

# 低吸水率の緻密高炉スラグ粗骨材のコンクリート適性評価

## Evaluation of Concrete Applicability for Coarse Aggregate of Dense Blast Furnace Slag with Low Water Absorption Ratio

中西 克佳 NAKANISHI Katsuyoshi JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員（課長）・博士（工学）  
村田 慶彦 MURATA Yoshihiko JFE スチール 東日本製鉄所 設備部 土木・建築室  
田 恵太 TA Yasutaka JFE スチール スチール研究所 スラグ・耐火物研究部 主任研究員（副課長）

### 要旨

従来の高炉徐冷スラグ粗骨材は、多孔質であるため、吸水率が高く、コンクリートの水分管理が困難になっている。これを解決するために、吸水率が天然骨材と同等の1%以下を満足する緻密化した高炉スラグ粗骨材を開発した。この緻密化した高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートは、天然粗骨材を用いた場合と同等のワーカビリティ、強度、耐久性を保有する。また、鉄筋コンクリート部材に適用した場合、その曲げ性能に関しても遜色ない。さらに、耐久性のうち乾燥収縮特性に関して、石灰石を用いた場合と同等以上の性能を有している。また、実工事での施工において、ポンプ圧送性や型枠への充填性、ならびにコンクリートの表面仕上げにも問題ないことが確認できた。

### Abstract:

The coarse aggregate of the conventional air-cooled blast furnace slag (BFG) has high porosity. Therefore, the water absorption ratio is high and it is difficult to control the water quantity of concrete. In order to reduce the water absorption ratio, JFE Steel has developed new coarse aggregate of dense BFG with low water absorption under 1% equivalent to natural aggregate. The concrete of dense BFG coarse aggregate has the same workability, strength and durability as that of natural coarse aggregate. Applicability to reinforced concrete parts is comparable to natural coarse aggregate. The drying shrinkage of the concrete with dense BFG is better than that of the concrete with limestone. In the test construction of actual plant, we confirmed that there is no problem with pump ability, filling property to formwork and surface finish.

## 1. はじめに

従来の高炉徐冷スラグ粗骨材は、多孔質であるため、吸水率が高く、水分管理が困難で、100%でのスラグ粗骨材使用では、生コンクリートの施工性を損なう要因となっている<sup>1)</sup>。その結果、天然資源の開発抑制による環境保全や採掘時の使用エネルギー削減に貢献できるものの、大幅なコストメリットがない限り、スラグ粗骨材のコンクリートへの活用は敬遠されている。

また、近年の建物の高層化・大型化に伴い、増加する自重を十分に支えることが出来るよう、躯体コンクリートの高強度化が求められ、超高強度コンクリートが開発されてきた。しかしながら、100 N/mm<sup>2</sup> 超級の超高強度コンクリートを扱うには、高強度用の骨材を保管するサイロが別途必要となることから、取り扱えるプラントは予備のサイロを保有しているプラントに限られている。

そこで、上述のような課題や社会的ニーズに応えるため、普通コンクリートから超高強度コンクリートまで幅広く使え

る高品質・高性能を目指し、低吸水率の緻密な高炉スラグ粗骨材を開発した<sup>2)</sup>。

本研究では、緻密高炉スラグ粗骨材の普通コンクリートおよび超高強度コンクリートへの適用性を評価する。本文では、配合試験、強度試験、耐久性試験、部材の曲げ載荷試験、および実施工を行い、緻密高炉スラグ粗骨材コンクリートの性能について評価・考察した。

## 2. 緻密高炉スラグ粗骨材の概要

緻密高炉スラグ粗骨材の製造手順は次の通りである<sup>3)</sup>。高炉スラグ鍋台車を、所定の位置にセットした後、一定速度で鍋を傾転させ、モールドに溶融スラグを注ぎ込む。目標スラグ凝固厚みは25 mm であり、モールド上で120秒保持して中心部まで凝固させ、モールドを反転させて凝固スラグをスラグピットに落下させる。板状に凝固した高炉スラグをインパクトクラッシャーにより20 mm 以下の粒径に破碎して緻密高炉スラグ粗骨材とする。表1には、緻密高炉スラグ粗骨材の品質を、天然粗骨材と比較して示す。

