

高炉スラグ微粉末高置換コンクリートの収縮および発熱特性に関する検討

Study of Shrinkage and Heat Generation Characteristics of High Replacement Concrete using Ground Granulated Blast Furnace Slag

榎 島 修^{*1}

Osamu Makishima

金 子 泰 明^{*1}

Yasuaki Kaneko

折 田 現 太^{*1}

Genta Orita

桃 木 昌 平^{*1}

Shouhei Momoki

【要旨】

高炉スラグ微粉末をセメントの一部と置換したコンクリートは、低炭素型のコンクリートとして活用が期待されている。ただし、高炉スラグ微粉末を多量に置換するとコンクリートの物性に影響を与えることが知られているものの、現状では、基本的な物性や耐久性、収縮特性、発熱特性などデータは十分に整備されていない。

本稿では、高炉スラグ微粉末を高置換したコンクリートの圧縮強度および、乾燥収縮、自己収縮、断熱温度上昇特性を実験的に評価し、従来コンクリートとの対比によって収縮ひび割れ対策としての有効性について検討した。

実験的な評価の結果、高炉スラグ微粉末を高置換したコンクリートは、普通ポルトランドセメントを使用した従来のコンクリートに比べて自己収縮、乾燥収縮が減少し、ひび割れリスクの低減が期待できる。また、同定した断熱温度上昇特性からは、低熱ポルトランドセメントと同等の終局断熱温度上昇量、断熱温度上昇速度であることを確認し、マスコンクリートの温度ひび割れ対策としての有効性を確認した。

【キーワード】 高炉スラグ微粉末 置換率 自己収縮 乾燥収縮 発熱特性

1. はじめに

セメントは、製造時に多量のCO₂が排出される¹⁾。コンクリートとしてのCO₂の排出量を削減するためには、単位セメント量を減少させることが有効となる。そのため、CO₂原単位の小さい混和材をセメントの一部と置換して使用することは、コンクリートの各種性状を確保するとともに、コンクリートとしてのCO₂排出量の抑制が期待される。特に、潜在水硬性を有する高炉スラグ微粉末（以降、BFSと表記する）は、混和材として大量に使用したコンクリートとして実績があることが示され²⁾、高炉セメントC種（置換率60～70%）の範囲を超える使用も可能となっている³⁾。ただし、BFSを高置換したコンクリートの基本的な物性や耐久性、ひび割れへの影響を評価するための収縮特性や発熱特性に関するデータは十分に整備されていない。

以上のことから、BFSを高置換したコンクリートを構造物に適用することの有効性を検討するために、収縮および発熱特性の取得を目的として、実験的に評価することとした。

本稿では、BFSを高置換したコンクリートの圧縮強度および、乾燥収縮、自己収縮、断熱温度上昇特性を評価対象とし、従来コンクリートとの対比によって収縮ひび割れ対策としての有効性について検討した結果を示す。

2. 実験概要

2.1 検討配合

検討配合を表-1に示す。使用材料としてのBFSは、JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」の「高炉スラグ微粉末4000」に該当し、せつこうが添加されたものを使用した。なお、せつこうの添加量は約2%である。また、セメントには、普通ポルトランドセメントを使用した。配合は、単位水量を一定として、水結合材比（以降、WBと示す）を55%、45%の2水準設定した。また、セメントに対するBFSの置換率を0%、75%、85%の3水準設定した。

表-1 検討配合

配合名称	水結合材比 (%)	BFS置換率 (%)	単位量(kg/m ³)			フレッシュ試験結果	
			C	BFS	W	スランプ (cm)	空気量 (%)
N55-0	55.0	0	315	0	173	20.0	3.1
N55-75	55.0	75	79	236	173	20.0	3.8
N55-85	55.0	85	47	267	173	20.5	3.3
N45-0	45.0	0	384	0	173	17.0	4.3
N45-75	45.0	75	96	288	173	14.0	3.0
N45-85	45.0	85	58	327	173	23.0	3.8

