

論文 フェロニッケルスラグを用いた高強度コンクリートの自己収縮および圧縮強度特性に関する研究

西村 名央*1・Sungchul Bae*2・松田 拓*3・兼松 学*4

要旨：本研究では、設計基準強度 60~80N/mm² 級の標準的な高強度コンクリートを対象として、フェロニッケルスラグ置換率および水セメント比が圧縮強度、自己収縮特性に及ぼす影響について実験的に検討を行った。フェロニッケルスラグの置換率を高めるほど圧縮強度が増進し、かつ自己収縮が低減されることが確認され、これらの効果は低水セメント比で顕著であった。また、化学分析の結果、フェロニッケルスラグの置換に伴う未水セメントの減少が確認され、フェロニッケルスラグの置換により水和が促進している可能性が示唆された。

キーワード：フェロニッケルスラグ、高強度コンクリート、自己収縮、強度発現、XRD

1. はじめに

近年、都心部を中心とした建物の高層化に伴い、高強度コンクリートの需要が伸びている。しかしながら、高強度コンクリートは単位セメント量が多いことから、自己収縮による変形が生じることが知られている¹⁾。

一方、近年の環境配慮型社会への移行を背景として、コンクリートの細骨材としてフェロニッケルスラグの利用が検討されている。フェロニッケルスラグとは、ニッケル鉱石からフェロニッケルを精錬する過程で得られる副産物であり、廃棄物抑制の観点から環境親和性が高いと言える。これまでの研究では、圧縮強度 200N/mm² を超える高強度コンクリートにフェロニッケルスラグ細骨材を用いると、強度が高まり、自己収縮が低減されることが明らかとなっている²⁾³⁾。

本研究では、これまでの研究²⁾³⁾を踏まえて設計基準強度 60~80N/mm² 級の高強度コンクリートを対象とする。圧縮強度および自己収縮特性を確かめると同時に、細骨材としてのフェロニッケルスラグ置換率、水セメント比およびセメントの種類が上記特性に与える影響を明らかにすることを目的とする。さらに、強度発現に対するフェロニッケルスラグの影響を明らかにするため、X線回折分析によって水和生成物を評価した。

2. 試験概要

2.1 使用材料

本研究で使用した材料を表-1に、細骨材の粒度分布を図-1に示す。

セメントは普通ポルトランドセメントおよび中庸熟ポルトランドセメントの2種類を、それぞれ市販品3種

表-1 使用材料および物性値

材料	名称	記号	物性等
水	イオン交換水	W	—
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度：3.15g/cm ³
	市販品3種配合 1:1:1		
	中庸熟ポルトランドセメント	M	
細骨材	フェロニッケルスラグ細骨材	FNS	密度：2.90g/cm ³ 吸水率：2.05%
	硬質砂岩砕砂	S	密度：2.62g/cm ³ 吸水率：0.98%
粗骨材	硬質砂岩碎石(5号, 6号)	G	密度：2.64g/cm ³ 実績率：58.6%
化学混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系

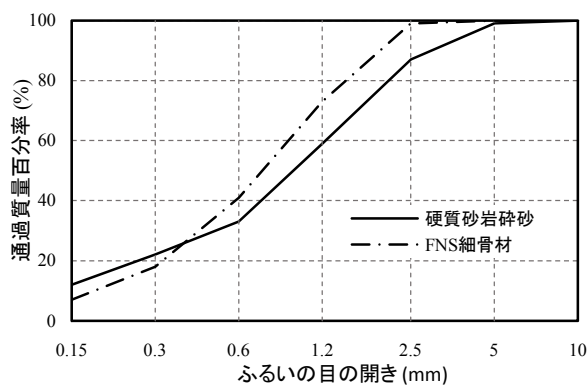


図-1 細骨材の粒度分布

を1:1:1の割合で混合して使用した。細骨材は青森県八戸産のフェロニッケルスラグ細骨材(以下 FNS)と茨城県つくば市産の硬質砂岩砕砂を使用した。粒度分布より、FNSのほうがやや粒度が細かいことが分かる。粗骨材は茨城県岩瀬産の硬質砂岩碎石を使用した。細骨材、粗骨材は表乾状態のものを使用した。化学混和剤はポリカ

