九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

コンクリート構造物の耐久性向上のための表面被覆の役割

濱田，秀則
Kyushu University

https://hdl.handle.net/2324/4479607

出版情報：Journal of The Surface Finishing Society of Japan. 72 (1), pp.9-11, 2021-01. The Surface Finishing Society of Japan
バージョン：
権利関係：(c) 一般社団法人 表面技術協会

KYUSHU UNIVERSITY

小特集：インフラ設備の防食と表面処理技術

コンクリート構造物の耐久性向上のための表面被覆の役割

濵　田　秀　則[a]

[a] 九州大学 大学院工学研究院（〒 819-0395　福岡県福岡市西区元岡 744）

Role of Surface Coating on Concrete Structures' Service Life Extension

Hidenori HAMADA [a]

[a] Faculty of Engineering, Kyushu University (744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka 819-0395)

Keywords : Concrete, Surface Coating, Deterioration, Durability, Design of Structure

1．はじめに

コンクリート構造物の早期劣化が社会問題となって久しい。1980 年代に入った頃からコンクリート構造物の早期劣化が社会的に問題となったと筆者は記憶している。アルカリ骨材反応，塩害，中性化，化学的侵食，凍害などによるコンクリートの劣化が全国各地で報告されるようになった。この問題に対して，コンクリート工学者が精力的に研究を開始し，官民学を問わず，耐久性を向上させるための技術開発が進められ現在も続いている。

コンクリート工学において，新設構造物の長寿命化のための方策として耐久性設計の検討が進められ，1999 年発刊のコンクリート標準示方書【施工編】[1)]に初めて耐久性設計の考え方が示されたことは画期的なことであった。一方，既設構造物において劣化が進行した場合に適用される補修・補強技術の開発も活発に行われた。コンクリートの表面被覆もその補修技術の一つである。

鋼橋などの鋼構造物においては，表面塗装（表面被覆）は錆（さび）防止のために必ず実施しなくてはならないが，コンクリートに表面被覆を施すことはそれまでにほぼなされていなかったこともあり，一部の技術者が強い拒絶反応を示したことも事実である。この背景には，表面被覆を実施しているにもかかわらず再劣化している事例が今なお多いこともある。再劣化が生じている構造物においては，被覆層の厚さが十分ではないケースがほとんどであり，塗料を一度（一層）塗布して安心している場合が多いようである。一方，技術者に限らず，コンクリートそれ自身に美しさを感じる人も多く，できればコンクリートを被覆せずにそのままの状態で使いたいと思う人も多いのもまた事実である。このことも十分に理解できることである。

それでも，過酷な劣化環境下においては，表面被覆はコンクリート構造物の耐久性向上のための大切な選択肢である。しかし，今なお，コンクリート構造物の耐久性の向上を目的とした表面被覆材の適用の基本的な考え方は確立されていない。そこで，本稿では，まず，表面被覆の効果およびその持続性に関するこれまでの知見をいくつか紹介する。次に，いくつかの設計基準における表面被覆の位置づけを再確認する。最後に表面被覆の位置づけについて筆者なりの考察を行うこととする。

2．表面被覆材料の長期耐久性を検証した事例

2．1　港湾空港技術研究所における研究事例 [2)~7)]

1980 年代後半から実験的研究が開始されている。その背景および目的は，塩害による劣化を受けやすい環境にある港湾コンクリート構造物の耐久性向上を主目的としているものである。一連の実験シリーズにおいて沖縄県の臨港道路橋梁を対象として開始した実験は非常に現実的・具体的である。腐食環境として厳しくない一般環境下においては，PC（プレストレストコンクリート）橋のかぶり厚は 30 mm が標準である。かぶりがあまりに大きくなると断面が大きくなり，構造的に合理的な設計とはならないためである。港湾の臨港道路橋梁がかぶり厚 30 mm で設計・施工されていたが，環境条件は海洋環境であり，施工後にかぶり厚不足を補うための対策として表面被覆の適用が検討されている。その一環として，沖縄県の港湾環境において暴露試験が実施されている。

港湾空港技術研究所内の海洋環境暴露施設における暴露試験，同研究所内で実施された高温海水の浸漬と自然乾燥の乾湿繰り返し劣化促進試験，および沖縄の実橋梁下における暴露試験が実施され，実環境暴露の 30 年経過時の評価試験結果が報告されている。

