

## 2. 高炉スラグ微粉末を各種割合で混和材として使用したコンクリートの実機実験 Actual Experiment of Concrete Using Granulated Blast Furnace Slag as the Mineral Admixture in Various Ratios

村井克綺\* 加藤義明\*\* 林晴佳\*

### —概要—

建設業界において、エネルギーの消費量や二酸化炭素の排出量は大きく、建築物を施工することで発生する二酸化炭素の排出量は、国内全体の約 10%に及ぶと試算される。構造材料としてもっとも使用量が多いコンクリート分野において、二酸化炭素排出量の削減は重要課題であるとともに SDGs の達成につながると考えられる。建築分野での混合セメントは二酸化炭素排出量の削減効果があるため、利用を拡大し、杭や地下のみならず、地上構造物など幅広い部位・部材に適用することが理想である。

混合セメントのひとつである高炉セメントでは、高炉スラグの使用率が多くなるほど、二酸化炭素の削減量も大きくなる。しかし、現状において製造される高炉セメントは B 種がほとんどであり、一般に A 種および C 種の市場への流通はない。必要に応じた任意の分量で高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートに関して、製造・出荷しているレディーミクストコンクリート工場は少なく、JIS マーク品としての取り扱いほとんどない。

そこで、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の諸性状を確認するための実験を行った。本報告は、対象とするコンクリートを CELBIC と称し、ゼネコン 13 社で構成する CELBIC 研究会で実施した実験\*であり、実際のレディーミクストコンクリート工場で実施した実機実験(表 1)によるコンクリートの諸性状や製造、施工性について検討した結果である。

### —技術的な特長—

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 10~70%の範囲で混和材料として用いたコンクリートについて、各調合における各種コンクリート性状を実験にて把握し、そこで得られたデータをもとに建築物への汎用的な適用について検討したものである。特長として、高炉スラグ微粉末を混和材料として用いることにより、高炉スラグ微粉末の使用率に応じた、各部位に求められる性能を満たす最適な環境配慮型コンクリートを適用することができる。また、コンクリート材料に由来する二酸化炭素の排出量を約 9~63%削減することができる(図 1)。

表 1 実機実験の要因と組み合わせ

項目	工場：X	工場：Y	工場：Z
BF 種類	c	b	a
混和材メーカー	イ	ロ	ハ
季節区分	標準期：S	BF15 BF30 BF60 BF70	BF15
	夏期：H	BF15	BF30 BF60
	冬期：W	BF15	BF70
呼び強度	21、33、42		

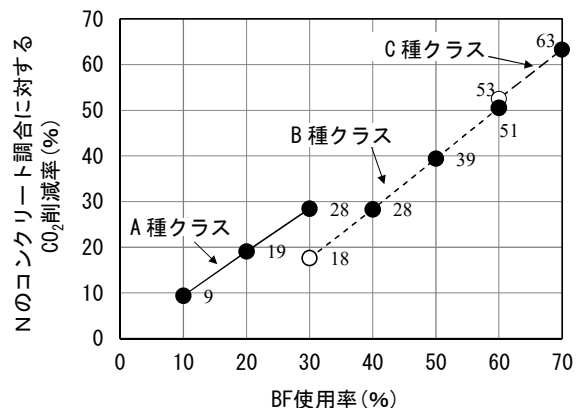


図 1 BF 使用率と N のコンクリート調合に対する二酸化炭素の削減率の関係

\*本研究は、“CELBIC” (セルビック、Consideration for Environmental Load using Blast furnace slag In Concrete)と称し、長谷工コーポレーション、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、矢作建設工業の 13 社による CELBIC 研究会の成果であり、本報の内容は、日本建築学会大会学術講演梗概集 (2020.09.pp.467-486)で発表済である。

\*技術研究所 構造研究部 建築構造研究室 \*\*建設技術本部 建築エンジニアリング部 総合評価グループ

## 高炉スラグ微粉末を各種割合で混和材として使用したコンクリートの実機実験 Actual Experiment of Concrete Using Granulated Blast Furnace Slag as the Mineral Admixture in Various Ratios

○村井 克綺\*                      加藤 義明\*\*                      林 晴佳\*  
Katsuki MURAI                      Yoshiaki KATO                      Haruka HAYASHI

**ABSTRACT** In the construction industry, energy consumption and carbon dioxide emissions are large, and reducing carbon dioxide emissions is an important issue. However, most of the blast furnace cements produced at present are type B, and there is no general distribution to the types A and C markets. There are few ready-mixed concrete factories that manufacture and ship concrete using granulated blast furnace slag.

Therefore, we conducted an actual experiment to confirm various properties, manufacturing, and workability of concrete using granulated blast furnace slag as the mineral admixture at a wide range of usage rates.

**Keywords** : 環境配慮型コンクリート, 高炉スラグ微粉末, 混和材料

*Environment conscious concrete, Granulated blast furnace slag, Mineral admixture*

### 1. はじめに

建設業界においては、エネルギーの消費量や二酸化炭素の排出量が大きく、建築分野に限定しても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% の二酸化炭素の排出量を占めており、構造材料として最も使用量が多いコンクリート分野においては、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。

ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末(以下、BF)で置換したコンクリートは、構成材料における二酸化炭素の排出量の原単位<sup>1)</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 BF が 35.6kg-CO<sub>2</sub>/t であることから、高炉スラグの分量が多くなるほど、二酸化炭素排出の削減量も大きくなる。しかし、セメントや混和材料の種類や量などの仕様が異なると、レディーミクストコンクリート工場(以下、生コン工場)においては個別の仕様に合わせ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。したがって、各種の

高炉セメントの使い分けでなく、BF を混和材料として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、生コン工場におけるサイロや流通といった材料管理の負担も軽減することができると考えられる。

そこで、本研究では、BF 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。各種性状を把握する目的として実施した室内実験の結果は、すでに報告している<sup>2)</sup>。本報では、引き続き実施した実機実験の結果およびコンクリートの製造および施工性について、検討した結果を報告する。

なお、本研究は、“CELBIC”(セルビック、Consideration for Environmental Load using Blast furnace slag In Concrete)と称し、ゼネコン 13 社による CELBIC 研究会にて実施したものである。CELBIC 研究会では、建築物におけるコンクリート構造物に求められる所要の品質を確保しつつ、コンクリート材料に由来する二酸化炭素排出量の削減によって、循環型社会の形成と地球環境問題の改善に寄与することを目的に、CELBIC の調合設計・施工マニュアルを整備している。

\*技術研究所 構造研究部 建築構造研究室 \*\*建設技術本部 建築エンジニアリング部 総合評価グループ  
※本報の内容は、日本建築学会大会学術講演会梗概集(2020.09.pp.467-486)にて発表済みである。

## 2. 実機実験の概要

### 2.1. 要因と水準

本報で報告する実機実験は、表1に示す要因と水準とした。セメントに対して混和材として使用する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、本研究では、BF使用率に応じて、例えばBF使用率10%を超え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BFの分量の関わり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<sup>1)</sup>」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。また、実験には3種類のBF(a、b、c)および3メーカーの化学混和剤(イ、ロ、ハ)を使用した。