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 漢陽大学 工学部 建築工学部 助教授 博士(工学) (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術本部 技術研究所 博士(工学) (正会員)

*4 東京理科大学 理工学部建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの調合およびフレッシュ性状

調合名称	FNS 置換率 (%)	W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	FNS (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	SP (C×%)	AE 助剤	フロー値 (mm)	コンクリート温度 (°C)	空気量 (%)
C25-0	0	25	175	700	0	682	850.9	2.90		558	26.0	1.4
C25-30	30				236	478		2.50		621	24.8	1.2
C25-100	100				787	0		1.60		633	24.0	1.4
C30-0	0	30	175	583	0	779	850.9	2.00		654	24.9	1.0
C30-30	30				270	546		1.70		678	24.2	1.2
C30-100	100				899	0		1.10		645	23.9	1.8
M25-0	0	25	175	700	0	693	850.9	1.30		688	25.0	1.0
M25-30	30				240	485		1.10		634	24.9	1.6
M25-100	100				799	0		0.80		615	24.3	1.8
M30-0	0	30	175	583	0	789	850.9	0.85		524	24.3	2.0
M30-30	30				273	552		0.75	○	533	23.7	1.8
M30-100	100				909	0		0.65	○	686	22.1	1.8

表-3 各種試験の試験水準および試験材齢

	試験水準	試験材齢
圧縮強度	C25, C30, M25, M30	7, 28 日
自己収縮ひずみ	C25, C30	—
XRD 分析	C25, C30	1, 3, 7, 28 日

ルボン酸系の高性能 AE 減水剤を用いた。

2.2 コンクリートの調合

作製したコンクリートの調合およびフレッシュ性状を表-2 に示す。表-2 の調合名称は、(使用したセメントの種類および W/C)-(FNS 置換率)を表している。

本研究では、FNS を 0%, 30%, 100% の 3 水準で細骨材に置換し、W/C は 25%, 30% の 2 種類とした。セメントの種類は普通ポルトランドセメントおよび中庸熱ポルトランドセメントを用いた。単位粗骨材かさ容積は 55% とし、目標スランプフロー(60cm±10cm)、目標空気量(2%±1.5%)に合わせて SP を調節した。FNS の置換率が高くなると、目標のスランプを得るために必要な化学混和剤の添加量は減少した。なお、一部調合においては AE 助剤を用いた。コンクリートの練り混ぜには強制 2 軸ミキサを使用し、モルタル先練り方式で実施した。

2.3 試験項目および方法

各種試験の試験水準および試験材齢を表-3 に示す。試験項目は、圧縮強度、自己収縮ひずみおよび XRD による硬化体の化学組成分析を行った。以下にその概要を示す。

2.3.1 圧縮強度試験

JIS A 1108 に準拠し、φ100×200mm の試験体を用いてコンクリートの圧縮強度試験を行った。試験材齢は、いずれも 7, 28 日とした。養生条件は、標準水中養生を基本とし、養生温度は 20°C±3°C とした。

試験は、各水準 3 本ずつとし、その平均値を各材齢の圧縮強度とした。試験には高剛性圧縮試験機を使用した。

2.3.2 自己収縮ひずみ

コンクリートの自己収縮ひずみは、100×100×400mm の角柱試験体を用い、市販の埋込み型ひずみ計(標点距離 100mm、試験機サイズ φ20×104mm)を試験体中央に埋設して計測した。同時に、室温と各試験体のひずみゲージ位置における温度の測定を行った。型枠による摩擦を最小限とするため、型枠の内側にテフロンシートを敷設した。各試験体は水分の逸散を防ぐため打設直後に封緘し、20°C 一定に制御された環境に存置した。材齢約 24 時間で脱型し、試験体の全面を、テフロンシートごとポリ塩化ビニル製のフィルムで覆うことで再度封緘し、測定を継続した。

