

塩害暴露試験によるコンクリートの塩分浸透性の評価

— その 1：早強ポルトランドセメントを用いたコンクリート —

谷口 秀明*1・渡辺 博志*2・手塚 正道*3・藤田 学*4

(独)土木研究所と(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会は、新潟の沿岸部において、PC橋を対象とする、早強ポルトランドセメントを用いた比較的高強度域のコンクリートの塩害暴露試験を実施している。暴露開始から14日目までの測定結果より、塩化物イオン濃度には降雨による付着塩分の洗い流し作用が大きく関与すること、中性化深さが数mmであっても、コンクリート内部の塩化物イオン濃度の再拡散は表面から30mm程度の範囲にまで影響を及ぼすこと、Fickの拡散方程式をあてはめた場合、表面塩化物イオン量および塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、降雨等の試験体の境界条件により暴露期間の影響が大きく異なること、暴露試験で得られた塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、コンクリート標準示方書による計算値よりも小さいこと等が明らかになった。

キーワード：早強ポルトランドセメント、高強度コンクリート、暴露試験、塩分浸透性、中性化

1. はじめに

PC構造物は、使用されるコンクリート自体が高い耐久性を有し、しかもプレストレス導入によりひび割れが制御されているため、通常の鉄筋コンクリート構造物と比べて耐久性に優れる。しかし、飛来塩分が到達する沿岸部や、内陸部でも凍結防止剤を散布する地域では、塩分の供給が過大となり、高強度コンクリートを使用した部材であっても塩化物イオンの浸透によって鋼材腐食を進行させる可能性がある。このため、使用される高強度コンクリートの塩分浸透性と鋼材腐食を正確にとらえ、適切な照査や維持管理を行うことが重要である。なお、本研究では、コンクリート標準示方書¹⁾(以下、示方書と略す)等における定義によらず、PC橋に使用する比較的高強度域のコンクリートを総じて「高強度コンクリート」と呼ぶ。

示方書では、使用材料および配合より塩化物イオン拡散係数を予測できる式を示している¹⁾。しかし、改訂資料²⁾によれば、普通ポルトランドセメントの予測式は、水セメント比が40%を超える配合が多数を占め、40%以下は少ないデータをもとに算出されたものである。また、PC橋で多用される早強ポルトランドセメントを使用したコンクリートの拡散係数のデータが少なく、予測式も示されていない。

(独)土木研究所と(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会では、前述の示方書で予測式が示される以前より、現場打ち高強度コンクリートの設計施工法に関する共同研究委員会(平成9年度～平成11年度)を設置し、PC橋に用いる高強度コンクリートに関するさまざまな検討を行ってきた。委員会では、塩害対策に関しては、試験室におい

る塩水浸漬試験以外に、実際の塩害環境下に置かれた早強ポルトランドセメントを使用した高強度コンクリートの耐塩性を把握する目的で、平成9年に新潟の沿岸部においてコンクリートの塩害暴露試験を開始した。

本報では、暴露開始から14日目までの測定結果をもとに、早強ポルトランドセメントを使用した高強度コンクリートの塩分浸透性について述べる。

2. 暴露環境条件

2.1 暴露試験場の位置

暴露試験場は、波しぶきが直接かからない範囲で、できるかぎり海に近い箇所であること、海の方向には障害物が存在しないこと、標高が低いこと、長期にわたって同一条件で存置できることなどを立地条件とし、新潟県の信濃川関屋分水の河口付近の海岸線から約20mの箇所に設けた。この場所は、道路橋示方書³⁾では、塩害の「地域区分B」および「対策区分S」に相当する。

2.2 飛来塩分量

暴露試験場には、土研式塩分捕集器を設置し、暴露開始から2年間、飛来塩分量を測定した。飛来塩分量(単位: $mdd = mg/dm^2/day$, NaClで表示)の月別変化を図-1に示す。飛来塩分量は、12月から1月にかけて最大となり、1月では約13mddに達するが、その一方で5月～7月の期間にはほとんど測定されていない。図-2は、風速が10m/s以上の日数(1ヵ月あたり)と飛来塩分量の関係を示したものである。風速10m/s以上の日数が多いほど、飛来塩分量が多いことがわかる。これは、この地区では、冬期に北西(海)からの風が強く、これに伴う飛来塩分の供給が多いことを示唆するものである。そこで、供試体

