

# 新北九州空港連絡橋コンクリート橋脚における 塩害の性能照査に関する考察

松下博通<sup>1</sup>・大津政康<sup>2</sup>・友田祐一<sup>3</sup>・武若耕司<sup>4</sup>・添田政司<sup>5</sup>・村田真斎<sup>6</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 九州大学教授 大学院工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎六丁目 10-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪二丁目 39-1)

<sup>3</sup>正会員 熊本大学技術専門職員 工学部技術部 (〒860-8555 熊本市黒髪二丁目 39-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元一丁目 21-40)

<sup>5</sup>正会員 博(工) 福岡大学講師 工学部土木工学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈八丁目 19-1)

<sup>6</sup>正会員 福岡県新北九州空港連絡道路建設事務所橋梁建設課第一係長 (〒800-0315 福岡県京都郡苅田町港町 28-2)

海洋コンクリート構造物における塩害は、多くの事例から主要な劣化機構として重要な検討項目となっており、塩害に関する性能照査が示方書等でも求められるようになってきている。そこで、福岡県新北九州空港連絡橋のコンクリート橋脚予定地において長期の暴露実験を6年間実施した結果について、室内試験と比較し暴露環境下での塩分浸透特性について検討した。これらの結果に基づいて、新北九州空港連絡橋のコンクリート橋脚における塩分浸透を予測し、設計かぶりの耐久性照査を試みた。

*Key Words : chloride permeation, diffusion equation, surface concentration, durability assessment*

## 1. はじめに

海洋構造物の多い我が国では、塩害によるコンクリート構造物の劣化が大きな問題となっている。そのため塩害に関する様々な研究が行われている。維持管理に関連して劣化状況の調査は行われているが、コンクリートの塩害は、品質および環境条件、設計、施工、その他の複雑な問題が絡み合っ起ることから、劣化度の定量的な判定は容易ではないようである。最近になってコンクリート標準示方書は性能照査型への移行が進められてきており、「施工編」(耐久性照査型)<sup>1)</sup>で耐久性を評価するようになった。塩害に関しては、設計段階での諸条件などは、かなり安全側に設定しているようである。したがって、実構造物によりデータを収集し、それに基づいて示方書での性能照査と比較・検討する必要性も残されていると考えられる。

塩害は、環境条件によりコンクリート中への塩分浸透が異なる。一般に健全なコンクリート中の鉄筋表面は不動態皮膜に覆われて、腐食作用から保護されているが、外部からの影響により不動態皮膜が破壊され鉄筋腐食が始まる<sup>2)</sup>。コンクリート中の塩化物イオンの進入経路は、製造時に材料から直接内部へ浸透する塩分と、構造物完

成後に、コンクリート表面から内部へ海水や海塩粒子が浸透する場合などに分けられる。後者の塩化物イオンは、近年、特に鉄筋腐食の主要因とされている。ただし、暴露環境下では表面濃度は変化し、拡散係数の評価についても実証的な検討は残されている。

本研究では、コンクリートの塩害に対して大きな要因である塩化物イオンの浸透特性に着目し、コンクリート構造物における塩害対策と耐久性照査について検討するために<sup>3)</sup>、連続浸せき実験によりコンクリート中への塩化物イオンの浸透を定量的に評価する手法に関して基礎的な研究を行った<sup>4)</sup>。それに基づいて新北九州空港連絡橋予定地における長期の暴露環境下で実験を行った結果を解析的に考察した。そして、新北九州空港連絡橋の海上橋脚である鉄筋コンクリート構造物の設計かぶり<sup>5)</sup>について示方書に基づいて検証した結果をまとめた。

## 2. 実験概要

### (1) 連続浸せき実験

連続浸せき実験におけるコンクリートの配合は表-1に示すように、塩分拡散に対する水セメント比の影響を

表-1 コンクリートの配合

種類	粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					スランブ+ (cm)	空気量+ (%)
				W	C	S	G	混和剤		
A	20	50	48	172	344	830	1021	0.104	3.0 (4.8)	6.0 (6.0)
B	20	55	47	170	308	809	1032	0.123	7.0	6.5

混和剤は、AE 剤(ヴィンゾル 70) +の括弧内は、練り混ぜ水に 3%NaCl 水溶液を使用した場合の値。

表-2 コンクリートの材料特性

種 類	W/C (%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
A	50	38.44	29.36	0.241
B	55	31.31	28.03	0.250

表-3 供試体の条件

W/C	かぶり	SF (%)	BS (%)
35%, 55%	20mm	0	0
		10	0
		0	30
		0	60

考慮する 2 種類とした。供試体は、100×100×200 mm の角柱供試体を作製し、練り混ぜ水には、純水と 3%NaCl 水溶液の 2 種類を使用した。28 日間標準水中養生を行い、100×100 mm の一面を除きエポキシ樹脂を塗布した後、連続浸せき実験を行った。ここでは、配合 A, B で純水と 3%NaCl 水溶液を練り混ぜ水とした供試体について、浸せき水に 3%NaCl 水溶液を使用し、28 日、120 日、240 日、730 日の浸せき期間を変えた実験を行い塩化物イオン拡散への水セメント比の影響について考慮した。実験終了後の供試体は、浸透面から 5cm の深さまで 1cm 毎にコンクリート中の全塩分量と可溶性塩分量<sup>6)</sup>を測定した。実験に使用した各コンクリートの材齢 28 日における力学特性を参考資料として表-2 に示す。

## (2) 暴露実験

暴露実験の供試体条件を表-3 に示す。表中の SF はシリカフェーム、BS は高炉スラグの混入率を示す。図-1 に示すような鉄筋コンクリート(RC)供試体を作製した。異形鉄筋は SD295 の D13 を 2 本配筋し、上面からのかぶり 20 mm としている。暴露環境は、図-2 に示すような防波堤より 10m 離れた施設内で実施した。暴露実験では、供試体中央に予め開口幅 0.2mm 程度の曲げひび割れを 1 本実験室で導入したひび割れ有り供試体と、ひび割れ無し供試体の 2 種類を用いた。暴露実験では、新北九州空港連絡道路建設予定地において平成 5 年度から平成 11 年度まで実施した。そして、約 1 年(360 日)、約 3 年(1045 日)、約 6 年(2156 日)の各期間について塩分試験を行

