



|                     |                                                                                                 |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title               | 断面解析モデルを用いたアンボンドPCaPC梁部材の構造特性評価に関する研究                                                           |
| Author(s)           | 松茂良, 諒                                                                                          |
| Degree Grantor      | 北海道大学                                                                                           |
| Degree Name         | 博士(工学)                                                                                          |
| Dissertation Number | 甲第11573号                                                                                        |
| Issue Date          | 2014-09-25                                                                                      |
| DOI                 | <a href="https://doi.org/10.14943/doctoral.k11573">https://doi.org/10.14943/doctoral.k11573</a> |
| Doc URL             | <a href="https://hdl.handle.net/2115/57224">https://hdl.handle.net/2115/57224</a>               |
| Type                | doctoral thesis                                                                                 |
| File Information    | Makoto_Matsumora.pdf                                                                            |



# 断面解析モデルを用いたアンボンドPCaPC梁 部材の構造特性評価に関する研究

松茂良 諒

断面解析モデルを用いたアンボンドPCaPC  
梁部材の構造特性評価に関する研究

Evaluation of Structural Characteristics  
for Unbonded Post-Tensioned Precast Concrete  
Beams by Using Section Analysis

北海道大学大学院工学院 建築都市空間デザイン専攻  
建築構造計画学研究室

松茂良 諒



---

## 論文要旨

近年、建築物の強度を保持しつつも建設工程を集約し、建設工事を迅速化することができるプレキャストプレストレストコンクリート構造 (以下、PCaPC 構造) を用いた建築物が数多く建設されている。PCaPC 構造はプレキャスト部材を PC 鋼材によって圧着接合した構造形式であるが、その PC 鋼材をアンボンドとする、つまりグラウト材による一体化を行わずに部材を圧着することで、さらなる工程の簡便化を実現するアンボンドプレキャストプレストレストコンクリート構造 (以下、アンボンド PCaPC 構造) がある。このアンボンド PCaPC 構造は被震後の残留変形や残留ひび割れを少なくでき、またグラウト材によってプレキャスト部材と PC 鋼材を一体化していないため、解体後に部材のリユースできる可能性があるなど多くの利点を持っており、損傷制御設計や被震後における構造物の活用など、合理的な設計や運用を可能にする構造形式として期待されている。しかし、本構造形式は PC 鋼材がアンボンドであることから、従来の解析手法および評価式などが直接的に適用できず、その構造特性の評価が難しいため、国内においては設計・施工例がほとんど見られない。このことから、その構造特性を明らかにし、耐震設計手法を整備することが本構造の普及において急務であるといえる。本研究では、載荷時において柱・梁間の圧着面に生じる目開きが梁部材全体の变形において支配的になるという本構造の特徴に着目し、圧着面の目開き挙動をモデル化した新たな断面解析モデルを提案した。本解析モデルを用いて、アンボンド PCaPC 梁部材の特徴的な挙動を明らかにし、さらにパラメトリック解析を通してアンボンド PCaPC 梁部材の曲げ終局耐力点の評価式を提案した。

第 1 章「序論」では本研究の背景と目的について述べた。まず構造物の施工において職人の減少や工期短縮化への要請などの社会的背景から、より簡便な構造形式としてのアンボンド PCaPC 構造が期待されることとともに、その耐震設計手法確立の必要性について述べた。次に PC 構造の構造特性評価に関する既往の解析手法として、1) グラウチングを施した通常の PC 構造の部分架構を対象とする数値解析モデル、2) プレキャスト部材ではないアンボンド PC 構造の梁部材を対象とする解析モデル、および 3) PCaPC 構造の梁部材を対象とする解析モデルを取り上げてそれぞれ概説し、その中でアンボンド PC 鋼材の変形量や圧着面における目開き挙動等に対する既往の評価手法を示した後、それらのアンボンド PCaPC 構造の解析モデルへの適用について現状と課題を整理した。加えて既往の終局耐力点の評価手法を概観し、本研究で提案する終局耐力点評価手法の位置づけを明示した。最後に本論文の内容とその研究手法の概略について示した。

第 2 章では本研究で提案した断面解析モデルについて概説した。この断面解析モデルは圧着面における目開き挙動をモデル化したものであり、目開き挙動時にコンクリートが負担する圧縮力とアンボンド PC 鋼材が負担する引張力を精度よく評価することで、圧着面における曲げモーメントと回転角の関係を得る解析モデルである。アンボンド PCaPC 部材ではアンボンド PC 鋼材の全長にわたる変形挙動と圧着面における目開き挙動とが密接に関係するため、ここではまず本解析モデルで用いたアンボンド PC 鋼材の変形挙動の評

---

価手法に関して、柱部材の片側に梁部材を圧着したト型試験体のように目開きが一箇所のみに生じる場合と、柱部材の両側に梁部材を圧着した十字型試験体のように目開きが柱を軸に逆対称に生じる場合との違いについて示した。次に本解析モデルの計算手順と梁断面を構成する各要素の設定など、本解析モデルにおける基本的な仮定事項を示し、それらの後、圧着面に生じる目開きを回転角として、回転角から各要素における変形量、ひずみ、応力、軸力、曲げモーメントをそれぞれ求める計算方法を順次示した。

第3章では第2章における提案解析モデルの妥当性および適合性を検証するため、解析結果とアンボンド PCaPC 部分架構の実験結果との比較を示した。比較に際してはト型試験体と十字型試験体の二つの試験体を対象とした。まずこれら二つの試験体の実験結果における挙動の違いを荷重一部材角関係、アンボンド PC 鋼材の引張合力一部材角関係、およびそれぞれのアンボンド PC 鋼材の応力一部材角関係で比較し、アンボンド PC 鋼材の変形挙動の違いが全体の履歴挙動に及ぼす影響とそのメカニズムについて示した。次に、コンクリートの負担する圧縮力を精度よく評価するために本解析モデルに設定した、破壊力学に基づくコンクリートの材料モデルについて、そのパラメータの意味と解析結果に及ぼす影響について考察した後、これらのパラメータを変化させた解析結果と実験結果の荷重一部材角関係による比較を示した。さらに実験結果の荷重一部材角関係を最もよく表現するパラメータの値を用いた解析結果と実験結果を複数の項目について比較した結果、本提案モデルを用いることでト型試験体及び十字型試験体それぞれの特徴的な挙動とその違いを精度よく表現できることを示した。

第4章では十字型試験体のような逆対称曲げを受けるアンボンド PCaPC 梁部材の曲げ終局耐力点の評価式を提案した。本研究で提案した評価式は終局時にアンボンド PC 鋼材が降伏しない場合を想定して構築したものであり、曲げ終局耐力および曲げ終局耐力時の変形自体を直接評価し得る。まずアンボンド PCaPC 梁の圧着面における終局時の曲げモーメント計算式および軸力の釣り合い式から、それぞれ曲げ終局耐力および曲げ終局耐力時の回転角(以下終局回転角)評価式の基本形を導出し、評価式における変数の妥当性と係数評価を検討するために、断面解析モデルを用いた計 72000 ケースのパラメトリック解析を行った。ここでは曲げ終局耐力点に影響すると考えられる 8 種類のパラメータを設定し、曲げ終局耐力および終局回転角に関する各パラメータの影響を示した後、変動係数を用いた評価を行い、評価式において用いた変数の妥当性を明らかにした。また、このパラメトリック解析結果に対する回帰分析により、評価式の係数評価を行った。曲げ終局耐力、終局回転角ともにまず PC 鋼材係数による回帰分析を行ったのち、得られた回帰係数に残りの影響の大きなパラメータによる回帰分析を行うことで、評価式における係数の回帰式を求めた。得られた係数の式を用いた評価式をパラメトリック解析結果と既往の実験結果に対して適用した結果、本評価式を用いて良好に終局耐力点を評価できることを示した。さらに既往の評価式による値と比較した結果、本評価式を用いて比較的良好に終局耐力点を評価できることを示した。

第5章では本論文の成果をまとめ、今後の課題と展望について述べた。

---

## 関連発表論文

### [論文]

1. 松茂良 諒, 越川 武晃, 菊地 優: アンボンド PCaPC 梁部材を対象とした断面解析モデルの適用性評価に関する一検討, 構造工学論文集, Vol.59B, pp73-80, 2013.3
2. 松茂良 諒, 越川 武晃, 菊地 優: 断面解析モデルを用いたアンボンド PCaPC 梁部材の曲げ終局耐力点評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 701 号, 2014.7

### [発表]

1. 松茂良 諒, 越川 武晃: アンボンド PCaPC 梁の曲げ終局耐力に及ぼす導入力レベルの影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp917-918, 2012.9
2. 松茂良 諒, 越川 武晃, 山下 仁: 断面解析モデルを用いたアンボンド PCaPC 部材の耐力評価に関する研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp917-918, 2011.6
3. 松茂良 諒, 越川 武晃: 断面解析モデルを用いたアンボンド PCaPC 部材の終局変形に関する研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp917-918, 2012.6
4. 松茂良 諒, 越川 武晃, 山下 仁: 断面解析を用いたアンボンド PCaPC 柱・梁圧着接合部材の耐力評価に関する研究, プレストレストコンクリート技術協会 第 20 回シンポジウム論文集, pp103-106, 2011.10
5. 松茂良 諒, 越川 武晃, 山下 仁: アンボンド PCaPC 梁部材を対象とした断面解析モデルのト型および十字型試験体への適用性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp831-832, 2013.9

### [本論文に直接関連しない論文]

1. 松茂良 諒, 門脇 花子, 越川 武晃: 梁端ダンパーを有するアンボンド PCaPC 梁のエネルギー吸収性能評価, プレストレストコンクリート技術協会 第 21 回シンポジウム論文集, pp103-106, 2012.10
2. 松茂良 諒, 門脇 花子, 越川 武晃: 梁端ダンパーを有するアンボンド PCaPC 梁のエネルギー吸収性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp963-964, 2012.10

- 
3. 松茂良 諒, 越川 武晃：アンボンド PCaPC 梁に付加したスチールバンドの損傷抑制効果に関する解析的検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp917-918, 2013.6

---

## 謝辞

この論文は、筆者が平成 20 年 4 月に北海道大学工学部・建築都市学科の空間構造環境学研究室（現建築構造計画学研究室）に配属され、平成 21 年 4 月に同大学大学院工学研究科・建築都市空間デザイン専攻の修士課程に入学し、平成 23 年 4 月に同専攻の博士後期課程に進学したのち、それから約 3 年半の間に取り組んだアンボンド PCaPC 圧着接合構造に関する研究内容を論文としてまとめたものです。

私が研究室に配属された年は、当研究室の元教授である上田正生先生がご退官なされる年度にあたり、1 年間という短い期間ではございますが、上田先生からは本研究に携わるきっかけを与えて頂きました。

上田先生が退官なされてからは、北海道大学助教である越川武晃先生にご指導頂き、修士課程から博士課程に至るまで、筆者の研究に関することはもちろんのこと、公私ともに様々な知識をご教示頂きました。筆者が本論文をまとめることができたのも、越川先生の粘り強く熱心なご指導の賜物です。お二人に衷心より深く万謝の意を捧げます。

研究室の菊地優先生や白井和貴先生からは研究を進めていく中で数々の叱咤激励を頂き、研究を進めていく中で自身の研究の内容やそれに対する姿勢などを顧みる機会を頂きました。また両先生からは研究に関することに限らず、あらゆる場面でご教示を頂き、多くのことを学ばせて頂きました。衷心より深謝申し上げます。

本論文の審査を通じて、主査の菊地優先生、副査の緑川光正先生・千歩修先生・西村康志郎先生からご意見を頂きました。多方面から論文を見て頂くことで、論文の内容がさらに充実したものとなりました。衷心より感謝申し上げます。

同研究室での先輩である石井建先輩や、同じく越川先生から指導を受けた高谷真実さんや門脇花子さんから、さらにこの他、すべての研究室の後輩やすでに社会で活躍している同級生からも多方面でのご支援を頂くとともに惜しみない協力を頂きました。ここに深く感謝を申し上げます。

以上簡単ではありますが、ご助力を頂きました皆様に改めて心から感謝を申し上げます。

2014 年 8 月 松茂良 諒

---

## 目次

|                                                      |           |
|------------------------------------------------------|-----------|
| 論文要旨 .....                                           | i         |
| 関連発表論文 .....                                         | iii       |
| 謝辞 .....                                             | v         |
| 目次 .....                                             | vi        |
| <br>                                                 |           |
| <b>第 1 章 序論</b> .....                                | <b>1</b>  |
| 1.1 研究の背景 .....                                      | 1         |
| 1.2 既往の研究 .....                                      | 4         |
| 1.2.1 解析モデル .....                                    | 4         |
| 1.2.2 曲げ終局耐力点評価に関する既往の研究 .....                       | 9         |
| 1.3 本研究の目的 .....                                     | 11        |
| 1.4 本研究の概要 .....                                     | 11        |
| 参考文献 .....                                           | 13        |
| <br>                                                 |           |
| <b>第 2 章 アンボンド PCaPC 梁部材圧着接合面を対象とする断面解析モデル</b> ..... | <b>15</b> |
| 2.1 はじめに .....                                       | 15        |
| 2.2 概要 .....                                         | 16        |
| 2.3 基本仮定事項 .....                                     | 20        |
| 2.4 断面解析モデルにおける変形状態の評価 .....                         | 21        |
| 2.4.1 各要素における変位評価 .....                              | 21        |
| 2.4.2 各要素におけるひずみ評価 .....                             | 22        |
| 2.4.3 圧着接合面に働く軸力による釣り合い条件 .....                      | 22        |
| 2.4.4 解析対象断面における曲げモーメント評価 .....                      | 23        |
| 2.4.5 載荷点における荷重と部材角の評価 .....                         | 23        |
| 2.5 材料モデル .....                                      | 24        |
| 2.5.1 破壊力学に基づいたコンクリートの材料モデル .....                    | 24        |
| 2.5.2 PC 鋼材の材料モデル .....                              | 25        |
| 2.6 まとめ .....                                        | 26        |
| 参考文献 .....                                           | 27        |
| <br>                                                 |           |
| <b>第 3 章 アンボンド PCaPC 梁部材実験のシミュレーション解析</b> .....      | <b>28</b> |
| 3.1 はじめに .....                                       | 28        |
| 3.2 アンボンド PCaPC 梁部材における履歴挙動の特徴 .....                 | 29        |
| 3.2.1 解析対象としたアンボンド PCaPC 部分架構実験 .....                | 29        |
| 3.2.2 アンボンド PCaPC 部分架構試験体の実験結果 .....                 | 31        |
| 3.3 断面解析モデルへの破壊力学に基づくコンクリートの材料モデルの適用 .....           | 35        |

|              |                                    |           |
|--------------|------------------------------------|-----------|
| 3.3.1        | 圧縮破壊領域長さと終局変形 .....                | 35        |
| 3.3.2        | 断面解析モデルにおける解析条件およびパラメータの設定 .....   | 37        |
| 3.3.3        | パラメトリック解析結果によるパラメータの評価 .....       | 37        |
| 3.4          | 断面解析モデルによる解析結果と実験結果の比較 .....       | 44        |
| 3.5          | まとめ .....                          | 49        |
|              | 参考文献 .....                         | 50        |
| <b>第 4 章</b> | <b>アンボンド PCaPC 梁部材の曲げ終局耐力点算定式</b>  | <b>51</b> |
| 4.1          | はじめに .....                         | 51        |
| 4.2          | 曲げ終局耐力点算定式の導出 .....                | 53        |
| 4.2.1        | 曲げ終局耐力算定式 .....                    | 53        |
| 4.2.2        | 終局回転角算定式 .....                     | 55        |
| 4.3          | パラメトリック解析 .....                    | 57        |
| 4.3.1        | パラメトリック解析概要 .....                  | 57        |
| 4.3.2        | 曲げ終局耐力点の傾向 .....                   | 58        |
| 4.4          | パラメトリック解析結果に基づく曲げ終局耐力点算定式の検討 ..... | 73        |
| 4.4.1        | 曲げ終局耐力点算定式の係数評価 .....              | 74        |
| 4.4.2        | 終局回転角算定式の係数評価 .....                | 78        |
| 4.5          | 実験結果および既往の算定式との比較 .....            | 82        |
| 4.5.1        | 対象とした既往の実験結果 .....                 | 82        |
| 4.5.2        | 比較に用いた既往の算定式 .....                 | 84        |
| 4.5.3        | 各実験結果および既往の算定式との比較 .....           | 86        |
|              | 参考文献 .....                         | 90        |
| <b>第 5 章</b> | <b>研究の総括および今後の課題</b>               | <b>91</b> |
| 5.1          | 研究の総括 .....                        | 91        |
| 5.2          | 今後の課題 .....                        | 92        |

# 第1章

## 序論

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1 アンボンドプレキャストプレストレストコンクリート構造

社会的背景の変化に伴い、日本における建築構造の方向性も大きく変わりつつあるが、近年、その方向性に強い影響を与えている背景の一つとして、1995年と2011年の大地震と日本国内における建設業就業者環境の変化が挙げられる。1995年の兵庫県南部地震において多くの建物が全壊や倒壊も含めて、使用不可能な状態に陥ったことから、被震後においても建築物の構造的健全性のみでなく、その社会的機能を維持することの重要性が大きく叫ばれるようになった。2011年の東北地方太平洋沖地震では、1995年の地震を教訓として免震装置などを用いることにより建築物への被害を抑え、機能を維持した例が多く見受けられたが、建物が大きく変形し、再使用できなくなった事例もまた多く、被震後における建築物の機能維持への重要性が再確認された。しかし、これら大地震による経験から建築構造の高性能化が叫ばれる反面、日本国内における建設業就業者数は減少の一途をたどっており、少子高齢化や団塊の世代の大量退職を背景とした熟練技術者の不足も重なって職人の経験に頼った複雑かつ大規模な施工はより一層困難なものになると予測される。

このような被震後においても建築物の機能を維持するという要請に応えながらも、施工を簡約化し、熟練技術者の減少にも対応することが可能な構造形式として、プレキャストプレストレストコンクリート圧着接合構造(以下、PCaPC構造)が注目されている。プレストレストコンクリート構造(以下、PC構造)は鉄筋コンクリート部材にPC鋼材による緊張力を加えることにより、コンクリート部材の引張に弱いという特徴を軽減し、さらにRC構造では実現の難しい長スパン化を可能にする構造形式である。このPC構造について、部材に工場生産した品質の高いプレキャスト部材を使用し、それらをPC鋼材で圧着接合したPCaPC構造は、そのプレストレスにより被震後においても残留変形と残留ひび

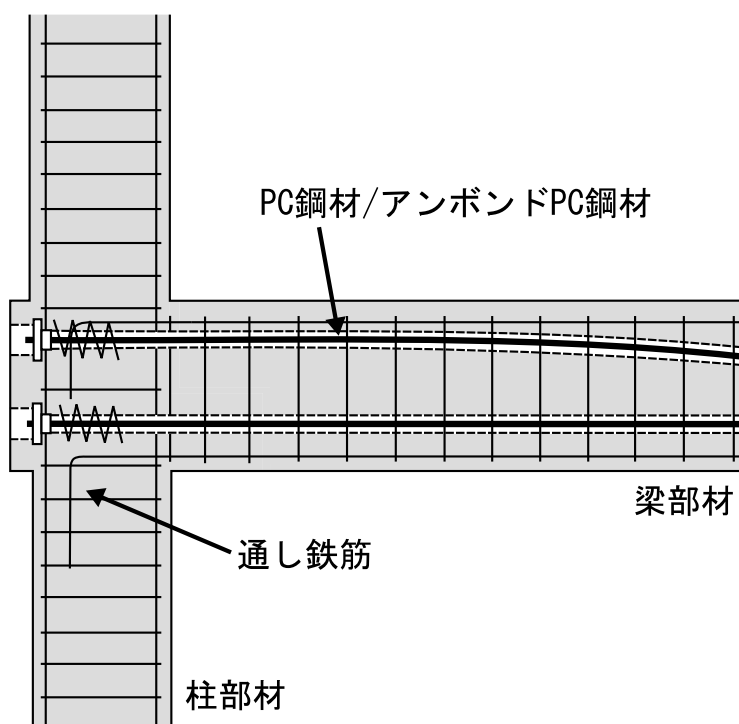


図 1.1 PC 構造/アンボンド PC 構造模式図

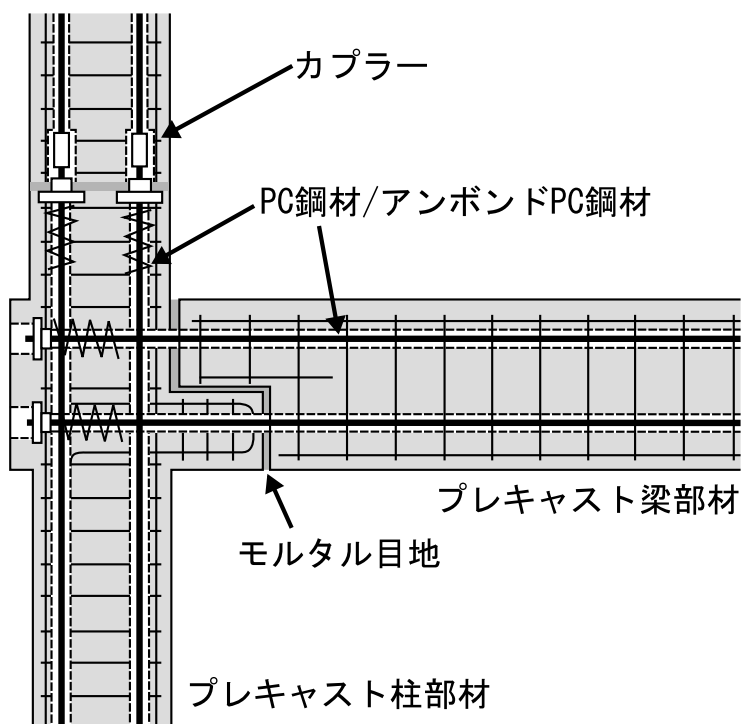


図 1.2 PCaPC 構造/アンボンド PCaPC 構造模式図

割れを抑えることができ、またプレキャスト部材のため工程を集約化した効率的な施工が可能であることから、最近ではオフィスビルや病院など数多くの建設物に採用されている。近年、このPCaPC構造に関して、PC鋼材に対するグラウチングを行わない、すなわちPC鋼材をアンボンドとして部材を圧着接合した構造形式であるアンボンドプレキャストプレストレストコンクリート圧着接合構造(アンボンドPCaPC構造)が盛んに研究されている[1-1]~[1-7]。PC構造とアンボンドPC構造の柱・梁接合部近傍の模式図を図1.1に、PCaPC構造とアンボンドPCaPC構造の同部分の模式図を図1.2に示す。アンボンドPCaPC構造はPC鋼材がアンボンドであるため、PC鋼材が降伏しにくいことから高い復元性を有しており、PC構造やPCaPC構造と同様に地震経験後の残留変形や残留ひび割れを抑制できるなどの特徴も持ち合わせ、さらにグラウト材によるグラウチングを行わないことから、さらなる施工の簡便化やプレストレス解放後のリユースが可能であるなど、PCaPC構造に比べより効率的な運用が可能な構造形式として期待されている。しかし、本構造は前述したアンボンドPC鋼材が降伏しにくく、高復元性を有するという特徴と、柱・梁間に通し鉄筋がなく、変形時に圧着接合面において目開きが生じるという特徴により従来のPC構造とは大きく異なる履歴挙動を示す。さらにその履歴挙動はPC構造に用いる従来の評価手法で想定する変形状態とは大きく異なっているため、PC構造を対象に用いられた数値解析手法や特性点の評価式を単純に適用することができない。そのため、特徴的なアンボンドPCaPC構造の履歴挙動を精度よく追跡・表現することのできる解析モデルを開発し、解析モデルを用いて構造特性を明らかにし、特性定点評価式などを含めた耐震設計手法を整備することが本構造の普及において急務であると言える。

## 1.2 既往の研究

### 1.2.1 解析モデル

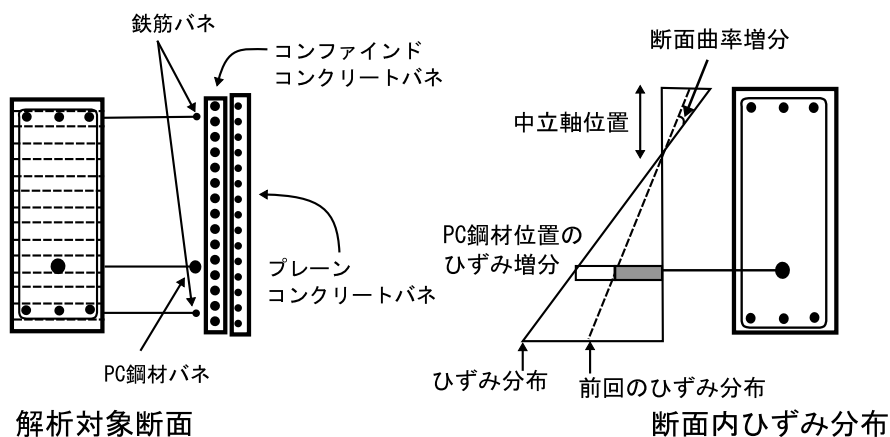


図 1.3 岸本ら [1-8] による PC 部材を対象とする断面解析モデル

構造特性を評価するための一般的な手法として、数値解析モデルを用いた履歴挙動と特性点の評価が挙げられる。従来の PC 構造では、PC 鋼材の伸び量とその伸びによるプレストレス力増分を考慮した数値解析モデルを用いて構造特性を評価した研究が数多く存在しており、有限要素法などの連続体を対象とした解析モデルや載荷時における危険断面、つまり柱・梁接合部近傍の梁部材のみを対象とした断面解析モデルなどが提案されている。

PC 部材を対象とした解析モデルの一例として、危険断面近傍を対象とした解析モデルである岸本ら [1-8] の断面解析モデルの模式図を図 1.3 に示す。この断面解析モデルでは等価ヒンジ領域を仮定し、その領域における曲率からコンクリートのひずみを求め、さらに PC 鋼材の要素と同じ位置におけるコンクリート要素のひずみからひずみ適合係数を用いて PC 鋼材のひずみを評価している。このように PC 部材を対象とした解析モデルは、要素分割した一定範囲の梁部材の変形と PC 鋼材の変形を関連付けて表現する点が特徴であり、解析対象となる梁部材の範囲において、ひずみ適合係数やグラウチングに使われるモルタルの付着特性を用いて、曲げ変形からコンクリート部材の変形と PC 鋼材の伸び量を表現する手法が一般的である。しかし、アンボンド PCaPC 構造では PC 鋼材がアンボンドであるため梁の変形と PC 鋼材の変形が一樣ではない、つまり平面保持の仮定を単純には適用できず、さらに圧着接合面に目開きが生じ、従来の PC 部材とは異なる変形状態となることから、通常の PC 部材を対象とした評価手法ではアンボンド PCaPC 部材における目開き挙動とアンボンド PC 鋼材の変形を評価することができない。

このように、アンボンド PCaPC 構造を対象とした解析モデルではアンボンド PC 鋼材の変形量の評価に加え、プレキャスト部材における変形の支配的要因を PC 鋼材の変形とどのようにして関連付けるかが課題となるが、これら課題への対応として既往のプレキャスト部材ではないアンボンド PC 部材を対象とした研究と PCaPC 部材を対象とした研究の評価手法を挙げることができる。まずアンボンド PC 部材を対象とした研究では、坂ら

[1-9] はアンボンド PC 梁の長期荷重時の終局耐力について、部材全体の変形が PC 鋼材の変形と同じとなる変形適合条件を用いることによりアンボンド PC 鋼材の変形量を求めている。坂らの研究を参考とした最上ら [1-10] の研究では、実験から変形の適合条件の妥当性を検討し、その結果を解析モデルに適用して、変形の支配的な要因となる塑性ヒンジからアンボンド PC 鋼材の伸び量を評価している。またプレキャスト部材の変形量の評価に関しては是永ら [1-11] は PCaPC 梁部材の実験と解析を通して圧着接合面における PC 鋼材の抜け出し、つまり目開きにおける変形が PC 鋼材の変形において支配的な要因となることを確かめている。すなわち、これらの研究において用いられた評価手法からアンボンド PCaPC 部材においても同様に、目開きを PC 鋼材の変形の要因として扱い、さらに変形の適合条件に基づいた評価を行うことでその挙動を表現できるものと考えられる。アンボンド PCaPC 部材については、河野ら [1-12] がアンボンド PCaPC 部材の実験から検討を行っており、これらアンボンド PC 部材の解析と PCaPC 部材の解析に用いられた考え方と同様に、圧着接合面における PC 鋼材と同じ高さにおける目開き量を PC 鋼材の変形にほぼ等しいとして仮定してよいことを報告している。以上のような既往の研究を踏まえ、アンボンド PCaPC 部材を対象とした解析モデルについて、圧着接合面の目開き挙動とアンボンドの PC 鋼材の変形適合条件を用いて表現することにより、その履歴挙動の評価を試みる解析モデルがいくつか提案されている。

本節では、既往の解析モデルとしてアンボンド PC 構造と PCaPC 構造、そしてアンボンド PCaPC 構造を対象とした解析モデルについて概説する。なお、アンボンド PC 構造、PCaPC 構造、アンボンド PCaPC 構造は PC 鋼材を用いて躯体にプレストレスを与えた部材という点では共通しているが、プレキャスト部材を用いて圧着接合したものであるか否かといった点や PC 鋼材がアンボンドであるか否かといった点で大きく異なっている。以下にそれぞれの構造形式の特徴を整理したものを示す。

1. アンボンド PC 構造は PC 鋼材はアンボンドであるが現場打設した躯体であり、柱・梁間には通し鉄筋が配置されている構造形式である。
2. PCaPC 構造は PC 鋼材は通常の PC 構造と同様にグラウチングを行っているが、構造躯体はプレキャスト部材を圧着接合した躯体であり、変形時に圧着目地に目開きが生じる構造形式である。
3. アンボンド PCaPC 構造は PC 鋼材がアンボンドであり、なおかつ構造躯体はプレキャスト部材を圧着接合した構造形式である。

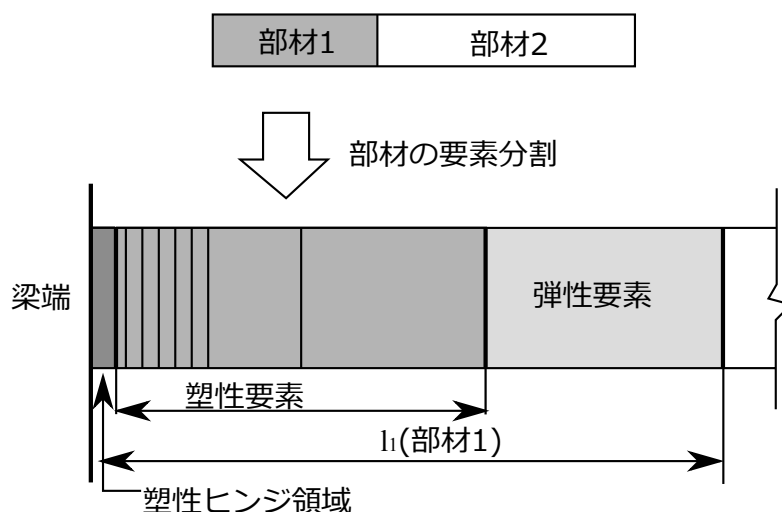


図 1.4 最上・是永ら [1-10] によるアンボンド PC 部材解析モデル

#### 1.2.1.1 アンボンド PC 部材を対象とする解析モデル

アンボンド PC 部材の構造特性を解析的に評価した研究として、最上・是永らの研究 [1-10][1-13] を挙げることができる。この研究では、アンボンド PC 鋼材の変形量が変形適合条件を用いた解析モデルによって評価可能であることを報告している。図 1.4 に最上・是永らの提案したアンボンド PC 部材の解析モデルの模式図を示す。この研究ではまずアンボンド PC 部材の解析法を提案し、実験との比較を通してその適合性を確かめ、さらに解析法を用いたパラメトリック解析から曲げ終局耐力点算定式を提案している。当該研究で用いた解析法では梁部材を塑性要素と弾性要素に分け、危険断面は塑性要素として、それ以外は弾性要素として梁部材の曲げ変形を評価する。また塑性要素となる部分はヒンジ長さ  $0.25d$  の塑性ヒンジが形成されると仮定し、ヒンジ領域内では曲率一定として計算している。この塑性ヒンジ領域における変形量に鉄筋の抜け出し量を加えたものがアンボンド PC 鋼材の変形量と等しいとして評価している（変形の適合条件）。最上らはこの解析法により得た結果と実験結果を比較して、当解析法により実験結果の包絡線をおおむね追跡できることを確かめている。さらに最上らはこの解析モデルを用いてパラメトリック解析を行うことにより、各パラメータを変化させた場合におけるアンボンド PC 部材の挙動の特徴を整理し、その結果に回帰分析を行うことにより終局耐力点算定式を提案している。

