

京都大学	博士 (工学)	氏名	天谷 公彦
論文題目	プレテンション部材から延ばした PC 鋼材を用いたプレストレス導入技術に関する研究		
<p>本論文は、プレテンション部材から延ばした PC 鋼材を用いて接続する部材にプレストレスを導入して一体化を図る構造（ハイブリッドプレストレストコンクリート：HPC 構造）を提案し、その実現のために行った実験、解析、試設計の検討成果を取りまとめたものである。検討にあたっては、PC 鋼より線の付着特性に着目し、PC 鋼より線の付着メカニズムを明らかにしたうえで、HPC 構造の実現性の評価とその活用シナリオの提案を行っている。本論文は全 8 章で構成される。</p> <p>第 1 章は、建設産業およびプレストレストコンクリート（以下、PC）分野における現状と課題を示したうえで、本研究の目的、本研究で提案する HPC 構造の概要、ならびに本論文の構成について示している。なお、HPC 構造は、導入プレストレスを増加させつつ PC 鋼材配置の自由度を確保してスリムな断面を実現すること、長期的な耐久性を確保することを目的とし、1S15.7 エポキシ樹脂被覆高強度 PC 鋼より線と高強度コンクリートの使用を基本としている。</p> <p>第 2 章では、本研究に関する既往の研究および関連規準類について整理し、HPC 構造の実現に向けた課題を整理している。本研究に関連する研究として、プレストレス導入時の付着挙動に関する研究、PC 鋼材とコンクリートの付着特性に関する研究、プレストレストコンクリート部材の耐久性に関する研究に着目している。</p> <p>第 3 章では、プレストレス導入時の 1S15.7 高強度 PC 鋼より線の付着特性の評価を目的とし、設計基準強度 40~80 N/mm² のコンクリートを組み合わせて定着実験を実施している。実験の結果から、HPC 構造には設計基準強度 60 N/mm² 以上の高強度コンクリートが適していること、エポキシ樹脂被覆 PC 鋼材の付着強度が被覆していないものよりも大きくなることを明らかにしている。一方、既往の知見にて、PC 鋼材の付着強度が過度に大きくなると部材端部に局部応力の発生が懸念されることが報告されている。この対応として、付着特性を考慮した HPC 構造の FEM 解析手法を確立することを本研究の課題として設定している。</p> <p>第 4 章では、HPC 構造の要の作業である再緊張時の付着特性・挙動を評価することを目的とし、再緊張実験を実施している。実験の結果、再緊張時には PC 鋼材が回転しながら抜出てくること、拔出し量はコンクリート強度が大きくなるほど小さくなること、再緊張時の緊張管理にて拔出しの影響を考慮する必要があることを明らかにしている。また、PC 鋼材の拔出し量は、再緊張時の PC 鋼材ひずみの変化量を積分することで推定でき、設計基準強度 60 N/mm² 以上の高強度コンクリートと組み合わせることで推定精度が確保できることを明らかにしている。PC 鋼材のひずみ分布の推測には、HPC 構造の FEM 解析手法の確立が必要なことから、本章でも解析手法の確立を本研究の課題としている。併せて、再緊張実験後に供試体の解体調査を行い、再緊張時においてもすべりが生じた箇所のエポキシ樹脂被覆の鋼材保護性能が確保されていることを確認している。</p> <p>第 3 章、第 4 章では、HPC 構造の供試体の組立実験を行い、プレストレス導入から再緊張までの一連の作業ステップにおける付着応力 τ とすべり量 S の関係（τ-S 関係）を求めている。併せて、各作業ステップでの PC 鋼材ひずみの分布を分析し、プレストレス導入時および再緊張時の付着メカニズムの解明を試みている。</p>			

その結果、付着力は PC 鋼材とコンクリートの界面の粘着力、界面の摩擦力、および、機械的な付着力によって構成され、それぞれの付着力の作用割合はプレストレス導入時と再緊張時で異なること、付着力の大きさはコンクリート強度や PC 鋼材のエポキシ樹脂被覆の有無で異なることを示している。

第 5 章では、第 3 章および第 4 章の研究で求めた τ - S 関係を定式化し、これを PC 鋼より線の付着を表現するインターフェース要素の構成則として汎用型非線形 FEM 解析に導入することで、HPC 構造の FEM 解析手法を提案している。さらに、HPC 構造の組立実験の再現解析および HPC 構造の実物大プレテンションセグメントのひび割れ解析を行い、提案した FEM 解析手法の妥当性を検証している。組立実験の再現解析では、プレストレス導入時および再緊張時の PC 鋼材ひずみを一定の精度で再現できており、再緊張時の緊張管理に必要な解析精度を有することを確認している。また、ひび割れ解析においても、実物大プレテンションセグメントに発生したひび割れを再現できており、プレストレス導入時のひび割れリスクを評価可能な結果が得られている。これらの成果をもとに、提案した FEM 解析手法の妥当性と有効性を確認している。

