

高炉スラグ微粉末を各種割合で混和材として使用した 環境配慮型コンクリートに関する研究

Study on Ecological Concrete Using Ground Granulated Blast-furnace Slag As the Mineral Admixture at Replacement Ratio

山下 紘太朗* 住 学*
Kotaro Yamashita Manabu Sumi

要旨

近年、環境負荷低減のため、二酸化炭素排出量を削減できる環境配慮型コンクリートの開発がなされている。本研究では、広範囲に適用できる環境配慮型コンクリートの開発を目的として、高炉スラグ微粉末を幅広い使用率で用いたコンクリートについて検討を行った。室内実験では高炉スラグ微粉末の種類や使用率がコンクリートの諸性状におよぼす影響について、実機実験では施工性や模擬部材による強度発現性状、調合設計手法について検討した。これらの成果をもとに、本研究における環境配慮型コンクリートについて、性能評価機関より建設材料技術性能証明を取得している。
キーワード：環境配慮型コンクリート 高炉スラグ微粉末 使用率 強度発現 耐久性 調合設計 二酸化炭素削減率

1. はじめに

建設業界では、エネルギー消費量や二酸化炭素排出量が多く、建築分野における住宅や業務ビルの建設では国内全体の約10%の二酸化炭素を排出するとも試算される。また、セメント産業では同様に約4%の二酸化炭素排出量を占めており、構造材料として最も使用量の多いコンクリート分野における二酸化炭素排出量の削減は重要な課題である。

経済産業省では、非エネルギー起源の二酸化炭素削減のため、混合セメントの普及拡大の方策¹⁾を示し、2013年度の利用率22.1%から2030年度には25.7%にすることを目標としている。建築分野における混合セメントの利用拡大については、杭や地下躯体だけでなく地上構造物まで含めた幅広い部位・部材に適用することが理想となる。

混合セメントのひとつである高炉セメントは、JIS R 5211「高炉セメント」でセメント中の高炉スラグの分量に応じてA～C種に分類される。日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」²⁾（以下、JASS 5）では、高炉セメントの特性が示されており、普通ポルトランドセメントと同様な性質を持つA種は上部構造物への適用が見込まれ、B種やC種では杭や地下構造物など、その利点を生かした適用方法があると考えられる。

しかしながら、現在製造される高炉セメントはB種がほとんどであり、A種およびC種の市場への流通は極めて少ない。また、高炉セメントB種においても、製品としての高炉スラグの分量は40～45%に限定されており、前述のような適材適所への使い分けは難しい。

一方、高炉スラグ微粉末（以下、BF）を高含有した環境

配慮型コンクリートの開発も多く見られる。これらは、いずれもBFなどの混和材料をポルトランドセメントの代替として使用するという概念は同じものの、混和材料の種類や使用量などの仕様が異なるため、レディーミクストコンクリート工場（以下、工場）においては各ゼネコンに応じた材料の手配や調合設計、サイロや貯蔵ビンの確保といった煩雑な管理が負担となる一面もある。

2. 研究の概要

このような背景の中、BFを混和材料として各種割合で用いた環境配慮型コンクリートは、使用率に応じて各部位に求められる性能を満たし、かつ工場におけるサイロ確保や流通といった材料管理の負担も軽減が可能と考えられる。

そこで本研究では、建築物へ広範囲に適用できる環境配慮型コンクリートの開発を目的として、BFを混和材料として幅広い使用率で用いたコンクリートについて室内実験と実機実験を実施した。室内実験では、BF種類や使用率がコンクリートの諸性状におよぼす影響について、実機実験では、施工性や模擬部材による強度発現性状や調合設計手法について検討した。

本研究は、ゼネコン13社（鴻池組、青木あすなろ建設、浅沼組、安藤ハザマ、奥村組、熊谷組、五洋建設、銭高組、鉄建建設、東急建設、東洋建設、長谷工コーポレーション、矢作建設工業）で組織された共同研究「環境配慮型コンクリートの諸性状および評価方法に関する研究会」で実施したものであり、本報告は既往の文献^{3),4)}を加筆修正し、まとめたものである。

* 技術研究所

3. 室内実験

3.1 室内実験の概要

室内実験では、BFの種類や使用率がコンクリートの諸性状におよぼす影響を把握するため、表3.1に示す要因と水準で、フレッシュコンクリート性状、強度および耐久性に関する各種試験を実施した。なお、本研究ではBF使用率に応じて、例えばBF使用率10%以上30%以下を「A種クラス」と表記することとした。これは、各BF使用率においてJIS A 5211で高炉セメントの種類および高炉スラグの分量の関係と対応することを示すものである。また、日本建築学会「高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針（案）・同解説」⁵⁾（以下、高炉指針）では、BF使用率により、例えばBF使用率20%以上30%以下を「高炉セメントA種相当」と定義しているが、これとは一致していない。

3.2 使用材料および調合とフレッシュコンクリート

3.2.1 使用材料

表 3.1 室内実験の要因と水準ならびに試験項目

要因	水準
BF 使用率	N : 0%、A 種クラス : 10、20、30% B 種クラス : 45、60% C 種クラス : 70%
水結合材比	45、55、65% (BF 使用率 0~45%) 35、45、55% (BF 使用率 60~70%)
BF 種類	記号 : a、b、c
三酸化硫黄量	約 2%、4%
混和剤種類	記号 : イ、ロ、ハ
環境温度	20℃、10℃、5℃
試験項目	スランプ (JIS A 1101)、空気量 (JIS A 1128)、ブリーディング (JCI-S-015)、凝結時間 (JIS A 1147)、断熱温度上昇 (空気循環式)、圧縮強度 (JIS A 1108)、静弾性係数 (JIS A 1149)、長さ変化 (レーザ非接触式)、促進中性化 (JIS A 1153)、凍結融解 (JIS A 1148)

表 3.2 に使用材料を、表 3.3 に BF の品質を示す。混和剤は製造者の異なる 3 種類（イ、ロ、ハ）を使用し、製造者の試験室において練混ぜを行った。セメントは同一ロットの普通ポルトランドセメントを使用した。BF は 3 種類（a、b、c）とし、いずれもせつこう添加タイプを使用した。各種 BF の品質は、JIS A 6206（コンクリート用高炉スラグ微粉末）による規格値を満たし、比表面積約 4300cm²/g、三酸化硫黄約 2%、塩基度約 1.8 のものを使用した。無水せつこうは、三酸化硫黄量 (SO₃) 4% とした調合に使用した。骨材は各種試験結果への影響を小さくするため、製造者の試験室で使用している JIS A 6204（コンクリート用化学混和剤）のコンクリート試験用骨材を使用した。練混ぜ水には上水道水を使用した。

3.2.2 調合とフレッシュコンクリート

表 3.4 に室内実験の代表的な調合とフレッシュコンクリートの試験結果を示す。目標性能は、AE 減水剤を用いたものでスランプ 18±2.5cm、高性能 AE 減水剤を用いたものでスランプ 21±2.0cm とし、空気量は全ての調合で 4.5±1.5% で管理した。

表 3.3 高炉スラグ微粉末 4000 の品質

品質	JIS A 6206 規格値	種類			
		a	b	c	
密度 g/cm ³	2.80 以上	2.89	2.86	2.89	
比表面積 cm ² /g	3500 以上 5000 未満	4370	4290	4390	
活性度 指数 %	材齢 7 日	55 以上	73	70	79
	材齢 28 日	75 以上	95	91	104
	材齢 91 日	95 以上	105	102	118
フロー値比 %	95 以上	99	96	98	
酸化マグネシウム %	10.0 以下	5.75	6.65	6.11	
三酸化硫黄 %	4.0 以下	2.06	2.07	1.92	
強熱減 %	3.0 以下	0.32	1.24	0.63	
塩化物イオン %	0.02 以下	0.003	0.003	0.005	
塩基度	1.60 以上	1.89	1.80	1.80	