### 2.2. 実験の組合せ

本実験における実験の組合せを表2に示す。実験は各BF使用率に対して打込み時期を3シーズン実施するように設定し、それぞれの打込み時期を異なる生コン工場で実施した。ただし、BF15については、工場、BF種類および化学混和剤種類の違いによる強度発現を比較する目的で、標準期に全ての生コン工場で実施した。さらに、BFの製造ロットの違いによる強度発現への影響と打込み時期の違いによる構造体強度補正值への影響を確認するために、X工場においては3シーズンで実施した。

### 2.3. 使用材料

本実験における使用材料は、コンクリートに使用したセメント、練混ぜ水、骨材は各生コン工場

で通常使用しているものとし、セメントは普通ポルトランドセメント(以下、N)とした。

BFの品質を表3に示す。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BF4000の規格値を満たしたものを使用し、いずれもせつこう添加タイプを使用した。化学混和剤は、原則として、目標とする呼び強度(以下、目標呼び強度)21ではAE減水剤(高機能タイプ)を採用し、目標呼び強度33及び42ではBF使用率

表1 実機実験の要因と水準

要因	水準
BF使用率	15%、30% (A種クラス)
	60% (B種クラス)
	70% (C種クラス)
打込み時期	夏期(H)、標準期(S)、冬期(W)
生コン工場	記号：X、Y、Z
BF種類	記号：a、b、c
化学混和剤メーカー	記号：イ、ロ、ハ
目標呼び強度	21、33、42

表2 実験の組合せ

BF使用率		BF15	BF30	BF60	BF70	
目標呼び強度		21~41				
適用した強度算定式		N	N	BB	BB-3 or -6	
X工場	BF種類:c 混和剤:イ	標準期(S)	●	●	●	●
		夏期(H)	●	—	—	—
		冬期(W)	●	—	—	—
Y工場	BF種類:b 混和剤:ロ	標準期(S)	○	—	—	—
		夏期(H)	—	●	●	—
		冬期(W)	—	—	—	●
Z工場	BF種類:a 混和剤:ハ	標準期(S)	○	—	—	—
		夏期(H)	—	—	—	●
		冬期(W)	—	●	●	—

凡例 ●：模擬柱試験体を採用 ○：模擬柱試験体なし

表3 BFの品質

品質	JIS A 6206 による 規格値	種類			
		a	b	c	
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.80以上	2.89	2.86	2.89	
比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	3500以上 5000未満	4280~ 4460	4260~ 4330	4310~ 4400	
活性度 指数%	7日	55以上	67~70	74~75	69~77
	28日	75以上	95~98	95~97	95~101
	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	1.96~2.06	2.10~2.14	
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	

15%、30%の場合高性能 AE 減水剤を、BF 使用率が 60%、70%の場合高性能 AE 減水剤(BF 高含有用)を採用した。

## 2.4. コンクリートの調合

各生コン工場の強度算定式と試し練りにおける圧縮強度試験結果を図1に示す。実機実験のコンクリートの調合は、事前に各生コン工場で試し練りを行い、得られた圧縮強度と生コン工場が運用する JIS A 5308 の強度算定式との関係を確認することで決定した。試し練りの結果、水結合材比は、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(以下、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>切片をマイナス側に平行移動した式を用いて、目標呼び強度 21、33 および 42 となる 3 水準とした。

## 2.5. 試験項目

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)、塩化物含有量(JASS5T-502)、単位水量(ZKT-210)、単位容積質量(JIS A 1116)および円筒貫入(AIJ 調合管理指針)とし、経時 0 分、30 分、60 分、90 分および 120 分後に実施した。

硬化コンクリートの試験項目は、圧縮強度試験

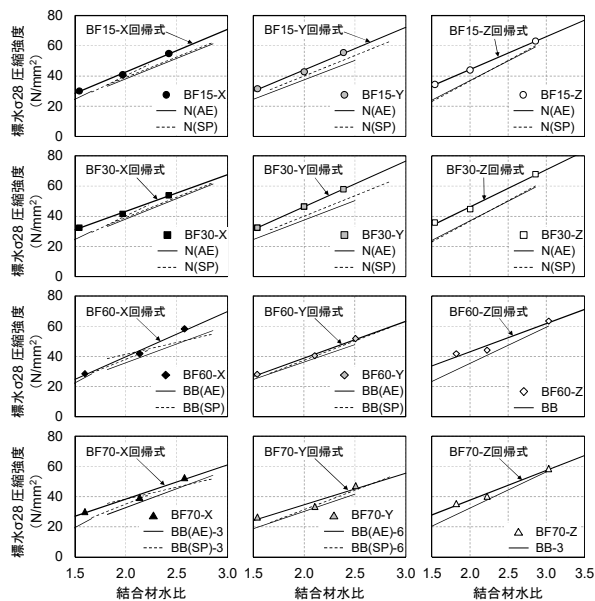


図1 各生コン工場の強度算定式と試し練りにおける圧縮強度試験結果

および促進中性化試験とした。

圧縮強度試験は JIS A 1108 により行った。圧縮強度試験に用いる供試体は、寸法は φ100×200mm とし、標準養生(材齢 7、28、56、91 日)、現場封かん養生(材齢 1、3、5、7、28、91 日)、簡易断熱養生(材齢 7、28、91 日)の供試体および模擬柱試験体より採取したコア供試体(材齢 28、56、91 日)について行った。なお、現場封かん養生における材齢 5 日までの試験材齢は BF 使用率や季節により前後するものもあった。また、これら各種養生における供試体および模擬柱試験体は、経時 60 分で採取し、標準養生のみ経時 0 分および 120 分でも採取した。

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た。供試体は 100×100×400mm とし、供試体数は n=2 とした。コンクリートを詰め終えた後に湿潤養生を行い、その後、BF15 および BF30 は材齢 1 日、3 日および 7 日、BF70 は材齢 3 日、5 日および 7 日に脱型し、20°C の恒温室にて静置し、材齢 56 日で促進試験を開始した。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 週に実施した。

模擬柱試験体は、寸法 1000×1000×1000mm とし、コンクリート温度を高さ 500mm でコンクリート表面から 500mm(中央部)、100mm(端部)および 50mm(表面)の 3 点で測定した。

## 3. 実験結果

### 3.1. フレッシュコンクリート試験

目標呼び強度 33 におけるスランプの経時変化を図2に示す。スランプは呼び強度 21 および 33 で 18±2.5cm、呼び強度 41 で 21±2.0cm を目標値としている。スランプは BF 使用率に関わらず、運搬時間による経時変化を見込むことで荷卸し時を想定した 60 分で目標値を満足した。スランプの経時変化は、練り上がりからの時間の経過とともに低下する傾向であり、特に、夏期(H)では 90 分から 120 分での低下が大きかった。本実験

では荷卸し時を想定した60分で管理値を満足するようなスランプの設定としたため、90分、120分では管理値を満足しないものもあった。なお、スランプの低下が大きかった夏期の120分では、混和剤を後添加することにより管理値を満足することを確認している。

