

論文 秋田県沿岸部の飛来塩分に及ぼす風波の影響と 10 年間暴露した供試体の塩分浸透

徳重 英信*1・木村哲士*2・篠村篤史*3・川上 洵*4

要旨: 秋田県由利本荘市の岩城アイランドブリッジにおける飛来塩分量の測定結果と、風向・風速との関係、さらに有義波高データとの相関について明らかにする。さらに、10 年間暴露を行ったコンクリート供試体の塩分浸透と物性値についても検討を行う。検討の結果、風向・風速は冬期間の北西の季節風の影響が卓越しており飛来塩分と相関が大きいこと、また有義波高データは本試験地においても飛来塩分量の推定に有効なデータとなり得ること、コンクリート供試体の付着塩分量は 10 年間で 20kg/m^3 を大幅に上回ること、さらに拡散係数は $10\text{mm}^2/\text{年}$ 程度に収束する可能性があることなどが明らかとなった。

キーワード: 飛来塩分, 風向, 風速, 有義波高, 暴露試験, 塩分浸透

1. はじめに

青森県から秋田県, 山形県に至る東北地方日本海沿岸部は、冬期に日本海からの西あるいは北西の季節風が卓越する地域であり、飛来塩分量も多く、コンクリート構造物の塩害も多数見受けられる地域である^{1,2)}。その中に位置する秋田県沿岸部である秋田県由利本荘市岩城道川では、島式漁港に至る岩城アイランドブリッジが 1997 年に竣工し、著者らは実橋のモニタリング等を目的として 1998 年から 20 計画で暴露試験を継続してきている³⁾。実橋はコンクリート塗装などの塩害対策を施しており、暴露供試体は実橋と同様の材料・配合で作製し、塗装の有無などもパラメータとして設定し、各種試験を行っている。

本研究では、1998 年 9 月から断続的ではあるが測定を行った捕集飛来塩分量の測定結果と、約 10 年間の風波、特に風向・風速および有義波高データとの関係を検討し、本試験地での飛来塩分量の推定手法を確立するための基礎データとすること、さらに暴露供試体の塩分浸透量について明らかにして、将来の塩分浸透の推定の基礎データとすることなどを目的としている。

2. 実験概要

2.1 暴露試験の概要

暴露試験地である岩城アイランドブリッジは、秋田県由利本荘市岩城道川の海岸部から島式漁港を結ぶ 3 径間連続 PC 箱桁橋（橋長 356m, 図-1）であり、1997 年に竣工している。北東北日本海沿岸部の海上橋であるため、特に冬期には西あるいは北西の季節風が吹き付け、波しぶきも受ける厳しい環境条件下に設置されている。



図-1 飛来塩分捕集器設置箇所と供試体設置状況 (岩城アイランドブリッジ)

2.2 飛来塩分の捕集

飛来塩分の捕集は、土研式塩分捕集器を図-1に示すように P1 および P5 の高欄上に設置して行っている。P1 に設置している捕集器は汀線より 120m 程度陸側の高さ 2.5m 程度の箇所にほぼ西向きに設置しており、また P5 では高欄海側に北西向きに設置している。飛来塩分の捕集は断続的に、暴露 1 年目、9 年目、および 11 年目以降に実施している。したがって、本研究で検討に用いる飛来塩分捕集データは、試験開始 1 年目 (1998 年 9 月～1999 年 8 月)、9 年目 (2006 年 9 月～2 月)、および 11 年目～12 年目 (2008 年 9 月～2010 年 1 月) であり、1 ヶ月に 1 回行った捕集・測定結果を日平均飛来塩分量 (mdd) に換算して検討に用いた。

2.3 暴露供試体の種類と配合

暴露供試体は実橋と同じ材料・配合を用いたもの (MC)、比較のため設置しているプレキャスト用高強度

*1 秋田大学 工学資源学部土木環境工学科准教授 博(工) (正会員)

*2 ショーボンド建設株式会社 補修工学研究所 修(工) (正会員)

*3 ショーボンド建設株式会社 補修工学研究所 (正会員)

*4 秋田大学 工学資源学部土木環境工学科教授 工博 (正会員)

