

海岸構造物への飛来塩分の付着過程に関する研究

山 田 文 則*・細山田 得 三**

飛来塩分の構造物への付着過程は、鋼構造物およびコンクリート構造物の分野から海岸工学の研究者に対して、その解明が強く要請されている。本研究では、構造物への飛来塩分の付着過程を明らかにするために2種の形状の構造物に対して実地観測および3次元の数値解析を行い、その結果について検討を行った。その結果、飛来塩分は構造物の壁面に一様に付着するのではなく分布を持って付着していること、構造物の形状によってその分布が大きく異なること、構造物への飛来塩分の付着過程は大部分が構造物の壁面近傍の気流の乱れによって生じていることが明らかになった。

1. はじめに

橋梁やコンクリート構造物の塩害は、海面から発生した飛来塩分が風によって輸送され、構造物に付着することによって生じる。付着した塩分は、時間と共に蓄積され構造物の長期的な耐久性を徐々に阻害する。鋼橋およびコンクリート構造物の設計マニュアルでは、各地域において重塩害地域をさだめているが、この地域の選定には実際の飛来塩分の輸送過程および構造物への付着過程を考慮したものではなく、経験的に海岸から数十 km として決めたものが多く、各地の気象・海象条件の考慮が十分とはいえないのが現状である。そのため、橋梁やコンクリート構造物分野から海岸工学の研究者に対して、飛来塩分の動態および構造物への付着過程の解明が強く要請されている。

飛来塩分の発生・輸送過程については、海岸工学の分野で盛んに研究が行われ、仲座ら(1991, 1993)、村上ら(1994, 1995)、細山田ら(2002)および山田・細山田(2003)によって検討が行われている。しかしながら、構造物の形状等を考慮した飛来塩分の付着過程は、いまだあまり研究が行われていないのが現状である。

本研究では、角柱型および円柱型のモデル構造物の飛来塩分の付着過程を明らかにするために飛来塩分が大量に発生・輸送されていると思われる冬季の日本海沿岸で実地観測を行った。さらに、飛来塩分の構造物への付着について3次元の数値解析を行い、その結果について検討を行った。

2. 実地観測

(1) 観測期間および観測場所

観測期間は2004年1～3月であり、観測海岸は図-1の新潟県中越地方に位置する大崎海岸とした。この海岸は、汀線付近に多数の消波ブロックが設置しており、海岸近傍で飛来塩分が大量に観測される。冬季では、季節

風の作用により気象・海象条件が厳しく、海岸近傍の風速が15 m/sを超える日もしばしば見られる海岸である。

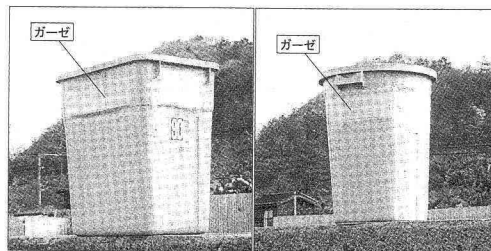
(2) 観測方法

観測方法は、図-2のような大型のプラスチック製の容器に乾燥したのガーゼ(10 cm×10 cm)を貼り付け、そのガーゼに付着する飛来塩分量を測定した。モデル構造物として用いたプラスチック製の容器は、角柱型(57 cm×42 cm×63 cm)、円柱型(直径51 cm×60 cm)の形状の異なる2種を用いた。ガーゼは、図-3(a), (b)のように各方向に設置した。大気中に飛来している塩分の捕捉は乾燥ガーゼ法を用いて行った。現地の風速は簡易式風速計を用いて測定した。1回の観測時間は1～3時間程度であり、できるだけ降雨および降雪のない時間を利用している。

モデル構造物は、図-4の1, 2, 3のような位置に設置



図-1 観測場所(新潟県中越地方)