目標呼び強度33におけるスランプフローの経時変化を図3に示す。スランプフローの経時変化もスランプの経時変化と同様な傾向であった。

目標呼び強度33における空気量の経時変化を図4に示す。空気量はBF使用率に関わらず、荷卸し時を想定した60分で目標値を満足した。空気量の経時変化は、BF使用率が15%の場合では少ないが、BF使用率が増加するに従い一部の条件でばらつきが認められた。

流入モルタル値の測定は、スランプフローの材料分離抵抗性<sup>3)</sup>のほかスランプの流動性評価<sup>4)</sup>に利用されているため実施した。目標呼び強度33における流入モルタル値の経時変化を図5に示す。流入モルタル値は、時間が経過するとともに小さくなる傾向となり、その傾向はスランプの低下、スランプフローの低下と同様であった。

単位水量は計画調査に対して $-9.7\sim 8.8\text{kg/m}^3$ 、塩化物含有量は $0.07\text{kg/m}^3$ 以下であった。

### 3.2. 温度履歴

コンクリート温度は模擬柱試験体によって測定を行い、簡易断熱養生供試体による温度はJIS A 5308「レディーミクストコンクリート」附属書E(軽量型枠)に適合する軽量型枠を使用し、熱伝導率 $0.04(\text{W/m}\cdot\text{K})$ 未満の発泡スチロール製の簡

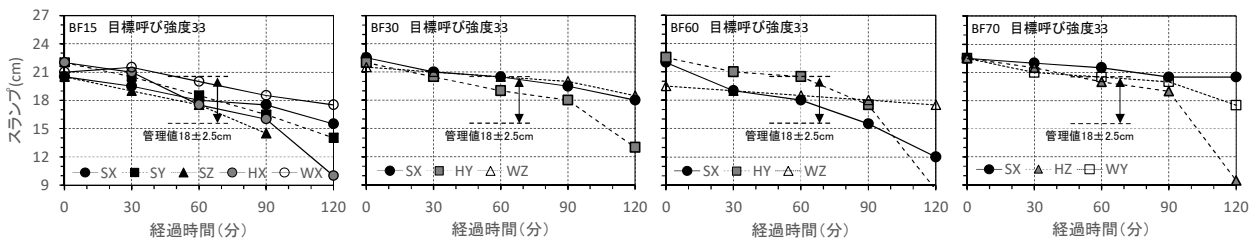


図2 スランプの経時変化

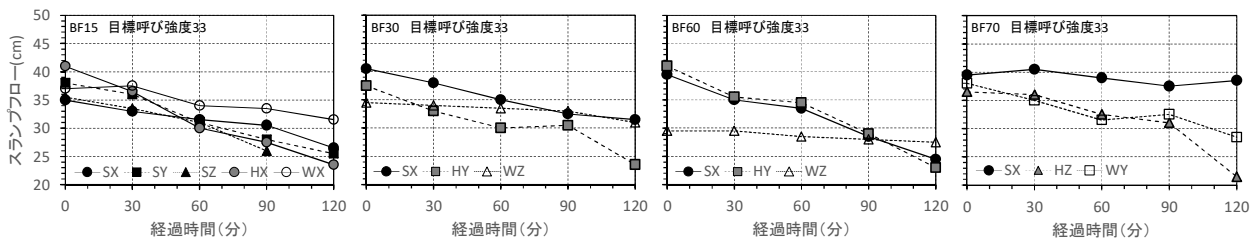


図3 スランプフローの経時変化

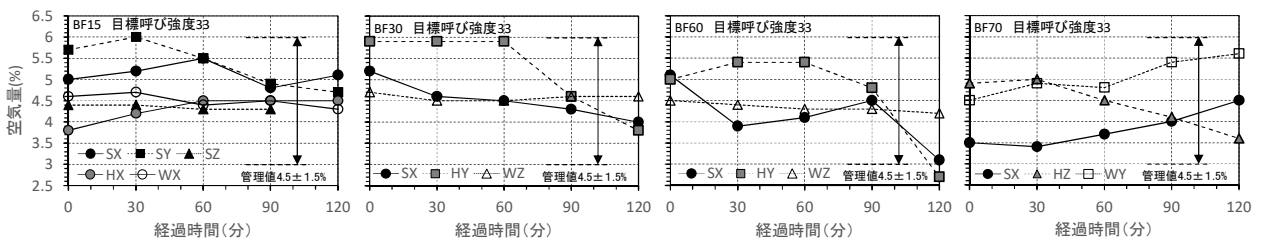


図4 空気量の経時変化

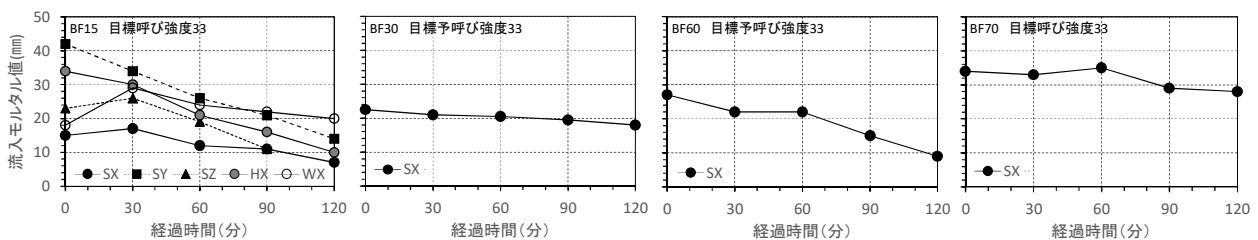


図5 流入モルタル値の経時変化

易断熱養生箱に入れ蓋を閉じ、粘着テープで密閉して材齢7日まで測定した。

各BF使用率における最高温度および温度上昇量を図6に示す。なお、温度上昇量は最高温度から打込み温度を差し引いた値であり、打込み温度は練上りから60分経過した際のコンクリート温度を用いている。BF使用率による最高温度および温度上昇量に大きな差はみられないが、BF70においては目標呼び強度の違いによる最高温度および温度上昇量の差が小さい傾向がみられた。

BF15における打込み時期ごとの最高温度および温度上昇量を図7に示す。最高温度および温度上昇量は、打込み時期が夏期、標準期、冬期の順に大きくなり、その傾向は全ての目標呼び強度で同様に見られた。

単位結合材量と最高温度および温度上昇量の関係を図8に示す。最高温度は単位結合材量と直線的な関係が認められ、その直線の傾きはBF15およびBF30では同程度であった。また、BF60はBF15に対し若干小さい傾きになり、BF70ではさらに小さい傾きとなっている。BF30およびBF70においてBF15に対し高い最高温度を示し

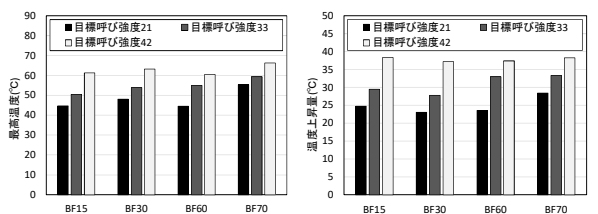


図6 各BF使用率における最高温度および温度上昇量(標準期)