表 3.2 使用材料

種類	記号	品質		
		混和剤種類 : イ	混和剤種類 : ロ	混和剤種類 : ハ
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3280cm ² /g, SO ₃ 量 2.10%		
高炉スラグ微粉末 4000	BF	a, b, c	a	a
無水せつこう	CS	粉末度 3620cm ² /g CaO:40.3%, SO ₃ :57.1%	—	—
細骨材	S	掛川産山砂 表乾密度 2.58 g/cm ³ , 粗粒率 2.77	大井川産陸砂 表乾密度 2.58 g/cm ³ , 粗粒率 2.71	大井川産陸砂 表乾密度 2.58 g/cm ³ , 粗粒率 2.69
粗骨材	G	青梅産硬質砂岩碎石 表乾密度 2.65g/cm ³ , 実積率 58.2%	青梅産硬質砂岩碎石 表乾密度 2.65g/cm ³ , 実積率 62.0%	青梅産硬質砂岩碎石 表乾密度 2.66g/cm ³ , 実積率 62.0%

単位粗骨材かさ容積は、いずれの BF 種類においても AE 減水剤使用では $0.60\text{m}^3/\text{m}^3$ とし、高性能 AE 減水剤使用では $0.58\text{m}^3/\text{m}^3$ とした。また、単位水量は化学混和剤の種類ごとに異なる骨材を使用したため、目視によるワーカビリティが目標スランプおよび使用した混和剤区分 (Ad, SP) ごとに同等となるように設定した。

フレッシュコンクリートのスランプおよび空気量は、全て目標値を満足する結果が得られ、材料分離等は認められず良好な性状であった。

3.3 試験結果

3.3.1 プリーディング

図 3.1 に JCI 法 (試料容器: $\phi 150 \times 300\text{mm}$) および JIS 法によるプリーディング量の経時変化を示す。プリーディング量はいずれの試験方法でも同程度であることを確認した。以下、試験方法は全て JCI 法とした。

図 3.2 に水結合材比 (以下、W/B) ごとのプリーディング量試験の結果を示す。プリーディング量は、BF 使用率の増

加に伴って減少する傾向にあった。また、いずれの条件でも $0.03 \sim 0.20\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であり、JASS 5²⁾ に示される $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下を満足する結果であった。また、BF 種類による影響は小さいことから、BF 種類選定の際にプリーディングに対して特別な配慮は必要ないと考えられる。

3.3.2 凝結時間

図 3.3 に BF 使用率と凝結時間の関係を示す。凝結時間は、BF 使用率の増加に伴って遅延する傾向を示し、終結時間では BF 使用率 60~70% で 3 時間程度の遅延を示した。

特に終結時間が遅延する傾向は、BF 使用率の増加に伴う単位セメント量減少、および混和剤使用量の増加により、初期の水和反応が遅延したためと考えられる。なお、 SO_3 量による影響は見られなかった。

3.3.3 断熱温度上昇量

断熱温度上昇量試験は、BF 使用率 70%、W/B=45% の BF3 種類において試験を行った。

断熱温度上昇量は、BF 種類による差異は小さく同程度であった。図 3.4 に BF3 種類の断熱温度上昇量の実測値と

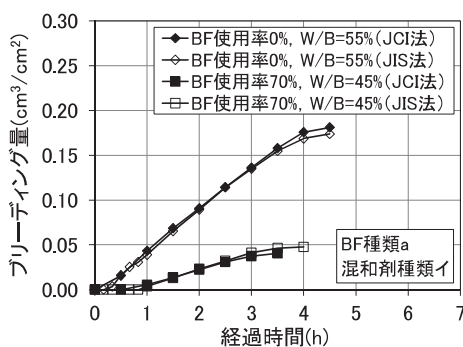


図 3.1 プリーディング量の経時変化

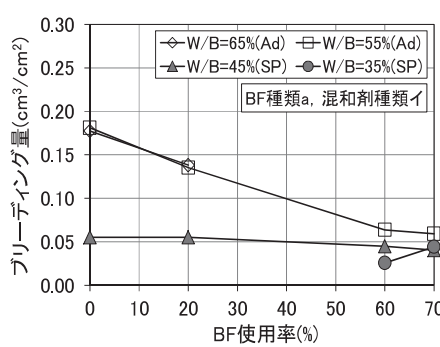


図 3.2 W/B ごとのプリーディング量

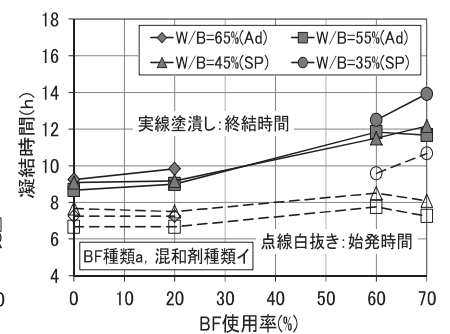


図 3.3 BF 使用率と凝結時間

表 3.4 代表的なコンクリートの調合とフレッシュコンクリートの試験結果

BF 種類	BF 使用率 (%)	W/B (%)	Gかさ容積 (m^3/m^3)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					化学混和剤			SL (cm)	SLF (mm)	Air (%)	CT ($^{\circ}\text{C}$)
					W	C	BF	S	G	種類	区分	使用量 (B×wt%)				
-	0	55	0.60	48.0	180	327	0	831	925	イ	Ad	0.80	20.0	325	4.5	22
-	0	55	0.60	45.9	170	309	0	813	986	ロ	Ad	1.00	19.5	300	4.3	20
-	0	55	0.60	44.6	180	327	0	773	990	ハ	Ad	0.50	20.0	330	4.6	18
a	20	65	0.60	49.1	180	222	55	868	925	イ	Ad	1.00	20.0	305	4.5	21
a	20	55	0.60	47.8	180	262	65	826	925	イ	Ad	0.70	19.5	315	4.7	21
a	20	55	0.60	45.7	170	247	62	808	986	ロ	Ad	0.95	20.0	340	4.7	20
a	20	55	0.60	44.4	180	262	65	768	990	ハ	Ad	0.40	19.5	355	5.2	18
a	20	45	0.58	48.4	175	311	78	818	895	イ	SP	0.85	22.5	395	4.5	21
a	45	55	0.60	48.3	175	175	143	841	925	イ	Ad	0.90	19.5	305	4.8	21
a	60	55	0.60	48.2	175	127	191	837	925	イ	Ad	0.90	20.0	325	4.4	21
a	60	45	0.58	48.8	170	151	227	829	895	イ	SP	0.85	21.5	360	4.2	21
a	60	45	0.58	46.8	160	142	213	817	953	ロ	SP	0.85	21.5	385	4.2	20
a	60	45	0.58	45.4	170	151	227	772	957	ハ	SP	0.85	23.0	410	4.7	19
a	60	35	0.58	44.9	175	200	300	710	895	イ	SP	0.85	23.0	385	4.9	21
a	70	55	0.60	48.1	175	95	223	835	925	イ	Ad	0.90	19.0	295	4.2	21
a	70	45	0.58	48.7	170	113	264	826	895	イ	SP	0.85	21.0	360	5.5	21
a	70	45	0.58	46.7	160	107	249	814	953	ロ	SP	0.80	22.0	385	4.4	19
a	70	45	0.58	45.3	170	113	264	769	957	ハ	SP	0.90	22.5	410	5.1	18
b	70	45	0.58	48.6	170	113	264	823	895	イ	SP	0.93	21.0	335	5.0	22
c	70	45	0.58	48.7	170	113	264	826	895	イ	SP	0.90	21.5	355	4.6	22
a*	70	45	0.60	43.9	190	127	296	705	925	イ	Ad	0.45	20.0	335	5.3	21