(a) 角柱型 (b) 円柱型

図-2 観測に用いたモデル構造物

* 学生会員 修(工) 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

** 正会員 工 博 長岡技術科学大学助教授 環境・建設系

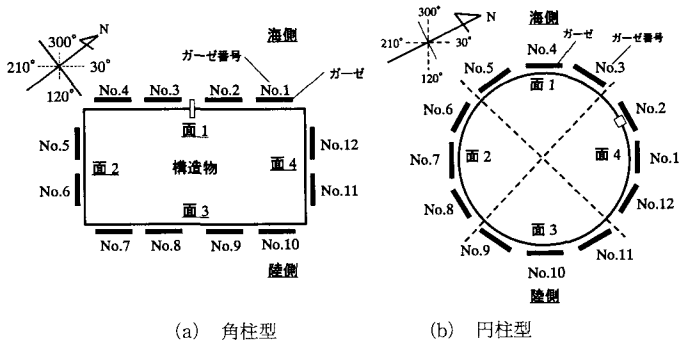


図-3 ガーゼの配置

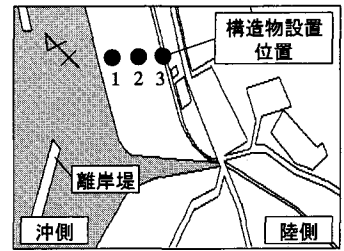


図-4 構造物の配置

表-1 観測結果および気象条件

構造物 形状	観測回数/日付	汀線からの距離 (m)	各面の飛来塩分量の平均値(g/m ² /h)				大気中の濃度 (g/m ² /h)	付着率 面1/大気中濃度	風速 (m/s)	風向 (°)
			面1	面2	面3	面4				
角柱型	第1回 2004/01/28	33	0.2495	—	0.0571	0.0686	2.6407	0.094	11.0	230
	第2回 2004/01/31(1)	33	0.0492	0.0188	0.0246	0.0188	1.0526	0.047	8.0	280
	第3回 2004/01/31(2)	20	0.0349	0.0140	0.0114	0.0298	1.0526	0.033	4.0	280
	第4回 2004/01/31(3)	33	0.0711	0.0381	0.0279	0.0394	1.0526	0.068	9.0	310
	第5回 2004/03/02	10	0.1310	0.0223	0.0223	0.0640	2.2159	0.059	9.0	310
	第6回 2004/03/08(1)	20	0.0437	0.0384	0.0093	0.0113	1.4307	0.031	7.0	230
	第7回 2004/03/08(2)	20	0.0335	0.0256	0.0085	0.0110	1.0410	0.032	6.0	230
	第8回 2004/03/08(3)	20	0.0249	0.0208	0.0080	0.0104	0.6602	0.038	6.0	230
円柱型	第1回 2004/01/28	33	0.1781	0.2313	0.0398	0.0766	2.6407	0.067	11.0	230
	第2回 2004/01/31(1)	33	0.0672	0.0211	0.0234	0.0164	1.0526	0.064	8.0	280
	第3回 2004/01/31(2)	20	0.0648	0.0224	0.0112	0.0192	1.0526	0.062	4.0	280
	第4回 2004/01/31(3)	33	0.0900	0.0493	0.0261	0.0290	1.0526	0.085	8.0	270
	第5回 2004/03/02	10	0.1405	0.0254	0.0305	0.1202	2.2159	0.063	9.0	310
	第6回 2004/03/08(1)	20	0.0339	0.0242	0.0116	0.0077	1.4307	0.024	7.0	230
	第7回 2004/03/08(2)	20	0.0279	0.0296	0.0093	0.0093	1.0410	0.027	6.0	230
	第8回 2004/03/08(3)	20	0.0264	0.0173	0.0061	0.0081	0.6602	0.040	6.0	230

