

高炉スラグ微粉末を大量使用した低炭素型のコンクリート 「スラグリート[®]」の現場適用に関する検討

COSIDERATION OF THE ON-SITE APPLICATION OF “SLAGRETE,” A LOW-CARBON CONCRETE USING A LARGE AMOUNT OF GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG

守屋 健一^{*1}, 井戸 康浩^{*1}, 土師 康一^{*2}, 田中 徹^{*3}
Kenichi MORIYA, Yasuhiro IDO, Kouichi HAZE and Tooru TANAKA

This is required the utilization of by-products from the perspective of consideration for the global environment and effective use of resources. In this study, laboratory and actual tests were conducted using materials from a ready-mixed concrete plant for the application of Slagrete, a low-carbon concrete in which blast furnace slag fine powder is substituted for 70% of cement, to be used for “TODA BUILDING”. The tests were conducted to examine flesh properties, compression strength and effect on durability.

The results of the tests, it is confirmed that by replacing 70% (by mass) of the cement for ground granulated blast furnace slag, a by-product, it is possible to reduce thermal cracking in mass concrete and reduce carbon dioxide emissions compared to concrete made with only ordinary Portland cement. Furthermore, when Slagrete was applied to the pressure-resistant plates of “TODA BUILDING,” both the slump and air content met were in the standard ranges, same as the ordinary concrete construction of the same slump.

Keywords: *environment consideration, ground granulated blast furnace slag, carbon dioxide emission, compressive strength, durability*

環境配慮, 高炉スラグ微粉末, 二酸化炭素排出量, 圧縮強度, 耐久性

1. はじめに

近年, 地球環境への配慮や資源の有効利用の観点から副産物の積極的な活用が求められている。特に, 高炉における銑鉄の製造過程で副産物として発生する高炉スラグ微粉末は, 二酸化炭素排出量原単位が少ないことから, コンクリートの使用材料に起因する二酸化炭素排出量削減を目的にポルトランドセメントの一部に置き換える具体的な検討が行われている。筆者らは, 高炉スラグ微粉末を使用した低炭素型のコンクリートの研究を進め, 国立研究開発法人土木研究所が主催した「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」(2011~2015)に参画¹⁾し, セメント質量の70~90%を高炉スラグ微粉末に置換した高炉スラグ微粉末高含有コンクリート「スラグリート[®]」を開発し, 土木工事現場や建築工事現場に適用してきた^{2), 3), 4)}。

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは, 長期強度の増進, アルカリシリカ反応の抑制, 水密性の向上および塩化物イオン浸透に対する抵抗性に優れ, コンクリート用混和材として有用である。

本論文では, 高炉スラグ微粉末をセメントの代替として70%を置換した低炭素型のコンクリート「スラグリート[®]」の「TODA BUILDING」への適用に向け, 出荷するレディーミクストコンクリート工場(以下, 生コンクリート工場)の材料を用いて各種試験を行い, フレッシュ性状, 圧縮強度, 耐久性に与える影響について検討

した結果と「TODA BUILDING」への適用について報告する。

2. 室内試験

2.1 試験概要

本試験では高炉スラグ微粉末を70%置換したコンクリートについて, フレッシュ性状, 圧縮強度, 耐久性を把握することを目的として室内試験を実施した。

(1) コンクリートの使用材料

表1に本コンクリートの使用材料を示す。

セメントは普通ポルトランドセメント(以下, Nセメント), 混和材はJIS A 6206に規定された高炉スラグ微粉末4000(無水せっこうをSO₃換算で2.0%添加)を使用した。細骨材および粗骨材は, 生コンクリート工場で通常

