

エポキシ樹脂塗装 PC 鋼より線について

蓮井 武*1・保坂 誠治*2

1. はじめに

昨今の PC 構造物に対する話題をキーワードで表すと「耐久性」「建設費低減」「品質保証」「補修・補強」「グラウト」などをあげることができる。これらは特別に目新しいものではないが、いずれも現在から将来にかけて、PC 業界に課せられた重要な技術課題であることは間違いない。

本稿で取り上げる「エポキシ樹脂塗装 PC 鋼より線」は、「エポキシ樹脂塗装鉄筋」と同様に、上述のいくつかの課題と、直接あるいは間接的にかかわりをもつ材料であり、多少大袈裟な表現が許されるならば、PC 構造物の耐久性向上に対するひとつの切り札、と見なすことができるかもしれない。

すでに、「エポキシ樹脂塗装鉄筋」は各種の基準¹⁾²⁾³⁾が刊行されており、現在とはとくに塩害環境のコンクリート構造物などでは採用が常識化している状況にある。

これら塗装鉄筋の基準が刊行された'80年代の中頃には、すでに日本海沿岸の PC 道路橋の塩害状況が公表され始めており、塗装鉄筋に引続いて「防食 PC 鋼材」も当然製品化に着手されるものと期待したのであるが、ようやく最近にいたり、3 種類の製品（正確には 1 種類はエポキシ樹脂に代わる熱可塑性樹脂を使用）が市場に出されるようになった⁴⁾。

FIP 京都シンポジウムでは、これら 3 製品に関してそれぞれ論文が発表され⁵⁾⁶⁾⁷⁾、すでに本誌 FIP 特集においてその概要が紹介された⁸⁾。しかし、その後はほとんどこれらの材料に関する報文が発表されておらず、その後の状況をうかがう情報の入手は比較的困難な状況であった。

本稿では、当初「エポキシ樹脂塗装 PC 鋼より線」に関する技術的展望を含め各製品の特徴等をまとめるこ

とを意図したのであるが、残念ながら前述の理由で各製品のデータ入手が困難なことから、その中のひとつである「SC ストランド」を通じて、この種の材料の特性に関する評価基準、試験結果の一部を紹介し、併せて適用分野についても若干の考察を行ってみたものである。

2. 製造方法および特徴

「SC ストランド」の主要な製造工程を図-1 に示す。

図-1 の製造工程は全自動連続工程を採っており、各検査も自動計測で行われている。

「SC ストランド」と他の製品とを比較すると、図-1 における 3) ~ 10) の塗装工程に大きな違いがあるが、その他の工程はそれほど変わらないものと推定される。

