論文　飛来塩分環境下におけるコンクリート表面の塩化物イオン浸透流束に関する検討

佐伯　竜彦[*1]・中村　大剛[*2]

要旨：本研究は，飛来塩分環境下にあるコンクリート構造物への塩化物イオン浸透予測を行うために必要な境界条件，即ち，コンクリート表面における塩化物イオン浸透流束について検討した。環境条件の異なる全国８地点に，異なる配合のモルタル供試体を暴露し，塩化物イオン浸透量の測定し，比較検討を行った。その結果，表面塩化物イオン浸透流束はモルタルの実効拡散係数に依存し，環境条件異なっても実効拡散係数比の相対的な影響は同じであることが明らかとなった。

キーワード：飛来塩分，塩分浸透予測，境界条件，浸透流束，実効拡散係数

1.　はじめに

コンクリート中への塩化物イオンの浸透を予測するには，コンクリート中での物質移動性を支配する拡散係数の他に境界条件が必要であり，一般的には表面塩化物イオン濃度を設定して予測が行われている[1)]。しかし，表面塩化物イオン濃度は環境条件やコンクリート自体の性質の影響を受け，その値を適切に設定することは容易ではない。

塩分浸透の境界条件の設定として，コンクリート表面における塩化物イオン浸透流束を与える方法もあり，飛来塩分等により塩分供給を受ける場合には，表面流束を用いる方が実際の現象にも近いと考えられる。そこで本研究では，飛来塩分環境下におけるコンクリート表面での塩化物イオンの流束について基礎的な知見を得ることを目的とし，塩分浸透流束の値とそれに及ぼす各種要因の影響について検討した。

2.　コンクリート表面における塩化物イオン流束

2．1 新潟県沿岸の塩害環境評価結果[2)]

著者らは，新潟県内の 15 地点において土研式塩分捕集器により１か月毎の飛来塩分量測定とモルタル供試体の暴露試験を行い，最長２年までの経時的な測定により飛来塩分量と供試体への浸透塩化物イオン量の関係を検討した。その結果，**図－１**に示すように，暴露開始から供試体内に浸透した塩化物イオンの総量は同期間中の累積飛来塩分量（１ヵ月ごとの飛来塩分量の積算値）と関係があり，両者には直線関係が認められた。このことは，コンクリート表面に到達した飛来塩分が，一定の割合でコンクリート中に浸透することを示していると考えられた。また，直線の傾き，即ち供給された塩化物イオン量に対する浸透した塩化物イオン量の比率（以下，「塩化物イオン浸透比」とする）は暴露地点，即ち環境条件によって異なっていた。一部の暴露地点では，飛来塩分捕集器と供試体の環境がおかれた環境が異なっており，累積飛来塩分量以上の塩化物イオン浸透量となっている例もみられるが，大部分の地点では累積飛来塩分量の約 20～35%程度が供試体内に浸透しており，具体的な浸透比は暴露地点によって異なっていた。暴露供試体の材料・配合は同一であることから，この塩化物イオン浸透比率の違いは環境条件によるものと考えられた。

図－２は，コンクリート供試体における累積

*1 新潟大学　工学部建設学科准教授　博士（工学）　(正会員)