試験に用いられている表面被覆システムは，1）アクリル系ポリマーセメント＋シリコンエマルジョン，2）柔軟型厚膜エポキシ樹脂＋柔軟型ポリウレタン樹脂，3）アクリルゴム＋アクリルウレタン樹脂，4）クロロプレンゴム＋クロロスルフォン化ポリエチレン，5）ガラスフレーク添加ビニールエステル樹脂＋アクリルウレタン樹脂，の 5 系統である。その結果は一言で言えば大変よい結果が得られている。上塗り部においては部分的に軽微な劣化が散見されるものの塗膜は健全であり，塩化物イオンの侵入はほぼ完全に遮断されていることが確認されている。

2．2　R. N. Swamy・谷川による研究事例[8)~10)]

R. N. Swamy および谷川による一連の研究は2つの書籍にまとめられている。一つは英文であり，一つは和文である。本文の筆者(濵田)もこの一連の研究に部分的に参加しているため，この両書籍においては共同研究者として准著者の位置づけとなっている。Swamy・谷川らによる研究成果は多くの文献に発表されている。

コンクリートの表面被覆材に対して要求される性能として，ひび割れ追従性，弾性，引張性能，付着強さ，耐疲労性等の力学的性能，さらには，水，空気，塩化物イオンおよび水蒸気などの劣化要因となる物質の浸透阻止性能を挙げることができる。谷川はアクリルゴムを主材とする被覆膜を提案し，その性能を様々な観点から評価している。アクリルゴムを主体とした被覆膜の構成として，プライマー(下塗り材)，主材(ベースコート)，トップコート(上塗り材)の3層構成が適切であるとし，全体の膜厚は1000 μmとしている。アクリルゴムの樹脂量は57%(質量)，残りの43%は無機系フィラーおよび顔料であり，アクリルゴムの主成分は，2-エチルヘキシルアクリレートである。

特筆すべきは，谷川が大城武博士(現琉球大学名誉教授)との共同研究として，沖縄県の海岸に大型の試験建物を設置し表面被覆の塩害防止効果を長期間(暴露期間8年まで)モニタリングするという研究を実施していることである。この研究により，コンクリート中への塩化物イオンの浸透性状，コンクリート内部の鉄筋の腐食性状が正確にモニタリングされ，実環境下における表面被覆の効果が明らかになっている。

実構造物でも本州四国連絡橋をはじめ多くの適用事例があり，供用10年までの追跡調査では表面被覆材の劣化の兆候はなく，健全な状態で供用されていることが確認されている。

2．3　二井谷・鬼頭・八木による調査事例[11)]

PCメーカーの一つであるオリエンタル白石㈱(旧オリエンタルコンクリート，その後オリエンタル建設)が所有する表面被覆材について，実橋梁に適用された被覆膜の25年経過時の調査結果が公表されている。なお，筆者(濵田)もこの材料を試験した経験を有しており[3),4)]，当時の試験データでは良好な結果を示していたと記憶している。

被覆膜の構成は，コンクリート表面の不陸整正材(ポリマーセメントモルタル)，プライマー(エポキシ樹脂)，中塗材・主材(クロロプレンゴム)，上塗材(クロロスルフォン化ポリエチレン)であり，3層構成となっている。なお，中塗材・主材の中に補強布(ビニロン繊維)が埋め込まれているのがこの被覆膜の特徴である。被覆膜厚が1 mm以上と厚く，複数層により構成された被覆膜によりコンクリートへの劣化因子の浸入をほぼ完全に抑制している。

塩害環境に位置する新潟県の道路橋に適用された被覆膜を一部切り出し，その性能試験を行った結果，塗膜の付着強さ，ひび割れ追従性および遮塩性は初期の性能を維持しており，十分な耐久性を有することが確認されている。

3．設計基準類における表面被覆の位置づけ

3．1　土木学会コンクリート標準示方書[12)]

コンクリート標準示方書における塩害を対象とした耐久性照査の基本的な考え方は，“耐久設計で設定する鋼材腐食発生限界濃度”と“鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値”を比較して，後者が前者より小さいことを確認(照査)するというものである。この照査の考え方を基本としながらも，以下のような記述がある。『照査に合格することが困難な場合には，耐食性が高い補強材や防錆処置を施した補強材の使用，鋼材腐食を抑制するためのコンクリート表面被覆，あるいは腐食の発生を防止するための電気化学的手法を用いることを原則とする。その場合には，維持管理計画を考慮した上で，それらの効果を適切方法により評価しなければならない。』というものである。

この記述にあるように，コンクリート自体の性能の向上，および細部設計でまずは対策を立て，それでも不足している耐久性を表面保護で補う，というのが基本的な考え方である。

