

# 論文 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

中村 好裕<sup>\*1</sup>・齊藤 和秀<sup>\*2</sup>・吉澤 千秋<sup>\*3</sup>・吉田 亮<sup>\*4</sup>

**要旨:** 微粉末の添加が高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのフレッシュ性状や硬化性状に与える影響について検討を行った。本研究では、高炉スラグ細骨材を細骨材全体容積のうち 75%使用したコンクリートに対して、微粉末（フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、石灰石微粉末、シリカサンド）を 5, 10, 15%の割合で置換し、コンクリートの諸物性（フレッシュおよび硬化物性）を比較した。その結果、硬化物性には微粉末の反応性の有無に起因する違いが見られ、強度発現性、乾燥収縮抵抗性ではフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を添加した配合に、中性化抵抗性では高炉スラグ微粉末を添加した配合に優位性が確認できた。

**キーワード:** 高炉スラグ細骨材, 混和材, 単位水量, 硬化物性, フレッシュ性状

## 1. はじめに

近年、天然資源の枯渇化が社会的問題となっており、天然砂の採取が規制されていることから、コンクリート業界では、細骨材不足が問題となっている。そこで、従来から使用されてきた川砂、海砂などの代替として、産業副産物である高炉スラグ細骨材（以下、スラグ細骨材）が挙げられ、その有効利用を促進すべく様々な研究が行われている<sup>1),2)</sup>。高炉スラグは潜在水硬性を持つため、コンクリート用細骨材の一部として使用した場合には、コンクリートの乾燥収縮ひずみや自己収縮ひずみの低減、中性化の抑制、長期強度の増進といった性能改善の効果が期待できると報告されている<sup>3),4),5)</sup>。しかし、スラグ細骨材をはじめとする副産物骨材は、粒子形状や密度などの基礎的な特性が天然骨材とは異なることから、天然骨材を使用したコンクリートに比べてフレッシュ性状が悪化する（流動性の低下、ブリーディングの増加）という問題が生じている<sup>6)</sup>。とくに、流動性の低下に伴う単位水量の増加は、コンクリートの強度や耐久性などの品質を悪くする要因となることは明らかである。

本研究では、上述のスラグ細骨材使用における問題の改善策として、各種微粉末（フライアッシュ FA、石灰石微粉末 LSP、高炉スラグ微粉末 SgP、シリカサンド SS）を混和材として使用することで、フレッシュ性状の改善を試みることにした。さらに、微粉末の反応性による組織の緻密化で、硬化性状が向上することを期待し、圧縮強度、長さ変化、凍結融解、中性化についての検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

本研究では、目標空気量・スランプをそれぞれ  $5.5 \pm 0.5\%$ 、 $12 \pm 1 \text{ cm}$  と設定し、所定の空気量を得るための混和剤および単位水量を試練りによって決定した。

セメントは普通ポルトランドセメント(密度  $3.16 \text{ g/cm}^3$ 、記号 C)、細骨材は大井川産陸砂(表乾密度  $2.59 \text{ g/cm}^3$ 、吸水率  $1.94\%$ 、F.M. 3.01、記号 S)および高炉スラグ細骨材(表乾密度  $2.72 \text{ g/cm}^3$ 、吸水率  $0.80\%$ 、F.M. 2.56、記号 SgS)、粗骨材は岡崎産砕石(表乾密度  $2.66 \text{ g/cm}^3$ 、吸水率  $0.78\%$ 、記号 G)、混和材は石灰石微粉末(ブレン値  $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、密度  $2.71 \text{ g/cm}^3$ 、記号 LP)、フライアッシュ(ブレン値  $4420 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、密度  $2.32 \text{ g/cm}^3$ 、記号 FA)、高炉スラグ微粉末(ブレン値  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、密度  $2.91 \text{ g/cm}^3$ 、記号 SgP)およびシリカサンド(密度  $2.65 \text{ g/cm}^3$ 、記号 SS)、混和剤は AE 減水剤標準形、AE 調整剤および消泡剤を使用した。

