

低水結合材比条件における水砕フェロニッケルスラグ細骨材の利用に関する研究

Study on Utilization of Granulated Ferronickel Slag fine aggregate under Low Water-binder Ratio Conditions

小宮 克仁^{*1}, 峯 竜一郎^{*1}, 松田 拓^{*2}

KATSUHITO KOMIYA, RYUICHIRO MINE, TAKU MATSUDA

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。電気炉水砕 FNS を高強度コンクリートのように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あることから、本研究では低水結合材比条件でのフレッシュ性状と 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調整が容易であった。(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

Ferronickel slag fine aggregate (hereafter FNS) tends to increase bleeding of concrete compared to natural fine aggregate. Among FNS types, electric furnace granulated FNS has been noted for its potential to cause alkali-silica reaction (ASR). In this study, fresh properties and ASR behavior under low water-binder ratio conditions were investigated since there is a possibility to use FNS in high-strength concrete with a relatively high powder content to suppress both bleeding (material segregation) and ASR. Following results were obtained. (1) It was easier to control the fresh properties when an air-entraining water-reducing admixture was used as a chemical admixture than when an air-entraining and high-range water-reducing admixture was used. (2) In a mix containing only ordinary Portland cement (hereafter NC) as a binder, expansion due to ASR occurred, however this was suppressed by replacing NC with ground granulated blast furnace slag (hereafter BF).

Keywords: Alkali-silica reaction, Water granulated electric arc furnace slag, Ground granulated blast furnace slag

1. はじめに

コンクリート骨材には古くから川砂利や川砂などが使われてきた。しかし、高度経済成長期よりそれらの枯渇問題への対策が必要となり、海砂や砕砂、砕石が使用されはじめた。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⁾。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などが従来から検討されている³⁾。

*1 技術研究所 技術開発推進部

*2 技術研究所 技術統括部

そこで本研究では、スラグの中でもフェロニッケル製錬の際に発生するフェロニッケルスラグ細骨材(以下 FNS)のコンクリート用細骨材としての利用を検討した。本研究では FNS のうち電気炉水砕 FNS に着目している。電気炉水砕 FNS は、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)したものを粉碎機で細粒化(2次加工)して製造される。本研究では、電気炉水砕 FNS のうち、1次加工まで実施された細骨材(以下 FNS-WG)を使用している。

FNS には一般的に密度が大きい、粒子の表面がガラス質である、細粒分が少なく単独では通常の JIS A 5308 で規定された粒度範囲に入らないものがある、という特徴がある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)}。また、電気炉水砕 FNS は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⁾骨材とされている。

アルカリシリカ反応(以下 ASR)とは、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させる現象である。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⁸⁾というように一般的に説明される。ASR の対策としては高炉スラグ微粉末(以下 BF)などの混和材を用いることで抑制する技術が従来知られている⁹⁾。BF 置換による ASR 抑制のメカニズムは、アルカリイオンの拡散や水分の移動が小さいことや、BF 置換したセメントは NC に比べアルカリイオンの固定能力が大きいことなどによるとされている¹⁰⁾。

さて、ASR に関して、高強度コンクリートとして利用をした際に以下の2点の関係性が考えられる。①高強度コンクリートの調合は、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^{11),12)}。②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が高いと考えられる。

上記を踏まえて本研究の目的をまとめる。高強度コンクリートは低水結合材比であるため、FNS-WG を使用したコンクリートの欠点であるブリーディングを抑制できる可能性がある。また、高強度コンクリートは組織が緻密なため ASR の原因となる外部からの劣化因子の侵入を防ぐ、加えて BF を置換することで更に ASR を抑制できることが考えられる。すなわち、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ある。これらの可能性を検討するために、本研究では、細骨材として FNS-WG を使用し、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 の一部を高炉スラグ微粉末(以下 BF)で置き換えた比較的低水結合材比となる調合を製造し、フレッシュ試験と ASR 促進試験、各種分析試験を実施した。

