

高炉セメントを用いたコンクリートの

表面塩化物イオン濃度の設計値の提案

報告書

新潟大学 佐伯竜彦

1. はじめに

土木学会・コンクリート標準示方書では、高炉セメントを用いたコンクリートの塩害抵抗性を照査するための表面塩化物イオン濃度の設計値が示されていない。塩害環境の厳しい新潟県において、塩害に対する耐久性が高いとされる高炉セメントを用いたコンクリート構造物を適切に設計するために、設計用値の提案が求められている。さらに近年、環境負荷の低減のために高炉スラグの大量使用が求められており、高炉スラグ混合率が異なる場合にも対応できる設計用値が必要である。

申請者が考案した「薄板モルタル供試体」を用いて、以前に普通ポルトランドセメントを用いた供試体の暴露試験を行った場所との同一環境において高炉セメントを用いた薄板モルタル供試体の暴露試験を行った。この結果を基に、高炉セメントを用いたコンクリートの表面塩化物イオン濃度を、これまで膨大なデータが蓄積されている普通ポルトランドセメントコンクリートの表面塩化物イオン濃度の関数として求め表面塩化物イオンの設計値を提案した。

2. 実験概要

(1) 暴露試験

i) 薄板モルタル供試体の作製

実験には、モルタル供試体を用いた。使用する高炉スラグ微粉末は、JIS A 6206 に規定される高炉スラグ微粉末 4000 とした。表 1 に各材料の基礎物性および化学組成を示す。

表 1 材料の物理的性質および化学組成

	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	化学組成 (%)					
			SiO ₂	MgO	SO ₃	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
OPC	3.15	3090	20.98	2.11	2.00	64.64	5.28	2.63
BFS	2.91	4190	33.19	5.92	2.03	42.24	13.62	0

モルタルの配合は水結合材比を 55%とし、高炉スラグ微粉末の置換率を 0%，（以降，OPC と略記）40%（NB40），50%（NB50），70%（NB70），および 85%（NB85）とした．初期養生は，水和を十分進行させるため 91 日間の水中養生を行った．なお供試体は，4×3×0.5cm の薄板状のものをを用いた．

ii）暴露試験

2016 年 11 月から 2017 年 4 月に日本全国で行った飛来塩分環境下での薄板モルタル供試体の暴露試験¹⁾における全 115 か所の暴露箇所から特徴的な 25 地点を選定し，高炉スラグ微粉末混和の薄板モルタル供試体による暴露試験を実施した．暴露地点を図 1 に示す．期間は，2021 年 11 月～2022 年 4 月とした．

暴露試験終了後，供試体を回収し，150 μm ふるいを全通するまで粉碎して分析試料とした．供試体に浸透した塩化物イオン量の測定は JCI-SC4 に準拠した電位差滴定および蛍光 X 線分析により行った．

