

論文 実構造物コアを用いた室内塩水浸せき試験による各種混和材の塩分浸透抵抗性の評価

鎌田 知久^{*1}・岸 利治^{*2}

要旨: 各種混和材を混合したコンクリートの塩分浸透抵抗性を評価するため、フライアッシュと高炉セメントが使用された護岸構造物から採取したコアを用いて、室内塩水浸せき試験を実施した。塩水浸せき期間 36 ヶ月経過時に塩分分析を行い、過去に同コアを用いて行われた結果と比較したところ、フライアッシュを混和したコンクリートでは、浸せき期間が延びているにもかかわらず、塩分の浸透位置は変化していなかった。塩分の浸透が拡散則に従わずに停滞する可能性があることを室内塩水浸せき試験で確認したものと見える。

キーワード: フライアッシュ, 高炉セメント, 室内塩水浸せき試験, 塩分浸透性状, 塩分浸透停滞現象

1. はじめに

コンクリート構造物の代表的な劣化事象の一つである塩害について現在の耐久性照査では、表面塩化物イオン濃度 C_0 と見かけの拡散係数 D_a が一定と仮定した上で、Fick の拡散則の解析解に基づきコンクリート中への塩化物イオンの浸透予測を行っている。しかし、実現象としては、 C_0 , D_a は経時的に変化することが武若ら¹⁾をはじめとして多くの研究者により指摘されている²⁾³⁾。また、高橋ら⁴⁾は、フライアッシュを混和した実構造物から採取したコアの塩分分析を行い、材齢の経過によらず塩化物イオンの浸透がある一定の深さで停滞する現象を報告している。さらに、佐々木ら⁵⁾は、フライアッシュと高炉セメントを使用した実構造物からコアを採取し塩分分析を行った結果、塩分供給量が異なるにもかかわらず塩分浸透深さが一定であることを確認している。このように、実環境において塩分の浸透が停滞する現象が報告されており、従来の考え方では説明し得ない塩分浸透停滞現象の存在が明らかになりつつある。著者らは、佐々木ら⁵⁾が採取したコアに対して室内塩水浸せき試験を継続して行っており、本研究では塩分浸透停滞現象の存在と、室内塩水浸せき試験においても上記の現象を再現可能であることを確認するため、浸せき期間 36 ヶ月時点において塩分分析を実施し過去の結果と比較することで、各種混和材の塩分浸透抵抗性を評価した。

2. 供試体および試験概要

2.1 供試体概要

フライアッシュを混和したコンクリート（以下、FC）と高炉セメントを使用したコンクリート（以下、BB）が隣接して打設された護岸構造物を対象に、2011 年 7 月（材齢 11 年時点）に調査が行われた⁵⁾。調査対象の護岸構造物について、FC は表-1 に示した配合表のうち、1 社で製造されたコンクリートが使用されているが、調査対象箇所のコンクリートがどの工場で製造されたかは不明である。また、BB は簡易的な配合（表-2）しか残されていない。さらに、いずれのコンクリートも養生条件については不明である。BB, FC 共に、護岸構造物海側の海面から高さの異なる 4 本（飛沫帯: 3 本, 干満帯: 1 本）と陸側から 2 本の計 6 本ずつコア（φ100×160~200mm）が採取された。海側のコア採取位置の概略図を図-1 に示す。陸側および上部 2 箇所はプレキャスト、下部 2 箇所は現場施工されたコンクリートである。以上の調査で採取されたコアを用いて、本研究では、コア採取時（材齢 11 年）に塩分分析が行われた表層 10cm 以外のより深い部分のコア、すなわち、塩分浸透の影響を受けていない領域を供試体（FC: 5 本, BB: 5 本）として使用した。コア採取後の供試体の処理工程を図-2 に示す。供試体は、4 分割にカットし、浸せき面とその反対面を除き、塩水の浸透を防ぐようにエポキシコーティングした。

表-1 3社の工場で製造されたフライアッシュを混和したコンクリートの配合表

| 工場 | W/(C+F) (%) | s/a (%) | 粗骨材 最大寸法 (mm) | FA 混入率 (%) | 単用量(kg/m ³) | | | | | |
|-----|----------------|------------|---------------------|---------------|-------------------------|-----------|--------------|----------|----------|-----------|
| | | | | | W 水 | C セメント | F フライアッシュ | S 細骨材 | G 粗骨材 | AE 減水剤 |
| A 社 | 45 | 43 | 40 | 30 | 166 | 258 | 111 | 741 | 1004 | 0.922 |
| B 社 | 45 | 43 | 40 | 30 | 166 | 258 | 111 | 738 | 1001 | 3.69 |
| C 社 | 45 | 43 | 40 | 30 | 164 | 255 | 109 | 743 | 1029 | 0.91 |

