

# 各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いた環境配慮型コンクリートの調合設計および耐久性に関する検討

野中 英\*

本研究は、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 15~70%の範囲で使用した環境配慮型コンクリートについて以下の項目について検討を行った。(1)フレッシュコンクリートおよび圧縮強度の制御における生コン工場の強度算定式を用いた一般的な調合設計手法の適用性、(2)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 種の標準値との比較、(3)高炉スラグ微粉末を多量に使用することによる中性化抵抗性への影響および型枠存置期間、湿潤養生の打切り時期の検討、(4)同一呼び強度の普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートとの CO<sub>2</sub>の排出量の比較を行った。

キーワード：高炉スラグ微粉末、調合設計、施工、環境配慮

## 1. はじめに

低炭素型社会の実現に向け、COP21 のパリ協定において我が国では温室効果ガスの排出量を 2030 年までに 2013 年比で 26%削減することを掲げ<sup>1)</sup>、2021 年にはその目標値を 46%まで引き上げた<sup>2)</sup>。

経済産業省では、非エネルギー起源の CO<sub>2</sub>の削減のため、混合セメントの利用拡大の方策を示し、2013 年度の混合セメント利用率 22.1%から 2030 年度には 25.7%とすることを目標としている<sup>3)</sup>。コンクリート製造における CO<sub>2</sub>排出量を削減する手法のひとつとして、産業副産物を使用した混合セメントを用いる方法が現在最も一般的であり、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 種に分類されている。

高炉セメントでは、構成材料における CO<sub>2</sub>の排出量の原単位<sup>4)</sup>がポルトランドセメントの 772kg-CO<sub>2</sub>/t に対して混合される高炉スラグ微粉末が 35.6kg-CO<sub>2</sub>/t であることから、高炉スラグ微粉末の分量が多くなるほど、CO<sub>2</sub>排出の削減量も大きくなる。

日本建築学会では、建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事<sup>5)</sup> (以下、JASS5) において、それぞれの高炉セメントの特性が示されており、A 種は普通ポルトランドセメントと同様な性質を持つことから上部構造物への適用を、B 種や C 種では杭や地下構造物への適用を提案しているものの、高炉スラグの分量が 40~45%以外の B 種や A 種、C 種の製造、流通は少なく汎用的とは言い難い。

一方で、近年ではゼネコンが主導となり、独自に高炉セメント C 種やそれ以上の分量で高含有した環境配慮型コンクリートの開発・実用を行っている<sup>6),7)</sup>。これらはいず

れも、高炉スラグ微粉末などの混和材料を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、レディーミクストコンクリート工場 (以下、生コン工場) において発注者や設計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面もある。

そこで Table 1 に示すゼネコン 13 社で組織された、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」では各種高炉セメントの使い分けでなく、高炉スラグ微粉末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、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実験・検討を行ってきた<sup>8),9)</sup>。

本研究では、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 15~70%の範囲で使用した環境配慮型コンクリートについて以下の項目の検討を行った。

### (1) コンクリートの調合設計手法

フレッシュコンクリートおよび圧縮強度の制御における生コン工場の強度算定式を用いた一般的な調合設計手法の適用性。

### (2) 構造体強度補正值<sub>28S<sub>91</sub></sub>

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 種の標準値との比較。

### (3) 構造体コンクリートの耐久性および養生

高炉スラグ微粉末を多量に使用することによる中性化抵抗性への影響および型枠存置期間、湿潤養生の打切り

Table 1 共同研究への参加会社

青木あすなろ建設	浅沼組	安藤ハザマ
○奥村組	熊谷組	鴻池組
○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	(五十音順, ◎: 主査, ○: 幹事)	

\* 技術本部 技術研究所 基盤技術研究室

時期の検討。

(4) CO<sub>2</sub>の排出量の削減効果

同一呼び強度の普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートとのCO<sub>2</sub>の排出量の比較。

本報は、これまで研究会で行った実験の結果から、環境配慮型コンクリートの上記の検討結果についてまとめたものである。

## 2. 実機実験の概要

### 2.1 実機実験の組合せ

Table 2に実機実験の組合せを示す。セメントの代替に混和材として使用する高炉スラグ微粉末（以下、BF）は、使用率を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。ここでは、BF使用率に応じて、BF使用率10%以上30%以下を「A種クラス」、30%を超え60%以下を「B種クラス」、60%を超え70%以下を「C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 R 5211で高炉セメントの種類および高炉スラグ微粉末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

Table 2 実験の組合せ

項目	工場：X	工場：Y	工場：Z
BF 銘柄	c	b	a
混和剤メーカー	イ	ロ	ハ
打込み時期	標準期：S	BF15, BF30 BF60, BF70	BF15
	夏期：H	BF15	BF30, 60
	冬期：W	BF15	BF70
呼び強度	21, 33, 42		