「再撚り合わせ装置」を写真-1 に示す。

本製品の塗装法を仮に素線塗装と名付け、他製品の塗装法をまるごと塗装と呼ぶものとすれば、その主な違い

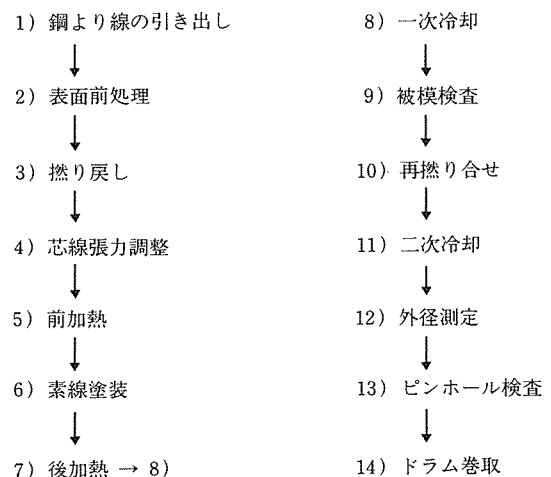


図-1 製造工程の概要

*1 Takeshi HASUI：黒沢建設㈱ 取締役技術部長

*2 Seiji HOSAKA：元黒沢建設㈱顧問

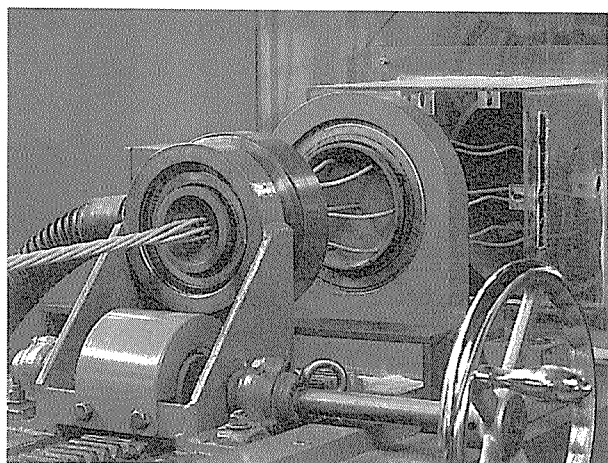


写真-1 再燃り合わせ装置(製造工程 10)

は、素線塗装では平滑な表面の塗装であるため、所定の防食被膜厚を侵さない範囲で比較的薄膜で仕上げられるのに対し、まるごと塗装は撚りによる平滑でない表面の塗装となるため、被膜が厚くなる傾向にある。また前者が芯線まで容易に一様な塗装ができるのに対し、後者は撚り目から塗料の浸透を図るため芯線付近の内部塗装に微妙な技術を必要とするようである。

「SCストランド」は、前述のように塗装被膜が薄いことから、次のような特長を備えることができた。

1) 各素線の素地調整を十分に行い、素線を回転させながら塗装を行うので、他製品に比べ薄い膜厚(平均 $150\mu\text{m}$)であるが、均一な膜厚で密着性が高く、信頼性の高い防食被膜となっている。

2) 無塗装鋼より線と比較して、本製品の柔軟性はほとんど損なわれていない。

3) 比較的新しい鋼より線でも芯線付近はさびが生じやすいものであるが、素地調整を十分に行うことができるので、被膜にピンホール、剥離、ふくれなどが発生しにくい。

4) 塗装鋼より線の外径の変化が比較的小さいため、在来型のPC定着具(ウエッジタイプ)がそのまま適用できる。

5) 塗料の使用量が比較的小さいため、製品価格の低廉化につながる。

これらの特長は、本製品を採用する場合に、定着具、関連機器などを大幅に変更する必要がなく、また施工上の制約条件も少ないことなどから、非常に扱いやすい材料とみることもできる。

3. 性能特性

3.1 性能評価の基準

「エポキシ樹脂塗装PC鋼より線」の性能評価に関する基準は、現在のところ「エポキシ樹脂塗装鉄筋」のように規定されたものはない。しかし通常の場合は、塗

装鉄筋の基準を準用することによって、大方の性能確認は可能と考えられる。

「SCストランド」は、すでに土木研究センターの「技術審査証明書」を取得しているが、この審査段階において、「審査証明委員会」より評価項目および判定基準等があらかじめ提示されたため、これに基づいて性能確認が行われている。