なお、比較天然材として、津久見産の石灰石砕石および

表1 緻密高炉スラグ粗骨材の品質  
Table 1 Quality of dense BFG

Type of coarse aggregate	Absolute dry density (g/cm <sup>3</sup> )	Water absorption ratio (%)	Solid volume percentage for shape determination (%)	Crushing value (%)	Compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (kN/mm <sup>2</sup> )
Dense BFG	2.84	0.66	62.4	13.8	149	87
Limestone	2.70	0.52	63.1	22.4	71	73
Sandstone	2.66	0.62	61.7	11.7	118	53

表2 普通コンクリートの配合試験結果  
Table 2 Results of formulation test for ordinary concrete

No.	Formulation conditions								Test results	
	Type of coarse aggregate	Water cement ratio (%)	Unit amount (kg/m <sup>3</sup> )					Slump (cm)	Amount of air (%)	
			Water W	Cement C	Fine aggregate S	Coarse aggregate G	Admixture (×C)			
							AE water reducing agent	AE agent		
1	Dense BFG	45	170	379	782	1 031	0.0080	0.000040	18.0	4.5
2		55		309	839	1 031	0.0075	0.000035	17.0	4.4
3		65		262	894	1 014	0.0115	0.000035	17.0	4.8
4	Limestone	45		378	782	980	0.0065	0.000060	18.0	4.4
5		55		309	839	980	0.0075	0.000050	19.0	4.1
6		65		262	894	964	0.0100	0.000050	18.5	4.5
7	Sandstone	45		378	782	966	0.0080	0.000040	17.0	4.6
8		55		309	839	966	0.0075	0.000035	17.0	4.3
9		65		262	894	950	0.0115	0.000035	18.0	4.7

青梅産の硬質砂岩砕石を用い、粗骨材はJIS A 5005の粒度範囲の中央値に調整して使用した。細骨材として、粗粒率2.57の大井川水系陸砂を用いた。

### 3. コンクリートへの適用性<sup>4)</sup>

#### 3.1 普通コンクリートの配合試験

普通コンクリートの配合条件は、標準配合を参考に、単位水量を170 kg/m<sup>3</sup>に固定し、目標スランプ18 cm±1.5 cm、目標空気量4.5%±0.5%、水セメント比を3水準とした。表2に示すように、緻密高炉スラグ粗骨材、石灰石、硬質砂岩とも水セメント比45%~65%の範囲では、単位水量を一定にし、同量の混和剤を使用した場合、所要のスランプおよび空気量が得られており、良好なフレッシュ性状であった。図1には、各配合のセメント水比と圧縮強度の関係を示す。図1より、3種類の粗骨材を用いたコンクリートのセメント水比と圧縮強度との間には高い相関関係が認められる。緻密高炉スラグ粗骨材コンクリートの圧縮強度は、石灰石コンクリートを上回り、硬質砂岩コンクリートよりやや下回っている。乾燥収縮率は、JIS A 1129に準じて実施した。

図2には、緻密高炉スラグコンクリートの乾燥収縮試験結果を、天然粗骨材を用いた場合と比較してそれぞれ示す。図2より、緻密高炉スラグコンクリートは、乾燥収縮に優位

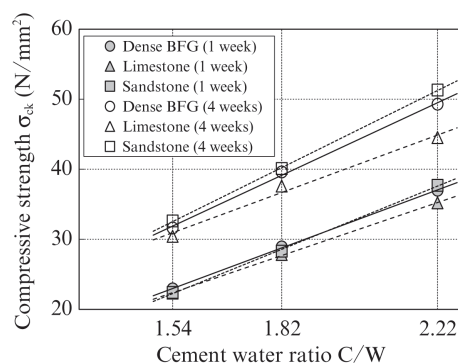


図1 各配合のセメント水比と圧縮強度の関係

Fig. 1 Relationship between cement water ratio and compressive strength of each formulation