*1 Hideaki TANIGUCHI: (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会

*2 Hiroshi WATANABE: (独)土木研究所

*3 Masamichi TEZUKA: (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会

*4 Manabu FUJITA: (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会

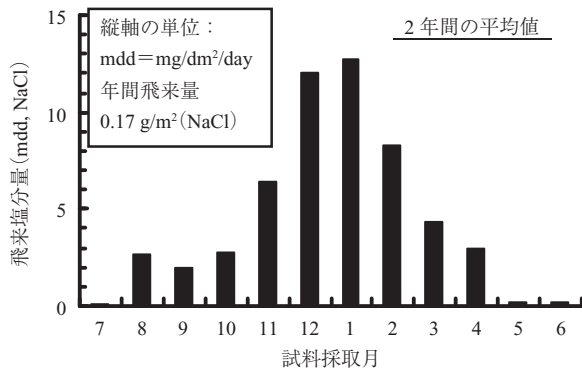


図 - 1 飛来塩分量の月別変化

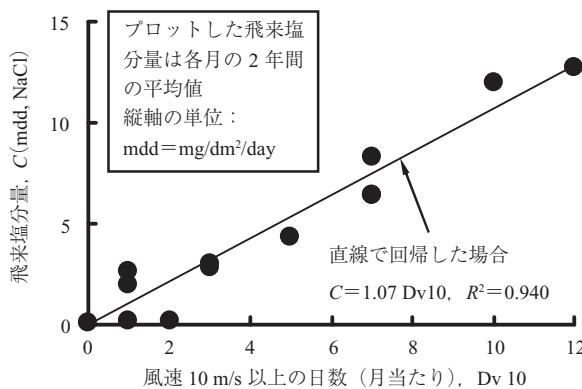


図 - 2 風速 10 m/s 以上の日数と飛来塩分量の関係

は、この大量の飛来塩分が試験面（海側と呼ぶ）に供給される向きに設置した。なお、飛来塩分量の年間総量は 0.17 kg/m^2 (NaCl で表示) と計算された。

2.3 表面附着塩分量

表面附着塩分量 (CI 換算) を測定するための供試体の設置方法および測定結果を、図 - 3 に示す。供試体のうえから 3 段目までにはコンクリート板 (水セメント比 : 40%, 厚さ : 10 mm) を、最下段となる 4 段目にはステンレス板 (厚さ 1 mm) の供試体を設置した。供試体は、いずれも直径 $\phi 100 \text{ mm}$ の円盤状のものである。また、降雨の影響を把握するため、屋根を設けた。表面附着塩分量の測定は暴露開始から 1, 2 および 5 年目に実施した。

コンクリート板で測定された表面附着塩分量は、板の位

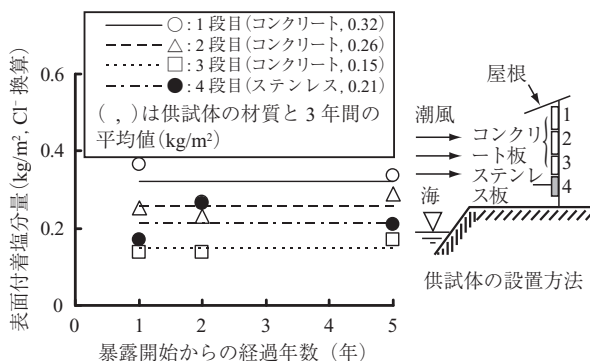


図 - 3 表面附着塩分量を測定する供試体の設置方法と測定結果

置が低くなるほど、表面附着塩分量が少なくなる傾向がある。これは、供試体の上部に設けた屋根によって、上部ほど降雨の影響が小さいことに起因するものと思われる。一方、ステンレス板は非吸水性であり、降雨の影響をもっとも受けやすい最下段に設置されているため、ステンレス板で測定される表面附着塩分量は、本来はコンクリート板よりも小さくなる可能性が高い。しかし、その表面附着塩分量は、2 段目と 3 段目のコンクリート板の中間的な値である。すなわち、降雨の影響を受ける環境下では、コンクリートとステンレス板の表面附着塩分量にはほとんど差異が認められない。なお、ここで示した方法で測定した表面附着塩分量は、前述の土研式塩分捕集器で測定した飛来塩分量の年間総量を CI に換算した値 (約 0.1 kg/m^2) に比べて若干大きい。