自己収縮ひずみは、試験体の発熱が確認された時点に自己収縮の開始時点とみなし、ひずみ計で計測した全ひずみから温度ひずみを差し引いて算出した。温度ひずみは試験体温度の実測値を用いて、線膨張係数を材齢に関わらず 10.0×10⁻⁶/°C と仮定して求めた。ここで、自己収縮ひずみを精度よく算定するには線膨張係数の経時変化を考慮する必要があるが、本論では材齢 168 時間の自己収縮ひずみを検討の対象としており、その影響は小さいと考え、一定値を用いた。C25 シリーズと C30 シリーズの 6 水準で測定を行い、試験体は各水準 2 個ずつを a, b とした。

2.3.3 X 線回折試験による分析

FNS のセメントの水和反応に与える影響を評価するために X 線回折分析(XRD)を実施した。

XRD 測定には卓上型 X 線回折装置を用いた。測定条件は、ターゲット CuKα (λ=1.54Å)、管電圧 30kV、管電流 10mA、走査範囲 5~70°(2Theta)とした。また、解析の際に FNS の置換率ごとに FNS に含まれる鉱物のピーク高さを揃えるため、補正係数を乗じた。各置換率で FNS の解析ピーク強度の高い 2Theta=31° 付近の 2 点の値の差を求め、各置換率の一番若い材齢のピーク強度差を基準として、他の材齢のピーク強度の割合を算出し、それを補正係数とした。

試験は C25 および C30 シリーズを対象とし、材齢 1, 3, 7, 28 日で行った。試料は各材齢の圧縮強度試験に用いた試験体から採取し、アセトンに 24 時間含浸し水と

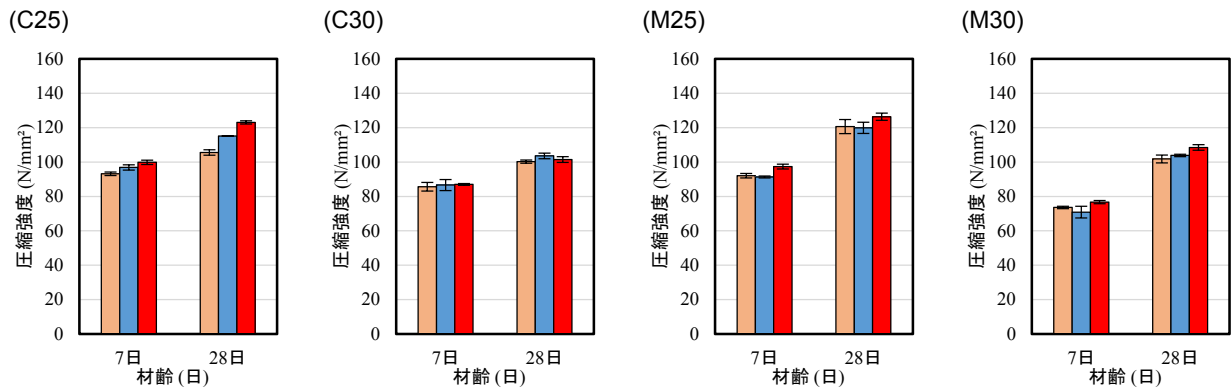


図-2 圧縮強度と材齢の関係
 FNS 置換率 ■ : 0% ■ : 30% ■ : 100% ※エラーバーは標準誤差

を停止させた。水和停止した試料は炭酸化を防止するため、試験直前まで真空チャンバー内で保管した。各試料はボールミルを用いて粉碎し、63 μ m のふるいを通過した粉末を分析に用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

