

海洋暴露30年経過したコンクリート表面保護工の調査報告

国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 博(工) ○佐々木 徹
 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 博(工) 櫻庭 浩樹
 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 博(工) 西崎 到
 (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 博(工) 青山 敏幸

1. はじめに

コンクリート構造物の力学的特性および耐久性は、設計施工に際して重要な検討項目である。高度成長期以降において各地で塩害による鋼材腐食によってコンクリートの損傷が見られたことから、塩害が予想される道路橋の設計・施工に対する対策として、1984年(昭和59年)に「道路橋の塩害対策指針(案)・同解説」が発刊された。鋼材のかぶりを厚くすることや、密実なコンクリートの施工を基本対策として、コンクリート塗装や鉄筋塗装等が推奨されていた。しかし、当時としては耐久性に関する多くの知見が得られていなかったことから、長期的な耐久性に関する実証研究が求められた。

このような背景から、海上飛沫帯におけるコンクリート構造物の防食技術の確立を目的として、1984年から、海洋構造物の耐久性向上研究委員会の一環として、土木研究所とプレストレスト・コンクリート建設業協会ほかの共同研究¹⁾における、駿河海岸に設置されている海洋技術総合研究施設で長期暴露を実施している。検討項目は、(1)コンクリートのかぶりおよび配合の影響、(2)コンクリート中の鋼材の防食技術として、樹脂塗装鉄筋やPC鋼材の防塩処理材料の検討、(3)被覆系塗料・含浸系塗料および耐海塩コンクリートの検討などである。

本報告では、暴露30年を経過した試験体のうち、被覆系塗料および含浸系塗料の違いによる塩分浸透分布測定から得られた調査結果を報告する。

2. 調査概要

2.1 試験体

試験体は200mm×200mm×1200mmで、φ9.3のPC鋼より線を使用したプレテンション方式のPC構造あるいはD13の主筋を使用したRC構造である。コンクリート配合は、早強ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は40%とした。帯鉄筋はφ6で純かぶりが25mmである。

被覆系、含浸系塗料の種類や塗布量を表-1、2に示す。昭和58年5-6月に製作した鉄筋コンクリート試験体に、これらの塗料を塗布し、昭和59年6月に設置した。

表-1 被覆系塗料と塗布量 単位:g/m²

	プライマ	パテ	中塗り	上塗り
A種エポキシ系	エポキシ樹脂 100	エポキシ樹脂 必要量	エポキシ樹脂 260	ポリウレタン樹脂 120
B種柔軟エポキシ系	エポキシ樹脂 100	エポキシ樹脂 100	柔軟型エポキシ樹脂 230	柔軟型ポリウレタン樹脂 125
B種柔軟ウレタン系	エポキシ樹脂 100	エポキシ樹脂 300	柔軟型ポリウレタン樹脂 260	柔軟型ポリウレタン樹脂 120

表-2 含浸系塗料と塗布量 単位:g/m²

塗装系統	第1層	第2層	第3層	第4層	第5層
シリコン系1	変性アクリルシリコン樹脂, 90	←同左 90	←同左 90	←同左 90	←同左 90
アクリル系1	アクリル樹脂ステアリン酸金属塩, 240	←同左 240	特殊アクリル樹脂, 270	—	—
シリコン系2	シリコン化合物, 150	←同左 150	湿気硬化型ウレタン樹脂, 150	←同左 150	—
有機無機複合系	有機無機複合プライマ, 140	←同左 140	有機無機複合塗料, 200	—	—
アクリル系2	アクリルモノマプライマ, 100	←同左 100	フッ素化アクリル樹脂, 100	—	—
ビニルエステル系	脂肪酸ステロール樹脂, 230	←同左 160	←同左 90	アクリル樹脂, 160	—
ポリエステル系	変性ポリエステル共重合樹脂, 40	←同左 40	特殊変性ポリエステル共重合樹脂, 80	←同左 80	—