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%をスラグ細骨材で置換した SgS75 を基準とした。また、各種微粉末は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減少する配合の比較として、混和材として C を用いた配合を設定した。同様に、水粉体比が減少する配合の比較として、非反応性微粉末 SS を用いた配合を設定した。コンクリートの配合を表-1 に示す。

### 2.2 各種試験概要

練り混ぜは、強制パン型ミキサ（容量 100L）を用い

\*1 名古屋工業大学大学院 創成シミュレーション工学専攻 (学生会員)

\*2 竹本油脂(株) 第三事業部 シニアマネージャー (正会員)

\*3 JFE ミネラル(株) 製鉄関連事業部 主任部員 博士(工学) (正会員)

\*4 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

供試体種別	W/C (%)	W/B (%)	W/P (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						合計
				W	C	S	SgS	混和材	G	
normal	60	60.0	60.0	161	268	904	0	0	958	2291
SgS75		60.0	60.0	177	295	210	664	0		2304
FA5		54.5	54.5	168	280	243	631	28		2308
FA10		49.5	49.5	158	263	285	598	56		2318
FA15		44.9	44.9	154	257	300	563	86		2318
LP10		60	48.5	166	277	251	598	65		2315
SgP5		53.3	53.3	169	282	241	631	35		2316
SgP10		48.0	48.0	168	280	243	598	70		2317
SgP15		43.3	43.3	167	278	249	563	108		2323
SS5		60	54.0	175	292	218	631	32		2306
SS10		60	49.2	174	290	220	598	64		2304
SS15		60	44.9	175	292	218	563	98		2304
C10		47	47	47.0	168	280	243	598		76

て行い、全材料投入後 90 秒間練り混ぜ、排出した。試験室内の温度は 20°C±2°C、練り量は 70L とした。

スランブは JIS A 1101、空気量は JIS A 1128、ブリーディング量は JIS A 1123 に準拠し、測定を行った。圧縮強度は JIS A 1108 に準拠し、標準養生を行った供試体で材齢 1, 4, 13, 26 週および 1 年の時点において試験を実施した。乾燥収縮は JIS A 1129-3 に準拠し、打設後 24 時間で脱型し、材齢 7 日まで標準養生を行った後に基長を測定した。その後、温度 20°C、R.H.60%の室内で乾燥材齢 26 週まで測定を行った。凍結融解試験、促進中性化試験はそれぞれ JIS A 1148、JIS A 1153 に準拠して実施した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 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-2 および図-1 に示す。

##### 3.1.1 単位水量

目標スランブを得るための単位水量は、normal の配合で 161 kg/m<sup>3</sup>、SgS75 では 177 kg/m<sup>3</sup> と、スラグ細骨材を使用することで 16 kg/m<sup>3</sup> 程度増加する結果となった。これは、既往の研究<sup>5)</sup>と一致した。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ている。微粉末の種類ごとに、置換率と単位水量の関係を見ていくと、SS では置換率 5%以上の配合において単位水量の減少がほとんど見られない。これは SS の平均粒径が 60μm であり、他の微粉末よりも粒径が大きいことによる影響であると考えられる。SgP では、置換率 5%までは、単位水量を大きく減少させるが、5%以上の置換ではその減少程度は小さくなっている。もっとも粒径の小さい FA では、置換率 15%まで直線的に単位水量は減少しており、本研究の範囲では最大で 25 kg/m<sup>3</sup> 程度まで減少させている。

#### 3.1.2 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、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においては、置換率の増加に伴いブリーディングは抑制され、置換率 10%までは直線的に減少する傾向が見られた。微粉末種類による違いは、置換率 15%において数%程度のブリーディング量の差として現れた。しかしいずれも、normal と比べるとブリーディング率は高くなる結果となった。

