PC 鋼材の付着すべりを考慮したプレキャスト PC 梁の曲げ変形解析法

FLEXURAL ANALYSIS METHOD OF PRECAST PRESTRESSED CONCRETE BEAMS CONSIDERING BOND-SLIP CHARACTERISTICS OF PRESTRESSING STEELS

是永 健好*, 渡辺 英義**

Takeyoshi KORENAGA and Hideyoshi WATANABE

Shear bending tests of precast prestressed concrete beams were carried out in order to study the flexural analysis method of beams and to confirm the bond characteristics of prestressing steels. The test parameter was the type of prestressing steel (strand, steel bar, deformed steel bar). As a result of experimental studies, it was shown that bond characteristics of prestressing bar was important for the evaluation of plastic rotation of beam end. Based on the test results, flexural analysis method of beams considering bond-slip characteristics was proposed. The load-deflection relationship of tests could be simulated by using this analysis method.

Keyword : precast prestressed concrete beam, prestressing steel, bond characteristics, pullout of steel, plastic hinge

プレキャストプレストレストコンクリート梁, PC 鋼材, 付着特性, 鋼材の抜け出し, 塑性ヒンジ

1. はじめに

地震時応力下のコンクリート系部材を対象とした一般的な曲げ変形解析では, クリティカル断面の抵抗モーメントを「平面保持の仮定」に基づき計算し, 部材の変形は平面保持解析の曲率分布から得られる曲げ変形に定着部からの鉄筋の抜け出しによる変形を付加回転として加える形で評価される¹⁾。また, 曲げ変形の算出にあたっては部材端に塑性ヒンジ等の仮説を立てる場合もある²⁾。

この抜け出し変形を付加回転変形とする考え方は, クリティカル断面の抵抗モーメントおよび部材の曲げ変形と独立に, 抜け出し変形を扱える点で計算上簡便である。すなわち, 部材端の抵抗モーメントが同じであれば, クリティカル断面における鉄筋の抜け出し量が異なっても, 抜け出しの回転中心は変わらず(平面保持解析の中立軸位置等), かつクリティカル断面の圧縮部コンクリートの応力分布も同じと考えるものである。しかし, 抜け出し量と, その回転中心や部材の抵抗モーメントは密接に関係し, 上記方法では地震時における材端部の応力・変形状態が必ずしも適切に評価できない。

クリティカル断面における鋼材の抜け出し量は, 一般に定着部内(柱梁接合部等)からの抜け出しのみを対象としている^{1, 3)}が, 部材内においてもひび割れが発生した時点で厳密には平面保持の仮定は成立しておらず⁴⁾, 鋼材の付着強度が低い場合には部材内からの鋼材の抜け出しも無視できなくなる。

このクリティカル断面の抜け出し現象が顕著に現れる構造形式として, 圧着接合方式のプレキャストプレストレストコンクリート造

梁(以下, PCaPC梁)があり, 近年各所で実験的研究がなされている⁵⁾。PCaPC梁では, 梁の鉄筋が柱梁接合部に定着されておらず, 圧着目地(モルタル充填)が存在するため, 目地部に抜け出し回転変形が集中しやすく, 引張側PC鋼材の付着性能の良否が部材の耐力変形性状を大きく左右する。例えば, PC鋼材の付着条件が悪い場合には, PC鋼材が降伏する前に梁端コンクリートの圧壊によって最大耐力が決まる場合もある⁶⁾。圧着接合に使用されるPC鋼材は, PC鋼棒(丸棒), PC鋼より線と異形PC鋼棒があり, それぞれ表面および断面形状が異なるため, その付着すべり特性も大きく異なる。

著者らは, すでに述べた既往の曲げ変形解析法における問題点を検討する目的で, PC鋼材の付着性能を要因としたPCaPC梁の実験を行い, 抜け出し回転中心が抜け出し量によって異なること, 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, 等の知見を得た^{7, 8)}。また, 鉄筋コンクリート造(以下, RC造)の柱部材や架構の実験からも, 同様な知見を得ることができた^{9, 10)}。しかし, それらの検討では, 鋼材の付着性能の相違による影響や部材内での引張側鋼材の付着劣化進展状況等の解明には至っておらず, 部材内における引張側鋼材の付着劣化過程をより実状に近い形で評価することが課題として残されていた。

本論では, 既発表のPCaPC梁の実験データ^{7, 8)}を用い, 実験で得られた梁端部での抜け出し回転挙動をPC鋼材の付着劣化過程と関連付けて整理・分析し, それに基づいた梁部材内でのPC鋼材の付着すべりを考慮した曲げ変形解析法を提案する。