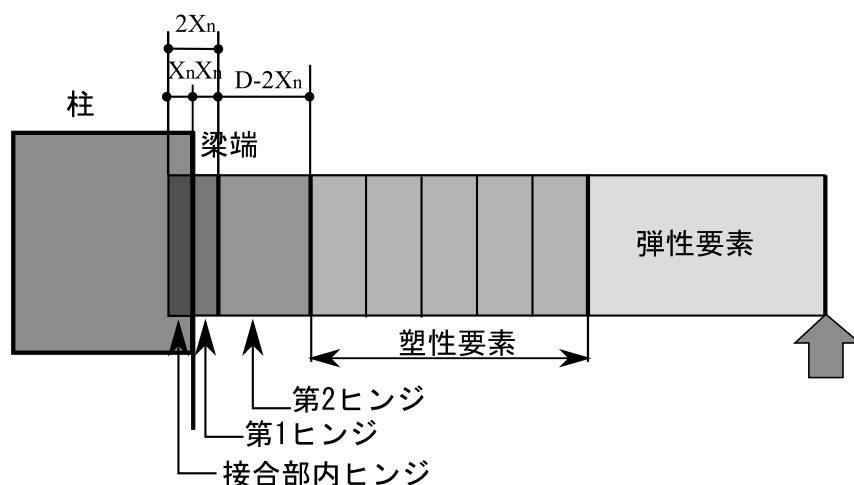


図 1.5 是永ら [1-11] による PCaPC 部材解析モデル

#### 1.2.1.2 PCaPC 部材を対象とする解析モデル

PCaPC 梁部材の構造特性を解析的に評価した研究として、是永ら [1-11] の研究を挙げることができる。この研究では、PCaPC 部材における PC 鋼材の変形量が目開きによる抜け出し量から評価可能であることを報告している。図 1.5 に是永らが提案した PCaPC 部材の解析モデルの模式図を示す。是永らはこの研究において PCaPC 梁部材の解析法を提案し、実験との比較を通してその適合性を確かめている。当研究で用いた解析法では、梁部材を 3 つの塑性要素と弾性要素に分け、最上らの解析法と同様に危険断面近傍を塑性要素として、それ以外を弾性要素として梁部材全体の変形を評価している。3 つの塑性要素において目地部の目開きと塑性ヒンジ部における曲率を評価し、それらから PC 鋼材の伸びを求めている。是永らはこの解析法から得られた結果と PCaPC 部材の実験結果を比較して、当解析法により実験結果の荷重-部材角関係の包絡線をおおむね追跡できることを確かめている。

#### 1.2.1.3 アンボンド PCaPC 部材を対象とする解析モデル

前述の通り、アンボンド PCaPC 部材においては同一断面におけるコンクリート部分と PC 鋼材の変形量が同一ではないため、平面保持の仮定を直接的に適用することはできず、さらにプレキャスト部材であるため梁端部には圧縮破壊が生じ、引張による損傷が比較的少ない。このような特徴を持つアンボンド PCaPC 部材を対象とした解析モデルとして、菅田ら [1-3] によるマクロモデルを用いた研究と越川ら [1-7] による有限要素解析モデルや前田ら [1-14] による分割要素法による解析モデルなど、連続体を用いた解析法による研究を挙げることができる。図 1.6 に菅田らが提案したアンボンド PCaPC 部材を対象としたマクロモデルの模式図を、図 1.7 に越川らが提案した本構造を対象とした有限要素解析モデルの模式図を、図 1.8 に前田らが提案した分割要素法による解析モデルの模式図を示す。

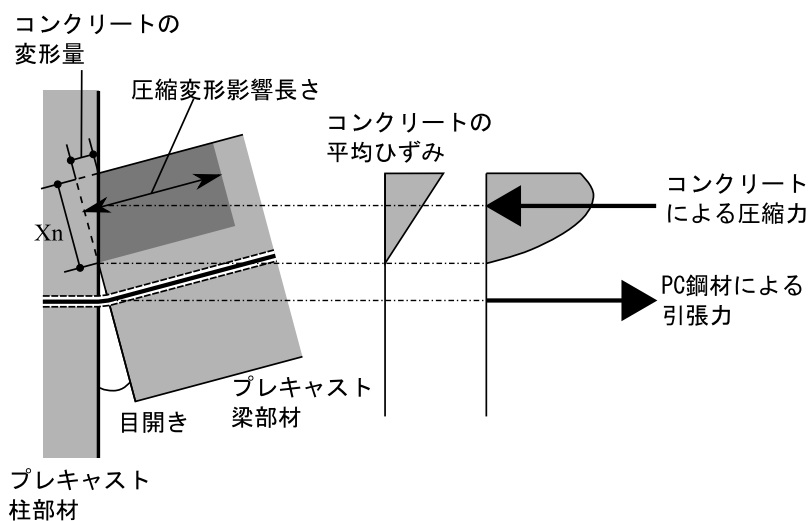


図 1.6 菅田ら [1-3] によるアンボンド PCaPC 部材を対象とするマクロモデル

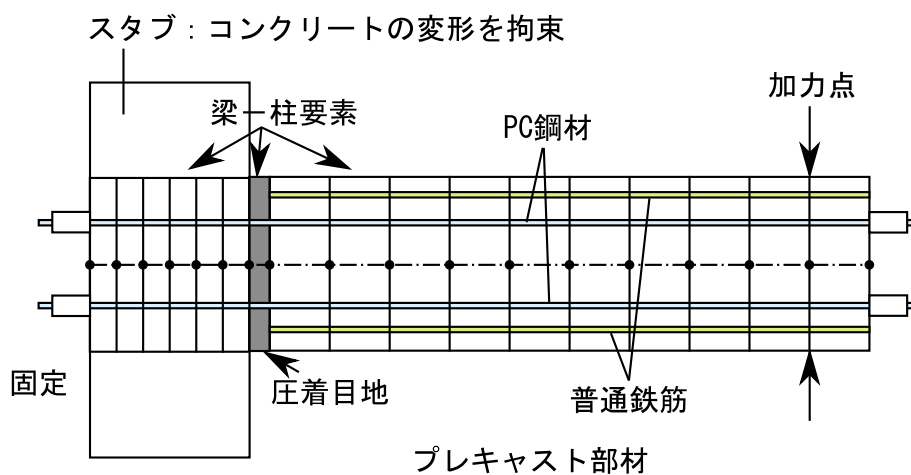


図 1.7 越川ら [1-7] によるアンボンド PCaPC 部材を対象とする有限要素モデル

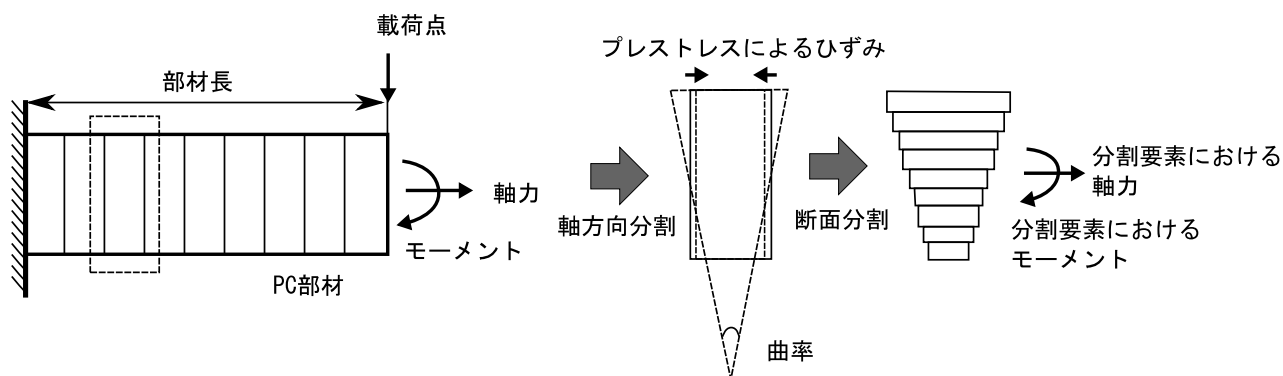


図 1.8 前田ら [1-14] による PC 部材を対象とする分割要素モデル

菅田らが提案したマクロモデルはコンクリートに生じる応力を一括して評価し、目開きを圧着接合面における回転角として解析を行うモデルである。当モデルでは  $X_n$  で表される回転中心の位置を変化させ、有限要素解析から求めた式を用いてコンクリートのひずみを決定した後、PC 鋼材とコンクリートの軸力の釣り合い条件から梁端部における曲げモーメントを求めるものであり、計算を簡易にすることで比較的扱いが簡便な解析モデルとして提案されている。菅田らはこの解析モデルによる解析結果と実験結果を比較し、実験結果をおおむね追跡できることを確かめている。さらに菅田らはこの解析モデルを用いてアンボンド PCaPC 梁部材の曲げ終局耐力点の評価式を提案しているが [1-15]、その精度についてはさらなる検討を要すること報告している。また越川らによる有限要素解析モデルでは圧着接合部近傍のモルタル目地部分に引張強度を考慮しないコンクリート材料モデルを設定し、解析を行っており、アンボンド PCaPC 部材の履歴挙動をおおむね追跡できることを報告しており、また前田らによる分割要素モデルにおいてもアンボンド PCaPC 柱部材の履歴挙動を追跡できることを報告している。

アンボンド PCaPC は前述の通り、載荷時において梁端部のみが損傷し、それ以外の部分は損傷が抑えられることが知られている。つまり本部材を履歴性状の要因はほぼ梁端部におけるコンクリートの圧縮変形と PC 鋼材の伸びに集約されることが考えられるため、解析モデルにおいても該当部分の履歴性状を追跡することにより、簡便ながらも精度のよい解析が可能になるものと考えられる。既往の解析モデルにおいて、そのような考え方とほぼ同様なモデルは菅田らのマクロモデルであると考えられるが、マクロモデルでは解析から求めた式によりコンクリート部分全体の平均ひずみと軸力を決定するため、コンクリート部分の詳細な挙動の評価については課題を残している。また越川らや前田らのような有限要素解析モデルではファイバー要素を用いるなど詳細な有限要素モデルに比べて比較的わかりやすいモデルを用いているものの、解析に時間がかかるなど簡便さに欠け、また本来連続体を対象とした解析モデルであるため、圧着接合面に生じる目開きの扱いに課題を残している。これら既往の研究を踏まえると、いまだアンボンド PCaPC 梁部材の挙動を十分な精度を持って解析できる解析モデルはいまだ少ないため、本構造の普及のためには詳細にその挙動を追跡できる解析モデルを構築することが必要であると考えられる。

## 1.2.2 曲げ終局耐力点評価に関する既往の研究

プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説 [1-16] やプレストレストコンクリート造技術基準解説及び設計計算例 [1-17] では PC 構造および PRC 構造を対象とした曲げ終局耐力の算定式が示されている。次式に当算定式を示す。

$$M_B = 1 - 0.5(q + q_s)pb d^2 f_{py} + \left\{ \frac{d_s}{d} - 0.5(q + q_s) \right\} p_s b d^2 f_{sy} \quad (1.1)$$

ただし、 $M_B$ ：終局耐力  
 $q$ ：PC 鋼材係数  
 $q_s$ ：引張鉄筋の鋼材係数  
 $p$ ：PC 鋼材鉄筋比  
 $b$ ：圧縮縁から PC 鋼材配置位置までの距離  
 $d$ ：梁せい  
 $f_{py}$ ：PC 鋼材の降伏強度  
 $d_s$ ：圧縮縁から引張側鉄筋配置位置までの距離  
 $p_s$ ：引張鉄筋の鉄筋比  
 $f_{sy}$ ：鉄筋の降伏強度

この算定式では梁端部の断

面に含まれる鉄筋および PC 鋼材が降伏したものと仮定してその曲げ終局耐力を評価するものである。しかし、前述したようにアンボンド PCaPC 部材は終局時において PC 鋼材が降伏するとは限らないため、通常の PC 構造を対象とした計算式を単純に適用することができない。そのため、同じくアンボンド PC 鋼材を用いるアンボンド PC 部材では終局耐力時のアンボンド PC 鋼材の応力や張力を求める略算式が提案されてきた。アンボンド PC 部材を対象とした代表的な地震荷重時の略算式として、実験式を提案した竹本らの研究 [1-18] の他に、解析法の概説において取り上げた最上・是永らの研究 [1-10] が挙げられる。この中でも最上・是永らの研究ではアンボンド PC 部材は PC 鋼材をアンボンドとする以外はほぼ通常の PC 部材と同様であることから、PC 部材の算定式における終局時の PC 鋼材応力の評価式を、また終局時の変形については RC 柱の降伏耐力算定式において軸力をプレストレス力に置き換えて求めた降伏変形を使って終局時の変形を評価する塑性率算定式を、それぞれパラメトリック解析を通して回帰的手法を用いて決定している。この最上・是永らの略算式を参考に菅田ら [1-15] はアンボンド PCaPC 梁部材を対象とした曲げ終局耐力算定法を提案している。曲げ終局耐力は最上・是永らと同様に終局時の PC 鋼材の応力評価式を、また終局時の変形については変数から変形を直接評価する式を、両式ともに回帰的手法を用いて提案している。しかし、菅田らの提案した式では、アンボンド PC 部材とは変形状態の異なるアンボンド PCaPC 部材において PC 鋼材の応力の評価までしか行っておらず、また終局時の変形評価式においてはパラメータと変形の関係から直接回帰分析を行っており、その精度には検討の余地があることを報告している。以上、既往の研究を概観するとアンボンド PCaPC 梁部材の曲げ終局耐力点の評価式は提案されているものの、アンボンド PC 部材の評価式のような詳細な検討を経た式はいまだ提案されていないのが現状である。

## 1.3 本研究の目的

以上概観したように、本研究で対象とするアンボンド PCaPC 梁部材が期待されているものの、その構造特性の評価については解析モデルや特性点の評価などがいまだ十分ではなく、またそれら解析モデルに関しても簡便でなおかつ精度よくその挙動を追跡できるモデルは少ないという課題が残されている。

本論文ではアンボンド PCaPC 梁部材を対象として、その挙動および構造特性を簡便でありながらも精度よく評価しうる断面解析モデルを提案し、その解析モデルを用いることによってアンボンド PCaPC 梁部材の構造特性として、スケルトンカーブ上における特性点である曲げ終局耐力点をより精度よく評価しうる算定式の提案を目的とする。具体的な内容を以下に示す。

### (1) アンボンド PCaPC 梁部材圧着接合面を対象とする断面解析モデル

柱・梁圧着接合面における目開き挙動を表現しうる解析モデルを提案する。本解析モデルでは圧着接合面に生じた目開きからコンクリート部材と PC 鋼材の変形量を推定することで、コンクリート部分の変形量と PC 鋼材の伸び量を合理的に関連付けた解析モデルであり、また断面の構成要素にファイバーモデルを用いることでコンクリートや PC 鋼材の性状を詳細に評価できる解析モデルとする。

### (2) アンボンド PCaPC 梁部材実験のシミュレーション解析

アンボンド PCaPC 部材部分架構の履歴挙動をシミュレーションすることにより、本研究で提案した断面解析モデルの妥当性を検討する。まずアンボンド PCaPC 部材ト型試験体と十字型試験体の実験結果を通して、アンボンド PCaPC 梁部材の履歴挙動の特徴について整理し、それらを対象として行った解析結果と実験結果を比較し、本解析モデルの適合性について検討する。

### (3) アンボンド PCaPC 梁部材の曲げ終局耐力点算定式

アンボンド PC 部材の履歴挙動における特性点の一つである曲げ終局耐力点について、その算定式を提案する。まず曲げ終局耐力と曲げ終局耐力時の回転角（以下、終局回転角）算定式の導出について示す。次にパラメトリック解析から両算定式の変数と係数について検討を行った後、既往の実験結果とアンボンド PC 部材やボンド PC 部材を対象とした算定式を用いた比較を行い、本算定式の適合性について検討する。

## 1.4 本研究の概要

本論文はアンボンド PCaPC 梁部材を対象とした断面解析モデルと、その妥当性の検証、および断面解析モデルを用いた曲げ終局耐力点の評価を目的として行った研究であり、全5章で構成される。以下、各章の概要を記す。

第1章では、本研究の背景について示すとともに、アンボンド PCaPC 梁部材に関連する既往の研究のうち、解析手法に関する研究と、特性点算定式を提案した研究を示すとともにその課題について言及し、本論文の目的と概要について記述している。

第2章では、本研究で用いた断面解析モデルについて、断面解析モデルの解析対象やその

適用範囲を示した後，その計算手順および手法，そして材料モデルについて記述している。

第3章では，本断面解析モデルの妥当性を示すため，2種類の試験体を用いた既往の実験結果との比較を行い，その適合性について記述している。

第4章では，まずアンボンド PCaPC 梁部材の地震荷重時における曲げ終局耐力点の評価式を導出した後，本断面解析モデル用いてパラメトリック解析を行い，統計的手法および回帰分析を用いて評価式の提案を行う。さらにそれら評価式を用いて既往の実験結果との比較を行い，本提案式の適合性について記述している。

第5章では，本研究のまとめと今後の課題について記述する。

## 参考文献

- [1-1] Cheok, G. S. and Lew, H. S. : Model Precast Concrete Beam-to-Column Connections Subject to Cyclic Loadign, PCI Journal, pp.80-92, Jul.-Aug. 1993
- [1-2] Priestley, M. J. N. and MacRae, G. A. : Seismic Tests of Precast Beam-to-Column Joint Subassemblages With Unbonded Tendons, PCI Journal, pp.64-81, Jan.-Feb. 1996
- [1-3] 菅田 昌弘, 中塚 侑: アンボンドPC 圧着工法によるエネルギー吸収型高復元性部材の荷重－変形関係に関する実験的検討, 日本建築学会構造系論文集, No.584, pp153-159, 2004.10
- [1-4] 松茂良 諒, 越川 武晃, 菊地 優: アンボンドPCaPC 梁部材を対象とした断面解析モデルの適用性に関する一検討, 構造工学論文集, Vol.59B, pp73-80, 2013.3
- [1-5] 西村 知明, 谷 昌典, 西山 峰広: プレストレストコンクリート圧着骨組の損傷評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.3, pp511-516, 2008
- [1-6] 岸田 慎司, 北山 和宏, 森山 健作, 丸田 誠: 圧着接合されたプレストレスト・コンクリート十字型部分架構の復元力特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp421-426, 2002
- [1-7] 越川 武晃, 齋藤 隆典, 上田 正生, 菊地 優: 緊張鋼材の付着すべりを考慮した圧着型 PCaPC 梁－柱部材の履歴挙動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp37-42, 2004
- [1-8] 岸本 一蔵, 大野 義照: 断面解析を用いたプレストレストコンクリート梁部材のエネルギー吸収能に関する一考察, コンクリート工学論文集, Vol24, No.2, pp.643-648, 2002.1
- [1-9] 坂 静雄, 六車 熙: 付着のないPC 梁の曲げ破壊耐力, 日本建築学会論文報告集, Vol.60, pp.641-644, 1958.10
- [1-10] 最上 達雄, 是永 健好: 逆対象曲げを受けるアンボンドPC 梁のモーメント－変形関係に関するパラメトリック解析 アンボンドPC 部材の構造特性に関する研究 (2), 日本建築学会構造系論文報告集, No.428, pp79-88, 1991.10
- [1-11] 是永 健好, 小林 淳, 桑田由加子: 終局時にPC 鋼材が降伏しないプレキャストPC 梁の曲げ変形解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, pp783-788, 1993
- [1-12] 小林 正仁, 越川 武晃, 上田 正生, 菊地 優: アンボンドPC 鋼材を用いたPCa 圧着梁部材の履歴特性モデルに関する研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.80, pp1185-1190, 2007.7
- [1-13] 最上 達雄, 是永 健好: 逆対象曲げを受けるアンボンドPC 梁の耐力－変形評価 アンボンドPC 部材の構造特性に関する研究 (1), 日本建築学会構造系論文報告集, No.411, pp29-38, 1990.5
- [1-14] 前田 博司, 岸本 一蔵, 西山 峰広: PC 鋼材の付着すべりを考慮したプレキャスト

- ト PC 部材の履歴挙動の解析法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.2, pp511-516, 2004
- [1-15] 菅田 昌弘, 中塚 侑: アンボンド PC 圧着エネルギー吸収型高復元性部材のフラッグ型履歴モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.598, pp133-140, 2005.12
- [1-16] 日本建築学会 編: プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説 第4版, 1998.11
- [1-17] アンボンド PC 部材の構造性能解明とその有効利用に関する研究委員会: アンボンドプレストレストコンクリートの建築物の設計 材料, 力学性能, 耐久性・耐火性から設計例まで, プレストレストコンクリート工学会, 2012.10
- [1-18] 竹本 靖: アンボンド PRC 部材の曲げ終局時テンドン応力について, 大林組技術研究所報, Vol.28, pp49-54, 1984

## 第2章

# アンボンド PCaPC 梁部材圧着接合面 を対象とする断面解析モデル

### 2.1 はじめに

PCaPC 構造においてアンボンド PC 鋼材を用いる大きなメリットは、圧着力の減退につながる PC 鋼材の降伏を遅らせることができ、かなりの大変形に至るまで PC 構造特有の高い原点指向性を保持できる点と、コンクリートと PC 鋼材間の付着によるひび割れの分散効果が働かないことから、部材の損傷を目開きが生じる圧着接合面のごく近傍に限定できる点にある。これらの特徴は、アンボンド PCaPC 構造が持つ損傷制御構造としての可能性を支える基礎となるものであり、その耐震性能を評価するためには、目開きやアンボンド状態がもたらす特徴的な非線形挙動を履歴性状も含めて捉えることが可能な解析手法が必要となる。

第1章で述べたようにアンボンド PCaPC 梁部材の履歴挙動を評価するためにはコンクリート部材の変形と PC 鋼材の変形を合理的に関連付ける必要がある。著者らは菅田ら [2-1] と同様な考え方にに基づき、アンボンド PCaPC 片持ち梁を対象として圧着接合面の目開き挙動を合理的に反映させ、目開きによる変形の適合条件と圧着接合面での力の釣り合い条件に基づいて梁部材の荷重－変形関係を推定し、さらに梁部材の履歴挙動をも詳細に表現し得るように、圧着接合面にファイバー断面要素を用いた断面解析モデルを提案する。

地震荷重作用時のアンボンド PCaPC 梁における圧着接合面での力学状態は、大きく捉えるとコンクリートが圧縮力を負担し、アンボンド PC 鋼材が引張力を負担するシンプルな状態と考えることができる。断面解析モデルはこのような力学状態を対象として構築したものである。

さらに本解析モデルでは変形時に生じる目開きがコンクリートおよび PC 鋼材の各断面要

素の変形量および伸び量に等しいと仮定し、それらからひずみ、応力、軸力を求め、コンクリート部分の圧縮力および PC 鋼材の引張力を求める。これら二つの軸力の釣り合い条件が収束するまで繰り返し計算を行った後、モーメントを得るという解析モデルである。

また実施工では PC 鋼材は多スパンにわたって架設されることが多いため、PC 鋼材の変形の仕方は十字型試験体のような変形状態とほぼ同様な状態になると考えられるが、鋼材破断時に部材落下を防止するため、梁部材の中央でボンド区間を設ける場合があり、そのような場合においては T 型試験体のような変形状態とほぼ同様になることが考えられるため、これら両方の変形状態について考慮できるモデルを構築することは重要である。そのため、本解析モデルでは、PC 鋼材要素の伸び量について、T 型試験体のような圧着接合面が一つのみ場合と十字型試験体のような柱両側に圧着接合面が存在する場合、両方の挙動を考慮したモデルを示す。

本章ではまずアンボンド PCaPC 梁部材を対象とした断面解析モデルの概要について記述する。次にコンクリート断面要素および PC 鋼材断面要素について目開きと変形量の関係と、T 型試験体を対象にした場合と十字型試験体を対象にした場合の PC 鋼材の伸び量の違いについて解説する。次に本部材の履歴性状の評価において大きく影響すると考えられるコンクリートおよび PC 鋼材のひずみの評価範囲について述べた後、応力や軸力など構成手法およびその計算手順について記述する。さらにアンボンド PCaPC 梁部材の履歴性能をより高精度に評価するために設定したコンクリートおよび PC 鋼材各材料モデルについて記述している。

## 2.2 概要

本節では断面解析モデルの概要および計算手順について概説する。図 2.1 に本解析モデルのフロー図を示す。この断面解析モデルは、圧着接合面の目開き挙動を回転角  $\theta$  と軸方向変位  $u$  によって表現し、そこからコンクリートと PC 鋼材各要素の変形量、ひずみ、応力を順に求め、コンクリートによる圧縮力  $C_c$  と PC 鋼材による引張力  $T_p$  の釣り合いが取れるまで軸方向変位  $u$  を収束させるよう計算を行った後、釣り合い状態での曲げモーメント  $M$ 、載荷点における荷重  $P$ 、部材角  $R$  を求めるという手順で解析を行うものである。本解析法では増分法に基づいて、変形量から荷重、部材角を求めるまでを 1 ステップとし、ステップ終了後に回転角に増分を与えて次ステップの計算を行う。

また図 2.2 に本解析モデルが対象とする T 型試験体のような一つの圧着接合面を持つ部分架構(以下、T 型)の柱・梁圧着接合面近傍を対象とした断面解析モデルの模式図を、図 2.3 に十字型試験体のような二つの圧着接合面を持つ部分架構(以下、十字型)の柱・梁圧着接合面近傍を対象とした断面解析モデルの模式図を示す。T 型および十字型の断面解析モデルはともに片側の圧着接合面近傍における梁部材端部の履歴挙動を表現するものである。圧着接合面における軸力は PC 鋼材による引張力とコンクリート部分による圧縮力のシンプルな釣り合い状態にあると仮定し、T 型では片側での PC 鋼材の伸び量のみを考慮し、十字型では柱両側での PC 鋼材の伸び量を考慮することで両方の履歴挙動を表現する。

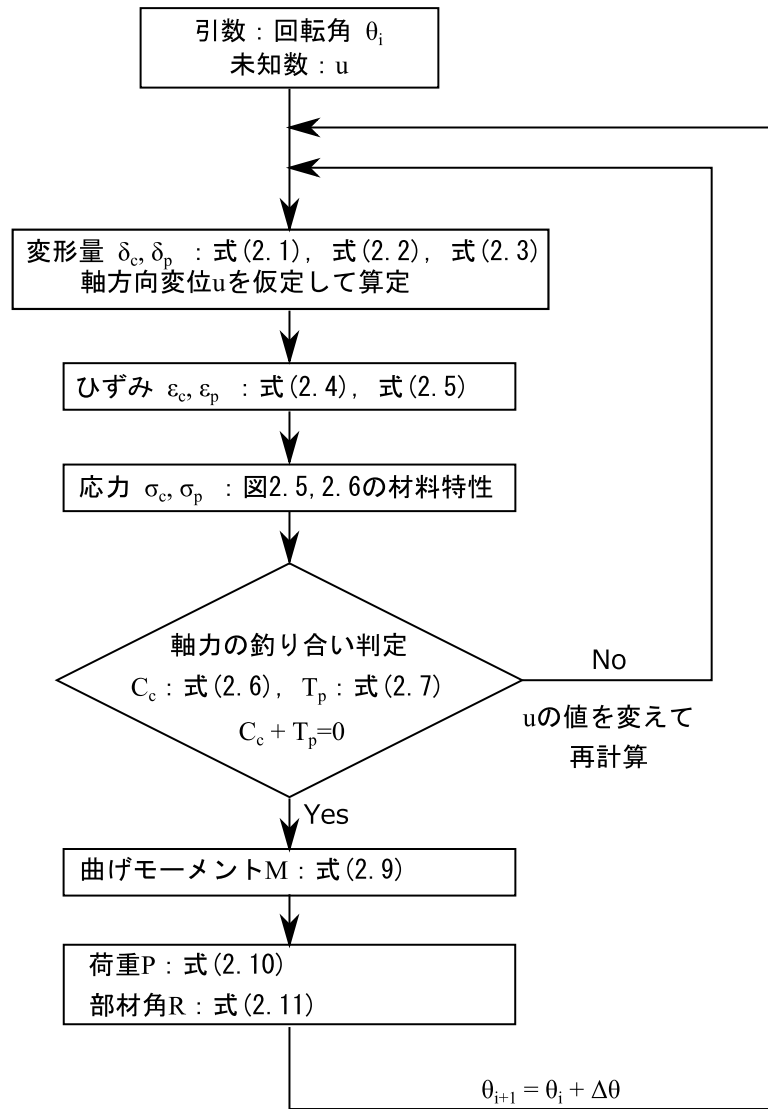


図 2.1 解析フロー

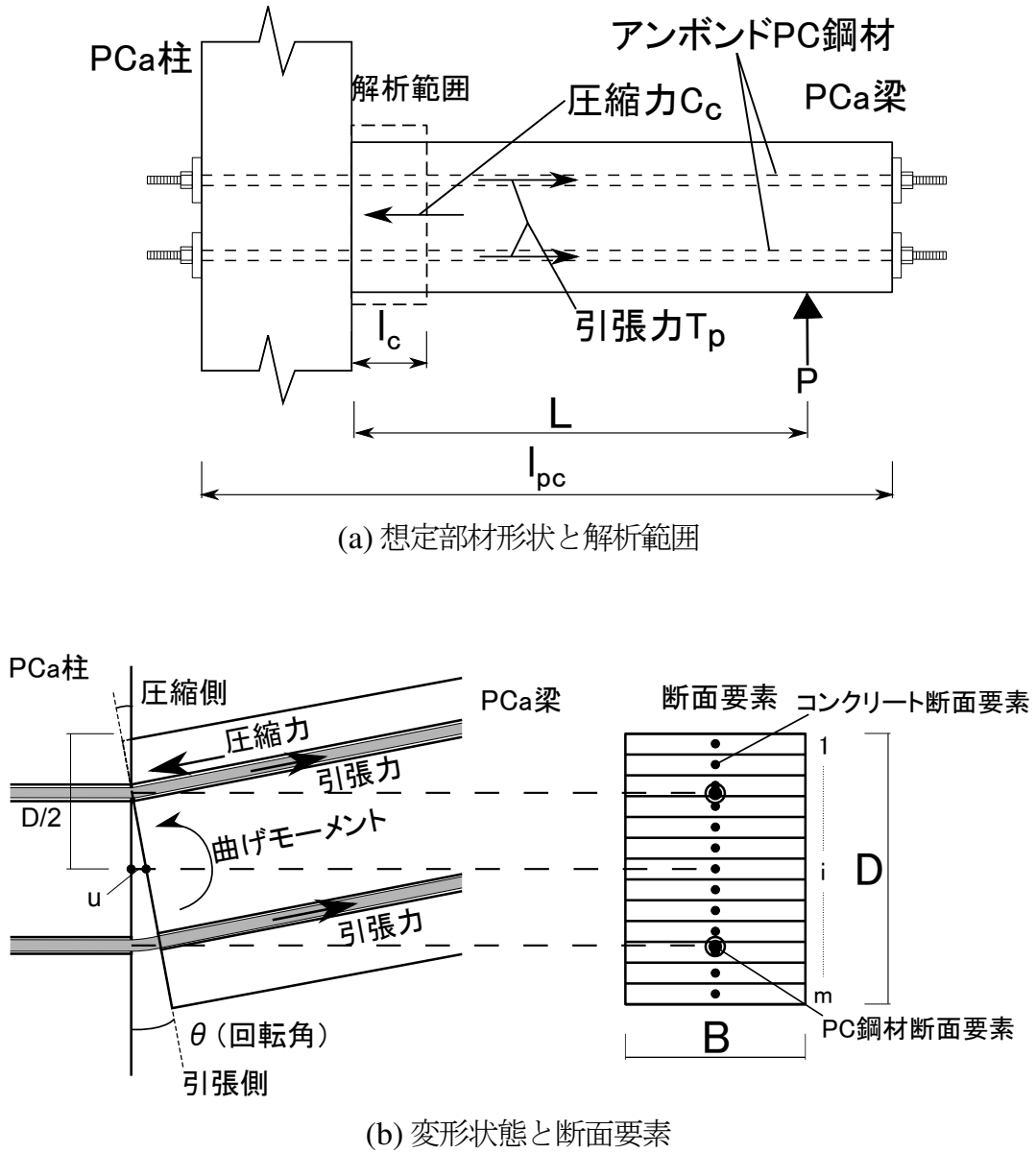
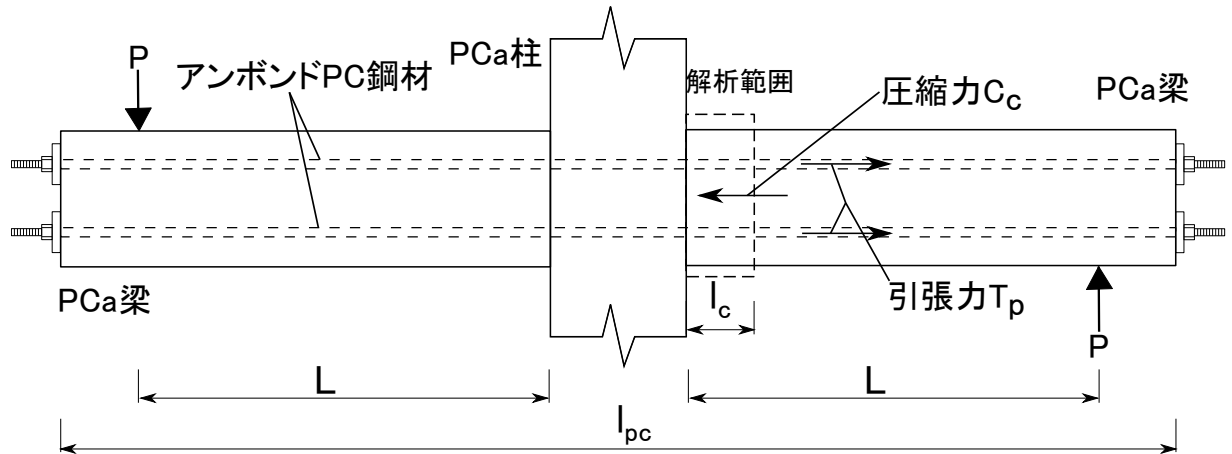
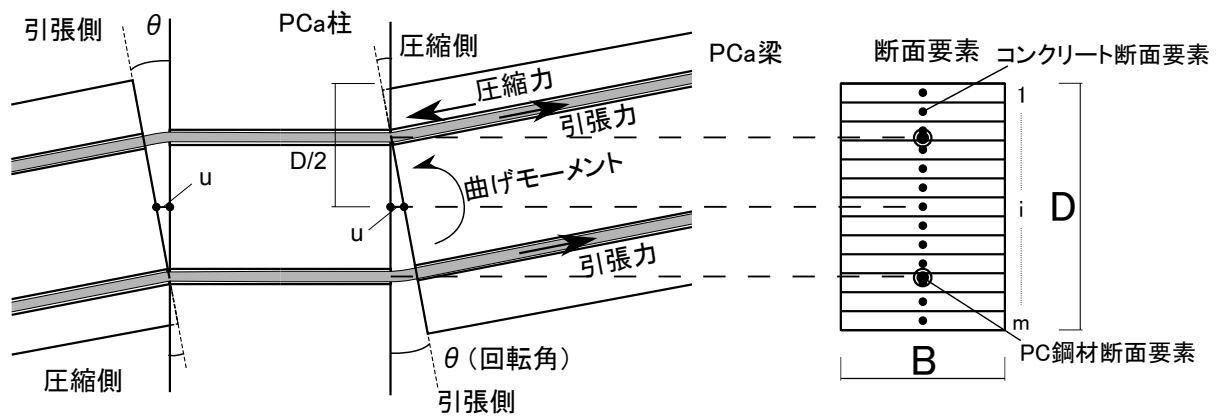


