

実構造物より採取したコアによる高炉セメントにフライアッシュを混合したコンクリートの硬化物性評価

中山大誠*・佐々木謙二**・原田哲夫**

Evaluation on Hardening Properties of Core of Concrete Using Blast-Furnace Slag Cement Mixed Fly Ash

by

Taisei NAKAYAMA*, Kenji SASAKI** and Tetsuo HARADA**

It has not been cleared that the long-term durability of blast-furnace slag cement mixed fly ash until today. In this study, the experiments were carried out in order to clear the effects of fly ash on strength, carbonation and chloride-ion penetration of concrete using blast-furnace slag cement mixed fly ash. From the experimental result of the concrete cores exposed in coastal and inland regions for a long term, it was found that in the case of blast-furnace slag cement with 20% fly ash substitution, the carbonation rate coefficient was higher than blast-furnace slag cement. Moreover it was cleared that surface of total chloride content was higher, depth of chloride penetration was smaller than blast furnace slag cement.

Key words : Blast-furnace slag cement, Fly ash, Carbonation, Chloride ion penetration resistance, Core of actual concrete structure

1. はじめに

長崎県では、海砂の代替骨材の検討を発端に、コンクリートへのフライアッシュの有効利用に向けた取組みが2008年以降活発に行われてきた。その結果、2015年1月に長崎県土木部により「長崎県におけるフライアッシュコンクリートの配合・製造及び施工指針」・「同技術資料」(以下、長崎県FAコンクリート指針と呼称)が発刊され¹⁾、長崎県の建設工事共通仕様書の改訂に至った。長崎県FAコンクリート指針の特徴として、ベースセメントとして高炉セメントB種を原則としていること、フライアッシュを混和材としてセメントの一部に置換する場合に従来の「W/C(水セメント比)」を「W/B(水結合材比)」に読み替えて管理することとしていること、従来のレディーミクストコンクリートと同等の製造管理と強度管理が可能で汎用性の高いコ

ンクリート構造物に使用する「標準型」と、部材断面の大きなマスコンクリートのセメント水和熱に起因した温度ひび割れの抑制などの目的で使用する「低熱型」の2種類を規定していること、などが挙げられる。

長崎県FAコンクリート指針の策定までの段階においては、実機試験や試験施工を通してデータ蓄積を図るとともに、関係者のFAコンクリートへの理解向上にも努めてきた。FAコンクリートの試験施工は、FAコンクリートでの施工事例のない重力式擁壁、L型擁壁、砂防ダム、波返工、消波ブロックなどの様々な構造物において実施され、施工性の評価が行われた。

本研究では、高炉セメントにフライアッシュを混合したコンクリートの試験施工箇所よりコアを採取し、強度特性、中性化進行状況、塩分浸透状況、空隙構造について調査し、高炉セメントにフライアッシュを混

平成30年6月20日受理

* 総合工学専攻 (Graduate Student, Department of Advanced Engineering)

** システム科学部門 (Division of System Science)

Table 1 調査・試験対象コンクリートの概要

シリーズ	配合 No.	呼び強度 (N/mm ²)	セメント 種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	水結合材 比(%)	FA 置換率 (%)	細骨材率 (%)	施工年月
A	1	18	BB	8	4.5	58.1 (45.8) *1	0	42.1	2009年10月
	2				3.5		0	42.1	
	3				3.5		20	42.2	
	4				3.5		10(外割)	42.2	
B	1	18	BB	8	4.5	63.8 (47.8) *1	0	45.9	2011年1月
	2				3.5		20	45.9	
	3				3.5		10(外割)	45.9	
C	1	21	BB	8	4.5	58.5	0	38.2	2012年8月
	2				4.5	55.5	10	38.2	

※*1:フライアッシュを結合材として見なした場合の水結合材比

Table 2 調査・試験対象コンクリートの配合

シリーズ	配合 No.	単位量 (kg/m ³)						
		W	C	FA	S	G	AE 減水剤	AE 剤 (g/m ³)
A	1	152	261	0	776	1137	0.65	1.044
	2	154	264	0	784	1149	0.66	0.528
	3	150	207	52	786	1148	0.67	1.813
	4	154	266	70	707	1148	0.65	6.720
B	1	153	240	0	847	1098	1.80	2160
	2	154	194	48	867	1080	2.42	339 ^{*2}
	3	150	236	78	792	1097	2.36	0
C	1	141	241	0	725	1226	1.93	482
	2	135	219	24	728	1228	1.95	973