Table 3 使用したBFの物性値

銘柄	種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	強熱減量 (%)
a	高炉スラグ微粉末 4000 (せっこう添加タイプ)	2.89	4370	0.32
b		2.86	4290	1.24
c		2.89	4390	0.63

Table 4 調合の例 (X工場 標準期 呼び強度 33)

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						Ad ((C+BF) × wt.%)
			W	C	BF	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	G	
BF15	50.8	46.0	170	285	50	328	490	989	0.875
BF30	50.8	45.9	170	235	100	326	487	989	1.05
BF60	46.8	48.7	181	155	232	330	493	894	1.10
BF70	45.7	47.8	170	111	260	336	503	918	0.975

記号：W/B（水結合材比），s/a（細骨材率），W（水），C（セメント），BF（高炉スラグ微粉末），S（細骨材），G（粗骨材），Ad（化学混和材）

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<sup>4)</sup>」（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、本研究におけるBF使用率と呼び名の関係はこれとは一致しない。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、対象とした生コン工場は、東京都内の臨海部に位置する3工場（X、Y、Z）とした。なお、普通ポルトランドセメントのみを使用した場合には水セメント比、普通ポルトランドセメントに高炉微粉末を添加した場合には水結合材比として示している。

### 2.2 使用材料および調査

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で、セメントは普通ポルトランドセメント（N）とした。BFと化学混和剤の組合せは各工場で異なり、BFの3銘柄はJIS A 6206（コンクリート用高炉スラグ微粉末）に適合するせっこう添加タイプで、一連の実機実験を通してロットが異なるものがある

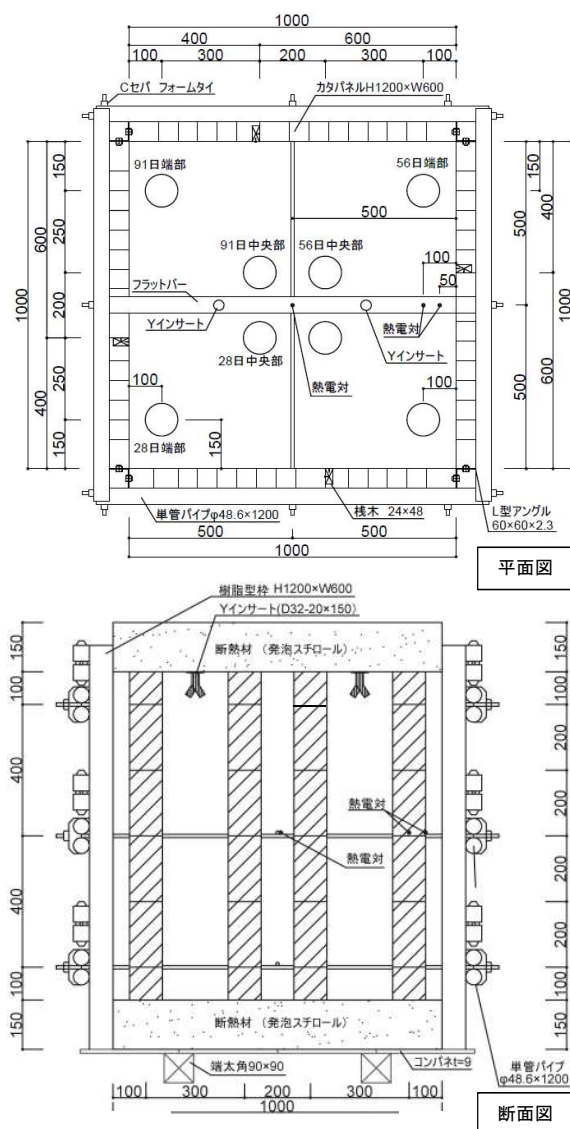


Fig.1 模擬試験体の概要

が、いずれも各銘柄の成績書では大きな品質の違いはなかった。Table 3 に使用したBFの物性値を示す。化学混和剤は原則として、呼び強度 21 は AE 減水剤を、呼び強度 33 および 42 は高性能 AE 減水剤とし、BF 使用率が 60、70%ではBF 高含有コンクリート用の高性能 AE 減水剤とした。

コンクリートの水結合材比は、事前に各工場で試し練りを実施し得られた圧縮強度と、JIS A 5308 の認証を受けるコンクリートの強度算定式との関係を確認しBF 使用率 15%および 30%は N の強度算定式、60%は高炉セメント B 種 (BB) の強度算定式、70%は BB の強度算定式から 3 または 6N/mm<sup>2</sup> 切片を負側に平行移動した式を用いて、呼び強度 21、33 および 42 となる 3 水準とした。Table 4 に製造したコンクリートの調合例を示す。

