

高耐食性を有する太径高強度PCストランドシステム

Highly Durable Ultra-high Strength Prestressing Strand System with Large Diameter

大島 克仁*
Katsuhito Oshima

田中 秀一
Shuichi Tanaka

中上 晋志
Shinji Nakaue

西野 元庸
Motonobu Nishino

松原 喜之
Yoshiyuki Matsubara

山田 眞人
Masato Yamada

住友電工スチールワイヤー㈱は、既存技術である1860MPa級PCストランドに比べ強度が1.2倍の15.7mm高強度ストランド(2230MPa級)を開発し、コンクリート構造物への普及に努めてきた。今般その技術を応用し、太径PCストランドとしてその定着システムにも適用を図り、大容量シングルストランド工法の開発に成功した。この高強度ストランドはエポキシ樹脂やポリエチレン樹脂の防食被覆加工を施すことで一般的に高強度化により懸念される遅れ破壊を防ぐだけでなく、その高い耐食性により近年のコンクリート橋に求められる高耐久化に寄与する製品である。本稿では「29.0mmプレグラウト高強度ストランドシステム」および「17.8mmECF高強度ストランドシステム」の特徴と性能について述べる。

Sumitomo (SEI) Steel Wire Corp. developed an epoxy coated and filled 15.7 mm ultra-high strength prestressing (UHSP) strand consisting of 7 wires. The UHSP strand is approximately 20% stronger (2230 MPa) than the conventional strand (1860 MPa). Through its experience and expertise, the company has recently developed large-diameter UHSP strands: a 29.0 mm 19-wire strand and a 17.8 mm 7-wire strand. These strands prevent delayed fracture by the epoxy or high-density-polyethylene coating, and thus contribute to high durability concrete bridges. This paper describes the features of the 29.0 mm 19-wire UHSP strand with pre-grout tendons and the epoxy coated and filled 17.8 mm 7-wire UHSP strand.

キーワード：PCストランド、高強度、高耐食性

1. 緒 言

PC*1ストランドはコンクリート構造物に圧縮力を与えることで引張りに弱いコンクリートを補強する鋼材である。当社ではPCストランドに加え、それを引っ張った状態で保持する定着具、圧縮力をコンクリートに伝達するプレートや補強筋等を含む定着システム製品、緊張装置等の施工機器を含めたPCストランドシステムをトータルで提供している。

近年、土木分野のコンクリート橋においても高耐久化、省資源化、省力化、環境負荷低減などの要求が高まっている。これらの要求に応えるべく、当社ではPCストランドの被覆技術および高強度化技術の適用および展開を推進しており、15.7mm内部充填型エポキシ樹脂被覆(以下、ECF)高強度ストランド、15.2~28.6mmプレグラウト(以下、PRG)ストランドは既に多数の橋梁に適用されている。本稿では、当社の被覆技術および高強度化技術を応用し、新たに開発した「29.0mmPRG高強度ストランドシステム」および「17.8mmECF高強度ストランドシステム」について報告する。

2. ECF高強度ストランドとPRGストランド

2-1 15.7mmECF高強度ストランドの現状

15.7mmECF高強度ストランドは、JISに規定されたピアノ線材(JIS G3502:SWRS82B)にC(炭素)およびSi(珪素)などを添加(表1)し、伸線加工技術とより線工程のホットストレッチ*2条件を最適化することにより、JIS G3536に規定される15.2mmストランド(1860MPa)に対し、1.2倍の引張強度(2230MPa)を有するものである。さらに本製品はストランド表面と内部にエポキシ樹脂被覆加工を施すことで高強度鋼材特有のキズ感受性と遅れ破壊の問題を払拭したPCストランドである(写真1)。高強度ストランドを使用したPC構造物の特徴を以下に示す。

- ①施工・維持管理の省力化・省人化が可能
- ②急速施工への対応が可能
- ③使用材料減による環境負荷の低減が可能(消費エネルギー、製造・輸送時のCO₂、SO_x、NO_x削減)
- ④軽量・スレンダーかつ強靱なPC構造物の実現が可能
- ⑤ケーブル配置の自由度の向上が可能