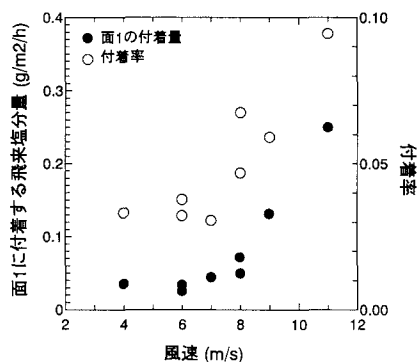
した。1は汀線から10 m程度、2は汀線から20 m程度、3は汀線から33 mの位置で高さ1.5 m程度の堤防の上に構造物を設置した場合である。角型の構造物は、図-3のガーゼ番号1～4の面が方位300°に、丸型はガーゼ番号2が方位0°になるように設置した。この方位300°は、冬季の新潟県大崎海岸の風向きの最も多かった角度である。ただし、汀線と垂直な沖側方向は270～280°程度である。

(3) 観測結果および考察

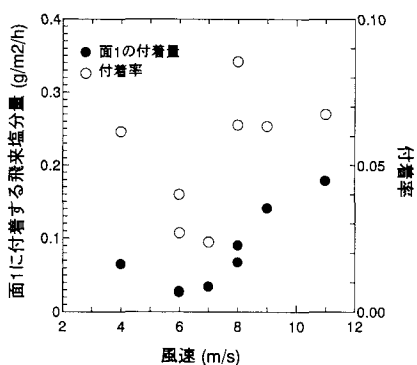
表-1は、各観測日における観測結果を示したものである。この結果、飛来塩分は面1に最も多く付着する傾向が見られる。面1は海側へ面しており、飛来塩分を含んだ風が直接壁面へ接触するためと考えられる。表の付着率は、構造物がない場合にその位置を通過する飛来塩分量に対する面1に付着した塩分量の割合を示したものである。この表に示すとおり、構造物への飛来塩分の付着率は2%～10%程度あり、大気中に輸送される量に比べ非常に少量である。これより、飛来塩分は移流による慣性力が要因となる付着ではなく、構造物の壁面近傍の大気の乱れによって付着していると考えられる。そのため、

風速が大きいほど壁面近傍で乱流が卓越し、付着量が増加すると考えられる。図-5(a) (b)は海側の面1に付着した塩分量、付着率と風速の関係を表したものである。この図-5(a)に示すように、角型の構造物では海側の面1に付着する塩分量は風速の増加とともに大きくなっている。付着率もばらつきは見られるものの風速と共に増加する傾向がある。ただし、第6回～第8回の観測は、風速がほかの観測日とは異なり、面1に垂直に風が当たっていないために付着量が減少した可能性がある。一方、円柱型の構造物では、付着率にかなりのばらつきが見られた。このばらつきに関しては風向の違いによるものと考えられる。

図-6は、第2回観測の1月31日における観測結果を表したものである。図-6(a) (b)は、角型構造物、円柱型構造物を設置した結果である。図に示すとおり、風が直接当たる面で飛来塩分が最も大きく付着している。一方、構造物の背後においても飛来塩分の付着が見られる。この結果より、飛来塩分粒子の付着は、先ほども述べたように粒子の慣性より大気の乱流によって付着している可能性が高いといえる。また、丸型では、角柱型に比べ

