論文　水砕フェロニッケルスラグ細骨材の高強度コンクリートへの利用に関する研究

小宮　克仁[*1]・峯　竜一郎[*1]・松田　拓[*2]

要旨：フェロニッケルスラグ細骨材（以下 FNS）は，天然細骨材に比べコンクリートのブリーディング量が多くなる。また FNS のうち電気炉水砕 FNS はアルカリシリカ反応（以下 ASR）性が指摘されている。本研究は，電気炉水砕 FNS の高強度コンクリートへの利用を検討すべく，低水結合材比の条件でのフレッシュ性状と圧縮強度および ASR を検討した。その結果，以下の結果を得た。1)化学混和剤に高性能 AE 減水剤よりも AE 減水剤を用いた方がフレッシュ性状の管理が容易であった。2)結合材を普通ポルトランドセメント（以下 NC）のみとした調合では ASR による膨張が生じ，NC の一部を高炉スラグ微粉末で置換するとこれが抑制された。

キーワード：アルカリシリカ反応，電気炉水砕スラグ，高炉スラグ微粉末，XRD，EPMA

1. はじめに

コンクリート骨材として古くは川砂利や川砂などが使われてきた。高度経済成長期よりそれらの枯渇問題への対策もあり，海砂や砕砂，砕石が使用されてきたが，近年ではこれらの天然資源はその確保と環境保全の両立が困難となり [1)]，採掘量が減少する傾向にある [2)]。また 2000 年代前半には中国からの禁輸措置などもあり，輸入による安定供給も難しい側面がある [2)]。このような背景のもと，鉄鋼業や非鉄金属業から排出されるスラグの骨材利用や，解体コンクリートを利用した再生骨材の利用などが従来検討されている [3)]。

フェロニッケルスラグ細骨材（以下 FNS）は，フェロニッケル製錬の際に発生するスラグをコンクリート用細骨材として利用するものである。FNS の一般的な特徴として密度が大きい，粒子の表面がガラス質である，粒度分布が下に凸の曲線（細粒分が少ない）となり単独では通常の JIS A 5308 で規定された粒度範囲に入らないものがある，といった特徴がある [4)]。そのため FNS を用いたコンクリートは天然細骨材を用いたコンクリートに比べてブリーディング量が多い [5),6)]。本研究は FNS のうち，電気炉で発生する溶融スラグを高圧水で水砕粒状化（1 次加工）したものを粉砕機で細粒化（2 次加工）した電気炉水砕 FNS に着目している。電気炉水砕スラグ細骨材は角張った形状をしており [7),8)]，また骨材のアルカリシリカ反応性試験（JIS A 1146:2017，JIS A 1145）において区分 B（無害でない）と判定される [7)]。本稿は，電気炉水砕 FNS のうち，1 次加工まで実施された（すなわち粉砕機で細粒化されていない）細骨材（以下 FNS-WG）の高強度コンクリートへの利用を検討したものである。

さて，アルカリシリカ反応（以下 ASR）は一般的に以下のように説明される。骨材の持つある種のシリカ鉱物などがコンクリート中の高いアルカリ性を呈する水溶液と反応して，骨材の周囲にアルカリシリカゲルを生成する。アルカリシリカゲルは吸水・膨張する性質があり，コンクリートに異常な膨張やそれに伴うひび割れを発生させる [9)]。ここでいうアルカリとは細孔溶液中のアルカリ金属イオン（Na^+，K^+）を指し，ASR においては水酸基イオン（OH^-）の存在も不可欠とされる [10)]。

ASR の対策として高炉スラグ微粉末（以下 BF）やフライアッシュといった混和材を用いることで抑制する技術は従来知られ，そのメカニズムは混和材を使用することによるコンクリート中の細孔溶液中の OH^-イオン量の低減，アルカリ金属イオンが骨材のシリカより先に消費される効果 [11)]，これに加えコンクリート内外に存在するアルカリ等の移動抵抗性の向上などにより説明されている [12)]。

また，高強度コンクリートの調合を考えると，一般強度のコンクリートと比較し，単位セメント量が多くセメントから供給されるアルカリ量が多い点で ASR に対し不利な条件である [13),14)]一方，組織が緻密なために外部からの劣化因子（Na^+，K^+，水）の侵入に対する抵抗性は高いと考えられる。すなわち，細粒分が少なく（FNS-WG の粒度分布を**図－1** に示す），反応性がある FNS-WG は，高強度コンクリートのように低水結合材比で粉体量の比較的多い調合で用いることで，ブリーディング量（材料分離）と ASR のどちらも抑制されたコンクリートとして利用できる可能性が考えられる。反応性を有する天然骨材の高強度コンクリートへの利用については澤田らの研究 [13)]があるが，反応性を有するスラグ細骨材に関する既往の研究はほとんどない。本研究は，FNS-WG を使用し