表1 本コンクリートの使用材料

使用材料	記号	詳細
セメント	N	普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm ³)
混和材	BFS	高炉スラグ微粉末4000 (無水せっこう添加, 密度2.89g/cm ³)
細骨材	S	山砂(千葉県市原, 表乾密度2.59g/cm ³) 砕砂(大分県戸高, 表乾密度2.67g/cm ³)
粗骨材	G	碎石2005(北海道稚朗, 表乾密度2.70g/cm ³)
化学混和剤	SP	高性能 AE 減水剤(標準形 I 種) (高炉スラグ高含有コンクリート用) ポリカルボン酸系化合物, リグニンスルホン酸塩

*1 戸田建設(株)技術研究所 修士(工学)

*2 戸田建設(株)本社土木技術部 修士(工学)

*3 戸田建設(株)技術研究所 工学修士

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.
Technology Division (Civil Engineering), TODA CORPORATION, M.Eng.
Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.

表2 コンクリートの配(調)合およびフレッシュ性状試験結果

BFS 置換率 (%)	SL (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (B×%)	フレッシュ試験結果		
					W	C	BFS	S	G		SL (cm)	Air (%)	CT (°C)
70	21	4.5	45	48.5	170	113	264	836	915	1.10	22.5	4.7	23
			40	47.1	170	128	298	791	915	1.05	22.0	3.9	23
			32	43.0	175	165	383	671	915	1.00	21.0	4.5	22

に使用されているものを使用し、化学混和剤は高炉スラグ高含有コンクリート用の高性能 AE 減水剤 (SP) を使用した。

(2) コンクリートの使用材料

表2にコンクリートの配(調)合を示す。

高炉スラグ微粉末の置換率はセメント質量の70%とし、水結合材比(W/B)は45%、40%および32%の3種類とした。単位水量は、W/B=45%および40%の配(調)合を170kg/m³とし、W/B=32%の配(調)合は175kg/m³とした。化学混和剤は、Nセメントと高炉スラグ微粉末を合せた結合材に対して添加(B×%)し、目標スランブ(SL)21cm、目標空気量(Air)4.5%が得られるように添加率を調整した。

(3) 試験項目および方法

表3に試験項目と試験方法を示す。

フレッシュ性状の試験は、スランブ、空気量、コンクリート温度(CT)および断熱温度上昇特性について実施し、硬化性状の試験は、圧縮強度、長さ変化および促進中性化について実施した。

なお、断熱温度上昇試験は、JCI-SQA3:「コンクリートの断熱温度上昇試験(案)」を参考に、試験装置には空気循環式を用いた。試料容積は50L(直径φ400mm×高さ400mm)で、測定は10分間隔で1日当りの温度変化量が±0.1°C以下になるまで継続した。

2.2 試験結果

(1) フレッシュ性状

表2にフレッシュ性状試験結果を示す。

スランブおよび空気量は、化学混和剤の添加率を調整することで、目標値を得ることができた。

図1に打込み温度20°Cでの材齢と温度上昇量の関係を示す。

試験は、W/B=45%、40%および32%のほか、比較用として普通ポルトランドセメント(W/C=40%、C=438kg/m³)、低発熱系セメントの中庸熱ポルトランドセメント(W/C=40%、C=438kg/m³)の配(調)合も実施した。高炉スラグ微粉末を70%使用した配(調)合の終局断熱温度上昇量Q_∞は、W/B=40%の時、中庸熱ポルトランドセメントよりも10°Cほど小さく、水和発熱量の抑制効果を確認でき、マスコンクリート構造物の水和発熱によるひび割れ抑制の対策として有効であることが確認された。

(2) 圧縮強度

図2に打込み温度20°Cでの材齢7日、14日、28日、56

表3 試験項目と試験方法

分類	試験項目	試験方法
フレッシュ性状	スランブ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
	断熱温度上昇	JCI-SQA3
硬化性状	圧縮強度	JIS A 1108
	長さ変化	JIS A 1129
	促進中性化	JIS A 1153

