

論文 北陸産分級フライアッシュによるコンクリートの遮塩性向上効果に関する地域特性を踏まえた評価

宮里 心一^{*1}・鳥居 和之^{*2}・伊藤 始^{*3}

要旨：分級フライアッシュは、コンクリートの耐久性向上に寄与することが知られている。北陸地方においても、最近になってこの分級FAが副産され、コンクリート用混和材として使用することが可能になった。そこで、北陸地方で流通する骨材との相性などを検証した上での実用化を図っている。本研究では、北陸産分級FAを用いた、富山県および石川県における呼び強度24あるいは27を対象として、実験室内および実機で製造されたコンクリートの遮塩性を明らかにした。その結果を踏まえて、FAを混和材等として用いることの耐久性向上効果を、腐食発生開始時期の延命効果の解析結果とASRに対する抑制効果を加味して評価した。

キーワード：分級フライアッシュ、遮塩性、実効拡散係数、腐食開始時期、北陸地方、地産地消

1. はじめに

市民が安心して快適に生活するためには、コンクリート構造物は安全でなければならない。したがって、既設構造物への適切な維持管理により延命化を図ると共に、構造物を新設あるいは更新する際には耐久性照査型設計に基づき長寿命化を図るべきである。その際に考慮すべき劣化要因は、地域や用途により変化する。例えば北陸地方では、図-1に示すとおり、季節風により運ばれる飛来塩分や、凍結防止剤として散布される塩分に由来する塩害、およびアルカリシリカ反応（以下、ASRと称す）が主たる劣化である。したがって、これらの劣化進行を抑制することが、合理的な耐久性設計である。

さて、フライアッシュ（以下、FAと称す）は従来からコンクリートの耐久性向上に寄与することが知られている^{1), 2), 3)}など。特に、分級されたFAの効果が高いことが確認されている⁴⁾。ここで、北陸地方には、3つの石炭火力発電所が存在する。この内、石川県の七尾大田発電所では平成21年9月に、また福井県の敦賀発電所では平成24年8月に、それぞれ分級装置が稼働した。したがって、北陸地方においても、地元で産出された分級FAを、コンクリート用混和材として使用することが可能になった。しかし、上述のFAによる耐久性向上効果は一般的

な傾向であり、北陸地方で流通する骨材との相性などを確認しなければ実用化は困難である。

環境への配慮が高まっており、副産物がコンクリート用材料として地産地消される機会は増えると予想する。その際に、地元で特有の条件も踏まえて、コンクリートの性能向上を図る工夫が、工学的にも社会的にも重要である。すなわち、各地方で生じている特徴的なコンクリートの劣化に対して、その地方で副産される材料を有効利用して、性能低下に伴うリスクを低減する取り組みが、今後は各地で推進されるべきであると考えられる。

以上の背景を踏まえて本研究では、七尾産分級FA（Ⅱ種）を混和材あるいはFAセメントB種として用いた、富山県および石川県における呼び強度24あるいは27のコンクリートを対象にして、遮塩性を明らかにした。その際、実験的検討として、実験室内でコンクリートを製造する16ケースと、実機で製造する2ケースを設定し、電気泳動試験により測定された実効拡散係数を比較した。また、その結果を踏まえて、FAを混和したコンクリートの腐食開始時期と、普通ポルトランドセメントあるいは高炉セメントB種を用いて製造されたコンクリート中の鉄筋の腐食開始時期を比較した。その際、北陸地方の環境条件を踏まえて、塩化物イオンの浸透を解析した。



(1) 塩害の橋梁

(2) ASRの洞門

図-1 北陸地方におけるコンクリートの劣化事例

2. 実験・解析ケースと対象コンクリートの概要

2.1 実験・解析ケース

実験および解析のケースを表-1に示す。

No.1~16のケースのコンクリートは、容量が500ℓの強制二軸ミキサを用いて、実験室内で製造された。骨材としては、石川県内で流通する手取川産と能登産の2種、および富山県内で流通する早月川産と庄川産の2種を用

