

圧着方式によるプレキャストプレストレストコンクリート梁の曲げせん断変形評価

是永, 健好

<https://doi.org/10.15017/1398267>

出版情報 : 九州芸術工科大学, 2002, 博士 (芸術工学), 論文博士
バージョン :
権利関係 :

第4章 PC鋼材の付着すべりを考慮した曲げ変形解析法

4.1 実験におけるクリティカル断面の抜け出し回転変形

4.2 部材内での付着すべりを考慮した曲げ変形解析手法の提案

4.2.1 解析方法

- (1) 解析モデル
- (2) 梁端部の強拘束領域
- (3) 材料特性およびPC鋼材の付着特性
- (4) 抜け出し量および抜け出し回転変形の評価

4.2.2 解析結果および考察

- (1) 荷重一部材角関係および付着劣化進展状況
- (2) 抜け出し回転挙動

4.3 まとめ

第4章 参考文献

第4章 PC鋼材の付着すべりを考慮した曲げ変形解析法

PC鋼材の種類（PC鋼より線，PC鋼棒，異形PC鋼棒）をパラメータとした第2章の実験から，部材諸元が同じでもPC鋼材の付着性能によって，部材の荷重変形特性およびひび割れ性状が異なることが確認できた。PC鋼材の付着性能の相違は，PC鋼材の材軸方向ひずみ分布，部材各部の断面ひずみ分布やクリティカル断面におけるPC鋼材の抜け出し量，等の実験結果にも如実に表われた。したがって，既往の平面保持の仮定に立脚した部材解析法ではPCaPC部材の構造性能を評価できず，実験で得られた実現象を適切に評価できる解析法を検討する必要がある。

また，同実験における結果の分析から，引張側PC鋼材が柱梁接合部からだけでなく梁部からも抜け出し，その抜け出し量の絶対値はPC鋼材の付着条件によって異なるものの，接合部と梁からの抜け出し量の比率は鋼材の付着条件に関係なくほぼ一定であることが実験的に確認できた。

本章では，第2章で得られた知見に基づき，PC鋼材の付着すべり特性をより実現象に近い形で評価する解析法を提案する。すなわち，梁端部での抜け出し回転挙動，部材内でのPC鋼材の付着劣化過程および部材各部の損傷状態（ひずみ状態）を関連づけた解析法を目指す。なお，本章で提案する解析法は，既往の曲げ解析で一般的に用いられるファイバーモデルに，実験の分析結果に基づく著者の仮説を盛り込んだものである。

4.1 実験におけるクリティカル断面の抜け出し回転変形

第1章で述べたように、平面保持の仮定に立脚した一般的な曲げ解析では、クリティカル断面に生じる抜け出し量を求め、回転中心位置は平面保持解析で得られる中立軸位置や圧縮側主筋位置としている^{1, 2)}。図4.1.1は抜け出し量と回転中心に関してその関係を概念的に示したものである。図では、梁内の鋼材とコンクリートは完全付着とし、スタブ内の鋼材をアンボンド状態としてその長さが異なる例を示してある。この場合、図に示すように、外力Pは同じであるが、抜け出し量によって回転中心位置は変化する。また、抜け出し量が多いと梁端の回転変形が増大して圧壊が早期に生じることになる。ここでは、まず第2章の実験データに基づいて梁端部の抜け出し回転挙動を分析し、このような現象を定性的に説明できる仮説を提案する。

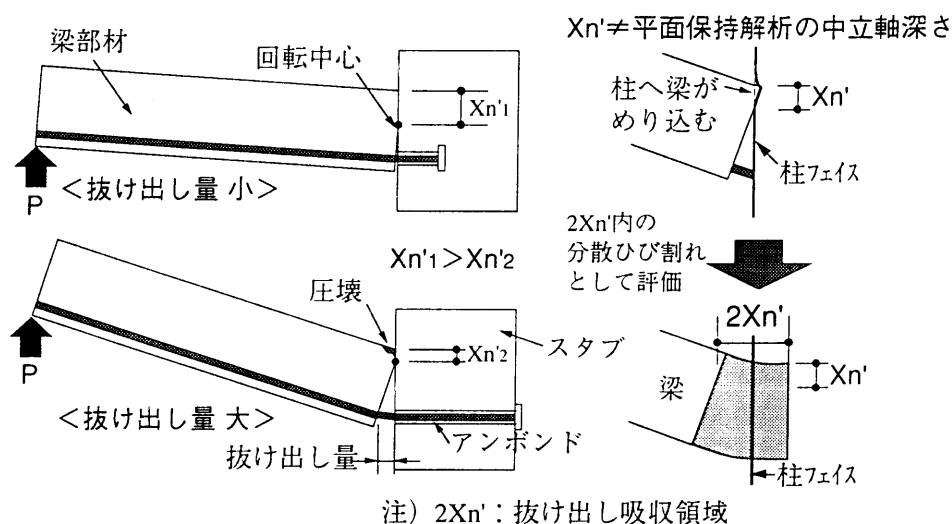


図 4.1.1 抜け出し回転中心の考え方

抜け出し量に応じて回転中心位置が変化する現象を模擬するため、図4.1.1に示すように、柱フェイス位置に生じる抜け出し量を、柱フェイス位置を挟んで断面回転中心深さ ($X_{n'}$) の2倍の領域 (抜け出し吸収領域：図4.1.1の扇形網掛け部) 内での平均化した分散ひび割れとして評価する。なお、柱部が剛体であれば、梁端の領域だけを考慮した分散ひび割れとする考え方もあるが、梁端圧縮部の柱へのめり込みを考慮して、本検討では暫定的に柱梁接合部内にもその領域を広げた。部材端圧縮部のめり込みについては、文献3)の著者等のRC柱の実験で簡単な検討がなされているが、既往の研究も少なく、抜け出し回転挙動との関係等未だ不明な点がある。この点は今後の課題である。なお、抜け出し吸収領域の長さ $2X_{n'}$ に関しては、単純梁形式のRC柱の実験に基づく山田等の圧縮側塑性ヒンジ長さ⁴⁾を参考とした。

検討方法と検討結果を図4.1.2に示す。鋼材とグラウト材 (またはコンクリート) が完全付着とする平面保持の仮定では、引張側PC鋼材位置の分散ひび割れのひずみはPC鋼材のひずみ (図4.1.2

の $\Delta \epsilon_L$ ：有効緊張力時を基準としたひずみ変化量)となる。しかし、実際にはこれにクリティカル断面の抜け出し量を考慮する必要がある。そこで、本解析においては、抜け出し量を、抜け出し吸収領域内の平均ひずみと捉えることとし、以下のように表現する。

すなわち、抜け出し吸収領域における引張側PC鋼材位置の分散ひび割れのひずみ (ϵ_s') は、実測抜け出し量 S を $2X_n'$ で除した値 (ϵ_s) と鋼材の実測ひずみ ($\Delta \epsilon_L$) の和とする。 X_n' を求めるために、 X_n' 点と引張側PC鋼材位置のみかけのひずみ ϵ_s' を結ぶ断面のひずみ分布直線を延長して圧縮縁コンクリートのひずみを求め、PC鋼材の実測ひずみから決定される引張力に釣り合うコンクリート圧縮力を、 X_n' 点を変数として収れん計算により求める。これによって抜け出し回転中心を決定し、柱フェイス位置の抜け出し回転量を求める。

以上の考え方に従えば、抜け出し量が増大すると ϵ_s' が大きくなり、回転中心位置が圧縮側へ移動し、図4.1.1で示した現象を計算で表現することができる。なお、内柱梁接合部架構では、接合部内での引張側PC鋼材の付着劣化が進行すると、対向側梁のコンクリートの圧縮部においてもPC鋼材が引張ひずみとなるため、図4.1.2 (a) に示すようにコンクリートの推定ひずみが圧縮状態でもPC鋼材のひずみが引張となる場合がある。すなわち、圧縮側PC鋼材も付着すべりが生じることを想定して上記計算を行っている。検討に用いた圧縮側コンクリートの材料特性モデルは後述する解析と同様である (4.2.1項)。

