

論文 飛来塩分/付着塩分/浸透塩分の比較評価—駿河海岸での調査から—

佐々木 巖^{*1}・櫻庭 浩樹^{*2}・西崎 到^{*3}・皆川 浩^{*4}

要旨: 塩害環境の定量把握については、これまでに様々な調査法が提案されるとともに、その分類や解釈が整理されている。環境作用を定量把握するための外来塩分量と、コンクリート構造物の劣化に直接作用する浸透塩分量は分けて考える必要があるが、前者は観測条件、後者は材料要因が影響するため、実務での運用が定まっているとはいえない。本研究では、外来塩分と浸透塩分の検証データの蓄積、現場での環境測定の実用条件の把握を目的とし、駿河海岸の暴露試験場での飛来塩分/付着塩分およびモルタル円盤への浸透塩分の調査結果とそれらの評価検討を示す。

キーワード: 塩害, 腐食環境, 飛来塩分, 付着塩分, 浸透塩分

1. はじめに

塩害における環境因子として、塩化物イオン、酸素が水などの物質移動と、拡散現象や腐食反応を律する温度の要因が考えられる。ここで、鋼材腐食を誘引する重要な因子として塩化物イオンがあり、構造物が置かれる地域や、部材形状による局所環境がその損傷条件を左右するため、塩分環境の適切な把握が特に重要である。

塩害環境の定量把握については、これまでに様々な調査法の提案とその分類や解釈が整理されてきている¹⁾。環境作用を定量するための外来塩分の測定方法と、コンクリート構造物の劣化に直接作用する浸透塩分の測定は分けて考える必要がある。コンクリート表面に到達した塩分全てが損傷に寄与するものではない。外来塩分の全量として捉えると過大となるが、構造物の設計や管理の方針の策定においては、平均値よりは、最大値や分散に着目し安全側に見積もるべき環境インデックスと言える。

本研究では、外来塩分と浸透塩分の検証データの蓄積、現場での環境測定の実用条件の把握を目的とし、駿河海岸の暴露試験場での飛来塩分/付着塩分およびモルタル円盤への浸透塩分の調査結果を報告する。

2. 評価試験方法

2.1 調査測定項目

本研究では、塩分環境の試験項目を表-1の通り、①飛来塩分、②付着塩分、③浸透塩分にわけて整理した。

①は既往の整理¹⁾のように海面で発生する海塩粒子のうちの調査地点に到達する塩分である。飛来塩分を測定する代表的な方法として、土研法(タンク法)²⁾がある。土研法の特徴は、海岸線近くを浮遊する粒径の比較的大きな海塩粒子や波しぶき等の飛沫を捕集できる点である。

表-1 本報での塩分評価項目と測定方法

	評価対象	本報での試験法と呼称
①飛来塩分	測定面に到達した海塩粒子の量	土研法(タンク法) ²⁾
②付着塩分	測定対象に付着保持された海塩粒子の量	ドライガーゼ法 JIS Z 2382
③浸透塩分	モルタル内に浸透した塩分量	モルタル円盤法 ⁶⁾

②はコンクリート表面に滞留する塩分を想定しており、その評価方法には湿潤ガーゼによる拭きとりや分光分析等がある。ドライガーゼ法は、飛来塩分(到達塩分)に分類される場合もあるが、本調査では海塩粒子(大気浮遊塩分)のガーゼへの付着を広義にとらえ、ドライガーゼ法によって捕集される塩分を付着塩分とした。土研法(タンク法)では捕集された海塩粒子はその多くが回収されるのに対して、雨水などによる洗い流しは生じないものの、生じた塩の結晶が風等により脱落する平衡状態にいたると考え、ここでは付着塩分として表記する。また、ドライガーゼ法は、ガーゼを設置する方向が塩分量に及ぼす影響の検討³⁾や橋梁断面周辺の塩分分布の検討⁴⁾にも用いられている。

