

# 論文 電気炉酸化スラグ細骨材の混合率がコンクリートの諸性状に及ぼす影響に関する研究

古川 雄太\*1・篠原 佳代子\*1・大岡 督尚\*2

**要旨:**本研究は、急冷製造(風砕)される電気炉酸化スラグ細骨材がコンクリートの性状に及ぼす影響について、混合率 50%までの範囲を対象に検討を行ったものである。電気炉酸化スラグ細骨材を用いたコンクリートは、混合率の増加に伴い単位水量は小さくなり、長さ変化および促進中性化速度係数も小さくなる傾向が示された。また、混合率が異なってもセメント水比と圧縮強度の関係は直線的であり、混合率にかかわらず同一の強度算定式で調合強度を定めることができる可能性が示唆された。一方、ブリーディング量は僅かではあるが増加し、凍結融解抵抗性に劣る傾向も示された。

**キーワード:** 電気炉酸化スラグ細骨材, スラグ骨材, 混合率, 力学性状, 耐久性

## 1. はじめに

一般に、スラグ骨材は他産業から排出される副産物であり、天然骨材の代替としてコンクリート用骨材として有効利用することは、環境保護(資源保護)の観点から良好であるといえる。しかし、スラグ骨材の中には、使用方法によってはコンクリートの一部の性状に悪影響を与えることもあるため、十分に検討した上で使用する必要がある。このため、スラグ骨材は天然骨材に比べて検討項目が多くなりやすく、性能によっては適用部位を限定することもあり、コンクリート用骨材として積極的な利用がなされているとはいえ、建築分野での利用は一部の地域・施工者の限定的な範囲に留まっているのが現状である。一方、スラグ骨材の中には、長さ変化の低減や中性化深さの低減など、コンクリートの性能向上を示す研究成果も報告<sup>1)</sup>されており、性能向上材料としての側面も期待されている。

コンクリート用スラグ骨材の一種である電気炉酸化スラグ細骨材(以下、EFS と略記)は、2003年にコンクリート用スラグ骨材として JIS が制定され、2005年には建築学会から「電気炉酸化スラグ細骨材を用いるコンクリートの設計施工指針(案)・同解説」<sup>2)</sup>(以下、スラグ指針と略記)が発刊されるなど、建築分野でコンクリート用骨材として利用する基・規準類は整備されていると考えられる。しかしながら、EFSは製造工程(徐冷、急冷など)によって物性は異なり、物性の違いがコンクリートに及ぼす影響が報告<sup>2)</sup>されているが、徐冷スラグに比べて製造量の少ない急冷スラグ(風砕)のデータは十分とはいえない。加えて、スラグ指針では、EFS混合率の標準値は30%以下であり、EFS混合率30%を超えるデータは十分とはいえない。また、既往の研究は、20年程度前に実施されたものが多く、スランプ12cmから18cm程度を対象としており、化学混和剤にはAE減水剤を使用したもの

が多いため、近年、建築分野で多用される高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートや、スランプを 21cm 程度としたコンクリートに関する物性の資料は不足している。

本論文は、急冷製造(風砕)される EFS の建築分野での有効利用を目的に、EFS 混合率 0%から 50%の範囲(10%刻み)における EFS を用いたコンクリートの各種基礎物性の把握を行い、EFS がコンクリートに及ぼす影響について検討した。

## 2. 実験の概要

表-1 に使用材料を示す。細骨材は、山砂、砂岩砕砂、EFS の 3 種類使用した。写真-1 に EFS および砂岩砕砂の代表的な粒形を示す。本研究に使用した EFS は、風砕

表-1 使用材料

材料	種類・物性等
水	上水道水(W)【神奈川県】
セメント	普通ポルトランドセメント(C)【 $\rho$ :3.16g/cm <sup>3</sup> 】
細骨材	山砂(MS)【 $\rho$ :2.63g/cm <sup>3</sup> ,Q:1.62%,FM:2.50】
	砂岩砕砂(CS)【 $\rho$ :2.64g/cm <sup>3</sup> ,Q:1.18%,FM:3.02】
	EFS【 $\rho$ :3.52g/cm <sup>3</sup> ,Q:0.36%,FM:3.27】
粗骨材	硬質砂岩砕石(G1)【 $\rho$ :2.65g/cm <sup>3</sup> ,Q:0.59%,Gs:60.0%】
	石灰岩砕石(G2)【 $\rho$ :2.70g/cm <sup>3</sup> ,Q:0.57%,Gs:60.0%】
化学混和剤(Ad)	AE 減水剤(Ad1)【リグニンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩】
	高性能 AE 減水剤(Ad2)【ポリカルボン酸系化合物】
	AE 剤(AE)【樹脂酸系界面活性剤】