### 3. 試験項目および方法

#### 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、スランブ (JIS A 1101)、空気量 (JIS A 1128)、コンクリート温度 (JIS A 1156) とし、経時 0、30、60、90 分および 120 分後に実施した。なお、各試験時間まではアジテータ車のドラムを低速回転とした。

スランブおよび空気量は実際の荷下し時を想定し、経時 60 分で管理値を満足することを目標とし、スランブの管理値は BF 使用率によらず呼び強度 21、33 では 18 ± 2.5cm、呼び強度 42 では 21 ± 2.0cm、空気量の管理値はいずれも 4.5 ± 1.5%とした。コンクリート温度は標準期で 19 ~ 28℃、夏期で 27 ~ 34℃、冬期で 10 ~ 15℃であった。

#### 3.2 圧縮強度試験

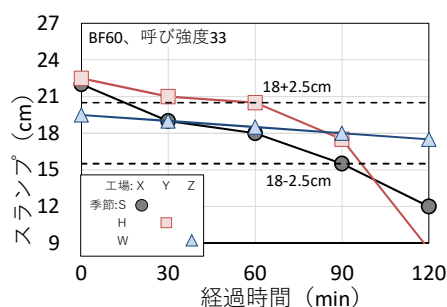
圧縮強度試験は管理用供試体 (JIS A 1108) およびコア供試体 (JIS A 1107) により行った。圧縮強度試験に用いる供試体の寸法は φ100mm × 200mm とし、管理用供試体は、標準養生 (材齢 28 日) および現場封かん養生 (材齢 1、3、5、7、28 日) とし、コア供試体は Fig. 1 に示す模擬試験体より採取したコア (材齢 28、56、91 日) とした。

現場封かん養生は模擬試験体と同様の場所に静置し、材齢 5 日までの試験材齢は BF 使用率や打込み時期により材齢 1 日と 3 日または 3 日と 5 日とした。また、各供試体および模擬試験体は、経時 60 分で採取および打込みを行った。

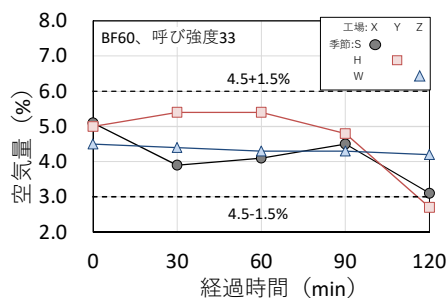
模擬試験体は、Fig. 1 に示すように寸法 1000mm × 1000mm × 1000mm (柱を模擬しているため、試験体の上下に断熱材を施した) とし、コアは材齢 28 日、56 日および 91 日において模擬試験体の端部および中心部から採取し、縦方向におよそ 200mm 間隔で切断した。コア強度は、端部および中心部で各 4 本の計 8 本の平均値を用いた。

#### 3.3 促進中性化試験

促進中性化試験は、X 工場の標準期における BF15、BF30 および BF70 の各呼び強度を対象に実施し、供試体は 100mm × 100mm × 400mm の角柱供試体とした。供試体は打込み後に湿潤養生を行い、BF15 および BF30 は材齢 1、3、7 日、BF70 は材齢 3、5、7 日に脱型し、その後 20℃、60%RH の恒温恒湿室で静置し、JIS A 1153 の促進条件で試験を開始した。なお、供試体は恒温恒湿室での静置中の試験面とする側面以外の面をアルミテープで封かん処理とした。JIS A 1153 の促進条件で試験を開始した。中性化深さの測定は、促進試験開始前と、1 週、4 週、8 週、13 週および 26 週に JIS A 1152 により実施した。測定値は 1 側面 5 箇所のうち、両端を除く 3 点の値とし、2 側面の合計 6 箇所の平均値を中性化深さとした。



a) スランブ



b) 空気量

Table 5 経時 60 分でのフレッシュ性状 (呼び強度 33)

工場	BF15		BF30		BF60		BF70	
	スランブ (cm)	空気量 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)
X	18.0 (S)	5.5 (S)						
	17.5 (H)	4.5 (H)	18.0 (S)	4.5 (S)	18.0 (S)	4.1 (S)	21.5 (S)	3.7 (S)
	20.0 (W)	4.4 (W)						
Y	18.5 (S)	5.5 (S)	20.5 (H)	5.9 (H)	20.5 (H)	5.4 (H)	20.5 (W)	4.8 (W)
Z	17.5 (S)	4.3 (S)	20.5 (W)	4.5 (W)	18.5 (W)	4.3 (W)	20.0 (H)	4.5 (H)

※数字後ろ () 内の記号は打込み時期を示す。

Fig. 2 フレッシュ性状の経時変化の例 (BF60, 呼び強度 33)

