

高炉スラグ微粉末使用コンクリートにおける 塩分侵入限界深さの存在検証と機構解明

研究代表者

東京大学生産技術研究所 教授 岸 利治

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物（以下、RC 構造物）に外部から塩分が進入してコンクリート中の鉄筋周りの塩化物イオン濃度が高まると、鉄筋の腐食が促進させることにより、構造物の健全性は著しく損なわれる。そこで、構造物の設計段階における耐久設計の一環として、現在では外部からコンクリート中への塩分浸透に関する照査が行われている。現在の塩害に対する耐久性照査においては、表面塩化物イオン濃度 C_0 と見かけの拡散係数 D_a が一定という仮定の下、Fick の拡散則の解析解を用いて塩化物イオン浸透予測を行っている。しかし、実際は C_0 、 D_a 共に経時的に変化することが、1980 年代後半以降、武若ら¹⁾による研究をはじめとして多くの研究者によって、研究・報告がされている^{2,3)}。その要因は、主にセメントの水和反応やフライアッシュや高炉スラグ微粉末等の混和材のポゾラン反応の進行によるものとされているが、明確な因果関係については、未だ実証されていないのが現状である。これまでに、研究代表者らは、石炭火力発電所から排出される副産物であるフライアッシュを用いた護岸コンクリート構造物の調査を実施し、コンクリート表面からの深さ方向の塩分分布の測定と調査材齢ごとの拡散係数の計算から、少なくとも緻密なコンクリートで内部の相対湿度が高い状況では、拡散則では説明できない塩分浸透の停滞メカニズムが存在する可能性があることを示してきた⁴⁾。しかしながら、コンクリート中への塩分の浸透が条件次第では停滞するという解釈は従来の常識とは大きく異なるものであり、その妥当性を確認するためには、更に調査・検討を重ねることが必要不可欠といえる。そこで本研究では、フライアッシュ以外の代表的なコンクリート用混和材である高炉スラグ微粉末を用いた構造物を対象とした調査を実施すると共に、フライアッシュを用いた構造物の調査結果の整理も行い、ポゾラン反応性を有する混和材を用いた場合に特に顕著なコンクリート中への塩化物イオン浸透の停滞現象の確認を行った。

2. 普通コンクリートおよびフライアッシュコンクリートにおける塩分停滞現象

調査対象とした護岸構造物に使用されたコンクリートは、基本となるベース配合(B0)、セメントの内割り置換で 60kg/m^3 のフライアッシュを混合した配合(F1)、細骨材の一部との外割り置換として 80kg/m^3 のフライアッシュを混合した配合(F2)の 3 種類のコンクリートであり、これらを同一の護岸の一部として隣接したブロックに打設している。護岸全体の厚さは 18.5m であるが、コアを採取したコンクリート自体の厚さは 1.3m であり、壁の背面側は間詰材が充填されており直接外気に接しておらず、結果として背面からの水分の逸散を防ぐ構造となっている。

研究代表者らが実施した調査では、対象護岸構造物から経年 8 年 9 ヶ月(8.75 年)の時点でコアを採取した。コア採取位置を図-1 に示す。コア採取位置は、1 年半(1.5 年)と 3 年半(3.5 年)の全塩化物イオン量測定を行った既往の研究²⁾に倣って決定した。本研究では、3 配合それぞれについて3つの異なる高さ(high, middle, low)からコアを採取し、配合 3 種類×高さ 3 段階の計 9 本のコアについて比較検討を行った。コアを採取した 3 つの高さはどれも満潮面よりも高く、飛沫帯に位置する。

