

# 高炉スラグ微粉末を用いた設計基準強度 36~48N/mm<sup>2</sup> のコンクリートの性状

## Properties of Concrete Using Blast Furnace Slag with Design Strength Varying Between 36 and 48 N/mm<sup>2</sup>

藺井孫文\*1 大屋戸理明\*2

### 概 要

コンクリートに使用する普通セメントのうち、使用率 10~70%の範囲で高炉スラグ微粉末に置換した、設計基準強度 36~48N/mm<sup>2</sup> の環境配慮型コンクリートの性状について検討を行った。室内実験の結果、使用率を 15%および 30%とした場合は工場保有の強度算定式と同等以上の強度が得られたが、使用率を 60%および 70%とした場合は強度算定式を下回る場合があることが確認された。また、Fc48N/mm<sup>2</sup> レベルのコンクリートでは、工場保有の強度算定式では過剰な強度設計となり、実験結果から強度算定式を設定することが合理的となる場合があることが確認された。

key words : 環境配慮型コンクリート、高炉スラグ微粉末、室内実験、圧縮強度、強度算定

### 1. はじめに

コンクリートには、建造物の用途や規模、周辺環境に応じた多様な性能が求められている。日本建築学会の建築工事標準仕様書・同解説 鉄筋コンクリート工事 (JASS 5) では、2022 年の改定により、要求性能として新たに「環境性」が追加されている。ここで示されている資源循環性および低炭素性に対応できる環境配慮型コンクリートは、コンクリート製造時の二酸化炭素排出量の大部分がセメント製造時の排出とされることを踏まえ、セメント使用量を削減したコンクリートとして建設業各社などで開発が進められている。

筆者らは、表-1 に示す CELBIC 研究会 13 社との共同研究を通じて、元のコンクリートに使用する普通セメント (OPC) のうち使用率 10~70%の範囲で高炉スラグ微粉末 (BF) に置換した、環境配慮型コンクリート「CELBIC」の開発を行っている。これまでに、スランブをワーカビリティの指標の一つに用いる (スランブ管理)、設計基準強度 (Fc) 36N/mm<sup>2</sup> 以下のコンクリートを対象に、フレッシュ性状や圧縮強度発現性などの性能ならびに設計法等に関する検討を行った<sup>1)~3)</sup>。BF 使用率 10~30%の A 種クラスでは、二酸化炭素の削減効果は小さいものの多くの地上構造物に適用可能であり、BF 使用率 60~70%の C 種クラスでは、適用箇所が限られるものの 60%程度と大きな二酸化炭素削減効果を得ることができる。CELBIC は、一般に BF 使用率が 40~45%程度で固定の高炉セメント B 種 (BB) とは異なり、BF 使用率を 10~70%の範囲で任意に設定でき、条件に応じて柔軟に適用できる。

一方、昨今の建築物の高層化等に伴い、高強度コンクリートの採用が増加している。断面積の減少や使用材料の削減等を目的とした高強度コンクリートの需要は高い。また、CELBIC を高流動とし、CFT 構造の充填コンクリートに使用できれば、中性化の懸念も少なく効果的である。

表-1 CELBIC 研究会 13 社

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	○長谷工コーポレーション
矢作建設工業	(五十音順、○は主査)	

表-2 室内実験の組合せ

呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )		36	45	52	60
Fc (N/mm <sup>2</sup> )		33	36	42	48
スランブ		—	21cm	—	—
スランブフロー		55cm	—	50cm	60cm
BF 使用率	A 種クラス	15%	—	○	○
		30%	—	○	○
	B 種クラス	60%	○	○	○
		70%	○	○	○

表-3 準用する強度算定式 (呼び強度 45~60)

工場	クラス*	セメント強度式	空気量
X 工場	A 種、B 種、C 種	OPC	4.5%
Y 工場	A 種、B 種、C 種	OPC	3.0%
Z 工場	A 種	OPC	4.5%
	B 種、C 種	BB	

\*A 種クラス : BF 使用率 10%以上 30%以下、B 種クラス : BF 使用率 30%を超え 60%以下、C 種クラス : BF 使用率 60%を超え 70%以下

