

論文 供用 40 年が経過したコンクリート部材の塩化物イオン浸透性状に関する研究

加藤 絵万^{*1}・濱田 洋志^{*2}・審良 善和^{*3}・横田 弘^{*4}

要旨：本研究は、塩化物イオン浸透性状の非一様性およびその不確定要因の提言に資する情報を提供することを目的として、供用約 40 年が経過した栈橋上部工から切り出した RC 部材のコンクリート中の塩化物イオン浸透性状について検討した。その結果、コア採取箇所と海水面の距離や海水の飛沫状況などの局所的な環境差により、同一部材内のコンクリート中においても塩化物イオン浸透性状にばらつきが生じることが考えられた。

キーワード：栈橋上部工、塩化物イオン濃度分布、環境条件、ばらつき

1. まえがき

RC 構造物をより長く安全に使用するために適切な維持管理が重要であることは、現在では技術者の共通認識となっている。そして、既設構造物の保有性能評価、性能の将来予測、また、それらに基づいた適切な対策の実施が遂行されることが強く求められている。しかし、各種要因により RC 構造物に生じる劣化現象は多様性に富み、同一構造物内、同一部材内においても様々な様相を呈する。このため、RC 構造物の維持管理を効率的に行うためには、環境的要因や材料的要因等の劣化現象に関わる不確定要因を工学的に処理しながら、性能評価および予測を精度よく行う手法の開発が必要である。

本研究は、供用約 40 年が経過した栈橋上部工から切り出した RC 部材のコンクリート中の塩化物イオン濃度分布から、塩化物イオン浸透性状の非一様性およびその不確定要因の提言に資する情報を提供することを目的としたものである。

2. 調査概要

2.1 部材概要

調査対象とした RC 部材は、栈橋上部工から切り出した床版 S1, S2, S3 およびはり B1, B2, B3 である。栈橋は 1964～1966 年に九州地方の日本海側に建設され、2004～2006 年に撤去された。建設年次や使用材料、コンクリートの配合等に関する詳細は不明である。

図-1 に栈橋上部工の断面図を示す。栈橋が建設された地点の H.W.L.は+2.16m であり、上部工はりの下面は+2.05m に位置している。

調査対象とした RC 部材の 1 ブロック内での切り出

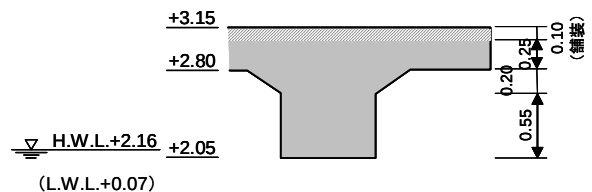


図-1 栈橋上部工の断面図

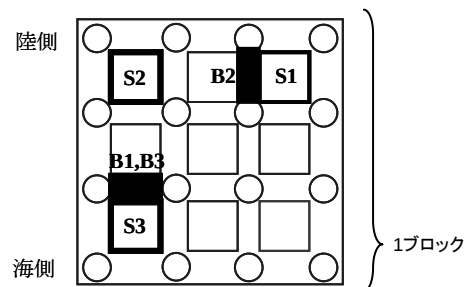


図-2 RC 部材の切出し位置

し位置の概略を図-2 に示す。床版は全て同じブロックから切り出され、S1 および S2 は陸側、S3 は海側に位置していた。はりとはそれぞれ異なるブロックから切り出され、B1 および B3 はブロック中心近傍の法線平行方向に、B2 は陸側近傍の法線直角方向に位置していたものである。なお、S1～S3, B1 および B2 については文献1)および文献2)において同様の調査結果を報告している。本研究は、既報を整理するとともに、新たに追加した調査結果を用いて検討を行うものである。

床版の寸法および床版下面の劣化状況を図-3 に示す。S1 では、鉄筋に沿ったひび割れと、その周辺に浮きを確認された。S2 では一部に浮きと錆汁が認められたが、はつり調査により、錆汁は下面付近に埋め込ま

*1 (独) 港湾空港技術研究所 LCM 研究センター 博(工) (正会員)