C25 シリーズ、C30 シリーズおよび M25 シリーズ、M30 シリーズの圧縮強度と材齢の関係を図-2 に、置換率と材齢 28 日圧縮強度の関係を表-4 に示す。

C25 シリーズでは FNS の置換率が大きくなるにつれて強度が増加した。材齢が進むにつれて FNS 置換率 0% と FNS 置換率 100% の圧縮強度の差は広がり、材齢 28 日では約 20N/mm² の差が認められた。すなわち、水セメント比 25% では FNS の置換が圧縮強度に寄与しているということが確認された。

一方、C30 シリーズでは材齢 7 日の FNS 置換率 0% と FNS 置換率 100% の圧縮強度の差は 3N/mm² 以内であり、材齢が進んでもほぼ同等の圧縮強度差であった。すなわち、水セメント比 30% では、FNS の置換による圧縮強度への影響はわずかであった。

次に、M25、M30 シリーズは C25、30 シリーズと比べ材齢 7 日の圧縮強度は若干低い、材齢 28 日ではどちらもほぼ同等の圧縮強度となった。また、FNS 置換率 0% と FNS 置換率 100% の圧縮強度の差は、材齢 28 日では約 5N/mm² であり、C25、30 シリーズと比べ材齢の進行に伴う変化は小さかった。

C25、C30 シリーズの材齢 7 日から材齢 28 日の圧縮強度増進率を材齢 7 日の圧縮強度を 100% とし、表-5 に示す。C25 シリーズでは、FNS の置換率が上がるにつれて圧縮強度の増進率が高くなっていることが分かる。置換率 100% が最も大きく、増進率は 123% を示した。C30 シリーズでは、FNS の置換率の違いにおいて強度増進に大きな差は見られず、いずれも 20% の増進を示した。

これらのことから本実験の範囲では、FNS 置換率の強

表-4 置換率と材齢 28 日圧縮強度率の関係 (無置換を基準とする)

FNS 置換率	0%	30%	100%
C25	100	109	117
C30	1.00	103	101
M25	100	99	105
M30	100	102	107

表-5 置換率と材齢 28 日圧縮強度率の関係 (材齢 7 日を基準とする)

調査名称	圧縮強度率	調査名称	圧縮強度率
C25-0	113	M25-0	131
C25-30	119	M25-30	131
C25-100	123	M25-100	130
C30-0	117	M30-0	138
C30-30	120	M30-30	147
C30-100	117	M30-100	141

度への影響は水セメント比 25% で顕著に認められた。

なお、各調査の空気量(表-2)が概ね同じであるため、強度結果に空気量の影響は無いものと判断する。

3.2 自己収縮特性および温度変化

コンクリートの自己収縮ひずみを図-3 に、コンクリートの温度変化を図-4 に示す。(I)は C25 シリーズ、(II)は C30 シリーズを示している。本研究では材齢 168 時間以前を自己収縮とみなす。

結果より、C25 と C30 を比較すると、水セメント比の低い方が自己収縮は顕著であった。これは、既往の研究⁴⁾⁵⁾で報告されている傾向と合致した。また、C30 の方が同調査の 2 体の試験体における自己収縮ひずみの差が大きくあらわれた。さらに、FNS の置換率が大きいほど自己収縮の低減効果が高いことが確認された。すなわち、自己収縮ひずみの測定材齢 168 時間において、C25 の場合、FNS 置換率が 0% の場合に比して、FNS 置換率が 100% のものは、 200×10^{-6} 程度の低減効果が確認された。C30 の場合も同様に、 200×10^{-6} 程度の低減効果であった。