本論文の一部は文献7)および8)に発表している。

* 大成建設技術研究所 主任研究員・工修

** 大成建設技術研究所 主任・工修

Chief Research Engineer, Technology Research Institute, Taisei Corporation, M Eng
Engineer, Technology Research Institute, Taisei Corporation, M Eng

2. 実験による抜け出し現象の検討

2.1 PC鋼材の付着性能を要因とした実験の概要

試験体および加力方法を図1に示す。実験の要因はPC鋼材の種類であり、PC鋼材の付着性能の相違による影響を顕在化させるために、終局時においてもPC鋼材が降伏しないように試験体を設計した。すなわち、緊張材としてPC鋼より線を用いたR-1では、PC鋼より線の有効緊張力を規格降伏点荷重 (P_y) に対して通常より小さく ($0.4P_y$) した。降伏点強度がPC鋼より線の2/3程度と小さいPC鋼棒と異形PC鋼棒を用いたR-2とR-3では、R-1とPC鋼材比および断面平均プレストレスを同一にし、かつPC鋼材が降伏しないようにするため、アンボンドPC鋼棒により圧着接合に必要なプレストレスを付加軸力として別途付与した。各試験体ともプレストレス導入から約1週間程度そのまま放置し、梁のクリープ変形を進行させ、グラウト材の注入は導入力を所定の値に調整した直後に行った。また、R-2とR-3の実験では、载荷中にアンボンドPC鋼棒の引張力 (軸力) が常に一定となるように制御した。本実験では、各試験体とも引張側PC鋼材が降伏するためには、载荷によってPC鋼材が 5000×10^6 以上伸びる必要があり、在来PC梁に比べて厳しい付着条件となる。試験体は内柱梁接合部架構を想定したものであり、柱部分にはひび割れを生じさせないようにプレストレスを導入している (約6MPa)。実験では、試験体载荷部の荷重と変形の他、接合部内のPC鋼材のひずみ、圧着目地付近の梁端部におけるPC鋼材のひずみおよびPC鋼材位置コンクリートの軸変位等を測定した。

図2に各試験体の荷重一部材角関係 (以下、Q-R関係) を重ね書きして示す。図中には、「平面保持の仮定」に基づくR-1の曲げ耐力計算値も示す。実験では、部材終局時にPC鋼材のひずみが測定不能となったため、鋼材降伏は確認できなかったが、各試験体の実験最大耐力は平面保持解析の耐力値 (引張側PC鋼材降伏) まで達していない。最大耐力は、PC鋼棒を用いたR-2が最も小さく、他の2体はほぼ同程度の耐力となった。R-1とR-3の耐力に差が生じなかった理由は、3.2節で解析結果も含めて詳述する。

図3に各試験体の最終破壊状況を示す。図から、付着強度の低いPC鋼棒を用いたR-2では、他の試験体に比べてひび割れ本数が少なく、圧着目地の開きが顕著であった。また、R-1とR-3では曲げせん断ひびわれが多数発生しているのに対してR-2ではその数が少なく、ほとんど曲げひび割れである。梁両端で圧壊が確認された時期は、R-2が最も早く、R-1とR-3はほぼ同じである。

2.2 引張側PC鋼材の抜け出し現象

コンクリート系部材の塑性ヒンジに関する研究は、Mattock¹¹⁾ を

図2 荷重一部材角関係の比較

図3 最終ひび割れ状況

図1 試験体および加力方法

初めてとして多くの研究者によって行われているが、引張側PC鋼材の付着劣化に伴うヒンジの生成機構を実験的に把握することが難しく、抜け出し現象と塑性ヒンジの生成を明確に関連づけた研究は少ない。

図4に地震時応力に対する梁端部のPC鋼材と鋼材位置コンクリートのひずみ分布の模式図を示す。なお、この図は、ひずみ分布をプレストレス導入後のひずみ変化量 ($\Delta \epsilon$) で表し、単調方向载荷のPC梁を対象としたものとなっているが、PC鋼材を鉄筋と見なし、 $\Delta \epsilon$ を鉄筋ひずみとすれば、緊張力が導入されていない一般のRC梁として考えることもできる。図に示すように、部材終局時には、柱梁接合部にはせん断ひび割れ、梁には曲げひび割れが生じており、鋼材位置コンクリートにも引張ひずみが生じている。また、変形の適合条件により、PC鋼材のひずみ分布から求まる伸び量と、鋼材位