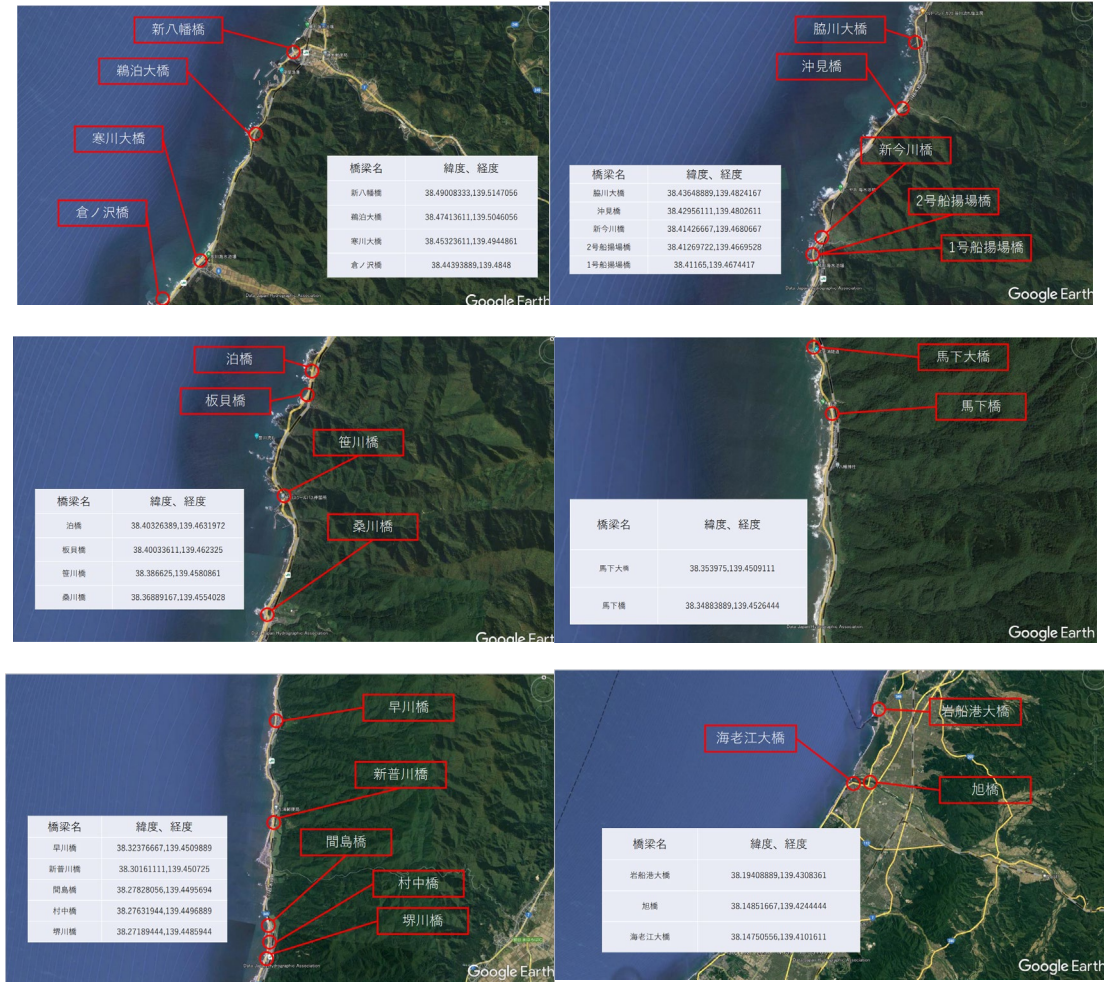