*1 金沢工業大学 環境・建築学部環境土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

*2 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 工博 (正会員)

*3 富山県立大学 工学部環境工学科准教授 博士(工学) (正会員)

表-1 実験・解析ケースおよびコンクリートの配合と基礎性状

実験・解析ケース				W/B	s/a	単位量 (kg/m ³)							スランプ (cm)	空気量 (%)	強度 (N/mm ²)
No	骨材産地	結合材	呼び強度			W	C	FA	S	G	Ad	AE			
1	手取川	N	27	0.55	0.44	156	285	0	802	1036	2.85	0.000	9.7	3.8	36.2
2		BB		0.54	0.44	154	287	0	789	1044	2.87	0.000	7.2	4.7	33.6
3		N+FA	24	0.53	0.46	144	230	40	851	1021	2.43	0.003	8.0	5.2	32.8
4				0.57	0.46	146	218	38	858	1021	2.30	0.003	7.7	5.5	30.1
5	能登	N	27	0.52	0.42	173	331	0	732	1024	3.64	0.000	8.3	4.4	33.0
6		BB		0.52	0.41	168	326	0	714	1051	3.59	0.000	7.3	3.7	31.0
7		N+FA	24	0.51	0.42	171	284	50	725	1024	3.34	0.033	6.9	3.3	32.8
8				0.55	0.42	171	266	47	742	1024	3.13	0.019	9.6	3.9	32.4
9	早月川	N	27	0.54	0.45	159	292	0	831	1044	2.92	0.000	7.8	4.9	37.3
10		BB		0.54	0.44	158	293	0	821	1050	4.40	0.000	8.2	3.5	33.8
11		N+FA	24	0.55	0.45	157	245	43	828	1044	2.78	0.000	8.0	4.8	35.2
12				0.59	0.45	158	229	41	850	1035	2.70	0.000	8.0	3.6	37.3
13	庄川 a	N	27	0.54	0.44	154	286	0	814	1034	1.14	0.000	8.0	5.9	34.6
14		BB		0.52	0.43	153	297	0	782	1052	1.19	0.000	8.5	4.9	36.1
15		N+FA	24	0.50	0.44	150	255	45	795	1038	1.20	0.300	7.6	3.4	35.7
16				0.55	0.45	149	229	40	828	1034	1.08	0.000	6.5	3.6	33.1
17	岩屋/青海	FB	27	0.51	0.44	159	309	0	780	1036	3.09	1.850	15.0	5.2	32.1
18	伊久留/庄川 b			0.52	0.40	165	318	0	690	1067	2.54	3.820	18.5	4.7	26.6

注：No.17 と 18 の骨材産地の表記は「粗骨材産地/細骨材産地」を示す。実工事における No.18 は材齢 56 日で管理された。

表-2 骨材の物理的特性

骨材産地	細・粗	種類	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
手取川	細骨材	陸砂	2.57	2.09	2.60
	粗骨材	陸砂利	2.60	1.84	6.84
能登	細骨材	山砂	2.53	2.05	2.46
		砕砂	2.61	2.19	3.42
能登	粗骨材	砕石	2.64	1.43	6.89
	細骨材	川砂	2.65	1.03	2.67
早月川	粗骨材	川砂利	2.69	0.74	6.90
	細骨材	陸砂	2.59	1.58	2.70
庄川 a	粗骨材	陸砂利	2.61	1.19	6.88
	細骨材	山砂	2.54	2.56	2.56
青海	粗骨材	石灰石砕石	2.70	0.50	6.77
伊久留	細骨材	山砂	2.51	1.86	2.66
庄川 b	粗骨材	陸砂利	2.64	1.53	6.87

いた。骨材の物理的特性を表-2 に示す。また、結合材としては、普通ポルトランドセメント (N)、高炉セメント B 種 (BB)、および普通ポルトランドセメントに内割で 15% の分級 FA を混和した (N+FA)、計 3 種を用いた。セメントおよび FA の特性を表-3 に示す。なお、FA のガラス質成分は 73.2% であった。ここで、N および BB を用いたケースでは 1 水準の呼び強度を、FA を混和したケースでは 2 水準の呼び強度を設定した。これは、後述の実機でコンクリートを製造したケースと照合させるためである。また、FA を混和することにより、強度は低いが耐久性は高い性能を付与できる可能性を検討するためでもある。すなわち、スランプと圧縮強度の他に、耐久性も考慮した生コンクリートの区分が、将来的に設定されることを意図したためである。