図4.1.2 (b) に示す検討結果の縦軸は柱フェイス位置の梁上端と下端の変位測定結果 (区間長さ25mm) から直接求めた回転量 θ_e (実験値) であり、横軸は上記の方法による回転量の推定値 θ_c である。なお、図中に黒塗りで示す値は、変形の小さい範囲で上記方法を適用すると計算が収束しないため、断面の釣合計算において平面保持の仮定を用いたものであり、この場合には平面保持解析における中立軸位置を回転中心位置とした。したがって、変形の小さい範囲では上記の考え方を適用できないが、この点を除けば θ_e と θ_c の値はほぼ等しい。 θ_e と θ_c の算出において抜け出し量は実測値を用いているため、同図から回転中心位置の実測値と推定値もほぼ等しくなっていることが推察できる。

図4.1.3と図4.1.4に圧着部における断面ひずみ分布を示す。両図ともコンクリートのひずみは上記方法による推定値であり、PC鋼材のひずみは実験における実測値である。図4.1.3は部材角 5×10^3 時で平面保持解析によるコンクリートのひずみ (推定値) であり、図4.1.4は実験における部材角 15×10^3 と 20×10^3 時における本検討から求まるコンクリートのひずみ (推定値) とPC鋼材の実測ひずみを示す。

図4.1.3より、変形の小さい段階では、各試験体ともほぼ同様なひずみ分布を示しており、PC鋼材の付着条件による相違は認められない。また、各試験体とも「平面保持の仮定」は成立していないものの、PC鋼材の実測ひずみ分布と、圧縮部コンクリートの推定ひずみ分布のひずみ勾配の

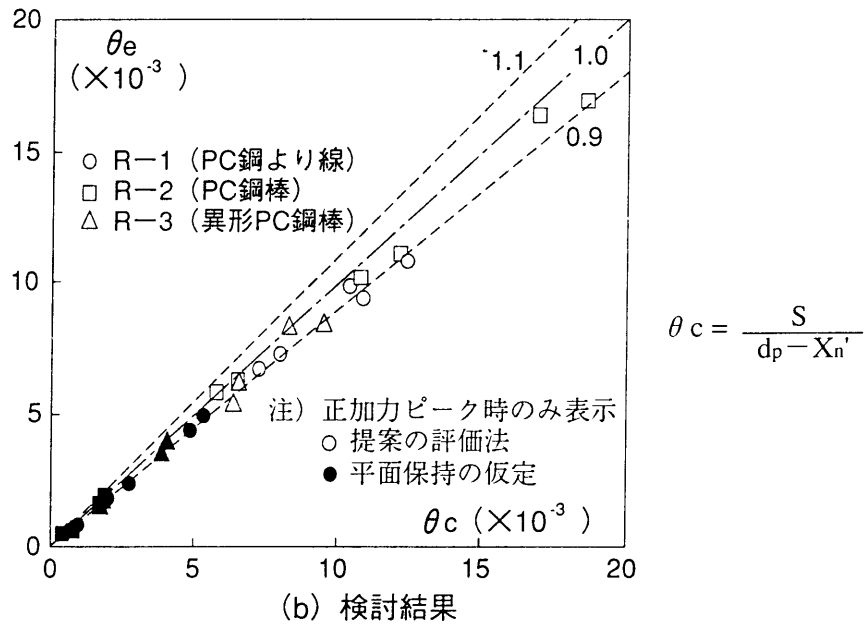
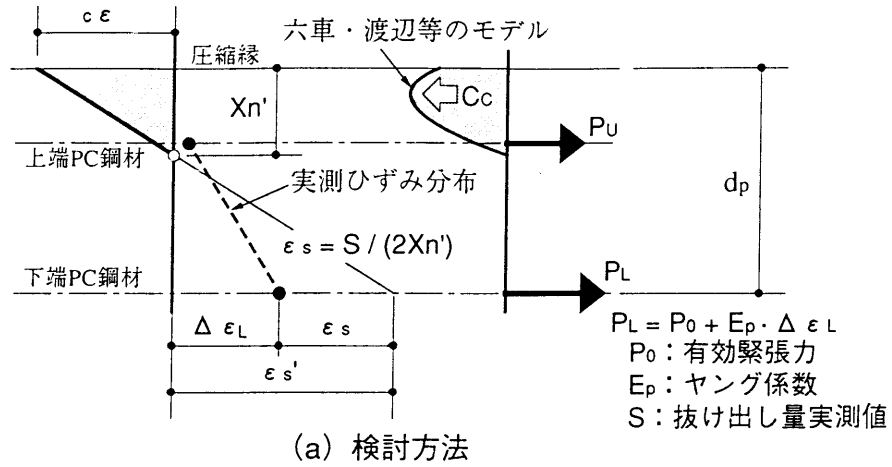
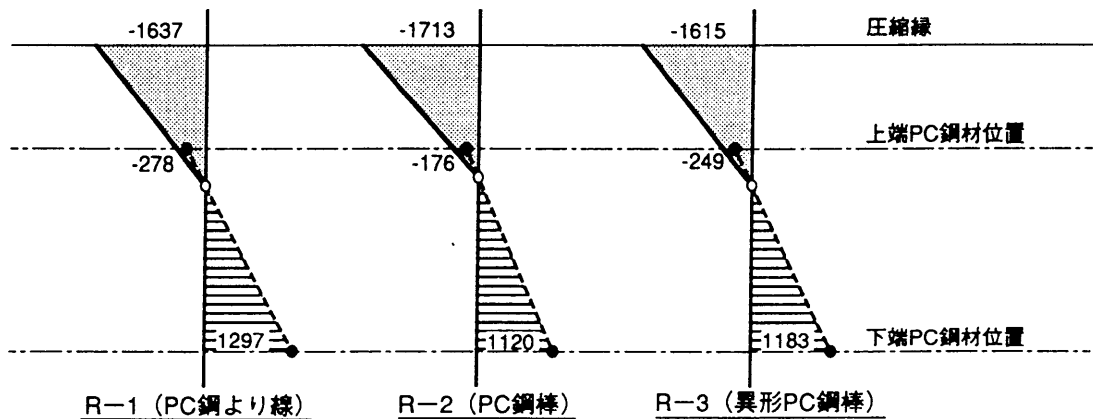


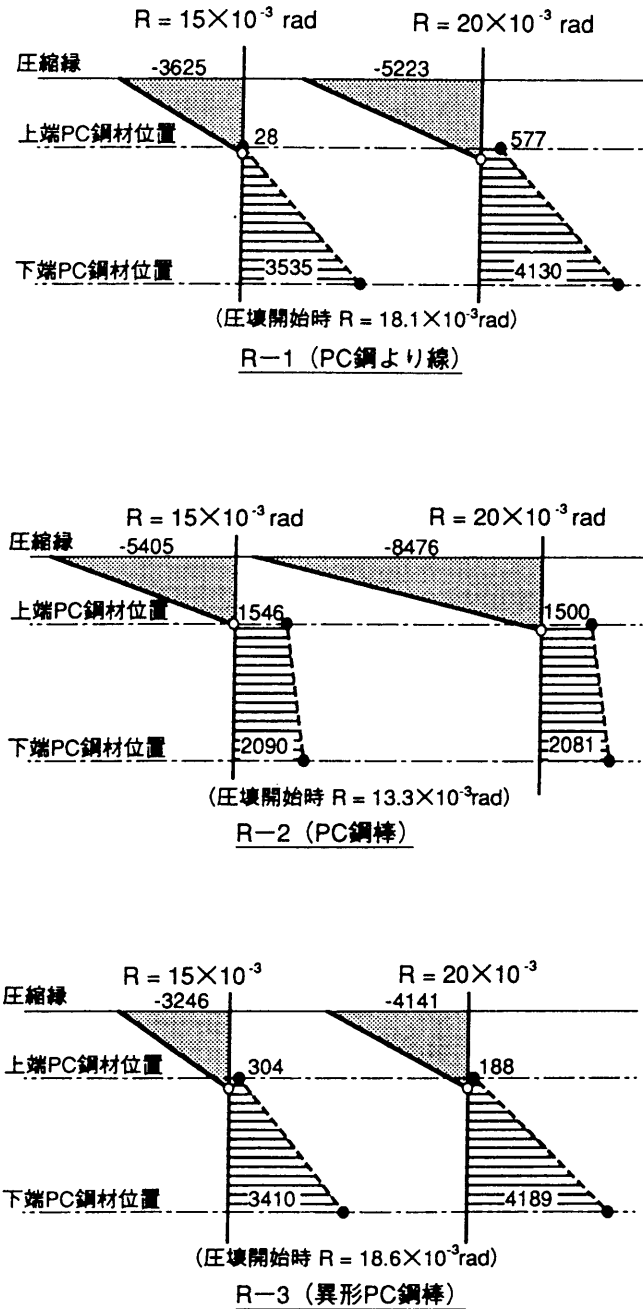
図 4.1.2 抜け出し回転中心に関する実験データの分析



注) 図中の数値は、ひずみ量 ($\times 10^{-6}$) を示す。PC鋼材位置のひずみは、伸びひずみ量。

図 4.1.3 圧着部における断面ひずみ分布 (正載荷時 $R = 5 \times 10^{-3}$)