\*1 Magofumi SONOI

技術本部技術研究所 主任研究員

\*2 Michiaki OYADO

技術本部技術研究所 主席研究員

表-4 計画調合の例 (BF70) と使用材料の品質

工場	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	計画調合						使用材料の品質**			
					W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
							W	C	BF	S		G		
X工場	36		55±7.5	4.5 ±1.5	44.6	48.1	175	118	274	814	907	C:密度 3.16g/cm <sup>3</sup> BF:密度 2.89 g/cm <sup>3</sup> S:富津産 表乾密度 2.61g/cm <sup>3</sup> G:美祢産 表乾密度 2.70g/cm <sup>3</sup> 実積率 61.0%		
	45	21±2.0			39.2	43.8	175	134	312	720	956			
	52		50±7.5		33.9	44.6	170	150	351	718	923			
	60		60±10.0		29.4	43.1	170	173	405	663	907			
Y工場	36		55±7.5	3.0 ±1.5	44.9	50.2	170	114	265	859	885		C:密度 3.16g/cm <sup>3</sup> BF:密度 2.89 g/cm <sup>3</sup> S:富津産 表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> G:美祢十八戸産 表乾密度 2.69g/cm <sup>3</sup> 実積率 61.0%	
	45	21±2.0			42.1	46.7	175	125	291	796	942			
	52		50±7.5		37.5	47.6	175	140	327	791	904			
	60		60±10.0		33.3	48.0	175	158	368	773	869			
Z工場	36		55±7.5	4.5 ±1.5	43.5	49.0	170	117	274	837	900			C:密度 3.16g/cm <sup>3</sup> BF:密度 2.89 g/cm <sup>3</sup> S:君津+佐野産 表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> G:佐野+横瀬産 表乾密度 2.70g/cm <sup>3</sup> 実積率 60.0%
	45	21±2.0			40.2	46.7	170	127	296	785	942			
	52		50±7.5		35.3	45.8	170	145	337	745	908			
	60		60±10.0		31.0	44.8	170	164	384	703	892			

\*\*骨材を混合使用した場合は、混合後の表乾密度・実積率を示す。

CELBIC の適用範囲を高強度・高流動領域に拡大することで、さらなる適用の柔軟性を確保できる。そこで本研究では、主にスランブフローをワーカビリティの指標の一つに用いる (フロー管理)、Fc=36~48N/mm<sup>2</sup> の CELBIC について室内実験を行い、フレッシュ性状と強度発現性の確認を行った。

2. 室内実験の概要

2.1 実験因子

本研究では、表-2 に示す組合せでの室内実験を実施した。実験は、BF 使用率 15% の A 種クラス (BF15) と、A~C 種クラスそれぞれで BF 使用率が最大となる 30% (BF30)、60% (BF60) ならびに 70% (BF70) の 4 水準で行った。コンクリートの呼び強度を 36・45・52・60N/mm<sup>2</sup> (Fc=33・36・42・48N/mm<sup>2</sup>) とし、スランブまたはスランブフローを表-2 のとおり設定した。呼び強度 36 (Fc=33N/mm<sup>2</sup>) は、普通強度かつ高流動を意図してパラメータとして設定している。ここで、JASS 5 では、OPC を用いたコンクリートに対し、Fc=48N/mm<sup>2</sup> での構造体強度補正值 <sub>28</sub>S<sub>91</sub> の標準値を 9N/mm<sup>2</sup> としている。本研究ではこの <sub>28</sub>S<sub>91</sub> の標準値に、Fc=42N/mm<sup>2</sup> で 1、Fc=48N/mm<sup>2</sup> で 3 を加算して、呼び強度を設定している。

2.2 調合

室内実験は、関東圏所在の 3 つのレディーミクストコンクリート工場で実施した。計画調合の例 (BF70) と使用材料の品質を表-4 に示す。調合は、既往の研究<sup>1)~3)</sup> で検討した調合設計法をもとに定めている。まず JIS または大臣認定で運用されている各工場の強度算定式 (表-3) を準用して、それぞれの呼び強度に応じた水結合材比 (W/B) を決定した。次に、それぞれの呼び強度・スランブまたはスランブフローに対応する標準配合の単位水量

