

高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの特性に関する研究

Study on Properties of Concrete Using Blast-Furnace Slag Fine Aggregate

2017年

齊藤和秀

# 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの特性に関する研究

## 目 次

第 1 章 序論	
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成	2
第 2 章 既往の研究	
2.1 概要	4
2.2 高炉スラグ細骨材	4
2.3 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの特性	9
2.3.1 フレッシュ性状	9
2.3.2 硬化物性	10
2.4 既往の研究から得られた課題	13
第 3 章 高炉スラグ細骨材と高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの特性	
3.1 概要	15
3.2 実験概要	15
3.3 実験結果および考察	19
3.4 まとめ	29
第 4 章 高炉スラグ細骨材と収縮低減剤を用いたコンクリートの特性	
4.1 概要	31
4.2 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの収縮低減メカニズム	31
4.2.1 実験概要	31
4.2.2 実験結果および考察	32
4.2.3 まとめ	35
4.3 収縮低減剤を用いたコンクリートの特性	36
4.3.1 実験概要	36
4.3.2 実験結果	38
4.3.3 まとめ	47
4.4 まとめ	47

第 5 章 高炉スラグ細骨材の粒径がコンクリートの硬化物性に与える影響	
5.1 概要	50
5.2 高炉スラグ細骨材の粒径の違いがモルタルの物性に与える影響（実験 1）	
5.2.1 実験概要	50
5.2.2 実験結果および考察	53
5.2.3 まとめ	55
5.3 高炉スラグ細骨材の微粒分の粒径の違いがモルタルの物性に与える影響（実験 2）	
5.3.1 実験概要	56
5.3.2 実験結果および考察	58
5.3.3 まとめ	61
5.4 高炉スラグ細骨材の微粒分がコンクリートの硬化物性に与える影響（実験 3）	
5.4.1 実験概要	61
5.4.2 実験結果および考察	64
5.4.3 まとめ	69
5.5 まとめ	70
第 6 章 高炉スラグ細骨材と各種微粉末を用いたコンクリートの特性	
6.1 概要	72
6.2 実験概要	72
6.3 実験結果および考察	74
6.4 まとめ	80
第 7 章 結論	82
謝辞	85

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景と目的

近年、天然骨材の枯渇化や環境悪化への懸念から、川砂や海砂を中心に天然砂の採取が規制されてきており、良質な骨材の入手が困難な状況となってきた。一方、各種スラグ系骨材は、天然骨材の代替、環境負荷低減およびCO<sub>2</sub>排出量削減などの観点から注目されつつあり、その有効利用の検討が各方面で進められている<sup>1),2)</sup>。特に高炉スラグ細骨材は、高炉水砕スラグを破碎し、粒度調整して製造される工業製品であり、コンクリートに有害な塩化物、不純物、粘土等を含まないため、川砂や海砂の代替としての利用が早くから期待されていた。高炉スラグ細骨材のコンクリート用骨材への利用については、1970年代から1980年代にかけて多くの研究が行われている<sup>3),4),5),6)</sup>。これらの研究によれば、高炉スラグ細骨材の使用により単位水量やブリーディングが増加するが、圧縮強度やその他の硬化物性は普通骨材とほぼ同等でありコンクリート用骨材として利用可能であることが確認されている。1981年には高炉スラグ細骨材のJISが制定され、1983年には土木学会において高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの設計施工指針(案)<sup>7)</sup>が作成され、高炉スラグ細骨材の使用技術の標準が示されている。このような背景の中、海砂の代替材、砕砂の粒度調整などの用途を中心として高炉スラグ細骨材のコンクリートへの利用は徐々に増加していき、2006年頃には300万t/年に達している。その後は150~200万t/年程度<sup>8)</sup>が続いており、高炉スラグの生産量が約2000万t/年であることを考慮すると、未だ細骨材として有効に利用されているとは言い難い状況である。その理由の1つとしては、高炉スラグ細骨材がガラス質で粒形が角ばっていることや単粒度であること、天然骨材に比べて密度が大きいことなどにより、コンクリートの単位水量やブリーディングが増加するため、一般に30%程度の混合率で使用されることが多く、多量に混合できないことが挙げられる。

そこで本研究では、高炉スラグ細骨材のさらなる利用拡大を最終的な目標とし、高炉スラグ細骨材の持つ課題、すなわち単位水量の増加とブリーディングの増大を解決するとともに、さらに高炉スラグ細骨材の持つ優れた特性を明らかにし、それを有効活用するための方法を検討することを目的とした。

具体的な内容としては、高炉スラグ細骨材と混和材料との組み合わせにより課題解決を検討することとし、混和剤として高性能AE減水剤と収縮低減剤を、混和材として高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、石灰石微粉末および硬質砂岩微粉末(シリカサンド)をとりあげた。単位水量の増加とブリーディングの増大に対しては、高性能AE減水剤および高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、石灰石微粉末およびシリカサンドを、高炉スラグ細骨材の持つ優れた特性の有効活用に対しては、収縮低減剤および高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、石灰石微粉末およびシリカサンドを用いて検討した。

## 1.2 本論文の構成

本論文は全7章により構成される。以下に各章の概要を記述する。

第1章では、本研究の背景と目的、本論文の構成について述べた。

第2章では、高炉スラグ細骨材の製造、種類、品質等についての概要と、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートに関する既往の研究をまとめ、高炉スラグ細骨材の持つ課題を明確にした。

第3章では、水セメント比15~45%の一般強度から高強度領域のコンクリートについて、高性能 AE 減水剤を用いて、高炉スラグ細骨材を使用する場合でも普通骨材コンクリートと同一単位水量とし、高炉スラグ細骨材置換率を変化させて、ブリーディングの抑制効果を検証した。また、同時に硬化コンクリートの各種物性を測定し、高炉スラグ細骨材に乾燥収縮や中性化を低減する効果があることを明らかにした。

第4章では、高炉スラグ細骨材がコンクリートの乾燥収縮を低減する効果があることに着目し、4.2ではその低減のメカニズムについて検討した。さらに4.3では化学混和剤の分野でコンクリートの乾燥収縮を低減する材料として知られる収縮低減剤と高炉スラグ細骨材を組み合わせて、それぞれを単独で使用するよりも大きな収縮低減効果が得られることを明らかにした。

第5章では、高炉スラグ細骨材が普通骨材と異なり、長期強度増進、乾燥収縮低減などの硬化物性向上効果を持ち、それが高炉スラグ細骨材の粒子表面の反応性に起因し、その反応速度が粒径(表面積)の影響を受けることに着目し、高炉スラグ細骨材の粒径や微粒分がコンクリートの各種硬化物性に与える影響について検討した。また、高炉スラグ細骨材の微粒分を想定して高炉スラグ微粉末をさらに添加した場合のフレッシュ性状の改善、長期強度増進、乾燥収縮低減および中性化抑制の効果を確認した。

第6章では、単位水量の増加とブリーディングの増大を改善するためのもう1つの対策として、高炉スラグ細骨材と各種微粉末の組み合わせに着目し、水セメント比が60%で高炉スラグ細骨材を75%使用したコンクリートを対象として、高炉スラグ細骨材の一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの各種微粉末に置換した場合の、フレッシュ性状の改善やブリーディング低減の効果を検証した。併せて、各種微粉末による長期強度増進、乾燥収縮低減などの硬化物性の向上の効果についても確認した。

第7章では、各章で得られた知見をまとめ、本研究を総括した。

## 参考文献

- 1) 吉澤千秋:高炉スラグ細骨材の現状と課題, コンクリートテクノ, Vol.24, No.12, pp.29-34, 2005.12
- 2) 上野敦, 國府勝郎, 宇治公隆:スラグ細骨材を用いたコンクリートの品質向上に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.2, pp.462-476, 2006.6

- 3) 長滝重義, 高田誠, 河野広隆 : 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの体積変化, セメント技術年報, No.31, pp.148-151, 1977
- 4) 長滝重義, 米山紘一, 高田誠 : 高炉スラグ水砕砂を用いたコンクリートの諸性状について, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.1, pp.193-196, 1979
- 5) 植田紳治 : 高炉水砕砂を使用したコンクリートの諸性状に関する実験研究, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.1, pp.197-200, 1979
- 6) 依田彰彦 : 高炉スラグを細骨材としたコンクリートの性質について, セメント技術年報, No.34, pp.133-136, 1980
- 7) 土木学会 : 高炉スラグ骨材コンクリート施工指針, 1993
- 8) 鐵鋼スラグ協会 : 鐵鋼スラグ統計年報(平成 26 年度実績), 2015

## 第2章 既往の研究

### 2.1 概要

高炉スラグ細骨材のコンクリート用骨材への利用については、1970年代から1980年代にかけて多くの研究が行われている。これらの研究は、水セメント比が50~70%程度のプレーンまたはAE減水剤を使用したコンクリートを対象として、高炉スラグ細骨材を100%または普通骨材に置換して用いたコンクリートについて、フレッシュ性状および硬化物性を普通骨材のみを用いたコンクリートと比較することによって、高炉スラグ細骨材のコンクリート用骨材としての利用の可能性を検討したものが多く。

第2章では、高炉スラグ細骨材の概要を述べるとともに既往の研究成果をまとめ、高炉スラグ細骨材の持つ課題を整理した。

### 2.2 高炉スラグ細骨材

#### (1) 高炉スラグ細骨材の製造

高炉スラグは、鉄鋼の製造時に発生する鉄鋼スラグの一種である。各種スラグの分類を図2.1に示す。鉄鋼スラグは、図2.2に示すように、生成フローの違いにより、高炉水砕スラグ、高炉徐冷スラグ、転炉系スラグなどに分類される。高炉スラグ細骨材の製造フローの一例を図2.3に示す。高炉スラグ細骨材は、高炉水砕スラグを破碎・整粒し、粒度分布を調整する。その後、貯蔵中の固結を防止するため、固結防止剤を添加している。

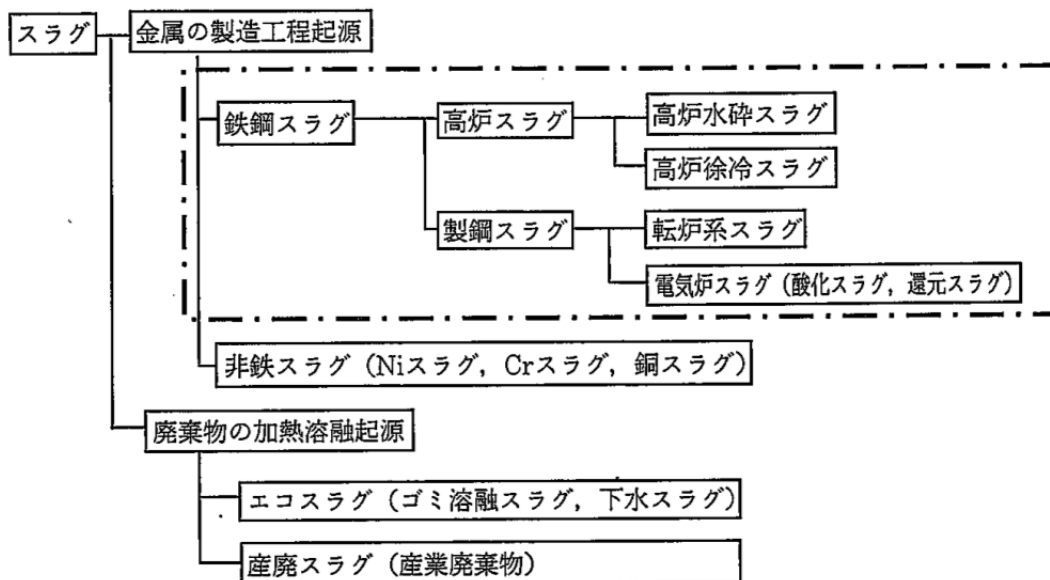


図 2.1 スラグの種類<sup>1)</sup>

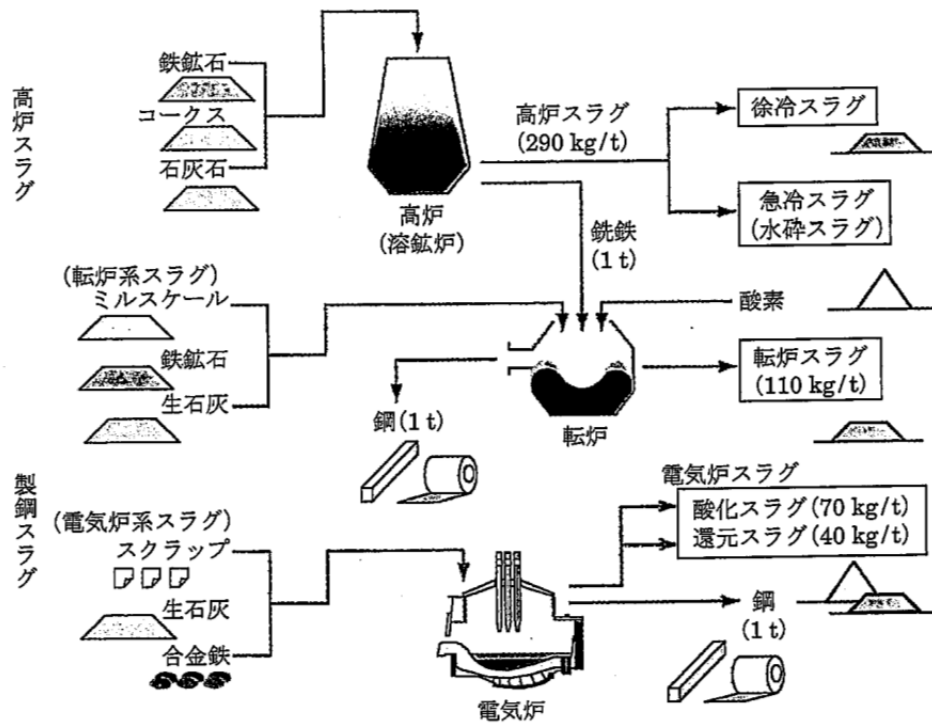


図 2.2 鉄鋼スラグの生成フロー<sup>1)</sup>

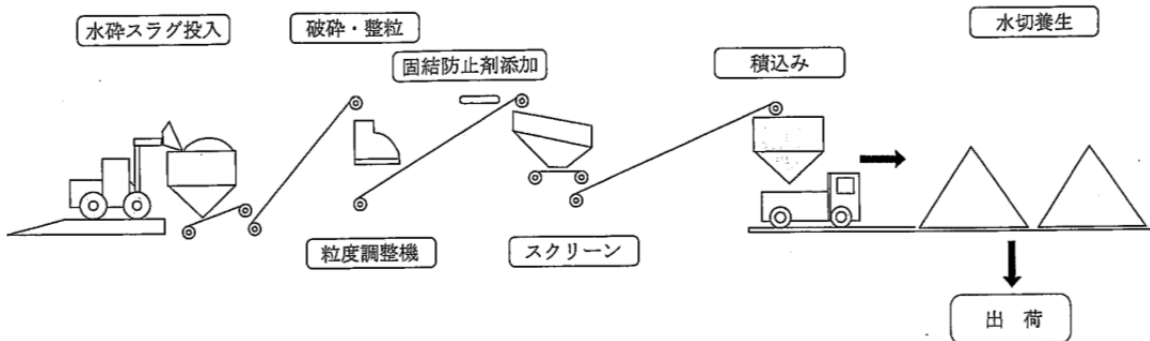


図 2.3 高炉スラグ細骨材の製造フロー例<sup>1)</sup>



## (2) 高炉スラグ細骨材の外観

高炉スラグ細骨材の粒子の外観は、一般にガラス質で角張った形状をしている。代表的な高炉スラグ細骨材の外観の顕微鏡写真を写真 2.1 に示す。製造所ごとに粒子形状、色、粒度分布等は若干異なるが、概ね写真 2.1 に示すような外観のものが多い。



写真 2.1 高炉スラグ細骨材の外観

## (3) 高炉スラグ細骨材の供給量の推移

高炉スラグの生成量および高炉スラグ骨材の供給量の最近の動向を表 2.1 に、高炉スラグ骨材の供給量の推移を図 2.4 に示す。

表 2.1 を見ると、高炉スラグの生成量は、2005 年以降大きな変動はなく、概ね 2200～2500 万 t で推移している。一方、高炉スラグ骨材の供給量を見ると、高炉スラグ粗骨材については、20～35 万 t で変動は少ないが、高炉スラグ細骨材については、環境保全や社会情勢の影響を受けて大きく変化している。高炉スラグ細骨材の供給量は、1996 年には 40 万 t 程度であったが、年々増加し、2006 年には 300 万 t を超えている。この理由としては、①

表 2.1 高炉スラグの生成量および高炉スラグ骨材の供給量<sup>2)</sup>

年度	生成量(万 t)			骨材の供給量(万 t)		生成量に対する骨材の供給量の比(%)	
	水砕スラグ	徐冷スラグ	合計	高炉スラグ細骨材	高炉スラグ粗骨材	高炉スラグ細骨材	高炉スラグ粗骨材
2005	1983	493	2476	278	36	14.0	7.2
2006	2041	435	2476	314	28	15.4	6.5
2007	2100	443	2543	301	23	14.3	5.1
2008	1878	409	2287	238	24	12.7	5.9
2009	1755	412	2167	178	22	10.2	5.4
2010	1984	509	2493	169	21	8.5	4.1
2011	1951	466	2417	166	26	8.5	5.5

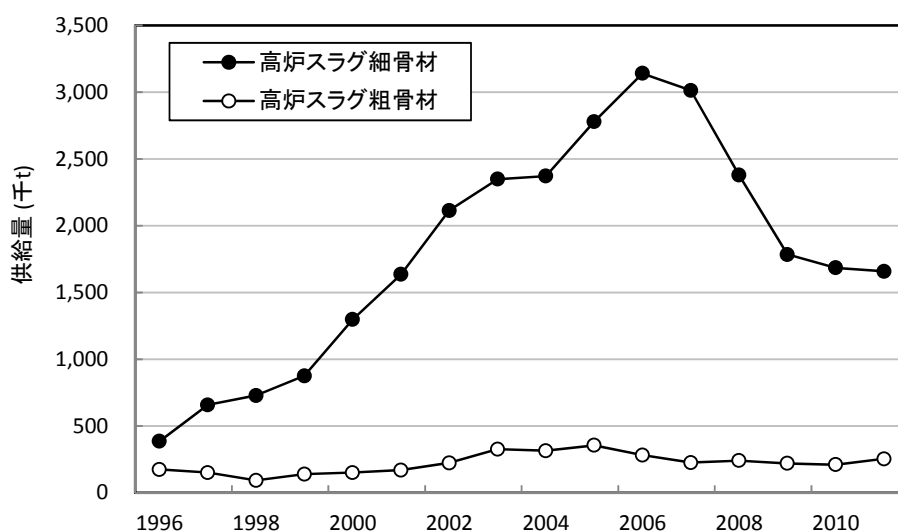


図 2.4 高炉スラグ骨材の供給量の推移<sup>2)</sup>

天然骨材の枯渇，②海砂の採取規制，③中国産川砂の輸出規制などの影響が挙げられる。しかし，その後，2008年のリーマンショックや熔融スラグのポップアウト等の問題の影響により大きく低下し，最近では150～200万t程度となっている<sup>2)</sup>。

#### (4) 高炉スラグ細骨材の種類と品質

高炉スラグ細骨材の種類と品質は，JIS A 5011-1-2013<sup>3)</sup> コンクリート用スラグ骨材 第1部：高炉スラグ骨材に規定されている。高炉スラグ細骨材の種類と粒度範囲を表 2.2，化学成分および物理的性質を表 2.3 に示す。JIS A 5011-1 の2013年の改正により，粗粒率は製造業者と購入者が協議によって定めた値に対して±0.20の範囲とするよう変更された。また，微粒分量は，許容差±2.0%の範囲内であればつきが生じても7.0%以下となるように変更された。

高炉スラグ細骨材は，現在，14の製造所で生産されている。各製造所では，常にスラグの化学組成を管理しているため，生成されるスラグの化学成分は製造所内では大きく変動することはなく安定している。しかし，製造所間での比較では，JISの規格の範囲内で若干異なるようである<sup>2)</sup>。また，粒度や物理的性質についても，製造業者が実施した試験結

表 2.2 高炉スラグ細骨材の種類と粒度範囲<sup>3)</sup>

種類	記号	ふるいを通るものの質量分率(%)						
		10mm	5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm
5mm 高炉スラグ細骨材	BFS5	100	90～100	80～100	50～90	25～65	10～35	2～15
2.5mm 高炉スラグ細骨材	BFS2.5	100	95～100	85～100	60～95	30～70	10～45	2～20
1.2mm 高炉スラグ細骨材	BFS1.2	-	100	95～100	80～100	35～80	15～50	2～20
5～0.3mm 高炉スラグ細骨材	BFS0.5-3	100	95～100	65～100	10～70	0～40	0～15	0～10

表 2.3 高炉スラグ細骨材の化学成分および物理的性質<sup>3)</sup>

項目		規定
化 学 成 分	酸化カルシウム(CaOとして) %	45.0 以下
	全硫黄(Sとして) %	2.0 以下
	三酸化硫黄(SO <sub>3</sub> として) %	0.5 以下
	全鉄(FeOとして) %	3.0 以下
物 理 的 性 質	絶乾密度 g/cm <sup>3</sup>	2.5 以上
	吸水率 %	3.0 以下
	単位容積質量 kg/L	1.45 以上
	微粒分量 %	7.0 以下
	粗粒率	製造業者と購入者が協議によって定め た粗粒率に対して±0.20 の範囲のもので なければならない

果を製造所間で比較したところ、概ね JIS 規格の範囲を満足しているが、若干異なる傾向にあることが報告されている<sup>2)</sup>。

#### (5) 高炉スラグ細骨材の貯蔵と固結

高炉水砕スラグを微粉砕して製造される高炉スラグ微粉末は、潜在水硬性を持ち水和反応により硬化する。一方、高炉水砕スラグを破砕して製造される高炉スラグ細骨材も、長期の貯蔵中に水和反応を起こすと粒子同士が接着し、塊状化する固結と呼ばれる現象を引き起こす場合がある。高炉スラグ細骨材は一般に写真 2.2 のような状態で貯蔵されるが、反応が進みやすい夏期や長期間の貯蔵時には写真 2.3 に示すような固結が発生しやすい。固結現象を防止するには、高炉スラグ細骨材の製造工場ですら固結防止剤を散布する方法がある。固結防止剤はオキシカルボン酸塩系化合物やポリアクリル酸塩系化合物を主成分とするものが開発されている<sup>4),5)</sup>。固結防止剤を高炉スラグ細骨材に対して 0.03~0.05%散布することにより、数週間から 3 ヶ月程度貯蔵が可能となる。固結防止剤を散布することによるコンクリートの品質への影響は少ないことが報告されている<sup>5)</sup>。



写真 2.2 高炉スラグ細骨材の貯蔵状況<sup>4)</sup>



写真 2.3 固結した高炉スラグ細骨材<sup>4)</sup>

## 2.3 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの特性

### 2.3.1 フレッシュ性状

#### (1) 単位水量とワーカビリティ

高炉スラグ細骨材は破碎して製造されるため、粒形が角張っており、所要のスランプを得るための単位水量は一般に増加する。高炉スラグ細骨材を単独で用いた場合、 $W/C=50\sim70\%$ で2~7%程度増加する傾向にある<sup>6),7)</sup>。

普通骨材に置換して使用する場合には、その置換率により単位水量増加の程度は変化する。植田ら<sup>8)</sup>が高炉スラグ細骨材および普通骨材を用いたコンクリートのセメント水比と単位水量の関係を調べた結果を図2.5<sup>8)</sup>に示す。 $W/C=60\%$ のプレーンコンクリートにおいて、高炉スラグ細骨材(水砕砂IV)は単位水量が山砂(細)よりも約 $30\text{kg/m}^3$ 程度多いが、山砂(細)の50%を高炉スラグ細骨材(水砕砂IV)に置換した場合は、山砂(細)単独よりも約 $10\text{kg/m}^3$ の増加となっている。

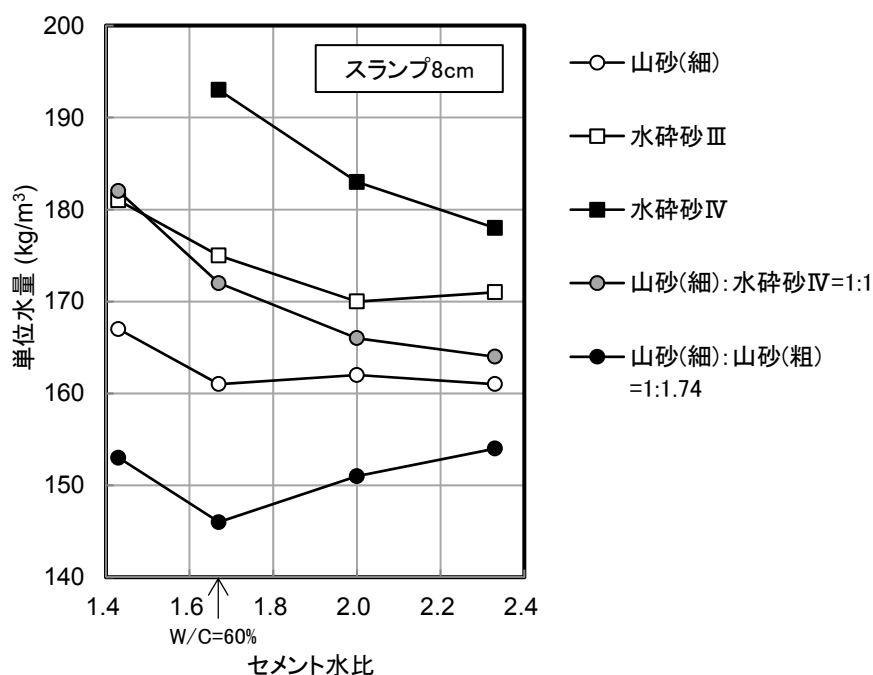


図 2.5 セメント水比と単位水量の関係<sup>8)</sup>

#### (2) ブリーディング

高炉スラグ細骨材は粒形が角張っており、骨材表面がガラス質で普通骨材より保水性が低いいため、同一スランプの普通骨材コンクリートに比べてブリーディング量は多くなる傾向にある<sup>6),7)</sup>。

普通骨材に置換して使用する場合には、その置換率によりブリーディング増加の程度は変化する。植田らが高炉スラグ細骨材および普通骨材を用いたコンクリートのブリーディングについて行った実験結果を図 2.6<sup>8)</sup>に示す。W/C=50%のプレーンコンクリートにおいて、水砕砂Ⅳはブリーディング量が山砂(細)の約 9 倍程度多いが、山砂(細)の 50%を水砕砂Ⅳに置換した場合は、山砂(細)単独の約 3.5 倍となっている<sup>8)</sup>。

上野らは、各種スラグ細骨材の粒子形状や密度に着目し、W/C や微粒分(フェロニッケルスラグ)を調整することでスラグ細骨材を 100%使用したコンクリートにおいても流動性の改善やブリーディングを大幅に減少できることを報告している<sup>9)</sup>

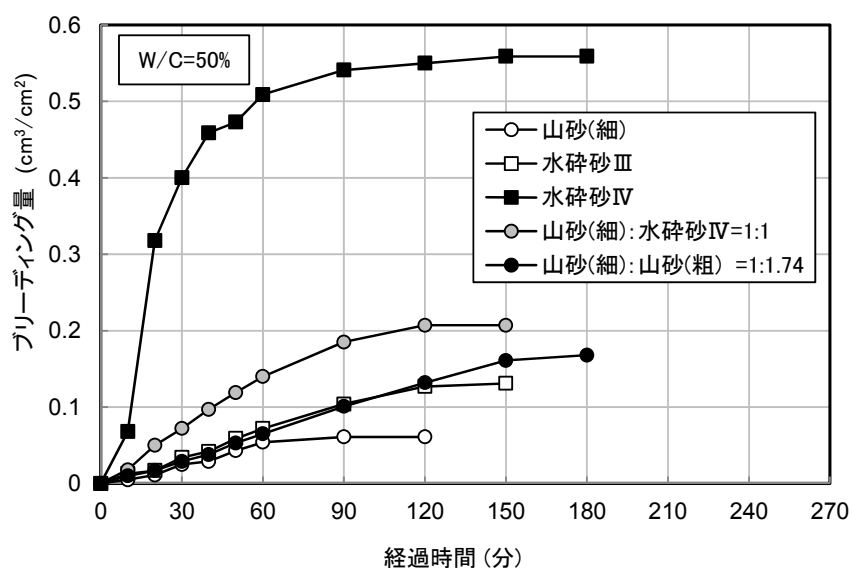


図 2.6 ブリーディング量の経時変化<sup>8)</sup>

### (3) 空気量

高炉スラグ細骨材は、粒形が角張っているため、空気を巻き込みやすい傾向にある<sup>7)</sup>。小林らが 4 種類の高炉スラグ細骨材を単独で用いたコンクリートの空気量と気泡間隔係数について行った実験によると、W/C=55%のプレーンコンクリートにおいて、川砂コンクリートの空気量が 2.1%であるのに対して、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの空気量は 2.7~4.7%であること、また、AE 剤を用いて空気量を川砂コンクリートと同等とした場合の気泡間隔係数が大きい傾向にあることが報告されている<sup>10)</sup>。

## 2.3.2 硬化物性

### (1) 強度特性

高炉スラグ細骨材を単独で用いた場合のコンクリートの圧縮強度は、普通骨材コンクリートに比べ、若材齢において小さい傾向にあるが、長期材齢では同等以上の強度が得られる場合が多い<sup>6),7),8),11)</sup>。国府らが行った長期強度試験結果を図 2.7<sup>11)</sup>に示す。高炉スラグ細

骨材コンクリートは、材齢 20 年においても強度増進しており、この強度増進は、ポルトランドセメントの水和の進行に加えて、高炉スラグ細骨材の潜在水硬性が寄与していることが報告されている<sup>11)</sup>。

高炉スラグ細骨材を普通骨材に置換して用いた場合は、その置換率に応じて高炉スラグ細骨材の特性が圧縮強度に与える影響は変化するが 20~60%の範囲内であれば、その影響は小さいと考えられる。

高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの引張強度、曲げ強度、ヤング係数については、コンクリートの圧縮強度との関係が普通骨材コンクリートと同等であることが報告されている<sup>6),7)</sup>。長瀧らは、高炉スラグ細骨材を用いたモルタルのヤング係数を天然砂と比較し、図 2.8<sup>12)</sup>に示すように高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは天然砂に比べてヤング係数が若干高い傾向にあることを報告している<sup>12)</sup>。

