

報 告

[1102] 気象因子とコンクリート中に蓄積された塩分量との関連について

正会員 角 徹三 (豊橋技術科学大学建設工学系)

正会員 ○ 安達 極 (大成建設)

1. はじめに

塩害環境下におけるRC部材の屋外暴露試験の一環として、昭和62年5月より暴露試験地に飛来する塩分量の採取・測定を行っている。そこで、この飛来塩分が気象因子とどの様に関連し、塩分量として採取されるのかについて主として考察した。また、採取塩分量のどの程度が、コンクリート中に蓄積されるのかについても検討した。

2. 飛来塩分の採取方法と測定結果

2-1 暴露試験地 (塩分量採取地)

図-1に示すように、三河湾を臨み、海岸線から32m離れてRCプリズム試験体 (以下、暴露試験体)、更に3mを隔てて飛来塩分量採集箱を設置している。

2-2 飛来塩分量の採取・測定

ここでは、飛来塩分量と採取塩分量をつぎのように区別している。



図-1 暴露試験地 (塩分量採取地)

○飛来塩分量とは、海の方面などから飛来する真の塩分量

○採取塩分量とは、飛来塩分量のうち、採取器具によって実際に採取される塩分量のことである。

a) 採取方法 飛来塩分量の採取には、土研式タンク法とガーゼ法の2方法にて行った。ただし、本採取におけるガーゼ法は、「JIS Z 2381 屋外暴露試験方法通則」の規定を参考にし、本暴露試験の状況に沿ったかたちに改めたものである¹⁾。JISでは、ガーゼを『直接雨に当たらない通風の良い所に・・・設置する』としているが、本採取では、採取器具の上側に5cmの底を設けたのみで雨 (以下、降水) が直接当たる状態で設置した。これは、RC暴露試験体とほぼ同じ状態での採取をねらったためである。(しかし、コンクリートとガーゼでは、採取される塩分量の降水による影響が同じであるとは限らないことから、昭和63年5月より屋根付のものも新設設置している。) また、採取面積について、JISでは「2枚重ねのガーゼの両面をとり2dm²」としている。しかし、本採取では飛来塩分量採取箱 (以下、採取箱) の4つの壁面に採取器具を取り付けているために、塩分量の採取が片方の面からのみであること、および、タンク法との比較等を考慮して、採取面積は1dm²とした。さらに、ガーゼ法の場合、塩害地域での測定においては、ガーゼ自体の塩分付着容量が小さいために飛来塩分量の多い場合には、その実態を過小評価するおそれがあるといわれている²⁾。このことから、原則として、ガーゼ法はガーゼを1週間ごとに交換し、タンク法では1ヶ月間ごとの交換として、毎月月末までに採取した塩分量をその月の塩分量とした。

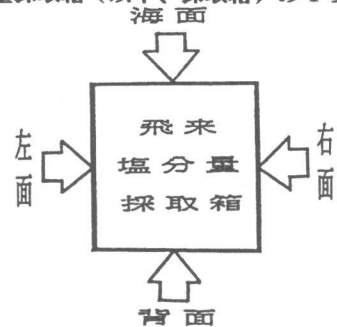


図-2 飛来塩分量採取位置

b) 採取面 採取口の高さは地上1mとし、図-2に示すように、RC暴露試験体の面の向きと同じになるように「海面」、「右面」、「左面」、「背面」の4面にて、塩分量の採取を行った。

c) 採取塩分の定量分析 回収されたタンク内やガーゼ中の塩分量は、塩化物イオン選択性電極を用いたイオン電極法により、定量分析された。塩分量の表示は、考察する状況に合わせて1 dm² の採取面積における、各期間に採取した塩分量（以下、期間採取塩分量）(mg, Cl m d)、もしくは、これを1日当りに換算した塩分量（以下、日平均採取塩分量）(mg, Cl m d d)として表した。