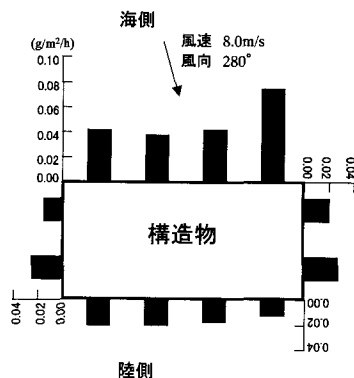


(a) 角柱型

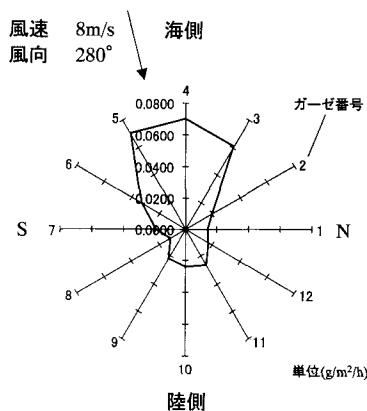


(b) 円柱型

図-5 付着率および面1に付着した飛来塩分量と風速の関係



(a) 角柱型



(b) 円角柱型

図-6 第2回実地観測における結果

て壁面近傍の大気の流れが小さくなり塩分の付着量が減少すると考えられるが、風が直接当たる面では円柱型の方が付着量は大きくなる傾向にあった。

以上の結果より、飛来塩分粒子の構造物壁面への付着は、大部分が構造物の壁面近傍の風の流れによるものと考えられる。そのため、本研究では付着過程が壁面近傍での大気の流れであると仮定して数値解析を行った。

3. 数値解析

(1) 計算方法

a) 計算モデル全体の構成

本計算モデルは、大きく分けて以下の3つの過程によって構成されている。

- ・定常な風の場合の計算
- ・移流拡散方程式による飛来塩分の輸送の計算
- ・塩分の構造物への付着過程の計算

風の場合の計算はオフライン処理で1度だけ計算を行い定常な風の場合を求め、飛来塩分の輸送の計算に用いている。各数値モデルについて以下に説明する。

b) 風の場合の計算

海上の風を非圧縮流体と考え、式(1)、(2)に示すような連続式とNS方程式による数値計算を行った。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_m \frac{\partial u_i}{\partial x_m} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - g_{xi} + \frac{\partial}{\partial x_n} \left(\nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_n} \right) \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 u_i , x , t , P , g_x , ν_t はそれぞれ、 i 方向の流速、3次元座標、時間、圧力、 i 方向重力加速度、 k - ϵ 乱流モデルによって計算した乱流粘性係数である。

c) 飛来塩分輸送の計算

飛来塩分輸送の計算は、式(3)のような移流拡散方程式により計算を行った。

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + (w - w_s) \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_t \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} \right) - Q \quad (3)$$

ここで、 w_s , Q はそれぞれ塩分粒子の沈降速度、塩分吸着量である。

d) 飛来塩分の付着過程

飛来塩分の構造物への付着の計算は、塩分粒子が構造物壁面の近傍の大気の流れによって付着すると仮定して式(4)

に示される, 乱流フラックスによって評価した.

$$\text{付着フラックス} = (\nu_t + \nu) \frac{\partial c}{\partial x_i} \dots \dots \dots (4)$$

ここで, 添字 i は構造物の壁面に垂直な方向を示している. ν_t および ν は, それぞれ乱流粘性係数, 分子粘性係数である. 実際の計算では, 構造物に隣接する格子に式 (4) によって入り込む塩分量がすべて壁面に付着すると仮定して計算を行っている. この計算法では, 飛来塩分の粒子が風によって壁面に衝突する量, すなわち移流フラックスを無視している. 飛来塩分の粒子が十分小さく, 慣性力を無視できる場合, この仮定は正しいがある程度粒子が大きくなるとそれは成立しないことに注意する必要がある.

(2) 計算条件および境界条件

計算領域は縦 2 m × 横 2 m × 高さ 2 m の 3 次元空間である. 設置した構造物は, 実地観測で用いた構造物と同様の寸法である. 計算に用いた格子は等間隔であり, 風は図の右端の面より鉛直方向に一樣に水平風速 10 m/s を与えた. 底面の境界条件は non-slip 条件とし, 大気空間左端の面は透過性の境界とした.

飛来塩分の発生の境界条件は, 式 (5) のような指数分布を計算領域の右端より与えている.

$$c(z) = c_0 \exp(-Az) \dots \dots \dots (5)$$

ここで, c , c_0 , A , z は境界における各高さでの飛来塩分濃度, $z=0$ での飛来塩分濃度, 鉛直方向の飛来塩分の減衰率, 鉛直高さである. 発生する飛来塩分の沈降速度は 0.001 m/s と仮定し計算を行った.