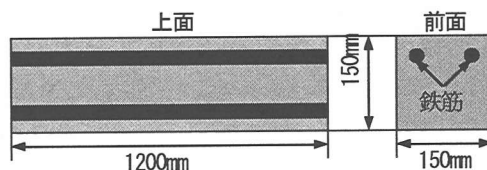


図-1 暴露実験供試体

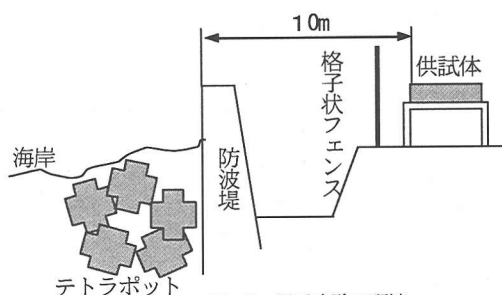


図-2 暴露実験の環境

った。ただし、約 5 年(1894 日)経過しても鉄筋腐食が認められない供試体があったために、最後の約 10 ヶ月間(262 日)は、上面に 10%NaCl 水溶液を湛水した浸せき実験を実施した。実験期間終了後の供試体は、ひび割れ挿入部以外の浸透面より深さ 1cm, 2cm, 2cm から中央部の各深さにおけるコンクリート中の全塩分量と可溶性塩分量<sup>6)</sup>を測定した。

## 3. 実験結果

### (1) 連続浸せき実験結果

連続浸せき実験の結果を図-3 に示す。水セメント比の違う(配合 A:W/C=50%と配合 B:W/C=55%)供試体では、水セメント比の小さい配合 A 供試体が表面部に限り全塩分量が多くなっている。これは、内部への浸透拡散が水セメント比の大きい供試体ほど容易となるためだと考えられる。ただし、全塩分量の内部への浸透状況に A, B の供試体で大きな変化は見られず、5%程度の水セメント比の差では、全塩分量の浸透差はあまりないことがわかる。可溶性塩分量は、28 日までは、水セメント比が異なる両者の浸透状況に差は見られなかった。しかし、120 日連続浸せきでは、配合 B 供試体の可溶性塩分量の割合が

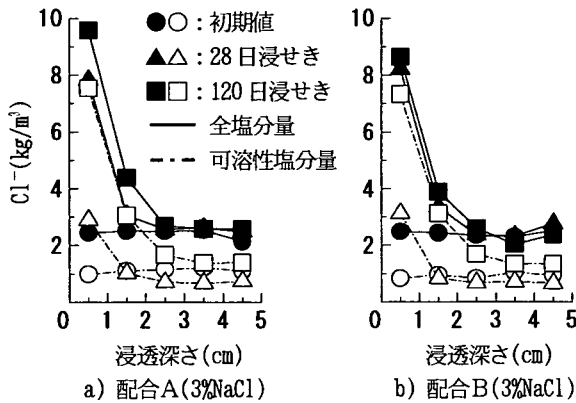


図-3 水セメント比の異なる連続浸せき実験結果

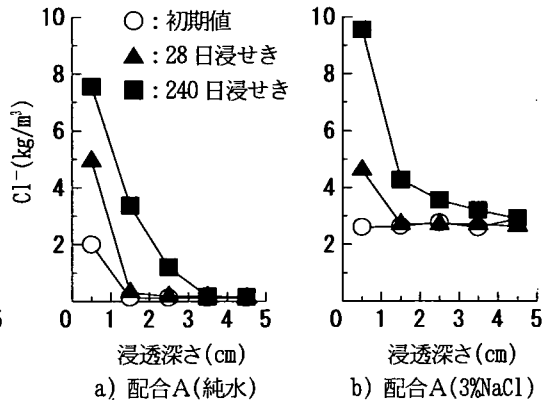


図-4 練混ぜ水の異なる連続浸せき実験結果

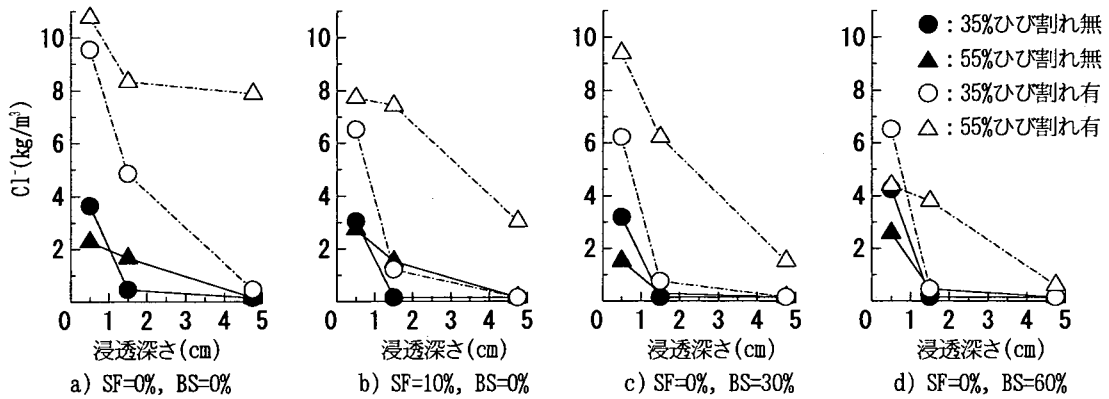


図-5 6年間暴露実験比較

増加しており、水セメント比が大きい場合は、内部への可溶性塩分の浸透がかなり進んでいる結果となった。図-4 に同じ水セメント比(配合 A:W/C=50%)の純水と3%NaCl 水溶液で練り混ぜた供試体による連続浸せき実験結果を示す。28日連続浸せきでは、浸せき期間が短いため、表面部の塩分濃度差に変化は見られなかった。しかし、240日連続浸せき後には、3%NaCl 水溶液で練り混ぜた供試体の表面付近での塩分濃度はかなり高くなっている。これは、純水よりも塩水で練り混ぜた供試体が、初期の段階で塩分を多く含んでいるために、コンクリート表面において塩分を多く判定したためと思われる。

