

論文 海岸線付近に位置する鉄道コンクリート構造物の塩化物イオン濃度分布の追跡調査

石橋 奈都実*1・轟 俊太郎*2・平野 悠輔*1・田所 敏弥*3

要旨： 海岸線付近に位置し、前回調査から 17～19 年経過した鉄道コンクリート構造物を対象に塩化物イオン濃度分布の追跡調査を行った。前回調査と今回調査結果の比較から表面における塩化物イオン濃度は概ね同様であり増加しているものもあったこと、17 年前の調査結果を基に定められ鉄道構造物の設計で用いられる表面における塩化物イオン係数 S は 17 年経過した構造物でも実態調査結果に対して安全側であること、調査から得られた拡散係数は室内試験から得られた拡散係数の予測式に対して約 64% が小さく分布していることがわかった。

キーワード： 塩化物イオン濃度分布、表面における塩化物イオン濃度係数、拡散係数、実態調査

1. はじめに

海岸線付近に位置する鉄筋コンクリート構造物は、海からの飛来塩分によりコンクリート中の鋼材の不動態被膜が破壊され腐食が進行する。設計では、塩化物イオンの供給がある環境において、設計耐用期間中に鋼材腐食をさせないことを条件とし、鋼材位置における塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度以下であることを照査すればよいとされている。鋼材位置における塩化物イオン濃度は、Fick の拡散則の解を用いて推定することが一般的であり、表面塩化物イオン濃度や拡散係数を設定する必要がある。

2017 年制定の土木学会コンクリート標準示方書¹⁾（以下、示方書）では、表面塩化物イオン濃度を一定とした解を用いているのに対し、鉄道構造物等設計標準・同解説²⁾（以下、鉄道標準）では独自に表面塩化物イオン濃度が時間の平方根に比例して増加するとした解を用いている。

表-1 に示す鉄道標準で用いる表面塩化物イオン濃度の浸透に関する係数 S は、17～19 年前に日本全国の海岸線付近に位置するコンクリート構造物から塩化物イオン濃度分布を採取し、海岸からの距離と海岸の地域区分ごとに設定が行なわれた。³⁾その後、追跡調査は行っていない。

拡散係数は、従来は実態調査結果に基づく予測式が設定されていたが、2012 年制定の土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾から、実構造物から得られたデータのばらつきや新材料の利用促進を考慮し、電気泳動法による室内実験の結果に基づく予測式に改訂された。一方で、電気泳動法で得られた拡散係数は、コンクリート中の空隙が液状水に満たされている影響で、大気環境下の拡散係数

より大きく算出されるという報告⁵⁾もある。

また、近年、Fick の拡散則によらない塩化物イオンの停滞現象⁶⁾など新たな知見が得られている。

そこで、17～19 年前の実態調査³⁾をもとに、海水中・干満帯以外に位置し、海からの飛来塩分の影響を受ける構造物を対象に塩化物イオン分布を追跡調査し、塩化物イオン濃度分布形状、表面塩化物イオン濃度の経年による傾向の分析、拡散係数とその予測式の比較について検討を行った。

表-1 表面塩化物イオン濃度係数 S ²⁾

海岸の 地域区分	飛沫帯 汀線 付近	海岸からの距離(m)					
		0	100	250	500	1000	1500
SS地域		別途検討					
S1地域	別途検討	0.9	0.35	0.2	0.15	0.12	-
S2地域	別途検討	0.9	0.15	0.12	-	-	-

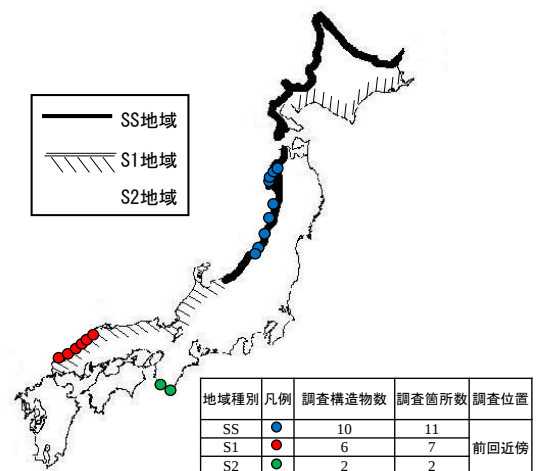


図-1 調査対象の位置と数量

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 研究員 修士(工学) (正会員)

