コンクリートへの塩分浸透と塩害環境の評価

CHLORIDE PERMEATION INTO CONCRETE AND ESTIMATION
OF SALINE ENVIRONMENT

川上 英男*, 脇 敬一**

Hideo KAWAKAMI and Keiichi WAKI

Mortar and concrete specimens were exposed at sea side areas in Hokuriku district, located in the central part of Japan, for 4 years. The specimens consisted of 4 kinds of water cement ratio and they were exposed at two kinds of conditions, roofed and un-roofed.

The larger was the water-cement ratio of the specimens, the larger value of the chloride content was resulted. And the larger values of the chloride content was found in the specimens of roofed exposure than that of un-roofed group of the specimens.

The facts proved that the permeated chloride was governed not only by the atmospheric salinity but also by the properties of the specimens and the exposure condition.

Keywords: exposure, saline environment, chloride content, permeation, diffusion, cement-water ratio

暴露、塩分環境、塩分含有量、浸透、拡散、セメント水比

1. まえがき

海岸付近の鉄筋コンクリートでは、外部より浸透蓄積した塩分によって鉄筋の腐食が促進され、鉄筋コンクリートの寿命を著しく短縮することがある。この種の塩害を生ぜしめる危険性は大気中の塩分濃度に支配され、その原因のほとんどは海塩粒子の飛来にあるとされている。

この大気中の塩分濃度の地域分布やそのコンクリート中への浸透蓄積の実態についての資料は極めて乏しい。

まず海塩粒子の発生や内陸部への飛来という現象については気象条件、海象条件、海岸からの距離、地形等多くの要因が総合して影響を及ぼし⁽¹⁾更にそれらが季節的にも変動するので、その実態は極めて多様で、且つ地域性に富むことが想定される。したがって、それを風向、風速など特定の影響要因別に系統的に把握することは極めて困難である。

そこで提案されている指標の一つに海岸からの距離がある。これについてはISO⁽²⁾、日本道路協会⁽³⁾、樫野

⁽⁴⁾の提案があり、また建設省によるステンレス板による塩分捕集調査⁽⁵⁾や橋梁等実構造物の被害実態調査に基づく塩害対策必要地域の設定が行われている。しかしながら海岸からの距離とコンクリート中の塩分濃度(塩害危険度)の関係については地域差が大きいこと^(6,7)を考えるとより適切な塩害対策にはきめ細かい範囲の地域設定が必要である。

さらに、塩害危険度の実態把握を困難にしている理由の一つは、コンクリートに飛来付着した海塩粒子が降雨雪によって洗い流され、大気中での捕捉塩分の年間の積算値がそのまま鉄筋コンクリート各部の塩害危険度の大小に対応しない可能性が考えられることである。このことは、海岸地域の建物の外壁に用いた亜鉛引き鉄板では、雨がかりになっている下方部は健全であるのに、却って雨の掛からない軒下部分が錆びているといった現象からも想定される。

そこで本研究では海塩環境に試験体を暴露し、コンク

* 福井大学工学部環境設計工学科 教授・工博

** 福井大学工学部環境設計工学科 文部技官

Prof., Dept. of Architecture and Civil Eng., Faculty of Eng., Fukui Univ., Dr. Eng.

Technician, Dept. of Architecture and Civil Eng., Faculty of Eng., Fukui Univ.