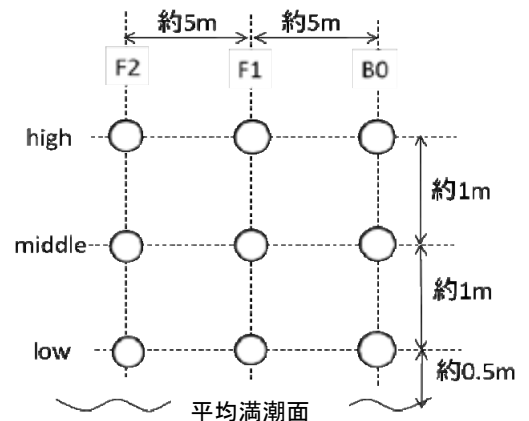


図-1 コア採取位置

採取コアにおいて、B0 の配合は構造物表面から 10cm までの部分、他の 2 配合は表面から 7cm までの部分を 1cm 幅でスライスし、電位差滴定法により、それぞれの位置の全塩化物イオン量を測定した。材齢 8.75 年において測定した全塩化物イオン量分布を図-2 に示す。

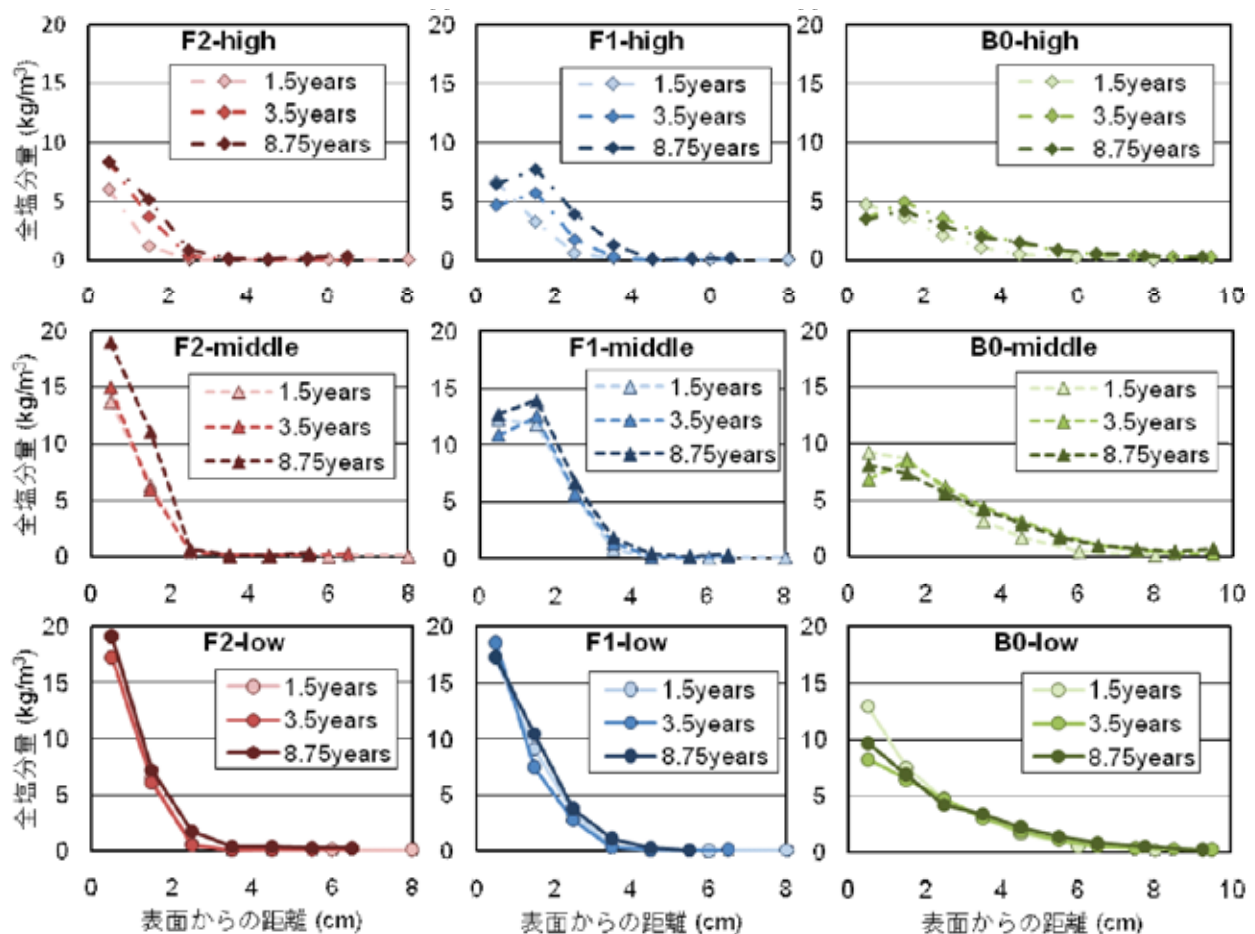


図-2 コアの全塩化物イオン量分布³⁾

図には既往の研究²⁾で測定された材齢 1.5 年と 3.5 年の結果も合わせて示している。

フライアッシュを混合したコンクリートにおいて、塩化物イオンの浸透深さは非常に浅く、フライアッシュコンクリートの高い遮塩性能が確認できる。また、海水との接触が最も頻繁であると考えられる low の位置において、何れの配合においても、全塩化物イオン濃度分布は調査時材齢によらずほぼ同じであり、構造物の深さ方向への浸透がほぼ停止しているように見受けられる。また、middle の位置においても、塩化物イオン浸透深さは調査時材齢によらずほぼ同一であり、塩化物イオン浸透フロントはほぼ停止しているように見える。さらに、これら low および middle の位置における浸透フロントの位置は、高さの違いに関わらず配合ごとにほぼ同一である。材齢 1.5 年の時点で F2 の配合は構造物表面から 2-3cm, F1 の配合は 4-5cm, B0 の配合は 8-10cm の位置まで塩化物イオンが浸透し、その後は浸透フロントはほとんど移動していないことがわかる。このような塩化物イオン浸透の停滞現象は示方書の耐久設計における塩害に対する照査⁵⁾で扱われているような簡易な拡散則では説明できず、少なくとも対象構造物のような壁厚が厚く、背面側が直接外気に曝されていない遮塩性能の高いコンクリートにおいては、拡散則とは異なる支配機構が存在する可能性を示唆していると言える。

