

論文 電気炉酸化スラグ細骨材とフライアッシュを用いた粉体系高流動コンクリートのフレッシュ性状

横山 卓哉*1・橋本 親典*2・渡辺 健*3・石丸 啓輔*4

要旨：電気炉酸化スラグ細骨材を用いたコンクリートは、ブリーディングの発生と骨材密度が大きいため材料分離抵抗性は良好ではない。本研究では、高い粘性により材料分離抵抗性に優れる粉体系高流動コンクリートに着目し、電気炉酸化スラグ細骨材を多量に使用した高流動コンクリートのフレッシュ性状について検討した。その結果、電気炉酸化スラグ細骨材は粉体系高流動コンクリートの流動性、間隙通過性、自己充填性を改善し、所要のフレッシュ性状を満足するための混和剤添加量の低減に効果があることが明らかになった。また、フライアッシュ混入量を調整することで、ブリーディングの発生を大幅に抑制することが確認できた。

キーワード：電気炉酸化スラグ細骨材、高流動コンクリート、フライアッシュ、フレッシュ性状

1. はじめに

近年、環境問題への意識の高まりの中で、副産資源の有効活用や天然骨材の枯渇、骨材採取による環境破壊防止の観点から、電気炉酸化スラグは環境負荷を低減させる材料として高く評価されている。電気炉酸化スラグは、回収された鉄スクラップを電気炉で精錬し、鉄筋、形鋼等の素材としての粗鋼を製造する際に副産されるもので、製鋼過程の原料酸化期に排出される。2003年にはJIS化され、土木学会より設計・施工指針(案)¹⁾も示されている。また、2005年にはグリーン購入法に基づく特定調達品目に指定されており、コンクリート用骨材としての利用拡大が期待されている。電気炉酸化スラグ骨材は、一般の普通骨材に比べて密度が大きいという特徴を活かし、港湾用のコンクリートブロックや砂防ダム、放射線遮蔽用コンクリートへ適用されてきた。しかし、電気炉酸化スラグ骨材をコンクリート用骨材として多量に使用した場合、プラスチック性の低下、骨材の沈降、ブリーディング量の増加など材料分離の発生が指摘されている²⁾。上述した土木学会の指針(案)では、フレッシュ時の性状および硬化コンクリートの品質を考慮し、粗骨材として碎石や砂利を単独で使用する場合は、電気炉酸化スラグ細骨材の容積混合率の上限を50%までとしている。また、2003年当初における細骨材は破碎スラグのみであったが、2011年頃から真球に近い風砕スラグの製造技術が確立された。風砕スラグを混和することによって、同一スランプでの単位水量の低減が可能になった。

また、石炭火力発電所から排出されるフライアッシュの発生量は年々増加し、処分場の延命化や環境負荷低減の観点から、フライアッシュを大量かつ有効に利用する

ことが望まれている。フライアッシュをコンクリートに用いた場合、流動性改善、単位水量低減、長期強度増進、低発熱性、アルカリシリカ反応抑制等、その有効性は実証されているが、フライアッシュを混和したコンクリートは広く普及していないのが現状である。その理由として、フライアッシュ中に含まれる未燃炭素がAE剤を吸着し、スランプや空気量の変動が大きくなることから、コンクリートのフレッシュ性状や耐凍害性が低下する危険性のあることが指摘されている³⁾。

一方、コンクリート施工の省力化やコンクリートの高品質化を目指して、フライアッシュ等の混和材を多量に使用した自己充填性を有する粉体系高流動コンクリートの開発が行われてきた。粉体系高流動コンクリートは、フレッシュ時の材料分離抵抗性を損なうことなく流動性を高めたコンクリートであり、高い耐久性を有する。しかし、一般的なスランプ配合のコンクリートと比較して、所要のフレッシュ性状を満足するための単位水量や高性能AE減水剤の添加量は増加する傾向にある。

本研究では、高い粘性により材料分離抵抗性に優れる粉体系高流動コンクリートに着目し、フライアッシュ混入量、水セメント比、単位水量等の違いが、電気炉酸化スラグ細骨材(風砕スラグ)を多量に使用した高流動コンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響について基礎的検討を行うことを目的とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本実験に使用した電気炉酸化スラグ細骨材の外観形状を写真-1に、使用材料一覧を表-1に示す。電気炉

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士後期課程 工修 (学生会員)

*2 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 教授 工博 (正会員)

