

論文 全量産業副産物としたクリンカーフリーコンクリートの開発

江 詩唯*1・今本 啓一*2・清原 千鶴*3・徐 建恒*4

要旨：製鉄所からの副産物の更なる活用を目的として、結合材に高炉スラグ微粉末を用い、骨材には全量高炉スラグ系骨材を用いたクリンカーフリーコンクリートの開発を試みた。シリーズ A ではアルカリ刺激材の最適な添加量を検討し、シリーズ B ではモルタル試験体にて収縮特性の確認を行い、シリーズ C ではコンクリートの材料特性について検討した。その結果、OPC に比べて強度発現性は低いアルカリ刺激材に膨張材を用いることで強度が向上した。高炉スラグ系骨材と組み合わせることで収縮ひび割れおよび中性化の抑制効果が確認できた。

キーワード：高炉スラグ微粉末, 高炉スラグ骨材, 圧縮強度, 乾燥収縮ひずみ, 中性化

1. はじめに

日本のセメント産業は、日本国内の温室効果ガス総排出量の約4%に相当するCO₂を排出し、大量のエネルギーも消費されており、コンクリートのCO₂排出の大部分はセメントによるものである。また、コンクリートに使用される天然骨材の採掘に伴う井戸水の枯渇や混濁あるいは海底地形の変化などの環境への影響や天然資源の枯渇化による天然骨材供給の不安定化などの問題も報告されている²⁾。

そのため、近年では、クリンカーフリーコンクリートの研究が進んでおり、セメントおよび天然骨材を全く用いることなく、結合材を高炉スラグ微粉末とし、骨材に鉄鋼生産の製鋼工程で発生する製鋼スラグを用いた環境調和型材料である鉄鋼スラグ水和固化体が開発され、異型ブロック、捨石代替材など港湾工事で利用されている³⁾。

高炉スラグ微粉末(以下 BFS と示す)は、アルカリ刺激による潜在水硬性があり、セメントに内割置換することでコンクリートの長期強度の改善や水和熱抑制に効果を発揮することが知られている。高炉スラグ骨材は、収縮低減効果があり、骨材界面に形成される遷移帯領域を緻密にすることも報告されている⁴⁾。

そこで、本研究ではセメントと天然骨材の代わりに高炉スラグ系副産物を用いたクリンカーフリーコンクリートの開発を目指している。そのためシリーズ A では、アルカリ刺激材として水酸化カルシウム(以下 CH と示す)を使用し、ペースト試験体を作製し、圧縮強度が最も高くなる最適な CH 添加率を検討した。シリーズ B では BFS 細骨材を用いたモルタル試験体の力学的特性について検討を行った。シリーズ C においてはシリーズ A および B で選定した結合材に高炉スラグ細骨材および高炉スラグ粗骨材を用いたクリンカーフリーコンクリート試験体を作製し、その基礎物性について検討を行った。

2. BFS ペースト実験(シリーズ A)

2.1 実験概要

使用材料の化学成分を表-1 に示す。作製した供試体は水結合材比 W/B を 30%とし、結合材には高炉スラグ微粉末(石膏含有 SO₃含有量2.11%)と、アルカリ刺激材として CH ならびに膨張材(以下, EA)を使用した。CH は添加量を 0.1~5%まで変化させた。EA の添加量は 0.5%一定とした。練混ぜは JIS R 5201 セメント物理試験方法を参考にし、CH 添加率が非常に少ない調査もあるため、セメントと CH の練混ぜ時間を 120 秒とした。

試験体は打込み直後から恒温室(温度 20℃)にて封緘養生した。材齢 3, 7, 28 日において、φ50×100mm の円柱供試体を用い、JIS A 1108 に準拠し圧縮強度試験を実施した。

2.2 実験結果および考察

CH 添加率と圧縮強度の関係を図-1 に示す。材齢 28 日では、CH 添加率 0.3%が最も圧縮強度が高く、CH 添加率 1.0%で最も圧縮強度が低くなった。CH 添加率1~5%の範囲内においては 3.5%で強度のピークが見られた。また、CH 添加率が少ない 0.1 および 0.2%において初期強度発現性は低い、材齢にともなう強度増加率は大きく、材齢 3 日に対する強度増加率は材齢 7 日において、CH 添加率 0.1%で