※*2: フライアッシュ用 AE 剤

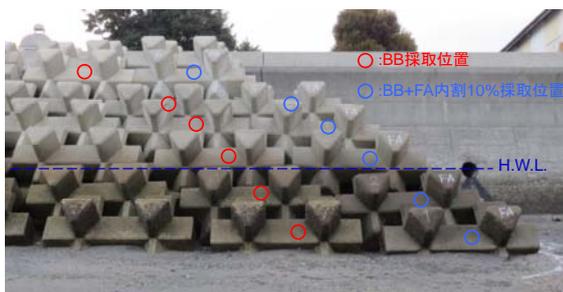


Photo 1 シリーズ C コア採取位置

いずれも長崎県内において試験施工として実施された高炉セメント B 種にフライアッシュ II 種を混合したコンクリートである。シリーズ A は離岸距離 100 m、標高 20 m 程度に位置する重力式擁壁である。シリーズ B は波返工、シリーズ C は消波ブロックである。

2.2 採取コア調査項目

(1) コア採取位置

2017 年 3 月および 11 月に各箇所において $\phi 100 \times 300 \sim 400$ mm 程度のコアを採取し、下記の試験を実施した。コアの採取は、シリーズ A においては重力式擁壁の地上露出部の高さ方向中心部において各配合 3 本、シリーズ B においては平均満潮位より 30 cm 上、80 cm 上の部分で各配合 5 本、シリーズ C においては Photo 1 の高さ位置の異なる 6 箇所において各配合 6 本を採取した。

合したことによる耐久性への影響について検討した。

2. 調査・試験概要

2.1 対象コンクリート

本研究の調査・試験対象のコンクリートの概要を Table 1 に、配合を Table 2 に示す。シリーズ A, B, C

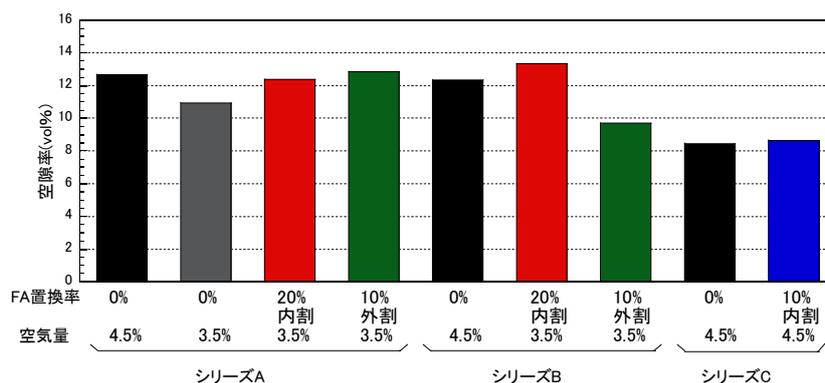


Fig. 1 空隙率

(2) 空隙率

採取コアを $\phi 100 \times 20$ mm 程度に切断し、表乾質量測定後、アルキメデス法により試験体の体積を算出した。その後、50℃乾燥炉において、質量が一定となるまで乾燥させ、空隙率を算出した。

(3) 圧縮強度・静弾性係数

採取コアを $\phi 100 \times 150 \sim 200$ mm 程度に切断し、JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に従い圧縮強度を測定した。その際に、試験体側面に添付したひずみゲージによりひずみを測定し、静弾性係数を算出した。

(4) 超音波伝搬速度

超音波伝搬速度は、コア表面より 20 mm ピッチで直接法により測定した。

(5) 中性化深さ

コア側面のノロを洗い流し、フェノールフタレイン溶液噴霧した後、24 時間経過後に中性化深さを測定した。

(6) 全塩化物イオン濃度分布

コア表面から 5 mm の深さごとに試料を採取し、全塩化物イオン量を JIS A 1154「硬化コンクリートに含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し、塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法により測定した。その結果を Fick の拡散方程式の解で回帰して、表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数を算出した。

3. 調査・試験結果および考察

3.1 空隙率

Fig. 1 に採取コアの空隙率を示す。いずれのシリーズにおいても、内割の場合、空隙率は無置換と同等になった。外割の場合、シリーズ A は無置換と同等、シリーズ B は無置換よりも小さくなった。外割において、フライアッシュを水結合材比としてみなした場合、外