2. 試験概要

(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、BF置換によるASR抑制効果を確認するためNC、BF(ブレン粉末度が4,000のもの)を使用した。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碎石(HG)を用いた。化学混和剤にはフレッシュ性状とブリーディングの観点から最適な化学混和剤を選定するために、高性能AE減水剤(SP1)とAE減水剤(SP2)の2種類を検討した。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。なお、FNS-WGの化学組成は文献13)と同様であり、SiO₂とMgOが大部分を占める。

表-1 調合表

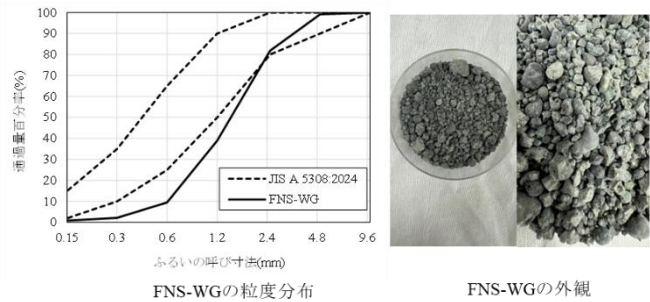
調合 No	記号	W/B [%]	使用細骨材	SP 種類	単位 水量 [kg/m³]	s/a [%]	単位 粗骨材 かさ容積 [m³/m³]	単位量[kg/m³]					
								W	B		S		G
									NC	BF	HS	FNS-WG	
1	HS-NC	30	HS	SP1	175	47.7	0.548	175	584		774		850
2	FNS-WG-NC-1	30	FNS-WG	SP1	175	47.7	0.548	175	584			866	850
3	FNS-WG(NC+BF)2:8-1	30	FNS-WG	SP1	175	46.6	0.548	175	117	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/cm^3
セメント	NC	普通ポルトランドセメント, 比表面積 $3,200\text{cm}^2/\text{g}$, 密度 3.16g/cm^3
高炉スラグ 微粉末	BF	比表面積 $4,690\text{cm}^2/\text{g}$, 密度 2.89g/cm^3 , SO_3 2.17%
細骨材	HS	鹿沼産硬質砂岩砕砂, 表乾密度 2.62g/cm^3 , 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/cm^3 , 粗粒率3.97%
粗骨材	HG	鹿沼産硬質砂岩砕石, 表乾密度 2.63g/cm^3 , 粗粒率6.55%, 実積率59.0%
	SP1	高性能AE減水剤, ポリカルボン酸系化合物
化学混和剤	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

代表的な電炉水砕FNSの化学成分(%)¹³⁾

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



(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, $100\times 100\times 400\text{mm}$ 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°C の室内に静置した。ASR 促進試験は 50°C 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¹⁴⁾を用いた。養生と試験条件は, 材齢 2 日まで 20°C 封かん, その後材齢 7 日まで 90°C 封かん→材齢 28 日まで 20°C 封かん→以降 50°C 飽和 NaCl 水溶液浸漬とした。なお本研究では十分に強度発現をさせるために 90°C 封かんを行った供試体を用いて試験を行っている。

3. 試験結果

(1) フレッシュ試験結果

フレッシュ試験の結果を表-3 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 $B\times 0.4\sim 0.8\%$) 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 $B\times 0.4\%$ 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 $B\times 0.4\sim 0.6\%$ 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 $B\times 0.6\%$ 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, 取り扱いが難しい結果となった。この理由としては, 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 $B\times 1.25\sim 1.5\%$) 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。なお, 圧縮強度に関しては 20°C 水中養生材齢 28 日において調合 No.3 が最も圧縮強度の低い結果となったが, その値は 50N/mm^2 を超えていることを確認している (54N/mm^2)。一方, 調合 No.5 が最も圧縮強度の高い結果となった (89N/mm^2)。

