

# 北陸地方のコンクリート構造物の塩害に対する耐久性確保に関する研究

|       |                                                                                             |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| メタデータ | 言語: jpn<br>出版者:<br>公開日: 2017-10-05<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者:<br>メールアドレス:<br>所属: |
| URL   | <a href="http://hdl.handle.net/2297/16656">http://hdl.handle.net/2297/16656</a>             |

|            |                                                                           |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名        | 青 山 實 伸                                                                   |
| 生 年 月 日    |                                                                           |
| 本 籍        | 福 井 県                                                                     |
| 学 位 の 種 類  | 博 士 (工 学)                                                                 |
| 学 位 記 番 号  | 博 甲 第 647 号                                                               |
| 学位授与の日付    | 平成 16 年 3 月 25 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    | 北陸地方のコンクリート構造物の塩害に対する耐久性確保に関する研究                                          |
| 論文審査委員(主査) | 鳥 居 和 之 (工学部・教授)                                                          |
| 論文審査委員(副査) | 川 村 満 紀 (工学部・教授) 北 浦 勝 (工学部・教授)<br>梶 川 康 男 (自然科学研究科・教授) 宮 川 豊 章 (京都大学・教授) |

## 学 位 論 文 要 旨

### Abstract

The purpose of this study is to propose the effective countermeasures for the durability-related problems of concrete such as chloride-induced corrosion of steel bars and alkali-silica reaction (ASR) in the bridges in the severe saline environment in the Hokuriku district. In this study, the amount of the chloride ingress into concrete from external sources was measured for the road bridges subjected to the influence of seawater or deicing salt. The effectiveness of a variety of the mix proportions of concrete and the repair methods of surface coating or surface patching was evaluated. Based on the results of the survey in the road bridges and the experiment in the laboratory, the most rational maintenance method for the concrete structures in the Hokuriku district was proposed from the viewpoint of life cycle cost (LCC).

### 1. 緒 言

北陸地方では、冬期の気象特性に起因する海岸部の厳しい塩害環境や凍結防止剤散布の影響を受けるコンクリート構造物で、塩害損傷が多く発生している。コンクリート構造物の塩害に対する耐久性確保には、塩害環境の把握や腐食因子である塩化物イオンのコンクリート中への浸透性を把握し、塩化物イオンの挙動を適切に予測する必要がある。既設コンクリート構造物の耐久性確保では、潜伏期および進展期の早い段階で塩分浸透状況や鋼材の腐食状態を把握し予防保全を適切に実施することが不可欠であり、効率的な補修技術の開発や維持管理手法の構築を図ることが重要となる。新設コンクリート構造物の耐久性確保では、これらの結果を設計・施工への確にフィードバックする必要がある。

以上のことを背景に、本論文では、日本海の厳しい塩害環境下に1985～1987年に建設した北陸自動車道の親不知海岸高架橋(海岸橋略記)の塩分浸透性を詳細に分析し、塩害環境の変動を反映した塩分浸透の予測モデルを提案するとともに、海岸橋に適用した各種の塩害対策の効果を評価した。また、北陸地方のASRの特徴と評価法、並びに海岸橋の塩分浸透によるASRによる複合的な劣化作用に関する検討を加えた。凍結防止剤の塩害では、北陸地方の道路構造物への塩分浸透状況および塩分浸透性に検討を加え、塩分浸透の特性を分析した。さらに、防錆剤混入モルタルの塩害劣化コンクリートでの防食効果を実験により確認し、防錆剤混入モルタルを用いた予防保全や補修方法を検討した。これらの塩分浸透性の分析結果および各種の塩害対策の評価結果より、新設および既設コンクリート構造物のLCCを勘案した耐久性確保の方策を考察した。