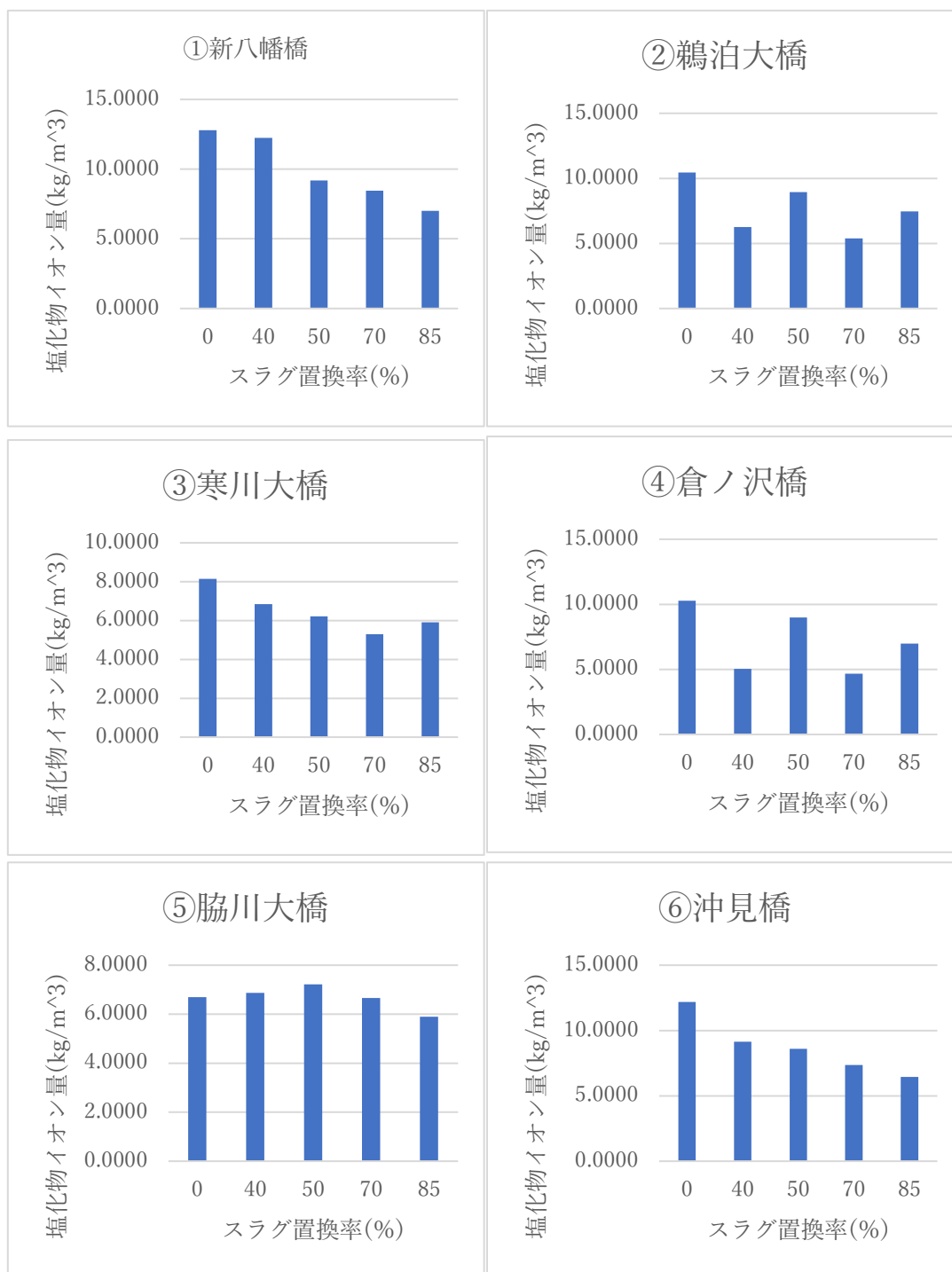


