

エコセメントおよび海水を併用した高炉スラグ高含有コンクリートの初期強度増進について

XU, JIALE

九州大学大学院工学府土木工学専攻 : 博士後期課程

福永, 隆之

九州大学大学院工学研究院社会基盤部門 : 助教

濱田, 秀則

九州大学大学院工学研究院社会基盤部門 : 教授

<https://hdl.handle.net/2324/7340472>

出版情報 : Journal of structures and materials in civil engineering. 39, pp.133-139, 2023-12-29. Kyushu Association for Bridge and Structural Engineering

バージョン :

権利関係 :



エコセメントおよび海水を併用した 高炉スラグ高含有コンクリートの初期強度増進について

Research on the early strength development of concrete with high content of
ground granulated blast furnace slag combined with eco-cement and seawater

XU JIALE^{1*}, 福永 隆之², 濱田 秀則³

XU JIALE, Takayuki FUKUNAGA, Hidenori HAMADA

¹学生会員 九州大学大学院 工学府土木工学専攻 博士後期課程 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

²非会員 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 助教 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

³正会員 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 教授 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

*Corresponding Author, E-mail: xujiale@outlook.com

高炉スラグ微粉末（BFS）は混和材としてセメントの一部を置換することにより、コンクリートの性能を改善できる。また、BFSを置換し、セメントの使用量を減少させることによりCO₂排出量を低減できるため、積極的な利用が期待されている。しかし、置換率が大きくなるほど、初期強度は低くなるという特徴がある。本研究では、初期強度の増進を目標として、エコセメントおよびBFSを結合材、海水を練混ぜ水として、BFSを高含有したコンクリートの強度性状および耐久性を検討した。その結果、エコセメントと海水を併用することで、海水中の塩分やBFS中の石こうが、アルミネート水和物の生成に影響を与え、初期強度を増進させることなどが明らかとなった。

キーワード：高炉スラグ微粉末、海水練り、エコセメント、初期強度

1. はじめに

コンクリートの構成材料であるセメントは、主原料である石灰石を焼成して製造するため、大量のCO₂が排出される。そのため、セメント産業のCO₂排出量は世界中の総排出量の8%を占めている¹⁾。地球温暖化防止の観点からセメントの使用量を抑えて、CO₂排出量を削減することが重要である。セメントの一部を異なる材料で置換する混和材の使用はCO₂削減の対策として有効である。混和材である高炉スラグ微粉末（BFS）は潜在水硬性を有することから、アルカリ成分を有するセメントによって反応して、コンクリートの長期強度を増進し、アルカリ骨材反応を抑制するなど様々な性能を改善できる。近年はCO₂削減の観点から、セメントをBFSで大量に置換することが望まれる。しかし、BFSを大量に使用したコンクリートの初期強度は普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートよりも低い。そのため、養生期間を長くとる必要があり、現場では活用しにくい。現場で活用するためには、初期強度の増進方法が必要である。それにより、無機塩類・刺激剤などの添加品を使用して初期強度の増進に関する研究が行われている。坂井ら²⁾は亜硝酸カルシウム（Ca(NO₂)₂）が高炉スラグ高含有セメントの水和反応や強度発現性に及ぼす影響について検討した。Ca(NO₂)₂の添加により、水和生成物としてNitrite AFmが生成して、結合材とした普通ポルトランドセメン

トおよび高炉スラグの反応が促進されるため、初期の圧縮強度は無添加より増進することを示した。さらに、以上の結果を踏まえて、坂井ら³⁾はジエタノールイソプロパノールアミンとCa(NO₂)₂を併用することにより、Ca(NO₂)₂単独添加に比べてBFSおよびセメントの反応が促進されるため、初期強度が大きくなることを報告している。安達ら⁴⁾は各種膨張材を刺激剤として利用した研究を行っている。その結果、膨張材はアルカリ成分を含有するため、BFSの水和反応を促進して、初期強度を増進することを報告している。以上の研究は、無機塩類、刺激剤を活用してBFSの反応を促進することを報告している。しかし、適切な添加量について詳細の検討が必要であり、実際にコンクリートを作製して長期の耐久性状はまだ明らかにでない。

一方、持続可能な社会の形成のためには、循環型材料の積極的な利用が望まれている。その一例として、都市ごみ焼却灰を主原料としたエコセメントが挙げられる。エコセメントは、都市ごみの埋め立て処分地の逼迫を解決する有効な方法である。しかし、エコセメントは都市ごみを主原料としているため、塩化物イオン量やアルカリ成分が高く、それを使用したコンクリートの耐久性が低い⁵⁾。そのため、使用用途が限られている。エコセメントを活用するために、長塩ら⁶⁾はエコセメントにBFSを50%置換した供試体を海洋環境で暴露して塩分浸透