③は塩分浸透予測において適切に環境条件の影響を考慮できる手法として佐伯ら⁵⁾や上原子ら⁶⁾により提案されている。特に、構造物形状や位置、コンクリートに浸透する塩分量を実態的に評価できる方法として近年注目されている。また、橋梁の主桁にモルタル片を設置して浸透塩分を測定し、橋梁断面周辺の塩分分布に関する数値解析と組み合わせて塩害環境を検討した事例も報告されている⁷⁾。

本研究における塩分量は、電位差滴定法で測定した塩化物イオン濃度から求めたNaCl換算値とし、日平均塩

*1 土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 主任研究員 博(工) (正会員)

*2 土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 研究員 博(工) (正会員)

*3 土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 上席研究員 博(工)

*4 東北大学 大学院工学研究科 建設材料学分野 准教授 博(工) (正会員)

分量 (mg/(day・dm²), mdd) で表すが、モルタル内への浸透塩分の考察では、暴露期間内に浸透した面積当たりの塩分総量 (mg-Cl/cm²) も求めた⁶⁾。

2.2 調査時期

現地調査は、四半期を目途として図-1 に示す期間で実施した。なお、ドライガーゼ法および土研法(タンク法)の標準的な調査期間は1ヵ月であるが、調査方法の適用性評価や現場調査の制約から、1つの調査期間が21日間(2015年7月27日~8月17日)であることを除き、概ね数ヶ月の期間で測定した。

2.3 調査地点

現地調査は、静岡県焼津市の駿河海岸沖合数百mにある暴露試験施設で行った。当該施設(図-2a)の2階部分(第2デッキ:海面からの高さ約10m)および3階部分(第1デッキ:海面からの高さ約15m)において、土研式塩分捕集器、ガーゼ、モルタル円盤を用いた調査を行った。調査機器の状況を図-2b),c),d)に示す。

雨掛かりについては、3階部分では風向により直接降雨を受けるが、2階調査箇所には天蓋があり暴風雨時を除き雨掛かりは無い。また、図-3には、駿河海岸近傍の気象データの例として、気象庁御前崎測候所で2014年に観測された月間平均の気温と湿度の変動を示す。風向は、強風時には西あるいは南からの風が卓越する傾向がある。

2.4 土研法(タンク法)

同施設は離岸堤外側の沖合数百mにあるが、その2階の東面(沖合側)と西面(海岸側)、ならびに、3階の東面(沖合側)に土研式塩分捕集器²⁾を1台ずつ設置して調査した。測定結果は、日平均の飛来塩分量(mdd)で示す。

2.5 ドライガーゼ法

2階の東西面および南北面、ならびに3階の東西面において、ドライガーゼ法(JIS Z 2382)を参考に大気浮遊塩分調査を行った。2階の当該部分には天蓋があるため、ガーゼは土研式塩分捕集器の直下に設置し、3階のガーゼは、百葉箱内に設置した。それらを回収(更新)して塩分量を測定し、これを面積および日数で除し、日平均の付着塩分量(mdd)とした。

2.6 モルタル円盤法

既往の研究では、モルタル円盤供試体を利用し、飛来塩分特性や塩分浸透量が計測されており、塩害の危険度を把握できる手法として提案されている⁶⁾。本調査では、土研法(タンク法)およびドライガーゼ法との比較評価を目的とし、既往の研究⁶⁾で用いられているものと同一の供試体を使用して現場調査を行った。設置位置は、土研式塩分捕集器の前面(図-2 b),c),d)とし、図-1に示した延べ8つの調査期毎に、飛来塩分と浸透塩分の関係を調査した。