表-3 結合材の特性

記号	密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)	ig.loss(%)
N	3.16	3348	2.4
BB	3.04	3805	1.7
FA	2.43	4780	2.0
FB	2.97	3510	2.5

表-4 生コン工場で使用したミキサの概要

No	17	18
種類	強制二軸式	傾倒式
容量	1.0m ³	
能力	50m ³ /時	

No.17 と 18 のケースのコンクリートは、表-4 に示す石川県羽咋郡志賀町にある 2 つの生コンクリート工場で製造された。また、結合材としては、予めセメント工場で分級 FA が混和された FA セメント B 種 (FB) を用いた。さらに、製造されたコンクリートは、防潮堤の建設工事に使用するため、呼び強度が 24 あるいは 27 を設定した。

2.2 コンクリートの配合と基礎性状

コンクリートの配合、および練り上がり直後のスランプと空気量ならびに材齢 28 日目の圧縮強度を、表-1 に示す。ここで、スランプは JIS A 1101 に準拠して、空気量は JIS A 1128 に準拠して、圧縮強度は JIS A 1108 に準拠して、測定された。

全ての配合は、生コンクリート工業組合および生コンクリート工場で設計された実用的な配合である。No.1~16 では、練り上がり直後の目標スランプは 8.0±2.0cm とし、目標空気量は 4.5%±1.5% とした。また No.17 と 18

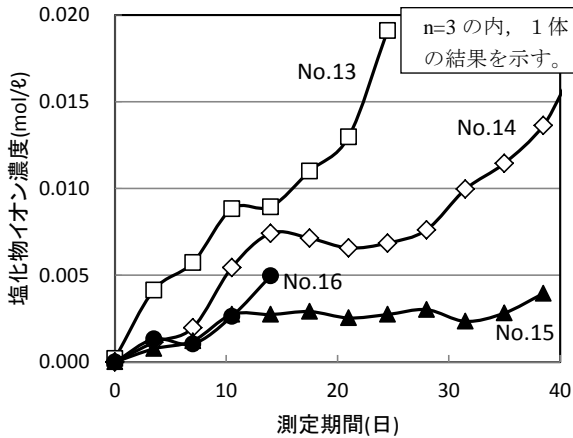


図-2 電気泳動試験で測定された塩化物イオン濃度の経時変化の例（庄川産骨材のケース）

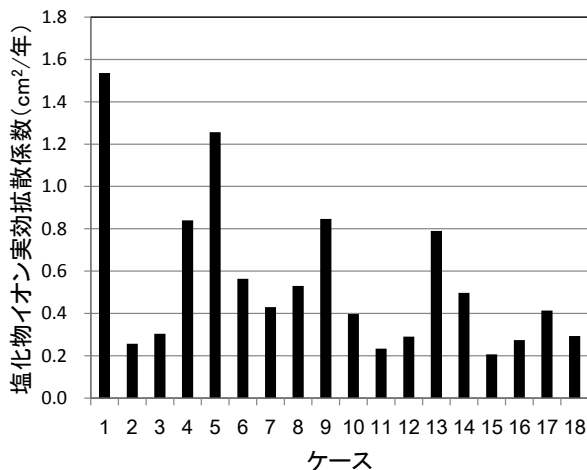


図-3 塩化物イオン実効拡散係数の実験結果

では、練り上がりから30分後（荷卸し時）の目標スランプは $12.0 \pm 2.5\text{cm}$ とし、目標空気量は $4.5\% \pm 1.5\%$ とした。これらを満足すべく、混和剤量を調整した。なお、混和剤はFA用ではなく汎用タイプである。

