

氏名	羽渕 貴士
本籍	神奈川県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第744号
学位授与の日付	平成17年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	塩害およびアルカリシリカ反応を受けた港湾コンクリート構造物の維持管理手法に関する研究
論文審査委員(主査)	鳥居 和之(自然科学研究科・教授)
論文審査委員(副査)	北浦 勝(自然科学研究科・教授), 梶川 康男(自然科学研究科・教授), 榎谷 浩(自然科学研究科・教授), 宮里 心一(金沢工業大学・助教授)

## 学 位 論 文 要 旨

### Abstract

Concrete structures play an important role as infrastructure facilities. Considering the following recent causes such as the deterioration of concrete structures at early stage, the duller recent economic growth, and the necessity of decreasing the environmental impact, the establishment of appropriate maintenance method for concrete structures stocked in large quantities will be one of the most important problems.

For concrete structures located in harbor, the main deterioration phenomena that greatly influences the structural performance are the chloride induced corrosion and/or the alkali-silica reaction (ASR). At present, a lot of concrete structures in harbor are suffering from the chloride induced corrosion due to the attack of seawater. Furthermore, when the reactive aggregate is used at the moment, the severe deterioration combined with ASR will occur in such a concrete structure.

For this reason, taking considerations the following three important items; 1) the durability performance to chloride induced corrosion for concrete structures in harbor and their appropriate repair methods, 2) the deterioration mechanisms of concrete itself and steel bars due to the combined action of seawater and ASR, 3) the applicability of the surface coating newly proposed, a detailed investigation was carried out based on research results both in site and in laboratory. As a noteworthy result, the new diagnosis and maintenance methods for concrete structures in harbor were developed.

### 学位論文要旨

コンクリート構造物はわが国の社会基盤施設として重要な役割を担っているが、これらの早期劣化や耐久性低下に関する社会問題化、昨今の経済成長の鈍化や環境負荷低減の必要性などの社会情勢を踏まえると、今後は、これまでに大量に建設され蓄積されたコンクリート構造物を適切に維持管理することが最大の課題である。とくに、コンクリート構造物の耐久性に関して社会的信頼を確立するためには、劣化現象のメカニズムを把握した上で、適切な維持管理手法を導き出すことが不可欠である。

海洋環境に位置する港湾コンクリート構造物に関して、その要求性能に特に大きく影響すると考えられる劣化現象は塩害とアルカリシリカ反応（ASR）である。ほとんどの港湾コンクリート構造物は海水から供給される塩化物によって塩害の影響を受け、また反応性骨材が用いられた場合には塩害とASRの複合的な劣化が懸念されることになるが、これらの劣化に対する構造物の耐久性や維持管理手法についての検討課題はまだ多く残されているのが実状である。これら以外にも構造物によっては問題となる劣化現象も考えられるが、我が国における一般的な港湾コンクリート構造物の場合には、塩害とASRを対象とした維持管理手法の確立が重要であろう。

そこで本研究では、塩害に対する耐久性および補修工法の性能、海水とASRの複合作用を受ける場合の劣化現象と鉄筋の腐食性状および開発した表面被覆工法の適用性に関して、実構造物の調査と暴露実験をもとに詳細な検討を行った。

塩害劣化に対しては、海洋環境条件の違いがコンクリートへの塩分浸透性および鉄筋腐食の進行程度に及ぼす影響を把握することにより塩害劣化環境による相違を明らかにし、これに基づく耐久性の評価手法を提案した。また、栈橋上部工に適用された表面塗装および断面修復による補修部の力学的性能および耐久性の長期的な低下傾向を明らかにし、補修部の劣化予測曲線を提案するとともに、補修部の維持管理に有用となる知見を整理した。一方、塩害とASRの複合劣化に対しては、複数の実構造物の調査結果および模擬試験体の暴露試験の結果に基づいて海水とASRの複合作用による劣化現象とその反応機構を把握し、海洋環境条件や配合条件などの違いが複合劣化に及ぼす影響に関する知見を得るとともに、海洋環境下でのASRの残存膨張性の評価手法を提案した。また、同様の複合作用を受けるコンクリート中の鉄筋の腐食性状は、主として鉄筋周囲の塩化物イオン量とASRゲルの生成量およびその組成（ASR膨張の進行）とのバランスに影響を受けることを明らかにするとともに、電気化学的手法によって推測することができることを示した。さらに、このような複合劣化を受ける構造物に適用可能なFRP複合パネルを用いた新しい表面被覆工法を開発し、その適用性を実験的に確認した。最後に、上記の知見をもとに、塩害およびASRを受ける港湾コンクリート構造物を適切に維持管理を行うために有用と考えられる知見を整理してまとめた。