## 4. 試験結果および考察

### 4. 1 コンクリートの調合設計手法

#### (1) フレッシュコンクリートの性状

呼び強度 33 について、Table 5 に経時 60 分でのフレッシュ性状を、Fig. 2 にフレッシュコンクリートの性状の経時変化の例 (BF60, 呼び強度 33) を示す。

スランプは、時間の経過とともに低下する傾向であり、特に、夏期では 60 分以降で管理値を外れるものも見られており、90 分から 120 分での低下が大きかった。空気量は BF 使用率に関わらず経時 60 分で管理値を満足したが、BF60 では夏期の経時 60 分以降で空気量が減少し、経時 120 分では管理値から外れる結果となった。

以上の結果より、あらかじめ運搬時間および運搬中のスランプロスを見込むことで、荷卸し時に所要のフレッシュコンクリートの性状を満足できると考えられる。

#### (2) 強度設計

Fig. 3 に呼び強度 33 における標準養生の材齢と圧縮強度の関係を示す。標準養生においては、同一の呼び強度、BF 使用率であっても生コン工場や打込み時期による強度に違いも見られ、材齢 28 日では呼び強度の強度値に近い値を示すものも見られた。各生コン工場の強度算定式と実機実験による標準養生材齢 28 日の圧縮強度試験結果 (以下、標水  $\sigma_{28}$  圧縮強度と略記) の比較を Fig. 4 に示す。実機実験にあたって採用した強度算定式は前述したとおり、BF15 および BF30 は生コン工場が運用する N の式を、BF60 および BF70 は 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。結合材水比と圧縮強度の関係を見ると、いずれの BF 使用率、

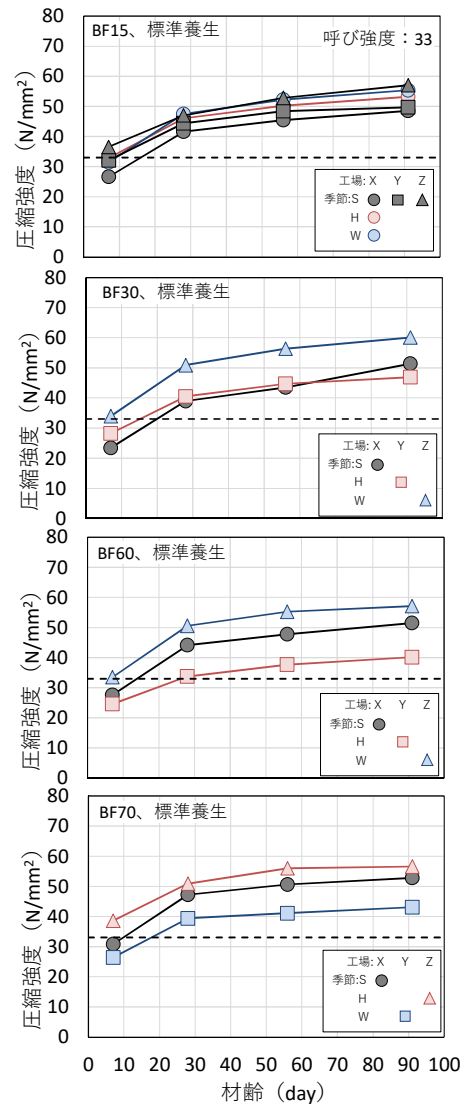


Fig. 3 材齢と圧縮強度の関係 (呼び強度 33)

