

論文 高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの長期性状および耐久性

宮澤 祐介*1・横室 隆*2

要旨：本研究は、比表面積 3000cm²/g 程度の高炉スラグ微粉末を使用し、高炉スラグ微粉末の置換率および SO₃ 量を調整したコンクリートの長期性状および耐久性について、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種と比較検討した。その結果、圧縮強度は高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど初期では低い値を示すが、長期強度は高くなる。また、中性化深さは、従来いわれているように若干大きな値を示す。また、塩分浸透深さは小さくなることが明らかとなった。

キーワード：高炉セメント、高炉スラグ微粉末、圧縮強度、化学分析、中性化深さ、塩分浸透深さ

1. はじめに

近年、地球温暖化防止の機運が高まる中、代表的な温室効果ガスである CO₂ の排出量の削減が急務となっている。我が国の CO₂ 排出量は年々増加傾向にあり、その中でもセメント産業から排出される CO₂ 排出量は、我が国の CO₂ 総排出量の約 4% を占めている。

このため、セメント産業における CO₂ 排出量削減が重要な課題となっており、その方策の一つとして、混合セメントの利用拡大が挙げられる。代表的な混合セメントとしては高炉セメントがあり、グリーン購入法の特定調達品目に選定されるなど、地球環境保護の観点から利用拡大が期待されている。

しかし、近年の高炉セメントは、高炉スラグの微粉末化やスラグの混合量の低減により比表面積が 4000cm²/g 程度の高炉スラグ微粉末が混合されるようになり、初期強度が改善され普通ポルトランドセメントに置き換わって利用されている。既往の文献¹⁾では、高炉セメントを用いたコンクリートは普通ポルトランドセメントを用いた場合より発熱量が大きくなる場合がある。また、比表面積が大きい高炉スラグ微粉末を用いた場合は自己収縮が大きくなることが報告されている。

一般に高炉セメントに含まれる高炉スラグ微粉末の比表面積は大きいものほど初期強度は増進するが、収縮の観点からみると小さいものほど低減される²⁾。また、SO₃ 量が過大であると強度低下などの悪影響を生じることがあり、SO₃ 量を適切な範囲で大きくすることにより、収縮および水和熱の低減^{3),4)}が期待されている。

これらの背景から筆者らは、高炉スラグ微粉末の比表面積および置換率を調整し、発熱量や強度発現性状などについて研究を継続している。

そこで本研究は、比表面積 3000cm²/g 程度の高炉スラグ微粉末を使用し、その置換率および SO₃ 量を調整したセメント（以下 BF セメントと略記）を用い、材齢 10 年までの強度発現および中性化や塩害に対する耐久性について、普通ポルトランドセメント (N) および高炉セメント B 種 (BB) と比較検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に本実験で使用した材料および物性を示す。また、表-2 に各種セメントの化学成分を示す。

なお、BF セメントは普通ポルトランドセメントにせ

表-1 使用材料および物性

使用材料	種類 (記号)	物性
セメント	普通ポルトランドセメント (N)	密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3320cm ² /g
	高炉セメント B 種 (BB)	同 3.04g/cm ³ , 同 3920cm ² /g
	BF セメント (BF-40)	同 3.04g/cm ³ , 同 3220cm ² /g
	BF セメント (BF-60)	同 2.98g/cm ³ , 同 3130cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末 (BFS)	同 2.94g/cm ³ , 同 3030cm ² /g
	天然無水石膏 (Gy)	同 2.90g/cm ³ , 同 4800cm ² /g
細骨材	葛生産砕砂 (70%) と陸砂 (30%) の混合砂 (S)	表乾密度 2.61g/cm ³ , f.m. 2.73
粗骨材	葛生産砕石 2005 (G)	同 2.64g/cm ³ , Gmax 20mm, 実積率 59.2%
化学混和剤	AE 減水剤 (リグニンスルホン酸化合物とオキシカルボン酸の複合体)	密度 1.09g/cm ³
練り混ぜ水	地下水 (W)	—

