低熱高炉セメントおよび高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐久性

藤井隆史^{*1} 檀康弘^{*2} Paweena JARIYATHITIPONG^{*3} 綾野克紀^{*1}^{*1} 岡山大学 大学院環境学研究科資源循環学専攻(〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)^{*2} 新日鐵高炉セメント株式会社 技術開発センター(〒803-0801 福岡県北九州市小倉北区西港町 16)^{*3} ランデス株式会社 本部技術センター(〒719-3201 岡山県真庭市開田 630-1)

要旨：高炉スラグ微粉末の割合を高めた高炉セメントを用いたコンクリートの圧縮強度および中性化は、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合に比べて若干劣る。しかし、耐硫酸性は、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合に比べて高く、その抵抗性は、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いることでさらに向上する。さらに、高炉セメントおよび高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、普通ポルトランドセメントおよび砕砂を用いたものよりも小さく、蒸気養生を行うことでさらに小さくなる。

キーワード：低熱高炉セメント、高炉スラグ細骨材、疑似断熱温度上昇、耐硫酸性、中性化、乾燥収縮ひずみ、圧縮強度

1. はじめに

高炉スラグは、高炉で鉄鉄を製造する工程で発生する副産物で、年間 2,200 万トン程度発生している¹⁾。高炉から排出された溶融状態のスラグに加圧水を噴射するなど急激に冷却処理することにより、ガラス質で粒状になったものが高炉水砕スラグである。高炉水砕スラグは、砂の代替材として土工材料やコンクリート用材料として広く用いられている。高炉水砕スラグを微粉化したものが高炉スラグ微粉末で、コンクリートの混和材等を用いられている。高炉スラグ微粉末や高炉セメントを用いたコンクリートは、長期強度の増進、化学抵抗性の向上、水和熱の低減が期待され、海洋構造物、マスコンクリート等に適用されている²⁾。しかし、粉末度の高い高炉スラグ微粉末やそれを混合した高炉セメントを用いたコンクリートでは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに比べて、断熱温度上昇量が高くなることもある^{3, 4)}。粉末度を下げ、高炉スラグ微粉末の分量を多くした高炉セメントであれば、従来のもの以上に水和熱の低減を図ることが可能である。

本研究では、粒度が粗くスラグ分量の多い低熱高炉セメントおよび高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐久性を検討したものである。疑似断熱温度上昇、圧縮強度、耐硫酸性、中性化および乾燥収縮ひずみについて、検討を行った。乾燥収縮ひずみでは、コンクリート二次製品に用いられた場合を想定し、蒸気養生を行ったものの検討も行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

Table 1 に本実験に用いたコンクリートの配合を示す。セメントは、普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm³、ブレン値: 3,350cm²/g)および低熱高炉セメント B 種(密度: 2.98g/cm³、スラグ分量: 55 %、三酸化硫黄量: 3.4 %、ブレン値: 3,210cm²/g)を用いた。また、スラグ分量および三酸化硫黄量が低熱高炉セメント B 種と同じになるように、普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm³、ブレン値: 3,350cm²/g)、高炉スラグ微粉末 4000(密度: 2.92g/cm³、ブレン値: 4,100cm²/g、石こう無添加)、工業用無水石こう(密度: 2.97g/cm³)および工業用二水石こう(密度: 2.30g/cm³)を混合したものも実験に用い、粉末度の影響の検討を行った。Table 2 に本実験に用いた結合材の化学成分分析結果を示す。普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、無水石こうおよび二水石こうを混合したものの化学成分は、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末の分析値から計算によって求めた値である。普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を混合したものの化学成分は、低熱高炉セメント B 種とおおよそ同じであることが分かる。細骨材には、硬質砂岩系砕砂(密度: 2.62g/cm³、吸水率: 3.02 %)および高炉スラグ細骨材(密度: 2.65g/cm³、吸水率: 1.44 %)を用いた。粗骨材には、硬質砂岩系砕石(密度: 2.74g/cm³、吸水率: 0.37 %)を用いた。混和剤は、ポリカルボン酸系高性能減水剤を用いた。コンクリートの配合は、強度を必要とする推進管等のコンクリート二次製品を想定した水結合材比 25 %のものと、一般的なコンクリートを

