

7本より 17.8 mm ECF 高強度ストランドシステムの開発

田中 秀一*1・大島 克仁*2・松原 喜之*3・山田 真人*4

JISに規定されている19本よりPC鋼より線(φ17.8, SWPR19L)と同等以上の機械的性質を有する7本より17.8 mm ECF(内部充填型エポキシ樹脂被覆)高強度ストランドおよびその定着システムを開発した。本製品は高い耐食性を有しており、ポリエチレンシースを用いた場合でも部材断面を大きくすることなくプレキャスト部材の横締めケーブルとして適用可能であり、塩害および凍害に対する高耐久化の要求が高まるなか、高耐久化に寄与するものといえる。本稿では、17.8mm ECF高強度ストランドおよびその定着システムの概要および性能確認試験について報告する。

キーワード：高強度ストランド、ECFストランド、7本より、19本より、横締めケーブル

1. はじめに

場所打ち部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鋼材を適用しようとする、シースの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17.8 mm ECF(内部充填型エポキシ樹脂被覆)高強度ストランドを新たに開発した。7本より線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、「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)¹⁾」(以下、土木学会指針)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、15.7 mm ECF高強度ストランドおよび先般実用化された極太径29.0 mm プレグラウト高強度ストランド²⁾の高強度技術を応用することで、7本より線でありながら、現行のJIS規格「PC鋼線及びPC鋼より線」(JIS G 3536)に規定される19本より17.8 mm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。

本稿では17.8 mm ECF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について報告する(写真-1)。なお、本稿における高強度とは、JISに規定される1860 N/mm²級を超える範囲のものを指す。

2. 被覆のない状態での17.8 mm高強度ストランドの諸特性

17.8 mm高強度ストランドの機械的性質および化学成分値を表-1, 2に示す。17.8 mm高強度ストランドは、JIS

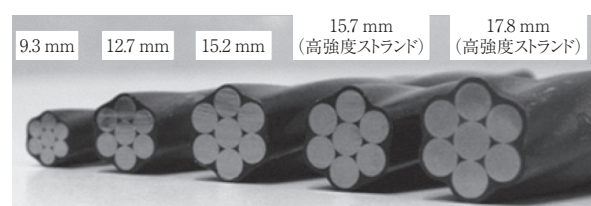


写真-1 ECFストランドの外観

G 3536で規定されている「ピアノ線材」(JIS G 3502)に対してCやSiの含有量が高い特殊な線材を用い、伸線およびより線工程のホットストレッチ条件の最適化によって、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17.8 mm PC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。被覆のない17.8 mm高強度ストランドの機械的性能、遅れ破壊抵抗性および耐疲労性について、性能確認試験の結果を以下に示す。

2.1 引張試験

17.8 mm高強度ストランドの引張試験結果として荷重-伸び曲線の一例を図-1に示す。最大試験力および0.2%永久伸びに対する試験力は、JIS規格品の荷重を上回り、表-1に規定する機械的性質(自主規格)を2037 N/mm²級で満足した。また、JIS規格品と同程度の伸び値を示しており、じん性を損なうことなく高強度化を達成している。

2.2 遅れ破壊抵抗性試験

遅れ破壊抵抗性試験は「高強度PC鋼材を用いたPC構造物の設計施工指針³⁾」(以下、高強度指針)にしたがい、50℃のチオシアン酸溶液(NH₄SCN (20 wt%))に浸漬し、

*1 Shuichi TANAKA：住友電工スチールワイヤー(株) PC技術部

*2 Katsuhito OOSHIMA：住友電工スチールワイヤー(株) PC技術部

*3 Yoshiyuki MATSUBARA：住友電工スチールワイヤー(株) PC技術部

*4 Masato YAMADA：住友電工スチールワイヤー(株) PC技術部

表 - 1 機械的性質 (自主規格)

	線径 (mm)	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 17.8 mm 高強度ストランド (自主規格)	17.8 mm +0.6-0.25	≥ 387	≥ 2 037	≥ 330	≥ 1 737	≥ 3.5	190.0
参考: 19本より 17.8 mm ストランド (JIS G 3536 SWPR19L)			≥ 1 857		≥ 1 583		208.4