【使用材料】

C: 普通ポルトランドセメント、

BFS: 高炉スラグ微粉末(粉末度4000、せつこう約2%添加)、W: 水

【配合名称】 セメント種別-水結合材比-BFS置換率

2.2 試験項目と方法

試験項目および方法を表-2に示す。圧縮強度試験、乾燥収縮試験はJIS法、自己収縮試験はJCI法により行った。簡易断熱温度上昇試験では、図-1に示す発泡スチロール製の簡易断熱容器を用い、ブリキ製の圧縮強度試験用コンクリート供試体成形型枠（φ100×200mm）にコンクリートを打込み設置した。打込み温度、室温は、20℃として供試体の温度を測定した。断熱温度上昇特性は、土木学会コンクリート標準示方書設計編（以降、示方書と表記する）に示される断熱温度上昇特性を表す式（解5.2.2）⁴⁾で表現し、実測値に基づく温度解析によって各係数を同定した。温度計測結果と同定した断熱温度上昇特性を表す式を用いた温度予測値の例を図-2に示す。このように、温度予測値は、実測値と概ね一致することを確認している。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度

検討配合における圧縮強度試験結果と示方書に示される普通ポルトランドセメント（以降、Nと示す）、低熱ポルトランドセメント（以降、Lと示す）、高炉セメントC種（以降、BCと示す）を用いた同様のWBのコンクリート（表中にJSCE-N55, JSCE-BC55, JSCE-L55, JSCE-N45, JSCE-BC45, JSCE-L45と表示）の予測とを対比して図-3, 図-4に示す。

この結果から、BFSを置換しない、WB45%（N45-0）は、土木学会の予測値に比べてやや低い値となっているが、WB55%（N55-0）は、よく一致している。これは、表-1に示したように、空気量の変動によって生じた差異とみられ、土木学会の予測値と概ね一致していると考えられる。

BFSの置換による圧縮強度への影響は、いずれのWBにおいても、BFSの置換率75%に比べて置換率85%の圧縮強度が低い傾向にある。また、いずれのWBにおいてもBFSの置換率85%では、材齢7日まではLよりも大きく、材齢28日では、Lよりも小さくなる傾向がみられた。

BCとの比較では、WB55%置換率75%（N55-75）とWB45%置換率85%（N45-85）が材齢7日までBCの強度発現と同等であり、材齢28日では、いずれの圧縮強度もBCに比べて小さい傾向となった。

このことから、今回評価したBFS高置換コンクリートは、材齢7日までの強度発現は比較的大きく、以降の強度の増加は小さい傾向が確認された。

3.2 自己収縮

検討対象の配合における自己収縮試験結果と、示方書に示されるNおよび高炉セメントB種（以降、BBと示す）を用いたWB55%, WB45%の予測（表中にJSCE-

表-2 試験項目および方法

試験項目	試験方法
圧縮強度試験	JISA1108コンクリートの圧縮強度試験方法に準じた標準水中養生、試験材齢3日、7日、28日
自己収縮試験	JCI-SAS2 セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法（案）に準じた供試体寸法10×10×40cm、環境温度20℃。
乾燥収縮試験	JISA1129モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法に準じた測定材齢：7日、28日、56日、91日、182日
簡易断熱温度上昇試験	発泡スチロールによる断熱容器：図-1参照 熱電対による温度計測位置：試験体中心、試験環境（室温） コンクリート線上がり温度、室温：20℃ 温度解析により、下記の断熱温度上昇特性を表す式 ⁴⁾ の係数（終局断熱温度上昇量： Q_{∞} 、断熱温度上昇速度に関する係数： r, s 、発熱開始材齢： t_0 ）を同定した $Q(t) = Q_{\infty} \left(1 - e^{-r(t-t_0)^s} \right)$