3. 試験方法

3.1 コンクリートの条件

コンクリートの使用材料および配合を、表 - 1 に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを使用した。配合 No.1 ~ No.3 は、細骨材率 (40%) および単位ペースト絶対容積 ($0.310 \text{ m}^3/\text{m}^3$) を一定として、水セメント比を 30, 40, および 55% に変化させたものである。また、配合 No.4 および No.5 は、配合 No.1 に対して単位水量を増減させたもの、配合 No.6 は、配合 No.5 と同一の単位水量で水セメント比を 25% にしたものである。

表 - 1 コンクリートの使用材料および配合

配合名	水セメント比, W/C (%)	細骨材率, s/a (%)	単位ペースト絶対容積 (m^3/m^3)	単位量 (kg/m^3)				SP ($C \times Wt$ %)
				W	C	S	G	
No.1	30	40	0.310	150	500	669	1031	1.8
No.2	40			173	433			1.2
No.3	55			196	356	0.5		
No.4	30		0.268	130	433	711	1096	2.5
No.5	30		0.357	173	577	620	956	1.5
No.6	25		0.393	173	692	583	898	2.3

W: 水道水, C: 早強ポルトランドセメント (密度 3.14 g/cm^3), S: 栃木県鬼怒川産川砂 (表乾密度 2.57 g/cm^3), G: 茨城県岩瀬産砕石 2005 (表乾密度 2.64 g/cm^3), SP: 高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体)

3.2 供試体の条件

コンクリートの塩分浸透性を把握するための供試体およびコア採取位置を、図 - 4 に示す。供試体 ($900 \times 900 \times 300 \text{ mm}$, 無筋) で、3 日間の湿潤養生を行った後、約 2 ヶ月間は室内に存置し、その後、暴露試験場に移動した。供試体には屋根を取り付け、降雨の影響を調べた。試験面はコアの両面とし、図中に示すように海側を S, 小屋側を W として高さ方向の位置を数字で表した。

なお、この暴露試験では、鋼材を入れた供試体も暴露し、自然電位、分極抵抗、破壊後の鉄筋腐食状態等を確認しているが、本報では省略する。

3.3 コンクリートの品質に関する試験

採取したコアの側面は、JIS A 1152 「コンクリートの中

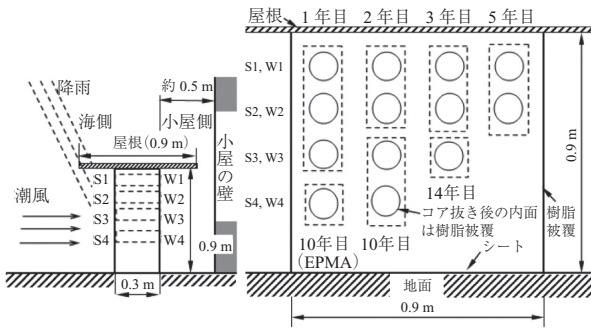


図 - 4 塩分浸透性を把握するための試験体

性化深さの測定方法に準じ、フェノールフタレイン 1 % エタノール溶液を噴霧して中性化深さを測定した。その後、コンクリート表面から厚さ 10 mm ごとにスライスし、予想される塩化物イオンの浸透深さに応じて 5 ~ 10 層分の試料を採取した。本報では、コンクリート表面にもっとも近い層を第 1 層目、その後は深さ 10 mm ごとに第 2 層目、第 3 層目……と呼ぶ。塩化物イオン濃度は、JCI-SC4 に準拠し、電位差滴定法により全塩分量を測定し、試験値はコンクリート 1 m³ 中の塩化物イオン濃度 (kg/m³) で表した。

4. 試験結果および考察

4.1 中性化深さ

中性化深さの測定結果を表 - 2 に示す。また、図 - 5 は、水セメント比 55 % のコンクリートの暴露期間と中性化深さの関係を示している。図中の曲線は、示方書¹⁾に示される中性化速度係数の特性値の算定式 (1) による計算結果である。ただし、環境の影響を表す係数 R は考慮していない。

$$y = R(-3.57 + 9.0 W/B)\sqrt{t} \quad (1)$$

ここに、

- y : 中性化深さ (mm)
- R : 環境の影響を表す係数
- W/B : 有効水結合材比
- t : 中性化期間 (年)