性状を検討した。その結果、5 年間に BFS を混合したエコセメントコンクリートは無混合と比較すると、組織が緻密化して塩化物イオンの浸透を抑制され、耐久性を向上する。そのため、BFS とエコセメントの併用が期待されている。しかし、BFS を高置換する例の検討が少ない。

一方、開発途上国では爆発的な人口増加、工業化および生活の質の向上により水の消費が急増している。そのため、2050 年には 50 億以上の人々が 1 年に 1 ヶ月以上に水不足な状態になると予測されている⁷⁾。このような将来的な水不足時代を勘案すると、種々の分野において淡水の確保を検討しなければならない。コンクリート分野では、近年水資源不足の問題を改善するために、海水を練混ぜ水としたコンクリートに関する研究が行われている。審良ら⁸⁾は練混ぜ水に海水を用いたコンクリートの干満帯における長期耐久性を評価した。その結果、暴露 26 年のコンクリートの強度は材齢初期と同程度またはそれ以上の状態を保持している。また、鉄筋の腐食は、海水コンクリートと水道水コンクリートに比べて大きな差はない。竹田ら⁹⁾は海水を練混ぜ水として使用することで、コンクリートの初期強度が増加することを示している。しかし、塩素の影響で鉄筋の腐食が懸念されるために、鉄筋コンクリートを使用する場合は対策が必要であることを報告している。その上で、西田ら¹⁰⁾は高炉スラグと併用することで鉄筋の腐食を抑えることが報告している。しかしながら、以上の海水練りコンクリートについて研究には BFS 高含有コンクリートと海水の併用に関する検討が少ない。

上述したように、エコセメントおよび海水を使用することにより、BFS を高含有したコンクリート(BFS 高含有コンクリート)の初期強度を促進する可能性がある。しかし、水和反応の機構およびコンクリートの耐久性はまだまだ明らかでない。

そこで本研究では、BFS 高含有コンクリートの初期強度の増進を目的として、エコセメントおよび海水を利用した供試体を作製し、強度性状、反応メカニズムおよび耐久性について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本研究では、セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの三種類を作製した。表-1 に使用材料を示す。結合材として、エコセメントと普通ポルトランドセメント単味（それぞれ E、N）とその 70%を BFS で置換したもの（以下、E70、N70）とした。BFS は高炉スラグ微粉末 4000(石膏添加品)を利用した。細骨材はモルタル供試体にはセメント強さ試験用標準砂を、コンクリート供試体には除塩した海砂を使用した。粗骨材は砕石 2005 を利用した。練混ぜ水は水道水(FW)および海水(SW)とした。海水の採水地は糸島市である。セメントの化学組成と鉱物組成を表-2 と表-3 に示す。エコセメント中の間隙相(C₃A,C₄AF)の含有量は普通ポルトランドセメントより

表-1 使用材料

材料区分	材料名	備考
セメント	OPC：普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³ 比表面積 3340cm ² /g
	EC：エコセメント	密度 3.15g/cm ³ 比表面積 4100cm ² /g
混和材	BFS：高炉スラグ微粉末 4000	密度 2.91g/cm ³ 比表面積 3960cm ² /g 石膏添加品
細骨材	S：標準砂	絶乾密度 2.64g/cm ³ 吸水率 0.42%
	SS：海砂(除塩)	表乾密度 2.53g/cm ³ 吸水率 1.37%
粗骨材	G：砕石 2005	表乾密度 2.87g/cm ³ 吸水率 0.68%
水	FW：水道水	
	SW:海水	採水地：糸島市
混和剤	AE 減水剤	標準形（I種）
	AE 剤	標準形（I種）

表-2 セメントの化学組成 (%)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl	R ₂ O
OPC	64	21	5.0	3.0	1.5	2.0	0.01	0.6
EC	61	18	7.0	4.2	2.0	3.9	0.05	0.4

表-3 セメントの鉱物組成 (%)

	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄
OPC	57	17	8	9	3.4
EC	47	16	11	13	6.6

表-4 海水の成分 (mg/L)

Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
12047	303	1278	17203	2504

多い。また、現在のエコセメントのアルカリ成分と塩化物イオンは開発当初のエコセメントと比較して小さくなっている。海水の成分を表-4 に示す。ナトリウムイオンおよび塩分イオンは多く占めている。モルタル供試体は JIS R 5201 に準拠して W/B=0.5、S/B=3 として作製した。打設 24 時間後に脱型して養生した。海水練り供試体は 20℃封かん養生を施した。一方、水道水練りは標準水中養生とした。セメントペースト供試体の水セメント比、BFS 置換率および養生条件はモルタル供試体と同一である。コンクリートの配合を表-5 に示す。s/a は 42.9%として、水道水練りの N70(FW)および E70(FW)、海水練りの N70(SW)と E70(SW)を作製した。混和剤は AE 減水剤および AE 剤を使用した。添加量はスランブ 10cm、空気量 3.0%となるように調整した。

表－5 コンクリートの配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)							スランプ (cm)	空気量 (%)
			W		B			SS	G		
			FW	SW	OPC	EC	BFS				
N70(FW)	50	42.9	170	-	102	-	238	728	1100	12.0	3.4
E70(FW)			170	-	-	102	238	728	1100	9.5	2.8
N70(SW)			-	170	102	-	238	728	1100	8.5	2.0
E70(SW)			-	170	-	102	238	728	1100	11.0	2.6

2.2 試験項目

(1)フロー試験および圧縮強度試験

モルタル供試体は JIS R 5201 に準拠してフロー試験圧縮試験を実施した。圧縮強度の測定材齢は 3 日、7 日、28 日、56 日、91 日および 168 日である。コンクリートの圧縮強度は JIS A 1108 に準拠して材齢 7 日、28 日で実施した。

(2)細孔径分布

細孔径分布の測定は、水銀圧入式ポロシメーターを使用した。材齢に達したモルタル供試体を約 5.0mm の立方体片に切り出し、試料とした。切り出した試料をアセトンで水和停止させた後、真空凍結乾燥機を用いて 2 日間乾燥させた。測定材齢は 3 日および 8 日とした。

(3)XRD 分析

セメントペースト供試体の反応生成物の経時変化を粉末 X 線回折法（以下、XRD）により測定した。試料はアセトンによる水和停止を実施したのち、150μm 以下に微粉砕した。生成物同定のため、粉砕した試料に対して、内部標準試料として MgO を内割りで 10%置換した。測定材齢は 3 日とした。

(4)BFS 反応率

高島ら¹¹⁾は提案した選択溶解法を用いて BFS の反応率を算出した。この方法はサリチル酸アセトンメタノール溶液を用い、未反応スラグを定量することで BFS 反応率を算出した。式(1)で高炉スラグの反応率を算出した。OPC の不溶残分は文献より¹²⁾不溶残分率を 21.1%として補正を行った。また、BFS と EC の不溶残分率を測定し、95%と 18.2%とした。

$$\alpha(t) = 100 - \frac{x(t) \cdot (100 - Ig'(t)) - mk_1 k_2 (100 - Ig(t))}{mk_3 k_4 (100 - Ig(t))} \times 100 \quad (1)$$

ここに $\alpha(t)$: 高炉スラグ微粉末の反応率
 t : 水和時間(日)
 $x(t)$: 不溶残分量(mg)
 m : 試料量(mg)
 $Ig(t)$: 水和試料の $ig.loss(\%)$
 $Ig'(t)$: 不溶残分の $ig.loss(\%)$
 k_1 : 無水物換算した OPC/EC の含有率(%)
 k_2 : OPC/EC のみの不溶残分率(%)

k_3 : 無水物換算した高炉スラグの含有率(%)

k_4 : 高炉スラグのみの不溶残分率(%)

(5)非定常電気泳動試験

本研究はコンクリート供試体に対して非定常方法で電気泳動試験¹³⁾を実施した。非定常方法は定常方法より実験期間が短期になる方法である。所定時間通電した供試体を割裂し、割裂面に硝酸銀溶液を噴霧し、呈色部分を塩分浸透深さとして測定を行い、この測定値と時間の関係から塩化物イオン拡散係数を求める方法である。拡散係数は通電時間と塩分浸透深さの関係から移動速度 k を求め、式(2)により算出した。印加電圧は 30V、溶液は 0.5mol/L の NaCl 水溶液および 0.3mol/L の NaOH 水溶液を使用した。材齢 28 日に試験を実施し、通電時間は 6 時間、24 時間および 48 時間とした。