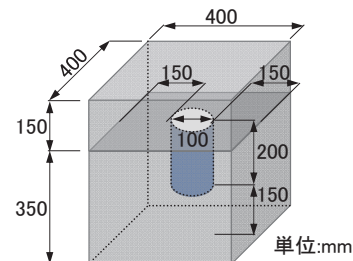


図-1 簡易断熱容器（発泡スチロール製）

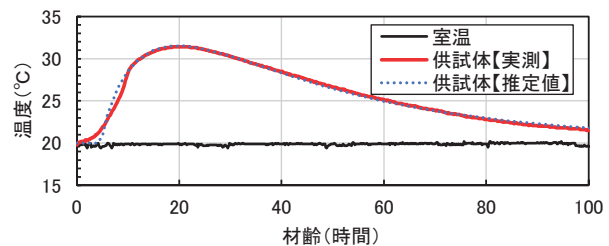


図-2 温度計測結果と同定した断熱温度上昇特性を用いた温度推定値の例（N55-0）

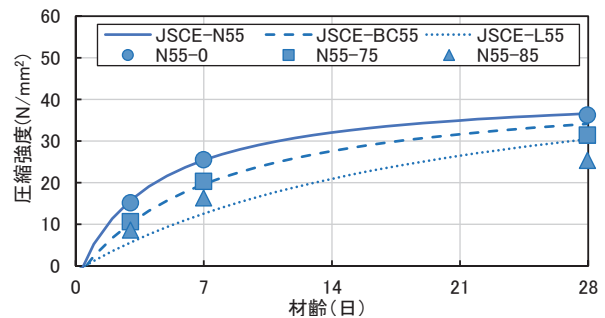


図-3 圧縮強度試験結果（WB55%）

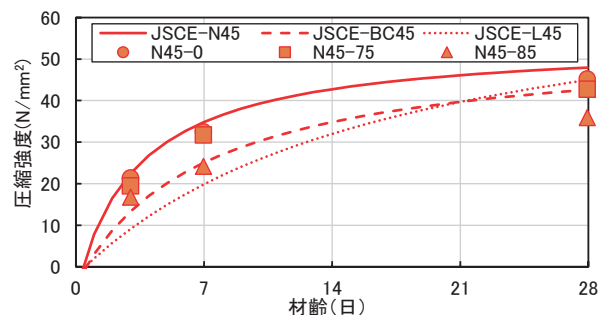


図-4 圧縮強度試験結果（WB45%）

N55, JSCE-N45と表示)を対比して図-5に示す。実験結果は、示方書に示されるNやBBを用いたコンクリートの自己収縮の予測に比べて、自己収縮が小さく、BFS高置換コンクリートの自己収縮ひずみの最小値は、 -10×10^{-6} (N45-75)であった。また、いずれのW/Bにおいても、BFSの置換率の増加によって自己収縮ひずみが減少する傾向がみられた。BFSを高置換したコンクリートは、W/B55%では材齢2日以降から膨張傾向が認められ、W/B45%では材齢初期に膨張傾向が認められた。このように、BFSを置換したコンクリートの自己収縮ひずみの減少は、発生した膨張が影響していると考えられる。

なお、W/B30%程度のBFS置換コンクリートでは、せつこうの添加量を2%としても自己収縮を抑制する効果はほとんど無く、添加量が3.5%以上必要であるとの報告がある⁹⁾ものの、今回の実験対象としたBFS高置換の配合では、BFSに2%添加されたせつこうが有効に機能した⁹⁾と考えられる。

以上より、W/B45%、55%の範囲であれば、2%のせつこうが添加されたBFSを75%、85%置換することで、自己収縮に伴うひび割れの抑制が期待できると考えられる。

3.2 乾燥収縮

検討対象の配合における乾燥収縮試験結果を図-6に示す。BFSを置換しない配合(N55-0, N45-0)では、W/Bの違いに関わらず材齢182日において長さ変化率が同等の約 530×10^{-6} であった。また、BFSの置換率を75%、85%とすることで、長さ変化率が14%~30%減少する傾向がみられた。このように、BFSを高置換したコンクリートは、乾燥収縮が小さく、ひび割れ抑制に貢献できるものと考えられる。

