

# 報告 塩害暴露試験による高強度コンクリートの塩分浸透性と鉄筋腐食の評価

谷口 秀明<sup>\*1</sup>・渡辺 博志<sup>\*2</sup>・河野 広隆<sup>\*2</sup>・藤田 学<sup>\*3</sup>

要旨：PC 橋を対象とする高強度コンクリートの耐塩害性を評価するため、海岸近くに供試体を暴露し、飛来塩分のコンクリート中への浸透や鉄筋の腐食進行について検討を行った。5年間の暴露試験により、コアの採取位置によって中性化の進行や塩化物イオン含有量が異なること、潮風を直接受ける海側で求めた拡散係数は採取年によって変化しやすいこと、水セメント比と拡散係数の関係は土木学会の予測式と概ね一致するものの、採取年や採取位置等によるばらつきを考慮する必要があること等がわかった。

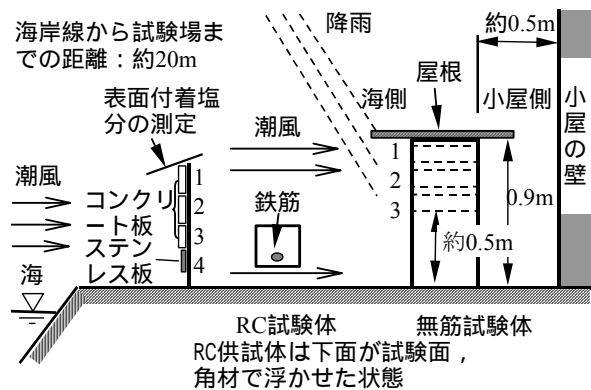
キーワード：高強度コンクリート，暴露試験，塩化物イオン量，腐食

## 1. はじめに

高強度コンクリートは、強度、耐久性の利点を活かし、部材断面の縮小による軽量化、施工の省力化、長寿命化、ライフサイクルコストの低減等への寄与が期待できる。コンクリート構造物の耐久性、維持管理が重視される昨今、耐久性に優れた高強度コンクリートの利用は有効な手段の一つと言える。

土木学会の耐久性照査<sup>1)</sup>では、塩化物イオンの拡散係数の予測式が示されている。しかし、示方書の改訂資料<sup>2)</sup>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 40%を超える配合が多数を占め、40%以下は少ないデータによって算出されている。また、PC 部材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に関しては拡散係数のデータは少なく、示方書で予測式が示されていない。

筆者らは、PC 部材を対象とした高強度コンクリートの塩害暴露試験を行っており、3年目までの塩化物イオンの拡散係数については既に報告している<sup>3)</sup>。本報告は、塩化物イオンの拡散係数に加え、飛来塩分量、中性化深さ、鉄筋の腐食等、5年間の試験結果を総括した内容である。



その他、RC試験体近くに土研式塩分捕集器を設置  
図 - 1 暴露試験場における供試体の設置方法

## 2. 試験方法

### 2.1 暴露条件

道路橋示方書<sup>4)</sup>における塩害の地域区分 B、対策区分 S を想定し、信濃川関屋分水の河口付近、海岸線から約 20m のところに暴露試験場を設けた。日本海側（西北西～北西）からの潮風が試験体に当たるように配置した。

### 2.2 試験体の条件

図 - 1 に示すとおり、暴露試験場には、飛来塩分量の測定を目的とした土研式塩分捕集器と、表面付着塩分量の測定用試験体を設置した。後者は、100mm の円盤状のコンクリート板（表

\*1 (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 工修 (正会員)

\*2 (独)土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 工修 (正会員)

\*3 (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 博(工) (正会員)

- 1 中の配合 No.2, 厚さ 10mm) とステンレス板 (厚さ 1mm) で 試験方法は文献 5) を参考にした。

表 - 1 に示した水セメント比 (ペースト濃度) のみを変化させた 3 配合のコンクリートを使用し, 塩分浸透性と中性化を評価するための無筋試験体 (900 × 900 × 300mm) と, 鉄筋の腐食度を把握するための RC 試験体 (200 × 200 × 600mm) を作製した。試験体は 3 日間の湿潤養生を行った後, 約 2 ヶ月後まで室内気中養生, その後, 暴露試験場に運搬して試験を開始した。