差が少ない。図4.1.4より、PC鋼材の付着条件によって断面のひずみ分布は大きく異なり、鋼材の付着性能が最も悪いR-2では、「平面保持の仮定」からかけ離れたひずみ分布となっている。同図には、梁端の圧壊開始時の部材角も示してある。圧壊の兆候が見られる時のコンクリートのひずみを -0.4% 程度と考えれば、計算により得られたコンクリートの圧縮縁ひずみはほぼ妥当な値と考えられる。



注) 図中の数値は、ひずみ量 ($\times 10^{-6}$) を示す。PC鋼材位置のひずみは、伸びひずみ量。

図4.1.4 圧着部における断面ひずみ分布 (正載荷時 $R = 15 \sim 20 \times 10^{-3}$)

4.2 部材内での付着すべりを考慮した曲げ変形解析手法

第2章の実験から柱フェイスで引張側PC鋼材が梁および柱梁接合部から抜け出すこと、4.1節の検討から抜け出し量を抜け出し吸収領域内の分散ひび割れとして評価することにより抜け出し量に応じた回転中心位置を推定できること等の結論を得た。本節では、これらの結果を基に、梁部材内でのPC鋼材の付着すべりを考慮した変形解析法を提案する。

4.2.1 解析方法

(1) 解析モデル

解析モデルは、第2章で実験したPCaPC梁の片側の片持ち梁とし、柱および対向側の梁については剛と仮定する。片持ち梁部分は図4.2.1に示すように要素分割し、各断面の応力計算はファイバーモデルによって行う。解析は、第1ヒンジ要素の圧縮縁ひずみを逐次増分させる単調漸増方式である。

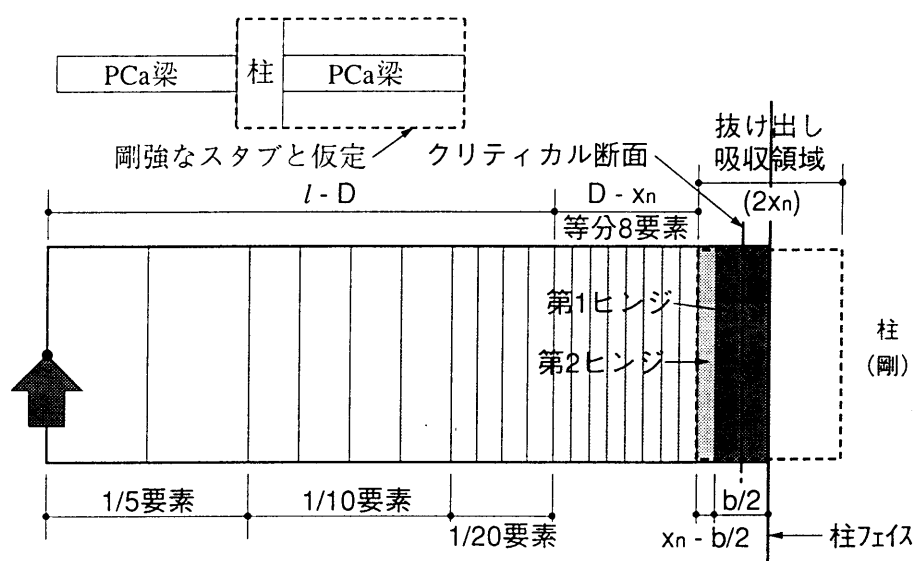


図4.2.1 解析モデルの要素分割

(2) 梁端部の強拘束領域

一般に、第2章の実験も含め、スパンの長いPC梁の実験では、梁端圧縮部でコンクリートが圧壊し、かぶりコンクリートが剥落する状態（部材角 30×10^{-3} 以上）においても耐力低下はほとんど生じない。一方、文献5)で報告した著者等の解析では梁部材角 20×10^{-3} 程度で変形が頭打ち状態（または計算が収束不能）となり、梁端圧縮部の圧壊開始後の変形性状を検討するまでには至らなかった。その理由の一つとして、梁端部が柱やスタブによって横方向の膨張を拘束されていることを解析で考慮していなかった点が挙げられる。

そこで、本解析では、図4.2.2に示すように柱フェイス位置で梁4隅から内側45°に伸びる線によって囲まれた5面体の部分を強拘束領域と仮定して解析を行う。これはコンクリートの圧縮試験の際に観られる供試体上下に形成される円錐上の非破壊部分と類似するものがある。これに関連する研究として、RC柱の終局耐力に着目した田中等の研究⁶⁾やPriestley等の研究⁷⁾と、高軸力を受けるRC柱の曲げ解析法に関する問題点を指摘した塩屋等のバネモデルによる解析的研究⁸⁾がある。ここで提案する強拘束領域は塩屋等の研究における非破壊ばねと同様な概念に基づくものであり、領域内のコンクリートは圧縮応力時には常に弾性とし、引張応力下の応力は負担しないと仮定する。

図4.2.3は、田中等の提案を、強拘束領域と関連付けて曲げ変形解析に適用する場合の考え方を示したものである。説明をわかりやすくするために、梁端で抜け出しがない場合について説明する。部材変形が小さい弾性範囲では、任意の曲率に対する部材各断面の保有する曲げ抵抗モーメントは部材全長にわたって等しいが、ひび割れが生じた後の塑性域では材端部に非破壊の強拘束

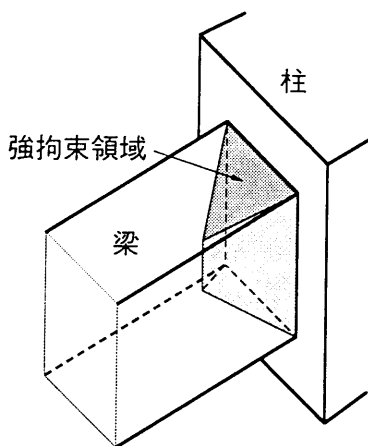


図 4.2.2 梁端の強拘束領域

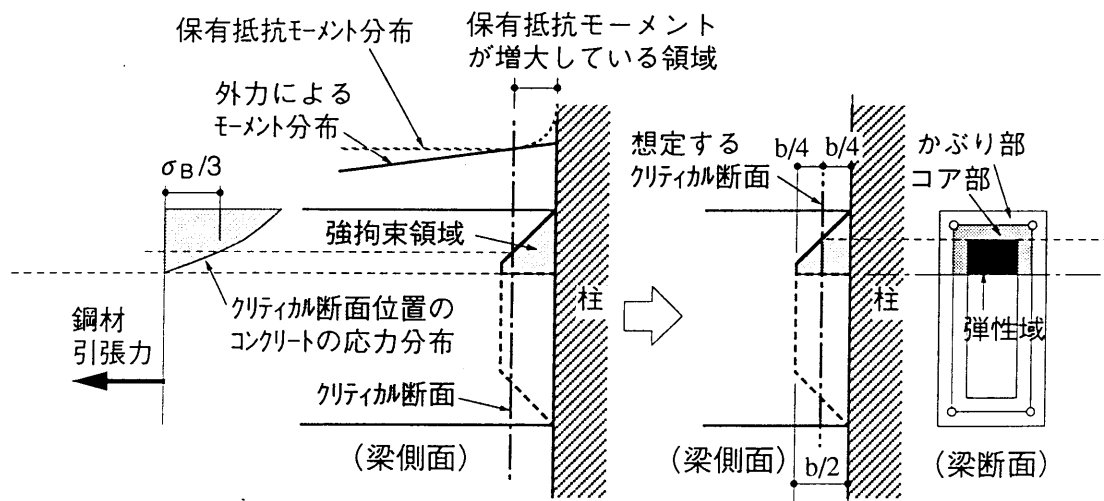


図 4.2.3 クリティカル断面の仮定

領域が存在するために柱フェイス付近の保有抵抗モーメントが大きくなる。したがって、クリティカル断面は柱フェイスから徐々に離れ、最終的には5面体の強拘束領域の頂点（柱フェイスから $b/2$ の位置、 b ：梁幅）付近まで移動することになる。

