

防錆被覆 PC 鋼材の耐久性について

名取 耕一朗*

PC 鋼材は、プレストレストコンクリートの高耐久化に関して重要な役割を担うべき材料の一つである。本稿では、現在行われている PC 鋼材の耐久性向上策の一つである防錆被覆に焦点をあて、防錆被覆 PC 鋼材に求められる性能とその確認方法について概要を示した。

キーワード：PC 鋼材、耐久性、防錆被覆

1. はじめに

重要な社会資本であるプレストレストコンクリート構造物（以下、PC 構造物）にとって、PC 鋼材は、PC 構造物の耐久性を左右する材料の一つである。PC 鋼材には、「PC 構造物の設計耐用期間中、設計当初に見込んだ緊張力を維持し続ける」ことが求められ、この要求性能を満足することで「PC 鋼材の耐久性」と捉えることができる。これまでに行われてきた PC 鋼材の耐久性向上のための主な取組みは、一つには PC グラウトの品質向上であり、また一つには防錆被覆 PC 鋼材の適用であろう。

PC 鋼材のもっとも理想的な防錆方法は、*fib* bulletin 11 “Factory applied corrosion protection of prestressing steel” によれば、鋼材周囲を pH 12～13 に維持し続けることにより、PC グラウトはそれが完全になされた場合、もっとも優れた PC 鋼材の耐久性向上策であることに異論は無いと思われる。それゆえ、PC グラウトについては、これまで多くの努力が積み重ねられ、本協会からも「PC グラウトの設計施工指針」が発行されるなど、施工技術の一般化による品質向上が進んでいる²⁾。しかし、それでもなお、施工現場での作業が主となる PC グラウトには、環境や作業員の熟練度などの外乱要因も多く、安定した品質を維持するためには、非常に多くの実践的労力を伴うこともまた事実である。

一方、同じく *fib* bulletin 11 では、完全な PC グラウトに次ぐ防錆方法を、鋼材表面の物理的な腐食促進因子からの遮へいであるとし、具体的な例としてメッキなど反応性被覆、樹脂被覆など無反応性被覆、ポリエチレンシースなど

防護の追加をあげている。この中で PC 鋼材の被覆は、工場内の安定した環境で加工が行われることや、必要な品質検査に合格した鋼材のみを用いることができるため、品質の安定化や施工現場での労力削減を実現できるという利点があり、PC グラウトを補うものとして発展してきた。しかし、防錆被覆 PC 鋼材の耐久性については、個々の鋼材について製造者が独自に確認試験等を行っており、公的な規格作成の動きはみられるものの、PC グラウトのような品質規格の一般化という面ではようやく端緒についたばかりという状況にある。

本稿は、今後行われるであろう品質規格一般化の一助となることを目的として、防錆被覆 PC 鋼材として実績が多い内部充てん型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線（以下、ECF ストランド）の耐久性について現時点で行われている確認試験方法およびその結果の例を示したものである。

2. PC 鋼材の防錆被覆方法

PC 鋼材の防錆被覆方法は、大きく分けてメッキと樹脂被覆がある。

PC 鋼材に用いられるメッキには、主に亜鉛、亜鉛・アルミ、アルミ・マグネシウムなどがあり、鉄よりもイオン化傾向が高い、すなわち「卑」な金属との合金層を鋼材表面に形成したものが用いられる。これは、鋼材表面が露出された際に、鉄が陰極、卑金属が陽極となる局部電池が形成され、卑金属が腐食（イオン化）されることで鉄の腐食を防ぐ、すなわち電気化学反応を利用した犠牲防食といわれる方法である。メッキの中でもっとも汎用的なのは亜鉛であるが、亜鉛は激しい腐食環境、とくに厳しい塩害環境においては、比較的早く損なわれることや、フレッチング疲労に対する抵抗性が若干低いことから、一般的にはそれ単体で用いられることは少なく、グリスやワックスおよびポリエチレン樹脂（以下、PE 樹脂）と組み合わせることも多い。また、亜鉛やアルミは両性金属であるため強アルカリ性物質、すなわちセメントやグラウトとの反応性が高く、反応時に発生する水素による水素脆性破壊の懸念があることから、強アルカリと直接接触する用途に使用することはできるだけ避ける必要がある。

