

高炉スラグ微粉末を用いた $F_c36\text{N/mm}^2 \sim F_c48\text{N/mm}^2$ のコンクリートの性状横山 右京^{*1}・川又 篤^{*2}

概 要

高炉スラグ微粉末の使用率を 10～70%として使い分けが可能な環境配慮型コンクリートを開発してきた。既往の開発では、 $F_c36\text{N/mm}^2$ 以下のスランプ管理の環境配慮型コンクリートの各種性能、調合設計や施工性に関する検討を行ってきた。本開発では、さらなる適用範囲の拡大を目的に、スランプフロー管理および $F_c36 \sim 48\text{N/mm}^2$ のコンクリートを対象に実験的な検討を行った。その結果、 $F_c48\text{N/mm}^2$ レベルでは、工場保有の強度算定式を利用した調合設計だけでなく、試し練りによる強度試験結果の近似式を合わせて利用することで合理的な調合設計ができることを確認した。

キーワード：環境配慮型コンクリート、高炉スラグ微粉末、 $F_c48\text{N/mm}^2$ 、強度算定式

PROPERTIES OF CONCRETE WITH COMPRESSIVE STRENGTH OF $F_c36\text{N/mm}^2$ TO $F_c48\text{N/mm}^2$ USING BLAST FURNACE FINE SLAG POWDERUkyo YOKOYAMA^{*1}, Atsushi KAWAMATA^{*2}

Abstract

Our research group has been an environmentally friendly concrete that takes in blast furnace fine slag powder, with the dosage adjustable between 10 and 70 percent, depending on specific requirements. In previous developments, various properties, mix designs, and workability of environmentally friendly concrete with a slump control of $F_c36\text{N/mm}^2$ or less have been investigated. The development project of this time, aiming for an expanded range of applications, has conducted experimental studies focused on managing slump flow in fresh concrete with an F_c of 36 to 48 N/mm^2 . As a result, at the $F_c48\text{N/mm}^2$ level, we confirmed that a reasonable mix design can be achieved not only by using the factory's strength calculation formula, but also by combining it with an approximate formula from trial mix strength test results.

Keywords: Environmentally friendly concrete, Blast furnace fine slag powder, $F_c48\text{N/mm}^2$, Strength calculation formula

^{*1} Material Group, Research & Development Center

^{*2} Senior Principal Researcher, Material Group, Research & Development Center

高炉スラグ微粉末を用いた Fc36N/mm²～Fc48N/mm²のコンクリートの性状

横山 右京*1・川又 篤*2

1. はじめに

建築分野では、建物の用途や規模および周辺環境のほか、部位や部材によっても要求性能が異なるため、多種多様なコンクリートが必要となる。日本建築学会の建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事（以下、JASS 5）に、2022 年の改定により要求性能としてこれまでの 5 項目に加えて新たに“環境性”が追加された。その中で、鉄筋コンクリート構造物では、コンクリートの環境影響が大きいことから、環境配慮をより推進するために、資源循環性、低炭素性および環境安全性が示された。

これらの環境性を有する環境配慮型コンクリートは、ゼネコンを中心として 2010 年代より各種の技術が開発、実用化されている。筆者らは、表-1 に示すゼネコン 13 社での共同研究として、環境配慮性をはじめとしたコンクリートに求められる多様な性能に応じて、普通ポルトランドセメント（以下、普通セメント）に対して高炉スラグ微粉末（記号：BF）の使用率を 10～70%として使い分けが可能な環境配慮型コンクリートについて、設計基準強度（記号：Fc）36N/mm²以下のスランブ管理のコンクリートを対象に各種の性能および調合設計や施工^{1)~3)}に関する検討を行ってきた。これにより、BF 使用率を 10～30%とする A 種クラスでは二酸化炭素の削減効果が小さいものの、普通セメントを用いたコンクリートと同様に地上構造物に適用が可能となる。また、BF 使用率 60～70%の C 種クラスでは適用箇所に限定があるものの二酸化炭素の削減効果が約 60%と大きく、BF 使用率 30～60%の B 種クラスを含めて適材適所に応じた性能の環境配慮型コンクリートの選択による建築物への適用が可能とな