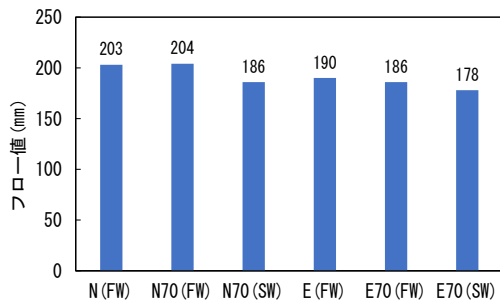
$$D = k \cdot \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \frac{L}{\Delta\phi} \quad (2)$$

ここに D : 塩化物イオン拡散係数 (cm²/year)
 k : 通電時間と塩化物イオン浸透深さの関係より求まる移動速度
 R : 気体定数 (8.31 J/ (mol・K))
 F : ファラデー定数 (96,500 C/mol)
 T : 絶対温度 (K)
 L : 試験体厚さ (mm)
 z : 価数
 $\Delta\phi$: 試験体に印加された電圧 (V)

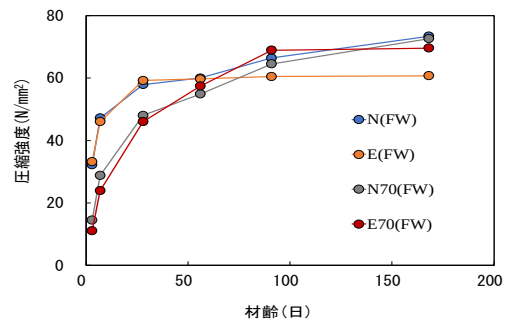
3. 実験結果および考察

3.1 フロー試験

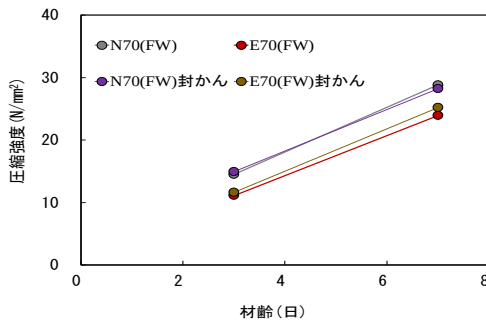
各配合のフロー試験の結果を図－1 に示す。図より、EC のフロー値は OPC のフロー値より低い。これは、EC の比表面積が OPC より高いため、セメントペーストの粘性が増加し、流動性が小さくなったと考えられる。同一セメントの場合、BFS の置換がフレッシュ性状に与える影響は小さい。一方、練混ぜ水に海水を用いた配合のフロー値は、水道水練りのフロー値と比較して低下する傾向がある。これは、海水の密度が水道水の密度より大きい、モルタル供試体の単位体積当たりには占める練混ぜ水の量は海水練りの方が小さいため、フロー値が低下したと推察される。



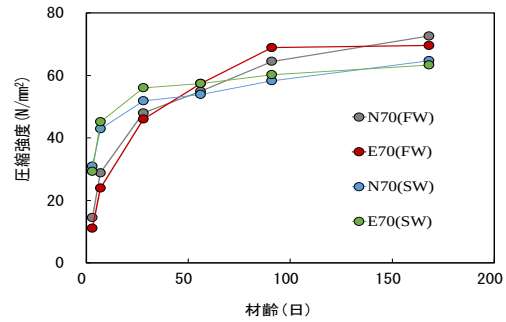
図－1 フロー試験の結果



図－2 水道水練り圧縮強度



図－3 封かん養生および水中養生の
N70(FW)とE70(FW)圧縮強度



図－4 海水練り圧縮強度

3.2 モルタル圧縮強度

図－2 に水道水練り供試体の圧縮強度を示す。E70(FW)の初期強度はN70(FW)より低い結果になった。これより、BFSを高含有する場合、セメントはエコセメントに変更することで初期強度が増加しないと考えられる。また、N70(FW)よりもE70(FW)の方が強度の伸びが大きい。既往の研究により、長期にECとBFS併用することで組織が緻密化したため、強度は増進することが報告されている⁹⁾。本研究は同じ現象が起きたと考える。

本研究において海水練り供試体と水道水練り供試体の養生条件は異なるため、封かん条件でE70(FW)とN70(FW)の供試体を作製し、養生条件が初期強度に与える影響を検討した。図－3 に水道水練りおよび海水練り供試体材齢初期の圧縮強度を示す。図より、封かん養生をした供試体の初期強度は水中養生の供試体の初期強度とほぼ一致した。そのため、材齢3日および7日において、養生条件の違いが強度へ与える影響は少ないと判断した。