high の位置については、F2 の配合では、middle の位置と同様の挙動であるが全体の塩化物イオン量が少ない。F1 はまだ浸透途中にあるように見える。これらは、high の位置は波があまりかからず、塩分供給量の少ない位置であるために、まだ他の位置と同様の分布となるまでには十分な塩分が供給されていないためと考えられる。

また、別途確認を行ったこれらのコンクリートの空隙構造は配合の違いに関わらず非常に似たものであったが、塩分浸透性状はフライアッシュの混和量により、大きく異なっている。このことは、本対象構造物においては、フライアッシュを混和することによって変化するコンクリート中の水和物の物理的構造ではなく、化学的な性質の変化がより支配的にフライアッシュコンクリートの高い塩分浸透抵抗性をもたらしているということを示しているといえる。

3. 高炉セメントを使用したコンクリート製防波堤における塩分浸透状況調査

調査対象とした構造物は高炉セメントを用いた防波堤であり、平成 6～10 年にかけて隣接した区画に毎年打設されたものである。詳細な記録は残っていないが、毎年打設されたコンクリートの配合は同じと考えられる。本研究の目的からすれば、同一の構造物に対して異なる材齢で実施した調査結果が複数有れば、コンクリート中への塩分の浸透が時間の経過に伴って進行するのか、あるいは停滞しているのかを判断することができるが、一般に同一の構造物に対して複数回の調査を行うことは稀である。なぜなら、一度、詳細な調査を行ってコンクリート表面から深さ方向の塩化物イオン濃度の分布を測定すれば、その結果を用いてコンクリート中の塩化物イオンの拡散係数を求めることが可能であり、同定された拡散係数を用いれば、その後の塩化物イオンの侵入は拡散則に従うことを前提として予測することが可能となるからである。本調査対象の防波堤も、

