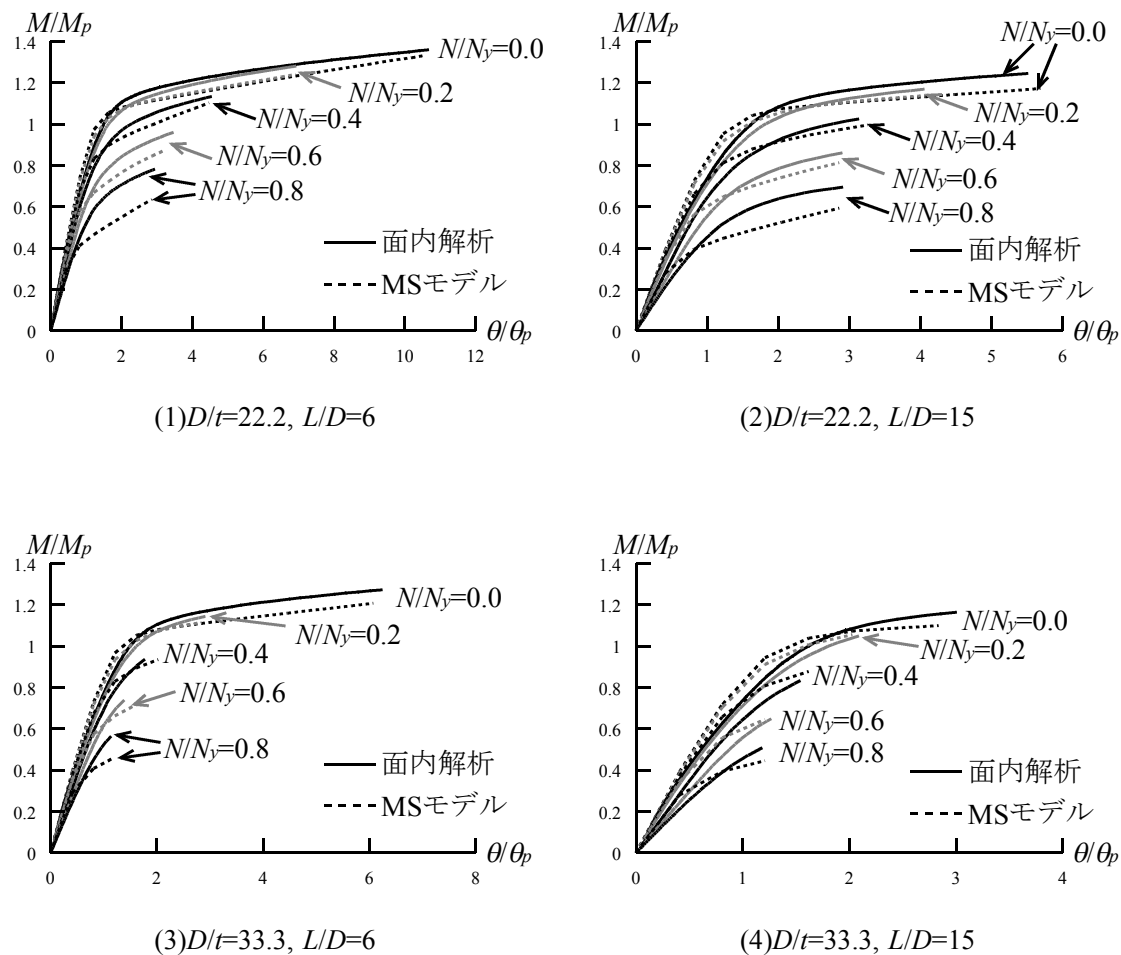
#### 第6章 変動軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の解析

変動軸力下で水平2方向外力を受ける角形鋼管柱の解析を行い、第5章で行った実験結果との比較によりその妥当性を検証した。解析モデルは第4章のMSモデルを用い、変動軸力下での挙動の解析に対応できるようにするため、第4章で構築した一定軸力の条件におけるMSモデルの要素バネの履歴モデルに修正を施した。第5章で行った実験結果と、修正した履歴モデルを適用したMSモデルによる解析結果との比較を行った。初期軸力を降伏軸力比で0.2とし、軸力を一定軸力下の柱に作用するせん断力に比例するように変動させ、その変動幅を降伏軸力比で $\pm 0.2$ 程度または $\pm 0.4$ 程度、幅厚比を22.2または33.3、平面載荷履歴を規則的またはランダムとしたいずれの試験体について、実験結果とMSモデルによる解析結果の各軸まわりの曲げモーメント-部材角関係及び軸方向変形は局部座屈発生以降の劣化域に至るまで対応していることを確認した。