*1 三井住友建設（株）　技術開発本部 R&D センター　第三グループ　修士（工）　（正会員）
*2 三井住友建設（株）　技術開発本部 R&D センター　副センター長　博士（工）　（正会員）

表－1　調合表

調合No	記号	W/B [%]	使用細骨材	SP種類	単位水量 [kg/m³]	s/a [%]	単位粗骨材かさ容積 [m³/m³]	単位量[kg/m³]					
								W	B		S		G
									NC	BF	HS	FNS-WG	HG
1	HS-NC	30	HS	SP1	175	47.7	0.548	175	584		774		850
2	FNS-WG-NC-1	30	FNS-WG	SP1	175	47.7	0.548	175	584			866	850
3	FNS-WG(NC+BF)2:8-1	30	FNS-WG	SP1	175	46.6	0.548	175	117	467		827	850
4	FNS-WG-NC-2	30	FNS-WG	SP2	175	47.7	0.548	175	584			866	850
5	FNS-WG(NC+BF)5.5:4.5	30	FNS-WG	SP2	175	47.1	0.548	175	321	263		844	850
6	FNS-WG(NC+BF)2:8-2	30	FNS-WG	SP2	175	46.6	0.548	175	117	467		827	850

表－2　使用材料

	記号	成分，物性等
水	W	上水道水，密度1.00g/cm³
セメント	NC	普通ポルトランドセメント，比表面積3200cm²/g，密度3.16g/cm³
高炉スラグ微粉末	BF	比表面積4690cm²/g，密度2.89g/cm³，SO_3 2.17%
細骨材	HS	鹿沼産硬質砂岩砕砂，表乾密度2.62g/cm³，粗粒率2.99%
	FNS-WG	フェロニッケルスラグ細骨材，吸水率1.08%，表乾密度2.93g/cm³，粗粒率3.97%
粗骨材	HG	鹿沼産硬質砂岩砕石，表乾密度2.63g/cm³，粗粒率6.55%，実積率59.0%
化学混和剤	SP1	高性能AE減水剤，ポリカルボン酸系化合物
	SP2	AE減水剤，ポリカルボン酸ポリエーテルポリマーと変性ポリオール

表－3　試験水準

	調合No	記号	養生方法	試験材齢(日) 7	28	91
圧縮強度試験	1	HS-NC	20℃水中養生	○	○	○
			90℃7d→20℃封かん	○		
	2	FNS-WG -NC-1	20℃水中養生	○	○	○
			90℃7d→20℃封かん	○		
	3	FNS-WG (NC+BF)2:8-1	20℃水中養生	○	○	○
			90℃7d→20℃封かん	○		
	4	FNS-WG -NC-2	20℃水中養生		○	
			90℃7d→20℃封かん	○	○	○
	5	FNS-WG (NC+BF)5.5:4.5	20℃水中養生		○	
			90℃7d→20℃封かん	○	○	○
	6	FNS-WG (NC+BF)2:8-2	20℃水中養生	○	○	○
			90℃7d→20℃封かん		○	
ASR促進試験	1-6	全ての水準	材齢2日まで20℃封かん→材齢7日まで90℃封かん→材齢28日まで20℃封かん→以降50℃飽和NaCl水溶液浸漬			
	4	FNS-WG -NC-2	材齢28日まで20℃封かん→以降50℃飽和NaCl水溶液浸漬			

た高強度コンクリートを対象とし，結合材を普通ポルトランドセメント（以下 NC）のみとした調合と，NC の一部を BF で置き換えた調合とを製造し，フレッシュ性状と ASR の発生状況を確認した。