表-1 使用材料の化学成分

結合材	密度 g/cm ³	比表面積 cm ² /g	MgO %	SO ₃ %	強熱減量 %					
高炉スラグ微粉末 (BFS)	2.85	4290	7.32	2.11	1.32					
刺激材	密度 g/cm ³	Ca(OH) ₂ %	Cl %	SO ₄ %	As ppm	Fe %	K %	Mg %	Na %	Pb %
消石灰 (CH)	2.07	95.0 以上	0.02 以下	0.05 以下	0.5 以下	0.02	0.05	1.0	0.05	0.004
膨張材 (EA)	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO %	SO ₃ %	CaO %	f-CaO %			
EA-A	1	7.2	0.8	-	18.5	70.6	49.8			
EA-B	1.0-2.0	12.0-15.0	0.3-0.8	0.4-2.3	27.0-31.0	50.0-53.6	17.5-22.0			

*1 デンカ(株) (元東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻) 修士(工学) (正会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 工学部建築学科 嘱託助教 博士(工学) (正会員)

*4 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻

4.7倍、0.2%で2.2倍となり、材齢28日においては、CH添加率0.1%で8倍、0.2%で3倍、0.3%で2.5倍と、CH添加率が少ないものほど大きい。膨張材にアルカリ刺激材として用いた試験体の材齢3日の強度はEA-A試験体の方がEA-B試験体よりも2倍程度高いが、材齢28日では、両者の差は小さい。EA-A試験体とCH添加率0.5%試験体は同じ程度の強度発現性があることが確認できた。

以上の検討結果より、材齢28日の圧縮強度発現性が良いCH添加率0.3%、3.5%および膨張材を最適なアルカリ刺激材として以下のモルタル試験体を作製した。

3. BFSモルタル実験(シリーズB)

3.1 実験概要

シリーズBにおけるモルタル試験体の混合比を表-2に示す。シリーズBではシリーズAと同様のW/B=30%とし、シリーズAで選定した配合を用いてモルタル試験体を作製した。使用した細骨材は高炉スラグ細骨材(絶乾密度2.75g/cm³、吸水率0.71%)であり、比較のため陸砂(表乾密度2.59g/cm³、吸水率2.07%)を用いた試験体も作製した。また、試験体はすべて封養生とした。圧縮強度試験は、材齢7、28および91日において、φ50×100mmの円柱供試体を用い、JIS A 1108に準拠し圧縮強度試験を実施した。自己収縮ひずみの測定はφ50×100mmの円柱試験体を用い、試験体中央部に埋設した埋め込みゲージにて測定を行った。なお、自己収縮ひずみの測定はすべて恒温恒湿室内(温度20℃、相対湿度60%)で実施した。

3.2 実験結果および考察

シリーズBの圧縮強度試験結果を図-2に示す。CH添加率0.3%であるB-1試験体は、シリーズAと同様に初期材齢の圧縮強度は1.3N/mm²と低いが、材齢に伴う強度増加率が高く、材齢91日においては、CH添加率3.5%であるB-2試験体より強い強度が得られている。細骨材の種類をみると、BFS細骨材を使用したB-2試験体が陸砂を使用したB-3試験体よりも圧縮強度が材齢28および91日において1割程度高くなっている。EA-Aを使用したB-4試験体では、CH添加率3.5%であるB-2試験体とほぼ同等の強度が得られており、EA-Bを用いたB-5試験体が最も圧縮強度が高い結果となった。

ヤング係数の測定結果を図-3に示す。CH添加率0.3%であるB-1試験体は、材齢28日のヤング係数は低いが、材齢91日においてはCH添加率3.5%であるB-2試験体と同等であった。BFS細骨材を使用したB-2試験体は陸砂を使用したB-3試験体と比較して高い値を示した。EA-Bを使用したB-5試験体では、CH添加率3.5%であるB-2試験体と同等のヤング係数が得られた。

自己収縮ひずみの測定結果を図-4に示す。自己収縮ひずみは、凝結始発の目安としてモルタルの水和熱による

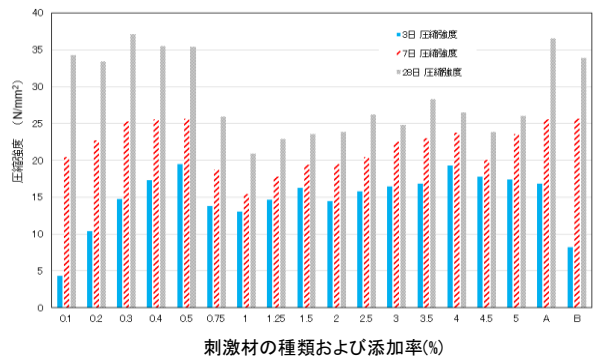


図-1 刺激材添加率と圧縮強度の関係(シリーズA)