これら特徴により、2004年に当社が開発以降、橋梁の外ケーブル(図1)を中心に16件以上の適用が進んでいる。なおECFストランドは「エポキシ樹脂を用いた高機能PC鋼材

を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針(案)、土木学会⁽¹⁾」(以下、土木学会指針)に15.2mmまでが、高強度ストランドは「高強度PC鋼材を用いたPC構造物の設計施工指針⁽²⁾」(以下、高強度指針)に15.7mmまでが規準化されている。

表1 高強度ストランドの化学成分値 (wt%)

	C (炭素)	Si (珪素)	Mn (マンガン)	P (リン)	S (硫黄)	Cu (銅)
高強度ストランド	0.95-1.02	0.85-1.50	0.30-0.50	0.024 max.	0.01 max.	0.15 max.
参考: SWRS 82B (JIS G3502)	0.80-0.85	0.12-0.35	0.60-0.90	0.025 max.	0.025 max.	0.20 max.

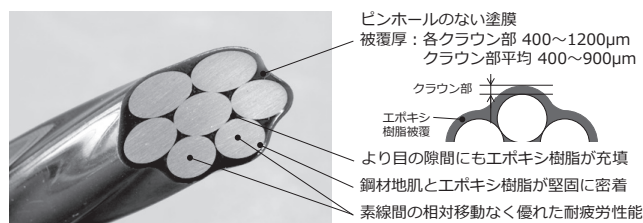


写真1 ECFストランドの特徴

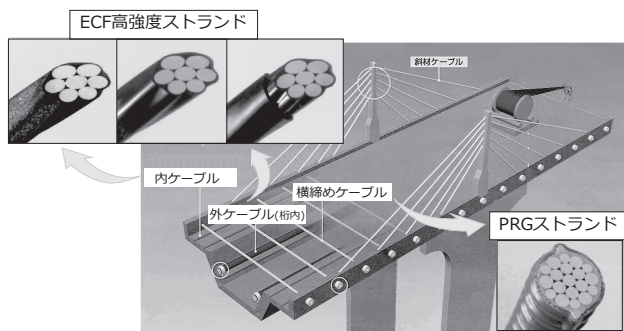
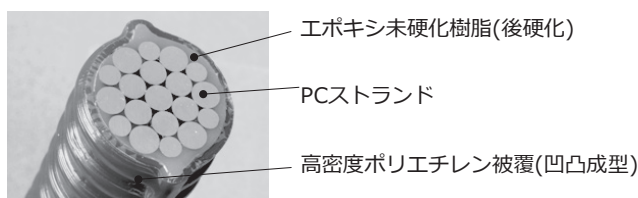


図1 ECF高強度ストランドとPRGストランドの主な適用箇所

2-2 PRGストランドの特徴

PRGストランドはPCストランドの表面に未硬化のエポキシ樹脂を塗布し、その外側に高密度ポリエチレンを連続押し出し成型した製品である。塗布されたエポキシ樹脂が時間経過と共に硬化することで、最終的に表面の凹凸を介してコンクリートと一体化する。このため施工現場でのグラウト作業(シースとPCストランドの隙間にセメントミルクを注入する作業)やシース配置作業が省略可能な防食PCストランドである(図2)。本製品は1990年から適用が進み、エポキシ樹脂の改良として従来の熱硬化型からコンクリートの水和熱による影響を受けにくい湿気硬化型樹脂の当社の開発に加え、土木学会指針⁽¹⁾への規準化などにより2010年から現在まで横締めケーブルの汎用品として約500件、橋軸方向ケーブルで18件に適用されている。



●従来工法(被覆のないストランドにグラウトを施す場合)

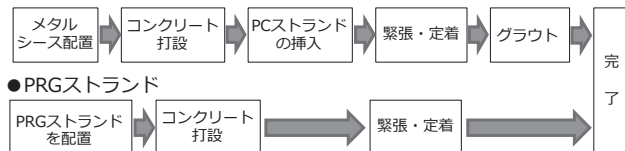


図2 PRGストランドの特徴

3. 29.0mmPRG高強度ストランドの開発

高強度化のニーズの高まりを受け、JISに規定されている1本のストランドでは最大容量である19本よりPCストランド(28.6mm、SWPR19L)に対し、最大試験力および0.2%永久伸びに対する試験力が約1.2倍の極太径19本よりPRG高強度PCストランド(29.0mm)を開発した。従来のPRGストランドが主に横締めケーブルなどに用いられるのに対し(図1)、本製品は部材主方向への適用の道を拓くことが期待される(図3)。以下に29.0mmPRG高強度ストランドとその定着システムの開発および性能確認試験の結果を報告する。