図4 PC鋼材と鋼材位置コンクリートのひずみ分布 (模式図)

置コンクリートのひずみ分布から求まる伸び量の差（図中網掛け部）が、柱梁接合部と梁部材に生じているPC鋼材位置のひび割れ幅の総和となる。

このような梁の変形状態では、梁材軸方向の曲率分布は、ひび割れ位置でみかけの曲率が突出した不連続なものとなり、厳密には平面保持の仮定が成立しない^{4, 12, 13)}。曲げとせん断を同時に受ける曲げモーメント勾配を持った梁において、図4に示す柱フェイス位置のひび割れ幅 $Wcr3$ は、部材終局時には変形の増大とともにかなり大きくなるが、 $Wcr4$ や $Wcr5$ 等のひび割れ幅はほとんど拡大せず、図中の矢印で示すように、広い範囲の梁ひび割れ領域から柱フェイス位置（ $Wcr3$ ）に鋼材が抜け出すと考えられる。また、PC鋼材が抜け出す範囲も鋼材の付着性能によって異なる。

この点を検証するために、2.1節で概説した実験において図5に示す考え方に基いて検討を行った。本検討では、圧着部の引張側PC鋼材位置で測定された変位（D1区間）を、PC鋼材の総抜け出し量の実測値として、ひずみ分布から推定した抜け出し量（推定値）と比較する。D1区間の変位は、図5に示すように柱フェイスから25mm（圧着目地幅20mm）の位置に埋め込んだボルトに変位計を取り付け、PC鋼材位置で測定した目地の開きである。なお、抜け出し量の推定ではD1区間内のPC鋼材の伸び量（図5中の①）も考慮した。計算仮定は以下の通りである。

- (1) 接合部コンクリートのひずみは、実験で接合部にひび割れが生じてないことからひずみ量は小さいと考えて無視する。また、対向側梁のPC鋼材位置コンクリートのひずみ（変位測定値から推定）も実験では小さかったので無視する。
- (2) 梁のPC鋼材位置コンクリートのひずみは、D1区間以外のPC鋼材位置における軸方向変位の実測値を測定区間長さで除した値とし、区間内一定とする。したがって、この値にはひび割れの影響も含まれており（以下、ひび割れコンクリートのひずみ）、図4で示したコンクリートのひずみと異なる。

検討結果の一例（ $R=1$ ）を図6に示す。図中の実線と破線は実験における変位測定によって得られた抜け出し量の実測値である。◇印、△印および○印はひずみ分布から推定した値であり、それぞれ抜け出し測定区間（D1区間）の伸び、梁からの抜け出し量および柱梁接合部からの抜け出し量である。これらの推定値の総和を●印で示すが、変位計による実測値とほぼ一致している。

柱梁接合部と梁からの抜け出し量の比率を、鋼材の付着性能が異なる $R=2$ と $R=3$ も含めて比較した結果が図7である。同図は抜け出し測定区間の鋼材の伸びも梁からの抜け出し量としており、ひずみ測定値の信頼性が保証できる範囲までの結果である。この図から、全抜け出し量の絶対値は試験体によって大きく異なるが、柱梁接合部と梁からの抜け出し量の比率は、鋼材の付着性能に関係なくほぼ一定であり、梁からの抜け出し量が全抜け出し量の4～5割を占めていることがわかる。

2.3 クリティカル断面における抜け出し回転中心

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, 3)}。図8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

図5 実験における抜け出し量の検討方法

図6 抜け出し量一部材角関係（ $R=1$ ）

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。図に示すように、同じ外力を受けても、抜け出し量によって回転中心位置が異なり、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。

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8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8の扇形網掛け部）内で平均化した分散ひび割れと

図7 接合部と梁からの抜け出し量の比率

図8 抜け出し回転中心の考え方

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9)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。また、抜け出し吸収領域の長さ $2X_n'$ 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¹⁴⁾を参考とした。

検討方法と検討結果を図9に示す。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($\Delta\epsilon_L$)の和となる。検討では、 X_n' を変数とし、PC鋼材の実測ひずみからPC鋼材の引張力を算出し、コンクリートのひずみ分布は ϵ_s' を引張側PC鋼材位置の見かけのひずみとして断面のひずみ勾配を決める。このひずみ勾配に基づくコンクリートの圧縮合力とPC鋼材の実測引張力が釣り合うまで X_n' を変化させること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8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(図4、5)ため、図9