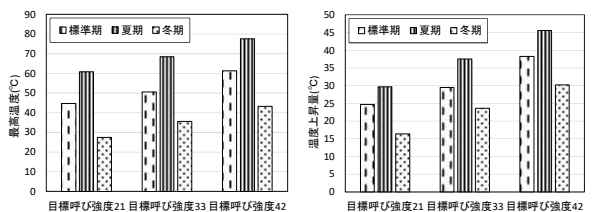


図7 打込み時期ごとの最高温度および温度上昇量(BF15)

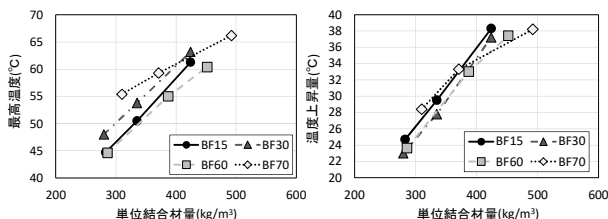


図8 単位結合材量と最高温度および温度上昇量の関係(標準期)

ているのは、BF30 および BF70 の打込み温度が高かったためと考えられる。

温度上昇量は、BF15 に対し BF30 および BF60 で小さい値を示し、BF70 では一部大きい値を示しているものの、単位結合材量が大きい場合でも温度上昇量が BF15 と同程度であることから、BF使用率の増加にともない単位結合材量に対する温度上昇量が小さくなることが考えられる。また、C種クラス、特にBF70では単位結合材量に対する最高温度および温度上昇量の傾きが小さいことから、温度抑制効果が期待される。

一部調査の模擬柱試験体および簡易断熱養生供試体の温度測定履歴を図9に、模擬柱試験体と簡易断熱養生供試体の最高温度および温度上昇量の比較を図10に示す。なお、模擬柱試験体の温度上昇量は測定箇所中央部の値を示す。

模擬柱試験体中央部では最高温度が低い範囲において模擬柱試験体と簡易断熱養生の最高温度は同程度の値を示したが、最高温度が高い範囲においては模擬柱試験体の最高温度が高くなる傾向がある。一方、端部においては模擬柱試験体と簡易断熱養生供試体の温度は同程度であり、表面においては簡易断熱養生供試体の温度が高くなる傾向がある。温度上昇量は簡易断熱養生供試体に比べ模擬柱試験体の方が大きくなる傾向がみられた。

BF使用率を示した模擬柱試験体と簡易断熱養生供試体の最高温度および温度上昇量の比較を図11に示す。なお、模擬柱試験体の最高温度は測定箇所中央部の温度を示す。BF使用率が模擬柱試験体および簡易断熱養生供試体の最高温度および温度上昇量に及ぼす影響に一貫した傾向はみられなかった。

### 3.3. 圧縮強度試験

目標呼び強度33の材齢と圧縮強度の関係を図12に示す。BF15の標準養生供試体圧縮強度(以下、標準養生強度)はすべての調査が材齢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

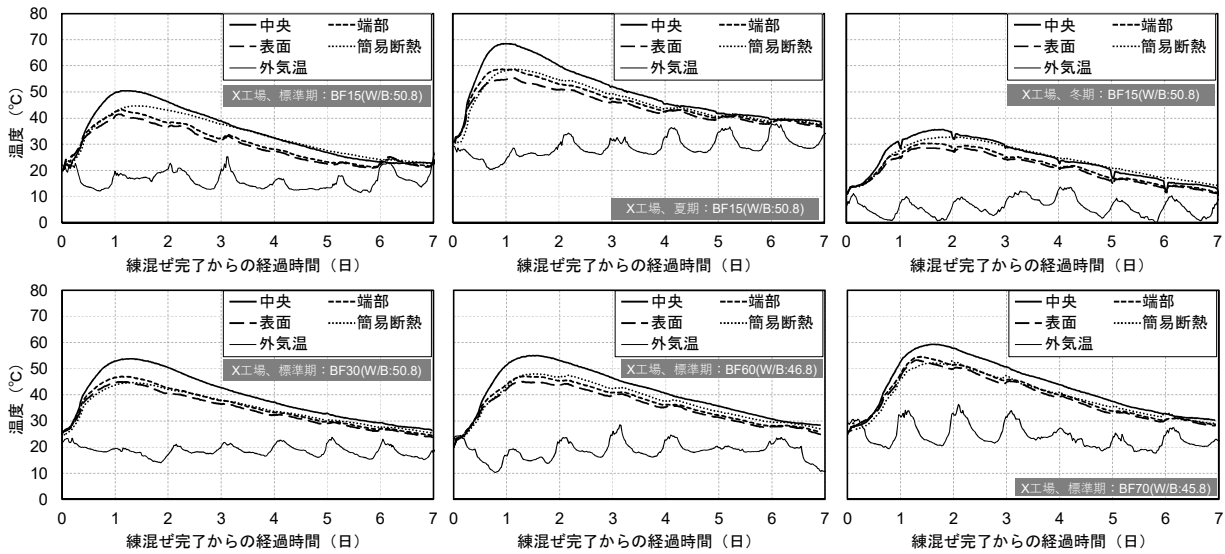


図9 模擬柱試験体および簡易断熱養生供試体の温度測定履歴(目標呼び強度 33)

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(WX)の場合において材齢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は小さい。

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、WZがSXと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

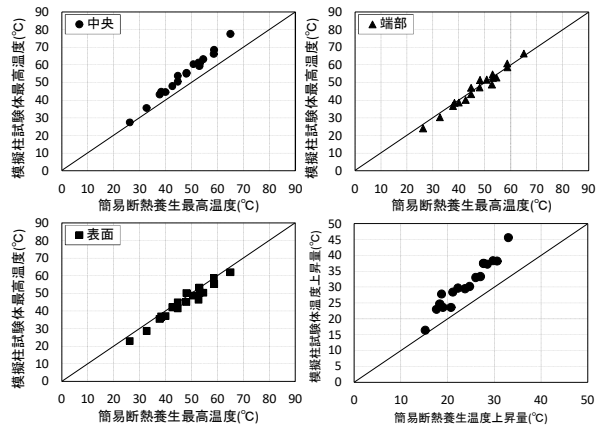


図10 模擬柱試験体と簡易断熱養生の最高温度および温度上昇量の比較

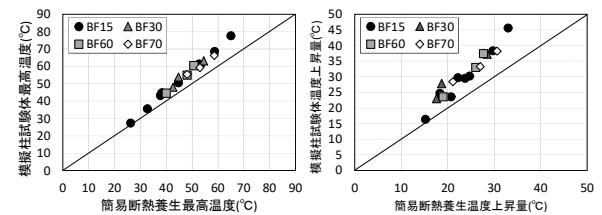


図11 模擬柱試験体と簡易断熱養生の温度上昇量の比較

期や工場間での違いが発生する傾向であった。なお、図示は無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)が標準養生強度に及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及ぼすような傾向は認められなかった。

コア強度端部と中央の関係を図13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  $y=0.994x$ 、決定係数  $R^2=0.962$  であるこ