表-2 フレッシュコンクリートの試験結果

供試体種別	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	スランブ (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	19.3	4.7
SgS75	177	12.0	5.0	18.8	19.9
FA5	168	13.5	5.9	19.2	14.1
FA10	158	11.5	5.6	19.3	8.2
FA15	154	13.0	5.0	19.3	5.7
LP10	166	13.5	5.1	19.1	9.0
SgP5	169	13.0	6.0	19.3	13.6
SgP10	168	11.0	5.0	19.4	9.6
SgP15	167	14.0	6.0	19.4	9.0
SS5	175	13.5	5.4	19.3	13.6
SS10	174	13.5	5.8	19.3	8.5
SS15	175	14.0	5.4	19.3	8.0
C10	168	14.0	5.3	19.4	10.3

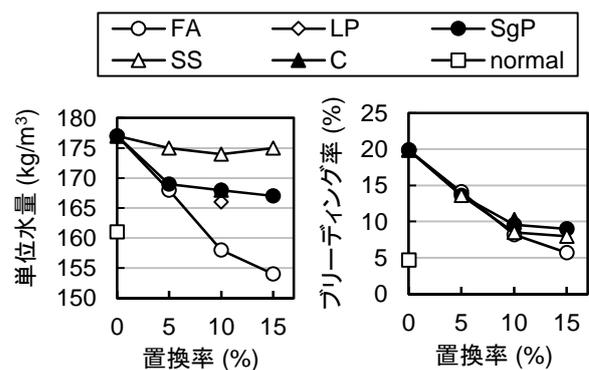


図-1 フレッシュコンクリートの試験結果

### 3.2 硬化コンクリートの物理的性状

前述のように、本研究の配合では微粉末の種類および細骨材に対する置換率の違いにより、フレッシュ性状が改善した。2.1 に示した目標空気量・スランプを満たす配合のなかで単位水量をできるだけ減少させた。本項では、微粉末の置換率および種類を比較し、硬化物性について検討を行っていくが、微粉末の置換による単位水量と水結合材比の減少による効果だけでなく、できるかぎり同一の単位水量、水結合材比の配合を比較することで、微粉末の置換率および種類による純粋な影響を抽出する。主な試験結果を表-3 に示す。

#### 3.2.1 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図-2 に示す。微粉末添加のない normal および SgS75 について見てみると、SgS75 は normal に比べて初期強度は低いものの、長期強度は同等以上であることがわかった。これはスラグ細骨材の潜在水硬性により、細骨材周りの組織が緻密化したことによる影響であると考えられる。微粉末を添加した配合については、置換率増加に伴い、強度発現性が高くなる傾向が見られた。材齢 1, 4 週の時点でも置換率が 10%以上の配合では、normal と同程度以上の圧縮強度が得られている。長期材齢に関しては、特に、FA および SgP を用いた配合においては、強度の増進が顕著となる結果であった。単位水量および水結合材比が同じである配合の比較として、SgP10, FA10 と混和材としてセメントを使用した C10 について見てみると、材齢 13 週時点での強度は SgP10 の方が若干高い程度であるのに対して、その後の強度増加は明らかに SgP10, FA10 の方が大きくなっている。このことから既往の研究<sup>7)</sup>通り、高炉スラグ微粉末の有する潜在水硬性やポゾラン反応により、長期に渡って強度発現を持続させる効果を持つことが確認された。

#### 3.2.2 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-3

に示す。

質量減少率のグラフを見てみると、normal に比べて SgS75 の方が、質量減少率が若干小さくなっていることがわかる。このことは、スラグ細骨材に含まれる微粉末の反応により組織が緻密化していることが考えられる。SS を用いた配合では置換率による単位水量の変化がほとんどなかった。この非反応性微粉末である SS を置換した配合では、乾燥による質量減少率の低下は見られるが、置換率が増えるにつれ、質量減少率は若干増加した。これは、スラグ細骨材が SS で置き換えられたため、緻密化の効果が薄れたことが要因であると考えられる。FA および SgP を用いた配合では、置換率の増加により、単位水量および水結合材比の減少により組織が緻密化したことから、質量減少率が小さくなる結果となった。ただし FA10 ではこの傾向から外れた。