とされている石灰石より長さ変化率が小さくかつ材齢26週で650 μ以下であり、「高級」の品質に入る性能を有していると言える<sup>5)</sup>。

#### 3.2 超高強度コンクリートの配合試験

超高強度コンクリートの配合条件は、単位水量を155 kg/m<sup>3</sup>に固定し、水セメント比20%、目標スランプフロー60 cm±5 cm、目標空気量2.0%±1.0%とした。セメントにはシリカフュームセメントを使用した。耐久性試験は、懸念される自

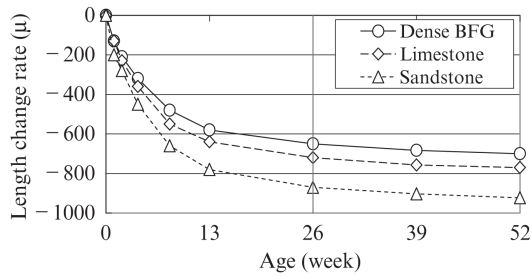


図2 各コンクリートの乾燥収縮試験結果

Fig. 2 Dry shrinkage test result of each concrete

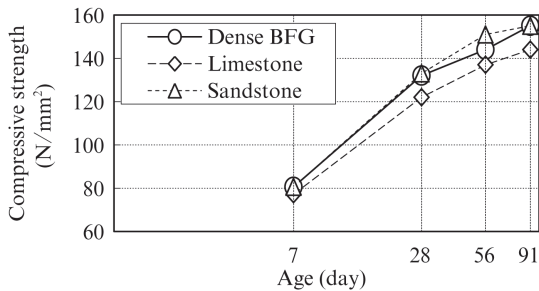


図3 各超高強度コンクリートの材齢—圧縮強度関係

Fig. 3 Relationship between material ages and compressive strength of ultra-high-strength concrete

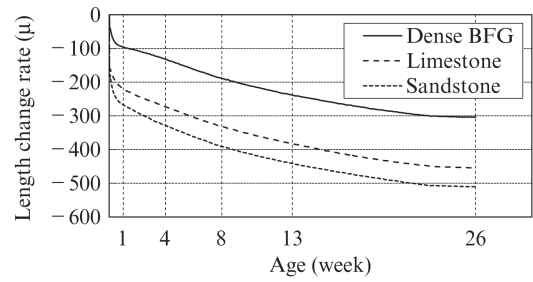


図4 各超高強度コンクリートの自己収縮試験結果

Fig. 4 Results of autogenous shrinkage test of each ultra-high-strength concrete

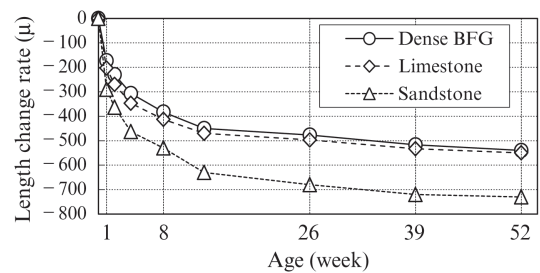


図5 各超高強度コンクリートの乾燥収縮試験結果

Fig. 5 Dry shrinkage test results of each ultra-high-strength concrete

己収縮および乾燥収縮に関して行った。表3には、超高強度コンクリートの配合試験結果を示す。緻密高炉スラグ粗骨材、石灰石、および硬質砂岩を用いた水セメント比20%のフレッシュコンクリートは、単位水量を一定にし、混和剤を同量使用した場合、3種類とも所要のスランプフロー値および空気量が得られた。すなわち、緻密高炉スラグ粗骨材を用いた場合も天然粗骨材を用いた場合に対し遜色のない良好なフレッシュ性状であった。図3には、材齢と硬化コンクリート圧縮強度との関係を示す。図3より、緻密高炉スラグ粗骨材を用いた超高強度コンクリートの圧縮強度は、硬質砂岩使用時と同等で、石灰石使用時より高いことが分かる。