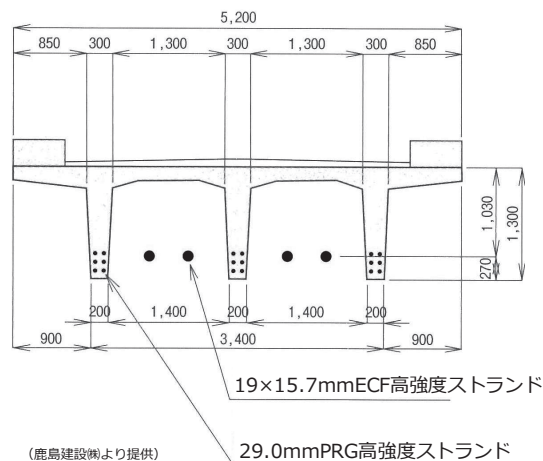


図3 29.0mmPRG高強度ストランドの適用例

3-1 被覆のない29.0mm高強度ストランドの諸特性

29.0mm高強度ストランドの機械的特性を表2に示す。19本より高強度ストランドは既に高強度指針⁽²⁾により規格化されているが、その最大試験力はJIS規定の製品に対し10~15%程度向上しているのみである。一方で、本ストラン

ドは、前述の15.7mmECF高強度ストランドの高強度化技術を応用することによって、JIS規格1.2倍の最大試験力を有することに成功している。以下に引張特性、リラクセーション^{*3}特性および高強度化により特性の低下が懸念される遅れ破壊特性について示す。

表2 29.0mmPRG高強度ストランドの機械的特性

	線径 (mm)	最大試験力 (kN)	0.2%永久伸びに対する試験力 (kN)	伸び (%)	リラクセーション値 (%)
29.0mm高強度ストランド (自主規格)	29.0 +0.6, -0.25	≥ 1139	≥ 996	≥ 3.5	≤ 2.5
参考：28.6mm高強度ストランド (高強度指針)		≥ 1044	≥ 888		
参考：28.6mmストランド (JIS G3536 SWPR19L)	28.6 +0.6, -0.25	≥ 949	≥ 807		

(1) 引張試験およびリラクセーション試験結果

29.0mm高強度ストランドの引張試験およびリラクセーション試験結果を表3に示す。試験の結果、最大試験力および0.2%永久伸びに対する試験力ともに、JIS規格荷重の1.2倍を満足した。高強度であるにも関わらず、JIS規格品と同程度の伸び値を示しており、JIS規格品と遜色のないじん性を有している。また1000時間後のリラクセーション値は0.99%であり、JIS G3536に規定される低リラクセーション品の規格(2.5%以下)を満足した。

表3 引張試験およびリラクセーション結果 (一例)

	最大試験力 (kN)	0.2%永久伸びに対する試験力 (kN)	伸び (%)	リラクセーション値 (%)
29.0mm高強度ストランド	1161	1030	5.7	0.99
参考：28.6mmストランド (JIS G3536 SWPR19L)	972	886	5.3	1.52

(2) 遅れ破壊抵抗性試験

遅れ破壊抵抗性試験は高強度指針⁽²⁾に則り、50℃のチオシアン酸溶液(NH₄SCN (20wt%))中で、より線の中心線を最大試験力の80%で載荷し、その破断時間を測定した。29.0mm高強度ストランドの遅れ破壊抵抗性試験結果を表4に示す。試験の結果、高強度指針⁽²⁾に規定された最小値が1.5時間以上および累積破断確率50%のときの破断時間が4時間以上を満足する結果となった。

表4 遅れ破壊抵抗性試験結果 (一例)

	1	2	3	4	5	6	最小値 (≥ 1.5h)	累積破断確率50% (≥ 4.0h)
破断時間 (h)	11.0	14.2	15.6	17.5	18.4	22.4	11.0	16.6