無筋試験体には屋根を取り付け, コア採取位置によって降雨の影響が異なる条件を設けた。コアは 暴露 1 年目には上下方向に 3 段採取し, 海側はすべて, 小屋側は 3 段目のみ採取した。2 年目以降は 1 年目の降雨の影響度から判断し, 両側とも 1,3 段目からの採取に変更した。測定は, 中性化深さ (コア側面を使用, フェノールフタレイン 1% エタノール溶液の噴霧による) と塩化物イオン含有量 (厚さ 10mm で深さ方向に 5 試料を採取, 電位差滴定法による測定) である。

一方, RC 試験体は, 所定のかぶり (10 ~ 70mm) で D13 鉄筋を埋め込んだもので, 鉄筋の端部の一方には, 自然電位および分極抵抗を測定するためのリード線を取り付けた。RC 試験体は図 - 1 のように角材で浮かせた状態とし, 試験面を下側とした。所定の材齢で鉄筋をはつり出し, 腐食状況を確認するとともに, 鉄筋の中心位置に対して ±10mm 部分のコンクリートを採取し, 塩化物イオン含有量を測定した。

なお, いずれのコンクリート試験体も試験面以外は樹脂で被覆し, 無筋試験体についてはコア採取後の面にも同様の処理を施した。

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 飛来塩分量

暴露 1,2 年目に測定した飛来塩分量 (mdd : mg/dm<sup>2</sup>/day, NaCl で表示) の月別変化を, 図 - 2 に示す。飛来塩分量は, 12,1 月には約 13mdd (2 年間の平均) に達する一方, 5 月 ~ 7 月の間では全く測定されていない。飛来塩分量の月別変化

表 - 1 コンクリートの条件

配合 No	コンクリートの配合						SP (C × Wt %)	材齢 28 日の圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )					標準水中養生	室内気中養生
			W	C	S	G			
1	30	40	150	500	669	1031	1.8	67.2	60.5
2	40		173	433			1.2	52.4	45.7
3	55		196	356			0.5	39.6	34.1

<記号> W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材率, W: 水道水, C: 早強ポルトランドセメント (密度 3.14g/cm<sup>3</sup>), S: 川砂 (表乾密度 2.57 g/cm<sup>3</sup>), G: 砕石 2005A (表乾密度 2.64g/cm<sup>3</sup>), SP: 高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)

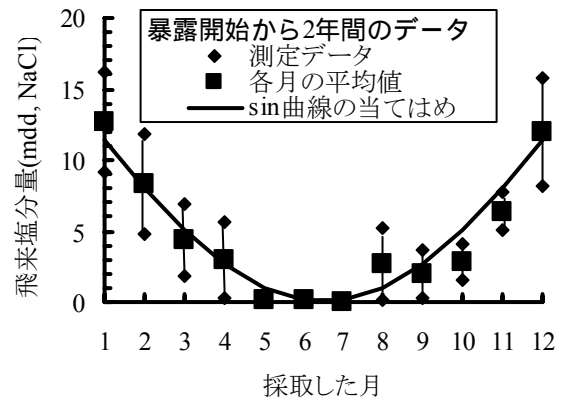


図 - 2 飛来塩分量の月別変化

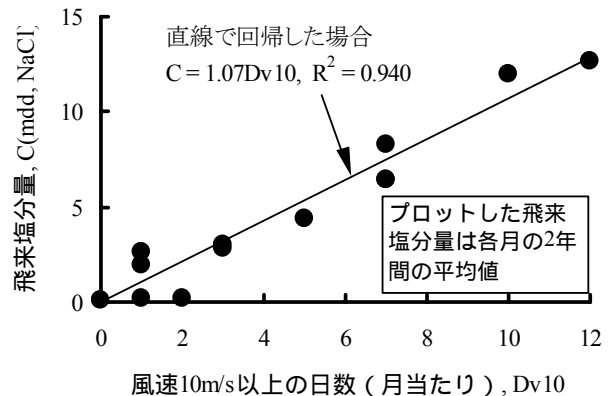


図 - 3 強風の日数と飛来塩分量の関係

は, 図中に示した 12 ヶ月を半周期とする三角関数の曲線と概ね一致する。また, 図 - 3 に示すとおり, 月当たりの風速 10m/s 以上の日数<sup>6)</sup>と飛来塩分量の関係には密接な関係があることがわかる。さらに, この地区では, 冬期に吹く強風は試験面を向けた北西である場合が多く, 冬期に大量の飛来塩分が供給されたと考えられる。な