本調査で使用した含浸材はいずれも昭和50年代の含浸材であり、現在普及拡大しつつあるシラン系やけい酸塩系といった撥水性やカルシウムとの反応性をもつ材料と同一とは限らない。たとえば、30年暴露後の表面状態の例として写真-1に示したように塗膜を形成しているものもあり、表面被覆工のプライマに類似した、浸透性を有する樹脂材料を活用した含浸系塗料も含まれている。

なお、表面保護材料は、近年では有機系被覆材や表面含浸材と用語が定義されているが、とくに含浸系材料の概念が同じとは限らないことから、本報では調査開始当時の呼称をもとに「含浸系塗装(塗料)」「被覆系塗装(塗料)」と表記する。



写真-1 含浸系塗装外観の例

2.2 暴露状況と調査方法

試験体は、静岡県駿河海岸の沖合250mに位置する写真-2に示す海洋技術総合研究施設で暴露を行った。海面から約9mの高さに位置するデッキ上に設置し、その状況を写真-3に示す。

当該試験施設は、塩害対策区分Sの環境で、試験位置(海面高)での年平均飛来塩分観測値²⁾は1mdd程度で、ISOの環境腐食性の分類でもカテゴリC4(High)に認定されている。

外観調査した試験体からφ50mmのコアを採取し、中性化深さを測定し、塩化物イオンの濃度分布を調査した。表面から1cm間隔でスライスした4層の試料に対して、JCI SC4の方法により、塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法で定量した。外観と中性化深さについては、いずれの試験体も健全な状態であったので、本報では塩分分布について述べる。

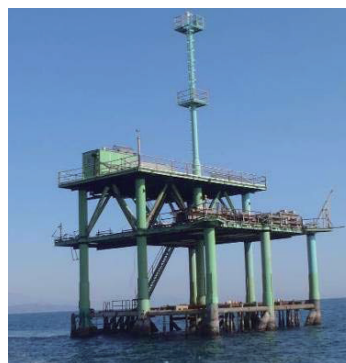


写真-2 暴露試験施設



写真-3 暴露試験状況

3. 調査結果

3.1 被覆系塗装試験体

(1) 塩分浸透状況の測定結果

コンクリート表面からの距離と塩化物イオン濃度の関係を図-1～3に示す。被覆系塗装試験体の塩分浸透は総じて少ないが、B種柔軟ウレタンを除き30年後の測定結果が特異な変化を示しているほか、いずれも内部のほうが塩分量が多くなっている。

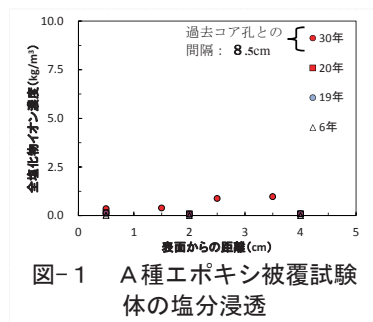


図-1 A種エポキシ被覆試験体の塩分浸透

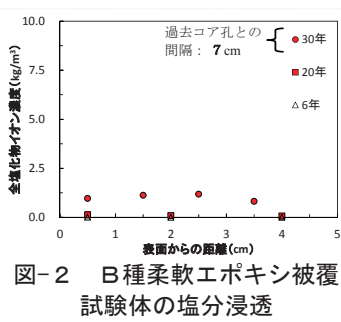


図-2 B種柔軟エポキシ被覆試験体の塩分浸透

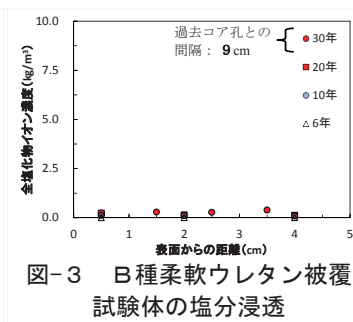


図-3 B種柔軟ウレタン被覆試験体の塩分浸透

る。これは、図-4に示すような20年目までに採取したコア孔からの横方向の塩分浸透であると考えており、その浸透量は図-1～3中に示すコア間隔との関連がみられ、隣接コア距離が短いB種柔軟エポキシの測定値が最も大きくなっている。過去採取コアの影響が少ない被覆箇所にて再調査が必要であるものの、20年目までの結果や既往の知見等から、被覆系塗装の遮塩性は表面(被覆層裏面)付近でも 0.3kg/m^3 以下(横方向浸透の影響が少ないウレタン被覆程度)に抑えられていると考えるのが妥当である。

