論文 プレテンション部材の PC 鋼材を用いて接合する構造における PC 鋼 材再緊張時の付着性状

天谷 公彦*1・角田 貴也*2・高谷 哲*3・山本 貴士*4

要旨: プレテンション工法の適用範囲の拡大を目的とし、 プレテンション部材から延びた PC 鋼材を用いて接続部材にプレストレスを導入し一体化を図る「ハイブリッドセグメント構造」の開発を目指している。本研究では、PC 鋼材を再緊張した際の高強度 PC 鋼材と高強度コンクリートの付着応力-すべり関係を求め、 プレテンション部材へのプレストレス導入時との付着機構の違いを考察した。検討の結果、導入時と再緊張時で、また PC 鋼材のエポキシ被覆の有無で付着機構が異なることが分かった。さらに、過去に再緊張実験を行った供試体の解体調査を行い、再緊張が ECF 高強度 PC 鋼材の鋼材保護性能に影響しないことを確認した。 キーワード: プレテンション構造、ECF 高強度 PC 鋼材, 再緊張, 付着応力-すべり関係

1. はじめに

プレストレストレストコンクリート (PC) の分野にお いてプレキャスト工法を活用する効果は大きく,工場製 作による品質の確保,現場作業の省力化による生産性の 向上や労働災害リスクの低減,さらには高強度コンクリ ートの活用による部材の高性能化などの多くの利点が期 待できる。

プレキャスト工法のPC部材にはプレテンション工法 とポストテンション工法がある。このうち,プレテンシ ョン工法は信頼性が高く,現場での施工性にも優れるが, 運搬上の制約条件から適用範囲が限定される。この課題 への対応として,プレテンション部材から延びたPC鋼材 を用いて接続する部材にプレストレスを導入し,部材の 一体化を図るハイブリッドセグメント(HS)構造を提案 する。HS構造は,支間25~32m程度のPC橋を想定してお り,簡易な緊張作業にてプレテンション工法の適用範囲 の拡大が期待できる。

筆者らは、これまでにHS構造の実現に向けた実験的検 討^{1),2)}を行い、プレテンション部材から延びたPC鋼材の 再緊張が可能なこと、HS構造には内部充てん型エポキシ 樹脂被覆(ECF)高強度PC鋼材と高強度コンクリートの 組合せが望ましいことを報告してきた。一方で、再緊張 時のPC鋼材とコンクリートの付着機構の解明には至っ ておらず、HS構造の性能を精度よく評価するためには、 両者の付着特性に関する更なる検討が必要と考えている。

本研究では、高強度PC鋼材と高強度コンクリートを組 み合わせたHS構造の供試体で再緊張実験を行った。さら に過去の再緊張実験の供試体を解体し、PC鋼材とコンク リートの状態を観察することで、プレストレス導入時お よび再緊張時の両者の付着挙動と、再緊張がECF高強度 PC鋼材の鋼材保護性能に与える影響について考察した。 2. 実験概要

プレストレス導入時および PC 鋼材の再緊張時の付着 特性を把握することを目的とし、プレテンション供試体 による再緊張実験を実施した。さらに、文献 1) で PC 鋼材の再緊張を実施したプレテンション供試体を解体し、 コンクリートと PC 鋼材の界面付近の状態を観察した。 また、再緊張がエポキシ樹脂被覆の鋼材保護性能に及ぼ す影響を把握することを目的とし、被覆の状態を詳細に 調査した。各検討方法の詳細を 2.1~2.3 に示す。

2.1 使用材料および供試体の概要

本実験に使用した高強度PC鋼材の諸特性を表-1に、 高強度コンクリートの配合を表-2に示す。高強度PC 鋼材は、一般的なプレテンション工法に用いられる 1S15.2PC 鋼より線(JIS G 3536)と比較して引張強度を 約19%高強度化し、直径を15.7mmに太径化することで、 導入できる緊張力を約28%高めている。本検討では、裸 の高強度PC鋼材(UHSP:Ultra-High Strength PC Strand) と ECF 高強度 PC 鋼材(UHSP ECF)の2種類のPC 鋼材 を用いた。コンクリートの設計基準強度は、70,80 N/mm²