## 2. 海岸部の橋梁での塩分浸透性とその予測

海岸橋で測定された表面塩化物イオン濃度( $C_o$  値)は、海上部や海岸部の高さ15 mまでは10 kg/m<sup>3</sup>以上になり非常に厳しい塩害環境になった。しかし、海上部でも高さ20 mを超える場合や汀線から20 m以上離れる場合には塩害環境が大きく緩和され、塩害環境は同じ海岸橋でも大きく異なっていた。塩分浸透性を示す見かけの拡散係数( $D_c$  値)は、構造物の水セメント比が小さいものほど大きく低減されていた。 $D_c$  値は同一の水セメント比でも一定にはならず、 $C_o$  値が増加するとともに $D_c$  値も増加する傾向を示した。同一の部位および環境である箇所での測定値から算定した $C_o$  値および $D_c$  値の変動係数の平均値は、それぞれ24 %および30 %であり、 $C_o$  値および $D_c$  値により求めた塩分浸透の予測値の変動係数は $C_o$  値の変動係数とほぼ同じになった。

フーチング部に使用した高炉セメントB種は厳しい塩分環境下でも長期にわたり優れた塩分浸透の抑制効果を発揮していた。このことは電気泳動法による促進拡散試験においても確認された。

海岸橋での塩害環境を示す飛来塩分量は海上からの高さと海岸からの距離により決定でき、各地点間の測定値には一定の関係があった。また、海岸部の飛来塩分量と波エネルギーの算定値との間には比例関係にあり、波浪観測データより長期間の塩害環境の変動を予測できた。この結果を用い、塩害環境の変動と塩分固定化を勘案した差分法による塩分浸透予測モデルを提案し、塩分濃度分布より算定される $D_c$  値は $C_o$  値の大きさにより変化することを証明した。塩分浸透予測モデルにより求めた $C_o$  値および $D_c$  値の経時変化は実構造物での測定結果と一致していた。本モデルを用いて予測した建設後50年経過時の予測結果は、10年経過時の塩分分布から算定した $C_o$  値および $D_c$  値を用いた予測値に比べ6~16 %大きくなった。その差は比較的小さいが、実構造物より測定された $C_o$  値および $D_c$  値を用いて長期の塩分浸透予測を行う場合には、予測値の差や測定時点の経年変化を勘案する必要があることを明らかにした。

## 3. 海岸部の橋梁での塩分浸透とASRによる複合的な劣化作用

北陸地方の道路構造物のASR損傷は河川砂利に含有される火山岩(安山岩、流紋岩、凝灰岩)によるものであり、川砂、河川砂利中の火山岩系反応性骨材の混入率は河川水系毎に大きく相違した。ASRによる損傷の程度はコンクリートに使用した川砂利中の安山岩の含有率に大きく依存していた。ASR発生の有無はカナダ法によるコアの残存膨張率により判定でき、その判定基準値はオーストラリアの判定基準(21日で0.1 %以上の膨張が「有害」)が妥当であることを示した。

海岸橋では、経過年数にともないひび割れが発生する橋脚が増加していた。塩害環境の厳しい海上部の橋脚では、コアの静弾性係数が圧縮強度に比べて大きく低下しており、骨材の一部に顕著な反応リムが観察され、海水の影響でASRが促進されていた。コアの静弾性係数の低下は、塩化物イオンの浸透量が関係し、海水からの塩分浸透がASRの進行に影響していた。他方、海水の影響が小さい上部工や高炉セメントB種を使用したフーチングではASR反応は進行していなかった。高炉セメントB種を使用したフーチングでは内部にアルカリがほとんど浸透しておらず、高炉セメントB種を使用したコンクリートは厳しい塩分環境下でも長期にわたりASRの発生を抑制できることを確認した。

## 4. 凍結防止剤による塩分浸透性とその予測

北陸地方の高速道路では、凍結防止剤は塩化ナトリウムが主体であり、散布量は1990年6月のスパイクタイヤ規制以前は約15 ton/kmであったものが、それ以降は約23 ton/kmに増加した。凍結防止剤の路面面積の1回あたり散布量は20~30 g/m<sup>2</sup>であり、年間使用量は冬季気象(冬日日数)により決まっていた。凍結防止剤のコンクリート構造物へ浸透は、大気に拡散する量は小さく海岸部構造物のように飛沫による影響はほとんどなく、路面水の飛散、路面水の漏水、雪堤の融雪水によるものであった。道路構造物への影響は、伸縮装置周辺の漏水の影響を受ける橋台・橋脚や上部工の端部、雪堤からの融雪水の影響を受ける壁高欄部や張出下面の水切部、RC構造のトンネルで認められた。