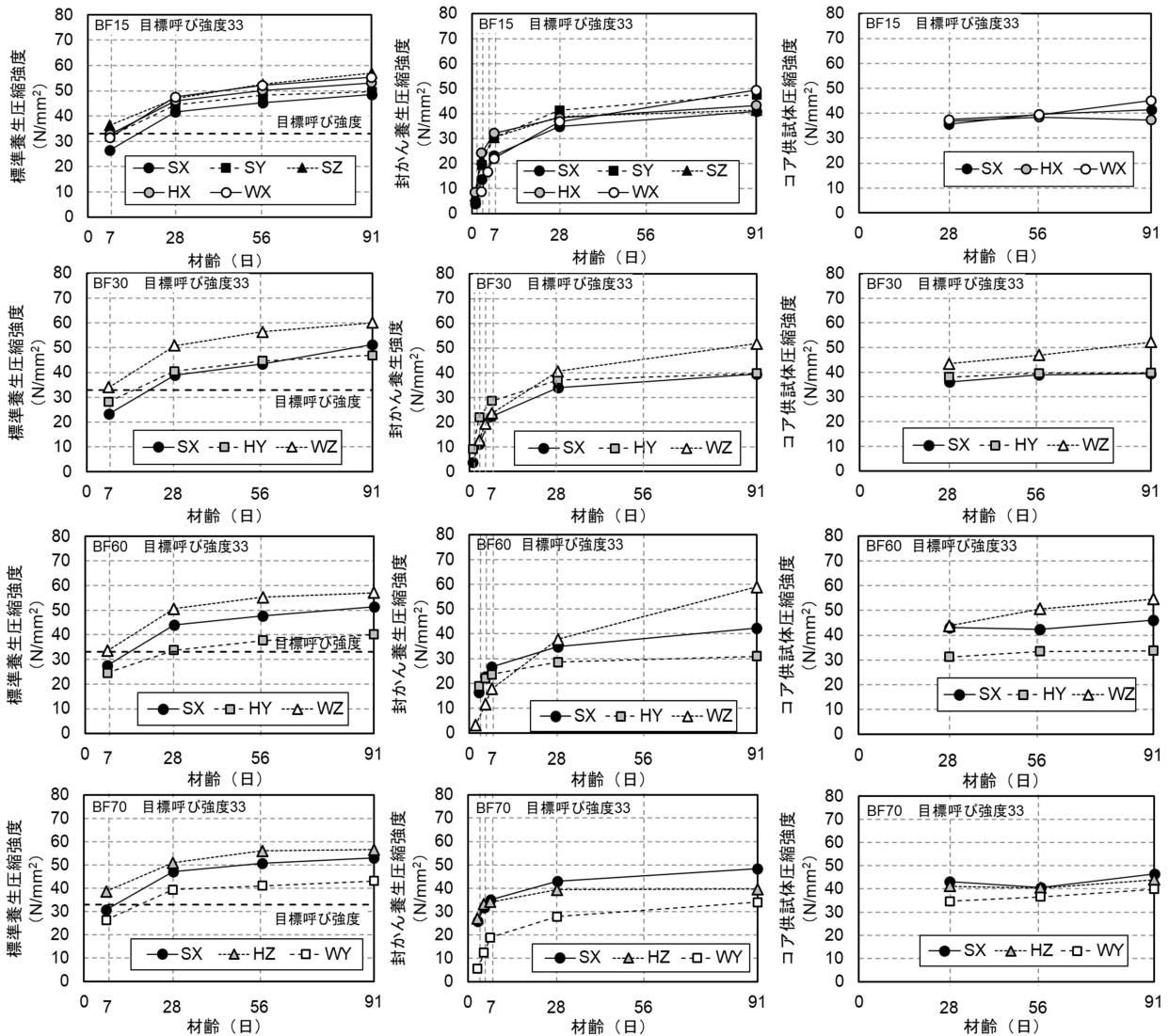


図 12 目標呼び強度 33 の材齢と圧縮強度の関係

とから端部・中央に差がないことが確認された。

材齢 91 日の封かん養生強度とコア強度の関係を図 14 に示す。打込み時期や生コン工場間によらず、封かん養生強度とコア強度でほぼ 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。

材齢 91 日のコア強度と簡易断熱養生強度の関係を図 15 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、決定係数  $R^2=0.934$  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概ねコア強度が推定される。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推測される。

### 3.4. 中性化試験

中性化深さは、JIS A 1153「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠して測定した。本実験では、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ため、1 側面 5 箇所での測定値のう



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、結果の検討には促進材齢1週以降のデータを用いることとした。

一部の中性化深さと促進期間の関係を図16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。

本実験における中性化速度係数とBF使用率の関係を図17に示す。同一水結合材比であるBF15とBF30を比較すると、BF使用率が大きいBF30の方が中性化速度係数は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、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と考えられる。

中性化速度係数と脱型時期の関係を図18に示す。水結合材比や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わかった。

### 3.5. 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 $\sigma_{28}$ 強度)の比較を図19に示す。BF15、BF30の標水 $\sigma_{28}$ 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ている。BF60、BF70では、X工場、Z工場では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ている。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定かではないが、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実験を実施したうえで、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

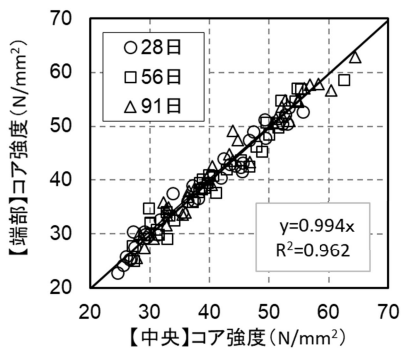


図13 コア強度端部と中央の関係

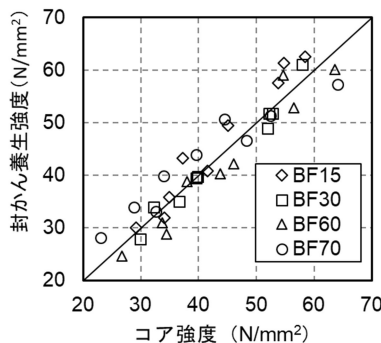


図14 封かん養生強度とコア強度の関係

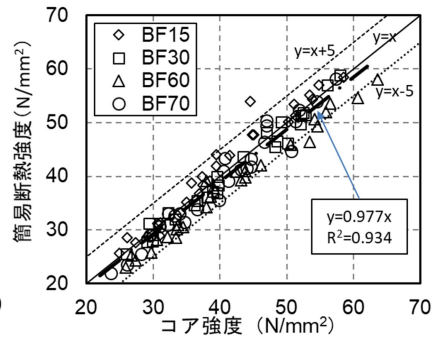


図15 各BFの簡易断熱養生強度とコア強度の関係

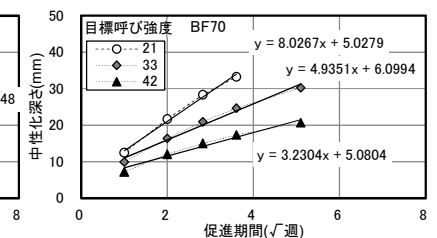
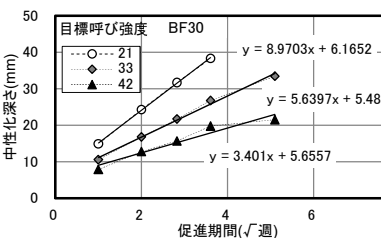
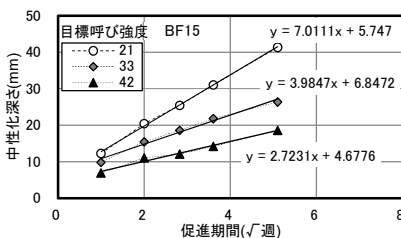