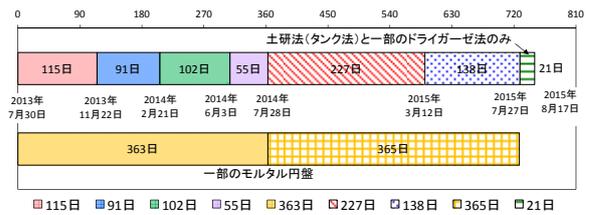


図-1 調査時期

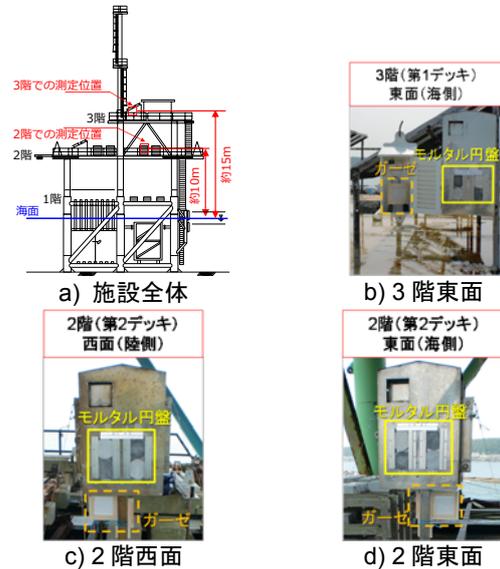


図-2 調査箇所(駿河海岸)と塩分調査機器

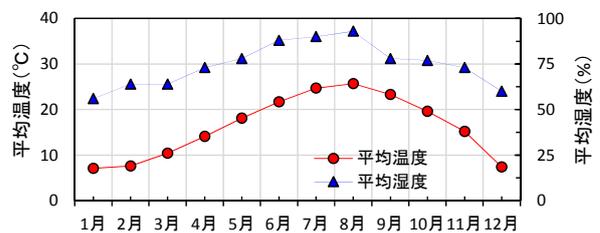


図-3 平均の気温・湿度の月間変動の例(2014年)

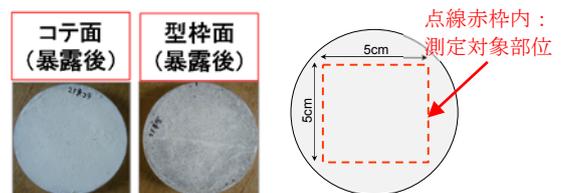


図-4 モルタル円盤供試体

モルタル円盤供試体は、内寸が直径85mm、厚さ11mmのスチロール製シャーレにセメントの物理試験方法(JIS R5201「10.4 供試体の作り方」)に従ってモルタルを打設して作製した。材料には、研究用普通ポルトランドセメント、純水およびISO標準砂を使用し、水セメント比は0.5である。養生期間は20℃の水中で約1ヵ月とした。供試体の表面形状や表層部分の密実性の影響を検討するため、暴露面がコテ面と型枠面(シャーレの底面)となる2種類を一組として暴露した。

塩分浸透量の測定部位は、図-4に示す5cm四方の範

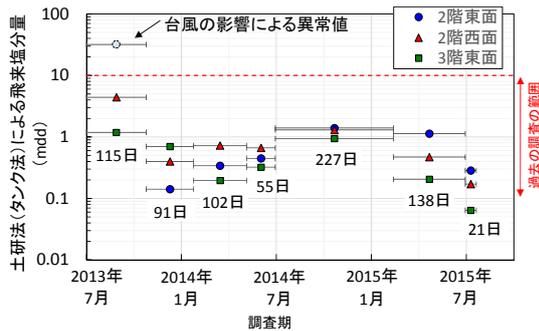


図-5 各調査期の飛来塩分量（土研法）

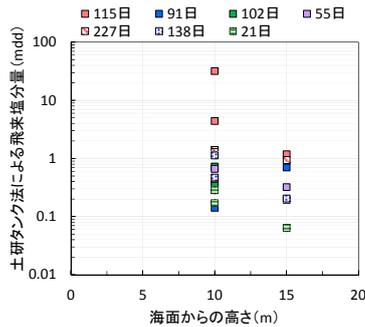


図-7 飛来塩分量（土研法）と海面からの高さの関係

囲内とし、板厚方向に浸透した塩化物イオンの総量を測定した。結果値は、対象部位から得た塩分量を面積で除して、コンクリート表面からの塩化物イオン浸透の総量 (mg-Cl/cm²) とし、さらに日数で除してモル当量換算した日平均の浸透塩分量 (mdd, mg-NaCl/dm²/day) とした。