*1 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 修士(工学) (学生会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 教授 博士(工学) (正会員)

表-2 高炉セメントを使用したコンクリートの簡易配合表

| 配合 | W/C (%) | 設計基準強度 (kg/cm ²) | 最大骨材寸法 (mm) | スランブ (cm) | 空気量 (%) |
|-----------|---------|------------------------------|-------------|-----------|---------|
| BB50 (B種) | 50 以下 | 210 | 20 | 10±2 | 4±1 |

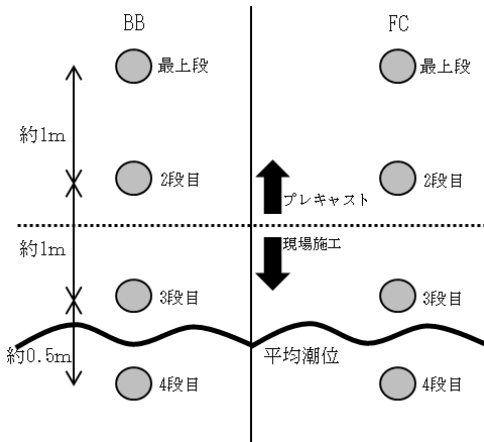


図-1 海側コア採取位置の概略図

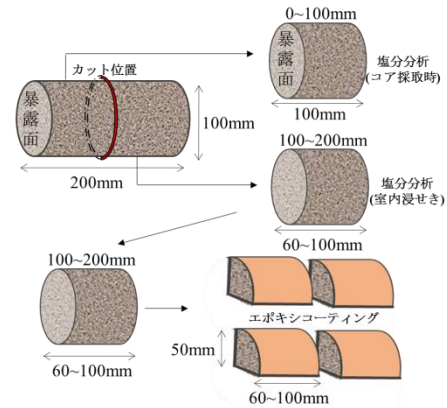


図-2 コア採取後供試体処理工程

2.2 試験概要

(1) 全塩化物イオン量滴定試験

佐々木ら⁵⁾は、採取したコアの表層から深さ 10cm までの部分を、1~5cm までは 1cm 間隔に、それ以深は 5~7cm, 7~10cm となるように 7cm の部分をカットし、JIS-SC-5「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法」に準拠して、表層から各深さにおいて全塩化物イオン量滴定試験を実施した。なお、その結果である対象護岸構造物の材齢 11 年経過時における、各種混和材の塩分浸透性状は参考文献⁵⁾で既に報告されているが、本研究の結果と比較するため、次章で本論文に転載し再度考察する。

(2) 空隙構造分析

塩分等の有害物質は、空隙を移動経路としてコンクリート内部へと侵入するため、物質浸透抵抗性としては空隙構造の緻密さは重要な要因となる。そこで、本研究では、後述する室内塩水浸せき試験に使用した供試体の表面から 5cm、すなわち構造物表面から 15cm 以深より試料を採取し、水銀圧入法による空隙構造の分析を行った。試料は 1 辺が 5mm 程度の立方体になるように加工し、各供試体から約 1.5g 採取した。その後、アセトンに 24 時間浸せきし、D-dry により 24 時間真空乾燥した後、水銀圧入ポロシメーターを使用して空隙構造を測定した。

(3) 室内塩水浸せき試験

2.1 節で示したように、採取されたコアにより、図-2 に示した表層 10cm 以深の部分室内塩水浸せき試験の供試体として使用した。供試体の長さは、短いもので 6cm、最も長いものでは 10cm となっている。また、供試体の浸せき方法としては、図-3 に示したように、塩水が垂直に浸潤するように、供試体を鉛直方向に設置した。なお、塩水浸せき用のコンテナには蓋がされており、内部

