

# 論文 CF RTP ストランドとコンクリートの付着および定着に関する 実験的検討

角田 貴也\*1・高岩 裕也\*2・阿部 拓也\*3・宮里 心一\*4

**要旨:** 本検討では、CF RTP (炭素繊維強化熱可塑性プラスチック) ストランドをプレテンション方式 PC 構造物の緊張材として適用することを目的とし、付着・定着性能の確認のために定着実験を実施した。この結果、CF RTP ストランド表面を組紐状に編み込んだガラス繊維により被覆することで、表面の凹凸に起因する機械的な付着により、付着・定着性能が向上することが分かった。加えて、繊維被覆を施していない CF RTP ストランドを用いる場合、必要な定着長が得られない可能性があることが分かった。

**キーワード:** プレテンション構造, 熱可塑性 FRP, 炭素繊維, 付着

## 1. はじめに

昨今、高度経済成長期に建設された構造物の劣化が問題視されている。特に PC (プレストレストコンクリート) 構造物では、PC 鋼材の腐食および破断が構造物の耐荷性能に与える影響は大きい。

この問題に対し、近年熱硬化型樹脂を用いた、FRP (繊維強化プラスチック) 製緊張材の PC 構造物への適用が検討されており、既に強化繊維として炭素繊維<sup>1)</sup>、アラミド繊維<sup>2)</sup>等を用いた緊張材が実用化されている。熱硬化型 FRP 製緊張材は軽量であり、かつ PC 鋼材と同等の引張強度を有し、さらに腐食、磁化を生じないといった点から、コンクリートの補強材として有効である。反面、製造プロセスが複雑であり高コストであることが普及の妨げになると考えられる。一方で FRTP (繊維強化熱可塑性プラスチック) は二次加工性に優れ、また量産により製造コストの低減が期待される。そこで、本研究では CF RTP ストランド<sup>3),4)</sup>に着目し、PC 構造物への適用に向けた検討を実施する。

CF RTP ストランドを PC 構造物へ適用するうえで、コンクリートあるいはグラウトとの付着が重要となる。これまでに、コンクリートに埋め込まれた CF RTP ストランドの一軸引抜き試験により付着特性の把握が試みられている<sup>3)</sup>。一方で、プレテンション方式 PC 構造物において、一般的な PC 鋼より線を用いた場合、プレストレス導入時と引抜き試験時では付着挙動が異なることが報告されている<sup>5)</sup>。そこで本研究では、CF RTP ストランドのプレテンション方式 PC 構造物への適用を想定し、プレストレス導入時の付着挙動の把握を目的とした実験的検討を行う。また、組紐状のガラス繊維被覆を施した CF RTP ストランド、一般的な PC 鋼より線と比較し、付着・定着の観点からプレテンション方式 PC 構造物への適用性について考察する。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料の諸元

本実験で用いた緊張材の諸元を表-1に、コンクリー

表-1 緊張材諸元

	CF RTP	CF RTP (ガラス繊維被覆有)	PC 鋼より線
強化繊維	高強度炭素繊維		/
被覆繊維	原料: ポリアクリロニトリル (PAN)		
マトリクス	E ガラス		
繊維の単位体積含有率	熱可塑性樹脂 (熱可塑性エポキシ)		
ガラス転移点	炭素繊維: 68% 炭素繊維: 45%, ガラス繊維: 26%		
より本数	90°C		
公称径	7 本		
周長	9 mm (素線径 3 mm)	9.3 mm (素線径 3.1 mm)	9.3 mm (素線径 3.1 mm)
線膨張係数	37.7 mm	39.0 mm	39.0 mm
有効断面積*	49.48 mm <sup>2</sup>	0.5 × 10 <sup>-6</sup> /°C	10 × 10 <sup>-6</sup> /°C
よりピッチ	52.83 mm <sup>2</sup>		51.61 mm <sup>2</sup>
0.2% 永久伸びに対する荷重	約 200 mm		136 mm
最大引張荷重	115 kN	97.0 kN	97.0 kN
引張強度	2140 N/mm <sup>2</sup>	92.3 kN	109 kN
ヤング係数	137400 N/mm <sup>2</sup>	1750 N/mm <sup>2</sup>	2110 N/mm <sup>2</sup>
リラクゼーション率	99950 N/mm <sup>2</sup>	9%	196300 N/mm <sup>2</sup>
			≤ 2.5%