*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 主任研究員 GL 博士(工学) (正会員)

2. 調査の概要

2.1 調査対象構造物

2020 年の調査（以下、今回調査）では、2001 年もしくは 2003 年の調査（以下、前回調査）が行われた鉄道コンクリート構造物のうち、17～19 年前に整理された分布パターンⅠ・Ⅱ³⁾にあてはまる構造物を選定した。分布パターンⅠはコンクリート表面における塩化物イオン濃度が最も大きく表面から塩化物イオン濃度が小さくなるような分布形状であり、分布パターンⅡは表面から 2 点目の塩化物イオン濃度が最も大きく、その後表面から深くなるにしたがって塩化物イオン濃度が小さくなる形状である。また、調査位置は図－1 に示すように SS 地域・S1 地域・S2 地域を網羅するように選定した。また、前回調査において、海岸からの距離が概ね 1500m 以下かつ海岸から構造物までの地形が概ね平坦である位置に存在するものが選定されている。

調査構造物数は 18 構造物となった。調査構造物の経年を図－2 に示す。最も古いものは経年 101 年であり、最も新しいものは経年 37 年である。

表－2 に、調査構造物の概要を示す。No で使用した SS,S1,S2 は鉄道標準に示される海岸の地域区分に対応している。周囲の状況は、調査位置の前面に海側からの飛来塩分を阻む物体がないか記載した。凡例は 4 章以降で示す図の凡例で、○：懸念事項なし、△：懸念事項あり、×：中性化深さ 10mm 以上とし、△の懸念事項の詳細は備考欄に記載した。

2.2 調査方法

(1) 試料採取方法

コア試料は JCI-SC8⁷⁾に準拠して採取した。コアの直径は 100mm を基本とし、配筋が密な構造物では 55mm とした。

試料採取位置の例を写真－1 に示す。試料採取位置は、前回調査のコア孔近傍を基本とし、コンクリート表面にひび割れ・浮き等の変状がないものとした。また、雨がかりはあるが、周辺と比較して水みちによる変色は見られない箇所とした。また、バッチによるコンクリートの品質差を避けるため、前回と今回で同一打設層とし、ブリーディングによる影響を考慮するため、前回となるべく同じ高さから採取した。

(2) 試料分析方法

採取した試料の塩化物イオン濃度分析は、JIS A 1154 に準拠して行った。採取したコアは写真－1 の 1～8 に示すように、表面から 0～10mm、10～20mm、20～30mm、30～40mm、40～60mm、60～80mm、80～100mm および最深部から 20mm 程度の厚さで 8 試料にスライスした。コアはコンクリート表面から 200～300mm の長さで採取した。試料ごとに粉砕した後、電位差滴定法により塩化物イオン濃度を測定した。

配合推定は、セメント協会法 F-18⁸⁾に準拠した。試料は、写真－1 に示すように塩化物イオン濃度分析を行ったコアと同一のコアで行った。一部試料では、十分な試料量が確保できなかったため、塩化物イオン分析で用いたコアの近傍から採取したコアを用いて行った。