および単位粗骨材量を設定し、その標準配合の W/B から求められる単位セメント量を BF 使用率に応じて案分し、これらを容積換算して 1000 L となるように単位細骨材量で調整した。同一の呼び強度とスランブまたはスランブフローの組合せでは、BF 使用率に関わらず、W/B、単位水量、結合材量 (C+BF) および単位粗骨材量は同値となる。

使用材料を表-5 に示す。BF はいずれも JIS A 6206 (コンクリート用高炉スラグ微粉末) に適合する BF4000 とした。OPC と BF は 2 銘柄ずつを用いているが、3 つの工場ではいずれも組み合わせが異なっている。骨材は各工場 で常用されているものを用いたが、粗骨材については産地は異なるもののいずれも石灰岩碎石となった。化学混

表-5 使用材料

材料種類	X工場	Y工場	Z工場
OPC	a社製	b社製	a社製
BF	c社製	c社製	d社製
細骨材	砂	砂	砂+石灰岩砕砂
粗骨材	石灰岩砕石	石灰岩砕石	石灰岩砕石
化学混和剤	e社製	f社製	g社製

表-6 試験項目

試験項目	試験方法	管理値
スランブ	JIS A 1101	表-4 参照
スランブフロー	JIS A 1150	
空気量	JIS A 1128	
流入モルタル値	円筒貫入試験 <sup>4)</sup>	60mm 以下
ブリーディング量	JASS 5 T-504	0.1cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> 以下
沈降量	CFT 基準 <sup>6)</sup>	2.0mm 以下
圧縮強度	JISA1108:2018	各呼び強度

和剤は各工場とも銘柄が異なり、BF 使用率や呼び強度、スランプまたはスランプフローに応じた高性能 AE 減水剤として、標準品・増粘剤一液タイプ・BF 高含有対応品・経時保持タイプなどを適宜選定した。

### 2.3 試験方法

試験項目を表-6に示す。ブリーディング量および沈降量の試験は、W/B が大きい呼び強度 36 (Fc=33N/mm<sup>2</sup> フロー管理) の調査でのみ実施した。

## 3. 試験結果

### 3.1 スランプ、スランプフローおよび空気量

スランプおよびスランプフローの試験結果ならびに X 工場における化学混和剤使用量を図-1に、空気量の試験結果を図-2に示す。化学混和剤の効果もあり、スランプおよびスランプフローと空気量はいずれも管理値内に収めることができた。

化学混和剤使用量については、同じ銘柄で比較した例として X 工場の使用量を図-1に示している。呼び強度が 45・52・60N/mm<sup>2</sup> (Fc=36・42・48N/mm<sup>2</sup>) の順で増加するとともに化学混和剤使用量がおよそ 0.6・0.9・1.0 と増加する傾向が見られ、その一方で BF 使用率による化学混和剤使用量の相違は小さいと考えられた。Y 工場・Z 工場における化学混和剤使用量も同様の傾向が見られた。

### 3.2 流入モルタル値

円筒貫入試験<sup>4)</sup>による流入モルタル値の試験結果を図-3に示す。呼び強度 36 (Fc=33N/mm<sup>2</sup>) を除いて、呼び強

度が 45・52・60N/mm<sup>2</sup> (Fc=36・42・48N/mm<sup>2</sup>) の順で増加するとともに流入モルタル値も概ね増加する傾向が見られ、また、やや不明瞭であるが、BF 使用率が 15・30・60・70%と増加するとともに流入モルタル値も増加する傾向が見られた。その一方、呼び強度 36 (Fc=33N/mm<sup>2</sup>) については、BF 使用率が大きい BF70 が BF60 より流入モルタル値は少ない傾向となった。なお、流入モルタル値が管理値 60mm を超えるケースもあったが、材料分離の傾向は見られなかった。

スランプフローと流入モルタル値の関係を図-4に示す。ばらつきは大きいものの、スランプフローの増加に伴い、流入モルタル値も増加する傾向を示した。これは、既往の文献<sup>5)</sup>と同様の傾向である。