図－4 に海水練り供試体の圧縮試験の結果を示す。図より、BFSを高置換した場合でも海水練りモルタルの初期強度は顕著に高くなっている。E70(SW)とN70(SW)と比較すると、材齢3日において強度はほぼ一致したが、3日以降にE70(SW)の強度の伸びはN70(SW)より大きくなった。そのため、エコセメントと海水を併用することにより、初期強度をさらに増進できると考えられる。また、海水練りにおける材齢28日以降の強度の伸びは水道水より小さい結果になった。これは、長期材齢において海水練りの供試体の各クリンカー反応率は水道水練り

より停滞すると報告されている。¹⁴⁾本研究でも同様の現象が起きたと推察した。

3.3 細孔構造

図－5 と図－6 に各供試体の累積細孔量を示す。海水練りと水道水練りを比較すると、材齢によらず海水練りの総空隙量は水道水練りより低い。また、材齢3日に比べて、材齢8日における総空隙量の差が小さくなった。

図－7 と図－8 に各供試体の細孔径分布を示す。図よりセメントの種類によって、細孔径分布に大きな差はない。これより、BFS高含有供試体においてセメントの種類が細孔径分布に与える影響は少ないと推察される。材齢3日における水道水練り供試体は海水練りと比較すると、空隙径100nm以上の細孔量が多く、海水練りにより組織が緻密化したと考えられる。材齢8日における水道水練り供試体の100nm～1000nmの細孔量は減少して、10nm～100nmの細孔量が多くなった。材齢3日から材齢8日まで、水道水練りの細孔構造の変化が大きいに対して、海水練りの方が小さい。

一般的に、空隙径が50nm～2μmの総細孔量がコンクリートの強度に影響を及ぼすと言われている¹⁵⁾。そこで、得られた実験データからこの範囲内の総細孔量を整理した。図－9 に各配合の空隙径が50nm～2μmの総細孔量を示す。図より材齢によらずE70(FW)の空隙径50nm～2μmの細孔量がN70(FW)より多い。これより、E70(FW)の初期強度はN70(FW)より低い結果となったと推察される。海水練り供試体の空隙径の50nm～2μmの細孔量は水道水練りより少ないため、強度が促進したと考えられる。また、E70(FW)のこの範囲内の細孔量はN70(FW)より多

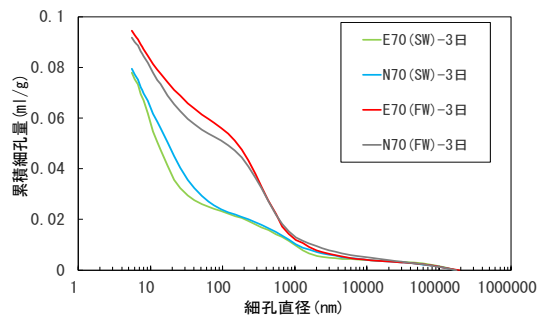


図-5 累積細孔量 (3 日)

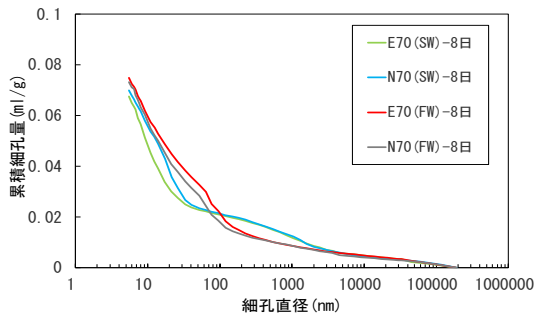


図-6 累積細孔量 (8 日)

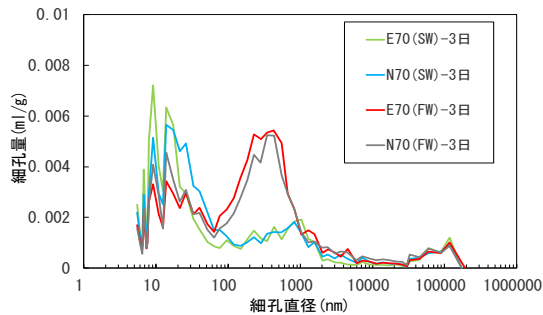


図-7 細孔径分布 (3 日)