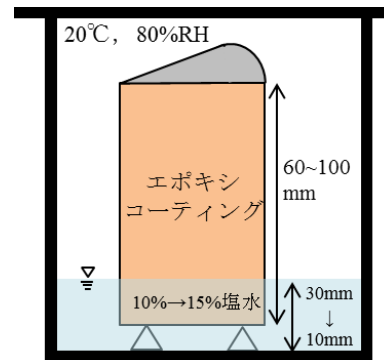


図-3 供試体浸せき状況

は常に 20°C, RH80% に保たれている状態であるため、上部開放面からの水分の逸散による塩分浸透への影響は小さいと考えられる。しかしながら、浸せき期間 36 ヶ月に至るまでに塩水の補充を行っていなかったため、水位は 30mm から 10mm に減少し、塩水の濃度は 15% に上昇していた。水位低下後も供試体浸せき面は、塩水に浸かっており、なおかつ水位の低下による水圧の変化よりも、毛管力による移流もしくは拡散現象が支配的であると考えるため、水位が低下したことによる水頭差の影響は受けないものと考えた。また、塩水濃度の上昇は、試験条件をより厳しくする方向の変化であるため、本研究の目的に照らして問題ないと考えた。浸せき後、供試体を表層から 1cm 間隔でカットし、JIS-SC-5「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法」に準拠して全塩化物イオン量滴定試験を実施した。本研究では、浸せき期間 36 ヶ月の塩分分析結果を浸せき期間 1 ヶ月の結果⁵⁾および材齢 11 年経過時の実構造物の調査結果⁵⁾と合わせて比較し、検討する。

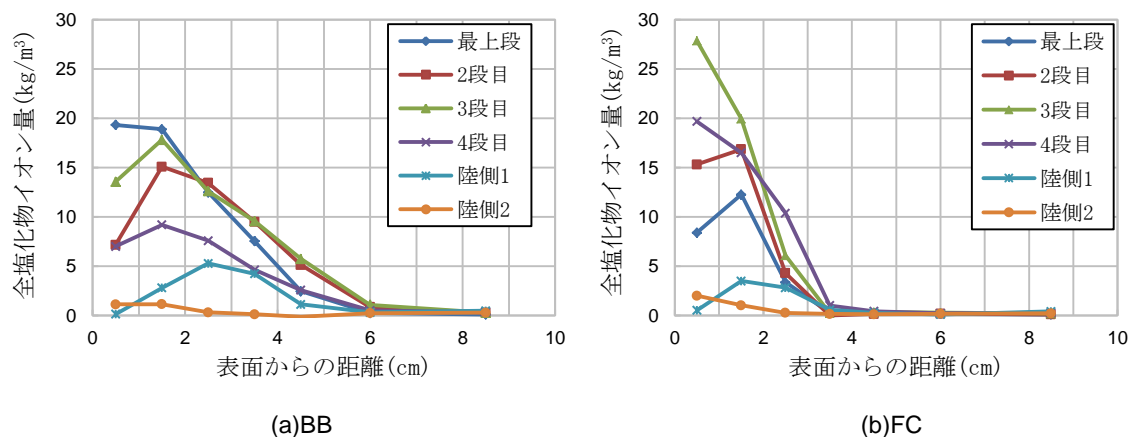


図-4 コア採取時点（材齢 11 年）⁵⁾

3. 試験結果および考察

3.1 全塩化物イオン量測定試験

材齢 11 年経過時における、全塩化物イオン量測定試験の結果を参考文献⁵⁾の図に修正を加え図-4 に示す。高炉セメントを使用したコンクリート (BB) において、コア採取高さによって塩分供給量が異なるにもかかわらず、いずれも表面から 6.5cm 付近が塩分浸透の最先端となっている。また、フライアッシュを混和したコンクリート (FC) においても、BB と同様にコア採取高さによって塩分供給量が異なるにもかかわらず、いずれも表面から 4.5cm 付近が塩分浸透の最先端となっている。浸透深さについて BB と FC を比較すると、フライアッシュを混和した方が、より高い塩分浸透抵抗性を示す結果となった。コア採取位置によって表面の塩化物イオン量や分布勾配に差異があるにもかかわらず、塩分浸透深さがほぼ等しいということは、塩分の浸透がその深さで停滞している可能性を強く示唆するものと捉えている⁵⁾。