このような経緯から、塗装PC鋼より線の性能評価は、当分の間「塗装鉄筋」の基準および「SCストランド」の「技術審査証明報告書」が参考になるものと思われる。

「報告書」より、表-1に性能確認のための試験・調査内容、表-2に「SCストランド」の品質基準を抜粋して示す。

表-1 性能確認のための試験・調査内容

項目	試験の種類	主な試験・調査内容
(1) 防錆性能	a) 塩水噴霧試験	試験方法: JIS Z 2371に準じて2000時間の塩水噴霧を実施 確認項目: 腐食状況
	b) 乾湿繰返し試験	試験方法: ASTM D 1141-90に準じて84サイクルの乾湿繰返しを実施 確認項目: 断面積損耗・機械的性質・腐食状況
	c) 耐薬品性試験	試験方法: 各種薬品に浸漬 確認項目: 腐食状況
	d) 被膜硬化度試験	試験方法: 塩害対策指針(案)塗膜硬化度試験に準じて実施 確認項目: 被膜の軟化・粘着化
	e) 補修被膜部の防錆試験	試験方法: 塩水噴霧試験、耐薬品性試験、曲げ試験 確認項目: 補修被膜部分の腐食状況
	f) 被膜損傷部の腐食伝搬試験	試験方法: 塩水噴霧試験、耐薬品性試験 確認項目: 被膜損傷部分の腐食伝搬状況
(2) 被膜の可とう性	a) 曲げ試験	試験方法: 油圧ベンダーを用い、曲げ加工を実施 確認項目: 被膜の亀裂、脹れ、剥離
(3) 柔軟性	a) たわみ量試験	試験方法: 供試体突出部分に荷重を載荷 確認項目: たわみ量
(4) 被膜の耐衝撃性	a) 耐衝撃性試験	試験方法: JIS K 5400(デュボン式)に準じて実施 確認項目: 被膜の状況、破砕割れ、脹れ、剥離
	b) 被膜硬度試験	試験方法: 塩害対策指針(案)塗膜硬度の測定試験に準じて実施 確認項目: 被膜の強度
(5) 機械的性質	a) 引張試験	試験方法: JIS G 3536に基づいて実施 確認項目: 引張強さ、降点強さ、伸び
	b) リラクセーション試験	試験方法: JIS G 3536に基づいて実施 確認項目: リラクセーション性状
(6) 疲労強度特性	a) 引張疲労試験	試験方法: 200万回の繰返し載荷 確認項目: 疲労特性、引張特性、引張剛性
(7) コンクリートとの付着強度特性	a) 定着長試験	試験方法: 「SCストランド」のプレテンション供試体によるコンクリートひずみ測定 確認項目: ゲージのゆがみ、コンクリートとの付着強度
(8) プレストレスコンクリートへの適用性	a) ダブルTスラブの曲げ試験	試験方法: JIS 載荷試験 確認項目: 曲げひびわれモーメント、曲げ破壊モーメント
	b) プレテンション桁の曲げ試験	試験方法: JIS 載荷試験 確認項目: 曲げひびわれモーメント、曲げ破壊モーメント
	c) ポストテンション方式における被膜損傷状況の調査	試験方法: シースへの挿入および定着状況調査「SCストランド」を用いる場合は定着具その他の部材も防錆処理を施したものをを用いて試験を実施した。 確認項目: 表面被膜の損傷状態、定着箇所の損傷状態

3.2 主な試験結果

「SCストランド」の試験・調査結果は「報告書」にデータ、写真とともに収録されている。

ここでは表-1の調査項目にしたがって、「報告書」に記載されている試験結果の要旨または一部データを抜粋して示す。

1) 防錆性能

防錆性能に関する一連の試験、a) ~ f) から、いずれの試験においても被膜表層部、内部ともにさび、脹れ等

表一 「SCストランド」品質基準

試験および調査項目	試験および調査方法と条件	品質基準
外 観	製造工程中、木製ドラム巻取り製品全数、目視により検査	被膜が均一で、たれ、突起、異物付着等著しくないこと
ピンホール	高周波スパークテスターH型により検査	ピンホールが発生した場合、その部分はすべて補修
被膜厚さ	電磁式被膜厚計、外径測定器により測定	120 μ m~180 μ m、範囲を超える頻度が10%以下
耐衝撃性	デュボン式衝撃試験法	撃芯部以外の損傷がないこと
曲げ加工性	油圧ベンダーにより曲げ加工	被膜損傷がないこと
被膜の硬度	JIS K 5400鉛筆濃度記号H	被膜に損傷がないこと
被膜の硬化	ラビングテスト	軟化、粘着化がないこと
耐食性	JIS Z 2371 2 000時間	平均発錆率が0.5%以下
耐薬品性	3溶液浸漬試験 1 000時間	発錆がないこと
付着強度	定着長試験	「道路橋示方書」直径の65倍以下

の発生が全く認められず、所定の防食性能を有していることが確認された。

2) 被膜の可とう性

塗装鋼より線を曲げ加工したとき、曲げ部の被膜にひびわれ、脹れ等はまったく認められず、被膜が十分な可とう性を備えていることが確認された。

3) 柔軟性

柔軟性の変化は片持ち式の曲げ試験から推定できる。一例として、図一2に12.7mmに対する塗装・無塗装鋼より線の各たわみ量（3本の平均値）を示す。両者のたわみ差は3%以内にとどまっており、塗装による柔軟性の低下は無視できる程度であることが確認された。