一方、現在国内で PC 構造物に適用されている樹脂被覆



* Koichiro NATORI

住友電工スチールワイヤー(株)
PC 技術部

PC 鋼材としては、エポキシ樹脂被覆 PC 鋼材、PE 樹脂被覆 PC 鋼材、アンボンド PC 鋼材などがあり、これらの樹脂による被覆で外界と鋼材表面を物理的に遮へいすることで鋼材を防錆する方法である。長期間の防錆性能確保のため、外部環境によって劣化等の影響を受けにくい樹脂が使用されており、とくに厳しい環境で使用される場合には、エポキシ樹脂+PE 樹脂や、PE 樹脂+グリッド+PE 樹脂など複数の防錆被覆層を組み合わせることもある。

3. 樹脂被覆 PC 鋼材の耐久性評価

前述のとおり PC 鋼材の耐久性とは、「必要な期間、緊張力を維持し続ける」性能と捉えることができる。これを言い換えれば、初期緊張力を与えられた後、必要な期間 PC 鋼材に破断もしくは大幅な張力低下が生じないこととなる。ここで張力低下については、JIS G 3536 (PC 鋼より線)、JIS G 3109 (PC 鋼棒)に規定されるリラクゼーション率に合致したものを使用すれば、大幅な低下を生じることなく、所定の性能を確保することができる。

一方、PC 鋼材の破断原因としては、軸疲労、遅れ破壊(応力腐食割れ、水素脆性破壊、鋼材腐食等)、フレット疲労が主な候補としてあげられ、実際には、これらが複雑に絡み合って破断に至ると考えられる。そのため PC 鋼材の破断を防ぐには、①耐軸疲労性能、②耐遅れ破壊性能、③耐フレット疲労性能といった個々の性能向上が重要となる。ここで①の疲労による破断については、種々の取り組みもなされているが、基本的に母材と定着具に負うところがほとんどである。そのため本稿では鋼材自身の耐久性である②および③に的を絞って記述し、①については割愛する。

3.1 耐遅れ破壊性の評価

「遅れ破壊」とは、金属に許容応力以下の応力が加えた際、ある程度の時間経過後に突然脆性的に破壊する現象を指すのが一般的である。現象面から応力腐食割れと水素脆性破壊に大別され、両者とも発生原理は諸説あるものの、定説は今のところ存在していない。しかし、いずれも金属表面に何らかの腐食的な環境因子が作用することで促進されることが知られており、金属と外部環境とを遮へいすることは、発生防止に有効であるとされている。防錆被覆によって耐食性を向上させることは遅れ破壊防止の有効な手段の一つと考えられている。

防錆被覆 PC 鋼材の耐食性は、防錆被覆層の品質に左右され、被覆の耐久性すなわち樹脂自身の劣化によって被覆に欠陥が生じないこと、および腐食促進因子の透過性が小さいことが重要となる。一般に樹脂の耐久性に関わる性能としては、耐水(耐湿)性、耐候性、耐薬品性、耐光(紫外線)性、耐冷耐熱性(ヒートサイクルを含む)、耐生物性(耐鳥糞、耐カビ、耐食害等)、耐摩耗性、耐クリープ性など数多く、通常はこれらの性能から用途に応じて必要な項目について評価が行われる。大石³⁾によれば、土木分野に使用される樹脂製品については、その使用環境から耐水性、耐候性、耐薬品性、耐生物性、耐クリープ性(寸法安定性)が主として必要とされているが、防錆被覆 PC については

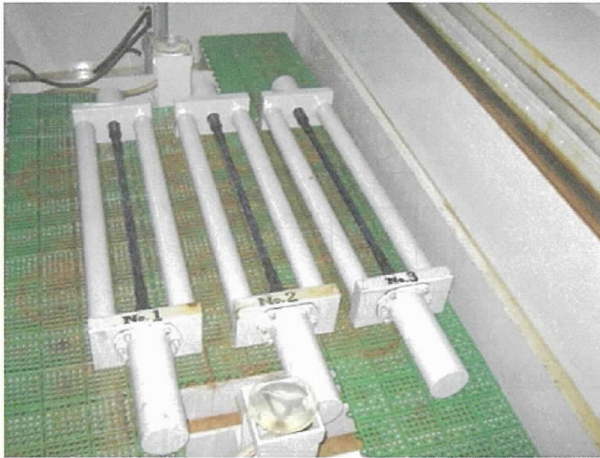
比較的用途が似ているエポキシ樹脂塗装鉄筋の品質規格(JSCE-E 501)に準じて評価を行うことが多いと思われる。

