

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2 硬化後のコンクリート

Effects of granulated blast-furnace slag as the mineral admixtures to concrete properties Part2.
Hardened concrete

藺井孫文*1

概 要

コンクリートに多用しているポルトランドセメントの製造には二酸化炭素(766.6kg-CO₂/t)発生量が多い。現状において製造される高炉セメントはB種が殆どであり、A種およびC種の市場への一般の流通はない。このような背景の中、高炉スラグ微粉末を幅広い使用率(0~70%)で混和材料として用いたコンクリートについて、その各種性状を把握し、建築物への汎用的な適用について検討を行った。その2では、主に硬化コンクリートの圧縮強度および静弾性係数などについて報告する。

key words : 環境配慮型コンクリート、高炉スラグ微粉末、圧縮強度、凍結融解

1. はじめに

その2では、硬化コンクリートの圧縮強度および静弾性係数などについて報告する。なお、供試体の要因と水準、組合せ、試験項目、略称は、その1に従う。

2. 圧縮強度試験

2.1 試験方法

JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) に準拠し、全ての要因について検討した。また、供試体の寸法はφ100×200mmとし、標準養生を行い、材齢7、28、63、91日において試験を実施した。

2.2 試験結果

(1) 圧縮強度とBF使用率

図-1に圧縮強度とBF使用率の関係を示す。圧縮強度は、いずれのBF使用率においても材齢の経過に伴い増加した。材齢7日においては、BF使用率の増加に伴い圧縮強度は連続的に低下したが、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となった。材齢28日以降においては、BF使用率0~30%まで同程度の圧縮強度を有しているが、BF使用率45~70%ではBF用率の増加に伴い緩やかに低下した。また、どの水結合材比においても、BFを使用したコンクリートは概ね初期強度がNよりも小さいが、潜在水硬性の影響により材齢が長くなるほど強度増進され、Nとの強度差が概ね小使さくなることを確認した。W/B=65%では、いずれの材齢においてもBF使用率の増加による圧縮強度の低下は小さく、長期材齢になるほど圧縮強度がNよりも大きくな

るBF使用率の範囲が広がる結果となった。

図-2に材齢28日のNの圧縮強度を基準とした圧縮強

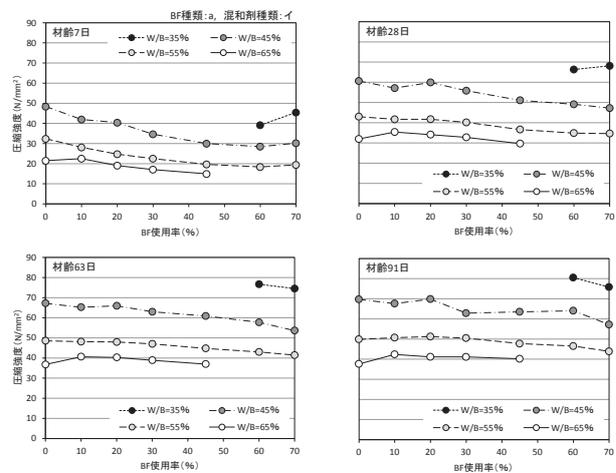


図-1 圧縮強度とBF使用率の関係

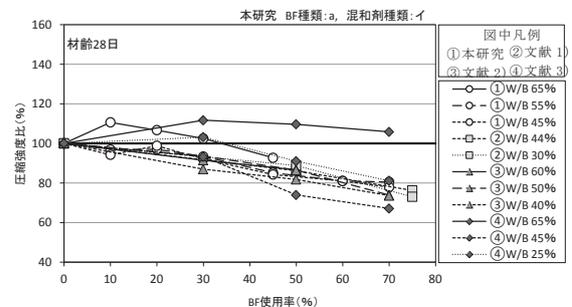


図-2 圧縮強度比とBF使用率の関係

*1 Magofumi SONOI

技術本部技術研究所 主任研究員

度比と BF 使用率の関係における、本研究と既往文献¹⁾~³⁾との比較を示す。なお、既往文献の数値はグラフから読み取っている。W/B=60%以上においては、BF 使用率の増加による圧縮強度比の増減にばらつきがみられるが、W/B=55%以下においては、本研究も既往文献も BF 使用率が増加すると圧縮強度比が低下する傾向が類似していることを確認した。

図-3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の影響を、図-4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 BF 種類の影響を示す。化学混和剤の種類の違いによる強度発現への大きな影響は認められず、いずれの化学混和剤においても同程度の圧縮強度比であった。また、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ず、いずれの BF 種類においても同程度の圧縮強度比であった。

図-5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、長期材齢になるほど強度増進が低下することを確認した。これらのことから長期材齢になるに伴い、BF を使用したコンクリートと N の圧縮強度差は概ね小さくなる傾向であった。