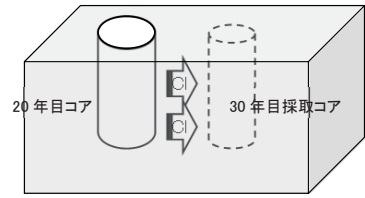


図-4 コア孔からの横方向塩分拡散

(2) 被覆系塗装の遮塩効果

被覆系塗装試験体の塩分浸透測定結果を、無塗装試験体とあわせて図-5に示す。図中には、測定結果をもとにFickの拡散方程式から算出した塩化物イオンの見掛けの拡散係数を用いた場合の近似曲線を付記する。鋼材腐食限界塩分濃度 C_{lim} は、コンクリート標準示方書の式をもとにセメント種とW/Cから 1.72kg/m^3 とした。

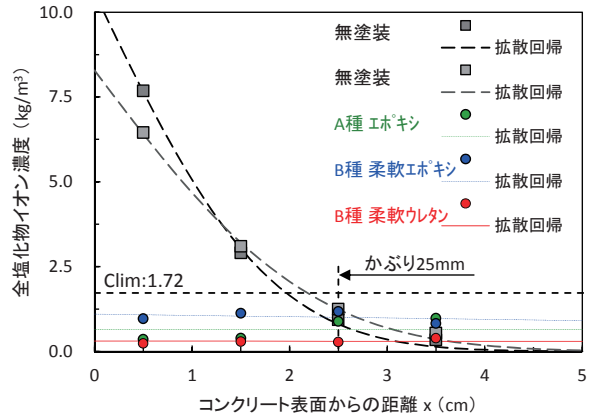


図-5 30年暴露後の被覆系塗装試験体の塩分分布

無塗装試験体は、かぶりコンクリートの厚さ(本調査では25mm)と品質で耐久性を確保しているが、海面上約9mでの30年間後の塩分浸透状況からすると、さらに10年経過した暴露40年頃には鉄筋位置が発錆限界を超えるものと考えられる。

これに対し、被覆試験体は30年暴露後も十分な遮塩性を有することがわかる。コア孔からの横方向塩分拡散が疑われるものの、言い換えると、コア孔程度の塗膜欠陥や断面欠損が仮にあっても、鉄筋が発錆限界に到るまでには相当な年数を要するものと解釈することもできる。

3.2 含浸系塗装試験体

(1) 塩分浸透状況の測定結果

30年間にわたり海面上約9mに暴露された含浸系塗装試験体の調査結果を、コンクリート表面からの距離と塩化物イオン濃度の関係として図-6に示す。測定結果をもとにFickの拡散方程式から算出した塩化物イオンの見掛けの拡散係数を付記する。なお、含浸試験体については過去に塩分浸透調査を行っておらず、コア跡等による塩分への影響はない。