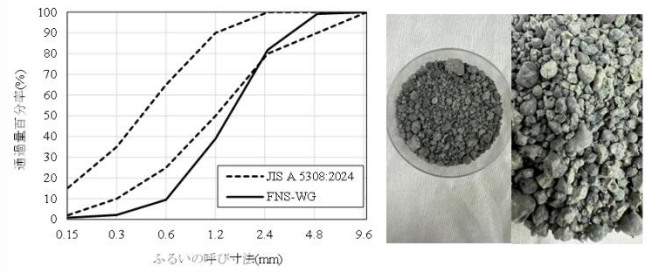
2. 試験概要

2.1 調合・使用材料

検討に用いた調合を**表－1** に，使用材料を**表－2** に示す。水結合材比は 30%，単位水量は 175kg とした。結合材として NC，BF（ブレーン粉末度が 4000 のもの）を使用した。なお，結合材に関して調合 No.1,2,4 は NC のみ，調合 No.3,6 は NC と BF の質量比を 2:8 とし，調合 No.5 は質量比で 5.5:4.5 とした。細骨材には硬質砂岩砕砂およびフェロニッケルスラグ細骨材（FNS-WG）を使用した。粗骨材には硬質砂岩砕石を用いた。化学混和剤は高性能 AE 減水剤（SP1）と AE 減水剤（SP2）の 2 種類を検討した。また，目標スランプフローを 600mm，目標空気量を 2%に設定した。FNS-WG の各種物性を**図－1** に示す。吸水率は 1.08%，表乾密度は 2.93g/cm³ である。粒度分布は 1.2mm 以下の通過量百分率が JIS の下限を下回る（すなわち 1.2mm 以下の細粒分が少ない）。この理由は前述した通り，FNS-WG は 2 次加工の粉砕細粒化（粒度調整）がされていないためである。なお，FNS-WG の化学組成は文献[15]と同様であり，SiO_2 と MgO が大部分を占める。

代表的な電炉水砕FNSの化学成分(%)[15]

製造方法	CaO	MgO	S	FeO	Fe	SiO_2
電炉水砕	0.28	33.2	0.03	10.4	0.19	51.3



FNS-WGの粒度分布　　FNS-WGの外観

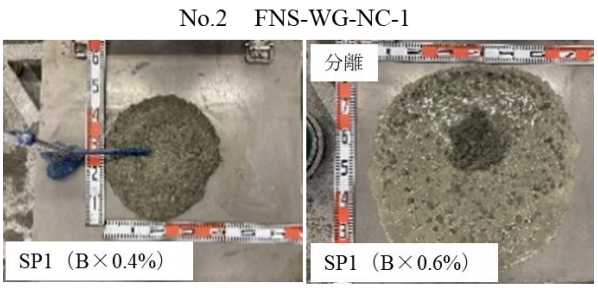
図－1　FNS-WG 各種物性

2.2 試験方法

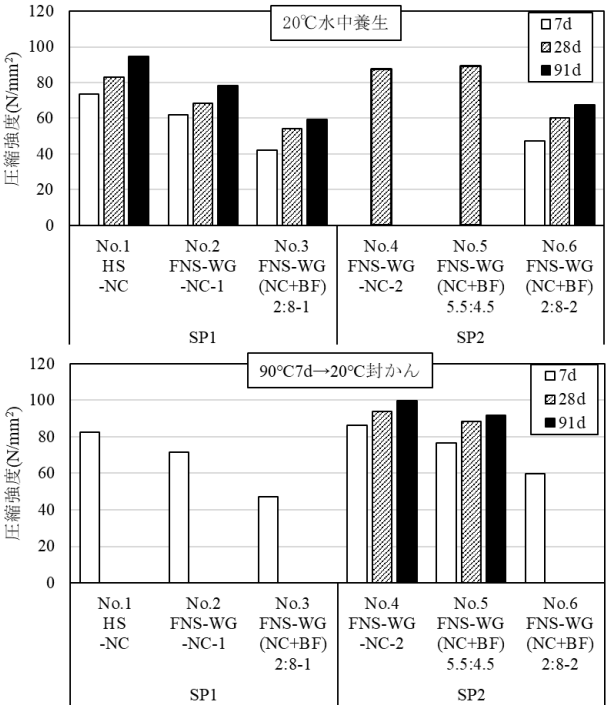
コンクリートの練上り後，スランプフローと空気量の測定を行った。フレッシュ試験後，φ100×200mm 円柱供試体（圧縮強度試験用）と 100×100×400mm 角柱供試体（ASR 促進試験用）を作製し，型枠ごと封かんして 20℃の室内に存置した。円柱供試体は材齢 1 日で脱枠し，その後試験材齢まで 20℃水中養生したものと，強度が十分に発現した条件を想定して材齢 2 日まで 20℃封かん養生→7 日まで 90℃封かん養生→試験材齢まで 20℃封かん養生の 2 水準とした。ASR 促進試験は 50℃の飽和 NaCl 溶液にコンクリートを浸漬する通称デンマーク法[16]を用いた。**表－3** に圧縮強度試験と ASR 促進試験の水準を示す。