$\rho$ :密度(骨材は表乾状態), Q:吸水率, FM:粗粒率, Gs:実積率

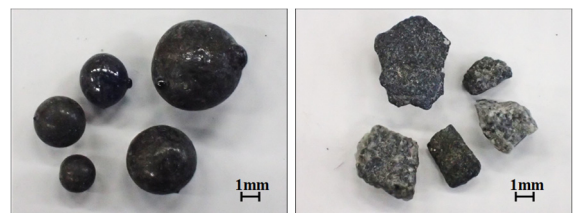


写真-1 EFS(左)と砂岩砕砂(右)の代表的な粒形

\*1 東急建設(株) 技術研究所 修士(工学) (正会員)

\*2 東急建設(株) 技術研究所 博士(工学) (正会員)

スラグの特徴である丸みを帯びた粒形であり、表面がガラス質であることが写真より確認できる。細骨材の混合率は、山砂を容積比で50%と一定にし、EFS混合率に応じて砂岩砕砂の混合量を減じて調整した。なお、EFS混合率0%で粗粒率2.76、EFS混合率50%で粗粒率2.89であり、EFS混合率の違いによる粗粒率への影響が可能な限り小さくなるように配慮した。粗骨材は、硬質砂岩砕石および石灰岩砕石を使用した(混合率50:50、質量比)。化学混和剤は、水セメント比(以下、W/Cと略記)65%および55%ではAE減水剤、W/C45%および35%では高性能AE減水剤を使用した。また、目標とする空気量が得られるように、AE剤を添加して空気量の調整を行った。

表-2に試験項目を示す。ブリーディング量はJCI規準を参考にΦ150×300mmのぶりき製容器を使用し、30分刻みで測定した(試験個数1個)。線膨張係数は、Φ100×200mmの供試体に埋込ひずみゲージを埋設し、20℃から1℃/hの昇温速度で60℃まで温度を上昇させ、60℃で6時間保持した後、1℃/hの降温速度で20℃まで低下させ、20℃で6時間保持した。この温度履歴を1サイクルとし、計3サイクルの温度履歴を与え、1サイクル毎にコンクリート温度の変化とひずみの変化から導き出される勾配を線膨張係数とし、3サイクルそれぞれで算出した値を平均した(試験中の湿度は60%RH)。なお、供試体は7日間水中養生した後、約56日間気中養生(20℃、60%RHの環境下)したものであり、試験中はシールなど

を行わず全面開放状態とし、含水率の変動によるひずみを含んだ総ひずみを測定した。長さ変化試験は、材齢7日まで標準水中養生してから基長を測定し、所定の乾燥期間において長さ変化率の測定を行った。その他の試験については表-2に示す方法に準じて行った。また、線膨張係数、凍結融解および気泡間隔係数については、W/C55%および45%のコンクリートのみで実施した。

表-3にコンクリートの調合およびフレッシュ性状を示す。W/Cは65%から35%の範囲で10%刻みの4水準として(以下、W/C65%~35%と略記)、EFSの全細骨材に対する混合率は、容積比で0%から50%の範囲で10%刻みの6水準とし(以下、EFS0%~50%と略記)、合計24水準のコンクリートで検討を行った。単位粗骨材かさ容積は、W/C65%および55%では590l/m<sup>3</sup>、W/C45%および35%で

表-2 試験項目

試験	方法
スランブ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
コンクリート温度	JIS A 1156
ブリーディング量	JCI-S-015-2018
圧縮強度	JIS A 1108
静弾性係数	JIS A 1149
線膨張係数	—
長さ変化	JIS A 1129-2
促進中性化	JIS A 1152, JIS A 1153
凍結融解	JIS A 1148(A法)
気泡間隔係数	ASTM C457

