

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 題目(和文)            | 一般環境下にある表面処理工を適用した鉄筋コンクリート床版の鉄筋腐食抑制効果に関する研究                                                                                                                                                     |
| Title(English)    |                                                                                                                                                                                                 |
| 著者(和文)            | 並松沙樹                                                                                                                                                                                            |
| Author(English)   | Saki NAMIMATSU                                                                                                                                                                                  |
| 出典(和文)            | 学位:博士(工学),<br>学位授与機関:東京工業大学,<br>報告番号:甲第12219号,<br>授与年月日:2022年9月22日,<br>学位の種別:課程博士,<br>審査員:岩波 光保,廣瀬 壮一,佐々木 栄一,竹村 次朗,千々和 伸浩,伊藤 裕一                                                                 |
| Citation(English) | Degree:Doctor (Engineering),<br>Conferring organization: Tokyo Institute of Technology,<br>Report number:甲第12219号,<br>Conferred date:2022/9/22,<br>Degree Type:Course doctor,<br>Examiner:,,,,, |
| 学位種別(和文)          | 博士論文                                                                                                                                                                                            |
| Category(English) | Doctoral Thesis                                                                                                                                                                                 |
| 種別(和文)            | 要約                                                                                                                                                                                              |
| Type(English)     | Outline                                                                                                                                                                                         |

## 論文要約

我が国では、高度経済成長期に鉄道、道路、港湾、空港等の各種交通インフラの整備を集中的に行ったことから、建設後50年以上経過した構造物は増加の一途を辿っている。鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食に関する研究の多くは、厳しい腐食環境下を対象としているが、構造物の大多数を占める一般環境下に存在する構造物は、維持管理の視点ではこれまであまり注目されていなかった。しかし、一般環境下の構造物も今後数十年の間にゆっくりと腐食が進行し、加速期や劣化期を迎えることが考えられる。したがって、長寿命化を念頭に置いた場合、建設から50年以上経過した一般環境下に存在する構造物の条件を考慮した長期耐久性に関する知見も必要となる。さらに、一般環境下の構造物は建設から数十年経過した後に予防保全として表面処理工法を適用しているものもあり、建設時と表面条件が異なることで鉄筋の腐食環境が変化していることが想定される。しかし、表面処理工適用後の鉄筋腐食抑制効果について、外部から内部への劣化因子の浸入抑制に関する研究は多くなされているが、既にコンクリート中に塩化物イオンを含む場合や中性化が進行している既設構造物へ表面処理工の適用を想定した条件、床版構造のように上面から水が浸入しやすい条件を対象とした研究は少ない。

そこで、本論文では、劣化が進行した既設鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版とする。）に表面処理工法を適用した場合の鉄筋腐食抑制効果について実験的に把握し、腐食発生からひび割れ進展、かぶりコンクリートの剥離剥落という劣化進行を考慮した表面処理工の選定フローを提案することを目的とした。

本論文は全8章から構成されており、その内容は次の通りである。

第1章では、本研究の背景、目的、構成を述べている。

第2章では、既往の研究について整理した。

第3章では、高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート床版の現状について、建設時の特徴に着目し、長期供用後の劣化状況に及ぼす影響を工事誌と実構造物から採取した試料を用いた分析により明らかにした。その結果、高度経済成長期は設計や施工に関する事項が変遷する時期であり、プロジェクト毎にコンクリートの品質が大きく異なることがその後の経年劣化に影響することを確認した。また、外観調査で目立った損傷がない長期供用構造物であっても鉄筋はつり調査では、一部で鉄筋腐食を確認した。一般環境下の劣化速度が遅い構造物も経年劣化により腐食が進行しており、今後、加速期や劣化期を迎えることからこれらの構造物を対象とした維持管理のビジョンを考える必要がある。

第4章では、背面から水が供給される既設RC床版への表面処理工法の適用が鉄筋腐食環境に及ぼす影響を把握することを目的とし、各種条件を想定したモルタル試験体を用いて電気化学モニタリングおよびモルタル中の水分や塩化物イオン量を測定し、鉄筋腐食抑制効果の検証を行った。下記に得られた知見を示す。