3. 実験的検討

3.1 実験方法

打込みから24時間後に脱型した。その後、FAのポズラン反応を期待して、材齢91日目まで 20°C で水中養生した。さらに、JSCE G571に準拠して、塩化物イオンの泳動試験を実施し、塩化物イオンの実効拡散係数を測定した。図-2に、泳動試験中に測定された、陽極側セル内の塩化物イオン濃度の経時変化の例を示す。

3.2 実験結果

図-3に、塩化物イオンの実効拡散係数の実験結果を示す。これによれば、実機で製造されたNo.17と18の実効拡散係数は $0.41\text{cm}^2/\text{年}$ と $0.29\text{cm}^2/\text{年}$ である。また、同じ呼び強度の実験室内で製造されたNo.4, 8, 12, 16の実

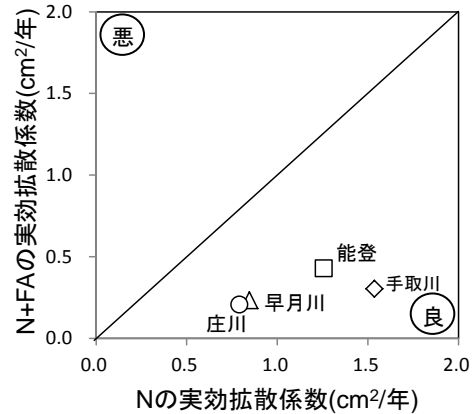


図-4 NとN+FAで製造されたコンクリートの塩化物イオン実効拡散係数に関する比較

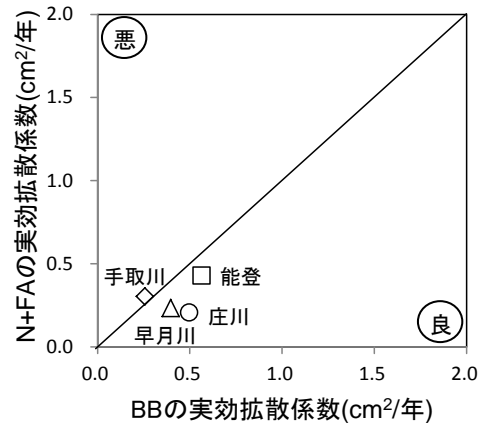


図-5 BBとN+FAで製造されたコンクリートの塩化物イオン実効拡散係数に関する比較

効拡散係数は $0.27 \sim 0.84\text{cm}^2/\text{年}$ で、No.3, 7, 11, 15の実効拡散係数は $0.21 \sim 0.43\text{cm}^2/\text{年}$ である。したがって、実機で製造されたコンクリートと、実験室内で製造されたコンクリートでは、遮塩性が同等であることを確認できた。

図-4および図-5に、実験室内で製造され、呼び強度が27のコンクリート（No.1~3, 5~7, 9~11, 13~15）を対象に、NあるいはBBで製造されたコンクリートの実効拡散係数と、FAが混和されたコンクリートの実効拡散係数を比較する。これらの図では、もし右下にプロットされていれば、FAが混和されたコンクリートの実効拡散係数が、NあるいはBBで製造されたコンクリートの実効拡散係数と比較して、低減されていることを意味し、遮塩性は向上したと判断できる。したがって、図-4によれば、全ての産地の骨材を用いたコンクリートにおいて、FAを混和することにより、無混和と比較して、遮塩性は向上することが認められる。また、図-5によれば、FAを混和したコンクリートと、BBを用いて製造されたコンクリートにおいて、遮塩性は同等に高いことが認め