※ CF RTP : 公称素線径より算出 PC 鋼より線 : 公称断面積

\*1 株式会社日本ピーエス 技術本部研究開発グループ 修士(工学) (正会員)

\*2 東洋大学 理工学部建築学科専任講師 博士(工学)

\*3 小松マテレー株式会社 技術開発部先端資材グループ

\*4 金沢工業大学 工学部環境土木工学会教授 博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリート配合表

設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				スランプ, スランプフロー (cm)	空気量 (%)
		C	W	S	G		
50	36.0	420	151	731	1093	11.3	4.5
80	29.2	497	145	354	1088	53.7	1.1



(a) ガラス繊維被覆 (b) 繊維被覆無  
写真-1 CFRTF ストランド

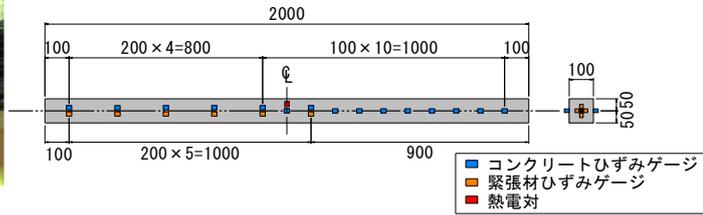


図-1 供試体概要

表-3 供試体一覧

供試体名	緊張材種類	初期緊張力 (kN)	導入直前緊張力 (kN)	コンクリート		
				設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	導入時圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	導入時ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
CFRTP50N	CFRTP緊張材	50	46.2	50	45.2	30.97
CFRTP80N	"		51.4	80	80.7	37.29
CFRTP50G	" (ガラス被覆有)		48.0	50	45.2	30.97
CFRTP80G	" (ガラス被覆有)		51.0	80	80.7	37.29
PC50	PC鋼より線		49.9	50	43.3	29.76
PC80	"		50.2	80	75.5	37.25

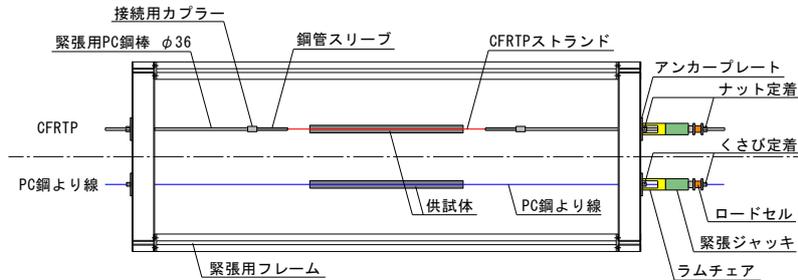


図-2 実験概要

この配合を表-2に示す。周長は中心素線の外周部に配置される素線のコンクリートと接する部分の長さとした<sup>3)</sup>。CFRTP ストランドの最大引張荷重は、実験に用いるものと同一ロットで製作したものの引張強度試験により求めた。引張強度は最大引張荷重を有効断面積で除すことで求めた。ヤング係数は、CFRTP ストランドに関しては緊張作業時のひずみと緊張荷重から求めた。PC 鋼より線のヤング係数はミルシートの値を記載している。本実験では、通常の CFRTP ストランドに加え、芯線の炭素繊維を、組紐状に撚り合わせたガラス繊維で被覆した後、熱可塑性樹脂に含浸させた素線を 7 本より線とした CFRTP ストランドを用いた。ガラス繊維被覆 CFRTP ストランドの外観を写真-1(a)に示す。繊維被覆無の CFRTP ストランド(写真-1(b))と比較し、組紐状の繊維被覆により表面に凹凸が形成されることで、機械的な付着の向上が期待できる。また、コンクリートは設計基準強度が 50N/mm<sup>2</sup>, 80N/mm<sup>2</sup> の 2 種類を用いた。