- (1) 中性化なしのケースでは、環境条件および表面被覆工の有無に関わらず腐食抑制効果が確認できた。しかし、湿潤条件では無塗装のケースよりも表面被覆工のケースの自然電位が低いことから、このような条件では表面被覆工を適用しない方が高い腐食抑制効果を得られる可能性が考えられる。また、コンクリート抵抗が大きくなるにつれて、自然電位が貴化することから、鉄筋付近を乾燥状態に保ち、腐食回路の形成を抑制することで腐食抑制効果を得られる可能性が考えられる。
- (2) 中性化なしのケースでは、環境条件に依らず表面処理工法の違いによる腐食抑制効果に大きな差は見られず、費用や工期、耐久性の維持を期待する期間、適用後の維持管理性を考慮した表面処理工の選択が可能と考えた。
- (3) 中性化ありのケースでは、表面処理工の種類の違いにより腐食抑制効果が異なることを確認した。湿潤条件の場合、表面被覆工のケースでは十分な腐食抑制効果を確認できなかったため、含浸材を適用することが望ましい。乾湿条件の場合、表面被覆工のケースでは十分な腐食抑制効果を確認できず、シラン系含浸材やけい酸塩系含浸材のケースでは自然電位による評価では腐食抑制効果は不明であった。ただし、シラン系含浸材のケースでは腐食電流密度が小さいことから撥水層は形成されており、自然電位が卑化した理由として、撥水効果によりカソード反応に必要な水分が減少し、腐食反応が抑制された影響を考えた。一方、中性化領域におけるけい酸塩系含浸材の改質効果については浸透深さと水酸化カルシウム量に依存するため、環境条件により改質効果の有無が異なっていた可能性が高く、確実に腐食抑制効果を期待する場合には用いないことが望ましい。

第5章では、既往の研究で指摘されている劣化した既設構造物へけい酸塩系含浸材を適用した際の改質効果の有無、また、シラン系含浸材の長期間適用時の撥水層付近への塩化物イオンの停滞現象に関して第4章の実験結果を用いて考察を行った。下記に得られた知見を示す。

- (1) けい酸塩系含浸材を適用したケースでは、中性化ありの湿潤条件では改質層は形成されなかった。一方、中性化ありの乾湿条件では改質層が形成した傾向が見られた。しかし、改質層が形成されない方が表面からの乾燥により、腐食回路の形成を抑制できることから、高い腐食抑制効果を有していることが確認できた。また、改質層の形成有無に関わらず含浸材が浸透することでアルカリ性の付与による鉄筋の腐食環境の改善効果が得られることを確認した。
- (2) シラン系含浸材を適用したケースでは、撥水層付近への塩化物イオンの停滞現象は見られず、促進期間が長くなっても鉄筋付近の塩化物イオン量が増大する傾向は確認できなかった。
- (3) けい酸塩系含浸材は適用する部位の中性化進行範囲や含水率、使用する含浸材製品により改質効果が異なる点が既設構造物へ適用する際の課題である。一方、シラン系含浸材は中性化の有無に関わらず撥水層が形成され、維持管理や長期耐久性に関する懸念

事項も少ないことから既設構造物に適していると考えた。

第6章では、内在塩分と中性化の複合作用を受けたコンクリート中の鉄筋腐食抑制効果に及ぼす表面被覆工の亀裂の影響を把握することを目的に、分割鉄筋を用いた試験体の促進腐食試験により表面被覆工による鉄筋腐食抑制効果が得られる適用範囲を検討した。下記に、得られた知見を示す。