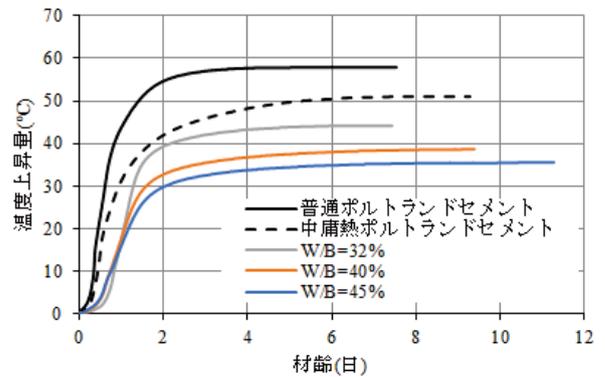


図1 材齢と温度上昇量の関係

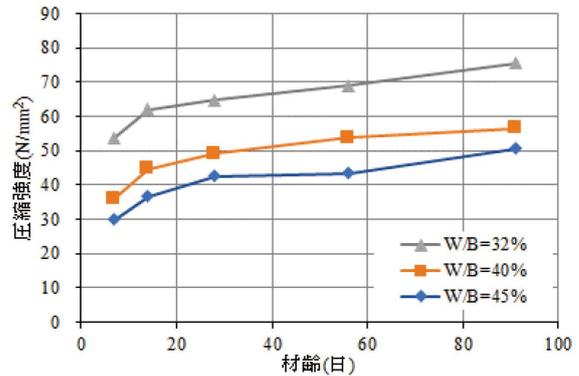


図2 材齢と圧縮強度の関係(標準養生)

日および91日における標準養生圧縮強度の関係を示す。

圧縮強度試験は、W/B=45%、40%および32%について実施した。結合材として高炉スラグ微粉末を用いているため、長期的な強度の増進はいずれの配(調)合も大きかった。

(3) 長さ変化および質量変化

図3に乾燥材齢と長さ変化率の関係、図4に乾燥材齢と質量変化率の関係を示す。

長さ変化率は W/B=32%の配(調)合では、他の配(調)合と比較して乾燥材齢1週で変化が大きい傾向を示したが、乾燥材齢26週においては、配(調)合による明確な差は見られず、概ね同じ長さ変化率であった。また、W/Bが小さい配(調)合ほど質量変化率が小さい傾向が確認された。

(4) 促進中性化試験

図5に促進中性化試験による促進材齢と中性化深さの関係を示す。

促進中性化試験は W/B=45%、40%および32%について実施した。W/Bが増加することで中性化深さは大きくなった。また、高炉スラグ微粉末の置換率を70%とした配(調)合においても、中性化深さは促進期間の平方根に比例する傾向が確認され、 \sqrt{t} 則が成り立つことが確認された。

(5) 二酸化炭素排出量

図6にコンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)⁵⁾に記載されている二酸化炭素排出量原単位を基に作成した二酸化炭素排出量を示す。本低炭素型のコンクリートは、二酸化炭素排出量原単位が大きいポルトランドセメント量を結合材中の30%まで低減し、二酸化炭素排出量原単位の小さい副産物である高炉スラグ微粉末を結合材として大量に使用することにより、二酸化炭素排出量を大幅に削減したコンクリートである。低炭素型の

コンクリートは、同一強度のポルトランドセメントを使用したコンクリートと比較すると約65%の二酸化炭素排出量削減効果が期待できる。

3. 実機試験

3.1 試験概要

本試験は出荷する生コンクリート工場の設備により製造されたコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度の確認を目的として実施した。

生コンクリート工場の設備により、高炉スラグ微粉末を70%置換した、W/B=45%、40%および32%の3種類の配(調)合について、フレッシュ性状および圧縮強度の確認試験を実施した。なお、実機試験は表1に示す材料を用いて標準期に実施した。