### 3.3 ブリーディング量

ブリーディング試験の結果を図-5に示す。本節に述べるブリーディング量の試験、および次節に述べる沈降量の試験は、W/B が大きい呼び強度 36 (Fc=33N/mm<sup>2</sup> フロー管理) の調査でのみ実施している。X 工場および Y 工場では、CFT 基準<sup>6)</sup>の管理値 0.1cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>を満足し、特に高性能 AE 減水剤に増粘剤一液タイプを使用した Y 工場では、ブリーディング量が最も少ない結果となった。

一方、Z 工場では、ブリーディング量が管理値を超える結果となった。また、X 工場および Y 工場では、BF 使用率の増加に伴いブリーディング量が減少しているのに対し、Z 工場では逆の傾向となった。これらの理由としては、Z 工場での実験日の気温が低かったことが影響している可

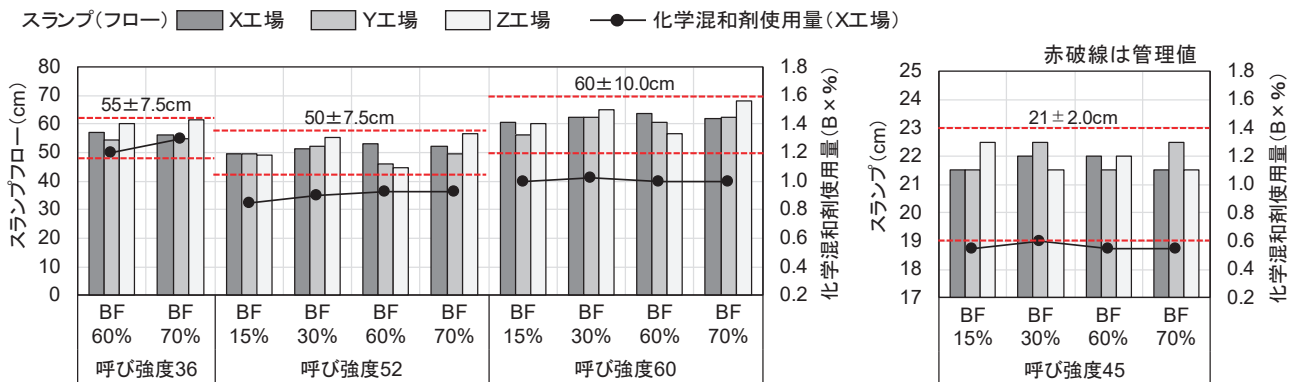


図-1 スランプおよびスランプフロー試験結果ならびに化学混和剤使用量

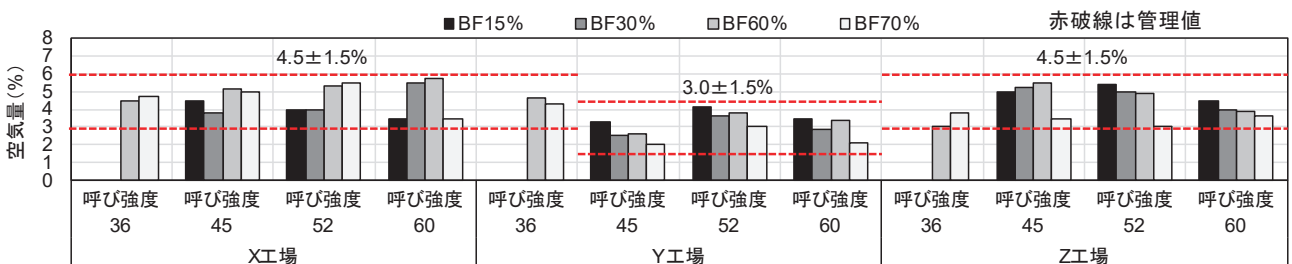


図-2 空気量試験結果

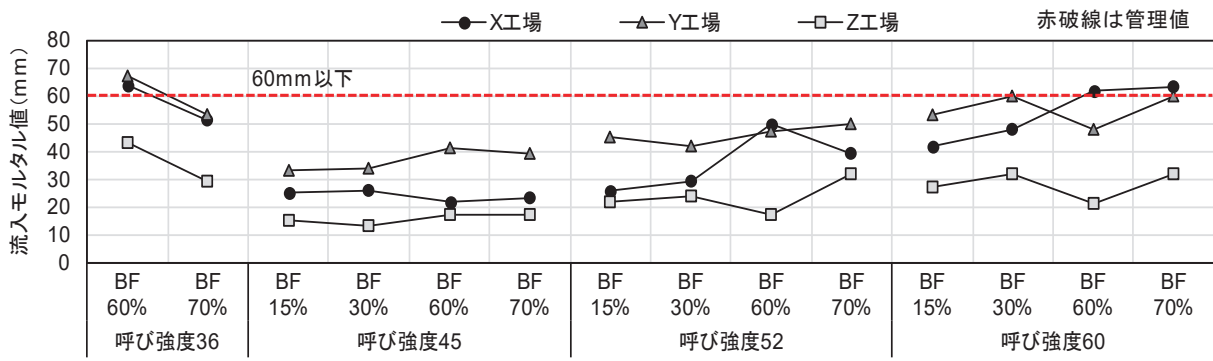


図-3 流入モルタル値試験結果

能性がある。Z工場の実験では、試験前日からの降雪による気温低下が生じており、ブリーディング試験容器を静置した試験室コンクリート床表面の温度が低下していた。既往の研究では、低温環境下ではBF使用率が高いほど凝結が遅延する傾向がある<sup>7)</sup>とされている。

3.4 沈降量