*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 准教授 博(工) (正会員)

*4 徳島大学 技術支援部 常三島技術部門 技術専門職員 (正会員)

酸化スラグ細骨材(以下, EFS), フライアッシュ(以下, FA)ともに, JISに適合するものを用いた。

コンクリートの配合を表-2に示す。実験シリーズ1では, 水セメント比50%, 単位水量175kg/m³の一定とし, 単位FA量を100, 150, 200kg/m³の3水準, EFSを砕砂, 石灰砕砂に対しそれぞれ0, 50, 75, 100%容積置換した。実験シリーズ2では, 単位粉体量500kg/m³, 単位水量175kg/m³の一定とし, 水セメント比55, 50, 45%の3水準, EFSを各細骨材に対しそれぞれ0, 50, 100%容積置換した。実験シリーズ3では, 単位粉体量500kg/m³, 細骨材をEFSのみとし, 単位水量185, 175, 165kg/m³の3水準, 各水準に対し水セメント比55, 50, 45%とした。コンクリートの目標スランプフローは65cm, 目標空気量は4.5%とし, 所要のフレッシュ性状を満足するように, 高性能AE減水剤とAE剤の使用量を調整した。なお, 本実験で使用した砕砂, 石灰砕砂, EFSの粗粒率は大きく異なるため, 各配合におけるコンクリートのフレッシュ性状を一定とした場合, 単位粗骨材かさ容積を調整し配合修正する必要があった。その結果, EFS置換率の増



写真-1 電気炉酸化スラグ細骨材の外観形状

表-1 使用材料

材料名	記号	種類および物性値
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16 g/cm ³ , 比表面積: 3470 cm ² /g
混和材	FA	フライアッシュII種, 強熱減量: 2.6% 密度: 2.30 g/cm ³ , 比表面積: 3680 cm ² /g
細骨材	NS	砕砂, 表乾密度: 2.58 g/cm ³ 吸水率: 1.96%, 粗粒率: 2.67
	LS	石灰砕砂, 表乾密度: 2.66 g/cm ³ 吸水率: 0.88%, 粗粒率: 2.85
	EFS	電気炉酸化スラグ5-0.3, 表乾密度: 3.52 g/cm ³ 吸水率: 0.36%, 粗粒率: 3.38
粗骨材	G	石灰砕石2005, 表乾密度: 2.70 g/cm ³ 吸水率: 0.51%, 実積率: 61.0%
混和剤	SP	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸エーテル系
	AE	AE助剤 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表-2 コンクリートの配合

実験シリーズ	W/C (%)	W/P (%)	P(=C+FA) (kg/m ³)	Gm ³ (L/m ³)	単位量(kg/m ³)								SP (P×%)	AE ^{*4} (P×%)	単位容積質量 (kg/m ³)						
					W	C	FA	NS	LS	EFS	G										
1	50	38.9	450	535	175	350	100	774	-	-	880	1.400	12.0A	2419							
				515				402	-	549	848	0.900	13.0A	2566							
				505				205	-	840	832	0.675	9.0A	2633							
				525				-	814	-	864	0.950	11.0A	2467							
				505				-	423	560	832	0.700	9.5A	2603							
				495				-	215	855	815	0.600	9.0A	2681							
		485	-	-			1162	799	0.500	7.0A	2748										
		540	35.0	500			540	175	350	150	710	-	-	888	1.425	14.0A	2418				
		520					370				-	505	856	0.900	13.0A	2542					
		510					178				-	774	840	0.700	11.0A	2620					
		530					-				747	-	872	0.900	13.0A	2450					
		510					-				390	516	840	0.750	13.0A	2572					
	500	-			199	789	824				0.650	11.0A	2632								
	490	-	-	1074	807	0.500	9.0A			2716											
	550	31.8	550	550	175	350	200			635	-	-	907	1.275	16.5A	2403					
	530			334						-	456	872	0.900	14.0A	2540						
	520			171						-	700	856	0.675	11.0A	2585						
	540			-						673	-	888	1.000	21.0A	2442						
	520			-						352	466	856	0.825	21.0A	2545						
	510			-				180	715	840	0.700	19.0A	2612								
	500	-	-	975			824	0.600	17.0A	2679											
	550	55	35.0	500			175	350	181	681	-	-	907	1.300	15.0A	2416					
	530									357	-	488	872	0.800	15.0A	2535					
	540									-	721	-	888	0.825	18.0A	2436					
520	-									376	498	856	0.675	17.0A	2562						
500	-									-	1038	824	0.450	11.0A	2698						
540	-				-	-				888	1.425	14.0A	2418								
520	50 ^{*2}				35.0	500			175	350	150	710	-	-	888	1.425	14.0A	2418			
520												370	-	505	856	0.900	13.0A	2542			
530												-	747	-	872	0.900	13.0A	2450			
510												-	390	516	840	0.750	13.0A	2572			
490												-	-	1074	807	0.500	9.0A	2716			
540												-	-	-	888	1.450	16.0A	2445			
520	45	35.0	500	175	350	111	377	-			-	514	0.925	12.0A	2551						
530							-	761			-	872	0.900	12.0A	2463						
510							-	396			524	840	0.700	10.0A	2579						
490							-	-			1091	807	0.600	5.0A	2739						
500							37.0	500			185	337	163	-	-	-	1014	824	0.350	8.0A	2672
490														370	130	-	-	1045	807	0.375	6.0A
45	412	88	-			-			1063	807				0.400	3.0A	2705					
55	319	181	-			-			1038	824				0.450	11.0A	2698					
50	350	150	-			-			1074	807				0.500	9.0A	2716					
45	389	111	-			-			1091	807				0.600	5.0A	2679					
55	33.0	500	165			300	200	-	-	-		1067	824	0.525	11.0A	2702					
50								330	170	-		-	1102	807	0.550	8.0A	2725				
45				367	133			-	-	1116		807	0.600	5.0A	2740						