表4に試験項目と試験方法を示す。

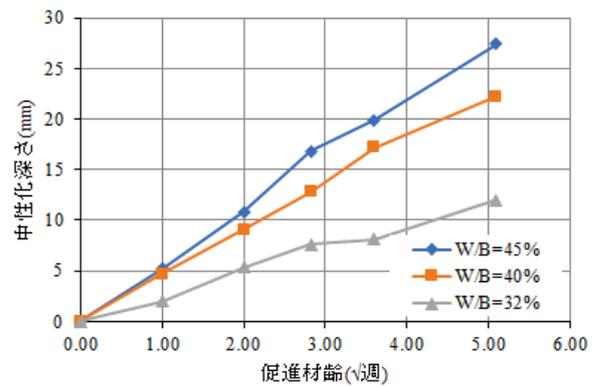


図5 促進材齢と中性化深さの関係

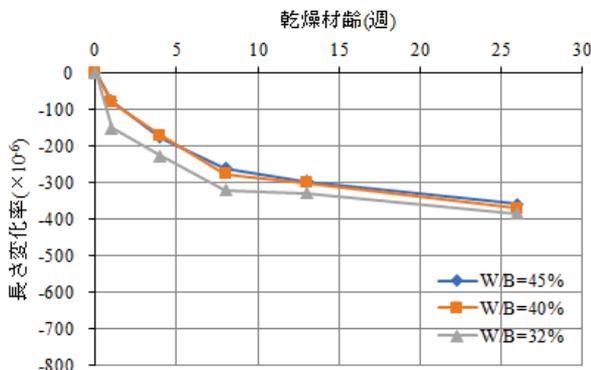


図3 乾燥材齢と長さ変化率の関係

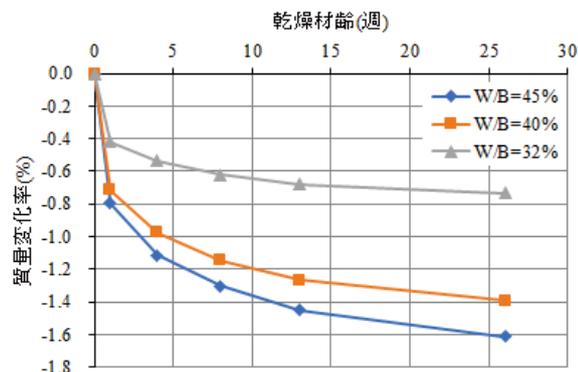


図4 乾燥材齢と質量変化率の関係

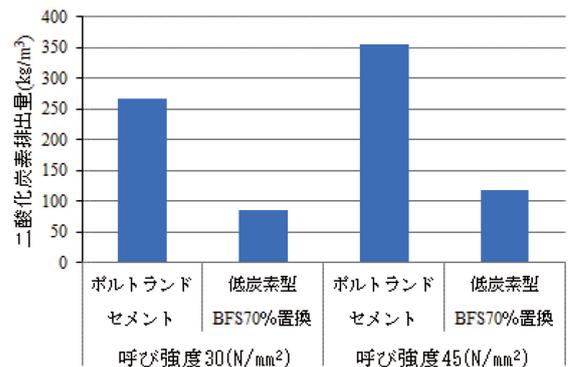


図6 二酸化炭素排出量

表4 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランブ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
コンクリート温度	JIS A 1156
ブリーディング	JIS A 1123
凝結時間	JIS A 1147
圧縮強度	JIS A 1108

表5 フレッシュ性状

BFS 置換率 (%)	W/B (%)	SP B×%	フレッシュ試験			ブリーディング試験		凝結時間 (時:分)	
			SL (SLF) (cm)	Air (%)	CT (°C)	率 (%)	量 (cm ³ /cm ²)	始発	終結
70	45	0.85	23.0 (40.0)	5.1	19	1.04	0.04	8 : 55	14 : 15
	40	0.85	23.0 (42.0)	4.3	19	0.89	0.04	9 : 20	14 : 15
	32	0.85	24.0 (44.0)	5.2	21	0.30	0.01	10 : 25	14 : 55