*1 足利工業大学 総合研究センター 客員研究員 (正会員)

*2 足利工業大学 工学部 創生工学科 建築・土木分野 建築学コース 教授 博士 (工学) (正会員)

表-2 各種セメントの化学成分 (%)

セメント種類	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
N	1.29	21.00	5.41	3.06	63.82	2.27	2.11	0.35	0.31
BB	1.02	24.68	8.62	2.36	56.83	3.52	1.67	0.33	0.31
BF-40	0.60	25.68	8.89	1.94	55.11	3.86	3.96	0.21	0.35
BF-60	0.47	27.68	10.64	1.37	50.33	4.67	3.54	0.21	0.36

っこうが含まれていない高炉スラグ微粉末と天然無水せっこう量を調整し、SO₃量が4%となるように混合したものでBF-40(高炉スラグ微粉末の置換率40%)およびBF-60(同60%)の2種類を作製した。

2.2 コンクリートの調合

コンクリートの目標強度は、材齢91日で圧縮強度(F₉₁)27N/mm²を超えるものとし、試し練りによって調合を定めた。各種コンクリートの水結合材比(W/(C+BFS))は、Nで53.9%、BBで53.0%、BF-40で50.0%、BF-60で48.0%とした。また、スランブは12±2.5cm、空気量は4.5±1.0%を目標とした。なお、表-3に各種コンクリートの調合を示す。

2.3 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜは生コン工場の2軸強制ミキサーを用い、1.5m³分に相当する化学混和剤を含む水、細骨材および粗骨材の順に投入し、その後、セメントを入れ合計2分間練り混ぜた。このコンクリートをアジテータトラックで、20分かけて現場に輸送し、荷卸し時におけるスランブ、空気量およびコンクリートの練上り温度を測定した。

3. 実験項目および試験方法

3.1 フレッシュコンクリートの試験方法

(1) スランブ

スランブ試験方法は、JISA 1101(コンクリートのスランブ試験)に従った。

(2) 空気量

空気量試験方法は、JISA 1128(フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法)に従った。

(3) コンクリートの練上り温度

コンクリートの練上り温度は、棒状温度計を用いて測定した。

(4) ワーカービリティ

ワーカービリティについては、スランブ試験の際、スランブしたコンクリートの形状や、くずれ方などを目視によって判断した。

(5) ブリーディング量

ブリーディング量試験方法は、JISA 1123(コンクリートのブリーディング試験方法)に従った。

(6) 凝結

凝結試験方法は、JISA 1147(コンクリートの凝結時間試験方法)に従った。

表-3 各種コンクリートの調合

セメント種類	水結合材比 (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)			
			水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)
N	53.9	44.8	168	312	803	1003
BB	53.0	45.0	168	317	802	992
BF-40	50.0	44.5	166	332	790	996
BF-60	48.0	44.0	165	344	774	996

[注] 使用した化学混和剤量はセメント×1.0%添加した。

3.2 硬化コンクリートの試験方法

(1) 圧縮強度

圧縮強度試験の供試体は、JISA 1132(コンクリートの強度試験用供試体の作り方)によって、φ100×200mmの供試体(20℃水中養生)およびφ150×300mmの供試体(屋外自然暴露・海中に浸漬)の2種類を作製した。

型枠に打込み後24時間は20℃・60%R.H.の恒温恒湿室にて養生し、翌日脱型した。その後、φ100×200mmの供試体は所定材齢まで20℃水中養生した。同様に、φ150×300mmの供試体は材齢28日まで20℃水中養生を行い、その後、屋外暴露(大学構内)および海中(神奈川県川崎市)に浸漬した。

圧縮強度試験はJIS A 1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)に従って行った。試験材齢は、φ100×200mmの供試体は7日、28日、91日、1年、5年および10年とした。