表-1 高強度 PC 鋼材の諸特性

PC 鋼材 種類	公称径 (mm)	公称 断面積 (mm ²)	引張 荷重 (kN)	0.2%永久伸 びに対する荷 重 (kN)	伸び (%)	リラクセー ション値 (%)
15.7UHSP			349.0	322.0	6.4	0.96
15.7 UHSP ECF	15.7	150	351.0	321.0	5.9	2.65
参考:SWPR7BL	15.2	138.7	≧261.0	≧222.0	≧3.5	≦2.5

表-2 高強度コンクリートの配合

		-		-	-		
設計 其進強度	W/C	単位量 (kg/m ³)				スランプ	空気量
(N/mm^2)	(%)	W	С	S	G	(cm)	(%)
70	29.3	142	485	676	1121	12.0±2.5	4.5±1.5
80	27.2	137	504	772	1082	60.0±10.0	2.0±1.0

*1 (株)日本ピーエス 技術本部 研究開発グループ 工修 (正会員) *2 (株)日本ピーエス 技術本部 研究開発グループ 工修 *3 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 工博 (正会員) *4 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 工博 (正会員)

の2種類とした。

2.2 再緊張実験

再緊張実験の供試体を図-1に、実験供試体の一覧を **表**-3に示す。供試体は、□150 mm×1500 mmの矩形断 面のプレテンション構造とし、断面中心に PC 鋼材を 1 本配置した。実験パラメータは、高強度 PC 鋼材のエポ キシ樹脂被覆の有無とコンクリート強度とし、それぞれ 2 体製作した。測定項目は、プレストレス導入時と再緊 張時の緊張力、PC 鋼材ひずみ、コンクリートひずみとし、 それぞれロードセル、 PC 鋼材ひずみゲージ (WSG:Wire Strain Gauge)、コンクリートひずみゲージを用いて測定 した。プレストレス導入時の PC 鋼材応力度は、実橋の 設計荷重作用時の PC 鋼材応力の下限を想定した値とし、 再緊張時の PC 鋼材応力度は、道路橋示方書・同解説 III に示されているプレストレッシング中の PC 鋼材の引張 応力度の制限値³⁾を参考として $\sigma_{ni}=1710$ N/mm²とした。

±1 ₽.	PC 鋼材	コンクリート強度	PC 鋼材応力度(N/mm ²)		
記方	種類	(N/mm^2)	導入時	再緊張時	
U70	16711100	70	1224	1717	
U80	15.7 UHSP	80	1334	1/1/	
UE70	15.7 UHSP	70	1356	1740	
UE80	ECF	80	1369	1/46	

表-3 実験供試体の一覧

再緊張実験の概要を図-1に示す。細居らの研究によると、PC 鋼材とコンクリートの付着機構は、両者の(a) 化学的粘着力、(b)摩擦力、(c)機械的抵抗の3つの作用に 分類され、このうち(c)は余長が短いほど大きくなること が報告されている^{4)、5)}。本検討では、HS 構造の再緊張時 のPC鋼材の付着特性の把握を目的としていることから、 プレテンション供試体に実橋を想定した場合の最短のセ グメント長(1セグメント分)となる長さ1.5 mのポス トテンションセグメントを接続したうえで、PC 鋼材の再 緊張を実施した。

2.3 解体調査

文献 1) で再緊張実験を行った供試体の解体調査を行った。再緊張時の PC 鋼材のひずみ分布を図-2に,解体調査の概要を図-3に示す。なお,図中の供試体の記号は,英字が PC 鋼材の種類を,数字がコンクリート強



度を示している。PC 鋼材ひずみは、プレテンション供試体へのプレストレス導入前に(PC 鋼材に緊張力を与えている状態で)初期値を設定した。そのため、PC 鋼材のひずみは全体的に引張であるが、図-2では導入前と比較して PC 鋼材の引張ひずみが減少した場合は負側、増加した場合は正側にひずみが推移するように描かれている。