割の水結合材比は無置換に比べて小さくなるため、乾燥しにくい環境のシリーズ B の外割の空隙率は無置換よりも小さくなった。一方で、シリーズ B に比べて乾燥しやすい環境であるシリーズ A では、ポズラン反応が進行せず、水結合材比が無置換と同等になり、空隙率は無置換と同程度になったと考えられる。シリーズ A, B で比較すると、シリーズ B の方が、水結合材比が 5% 大きいにも関わらず、無置換、内割の場合は同等、外割の場合は小さくなっていることから、海洋構造物においては、より空隙率が小さくなることが確認された。

3.2 力学的特性

(1) 圧縮強度・静弾性係数

Fig. 2 に圧縮強度の経時変化を示す。材齢 56 日までの結果は、標準養生したテストピースの圧縮強度である。いずれの配合においても材齢 5.3~7.5 年後のコアの圧縮強度は、標準養生した材齢 56 日の圧縮強度よりも増進しており、特にシリーズ B や C の海岸構造物においてフライアッシュを混合した場合に顕著な強度増進が見られる。

Fig. 3 に材齢 56 日のテストピースの圧縮強度に対する採取コアの圧縮強度比を示す。無置換よりもフライアッシュを混合したほうが圧縮強度比が大きくなっていることが分かる。例外的にシリーズ B の外割の圧縮強度比は無置換とほぼ同等になっている。Fig. 2 に示す通り、シリーズ B の外割 10% 置換のコアの圧縮強度は最も大きく、テストピースの圧縮強度も最も大きかったので、圧縮強度比の増加が相対的に小さく評価されたためと考えられる。

Fig. 4 にコアの空隙率と圧縮強度の関係を示す。いずれのシリーズにおいても、内割の場合、無置換と比較して、空隙率は同等であるものの圧縮強度は大きくなった。また、外割の場合、シリーズ A においては、

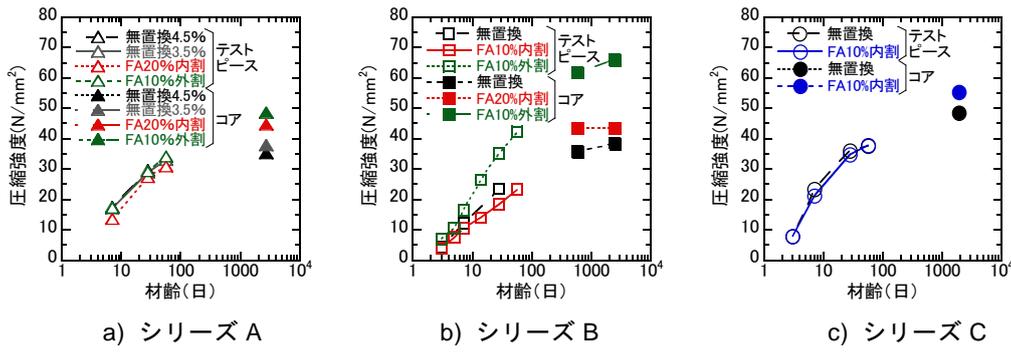


Fig. 2 圧縮強度の経時変化

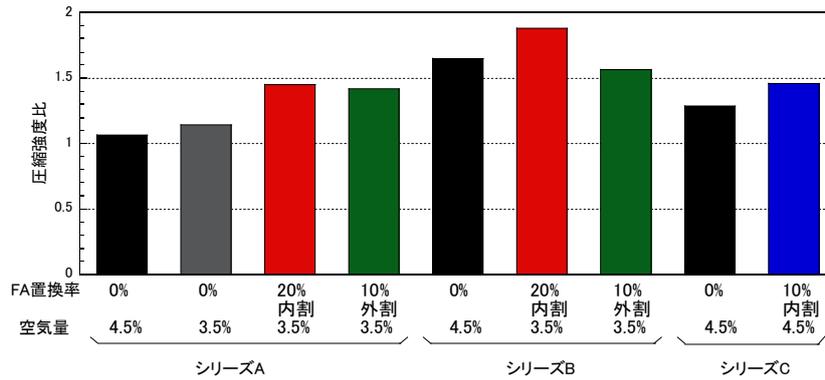


Fig. 3 コアのテストピースとの圧縮強度比

無置換と同等の空隙率であるが、圧縮強度は無置換、内割 20% 置換よりも大きくなった。シリーズ B の外割 10% 置換は、空隙率は小さく、圧縮強度が顕著に大きくなっている。このことから、フライアッシュを混合することで、内割の場合、空隙率は無置換と同程度でも、圧縮強度は大きくなるが、外割の場合は、湿潤環境においては、空隙率は無置換よりも小さくなり、それに伴って圧縮強度も無置換より飛躍的に大きくなる事が確認された。