*2 (独) 港湾空港技術研究所 LCM 研究センター (東亜建設工業(株)) (正会員)

*3 (独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部材料研究室 博(工) (正会員)

*4 (独) 港湾空港技術研究所 LCM 研究センター長 博(工) (正会員)

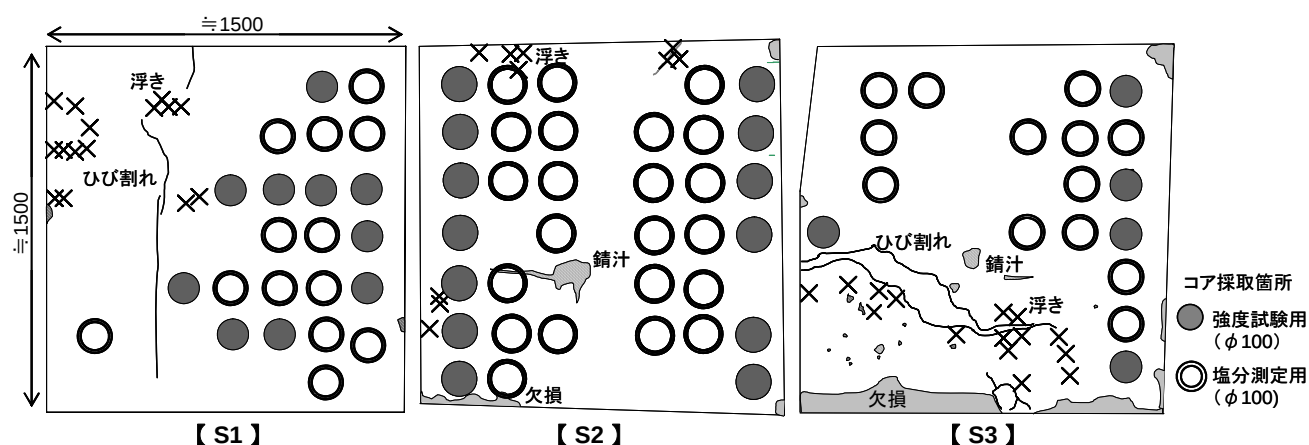


図-3 床版下面の劣化状況とコア採取位置

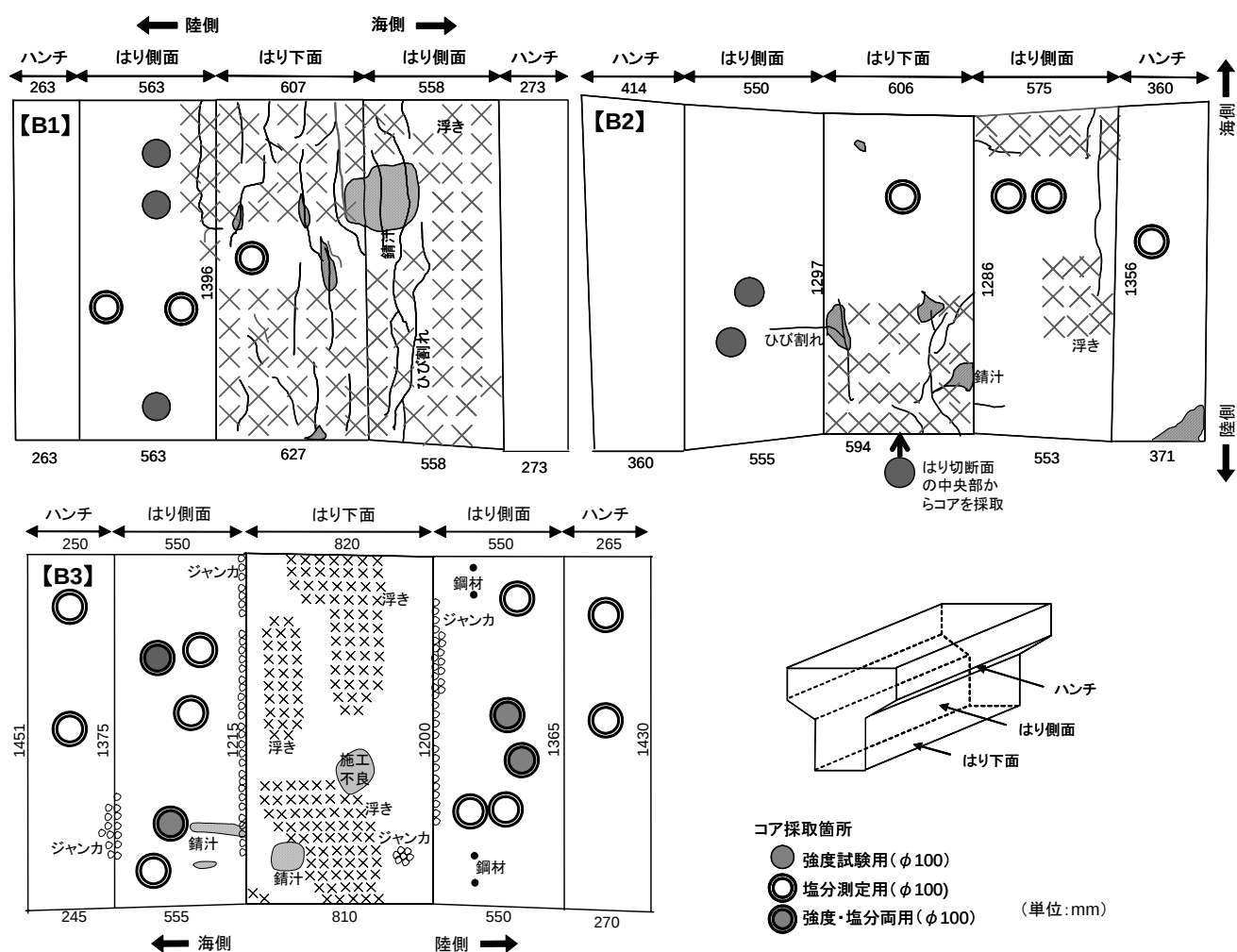


図-4 はりの劣化状況とコア採取位置（展開図）

れた金属片の影響であることが確認されている。S3では、ひび割れおよび浮きが多数確認された。

はりの寸法およびはり下面、側面およびハンチの劣化状況を、図-4に展開図として示す。はり B1では、下面および側面に幅 0.1～0.4mm の一方向ひび割れが

確認され、特に、海側面においては浮きが顕著であった。B2では、下面および側面の一部にひび割れと浮きが認められた。B3では、底面の大部分に浮きが確認されたが、両側面ともに顕著な変状は見られなかった。

以上の各部材の劣化状況を、表-1に示す点検診断

項目および判定基準³⁾に基づいて、目視調査のみにより判定すると、各部材の劣化度はそれぞれ同表のように表される。

2.2 調査方法

コンクリートのひび割れおよび浮きが認められない箇所からφ100mmのコアを採取し、コンクリート中の全塩化物イオン濃度分布を測定した。部材毎のコア採取位置は図-3および図-4のとおりである。全塩化物イオン濃度分布の測定は、コア表層部の1~2mmほどを除き、主に表面からの深さ100mmまで対象としてJCI-SC5に準拠した電位差滴定法により測定した。また、コンクリート中の塩化物イオン濃度測定値を式(1)に示すFickの拡散方程式の解で回帰することにより、塩化物イオンの見かけの拡散係数と表面における塩化物イオン濃度を算定した。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{0.1x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (1)$$

ここに、 $C(x,t)$:コンクリート表面からの距離 x mm, t 年における塩化物イオン濃度(kg/m³), C_0 :表面における塩化物イオン濃度(kg/m³), D :塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm²/年), erf :誤差関数である。

なお、前述のとおり、調査対象とした栈橋上部工の建設時の情報は不明であるため、すべての部材について、初期混入塩化物イオン濃度を0.0kg/m³、暴露年数を40年として取り扱うこととした。