## 2.2 供試体概要

供試体の概要を図-1に示す。本実験では、緊張材とコンクリートとの付着特性を把握するため、鉄筋は配置していない。実験供試体の一覧を表-3に示す。供試体のパラメータは緊張材種類およびコンクリート強度とし

た。本論文では、例えば、被覆無 CFRTP ストランド、設計基準強度 50N/mm<sup>2</sup> のコンクリートを用いた供試体を「CFRTP50N」と表記する。末尾のアルファベットは N: 外装被覆無, G: ガラス繊維被覆を示す。各ストランドの初引張荷重は、文献 6)を参考に、被覆無の CFRTP ストランドの破壊確率から 50kN で統一した。

## 2.3 定着実験概要

本実験の概要を図-2に示す。CFRTP ストランドは表面のわずかな損傷が引張強度に大きく影響するため、配置方法および緊張方法に配慮する必要がある。本実験では、フレーム、アンカープレートに直接緊張材を通さないために、ストランドの両端に取り付けた鋼管スリーブを PC 鋼棒に接続し、PC 鋼棒に引張荷重を与えることで、CFRTP ストランドを緊張した。CFRTP ストランドの定着方法には HEM 定着法<sup>7)</sup>を用い、カプラーで緊張用 PC 鋼棒と接続した。鋼管スリーブの 2 方向(軸方向, 円周方向)に貼付したひずみゲージにより膨張圧を外管法<sup>8)</sup>によりモニタリングした。PC 鋼より線に関しては一般的なくさび式定着具で定着した。計測項目は、緊張材ひずみ、コンクリートひずみとした。緊張材には同断面の素線 4 本に対してそれぞれ 1 枚ずつ、コンクリートに対しては図-1に示すように供試体側面にひずみゲージを貼付し

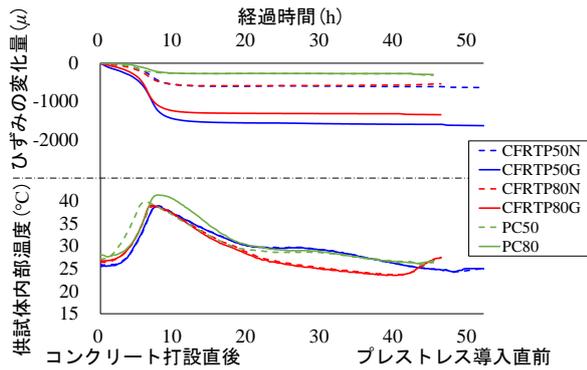


図-3 コンクリート中の緊張材の挙動  
表-4 緊張作業直前の静的破壊剤の膨張圧

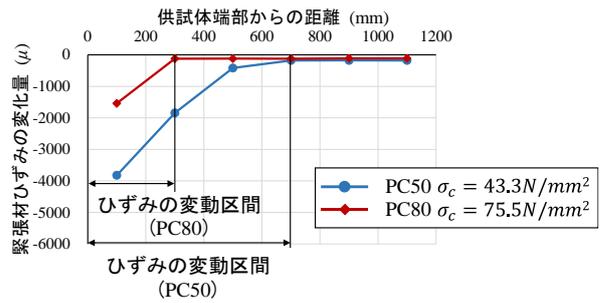
供試体名	緊張作業直前の膨張圧 (N/mm <sup>2</sup> )
CFRTTP50N	35.3
CFRTTP50G	55.2
CFRTTP80N	33.0
CFRTTP80G	45.6

た。なお、ガラス繊維被覆 CFRTTP ストランドに対しては、繊維被覆部と芯線部が樹脂により一体化しているため、被覆上からひずみゲージを貼付した。また、本論文では、各種緊張材の挙動を相対的に評価するため、撚り角度によるひずみの補正は行っていない。緊張荷重は緊張端に配置したロードセルを用いて制御した。