乾燥収縮率について見てみると、スラグ細骨材を使用した配合すべては normal に対して収縮は大幅に低減される結果であった。これは、上述の質量減少率の低下に

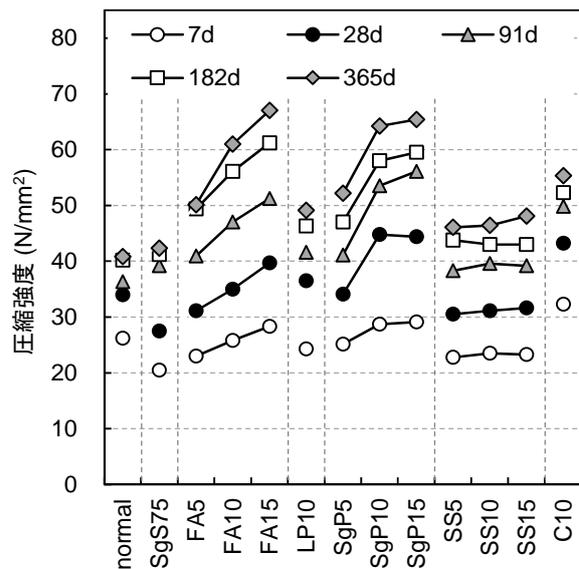


図-2 圧縮強度試験結果

表-3 試験結果 (圧縮強度, 乾燥収縮, 気泡間隔係数, 凍結融解, 中性化)

供試体種別	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )					乾燥収縮率(×10 <sup>-6</sup> )				気泡間隔係数 (cm)	凍結融解		中性化深さ(mm) 26週
	1週	4週	13週	26週	1年	1週	4週	13週	26週		耐久性指数(%)	26週	
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	

加えて、スラグ細骨材は密度が高く固いため、ペーストの変形が拘束され、モルタル部の収縮が抑えられたことが影響していると考えられる。各種微粉末を添加した配合では、質量減少率の場合と同様に、微粒分の反応性特性に起因する違いが現れ、非反応性のSSでは、置換率の増加により乾燥収縮量は増大し、反応性のFA、SgPでは、乾燥収縮量が抑制された。しかし、反応性であり単位水量も小さいFA15やSgP15の乾燥収縮量が、単位水量が最も大きく微粉末添加もないSgS75と同程度であった。このことから、反応性微粉末の置換よりも、スラグ細骨材自体の固さによるペーストの収縮拘束効果の方が、乾燥収縮に対して影響が大きいと言える。

### 3.2.3 凍結融解

凍結融解試験結果および質量減少率試験結果を図-4に示す。

SgS75について見てみると、耐久性指数は17%で、相対動弾性係数は108サイクル時点で60%を下回る結果となり、既往の研究<sup>8)</sup>通り、凍結融解抵抗性が低いことが示された。微粉末置換率の増加に伴い、耐久性指数は17%から50%程度まで大幅に向上することが確認された。SSおよびLPを除いた置換率10%以上のほとんどの供試体において、300サイクル時点での相対動弾性係数が60%以上となる結果が得られた。なお、FAを置換した配合においては、FA15の耐久性指数が57%と、FA10