表-2 モルタル試験体の混合比

記号	W/B %	結合材混合率 (%)		使用した 細骨材の 種類	AE 減水剤 Bx%
		BFS	刺激材		
B-1	30	99.7	CH 0.3	BFS 細骨材	1.0
B-2		96.5	CH 3.5		
B-3		96.5	CH 3.5	陸砂	
B-4		95.1	EA-A 4.9	BFS 細骨材	
B-5		96.4	EA-B 3.6		

*W:B:S=0.3:1:2.5(質量比)

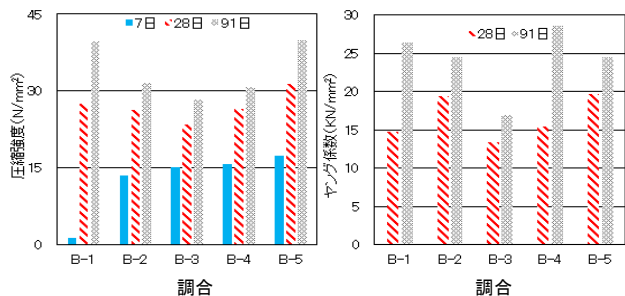


図-2 圧縮強度試験(シリーズB)



図-3 ヤング係数(シリーズB)

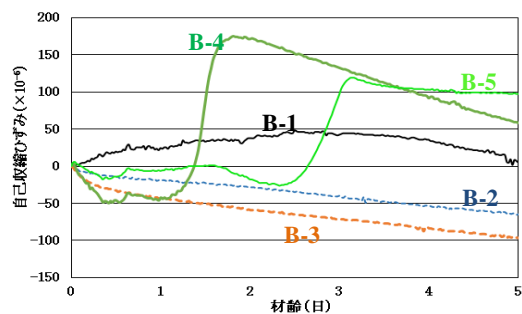


図-4 自己収縮ひずみの測定結果(シリーズB)

温度が最高となった時点として原点としている。膨張材を用いた調合B-4、B-5は材齢1日および2日から膨張側に進展している。CH添加率0.3%のB-1試験体とCH添加率3.5%のB-2試験体を比較すると、CH添加率が多いほど自己収縮ひずみは大きい。また、BFS細骨材を使用したB-2試験体と陸砂を使用したB-3試験体を比較すると、BFS細骨材を使用した試験体の方が自己収縮ひずみは小さくなる結果となった。

以上のことから、BFSにアルカリ刺激材を添加した結合材とBFS細骨材の組合せは、強度発現性、自己収縮ひずみ抑制効果に有効であることが示唆された。

4. コンクリート実験(シリーズ C)

4.1 実験概要

シリーズ A およびシリーズ B の結果より、強度発現性および収縮抑制効果のあるアルカリ刺激材として、練混ぜ性能ならびに施工性能を考慮して CH の添加量を 3.5% とし、EA-B の添加量を CaO 含有量が 3.5% になるように調整したものを選定した。実験要因を表-3 に示す。ここでは 1: 結合材(BFS+CH)+高炉スラグ骨材, 2: 結合材(BFS+CH)+天然骨材, 3: 結合材(BFS+EA)+高炉スラグ骨材, 4: 結合材(普通ポルトランドセメント)+天然骨材の組合せとする 4 種類のコンクリートを作製し、1, 3 および 4 で結合材種類の違いを、1 および 2 では骨材の種類の違いを検討した。なお、コンクリートの調合を表-4 に示す。使用材料はシリーズ A およびシリーズ B と同様である。粗骨材には、高炉スラグ粗骨材(絶乾密度 2.58g/cm³, 吸水率 1.98%)を用い、比較のために砕石(絶乾密度 2.59g/cm³, 吸水率 2.07%)を用いた。水結合材比 W/B は 30%, 細骨材率は 42.5% とし、スランブは、20±2.0cm, 空気量は 4.5±1.5% となるように試し練りを行い決定した。

表-5 には実験項目を示す。本実験では、クリンカーフリーコンクリートの強度、乾燥収縮特性および中性化速度係数を明らかにすることを目的に、強度試験、乾燥収縮ひずみ試験、乾燥収縮ひび割れ試験および促進中性化試験を計画した。