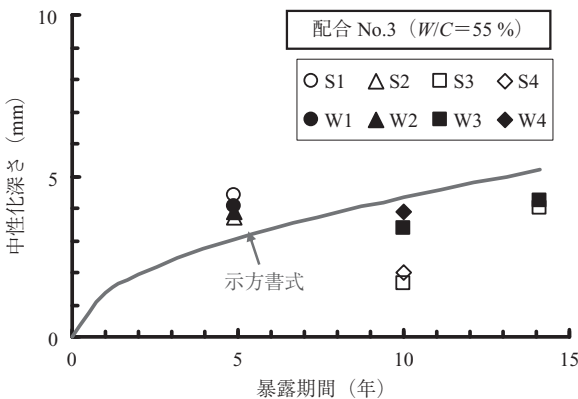


図 - 5 暴露期間と中性化深さの関係

示方書式では水セメント比が 39.7 % となる場合に中性化速度係数が 0 mm/√年となるが、表 - 2 に示すとおり、

表 - 2 中性化深さの測定結果

配合 No.	水セメント比 (%)	暴露 5 年目		暴露 10 年目		暴露 14 年目							
		測定箇所	中性化深さ (mm)	測定箇所	中性化深さ (mm)	測定箇所	中性化深さ (mm)						
2	40	S1	2.3	W1	0.0	S3	0.5	W3	0.8	S3	1.3	W3	0.7
		S2	0.7	W2	0.0	S4	0.5	W4	0.0				
3	55	S1	4.4	W1	4.0	S3	1.6	W3	3.4	S3	4.0	W3	4.2
		S2	3.7	W2	3.9	S4	2.0	W4	3.9				

S : 海側, W : 小屋側 1 ~ 4 : 上からのコア採取位置 No.

配合 No.2 (水セメント比 40 %) の中性化深さは 1 ~ 2 mm 発生した。水セメント比が 55 % の中性化深さは、図 - 5 に示すとおり、おおむね、示方書式と同等もしくは長期的にはそれ以下である。ただし、中性化深さは、いずれの配合も最初に測定した暴露期間 5 年から 14 年までの間にほとんど増加していない。なお、水セメント比が 25 および 30 % の中性化深さはすべて 0 mm であった。

4.2 塩化物イオン濃度

(1) 塩化物イオン濃度分布

暴露 14 年目におけるコンクリートの塩化物イオン濃度の深さ方向の分布を、図 - 6 に示す。図中には、示方書³⁾で示される鋼材腐食発生限界濃度 1.2 kg/m³ と、国土交通省コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領 (案) に示される対策の要否の判定値 2.5 kg/m³ を、それぞれ、実線と点線で示した。暴露年数が同一であっても、水セメント比が小さいほど、鋼材腐食発生限界濃度 1.2 kg/m³ あるいは判定値 2.5 kg/m³ に達するかぶりが小さく、高強度コンクリートが耐塩分浸透性に優れることが明らかである。

試験面の相違に着目すると、小屋側 (W) の塩化物イオン濃度は海側 (S) に比べて相当に大きく、海側からの降雨は塩分蓄積の低下に大きく関与することが分かる。水セメント比 55 % では、第 1 層目 (5 mm 位置) の塩化物イオン濃度が第 2 層目 (15 mm 位置) よりも小さく、とくに小屋側における第 1 層目の低下は顕著である。小屋側の水セメント比 30 %, 40 % においては、水セメント比 55 % のような第 1 層目における塩化物イオン濃度の明確な低下は認められないが、第 2 層目よりも深い位置での塩化物イオン濃度の分布を鑑みれば、表面近くでは塩化物イオン濃度が低下している可能性がある。このような現象は、一般に中性化の進行によって発生するといわれている。すなわち、コンクリートの中性化領域と内部の非中性化領域の塩化物イオンの濃度差により中性化領域にあった塩化物イオンが内部に拡散すると考えられている。しかし、中性化は、前述のとおり、ごく表面に近い部分でしか確認されておらず、中性化以外に乾湿繰返しや図 - 1 に示す飛来塩分量の変動等の環境要因が影響を及ぼしている可能性がある。