また、コンクリートの材料特性の把握のため、圧縮強度試験を実施し、圧縮強度およびヤング係数の測定を行った。圧縮試験用コアは、表層から10~15mmの部分を除いて直径100mm、高さ160~200mmに成形して試験に供し、コア高さを補正して圧縮強度およびヤング係数を算定した。

3. アルカリ骨材反応による劣化の可能性について

図-5にコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係を示す。同図に示した曲線は、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕⁴⁾における普通コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係を示している。各部材の圧縮強度とヤング係数はばらつきが大きく、両者の関係は全てこの曲線を下回る結果となった。既往の研究によれば、アルカリ骨材反応による損傷を受けたコンクリートでは、力学的性質の変化が圧縮強度よりもヤング係数に鋭敏に現れるとされている⁵⁾。また、同じ栈橋上部工から切り出した床版の骨材周囲に観察された白色生成物がアルカリ-カルシウム-シリカ型のゲルであったことから²⁾、調査対象とした全ての床版およびはりとはASRによる損傷を受けている可能性が

表-1 栈橋上部工下面部の劣化判定基準³⁾と判定結果

劣化度	判定基準	部材
a	スラブ: □網目状のひび割れが部材表面の50%以上ある。 □かぶりの剥落がある。 □錆計が広範囲に発生している。 はり・ハンチ: □幅3mm以上の鉄筋軸方向のひび割れがある。 □かぶりの剥落がある。 □錆計が広範囲に発生している。	B1
b	スラブ: □網目状のひび割れが部材表面の50%未満である。 □錆計が部分的に発生している。 はり・ハンチ: □幅3mm未満の鉄筋軸方向のひび割れがある。 □錆計が部分的に発生している。	S3 B2
c	スラブ: □一方向のひび割れ若しくは帯状又は線状のゲル吐出析出物がある。 □錆計が点状に発生している。 はり・ハンチ: □軸と直角な方向のひび割れのみがある。 □錆計が点状に発生している。	S1 S2 B3
d	□変状なし。	-

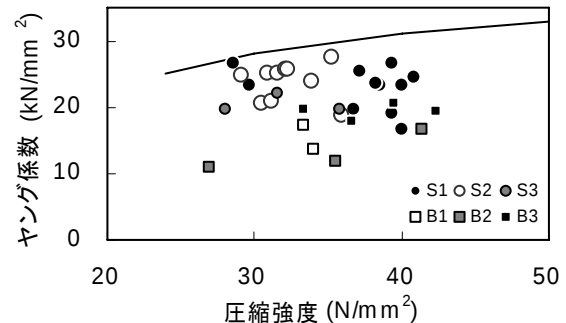


図-5 圧縮強度とヤング係数の関係

あることが考えられるが、目視ではASRによると考えられるひび割れは確認されなかった。このことより、本研究で対象とした部材の主たる劣化要因は塩害であり、ASRによる劣化の影響は非常に小さいと考えられる。よって、ASRによるコンクリートの損傷レベルについては特に言及せず、コンクリート中の塩化物イオン浸透性状にのみ着目して以降の検討を進める。

4. 塩化物イオン浸透性状に関する検討

4.1 床版の塩化物イオン浸透性状

(1) 下段鉄筋近傍の塩化物イオン濃度分布

図-6にS1, S2, S3の床版下面からの深さ50~60mmにおけるコンクリート中の塩化物イオン濃度測定値の頻度分布を示す。塩化物イオン濃度の頻度分布は、S1ではばらつきが大きく、S2では平均値を中心としたほぼ対称な分布形状となり、海側に位置していたS3では最もばらつきが小さくなった。これより、陸側に位置する部材のコンクリート中への塩化物イオンの侵入は、海側と比較して、海水の飛沫状況や波浪等による部材内のごく局所的な塩化物イオンの供給環境に影響を受けやすいことが考えられる。なお、各部材の測定数は、S1で14点、S2で22点、S3で13点であり、測