以上より, FNS-WG を比較的 low 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) の方が適しているといえる。

(2) ASR 促進試験結果

ASR 促進試験の結果を図-3 に示す。同図中には, 文献 15) に示されている判定値 (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 (調合 No.2, 4) において, 膨張やひび割れが確認された。一方,

表-3 フレッシュ試験結果

調査 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 [°C]	AT [°C]	圧縮強度 (N/mm ²) 20°C水中養生 材齢28日
1	HS-NC	30	NC	HS	SP1	0.8	343	21.5	3.7	20.7	20.5	83
2	FNS-WG-NC-1	30	NC	FNS-WG	SP1	0.4	406	23.5	6.6	20.3	20.7	68
						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	54
4	FNS-WG-NC-2	30	NC	FNS-WG	SP2	1.25	-	11.0	1.8	22.7	19.8	88
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	89
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	60

No.2 FNS-WG-NC-1

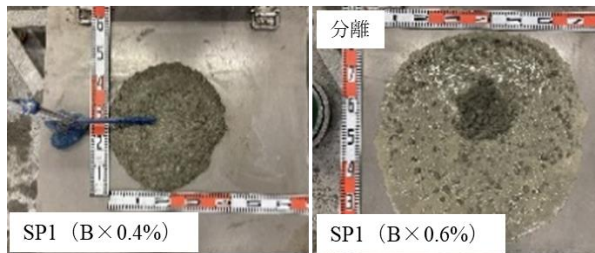


図-2 スランプフロー試験結果の一例

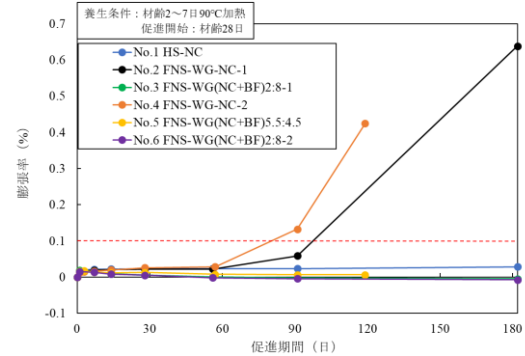


図-3 ASR 促進試験結果

NCの一部をBFで置換した水準では置換率8割(調査No.6)と高炉セメントB種相当の4.5割(調査No.5)のどちらの水準においても膨張やひび割れは確認されていない。蔡ら¹⁵⁾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。

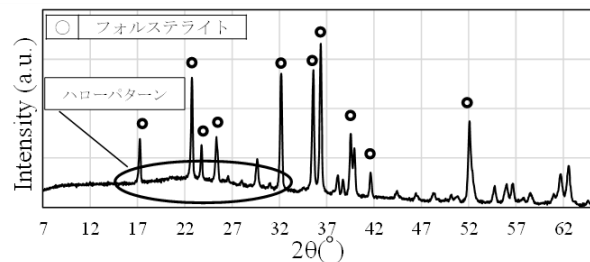


図-4 XRD 測定結果 (FNS-WG)

(3) X線回折 (XRD)

FNS-WGを結合材がNCのみの調合(調査No.2, 4)の供試体が膨張したメカニズムを考察するために, まずX線回折(XRD)を用いて骨材の鉱物組成を対象とした定性分析を行った。図-4にFNS-WG単体の測定結果を示す。図-4からFNS-WG単体の鉱物組成の大部分はフオルステライト(Mg₂SiO₄)であり, エンスタタイト(MgSiO₃)のピークは確認されない。15~35°付近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¹⁶⁾。

秋山ら¹⁷⁾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, 「フオ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ASRを起こす危険がある」と考察されている。フオ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¹⁸⁾や楠田ら¹⁹⁾も指摘している。以上の結果より, フオ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。

(4) 電子線マイクロアナライザー (EPMA)