(2) 暴露実験結果

暴露実験の結果を図-5 に示す。連続浸せき実験と同様に、水セメント比の小さいひび割れ無しの供試体は、表面部のみ全塩分量が多くなっている。ひび割れ有りの表面部では、W/C=55%の供試体で内部への塩分浸透は格段に多くなっている。このように、ひび割れにより塩分浸透を容易にすることが認められる。BS を混入していない供試体では、水セメント比の大きい供試体が塩分浸透は多くなっている。BS を入れたひび割れ無し供試体では、

内部への塩分浸透は少なく、水セメント比による変化はほとんど見られない。しかし、水セメント比が小さくてもひび割れにより SF=10%、BS=30%のコンクリートでは、格段に塩分が浸透していることから、ひび割れにより内部への塩分浸透を容易にすることが認められる。これらの結果より、水セメント比が小さければ SF、BS の混入が塩分浸透抑制に有効であることが確認できた。しかし、水セメント比が大きい場合にはひび割れが入れば、SF、BS を入れた供試体でも塩分浸透を抑制できなくなる。

(3) 全塩分量中に占める可溶性塩分量の割合

今回の実験では浸せき期間が短いことを考慮して、コンクリート中の深さ 1cm における全塩分量中に占める可溶性塩分量の割合について検討した。連続浸せき実験と暴露実験の結果をまとめて図-6 に示す。連続浸せき実験は、練り混ぜ水に 3%NaCl 水溶液を用いた供試体の比較を行っている。図のように浸せき期間が長くなるほど、全塩分量中に占める固定塩分量の割合が大きくなっており、浸せき期間が長くなると塩分が供試体内で固定化され、移動が少なくなることが認められた。また、水セメント比を変えた b と c 供試体では、水セメント比の大き

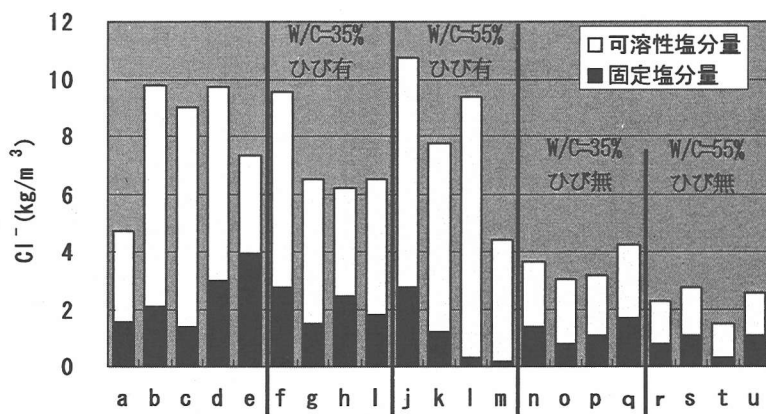


図-6 全塩分量中に占める可溶性塩分量の割合

- a : 28日浸せき実験(配合A)
- b : 120日浸せき実験(配合A)
- c : 120日浸せき実験(配合B)
- d : 240日浸せき実験(配合A)
- e : 730日浸せき実験(配合A)

W/C	SF (%)	BS (%)	6年暴露供試体
35%	0	0	f, j, n, r
	10	0	g, k, o, s
55%	0	30	h, l, p, t
	0	60	i, m, q, u

い供試体の可溶性塩分量が増加している。これより5%の水セメント比の違いでも可溶性塩分量の割合に影響することが明らかになった。6年間暴露実験では、ひび割れ有りの供試体は、全塩分量が多く浸透しており、可溶性塩分量の割合も多い。これは、ひび割れにより塩分の浸透が容易になっているためだと考えられる。特に水セメント比が大きくなると全塩分が増加すると同時に可溶性塩分量も増加している。ひび割れ無しの供試体では、水セメント比の小さい供試体の全塩分量が多くなっている。これは内部への塩分浸透が容易ではないために表面付近(1cm)での塩分が増加したためだと考えられる。

#### 4. 解析方法

##### (1) 拡散係数

連続浸せき実験では、既往の研究<sup>1)</sup>に基づいて実験結果より、塩化物イオンの拡散係数 $D$ を決定した。その方法は、拡散過程をレートプロセスと考えて、

$$C = C_0(1 - e^{-Dt}) \quad (1)$$

と近似し、ある期間 $\Delta t$ での塩化物イオンの増分 $\Delta C$ に対して式(2)から拡散係数 $D$ を決定する。

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = D(C_0 - C) \quad (2)$$

ここで、

$C_0$ : コンクリート表面塩化物イオン濃度は、浸せき水(3%NaCl水溶液)の $Cl^-$ 単位容積重量

$C$ : 深さ0.5cmの全塩化物イオン濃度 ( $kg/m^3$ )

$D$ : 塩化物イオンの拡散係数 ( $cm^2/sec$ ) とする。

式(2)に28日連続浸せき実験の値を代入して拡散係数 $D$ を決定した。一方、示方書<sup>1)</sup>による見掛けの拡散係数

と水セメント比の関係を表した回帰式として次式が示されている。

普通ポルトランドセメント使用の場合

$$\text{Log}D = 4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 8.47 \quad (3)$$

高炉セメント使用の場合

$$\text{Log}D = 19.5(W/C)^2 - 13.8(W/C) - 5.74 \quad (4)$$

ここで、 $W/C$ : 水セメント比とする。

以上より、式(2)、式(3)、式(4)から塩化物イオンの拡散係数 $D$ を求めることにより、連続浸せき実験の結果を解析し比較検討を行った。

##### (2) 塩分浸透予測

塩分浸透拡散の解析には、表面塩化物イオン濃度を一定とすれば、式(5)が得られる。

$$C(x, t) = C_0 \left( 1 - \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (5)$$