3. 調査結果

(1) 飛来塩分量

今回の調査期間における土研法による飛来塩分量を図-5に示す。2013年7月～11月の測定値を除き、0.06～1.5mddの範囲内にある。

2013年7月～11月の期間には、海面上10mの位置にある2階東面に、台風による波浪が直接到達したことが確認されており（近傍のコンクリート供試体が設置から20年以上を経てはじめて東からの波により西方へ転倒）、その影響により飛来塩分量が異常に大きく測定されたものと推察される。土研法は海水を捕集器内のポリタンクに直接捕集してしまうという課題があり、2013年7月～11月調査期の2階東面については、数十年に一度の大きな波浪の影響を直接受けたものとみられる。

また、2階の東西方向では、台風による異常値を除いて、2013年7月～2014年7月調査期では2階西面の飛来塩分量が大きい、2014年7月以降ではその傾向が逆になっている。飛来塩分量が卓越する方向が、調査期によって変化するものと思われる。

(2) 過去調査との対応

土木研究所が過去に実施した飛来塩分の全国調査⁸⁾の駿河付近における飛来塩分量の範囲は、0.1～10mdd未満

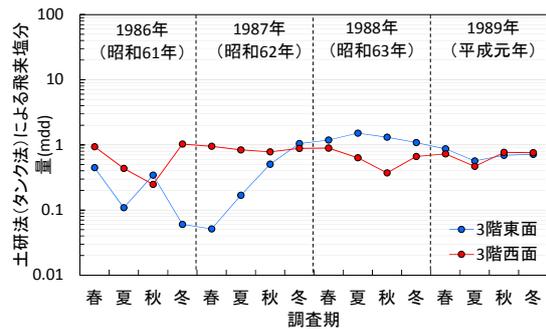


図-6 飛来塩分量（土研法）の過去調査（3階東西面）

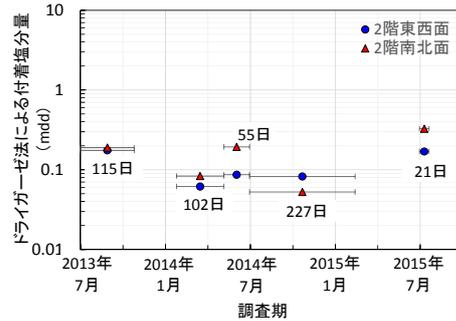


図-8 各調査期の付着塩分量（ドライガーゼ法）

であり、この調査結果を図-5右端に示す。今回の調査結果は、台風による異常値を除き、過去の全国調査結果（1984,1985年）での知見と概ね整合している。

そして、当該試験施設の3階東西面においては、同様な飛来塩分調査⁹⁾が過去にも継続的に行われており、その結果の一部を図-6に示す。3階東西面における過去の調査結果は、0.05～1.5mddの範囲であり、図-5の台風の影響による異常値を除いた範囲と一致している。よって、本調査結果は、3階東西面における過去の調査結果の範囲内にあるといえる。また、1986～1987年は西面の飛来塩分量が大きく、1988年はその傾向が逆転するなど、調査期によって、飛来塩分量が卓越する方向が変化する点も本調査結果と対応している。

(3) 海面高さの影響

図-7は、海面からの高さで飛来塩分量の関係を示す。暴露期間91日の場合を除き、海面高さが10mの方が飛来塩分量は大きくなる傾向がある。しかし、それらの差は0.1～0.5mddの範囲であり、図-5や図-6で示した経時変化の範囲と比較して小さい。これは、通常の日候時の上空部では、細かい海塩粒子が拡散で一様に分布し、風速勾配も緩やかであるため、塩分分布勾配も緩くなる¹⁰⁾ためと思われる。高さ方向の分布については、海面高さが10m未満の場合と15mを超える位置での測定を追加し、さらに検証する必要がある。