次にASR促進試験環境下でのNaClの侵入状況を確認するため, HS-NC(調査No.1 (ASR膨張無し)), FNS-WG-NC-1(調査No.2 (ASR膨張有り)), FNS-WG(NC+BF)2:8-1(調査No.3 (ASR膨張無し))を対象として, EPMAによる面分析を行った。なお, 測定に用いた角柱供試体は促進材齢213日で促進槽から取り出し, 20°C60%の環境下で一週間程度乾燥させた後に封かんし, 保管したものである。

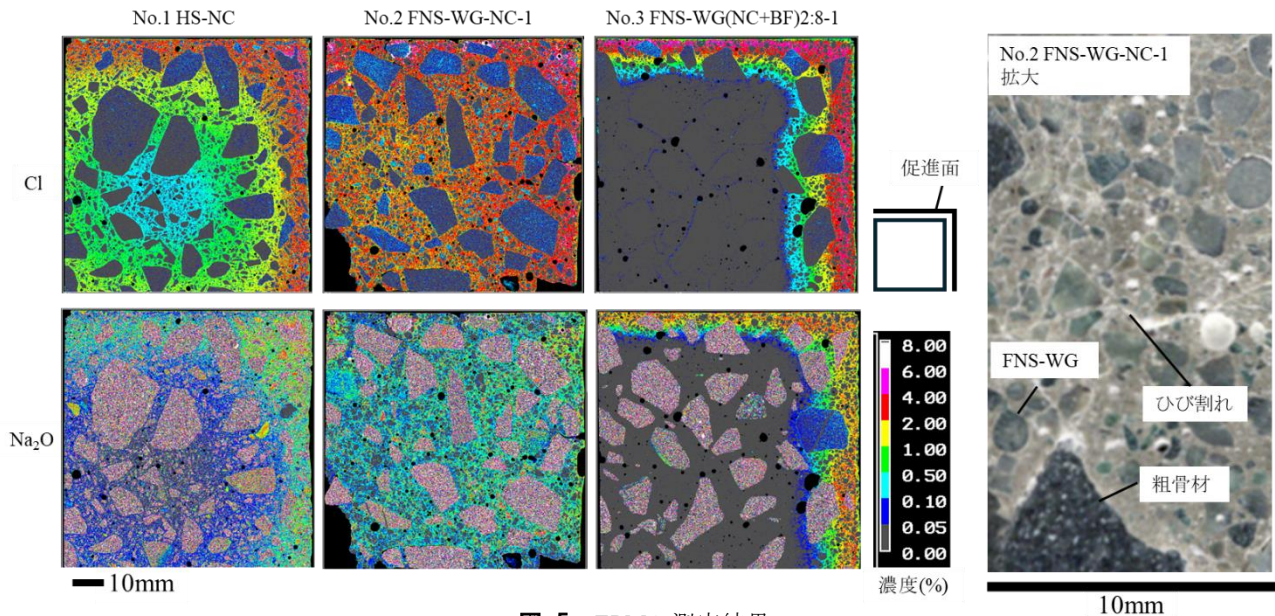


図-5 EPMA 測定結果

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-5にClとNa₂O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-5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Na₂O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Na₂O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Na₂O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。

図-5の右側に調合No.2の表層写真を示す。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（写真中の白色のライン）が生じていることが確認できる。一方、BF置換した水準（調合No.3）では、表層数ミリ程度まで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²⁰⁾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²¹⁾。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¹⁰⁾。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）の表層数ミリ程度までは、Naが侵入しているが、前述の条件①、②、③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) ひび割れ可視化

ひび割れ箇所の観察のため、ひび割れの可視化を行った。ひび割れの可視化には蛍光エポキシ樹脂含浸法を用いた。この手法では目視での判断が難しい12μm程度の微細ひび割れの有無を観察可能である。試験方法の詳細は文献22)を参考とした。エポキシ樹脂硬化後、供試体に紫外線探傷灯を照射し、電子顕微鏡を用いてひび割れ箇所の観察を行った。

