

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4 実機試験練りの硬化後のコンクリートおよび強度設計

Effects of granulated blast-furnace slag as the mineral admixtures to concrete properties
Part4. Hardened concrete of actual machine test and strength design

藺井孫文*1

概 要

建設業界においては、他業種よりエネルギーの消費量や二酸化炭素の排出量が大きく、特に構造材料として最も使用量が多いコンクリート分野では、二酸化炭素排出量の削減といった課題は重要であるとともに SDGs の達成につながると考えられる。そこで、本研究では、高炉スラグ微粉末を幅広い使用率で混和材料として用いたコンクリートについて検討を行うことを目的として実施した。その3の実機試験練りの試験概要およびフレッシュ性状に引き続き、その4では実機試験練りの硬化後の性状および耐久性を考慮した強度設計について報告する。

key words : 環境配慮型コンクリート、高炉スラグ微粉末、耐久性、強度設計

1. はじめに

その4では実機試験練りした硬化コンクリートの性状および中性化を考慮した耐久強度設計について報告する。試験練りの組合せ、試験項目、供試体作成方法等はその3に示した通りである。

2. 環境配慮型コンクリートの強度特性

2.1 圧縮強度の発現性

目標呼び強度 33 の材齢と圧縮強度の関係を図-1 に示す。高炉スラグ微粉末(以下、BF)の使用率 15%(以下 BF15、同様に BF30、BF60、BF70 と表記)の標準養生供試体圧縮強度(以下、標準養生強度)はすべての調合が材齢 7 日から各材齢への強度発現性が同程度であった。現場封かん養生供試体圧縮強度(以下、封かん養生強度)、模擬柱コア供試体の圧縮強度(以下、コア強度)は、打込み時期が冬期 X 工場(WX)の場合は材齢 28 日以降の強度増進が大きい傾向にあり、若材齢で積算温度が低かった影響と推察できる。また、打込み時期や工場間での違いが小さいことが確認された。

BF30 では標準養生強度は打込み時期や工場において一部傾向の違いが確認され、冬期 Z 工場(WZ)が標準期 X 工場(SX)と夏期 Y 工場(HY)に比べて大きい値で推移している。封かん養生強度、コア強度は、標準養生強度と同じように、WZ が SX、HY に比べて高い傾向であった。

BF60 では標準養生強度は、WZ、SX、HY の順に強度が低くなっていた。封かん養生強度、コア強度についても、標準養生強度と同じように WZ、SX、HY の順に強度が低くな

っており、特に HY の強度が低い結果であった。

BF70 では標準養生強度は HZ、SX、WY の順に低い強度結果となる傾向であった。封かん養生強度、コア強度は、標準養生強度とは一部傾向が異なり、SX、HZ、WY の順に強度が低くなっていた。これは、封かん養生強度をみると、HZ の強度増進が材齢 7 日以降停滞していることから、夏期温度の影響によるものと推察される。なお、WY の強度はすべて低い結果であった。

全体的には、BF 使用率が増加すると打込み時期や工場間での違いが発生する傾向であった。なお、図示はしないがコンクリートの練り上がりからの経過時間(30、60、120 分)が標準養生強度におよぼす影響に関しては、一定の変動はあるものの圧縮強度試験結果に大きく影響をおよぼすような傾向は認められなかった。

2.2 コア供試体強度の端部と中央の比較

コア強度の端部と中央の関係を図-2 に示す。材齢別の比較としては傾向がなかった。直線回帰した結果が $y=0.994x$ 、 $R^2=0.962$ であり端部・中央に差がないことが確認された。

2.3 封かん養生強度とコア強度の関係

材齢 91 日の封かん養生強度とコア強度の関係を図-3 に示す。打込み時期や工場間によらず、封かん養生強度とコア強度で明確な傾向は認められなく、ほぼ 1:1 の関係であったが、BF 使用率が高くなるほどコア強度がやや高くなる傾向であった。