4.2 実験方法

(1) 練混ぜ方法

練混ぜ方法は、混合するアルカリ刺激材の量が少量であることから、ばらつきがでないよう粉体を良く混ぜあわせるため、BFS、細骨材およびアルカリ刺激材を 1 分間練混ぜ後、水を投入し 30 秒間練混ぜ、粗骨材を投入し 60 秒間練混ぜた。その後、スランブと空気量などの測定を行った。

(2) 圧縮強度試験

全ての調合において φ100×200mm の円柱試験体を作製し、圧縮強度試験(JIS A 1108)、弾性係数試験(JIS A 1149)および割裂引張強度試験(JIS A 1113)を行った。強度試験は、1 調合 1 材齢につき 3 体とし、表-5 に示す試験材齢において実施した。なお、試験体の養生条件は、乾燥収縮ひび割れ試験と同様とし、打ち込み直後から恒温室(温度 20℃)にて封緘養生、材齢 7 日で脱型し、恒温恒湿室(温度 20℃, 相対湿度 60%)で気中養生を行った。

(3) 自由収縮試験および自由収縮ひび割れ

100×100×400mm の角柱試験体を用い、乾燥収縮ひずみの測定には、試験体中央部に埋設した埋め込みゲージを用いた。測定はすべて恒温恒湿室内で実施した。

図-5 に乾燥収縮ひび割れ試験体の詳細を示す。乾燥収縮ひび割れ試験は、日本コンクリート工学会で提案されているコンクリートの収縮ひび割れ評価試験方法⁵⁾に準拠し、

表-3 実験要因

	調合記号	結合材	アルカリ刺激材	細骨材	粗骨材
1	All-BFS(CH)	BFS	CH	高炉スラグ細骨材	高炉スラグ粗骨材
2	BFS(CH)	BFS	CH	陸砂	砕石
3	All-BFS(EA)	BFS	EA	高炉スラグ細骨材	高炉スラグ粗骨材
4	OPC	OPC	—	陸砂	砕石

表-4 調合

調合記号	W/B (%)	単位量(kg/m ³)								SP (B×%)	
		W	B				S	BFSS	G		BFSG
			OPC	BFS	CH	EA					
All-BFS(CH)	30	170	—	547	20	—	—	729	—	813	0.5
BFS(CH)	—	170	—	543	24	—	711	—	826	—	0.5
All-BFS(EA)	—	170	—	538	0	29	—	729	—	813	1.2
OPC	—	185	617	—	—	—	813	—	905	—	0.7

S:陸砂, BFSS: 高炉スラグ細骨材, G: 砕石, BFSG: 高炉スラグ粗骨材, SP: 高性能 AE 減水剤

表-5 実験項目

実験項目	試験体寸法 (mm)	各試験体数 (本)	試験材齢および測定開始材齢 (日)
フレッシュ性状	—	—	—
圧縮強度	φ100×200	3	7, 28, 91
割裂引張強度	φ100×200	3	28
乾燥収縮ひずみ	100×200×400	3	7
乾燥収縮ひび割れ	100×100×1100	2	7
促進中性化&透気試験	100×100×400	2	4 週
内部湿度試験	100×100×200	1	4 週

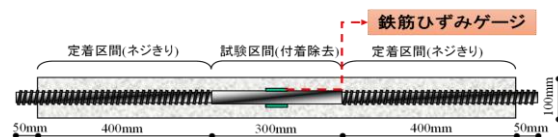


図-5 乾燥収縮ひび割れ試験体概要

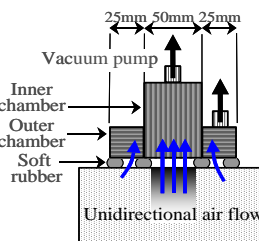


図-6 DC 法

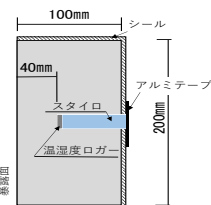


図-7 内部湿度供試体概要

100×100×1100mm の試験体を 1 調合につき 2 体作製した。拘束体である鉄筋は丸鋼 φ32mm とし、定着部を M33 相当のネジ加工とし、試験区間は 300mm, 定着区間は 400mm とした。試験区間の中央部にて対称に 2 枚のひずみゲージを貼付し測定を行った。試験体は打ち込み直後から恒温室にて封緘養生を行い、材齢 7 日に脱型し、試験体側面 2 面を乾燥面とし、打ち込み面、底面および端面をアルミ箔テープによりシールし、恒温恒湿室にて乾燥を開始した。