2-3 採取塩分量測定結果

a) ガーゼ法とタンク法の比較 「海面」の採取面におけるガーゼ法とタンク法の採取塩分量の経月推移を、図-3(a)に示す。季節における採取塩分量の推移については、いずれの方法とも6月~9月の夏季に少なく、冬季を中心に10月~5月が多い。また、その採取塩分量についてみると、両方法による差異はほとんどみられない。しかし、図-3(b)の「背面」での採取塩分量が示すように、「海面以外の面」では、タンク法による実測値はガーゼ法のそれよりも少ない傾向を示した。この結果から、ガーゼ法は、採取期間を1週間程度と短く設定するのであれば、タンク法に比べてより正確な飛来塩分量の把握ができることが示された。

b) 各採取面での実測値の比較 ガーゼ法による各採取面での実測結果を図-4に示す。「海面」が最も多く、次に「右面」と「左面」がほぼ同量で、「背面」が最も少ない。これらの採取塩分量の差異に、気象因子が関わっていると考えられる。

3. 採取塩分量と気象因子との関連性

飛来塩分量や採取塩分量に影響をおよぼすと考えられる気象因子の中から、風向、風速および降水量を取り上げ、採取塩分量との関連性を、タンク法、ガーゼ法それぞれについて検討した。検討期間は、昭和62年5月より63年4月までの一年間である。気象データは、図-5に示すように、暴露試験地から南東へ1700mに位置する童浦測定局（愛知県庁設置）の風向・風速と、同じく南へ4600mに位置する田原警察署測定局のアメダス降水量を用いた。

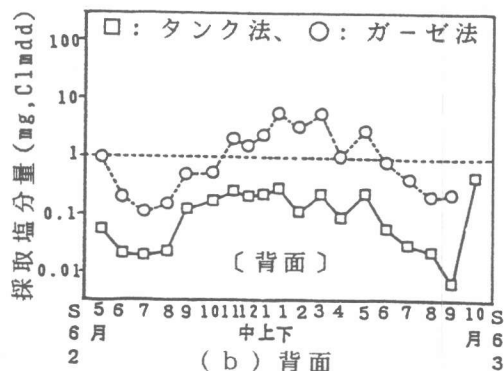
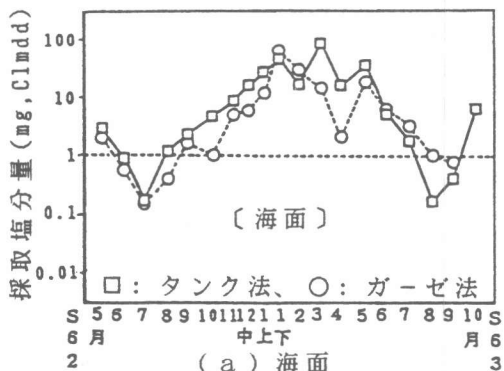


図-3 採取塩分量の経月推移

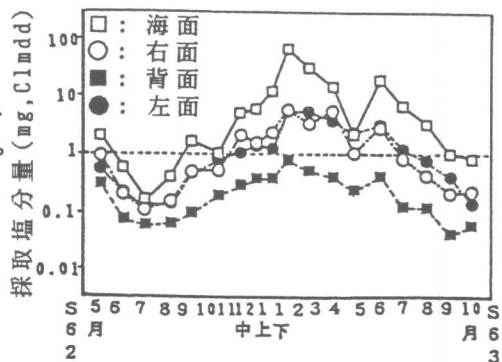


図-4 ガーゼ法による各面での採取塩分量

3-1 採取塩分量と風向・風速

a) 採取面における平均風速 童浦測定局の風速・風向データは、地上20mにおける値である。これと採取塩分量の関連性を求めるには、採取口の高さである地上1mの値（以下、1m風速値）に変換する必要がある。この変換には、次に示す『べき法則（指数分布則）』を用いた³⁾。

$$V_z = V_R (Z / Z_R)^{1/n}$$

(V_z, V_R : 地上からの高さ Z, Z_R での風速(m/s)、

n : 分布の形状を決める定数)

n は、海のように平坦な場所における $n=6$ とした。次に、各採取面には、直接的にどれほどの風量が当たっているのかを考えて、べき法則から求めた1m風速値と風向データから、風が各採取面に対して垂直に当たる風速成分（以下、垂直成分風速）を求めた。図-6は、塩分量を採取した各採取面における垂直成分風速の平均値の推移である。「海面」や「右面」では、夏季に比べて冬季の風速値が大きく、特に「海面」ではそれが顕著である。逆に「左面」や「背面」では冬季の風速値は小さい。