本論文は第1章から第8章までの8章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章「序論」では、塩害およびASRを受けた港湾コンクリート構造物の維持管理手法に関する研究を実施するに至った背景、本研究の目的および本論文の構成を明らかにした。さらに、塩害およびASRを受けたコンクリート構造物の劣化現象と維持管理に関する既往の研究を整理して示した。

第2章「港湾コンクリート構造物への塩分浸透性および塩害に対する耐久性の評価」では、主にコンクリートの湿潤状態の違いを考慮して、岸壁ケーソンに代表される「海中部～干満帯」と栈橋上部工に代表される「飛沫帯～海上大気中」に海洋環境区分を分けて検討した。「海中部～干満帯」に関して、70年以上もの長期間供用された岸壁ケーソンの調査により、塩化物イオン量の深さ方向の分布に対してFickの拡散方程式を近似することにより得られる表面塩化物イオン量は海中部では $20\sim 25\text{kg/m}^3$ 以上の値となっていたことを示した。また、海中部および干満帯では海水から供給される多くの塩化物イオンによって鉄筋の不動態被膜は破壊されるものの、腐食進行に必要な酸素が十分に供給されないために腐食速度が非常に遅く、塩害環境としてはそれほど厳しいものではないことを実証した。さらに、「飛沫帯～海上大気中」に関して、複数の栈橋上部工における調査結果から、表面塩化物イオン量はコンクリート標準示方書に示される飛沫帯での値 $13\text{kg/m}^3$ よりも大きな値となる場合も多く、一つの栈橋上部工では部材の海面からの距離が大きくなるほど小さくなり、栈橋の着船側および護岸側に近い部材では栈橋中央部付近よりも大きくなる傾向があることを明らかにした。また、これらのデータに基づき、栈橋上部工の耐久設計を行う場合に有用な、表面塩化物イオン量の推定式を提案した。

第3章「港湾コンクリート構造物の塩害に対する補修工法の性能評価」では、栈橋上部工の塩害劣化対策として表面塗装工法（厚膜型ポリブタジエン樹脂系塗装）および断面修復工法（ポリマーセメント系無収縮モルタル）による補修が実施された部材の継続的な調査結果に基づき、各補修工法の適用後13

～16年間にわたっての各種要求性能に関する定量的な評価を行った。その結果、表面塗装部では塗膜自体の外観上の変状は非常に少なく、ひび割れ追従性、遮塩性、酸素遮断性は十分な性能を有していたが、付着強度（母材との一体性）は塗装後に一旦増大し、塗装後5年程度をピークにしてその後低下する傾向を示すとともに、塗装5年後以降では測定値のばらつきも経年にしたがって大きくなることが確認された。一方、断面修復部では、表面塗装を併用することが望ましいこと、圧縮強度、付着強度、遮塩性能などの経時的な低下は非常に小さいことが確認された。また、表面塗装工法は塗装後に残留塩分によって鉄筋腐食が生じない範囲に適用すること、断面修復工法はマクロセル腐食を生じないように補修範囲を設定することが重要であることを示した。これらの結果より、表面塗装部および断面修復部について性能低下面積率という指標を用いた劣化予測曲線を提案するとともに、これらを合理的、効率的な維持管理計画の立案に反映させる考え方を示した。