ただし、実際の問題として、表面塩化物イオン濃度 $C_0$ を一定と見なすこと、及び実験的に決定することは困難とされている<sup>2)</sup>。そこで、見掛けの表面塩化物イオン濃度を $C_1$ として用いることにした。この場合、表面塩化物イオン濃度 $C_1$ は、

$$C_1 = \frac{C(x)}{1 - \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}} \quad (6)$$

ここで、 $x$ : 塩分量測定深さ(cm)

$t$ : 実験期間(日)

$C(x)$ : 各実験における0.5cm~2.5cmまでの塩化物イオン濃度とする。

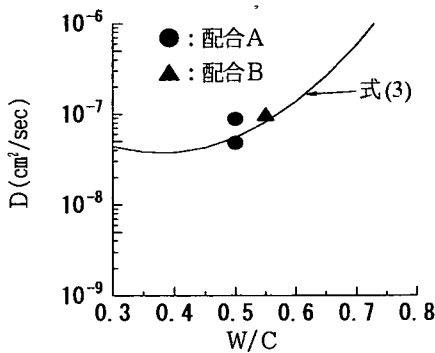


図-7 浸せき実験の水セメント比と拡散係数の関係

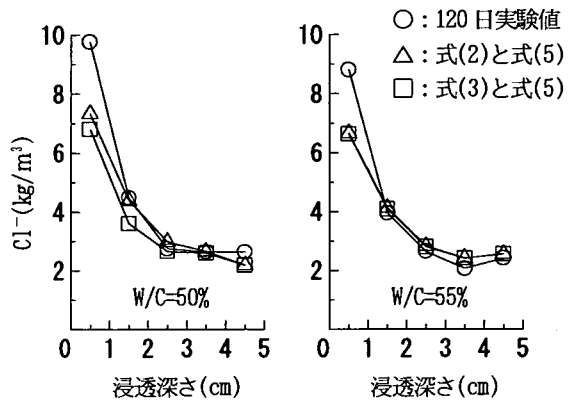


図-8 120日連続浸せき実験解析結果

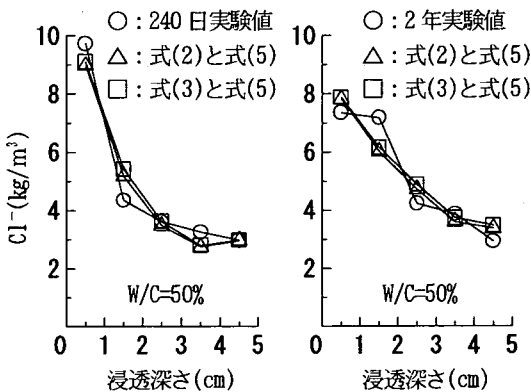


図-9 長期連続浸せき実験解析結果

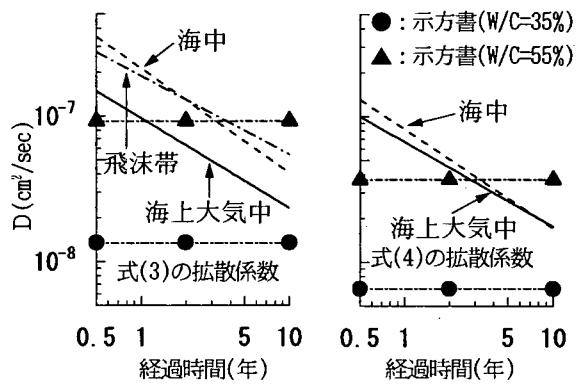


図-10 暴露環境別拡散係数

と置き、解析では式(6)より求めた0.5cm~2.5cmまでの表面塩化物イオン濃度を平均して各期間における連続浸せき実験の見掛けの表面塩化物イオン濃度  $C_1$  を推定した。

## 5. 解析結果

### (1) 連続浸せき実験の解析結果

普通ポルトランドセメントを使用した場合の水セメント比を変えた供試体について、式(2)と(3)により求めた拡散係数  $D$  の関係を図-7に示す。図のように、式(3)から求められる拡散係数  $D$  と実験値を用いて式(2)より求めた拡散係数  $D$  は、よく一致している。普通セメントの水セメント比が50%程度の場合には、拡散係数  $D$  は示方書の式により推定できることが確認できた。

図-8、図-9には、3%NaCl水溶液で練り混ぜた供試体による各期間の連続浸せき実験結果と解析結果の比較を示す。これらは、各期間における塩分濃度分布の再現、

最適な表面濃度の算出、および表面濃度の見掛け上の経時変化を把握するために解析を行ったものである。これらより、実験結果と予測解析結果は、よく一致しており、水セメント比が特定された普通コンクリートにおける連続浸せきの塩分浸透は、かなりの精度で予測できると考えられる。これは、示方書<sup>1)</sup>における耐久性評価の妥当性を与える結果ともいえる。

### (2) 暴露実験の解析結果

#### a) 暴露環境下での拡散係数の決定

今回のような暴露実験では、塩分浸透分布から逆解析あるいはシミュレーション解析によって拡散係数が決定されることが多い。しかし、3年間まで浸透が少なかった穏やかな環境を考慮すれば、変動が大き過ぎ、かつ、式(2)による方法も示方書<sup>1)</sup>の提案式と差異はないことが連続浸せき実験より確認できた。暴露実験のコンクリートにおいて示方書から求めた見掛けの拡散係数を竹田ら<sup>9)</sup>による10年間の海洋暴露実験結果から求めた見掛けの拡散係数と比較した結果を図-10に示す。