3.3 断熱温度上昇特性

実験によって同定した、BFSを置換しない配合(N55-0, N45-0)の断熱温度上昇特性と、示方書に示されるNを用いた同等の単位セメント量のコンクリート(表中にJSCE-N55, JSCE-N45と表示)の終局断熱温度上昇量を比較として図-7に示す。図に示すように、終局断熱温度上昇量は、示方書に示される予測と概ね一致する結果であった。このことから、今回実施した簡易断熱温度上昇試験によって評価された実験結果は概ね妥当であると判断される。

次に、検討対象の配合の断熱温度上昇特性の結果と、示方書に示されるNを用いた検討対象の配合に対して単位セメント量の25%、15%とした場合の終局断熱温度上昇量の予測値(表中にN55-C25%, N55-C15%, N45-C25%, N45-C15%と表示)を比較として図-8に示す。また、実験結果から同定した断熱温度上昇特性に関する式の係数を表-3示す。なお、示方書に示される断熱温度上昇

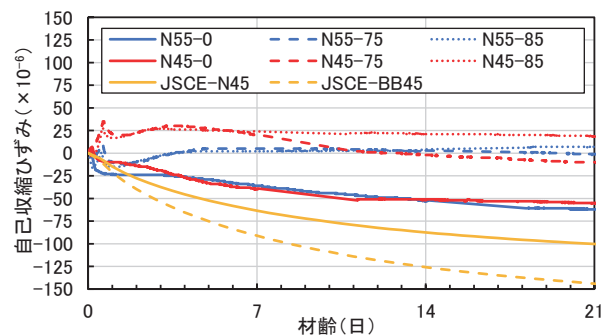


図-5 自己収縮試験結果

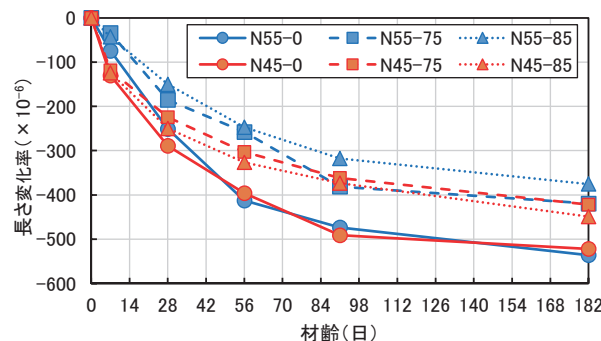


図-6 乾燥収縮試験結果

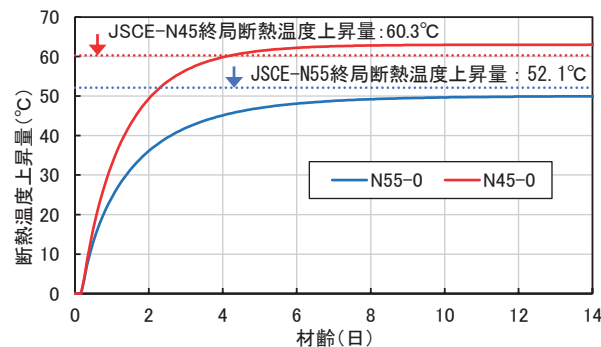


図-7 断熱温度上昇特性(ベース配合)

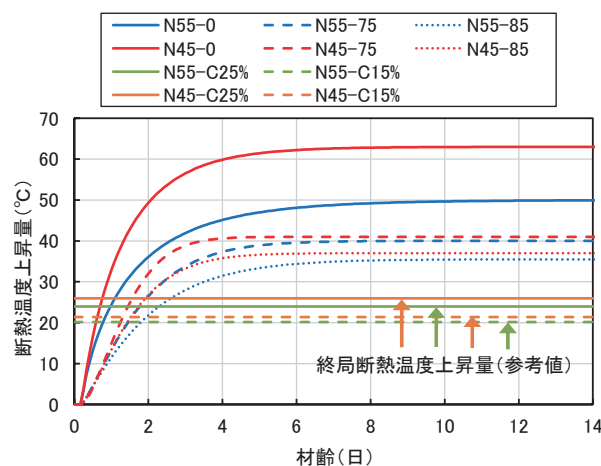


図-8 断熱温度上昇特性

特性の予測式は、単位セメント量 $250\text{kg/m}^3 \sim 400\text{kg/m}^3$ のコンクリートが対象であるため、W/B55%、W/B45%、単位セメント量25%、15%としたコンクリートでは、セメント量が適用対象外($47\text{kg/m}^3 \sim 96\text{kg/m}^3$)であることが