同様にφ150×300mmの供試体は1年、5年および10年とした。なお、供試体寸法が異なる理由は、長期間にわたって中性化および耐海水性を評価することから、供試体への劣化進行等に対応できるように供試体寸法を大きくした。

(2) 中性化深さおよび鉄筋の発錆

中性化深さおよび鉄筋の発錆試験は、図-1(a)に示す供試体を用い、かぶり厚さ(2, 3, 4cm)の位置に磨き鉄筋(φ10mm)を配筋した。また、供試体の前養生は、型枠に打込み後、材齢28日まで散水養生を行った。その後、屋外に暴露し、材齢1年、5年および10年の中性化深さと鉄筋の発錆について試験した。

なお、中性化深さの測定は、長手方向に10cm厚に切断・清掃し、その断面にフェノールフタレインアルコール溶液(1%)を噴霧し、両側面計4ヶ所をノギスで測定し、平均中性化深さを求めた。

また、鉄筋の発錆については、この供試体からコンクリートを研り、鉄筋を取り出し目視により錆を確認した。

(3) 塩分浸透深さ

塩分浸透深さおよび鉄筋の発錆試験は、図-1 (b) に示す供試体を用い、かぶり厚さ (5, 6, 7cm) の位置に磨き鉄筋 ($\phi 10\text{mm}$) を配筋した。また、供試体の前養生は上記 3.2 (2) と同様とし、材齢 28 日から 3.2 (1) と同様の海中に浸漬した。なお、供試体の浸漬状態は、満潮時には海中に浸漬されており、干潮時には露出している状態となっており、この供試体の材齢 1 年、5 年および 10 年の塩分浸透深さと鉄筋の発錆について試験した。

なお、塩分浸透深さの測定は、長手方向に 10cm 厚に切断・清掃し、その断面にフルオレセインナトリウム溶液と硝酸銀溶液を噴霧し、白色に変色した部分の深さの両側面 40 ケ所をノギスを用いて測定し、その平均浸透深さを求めた。

また、鉄筋の発錆については、上記 3.2 (2) と同様の方法で確認した。

(4) 化学分析

生成物の組成および確認と微細組織の観察をするため、以下の項目の化学分析を材齢 10 年で行った。

1) 蛍光 X 線分析 (XRF)

コンクリートの組成および化学成分等を確認するため JIS R 5204 に準拠し、化学成分を全て酸化物に換算し、日本電子(株)製 JSX-3100R II を用い定量分析を行った。なお、XRF の測定条件は、ターゲット:Cu、管電圧 50kV、コリメータ 7mm、測定時間 120 秒、雰囲気:VAC(真空)、測定モード:定量分析とした。

2) X 線回折 (XRD)

水和生成物の生成量の相対比較を行うため、前処理後、内部標準物質として $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ を内割りで 10% 加え、マック・サイエンス製 MXP-3A を用い生成物の確認をした。なお、XRD の測定条件は、ターゲット:Cu、管電圧 40kV、管電流 20mA、測定範囲: $2\theta = 5 \sim 60\text{deg}$ 、ステップ角度: 0.02deg 、計数時間: 1 秒とした。また、回折は既往の文献⁵⁾を参考に、各生成物に応じて採用する定量ピークを限定し、ピーク位置および積分強度を算出した。なお、表-4 に対象とした定量ピークを示す。

3) 走査型電子顕微鏡 (SEM)

生成物の結晶構造等を確認するため、日本電子製 JSM-6510LA を用い、微細組織の観察を行った。

なお、1) ~3) の試料調整については、各種コンクリート供試体の表面部から粗骨材を取り除いたモルタル部分をハンマーで粉碎し、5mm 程度の破片を採取し、アセトンに浸漬して反応を停止させた。その後、試料を溶液から取り出し 2mm 以下の大きさに圧縮粉碎し、デシケータに入れ、真空ポンプ (真空度 33.3kPa) を接続し 1 時間以上吸引してから実施した。なお、乾燥時の温度は試験室の室温 (18~21°C) となっている。