この考え方に関する実験事実はないが、文献9)には部材端で保有抵抗モーメントが増大することによりクリティカル断面が移動するという概念を説明し、田中等やPriestley等の研究を紹介している。田中等はRC柱の実験結果の分析から、最大耐力時にはクリティカル断面がスタブフェイスから $0.5X_{nu}$ (X_{nu} ：平面保持解析の終局モーメント時の中立軸深さ)まで移動すると指摘している⁶⁾。柱の実験では、クリティカル断面の移動によって、実験最大耐力が平面保持解析の終局耐力を大きく上回る場合がある^{6,7)}が、スパンの長いPC梁では、耐力増大効果は少なく、梁端部コンクリートの圧縮負担能力の増大によって変形性能が向上する。

厳密には、逐次移動するこのクリティカル断面を部材の応力状態に応じて考慮する必要があり、また強拘束領域も田中等の提案を考慮すると逐次変化していると考えられるが、計算が繁雑になるので、本解析では強拘束領域およびクリティカル断面位置を固定して応力計算を行うこととした。クリティカル断面は、図4.2.3に示すように5面体の強拘束領域の頂点と柱フェイスの中間位置（柱フェイスから $b/4$ 離れた位置）に固定し、梁第1ヒンジ要素の応力計算ではこの位置の断面条件を採用した。梁の塑性ヒンジ領域長さは、山田等の研究⁴⁾を参考として、平面保持解析によって得られる中立軸深さ (X_n) とし、その部分を梁の第1および第2ヒンジ要素で表す。それぞれのヒンジ要素の解析条件、ヒンジ領域長さに4.1節で述べた回転中心深さ (X_n') を適用しなかった理由等については、解析における抜け出し吸収領域の考え方とあわせて後の (4) で述べる。

(3) 材料特性およびPC鋼材の付着特性

コンクリートの圧縮応力-ひずみ特性は図4.2.4に示す六車・渡辺等のモデル¹⁰⁾を用い、かぶり部（プレーンコンクリート）とコア部（拘束コンクリート）の材料特性の相違を考慮する。コンクリートの引張強度は、第1ヒンジ要素（圧着部）では無視し、それ以外の要素では $0.56\sqrt{\sigma_{cs}}$ (MPa) とする。鋼材の応力-ひずみ特性は完全弾塑性型とする。阿波野・中塚等の実験¹¹⁾によって、柱フェイス位置で鉄筋がカットされている「鉄筋かご」用の軸方向鉄筋も圧縮力に対しては応力を負担していることが示されているので、第1および第2ヒンジ要素では軸方向鉄筋の圧縮応力を考慮する。それ以外の要素では軸方向鉄筋は圧縮・引張とも有効に働くとする。また、単調漸増解析においても厳密にはコンクリートや鋼材の応力除荷時における応力-ひずみ履歴を考慮する必要があるが、本解析ではその影響は無視する。

図4.2.5および図4.2.6に解析に用いるPC鋼材の付着応力-すべり特性（以下、 τ - S 特性）を示

す。図4.2.5のPC鋼より線の $\tau-S$ モデルは、第3章の引抜きタイプの付着実験の結果を基に提案したものである。PC鋼棒のモデルについては現状では解析に適用可能な適切なモデルがないため、文献12)で報告された付着実験結果等より、PC鋼棒ではPC鋼より線に比べて付着強度(τ_{max})以降の τ の低下が著しいことを考慮し、図に示すようにモデル化し、 τ_{max} は暫定的にPC鋼より線の1/2 (1.9 MPa)とする。

異形PC鋼棒の $\tau-S$ 特性は図4.2.6に示す森田等のモデル¹³⁾を用いる。森田等のモデルは異形鉄筋とコンクリートの付着を対象としたものであり、ここではコンクリートの圧縮強度 σ_B の代わりにグラウト材の圧縮強度($G\sigma_B$)を用いる。また、 τ_{max} は圧縮強度の2/3乗に比例し¹⁴⁾、 τ_{max} 時のすべり量($S_{\tau max}$)は鋼材径に比例すると仮定する。

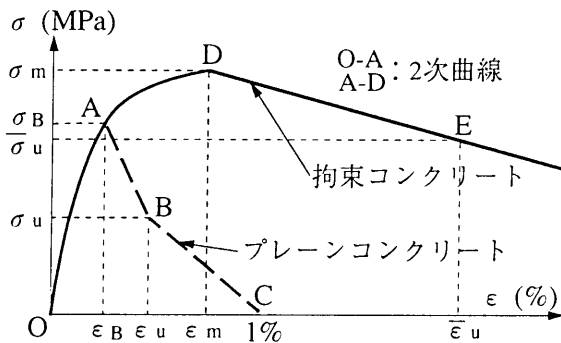


図 4.2.4 コンクリートの応力-ひずみ関係 (六車・渡辺モデル)

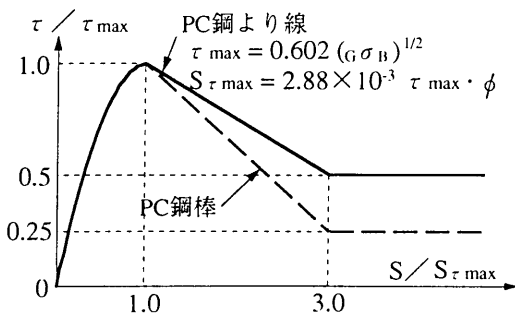


図 4.2.5 PC鋼より線とPC鋼棒の $\tau-S$ モデル

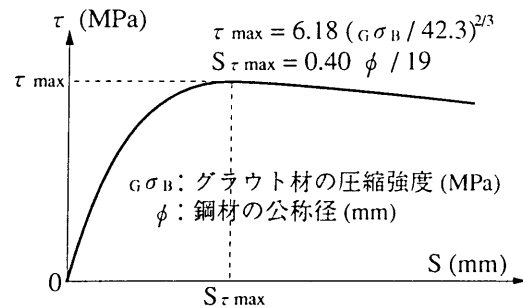


図 4.2.6 異形PC鋼棒の $\tau-S$ モデル

(4) 抜け出し量および抜け出し回転変形の評価

梁のクリティカル断面は、本項の(2)で述べたように柱フェイスから $b/4$ 離れた位置と仮定し、PC鋼材の抜け出しによる梁の変形は柱フェイス位置に生じると考える。PC鋼材の抜け出し量は柱梁接合部からの分と梁からの分を別個に計算し、その和を総抜け出し量とする。

本論では、柱梁接合部と梁部とではPC鋼材の付着すべり特性が異なり、柱梁接合部では定着付着となっている性状を、梁では曲げ付着となっている性状を考慮する。ただし、PC梁ではPC鋼材のかぶり厚が比較的大きく、PC鋼材がシースで囲まれていること等を考慮し、接合部と梁部で最大付着強度(τ_{max})は同じであると仮定する。接合部からの抜け出し量(${}_pS$)は、接合部および対向側梁のPC鋼材位置コンクリートにはひずみが生じない(剛強なスタブ)と仮定し、 $\tau-S$ モデル曲線を逐次積分する方法¹³⁾で求める(定着付着)。梁については、前記の $\tau-S$ モデルから数値計算で予め求めた $\tau-\epsilon$ 特性¹³⁾を用いて、後述する部材内の付着すべりを考慮した手法により各要素のすべり量を求める(曲げ付着)。換言すると、PC鋼材の $\tau-\epsilon$ 特性は接合部および梁とも同じであるが、 $\tau-S$ 特性は周辺コンクリートの応力状態によって異なるものとする。