日本建築学会「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針」の予測式⁶⁾と日本コンクリート工学会「マスコンクリートのひび割れ制御指針2016」の予測式⁷⁾による各種セメントの予測値との比較を示す。

断熱温度上昇量の実測値は、BF3種類ともに低熱ポルトランドセメント(L)による予測値に最も近い傾向を示した。ただし、材齢1日~3.5日程度の期間については、予測値が実測値よりも小さくなる傾向にあり、中庸熱ポルトランドセメント(M)による予測値を用いることにより安全側の評価とできる。なお、学会式とJCI式による予測値を比較すると、JCI式が実測値に近い傾向を示した。

3.3.4 圧縮強度試験

図3.5に圧縮強度とBF使用率の関係を示す。材齢7日の圧縮強度はBF使用率の増加に伴い低くなる傾向にあったが、BF使用率70%の圧縮強度はBF使用率60%よりも大きくなる結果であった。材齢28日以降では、BF使用率0~30%まで同程度の圧縮強度であったが、BF使用率45~70%ではBF使用率の増加に伴い緩やかに低下する傾向にあった。また、BFを使用したコンクリートは、おおむね初期強

度がN(BF使用率0%)よりも小さいが、長期材齢では潜在水硬性により強度増進し、Nとの強度差が小さくなることが確認された。

図3.6に材齢28日の圧縮強度を基準とした圧縮強度比におよぼす化学混和剤種類とBF種類の影響を示す。いずれの化学混和剤でも同程度の圧縮強度比であり、BF種類の違いによる強度発現への大きな影響も認められなかった。

図3.7に材齢28日の圧縮強度を基準とした圧縮強度比におよぼすSO₃量の影響を示す。SO₃の添加によって材齢7日の初期強度は大きくなるが、長期材齢における強度増進は低下する結果であった。

3.3.5 静弾性係数

図3.8に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。図中にはNew RC式⁸⁾による推定値(k₁=1.0、k₂=0.95、1.0、1.1、 $\gamma=2.31$)を示している。本実験における静弾性係数は、いずれのBF使用率でも混和材の種類により定まる修正係数k₂は0.97~1.02であり、BFを使用しないNと同程度の静弾性係数であった。

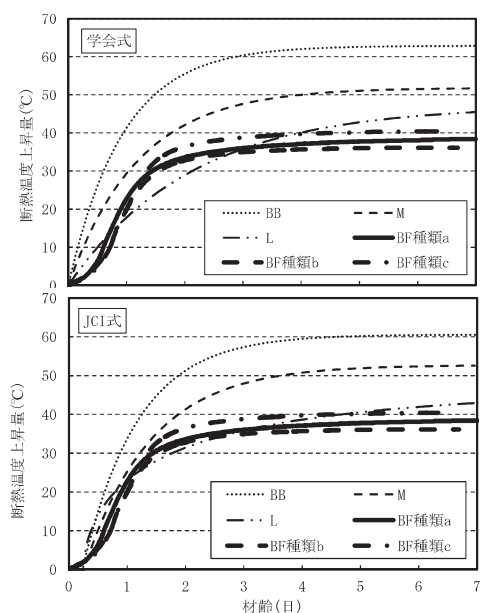


図3.4 断熱温度上昇量

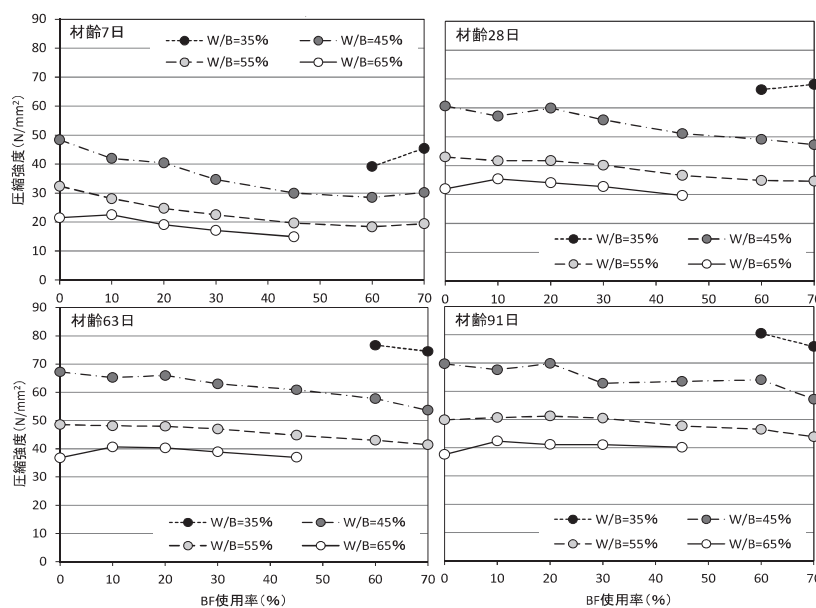


図3.5 BF使用率と圧縮強度

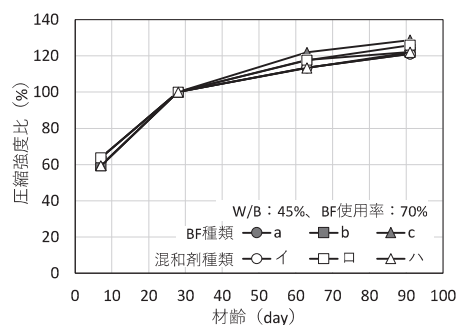


図3.6 圧縮強度比(混和材種類)

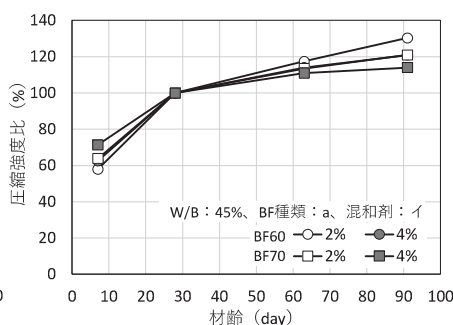


図3.7 圧縮強度比(SO₃量)

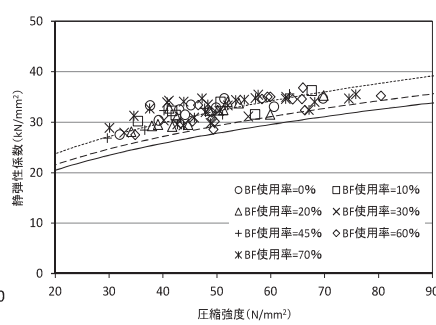


図3.8 静弾性係数

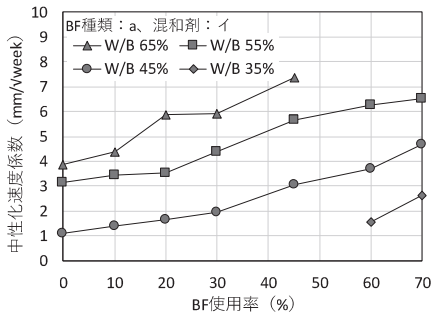


図 3.9 中性化速度係数と BF 使用率

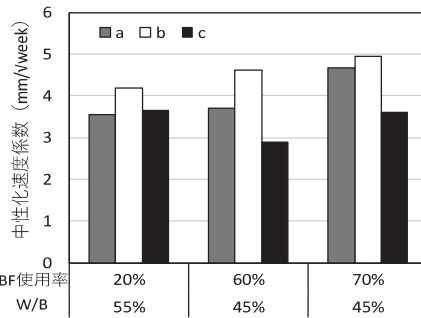


図 3.10 中性化速度係数 (BF 種類)