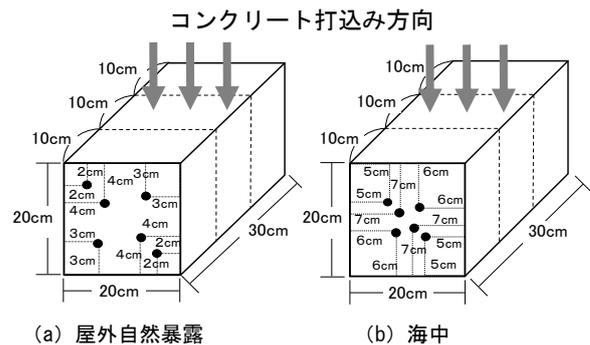


図-1 中性化深さ・塩分浸透深さおよび鉄筋の発錆試験用供試体

表-4 粉末 X 線回折における定量ピーク

水和生成物	$2\theta (^{\circ})$
AFt	9.1
AFm	9.9
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	12 付近
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	18.06
CaCO_3	29.4
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	52.52

表-5 各種コンクリートのフレッシュ試験結果

セメント種類	フレッシュ性状			
	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリートの練上り温度 ($^{\circ}\text{C}$)	ワーカビリティ
N	10.0	5.0	10.0	良
BB	11.5	3.5	9.0	良
BB40	14.5	5.2	11.0	良
BB60	10.0	4.4	11.0	良

4. 実験結果と考察

4.1 フレッシュコンクリートの性状

表-5 に各種コンクリートのフレッシュ試験結果を示す。

(1) ワーカビリティ

各種コンクリートのワーカビリティは、荷卸し時に目視で観察を行った。いずれのコンクリートともスランプおよび空気量は目標とした値が得られ、ワーカビリティは良好であった。

(2) ブリーディング量

図-2 に各種コンクリートの最終ブリーディング量を示す。N に比べて他のコンクリートのブリーディング量は若干多くなっている。また、BB に比べて高炉スラグ微粉末の置換率が増すほどブリーディング量は少なくなっており、いずれのコンクリートとも JASS 5 の目標値 $0.50\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下となっている。

(3) 凝結

図-2 に各種コンクリートの凝結時間を示す。N に比べて他のコンクリートの凝結の始発および終結時間は長くなっている。また、BB に比べて、BF-40 および BF-60 の凝結は始発および終結時間は高炉スラグ微粉末の置換率

が増すほど長くなった。一般に高炉スラグ微粉末の置換率が増加するほど凝結時間は遅延することが報告⁹⁾されており、同様の結果となった。

4.2 硬化コンクリートの性状

(1) 圧縮強度

図-3に各種コンクリートの圧縮強度を示す。圧縮強度は材齢の経過に伴い、いずれのコンクリートとも強度が増進している。材齢7日をみるとNに比べて高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど初期強度が低くなっている。

同様に材齢28日では、Nを除く他のコンクリートは同程度の強度となっている。

また、目標とした圧縮強度は、いずれのコンクリートとも材齢91日で27N/mm²を超えており、Nに比べ高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど大きくなった。さらに、それ以降、10年まででは材齢の経過に伴い、いずれのコンクリートとも強度は増進しており、BF-60のものが最も高い強度となっている。

図-4に各種コンクリートの材齢毎の圧縮強度比を示す。なお、強度比とは、各種コンクリートの材齢91日圧縮強度に対する所定材齢の圧縮強度の増進比である。材齢1年、5年および10年ではNおよびBBは同程度の強度比となっているが、BF-40およびBF-60では高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど強度比が大きくなる傾向となった。

図-5に各種コンクリートの高炉スラグ微粉末の置換率と強度比の関係を示す。なお、強度比とは、各材齢におけるNコンクリート圧縮強度に対する各種コンクリート圧縮強度の強度比である。