コンクリート(HC), もみ殻灰 10%混和高強度コンクリート(RMC-10), 高活性もみ殻灰 5%混和高強度コンクリート(RHC-5)およびシリカフェーム 10%混和高強度コンクリート(SC-10)である。全供試体を図-1に示した橋梁橋脚上面の北側に設置している。各供試体の配合を表-1および表-2に示す。また, RMC-10 に用いたもみ殻灰(RHA-M), RHC-5 に用いた高活性もみ殻灰(RHA-H)およびシリカフェームの物理的性質および化学組成を表-3および表-4に示す。

表-1 実橋モニタリング用供試体(MC)の配合

供試体名	粗骨材の最大寸法(mm)	W/B (%)	単位量(kg/m ³)				SP(kg/m ³)	スランブ(cm)	空気量(%)
			W	C	S	G			
MC	20	41.0	166	403	486	1216	40.3	8.0	4.5

表-2 比較用供試体の配合

供試体名	粗骨材の最大寸法(mm)	W/B (%)	単位量(kg/m ³)				SP(kg/m ³)	AE(kg/m ³)	スランブ(cm)	空気量(%)	
			W	C	RHA or SF	S					G
HC	20	30.0	153	510	0	734	1040	0.92	0.04	19.0	3.9
RMC-10			149	448	50			1.67	0.13	23.0	5.5
RHC-5			151	478	25			1.23	0.10	16.0	4.8
SC-10			150	449	50			0.98	0.05	20.0	4.6

表-3 混和材の物理的性質

	RHA-M	RHA-H	SF
密度(g/cm ³)	2.15	2.15	2.20
平均粒径(μm)	7.8	5.85	0.15
BET比表面積(m ² /g)	53.0	112.1	18.9

表-4 混和材の化学組成

化学組成(%)	RHA-M	RHA-H	SF
SiO ₂	97.7	94.2	88.7
Al ₂ O ₃	0.03	0.18	0.93
Fe ₂ O ₃	0.24	0.10	0.09
CaO	0.32	0.32	0.45
MgO	0.13	0.16	1.97
Na ₂ O	0.08	0.09	0.54
K ₂ O	1.45	1.53	1.67
強熱減量	1.76	1.46	3.50

供試体 MC の寸法は塩分浸透測定用が 100×100×200mm, 力学的性質測定用がφ100×200mm である。また高強度コンクリート供試体の寸法は全てφ75×150mm である。なお, 塩分測定用供試体は1面からのみ塩分浸透させるために側面と底面に実橋と同じ柔軟型硬膜エポキシ塗装を施している。

2.4 供試体の測定項目と測定方法

(1)コンクリート中の塩化物イオン量の測定

実橋モニタリング用供試体(MC)は角柱であるため, 長さ200mmのうち中心幅50mm分について, 塩分浸透方向に厚さ20mm毎に切り出し, 塩化物イオン量を測定している。また, 高強度コンクリート円柱供試体について

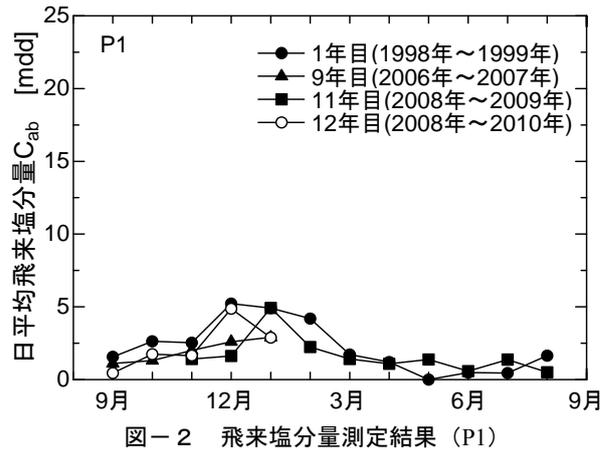


図-2 飛来塩分量測定結果 (P1)

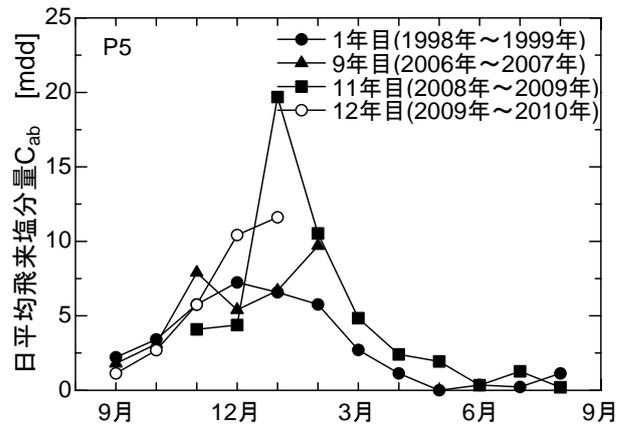


図-3 飛来塩分量測定結果 (P5)