このような塩分浸透停滞現象は、従来の耐久性照査における簡易的な拡散則では説明することはできず、拡散則とは異なる塩分浸透メカニズムが存在するものと考えられる。これまでに、塩分の浸透位置が液状水の浸潤位置と一致するという結果が報告されており⁶⁾、岡崎らは、分子動力学シミュレーションにより、微小空隙中の透水現象を再現し、微小空隙中では液状水の浸潤が停滞する可能性があることを指摘している⁷⁾。さらに中村らは、ガラス製チップ上に作製したナノスケールの流路を用いて、10nm オーダーの狭い管路では、条件により塩化物イオンの浸透が静電的作用により抑制される可能性があることを示している⁸⁾。これらの事象が複合的に作用することにより、コンクリート内部で塩分の浸透が停滞する現象が生じているのではないかと考えられるが、上記以外の機構の存在も視野に入れ、解明することが今後の課題である。

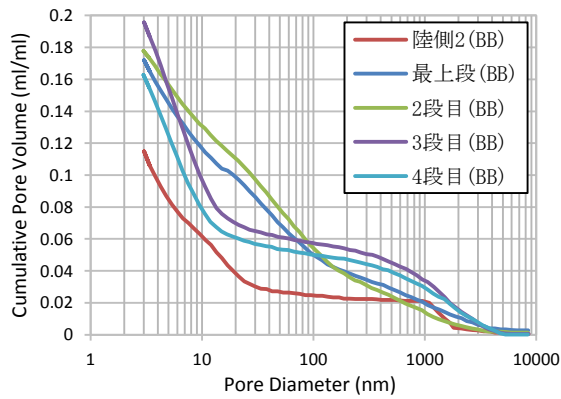
3.2 空隙構造分析

水銀圧入法による空隙構造分布の測定結果を図-5 に示す。BB に関して、プレキャスト（最上段と 2 段目）と現場施工（3 段目と 4 段目）を比較すると、空隙構造の分布は異なる傾向を示した。陸側 2 に着目すると、空隙構造がその他の分布と比べ極めて密という結果であった。また、FC はプレキャストと現場施工において空隙構造の分布に目立った相違は見受けられなかった。BB と FC の空隙構造分布を比較するため、図-5 中の(c), (b) に示したように、BB と FC をプレキャスト（最上段および 2 段目）と現場施工（3 段目および 4 段目）に分類した。それぞれを比較した結果、FC の方がプレキャスト、現場施工共に、BB より累積空隙量曲線が下方に分布しており、空隙構造が緻密であることが分かる。すなわち、空隙構造の観点から見ると、FC の方が BB よりも物質移動抵抗性が高く、塩分浸透抵抗性の傾向と整合した結果であるといえる。

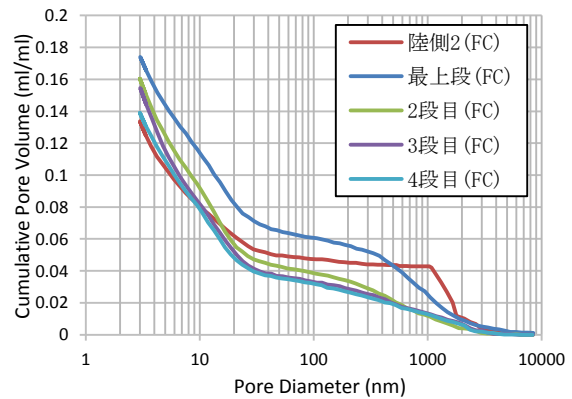
3.3 室内塩水浸せき試験

室内塩水浸せき試験の浸せき期間 36 ヶ月における全塩化物イオン量測定試験の結果を図-6 に示す。また、浸せき期間 36 ヶ月の結果と共に、浸せき期間 1 ヶ月の室内塩水浸せき試験の結果⁵⁾と材齢 11 年経過時の実構造物調査の結果⁵⁾を合わせて比較したものを図-7 に示す。本比較では、室内塩水浸せき試験と最も条件に近い、実環境で干満帯に位置していた 4 段目と、過去に試験が行われた供試体数の制約から陸側 2 のみ比較を行った。