Fig. 5 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。参考に土木学会コンクリート標準示方書の圧縮強度と静弾性係数の関係を併せて示した。シリーズ C を除いて、概ね示方書式に近い圧縮強度と静弾性係数の関係となった。シリーズ C は、粗骨材が石灰石骨材であるため、粗骨材の岩種の影響により、シリーズ A や B、示方書式に比べて、同一圧縮強度における静弾性係数が大きくなったと考えられる。

(2) 超音波伝搬速度

Fig. 6 にコアの超音波伝搬速度を示す。いずれの場合においてもフライアッシュを混合した方が超音波伝搬速度は大きくなっていることが分かる。フライアッシュのポズラン反応で固体部分の連続性が高まったことにより、超音波伝播速度が大きくなったと考えられ

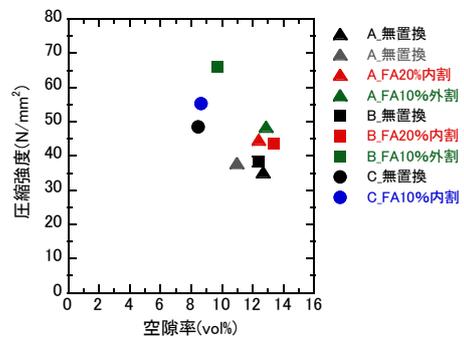


Fig. 4 空隙率と圧縮強度の関係

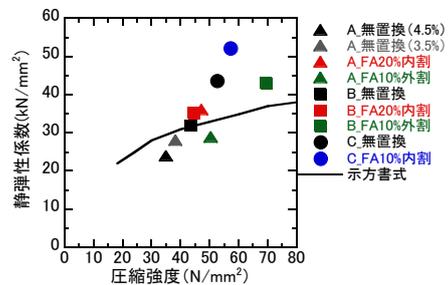


Fig. 5 圧縮強度と静弾性係数の関係

る。

Fig. 7 にコアの超音波伝搬速度と圧縮強度の関係を示す。既往の研究²⁾によれば、圧縮強度が 40N/mm²

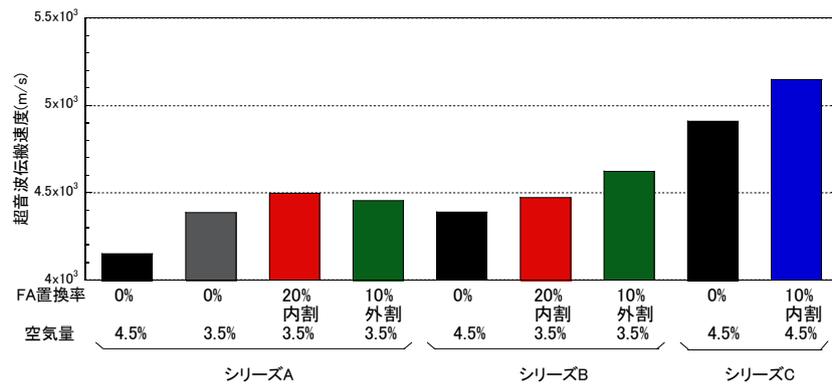


Fig. 6 超音波伝搬速度

を超える範囲も含む全強度域を対象とした超音波伝搬速度と圧縮強度の関係は、線形近似よりも指数近似の方が適切であることから、本研究の結果を見ると前述の圧縮強度と静弾性係数の関係と同様に、石灰石骨材を用いているシリーズCの超音波伝搬速度と圧縮強度の関係が他と異なる傾向を示した。粗骨材そのものの特性が大きく変わらない範囲においては、フライアッシュ混合の有無に関わらず、超音波伝搬速度と圧縮強度の関係はほぼ同一となり、超音波伝搬速度の測定により非破壊で圧縮強度が推定できるものと考えられる。