JCIの「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」に従って、緻密高炉スラグ粗骨材を用いた超高強度コンクリートの自己収縮性を調べた。図4に示すように、緻密高炉スラ

グ粗骨材を用いた超高強度コンクリートの長さ変化率は、他の2種類の天然粗骨材を用いた場合に対して3/5~2/3であり、著しく小さいことが分かる。

自己収縮量も含めた乾燥収縮試験結果を、図5に示す。長さ変化率は、材齢6か月で、緻密高炉スラグ粗骨材、石灰石、および硬質砂岩を用いた場合がそれぞれ-480μ、-500μ、および-680μであり、緻密高炉スラグ粗骨材の乾燥収縮抵抗性能が最も高く優位と言える。

### 3.3 RC梁の曲げ性能試験

緻密高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートの施工性および部材としての性能を検証するため、2種類のコンクリート強度のRC梁の曲げ載荷試験を実施した。図6には、RC梁試験体と載荷状況を示す。

表3 超高強度コンクリートの配合試験結果

Table 3 Results of formulation test for ultra-high-strength concrete

No.	Formulation conditions								Test results		
	Type of coarse aggregate	Water cement ratio (%)	Unit amount (kg/m <sup>3</sup> )					Admixture (×C)		Slump flow (mm)	Amount of air (%)
			Water W	Cement C	Fine aggregate S	Coarse aggregate G	AE water reducing agent	AE agent			
1	Dense BFG	20	155	775	632	934	0.0095	0.0001	621×604	2.3	
2	Limestone					888			613×606		
3	Sandstone					875			614×592		

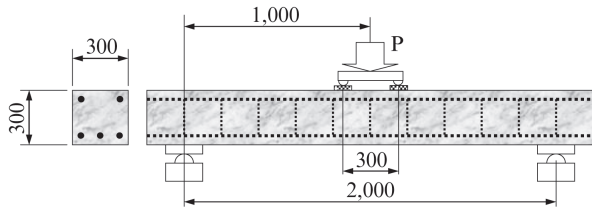


図 6 RC 梁試験体と荷重状況 (寸法単位 : mm)

Fig. 6 RC beam specimen and loading situation (Unit: mm)

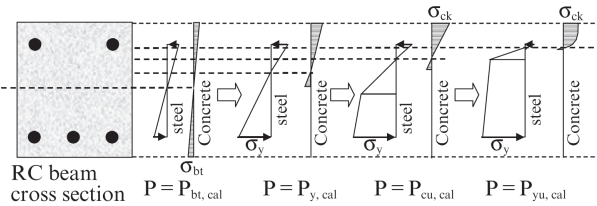


図 7 各荷重時の応力状態

Fig. 7 Stress condition at each load

RC 梁試験体には、D19 (SD345) の異径鉄筋を、上鉄筋として 181 mm 間隔で 2 本 (かぶり 50 mm)、下鉄筋として 90.5 mm 間隔で 3 本 (かぶり 50 mm) を配置した。全長 2.4 m、300 mm×300 mm 断面の RC 梁であり、コンクリートには緻密高炉スラグ粗骨材、あるいは天然粗骨材を用いた。帯筋として、D13 (SD345) の異径鉄筋を部材軸方向に 150 mm 間隔で配置した。荷重方法は、支間 2 m の中央部 2 点に荷重する 4 点曲げ荷重とした。荷重荷重は、2 体とも下鉄筋のひずみが 30 000 μ に到達、あるいはコンクリートが圧壊して荷重が急激に低下するまで荷重した。