中性化深さは、コア採取後、コア孔を水道水で洗浄し、

表－2 調査構造物の概要

No.	地域	都道府県	距離※1	状況※2	中性化深さ (mm)		W/C		凡例	備考
					前回	今回	中性化深さ逆算	配合推定		
SS-1	日本海	青森	150	2	0	0	-	60%	○	-
SS-2	日本海	新潟	50	1	3	7	49%	51%	○	-
SS-3	日本海	新潟	110	4	5	5	46%	46%	○	-
SS-4	日本海	青森	200	2	0	3	44%	75%	○	-
SS-5	日本海	新潟	100	4	0	1	41%	54%※4	△	前回はドリルによる削孔粉を使用
SS-6	日本海	新潟	150	1	1	0	-	70%	△	前回から①の塩化物イオン濃度が大きく低下
SS-7	日本海	青森	100	1	0	0	-	67%	△	採取位置に高低差
SS-8	日本海	秋田	1500	4	0	0	-	70%	○	-
SS-9	日本海	山形※3	1300	4	4	5	46%	57%※4	○	-
SS-10	日本海	青森※3	120	2	0	11	56%	88%	×	中性化深さ10mm以上
SS-11	日本海	秋田	550	4	3	14	60%	59%	×	中性化深さ10mm以上
S1-1	日本海	山口	150	1	0	3	43%	56%	○	-
S1-2	日本海	島根	1500	1	0	2	42%	44%	○	-
S1-3	日本海	山口	0	4	0	0	-	27%	○	S1-3とS1-4は同一橋りょう
S1-4	日本海	山口	0	4	0	0	-	36%	○	同上
S1-5	日本海	島根	30	4	8	1	41%	62%	△	前回調査から中性化深さが大きく減少
S1-6	日本海	島根	1000	2	6	11	50%	49%	×	中性化深さ10mm以上
S1-7	日本海	島根	200	1	6	16	63%	55%	×	中性化深さ10mm以上
S2-1	太平洋	和歌山	100	1	6	13	54%	56%	×	中性化深さ10mm以上
S2-2	太平洋	和歌山	60	3	3	5	45%	40%	○	-