一般に、有限要素法等による解析で定義される付着ばねは $\tau-S$ 特性モデルであるが、モーメント勾配のある(曲げせん断応力状態)部材内では、 $\tau-S$ 特性を剛塑性モデルに仮定しないかぎり、たとえ弾性域でも僅かな付着応力により鋼材位置ですべりが生じることになる。力学の基本から考えれば、少なくともひび割れが生じない弾性域では鋼材とコンクリートは完全付着状態にあり、また既往の部材実験の結果等を巨視的に見ればひび割れが発生した部材塑性域でも、鋼材とコンクリートを完全付着とする「平面保持の仮定」が成立する変形レベル(または部材位置)もありうる。この考え方に従って、本解析では、後述する図4.2.9に示すように平面保持解析が適用できる範囲と付着すべりを考慮すべき範囲を判定する。

<クリティカル断面（第1ヒンジ要素）の解析条件>

図4.2.7に梁第1ヒンジ要素のひずみ分布および抜け出し回転変形の算出方法を示す。同図の基本的な考え方は、4.1節で示した図4.1.2と同じであるが、4.1節と異なる点は、PC鋼材のひずみを平面保持解析の値のままコンクリートのひずみ分布を変化させる点（4.1節ではPC鋼材のひずみは実験値）、抜け出し吸収領域長さを初期値である平面保持解析の中立軸深さの2倍（ $2X_n$ ）とした点、圧縮側PC鋼材の付着すべりを無視する点、等である。

抜け出し吸収領域を中立軸深さの2倍とした理由は、4.1節の検討から、回転中心深さ（ X_n' ）を変数とし、その2倍を抜け出し吸収領域として第1ヒンジ要素の計算を行うと、変形の小さい段階で計算が収束しない場合がある点と、部材終局時には抜け出し吸収領域をどちらの値に仮定しても最終的に得られる回転中心位置に顕著な差がないためである。

第3章の付着実験だけでなく、既往の実験の結果からも、鋼材の引抜き端付近では早期に鋼材の付着力が低下することが指摘されている¹⁵⁾。梁のヒンジ領域および柱梁接合部内の引張側PC鋼材付近の付着条件は、付着実験における引抜き端の状態に近いと考えられるが、本解析ではその影響を第1ヒンジ要素のみで考慮する。すなわち、梁の第1ヒンジ要素内ではPC鋼材の付着抵抗力はなく、圧着面の離間と同時に付着力が消失するとし、要素内のPC鋼材の伸び量分がすべてクリティカル断面へ抜け出すと仮定する。したがって、第1ヒンジ要素自身の曲げ変形は図4.2.7に示す ϕ_1 を要素の曲率として計算する。

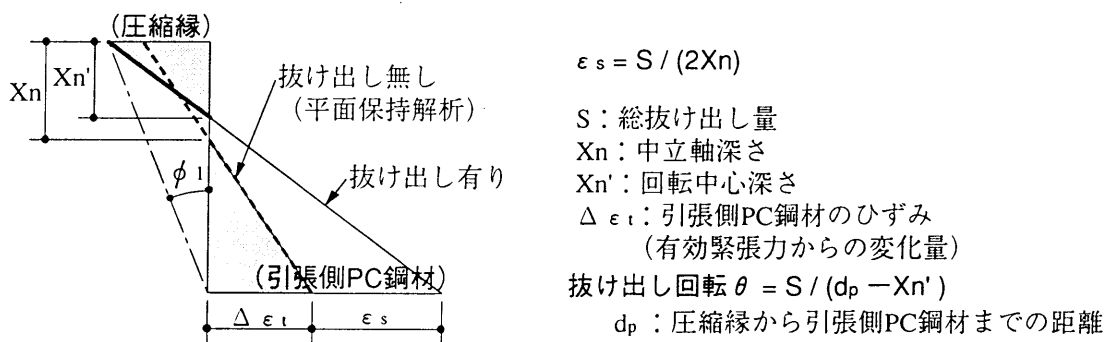


図4.2.7 梁第1ヒンジ要素のひずみ分布および抜け出し回転変形の算出方法

<部材内でのPC鋼材の付着劣化判定方法>

図4.2.8に第2ヒンジ要素およびその他の各要素（18個）における断面ひずみ分布および抜け出し量の算出方法を示す。また、図4.2.9に各要素の付着劣化判定手順を示す。第2ヒンジ要素では、本項の（3）で述べたように柱フェイス位置でカットされている引張側の鉄筋を無視し、更に後述する付着劣化の判定に用いる $\tau-\epsilon$ 特性の τ を1/2に低減する。これらの点を除けば、第2ヒンジ要素とそれ以外の要素における計算方法は同様である。本解析では、曲げモーメントが大きい第2ヒンジ要素から、順次引張側PC鋼材の付着劣化の判定を行い、PC鋼材の梁からの抜け出し量を計算する。

まず、予め計算した $\tau-\epsilon$ 特性から、要素の引張側PC鋼材のひずみに対する τ を求め、その値を当該ひずみ時の保有付着強度（以下、保有 τ ）とする。ここで、仮に（i-1）番目の要素まで付着劣化が進行しているとする。i番目の要素において、まず外力モーメント分布から得られる要素のモーメントと等しくなる断面のひずみ分布を平面保持解析によって求める。次に、（i-1）番目とi番目の引張側PC鋼材の引張力差から、i番目の要素で「平面保持の仮定」が成立するための必要付着強度（以下、必要 τ ）を計算する。

必要 τ が（i-1）番目の保有 τ より小さい場合には、i番目の要素は「平面保持の仮定」が成立するとして、以後の要素における計算はすべて平面保持解析となる。i番目の必要 τ が（i-1）番目の保有 τ より大きい場合には、i番目の要素ではPC鋼材の付着劣化が生じたとして、以下に示す再計算を行う。すなわち、（i-1）番目からi番目の要素に保有 τ で伝達できる引張力（以下、付着伝達力）を計算し、（i-1）番目要素の引張側PC鋼材の引張力から上記の付着伝達力を差し引いた値を、i番目要素における引張側PC鋼材の引張力とする。引続き、断面の力の釣合条件により、外力モーメント分布による要素のモーメントと等しくなるコンクリートのひずみ分布を算出する。以上の考え方によれば、必要 τ が保有 τ より大きくなった時点（平面保持不成立）で初めてすべりが生じることになり、解析から得られる要素の $\tau-S$ 特性は、図4.2.5および図4.2.6で示したモデルと異なり、剛塑性ばね的な特性を持つことになる。

上記の計算から得られたi番目要素における引張側PC鋼材のひずみ（ $\Delta \epsilon_{t_i}$ ）と、PC鋼材位置におけるひび割れコンクリートのひずみ（ $\Delta \epsilon_{c_i}$ ）の差（ ϵ_{s_i} ）から、図4.2.8に示すようにi番目要素のすべり量（ ${}_b S_i$ ）が得られる。また、i番目要素の回転量は再計算によるコンクリートのひずみ分布から求める。すなわち、コンクリートについてのみ見かけ上平面保持が成立すると考える。

以上述べた各要素のすべり量の総和を、PC鋼材の梁からの抜け出し量の計算値（ ${}_b S_c$ ）とし、その値が最初に仮定した抜け出し量（ ${}_b S_a$ ）と等しくなるまで収れん計算を行った後、部材の変形を算出する。

