論文 東北地方における鉄道コンクリート構造物への塩分浸透に関する 調査研究

川村 力^{*1}·谷村 幸裕^{*2}·曽我部 正道^{*3}·鳥取 誠一^{*4}

要旨:本研究は、東北地方の海岸付近に位置する鉄道コンクリート構造物における実態 調査により、コンクリート内部の塩化物イオン濃度分布を測定し、海岸線からの距離や 日本海側と太平洋側の地域の違いがコンクリート中への塩分浸透におよぼす影響につい て検討を行った。その結果、34箇所の実構造物の測定データから、コンクリート表面の 塩化物イオン濃度の違いが定量的に明らかになった。

キーワード:鉄道コンクリート構造物,塩化物イオン濃度,表面塩化物イオン濃度

1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書¹⁾(以下, 学会示方書と言う)では,鉄筋位置における塩 化物イオン濃度の設計値が,腐食発生限界濃度 以下となることを確かめることによる塩化物イ オンに関する耐久性照査方法が示されている。 この場合,鉄筋位置における塩化物イオン濃度 の設計値は,海岸線からの距離に応じてコンク リート表面における塩化物イオン濃度(以下, 表面塩化物イオン濃度と言う)を設定し,拡散 理論により求めることとしている。

一方,海からの飛来塩分を調査した結果²)に よると,飛来塩分の量は日本海側と太平洋側な どの地域により異なることが明らかになってい る。したがって,構造物が建設される地域に応 じて表面塩化物イオン濃度を適切に設定するこ とで,合理的な設計が可能となると考えられる。

そこで本研究では、青森県、秋田県、新潟県 の日本海側と岩手県の太平洋側で、海岸付近に 建設された鉄道コンクリート構造物の調査を行 い、海岸線からの距離や地域の違いが表面塩化 物イオン濃度におよぼす影響について検討を行 うこととした。

調査の概要

2.1 調査対象構造物

調査対象は鉄道構造物で,海岸からの距離が 概ね1,500m以下かつ海岸線から構造物までの 地形が概ね平坦である位置に存在するものを選 定した。図-1に調査対象構造物の位置を,表 -1に調査箇所数を示す。

図-2に調査対象構造物の経年別箇所数分布 を示す。調査対象構造物の構造は,鉄筋コンク リートまたは無筋コンクリートである。上部工 は,RC桁,PC桁または鋼桁であり,いずれも 鉄道橋りょうとしては,ごく一般的に用いられ ている構造形式である。

2.2 調査方法

2.2.1 試料の採取方法

試料の採取方法はJCI-SC8³⁾に準拠して,コ ンクリートコアを採取した。コアの直径は 100mmまたは120mmを基本としたが,配筋状 態等により採取が困難である場合は55mmとし た。コンクリートの粗骨材の最大寸法は20mm ~40mmであったが,コアの直径はおおむねそ の3倍以上とすることを基本とした。コアはコ ンクリート表面から200mm~250mmの長さで

*1	(財)鉄道総合技術研究所	コンクリート構造 研究員 工修 (正会員)
*2	(財)鉄道総合技術研究所	コンクリート構造 主任研究員 工修 (正会員)
*3	(財)鉄道総合技術研究所	構造力学 主任研究員 工博 (正会員)
*4	(財)鉄道総合技術研究所	コンクリート構造 主任研究員GL 工博 (正会員)

採取した。採取位置は、塩化物イオンの浸透量 が最も多いと考えられる位置を選定し、橋脚、 橋台く体の海側面の地表から1.0~1.5m程度の 高さとした。また、コンクリート表面にひび割 れ、はく離やジャンカ等が認められない箇所と し、降雨時に上部工等からの水が表面を流れた 痕跡のある箇所は、雨水により表面塩化物イオ ンが流失することが考えられるため、避けて採 取することとした⁴⁾。採取位置付近にコンク リートの打継目が存在する場合は、打継目を含 まないように採取した。また、打継目の直下は、 ブリージングによりコンクリートの品質が低下 していることが考えられるため、打継目の直下 は避けて採取した。コア採取の際に、中性化深 さも測定した。

2.2.2 試料の分析方法

採取した試料の塩化物イオン濃度分析はJCI-SC4³⁾に準拠し,塩化物イオン濃度のコンク リート表面からの深さ方向分布を調べた。採取 したコアは図-3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30mmの厚さで8試料にスライスし, 試料ごとに粉砕した後,電位差滴定法により全 塩化物イオン濃度を測定した。