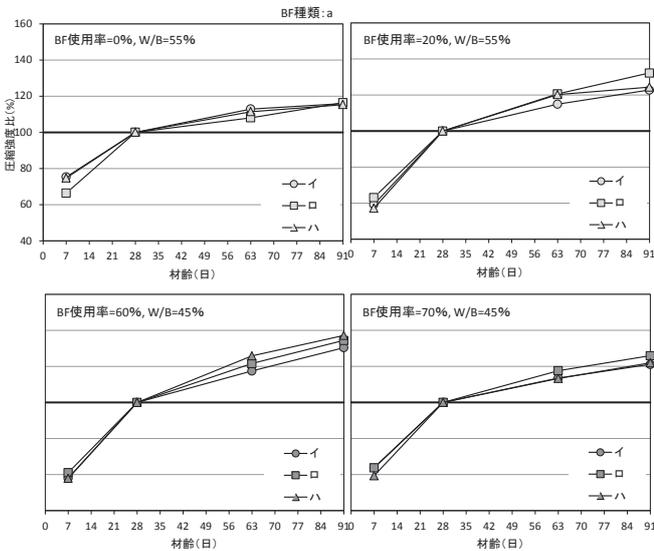


図-3 圧縮強度比におよぼす化学混和剤種類の影響

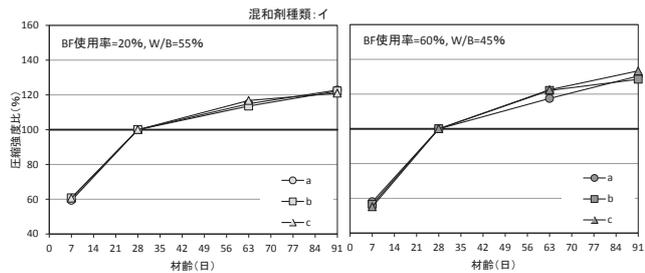


図-4 圧縮強度比におよぼす BF 種類の影響

3. 静弾性係数

図-6に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。なお、図中には New RC 式⁴⁾による推定値 ($k_1=1.0$ 、 $k_2=0.95$ 、 1.0 、 1.1 、 $\gamma=2.31$) ([1]) を示している。

New RC 式では、高炉スラグ微粉末を用いる場合、混和剤の種類により定まる修正係数 $k_2=0.95$ を用いる。

静弾性係数は、圧縮強度が増加するに伴い New RC 式による推定値に沿って増加する傾向であった。

表-1 に本試験結果の圧縮強度と静弾性係数を推定式 [1] に代入し算出した k_2 、算出した N の k_2 を基準とした各 BF 使用率における k_2 を示す。BF 使用率にかかわらず、混和剤の種類により定まる修正係数 k_2 は 0.97~1.02 であった。

これより、いずれも N と同程度の静弾性係数を有しており、BF 使用による静弾性係数への大きな影響は見られなかったと考える。

$$E = 33.5 \times k_1 \times k_2 \times \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{\sigma_B}{60}\right)^{\frac{1}{3}} \quad [1]$$

ここに、E：静弾性係数 (kN/mm²)

k_1 ：粗骨材の種類により定まる修正係数

k_2 ：混和材の種類により定まる修正係数

γ ：コンクリートの単位容積質量 (t/m³)

σ_B ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

これらのことから BF を使用したコンクリートは、BF を使用しない一般のコンクリートと同様な静弾性係数を有している結果であった。

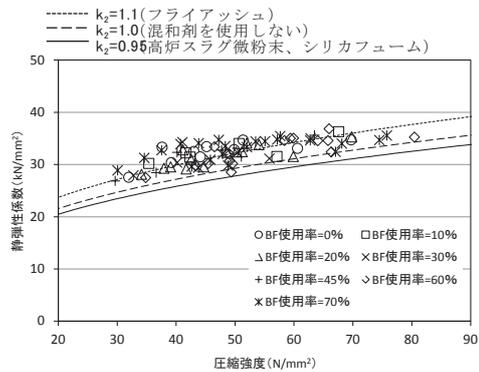


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

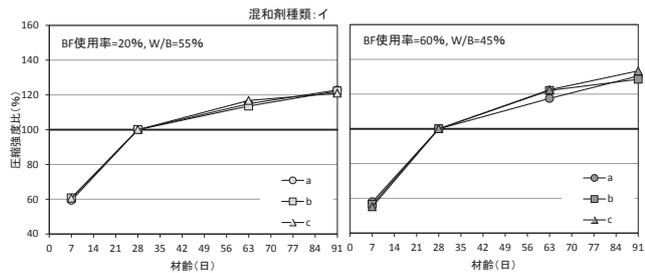


図-4 圧縮強度比におよぼす BF 種類の影響

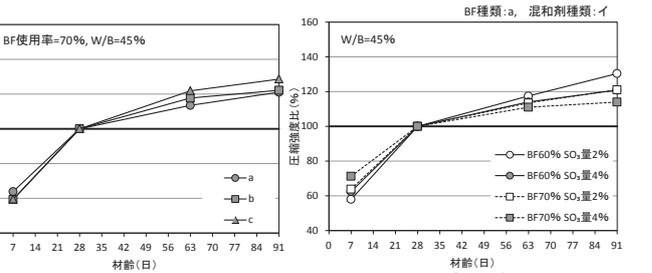


図-5 圧縮強度比におよぼす SO₃ 量の影響

表-1 静弾性係数の推定式における k_2 の値

BF 使用率 (%)	k_2	
	計算値	N を基準
0	1.11	1.00
10	1.11	1.00
20	1.09	0.98
30	1.11	1.00
45	1.12	1.01
60	1.08	0.97
70	1.14	1.02