表-3 コンクリートの調合およびフレッシュ性状

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							Ad(C×wt%)			単位容積質量*1(kg/m <sup>3</sup> )	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
			W	C	MS	CS	EFS	G1	G2	Ad1	Ad2	AE				
65-0	65	48.5	180	277	438	440	0	474	474	1.0	—	0.0060	2283	19.5	4.8	22
65-10		48.9	176	271	446	358	119	474	474	1.0	—	0.0055	2318	19.5	5.0	22
65-20		49.3	172	265	454	273	243	474	474	1.0	—	0.0045	2355	20.0	4.6	22
65-30		49.8	168	259	462	185	371	474	474	1.0	—	0.0035	2393	19.5	4.9	21
65-40		50.2	164	253	469	94	503	474	474	1.0	—	0.0020	2431	19.5	4.7	21
65-50		50.6	160	247	477	0	639	474	474	1.0	—	0.0020	2471	19.5	4.8	21
55-0		55	47.2	180	328	417	419	0	474	474	1.2	—	0.0030	2292	19.0	4.6
55-10	47.8		176	320	426	342	114	474	474	1.2	—	0.0020	2326	19.5	4.3	19
55-20	48.2		172	313	434	261	232	474	474	1.2	—	0.0020	2360	20.0	4.4	20
55-30	48.7		168	306	442	177	355	474	474	1.2	—	0.0025	2396	20.0	5.0	21
55-40	49.1		164	299	450	90	482	474	474	1.2	—	0.0020	2433	20.0	4.3	20
55-50	49.6		160	291	459	0	614	474	474	1.2	—	0.0025	2472	20.0	4.2	20
45-0	45		47.9	175	389	414	416	0	458	458	—	0.7	0.0045	2310	22.0	4.2
45-10		48.6	170	378	425	342	114	458	458	—	0.7	0.0030	2345	22.0	4.5	20
45-20		49.2	165	367	436	263	234	458	458	—	0.7	0.0020	2381	22.0	4.2	20
45-30		49.9	160	356	448	180	359	458	458	—	0.7	0.0025	2419	22.0	4.4	20
45-40		50.5	155	345	459	92	491	458	458	—	0.7	0.0035	2458	22.5	4.8	19
45-50		51.1	150	334	470	0	629	458	458	—	0.7	0.0030	2499	22.0	4.7	19
35-0		35	45.0	175	500	368	369	0	458	458	—	0.7	0.0070	2328	22.0	4.8
35-10	45.8		170	486	380	305	102	458	458	—	0.7	0.0048	2359	23.0	4.3	22
35-20	46.6		165	472	393	237	210	458	458	—	0.7	0.0040	2393	22.0	4.2	22
35-30	47.4		160	458	405	163	325	458	458	—	0.7	0.0040	2427	21.0	4.6	22
35-40	48.2		155	443	418	84	448	458	458	—	0.7	0.0038	2464	22.0	4.1	22
35-50	48.9		150	429	430	0	576	458	458	—	0.7	0.0035	2501	22.0	4.2	22

\*1 計画調合における単位量の累計値(骨材は表乾密度で計算)

は  $570\text{l/m}^3$  とした。単位水量は、EFS0%で W/C65%および 55%は  $180\text{kg/m}^3$ 、W/C45%および 35%では  $175\text{kg/m}^3$  とし、目標スランブが得られるように Ad の添加率を調整した。EFS を混合したものは、EFS0%で定めた Ad1 および Ad2 の添加率を固定し、EFS 混合率に応じて目標のスランブが得られるように単位水量を調整した。なお、目標スランブは、W/C65%および 55%では  $18\pm 2.5\text{cm}$ 、W/C45%および 35%では  $21\pm 2.0\text{cm}$  とし、目標空気量は  $4.5\pm 1.5\%$  とした。表-3 に示すように、スランブおよび空気量は目標値を満足する結果であった。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 単位水量および AE 剤使用量

図-1 に EFS 混合率と単位水量の関係を示す。AE 減水剤を使用した W/C65%および 55%のコンクリートでは、EFS 混合率が 10%増えるごとに単位水量が  $4\text{kg/m}^3$  低減する傾向を示した。また、高性能 AE 減水剤を使用した W/C45%および 35%のコンクリートでは、EFS 混合率が 10%増えるごとに単位水量が  $5\text{kg/m}^3$  が低減する傾向を示し、いずれの場合でも EFS を混合することで単位水量の低減が顕著に現れることが示された。これは、EFS 混合率 50%の場合、AE 減水剤を使用したコンクリートで単位水量の低減率が約 11%、高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートで約 14%であり、高炉セメント B 種やフライアッシュセメント B 種の標準的な低減率 4%および 5%<sup>3)</sup>と比較すると、EFS は単位水量の低減効果が大きいといえる。なお、過度な単位水量の低減は、ワーカビリティの低下を招くこともあるが、本検討範囲ではそのような傾向は確認されず、良好な状態であった。これは、EFS は形状が球形であり、表面性状も滑らか(凹凸が少ない)であることから、単位水量を大幅に低減しても EFS 混合率 0%と 50%で流動性に寄与するセメントペースト量に差がなかったため、ワーカビリティの低下を招かなかったものと推測される<sup>4)</sup>。

