

(143) PC鋼より線の防食と疲労性能に関する研究

黒沢建設株式会社	技術開発部	○平井 圭
同 上	技術部長	蓮井 武
同 上	設計本部長	正会員 工博 田邊 恵三
株式会社日鐵テクノリサーチ	材料評価部	浅野 厳之

1. はじめに

近年、PC構造物に対してミニマムメンテナンスやライフサイクルコストの縮減等の耐久性に関する要求が高まってきている。これを受けてコンクリート構造物の耐久性に関する研究は、アルカリ骨材反応、中性化等に対応するコンクリート材料に関しては活発に行われ、多くの成果が報告されている。特に塩害対策地域¹⁾においては適用事例も多い。しかしながら、コンクリートと鉄筋、緊張材の複合構造であるPC構造物の耐久性に関する研究は発展途上であり、特にPC構造の核ともいえる緊張材の耐久性に関する研究は近年になって活発化してきているが、未だ実績も少ないのが現状である。

PC緊張材の耐久性向上は一般的に樹脂系材料で防錆処理されるが、PC鋼より線の場合はより線形状を有するため樹脂塗装が困難であり非常に高い塗装技術が要求される。米国で開発されたPC鋼より線の防錆方法は、よりの外周を塗装し、内部の空隙に充填する方法であるが、より線螺旋溝の防錆のために樹脂皮膜厚さが600 μ m程度必要となる。このとき、皮膜厚が厚くなると裸PC鋼より線の定着具が使用不可能であったり、PC鋼より線の特徴でもある可とう性が失われるなどの影響が生ずる。

本研究は、PC鋼より線のよりを一時的に戻し、素線の一本一本をエポキシ樹脂塗装した後に再度よることにより、裸PC鋼より線の形状を全く変化させずに防錆処理を行ったエポキシ樹脂全塗装PC鋼より線の防錆性能、疲労性能の確認試験を行ったものである。

2. エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線の製造概要

エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線の製造工程を図-1および図-2に、塗装後の状態を写真-1に示す。エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線は、裸PC鋼より線のよりを一時的に戻し、素線一本一本の表面処理を行い、さらに素線一本一本にエポキシ樹脂静電粉体塗装を施し、再度よる工程により製造される。この製造工程により完成した全塗装PC鋼より線の外観は、裸PC鋼より線と全く同様のものとなる。