4. 促進中性化試験

4.1 試験方法

促進中性化試験は、JIS A 1153(コンクリートの促進中性化試験方法)に基づいて行った。中性化深さの測定は、促進試験開始前と促進期間が1、4、8、13、26週になった時に実施した。促進試験開始前に測定した中性化深さを初期値として、各測定材齢の中性化深さは、実際の測定値より初期値(0.0mm~2.3mm)を減じた修正値を採用した。中性化速度係数(mm/√週)は、全測定材齢の中性化深さ(mm)と促進期間の平方根(√週)の関係より、原点を通る1次直線で回帰した時の傾きとして算出した。

4.2 試験結果と考察

図-7 に中性化深さと促進期間の関係の一例として、BF 使用率0%、45%、70%の結果を示す。全体的な傾向として、中性化深さと促進期間には直線的な関係が認められ、BF 使用率が異なっても \sqrt{t} 則が成り立つことが確認された。

図-8 に中性化速度係数と BF 使用率の関係を示す。水結合材比ごとに見てみると、いずれの水結合材比でも BF 使用率の増加に伴い、中性化速度係数は大きくなる傾向が認められる。従って、水結合材比および BF 使用率から中性化深さを評価できると考えられる。

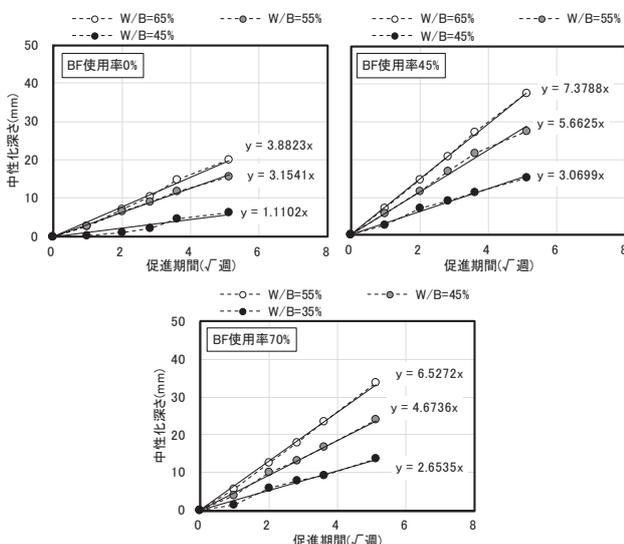


図-7 中性化深さと促進期間の関係

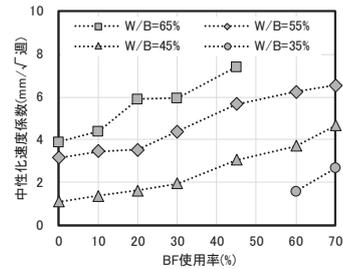


図-8 中性化速度係数と BF 使用率の関係

図-9 に中性化速度係数と材齢28日標準養生圧縮強度の逆数の関係を示す。全体的な傾向として、圧縮強度の逆数が大きくなるに伴い、中性化速度係数は大きくなる傾向が認められる。しかし、異なる BF 使用率を比較すると、同一強度であっても中性化速度係数は A 種、B 種、C 種クラスによって若干異なる傾向を示していることから、中性化深さは、強度のみでなく BF 使用率も考慮して評価する必要があると考えられる。

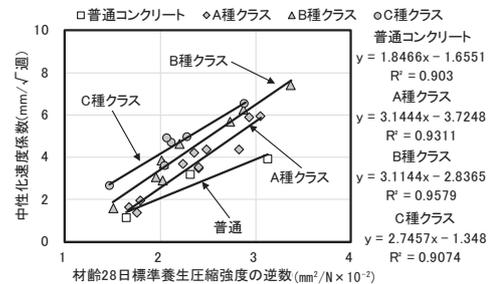


図-9 中性化速度係数と材齢28日標準養生圧縮強度の逆数の関係

図-10 に中性化速度係数と材齢28日圧縮強度の逆数の関係に関する既往の研究^{5)~9)}との比較を示す。なお、文献データは、文献中のグラフより読み取った値である。全体的な傾向として、本研究結果の中性化速度係数と圧縮強度の逆数の関係は、他の研究と同様な傾向を示していることから、本研究の中性化速度係数は、一般的な値であると判断できる。