(1)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(3.13項)。

図9(2)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 。(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 とも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いことが推察できる。

図10に、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。図に見られるように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

(1) 検討方法

(2) 検討結果

図9 抜け出し回転中心に関する検討

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。

3. 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

2章で、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、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

図10 クリティカル断面のひずみ分布

図11 要素分割

図12 強拘束領域

ること等の結論を得た。本章では、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。

3.1 解析方法

3.1.1 解析モデル

解析モデルの要素分割を図11に示す。解析モデルは柱および対向側の梁を剛強なスタブと仮定した片持ち梁であり、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解析とする。各断面の応力計算はファイバーモデルによって行う。

3.1.2 梁端部の強拘束領域

一般に、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6)で報告した解析法では梁部材角 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点が挙げられる。

本解析では、その拘束されている領域（以下、強拘束領域）を、図12に示す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面体と仮定する。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¹⁵⁾やPriestley等の研究¹⁶⁾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¹⁷⁾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13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、梁端で抜け出しが生じないと仮定する。変形が小さい部材弾性範囲では、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18)にも概念として図13と同様な図を用いて田中等やPriestley等の研究が紹介されている。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

図13 クリティカル断面の仮定

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¹⁵⁾。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^{15), 16)}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るが、計算が複雑になるので本解析では、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13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）に仮定し、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、山田等の圧縮側塑性ヒンジ長さ¹⁴⁾を参考としたものであり、平面保持解析における中立軸深さ（ X_n ）とし、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2.3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3.1.4項で述べる。

3.1.3 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14に示す六車・渡辺等のモデル¹⁹⁾を用い、かぶり部（ブレンコンクリート）とコア部（拘束コンクリート）の材料特性の相違も考慮する。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 $0.56\sqrt{\sigma_B}$ （ σ_B ：コンクリート圧縮強度 MPa, MKS単位系では $1.8\sqrt{\sigma_B}$ ）とする。普通鉄筋およびPC鋼材の応力-ひずみ特性は完全弾塑性型である。阿波野・中塚等の実験²⁰⁾によって、柱フェイス位置で鉄筋がカットされている圧着型のPCaPC梁であっても圧縮鉄筋が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ヒンジ要素では圧縮鉄筋のみを考慮する。それ以外の要素では鉄筋は圧縮・引張とも有効に働くとする。また、単調漸増解析において

図14 コンクリート σ - ϵ モデル

図15 より線・鋼棒 τ - S モデル

図16 異形鋼棒 τ - S モデル

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15および図16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15のPC鋼より線の τ - S モデルは、著者ら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^{21, 22)}。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⁵⁾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（ $\tau_{\max}$ ）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、 $\tau_{\max}$ 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 τ - S 特性は図16に示す森田等のモデル⁴⁾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、実験時の σ_B に基づく τ - S 実験曲線式であるため、 σ_B をグラウト材の圧縮強度（ σ_{GB} ）に置き換え、 $\tau_{\max}$ は圧縮強度の2/3乗に比例し²³⁾、 $\tau_{\max}$ 時のすべり量（ $S_{\tau_{\max}}$ ）は鋼材径に比例すると仮定する。

3.1.4 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、3.1.2項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と梁からの抜け出し量を別個に計算し、その和を総抜け出し量とする。

本論では、柱梁接合部と梁部ではPC鋼材の付着すべり特性が異なると考える。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（ $\tau_{\max}$ ）は同じと仮定する。接合部からの抜け出し量（ p_s ）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、 τ - S モデル曲線を逐次積分する方法⁴⁾で求める（定着付着）。梁については、前記の τ - S モデルから数値計算で予め求めた τ - ϵ 特性⁴⁾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）。表現を換えると、PC鋼材の τ - ϵ 特性は接合部および梁とも同じと仮定し、 τ - 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。

(1) クリティカル断面（第1ヒンジ要素）の解析条件

図17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、2.3節で示した図9と同じであるが、2.3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でコンクリートのひずみ分布を変化させる点（2.3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、2.3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。

既往の付着実験の結果から、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^{21, 24)}。梁のヒンジ領域お

図17 梁第1ヒンジ要素のひずみ分布

図18 第2ヒンジ要素と各要素のひずみ分布

図19 要素の付着劣化判定手順

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ヒンジ要素内での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17に示す ϕ_1 を要素の曲率として計算する。

(2) 部材内でのPC鋼材の付着劣化判定方法

図18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、図19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、3.1.3項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 τ - ϵ 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、梁からの抜け出し量を計算する。