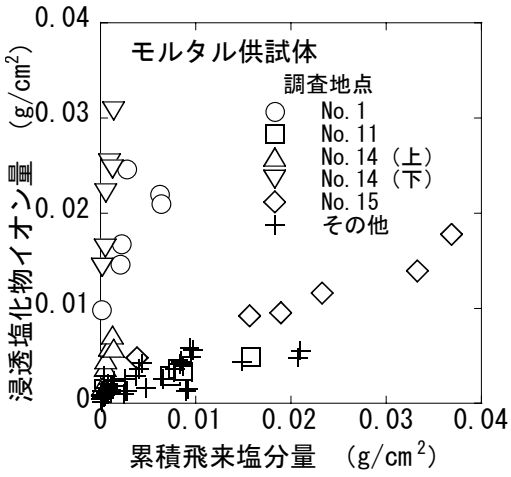
*2 新潟大学　工学部建設学科

飛来塩分量と供試体内への塩化物イオン浸透量の関係である。暴露箇所はモルタル供試体の暴露地点の内の５ヶ所で暴露期間は 13 年である。なお，この場合の累積飛来塩分量は，２年間の飛来塩分量の測定値を平均して13倍したものである。**図－１**と比較すると，累積飛来塩分量および浸透塩化物イオン量の絶対値はモルタル供試体と異なるものの，調査地点の大小関係は類似している。また，若干のばらつきはあるものの，同一地点におけるモルタル供試体の塩化物イオン浸透比はコンクリート供試体の塩化物イオン浸透比の約４倍程度となっていた。モルタル供試体およびコンクリート供試体は同一地点に暴露され，同じ環境条件下におかれたことから当然とも言えるが，モルタル供試体を比較的短期間暴露することによって相対的な塩害環境比較とコンクリート供試体への塩化物イオン浸透量を推定できる可能性があることがわかった。

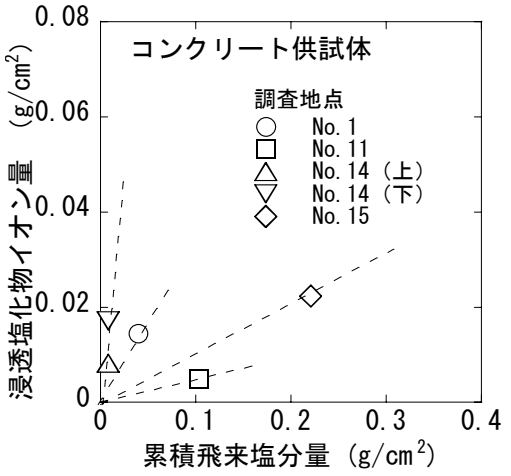
2. 2 塩化物イオン浸透予測の境界条件としての表面流束の適用性

コンクリート表面における塩化物イオン浸透流束を境界条件として塩分浸透予測を行うためには，予測したい期間中の表面塩化物イオン浸透流束の値を知る必要がある。前節で示したように，表面塩化物イオン浸透流束は飛来塩分量によって決まると考えられるため，飛来塩分量の経時変化を把握する必要がある。のため，飛来塩分量が経時的に変動する場合には，予測が難しくなる。新潟県内に限定した場合，年毎の飛来塩分量の変動はそう大きくないことが確かめられているが[2)]，他の地域についても検討が必要である。また，表面塩化物イオン浸透流束を直接測定する方法も考えられる。即ち，当該地点に供試体を短期間暴露し，暴露期間中に供試体内に浸透した塩化物イオン総量を測定する方法である。

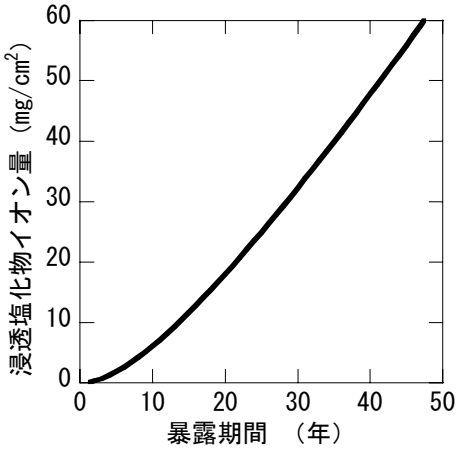
ただし，いずれの方法によるとしても，表面塩化物イオン浸透流束が経時的にどう変化するかを把握する必要がある。表面塩化物イオン浸透流束を境界条件とした浸透予測の研究例[3)]で



図－１　累積飛来塩分量と浸透塩化物イオン量の関係（モルタル供試体）[2)]



図－２　累積飛来塩分量と浸透塩化物イオン量の関係（コンクリート供試体）[2)]