ることを示した^{1)~3)}。本研究では、このようなコンクリートについて、さらなる適用範囲の拡大を目的に、スランブフロー管理および Fc36～48N/mm²（以下、Fc48N/mm² レベル）のコンクリートを対象に実験的な検討を行った。

なお、本報は文献^{4)~6)}を再構成し、加筆したものである。

2. 室内実験概要

2.1 実験の概要

Fc48N/mm² レベルにおける BF 使用率 10～70%の環境配慮型コンクリートの検討のために、表-2 に示す組合せで室内実験を実施した。BF 使

表-1 共同研究会の参加会社

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)	

表-2 室内実験の組合せ

呼び強度			36	45	52	60
スランブ/スランブフロー			55cm	21cm	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）

生コン工場	クラス*	準用する強度算定式	
		セメントの種類	空気量
X 工場	A 種, B 種, C 種	普通セメント	4.5%
Y 工場	A 種, B 種, C 種	普通セメント	3.0%
Z 工場	A 種	普通セメント	4.5%
	B 種, C 種	高炉セメント B 種	

*クラスは、BF 使用率に応じて A 種クラス（10 以上 30%以下）、B 種クラス（30 を超え 60%以下）、C 種クラス（60 を超え 70%以下）を指す。

*1 研究開発センター 材料グループ

*2 研究開発センター 材料グループ 主幹研究員

表-4 コンクリートの計画調合の例と使用材料の品質

BF 使用率 (%)	呼び 強度	スランプ／ スランプフロー (cm)	空気量 (%)	計画調合							使用材料の品質*
				W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					
						W	C	BF	S	G	
■X 工場											
70	36	55±7.5	4.5±1.5	44.6	48.1	175	118	274	814	907	C : 密度 3.16g/cm³ BF : 密度 2.89 g/cm³ S : 富津産, 密度 2.61g/cm³ G : 美祢産, 密度 2.70g/cm³, 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											
70	36	55±7.5	4.5±1.5	44.9	50.2	170	114	265	859	885	C : 密度 3.16g/cm³ BF : 密度 2.89 g/cm³ S : 富津産, 密度 2.62g/cm³ G : 美祢+八戸産, 密度 2.69g/cm³, 実積率 61.0%
	45	21±2.0	3.0±1.5	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											
70	36	55±7.5	4.5±1.5	43.5	49.0	170	117	274	837	900	C : 密度 3.16g/cm³ BF : 密度 2.89 g/cm³ S : 君津+佐野産, 密度 2.62g/cm³ G : 佐野+横瀬産, 密度 2.70g/cm³, 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	

* 骨材の品質における密度は表乾密度を示し、混合使用の場合は混合後の密度および実積率を示す。

表-5 使用材料の組合せ

種 類	生コン工場		
	X工場	Y工場	Z工場
普通セメント	a社製	b社製	a社製
高炉スラグ微粉末	c社製	c社製	d社製
細骨材	砂	砂	砂+石灰岩砕砂
粗骨材	石灰岩碎石	石灰岩碎石	石灰岩碎石
化学混和剤	e社製	f社製	g社製

用率は、各種クラスの最大値となる 30%, 60%および 70%, A 種クラス 15%の計 4 水準とした。コンクリートの呼び強度は、36, 45, 52, 60 の 4 水準とし、各呼び強度に応じたスランプまたはスランプフローを表-2 のとおり設定した。なお、JASS 5 では、普通セメントを用いた場合、 F_c48N/mm^2 に対する構造体強度補正値 $_{28}S_{91}$ の標準値を $9N/mm^2$ としており、本研究では、スラグ高含有コンクリートの場合の割増を考慮し、呼び強度 60 のコンクリートが F_c48N/mm^2 レベルに相当すると仮定した。