*1 単位粗骨材かさ容積 *2 実験シリーズ1の結果を用いる。 *3 実験シリーズ1, 2の結果を用いる。 *4 AE剤は1A=0.001%で計算する。

表-3 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	備考
スランプフロー	JIS A 1150	65±5cm
空気量	JIS A 1128	4.5±1.5%
単位容積質量	JIS A 1116	
ブリーディング	JIS A 1123	0.3cm ³ /cm ² 以下
充填試験	JSCE-F 511	充填高さ R2=300mm 以上
流下試験	JSCE-F 512	流下時間=13 秒以下
圧縮強度	JIS A 1108	標準水中養生 7, 28, 91 日
静弾性係数	JIS A 1149	標準水中養生 28, 91 日

大に伴い単位粗骨材かさ容積は小さくなり、砕砂 100% 配合に比較して、EFS100%配合の単位粗骨材かさ容積は 50L/m³程度小さくなった。

2.2 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜには、容量 100 リットルの強制二軸ミキサを用いた。最初にセメント、FA、細骨材を 10 秒間空練りした後、混和剤を溶解した水を加えて 60 秒間、さらに粗骨材を加えて 60 秒間の練混ぜを行った。ミキサ停止後、5 分間の静置を行い、30 秒間練混ぜた後排出した。また、実験シリーズ 1 における単位粉体量 550kg/m³とした配合 7 水準については、モルタルの練混ぜ時間を 120 秒間に延長した。

2.3 試験項目および方法

試験項目および試験方法を表-3 に示す。フレッシュ性状の確認は、状態を目視で観察するとともに、スランプフロー、空気量、単位容積質量、ブリーディングおよび充填試験(U 形)、流下試験(V 漏斗)を実施した。硬化性状は、圧縮強度および静弾性係数を実施し、それぞれ関連する試験方法に準拠した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性状

(1) 混和剤添加率とスランプフローおよび空気量

実験シリーズ 1 における EFS 置換率と混和剤添加率の関係を図-1 に、全実験シリーズにおける混和剤添加率とスランプフローおよび空気量の関係を図-2 に示す。EFS 置換率の増加に伴い SP 剤添加率、AE 剤添加率ともに減少する傾向が確認された。また、スランプフロー、空気量ともに所定の目標範囲内に入っているが、空気量と AE 剤添加率にはほとんど相関性がない。一方、NS100 を除くと、スランプフローと SP 剤添加率には正の相関性があることが確認できる。EFS は粒子形状が丸く適度な粒度分布を有しており、流動性状が改善されるため SP 剤の低減に寄与したと思われる。

全実験シリーズにおける FA 混入量と AE 剤添加率の関係を図-3 に示す。FA 混入量の増加に伴い AE 剤添加率は直線的に増加した。フライアッシュに含まれる未燃炭素は AE 剤を吸着し、コンクリートの空気連行を阻害することが指摘されており、本実験においても同様の傾向を示した。一方で、EFS 置換率の増大に伴い AE 剤添