※1：海岸線からの距離 (m) ※2：海側の状況 1：道路橋あり、2：草木あり、3：民家あり、4：なし ※3：今回調査で修正 ※4：設計図書にて48%と記載

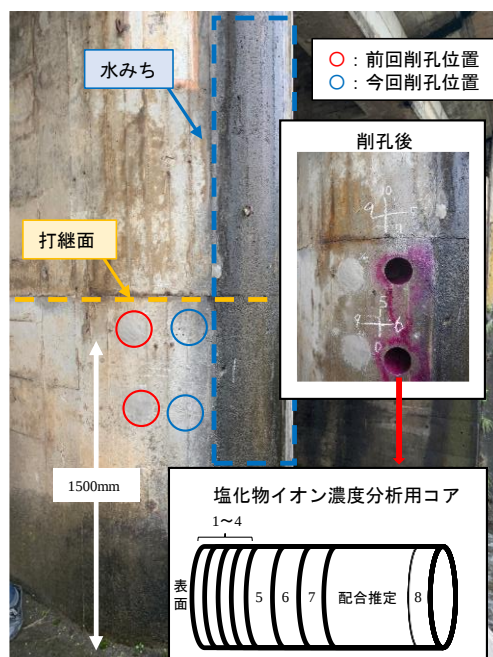


写真-1 試料採取位置

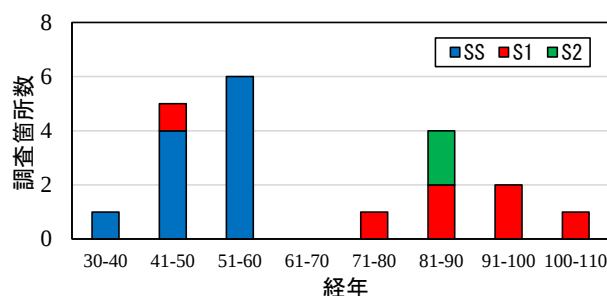


図-2 調査構造物の経年

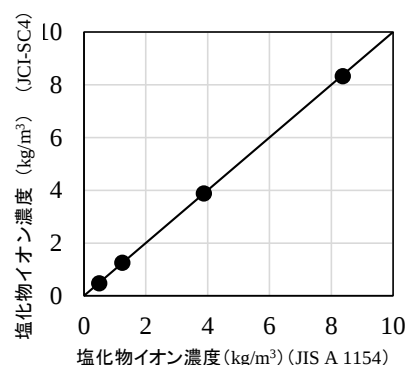


図-3 分析方法による差異の確認

表-3 用いる塩化物イオン濃度分布と回帰分析による S と D

No.	前回/今回		前回								今回								S	D	S	D	分布パターン
	経年 (年)	塩化物イオン濃度(kg/m ³)																					
		1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	前回					
SS-1	20	37	1.37	0.83	0.73	0.62	0.49	0.30	0.28	0.21	1.36	1.61	1.13	1.05	0.63	0.38	0.25	0.48	0.199	92.3	0.34	33.5	1
SS-2	35	52	2.37	2.04	1.95	1.80	1.40	1.01	0.92	0.50	3.23	4.13	3.43	2.61	2.23	1.91	1.67	0.84	0.385	88.9	0.51	108	2
SS-3	35	52	1.92	1.74	1.83	1.61	1.36	0.89	0.63	0.22	2.65	3.50	3.21	2.81	1.58	0.98	0.56	0.18	0.414	102	0.66	40.5	1
SS-4	30	47	1.37	1.80	1.22	0.82	0.71	0.45	0.47	0.32	2.49	2.07	1.86	1.66	1.24	0.83	0.62	0.41	0.440	25.3	0.35	60.7	2
SS-5	35	52	1.66	1.55	1.44	1.21	0.71	0.52	0.34	0.09	1.83	1.65	1.21	1.21	0.88	0.77	0.55	0.15	0.354	86.1	0.24	93.1	4
SS-6	35	52	5.97	1.98	1.29	0.96	0.59	0.30	0.11	0.17	3.88	2.44	1.58	1.37	1.23	0.91	0.63	1.26	0.435	27.1	0.36	56.9	2
SS-7	30	47	6.44	3.97	2.77	2.67	2.37	1.47	1.30	0.35	8.37	5.45	4.91	4.55	2.67	1.42	0.79	0.48	0.926	110	1.09	45.6	1
SS-8	38	55	0.87	0.81	0.78	0.68	0.68	0.53	0.42	0.36	0.99	0.82	0.80	0.66	0.56	0.52	0.37	0.41	0.097	94.4	0.09	38.5	3
SS-9	36	53	0.35	0.42	0.31	0.26	0.29	0.26	0.15	0.15	0.57	0.57	0.48	0.39	0.28	0.33	0.28	0.20	0.039	114	0.067	65.0	3
SS-10	26	43	1.27	0.91	0.89	0.65	0.36	0.32	0.25	0.27	1.24	0.61	0.63	0.67	0.53	0.45	0.43	0.32	0.222	37.2	0.08	128	4
SS-11	27	44	1.57	2.25	2.18	1.27	0.89	0.87	0.72	0.70	0.74	1.37	2.09	2.41	1.52	1.11	0.80	0.67	1.425	10.9	0.43	43.9	1
S1-1	72	91	1.10	1.23	0.97	0.82	0.64	0.60	0.48	0.44	1.23	1.06	1.00	0.53	0.43	0.54	0.47	0.37	0.137	15.9	0.14	5.0	3
S1-2	77	96	0.82	0.49	0.35	0.35	0.18	0.22	0.22	0.24	0.91	0.37	0.33	0.29	0.26	0.20	0.22	0.25	0.0571	5.57	0.02	6.5	3
S1-3	69	88	16.40	9.46	6.03	5.13	2.25	1.30	1.02	0.31	18.0	12.8	6.60	5.98	3.34	2.20	1.50	0.46	1.70	14.2	1.94	10.9	2
S1-4	69	88	9.79	10.53	7.11	3.83	3.03	3.05	3.72	0.58	19.6	9.7	7.96	6.43	5.34	3.78	2.72	0.39	1.55	21.3	1.19	39.0	4
S1-5	54	73	1.92	3.72	3.63	2.93	1.63	0.53	0.37	0.22	2.61	2.67	3.49	4.77	4.01	2.43	0.75	0.21	1.043	19.7	0.50	152	2
S1-6	82	101	0.59	0.50	0.48	0.37	0.24	0.39	0.24	0.22	0.54	0.43	0.56	0.50	0.34	0.25	0.28	0.44	0.0426	23.4	0.07	10.9	3
S1-7	24	43	0.66	0.94	0.72	0.88	0.48	0.31	0.33	0.15	0.24	0.29	0.67	0.79	0.44	0.34	0.26	0.15	0.220	107	0.25	30.2	3
S2-1	62	81	1.16	0.62	0.72	0.55	0.51	0.37	0.25	0.21	0.86	0.80	0.62	0.52	0.39	0.42	0.32	0.38	0.108	32.4	0.06	44.2	3
S2-2	63	82	0.82	0.70	0.33	0.33	0.14	0.19	0.19	0.16	1.18	0.81	0.53	0.38	0.27	0.23	0.21	0.21	0.0615	11.5	0.14	4.97	3