2.2 調合

実験は、関東圏における市中の 3 つの生コン工場で実施し、コンクリートの計画調合は既往の研究^{1)~3)}で検討した調合設計をもとに、以下の手順で定めた。

まず、表-3 に示す生コン工場において JIS または大臣認定で運用する強度算定式を準用して呼び強度に応じた水結合材比（記号：W/B）を決定した。次に、単位水量は、各呼び強度のスランプまたはスランプフローに対応する標準配合の値として、W/B から求められる単位結合材（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 1000L となるように単位細骨材量で調整した。すなわち、いずれの BF 使用率においても同一の呼び強度とスランプあるいはスランプフローの組合せでは、W/B、単位水量、結合材量（C+BF）および単位粗骨材量は同じ値の調合となる。この方法で求めた各工場における BF 使用率 70%のコンクリートの計画調合の例を表-4 に示す。

また、各工場で使用した各種材料の組合せを表-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）に適合する高炉スラグ微粉末 4000 とした。普通セメントと BF は 2 銘柄ずつを用いたが、3 つの生コン工場ではいずれも異なる組合せである。また、骨材は各生コン工場で日常的に使用するものとした。粗骨材は、

産地が異なるがいずれも石灰岩砕石であった。化学混和剤は各工場で異なるメーカーのものを使用し、各メーカーで 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、標準品のほか、増粘剤一液タイプや BF 高含有タイプ、経時保持タイプなどを選定した。

2.3 室内試験方法

フレッシュコンクリートの試験項目、試験方法および管理値を表-6 に示す。ブリーディング量および沈降量の試験は、普通強度域のスランプフロー管理の調査である呼び強度 36 のみ実施した。また圧縮強度試験は、JIS A 1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）に準拠して行った。供試体寸法はφ100×200mm、養生方法は標準養生とし、材齢 7, 28, 56, 91 日に試験を実施した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリート試験結果

(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。すべての調査とも、適切な化学混和剤使用量とすることで、

いずれも管理値内に収まった。化学混和剤使用量については、同銘柄を使用した呼び強度 45, 52 および 60 において、呼び強度およびスランプ（フロー）の増加とともに使用量が多くなる傾向が見られた。また、同じ呼び強度およびスランプ（フロー）の中で比較すると、BF 使用率による影響は小さかった。他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。

(2) 流入モルタル値

円筒貫入試験による流入モルタル値の結果を図-3 に示す。BF 使用率の増加に伴い、流入モルタル値も増加する傾向を示した。また、呼び強度 36 を除き呼び強度の増加に伴い、言い換えるとスランプ（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。呼び強度 36 では、BF 使用率が増加すると流入モルタル値は低下する

表-6 フレッシュコンクリートの試験項目

試験項目	試験方法	管理値
スランプ	JIS A 1101	呼び強度 45 : 21±2.0cm
スランプフロー	JIS A 1150	呼び強度 36 : 55±7.5cm
		呼び強度 52 : 50±7.5cm
		呼び強度 60 : 60±10cm
空気量	JIS A 1128	X 工場, Z 工場 : 4.5±1.5% Y 工場(呼び強度 36) : 4.5±1.5% Y 工場(呼び強度 45~60) : 3.0±1.5%
流入モルタル値	円筒貫入試験 ¹⁾	60mm 以下
ブリーディング量	JASS 5 T-504	0.1cm ³ /cm ² 以下
沈降量	CFT 造技術指針 ²⁾	2.0mm 以下