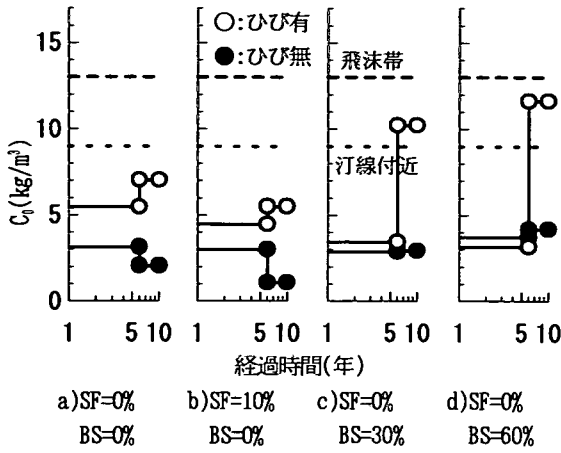


図-11 W/C=35%暴露環境別見掛けの表面塩化物イオン量

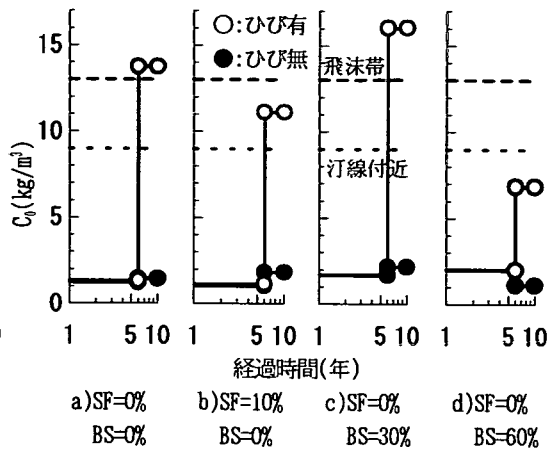


図-12 W/C=55%暴露環境別見掛けの表面塩化物イオン量

竹田らは、以下の式(7a)から式(7e)により環境条件や結合材によって見掛けの拡散係数を算出している。

海上大気中	普通セメント	$9.7 \times 10^{-8} t^{-0.62}$	(7a)
	高炉セメント	$6.7 \times 10^{-8} t^{-0.58}$	(7b)
飛沫帯	普通セメント	$18.9 \times 10^{-8} t^{-0.54}$	(7c)
海中	普通セメント	$21.3 \times 10^{-8} t^{-0.72}$	(7d)
	高炉セメント	$8.2 \times 10^{-8} t^{-0.79}$	(7e)

この図によれば、6年間程度の暴露実験ならばいずれの場合も拡散係数に大きな差異はないことがわかる。そこで、今回の暴露実験解析での拡散係数にはひび割れ有り、無しともに、示方書<sup>1)</sup>における回帰式からBSが混入されていない供試体を普通ポルトランドセメントとして式(3)により求め、BS混入を高炉セメントの場合として式(4)により求めることにした。一般的に拡散係数は時間の経過と共に遅くなるが、図-10によれば6年間程度の期間では水セメント比が大きい場合はその変動はわずかで、環境条件による塩分浸透の変化は表面濃度により考慮していることから、平均的に一定とみなしても解析できる可能性を示している。拡散係数を一定とみなすことの問題点は、長期と乾湿繰り返しの場合において浸透予測に現れる。前者については、安全側の評価が得られると考えた。後者については、拡散係数は一定として移流項を考慮することで対応できることを報告している<sup>3)</sup>。設計では、50年、100年に対する期間が対象となるが、ここではそのような資料に乏しいため、以上のような判定を行った。なお、水セメント比が小さくなると図のように示方書の拡散係数は、相当に小さく決定される傾向が認められる。

b) 暴露環境下での表面塩化物イオン濃度の決定

暴露実験が海岸より10m離れた環境であることから

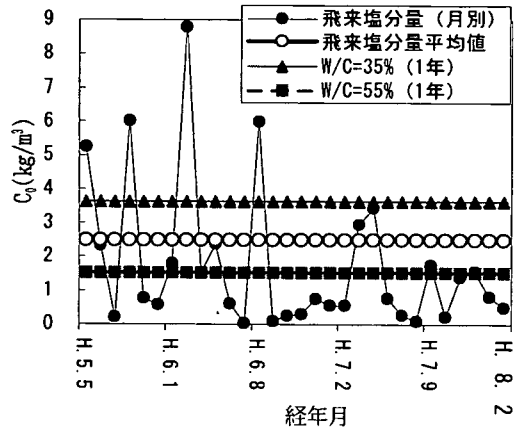


図-13 飛来塩分量測定結果

示方書のコンクリート表面における塩化物イオン濃度  $C_0$  に関する飛沫帯  $13.0 \text{ kg/m}^3$  および汀線付近  $9.0 \text{ kg/m}^3$  の値を1年間の暴露実験結果を用いて式(6)により求めた見掛けの表面塩化物イオン濃度  $C_1$  (0.5cm~1.5cmの平均)の結果と比較して図-11、図-12に示す。今回の暴露実験では、約5年経過の後に262日間10%NaCl水溶液に湛水したために、最後の262日間は、別の表面塩化物イオン濃度として見掛けの表面塩化物イオン濃度  $C_1$  を算出した。そのため図のように、ひび割れ有りの供試体では、約5年のところで濃度が急激に上昇したとなっている。その上昇度は、水セメント比が小さい場合には少ないことが確認できる。ひび割れ無しの供試体では、約10ヶ月間10%NaCl水溶液に湛水しても汀線付近にも届いていない。また、表面塩化物イオン濃度がむしろ低下していることから、SF、BSにより塩分浸透を十分妨げていることが確認できる。ひび割れ有り供試体では、実験結果において内部での塩化物イオン濃度が大きくなって