沈降量試験の結果を図-6に示す。いずれの工場も、CFT基準<sup>6)</sup>の管理値2.0mm以下を満足した。特に高性能AE減水剤に増粘剤一液タイプを使用したY工場では、沈降量が最も少なく、前述のブリーディング量が最も少ないこととも整合する結果となった。なお、ブリーディング量が管理値を超えたZ工場では、沈降量が過剰に増加する傾向は見られなかったが、これは沈降量試験をブリーディング試験とは異なる室内で実施したことが影響した可能性がある。

3.5 圧縮強度

圧縮強度試験結果を工場ごとに総括して図-7~9に示す。いずれの調合においても、材齢の増加と共に圧縮強度も増加しており、材齢28日においては設定した呼び強度を上回った。高流動コンクリートを対象とした呼び強度36 ( $F_c=33N/mm^2$ )においても、材齢28日には呼び強度を満たす圧縮強度が確認できた。

BF使用率ごとに試験結果を確認する。Y工場・Z工場では、BF30が最も強度が大きく、BF使用率の増加に伴って圧縮強度が低下する傾向を示した。材齢91日時点では、BF使用率の高い調合における長期材齢による強度増進は見られなかった。工場による差は小さい傾向であった。今回の実験結果から、 $F_c=48N/mm^2$ レベルのCELBICにおいて、既往の研究<sup>8)</sup>におけるBFを使用した $F_c=36N/mm^2$ 以下のCELBICと同様の傾向となることが確認できた。

3.6 圧縮強度と強度算定式の比較

圧縮強度試験結果を結合材水比と比較し、各工場保有の強度算定式を併記して図-10に示す。前述の通り、本実験では、各工場保有の強度算定式により、結合材水比から調合強度を定めている。X工場・Y工場は、OPCを使用した場合の強度算定式(N式)のみ記載したが、Z工場はN式に加えてBB式を使用した場合の強度算定式(BB式)