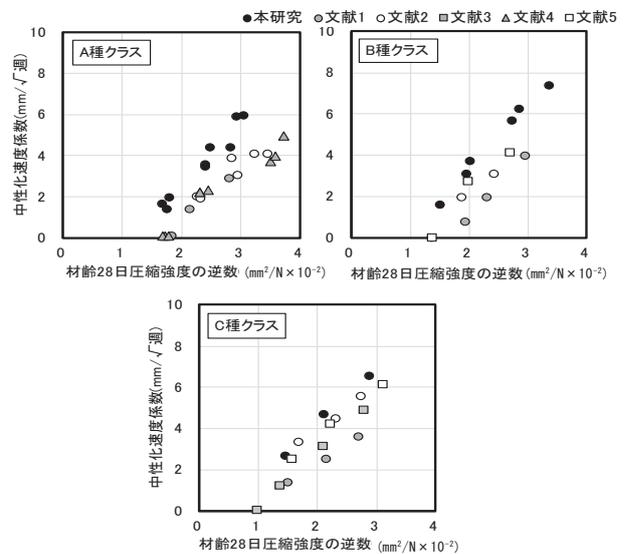


図-10 既往の研究との比較 (中性化速度係数と材齢28日圧縮強度の逆数の関係)

図-11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る。スラグの活性度指数(その1参照)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及ぼしていることが伺える。

図-12にSO₃量2%および4%の中性化速度係数の比較を示す。両者の差は、僅かであることから、SO₃量が中性化速度係数に与える影響は小さい。

図-13にBF使用率0%のCa(OH)₂量に対する各BF使用率のCa(OH)₂量の比率として算出した中性化比率CHと水結合材比の積と中性化速度係数の関係を示す。なお、中性化比率CHは[2]により算出した。

$$\text{中性化比率}CH = \sqrt{100/(100 - \text{BF使用率})} \quad [2]$$

全体的な傾向として、中性化比率と水結合材比の積が大きくなるに伴い、中性化速度係数は大きくなる傾向が認められる。また、C種クラスを除けば、両者の傾向はほぼ等しい。従って、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの中性化速度係数は、C種クラスを除けば、BF使用率に応じたCa(OH)₂量の中性化比率を考慮すれば同様に評価することができると考えられる。

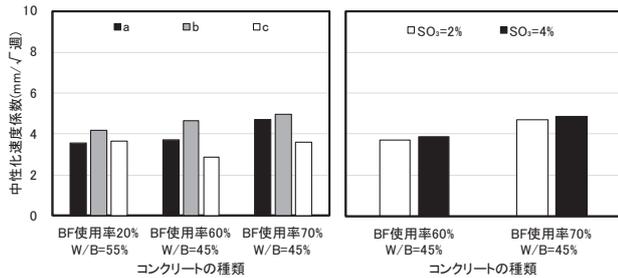


図-11 BF種類による中性化速度係数の比較

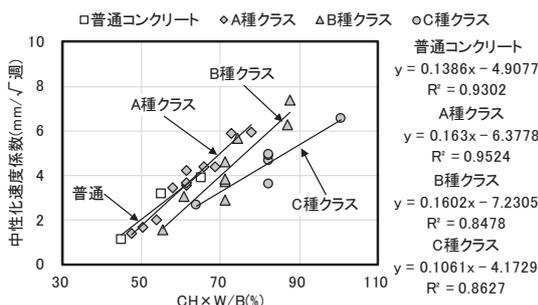


図-12 SO₃量2%および4%の中性化速度係数の比較

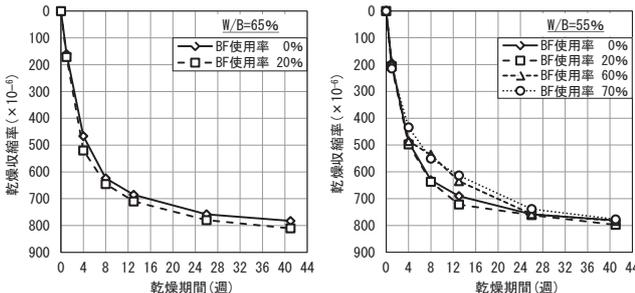


図-13 中性化速度係数と中性化比率と水結合材比の積の関係

5. 長さ変化試験

5.1 長さ変化試験結果

乾燥期間と乾燥収縮率の関係を図-14に示す。長さ変化試験では、長期材齢においても乾燥収縮が進行すると考えられる傾向にあったため、乾燥期間41週まで試験を実施した。使用材料については、BF種類：a、混和剤種類：イは統一としている。すべての供試体において、乾燥期間26週の乾燥収縮率が、建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事¹⁰⁾(以下、JASS 5)にて規定されている設計値 8×10^{-4} を下回っていることが確認できる。BF使用率ごとに比較すると、乾燥期間4~13週においては、BF使用率の高いB、C種クラスで乾燥収縮率が $50 \sim 100 \times 10^{-6}$ 程度低減されている。乾燥期間26週以降では、W/B=35%を除いて、BFを使用したコンクリートでも同様の乾燥収縮率に収束することが確認できる。乾燥期間1週時ではW/Bが小さいほど乾燥収縮率が大きくなっているが、その後はほぼ収束していく傾向を示した。