また、腐食促進因子の透過性に関する性能としては、被覆の不連続部分すなわちピンホールなどの物理的な欠陥を通じた透過や、被覆層を化学的に拡散することによる透過がある。被覆を拡散透過する物質としては、化学的に活性な気体、すなわち O₂、H₂O などや、酸、アルカリなどのイオン性物質を伴った液体などが主として考えられるが、通常の被覆樹脂においては、活性な気体の透過は非常に早く、被覆-鋼材界面に相当量供給されるため、一般に被覆の耐食性は、外界から鋼材表面へのイオン性物質透過に左右されるとされている⁴⁾。イオン性物質としては、自然界で接触する量、頻度とも塩化物イオンが一般的と考えられている。塩化物イオンの透過性の指標としては、耐塩水噴霧試験(JIS K 5600-7-1)が一般的に行われているが、エポキシ樹脂塗装鉄筋で行われている塩化物イオン透過性試験(JSCE-E 530)や、コンクリートで実施されている EPMA を用いた塩素イオンの浸透深さの測定なども試みられている。

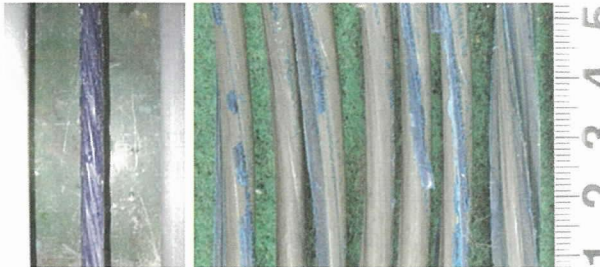
現在、防錆被覆 PC 鋼材の個々の製品については、公的な品質規格作成に向けた活動が行われており、耐久性についてもその中で論じられている。参考までに PC 構造物へ適用実績が多い ECF ストランドについて行われている、防錆被覆 PC 鋼材の耐遅れ破壊性能に関わる主な試験方法を表-1に、また試験の例を写真-1、2に示す。

表-1 ECF ストランドの被覆の耐遅れ破壊性に関する試験方法(規格名称が無いものは、製造者の自主規格で実施)

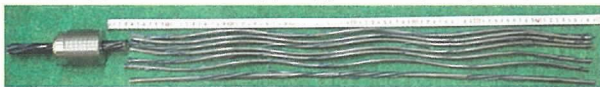
試験項目	試験方法 (規格名称)	試験概要
耐水(耐湿)性	連続結露試験 (JIS K 5600-7-2)	被覆 PC 鋼材を 50℃/95% RH 以上の環境に 2400 時間さらし、被覆の異常、鋼材発錆が生じないことを確認する試験
耐候性	促進耐候性試験 (キセノンランプ法) (JIS K 5600-7-7 準拠)	樹脂被覆した鋼板にサンシャインカーボンアーク光源を用いて 300 時間の湿潤サイクル試験を行い、試験後の鋼板の曲げによる被覆異常が生じないことを確認する試験
耐薬品性	耐薬品性試験 (JSCE-E 528)	被覆 PC 鋼材を各種薬品(3mol NaOH, 3 mol CaCl ₂ , 飽和 Ca(OH) ₂ , 5% H ₂ SO ₄)に 1000 時間浸せきし、被覆の異常、鋼材の発錆が生じないことを確認する試験
耐クリープ性	腹圧圧縮 クリープ試験	19S15.2 で偏向部 R = 3000 mm の場合にストランドが側面から受ける圧力(腹圧力: 333 kN/m)を試験的に 2 本重ねの試験片に 1000 時間載荷し、クリープによる被覆損傷による鋼材露出が無いことを確認する試験
耐塩水噴霧性	塩水噴霧試験 (JIS K 5600-7-1)	被覆 PC 鋼材に 5% NaCl 溶液を 3600 時間噴霧させ、被覆の異常、鋼材発錆が生じないことを確認する試験
耐塩化物イオン透過性	塩化物イオン透過性試験 (JSCE-E 530 準拠)	5% NaCl 溶液と蒸留水を被覆樹脂膜でセパレートし、23 ± 2℃、90 日後の蒸留水中の塩素イオン濃度が 0.1 ppm 以下であることを確認する試験
耐冷耐熱性	冷熱繰り返し試験 (JIS C 0025)	24 時間で -20℃ → 40℃ → -20℃ の温度変動を 1 サイクルとし、被覆 PC 鋼材を 100 サイクル曝した後、被覆の異常、鋼材発錆が無いことを確認する試験



(a) 全体の状況



(b) 外観拡大 (c) 解体した鋼材内部の拡大



(d) 解体した鋼材の全景

写真-1 ECF ストランドの塩水噴霧試験 3 600 時間後の状況 (0.7 Pu 緊張状態での例)