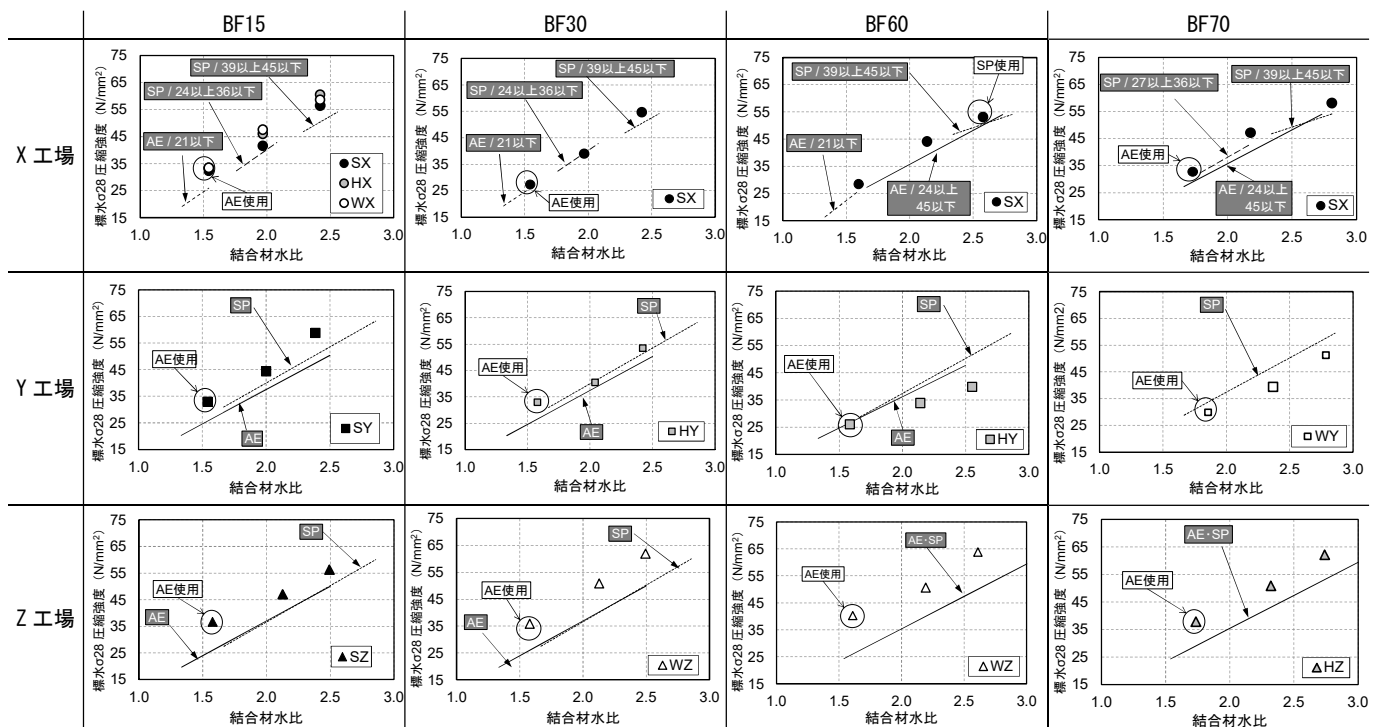


Fig. 4 標準養生材齢 28 日の圧縮強度試験結果の比較 (記号: S 標準期, H 夏期, W 冬期, X, Y, Z は工場名)



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た。

本実験では、原因は定かではないものの、Y工場のBF60, BF70で管理用供試体圧縮強度が強度算定式を下回った。そのため、実物件への適用時にあたっては、採用されるBF使用率を考慮して今回のような手順で実験を実施したうえで、強度算定式の結合材水比に対する傾きが同等である場合は生コン工場の強度算定式を3または6N/mm<sup>2</sup>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) 圧縮強度の標準偏差

X工場のBF15の実験実験における3シーズンの実験から得られた、標本σ<sub>28</sub>圧縮強度の標準偏差をFig.5に示す。本実験における圧縮強度の標準偏差は、いずれの水結合材比においても図中に併記したX工場のNの実績に基

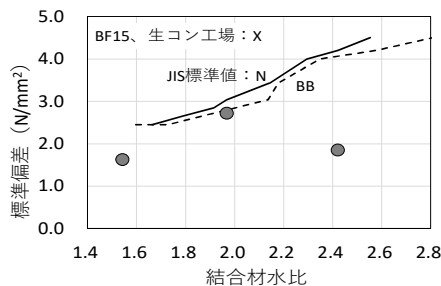


Fig. 5 圧縮強度の標準偏差と標準値 (X工場)

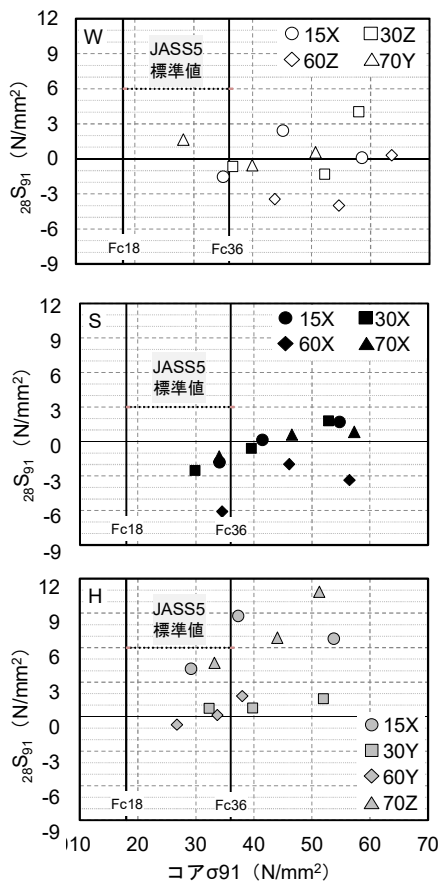


Fig. 6 材齢91日コア強度と構造体強度補正值 28S91の関係

づく標準偏差の標準値を下回っており、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と判断できる。B種クラスやC種クラスにおいては、本実験の範囲からは十分な検討はできないものの、強度設計にあたりNとBBで同程度の標準偏差を標準値としていることから、調合設計においては強度算定式と同様に、これらの標準偏差を用いることができると考えられる。