図-2 に EFS 混合率と AE 剤使用量の関係を示す。多少のばらつきはあるが、EFS 混合率 20%程度までは混合率の増加に伴い AE 剤使用量が低減する傾向を示し、混合率 20%以降は大きな差がない傾向であった。EFS 混合率が大きくなるに伴い単位水量が小さくなることは、換言すれば、単位粗骨材かさ容積を一定にした条件下では、単位細骨材量が増えることになり、巻き込み空気が増える可能性がある。よって、EFS の直接的な性質(吸着量等)によって AE 剤使用量が変動したのではなく、単位水量の低減など副次的な影響によるものと推測される。

#### 3.2 ブリーディング量

図-3 に EFS 混合率とブリーディング量の関係を示す。使用した化学混和剤の種類によって傾向が異なり、AE 減

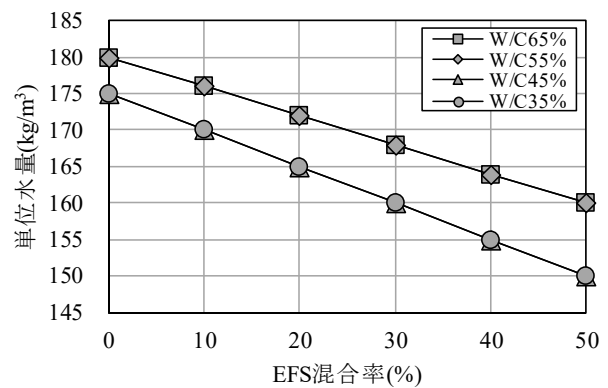


図-1 EFS 混合率と単位水量の関係

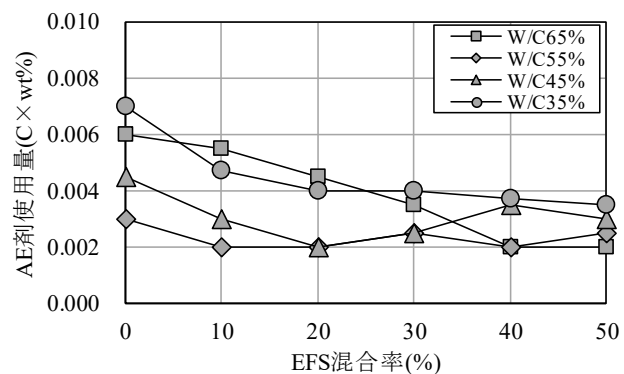


図-2 EFS 混合率と AE 剤使用量の関係

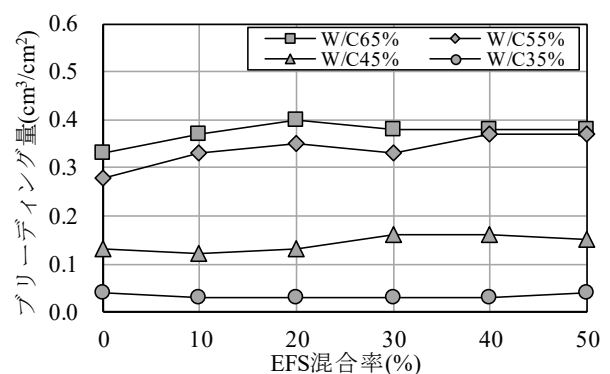


図-3 EFS 混合率とブリーディング量の関係

水剤を使用した W/C65%および 55%のコンクリートでは、EFS 混合率 20%までは混合率の増加に伴いブリーディング量が僅かに増える傾向であり、混合率 20%以降ではブリーディング量の大きな変動は認められなかった。また、高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートでは、W/C45%の場合、EFS 混合率が 30%以上になると EFS20%以下のものよりも僅かにブリーディング量が増える傾向が示された。W/C35%のコンクリートでは、ブリーディング量の値が他に比べ小さく、EFS 混合率による明確な差は認められなかった。一般に、ガラス質のスラグ骨材を使用した場合、保水性が低いことなどに起因し、ブリーディング量の過度な増大が懸念されるが<sup>5)</sup>、今回の検討では、EFS の混合率が 50%までの範囲であれば、EFS 混合率 0%と比較してブリーディング量の増大量は  $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$  未満