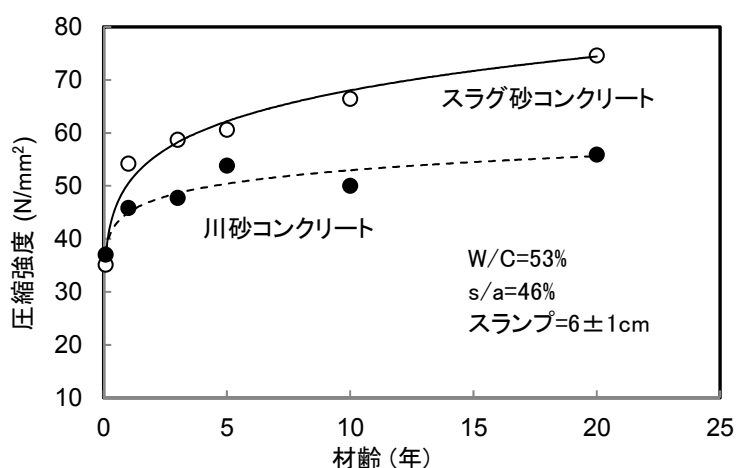


図 2.7 圧縮強度の経時変化<sup>11)</sup>

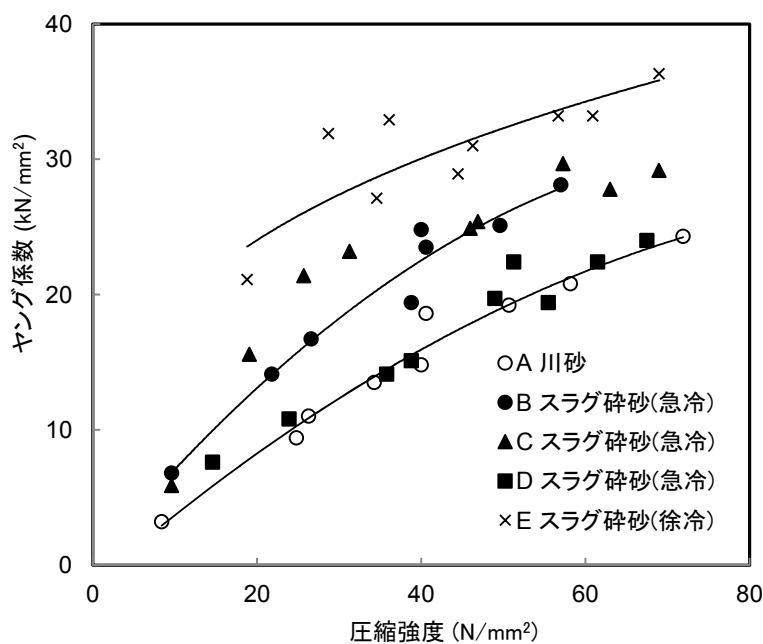


図 2.8 圧縮強度とヤング係数の関係<sup>12)</sup>

## (2) 乾燥収縮ひずみ

高炉スラグ細骨材を単独で用いた場合のコンクリートの乾燥収縮ひずみは、同一水セメント比で単位水量が多いにも関わらず普通骨材コンクリートよりも若干小さい傾向にある<sup>6),7),8),12)</sup>。長瀧らは、高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの乾燥収縮ひずみを天然砂と比較し、高炉スラグ細骨材の乾燥収縮ひずみは天然砂に比べて若干小さいこと、およびその理由が、高炉スラグ細骨材の潜在水硬性と高炉スラグ細骨材に含まれる微粒分の微粉末効果によるものであることを報告している<sup>12)</sup>。

高炉スラグ細骨材を普通骨材に置換して使用する場合には、その置換率により乾燥収縮ひずみ低減の程度は変化する。植田らが高炉スラグ細骨材および普通骨材を用いたコンクリートについて行った乾燥収縮試験結果を図 2.9<sup>8)</sup>に示す。W/C=50%のプレーンコンクリートにおいて、乾燥期間約 220 日における水砕砂Ⅳの乾燥収縮ひずみは、山砂(細)よりも約 100 $\mu$  程度小さい。山砂(細)50%を水砕砂Ⅳに置換した場合は、山砂(細)単独の場合とほぼ同等の値となっている<sup>8)</sup>。

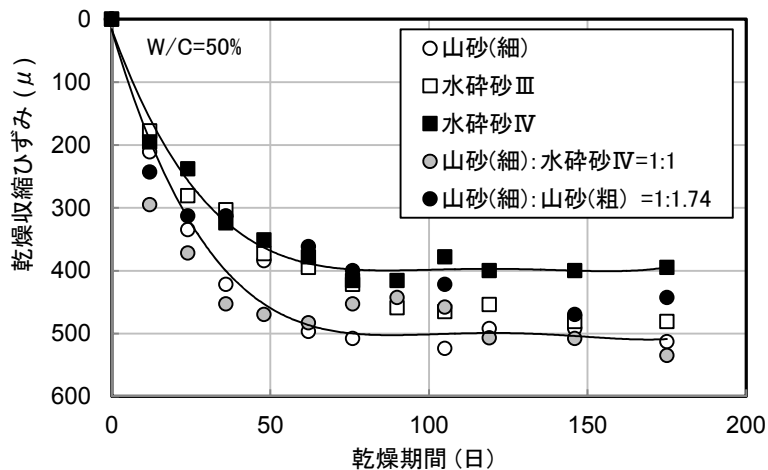


図 2.9 乾燥収縮ひずみの経時変化<sup>8)</sup>

## (3) 凍結融解抵抗性

高炉スラグ細骨材を単独で用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は、同一空気量の場合、普通骨材コンクリートに比べ若干小さくなる傾向があるが、空気量を多目に設定することにより、普通骨材コンクリートと同程度の凍結融解抵抗性を得ることができる<sup>6),7)</sup>。凍結融解抵抗性が低下する理由として、高炉スラグ細骨材の使用により、ブリーディングが増大すること、空気量が同一の場合でも比較的大きな気泡が多く気泡間隔係数が大きいことなどが報告されている<sup>10)</sup>。

高炉スラグ細骨材を普通骨材に置換して使用する場合は、その置換率により凍結融解抵抗性の程度は変化する。高炉スラグ細骨材置換率が 20~60%の範囲内であれば、普通骨材コンクリートと同等とされている<sup>13)</sup>。

#### (4) 中性化抵抗性

高炉スラグ細骨材を単独で用いたコンクリートの中性化速度は普通骨材コンクリートと同等<sup>6)</sup>か若干小さい<sup>7)</sup>という報告が多い。依田らが高炉スラグ細骨材および普通骨材を用いたコンクリートについて行った中性化試験結果を表 2.3<sup>7)</sup>に示す。

高炉スラグ細骨材を普通骨材に置換して使用する場合は、その置換率により中性化抵抗性は変化するが影響は小さいと考えられる。

表 2.3 促進中性化試験結果(W/C=60%)<sup>7)</sup>

セメント	細骨材		粗骨材		材齢 28 日の圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )			CO <sub>2</sub> 促進 34 週		引張強度に対する圧縮強度の比						中性化深さ(mm)			コンクリート中の鉄筋の発錆 <sup>(4)</sup> 状況		
					水中養生(°C)	圧縮強度 <sup>(3)</sup>	ヤング係数比 <sup>(3)</sup>	1 週	4 週	13 週	26 週	1 年	2 年	1 年	2 年	3 年	1 年	2 年	3 年		
														ただし CO <sub>2</sub> 促進 13 週	ただし CO <sub>2</sub> 促進 26 週	ただし CO <sub>2</sub> 促進 34 週					
														20	10	5					
普通ポルトランドセメント	急冷	g	川砂利	G	260	210	187	1.19	1.07	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	9	14	17	○	○	○
					260	209	186	1.16	1.10	0.10	0.09	0.10	0.09	0.09	9	12	18	○	○	○	
					261	208	185	1.15	1.12	0.10	0.10	0.11	0.10	0.09	0.09	10	16	18	○	○	○
					269	210	187	1.16	1.12	0.11	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08	10	17	21	○	○	○
	徐冷	h	高炉スラグ碎石	H	245	205	181	1.14	1.09	0.12	0.11	0.10	0.08	0.08	0.08	11	15	19	○	○	○
					248	207	182	1.14	1.11	0.10	0.11	0.09	0.09	0.07	0.09	10	15	21	○	○	○
					259	208	187	1.15	1.10	0.11	0.11	0.09	0.09	0.08	0.09	10	16	21	○	○	○
					256	211	186	1.20	1.12	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	11	17	22	○	○	○

[注] : (3) 材齢 2 年の 20°C 水中養生の値を 1.00 とした場合

(4) ○印はさびが発生していないことを示す

#### 2.4 既往の研究から得られた課題

これまで述べた既往の研究を総括すると、W/C=50~70%程度のプレーンコンクリートまたは AE 減水剤を使用したコンクリートに、高炉スラグ細骨材を単独または 50%程度内割置換して使用した場合にコンクリートに与える影響は次のようにまとめられる。

- (1) 単位水量が増大する。
- (2) ブリーディングが増加する。
- (3) 巻き込み空気量が増大し、同一空気量での気泡間隔係数は大きくなる。
- (4) 圧縮強度は初期材齢では若干低い、長期材齢では同等以上となる。
- (5) 乾燥収縮ひずみは若干小さくなる。
- (6) 凍結融解抵抗性は若干低下する。
- (7) 中性化速度は同等か若干小さくなる。



つまり、高炉スラグ細骨材は、コンクリートの長期強度を増進させる効果や、乾燥収縮ひずみや中性化速度を同等か若干小さくする効果などのコンクリートの品質を向上させる性質を持つが、一方で、ガラス質で骨材粒子の形状が角ばっていることや、単粒度であることなどにより、コンクリートの単位水量やブリーディングの増大や、粗大な気泡を巻き込みやすいことによる凍結融解抵抗性の低下などコンクリートの品質を低下させる性質も持っている。したがって、コンクリート用骨材として利用する際には、コンクリートの品質への悪影響を回避するため、普通骨材に20～60%置換して使用することが一般的となっている。本研究の最終目標である高炉スラグ細骨材のさらなる利用拡大のためには、高炉スラグ細骨材の持つマイナスの性質を改善する対策の検討および普通骨材よりも優れた特性を見出し、それを活用していくことが重要である。

## 参考文献

- 1) 山中量一：高炉スラグ骨材，コンクリート工学，Vol.46，No.5，pp.90-94，2008.5
- 2) 日本建築学会：高炉スラグ細骨材を用いるコンクリートの調合設計・施工指針・同解説，pp.91-108，2013
- 3) 日本規格協会：JIS A 5011-1-2013 コンクリート用スラグ骨材 第1部：高炉スラグ骨材
- 4) 高橋智雄，木之下光男，吉澤千秋，光藤浩之：高炉スラグ細骨材用固結防止剤の開発，コンクリート工学，Vol.40，No.11，pp.19-25，2002.11
- 5) 光藤浩之，吉澤千秋，高橋智雄，木之下光男：高炉スラグ細骨材の固結防止技術，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.1，pp.87-92，2004
- 6) 岸谷孝一，友沢史紀，沼田晋一：コンクリート用水砕スラグ細骨材の使用規準作成に関する研究，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.1，pp.213-216，1979
- 7) 依田彰彦：高炉スラグを細骨材としたコンクリートの性質について，セメント技術年報，No.34，pp.133-136，1980
- 8) 植田紳治：高炉水砕砂を使用したコンクリートの諸性状に関する実験研究，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.1，pp.197-200，1979
- 9) 上野敦，國府勝郎，宇治公隆：スラグ細骨材を用いたコンクリートの品質向上に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.62，No.2，pp.462-476，2006.6
- 10) 小林正几，田中弘：高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートの気泡組織について，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.2，pp.41-44，1980
- 11) 国府勝郎，下山善秀：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの20年試験結果，セメント・コンクリート，No.714，pp.27-32，2006
- 12) 長滝重義，高田誠，河野広隆：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの体積変化，セメント技術年報，No.31，pp.148-151，1977
- 13) 土木学会：高炉スラグ骨材コンクリート施工指針，pp.5-6，1993

### 第3章 高炉スラグ細骨材と高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの特性<sup>1)</sup>

#### 3.1 概要

高炉スラグ細骨材に関する既往の研究によると、水セメント比が50～70%程度のプレーンまたは AE 減水剤を使用したコンクリートに高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、無添加の場合に比べて単位水量やブリーディングが増大したり、耐凍害性が低下することが報告されている<sup>2),3),4)</sup>。最近、化学混和剤の分野では、コンクリート構造物の高強度化や骨材事情の悪化等により、AE 減水剤の代わりに高性能 AE 減水剤が広く使用されるようになってきている。高性能 AE 減水剤を使用すれば、使用材料や水セメント比が変化する場合でも単位水量を増加させることなく、高性能 AE 減水剤の添加量を変化させることにより、ワーカビリティを調整することが可能である。

そこで本章では、水セメント比15～45%の広範囲なコンクリートに高炉スラグ細骨材を適用し、天然細骨材を100%使用した場合と同じ単位水量で、高炉スラグ細骨材の置換率を変化させて高性能 AE 減水剤を用いることによるブリーディングの抑制効果を検証した。また、同時に硬化コンクリートの各種物性を測定し、高炉スラグ細骨材による乾燥収縮や中性化低減の効果についても確認した。

#### 3.2 実験概要

##### (1) 使用材料

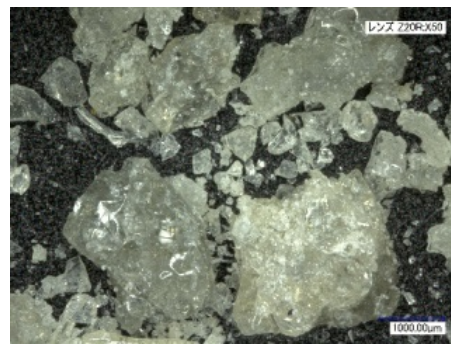
高炉スラグ細骨材は JIS A 5011-1 コンクリート用スラグ骨材 第1部：高炉スラグ骨材に適合し、製造所の異なる SG1～SG4 を使用した。高炉スラグ細骨材の物性値を表 3.1、顕微鏡写真の一例を写真 3.1 およびその他の使用材料を表 3.2 に示す。

表 3.1 高炉スラグ細骨材の物性値

高炉スラグ細骨材	SG1	SG2	SG3	SG4
区分	BFS5	BFS5	BFS5	BFS5
表乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.73	2.81	2.73	2.77
吸水率(%)	0.45	0.73	0.60	0.75
粗粒率	2.56	3.54	2.26	2.26



SG1



SG2

写真 3.1 高炉スラグ細骨材の顕微鏡写真

表 3.2 その他の使用材料

種類	記号	産地・性質・成分
セメント	N	普通ポルトランドセメント (密度 3.16 g/cm <sup>3</sup> ,比表面積 3300 cm <sup>2</sup> /g)
	BB	高炉セメント B 種 (密度 3.14 g/cm <sup>3</sup> ,比表面積 3850 cm <sup>2</sup> /g)
	M	中庸熱ポルトランドセメント (密度 3.21 g/cm <sup>3</sup> ,比表面積 3750 cm <sup>2</sup> /g)
	S	シリカフェームプレミックセメント (密度 3.08 g/cm <sup>3</sup> ,比表面積 56000 cm <sup>2</sup> /g)
細骨材	S1	大井川水系産陸砂 (表乾密度 2.58 g/cm <sup>3</sup> ,吸水率 2.31%,F.M.2.87)
	S2	岩瀬産砕砂 (表乾密度 2.64 g/cm <sup>3</sup> ,吸水率 1.40%,F.M.2.67)
粗骨材	G1	岡崎産砕石(表乾密度 2.68 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.78% , 実積率 60.0%)
	G2	岩瀬産砕石(表乾密度 2.66 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.13% , 実積率 60.0%)
混和剤	HP1	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤(普通強度用) チューポール HP-11
	HP2	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤(高強度用) チューポール HP-11W
	SSP	ポリカルボン酸系高性能減水剤(超高強度用) チューポール SSP-104

## (2) モルタル試験

コンクリート試験に使用する高炉スラグ細骨材を選定する目的で、各種高炉スラグ細骨材を使用したモルタルの流動性と乾燥収縮を試験した。天然細骨材 S1 を基準として、高炉スラグ細骨材は容積で 50%置換して使用した。モルタルの配合は、水セメント比 45%、S1/N=2.5(容積比)とし、高性能 AE 減水剤の添加量は C×0.75%の一定とした。なお、空気量の影響をなくすため消泡剤を使用して空気量 2%以下とした。モルタルの練混ぜは JIS R 5201 に準拠して行い、フロー値の測定は JIS R 5201 に規定されているフローコーンを用いた 0 打フローとした。乾燥収縮の供試体は 4×4×16cm のサイズとし、測定は JIS A 1129-3 に準拠し、供試体成形後 24 時間で脱型後、材齢 7 日まで標準水中養生した後の長さを基長として温度 20°C、湿度 60%RH の室内に保管し乾燥期間 26 週まで測定した。

### (3) コンクリート試験

#### a) 実験の因子と水準

高炉スラグ細骨材 SG1 を使用してコンクリートの諸物性を高炉スラグ細骨材無添加のコンクリートと比較した。実験の因子と水準を表 3.3 に示す。

表 3.3 実験の因子と水準

因子	水準
セメント	N, BB, M, S
水セメント比(%)	45, 30, 25, 15
高炉スラグ細骨材置換率(%)	0, 25, 50, 75, 100

#### b) コンクリートの配合

設計基準強度  $36 \sim 120 \text{N/mm}^2$  を想定した水セメント比(以下, W/C)45, 30, 25 および 15% の配合を設定し, 対象とする強度レベルによりセメント種類および混和剤を変えて用いた。コンクリートの配合を表 3.4 に示す。各配合は 45N25 のように W/C, セメント種別, 高炉スラグ細骨材置換率を組み合わせた記号で示した。目標スランブまたはスランブフローおよび目標空気量は, 強度レベルに応じてスランブ 8cm からスランブフロー 70cm, および空気量 2%以下から 4.5%の範囲で設定した。コンクリート材料および試験室温度は  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  とした。高炉スラグ細骨材を使用する配合は天然細骨材に容積置換とし, 単位水量と単位粗骨材容積は一定とした。SG1 と S1 の混合粒度分布を図 3.1 に示す。混合粒度分布は F.M. が 2.56~2.87 の範囲で変化したが, いずれの混合比率においても JIS A 5308 の粒度分布の

表 3.4 コンクリートの配合

記号	設計基準強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	セメント	W/C (%)	s/a (%)	SG1 置換率 (%)	目標スランブまたはフロー(cm)	目標空気量 (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )						
								W	C	S1	S2	SG1	G1	G2
45N0	36	N	45	43.4	0	$8 \pm 1.0$	$4.5 \pm 1.0$	150	333	784	-	0	1061	-
45N25					25					588	-	207		
45N50					50					392	-	415		
45N75					75					196	-	622		
45B0		BB		43.0	0			150	333	771	-	0	1061	-
45B25					25					578	-	203		
45B50					50					387	-	405		
30N0					60					N	30	0		
30N25	25	601	-	213										
30N50	50	402	-	426										
30N100	100	0	-	849										
30B0	BB	48.0	0	160		533	787	-	0	884		-		
25M0	80	M	25	48.0	0	$65 \pm 5$ (フロー)	$3.0 \pm 1.0$	160	640	-	774	-	-	846
25M100					100					-	-	800		
15S0	120	S	15	32.9	0	$70 \pm 5$ (フロー)	2%以下	160	1067	-	412	-	-	846
15S100					100					-	-	426		

範囲に収まることを予め確認した。混和剤は水の一部として添加した。空気量調整は消泡剤と AE 調整剤を組み合わせで行った。

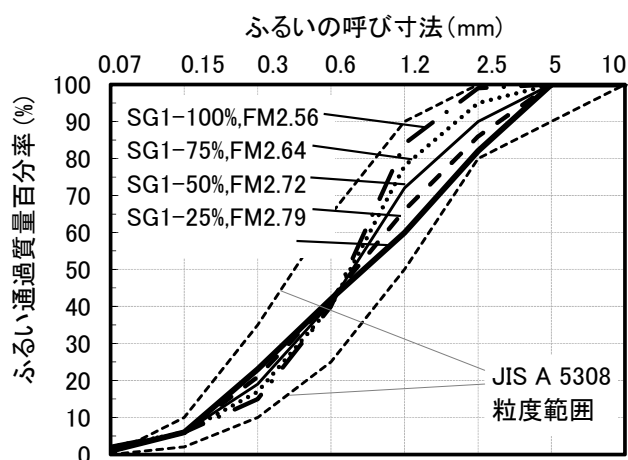


図 3.1 SG1 と S1 の混合粒度分布

### c) 試験方法

練混ぜは、W/C=45 および 30%は強制パン型ミキサ(容量 55L), W/C=25 および 15%は強制二軸ミキサ(容量 55L)を使用した。W/C=45%では全材料投入後 90 秒練り混ぜ後排出した。W/C=30%では全材料投入後 120 秒練り混ぜた後ミキサー内に 3 分静置後 60 秒練混ぜ排出した。W/C=25 および 15%では細骨材とセメントで 15 秒空練り後、水と混和剤を添加し 120 秒練り混ぜ、粗骨材を投入し 120 秒練り混ぜた後ミキサー内に 3 分静置後 30 秒練混ぜ排出した。試験項目と試験方法を表 3.5 に示す。

表 3.5 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101
スランプフロー	JIS A 1150
空気量	JIS A 1128
ブリーディング量	JIS A 1123
凝結時間	JIS A 1147
圧縮強度	JIS A 1108, 標準養生は材齢 7,28,91,182 日,1,2 年,簡易断熱養生は材齢 28,91 日,厚さ 200mm の発泡スチロール製(熱伝導率 0.04W/mK 程度)の断熱箱(750×1200×600mm)で材齢 7 日まで養生し,以降 20℃で封かん養生
ヤング係数	JIS A 1149
乾燥収縮	JIS A 1129-3 : 24 時間後脱型, 材齢 7 日まで水中養生後基長し,20℃,60%RH で乾燥期間 52 週まで測定
自己収縮	自己収縮は JCI 自己収縮委員会の試験方法に準拠し, ひずみの測定は埋込型ひずみゲージを使用し,凝結始発時のひずみ値を基長とし,材齢 182 日まで測定
凍結融解	JIS A 1148
促進中性化	JIS A 1153

### 3.3 実験結果および考察

#### (1) モルタル試験結果

モルタルのフロー値を図 3.2 に示す。高炉スラグ細骨材の種類によりモルタルの流動性は異なり、粗粒率の小さい SG3 および SG4 は高炉スラグ細骨材無添加に比べてフローの低下が 50~60mm 程度とやや大きい傾向であった。また、粗粒率の大きい SG2 は粒度調整のため特殊に粗く製造されたものであるため、モルタルが荒々しくやや分離気味となった。乾燥収縮試験結果を図 3.3 に示す。高炉スラグ細骨材を置換することにより乾燥収縮ひずみは約 16~21%低減した。高炉スラグ細骨材種類の違いによる乾燥収縮低減効果の違いはわずかであった。

以上の結果をまとめると、流動性の面では SG1 と SG2 はほぼ同等であったが、分離傾向が見られなかった SG1 を選定し、コンクリート試験には SG1 を使用することにした。

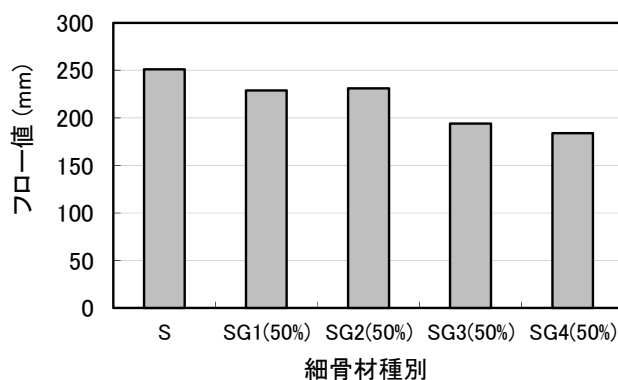


図 3.2 モルタルフロー値

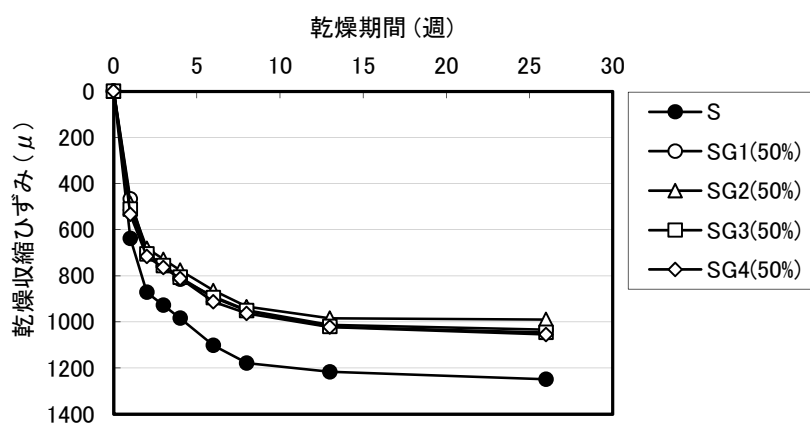


図 3.3 モルタルの乾燥収縮試験結果

## (2) コンクリート試験結果

### a) 混和剤添加量

フレッシュコンクリートの試験結果を表 3.6, 高炉スラグ細骨材置換率と混和剤添加量の関係を図 3.4 に示す. 混和剤の添加量は, W/C=45%および 30%では高炉スラグ細骨材置換率が 50%までは無添加と同等か若干少ない傾向であったが 50%を超えると増加した. 45N75 では  $C \times 0.85\%$ 以上添加してもスランプが増加せずやや分離傾向が認められたため, 目標スランプは得られなかったが供試体を採取した. 30N100 では約 1.2 倍の添加量を必要とし, 目標スランプを得ることができたが, やや荒々しいコンクリートとなった. W/C=25% および 15%では, 高炉スラグ細骨材を 100%使用しても無添加と同等の添加量であった.

表 3.6 フレッシュコンクリートの試験結果

記号	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	セメント	W/C (%)	SG1 (%)	混和剤種別	混和剤添加量 (C×%)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(°C)	凝結時間(h)		ブリーディング量 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )
											始発	終結	
45N0	36	N	45	HP1	0.75	8.0	-	4.2	21	4.5	6.6	0.039	
45N25					0.75	8.5	-	4.5	21	4.6	6.8	0.029	
45N50					0.75	7.5	-	4.4	21	4.8	6.9	0.022	
45N75					0.85	2.5	-	4.7	22	6.7	9.1	0.147	
45B0		BB			0.60	8.0	-	4.6	20	5.0	7.8	0.029	
45B25					0.60	8.0	-	5.0	20	5.2	7.7	0.022	
45B50					0.60	8.0	-	4.8	20	4.8	7.5	0.029	
					0.60	8.0	-	4.8	20	4.8	7.5	0.029	
30N0	60	N	30	HP1	1.10	23.0	-	3.1	23	3.9	6.0	0	
30N25					1.05	22.0	-	2.8	23	3.7	5.8	0	
30N50					1.00	23.0	-	3.2	23	3.6	5.7	0	
30N100					1.30	22.0	-	3.1	23	4.8	7.3	0	
30B0		0.85			22.5	-	3.0	22	4.8	6.5	0		
25M0	80	M	25	HP2	1.25	-	63.0	3.0	23	6.0	8.4	-	
25M100					1.25	-	63.5	3.9	23	6.3	8.9	-	
15S0	120	S	15	SSP	1.20	-	70.0	1.9	24	6.5	9.0	-	
15S100					1.20	-	67.0	2.0	24	6.2	8.5	-	

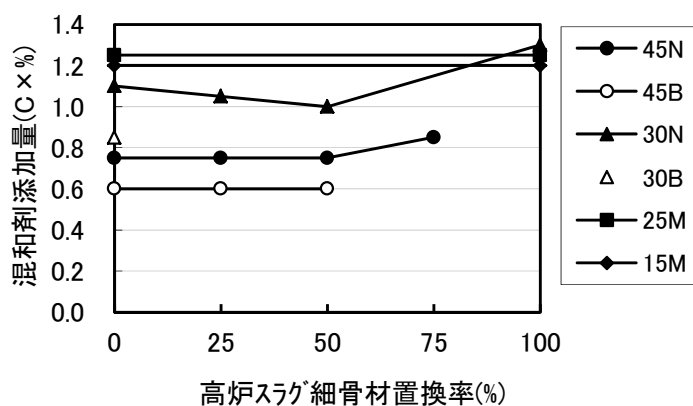


図 3.4 高炉スラグ細骨材置換率と混和剤添加量の関係

これは高強度領域では単位セメント量が増加することにより単位細骨材量が減少し、細骨材の違いによる影響が小さくなったためと考えられる。

### b) ブリーディング

高炉スラグ細骨材置換率とブリーディング量の関係を図 3.5 に示す。W/C=45%では置換率 50%までは無添加と同等か若干減少する傾向であったが、置換率 75%では約 3 倍に増加した。これは高炉スラグ細骨材の表面がガラス質であるため<sup>5)</sup>、多量に置換すると細骨材全体としての保水能力に影響を及ぼすためと考えられる。W/C=30%ではいずれの配合でもブリーディングは認められなかった。

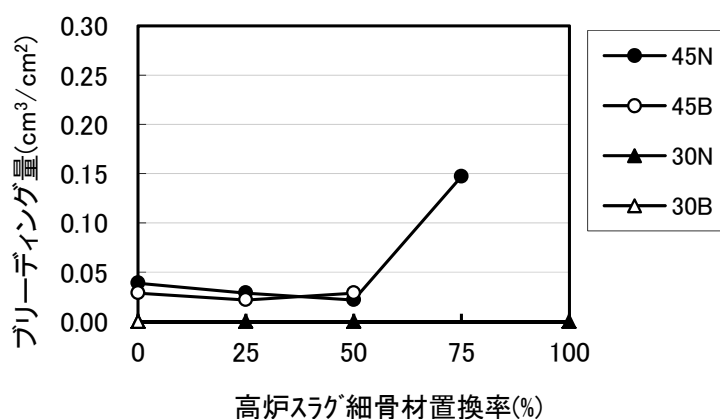


図 3.5 高炉スラグ細骨材置換率とブリーディング量の関係

### c) 凝結時間

高炉スラグ細骨材置換率と凝結始発の関係を図 3.6 に示す。W/C=45%では高炉スラグ細骨材置換率 50%までは無添加に対してほぼ同等か約 20 分程度遅延するケース(45N50, 45B25)が見られたが、これは固結防止剤の添加によるものであり程度はわずかであった<sup>6)</sup>。しかし、置換率が 75%になると高性能 AE 減水剤の添加量が増加したため約 120 分程度遅

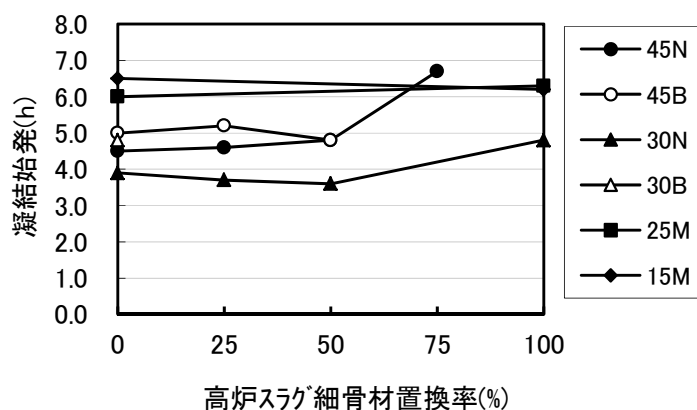


図 3.6 高炉スラグ細骨材置換率と凝結時間(始発)の関係



延した。W/C=30%では置換率 50%まで凝結遅延は認められなかったが、100%では高性能 AE 減水剤の添加量が増加したため約 80 分程度遅延した。W/C=25%および 15%では、高炉スラグ細骨材を 100%使用しても無添加に対して約 30 分程度の差であり、大きな遅延は認められなかった。

#### d) 圧縮強度およびヤング係数

圧縮強度試験結果を図 3.7, 図 3.8 および図 3.9 に示す。いずれの配合も材齢 28 日で想定した強度を十分に満足する強度が得られた。W/C=45%ではいずれのセメントにおいても高炉スラグ細骨材置換率 50%以下では初期強度は無添加と同等かやや低い値であったが、長期強度は天然細骨材よりも高い値が得られた。これは高炉スラグ細骨材の潜在水硬性<sup>7)</sup>により長期に渡り強度増進するためである。置換率 50%での無添加に対する増加率は材齢 2 年で普通ポルトランドセメント(以下, 普通セメント)で約 14%, 高炉セメント B 種(以下, 高炉 B 種)で約 9%であった。しかし、置換率が 50%を超えると凝結遅延の影響で初期強度の低下が大きくなった。W/C=30%の標準養生については、高炉スラグ細骨材置換率の増加