荷重試験に先立ち、鉄筋とコンクリートとが完全合成であるとして、図 7 に示す各荷重を、各荷重時の応力状態を仮定して算出した。ここで、引張側コンクリートのひび割れ荷重  $P_{bt,cal}$  は、道路橋示方書記載のコンクリートの応力  $\sigma_c$  - ひずみ  $\epsilon_c$  曲線および曲げ引張強度  $\sigma_{bt}$  を用いて計算している<sup>6)</sup>。すなわち、

$$\sigma_c = 0.85 \sigma_{ck} [2(\epsilon_c/0.002) - (\epsilon_c/0.002)^2] \dots\dots (1)$$

$$\sigma_{bt} = 0.23 \sigma_{ck}^{2/3} \dots\dots (2)$$

表 4 各 RC 梁試験体コンクリートの機械的性質

Table 4 Mechanical properties of concrete of each RC beam specimen

Type of RC beam	Type of coarse aggregate	Strength (N/mm <sup>2</sup> )				Young's modulus (kN/mm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio (%)	
		Compression		Tensile	Bending			
	Age	4th week	On the test day			4th week		
Ordinary strength	Dense BFG		38.5	42.3	2.9	4.4	32.7	0.20
	Limestone		39.2	41.7	3.2	4.6	28.6	0.20
High strength	Dense BFG		73.7	76.3	4.8	6.3	43.6	0.21
	Sandstone		74.1	79.0	4.4	6.2	35.1	0.18

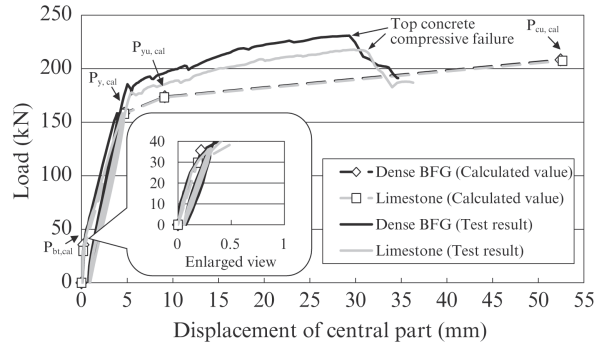


図 8 普通 RC 梁の荷重—中央変位関係

Fig. 8 Relationship between load and displacement of ordinary RC beam

ここに、 $\sigma_{ck}$  はコンクリートの圧縮強度である。 $P_{y,cal}$  および  $\sigma_y$  は下鉄筋の降伏荷重および降伏応力、 $P_{cu,cal}$  はコンクリートの圧壊荷重である。また、終局荷重の計算値  $P_{yu,cal}$  は、下鉄筋の終局ひずみ  $\epsilon_u$  を、

$$\epsilon_u = 20 \epsilon_y \quad (\epsilon_y : \text{下鉄筋の降伏ひずみ}) \dots\dots (3)$$

として算出した。たわみは、各荷重時の応力状態における曲率から、線形補間して求めた各断面位置の曲率を、長さ方向に積分して求めた。

普通強度 RC 梁および高強度 RC 梁に用いたコンクリート配合条件は、目標スランプを 18 cm±1.0 cm、目標空気量をそれぞれ 5.0%±0.5%、および 3.0%±0.5% とした。表 4 には、各 RC 梁試験体コンクリートの機械的性質を、それぞれ示す。

普通 RC 梁曲げ荷重試験における荷重—中央変位関係を、計算値と比較して図 8 に示す。図 8 より、粗骨材の種類にかかわらず、両者ともコンクリート圧壊荷重の計算値より大きいことが分かる。また、両者とも載荷荷重 30 kN 前後で最初のひび割れが発生した。

高強度 RC 梁曲げ荷重試験における荷重—中央変位関係を、計算値と比較して図 9 に示す。図 9 より、曲げ耐力は、骨材の種類にかかわらず、両者ともコンクリート圧壊荷重の計算値より大きいことが分かる。変形性能については、緻密高炉スラグ粗骨材 RC 梁の方が硬質砂岩 RC 梁より高い結果となった。