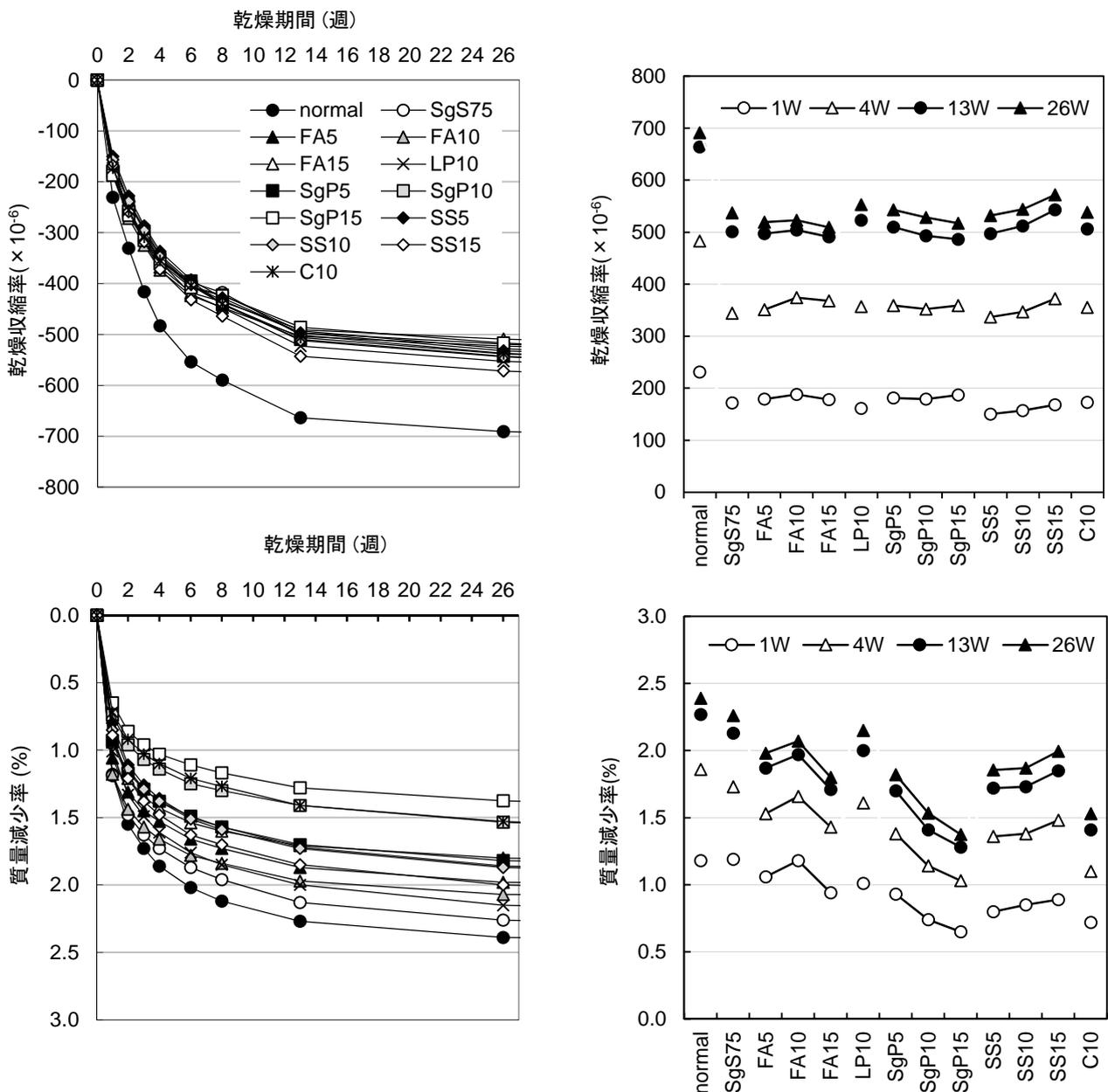


図-3 乾燥収縮，質量減少率試験結果

よりも低くなっているが、これはFA15の空気量(表-2参照)が若干低く、気泡間隔係数(表-3参照)が大きくなっていることによる影響であると考えられる。凍結融解抵抗性の低下には、空気泡やブリーディング性状が影響することが報告<sup>9)</sup>されているが、微粉末を置換することで、スラグ細骨材の歪な形状による巻き込み空気量の減少とブリーディングの抑制につながり、凍結融解抵抗性が改善する可能性が示された。

### 3.2.4 中性化

促進中性化試験結果を図-5に示す。

SgS75は、normalに比べて単位水量が大きいにも関わらず、中性化深さは小さくなる結果となった。このことは、既往の研究<sup>10)</sup>で報告される様に、スラグ細骨材に含