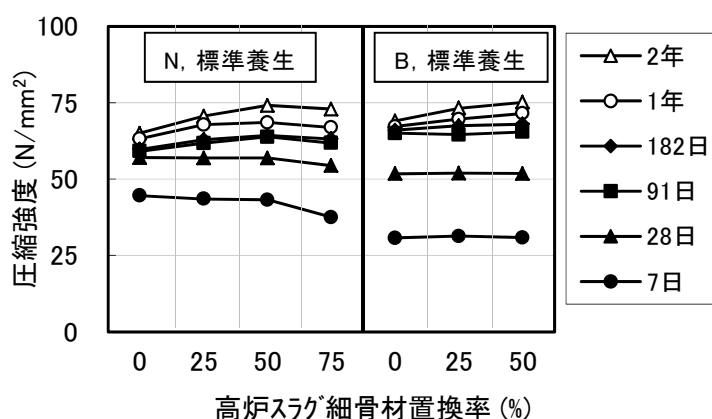


図 3.7 高炉スラグ細骨材置換率と圧縮強度の関係(W/C=45%)

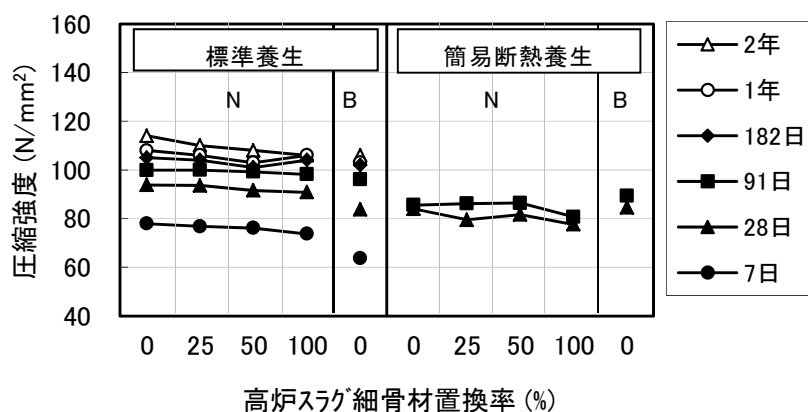


図 3.8 高炉スラグ細骨材置換率と圧縮強度の関係(W/C=30%)

にともない初期強度は同等かわずかに低下したが材齢 182 日では約  $105\text{N/mm}^2$  程度で同等となった。しかし、それ以降の強度増進は認められず、これは高炉スラグ細骨材自体の強度が影響しているものと考えられる。簡易断熱養生では材齢 28,91 日ともに高炉スラグ細骨材置換率の増加にともない若干低下した。W/C=25%では高炉スラグ細骨材は天然骨材に比較して約 14~19%低い傾向であるが、材齢 182 日で  $120\text{N/mm}^2$  程度の強度が得られた。W/C=15%においても約 2~9%低い傾向であったが、標準養生で  $180\text{N/mm}^2$ 、簡易断熱養生で  $170\text{N/mm}^2$  程度の強度が得られており、設計基準強度  $120\text{N/mm}^2$  クラスの高強度コンクリートに十分適用可能と考えられる。

材齢 28 日から 182 日のヤング係数試験結果を図 3.10 に示す。いずれも New RC 式<sup>8)</sup>に近い値であり既往の研究<sup>2)</sup>に見られるとおり圧縮強度との相関が高いが、高炉スラグ細骨材を置換したコンクリートのヤング係数は無添加のコンクリートに比べて大きい傾向にある。

簡易断熱養生の温度履歴を図 3.11 に示す。高炉スラグ細骨材の置換によりピーク到達時間が若干遅くなったが、これは凝結遅延の影響である。置換率の違いによる最高温度の差はわずかであり、高炉スラグ細骨材の使用が発熱温度に与える影響は小さいことがわかる。

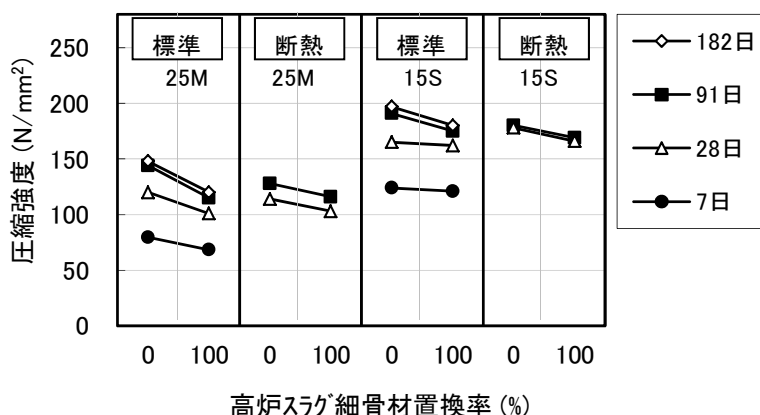


図 3.9 スラグ置換率と圧縮強度の関係(W/C=25%,15%)

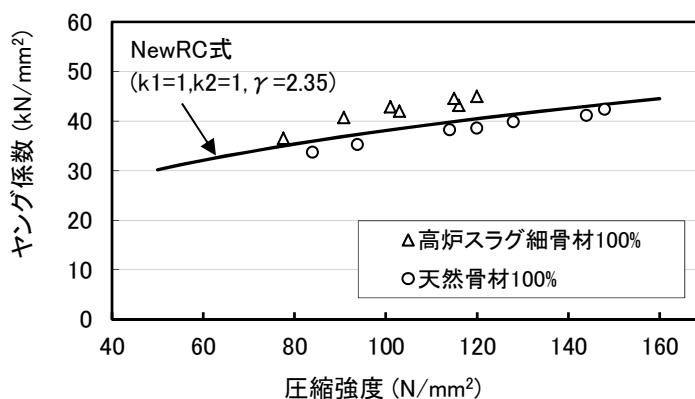


図 3.10 圧縮強度とヤング係数の関係

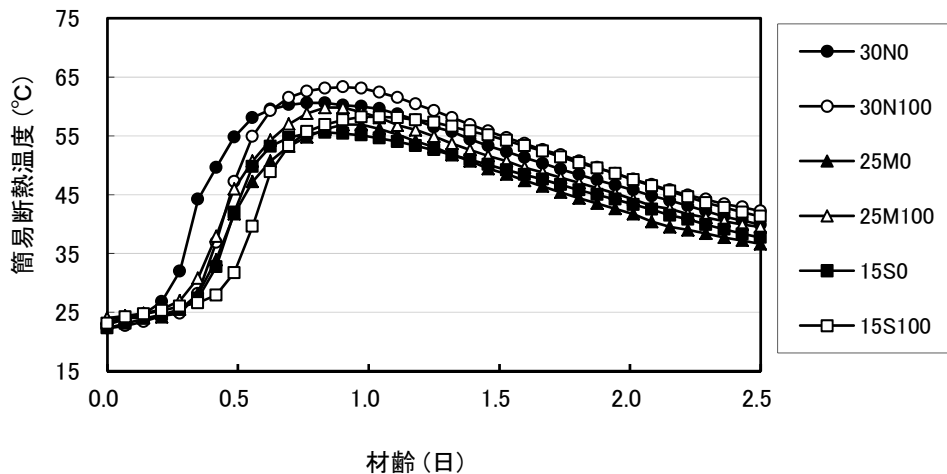


図 3.11 簡易断熱養生の温度履歴

#### e) 乾燥収縮

乾燥収縮試験結果を図 3.12, 図 3.13, 図 3.14, 高炉スラグ細骨材置換率と乾燥収縮低減率の関係を図 3.15, 高炉スラグ細骨材置換率と質量減少率の関係を図 3.16 および収縮試験結果のまとめを表 3.7 に示す. 高炉スラグ細骨材置換率の増加にともない乾燥収縮ひずみと質量減少率(基長時の質量に対する質量減少量の割合)は低減し,  $W/C=45\%$ ではいずれのセメントについても置換率 50%で, 高炉スラグ細骨材無添加の乾燥収縮ひずみに対してひずみが約  $140 \times 10^{-6}$  程度低減し, 収縮低減率で表すと約 20%程度の低減効果が得られた.  $W/C=30\%$ では, 乾燥収縮ひずみが約  $90 \times 10^{-6}$  程度, 収縮低減率で約 14%低減した. また, コンクリートのワーカビリティは低下したが 50%以上置換することで 45N75 では 27.1%, 30N100 では 32.3%の低減効果が得られた. 高炉スラグ細骨材無添加の 45N0, 45B0, 30N0, 30B0 の 52 週における乾燥収縮ひずみはそれぞれ, 715, 724, 655 および  $652 \times 10^{-6}$  であり, セメントの違いによる乾燥収縮ひずみの差はわずかであった. また, 45B0 と 30B0 は高炉 B 種中に高炉スラグ微粉末が含まれているが, 乾燥収縮ひずみはそれぞれ 45N0 および 30N0 とほぼ同等であり, 同じ高炉水砕スラグ起源であっても高炉スラグ微粉末には乾燥収縮低減効果は認められない.  $W/C=25\%$ および 15%の乾燥収縮ひずみは約  $550 \times 10^{-6}$  程度であり  $W/C=45\%$ および 30%に比較して小さいが,  $W/C=25\%$ では, 高炉スラグ細骨材置換率 100%で乾燥収縮ひずみが約  $170 \times 10^{-6}$  程度, 収縮低減率で約 31%低減した.  $W/C=15\%$ では, 高炉スラグ細骨材置換率 100%でも細骨材単位量が  $400\text{kg/m}^3$  程度と少ないこともあり収縮低減率は約 7%程度に留まった.

高炉スラグ細骨材を置換したコンクリートの収縮が無添加に比べて小さくなる理由については, (1)高炉スラグ細骨材表面に潜在水硬性<sup>7),9)</sup>による緻密な水和層が形成され, 乾燥収縮を増加させるポーラスな遷移帯の形成が少なくなり収縮が低減した, (2)高炉スラグ細骨材はガラス質であり, ヤング係数が大きく吸水率が小さいためそれ自体の乾燥収縮が小さくコンクリートの収縮低減に寄与したことなどが考えられる. (1)については高炉スラグ

細骨材を置換したコンクリートの質量減少率が小さいこと、(2)については高炉スラグ細骨材を置換したコンクリートのヤング係数が無添加のコンクリートに比べて大きいことにも関係していると考えられる。

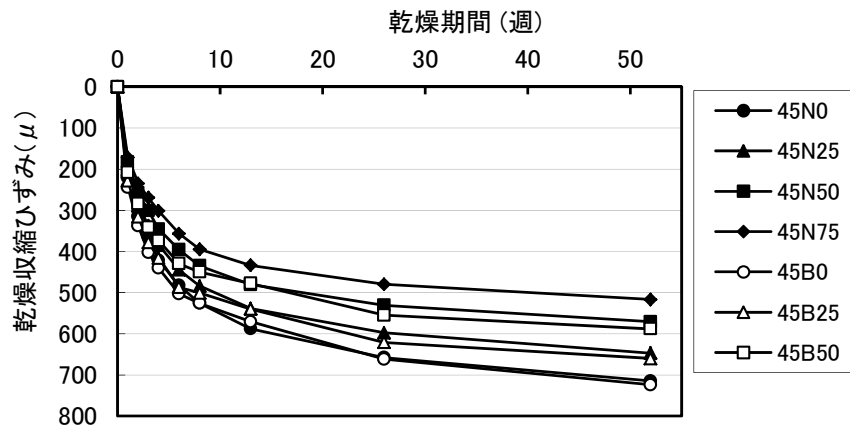


図 3.12 乾燥収縮試験結果(W/C=45%)

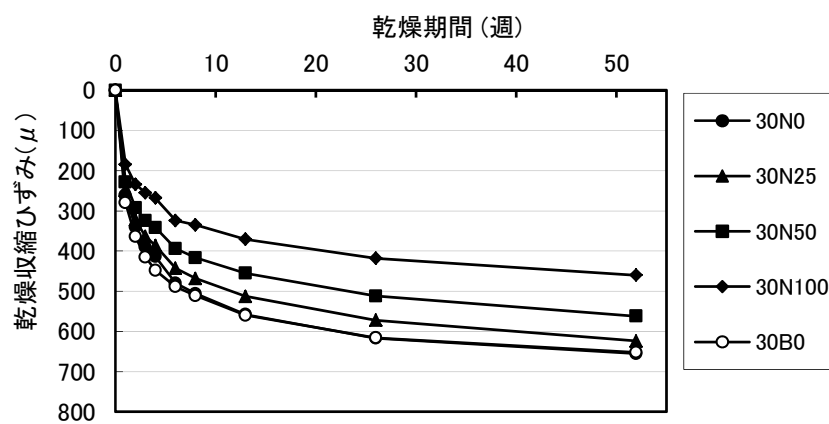


図 3.13 乾燥収縮試験結果(W/C=30%)

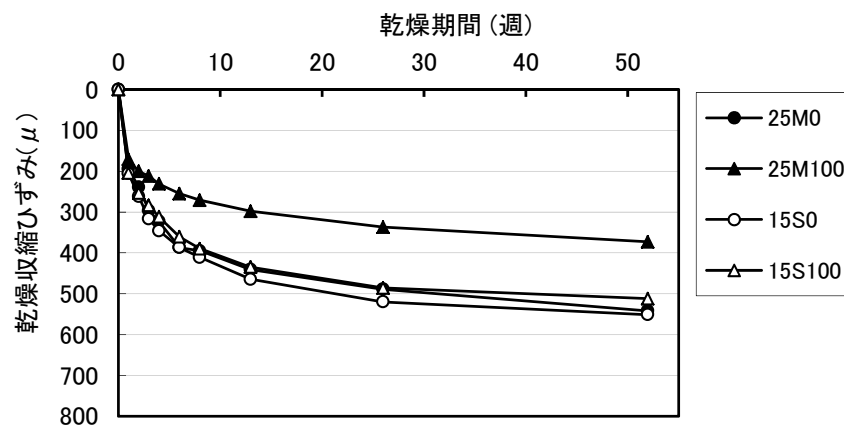


図 3.14 乾燥収縮試験結果(W/C=25%,15%)

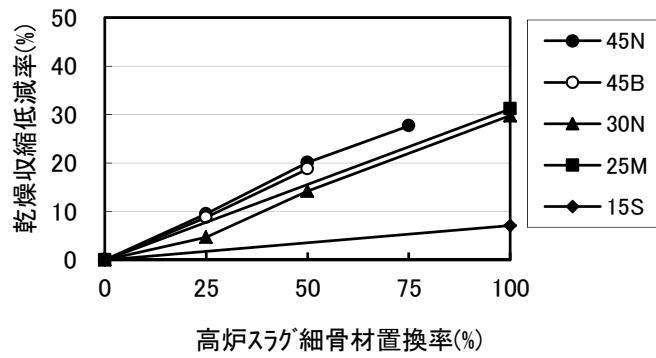


図 3.15 高炉スラグ細骨材置換率と乾燥収縮低減率の関係

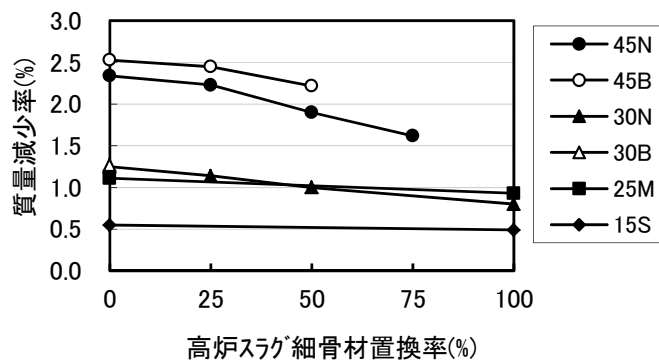


図 3.16 高炉スラグ細骨材置換率と質量減少率の関係

表 3.7 収縮試験結果まとめ

記号	乾燥収縮 (乾燥期間 52 週)			自己収縮 (材齢 182 日)	
	乾燥収縮 ひずみ ( $\mu$ )	収縮 低減率 (%)	質量 減少率 (%)	自己収縮 ひずみ ( $\mu$ )	収縮 低減率 (%)
45N0	715	-	2.34	-	-
45N25	647	9.5	2.23	-	-
45N50	571	20.1	1.90	-	-
45N75	517	27.7	1.62	-	-
45B0	724	-	2.53	-	-
45B25	660	8.8	2.45	-	-
45B50	588	18.8	2.22	-	-
30N0	655	-	1.25	471	-
30N25	624	4.7	1.14	428	9.1
30N50	562	14.2	1.00	413	12.3
30N100	460	29.8	0.80	-	-
30B0	652	-	1.27	-	-
25M0	542	-	1.11	249	-
25M100	373	31.2	0.93	221	11.2
15S0	551	-	0.55	691	-
15S100	512	7.1	0.49	574	16.9

f) 自己収縮

自己収縮試験結果を図 3.17 および図 3.18 に示す。自己収縮ひずみの値は、W/C=15% > 30% > 25% の順であり、W/C だけでなくセメント種類の影響を受け、中庸熟ポルトランドセメントは比較的小さい傾向であった。高炉スラグ細骨材の置換により自己収縮は低減する傾向にあり、材齢 182 日において、W/C=30% では置換率 50% で約 12%、W/C=25% では置換

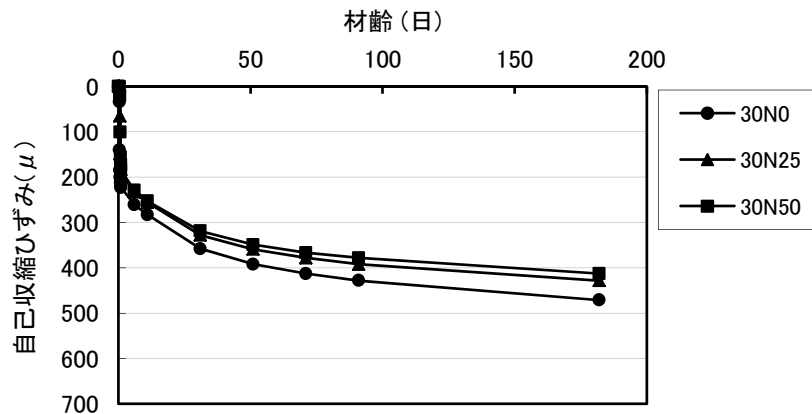


図 3.17 自己収縮試験結果(W/C=30%)

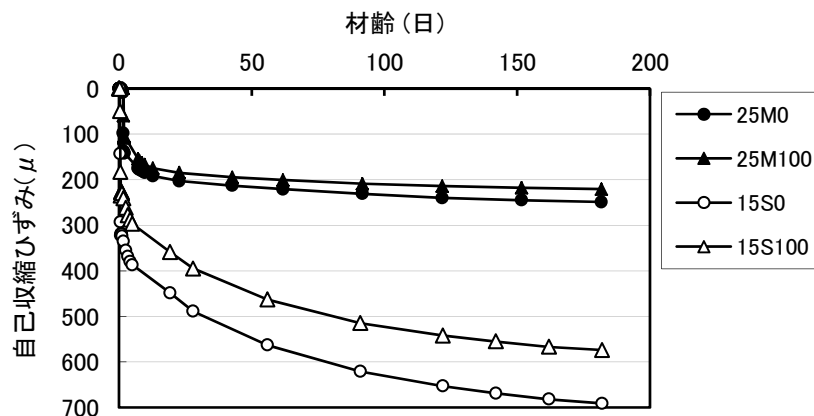


図 3.18 自己収縮試験結果(W/C=25%,15%)

率 100% で約 11%、W/C=15% では置換率 100% で約 17% の低減効果が得られた。W/C=15% では高炉スラグ細骨材 100% 使用で乾燥収縮ひずみは 7% 程度しか低減しなかったが、自己収縮ひずみは約  $110 \times 10^{-6}$ 、約 17% 低減しており、高炉スラグ細骨材は、 $100\text{N/mm}^2$  を超える高強度コンクリートの自己収縮低減対策の 1 つとしても有効であると考えられる。

自己収縮は外部との水分の出入りのない条件下でのセメントの水和に伴うゲル空隙などに生ずる一種の乾燥に起因しており、乾燥収縮と同様の機構で説明が可能とされている<sup>10)</sup>。したがって、高炉スラグ細骨材を置換したコンクリートの自己収縮が無添加に比べて小さくなる理由については、乾燥収縮低減と同様のメカニズムによるものと考えられる。

g) 凍結融解抵抗性

凍結融解試験結果を図 3.19 および図 3.20 に示す。いずれの配合においても、耐久性指数が 90 以上であり十分な凍結融解抵抗性を示したが、W/C=45%では高炉スラグ細骨材置換率の増加にともない耐久性指数がわずかに低下した。これは空気量が同一の場合でも高炉スラグ細骨材を使用すると比較的大きな気泡が多く含まれ、凍結融解抵抗性を向上させるのに有効な 100  $\mu\text{m}$  以下の気泡の数が減少したため<sup>11)</sup>と考えられる。

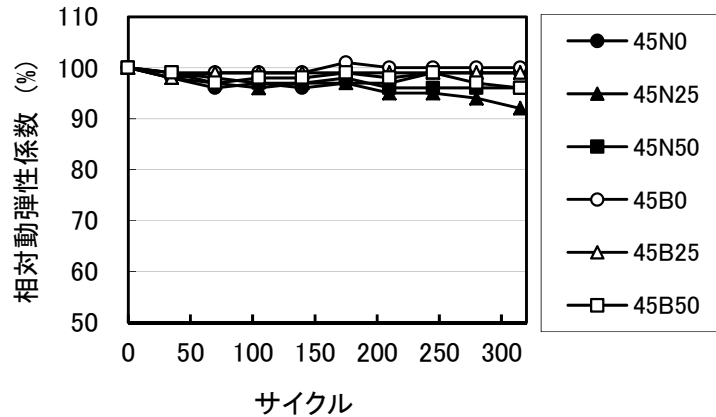


図 3.19 凍結融解試験結果(W/C=45%)

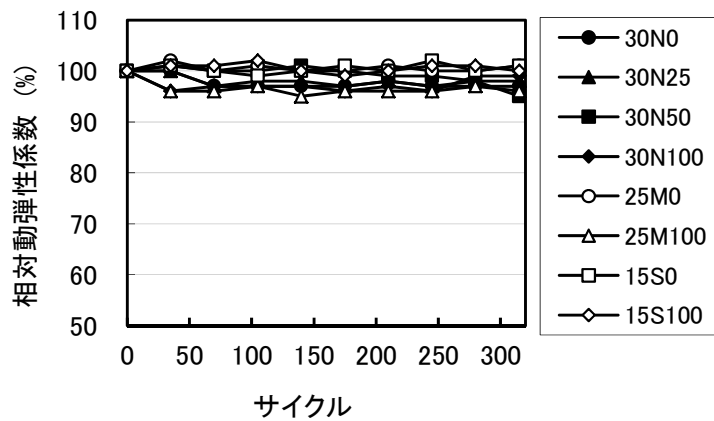


図 3.20 凍結融解試験結果(W/C=30%,25%,15%)

h) 中性化抵抗性

W/C=45%について実施した促進中性化試験結果を図 3.21 および図 3.22 に示す。いずれの配合においても、促進期間 26 週における中性化深さが 15mm 以下であり十分な中性化抵抗性を示した。また、高炉スラグ細骨材置換率の増加にともない中性化深さが小さくなる傾向があり、既往の研究結果<sup>3)</sup>と一致した。これは高炉スラグ細骨材の潜在水硬性により組織が緻密化し、炭酸ガスの侵入を抑制するため<sup>12),13)</sup>と考えられる。

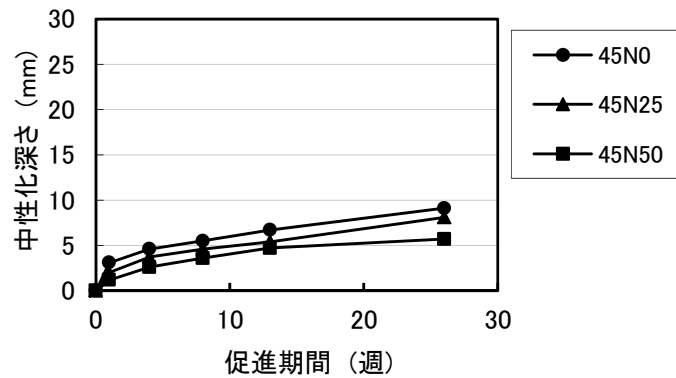


図 3.21 促進中性化試験結果(普通セメント)

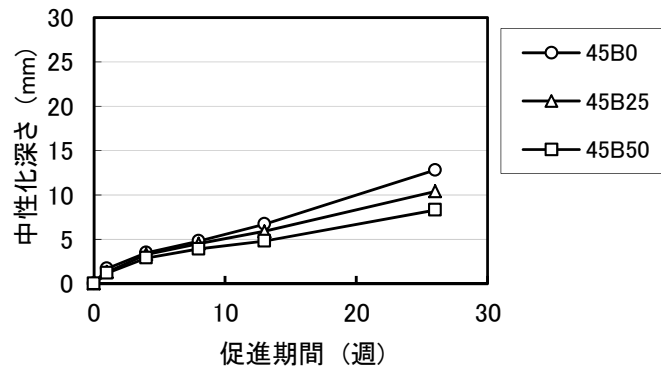


図 3.22 促進中性化試験結果(高炉 B 種)

### 3.4 まとめ

W/C=15%~45%の高炉スラグ細骨材を用いた一般強度から高強度領域のコンクリートについて、高性能 AE 減水剤を用いることによるブリーディング低減効果と、高炉スラグ細骨材の乾燥収縮や中性化を低減する効果および高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性について検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 高性能 AE 減水剤を用いることにより、W/C=45%では、高炉スラグ細骨材の置換率 50%まで、ブリーディング量を天然細骨材 100%のコンクリートと同等とすることができる。W/C=30%以下では高炉スラグ細骨材を 100%使用してもブリーディングは発生しない。
- (2) W/C=45%では、高炉スラグ細骨材を天然細骨材に 25~50%容積置換することにより乾燥収縮ひずみを約 9~20%低減できる。W/C=30%以下では、100%置換することで、乾燥収縮ひずみを最大で約 31%、自己収縮ひずみを最大で約 17%低減できる。
- (3) 高炉スラグ細骨材を用いることにより中性化速度は若干小さくなる。
- (4) W/C=45%では置換率 50%まで、W/C=30%以下では置換率 100%においても高炉スラグ細骨材を置換したコンクリートは十分な凍結融解抵抗性を有する。



## 参考文献

- 1) 齊藤和秀, 木之下光男, 伊原俊樹, 吉澤千秋: 高炉スラグ細骨材を使用した耐久性向上コンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.139-144, 2009
- 2) 岸谷孝一, 友沢史紀, 沼田晋一: コンクリート用水砕スラグ細骨材の使用規準作成に関する研究, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.1, pp.213-216, 1979
- 3) 依田彰彦: 高炉スラグを細骨材としたコンクリートの性質について, セメント技術年報, No.34, pp.133-136, 1980
- 4) 植田紳治: 高炉水砕砂を使用したコンクリートの諸性状に関する実験研究, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.1, pp.197-200, 1979
- 5) 山崎舞, 千歩修, 長谷川拓哉: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐凍害性におよぼすブリーディングの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.898-903, 2012
- 6) 光藤浩之, 吉澤千秋, 高橋智雄, 木之下光男: 高炉スラグ細骨材の固結防止技術, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.87-92, 2004
- 7) 長滝重義, 米山紘一, 高田誠: 高炉スラグ水砕砂を用いたコンクリートの諸性状について, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.1, pp.193-196, 1979
- 8) 建設省総合技術開発プロジェクト 鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発, 平成4年度 高強度コンクリート分科会報告書, 1993.3
- 9) 長滝重義, 高田誠, 河野広隆: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの体積変化, セメント技術年報, No.31, pp.148-151, 1977
- 10) 児島孝之編: コンクリート混和材料ハンドブック, エヌ・ティー・エス, pp.80-84, 145-146, 2004
- 11) 小林正几, 田中弘: 高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートの気泡組織について, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.2, pp.41-44, 1980
- 12) 鶴飼貴史, 佐藤寛之, 吉田亮, 齊藤和秀, 梅原秀哲: 寸法の異なるスラグ細骨材を用いたコンクリートの物質移動抵抗性に関する一考察, 土木学会第66回年次学術講演会, V-270, pp.539-540, 2011
- 13) 鶴飼貴史, 齊藤和秀, 吉田亮, 吉澤千秋, 梅原秀哲: 高炉スラグ細骨材と高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの物質移動抵抗性に関する一考察, 土木学会中部支部研究発表会, V-021, pp.423-4424, 2012.3

## 第4章 高炉スラグ細骨材と収縮低減剤を用いたコンクリートの特性

### 4.1 概要

コンクリート構造物のひび割れ抑制対策として、コンクリートの乾燥収縮を低減することが有効であることが知られている。コンクリートの収縮を低減するための材料としては収縮低減剤や石灰石等が一般に知られているが、第3章により、高炉スラグ細骨材にもコンクリートの乾燥収縮ひずみを低減する効果があり、W/C=45%において、天然細骨材に25～50%容積置換することにより乾燥収縮を約6～19%低減できることが明らかとなった。

第4章では、高炉スラグ細骨材が持つコンクリートの乾燥収縮ひずみの低減効果に着目し、4.2でそのメカニズムについて検討した。また、4.3では、高炉スラグ細骨材と収縮低減剤を組み合わせ、それぞれを単独で使用するよりも大きな収縮低減効果を得ることを検討した。

### 4.2 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの収縮低減メカニズム<sup>1)</sup>

コンクリートの乾燥収縮は主にセメントペースト中の水分が乾燥することにより生じる。骨材はセメントペーストの収縮を拘束し、コンクリートの収縮を低減するが、その効果は骨材の種類によって異なる。第3章により、高炉スラグ細骨材はコンクリートの乾燥収縮を低減する効果を持つことが明らかとなったが、そのメカニズムについては、高炉スラグ細骨材自体の乾燥収縮が小さいことや潜在水硬性による骨材表面組織の緻密化等が考えられるが、十分には解明されていない。そこで本節では、モルタル試験により、高炉スラグ細骨材の収縮低減効果を再確認すると共に、モルタル中の骨材界面を分析することにより、高炉スラグ細骨材の収縮低減のメカニズムについて検討した。

#### 4.2.1 実験概要

##### (1) 使用材料

使用材料を表4.1に示す。本研究では、比較的粗粒の高炉スラグ細骨材(SG)を使用した。

##### (2) 試験方法

モルタルの配合は、水セメント比40%、S/C=1.5(容積比)とした。なお、空気量の影響をなくすため消泡剤を使用してNON-AEとした。モルタルの練混ぜはJIS R 5201に準拠して行った。乾燥収縮の供試体は4×4×16cmのサイズ、測定はJIS A 1129-3に準拠し、供試体成形24時間後に脱型し、材齢7日まで標準水中養生後の長さを基長として温度20℃、湿度60%RHの室内で乾燥期間8週まで測定した。分析用の試料は、SGそのものおよびSG

表 4.1 使用材料

種類	記号	産地・性質
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	SG	千葉産高炉スラグ細骨材(JIS A 5011-1 コンクリート用スラグ骨材 第1部:高炉スラグ骨材, 区分 BFS5, 表乾密度 2.79g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.10%, FM3.45)
	S1	大井川産陸砂(表乾密度 2.59g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 2.10%, FM2.84)
	S2	秩父産石灰砕砂(表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.12%, FM2.81)

を用いた水セメント比 35%, S/C=1.8(容積比)のモルタル供試体(φ5×10cm)を材齢 91 日まで標準水中養生後に破砕し, 細骨材粒子を取り出したものとした。