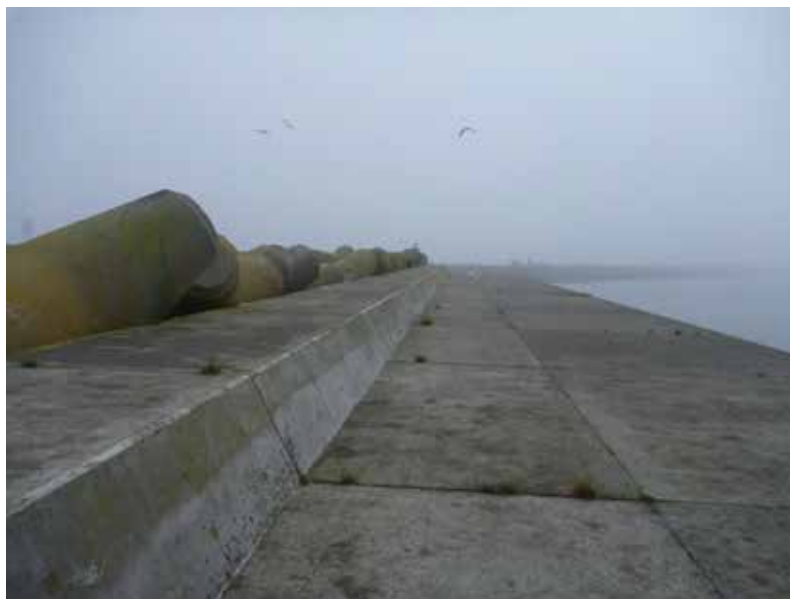


写真-1 調査対象とした高炉セメントを使用した防波堤



写真-2 防波堤側面のコンクリート表面近影（透水型砕の様態が見える）

過去にコンクリート中への塩化物イオンの侵入に関する調査が行われたことはなく、異なる調査材齢間でのデータの比較を行うことはできなかった。しかし、同じ配合のコンクリートを打設したと考えられる連続した防波堤が、平成6年から10年に掛けて連続して施工されていることから、施工年がそれぞれ1年ずつ異なる箇所からコンクリートを採取することにより、経年によるコンクリート中への塩分浸透の進行状況を捉えることが可能ではないかと考えた。調査対象とした防波堤の状況を写真-1に示す。

防波堤の側面には、その模様より、透水型砕が用いられたものと考えられる。透水型砕の跡と考えられる模様が分かる側面の近影を写真-2に示す。

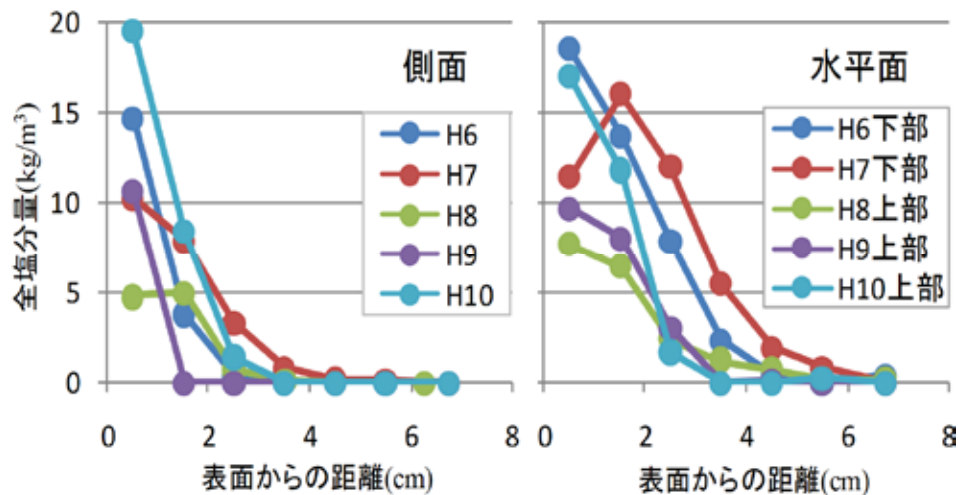


図-3 高炉セメントを使用したコンクリート防波堤における塩分浸透状況

防波堤は胸壁を有する段状になっており、コンクリートコアは側面（壁面）およびその上下の水平面から採取した。全塩化物イオン量滴定試験は、JCI-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」に準拠して測定を行った。