表－4　フレッシュ試験結果

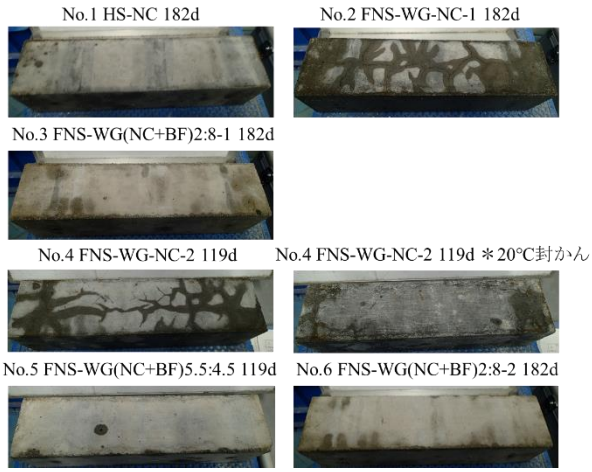
調合 No	記号	W/B [%]	B	細骨材種類	SP 種類	SP [B×%]	スランプフロー [mm]	スランプ [cm]	空気量 [%]	CT [℃]	AT [℃]
1	HS-NC	30	NC	HS	SP1	0.8	343	21.5	3.7	20.7	20.5
2	FNS-WG-NC-1	30	NC	FNS-WG	SP1	0.4	406	23.5	6.6	20.3	20.7
						0.6	724(分離)	-	-	-	-
3	FNS-WG(NC+BF)2:8-1	30	NC+BF(2:8)	FNS-WG	SP1	0.5	298	19.5	4.5	20.0	20.7
4	FNS-WG-NC-2	30	NC	FNS-WG	SP2	1.25	-	11.0	1.8	22.7	19.8
5	FNS-WG(NC+BF)5.5:4.5	30	NC+BF(5.5:4.5)	FNS-WG	SP2	1.25	381	21.0	1.6	22.2	20.1
6	FNS-WG(NC+BF)2:8-2	30	NC+BF(2:8)	FNS-WG	SP2	1.5	591	-	1.0	19.5	19.7



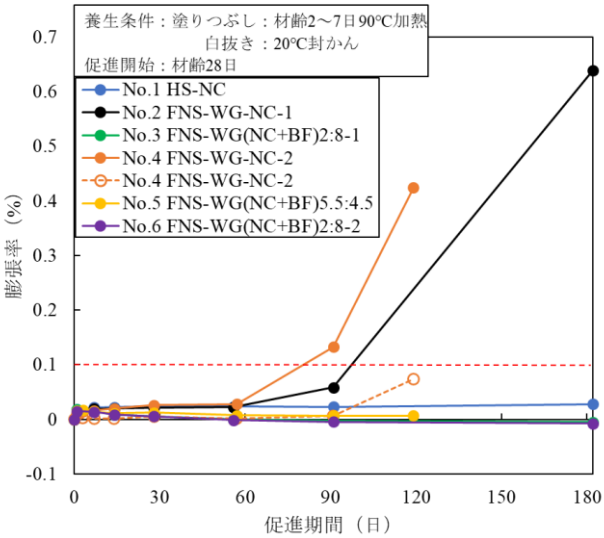
図－2　スランプフロー試験結果の一例



図－3　圧縮強度試験結果



図－4　ASR 促進試験供試体の外観



図－5　ASR 促進試験結果

3. 試験結果

フレッシュ試験の結果を**表－4** に，スランプフロー試験結果の一例を**図－2** に示す。まず SP1 を使用した水準（調合 No.1～3，SP1 添加量 B×0.4～0.8%）をみる。細骨材が HS（調合 No.1）と FNS-WG（調合 No.2）を比べると，No.2 は添加量が No.1 の半分（かつ B×0.4%と非常に少ない）だがスランプ値，フロー値どちらも No.1 より大きい。**図－2** に示すように，調合 No.2 の条件で SP1 の添加量を B×0.4～0.6%と僅かに変化させるとフロー値の変化が非常に大きい（添加量 B×0.6%で材料分離が生じた）。以上より，FNS-WG を使用したコンクリートに SP1 を用いると，低水結合材比で粉体量の多い調合であるにも関わらず僅かな添加量の違いによるフレッシュ性状の変動が非常に大きく，管理が難しいと考えられた。これは，前述したように FNS-WG の表面がガラス質で細粒分が少ないために，ブリーディングの生じやすい性質[5),6)]であることが理由として考えられる。