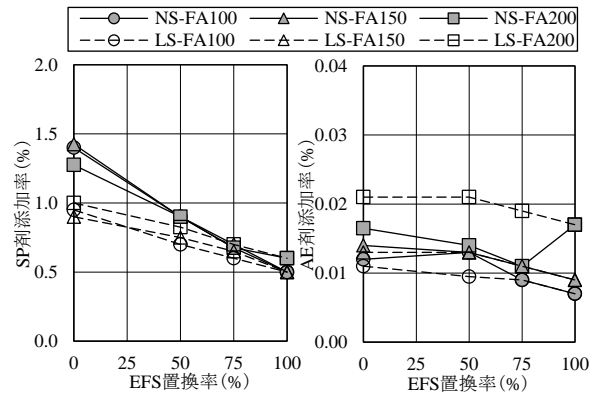


図-1 EFS 置換率と混和剤添加率

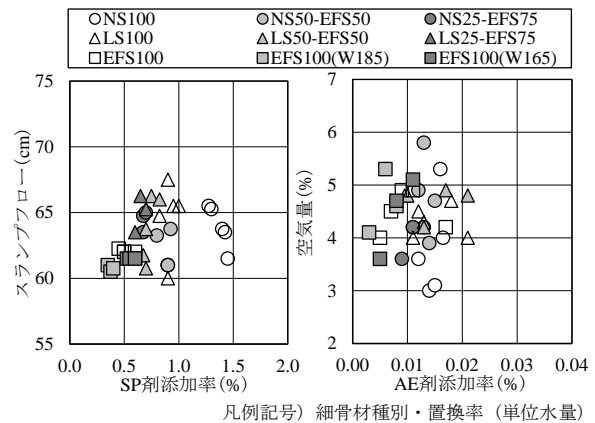


図-2 混和剤添加率と各種性状

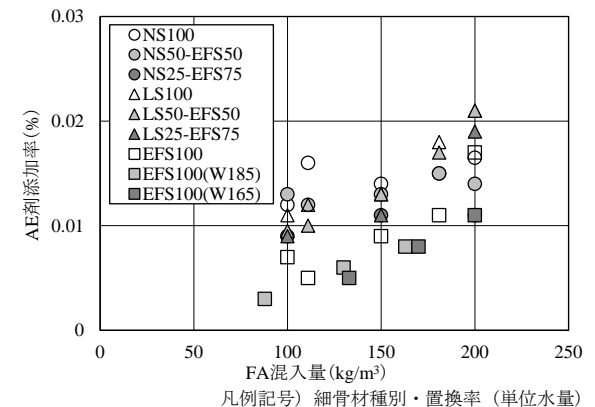


図-3 FA 混入量と AE 剤添加率

加率は減少傾向を示したことから、EFS は他の骨材に比べて空気連行性に優れるものと考えられる。

(2) V 漏斗流下時間

EFS 置換率と V 漏斗流下時間の関係を図-4 に示す。骨材種別に関わらず、EFS 置換率の増大に伴い V 漏斗流下時間は大幅に減少し、EFS を使用することで流動性および間隙通過性に対する改善効果が確認できた。ただし、本実験の条件では、EFS 置換率の増大に伴い単位粗骨材かさ容積を小さく設定したため、コンクリート中の粗骨材量が少なくなり、漏斗通過時における粗骨材の噛み合わせが緩和されたため、V 漏斗流下時間が減少したことも影響したと考えられる。また、砕砂に比べ、石灰砕砂

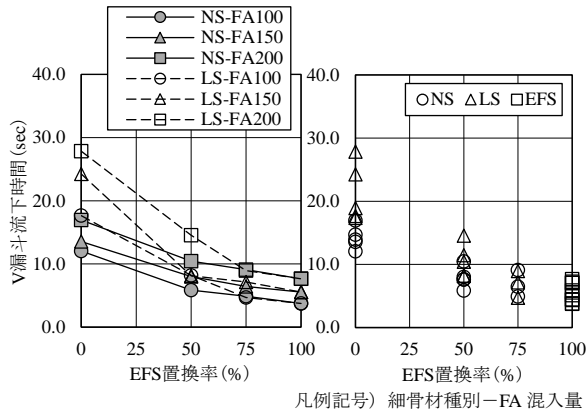


図-4 EFS 置換率とV漏斗流下時間
(左：シリーズ1, 右：全シリーズ)