図1 暴露地点

リート中への塩分の浸透蓄積の実態を明らかにすることを試みた。すなわち、北陸地方の内、図1に示すF及びKの2地域にモルタル及びコンクリート試験体を4年間暴露し、そこに浸透蓄積した塩分の分析結果から塩分の浸透蓄積に及ぼす水セメント比、及び雨よけのフードの有無によるコンクリートの乾湿条件の影響を検討した。なお一旦コンクリートに浸透した塩分の一部はセメントと結合してフリーデル氏塩を形成し、鉄筋の腐食に関与するのはその残りの溶解塩分とされていることから、本報告では溶解塩分を対象とした。また、拡散理論を適用して耐久性上設定された許容塩分濃度に達する期間を試算し、鉄筋コンクリートの塩害対策を必要とする範囲についても考察した。なお、本報告は既報の1年、2年^(8,9)及び4年間の暴露試験結果⁽¹⁰⁾をとりまとめたものである。

2 試験体及び暴露条件

暴露試験体用材料は表1に示す通りである。

調査は表2に示すように4水準の水セメント比を対象とした。モルタルはこれらの調査から粗骨材を除いたものである。モルタルは直径5.5 cm、コンクリートは直径10 cmの塩化ビニールパイプ（長さ90 cm）に詰め16日間密封養生後、長さ15 cmに切断、脱型した。これらを室内において気乾状態とし、端面を残して遮塩性塗料を塗布した。コンクリート試験体は表2の調査のうち水セメント比45%と65%の2種類を対象とした。砂利自体は塩分の浸透にあまり関係しないと考えられること、また、浸透塩分の分析においても、試料中の砂利の多少が試料全体に対する塩分量の比率に影響し、分析値の信頼性を低下させる恐れが大きいことを考えて、暴露試験体はモルタルを主とした。なお、使用材料中には塩分は

表1 使用材料

		表乾比重	吸水率(%)	粗粒率
骨材	九頭龍川産 川砂	2.59	2.49	2.36
	九頭龍川産 川砂利	2.64	1.68	7.00
セメント	普通ポルトランドセメント	比重:3.15		
	圧縮強度 364 kgf/cm ² , 曲げ強度 68.4 kgf/cm ²			

表2 調査表 (kg/m³)

W/C(%)	水	セメント	砂	砂利
45	168	372	655	1190
55	166	302	717	(1190)*
65	165	255	774	1175
70	157	227	818	(1175)*

* (モルタルのみ)

表3 暴露試験体準備

材令	準備作業及び養生
(打設後)	塩ビパイプ内密封養生
16日	切断・脱型・室内保存
60日	塗料コーティング開始
73日	K-1~K-4暴露開始
83日	FK-5暴露開始

殆ど含まれていないものと見なされる。このことは後述の分析結果において試験体内部の塩分浸透が及ばない部分では塩分が検出されていないことにも現われている。

試験体の準備作業及び養生等を表3に示す。

暴露地点を図1に示す。F地域1箇所（海からの距離200m）、K地域4箇所（海からの距離100m-3km）で、試験体露出端面を海の方に向けて水平に設置した。設置場所は海風を遮るものの無い建物屋上またはフェンスとし、その高さは地上約6-12m（海面より約15m-21m）である。

暴露試験体1セットはモルタル4種各3本、コンクリート2種各1本、計14本である。各暴露地点には雨よけのフードを設けた1セットとフード無し1セットを隣接して設置した。暴露試験体各セットの状況を図2に、暴露期間等の条件を表4に示す。

3 塩分分析

回収したモルタル試験体は約1 cm厚に輪切りにし、各片を微粉碎して電気乾燥器（105°C）に入れ、絶乾状態

図2 試験体暴露状況

表4 暴露期間

暴露地点	海からの距離	暴露期間
K1	3.0 km	1987.7.14
K2	2.1 km	}
K3	500 m	
K4	100 m	
FK5	200 m	1987.7.24
		1991.6.8
		(1415 日)

とした後、質量を測定する。これを50℃精製水に浸漬、攪拌、24時間以上経過後の上澄水を濾過し、これに対して電量滴定法による塩分濃度計を用いて塩素イオン量を測定した。コンクリート試験体は約1cm厚に輪切りの後、丁寧にハンマーで粗砕、丹念に砂利を取り除き、残りのモルタル部について上記モルタルと同様の分析を行った。塩素イオン量はいずれもモルタル絶乾質量に対する百分率で表した。