図16 中性化深さと促進期間の関係(材齢3日)

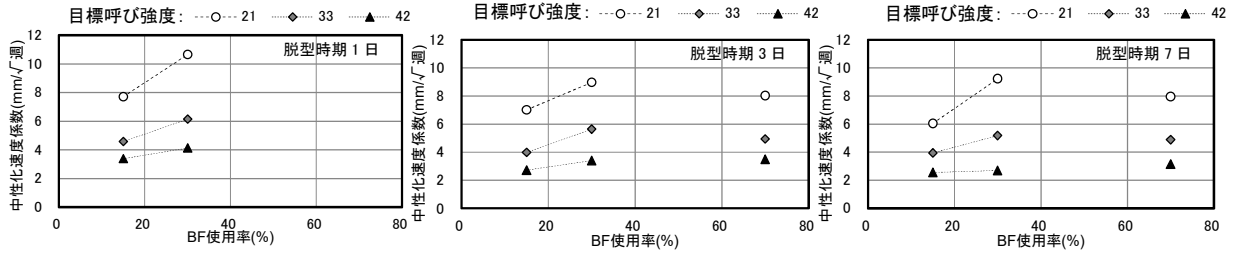


図 17 中性化速度係数とBF使用率の関係

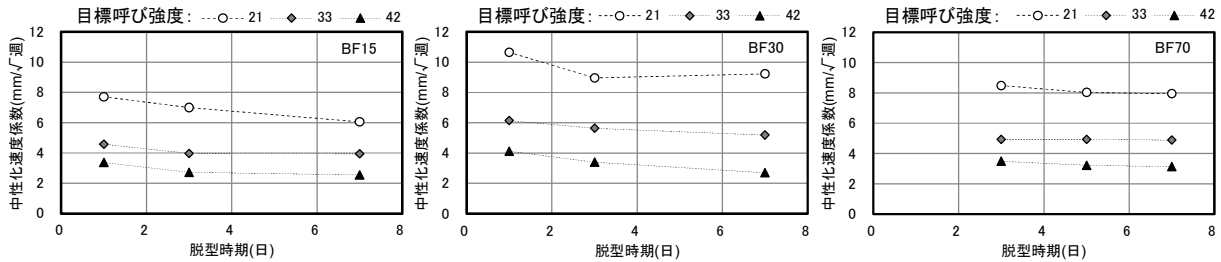
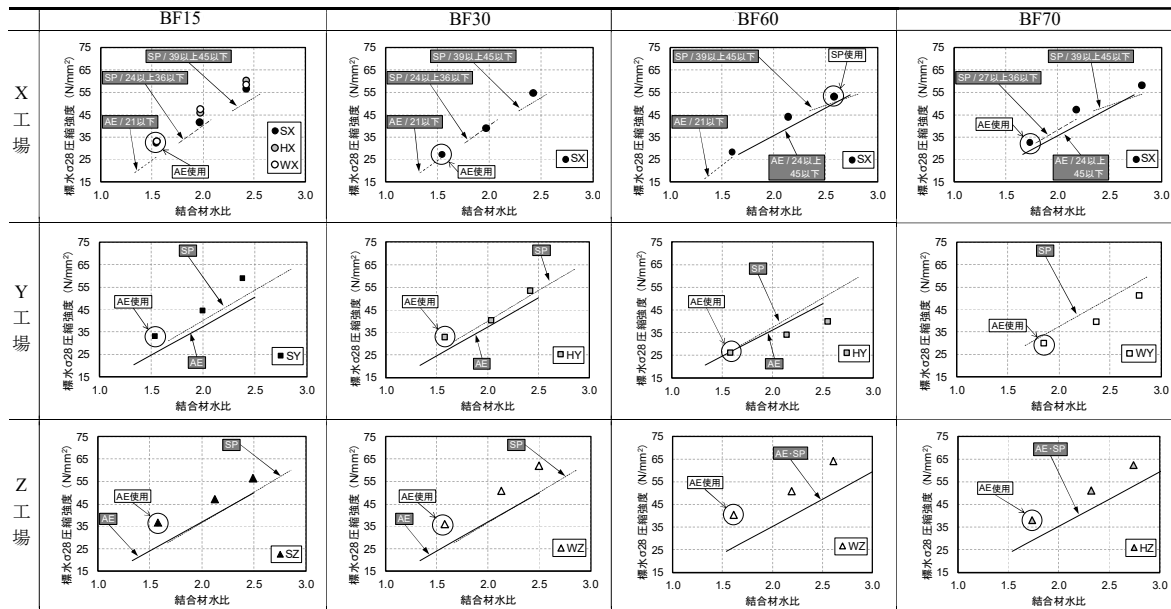


図 18 中性化速度係数と脱型時期の関係



注釈 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 19 各生コン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

適切な強度設計ができるものと考えられる。

### 3.6. 圧縮強度の標準偏差

X工場のBF15の実機実験における3シーズンの標水σ28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20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X工場の標準偏差の標準値を下回っており、BFを使用することによる影響はないと判断できる。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<sup>5)</sup>に

おいても、呼び強度24で標準偏差は2.5N/mm<sup>2</sup>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、本実験結果も同様の傾向が示された。

### 3.7. 構造体強度補正值(28S<sub>91</sub>)

構造体強度補正值<sub>28</sub>S<sub>91</sub>の標準値について、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、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<sub>28</sub>S<sub>91</sub>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。

$_{28}S_{91}$ と実機実験結果から得られた材齢91日のコア強度の関係を図21に示す。図には告示第1102号の根拠資料となった実験結果<sup>6)</sup>を併記している。全体的な傾向として、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となる設計基準強度18~36N/mm<sup>2</sup>の範囲では概ね3または6N/mm<sup>2</sup>を満足していた。

### 3.8. 型枠存置および湿潤養生期間

建設省告示第110号およびJASS5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すこととしている。また、湿潤養生期間についてもJASS5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。

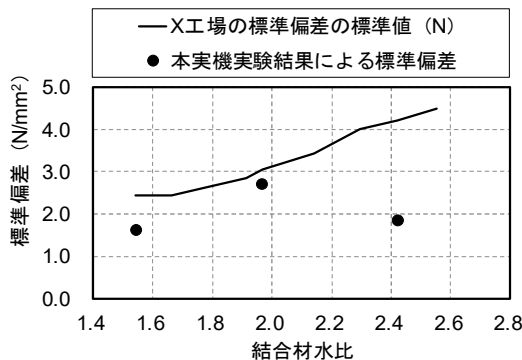


図20 X工場における実機実験結果による圧縮強度の標準偏差と標準値

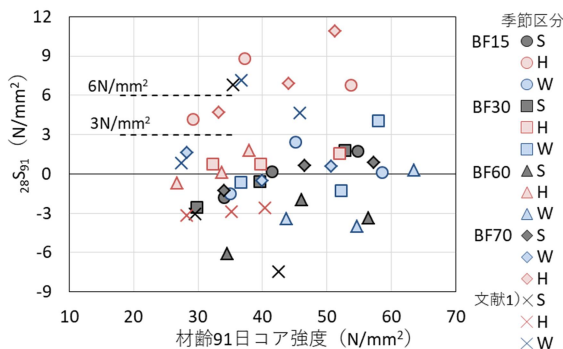


図21 構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ と材齢91日コア強度の関係

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。

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

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

目標呼び強度に対する現場封かん養生の強度比と積算温度の関係を図22に示す。なお、検討は材齢28日までのデータを対象とした。強度比と積算温度は、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使用率によらず近いものであった。