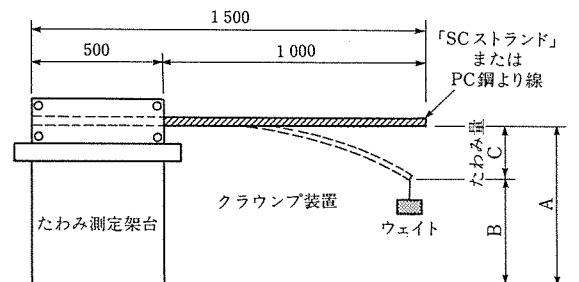
4) 被膜の耐衝撃性

耐衝撃性試験から、撃芯が直接当たった部分以外の被膜に破碎割れ、剥離、脹れ等はまったく認められず、所定の耐衝撃性を有していることが確認された。

5) 機械的性質

一例として、12.7mmに関する両鋼より線の引張試験の結果（5本の平均値）を図一3に、また1000時間の常温リラクセーション試験の結果（2本の平均値）を図一4に示す。図から推定できるように、いずれの試験結果も両者の間にはほとんど差がなく、塗装が鋼より線の機械的性質に変化を与えていないことが確認された。

6) 疲労強度特性

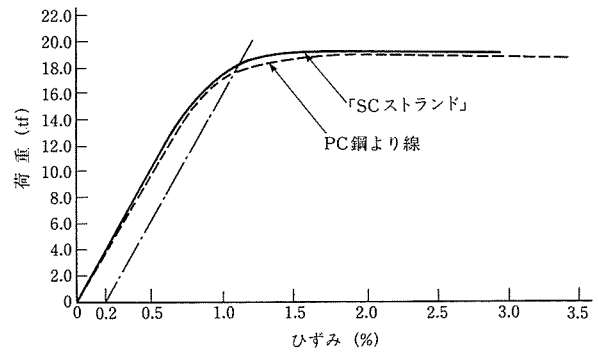


図一2.1 柔軟性測定法

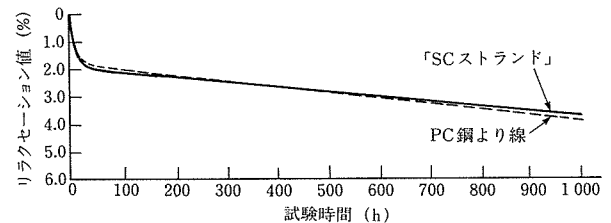
12.7mm について両鋼より線の疲労試験（各3本）を行った結果、いずれも試験前後の引張強度比が約0.99を示し、両者はほぼ同等の疲労強度特性を有していることが確認された。

疲労試験後にすべての鋼より線に対して引張試験を行っている。写真一2に見られるように、両者の破断状況には明らかな違いが観測できる。すなわち「SCストランド」は、より線を構成する各素線の破断位置がいずれも供試体の中央部付近に集中していることである。この傾向は（5）の引張試験でも同じであった。

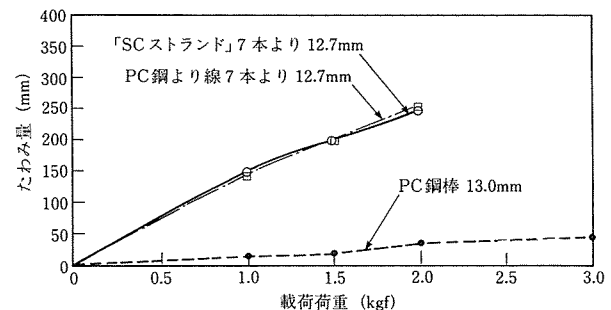
この現象から、「SCストランド」に固有な塗装時の撚り戻し・再撚り合わせ工程が、製品の機械的性質や疲労強度特性にほとんど変化を与えていないことが推定される。



図一3 引張試験結果(12.7mm)



図一4 リラクセーション試験結果(常温, 1000hrs)(12.7mm)



図一2.2 柔軟性測定結果(12.7mm)