## 付録1

## 弾塑性要素にモデル化する領域の長さの検証

弾塑性要素にモデル化する領域の長さを材長の5%としたMSモデルによる解析結果と、数値積分による面内解析(塑性化領域の広がりを考慮できるモデル)による解析結果<sup>付1.1)</sup>の最大耐力までの曲げモーメント-部材角関係の比較を付図 1.1(1)~(4)に例示する。図中、 $M_p$ は軸力が作用しない条件における全塑性モーメント、 $\theta_p$ は $M_p$ に対応する弾性部材角の計算値を示す。ここで、弾塑性要素にモデル化する領域の長さの検証において対象としたパラメーターの範囲は、降伏軸力比  $N/N_y$  を 0.0~0.8、幅厚比  $D/t$  を 16.7~41.7、材長(逆対称曲げとしたときの曲げスパン)と断面幅の比  $L/D$  を 6~16.7 とした。面内解析とMSモデルによる解析結果は対応しており、また、例示以外のパラメーターについても同様の結果であった。



付図1.1 面内解析と MS モデルによる解析結果の比較

[参考文献]

付 1.1) 山田 哲, 秋山 宏, 桑村 仁: 局部座屈を伴う箱形断面部材の劣化域を含む終局挙動, 日本建築学会構造系論文報告集 第 444 号, pp.135-143, 1993.2