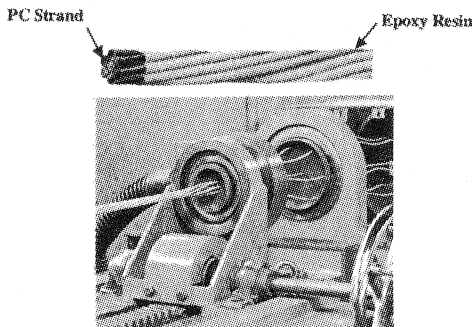


写真-1 エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線塗装後

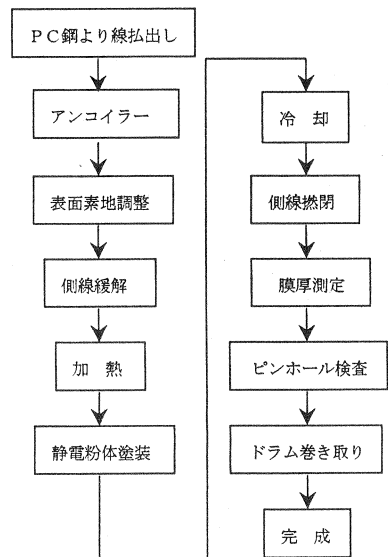


図-1 エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線製造工程

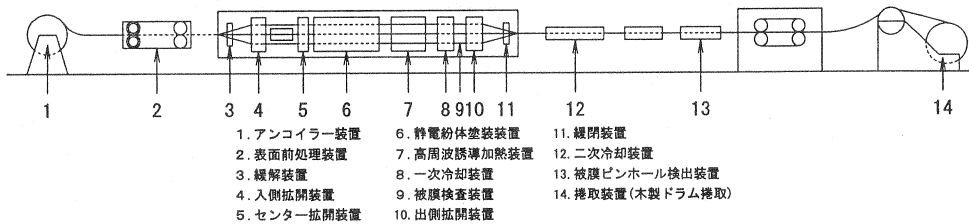


図-2 エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線の製造工程概略図

3. エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線の仕様

現在、土木学会²⁾ではエポキシ塗装鉄筋 (以下 EP 鉄筋) に関する基準を設けているが、エポキシ樹脂塗装PC鋼より線に関する基準および規定がないため、エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線の仕様は「塗装に対してエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針(案) 土木学会」を参考に、また機械的性質は JISG3536 に従い決定した。エポキシ樹脂塗装の主な目的は防錆であるが、塗装の防錆性能は塗膜厚に依存する報告がなされている。図-3 にRC梁曲げ載荷を行い、0.2mm~0.3mm のひび割れを導入して海洋飛沫帯に3年間暴露した場合のEP鉄筋の塗膜厚と鉄筋腐食量の関係を示す。図-2によれば、無塗装鉄筋の腐食面積はかぶり厚20mmにおいて150cm²以上、かぶり厚30mmにおいて約60cm²となっており、塗膜厚さ100μmではそれぞれ110cm²、20cm²となっている。

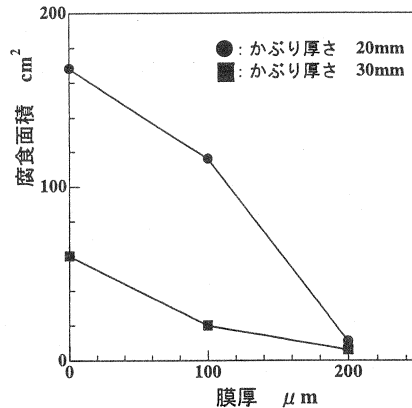


図-3 EP鉄筋の塗膜厚さと腐食量の関係

さらに塗膜厚さが200μmになると腐食面積は急激に減少し、かぶり厚が20mmの場合でも腐食面積は10cm²以下となっている。このことから、防錆性能は塗膜厚が200μm以上であれば完全であるといえる。上記は鉄筋のリップ、ふしを有する形状のため、リップ、ふしと円筒形の形状変化部にピンホールが発生することにも起因している。しかしながら、PC鋼より線の場合、円形のPC鋼線の集合であることからリップやふしの影響は無視できるため、塗膜厚さは200μm以下としても十分は防食効果が期待できる。また、塗膜厚を必要以上に厚くするとPC鋼より線の可とう性に悪影響を与えるばかりでなく、定着具も専用のものを使用しなければならず、単純に膜厚を厚くすればよいというわけではない。エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線のように線の素線一本一本に塗装を施しより直す場合には、膜厚が350μm以上になるとよりが締まらずに緩解する恐れがあり、膜厚は350μm以下となるようにする必要がある。また、塗膜厚が厚くなると耐衝撃性能が低下するなどの影響がある。そこでエポキシ樹脂全塗装PC鋼より線の標準膜厚は150μm±30μmとしている。表-1にエポキシ樹脂全塗装PC鋼より線の仕様を示す。また、図-4にエポキシ樹脂全塗装PC鋼より線の膜厚度数分布を示す。

表-1 エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線の仕様

部材	呼び径	引張荷重 (kN)	0.2%永久伸びに対する荷重(kN)	塗膜厚さ (μm)	樹脂種類	標準単位質量 (g/m)
裸PC鋼より線	φ 12.7	183	156	—	—	774
	φ 15.2	261	222	—	—	1,101
全塗装PC鋼より線	φ 12.7	183	156	150±30	エポキシ樹脂	789
	φ 15.2	261	222	150±30	エポキシ樹脂	1,119

図-4によれば、母集団 1,129 のサンプルについて調査したところ、平均膜厚は 155.72 μm 、3 σ 下限値が 132.59 μm 、3 σ 上限値が 178.90 μm であった。したがって 150 μm ± 30 μm の管理範囲は十分満足する結果であった。