4 塩分分析結果

暴露地点5箇所の各モルタル試験体内部の塩分量を表面からの深さとの関係で示したのが図3である。

各図にプロットした各データは輪切りにした試験体部

分の平均値を表すものである。海岸に最も近いK4地点では塩分量が大きいので縦軸の目盛は他の場合の1/2に縮めてある。

コンクリート試験体の分析結果を同様に図4に示す。

5 考察

5.1 試験体内の塩分分布

どの暴露地点においても、試験体表面より内部への距離（深さ）が大きくなるほど塩分量は少なくなっているのが一般的傾向である。中には表層部の塩分量が2層目の塩分量より小さい場合も認められる。この現象は水セメント比の大きい試験体において顕著である。

JASS 5 の許容塩分量 0.3 kg/m^3 (対コンクリート) は、コンクリート中のモルタルとして 1100 kg/m^3 を見込むときは対モルタル塩分量は 0.027% となる。この値はコンクリート製造時の全塩分であるが、まえがきに述べたように、ある経過年数以後の塩害は溶解塩分に起因するところから、これら両者を対比することとした。

海岸から500m以内では、この値を超える部分が多く見受けられる。また通常の鉄筋位置として想定される深さを表面から3cmとすると、これらの図に示すように、

図3 表面からの深さと塩分量 (モルタル)

図4 表面からの深さと塩分量 (コンクリート)

すでにその値に達したり、または それを超えるものは、海岸からの距離200m (FK-5) のフード付き試験体では、 $w/c=70\%$ 、65%の場合であり、距離100m (F-4) ではフード無しの $w/c=45\%$ の試験体を除いてすべての試験体に及んでいる。

同一暴露地点、同一水セメント比の試験体ではフード付き試験体表層部の塩分量はフード無しの場合に比べて、塩分量は大きく、およそ2倍に達している。降雨雪によって一旦飛来付着した塩分が流されることが少ないためと考えられる。試験体内部の塩分量も同一深さを比較するとフード付きの方がフード無しの場合より大きい値を示している。

同一地点内の試験体では 水セメント比 (w/c) が大きい程、試験体内各部の塩分量は大きい値となっている。

5.2 海岸からの距離と試験体表層部の塩分量

一般的に海岸からの距離が大きくなるほど、各水セメント比の試験体内の各深さにおける塩分量は減少している。試験体表層部の塩分量を海岸から暴露地点までの距離に対応して示したのが図5である。

図5 海からの距離と表層部塩分量

フード付きの場合、表層部塩分量は、海岸からの距離100m (k4地点) の場合に比べて500m (k3地点) では約1/6に減少し、2.1 km地点 (k-2) では極めて小さい値となっている。

フード無しの場合では、海岸からの距離 500mでその表層部塩分量は極めて小さくなり、2.1 km 地点の場合と殆ど同程度となっている。

これらの結果は、この地域では海岸より 100mの地点に比べ 500m以遠の地点では塩分のコンクリート中への蓄積が大幅に減少することを示している。

5.3 コンクリートとモルタルの比較

図3及び図4によるとコンクリートとモルタルでは試験体の表面から内部に向かうほど塩分量が減少する傾向はほぼ同様である。又塩分量そのものは各暴露地点毎に両者の間にやや差が見られるが、どちらが大きいと言った一定の傾向は見られない。すなわち塩分浸透蓄積状況はほぼ同様と見做しうる。この点については次節でも述べる。

5.4 塩分浸透特性

上記の結果にもとづき、各試験体内部の塩分分布に対してFickの拡散方程式の解(式(1))を適用し、最小自乗法を用いて見かけの表面塩分量(C_0)と見かけの拡散係数(D_c)を算定した。

$$C = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right) \quad \dots\dots (1)$$

C : x における塩分量 erf : 誤差関数

C_0 : 見かけの表面塩分量 x : 表面からの距離 (cm)

D_c : 見かけの拡散係数 t : 暴露期間 (sec)