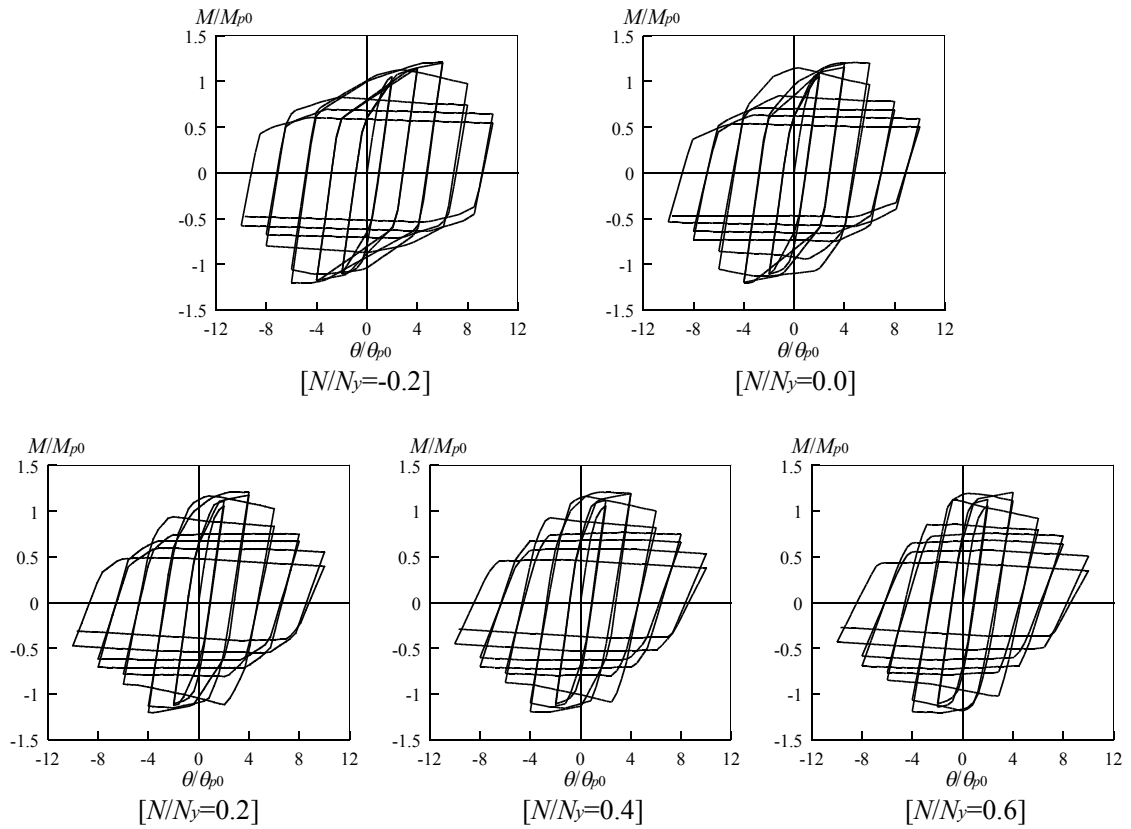
## 付録2

## バウシンガー部・耐力上昇部・除荷部における降伏軸力比の影響

バウシンガー部・耐力上昇部・除荷部での軸力変動が履歴挙動に及ぼす影響を検討するため、一定軸力下で繰り返し1軸曲げを受ける角形鋼管柱を対象に、バウシンガー部及び耐力上昇部における塑性ひずみ量と除荷部の剛性低下について降伏軸力比を変えたモデルを使用した場合の差異を検討する。解析では、局部座屈発生により決まる最大耐力に至るまでの骨格曲線での変形量が大きく、バウシンガー部での塑性ひずみ量が比較的大きくなる部材の代表として幅厚比を20とし、降伏軸力比0.2の一定軸力を作用させた。载荷履歴は2サイクルごとに $2\theta_{p0}$ ずつ振幅が漸増する正負交番繰り返し载荷である。ここで、 $\theta_{p0}$ は $0^\circ$ 方向に载荷したときの軸力が作用しない条件での全塑性モーメント $M_{p0}$ に対応する弾性部材角の計算値である。解析パラメーターはバウシンガー部及び耐力上昇部の塑性ひずみ量と除荷部の剛性低下を規定する降伏軸力比 $N/N_y$ で、-0.2、0.0、0.2、0.4、0.6の5種類とした。

解析結果を付図2.1に示す。履歴モデルが対応する降伏軸力比を変化させても、全体的な履歴曲線の差異はあまり大きくない。なお、今回の検討は履歴モデルが対応する降伏軸力比を一定とした極端な条件について行ったものであり、変動軸力下では差異はより小さくなると類推できることから、バウシンガー部・耐力上昇部・除荷部での軸力変動が履歴挙動に及ぼす影響はそれほど大きくないと考えられる。

軸方向と水平2方向の複合荷重を受ける角形鋼管柱の繰返し劣化挙動



付図2.1 バウシンガー部・耐力上昇部・除荷部における降伏軸力比の影響

## 本研究に関連した発表論文

### 【査読付論文】

#### 第2章

- 1) 山田 哲, 石田孝徳, 島田侑子: 局部座屈を伴う角形鋼管柱の劣化域における履歴モデル, 日本建築学会構造系論文集 第 674 号, pp.627-636, 2012.4

#### 第3章

- 2) 山田 哲, 石田孝徳, 島田侑子: 一定軸力下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し載荷実験, 日本建築学会構造系論文集 第 683 号, pp.203-212, 2013.1

#### 第4章

- 3) 石田孝徳, 山田 哲, 島田侑子: 一定軸力下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集 第 691 号, pp.1631-1640, 2013.9

#### 第5章, 第6章

- 4) 石田孝徳, 山田 哲, 島田侑子: 変動軸力下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の履歴挙動の追跡, 日本建築学会構造系論文集 第 699 号, 2014.5(採用決定)

### 【国際会議における発表】

- 1) T. ISHIDA, Y. SHIMADA, S. YAMADA: Post-Buckling Behavior of RHS-Columns under Cyclic Loadings, The 3<sup>rd</sup> ASIA Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, Bangkok, Thailand, 2010.12 (Oral)
- 2) T. ISHIDA, Y. SHIMADA, S. YAMADA: Investigation of Cyclic Deterioration Behavior of RHS-Columns, 8<sup>th</sup> International Conference on Urban Earthquake Engineering, pp.947-952, Tokyo, Japan, 2011.3 (Oral)
- 3) T. ISHIDA, Y. SHIMADA, S. YAMADA: Bi-axial Bending Behavior of RHS-columns Including Post-buckling and Deterioration Range, 9<sup>th</sup> International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4<sup>th</sup> ASIA Conference on Earthquake Engineering Joint conference, pp.1097-1101, Tokyo, Japan, 2012.3 (Oral)
- 4) T. ISHIDA, Y. SHIMADA, S. YAMADA: Bi-axial Bending Behavior of RHS-columns Including Post-buckling and Deterioration Range, 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012.9.26 (e-poster)
- 5) T. ISHIDA, Y. SHIMADA, S. YAMADA: Cyclic Loading Test on RHS columns under Bi-directional Horizontal Forces, 10<sup>th</sup> International Conference on Urban Earthquake Engineering, pp.959-965, Tokyo, Japan, 2013.3 (Oral)
- 6) T. ISHIDA, Y. SHIMADA, S. YAMADA: Post Buckling and Deterioration Behavior of RHS Columns under Bi-directional Horizontal Forces, 7<sup>th</sup> International Symposium on Steel Structures, pp.118-119, Jeju, Korea, 2013.11 (Oral)