(a) 試験外観



(b) 最大圧潰部分の被覆断面

写真-2 ECF ストランドの耐腹圧圧縮クリープ試験の例

3.2 耐フレット疲労性能の評価

フレット疲労は、一般に引張応力がかかった鋼材同士の金属表面が直接接触した状態で擦れ合うことによって、摩耗部分を起点に疲労破壊することである(写真-3, 4)。とくに外ケーブル構造の偏向部に配置されたPC鋼材は、長期にわたって高い腹圧力を受けながら変動応力を受けるため、このフレット疲労が生じやすい。ただし、樹脂被覆PC鋼材の場合、被覆樹脂がPC鋼材の金属表面の直接接触を防ぐことによりフレット疲労を低減する機能をもつため、被覆樹脂が腹圧力によって圧壊、摩滅して金属表面同士が接触することがなければ、フレット疲労による鋼材破断は生じないといえる⁵⁾。

現在のところ、これに関する公的な試験方法および規格は存在していない。そのため、使用者と製造者間の取決めに基づき、定着部間に偏向部を模擬したブロックを配置した実大疲労試験によって個別に確認が行われている状況にある。この試験では、偏向部を模擬したブロックに上下振動を与え、PC鋼材に加わる曲げ応力を繰り返し変動させている。

参考までに、PC鋼材のフレット疲労試験方法の例としてECFストランドで行われている試験方法を図-1に示す⁶⁾。この試験方法では、実際の橋梁のケーブル配置状況を模擬して、偏向部ブロックを図-1の下に拡大したように二つ山としている。そのため固定点からの相対移動量



写真-3 フレット痕 (丸枠内に摩耗の痕がみられる)

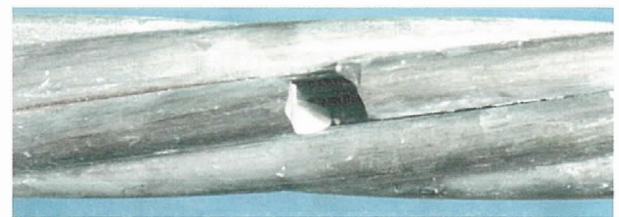


写真-4 裸PC鋼より線でのフレット疲労試験による素線破断の状況



写真-5 ECF ストランドでのフレット疲労試験による素線破断の状況 (PC鋼材の露出、破断は生じていない)