も併記している。図によると、結合材水比の増加と共に圧縮強度も増加している。各工場の強度算定式と圧縮強度

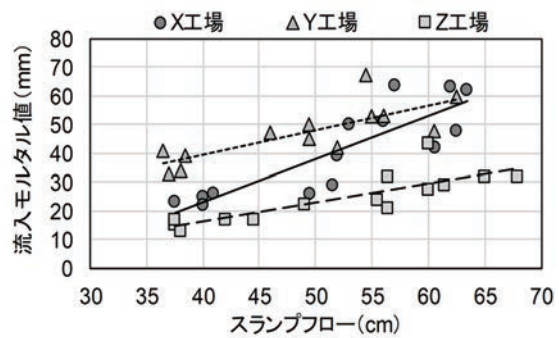


図-4 スランプフローと流入モルタル値の関係

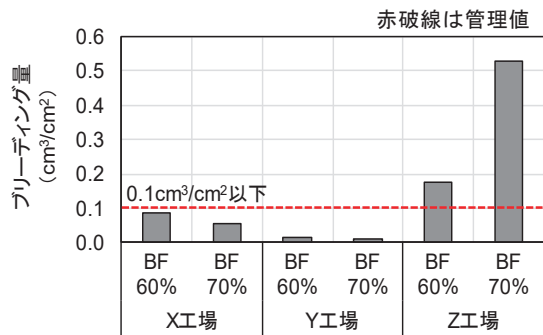


図-5 ブリーディング試験結果

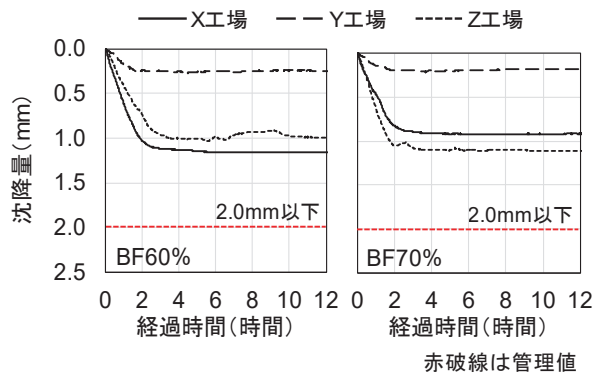


図-6 沈降量試験結果

試験結果を比較すると、特に X 工場と Z 工場で、圧縮強度試験結果の近似式の傾きが工場の強度算定式の傾きよりも若干大きくなっている。

BF30 の場合、3 工場の圧縮強度試験結果は全て強度算定式を上回り、BF15 の場合も同等以上の強度となっている。これに対して、BF60・BF70 においては、圧縮強度試験結果が強度算定式と同等または若干下回っている。特に BF 使用率が大きいあるいは結合材水比が小さい場合に強度算定式を下回る可能性があり、強度算定式に対して

表-7 強度算定式と圧縮強度の差および割増強度 (N/mm<sup>2</sup>)

工場	BF15	BF30	BF60	BF70
X	0 (3.0)	0 (7.0)	9 (-6.7)	9 (-7.7)
	0 (3.3)	0 (4.2)	3 (-0.8)	6 (-5.7)
Z	3 (-0.2)	0 (3.4)	3 (-2.9)	6 (-3.8)
	3 (-0.5)	0 (3.1)	6 (-3.2)	6 (-4.1)

※上段：割増強度、下段( )：強度算定式と圧縮強度の差

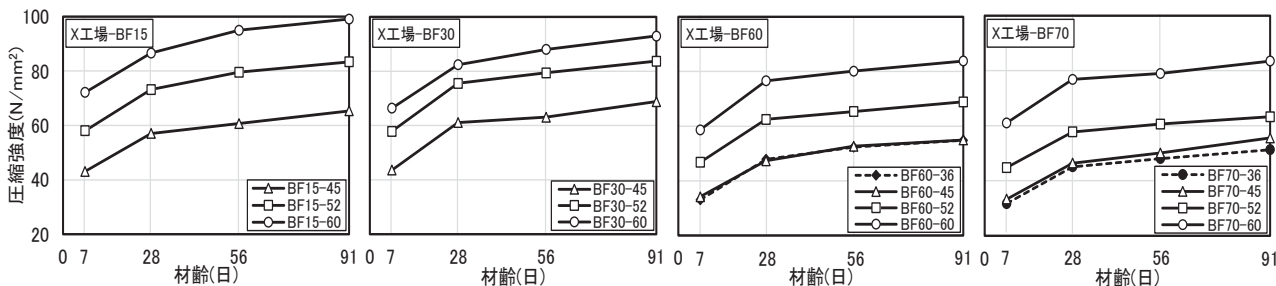


図-7 圧縮強度結果(X工場)