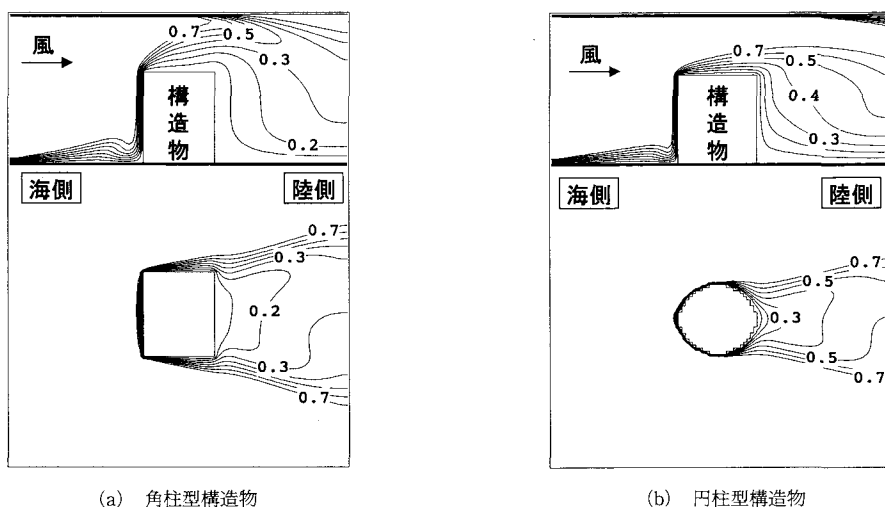
(3) 計算結果および考察

図一7 は, 大気中の飛来塩分の濃度分布を示したものである. 上の図が鉛直断面図を, 下の図が地面から 0.5 m

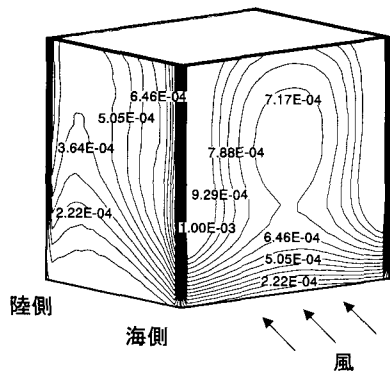
の位置での平面分布を表したものである. 図一7(a) の角柱型構造物では, 飛来塩分濃度は側面および背後面近傍で減少する傾向が見られる. 一方, 図一7(b) の円柱型構造物では, 構造物の背後のみで塩分量が減少している. また, 2 つの構造物の結果を比較した場合では, 角柱型の方が構造物の背後での飛来塩分濃度の減少が大きいことがわかった.

図一8 は, 風による乱流現象により飛来塩分が構造物に付着すると仮定して計算を行った場合の付着塩分量の分布である. 図一8(a), (b) は角柱型の構造物を, 図一8(c), (d) は円柱型構造物を設置した場合である. 図に示すように, 飛来塩分は風が直接当たる壁面に大量に付着する傾向にあった. また, 図一8(a), (b) の各壁面全体を見た場合, 飛来塩分は一樣に付着するのではなく, 分布を持って付着することがわかる. 風が直接あたる面およびその背後の壁面では, 端部分で付着量が大きくなる傾向が見られた. 一方, 図一8(c) に示す円柱型の海側の壁面では, 飛来塩分は構造物の中央部分に最も多く付着している. 図一8(d) に示す背後の面では, 逆に構造物の中央部分で付着量が小さくなる傾向にあった. また, 各構造物の飛来塩分の付着量を比較した場合では, 海側の壁面では両者に大きな差は見られなかった. 陸側の壁面では, 付着量は円柱型の方が大きくなることがわかった. これは, 円柱型の方が構造物の背後で大気中の飛来塩分濃度が高いためであると考えられる.