は塩化物イオンの浸透面(無塗装面)からコンクリートカッターにより厚さ10mm毎に供試体を切り出し, 各切り出し部の塩化物イオン量を測定している。各供試体ともにJCI-SC-4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」により測定を行っている。

(2)供試体の動弾性係数と圧縮強度

供試体 MC および高強度コンクリート供試体全てにおいて円柱供試体を用いて, 動弾性係数と圧縮強度を測定した。なお, 供試体は所定の引き上げ時期(0, 1, 3, 5, 8, 10, 15 および 20 年目)に破壊試験および塩化物イオン測定を行うために, 測定数分の供試体を設置している。本研究では, 暴露開始から 1, 3, 5, 8 および 10 年目に各供試体を引き上げて測定を行った結果について述べる。なお, 圧縮強度試験は JIS A 1108, 動弾性係数の測定は JIS A 1127 にしたがって行っている。

3. 実験結果および考察

3.1 飛来塩分の測定結果

1998 年以降, 1 年, 9 年および 11~12 年目における飛来塩分の測定結果を図-2 および図-3 に示す。橋脚に設置している P1, 高欄上である P5 ともに, 各年で 11 月~3 月に塩分量が多くなる傾向を示している。また, P5

での捕集塩分量は P1 の値に比較して最大で 4 倍程度の差異があり、同一の暴露試験地においても捕集器の設置箇所によって大きく測定結果が異なる。また P5 での 2008 年～2009 年の捕集塩分量は、他の測定年の冬季の捕集塩分量の 2～3 倍を示しており、測定年によるばらつきも大きいことが明らかとなり、長期間にわたって継続的に測定を行うことが必要である。

3.2 試験地周辺の風向・風速が飛来塩分に及ぼす影響

暴露試験地である岩城アイランドブリッジは秋田県秋田市南部に接している。そこで本研究では気象庁アメダスで公開されている秋田市の気象データ、特に風向と風速のデータを用い、その飛来塩分に対する影響を検討した。なお、降雨・降雪などの他の気象データとの相関の検討も実施した³⁾が、本研究では風向と風速を基に換算した検討パラメータ（風向風速変換値）が支配的であると考え、風向と風速のみを対象として検討を行う。

北東北日本海沿岸部では、冬期に西あるいは北西からの季節風が強く吹き、特に北西からの季節風が卓越している。そこで北西方向を $\theta=0^\circ$ として、このときの風の影響が最大になるように、図-4に示すように反時計まわりに風向を角度（ $\cos\theta$ ）で表し、その値に風速（ v ）を乗じて風向風速変換値（ V_r ）を次式により算出している。