#### 【国内学会・シンポジウム等における発表】

- 1) 石田孝徳, 焦 瑜, 島田侑子, 山田 哲: 繰返し曲げを受ける角形鋼管柱の劣化挙動 その1 三点曲げ実験による基礎的検討, 2009 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.457-460, 2010.3
- 2) 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲: 繰返し曲げを受ける角形鋼管柱の劣化挙動 その2 データーベースの構築と基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅲ, pp.921-922, 2010.9
- 3) 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲: 角形鋼管柱の繰返し劣化挙動に関する検討, 日本地震工学シンポジウム 2010, pp.2874-2881, 2010.11
- 4) 松永達哉, 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲: 載荷方向を変化させた角形鋼管柱の劣化域を含む履歴挙動の検討 その1. 繰返し載荷実験, 2010 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.233-236, 2011.3
- 5) 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲: 載荷方向を変化させた角形鋼管柱の劣化域を含む履歴挙動の検討 その2. 繰返し挙動の検討, 2010 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.237-240, 2011.3
- 6) 松永達哉, 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲: 載荷方向を変化させた角形鋼管柱の劣化域を含む履歴挙動の検討 その1. 繰返し載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅲ, pp.685-686, 2011.8
- 7) 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲: 載荷方向を変化させた角形鋼管柱の劣化域を含む履歴挙動の検討 その2. 繰返し挙動の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅲ, pp.687-688, 2011.8
- 8) 石田孝徳, 松永達哉, 島田侑子, 山田 哲: 部材の水平 2 方向載荷実験における平面載荷履歴の検討 その1 中低層鉄骨造建物を対象とした平面載荷履歴の検討方法, 日本地震工学会大会-2011 梗概集, pp.388-389, 2011.11
- 9) 石田孝徳, 松永達哉, 島田侑子, 山田 哲: 部材の水平 2 方向載荷実験における平面載荷履歴の検討 その2 中低層鉄骨造建物を対象とした平面載荷履歴の提案, 日本地震工学会大会-2011 梗概集, pp.390-391, 2011.11
- 10) 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲: 載荷方向を変化させた角形鋼管柱の履歴挙動, 鋼構造年次論文報告集 第19巻, pp.691-696, 2011.11
- 11) 松永達哉, 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲: 水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の繰返し載荷実験 その1 平面載荷履歴の提案, 2011 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.637-640, 2012.3
- 12) 石田孝徳, 松永達哉, 島田侑子, 山田 哲: 水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の繰返し載荷実験 その2 繰返し載荷実験, 2011 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.641-644, 2012.3
- 13) 松永達哉, 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲: 水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の

劣化域を含む挙動 その 1 実験計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅲ, pp.701-702, 2012.9

- 14) 石田孝徳, 松永達哉, 島田侑子, 山田 哲: 水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の劣化域を含む挙動 その 2 実験結果・解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅲ, pp.703-704, 2012.9
- 15) 西村由香, 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲: 角形鋼管柱の水平 2 方向繰り返し載荷実験 その 1 実験概要, 日本地震工学会大会-2012 梗概集, pp.158-159, 2012.11
- 16) 石田孝徳, 西村由香, 島田侑子, 山田 哲: 角形鋼管柱の水平 2 方向繰り返し載荷実験 その 2 実験結果・解析, 日本地震工学会大会-2012 梗概集, pp.160-161, 2012.11
- 17) 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲: 角形鋼管柱の水平 2 方向載荷実験に用いる平面載荷履歴, 鋼構造年次論文報告集 第 20 巻, pp.787-794, 2012.11
- 18) 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲: 変動軸力下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の繰り返し載荷実験, 2012 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.561-564, 2013.3
- 19) 石田孝徳, 西村由香, 島田侑子, 山田 哲, 小林良平: 水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の解析モデルの構築 その 1 解析モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅲ, pp.1239-1240, 2013.8
- 20) 西村由香, 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲, 小林良平: 水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の解析モデルの構築 その 2 水平 2 方向ランダム載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅲ, pp.1241-1242, 2013.8
- 21) 小林良平, 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲, 西村由香: 水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の解析モデルの構築 その 3 実験結果と解析結果の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅲ, pp.1243-1244, 2013.8
- 22) 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲: 水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の MSS モデルを用いた解析, 鋼構造年次論文報告集 第 21 巻, pp.277-284, 2013.11
- 23) 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲: 変動軸力下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の解析 その 1 履歴モデルの修正, 2013 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.549-552, 2014.2
- 24) 石田孝徳, 島田侑子, 山田 哲: 変動軸力下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の解析 その 2 実験結果と解析結果の比較, 2013 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.553-556, 2014.2