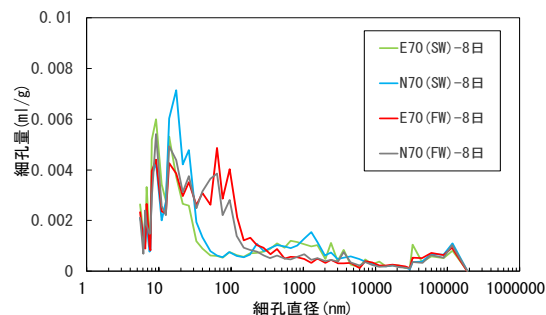


図-8 細孔径分布 (8 日)

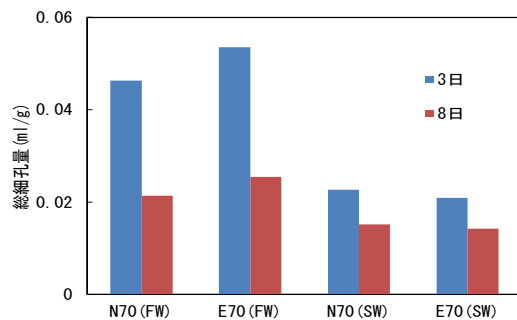


図-9 50nm~2μm の総細孔量

いが、E70(SW)の方は N70(SW)より少ない。そのため、E70(SW)の初期強度はさらに促進したと推察される。

3.4 水和生成物

図-10 に材齢 3 日の供試体の XRD パターンを示す。図の縦軸は各物質と標準物質 MgO のピーク強度比である。これより、各水和物の生成量はピーク強度比で比較できる。なお、XRD パターンに C_3S のピークは検知されていないため、本研究では全て反応したと推察した。図中の Et はエトリンガイト($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)、Ms はモノサルフェート($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)、Fs はフリーデル氏塩($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)である。図より、水道水練りの供試体はモノサルフェートが生成した。これは、既往の研究と一致する¹⁴⁾。一方、海水練りの供試体はフリーデル氏塩が生成された。これは、液相中の Cl^- 濃度が高いため、 C_3A 由来である $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ およびモノサルフェートが Cl^- と反応したと考えられる(式(3)(4))。モノサルフェートの反応によって SO_4^{2-} が放出され、細孔溶液中の SO_4^{2-} 濃度が高くなり、エトリンガイトが生成したと推察される。次にセメントの種類に着目すると、E70(SW)のエトリンガイト生成量は N70(SW)より高い。これは、EC 中の C_3A および C_4AF の含有量が OPC よりも高く、 SO_4^{2-} の存在によりエトリンガイトを多く生成したと推察される。エトリンガイトは針状結晶で、細孔空隙に充填することが報告されている¹⁶⁾。空隙径の緻密化と生成した水和物の関係から、本研究においても同様な現象が起きたと考える。これより、初期強度の発現が大きくなったと推察した。

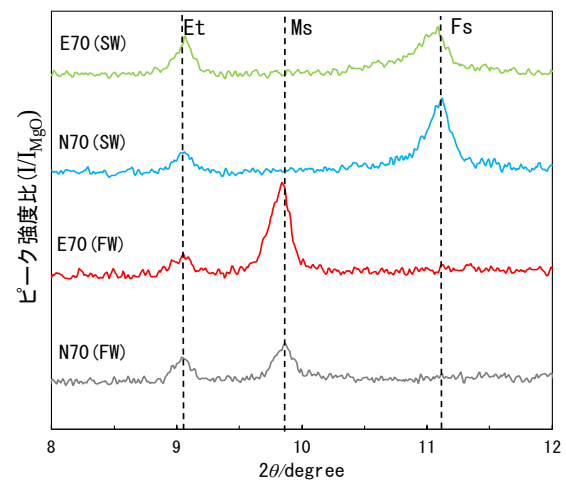
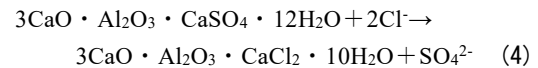
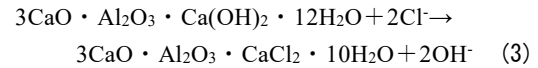


図-10 XRD パターン (3 日)

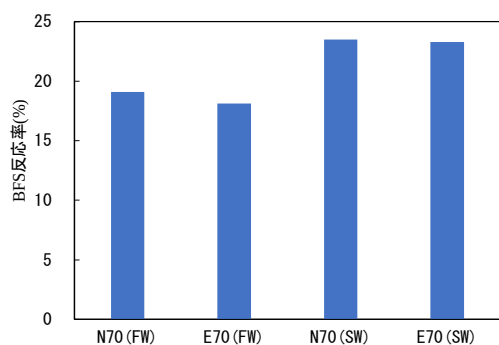


図-11 BFS 反応率 (3 日)