2.4 簡易断熱養生供試体圧縮強度とコア強度の関係

材齢 91 日の簡易断熱養生強度とコア強度の関係を図-

*1 Magofumi SONOI

技術本部技術研究所 主任研究員

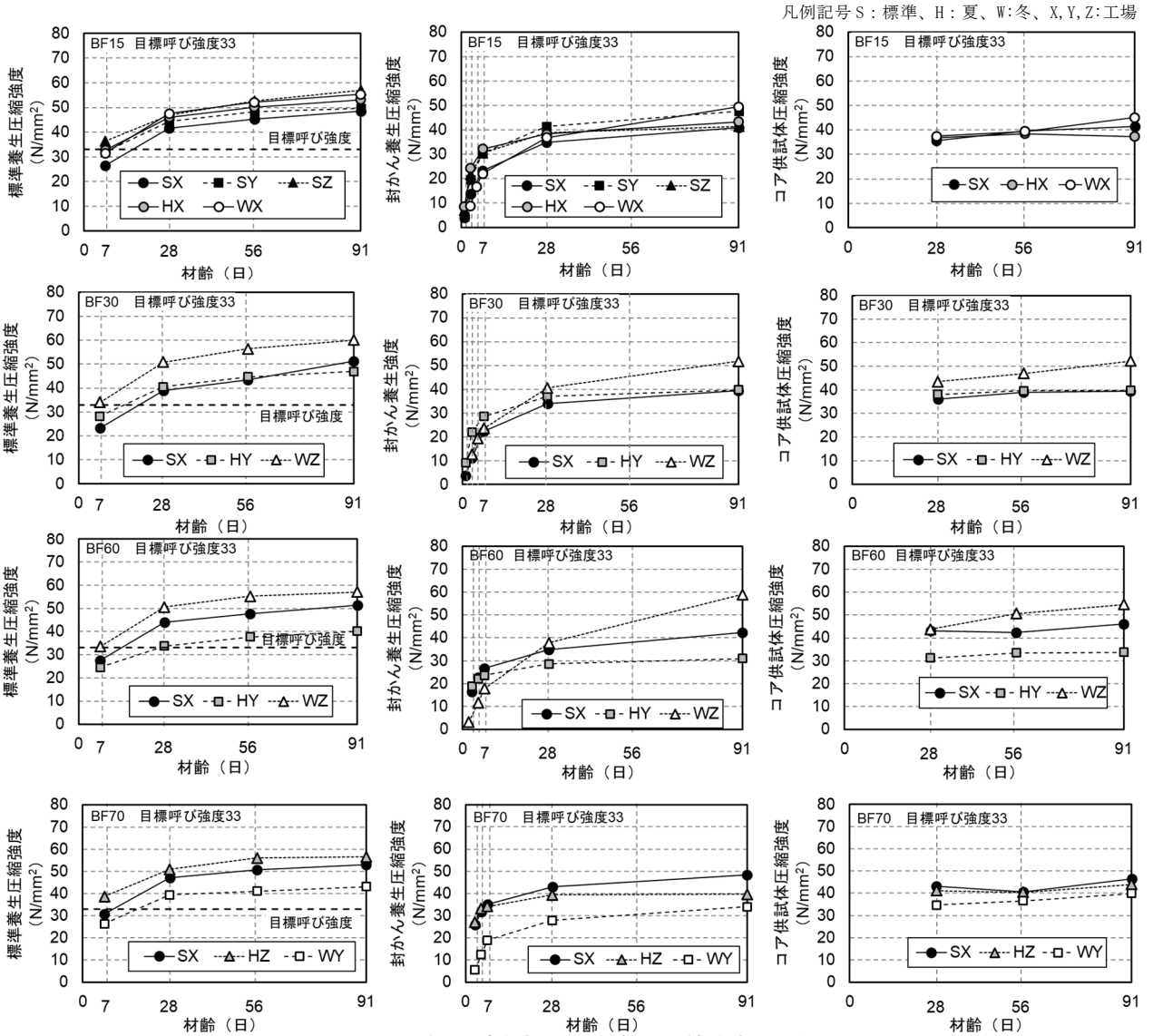


図-1 目標呼び強度 33 の材齢と圧縮強度の関係

4に示す。概ね $y=x \pm 5$ の範囲であった。BF15では、コア強度と比べて簡易断熱養生強度が若干高い傾向を示した。BF30、60および70ではコア強度のほうが高く、特にBF60でその傾向が顕著であったが、全体的な傾向としては、BF使用率が高くなるほど簡易断熱養生強度よりコア強度が高くなる傾向であった。また、全体の相関性をみると、寄与率 $R^2=0.93$ と高い相関性を示した。これらのことから本研究で検討した範囲において構造体コンクリート強度の

推定には簡易断熱養生供試体を用いても概ねコア強度が推定できると考えられる。なお、各BF使用率の関係式を用いることでさらに推定精度が高くなると考えられる。

3. 環境配慮型コンクリートの強度設計

各生コン工場の強度算定式と実機試験練りによる圧縮強度試験結果の比較、標準偏差および構造体強度補正值 ($_{28}S_{91}$) によりBFコンクリートの強度設計に必要となる

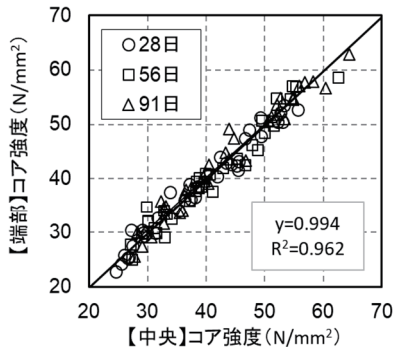


図-2 コア強度の端部と中央の関係

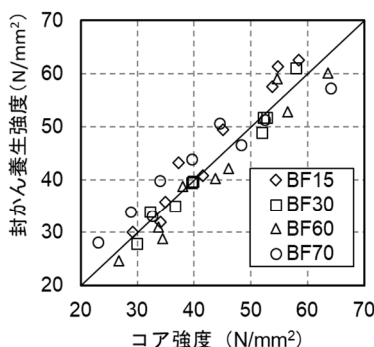


図-3 材齢 91 日の封かん養生強度とコア強度の関係

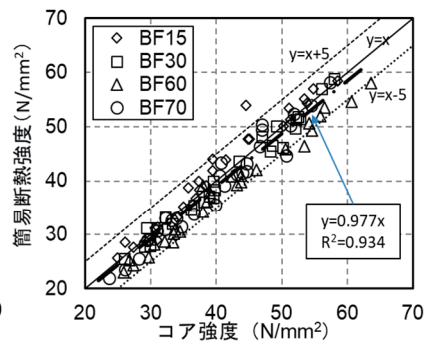


図-4 材齢 91 日の簡易断熱養生強度とコア強度の関係

根拠データを検討した。

3.1 生コン工場の強度算定式と圧縮強度の関係

各生コン工場の強度算定式と実機試験練りによる標準水中養生材齢 28 日の圧縮強度試験結果（以下、標水 σ 28 圧縮強度）の比較を図-5 に示す。実機試験練りにあたって採用した強度算定式はその3で示したとおり、生コン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 の標水 σ 28 圧縮強度は、いずれの生コン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た。BF60、BF70 では、X 工場、Z 工場では 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たが、Y 工場では強度算定式を下回る結果となった。一方で、結合材水比と圧縮強度の関係をみると、いずれの BF 使用率、生コン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不明であったが、実物件への適用時にあたっては、実際に採用される BF 使用率を考慮して今回のような手順で実機試験練りを実施したうえで、生コン工場の強度算定式を 3N/mm^2 または 6N/mm^2 と必要な範囲で切片を負側に平行移動するなどの方法により、安全を考慮した適切な強度設計ができるものと考えられる。

3.2 圧縮強度の標準偏差

X 工場の BF15 の実機試験練りにおける 3 シーズンの標水 σ 28 圧縮強度から得られた標準偏差と、X 工場の N を使用したコンクリートの実績に基づく標準偏差の標準値の関係を図-6 に示す。

本試験練りにおける圧縮強度の標準偏差は、いずれの結合材水比においても X 工場の標準偏差の標準値を下回っており、BF を使用しても標準値以下であると判断できる。A 種クラス（BF 使用率 30%未満）のコンクリートを実適用した既往の報告¹⁾においても、呼び強度 24 で標準偏差は 2.5N/mm^2 と通常のコンクリートと同程度であることが示されており、本試験練り結果も同様の傾向が示されたものといえる。