(2) 表面塩化物イオン量と塩化物イオンの見掛けの拡散係数

塩化物イオンの見掛けの拡散係数の算出にあたっては、示方書¹⁾に示された表面塩化物イオン量を一定とする

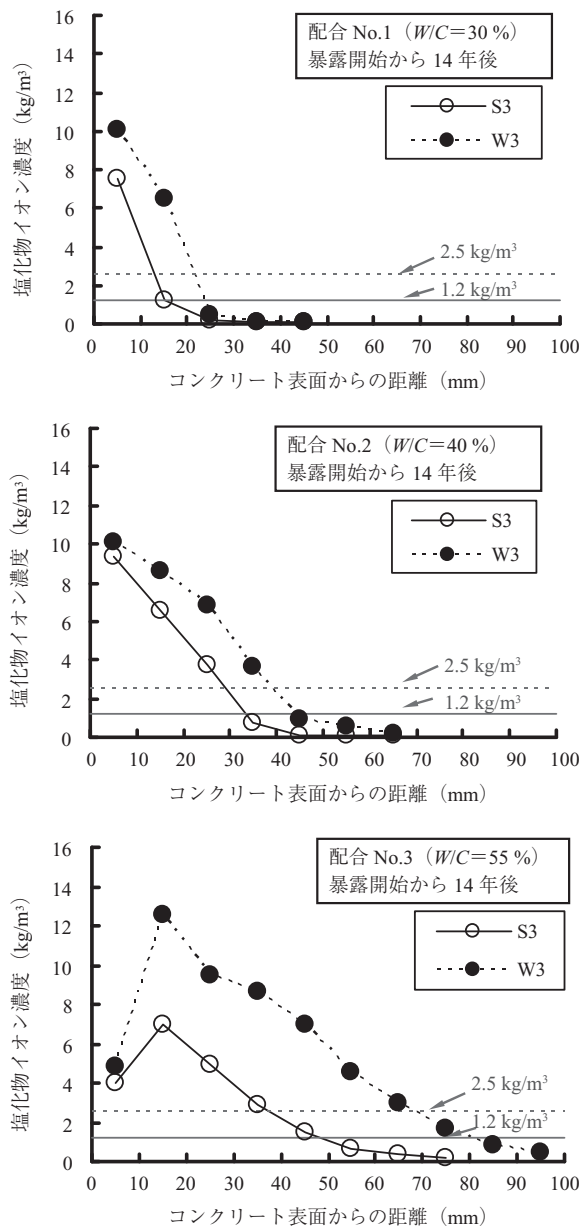


図 - 6 塩化物イオン濃度の深さ方向の分布（暴露 14 年目の結果）

Fick の拡散方程式である式 (2) を用いた。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \frac{\text{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}}{2} \right) \quad (2)$$

ここに、

$C(x, t)$: 深さ x (cm)、時刻 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

C_0 : 表面塩化物イオン量 (kg/m^3)

D : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

コンクリートの塩化物イオンの拡散係数ならびに境界条件としてのコンクリート表面塩化物イオン量を、暴露後の経過時間によらず一定と見なして、コンクリート中の塩化物イオンの浸透状況を評価するのが一般的である。ただし、コンクリート中においてセメントの水和反応が長期的に進行することや、飛来塩分が断続的に供給され続けるこ

と等については、暴露開始からの経過時間の関数として捉える必要があるかもしれない。

暴露期間と表面塩化物イオン量および塩化物イオンの見掛けの拡散係数（これ以降、文章中では拡散係数と略す）の関係の一例として、配合 No.1, No.2 および No.3 の結果を、図 - 7 に示す。海側 S1 の表面塩化物イオン量は、おおよそ、暴露期間が 2 ～ 3 年目を境界として、海側の計測値が小屋側の計測値と近い値を取るように変化している。すなわち、図 - 4 に示す短い屋根が存在するだけで、試験面の境界条件が相当に変化することが分かる。

表面塩化物イオン量は、海側と小屋側で傾向が大きくなる。S1 を除く海側においては、表面塩化物イオン量は暴露期間の経過とともにほぼ一定の割合で増加する傾向がある。これに対して、小屋側の表面塩化物イオン量は、暴露期間 0 ～ 2 年間で急増した後、水セメント比が 55 % ではほぼ一定（約 $16 \text{ kg}/\text{m}^3$ ）になっている。一方、水セメント比が 30 % および 40 % の表面塩化物イオン量は、図中に点線で示すように暴露期間が長くなるほど小さくなる傾向が認められる。