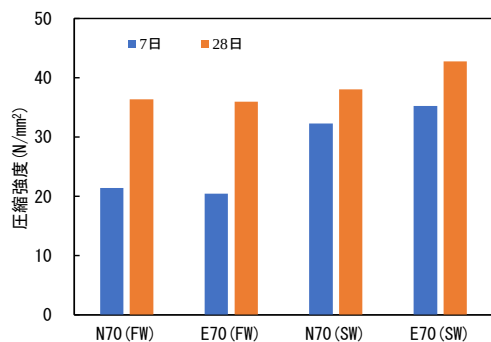


図-12 コンクリート圧縮強度

3.5 BFS 反応率

図-11 に材齢 3 日における BFS の反応率を示す。図より BFS を高置換した場合、OPC と比較してエコセメントは BFS の反応を促進できない結果となった。これは、強度の結果と一致する。また、練混ぜ水が海水の場合、BFS の反応率は水道水練りより向上する結果になった。これは、 C_3S および C_2S 由来の $Ca(OH)_2$ が C_3A と反応して、アルミネート水和物である $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Ca(OH)_2 \cdot 12H_2O$ を生成した。その後、式 (3) のような反応により OH^- が放出され、細孔溶液中の OH^- 濃度が高くなった。そのため、pH が上がって BFS の反応を促進したと考えられる。

3.6 コンクリート圧縮強度

図-12 にコンクリートの圧縮強度を示す。E70(FW)とN70(FW)の初期強度はほぼ同じであるため、エコセメントは初期強度に与える影響が少ないと示唆された。水道水練りの供試体に比べて、海水練りの供試体の 7 日強度は顕著に促進されて、7 日から 28 日まで強度の伸びが小さい。また、材齢 7 日と 28 日における E70(SW)の強度は N70(SW)より高い。そのため、海水の使用あるいはエコセメントと海水を併用して、BFS 高含有コンクリートの初期強度を改善できると考えられる。

3.7 塩化物イオン拡散係数

写真-1 に通電 24 時間後に硝酸銀溶液を噴霧した供試体の割裂面を示す。写真より、海水の塩分が硝酸銀での呈色領域に影響を及ぼさないと判断した。そのため、非定常方法によって海水練りコンクリートの塩化物イオン

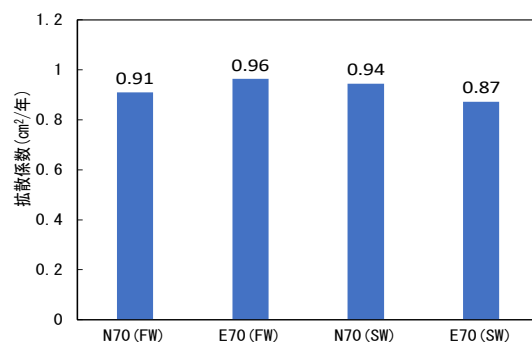


図-13 塩化物イオン拡散係数

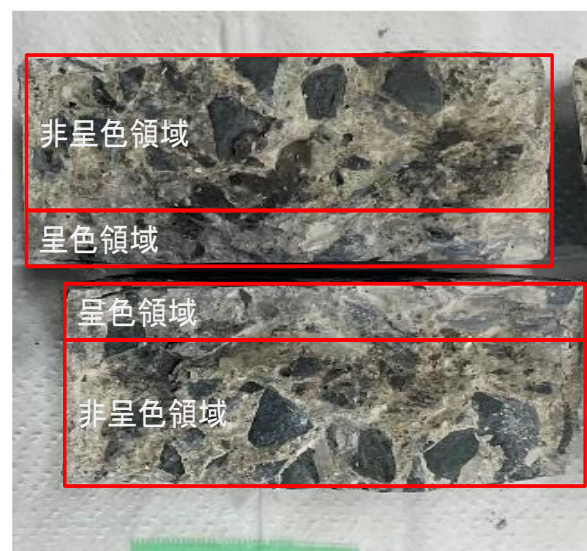


写真-1 硝酸銀溶液を噴霧した N70 (SW) 供試体割裂面 (通電 24 時間)

係数を測定できると推察した。図-13 に塩化物イオン拡散係数を示す。図より、セメントの種類と練混ぜ水によらず、28 日時点でコンクリート供試体の塩化物イオン拡散係数はほぼ同等である。これより、BFS を高含有する場合、材齢 28 日におけるエコセメントおよび海水が塩化物イオン拡散係数に与える影響が少ないと推察した。