図 2.2 ト型試験体を想定した断面解析モデル



(a) 想定部材形状と解析範囲



(b) 変形状態と断面要素

図 2.3 十字型試験体を想定した断面解析モデル

## 2.3 基本仮定事項

アンボンド PCaPC 梁部材を対象とした断面解析モデルにおける基本的な仮定事項は以下に示すとおりである。

1. 圧着接合面に目開きが生じた状態を回転角  $\theta$  として表す。
2. 圧着接合面は平面を保持したまま回転および軸方向に移動するものと仮定する
3. 対象範囲となる断面にはファイバー要素を用いるものとし、図に示すように全  $n$  層のコンクリート層と、いくつかのコンクリート層内に配置される全  $m$  層の PC 鋼材層によって構成される。
4. コンクリートと PC 鋼材の間にはアンボンドのため付着が生じないものとし、さらに摩擦についても考慮しないものとする。
5. 各コンクリート層、各 PC 鋼材層の材料性状は、各層の中央位置の値で評価し、それぞれの層内では一定の性状を有するものとする。
6. 各要素の変形量については、コンクリート断面要素の変形量は圧着接合面の回転・移動による断面要素位置での変位が圧縮となる場合は縮み、引張となる場合は目開きが生じているものとする。
7. 梁部材全体の曲げ変形は PC 鋼材の伸び量に影響しないものとする。
8. 柱部材の変形による影響は考慮しないものとする。

## 2.4 断面解析モデルにおける変形状態の評価

### 2.4.1 各要素における変位評価

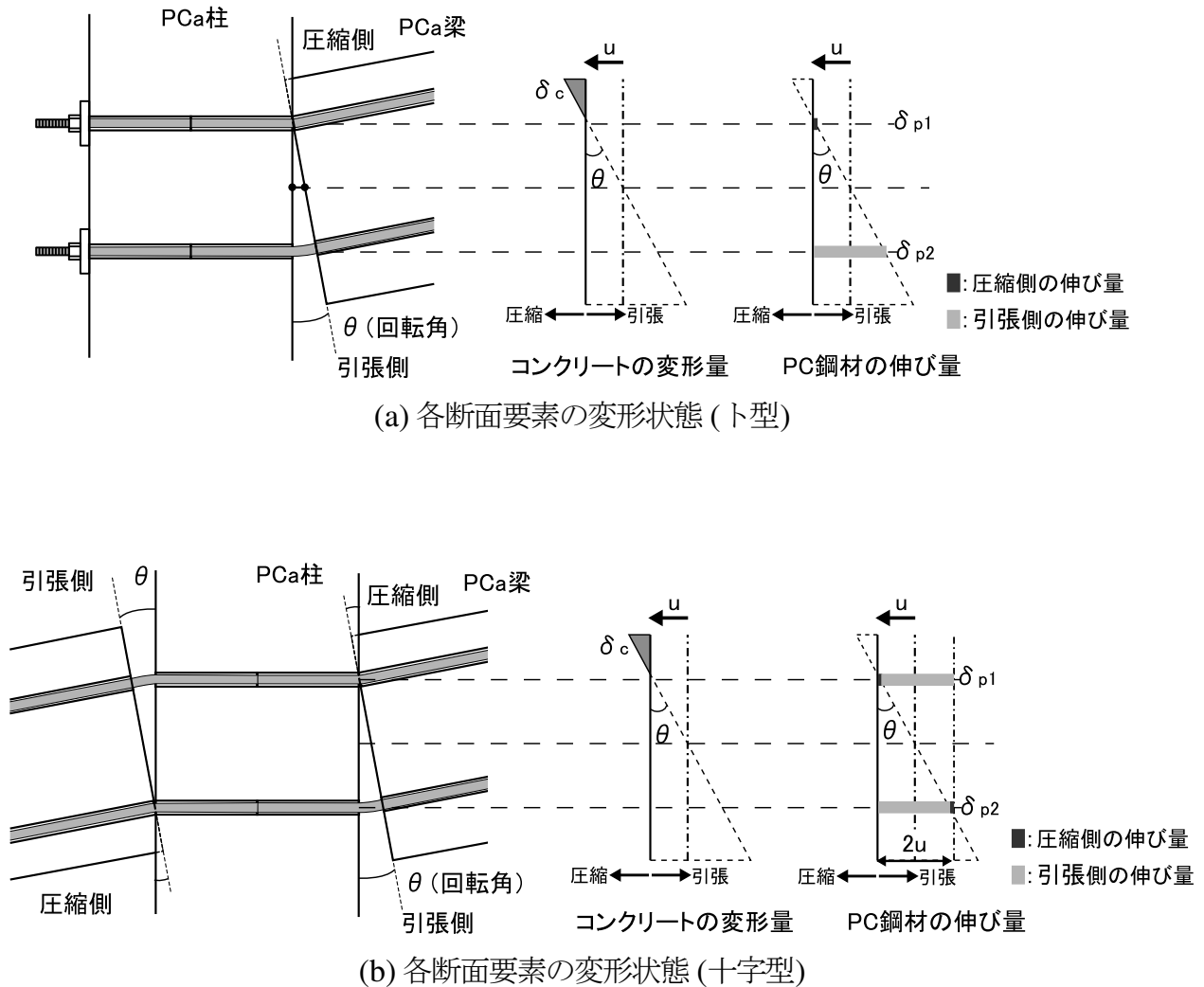


図 2.4 断面解析モデル

図 2.4 に圧着接合面に目開きが生じた状態の本解析モデル模式図を示す。また模式図はト型を対象にした場合と十字型を対象にした場合の二つの場合について示している。本解析モデルでは圧着接合面に目開きが生じた状態を梁断面の回転角  $\theta$  により表現し、コンクリート断面要素については各要素の断面中心からの位置  $h_{ci}$  による断面要素の回転変位  $h_{ci} \cdot \theta$  に各要素一様の軸方向変位  $u$  を加えたものをコンクリート変形量  $\delta_{ci}$  とする。

$$\delta_{ci} = h_{ci} \cdot \theta + u \quad (2.1)$$

ただし、 $h_{ci}$  : 梁断面中央からのコンクリート要素  $i$  までの距離

PC 鋼材要素の伸び量  $\delta_{pi}$  については、ト型の場合は式 (2.2) のように、断面の PC 鋼材位置における柱片側の圧着接合面における目開き量から求める。一方、十字型では柱両側の圧着接合面が逆対称に回転・移動し、PC 鋼材が上下対称に配置されてい 1.1.1 の状態を

考えると、ト型の場合の伸び量を上下段分足し合わせた形となり、式(2.3)のようになる。

$$\text{ト型：} \quad \delta_{pi} = h_{pi} \cdot \theta + u \quad (2.2)$$

$$\text{十字型：} \quad \delta_{pi} = 2u \quad (2.3)$$

ただし、 $h_{pi}$ ：梁断面中央から PC 鋼材各要素  $i$  までの距離

## 2.4.2 各要素におけるひずみ評価

コンクリートのひずみを求める際には、菅田らのマクロモデルと同様に一定の圧縮破壊領域長さ  $l_c$  にコンクリートのひずみ  $\epsilon_{ci}$  が一様分布するものと仮定して、式(2.4)のようにコンクリート断面の変形量  $\delta_{ci}$  を  $l_c$  で除し、それらに導入プレストレス力によるひずみ  $\epsilon_{c0}$  を加えることで  $\epsilon_{ci}$  を求める。また、PC 鋼材のひずみ  $\epsilon_p$  はアンボンド状態であることを考慮して、式(2.5)のように PC 鋼材の全長  $l_p$  を用いて PC 鋼材の伸び量  $\delta_{pi}$  を除したものと導入プレストレス力によるひずみ  $\epsilon_{p0}$  の和として求める。

$$\epsilon_{ci} = \delta_{ci}/l_c + \epsilon_{c0} \quad (2.4)$$

$$\epsilon_{pi} = \delta_{pi}/l_p + \epsilon_{p0} \quad (2.5)$$

ここで、

$$\epsilon_{c0} = \frac{-P_e}{B \cdot D \cdot E_c}, \quad \epsilon_{p0} = \frac{P_e}{A_p \cdot E_p}$$

ただし、 $P_e$ ：導入プレストレス力

$B$ ：梁幅

$D$ ：梁せい

$E_c$ ：コンクリートのヤング率

$A_p$ ：PC 鋼材の全断面積

$E_p$ ：PC 鋼材のヤング率

## 2.4.3 圧着接合面に働く軸力による釣り合い条件

材料モデルを用いてひずみから応力を求めたのち、各コンクリート断面要素の応力  $\sigma_{ci}$  および各 PC 鋼材の応力  $\sigma_{pi}$  から式(2.6)、式(2.7)のようにコンクリートの圧縮力  $C_c$  と PC 鋼材の引張力  $T_p$  を求め、式(2.8)のように圧縮力と引張力が釣り合いが取れるまで軸方向変位  $u$  を変化させて繰返し計算を行う。

$$C_c = \sum_{i=1}^m \sigma_{ci} \cdot B \cdot \frac{D}{m} \quad (2.6)$$

$$T_p = \sum_{i=1}^2 \sigma_{pi} \cdot a_{pi} \quad (2.7)$$

$$C_c + T_p = 0 \quad (2.8)$$

ここで、 $m$  : コンクリート断面要素の数

$a_{pi}$  : 1 本あたりの PC 鋼材断面積

#### 2.4.4 解析対象断面における曲げモーメント評価

圧縮力と引張力の釣り合いが取れたのち、式 (2.9) のようにそれぞれの要素の応力から曲げモーメント  $M$  を得る。

$$M = \sum_{i=1}^m \sigma_{ci} \cdot B \cdot \frac{D}{m} \cdot h_{ci} + \sum_{i=1}^2 \sigma_{pi} \cdot a_{pi} \cdot h_{pi} \quad (2.9)$$

#### 2.4.5 載荷点における荷重と部材角の評価

載荷点における荷重  $P$  は式 (2.10) に示すように曲げモーメント  $M$  を載荷点距離  $L$  で除したものとし、部材角  $R$  は式 (2.11) に示すように圧着接合部の回転角  $\theta$  と曲げ変形  $R_b$  の和として求める。

$$P = \frac{M}{L} \quad (2.10)$$

$$R = \theta + R_b = \theta + \frac{ML}{3EI} \quad (2.11)$$

ただし、 $EI$  : PCa 梁の曲げ剛性

## 2.5 材料モデル

### 2.5.1 破壊力学に基づいたコンクリートの材料モデル

図 2.5 に本解析で用いるコンクリートおよび PC 鋼材の材料モデル，応力-ひずみ関係を示す。まず単調載荷時の経路として，原点から圧縮強度  $f'_c$  に至るまでは放物線による経路とした。圧縮強度以降の応力遁減領域については圧縮強度点と分担応力が 0 となる終局ひずみ  $\epsilon_{cu}$  点を結ぶ直線軟化経路で仮定する。この終局ひずみ  $\epsilon_{cu}$  の値，すなわち図中の色塗り部分の面積は破壊力学の概念に基づいて圧縮破壊エネルギー  $G_{fc}$  と 2.4 節において設定したコンクリートのひずみが当分布する領域である圧縮破壊領域長さ  $l_c$ ，さらにコンクリートの圧縮強度  $f'_c$  によって次式から決定する。

$$\epsilon_{cu} = \frac{2f'_c}{E_c} + \frac{2G_{fc}}{f'_c \cdot l_c} \quad (2.12)$$

除荷再載荷時の履歴経路については既往の研究 [2-2]・[2-3] に基づいてコモンポイントを設定した履歴経路を用いるものとした。この履歴経路は除荷時は放物線上を通過して除荷され，載荷時は除荷曲線上のコモンポイントを通る直線上を移動し，軟化経路に戻る。また梁部材は圧着接合面において離間変形が生じるため引張時の応力を考慮しないものとした。

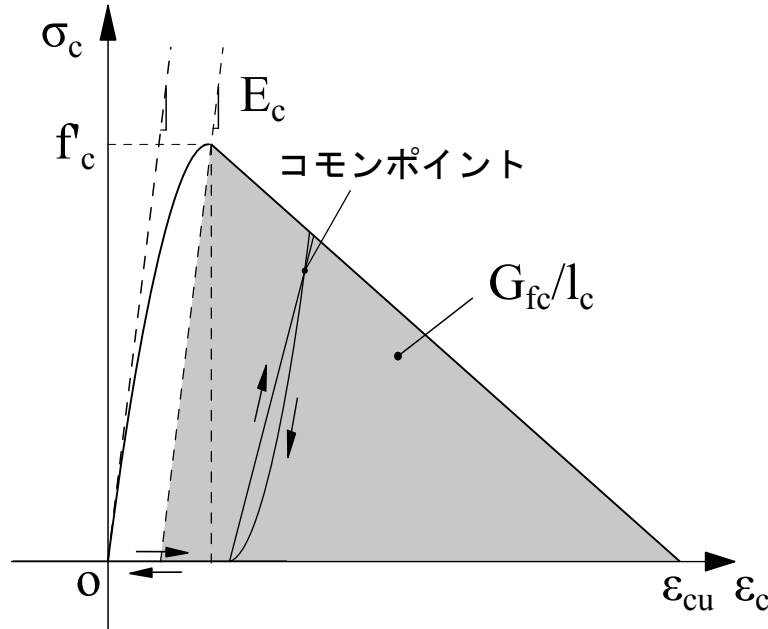


図 2.5 コンクリートの材料モデル

## 2.5.2 PC 鋼材の材料モデル

図 2.6 に示した PC 鋼材の材料特性については、一般的に用いられるバイリニア型の材料特性ではなく、より実際の PC 鋼材の挙動に近い漸近線の履歴挙動となる menegotto-pinto 式に基づいた包絡線および履歴経路を持つモデルを設定した [2-4]。この材料モデルでは PC 鋼材の挙動をより精度よく再現するため、単調載荷時および除荷、再載荷時の履歴曲線の形状をパラメータ  $R$  を用いて設定する。本材料モデルの履歴曲線はこのパラメータ  $R$  を用いて次式から決定される。またパラメータ  $R$  に関しては平尾らの研究 [2-5] を参考にその値を決定した。

$$\tilde{\sigma} = R_s \tilde{\varepsilon} + \frac{(1 - R_s) \tilde{\varepsilon}}{(1 + \tilde{\varepsilon}^R)^{1/R}} \quad (2.13)$$

ここで、

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r} \quad (2.14)$$

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma_s - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r} \quad (2.15)$$

$$R_s = \frac{E_{s2}}{E_s} \quad (2.16)$$

ただし、 $R_s$ ：ひずみ効果係数

$E_s$ ：PC 鋼材の初期弾性係数

$E_{s2}$ ：PC 鋼材の降伏後の弾性係数

$\varepsilon_s, \sigma_s$ ：PC 鋼材のひずみと応力

$\varepsilon_r, \sigma_r$ ：載荷反転点のひずみと応力

$\varepsilon_0, \sigma_0$ ：漸近線の交点

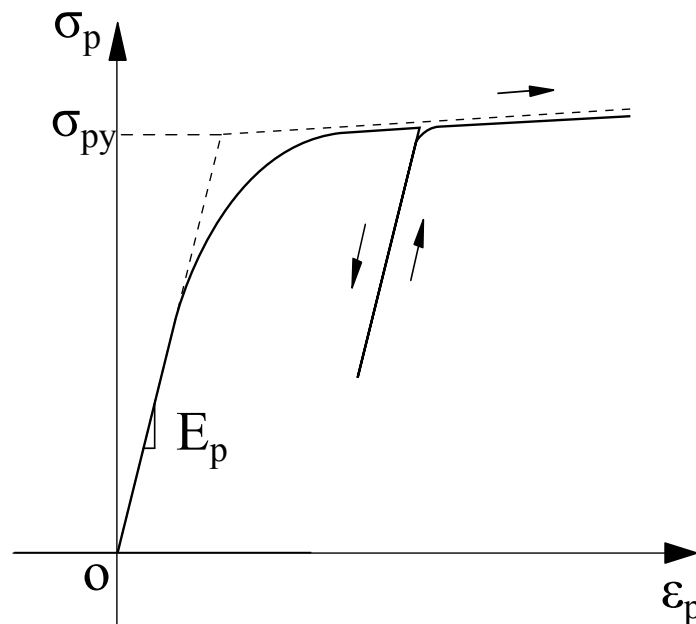


図 2.6 PC 鋼材の材料モデル

## 2.6 まとめ

本章ではアンボンド PCaPC 梁部材を対象とした断面解析モデルについてその詳細を記述した。本章の概略を以下に列挙して記す。

1. 本解析モデルにおける解析対象は柱・梁接合部の圧着接合面近傍における梁部材であることとともに圧着接合面が一つの場合と柱両側にある場合の二つの場合を考慮していること、また当解析モデルにおいて仮定条件を示した。続けて、コンクリート、PC 鋼材各断面要素の変形量から曲げモーメントまでの計算法を順に解説し、さらに両断面要素の材料モデル、その応力-ひずみ関係について示した。
2. 本解析モデルにおけるコンクリート部材と PC 鋼材の伸び量がほぼ同様な形式で表現できることと、十字型とト型を対象にした場合で PC 鋼材の伸び量の評価に違いが生じることを示した。
3. 本解析モデルにおけるコンクリート部材と PC 鋼材のひずみは、コンクリート部分については圧縮破壊領域  $l_c$  を仮定し、PC 鋼材についてはアンボンドのため PC 鋼材全体にひずみが等分布すると仮定して評価することを示した。

## 参考文献

- [2-1] 菅田 昌弘, 中塚 侑 : アンボンド PC 圧着エネルギー吸収型高復元性部材のマクロモデルによる荷重－変形関係の推定, 日本建築学会構造系論文集, No.590, pp103-110, 2005.4
- [2-2] Karsan, I. D. and Jirssa, J. O. : Behavior of Concrete Under Compressive Loadings, Proceedings of the American Society of Civil Engineers Journal of the Structural Division, Vol.95, No.ST12, pp2543-2563, 1969
- [2-3] 長沼 一洋, 大久保 雅章 : 繰返し応力化における鉄筋コンクリート版の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, No.536, pp135-142, 2000.10
- [2-4] 堺 淳一, 川島 一彦 : 部分的な除荷・再載荷を含む履歴を表す修正 Menegotto-Pinto モデルの提案, 土木学会論文集, No.738, pp159-169, 2003.7
- [2-5] 平尾 正, 中塚 侑, 溝口 茂 : PC 鋼材の繰返し応力－ひずみ関係モデル, 日本建築学会構造系論文集, No.550, pp7-14, 2001.12

## 第3章

# アンボンド PCaPC 梁部材実験のシミュレーション解析

### 3.1 はじめに

本章では2章において概説した断面解析モデルによる解析を行い、その解析結果と実験結果の比較を通してその妥当性を検討する。

本断面解析モデルは圧着接合面における軸力の釣り合いをコンクリートが負担する圧縮力と PC 鋼材が負担する引張力のシンプルな関係として評価することから、コンクリートや PC 鋼材の負担分の評価方法が全体の解析結果に大きく影響するモデルである。本解析モデルにおいて精度のよい結果を得るためには、アンボンド PC 鋼材については伸び量が PC 鋼材の位置での目開き量と等しいと仮定し、PC 鋼材全体にひずみが等分布するものとして引張力を、またコンクリートについては圧着接合面から一定の範囲内に損傷が集中すると仮定して、破壊力学に基づいた材料特性から圧縮力を求めており、これらの評価方法による適合性について検討する必要がある。そこで本章では2章において解説したアンボンド PCaPC 梁部材を対象とした断面解析モデルの妥当性について PC 鋼材の変形が実際の架構における変形とほぼ同様になると考えられる十字型試験体の実験結果と、その部材角が十字型試験体のものと同程度であっても PC 鋼材の応力状態は異なるト型試験体を対象に、実験結果の複数の点からの比較を通して、本解析モデルの適合性について詳細な検討を行う。

本章ではまず比較対象となる十字型試験体およびト型試験体についてその実験結果の特徴および両試験体における挙動の違いについて概説する。次に圧縮力の評価において重要となるコンクリートの圧縮挙動に関わるパラメータ、圧縮破壊エネルギー  $G_{fc}$  と圧縮破壊領域長さ  $l_c$  の意味と影響について明示する。そしてそのパラメトリック解析結果と両試験

体の実験結果の荷重一部材角関係を比較することにより、両パラメータによる影響の評価や適合性の検討を行う。このパラメトリック解析において実験結果を最もよく表現するパラメータを用いた解析結果と実験結果について荷重一部材角関係、PC 鋼材引張合力一部材角関係、目開き量、等価粘性減衰定数の複数の項目について比較・検討を行う。

## 3.2 アンボンド PCaPC 梁部材における履歴挙動の特徴

### 3.2.1 解析対象としたアンボンド PCaPC 部分架構実験

シミュレーション解析の対象とした繰り返し載荷実験の概要について示す。本実験は2008年に山下らによって行われたト型、十字型試験体による正負交番載荷実験 [3-1] であり、実験に使用した試験体について図 3.1、図 3.2 に各試験体詳細を、表 3.1 と表 3.2 にコンクリートおよび PC 鋼材の材料特性を示す。図に示すようにト型試験体は上下に二段配置されたアンボンドの PC 鋼材の緊張力により梁部材をスチールバンドを付加した柱片側にのみ圧着接合したものであり、十字型試験体は柱両側に梁部材を圧着接合したものである。なお、柱のスチールバンドについては山下らの実験結果 [3-2] によると、スチールバンドの有無が梁自体の履歴性状にはほとんど影響を及ぼさないことが明らかにされている。柱部材と梁部材の間にはモルタル目地を介しており、ト型および十字型試験体の柱部材、梁部材、PC 鋼材などの寸法や配筋は共通で、各試験体へのプレストレスも両試験体ともに PC 鋼材 1 本あたり規格降伏耐力の 7 割となる  $270kN$ 、コンクリート梁断面に  $4N/mm^2$  となるように設計されている。載荷サイクルはともに、部材角で  $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.2\%$  を 1 サイクルずつ、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 2.0\%$ 、 $\pm 3.0\%$  をそれぞれ 2 サイクルずつ、 $\pm 4.0\%$ 、 $\pm 5.0\%$  を 1 サイクルずつである。なお、柱に軸力は導入されていない。載荷時には、載荷点における荷重および変位、ロードセルによる PC 鋼材の緊張力、また変位計を用いて圧着接合面における目開きを計測している。載荷方法に関しては、両試験体ともに梁が水平になるように、柱部材を振れ止めである PC 鋼材によって図に示す支持点を外部から固定した後、鉛直方向に載荷が行われた。そのせん断スパン比はト型試験体、十字型試験体共に 3 であり、また十字型試験体では柱を軸として逆対称の載荷が行われた。

表 3.1 コンクリートの材料特性

|                     |       |
|---------------------|-------|
| 圧縮強度 ( $N/mm^2$ )   | 56.1  |
| 引張割裂強度 ( $N/mm^2$ ) | 3.4   |
| ヤング係数 ( $N/mm^2$ )  | 28500 |

表 3.2 PC 鋼材の材料特性

|                     |      |
|---------------------|------|
| 降伏強度 ( $N/mm^2$ )   | 1093 |
| 規格降伏強度 ( $N/mm^2$ ) | 930  |
| 引張強度 ( $N/mm^2$ )   | 1224 |
| 引張強度時の伸び (%)        | 10   |
| 導入力レベル ( $N/mm^2$ ) | 0.7  |

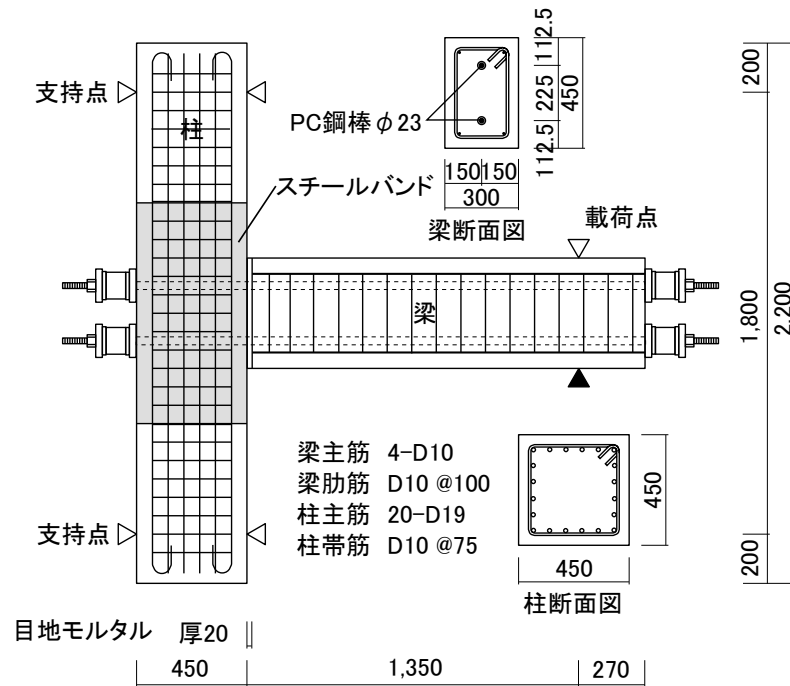


図 3.1 ト型試験体詳細

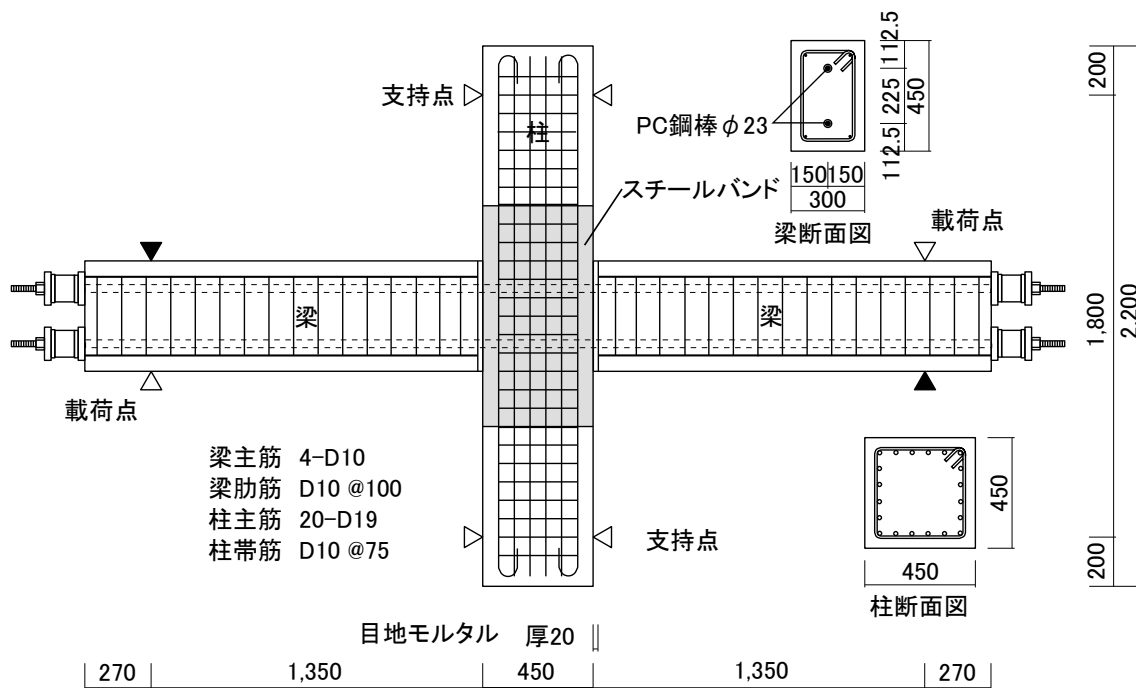


図 3.2 十字型試験体詳細

## 3.2.2 アンボンド PCaPC 部分架構試験体の実験結果

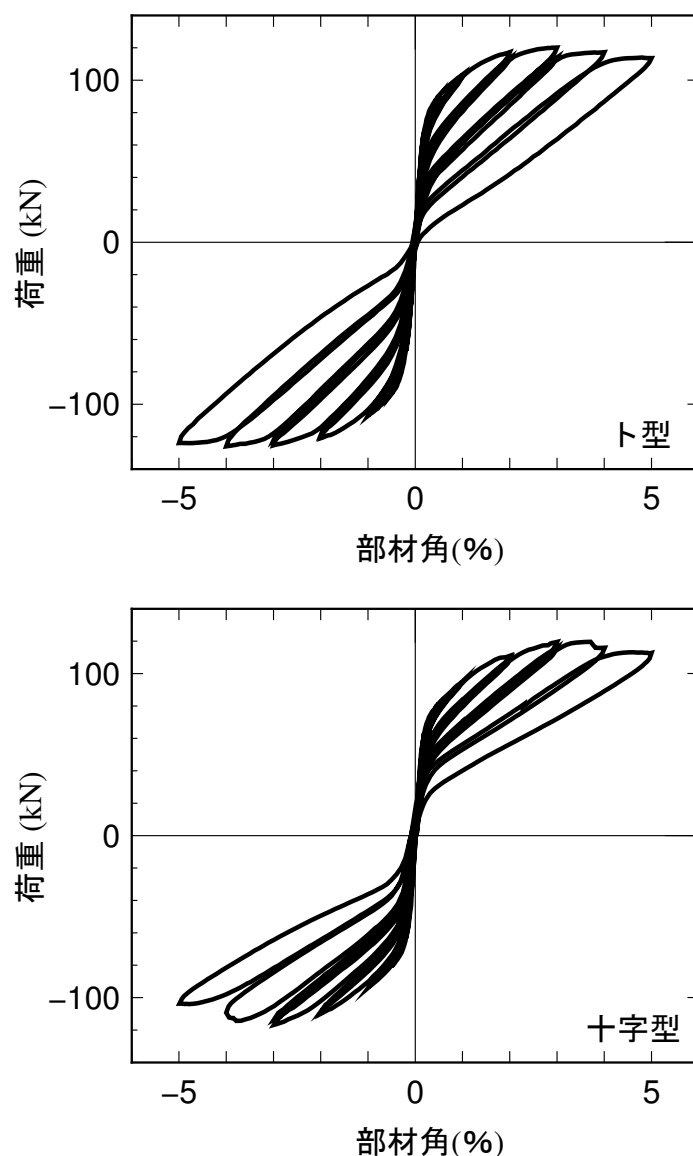


図 3.3 荷重－部材角関係

図 3.3 に荷重－部材角関係、図 3.4 に上下二段分の PC 鋼材張力の合計、すなわち PC 鋼材引張合力と部材角の関係、また図 3.5 に上下段の PC 鋼材それぞれの応力と部材角の関係を示している。荷重－部材角関係を見ると、ト型試験体、十字型試験体ともに部材角 1 %のサイクルまではほとんど履歴ループのふくらみがなく、弾性とほぼ同様な状態を維持していることが伺える。また履歴ループのふくらみが確認でき、弾性域は脱していると考えられる部材角 2 %以降のサイクルにおいて、部材角 5 %の変形を経験した後も除荷後には残留変形がほとんど残っていないことから、高い原点指向性を示していることがわかる。またト型および十字型試験体の両方の結果において最大耐力は  $120\text{kN}/\text{mm}^2$  程度と同様な値となっているが、除荷時の