#### 4.2.2 実験結果および考察

##### (1) モルタル試験結果

モルタルの乾燥収縮試験結果を図 4.1 に示す. SG は天然の陸砂 S1 に対して約  $350 \times 10^{-6}$ , 一般に収縮が小さいとされている石灰砕砂 S2 に対しても約  $200 \times 10^{-6}$  の収縮低減効果を示した。

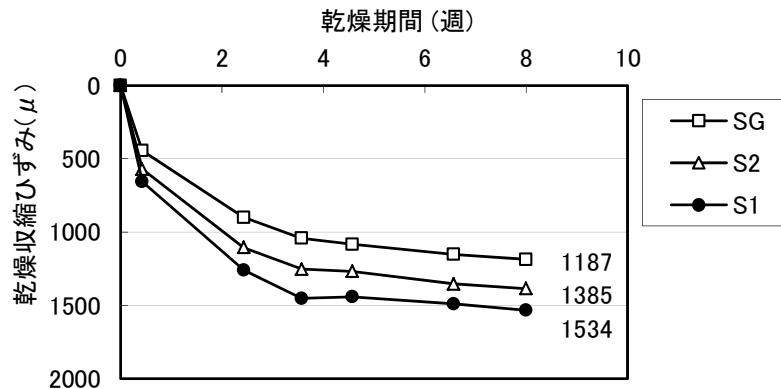


図 4.1 乾燥収縮試験結果

##### (2) 分析結果

骨材粒子表面から 1 ナノメートルの深さの元素を XPS(X 線光電子分光分析)により分析した結果を図 4.2 に示す. 処理前(SG 粒子)では Ca,Si,Al,Na,C,O が, 処理後(モルタルから採取した SG 粒子)では処理前の元素に加え, S(硫黄)が同定されたがその量は微量である. このことから, 処理前の粒子には S は存在せず, 処理後の粒子にはセメント由来の S が存在すると推察される。

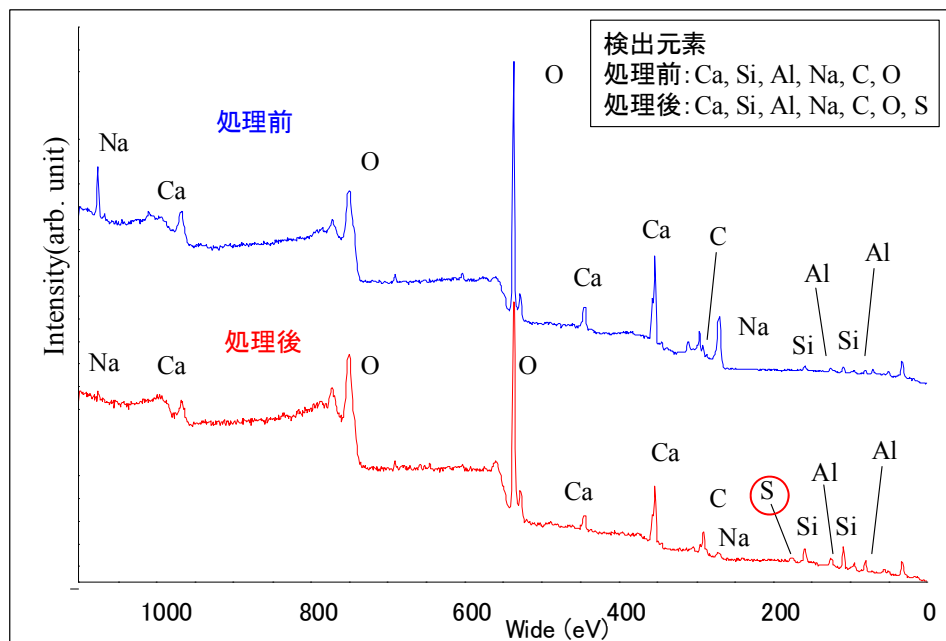


図 4.2 XPS による表面分析結果

骨材表面を SEM により観察し、さらに EPMA(深さ方向 1 マイクロメートル)のカラーマップにより、Ca,Si,Al,S を調べた結果を図 4.3 および図 4.4 に示す。Ca,Si,Al が黄色く表示され、含有することが認められるが、S は骨材表面には少なくとも  $\text{CaSO}_4$  としてサブミクロン以上の厚みで濃化は認められず、試料内部に偏析して存在することが認められた。このことから、高炉スラグ細骨材の表面には Ca,Si,Al が多く存在することがわかる。

モルタルから採取した SG 粒子の粉末 X 線回折による同定結果を図 4.5 に示す。解析により  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、ゲーレンイト水和物( $\text{C}_2\text{ASH}_8$ )、ゲーレンイト( $\text{C}_2\text{AS}$ )、 $\text{CaCO}_3$ 、エトリングガイドおよびモノサルフェートの存在が確認された。このうち  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、エトリングガイド、モノサルフェートは、セメントの水和により生成したものである。

したがって、XPS で検出された S はエトリングガイドかモノサルフェート由来であると推

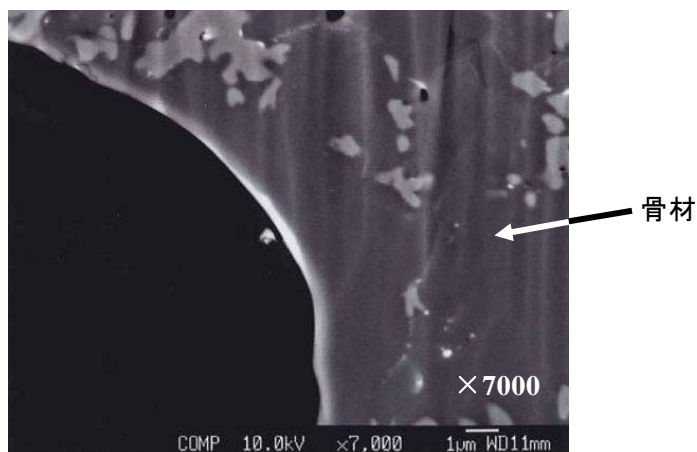


図 4.3 SEM による骨材表面の状態

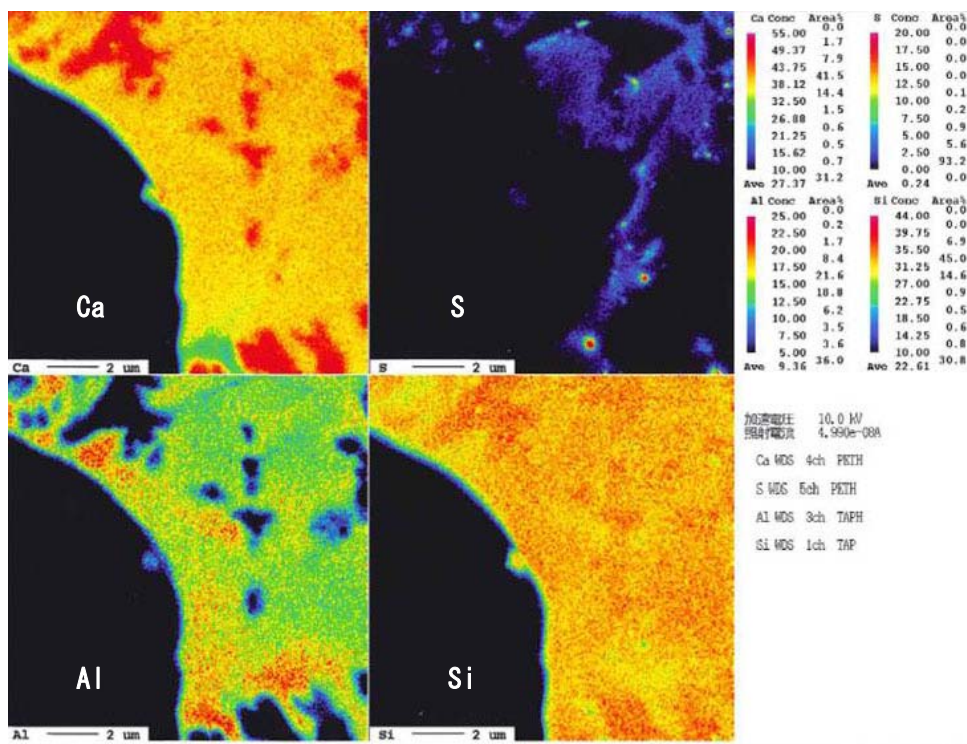


図 4.4 EPMA カラーマッピング画像

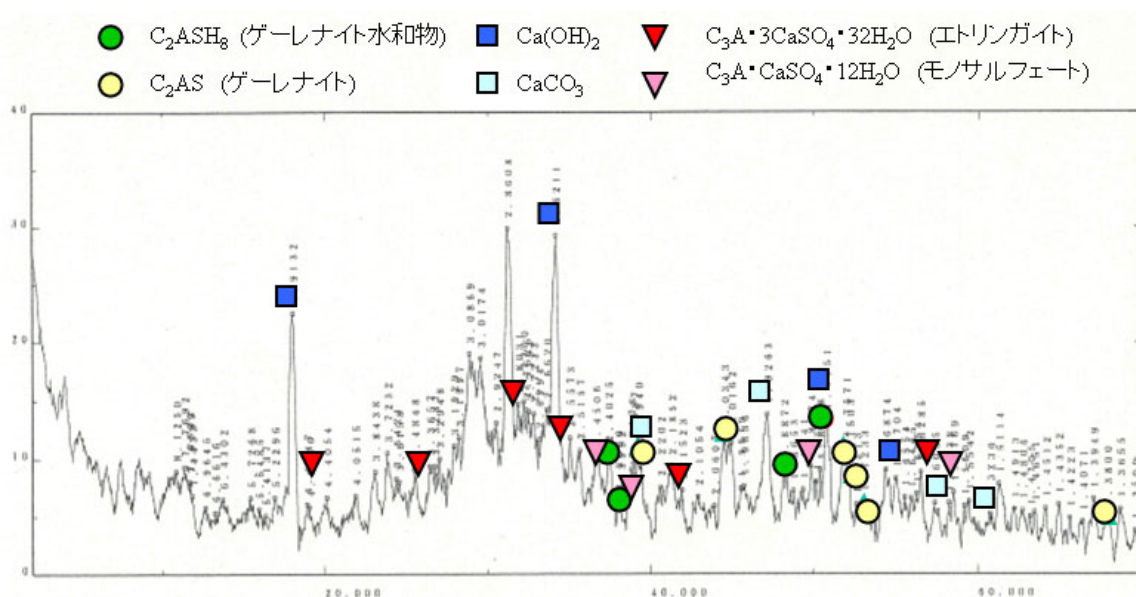


図 4.5 モルタル中の SG 粒子の粉末 X 線回折による分析結果

察されるが、高炉スラグ細骨材表面にわずかな量しか存在しないと考えられる。一方、 $C_2AS$  は高炉スラグ細骨材中にガラス質および結晶質として存在するもので、 $CaO$ 、 $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$  からなる。結晶質の  $C_2AS$  は水和せずこのまま存在するものと考えられる。 $C_2ASH_8$  はガラス質の  $C_2AS$  がセメントのアルカリ刺激によりガラス構造が壊れ水和し、生成したものである<sup>2)</sup>。 $C_2AS$  の水和は以下の式で表される。



以上の分析結果をまとめると、高炉スラグ細骨材の収縮低減メカニズムは、高炉スラグ細骨材表面に存在するガラス質の  $\text{C}_2\text{AS}$  が水和して  $\text{C}_2\text{ASH}_8$  の水和層を形成することによるものと考えられる。すなわち、 $\text{C}_2\text{ASH}_8$  は  $\text{C}_2\text{AS}$  よりも体積が大きい(推定約 1.5 倍)ため、骨材表面に緻密な水和層を形成し、乾燥収縮ひずみを増加させるポーラスな遷移帯の形成が少ないためである。このことは高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの質量減少率が小さいことの理由の 1 つと考えられる。また、 $\text{C}_2\text{ASH}_8$  への水和は長期に渡り持続するため、乾燥収縮ひずみの低減効果も長期に渡り持続するものと考えられる。

#### 4.2.3 まとめ

高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの収縮低減効果を石灰砕砂と比較するとともに、モルタル中の骨材界面を分析し、高炉スラグ細骨材の収縮低減のメカニズムについて検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 高炉スラグ細骨材の乾燥収縮低減効果は石灰砕砂よりも大きい。
- (2) 高炉スラグ細骨材の収縮低減メカニズムの 1 つは、高炉スラグ細骨材表面にゲーレンナイト水和物が長期に渡って生成し緻密な水和層を形成することにより、乾燥収縮ひずみを増加させるポーラスな遷移帯の形成が少ないことと推察した。

### 4.3 収縮低減剤を用いたコンクリートの特性<sup>3),4)</sup>

4.2 では、高炉スラグ細骨材の収縮低減効果のメカニズムについて検討し、そのメカニズムの1つは、高炉スラグ細骨材表面にゲーレンナイト水和物による緻密な水和層が形成し、乾燥収縮ひずみを増加させるポーラスな遷移帯の形成が少なくなることと推察した。

一方、コンクリートの収縮を低減する一般的な材料としては、収縮低減剤が知られている。コンクリートの乾燥収縮のメカニズムの1つである毛細管張力説<sup>5)</sup>では、毛細管中の水分が乾燥して毛細管内部に収縮応力が発生し、コンクリートが収縮すると考えられているが、収縮低減剤は、その界面活性作用により毛細管内部の水の表面張力を低下させ毛細管に作用する内部応力を低減することでコンクリートの乾燥収縮を低減するものである<sup>6)</sup>。したがって、高炉スラグ細骨材と収縮低減剤は、その収縮低減のメカニズムが異なるため、組み合わせて使用しても同時に2つの収縮低減効果が得られることが予想される。

そこで、本節では高炉スラグ細骨材と収縮低減剤の2つの収縮低減性材料を併用し、凍結融解抵抗性も考慮して、それぞれ単独で用いるよりも大きな収縮低減効果を得ることを検討した。

なお、収縮低減剤は添加量を変化させて収縮低減量を調節できるため、 $10 \text{ kg/m}^3$ 以上添加することで単独でも大きな乾燥収縮低減効果を得ることも可能である。しかし、多量に使用すると、強度低下や凍結融解抵抗性が低下する場合があるため、本節では、凍結融解抵抗性にも考慮して検討を行った。

#### 4.3.1 実験概要

##### (1) 使用材料

収縮低減剤は、ポリエーテル誘導体を主成分とし、日本建築学会 JASS 5 M-402:2009 コンクリート用収縮低減剤の性能判定基準 附属書 1 コンクリート用収縮低減剤の品質基準3)に適合するもの(以下、SRA)を使用した。

高炉スラグ細骨材は JIS A 5011-1 コンクリート用スラグ骨材 第1部:高炉スラグ骨材に適合するもの(以下、SG)を使用した。各使用材料の産地、成分および物性を表 4.2 に示す。

##### (2) 実験の因子と水準

実験の因子と水準を表 4.3 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(以下、普通セメント)と高炉セメント B 種(以下、高炉 B 種)の2種類とした。SRA の添加量は 0,3 および  $6 \text{ kg/m}^3$  とした。SG は天然骨材に容積置換して使用することとした。第2章により、置換率が 50%を超えると高性能 AE 減水剤(以下、HP)の添加量が増加し、ブリーディング量の増加や凝結時間の遅延等の影響が見られたため本研究では置換率を 0,25,50%とした。ただし、SRA  $6 \text{ kg/m}^3$  については、0,50%とした。

表 4.2 使用材料

種類	記号	産地・性質・成分
セメント	N	普通ポルトランドセメント (密度 3.16 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3300 cm <sup>2</sup> /g)
	BB	高炉セメント B 種 (密度 3.14 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3850 cm <sup>2</sup> /g)
細骨材	S	大井川水系産陸砂(表乾密度 2.58 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 2.31%, F.M.2.87)
	SG	福山産高炉スラグ細骨材 (区分 BFS5, 表乾密度 2.73 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.45%, F.M.2.56)
粗骨材	G	岡崎産砕石(表乾密度 2.68 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.78%, 実積率 60.0%)
混和剤	HP	高性能 AE 減水剤 チューポール HP-11 (主成分: ポリカルボン酸コポリマー)
収縮低減剤	SRA	ヒビダン B (主成分: ポリエーテル誘導体)

表 4.3 実験の因子と水準

因子	水準
セメント	N, BB
水セメント比 (%)	45
SG 置換率 (%)	0, 25, 50
SRA 添加量 (kg/m <sup>3</sup> )	0, 3, 6

### (3) コンクリートの配合

設計基準強度が 36 N/mm<sup>2</sup>程度の普通強度の高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートを想定し、水セメント比(以下, W/C)は 45%とした。コンクリートの配合を表 4.4 に示す。配合は 3N25 のように SRA 添加量, セメント種別, SG 置換率を組み合わせた記号で示した。SG を置換する場合は単位水量と単位粗骨材かさ容積を一定とした。目標スランプは 10±1 cm, 目標空気量は 4.5±1%, コンクリート温度は 20±2°Cとした。HP と SRA は水の一部として添加した。空気量調整は, ポリエーテル系の消泡剤とアルキルリン酸エステル系の AE 調整剤を組み合わせで行った。3N50, 6N0, 6N50 および 6B50 の配合については同一配合で目標空気量を 6.0±0.5%としたコンクリートも試験し, 凍結融解試験および気泡間隔係数を測定した。

### (4) 試験方法

練混ぜは, 強制パン型ミキサ(容量 55 L)を用いて, 全材料投入後 90 秒練り混ぜ後排出した。練り量は 40 L とした。試験項目と試験方法を表 4.5 に示す。



表 4.4 コンクリートの配合

記号	セメント	SRA (kg/m <sup>3</sup> )	SG (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	SG	G
0N0	N	0	0	150	333	812	0	1029
0N25			25			609	216	
0N50			50			406	431	
3N0		3	0			812	0	
3N25			25			609	216	
3N50			50			406	431	
6N0		6	0			812	0	
6N50			50			406	431	
0B0	BB	0	0	150	333	799	0	1029
0B25			25			599	213	
0B50			50			401	426	
3B0		3	0			799	0	
3B25			25			599	213	
3B50			50			401	426	
6B0		6	0			799	0	
6B50			50			401	426	

表 4.5 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
ブリーディング量	JIS A 1123
凝結時間	JIS A 1147
圧縮強度	JIS A 1108, 標準養生, 材齢 7, 28, 91 日
乾燥収縮	JIS A 1129-3 : 24 時間後脱型, 材齢 7 日まで水中養生後基長, 20°C, 60%RH で乾燥期間 52 週まで測定
促進中性化	JIS A 1153
凍結融解	JIS A 1148
気泡間隔係数	ASTM C457-98, リニアトラバース法

#### 4.3.2 実験結果

##### (1) フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表 4.6 に示す。

表 4.6 フレッシュコンクリートの試験結果

記号	HP 添加量 (C×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンク リート 温度(°C)	凝結(h)		ブリーディング量 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )
					始発	終結	
0N0	0.70	10.5	4.4	21	5.3	7.4	0.04
0N25	0.75	10.0	4.6	21	5.4	7.6	0.04
0N50	0.80	9.0	4.8	21	5.7	7.8	0.05
3N0	0.65	11.0	5.3	21	5.8	7.8	0.05
3N25	0.70	9.5	5.2	21	6.0	8.0	0.05
3N50	0.75	9.5	5.1	21	6.2	8.2	0.06
6N0	0.60	11.0	4.9	21	6.3	8.3	0.06
6N50	0.75	10.0	5.0	21	6.7	8.7	0.07
0B0	0.65	10.0	3.9	21	5.8	8.6	0.03
0B25	0.65	10.5	3.8	21	6.0	8.5	0.04
0B50	0.60	11.0	4.1	21	6.2	8.8	0.06
3B0	0.65	11.0	4.2	21	6.6	9.3	0.04
3B25	0.60	10.0	4.3	21	6.7	9.5	0.05
3B50	0.60	10.5	4.8	21	7.0	10.0	0.07
6B0	0.60	10.0	4.9	21	7.1	10.0	0.06
6B50	0.55	10.5	4.7	21	7.5	10.8	0.09

a) 高性能 AE 減水剤の添加量

SRA 添加量と HP 添加量の関係を図 4.6 に示す。収縮低減剤は界面活性剤の一種であり若干減水性を持つため、HP の添加量は、SRA 添加量の増加にともない 0~5%程度減少した。SG 置換率と HP 添加量の関係を図 4.7 に示す。HP の添加量は、普通セメントでは SG 置換率の増加にともない 10~15%程度増加したが、高炉 B 種では 0~5%程度減少した。SG と SRA を併用した場合は、普通セメントでは無添加に比べて同等かわずかに増加し、高炉 B 種では 0~5%程度減少した。

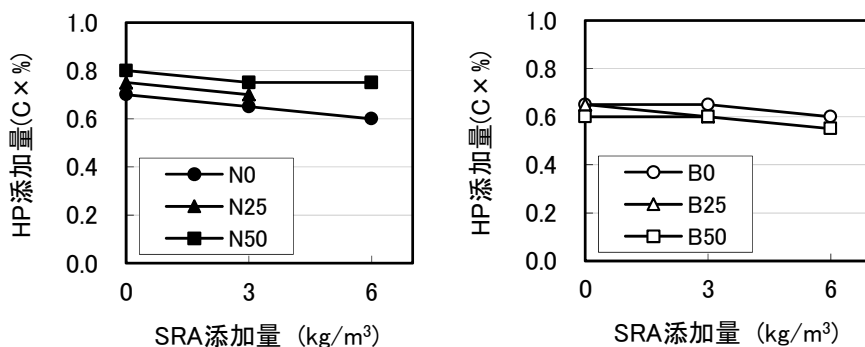


図 4.6 SRA 添加量と HP 添加量の関係

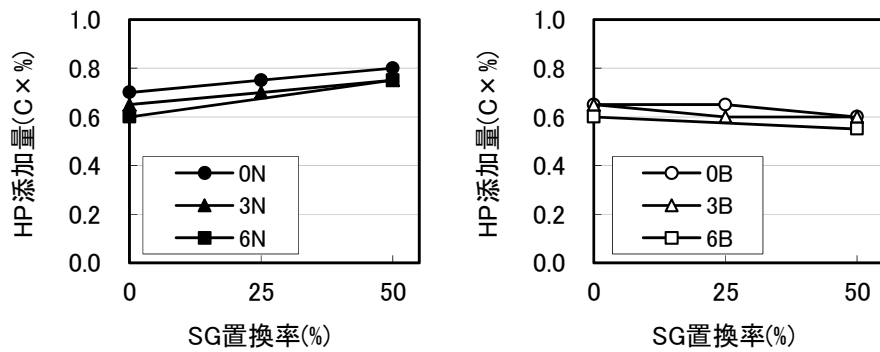


図 4.7 SG 置換率と HP 添加量の関係

b) ブリーディング量

SRA 添加量とブリーディング量の関係を図 4.8, SG 置換率とブリーディング量の関係を図 4.9 に示す. SRA および SG の添加によりブリーディング量は  $0.01 \sim 0.03 \text{cm}^3/\text{cm}^2$  程度増加した. これは SRA の添加により凝結が遅延したため, および SG 表面がガラス質であること<sup>7)</sup>などによるが, SRA 添加量  $6 \text{kg}/\text{m}^3$  程度, SG 置換率 50%程度までであれば影響は小さい. SG と SRA を併用した場合は, 普通セメントでは無添加に比較して  $0.01 \sim 0.03 \text{cm}^3/\text{cm}^2$

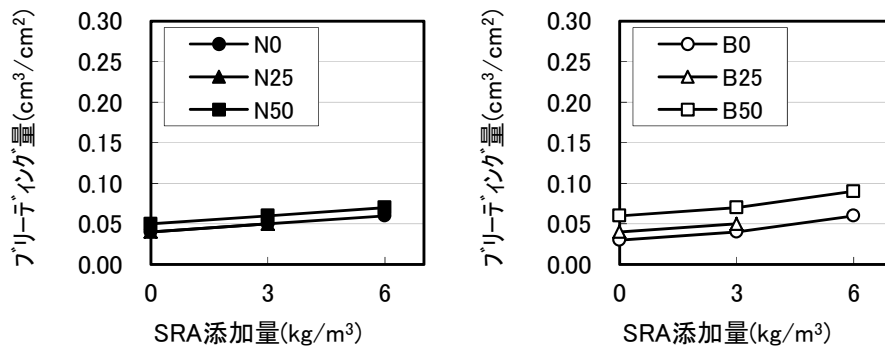


図 4.8 SRA 添加量とブリーディング量の関係

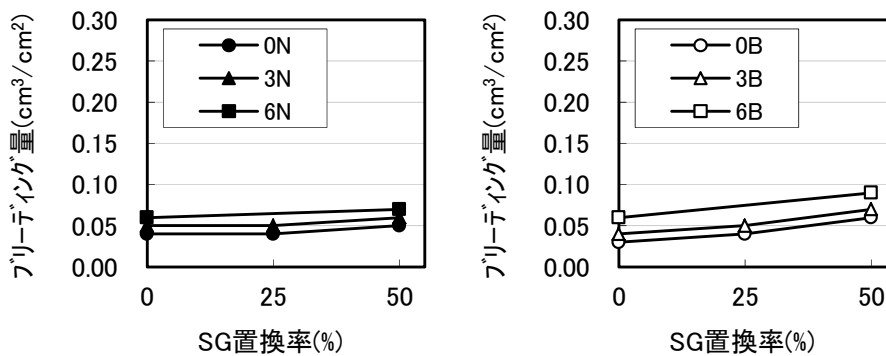


図 4.9 SG 置換率とブリーディング量の関係

程度、高炉 B 種では  $0.02 \sim 0.06 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$  程度増加したが、本研究では、高性能 AE 減水剤を使用して単位水量を低減したことや W/C の設定を比較的小さい 45% としたことなどによりブリーディング量は最大でも  $0.10 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$  以下であり、全体的に小さい傾向であった。

### c) 凝結時間

SRA 添加量と凝結始発時間の関係を図 4.10 に、SG 置換率と凝結始発時間の関係を図 4.11 に示す。SRA の添加により凝結時間は 30～60 分程度、SG の添加により約 25 分遅延した。これは SRA の場合は、SRA がセメントの水和を遅延させるため<sup>8)</sup>であり、SG の場合は SG に含まれる固結防止剤<sup>9)</sup>の影響である。SG と SRA を併用した場合は、普通セメントでは無添加に比較して 40～100 分程度、高炉 B 種では 60～120 分程度遅延し、併用により若干遅延傾向が大きくなった。

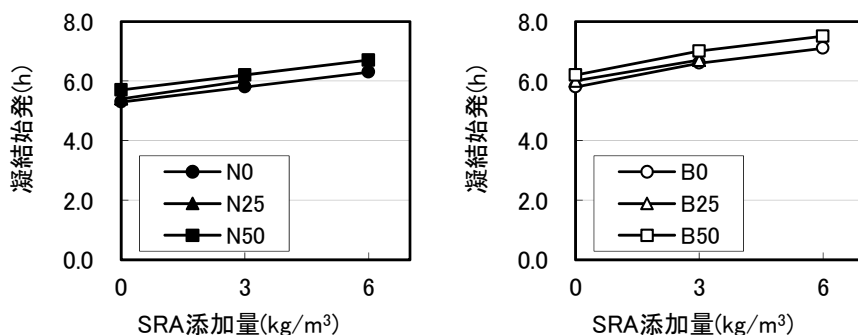


図 4.10 SRA 添加量と凝結始発時間の関係

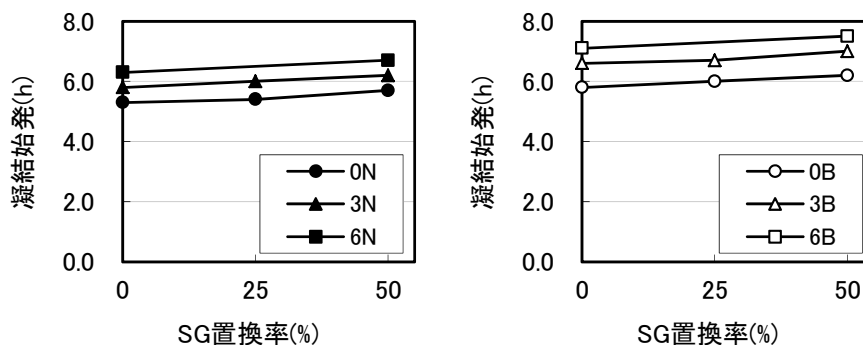


図 4.11 SG 置換率と凝結始発時間の関係

## (2) 乾燥収縮

乾燥収縮試験結果を図 4.12, SRA 添加量と乾燥収縮みずみの関係を図 4.13 および SRA 添加量と収縮低減率の関係を図 4.14 に示す. SRA 添加量の増加にともない乾燥収縮みずみは減少し,  $6 \text{ kg/m}^3$  の添加で普通セメントでは約  $200 \times 10^{-6}$ , 高炉 B 種では約  $133 \times 10^{-6}$  低減した. 無添加に対する収縮低減率はそれぞれ約 29%および約 20%であった.

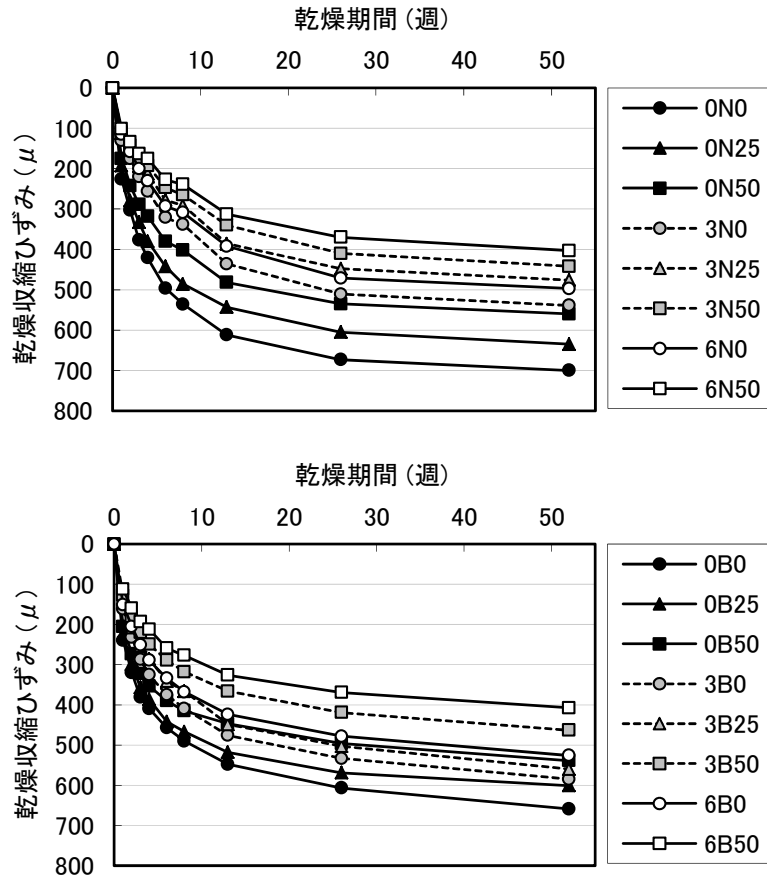


図 4.12 乾燥収縮試験結果

SG 置換率と乾燥収縮みずみの関係を図 4.15 に, SG 置換率と収縮低減率の関係を図 4.16 に示す. SG 置換率の増加にともない乾燥収縮みずみは減少し, 50%置換で普通セメントでは約  $140 \times 10^{-6}$ , 高炉 B 種では約  $120 \times 10^{-6}$  低減した. 無添加に対する収縮低減率はそれぞれ約 20%および約 18%であった. SRA では高炉 B 種に対する収縮低減効果が普通セメントに比較してやや小さい傾向であったが, SG ではセメントの違いによる収縮低減効果に大きな差はなかった. SG と SRA を併用した場合は, それぞれ単独で添加した場合よりも大きな収縮低減効果が得られており, 普通セメントでは最大で約  $300 \times 10^{-6}$  低減, 約 42%の低減効果, 高炉 B 種では最大で約  $250 \times 10^{-6}$  低減, 約 35%の低減効果が得られた.