伸縮装置部の漏水による周辺部位の塩分浸透は、橋台縦壁部、主版部で影響を受けており、RC中空

床版端部の凍結防止剤の影響範囲は桁端部より2 mの範囲までであった。また、橋脚では、漏水流下により橋脚上端から下端まで影響が及び、海岸橋の海上部橋脚と同程度の塩害環境を示す場合があった。RC 中空床版橋の横断方向の塩分浸透は、水切部、壁高欄部、地覆部表面が顕著であった。水切部付近では、路肩側が中央分離帯側よりも浸透量が多くなっていた。トンネルでは、コンクリート壁面に塩分が浸透しており、浸透量は路面から高くなると減少し、高さ4 mを超えると影響が小さくなった。また、トンネルの  $Co$  値と  $Dc$  値の関係は海岸橋の塩分浸透の分布形状と類似していた。

凍結防止剤による塩分浸透分布のパターンは3タイプあり、表面より塩分が減少するタイプ、分布形状が表面部より内部の濃度が大きい山形分布となるタイプ、深部での塩分濃度が表面部と同程度か大きい分布を示すタイプであった。塩分浸透予測では、凍結防止剤のコンクリート構造物に影響を与える時期や期間を考慮することにより、凍結防止剤による塩分浸透を精度良く予測できた。この結果、凍結防止剤が影響した時期や期間によって、塩分浸透分布状況や塩分分布から測定される  $Dc$  値が大きく変化することを明らかにした。

## 5. 防錆剤混入ポリマーセメントモルタルによる塩害劣化コンクリートの防食

ポリマーセメントモルタルの強度特性およびワーカビリティより判断すると、ポリマーセメントモルタルへの防錆剤の混入量は亜硝酸カルシウムで  $30 \text{ kg/m}^3$  程度まで、亜硝酸リチウムで  $55 \text{ kg/m}^3$  程度までが可能であった。

防錆剤を混入したポリマーセメントモルタルにより断面修復を行った試験体では、腐食電流値が  $1 \mu\text{A/cm}^2$  程度以下になり、乾湿繰返し環境下で長期にわたり鉄筋腐食の抑制効果が認められた。断面修復におけるはつり深さの影響に関して、鉄筋の裏側まで断面修復した試験体は鉄筋の表面までしか断面修復しなかった試験体と比較し、断面修復部近傍および非補修部での腐食電流値が相対的に大きくなり、解体調査の結果からもその周囲でのマクロセル腐食の進展が認められた。インピーダンススペクトル（コールコールプロット）の経時変化により、マクロセル腐食は、補修後の比較的早期から生じていることが示された。防錆剤の種類に関して、亜硝酸イオンのモル比が同じ場合には亜硝酸リチウムと亜硝酸カルシウムの鉄筋腐食の抑制効果は同程度であった。防錆剤を混入した普通モルタルの貼付けは、鉄筋腐食を抑制していたが、十分な量の亜硝酸イオンが鉄筋周囲まで比較的短い期間に浸透するのは難しく、この間に鉄筋腐食が進行したものと考えられた。

電気化学的計測では、交流インピーダンス法により求めた腐食減量値は直線分極抵抗法により求めた値より大きくなり、より実測値に近くなった。鉄筋の腐食減量は、腐食面積率が大きくなるにしたがって腐食減量率は緩やかに増加し、腐食面積率が70 %を超えると腐食減量率が急激に増加した。

塩害の潜伏期および進展期における予防保全や補修の方法として、防錆剤混入モルタルを用いてコンクリート中に濃度差により防錆剤を浸透させる予防保全や、鉄筋表面まで防錆剤混入モルタルにより断面修復を行う補修工法がマクロセル腐食を抑制するうえで有効なことを明らかにした。