(4) 促進中性化試験

100×100×400mm の角柱供試体を使用し、JIS A 1153 に準拠して促進中性化試験を実施した。試験体は全て材齢 1 日にて脱型し、水中養生を材齢 28 日行った後、恒温恒湿室で 28 日間気中養生を行った後、エポキシ樹脂およびアルミテープで暴露面以外の面をシールし促進中性化試験を開

始した。試験環境は CO₂ 濃度 5%, 温度 20℃, 相対湿度 60%である。試験開始より 1, 4, 8, 13 週間後に試験体を割裂し, 割裂面に 1%フェノールフタレイソエタノール溶液を噴霧後, 未着色域を中性化部とし, 深さ 10 点の平均値を中性化深さとして求めた。

(5) 透気試験(ダブルチャンパー法)

ダブルチャンパー法(以下, DC 法)は, 透気性測定部の内部チャンパーと圧力調整用の外部チャンパーの独立 2 重構造から成り立っている(図-6)。外部と内部の圧力を等しく制御することで, シングルチャンパー法などで懸念されるコンクリートの極表層の脆弱部(Skin)の影響⁹⁾などの測定部周辺から流入する空気の流れを物理的に遮断し, 内部チャンパー断面の一次元方向の品質を原位置で評価できる試験方法である。促進中性化試験開始より 1, 4, 8, 13 週間後中性化深さと同様な時点で DC 法により透気係数の測定を行った。

(6) コンクリート内部湿度変化試験

図-7 にコンクリート内部湿度変化を測定した試験体の概要図を示す。鉄筋の一般的ななかぶり厚さを想定した暴露面から 40mm の箇所 に 温湿度ロガーを埋設し, 湿度 100% の環境下静置した。

4.3 実験結果

(1) フレッシュ性状

表-6 にフレッシュ性状の一覧を示す。表-4 に示すように CH 添加した調合においては化学混和剤の使用量も少なく, 単位水量も低いが OPC とほぼ同程度の流動性が得られることが確認できた。

(2) 圧縮強度

図-8 に圧縮強度試験結果を示す。クリンカーフリーコンクリートの圧縮強度はいずれの材齢において, 同一水粉体比の OPC 試験体の圧縮強度より低い結果となったが, 材齢 91 日において All-BFS(CH)試験体では 31.5N/mm², All-BFS(EA)試験体では OPC 試験体の 74% 程度の 44.5N/mm² の圧縮強度が得られた。一方, 同様の結合材を用いても骨材に陸砂を用いた BFS(CH)試験体が最も強度が低い結果となった。

これらの結果より, 結合材の種類を比較すると膨張材を用いた All-BFS(EA)試験体の強度発現性が高い。骨材の種類を比較すると, All-BFS(CH)試験体は BFS(CH)試験体より強度発現性が高く, 高炉スラグ微粉末とアルカリ刺激材を使用した高炉スラグ骨材を使用した組み合わせが強度発現性には有効であることが確認できた。BFS(CH)試験体および OPC 試験体とは材齢 28 日以降の強度増進が小さい。All-BHS(CH)試験体および All-BHS(EA)試験体は材齢 7 日において約 75% の強度比だったが材齢 7 日以降の強度の伸びが大きく, 材齢 28 日以降も良好な強度増進を示した。

表-6 フレッシュ性状

調合	スランブ (cm)	練り上がり温度 (°C)	空気量 (%)
All-BFS(CH)	18.0	26.3	3.7
BFS(CH)	21.5	24.7	4.5
All-BFS(EA)	20.0	24.1	3.4
OPC	22.0	25.2	3.5