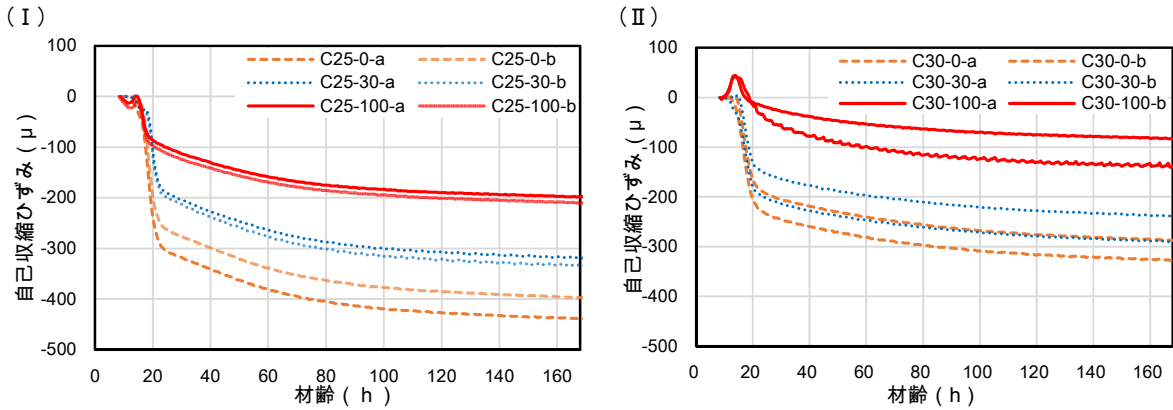


図-3 自己収縮ひずみ ((I)C25, (II)C30)

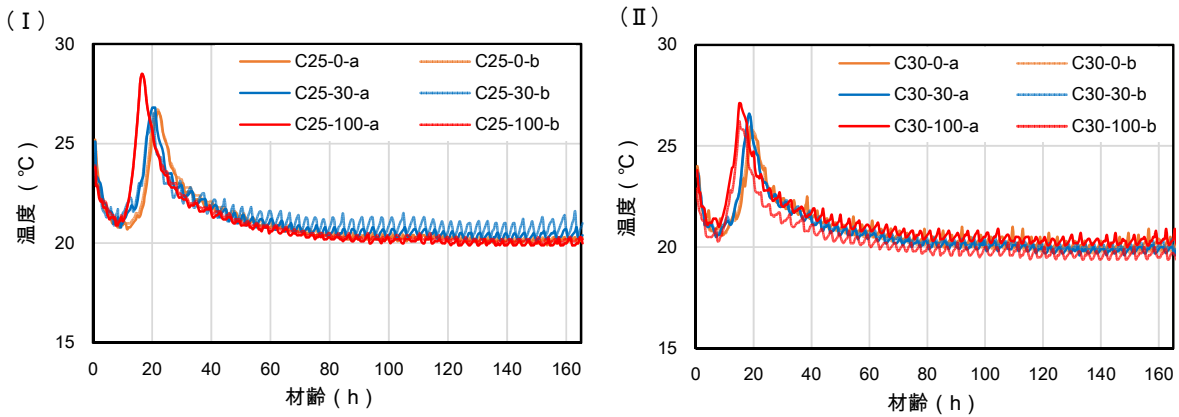


図-4 コンクリートの温度変化 ((I)C25, (II)C30)

また、若材齢の温度変化と自己収縮ひずみを図-5 に示す。図-5の(a), (c)はC25シリーズ、図-5の(b), (d)はC30シリーズを示している。若材齢における自己収縮ひずみに着目すると、C25(図-5(c)), C30(図-5(d))はどちらも材齢約15時間で膨張側に挙動した。これはFNSの置換率が高いほど顕著にみられた。

各試験体において水和反応による発熱ピークは測定開始後20時間までに見られたが、C25, C30のどちらもFNSの置換率が高くなるにつれて発熱のピーク時期が早まる結果となった。特にFNS置換率100%の水準は、他の置換率より約5時間早く、C25, C30ともに材齢約15時間で発熱のピークを迎えた。さらに、FNSの置換率が上がるにつれて発熱のピーク値は増加した。特にFNS置換率100%の水準は他の置換率と比較して、C25では約2°C, C30では約1°C、発熱のピーク値が高い結果となった。