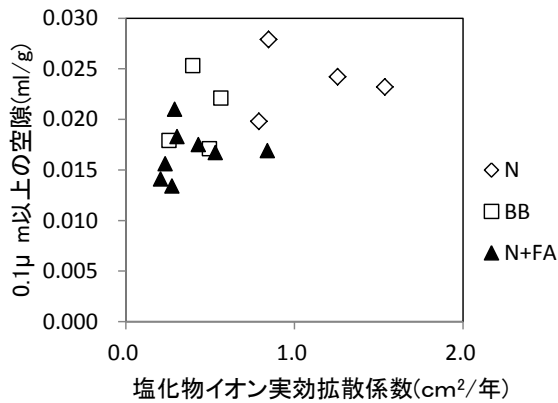


図-6 塩化物イオン実効拡散係数と空隙量の関係

表-5 塩化物イオンの見かけの拡散係数の換算値

No	$K_1 \cdot K_2$	見かけの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)
1	0.57	0.87
2	0.75	0.19
3	0.66	0.20
4	0.69	0.58
5	0.54	0.67
6	0.70	0.40
7	0.65	0.28
8	0.68	0.36
9	0.56	0.47
10	0.75	0.30
11	0.68	0.16
12	0.70	0.21
13	0.56	0.44
14	0.70	0.35
15	0.64	0.13
16	0.68	0.19
17	0.65	0.27
18	0.66	0.19

られる。

図-6に、塩化物イオンの実効拡散係数と0.1 μm 以上の空隙量の関係を示す。ここで、空隙量の測定方法を説明する。泳動試験を終了した試験体の中心部から、1辺が3mm程度の角片を採取した。次に、それらの中からトータルで約2mg分の試料をガラス製容器(容積5cc)に入れ、水銀圧入式ポロシメータにセットした。その後、加える圧力と水銀が圧入される細孔の大きさのに基づき、試料の細孔径分布を測定した。図-6によれば、0.1 μm 以上の空隙量が少ないほど、塩化物イオンの実効拡散係数は減少することが認められる¹⁾。したがって、FAを混和することにより、細孔が緻密になったため、遮塩性は向上したと考えられる。

表-6 解析の条件

項目	水準
海岸からの距離(km)	0.1, 0.25, 0.5, 1.0
かぶり(cm)	5.0
腐食発生限界Cl濃度(kg/m^3)	1.2
予測の最長期間(年)	100

4. 解析的検討

4.1 解析方法

はじめに、土木学会「コンクリート標準示方書[設計編]2012年制定」に従って、図-3に示した実効拡散係数を、見かけの拡散係数に換算した。換算結果を表-5に示す。次に、表-6に示す条件で、フィックの拡散則に基づき、コンクリート中鉄筋の腐食開始時期を算定した。その際、富山県および石川県は北陸地方に位置するため、飛来塩分が多い地域の表面塩化物イオン濃度を代入した。解析結果の例として、図-7に、庄川産の骨材を用いた場合の鉄筋表面における塩化物イオン濃度の経時変化を示す。

4.2 解析結果

図-8に、腐食開始時期の解析結果を示す。

まずは、FAを混和したことによる耐久性の向上効果を比較する。早月川産骨材および庄川産骨材を用いたケース(No.9~16)で比較すると、FAを混和したケース(No.11, 12, 15, 16)の腐食開始時期は、無混和のケース(No.9, 13)やBBで製造されたケース(No.10, 14)の腐食開始時期より、明らかに遅延することが認められる。また、能登産骨材を用いたケース(No.5~8)で比較すると、FAを混和したケース(No.7, 8)の腐食開始時期は、無混和のケース(No.5)の腐食開始時期より明らかに遅延され、BBで製造されたケース(No.6)の腐食開始時期より若干遅延されることが認められる。さらに、手取川産骨材を用いたケース(No.1~4)で比較すると、FAを混和したケース(No.3, 4)の腐食開始時期は、無混和のケース(No.1)の腐食開始時期より明らかに遅延され、BBで製造されたケース(No.2)の腐食開始時期と概ね同等あるいは早くなることが認められる。したがって、骨材産地によって、FAの混和による遮塩性向上効果は異なることを確認できた。

次に、海岸からの距離毎に、腐食開始時期を評価する。海岸からの距離が0.1kmあるいは0.25kmの場合には、腐食開始時期は12年~100年超であることが認められる。一方、海岸からの距離が0.5kmあるいは1.0kmの場合には、ほとんどのケースにおいて、腐食開始時期は100年を超えることが認められる。ここで、一般的なコンクリート構造物の耐用設計年数は50~100年間である。したがって、本研究の範囲(コンクリートの配合、表面塩化物イオン濃度やかぶりなどの条件)で、維持管理限界が