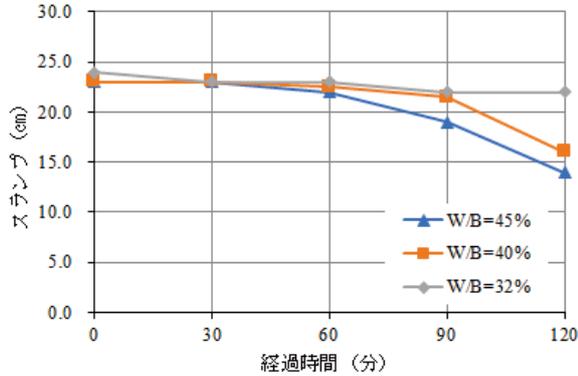


図7 経過時間とスランプの関係

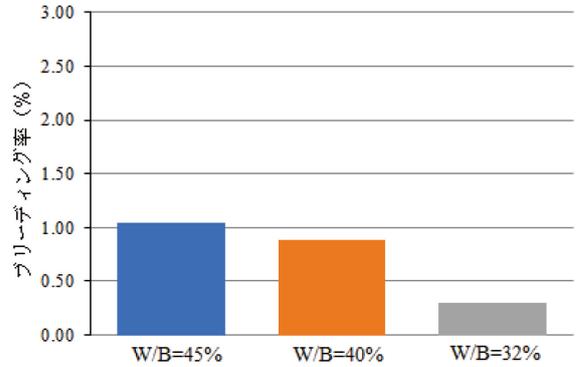


図8 ブリーディング率

試験は、スランプ、空気量、コンクリート温度、ブリーディング、凝結時間および圧縮強度について実施した。

3.2 試験結果

(1) フレッシュ試験

表5にフレッシュ性状、図7に経過時間とスランプの関係を示す。

試験は W/B=45%、40%および32%の配(調)合で練上がりから120分までアジテータ車を用いて実施した。

W/B=45%の配(調)合は、経過時間60分程度まではほとんどスランプの低下はないものの、それ以降はややスランプの低下が大きくなる傾向となり、W/B=40%の配(調)合は、経過時間90分程度まではほとんどスランプの低下はないものの、それ以降はややスランプの低下が大きくなる傾向となった。一方、W/B=32%の配(調)合は、経過時間120分までほとんどスランプの低下はなかった。

図8にブリーディング試験によるブリーディング率の結果を示す。

ブリーディング試験は W/B=45%、40%および32%の配(調)合で実施し、W/Bの増加に伴いブリーディング率が大きくなったが、W/B=45%の配(調)合でも1.04%であり、施工上問題となるブリーディングは確認されなかった。

図9に凝結時間の結果を示す。

凝結試験は、W/B=45%、40%および32%の配(調)合で実施した。W/Bの減少に伴い始発時間が遅れる傾向となり、W/B=45%と40%の配(調)合の終結時間は、14時間15分となり、W/B=32%の配(調)合は、14時間55分と遅延する傾向を示した。

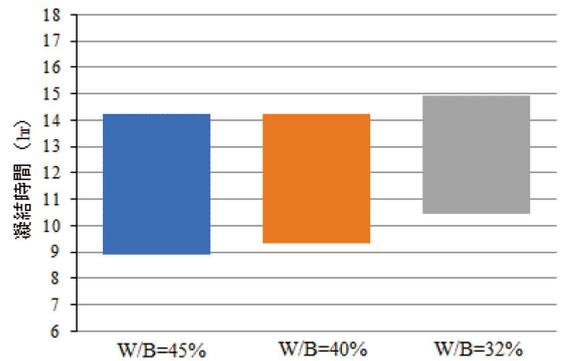


図9 凝結時間

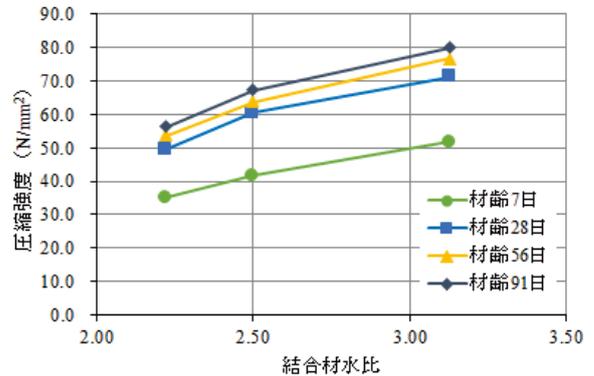


図10 材齢と圧縮強度の関係 (標準養生)