3-2 プレグラウト加工

当社では、高強度ストランドのキズや遅れ破壊の感受性を考慮し、実用に供するものはすべて工場加工型の防食を施すことを基本方針にしている。29.0mmPRG高強度ストランドには土木学会指針⁽¹⁾に規定されるプレグラウト加工を施した。そのため本製品は1000時間の塩水噴霧試験(JIS Z2371)や耐アルカリ試験(ASTM G20)を満足する優れた耐食性を有している。

(1) プレグラウト加工後の形状寸法

プレグラウト加工後の形状寸法を図4に示す。従来品の28.6mmPRGストランドの形状寸法に対し、付着特性に影響を及ぼす凸部と凹部の径差および耐食性に影響を及ぼす凸部の樹脂被覆厚さは同一とし、凸部径、および凹部径は鋼材径に対応して僅かに外径を大きくした。

項目	29.0mmPRG 高強度ストランド	従来品 28.6mmPRGストランド
凸部と凹部の径差	≥ 0.5mm	同左
凸部の被覆厚さ	≥ 1.2mm	同左
凸部径	34.0~40.0mm	34.0~38.0mm
凹部径	30.0~35.5mm	30.0~33.5mm
リブ部径	≤ 45mm	同左

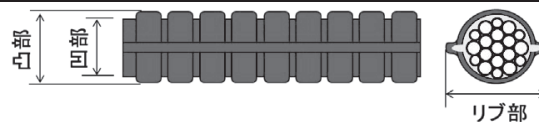


図4 プレグラウト加工後の形状寸法

(2) 付着特性試験

土木学会指針⁽¹⁾に規定されるPRGストランドの付着特性試験を行った。試験結果を表5に示す。試験の結果、PCグラウトを施した被覆のない29.0mm高強度ストランドと同等以上の付着強度を示し、規準を満足した。

表5 付着特性試験結果 (一例)

	付着強度 (N/mm ²)
29.0mmPRG高強度ストランド	6.9
PCグラウトを施した29.0mm高強度ストランド	6.2

3-3 シングル29mmPRG高強度ストランド用定着システム

開発した29.0mmPRG高強度ストランドのシングル定着具(オスコーンおよびメスコーン)と定着システムを図5に示す。本定着システムを用いた性能確認試験の結果を以下に示す。

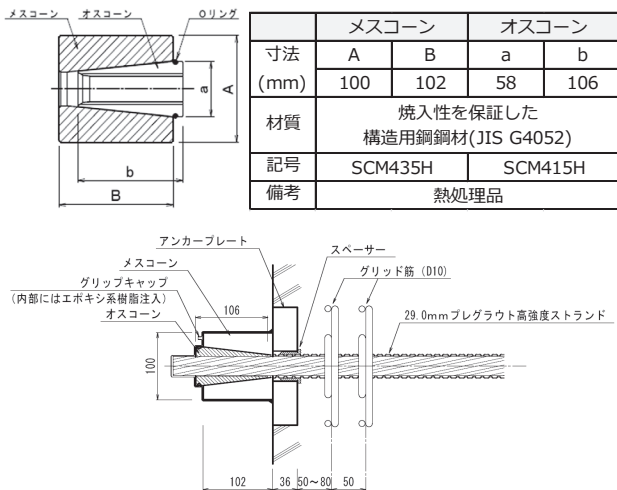


図5 29.0mmPRG高強度ストランドの定着システム

(1) 定着具と緊張材を組み合わせた性能試験

「コンクリート標準示方書【施工編：特殊コンクリート】、土木学会⁽³⁾」(以下、コンクリート標準示方書)に規定される静的引張試験で定着具の定着効率を測定した。結果、99.7%と対最大試験力95%以上を満足した。

(2) 定着具と緊張材を組み合わせた耐疲労性試験

[FIP Recommendation for the acceptance of post-tensioning systems, 1993⁽⁴⁾] (以下、FIP規格)に規定される上限荷重0.65Pu (Pu：最大試験力)、変動応力幅80MPa、繰返し回数200万回の耐疲労性試験を実施した。その結果、200万回の繰返し後も未破断であり、十分な疲労耐久性が示された。