まず、予め計算した τ - ϵ 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と、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。引き続き、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 τ -S特性は、図15および図16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（ $\Delta \epsilon_{ci}$ ）と、PC鋼材位置におけるひび割れコンクリートのひずみ（ $\Delta \epsilon_{ci}$ ）の差（ ϵ_{si} ）から、図18に示すようにi番目要素のすべり量（ δ_{si} ）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梁からの抜け出し量の計算値（ S_e ）とし、その値が最初に仮定した抜け出し量（ S_0 ）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。

3.2 解析結果および考察

2章に示した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20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

図20 解析結果（Q-R関係、 $\Delta \epsilon$ 分布）

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²⁰⁾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ることが指摘されており、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（异形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結果となった。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の异形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。PC鋼材の付着特性と部材の耐力変形状状については、RC部材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²⁵⁾。

実験における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、梁せいの減少により平面保持解析の終局耐力まで達しないことが考えられる。この点は、部材の耐力変形状状を評価する場合に留意しておく必要がある。

図20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 $\epsilon_c = -0.4\%$ 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。図3の最終ひび割れ状況で述べたように、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のに対して、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。

4. まとめ

本報告では、圧着接合方式のPCaPC梁の実験結果を基に、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。

本解析法の主な特徴は、①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する点、②梁端における抜け出しの回転中心深さと平面保持解析の中立軸深さは異なると考え、抜け出し量に応じてその回転中心とコンクリートの圧縮負担力を推定する点、③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する点、等である。

本解析により、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。また、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。なお、曲げせん断ひび割れによる変形の評価については今後の課題である。

謝 辞

本研究をまとめるに際し、九州芸術工科大学の大久保全陸教授にご指導を戴きました。実験の計画および結果の分析には、秋田県立大学的小林淳教授(元大成建設(株)技術研究所室長)に終始ご指導を戴きました。また、大阪大学の中塚信助教授には、関連する委員会でも有益なご助言・ご指導を戴きました。ここに記して感謝の意を表します。

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) 例えば、中塚信、阿波野昌幸、石井孝幸、上東弘英：等価塑性ヒンジ長さ断面曲げ解析によるPC梁の荷重-変形関係の推定(その1)、(その2)、日本建築学会大会学術講演会梗概集 構造IV, pp.1043-1046, 1999年9月
- 3) 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

- 4) 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(1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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 是永健好、渡辺英義、桑田由加子、小林淳：プレキャストPC梁内のPC鋼材とグラウト材の付着性状、大成建設技術研究所報 第26号, pp 155-162, 1993年
- 8) 是永健好、渡辺英義、小林淳：梁端部における塑性回転評価に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集, Vol 16, No.2, pp.323-328, 1994年
- 9) 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
- 10) 是永健好、竹崎真一、小室努、川端一三：接合部RC造の柱RC・梁プレキャストPC架構の耐力変形性状、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1035-1040, 1997年
- 11) Mattock, A.H. : Rotational Capacity of Hinging Regions in Reinforced Concrete Beams, ACI, SP.12, Flexural Mechanics of Reinforced Concrete, 1965
- 12) 松崎育弘、福山洋、中澤春生、物部雅江：鉄筋コンクリート部材におけるひび割れ発生領域の抵抗機構に関する実験研究-ひび割れの閉閉性状-, 日本建築学会構造系論文報告集 第388号, PP 35-44, 1988年, 福山洋, 松崎育弘: 同題名-ひび割れ閉閉モデルの検証-, 日本建築学会構造系論文報告集 第409号, PP 37-50, 1990年
- 13) 松崎育弘、福山洋、河野賢一：鉄筋コンクリート曲げ部材の復元力特性に関する解析的研究-ひび割れ閉閉モデルを用いた部材回転変形の算出法-, 日本建築学会構造系論文報告集 第411号, PP 39-48, 1990年
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 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
- 18) Edmund Booth : Concrete Structures in Earthquake Regions, Design and Analysis, Concrete Design and Construction Series, Longman Scientific & Technical, pp.105-108, 1994
- 19) 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
- 20) 阿波野昌幸、中塚信、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
- 21) 是永健好、渡辺英義、小林淳：PC鋼より線の付着実験、大成建設技術研究所報 第27号, pp 111-116, 1994年
- 22) 是永健好、渡辺英義：PC鋼より線とグラウト材の付着特性評価、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造IV, pp 1083-1084, 1999年
- 23) 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
- 24) 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
- 25) 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

(2000年1月10日原稿受理, 2000年5月22日採用決定)