定数に偏りがあることも頻度分布に影響を及ぼしていることが考えられる。

ここで、床版下段鉄筋の平均かぶりはそれぞれ 70, 60, 60mm である。はつり調査の結果^{1), 2)}, S1 ではコンクリート表面にひび割れが見られた箇所の鉄筋のみ、ひび割れを挟んで左右に 100mm 程度の範囲で腐食が生じており、腐食による鉄筋の質量減少率は最大で 31% であった。S3 においても、ひび割れ・浮きが見られた箇所の鉄筋のみが腐食しており、鉄筋の質量減少率は最大で 32% であった。なお、前述のとおり、ひび割れ・浮きが確認された箇所からはコアは採取していない。また、S2 では鉄筋の腐食は目視では確認されなかった。つまり、図-6 より、各床版の下段鉄筋近傍のコンクリート中には、腐食発生限界塩化物イオン濃度^{例えば、6), 7)}を上回る塩化物イオンが侵入していたにも関わらず、鉄筋腐食は生じていなかった。特に、S1 および S3 については、下段鉄筋のかぶりの大小や海水の飛沫状況等の部材内のごく局所的な環境差などの要因により、マクロセルが形成されていた可能性が考えられる。

(2) 塩化物イオン浸透性状のばらつきの検討

図-7 に S1, S2, S3 の塩化物イオンの見かけの拡散係数 D と表面における塩化物イオン濃度 C_0 を示す。また、表-2 に塩化物イオンの見かけの拡散係数および表面における塩化物イオン濃度の平均値 $\pm 1\sigma$ 内のデータの割合を示す。図-7 中の直線は、塩化物イオンの見かけの拡散係数と表面における塩化物イオン濃度の平均値、およびそれぞれの平均値 $\pm 1\sigma$ (σ : 標準偏差) の範囲を示している。ここで、同図は塩化物イオンの見かけの拡散係数と表面における塩化物イオン濃度の相関を示すものではなく、各部材から採取したコア毎の両者の値を比較するためのものである。

コンクリート中を塩化物イオンが拡散現象により移動する場合、その速度の指標となる見かけの拡散係数はコンクリート中の細孔構造の緻密性に大きく影響される。細孔構造は、コンクリートの使用材料や配合などの材料条件、施工状況、供用期間などに影響されるが、各部材は同一ブロックから切出したものであるため、それらの条件は概ね一定と見なすことが可能と考えられる。また、表面における塩化物イオン濃度は、コンクリートが曝される塩害環境の厳しさを定量的に表すものである。既往の研究^{例えば、8)}により、表面における塩化物イオン濃度は H.W.L. から部材表面までの距離と相関が高いことが示されているが、各部材は全て同一高さに位置していた。以上のことから、表面塩化物イオン濃度のばらつきは、床版下面における海水の飛沫状況や風向など部材内の局所的な塩化物イオン