であり、過度なブリーディング量の増加は認められなかった。これは、EFS 混合率の増加に伴い単位水量が大きく低減されたことに起因していると推測される。

### 3.3 圧縮強度、静弾性係数および線膨張係数

図-4 に圧縮強度試験結果の一例として、W/C55%の圧縮強度試験結果を示す。EFS 混合率による圧縮強度への影響はみられず、材齢ごとに概ね同等の圧縮強度であることが認められた。また、材齢ごとの強度増加量も EFS 混合率の影響を受けずに同等の値であった。スラグ骨材には、材齢 28 日以降の強度発現が大きいなど、長期的な強度発現を示すものもあるが、本研究に使用した EFS においては、材齢 91 日までの範囲では長期的な強度増進は普通コンクリート(EFS0%)と同等であると考えられる。なお、他の W/C のコンクリートにおいても同様な傾向であった。

図-5 にセメント水比と材齢 28 日における圧縮強度の関係を示す。圧縮強度の値が約 20~70N/mm<sup>2</sup>の範囲であった本研究では、セメント水比と圧縮強度の関係は、EFS 混合率にかかわらず直線的な関係が認められ、決定係数は 0.98 と高い相関関係を示した。この傾向は、EFS 混合率が異なっても、他の使用材料が同一であれば同一の強度算定式を使い調合強度を定めることができることを示唆するものである。すなわち、強度算定式を変えることなく、適用部材や使用目的に応じて EFS 混合率を自由に变化させることができる可能性を示すものである。

図-6 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中には、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」<sup>5)</sup>に示される式(1)により算出した値(以下、推定値)を示している。なお、コンクリートの単位容積質量( $\gamma$ )は、EFS 混合率によって異なり、約 2.3~2.5t/m<sup>3</sup>の範囲であるため、推定値は  $\gamma = 2.3\text{t/m}^3$ (破線)および  $2.5\text{t/m}^3$ (実線)とし、粗骨材の種類により定まる修正係数  $k_1$  は、粗骨材に硬質砂岩と石灰岩を 50%ずつ使用しているため、 $k_1 = 1.1$  として図示した。

$$E = k_1 \times k_2 \times 3.35 \times 10^4 \times (\gamma/2.4)^2 \times (\sigma_B/60)^{1/3} \quad (1)$$

ただし、

$E$  : コンクリートのヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)

$\gamma$  : コンクリートの単位容積質量(t/m<sup>3</sup>)

$\sigma_B$  : コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$k_1$  : 粗骨材の種類により定まる修正係数(1.1)

$k_2$  : 混和材の種類により定まる修正係数(1.0)

図-6 からは、多少のばらつきはあるが、EFS 混合率が小さくコンクリートの単位容積質量が小さいものは  $\gamma = 2.3\text{t/m}^3$  の推定値に近似し、EFS 混合率が大きくコンクリートの単位容積質量が大きいものは  $\gamma = 2.5\text{t/m}^3$  の推定値に近似する傾向が認められる。よって、コンクリートの単位容積質量を考慮することで静弾性係数を推定でき、一般的なコンクリートと同様に圧縮強度との関係で評価

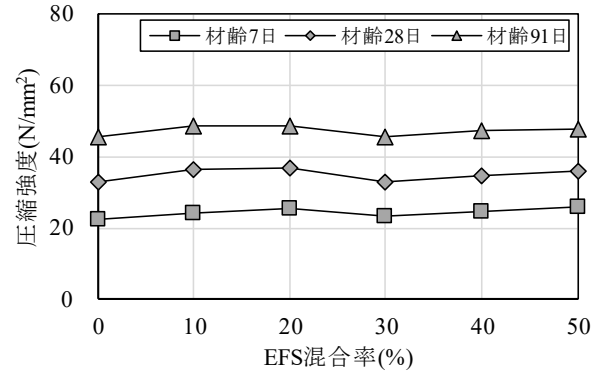


図-4 圧縮強度試験結果(W/C55%)