材齢7日および28日では、高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど強度比が小さくなる傾向となった。また、BBと比べても同様の結果となった。さらに、材齢91日以降10年まででは、材齢の経過に伴い高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど強度比は大きくなった。

(2) 中性化深さおよび鉄筋の発錆

図-6に各種コンクリートの中性化深さと圧縮強度の

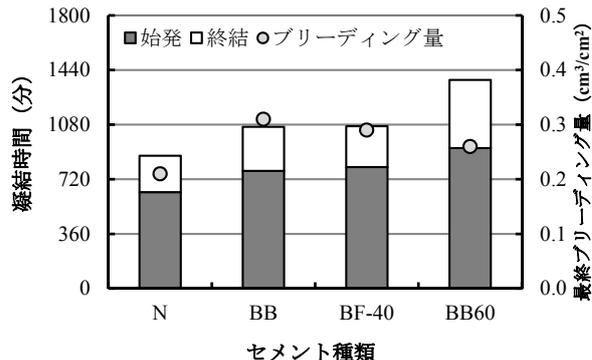


図-2 各種コンクリートの凝結とブリーディング量

関係を示す。各種コンクリートとも材齢の経過に伴い中性化深さが大きくなるほど圧縮強度は高い値を示しており中性化に伴う強度低下は無かった。また、高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど中性化深さは大きい値を示した。ここで、各種コンクリートの材齢1年の中性化深さを基準とした各材齢における中性化深さの増加割合を計算すると、材齢の経年に伴い高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど中性化深さの増加割合は小さくなる傾向が伺えた。なお、材齢10年までの鉄筋の発錆は、現在のところ認められていない。

これらについては既往の文献⁷⁾から、長期わたって屋外自然暴露のような実環境下に養生した場合のNおよびBBの比較では、その差がほとんど無いと報告されている。この理由としては、屋外暴露で降雨などにより水分供給がおこなわれ、水和が徐々に進行したことによりコンクリート組織が緻密になり、CO₂の拡散が阻害されたためと考える。また、本実験では高炉スラグ微粉末の混入やセメント種類が異なることによりセメント水和物の量やその特質が異なることによる影響も考えられる。

(3) 塩分浸透深さおよび鉄筋の発錆

図-7に海中に浸漬した、各種コンクリートの塩分浸透深さと圧縮強度の関係を示す。各種コンクリートとも材齢の経過に伴い塩分浸透深さは大きな値を示しており、それに伴って圧縮強度は低くなっている。また、高炉ス

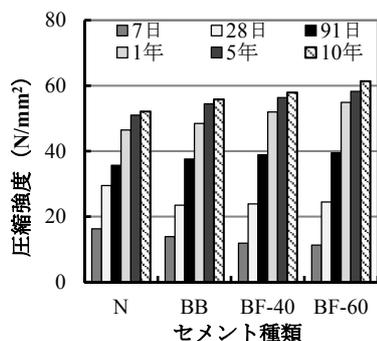


図-3 各種コンクリートの圧縮強度 (20°C水中養生)

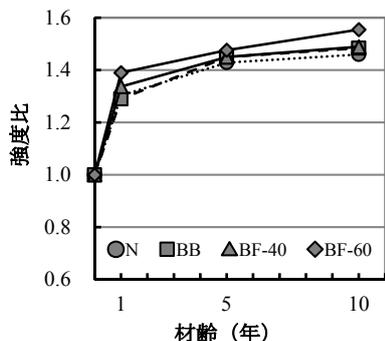


図-4 各種コンクリートの圧縮強度比 (20°C水中養生)

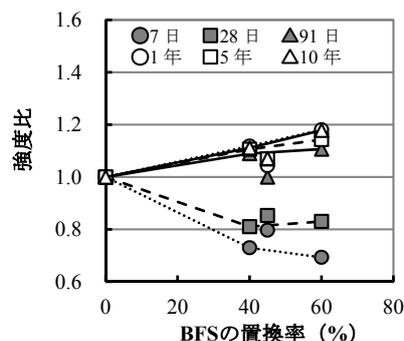


図-5 各種コンクリートの置換率と強度比 (20°C水中養生)