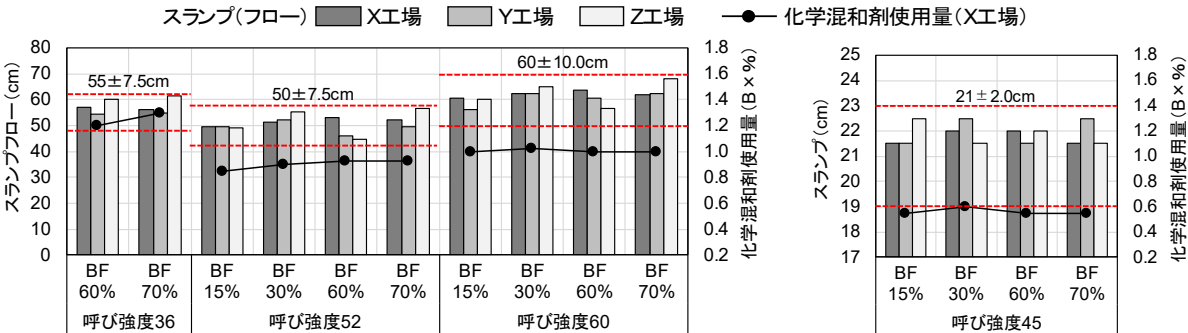


図-1 スランプおよびスランプフロー試験結果ならびに化学混和剤使用量

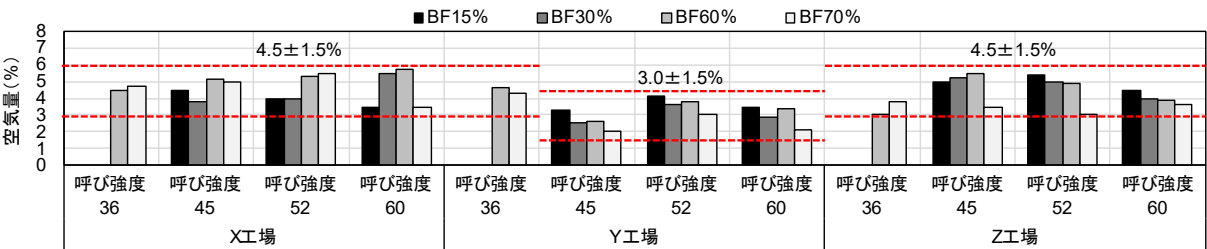


図-2 空気量試験結果

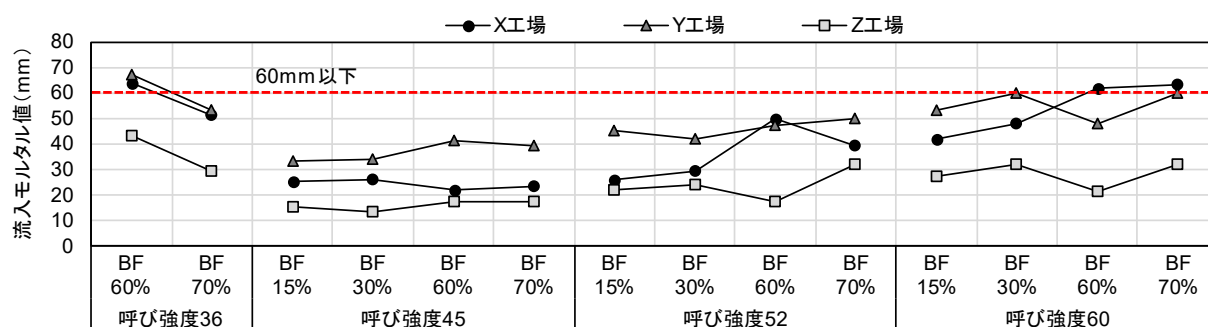


図-3 流入モルタル値試験結果

傾向を示した。なお、管理値 60mm を超える調査もあったが、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⁹⁾と同様の傾向であった。

(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。X工場およびY工場では、CFT造技術指針⁸⁾の管理値 $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ を満足し、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、最も少ない結果となった。一方、Z工場では、管理値を超える結果となった。また、他の2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て、Z工場では逆の傾向となった。Z工場では、ブリーディング試験容器を置いていた試験室のコンクリート表面温度が低かったため、低温環境下でBF使用率が高いほど凝結が遅延する¹⁰⁾ことが影響したものと考えられる。

(4) 沈降量

沈降量試験の結果を図-6に示す。いずれもCFT造技術指針⁸⁾の管理値 2.0mm 以下を満足した。高性能AE減水剤に増粘剤一液タイプを使用したY工場では沈降量が小さくなり、ブリーディング量との相関が見られた。なお、Z工場における沈降量試験は、ブリーディング試験とは異なる室内で実施したため、沈降量が過剰に増加するような傾向は見られなかった。