図－３ 吸着塩分量の経時変化（式(3)による）

は，浸透流束が時間とともに減少するモデルを用いている。一方，暴露期間２年までの測定結果を示した**図－１**では，累積飛来塩分量と塩化物イオン浸透量が直線関係，即ち，塩分浸透比が時間によらず一定値をとる結果を示している。

既往の研究では，コンクリート表面における塩化物イオンの浸透が吸着現象で説明できると考え，飛来塩分量と浸透塩化物イオン量（文献４中では「吸着塩化物イオン量」）の間に以下のような関係があるとしている[4)]。

$$W = \frac{b \cdot C}{1 + a \cdot C} \quad (1)$$

ここに，W：吸着塩化物イオン量 (mg/cm^2/year)
C：飛来塩化物イオン量 (mg/cm^2/year)
a，b：定数

毎年同量の飛来塩分量が供給され，長期的な耐久性を考える場合において飛来塩分量の季節変動は考える必要がないと仮定すると，累積飛来塩分量は以下のように表せる。

$$C = \alpha \cdot t \quad (2)$$

ここに，α：年間飛来塩分量
t：暴露期間（年）

式(2)を式(1)に代入し，時間 t で積分すると積算の塩化物イオン浸透量 W_{total} は以下のようになる。

$$W_{total} = \int W dt = c\left(\frac{t}{d} - \frac{\log(1 + d \cdot t)}{d^2}\right) \quad (3)$$

ここに，c, d：定数

式(3)の形状は定数の値に依存するが，文献[4)]での値（a=0.1，b=0.2）を用いて図示すると，**図－３**のように直線に近い形状となる。以上より，塩化物イオン浸透量が時間に比例して際限なくに増加するとは考えにくいが，ある程度の期間において表面塩化物イオン浸透流束を一定として予測を行える可能性があると思われる。

3　配合条件が表面塩化物イオン流束に及ぼす影響

2.1の検討では，暴露地点が新潟県内に限られていたこと，コンクリート供試体およびモルタル供試体の配合がそれぞれ１種類であったことから，結果の適用性が限られたものであった。そこで，北海道，新潟県，沖縄県において新たにモルタル供試体を暴露して，飛来塩分量と浸透塩化物イオン量の関係についてより詳細に検討した。

3.1　実験概要

本研究で用いたモルタル供試体の配合は**表－１**に示す４種類である。高炉スラグ微粉末は，ブレーン 4000 のものを用いた。初期養生として，28 日間の 20℃水中養生を行った。供試体形状は**図－４**に示す通りで，厚さ 1cm の薄い円盤状のものを暴露した。薄板供試体を用いたのは，浸透した塩化物イオンの濃度分布ではなく総量に着目したためであり，浸透量の分析では，供試体全てを粉砕して試料とした。

暴露地点は，**図－５**に示す通り新潟県内６ヶ所と北海道および沖縄に１ヶ所ずつの計８ヶ所である。No.1～4 は前報[2)]と同一地点である。各地暴露地点の概要を表－２に示す。なお，供試体暴露面は，海岸線までの最短距離の方向に正対させた.

暴露試験は，地点 No.1～4 では 2005.12～2006.3 の冬期３ヶ月間実施した。測定を冬期としたのは，新潟県沿岸において飛来塩分量が多くなるのがこの期間であることによる[2)]。暴露地点 No.2-1～2-4 では３ヶ月間暴露の後，供試体の回収と新たな供試体の暴露を行い，連続４回で通年の測定とした。本論文では，2005.12～2006.8 の結果を用いて検討を行った。回収した供試体中の全塩化物イオン量を JCI SC-4 に準じて測定した。