## 6. 厳しい塩害環境下におけるコンクリート構造物の耐久性確保

海岸橋で実施したコンクリート塗装および防食パネルは、15年間にわたり中性化の進行と塩化物イオンの浸透を抑制していた。浸透性塗膜は、中性化の進行を防止していたが、塩分浸透を抑制していたものの長期間にわたり機能が継続しなかった。コンクリート塗装の上塗材の耐久性能は、ポリウレタン樹脂では約10年程度、フッ素樹脂では15年以上あると推察した。中塗材では、エポキシ樹脂が遮塩効果や付着性において優れており、中塗材の膜厚が厚くなるほど塩化物イオンの浸透抑制効果が向上する傾向にあった。防食パネルは、外観上の劣化もなく遮塩性と耐久性に優れ、厳しい塩害環境での表面被覆に適すると考えられた。15年間経過したエポキシ樹脂塗装鉄筋は、曲げ加工部以外は塗膜の光沢も保持されており長期間にわたる耐久性が期待できると推察された。しかし、曲げ加工部では一部変色した状況が見られ、耐久性に及ぼす影響について追跡する必要がある。

コンクリート構造物では、塩分浸透性および発錆塩分濃度の値により耐用年数やかぶりで対応でき

る塩害環境が大きく異なった。コンクリート本来のかぶりの有する防食機能による厳しい海岸部の塩害環境への対応では、上部工で水セメント 40 %クラス、橋脚では高炉セメント B 種を用い水セメント 50 %クラスのコンクリートを用いて、かぶりを増すことによりある程度可能となった。

コンクリート構造物では、かぶりの有する機能を活用し、初期の段階で塩分の浸透・蓄積を許容させ、塗装時期を遅らせる予防保全の考え方を示した。表面被覆による塩害対策では、塗替え回数が少ない塩害環境の場合には塗装による予防保全が、塗替え回数が多い塩害環境の場合には建設段階から防食パネルによる表面被覆の実施が LCC 上有利になった。また、表面被覆による塩害対策では、表面積の少ない構造型式を選定することが LCC 上有効なことを示した。

これらの検討結果より、新設構造物の耐久性確保では、塩分浸透性の小さいコンクリートを使用し、かぶりの増加と予防保全での対策を基本に、塩害環境が厳しい場合は表面被覆工法等の併用を含め、塩害環境に対応した対策を LCC の観点から選定することの必要性を示した。既設構造物の耐久性確保では、LCC の観点からは塗装による予防保全が最も有利で、続いて防錆剤混入モルタルによる対策が有効となった。提案した防錆剤混入モルタル貼付けや、防錆剤混入モルタルでの表面部の断面修復による方法を適用することで予防保全の適用環境を拡大することを可能とした。鋼材表面まで高濃度の防錆剤混入モルタルにより断面修復では、進展期での部分的な補修への適用が有効なことを示した。

## 学位論文審査結果の要旨

本学位申請論文に対して、審査委員が個別に面接と試問を行うとともに、第 1 回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 27 日開催の口頭発表及び同日開催の第 2 回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、北陸地方のコンクリート構造物の耐久性（塩害による鋼材の腐食、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、日本海の厳しい塩分環境下に建設された親不知架橋の塩分浸透特性を長期にわたる詳細な調査により検討し、季節変動を考慮した、海岸部の橋梁の塩分浸透モデルを構築するとともに、塩害対策の目的で実施された各種補修工法の実際の効果を評価している。また、北陸地方の道路構造物で問題となっているアルカリシリカ反応と凍結防止剤によるコンクリートの劣化現象に関して、アルカリシリカ反応の岩石学的な特徴とその評価方法、凍結防止剤による劣化状況と塩分浸透の特徴、塩分浸透とアルカリシリカ反応による複合的な劣化作用について、実構造物での点検と採取コアによる調査結果より有用な知見を得ている。さらに、塩害劣化コンクリートの防食に対して、防錆剤混入ポリマーセメントモルタルによる予防保全及び補修方法を提案している。本研究で得られた研究成果は、北陸自動車道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。

本論文は、今後ますます重要となる、北陸地方のコンクリート構造物の維持管理及び補修技術の開発に貢献するところが大きく、工学上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。