表 - 2 化学成分値 (%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu
高強度ストランド	0.95-1.02	0.85-1.50	0.30-0.50	≤ 0.024	≤ 0.010	≤ 0.15
参考: SWRS 82B (JIS G 3502)	0.80-0.85	0.12-0.35	0.60-0.90	≤ 0.025	≤ 0.025	≤ 0.20

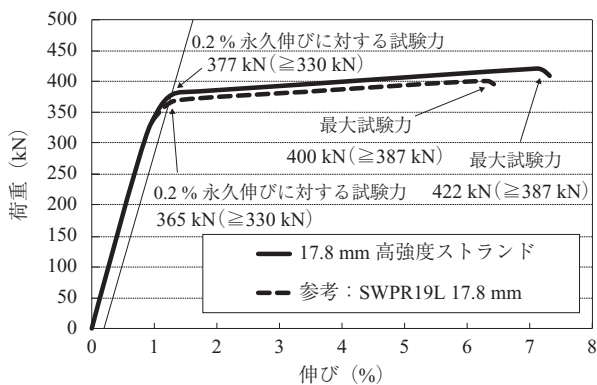


図 - 1 引張試験結果の一例

より線の中心線を実際の最大試験力の 80 % で载荷した状態で、その破断時間を評価した。本製品の遅れ破壊抵抗性試験結果を図 - 2 に示す。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。

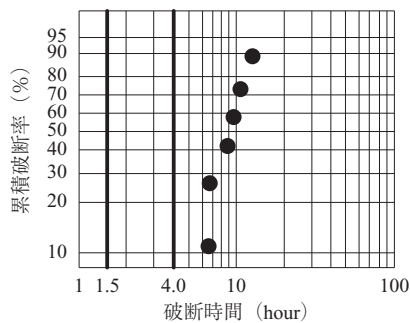


図 - 2 遅れ破壊抵抗性試験結果

2.3 耐疲労性試験

PC 鋼材本体の疲労試験は、高強度指針³⁾に従い、上限荷重 0.70 Pu (Pu: 規格最大試験力)、変動応力幅 195 MPa の条件で 200 万回繰り返した後未破断であることが確認された。

2.4 曲げ引張抵抗性試験

高強度指針³⁾にしたがって、曲げ引張抵抗性試験を実施した。試験方法を図 - 3、試験結果を表 - 3 に示す。試験

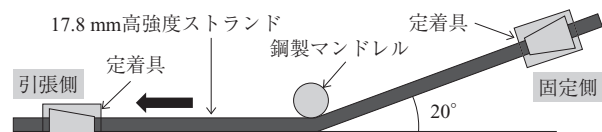


図 - 3 曲げ引張抵抗性試験方法

表 - 3 曲げ引張抵抗性試験結果の一例

	1 本目	2 本目	3 本目	4 本目	5 本目	平均値 ≤ 28
荷重低下率 (%)	16.3	21.7	17.3	19.4	12.7	17.5

の結果、規格の荷重低下率 28 % 以下に対し、17.5 % と良好な曲げ引張抵抗性を示した。

3. 被覆のある 17.8 mm ECF 高強度ストランドの諸特性

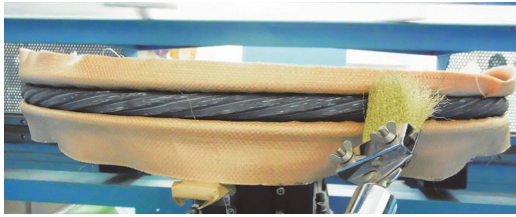
17.8 mm ECF 高強度ストランドは土木学会指針¹⁾にしたがったエポキシ被覆加工を施している。クラウン部の平均膜厚 0.4 ~ 0.9 mm および各クラウン部の膜厚 0.4 ~ 1.2 mm の被覆厚であり、全長ピンホールのない耐食性に優れたエポキシ被覆を有する。被覆のある 17.8 mm ECF 高強度ストランドのリラクセーション特性、被覆密着性、付着特性および耐衝撃性について、性能確認試験の結果を以下に示す。

3.1 リラクセーション試験

17.8 mm ECF 高強度ストランドのリラクセーション試験は「金属材料の引張りリラクセーション試験方法」(JIS Z 2276) に則って行い、初期試験力は最大試験力 (387 kN) の 70 % とした。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。

3.2 被覆密着性試験

被覆密着性は「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) にしたがって実施した。曲げ試験および引張破断試験結果を写真 - 2 に示す。曲げ試験は 20 ± 2 °C において鋼材公称径