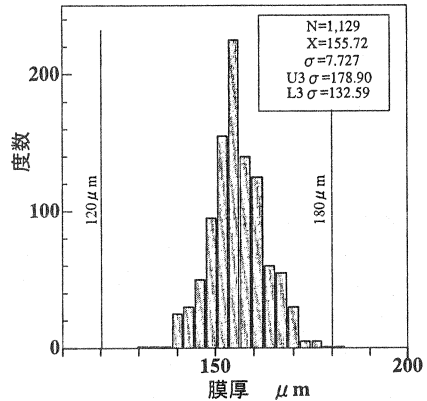


図-4 全塗装PC鋼より線の膜厚分布

3. 性能確認試験

エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線に要求される性能は大別して以下に示すとおりである。

- ① 耐久性 …… 耐アルカリ性、防食性
- ② 施工性 …… 耐衝撃性
- ③ 設計条件 …… 付着強度、疲労強度

上記に列挙した要求性能を確認した試験の結果⁹⁾からとくに耐久性および疲労強度に関する試験結果を順次示す。

4.1 耐アルカリ性、防食性試験

エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線の耐アルカリ性および防食性を確認するために耐薬品性試験および乾湿繰り返し試験を行った結果を表-2に示す。耐アルカリ性は、3モル水酸化ナトリウム水溶液 (pH13.2) に1,000hr浸せきした結果、塗膜の軟化、膨潤、ふくれおよび剥離等の異常は認められなかった。耐アルカリ性は、樹脂の品質に依存するところも多いが、最近では多くの耐薬品性に優れた樹脂が開発されているため樹脂の選定も重要となる。防食性は、コンクリート供試体中にPC鋼より線を配置し0.8Pyの緊張力を導入した後に3%濃度の塩化ナトリウム水溶液に16hr浸せきし、空中にて8hr乾燥させるサイクルを84サイクル実施した。試験より得られた結果を表-3に示す。表-3によれば、試験終了後にPC鋼より線の素線径を測定し断面損耗量を確認したところ、裸PC鋼より線では芯線の損耗量は2.71%であり、測線の損耗量は16%程度であったのに対し、エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線では断面損耗は全くなく、樹脂塗膜のふくれ、剥離等の現象は全く発生しなかった。さらに、試験終了後のPC鋼より線の機械的性質を確認したところ、裸PC鋼より線では引張荷重が2%減少し、0.2%永久伸びに対する荷重は4.5%減少していたが、エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線は、試験前と試験終了後で機械的性質の変化は見られなかった。したがって、エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線は十分な耐アルカリ性能、防食性能を有していることが確認された。

表-3 乾湿繰り返し試験結果一覧

試験項目	項目	エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線 (φ12.7)			裸PC鋼より線 (φ12.7)		
		試験前	試験後	断面積変化率(%)	試験前	試験後	断面積変化率(%)
断面の損耗状況	芯線径	4.50	4.49	-0.44	4.40	4.34	-2.71
	測線径1	4.39	4.39	0.00	4.19	3.84	-16.01
	測線径2	4.41	4.40	-0.45	4.20	3.94	-12.00
	測線径3	4.38	4.39	0.46	4.20	3.90	-13.78
	測線径4	4.40	4.39	-0.45	4.20	3.97	-10.65
	測線径5	4.38	4.39	0.46	4.21	3.84	-16.80
機械的性質	引張荷重(kN)	191	190	-0.52	190	186	-2.11
	0.2%荷重(kN)	177	177	0.00	176	168	-4.55
	伸び(%)	8.5	8.8	3.53	7.2	4.9	-31.94
外観	表層部	錆・ふくれ・剥離等は認められなかった。			発錆が著しく、表面の剥離、脱落が認められた。		
	内部						