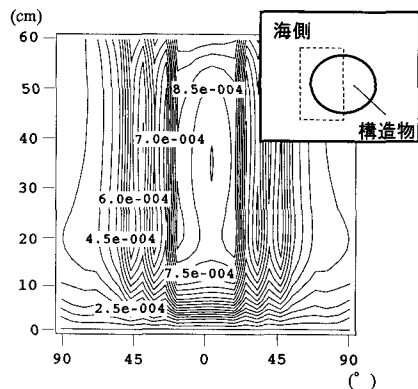
今回の解析は, 飛来塩分の沈降速度が小さい場合の計算結果であり, 実際の海岸では, 飛来塩分の粒子の沈降速度および風速などの条件によって, 飛来塩分の構造物への付着過程が変化するものと考えられる. また, 今回の解析において円柱型構造物に矩形格子を用いたために



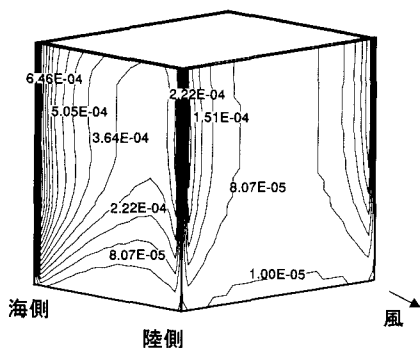
図一7 大気中の飛来塩分濃度の分布 単位 (g/m³/h)



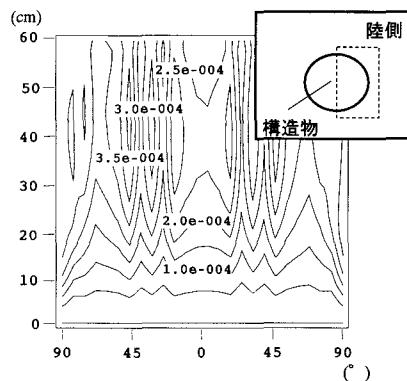
(a) 海側の壁面(角柱)



(b) 海側の壁面(円柱)



(c) 陸側の壁面(角柱)



(d) 陸側の壁面(円柱)

図-8 飛来塩分の付着量 単位 (g/m²/h)

構造物壁面が粗くなり、計算結果に大きな影響を与えていると考えられる。そのため、今後、以上のことを考慮した解析を行う必要がある。

4. 結 論

構造物への飛来塩分の付着過程を明らかにするために、実地観測および3次元数値解析を行った。その結果、飛来塩分は壁面全体に様に付着するのではなく、分布を持って付着すること。その分布は、風が直接当たる壁面では、角柱型が壁面の端の部分で多く、円柱型が壁面中央部で大きくなる傾向があること。ただし、飛沫の発生が構造物の充分近傍である場合、飛沫の粒径が十分大きく慣性が無視できない。その様な場合には、乱流によるフラックスに比べて飛沫の直接的な衝突が付着に高く寄与すると思われる。付着量を計算するスキームとして、条件によってどの様に選択すべきかについては、今後の検討課題としたい。

参 考 文 献

- 仲座栄三・津嘉山正光・照屋雅彦 (1991): 大気環境アメニティの一要素としての飛塩量特性, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 896-900.
- 仲座栄三・津嘉山正光・山路功祐・日野幹雄 (1993): 飛沫(海塩粒子)拡散の数値流体力学解析, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1036-1040.
- 村上和男・山田邦明・西守男雄 (1994): 沿岸域の飛沫に関する現地調査—津田における現地調査結果とアンケート調査結果—, 港湾技研報告, No. 784, 48 p.
- 村上和男・加藤一正・清水勝義・鶴崎賢一・中村聡志・尾崎 靖・福田真人・宮崎啓司・山田邦明・西守男雄 (1995): 飛沫の発生と疑似植栽による飛沫抑制効果に関する現地調査, 港湾技術研究所報告, 第四号, 第34巻, pp. 3-32.
- 細山田得三・山田文則・田安正成 (2002): 波動場数値計算の碎波判定によって発生する飛来塩分とその輸送に関する数値実験, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1256-1260.
- 山田文則・細山田得三 (2003): 海面から発生する飛来塩分に関する実地観測とその飛来塩分発生・輸送数値モデルの開発, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1176-1180.