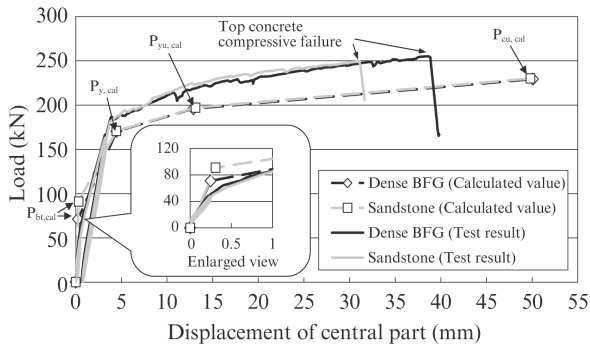


図9 高強度 RC 梁の載荷荷重—変位関係

Fig. 9 Relationship between load and displacement of high-strength RC beam

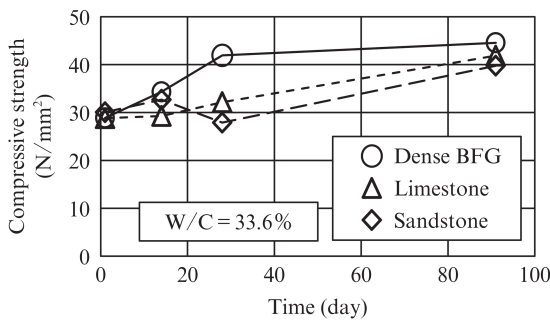


図10 蒸気養生した各コンクリートの圧縮強度

Fig. 10 Compressive strength of curing concrete

以上のことから、緻密高炉スラグ粗骨材を高強度 RC 梁に適用した場合、曲げ耐力は計算値よりも高く安全側となり、かつ変形性能に優れることを実証した。

### 3.4 コンクリート二次製品配合試験

コンクリート二次製品の配合条件は、単位水量を  $168 \text{ kg/m}^3$  に固定し、目標スランプ  $21 \text{ cm} \pm 1.5 \text{ cm}$ 、目標空気量  $4.5\% \pm 1.5\%$  とした。水セメント比は  $33.6\%$  および  $50.0\%$  の 2 水準とした。3.1 節と同様に、単位水量が同じ条件において所要のスランプおよび空気量が得られており、良好なフレッシュ性状であった。蒸気養生条件は、供試体を蒸気槽にセットしたあと、 $20^\circ\text{C}$  で 1 時間保持し、 $45^\circ\text{C}/\text{hour}$  で  $65^\circ\text{C}$  まで

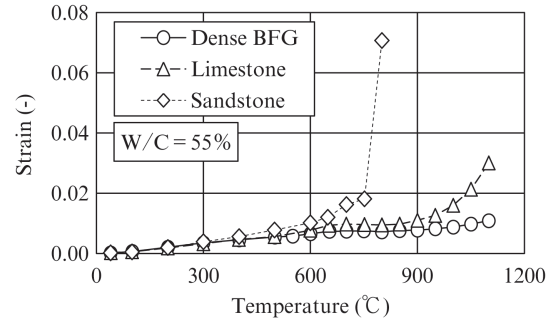


図11 各コンクリートの熱ひずみ

Fig. 11 Strain of curing concrete

上昇させ、3 時間保持した。その後、 $45^\circ\text{C}/\text{hour}$  で  $20^\circ\text{C}$  まで冷却させ、20 時間保持後に取り出し、気中養生した。図 10 には、セメント水比  $33.6\%$  の時の圧縮強度の経時変化を示す。緻密高炉スラグを配合したコンクリートは、材齢 91 日で  $45 \text{ N/mm}^2$  と天然石と比べて高い強度となった。水セメント比  $55\%$  での各種コンクリートの熱ひずみを図 11 に示す。石灰石は  $600^\circ\text{C}$  から、ひずみ量が増加し、 $800^\circ\text{C}$  で炭酸カルシウムの分解反応と考えられる急激な膨張を示した。硬質砂岩は、ひずみ量が  $900^\circ\text{C}$  から増加し、 $1100^\circ\text{C}$  において  $0.03$  程度であった。緻密高炉スラグは、ひずみ量が  $600^\circ\text{C}$  からほぼ変化なく、熱的に安定であった。

## 4. 試験施工と実施工

試験施工用のコンクリート配合条件を表 5 に示す。単位水量を  $173 \text{ kg/m}^3$  に固定し、水セメント比  $55\%$ 、目標スランプ  $15 \text{ cm} \pm 2.5 \text{ cm}$ 、および目標空気量  $4.5\% \pm 1.5\%$  とした。