$$V_r = V_r \times \cos\theta \quad (1)$$

この風向の変換により、1998 年 9 月以降の気象データから算出した風向風速変換値を図-5に示す。

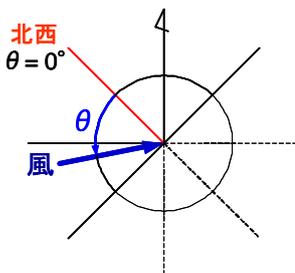


図-4 風向の変換

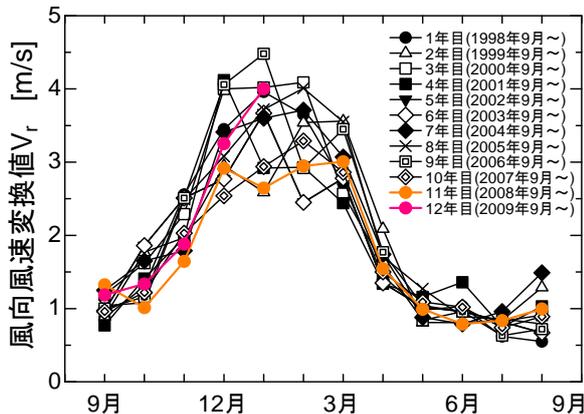


図-5 風向風速変換値の経時変化

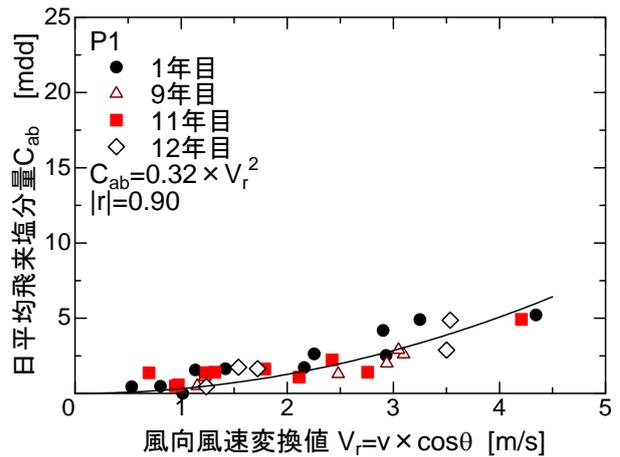


図-6 飛来塩分と風向風速変換値の関係 (P1)

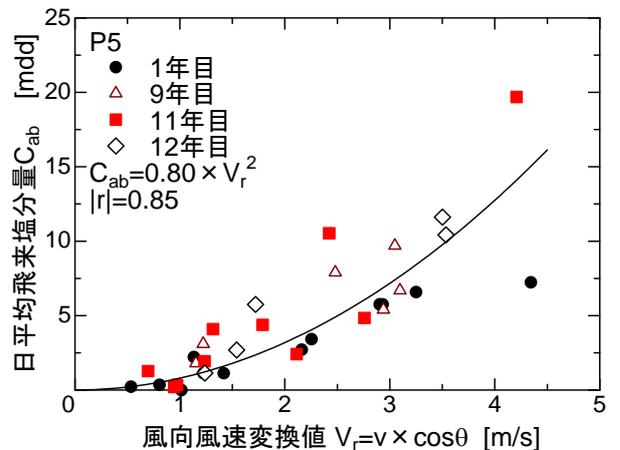


図-7 飛来塩分と風向風速変換値の関係 (P5)

風向風速変換値は、図-2および図-3に示した飛来塩分量の測定結果と定性的には相関があると考えられる。冬期に V_r はピークを示し、またピーク値は年ごとに 1.5～2 倍程度の開きを持っている。この風向風速変換値と日平均飛来塩分量の各月の平均値との相関を検討したところ、図-6および図-7示すように、両者は P1 および P5 で各々高い相関を持つことが明らかとなった。

本研究では、P1 と P5 では捕集器を設置している高さおよび向き、さらに汀線からの距離が異なり、P1 では橋脚部西向きに、P5 では高欄部北西向きとなっている。そのために、本研究の範囲では、飛来塩分量は北西の季節風による影響との相関が高くなったものと考えられる。構造物の設置方向が、塩分浸透に対して大きく影響することは当然である。しかし、本試験地では特に冬季に海側、つまり飛来塩分の発生源からの風が卓越していることが過去の気象データからも明らかとなっており、季節風の影響も考慮する必要があると考えられる。また、本試験地では暴露供試体を全て北側に設置しており、飛来塩分量と供試体中の塩化物イオン浸透量の関係を今後検討するためにも、北西面または西面向きの捕集器を設置し、検討を行った。本試験地においては、飛来塩分量

を風向風速変換値から推定することは、有効な手法となることが期待できるものと考えられる。

3.3 試験地周辺の有義波高が飛来塩分に及ぼす影響

暴露試験地である岩城アイランドブリッジは海上橋であるため、波しぶきの影響を大きく受ける。また、飛来塩分は有義波高を用いた波エネルギーとの相関が高いことが既往の研究⁴⁾から明らかにされている。そこで、本研究では全国港湾海洋波浪情報網の観測データ⁵⁾を用いて、秋田港における有義波高と飛来塩分量の相関について検討を行った。

飛来塩分量の測定年における各月の有義波高の平均値との関係は、図-8および図-9に示すとおりとなる。飛来塩分量と風向風速変換値との相関に比較して、有義波高と日平均飛来塩分量の月平均値との相関は、ほぼ同様である結果を得た。