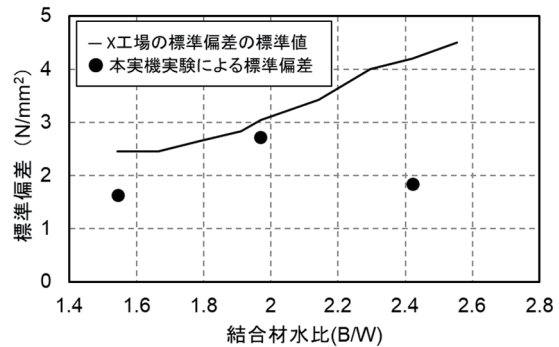
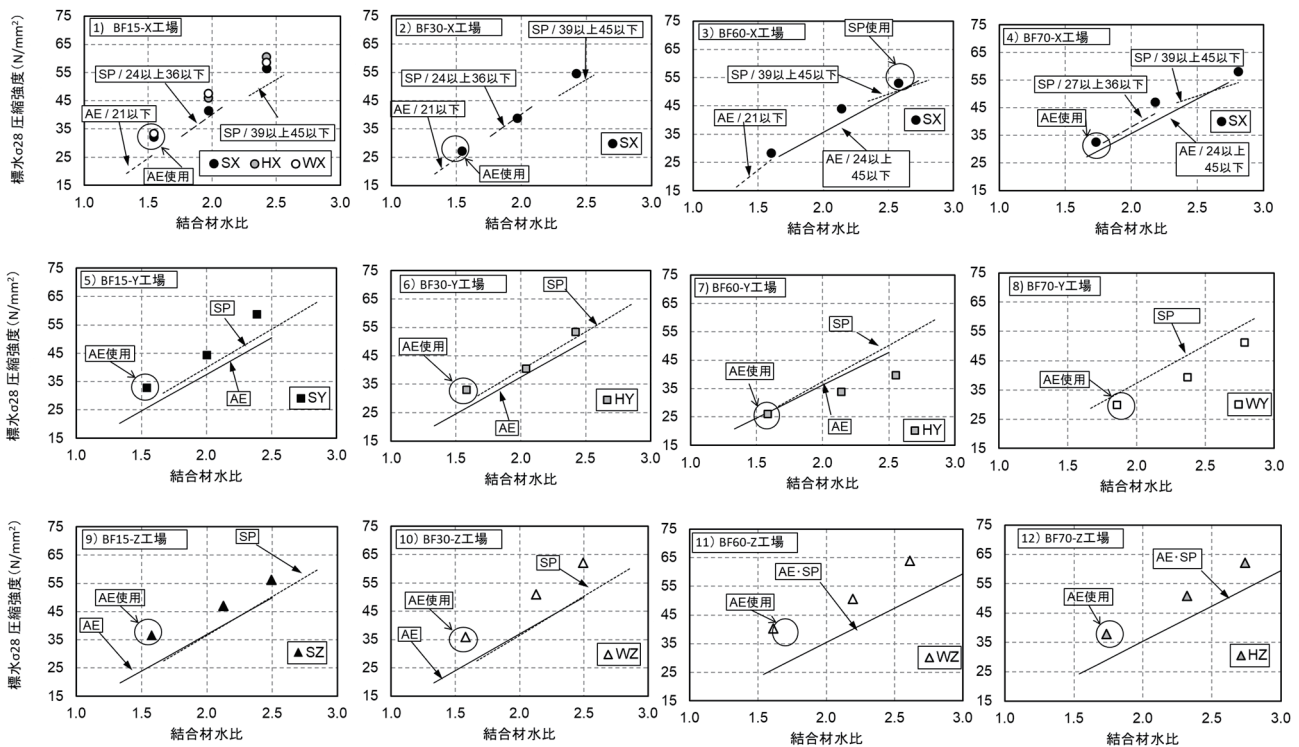


図-6 X 工場における実機試験練り結果による圧縮強度の標準偏差と標準値



注釈 打込み時期（S：標準期、H：夏期、W：冬期）、生コン工場別：X、Y、Z
図中の線形は生コン工場の強度算定式（AE：AE 減水剤、SP：高性能 AE 減水剤）を示す

図-5 各生コン工場の強度算定式と実機試験練りによる圧縮強度試験結果の比較

3.3 構造体強度補正值 ($_{28}S_{91}$)

構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ の標準値について、建設省告示 1102 号および JASS 5 を表-1 に示す。外気温度によって $3N/mm^2$ または $6N/mm^2$ と規定されているが、結合材の種類として高炉セメント 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 種相当に該当する結合材種類に応じて $_{28}S_{91}$ の標準値について示されており、本検討範囲においても同様に整理できると考えられる。

実機試験練り結果から得られた材齢 91 日のコア強度と $_{28}S_{91}$ の関係を図-7 に示す。図-7、表-1 で整理したとおり、標準的な $_{28}S_{91}$ の値として、標準期に $3N/mm^2$ 、冬期と夏期に $6N/mm^2$ のラインを示している。さらに、普通コンクリートの強度範囲の参考値として $21 (Fc18+3) \sim 42 (Fc36+6) N/mm^2$ の領域を示している。

全体的な傾向として、一般的に知られるように、実強度であるコアの圧縮強度が高くなるほど $_{28}S_{91}$ が大きくなる傾向が確認できる。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がみられるが、普通コンクリートの強度範囲においては、表-1 で示した標準的な $_{28}S_{91}$ の値を適用できるものと判断される。

4. 環境配慮型コンクリートの耐久性

BF の使用率および型枠脱型時期を実験要因とした中性化について検討した。

実験では、型枠脱型後に促進中性化を開始するまでに、供試体全面が乾燥状態にさらされていることや、ブリーディングによる影響で、供試体表面層や打込み上面にポーラスな層が形成されていることが想定されたことから、1 側面 5 箇所、2 側面の合計 6 箇所の測定値のうち、上下両端の測定値を除く 3 点、2 側面の合計 6 箇所の測定値の平均値を中性化深さとした。

また、上記の影響を考慮して、促進材齢 1 週以降のデータを用い、切片を持たせた回帰式により中性化速度係数を算出して検討を行った。

4.1 試験結果および考察

(1) 中性化深さと促進期間の関係

本試験練りにおける各促進期間の中性化深さおよび中性化速度係数を表-2 に示す。また、一部の中性化深さと促進期間の関係を図-8 に示す。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、水結合材比 (目標呼び強度) に関わらず \sqrt{t} 則が成り立つことが確認された

(2) BF 使用率と中性化速度係数の関係

本試験練りにおける BF 使用率と中性化速度係数の関係を図-9 に示す。同一水結合材比同士である BF15 と BF30 を比較すると、BF 使用率が大きい BF30 のほうが、中性化速度係数が大きくなる傾向が認められる。同一目標呼び強度で比較すると、前述のように、BF30 は BF15 より中性化速度係数は大きくなるが、BF70 は BF30 と概ね同等であった。ただし、目標呼び強度を同一に設定したものの、表-2 より材齢 7 日強度は BF70 が大きい結果となっている。以上のことから、C 種クラスにおいても、耐久設計基準強度を適切に定めることで A 種クラスと同等の中性化抵抗性は確保できるものと考えられる。