7) コンクリートとの付着強度特性

「SCストランド」の付着強度特性は定着長の測定から推定することができる。

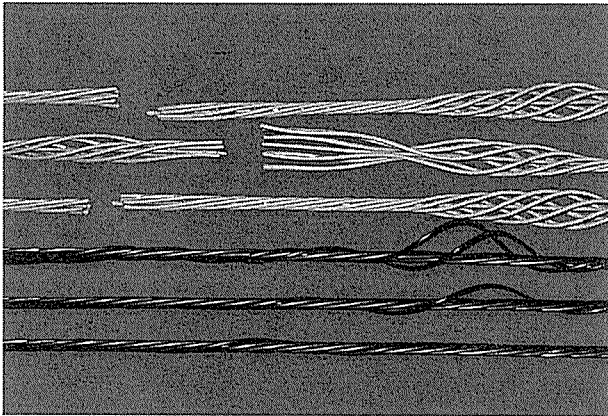


写真-2 引張破断部の比較
(上側「SCストランド」, 下側「PC鋼より線」)

一例として、図-5に付着条件の最も厳しい15.2mmに対する両者の試験結果を示す。

図から、定着長の長さは無塗装鋼より線の57cmに対し、「SCストランド」は67cmで約20%程度長くなっていることが分かる。これは長さあたりの付着強度が後者の方が若干低いことを示している。

しかし、「道路橋示方書」では設計定着長を65φ(15.2mmで99cm)と規定しており、その条件は十分に満足している。つまり、設計においては所定の付着強度特性を有する材料として適用できるということが確認された。

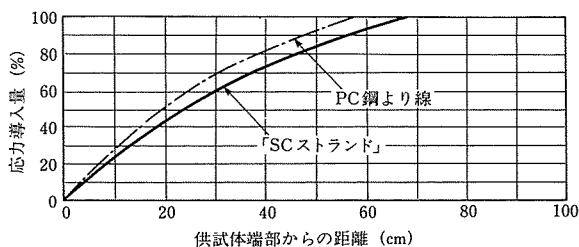


図-5 定着長試験結果(15.2mm)

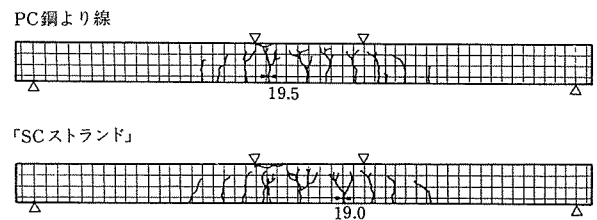
8) プレストレストコンクリートへの適用性

JIS規格のプレテン部材すなわちダブルTスラブおよび橋梁用ホロー桁の曲げ試験を塗装および無塗装鋼より線を適用した試験体について行った。試験体の計算荷重の算出は慣用計算(無塗装)で行っている。

試験結果から、ひびわれ荷重、破壊荷重は共に計算値に対し実測値が上回っていた。鋼より線の違いによる各試験体の比較では、ひびわれ・破壊荷重、たわみ、ひびわれ幅等に関しては、ほとんど差がないことが確認された。一例として、図-6にホロー桁の破壊時ひびわれ分布を示す。図からひびわれ状況にもほとんど差がないことが推定できる。

ポステン工法において通常行われているテンドンの

後挿入による被膜の損傷調査から、数回の挿入、抜き出し作業ではまったく損傷が生じないことが確認された。



【注】(1) →：ひびわれ幅測定位置
(2) 図中の数字は、ひびわれ発生荷重を示す。

図-6 曲げ破壊時ひびわれ図

9) 試験結果の総括

「SCストランド」に関して、防食被膜としての各種要件、原材料の性質等に及ぼす塗装の影響、PC部材への適用要件、運搬等のハンドリングなど多面的な特性について試験を通じて確認した。被膜の要件以外の特性調査は無塗装PC鋼より線との比較を基本においた。本試験の範囲から総括すると、およそ次のことがいえる。

- * 「SCストランド」の防食被膜は所期の特性を備えていることが確認できた。
- * 「SCストランド」をPC鋼材として使用する場合は、無塗装PC鋼より線と同じ条件で使用できることが確認できた。