全塩化物イオン量滴定結果を図-3 に示す。透水型枠を用いたと考えられる側面においては、4cm 以深にほぼ塩分の浸透がみられないことから、塩分浸透が相当に抑制されていると考えられる。平成 6 年、平成 9 年、平成 10 年施工の箇所では、塩分の分布形状は表面から内部に向けて急激に減少する形状であるが、平成 7 年および平成 8 年施工の箇所では、表面付近の分布の傾きが若干緩やかである。中性化深さの測定も実施したが、いずれのコアでも中性化の進行は確認できなかったことから、これらの塩化物イオン濃度の分布の相違は中性化による影響ではない。

水平面についても塩分浸透深さはコアによって若干異なっているが、下部と表記したものに比べて上部と表記したものの方が塩分浸透深さが抑制されている傾向が見てとれる。ここで、下部と表記したものは、二段になっている防波堤水平面の下段から採取したコアであり、一方、上部と表記したものは、防波堤の上段から採取したものである。防波堤の形状から、防波堤の上段は波を被っても水はけが良く、雨水による洗い流しの効果も高いと考えられるのに対して、防波堤の下段は、海水や塩水を含んだ雨水が長時間溜まっている可能性が高いと考えられることから、このような環境条件の相違が、塩分の浸透状況に影響していたものと考えられる。

防波堤に使用されたコンクリートはほぼ同じ配合と考えられるが、施工年は 1 年ずつ異なっており、施工条件が同一である保証はなく、また、防波堤の全長は数 km に及んでいることから、天候が荒れた場合に海水の飛沫にさらされる頻度は、場所ごとに大きく異なると考えられる。したがって、施工条件・環境条件の両者に関して、防波堤の場所ごとに異なっている可能性が高いが、側面・水平面のいずれでも、塩化物イオンの侵入はコンクリートの表面付近に留まっており、特に、透水型枠を使用したと考えられる

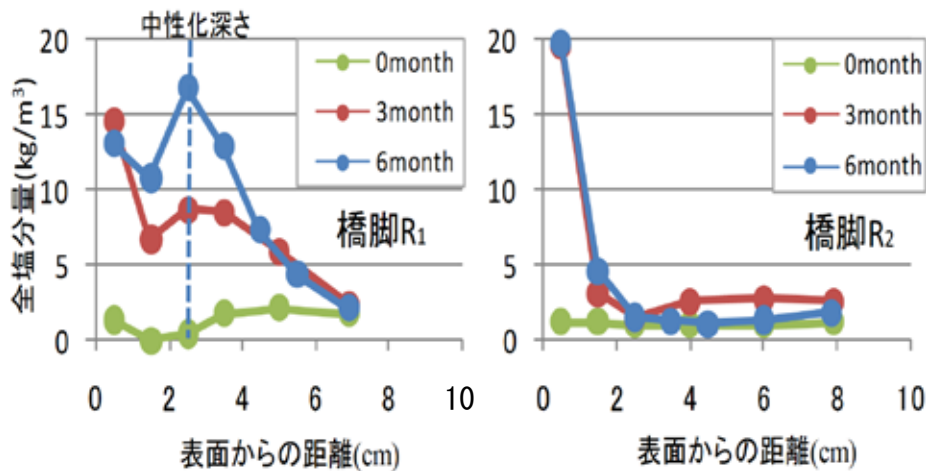


図-4 高炉セメントを使用したコンクリートコアを用いた室内塩水浸せき結果

側面では、浸透深さが約 4cm 付近に留まっている。これらの結果は、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートにおいても、コンクリートの品質がある程度高ければ、厳しい塩害環境においても、コンクリート中への塩分の浸透がコンクリートのごく表面に留まる可能性を示唆している。しかし、同一箇所での異なる調査時材齢間の比較ではないことから、場所ごとに外部からの供給塩分量とコンクリート品質が異なっていると考えられることから、この調査結果からは、コンクリート中への塩分浸透の停滞現象の有無についての確定的な判断は行えない。