SRA 添加量と質量減少率の関係を図 4.17, SG 置換率と質量減少率の関係を図 4.18 に示す. いずれのセメントにおいても SG の置換率の増加にともない質量減少率は減少するが,

SRA の添加による質量減少率の変化はほとんど認められなかった。また、SG と SRA の併用は、SG のみの場合と同様に質量減少率が減少した。

収縮低減剤の収縮低減メカニズムについては、収縮低減剤が表面張力を低下させ毛細管張力を低減させる<sup>10)</sup>と考えられているが、最近では、分離圧曲線の変化<sup>11)</sup>や比表面積の減少<sup>11)</sup>などが関係しているとの報告もある。スラグ細骨材の収縮低減メカニズムについては、(1)スラグ細骨材表面の組織が潜在水硬性による水和反応により緻密化した<sup>12),13),14)</sup>(2)スラグ細骨材の吸水率が小さいためもともとコンクリート中の水分が少なく乾燥水分量(質量減少率)が小さい、等が考えられる。したがって、本研究で SRA と SG を併用した時に、それぞれを単独で使用した場合の効果をし合わせた低減率に近い効果が得られたのは、SRA と SG の収縮低減メカニズムが異なるからと考えられる。

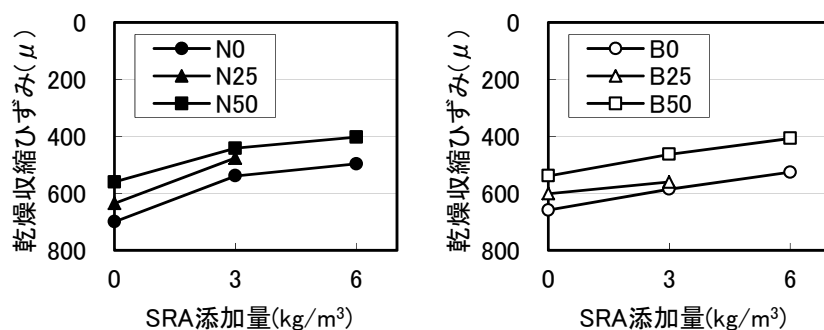


図 4.13 SRA 添加量と乾燥収縮ひずみの関係

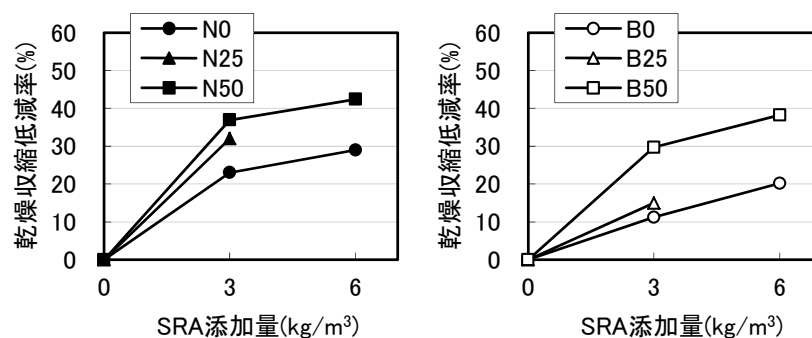


図 4.14 SRA 添加量と乾燥収縮低減率の関係

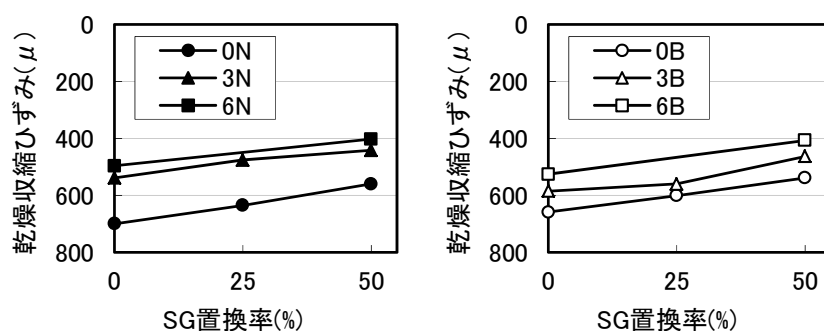


図 4.15 SG 置換率と乾燥収縮ひずみの関係

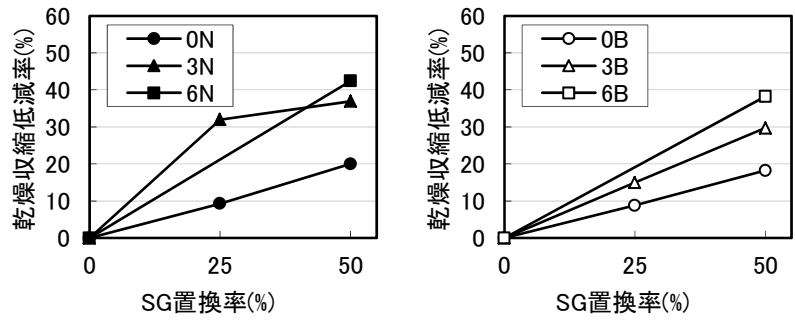


図 4.16 SG 置換率と乾燥収縮低減率の関係

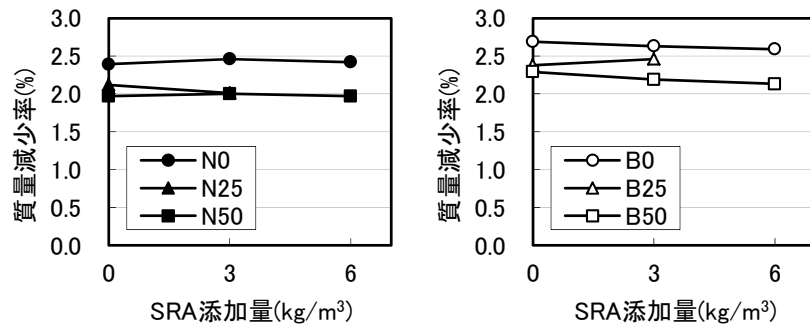


図 4.17 SRA 添加量と質量減少率の関係

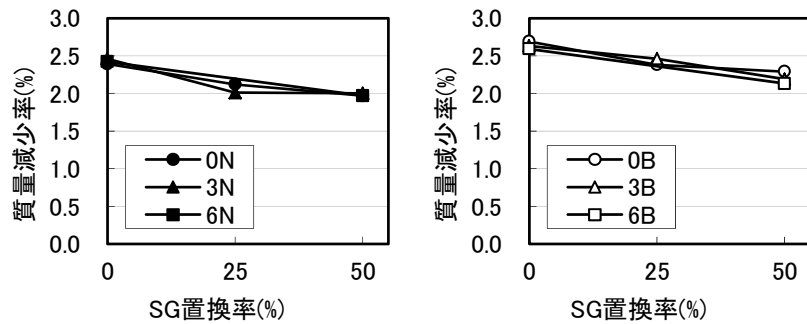


図 4.18 SG 置換率と質量減少率の関係

### (3) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図 4.19 に示す. いずれのケースも想定した強度を十分に満足する強度が得られた. SRA の添加により強度が若干低い傾向にあり, 材齢によらず無添加の約 95~98%程度の強度であった. SG の添加により普通セメントでは初期強度がやや低い傾向があるが材齢 91 日では無添加と同等以上となった. 高炉 B 種では強度低下は見られなかった. SG と SRA を併用した場合は, SRA の影響で初期強度が約 90%程度に低下したが, 材齢 91 日では SG の潜在水硬性による強度増進<sup>12)</sup>により無添加とほぼ同等の強度となった.

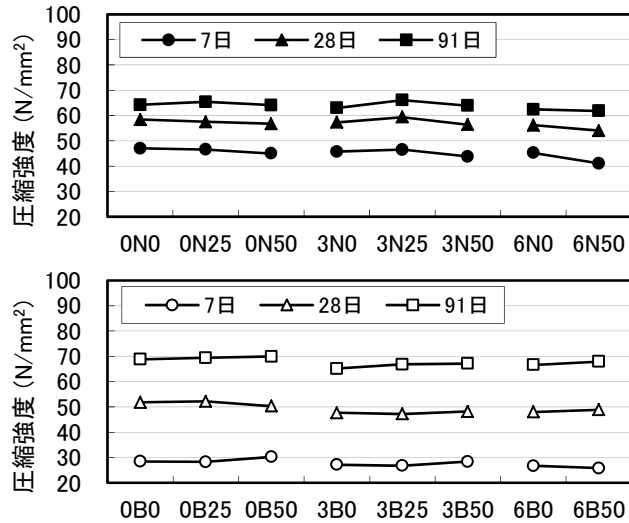


図 4.19 圧縮強度試験結果

#### (4) 中性化抵抗性

促進中性化試験結果を図 4.20 に示す. いずれのケースにおいても, 促進期間 26 週における中性化深さが 15 mm 以下であり十分な中性化抵抗性を示した. SRA および SG を添加したものは無添加に比較して中性化深さが小さく, また併用によりさらに小さくなった.

SRA の中性化抑制効果は既往の研究<sup>15)</sup>でも報告されており, そのメカニズムについては収縮低減剤の収縮低減効果により微細なひび割れが減少し CO<sub>2</sub> の侵入が抑制されたためと考えられるが十分に解明されておらず今後検討が必要である. SG については, 既往の研究<sup>13)</sup>においてスラグ細骨材を使用したコンクリートの透気係数や塩化物イオン実効拡散係数が天然細骨材を使用したコンクリートに比較して小さいことが報告されていることなどから, スラグ細骨材の潜在水硬性により組織が緻密化し, CO<sub>2</sub> の侵入を抑制するため<sup>14)</sup>と考えられる.

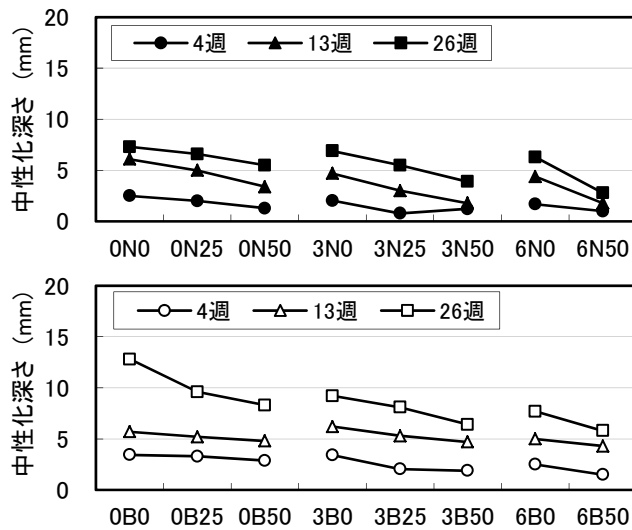


図 4.20 促進中性化試験結果



## (5) 凍結融解抵抗性および気泡間隔係数

凍結融解試験結果を図 4.21 に示す。SRA および SG を添加したもののうち 3N50, 6N0, 6N50 および 6B50 は 300 サイクル前に相対動弾性係数が 60%を下回る結果となり、SRA や SG を多めに添加したものは凍結融解抵抗性が低下する結果となった。そこで、3N50, 6N0, 6N50 および 6B50 については、目標空気量を  $6 \pm 0.5\%$  に調整したコンクリート供試体 (3N50-6%, 6N0-6%, 6N50-6% および 6B50-6%) を作製し凍結融解試験と気泡間隔係数測定を行った。その結果、いずれも耐久性指数が 60%以上となり、SRA や SG を併用しても空気量を 6%程度に設定することにより凍結融解抵抗性を確保できることが確認された。気泡間隔係数測定結果を図 4.22 に示す。SRA や SG の添加により気泡間隔係数は増大する傾向にあり、特に耐久性指数が 60%を下回った 3N50, 6N0, 6N50 および 6B50 については気泡間隔係数が  $400 \mu$  を超えていることがわかる。気泡間隔係数が増大した理由として、SRA については、SRA が表面張力を低下させることにより気泡径の大きな気泡が多く存在するためであり<sup>17)</sup>、SG についても、SG の添加により比較的大きな気泡が多く連行され、凍結融解抵抗性を向上させるのに有効な  $100 \mu\text{m}$  以下の気泡の数が減少したため<sup>18),19)</sup>と考えられる。空気量を 6%とした 3N50-6%, 6N0-6%, 6N50-6% および 6B50-6% については気泡間隔係数が  $300 \sim 330 \mu$  程度に低下しており、凍結融解試験結果とも整合する。大きな収縮低減効果を得るために SG と SRA を多めに使用する場合には、空気量を 6%程度に設定することで凍結融解抵抗性を確保することが可能と考えられる。

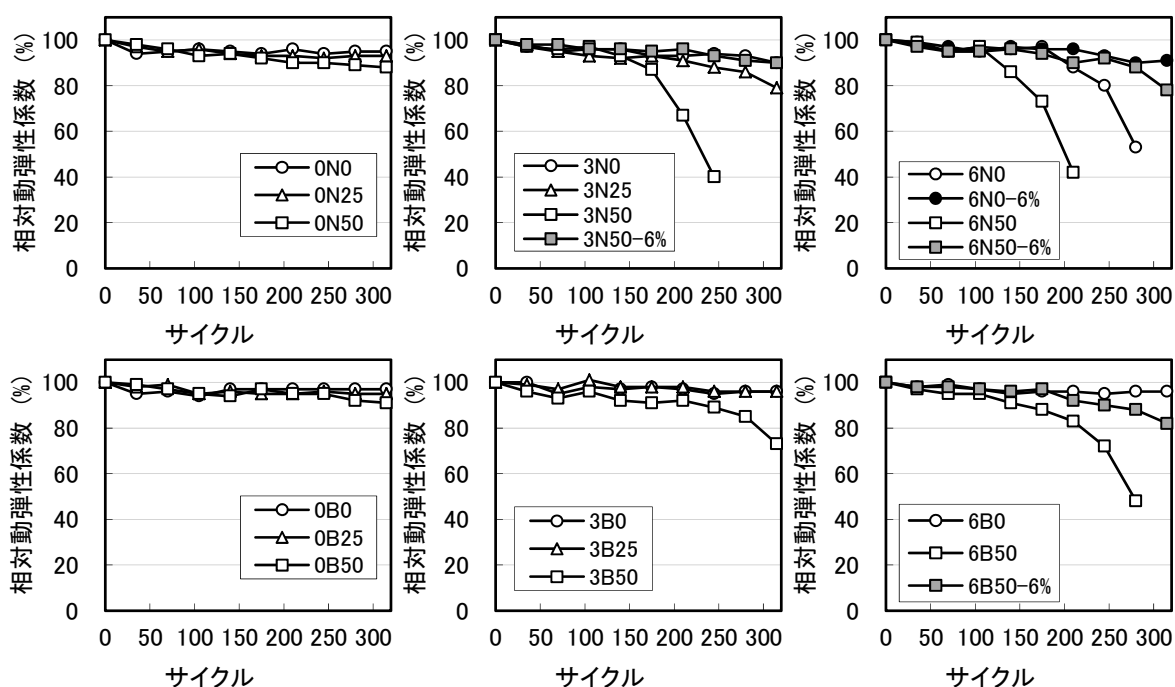


図 4.21 凍結融解試験結果

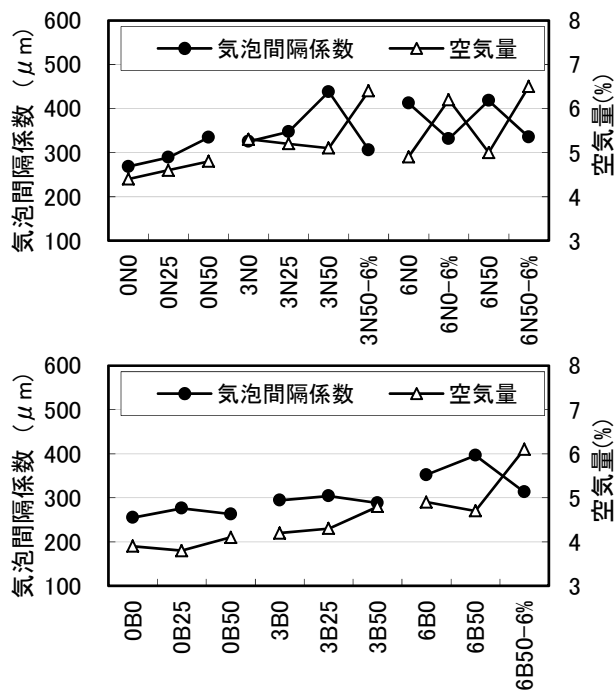


図 4.22 気泡間隔係数試験結果

#### 4.3.3 まとめ

高炉スラグ細骨材と収縮低減剤を組み合わせた場合の凍結融解抵抗性も考慮し、これらを単独で使用した場合よりもさらに大きな収縮低減効果を得ることを検討し、以下の知見を得た。

- (1) 高炉スラグ細骨材と収縮低減剤を併用することにより、それぞれ単独で添加した場合よりも大きな乾燥収縮低減効果が得られる。本実験では無添加に対して、普通セメントでは最大で約  $300 \times 10^{-6}$ 、高炉 B 種では最大で約  $250 \times 10^{-6}$ 、乾燥収縮ひずみが低減し、それぞれ約 42% および約 35% の収縮低減効果が得られた。
- (2) 高炉スラグ細骨材と収縮低減剤を併用する場合、添加量が多い場合に凍結融解抵抗性が低下する可能性があるが、空気量を 6% 程度に設定することで十分な凍結融解抵抗性を確保できる。

#### 4.4 まとめ

高炉スラグ細骨材が持つコンクリートの乾燥収縮ひずみの低減効果に着目し、そのメカニズムについて検討した。その結果、高炉スラグ細骨材の収縮低減のメカニズムは、収縮低減性材料として一般的に知られている収縮低減剤とは異なるメカニズムであることが推察された。収縮低減剤は使用を増加することにより大きな収縮低減効果を得ることができるが、多量に使用すると凍結融解抵抗性が低下する。そこで、高炉スラグ細骨材と収縮低

減剤を組み合わせて、凍結融解抵抗性も考慮して、それぞれを単独で使用するよりも大きな収縮低減効果を得ることを検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 高炉スラグ細骨材の収縮低減メカニズムの1つは、高炉スラグ細骨材表面にゲーレンナイト水和物が長期に渡って生成し、緻密な水和層を形成することにより、乾燥収縮ひずみを増加させるポーラスな遷移帯の形成が少なくなることと推察した。
- (2) 高炉スラグ細骨材と収縮低減剤を併用することにより、それぞれ単独で添加した場合よりも大きな乾燥収縮低減効果が得られる。本実験では無添加に対して、普通セメントでは最大で約  $300 \times 10^{-6}$ 、高炉セメント B 種では最大で約  $250 \times 10^{-6}$ 、乾燥収縮ひずみが低減し、それぞれ約 42% および約 35% の収縮低減効果が得られた。
- (3) 高炉スラグ細骨材と収縮低減剤併用する場合、添加量が多い場合に凍結融解抵抗性が低下する場合があるが、空気量を 6% 程度に設定することで十分な凍結融解抵抗性を確保できる。

## 参考文献

- 1) 露木尚光, 木之下光男, 吉澤千秋, 齊藤和秀: 高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの収縮低減メカニズムの考察, 土木学会第 66 回年次学術講演会, pp.1045-1046, 2011.9
- 2) 露木尚光, 小笠原直仁, 笠井順一, 飯島善時: ゲーレンナイト組成ガラスの水和におよぼす  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の刺激効果: Gypsum&Lime, No.247, pp.42-48, 1993
- 3) 齊藤和秀, 吉澤千秋, 吉田亮, 梅原秀哲: 収縮低減剤と高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.439-445, 2013
- 4) K. Saito, M. Kinoshita, H. Umehara and R. Yoshida: Properties of Low-Shrinkage High-Strength SCC Using Shrinkage Reducing Admixture Blast Furnace Slag Aggregate and Limestone Aggregate, 6th International RILEM Symposium on SCC, pp.283-293
- 5) Final Report and Conclusion: RILEM Symposium on Physical and Chemical Causes of Creep and Shrinkage of Concrete, Session 6, pp.553-558, Munich, (1968)
- 6) 富田六郎, 後藤孝治, 酒井公武, 茂庭孝司: 収縮低減剤を用いたコンクリートの乾燥収縮およびひびわれに関する実験的研究, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol.5, pp.181-184, 1984
- 7) 山崎舞, 千歩修, 長谷川拓哉: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐凍害性におよぼすブリーディングの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.898-903, 2012
- 8) コンクリート混和剤の開発と最新技術, シーエムシー, pp.152-153, 1995
- 9) 高橋智雄, 木之下光男, 光藤浩之, 吉澤千秋: 高炉スラグ用固結防止剤の開発, コンクリート工学, Vol.40, No.11, pp.19-25, 2002.11

- 10) 富田六郎, 後藤孝治, 酒井公式, 茂庭孝司: 収縮低減剤を用いたコンクリートの乾燥収縮およびひびわれに関する実験研究, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol.5, pp.181-184, 1983
- 11) 丸山一平, 岸直哉: 収縮低減剤の作用機構, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.645, pp.1895-1903, 2009
- 12) 長滝重義, 米山絃一, 高田誠: 高炉スラグ水砕砂を用いたコンクリートの諸性状について, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.1, pp.193-196, 1979
- 13) 鵜飼貴史, 佐藤寛之, 吉田亮, 齊藤和秀, 梅原秀哲: 寸法の異なるスラグ細骨材を用いたコンクリートの物質移動抵抗性に関する一考察, 土木学会第66回年次学術講演会, V-270, pp.539-540, 2011
- 14) 齊藤和秀, 吉澤千秋, 木之下光男, 小林竜平, 露木尚光, 吉田亮: 高炉スラグ細骨材と高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの特性, 土木学会第67回年次学術講演会, V-520, pp.1039-1040, 2012
- 15) 井上和政, 三井健郎, 見澤大介, 木之下光男: 乾燥収縮 200 $\mu$ クラスの超低収縮コンクリートのひび割れ抑制効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.515-520, 2011
- 16) 依田彰彦: 高炉スラグを細骨材としたコンクリートの性質について, セメント技術年報, No.34, pp.133-136, 1980
- 17) 藤原浩巳, 富田六郎, 下山善秀: 収縮低減剤を用いたコンクリートの耐久性に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.37-42, 1988
- 18) 山崎舞, 千歩修, 長谷川拓哉: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐凍害性におよぼすブリーディングの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.898-903, 2012
- 19) 小林正几, 田中弘: 高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートの気泡組織について, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.2, pp.41-44, 1980

## 第5章 高炉スラグ細骨材の粒径がコンクリートの硬化物性に与える影響<sup>1)</sup>

### 5.1 概要

既往の研究および第3章より、高炉スラグ細骨材は普通骨材と異なり、長期強度増進、乾燥収縮低減、中性化抑制などの硬化物性向上効果を持つことを確認した。これらの効果のうち、乾燥収縮低減については、第4章において、高炉スラグ細骨材の粒子表面に水和生成物の緻密な層が生成することにより脆弱な遷移帯の生成が少なくなることがメカニズムの1つであると推察した。収縮低減効果以外の硬化物性向上効果についても、高炉スラグ細骨材粒子表面の反応性が影響していると考えられ、その影響の程度は粒径(表面積)により異なることが推測される。一方、骨材の粒径の違いが、コンクリートの乾燥収縮や強度発現性状に影響を与えることは一般的に知られている。高炉スラグ骨材に限らず、反応性がほとんどないと言われている硬質砂岩や石灰石を起源とする骨材でも、粒径が異なることで乾燥収縮や強度発現に影響を与えることが報告されている<sup>2)</sup>。高炉スラグ細骨材の場合は、このような粒径の違いと粒子表面の反応性の両方がコンクリートの硬化物性に影響を及ぼすと考えられるが、これまで詳細な検討は行われていない。

そこで第5章では、高炉スラグ細骨材がコンクリートの硬化物性を向上させるメカニズムを明らかにすることを目的として、高炉スラグ細骨材の粒径や微粒分に着目し、高炉スラグ細骨材の粒径や微粒分が高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの各種硬化物性に与える影響について検討した。また、高炉スラグ細骨材の微粒分を想定して、高炉スラグ微粉末を、微粒分量として約2%および約5%となるように添加した場合のコンクリートのフレッシュ性状の改善および、強度増進、乾燥収縮低減および中性化抑制等の硬化物性向上効果を確認した。

### 5.2 高炉スラグ細骨材の粒径の違いがモルタルの物性に与える影響(実験1)

#### 5.2.1 実験概要

本実験では、高炉スラグ細骨材を5つの粒径範囲に分級し、各粒径を単独で使用した場合にモルタルの乾燥収縮と圧縮強度に与える影響について検討した。

##### (1) 使用材料

使用材料を表5.1に、高炉スラグ細骨材および大井川産陸砂の粒度分布を図5.1に示す。高炉スラグ細骨材はFM2.5程度以下の細粒のものが一般的であり、1.2mm以上の粒径の割合が少なく試料調整が困難であったため、実験に使用する試料は、1.2-0.6mm, 0.6-0.3mm, 0.3-0.15mm, 0.15-0.075mm, 0.075mm以下の5つの粒径範囲に調整した。高炉スラグ細骨材は、ふるい分けにより分級したが、含有量の少ない0.3mm以下の粒径については、原骨

材をロッドミルで粉砕し、ふるい分けて作製した。比較のため、高炉スラグ細骨材の原骨材(粒度未調整品)も試験した。石灰砕石および硬質砂岩砕石は、原骨材をジョークラッシャーおよびロッドミルで粉砕し、高炉スラグ細骨材と同様に5つの粒径範囲に調整した。これらの試料は、いずれもそれぞれ単独で絶乾状態で使用した。高炉スラグ微粉末は、高炉スラグ細骨材と同じ鉄鋼メーカーの異なる製鉄所で製造されたものを使用した。高炉スラグ微粉末の粒度分布を図 5.2 に示す。大井川産陸砂、高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末は、いずれも粒度未調整、絶乾状態で使用した。

表 5.1 使用材料

種類	記号	産地・性質
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm <sup>3</sup> )
原骨材	SgS	福山産高炉スラグ細骨材(JIS A 5011-1 コンクリート用スラグ骨材 第1部：高炉スラグ骨材, 区分 BFS5, 表乾密度 2.74g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.62%)
	LS	石灰砕石 2005(表乾密度 2.70g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.24%)
	SS	硬質砂岩砕石 2005(表乾密度 2.60g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.19%)
	RS	大井川産陸砂(表乾密度 2.56g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 2.31%)
微粉末	SgP	高炉スラグ微粉末(JIS A 6206, 比表面積 4260cm <sup>2</sup> /g, 石膏無添加, 密度 2.91g/m <sup>3</sup> )
	LP	石灰石微粉末(比表面積 5000 cm <sup>2</sup> /g, 密度 2.70g/m <sup>3</sup> )
混和剤	AD	高性能 AE 減水剤標準形 I 種 チューポール HP-11

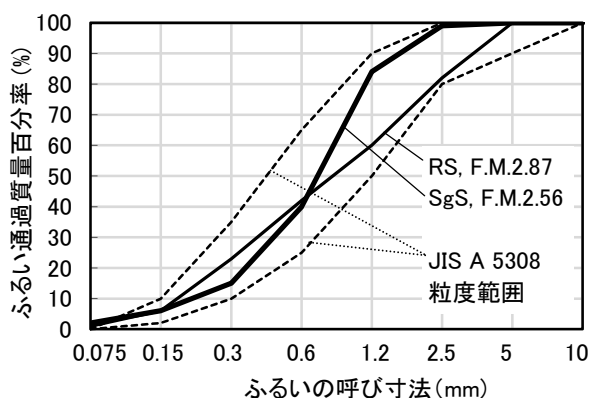


図 5.1 原骨材の粒度分布図

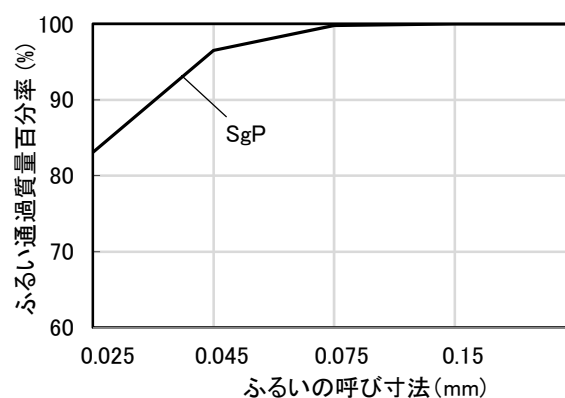


図 5.2 高炉スラグ微粉末の粒度分布

## (2) モルタルの配合

モルタルの配合を表 5.2, 実験の組み合わせを表 5.3 に示す。実験は3つのシリーズとし、SgS シリーズでは高炉スラグ細骨材の原骨材と粒度調整品を、LS シリーズと SS シリーズはそれぞれ石灰砕石と硬質砂岩砕石の粒度調整品を試験した。比較のため、高炉スラグ微粉末、石灰石微粉末および大井川産陸砂も試験した。各配合は骨材の種類と各粒径範囲の最大値を組み合わせた記号で示した。本実験では、水セメント比を 40%に、S/C を体積比

で 0.8 に設定した。モルタルの流動性は高性能 AE 減水剤を用いて供試体が成型できる程度に調整した。目標空気量は、空気量の影響をなくすため消泡剤を用いて 2%以下とした。

### (3) 試験方法

モルタルは、空練り 10 秒後に水を投入し、90 秒練り混ぜて製造した。試験温度は 20℃とした。圧縮強度用供試体は  $\phi 5 \times 10\text{cm}$  とし、養生は乾燥収縮試験と同じとし、供試体成形後 24 時間で脱型し、材齢 7 日まで標準養生後、温度 20℃、湿度 60%RH の室内で気乾養生した。試験材齢は、材齢 35 日(乾燥期間 28 日)および材齢 98 日(乾燥期間 91 日)とし、測定は JIS A 1108 に準拠した。乾燥収縮の供試体は  $4 \times 4 \times 16\text{cm}$  のサイズとし、測定は JIS A 1129-3 に準拠した。供試体成形後 24 時間で脱型し、材齢 7 日まで標準養生した後の長さを基長として温度 20℃、湿度 60%RH の室内に保管し乾燥期間 26 週まで測定した。

表 5.2 モルタルの配合

W/C (%)	単 位 量 (L/m <sup>3</sup> )		
	水	セメント	細骨材
40	413	326	261

表 5.3 実験の組み合わせ

シリーズ	記号	骨材種別	粒径範囲(mm)
SgS シリーズ	SgS	高炉スラグ細骨材原骨材	未調整(5-0)
	SgS 1.2	高炉スラグ細骨材 粒度調整品	1.2-0.6
	SgS 0.6		0.6-0.3
	SgS 0.3		0.3-0.15
	SgS 0.15		0.15-0.075
	SgS 0.075		0.075 以下
LS シリーズ	LS 1.2	石灰碎石 粒度調整品	1.2-0.6
	LS 0.6		0.6-0.3
	LS 0.3		0.3-0.15
	LS 0.15		0.15-0.075
	LS 0.075		0.075 以下
SS シリーズ	SS 1.2	硬質砂岩碎石 粒度調整品	1.2-0.6
	SS 0.6		0.6-0.3
	SS 0.3		0.3-0.15
	SS 0.15		0.15-0.075
	SS 0.075		0.075 以下
比較	SgP	高炉スラグ微粉末	未調整
	LP	石灰石微粉末	未調整
	RS	大井川産陸砂	未調整(5-0)

## 5.2.2 実験結果および考察

### (1) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図 5.3 に、粒径範囲と圧縮強度の関係を図 5.4 に示す。いずれの骨材も粒径が小さいほど概ね強度が高くなっているが、高炉スラグ細骨材は特に明確な傾向を示しており、ほぼ直線的に強度が増加している。一般に骨材の粒径が小さいほど遷移帯の厚さが薄くなる等の理由でコンクリートの強度は高くなる傾向がある<sup>3)</sup>が、高炉スラグ細骨材は、それに加えて潜在水硬性による強度増加の効果<sup>4)</sup>があるため、より強度が増進したものと推察される。しかし、0.075mm 以下の粒径でも高炉スラグ微粉末(SgP)に比べると約 30%程度低く、SgP ほどの強度増加の効果はない。

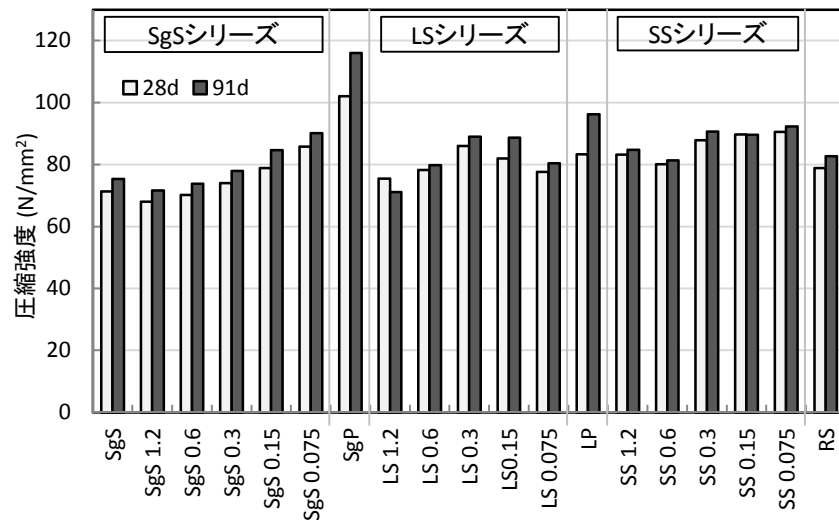


図 5.3 圧縮強度試験結果

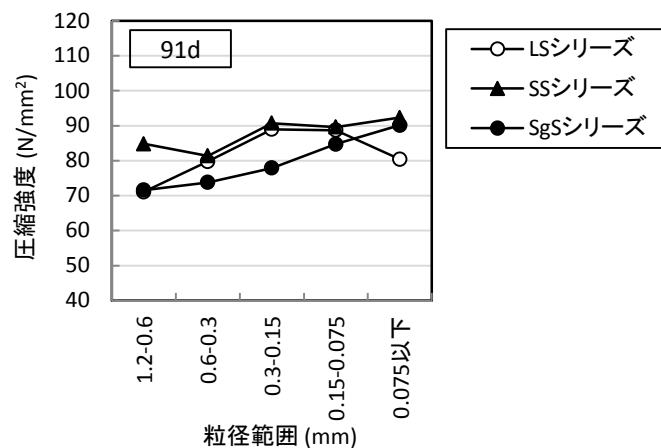


図 5.4 粒径範囲と圧縮強度の関係



## (2) 乾燥収縮

乾燥収縮試験による乾燥収縮ひずみを図 5.5, 質量減少率を図 5.6, 粒径範囲と乾燥収縮ひずみの関係を図 5.7, および粒径範囲と質量減少率の関係を図 5.8 に示す. SS シリーズは粒径が小さいほど乾燥収縮ひずみが大きい. これは骨材の粒径が小さいほどペーストの収縮を拘束する力が小さくなるためである<sup>2)</sup>. これに対して高炉スラグ細骨材は, 粒径が小さいほど乾燥収縮ひずみおよび質量減少率が小さい. これは, 高炉スラグ細骨材には, 潜在水硬性により粒子表面が緻密化して水分逸散を抑制する特徴があり<sup>4),5)</sup>, 粒径が小さいほどその傾向が強くなるためと考えられる. 粒径 0.075mm 以下では原骨材(SgS)に対して乾燥収縮ひずみが約 13%小さいが, 高炉スラグ微粉末(SgP)は SgS に対して約 42%小さく, 0.075mm 以下でも SgP ほどの低減効果はないことがわかる.