(3) その他定着システムの仕様

本定着システムのケーブルの配置間隔、グリッド筋および支圧プレートについては、コンクリート標準示方書⁽³⁾に規定されたコンクリート載荷試験を行い、標準仕様を決定した。緊張機器として、29.0mmPRG専用のジャッキおよびジャッキ用ウェッジを開発し、繰返し緊張試験により、耐久性を確認している。その他、セット量(7mm)の計測やグリップの保護キャップなど付属品の準備も併せ、設計や施工に必要な一連の技術事項を確認している。

4. 17.8mmECF高強度ストランドの開発

場所打ち部(間詰め部など)を伴うプレキャスト桁の横締めケーブルの高耐久化を目的として、ポリエチレンシース(以下、PEシース)と防食PC鋼材を適用するケースでは、シース接続部のディテールとシース外径の拡大化の影響によって、床版部断面の変更を余儀なくされる場合がある。このようなケースにおいても、部材断面を変更することなく、PEシース+セメントグラウト+防食PC鋼材によって多重防

食機構を実現することを目的として、7本より17.8mmECF高強度ストランドを新たに開発した(図6)。7本よりとすることで鋼材素線間のエポキシ樹脂充填を確実なものとし、土木学会指針⁽¹⁾のECFストランドに関する諸規定を満足するものである。また、当社の高強度技術を応用することで、7本よりでありながら、現行のJIS規格(JIS G3536)に規定される19本より17.8mmストランドと同等以上の最大試験力(引張力)が得られている(写真2)。以下に17.8mm高強度ECFストランドとその定着システムの開発および性能確認試験の結果を報告する。

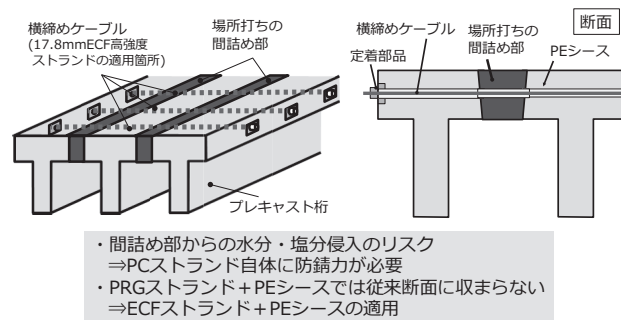


図6 17.8mmECF高強度ストランドの適用例

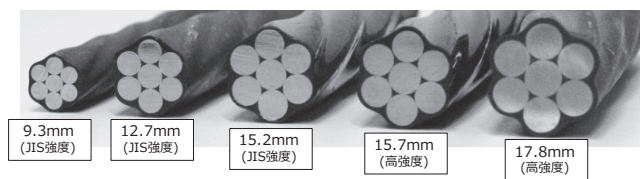


写真2 ECFストランドの外観

4-1 被覆のない17.8mm高強度ストランドの諸特性

17.8mm高強度ストランドの機械的性質を表6に示す。17.8mm高強度ストランドは、前述の高強度技術を応用することで引張強度が約15%向上している。このストランドは7本よりの素線構成のため、同径の19本より線よりも鋼材断面積が小さくなっているものの、強度の向上によって、従来の19本より17.8mmPC鋼より線以上の最大試験力および0.2%永久伸びに対する試験力を達成している。

表6 機械的特性

	最大試験力		0.2%永久伸びに対する試験力		伸び (%)	(参考) 公称断面積 (mm ²)
	(kN)	強度 (N/mm ²)	(kN)	強度 (N/mm ²)		
7本より17.8mm高強度ストランド (自主規格)	≥387	≥2037	≥330	≥1737	≥3.5	190.0
参考：19本より17.8mmストランド (JIS G3536 SWPR19L)		≥1857		≥1583		208.4

(1) 引張試験

17.8mm高強度ストランドの引張試験結果を表7に示す。表6に規定する機械的性質（自主規格）を満足した。また、JIS規格品と同程度の伸び値を示し、じん性を損なうことなく高強度化を達成した。

表7 引張試験結果（一例）

	最大試験力 (kN)	0.2%永久伸びに対する試験力 (kN)	伸び (%)
7本より17.8mm高強度ストランド	422	377	7.1
参考：19本より17.8mmストランド (JIS G3536 SWPR19L)	400	365	6.5