次に SP2 を使用した水準（調合 No.4～6 ，SP2 添加量 B×1.25～1.5%）を見る。結合材が NC（調合 No.4）のスランプ値は 11cm と，BF を置換した水準（調合 No.5～6）に比べ明らかに小さい。また調合 No.4～6 では材料分離は確認されず，SP1 に比べフレッシュ性状が改善した。

次に圧縮強度試験の結果（**図－3**）を見る。上に 20℃水中養生，下に 90℃加熱養生の試験結果を示す。SP1 を使用した水準の圧縮強度は，試験材齢に関わらずどちらの養生条件も HS-NC（No.1）＞FNS-WG-NC-1（No.2）＞FNS-WG(NC+BF 2:8)-1（No.3）である。一方，SP2 を使用した水準の圧縮強度では，20℃水中養生の材齢 28 日を比較すると FNS-WG(NC+BF 4.5:5.5)（No.5）が FNS-WG-NC-2（No.4）よりも高い。また SP1 と SP2 を使用した水準を調合ごとに同じ材齢で比較すると，養生条件によらず SP2 のほうが FNS-WG-NC では 15N/mm^2 程度，FNS-WG(NC+BF 2:8)では 10N/mm^2 程度大きい結果となった。なお, SP 種類の違いによる強度差に関しては空気量の差が大きく影響するため，空気量を揃えた水準での比較は今後の検討課題とする。以上より，FNS-WG を比較的低水結合材比条件のコンクリートで使用する場合，フレッシュ性状の観点から高性能 AE 減水剤（SP1）より AE 減水剤（SP2）の方が適している結果となった。

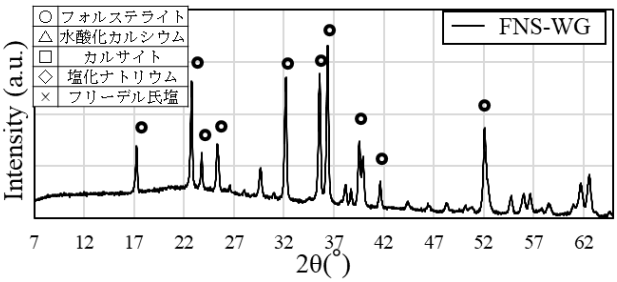
次に，ASR 促進試験の結果を**図－4** と**図－5** に示す。**図－5** には，文献[17]に示される判定値（0.1%）を参考に示している。結合材が NC で FNS-WG を使用した全ての水準（FNS-WG-NC-1 と-2）において膨張，ひび割れが確認された。一方，NC の一部を BF で置換した水準では置換率 8 割(No.6)と高炉セメント B 種相当の 4.5 割(No.5)どちらの水準にも膨張やひび割れは確認されていない。蔡ら[17]が実施したデンマーク法の結果（反応性のある天然骨材, W/B＝50%と 35%, BF 置換の有無を比較）では，NC のみの調合で ASR による膨張が確認され，NC の一部を BF で置換するとこれが抑制されている。本研究（反応性のあるスラグ骨材を使用した W/B＝30%の条件）でも，これと同様の結果が得られた。

4. 考察

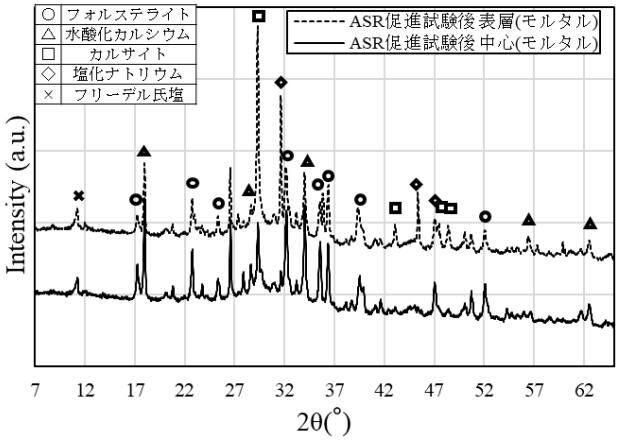
FNS-WG を結合材が NC のみの調合で使用した供試体が膨張したメカニズムを考察するために，ASR 促進試験後（促進材齢 213 日）の供試体を用いて X 線回折法（XRD）および電子線マイクロアナライザー（EPMA）による化学分析を実施した。XRD を測定した水準は，ASR による膨張が確認された結合材が NC のみの FNS-WG-NC-1（調合 No.2）である。EPMA を測定した水準は，HS-NC（調合 No.1（ASR 膨張無し）), FNS-WG-NC-1（調合 No.2（ASR 膨張有り）)，FNS-WG(NC+BF)2:8-1（調合 No.3（ASR 膨張無し））とした。角柱供試体は促進材齢 213 日で促進槽から取り出し，20℃60%環境下で一週間程度乾燥させた後に封かんし，切断作業を行うまで保管した。