Table 1 Mixture proportions of concrete

Type of binder	Gmax (mm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m ³)								HRWRA*5 (kg/m ³)
					W	C	GGBF*3	CaSO ₄	CaSO ₄ ·2H ₂ O	S	BFS*4	G	
OPC*1	20	25.0	2.0	50.0	175	700	0	0	0	763	0	798	7.00
GGBF + OPC						276	385	1.57	37.6	745		779	
LBB*2						700	0	0	0	0	755	781	
OPC		60.0				292	0	0	0	933	0	976	1.17
GGBF + OPC						115	160	0.65	15.7	926	0	968	
LBB						292	0	0	0	0	937	969	

*1 OPC : Ordinary Portland cement, *2 LBB : Low-heat Portland blast furnace slag cement, *3 GGBF : Ground granulated blast furnace slag, *4 BFS : Blast furnace slag fine aggregate, *5 HRWRA : High-range water reducing admixture

Table 2 Chemical component of binder (%)

Binder	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl
OPC	1.51	21.5	5.1	2.78	65.2	1.07	1.99	0.31	0.07	0.28	0.27	0.13	0.02
GGBF	0.31	34.4	14.8	0.29	43.2	5.46	-	0.54	0.15	0.33	0.30	0.01	0.00
LBB	1.87	27.0	10.0	1.31	51.8	3.52	3.39	0.41	0.13	0.28	0.29	0.06	0.01
OPC + GGBF*	1.88	27.3	10.1	1.25	51.1	3.41	3.40	0.42	0.11	0.29	0.27	0.06	0.01

* : Calculated value

想定した水結合材比を 60 % のものを用いた。いずれの配合においても、単位水量および細骨材率は、それぞれ、175kg/m³ および 50.0 % で一定とした。

2.2 試験方法

(1) 疑似断熱温度上昇試験

試験には、Fig. 1 に示す厚さ 200mm の発泡スチロールで作製した容器(内寸：250×250×250mm)を用いた。容器内にコンクリートを 15.6L 打設し、コンクリートの中心に銅コンスタンタン熱電対を設置し、温度の測定を行った。測定は、コンクリート温度がほぼ室温になる材齢 10 日まで行った。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108 : 2006「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従って行った。試験にはφ100×200mm の円柱供試体を用いた。コンクリートは、打設後 24 時間型枠内に置き、脱型後、試験を実施するまで水中で養生を行った。

(3) 耐硫酸性試験

耐硫酸性試験には、φ100×200mm の円柱供試体を用いた。コンクリートは、打設後 24 時間型枠内に置き、脱型後、材齢 7 日まで水中で養生を行った。養生後、質量パーセント濃度で 5 % の硫酸に供試体を浸漬させた。所定の期間浸漬させた供試体をコンクリートカッターで切断し、フェノールフタレイン溶液を切断面に噴霧し、硫酸による侵食深さを測定した。

(4) 中性化試験

中性化試験には、φ100×50mm の円柱供試体を用いた。コンクリートは、打設後 24 時間型枠内に置き、脱型した後、材齢 7 日まで水中で養生を行った。養生後、

両円断面をエポキシ樹脂でコーティングした後、温度が 30.0±1.0 °C で、相対湿度が 60±5 % で、炭酸ガス濃度が 5.0±0.2 % の中性化促進試験装置の中に供試体を設置し試験を開始した。