解体調査は、文献1)のU80およびUE80の両供試体 に対して実施し、PC 鋼材とコンクリートの界面付近の状 態を目視で確認した。各供試体の再緊張時の不動点は、 文献1)のU80が800mm付近、UE80が400mm付近で あったことから、これらの点を超える1200mmの位置ま で供試体を解体した。さらに文献1)のUE80に関して は、供試体解体後にPC 鋼材を採取し、左端側(WSGを 貼り付けた側)から切出した PC 鋼材でエポキシ樹脂被 覆の膜厚測定を、右端側から切出した PC 鋼材で塩水の 乾湿繰返しによる腐食実験を実施した。それぞれの検討 方法の詳細を(1)、(2)に示す。

(1) エポキシ被覆の膜厚の測定方法

UHSP ECF の膜厚は、デュアルタイプ膜厚計 LZ-990(測 定範囲 0~2000µm, 測定精度±2%)を用いて測定した。 測定位置は、供試体端部から 1100mm までの範囲を概ね 均等に分割した 33 測点とし、1 測点あたり 3 回の測定を 行い、その平均値を測定値とした。

(2) 塩水乾湿繰り返し実験

塩水乾湿繰り返し実験の概要を図-4に示す。供試体 端部から 800 mm までの PC 鋼材を長さ 200 mm に 4 分割



し, 切断面をエポキシ樹脂で被覆した後に実験に供した。 PC 鋼材は,5%NaCl 溶液を含ませたスポンジで覆い,35 ±2℃の恒温槽内に静置した。溶液の補給は,PC 鋼材の 乾燥を確認したうえで,1週間に1回の頻度で行った。

3. 再緊張実験の結果

3.1 PC 鋼材のひずみ分布

再緊張時の PC 鋼材ひずみの分布を図-5に示す。図 の値は供試体2体の平均値を示しており,引張ひずみを 正としている。PC 鋼材ひずみは,PC 鋼材の緊張前に初 期値を設定し,緊張作業以降のひずみの変化量を測定し た。再緊張時のコンクリート強度はU70が77.1 N/mm², U80が94.3 N/mm², UE70が69.0 N/mm², UE80が85.0 N/mm², ヤング係数は順に 3.78×10⁴ N/mm², 4.31×10⁴ N/mm², 3.79×10⁴ N/mm², 3.98×10⁴ N/mm²であった。

PC 鋼材に再緊張力を加えると,全ての供試体で定着区間の PC 鋼材ひずみが徐々に増加し,ひずみの不動点が供試体内部に移動した。この結果から,プレテンション部材から延びた PC鋼材を再緊張し端部定着することで,定着区間にもプレストレスが導入できると考えられる。

PC 鋼材ひずみの分布状況に着目すると, UHSP を用いた U70, U80 はそれぞれ供試体端部から 700mm, 900mm の位置を不動点とし,端部に向けてなだらかにひずみが増加した。PC 鋼材ひずみが変動する範囲は, コンクリート強度が高い U80 の方が U70 よりも小さくなった。

UHSP ECF を用いた UE70, UE80 は,供試体端部から 700 mm の位置を不動点とし,端部から 300 mm の位置に 向けて急激にひずみが増加した。また,供試体端部~300 mm の範囲の PC 鋼材ひずみは,ほぼ一定値となった。 PC 鋼材ひずみの変動範囲は,UE70,UE80 ともに 400 mm 程度であり,本実験の WSG の貼付け間隔の場合は,コ ンクリート強度による差は見られなかった。

実験の結果, PC 鋼材のエポキシ被覆の有無によって再 緊張時の定着区間の PC 鋼材ひずみの挙動が異なった。 HS 構造の実橋では、プレテンション部材の断面に複数 の PC 鋼材が配置され²⁾、そのうちの一部をポストテン ションセグメントまで延長(残りはプレテンション用の みに用いる)して再緊張を行う。よって、プレテンショ ン部材の定着区間は応力状態が複雑となる。このことか ら HS 構造には、プレストレス導入時および再緊張時の 定着長が短く、再緊張時に部材端部で PC 鋼材ひずみが 一定値となる UHSP ECF が適していると考えられる。