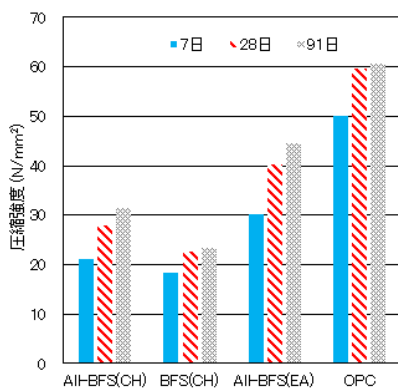


図-8 圧縮強度

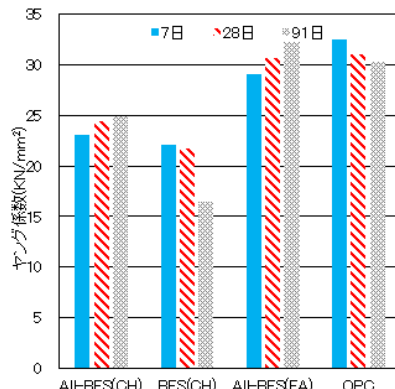


図-9 ヤング係数

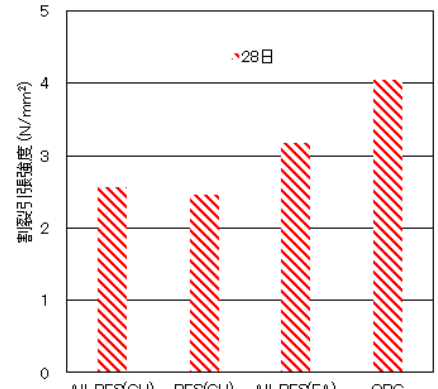


図-10 割裂引張強度

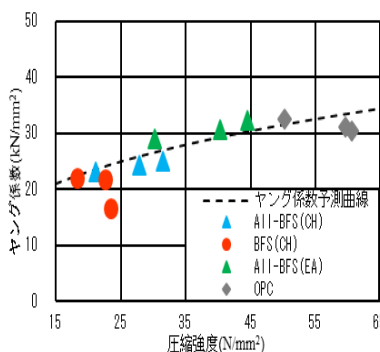


図-11 圧縮強度とヤング係数の関係

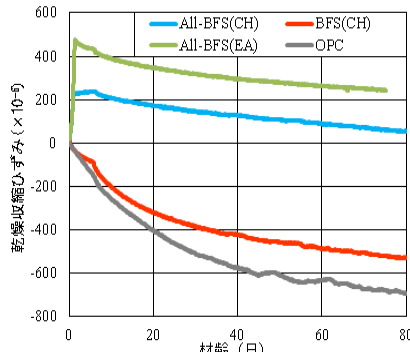


図-12 自由収縮ひずみ

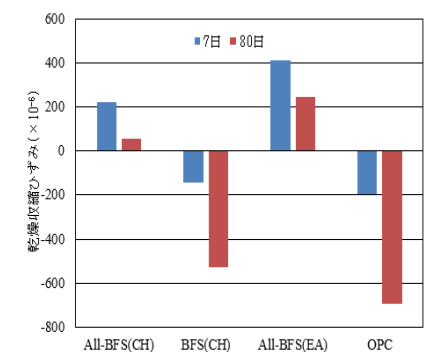


図-13 材齢 7, 80 日の自由収縮ひずみ

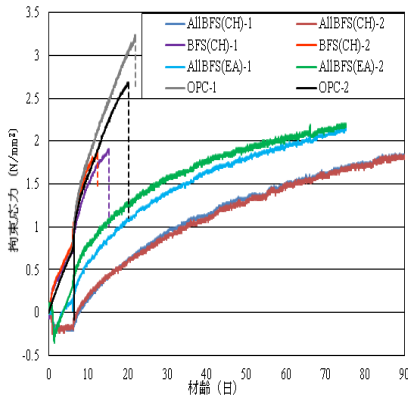


図-14 拘束応力の経時変化

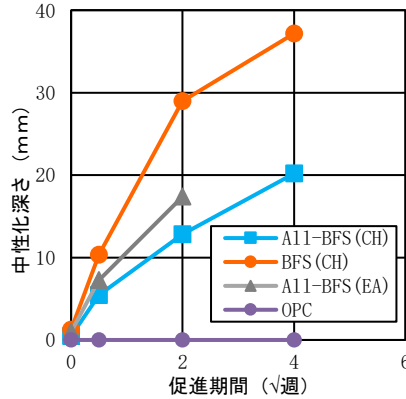


図-15 促進中性化試験結果

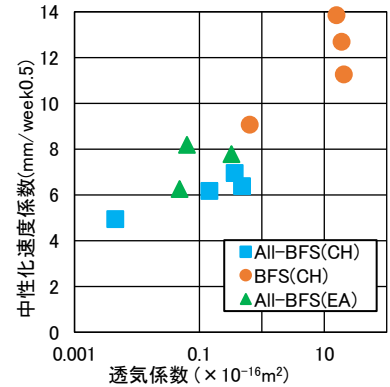


図-16 透気係数と中性化速度係数

この傾向はヤング係数(図-9)および割裂引張強度(図-10)の結果も同様である。

図-11に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。図中にはJASS 5におけるヤングの予測式⁹⁾を実線で示している。これによるとクリンカーフリーコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係も普通コンクリートと同じ予測式で表されることが確認できた。