(5) 乾燥収縮ひずみ試験

コンクリートの乾燥収縮ひずみの測定は、φ50×100mm のコア供試体を用いた。水中養生を行う供試体は、打設後 24 時間は型枠内で養生し、脱型後、材齢 4 日まで水中で養生を行った。蒸気養生を行うコンクリートは、打設後 24 時間は型枠内で養生し、脱型後、材齢 4 日まで水中で養生を行った。蒸気養生は、平成 8 年制定土木学会コンクリート標準示方書[施工編]に示される方法⁵⁾に従い、コンクリートを打設後、前養生を 2 時間行った後、昇温速度を 20 °C/時間、最高養生温度を 65 °C、最高養生温度保持時間を 4 時間の条件で行った。蒸気養生終了後、材齢 24 時間までは型枠内で養生し、脱型後、材齢 4 日まで水中で養生を行った。材齢 4 日に 100×100×400mm の角柱供試体から直径 50mm のコアを抜き、φ50×100mm の供試体を作製した。コア供試体には、Photo. 1 に示されるように上下端面中央にコンタクトゲージを瞬間接着剤により貼り付け、周りをエポキシ樹脂によって保護した。エポキシ樹脂の塗布量の差をなくすために、コア供試体の上面および底面の全てにエポキシ樹脂を塗布し、側面のみを乾燥面とした。エポキシ樹脂を硬化させる工程においてコンクリートが乾燥するのを防ぐために、コア抜き後から長さ変化の測定を開始する材齢 7 日まで、コア供試体は、底面に水を張った密閉容器を用いて、湿度 95 % 以上の湿潤環境下で貯蔵した。コア供試体の長さ変化の測定には、Photo. 1 に

Fig. 1 Detail of quasi-adiabatic temperature rise test

Fig. 2 Result of quasi-adiabatic temperature rise test (W/B ratio : 25 %)

示すりニアゲージ(最小目盛り: 5/10,000mm)を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 疑似断熱温度上昇

Fig. 2 は、Fig. 1 に示す容器を用いて測定した水結合材比が 25 % の種々のコンクリートの水和熱による疑似断熱温度上昇の測定結果を示したものである。図中の●は、結合材には普通ポルトランドセメントのみを用い、細骨材には、砕砂を用いたコンクリートの結果を示している。△は、結合材に、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材に砕砂を用いた結果を示している。□は、結合材に普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた結果を示している。○は、結合材に低熱高炉セメント B 種を用い、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた結果を示している。結合材に普通ポルトランドセメントを用い、細骨材に砕砂を用いたコンクリートが、最も温度の上昇が大きく、81.1 °C までコンクリート温度が上昇している。一方、結合材に普通ポルトランドセ

Photo. 1 Specimen of drying shrinkage strain test

Fig. 3 Result of quasi-adiabatic temperature rise test (W/B ratio : 60 %)

メントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材に砕砂を用いたものは 63.1 °C まで、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたものは、64.7 °C までコンクリート温度が上昇した。低熱高炉セメント B 種および高炉スラグ細骨材を用いたものは、62.6 °C まで温度が上昇している。高炉セメントを用いることで、普通ポルトランドセメントを用いたものよりも温度上昇 20 °C 程度低く抑えられている。また、粉末度の小さい高炉セメントを用いることで、さらに温度上昇が低く抑えられている。

Fig. 3 は、水結合材比が 60 % の種々のコンクリートの疑似断熱温度上昇試験の結果を示したものである。水結合材比が 25 % の場合と同様に、粒度の粗い高炉セメントを用いることで、水和熱による温度上昇が低く抑えられていることが分かる。

3.2 圧縮強度

Fig. 4 および Fig. 5 は、それぞれ、水結合材比が 25 % および 60 % の種々のコンクリートの圧縮強度試験の結果を示したものである。図中の左から、結合材には普通ポルトランドセメントのみを用い、細骨材には砕

Fig. 4 Result of compressive strength at 28 days (W/B ratio : 25 %)

Fig. 5 Result of compressive strength at 28 days (W/B ratio : 60 %)

Fig. 6 Resistance of sulfuric acid attack (W/B ratio : 25 %)

