

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硬化性状

横山 卓哉*1・橋本 親典*2・渡辺 健*3・石丸 啓輔*4

要旨: コンクリート施工の省力化や省人化, 過密配筋構造物への対応, 環境負荷低減の観点から, 産業副産物である電気炉酸化スラグ細骨材およびフライアッシュを多量に使用した粉体系高流動コンクリートの硬化性状および耐久性について検討を行った。なお, 本研究では, 電気炉酸化スラグ細骨材の中でも特殊製法で製造された真球に近い形状を有する風砕スラグを用いた。その結果, 風砕スラグ置換率の増加に伴い圧縮強度は低下傾向を示したが, 静弾性係数は風砕スラグを使用した条件で最も大きくなった。また, 風砕スラグを使用することで, 乾燥収縮ひずみ, 質量減少率ともに他の一般的な骨材と比較して小さくなった。

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, 硬化性状

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。2003年にはJIS化され, 土木学会より施工指針(案)¹⁾も示されており, 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。電気炉酸化スラグは, 一般の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へ適用されてきた。しかし, 電気炉酸化スラグをコンクリート用骨材として多量に使用した場合, 骨材の沈降や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⁾。一方, 2003年当初における電気炉酸化スラグ細骨材は破砕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(以下, EFS)の製造技術が確立された。この技術革新により, EFSをコンクリート用細骨材として使用することで同一スランブを得るための単位水量を低減することが可能になった。

また, コンクリート施工の省力化や省人化, 過密配筋構造物への対応, 環境負荷低減の観点から, 産業副産物であるフライアッシュ(以下, FA)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研究が行われてきた。FAをコンクリートに用いた場合, FA中に含まれる未燃炭素がAE剤を吸着することで空気連行性が低下し, コンクリートのフレッシュ性状や耐凍害性の低下を招くことが指摘されている³⁾。粉体系高流動コンクリートは, 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一方で, 一般的なスランブ配合のコンクリートに比べ, 所要のフ

レッシュ性状を得るための単位水量や高性能 AE 減水剤(以下, SP 剤)の使用量が増加する傾向にある。2019年には, 生産性向上の一環として, JIS A 5308における普通コンクリートの区分にスランブフロー45, 50, 55および60cmが追加されており, EFSは単位水量やSP剤の使用量を低減できる材料の一つとして今後利用される可能性が高いと思われる。

著者らは, EFSと粉体系高流動コンクリートそれぞれの特徴に着目し, EFS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を行った⁴⁾。その結果, EFSを使用することにより, 所要のスランブフロー, 空気量を得るためのSP剤, AE剤使用量を大幅に低減でき, 流動性, 間隙通過性, 自己充填性の改善に効果のあることが確認できた。また, EFSの多量使用はブリーディング量の増大を招いたが, 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った。

本研究では, EFSの粉体系高流動コンクリートへの適用の可能性について, 硬化性状や耐久性の観点から評価を行い, 検討を行うことを目的とした。本論文は, 参考文献⁴⁾の続報であるため, 実験に供した材料や配合は同一であり, フレッシュ性状に関する研究成果は前報で報告している。

2. 実験概要

2.1 使用材料および特性

EFSの製造状況および外観形状を写真-1に示す。まず, 専用の釜で電気炉から副産された熔融スラグを専用車両で風砕建屋に運搬する。その後, 傾動式の釜に熔融スラグを移し替える(A)。移し替えられた熔融スラグの

*1 (株)キクノ 品質管理部 部長 博(工) (正会員)

*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)



写真-1 EFSの製造状況および外観

入った釜を徐々に傾け(B)、流れ落ちる熔融スラグに後方から風を送り空気中に飛散させる(C)ことで、真球に近い形状のスラグ骨材(D)が生成される。本実験に使用した使用材料の物理的性質を表-1に示す。EFS, FAともに、JISに適合するものを用いた。