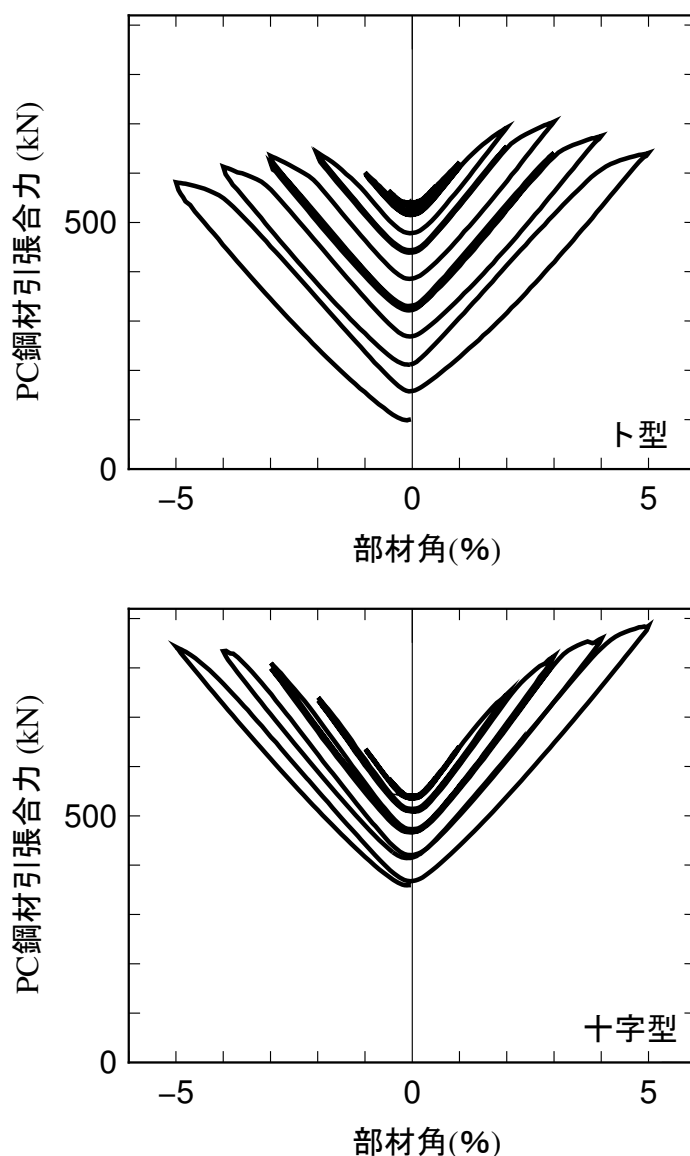
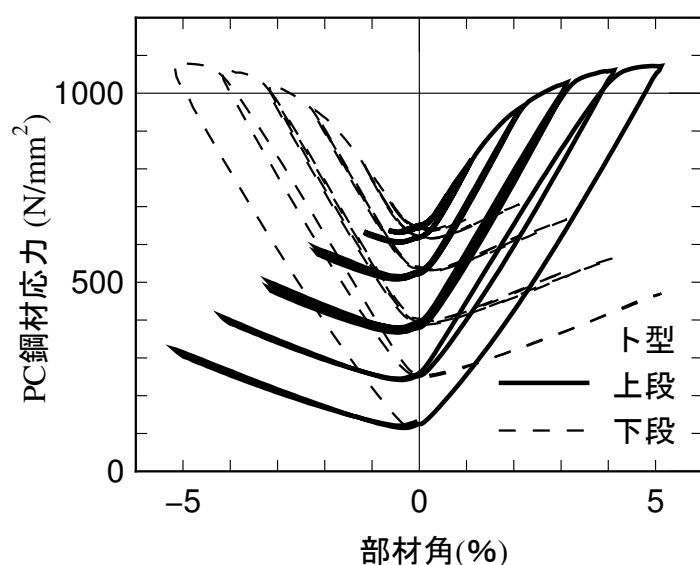


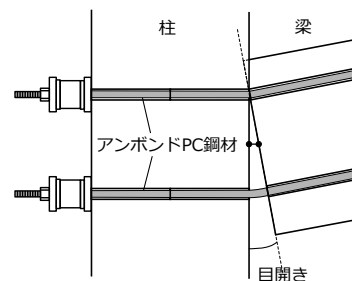
図 3.4 PC 鋼材引張合力－部材角関係

変形の戻り具合はト型試験体に比べ十字型試験体の方がその傾きが緩く、より高い荷重を維持した状態で戻ることがわかる。これは変形を経てもなお残存している PC 鋼材の張力の程度が大きく影響しているためである。

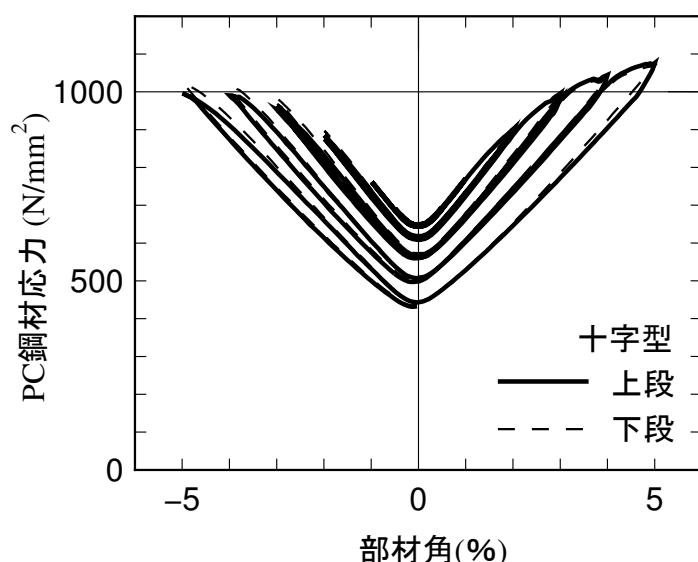
次に PC 鋼材引張合力－部材角関係を見る。両試験体の結果に共通する特徴として、部材角 0 %時における合力が载荷サイクルの進行につれて減少していることがわかる。また両試験体の結果の違いとして、各サイクルのピーク時の合力および部材角 0 %時の合力の減少具合が十字型試験体に比べてト型試験体の方が大きく、部材角 2 %以降、その特徴が顕著になっていることがわかる。荷重－部材角関係においても述べたとおり、この部材角 0 %時の合力の大きさが荷重－部材角関係の除荷時の変形の戻り具合の違いに大きく関係しており、合力の減少が大きいト型試験体では荷重－部材角関係における除荷時の



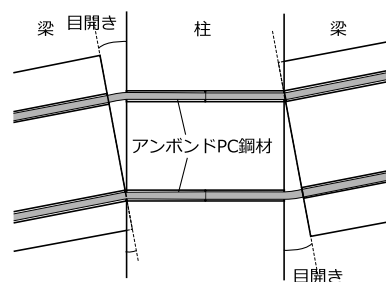
(a) PC 鋼材応力一部材角関係



(b) 変形状態の模式図



(a) PC 鋼材応力一部材角関係



(b) 変形状態の模式図

図 3.5 各段の PC 鋼材応力とその変形状態

傾きが急になり、戻った際の荷重も小さくなるが、合力の減少が小さい十字型試験体は除荷時の傾きが緩やかになり、戻った際の荷重も大きくなると考えられる。またこの PC 鋼材引張合力一部材角関係では、ト型試験体では部材角 3 %以降ピーク時の合力がサイクルの進行に伴い減少するのに対して、十字型試験体は 5 %までピーク時の合力が増加していることが読み取れる。これらのことは両試験体における PC 鋼材の伸び方と塑性化の度合の違いに起因するものであり、PC 鋼材応力一部材角関係を比較することにより明らかにすることができる。

図 3.5 に PC 鋼材応力一部材角関係とともにト型試験体および十字型試験体の変形状態の模式図を示す。これらを見ると、十字型試験体の結果では柱両側の圧着接合面における目

開きによって、上下段の PC 鋼材ともに片側は引張側、もう一方は圧縮側の変形が生じることから、2つの PC 鋼材がほぼ同じような挙動を示しているのに対し、ト型試験体では1つの圧着接合面の目開きのみが PC 鋼材の伸びに関係するため、引張側にある PC 鋼材では応力が大きく増加し、また圧縮側にある場合には応力があまり増加せず、部材角 0%を軸として上下段の PC 鋼材がほぼ対称的な挙動を示していることがわかる。さらに同じサイクル時の両試験体における PC 鋼材応力の変動傾向を見比べてみると、ト型試験体の引張側にある PC 鋼材応力が十字型試験体の応力よりも応力変化の傾きが大きくなっていることがわかる。これは十字型試験体に比べ、ト型試験体の PC 鋼材の伸びが大きいことに起因している。十字型試験体における伸び量は柱の両側の目開きの和として評価されることから、一見ト型試験体の伸び量よりも大きく伸長しているように見えるものの、十字型試験体の PC 鋼材全長はト型試験体の PC 鋼材全長に比べ長いため、その単位長さあたりの伸びは PC 鋼材全長の短いト型試験体のほうがより大きく伸長している。したがって、先に述べた両試験体における実験結果の違いは、ト型試験体と十字型試験体の PC 鋼材の変形の仕方の違いと、PC 鋼材全長の違いによりト型試験体の PC 鋼材のほうがより大きく伸長し、塑性化の度合いがより進行したことによるものと考えられる。

### 3.3 断面解析モデルへの破壊力学に基づくコンクリートの材料モデルの適用

#### 3.3.1 圧縮破壊領域長さと終局変形

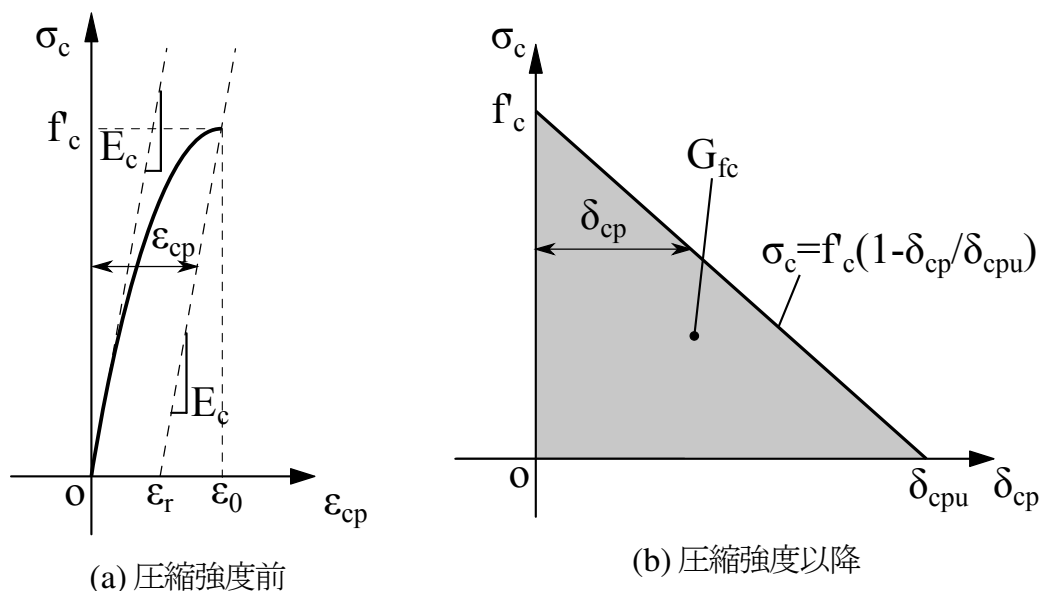


図 3.6 コンクリート材料モデル詳細

本研究で用いる断面解析モデルは前述の通り、PC 鋼材とコンクリートがそれぞれ負担する引張力と圧縮力の評価方法がその精度に大きく影響する解析モデルである。その断面解析モデルの計算過程において、PC 鋼材については試験体緒元からその全長を用いてひずみを求めるのに対して、コンクリートについては仮定した圧縮破壊領域長さ  $l_c$  を用いてひずみを求めている。この  $l_c$  は圧縮破壊エネルギー  $G_{fc}$  とともに材料モデルの軟化経路の設定にも関係するパラメータであることから、その解析結果に及ぼす影響について明確にする必要がある。

本断面解析に用いられたコンクリートの材料モデルは破壊力学に基づいて、圧縮強度以降、狭い領域に破壊が集中する損傷の局所化を考慮したモデルであり、圧縮強度前のひずみと応力の関係と圧縮強度以降の応力と塑性変形の関係の組み合わせにより材料モデルを構成した Hillerborg の研究 [3-3] と、圧縮強度以降、圧縮を受ける領域全体において吸収された単位面積当たりのエネルギーを圧縮破壊エネルギー  $G_{fc}$  と定義して軟化勾配の評価を行った Nakamura らの研究 [3-4] の二つに基づいたモデルである。なお、これらの研究では RC 梁の曲げ挙動に対し、それぞれの材料モデルの適用性について検討がなされている。

図 3.6(a) にこの考え方に基づいた圧縮強度に至る前の材料モデルを、(b) に圧縮強度以降の材料モデルを示す。図 2.5 にて示した材料モデルは、図 3.6(a) 圧縮強度前の応力-ひずみ関係 ( $\sigma_c - \epsilon_{cp}$  関係) と、(b) 圧縮強度以降の応力-塑性変形関係 ( $\sigma_c - \delta_{cp}$  関係) との 2 つの状態を組み合わせ、応力-ひずみ関係によりあらわしたものである。なお、塑性変形  $\delta_{cp}$  はその変形が生じる領域の長さとは独立に定義される。このような状態の材料モデルを断面解析モデルでの変形量と照らし合わせて考えると、回転角  $\theta$  から得られるコン

クリート断面要素の変形量  $\delta_c$  は、圧縮強度前は圧縮強度前のひずみ  $\varepsilon_{cp}$  と圧縮破壊領域長さ  $l_c$  を用いて式 (3.1) のように表せる。また圧縮強度以降については塑性変形  $\delta_{cp}$  を用いることにより、 $\delta_c$  が式 (3.2) のように表現される。この式は、ある段階における  $\delta_c$  の内訳が、(a) において矢印で示された圧縮強度点からヤング係数の傾きでおろした除荷直線上までのひずみ  $\varepsilon_{cp}$  と  $l_c$  の積と、(b) において矢印で示された  $\delta_{cp}$  からなることを示している。

$$\delta_c = \varepsilon_{cp} \cdot l_c \quad (3.1)$$

$$\delta_c = \varepsilon_{cp} \cdot l_c + \delta_{cp} \quad (3.2)$$

圧縮強度前の状態では、式 (3.1) によりそのひずみが決定されることから、応力の決定において変形量をひずみに変換する圧縮破壊領域長さ  $l_c$  の影響が大きいことがわかる。一方圧縮強度以降では、式 (3.2) によりひずみが決定されるため、変形量が大きくなるにつれてその割合から  $l_c$  による影響が少なくなり、塑性変形  $\delta_{cp}$  の影響が支配的になっていくことが読み取れる。さらに塑性変形  $\delta_{cp}$  は設定した軟化曲線に対応した値であるため、終局変形  $\delta_{cpu}$  に影響される値であり、さらに式 (2.12) と式 (3.2) の関係から  $\delta_{cpu}$  は圧縮破壊エネルギー  $G_{fc}$  に対応したものであることから、これは圧縮破壊エネルギー  $G_{fc}$  による影響であるといえることができる。

本研究では  $l_c$  および  $G_{fc}$  の影響を評価するため、これらをパラメータとした解析結果と実験結果における正側の荷重-部材角関係との比較を用いて、段階を踏んだ検討を行う。まず  $G_{fc}$  の影響が少ないと考えられ、ト型および十字型試験体それぞれの曲げ終局耐力前となる部材角 2 % までの範囲で  $l_c$  のみを変動させて解析結果と実験結果の履歴を比較する。次にもっとも実験結果と適合した  $l_c$  の値を固定して  $l_c$  の変動による影響をなくし、両試験体において曲げ終局耐力後となる部材角 3 % から 5 % までの範囲で、 $G_{fc}$  のみを変動させて比較を行い、その影響を検討する。そして、これら検討においてもっとも実験結果を表現できた  $l_c$  および  $G_{fc}$  を用いて複数の項目について実験結果と解析結果の比較を行う。

### 3.3.2 断面解析モデルにおける解析条件およびパラメータの設定

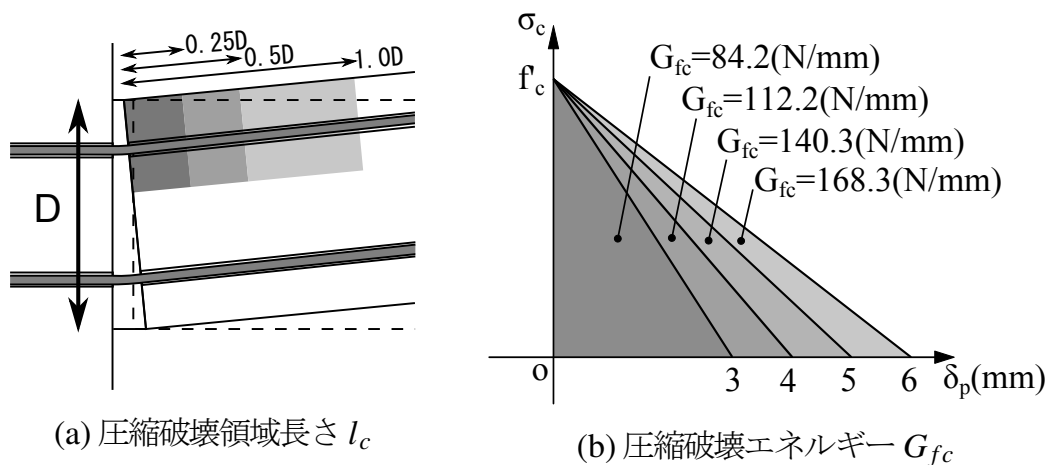


図 3.7 設定パラメータ

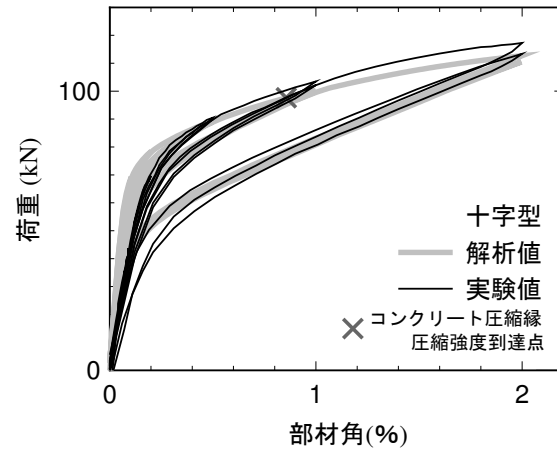
図 3.7 に本パラメトリック解析に用いたパラメータの値を示す。圧縮破壊領域長さ  $l_c$  は、梁せい  $D$  を基準としてその 0.25 倍 (112.5mm), 0.5 倍 (225mm), 1.0 倍 (450mm) の 3 種類とした。また本解析モデルは与えられた回転角から変形量を求め、順次計算を行う解析法なので、終局時の変形  $\delta_{cpu}$  の値を変動させることより、圧縮破壊エネルギー  $G_{fc}$  の影響を検討するものとし、 $\delta_{cpu}$  の値は、3(mm), 4(mm), 5(mm), 6(mm) の 1mm 刻み 4 種類の値を設定した。これらパラメータを用い、断面を 45 分割、回転角の増分を 0.01 % とし、実験と同様の载荷サイクルを設定し、パラメトリック解析を行った。

### 3.3.3 パラメトリック解析結果によるパラメータの評価

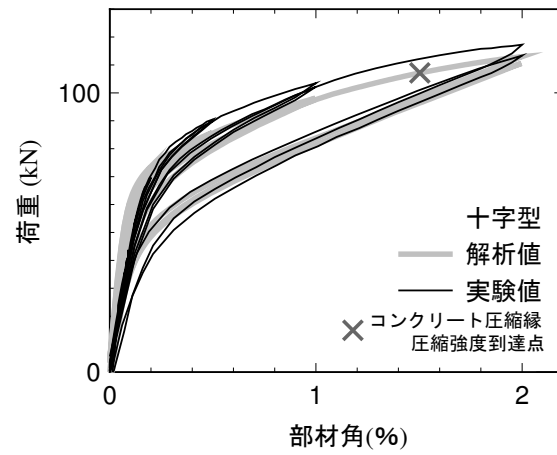
#### 3.3.3.1 荷重－部材角関係による圧縮破壊領域長さの評価

図 3.9 に圧縮破壊領域長さ  $l_c$  を変化させたト型試験体および十字型試験体の実験値と解析値による荷重－部材角関係の比較を示す。この比較では  $\delta_{cpu}=3$ mm の結果を示してある。また前述のとおり  $l_c$  の影響が大きいと考えられる部材角 2 % までの正側の履歴の比較を示しており、上から (a)  $l_c=0.25D$ , (b)  $l_c=0.5D$ , (c)  $l_c=1.0D$  の結果を示している。それぞれの図中では淡色の実線が解析による結果を、黒の実線が実験結果を表している他、解析結果において圧縮縁のコンクリート断面要素が圧縮強度に達した時点を x 印にて示してあるが、(c)  $l_c=1.0D$  の場合では部材角 2 % 以降に圧縮縁のコンクリート断面要素が圧縮強度に達したため図中には示していない。図 3.9 を概観すると、ト型試験体の解析結果および十字型試験体の解析結果はともに  $l_c$  の大きさによらず、(a)(b)(c) いずれの解析結果も実験結果と同様な原点指向性の強い履歴を描いており、おおむね本解析モデルによってその履歴挙動を追跡できることがわかる。次に  $l_c$  の値ごとの違いを見ると、ト型試験体、十字型試験体ともに  $l_c$  が増加するにつれて解析結果による荷重値と初期の剛性が小さく評価される傾向とコンクリー

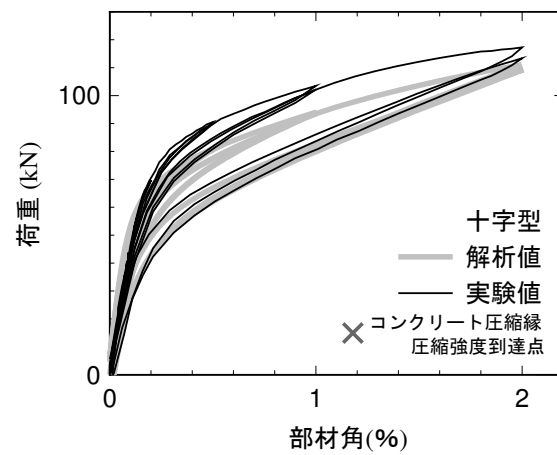
ト断面要素の圧縮縁が圧縮強度に到達したときの部材角が増加する傾向が見られる。初期の剛性と荷重が小さく評価される傾向と、圧縮強度に到達したときの部材角が増加する傾向はコンクリートの変形量が同程度であっても  $l_c$  を大きくするほどひずみが小さく評価されるため、その結果荷重も小さく評価されたためと考えられる。これらの解析結果からト型、十字型どちらにおいても耐力と初期の剛性が比較的实验値に近いと考えられる  $l_c = 0.5D$  の値を用いて次の  $\delta_{cpu}$  の比較を行った。



(a)  $l_c = 0.25D$

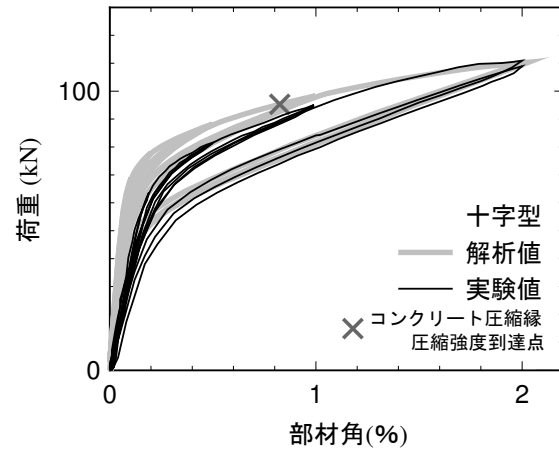


(b)  $l_c = 0.5D$

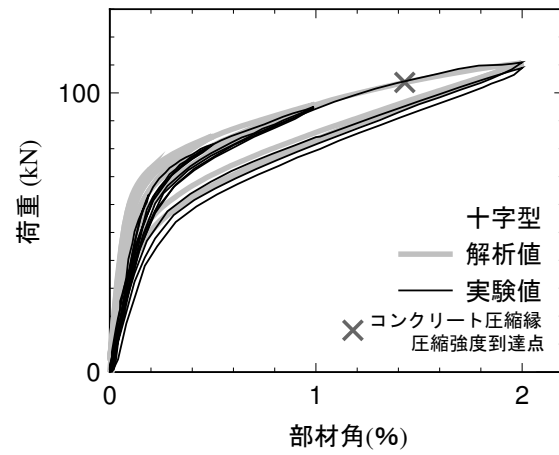


(c)  $l_c = 1.0D$

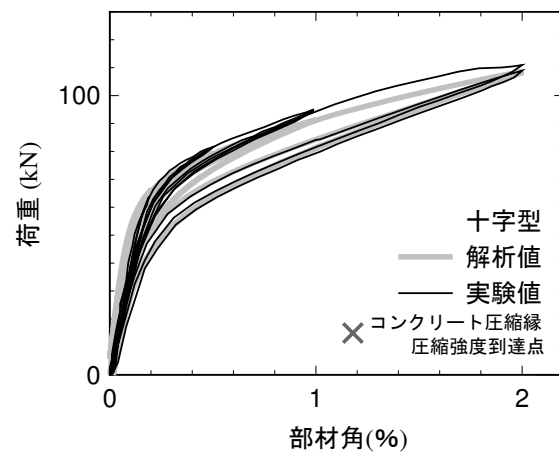
図 3.8  $l_c$  によるト型試験体の実験結果と解析結果の比較



(a)  $l_c = 0.25D$



(b)  $l_c = 0.5D$

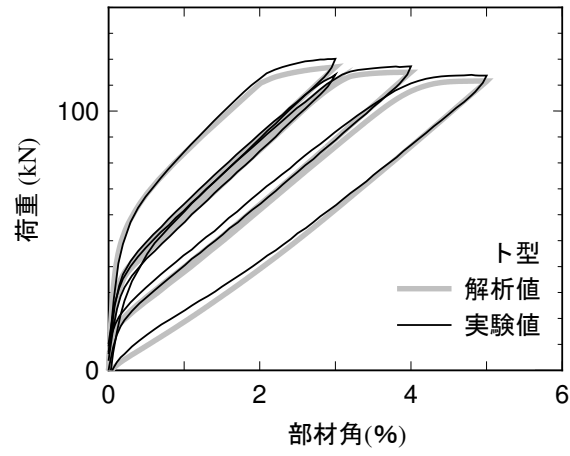


(c)  $l_c = 1.0D$

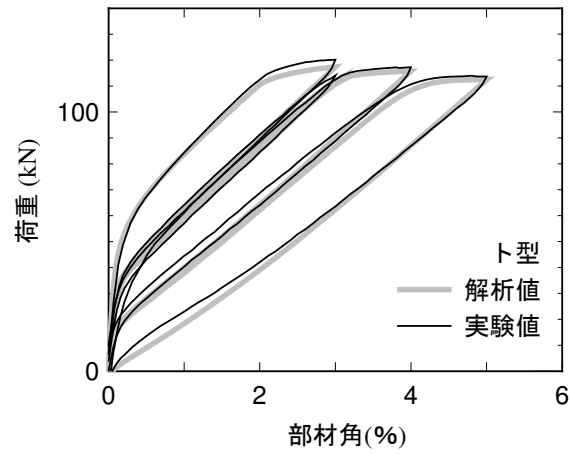
図 3.9  $l_c$  による十字型試験体の実験結果と解析結果の比較

### 3.3.3.2 荷重一部材角関係による終局変形の評価

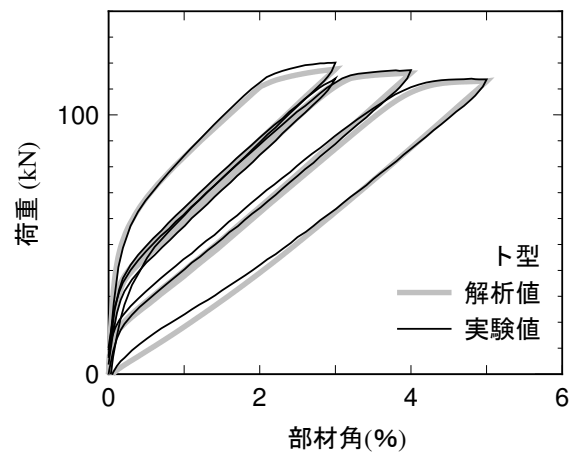
図 3.10 と図 3.11 に終局変形  $\delta_{cpu}$  を変化させたト型試験体および十字型試験体の実験値と解析値による荷重一部材角関係の比較を示す。図には前述のとおり、部材角 3 % から 5 % までのサイクルを示しており、部材角 2 % 以下の比較と同様に淡色の実線が解析結果、黒の実線が実験結果を示している。 $\delta_{cpu}=3mm$  の場合では十字型試験体の解析結果が  $\delta_{cpu}=4mm$  の場合よりも早期に荷重が著しく低下する傾向を見せたため、上から (a) $\delta_{cpu}=4mm$ , (b) $\delta_{cpu}=5mm$ , (c) $\delta_{cpu}=6mm$  の結果を示している。まずト型試験体の解析結果を見てみると、 $\delta_{cpu}$  の値による違いがほとんど見られず、載荷時および除荷時においてもおおむね実験結果は解析結果を追跡できていることがわかる。これは部材角 3 % 以降のト型試験体の荷重一部材角関係に対しては PC 鋼材引張合力の低下による影響が支配的になっており、 $\delta_{cpu}$  の変化による影響が相対的に小さくなったためと考えられる。一方、十字型試験体の解析結果を比較すると、主に部材角 5 % 時のサイクルで違いが表れており、 $\delta_{cpu}$  の増加につれて荷重が増加していることがわかる。これは  $\delta_{cpu}$ 、つまり  $G_{fc}$  が大きいほど、軟化直線の傾きが緩やかになり、コンクリート断面要素が受けた変形が同様な値であっても、高い応力を保持しやすく、なおかつ終局状態に達しにくくなり、その結果荷重が上昇しているものと考えられる。これらの比較から十字型試験体の解析結果においてもっとも実験結果と適合していると考えられる  $\delta_{cpu}=5mm$  を採用することにし、これと圧縮破壊領域長さ  $l_c=0.5D$  の解析結果を用いて、ト型試験体、十字型試験体それぞれの解析結果と実験結果のより詳細な比較・検討を行う。



(a)  $\delta_{cpu} = 4(mm)$

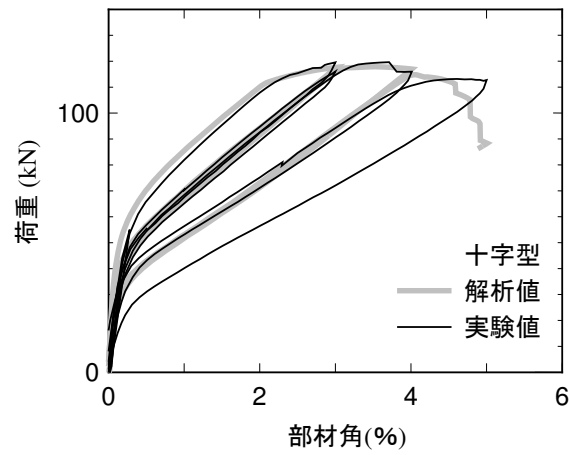


(b)  $\delta_{cpu} = 5(mm)$

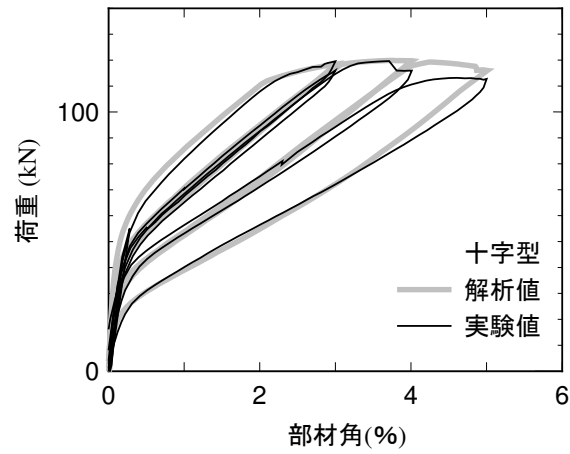


(c)  $\delta_{cpu} = 6(mm)$

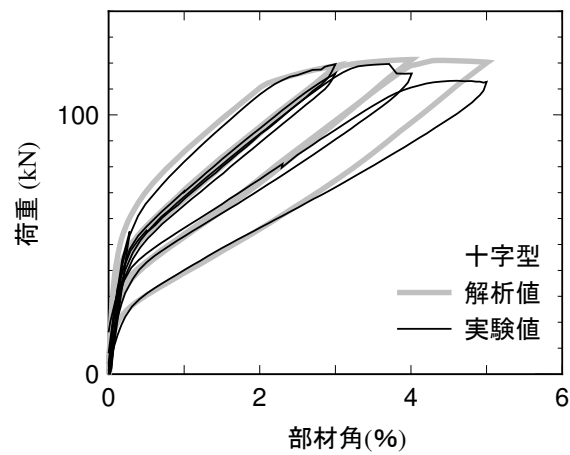
図 3.10  $\delta_{cpu}$  によるト型型部材の解析結果と実験結果の比較



(a)  $\delta_{cpu} = 4(mm)$



(b)  $\delta_{cpu} = 5(mm)$



(c)  $\delta_{cpu} = 6(mm)$

図 3.11  $\delta_{cpu}$  による十字型部材の解析結果と実験結果の比較

### 3.4 断面解析モデルによる解析結果と実験結果の比較

前節において求めた終局変形  $\delta_{cpu}$  および圧縮破壊領域長さ  $l_c$  を用いて行った各試験体の断面解析結果と実験結果の比較・検討を行う。以下の図には両試験体の荷重一部材角関係、PC 鋼材引張合力一部材角関係、履歴の1ループ目における等価粘性減衰定数および履歴の2ループ目(以下、定常ループ)における等価粘性減衰定数、ピーク時の目開き量を示す。それぞれ上にト型試験体の結果を、下に十字型試験体の結果を示している。すべての図において、解析結果を実線で、実験結果を破線で示している。また定常ループの等価粘性減衰定数に関しては実験において2ループ目のサイクルを行った部材角1%から3%の結果のみ示しており、目開き量に関しては、実験において梁せいの上端から112.5(mm), 225(mm), 337.5(mm)の位置での目開き量を計測しているため、解析結果においても同じ位置での目開き量について、ト型試験体、十字型試験体ともに安定して計測できた部材角3%までの結果を示している。