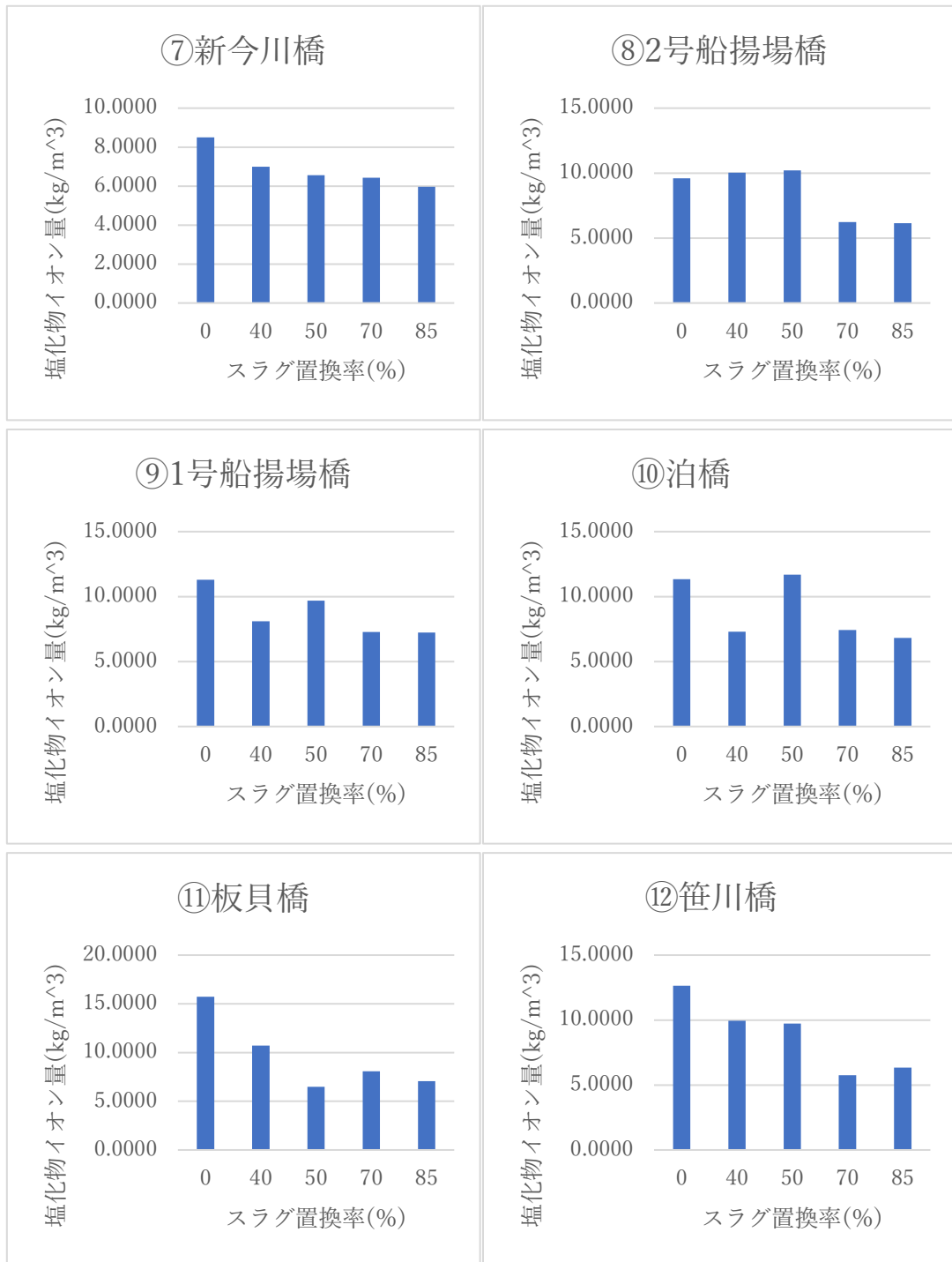
図 1 供試体暴露地点

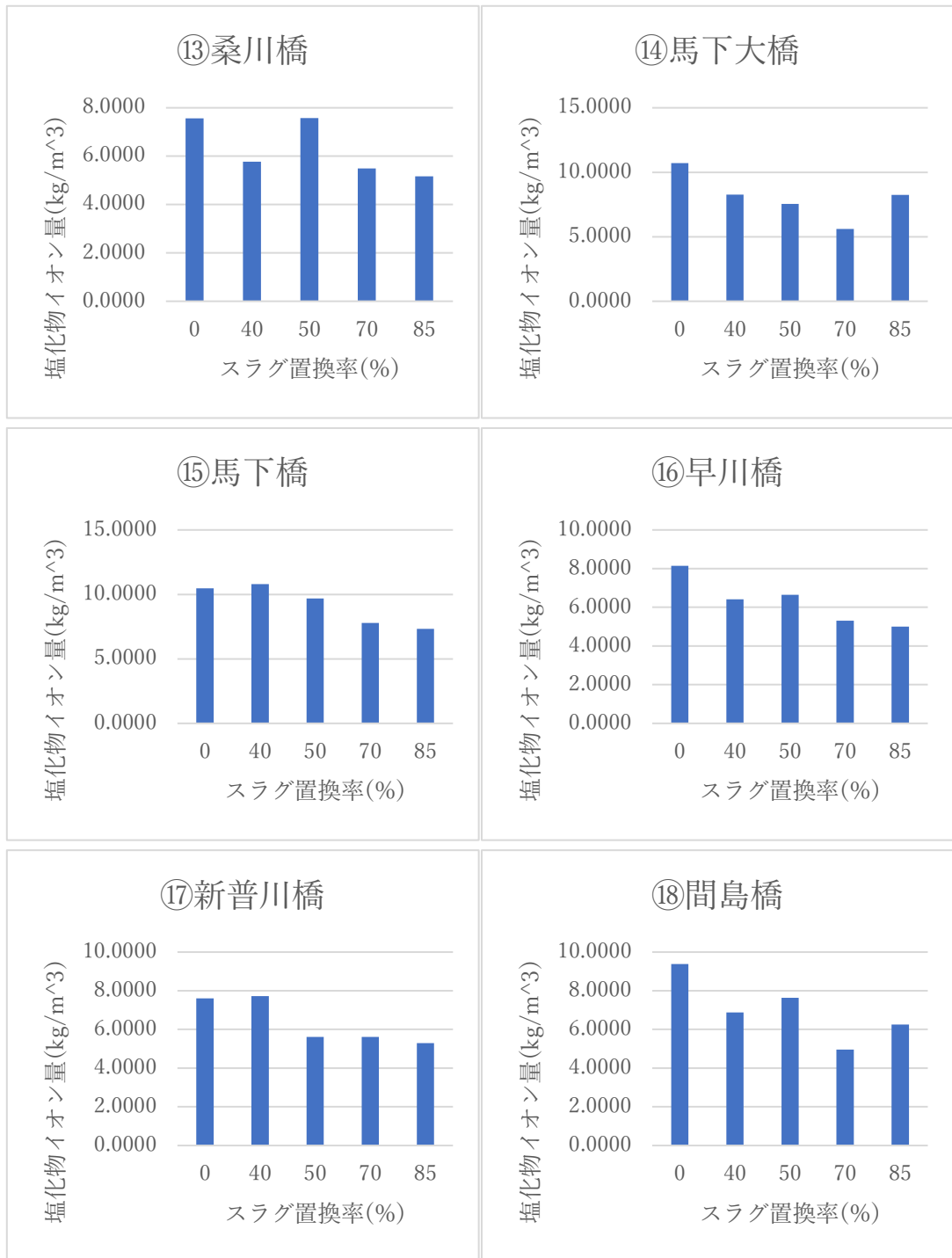
3. 暴露試験結果

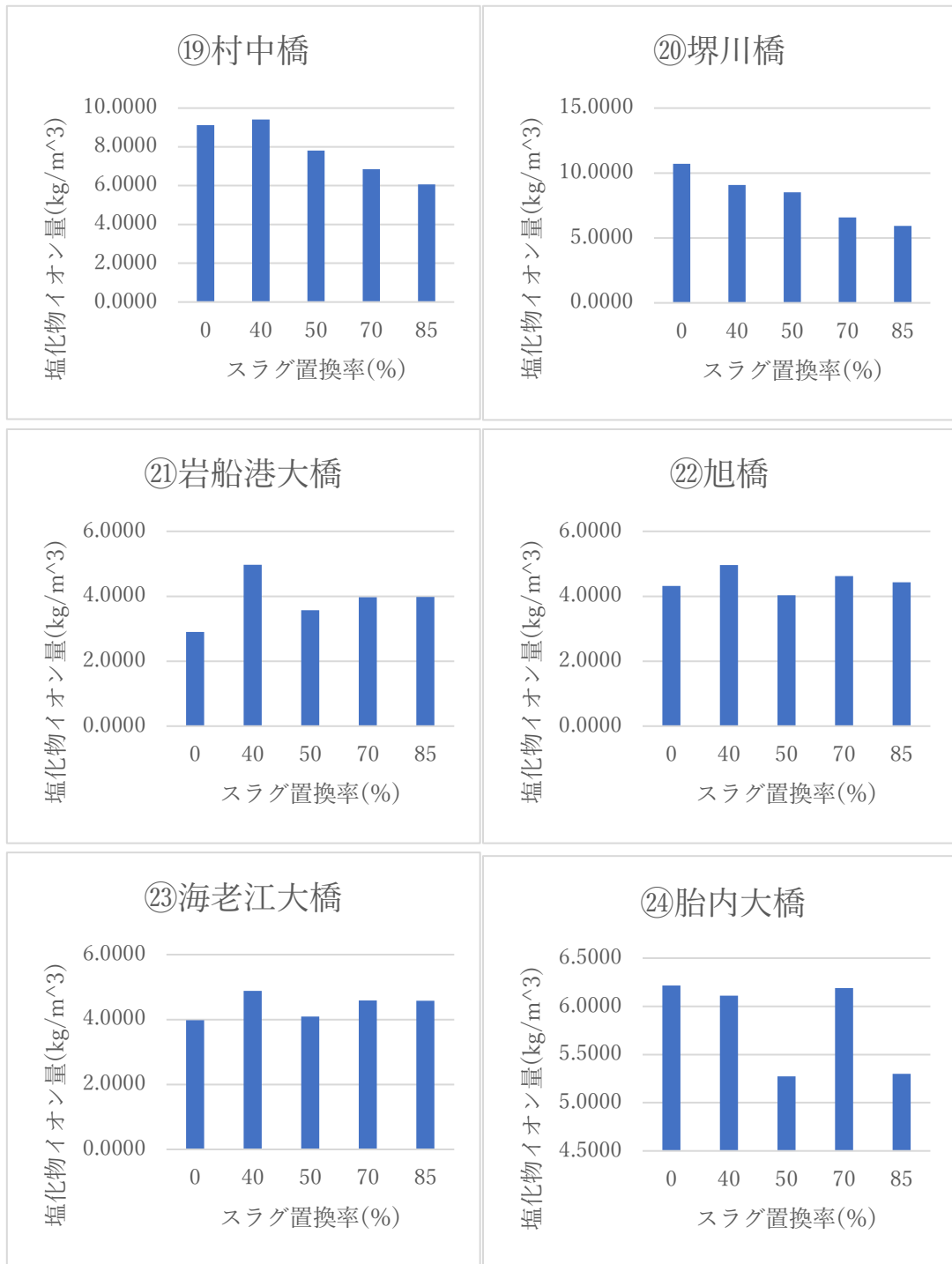
飛来塩分環境下 25 地点に暴露した 5 種類の置換率の供試体(計 125 個)の全塩化物イオン濃度を、図 2 に示す。

図より、地点によって飛来塩分量が異なること、高炉スラグ置換の影響が異なることがわかる。