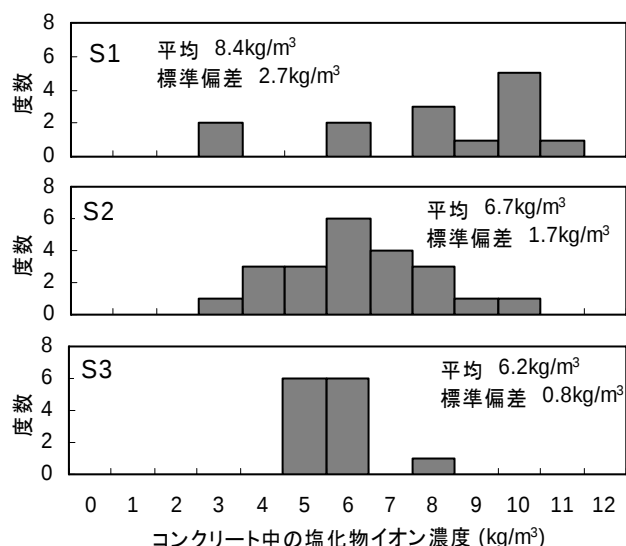


図-6 塩化物イオン濃度の頻度分布

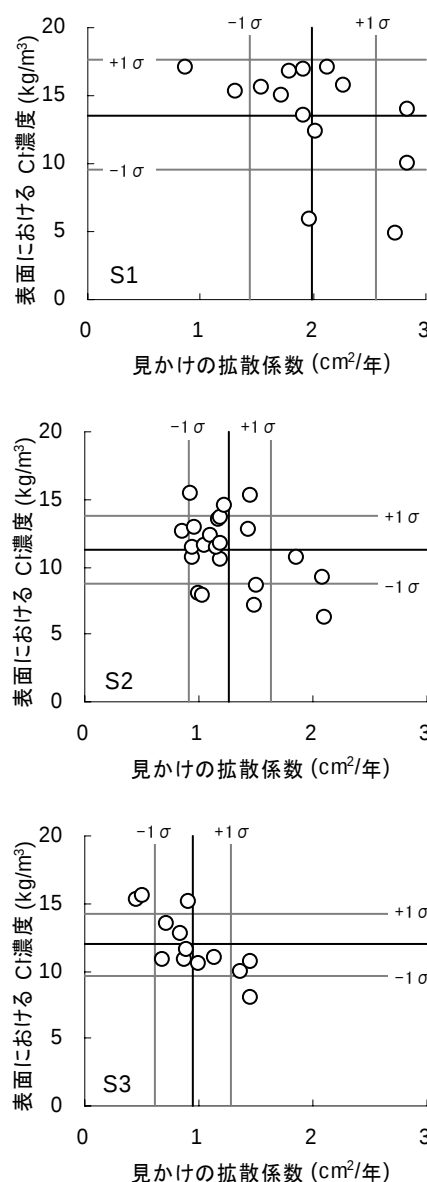


図-7 見かけの拡散係数と表面塩化物イオン濃度

の供給環境差により生じたことが考えられる。さらに、環境条件のばらつきが、計算上、それぞれのコアにおける塩化物イオンの見かけの拡散係数に影響を及ぼしたことが推測される。

表-2 に示すように、塩化物イオンの見かけの拡散係数および表面における塩化物イオン濃度ともに平均値 $\pm 1\sigma$ の範囲であるコアは、各部材とも5割程度であった。既存構造物の塩化物イオン濃度調査では、一般的に、一部材から1~2本程度のコアを採取し、コンクリート中の塩化物イオン浸透性状を評価している。しかし、表-2の結果から、採取したコア1本が部材全体のコンクリートの塩化物イオン浸透性状を代表するものではない可能性が高いことが考えられる。長期間供用した一構造部材から複数のコンクリートコアを採取し、それらの塩化物イオン浸透性状のばらつきを検討した報告は見当たらないため、本研究でみられたばらつきの程度の大小は定かではない。しかし、点検結果を基にRC構造物の劣化予測を精度良く行うためには、最適なコア採取手法や採取したコアの信頼性に関する検討が必要であるといえる。

4.2 はりの塩化物イオン浸透性状

(1) 塩化物イオン濃度分布

塩化物イオンは、海水面と部材との距離が小さいほどコンクリート中に多量に侵入する。本研究では、はり部下面および側面、またハンチ部からコアを採取したため、海水面からそれぞれのコア採取箇所までの距離を考慮して、コンクリート中の塩化物イオン濃度分布を整理する。海水面からコア採取箇所までの距離は、コア直径を鑑みて、距離0.05m毎に採取距離を下方側に丸めて取り扱うこととした。

ここで、前述のとおり、はり下面はH.W.L.より下方に位置することから、計算上、はり満潮時に下面から110mm程度は浸水する状態である。また、はり隅角部のコンクリートには、下面および側面の2方向から塩化物イオンが侵入する。このことから、図-8に示すはりB3におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度分布は、海水面からコア採取箇所までの距離+0.15m以下とそれ以上の箇所に分類し、また、図の煩雑化を避けることを目的として陸側および海側側面に分類した。これより、+0.15m以下における塩化物イオン濃度は、他と比較して内奥部にも多量の塩化物イオンが侵入しており、その分布形状からも前述の2方向からの塩化物イオンの供給が推測される。+0.15m以上においては、表面付近の中性化あるいはセメント水和物の溶出などの影響が考えられるものが一部見られたが、概ね式(1)で回帰が可能な形状の塩化物イオン濃度分布となった。なお、一部のコアの中性化を確認したとこ