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<sup>2</sup>では図23となる。本検討では、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<sup>2)</sup>として、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使用率の違いは大きく影響しない程度となる。

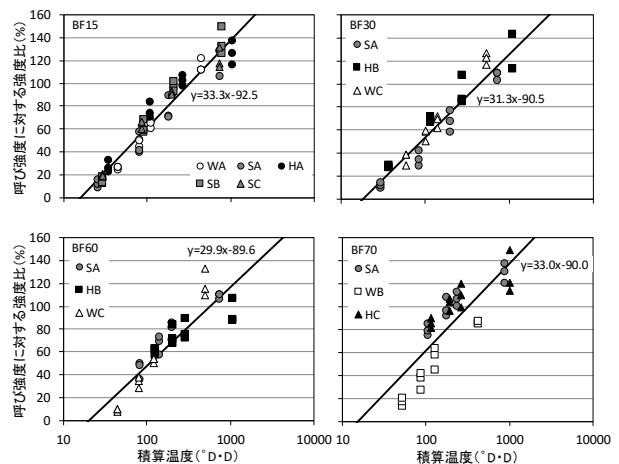


図22 目標呼び強度に対する強度比と積算温度の関係

JASS 5 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、JASS 5 では日数について BB の規定があるのみである。そこで、ここでは促進中性化試験結果より、湿潤養生の打切り(脱型)時期と中性化への関係から検討を行った。

中性化速度係数と脱型時強度の関係を図 24 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。

材齢 7 日を基準とした中性化速度係数比と脱型時強度の関係を図 25 に示す。中性化速度係数比は脱型時強度が 10N/mm<sup>2</sup> 以上では概ね 1.1 以下の値であった。また、図 25 中には JASS 5(検討 1<sup>7)</sup>)および建築学会の高炉指針(検討 2<sup>8)</sup>)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。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/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、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、湿潤養生の打切りは、圧縮強度が 10N/mm<sup>2</sup> 以上であれば構造体コンクリートとし

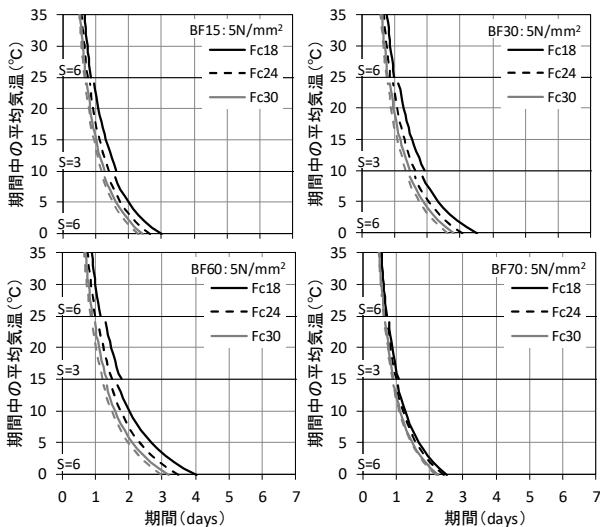


図 23 柱・壁などのせき板の存置期間と期間中の平均気温

ての耐久性能を満足すると考えられる。

### 3.9. 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。

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、SO<sub>3</sub> 量や単位水量を数水準とした室内実験による促進中性化試験のデータ<sup>2)</sup>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、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<sup>9)~14)</sup>も用いて

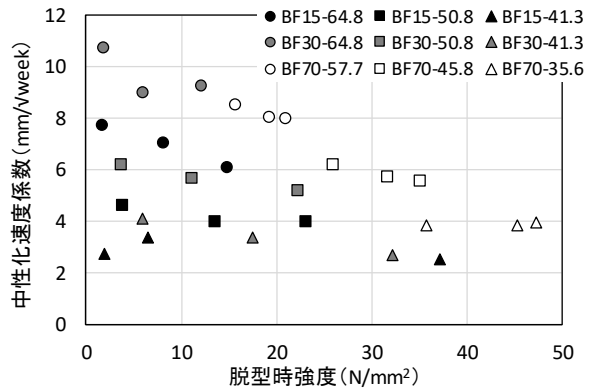


図 24 中性化速度係数と脱型時強度の関係

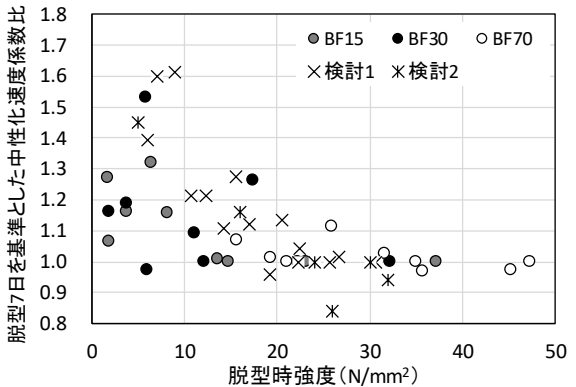


図 25 脱型 7 日を基準とした中性化速度係数比と脱型時強度の関係

耐久設計基準強度を検討した。

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 26 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 26 からは、研究 9 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。

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、BF 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乏しく、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 26 に示す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。

耐久設計基準強度の検討は、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<sup>4)</sup>と比較し、条件を満足するよう求めた。なお、CO<sub>2</sub>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で中性化によって設計限界状態に達しないように 20%に設定した。

【屋外の場合】

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

【屋内の場合】

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

ここに、

$D_d$  : 設計かぶり厚さ(mm)、 $\bar{c}_t$  : 中性化深さ(mm)

$A$  : 促進中性化速度係数(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%)

$\Sigma$  : かぶり厚さの標準偏差(10mm)

$$\text{ただし、} \quad u(P) = -\left( z - \frac{2.30753 - .2706}{1 + 0.99229z + 0.04481z^2} \right) \\ z = \sqrt{-2 \log P}$$

検討結果の一例を表 4 に、本検討で設定した耐久設計基準強度を表 5 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。

4. 二酸化炭素削減効果

実験結果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表 6 に、BF 使用率と N のコンクリート調査に対する二酸化炭素の削減率の関係を図 27 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

