# 論文 飛来塩分の影響を受けるコンクリートの表面塩分に関する実験的検 討

山下 寬生<sup>\*1</sup>·下村 匠<sup>\*2</sup>·山田 文則<sup>\*3</sup>

**要旨**:塩害を生じさせる環境条件の定量的把握のための基礎的検討として,室内における模型実験によりコンクリート表面への塩分到達,コンクリート中への浸透および,降雨による洗い流しの再現を行った。単位時間当たりの飛来塩分量が一定の環境下では,暴露時間の経過とともに表面塩分濃度は一定の値に収束すること,飛来塩分量と表面塩分濃度は相関関係にあること,降雨による洗い流しの影響を受けることにより,表面塩分濃度およびコンクリート中への塩分浸透量は低下することが明らかとなった。

キーワード:飛来塩分,塩害,表面塩分,洗い流し

#### 1. はじめに

コンクリート構造物の塩害による劣化の進行 を予測するためには,構造物に塩害を生じさせ る環境条件を与える必要がある。これは、構造 設計において構造物に作用する荷重を与えるこ とに相当するので,劣化外力と呼ばれることが ある。土木学会コンクリート標準示方書では, 線形拡散モデルによりコンクリート中の塩分の 移動を計算し、塩化物イオンの侵入による鋼材 腐食に対する抵抗性を照査する方法が導入され ている<sup>1)</sup>。この方法では,塩害を進行させる劣化 外力の程度はコンクリートの表面塩分濃度によ り表される。示方書には、海岸から対象構造物 までの距離に応じた表面塩分濃度の値が掲載さ れている。この値は,既存構造物のデータから 求められたものである。将来、構造物の塩害の 照査を精度よく行うには、この表面塩分濃度を、 海岸からの距離だけでなく、気候、地形、構造 物形状など,対象構造物の多くの条件を精密に 反映し定められるようにする必要がある。

コンクリート構造物の表面塩分濃度を汎用的 に表すには、実構造物の実測によるだけでなく、 構造物への飛来塩分量や気象条件などの情報か ら定められるようにすることが望ましい。しか し、構造物表面に到達した塩分がすべて表面塩 分となるのではないこと、実環境下では降雨に よる洗い流しなどの影響を複雑に受けると考え られること、などから表面塩分濃度を理論的に 予測することは難しいと考えられる。

そこで本研究では、室内における模型実験に よりコンクリート表面に到達した塩分がコンク リート中に浸透する状況を再現し、飛来塩分量 と表面塩分濃度の関係を実験的に検討する。ま た、真水を噴霧することにより降雨を再現し、 降雨による洗い流しの影響を検討する。

### 2. 実験概要

### 2.1 飛来塩分発生装置

飛来塩分発生装置の概要を図-1~3 に示す。 断面が 40cm×40cm のアクリル製の水路内に設 置した海水中に気泡発生装置を設置し,海水中 に気泡を発生させ,気泡が海水面ではじけるこ とによって海水粒子を発生させた。この海水粒 子を送風機によって飛散させ,モルタル供試体 に飛来させた。水路は,風を循環させることに より,一定の風速を維持し,一定の飛来塩分が

- \*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)
- \*2 長岡技術科学大学 工学部環境·建設系助教授 工博 (正会員)

\*3 長岡技術科学大学大学院 工学研究科エネルギー・環境工学専攻 工修 (正会員)





図-2 供試体の設置状況

衣─I 小刀配口						
W/C	S/C	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
(%)		W	C	S		
50	2. 1	338	675	1176		

ᆂᇑᄼ

供給されるようにした。供試体への飛来塩分量 は, 飛来塩分発生源から供試体までの距離と風 速を変化させることにより調節した。予備実験 の結果,安定して実験が行える条件の組み合わ せとして, 飛来塩分発生源から供試体までの距 離を85cm, 風速を2.44m/secと設定した。

## 2.2 飛来塩分捕集方法

供試体設置位置における飛来塩分をガーゼ法 を用いて捕集した。ガーゼは医療ガーゼを使用 した。障害物の影響を受けずに大気中を通過す る塩分の輸送量(通過塩分量)は、風がガーゼ を透過する条件で採取した。空気中に置かれた



図-3 飛来塩分発生装置全景



物体に衝突し、付着する塩分(到達塩分量)は、 ガーゼ裏面にプラスチック板を当て,風がガー ゼを不透過とした条件で捕集した。捕集時間は4 時間とした。捕集した塩分の測定は、ガーゼを イオン交換水に浸し、プラスチックに付着した 塩分をイオン交換水で洗い流し, その水溶液中 のCI濃度を塩化物イオンメーターを用いて測定 することにより行った。その後,塩分付着時間 及び受風面積をもとに,単位時間,単位面積あ たりの付着塩分量(mg/dm/day)を算出した。

### 2.3 供試体

供試体の示方配合を表-1に示す。供試体は普

通ポルトランドセメントを用いたモルタルで作 製した。供試体の形状を図-4に示す。飛来塩分 発生装置の断面寸法を考慮して、φ5×10cmの 円柱供試体を用いた。供試体は材齢28日まで水 中養生を行った後,試験開始まで7日間,気温 20℃,湿度60%で気中養生した。気中養生中に 塩分付着面以外をエポキシ樹脂でシールした。