4.1 XRD

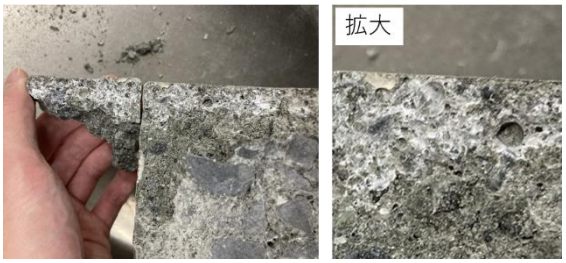
X 線回折（XRD）を用いて骨材の鉱物組成や水和生成物を対象とした定性分析を行った。XRD の試料は，ASR



図－6　FNS-WG の XRD 測定結果



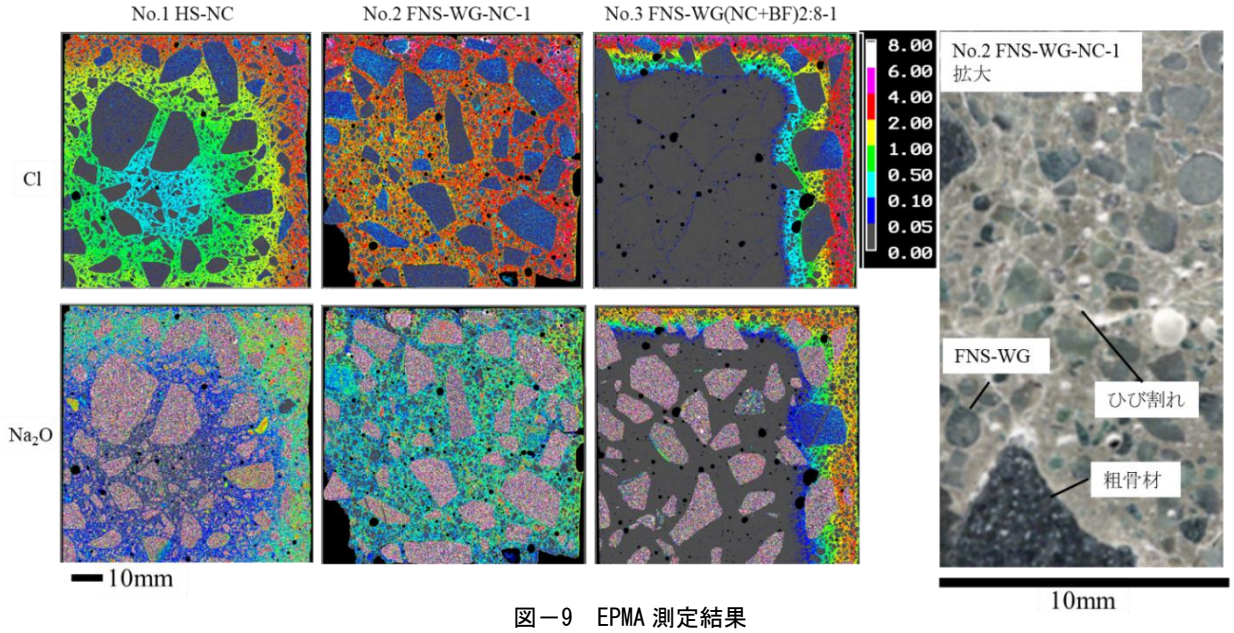
図－7　ASR 促進試験後 粉砕モルタル試料の XRD 測定結果（FNS-WG-NC-1（調合 No.2））



図－8　FNS-WG-NC-1（調合 No.2）破断面

促進試験後の供試体を湿式カッターで切断した面から，手作業ではつりとったモルタル部より採取した微粉から 105μm 以下を採取し用いた。**図－6** に FNS-WG 単体の測定結果，**図－7** に ASR 促進試験後の FNS-WG-NC-1（No.2） から採取した試料の測定結果を示す。ASR 促進試験後の測定試料は供試体の内部と表層部の 2 か所から採取した。**図－6** から FNS-WG 単体の鉱物組成の大部分はフォルステライト（Mg_2SiO_4）であり，エンスタタイト（$MgSiO_3$）のピークは確認されない。15-35°付近[18]でブロードなハローパターンも確認できることから，FNS-WG には非晶質のガラスも含まれているとわかる。