- (1) 亀裂なしでは、総腐食電気量密度および腐食速度の値が小さく、腐食の進行が懸念となる条件は見られないことを確認した。これは、試験体が完全に表面被覆工で覆われていることで、試験体中へ供給される酸素や水分を遮断でき、腐食の進行を抑制したためと考えた。
- (2) 亀裂ありでは、表面被覆工に亀裂があり、中性化が進行した場合の総腐食電気量密度は亀裂なしと比較し、著しく大きくなることを確認した。
- (3) 表面被覆工に亀裂があり、中性化の進行範囲が広がることで鉄筋腐食が最大となる鉄筋要素位置は、欠陥部より試験体の端部方向に移動した。
- (4) 初期塩化物イオン量の許容値の2倍程度の塩化物イオン量を含む場合は、表面被覆工に亀裂があり、中性化の進行範囲が広い場合、腐食が著しく進行した。ひび割れ追従性の高い被覆材を選定することや適用後に亀裂を見つけた後は早期に補修する等、適切な維持管理をしながら表面被覆工を適用することにより、無処置の場合と比較し、鉄筋腐食抑制効果が得られると考えた。
- (5) 初期塩化物イオン量の許容値の4倍程度の塩化物イオン量を含む場合は、表面被覆工に亀裂がある場合、中性化の進行範囲に関わらず腐食が進行する。そのため、腐食環境自体の改善を目的とした電気化学的防食工法と併用し、表面被覆工を適用することが望ましいと考えた。

第7章では、表面処理工法を適用したコンクリート中の鉄筋腐食の進行がひび割れの進展やかぶりコンクリートの剥離・剥落形態に及ぼす影響を把握することを目的に、腐食膨張圧を模擬した破壊試験を実施し、デジタル画像相関法を用いて表面ひずみやひび割れ幅を計測した。下記に、得られた知見を示す。

- (1) ひずみの発生やひび割れの進展傾向は表面条件により異なることを確認した。表面被覆工のケースでは、ひずみの最大値の大小に関係なく、無塗装のケースと比較してひずみの発生を抑制する傾向が見られた。
- (2) 試験終了後の試験体写真や内部ひび割れの発生状況より、ひび割れが完全に開口した後は、表面条件の違いによる影響は小さいことを確認した。かぶりコンクリートの剥離・剥落形態は表面条件の違いではなく、かぶりや鉄筋間隔の影響が支配的であることを確認した。
- (3) 表面被覆工を適用した場合、ひび割れ追従性や剥離抵抗性が発揮される範囲内であれば、小規模なコンクリート片の剥離・剥落を抑制できる可能性が高い。しかし、ひずみ抑制効果やひび割れ追従性により鉄筋軸方向へのひび割れの進展が抑制されること

で、鉄筋間に貫通ひび割れが発生し、大きな外力がトリガーとなると一部が表面被覆工とともに落下し、表面被覆工がコンクリートの自重に耐えきれなくなることで隣接箇所にも剥離が連鎖して大断面剥離に繋がると考えた。

第8章では、第3～7章の成果を総括し、既設RC床版の予防保全のための表面処理工法選定フローを提案するとともに、今後の課題について整理した。新たに提案した選定フローは適用可否の判断だけではなく、既に表面被覆工を適用した箇所について本フローを用いて改めて適切な表面処理工法を選定することで、適用後の維持管理時の注意箇所の把握にも活用できる。

最後に、本論文の実験結果から鉄筋コンクリート構造物の維持管理で広く用いられている表面被覆工が鉄筋腐食抑制やかぶりコンクリートの剥離・剥落に対して必ずしも有効であるとは限らないことが明らかとなった。我が国で表面被覆工が用いられるようになってから30年以上経過した現在、一部の構造物では被覆材の再塗装を検討する時期を迎えており、適切な表面処理工法は何かを再考する良い時期に来ている。また、我が国の社会資本の大部分を管理する市町村は財源不足や人手不足を背景に、構造物の維持管理が大きな負担となっている。予防保全型の維持管理への転換が求められているが、本論文で対象とした一般環境下の構造物では、何も手を加えないことが最善の判断の場合もある。

構造物の維持管理はすぐに結果が出るわけでないが、本論文の成果が、今後の鉄筋コンクリート構造物の設計、施工、維持管理の一助となり、安全・安心・快適な国土基盤の確立に役立つことを期待する。