b) 各面の垂直成分風速と採取塩分量の関係

図-7に示すように、各面の垂直成分風速と採取塩分量の関係をみると、「海面」では、風速の増加にともなって塩分量が急速に増加する関係にあることがわかる。「右面」や「左面」においては、「海面」とは逆に、風速の増加に伴って塩分量が減少する反比例の関係にある。「背面」においては明確な相関はない。一方、既往の報告では、採取塩分量は風速の自乗に比例するといわれ

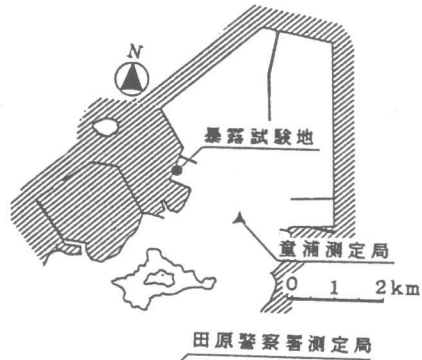


図-5 暴露試験地と気象観測地との位置関係

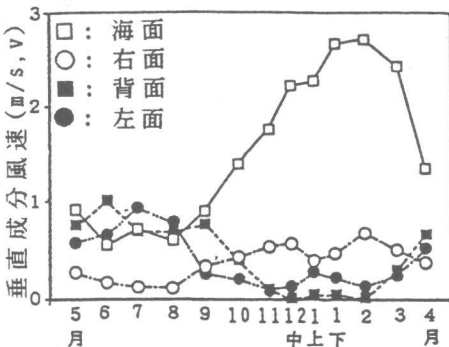
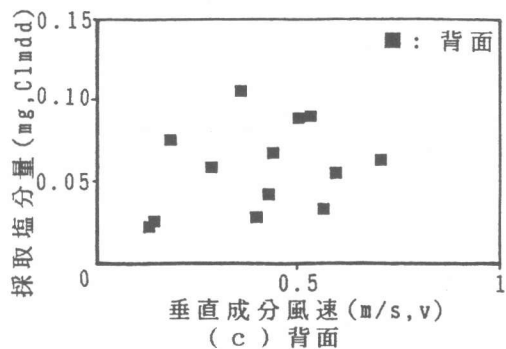
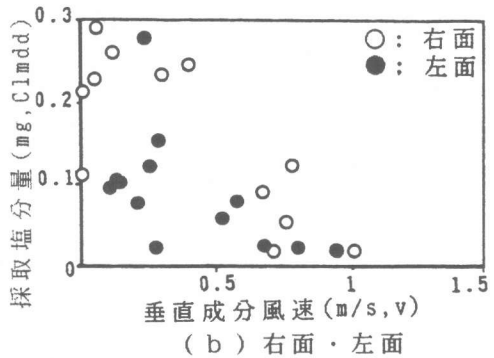
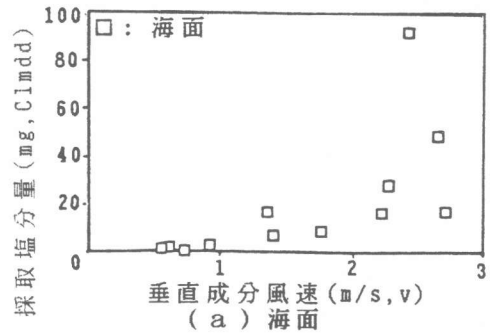


図-6 垂直成分風速の経月推移

図-7 風速と採取塩分量の関係

ている⁴⁾。以上のことから、「海面の垂直成分風速」=海からの風(海風などの局地風+一般風)が塩分の飛来に関与していることはほぼ間違いない。さらに、建物周囲の風の流れに関する既往の研究からもわかるように、風が直接当たらない面においても渦として間接的に作用することは十分あり得る。したがって、海からの風が直接的にほとんど当たらない「右面」や「左面」、また全く当たらない「背面」においても海からの風によって飛来する塩分量を採取していると考えられる。