図3.12 荷重一部材角関係を見ると、 $l_c$  および  $\delta_{cpu}$  の比較においても示したように、ト型試験体、十字型試験体両方において解析結果は実験結果の初期の傾きや、原点指向性の強い履歴形状、耐力をおおむね良好に表現できていることが確認できる。また各試験体の特徴であった除荷後の変形の戻り具合とその傾きを良好に追跡できていることがわかる。ト型試験体の比較において、負側の実験結果に比べ解析結果の耐力が低い値を示しているが、その除荷後の戻り具合や傾きなど、履歴挙動の形状はおおむね一致していることがわかる。また十字型試験体では正側の履歴形状と負側の履歴形状がやや異なっており、負側の履歴形状は正側に比べ履歴ループのふくらみが若干小さくなっている。これは図3.4で示したようにPC 鋼材の挙動を反映したものであるが、解析結果ではその負側の履歴形状の違いもおおむね良好に表現できている。図3.13にPC 鋼材引張合力一部材角関係をに示す。両試験体ともに、その履歴形状やピーク時の合力、サイクルの進行とともに部材角0%時の合力が減少する傾向など、実験結果をおおむね表現できていることがわかる。またト型試験体と十字型試験体の合力の大きさの違いや各サイクルピーク時の合力がト型試験体では部材角3%以降減少することや十字型試験体では減少しないなど、各試験体の挙動の違いについてもおおむねその特徴を表現できていることがわかる。図3.14に等価粘性減衰定数を示す。両試験体ともに1ループ目の等価粘性減衰定数がサイクルの進行とともに上昇していく傾向や、定常ループ時の等価粘性減衰定数がサイクルが進行してもほとんどその値が変わらない傾向を表現できている。また十字型試験体に比べト型試験体の方が1ループ目の等価粘性減衰定数が大きいことや、両試験体の定常ループ時の等価粘性減衰定数に大きな違いがない点についてもおおむね良好に表現できている。図3.15に目開き量の比較を示す。ト型では多少その値に差はあるものの、解析結果は実験結果の傾向をとらえていることがわかる。また十字型では解析結果は実験結果を比較的良好に表現できていることがわかる。

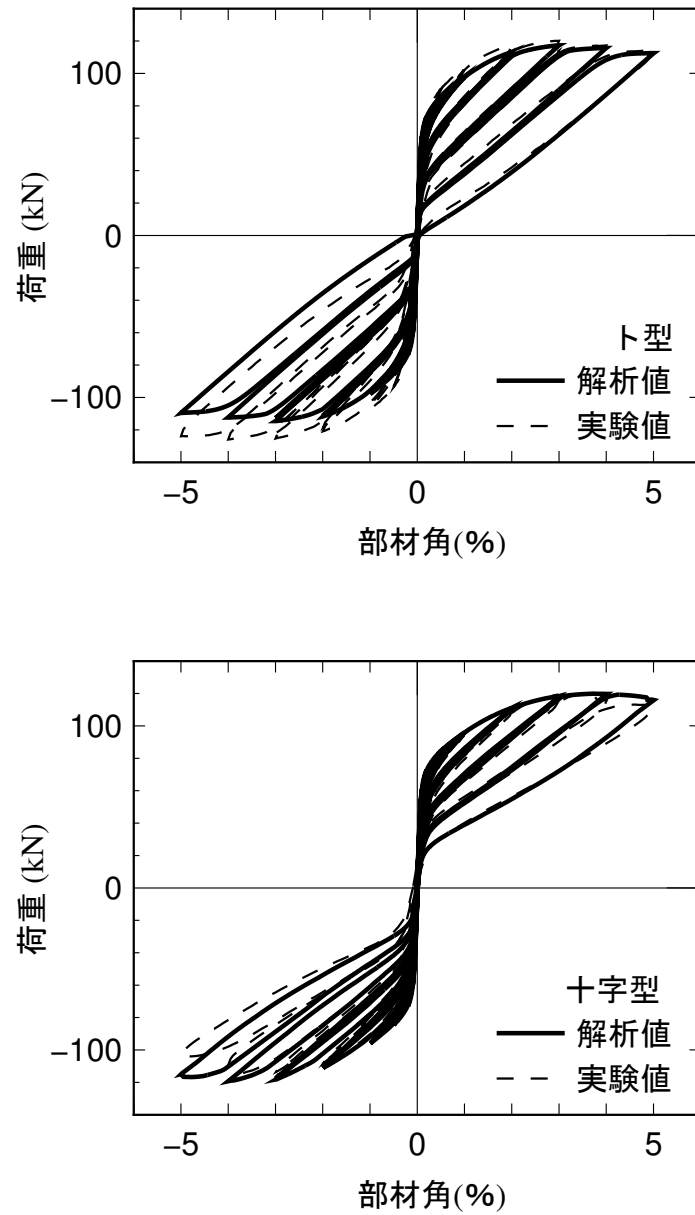


図 3.12 荷重一部材角関係の比較

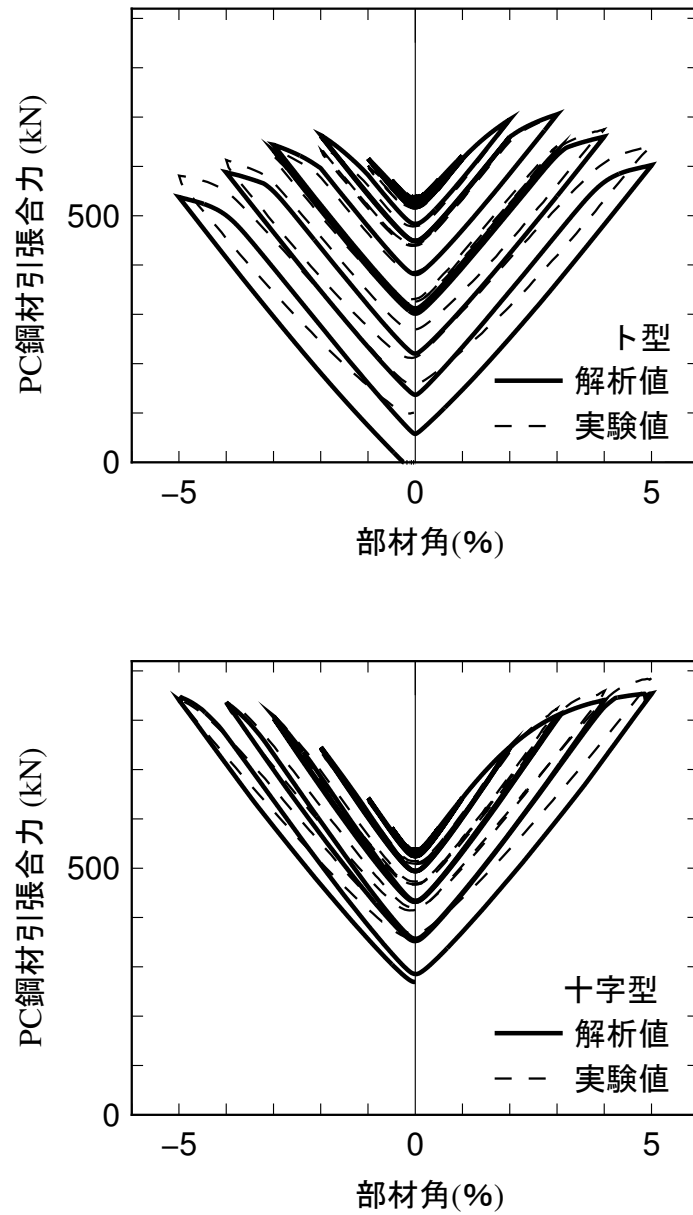


図 3.13 PC 鋼材引張合力－部材角関係の比較

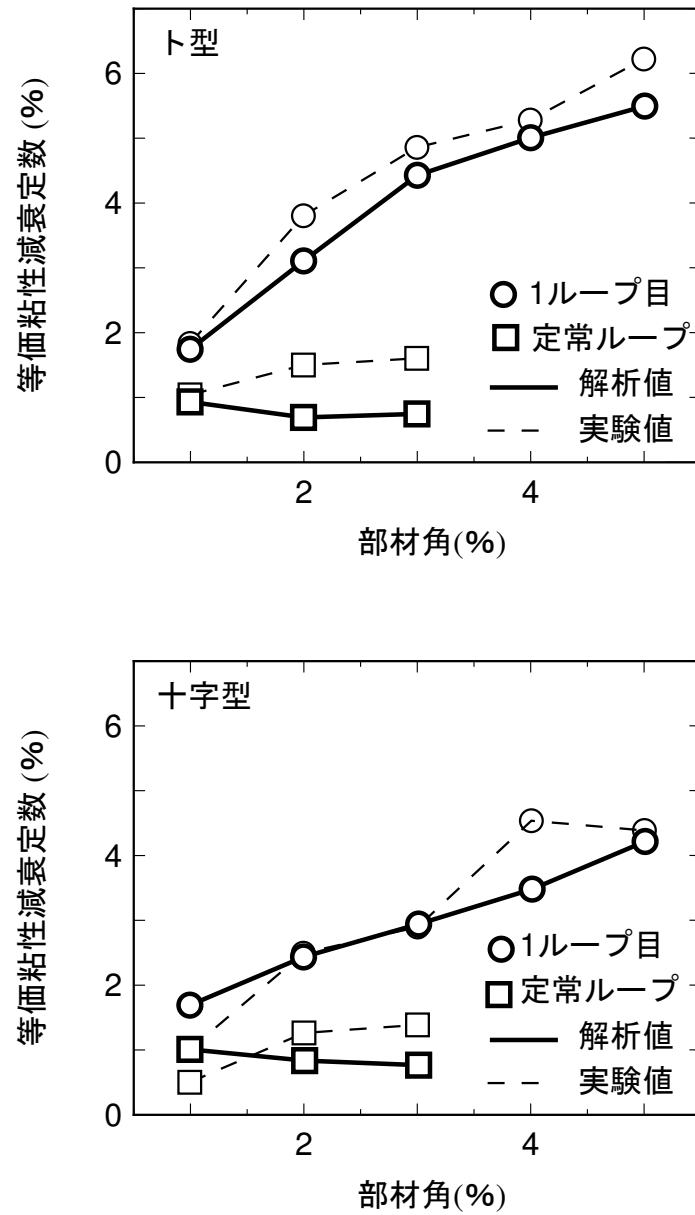


図 3.14 等価粘性減数定数の比較

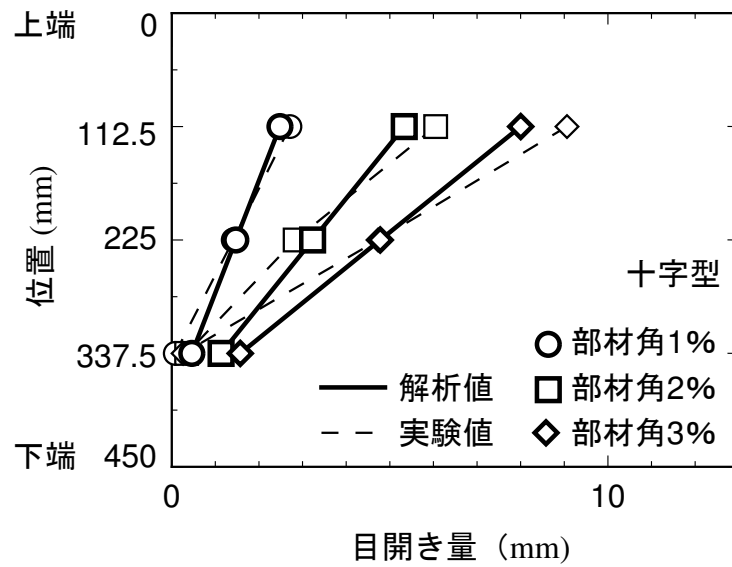
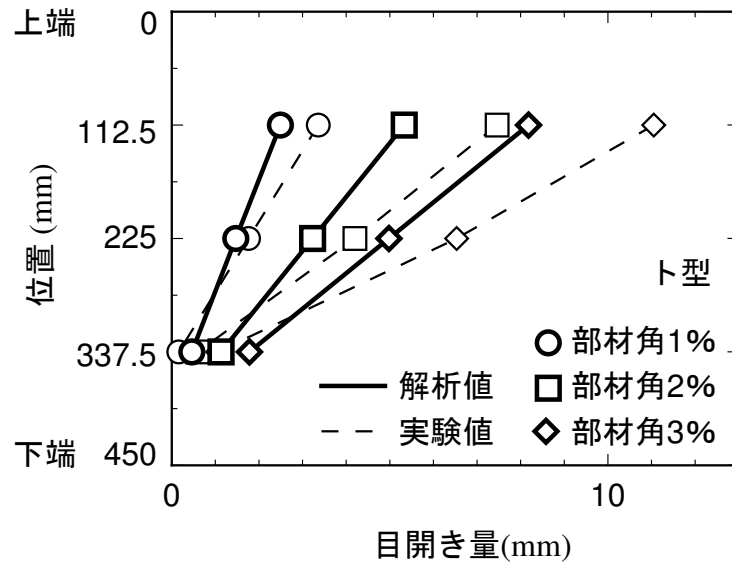


図 3.15 目開き量の比較

## 3.5 まとめ

本研究では2章において提案したアンボンド PCaPC 梁の断面解析モデルを用いてト型、十字型試験体を対象としたシミュレーション解析を行い、実験結果との比較・検討を行った。得られた結論は以下の通りである。

1. ト型試験体および十字型試験体を対象とした既往の実験について概説した。また両試験体の実験結果について荷重－変形関係と PC 鋼材引張合力－部材角関係を示し、その特徴やト型試験体、十字型試験体間の違いについて示した。
2. 本断面解析において重要なパラメータとなる、圧縮破壊領域長さ  $l_c$  および圧縮破壊エネルギー  $G_{fc}$  について、材料モデルを通してその意味と解析結果に及ぼす影響を示した。
3. 実験結果とパラメトリック解析結果との段階を踏んだ比較を行い、ト型試験体と十字型試験体に対して共通した影響および異なる影響について示したのち、実験結果を最もよく表現しうるパラメータの値を示した。
4. ト型試験体と十字型試験体の実験結果において荷重－部材角関係の他、PC 鋼材引張合力－部材角関係、等価粘性減衰定数、圧着接合面での目開き量を用いて解析結果との比較を行った結果、両試験体の実験結果の特徴や違いをおおむね表現できており、本断面解析によりアンボンド PCaPC 部材の挙動を良好に表現できることを示した。

## 参考文献

- [3-1] 山下 仁, 溝口 光男, 越川 武晃, 菊地 優: スティールバンドを有するアンボンド PCaPC 圧着接合による柱・梁ト型試験体および十字型試験体の繰り返し載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp865-866, 2009.8
- [3-2] 山下 仁, 越川 武晃, 和田 俊良, 上田 正生, 溝口 光男, 小松 憲一, 井上 圭一: スティールキャップを有するアンボンド PCaPC 柱・梁圧着接合によるト型試験体の繰り返し載荷実験, 日本建築学会技術報告集, Vol.14, No.27, pp115-120, 2008.6
- [3-3] Hillerborg, A. : Fracture Mechanics Conceptes Applied to Moment Capacity and Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beam, Engineering Fracture Mechanics, Vol.35, No.1/2/3, pp233-240, 1990
- [3-4] Nakamura, H. and Higai, T. : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar of Post-Peak Behavior of RC Structures Sbujected To Seismic Loads, Vol.2, pp259-272, 1999.10

## 第4章

# アンボンド PCaPC 梁部材の曲げ終局 耐力点算定式

### 4.1 はじめに

アンボンド PC 鋼材にプレストレス力を導入し、梁と柱を圧着接合・一体化するプレキャスト・プレストレストコンクリート構造（以下、アンボンド PCaPC 構造）は、非線形弾性的な復元力特性を示すことが知られている。これはアンボンド PCaPC 部材において、梁端面と柱側面間に位置する圧着面の目開きが変形時の支配的な挙動となるために、構造的な損傷の発生がこのごく近傍の狭い範囲に限定されることと、PC 鋼材がアンボンドであることから、ひずみが鋼材全長にわたって均一に分布して、かなりの大変形時においても PC 鋼材が降伏せずにプレストレス力が保持されるという通常のボンドタイプの PC 部材とは異なった構造的特徴を有しているためである。被震後の残留変形や残留ひび割れを小さくできるこの優れた性能は、この種の構造の大きな利点であり、また 2007 年には PC 構造に関する告示改正によってアンボンド PC 鋼材の耐震部材への適用も認められたが、いまだこのようなアンボンド PCaPC 部材の適用例はほとんど見当たらない。その理由の一つに、アンボンド PCaPC 部材の設計に必要な曲げ終局耐力や変形性能に関する評価法が明確に示されていないことが挙げられる。

アンボンド PC 鋼材を用いた部材の曲げ終局耐力に関する既往の研究では、曲げ終局耐力時におけるアンボンド PC 鋼材の応力を簡単な算定式を用いて評価し、ボンドタイプの PC 部材を対象とした曲げ終局耐力実用式 [4-1]・[4-2] で、降伏強度に代えてこの応力を用いることにより曲げ終局耐力を算定する手法がいくつか提案されている。最上ら [4-3] や竹本 [4-4] は圧着型ではないアンボンド PC 部材における曲げ終局耐力時の PC 鋼材張力または応力算定式を示しており、また菅田ら [4-5] はエネルギー吸収デバイスを配置したア

ンボンド PCaPC 部材の PC 鋼材の応力の算定式を提案している。

曲げ終局耐力を求めるこれらの実用式は PC 鋼材の終局時の応力やストレスブロックによる応力中心間距離といった曲げ終局耐力の評価に関わるそれぞれの要素を別個に求めた上で、それらを組み合わせて算定する式である。曲げ終局耐力時の変形角についても同様な考え方をを用いた算定式が提案されている [4-6]。このような考え方は終局時における応力などの個々の要素のみを対象に評価するという簡便さが利点であり、また一定の妥当性も有するが、本来終局時における応力や応力中心間距離などは互いに密接に関連したものであり、それらを別個に評価しきれものではない。このような別個に評価された要素を用いることによる影響は、コンクリートが圧縮力を負担し、PC 鋼材のみが引張力を負担するアンボンド PCaPC 部材の曲げ終局耐力点評価においてより顕著に現れるものと考えられる。そこで本研究では、曲げ終局耐力および曲げ終局耐力時の変形自体を直接評価しうる算定式の構築を試みる。

本章では、逆対称曲げを受けるアンボンド PCaPC 梁の圧着面における曲げ終局耐力算定式および曲げ終局耐力時(以下、終局時)の回転角算定式を提案する。すなわち PC 鋼材とコンクリートの応力状態に基づく終局時の曲げモーメント計算式および軸力釣り合い式を出発点として、それぞれ曲げ終局耐力算定式および回転角算定式の基本形を導出する。次にアンボンド PCaPC 十字型部分架構の梁圧着面を対象とする断面解析モデルを用いたパラメトリック解析を行い、梁を構成する種々のパラメータ(梁せいや梁幅、PC 鋼材係数、コンクリートや PC 鋼材の材料特性など)による終局時の耐力および回転角への影響と算定式の妥当性を示した上で、導出した算定式の係数を回帰分析により求める。そして、回帰分析に基づく算定式について、既往の実験結果や既往の算定式との比較を行い、その適用性に関する検討を行う。

## 4.2 曲げ終局耐力点算定式の導出

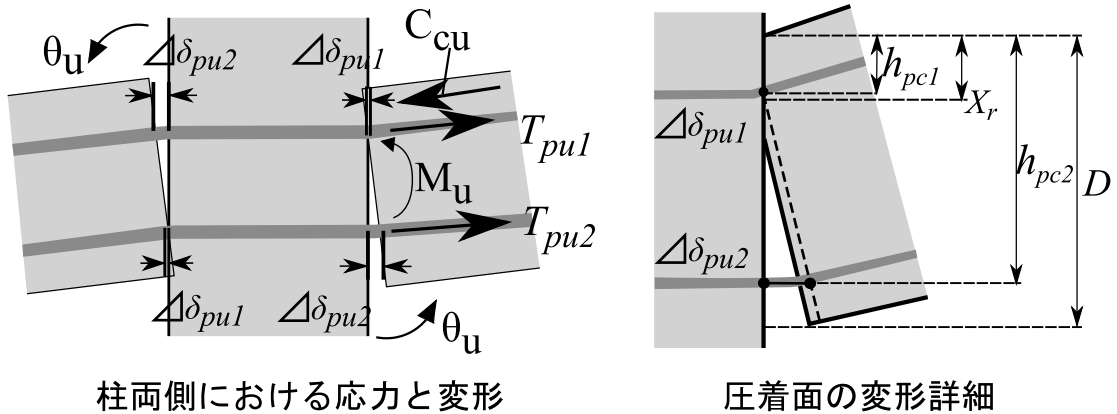


図 4.1 終局時の応力・変形状態

本節ではアンボンド PCaPC 梁の圧着面における，終局時の曲げモーメントを出発点とする曲げ終局耐力算定式と，力の釣り合いを出発点とする曲げ終局耐力時の回転角（以下，終局回転角）算定式の導出過程を示す。図 4.1 に示すような，矩形断面に同一のアンボンド PC 鋼材を 2 段に上下対称配置し，2 段ともに同じプレストレス力を導入して，これらの PC 鋼材によって柱両側に梁部材を圧着した十字型部分架構の梁圧着面を対象とする。算定式の導出に当たっての前提条件として，地震荷重時に梁部材が柱両側で逆対称に変形する状態を想定し，柱両側の圧着面での目開きは等しいとして，これを回転角で表す。また，左右の梁の反曲点位置間の距離を PC 鋼材の長さとし，PC 鋼材の応力と伸び量は上下段ともに等しいと仮定する。

### 4.2.1 曲げ終局耐力算定式

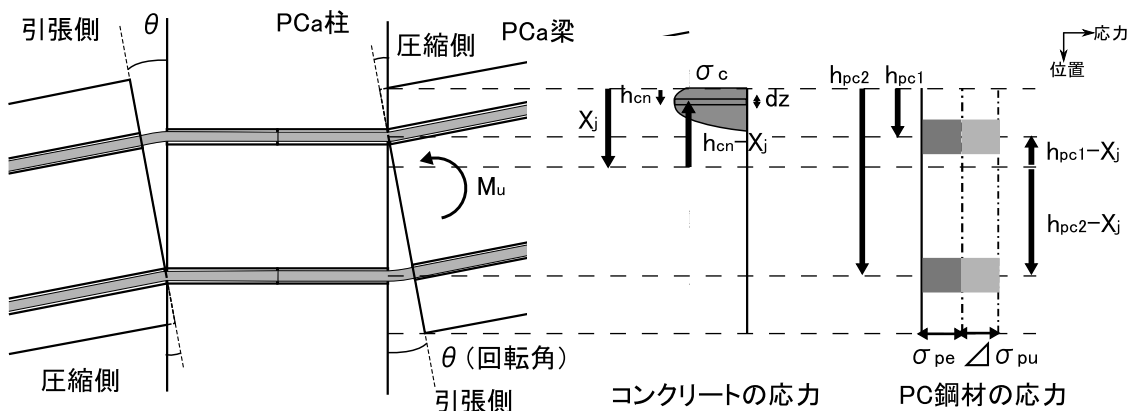


図 4.2 コンクリート部分および PC 鋼材の終局時の応力

梁の圧着面に生じる終局時の曲げモーメント  $M_u$  を，アンボンド PC 鋼材の引張力によるモーメントの成分  $M_{pu}$  とコンクリートの圧縮力によるモーメントの成分  $M_{cu}$  を用いて次式のように表す。

$$M_u = M_{pu} + M_{cu} \quad (4.1)$$

$M_{pu}$  は図 4.1 に示す 2 段の PC 鋼材の引張力  $T_{pu1}$ ,  $T_{pu2}$  によるモーメントの成分である。図 4.2 に示すように上下段の PC 鋼材の断面積および応力は等しく、さらに対称配置であることからその配置位置の和  $h_{pc1} + h_{pc2}$  は梁せい  $D$  として表せるので、圧着面上の任意の位置  $j$  点回りのモーメントの成分を考えると、 $M_{pu}$  は次式の形に表すことができる。

$$M_{pu} = \sum_{i=1}^2 T_{pui}(h_{pci} - X_j) = (\Delta\sigma_{pu} + \sigma_{pe}) \frac{A_{pc}}{2} (D - 2X_j) \quad (4.2)$$

ただし、 $\Delta\sigma_{pu}$  : 終局時の PC 鋼材の応力増分

$\sigma_{pe}$  : 有効プレストレス力による PC 鋼材の応力

$A_{pc}$  : PC 鋼材の全断面積

$h_{pci}$  : 梁上端から PC 鋼材の配置位置までの距離

$X_j$  : 梁上端から  $j$  点までの距離

$M_{cu}$  は図 4.1 に示すコンクリートの圧縮力  $C_{cu}$  によるモーメントの成分であり、図 4.2 に示すように終局時に圧着面に生じる応力を積分したものと考えると、 $j$  点回りの  $M_{cu}$  は次式のように表せる。

$$M_{cu} = \int_0^D \sigma_{cu} \cdot (h_{cn} - X_j) \cdot B dz \quad (4.3)$$

ただし、 $\sigma_{cu}$  : 終局時、コンクリート微小断面に生じる応力

$h_{cn}$  : 梁上端から微小断面までの距離

$B$  : 梁幅

この 2 つの式を式 (4.1) に代入し、全体を  $BD^2 f'_c$  で無次元化すると、次式が得られる。

$$\frac{M_u}{BD^2 f'_c} = \alpha_1 \cdot q + \alpha_2 \cdot \lambda_{pe} \cdot q + \alpha_0 \quad (4.4)$$

ここで、 $q$  は PC 鋼材係数、 $\lambda_{pe}$  は導入力レベル、 $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_0$  は終局時の状態を表す係数であり、それぞれ、

$$q = \frac{A_{pc} \cdot \sigma_{py}}{BD f'_c} \quad (4.5)$$

$$\lambda_{pe} = \frac{\sigma_{pe}}{\sigma_{py}} \quad (4.6)$$

$$\alpha_1 = \frac{\Delta\sigma_{pu}}{\sigma_{py}} \cdot \left( \frac{1}{2} - \frac{X_j}{D} \right) \quad (4.7)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2} - \frac{X_j}{D} \quad (4.8)$$

$$\alpha_0 = \int_0^D \frac{\sigma_{cu}}{f'_c} \cdot \frac{h_{cn} - X_j}{D} \cdot \frac{1}{D} dz \quad (4.9)$$

ただし、 $\sigma_{py}$ : PC 鋼材の降伏強度、

$f'_c$ : コンクリートの圧縮強度

以上を見ると明らかなように、式 (4.4) は無次元化した曲げ終局耐力を、PC 鋼材係数  $q$  と導入力レベル  $\lambda_{pe}$  という PC 構造特有の評価指標を主な変数とし、終局時の状態を表す無次元の値  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_0$  を係数としたものであり、本研究ではこの式を曲げ終局耐力算定式の基本形とする。

### 4.2.2 終局回転角算定式

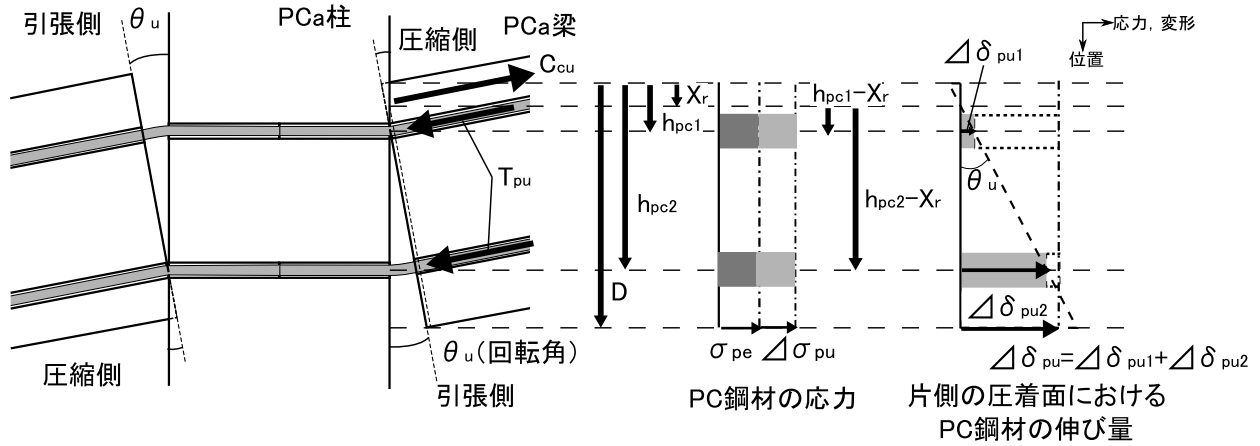


図 4.3 PC 鋼材の終局時の伸び量

終局時の圧着面における力の釣り合い式は、終局時の PC 鋼材の引張力の和  $T_{pu}$  と終局時のコンクリートの圧縮力  $C_{cu}$  から次式のように書くことができる。

$$T_{pu} = -C_{cu} \quad (4.10)$$

$T_{pu}$  は終局時の PC 鋼材の引張力増分  $\Delta T_{pu}$  と有効プレストレス力  $T_{pe}$  の和で表せる。終局時に PC 鋼材の引張力が降伏耐力  $T_{py}$  以下であるとする、 $\Delta T_{pu}$  は PC 鋼材の軸剛性  $K_p$  と終局時の伸び量増分  $\Delta\delta_{pu}$  で表現できる。したがって、式 (4.10) は次のようになる。

$$K_p \Delta\delta_{pu} = -C_{cu} - T_{pe} \quad (4.11)$$

ここで、

$$K_p = \frac{T_{py}}{\delta_{py}} \quad (4.12)$$

ただし、 $\delta_{py}$  : PC 鋼材の降伏時の伸び量

図 4.1 に示すように、梁部材は柱を中心に逆対称に変形する状態を想定しているので、上下段の PC 鋼材に生じる終局時の伸び量増分  $\Delta\delta_{pu}$  はともに図中の  $\Delta\delta_{pu1}$  と  $\Delta\delta_{pu2}$  の和として表すことができる。 $\Delta\delta_{pu1}$ 、 $\Delta\delta_{pu2}$  を各 PC 鋼材から回転中心位置までの距離  $h_{pci} - X_r$  と圧着面における終局時の回転角  $\theta_u$  を用いて表し、さらに先に示したように各 PC 鋼材配置位置の和は梁せい  $D$  と等しいことから、 $\Delta\delta_{pu}$  は次の式で表すことができる。

$$\Delta\delta_{pu} = \sum_{i=1}^2 \theta_u (h_{pci} - X_r) = \theta_u (D - 2X_r) \quad (4.13)$$

式(4.11)に式(4.13)を代入し、梁せい  $D$  と PC 鋼材の降伏耐力  $T_{py}$  を用いてそれぞれの項を無次元化し、整理することにより、終局回転角  $\theta_u$  に関する次式を得ることができる。この式は、曲げ終局耐力算定式(4.4)と同様に、PC 鋼材係数  $q$  と導入力レベル  $\lambda_{pe}$  を主な変数とし、終局時の状態を表す無次元の値  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  を係数としたものであり、終局回転角算定式の基本形とする。

$$\frac{D}{\delta_{py}}\theta_u = \beta_1 \frac{1}{q} + \beta_2 \cdot \lambda_{pe} \quad (4.14)$$

ここで、PC 鋼材の降伏時の伸び量  $\delta_{py}$  および終局時の状態を表す係数  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  はそれぞれ、

$$\delta_{py} = \frac{\sigma_{py} \cdot l_p}{E_p} \quad (4.15)$$

$$\beta_1 = -\frac{C_{cu}}{BDf'_c} \cdot \frac{D}{D-2X_r} \quad (4.16)$$

$$\beta_2 = -\frac{D}{D-2X_r} \quad (4.17)$$

ただし、 $E_p$  : PC 鋼材のヤング率,

$l_p$  : PC 鋼材の全長

## 4.3 パラメトリック解析

### 4.3.1 パラメトリック解析概要

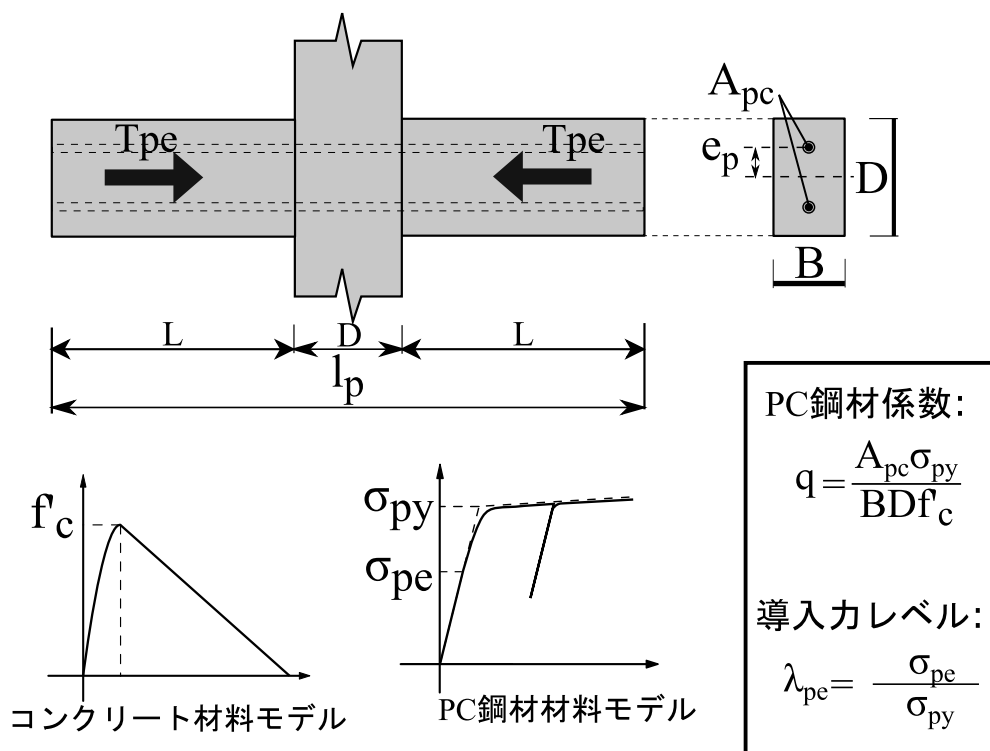


図 4.4 パラメータ概要

表 4.1 設定パラメータ

| パラメータ名      | 基準値                   | 水準     |
|-------------|-----------------------|--------|
| 梁せい         | $D(mm)$               | 800    |
| 梁幅          | $B(mm)$               | $2D/3$ |
| コンクリートの圧縮強度 | $f'_c(N/mm^2)$        | 60     |
| PC 鋼材の降伏強度  | $\sigma_{py}(N/mm^2)$ | 1000   |
| シアスパン比      | $L/D$                 | 8      |
| PC 鋼材係数     | $q$                   | 0.15   |
| 導入力レベル      | $\lambda_{pe}$        | 0.7    |
| PC 鋼材配置位置   | $e_p/D$               | 0.4    |