秋山ら[19]は 8 種類の FNS を対象に XRD 測定と ASR 反応性試験（モルタルバー法）をそれぞれ実施している。この研究によれば，本研究で対象とした FNS-WG と酷似した XRD 測定結果となる電気炉水砕 FNS による供試体で膨張が確認されており,「フォルステライトだけを結晶鉱物として含み, 残りがガラス質である FNS は



図－9　EPMA 測定結果

ASR を起こす危険がある」と考察されている。フォルステライトと残留ガラス相を多く含む FNS の反応性が高いことは，松尾ら[20]や楠田ら[21]も指摘している。以上の結果より，フォルステライトを多く含む FNS-WG が反応性のある細骨材であることは確からしく，本研究で生じた膨張やひび割れの原因も ASR と考えられる。

続いて，ASR 促進試験終了後の供試体から採取された試料の XRD 測定結果（**図－7**）を確認する。表層の結果からは明確に NaCl のピークが確認された。内部の結果にも，表層に比べピーク強度は低いが NaCl が確認された。供試体から試料を採取する際に，ひび割れに沿って供試体を破壊したところ，破断面に白い NaCl の結晶が確認されたことから（**図－8**），NaCl は発生したひび割れを経由することでも内部に侵入したと考えられる。なお，内部から得られた NaCl のピーク強度は表層と比較して相対的に低い結果となったが，今回は標準物質の添加などは行っていないため，定量的な評価までは言及しない。

また，表層と内部の両方で炭酸カルシウムのピークが確認された。この理由は，ASR 促進試験中は塩水中に浸漬され炭酸化の進行は考えにくいことから，ASR 促進試験終了後に封かんで静置された際に炭酸化がひび割れに沿って内部まで進行したことが考えられる。

4. 2 EPMA

ASR 促進試験環境下での NaCl の侵入状況を確認するため，EPMA による面分析を行った。測定用供試体は硬化性の樹脂で固めたのち，表面を乾式研磨した。研磨後，炭素を蒸着し測定を行った。**図－9** に Cl と Na_2O の測定結果を示す。なお EPMA の試料は，ASR 促進試験後の供試体から促進面を 2 面残すように湿式カッターで 80mm×80mm×10mm 程度に切断した試験片とした（**図－9** の各サンプル上側と右側が促進面）。結合材が NC のみの HS-NC（調合 No.1）では，Cl と Na_2O どちらも内部まで侵入した。一方，BF 置換した水準（調合 No.3）は供試体内部への Cl と Na_2O どちらの侵入も抑制された。調合 No.3 で ASR が抑制された理由は，BF によりアルカリ金属イオンである Na^+の侵入が抑制されたためと考えられる。

次に両方とも結合材が NC のみの調合である調合 No.1 と No.2 を比べると，No.2 の方が Cl と Na_2O どちらも内部までの侵入量が多い。この理由は前述したように，No.2 では ASR により発生したひび割れが NaCl の侵入経路となるためと考えられる。調合 No.2 では，骨材およびセメントペーストマトリックス中に連続したひび割れが生じていることが確認できる。

また，BF 置換した水準（調合 No.3）では，表層数 mm 程度まで Na や Cl が浸透しているもののその箇所でひび割れやゲルが生成し膨張した形跡は確認されなかった。塩分が浸透した表層部でも ASR 膨張が生じない現象は，松村ら[22]の研究（反応性天然骨材，W/B＝50%，BF50% 置換）にもある。この理由を考察する。一般的に ASR は十分なアルカリ金属イオン量，十分な湿度，骨材中の反応性シリカの限界量が揃った時に発生するとされている[23]。BF 置換による ASR 抑制メカニズムについては 1 章でも触れたが，以下のように説明される[24]。①全空隙率が小さく毛細管空隙の細孔径分布が小径側にあり，アルカリイオンの拡散や水分の移動が小さい，②高炉セメントは NC に比べアルカリイオンの固定能力が大きい，③高炉セメント硬化体中の $Ca(OH)_2$ がスラグによって消費され，pH が低下し ASR が生じ難い。すなわち，BF 置換した水準（調合 No.3）の表層数 mm 程度までは，Na が侵入しているが，前述の条件①②③が複合的に作用するためにアルカリ金属イオンと反応性骨材の両者が存在し