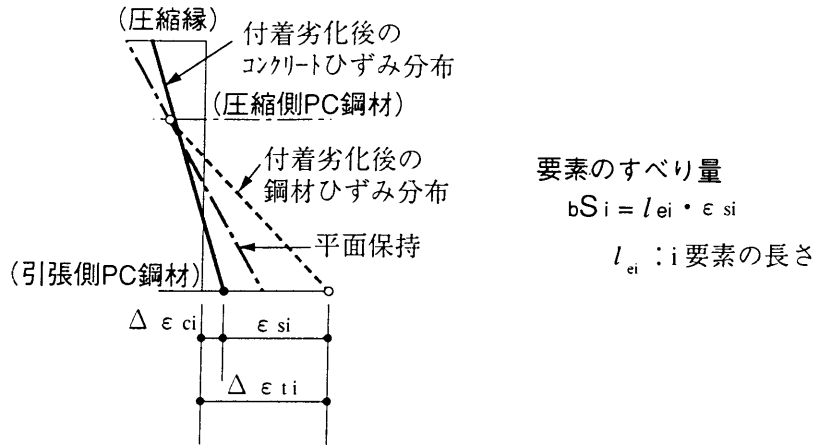


図4.2.8 第2ヒンジ要素およびその他要素のひずみ分布およびすべり量の算出方法

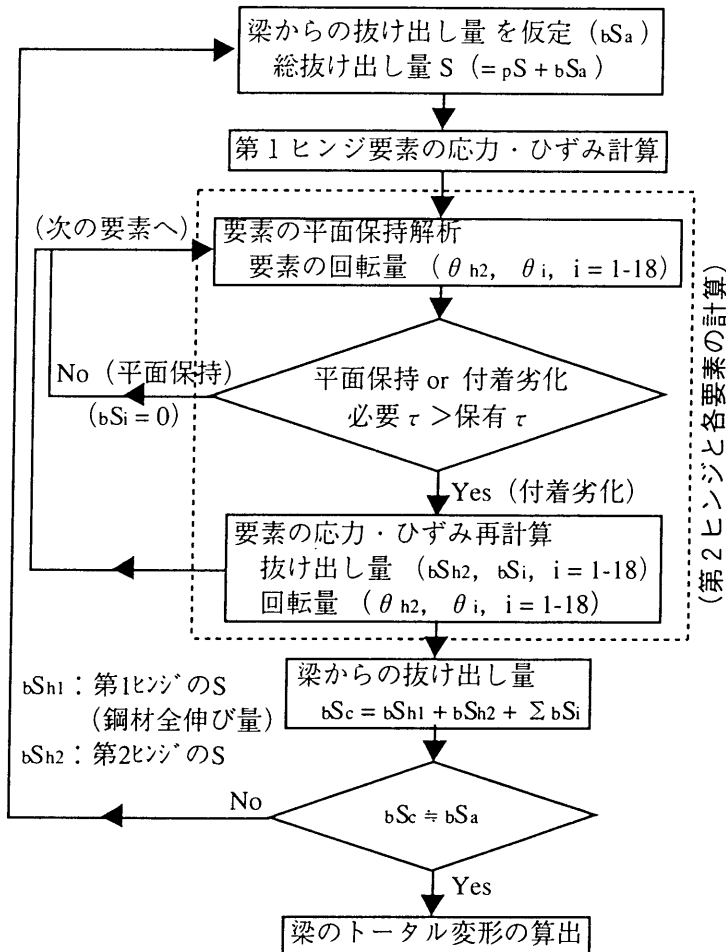


図 4.2.9 要素の付着劣化判定手順

4.2.2 解析結果および考察

(1) 荷重一部材角関係および付着劣化進展状況

第2章で実験したPCaPC梁3体について解析した結果を、実験結果（Q-R関係の正加力時の包絡線）と比較して図4.2.10に示す。同図では、解析における梁のQ-R関係に梁クリティカル断面位置でのコンクリートの圧縮縁ひずみ（ ϵ_c ）が -0.2% ～ -1.0% 時の変形を示し、それに対応するPC鋼材のひずみ分布（ $\Delta\epsilon$ 分布）も併せて示してある。 $\Delta\epsilon$ 分布の黒塗りのプロット値は付着劣化が生じている要素のひずみである。

図に見られるように、Q-R関係の実験結果と解析結果はよく一致している。また、解析における $\Delta\epsilon$ 分布から、クリティカル断面のひずみが増大することによって、付着劣化域が柱フェイスから徐々に広がっていく様子が伺える。付着強度が最も低いR-2（PC鋼棒使用）では、クリティカル断面の鋼材ひずみが約 2000×10^{-6} 時（ $\epsilon_c = -0.4\%$ 時）にすでに部材の大部分の領域で付着劣化が生じており、部材角が 20×10^{-3} 付近（ $\epsilon_c = -0.6\%$ 時）では部材全域にわたってPC鋼材が付着劣化する結果となっている。本実験では、部材全域のひずみ測定は行っていないが、阿波野・中塚等のPC鋼棒を用いた圧着型PC梁の実験¹¹⁾では終局時に部材全域で付着劣化が進行し、最終的にはPC鋼棒がアンボンド状態になったことが報告されており、本解析はその性質を捉えている。

PC鋼材の付着性能が異なるR-1（PC鋼より線）とR-3（異形PC鋼棒）のQ-R関係および $\Delta\epsilon$ 分布は、実験および解析ともほぼ同様な性状となった。これは、R-1におけるPC鋼より線（ $6 - \phi 15.2$ ）の延べ周長がR-3の異形PC鋼棒（2-D23）に比べて大きく、引張側PC鋼材の総付着抵抗力が同程度となったためである。鋼材の付着特性と部材の耐力変形状については、RC部材の場合においても指摘されているように、鋼材の径（または延べ周長）と部材断面寸法も含めて評価する必要がある¹⁶⁾。

実験ではPC鋼材の降伏は、部材終局時にひずみ測定が不能となったため確認できていないが、R-3の解析では $\epsilon_c = -1.2\%$ 時にPC鋼材が降伏している。この変形レベルでは実験および解析ともかぶりコンクリートが剥落して梁せいが減少している状況であり、梁ヒンジ部では部材全断面が有効に外力に抵抗しておらず、たとえ引張側PC鋼材が降伏しても、全断面有効と仮定する平面保持解析の終局耐力まで達しない。この点は、部材の耐力変形状を評価する場合に留意しておく必要がある。

図4.2.10の実験のQ-R関係には、梁両端で圧壊が観察された時期（▲）を示してある。圧壊の兆候は、PC鋼材の付着強度が低いR-2が最も小さい変形で確認されており、R-1とR-3はそれに比べて大きな変形で圧壊が観察されている。コンクリートの圧縮縁ひずみ ϵ_c が -0.4% 程度で

圧壊が生じると考えると、解析は実験と逆の傾向を示している。つまり解析における $c\epsilon = -0.4\%$ 時の変形は、R-2では実験の圧壊開始時と概ね一致するが、R-1およびR-3では実験における圧壊開始時の変形が大きい。この理由として、両者のひび割れ性状の違いが考えられる。第2章における各試験体のひび割れ発生状況（図2.3.1～図2.3.3）で述べたように、R-2では梁に生じているひび割れはほとんど曲げひび割れであるが、R-1およびR-3では多くの曲げせん断ひび割れが発生しており、本解析法はその曲げせん断ひび割れによる変形を評価できないためと考えられる。曲げせん断ひび割れ発生による梁の変形増加の性状を解析的に考慮する方法については、本論の第6章で扱う。