3.2 付着塩分量

図-8は、各調査期における、付着塩分量としてのドライガーゼ法による調査結果を示す。なお、測定値が抜けている期間は、ガーゼの破損により測定値が得られて

いない。この結果から、暴露期間 55 日と 21 日の場合に、東西面と南北面の差が、それぞれ 0.11mdd および 0.16mdd となり、他の調査期間の場合と比較して大きくなっている。よって、調査期間が短い場合には、既往の研究で報告³⁾されているように、方向の違いによる付着塩分量の相違を測定できると考えられる。また、土研法による飛来塩分量の測定結果では台風による異常値が測定されたが、ガーゼ法による付着塩分量についてはその傾向は認められない。これは、海水を直接かぶった場合、土研法ではその多くをタンク内に直接捕集するが、ガーゼでは海水中塩分の一部のみが残留付着塩となるために影響が小さかったものとする。なお、付着塩分量と暴露期間との関係については、後述の付着塩分総量の検討において考察する。

図-9は、付着塩分量と海面からの高さの関係を示す。付着塩分量の総量は土研法（タンク法）による飛来塩分量よりも小さいものの、海面に近い方が付着塩分量は大きい傾向がある。ただし、海面からの高さ 10m と 15m の付着塩分量の差は 0.01~0.14mdd の範囲であり、図-7の土研法による飛来塩分量と比べて小さい値である。

3.3 付着塩分量と飛来塩分量の関係

本調査での観測機材は、箇所ごとに非常に近接して設置し、調査期も一致しているため、測定法の比較評価が可能である。図-10には、飛来塩分量と付着塩分量の関係を両対数軸で整理した結果を示す。付着塩分量と飛来塩分量の比を塩分保持率とすれば、測定値は概ね塩分保持率 0.02~1 の範囲内にある。また、ガーゼの調査期間が長いほど塩分保持率が低下し、土研法（タンク法）との乖離が拡大する傾向がみられる。

このため、付着塩分総量と暴露日数の関係として図-11に整理した。その結果、2階における暴露期間 227 日の付着塩分総量は、暴露期間 115 日のそれよりもやや減少していることがわかる。3階の場合でも、期間に応じて増加しているものの、増加割合は小さくなる。供試ガーゼは、直射日光や雨がかりはないものの数ヵ月間の暴露中の風等により繊維が劣化し、塩分の脱離や保持力の低下等が生じたものと考えられる。2階および3階のガーゼは、それぞれ、土研式塩分捕集器の直下、百葉箱の中に設置していたが、前者の方が塩分の脱離や劣化が生じやすい環境であったと推察される。いずれのガーゼも、暴露期間 115 日以降の増加割合が小さくなっていることから、ガーゼの塩分付着容量が飽和状態に近いと思われる。既往の研究において、いわゆる塩害地域等の飛来塩分量が多い環境ではドライガーゼ法が適さない場合があるとの指摘もあることから¹⁾、ガーゼの塩分付着容量を把握して適用することが望ましい。