てもASRが進行しないと推察される。

5. まとめ

細粒分の少ない FNS-WG を対象に，低水結合材比（W/B=30%）で粉体量の多い調合への適用性を検討した。以下にまとめを示す。

１）高性能 AE 減水剤よりも AE 減水剤を用いた方がフレッシュ性状の管理が容易であった。

２）結合材を NC のみとした調合では ASR による膨張が生じ，NC の一部を BF で置換するとこれが抑制された。

３）骨材の鉱物組成や水和生成物，ひび割れの様子やイオンの浸透状況，ASR 反応性を有する天然骨材を対象とした既往の研究を踏まえ考察し，ASR の発生条件とその抑制対策は，天然骨材の場合と同様と考えられた。

今回の結果から，FNS-WG の低炭素型高強度コンクリート（NC の一部を BF で置換）利用の可能性が得られた。引き続き調合条件や使用材料の範囲を広げ検討を進める。

謝辞

本研究の実施に際し，（株）日向製錬所より実験用サンプルを提供いただきました。ここに記し感謝いたします。

参考文献

1) 國府勝郎，十河茂幸，河野広隆，野口貴文：コンクリート用骨材の現状と展望～骨材の品質と有効利用に関する研究委員会報告より～，コンクリート工学，Vol.46，No.5，pp.127-133，2008.5
2) 阿部道彦：天然骨材の現状と課題，コンクリート工学，Vol.46，No.5，pp.4-10，2008.5
3) 辻幸和：副産物起源骨材の現状と課題，コンクリート工学，Vol.46，No.5，pp.11-16，2008.5
4) 戸川一夫，庄谷征美，高津行秀，斎藤賢三：フェロニッケルスラグ細骨材コンクリートの諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.15，No.1，1993
5) 小沢優也，永田剛志，鹿毛忠継，阿部道彦：非鉄スラグ骨材を使用したコンクリートに関する研究 その 3　ブリーディング・凝結，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.107-108，2016.8
6) 日本建築学会：フェロニッケルスラグ骨材または銅スラグ細骨材を使用するコンクリートの調合設計・製造・施工指針・同解説，p.25，2018
7) 阿部道彦，野口貴文，鹿毛忠継，真野孝次：非鉄スラグ骨材を使用したコンクリートに関する研究 その 1 研究概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.103-104，2016.8
8) 日本建築学会：フェロニッケルスラグ骨材または銅スラグ細骨材を使用するコンクリートの調合設計・製造・施工指針・同解説，p.18，2018
9) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書―鉄筋破断と新たなる対応―，p. I -3，2005
10) 田村博：コンクリート用材料とアルカリ骨材反応，コンクリート工学，Vol.24，No.11，pp.23-28，1986.11
11) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書―鉄筋破断と新たなる対応―，p. I -9，2005
12) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針，p.11，2018
13) 澤田由美子ほか：高強度コンクリートのアルカリ骨材反応性と高炉スラグ微粉末による抑制効果に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.479，pp.1-6，1996.1
14) 来海豊：反応性骨材を用いた高強度コンクリートの収縮・膨張性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.2，1999
15) 栗栖一之：建設資材としての非鉄スラグ，建設の施工企画，pp.71-78，2013.3
16) 日本コンクリート工学会：2014 年版「ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会」報告書，pp.320-323，2014.7
17) 蔡云峰，鳥居和之，横山博司，古川柳太郎：促進養生法による高炉スラグ微粉末の ASR 抑制効果の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，2005
18) 谷川亘，多田井修：RockJock ソフトを用いた粉末 X 線回折法による鉱物の定量分析に関する報告，JAMSTEC 研究開発報告，Vol.27，pp.57-67，2018.9
19) 秋山淳，山本泰彦：コンクリート用細骨材としてのフェロニッケルスラグの利用，土木学会論文集，No.366，pp.103-112，1986.2
20) 松尾泰明，武部博倫，太田能生，森永健次：フェロニッケルスラグの冷却条件と組織に関する研究―アルカリ骨材反応防止のための冷却条件―，資源・素材学会誌，Vol.105，No.14，pp.1067-1071，1989
21) 楠田啓ほか：フェロニッケルスラグの骨材化－アルカリ骨材反応について－，資源・素材関係学協会合同秋季大会分科研究会資料，pp.5-8，1990.10
22) 松村将充，蔡云峰，蓑田理希，古川柳太郎：塩化ナトリウム溶液浸漬法による高炉スラグ微粉末の ASR 抑制効果の評価，土木学会年次学術講演会，pp.863-864，2005.7
23) 日本建築センター：コンクリートの塩化物総量規制とアルカリ骨材反応対策－建設省住宅局建築指導課長通達の解説－，p.97，1986
24) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用，p.26，2024