の方がV漏斗流下時間は増大した。石灰砕砂は、製造する際に破碎によって生じた石粉を多く含むため見掛けの粉体量が増加し、流動性および間隙通過性が低下したものと考えられる。FAの影響として、混入量の増加に伴いV漏斗流下時間は増大した。

(3) U形充填時間および高さ

EFS置換率とU形充填時間の関係を図-5に示す。骨材種別に関わらず、EFS置換率の増大に伴いU形充填時間は減少し、EFSを使用することにより間隙通過性が向上したが、EFS置換率が75%を超える条件ではU形充填時間に大きな差はみられなかった。EFS置換率とU形充填高さの関係を図-6に示す。EFS置換率の増大に伴いU形充填高さは増加し、EFS置換率75%以上で平衡高さ(355mm)付近まで充填した。また、FA混入量100kg/m³、EFS置換率100%の条件では平衡高さを超えて充填したが、これは粉体量が少ないことでコンクリートがB室側へ勢いよく流入したことによるものと推察される。また、全ての配合でU形充填高さ(障害R2)300mm以上を満足し、高流動コンクリートの施工指針⁴⁾におけるランク2相当の自己充填性を有することが認められた。ただし、EFS置換率の増大に伴い単位粗骨材かさ容積を小さく設定したため、コンクリート中の粗骨材量が少なくなり、間隙通過性が向上したことも影響したと考えられる。

(4) 各指標相互関係

フレッシュ性状における各指標間の相互関係を図-7～図-10に示す。50cmフロー到達時間、フロー停止時間の増大に伴いV漏斗流下時間、U形充填時間は増大する傾向を示し、各指標間には高い相関性が認められた。50cmフロー到達時間とU形充填高さの関係より、50cmフロー到達時間に関わらずU形充填高さはほぼ同等であった。また、石灰砕砂、砕砂、EFSの順に50cmフロー到達時間、フロー停止時間およびV漏斗流下時間は増大した。高流動コンクリートの施工指針⁴⁾における50cmフロー到達時間の目安は、ランク2相当で3～15秒である。

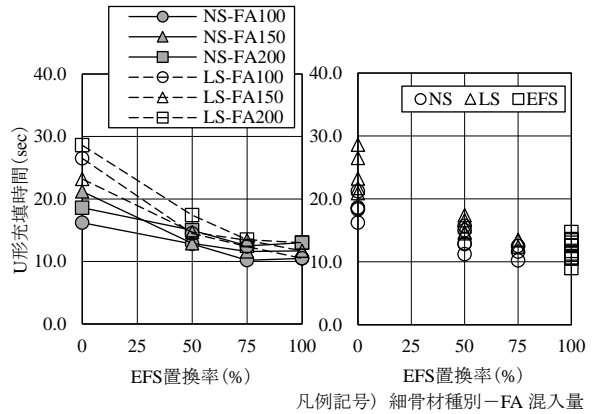


図-5 EFS 置換率とU形充填時間
(左：シリーズ1, 右：全シリーズ)

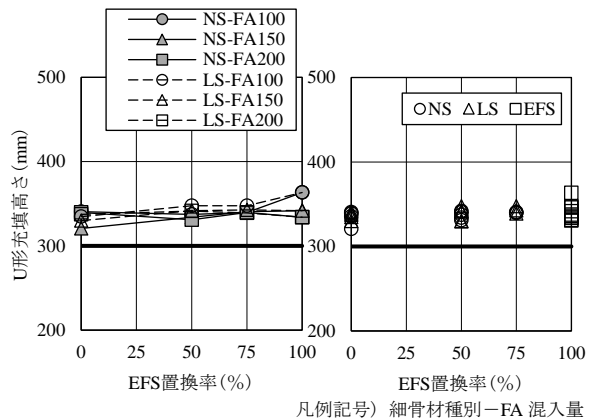


図-6 EFS 置換率とU形充填高さ
(左：シリーズ1, 右：全シリーズ)