#### 2.4 塩分分析

塩分付着面からの深さ方向の塩化物イオン濃 度分布を測定するために,塩分付着面から5,20, 30,40,50,60mmの深さの位置に側面からφ5mm のドリルで8箇所穴をあけ,粉末状の試料を採 取した。試料中の塩化物イオン濃度は,JCI-SC4 「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方 法」に準じて測定した。

# 3. 通過塩分量と到達塩分量の関係の検討

図-5 は飛来塩分発生装置の風洞を塩化ビニ ール製とした場合の,各供試体設置位置におい て捕集した通過塩分量と到達塩分量,図-6 は飛 来塩分発生装置の風洞をアルミ製とした場合の 通過塩分量と到達塩分量である。いずれの場合 も,供試体設置位置が上段の4~6 は,設置位置 が下段の1~3 に比べて通過塩分量が半分程度と なっている。設置位置下段には,発生させた海 水粒子の中でも比較的粒径の大きい粒子が付着 しており,設置位置上段には比較的粒径の小さ い粒子が付着していることが目視により確認で きた。粒径が大きい粒子は重力の支配を受けや すく,はやく沈降したことを表していると考え られる。

通過塩分量と到達塩分量を比較すると,風洞 が塩化ビニール製の場合,到達塩分量が通過塩 分量の約 10%,風洞がアルミ製の場合,到達塩 分量が通過塩分量の約 12%となっている。著者 らが冬季の日本海側でのガーゼ法による現地観 測を行った結果,到達塩分量は通過塩分量の 3% ~10%程度であったことから<sup>2)3)</sup>,空気中を飛来 する塩分が物体にぶつかって付着する状況は実 際の塩害環境と同等であるといえる。



図-7 供試体中の塩化物イオン濃度分布の 経時変化(設置位置下段)

# 4. 到達塩分量と表面塩分濃度の関係の検討

#### 4.1 実験ケース

モルタル供試体表面の到達塩分量と表面塩分 濃度の関係に関する基礎的検討として,暴露時 間をパラメーターとした再現実験を2回行った。 飛来塩分発生装置の下段に設置した供試体は暴 露時間 3, 6, 9, 12, 15, 18 日において内部塩 化物イオン濃度分布の測定を行い,設置位置上 段の供試体は暴露時間 12, 15, 18, 21, 24, 27 日において測定した。

本実験では,飛来塩分発生装置の風洞は塩化 ビニール製のものを用いた。

## 4.2 暴露時間と浸透塩分量の関係

図-7,8はそれぞれ供試体設置位置下段,上 段における供試体中の塩化物イオン濃度分布で ある。いずれの場合も,塩分付着面から深さ5mm の点において,暴露時間の増加とともに塩化物 イオン濃度が上昇している。深い点ほど,暴露 時間の経過による濃度変化は小さい。これらの 傾向より,供試体表面への塩分の総到達量の増 加にともない,供試体内部への浸透量が増加す ることが確認できた。

# 4.3 暴露時間と表面塩分濃度の関係

供試体中の塩化物イオン濃度分布の実測値と, 拡散方程式の解である式(1)による濃度分布の誤 差が最小となる表面塩分濃度C<sub>0</sub>を,最小二乗法 により求めた。その際,表面塩分濃度を同定す る条件として,拡散係数は同じ配合のモルタル では時間によらず一定値とすることにした。モ ルタルの拡散係数の値は,実測することが困難 であったため,式(2)の予測式<sup>1)</sup>を用いて水セメン ト比からD=5.2×10<sup>-8</sup>(cm<sup>2</sup>/sec)と推定した。

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

$$\log D = [4.5(W/C)^{2} + 0.14(W/C) -8.47] + \log(3.15 \times 10^{7})$$
(2)

本研究において実験的に求めた表面塩分濃度は上記の仮定に基づくものである。

表-2 に各暴露時間における表面塩分濃度を 示す。図-9 に供試体設置位置下段,到達塩分量 約 9mdd である場合の表面塩分濃度と暴露時間 の関係を,図-10 に供試体設置位置上段,到達



図-8 供試体中の塩化物イオン濃度分布の 経時変化(設置位置上段)

表-2 暴露時間と表面塩分濃度

暴露時間	表面塩分濃	暴露時間	表面濃塩分
設置:下段	度(kg/m³)	設置:上段	度(kg/m³)
3日	160. 11	12 日	3.28
6日	17.61	15日	3.64
9日	9. 20	18日	3.95
12 日	6. 02	21日	4. 27
15日	6. 11	24 日	4. 28
18日	6. 28	27日	4. 32



(到達塩分量 9mdd)