(2) 遅れ破壊抵抗性試験

遅れ破壊抵抗性試験結果を表8に示す。試験の結果、規格の最小破断時間が1.5時間以上および累積破断確率50%のときの破断時間が4時間以上を満足した。

表8 遅れ破壊抵抗性試験結果（一例）

	1	2	3	4	5	6	最小値 (≧1.5h)	累積破断確率50% (≧4.0h)
破断時間 (h)	6.6	6.7	8.7	9.5	10.5	12.5	6.6	9.1

(3) 耐疲労性試験

PC鋼材本体の疲労試験は、高強度指針⁽²⁾に従い、上限荷重0.70Pu (Pu：最大試験力)、変動応力幅195MPaの条件で200万回繰り返し後に未破断であることを確認した。

(4) 曲げ引張抵抗性試験

高強度指針⁽²⁾に従い、曲げ角度20°での曲げ引張抵抗性試験を実施した。規格の荷重低下率28%以下に対し、17.5%（一例）と良好な結果を示した。

4-2 17.8mm ECF高強度ストランドの諸特性

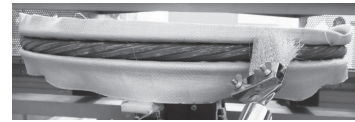
17.8mm ECF高強度ストランドはクラウン部の平均膜厚0.4~0.9mmおよび各クラウン部の膜厚0.4~1.2mmの被覆厚であり、全長ピンホールのない耐食性に優れたエポキシ樹脂被覆を有し、土木学会指針⁽¹⁾に従ったエポキシ樹脂被覆加工を達成している。

(1) リラクセーション試験

リラクセーション試験の結果、1000時間後のリラクセーション推定値は3.3%であり、土木学会指針⁽¹⁾に規定される6.5%以下を満足した。

(2) 被覆密着性試験

被覆密着性の試験を「内部充てん型エポキシ樹脂被覆PC鋼より線試験方法—被覆密着性試験—」(JSCE-E 731)に従って実施した。曲げ試験および引張破断試験結果を写真3に示す。曲げ試験は20±2℃において鋼材公称径の32倍の円筒に180°巻き付けた状態で、エポキシ樹脂被覆の損傷および



(a) 曲げ試験状況



(b) 引張破断試験後のPC鋼材外観

写真3 被覆密着性試験（一例）

ピンホールが認められない結果であった。引張破断試験では、破断時の高い衝撃に関わらず、破断部近傍において被覆の剥落や飛散はなく、優れた被覆密着性を示した。

(3) 付着型ECF高強度ストランドの付着特性試験

土木学会指針⁽¹⁾に規定されるECFストランドの付着特性試験を行った。試験の結果、被覆のない17.8mm高強度ストランドと同等以上の付着強度を示した。

表9 付着特性試験結果（一例）

	付着強度 (N/mm ²)
17.8mm ECF高強度ストランド	0.97
被覆のない17.8mm高強度ストランド	0.81

(4) 耐衝撃性試験

土木学会指針⁽¹⁾に規定される耐衝撃性試験（試験方法：ISO 6272）を行った結果、永久変形した範囲外でエポキシ樹脂被覆に割れ、はく離等の異常はなく、土木学会指針⁽¹⁾を満足する十分な耐衝撃性が示された。

4-3 シングル17.8mm ECF高強度ストランド用定着システム

開発した17.8mm高強度ECFストランドのシングル定着具（オスコーンおよびメスコーン）と定着システムを図7に示す。

(1) 定着具と緊張材を組み合わせた引張試験

コンクリート標準示方書⁽³⁾に規定される静的引張試験で定着具の定着効率を測定した。試験の結果、107.7%（一例）と対最大試験力95%以上を満足した。

(2) 定着具と緊張材を組み合わせた耐疲労性試験

耐疲労性試験はFIP規格⁽⁴⁾に従い、200万回繰り返し後も鋼材は破断せず、十分な疲労耐久性が示された。

(3) 定着具とコンクリートを組み合わせた荷重伝達試験

本定着システムのケーブルの配置間隔、グリット筋および支圧プレートについては、コンクリート標準示方書⁽³⁾に規定されたコンクリート載荷試験を行い、標準仕様を決定した。その他、セット量（12mm）の計測や緊張機器など、設計や施工に必要な一連の技術事項を確認した。