4. 高炉セメントを使用した構造物から採取したコンクリートコアを用いた室内試験

高炉セメントを使用した 2 つのコンクリート橋脚（橋脚 R₁, R₂）からコアを採取し、実験室において塩水浸せき試験を実施した。室内塩水浸せき試験は、「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験方法(案)（JSCE-G572-2007）」に準拠して実施した。表面からコンクリート中への一次元の塩分浸透を生じさせるために、試験体は浸透面以外を樹脂で被覆し、20℃10%塩水中に水平に浸せきした。全塩化物イオン分布は電位差滴定法により測定した。試験体は所定の浸せき材齢ごとに取り出し、塩分浸透方向に切断して測定する試料を順次切り出して、測定試料以外は再度側面を樹脂で被覆して浸せきを継続することで、1 つの試験体で複数回の材齢での測定を実施した。

図-4 に、橋脚 R₁ と橋脚 R₂ から採取されたコアの塩水浸せき試験の結果を示す。ただし、橋脚 R₂ は採取したコアの深部を使用している。橋脚 R₁ のコアでは、構造物表面からの塩分浸透状況を見ているが、コンクリート表層の品質を反映した影響か、比較的深部まで塩分が浸透している様子が確認できる。中性化深さを測定したところ、表層部で中性化の進行が確認されたことから、中性化領域では塩化物イオンの固定化が生じずに

コンクリートの深部への塩化物イオンの侵入が進んでいる。しかし、5cm 以深では、浸せき材齢 3 ヶ月から 6 ヶ月にかけて塩分量分布の変化が生じていないことから、塩分浸透が停止している可能性が考えられる。また、橋脚 R₂ から採取した深部のコアにおいては、浸透深さが浸せき材齢 3 ヶ月から 6 ヶ月にかけてほとんど変化しておらず、塩分浸透が停滞している可能性が示唆された。また、塩化物イオンの浸透範囲は、わずか 2cm 程度であり、高炉スラグ微粉末を使用した場合にも、コンクリート品質が良好であれば、極めて高い遮塩性能を有することが伺える。

高炉セメントを使用した実構造物から採取したコンクリートコアを用いた室内塩水浸せき試験により、高炉スラグ微粉末を使用した場合にも、フライアッシュを用いたコンクリートと同様に、コンクリート中への塩分浸透が停滞する場合があるものと考えられる。

5. 高炉セメントを使用した構造物から採取したコンクリートコアを用いた室内試験

前章での高炉セメントを使用した実構造物から採取したコアを用いた室内塩水浸せき試験の結果から、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートにおいても塩分浸透の停滞現象が生じていることが示唆された。しかし、塩水浸せき試験の実施期間は 6 ヶ月と短く、また、2 章の高炉セメントを使用した実構造物の防波堤の調査では、条件を整えた比較を十分に行うことができなかった。そこで、再度、実構造物を対象とした調査を実施し、高炉セメントを使用した護岸構造物での塩分浸透状況を確認した。また、併せて、隣り合わせて建設されたフライアッシュを混和した護岸構造物からもコアを採取し同様の分析を行った。

調査対象としたのは九州地方に 2000 年に建設された護岸構造物であり、海側と陸側の両面から φ10×約 20cm のコアを採取した。コアの採取は、構造物の建設後 11 年で行った。海側のコア採取位置を図-5 に示す。図中の波線は平均潮位を示している。高炉セメントを使用したコンクリートとフライアッシュを使用したコンクリートから、それぞれ 4 本のコアを採取した。最下段は干満帯に位置し、表面は牡蠣に覆われていた。また上部 2 箇所の採取位置はプレキャスト、下部 2 箇所は現場施工されたコンクリートである。陸側からは高炉セメントを使用したコンクリートとフライアッシュを使用したコンクリート、それぞれのプレキャストコンクリートから 2 本ずつコアを採取した。本研究では 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、塩化物イオン量滴定試験を実施した。ま