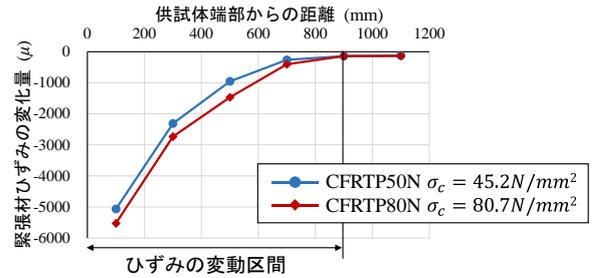
### 3. 定着実験の結果

#### 3.1 プレストレス導入までの挙動

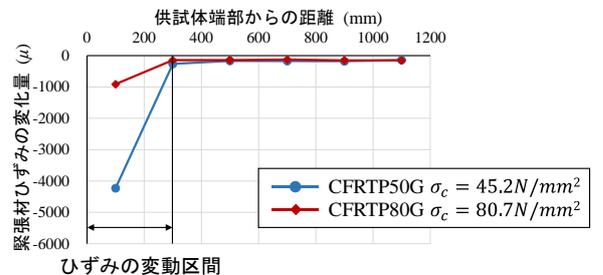
本実験では緊張材の緊張直後にコンクリートの打設を実施している。図-3 にコンクリート打設完了からプレストレス導入直前までの各緊張材のひずみとコンクリート内部温度の変化量を示す。また、緊張作業直前の鋼管スリーブ膨張圧を表-4 に示す。緊張材のひずみの変化量は全区間の平均値とした。ここで、ひずみの変化量は負の値が減少を示す。この結果、コンクリート内部温度の上昇に伴い、緊張材ひずみは減少し、コンクリートの硬化に伴う拘束により減少量は一定値に収束する傾向が得られた。PC 鋼より線に比べ被覆無の CFRTTP ストランド(CFRTTP50N, CFRTTP80N)は減少量が大きく、ガラス繊維被覆 CFRTTP ストランド(CFRTTP50G, CFRTTP80G)では減少がより顕著であった。鋼管スリーブの膨張圧に着目すると、減少量の大きい CFRTTP50G, CFRTTP80G の方が CFRTTP50N, CFRTTP80N に比べ膨張圧は大きく、緊張材のスリーブからの抜け出しは原因として除外できると考えられる。また、CFRTTP ストランドのマトリクスである熱可塑性エポキシ樹脂は酸・アルカリ下で安定なエーテル結合から成っており、加水分解に伴う化学的な劣化による影響も生じにくいと考えられる<sup>4)</sup>。したがって、CFRTTP の緊張材ひずみの減少は緊張材のクリープ、リラクセー



(a) PC 鋼より線



(b) 被覆無 CFRTTP ストランド



(c) ガラス繊維被覆 CFRTTP ストランド

図-4 緊張材ひずみの変化量

ションおよび外気温の変化に伴う緊張用 PC 鋼棒の変形によるものと推定される。また、コンクリートの水和熱による樹脂の軟化に起因する強度、剛性の低下も要因として考えられる。ガラス繊維被覆 CFRTTP ストランドは、線膨張係数は非常に小さく温度の変化による収縮・膨張量は小さいが、被覆が無いものに比べ軸方向の応力伝達を支配する芯線中の炭素繊維の含有量が少なく、特に樹脂の軟化の影響を受けやすいと考えられる。したがって被覆が無い場合に比べ、ひずみの減少量が大きくなったと考えられる。これらの要因によるひずみの減少が生じた段階でコンクリートの硬化により変形が拘束され、ひずみの減少が残留したと考えられる。

この結果から、適切なプレストレスを導入するには、緊張材のクリープ、リラクセーションに加え、コンクリート中の熱による力学的性能の低下も考慮し、適切な緊張荷重を設定する必要があると考えられる。

#### 3.2 緊張材ひずみの変化量

プレストレス導入開始直前から導入直後までの緊張材種類ごとのひずみの変化量を図-4 に示す。各点のひずみは4枚のひずみゲージの値の平均値を示している。ここで、ひずみの変化量が小さくなる、あるいは変動区間