なお，No.1～4 では 4 種類全ての供試体を，No.2-1 と No.2-2 では N,NB,H の３種類を，No.2-3

およびNo.2-4ではNとHの２種類のみを暴露した。

暴露供試体と同一配合のモルタル供試体を用いて，電気泳動法により実効拡散係数を求めた。供試体形状はφ10×5cmとし，JSCE-G571に準じて試験を行った。

3.2　薄板供試体への塩分浸透量

図－５に，モルタル供試体の実効拡散係数を示す。実効拡散係数は，各配合の基本的な物質移動性を評価する目的で測定した。図より，水結合材比が小さくなるほど，また，高炉スラグ微粉末を混和することにより実効拡散係数が小さくなることが確認できる。

図－６は，モルタル供試体の実効拡散係数比と暴露期間中の平均表面塩化物イオン浸透流束の関係である。平均表面塩化物イオン浸透流束は，暴露期間中に供試体に浸透した総塩化物イオン量を供試体の暴露面積と暴露期間で除したものである。また，実効拡散係数比は普通セメントのみを用いた供試体（N）の実効拡散係数の値を１として算出したものである。図より，同一暴露地点においては，実効拡散係数比が小さいものほど表面塩化物イオン浸透流束が少ない。暴露地点が同一であることから，供給される飛来塩分量は同じであり，表面塩化物イオン浸透流束は，供試体内部の物質移動性に影響を受けていることがわかる。

またNo.2，No.2-2を除いて，図中の同一地点毎の回帰直線の傾きは暴露地点が異なってもほぼ同じ値となっている。このことは，塩分浸透量の絶対値は暴露地点によって異なっているものの，実効拡散係数比が塩分浸透流束におよぼす影響は暴露地点が異なっていてもほぼ同じであることを示している。即ち，基本的な物質移動性（ある同一条件下での物質移動性）を表す実効拡散係数の影響は環境条件が異なってもほぼ同じであると考えられる。

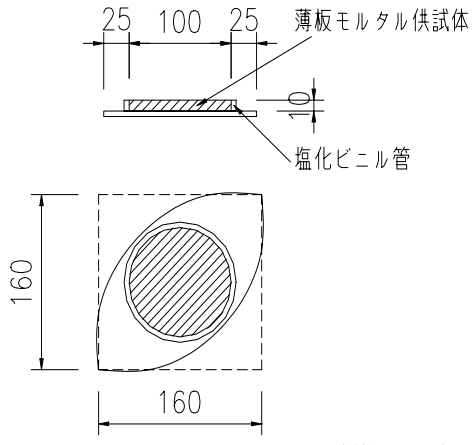
図－７は，コンクリート供試体の暴露試験に関する文献データ[5)6)7)8)]を用いて**図－６**と同様の検討をしたものである。ただし，実効拡散係数の測定データが無いため，論文に示されている暴露供試体中の全塩化物イオン濃度分布から見かけの拡散係数を求め，式(4)を用いて実効拡散係数の推定値を算出した。式中の固定化率Rの値は，セメントの種類に応じて既往の研究で得られている値，即ち普通ポルトランドセメントの場合1.64，高炉セメントB種の場合2.36を