乾燥を確認してからフェノールフタレイン 1%溶液を噴霧し、1孔につき4箇所測定した平均値とした。一部試料ではコアを割裂して追加測定した。割裂による計測を行った場合は、コア孔と割裂の平均とした。

2.3 分析方法の検証と調査結果を用いた推定

(1) 塩化物イオン濃度の分析方法

前回調査では JCI-SC4⁷⁾に準拠して行っていたが、今回調査までに JIS A 1154 が規格化されたため、一部試料で JCI 法と JIS 法の差異を確認した。図-3 に結果を示す。分析方法による差異はほとんどないことがわかる。

(2) W/C の推定

W/C は配合推定、中性化深さの予測式で推定した。配

合推定から得られた W/C は最小 27%～最大 88%であった。配合推定では、特に空隙の多いコンクリートや内部にひび割れ等の変状があるコアは十分に乾燥させることができず、水分が多く測定されるため、W/C が大きく測定される場合がある。

中性化深さ予測式³⁾に基づいた式(1)を用いて、各構造物の経年と中性化深さから W/C を推定した。環境係数は目視により雨がかりがあると判断し、1.0 とした。なお、中性化深さ 0mm の場合、W/C を算定できないため検討を行っていない。

$$y_g = \gamma_{cb} \cdot \alpha_g \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

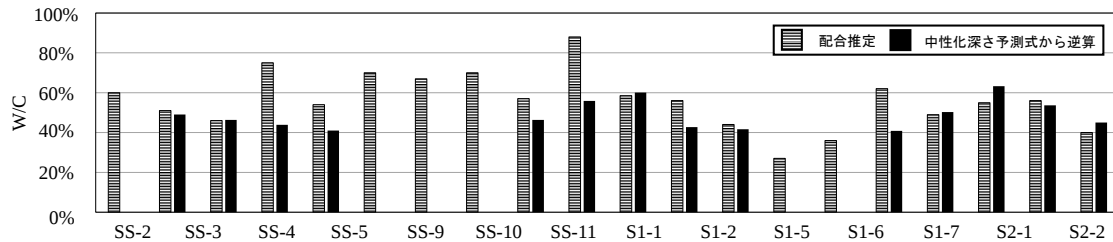


図-4 中性化深さ予測式と配合推定から得られた W/C の比較

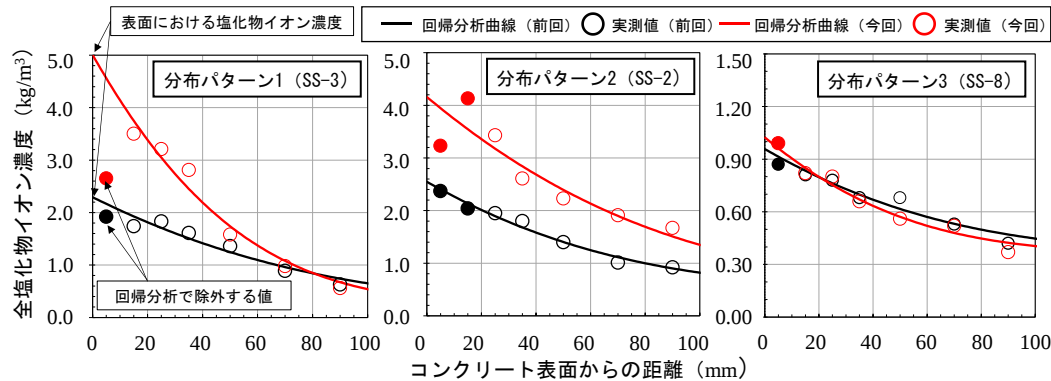


図-5 塩化物イオン濃度の分布パターン

y_g : 中性化深さ

$\alpha_g = \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c$ ($\alpha_k = 1.0$ α_p)

α_p : 中性化速度係数 ($= -3.57 + 9.0 \cdot W/C$)

β_e : 環境係数 ($= 1.0$)

γ_c : 材料係数 ($= 1.0$)