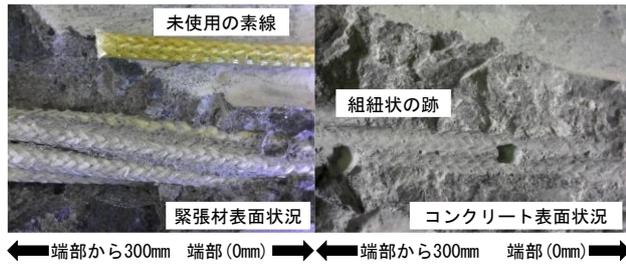


写真-2 供試体内部状況

が小さくなると付着抵抗は大きくなる。また、プレテンション部材の場合、部材端部ではプレストレスがゼロ(緊張材ひずみがゼロ)となるため<sup>9)</sup>、ひずみの変化量が非常に大きくなると想定される。いずれの緊張材においても、プレストレス導入直後の時点で供試体中央付近においてひずみの変化量が非常に小さくなる範囲が形成されており、CFRTP スtrandを用いた場合でも、プレテンション方式によりプレストレスの導入が可能であることが分かった。なお、供試体中央部のひずみの微小変化はコンクリートの弾性変形によるものである。

ひずみの変動区間、変化量とコンクリートの力学的特性との関係に着目すると、ガラス繊維被覆 CFRTP スtrand、PC 鋼より線を用いた場合、コンクリート強度、ヤング係数が大きいほど、ひずみの変動区間および変化量が小さくなる結果となった。ガラス繊維被覆 CFRTP スtrandの場合は、緊張材表面の凹凸にモルタルあるいはセメントペーストが浸入し硬化することで、コンクリートと一体化されると推定される。このような機械的な付着の破壊は、表面凹凸に浸入したモルタル、セメントペーストの力学的特性に依存すると考えられる。したがって、コンクリートの強度、ヤング係数が大きく、表面の凹凸に浸入したモルタルあるいはセメントペーストの破壊が生じにくい CFRTP80G においてひずみの変化量が小さくなったと考えられる。また、ひずみゲージの貼付間隔の影響で、CFRTP50G、CFRTP80G 共に同様の変動区間となっているが、供試体最端部のひずみの変化量から、変動区間に関してもコンクリートの力学的特性の影響を受けていると考えられる。写真-2 に CFRTP50G 供試体の端部(0~300mm)を割裂した際の緊張材表面および緊張材と接していたコンクリート表面の状態を示す。緊張材表面および撚り目にはモルタル、セメントペーストが浸入、硬化していることが確認された。また、コンクリート表面には組紐状の跡が確認された。PC 鋼より線の場合は、製造時のホットストレッチングによる表面性状の変化が要因と考えられる。ホットストレッチングとは、PC 鋼より線に張力を与え(ストレッチング)、約 350℃で加熱する処理(ブルーイング処理)であり、降伏強度の増加、リラクゼーション特性の向上が主な目的となる。こ

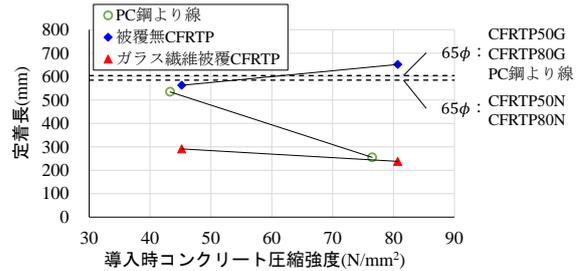


図-5 定着長とコンクリート圧縮強度の関係

の過程で実施するブルーイング処理により、PC 鋼より線の表面に酸化被膜( $Fe_3O_4$ )が形成される。この酸化被膜の微視的な凹凸によりコンクリートとの付着性能が向上することが報告されている<sup>10)</sup>。加えて PC 鋼より線-コンクリート間の界面粘着力、プレストレス導入に伴うより線のポアソン効果による摩擦抵抗力が複合的に作用していると考えられる<sup>11)</sup>。

一方、繊維被覆無の CFRTP スtrandを用いた場合、コンクリートの力学的特性の差異によらずひずみの変動区間および変化量は同程度となる傾向であった。これは、被覆無の CFRTP スtrand表面が非常に滑らかであり、コンクリート-PC 鋼より線界面の微視的な凹凸や、ガラス繊維被覆 CFRTP スtrandのような組紐状の被覆による機械的な付着が期待できないことが要因と考えられる。したがって、被覆無 CFRTP スtrandの付着機構はプレストレス導入に伴う緊張材径および撚りピッチの減少とそれに伴う腹圧の上昇に起因する摩擦抵抗の増加が支配的であると考えられる。