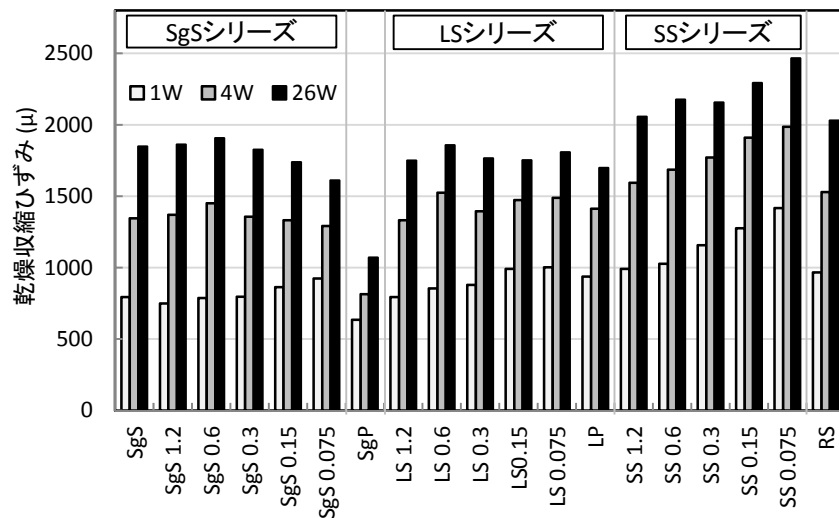


図 5.5 乾燥収縮試験結果(乾燥収縮ひずみ)

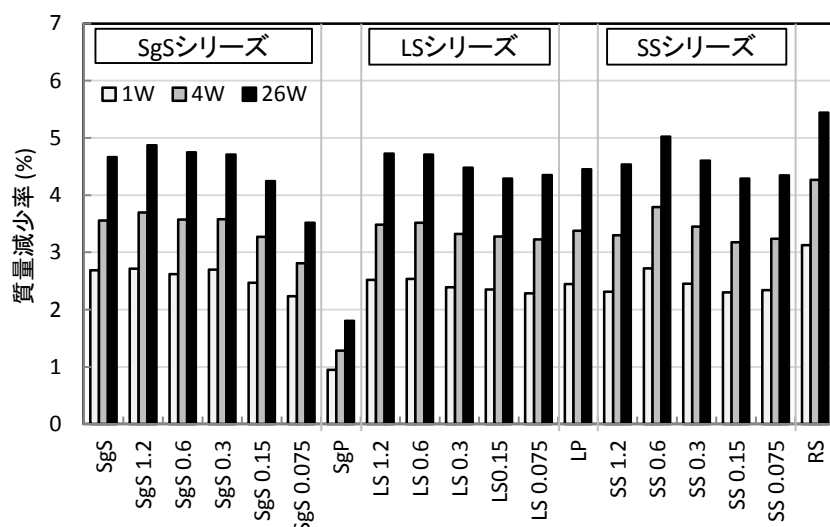


図 5.6 乾燥収縮試験結果(質量減少率)

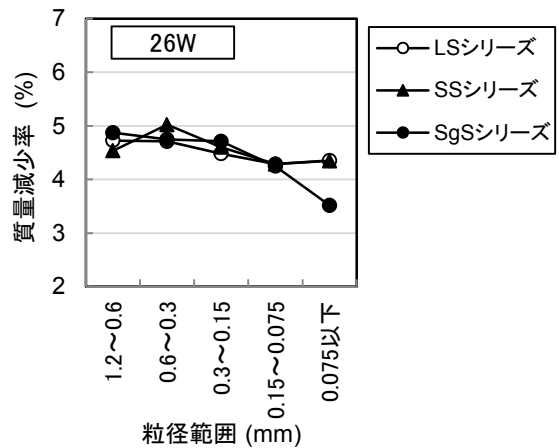
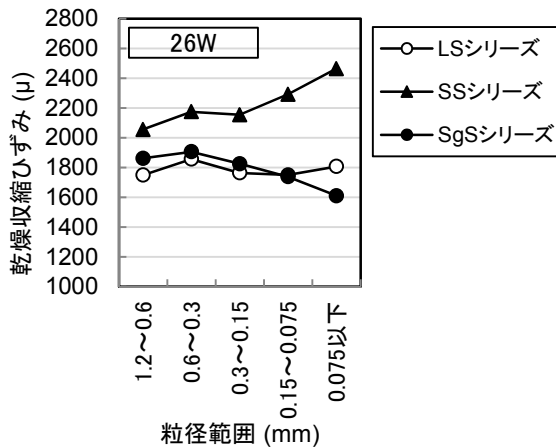


図 5.7 粒径範囲と乾燥収縮ひずみの関係 図 5.8 粒径範囲と質量減少率の関係

1.2-0.6mm に対する各粒径の乾燥収縮ひずみの比を図 5.9 に示す。反応性が低い SS シリーズは、粒径の影響を強く受けるため、粒径が小さいほど乾燥収縮ひずみが大きくなる。しかし、SgS シリーズは、0.6-0.3mm よりも小さい粒径では、粒径が小さいほど乾燥収縮ひずみが小さくなっている。このことから、高炉スラグ細骨材は、0.6mm 程度以下の粒径では、粒径が小さくなることによる収縮増大の効果よりも、緻密化による収縮低減の効果の方が強いことがわかる。LS シリーズは全体的に乾燥収縮ひずみが小さいが、石灰石微粉末 (LP) も含めて粒径の違いによる乾燥収縮ひずみや質量減少率の差は認められない。

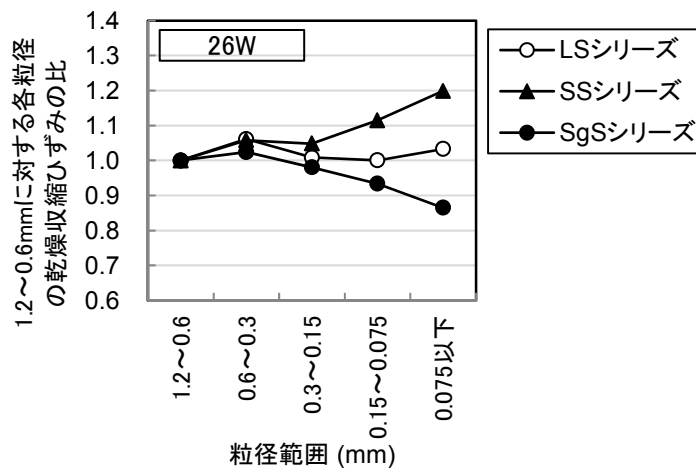


図 5.9 粒径範囲と 1.2-0.6mm に対する各粒径の乾燥収縮ひずみの比の関係

### 5.2.3 まとめ

高炉スラグ細骨材を 1.2-0.6mm, 0.6-0.3mm, 0.3-0.15mm, 0.15-0.075mm, 0.075mm 以下の 5 つの粒径に調整し、各粒径を単独で使用したモルタルの圧縮強度と乾燥収縮を石灰石および硬質砂岩と比較した結果、以下の知見を得た。

- a) いずれの骨材も粒径が小さいほど概ね強度が高くなるが、特に高炉スラグ細骨材は粒径が小さいほど明確な強度増加が認められた。
- b) 乾燥収縮については、高炉スラグ細骨材は、粒径が小さいほど乾燥収縮ひずみが小さい。硬質砂岩は粒径が小さいほど乾燥収縮ひずみが大きくなるが、石灰石は粒径の違いによる差は認められなかった。

### 5.3 高炉スラグ細骨材の微粒分の粒径の違いがモルタルの物性に与える影響（実験2）

#### 5.3.1 実験概要

実験1において、高炉スラグ細骨材の粒径が小さいほど乾燥収縮ひずみは小さく、圧縮強度は高い傾向にあることが明らかとなった。そこで実験2では、実験1では区別しなかった0.075mm以下の粒径について、さらに細かく粒径を分け、粒径の違いがモルタルの硬化物性に与える影響を検討した。

##### (1) 使用材料

使用材料を表5.4に示す。高炉スラグ細骨材、大井川産陸砂および高炉スラグ微粉末は、実験1と同じものを使用した。高炉スラグ細骨材の粒度調整品は、高炉スラグ細骨材をボールミルで粉砕し、0.3-0.15mm、0.15-0.075mm、0.075-0.045mm、0.045-0.025mm、0.025mm以下の5つの粒径範囲にふるい分け、絶乾状態で使用した。また比較のため、高炉スラグ微粉末、硬質砂岩砕砂の粉砕品0.15-0.075mm、および市販のガラスビーズ0.25-0.177mmおよび0.063-0.037mmを、いずれも絶乾状態で使用した。天然細骨材は大井川産陸砂を表乾状態で使用した。使用した骨材の物理的性質を表5.5に示す。

表 5.4 使用材料

種類	記号	産地・性質
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	SgS	福山産高炉スラグ細骨材(JIS A 5011-1 コンクリート用スラグ骨材 第1部:高炉スラグ骨材, 区分 BFS5, 表乾密度 2.74g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.62%)
	RS	大井川産陸砂(表乾密度 2.56g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 2.31%)
微粉末	SgP	高炉スラグ微粉末(JIS A 6206, 比表面積 4260cm <sup>2</sup> /g, 石膏無添加, 密度 2.91g/cm <sup>3</sup> )
混和剤	AD	高性能 AE 減水剤標準形 I 種 チューポール HP-11

##### (2) モルタルの配合

実験2では、大井川産陸砂(RSと略記)を使用したモルタルを基準(STDと略記)とし、各種骨材はRSに容積置換して比較した。置換率は一般的な混合率である30%とした。モル

表 5.5 骨材および微粉末の物理的性質

種別	粒径範囲 (mm)	密度*1 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)
大井川産陸砂(RS)	未調整(5-0)	2.56	2.31	-
高炉スラグ細骨材 原骨材および 粒度調整品 (SgS)	未調整(5-0)	2.74	0.62	-
	0.3-0.15	2.88	-	-
	0.15-0.075	2.92	-	-
	0.075-0.045	2.90	-	2700
	0.045-0.025	2.90	-	2960
高炉スラグ微粉末(SgP)	未調整	2.91	-	3900
	硬質砂岩砕砂粒度調整品(SS)	0.15-0.075	2.65	-
ガラスビーズ(GB)	0.25-0.177	2.50	-	-
	0.063-0.033	2.50	-	-

\*1:RS および SgS は表乾密度, その他は絶乾密度

タルの配合を表 5.6 に示す. 実験の組み合わせを表 5.7 に示す. 実験は細骨材として RS を 100%使用する STD を基準とし, 高炉スラグ細骨材の未調整品と粒度調整品(SgS シリーズ), 比較のため高炉スラグ微粉末(SgP), 硬質砂岩砕砂品(SS), およびガラスビーズ(GB シリーズ)を試験した. 各配合は骨材の種類と各粒径範囲の最大値を組み合わせた記号で示した.

表 5.6 モルタルの配合

W/C (%)	単 位 量 (L/m <sup>3</sup> )		
	水	セメント	細骨材
50	275	174	551

表 5.7 実験の組み合わせ

シリーズ	記号	骨材 1		骨材 2		
		種別	比率 (%)	種別	粒径範囲 (mm)	比率 (%)
STD	STD	RS	100	-	-	-
SgS シリーズ	SgS	RS	70	高炉スラグ 細骨材 原骨材および 粒度調整品	未調整(5-0)	30
	SgS 0.3				0.3-0.15	
	SgS 0.15				0.15-0.075	
	SgS 0.075				0.075-0.045	
	SgS 0.045				0.045-0.025	
SgS 0.025	0.025 以下					
SgP	SgP			高炉スラグ 微粉末	未調整	
SS	SS 0.15			硬質砂岩砕砂	0.15-0.075	
GB シリーズ	GB 0.25			ガラスビーズ	0.25-0.177	
	GB 0.063				0.063-0.033	

### (3) 試験方法

モルタルは、空練り 10 秒後に水を投入し、90 秒練り混ぜて製造した。試験温度は 20℃とした。圧縮強度用供試体はφ5×10cmで、標準養生、材齢 28 日とし、測定は JIS A 1108 に準拠した。乾燥収縮の供試体は 4×4×16cm とし、測定は JIS A 1129-3 に準拠した。供試体成形後 24 時間で脱型し、材齢 7 日まで標準養生した後の長さを基長として温度 20℃、湿度 60%RH の室内に保管し乾燥期間 26 週まで測定した。透気試験の供試体はφ10×5cm とし、供試体成形後 24 時間で脱型し、材齢 7 日まで標準養生後、材齢 28 日まで温度 20℃、湿度 60%RH で気中養生した。測定は負荷圧力を 0.2~0.5MPa の範囲で行い、供試体内部を透過した空気の流量が定常となった後、水上置換法により透過量を測定した。

### 5.3.2 実験結果および考察

#### (1) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図 5.10、粒径範囲と圧縮強度の関係を図 5.11 に示す。高炉スラグ細骨材は、粒径が小さいほど圧縮強度が高く、特に 0.045mm 以下の粒径範囲(SgS0.045 および SgS0.025)でその傾向が顕著となっている。これは、高炉スラグ細骨材の特性が、小粒径

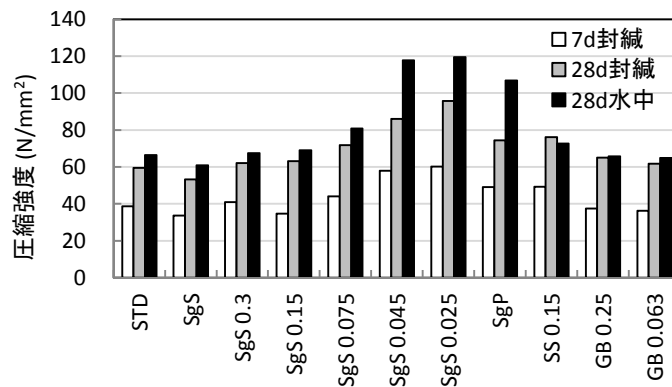


図 5.10 圧縮強度試験結果

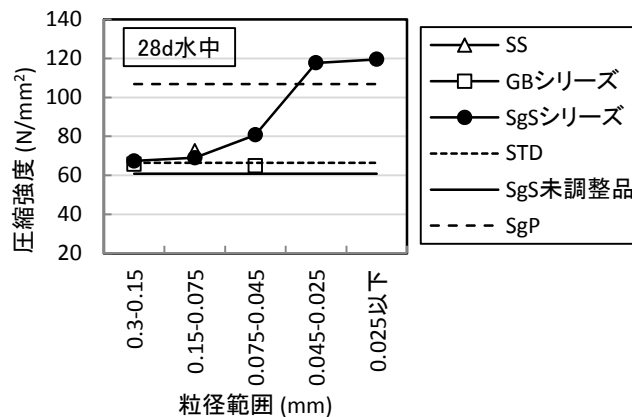


図 5.11 粒径範囲と圧縮強度の関係

になるにつれて高炉スラグ微粉末の特性に近づいていくが、今回設定した粒径範囲の 0.045～0.025mm 付近から、高炉スラグ微粉末の特性がより強く出始めているためと推察される。実験 1 では、粒径範囲 0.075mm 以下(SgS0.075)は、高炉スラグ微粉末(SgP)に比べて約 30% 程度強度が低かったが、実験 2 では、0.075mm 以下をさらに分級しているため、より小粒径の SgS0.045 および SgS0.025 は、SgP とほぼ同等の強度が得られたものと思われる。高炉スラグ細骨材未調整品(SgS)は基準(STD)と同等の強度であり、材齢 28 日の時点では長期強度増進の効果は認められない。また、反応性がない硬質砂岩砕砂(SS)やガラスビーズ(GB シリーズ)についても STD と同等の強度であり強度増進効果は認められない。

## (2) 乾燥収縮

乾燥収縮試験によって得られた乾燥収縮ひずみを図 5.12, 粒径範囲と乾燥収縮ひずみの関係を図 5.13, 質量減少率を図 5.14, および粒径範囲と質量減少率の関係を図 5.15 に示す。高炉スラグ細骨材未調整品(SgS)は基準(STD)に対して乾燥収縮ひずみが約 200 $\mu$ , 約 13% 程度低減している。これは既往の研究<sup>6)</sup>と同様の傾向であり、粒子表面の潜在水硬性による緻密化<sup>4),5)</sup>や骨材自体のヤング係数が高く<sup>5),6)</sup>, ペーストの収縮拘束力が強いことが関係していると思われる。高炉スラグ細骨材粒度調整品は、粒径 0.3mm から 0.045mm までは

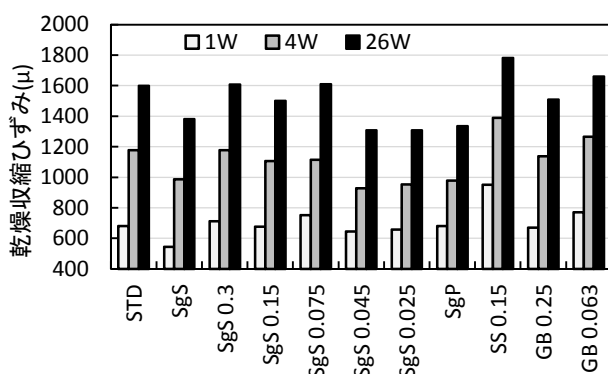


図 5.12 乾燥収縮試験結果(乾燥収縮ひずみ)

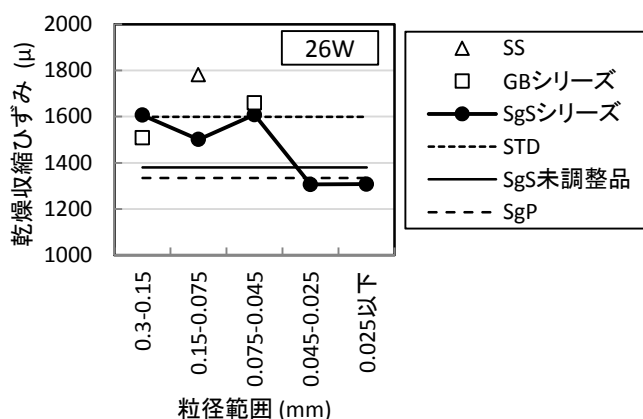


図 5.13 粒径範囲と乾燥収縮ひずみの関係

乾燥収縮ひずみが STD とほぼ同程度であり，収縮低減効果は認められないが，0.045mm 以下(SgS0.045 および SgS0.025)は，高炉スラグ微粉末(SgP)と同様に，STD に比べて乾燥収縮ひずみが約 300 $\mu$  程度小さく，粒径 0.045mm 程度よりも小さい粒径では，乾燥収縮ひずみが顕著に低減している．質量減少率も同様の傾向を示しており，潜在水硬性による組織の緻密化によって，水分逸散が抑制されたことによるものと推察される．比較のための硬質砂岩砕砂(SS)やガラスビーズ(GB シリーズ)は反応性がほとんどないことや，粒径が 0.045mm 程度より大きいこともあり，乾燥収縮ひずみや質量減少率の低減は認められなかった．

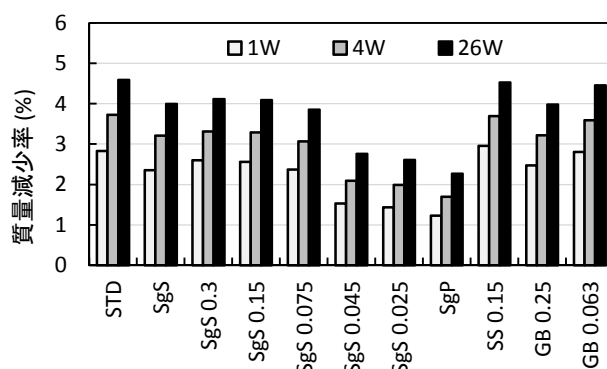


図 5.14 乾燥収縮試験結果(質量減少率)

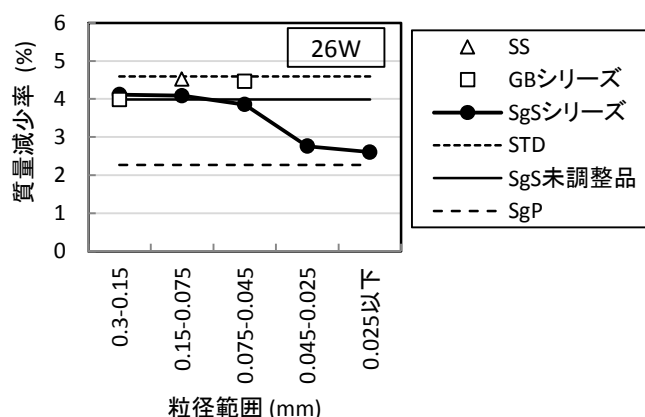


図 5.15 粒径範囲と質量減少率の関係

### (3) 透気係数

高炉スラグ細骨材の潜在水硬性や粒径の違いによる緻密化の効果を検証するため，一部の水準について透気係数試験を行った結果を図 5.16 に示す．高炉スラグ細骨材未調整品(SgS)は基準(STD)に比べて透気係数が大きい ( $187 \times 10^{-18}$ ) 値を示している．これは SgS は粒子表面がガラス質のためペーストとの付着が悪く，材齢 28 日では潜在水硬性による表面の緻密化がまだ進んでいないためと考えられる．これに対して粒度調整品では，粒径が小さいほど透気係数が小さくなり，特に SgS0.045 では高炉スラグ微粉末(SgP)と同等の値と

なった。これは粒径が小さくなることで比表面積が大きくなり、潜在水硬性による緻密化の効果が高くなったためと考えられる。

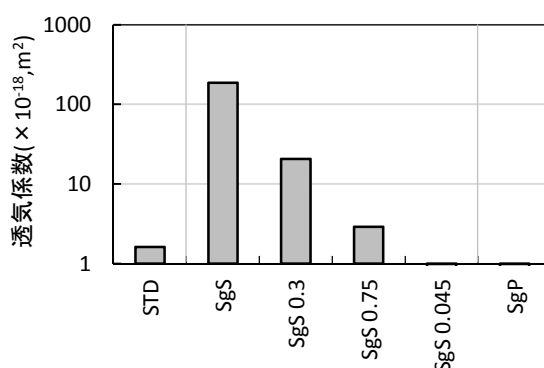


図 5.16 透気試験結果

### 5.3.3 まとめ

高炉スラグ細骨材を 0.3mm 以下の 5 つの粒径範囲に調整し、これらを天然骨材に 30%置換したモルタルの乾燥収縮と圧縮強度に与える影響について検討した結果、以下の知見を得た。

- 高炉スラグ細骨材は粒径が小さいほど圧縮強度増進効果が高く、特に 0.045~0.025mm 以下の粒径範囲でその傾向が顕著であり、高炉スラグ微粉末に近い性質を示す。
- 高炉スラグ細骨材は 0.3mm から 0.045mm までの粒径では乾燥収縮ひずみの低減効果は認められない。
- 高炉スラグ細骨材は 0.045mm 程度以下の粒径では潜在水硬性による組織の緻密化により水分逸散が抑制され乾燥収縮ひずみが顕著に低減する。

## 5.4 高炉スラグ細骨材の微粒分がコンクリートの硬化物性に与える影響（実験 3）

### 5.4.1 実験概要

実験 1 および 2 より、高炉スラグ細骨材は各粒径ごとに異なる特性を持ち、特に 0.045mm 程度以下の小さい粒径がモルタルの硬化物性に与える影響が大きいことが明らかとなった。実験 3 では、高炉スラグ細骨材の 0.045mm 以下の粒径が、高炉スラグ細骨材を単独使用したコンクリートの場合にどのように硬化物性に影響しているのかを検討するとともに、0.045mm 以下の粒径の含有量が約 2%および約 5%となるように高炉スラグ微粉末を添加して、コンクリートのフレッシュ性状の改善および、強度増進、乾燥収縮低減および中性化抑制などの硬化物性をさらに向上させる効果についても確認した。



## (1) 使用材料

使用材料を表 5.8 に示す。実験 3 では産地の違いによる影響を見るために、2 種類の高炉スラグ細骨材を使用した。細骨材の粒度分布を図 5.17 に、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材の微粒分(0.075mm 以下)の粒度分布を図 5.18 に示す。高炉スラグ細骨材は、0.15mm 以下の粒径を洗浄して取り除いたものを基準とした。0.15mm 以下の粒径の除去は、練混ぜの前日に高炉スラグ細骨材の原骨材を細骨材の微粒分量試験の手順で 0.15mm のふるい上で洗浄し、ふるいに残ったものを表面水 2%程度に調整して使用した。

実験 1, 2 では、0.045mm 以下の粒径の影響が大きいことが明らかとなったが、SgS1 および SgS2 のいずれも 0.045mm 以下の含有量が約 1.5%程度と少ない。そこで実験 3 では、0.045mm 以下の粒径を増加してさらに大きな硬化物性向上効果を得ることが可能かどうかを確認するため、高炉スラグ微粉末を高炉スラグ細骨材(SgS1 の 0.15mm 以下除去品)に内割容積置換で 2%および 5%添加した場合も試験した。

表 5.8 使用材料

種類	記号	産地・性質
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm <sup>3</sup> )
微粉末	SgP	高炉スラグ微粉末(JIS A 6206, 比表面積 4325cm <sup>2</sup> /g, 石膏無添加, 密度 2.91g/m <sup>3</sup> )
細骨材	RS	大井川産陸砂(表乾密度 2.57g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 2.44%, FM3.01, 実積率 67.1%, 微粒分量 1.5%)
	SgS1	福山産高炉スラグ細骨材(JIS A 5011-1 コンクリート用スラグ骨材 第 1 部:高炉スラグ骨材, 区分 BFS5, 表乾密度 2.74g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.62%, FM2.50, 実積率 59.7%, 微粒分量 2.6%)
	SgS2	名古屋産高炉スラグ細骨材(JIS A 5011-1, 区分 BFS5, 表乾密度 2.73g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.51%, FM2.35, 実積率 59.0%, 微粒分量 3.1%)
粗骨材	G	硬質砂岩砕石 2005(表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.78%, 実積率 61.0%)
混和剤	AD	AE 減水剤標準形 I 種 チューボール EX60