5.2 早期判定の検討

乾燥期間26週に対する各乾燥期間での乾燥収縮率を図-15に、早期判定式の係数の比較を表-2に示す。早期判定には、JASS 5に示されている以下の早期判定式[3]を用いて算出した。

$$\epsilon_{sh}^{est} = \alpha_i \times \epsilon_{sh}^i \quad [3]$$

ϵ_{sh}^{est} : 乾燥期間26週における乾燥収縮率の推定値

ϵ_{sh}^i : 乾燥期間*i*週における乾燥収縮率

(*i*は4、8、13のいずれか)

α_i : ϵ_{sh}^i から ϵ_{sh}^{est} を推定するための係数

図-15には、JASS 5に記載されている早期判定式の平均値と4%不良率を許容した係数 α_i を用いた式を結果とともに示している。表-2の試験結果から算定した係数は、試験結果の母数が少ないため平均値を採用している。図より、乾燥期間4週と26週ではBF使用率によってばらつきがあるものの、13週と26週ではJASS 5の平均値に収束していることがわかる。試験結果より算定した早期判定式の係数を比較すると、すべての結果においてJASS 5に示されている α_i よりも小さくなることを示

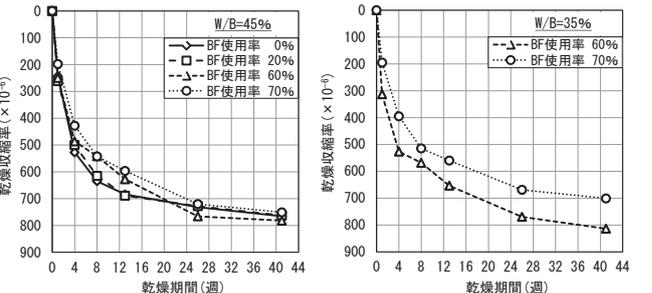


図-14 乾燥期間と乾燥収縮率の関係

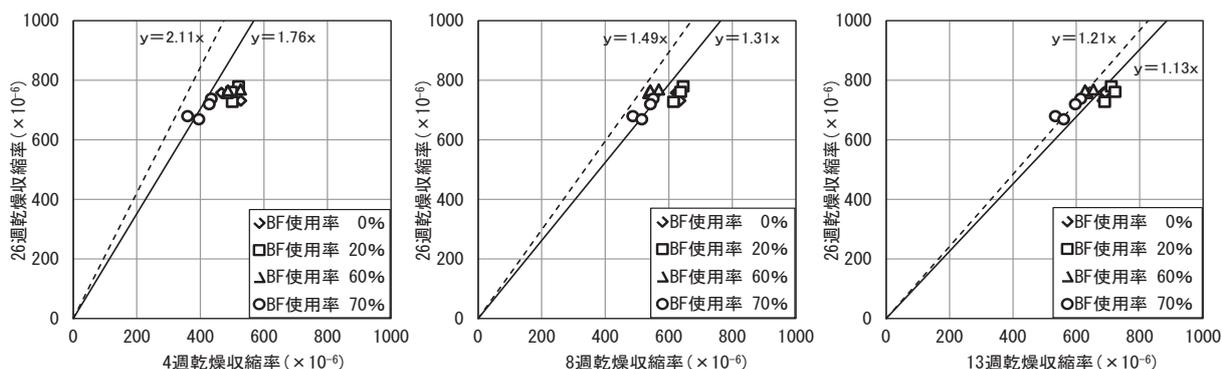


図-15 乾燥期間 26 週に対する各乾燥期間での乾燥収縮率

した。また、BF 使用率が高くなるほど係数が大きくなる傾向を示した。これは、乾燥材齢 4~13 週における乾燥した。また、BF 使用率が高くなるほど係数が大きくなる収縮率の低減が影響していると考えられる。早期判定式を用いる場合は、BF 使用率による係数の補正が必要である。

6. 凍結融解試験

6.1 相対動弾性係数

凍結融解試験による相対動弾性係数を図-16 に、質量減少率を図-17 に示す。コンクリートの空気量は 4.5 ± 1.5% で管理しており、最も小さな空気量でも 4.2% であった。BF 使用率 0% では、W/B=65% において 150 サイクル以降に大きく相対動弾性係数が小さくなっている。BF 使用率 20、60% では、大きく変動することなく同様の傾向を示している。しかし、BF 使用率 70% では相対動弾性係数 60% を下回る結果となった。JASS 5 で規定されている 300 サイクルにおける相対動弾性係数 85% 以上という基準に対しては、BF 使用率 70% を除くと、W/B が 35~45% と低いものすべてが満たしている結果となった。質量減少率を見ても、BF を使用したコンクリートでは、相対動弾性係数の増減に対する相関性が見られなかった。

SO₃ 量による相対動弾性係数の比較を図-18 に示す。SO₃ 量 2% の供試体よりも、SO₃ 量 4% の供試体の方が低い相対動弾性係数を示し、既往の研究¹¹⁾と同様の傾向を示した。