表-2 D および C_0 のばらつき

部材	D の 変動係数	C_0 の 変動係数	D, C_0 平均値 $\pm 1\sigma$ 範囲内データの割合
S1	28%	30%	57%
S2	28%	23%	50%
S3	35%	19%	54%

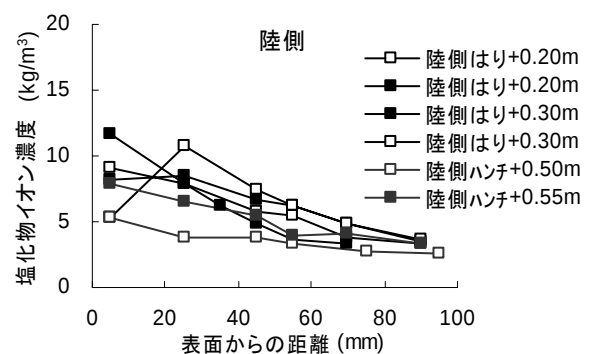
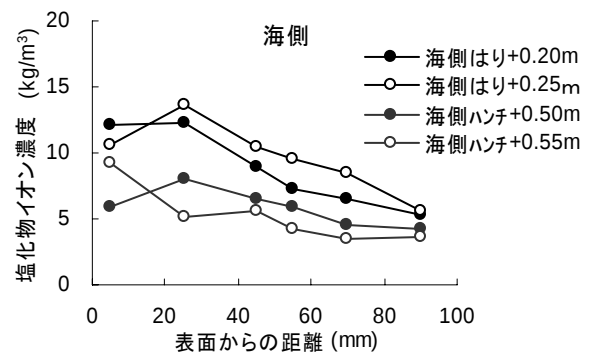
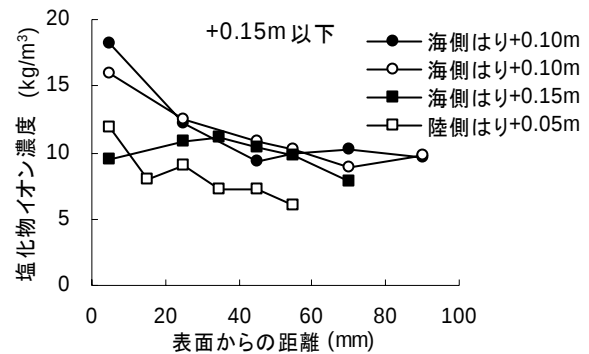


図-8 塩化物イオン濃度分布 (B3)

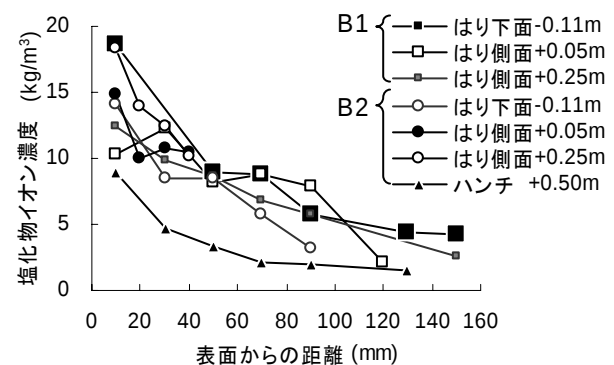


図-9 塩化物イオン濃度分布 (B1, B2)

ろ、中性化深さは2～5mm程度であった。海側と陸側の塩化物イオン濃度分布を比較すると、海側の塩化物イオン濃度が大きくなる傾向が見られた。これより、波浪や風向などの影響により、海側側面は陸側と比較して、塩化物イオンが多量に供給される環境であったことが考えられる。また、両者とも、ハンチ部は側面部よりも塩化物イオン濃度が小さく、これは海水面からコア採取箇所までの距離の影響によるものと考えられる。

図-9にB1およびB2におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を示す。B3と同様、はり側面+0.15m以下における塩化物イオン濃度分布からは、2方向からの塩化物イオンの供給が推測される。また、ハンチ部の塩化物イオン濃度分布に着目すると、B3よりも海水面からの距離が大きいことによる影響が顕著であった。