(3) 自由収縮ひずみ

図-12に自由収縮ひずみの経時変化を示す。また、材齢7日および材齢80日時点の自由収縮ひずみを図-13に示す。なお、後述する乾燥収縮ひび割れの鉄筋にひずみが発生した時点を実線として示している。

これによると、AII-BHS(CH)試験体およびAII-BHS(EA)試験体はいずれも材齢3日程度まで膨張側にひずみが発生し、その後緩やかにひずみが収縮側に進行している。一方、OPC試験体は測定開始直後から収縮側にひずみが生じており、AII-BHS(CH)試験体およびAII-BHS(EA)試験体は収縮ひずみの抑制効果が高いことが確認できた。また、同一の結合材を用い、骨材のみ陸砂を使用したBFS(CH)試験体も収縮ひずみが大きく、高炉スラグ骨材には収縮低減効果があることが確認できた。

(4) 拘束ひび割れ

図-14に試験体に発生する拘束応力の経時変化を示す。コンクリートの自由収縮ひずみに伴い発生する拘束応力は式(1)に示す鉄筋のひずみから算出している。

$$\delta_{rs}(t) = -\frac{\varepsilon_s(t) \times E_s \times A_{rs}}{A_{cs}} \quad (1)$$

ここに、

- $\delta_{cs}(t)$: 材齢 t における収縮拘束応力 [N/mm²]
- $\varepsilon_{cs}(t)$: 材齢 t における拘束鉄筋のひずみ [$\times 10^{-6}$ m]
- E_s : 拘束鉄筋の弾性係数 [MPa]
- A_{rs} : 拘束鉄筋の断面積 [mm²]
- A_{cs} : 拘束ひび割れ試験体の中央部試験区のコンクリート断面積 [mm²]

いずれの試験体も同様に乾燥開始から、拘束応力が増加し、その後も緩やかに増加している。なお、拘束応力がピークを迎えた後、瞬間的に下がった材齢をひび割れ発生材齢とした。

表-6に拘束ひび割れ試験結果を示す。普通コンクリートのOPC試験体2体にそれぞれ乾燥日数20日および21日程度でひび割れが発生している。BFS(CH)試験体2体にそれぞれ乾燥日数12日および15日程度でひび割れが発生しているが、試験体の乾燥開始時の拘束応力は1.1 N/mm²以上になった。これに対してAII-BHS(CH)試験体は乾燥開始時の拘束応力が0 N/mm²に近い値となり、乾燥日数90日現在においてもひび割れは発生しなかった。また膨張材を使用したAII-BHS(EA)試験体について、乾燥開始時の拘束応力が0.6 N/mm²以下となり、ひび割れは確認できなかった。

表-6 乾燥収縮ひび割れ試験結果

調査	ひび割れ発生材齢(日)	Ave	最大拘束応力 (N/mm ²)	Ave
AII-BFS(CH)	1 ひび割れず	-	2.07	1.99
	2 ひび割れず		1.92	
BFS(CH)	1 15.31	13.85	1.91	1.89
	2 12.40		1.86	
AII-BFS(EA)	1 ひび割れず	-	2.16	2.18
	2 ひび割れず		2.21	
OPC	1 22.01	21.11	3.23	2.96
	2 20.20		2.68	

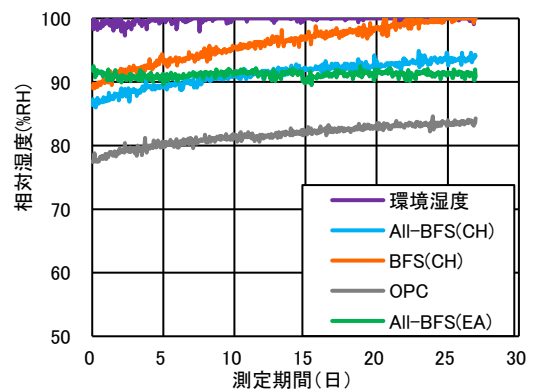


図-17 内部湿度の経時変化

これらの結果より、高炉スラグ骨材と BFS にアルカリ刺激材を添加した結合材を併用した場合は鉄筋との拘束応力が小さく、収縮ひび割れ抵抗性が高い結果となった。

(5) 促進中性化試験および透気試験

図-15 に BFS を使用した試験体 8 週間促進中性化試験結果を示す。各試験体の中性化深さは All-BFS (CH) < All-BFS (EA) < BFS(CH) の順に大きく、高炉スラグ骨材と BFS を併用することによる試験体の中性化抵抗性は高くなる結果となった。All-BFS (CH) 試験体の促進 8 週間における中性化深さは 20mm であり、天然骨材を用いた試験体(中性化深さ 37.2mm) の 55% 程度に抑制されることが分かった。