3. 調査結果

3.1 塩化物イオン濃度の分布形状

図-4(a)~(d)に、コンクリート内部におけ るコンクリート表面からの塩化物イオン濃度分 布の例を示す。また、中性化深さを図中に点線 で示した。図-4(a)~(d)に示す塩化物イオン 濃度は、図-3に示した各スライス①~⑦によ り測定された塩化物イオン濃度を、各スライス の中間点における塩化物イオン濃度として図示 したものである。ここで、最深部のスライス⑧ における塩化物イオン濃度を、コンクリートの 施工時に導入された塩化物イオン濃度(以下、 初期塩化物イオン濃度から減じて、浸透による塩化



図-1 調査対象構造物の位置

表一1 調査箇所数

構造種	別	調査箇所数	調査位置			
伝りょう	橋台	2				
間りより	橋脚	22	海側面			
架道橋	橋台	10	地上から1.0~1.5m			
合計		34				





図-3 コア切断図

物イオン濃度のみを示した。

図-4(a)~(d)に示すように,調査を行った 全構造物のコンクリート表面から深さ方向の塩 化物イオン濃度分布を,その分布形状から整理 すると4つのパターンに分類された。

(1) 分布パターン I

分布パターンIは、図-4(a)に示すように、 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、表面から深くなるにしたがって塩 化物イオン濃度が小さくなるような分布形状で ある。コンクリート表面から塩化物イオンが浸 透した場合の典型的な分布形状と考えられる。 (2) 分布パターンⅡ

分布パターンⅡは、図-4(b)に示すように、 コンクリート表面から二番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ような 分布形状である。このような分布形状となる要 因としては、コンクリートの中性化による塩化 物イオンの移動や、雨水等による表面付近の塩 化物イオンの流出が考えられる⁴⁾。

(3) 分布パターンⅢ

分布パターンⅢは、図-4(c)に示すように、 コンクリート内部の全ての測定点で塩化物イオ ン濃度が小さい場合である。このパターンに分 類されるのは、測定された塩化物イオン濃度の うち、最大のものを現時点での表面塩化物イオ ン濃度と仮定し、100年後における表面塩化物 イオン濃度を推定した場合、その値が0.9kg/m³ 以下となる場合とした。表面塩化物イオン濃度 が0.9kg/m³以下であれば、初期塩化物イオン濃 度として0.3kg/m³を考慮しても、コンクリート 内部における塩化物イオン濃度は、腐食発生限 界濃度1.2kg/m³以下となるため、塩化物イオン に関する耐久性照査が不要となる。

(4) 分布パターンIV

分布パターンⅣは、分布パターン I ~Ⅲに該 当しない場合である。図-4(d)に一例を示す。 コンクリート中にある程度の塩化物イオンが浸 透しているが、中性化等の原因により分布が大



きくばらついているものと考えられる。

表-2に, 塩化物イオン濃度の測定結果と分 布パターンの区分を示す。

3.2 表面塩化物イオン濃度の検討

3.2.1 塩化物イオン濃度分布の推定

コンクリート内部における塩化物イオンの浸 透現象は、拡散理論に基づくものとして、Fick の拡散方程式の解を用いて塩化物イオン濃度を 推定するのが一般的である。学会示方書では、 Fickの拡散方程式を、表面塩化物イオン濃度が 一定として塩化物イオン濃度を算定することと している。しかしながら、構造物が海岸線付近 にある場合、表面塩化物イオンは、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 り供給される。よって、表面塩化物イオン濃度 は時間とともに増加すると考えられる。