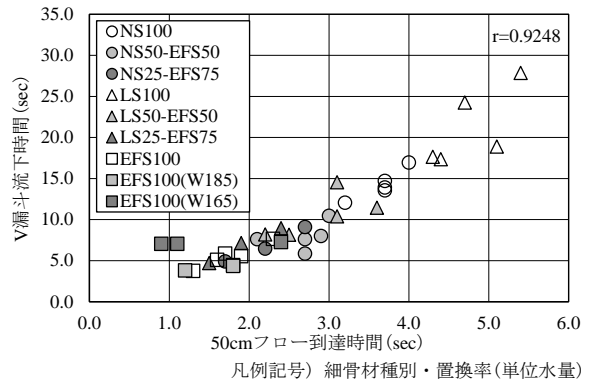


図-7 50cm フロー到達時間とV漏斗流下時間

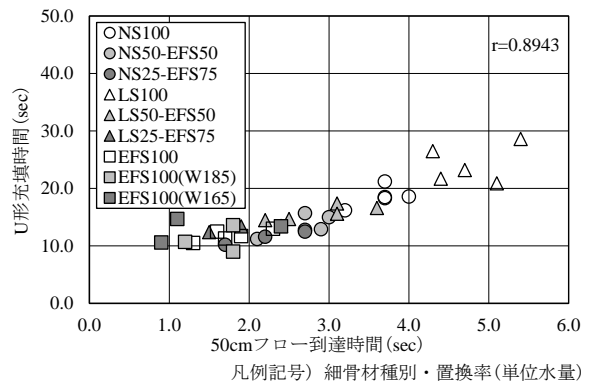


図-8 50cm フロー到達時間とU形充填時間

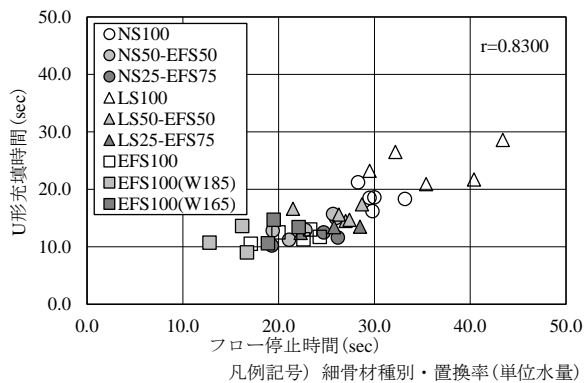


図-9 フロー停止時間とU形充填時間

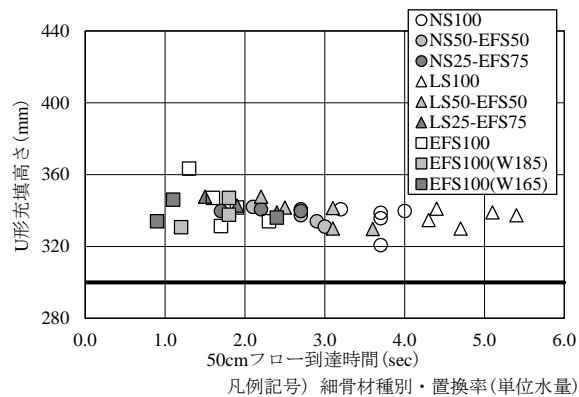


図-10 50cmフロー到達時間とU形充填高さ

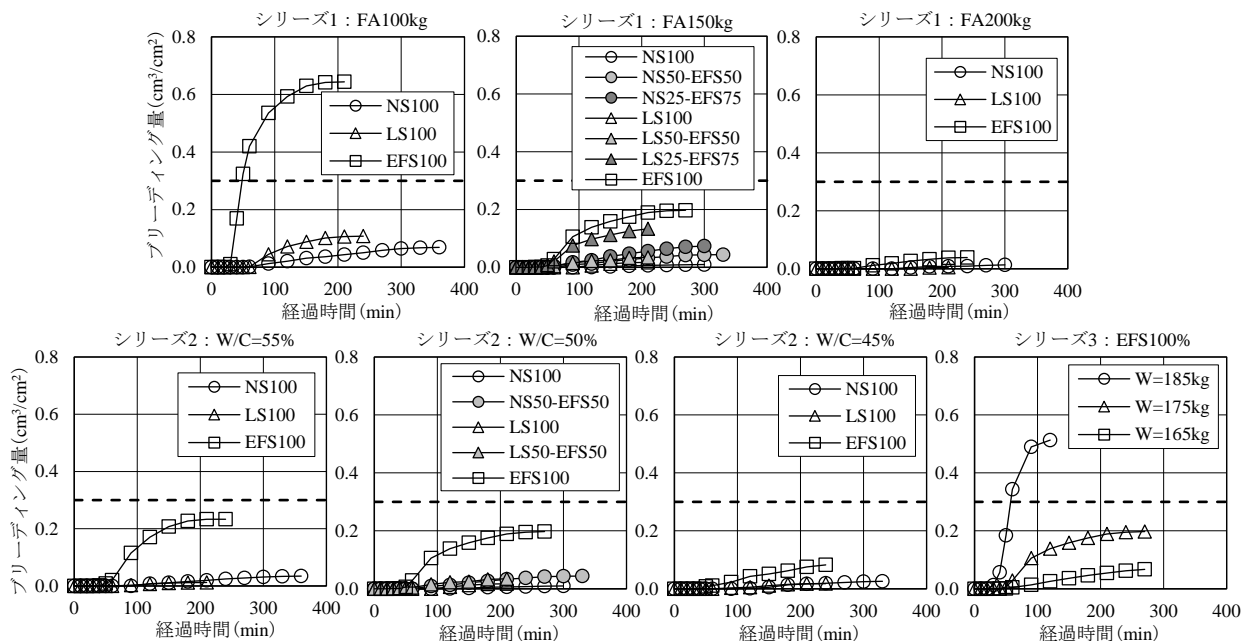


図-11 各種要因とブリーディング量の関係

本実験では、骨材種別に関わらずEFSを50%以上置換した場合で50cmフロー到達時間は大幅に減少し、EFS置換率75%以上で全て3秒以下となった。これは、EFS自体が滑らかで真球に近い形状であるため、EFS置換率の増大に伴い流動性が向上したものと考えられる。

(5) ブリーディング

各種要因とブリーディング量の関係を図-11に示す。なお、ブリーディング量の目安としてJASS5凍結融解作用を受けるコンクリート⁵⁾を参考に、図中に破線で示した。実験シリーズ1において、EFS置換率の増大に伴いブリーディング量は増加したが、FA混入量を増加することでブリーディング量は大幅に低減できた。