#### 【その他の主な論文】

- 1) 山田 哲, 島田侑子, 石田孝徳, 沢田涼佑: ピン形式柱脚のせん断伝達能力改修工法, 日本建築学会構造系論文集 第 695 号, pp.145-152, 2014.1
- 2) S. YAMADA, T. ISHIDA and Yuko SHIMADA: Collapse Behavior and Ultimate Earthquake

Resistance of Weak Column Type Multi Story Steel Frame with RHS Columns, Structures  
Congress 2012, DVD-ROM, Chicago, U.S.A., 2012.3 (Oral)

## 謝辞

東京工業大学准教授・山田哲先生には、本研究に携わる機会を与えて頂いたことはもとより、研究に限らず人生の先輩として私生活の様々なことに対して御助言頂きました。修士課程および博士課程において終始頂いた御指導・御鞭撻と諸々の励ましのお言葉に心から感謝し、この場をお借りして御礼申し上げます。このような貴重な経験を私のこれからの人生の糧として、益々精進していきたいと思っております。

論文を審査して頂いた東京工業大学教授・坂田弘安先生、山中浩明先生、河野進先生、東京工業大学准教授・篠原保二先生には、貴重な御指摘、御指導を賜りました。また、東京工業大学教授・笠井和彦先生には、論文発表会において貴重な御意見を頂きました。深く感謝の意を表します。

千葉大学助教・島田侑子先生(元山田研究室)には、本研究を行うにあたり、終始様々なアドバイスを頂きました。また、研究室に入った当初から学生生活に関する様々なことについて御指導頂きました。深く感謝の意を表します。

大阪工業大学講師・吉敷祥一先生(元東京工業大学助教)には、ゼミにおいて様々な御助言を頂きました。また、実験においても様々なアドバイスを頂きました。深く感謝の意を表します。

大連理工大学准教授・崔瑤先生(元東京工業大学研究員)には、本研究の一連で行った有限要素解析において御指導を頂きました。また、国際会議等の発表練習において的確なアドバイスを多々頂きました。深く感謝の意を表します。

神戸大学助教・浅田勇人先生(元山田研究室)には、実験や建築構造について丁寧に御指導して頂きました。また、研究に関するアドバイスを多々頂きました。深く感謝の意を表します。

東京理科大学助教・焦瑜先生(元山田研究室)には、私が初めて行った実験において丁寧な御指導を頂きました。また、英語での論文執筆の際にはアドバイスを多々頂きました。深く感謝の意を表します。

本研究における実験は、様々な方の御助力無くては成し得ないものでした。本研究の実験は、元山田研究室・御手洗達也君、浅見尚哉君、齊藤諭君、高山大君、松永達哉君、金ジュホ君、石川諒君、近藤直弥君、高橋健太君、山田研究室・Ene Dianaさん、三木徳人君、沢田涼佑君、西村由香さん、渡辺重仁君、李東錫君、久保田航平君、小林良平君、戸松一輝君、納所昌広君に御協力頂きました。御助力頂いた皆様に、深く感謝の意を表します。

山田研究室補佐員・井林をとね様には、常に研究室での生活環境に細やかな心配りをして頂きました。御陰様で研究活動に専念することができました。深く感謝の意を表します。

修士課程時代に研究生活を共にした、元山田研究室・御手洗達也君、元和田研究室・野々山昌峰君、三好新君、元坂田研究室・宇田川洋隆君、宮木志伸さん、吉永剛大君には、実験を始め多くの面で助けられ、楽しく有意義な学生生活を過ごせました。

このほかにも、学内外の方々に様々な形で激励、御助力を頂きました。数多くの方々に支えられながら研究生活を過ごせたことはこの上ない幸せでした。深く感謝の意を表します。

最後に、常に健康を気遣い、これまで私を支えてきてくれた両親に心より感謝致します。

2014年2月

石田孝徳