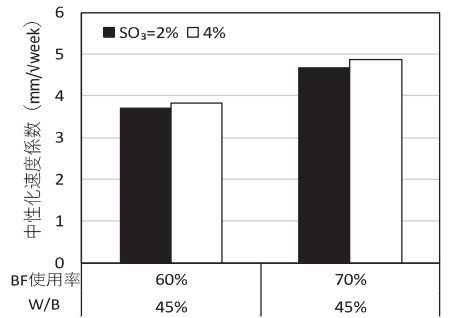


図 3.11 中性化速度係数 (SO₃ 量)

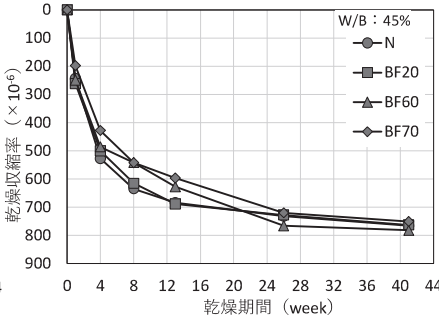
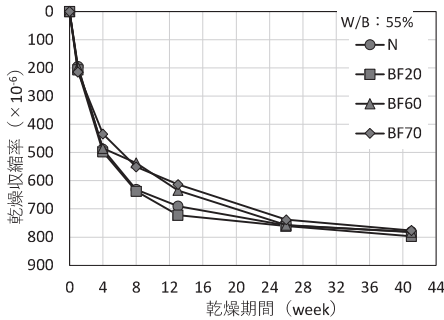


図 3.12 乾燥収縮率 (W/B55%、45%)

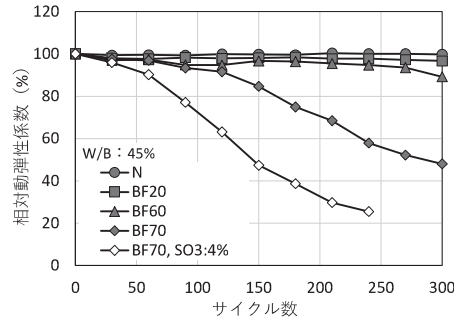


図 3.13 相対動弾性係数

3.3.6 促進中性化試験

図 3.9 に中性化速度係数と BF 使用率の関係を示す。中性化速度係数は、いずれの W/B でも BF 使用率の増加に伴い大きくなる傾向が認められることから、W/B および BF 使用率から中性化深さを評価できると考えられる。

図 3.10 に BF 種類による中性化速度係数の比較を示す。中性化速度係数は、BF 種類により若干の違いが認められ、スラグの活性度指数が大きい種類ほど、中性化速度係数は小さくなっており、スラグの活性度指数が中性化に影響をおよぼしていると考えられる。

図 3.11 に SO₃ 量 2% および 4% の中性化速度係数を示す。中性化速度係数はほぼ同等であり、SO₃ 量が中性化速度係数に与える影響は小さいと考えられる。

3.3.7 長さ変化試験

図 3.12 に乾燥収縮率を示す。長さ変化試験では、長期材齢において乾燥収縮が進行すると考えられることから、乾燥期間 41 週までで試験を実施した。乾燥期間 26 週の乾燥収縮率は、JASS 5²⁾ に示される設計値 8×10^{-4} を下回ることが確認された。BF 使用率の高い B、C 種クラスにおいて、乾燥期間 4~13 週の乾燥収縮率は $50 \sim 100 \times 10^{-6}$ 程度低減される結果となったが、乾燥期間 26 週以降に乾燥収縮は進み、BF を使用したコンクリートでも同程度の乾燥収縮率に収束することが確認された。

3.3.8 凍結融解試験

図 3.13 に W/B=45% の凍結融解試験による相対動弾性係数を示す。コンクリートの空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ で管理しており、最小で 4.2% であった。BF 使用率 20、60% では、相

対動弾性係数が大きく低下することはなかったが、BF 使用率 70% では、JASS 5 における基準である 300 サイクル時の相対動弾性係数 85% 以上を大きく下回る結果となった。このため、BF 使用率が高い場合には、より詳細な検討が必要と考えられる。なお、BF 使用率 70% で SO₃ 量 4% では 2% の場合よりも早期に相対動弾性係数が低下し、既往の研究⁹⁾ と同様の傾向を示した。

3.4 室内実験のまとめ

表 3.5 に室内実験で得られた BF 使用率と各種コンクリートの性状を示す。

表 3.5 室内実験のまとめ

項目	BF 使用率 (%)						
	10	20	30	45	50	60	70
ブリーディング	—	同等	—	—	—	—	減少
凝結時間	—	同等	—	—	—	—	遅延
凝結時間 (低温)	—	同等	—	—	—	—	著しく遅延
温度上昇量	—	—	—	—	—	—	減少
圧縮強度：7 日	BF 使用率の増加に伴い低下						
28 日	同等			BF の増加に伴い低下			
91 日	同等			BF の増加に伴い低下			
静弾性係数	同等						
乾燥収縮	—	同等	—	—	—	—	同等
中性化抵抗性	BF 使用率の増加に伴い低下						
耐凍害性	—	同等	—	—	—	—	微低 低下

注) BF 使用率 0% と比較した場合のコンクリートの性状を示す。

4. 実機実験

4.1 実機実験の概要

実機実験は、表 4.1 に示す組合せで実施した。実施工場は、東京都内の臨海部に位置する 3 工場 (X、Y、Z) とし、打込み時期は、標準期(S)、夏期(H)および冬期(W)の 3 シーズンとした。BF 使用率は、A 種クラスとして 15%および 30%、B 種クラスとして 60%、C 種クラスとして 70%の計 4 水準とした。

4.2 コンクリートの使用材料および調合

4.2.1 コンクリートの使用材料

表 4.2 にコンクリートの使用材料を示す。コンクリートに使用したセメント、練混ぜ水、骨材は各工場で通常使用しているものを、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。表 4.3 に BF の品質を示す。BF は a、b、c の 3 種類とし、いずれもせっこう添加タイプを使用した。化学混和剤は、呼び強度 21 では AE 減水剤 (高機能タイプ) を、

呼び強度 33 および 42 では、BF 使用率 15、30%の場合には高性能 AE 減水剤を、BF 使用率 60、70%の場合には高性能 AE 減水剤 (高炉スラグ微粉末高含有用) を使用した。

4.2.2 コンクリートの調合

事前の試し練りの結果、BF15、BF30 および BF60 の W/B は、呼び強度 21、33、42 に対応する各工場の強度算定式 (普通ポルトランドまたは高炉セメント B 種) により設定した。BF70 の W/B は、高炉セメント B 種の強度算定式を基準として、呼び強度より X 工場と Z 工場で 3N/mm²、Y 工場で 6N/mm² 安全側となる強度式により設定した。表 4.4 に決定した調合の一例を示す。

4.3 試験項目

4.3.1 フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリート試験は、スランプ(JIS A 1101)、空気量(JIS A 1128)、コンクリート温度(JIS A 1156)、とし、練上がり直後、経時 30 分、60 分、90 分および 120 分で実施した。

表 4.1 実機実験の組合せと試験項目

項目		工場 : X	工場 : Y	工場 : Z
BF 種類		c	b	a
混和剤種類		イ	ロ	ハ
季節区分	標準期 : S	BF15、BF30 BF60、BF70	BF15	BF15
	夏期 : H	BF15	BF30、60	BF70
	冬期 : W	BF15	BF70	BF30、BF60
呼び強度		21、33、42		
試験項目		スランプ (JIS A 1101) 空気量 (JIS A 1128) 単位水量 (ZKT-210) 圧縮強度 (JIS A 1108)、 促進中性化 (JIS A 1153)		