(a) 曲げ試験状況



(b) 引張破断試験後の鋼材外観

写真 - 2 被覆密着性試験状況

の32倍の円筒に180°巻き付けた状態で、エポキシ被覆の損傷およびピンホールは認められない結果であった。引張破断試験では、破断時の衝撃にも関わらず、破断部近傍において被覆のはく落および飛散はなく、優れた被覆密着性を示した。

3.3 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。試験状況を写真 - 3 に、試験結果を表 - 4 に示す。試験の結果、被覆のない 17.8 mm 高強度ストランドと同等以上の付着強度を示した。

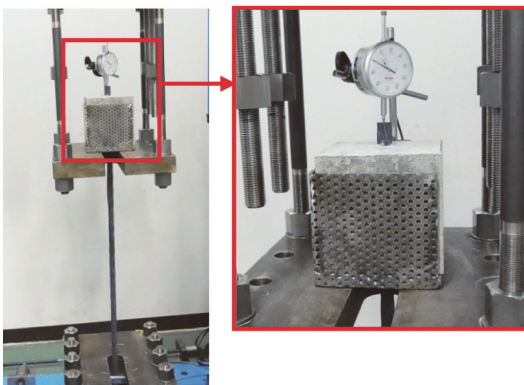


写真 - 3 付着特性試験状況

表 - 4 付着特性試験結果

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

3.4 耐衝撃性試験

土木学会指針¹⁾に規定される ECF ストランドの耐衝撃性試験(試験方法: ISO 6272)を行った。試験結果を写真 - 4 に示す。試験の結果、永久変形した範囲外でエポキシ被覆に割れ、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。

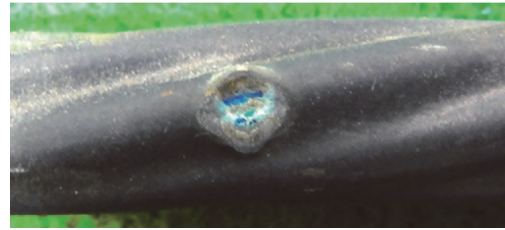
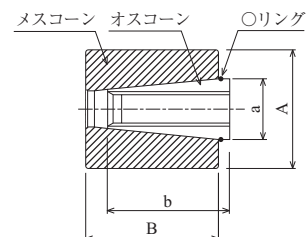


写真 - 4 耐衝撃試験状況

4. シングルストランド定着システム

17.8 mm ECF 高強度ストランドに用いるシングル定着具を開発した。開発したシングル定着具(オスコーンおよびメスコーン)の寸法および材質を図 - 4 に示す。定着具を用いて以下に示す引張試験および耐疲労性試験を実施し、その健全性を評価した。



寸法 (mm)	メスコーン		オスコーン	
	A	B	a	b
	65	75	37	75
材質	焼入性を保証した 構造用鋼鋼材 (JIS G 4052)			
記号	SCM435H		SCM415H	
備考	熱処理品			

図 - 4 シングル定着具

4.1 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【施工編: 特殊コンクリート】⁴⁾」に規定される静的引張試験を行い、定着具の定着効率を測定した。その結果を表 - 5 に示す。開発した定着具は対最大試験力 95 % 以上の規準を満足することを確認した。

表 - 5 定着効率試験結果

No.	破断荷重 (kN)	定着効率 (%) (≧対最大試験力 95 %)
1	422	109
2	420	109
3	407	105

4.2 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 Recommendations for the acceptance of post-tensioning systems⁵⁾」に規定される上限荷重 0.65 Pu, 変動応力幅 80 MPa の条件で実施した。試験状況を写真 - 5 に示す。200 万回繰り返し後も鋼材は破断せず、十分な耐疲労性が示された。

4.3 定着具とコンクリートを組み合わせた荷重伝達試験

グリット筋, 支圧プレートおよび配置間隔のシステム仕様を決定するため、緊張力導入時のコンクリート強度

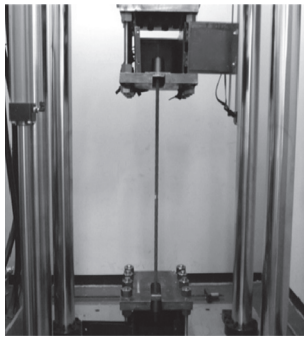


写真 - 5 定着具疲労試験状況

27 N/mm²においてコンクリート標準示方書【施工編：特殊コンクリート】⁴⁾に規定される荷重伝達試験を行った。試験の結果、規格の1.0 Pu 以上に対し、1.2 Pu 以上の載荷荷重に耐えうることを確認した。図 - 5 に定着システムの構成の一例を示す。