ら、参考として扱う。BFSの置換率の増加により終局断熱温度上昇量が減少する傾向が認められた。BFSの置換率を75%、85%とした場合、終局断熱温度上昇量は、W/B（単位セメント量）の違いに関わらず比較的近い値を示し、W/Bが小さいほど置換しない配合に比べて減少量が大きい傾向となることが確認された。BFSを高置換しセメント量を減じた配合と、同等のセメント量となる単位セメント量を25%、15%に減じた場合のコンクリートの終局断熱温度上昇量の予測値を比べると、BFSを置換した方が大きい値になることを確認した。この差は、添加したBFSの反応に伴う発熱が加味されていることを示し、単純にセメント量を減じただけの断熱温度上昇特性で評価することは適切でないことを確認した。温度上昇速度については、置換率が大きいほど、W/Bが大きいほど温度勾配が緩やかになることが認められ、置換率の増加は、温度ひび割れの抑制に有効と考えられる。

検討対象の配合の断熱温度上昇特性と、示方書に示される低発熱型セメント（中庸熟ポルトランドセメント（以降、Mと示す）、BC、L）を用いたコンクリートの予測（表中に、JSCE-M55、JSCE-BC55、JSCE-L55、JSCE-M45、JSCE-BC45、JSCE-L45と表示）との対比をW/Bごとに図-9、図-10に示す。W/B55%のBFS75%の置換では、MとLの中間に位置し、BFSの85%置換では、終局断熱温度上昇量および温度上昇速度のいずれもLを下回ることが確認された。W/B45%では、BFSの75%、85%置換により、終局断熱温度上昇量および温度上昇速度のいずれもLを下回ることが確認された。

以上から、BFSの置換率75%、85%のコンクリートは、低W/Bほど発熱が抑制される傾向にあり、Lと同等あるいはそれ以上の発熱抑制効果が期待できる。また、材齢初期の圧縮強度の発現が、Lよりも比較的大きく推移することから、Lよりも温度ひび割れ抑制効果が大きくなる可能性があるものと考えられる。

4. まとめ

本検討で得られた結果を以下に示す。

- ・圧縮強度は、BFSの置換率が大きいほど長期材齢における強度増加が小さいが、材齢7日までの短期材齢の強度発現はLに比べて大きい。
- ・自己収縮は、せっこうが2%添加されたBFSの使用により、自己収縮が極めて小さく、自己収縮に伴うひび割れの抑制が期待できる。
- ・乾燥収縮は、せっこうが2%添加されたBFSの使用によりBFS無添加に比べて14%~30%低減し、乾燥収縮に伴うひび割れの抑制が期待できる。
- ・断熱温度上昇特性は、低発熱型セメントと同等あるいはそれ以上の発熱抑制効果が認められ、低W/Bにおいてより有利となる。

表-3 同定した断熱温度上昇特性に関する係数

配合名称	終局断熱温度上昇量	断熱温度上昇速度に関する係数		発熱開始材齢
	Q_{∞}	r	s	
N55-0	50.0	0.80	0.80	0.2
N55-75	40.0	0.53	1.22	0.2
N55-85	35.5	0.50	1.10	0.2
N45-0	63.0	0.90	0.90	0.2
N45-75	41.0	0.63	1.50	0.2
N45-85	37.0	0.60	1.30	0.2