6.2 耐久性指数

BF 使用率と耐久性指数の関係を図-19 に、圧縮強度と耐久性指数の関係を図-20 に示す。BF 使用率で比較すると、BF 使用率が高くなるほど耐久性指数が徐々に低下し、BF 使用率 70% で急激に低下することが確認できる。また、W/B が小さいほど耐久性指数は高くなっている。材齢 28 日における圧縮強度と耐久性指数を比較すると、圧縮強度が高いほど耐久性指数も高くなっており、両者の相関性が確認出来る。BF 使用率 60% 以下では、圧縮強度が 40N/mm² 以上で耐久性指数が 80 以上を確保できている。BF 使用率 70% では、圧縮強度が高い場合でも耐久性指数が低くなっており、BF 使用率が高い場合は注意が必要である。

表-2 早期判定式による係数

BF 使用率 (%)	乾燥収縮率比		
	26 週/4 週	26 週/8 週	26 週/13 週
試験結果			
0	1.52	1.19	1.09
20	1.50	1.20	1.07
60	1.53	1.39	1.20
70	1.69	1.32	1.20
JASS5			
平均値	1.76	1.31	1.13
α_i	2.11	1.49	1.21

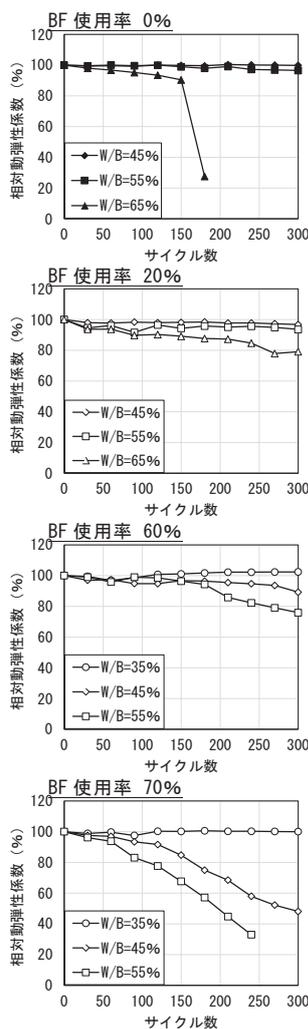


図-16 相対動弾性係数

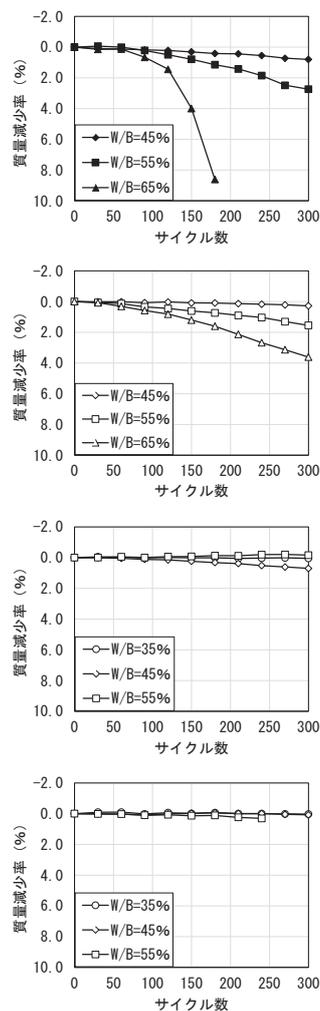


図-17 質量減少率

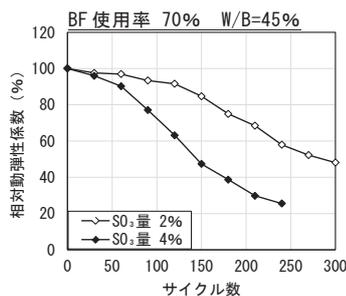


図-18 SO₃量による影響

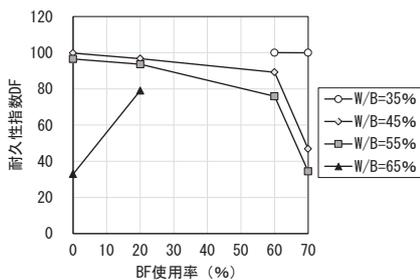


図-19 BF 使用率と
耐久性指数の関係

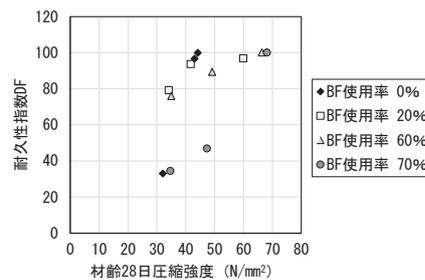


図-20 圧縮強度と
耐久性指数の関係

7. 低温環境下における検討

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、低温環境下で凝結遅延が生じることや初期強度発現の停滞が生じることが指摘されている¹²⁾。以下に環境温度(5℃、10℃、20℃)が凝結性状に及ぼす影響について検討した結果について報告する。