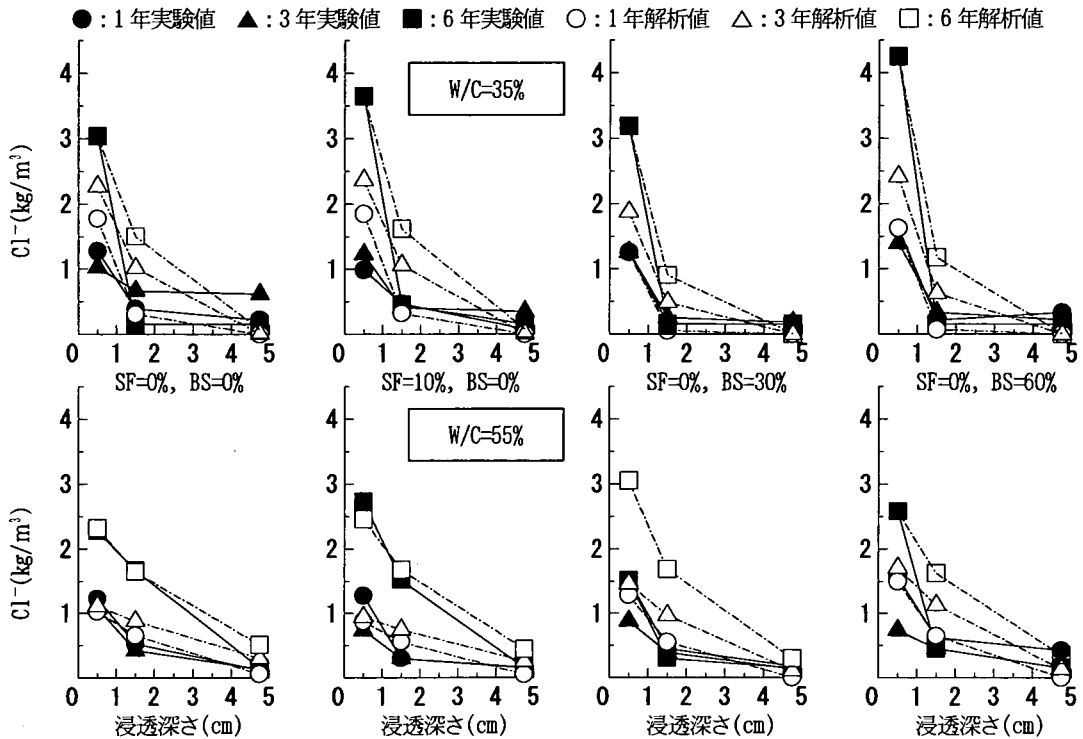


図-14 暴露実験解析結果(ひび割れ無し)

いない供試体についても表面塩化物イオン濃度は大きくなった。これは、浸透面から1cmの濃度があまりに大きいため表面塩化物イオン濃度  $C_1$  が大きく算出されるためと考えられる。これらの結果をまとめると、示方書による表面塩化物イオン濃度  $C_0$  は、相当に安全な値として設定していることが伺われる。この結果は別の報告<sup>10)</sup>とも一致している。

#### c) 飛来塩分量と表面濃度の関係

暴露実験での飛来塩分量と解析で求めた湛水前の表面塩化物イオン濃度の関係を図-13に示す。図中のW/C=35, 55%は、1年間の暴露実験における塩分濃度分布より得た見掛けの表面塩化物イオン濃度  $C_1$  を表している。図より分るように、暴露実験の位置における飛来塩分は、非常に穏やかな環境であったことが確認できる。現場の実験データとして飛来塩分量(NaCl)の単位はmg/day/100cm<sup>2</sup>となっていた。そこで、単位容積重量を2500kgと仮定して塩化物イオン濃度Cl<sup>-</sup>(kg/m<sup>3</sup>)への換算を行ったものである。解析結果では、W/C=35%の場合がW/C=55%の表面塩化物イオン濃度を上回っている。これは、室内試験での結果と一致しており、水セメント比が小さい場合に表面付近だけ濃度が高くなる結果を示している。なお、W/C=55%では、見掛けの表面塩化物イオン濃度は、実測値より低くなっている。さらに、暴露環境下での示方書に設定された海岸からの距離0.1kmの表面塩化物イオン濃度(4.5 kg/m<sup>3</sup>)よりいずれも低い結果となってい

る。結果として飛来塩分量と見掛けの表面塩化物イオン濃度  $C_1$  の対応はかなりよく、飛来塩分量に基づいて表面塩化物イオン濃度  $C_0$  を決定<sup>10)</sup>する妥当性も示された。

#### d) 暴露実験の塩分浸透予測

図-14にひび割れ無しの暴露実験の解析結果を示す。水セメント比の小さいW/C=35%における内部の塩分浸透は、かなり大きい予測となる傾向にある。また、W/C=55%では、普通セメントの解析について精度よく塩分浸透を予測できているが、高炉セメントに関しては、表面1cmにおける予測は出来ているが、それ以降では、実験結果よりかなり大きい予測となっている。ひび割れ無しの健全な供試体は、塩分の浸透が容易でないため表面の濃度だけが高くなる。その結果、解析結果では見掛けの表面塩化物イオン濃度が高くなり、長期の内部濃度を高く予測する傾向にある。

図-15にひび割れ有りの暴露実験解析の結果を示す。ここでは、実験において内部への塩分浸透が進んでいるためか、よい精度で予測できていることが認められる。これらの結果から6年程度の暴露実験では、水セメント比の大きい供試体とひび割れ有りの供試体については、内部への塩分浸透が容易であるために、よく塩分浸透を予測することができている。しかし、水セメント比が小さくなると内部への塩分浸透が容易でないために浸透予測が大きくなる傾向が明らかとなった。実際には、示方書に規定する見掛けの拡散係数は、ひび割れ有りに対応