10) エポキシ樹脂粉体塗料の特性

「SCストランド」で使用しているエポキシ樹脂粉体塗料の特性を確認する試験項目と試験結果を表-3に示す。

3.3 性能確保のための要件

「SCストランド」を実際に現場で使用する場合は、前述の性能確保のためにいくつかの要件⁹⁾が必要となる。たとえば、シースの選定、定着具等の防錆、運搬・荷姿、切断等の加工、配置時の被膜保護などであるが、

表-3 エポキシ樹脂粉体塗料試験結果

試験項目	試験方法	試験結果
光沢値	JIS K 5400.7.6	90以上
硬度	JIS K 5400.8.4.2	H~H ₂
基礎目密着性	1mm角基盤目 残存数/100 JIS K 5400.8.5.1	100/100
耐衝撃性	デュボン式(1/2"×500g) JIS K 5400.8.3.1	50cm合格
エリクセン試験	JIS Z 2247	8mm合格
耐水性	水道水浸漬(20°×3ヵ月)	異常なし
耐沸騰水性	沸騰水浸漬(98°×1時間)	異常なし
耐摩擦性	テーバー摩擦試験機(1kg×1000rpm.cs-17)	30g以下
耐酸性	10% H ₂ SO ₄ 20°×1ヵ月	異常なし
耐アルカリ性	5% NaOH 20°×1ヵ月	異常なし
耐溶剤性	キシロールラビング20往復	若干つや引け
耐湿性	JIS Z 0288 500時間	異常なし
耐食性	JIS K 5400.9.1 1000時間	±1mm以内

本稿からは割愛した。

4. 適用分野

現時点で考えられる「エポキシ樹脂塗装 PC 鋼より線」の適用分野をあげると、おおよそ次のようなものが考えられる。

1) 塩害環境下の PC 構造物への適用

塩害環境下の PC 構造物としては、栈橋、ポンツーン、PC 護岸矢板、消波・防波ケーソン等港湾構造物および海岸・海上橋などをあげることができる。凍結防止剤として塩化物を散布する寒冷地高架橋の床版などもこのグループに区分される。

これらの PC 構造物に塗装鋼より線を適用する場合は、冒頭に述べた「樹脂塗装鉄筋」と併用することが大切である。なお、ポステン工法で特に PC 鋼材の防食性を高めたい場合はポリエチレンシース¹⁰⁾を併用すれば効果的である。このポリエチレンシースは通常の PC 鋼材を塩害環境下の PC 構造物へ適用する場合を想定して開発されたものである。

2) グラウンドアンカーへの適用

近年、永久アンカーとしてグラウンドアンカーの利用はめざましいものがある。

アンカー工法は土中に PC 鋼材を埋設して使用することから、地盤工学会基準では「永久アンカーは（独立の）二重防食を原則とする」としており、施工性などから必然的に防食効果の高い塗装鋼より線へ移行することが考えられる。

3) PC 吊材・外ケーブル工法への適用

PC 斜張橋、エクストラドーズド橋などのステークケーブル、超高強度コンクリート PC 橋（800 kg/cm²以上）の部材厚縮小化の要請から導かれる外ケーブル工法、あるいは既設コンクリート橋の PC 補強工事における外ケーブル工法の適用など、PC 鋼材を主桁断面の外部に配置する構造物の設計は今後ますます増加するものと考えられる。従来は無塗装 PC 鋼材を使用していたため、これをポリエチレン管、ステンレス管などに収納し、グラウトまたは各種防食剤を封入する対策が取られてきた。これらのケースにおいても塗装鋼より線への移行が期待される。

4) 橋梁の横締めケーブルへの適用

橋梁の横締めのような、ほぼ水平なケーブルにグラウトを完全に充填することは存外難しい面を有している。PC 建協ではグラウトの信頼性を向上するため、グラウトに関する材料、施工、検査など全面的な見直しを行ってきた。このケースでも塗装鋼より線の適用は考慮に値する。

5) 鋼橋プレキャスト床版への適用

施工の合理化、品質の向上、急速施工、省力化などから注目されている鋼橋のプレキャスト床版工法は、直接輪荷重が繰返し作用する一方、床版間継目の箇所が極端に多い構造となっている。この場合、床版同士は耐ひびわれ、防水等の面から PC 接合が好ましく、使用 PC 鋼材は塗装鋼より線の選定が望ましい。