(3) 脱型時期と中性化速度係数の関係

脱型時期と中性化速度係数の関係を図-10 に示す。水結合材比、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がみられた。また、脱型時期を材齢 3 日目以降とすれば、中性化速度係数への影響が小さいことがわかった。

表-1 JASS5・告示 1102 号・高炉指針における $_{28}S_{91}$

	結合材の種類	構造体強度補正值 $_{28}S_{91} (N/mm^2)$		
		6	3	6
建設省告示 ^{*1}	N	$\theta < 10$	$10 \leq \theta < 25$	$25 \leq \theta$
	BB	$\theta < 15$	$15 \leq \theta < 25$	$25 \leq \theta$
JASS5 ^{*2}	N	$\theta < 8$	$8 \leq \theta < 25$	$25 \leq \theta$
	BB	$0 \leq \theta < 13$	$13 \leq \theta$	暑中期間
高炉指針	A種相当 ^{*3}	$\theta < 10$	$10 \leq \theta < 25$	$25 \leq \theta$
	B種相当	$\theta < 15$	$15 \leq \theta < 25$	$25 \leq \theta$
	C種相当	$\theta < 15$	$15 \leq \theta < 25$	$25 \leq \theta$

註:*1:1102号-2016、*2:JASS5-2018
*3:使用率20~30%、*4:同40~50%、*5:同60~70%
設計基準強度はすべて $36N/mm^2$ 以下

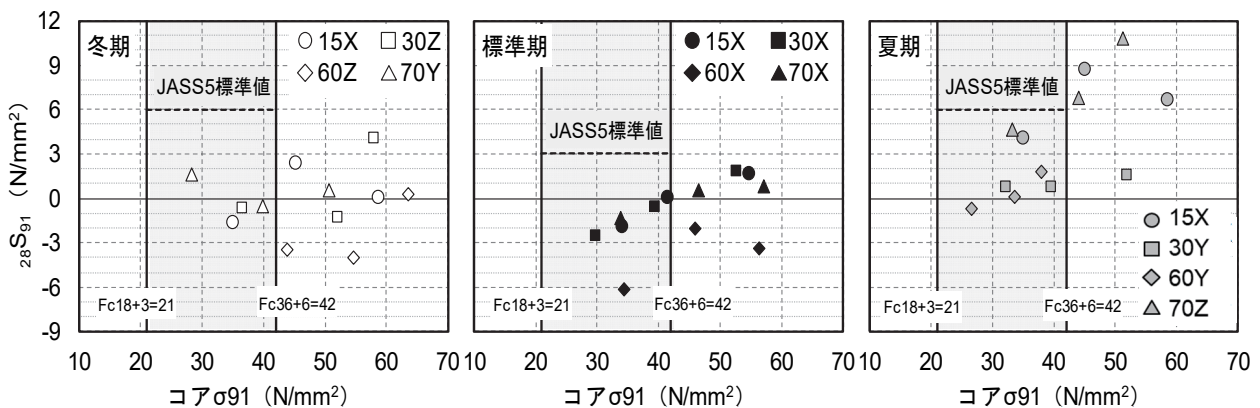


図-7 材齢 91 日コア強度と構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ の関係

表-2 促進期間と中性化深さの関係

BF 使用率	目標呼び強度	W/B (%)	脱型時期 (日)	脱型時強度*2 (N/mm ²)	7日強度*2 (N/mm ²)	促進前中性化深さ (mm)	中性化深さ(mm)					中性化速度係数 (mm/√週)	
							促進期間(週)						
							1	4	8	13	26		
BF15	21	64.8	1	1.8	14.9	4.0	15.5	23.1	29.7	35.5	- *1	7.71	
			3	8.2		3.7	12.3	20.4	25.5	31.1	41.4		7.01
			7	14.9		2.6	11.2	17.8	23.2	28.9	35.7		6.06
	33	50.8	1	3.9	23.2	2.5	11.7	16.7	20.3	23.3	30.8	4.58	
			3	13.6		2.1	9.8	15.5	18.6	21.8	26.4	3.98	
			7	23.2		1.3	8.9	14.1	17.4	20.0	25.4	3.95	
42	41.3	1	6.5	37.2	1.8	9.6	13.8	16.5	18.3	23.8	3.38		
		3	24.0		0.7	6.9	11.1	12.1	14.2	18.6	2.72		
		7	37.2		0.3	6.4	9.3	11.2	12.9	17.1	2.56		
BF 30	21	64.8	1	2.0	12.2	4.5	16.1	26.1	35.8	43.6	- *1	10.65	
			3	6.0		4.2	14.9	24.3	31.7	38.3	- *1		8.97
			7	12.2		3.4	13.4	23.8	29.8	37.9	- *1		9.23
	33	50.8	1	3.8	22.3	2.9	12.5	20.4	25.0	30.2	38.0	6.15	
			3	11.2		2.1	10.6	16.8	21.7	26.8	33.5	5.64	
			7	22.3		2.1	11.0	17.1	20.6	24.8	32.5	5.18	
42	41.3	1	5.9	32.2	2.1	9.4	15.3	18.8	23.7	26.0	4.13		
		3	17.5		0.7	7.9	12.8	15.7	19.8	21.5	3.40		
		7	32.2		0.8	7.9	12.0	15.3	16.3	19.1	2.70		
BF 70	21	57.7	3	15.7	21.1	4.8	13.8	23.9	30.7	35.9	- *1	8.49	
			5	19.3		3.6	12.5	21.7	28.4	33.3	- *1		8.03
			7	21.1		3.6	12.1	19.8	26.8	32.6	- *1		7.95
	33	45.8	3	26.0	35.1	3.3	10.7	18.9	23.2	26.8	31.4	4.94	
			5	31.7		2.6	9.9	16.4	20.9	24.7	30.3	4.94	
			7	35.1		2.7	9.4	15.7	19.5	24.0	29.4	4.88	
42	35.6	3	35.7	47.3	2.4	9.8	13.8	17.7	19.6	24.2	3.49		
		5	45.3		2.2	7.3	12.0	15.0	17.3	20.7	3.23		
		7	47.3		1.8	7.4	10.6	14.3	17.6	19.7	3.14		