若材齢においてFNSの置換率が高いものほど発熱のピークが早まる理由の一つに、前述したように、化学混和剤の添加量が少ないことが考えられる。しかし、発熱のピーク値が高い(すなわち発熱量が多い)ことは、同時に何らかの理由で水和反応が促進されていることが示唆される。若材齢での膨張挙動は既往の研究⁹⁾において、軽量細骨材の内部養生効果として報告されている傾向と一

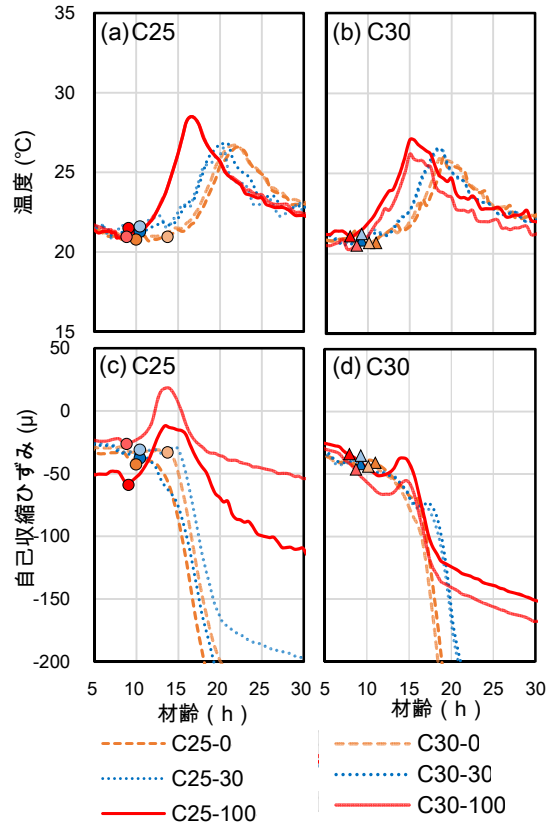


図-5 若材齢の温度変化と自己収縮 ((a)(c)C25, (b)(d)C30)

(●:C25の自己収縮起点, ▲:C30の自己収縮起点)