3-2 採取塩分量と降水量

a) 採取面における降水量 田原警察署測定局の降水量データとは、水平面での降水量(以下、水平面降水量)である。これを各採取面に直接当たる降水量(つまり、垂直面降水量)に変換して、採取塩分量との関連性を検討した。この変換には、次に示す『レイシーの式』を用いた⁵⁾。

$$r = 0.222 V_w P_h^{-0.12}$$

$$r = P_v / P_h \text{より } P_v = 0.222 V_w P_h^{0.38}$$

(P_v : 垂直面降水量(mm/h, pv)、 P_h : 水平面降水量(mm/h, pv)、 V_w : 垂直成分風速(m/s, v))

図-8は、塩分量を採取した各採取面における垂直面降水量の推移である。

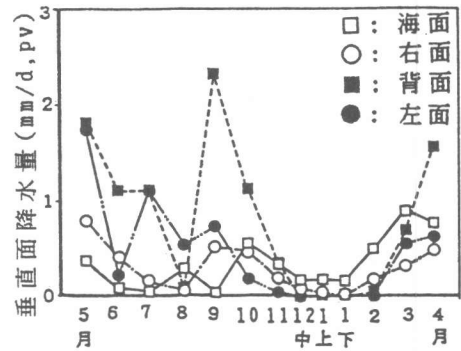


図-8 垂直面降水量の経月推移

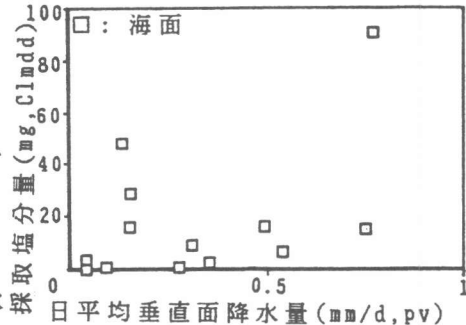


図-9 降水量と採取塩分量の関係

b) 各面の垂直面降水量と採取塩分量の関係 各面の垂直面降水量と採取塩分量の関係においては、図-9の「海面」のように明確な相関はみられなかった。

3-3 採取塩分量の推定式

垂直成分風速と垂直面降水量のデータから、本暴露試験地における採取塩分量を求める推定式を考える。前述したように、風が直接当たらない面においても渦として間接的に当たっているため、ある面の採取塩分量は、すべての面の垂直成分風速が関係するような推定式であることが適切である。なお、各面の垂直面降水量については、その面に直接当たる降水量のみを考慮すればよいと考えた。採取塩分量と気象因子との関係について重回帰分析等を用いて検討を重ねた結果、タンク法については、最終的に次式を導いた。

$$\cdot \log Y_{Di} = \sum C_{wj} \cdot X_j + C_{ri} \cdot \log Z_{Di} \quad \dots (1)$$

(Y_{Di} : i面の日平均採取塩分量(mg, Clmdd)、 X_j : j面の平均垂直成分風速(m/s, v)、 Z_{Di} : i面の日平均垂直面降水量(mm, /d, pv)、 C_{wj} および C_{ri} : 各係数、iおよびj = 1~4 (1: 海面、2: 右面、3: 背面、4: 左面))

(1)式は、採取塩分量を対数値とした1次式であり、「すべての面の垂直成分風速と、対象とする面の垂直面降水量」によって採取塩分量を推定している。

次にガーゼ法による推定式を導く。ガーゼによる採取の場合、降水があると、それまでに採取した塩分量が洗い流されてしまうことが十分考えられる。このことから、富坂らの研究報告を参

考に、垂直成分風速を「無降水時」と「降水時」とに分けて考えた⁷⁾。なお、ガーゼ法については、各変数を積算値として、推定式を与えた。重回帰分析の結果、降水の項はすべての面において除かれ、(2)式を最終的に導いた。

$$\cdot \log Y_i = \sum C_{WjN} \cdot X_{SjN} + \sum C_{WjR} \cdot X_{SjR} \dots (2)$$