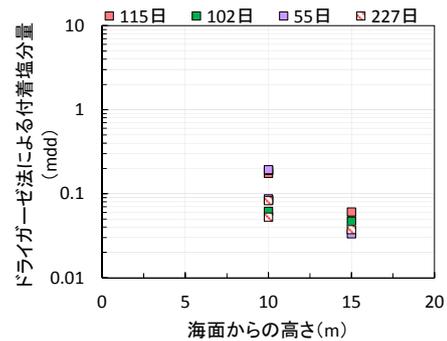


図-9 付着塩分量(ドライガーゼ法)調査結果

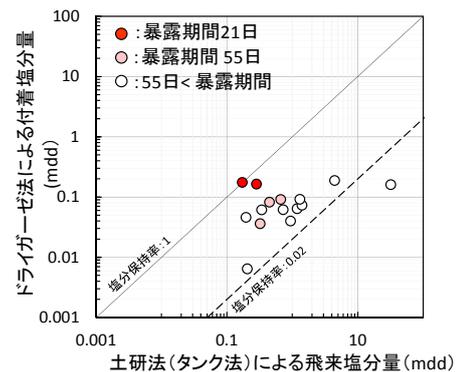


図-10 付着塩分量と飛来塩分量の関係

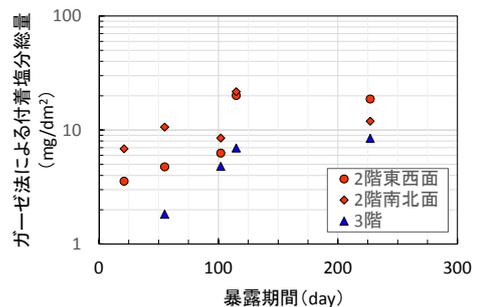


図-11 付着塩分総量と暴露期間の関係

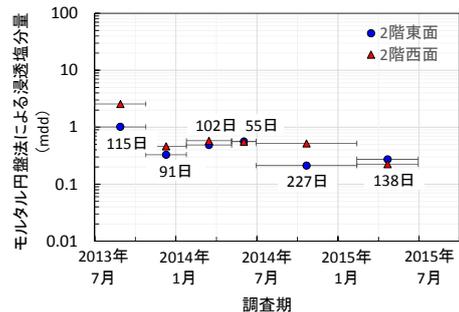


図-12 各調査期の浸透塩分量(モルタル円盤法)

3.4 浸透塩分量

(1) 調査結果

モルタル円盤供試体内に浸透した塩分量の調査結果を各調査期で整理したものを図-12に示す。なお、図-12の浸透塩分量は、暴露面がコテ面と型枠面の平均値である。浸透塩分量の傾向は、2015春を除き、2階西面>2階東面となっており、土研法による飛来塩分と同様の傾

向が確認される。よって、モルタル円盤法による浸透塩分の結果は、土研法による飛来塩分の結果と対応し得ると考えられる。

台風の影響を受けた2013夏において、土研法による飛来塩分量では2階東面で異常値(約32mdd)が測定されたが、同調査期の2階東面における浸透塩分量は約1.0mddである。これは、モルタル円盤供試体の表面に海水が直接到達しても、即座に供試体内部には浸透せず流れ落ちるためと推察される。すなわち、土研法では海水が捕集器に直接入り塩分環境を過大評価する可能性があるのに対し、モルタル円盤法は海水を直接かぶる場合においても異常値が生じることなく測定できると考えられる。

2012年制定コンクリート標準示方書設計編¹²⁾では、飛来塩分量と表面塩化物イオン濃度(C_0)の関係が示されているが、土研法による飛来塩分量は設置高さによっては台風等による異常値が測定される可能性があることを考慮すれば、モルタルへの浸透塩分量と表面塩化物イオン濃度(C_0)の関係の検討が重要となる。

(2) 海面からの高さの影響

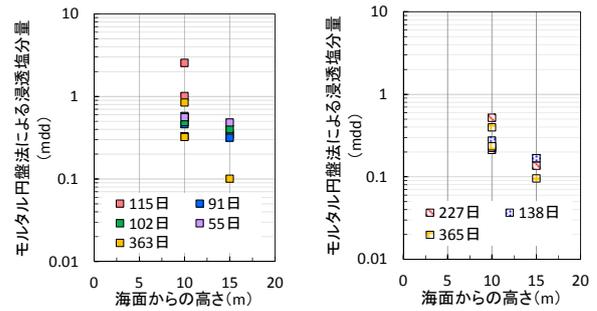
浸透塩分量の調査結果を海面からの高さで整理したものを図-13a),b)に示す。なお、図-13a),b)の浸透塩分量は、暴露面がコテ面と型枠面の平均値である。浸透塩分量の傾向は2階>3階となっており、飛来塩分量の場合と同様に海面からの高さの影響を確認できる。海面からの高さ10mと15mの場合の浸透塩分量の差は、0.01~2.21mddの範囲であり、暴露期間115日および363日の場合に差が大きくなっている。

1年間暴露した場合(363日と365日)に着目すると、2階の結果は各調査期の測定位置に近い値を示しているが、3階の結果は各調査期の測定値よりも小さいことが確認される。これは、3階では雨掛かりが有るため、モルタル円盤供試体の表面において塩分が洗い流されることも影響するものと考えられる。既往の研究においても、洗い流し効果の有無は、モルタルへの塩分浸透に大きな影響を及ぼすことが示されている¹³⁾。