表－１　モルタル供試体の配合

記号	セメントの種類	水結合材比(%)	高炉スラグ微粉末置換率(%)
N	普通	50	0
NB	普通	50	50
H	早強	35	0
HB	早強	35	50

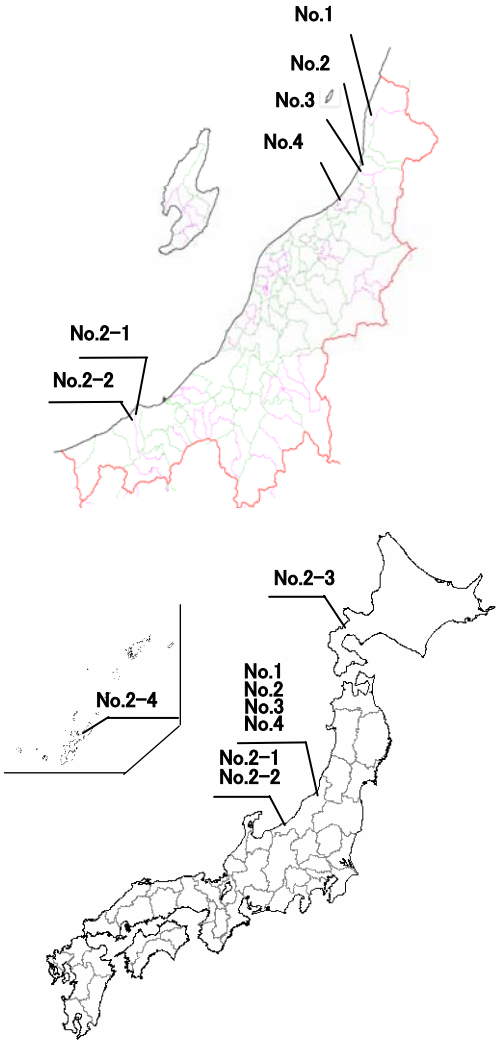
表－２　供試体設置地点の概要

調査地点	地点名	海岸線からの距離（m）	標高（m）
1	馬下大橋	0	6
2	大日川樋門	150	11
3	旭橋	1400	7
4	胎内大橋	300	3
2-1	新名立大橋①	30	6
2-2	新名立大橋②	30	3
2-3	幌別橋	20	5
2-4	平安橋	25	10