*1 全断面が中性化したため測定不可、中性化速度係数は促進期間 13 週までのデータで算出
*2 現場封かん養生供試体

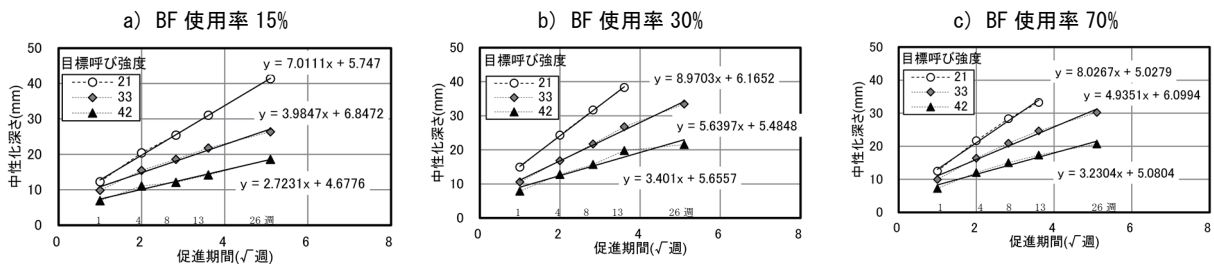


図-8 促進期間と中性化深さの関係(材齢 3 日)

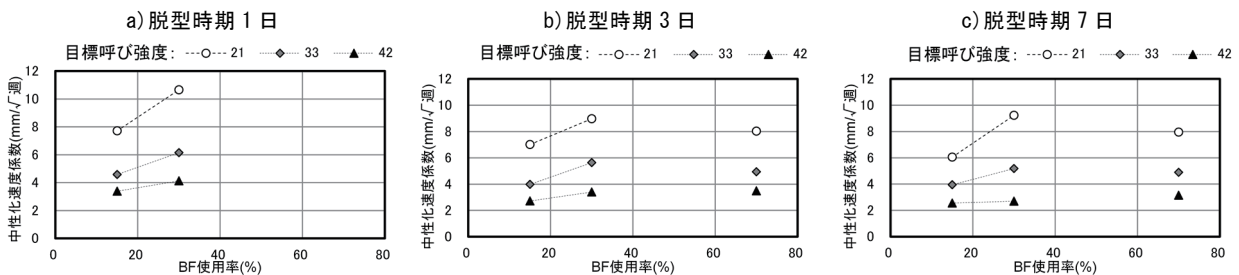


図-9 中性化速度係数と BF 使用率の関係

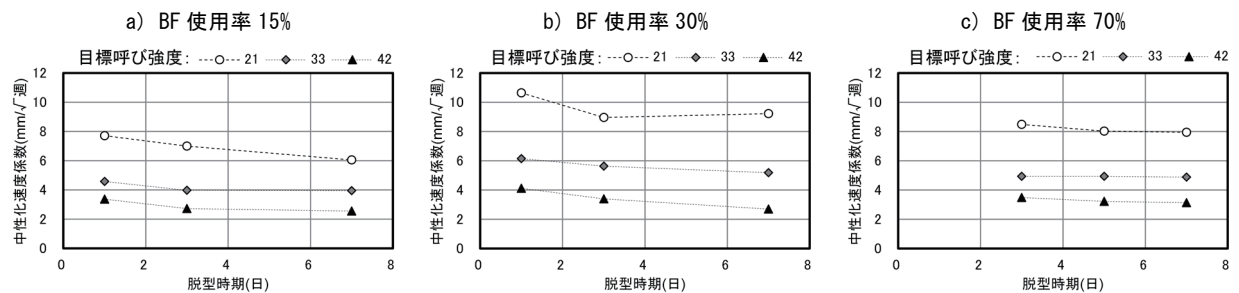


図-10 脱型時期と中性化速度係数の関係

5. 環境配慮型コンクリートの型枠存置と湿潤養生期間

実機試験練りにおける現場封かん養生の強度発現性より、構造体コンクリートとして打込まれたコンクリートの型枠存置期間および湿潤養生期間について検討した。

5.1 積算温度による強度発現性

建設省告示第 110 号および JASS 5 では、対応する部位について、せき板および支柱（支保工）の存置期間について、所定の日数および圧縮強度が示されており、このうちのどちらかを確認した後に取り外せるとしている。また、湿潤養生期間についても JASS 5 では同様に所定の日数または圧縮強度による打ち切り時期が示されている。

ここでは、現場封かん養生した供試体の強度発現性と、期間中の外気温でより式(1)で求められる積算温度との関係から、これらの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。

$$M = \sum_{z=1}^n (\theta z + 10) \tag{1}$$

ここに、M：積算温度（°D・D）、z：材齢（日）
 θz：材齢z日における平均気温（°C）

積算温度と目標呼び強度に対する現場封かん養生の強度比との関係を図-11に示す。なお、検討は材齢28日までのデータを対象とした。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何れのBF使用率についてもよい対応を示した。

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毎に図示すると、例えば柱、壁などのせき板の存置期間である所定強度 5N/mm²では図-12となる。また、同様に、そのほかの所定強度が発現するまでの日数の目安を期間中の平均温度毎に整理したもので表-3に示す。