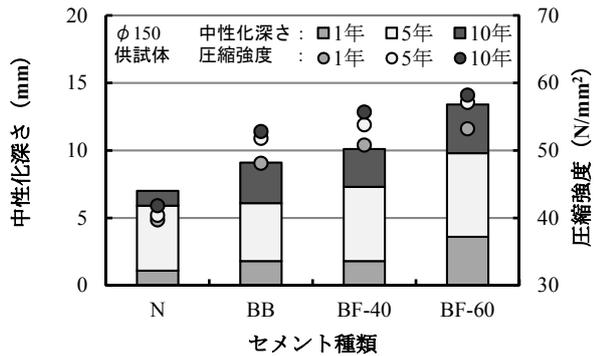


図-6 各種コンクリートの中性化深さと圧縮強度の関係

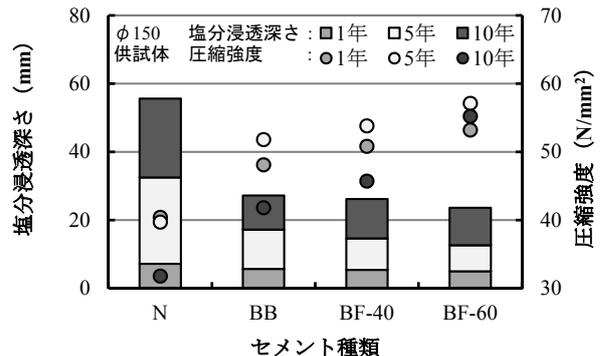


図-7 各種コンクリートの塩分浸透深さと圧縮強度の関係

ラグ微粉末の置換率が増すほど塩分浸透深さは小さい値を示した。

この理由としては、高炉スラグ微粉末を混合したものは、通常のコンクリートの約2倍の Al_2O_3 を含有しているため、内部に塩分の拡散を抑制するフリーデル氏塩の生成量が多いこと、さらには、コンクリートの透水係数が通常のコンクリートよりも小さいため、塩分浸透抑制効果があるものと推察される。なお、材齢10年までの鉄筋の発錆は、N以外のものについては、現在のところ認められていない。

(4) 化学分析

1) 蛍光 X 線分析 (XRF)

表-6 に材齢10年経過した各種コンクリートの蛍光 X 線分析による定量分析の結果を示す。 SO_3 成分が多い順に $BF-60 > BF-40 > BB > N$ となっており、高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど SO_3 成分が残存しており、 SO_3 量が圧縮強度に寄与していると推察される。これらについては今後、詳細に検討したいと考えている。

2) X 線回折 (XRD)

図-8 および図-9 に材齢10年経過した各種コンクリートの回折パターンを示す。回折パターンをみると、AFt、AFm、 $Ca(OH)_2$ 水和物、 $CaCO_3$ 等の生成物由来とみられる回折ピークが認められた。また、細骨材および粗骨材に由来する SiO_2 の回折ピークが認められている。さらに Al_2O_3 と比較して $CaCO_3$ の回折ピークは小さくなっている。その一方で、中性化が進行した図-9の結果からは $Ca(OH)_2$ の回折ピークはほぼ消滅しており、 $CaCO_3$ の回折ピークは Al_2O_3 に比べて大きくなっている。この理由としては、中性化の進行に伴い $Ca(OH)_2$ が消費され、 $CaCO_3$ が増加したことによる影響と考える。また、 $CaCO_3$ の積分強度比は420~470の範囲にあり、いずれのコンクリートともに $CaCO_3$ の生成量に大きな差は見られなかった。