(3) 表面状態の影響

図-14は、モルタル円盤供試体の浸透塩分量に対する表面状態の影響を示す。図-14の縦軸および横軸は、暴露面をコテ面とした場合と型枠面とした場合の比および土研法(タンク法)による飛来塩分量である。

飛来塩分量が0.1~0.95mddの範囲においては、浸透塩分量の比は0.8~1.2の範囲である。一方、飛来塩分量が0.95を超える場合には浸透塩分量の比は0.9~2.0となり、飛来塩分量が小さい場合と比較して、コテ面の浸透塩分量が大きくなる傾向がある。すなわち、コテ面および型枠面としての表面状態の相違による浸透塩分量は、土研法(タンク法)の飛来塩分量が約1mdd程度以上となる



a) 2013年7月~2014年7月 b) 2014年7月~2015年7月

図-13 浸透塩分量(モルタル円盤法)と海面からの高さ

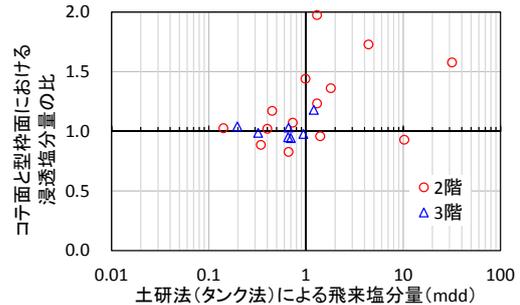


図-14 表面状態が浸透塩分量に及ぼす影響

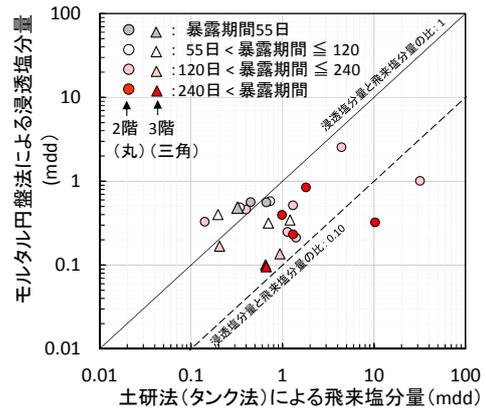


図-15 モルタル円盤法による浸透塩分と土研法(タンク法)による飛来塩分量の関係

場合に、コテ面>型枠面となるような浸透塩分量の相違が見られ、それよりも飛来塩分量が少ない場合にはほぼ同じ値になることが本調査の範囲で示された。

鋼材への付着塩分に関する検討ではあるが、I形鋼とトタン板に付着した塩分の洗い流しに対する残留率を検討し、表面粗度の小さいトタン板の方が残留率は小さくなる(洗浄効果が大きい)との報告¹⁴⁾もある。塩害対策は飛来塩分量が多い場所での重要度が高く、 C_0 との関係とあわせて、表面状態も考慮した設計が必要であろう。

3.5 浸透塩分量と飛来塩分量の関係

図-15には、飛来塩分量と浸透塩分量(暴露面がコテ面と型枠面の平均値)の関係を両対数軸で整理した結果を示す。その結果、測定値は、浸透塩分量と飛来塩分量の比が概ね0.10~1の範囲にある。また、飛来塩分量が

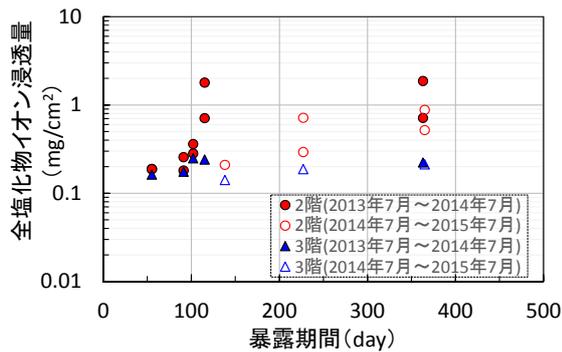


図-16 モルタル円盤への塩化物浸透量と暴露期間

約0.7mdd以上になると、暴露期間が長くなるにつれて、浸透塩分量が相対的に小さくなる場合がある。この結果より、暴露期間が長期になった場合、モルタル円盤供試体に浸透する塩分量が経時的に減少する可能性が考えられる。