実機プラントでの練混ぜから 40 分、60 分、および 90 分経過時のスランプ、空気量、およびポンプ圧送値の測定結果を、図 12、図 13、および図 14 に示す。どの測定項目も基準値内であり、良好なフレッシュ性状が得られた。図 15 には、圧縮強度試験結果を示す。図 15 より、材齢 28 日で天然粗骨材と同等の圧縮強度であることが分かる。

製鉄所構内設備新設基礎の一部へ、緻密高炉スラグコンクリートを打設した。配合を表 5 に、打設状況を図 16 にそれぞれ示す。ポンプ圧送時に配管詰まりもなく、ワーカビリ

表 5 試験施工及び実施工に用いたコンクリート配合

Table 5 Formulations for concrete in test construction and actual work

Formulation conditions							Slump (cm)	Amount of air (%)
Type of coarse aggregate	Water cement ratio (%)	Unit amount ( $\text{kg/m}^3$ )						
		Water W	Cement C	Fine aggregate S	Coarse aggregate G	AE water reducing agent		
Dense BFG	55	173	316	782	1 057	3.16	15	4.5
Limestone	55	173	316	746	1 053	3.16	15	4.5

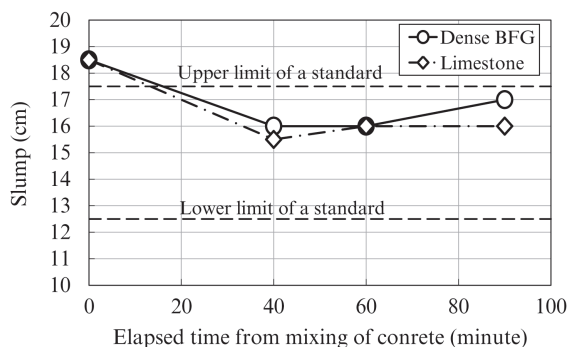


図 12 各コンクリートのスランプ試験結果  
Fig. 12 Slump test result of each concrete

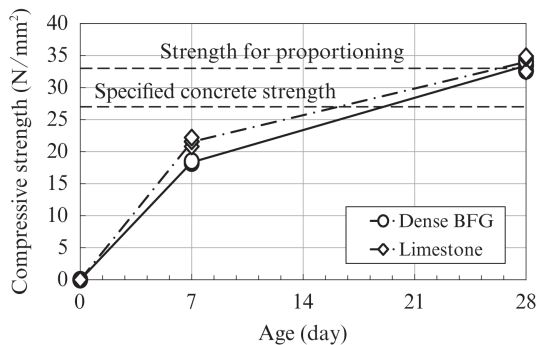


図 15 各コンクリートの材齢—圧縮強度関係  
Fig. 15 Relationship between material ages and compressive strength of concrete

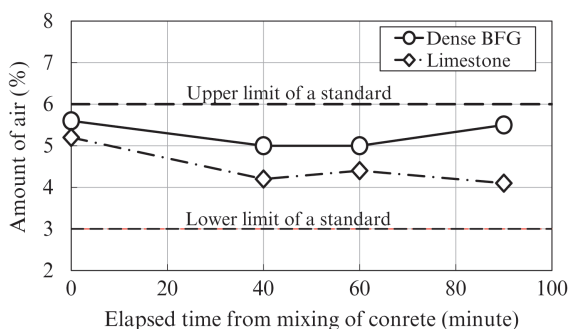


図 13 各コンクリートの空気量試験結果  
Fig. 13 Amount of air test result of each concrete



図 16 実施工におけるコンクリート打設  
Fig. 16 The placement of concrete in actual work

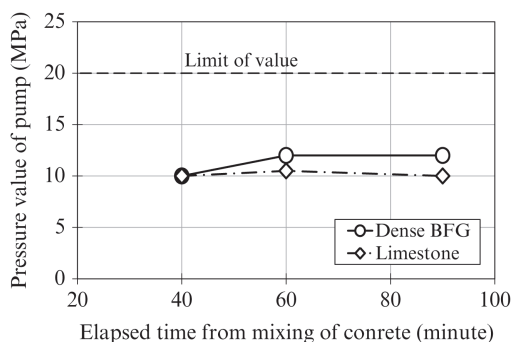


図 14 各コンクリートのポンプ圧送値測定結果  
Fig. 14 Pumping pressure measurement result of each concrete