図-16 に DC 法により求めた透気係数と中性化速度係数の関係を示す。これによると、全量高炉スラグ骨材を用いた All-BFS (CH) 試験体の透気係数は、BFS(CH) 試験体よりも小さく、中性化が抑制されていることが確認できた。既往の研究⁴⁾によれば、高炉スラグ骨材の潜在水硬性により、骨材とペーストの界面に反応層が形成されており、組織が緻密になり、表層からの CO₂ 侵入抵抗性が高くなり、中性化が抑制されたことが考えられる。膨張材を用いた All-BFS (EA) 試験体についてもほぼ同等の中性化抑制効果が認められ、収縮同様、高炉スラグ骨材を併用することによりコンクリートの中性化を大幅に抑制できることが分かった。

(6) 内部湿度試験

外部相対湿度 100% の環境下における各試験体内部湿度の経時変化を図-17 に示す。OPC 試験体の内部湿度は各調査中で最も低く相対湿度 84% であった。BFS(CH) 試験体は外部環境の湿度と平衡になるまでの期間が最も速く 23 日間後には相対湿度 100% となった。一方、All-BFS 試験体は、相対湿度 90% 程度を推移しており、水分浸透性は BFS(CH) 試験体よりも低いことが確認された。既往の研究⁷⁾によれば、中性化が鉄筋まで到達していてもコンクリート内部の相対湿度が低く保たれていれば鉄筋腐食の進行が緩やかであることが報告されている。今後は曝露試験を実施し、温湿度が変動する環境下における鉄筋腐食速度を確認する予定である。

5. まとめ

本論文では高炉スラグ系産業副産物を用いたクリンカーフリーコンクリートを作製し、W/B を同一とした普通ポルトランドセメントを用いた試験体と比較検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 同程度の流動性を得るための単位水量を減じることができる。
- 2) クリンカーフリーコンクリート試験体の圧縮強度は OPC 試験体と比べて低いが、膨張材を使用することにより、圧縮強度は増加し、材齢 28 日において圧縮強度は

OPC 試験体の 70% 強度に達した。

- 3) クリンカーフリーコンクリート試験体は OPC 試験体と比べ、収縮ひずみが小さくなることが確認できた。
- 4) アルカリ刺激材に膨張材を使用した試験体については膨張材の膨張効果が打込み後 3 日間まで発揮され、自由ひずみは膨張側に進展した。その後水酸化カルシウムを添加した試験体と同様な乾燥収縮挙動を示した。
- 5) 高炉スラグ骨材と BFS にアルカリ刺激材を添加した結合材を併用した試験体の乾燥ひび割れ発生材齢は陸砂を用いた試験体より大幅に延伸できることが確認できた。
- 6) 高炉スラグ骨材と BFS にアルカリ刺激材を添加した結合材を併用した試験体は、陸砂を用いた試験体よりも中性化抑制効果が高い。

今後は、クリンカーフリーコンクリートの材齢に伴う強度増加の確認とともに鉄筋腐食防止効果について検討して行く予定である。

謝辞

本試験の実施には、鐵鋼スラグ協会の多大なるご協力をいただきました。また鹿島学術振興財団より助成をいただきました。デンカ株式会社には膨張材の提供を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 株式会社エックス都市研究所:平成 27 年度エネルギー使用合理化促進基盤整備委託費セメント産業における省エネ製造プロセスの普及拡大方策に関する調査-混合セメントの普及拡大方策に関する検討-報告書, E005579, 2016.4
- 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) 高野良広ほか:鉄鋼スラグ水和固化体の開発経緯と特徴および適用事例, 新日鉄住金技報第 399 号, pp.42-50, 2014
- 4) 長滝重義, 高田誠, 亀田均:水砕スラグ砂とセメントペーストの界面機構がコンクリートの物性に及ぼす影響, セメント技術年報, pp. 172-176, 1979
- 5) 日本コンクリート工学会:混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会, 2010.9
- 6) Schönli, K. and Hilsdorf, H.: Evaluation of the effectiveness of curing of concrete structure, ACI SP-100, Concrete Durability. Katharine and Bryant Mather Intern. Confer., Vol.1, pp.207-226, Detroit, ACI, 1987
- 7) 清原千鶴ほか:実構造物調査を通じた中性化到達鉄筋の腐食性状, 日本建築学会大会講演梗概集, pp.651-652, 2017