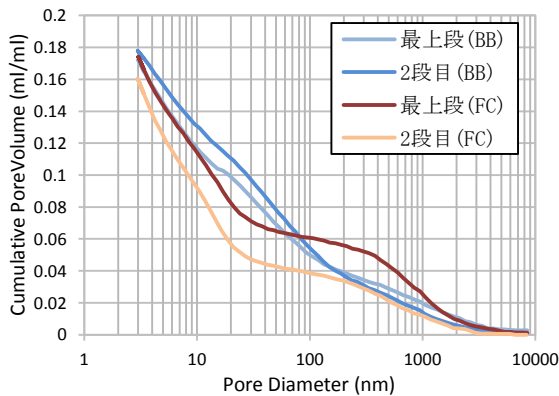
本研究で実施した室内塩水浸せき試験は、供試体浸せき面への塩分供給量が一定であるため、図-4 の材齢 11 年経過時の結果と比べ、図-6 における表面付近の塩化物イオン量および分布傾向は BB、FC 共にコア採取位置によらず概ね類似している。また、図-6 の BB において、塩化物イオンの浸透深さは表面から約 4.5cm、FC においては、約 2.5~3.5cm という結果となっており、フラ



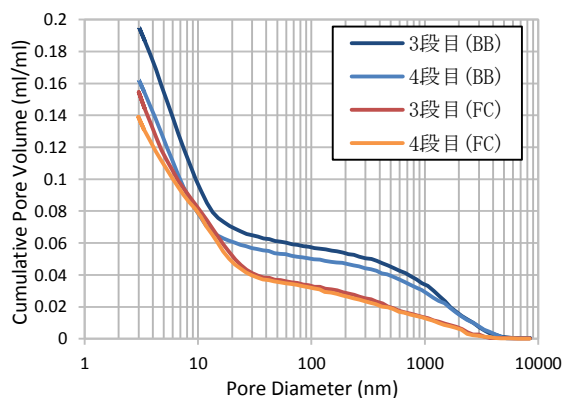
(a)BB



(b)FC

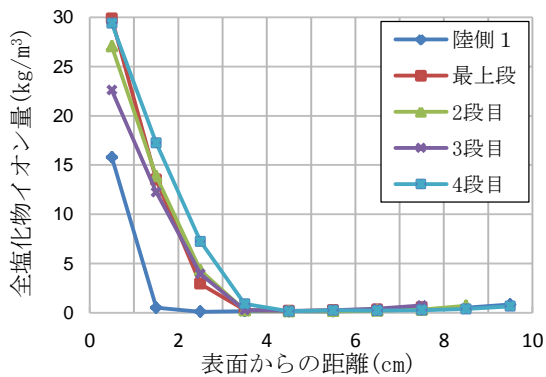


(c) 最上段, 2段目による比較

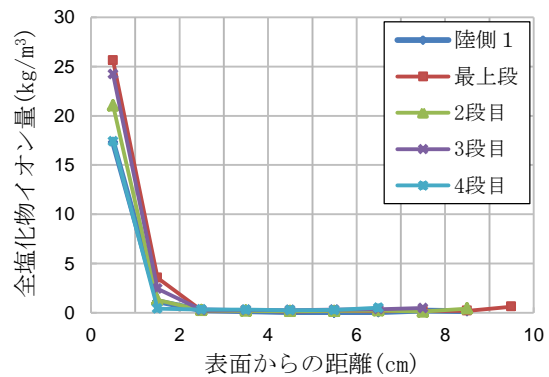


(d) 3段目, 4段目による比較

図-5 空隙径分布



(a)BB



(b)FC

図-6 浸せき期間36ヶ月における塩分浸透性状

イアッシュを混和したコンクリートの方がより高い塩分浸透抵抗性を示した。この結果は、コア採取時（材齢11年経過時）と同様の傾向を示しており、フライアッシュの混和による塩分浸透抵抗性を室内塩水浸せき試験でも確認したといえる。また、3.2節の空隙構造の分析結果と、これらの結果が対応していることから、各種混和材を使用した場合の塩分浸透抵抗性は空隙構造とも相関が高いことが示唆されたといえる。

続いて塩分供給期間による比較結果を述べる。図-7中のBB、FC共に、浸せき面とは反対側の深部で塩化物イオン量のごく僅かに増加している結果がいくつか見られるが、これについては、浸せき期間中に供試体外側の壁面を塩分が徐々に登って行き、開放面から供試体内部に塩分が浸透したことが原因の一つである可能性があるため、本研究では、供試体深部の塩化物イオン量の微小な増加は塩分浸透現象によるものではないと解釈した。