第4章「海水とASRの複合作用を受けるコンクリート構造物の劣化現象」では、ASRによる劣化損傷の確認された、海洋環境に位置する構造物について全国的な調査を実施するとともに、反応性骨材を使用したコンクリートのコア試験体の実験室内での促進環境および実際の海洋環境での暴露試験を実施した。実構造物の調査からは、反応性骨材の岩石学的特徴に関して地域的な相違があること、反応性骨材（安山岩）自身が多く含有するアルカリがASR膨張に関与する可能性があること、干満帯や海中部では海水から供給されるアルカリが劣化現象に影響を及ぼすと考えられることを示した。また、コンクリート表面のひび割れは飛沫帯において顕著であるが、骨材の割れなどの内部劣化は干満帯や海中部において顕著であること、干満帯や海中部の無筋コンクリートでは波浪の影響により大きな劣化損傷に至る場合があること、ASRゲルの生成状況および化学組成の評価からは飛沫帯よりも干満帯や海中部においてASRが進行していること、鉄筋位置で $2\text{kg}/\text{m}^3$ 程度の塩化物イオン量が存在しても鉄筋は腐食していないことが明らかとなった。さらに、残存膨張性の評価法として提案した人工海水浸漬法は、海水の影響を考慮できるために干満帯や海中部に位置する実構造物のコンクリートに対して有効であることを示した。一方、暴露試験からは、高炉セメントB種を使用することによってASR膨張の抑制効果が認められたが、内在塩分量が大きい場合には普通ポルトランドセメントの場合よりも大きな膨張率を示すことが明らかとなった。また、干満帯>海水中>飛沫帯≒海上大気中の順で膨張率が大きくなり、アルカリ供給量と環境温度がASR膨張に影響を及ぼすと考えられた。さらに、促進環境と海洋環境での膨張率の比較により、膨張率が比較的小さい段階での促進試験の促進条件を確認した。

第5章「海水とASRの複合作用を受けるコンクリート中の鉄筋の腐食性状」では、反応性骨材を使用したコンクリートに鉄筋を埋設した供試体を作製し、実験室内での促進環境および実際の海洋環境での膨張挙動および鉄筋の電気化学的特性との関係について実験的に検討した。ASRゲルの生成が鉄筋の不動態に及ぼす影響に関しては、外来・内在塩分に関わらず、鉄筋位置で $1.2\sim 3.5\text{kg}/\text{m}^3$ 程度の塩化物イオンが存在しても、 $3\sim 5\text{kg}/\text{m}^3$ 程度のアルカリ量によりASRゲルが活発に生成されることによって、鉄筋は安定した不動態状態が維持され、これを上回る量の塩化物イオンが存在する場合に著しく腐食が進行するものと考えられた。このようなASRゲルの緩衝作用により不動態被膜が再生される現象は、鉄筋位置の塩化物イオン量、鉄筋周囲の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量（ $\text{NaCl}$ による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費量）、ASRゲルの組成や生成速度（ASRの反応の活性度）、コンクリート組織の緻密さ（酸素や水の移動度）の影響を大きく受けることが考えられた。さらに、電気化学的手法により自然電位や腐食速度を測定することによって海水とASRの複合作用を受けたコンクリート中の鉄筋の腐食性状を推測できることを示した。また、海水中と飛沫帯の暴露条件に関わらず、鉄筋の腐食減量は交流インピーダンス法から求めた腐食速度より推定した積算腐食電流量と良い相関を示し、ASRを生じたコンクリート中での鉄筋の腐食減量がある程度の精度で推測することができることを示した。

第6章「塩害とASRの複合作用を受ける部材に対する表面被覆工法の開発」では、塩害とASRの複合作用を受けるコンクリート構造物（部材）の補修工法として、FRPパネルと発泡ポリエチレンで構成される高耐久性のFRP複合パネルを用いた表面被覆工法について実験的に検討した。FRP複合パネルの