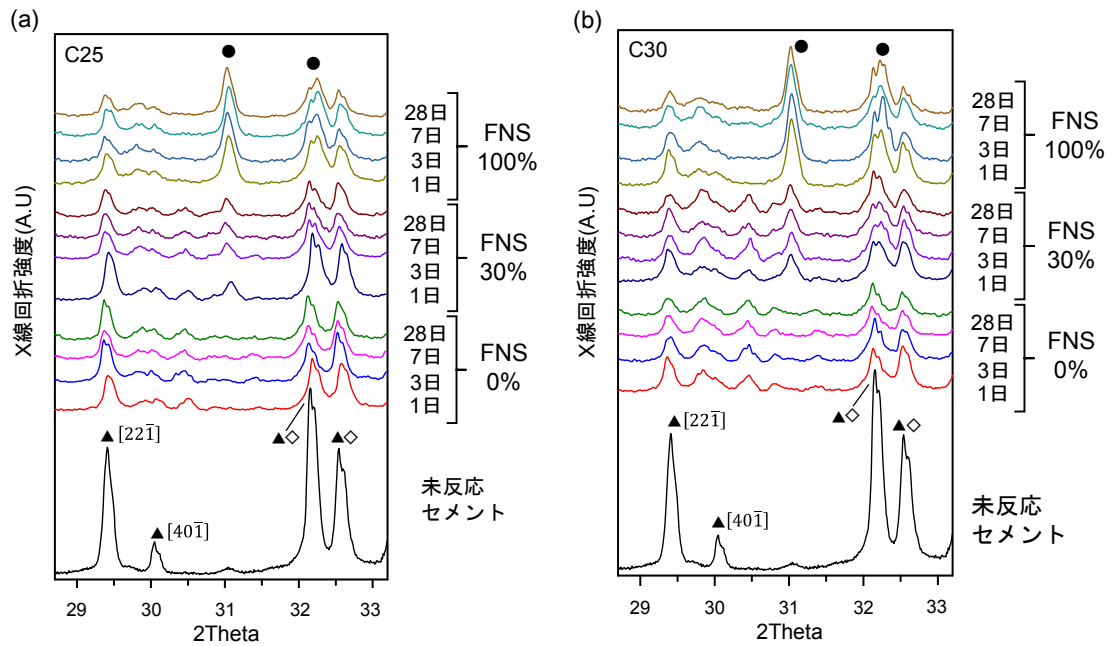


図-6 XRD 測定結果

((a)C25, (b)C30, 材齢:1, 3, 7, 28日, FNS 置換率:0, 30, 100%, ▲:C₃S, ◇:C₂S, ●:FNS)

致しており、既往の研究³⁾では、超低水結合材比(12~18%)の条件で FNS を適用すると強度が高まり、自己収縮が低減される結果が報告されている。その理由として、FNS に含まれる水分による内部養生効果が考察されている。

以上を踏まえると、今回の結果については自己収縮が低減される理由の一つに、FNS 細骨材からペーストに水が供給されることで、自己収縮の原因となる自己乾燥を抑制する内部養生効果が推察される。また、発熱のピークが早まる理由の一つに、FNS 細骨材からペーストに供給された水が、水和反応に寄与していることが推察される。

FNS 置換率 100%は自己収縮低減効果が高く温度上昇のピーク時期が早い。すなわち、FNS 細骨材の量が多い調合ほど高い内部養生効果が得られていると考えられる。

なお、本研究では若材齢における線膨張係数の時間依存性を考慮していないことから、低減効果の定量値には不確定な要素を含むが、化学混和剤の添加量の違いは、発熱の開始時期やそのピーク値の観点からの考察において影響がないと判断した。

3.3 XRD 分析

FNS 置換率および水セメント比の違いがコンクリート中のセメント水和反応に与える影響を検討するため、採取サンプルと未水和セメントの比較を行った。分析区間は、セメント鉱物である C₃S および C₂S の回折ピーク強度が最も高い区間(2θ 28.8~33.2°)とした。

材齢 1, 3, 7, 28 日の C25 および C30 シリーズの XRD 結果を図-6 に示す。それぞれ、試料に用いた未水和の

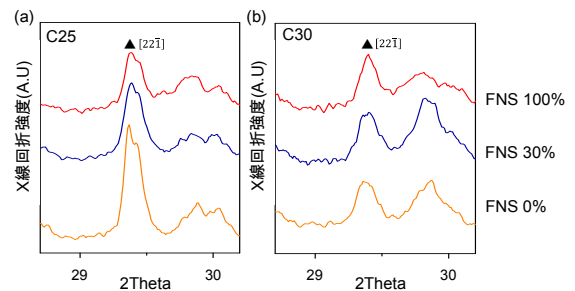


図-7 XRD 測定結果(材齢 28 日)

((a)C25, (b)C30, FNS 置換率:0, 30, 100%, ▲:C₃S)

3 種を混合したセメントのピークを下に示す。

C25 および C30 両方とも FNS 置換率の増加に伴い FNS の組成鉱物(エンステタイトおよびフォルステライト)の強度が増加する傾向が確認された。

また、C25 の FNS 置換率 0%の場合、C30 の FNS 置換率 0%に比べ、高い未反応 C₃S の強度を示した。これは比較的低い水セメント比において、未水和のセメントの量が大きくなる傾向に起因するものと考えられる。材齢 28 日の FNS の置換率ごとの C₃S の[22-1]のピーク強度の拡大図を図-7 に示す。他の鉱物および水和反応物回折ピークと重なっていない C₃S の[22-1]のピーク強度に注目すると、C25 では FNS の置換率の増加に伴い減少している傾向が見られた(図-7(a))。材齢 28 日の C25 の FNS 置換率 0%と 100%の結果を比較すると特にその差が顕著であった。なお、図-6(a)の 32.2°付近にある C₃S および C₂S のピークも同様に減少する傾向が確認できた。