γ_{cb} : 推定値のばらつき ($= 1.15$)

結果を図-4 に示す。中性化深さの予測式から逆算した W/C は最小 41%～最大 63% となった。

3. 塩化物イオン濃度分布形状

表-3 に測定した塩化物イオン濃度を示す。塩化物イオン濃度は各スライスの中点における塩化物イオン濃度としてプロットした。前回と今回の塩化物イオン濃度分布形状の比較から、塩化物イオン濃度を 4 つの分布パターンに分類した。パターン 1 は深部で塩化物イオンの浸透が見られず、表面付近で浸透が確認できる形状、2 は深部まで概ね一定で浸透している形状、3 は塩化物イオンの浸透がほとんど見られない形状、4 はそれ以外とする。分布パターンの例を図-5 に示す。今回の調査結果からは、配合推定から同等の W/C と推定された構造物でパターン 1 (平均 W/C=58%), 2 (平均 W/C=57%) 両方確認され、W/C とパターン 1・2 の関係は明確でなかった。また、パターン 3 (平均 W/C=53%) はパターン 1・2 と比較して相対的に W/C が小さかったため、浸透が進んでいなかったと考えられる。

4. 塩化物イオン濃度分布の回帰分析による実測値と設計値の比較検討

4.1 回帰分析方法

塩化物イオン濃度は表面塩化物イオン濃度を一定とした場合式(2)、海からの飛来塩分がコンクリート表面に付着することにより供給され、表面塩化物イオン濃度が時間の平方根に比例して増加するとした場合式(3)を用いて算定する。鉄道標準では、海水中および干満帯に位置する場合は表面塩化物イオン濃度を一定とし、それ以外では式(3)を用いる。

$$C(x,t) = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) + C_i \quad (2)$$

$$C(x,t) = \gamma_{cl} \cdot S\sqrt{t} \left\{ \exp \left(-\frac{x}{4D \cdot t} \right) - \frac{x\sqrt{t}}{2\sqrt{D \cdot t}} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\} + C_i \quad (3)$$

$C(x,t)$: 深さ x , 経年 t の塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

γ_{cl} : 安全係数(=回帰分析では 1.0 とした)

C_0 : 表面塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

x : コンクリート表面からの深さ(mm)

t : 経年 (年)

D : 塩化物イオンの拡散係数 ($\text{mm}^2/\text{年}$)

erf : 誤差関数

C_i : 初期塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

S : 表面塩化物イオン濃度係数 ($\text{kg/m}^3/\sqrt{\text{年}}$)

測定で得られた塩化物イオン濃度の回帰分析は JSCE-G573-2018「附属書2(参考) コンクリート中の全塩化物イオン濃度分布に基づいた見掛けの拡散係数の算出方法」⁹⁾に準拠して整理した。ただし、中性化深さの測定誤差を考慮して、中性化した領域+5mm およびそこからの深部で採取された試料から得られた結果を除外することとした。初期塩化物イオン濃度は前回調査の最深部8として、式(3)を用いて回帰分析を行った。なお、S1-3、S1-4は目視の結果、海水がかかる場合があり、表面塩化物イオン濃度が一定である可能性があるため、式(2)による検討も併せて行った。

4.2 表面における塩化物イオン濃度係数 S

図-6に式(3)による回帰分析から得られた表面における塩化物イオン濃度の前回結果と今回結果の比較を示す。なお、ここでの表面における塩化物イオン濃度は、中性化による影響を考慮し、図-5に示す回帰分析から算出した0mmにおける塩化物イオン濃度とした。表面における塩化物イオン濃度は前回から今回にかけて概ね同様であり、一部増加しているものもあった。また、地域区分に着目すると、SS地域で増加している傾向があった。これはSS地域に比べてS1・S2地域の経年が大きく、 $\sqrt{t}$ 則によれば、すでに表面塩化物イオン濃度が増加しにくい経年にあるためと考えられる。

図-7に今回調査結果から求めた S と鉄道標準で設定されている S の関係を示す。鉄道標準の S は17年前の調査結果を包含するように安全側に定められたが、17年経過した今回調査結果も包含され、安全側であることが確認された。