図-16は、面積当たりの塩化物イオン浸透量と暴露日数との関係を示したものである。2013年7月～2014年7月の調査期では、暴露期間115日と363日における値が同程度である。同様に、2014年7月～2015年7月の期間では、暴露期間227日以降の傾きが小さい。この理由としては、供試体の含水率が長期暴露により低下したことや供試体に塩化物イオンが浸入して濃度勾配が小さくなったことの影響等が考えられるが、浸透拡散現象の詳細な検討は今後の課題としたい。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

土研法による飛来塩分量は、過去に行われた調査結果と傾向が一致し、調査期によって飛来塩分が卓越する方向が変化することおよび海面からの高さによって飛来塩分量が異なることを確認した。

ドライガーゼ法による付着塩分量と土研法による飛来塩分量との比較を行い、ガーゼを暴露する環境や期間によっては、塩分付着容量の飽和や綿布の劣化とみられる塩分保持力の低下の可能性を示した。ドライガーゼ法は、これらの項目を考慮した上で、塩分環境調査に用いることが望ましい。

モルタル円盤法による浸透塩分量は、浸透塩分量が卓越する方向が土研法による飛来塩分量の結果と概ね一致し、土研法飛来塩分量の傾向と対応し得ることを示した。また、モルタルの暴露面がコテ面と型枠面の場合で比較した結果、土研法による飛来塩分量が一定量を超えた場合に、暴露面を型枠面とした場合の浸透塩分量が小さくなる傾向が認められた。さらに、浸透塩分量と暴露期間の関係を検討した結果、暴露期間が長期になるにつれて、浸透塩分量が経時的に減少する可能性が示された。

参考文献

- 1) 土木学会：材料劣化が生じるコンクリート構造物の維持管理優先度研究小委員会（342委員会）委員会報告書、コンクリート技術シリーズ、No.98、2012.7.
- 2) 土木研究所：飛来塩分量全国調査（I）、土木研究所資料第2203号、pp.1-8、36-39、1985.3.
- 3) 小島靖弘、浅野幸士、岩崎英治：塩分捕集器具の設置方向と飛来塩分量の関係、土木学会第63回年次学術講演会、1-006、pp.11-12、2008.9.
- 4) 岩崎英治、長井正嗣：橋梁断面周辺の飛来塩分の推定に関する一検討、構造工学論文集、Vol.53A、pp.739-746、2007.3.
- 5) 佐伯竜彦他：飛来塩分環境の定量評価に関する研究、土木学会論文集E、Vol.66、No.1、pp.1-20、2010.1.
- 6) 上原子晶久、皆川浩、久田真、鈴木基行：モルタル円盤供試体による青森県沿岸部の飛来塩分調査、コンクリート工学年次論文集、Vol.37、No.1、pp.757-762、2015.7.
- 7) 富山潤：コンクリート構造物を対象としたマイクロ・マクロ塩害環境に関する研究、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、第15巻、pp.-405-410、2015.10.
- 8) 土木研究所：建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書（第一編）」、pp.76-78、1988.
- 9) 土木研究所：海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書、第143号、pp.17-23、1995.
- 10) 山田義智他：海岸から飛来する塩分量の数値解析、コンクリート工学年次論文集、Vol.18、No.1、pp.945-950、1996.
- 11) 片脇清、守屋進、箕作光一：飛来塩分量の特性と測定方法、プレストレストコンクリート、Vol.27、No.1、1985.
- 12) 土木学会：2012年制定版コンクリート標準示方書設計編、pp.156-157、土木学会、2012.12.
- 13) Rungrawee Wattanapornproml and Tetsuya Ishida: Time dependent boundary conditions for modeling the ingress of airborne chloride combined with rainfall effects, Proceedings of the Fifth International Conference on Construction Materials (ConMat'15), 58, Whistler, Canada, 2015.8.
- 14) 野口恭平他：海塩粒子付着量の予測精度向上に関する基礎的研究、構造工学論文集、Vol.59、pp.585-595、2013.9.