飛来塩分捕集器は、P1では西向き、P5では北西向きに設置しており、捕集に対して方向性を有している。一方、有義波高は波の高さのみをパラメータとしており、波の向きは考慮していない。したがって、本試験地では海側、特に季節風が卓越する北西または西向きに捕集器を設置したことは、有意であったものと考えられる。この理由としては、飛来塩分の発生源である日本海が試験地の西側に面していること、輸送媒体である海側からの風が冬季に卓越した環境であること等が影響したものと考えられる。

飛来塩分の発生源である波は風によって発生し、その風が塩分を輸送するため、風と波が複合的に飛来塩分の到達に影響を及ぼしている。その複合機構については、詳細な検討が必要である。

3.4 暴露供試体の物性

暴露試験に供している各供試体の相対動弾性係数の経時変化を図-10に、圧縮強度の経時変化を図-11に示す。

相対動弾性係数は全供試体で若干の増加傾向を示した。この要因としては、水和反応によるコンクリートの緻密化が進行しているものと考えられる。また本暴露試験地は、積雪寒冷地でもあるため凍結融解作用による劣化も想定されたが、目視による観察および相対動弾性係数の測定結果からも、凍害による物性の変化は特に認められなかった。

一方、供試体の圧縮強度試験結果では、高強度コンクリートの圧縮強度試験結果については、試験年によって若干の変動が見られるが大きな低下や増加は認められない。一方、モニタリング供試体の圧縮強度は若干の増加傾向が見られた。これは水和の進展によるものと考えられる。

以上より本試験地での暴露供試体の物性は、10年経過後においても低下は認められないことが明らかとなった。

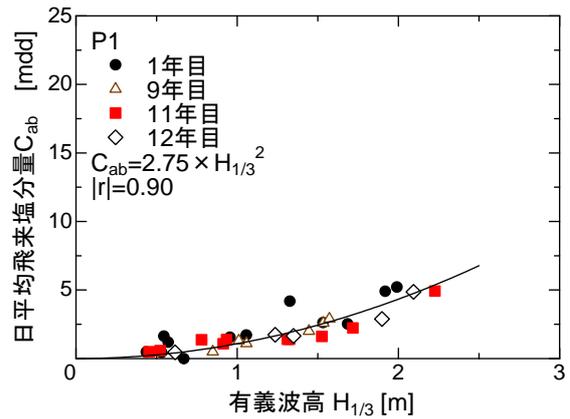


図-8 飛来塩分と有義波高の関係 (P1)

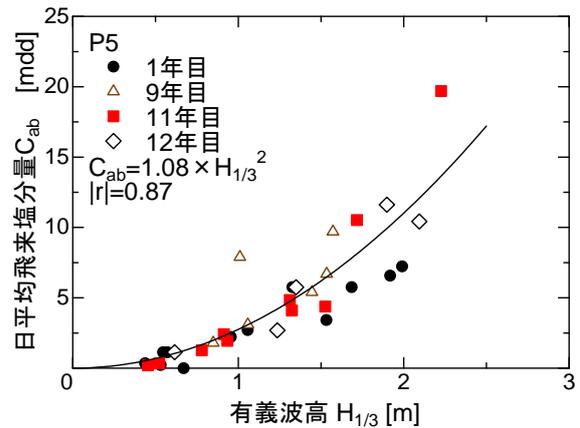


図-9 飛来塩分と有義波高の関係 (P1)