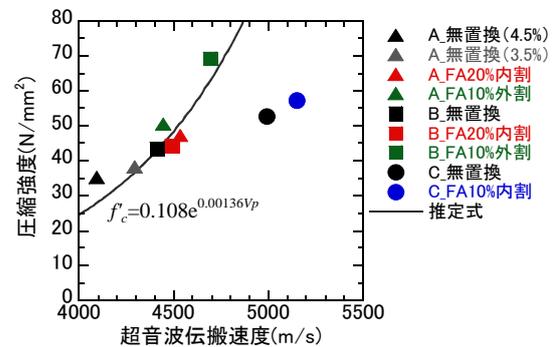


Fig. 7 超音波伝搬速度と圧縮強度の関係

3.3 中性化

Fig. 8 に採取コアの中性化深さより算出した中性化速度係数を示す。シリーズA, Bそれぞれにおいて内割20%置換の中性化速度係数は最大となった。これは、セメントの水和反応により生成し、中性化の進行を左右する水酸化カルシウム量が無置換、外割10%置換に比べて少なかったこと、フライアッシュのポゾラン反応による組織の緻密化が起こる前にCO₂の侵入があり、中性化が進行してしまったことによるものと考えられる。シリーズA, Bの外割10%置換の中性化速度係数は、無置換(空気量4.5%)と同程度になった。なお、シリーズAにおいて無置換(空気量3.5%)と外割10%置換の中性化速度係数を比較すると、外割10%置換の方が2倍程度となったが、詳細は不明である。無置換と外割10%置換とでは単位セメント量がほとんど変わらないが、フライアッシュのポゾラン反応により外割10%置換の方が水酸化カルシウム量が減少すると考えられる。一方で、CO₂の侵入の観点では、フライアッシュのポゾラン反応による緻密化、フライアッシュを結合材とみなした場合の水結合材比が無置換の場合よりも小さくなることにより、外割10%置換の方がCO₂の侵入しにくくなると考えられる。フライアッシュを

外割置換した場合には、水酸化カルシウム量の減少とCO₂の侵入抑制のバランスによって、無置換(空気量4.5%)と外割10%置換の中性化速度係数は同程度になったと考えられる。また、シリーズA, Bの結果を比較すると、呼び強度は18 N/mm²で同じであるが、水結合材比がシリーズAの方が5%程小さい。よってシリーズAの方が生成する水酸化カルシウムが多くなり、かつ組織の緻密化が進行し、CO₂の侵入が抑制されたことにより、中性化速度係数が小さくなったと考えられる。シリーズCの内割10%置換の中性化速度係数は無置換よりも小さい結果となった。内割10%置換の方がセメント量が少ないため、水酸化カルシウム生成量は内割10%置換の方が少ないと考えられるが、フライアッシュのポゾラン反応による組織の緻密化、および材齢28日強度がほぼ同一となるように水結合材比を3%小さくしていることにより、無置換よりもCO₂の侵入が抑制されると考えられる。水酸化カルシウム量の減少よりも、CO₂侵入の抑制効果の方が卓越したため、内割10%置換の中性化速度係数は無置換よりも小さくなったと考えられる。このことから、呼び強度(材齢28日強度)を一定とし、内割10%置換の水結合材比を3%小さくした場合には、中性化速度係数を小さく

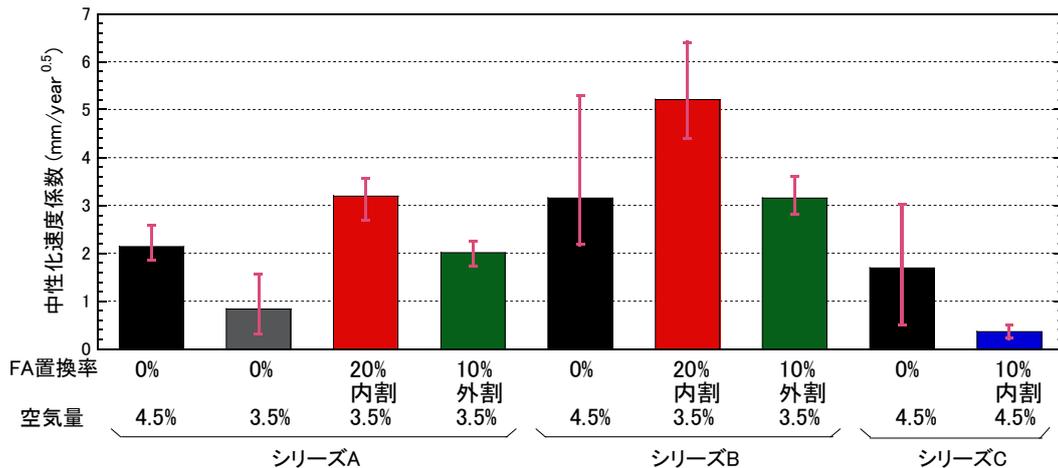


Fig. 8 中性化速度係数

できることが明らかとなった。

3.4 塩分浸透抵抗性

(1) 全塩化物イオン濃度分布

シリーズBの波返工より採取したコアの全塩化物イオン濃度分布をFig. 9に示す。コア採取時の材齢は6.8年であり、採取位置はH.W.Lより30cm上の位置である。塩分浸透深さは、内割20%置換、外割10%置換いずれにおいてもフライアッシュによるポズラン反応により組織が密実になったため、無置換よりも小さくなったと考えられる。無置換、内割20%置換、外割10%置換の全塩化物イオン濃度分布を比較すると、内割20%置換が最も多くの塩分が浸透している結果となった。これはフライアッシュのポズラン反応による組織の緻密化が起こる前に塩分浸透が進んでしまったからと考えられる。