4. 2 構造体強度補正值 28S91

構造体強度補正值 28S91の標準値について、高炉セメントB種では、建設省告示1102号およびJASS5でそれぞれ3または6N/mm<sup>2</sup>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種相当に該当する結合材種類に応じて28S91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ものと考えられる。

実験結果から得られた材齢91日のコア強度と28S91の関係をFig.6に示す。なお、図中の「JASS5標準値」は5節で示されるNおよびBBの値を示す。一般的に知られるように<sup>10)</sup>、実強度であるコアの圧縮強度が高くなるほど28S91が大きくなる傾向が確認できる。打込み時期の影響としては、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、普通強度となる設計基準強度18~36N/mm<sup>2</sup>の範囲ではおおむね3または6N/mm<sup>2</sup>を満足していた。

4. 3 (1) 中性化抵抗性

促進期間と中性化深さの関係について、例として型枠存置期間3日の結果をFig.7に示す。促進期間の平方根

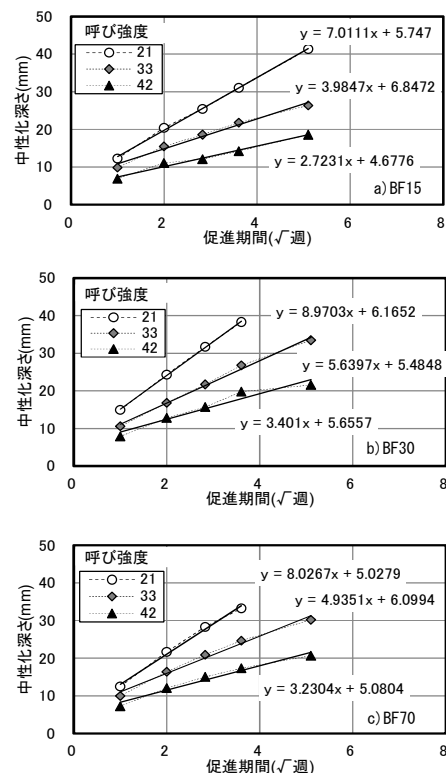


Fig. 7 促進期間と中性化深さの関係 (材齢3日)

と中性化深さは直線的な関係であり、BF 使用率、水結合材比によらず $\sqrt{t}$  則が成り立つことが確認された。また、この関係は他の型枠存置期間においても同様であった。本実験では、呼び強度を水準としており、BF70 はBF15 および BF30 に比べ水結合材比が小さい。そのため、同一呼び強度ではBF 使用率によらず同程度の中性化抵抗性であった。

脱型時期と型枠存置期間 7 日に対する中性化速度係数の比率を Fig. 8 に示す。一部例外があるものの、脱型時期を 3 日間以上とした場合の中性化速度係数は、脱型 7 日とした場合とほぼ同等であることから、脱型時期を 3 日間以上とすれば中性化速度係数への影響が小さいと考えられる。

(2) 積算温度と強度発現性

コンクリートの強度発現性と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。

Fig. 9 に呼び強度に対する圧縮強度比と積算温度の関係を示す。図中の積算温度は期間中の外気温から求め、圧縮強度は材齢 28 日までの現場封かん養生とした。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た。この関係を用いて、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  $5N/mm^2$  では Fig. 10 となる。本検討では BF 使用率によらずいずれも同様な日数で所定強度が発現される試算となったが、BF70 の冬期における強度発現性は Fig. 9 に示した近似式よりも低くなる傾向が認められるため、実際の適用にあたっては留意す

る必要がある。

本研究における室内実験の結果として材齢初期の圧縮強度は、同一水結合材比の場合 BF 使用率の増加に伴い小さくなる<sup>8)</sup>。しかし、本検討のように BF 使用率の高い調合においてはコンクリートの水結合材比を小さくし同一の呼び強度とすることで、型枠存置期間や湿潤養生の打