第 6 章では、「再緊張作業がかぶりコンクリート表面からの物質移動抵抗性に与える影響の評価（検討(a)）」と「応力状態に応じた HPC 構造のコンクリート部材およびセグメント接合部付近の物質移動抵抗性の評価（検討(b)）」を目的とし、HPC 構造と一体打ち構造の供試体の塩水浸せき実験を実施している。検討(a)では、再緊張時に PC 鋼より線にすべりが生じた箇所（すべり点）と生じていない箇所（不動点）から採取したコア試料の塩化物イオン含有量を比較し、再緊張時に生じる PC 鋼より線のすべりは、かぶりコンクリートの塩分浸透抵抗性に悪影響を与えないことを明らかにしている。検討(b)では、各構造（HPC 構造と一体打ち構造）の供試体に曲げを載荷した状態で塩水浸せき実験を行い、塩化物イオン含有量を比較している。その結果、道路橋示方書の基準に準拠して設計・施工を行うことで、HPC 構造の接合部は一体打ち構造と同等の塩分浸透抵抗性を発揮できること示している。

第 7 章では、HPC 構造をセグメント工法の主桁として用いたケースと、HPC 構造を活用してプレテンション桁を連続構造としたケースについて試設計を行い、HPC 構造の活用方法を提案している。主桁として用いたケースにおいては、従来のセグメント工法のホロー桁と比較して桁高を約 24% 低減でき、HPC 構造に優位性があることを確認している。プレテンション桁の連続構造化を検討したケースでは、支間中央部を PC 構造、中間支点部を PRC 構造として照査を行うことで、構造が成立することを確認している。これらの結果をもって、HPC 構造の活用方法を提案するとともに、試設計の結果から得られた特徴と課題を示している。

第 8 章では、本研究の結論として 3 章から 7 章の検討で得られた知見を取り纏めるとともに、各章の検討で得られた HPC 構造の課題を示している。また、PC 橋の劣化状況を踏まえた現状を整理したうえで、HPC 構造をどのような環境で採用すべきかの活用シナリオを提案している。併せて、本研究で提案した HPC 構造の FEM 解析手法が、PC 鋼材の破断が確認された PC 橋の耐荷力評価に応用可能なことを提案している。

氏名	天谷 公彦
----	-------

本論文は、プレテンション部材から延ばした PC 鋼材を用いて接続する部材にプレストレスを導入して一体化を図る構造（ハイブリッドプレストレストコンクリート：HPC 構造）を提案し、その実現のために行った実験、解析、試設計の検討成果を取りまとめたものである。検討にあたっては、PC 鋼より線の付着特性と付着メカニズムに着目し、HPC 構造の実現性を評価している。得られた主な成果は次のとおりである。

1. 1S15.7 高強度 PC 鋼より線と設計基準強度 60N/mm^2 以上の高強度コンクリートを組み合わせることで、設計および施工の品質を確保でき、HPC 構造が実現可能なことを確認している。

2. PC 鋼より線とコンクリートの付着応力とすべり量の関係（ τ - S 関係）を求め、この関係の各ステップにおける PC 鋼材ひずみの分布を確認することで、プレストレス導入時および再緊張時の付着メカニズムを示している。PC 鋼材の付着力はコンクリートとの界面の粘着力、界面の摩擦力、および、機械的な付着力によって構成される。各付着力の大きさや作用割合は、コンクリート強度や PC 鋼材のエポキシ樹脂被覆の有無、プレストレス導入時と再緊張時で異なることを明らかにしている。

3. 1S15.7 高強度 PC 鋼より線の τ - S 関係を定式化し、これを PC 鋼より線の付着を表現するインターフェース要素の構成則として非線形 FEM 解析に導入することで、HPC 構造の FEM 解析手法を提案している。この解析手法を用いることで、プレストレス導入時および再緊張時の PC 鋼材のひずみ分布を一定の精度で推定でき、再緊張時の緊張管理に活用できる。また、HPC 構造を想定した実物大プレテンションセグメントのひび割れ解析結果から、本解析手法がプレストレス導入時のひび割れリスクの評価に有効であることを確認している。

4. HPC 構造と一体打ち構造の供試体の塩水浸せき実験を実施し、一体打ち構造のプレテンション供試体と HPC 構造供試体の接合部近傍の塩分浸透抵抗性を評価している。検討の結果、再緊張時に生じる PC 鋼より線のすべりは、かぶりコンクリートの塩分浸透抵抗性に影響しないことを明らかにしている。また、HPC 構造と一体打ち構造の供試体の塩分浸透状況を比較し、適切な設計・施工を行うことで HPC 構造の接合部は耐久性上の弱点とならないことを示している。

5. HPC 構造をセグメント工法の主桁として用いたケースと、HPC 構造を活用してプレテンション桁を連続構造としたケースについて試設計を行い、HPC 構造の活用方法を提案している。試設計の結果から、桁高の低減や施工性向上などの効果が期待される。

本論文は、1S15.7 高強度 PC 鋼より線の付着特性を評価し、その付着メカニズムを解明することで、HPC 構造が実現可能なことを示した。また、本研究で提案した PC 鋼材の付着を考慮した非線形 FEM 解析手法は、一般的な PC 構造物の解析にも応用可能な手法である。本論文で得られた成果は、学術上のみならず、実務上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 5 年 2 月 20 日に論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。