試験体の表面から第一層目の塩分量が第2層目の値より少なく、又2層目以降の塩分量の分布傾向より大きく

図6 海からの距離と見かけの表面塩分量

外れている場合は、第2層目以降の塩分量のデータを解析の対象とした。このような場合は C_0 の算定値は表層の塩分分析値よりかなり大きい値となるが、試験体内部の塩分分布をより忠実に反映するものと見做される。

a) 見かけの表面塩分量 (C_0)

C_0 の値を水セメント比 (w/c) 別に、海岸からの距離に対してプロットしたのが図6である。

海岸より100mの地点 (K4) では フードの有無に拘わらず、 C_0 は水セメント比が大きいほど、大きい値を示している。すなわち同じ海塩環境下であっても、内部への塩分浸透を特徴づける指標としての C_0 は同一値を示さず、モルタルの水セメント比に依存することを示している。海岸よりの距離が大きい場合は塩分量の絶対値が小さいので、その差も小さく、上記の傾向を見分けられるほどには至らない。

b) 見かけの拡散係数 (D_c)

見かけの拡散係数 D_c は試験体の水セメント比が同一であっても暴露地点によってバラツキがあるので、それらの値の水セメント比及びセメント水比ごとの平均値を図7に示す。

D_c の平均値は水セメント比が小さいほど、小さくなっており、同一表面塩分量に対しては内部への浸透塩分量を低く押さえられることを示している。

一方、どの水セメント比の場合においても D_c はフード付きの場合の方がフード無しの場合に比べて小さい値となっている。このことは同じ水セメント比のモルタルやコンクリートでもその環境条件 (フードの有無による乾湿度の差など) によって拡散係数が異なることを示している。

表5 表面から3cmの位置で Cl^- が
0.3kg/m³に達する暴露期間 (年)

W/C (%)	海からの距離			
	100m	500m	2.1km	3.0km
45	3.9	106.5	2064.4	—
55	2.8	19.8	—	—
65	1.2	11.2	106.1	154.2
70	0.7	6.3	38.8	46.9

(フード付きの場合)

図7 セメント水比・水セメント比と拡散係数

また同図は暴露期間が長期になるほど D_c の値は小さくなることを示している。これには試験体の材令が進んで材質が緻密化したことも関与しているものと考えられる。

c) 塩分蓄積の推定

(1)式によれば C_0 と D_c が与えられると、ある期間 (t) における表面からの距離 (x) に対応する塩分量 (C) が求められる。今仮に暴露期間4年の C_0 と D_c を用いて、表面からの深さ3cm (通常の鉄筋コンクリートにおける鉄筋の位置を想定) における塩分量が 0.3 kg/m³ (JASS 5, 鉄筋の腐食を防止する観点から定めたコンクリート中の Cl^- イオンの上限値) に達する期間 (t 年) を算定した。その結果を表5に示す。

同表中の空欄は暴露期間4年の C_0 の値が 0.3 kg/m³ (対モルタル 0.027%) に達していないので (1) 式を適用するに至らなかったものである。

それらの t の算定値を海岸から暴露地点までの距離との関係で示したのが図8である。座標軸は両対数目盛としてある。海岸からの距離 500m地点でも w/c が55%より大きいときは 通常のRC建物の耐用年数 65年に至らない内に 0.3 kg/m³に達する。このように同図は海

図8 海からの距離と塩分限度到達年数

岸からの距離と t との関係を与えるものとなる。ただし、これらの関係は暴露時までの試験体の養生条件によっても異なると考えられるので、上記の数値は一応の参考値である。しかし、この手法は多年に及ぶ塩分の蓄積を推定する可能性を示すものと考えられる。

また、F地区 海岸から200m地点の算定値を図8に破線で囲んで示す。これらの値は、K地区の同列地点の年数より大きく、塩害危険度はK地区より小さいことを意味する。なお 図8において海岸からの距離と t はほぼ直線的関係となっているが、その普遍性については、塩分環境の地域依存性とあわせて検証する必要がある。