4.2 疲労強度

表-4、図-5 に裸PC鋼より線とエポキシ樹脂全塗装PC鋼より線の軸引張疲労試験より得られた結果を示す。試験は母材をくさび定着もしくは厚着グリッパ定着を行い、応力振幅を変化させたものについて実施した。図-5によれば、両者とも、応力振幅が100Mpa程度では疲労試験中の異常は発生せず、疲労試験終了後の引張試験においても引張荷重の低下はほとんど見受けられなかった。さらに応力振幅を大きくし、245Mpaになると裸PC鋼より線は疲労試験中に30万回後半で定着部付近にて破断している。これに対し、全塗装PC鋼より線は245Mpaにおいて400万回終了し、その後の引張試験においても引張荷重の低下はほとんど見られない。これは、以下のことが原因と推測される。PC鋼より線の単体(モノストランド)の軸方向引張疲労試験において、芯線の周囲を側線が螺旋形に巻き付けてあるというPC鋼より線の特徴的な形状から、疲労振幅中によりが締まったり緩んだりする現象を繰り返す。したがって、芯線と側線の伸びに微小な差が生じ、芯線と側線の接触部においてフレットングが発生する。単体の軸引張疲労試験の供試体は長さが短いことから芯線と側線の伸び量の差は小さく疲労強度には若干の影響は与えるものの、大きく影響を与えるまでのフレットングは発生しない。しかしながら、くさび定着具もしくは厚着グリッパ定着具を使用した場合のモノストランド軸方向引張疲労試験においては、定着具によりくさび部分もしくは厚着グリッパ部分には大きな側圧が作用し、芯線と側線の伸びの差と側圧の複合作用もしくは、くさび歯等の切り欠き効果により疲労強度には大きな影響を与える。そこで、エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線は全ての素線間の接触部分に樹脂皮膜が存在するため、素線間のフレットングが回避されるとともに切り欠き効果の軽減されているため、疲労強度が増大したといえる。

表-4 軸引張疲労試験結果

供試体	呼び径	軸引張疲労試験			疲労試験後引張試験	
		上限荷重	応力振幅	繰り返し回数	引張荷重もしくは引張低下率	
		(kN)	(Mpa)	(回)	(kN)	(%)
裸PC鋼より線 SWPR7B	φ12.7	0.65Pu	100	2.0 × 10 ⁶	186.8	2.81
	φ15.2	0.45Pu	160	8.0 × 10 ⁵	—	—
	φ15.2	0.45Pu	245	3.5 × 10 ⁵	—	—
全塗装PC鋼より線 SWPR7B	φ12.7	0.65Pu	100	2.0 × 10 ⁶	188.6	1.93
	φ15.2	0.33Pu	245	2.0 × 10 ⁶	1735*	—
	φ15.2	0.45Pu	245	3.0 × 10 ⁶	—	1.7
	φ15.2	0.45Pu	245	4.0 × 10 ⁶	268	—

*印は7本タイプ

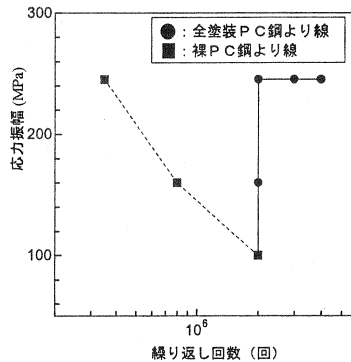


図-5 軸引張疲労試験 S-N 図

4. おわりに

PC鋼より線の素線一本一本にエポキシ樹脂塗装を施したエポキシ樹脂全塗装PC鋼より線に対して性能確認試験を実施したところ、以下の結果が得られた。

- ① エポキシ樹脂塗膜の厚さは150 μm ± 30 μm の範囲で管理できる。
- ② 150 μm 程度の塗膜厚があれば、耐アルカリ性能、防食性能は十分得られる。
- ③ 軸方向引張疲労試験において、樹脂塗膜の存在により素線間の接触点においてフレットングの発生を防ぎ、裸PC鋼より線と比較して10倍以上の軸引張疲労強度が得られる。

5. 参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針(案)・同解説，昭和59年2月
- 2) 土木学会：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針(案)，昭和61年2月
- 3) (財) 土木研究センター：土木系材料技術・技術審査証明報告書「SCストランド」，平成7年3月