表 4.3 BF の品質

品 質	JIS A 6206 規格値	種 類			
		a	b	c	
密度 g/cm ³	2.80 以上	2.89	2.86	2.89	
比表面積 cm ² /g	3500 以上 5000 未満	4280~ 4460	4260~ 4330	4310~ 4400	
活性度 指数 %	材齢 7 日	55 以上	67~70	74~75	69~77
	材齢 28 日	75 以上	95~98	95~97	95~101
	材齢 91 日	95 以上	108~115	100~106	100~113
フロー値比 %	95 以上	99~102	95~98	97~101	
酸化マグネシウム %	10.0 以下	5.95~6.24	5.30~5.98	5.89~6.21	
三酸化硫黄 %	4.0 以下	2.01~2.07	2.01~2.07	2.01~2.07	
強熱減量 %	3.0 以下	0.20~0.35	1.10~1.21	0.89~1.11	
塩化物イオン %	0.02 以下	0.004	0.002~ 0.003	0.005~ 0.007	
塩基度	1.60 以上	1.87~1.89	1.77~1.78	1.82~1.86	

表 4.2 使用材料

名称	記号	種類・品質			
		X 工場	Y 工場	Z 工場	
セメント	N	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³			
細骨材	S	S1	市原産山砂 表乾密度 2.60g/cm ³	富津産山砂 表乾密度 2.58g/cm ³	市原産山砂 表乾密度 2.59g/cm ³
		S2	佐野産砕砂 表乾密度 2.66 g/cm ³	八戸産砕砂 表乾密度 2.69 g/cm ³	戸高産砕砂 表乾密度 2.67g/cm ³
粗骨材	G	G1	佐野産砕石 表乾密度 2.70g/cm ³ 実積率 60.0%	美祿産砕石 表乾密度 2.69g/cm ³ 実積率 61.0%	峯朗産砕石 表乾密度 2.70g/cm ³ 実積率 60.0%
		G2		八戸産砕石 表乾密度 2.69g/cm ³ 実積率 61.0%	
混和材	BF	c	b	a	
練混ぜ水	W	工業用水	工業用水	上澄水	
化学 混和剤	AE 減水剤	化学混和剤メーカ イ	化学混和剤メーカ ロ	化学混和剤メーカ ハ	
	高性能 AE 減水剤				

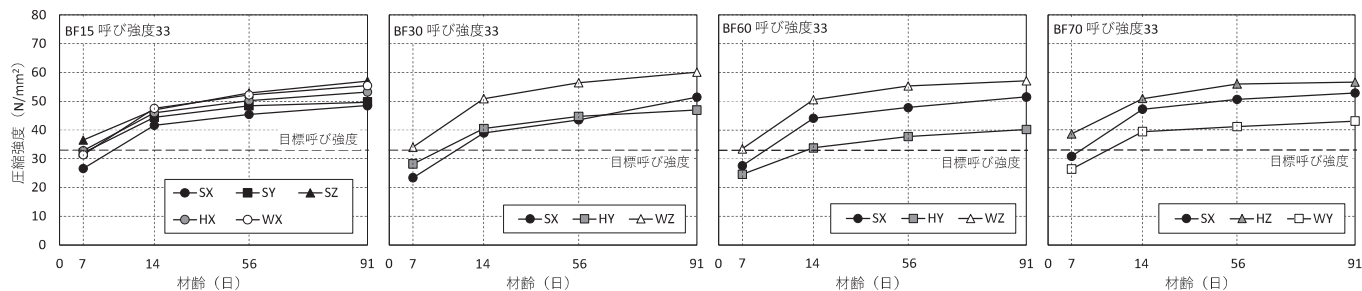


図 4.4 圧縮強度 (標準養生、呼び強度 33)

た。なお、スランプ低下の大きかった夏期の経時 120 分では、混和剤の後添加により管理値を満足することを確認している。空気量は経時 60 分で目標値を満足した。

4.4.2 圧縮強度試験

図 4.4 に呼び強度 33 の圧縮強度を示す。標準養生では、同一の呼び強度、BF 使用率であっても工場や季節区分による違いも見られ、材齢 28 日であっても呼び強度の強度値に近い値を示す場合もあった。

図 4.5 に中央部と端部のコア供試体強度を示す。中央部と端部に強度差は認められず、同程度の強度であった。

図 4.6 にコア供試体強度と簡易断熱養生強度の関係を示す。試験結果は $y = x \pm 5$ の範囲であり、本研究で検討した範囲では、簡易断熱養生供試体を用いて構造体コンクリートの強度を推定できると考えられる。

4.4.3 促進中性化試験

図 4.7 に中性化深さと促進期間(脱型 3 日)を示す。中性化深さと促進期間の平方根には直線的な関係が認められ、BF 使用率、脱型時期、W/B (呼び強度)に関わらず \sqrt{t} 則が成り立つことが確認された。

図 4.8 に脱型時期と中性化速度係数の関係を示す。W/B、

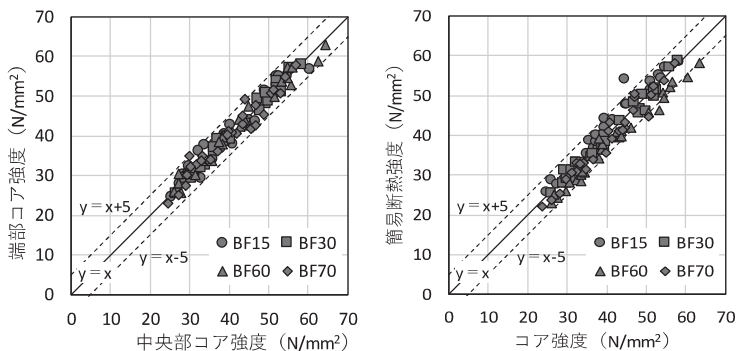


図 4.5 中央部と端部のコア強度 図 4.6 簡易断熱養生強度とコア強度

BF 使用率に関わらず、脱型時期が遅くなると中性化速度係数が小さくなる傾向であった。また、脱型時期を 3 日以降とすれば、中性化速度係数への影響が小さいことが確認された。

4.5 BF を使用したコンクリートの強度設計

4.5.1 BF を使用したコンクリートの強度算定式

図 4.9 に各工場の強度算定式と実験による標準養生材齢 28 日の圧縮強度試験結果 (以下、標準 28 日強度) の

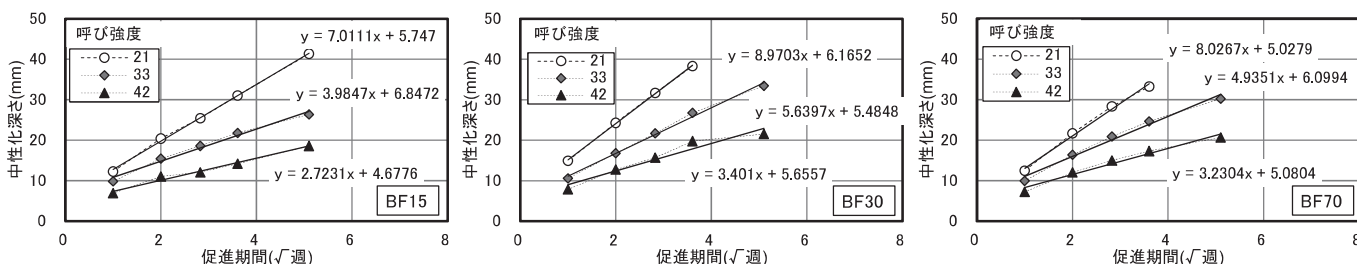


図 4.7 中性化深さ (脱型 3 日)