お, 1年間の総飛来塩分量は Cl 換算で, 1年目が 7.9g/m<sup>2</sup>, 2年目が 12.0g/m<sup>2</sup> と計算された。

### 3.2 付着塩分量

図 - 4 は, 暴露開始から 1,2,5 年目に測定した表面付着塩分量 (Cl 換算) である。コンクリート板による測定値は, 板の位置が低くなるほど, 表面付着塩分量が少なくなる傾向にある。これは, 試験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推測される。ただし, ステンレス板は, 最下段に設置したにもかかわらず, コンクリート板の 3 段目の値よりも大きく, 塩分の付着には試験体の材質が影響するものと考えられる。

### 3.3 中性化

暴露 5 年目の中性化深さを, 表 - 2 に示す。暴露 1,3 年目の中性化深さはいずれも 0mm であった。表中の計算値とは, 土木学会示方書が示す式(1)を用いて計算したもので, 乾燥しやすい環境と判断し, 係数 R は 1.6 とした。

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

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)

水セメント比 30, 55%の値は, 示方書式による計算値と概ね一致する。しかし, 水セメント比 40%では, 小屋側の中性化深さは 0mm であるものの, 潮風を直接受ける海側の測定値は計算値よりも大きく, とりわけ, 1 段目のコアの中性化は 6.1mm まで進行した部分も存在した。海側は小屋側よりも乾湿の繰返し(降雨, 日射を含む)の影響が大きいと考えられ, 中性化深さの違いに影響した可能性がある。

### 3.4 塩分浸透性

暴露 5 年目における塩化物イオン含有量の深さ方向の分布を, 図 - 5 に示す。図中には, RC

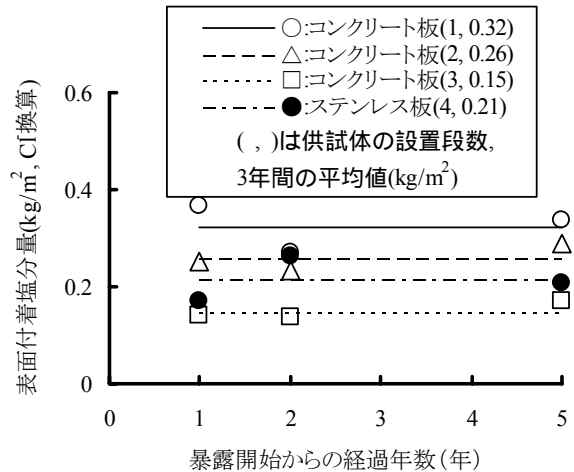


図 - 4 表面付着塩分量の測定結果

表 - 2 暴露 5 年目の中性化深さの測定結果

配合 No.	W/C (%)	コア位置	海側		小屋側		計算値
			平均	最大	平均	最大	
1	30	1	0	0	0	0	0*
		3	0	0	0	0	
2	40	1	2.3	6.1	0	0	0.1
		3	0.7	2.2	0	0	
3	55	1	4.4	5.9	4.0	6.5	4.9
		3	3.7	5.7	3.9	5.8	

\*)計算上は負の値になるが, 0mmとした。(単位:mm)

試験体の鉄筋位置の値も示した。なお, 塩化物イオン含有量は, 土木学会資料<sup>7)</sup>に基づき, セメント質量に対する比率(以降, 図中の記号 C はセメント質量を意味する)で表した。塩化物イオン含有量の分布は海側と小屋側で異なり, その傾向は水セメント比が大きいほど顕著である。降雨等の影響を受けにくい小屋側の方が塩分を蓄積しやすい環境であることや, 同じ海側であっても, 水セメント比 30,40%では 1 段目の分布は小屋側と比較的近く, 3 段目で降雨等の影響が大きいこと等がわかる。