シリーズBの波返工より材齢1.6年、6.8年時に採取したコアの全塩化物イオン濃度分布をFig. 10に示す。無置換は材齢1.6年、6.8年のそれぞれの塩分浸透深さは3.0cm程度、4.0cm程度となり、材齢6.8年の方が1.0cm程度大きくなった。一方で、内割20%置換は、塩分浸透量は材齢6.8年の方が著しく多いが、塩分浸透深さは、材齢1.6年、6.8年共に3.0cm程度となった。これは、時間の経過と共にポズラン反応が進み、組織の密実化が起こったため、既に内部に侵入していた塩分は深部まで浸透できなかったためと考えられる。また、外割10%置換も内割20%置換と同様に、材齢6.8年の方が塩分浸透量が多くなったが、塩分浸透深さはどちらも3.0cm程度となった。後述のFig. 13より、シリーズBの材齢6.8年の全塩化物イオン濃度分布より求めた塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、

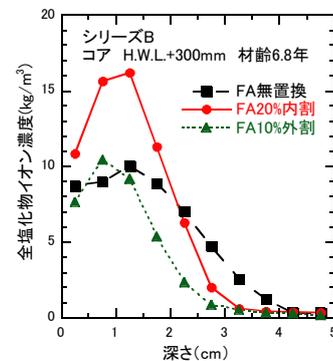


Fig. 9 全塩化物イオン濃度分布 (シリーズB)

材齢1.6年と比較して無置換では40%程度まで、内割20%置換では20%程度まで低下しており、内割20%置換の方がより顕著に低下している。これらのことから、フライアッシュを混合すると時間経過と共に無置換よりも塩分拡散が抑えられることが分かる。以上のことから、高炉セメントB種にフライアッシュを混合することで、時間の経過と共に表面から浅部の塩分浸透量は増えるが、深部への塩分浸透を防ぐことができると言える。

シリーズCの消波ブロックより採取したコアの全塩化物イオン濃度分布をFig. 11に示す。無置換、内割10%置換それぞれにおいて1段目は干満部、4、6段目は飛沫部である。無置換、内割10%置換の全塩化物イオン濃度分布を比較すると、いずれにおいても内割10%置換の方が塩分浸透が少ない結果となった。これは、フライアッシュによるポズラン反応により組織が密実になったため塩分浸透が抑制されたためと考えられる。また、無置換においては最も大きいもので深さ3.5cm

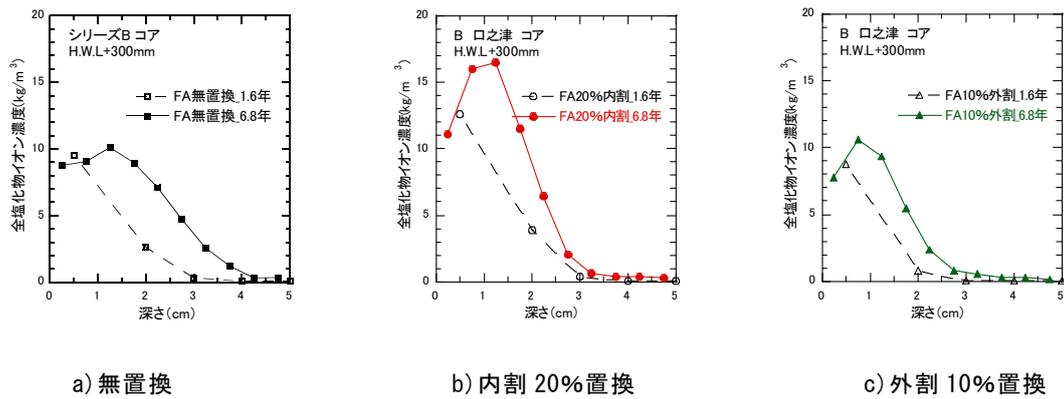


Fig. 10 全塩化物イオン濃度の経時変化 (シリーズ B)