(1) 算出方法

3.2 付着応カーすべり関係

付着応力 τとすべり量 S の算出方法⁶を図-6に,算出 式をそれぞれ式(1),式(2)に示す。付着応力は,プレスト レス導入時および再緊張時の PC 鋼材の引張ひずみの変



化量 $_{pE_i}$ (図-5(b)参照) に断面積とヤング係数を乗じ て緊張力 T_i を算出し,隣接する測点からの緊張力の増加 量 ΔT_i を PC 鋼材の周長とゲージ間隔で除して求めた。

$$\tau_i = \frac{A_p}{\Delta x \cdot \phi} \Big({}_p \varepsilon_i \cdot {}_p E_i - {}_p \varepsilon_{i+1} \cdot {}_p E_{i+1} \Big)$$
(1)

ここに, τ_i : i 点での付着応力(N/mm²)

pεi : i 点の PC 鋼材ひずみの変化量(×10⁶)

 $_{p}E_{i}$: i点の PC 鋼材ヤング係数(N/mm²)

- A_p : PC 鋼材の公称断面積(mm²)
- **Δ***x* : ひずみゲージの間隔(mm)
- **φ** : PC 鋼材の周長(mm)

すべり量は、プレストレス導入時および再緊張時の PC 鋼材の引張ひずみの変化量とコンクリートの圧縮ひずみ の変化量の分布より、各測点の PC 鋼材ひずみの変化量 p&とコンクリートひずみの変化量 c&の差を、PC 鋼材ひ ずみの不動点から当該位置までの距離で積分して求めた。

$$S_i = \int_0^{x_i} \left({}_p \varepsilon_i - {}_c \varepsilon_i \right) dx \tag{2}$$

ここに、 S_i : *i* 点でのすべり量(mm) c^{ϵ_i} : *i* 点のコンクリートひずみ変化量(×10⁶) x_i : 不動点から *i* 点までの距離(mm)

(2) 付着応カーすべり関係の算出結果

U70, U80, UE70, UE80 の付着応力-すべり関係を図 -7に示す。付着応力-すべり関係は,各供試体の測定 値の平均値を用いて算出しており,プレストレス導入時 には負の方向に,再緊張時には正の方向に履歴が生じる ように描いている。また,図中の1はプレテンション供 試体の端部からの距離(図-1参照)を示している。

全ての供試体で,プレストレス導入開始からすべり量 の増加に伴い付着応力度がほぼ線形に増加していくが, ある時点で剛性が急激に低下しすべりが大きくなる現象 がみられた。本稿では,この現象を付着降伏,その点を 付着降伏点と称する。

プレストレス導入時の挙動に着目すると,UHSP を用 いたU70,U80は、付着降伏点はほぼ同値であったが、 付着降伏以降の傾きが異なる傾向にあった。UHSP ECF を用いたUE70,UE80は、コンクリート強度が大きくな るほど付着降伏点も大きくなる傾向にあったが、付着降 伏以降の傾きは両者とも同程度であった。また、プレス トレス導入時の付着応力は、70,80 N/mm²のいずれのコ ンクリート強度においても、UHSP ECF を用いた供試体 の方が大きく発生する傾向にあった。

再緊張時の挙動に着目すると,U70,U80 は全ての測 点ですべり量の増加に伴い付着応力も増加し,2 N/mm² 程度でピークを迎えた。その後,付着応力は緩やかに低 下し,更にすべり量が増加すると再び緩やかに上昇に転 じた。UE70,UE80 は,すべり量の増加に伴い付着応力 も増加したが,*I=200*の位置では0 N/mm²付近をピーク に緩やかな下降に転じ,その後は付着応力がほぼ一定で すべりのみが生じる傾向であった。ただし,プレストレ ス導入時に付着降伏点に達していない測点(*I=400*,600) においては,再緊張時もすべり量の増加に伴い付着応力 が大きくなった。