図-6にひび割れの可視化状況（上段紫外線照射なし、下段紫外線照射あり）を示す。調合No.2の下段を見ると、供試体全体にひび割れが観察されていることがわかる。また、調合No.1とNo.3では表層、内部ともにひび割れは確認されなかった。ひび割れが確認された調合No.2を顕微鏡で拡大観察したものが図-7である。拡大すると一部のFNS-WGにひび割れが生じている、もしくはそこからひび割れが進展していると推察される様子も確

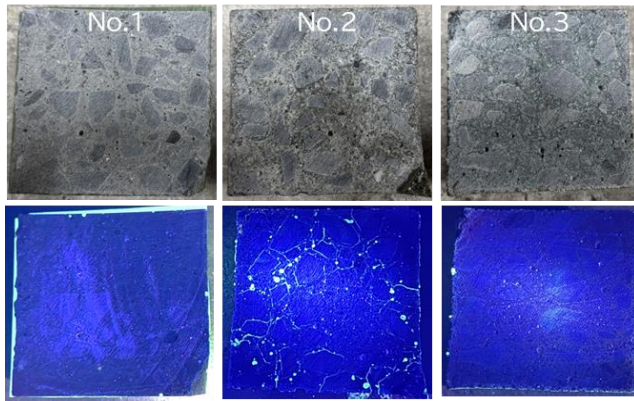


図-6 ひび割れ可視化状況

(上段紫外線照射なし、下段紫外線照射あり)

認できる。以上の画像観察結果から、細骨材である FNS-WG が ASR によるひび割れの要因になっていることが推察されたが、NC を BF に置換するとこれを抑制できることも確認された。

4. 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調整が容易であった。
- 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。
- ③FNS-WG を用いた低水結合材比条件のコンクリートにおいて、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.1，1993.6
- 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) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書ー鉄筋破断と新たなる対応ー，p.1-3，2005
- 9) 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

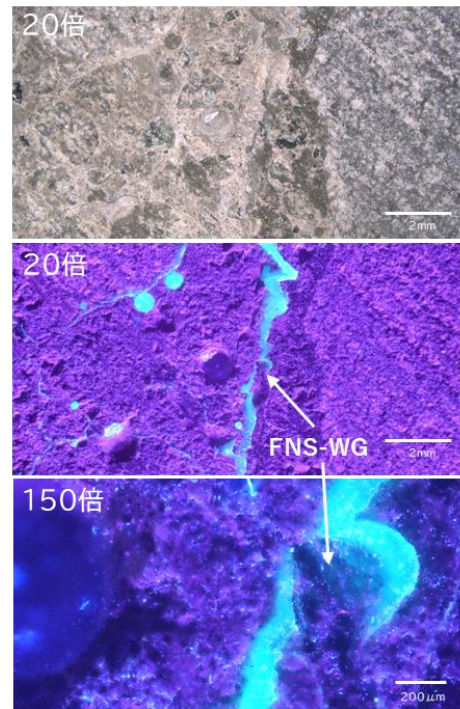


図-7 ひび割れ可視化拡大図 (No.2)

- 10) 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
- 11) 澤田由美子，權寧璣，浜幸雄，田畑雅幸，鎌田英治：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
- 12) 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.2，1999.6
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 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.1，2005.6
- 16) 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
- 17) 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
- 18) 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.1067-1071，1989.12
- 19) 楠田啓，西山孝，平井宏，村井浩介，鍋谷裕：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
- 20) 松村将充，蔡云峰，養田理希，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
- 21) 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
- 22) 手塚喜勝，朝倉啓仁，中村眞一，佐々木元茂：蛍光エポキシ樹脂含浸法によるコンクリートコアサンプルの微細ひび割れの可視化手法，土木学会北海道支部論文報告集，V-10，Vol.61，2005.2