7.1 実験概要

実験の要因と水準を表-3に示す。環境温度は、5℃、10℃および20℃の3水準とした。BF使用率は0%、20%、60%および70%の4水準とし、SO₃量は2%および4%の2水準(BF使用率70%のみ実施)とした。

表-4に使用材料を示す。使用材料は、環境温度20℃の混和剤イに統一し、環境温度5℃および10℃の実験で使用したものは、異なるロットを使用した。表-4に示したように、材料の物性値に大きな違いがないことから、物性値の差がコンクリートに及ぼす影響は小さいと判断し、以後の考察では考慮していない。

試験はスランブ(JIS A 1101)、空気量(JIS A 1128)、コンクリート温度(JIS A 1156)および凝結時間(JIS A 1147)を実施した。また、凝結時間の遅延によりブリーディング量が増加し、沈降量が増大することが懸念されたため、沈降量試験(JASS 5T-503)も実施した(環境温度5℃のみ)。

各種試験の環境温度5℃および10℃のものは同一バッチとし、室温5℃でコンクリートの練混ぜを行い、練上がり直後のフレッシュ試験実施後、直ちに環境温度5℃または10℃の環境下で試験および養生を実施した。

表-5にコンクリートの調合およびフレッシュ性状を示す。目標スランブは21±2cm、目標空気量は4.5±1.5%とし、水結合材比45%、単位粗骨材かさ容積は0.58m³/m³と一定にした。スランブおよび空気量については、目標範囲を満足する結果であった。

表-3 要因と水準

要因	水準
環境温度	5℃、10℃、20℃
BF 使用率	0%、20%、60%、70%
SO ₃ 量	約 2%、4%

表-4 使用材料

材料名	項目	物性値等	
		環境温度	
		5℃、10℃	20℃
セメント ポルトランド セメント	密度 (g/cm ³)	3.16	3.16
	比表面積 (cm ² /g)	3270	3280
	SO ₃ 量 (%)	2.06	2.10
混和材 高炉スラグ 微粉末 (a)	密度 (g/cm ³)	2.89	2.89
	比表面積 (cm ² /g)	4460	4370
	SO ₃ 量 (%)	2.01	2.06
無水せっこう	SO ₃ 量 (%)	57.3	57.1
	細骨材 静岡県掛川産 山砂	表乾密度 (g/cm ³)	2.57
粗粒率		2.61	2.77
粗骨材 東京都青梅産 硬質砂岩碎石	表乾密度 (g/cm ³)	2.64	2.65
	実積率 (%)	58.0	58.2
混和剤 高性能 AE 減水剤	混和剤種類：イ (前報その1 表-4と同じ)		

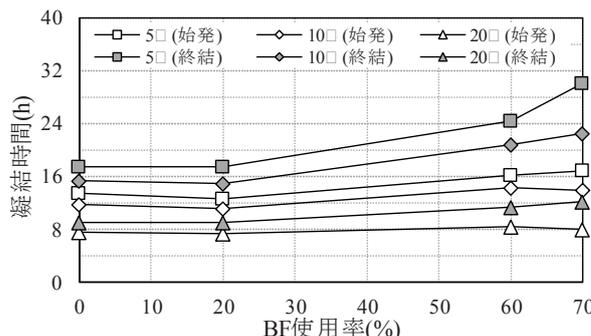


図-21 凝結時間と BF 使用率の関係

表-5 コンクリートの調合およびフレッシュ性状

BF 使用率 (%)	SO ₃ 量 (%)	環境温度 (°C)	単位粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	単体量 (kg/m ³)			高性能 AE 減水剤 使用量 (B × wt%)	SL (cm)	Air (%)	C. T. (°C)
				W	C	BF				
0	2.06	5・10	0.58	175	389	0	0.90	22.5	4.6	7
	2.10	20	0.58				0.80			
20	2.05	5・10	0.58	175	311	78	0.85	22.0	4.7	8
	2.09	20	0.58				0.73			
60	2.03	5・10	0.58	170	152	227	0.85	21.5	4.9	9
	2.08	20	0.58				0.85			
70	2.03	5・10	0.58	170	114	265	0.85	21.5	5.0	8
	2.07	20	0.58				0.78			
70	4.00	5・10	0.58	170	114	265	0.85	21.5	4.8	8
	4.00	20	0.58				0.75			

7.2 試験結果と考察

図-21 に凝結時間と BF 使用率の関係を示す。環境温度 20°C の場合、始発時間は BF 使用率の影響を受けずに、ほぼ同等の値となった。終結時間は、BF 使用率が大きくなるに伴い、若干遅延する傾向(最大約 3 時間)が認められた。環境温度 5°C および 10°C では、BF 使用率が 20% を超えると始発時間が遅延する傾向が認められ、最大で約 4 時間程度遅延する傾向であった。また、終結時間については、その傾向がより顕著であり、BF 使用率 0% および 20% に比べ、60% および 70% は 7~13 時間程度の凝結遅延が生じる結果であった。