水セメント比が小さいほど、第 2 層目以降の塩化物イオン濃度が相当に小さいため、とくに暴露が短期の場合には、表面塩化物イオン量および拡散係数の結果が第 1 層目の値に左右されやすい。たとえば、水セメント比が 40 % の場合には短期の表面塩化物イオン量は、 $30 \text{ kg}/\text{m}^3$ を大幅に超える結果も確認された。しかし、筆者らが実施した塩水浸漬試験（暴露試験と同一配合）の結果⁴⁾では、表面塩化物イオン量は $20 \sim 30 \text{ kg}/\text{m}^3$ の範囲であり、暴露の雰囲気環境としてこれを遙かに超えることは考えにくい。また、自然環境を利用した暴露試験において短期の表面塩化物イオン量の厳密性を求めても、本研究の趣旨に合致するものでもない。そこで、水セメント比 55 % の場合と同様に暴露期間 2 年以降ではほぼ一定となると仮定すると、相当にばらつきはあるが、一定となる表面塩化物イオン量は、水セメント比 30 % では約 $21 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、水セメント比 40 % では約 $17 \text{ kg}/\text{m}^3$ である。これらの結果によれば、水セメント比が小さいほど、一定となる表面塩化物イオン量は大きくなるが、水セメント比 30 % の配合 No.4 および No.5、ならびに水セメント比 25 % の一定となる表面塩化物イオン量は $16 \sim 17 \text{ kg}/\text{m}^3$ 程度であり、水セメント比の傾向は必ずしも明確ではない。なお、海側と小屋側の表面塩化物イオン量は、暴露期間が 10 年前後で比較的近い値になる。

一方、拡散係数は、海側よりも小屋側の方が若干大きくなる傾向がある。水セメント比が 55 % の場合には、海側、小屋側ともに暴露期間による拡散係数の変化は比較的小さく、ほぼ一定と見なせる。水セメント比が 30 % および 40 % における拡散係数は、暴露期間が短い場合にはやや大きな値となり、小屋側においては暴露開始から 2 年目以降、海側においては水セメント比が 30 % で 10 年目以降、40 % で 2 年目以降、拡散係数はほぼ一定と見なせる。したがって、小屋側では、表面塩化物イオン量を一定とする Fick の拡散方程式を用いても良いが、海側において、とくに水