水セメント比 55%の 1 層目(コンクリート表面に最も近い部分)の塩化物イオン含有量は 2 層目よりも小さい, もしくは 2 層目と 3 層目の変化量により小さいと推測される。表 - 2 に示した中性化深さの結果により, 1 層目の塩化物イオン含有量の低下には, 中性化以外に乾湿繰返し等の影響も考慮する必要があると判断される。

次に, 塩化物イオン含有量の見かけの拡散係数を算出した。算出に当たっては, 一般に用い

られる表面塩化物イオン量を一定 ( $C_0$ ) とする Fick の拡散方程式を当てはめた。加えて、これまでの筆者らの研究<sup>3)</sup>と同様に、式(2), (3)に示す境界条件によっても拡散係数も算出した。S, A は、コンクリート表面からの塩化物イオンの供給量  $C(0,t)$  が時間  $t$  の平方根もしくは時間  $t$  と比例すると仮定した場合の係数である。

$$C(0,t) = S\sqrt{t} \quad (2)$$

$$C(0,t) = At \quad (3)$$

図 - 6 は、塩化物イオンのみかけの拡散係数、表面塩化物イオン量  $C_0$  および係数 S, A の経年変化を示したものである。得られる拡散係数はコア採取位置によって異なる。また、海側の値は小屋側に比べ、暴露年数によって異なり、かついずれの水セメント比でも見られることから、環境条件に起因する現象であると判断される。

図 - 5 に示したとおり、水セメント比 55% では 1 層目の塩化物イオン含有量の低下が顕著で、これを含めた 5 点で拡散係数を求めることが難しい。土木学会試験案<sup>8)</sup>では、中性化の影響を受けていない場合であっても、1 層目を除くデータによる拡散係数の算出を提案している。図 - 6 中には、暴露 5 年目のデータを使用し、1 層目を含まない 4 点で回帰した結果を示した。水セメント比 40%, 55% では、4 点回帰で求めた拡散係数は、5 点回帰の値よりも小さくなる傾向がある一方、水セメント比 30% ではかなり大きい。また、水セメント比 30% では 3 層目以降の塩分イオン含有量が極めて少なく、4 点回帰を行った場合には 2 層目の値が支配的になる。しかし、2 層目の値自体も小さいため、塩分イオン含有量の測定精度から考えて 4 点回帰で得られた拡散係数についても同様に精度上の問題を生じる。

表面塩化物イオン量を一定 ( $C_0$ )、時間の平方根 (S) または時間に比例 (A) の仮定で得られた拡散係数に違いはあるものの、経年変化には明確な差異は認められない。係数 S, A は係数  $C_0$  と同様に一定値とはならず、実際の暴露環境に応じた

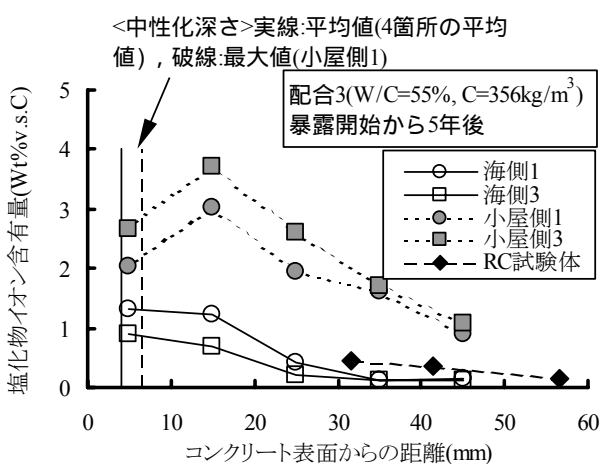
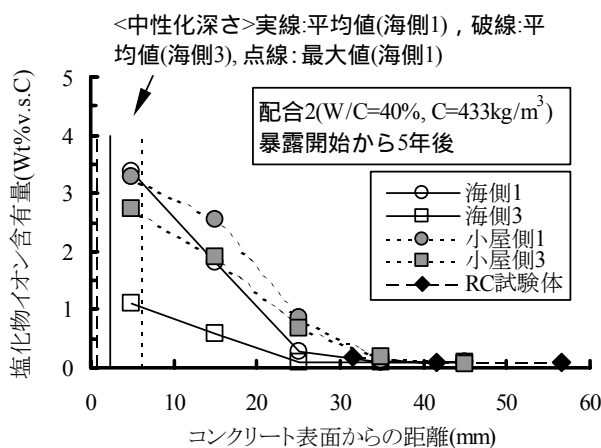
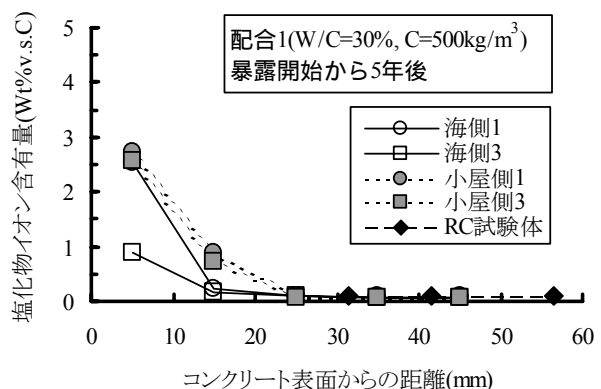