図-22 に凝結時間と環境温度の関係(せっこう量の影響)を示す。図中より、せっこう量が異なっても、環境温度と凝結時間の関係は同等であると判断できる。よって、せっこう量が異なっても凝結時間に及ぼす影響はないものと考えられる。

24 時間経過時点における沈降量は、BF 使用率 0% で 1.04mm、BF 使用率 70% で 0.85mm であり、BF 使用率 70% のものがスラグを使用していないものより小さい沈降量であった。

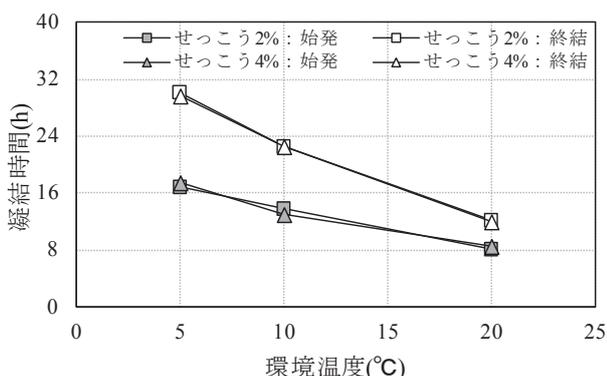


図-22 凝結時間と環境温度の関係

8. おわりに

以上の室内実験の結果を表-6 に示す。BF 使用率 10% から 70% の範囲における各性状について、以下の知見を得た。

表-6 室内実験のまとめ

項目	BF 使用率 (%)					
	10	20	30	45	60	70
フレッシュ経時変化*	-	-	-	-	-	同等
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	-	-	-	大遅
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					
圧縮強度(28日)	同等			使用率に伴い低下		
圧縮強度(91日)	同等			使用率に伴い低下		
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

* 前報その 1 にて報告

- (1) BF 使用率 70% においても、静置で経時 60 分のスランプ保持性能を有していた。
- (2) BF 使用率の増加に伴い、ブリーディング量が減少した。
- (3) BF 使用率 60% 以上になると、セメント量の減少および混和剤使用量の増加により、終結時間が遅延した。
- (4) 低温環境下における凝結時間は、BF 使用率 60% 以上になると終結時間が大幅(7~13 時間)に遅延した。

- (5) 断熱温度上昇量の最高温度は、BF 使用率 70%の場合、同一結合材量の低熱セメントを使用したコンクリートよりも小さい値であった。
- (6) 圧縮強度は、材齢 28 日以降であれば BF 使用率 30%以下は N と同等と見なせ、BF 使用率 30%を超えると強度低下が認められた。
- (7) 静弾性係数は、BF 使用率に関わらず、BF を使用していない一般のコンクリートと同様な静弾性係数を有していた。
- (8) 乾燥収縮は、BF 使用率に関わらず N と同等であった。
- (9) 中性化抵抗性は、BF 使用率の増加に伴い低下した。
- (10) 耐凍害性は、BF 使用率が高くなるほど低下し、かつ、水結合材比が大きい場合、BF 使用率 70%で急激に低下するため、BF 使用率が高く水結合材比も大きい場合は注意が必要である。

今後は、市中の生コン工場でコンクリートの製造実験および模擬部材による構造体コンクリートの品質について検討を行う予定である。

【謝辞】

本研究は、当社と長谷工コーポレーション、青木あすなろ、淺沼組、安藤・間、奥村組、熊谷組、鴻池組、五洋建設、鉄建建設、東急建設、東洋建設、矢作建設工業の 13 社の共同研究です。また、実施にあたり、鐵鋼スラグ協会、フローリック、BASF ジャパン、日本シーカ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) 溝渕ほか：混和材を高含有したコンクリートの基礎的性状（その 1 フレッシュ性状および力学性状），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 185-186, 2011
- 2) 親本ほか：混合セメントを用いたコンクリートの耐久性能（その 1 実験概要）、日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 427-428, 2014
- 3) 宮澤ほか：高炉スラグ微粉末の比表面積および置換率がコンクリートの長期強度発現に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，第 82 巻，第 740 号，pp. 1517-1526, 2017
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018
- 5) 小林利充他：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概要集，pp. 61-62, 2017. 8,
- 6) 溝渕麻子他：混和材を高含有したコンクリートの基礎的性状、日本建築学会大会学術講演概要集，pp. 185-190, 2011. 8
- 7) 辻大二郎他：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，日本建築学会大会学術講演概要集，pp. 205-210, 2011. 8
- 8) 金子樹他：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，日本建築学会大会学術講演概要集，pp. 63-68, 2017. 8
- 9) 大岡督尚他：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，日本建築学会大会学術講演概要集，pp. 79-84, 2016. 8
- 10) 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，2016
- 11) 和地正浩他：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
- 12) 井戸・田中・土師他 3 名：高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの環境温度が各種性状に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），pp. 721-722, 2018. 9