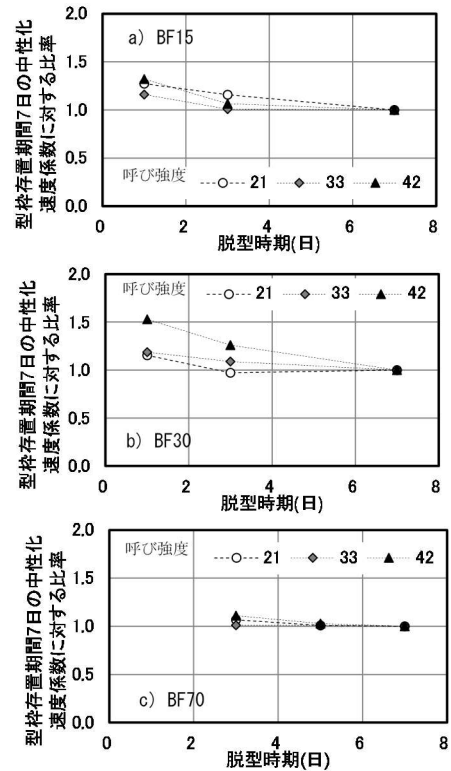


Fig. 8 脱型時期と型枠存置期間 7 日の中性化速度係数に対する比率

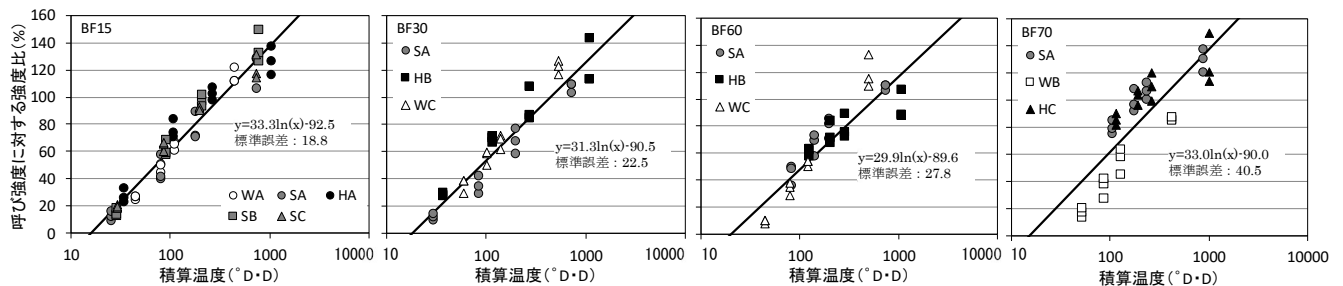


Fig. 9 呼び強度に対する強度比と積算温度の関係

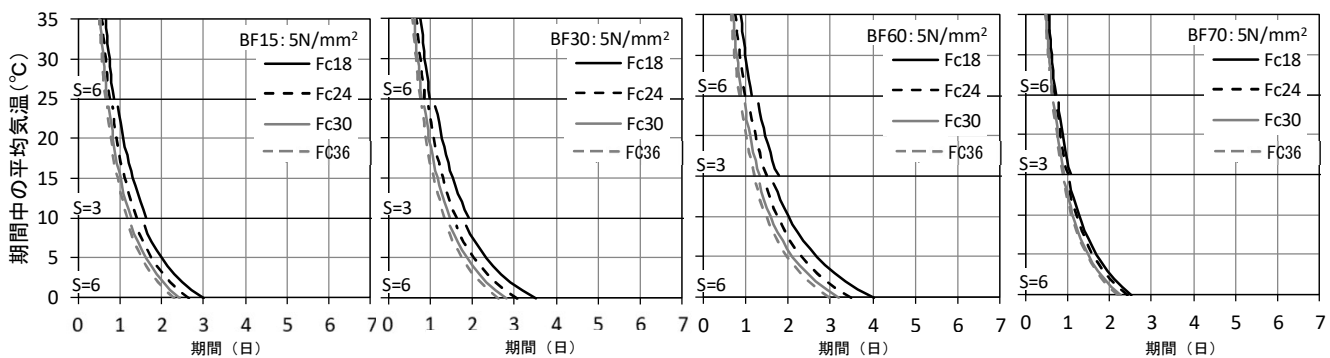


Fig. 10 柱・壁などのせき板の存置期間と期間中の平均気温

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。

(3) 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するとし、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、JASS5 においては湿潤養生の日数について、高炉セメントでは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より、湿潤養生の打ち切り（脱型）時期と中性化との関係から検討を行った。

Fig. 11 に脱型時強度と材齢 7 日を基準とした中性化速度比の関係を示す。材齢 7 日を基準とした中性化速度比は脱型時強度が 10N/mm<sup>2</sup> 以上では概ね 1.1 以下の値であった。また、Fig. 11 中には JASS5 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<sup>11),12)</sup>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、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/mm<sup>2</sup> 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、構造体コンクリートの耐久性能は、耐久設計基準強度で確保するものとした場合、湿潤養生の打ち切り時の圧縮強度が 10N/mm<sup>2</sup> 以上であれば満足するものと考えられる。

4. 4 環境配慮性

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 CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果を Table 6 に、BF 使用率と N のコンクリート調合に対する CO<sub>2</sub> の削減率の関係を Fig. 12 に示す。なお、計算は呼び強度 33 で X 工場の強度算定式を使用し、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、B 種クラスは BB の呼び強度 33、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。CO<sub>2</sub> 排出量の削減率は、N の調合に対して、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、CO<sub>2</sub> 排出量の削減率は強度レベルによらず、おおむね同様な値となる。