一例として図-10 に AFt と $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の積分強度比を示す。なお、積分強度比とは、表-2 に示した内部標準物質の回折ピーク ($2\theta = 52.52^\circ$) の積分強度を 100 とし

表-6 各種コンクリートの蛍光 X 線分析 (材齢 10 年)

化学成分 (%)	N		BB		BF-40		BF-60	
	有	無	有	無	有	無	有	無
Na ₂ O	0.555	0.629	0.594	0.563	0.526	0.568	0.587	0.637
MgO	1.77	2.15	2.22	2.1	2.7	2.29	2.33	2.63
Al ₂ O ₃	6.53	9.14	7.64	7.87	7.64	7.91	8.25	9.06
SiO ₂	59.0	57.6	64.4	64.7	58.0	63.7	61.2	56.4
P ₂ O ₅	0.144	0.162	0.117	0.107	0.122	0.134	0.149	0.158
SO ₃	0.111	0.427	0.184	0.339	0.445	0.721	0.841	1.38
K ₂ O	0.092	0.524	-	0.06	0.067	0.091	0.021	0.103
CaO	15.1	15.3	13.0	13.5	17.0	15.0	14.7	18.1
TiO ₂	0.419	0.638	0.44	0.433	0.481	0.462	0.45	0.492
MnO	0.402	0.215	0.26	0.23	0.305	0.307	0.265	0.292
Fe ₂ O ₃	4.17	6.49	4.65	4.08	4.34	4.21	3.64	3.67
SrO	0.061	0.058	0.058	0.063	0.068	0.065	0.066	0.068

※：有：中性化部分 無：未中性化部

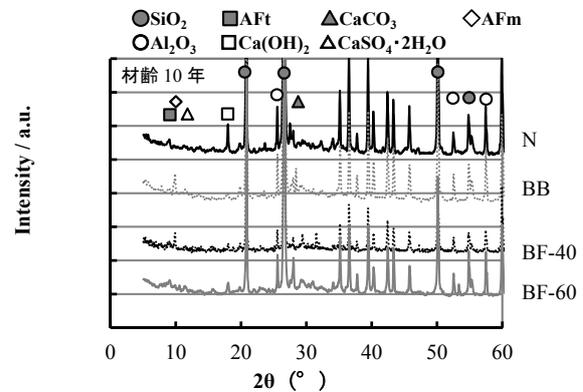


図-8 各種コンクリートのX線回折 (XRD) による回折パターン (20°C水中養生)

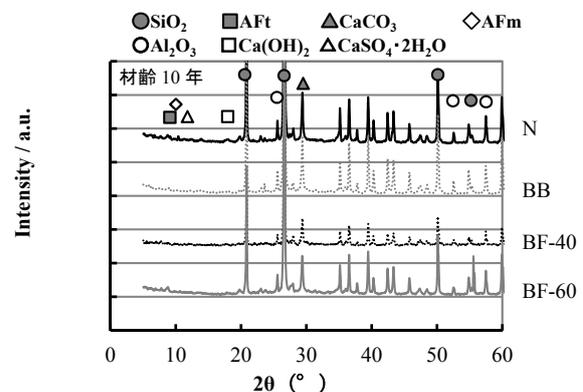


図-9 各種コンクリートのX線回折 (XRD) による回折パターン (中性化部分)

たときの各生成物の積分強度比である。

AFt および $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の積分強度比は大きい順に $\text{BF-40} > \text{BF-60} > \text{BB} > \text{N}$ となっており、既往の文献²⁾で報告されている通り、せっこうを添加し、 SO_3 量を調整した高炉セメントでは AFt および $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の生成量が増えることにより長期強度が高くなることが本実験結果からも確認された。

3) 走査型電子顕微鏡 (SEM)

写真-1 に材齢 10 年経過した各種コンクリートの SEM 像を示す。BF-40 および BF-60 からは AFt の針状結晶が確認された。また、写真に示していないが N および BB に比べて AFt が多く生成していることも確認できた。