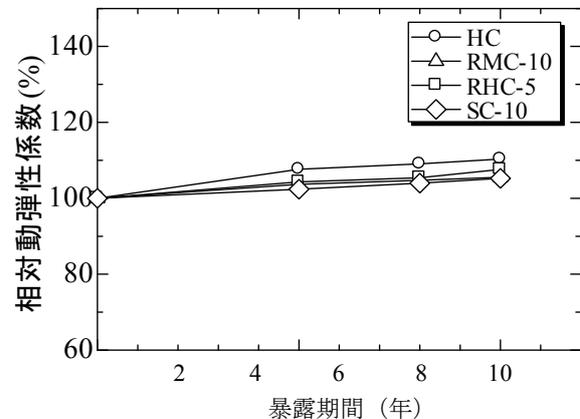


図-10 供試体の相対動弾性係数

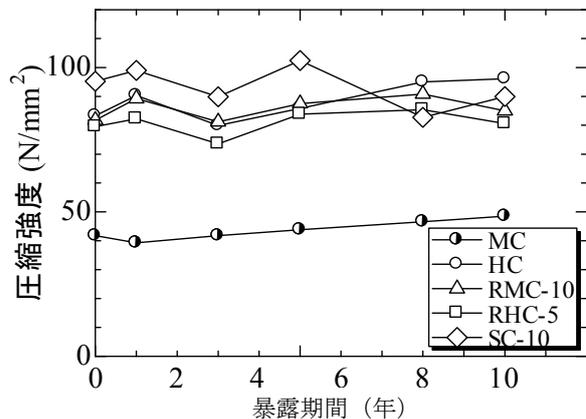


図-11 供試体の圧縮強度

3.5 暴露供試体の塩化物イオン浸透

供試体の暴露 10 年経過後の塩化物イオン浸透量の測定結果を図-12に示す。図中のプロットは測定値、線は Fick の拡散方程式の解を用いた近似線である。

高強度コンクリートである HC、もみ殻灰を 10%混和した RMC-10、高活性もみ殻灰を 5%混和した RHC-5 およびシリカフュームを 10%混和した SC-10 とともに、供試体表面から 25mm で塩化物イオン量はほぼ 0 となっており、表面塩分量も 13kg/m^3 以下を示している。

一方、実橋のモニタリング用として作製した供試体 MC は表面塩化物イオン量が 25kg/m^3 を上回っているおり、表面から 50mm 程度の箇所まで塩化物イオン量が 0 に収束している。実橋はコンクリート塗装が施されており、この供試体の状況とは異なるが、塗装が無い場合や塗装に欠陥がある場合には、実橋のかぶりである 70mm に近い箇所まで塩化物イオンが侵入しており、今後の早期の劣化が懸念されるところである。

暴露期間 0~10 年経過時までの、所定の測定年に引き上げて測定した、各供試体の塩化物イオンの浸透量の測定結果から、拡散方程式の解を用いて塩化物イオン量とコンクリート表面からの距離の関係を、各測定年の供試体について近似し、算出した経時変化を図-13に示す。また、表面塩分量と同様に各測定年において求めた各供試体の拡散係数の経時変化を図-14に示す。

高強度コンクリートやポズランを混和した供試体の表面塩分量は、暴露開始時から増加を続けたものの、10~ 15kg/m^3 の間に収束する傾向を示している。しかし、実橋モニタリング用供試体 MC については、暴露期間 8 年目までは他の供試体と同様な傾向を見せたが、10 年で急激に増加する傾向を示した。今後の継続的な測定結果から考察を行う必要があるが、本試験地での 10 年経過時では 25kg/m^3 程度の表面塩分量が測定され、地域性が影響した可能性も考えられる。

また、拡散係数の経時変化については、図-14に示すとおり、時間の経過に伴って各供試体ともに大幅に低下しており、10~ $20\text{mm}^2/\text{年}$ 程度に収束する可能性があるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、秋田県沿岸部の飛来塩分と風波との関連を検討し、また 10 年間暴露したコンクリート供試体の物性値および塩化物イオン浸透量などに対する検討を行った。本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりとなる。

(1) 秋田県沿岸部での飛来塩分量は、特に冬期間において北西の季節風によって卓越する。しかし、各測定年に

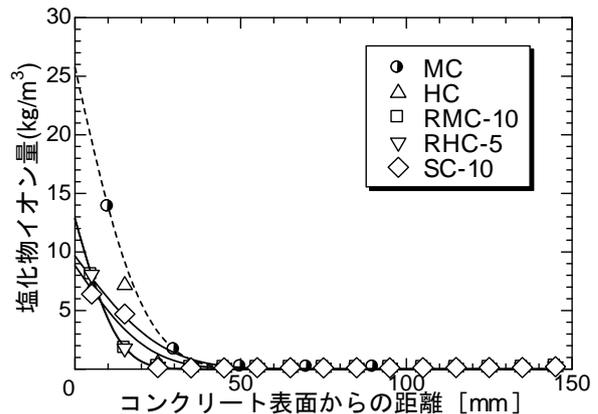


図-12 暴露供試体内の塩化物イオン浸透 (10 年経過後)