図 - 5 塩化物イオン含有量の深さ方向の分布

境界条件の設定が必要であると考えられる。

表 - 3 は、5 年目のデータを用いた場合、各年で算出した 5 年間の拡散係数を平均した場合、並びに 5 年間のデータを一括で回帰した場合 ( $C_0$  を除く) の結果である。この表の平均値を用いて、水セメント比との関係を調べたものが、図 - 7 である。図中には、示方書が示す塩化物イオンの見かけの拡散係数  $D(\text{cm}^2/\text{年})$  と水セメント比  $W/C$  の関係式(4)の第 3 項を  $\pm 0.5, 1.0$  変化させ

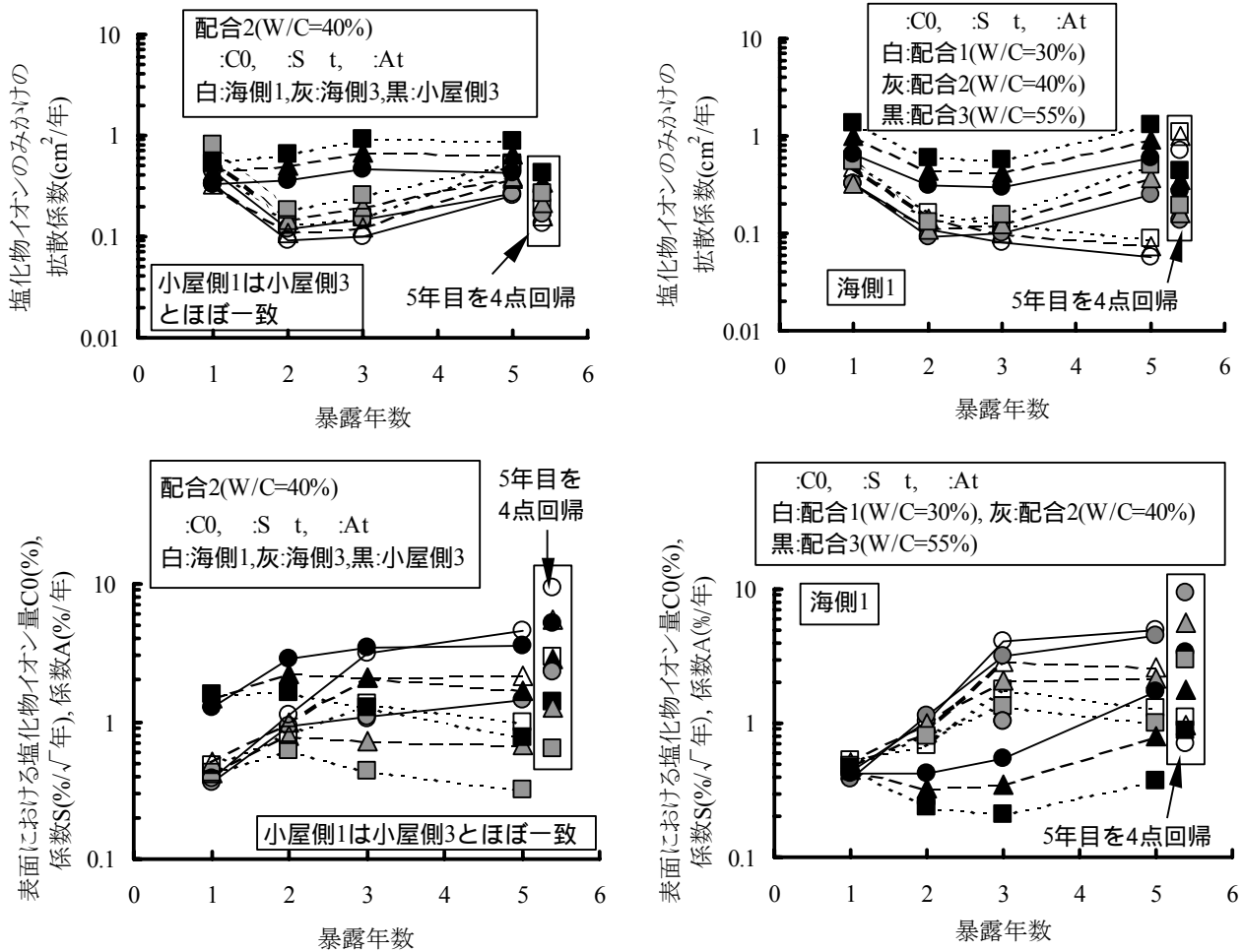


図 - 6 塩化物イオンの見かけの拡散係数，表面における塩化物イオン量C0および係数S,Aの経年変化

た線を示した。±1.0とした曲線は、概ね、示方書式の元データの最大・最小値を通る。

$$\log D = -3.9 \left( \frac{W}{C} \right)^2 + 7.2 \left( \frac{W}{C} \right) - 2.5 \quad (4)$$

暴露試験で得られた拡散係数は、示方書式と概ね一致している。ただし、5年未満の初期データを含めると、拡散係数は大きくなること、境界条件の与え方の影響が水セメント比によって異なること、並びに図 - 7 は平均値で表したものであって、表 - 3 のように個々のデータにはばらつきを有すること等を考慮する必要がある。

### 3.5 鉄筋の腐食度

図 - 8 は、RC 試験体の鉄筋位置の塩化物イオン含有量と鉄筋の腐食の関係を表すものである。

表 - 3 塩化物イオンのみかけの拡散係数