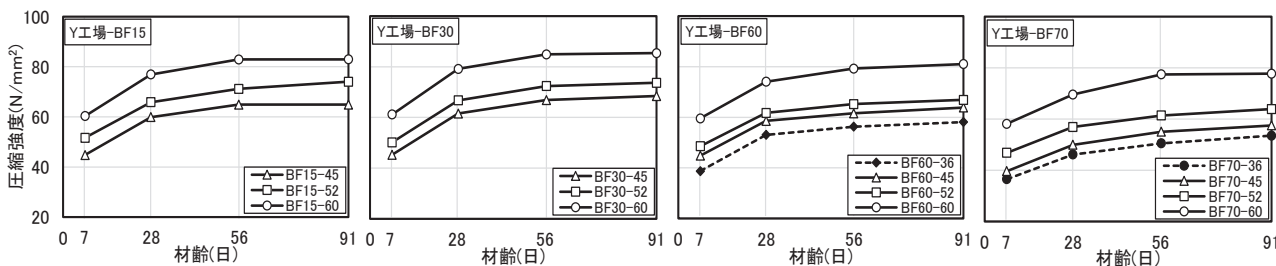


図-8 圧縮強度結果(Y工場)

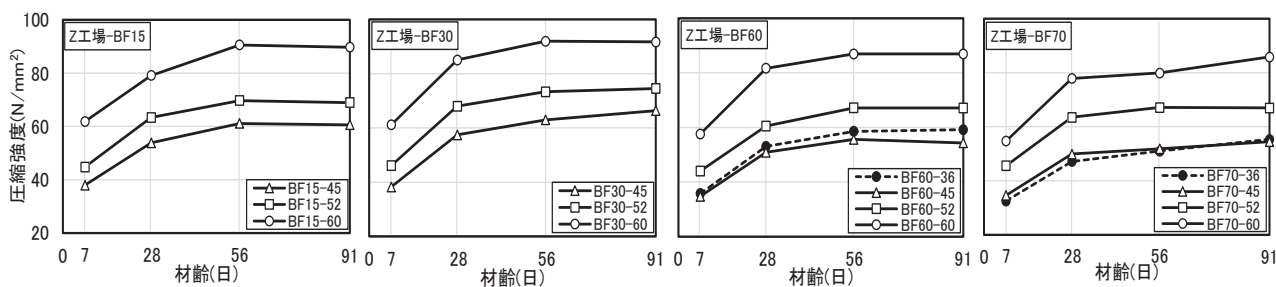


図-9 圧縮強度結果(Z工場)

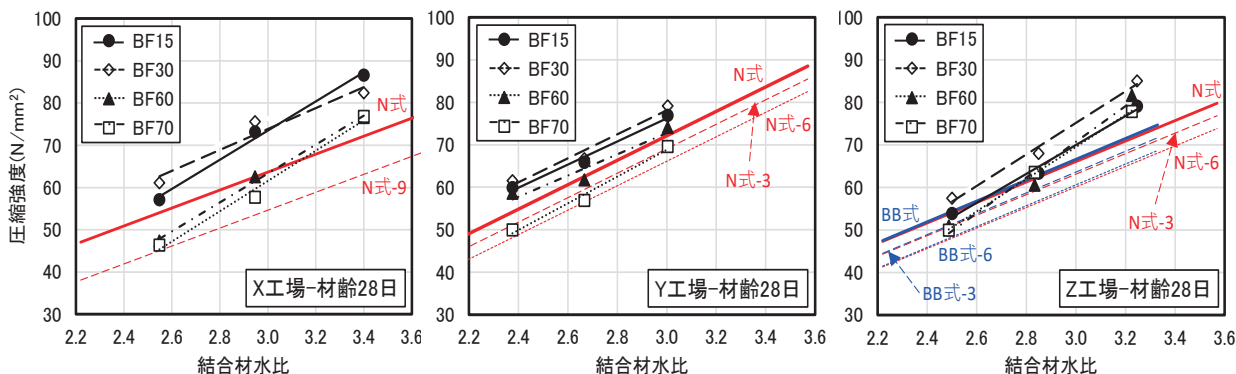


図-10 圧縮強度試験結果と各工場強度算定式の比較

補正が必要となる。

なお、Z工場はBB式を有しているが、BB式と圧縮強度の関係は、N式と同様の傾向であった。

### 3.7 強度算定式の設定

工場の強度算定式を活用し、BFを使用した $F_c=48\text{N/mm}^2$ レベルのコンクリートにおける強度設計法を検討する。既往の検討<sup>9)</sup>と同様に、各工場保有の強度算定式をもとに圧縮強度試験結果全体を包括できるように、目標とする呼び強度を割増す(強度算定式の圧縮強度を割引く、直線を低強度方向に平行移動する)ことで結合材水比を算出する方法を検討する。強度算定式により求めた強度と圧縮強度実験値の差、および圧縮強度試験結果を包括する割増強度を表-7に示す。図-10には、割増強度分だけ平行移動した強度算定式を併記している。BF15・30では、概ね強度算定式を下回ることなく、割増強度を設定せずに工場保有の強度算定式を使用可能である。Z工場では $0.2\sim 0.5\text{N/mm}^2$ 強度算定式を下回るものがあるため、割増強度を設定する必要がある。