以上のブリーディング量と沈降量の試験結果から、適切な調合とすることで、CFT造への適用

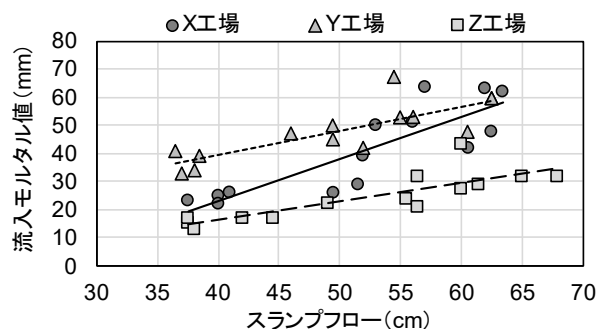


図-4 スランプフローと流入モルタル値の関係

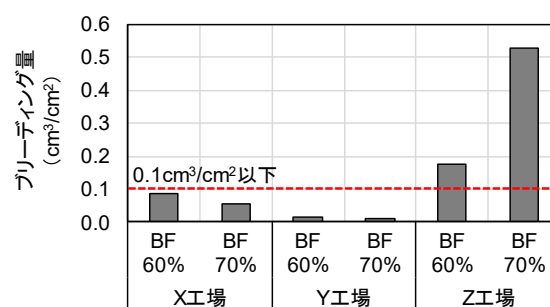


図-5 ブリーディング試験結果

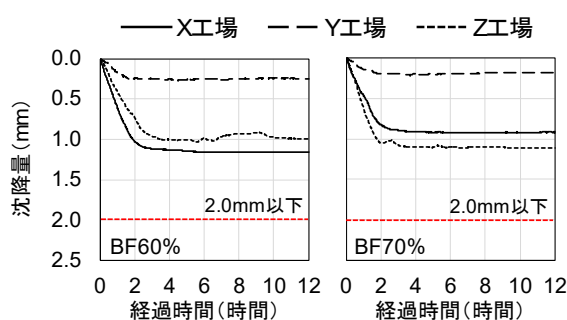


図-6 沈降量試験結果

が可能であることが確認できた。

3.2 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を生コン工場ごとに図-7~9に示す。いずれの調査についても、材齢と共に圧縮強度も増加しており、材齢 28 日において設定した呼び強度を上回る結果となった。スランプフ

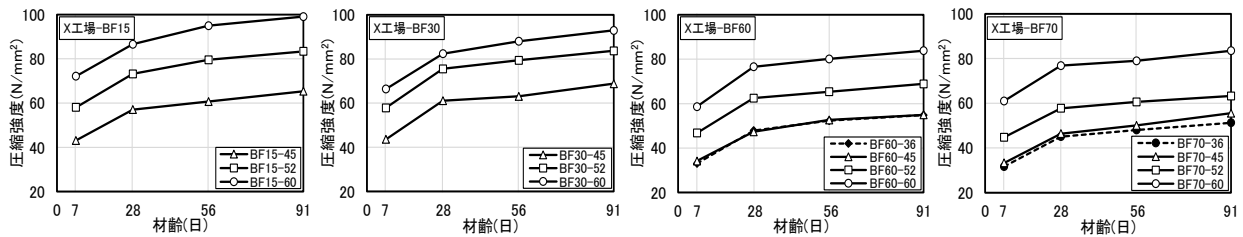


図-7 圧縮強度結果(X工場)

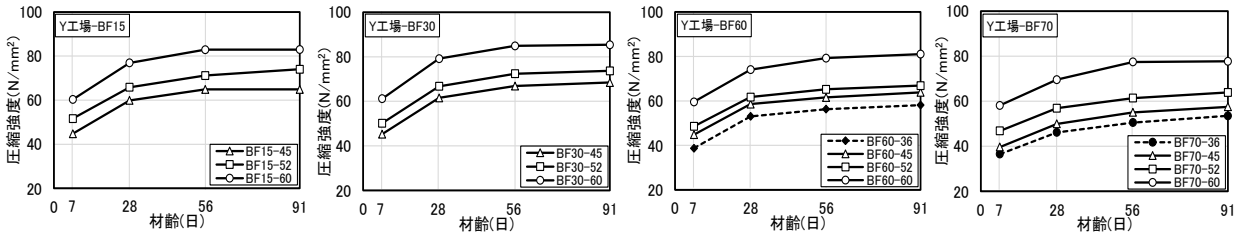


図-8 圧縮強度結果(Y工場)