Table 6 CO<sub>2</sub> 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	70
水結合材比(%)	50.8	50.8	46.8	45.7
単位量 (kg/m <sup>3</sup> )	N	335	235	155
	BF	0	34	100
CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	258.6	234.4	185.0	127.9
CO <sub>2</sub> 削減率(%)	0	9	28	51

※インベントリデータは、普通ポルトランドセメント：772kg-CO<sub>2</sub>/t、高炉スラグ微粉末 35.6kg-CO<sub>2</sub>/t (高炉指針<sup>9)</sup>より引用)を用いて算出。水、骨材、化学混和剤の CO<sub>2</sub> 排出量は含んでいない。

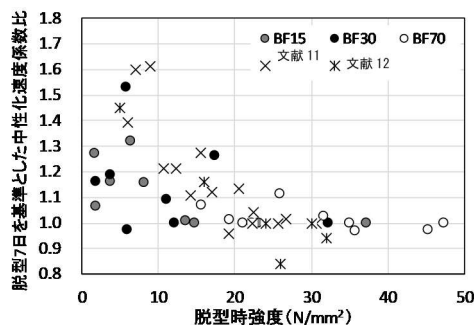


Fig. 11 促進期間と中性化深さの関係 (材齢 3 日)

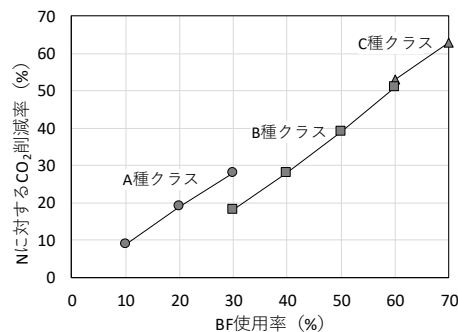


Fig. 12 BF 使用率と N に対する CO<sub>2</sub> の削減率の関係

5. まとめ

普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 15~70%の範囲で使用した環境配慮型コンクリートについて、本実験で得られた知見を以下に示す。

- 1) JIS A 5308 および JASS5 と同様な調合設計手法により、フレッシュコンクリートの性状および圧縮強度は目標管理値を満足する。
- 2) 積算温度により現場封かん養生の圧縮強度はおおむね推定が可能であるが、BF70 の冬期の圧縮強度は本実験で得られた予測式より下回る傾向があるため留意が必要である。
- 3) 構造体強度補正值  $_{28}S_{91}$  は、本実験の範囲では建設省告示 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 種の標準値と同等である。
- 4) 本実験の範囲では、期間中の平均気温と圧縮強度の発現性の関係から設定した湿潤養生により、所定の強度および中性化に対する耐久性を確保できる。
- 5) 普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに比べ、同一強度における CO<sub>2</sub> の排出量は 9~63%削減できる。

謝辞

本報告が建設材料分野における CO<sub>2</sub> 排出量の削減につながるものであり、高炉スラグ微粉末を用いた環境配慮型コンクリートの実現場への適用への一助として、さらなる普及に役立てば幸いである。

本研究の実施にあたり、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、

鐵鋼スラグ協会、フローリック、ポゾリスソリューションズ、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) 外務省：日本の約束草案，2015.7
- 2) 環境省：パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略，2021.10
- 3) 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
- 4) 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，2017
- 5) 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
- 6) 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 A-1，pp.185-188，2011.8
- 7) 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性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.485-490，2010
- 8) 金子ほか：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），材料施工，pp.535～pp.550，2019.9
- 9) 高橋ほか：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），材料施工，pp.467-486，2020.9
- 10) 日本建築学会：高強度コンクリート施工指針・同解説，2013
- 11) 和泉ほか：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，pp.35-45，1993.7
- 12) 松下哲郎，辻大二郎，井上和政，関田徹志：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，Vol.36，No.1，pp.1714-1719，2014

---

## Study on Mix Design and Durability for Concrete Using Granulated Blast-Furnace Slag in Various Usage Rates as the Mineral Admixtures

Akira NONAKA

### Abstract

This study examines the following aspects of environmentally-friendly concrete made with ordinary Portland cement and granulated blast furnace slag added in proportions ranging from 15% to 70%: (1) the applicability of the general mix design method based on strength calculations used in ready-mixed concrete plants to control fresh concrete and compressive strength; (2) comparisons to standard values for ordinary Portland cement or Type B blast furnace slag cement, as specified in Notification 1102 of the Ministry of Construction and JASS5; (3) the effects of using large amounts of granulated blast furnace slag on neutralization resistance and consideration of times until formwork is removed and moist curing is terminated; and (4) comparisons of CO<sub>2</sub> emissions to those for concrete made with ordinary Portland cement of the same nominal strength.

Key words: Granulated blast furnace slag, Mix design, Construction, Consideration Environmental

---