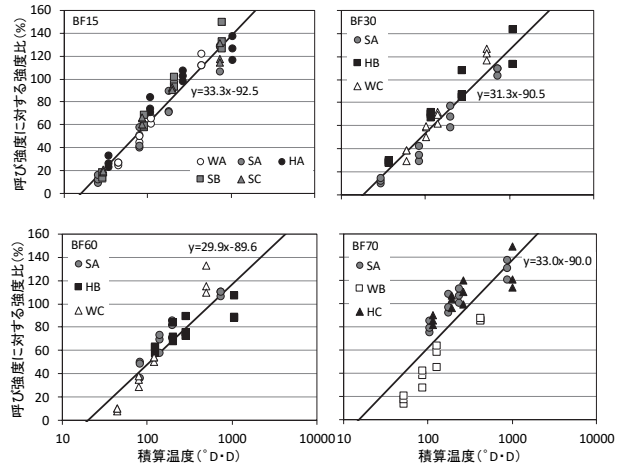


図-11 積算温度と目標呼び強度に対する強度比

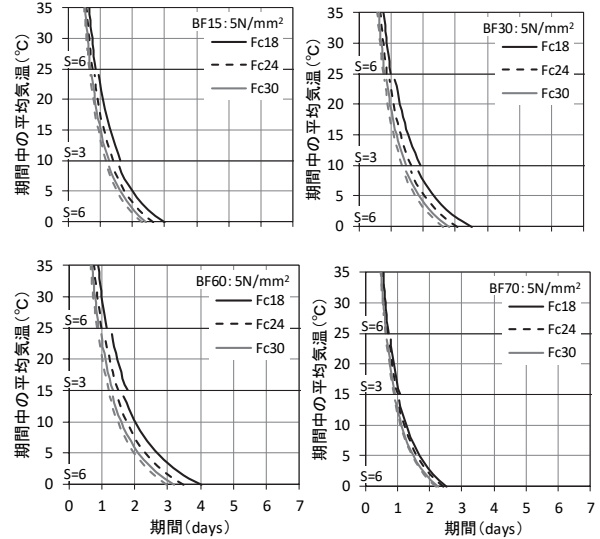


図-12 柱・壁などのせき板の存置期間と期間中の平均気温

表-3 型枠の存置期間および湿潤養生期間の目安（日）

BF 使用率	Fc (N/mm ²)	基礎、梁側、柱、壁の せき板 5N/mm ²				スラブ下、梁下のせき板 Fc 50%				スラブ下の支保工 Fc 85%				梁下の支保工 Fc 100%				湿潤養生期間の打ち切り 10N/mm ²			
		5°C	10°C	20°C	30°C	5°C	10°C	20°C	30°C	5°C	10°C	20°C	30°C	5°C	10°C	20°C	30°C	5°C	10°C	20°C	30°C
		BF15	24	2.5	1.5	1.0	1.0	4.0	3.5	2.0	1.5	8.5	8.0	5.5	3.5	12.0	12.0	8.0	4.5	3.0	2.5
	30	2.0	1.5	1.0	1.0	4.0	3.5	2.5	1.5	9.0	8.5	5.5	3.5	13.5	12.5	8.5	5.0	2.5	2.0	1.5	1.0
	36	2.0	1.5	1.0	1.0	4.0	3.5	2.5	1.5	10.0	8.5	6.0	4.0	14.5	13.0	9.0	5.5	2.5	2.0	1.5	1.0
BF30	24	2.0	2.0	1.5	1.0	4.5	4.0	2.5	2.0	10.5	10.5	7.0	4.0	15.5	15.5	10.5	6.0	3.5	3.0	2.0	1.5
	30	2.0	1.5	1.5	1.0	4.5	4.0	3.0	2.0	11.5	11.0	7.5	4.5	17.5	16.5	11.0	6.5	3.0	2.5	2.0	1.5
	36	2.0	1.5	1.5	1.0	5.0	4.0	3.0	2.0	12.5	11.0	7.5	5.0	19.0	17.5	11.5	7.0	3.0	2.0	1.5	1.0
BF60	24	2.5	2.0	1.5	1.0	5.5	4.0	3.0	2.0	13.0	10.0	8.5	5.0	19.5	14.5	13.0	7.5	4.5	3.5	2.5	1.5
	30	2.5	2.0	1.5	1.0	5.5	4.0	3.5	2.0	14.5	11.0	9.0	5.5	22.0	16.5	14.0	8.5	3.5	2.5	2.0	1.5
	36	2.0	1.5	1.0	1.0	6.0	4.5	3.5	2.5	15.5	11.5	9.5	6.0	23.5	18.0	15.0	9.0	3.0	2.5	2.0	1.5
BF70	24	2.0	1.5	1.0	1.0	3.5	3.0	2.0	1.5	8.0	6.0	5.0	3.0	11.5	9.0	7.5	4.5	3.0	2.5	2.0	1.0
	30	2.0	1.5	1.0	1.0	4.0	3.0	2.0	1.5	9.0	6.5	5.5	3.5	13.0	10.0	8.0	5.0	3.0	2.0	1.5	1.0
	36	1.5	1.5	1.0	0.5	4.0	3.0	2.5	1.5	9.5	7.0	5.5	3.5	14.0	10.5	8.5	5.5	2.5	2.0	1.5	1.0

本検討では、BF 使用率に係わらず、いずれも同様の日数で所定強度が発現される試算となった。本研究における室内実験の結果として、前報²⁾その2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水結合材比も小さくなり、型枠存置期間や湿潤養生の打ち切りといった所定強度の発現時期については、BF 使用率の違いにほとんど差がない傾向であった。

5.2 湿潤養生期間の妥当性

JASS5では湿潤養生の必要性について、初期の湿潤養生の期間が短いほど、かつ水和速度の遅いセメントほど中性化が早く進行し、セメントの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BBのみ規定がある。そこで、前項で示した促進中性化試験結果より、湿潤養生の打ち切り(脱型)時期と中性化への関係を検討した。

脱型時強度と中性化速度係数の関係を図-13に示す。BF 使用率および水セメント比により異なるが、脱型時強度が大きくなるに従い中性化速度係数は小さくなる傾向であった。また、脱型時強度と材齢7日を基準とした中性化速度比の関係を図-14に示す。また、図-14中にはJASS 5(検討1³⁾)および建築学会の高炉指針(検討2⁴⁾)において、湿潤養生期間の設定の根拠としているデータを併記した。材齢7日を基準とした中性化速度比は脱型時強度が10N/mm²以上では特に検討1,2以外において概ね1.1以下の値であった。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%程度となる。以上より、コンクリートの耐久性能は、耐久設計基準強度により確保するものとした場合、湿潤養生の打ち切りは、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。

6. 環境配慮型コンクリートの耐久設計基準強度

BF 使用率と計画供用期間の級に応じた耐久設計基準強度について検討した。なお、ここではその3で報告した促進中性化試験結果に基づいて検討した結果を報告する。

6.1 BF 使用率と耐久設計基準強度

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、本検討とはBF 使用率の範囲が異なり、高炉指針で規定される耐久設計基準強度を適用するには検討が必要となる。よって、本検討では、高炉指針に示されるBF 使用率と計画供用期間の級に応