4.3 拡散係数 D

図-8に回帰分析により求めた拡散係数と設計で使用されている予測式の関係を示す。拡散係数は今回調査で中性化深さ10mm以上であったり、前回調査と試料の採取位置が異なるなどの懸念事項がないと判断したデータ(表-2(凡例:○))と、前回調査結果をプロットした。また、S1-3、S1-4は式(2)による回帰分析により求めた D を併せてプロットした。なお、式(2)から得られる拡散係数は、式(3)から得られる拡散係数と比較して小さく算出されるため、式(3)による拡散係数の検討は安全側となる。予測式は、鉄道標準では実態調査結果に基づく式(4)、示方書では室内実験結果に基づく式(5)が設定されている。

$$\log D = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 0.5 \quad (4)$$

$$\log D = 3.0(W/C) - 1.8 \quad (5)$$

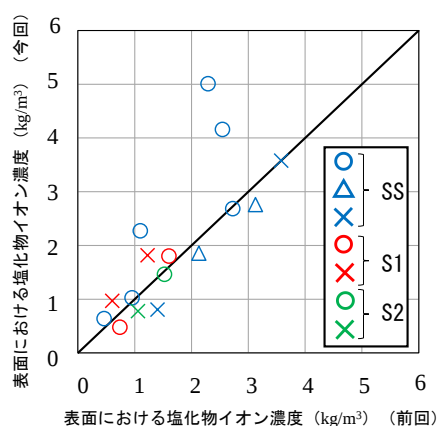


図-6 表面における塩化物イオン濃度の比較

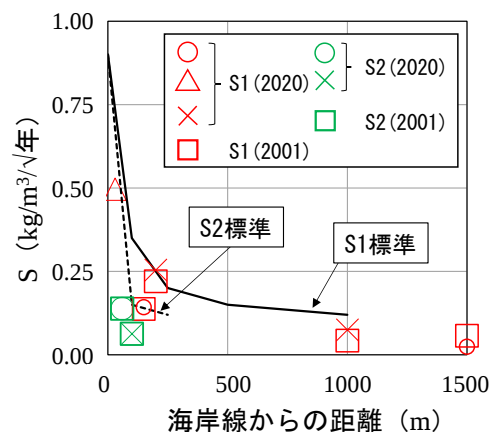


図-7 S と海岸線からの距離の関係

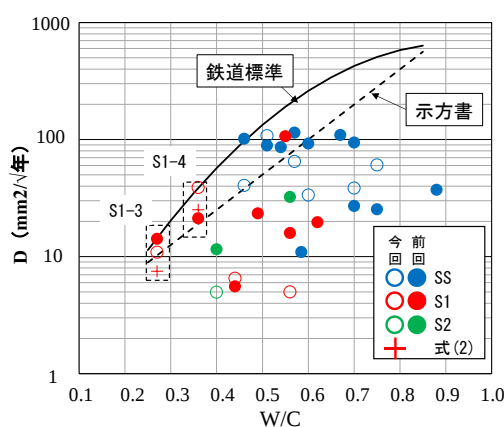


図-8 D の実測値と予測式の関係

表-4 コンクリート表面塩化物イオン濃度 C_0 ¹⁾

海岸の 地域区分	飛沫帯	海岸からの距離(m)				
		汀線付近	100	250	500	1000
飛来塩分が 多い地域	13	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛来塩分が 少ない地域	13	4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