6) 再緊張、ケーブル交換を考慮した適用

たとえば PCPV、PCCV など重要構造物等は、原則的に再緊張、ケーブル交換などが可能な対策を考慮しておかなければならない。このような場合、アンボンド工法で対処することになるが、当然のことながら PC 鋼材の防食性能は最も重要な要件である。塗装鋼より線はこの分野でも選択肢のひとつと考えられる。

5. おわりに

より耐久性の高い PC 構造物を建造しなければならないという課題は、PC 構造物を計画、設計する発注者にとっても、施工する請負業者にとっても、等しく重要な問題として受止め、これを達成する努力をしていかなければならない。

しかし、耐久性にマイナスとなるようなリスクの発生確率を 0 にすることは、残念ながら不可能に近い。したがって、その確率を 0 に近づける努力を尽くすことは当然であるが、マイナスの影響力が最小限に止まるような方策を選択することも大切である。

たとえば、「高流動コンクリート」のさきがけとなった「ハイパーフォーモンスコンクリート」¹¹⁾の研究開発に、このような考え方を垣間見ることができるようになる。

この研究者達は、著書の序文で取組みの動機について次のように述べている。

「コンクリート構造物の早期劣化は原因が充填不良にあると強く認識している。…しかし、建設産業の労働環境やその将来を考えると、施工や締固め作業に多くを期待するのは不可能である…」として「締固め不要の自己充填コンクリートの開発に専心する…」と。

筆者はこの研究者らの言葉をつぎのように受け止めてみた。つまり、「これからの時代にあっては、入念な施工管理などの言葉にこめられている人間への過大な期待から、新材料の開発など別の方策を通してリスクの軽減を図り、構造物の耐久性向上に寄与する…」。

冒頭において、「エポキシ樹脂塗装 PC 鋼より線」は、PC 構造物の耐久性向上に寄与するひとつの切り札になるかもしれない、と述べた。この判断の是非は今後の時間が解決してくれるものと思われるが、「エポキシ樹脂塗装 PC 鋼より線」も、「ハイパーフォーモンスコンクリート」と同じような認識で評価されるようにな

れば…、と筆者らはひそかな期待を抱いているものである。

補記

「エポキシ樹脂塗装PC鋼より線」のひとつである「SCストランド」は、その生産技術、製品の信頼性等に対して高い評価を受け、平成6年度の「大河内記念生産賞」を受賞した。

参考文献

- 1) 道路橋の塩害対策指針(案)・同解説, 日本道路協会, 1984
- 2) 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), コンクリート・ライブラリー, 第58号, 土木学会, 1986
- 3) 海洋コンクリート構造物の防食指針(案), 改訂版, 日本コンクリート
- 工学協会, 1990
- 4) ケーブル構造設計指針・同解説, 付録3 被覆PC鋼より線の種類, P145, 日本建築学会, 1994
- 5) Hasui, T., et al.: Study on New Corrosion Protection Method for Prestressing Steel. "FIP '93 Symp." Proc. Vol. III, P1679, 1993
- 6) Hada, S., et al.: Epoxy Coated Strand. "FIP '93 Symp." Proc. Vol. III, P1685, 1993
- 7) Takeda, K. et al.: Development of New Corrosion Protection Prestressing Strand. "FIP '93 Symp." Proc. Vol. III, P1717, 1993
- 8) 小柳ほか:プレストレストコンクリートの耐久性およびプレストレス技術による補修と補強, 技術会議報告T8: 特集;'93 FIP京都シンポジウム, プレストレストコンクリート, Vol. 36, No.2, 1994
- 9) 民間開発建設技術の技術審査・証明事業認定過程に基づく土木系材料技術・技術審査証明 報告書(技審証 第0612号) エポキシ樹脂全塗装PC鋼より線「SCストランド」, 土木研究センター, 1995
- 10) 「ポリエチレン製シースの品質・設計・施工マニュアル(案)」, ポリエチレン製シース実用化試験報告書, PC建設業協会, 1995
- 11) 岡村ほか:ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993
【1996年11月15日受付】