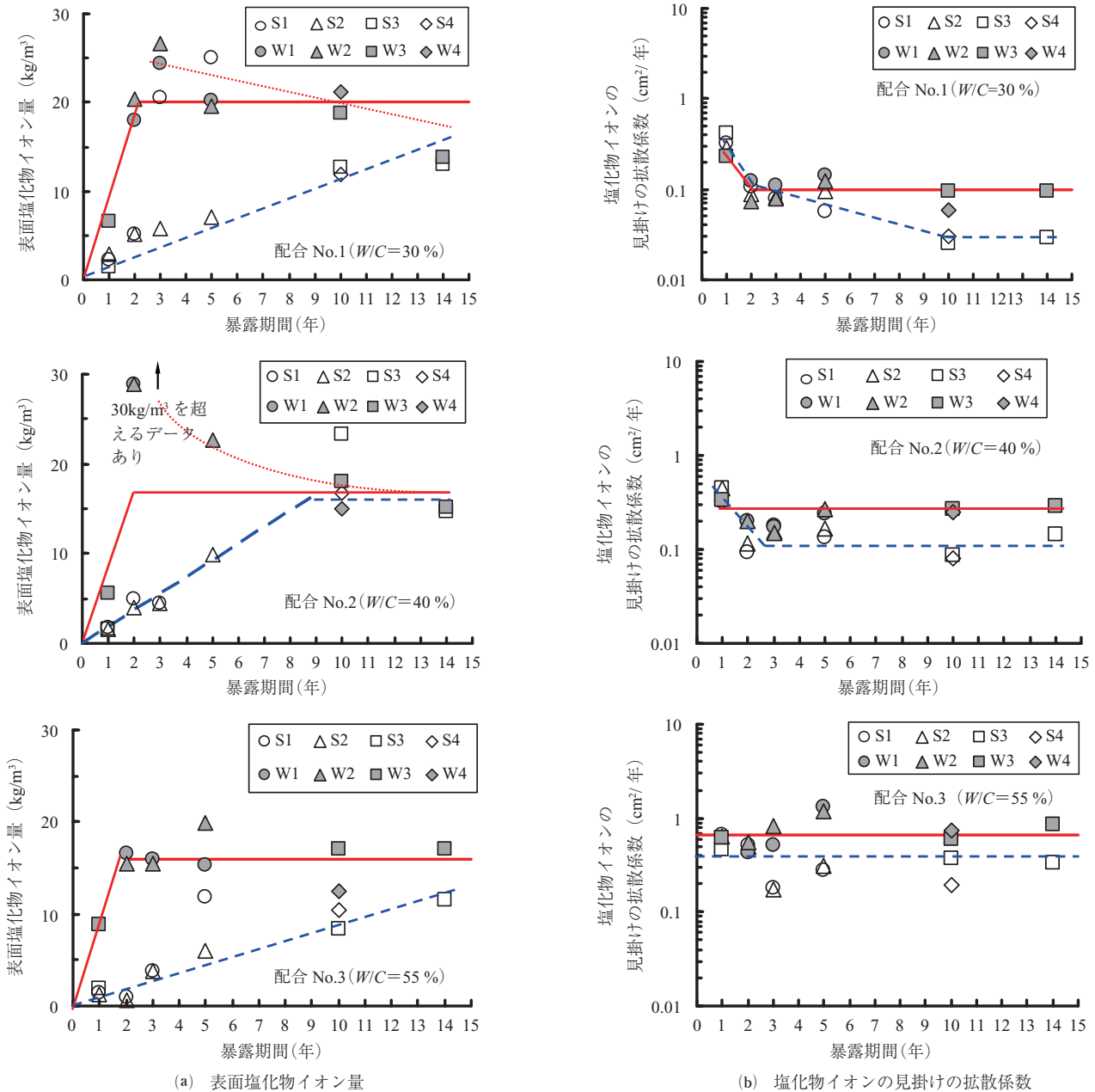


図 - 7 暴露期間と表面塩化物イオン量および塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係

セメント比が小さい高強度コンクリートを短期間で拡散係数を求める場合には、表面塩化物イオン量を何らかの時間の関数で表すことが必要になる可能性がある。ただし、10年程度の暴露期間を確保すれば、水セメント比が30%であっても表面塩化物イオン量を一定とするFickの拡散方程式を適用できる可能性がある。前述のとおり、短期間では第1層よりも深い位置での塩化物イオン濃度が小さく、Fickの拡散方程式を当てはめた場合の推定精度上の問題もあるため、コンクリートの強度域が高いほど、暴露期間は長くすることが望ましい。

(3) 水セメント比と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係

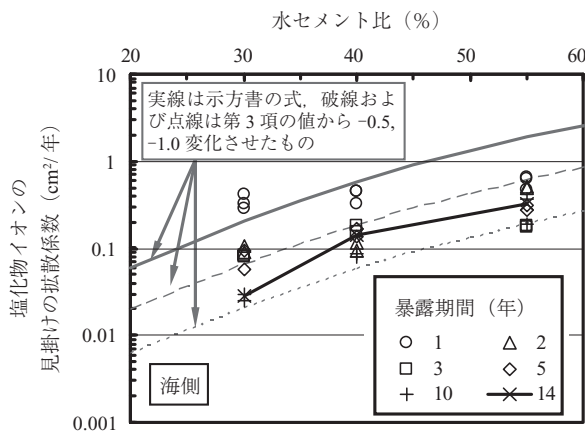
水セメント比と拡散係数の関係を、図 - 8 および図 - 9 に示す。図 - 8 では、配合 No.1 ~ No.3 のコンクリートを

対象とし、暴露期間が1~14年目の海側(図 - 8(a))と小屋側(図 - 8(b))の計算結果を分けて示している。図 - 9 では、配合 No.1 ~ No.6 の全配合を対象とした海側と小屋側の計算結果を示した。配合 No.4 ~ No.6 は、水セメント比が配合 No.1 と同一または小さいため、長期間(10および14年)暴露した試験結果に限定した。

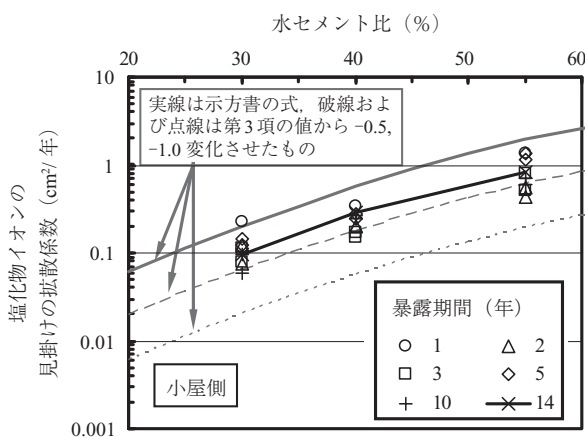
図 - 8 および図 - 9 中には、式(3)に示す示方書¹⁾における普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの拡散係数 D の算定式を示した。また、参考として、式(3)の第3項の値を-0.5および-1.0変化させた線も図示している。なお、式(3)中の W/C は水セメント比を指す。

$$\log D = -3.9\left(\frac{W}{C}\right)^2 + 7.2\left(\frac{W}{C}\right) - 2.5 \quad (3)$$