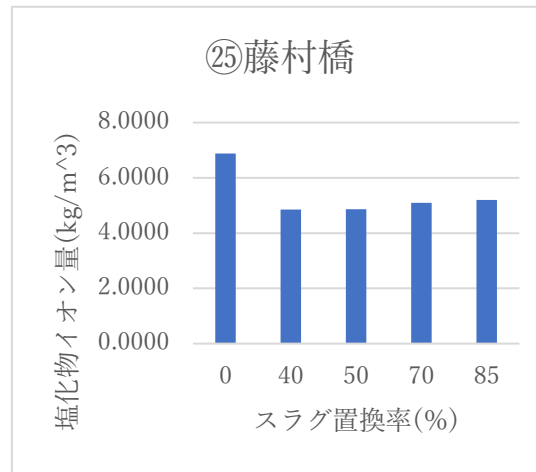


図 2 暴露供試体の全塩化物イオン量

4. 高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの表面塩化物イオン濃度の算定式

一般に、飛来塩分環境にあるコンクリートの表面塩化物イオン濃度は、初期の数年で経時的に増加し、その後 5～10 年程度で一定値となる傾向が見られる。即ち、通常の暴露試験で長期耐久性を照査するための表面塩化物イオン濃度を得るためには、長期間の暴露試験が必要となる。一方で、薄板モルタル供試体は薄いため、短期間で供試体中の塩化物イオン濃度がその環境で到達し得る上限値に達することが確かめられている¹⁾²⁾。

そこで、同一箇所に暴露した普通ポルトランドセメントのみを用いた供試体（OPC）の塩分浸透量を基準として、高炉スラグ微粉末を混和した場合（NB40, NB50, NB70, NB85）の表面塩化物イオン評価式を下記の様にして求めた。