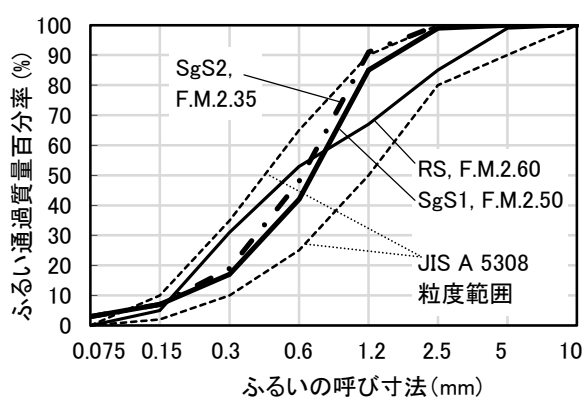


図 5.17 細骨材の粒度分布

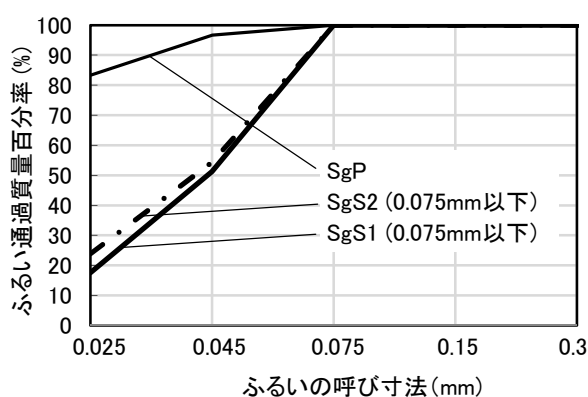


図 5.18 高炉スラグ微粉末および微粒分(0.075mm 以下)の粒度分布

## (2) コンクリートの配合

コンクリートの配合は、水セメント比 50%、スランプ 10cm のコンクリートを想定した。単位水量は  $175\text{kg/m}^3$  に固定し、空気量は 5.5% に設定した。目標スランプは  $10 \pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量は  $5.5 \pm 1.0\%$  とした。実験の組み合わせおよび、各配合における 0.045mm 以下と 0.15mm 以下の粒径の細骨材全体に対する割合を表 5.9 に示す。各配合は、細骨材の種類と 0.045mm 以下の粒径の割合を組み合わせた記号で示した。RS シリーズは、大井川産陸砂 (RS) を、そのままと高炉スラグ微粉末 (SgP) を内割で 2% 添加した 2 水準、SgS1 シリーズは、高炉スラグ細骨材 SgS1 に SgP を 2% および 5% 添加した水準を含めて 0.045mm 以下の粒径の割合が 0% (SgS1-0 と略記)、1.2% (SgS1 と略記)、2.0% (SgS1-P2 と略記)、4.9% (SgS1-P5) と変化させた 4 水準、SgS2 シリーズは、SgS2 について 0.045mm 以下の粒径の割合が 0%、1.8% となる 2 水準とした。細骨材の粒度構成を表 5.10、コンクリートの配合を表 5.11 に示す。

表 5.9 実験の組み合わせ

シリーズ	記号	SgP 添加量 (細骨材×%)	細骨材全体に対する割合(%)	
			0.045mm 以下	0.15mm 以下
RS シリーズ	RS	-	0.2	5.1
	RS-P2	2	2.2	7.1
SgS1 シリーズ	SgS1-0	-	0.0	0.0
	SgS1	-	1.2	6.3
	SgS1-P2	2	2.0	2.1
	SgS1-P5	5	4.9	5.1
SgS2 シリーズ	SgS2-0	-	0.0	0.0
	SgS2	-	1.8	7.4

表 5.10 細骨材の粒度構成

記号	粒度構成(%)								
	粒径範囲 (mm)								
	0.025 以下	0.045-0.025	0.075-0.045	0.15-0.075	0.3-0.15	0.6-0.3	1.2-0.6	2.5-1.2	5-2.5
RS	0.1	0.1	0.2	4.7	26.3	21.7	14.6	17.3	15.0
RS-P2	1.8	0.4	0.3	4.6	25.8	21.2	14.3	16.9	14.7
SgS1-0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.2	26.9	46.0	15.0	0.8
SgS1	0.4	0.8	1.2	3.9	10.5	25.2	43.1	14.1	0.8
SgS1-P2	1.7	0.3	0.1	0.0	11.0	26.3	45.1	14.7	0.8
SgS1-P5	4.2	0.7	0.2	0.0	10.6	25.5	43.7	14.3	0.8
SgS2-0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.5	31.9	46.1	9.4	0.2
SgS2	0.8	1.0	1.5	4.1	11.6	29.5	42.7	8.7	0.2

表 5.11 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

記号	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )						スランブ (cm)	空気量 (%)		
	W	C	RS	SgS	SgP	G				
RS	175	350	671	0	0	1072	13.0	5.9		
RS-P2			658	0	15		13.0	5.9		
SgS1-0			0	715	0		10.5	5.3		
SgS1					0			9.5	6.2	
SgS1-P2					701			15	10.5	5.9
SgS1-P5					680			38	11.5	5.3
SgS2-0					713			0	10.0	6.2
SgS2								0	9.5	5.8

### (3) 試験方法

コンクリートは、強制パン型ミキサ(容量 55L)を用い、全材料投入後、90 秒練り混ぜて製造した。試験温度は 20℃、練り量は 55L とした。スランブは JIS A 1101、空気量は JIS A 1128、凝結時間は JIS A 1147、ブリーディング量は JIS A 1123 に準拠して測定した。圧縮強度は JIS A 1108 に準拠し、標準養生、材齢 7, 28, 91, 182 日とした。ヤング係数は JIS A 1149 に準拠した。乾燥収縮は JIS A 1129-3 に準拠し、脱型後材齢 7 日まで標準養生後を基長とし温度 20℃、60%RH で乾燥期間 26 週まで測定した。促進中性化試験は JIS A 1153 に準拠した。透気試験は φ 10×20cm の供試体で、成形後 24 時間で脱型し、材齢 28 日まで標準養生後、φ 10×5cm の供試体を切り取り、温度 20℃、湿度 50%RH で恒量となるまで気中養生した。測定は負荷圧力を 0.2~0.5MPa の範囲で行い、供試体内部を透過した空気の流量が定常となった後、水上置換法により透過量を測定した。

## 5.4.2 実験結果および考察

### (1) フレッシュ性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表 5.11、0.045mm 以下の粒径の含有量とブリーディング量の関係を図 5.19 に示す。高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、全体的に大井川産陸砂(RS)に比べてブリーディングが多く、既往の研究<sup>6)</sup>と同様の傾向である。SgS1を除けば 0.045mm 以下の粒径 2%程度の含有量では、ブリーディング低減効果は認められない。高炉スラグ微粉末(SgP)を添加して 4.9%としたものでは、ブリーディングが 25%程度低減しているが、RS と同程度まで低減するには、SgP をさらに増加する必要がある。SgS1のブリーディングが少ない理由については、0.15~0.045mm の粒径が多いためと考えられる。凝結時間については、高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、RS に比べて遅れる傾向が見られたが、最大でも 1 時間以内の遅延であり、大きな遅延は認められなかった。

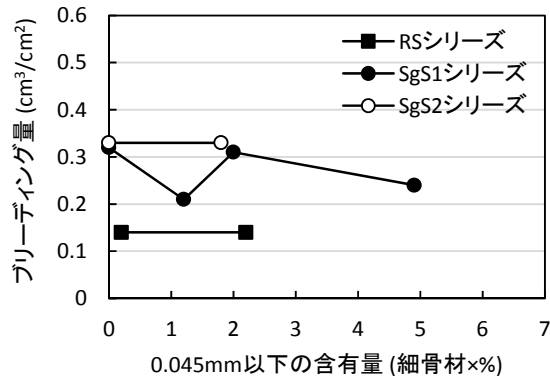


図 5.19 0.045mm 以下の含有量とブリーディング量の関係

## (2) 圧縮強度およびヤング係数

圧縮強度試験結果を図 5.20、ヤング係数試験結果を図 5.21 に示す。高炉スラグ細骨材未調整品(SgS1, SgS2)は、大井川産陸砂(RS)と比較して、圧縮強度は材齢 7 日では同等かやや低いが長期では高い。また、ヤング係数は全材齢において RS よりも高い。この傾向は既往の研究<sup>6)</sup>と同様である。

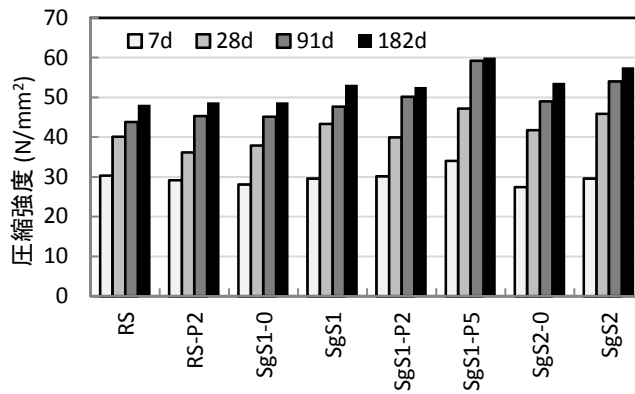


図 5.20 圧縮強度試験結果

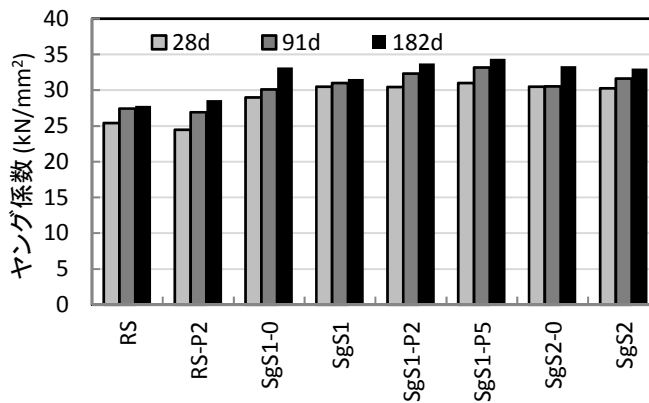


図 5.21 ヤング係数試験結果

0.045mm以下の粒径の含有量と圧縮強度の関係を図5.22に示す。高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、0.045mm以下の含有量の増加にともない圧縮強度が直線的に増加し、SgS1シリーズにおいては、0.045mm以下を含まないSgS1-0に対して、0.045mm以下の含有量2.0%で約11%、4.9%で約31%の大幅な強度増進効果を示した。SgS2シリーズにおいてもSgS2は、SgS2-0に対して0.045mm以下の含有量1.8%で約10%の強度増進が認められ、高炉スラグ細骨材の産地が異なっても同様の効果が得られることがわかる。0.045mm以下の粒径でこれほど顕著な効果が現れた理由は、高炉スラグ細骨材は、小粒径になるにつれて高炉スラグ微粉末の特性に近づいていくが、0.045mm程度以下の粒径では、比表面積が大きく、より高炉スラグ微粉末に近い特性を示すため、少量の添加でも直線的に強度増進したと考えられる。0.045mm以下の粒径の含有量とヤング係数の関係を図5.23に示す。高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、0.045mm以下の含有量の増加にともないヤング係数が増加しているが、圧縮強度ほど顕著ではない。SgS1シリーズおよびSgS2シリーズのいずれも同様の傾向を示しており、産地による違いは認められない。RSシリーズでは、高炉スラグ微粉末(SgP)を2%添加することにより圧縮強度、ヤング係数ともに若干増加したが、顕著な増進効果は認められない。

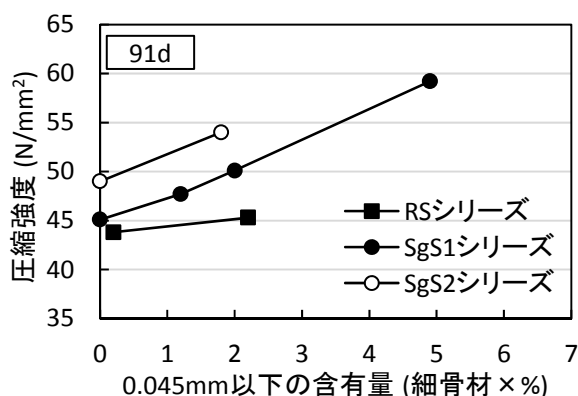


図 5.22 0.045mm 以下の含有量と圧縮強度の関係

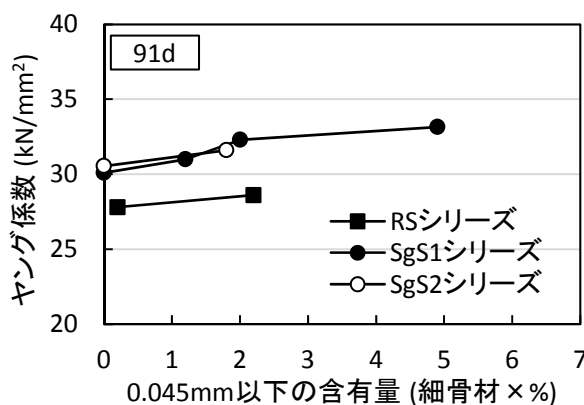


図 5.23 0.045mm 以下の含有量とヤング係数の関係

### (3) 乾燥収縮

乾燥収縮試験結果を図 5.24 および図 5.25 に示す。高炉スラグ細骨材未調整品(SgS1, SgS2)は、大井川産陸砂(RS)に比べて、それぞれ乾燥収縮ひずみが約 24%および約 27%、質量減少率が約 22%および約 29%小さく、既往の研究<sup>6)</sup>と同様の傾向である。

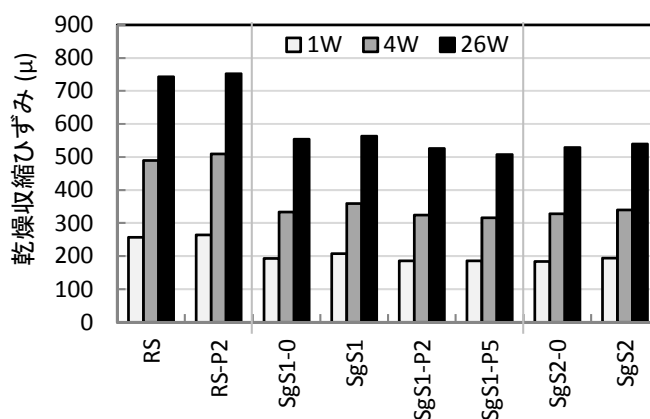


図 5.24 乾燥収縮試験結果(乾燥収縮ひずみ)

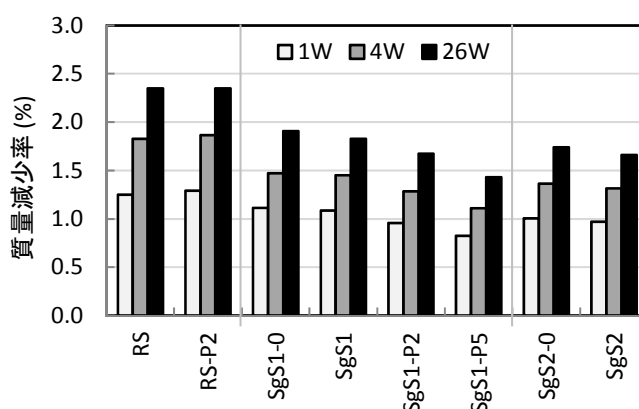


図 5.25 乾燥収縮試験結果(質量減少率)

0.045mm 以下の粒径の含有量と乾燥収縮ひずみの関係を、図 5.26 に示す。高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、0.045mm 以下が 2%程度までの範囲では、0.045mm 以下を含まない SgS1-0 に対して、乾燥収縮ひずみの低減はほとんど見られない。2%を超えると若干低減する傾向を示したが、4.9%でも約 8%の低減である。0.045mm 以下の粒径による乾燥収縮低減効果が圧縮強度増進効果に比べて小さい理由は、高炉スラグ細骨材が粒径によらず、乾燥収縮ひずみを低減する性質を持ち、特に本実験では細骨材として 100%使用しているため、その効果がより明確に現れ、0.045mm 以下の粒径の効果が 5%程度の添加では見えにくかったからではないかと推察される。0.045mm 以下の粒径の含有量と質量減少率の関係を、図 5.27 に示す。高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、0.045mm 以下の含有量の増加にともない、質量減少率が若干減少しており、0.045mm 以下の粒径の

潜在水硬性による緻密化の効果が認められる。RS シリーズでは高炉スラグ微粉末(SgP)を2%添加しても、乾燥収縮ひずみや質量減少率の低減効果は認められない。

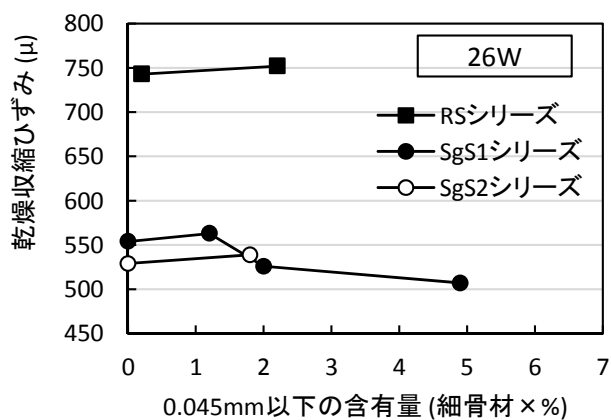


図 5.26 0.045mm 以下の含有量と乾燥収縮ひずみの関係

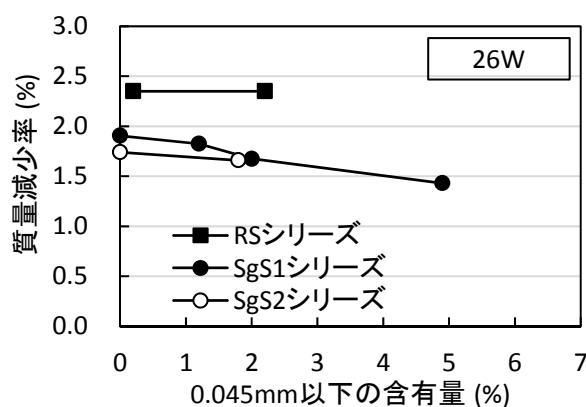


図 5.27 0.045mm 以下の含有量と質量減少率の関係

#### (4) 中性化抵抗性

0.045mm 以下の粒径の含有量と中性化深さの関係を、図 5.28 に示す。中性化深さはいずれも 15mm 以下であり、全体的に小さい値であった。高炉スラグ細骨材未調整品(SgS1, SgS2)は、大井川産陸砂(RS)と比較すると中性化深さが若干小さく、既往の研究<sup>6)</sup>と同様の傾向である。高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、0.045mm 以下の含有量の増加にともない、0.045mm 以下を含まない SgS1-0 に対して、中性化深さがわずかに減少しているが、高炉スラグ細骨材を使用することにより、もともと中性化が低減されるため、0.045mm 以下の粒径の少量の添加ではその効果が見えにくいと考えられる。RS シリーズでは、高炉スラグ微粉末(SgP)を2%添加しても、中性化深さに与える影響は認められない。

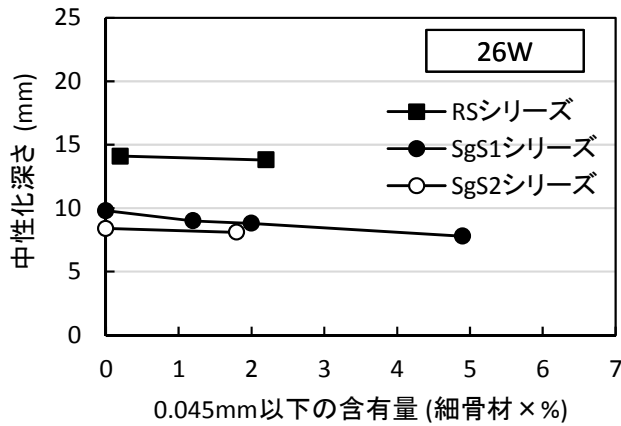


図 5.28 0.045mm 以下の含有量と中性化深さの関係

### (5) 透気係数

透気試験結果を図 5.29 に示す。高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、大井川産陸砂(RS)と比較すると、透気係数が 1/6～1/3 程度と小さい傾向にあるが、0.045 mm 以下の粒径の含有量の増加による透気係数の低減効果は顕著ではない。0.045mm 以下の粒径による透気係数の低減効果が圧縮強度増進効果に比べて小さい理由は、高炉スラグ細骨材は、粒径によらず粒子表面が潜在水硬性により緻密化し、透気係数を低減するため、0.045mm 以下の粒径の 5%程度の添加では効果が見えにくいからと推察される。RS シリーズについても、高炉スラグ微粉末(SgP)2%添加による緻密化の効果は認められない。

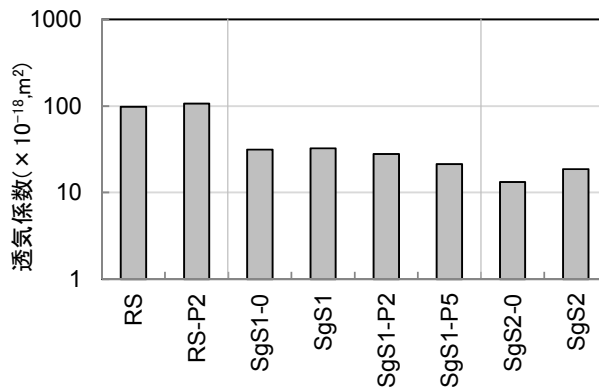


図 5.29 透気試験結果

### 5.4.3 まとめ

高炉スラグ細骨材の 0.045mm 以下の粒径が、高炉スラグ細骨材を単独使用したコンクリートの硬化物性与に与える影響を検討するとともに、0.045mm 以下の粒径の含有量が約 2% および約 5%となるように、高炉スラグ微粉末を添加して、コンクリートのフレッシュ性



状の改善および、強度増進、乾燥収縮低減および中性化抑制などの硬化物性をさらに向上させる効果について確認した結果、以下の知見を得た。

- a) 0.045mm 以下の粒径を 5%程度とすることによりブリーディングは減少するが、天然細骨材と同程度とするためにはさらに多く添加する必要がある。
- b) 0.045mm 以下の含有量の増加にともない圧縮強度は直線的に増加し、0.045mm 以下の含有量約 2%で約 11%、約 5%で約 31%圧縮強度が増進する。
- c) 0.045mm 以下の粒径の含有量の増加にともない乾燥収縮ひずみ、質量減少率、中性化深さおよび透気係数は低減する。しかし、高炉スラグ細骨材は未調整や 0.045mm 以下を含まない場合でもこれらの低減効果が高いため、0.045mm 以下の粒径 5%程度までの範囲ではその効果は顕著に現れない。

## 5.5 まとめ

高炉スラグ細骨材がコンクリートの硬化物性を向上させるメカニズムを明らかにすることを目的として、高炉スラグ細骨材の粒径や微粒分に着目し、高炉スラグ細骨材の粒径や微粒分が高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの各種硬化物性に与える影響について検討した。また、高炉スラグ細骨材の微粒分を想定して、高炉スラグ微粉末を、微粒分量(0.045mm 以下の粒径)として約 2%および約 5%となるように添加した場合のコンクリートのフレッシュ性状の改善および、強度増進、乾燥収縮低減および中性化抑制等の硬化物性向上効果を確認した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 高炉スラグ細骨材の粒径が小さいほど、モルタルの圧縮強度は高く、乾燥収縮ひずみは小さい傾向にあり、これらの特性は、特に粒径 0.045mm 程度より小さい粒径で顕著となる。その理由としては、粒径が小さくなることによって潜在水硬性による緻密化の効果がより強く現れるためと推察される。
- (2) 0.045mm 以下の粒径を 5%程度とすることによりブリーディングは減少するが、天然細骨材と同程度とするためにはさらに多く添加する必要がある。
- (3) 高炉スラグ細骨材の 0.045mm 程度以下の粒径の含有量の増加にともない、コンクリートの圧縮強度は直線的に増加し、0.045mm 程度以下を含まない場合に対して、約 2%で約 11%、約 5%で約 31%圧縮強度が増進する。
- (4) 0.045mm 程度以下の粒径の含有量の増加にともないコンクリートの乾燥収縮ひずみは低減し、中性化深さは減少する。しかし、高炉スラグ細骨材は未調整や 0.045mm 程度以下を含まない場合でも、乾燥収縮低減効果が高く、中性化も抑制するため、0.045mm 程度以下の粒径 5%程度までの範囲ではその効果は顕著に現れない。

## 参考文献

- 1) 齊藤和秀, 吉田亮, 吉澤千秋, 梅原秀哲: 高炉スラグ細骨材のコンクリートの硬化物性向上効果に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.72, No.4, pp.355-367, 2016
- 2) 鵜飼貴史, 齊藤和秀, 吉田亮, 梅原秀哲: 骨材の寸法および種類がセメント硬化体の乾燥収縮に及ぼす影響に関する研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-154, pp.307-308, 2010
- 3) 内川浩, 羽原俊祐, 沢木大介: 硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度の関係の検討, コンクリート工学論文集, 第 4 巻 2 号, pp.1-8, 1993.
- 4) 長滝重義, 米山紘一, 高田誠: 高炉スラグ水砕砂を用いたコンクリートの諸性状について, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.1, pp.193-196, 1979
- 5) 長滝重義, 高田誠, 河野広隆: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの体積変化, セメント技術年報, No.31, pp.148-151, 1977
- 6) 齊藤和秀, 木之下光男, 伊原俊樹, 吉澤千秋: 高炉スラグ細骨材を使用した耐久性向上コンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.139-144, 2009

## 第6章 高炉スラグ細骨材と各種微粉末を用いたコンクリートの特性<sup>1)</sup>

### 6.1 概要

既往の研究により，高炉スラグ細骨材はガラス質で粒形が角ばっていることや単粒度であること，天然骨材に比べて密度が大きいことなどにより，コンクリートの単位水量やブリーディングが増加したり，凍結融解抵抗性が低下することが指摘されている．第3章では， $W/C=15\sim 45\%$ の範囲で，高性能 AE 減水剤を用いることにより，高炉スラグ細骨材を50～100%の置換率で使用してもブリーディングが少なく，十分な凍結融解抵抗性のあるコンクリートとすることができることを確認した．しかし，水セメント比が50%を超える領域では，高性能 AE 減水剤の使用領域から外れてくるため，単位水量やブリーディング増加に対する別の対策が必要である．一方，第5章においては，高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの各種物性に対する粒径や微粒分の影響を検討した結果，微粒分のうち特に0.045mm以下の粒径がブリーディングの低減に効果があることが明らかとなっているが，第5章では約5%までの添加量での検討であり，顕著な結果は得られなかった．

そこで，第6章では，高炉スラグ細骨材を用いた時の単位水量の増加とブリーディングの増大を改善するためのもう1つの対策として，高炉スラグ細骨材と各種微粉末の組み合わせに着目し，水セメント比が60%で高炉スラグ細骨材を75%使用したコンクリートを対象として，高炉スラグ細骨材の一部を高炉スラグ微粉末，フライアッシュ，石灰石微粉末およびシリカサンドの4種類の微粉末に置換した場合の，フレッシュ性状の改善やブリーディング低減の効果を検証した．併せて，これらの微粉末による長期強度増進，乾燥収縮低減などの硬化物性の向上の効果についても確認した．

### 6.2 実験概要

#### (1) 使用材料

高炉スラグ細骨材は JIS A 5011-1 コンクリート用スラグ骨材 第1部：高炉スラグ骨材に適合するものを使用した．フライアッシュは，JIS A 6201 コンクリート用フライアッシュフライアッシュⅡ種に適合するものを使用した．石灰石微粉末は，日本コンクリート工学会 石灰石微粉末研究委員会 コンクリート用石灰石微粉末品質規格(案)に適合するものを使用した．高炉スラグ微粉末は，JIS A 6206 コンクリート用高炉スラグ微粉末に適合し，高炉スラグ細骨材と同じ鉄鋼メーカーの異なる製鉄所で製造されたものを使用した．シリカサンドは瀬戸産乾燥シリカを使用した．各使用材料の産地，成分および物性を表 6.1 に示す．

表 6.1 使用材料

種類	記号	産地・性質・成分
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度 3.16 g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S	大井川水系産陸砂(表乾密度 2.59 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.94%, F.M.3.01)
	SgS	高炉スラグ細骨材(区分 BFS5, 表乾密度 2.72 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.78%, F.M.2.56)
粗骨材	G	岡崎産碎石(表乾密度 2.66 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.78%, 実積率 60.0%)
混和材	FA	フライアッシュ(比表面積 4420 cm <sup>2</sup> /g, 密度 2.32 g/cm <sup>3</sup> )
	LP	石灰石微粉末(比表面積 5000 cm <sup>2</sup> /g, 密度 2.71 g/cm <sup>3</sup> )
	SgP	高炉スラグ微粉末(比表面積 4000 cm <sup>2</sup> /g, 密度 2.91 g/cm <sup>3</sup> , 石こう無添加)
	SS	シリカサンド(密度 2.65 g/cm <sup>3</sup> )
混和剤	HP	AE 減水剤標準形 I 種 チューポール EX60

## (2) コンクリートの配合

コンクリートの配合は、細骨材として大井川産陸砂を 100%使用した normal に対して、75%を高炉スラグ細骨材で容積置換した SgS75 を基準とした。また、各種微粉末は高炉スラグ細骨材の一部として使用し、FA, SgP, SS はそれぞれ 5, 10, 15%の割合で、LP, C は 10%の割合で高炉スラグ細骨材容積に対して置換した。微粉末の添加により水結合材比が小さくなる配合との比較のため、C を細骨材に置換して用いた配合も試験した。同様に、水粉体比が小さくなる配合との比較のため、反応性のない微粉末として SS を用いた配合を設定した。目標スランプおよび目標空気量をそれぞれ 12±1 cm, 5.5±0.5%とした。AE 減水剤の添加量を C×1.0%に固定し、目標スランプが得られるよう単位水量を変化させた。コンクリートの配合を表 6.2 に示す。

表 6.2 コンクリートの配合

種別	W/C (%)	W/B (%)	W/P (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )							
				W	C	S	Sg	混和材	G	合計	
normal	60.0	60.0	60.0	161	268	904	0	0	958	2291	
SgS75		60.0	60.0	177	295	210	664	0	958	2304	
FA5		54.5	54.5	168	280	243	631	28	958	2308	
FA10		49.5	49.5	158	263	285	598	56	958	2318	
FA15		44.9	44.9	154	257	300	563	86	958	2318	
LP10		60.0	48.5	166	277	251	598	65	958	2315	
SgP5		53.3	53.3	169	282	241	631	35	958	2316	
SgP10		48.0	48.0	168	280	243	598	70	958	2317	
SgP15		43.3	43.3	167	278	249	563	108	958	2323	
SS5		60.0	54.0	175	292	218	631	32	958	2306	
SS10		60.0	49.2	174	290	220	598	64	958	2304	
SS15		60.0	44.9	175	292	218	563	98	958	2304	
C10		47.0	47.0	47.0	168	280	243	598	76	958	2323

### (3) 試験方法

練混ぜは、強制パン型ミキサ（容量 100L）を用いて行い、全材料投入後 90 秒間練り混ぜ、排出した。コンクリート温度は 20℃±2℃、練り量は 70L とした。試験項目と試験方法を表 6.3 に示す。

表 6.3 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
ブリーディング量	JIS A 1123
凝結時間	JIS A 1147
圧縮強度	JIS A 1108, 標準養生, 材齢 7,28,91,182 日,1,年
ヤング係数	JIS A 1149
乾燥収縮	JIS A 1129-3 : 24 時間後脱型, 材齢 7 日まで水中養生後基長し,20℃,60%RH で乾燥期間 26 週まで測定
凍結融解	JIS A 1148
促進中性化	JIS A 1153

## 6.3 実験結果および考察

### (1) フレッシュコンクリートの性状

コンクリートのフレッシュ性状試験結果を表 6.4 および図 6.1 に示す。

表 6.4 フレッシュコンクリートの試験結果

種別	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)	ブリーディ ング率 (%)
normal	161	13.5	5.9	19	4.7
SgS75	177	12.0	5.0	19	19.9
FA5	168	13.5	5.9	19	14.1
FA10	158	11.5	5.6	19	8.2
FA15	154	13.0	5.0	19	5.7
LP10	166	13.5	5.1	19	9.0
SgP5	169	13.0	6.0	19	13.6
SgP10	168	11.0	5.0	19	9.6
SgP15	167	14.0	6.0	19	9.0
SS5	175	13.5	5.4	19	13.6
SS10	174	13.5	5.8	19	8.5
SS15	175	14.0	5.4	19	8.0
C10	168	14.0	5.3	19	10.3