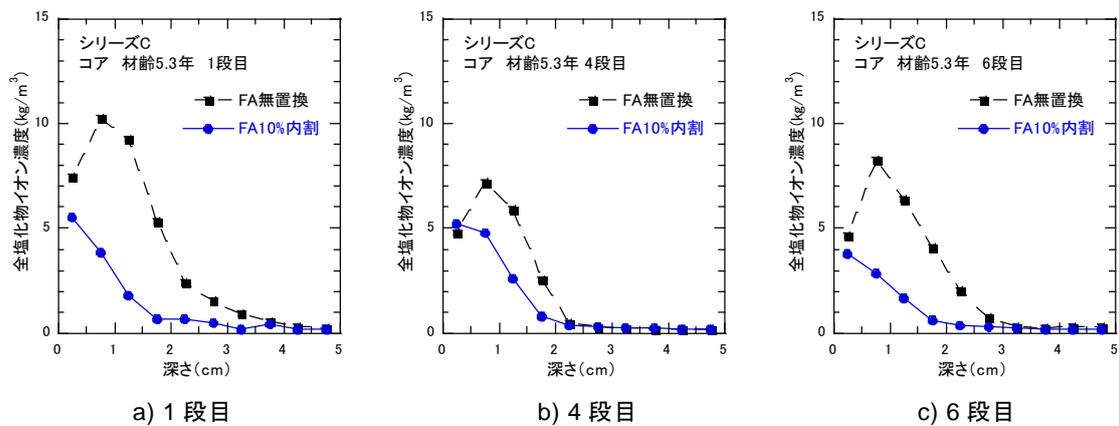


Fig. 11 全塩化物イオン濃度分布 (シリーズ C)

程度まで(1段目), 最も小さいもので深さ 2cm 程度まで(4段目)塩分浸透しており差が見られた. 一方, 内割 10%置換ではいずれにおいても深さ 2cm 程度までしか塩分が浸透していないことが確認されたことから, 高炉セメント B 種にフライアッシュを 10%混合することで, 環境条件に関わらず, フライアッシュ無置換の場合に比べて塩分浸透を抑制できていると言える.

(2) 表面塩化物イオン濃度, 見掛けの拡散係数

シリーズ B の波返工, シリーズ C の消波ブロックより採取したコアの表面塩化物イオン濃度を Fig. 12 に示す. シリーズ B の材齢 6.8 年では, 内割 20%置換の表面塩化物イオン濃度は, 無置換, 外割 10%置換よりも大きくなった. 一方で, シリーズ C の内割 10%置換の表面塩化物イオン濃度は, 1, 4, 6 段目いずれにおいても内割 10%置換の方が無置換よりも小さくなった. これは, シリーズ C ではフライアッシュのポズラン反応による組織の緻密化に加え, 無置換より内割 10%置換の方が水結合材比が小さいことにより, 外部環境からコンクリート表面への塩分の侵入が少なかったためであると考えられる.

シリーズ B の波返工, シリーズ C の消波ブロックよ

り採取したコアの塩化物イオンの見掛けの拡散係数を Fig. 13 に示す. シリーズ B の材齢 6.8 年のコアの見掛けの拡散係数は, 内割 20%置換の方が無置換よりも小さくなった. また外割 10%置換では, フライアッシュのポズラン反応の効果, フライアッシュを結合材とみなした場合の水結合材比が無置換, 内割 20%置換よりも小さいことから, 見かけの拡散係数が最も小さくなった. シリーズ C では, フライアッシュのポズラン反応による組織の緻密化および水結合材比を 3%小さくしていることにより, 内割 10%置換の方が見かけの拡散係数は小さくなった. 無置換の 4 段目を除けば, 無置換, 内割 10%置換それぞれにおいて高さによらず見掛けの拡散係数はほぼ同程度となった. シリーズ C の消波ブロックは 6 ヶ月間, ヤードに仮置きされてから設置され, 無置換の場合と比較して内割 10%置換の方はポズラン反応による組織の緻密化の効果もある程度発揮してから設置されたことによって, 塩分の浸透がしにくくなったためと考えられる.

4. まとめ

本研究により得られた知見は, 以下の通りである.