4. まとめ

本研究は、高炉スラグ高含有コンクリートについて、セメントの種類および練混ぜ水を変化させ、エコセメントと海水が高炉スラグ高含有コンクリートの初期強度性状に及ぼす影響および強度増進のメカニズムを検討した。得られた結果を、以下に示す。

- (1) 初期強度の増進方法について、エコセメントと BFS の組み合わせのみの促進効果は得られなかった。海水練りにおける初期強度が顕著に促進され、エコセメントと海水を併用することで、BFS 高含有コンクリートの初期強度は良く改善できることが明らかになった。
- (2) 海水練り供試体の圧縮強度が増加した理由として、組織の空隙量が減少し、緻密化したためと考えられる。
- (3) 海水練り供試体において初期の細孔構造が緻密化した理由として、海水練りは結合材のセメントおよび BFS

両方の反応を促進したためと考えられる。

(4)OPC と海水の組み合わせに比べて、エコセメントと海水を併用した方の初期強度が大きく増進した理由として、エコセメント中の C_3A および C_4AF の含有量が OPC より多く、エトリンガイトの生成に関連すると考えられる。
(5)材齢 28 日時点では、エコセメントおよび海水がコンクリートの塩化物イオン拡散係数に与える影響が少ない。

5. 参考文献

- 1) Robbie M. Andrew : Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018, Earth System Science Data, Article, Vol 11, No.4, ESSD 11, 1675–1710, 2019
- 2) 坂井 悦郎、植田 由紀子、相川 豊、二戸 信和：亜硝酸カルシウムを添加した高炉スラグ高含有セメントの水和、セメント・コンクリート論文集、Vol.71、No.1、pp.62-67、2017
- 3) 坂井 悦郎、植田 由紀子、相川 豊、二戸 信和：高炉スラグ高含有セメントの水和に及ぼす亜硝酸カルシウムとアルカノールアミンの影響、セメント・コンクリート論文集、Vol.73、No.1、pp.52-58、2020
- 4) 安達 丈、新 大軌、森泰 一郎：高炉スラグ微粉末および高炉セメントの水和反応に及ぼす刺激材としての各種膨張材の効果、セメント・コンクリート論文集、Vol.74 No.1、pp.51-58、2021
- 5) Park Kwangmi、三島 直生、畑中 重光：エコセメントを用いたコンクリートの長期強度特性に及ぼす養生湿度の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.1、pp.69-74、2007
- 6) 長塩 靖祐、鶴澤 正美、山路 徹、審良 善和：5 年間海洋環境下に暴露したエコセメントコンクリートの性状、コンクリート工学論文集 Vol.21、No.1、pp.35-48、2010
- 7) WMO : State of Global Water Resources、2022
- 8) 審良 善和、山路 徹、小林 浩之、濱田 秀則：練混ぜ水に海水を用いたコンクリートの干満帯における長期耐久性、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.1、pp.820-825、2012
- 9) 竹田 宣典、大即 信明：海水練りコンクリート、コンクリート工学、Vol.56、No.5、pp.525-530、2016
- 10) 西田 孝弘、大即 信明、小原 弘毅：練混ぜ水として海水を用いたコンクリートの物質移動抵抗性に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.1、pp.685-690、2013
- 11) 高島三郎：セメント技術年報 XII、pp.49-55、1958
- 12) 近藤 連一、大沢 栄也：高炉水砕スラグの定量およびセメント中のスラグの水和反応速度に関する研究、窯業協会誌 77 [2]、pp.39-46、1969
- 13) 土木学会：コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向、コンクリート技術シリーズ 55、2003
- 14) 斎藤 豪、菊地 道生、多田 直央、佐伯 竜彦：海水練りセメントペースト供試体の水和反応解析、セッコウ・

石灰・セメント・地球環境の科学/無機マテリアル学会編 Vol.21、No.371、pp.231-241、2014

15) 齋藤 淳、福留 和人、古川 幸則、庄野 昭：湿潤養生条件がコンクリートの細孔径分布に及ぼす影響評価手法に関する研究、土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)、Vol.69、No.3、pp.270-280、2013

16) 坂井 悦郎、安斎 剛史、新 大軌、池尾 陽作：初期水和性状を考慮した高炉スラグ高含有セメントの材料設計、セメント・コンクリート論文集、Vol.65、No.1、pp.20-26、2011

(2023.6.30 受付)