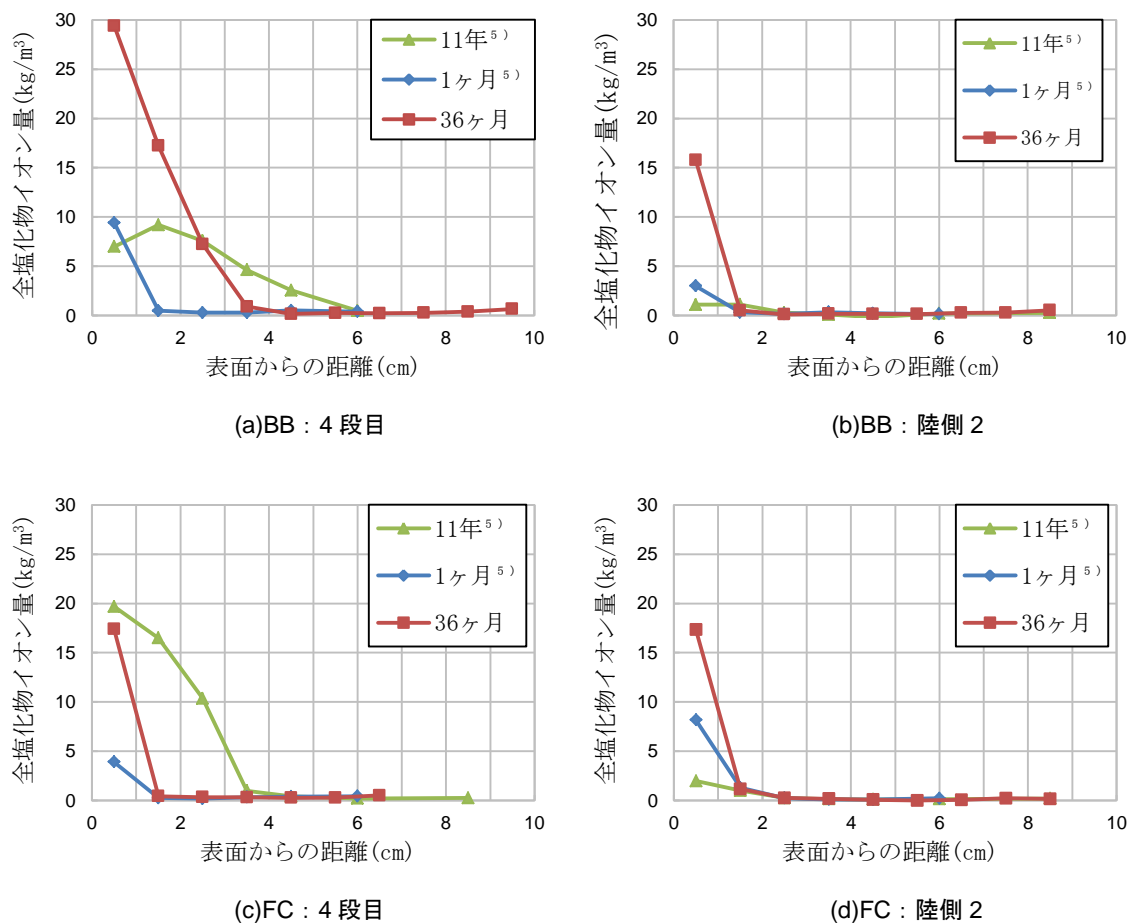


図-7 浸せき期間における塩分浸透性状の比較

BB, FC 共に, 浸せき期間によらず表面付近で塩化物イオンの浸透量が大幅に減少し, そこから緩やかな勾配となる傾向が見受けられる。図-7 中の(a), (b)に示した BB のコア採取位置ごとの比較結果より, 浸せき期間 1ヶ月時点では, 4 段目, 陸側 2 の双方が表面から 1.5cm 付近まで塩分が浸透している。浸せき期間 36ヶ月時点では, 4 段目は 4.5cm まで浸透しているものの, 陸側 2 では 1ヶ月時点以上の浸透が認められず, 塩分の浸透が停滞している。これは, 3.2 節の空隙構造の分析結果から, 陸側 2 のみ極めて緻密であったことが影響していると考えられる。しかし, 空隙構造の結果からは, 陸側 2 以外の供試体では同様の傾向を示しているため, 塩分浸透性状においてはそのほとんどが, 4 段目の結果と同様の傾向を示すと推察される。それにより, 4 段目では 36ヶ月時点で, 塩分浸透停滞の判断材料が现阶段では欠けているため, BB については今後も塩水浸せき試験を継続して行い, 塩分浸透性状を明らかにする予定である。