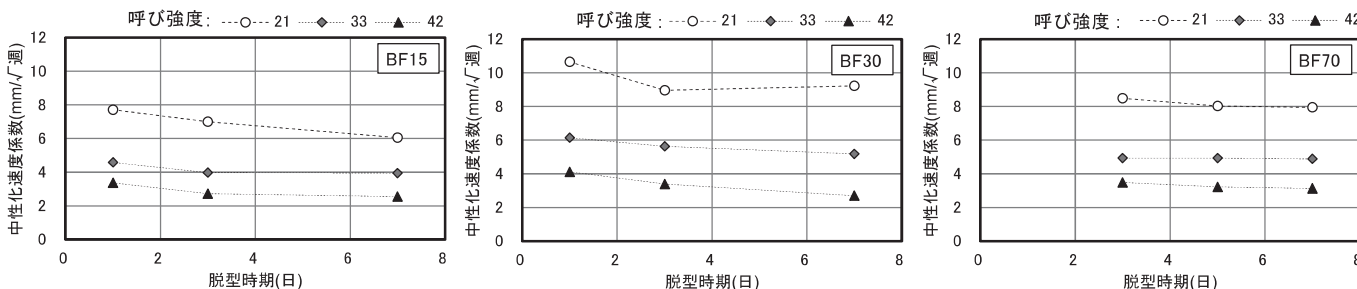


図 4.8 脱型時期と中性化速度係数

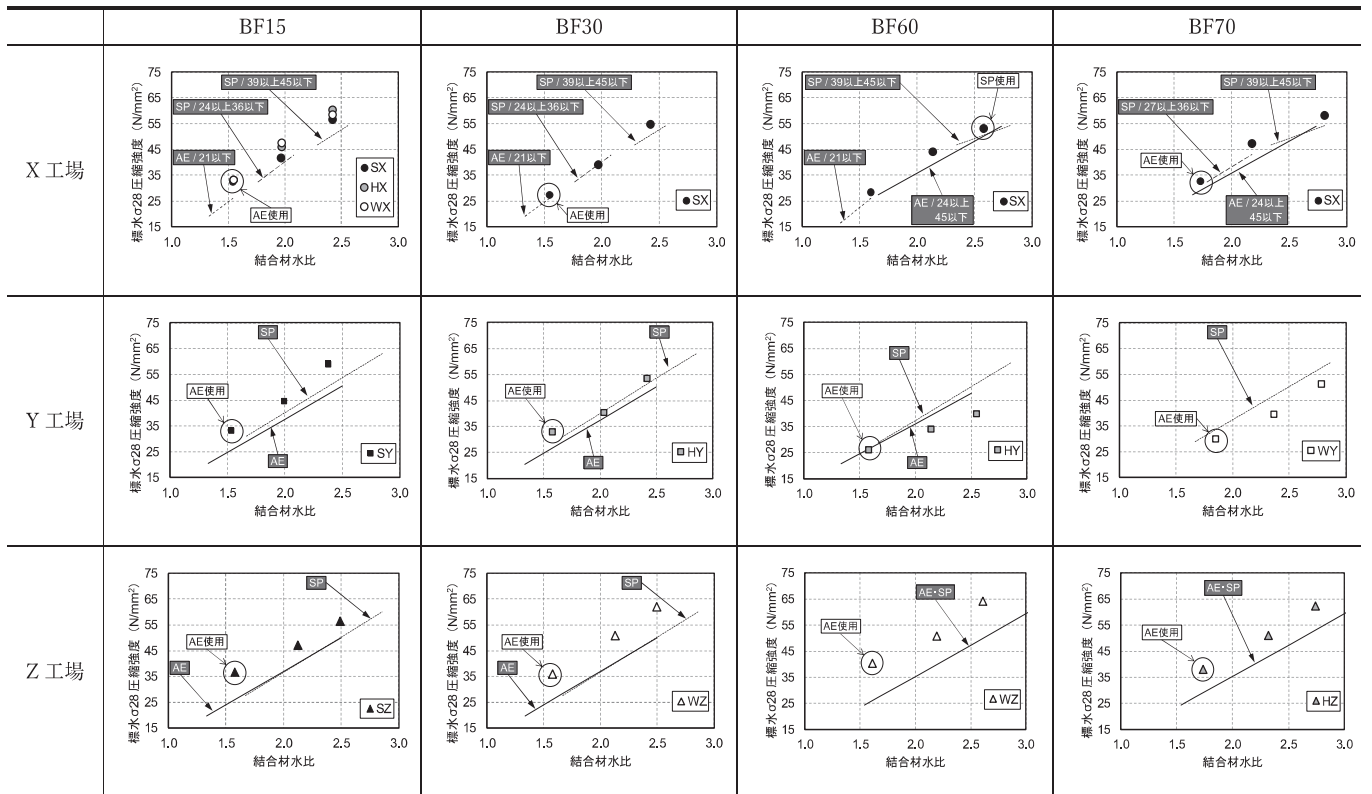


図 4.9 各工場の強度算定式と実機実験による圧縮強度試験結果の比較

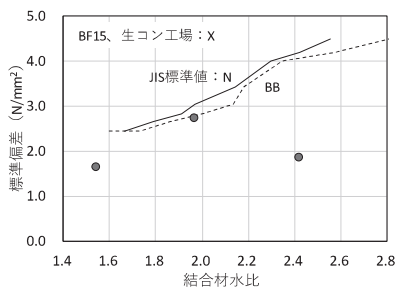


図 4.10 圧縮強度の標準偏差 (X 工場)

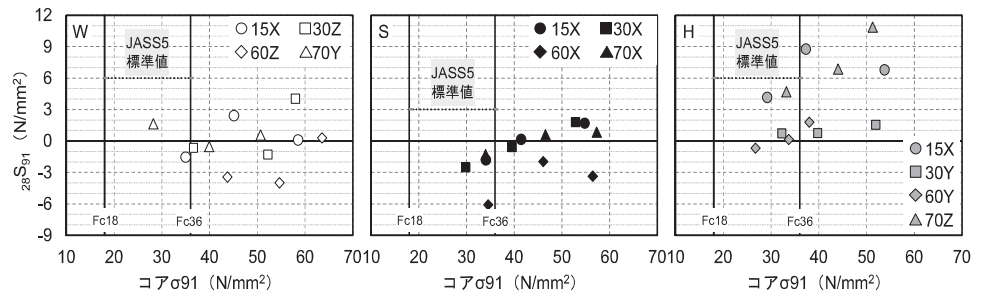


図 4.11 材齢 91 日コア強度と構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$

比較を示す。実機実験にあたって採用した強度算定式は前述のとおり、工場が運用する普通ポルトランドセメント(以下、N)と高炉セメントB種(以下、BB)の強度算定式をベースに、事前に実施した試し練りの結果を考慮して決定している。

BF15、BF30の標準28日強度は、いずれの工場においても採用した強度算定式と同等か上回る結果となっている。BF60、BF70は、X工場、Z工場においてBF15、BF30の結果と同様に、強度算定式と同等か上回る結果となっているが、Y工場では強度算定式を下回る結果となった。ここで、結合材水比と強度の関係をみると、いずれのBF使用率、工場においても採用した強度算定式と同等の傾きであることが確認できる。

今回の結果においてY工場のBF60、BF70だけ強度算定式を下回った原因は特定されなかったが、実物件への適用時

にあたっては、実際に採用するBF使用率を考慮して、今回のような手順で実機実験を実施したうえで、工場の強度算定式に対して安全を考慮した適切な強度補正を行うことにより強度設計ができるものと考えられる。