表面被覆材料としての基本性能に関しては、とくに、防水性（遮水性）、遮塩性、酸素遮断性などの劣化因子遮断性能やひび割れ追従性は非常に優れた値を示し、付着性、耐候性、耐アルカリ性、耐海水性などの性能も大きな問題はないことが確認された。また、純引張および曲げ載荷、鉄筋の電食によるひび割れ追従性試験より、FRP 複合パネルを用いた表面被覆材は 6~8mm 程度までのひび割れに追従するとともに、ひび割れの進展を拘束するような効果（ひび割れ幅の抑制効果）を発揮することが確認された。さらに、反応性骨材を用いたコンクリートの促進膨張試験により、FRP 複合パネルによって外部からの水分や水蒸気などを遮断することにより、被覆のない場合に比較して ASR 膨張を抑制する傾向を示すことを確認した。これらにより、本工法は、塩害、ASR およびこれらの複合的な劣化への対策工法として有効であり、このような劣化を受けるコンクリート構造物のライフサイクルコストを低減できる可能性があることを示した。

第 7 章「塩害および ASR に対する港湾コンクリート構造物の維持管理手法の提案」では、第 2 章から第 6 章までの検討結果を総合的にまとめて、塩害および ASR を受ける港湾コンクリート構造物を適切に維持管理するための一つの考え方を提案した。構造物の耐久性照査に関しては、海中部または干満帯において考慮すべき表面塩化物イオン量の値、ASR の影響を受けない場合の海中部での腐食速度、栈橋上部工の表面塩化物イオン量の算定方法について示した。さらに、ASR に対する耐久性を確保する方法（ASR 抑制効果のある混合セメントの使用を最優先とすること、これができない場合はアルカリ総量を  $2.5\text{kg/m}^3$  以下とすること、状況によりアルカリの浸透を抑制できる被覆などの併用を考慮すること）を提案した。構造物の劣化予測に関しては、反応性骨材使用コンクリートの塩化物イオン拡散係数、ASR 反応性の予測手法としてのデンマーク法や人工海水浸漬法の促進程度、ASR 劣化コンクリートの残存膨張性の評価法としてのデンマーク法や人工海水浸漬法の有効性と判定基準、海水と ASR の複合作用を受けるコンクリート中の鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン量について示した。構造物の点検に関しては、海水と ASR による複合的な劣化を生じている場合の実際の構造物での注意点を示し、ASR の発生するおそれのある（または劣化損傷が確認された）構造物の点検頻度を提案した。補修工法の選定に関しては、外観上の劣化状況、ASR の判定結果および塩化物イオン浸透と残存膨張の予測結果を組み合わせる評価する補修工法の選定フローを提案した。最後に、塩害を受ける構造物の補修後の劣化予測に関して、補修材料自体の経年的な性能低下傾向、補修部材としての劣化予測の考え方について示した。

第 8 章「結論」では、本研究で得られた結論を総括するとともに、今後の課題について示した。

以上

## 学位論文審査結果の要旨

本学位申請論文に対して、審査委員全員で面接と試問を行うとともに、審査委員会にて論文の内容を検討し、審査方針を決定した。1 月 25 日開催の口頭発表及び同日開催の審査委員会にて協議の結果、以下の通り判定した。

本研究は、港湾コンクリート構造物の耐久性（塩害による鋼材の腐食とアルカリシリカ反応）の評価とその防止対策の確立を目的として、栈橋、ドルフィンなどの港湾構造物の詳細な現地調査を全国的に実施し、劣化現象の特徴とそのメカニズムを把握するとともに、塩害による鋼材の腐食とアルカリシリカ反応とによる複合的な劣化現象を模擬した屋内実験を広範囲に実施し、複合的な劣化現象のメカニズムの解明とその評価法を確立している。また、長期的な性能低下を考慮した港湾コンクリート構造物の新しい維持管理手法を提案するとともに、港湾コンクリート構造物の調査・診断の具体的な手順及び補修・補強設計の考え方を取りまとめている。本研究の成果の一部は、東京湾、大阪湾でのコンクリート構造物の調査・診断及び補修に実際に役立っているとともに、土木学会・表面保護工法研究委員会、コンクリート工学協会・長期性能照査支援モデル研究委員会などの報告書にも取り入れられている。

本学位論文は、今後ますます重要となる、港湾コンクリート構造物の維持管理及び補修・補強技術の開発に貢献するところが大きく、工学上の有用な知見を多く得ていることから、本申請者は博士（工学）の学位を受けるに値する、と判定した。なお、申請者は国際会議の発表経験が 2 回あり、外国語の能力も十分に有するものと判定した。