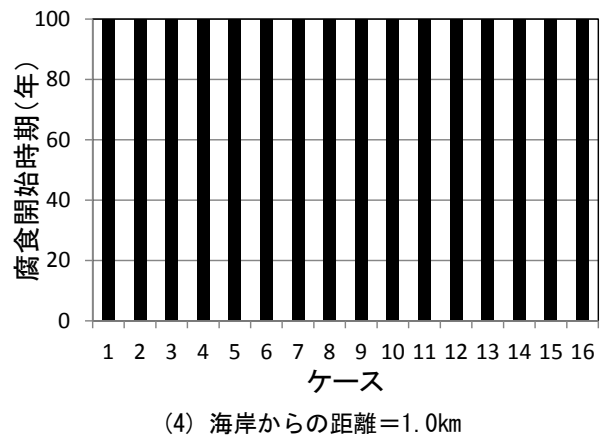
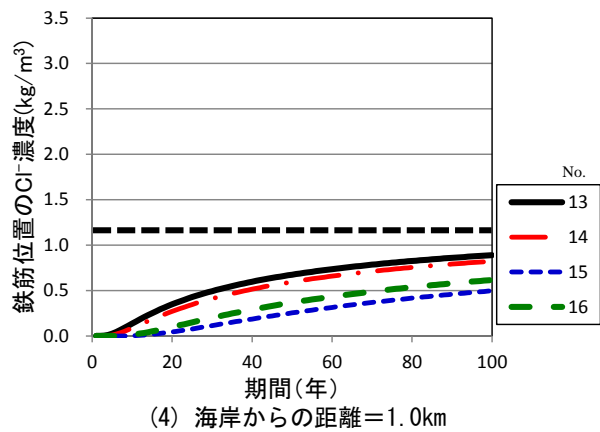
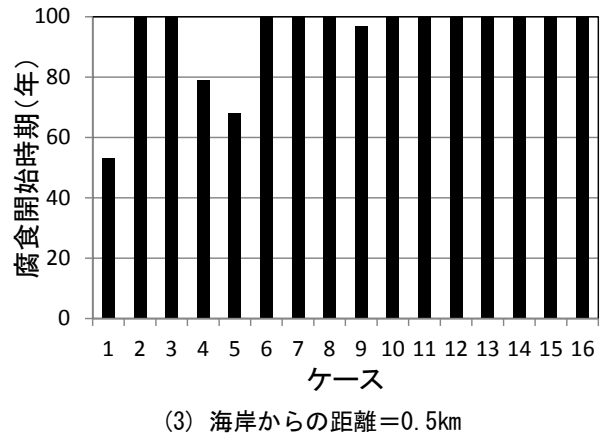
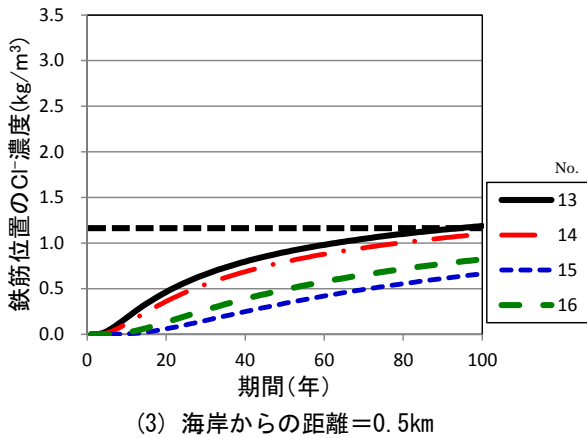