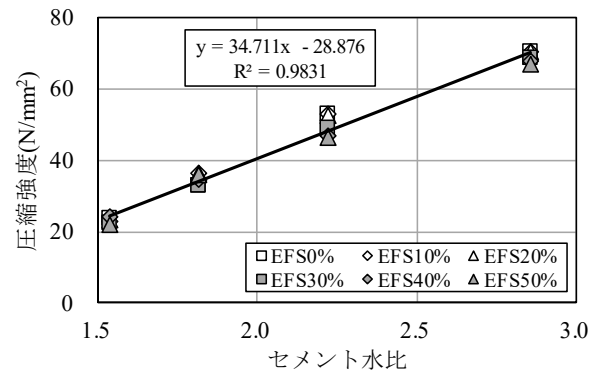


図-5 セメント水比と材齢 28 日圧縮強度の関係

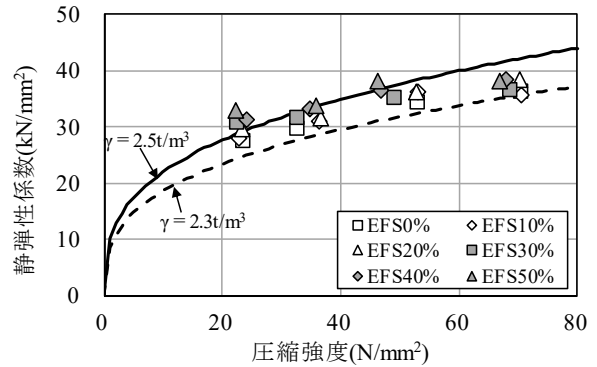


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

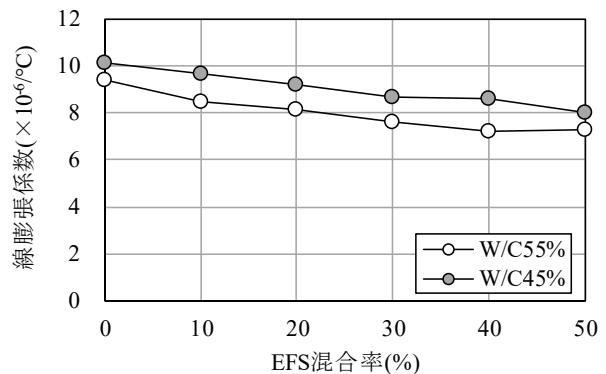


図-7 EFS 混合率と線膨張係数の関係

できるものと考えられる。

図-7 に EFS 混合率と線膨張係数の関係を示す。線膨張係数は、EFS 混合率の増加に伴い小さくなる傾向が認められた。EFS を混合したコンクリートの線膨張係数は、

普通コンクリート(EFS0%)と同等であるとの報告<sup>2)</sup>もあるが、本研究では、石灰岩を用いることでコンクリートの線膨張係数が小さくなる傾向<sup>6)</sup>と同様に、EFSを混合することでコンクリートの線膨張係数が小さくなる可能性が示され、体積変化によるひび割れを抑制できる可能性が示唆された。ただし、EFS混合率の増加に伴い単位水量を減らしているため、線膨張係数の低下は体積変化の主要因であるセメントペースト量の低減による影響もあったものと考えられる。

### 3.4 長さ変化, 促進中性化および凍結融解

図-8に乾燥期間26週における長さ変化率とEFS混合率の関係を示す。全体的な傾向として、EFS混合率の増加に伴い長さ変化率が直線的に小さくなる傾向が認められた。W/Cによって多少異なるが、EFS混合率50%のコンクリートは、EFS混合率0%のものよりも $110 \times 10^{-6}$  ~  $160 \times 10^{-6}$ 程度、長さ変化率が小さくなっており、EFSによる長さ変化の低減効果が確認された。この要因としては、EFSの混合率が増えることで単位水量が大きく低減し、収縮の主要因であるセメントペースト量が減少したことが影響したと推測される。また、EFSの混合率が増えることで、静弾性係数が増加する傾向も認められたため、EFSがセメントペーストの収縮に対する抵抗体として機能したと考えられ(拘束効果<sup>7)</sup>)、単位水量の低減および拘束効果が複合的に影響して長さ変化率が小さくなったと考えられる。

図-9に促進中性化試験の結果の一例として、W/C55%の試験結果を示す。いずれのEFS混合率においても促進期間と促進中性化深さの関係は概ね直線的であり、一般的なコンクリートと同様に $\sqrt{t}$ 則が成り立つ傾向が認められた。また、EFS混合率の増加に伴い促進中性化深さは僅かに小さくなる傾向であった。なお、他のW/Cのコンクリートにおいても同様な傾向であった。ただし、W/C35%のコンクリートにおいては、全てのEFS混合率で中性化の進行が認められなかったため、以降の考察からは除外した。

図-10にEFS混合率と促進中性化速度係数の関係を示す。W/Cによっては差が小さいものもあるが、EFS混合率の増加に伴い、緩やかに促進中性化速度係数は小さくなっており、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートと同様な傾向<sup>7)</sup>であった。EFSを混合したコンクリートは、普通コンクリート(EFS0%)と同等かそれ以上の中性化抵抗性を有していると考えられることから、中性化の観点からは、耐久設計基準強度やコンクリートのかぶり厚さは、普通コンクリートと同等かそれ以下で設定できる可能性が示された。