これらの結果から、プレストレス導入時と再緊張時で,





また PC 鋼材のエポキシ被覆の有無で付着機構が異なる ことが示された。プレストレス導入時の付着力は, PC 鋼材とコンクリートの粘着力および PC 鋼材のポアソン 効果による摩擦抵抗力で構成されることが報告されてい る⁷⁾。本検討においても,同様の付着機構が作用したと 想定され、UHSP ECF はコンクリートとの粘着力が増加 した分だけ付着降伏点も大きくなったと考えられる。

一方, PC 鋼材の再緊張(引抜き)時は,両者の粘着力 と機械的作用による付着機構で構成され,付着応力はピ ークを迎えた後に緩やかに増加に転じる傾向となること が報告されている^{4),5),8),9)}。本検討では,UHSPを用い た供試体はこれらの知見と同様の傾向が確認できたが, UHSP ECF を用いた場合は粘着力消失後の機械的付着の 増加がみられなかった。これは,UHSP ECF はエポキシ 樹脂で被覆されているため撚りの凹凸が小さく,粘着力 が破壊された以降に,撚り目のセメントペーストの微小 破壊や,撚りわらいに伴う腹圧増加といった付着機構が 作用しなかったことが要因と考えられる。

4. 解体調査の結果

4.1 目視確認の結果

文献 1)の U80 および UE80 の解体後の状況をそれぞ れ写真-1,写真-2 に示す。再緊張時には,文献 1)の U80 は供試体端部~800mm, UE80 は端部~400mmの 位置にかけて PC 鋼材のひずみが変動している。

文献 1) の U80 のコンクリート面を観察すると,供試体の端部(0~300 mm)および内部(600~900 mm)のいずれの位置でも UHSP の撚り目に沿った跡が確認でき,再緊張後も破壊されずに残存していた。また,PC 鋼材の撚りの隙間にはセメントペーストが充填されており,部分的にモルタルが付着している箇所も見られた。

文献1)のUE80のコンクリート面を観察すると,UHSP ECF の撚り目にそった溝の跡が確認できた。ただし, UHSP と比較して溝は浅くなだらかであった。また,供 試体端部の PC 鋼材ひずみに大きな変動が見られた位置 において,コンクリートおよび PC 鋼材に斑模様のすべ り痕が確認された。このすべり痕部分を顕微鏡で観察す ると,エポキシ被覆のものとみられる淡青色の塗料がご くわずかに確認された。

解体調査の結果,いずれの供試体も PC 鋼材の撚りの 隙間までモルタルおよびセメントペーストが充填されて いたが,撚り目に沿った溝は文献1)のU80の方が深く, その跡は再緊張後も残存していた。この結果から,機械 的な付着はUHSPを用いた場合の方が大きいと推測され る。

4.2 エポキシ被覆の膜厚の測定結果

文献 1)の UE80 から採取した UHSP ECF のエポキシ 被覆の膜厚の測定結果を図-8に示す。膜厚は、供試体 端部から 1100mm の範囲の 33 箇所で測定した。図中の 一点鎖線は 33 測点の膜厚の平均値を,点線は平均値±2σ を示している。なお, PC 鋼材の製造会社の膜厚の管理値 は 0.40 mm~1.20 mm に設定されている。



写真-1 文献1)のU80の解体状況



写真-2 文献 1)の UE80 の解体状況



測定の結果, 膜厚の最大値は 0.87 mm, 最小値は 0.74 mm, 平均値は 0.82 mm,標準偏差σは 0.03 mm であった。 再緊張時に PC 鋼材ひずみに変動が見られた供試体端部 から 400 mm までの範囲 (図-2参照) と,400~1100 mm までの範囲の膜厚の平均値を比較すると,いずれも 0.82 mm で同値となった。また,参考として供試体の外部に 突出している PC 鋼材の任意の箇所 9 箇所で膜厚を測定 した結果,平均値は 0.82 mm となり,内部の膜厚の平均 値と同値となった。

これらの結果から、プレストレスの導入および再緊張 作業は、エポキシ被覆の膜厚に与える影響はほとんどな

いと考えられる。

4.3 塩水乾湿繰返し実験の結果

塩水乾湿繰返し実験の開始前と2サイクルの乾湿繰返 し後のUHSPECFの状況を写真-3に示す。PC鋼材は, UE80の供試体内部(端部~800mmの範囲)から採取し た4試料に加え,参考のため供試体外部から採取した試 料も実験に供している。