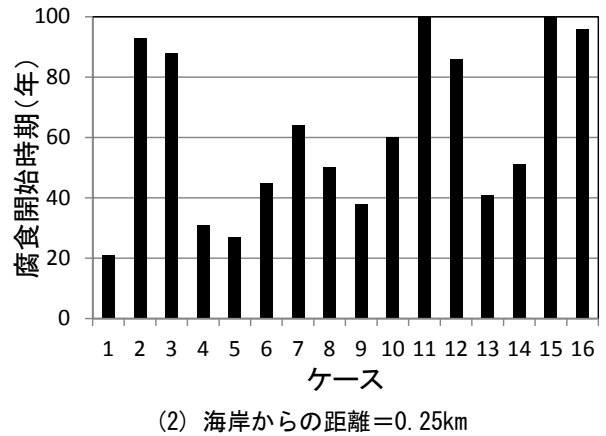
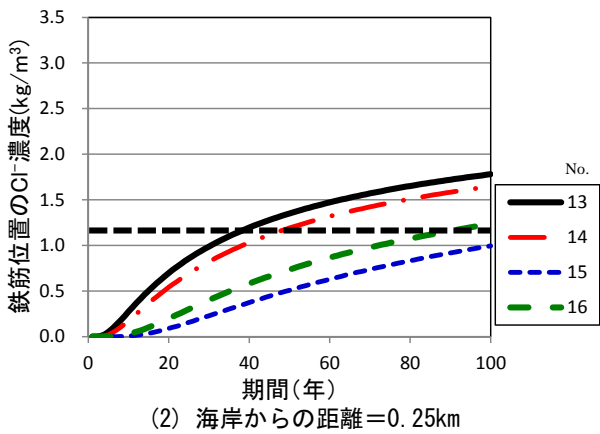
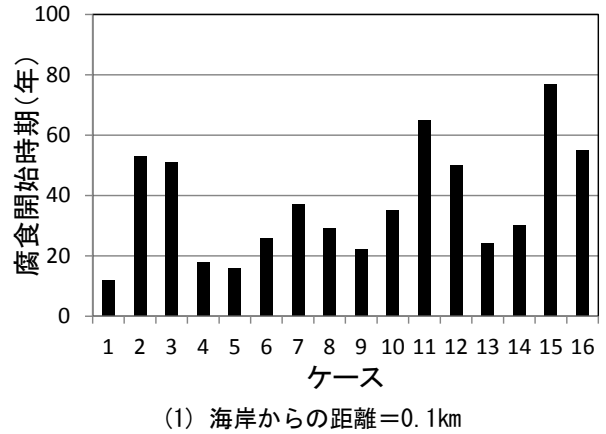
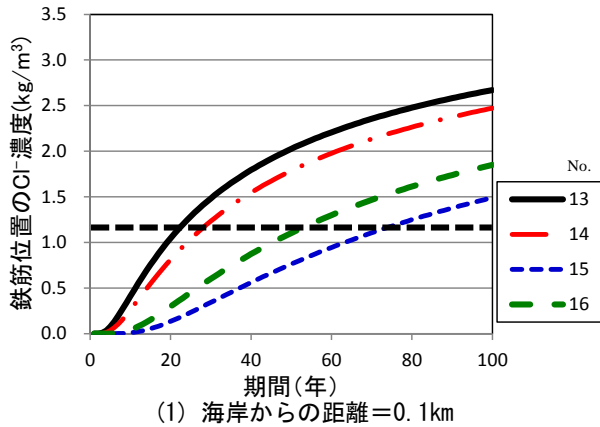