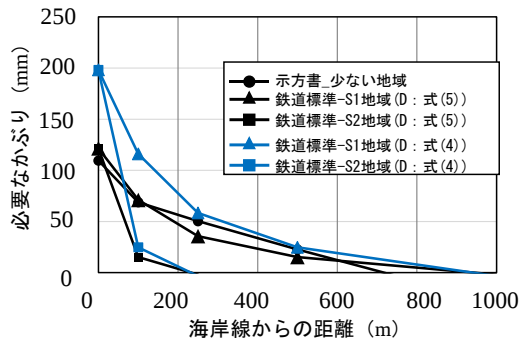


図-9 かぶりの試算

鉄道標準で 17 年前から使用されてきた式(4)は実態調査結果を安全側に包含した予測式であり、今回の調査結果も包含する結果となった。式(5)は室内実験結果の平均付近で定められた予測式であり、一部調査結果より下回った。また、実態調査結果の一部は式(5)に比べて明らかに小さいものがある。これは、式(5)はコンクリート中の空隙が液状水に満たされた状態下の室内試験から求めた拡散係数を基に定式化しているため、乾湿繰返しの程度により塩化物イオンの拡散・移流が制限される大気環境下では拡散係数が予測式(式(5))に比べて小さくなること⁹⁾などが要因であると考えられる。今回の調査結果は、式(5)に対して約 64%が小さく分布していることがわかった。雨がかりがある箇所であり、水が供給されやすい環境を対象としているため平均的になったと考えられる。

5. 設計かぶりの試算

今回の調査結果から、示方書の拡散係数の予測式は実態調査から得られた拡散係数と比較して安全側であることが分かった。そこで、式(3)に式(4)、式(5)に示される拡散係数の予測式を適用しかぶりの試算を行い、併せて示方書のかぶりも記載した。

図-9 に塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する検討を満足するために必要なかぶりと海岸からの距離の関係を示す。W/C は 50%、普通ポルトランドセメント、初期塩化物イオン濃度 0.3kg/m^3 、設計耐用年数 100 年、安全係数 1.3、かぶりの施工誤差 0mm、ひび割れ幅 0mm とし、鋼材腐食発生限界濃度は示方書に準ずることとした。表-4 に示方書で示されるコンクリート表面塩化物イオン濃度 C_0 を示す。地域は、S1・S2 地域と対応する飛来塩分が少ない地域とし、汀線付近については海岸線からの距離 0m にプロットした。

式(4)を用いたかぶりは 100m 以上となる場合があり、部材圧にもよるが施工や耐力変形性能などに影響を及ぼすような過大なものになると考えられるため、適切にかぶりを設定する必要がある。式(5)を用いたかぶりは S1 地域と示方書で同程度となり、S2 地域は示方書より小さ

くなった。示方書の鋼材腐食発生限界濃度も安全側に設定されている¹⁰⁾ことから、式(5)を用いてもかぶりは安全側に設定されていると考えられる。

6. まとめ

海水中・干満帯以外に位置し、海からの飛来塩分を受け、雨がかりがあり、経年 37 年以上、前回調査から 17～19 年経過した鉄道コンクリート構造物を対象に塩化物イオン濃度分布の追跡調査を行った結果、以下のことが明らかになった。

(1) 表面における塩化物イオン濃度は概ね同様であり、増加しているものもあった。

また、17 年前の調査結果を基に定められ、設計で用いられている表面における塩化物イオン濃度係数 S は、17 年経過した調査結果を包含する。

(2) 調査から得られた拡散係数は、実態調査結果から得られた予測式に包含され、室内実験から得られた予測式に対して約 64%が小さく分布していることがわかった。

7. 参考文献

- 1) 土木学会編:2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2018.3
- 2) (財)鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等設計標準・同解説, コンクリート構造物, 丸善, 2004.4
- 3) 川村力, 谷村幸裕, 曾我部正道, 鳥取誠一, 長谷川雅志, 東川孝治:鉄道構造物の調査に基づくコンクリート中への塩化物イオン浸透に関する研究, 土木学会論文集, No.781, pp.193-204, 2005
- 4) 土木学会編:2012年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2013.3
- 5) 皆川浩, 中村英佑, 藤井隆史, 綾野克紀:大気中環境下における塩化物イオンの見掛けの拡散係数の設定に関する一考察, Vol.41, No.1, pp.767-772, 2019
- 6) 志村雅仁, 岸利治, 鎌田和久:コンクリートへの塩分浸透に支配的な影響を与える停滞現象に関する実験的検討, Cement Science and Concrete Technology, Vol.69, No.1, pp.478-483, 2015
- 7) 日本コンクリート工学協会編:コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案), 1987.4
- 8) セメント協会編:硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告, コンクリート専門委員会報告, No.F-18, 1967.9
- 9) 土木学会コンクリート小委員会・基準関連小委員会編:2018年制定コンクリート標準示方書[基準編],
- 10) 土木学会編:2012年制定コンクリート標準示方書改訂資料,2013,3