ここでは C_0 、 D_c の値は暴露4年の場合を採用している。今後材質は安定していると見做されるので D_c の値はそれほど変化するとは考えにくい。が、 C_0 の値は、その経年変化を図9に示すように、一部例外はあるが年々増加している。また、参考までに図3の塩分量分布から浸透塩分の総量（塩分分布図の面積）と暴露期間との関係を図10に示す。

これらの浸透塩分増加の傾向考えると、暴露期間4年のデータに基づいて算定した上記のそれぞれの値は、より長年月の予測に対してはいずれもさらに大きい塩分量となる可能性があることを示している。

6 むすび

北陸地方の海岸地域に4年間屋外暴露したモルタル及びコンクリート中の可溶性塩分分析及びその考察から、塩分の浸透蓄積について、海岸からの距離を始め、水セメント比やフードの有無など材質や暴露条件ごとに、その実態を明らかにし、この手法が塩害対策地域区分の設定に有力な手段となり得ることを示した。又、塩分の浸透現象について明らかになった事項を要約すると次の通りである。

1) 試験体各部の浸透塩分量は同地点、同水セメント

図9 暴露期間と見かけの表面塩分量

図10 暴露期間と溶解塩分総量

比の場合、フード付きの方がフード無しの場合に比べて大きく、約2倍の塩分量を示した。又同地点、同暴露条件のもとでは水セメント比の大きい場合ほど試験体各部の塩分量は大きい値を示した。すなわちコンクリートやモルタルに浸透蓄積する塩分は必ずしも大気中の塩分濃度だけで一義的に決まるものでなく、コンクリート、モルタルの材質条件や、雨がかりの有無などの環境条件が関与することが示された。

2) 拡散理論解を用いて塩分浸透量を推定する場合の根拠となる見かけの表面塩分量についても同様に水セメント比、フードの有無によって異なった値となり、同一地点に対して一定の値を想定できないことが明らかとなった。又この値は暴露期間とともに大きくなることも示された。

コンクリートやモルタルへの塩分の蓄積状況においては地域差が顕著である。それらに対応する塩害対策の地域区分は小範囲が望ましく、できれば本報告の手法によって多数の試験体を一斉に各地に暴露するのが望ましいが、そのような資料が整わないうちは、塩害を受けることのないように十分な対策を講ずる配慮が必要である。

謝辞

本研究の塩分分析および理論的解析には福井大学学生、南弘子、平井美穂、川上英昭の諸君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) たとえば、堀田健治：砂浜海岸における海塩粒子の発生に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第444号、pp. 145-152, 1993. 2
- 2) ISO/TC. 156, WG4, N66E: Corrosivity of Atmospheres. 1983
- 3) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針（案）同解説、1984. 2
- 4) 梶野紀元：RC造建築物における塩害地域区分の設定についての一考察、日本建築学会関東支部研究報告集、1983
- 5) 建設省：コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書（第一編）（第二編）、建設省総合技術開発プロジェクト、1988. 11
- 6) 川上英男：北陸地方の環境塩害危険度分布について、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、pp. 81-84, 1986
- 7) 川上英男：北陸地方の塩分環境、日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp. 265-266, 1987. 10
- 8) 川上英男：塩害環境とモルタル中の塩分蓄積、日本建築学会大会学術講演梗概集 A、pp. 631-632, 1989. 10
- 9) 川上英男：塩害環境とモルタルへの塩分蓄積、日本建築学会大会学術講演梗概集 A、pp. 131-132, 1990. 10
- 10) 川上英男：塩害環境とモルタルへの塩分蓄積（暴露期間4年の場合）、日本建築学会大会学術講演梗概集 A、pp. 1065-1066, 1992. 8

（1993年4月8日原稿受理、1993年8月16日採用決定）