図-7 中の(c), (d)に示した, FC のコア採取位置ごとの比較結果では, 4 段目の結果より, 浸せき期間 1ヶ月時点で 1.5cm 付近までの塩分の浸透を確認した。浸せき期間 36ヶ月時点では, 浸せき期間が延びたことで, 表面

付近の塩化物イオン量は増加しているが, 浸透位置は 1.5cm であり, 浸せき期間の経過によらず塩分の浸透深さが変化していない。さらに, 陸側 2 の結果も同様に, 浸透位置は 4 段目の結果と異なるが, 浸せき期間が延びているにもかかわらず浸透位置が 2.5cm 付近で停止している。これらは, 塩分の浸透が停滞していることを示唆する結果であり, フライアッシュを混和したコンクリートでは, その高い塩分浸透抵抗性を示すと共に, 塩分浸透停滞現象を確認できたといえる。しかしながら, 浸せき期間 36ヶ月時点で, 塩分浸透フロントが材齢 11 年経過時の塩分浸透位置に到達していないことから, 今後さらに浸せき期間を設けることで塩分の浸透位置が深くなる可能性があるとも考えられる。しかし, これは空隙構造が密になりきっていない竣工直後から, 塩分が供給される環境下に置かれたことにより, 塩分が深部まで到達したことが原因であると説明できる。このような塩分浸透停滞現象は, 空隙構造の緻密さが支配的であるようにも考えられるが, 電気的あるいは化学的な影響の可能性も排除することができない。そのため, 電気的, 科学的もしくはそれ以外のメカニズムの存在を考慮し, 塩分浸透停滞現象の解明をする必要がある。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1)フライアッシュおよび高炉セメントを使用した実構造物から採取したコアにおいて、材齢 11 年経過時の塩分分析の結果を既往の研究より転載し、考察した結果、塩分供給量が異なるにもかかわらず、塩分の浸透が一定の深さで停滞していることを確認した。さらに、高炉セメントを使用した場合に比べ、フライアッシュを混和したコンクリートの方が優れた塩分浸透抵抗性を有していることを確認した。
- (2)水銀圧入法による空隙構造分布の測定結果から、混和材種類により空隙構造の相違がみられ、フライアッシュを混和したコンクリートでは、空隙構造が緻密になっていることを示した。また、室内塩水浸せき試験の結果と比較し、よく対応していることを確認した。
- (3) 室内塩水浸せき試験の結果、フライアッシュを混和したコンクリートでは、浸せき期間 1 ヶ月と 36 ヶ月の塩分浸透深さが一致していた。塩分供給期間が延びたにもかかわらず、塩分の浸透位置が変化していないため、塩分浸透停滞現象が生じていることを確認できたといえる。

参考文献

- 1) K. Takewaka and S. Matsumoto : Quality and Cover Thickness of Concrete Based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments, ACI SP109-17, pp.381-400, 1988.8
- 2) 大城良信, 仲本文範, 山田義智, 大城武 : 海洋環境下における石炭灰を使用した RC 構造物の施工報告, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.789-794, 2002
- 3) (社) 土木学会 電力 FA コンクリート研究会 : 平成 20 年度フライアッシュを利用するコンクリートの耐久性に関する調査研究, pp.44-54, 2009.3
- 4) 高橋佑弥, 井上翔, 秋山仁志, 岸利治 : 実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.803-808, 2010
- 5) 佐々木章, 竹内直也, 岸利治, 蔵重勲 : 混和材を使用したコンクリート護岸から採取したコアを用いた塩分浸透停滞に関する研究, 土木学会第 67 回年次学術講演概要集, 第 V 部, pp.171-172, 2012.9
- 6) 高橋佑弥, 岸利治, 糸山豊 : フライアッシュを用いた護岸コンクリート構造物の液状水移動に着目した塩分浸透性状の検討, コンクリート技術シリーズ 89 号, シンポジウム概要集, pp.449-454, 2010
- 7) 岡崎慎一郎, 浅本晋吾, 岸利治 : 分子シミュレーションによる微小空隙中の液状水挙動の検証, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.3, pp.311-321, 2009
- 8) 中村兆治, 酒井雄也, 岸利治 : コンクリートへの塩化物イオン浸透停滞の機構に関するガラス製マイクロ/ナノ複合チップを用いた光学的実験による検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.841-846, 2013