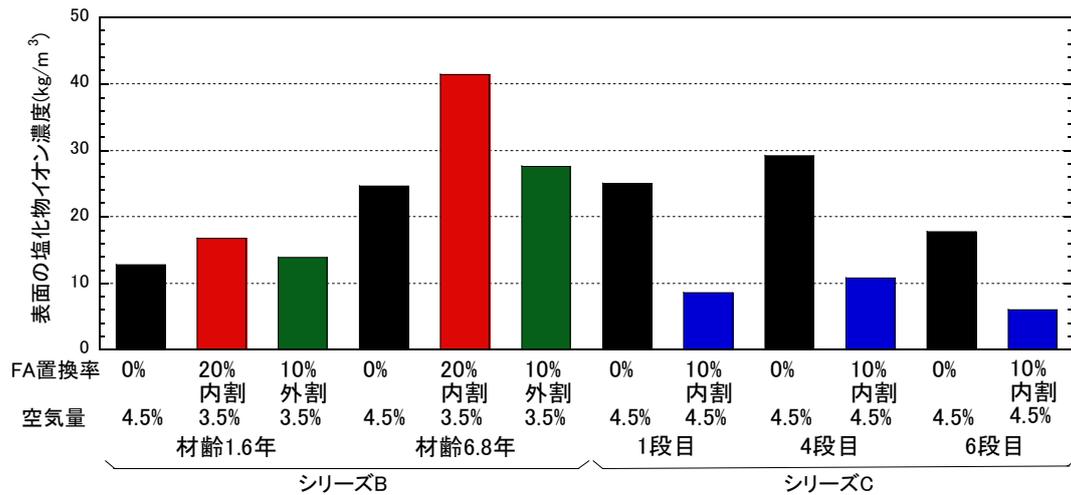


Fig. 12 表面塩化物イオン濃度

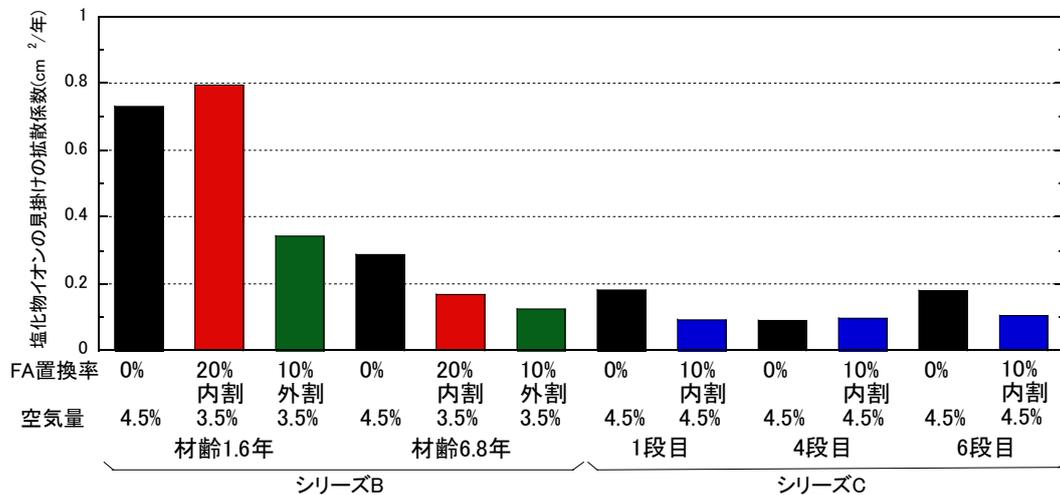


Fig. 13 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

- フライアッシュを混合した場合、空隙率は、内割置換の場合、無置換と同等、外割置換の場合、海洋構造物において、無置換よりも小さくなることを確認された。
- フライアッシュを混合した場合、海岸構造物において顕著な強度増進が確認された。
- 粗骨材の品質がほぼ同等の範囲においては、フライアッシュ混合の有無に関わらず、圧縮強度と静弾性係数の関係、超音波伝搬速度と圧縮強度の関係はほぼ同一となる。
- 同一の水結合材比においては、フライアッシュ20%内割置換の場合には中性化速度係数は無置換に比べて大きくなるが、10%外割置換の場合には無置換（空気量4.5%）と同程度である。呼び強度（材齢28日強度）を一定とし、内割10%置換の水結合材比を3%小さくした場合においては、中性化速度係数を小さくできることが明らかとなった。

- フライアッシュの混合により、表層部での全塩化物イオン量は増加するものの、内部への塩化物イオンの浸透が抑制されることが確認された。

謝辞

本研究は、長崎県フライアッシュコンクリート検討会（長崎大学、長崎県土木部、長崎県生コンクリート工業組合、九州電力株式会社、他）の活動の一環として実施しました。関係各位に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 長崎県土木部：長崎県におけるフライアッシュコンクリートの配合・製造及び施工指針，2015.1
- 木村芳幹，谷川恭雄：超音波速度法による高強度コンクリート構造体の品質の推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.577-582，2001