図 - 8 に示すとおり、高強度コンクリートの拡散係数



(a) 海側の結果



(b) 小屋側の結果

図 - 8 水セメント比と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係 (配合 No.1 ~ No.3, 暴露期間 1 ~ 14 年)

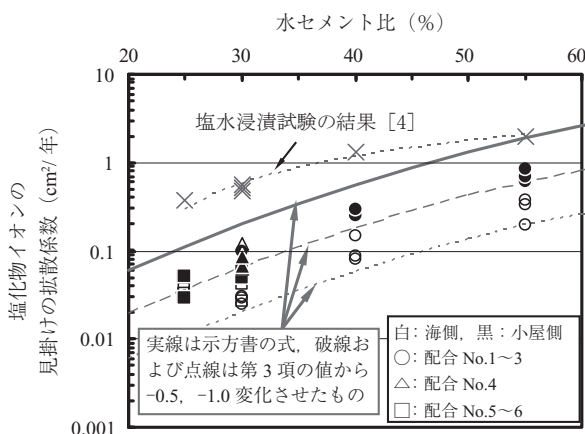


図 - 9 水セメント比と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係 (配合 No.1 ~ No.6, 暴露期間 10 年および 14 年)

は、暴露期間が短い試験値を除けば、示方書の式を表す曲線よりも小さく、同式の第3項を0.5小さくした曲線とほぼ一致する。また、海側と小屋側の試験値を比べると、そ

の曲線に対して、小屋側は大きく、海側は小さい。

図 - 9 に示すとおり、配合 No.4 ~ No.6 の拡散係数は、配合 No.1 ~ No.3 までの結果とほぼ一致している。すなわち、水セメント比が25%までのコンクリートに対して、今回の結果が適用できる。暴露試験で求めた拡散係数は、筆者らの一部が実施した同一配合による塩水浸漬試験の結果⁴⁾と比べると小さいことが分かる。なお、配合 No.4 の拡散係数は若干大きめの値であったが、暴露開始前に測定した圧縮強度も同一水セメント比の配合 No.1 および No.5 に比べて10 N/mm²程度小さく、表 - 1 に示すように単位水量が過小で、他の配合と比べて供試体の密実性がやや劣ることが原因である可能性がある。

5. おわりに

早強ポルトランドセメントを使用した、比較的高い強度域のコンクリートの塩害暴露試験を実施した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 塩化物イオン濃度は、潮風を直接受ける海側よりもその背面の小屋側で高くなる。塩化物イオン濃度には、降雨による付着塩分の洗い流し作用が大きく関与する。
- (2) 中性化深さが数 mm であっても、内部での塩化物イオン濃度の再拡散は、表面から30 mm程度の範囲にまで影響を及ぼす場合がある。
- (3) Fick の拡散方程式をあてはめた場合、表面塩化物イオン量は、小屋側では暴露開始して2年程度ではほぼ一定となるが、海側では暴露期間の経過とともにほぼ一定で増加傾向を示し、暴露期間が10年前後で小屋側の値に達する。一方、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、海側では水セメント比が小さいほど、拡散係数が一定となる暴露期間は長くなるが、実施した暴露試験の条件下では、10年程度の暴露を行えば、拡散係数はほぼ一定となる。また、水セメント比、暴露期間に関わらず、小屋側で求めた拡散係数が海側で求めた拡散係数よりも若干大きくなる。
- (4) 暴露試験で得られた塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、コンクリート標準示方書の式で求めた計算値あるいは塩水浸漬試験で得られた試験値よりも小さい。

謝 辞

暴露試験にご協力いただいた国土交通省信濃川下流工事事務所、同関屋出張所に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2008.3
- 2) 土木学会：2002年版コンクリート標準示方書改訂資料, 2002.3
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, コンクリート橋編, 2002
- 4) 田中良樹, 藤田学, 河野広隆, 渡辺博志：高強度コンクリートの塩分浸透抵抗性, コンクリート工学年次論文集, 23-2, pp.517-522, 2001.7

[2012年6月13日受付]