4.5.2 圧縮強度の標準偏差

図 4.10 に X 工場の BF15 の実機実験における 3 シーズンの標準 28 日強度から得られた圧縮強度の標準偏差を示す。本実験における圧縮強度の標準偏差は、いずれの W/B においても X 工場の実績に基づく標準偏差を下回っており、A 種クラスにおいては BF を使用することによる影響は小さいものと考えられる。B 種クラスや C 種クラスについては、本実験の範囲では十分な検討はできないものの、工場における強度設計では、N と BB で同程度の標準偏差を用いることを参考にして標準偏差の標準値を適用することが妥当と考えられる。

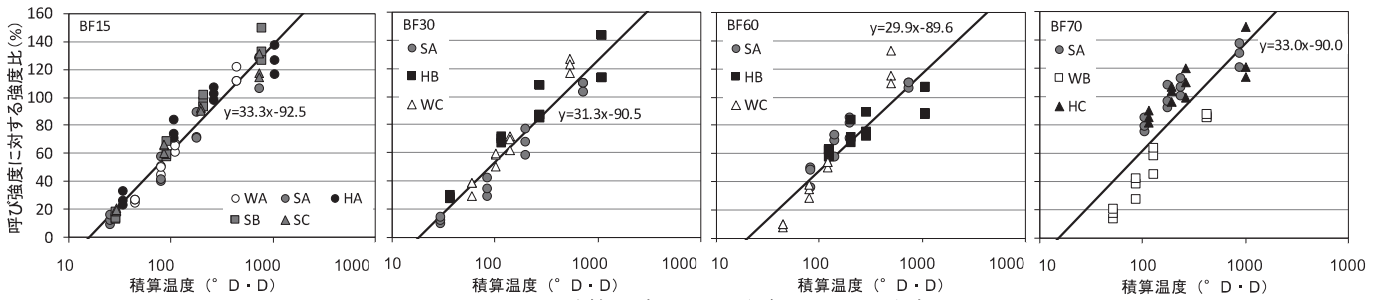


図 4.12 積算温度と呼び強度に対する強度比

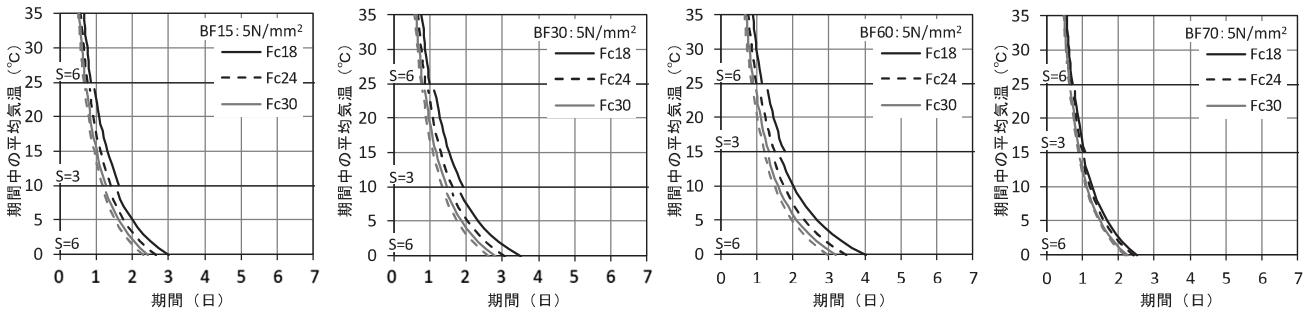


図 4.13 柱・壁などのせき板存置期間 (5N/mm²) と期間中の平均気温

4.5.3 構造体強度補正值 (28S₉₁)

構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ の標準値については、建設省告示 1102 号および JASS 5 で 3 または 6N/mm² と規定されているが、高炉セメント A 種および C 種については規定がない。一方、高炉指針では A 種相当～C 種相当の結合材種類に応じて $_{28}S_{91}$ の標準値が示されており、本検討範囲においても同様に整理できるものと考えられる。

図 4.11 に実機実験結果から得られた材齢 91 日のコア強度と $_{28}S_{91}$ の関係を示す。一般的に知られるように、コア強度が高くなるほど $_{28}S_{91}$ が大きくなる傾向が確認された。季節の影響としては、標準期が小さく、冬期、夏期の順に大きくなる傾向であったが、普通コンクリートの強度範囲となる設計基準強度 18～36N/mm² においては、3 または 6 N/mm² 程度であった。

4.6 型枠存置および湿潤養生期間

4.6.1 積算温度による強度発現性

ここでは、現場封かん養生供試体の強度発現性と、期間中の外気温による積算温度との関係から、所定の強度が発現する日数の目安について試算を行った。

図 4.12 に積算温度と呼び強度に対する現場封かん養生の強度比との関係を示す。積算温度と強度比は、いずれの BF 使用率においても直線的な関係を示し、図中に併記した近似式は BF 使用率によらず類似したものであった。

この関係式を用いて、期間中の平均気温との関係を設計基準強度ごとに図示すると、例えば柱・壁などのせき板存置期間である所定強度 5N/mm² では図 4.13 となる。本検討

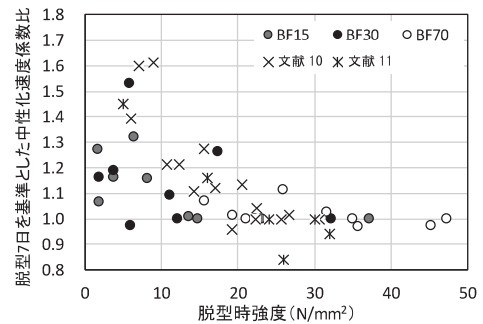


図 4.14 脱型時強度と脱型 7 日を基準とした中性化速度係数比

では、BF 使用率に関わらず、いずれも同様な日数で所定強度となる試算となった。本研究における室内実験の結果で示したように、材齢初期の圧縮強度は BF 使用率の増加に伴い小さくなる。しかし、本検討のように、コンクリートの呼び強度を合わせることで、BF 使用率が大きい場合には W/B も小さくなり、型枠存置期間や湿潤養生の打切りといった所定強度の発現時期については、BF 使用率の違いは大きく影響しない程度となる。

4.6.2 湿潤養生期間の妥当性

JASS 5 では湿潤養生の必要性について、初期の湿潤養生期間が短いほど、水和速度の遅いセメントほど中性化の進行が早くなるとして、セメント種類について期間となる日数や所定強度が示されている。しかし、JASS 5 では日数について高炉セメント B 種の規定があるのみである。そこで本実験の促進中性化試験結果から、湿潤養生の打切り(脱型)時期と中性化の関係から検討を行った。

図 4.14 に脱型時強度と材齢 7 日を基準とした中性化速度係数比の関係を示す。材齢 7 日を基準とした中性化速度

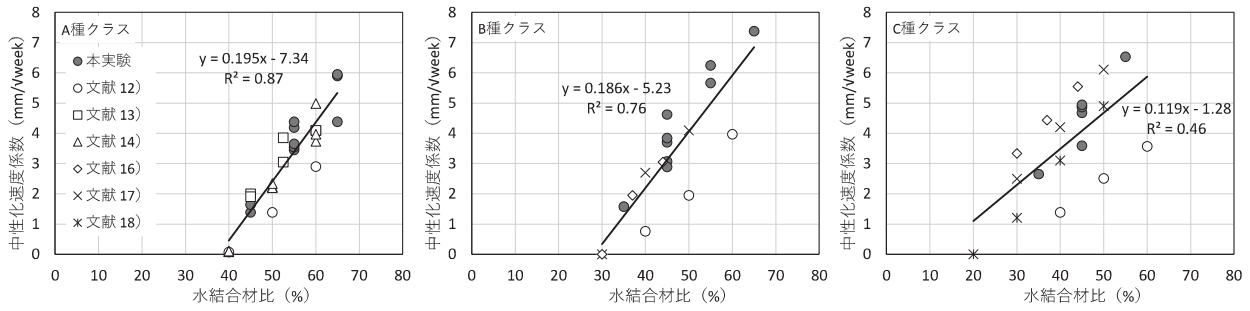


図 4.15 W/B と中性化速度係数

表 4.5 計画供用期間の級と耐久設計基準強度 (N/mm²)