本研究では、断面解析モデルを用いたパラメトリック解析結果に基づいて、曲げ終局耐力点算定式に関する変数の妥当性とその係数評価の検討を行う。パラメトリック解析に用いたパラメータの概要およびその基準値と水準を、図 4.4 および表 4.1 に示す。ここでは、曲げ終局耐力点に関連すると考えられるパラメータとして、梁せい  $D$ 、梁幅  $B$ 、コンクリートの圧縮強度  $f'_c$ 、PC 鋼材の降伏強度  $\sigma_{py}$ 、PC 鋼材配置位置  $e_p/D$ 、PC 鋼材係数  $q$ 、導入力レベル  $\lambda_{pe}$ 、梁部材のシアスパン比  $L/D$  の 8 種類を設定した。PC 鋼材配置位置  $e_p/D$

については梁断面中央から PC 鋼材の配置位置までの距離を偏心距離  $e_p$  と置き、偏心距離  $e_p$  の梁せい  $D$  に対する割合として表現している。表 4.1 に示す各パラメータの値は試験体レベルから実大部材レベルまでを考慮した値であり、すべての値の組み合わせである計 72000 ケースの解析を行った。PC 鋼材の全断面積  $A_{pc}$  については、PC 鋼材係数  $q$  といくつかのパラメータとの関係式に基づき次の式を用いて設定した。

$$A_{pc} = q \cdot \frac{BDf'_c}{\sigma_{py}} \quad (4.18)$$

さらに PC 鋼材長さ  $l_p$  については柱部材の幅が梁部材のせいと同じ長さであるとしてシアスパン比  $L/D$  と梁せい  $D$  を用いて次式で設定した。

$$l_p = 2L + D = D(2\frac{L}{D} + 1) \quad (4.19)$$

ただし、 $L$ ：梁のせん断スパン

材料モデルに用いたコンクリートのヤング率  $E_c$  は鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 [4-7] に示される式を用いて  $\gamma = 24$  として計算し、PC 鋼材のヤング率  $E_p$  は  $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$  とした。また、コンクリートの軟化経路に関しては、各解析ケースにおいて同様の靱性能が得られるように、コンクリートの圧縮破壊領域長さ  $l_c$  は  $0.5D$  とし、終局ひずみ  $\epsilon_{cu}$  の値を各解析ケースとも前章と同程度となるように設定した。

本パラメトリック解析ではコンクリート断面要素数を 50 とし、回転角増分を 0.01% とし、部材角が最大 10% に到達するまで単調載荷の解析を行った。

## 4.3.2 曲げ終局耐力点の傾向

### 4.3.2.1 各パラメータによる曲げ終局耐力点への影響

本項ではまず、統計的手法の一つである変動係数による検討を用いてパラメータによる曲げ終局耐力および終局回転角への影響を明らかにするとともに、算定式の基本形に用いた変数の妥当性について検討する。その後、次節において回帰分析により提案式における係数の評価を行う。まず各パラメータの変化が終局耐力点に与える影響について検討する。図 4.5 から図 4.12 に圧着面における曲げ終局耐力点（終局時の曲げモーメントと回転角）の解析結果の一例を示す。それぞれの図には、設定したパラメータのうち 1 つのパラメータ（主パラメータ）の値のみを変化させ、そのほかのパラメータ（副パラメータ）には基準値を用いた場合の結果が示されている。これらの図を概観すると、それぞれの主パラメータの値が曲げ終局耐力点の値に及ぼす影響を見て取ることができる。まず図 4.5、4.6、4.7 を見ると、梁せい  $D$ 、梁幅  $B$ 、コンクリートの圧縮強度  $f'_c$  はいずれにおいても曲げ終局耐力の変化は大きいものの、終局回転角の変化は小さいことから、設定した基準値における曲げ終局耐力点への影響は曲げ終局耐力に対してのみ大きいことがわかる。同様に他の図を見てみると、図 4.8 と 4.9 に示す PC 鋼材の降伏強度  $\sigma_{py}$  とシアスパン比  $L/D$  は曲げ

終局耐力の変化は小さく、終局回転角の変化が大きくなっていることから、これら二つのパラメータは終局回転角に対してのみ大きな影響を及ぼすことがわかる。図 4.10 では曲げ終局耐力および終局回転角どちらも大きく変化し、その変動係数も比較的大きな値となっている。また、図 4.11 では終局回転角が大きく変化していることが顕著であるが、曲げ終局耐力についても変動係数を見ると PC 鋼材係数に次いで大きな値を示していることがわかる。図 4.12 は曲げ終局耐力および終局回転角、どちらについても大きく変化はしておらず、変動係数についても小さい値を示していることがわかる。以上の結果は、設定したパラメータの基準値に対する主パラメータの値の変化の影響を見たものである。

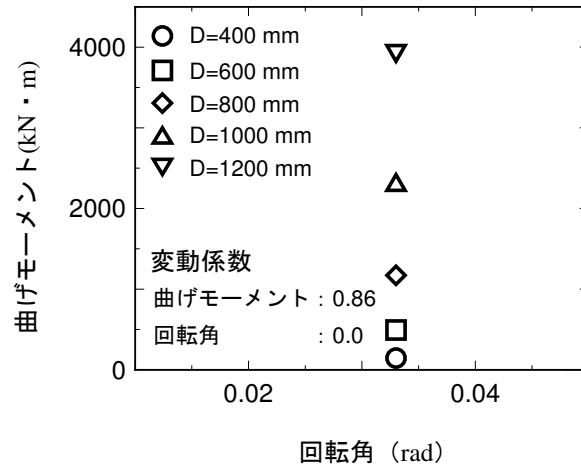


図 4.5 梁せい  $D$  による終局耐力点の傾向

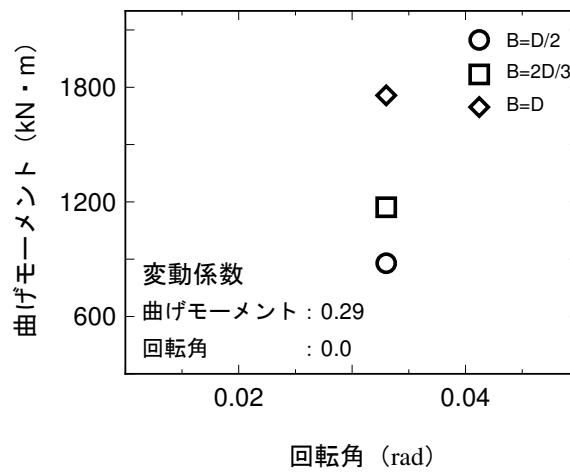


図 4.6 梁幅  $B$  による終局耐力点の傾向

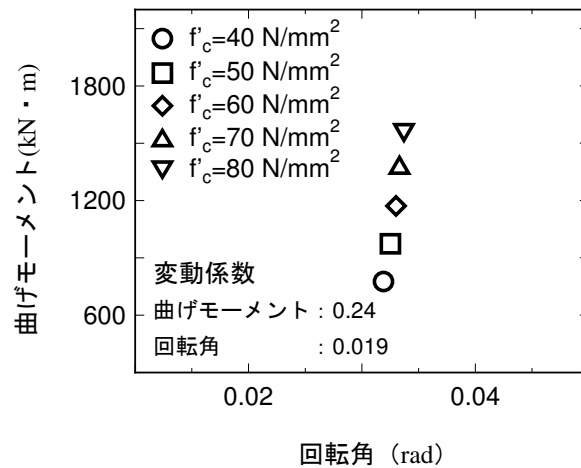


図 4.7 コンクリートの圧縮強度  $f'_c$  による終局耐力点の傾向

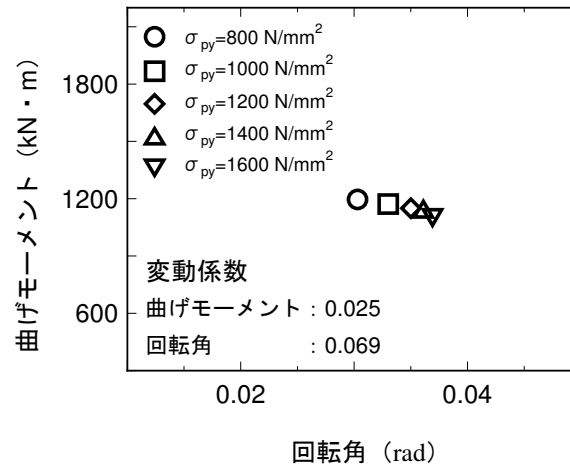


図 4.8 PC 鋼材の降伏強度  $\sigma_{py}$  による終局耐力点の傾向

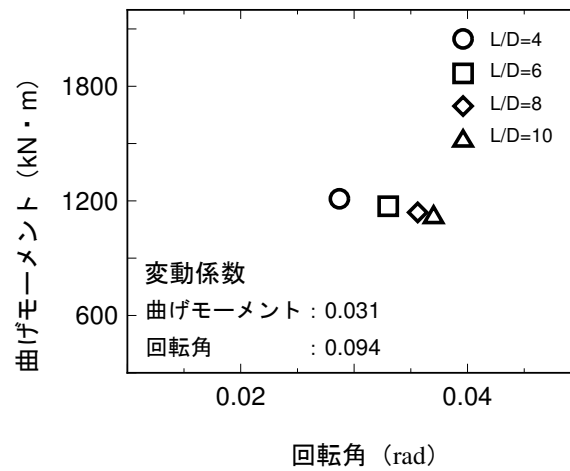


図 4.9 シアスパン比  $L/D$  による終局耐力点の傾向

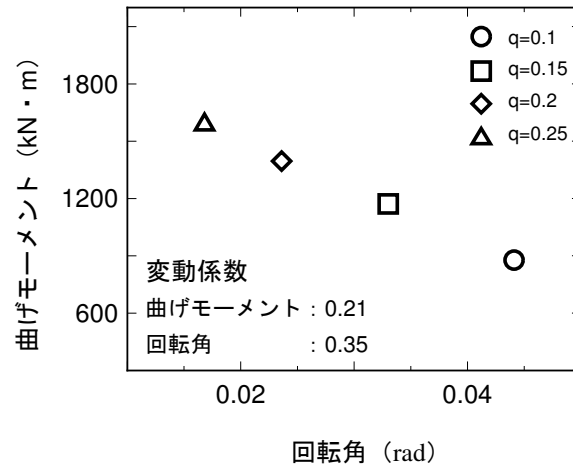


図 4.10 PC 鋼材係数  $q$  による終局耐力点の傾向

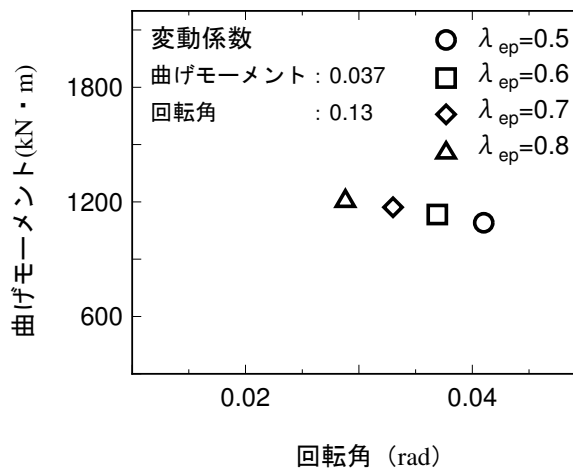


図 4.11 導入力レベル  $\lambda_{pe}$  による終局耐力点の傾向

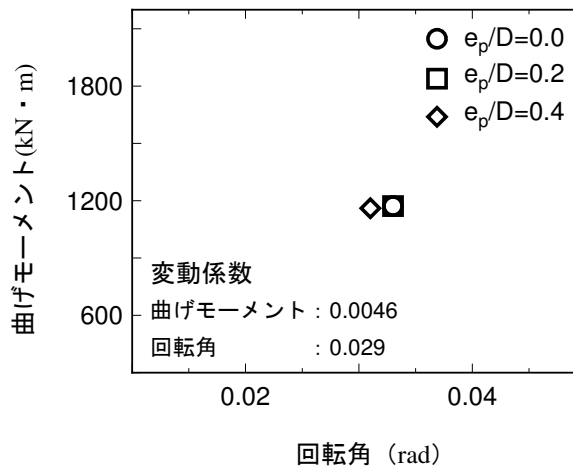


図 4.12 PC 鋼材配置位置  $e_p/D$  による終局耐力点の傾向

### 4.3.2.2 変動係数を用いた比較

次に基準値以外のパラメータの組み合わせに対する影響について、変動係数を用いて検討する。変動係数を求める式を次に示す。

$$cv = \frac{s}{x_{ave}} \quad (4.20)$$

ただし、 $cv$ ：変動係数

$s$ ：標準偏差

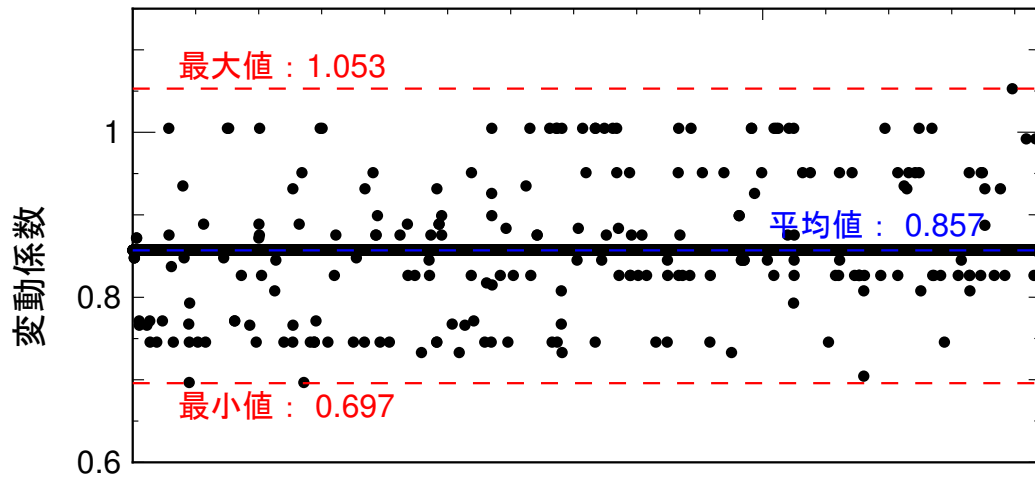
$x_{ave}$ ：平均値

表 4.2 において求めた変動係数は、副パラメータの値のすべての組み合わせそれぞれに対して、主パラメータの値を変化させた場合の曲げ終局耐力点の解析結果における変動係数を求め、その最大値、最小値、平均値を示したものである。例として梁せい  $D$  の場合について説明する。主パラメータは梁せい  $D$ 、それ以外の 7 種類のパラメータが副パラメータとなるので、副パラメータの値を基準値と同様とした場合、梁せい  $D$  による曲げ終局耐力点の変動係数は図 4.5 に示す通り、曲げ終局耐力に対しては 0.86、終局回転角に対しては 0 となる。この変動係数をすべての副パラメータの値の組み合わせごとに求めると、14400 ケースの変動係数が得られるので、これらにおける最大値、最小値、平均値を示したものが表 4.2 の梁せい  $D$  の項における各値である。すべての主パラメータに対してこのような評価を行い、表 4.2 における各値を得た。また参考として、曲げ終局耐力と終局回転角ごとのすべての変動係数を示したものを、図 4.13 から図 4.20 に示す。図 4.13 から図 4.20 では縦軸に変動係数をとったものを各副パラメータの組み合わせケースごとに横方向に羅列したものである。それぞれの図には最大値、最小値、平均値を破線で示している他、各主パラメータによる変動係数のスケールが大きく異なるため、図における縦軸のスケールは各主パラメータ間において共通していない。

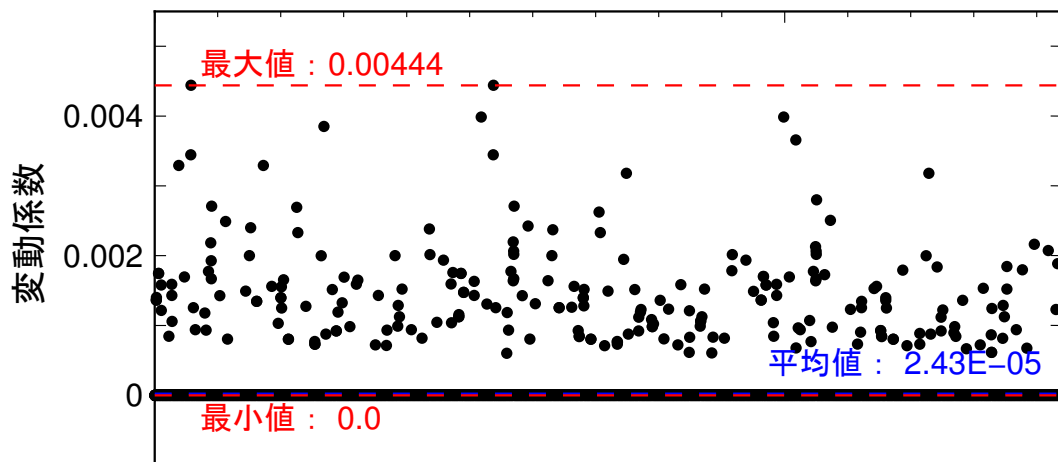
表 4.2 曲げ終局耐力の変動係数を見てみると、表に網掛けで示した梁せい  $D$ 、梁幅  $B$ 、コンクリートの圧縮強度  $f'_c$ 、PC 鋼材係数  $q$  による値が大きく、図 4.5, 4.6, 4.7, 4.10 の結果と同様の傾向を見て取ることができる。また導入力レベル  $\lambda_{pe}$  についても最小値は PC 鋼材の降伏強度  $\sigma_{py}$  と同程度であるものの、最大値や平均値は PC 鋼材係数  $q$  に次いで大きな値を示していることがわかる。終局回転角についても、図 4.9, 4.10, 4.11 と同様に PC 鋼材係数  $q$ 、導入力レベル  $\lambda_{pe}$ 、シアスパン比  $L/D$  や PC 鋼材の降伏強度  $\sigma_{py}$  の変動係数が、最大値、最小値、平均値についても比較的大きな値を示していることがわかる。これらのことは、曲げ終局耐力点の解析結果が、それぞれ変動係数の大きなパラメータの値によって大きく変化することを意味しており、したがってその評価に際しては、これらのパラメータによる影響を加味する必要がある。これらの結果を踏まえ、式 (4.15) と (4.19) の関係を考慮すると、本研究で提案する曲げ終局耐力点の算定式 (4.4) と (4.14) は、いずれも表 4.2 にて比較的大きなパラメータを変数としており、これらの変数を用いることで曲げ終局耐力、終局回転角をおおむね評価可能であると考えられる。

表 4.2 各パラメータによる変動係数

| パラメータ名                      | 変動係数    |         |        |        |        |         |
|-----------------------------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|
|                             | 曲げモーメント |         |        | 回転角    |        |         |
|                             | 最大値     | 最小値     | 平均値    | 最大値    | 最小値    | 平均値     |
| 梁せい $D$                     | 1.05    | 0.70    | 0.86   | 0.0044 | 0.0    | 2.4E-05 |
| 梁幅 $B$                      | 0.31    | 0.26    | 0.29   | 0.0048 | 0.0    | 2.0E-05 |
| コンクリートの<br>圧縮強度 $f'_c$      | 0.27    | 0.20    | 0.24   | 0.098  | 0.0013 | 0.029   |
| PC鋼材の<br>降伏強度 $\sigma_{py}$ | 0.043   | 0.0032  | 0.023  | 0.16   | 0.0    | 0.058   |
| PC鋼材配置位置 $e_p/D$            | 0.017   | 2.9E-04 | 0.0047 | 0.056  | 0.0    | 0.020   |
| PC鋼材係数 $q$                  | 0.26    | 0.16    | 0.20   | 0.60   | 0.216  | 0.37    |
| 導入カレベル $\lambda_{pe}$       | 0.096   | 0.0044  | 0.051  | 0.39   | 0.079  | 0.19    |
| シアスパン比 $L/D$                | 0.056   | 0.0096  | 0.031  | 0.18   | 0.0046 | 0.069   |