（単位：mm）

図－４　モルタル暴露供試体



図－５ 供試体暴露地点

$$D_a = \frac{D_e}{R+1} \qquad (4)$$

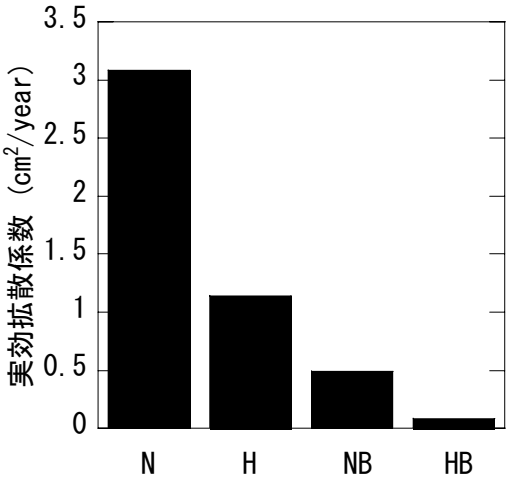
ここに，D_a：見かけの拡散係数

D_e：実効拡散係数

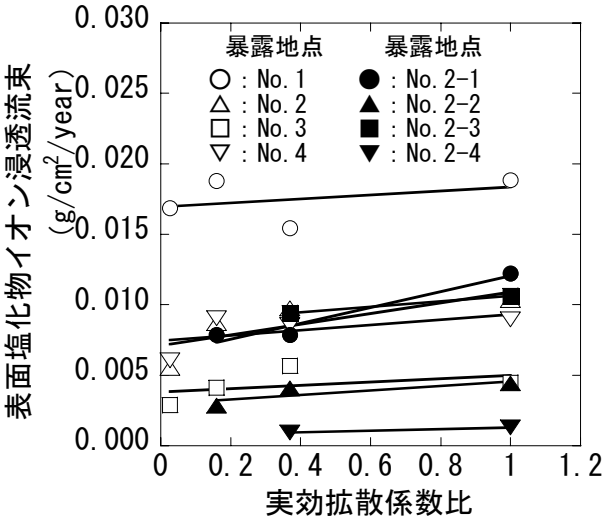
R：固定化率

用いた[9]。また**図－７**との比較のため，普通セメントモルタル供試体（N）の実効拡散係数を１とした実効拡散係数比によりデータを整理した。

図より，著者らの実験結果より実効拡散係数比と表面浸透流束のばらつきが大きいが，暴露場所やコンクリートの配合が異なっても回帰式



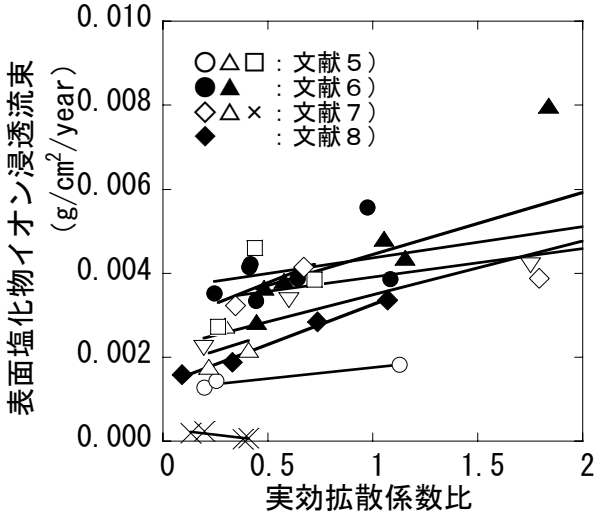
図－６ モルタル供試体の実効拡散係数



図－７ 実効拡散係数と表面漢化物イオン浸透流束の関係

表－３ 直線回帰式（図－７中）の傾き

暴露地点	回帰式の傾き
No. 1	0. 0014
No. 2	0. 0038
No. 3	0. 0012
No. 4	0. 0018
No. 2-1	0. 0056
No. 2-2	0. 0016
No. 2-3	0. 0019
No. 2-4	0. 0005



図－８ 実効拡散係数と塩分浸透量の関係
（文献データ） 5）6）7）8）

の傾きが近い値になる傾向が見られた。以上のことから，供試体暴露によって塩害環境を評価する場合には複数の配合の供試体を用いる必要は無く，室内実験によって実効拡散係数を求めておけば異なる配合での結果を推定できる可能性があると考えられる。

4. まとめ

本研究は，飛来塩分環境下おいて異なる配合のモルタル供試体への塩化物イオン浸透量の測定を行い，表面塩化物イオン浸透流束を求めた。その結果，表面塩化物イオン浸透流束の値そのものは暴露地点によって異なるものの，同一暴露地点においては塩化物イオンの実効拡散係数が大きいほど表面浸透流束が大きいことが明らかとなった。また，浸透流束に対する実効拡散係数の相対的な影響は暴露地点が異なっていてもほぼ同等であり，暴露試験により塩害環境を評価する場合おいて，１種類の配合で実験を行えば十分である可能性が示唆された。

謝辞

本研究で用いた暴露試験データの一部は，(財)海洋架橋・橋梁調査会 橋梁塩害対策検討委員会の研究の一部として実施されたもので，関係各位に謝意を表します。

参考文献

1) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，2002.
2) 佐伯竜彦，堀岡祐介：新潟県沿岸の飛来塩分環境とコンクリートへの塩分浸透性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.923-928，2006.
3) 山田義智，大城　武，桝田佳寛：コンクリート中への塩分浸透過程および蓄積量に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.19，No.1，pp.949-954，1997.
4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の長期性能照査支援モデル研究員会報告書，2004.
5) 佐々木慎一，堺 孝司：コンクリート中への塩化物の浸透と海洋環境条件，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16,No.1，pp.941-946,1994.
6) 笹谷　輝彦：過酷な塩分環境下におけるコンクリート構造物の劣化機構とその防止対策，金沢大学博士論文，1997
7) セメント協会：コンクリート専門委員会報告 各種発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究,2006.
8) 山路　徹，中野松二，濱田秀則：港湾 PC 構造物における塩化物イオン拡散係数調査結果および簡易推定手法に関する検討,港湾空港技術研究所資料，No.1141，2006.
9) 細川佳史，山田一夫，高見　満，杉山隆文：浸せき法および電気泳動法により評価した塩化物イオン拡散係数に関する検討,コンクリート工学年次論文集，Vol.26,No.1,pp.725-730，2003.