そこで本研究では、Fickの拡散方程式を、表 面塩化物イオン濃度が時間の平方根に比例して

No.	地區	距離 ^{**1} (m)	経 年	塩化物イオン濃度(kg/m ³) ^{※2}							中性化 深さ	分 布	周囲の	
				1	2	3	4	5	6	\bigcirc	8	(mm)	形 状	状況*3
1		700	33	0.55	0.53	3.96	2.86	1.02	0.66	0.27	0.08	26	IV	2
2		150	20	1.37	0.83	0.73	0.62	0.49	0.30	0.28	0.21	0	Ι	4
3		400	28	1.70	1.57	1.12	0.75	0.56	0.45	0.34	0.17	0	Ι	4
4		200	30	1.37	1.80	1.22	0.82	0.71	0.45	0.47	0.32	0	П	4
5		100	30	6.44	3.97	2.77	2.67	2.37	1.47	1.30	0.35	0	Ι	1
6		1,200	23	1.07	0.59	0.39	0.35	0.35	0.24	0.11	0.13	0	Ι	2,3
7		1,500	38	0.87	0.81	0.78	0.68	0.68	0.53	0.42	0.36	0	Ι	4
8		550	27	1.57	2.25	2.18	1.27	0.89	0.87	0.72	0.70	3	П	3
9		150	82	0.44	0.50	0.75	0.63	0.52	0.44	0.44	0.35	0	Ш	3
10		50	37	4.54	5.57	9.32	9.42	6.32	3.57	1.97	0.39	14	IV	4
11	日	1,150	34	0.39	0.55	0.46	0.34	0.25	0.21	0.18	0.21	7	П	4
12	本	250	20	0.28	0.35	0.30	0.28	0.26	0.26	0.20	0.20	0	П	1
13	海	250	33	0.98	0.66	0.61	0.41	0.27	0.18	0.18	0.16	1	Ι	1
14	側	150	33	0.63	0.40	0.35	0.31	0.26	0.26	0.26	0.12	1	Ι	1,2
15	Į	150	33	1.25	0.79	0.60	0.51	0.32	0.28	0.23	0.26	1	Ι	1,2
16		150	33	1.06	0.54	0.47	0.33	0.28	0.26	0.24	0.24	0	Ι	1,2
17		500	33	0.16	0.18	0.16	0.11	0.09	0.07	0.07	0.07	2	П	1
18		500	33	0.37	0.26	0.28	0.19	0.09	0.07	0.07	0.05	1	Ι	1
19		500	33	0.09	0.18	0.16	0.16	0.11	0.14	0.07	0.11	3	Ш	1
20		800	33	0.20	0.61	0.54	0.29	0.20	0.11	0.07	0.07	4	П	4
21		100	34	0.57	0.97	1.27	0.92	0.64	0.33	0.18	0.09	9	IV	4
22		100	34	0.97	2.30	2.08	1.14	0.75	0.34	0.24	0.04	3	Π	4
23		100	34	0.60	0.84	0.62	0.54	0.43	0.30	0.19	0.09	1	Π	4
24		150	29	2.89	2.99	2.57	1.90	1.82	1.21	1.09	0.75	0	Π	4
25		1,000	37	0.89	0.93	0.62	0.51	0.29	0.11	0.07	0.09	2	П	2
26		100	29	0.76	0.81	0.64	0.53	0.78	0.83	0.58	0.60	5	Ш	4
27		200	28	0.19	0.28	0.26	0.26	0.26	0.19	0.16	0.14	4	П	4
28	太	700	27	0.12	0.40	0.24	0.24	0.21	0.19	0.21	0.16	11	Π	4
29	平	150	26	0.81	0.57	0.48	0.55	0.40	0.40	0.31	0.31	2	Ι	4
30	洋	100	26	0.13	0.75	1.92	1.60	1.22	0.71	0.51	0.11	15	IV	4
31	側	50	26	0.46	1.06	0.88	0.64	0.31	0.18	0.09	0.09	18	П	4
32		100	27	0.63	0.47	0.43	0.36	0.31	0.31	0.22	0.27	0	Ι	4
33	_	150	27	0.66	0.91	0.71	0.77	0.57	0.57	0.41	0.55	1	П	3
34		200	27	0.27	0.20	0.53	0.53	0.47	0.47	0.38	0.35	0	Ш	2

表-2 測定結果

※1:海岸線からの距離

※2:①~⑧の位置は図-3を参照

※3:海側の状況、1:道路橋あり、2:樹木あり、3:民家あり、4:なし

増加するとして解いた,式(1)を用いて塩化物 イオン濃度を算定することとした^{5),6)}。

 $C(x,t) = S\sqrt{t} \left[\exp\left(-\frac{x^2}{4D \cdot t}\right) - \frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{D \cdot t}} \left\{ 1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right) \right\} \right] (1)$ ここに, S:表面塩化物イオン濃度係数 (kg/m³/√年) x:コンクリート表面からの深さ(mm) t:設計耐用年数または建設後経過年数(年) D:塩化物イオンの拡散係数(mm²/年) erf:誤差関数

3.2.2 表面塩化物イオン濃度係数の推定

調査で得られた塩化物イオン濃度分布を,式 (1)で回帰分析して表面塩化物イオン濃度係数 を推定する。表面塩化物イオン濃度は表面塩化 物イオン濃度係数に設計耐用年数の平方根を乗 じることで求まるが,本研究では表面塩化物イ オン濃度係数を基準として論じることとする。

分析に用いた塩化物イオン濃度分布は,分布 形状がパターンⅠとⅡのものとした。分布パ ターンⅡは表面から二番目の塩化物イオン濃度 が最大となっている。そこで、コンクリート表 面側の1点目の測定値を除いて回帰分析を行っ た。この場合、1点目の測定値が小さい原因が、 中性化による濃縮であれば、実際の表面塩化物 イオン濃度は回帰分析により求まる値よりも小 さいと考えられる。また,雨水による流失が原 因であれば、実際の表面塩化物イオン濃度は回 帰分析により求まる値と同程度であると考えら れる。表-2より、分布パターンⅡに分類され た14箇所の中性化深さは0~18mmであり、比 較的中性化深さが深いものは中性化による濃縮 が原因と考えられ、それ以外のものは雨水等に よる流失等が原因と考えられる。