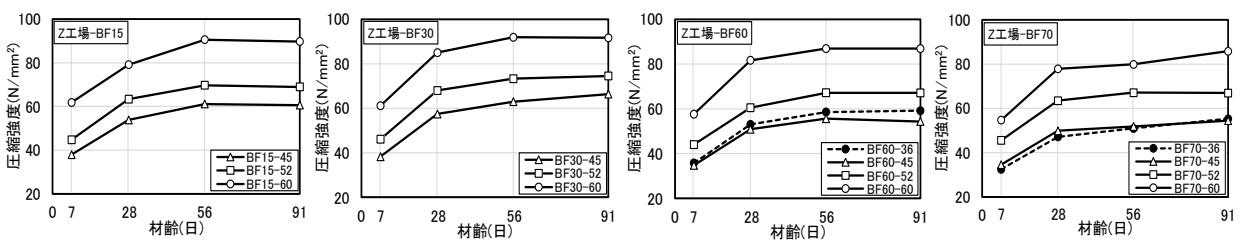


図-9 圧縮強度結果(Z工場)

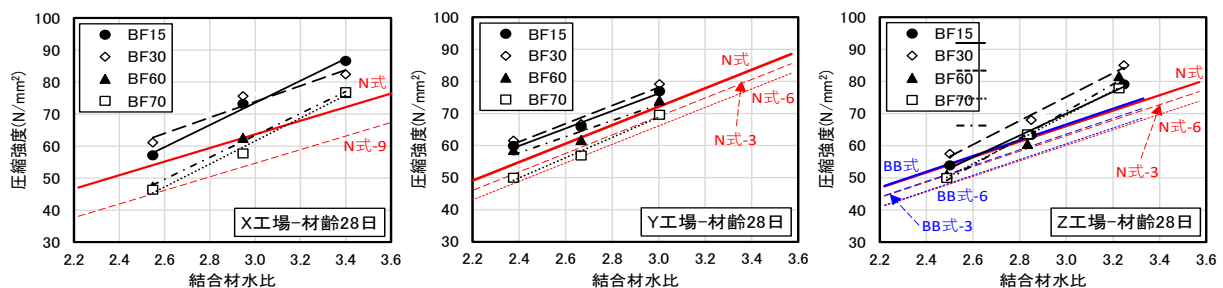


図-10 圧縮強度試験結果と各生コン工場強度算定式の比較

ロー管理とした呼び強度 36 の調合についても、材齢 28 日において呼び強度を上回る結果となった。BF 使用率ごとに見てみると、Y、Z 工場では BF30 が最も強度が大きいものの、全体的には BF 使用率の増加に伴い圧縮強度は低下する傾向を示した。BF 使用率の高い調合における材齢 91 日の長期材齢での強度増進は見られなかった。これらの結果から、本報で対象とした $Fc48N/mm^2$ レベルのコンクリートでは、既往の研究¹⁰⁾における高炉スラグ微粉末を使用した $Fc36N/mm^2$ 以下のコンクリートと、材齢 28 日から材齢 91 日までの強度増進の傾向は若干異なるものの、BF 使用率が増加するに伴って圧縮強度が低下する傾向に関しては同様となった。

圧縮強度と強度算定式の比較

圧縮強度試験結果と各生コン工場保有の強度算定式との比較を図-10 に示す。X、Y 工場は普通セメントの強度算定式のみであるが、Z 工場は高炉セメントの強度算定式も合わせて記載している。各工場の強度算定式と圧縮強度の結果を比較すると、圧縮強度結果の近似式と強度算定式で傾きが若干異なるものがあるものの、結合材水比の増加と共に圧縮強度も増加しており、概ね同様の傾向を示している。また、各工場において BF 使用率が変わっても、近似式の傾きは同程度の傾向を示した。BF30 における圧縮強度はすべて強度算定式を上回る結果となり、BF15 においても同等以上の強度結果となった。また、最も大きい