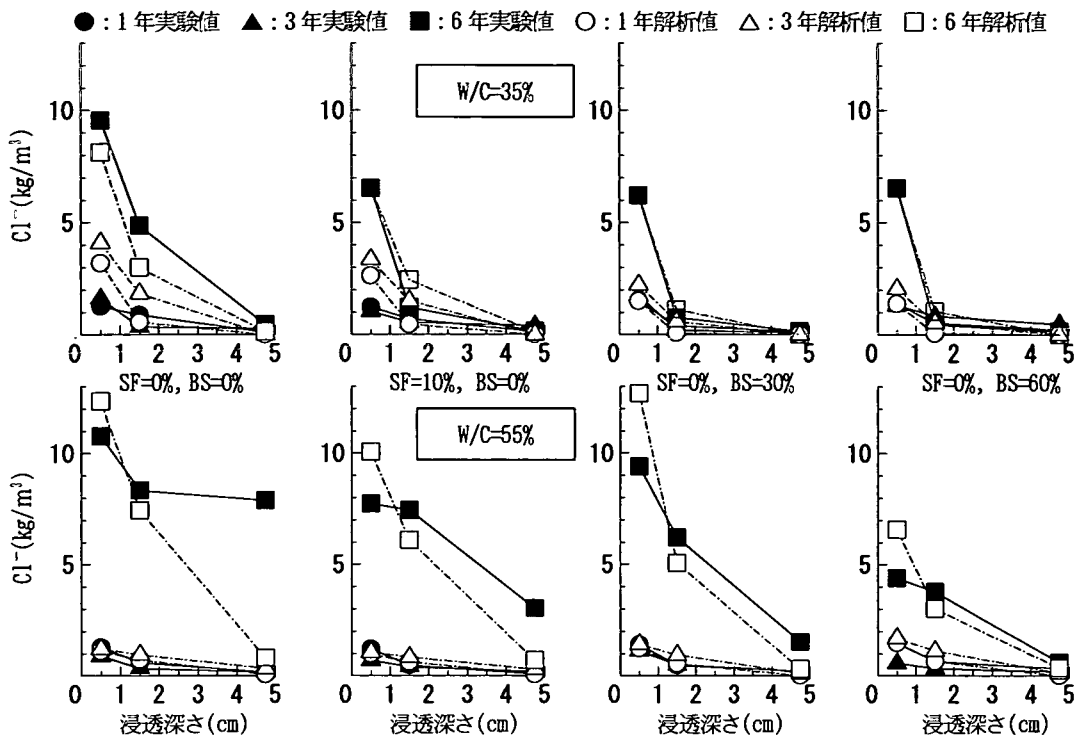


図-15 暴露実験解析結果(ひび割れ有り)

したものではない。したがって、示方書に規定する拡散係数も安全側に設定されていると考えられる。なお、単位容積重量は、2500kgと仮定して塩化物イオン濃度の予測解析を行っているが、示方書「維持管理編」<sup>11)</sup>では、塩化物イオン濃度を単位容積中の量として計算するのではなく液相中の塩化物イオン濃度を用いることが基本となるとしてある。実際の問題として構造物の単位容積重量は正しく計測できないと考えられることから、塩化物イオン濃度の測定に用いる計測重量当たりのパーセント表示が妥当であると思われる。これには、示方書による単位容積重量当たりの規制値を上記の表示と同時に提示すべきだと考えられる。

## 6. 耐久性照査の検討

### (1) かぶり厚の設定

新北九州空港連絡橋設計・施工委員会では、海上橋脚における鉄筋コンクリート構造物のかぶりの検討<sup>9)</sup>を行う上で海上橋脚の環境を、飛沫帯にある部位を対象とし、それ以外の部分においても安全側の飛沫帯に準ずとしている。基本条件は、構造形式(海上橋鉄筋コンクリート橋脚)、架橋地点(福岡県京都郡苅田町大字松山)、海岸からの距離(L=0.0km)、設計耐用期間(100年)である。

表-4 使用材料の条件

セメント	高炉セメントB種(低発熱型)	
骨材	細骨材	粗骨材 (Gmax25mm)
	海砂	碎石
水セメント比	45%	
単位水量	149kg/m <sup>3</sup>	
単位セメント量	330kg/m <sup>3</sup>	

これらより、本構造物が空港島の連絡橋であること、海洋構造物のため補修・補強が困難なことなどから、高度の耐久性(100年耐用期間)に該当するものとしている。使用材料は、土木学会・コンクリート標準示方書(施工編)の海洋コンクリート<sup>12)</sup>に準じており、各材料の条件を表-4に示す。これらの条件から、塩害による劣化深さを、

$$Cde = 1.3 \frac{Ecl}{Qcl \cdot Qdc} \sqrt{t} \quad (8)$$

ここで、

$Cde$ : 塩害に係わる劣化深さ(cm)

$Ecl$ : 塩害に係わる環境係数

$Qcl$ : 塩害に係わる品質係数

$Qdc$ : 設計・施工に係わる品質係数

$t$ : 設計耐用期間(年)とする。

により算出すると設計上の純かぶりとして、50年で



表-5 維持管理における条件

項目	条件等	
維持管理区分	区分A	
予定供用期間	100年	
要求性能と グレート	安全性能	状態Ⅰ-2(進展期)
	使用性能	状態Ⅰ-2(進展期)
	美観・景観	状態Ⅰ-2(進展期)

74.2mm, 100年で104.9mmと算出された<sup>9)</sup>。

(2) 耐久性照査

上述の検討により決定されたかぶり厚 105mm について、「維持管理編」<sup>11)</sup>に基づいて表-5の条件の下で塩化物イオンの進入に伴う鋼材腐食に関する照査を行った。示方書では、塩化物イオンの進入に伴う鋼材腐食に関する照査は、式(9)において1.0以下であることを確かめることによって行うとしている。

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1.0 \quad (9)$$

ここで、

$\gamma_i$  : 構造物係数は1.0

$C_{lim}$  : 鋼材腐食発生限界濃度は2.4kg/m<sup>3</sup>

$C_d$  : 鋼材位置の塩化物イオン濃度設計値とする。

なお、上記の発生限界値  $C_{lim}$  は、委員会<sup>5)</sup>により設定されたもので、長期間にわたる照査を考慮して、特に定めた値である。そして、 $C_d$  は、式(10)で求める。

$$C_d = \gamma_d \cdot C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1 \cdot c}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right) \quad (10)$$

ここで、

$C_0$  : コンクリートの表面塩化物イオン濃度は飛沫帯として13kg/m<sup>3</sup>とする。

$C$  : かぶりの設計値は105mm

$D_d$  : コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数は、示方書<sup>1)</sup>による式(3)、式(4)から求め材料係数 $\gamma_c$ は1.0

$t$  : 塩化物イオンの進入に対する耐用年数は、50年と100年を考慮

$\gamma_d$  : 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値  $C_d$  の安全係数は1.0とする。

以上の決定条件より示方書に定める水セメント比から決定された拡散係数を用いてかぶり厚を求めた結果を新北九州空港連絡橋設計・施工委員会で海上橋下部工(橋脚)のかぶり検討<sup>9)</sup>により決定された結果と比較して