図 2 より、OPC に対する BFS 供試体の塩分浸透量の比は暴露地点によって異なっており、BFS 供試体の方が塩分浸透量が少ない場合と多い場合がある。そこで、地点の飛来塩分量のレベルに応じて、表 2 のように場合分けを行った。飛来塩分量が 3mdd 以下の地点を「飛来塩分量が少ない地点」、3～6mdd の地点を「飛来塩分量が中程度の地点」、6mdd～の地点を「飛来塩分量が多い地点」とし、それぞれについて表面塩化物イオン濃度評価式を求めた。

表 2 各地点の飛来塩分量と供試体中の全塩化物イオン量

橋梁番号	飛来塩分量(mdd)	OPC(kg/m ³)
21	1.45	2.90
23	1.99	3.98
22	2.16	4.32
24	3.00	5.99
5	3.35	6.70
25	3.44	6.88
13	3.78	7.57
17	3.81	7.61
16	4.07	8.14
3	4.07	8.14
7	4.25	8.50
19	4.56	9.12
18	4.69	9.39
8	4.80	9.60
4	5.14	10.28
2	5.22	10.45
15	5.24	10.48
20	5.35	10.70
14	5.35	10.71
9	5.64	11.29
10	5.67	11.34
6	6.10	12.19
12	6.32	12.64
1	6.40	12.80
11	7.87	15.74

飛来塩分量が少ない地点

$$\text{NB40: } C_0 = 1.265 \times C_{0(\text{OPC})}$$

$$\text{NB50: } C_0 = 1.019 \times C_{0(\text{OPC})}$$

$$\text{NB70: } C_0 = 1.145 \times C_{0(\text{OPC})}$$

$$\text{NB85: } C_0 = 1.108 \times C_{0(\text{OPC})}$$

飛来塩分量が中間の地点

$$\text{NB40: } C_0 = 0.816 \times C_{0(\text{OPC})}$$

$$\text{NB50: } C_0 = 0.862 \times C_{0(\text{OPC})}$$

$$\text{NB70: } C_0 = 0.662 \times C_{0(\text{OPC})}$$

$$\text{NB85: } C_0 = 0.688 \times C_{0(\text{OPC})}$$

飛来塩分量が多い地点

$$\text{NB40: } C_0 = 0.794 \times C_{0(\text{OPC})}$$

$$\text{NB50: } C_0 = 0.651 \times C_{0(\text{OPC})}$$

$$\text{NB70: } C_0 = 0.559 \times C_{0(\text{OPC})}$$

$$\text{NB85: } C_0 = 0.507 \times C_{0(\text{OPC})}$$

ここに、 C_0 ：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの表面塩化物イオン濃度

$C_{0(\text{OPC})}$ ：同一環境下における、高炉スラグ微粉末無混和コンクリートの
表面塩化物イオン濃度

4. まとめ

本研究では、高炉スラグ微粉末を用いた表面塩化物イオン濃度の評価式を作成することを目的として暴露試験を行い、薄板モルタル供試体中への塩分浸透量を測定した。

暴露試験結果に基づき、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの表面塩化物イオン濃度を、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートの表面塩化物イオン濃度の関数として定式化した。なお、評価式は、暴露地点の飛来塩分量レベルによって異なる結果となった。

謝 辞

本研究は令和4年度新潟県建設技術センターの研究助成を受けて行ったものである。また、暴露試験は新潟県村上地域振興局および新発田地域振興局のご協力を得て実施しました。ここに付記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐伯竜彦, 富山 潤, 中村文則, 中村亮太, 花岡大伸, 安 琳, 佐々木 巖巖, 遠藤裕丈: 飛来塩分環境下にあるコンクリートの表面塩化物イオン濃度評価式の検討, 土木学会論文集 E2, Vol. 76, No. 2, pp. 98- 108, 2020. 3
- 2) 佐伯竜彦, 竹田光明, 佐々木謙二, 嶋 毅: 飛来塩分環境の定量評価に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol. 66, No. 1, pp. 1-20, 2010. 1