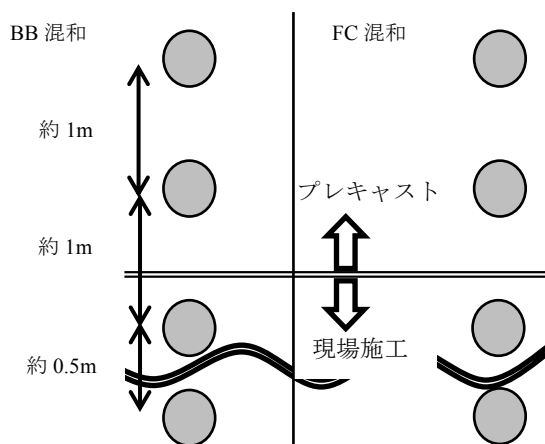


図-5 コア採取位置の概略図

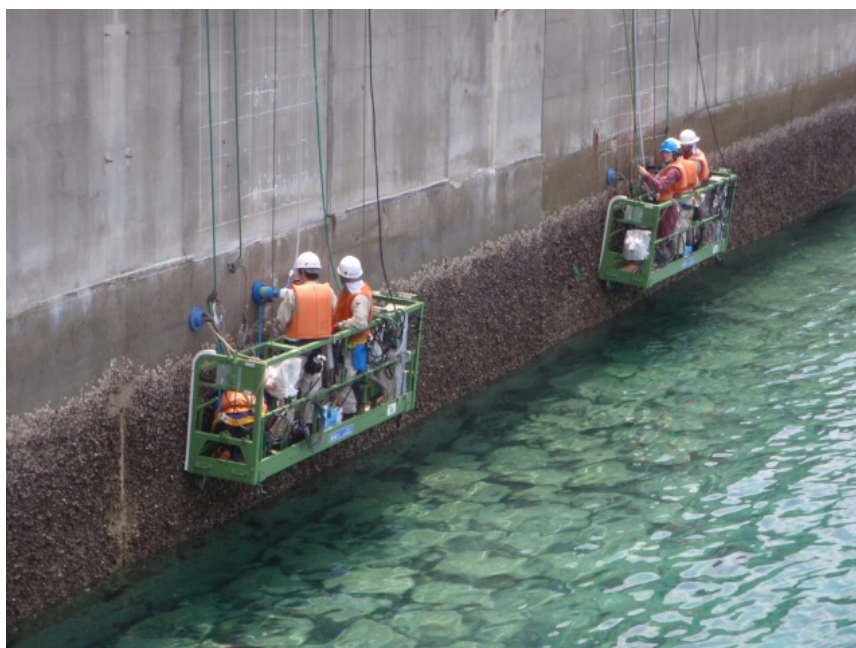


写真-3 調査対象とした高炉スラグ微粉末とフライアッシュを使用した護岸構造物

た、全てのコアの中性化深さを測定したところ、いずれも 1cm 程度であった。ゴンドラを使用して、護岸構造物の海側からコアを採取している状況を写真-3 に示す。

コアの表層部分 0-10cm を用いて採取時（材齢 11 年）の全塩化物イオン量の測定を行った。高炉セメントを使用したコンクリート護岸における滴定結果を図-6 に示す。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、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートコアではいずれも深さ約 6.5cm において、塩化物イオン量が 0 となる結果となった。コアによって表面の塩化物イオン量や分布の勾配に大きな差異があるにもかかわらず、浸透深さがほぼ等しいという結果は、その深さにおいて塩分浸透が停滞していることを示していると考えられる。