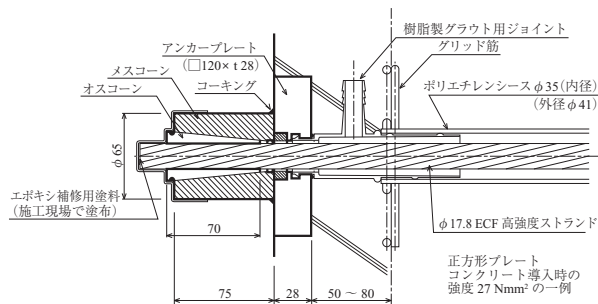


図 - 5 定着システム図 (一例)

4.4 PE シースとの擦り減り抵抗性試験

PE シースを用いた PC 橋の設計施工指針 (案)⁶⁾にしたがい、ケーブルの最小曲げ半径 (100 D)、0.7 Pu 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 (図 - 6)。試験後のシース残留肉厚を表 - 6 に示す。いずれもシース残留肉厚は 1.5 mm 以上であり、同指針の規格を満足した。また、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。

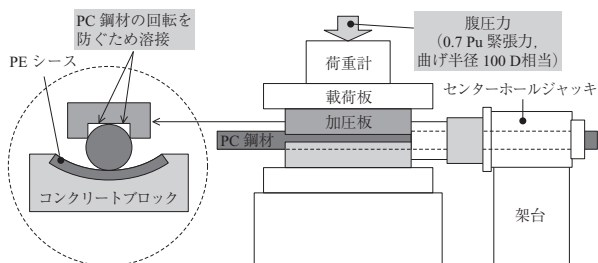


図 - 6 擦り減り抵抗性試験方法

4.5 可とう性

17.8 mm ECF 高強度ストランド 10 m の中央部を 5 m 間隔で 2 点支持し、可とう性を確認した。中央部にはたわみ

表 - 6 PE シースの擦り減り抵抗性試験結果 ※

	残留肉厚 (mm)		
	≥ 1.5		
	1 本目	2 本目	3 本目
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

※ 最小曲げ半径：100 D，試験温度 50℃の一例

が認められ、PC 鋼棒のような太径で単一の PC 鋼材に比べ、本開発品は一定の可とう性を有していることが確認された (写真 - 6)。

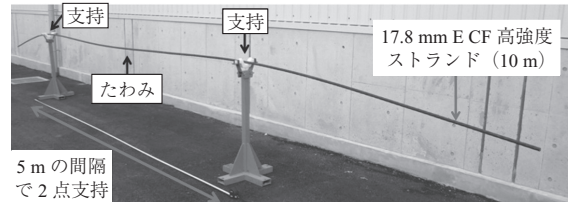


写真 - 6 可とう性の確認状況

5. おわりに

JIS に規定されている 19 本より 17.8 mm ストランドと同等以上の最大試験力や 0.2 % 永久伸びに対する試験力を有した 7 本より 17.8 mm ECF 高強度ストランドおよびその定着システムを新たに開発し、各種の性能試験を満足することを確認した。本稿では割愛したが、緊張ジャッキによる緊張・盛り換え等の施工性の確認試験も終え、近日中に実用に供される予定である。

プレキャスト部材を用いた構造は工場製作の優れた耐久性が確保され易い一方で、シースの不連続部や場所打ちコンクリートとの境界部に課題が生じやすいとも言える。本稿における 17.8 mm ECF 高強度ストランドは止水性が課題となる部材間の接続部でも ECF ストランドの優れた耐食性により、高耐久化に貢献できる製品であると考えている。本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。

参考文献

- 1) 土木学会：エポキシ樹脂を用いた高性能 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
- 2) 第 23 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：極太径 29.0 mm プレグラウト高強度 PC 鋼より線の開発，2014
- 3) 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
- 4) 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
- 5) FIP, Recommendations for the acceptance of posttensioning systems, 1993
- 6) 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

【2015 年 11 月 6 日受付】