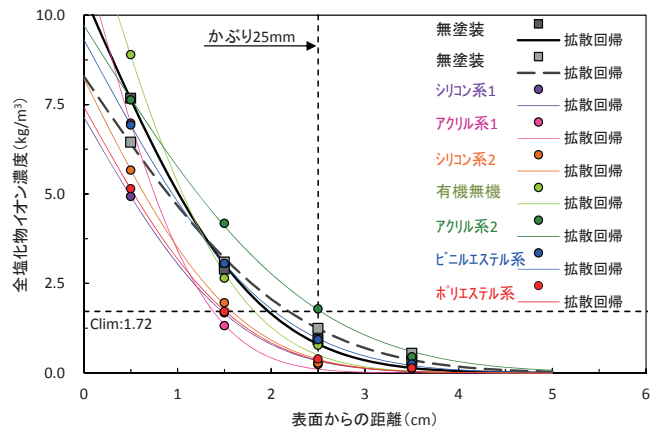


図-6 30年暴露後の含浸系塗装試験体の塩分分布

含浸系塗料の種類にかかわらず表面塩分量は多く、被覆系塗装とは異なりコンクリート表面付近に

は多くの塩分が浸入していることがわかる。しかしながら、鉄筋位置(25mm)での全塩化物イオン濃度には塗料によりかなりの相違があり、かぶりコンクリート中の拡散速度には差があることがわかる。このように、無塗装と同程度あるいは劣る材料もあるものの、塩化物イオンの拡散が抑制されている試験体があることがわかった。そこで、塩分浸透の予測を行った。

(2) 拡散解析による塩害抑制効果

塩化物イオンの見掛けの拡散係数と表面塩分量から、鉄筋位置における塩化物イオン濃度の経年変化を試験体ごとに算定した結果を図-7に示す。この図から、当該コンクリートの鉄筋位置における、鋼材腐食発生の限界濃度 C_{lim} に到る年数を推定することができる。本検討は30年暴露の測定結果から外

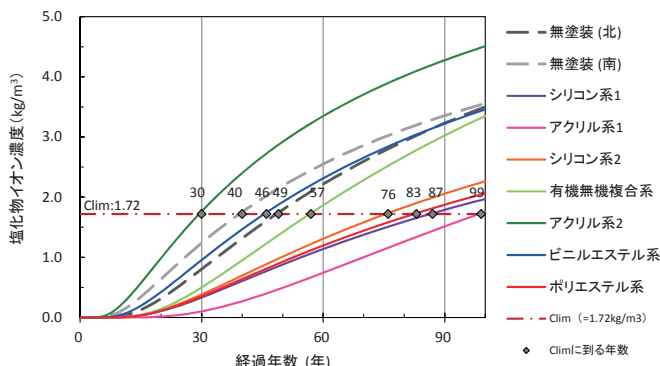


図-7 30年後結果から推定される鉄筋位置への塩分拡散

挿して求めたものであり、塗料の劣化分解、含浸膜(層)の等価かぶり等に仮定はあるものの、一部の含浸材(シリコン系、アクリル系1、ポリエステル系)では、塩分浸透の抑制効果が期待できることがわかった。本試験体ではかぶり厚は25mmであるが、塩害対策としてのかぶり厚の設計やひび割れ等の欠陥抑制と併用すれば、含浸系塗装も有効な塩害対策になり得ることが示唆される。

4. まとめ

本報告では、以下の知見が得られた。

- (1) 被覆系塗装試験体は、過去のコア処理の不具合があったものの塩分浸透量は非常に少ない。
- (2) 含浸系塗装試験体のなかには塩分浸透の抑制が認められるものがあり、適切に材料を選定すれば塩害対策としての効果が期待できる。
- (3) 被覆系塗装は被覆膜裏面での塩化物の浸透をほぼ抑制しているのに対し、含浸系塗装は拡散速度を低下させるものの塩分の浸入自体を抑止する工法ではない。

謝辞 本暴露試験を行っている海洋技術総合研究施設を長期間にわたって維持管理をしていただきありがとうございます国土交通省中部地方整備局静岡河川事務所の関係各位に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木研究所, プレストレスト・コンクリート建設業協会: 海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書—飛沫部におけるコンクリート構造物の防食技術に関する研究 第2分科会—, No. 348, 平成18年7月.
- 2) 土木研究所, 土木研究センター: 海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書—海上大気中の長期防錆塗装技術に関する研究 第3分科会塗料部会—, No. 143, 平成7年12月.