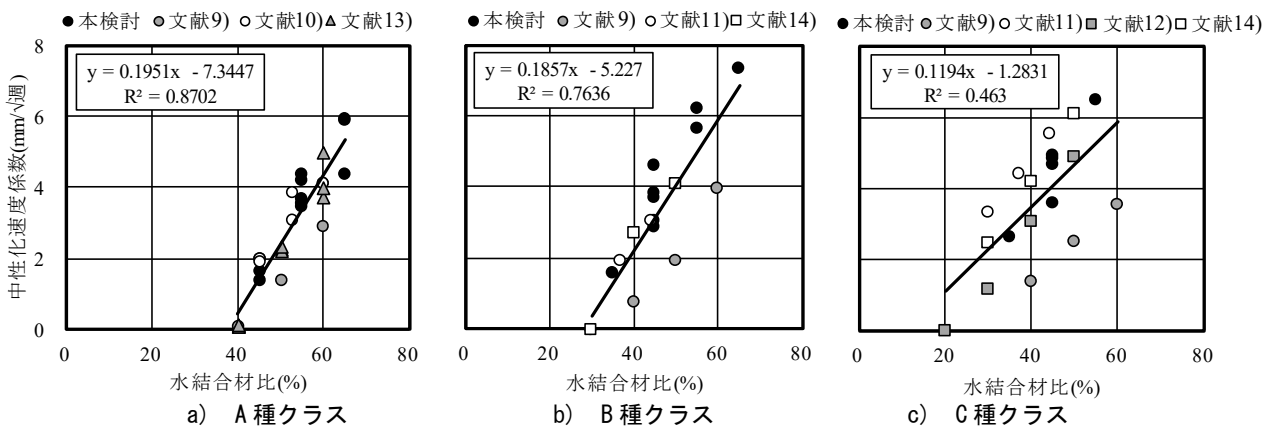


図 26 中性化速度係数と水結合材比の関係

表4 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 <sup>2</sup> /年)	所要の促進中性化速度係数 (mm <sup>2</sup> /週)	所要の水結合材比 (%)	耐久設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	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	屋内	20	30	100	0.409	4.011	58.2	30	33	48.3	44.5
			屋外		40		0.312	4.327	59.8				
		柱、梁、耐力壁	屋内		40		0.506	4.962	63.1				
			屋外		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	屋内	20	30	100	0.409	4.011	49.7	30	33	48.3	44.5
			屋外		40		0.312	4.327	51.4				
		柱、梁、耐力壁	屋内		40		0.506	4.962	54.9				
			屋外		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	屋内	20	30	100	0.409	4.011	44.3	33	36	45.2	41.4
			屋外		40		0.312	4.327	47.0				
		柱、梁、耐力壁	屋内		40		0.506	4.962	52.3				
			屋外		50		0.409	5.672	58.2				

\*呼び強度は構造体強度補正值を 3N/mm<sup>2</sup> と仮定し、呼び強度に対応する水結合材比の範囲を示す

表5 BF 使用率と耐久設計基準強度の関係

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	JASS5 と同様に適用範囲外とした		

表6 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	
水結合材比 (%)	50.8	50.8	50.8	46.8	
単位量 (kg/m <sup>3</sup> )	N	335	30.2	235	155
	BF	0	34	100	232
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	

■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
- ・X 工場の調査条件より算出した
- ・インベントリデータは N を 772kg-CO<sub>2</sub>/t、BF を 35.6kg-CO<sub>2</sub>/t とした<sup>1)</sup>

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、おおむね同様な値となる。

5. まとめ

実験から得られた結果を以下に示す。

○フレッシュ性状

- ・BF 使用率に関わらず、運搬時間による経時変化を見込むことで、現場荷下ろし時における所要のフレッシュ性状を満足することができる。

○温度履歴

- ・単位結合材量に対する温度上昇量は C 種クラス、特に BF70 において小さい。

○強度特性

- ・BF 使用率 60 以下では冬期における強度増進が大きく、また、BF60、70 では打設時期や工場間の影響が見られた。
- ・構造体コンクリート強度の推定には N と同様

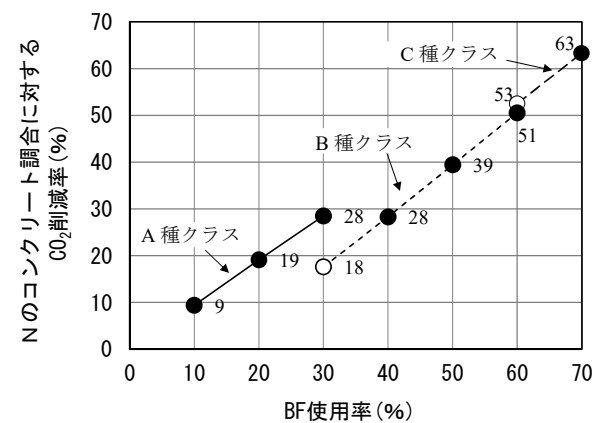


図27 BF 使用率と N のコンクリート調合に対する二酸化炭素の削減率の関係

に簡易断熱養生供試体を用いることが可能。

○中性化

- ・C 種クラスでも耐久設計基準強度を適切に定め

れば、A種クラスと同等の耐久性を確保できる。

- ・型枠の脱型時期が早い方が中性化進行速度は速いが、標準期において脱型時期が3日以降の場合では中性化進行速度への影響は小さい。

#### ○調合設計

- ・構造体強度補正值は、建設省告示1102号およびJASS5に示されるNまたはBBの標準値である標準期3、冬期6、夏期6N/mm<sup>2</sup>と同等である。
- ・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Nの強度算定式を、BおよびC種クラスではBBの強度算定式をベースに算定することが可能である。C種クラスでは、試し練り試験の結果、生コン工場のBBの強度算定式より強度が小さい場合には、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。
- ・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。計画供用期間100年の耐久設計基準強度は、AおよびB種クラスで30、C種クラスで33N/mm<sup>2</sup>となる。

#### ○施工性（湿潤養生期間）

- ・型枠の脱型を10N/mm<sup>2</sup>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%程度の増加にとどまる。計画供用期間の級に応じて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/mm<sup>2</sup>以上であれば所要の耐久性能を満足するものと考えられる。

## 6. おわりに

建築材料分野における二酸化炭素排出量の削減、すなわちSDGsの達成につながる本研究成果に基づくコンクリートを今後、建築工事に展開していきたい。また、本成果がBFを用いたコンクリートのさらなる普及に役立てば幸いである。

## 【謝辞】

本研究は、長谷工コーポレーション、青木あすなる建設、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、矢作建設工業の13社共同研究によるCELBIC研究会の成果である。また、本研究の実施にあたり、鉄鋼スラグ協会、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、ここに記す。

## 【参考文献】

- 1) 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
- 2) 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）、pp.535-550、2019.9
- 3) 松田ほか：円筒貫入計による高流動コンクリートのコンシテンシー評価に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、A、pp.511-512、1994.7
- 4) 日本建築学会：コンクリートの調合設計指針・同解説、日本建築学会、2015.2
- 5) 小林ほか：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
- 6) 棚野博之ほか：片脇の取り外しに関する管理基準の検討、建築研究資料、No.168、2016.3
- 7) 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
- 8) 松下ほか：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 pp.36-1、2014
- 9) 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、2016.8、pp.49-50
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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）SO<sub>3</sub>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
- 13) 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
- 14) 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