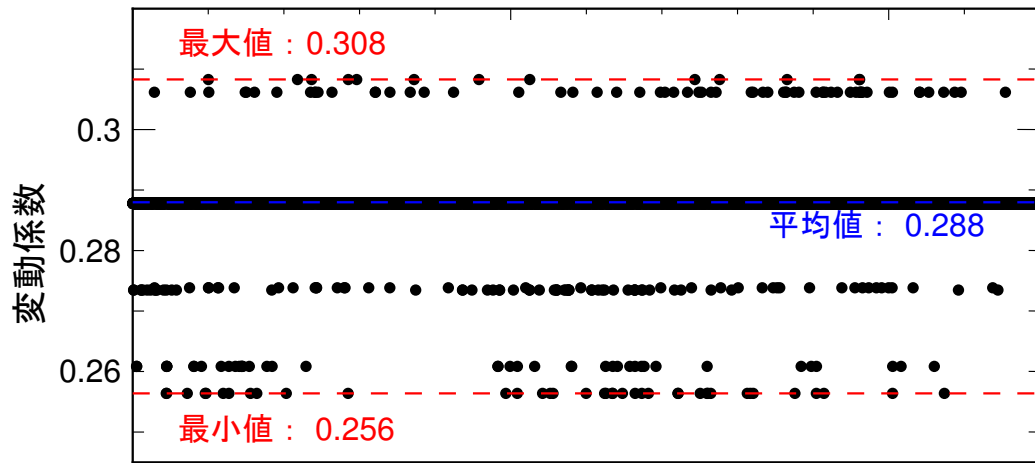


(a) 曲げ終局耐力の変動係数

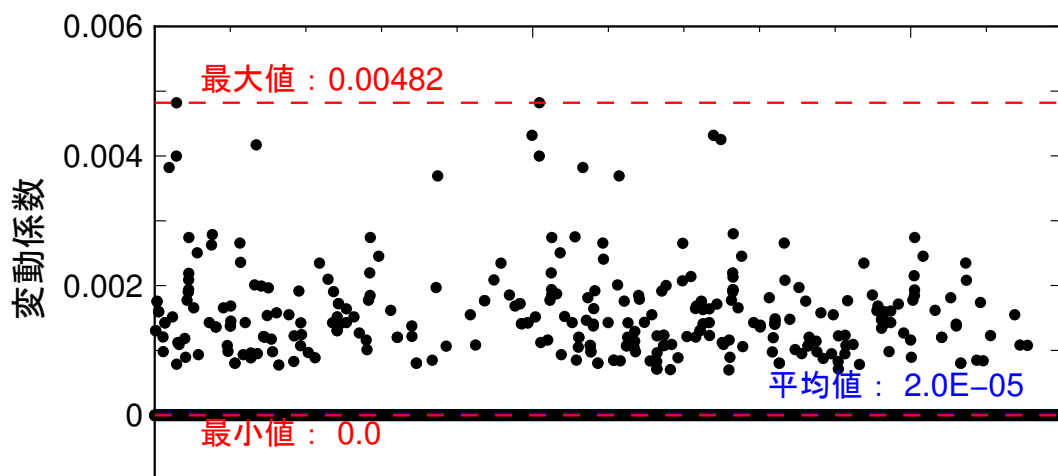


(b) 終局回転角の変動係数

図 4.13 梁せい  $D$  を変動させた場合の変動係数

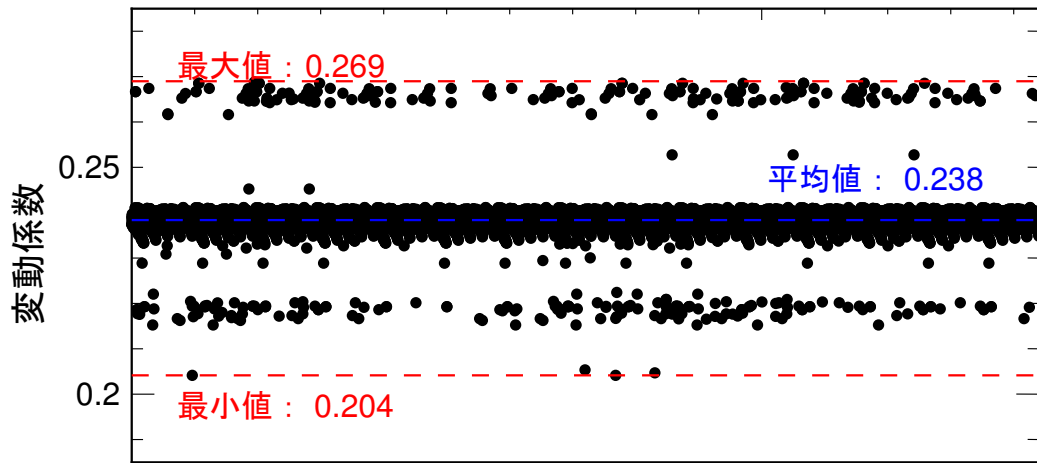


(a) 曲げ終局耐力の変動係数

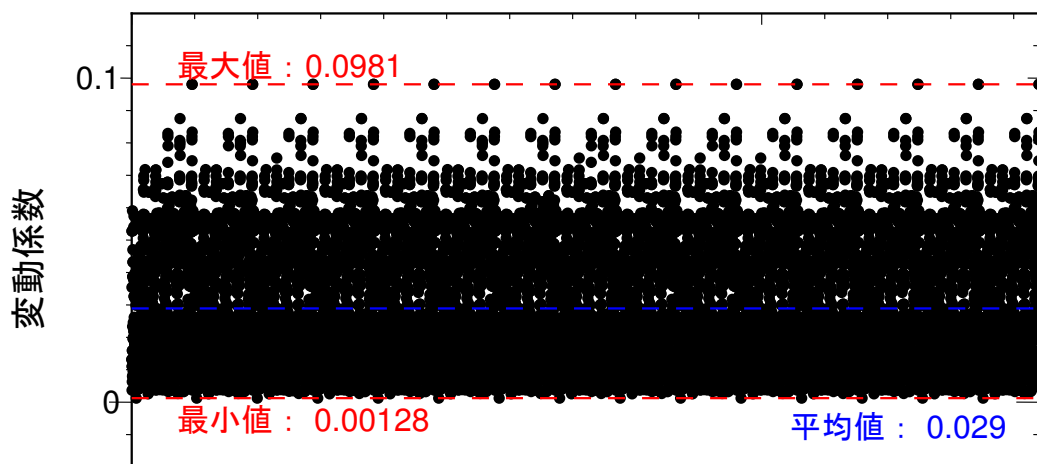


(b) 終局回転角の変動係数

図 4.14 梁幅  $B$  を変動させた場合の変動係数

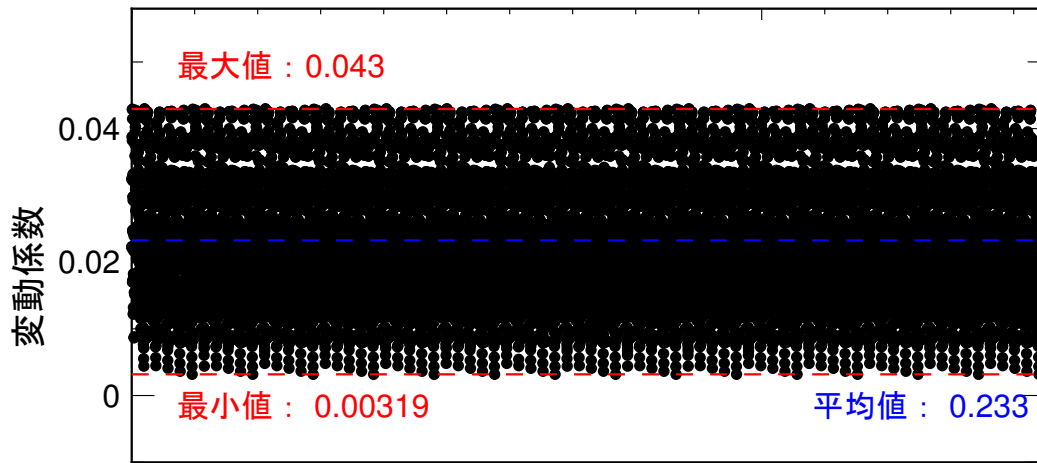


(a) 曲げ終局耐力の変動係数

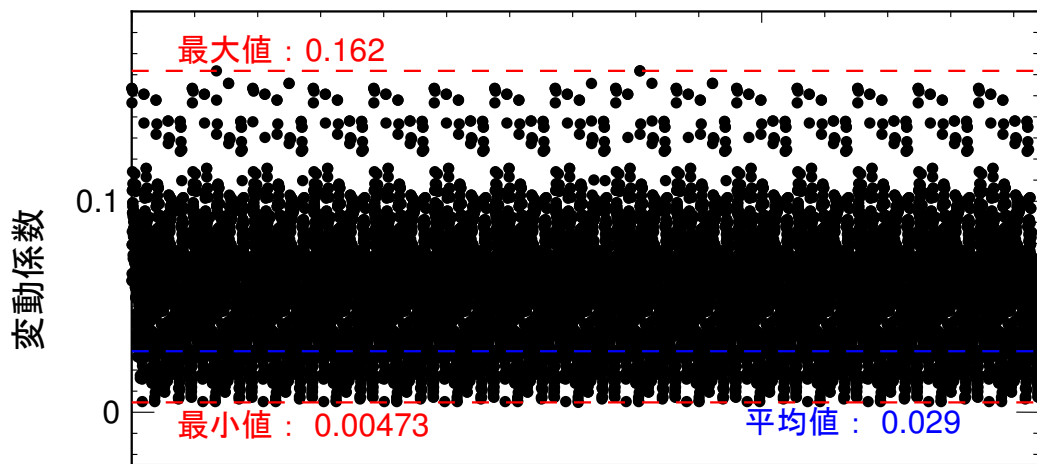


(b) 終局回転角の変動係数

図 4.15 コンクリートの圧縮強度  $f'_c$  を変動させた場合の変動係数

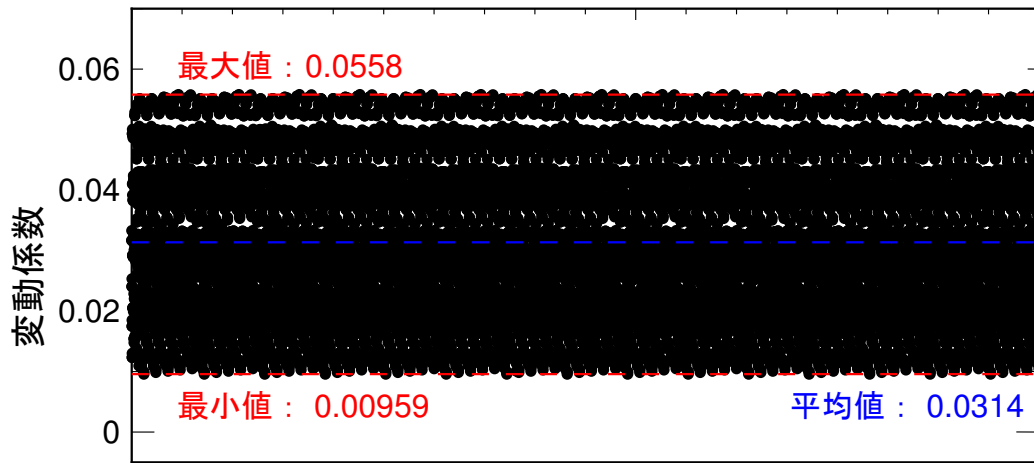


(a) 曲げ終局耐力の変動係数

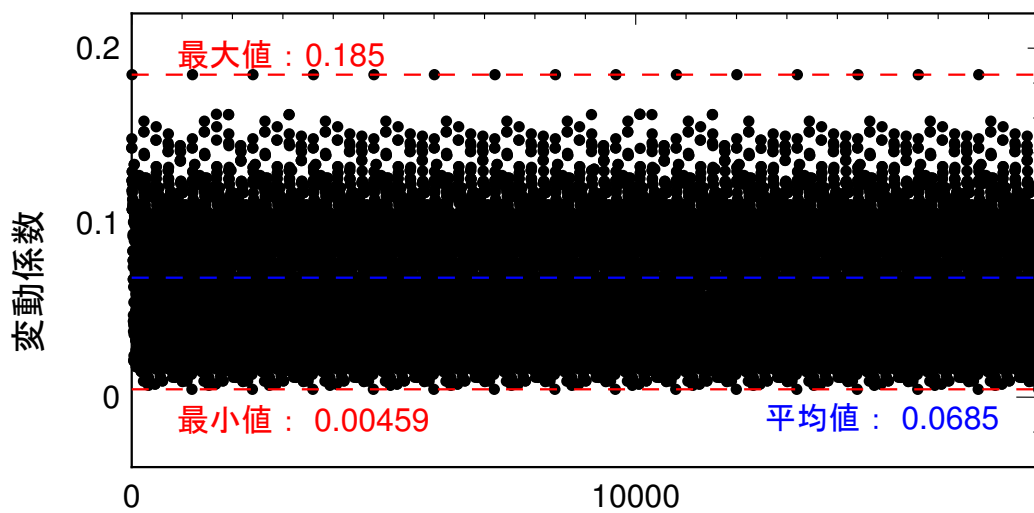


(b) 終局回転角の変動係数

図 4.16 PC 鋼材の降伏強度  $\sigma_{py}$  を変動させた場合の変動係数

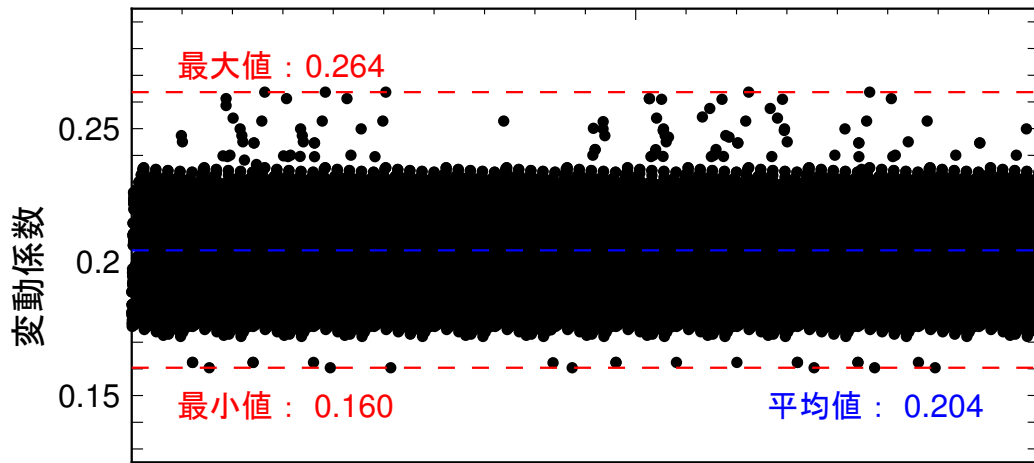


(a) 曲げ終局耐力の変動係数

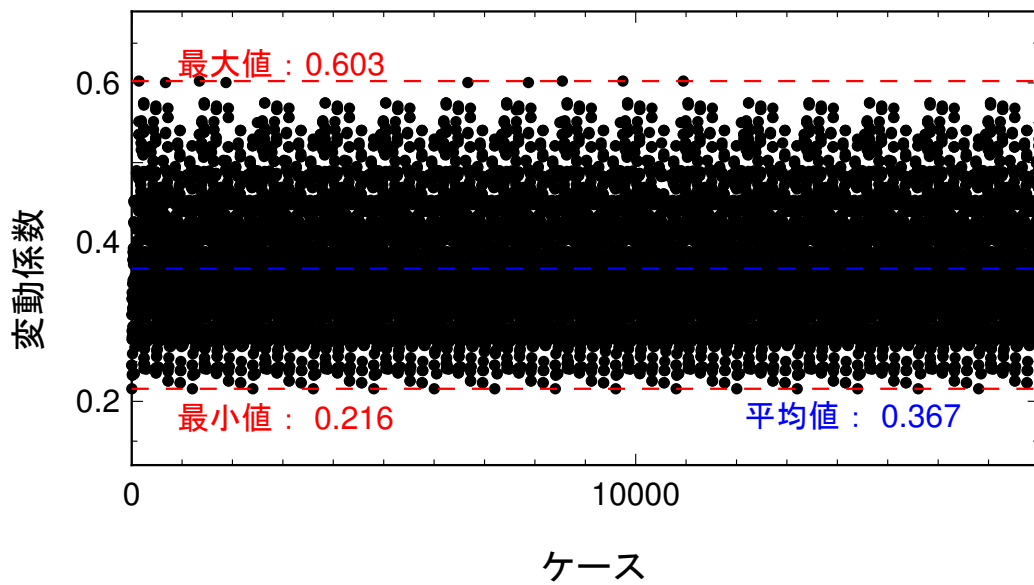


(b) 終局回転角の変動係数

図 4.17 シアスパン比  $L/D$  を変動させた場合の変動係数

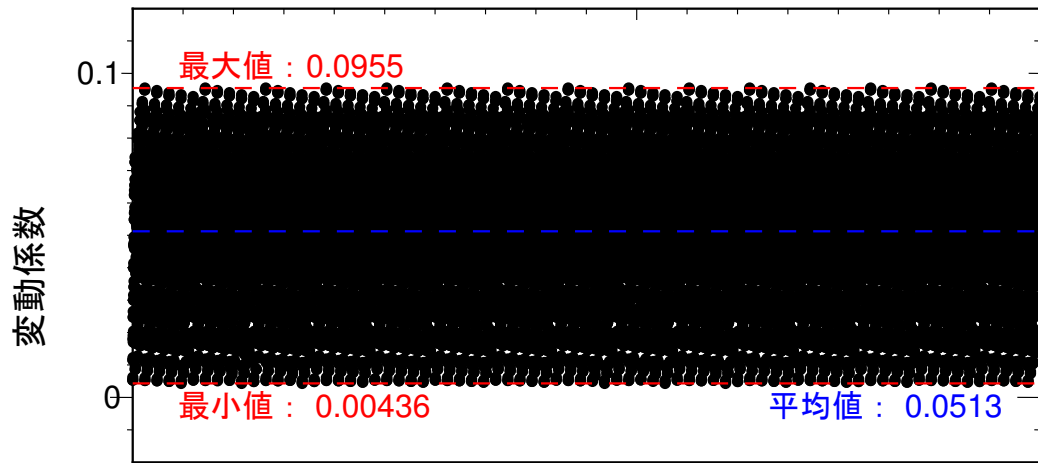


(a) 曲げ終局耐力の変動係数

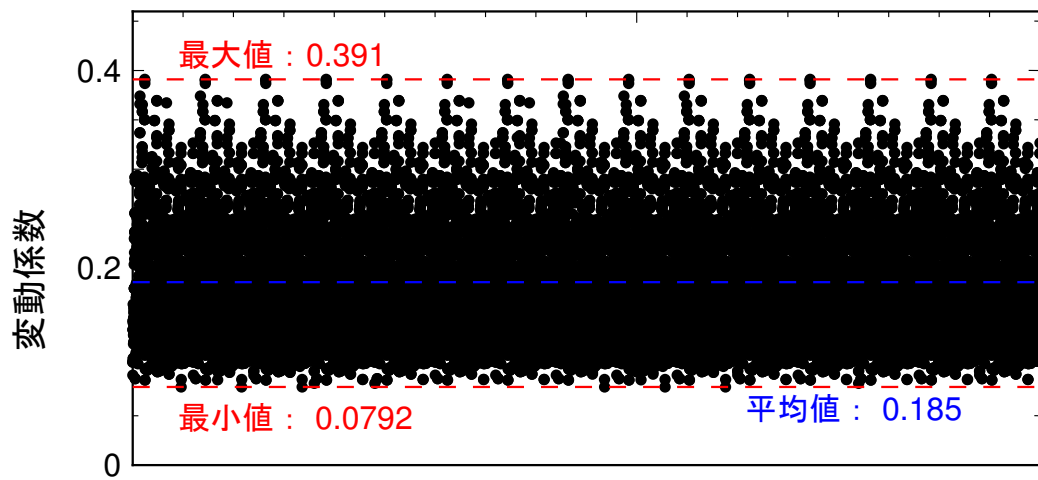


(b) 終局回転角の変動係数

図 4.18 PC 鋼材係数  $q$  を変動させた場合の変動係数

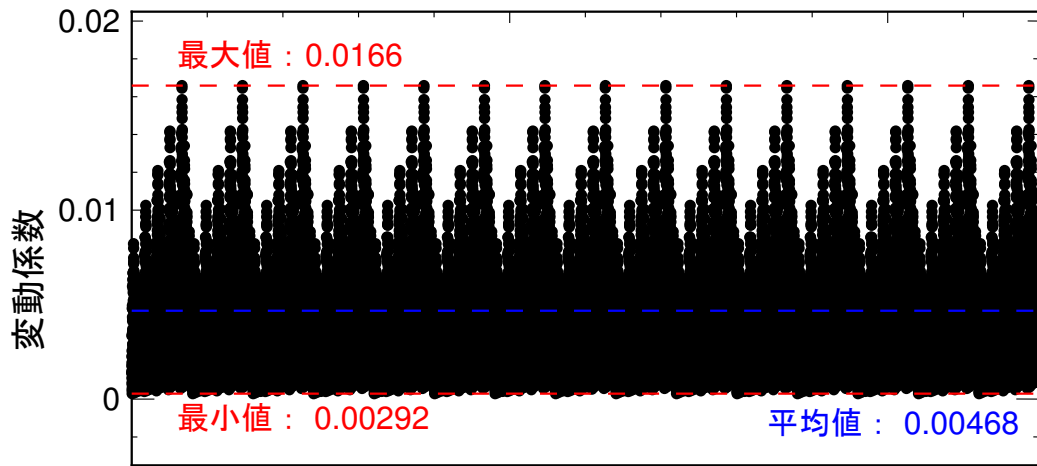


(a) 曲げ終局耐力の変動係数

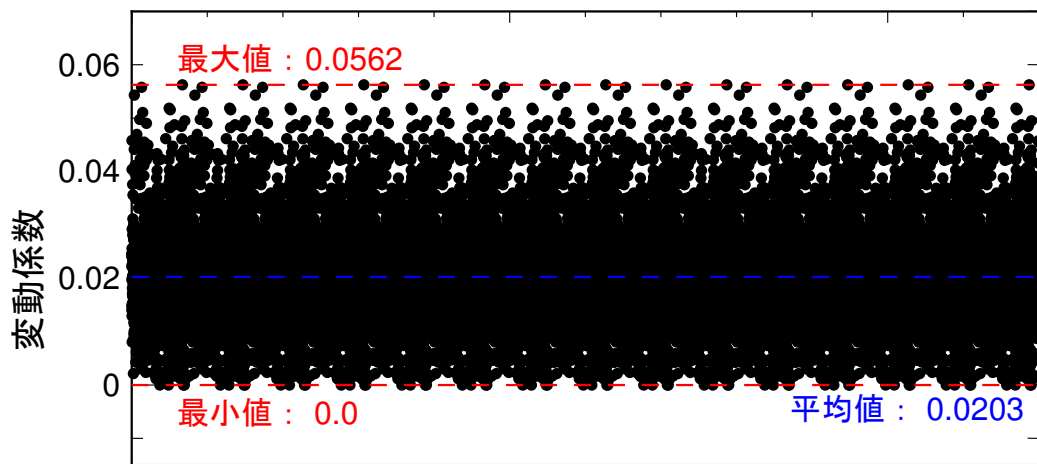


(b) 終局回転角の変動係数

図 4.19 導入力レベル  $\lambda_{pe}$  を変動させた場合の変動係数



(a) 曲げ終局耐力の変動係数



(b) 終局回転角の変動係数

図 4.20 PC 鋼材配置位置  $e_p/D$  を変動させた場合の変動係数

## 4.4 パラメトリック解析結果に基づく曲げ終局耐力点算定式の検討

前節においては、パラメトリック解析結果に基づく検討から曲げ終局耐力点算定式の変数に関する妥当性について示した。本節では、算定式で定義した係数  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  について、解析結果を用いた回帰分析による評価を行う。

係数の回帰分析を行う際の説明変数は、前章までで示したように、曲げ終局耐力に関しては、梁せい  $D$ 、梁幅  $B$ 、コンクリートの圧縮強度  $f'_c$ 、PC 鋼材係数  $q$ 、導入力レベル  $\lambda_{pe}$  の 5 つ、また終局回転角に関しては、PC 鋼材の降伏強度  $\sigma_{py}$ 、シアスパン比  $L/D$ 、PC 鋼材係数  $q$ 、導入力レベル  $\lambda_{pe}$  の 4 つである。ここで、曲げ終局耐力算定式の形に従って、コンクリートに関するパラメータは  $BD^2 f'_c$  の形にまとめて扱うことにする。またパラメトリック解析結果において PC 鋼材長さを  $L/D$  を用いた式 (4.19) で設定していることから、 $\sigma_{py}$  と  $L/D$  は PC 鋼材に関するパラメータと見ることができ、さらに終局回転角算定式の項とは次の関係が成立するので、これらは  $\delta_{py}/D$  の形で代表させることにする。PC 鋼材のヤング率  $E_p$  は  $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$  とした。

$$\frac{\delta_{py}}{D} = \frac{\sigma_{py} \cdot I_p}{D \cdot E_p} = \frac{\sigma_{py} \cdot (2L/D + 1)}{E_p} \quad (4.21)$$

本研究では、以上の説明変数を用いた解析結果の曲げ終局耐力点に関する回帰分析を段階を踏んで行うことにする。すなわち、いずれもまず PC 鋼材係数  $q$  による回帰分析を行い、得られた回帰係数に対して残りの説明変数による回帰分析を行うことで、算定式の係数の値を評価する。

#### 4.4.1 曲げ終局耐力点算定式の係数評価

曲げ終局耐力算定式の係数評価を行うにあたって、まず算定式 (4.4) を次の形に置き直した上で、導入力レベル  $\lambda_{pe}$  の値とコンクリートに関するパラメータ  $BD^2 f'_c$  の値がそれぞれ同じ解析ケースの曲げ終局耐力結果に対して PC 鋼材係数  $q$  による回帰分析を行う。

$$\frac{M_u}{BD^2 f'_c} = \alpha'_1 \cdot q + \alpha_0 \quad (4.22)$$

ここで、

$$\alpha'_1 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot \lambda_{pe} \quad (4.23)$$

図 4.21 は以上のような解析ケースの曲げ終局耐力  $M_u/BD^2 f'_c$  と PC 鋼材係数  $q$  の関係を示したものである。まず上段には  $D = 400(\text{mm})$ ,  $B = D/2$ ,  $f'_c = 40(\text{N/mm}^2)$  の結果を、中段には  $D = 800(\text{mm})$ ,  $B = 2D/3$ ,  $f'_c = 60(\text{N/mm}^2)$ , 下段には  $D = 1200(\text{mm})$ ,  $B = D$ ,  $f'_c = 80(\text{N/mm}^2)$  の結果を示しているのに加え、それぞれの段において左側の図には  $\lambda_{pe} = 0.5$  の場合の関係を、右側には  $\lambda_{pe} = 0.8$  の結果を示しており、それぞれパラメータの値を図左上に示している。それぞれの図には式 (4.22) による回帰直線とその式も示してあるが、いずれにおいても曲げ終局耐力の結果  $M_u/BD^2 f'_c$  は PC 鋼材係数  $q$  の値と比例関係にあり、またその値が回帰直線による値のほぼ  $\pm 10\%$  程度の範囲に収まっていることがわかる。それぞれの回帰直線の式における回帰係数  $\alpha'_1$ ,  $\alpha_0$  の値を見てみると、同じ段における右側と左側の図、つまりコンクリートに関するパラメータ  $BD^2 f'_c$  の値は同一で、導入力レベル  $\lambda_{pe}$  の値が異なる場合を比較すると  $\alpha'_1$ ,  $\alpha_0$  の値も変化していることがわかる。しかし、上中下段それぞれの右側もしくは左側の図、つまり  $BD^2 f'_c$  の値が異なり、 $\lambda_{pe}$  の値は同一の場合を比較すると、 $BD^2 f'_c$  の値による  $\alpha'_1$  と  $\alpha_0$  の値の変化はほとんど見られない。このような傾向は、ここで示した以外のパラメータの組み合わせによる結果においても同様であることを確認している。これらのことから  $\alpha'_1$ ,  $\alpha_0$  の値の評価に際しては、 $BD^2 f'_c$  による変化は大きいものではなく、いずれに対しても  $\lambda_{pe}$  の関係を見る必要があることがわかる。

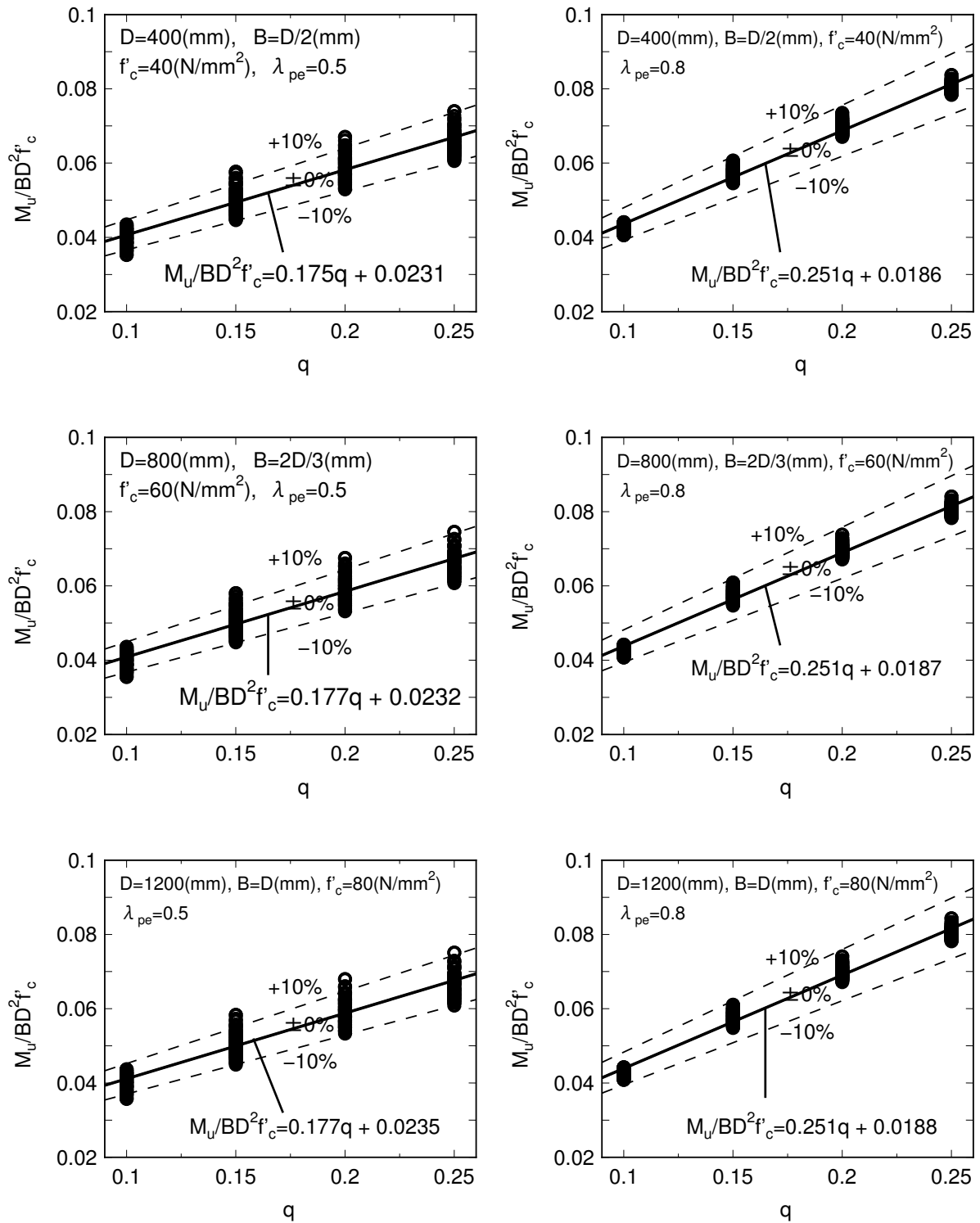


図 4.21 曲げ終局耐力と PC 鋼材係数  $q$  の関係

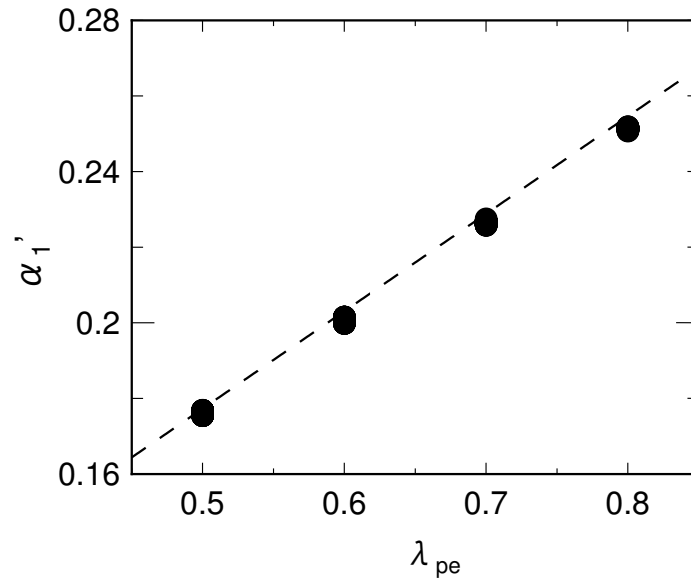
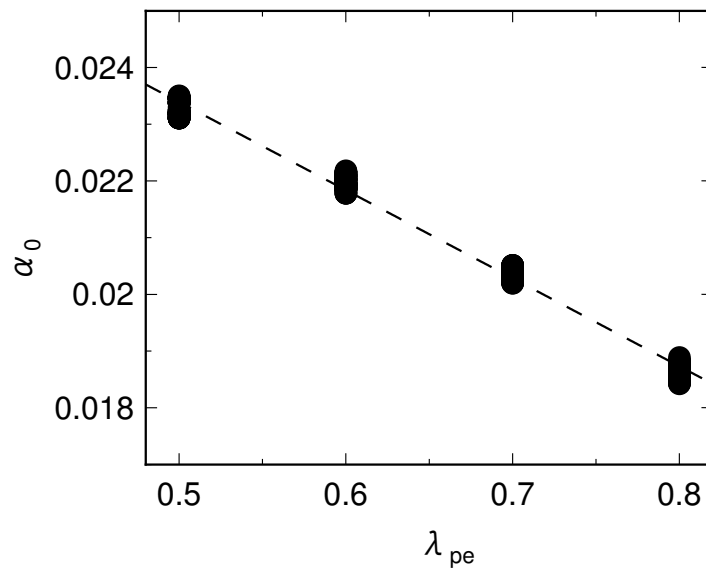

 (a)  $\alpha_1'$  との関係

 (b)  $\alpha_0$  との関係

 図 4.22 回帰係数  $\alpha_1'$ ,  $\alpha_0$  と導入力レベル  $\lambda_{pe}$  の関係

図 4.22 に、図 4.21 のような回帰分析をすべての  $\lambda_{pe}$  と  $BD^2 f_c'$  の場合について行い、その結果得られたすべての回帰係数  $\alpha_1'$ ,  $\alpha_0$  と  $BD^2 f_c'$  の関係を示す。図の (a) は  $\alpha_1'$  と  $\lambda_{pe}$  の関係を、(b) は  $\alpha_0$  と  $\lambda_{pe}$  の関係を見たものであり、それぞれの図には  $\lambda_{pe}$  による回帰直線を示してある。各図を見ると、明らかなように、各  $\lambda_{pe}$  ごとにプロットはほぼまとまっており、 $\alpha_1'$  と  $\alpha_0$  の値はどちらもほぼ一直線上に並んでいるため、 $\alpha_1'$  と  $\alpha_0$ ,  $\lambda_{pe}$  の間には明確な相関関係が見て取れる。図の回帰直線と式 (4.22), 式 (4.23) との関係から得られ

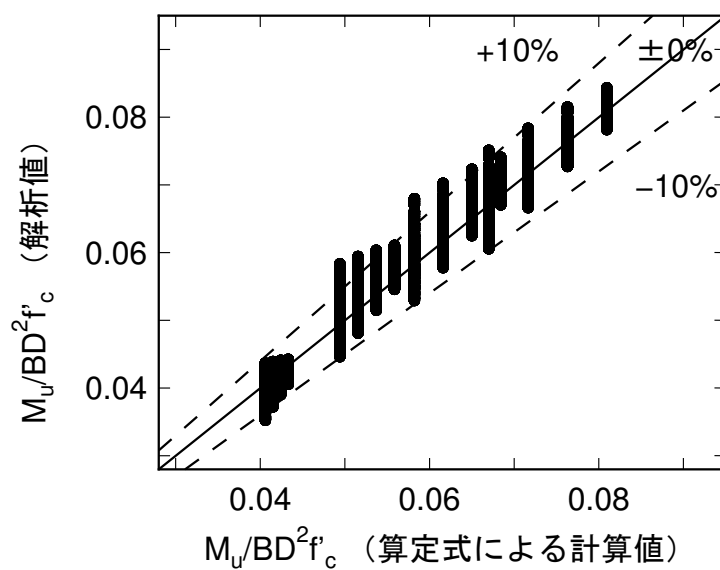


図 4.23 曲げ終局耐力  $\frac{M_u}{BD^2 f_c}$  の解析値と計算値の比較

た曲げ終局耐力算定式の係数  $\alpha'_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_0$  の値はそれぞれ次の通りである。

$$\alpha_1 = 0.051 \quad (4.24)$$

$$\alpha_2 = 0.25 \quad (4.25)$$

$$\alpha_0 = -0.016\lambda_{pe} + 0.031 \quad (4.26)$$

図 4.23 に曲げ終局耐力に関する全解析ケースの解析値と、以上の係数の値を用いた算定式 (4.4) による計算値の比較を示す。提案式による値はおおむね解析値の  $\pm 10\%$  内に収まっており、本提案式によって良好に解析値を追跡できることがわかる。

#### 4.4.2 終局回転角算定式の係数評価

終局回転角算定式の係数評価においては、曲げ終局耐力算定式の検討と同様に、算定式(4.14)を次の形に置き直し、導入力レベル  $\lambda_{pe}$  の値と PC 鋼材に関するパラメータ  $\delta_{py}/D$  の値が同一であるすべての解析ケースから得られた終局回転角の結果  $\theta_u \cdot D/\delta_{py}$  に対して、PC 鋼材係数  $q$  による回帰分析を行う。

$$\frac{D}{\delta_{py}}\theta_u = \beta_1 \frac{1}{q} + \beta'_2 \quad (4.27)$$

ここで、

$$\beta'_2 = \beta_2 \cdot \lambda_{pe} \quad (4.28)$$

図 4.24 はこのような解析ケースについて終局回転角の結果  $\theta_u \cdot D/\delta_{py}$  と PC 鋼材係数の逆数  $1/q$  の関係を示したものである。曲げ終局耐力の比較と同様に、上段には  $\sigma_{py} = 800\text{N/mm}^2$ ,  $L/D = 4$  の結果を、中段には  $\sigma_{py} = 1000\text{N/mm}^2$ ,  $L/D = 6$  の結果を、下段には  $\sigma_{py} = 1200\text{N/mm}^2$ ,  $L/D = 8$  の結果を示しているのに加え、それぞれの段の左側には  $\lambda_{pe} = 0.6$  の結果を、右側には  $\lambda_{pe} = 0.8$  の結果を示しており、図の (a) には導入力レベル  $\lambda_{pe}$  の値が異なる場合の比較を、また (b) には PC 鋼材に関するパラメータ  $\delta_{py}/D$  の値が異なる場合の比較を示しており、さらに各図において式 (4.27) の関係による回帰直線とその式を示している。それぞれの図を見ると、いずれにおいても終局回転角の結果  $\theta_u \cdot D/\delta_{py}$  は  $1/q$  と比例関係にあることと、その値が回帰直線のほぼ  $\pm 10\%$  程度に収まっていることが確認できる。しかし、それぞれの回帰直線の式における回帰係数  $\beta_1$ ,  $\beta'_2$  の値を見てみると、曲げ終局耐力の場合とは異なり、各段の左側と右側の図、つまり  $\lambda_{pe}$  の値が異なる場合と上中下段それぞれの左側もしくは右側の図、つまり  $\delta_{py}/D$  の値が異なる場合を比較すると、 $\lambda_{pe}$  の値が異なる場合は  $\delta_{py}/D$  の値が異なる場合と比べて  $\beta_1$  の変化が幅があまり大きくはないものの、どちらを変化させた場合においてもおおむね  $\beta_1$ ,  $\beta'_2$  の値が変化していることがわかる。これらのことから  $\beta_1$  および  $\beta'_2$  の評価については  $\lambda_{pe}$ ,  $\delta_{py}/D$  両方との関係について検討し、その評価を行う必要があることがわかる。また、このような傾向はここで示した結果以外についても同様であることを確認している。

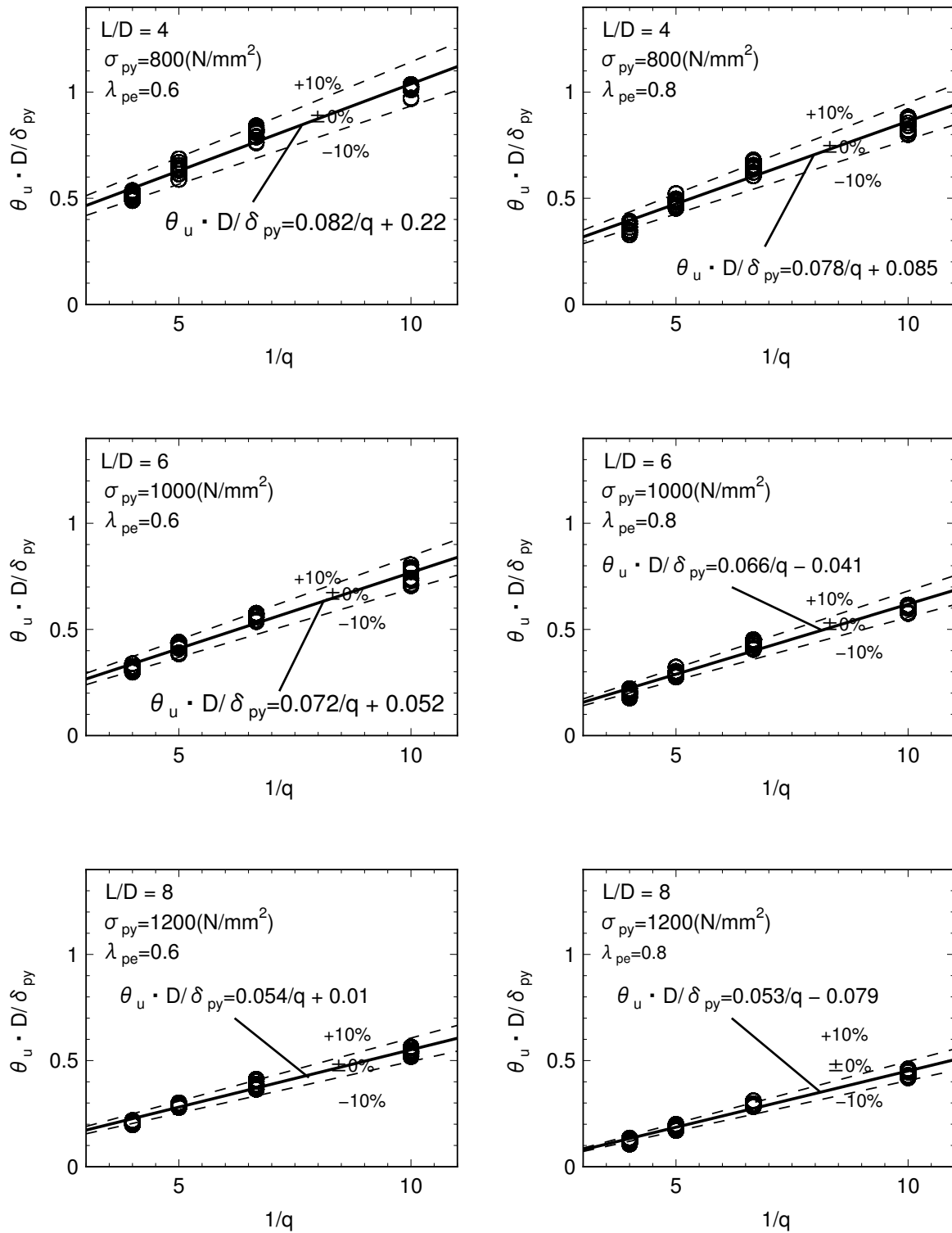


図 4.24 終局回転角と PC 鋼材係数  $q$  の関係

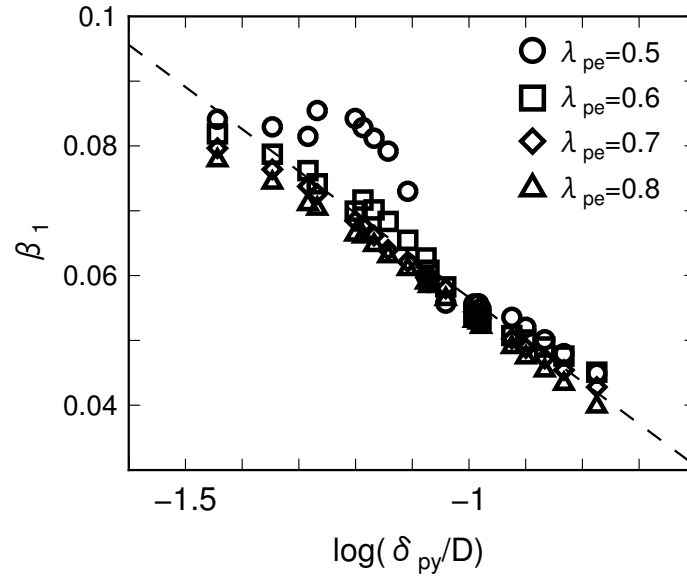
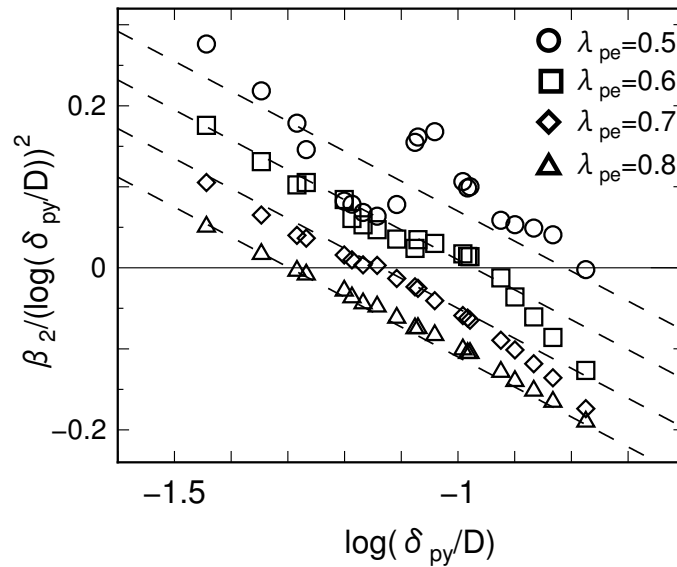