これらの結果から、CFRTP スtrandをプレテンション方式の PC 構造物に適用する場合は、表面の繊維被覆等、何らかの付着性能向上の措置が有効であることが明らかとなった。

### 3.3 定着長の推定

定着長とは、設計で想定するプレストレス力が導入される断面までの距離である<sup>9)</sup>。本研究では、供試体側面に貼付したひずみゲージにより計測されるコンクリートひずみの変化量から定着長を求めた。算出方法は、文献 12)を参考にプレストレス導入によるコンクリート表面の応力分布が一定となる区間(応力棚)までの曲線を最小二乗法により線形近似し、応力棚と近似直線との交点を定着長とした。

各供試体におけるプレストレス導入直後の定着長を図-5 に示す。道路橋示方書<sup>9)</sup>では $\phi 15.2$ までの PC 鋼より線の場合、定着長は $65\phi$ としており、被覆無の CFRTP スtrandを用いる場合、これを満足しない可能性が高い。一方、ガラス繊維被覆 CFRTP スtrandを用いた場合は、定着長が $65\phi$ の半分以下となり、規定を満足することが分かった。

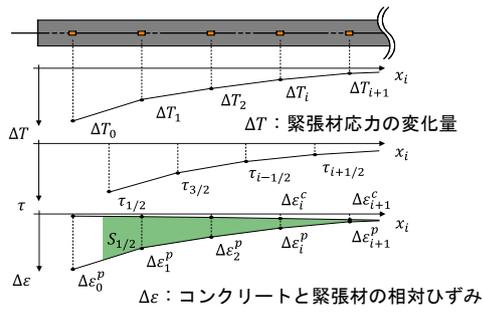


図-6 付着応力-すべり関係の算出方法

また、ガラス繊維被覆CFRTPストランドに関して、緊張材ひずみの変動区間の長さ、コンクリート表面ひずみから求めた定着長が概ね一致することから、ガラス繊維被覆部と芯線の炭素繊維は樹脂で一体となって挙動していると考えられる。

### 3.4 付着応力-すべり関係

#### 3.4.1 算出方法

図-6 に付着応力-すべり関係の導出方法を示す。本研究では、付着応力は当該位置間の緊張材応力の差から求めた。算出に用いた式を以下に示す。

$$\tau_{i+1/2} = \frac{A_p}{\Delta x \cdot \phi} (\Delta \varepsilon_i^p \cdot E_i^p - \Delta \varepsilon_{i+1}^p \cdot E_{i+1}^p) \quad (1)$$

ここで、 $\tau_{i+1/2}$ ：位置*i*+1/2における付着応力、 $\Delta \varepsilon_i^p$ ：位置*i*における緊張材ひずみの変化量、 $E_i^p$ ：位置*i*における緊張材のヤング係数、 $A_p$ ：緊張材断面積、 $\Delta x$ ：緊張材ひずみの計測間隔、 $\phi$ ：緊張材周長である。

また、すべり量に関しては不動点(供試体中央部と仮定)から当該点までの緊張材とコンクリートの相対ひずみを積分することで求めた。

$$S_{i+1/2} = \int_0^{x_{i+1/2}} (\Delta \varepsilon_i^p - \Delta \varepsilon_c^f) dx \quad (2)$$

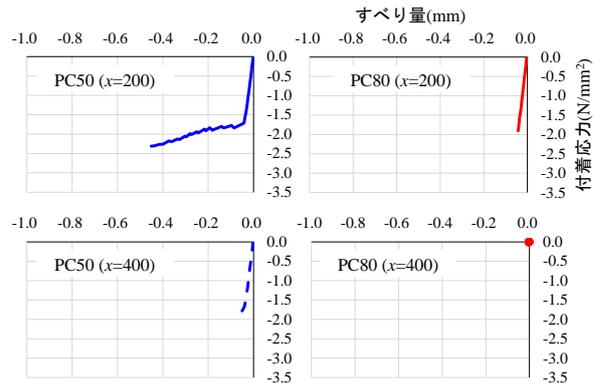
ここで、 $S_{i+1/2}$ ：位置*i*+1/2におけるすべり量、 $\Delta \varepsilon_c^f$ ：位置*i*におけるコンクリートひずみの変化量である。