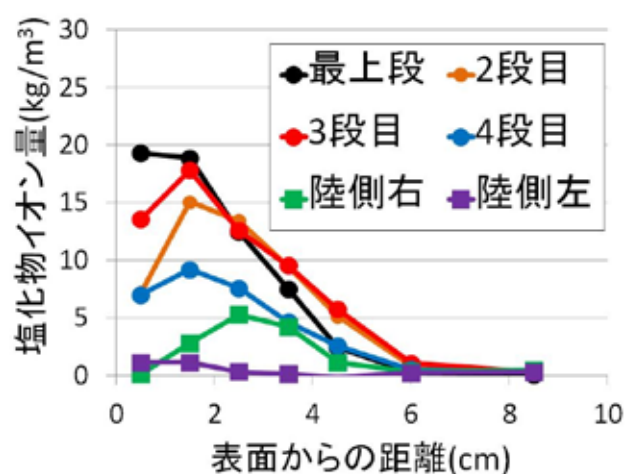


図-6 高炉セメントを使用したコンクリート護岸における塩分浸透状況

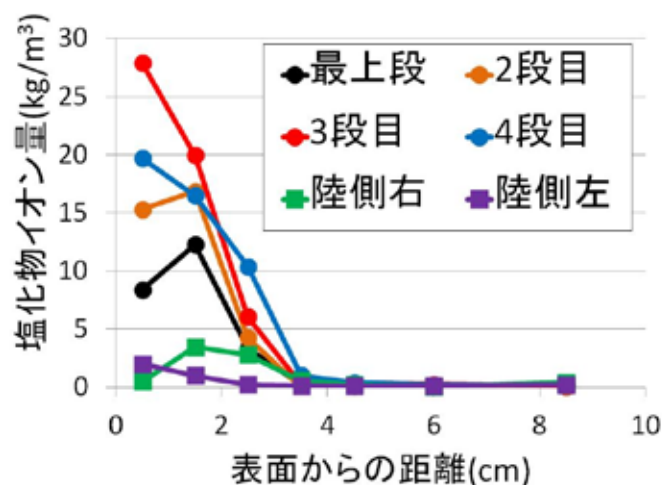


図-7 フライアッシュを使用したコンクリート護岸における塩分浸透状況

次に、フライアッシュを使用したコンクリート護岸における滴定結果を図-7に示す。高炉セメントを使用したコンクリート護岸における滴定結果と同様に、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、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートコアではいずれも深さ約4.5cmにおいて、塩化物イオン量が0となる結果となった。コアによって表面の塩化物イオン量や分布の勾配に大きな差異があるにもかかわらず、浸透深さがほぼ等しいという結果は、フライアッシュを使用したコンクリートにおいても、その深さにおいて塩分浸透が停滞していることを示していると考えられる。

6. まとめ

本研究では、高炉セメントを使用したコンクリートを用いた実構造物を調査し、採取したコアの分析結果とコアを用いて実施した室内塩分浸せき試験の結果から、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートにおいても、コンクリート表層からの塩分浸透の停滞現象が生じることを確認した。

従来、拡散則に従って時間の経過に伴ってコンクリート中に拡散していくと考えられていた塩化物イオンの浸透が、実際には完全には拡散則には従わずに、ある時点で停滞する可能性が示唆された。その機構については未だ不明な点が多いが、液状水の浸潤が停滞することにより、塩化物イオンの浸透領域も程度に強く依存した状況が想定される。研究代表者ら⁶⁾は、物質移動抵抗性の高い緻密なコンクリートにおいて、液状水の浸潤がある深さで停止する現象が存在する可能性を指摘し、その妥当性を分子シミュレーションにより検討している。仮に、液状水の浸潤がコンクリート表面からある深さで停滞するとすれば、液状水によって飽和した範囲でのみ、塩化物イオンの拡散や移流が生じるという考え方である。また、液状水が浸潤していない深部の不飽和領域にも、当該空

隙中の相対湿度と平衡した気液界面が存在する微小空隙中には液状水が存在しているが、そのような空隙では、塩化物イオンの拡散が生じない状況が想定される。その原因としては、液状水が凝縮した微小空隙相互が連結していない可能性や、ある寸法以下の微小空隙中では塩化物イオンの拡散が生じない可能性があるが、それらの機構に関する検討は今後の課題である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、公益財団法人 JFE21 世紀財団より助成を受けた。付記して、深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) Takewaka, K. and Matsumoto, S.: Quality and Cover Thickness of Concrete Based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments, ACI SP109-17, pp381-400, Aug.1988
- 2) 大城良信ほか：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，pp789-794，2002
- 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，pp44-54，2009.3
- 4) 高橋佑弥ほか：実構造物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，pp803-808，2010
- 5) （社）土木学会：2007 年制定 コンクリート標準示方書「設計編」，pp119，2007.3
- 6) 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，pp311-321，2009