2 サイクルの塩水乾湿繰返しを行った結果, PC 鋼材の 発錆は確認できていない。そのため、現段階においては プレストレスの導入および再緊張作業によって UHSP ECF のエポキシ樹脂の鋼材保護性能に悪影響は生じてい ないと考えられる。なお、今後も3ヵ月程度塩水乾湿繰 返し実験を継続し, PC 鋼材の発錆の有無を観察する予定 である。



実験開始前 2 サイクル完了 写真-3 塩水乾湿繰返し実験の状況

5. まとめ

HS 構造を想定した供試体による再緊張実験および実 験供試体の解体調査から得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 再緊張時の PC 鋼材の挙動は, エポキシ被覆の有無に よって異なる。HS 構造には, プレストレス導入時お よび再緊張時の定着長が短く, プレテンション部材 の端部で PC 鋼材ひずみが一定となる UHSP ECF が適 していると考えられる。
- (2) プレストレス導入時の付着応カーすべり関係は, UHSP を用いた場合は付着降伏点以降の傾きが, UHSP ECF を用いた場合は付着降伏点の値が,コンク リート強度の影響を受ける。
- (3) PC 鋼材とコンクリートの付着機構は、プレストレス 導入時と再緊張時で、また PC 鋼材のエポキシ被覆の 有無で異なる。UHSP ECF は、粘着力が破壊された以 降の機械的な付着機構がほとんど期待できないと考 えられる。
- (4) 解体調査の結果, PC 鋼材の撚りの隙間までセメント ペーストあるいはモルタルが充填されていた。なお、 溝の深さは UHSP の方が深く、その跡は再緊張後も 残存していた。
- (5) UHSP ECF を再緊張した場合,大きなすべりが生じる

箇所においても、エポキシ被覆の膜厚や鋼材保護性 能に悪影響はないと考えられる。

本検討にて,高強度 PC 鋼材と高強度コンクリートの プレストレス導入時および再緊張時の付着応力-すべり 関係を求めることができた。その結果,特に再緊張時に プレテンション部材の端部にすべりが生じることが確認 された。今後,本検討で得られた付着応力-すべり関係 を FEM 解析に反映し, PC 鋼材の付着特性が HS 構造の 耐荷性能に及ぼす影響について検討を進めたいと考える。

参考文献

- 天谷公彦,角田貴也,高谷哲,山本貴士:プレテン ション部材から延びた PC 鋼材を用いた接合技術に 関する研究,第 28 回プレストレストコンクリート の発展に関するシンポジウム論文集,pp.125-130, 2019.11
- Amaya K., Tsunoda T., Takaya S., Yamamoto T.(2019)., "Development of Hybrid Structure adding Post-tensioned Segment on Pre-tensioned Member,", Proceedings of the *fib* symposium 2019, pp.1331-1338, 2019. 5
- 3) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 Ⅲ コンクリ ート橋・コンクリート部材編, pp.22-24, 2017.11
- 4) 細居清剛,市来隆志,中塚佑:PC 鋼より線とグラウトとの付着特性に関する研究,第 12 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集,pp.77-80,2003.10
- 5) 細居清剛,市来隆志,白濵昭二,中塚佑:マルチス トランドケーブルの付着挙動の推定に関する検討, 第 18 回プレストレストコンクリートの発展に関す るシンポジウム論文集,pp.251-256, 2009.10
- 6) 竹崎真一, 是永健好, 野口博: プレストレス導入時 における高強度鉄筋の付着性状に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集 第 77 巻 第 676 号, pp.967-973, 2012.6
- 7) 國富康志,泉満明,高野茂晴,横山博司:PC鋼より 線のプレストレス定着長,第 12 回プレストレスト コンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.561-564, 2003.10
- 8) 足立将人,西山峰広,河野進: PC 鋼より線の付着応 カーすべり-ひずみ関係に関する実験的研究,コン クリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.661-666, 2002 ポアソン効果の論文
- 9) 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(中国),pp.1083-1084,1999.9