 (a)  $\beta_1$  との関係

 (b)  $\beta_2$  との関係

 図 4.25 回帰係数  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  と  $\lambda_{pe}$ ,  $\delta_{py}/D$  の関係

図 4.25 に、以上のような回帰分析をすべての  $\lambda_{pe}$  および  $\delta_{py}/D$  の場合について行い、その結果得られたすべての回帰係数  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  と PC 鋼材に関するパラメータ  $\delta_{py}/D$  の関係を示す。 $\beta_1$  については  $\delta_{py}/D$  と指数的な関係が見られ、 $\beta_2'$  については式 (4.28) を用いて値を置き換えた  $\beta_2$  と  $\delta_{py}/D$  との間に指数的な関係に加えて、さらに高次関数的な関係が見られたことから、それぞれ回帰が容易な線形的関係として評価するために、図の (a) には  $\beta_1$  と  $\log(\delta_{py}/D)$  の関係を示し、(b) には、 $\beta_2/(\log(\delta_{py}/D))^2$  と  $\log(\delta_{py}/D)$  の関係を示

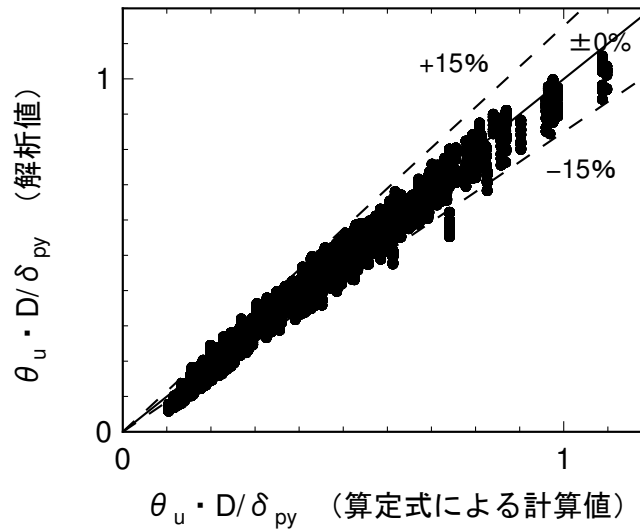


図 4.26 終局回転角  $\frac{D}{\delta_{py}} \theta_u$  の解析値と計算値の比較

してある。まず (a), (b) について,  $\lambda_{pe}$  と  $\delta_{py}/D$  による変化を見てみると, (a) では  $\lambda_{pe}$  の値が小さくなるほど  $\beta_1$  の値のばらつきが大きくなっていることから, この結果として  $\lambda_{pe} = 0.5$  の場合に一部の値がやや外れた位置に分布しているものの, おおむね各  $\lambda_{pe}$  による値はまとまっており, またすべての場合において右下がりの分布を示していることがわかる。(b) では  $\lambda_{pe}$  の値が大きくなると  $\beta_2/(\log(\delta_{py}))^2$  の値が減少し, また  $\lambda_{pe}$  の値ごとにおおむね直線的な右下がりの分布を示すことがわかる。これらの分布から  $\beta_1$  については (a) の関係から  $\log(\delta_{py}/D)$  のみによる回帰分析を, また  $\beta_2$  については (b) の関係から  $\lambda_{pe}$  および  $\log(\delta_{py}/D)$  による重回帰分析を行うこととした。(a), (b) に示してある点線はそれぞれの回帰直線であり, いずれもそれぞれの値の分布に沿っていることが確認できる。図の回帰直線と式 (4.27), 式 (4.28) との関係から得られた終局回転角算定式の係数  $\beta_1$  と  $\beta_2$  の回帰式はそれぞれ次の通りである。

$$\beta_1 = -0.065 \log\left(\frac{\delta_{py}}{D}\right) - 0.0084 \quad (4.29)$$

$$\beta_2 = \left\{ -0.37 \log\left(\frac{\delta_{py}}{D}\right) - 0.6 \lambda_{pe} \right\} \left\{ \log\left(\frac{\delta_{py}}{D}\right) \right\}^2 \quad (4.30)$$

図 4.26 に終局回転角に関する全解析ケースの解析値と, 以上の係数の回帰式を用いた式 (4.14) による計算値の比較を示す。結果はほぼ  $\pm 15\%$  の範囲に分布しており, 算定式を用いることで解析値を比較的良好に表現できることがわかる。

## 4.5 実験結果および既往の算定式との比較

本節では、以上で得られた算定式の既往の実験結果に対する適用性について検討する。対象とした実験については、既往の論文からアンボンド PCaPC 圧着構造を対象に行った実験 5 ケースの十字型試験体を対象とした。また実験結果との比較に伴って、アンボンド PCaPC 構造を対象とした算定式ではないが、参考として普通鉄筋を通し配筋したアンボンド PC 部材を対象とする最上・是永式および文献 9) に示された PC 部材性能指針 (案) における式 (以下、PC 部材性能指針 (案) 式) を用いた場合との比較を行った。最上・是永式は、アンボンド PC 部材の終局時の PC 鋼材張力と塑性率を算定するものであり、また PC 部材性能指針 (案) 式は、アンボンド PC 部材の PC 鋼材張力とボンド PC 部材のヒンジ部変形角を算定するものである。

### 4.5.1 対象とした既往の実験結果

対象とした実験結果は、岸田ら [4-9]、山下ら [4-10]、西村ら [4-11]、キムら [4-6]、Cheok ら [4-12] が行った 1/2~1/3 スケール程度の試験体を用いたものであり、いずれも試験体の最大荷重は梁の曲げ耐力により決定されている。岸田ら、山下ら、西村らの行った実験では、本研究で対象とした架構と同様に、梁断面に上下 2 段対称配置としたアンボンド PC 鋼材を用いて梁部材を柱に圧着した試験体を用いている。キムらの実験では柱・梁接合部に鋼材破断時を想定した部材の落下防止用ブラケットを設けている他、試験体によって PC 鋼材長さに違いがあり、また Cheok らの実験では PC 鋼材に一部ボンド区間を設けているが、これらやや条件が異なる試験体に対する適用性も検討する。表 4.3 および表 4.4 にこれらの実験結果における試験体の諸元および実験で得られた曲げ終局耐力、終局時の変形それぞれの値と、本算定式による計算値に対する曲げ終局耐力および終局時の変形の実験値の比を示す。算定式による計算に必要な、導入力レベル、コンクリートの圧縮強度および PC 鋼材の降伏強度については基本的には計測値および部材実験結果を用いており、それらが記述されていない場合には設計値を用いた。

表 4.3 実験値諸元

| 参考文献                          | 試験体名     | 梁幅<br>(mm) | 梁せい<br>(mm) | コンクリートの圧<br>縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) | PC鋼材の降伏<br>強度(N/mm <sup>2</sup> ) | PC鋼材の全<br>断面積(mm <sup>2</sup> ) | PC鋼材全長<br>(mm) | 導入カ<br>レベル |
|-------------------------------|----------|------------|-------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------|------------|
| 岸田慎司ら <sup>[4-9]</sup>        | BNU      | 250        | 400         | 76.6                                | 1014                              | 1608.4                          | 3700           | 0.56       |
| 山下仁ら <sup>[4-10]</sup>        | PCBB00-Ⅲ | 300        | 450         | 56.1                                | 1093                              | 831.0                           | 3990           | 0.59       |
| 西村知明ら <sup>[4-11]</sup>       | KPC-RU-I | 200        | 300         | 56.2                                | 1083                              | 831.0                           | 1900           | 0.49       |
| キム・ミョンミンら <sup>[4-6]</sup>    | UBJ1     | 280        | 280         | 85                                  | 1082                              | 908.0                           | 2100           | 0.67       |
|                               | UBJ2     |            |             | 62                                  | 1051                              | 908.0                           | 1200           | 0.69       |
| G. S.Cheokら <sup>[4-12]</sup> | G-P-Z4   | 203        | 406         | 30.1                                | 1820                              | 445.2                           | 1219           | 0.66       |
|                               | H-P-Z4   |            |             | 32.2                                |                                   |                                 |                |            |

表 4.4 実験における曲げ終局耐力点および算定式との比較

| 参考文献                          | 試験体名     | 曲げ終局耐力<br>(kN)  | 耐力実験値/<br>計算値(%) | 終局時の変形<br>角(%) | 変形実験値/<br>計算値(%) | 備考                       |
|-------------------------------|----------|-----------------|------------------|----------------|------------------|--------------------------|
| 岸田慎司ら <sup>[4-9]</sup>        | BNU      | 146.6<br>-149.0 | 96%<br>98%       | 2.0<br>-2.5    | 97%<br>121%      | 層せん断力<br>層間変形角           |
| 山下仁ら <sup>[4-10]</sup>        | PCBB00-Ⅲ | 119.7<br>-116.8 | 102%<br>99%      | 3.0<br>-3.0    | 101%<br>101%     | 梁せん断力<br>梁部材角            |
| 西村知明ら <sup>[4-11]</sup>       | KPC-RU-I | 59.2<br>-58.2   | 105%<br>104%     | 2.1<br>-2.8    | 113%<br>152%     | 梁せん断力<br>層間変形角           |
| キム・ミョンミンら <sup>[4-6]</sup>    | UBJ1     | 162<br>-161     | 119%<br>116%     | 3.0<br>-3.0    | 132%<br>132%     | 層せん断力<br>層間変形角<br>ブラケット有 |
|                               | UBJ2     | 165<br>-161     | 128%<br>127%     | 1.9<br>-2.0    | 118%<br>124%     |                          |
| G. S.Cheokら <sup>[4-12]</sup> | G-P-Z4   | 228<br>-228     | 126%<br>126%     | 2.7<br>-2.7    | 191%<br>191%     | 層せん断力<br>層間変形角<br>ボンド区間有 |
|                               | H-P-Z4   | 248<br>-248     | 135%<br>135%     | -2.6<br>-2.6   | 177%<br>177%     |                          |

## 4.5.2 比較に用いた既往の算定式

### 4.5.2.1 最上・是永式

最上・是永らが提案した終局時の PC 鋼材張力算定式および塑性率算定式を次に示す。曲げ終局耐力  $M_u$  は PC 鋼材張力  $T_{pu}$  とコンクリートのストレスブロック係数を用いた算定法から求められ、終局時の部材角  $R_b$  は塑性率  $\mu$  と降伏時の部材角  $R_y$  から算定される。また降伏時の部材角  $R_y$  は、鉄筋コンクリート構造計算基準 [4-7] による柱の降伏耐力式の軸力を PC 鋼材張力に置き換えて得られた梁部材の降伏耐力と剛性低下率を用いて求められる。なお本検討では、対象とするアンボンド PCaPC 部材には柱・梁間に通し鉄筋がないため、剛性低下率算定式には鉄筋の有効せいとして梁上端から引張側 PC 鋼材までの距離を用いた。

$$T_{pu} = (0.97\lambda_{pe} \cdot q + 0.021)BDf'_c \quad (4.31)$$

$$R_b = \mu R_y \quad (4.32)$$

$$\mu = \alpha(\lambda_{pe} \cdot q)^{-0.5} + 1 - 1.7\alpha \quad (4.33)$$

$$\alpha = 2.2\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.83} + 0.76 \quad (4.34)$$

### 4.5.2.2 PC 部材性能指針 (案) 式

PC 部材性能指針 (案) によるアンボンド PC 部材を対象とした終局時の PC 鋼材張力算定式およびボンド PC 部材を対象とした終局時のヒンジ部変形角の算定式を次式に示す。曲げ終局耐力  $M_u$  は PC 鋼材張力  $T_{pu}$  とコンクリートのストレスブロック係数を用いた算定法から求められ、終局時の部材角  $R_b$  はヒンジ部変形角  $R_u$  と梁の弾性変形による変形角の和として算定される。

$$T_{pu} = (\sigma_{pe} + (102 - \frac{5.21 \times 10^5}{f'_c} P_p))A_{pc} \quad (4.35)$$

$$R_u = \frac{\epsilon_{py} - \epsilon_{pe}}{(\frac{h_{pc2}}{D} - \frac{q_{pr}}{2} - 0.25)F} \quad (4.36)$$

ただし、

$$P_p = \frac{A_{pc}}{Bh_{pc2}}, \quad q_{pr} = \frac{A_{pc}(\sigma_{py} + \sigma_{pe})}{BDf'_c}, \quad F = 0.5 \quad (4.37)$$

$P_p$  : PC 鋼材比,  $q_{pr}$  : 鋼材係数,  $\epsilon_{py}$  : 降伏時における PC 鋼材のひずみ,  $\epsilon_{pe}$  : 有効プレストレス力による PC 鋼材のひずみ,  $h_{pc2}$  : 梁端から引張側 PC 位置までの距離

## 4.5.2.3 層せん断力および層間変形角の算定方法

実験では、表 4.4 の備考に示すように、曲げ終局耐力については梁部材支持位置での荷重（梁せん断力）を計測したケースと層せん断力を計測したケースが、終局時の変形については梁部材角を計測したケースと層間変形角を計測したケースがある。そのため、各算定式から得られた曲げ終局耐力については梁せん断力もしくは層せん断力に、終局時の変形についても梁部材角もしくは層間変形角に変換して比較を行っており、また各図においてすべてのケースを合わせて示している。本項では、これらの変換に用いた方法の詳細について記述する。梁せん断力  $Q_b$  については算定式から求めた曲げ終局耐力  $M_u$  と梁部材圧着面から支持位置までの距離  $L_b$  を用いて次式により求める。

$$Q_b = \frac{M_u}{L_b} \quad (4.38)$$

梁部材角  $R_b$  については算定式から求めた回転角  $\theta_u$  に梁部材の弾性変形  $\delta_b$  による変形分を足し合わせたものとして以下の式を用いて求める。

$$R_b = \theta_u + \delta_b / L_b \quad (4.39)$$

ここで、

$$\delta_b = \frac{Q_b}{3E_b I_b} (L_b)^3 \quad (4.40)$$

ただし、 $E_b I_b$ ：梁部材の剛性

層せん断力  $Q_c$  については算定式により求めた曲げ終局耐力  $M_u$  が圧着面における値であることから、十字型試験体の接合部中央での曲げモーメントの釣り合い状態を想定し、梁支持位置から接合部中央までの距離  $L_b + D_c/2$  と接合部中央から柱部材支持位置までの距離  $H_c + D_b/2$  を用いて次式のように求める。

$$Q_c = \frac{M_u}{L_b} \cdot \frac{L_b + \frac{D_c}{2}}{H_c + \frac{D_b}{2}} \quad (4.41)$$

ただし  $D_b$ ：梁せい、 $H_c$ ：梁天端から柱支持位置までの距離、 $D_c$ ：柱の幅

層間変形角  $R_c$  については梁圧着面における回転角および梁部材の弾性変形と柱部材の弾性変形を考慮し、式 (4.43) で表される梁部材の変形による層間変形  $\delta_{cb}$  と式 (4.44) で表される柱部材の弾性変形  $\delta_{ce}$  を用いて、層間変形角  $R_c$  を以下の式により求める。

$$R_c = \frac{\delta_{cb} + \delta_{ce}}{2(H_c + \frac{D}{2})} \quad (4.42)$$

ここで、

$$\delta_{cb} = (\theta_u \cdot L_b + \delta_b) \frac{H_c + \frac{D_b}{2}}{L_b + \frac{D_c}{2}} \quad (4.43)$$

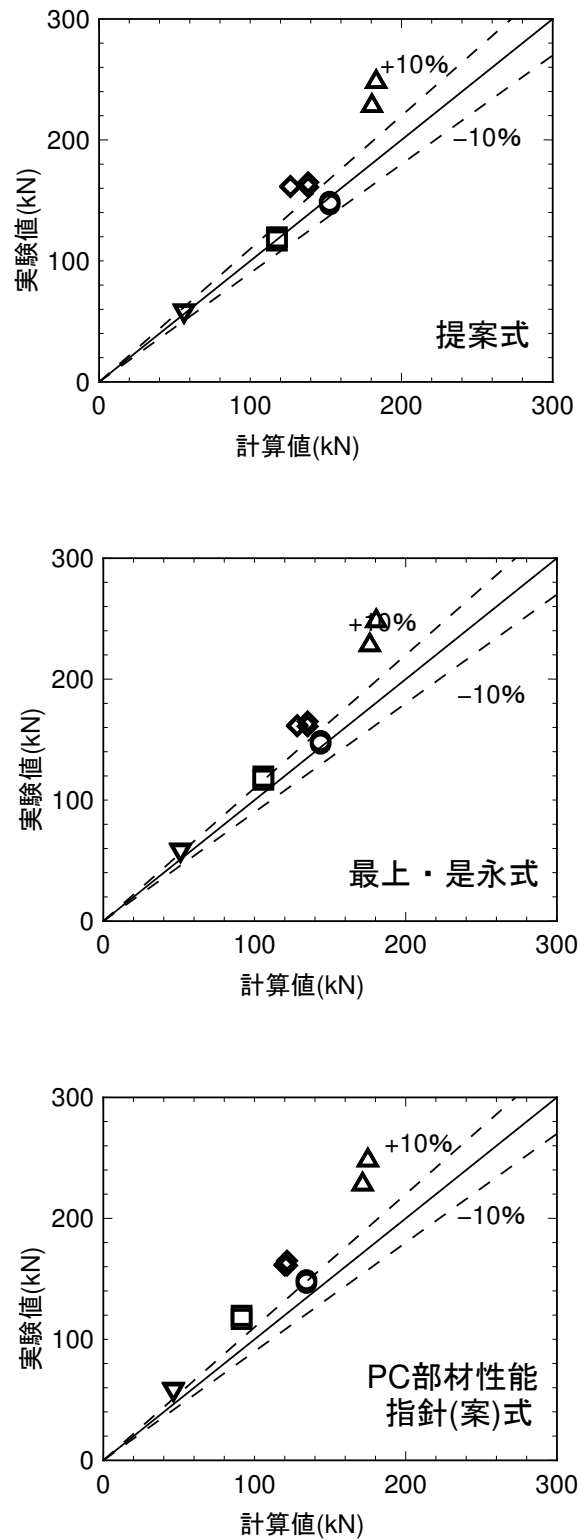
$$\delta_{ce} = 2 \frac{Q_c}{3E_c I_c} (H_c)^3 \quad (4.44)$$

ただし、 $E_c I_c$ ：柱部材の剛性

### 4.5.3 各実験結果および既往の算定式との比較

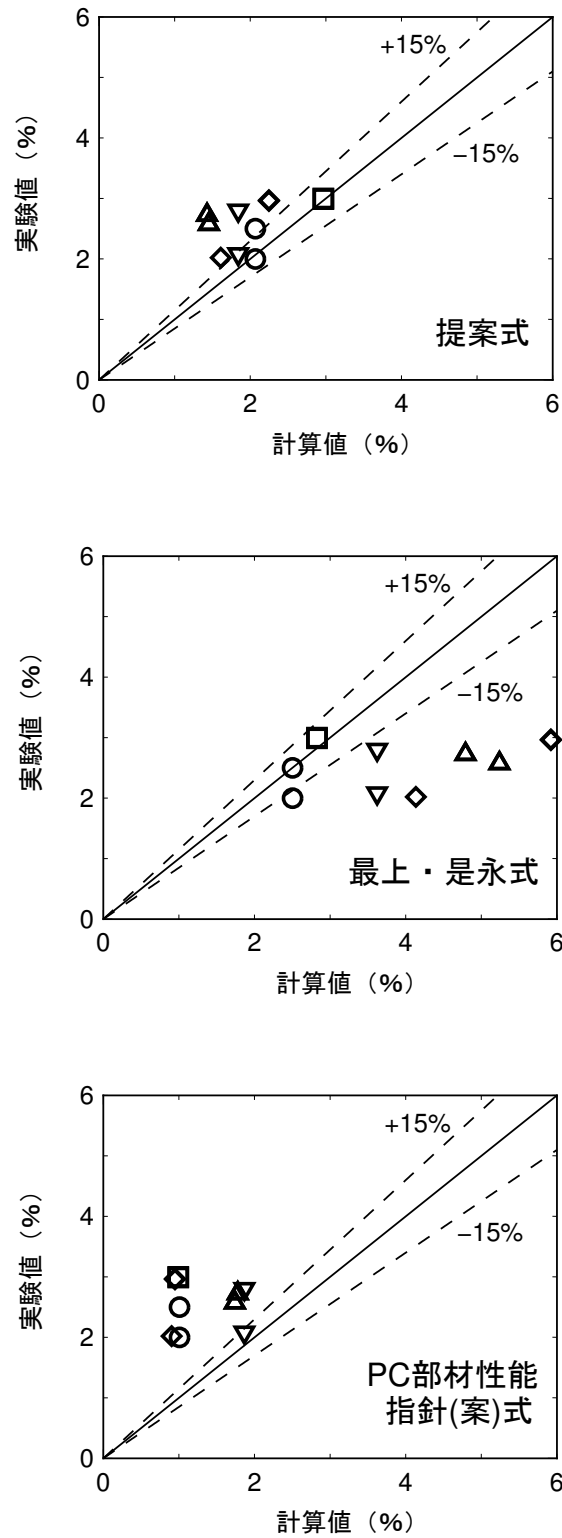
図 4.27 を見ると、各算定式ともキムらや Cheok らを除いて実験値の傾向を捉えていることがわかる。またキムらや Cheok らの結果についても、実験値に対して+10 %であることを示す点線から外れた位置に分布しているものの、いずれの算定式もおおむねその傾向を捉えていることがわかる。しかしより詳しく見ていくと、最上・是永式および PC 部材性能指針(案)式による計算値は全体的に実験値をやや小さく評価する傾向があるが、本提案式では岸田ら、山下ら、西村らの実験結果を良好に表現できており、さらにキムらや Cheok らの実験結果についてもその傾向を比較的良好に表現できていることがわかる。キムらや Cheok らの実験に対して提案式の値が小さく評価されるのには、キムらの実験についてはスパイラル拘束筋やブラケットの影響などが考えられ、また Cheok らの実験についても部分的なアンボンドであることや密な横補強筋によるコンファインド効果などの影響が考えられる。

次に図 4.28 を見ると、PC 部材性能指針(案)式、最上・是永式ともに対象とした試験体が基本的には適用範囲外であるため、PC 部材性能指針(案)式による計算値では全体的に実験値が小さく評価され、また最上・是永式ではばらついて評価されている。本提案式では、Cheok らの結果について大きく過小評価しているものの、キムらの結果については過小評価ながら比較的その傾向を表現できており、さらに岸田ら、山下ら、西村らの結果ではおおむね±15%程度で評価できていることがわかる。



○ 岸田ら   □ 山下ら   ▽ 西村ら   ◇ キムら   △ Cheokら

図 4.27 本研究による曲げ終局耐力式と既往の算定式の比較



○ 岸田ら   □ 山下ら   ▽ 西村ら   ◇ キムら   △ Cheokら

図 4.28 本研究による終局回転角算定式と既往の算定式の比較

## 4.6 まとめ

本研究ではアンボンド PCaPC 梁の圧着面を対象とする，終局時のモーメント計算式から終局耐力算定式を，終局時の力の釣り合い式から終局回転角算定式を提案した。本研究によって得られた知見を以下に示す。

1. 断面解析モデルを用いたパラメトリック解析を行い，曲げ終局耐力および終局回転角に関する各パラメータの影響を検討した。その結果，曲げ終局耐力については PC 鋼材係数，梁せい，梁幅，コンクリートの圧縮強度，導入力レベルの影響が大きく，終局回転角については PC 鋼材係数，導入力レベル，シアスパン比，PC 鋼材の降伏強度の影響が大きいため，曲げ終局耐力点の評価においてはこれらのパラメータによる影響を加味する必要があることを明らかにした。またこれらのパラメータは算定式に用いた変数と同様であることを示した。
2. パラメトリック解析結果に対する回帰分析により，算定式の係数評価を行った。曲げ終局耐力，終局回転角ともにまず PC 鋼材係数による回帰分析を行ったのち，得られた回帰係数に残りの影響の大きなパラメータによる回帰分析を行うことで，算定式における係数の回帰式を求めた。得られた係数の式を用いた算定式による計算値と解析結果の比較を行った結果，曲げ終局耐力および終局回転角それぞれについて算定式の結果は解析値を良好に表現できることを示した。
3. 得られた曲げ終局耐力および終局回転角算定式を既往の実験結果に適用し，さらに既往の算定式との比較を行った結果，本提案式は実験結果を曲げ終局耐力，終局回転角それぞれにおいて良好に表現することを示し，また既往の算定式と比べて比較的良好に実験結果の傾向を追跡できることを明らかにした。

## 参考文献

- [4-1] 日本建築学会 編：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説 第4版，1998.11
- [4-2] 2009年版 プレストレストコンクリート造技術基準解説及び設計・計算例編集委員会 編：2009年版 プレストレストコンクリート造技術基準解説及び設計・計算例，2009.9
- [4-3] 最上 達雄，是永 健好：逆対象曲げを受けるアンボンド PC 梁のモーメントー変形関係に関するパラメトリック解析 アンボンド PC 部材の構造特性に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，No.428，pp79-88，1991.10
- [4-4] 竹本 靖：アンボンド PRC 部材の曲げ終局時テンドン応力について，大林組技術研究所報，Vol.28，pp49-54，1984
- [4-5] 菅田 昌弘，中塚 侑：アンボンド PC 圧着エネルギー吸収型高復元性部材のフラッグ型履歴モデルに関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.598，pp133-140，2005.12
- [4-6] キム ミョンミン，塩原 等，楠原 文雄：施工性と修復性の向上を目指したアンボンド PCaPC 十字型部分架構の耐震実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp343-348，2008
- [4-7] 日本建築学会 編：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説ー許容応力度設計法ー，1999.11
- [4-8] アンボンド PC 部材の構造性能解明とその有効利用に関する研究委員会：アンボンドプレストレストコンクリートの建築物の設計 材料，力学性能，耐久性・耐火性から設計例まで，プレストレストコンクリート工学会，2012.10
- [4-9] 岸田 慎司，北山 和宏，森山 健作，丸田 誠：圧着接合されたプレストレスト・コンクリート十字型部分架構の復元力特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp421-426，2002
- [4-10] 山下 仁，溝口 光男，越川 武晃，菊地 優：スチールバンドを有するアンボンド PCaPC 圧着接合による柱・梁ト型試験体および十字型試験体の繰り返し載荷実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 IV，pp865-866，2009.8
- [4-11] 西村 知明，谷 昌典，西山 峰広：プレストレストコンクリート圧着骨組の損傷評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.3，pp511-516，2008
- [4-12] Cheek, G. S. and Lew, H. S. : Model Precast Concrete Beam-to-Column Connections Subject to Cyclic Loadign, PCI Journal, pp.80-92, Jul.-Aug. 1993

## 第5章

# 研究の総括および今後の課題

### 5.1 研究の総括

本論文は、アンボンド PCaPC 梁部材を対象とした断面解析モデル提案し、ト型試験体と十字型試験体など変形の仕方の異なる部分架構を用いた実験を対象にシミュレーション解析を行って断面解析モデルの妥当性を検証した論文と、曲げ終局耐力点算定式を提案して、本解析モデルを用いてその検討を行い、既往の実験や算定式との比較を行った論文をまとめたものであり、全5章で構成されている。

第1章「序論」においては、まず本研究の背景とプレストレストコンクリート構造の解析手法について触れた後、既往の研究のうち、アンボンド PC 構造およびアンボンド PCaPC 構造を対象としてその構造特性の評価を試みた研究について概観することで、本研究の位置づけを明確にし、それらを踏まえて本論文の目的、およびその概要について記述した。

第2章「アンボンド PCaPC 梁部材圧着接合面を対象とする断面解析モデル」では、本論文において用いた解析モデルであるアンボンド PCaPC 梁部材を対象とした断面解析モデルについて、本解析法の概要を示した後、その計算手順について概説した。まず概要と基本仮定事項について述べた後、コンクリート断面要素および PC 鋼材断面要素について圧着面に生じた目開きを回転角としてその変形量および伸び量から圧着面におけるモーメントを求めるまでの計算方法を示した。また変形量の評価方法ではト型試験体のような柱・梁間の目開きが一つ生じる場合と十字型試験体のような目開きが柱の両側で生じる場合の違いについても示し、またひずみの評価についてはコンクリート断面要素ではひずみが等分布する領域として圧縮破壊領域長さを仮定し、PC 鋼材要素ではアンボンドのため PC 鋼材全長を用いて評価することを示した。

第3章「アンボンド PCaPC 梁部材実験のシミュレーション解析」では第2章で示した断面解析モデルを用いて、実験結果との比較を通してその妥当性を検討した。まず材料モ

デルにおいて重要なパラメータである圧縮破壊領域長さ  $l_c$  および終局変形  $\delta_{cpu}$  を荷重一部材角関係から比較・検討し、もっとも適合する値を決定した。次にそれらの値を用いて荷重一部材角関係、PC 鋼材引張合力一部材角関係、等価粘性減衰定数、目開きにおいて解析結果と実験結果の比較を行った結果、本解析モデルを用いて実験結果を良好に追跡できることを確かめた。

第4章「アンボンド PCaPC 梁部材の曲げ終局耐力点算定式」では曲げ終局耐力および終局回転角算定式を提案し、パラメトリック解析を通してその変数と係数について検討を行った後、既往の実験結果および既往の算定式を用いて、その適用性を論じた。まずモーメント計算式を用いて曲げ終局耐力算定式の基本形を、軸力の釣り合い条件式を用いて終局回転角算定式の基本形を導出した。次にパラメトリック解析を行い、その結果得られた曲げ終局耐力および終局回転角に対して変動係数を用いた評価を行うことで、本提案式において用いた諸元で曲げ終局耐力および終局回転角を評価することがおおむね妥当であることを確認した。さらにパラメトリック解析結果を用いて各算定式の係数を回帰的に決定し、それらを用いて既往の実験結果およびアンボンド PC 部材等を対象とした算定式を用いて比較・検討を行った結果、本提案式によって実験結果を比較的良好に評価可能であることを示した。

## 5.2 今後の課題

本研究では断面解析モデルを用いたアンボンド PCaPC 梁部材の構造特性評価について論じた。以下に、今後の課題と展望について述べる。

本研究で研究対象としたアンボンド PCaPC 構造は、耐震性能を評価する手法が確立していないため、建設例がいまだ見られない。そのため本構造形式を実際の建築物に適用するに当たっては様々な技術的課題が考慮されるべきではあるがその種類などは多岐にわたるため、本節では本論文で用いた断面解析モデルについてのみ課題を述べる。

本研究で用いた断面解析モデルでは断面要素としてコンクリートと PC 鋼材の断面要素のみをモデル化している。しかしアンボンド PCaPC 部材は法令上、PC 鋼材が破断した際のフェイルセーフを組み込む必要があり、キムらなどは PC 鋼材破断時の部材落下防止用のブラケットを設けた試験体の実験結果について報告している。これらのことから本断面解析モデルについても断面に配置する要素を拡張し、さらに精度よく、また将来の仕様拡張を評価可能な解析モデルとすることが望ましい。

アンボンド PCaPC 構造は PC 鋼材特有のエネルギー吸収性能が低いという特徴を持っているため、建築物の耐震性能を評価する際には地震応答解析を行い、その履歴性状を十分に評価する必要があるが、アンボンド PCaPC 構造に対応した復元力特性はいまだ提案されて意なのが現状である。本研究で用いた断面解析モデルは3章で示したとおりその履歴性状も精度よく追跡することができるため、本解析モデルを用いることで復元力特性が得られるものと考えられる。

アンボンド PCaPC 部材ではエネルギー吸収性能の低さを補うため、目開きを利用して変

形する履歴型ダンパーが研究されている。履歴型ダンパーは設置が比較的簡単であり、うまく設置すればアンボンド PCaPC 部材の高復元性を保持したままそのエネルギー吸収性能を向上させることができる。しかし過剰な量、もしくは性能のダンパーを配置してしまうと残留変形を生じさせてしまうという課題も残っている。本解析モデルはこのようなダンパーを設置した場合の解析についても精度のよい結果が得られるため、本解析モデルを用いてさらなる検討が期待される。