なお，土木学会では，表面保護工の一つとして表面被覆が位置付けられ，表面保護工法を，表面被覆工法，表面含浸工法，断面修復工法，に分類している。さらに，表面被覆工法を，有機系表面被覆工法と無機系表面被覆工法に分類している[13)]。

3．2　道路橋指針(道路橋示方書・同解説)[14)]

この指針では，コンクリートの内部の鋼材の腐食を抑制し，構造物の耐久性を向上させる方法として，最小のかぶり厚を規定している。耐久性に影響を及ぼす環境として全国を3つに区分し，さらに部材・部位を3区分として，合計9条件に対して，25 mm，30 mm，35 mm，50 mm，70 mmの最小かぶり厚を規定している。規定のかぶり厚としての最大値が70 mmである点は，後述する港湾基準と一致している。ただし，最も環境条件が厳しい場合，かぶり厚の基準のみでは十分に耐久性の確保ができないと想定される場合は，塗装鉄筋またはコンクリート塗装等の追加の対策を取ることが規定されている。しかし，これらの追加の対策を適用する場合でも，かぶり厚の最小値の規定は遵守することが求められている。これは，かなり安全側の対策と考えられるが，塗装鉄筋およびコンクリートの表面被覆に対する信頼性がまだ十分ではないことがその背景にあるものと思われる。

3．3　港湾基準(港湾の施設の技術上の基準・同解説)[15)]

港湾基準におけるコンクリートの耐久性向上対策としては，まずコンクリートの配合において対応することとし，最大の水セメント比が定められている。無筋コンクリートに対して60%および65%，鉄筋コンクリートに対して50%，55%，60%が構造物の種類ごとに示されている。ただし，塩害による劣化が最も著しい桟橋上部コンクリートに対しては，この水セメント比の規定は適用されていない。さらに，かぶり厚の最小値についても定められており，特に厳しい腐食性環境，すなわち，海水に直接接する部分，海水で洗われる部分，厳しい潮風を受ける部分では70 mm，上記以外の一般の環境では50 mmと規定されている。

桟橋上部コンクリートのような塩害を受けることがほぼ確実に想定される場合，性能照査型の耐久性設計の方法が示されている。この考え方は，土木学会のコンクリート標準示方書に準拠したものであり，設計供用期間内において，鉄筋位置における塩化物イオン濃度の設計用値が鉄筋腐食発生限界濃度を超えないことを照査するというものである。

さらに，港湾構造物が極めて厳しい塩害劣化環境に置かれることも多いことを考慮して，以下のような記述もある。『塩害による性能低下が生じることが予測される構造部材については，部材に設定された維持管理レベルを考慮し，設計供用期間中に発生する鉄筋腐食を抑制・防止するための方策を講じるとよい。コンクリート構造部材の鉄筋腐食を抑制・防止するための方策のうち，これまでに港湾構造物に適用された事例がある代表的なものとして，エポキシ樹脂塗装鉄筋，ステンレス鉄筋，連続繊維補強材等の高耐久補強材を使用する方策，表面被覆やセメント硬化体組織の緻密化等により外部からの劣化因子（塩化物イオン等）の浸透を抑制する方策，及び電気防食により鋼材腐食を抑制する方策等がある。』

このように耐久性照査と追加的な方策が併記されている。しかし，表面被覆を含む追加的な方策が適用される場合の照査結果の取り扱いについては，明確な記述はなく，照査の結果で耐久性が不十分と判断される部分を補うというのが表面被覆に期待されている効果と考えられる。

4．表面被覆の取り扱いに関する一提案

3. において示した土木学会コンクリート標準示方書，道路橋指針，港湾基準における表面被覆の取り扱いは，決して合理的とは言えないように思われる。性能照査で不足している耐久性を補う材料として位置づけられているため，過度に安全側の思想と言える。この設計思想に従うと，かぶり厚を最大限に確保してさらに表面被覆を施すという方策を取ることになる。耐久性を確保する観点からは十分な対策となっているが，逆に表面被覆の効果を過小評価していることになり，表面被覆に対する信頼が十分には得られていないことを示すものであると言える。