前者は、EFSの表面がガラス質で吸水率が小さいことによる保水性低下や、EFS置換率の増大に伴い骨材全体の密度が大きくなり骨材相に作用する鉛直下向きの力がより大きくなったことに起因し、後者は、粉体量を増加することによる自由水の移動制限やフレッシュコンクリートの保水性向上によるものと考えられる。また、FA混入量100kg/m³、EFS置換率100%の条件では、ブリーディング量の規定

値0.3cm³/cm²を大幅に上回った。単位水量175kg/m³、単位粉体量500kg/m³の一定とした実験シリーズ2では、水セメント比が大きくなるとブリーディング量は増加したが、いずれの条件においてもブリーディング量の規定値を下回った。細骨材としてEFSを100%置換した実験シリーズ3では、単位水量185kg/m³の条件でブリーディング量の規定値を上回ったが、単位水量を低減することにより、ブリーディングの発生を大幅に抑制できた。

3.2 硬化コンクリートの性状

(1) 圧縮強度

FA混入量とEFS置換率、圧縮強度の関係を図-12に示す。骨材種別に関わらず、EFS置換率の増大に伴い圧縮強度は直線的に低下した。これは、EFS自体が滑らかで粒子形状が丸いため、セメントペーストとの付着力が低下したためと考えられる。また、FA混入量の増加に伴い各材齢における圧縮強度は増加した。水セメント比一定の条件下では、FAを混入することによるフィラー効果によりコンクリートの組織が緻密化し、強度が増加したものと考えられる。水セメント比とEFS置換率、圧縮強

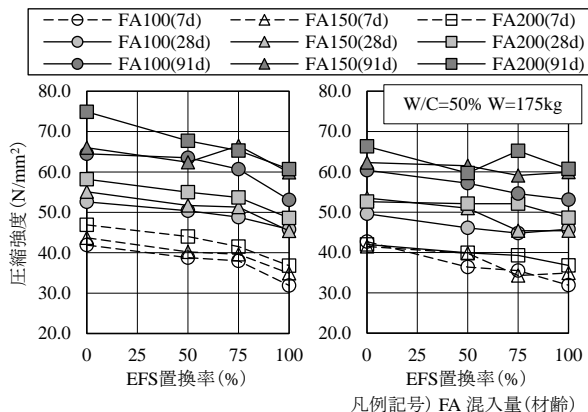


図-12 EFS 置換率と圧縮強度(シリーズ 1)
(左：碎砂置換，右：石灰碎砂置換)