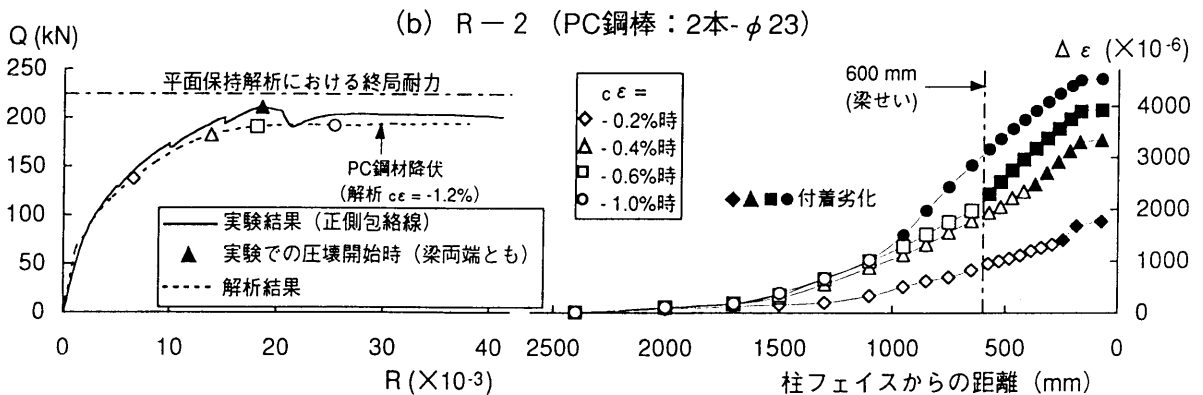
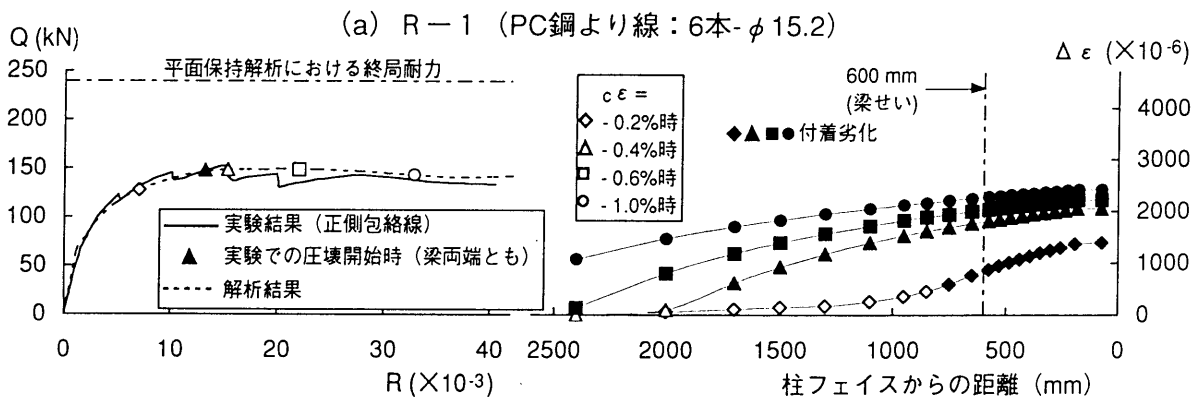
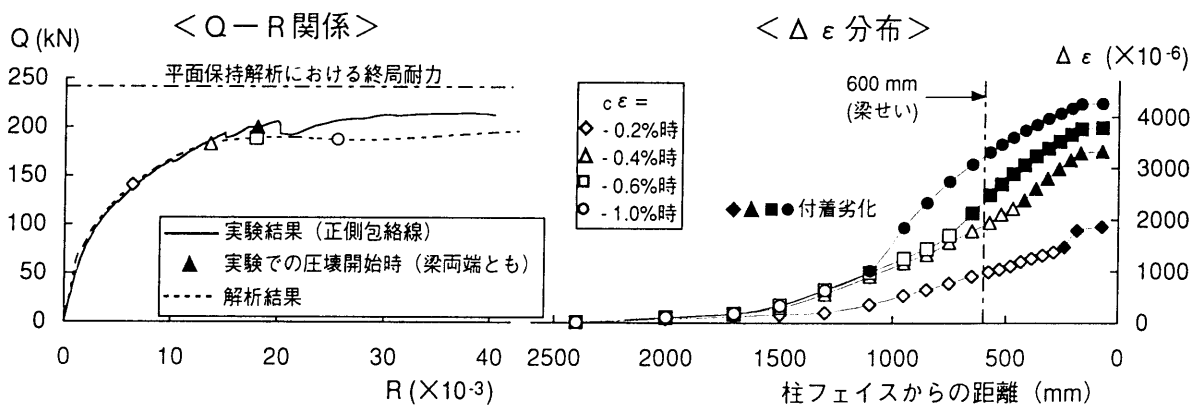


図4.2.10 解析結果 (Q-R関係, $\Delta\epsilon$ 分布)

(2) 抜け出し回転挙動

本章で提案した解析法により、PC鋼材の付着すべり特性の相違によって、PC鋼材の付着劣化進展状況（PC鋼材のひずみ分布）が大きく異なることが把握でき、実験における部材の耐力変形成性を精度良く推定できることを示した。一方、本解析法では、曲げせん断ひび割れの影響を考慮できないため、(1)で述べたように梁端圧縮部コンクリートに圧壊の兆候が生じる時期等に関して微視的に見ると問題点があることも指摘した。

そこで、その問題点を明確にするために、ここでは抜け出し回転挙動に関して実験結果と解析結果を比較・検討した。図4.2.11はその検討結果について示したものである。図の縦軸は梁の全体変形に占める抜け出し回転変形の比率（ δ_n / δ ）、横軸は梁の部材角Rである。

曲げせん断ひび割れがほとんど発生していないR-2（PC鋼棒）では、 $\delta_n / \delta - R$ 関係に関して実験と解析がよく一致しているが、曲げせん断ひび割れが生じたR-1（PC鋼より線）とR-3（異形PC鋼棒）では部材角 15×10^{-3} 以降から実験と解析に差が大きくなる。因みに、R-1とR-3の解析における δ_n / δ は部材終局時（ $R \geq 30 \times 10^{-3}$ ）には付着性能の劣るPC鋼棒を用いたR-2に近づく。

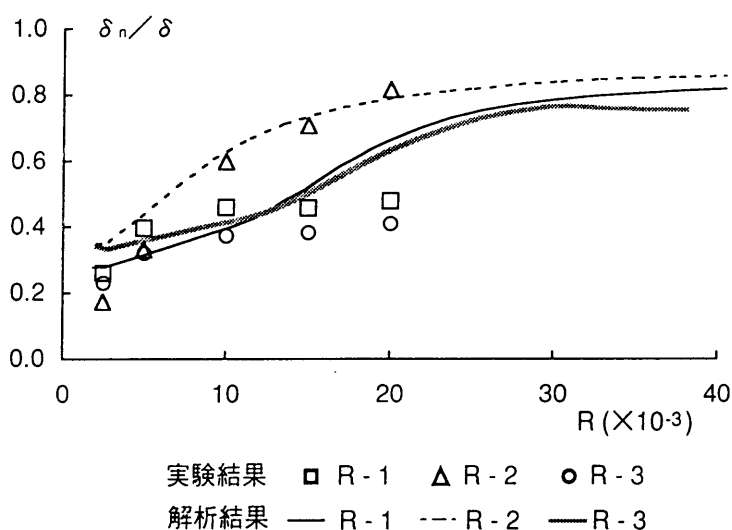


図 4.2.11 梁の全体変形に占める抜け出し回転変形の比率（実験結果と解析結果）

第2章の実験では、曲げせん断ひび割れも含め、各変形段階でひび割れ幅の測定は行っていないが、R-1とR-3において曲げせん断ひび割れが生じ始めるのは部材角 10×10^{-3} あたりからであり、圧壊の兆候が観察される部材角 $15 \sim 20 \times 10^{-3}$ に曲げせん断ひび割れが顕著となる。この点は第2章のひび割れ発生状況図（R-1：図2.3.1，R-3：図2.3.3）からも明らかである。したがって、図4.2.11のR-1とR-3における部材角 15×10^{-3} 以降の実験と解析での性状の相違と、曲げせん断ひび割れの伸展・拡大が何らかの因果関係にあると推察される。

PC鋼材の抜け出し量は、第2章の実験結果の分析および本章でも述べたように、PC鋼材のひず

み分布とPC鋼材位置ひび割れコンクリートのひずみ分布から得られる伸び量の差となる。したがって、両者のひずみ量を精度よく推定できれば、抜け出し量に関して実験と解析が一致することになる。