(2) 表面における塩化物イオン濃度に関する検討

図-10に表面における塩化物イオン濃度とH.W.L.からコア採取位置までの距離の関係を示す。ここでは、前節で述べた隅角部の影響を排除するため、+0.15mより下方のはり側面から採取したコアを除いて整理している。また、同図に、文献7)および文献8)における両者の関係を示した。はりB1、B2、B3における両者の関係は、H.W.L.からコア採取位置までの距離が小さくなるほど、表面における塩化物イオン濃度が増加する傾向であった。また、両者の関係を平均的に整理した場合、本研究における両者の関係は、文献7)および文献8)よりも緩やかになることが考えられる。これは、既往の研究では複数の栈橋上部工におけるコンクリートの塩化物イオン濃度分布から両者の関係を求めているのに対して、本研究では1箇所の栈橋上部工を対象としており、そのために環境条件が集約したことが要因と考えられる。また、参考までに、床版S1、S2、S3における両者の関係を図-10に示した。はりのデータも含めて、同一距離における表面塩化物イオン濃度のばらつきがあらためて認識される。現状では、このような同一構造物内の表面における塩化物イオン濃度のばらつきを精緻に評価することは不可能である。RC構造物の効率的な維持管理の実現のためにも、調査および劣化予測のために採取したコアの塩化物イオン濃度分布に対する信頼性の評価手法の構築が必要であるといえる。

5. まとめ

本研究では、供用約40年が経過した栈橋上部工から切り出したRC部材のコンクリート中の塩化物イオン浸透性状の非一様性について検討した。コンクリー

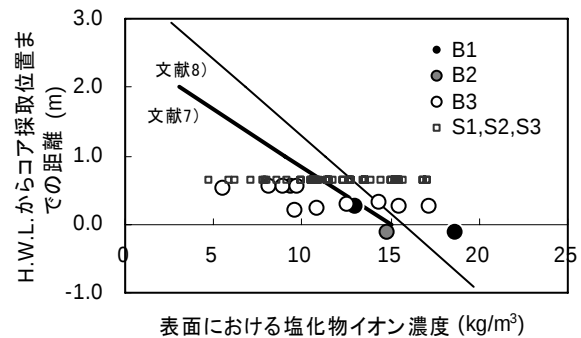


図-10 表面における塩化物イオン濃度とH.W.L.からコア採取位置までの距離の関係

ト中の塩化物イオン浸透性状は、部材内のコア採取箇所と海水面の距離、海水の飛沫状況、波浪、風向などの局所的な環境差により、同一部材内においてもばらつきを生じることが推測された。このため、RC構造物の塩化物イオン浸透予測を精度良く行うためには、最適なコア採取手法や採取したコアの塩化物イオン濃度分布に対する信頼性の評価手法の構築が必要であることが考えられた。

参考文献

- 1) 加藤絵万, 岩波光保, 山路徹, 横田弘: 建設後30年以上が経過した栈橋上部工から切り出したRC部材の劣化性状と構造性能, 港湾空港技術研究所資料, No.1140, p.1-87, 2006.9
- 2) 横沢篤, 加藤絵万, 横田弘, 下村匠: 供用40年が経過したRC栈橋上部工の劣化と構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1591-1596, 2005
- 3) 国土交通省港湾局監修, (独)港湾空港技術研究所編著: 港湾の施設の維持管理技術マニュアル, 沿岸技術ライブラリー, No.26, (財)沿岸技術研究センター, 2007
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書[構造性能調査編], p.28, 2002
- 5) 小林一輔, 森弥広, 野村謙二: 圧縮載荷試験によるアルカリ骨材反応の診断方法, 土木学会論文集, No.460/V-18, pp.151-154, 1993
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書[施工編], 2002
- 7) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 2007
- 8) 網野貴彦, 羽淵貴士, 守分敦郎: 構造条件や波浪条件の違いが栈橋上部構内の空間的な腐食環境に及ぼす影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.7, pp.225-230, 2007.11