配合No	W/C (%)	5年目のデータによる回帰			5年間の回帰結果の平均			5年間のデータを一括回帰					
		Co	S	t	At	Co	S	t	At	S	t	At	
1	30	平均	0.11	0.15	0.19	0.42	0.51	0.78	0.21	0.98			
		最大	0.14	0.21	0.27	0.06	0.07	0.09	0.06	0.09			
		最小	0.06	0.07	0.09	0.14	0.19	0.24	0.15	0.49			
2	40	平均	0.35	0.52	0.71	0.47	0.69	0.92	0.63	0.39			
		最大	0.44	0.67	0.92	0.09	0.11	0.13	0.24	0.06			
		最小	0.25	0.38	0.50	0.30	0.42	0.56	0.45	0.22			
3	55	平均	0.77	1.13	1.51	1.37	2.04	2.76	1.90	2.17			
		最大	1.33	2.00	2.71	0.20	0.27	0.35	0.59	0.54			
		最小	0.27	0.36	0.44	0.73	1.06	1.41	1.23	1.36			

単位：cm<sup>2</sup>/年

軽微な点錆はほとんどの鉄筋に生じているものの、腐食限界塩化物イオン含有量 1.2kg/m<sup>3</sup> を超える場合であっても、鉄筋の質量減少率が明確となるような腐食には達していない。ただし、

自然電位が不確定の領域であり，局所的には微小ながら浮きさびも生じ始めている。そのため，今後の暴露試験で塩化物イオン含有量が高い状態が継続されることにより，鉄筋の腐食が加速されるものと推測される。なお，分極抵抗の結果には明確な差異は認められなかった。