	メスコーン		オスコーン	
寸法 (mm)	A	B	a	b
	65	75	39	70
材質	焼入性を保証した 構造用鋼鋼材(JIS G4052)			
記号	SCM435H		SCM415H	
備考	熱処理品			

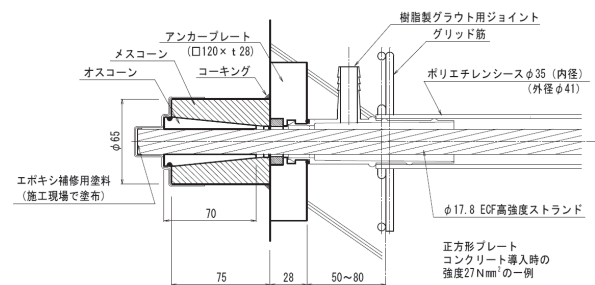


図7 1S17.8ECF高強度ストランドの定着システム

(4) PEシースとの擦り減り抵抗性

PEシースを用いたPC橋の設計施工指針(案)⁽⁵⁾に従い、ケーブルの最小曲げ半径(100D:鋼材径)、0.7Puの引張力を想定した腹圧力を50℃でPC鋼材に載荷した状態でPEシースの上を移動させた。試験後のシース残留肉厚を表10に示す。シース残留肉厚は規格の1.5mm以上であり、試験後のECF高強度ストランドの被覆厚の減少は認められず、良好なPEシースとの擦り減り抵抗性を示した。

表10 擦り減り抵抗性試験結果(一例)

		残留肉厚 (mm) ≥1.5mm (規格)		
		1	2	3
PEシースメーカー	A社製	2.06	2.04	2.01
	B社製	1.88	1.80	1.86
	C社製	1.70	1.86	1.52

5. 結 言

JISに規定されているPCストランドに対し、高強度化および高耐食性を両立した「29.0mmプレグラウト高強度ストランドシステム」および「17.8mmECF高強度ストランドシステム」を新たに開発し、各種性能試験を満足することを確認した。29.0mmプレグラウト高強度ストランドについては、既に初出荷を終え、問題なく施工が完了している。また、17.8mmECF高強度ストランドについては、近日中に実用に供される予定である。

現在、新たに21.8mmECF高強度ストランドの開発を進めており、これら開発品が普及することで、構造物の長寿命化およびライフサイクルコストの低減に寄与することができれば幸いである。

用語集

※1 PC

Prestressed Concreteの略称。

※2 ホットストレッチ

より線後に張力をかけつつ加熱冷却を行う処理。主にリラクセーション特性と降伏点の向上を目的として行う。

※3 リラクセーション

ひずみ一定の状態で応力が経時的に緩和する現象。

参考文献

- (1) プレストレストコンクリート技術協会、「高強度PC鋼材を用いたPC構造物の設計施工指針」(2011)
- (2) 土木学会、「エポキシ樹脂を用いた高機能PC鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針(案)」(2010)
- (3) 土木学会、「コンクリート標準示方書【施工編:特殊コンクリート】」(2012)
- (4) FIP, "Recommendations for the acceptance of post-tensioning systems" (1993)
- (5) プレストレストコンクリート工学会、「PEシースを用いたPC橋の設計施工指針(案)」(2015)

執 筆 者

大島 克仁*: 住友電工スチールワイヤー(株)
PC技術部 主査



田中 秀一: 住友電工スチールワイヤー(株)
PC技術部



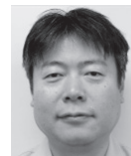
中上 晋志: 住友電工スチールワイヤー(株)
PC技術部



西野 元庸: 住友電工スチールワイヤー(株)
PC技術部 グループ長



松原 喜之: 住友電工スチールワイヤー(株)
PC技術部 グループ長



山田 真人: シニアスペシャリスト
住友電工スチールワイヤー(株)
取締役 PC技術部長



*主執筆者