計画供用期間の級	A 種クラス	B 種クラス	C 種クラス
短期	18	18	24
標準	24	24	27
長期	30	30	33
超長期	JASS 5 と同様に適用範囲外とした		

表 4.6 二酸化炭素排出量の削減効果の試算

種類	N	A 種クラス	B 種クラス	C 種クラス		
BF 使用率(%)	0	10	30	60	70	
水結合材比(%)	50.8	50.8	50.8	46.8	45.7	
単位量 (kg/m ³)	N	335	302	235	155	111
	BF	0	34	100	232	260
CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /m ³)	258.6	234.4	185.0	127.9	94.9	
CO ₂ 削減率(%)	0	9	28	51	63	

係数比は脱型時強度が 10N/mm² 以上では、おおむね 1.1 以下の値であった。また、図中には JASS 5 および高炉指針において、湿潤養生期間の設定の根拠としているデータ^{10), 11)}を併記した。本実験と既往の実験結果では同様な関係を示しており、材齢 7 日で脱型した場合と比較し、それ以前に脱型した場合でも脱型時強度が 10N/mm² 以上であれば中性化速度係数の増加は 10% 程度にとどまる。以上から、コンクリートの耐久性能を耐久設計基準強度 (次項 4.7.2) により確保するものとした場合、湿潤養生の打切りは圧縮強度が 10N/mm² 以上であれば構造体コンクリートとしての耐久性能を満足するものと考えられる。

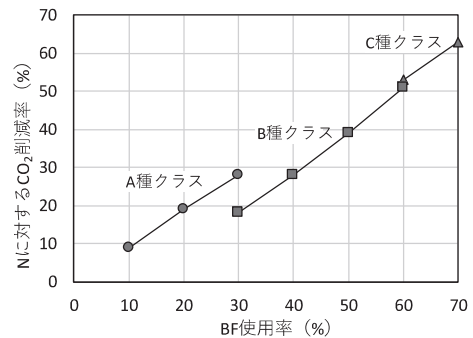


図 4.16 BF 使用率と CO₂ 削減率の試算結果

4.7 BF を使用したコンクリートの耐久設計

4.7.1 中性化速度係数と W/B の関係

高炉指針では、短期、標準および長期において、高炉セメント A 種・A 種相当から C 種・C 種相当の範囲で耐久設計基準強度が規定されているが、本検討と BF 使用率の範囲が異なる。そこで、本検討では、BF 使用率を 10~70% と変化させ、BF3 銘柄、化学混和剤 3 銘柄、SO₃ 量や単位水量を水準とした室内実験による促進中性化試験のデータに加え、BF 使用率 10~75% の範囲を対象とした既往の研究結果^{12)~17)}も用いて耐久設計基準強度を検討することとした。

図 4.15 に本検討および既往の研究における中性化速度係数と W/B の関係を示す。文献 13 の中性化速度係数が小さい傾向にあるが、中性化速度係数と W/B の関係は直線的であり、本検討の結果は既往の研究と同様の傾向にあると考えられる。

4.7.2 耐久設計基準強度の検討

構造体コンクリートの耐久性については、実暴露による

中性化速度係数から求めるのが望ましいが、BF を使用したコンクリートの実暴露によるデータは少なく、本検討でも十分なデータ取得に至っていない。このため、図 4.15 に示す中性化速度係数と W/B の関係式により評価することとした。なお、CO₂ 濃度は屋外 0.05%、屋内 0.10% とし、鉄筋腐食確率は、設計耐用年数期間内は中性化によって設計限界状態に達しないようにするため 20% とした。表 4.5 に本検討で設定した耐久設計基準強度を示す。ここに示した値は、A 種クラス、および B 種クラスでは、JASS 5 に示される耐久設計基準強度と同じ値となり、C 種では 3 または 6N/mm² 補正した値となった。

4.8 二酸化炭素削減効果

表 4.6 に実機実験に基づく調査設計で試算した呼び強度 33 の各クラスにおける二酸化炭素排出量の削減効果を、図 4.16 に BF 使用率と N のコンクリート調合に対する二酸化

炭素の削減率の試算結果を示す。A種クラスのW/BはNの呼び強度33の水セメント比と、B種クラスはBBの呼び強度33と、C種クラスはBBの呼び強度36の水セメント比と同一としている。二酸化炭素排出量の削減率は、Nのコンクリート調合に対して、A種クラスで約9～28%、B種クラスで18～51%、C種クラスで53～63%となる。なお、二酸化炭素排出量の削減率は強度レベルによらず、同程度の値となる。

5. おわりに

本研究では、建築物へ広範囲に適用できる環境配慮型コンクリートの開発を目的として、BFを幅広い使用率で用いたコンクリートについて室内実験と実機実験を実施した。室内実験ではBF種類や使用率がコンクリートの諸性状におよぼす影響について、実機実験では施工性や模擬部材による強度発現性状、調合設計手法について検討した。その結果、本研究における環境配慮型コンクリートは、使用率に応じた性能を有し、適切な調合設計により上部構造物を含めた各部位への適用も可能であることを確認した。

建築材料分野における二酸化炭素排出量の削減は、パリ協定の目標やSDGsの達成につながるものであり、本研究成果がBFを使用した環境配慮型コンクリート適用への一助となれば幸いである。

なお、これらの成果をもとに、調合設計・施工マニュアルをとりまとめ、性能評価機関において建設材料技術性能証明(GBRC材料証明第20-04号)を取得している。

謝辞

本研究の実施にあたり、フローリック、BASF ジャパン、日本シーカ、東京コンクリート砂町工場、関東宇部コンクリート工業豊洲工場、晴海小野田レミコン、鉄鋼スラグ協会のご協力をいただきました。関係各位に謝意を表し、ここに記します。

参考文献

- 1) 経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課：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、2016.3
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事、2018.7

- 3) 金子樹ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状その1～その8、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、pp.535～pp.550、2019.9
- 4) 高橋祐一ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状その9～その18、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、pp.467～pp.486、2020.9
- 5) 日本建築学会：高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針(案)・同解説、p.33、2017
- 6) 日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針、p.51、2008
- 7) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針、p43、2016
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、2018
- 9) 和地正浩ほか：高炉スラグ微粉末高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性に関する研究、竹中技術研究報告、No.67、2011
- 10) 和泉意登志ほか：せき板の存置期間および初期養生が構造体コンクリートの品質に及ぼす影響に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、No.449、pp35-45、1993.7
- 11) 松下哲郎ほか：脱型時期が高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの圧縮強度、ヤング係数、中性化抵抗性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集 36-1、2014
- 12) 辻大二郎ほか：混合セメントを用いたコンクリートの耐久性(その7)、日本建築学会大会学術講演梗概集、2016.8、pp.49-50
- 13) 小林利充ほか：高炉セメントA種相当品を使用したコンクリートの基礎的性状に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、2017.8、pp.61-62
- 14) 溝渕麻子ほか：混和材を高含有したコンクリートの基礎的性状(その1～その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、2011.8、pp.185-188
- 15) 辻大二郎ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性(その1～その3)SO₃量と水セメント比が自己収縮、乾燥収縮、中性化に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、2011.8、pp.205-210
- 16) 金子樹ほか：セメント混合における高炉セメントA種相当のコンクリートの諸性状(その1～その3)日本建築学会大会学術講演梗概集、2017.8、pp.63-68
- 17) 大岡督尚ほか：高炉スラグ微粉末を高含有した環境配慮型コンクリートの基礎物性(その1～その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、2016.8、pp.79-84