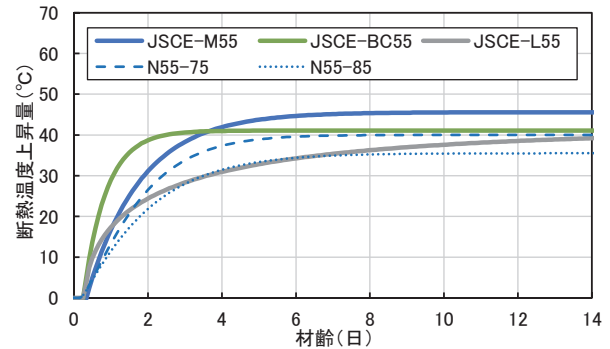


図-9 断熱温度上昇特性 他セメントとの比較(W/B55%)

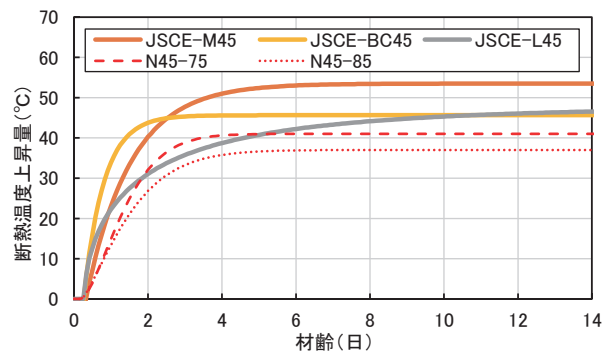


図-10 断熱温度上昇特性 他セメントとの比較(W/B45%)

以上より、W/Bが55%、45%の範囲では、せっこうが添加されたBFSをセメントに75%、85%置換することで、従来のコンクリートに比べて良好な収縮特性を示し、発熱抑制効果も大きいことから、温度応力の対策が必要なコンクリート構造物では、ひび割れ抑制に有利な材料であることが確認された。今後、実構造物に適用した場合の発熱特性の確認により、実施工における温度ひび割れ抑制効果の予測、評価につなげたい。

【参考文献】

- 1) セメント協会、セメントの LCI データの概要、p8, 2023.2
- 2) 土木学会、混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案）、コンクリートライブラリー152, p38, 2018.9

- 3) 土木研究所, 戸田建設, 西松建設: 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(V)高炉スラグ微粉末を高含有した低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル(案), 共同研究報告書, 第475号, 268p., 2016.1
- 4) 土木学会, 2022年制定コンクリート標準示方書設計編, 6編温度ひび割れに対する照査, 5.2 熱物性, p.346, 2023.3
- 5) 土木学会, 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針, コンクリートライブラリー151, p.40, 2018.9
- 6) 加藤弘義, 宮川豊章, 中村明則, 土井宏行: 高炉スラグ微粉末を使用した高流動コンクリートの自己収縮に与えるセッコウおよび石灰石微粉末の影響, 土木学会論文集, No.711/V-56, pp.111-124, 2002.8

Summary Concrete of which part of the cement was replaced with ground granulated blast furnace slag is expected to be utilized as low carbon-type concrete. However, although it is known that the replacement with a large amount of ground granulated blast furnace slag affects physical properties of concrete, the data of basic physical properties, durability, shrinkage characteristics, and heat generation characteristics are not sufficiently arranged in the present situation.

This paper experimentally evaluated compressive strength, drying shrinkage, autogenous shrinkage and adiabatic temperature rise characteristics of high replacement concrete with ground granulated blast furnace slag and examined the effectiveness of shrinkage crack measures by comparisons with conventional concrete.

As a result of experimental evaluations, high replacement concrete with ground granulated blast furnace slag is drying shrinkage and autogenous shrinkage are reduced in comparison with conventional concrete using ordinary Portland cement. In addition, we verified from the identified adiabatic temperature rise characteristics that the concrete has the adiabatic temperature rise amount and adiabatic temperature rise speed equivalent to low-heat Portland cement and recognized the effectiveness as temperature crack measures for mass concrete.

Key Words : *ground granulated blast furnace slag, rate of replacement, autogenous shrinkage, drying shrinkage, heat generation characteristics*