Fig. 7 Resistance of sulfuric acid attack (W/B ratio : 60 %)

砂を用いたコンクリート、結合材に普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材に砕砂を用いたもの、結合材に普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたもの、結合材に低熱高炉セメント B 種を用い、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたものの結果をそれぞれ示している。高炉スラグ微粉末または低熱高炉セメントを用いたものは、普通ポルトランドセメントを用いたものに比べて、材齢 28 日における圧縮強度は、小さいことが分かる。水セメント比が 60 % のものに比べて 25 % の方が、セメントの水和反応により水酸化カルシウムがより多く生成されることで高炉スラグ微粉末の水和反応が速く進み、強度の差が小さくなったと思われる。

3.3 耐硫酸性

Fig.6 および Fig.7 は、それぞれ、水結合材比が 25 % および 60 % のコンクリートを質量パーセント濃度で 5 % の硫酸に浸漬させた結果を示したものである。いずれのコンクリートも、浸漬期間に比例して、硫酸に

よる侵食深さが深くなっている。水結合材比が 60 % のコンクリートにおいては、結合材に用いた高炉スラグ微粉末および高炉セメントの粒度および細骨材の種類に関係なく、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合よりも、高炉スラグ微粉末または高炉セメントを用いたものの方が硫酸に対する抵抗性が高くなっている。水結合材比 25 % のコンクリートにおいても、結合材に高炉スラグ微粉末または高炉セメントを用いることで、硫酸に対する抵抗性は向上している。また、硫酸と反応しやすい高炉スラグ細骨材を細骨材に用いることで、コンクリート表面に二水石こうの膜が形成され、さらに、その抵抗性が高くなることが分かる。

3.4 中性化

Fig.8 は、水結合材比が 25 % の種々のコンクリートの中性化試験の結果である。普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの中性化は、70 日間生じていないのに対し、高炉スラグ微粉末を結合材に用いたものでは、5mm 程度の中性化が生じている。この傾向は、水

Fig. 8 Result of carbonation test (W/B ratio : 25 %)

Fig. 9 Result of carbonation test (W/B ratio : 60 %)

Fig. 10 Drying shrinkage strain of concrete with under water curing (W/B ratio : 25 %)

Fig. 11 Drying shrinkage strain of concrete with steam curing (W/B ratio : 25 %)

結合材比が 60 % のコンクリートの試験結果を示した Fig. 9 においても同様で、結合材に普通ポルトランドセメントのみを用いた場合に比べ、高炉スラグ微粉末または高炉セメントを用いたコンクリートの中性化は大きくなる。結合材の粒度および細骨材の種類による差は、実験で生じるばらつき程度で小さいものである。

3.5 乾燥収縮ひずみ

Fig. 10 および Fig. 11 は、それぞれ、水中養生および蒸気養生を行った水結合材比が 25 % のコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。結合材に高炉スラグ微粉末あるいは低熱高炉セメント B 種を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、普通ポルトランドセメントを用いたものに比べて小さいことが分かる。また、骨材に高炉スラグ細骨材を用いることで、コンクリートの乾燥収縮ひずみがさらに小さくなることが分かる。一方、いずれの種類コンクリートにおいても、蒸気養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみは、水中養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみに比べて

小さくなっている。

Fig. 12 および Fig. 13 は、それぞれ、水中養生および蒸気養生を行った水結合材比が 60 % のコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。水結合材比が 25 % のコンクリートと同様に、水結合材比が 60 % のコンクリートにおいても、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた場合には、砕砂を用いた場合に比べて、乾燥収縮ひずみを小さくなる。しかし、養生方法がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は、水結合材比が 60 % のものでは小さく、蒸気養生を行った場合でも、水中養生を行ったものに比べて若干小さくなる程度である。

4. まとめ

結合材に高炉スラグ微粉末または高炉セメントを用いることで、水和熱による温度上昇を低く抑えることが可能である。また、粒度の粗くスラグ分量の多い低熱高炉セメントを用いることで、さらに、温度上昇を小さくすることが可能である。一方、材齢 28 日における圧縮強