塩分量約 4mdd である場合の表面塩分濃度と暴 露時間の関係を示す。

図-9の到達塩分量が 9mdd のシリーズでは, 暴露時間が 3,6 日では表面塩分濃度が著しく大 きい値が得られている。これは,ここで採用し た拡散係数を一定と仮定する表面塩分濃度の求 め方に起因するものであると考えられる。暴露 期間 9 日以降においては,得られた表面塩分濃 度はほぼ一定値となっている。図-10 の到達塩 分量が 4mdd のシリーズでは,暴露時間が 12~ 27 日の全てのケースにおいて,概ね一定の表面 塩分濃度が得られている。

以降の考察では,この収束値を実験的に得ら れた表面塩分濃度とする。

# 5. 降雨による洗い流しの影響の検討

# 5.1 洗い流し再現実験

供試体に真水を噴霧することにより降雨によ る洗い流しを再現した。新潟県の11月~2月の 月降水量(1971~2000年の平均値)が約300mm であったことから、1日平均降水量を10mmと仮 定し、洗い流し強さを総降水量10mm一定とし て、洗い流し時間を1日毎に2時間とした。図 -11は洗い流し再現実験の模式図である。洗い 流しは、飛来塩分発生装置より供試体を取り出 して行ったため、洗い流し中は塩分が供給され ていない。暴露時間は12日間とした。

本実験では、供試体を上段(到達塩分量約 9mdd)と下段(到達塩分量約 19mdd)に各々2 個設置した。飛来塩分発生装置の風洞はアルミ 製のものを用いることとした。

# 5.2 洗い流しが浸透塩分量に及ぼす影響

図-12 は、洗い流しがない場合とある場合に おける供試体中の塩化物イオン濃度分布である。 洗い流しがない場合に比べて、洗い流しがある 場合では全体的に濃度が低くなっている。これ らの結果より、供試体表面に到達した塩分が洗 い流されることにより、供試体内部への浸透す る塩分量も低下したと考えられる。

## 5.3洗い流しが表面塩分濃度に及ぼす影響

4.2 と同じ方法で表面塩分濃度を算出した。

図-13 は、到達塩分量と表面塩分濃度の関係 である。到達塩分量が 19mddのシリーズにおい ては、洗い流しがある場合、洗い流しがない場 合よりも表面塩分濃度が 2.26kg/m<sup>3</sup> (20%)低下 した。到達塩分量が 9mddのシリーズにおいては、 洗い流しがある場合、洗い流しがない場合より





# 図-12 供試体中の塩化物イオン濃度分布の 経時変化

も表面塩分濃度が2.00kg/m<sup>3</sup>(33%)低下した。 以上の結果より、降雨による洗い流しによっ て、表面塩分濃度が低下する傾向にあることが 明らかとなった。

#### 6. 到達塩分量と表面塩分濃度の関係

洗い流しのないシリーズの,暴露時間12日間 における,到達塩分量と表面塩分量の関係を図 -14に示す。到達塩分の増加とともに表面塩分 濃度も増加しており,両者には直線関係が認め られる。

一方,実環境下での暴露試験より,到達塩分量と表面塩分濃度には相関関係にあることが確認されており,両者の関係式として式(3)が提案されている<sup>4)5)</sup>。

$$C_0 = 1.5 C_{air}^{0.4} \tag{3}$$

ここに*C<sub>air</sub>*は到達塩分量 (mdd) である。ただし, ガーゼ法ではなく,土研式飛来塩分捕集箱によ り測定したものである。

到達塩分量の実験値を式(3)に代入して得られ た表面塩分濃度と,表面塩分濃度の実験値を比 較すると,全体的に実験値が式(3)による推定値 を上回る傾向となった。この原因のひとつは, 実環境下ででは降雨による洗い流しの影響を受 けているためであることが,本研究で行った実 験の結果から推察される。

# 7. まとめ

本研究では,室内における模型実験装置を用 いて,コンクリートへの塩分の飛来現象に関す る再現実験を行った結果,以下の知見を得た。

- (1) 単位時間当たりの飛来塩分量が一定の環境 下では、暴露時間の経過とともにコンクリー トの表面塩分濃度は一定の値に収束する。
- (2) 降雨によるコンクリート表面の洗い流しにより、コンクリート表面に付着した塩分が流され、表面塩分濃度、浸透塩分量ともに減少する。
- (3) コンクリート表面への単位時間当たりの到 達塩分量と表面塩分量は相関関係にある。

今後,本再現実験において様々な実験条件を 設け,表面塩分濃度に及ぼす多くの因子の影響 を検討していく必要があると考えている。





図-14 到達塩分量と表面塩分濃度の関係

#### 参考文献

- 1) 土木学会:平成11年版コンクリート標準示 方書[施工編]耐久性照査型,1999
- 山田文則,細山田得三:海岸構造物への飛来 塩分の付着過程に関する研究,海岸工学論 文集, Vol.51, pp.1126-1130, 2004
- 山田文則,細山田得三,下村 匠:構造物の 各部位に付着する飛来塩分量に関する現地 観測,土木学会第61回年次学術講演会講演 概要集,5-284, pp.565-566,2006
- 土木研究所:飛来塩分量全国調査(4),土木 研究所資料第 3175 号,1993
- 5) 土木研究所、プレストレスト・コンクリート 建設業協会: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(3)、共同研究 報告書 270 号、2001