#### 3.4.2 付着応力-すべり関係の算出

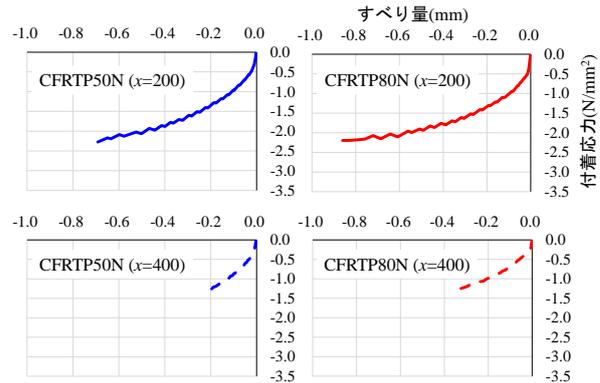
図-7 に、前述の方法で算出した付着応力-すべり関係を示す。計算には、プレストレス導入時に緊張荷重が2kN減少する毎に計測したひずみのデータを用いた。座標軸はプレストレス導入方向が負となるように定義した。

PC50 ではプレストレス導入に伴う供試体端部付近の緊張材すべり量の増加とともに付着応力がほぼ線形に増加していき、ある点に到達した段階で剛性が急激に低下し、すべり量が大きく増加する傾向であり、既往の知見と一致する結果となった<sup>11)</sup>。また、緊張材の位置によらず同様の傾向となった。本論文ではこの現象を付着降伏、剛性の急激な低下に転じる点を付着降伏点と呼ぶ。PC80 の場合は付着降伏点に達する前にプレストレスの導入が完了していると考えられる。

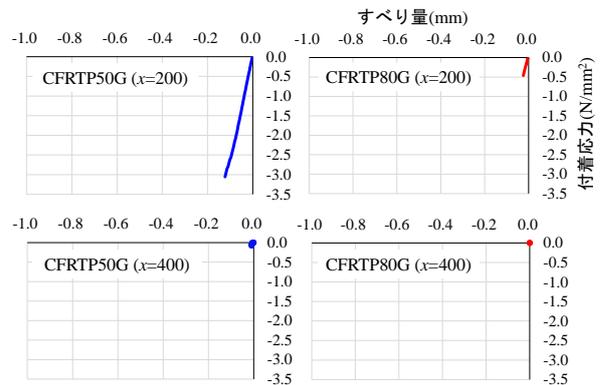
CFRTP50N, CFRTP80N では、明確な付着降伏点は現れ



(a) PC 鋼より線



(b) 被覆無 CFRTP ストランド



(c) ガラス繊維被覆 CFRTP ストランド

図-7 付着応力-すべり関係

ず、すべりが増加するとともに付着応力が PC 鋼より線と比較して緩やかに増加する傾向となった。また、付着剛性はともに同程度であり、付着応力-すべり関係がコンクリートの力学的特性の影響を受けないという傾向は緊張材ひずみ分布の結果と一致した。

CFRTP50G, CFRTP80G では、CFRTP50N, CFRTP80N と同様に付着降伏点は現れない結果となったが、すべり量が小さく、かつ付着応力が大きいことから PC 鋼より線、被覆無の CFRTP ストランドに比べ大きな付着抵抗を有することが分かった。