ティー、および圧縮強度が良好で、コンクリートの表面仕上げにも問題なかった。

## 5. おわりに

本研究では、吸水率1%以下の緻密高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートの基本性能を評価・考察した。得られた成果を、以下に列挙する。

(1) 緻密高炉スラグ粗骨材を用いた 30~50 N/mm<sup>2</sup> 級の普通コンクリートの圧縮強度は、硬質砂岩コンクリートと同等であり、石灰石コンクリートよりも高く優位である。

- (2) 緻密高炉スラグ粗骨材を用いた 100 N/mm<sup>2</sup> 超級の高強度コンクリートの圧縮強度は、硬質砂岩コンクリートと同等であり、石灰石コンクリートよりも高い。自己収縮量は、天然粗骨材（硬質砂岩、石灰石）コンクリートより著しく小さく優位である。
- (3) 100 N/mm<sup>2</sup> 超級の高強度も含め、30 N/mm<sup>2</sup> 以上のコンクリート強度の場合、緻密高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートは、天然粗骨材使用時と比較してフレッシュ性状及び強度の面で遜色がない。
- (4) 緻密高炉スラグコンクリートは、良好な収縮特性を有している。
- (5) コンクリート強度 40 N/mm<sup>2</sup> 級および 75 N/mm<sup>2</sup> 級の RC 梁を作製し、その後 4 点曲げ載荷試験を実施した結果、緻密高炉スラグ RC 梁は、曲げ耐力に関して計算値より高く安全側、かつ天然粗骨材を用いた場合に比べ若干大きいことを実証した。
- (6) コンクリート二次製品の配合において、緻密高炉スラグ粗骨材使用時の方が天然石使用時よりも強度が高く、熱ひずみも小さく、熱的に安定なコンクリート特性であった。
- (7) 従来品の高炉スラグ粗骨材 100% 使用のコンクリートでは実施工上のトラブルがあったが、緻密高炉スラグ粗

骨材 100%使用のコンクリートでは問題なく施工できることが実証できた。

#### 参考文献

- 1) 福田聡之, 上原義和, 吉田英信, 中 博明, 片桐健詞. 高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートの火力発電所土木設備への適用について(その1) —基本特性と適用実績について—. 土木学会年次学術講演会講演概要集, 2002, vol. 55, no. 5, p. 858-859.
- 2) 當房博幸, 宮本陽子, 渡辺圭児, 桑山道弘, 小澤達也, 田中敏宏. 粗骨材用高炉徐冷スラグの気孔率低減の凝固条件. 鉄と鋼, 2013, vol. 99, no. 8, p. 30-39.
- 3) 白川 輝, 藤井隆史, 高橋克則, 綾野克紀. 緻密化した高炉徐冷スラグ粗骨材を用いたコンクリートの強度および変形特性に関する研究. コンクリート工学年次論文集, 2015, 37 巻, 1 号, p. 79-84.
- 4) 中西克佳, 王 蓓, 田 恵太. 緻密高炉スラグ粗骨材コンクリートの性能に関する基礎的研究. コンクリート工学年次論文集, コンクリー

ト工学会, 2016, 7, no. 1008.

- 5) 都築正則, 一瀬賢一, 神代泰道, 小柳光生. 各地域のレディーミキストコンクリート工場にて製造されたコンクリートの乾燥収縮に関する調査. コンクリート工学論文集, 2008, vol. 30, no. 1, p. 483-488.
- 6) (社) 日本道路協会. 道路橋示方書・同解説V. 耐震設計編, 2002.3.



中西 克佳



村田 慶彦



田 恵太