図-11に耐久性指数とEFS混合率の関係を示す。W/Cの違いに着目すると、全体的にW/C55%のコンクリート

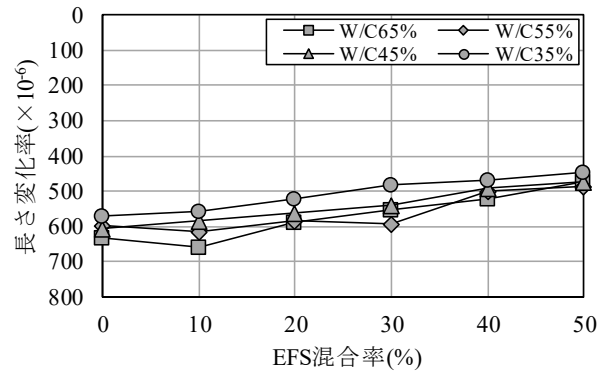


図-8 EFS混合率と長さ変化率の関係

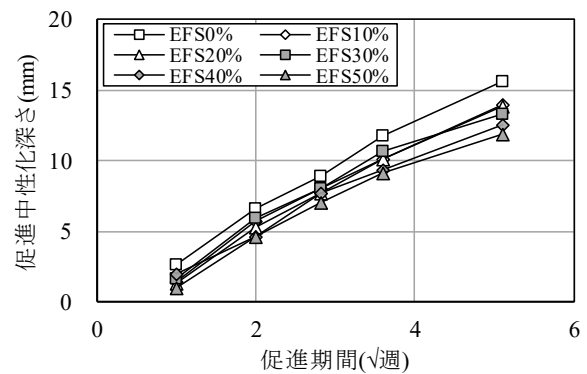


図-9 促進中性化試験結果(W/C55%)

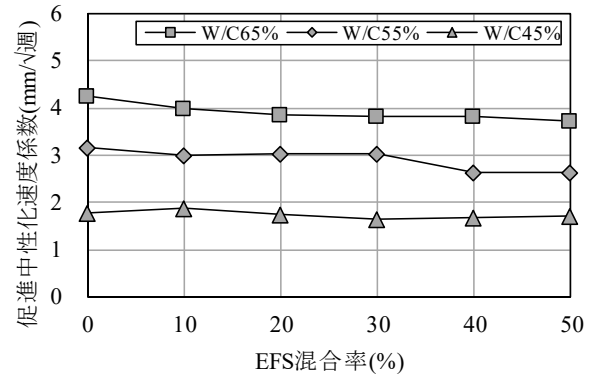


図-10 EFS混合率と促進中性化速度係数の関係

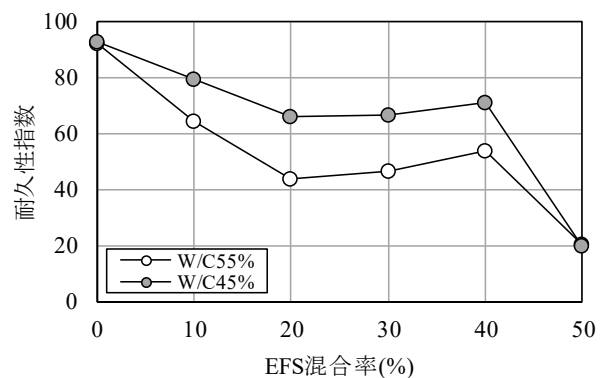


図-11 EFS混合率と耐久性指数の関係

がW/C45%のコンクリートよりも耐久性指数が小さい傾向が認められた。また、EFS混合率の影響に着目すると、耐久性指数はEFS混合率の影響を受けて低下しており、特にEFS50%では著しく低下する傾向を示した。

図-12 に気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示す。気泡間隔係数は、耐凍害性の確保のための目安として250 $\mu\text{m}$ 以下<sup>9)</sup>とされているが、本検討では全体的に大きい値を示した。この要因としては、AE剤の性質により、気泡径の大きい連行空気が導入されたことや、AE剤使用量がEFS混合率の増加に伴い小さくなっていることから、連行空気そのものが少なかったためと推測される。気泡間隔係数と耐久性指数の関係は、EFS混合率0%~20%程度までは、気泡間隔係数と耐久性指数の関係が直線的であるため、耐久指数の低下は気泡間隔係数の影響が支配的であると考えられる。しかし、EFS混合率30%~50%の範囲では、EFS混合率0%~20%の範囲と同等の気泡間隔係数であっても、耐久性指数は小さい傾向であり、気泡間隔係数以外の影響を受けて耐久性指数が低下している可能性が考えられる。