呼び強度 60 の調合の圧縮強度は、Y 工場の BF70 を除いて、強度算定式を上回る結果となった。これに対して、BF60、BF70 の呼び強度 45 および 52 の調合の圧縮強度は、強度算定式と同等か下回る結果となった。BF 使用率が大きい、あるいは結合材水比が小さい場合には、強度算定式を下回る可能性がある。Z 工場における高炉セメントの強度算定式と普通セメントの強度算定式は重なり合うような算定式であるため、いずれの算定式と比較しても実験で得られた圧縮強度との強度差に違いは見られなかった。

4. 本報における強度算定式の設定

圧縮強度結果が強度算定式を下回るもしくは下回る可能性がある調合があることから、高炉スラグ微粉末を使用した $Fc48N/mm^2$ レベルのコンクリート調合設計方法を検討した。既往の検討¹²⁾と同様に、各工場保有の強度算定式をもとに圧縮強度結果全体を包括できるように、目標とする呼び強度を割り増す（強度算定式の切片を小さくする）ことで結合材水比を算出する方法を検討した。表-7 に強度算定式と圧縮強度の差および強度を満たすための割増強度を示す。図-10 に割増強度を反映させた強度算定式を合わせて示す。BF15、BF30 では、概ね強度算定式を下回ることではなく、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 工場のように $0.2\sim0.5N/mm^2$ 強度算定式を下回る場合もあるため、安全側をみて割増強度の設定が必要な場合もあると考える。BF60、BF70 については、すべての工場において強度算定式を下回る結果が確認された。最も大きいもので $7.7N/mm^2$ の差が確認されたため、 $3\sim9N/mm^2$ 割増強度を設定する必要がある。既往の研究¹²⁾の結果である $3\sim6N/mm^2$ よりも大きい割増強度となっているが、これは Fc を大きくした高強度域による影響であると考えられる。工場保有の強度算定式を利用した調合設計方法では、X、Z 工場のように圧縮強度結果と強度算定式の傾きが同等でない場合に、高強度域で過剰な強度設計になる可能性がある。 $Fc48N/mm^2$ レベルのコン

表-7 強度算定式との強度差と割増強度(N/mm^2)

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

※上段が割増強度、下段()が強度算定式と圧縮強度の差

クリートでは、実験結果から算出した近似式をもとにした強度算定式を設定する方が合理的な場合もあることが示唆された。

5. まとめ

本報で得られた知見を以下に示す。

- 適切な化学混和剤使用量とすることで、目標とするフレッシュコンクリートの品質を得られることが確認された。
- 圧縮強度は、 $Fc48N/mm^2$ レベルであっても $Fc36N/mm^2$ 以下のコンクリートと同様に BF の使用率が同一の場合は、結合材水比の増加と共に圧縮強度も増加する傾向が示された。
- BF15、30 などの BF 使用率の小さい調合では強度算定式を上回るか同等であり、BF60、70 の BF 使用率の大きい調合では強度算定式を下回ることが確認された。
- $Fc48N/mm^2$ レベルでは、工場保有の強度算定式を利用した調合設計方法だけでなく、圧縮強度結果における近似式を利用した調合設計方法も合わせて検討することで合理的な強度設計が可能となることが示唆された。

謝辞

本研究の実施にあたり、内山アドバンス、関東宇部コンクリート工業およびアサノコンクリート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

- 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) 金子樹ほか: 高炉スラグ微粉末を混和材として用いたFc48N/mm²レベルのコンクリートの性状 (その1) 室内実験の概要
 - 5) 川又篤ほか: 高炉スラグ微粉末を混和材として用いたFc48N/mm²レベルのコンクリートの性状 (その2) 室内実験におけるフレッシュコンクリート
 - 6) 村井克綺ほか: 高炉スラグ微粉末を混和材として用いたFc48N/mm²レベルのコンクリートの性状 (その3) 室内実験における圧縮実験
 - 7) 日本建築学会: コンクリートの調合設計指針・同解説, 2015.2
 - 8) 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
 - 9) 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
 - 10) 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
 - 11) 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概要集, 2019.9
 - 12) 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概要集, 2020.9