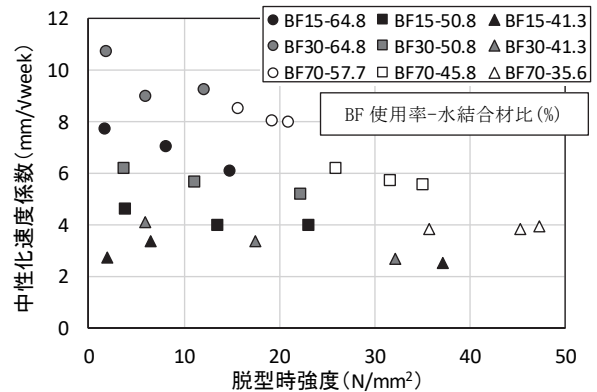


図-13 脱型時強度と中性化速度係数

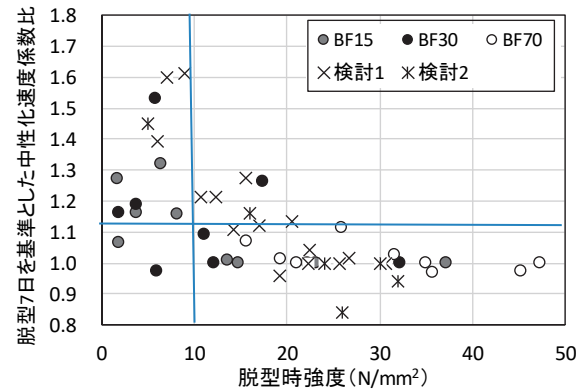


図-14 脱型時強度と脱型7日を基準とした中性化速度係数比

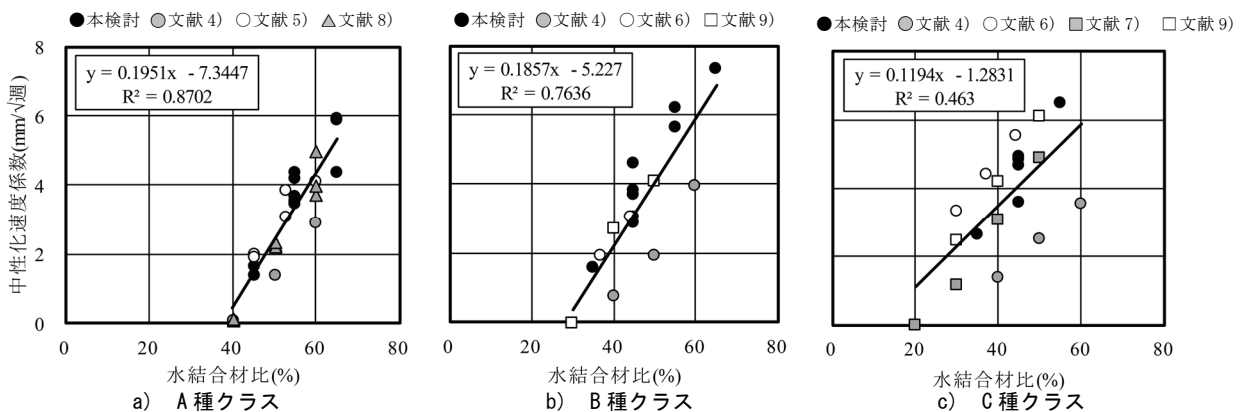


図-15 中性化速度係数と水結合材比の関係

じた耐久設計基準強度を、本検討のBF使用率の区分で適用可能かについて耐久設計指針の性能検証型耐久設計法に準拠し検討した。

6.2 検討に用いたデータ

本検討では、BF使用率を10~70%と変化させ、3種類のBFと化学混和剤3種、SO₃量や単位水量を水準とした室内実験(前報²⁾その1、その2)による促進中性化試験の21データを用いた。本検討で求めた試験データは、比較的広範囲であると考えられるが、よりデータ数を増やし、検討の妥当性を向上させる目的で、BF使用率10~75%の範囲を対象とした既往の研究結果^{5)~10)}も用いて耐久設計基準強度を検討することとした。

本検討および既往の研究における中性化速度係数と水結合材比の関係を図-15に示す。なお、既往の研究の試験値は、一部図から読み取った値である。図-15からは、文献4の中性化速度係数が小さい傾向であるが、中性化速度係数と水結合材比の関係は全体的には直線的であり、本検討の試験値は特異な値ではないことが確認できる。

6.3 中性化速度係数の予測式

中性化速度係数の予測式としては、一般には材齢28日標準養生強度と実暴露による中性化速度係数の関係が用いられる。しかしながら、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの実暴露による中性化速度係数の実績は少なく、本検討でも十分なデータの取得を行っていない。よって、本検討では、図-15に示した本検討結果および既往の研究による促進試験における中性化速度係数と水結合材比の関係を直線回帰した式を、中性化速度係数の予測式として用いることとした。

6.4 耐久設計基準強度の検討

耐久設計基準強度の検討は、表-4の検討項目について、式(2)および式(3)より算出される所要の水結合材比に対して、生コン工場の呼び強度に対応する水結合材比の範囲¹¹⁾と比較し、条件を満足するよう求めた。

なお、CO₂濃度は屋外0.05%、屋内0.10%とし、鉄筋の腐

食確率は設計耐用年数の期間内は、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%に設定した。

【屋外の場合】

$$D_d = \bar{C}_t - X = A \times \sqrt{T} - u(P) \times \sqrt{\bar{C}_t^2 \cdot v^2 + \sigma^2} \quad (2)$$

【屋内の場合】

$$D_d = \bar{C}_t - X - 20 = A \times \sqrt{T} - u(P) \times \sqrt{\bar{C}_t^2 \cdot v^2 + \sigma^2} - 20 \quad (3)$$

ここに、

- D_d : 設計かぶり厚さ(mm)
- \bar{C}_t : 中性化深さ(mm)
- A : 中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{year}}$)
- T : 目標耐用年数
- P : 鉄筋の腐食確率(20%)
- v : コンクリートの中性化深さの変動係数(10%)
- σ : かぶり厚さの標準偏差(10mm)

ただし、 $u(P) = -\left(z - \frac{2.30753 + 0.27061z}{1 + 0.99229z + 0.04481z^2}\right)$

$$z = \sqrt{-2 \log P}$$

屋内の式(3)の最終項の-20mmは、「コンクリートの鉄筋は中性化領域が鉄筋かぶる厚さを20mm通りこした時点で有害な腐食状態になる」、屋外の式(2)は「中性化領域が鉄筋表面に到達すると同時に有害な腐食状態となる」と仮定して求めた。

表-4 耐久設計基準強度の検討条件

項目	条件
種類	A種クラス、B種クラス、C種クラス
部分	土または水に接しない、土または水に接する
部位	柱、梁、耐力壁、床・屋根スラブ、非耐力壁、基礎、擁壁
環境	屋内、屋外
設計かぶり厚さ	30、40、50、70mm
計画供用期間	30、65、100年