千歩らの研究<sup>9)</sup>によれば、石灰岩(粗骨材)を用いたコンクリートが凍害に弱い一因として、骨材とモルタルの線膨張係数の差異により発生する温度応力による影響であると考察している。本研究では、EFSを用いることで線膨張係数が小さくなる傾向が認められたことから、EFS混合率の増加に伴いセメントペーストとEFSの線膨張係数の差異は大きくなることが推測できる。EFS混合率が大きくなるに伴い、EFSの骨材界面量が増え、温度応力が大きくなったと仮定すると、線膨張係数の小さい骨材を用いることで凍結融解抵抗性が低下する点について、細骨材と粗骨材の違いはあるが、千歩らの研究と整合がとれる。また、本研究に使用したEFSは骨材表面がガラス質で滑らかであるため、EFSの骨材界面に温度応力が生じた場合、骨材界面の付着力が弱いことで骨材界面に欠陥が生じ、凍結融解抵抗性が低下したと考えられる。しかしながら、凍結融解作用時に生じる骨材界面の挙動については検証できておらず、今後の検討課題である。

#### 4. まとめ

EFSの混合率がコンクリートの諸性状に及ぼす影響について検討を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) EFSの混合率10%に対する単位水量の低減量は4~5 $\text{kg}/\text{m}^3$ であった。
- (2) EFSを混合するとブリーディング量が増大する傾向であったが、増加量は0.1 $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 未満であり、過度なブリーディング量の増加は認められなかった。
- (3) 材齢28日における圧縮強度とセメント水比の関係はEFS混合率にかかわらず直線的な関係であり、EFS混合率が異なっても同一の強度算定式でコンクリートの調合強度を算定できる可能性が示唆された。
- (4) 静弾性係数の関係は、一般的なコンクリートと同様に圧縮強度との関係で評価できると考えられる。

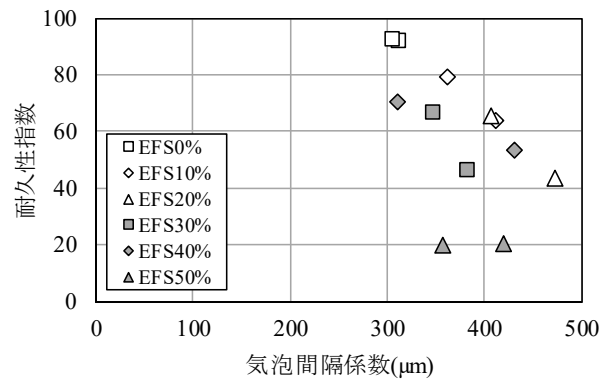


図-12 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

- (5) 線膨張係数は、EFS混合率の増加に伴い小さくなる傾向であった。
- (6) 長さ変化は、EFS混合率の増加に伴い小さくなる傾向であり、混合率50%では無混合と比較して110~160 $\times 10^{-6}$ 程度小さくなった。
- (7) 中性化抵抗性は、水セメント比によってはEFS混合率の増加に伴い緩やかに向上する傾向であった。
- (8) 凍結融解抵抗性は、EFS混合率が大きくなるに伴い低下する傾向であり、気泡間隔係数による影響に加え、線膨張係数が影響している可能性が示唆された。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、(株)星野産商に多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：高炉スラグ細骨材を使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説，2013.2
- 2) 日本建築学会：電気炉酸化スラグ細骨材を用いるコンクリートの設計施工指針(案)・同解説，2005.9
- 3) 日本建築学会：コンクリートの調合設計指針・同解説，pp.186-187，2015.2
- 4) C.T.Kennedy：The Design of Concrete Mixtures，Proceedings of the ACI，Vol.36，pp.373-400，Feb.1940
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造設計規準・同解説，pp.55-57，2018.12
- 6) 日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針・同解説，pp.62-64，2019.11
- 7) 土木学会：電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針(案)，p.90，2003.3
- 8) 日本コンクリート工学会：コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会報告書，pp.87-93，2016.6
- 9) 千歩・浜・松村・袴谷：コンクリートの耐凍害性に及ぼす粗骨材の線膨張係数と石粉の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.787-792，2000.7