(Y_i : i 面の期間採取塩分量(mg, Clmd)、 X_{SjN} : j 面の無降水時における積算垂直成分風速(m/s, v)、 X_{SjR} : j 面の降水時における積算垂直成分風速(m/s, v)、 C_{WjN} 、 C_{WjR} : 各係数、 i および $j = 1 \sim 4$ (1:海面、2:右面、3:背面、4:左面))

(2)式は、「すべての面の無降水時における垂直成分風速と、降水時における垂直成分風速」によって採取塩分量を推定する。表-

表-1 推定式(2)の各係数の
有意性判定と式の評価

	C_{W1N}	C_{W2N}	C_{W3N}	C_{W4N}	自由度調整済寄与率 (R^2) 式全体
	C_{W1R}	C_{W2R}	C_{W3R}	C_{W4R}	
海面	+ 0.003 (86.00>7.28) ○			- 0.005 (18.78>7.28) ○	.719 (30.45)
		- 0.041 (8.41>7.28) ○	+ 0.012 (4.66>4.06) △		+ 0.524 ○
右面	+ 0.004 (38.29>7.28) ○	- 0.005 (2.86<4.06) ×		- 0.004 (19.67>7.28) ○	.717 (30.17)
			+ 0.013 (10.44>7.28) ○		+ 0.233 ○
背面	+ 0.002 (31.01>7.07) ○		- 0.002 (7.66>7.07) ○		.609 (24.87)
			+ 0.007 (3.93<4.06) ×		- 0.270 ○
左面	+ 0.004 (30.88>7.28) ○	- 0.006 (3.27<4.06) ×		- 0.004 (13.42>7.28) ○	.637 (21.19)
			+ 0.013 (7.94>7.28) ○		+ 0.210 ○

○: 1%有意, △: 5%有意, ×: 有意性なし

1にガーゼ法における各係数と判定結果を示す。各係数の符号から、「海面と背面の垂直成分風速」は採取塩分量の増加に関与し、「両側面の垂直成分風速」は減少に関与している。よってこのことから、海風や陸風および冬季の季節風などの海上を経由する風は塩分の飛来に関係し、それ以外の一般風は採取塩分量の減少に関係していると判断される。さらに、タンク法においては、「海面の垂直面降水量」の項もプラスとして存在し、海からの風が吹いているときにおける降水量も関係している。図-10にガーゼ法における推定式(2)による採取塩分量の計算値と、実測値との比較を示す。タンク法では、試料数52個で、標準偏差は対数値として0.103。ガーゼ法では、試料数192個で、標準偏差は0.263となった。

4. 採取塩分量と蓄積塩分量との関係
採取塩分量のどの程度がコンクリート中に蓄積されるのかについて、本暴露試験とほぼ同様な条件において暴露試験がおこなわれた、既往の研究報告(いずれもタンク法)との比較を含めて検討した⁸⁾。本試験の検討には、タンク法における採取塩分量と、暴露19ヶ月目のコンクリート試験体の蓄積塩分量を用いた。比較する各飛来塩分量調査地点における採取塩分量を、