まれる微粉末の反応により組織が緻密化したためであると考えられる。FA、非反応性のLP、SSを置換した配合については、ほとんどがSgS75よりも中性化深さが大きくなっていることから、スラグ細骨材がこれらの微粉末で置換されることで中性化に対する抵抗性が小さくなったと考えられる。しかし、SgPを置換した配合では、置換率の増加に伴い中性化深さは小さくなっており、スラグ細骨材・微粉末を使用した供試体の中性化抵抗性の高さが顕著に現れる結果となった。反応性微粉末であるFAとSgPの差については、反応材齢と促進中性化試験時期の関係が影響しており、材齢初期でも比較的反応が進むSgPにおいて、良い結果が得られたことが考えられる。

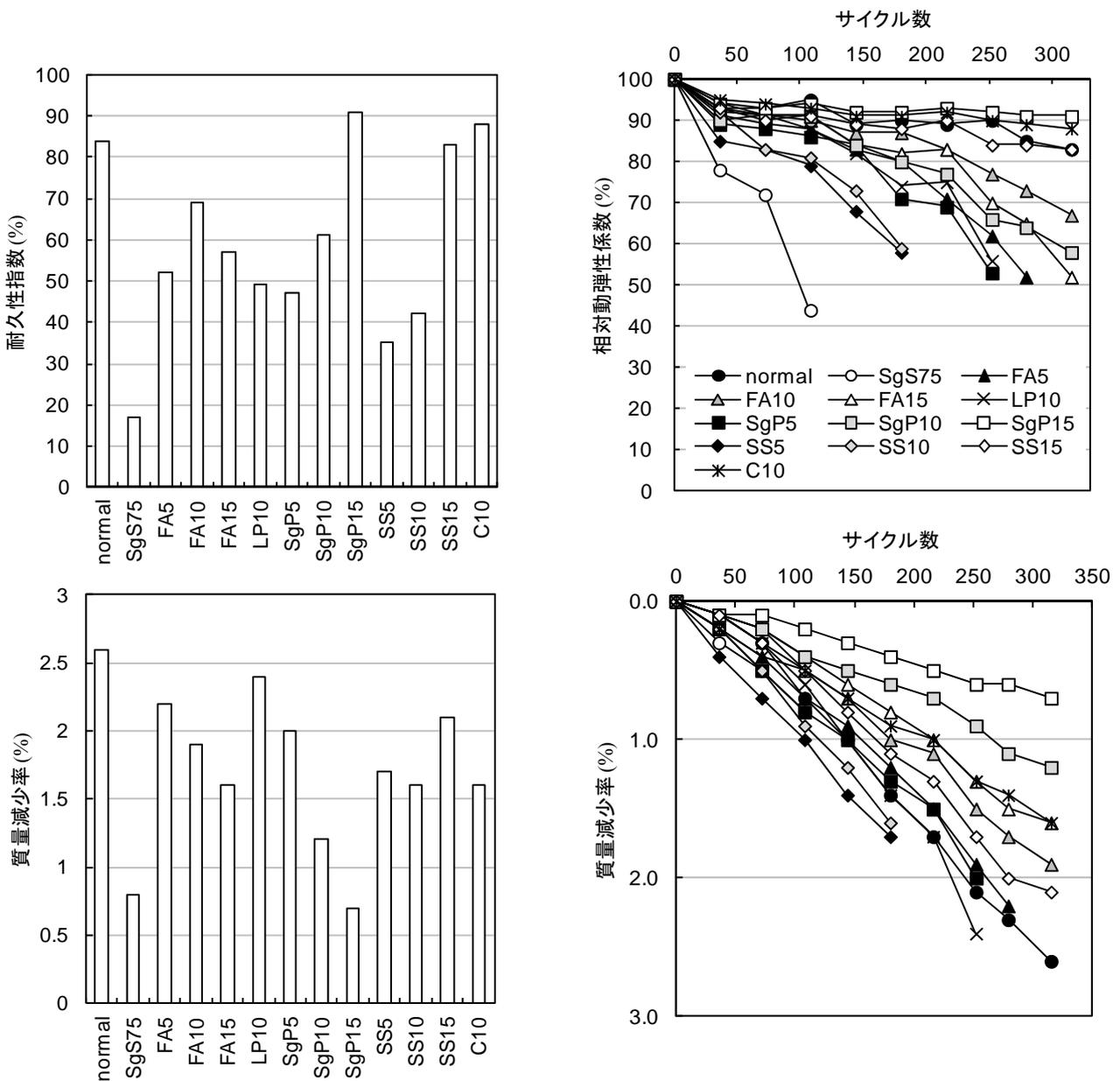


図-4 凍結融解、質量減少率試験結果

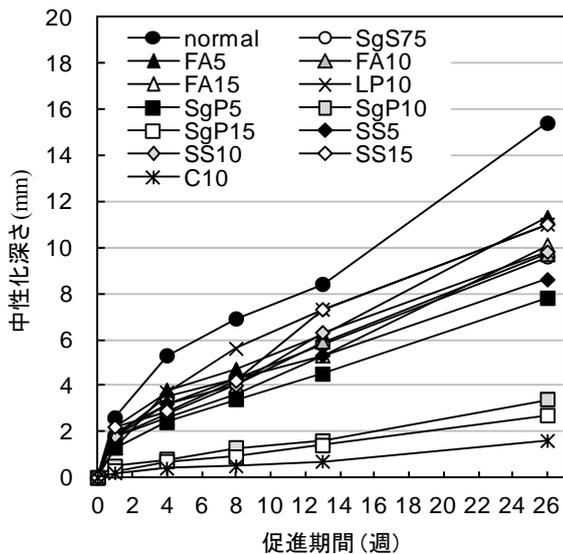


図-5 促進中性化試験結果

#### 4. まとめ

本研究では、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、各種微粉末（反応性微粉末：フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、非反応性微粉末：石灰石微粉末、シリカサンド）を、置換率を変えて添加することにより、コンクリートの諸性状を比較した。本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、天然細骨材のみを使用したコンクリートに対して、単位水量は  $16 \text{ kg/m}^3$  大きくなり、ブリーディングは約4倍に増加する結果となった。単位水量については、微粉末の添加によって減少させることが可能であり、フライアッシュを15%置換した配合では最大  $25 \text{ kg/m}^3$  程度まで減少した。ブリーディングについても、微粉末の置換率が増加するにつれて抑制され、置換率10%までは直線的に減少する傾向が見られた。

硬化物性においては、置換した微粒分の反応性の有無に起因する影響が多く見られた。

圧縮強度については、反応性のあるフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を添加した配合において長期強度の増進が顕著となる結果が得られた。