5. まとめ

本研究では、高炉スラグ微粉末を使用し、高炉スラグ微粉末の置換率および SO_3 量を調整したコンクリートの長期性状および耐久性について、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種と比較検討した。結果を以下に示す。

- (1) ブリーディング量は、N に比べていずれのコンクリートとも多くなるが、高炉スラグ微粉末の置換率が増すほどブリーディング量は少なくなる。
- (2) 凝結は、高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど始発・終結時間も長くなる。
- (3) 圧縮強度は、高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど、初期では若干低い値を示すが、長期強度は高くなる。
- (4) 中性化深さは、高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど大きくなが、長期材齢になるとその増進割合は小さくなる。また、鉄筋の発錆は現在のところ、いずれのコンクリートとも認められない。
- (5) 塩分浸透深さは、高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど、その浸透深さは小さくなる。また、鉄筋の発錆は N 以外のものについては、現在のところ認められない。
- (6) XRF および XRD から圧縮強度および中性化に影響を及ぼす化学成分や生成物が確認された。また、SEM 観察から、AFt の生成物が確認され、強度増進に寄与する傾向が伺えた。

〈謝辞〉

本研究を進めるにあたり、試料の提供および実験にご協力頂いた (株) デイ・シイの二戸信和氏および化学分析にご協力頂いた県南技術支援センターの金子優氏をはじめ関係各位に謝意を表します。

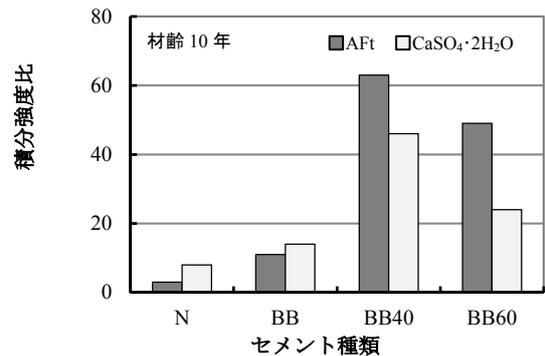


図-10 各種コンクリートの生成物の積分強度比 (20°C水中養生)

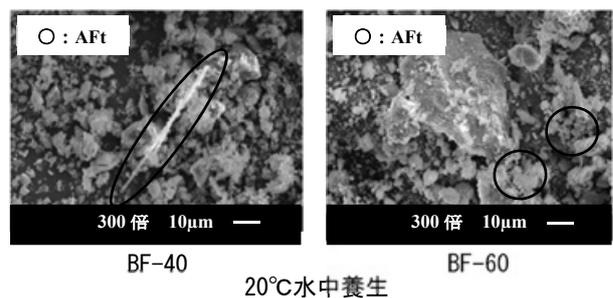


写真-1 硬化体の SEM 像 (材齢 10 年)

参考文献

- 1) 田澤栄一, 宮澤伸吾: セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響, 土木学会論文集, No.502/V-24, pp.43-52, 1994
- 2) 宮澤伸吾, 大澤友宏, 廣島明男, 鯉淵 清: 低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートの特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.487-492, 2005
- 3) 二戸信和, 羽原俊祐, 鯉淵 清, 坂井悦郎: 断熱温度上昇に及ぼす高炉セメントの水和反応の温度依存性の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.59-64, 2010
- 4) 和地正浩, 米澤敏男, 三井健郎, 井上和政: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの物性に及ぼす SO_3 量の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.203-208, 2011
- 5) 坂井悦郎, 井元晴丈, 大門正機: 高炉セメント硬化体の相組成と強度発現, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.135-140, 2004
- 6) 日本建築学会: 高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説, 2001
- 7) 松田芳範, 上田洋, 石田哲也, 岸利治: 実構造物調査に基づく炭酸化に与えるセメントおよび水分の影響, コンクリート工学論文集, Vol.32, No.1, pp.629-634, 2010