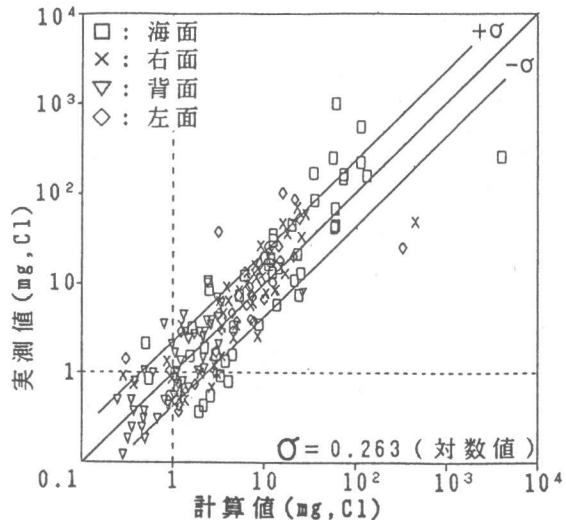


図-10 推定式(2)による計算値と実測値の比較

図-11に示す。また、各地点の蓄積塩分量の分布を、コンクリート重量に対する比率として図-12に示す。本地点以外の蓄積塩分量は暴露12ヶ月目においてであり、直接的な比較はできないが、しかし、本地点は他地点と比べて採取塩分量ならびに蓄積塩分量ともかなり多い量となっている。次に、この蓄積塩分量の分布から総侵入塩分量を求め、総採取塩分量との比(塩分侵入率と定義する)を示したものが表-2である。本試験体の塩分侵入率は54%と調査3地点中最も高い値を示した。これは、本試験体が、強風時には波しぶきを直接受ける環境にあることにもよるが、本暴露試験地が非常に厳しい塩害環境におかれていることが示された。

5. まとめ

以上の実測および推定結果をまとめると、以下の通りである。

1. 飛来塩分量の採取において、ガーゼ法は、採取期間が1週間程度と短いならば、タンク法と同等以上の正確な塩分量の把握ができる。
2. 採取塩分量は、気象因子と関連性があり、タンク法については(1)式、ガーゼ法については(2)式により採取塩分量の推定が可能である。
3. 風速は、その風向にかかわらず採取塩分量に影響をおよぼす。その中でも海上を經由する風は、各面における採取塩分量の増加に関係する。一方、海上を經由しない一般風は、減少に関係する。また、降水量は、タンク法における採取塩分量の増加に寄与することがある。

(参考文献)

- 1) 日本工業標準調査会：屋外暴露試験方法通則JIS Z 2381-1979, 日本規格協会
- 2) 藤原稔、田中良樹：「外部からの塩化物」コンクリート工学, Vol125, No11, Nov. 1987, pp45
- 3) 風工学研究所編：ビル風の知識, pp22, 鹿島出版
- 4) 高橋浩一郎：気象災害論, 1968, pp131, 地人書館
- 5) 岡内功、伊藤學、宮田利雄：耐風構造, 1977, pp101~123, 丸善
- 6) 松尾陽、村上周三、宮田紀元、鎌田元康、坂本雄三：建築と気象, 1986, pp134, 朝倉書店
- 7) 富坂崇、櫻野紀元、高根由充：「海塩粒子捕集量におよぼす気象因子の影響」日本建築学会構造系論文報告集, No384, Feb. 1988, pp34~41
- 8) 耐久性専門委員会：耐久性専門委員会報告D-3, 1988, セメント協会

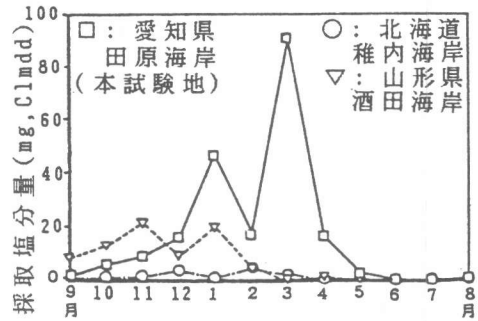


図-11 採取塩分量の経月推移 (他地点の実測値との比較)

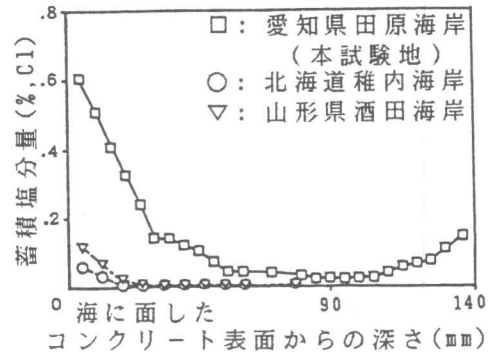


図-12 コンクリート中への塩分の浸透・蓄積量

表-2 各地点における塩分侵入率

調査地点		(本試験地) 田原海岸	北海道 稚内海岸	山形県 酒田海岸
位置	海岸からの距離(m)	32 (35)	100	30
	地上高さ(m)	1	2	1.5
暴露経過年月(月)		19	12	12
総侵入塩分量(換算値)		6997.9	203.9	398.2
総採取塩分量(mg, Cl)		12971.5*	427.5	2341.9
塩分侵入率		54%	48%	17%

*: 既存データからの推定値