性能設計の体系において「構造設計＋耐久性設計」がほぼ一般的に行なわれるようになってきている。このことは，1999 年にコンクリート標準示方書に耐久性能照査の考えが導入されたことに端を発するコンクリート工学の大きな進歩である。しかし，この体系の中では，表面被覆は二重防護の考え方で用いられることになる。表面被覆の耐久性が 30 年まで確認されていることを考えると，表面被覆自体の材料選定，被覆層の設計を正しく行い，その効果を十分に発揮させれば，構造設計から導かれる構造細目（かぶり厚を含む）を遵守した構造物に表面被覆を適用すれば十分であり，かぶり厚を必要以上に大きくする必要はないように思われる。

誤解を招かないために繰り返すが，耐久性設計は優れた知恵であり，耐久性設計で適切に対応できる場合は最適解を与える。しかし，さらに補足的な対策として表面被覆を適用する場合は，「構造設計＋（正しい）表面被覆」で十分であり，これが，構造体としての最適解と考えられるのである。

5．おわりに

コンクリート構造物の耐久性向上が社会問題となって以来，半世紀以上が経過しようとしている。この間のコンクリート工学の進歩により，技術的にはほぼ解決に近づいているのではないかと考えている。しかし，社会経済的に最適な技術が何か，構造物ごとに答えを出すことが求められており，設計供用期間（設計耐用期間），設計残存寿命に対しての最適解を示すことが求められている。

筆者がかかわった一つの事例として，発電所の海水取水施設のコンクリート構造物の塩害劣化事例がある。コンクリート水路のはり部材，床版部材の塩害による劣化が著しく，予防保全として表面被覆が有力な対策の一つとなるとの結論を得た。これまでの多くの研究成果を踏まえて出した結論である[16]。

現時点では，港湾空港技術研究所が発表した 30 年試験結果が最も長期の成果と思われる。さらに長期の成果が待たれるところである。表面被覆に対して期待できる耐用期間が環境条件ごとに明らかになれば，表面被覆に対する信頼性が得られることになり，ひいてはコンクリート構造物の設計が大きく合理化できる，ことを記して本文の結語とする。

（Received October 14, 2020）

文　献

1）平成11年版コンクリート標準示方書［施工編］―耐久性照査型―（土木学会, 平成12年）.

2）大即信明, 濵田秀則, 原茂雅光；各種補修を施したコンクリート梁の促進海水養生試験, 港湾技研資料, No.631（1988）.

3）濵田秀則, 福手　勤, 阿部正美, 山本邦夫；コンクリート表面被覆の塩害防止効果ならびにその評価法について，港湾技研資料, No.706（1991）.

4）濵田秀則, 福手　勤, 阿部正美；塩害を受けた鉄筋コンクリート部材の補修効果に関する実験, 港湾技研資料, No.725（1992）.

5）山路　徹, 小牟禮建一, 濵田秀則；塩害環境下に15年間暴露されたコンクリートの耐久性および表面被覆材による塩害防止効果, 港湾空港技術研究所報告, **43**, (2), 73（2004）.

6）山路　徹, 富山　潤, 金城信之；海上大気中に30年間暴露されたコンクリートにおける表面被覆材の塩害防止効果，コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1,（2018）.

7）山路　徹, 金城信之, 富山　潤；那覇港臨港道路橋における表面被覆材およびエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたコンクリートの長期暴露試験, 港湾空港技術研究所資料, No.1362（2019）.

8）R. N. Swamy, S. Tanikawa,（H. Hamada, J.-C. Laiw, T. Oshiro）; Surface Coating for Sustainable Protection and Rehabilitation of Concrete Structures（Kohbunsha, 2012）.

9）R. N. Swamy, 谷川　伸,（濵田秀則, Jaw-Chang Laiw, 大城　武）; 表面被覆材によるコンクリート構造物の長寿命化（工文社, 2015）.

10）R. N. Swamy, 大城　武, 濵田秀則, 谷川　伸；塩分雰囲気下の過酷環境下におけるコンクリート構造物の保護　－耐久的な構造物建設の鍵―, コンクリート工学, **38**, (3), 24（2000）.

11）二井谷教治, 鬼頭　剛, 八木裕明；25年間供用されたクロロプレンゴム系表面被覆工法の塗膜の耐久性，土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, p.49（2011）.

12）2017年制定コンクリート標準示方書【設計編】（土木学会，平成30年）.

13）コンクリートライブラリー 119，表面保護工設計施工指針（案）（土木学会, 平成17年）.

14）道路橋示方書・同解説，Ⅰ共通編，Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編（日本道路協会, 平成29年）.

15）港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会, 平成30年）.

16）山田裕之, 春口雅寛；火力発電取水ピットにおける塩害劣化の予防保全手法の提案, 電力土木, No.404（2019）.