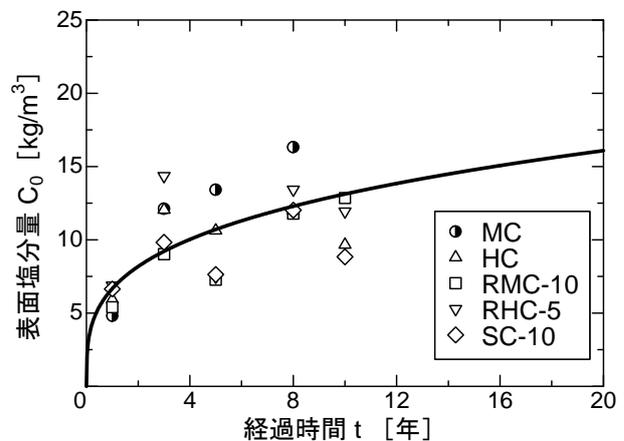


図-13 表面塩分量の経時変化

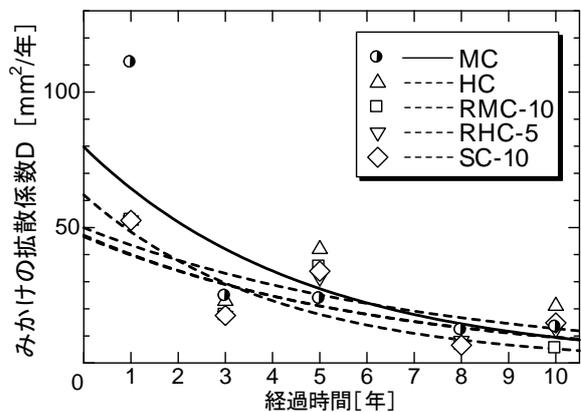


図-14 拡散係数の経時変化

において 2~5 倍程度の開きがあり、継続的に測定することが必要である。また、飛来塩分量は同一暴露試験敷地内においても、陸上部と海上部で大きく異なる。

(2) 飛来塩分量に及ぼす風向および風速の影響は、本試験地の場合、北西の季節風が支配的であると考えた風向風速変換値を用いることにより、定量的に推定できる可能性がある。

(3)有義波高は飛来塩分に大きく影響することが明らかとなり、飛来塩分量の推定に有効なパラメータとなるものと考えられる。

(4) 10年間暴露したコンクリート供試体の圧縮強度および相対動弾性係数はほぼ変わりなく、劣化は認められない。

(5)暴露試験の結果からコンクリート表面の付着塩分量は 25kg/m^3 を上回り、拡散係数は $10\sim 20\text{mm}^2/\text{年}$ 程度に収束する可能性があることが明らかとなった。

(6) 高強度コンクリート供試体のみかけの付着塩分量と拡散係数は、それぞれ 15kg/m^3 、 $10\text{mm}^2/\text{年}$ 前後に今後収束し、実橋モニタリング用供試体のみかけの拡散係数は $10\text{mm}^2/\text{年}$ 前後に今後収束すると考えられる。また、本研究の範囲では、もみ殻灰を10%混和高強度コンクリート供試体が最も高い塩化物イオン浸透抑制能力を示すことが明らかとなった。しかし、これらの値については今後の継続した調査が必要であるものと考えられる。

参考文献

- 1) 岩城一郎, 鶴田浩章, 上原子晶久, 荒木昭俊, 相馬基, 鈴木基行: 青森県日本海沿岸において著しい塩害を受けたコンクリート橋の劣化調査, 橋梁と基礎, Vol.41, No.10, pp.33-37, 2007.
- 2) 藤田弘昭, 上原子晶久, 津村浩三, 石澤 徹: 青森県日本海沿岸におけるRC橋梁の塩害に関する調査, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.2, 2006.
- 3) 徳重英信, 木村哲士, 川上 洵: 秋田県沿岸部に8年間暴露したコンクリートの塩分浸透と飛来塩分, セメント・コンクリート論文集, No.61, pp.338-343, 2008.
- 4) 大即信明, 長瀧重義, 福手 勤, 中下兼次: 港湾での鉄筋コンクリートの塩害に及ぼす海洋環境の影響に関する基礎的検討, 土木学会論文集, No.472, V-20, pp.59-68, 1993.
- 5) 全国港湾海洋波浪情報網観測データ: 国土交通省港湾局, 1998~2009.