表-6 かぶり厚の設計値比較

耐用年数	かぶりの検討値 (mm)	示方書による設計値 (mm)
50年	74.2	73.9
100年	104.9	104.5

表-6に示す。なお、今回の実験結果を参考に示方書の表面塩化物イオン濃度では設定が非常に大きくなされていること、別の報告書<sup>10), 13)</sup>でも長期に渡る予測では表面塩化物イオン濃度の時間依存性を考慮した低減が指摘されていることから、13kg/m<sup>3</sup>の表面塩化物イオン濃度  $C_0$  だけで安全係数は満たされているとして安全係数 $\gamma_d$ は1.0と設定した。

以上の結果より、コンクリート橋脚において新北九州空港連絡橋設計・施工委員会により決定された105mmの設計かぶり厚は、示方書の基準を満足しており、100年程度の塩害耐久性において十分耐久であると評価できる。

7. まとめ

塩化物イオン濃度の浸透特性に関して、材料特性や暴露環境下による影響を考慮した実験を行い、新北九州空港連絡橋コンクリート橋脚について塩害予測と耐久性照査の検討を行った。その結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 塩分の浸透は、シリカフェームや高炉スラグにより抑制されることが確認できたが、水セメント比が大きくなりひび割れが入れば塩分浸透の抑制力が弱まる。
- (2) 飛来塩分量を単位体積あたりに換算することにより、表面塩化物イオン濃度を決定する可能性が確認できた。これは示方書に規定する表面塩化物イオン濃度が厳しすぎる場合に、現場に合わせて補正しうる可能性を示すものと言える。
- (3) 連続浸せき実験では、全塩分量中に占める可溶性塩分量の割合は、浸せき期間が長くなる程、固定塩分量の割合が大きくなり、5%の水セメント比の差でも可溶性塩分量に大きく影響することが確認できた。暴露試験では、水セメント比が大きいほど可溶性塩分量は増加し、小さくなると塩分が供試体内で固定化され移動が少なくなる。
- (4) 拡散係数の決定は、水セメント比50%程度の場合は、コンクリート標準示方書(耐久性照査型)に規定された水セメント比から推定できること、示方書における耐久性評価式によって塩化物イオン濃度の浸透予測を行った結果は連続浸せきでの予測に有効であることが確認できた。
- (5) 6年程度の暴露実験では、水セメントの大きい供試体については、精度よく塩化物イオン濃度の浸透予測を

することが確認されたが、水セメント比が小さくなると大きめに予測することが明らかとなった。

(6) 構造物の単位容積重量は正しく計測できないと考えられることから、塩分濃度測定に用いる測定重量当りのパーセント表示も合わせて示すことも必要と思われる。

(7) 検討中のコンクリート橋脚における105mmの設計かぶり厚は、示方書による検討でも基準を満足していることから100年程度の塩害耐久性において十分耐久であると判定された。

付録：新北九州空港連絡道路橋設計・施工委員会  
「コンクリート部会」

幹事委員：松下博通：九州大学大学院教授

大津政康：熊本大学大学院教授

原田哲夫：長崎大学工学部教授

山崎竹博：九州工業大学工学部教授

大和竹史：福岡大学工学部教授

添田政司：福岡大学工学部講師

実務担当委員

柳健太郎：(財)九州環境管理協会分析科学部環境分析課主任

事務局

金子正猪：福岡県新北九州空港連絡道路建設事務所  
橋梁建設課課長

大造幸夫：同上参事補佐

村田真斎：同上第一係長

長部静之：同上第一係主任技師

佐々木大介：同上

中尾誠二：同上

本報告は、以上のメンバーにより検討を行った。

参考文献

1) 土木学会：コンクリート標準示方書「施工編」耐久性照査型，平成11年版，2000。

2) 小林豊治，米澤敏男，出頭圭三：鉄筋腐食の診断，森北出版，1993。

3) 大津政康：塩害によるコンクリート劣化の早期検出と予測に関する解析的考察，コンクリート構造物のリハビリテーションに関するシンポジウム論文集，pp.29-34，1998.10。

4) 友田祐一，鎌田憲治，大津政康：コンクリートの塩分浸透機構と予測に関する考察，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.192-193，1999.9。

5) 新北九州空港連絡橋技術専門委員会：海上橋下部工(橋脚)のかぶり検討，第2回コンクリート部会，1993。

6) 船戸巳和男：硬化コンクリート中に含まれる塩分分析法，日本セメント(株)，中央研究所共同実験資料，1984。

7) 友田祐一，渡邊真宏，大津政康：コンクリートへの塩分浸透機構に関する考察，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.168-169，1998.10。

8) 佐伯竜彦，植木聡，嶋毅：コンクリート表面における塩化物イオンの濃度に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.985-990，1999。

9) 竹田宣典，十河茂幸，迫田恵三，出光隆：種々の海洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する実験的研究，土木学会論文集，No.599/V-40，pp.91-104，1998.8。

10) 建設省土木研究所：ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書(II)，共同研究報告書第258号，2000.12。

11) 土木学会：コンクリート標準示方書「維持管理編」，2001年制定，2001。

12) 土木学会：コンクリート標準示方書「施工編」，平成3年版，1991。

13) 土木学会：コンクリート標準示方書「施工編」-耐久性照査型-改定資料，コンクリートライブラリー-99，平成11年版，2000。

(2001. 4. 26 受付)

## PERFORMANCE-BASED EVALUATION ON THE DURABILITY OF CONCRETE PIERS IN SIN-KITAKYUSYU AIRPORT BRIDGE DUE TO SALT ATTACK

Hiromichi MATSUSHITA, Masayasu OHTSU, Yuichi TOMODA  
Koji TAKEWAKA, Masashi SOEDA and Masayoshi MURATA

Damage of marine structures due to salt attack is well known as one of major deterioration processes of reinforced concrete (RC) structures. In order to investigate diffusion characteristics of chloride ions in concrete piers of Sin-Kitakyusyu Airport Bridge, exposure tests of RC beams were carried out for six years. Results on chloride diffusion were studied in comparison with the continuous diffusion tests in a laboratory. Based on these results, a performance-based analysis on the salt attack of the piers is conducted to confirm the durability of the concrete piers.