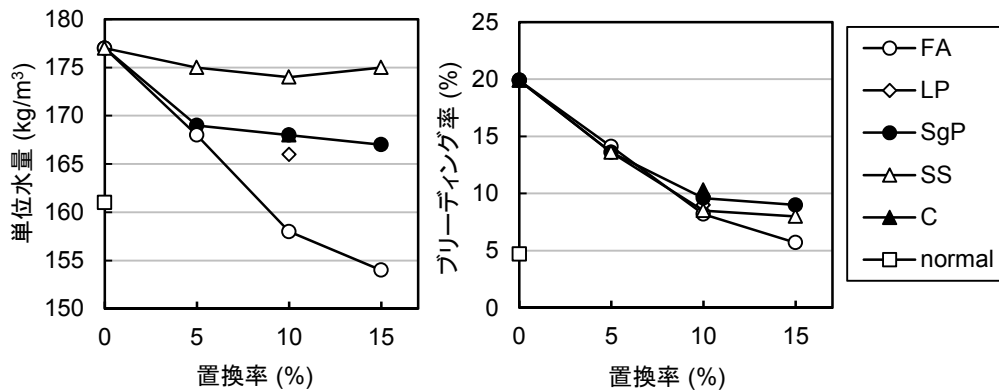


図 6.1 フレッシュコンクリートの試験結果

#### a) 単位水量

目標スランプを得るための単位水量は、normal の配合で  $161 \text{ kg/m}^3$ 、SgS75 で  $177 \text{ kg/m}^3$  であり、高炉スラグ細骨材の使用により  $16 \text{ kg/m}^3$  増加した。これは、既往の研究<sup>2)</sup>と同様の傾向である。微粉末を添加した配合では、微粉末の種類によらず、置換率の増加にともない単位水量は減少したが、微粉末の種類ごとに傾向が異なり、SS では置換率 5%以上ではほとんど減少しない。これは SS の平均粒径が  $60\mu\text{m}$  であり、他の微粉末よりも粒径が大きいためと考えられる。SgP では、置換率 5%を超えるとその減少の程度は小さくなった。FA では、置換率 15%まで直線的に単位水量が減少し、最大で  $25 \text{ kg/m}^3$  程度減少した。

#### b) ブリーディング

天然骨材を使用した normal のブリーディング率が 4.7%であるのに対して、高炉スラグ細骨材を使用した SgS75 のブリーディング率は約 4 倍の 19.9%であった。微粉末を置換した配合では、置換率の増加にともないブリーディングは減少し、いずれも置換率 10%まで直線的に減少した。置換率 15%では微粉末の種類により傾向が異なり、特に FA のブリーディング低減効果が高く、normal とほぼ同等のブリーディング率となった。

### (2) 硬化コンクリートの性状

硬化コンクリートの試験結果を表 6.5 に示す。

#### a) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図 6.2 に、微粉末の置換率と圧縮強度の関係を図 6.3 示す。微粉末無添加の normal と SgS75 を比較すると、SgS75 は normal に比べて初期強度は低いが、長期強度では同等以上となっている。これは高炉スラグ細骨材の潜在水硬性により、長期に渡り細骨材周りの組織が緻密化したためと考えられる。微粉末を添加した配合では、いずれも置換率が高いほど強度が高い傾向にあるが、反応性がほとんどない LP と SS は強度増加の程度は小さい。一方、FA と SgP は反応性を有するため、置換率増加にともなう強度増加の効果が大きく、置換率 10%では、材齢 7 日の時点で normal と同程度以上の圧縮強度

が得られている。また、FA と SgP は長期に渡って水和が進行するため長期強度の伸びが大きく、特に SgP の置換率 15%では、材齢 91 日で SgS75 に対して強度が約 1.4 倍となった。SgP と FA を結合材と考えた場合に水結合材比がほぼ同程度となる SgP10、FA10 および C10 を比較すると、材齢 28 日ではいずれもほぼ同等の強度であるが、材齢 182 日では明らかに SgP10 や FA10 の方が C10 よりも高い。このことから、SgP は潜在水硬性により、FA はポズラン反応により長期に渡って強度を増進することが確認できる。

表 6.5 硬化コンクリートの試験結果

種別	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )					乾燥収縮ひずみ(μ)				気泡間隔係数(mm)	凍結融解耐久性指数(%)	中性化深さ (mm)
	7d	28d	91d	182d	365d	1W	4W	13W	26W			
normal	26.2	34.0	36.3	40.2	40.8	231	483	664	691	0.251	84	15.4
SgS75	20.5	27.5	39.2	41.2	42.3	172	344	501	537	0.383	17	9.6
FA5	23.0	31.1	40.9	49.4	50.1	179	351	497	519	0.299	52	11.3
FA10	25.8	35.0	47.0	56.1	61.0	188	374	504	523	0.289	69	9.7
FA15	28.3	39.7	51.2	61.2	67.0	178	368	491	509	0.316	57	10.1
LP10	24.3	36.5	41.6	46.3	49.1	161	357	523	553	0.351	49	11.0
SgP5	25.1	34.1	41.1	47.0	52.2	181	359	510	543	0.337	47	7.8
SgP10	28.7	44.8	53.5	58.0	64.2	179	352	493	528	0.390	61	3.4
SgP15	29.1	44.4	56.1	59.5	65.4	187	359	486	517	0.241	91	2.7
SS5	22.8	30.5	38.3	43.8	46.1	150	337	497	532	0.381	35	8.6
SS10	23.5	31.1	39.6	43.0	46.4	157	347	512	544	0.350	42	9.8
SS15	23.3	31.6	39.2	43.0	48.1	168	372	543	572	0.280	83	11.0
C10	32.3	43.2	49.8	52.3	55.3	173	355	506	538	0.351	88	1.6

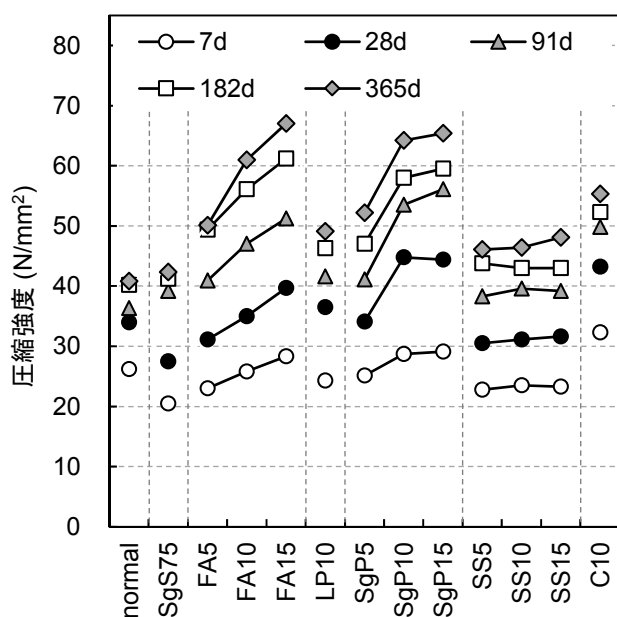


図 6.2 圧縮強度試験結果

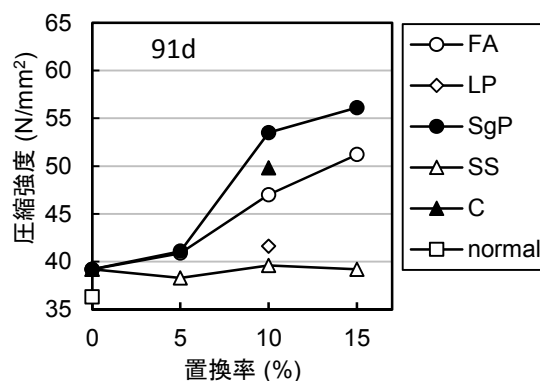


図 6.3 微粉末の置換率と圧縮強度の関係

b) 乾燥収縮

乾燥収縮試験結果および質量減少率試験結果を図 6.4 に、微粉末の置換率と乾燥収縮ひずみの関係を図 6.5 に、微粉末の置換率と質量減少率の関係を図 6.6 に示す。微粉末未添加の normal と SgS75 を比較すると、乾燥期間 26 週において、SgS75 は normal に比べて乾燥収縮ひずみが約  $150 \mu$ 、低減率で約 22% 小さく、既往の研究<sup>3)</sup>と同様の傾向である。微粉末を添加した配合では、微粉末の種類により傾向が異なる。反応性のある SgP と FA は、添加することにより乾燥収縮ひずみが低減したが、その低減効果は、置換率 15% においても SgP は約  $20 \mu$ 、FA は約  $30 \mu$  程度であり、normal に対する SgS75 の乾燥収縮低減効果に比べて小さい。これは、SgS や FA は反応により組織を緻密化し乾燥収縮を低減するが、

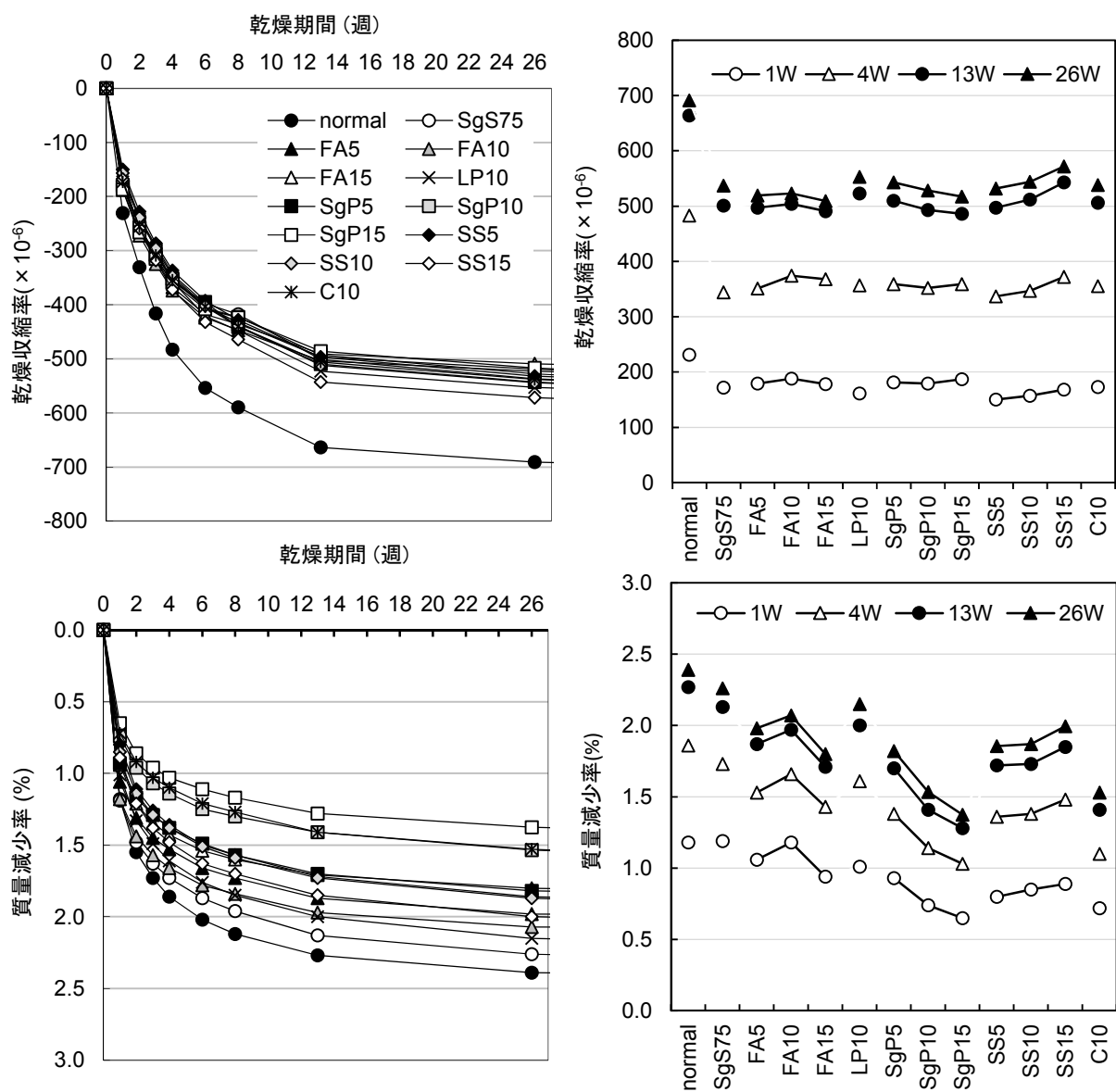


図 6.4 乾燥収縮，質量減少率試験結果



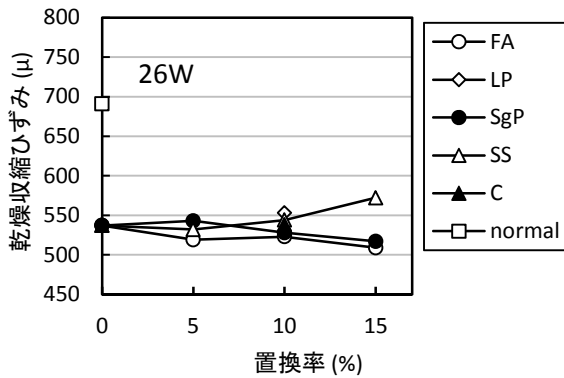


図 6.5 微粉末の置換率と乾燥収縮ひずみの関係

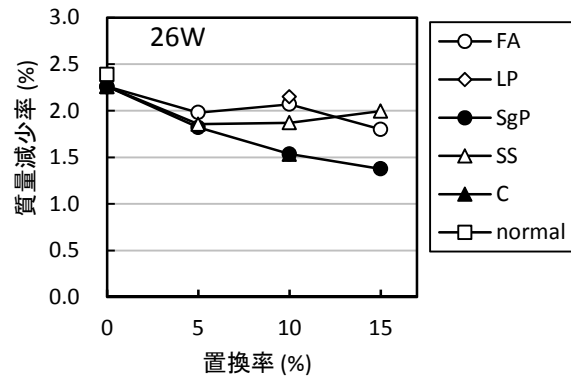


図 6.6 微粉末の置換率と質量減少率の関係

高炉スラグ細骨材添加の効果(ペーストの収縮拘束や骨材粒子表面の緻密化など)により既に **normal** に対して乾燥収縮が低減しているため、15%程度の置換率では、さらに大きな効果が得られなかったものと考えられる。一方、反応性がほとんどない **SS** と **LP** は添加することにより乾燥収縮ひずみが若干増大した。これは、**SS** や **LP** を置換して添加することで、高炉スラグ細骨材の緻密化の効果が薄れたためと考えられる。

質量減少率については、いずれの微粉末においても、添加することにより若干小さい傾向にある。特に反応性のある **SgP** は置換率の増加とともに質量減少率が小さくなったが、その程度は小さい。その他の微粉末については明確な傾向は認められなかった。

### c) 凍結融解抵抗性

凍結融解試験結果および質量減少率試験結果を図 6.7 に示す。微粉末無添加の **normal** と **SgS75** を比較すると、耐久性指数は、**normal** が 84%であるのに対して **SgS75** は 17%であり、高炉スラグ細骨材を 75%置換しているため凍結融解抵抗性が低い。これは既往の研究<sup>4)</sup>と同様の傾向である。微粉末を添加した配合では、いずれも **SgS75** に比べて凍結融解抵抗性は向上し、置換率が高いほど耐久性指数は概ね高い傾向を示した。特に反応性のある **SgP** と **FA** の効果が高いが、耐久性指数を 60%以上とするためには、いずれも 10%以上添加する必要がある。ここで、**FA15** の耐久性指数が **FA10** よりも小さい値となった理由については、**FA15** の空気量(表 6.4 参照)が若干少なく、気泡間隔係数(表 6.5 参照)が若干大きいためであると考えられる。一般にコンクリートの凍結融解抵抗性には、気泡の質やブリーディング性状が影響することが報告<sup>5)</sup>されているが、本実験で微粉末を添加することにより凍結融解抵抗性が向上した理由については、微粉末の添加により単位水量やブリーディングが低減したこと、および反応性のある **SgP** や **FA** では、反応による組織の緻密化や強度増進などが影響していると考えられる。

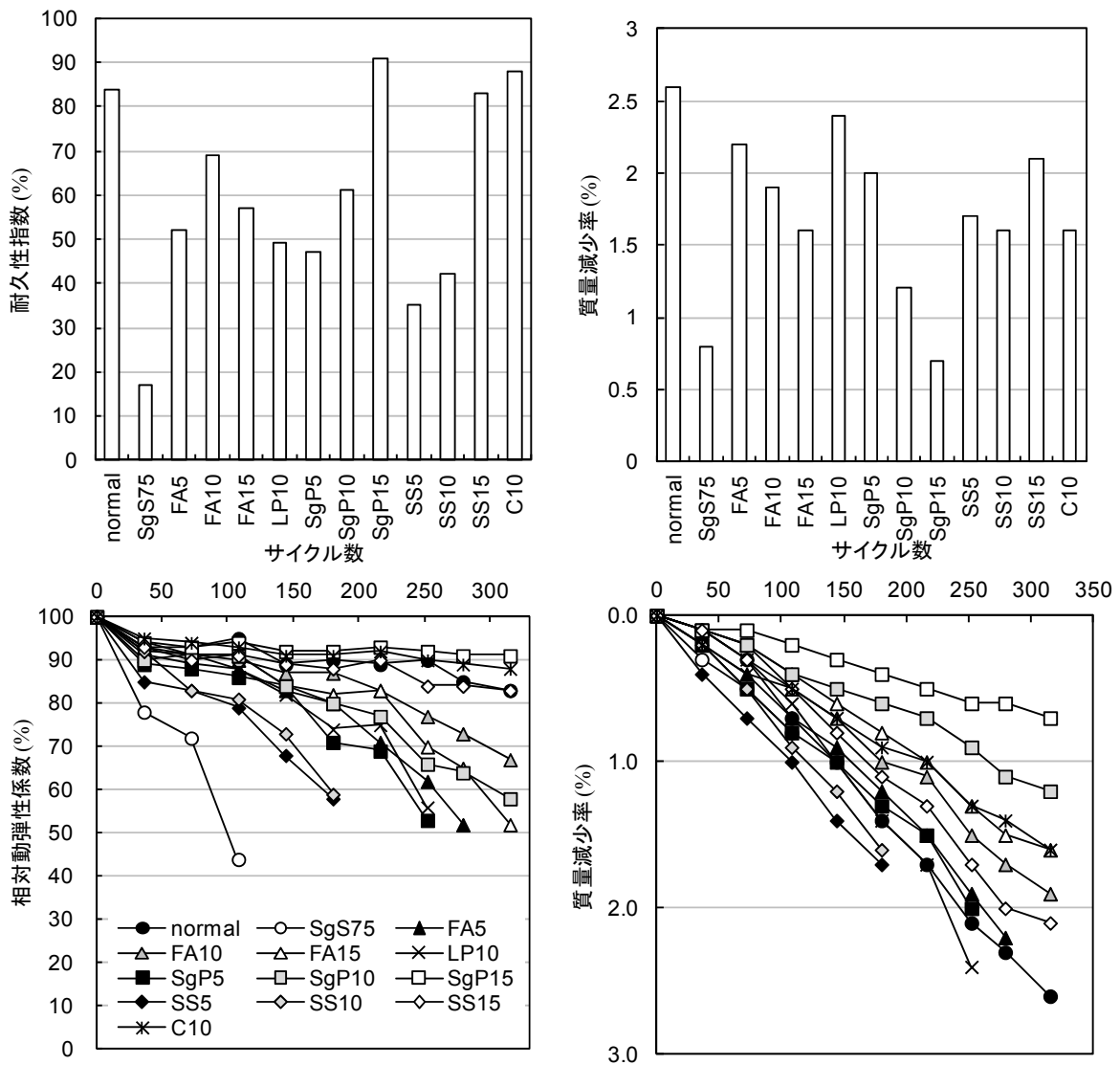


図 6.7 凍結融解，質量減少率試験結果

#### d) 中性化抵抗性

促進中性化試験結果を図 6.8 に，微粉末の置換率と中性化深さの関係を図 6.9 に示す。微粉末無添加の normal と SgS75 を比較すると，SgS75 は normal に比べて単位水量が大きいにも関わらず中性化深さが小さい。これは，既往の研究<sup>9)</sup>と同様の傾向であり，その理由としては，高炉スラグ細骨材は骨材粒子表面の潜在水硬性により組織が緻密化し，炭酸ガスの侵入を抑制したためと考えられる。微粉末を添加した配合では，FA，LP，SS は，置換率によらず中性化深さが SgS75 とほぼ同等の値であり，中性化抑制効果は認められない。一方，SgP は置換率の増加にともない中性化深さが減少した。これは，SgP の潜在水硬性による組織の緻密化や強度増進などが影響していると考えられる。SgP と同様に反応性のある FA に中性化抑制効果が認められなかった理由については，反応速度と促進中性

化試験の試験時期が関係しており、反応の遅い FA は試験時期に緻密化の効果が発揮できなかったためと考えられる。

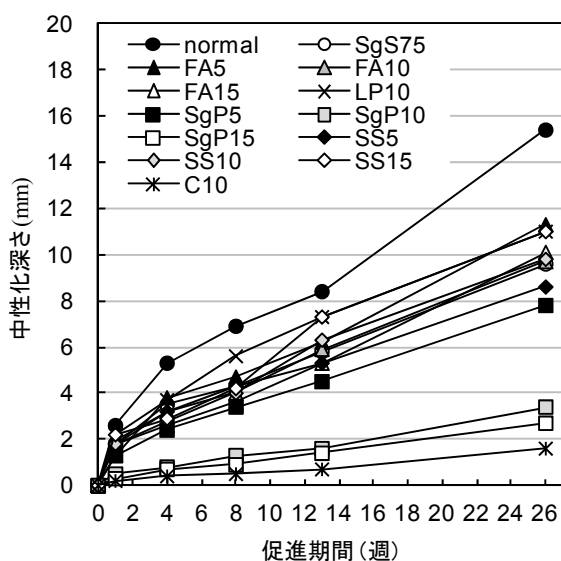


図 6.8 促進中性化試験結果

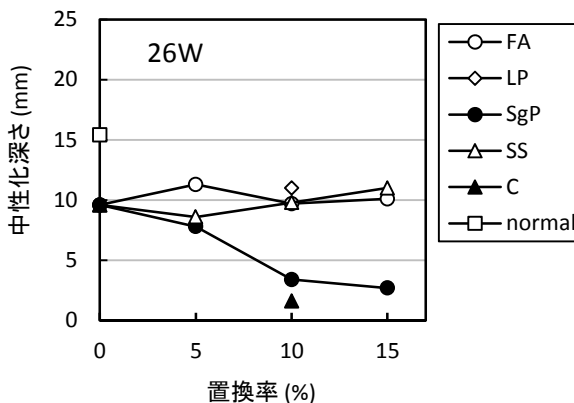


図 6.9 微粉末の置換率と中性化深さの関係

#### 6.4 まとめ

水セメント比が 60%で高炉スラグ細骨材を細骨材全体容積の 75%使用したコンクリートに対して、高炉スラグ細骨材の一部を高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、石灰石微粉末およびシリカサンドの 4 種類の微粉末に置換した場合の、フレッシュ性状の改善やブリーディング低減の効果を検討した。併せて、これらの微粉末による長期強度増進、乾燥収縮低減などの硬化物性の向上の効果についても確認した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 高炉スラグ微粉末、フライアッシュおよび石灰石微粉末は置換率の増加にともない単位水量が減少するが、シリカサンドは置換率を変化させてもほとんど変化しない。
- (2) いずれの微粉末においても置換率 10%まで直線的にブリーディングが低減し、無置換に対して約 60%の低減効果が得られる。置換率 15%では微粉末の種類により異なり、ブリーディング率で数%程度フライアッシュの低減効果が高い。
- (3) 硬化物性向上の効果については、微粉末の反応性の有無により傾向が異なる。圧縮強度については、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末による長期強度増進が顕著となる。乾燥収縮については、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の添加により乾燥収縮ひずみは低減する傾向にあるが、その程度は小さい。中性化については、高炉スラグ微粉末に中性化抑制効果が認められたが、その他の微粉末には効果は認められない。
- (4) いずれの微粉末においても、添加することにより無置換に比べて凍結融解抵抗性は向上する。しかし、耐久性指数 60%を満足するためには、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュは置換率 10%以上、シリカサンドは 15%以上添加する必要がある。

## 参考文献

- 1) 中村好裕, 齊藤和秀, 吉澤千秋, 吉田亮: 各種微粉末を添加した高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのフレッシュおよび硬化物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.535-540, 2015
- 2) 植田紳治: 高炉水砕砂を使用したコンクリートの諸性状に関する実験研究, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.1, pp.197-200, 1979
- 3) 齊藤和秀, 木之下光男, 伊原俊樹, 吉澤千秋: 高炉スラグ細骨材を使用した耐久性向上コンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.139-144, 2009
- 4) 小林正几, 田中弘: 高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートの気泡組織について, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.2, pp.41-44, 1980
- 5) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 作榮二郎: コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすブリーディングの影響に関する一考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.2, pp.59-69, 2012
- 6) 依田彰彦: 高炉スラグを細骨材としたコンクリートの性質について, セメント技術年報, No.34, pp.133-136, 1980

## 第7章 結論

本研究では、高炉スラグ細骨材のさらなる利用拡大を目標とし、高炉スラグ細骨材をコンクリート用骨材として使用した時の課題である単位水量の増加とブリーディングの増大を、高炉スラグ細骨材と高性能 AE 減水剤および高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどの混和材料を組み合わせることで解決することを検討した。また、高炉スラグ細骨材が持つ長期強度増進や乾燥収縮低減などの優れた特性を、収縮低減剤および高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、石灰石微粉末、シリカサンドなどの混和材料を組み合わせることによってさらに引き出し、高炉スラグ細骨材の付加価値を高めることを検討した。本研究で得られた結論は次のとおりである。

### (1) 高性能 AE 減水剤によるブリーディング抑制について

高性能 AE 減水剤を用いることによるブリーディングの抑制効果を検証した。その結果、高性能 AE 減水剤を用いて高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの単位水量を普通骨材コンクリートと同一とすることにより、W/C=45%では、高炉スラグ細骨材の置換率 50%まで、W/C=30%以下では置換率 100%までブリーディングの増大を抑制できること、および高炉スラグ細骨材に乾燥収縮低減、自己収縮低減および中性化抑制の効果があることが明らかになった。

### (2) 高炉スラグ細骨材の乾燥収縮低減メカニズムについて

高炉スラグ細骨材がコンクリートの乾燥収縮を低減する効果があることに着目し、そのメカニズムについて検討した。その結果、高炉スラグ細骨材の収縮低減メカニズムの1つは、高炉スラグ細骨材表面にゲーレンイト水和物が長期に渡って生成し緻密な水和層を形成することにより、乾燥収縮ひずみを増加させるポーラスな遷移帯の形成が少ないことと推察された。

### (3) 高炉スラグ細骨材と収縮低減剤を併用した場合の収縮低減効果について

高炉スラグ細骨材と収縮低減剤の2つの収縮低減性材料を併用し、凍結融解抵抗性も考慮して、それぞれ単独で用いるよりも大きな収縮低減効果を得ることを検討した。その結果、高炉スラグ細骨材と収縮低減剤は収縮低減のメカニズムが異なるため、高炉スラグ細骨材を普通骨材に置換率 50%で置換し、収縮低減剤  $6\text{kg/m}^3$  を併用することにより、これらを用いない場合に比べて、普通セメントでは最大で約 42%、高炉セメント B 種では最大で約 35%、乾燥収縮ひずみを低減できるが、凍結融解抵抗性を確保するためには空気量を高めに設定する必要があることが明らかになった。

#### (4) 高炉スラグ細骨材の粒径や微粒分がコンクリートの硬化物性に与える影響について

高炉スラグ細骨材がコンクリートの硬化物性を向上させるメカニズムを明らかにすることを目的として、高炉スラグ細骨材の粒径や微粒分がモルタルやコンクリートの各種硬化物性に与える影響について検討した。その結果、高炉スラグ細骨材は粒径が小さいほど、モルタルの圧縮強度は高く、乾燥収縮ひずみは小さい傾向にあり、この傾向は特に0.045mm程度以下の粒径で顕著となることがわかった。そこで、高炉スラグ細骨材の微粒分を想定して高炉スラグ微粉末を約2%および約5%となるように添加した場合のコンクリートのフレッシュ性状の改善、長期強度増進、乾燥収縮低減および中性化抑制の効果を確認した結果、①高炉スラグ微粉末を添加することにより、ブリーディングは減少するが、普通細骨材100%のコンクリートと同程度とするためにさらに多く添加する必要があること、②高炉スラグ微粉末を添加することにより、約2%で約11%、約5%で約31%圧縮強度が増進すること、③高炉スラグ微粉末を添加することにより、コンクリートの乾燥収縮ひずみは低減し、中性化深さは減少するが、5%程度の添加量ではこれらの効果は顕著に現れないことが明らかになった。

#### (5) 各種微粉末によるブリーディング抑制と硬化物性向上効果について

水セメント比が60%で高炉スラグ細骨材を75%使用したコンクリートを対象として、高炉スラグ細骨材の一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの各種微粉末に置換した場合の、単位水量やブリーディングの低減効果を検証した。その結果、高炉スラグ微粉末、フライアッシュおよび石灰石微粉末は、置換率の増加にともない単位水量が減少するが、シリカサンドには単位水量低減の効果はないこと、また、いずれの微粉末においても置換率10%で約60%のブリーディング低減効果が得られることが明らかになった。

さらに、各種微粉末を置換することによる長期強度増進、乾燥収縮低減などの硬化物性の向上の効果を確認した結果、①フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末による長期強度増進が顕著となること、②フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の添加により乾燥収縮ひずみは低減する傾向にあるが、その程度は小さいこと、③高炉スラグ微粉末に中性化抑制効果があること、④いずれの微粉末においても、添加することにより凍結融解抵抗性が向上するが、耐久性指数60%を満足するためには、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュは置換率10%以上、シリカサンドは15%以上添加する必要があることが明らかになった。

## 謝辞

本論文は、私が2009年から2016年にかけて実施した研究成果を取りまとめたものです。

名古屋工業大学大学院教授 梅原秀哲先生には、ご多忙の中、いつも熱心な御指導御鞭撻を賜りました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

名古屋工業大学大学院助教 吉田亮先生には、多くの実験、特にメカニズムの考察に必要な透気試験や空隙構造の測定に御協力頂き、さらに実験の考察や論文のとりまとめについても多くの助言を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

また、実験の実施にあたり、名古屋工業大学梅原研究室の皆様には御協力頂きました。特に中村好裕氏には高炉スラグ細骨材の粒径に関する実験で大変お世話になりました。心から感謝申し上げます。

JFE ミネラル(株) 吉澤千秋 博士には、本研究全般の実施にあたり、高炉スラグ細骨材のサンプルの御提供、骨材表面組織の分析等の御協力ならびに貴重な御助言・御意見を賜りました。心から御礼申し上げます。

竹本油脂(株) 竹本元泰 代表取締役社長、元竹本油脂(株) 柏木正和 元第三事業部長には学位取得の貴重な機会を与えて頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

元竹本油脂(株) 木之下光男 博士には、学位取得を勧めて頂きました。また、研究の遂行にあたって多くの貴重な助言を賜りました。心から御礼申し上げます。

竹本油脂(株) 青山晴洋 執行役員第三事業部長ならびに竹本油脂(株)営業技術グループ 原田健二グループリーダーには、上司として温かい励ましの御言葉を賜りました。心から感謝申し上げます。

本研究の実施にあたり、竹本油脂(株)第三事業部研究開発部コンクリートグループの皆様には多くのコンクリート実験に御協力頂きました。特に小林竜平氏には、膨大な実験や各種硬化物性の測定を実施して頂きました。ここに心から感謝申し上げます。

最後に、本論文の作成にあたり、多くの方々の御協力と御指導を賜りました。ここに改めて感謝の意を表します。

2017年3月 齊藤 和秀