表-5 所要の促進中性化速度係数と耐久設計基準強度の関係の検討結果の一例

種類	部位	環境	腐食確率(%)	設計かぶり厚さ(mm)	計画供用期間(年)	所要の中性化速度係数(cm/ $\sqrt{\text{年}}$)	所要の促進中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{週}}$)	所要の水結合材比(%)	耐久設計基準強度(N/mm ²)	呼び強度	呼び強度に対応する水結合材比の範囲	
											最大値	最小値
											(%)	
A種クラス	土または水に接しない 床・屋根スラブ、非耐力壁 柱、梁、耐力壁	屋内 屋外 屋内 屋外	20	30	100	0.409	4.011	58.2	30	33	48.3	44.5
				40		0.312	4.327	59.8				
				40		0.506	4.962	63.1				
				50		0.409	5.672	66.7				
B種クラス	土または水に接しない 床・屋根スラブ、非耐力壁 柱、梁、耐力壁	屋内 屋外 屋内 屋外	20	30	100	0.409	4.011	49.7	30	33	48.3	44.5
				40		0.312	4.327	51.4				
				40		0.506	4.962	54.9				
				50		0.409	5.672	58.7				
C種クラス	土または水に接しない 床・屋根スラブ、非耐力壁 柱、梁、耐力壁	屋内 屋外 屋内 屋外	20	30	100	0.409	4.011	44.3	33	36	45.2	41.4
				40		0.312	4.327	47.0				
				40		0.506	4.962	52.3				
				50		0.409	5.672	58.2				

検討結果の一例を表-5に、本検討で設定した耐久設計基準強度を表-6に示す。

本検討では、全体的に所要の水結合材比に対して、生コン工場の呼び強度に対応する水結合材比の最大値が下回るように耐久設計基準強度を設定した。ただし、C種クラスにおいて、屋内の床・屋根スラブ・非耐力壁で計画供用期間100年の場合、所要の水結合材に対して、生コン工場の呼び強度に対応する水結合材比の最大値が僅かに上回ったが、屋内側では水分供給がなく、鉄筋腐食が想定されないか、発生しても浮きさびにとどまり、耐久性上大きな問題はないと考えられる。

表-6 BF使用率と耐久設計基準強度の関係

参照指針等	計画供用期間の級	耐久設計基準強度(N/mm ²)		
		A種クラス (10以上30以下)	B種クラス (30超え60以下)	C種クラス (60超え70以下)
本検討	短期	18	18	24
	標準	24	24	27
	長期	30	30	33
JASS 5	短期	18	18	—
	標準	24	24	—
	長期	30	—	—
高炉指針	短期	18	18	24
	標準	24	24	27
	長期	30	30	33

(*スラグ使用率は質量%)

7. 環境配慮型コンクリートの二酸化炭素削減効果

実験結果に基づく調合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表-7に示す。A種クラスの水結合材比はNの呼び強度33の水セメント比と同一、B種クラスはBBの呼び強度33と同一、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種クラス使用率60%では51%、C種クラス同70%では63%となった。

8. まとめ

その4では実機試験練りの硬化コンクリートの性状および中性化を考慮した強度設計について検討した。その結果、下記の知見を得られた。

- ①構造体コンクリート強度の推定には普通ポルトランドセメントと同様に、簡易断熱養生供試体を用いることが可能である。
- ②模擬柱部材から採取したコア強度は端部と中央部に差がない。
- ③結合材水比と圧縮強度の関係は、いずれのBF使用率、

表-7 二酸化炭素排出量の削減効果の試算
(同一呼び強度での比較)

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	
単体量 (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	

■試算条件

- ・コンクリートの呼び強度を33と設定し、生コン工場が保有するJISの強度算定式を準用した
- ・前報その3の図-1に示すX工場の調合条件より算出した
- ・インベントリデータは、Nを772kg-CO₂/t、BFを35.6kg-CO₂/tとした¹²⁾

生コン工場においても採用した強度算定式と同等の傾きであった。

- ④水結合材比の算定は、A種クラスでは、生コン工場が保有する普通ポルトランドセメントの強度算定式を、BおよびC種クラスでは高炉セメントB種の強度算定式をベースに算定することが可能で、C種クラスにおいて、試し練り試験の結果より、生コン工場の高炉セメントB種の強度算定式より強度が小さい場合には、強度算定式を3N/mm²または6N/mm²と必要な範囲で切片をマイナス側に平行移動することで適切な強度設計ができる。
- ⑤圧縮強度の標準偏差は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同様に設定できる。
- ⑥構造体強度補正值_{28S₉₁}は、建設省告示1102号およびJASS5に示される普通ポルトランドセメントまたは高炉セメントB種の標準値である標準期3N/mm²、冬期および夏期6N/mm²と同等である。
- ⑦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、型枠の脱型時期、水結合材比に関わらず√t則が成り立つことが確認された。
- ⑧C種クラスにおいても、耐久設計基準強度を適切に定めることでA種クラスと同等の中性化抵抗性は確保できる。
- ⑨水結合材比、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がみられ、脱型時期を材齢3日目以降とすれば、中性化速度係数への影響が小さい。
- ⑩型枠の脱型を10N/mm²以上で行った場合のコンクリートの中性化速度係数は、材齢7日で脱型した場合に比べ10%程度増加にとどまる。計画供用期間の級に応じ、耐久設計基準強度が設定されるため、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ほぼ満足する。

- ⑩実施した促進中性化試験の結果と既往文献の報告から、BF 使用率と計画供用期間の級に応じた耐久設計基準強度を導いた(表-6 本検討)。計画供用期間 100 年の場合の耐久設計基準強度は、A および B 種クラスで 30 N/mm²、C 種クラスで 33N/mm² となる。

【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、浅沼組、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。関係各位に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 小林利充ほか：環境配慮型コンクリートの適用拡大、大林組技術研究所報 No. 82、pp. 1-8、2018
- 2) 菌井孫文：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 2)、錢高組技報 No. 44、pp. 27-42、2019. 11
- 3) 和泉意登志：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
- 4) 松下哲郎：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、1714-1715、2014
- 5) 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能(その 7)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 49-50、2016. 8
- 6) 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、pp. 61-62、2017. 8
- 7) 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、pp. 185-188、2011. 8
- 8) 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) S03 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、pp. 205-210、2011. 8
- 9) 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、pp. 63-68、2017. 8
- 10) 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、pp. 79-84、2016. 8
- 11) 日本建築学会：コンクリートの調合設計指針・同解説、pp. 288-297、2015. 2
- 12) 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. 158-168、2017