そこで、その点を検証するために、PC鋼材のひずみとPC鋼材位置ひび割れコンクリートのひずみに関して実験結果と解析結果を比較した。結果を図4.2.12に示す。図に示す各ひずみの実験値は、柱フェイスから225mm（約0.4D，D：梁せい）の位置で計測されたものであり、解析値は実験と同じ付近にある要素の解析値から実験の当該位置のひずみを推定したものである（2つの要素の解析値を直線補間したもの）。各試験体ともPC鋼材のひずみは実験と解析で大きな差はないものの、鋼材位置ひび割れコンクリートのひずみに関しては大きな差が生じている。PC鋼材位置ひび割れコンクリートのひずみは、鋼材位置でのコンクリートの区間変位を区間長さで除した値であり、実験でひび割れ等によって変位測定用ボルトの緩み等が生じている可能性もある。したがって、それらには測定誤差も含まれており、必ずしも信頼性があるとはいいきれないが、少なくとも、R-1とR-3ではひび割れコンクリートのひずみが解析の方が小さく、特にR-1では解析結果が実験結果の約1/3程度となっており、解析で梁からの抜け出し量を過大評価していることになる。これらの点から、R-1とR-3では 15×10^{-3} 付近からの曲げせん断ひび割れの伸展・拡大により、PC鋼材位置ひび割れコンクリートひずみが増大し、それに伴い梁からの抜け出し量の増大が少なくなったと推察される。

部材の引張側鋼材とその鋼材位置ひび割れコンクリートのひずみについては、別の目的で実施したRC部材の実験データを基に、第5章で抜け出し回転挙動と曲げせん断ひび割れ性状を関連づけて論述する。

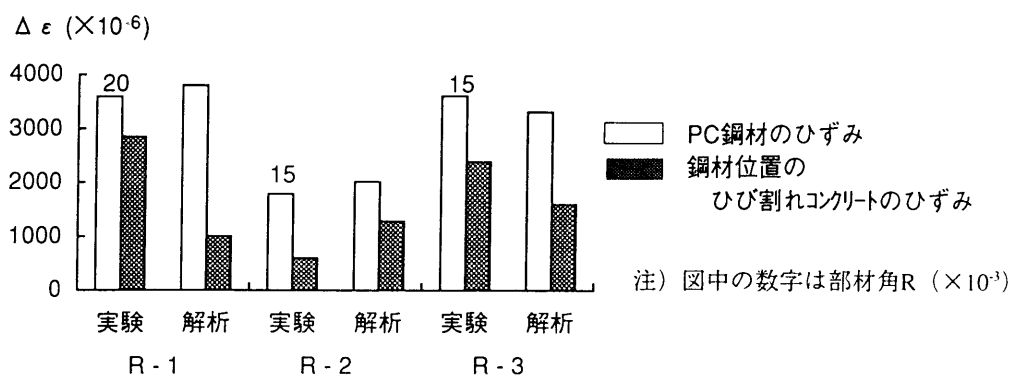


図4.2.12 PC鋼材およびPC鋼材位置ひび割れコンクリートのひずみ

4.3 まとめ

本章では、第2章の実験結果を基に梁端部でのPC鋼材の抜け出し現象について考察し、その結果を参考としてPC鋼材の付着すべりを考慮した曲げ変形解析法を提案した。以下に得られた知見を記す。

(1) 実験における梁端の抜け出し回転中心に関する検討から、梁端の回転中心深さ X_n' の2倍の領域、すなわち「抜け出し吸収領域」を柱フェイスを中心として梁部から接合部内に仮定し、抜け出し量をその領域の分散ひび割れとして評価することにより、梁端のコンクリートの応力状態および抜け出し量の相違による回転中心位置の変化を概ね予測できることがわかった。

(2) 田中等のクリティカル断面移動説を説明するために、梁端部コンクリートの横方向の膨張が柱やスタブによって拘束されている強拘束領域を仮定し、柱フェイスから離れた位置にクリティカル断面が存在することを定性的に示した。また、この考え方を導入することにより、部材角 30×10^{-3} を超える大変形域までの耐力変形性状を解析で予測できることを示した。

(3) 鋼材の付着応力-ひずみ関係は部材の応力状態に関係なく一定とし、部材各部の付着応力-すべり関係を付着応力-ひずみ関係から逐次推定する評価法を提案した。この考え方を基に、梁の各要素の計算において、クリティカル断面側から平面保持の仮定が成立するか否かを順次判定することによって梁からの抜け出し量を算出した。

(4) 本解析法により、部材変形の増大とともに梁部材内で引張側PC鋼材の付着劣化が進展する状況が把握でき、PC鋼材が柱梁接合部からだけでなく梁からも抜け出すことを解析的に示した。

(5) 解析における荷重-変形関係は実験結果とよく一致しており、本解析法でPC鋼材の付着すべり特性の相違が部材の耐力変形性状に及ぼす影響を概ね評価できることがわかった。

(6) 実験と解析における抜け出し回転挙動の比較・検討から、解析における抜け出し量を精度よく推定するためには、曲げせん断ひび割れによる変形および鋼材位置ひび割れコンクリートのひずみ分布の適切な評価が必要となる点を指摘した。

第4章 参考文献

- 1) 例えば, 北山和宏: 主筋の抜け出しを考慮した柱・梁部材の降伏変形推定法, コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集, コンクリート工学協会靱性部材配筋詳細研究委員会, pp.103-108, 1990年5月
- 2) 角徹三, 稲田祐二, 喜連川昭夫, 中田信治: 接合部からの鉄筋の抜け出しを考慮した鉄筋コンクリート骨組の変形解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.5, pp.301-304, 1983年
- 3) 是永健好, 竹崎真一, 小室努, 川端一三: 超高強度材料を用いたRC柱の構造性能(その2 実験結果の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.39-40, 1997年9月
- 4) 山田稔, 武貞健二, 鉄筋コンクリート柱の弾塑性曲げ変形性状に関する研究(プラスチックヒンジの生成機構について), 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.57-60, 1968年
- 5) 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, pp.783-788, 1993年
- 6) Tanaka, H., Park, R., McNamee, B.: Anchorage of Transverse Reinforced Concrete Columns in Seismic Design, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol.18, No.2, June, pp.165-190, 1985
- 7) Priestley, M.J.N., Park, R.: Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns under Seismic Loading, ACI Structural Journal, 84(1), pp.61-76, 1987
- 8) 塩屋晋一, 松元秀樹, 徳弘育夫, 徳富久二: コンクリート部材の中心圧縮特性と曲げ圧縮特性の相関性に関する研究(その3 高軸力を受ける鉄筋コンクリート造柱の曲げ解析方法の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造IV, pp.49-50, 1997年
- 9) Edmund Booth: Concrete Structures in Earthquake Regions, Design and Analysis, Concrete Design and Construction Series, Longman Scientific & Technical, pp.105-108, 1994
- 10) 六車熙, 渡辺史夫, 田中仁史, 勝田庄二: 横拘束筋によるプレストレストコンクリート梁の曲げ靱性改善に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.2, pp.377-380, 1980年
- 11) 阿波野昌幸, 中塚侑, 石井孝幸: 圧着型および一体型片持PC梁の荷重-変形特性(その1 実験概要および荷重-変形特性), (その2 ひび割れ状況, PC鋼材のひずみ分布および曲率分布), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造IV, pp.873-876, 1997年
- 12) 建設省建築研究所ほか: 共同研究「PC構造設計・施工指針の作成」平成8年度~10年度研究報告書, 1996~1998年
- 13) 森田司郎: 鉄筋コンクリートにおける付着とひび割れ, コンクリートジャーナル, コンクリート工学協会, 1969年4月, 六車熙, 森田司郎, 富田幸次郎: 鋼とコンクリートの付着に関

- する基礎的研究 (I 付着応力分布について) , 日本建築学会論文報告集 第132号, 1967年2月
- 14) 山尾芳秀, 周礼良, 二羽淳一郎: 付着応力-すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文報告集第343号, 1984年3月
- 15) 藤井栄, 森田司郎: 異形鉄筋の付着応力-すべり関係に関する考察, 第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, pp.37-44, 1983年10月
- 16) 藤井栄, 村上秀夫, 山田稔明, 森田司郎: 高強度鉄筋コンクリート柱・梁接合部における梁通し筋の付着性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.483-488, 1991年