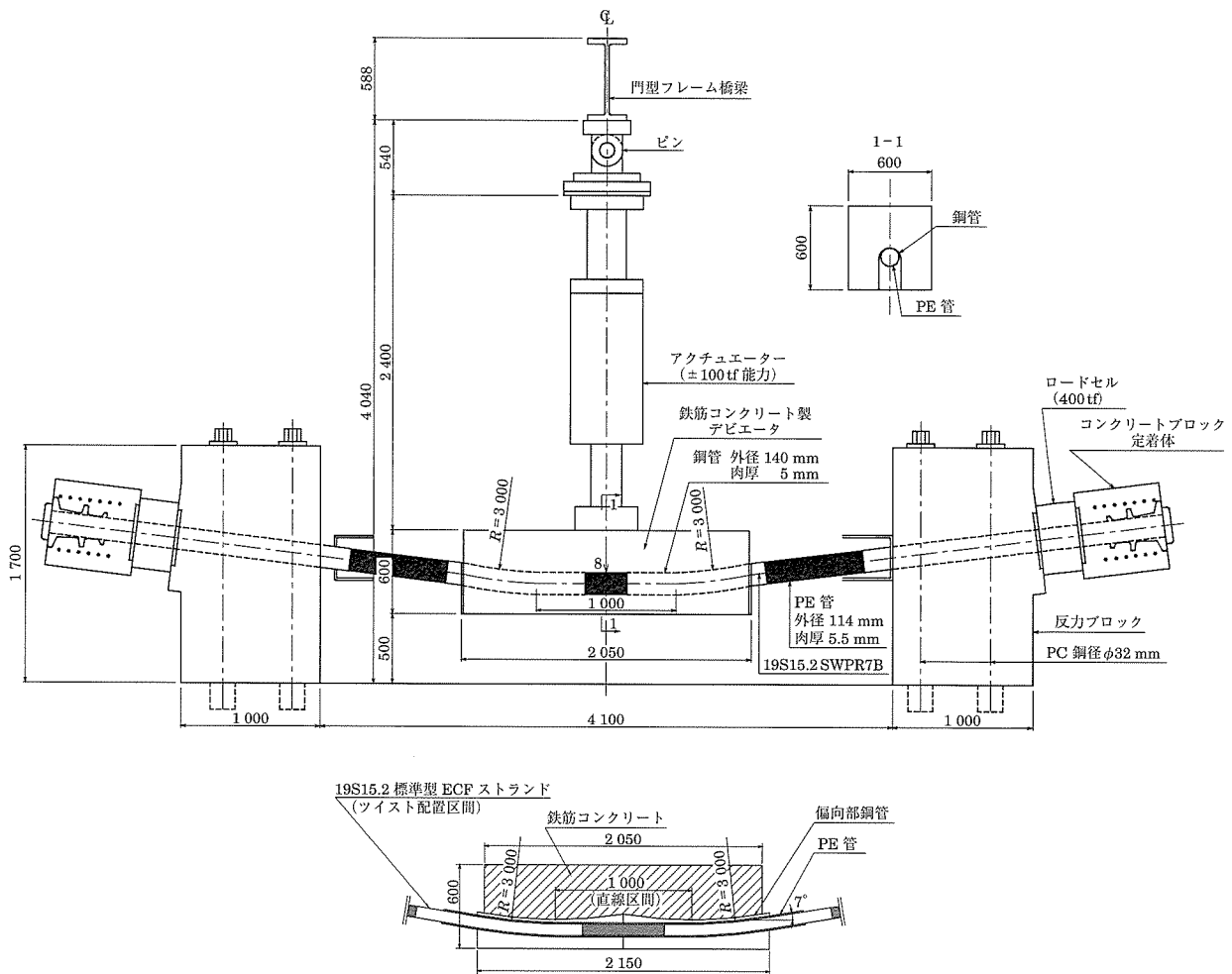


図-1 ECF ストランドについて行われたフレットング疲労試験の結果の例
(上：装置全体，下：偏向部の拡大)

を十分に確保した試験となっている。ECF ストランドについて行われた試験結果を表-2 および写真-5 に示す。

4. おわりに

浅学ではあるが、防錆被覆 PC 鋼材の耐久性に関する評価の現状について ECF ストランドの例を引いて示させていただいた。冒頭にも記したように、現在個々の防錆被覆 PC

鋼材製品ごとに耐久性を含めた公的な品質規格作成の動きがみられ、土木学会・コンクリート標準示方書に沿って設計耐用年数を 100 年に設定した公的規格の制定も進められている。今後こうした動きを、耐久性向上に必要な防錆被覆 PC 鋼材の性能についてさらに深く掘り下げた議論につなげ、ユーザーが安心して使用することができる環境の整備を進めていくことが重要であり、それは製造者の責任の一つでもありと考えている。

表-2 ECF ストランドについて行われたフレットング疲労試験の結果の例

ケーブル	偏向部		载荷条件		繰り返し回数	結果
	グラウト有無	曲げ半径	荷重	ストレスレンジ		
19S15.2 ECF ストランド	グラウトなし	3 m	下限 0.6 Pu	49 MPa	300 万回	鋼材破断なし (写真-5)
19S15.7 高強度 ECF ストランド	グラウトなし	4 m	下限 0.6 Pu	50 MPa	300 万回	鋼材破断なし
19S15.7 高強度 ECF ストランド	グラウトなし	4 m	上限 0.65 Pu	50 MPa	300 万回	鋼材破断なし
19S15.7 PE 被覆型高強度 ECF ストランド	グラウトなし	3 m	上限 0.6 Pu	49 MPa	300 万回	鋼材破断なし
19S15.2 PC 鋼より線 (SWPR7BL)*	全長グラウト	3 m	下限 0.6 Pu	49 MPa	300 万回	偏向部にて 13 カ所破断 (写真-4)

*・・・被覆していない PC 鋼より線

参考文献

- 1) fib : fib bulletin 11 " Factory applied corrosion protection of prestressing steel " (2001)
- 2) プレストレストコンクリート技術協会：PC グラウトの設計施工指針，平成 17 年 12 月
- 3) 大石：プラスチックの耐久性，p. 22，工業調査会
- 4) 大藪：塗膜の保護機能を解剖する，塗装技術，1984 年 10 月号，pp. 79-83
- 5) 新井英雄，藤田 学，梅津健司，鮎子多浩一，上田多門，大容量 PC 鋼より線の配置部におけるフレットング疲労特性：土木学会論文集 No.627/V-44，pp.205-222，1999.8
- 6) 高速道路技術センター：PC 橋の耐久性向上に関する設計・施工マニュアル，平成 13 年 10 月

【2010 年 1 月 26 日受付】