BF60・BF70においては、すべての工場において強度算定式を下回る圧縮強度試験値が存在する。強度算定式と圧縮強度試験値との差は最大で $7.7\text{N/mm}^2$ で、 $3\sim 9\text{N/mm}^2$ の割増強度を設定する必要がある。既往の $F_c=36\text{N/mm}^2$ 以下の研究<sup>9)</sup>での割増強度は $3\sim 6\text{N/mm}^2$ であり、これよりも大きい割増強度となっている。Z工場におけるBB式は、N式と同等の強度差であった。

工場保有の強度算定式を利用にした設定方法では、X工場・Z工場のように圧縮強度試験結果の近似曲線の傾きが強度算定式の傾きよりも大きい場合には、高強度域で過剰な強度設計になる可能性がある。このような $F_c=48\text{N/mm}^2$ レベルのCELBICでは、実験結果から近似式を求め、強度算定式を設定する方が合理的な場合もあると考えられる。

## 4. まとめ

本研究では、 $F_c=36\sim 48\text{N/mm}^2$ の主にフロー管理のCELBICについて室内実験を行い、フレッシュ性状と強度発現性の確認を行った。この結果、以下の事項を確認した。

- (1) 化学混和剤を調整することで、目標とするフレッシュコンクリートの品質を得ることができた。スランプおよびスランプフローと空気量はいずれも管理値内に収めることができた。呼び強度が増加するとともに化学混和剤使用量が増加した。円筒貫入試験による流入モルタル値は、呼び強度が増加するとともに増加した。ブリーディングと沈降量は、増粘剤一液タイプを使用した場合に最も少なかった。
- (2) 圧縮強度は、材齢28日において設定した呼び強度を上回った。結合材水比と圧縮強度の関係の近似式の傾きは、工場の強度算定式の傾きよりも大きい場合があ

り、BF60・BF70では圧縮強度は強度算定式を下回る場合がある。

- (3) 工場の強度算定式をもとに呼び強度を割り増す方法で結合材水比を算出する方法によれば、例えばBF60・BF70の場合に $3\sim 9\text{N/mm}^2$ の割増強度を設定する必要がある。高強度域で過剰な強度設計になる可能性があり、実験結果をもとに強度算定式を設定する方が合理的な場合もある。

### 【謝辞】

本研究は、CELBIC研究会13社(青木あすなろ建設、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、長谷工コーポレーション、矢作建設工業ならびに銭高組)の共同研究にて実施した。関係各位に謝意を表します。

### 【参考文献】

- 1) 金子樹、山下紘太郎、新田稔、川又篤、林晴佳、唐沢智之、村井克綺、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1～その8、日本建築学会学術講演梗概集(北陸)、pp.535～550、2019.9
- 2) 高橋祐一、清水啓介、野中英、岸本豪太、菌井孫文、靄見淳也、鈴木好幸、金子樹、古川雄太、河野政典ほか：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、日本建築学会学術講演梗概集(関東)、pp.467～486、2020.9
- 3) 高橋祐一、金子樹、古川雄太ほか：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19～その21、日本建築学会学術講演梗概集(東海)、pp.389～394、2021.9
- 4) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針・同解説、p.167、2021.12
- 5) 野中英ほか：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11)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.471～472、2020.9
- 6) 新都市ハウジング協会：コンクリート充填鋼管(CFT)造技術基準・同解説の運用及び計算例等、2024.1
- 7) 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8)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.549～550、2019.9
- 8) 林晴佳ほか：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5、日本建築学会大会学術講演梗概集、2019.9
- 9) 鈴木好幸ほか：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15、日本建築学会大会学術講演梗概集、2020.9