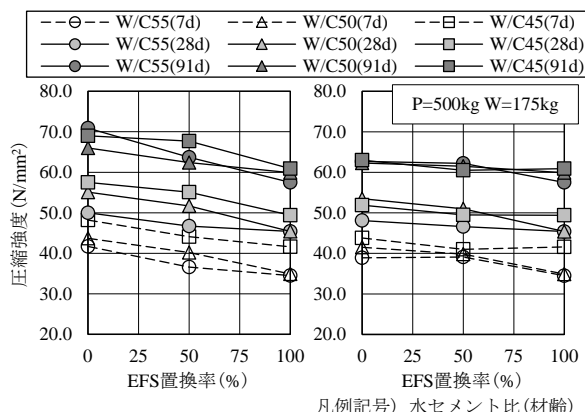


図-13 EFS 置換率と圧縮強度(シリーズ 2)
(左：碎砂置換，右：石灰碎砂置換)

度の関係を図-13に示す。骨材種別に関わらず、EFS 置換率の増大に伴い圧縮強度は低下傾向を示した。

(2) 静弾性係数

コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を図-14に示す。参考のため、土木学会標準示方書の式⁶⁾を実線で、単位容積質量を 2.4t/m³とした New RC 式⁵⁾を破線、2.6t/m³とした New RC 式を一点鎖線で示す。各材齢ともに、静弾性係数は EFS を 100%置換した条件で最も大きな値を示した。一般に、コンクリートの単位容積質量が大きいほど静弾性係数は大きい値を示すが、本実験においても同様の傾向がみられた。材齢で比較すると、材齢の進行に伴い圧縮強度は増加するが、静弾性係数は圧縮強度の増加に比例するほど増加しなかった。また、単位水量の増減による有意な差は確認できなかった。

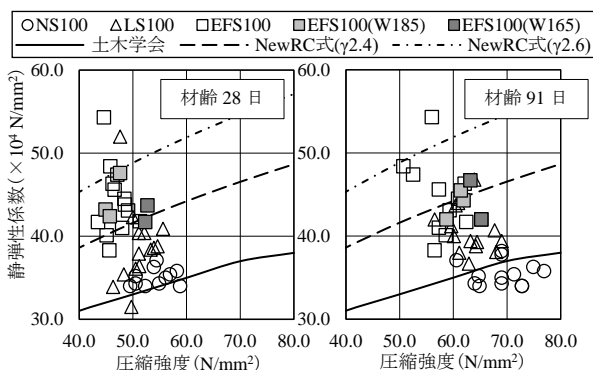


図-14 圧縮強度と静弾性係数

4. 結論

本研究で得られた結果は以下の通りである。

- (1) EFS は所要のスランプフローを満足するための SP 剤添加量を大幅に低減でき、その効果は EFS 置換率の増大に伴い著しい。
- (2) FA 混入量の増加に伴い AE 剤添加量は増加するが、EFS を置換することで大幅に低減できる。
- (3) EFS は、粉体系高流動コンクリートの流動性、間隙通過性、自己充填性の改善に効果がある。

- (4) EFS の多量使用は、ブリーディング量の増大を招くが、単位水量の低減や FA 混入量を増加することにより抑制可能であり、EFS 置換率 100%の条件においても配合条件により規定値を下回った。
- (5) EFS 置換率の増大に伴い圧縮強度は若干低下するが、静弾性係数は増加する。

謝辞

本研究を実施するにあたり、徳島大学工学部建設工学科コンクリート研究室の院生や卒論生諸氏の協力を得ました。また、ポゾリスソリューションズ(株)松田氏、国際企業(株)原田氏には実験に際し多大な協力を頂きました。電気炉酸化スラグ細骨材は(株)星野産商から、フライアッシュは四電ビジネス(株)から提供を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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)，コンクリートライブラリー110，2003.5
- 2) 五味信治ほか：スラグ骨材を使用した高密度コンクリートの調合とその性質に関する実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.433-438，2008
- 3) 山本隆信，杉山隆文，辻幸和：フライアッシュコンクリートの空気連行性およびブリーディングに影響を及ぼす各種要因，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，pp.97-102，1998
- 4) 土木学会：高流動コンクリートの配合設計・施工指針 [2012 年版]，コンクリートライブラリー136，pp.33-58，2012.6
- 5) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2015.7
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，pp.43，2017.3