(2) 圧縮強度

図10に打込み温度20°Cでの材齢7日、28日、56日および91日における、結合材水比 (B/W) と標準養生圧縮強度の関係を示す。

表6 コンクリートの配(調)合

呼び強度	SL (cm)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (B×%)
				W	C	BFS	S	G	
40	21	41.5	47.5	170	123	287	804	915	1.275~1.225



写真1 コンクリートの打設箇所

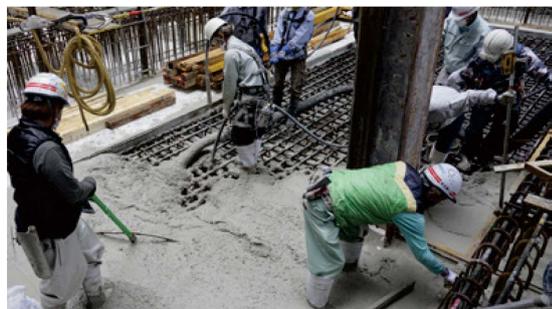


写真2 コンクリートの打設状況



写真3 コンクリートの打設完了後の状況

結合材水比と圧縮強度は直線関係にあり、各材齢での強度増進も確認され、一般的な普通コンクリートと同様に、結合材水比と圧縮強度との間に関係性が認められた。

4. 現場適用

4.1 現場概要

前述の事前検討を基に低炭素型のコンクリート「スラグリート®」を「TODA BUILDING」の耐圧版に300m³適用した。

表6に適用したコンクリートの配(調)合を示す。

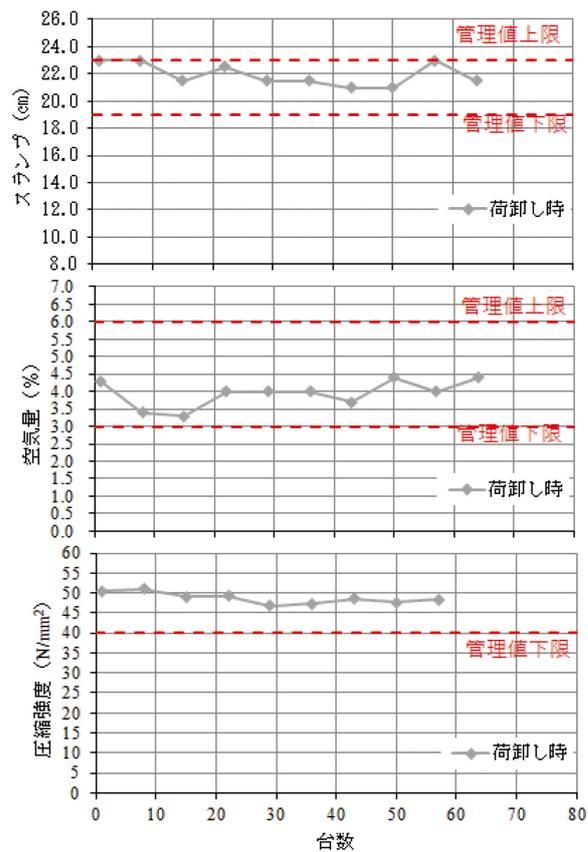


図11 荷卸し時に実施した品質管理結果

コンクリートの配(調)合は、呼び強度40N/mm²、スランプ21.0cm、空気量4.5%とし、使用材料は、前述の事前検討と同様に置換率を70%とし、高炉スラグ微粉末4000に無水せつこうをSO₃換算で2.0%添加したものを使用した。2020年5月に取得した一般財団法人日本建築総合試験所の建設材料技術性能証明の結果を基に、表6に示す配(調)合を使用した。