#### 4. おわりに

塩害暴露試験によって以下のことがわかった。

- (1) 飛来塩分量は，10m/s以上の強風を発生する月当たりの日数との関連性が高い。
- (2) 中性化の進行がコア採取位置により異なり，風雨，日射を直接受ける海側の中性化深さが大きくなる場合があることを確認した。
- (3) 小屋側の塩化物イオン含有量は，風雨を直接受ける海側よりも多く，また海側の拡散係数は採取年によって変化しやすい。
- (4) 水セメント比と拡散係数の関係は，土木学会の予測式と概ね一致する。ただし，採取年や採取位置等によるばらつきを考慮する必要がある。

#### 謝辞

暴露試験にご協力頂いている国土交通省信濃川下流工事事務所，同関屋出張所の関係各位に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，2002.3.
- 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) Tanaka, Y. et. al.: Chloride Permeability of High-Strength Concrete, Proceedings of the 1st fib Congress, Session 8, pp.145-154, 2002.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，コンクリート橋編，2002.3.
- 5) 日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧，1990.6.
- 6) 丸善：理科年表，1999年版
- 7) 土木学会：コンクリートの耐久性に関する

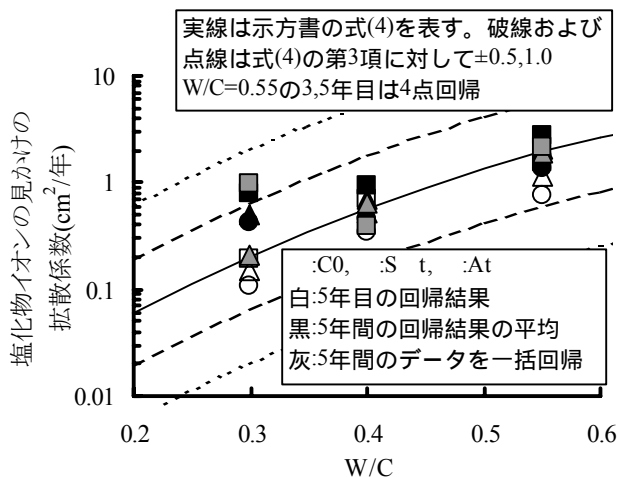


図 - 7 水セメント比と塩化物イオンのみかけの拡散係数の関係

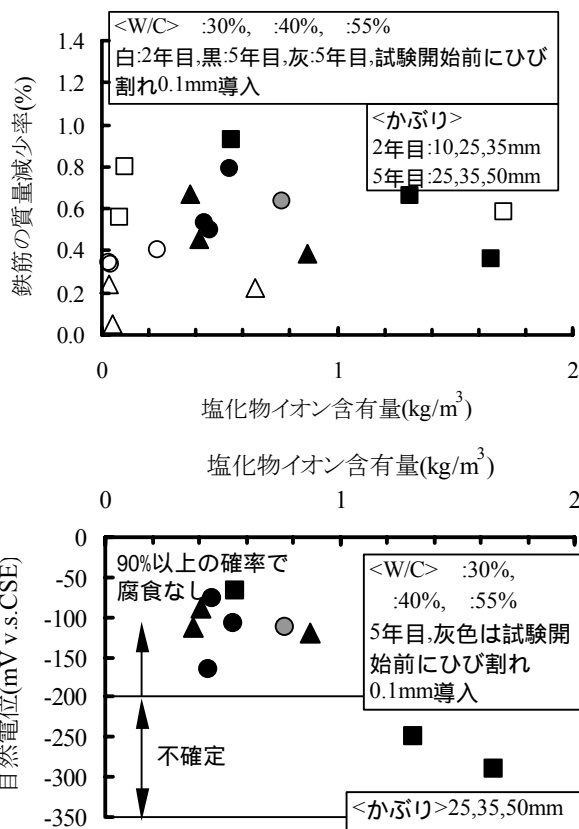


図 - 8 塩化物イオン含有量と鉄筋腐食の関係

研究の現状とデータベース構築のためのフォーマットの提案，2002.12.

- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]に準拠した維持管理マニュアル(その1)および関連資料，2003.11.