C25 シリーズにおいて、FNS の置換により未水和セメントの材齢による減少が観察されたことから、水和の促

進が確認された。この促進は、既往の研究³⁾で指摘されているように FNS からの水分供給による内部養生効果だと考えられる。

一方、C30 シリーズの場合、FNS の置換率によるセメント鉱物には差が見られず、ほぼ同等な傾向となった(図-7(b))。

C₃S は一般にセメント初期反応に強く寄与し、コンクリートの初期強度発現に最も影響するセメント鉱物とされている。圧縮強度試験結果および XRD 分析結果を踏まえると、水セメント比 25%のコンクリートの細骨材を FNS で置換することにより生じる内部養生効果で C₃S の反応が促進され、コンクリートの強度増進に寄与したと考えられる。しかしながら、水セメント比 30%のコンクリートでは FNS の水和促進効果は比較的低い結果となり、強度発現に寄与しなかったと考えられる。

4 結論

F_c=60~80N/mm² の高強度コンクリートにおいて、フェロニッケル細骨材の置換による効果を検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 細骨材の FNS 置換率を上げることで、圧縮強度が高くなる傾向が見られ、材齢 7 日から 28 日にかけての圧縮強度では、FNS 置換率 100%の水準が最も高い強度増進率を示した。この傾向は、水セメント比 25%において顕著であった。また、中庸熟ポルトランドセメントにおいてはその傾向はわずかであった。
- (2) 自己収縮ひずみは、細骨材の FNS 置換率を上げるほど小さくなる結果が得られた。これは、FNS は自己収縮抑制に効果があるという既往の知見³⁾と合致した。また、同試験体の温度変化の結果から FNS が水和反応の促進に寄与していることが推察された。
- (3) XRD 分析の結果、FNS を置換することでセメントに

含まれる C₃S の水和反応が促進されることが明らかとなった。水セメント比 25%の方が FNS を置換することによる水和促進効果が顕著であった。

【謝辞】

本研究は、日本建築学会 非鉄スラグ骨材委員会、スラグ協会関係各位の協力のもと実施した。また、本実験の実施に当たり、東京大学大学院工学系研究科 野口貴文教授、国立研究開発法人 建築研究所、(株)フローリックの西祐宜氏、東京理科大学の川村泰生氏、小山拓氏に協力頂いた。記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 田澤栄一、宮沢伸吾、佐藤 剛、小西謙二郎：コンクリートの自己収縮、コンクリート工学年次論文報告集, vol.14, No.1, pp561~566, 1992
- 2) 松田 拓、本田和也、蓮尾孝一、野口貴文：シリカフュームとフライアッシュを併用した超高強度コンクリートに関する研究、コンクリート工学年次論文集, vol.36, No.1, pp.1462~1467, 2014
- 3) 松田 拓、蓮尾孝一、野口貴文：細骨材の違いが超高強度コンクリート性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集, vol.37, No.1, pp.1117~1122, 2015
- 4) 堀田智明、名和豊春、大沼博志：セメント系材料の自己収縮に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集, vol.22, No.2, pp.595~600, 2000
- 5) 堀田智明、名和豊春：セメントペーストの自己収縮に及ぼす水セメント比の影響、日本建築学会構造系論文集, 第 565 号, pp.1~7, 2003.3
- 6) Sungchul Bae, 早野博幸, 野口貴文, 長井宏憲：軽量骨材の自己収縮ひび割れ低減効果に関する研究、コンクリート工学年次論文集, vol.31, No.1, pp.565~570, 2009