4.2 施工および品質管理

写真1に「スラグリート®」を適用した耐圧版の打設箇所、写真2にコンクリートの打設状況、写真3にコンクリートの打設完了状況を示す。

コンクリートの打込みには、ピストン式のコンクリートポンプ車を使用し、乗入れ構台上のポンプ車設置箇所から耐圧版の打込み箇所までの高低差は約20mであった。

図11にコンクリート打設時の荷卸し時に実施した品質管理結果を示す。

コンクリートの打設数量は300m³であり、品質管理は現場の受入れ検査とは別に、計10回、スランプ、空気量の試験を実施し、材齢28日の標準養生圧縮強度用試験体採取した。

コンクリート打込み時の気温は15~17℃であり、荷卸し時におけるスランプは21.0~23.0cm、空気量は3.3~4.4%、コンクリート温度は20~23℃の範囲となり、試験の結果、スランプおよび空気量ともに管理値を満足する

結果となり、同スランプの一般的なコンクリートと同様の施工が可能であった。圧縮強度は、材齢28日時点でいずれも呼び強度40N/mm²を満足し、平均は48.7N/mm²であった。

5. おわりに

本論文では、高炉スラグ微粉末をセメントの代替として70%を置換した低炭素型のコンクリート「スラグリート®」の「TODA BUILDING」への適用に向け、出荷するレディーミクストコンクリート工場の材料を用いて各種試験を行い、フレッシュ性状や強度、耐久性に与える影響について検討した結果と「TODA BUILDING」への適用について報告した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 高炉スラグ微粉末を70%置換した配（調）合は、中庸熱ポルトランドセメントと比較して、終局断熱温度上昇量は10℃ほど小さく、水和発熱量の抑制効果を確認でき、マスコンクリート構造物の水和発熱によるひび割れ抑制の対策として有効である。
- 2) 低炭素型のコンクリート「スラグリート®」は、同一強度のポルトランドセメントを使用したコンクリートと比較して、約65%の二酸化炭素排出量削減効果が期待できる。
- 3) 「TODA BUILDING」の耐圧版に適用した結果、スランプおよび空気量ともに規格値を満足する結果となり、同スランプの一般的なコンクリートと同様の施工が可能であった。

以上の結果より、コンクリートの配（調）合に含まれるセメント質量の70%を副産物である高炉スラグ微粉末に置換することで、普通ポルトランドセメントのみを用いた配（調）合のコンクリートと比較して、マスコンクリートでの温度ひび割れの抑制や、二酸化炭素排出量を削減することが可能であることを確認した。また、「TODA BUILDING」の耐圧版に適用した結果、スランプおよび空気量ともに管理値を満足することができ、同スランプの一般的なコンクリートと同様の施工が可能であることを確認した。

コンクリートの製造により排出される二酸化炭素排出量を削減することは重要な課題である。「スラグリート®」は、特殊な材料や製造方法を必要としないため、レディーミクストコンクリート工場で製造が可能であり、これまでも様々な構造物に適用してきた。今後も積極的に「スラグリート®」を現場に適用するとともに、本技術の知見を活かして、より二酸化炭素排出量を削減したコンクリートを開発し、カーボンニュートラルを実現した社会の構築を推進していきたい。

参考文献

- 1) 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）一、第475号

- 2) 新谷岳，土師康一，田中徹：高炉スラグ微粉末を高含有した低炭素型コンクリート『スラグリート®』開発，戸田建設技術研究報告第42号，pp.10.1-10.8，2016
- 3) 椎名貴快，田中徹，小池晶子，中村英佑：暑中環境下での高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの基本特性と施工品質評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.157-162，2017
- 4) 新谷岳，土師康一，田中徹，椎名貴快：高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの現場適用，コンクリート工学，pp.240-245，2018.3
- 5) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリー125，2005