## 4. まとめ

本研究では、CFRTP ストランドのプレテンション方式 PC 構造物への適用を想定し、付着・定着の観点から適用

性について検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) プレストレス導入までの挙動は、通常の PC 鋼より線に比べ、クリープ、リラクセーション、マトリクスの力学的特性の変化が要因と考えられる応力の減少が大きく、ガラス繊維被覆を施すことでより顕著となった。したがって、設計、施工時にはこれらを考慮し、適切に緊張力を設定する必要がある。
- (2) 被覆無の CFRTP ストランドをプレテンション方式 PC 構造物の緊張材として用いた場合、従来の PC 鋼より線と比較して、コンクリートの力学的特性によらず緊張材ひずみの減少量、変動区間は同程度となった。これは、表面が非常に滑らかであり、緊張材表面の機械的な付着が期待できないことが要因であると考えられる。
- (3) 付着応力-すべり関係に着目すると、ガラス繊維被覆 CFRTP ストランドは高い付着抵抗を有することが分かった。被覆無の CFRTP ストランドの場合は、付着降伏点が現れず、コンクリートの力学的特性によらず一定の挙動を示し、付着抵抗は小さくすべりが大きく生じることが分かった。
- (4) 被覆無の CFRTP ストランドを用いた場合、定着長は道路橋示方書で示されている $65\phi$ を満たさない可能性がある。一方でガラス繊維被覆 CFRTP ストランドを用いた場合は定着長が大幅に低減され、プレテンション方式 PC 構造物に用いることが可能であると考えられる。

以上より、プレテンション方式 PC 構造物に CFRTP ストランドを適用する際には、付着性能の向上を目的とした何らかの工夫が必要であることが分かった。本実験で使用した組紐状のガラス繊維被覆は、付着・定着の観点から、有効であると考えられる。

本研究では、ガラス繊維で被覆された CFRTP ストランドを用いたが、ガラスの主成分であるケイ素(Si)がコンクリートに内在することになり、樹脂被覆が存在するものの、アルカリシリカ反応の発生の可能性が高まることとなる。この点はアラミド繊維等のコンクリートとの反応性を持たない繊維で被覆した CFRTP ストランドを緊張材として用いることが有効と考えられる。この場合、緊張材自体の力学的特性が異なるため、別途検討が必要となるが、この点は今後の課題とする。

## 謝辞

本研究は文部科学省・科学技術振興機構による COI プログラム「革新材料による次世代インフラシステムの構築～安全・安心で地球と共存できる数世代社会の実現～」

の支援を受けたものである。また、本研究の遂行にあたり金沢工業大学田中泰司准教授、保倉篤研究員には実験に関する御助言を賜った。ここに記し感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 細沼宏之, 川畑勝嗣: 橋梁への新素材の適用による耐久性向上に向けた取組み, 土木技術資料, 一般財団法人土木研究センター, Vol.57, pp.38-41, 2015.12
- 2) 三加崇, 野並優二, 臺哲義, 浅井洋: 建設後 28 年が経過したアラミド FRP 緊張材プレテンション桁の曲げ性状, 第 27 回プレレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, pp.205-210, 2018.11
- 3) 高岩裕也, 保倉篤, 鶴澤潔, 宮里心一: 炭素繊維複合材料より線の緊張力がコンクリートとの付着性状に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.66B, pp.543-548, 2020.3
- 4) 西田裕文: 新しいコンポジットの創製を目指して, 日本接着学会誌, Vol.47, No.9, pp.361-368, 2011
- 5) 竹崎真一, 是永健好, 荳嶋誠, 村田勤: 太径ストランドの実用化に関する研究, 大成建設技術センター報, 第 40 号, 2007
- 6) 吉越大賀, 田中泰司: 熱可塑性 CFRP を緊張材に用いた PC 部材の力学性能評価, 第 29 回プレレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, pp.41-46, 2020.10
- 7) 原田哲夫, 生田泰清, 佐々木謙二, 大畑裕志, 徳山ミヨーキン: 定着用膨脹材による CFRP より線と PC 鋼より線の定着機構に関する研究, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.70, No.4, pp.370-389, 2014.11
- 8) 原田哲夫, 出光隆, 渡辺明: 静的破砕剤を用いたコンクリートの解体に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 360 号/V-3, pp.61-70, 1985.8
- 9) 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, 日本道路協会, pp.99-111, 2017
- 10) Maehata, T. and Ioka, H.: Bond strength of PC wire in concrete, Wire Journal International, Wire Association International, pp.94-97, Apr.2006
- 11) 天谷公彦, 角田貴也, 高谷哲, 山本貴士: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.427-432, 2020
- 12) 濱岡弘二, 原幹夫, 前川幸次: 高性能プレテンション部材の開発に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.988-997, 2007.3