分布パターンⅢは、表面塩化物イオンの量が 前述の理由により無視できるレベルであり、表 面塩化物イオンの浸透もないものと考え、表面 塩化物イオン濃度係数を便宜上0として整理し た。分布パターンⅣは、式(1)による回帰分析 が困難であるため、本検討から除外した。

図-5に表面塩化物イオン濃度係数と海岸線



からの距離の関係を示す。ここで、学会示方書 に示されている表面塩化物イオン濃度の値を、 設計耐用年数を100年として、表面塩化物イオ ン濃度係数に換算したものを点線で示した。

3.2.3 海岸からの距離の影響

図-5より,海岸線からの距離が大きくなる ほど,表面塩化物イオン濃度係数が小さくなる 傾向にある。また,海岸線に近くても表面塩化 物イオン濃度係数が小さい場合もある。図-6 に,表-2におけるNo.14,24,29の塩化物イオン 濃度分布を示す。なお,前述のとおり初期塩化 物イオン濃度を除いている。

図-6より、No14とNo.24は、ともに日本海 側に位置し、海岸線からの距離も同じ150mで あるが、調査箇所の海側に樹木や道路橋などの 遮蔽物があるNo.14に比べて、遮蔽物の無い No.24のほうがコンクリート内部の塩化物イオ ン濃度が大きい。したがって、表面塩化物イオ ン濃度係数は、海岸線からの距離が同じでも、 構造物が置かれた状況によって大きく異なるこ とが考えられる。

3.2.4 地域の影響

図-5より,日本海側では,海岸線からの距離が大きくなると表面塩化物イオン濃度係数が小さくなる傾向はみられるが,ばらつきが大きく,学会示方書の値を上回る場合も多数存在している。また,海岸線からの距離が1,000mを超える場合でも表面塩化物イオン濃度係数が学会示方書の値を超えるものがあった。太平洋側では,日本海側にくらべてばらつきは少なく,学会示方書の値よりも小さい値となった。

図-6より、No.24とNo.29は、日本海側と太 平洋側で、海岸線からの距離が等しく遮蔽物も 無い場合である。これより、同じ条件でも太平 洋側に比べて日本海側において表面塩化物イオ ン濃度係数が大きいことがわかる。これは海か らの飛来塩分量の差と考えられる²⁾.

3.3 塩化物イオンに対する拡散係数の検討

図-7に塩化物イオン濃度分布から拡散係数 を算定した結果を示す。図中には,普通ポルト ランドセメントを使用する場合に,学会示方書 式(2)¹⁾により算定される拡散係数も示した。

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

ここに, D:塩化物イオンの拡散係数(mm²/年) W/C:水セメント比

調査構造物の水セメント比は不明であるが、 一般に、調査対象である橋脚、橋台の水セメン ト比は、設計時には60%程度に設定される。既 往の研究により、拡散係数のばらつきは大きい ことが認められており、拡散係数から水セメン ト比を推定することは難しいが、本調査対象の コンクリートの水セメント比は、全般的に設計 時に想定される値よりも小さいことが伺われる。

4. まとめ

東北地方における海岸付近に位置する34箇所 の鉄道コンクリート構造物の調査結果から,以 下のことが明らかになった。

(1) 表面塩化物イオン濃度は、海岸線からの距



図-7 塩化物イオンに対する拡散係数

離や地域により異なり,太平洋側に比べて, 日本海側において値が大きく,ばらつきも 大きい。また,海岸線からの距離や地域が 同じでも,構造物が置かれる状況によって, 表面塩化物イオン濃度は大きく異なる。

(2) 太平洋側において,表面塩化物イオン濃度 は学会示方書の値と比べて小さい。

謝辞

本研究を進めるにあたり, 鹿児島大学武若耕 司助教授にご指導をいただいた。ここに感謝の 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年制定,2002.3
- 建設省土木研究所;土木研究所資料第3175 号,1993.3
- 日本コンクリート工学協会;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
- 4) 東川孝治ほか;海岸付近に位置する鉄道橋 梁下部工における塩化物イオンの浸透に関 する調査,土木学会第58回年次学術講演会 講演概要集,V-073,2003.9
- 5) 前田聡ほか; コンクリート中への塩化物浸 透過程に関する既往調査の整理と分析, コ ンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, 2002.6
- 6) 丸屋剛ほか;コンクリートへの塩分の拡散
 浸透に関する表面塩分量の定式化,コンク
 リート工学年次論文報告集,11-1,1989.6