Fig. 12 Drying shrinkage strain of concrete with under water curing (W/B ratio : 60 %)

Fig. 13 Drying shrinkage strain of concrete with steam curing (W/B ratio : 60 %)

度は、普通ポルトランドセメントのみを用いたものに比べ、粒度の粗くスラグ分量の多い低熱高炉セメントを用いたものは低い。また、中性化も高炉セメントを用いたものは、普通ポルトランドセメントを用いたものに比べて大きくなる。しかし、硫酸に対する抵抗性は、強度の傾向とは逆に、低熱高炉セメントを用いたものの方が数倍程度高くなる。高炉セメントおよび高炉スラグ細骨材を用いたものの乾燥収縮ひずみは、普通ポルトランドセメントおよび砕砂を用いたものよりも小さく、蒸気養生を行うことで、さらに小さくなる。

参考文献：

1) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報（平成 21 年

度実績）、鉄鋼スラグ協会、pp.12-21（2010）

- 2) 坂田昇ほか：高炉スラグ微粉末を大量に混合した RCD コンクリートに関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 32、No. 1、pp. 191-196（2010）
- 3) 宮澤伸吾ほか：低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートの特性、コンクリート工学年次論文集、Vol. 27、No. 1、pp. 487-492（2005）
- 4) 二戸信和ほか：断熱温度上昇に及ぼす高炉セメントの水和反応の温度依存性の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 32、No. 1、pp. 59-64（2010）
- 5) 土木学会コンクリート委員会：平成 8 年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕、土木学会、pp. 344-345（1996）

DURABILITY OF CONCRETE WITH LOW-HEAT PORTLAND BLAST FURNACE SLAG CEMENT AND BLAST FURNACE SLAG FINE AGGREGATE

Takashi FUJII^{*1}, Yasuhiro DAN^{*2}, Paweena JARIYATHITIPONG^{*3} and Toshiki AYANO^{*1}

*1 OKAYAMA UNIVERSITY, Graduate School of Environmental Science (3-1-1, Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama 700-8530, Japan)

*2 NIPPON STEEL BLAST-FURNACE SLAG CEMENT CO., LTD, Technology and Development Laboratories (16, Nishiminato, Kokurakita-ku, Kitakyusyu-shi, Fukuoka 803-0801, Japan)

*3 LANDES CO., LTD, Research and Development Center (630-1, Kaide, Maniwa-shi, Okayama 719-3201, Japan)

ABSTRACT : Low-heat Portland blast furnace slag cement is the cement which raised a ratio of the ground granulated blast furnace slag and reduced the specific surface area of cement by blaine. When Portland blast furnace slag cement is used by binder, the temperature rise of concrete is lower than that of using ordinary Portland cement. In the case that low-heat Portland blast furnace slag cement is used by binder, the temperature rise of concrete is more low that of using Portland blast furnace slag cement which the specific surface area of cement by blaine is high. In the case of using Portland blast-furnace slag cement which raised a ratio of the ground granulated blast furnace slag, compressive strength and carbonation of concrete are worse than that of using ordinary Portland cement. However, sulfuric acid attack resistance is higher than that of using ordinary Portland cement. And in the case of using blast furnace slag sand together, resistance of sulfuric acid attack is more high. In addition, the drying shrinkage strain of concrete with Portland blast furnace slag cement and blast furnace slag sand is smaller than that of using ordinary Portland cement and crushed sand. And in the case that concrete with Portland blast furnace slag cement and blast furnace slag sand cured in stream, the drying shrinkage strain becomes small more.

KEY WORDS : Low-heat Portland blast-furnace slag cement, Blast furnace slag fine aggregate, Quasi-adiabatic temperature rise, Sulfuric acid attack resistance, Carbonation, Drying shrinkage strain, Compressive strength