乾燥収縮では、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を置換した配合で、置換率の増加に伴い、乾燥収縮量は低減された。これは、単位水量および水結合材比の減少により組織が緻密化したことで、水分の逸散が抑制されたためであると考えられる。しかし、いずれも微粉末無置換のスラグ供試体と同程度の乾燥収縮量であることから、乾燥収縮においては反応性微粉末による組織の緻密化の影響よりもスラグ細骨材自体の固さによるペーストの収縮拘束効果の影響の方が大きいと言える。

凍結融解における耐久性指数は、スラグ細骨材を使用

した配合で著しく低い値を示したが、反応の有無によらず、微粉末を置換することで改善された。このことから、微粉末添加による巻き込み空気の減少およびブリーディング抑制が、凍結融解抵抗性の改善に繋がる可能性が示唆される。

中性化については、スラグ細骨材を使用することで中性化深さが小さくなる結果となった。これは、スラグ細骨材に含まれる微粒分の反応により、組織が緻密化した影響であると考えられる。同じ理由で、スラグ微粉末を置換した配合においても、高い中性化抵抗性が示された。

#### 謝辞

竹本油脂株式会社 稲垣順司氏、小林竜平氏には本実験の実施にあたり、多くの御協力を頂きました。ここに記し、深く感謝致します。

#### 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) 山中量一：高炉スラグ細骨材，コンクリート工学，Vol.46，No.5，pp.90-94，2008.5
- 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.1，2009
- 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) 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
- 7) 依田彰彦：高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性質，材料，Vol.43，No.491，pp.943-948，1994.8
- 8) 小林正凡，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
- 9) 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
- 10) 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