図-7 鉄筋表面における塩化物イオン濃度の経時変化の例 (庄川産骨材)

図-8 腐食開始時期の解析結果

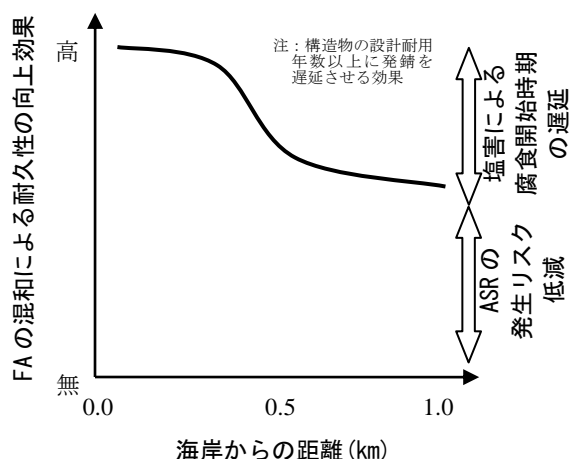


図-9 FAの混和による耐久性向上効果

発錆の場合、FAの混和による実用的な遮塩効果を期待できる構造物は、海岸からの距離が0.3km程度以内であると考えられる。

4.3 ASR抑制効果も鑑みた総合評価

FAの混和により、ASRが抑制されることが知られている^{5),6),7)}。したがって、4.2に示す遮塩効果とASR抑制効果を総合して考えると、分級FAの混和による北陸地方におけるコンクリートの耐久性向上効果は、図-9の様子に整理される。すなわち、無混和と比較してFAを混和することにより、海岸からの距離に拘らず、ASRの発生リスクを低減する効果が期待できる。それに加えて、無混和の場合には10~50年間程度で腐食が開始する、海岸からの距離が0.3km以内の構造物に対して、FAを混和することにより、塩害による腐食開始時期を遅延させる効果が期待できる。

5. まとめ

実用研究の結果として得られた、主な成果を列挙する。

- (1) 七尾産分級FAを混和材あるいはFAセメントB種として用い、富山県および石川県に流通する骨材を混練して製造されたコンクリートの遮塩性を、実験により定量的に評価できた。その上で、分級FAを用いることの耐久性向上効果を、飛来塩分による塩害に対する腐食開始時期の解析値により明らかにできた。
- (2) 七尾産分級FAを用いて製造されたコンクリートでは、無混和のコンクリートと比較して、塩化物イオンの実効拡散係数が低減された。また、BBで製造されたコンクリートと同等に、塩化物イオンの実効拡散係数は低かった。
- (3) 腐食開始時期の解析によれば、七尾産分級FAを用いて製造されたコンクリートでは、無混和と比較して、腐食開始時期が遅延された。また、BBで製造された

コンクリートと比較して、腐食開始時期は遅延、同程度あるいは早まる場合があった。したがって、使用する骨材やセメントの種類、コンクリートの呼び強度、海岸からの距離、かぶり、耐用設計年数や目標とする性能を考慮して、FAの混和により耐久性が向上するかを判断した上で実用することが重要である。

謝辞

本研究の実施に当たって、北陸電力(株)土木部および火力部、富山県と石川県の生コンクリート工業組合、前田建設工業・鹿島建設JV、ならびに金沢工業大学の学生の支援を受けた。ここに記して、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 川村満紀, 鳥居和之, 五十嵐心一, 藤井 剛: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートにおける養生条件の塩素イオン透過性に及ぼす影響, 材料, Vol.38, No.431, pp.953-958, 1989.8
- 2) 川原真一, 佐伯竜彦, 佐々木謙二, 佐藤道生: フライアッシュを用いた長期材齢コンクリートの塩分浸透抵抗性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.845-850, 2011.7
- 3) 加地 貴, 石井光裕, 橋本紳一郎, 橋本親典: フライアッシュコンクリートの実規模施工試験による実用性の検討, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.713-727, 2006.11
- 4) 濱田秀則, 福手 勤, 石井光裕: 混和材として分級フライアッシュを用いたコンクリートの基礎物性および海洋環境下における耐久性, 土木学会論文集, No.571/V-36, pp.69-78, 1997.8
- 5) 参納千夏男, 鳥居和之, 山戸博晃, 野口陽輔: 北陸地方産のフライアッシュによるアルカリシリカ反応の抑制効果, セメント・コンクリート論文集, No.58, pp.233-239, 2005.2
- 6) 平野貴宣, 参納千夏男, 橋本 徹, 鳥居和之: 富山県海岸部における反応性骨材含有 RC 試験体の長期暴露性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1035-1040, 2008.7
- 7) 川端雄一郎, 松下博通: アルカリシリカ反応抑制の観点からのフライアッシュの品質評価に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.3, pp.379-395, 2007.7