2.2 配合

コンクリートの配合を表-2に示す。実験シリーズ1ではEFS置換率および単位粉体量(単位FA量)の影響について評価することを目的とし、水セメント比50%, 単位水量175kg/m³の一定, 単位粉体量を450, 500, 550kg/m³の3水準, EFSをNS, LSに対しそれぞれ0, 50, 75, 100%容積置換した。実験シリーズ2では単位粉体量一定

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	配合記号	W/C (%)	W/P (%)	P ¹ (kg/m ³)	Gm ² (L/m ³)	単位量 (kg/m ³)								SP ³ (%)	AE ⁴ (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	試験実施項目			
						W	C	FA	NS	LS	EFS	G	圧縮強度				静弾性係数	乾燥収縮	凍結融解	
1	FA100-N100	38.9	450	535	175	350	100	774	-	-	880	1.400	12.0A	2419	○	○	○			
	FA100-N50E50							402	-	549	848	0.900	13.0A	2566	○	○	○			
	FA100-N25E75							205	-	840	832	0.675	9.0A	2633	○	○	○			
	FA100-L100							-	814	-	864	0.950	11.0A	2467	○	○	○			
	FA100-L50E50							-	423	560	832	0.700	9.5A	2603	○	○	○			
	FA100-L25E75							-	215	855	815	0.600	9.0A	2681	○	○	○			
	FA100-E100	485	-	-	1162	799	0.500	7.0A	2748	○	○	○	○							
	FA150-N100	50	35.0	500	175	350	150	710	-	-	888	1.425	14.0A	2418	○	○	○	○		
	FA150-N50E50							370	-	505	856	0.900	13.0A	2542	○	○	○			
	FA150-N25E75							178	-	774	840	0.700	11.0A	2620	○	○	○			
	FA150-L100							-	747	-	872	0.900	13.0A	2450	○	○	○	○		
	FA150-L50E50							-	390	516	840	0.750	13.0A	2572	○	○	○			
	FA150-L25E75							-	199	789	824	0.650	11.0A	2632	○	○	○			
	FA150-E100	490	-	-	1074	807	0.500	9.0A	2716	○	○	○	○							
	FA200-N100	31.8	550	550	175	350	200	635	-	-	907	1.275	16.5A	2403	○	○	○			
	FA200-N50E50							334	-	456	872	0.900	14.0A	2540	○	○	○			
	FA200-N25E75							171	-	700	856	0.675	11.0A	2585	○	○	○			
	FA200-L100							-	673	-	888	1.000	21.0A	2442	○	○	○			
FA200-L50E50	-							352	466	856	0.825	21.0A	2545	○	○	○				
FA200-L25E75	-							180	715	840	0.700	19.0A	2612	○	○	○	○			
FA200-E100	500	-	-	975	824	0.600	17.0A	2679	○	○	○	○								
2	W/C55-N100	55	35.0	500	175	350	181	681	-	-	907	1.300	15.0A	2416	○	○	○			
	W/C55-N50E50							357	-	488	872	0.800	15.0A	2535	○	○	○			
	W/C55-L100							-	721	-	888	0.825	18.0A	2436	○	○	○			
	W/C55-L50E50							-	376	498	856	0.675	17.0A	2562	○	○	○			
	W/C55-E100							-	-	1038	824	0.450	11.0A	2698	○	○	○	○		
	W/C50-N100							710	-	-	888	1.425	14.0A	2418	○	○	○			
	W/C50-N50E50	370	-	505	856	0.900	13.0A	2542	○	○	○									
	W/C50-L100	-	747	-	872	0.900	13.0A	2450	○	○	○	○								
	W/C50-L50E50	-	390	516	840	0.750	13.0A	2572	○	○	○									
	W/C50-E100	490	-	-	1074	807	0.500	9.0A	2716	○	○	○	○							
	W/C45-N100	45	35.0	500	175	350	111	722	-	-	888	1.450	16.0A	2445	○	○	○			
	W/C45-N50E50							377	-	514	856	0.925	12.0A	2551	○	○	○			
W/C45-L100	-							761	-	872	0.900	12.0A	2463	○	○	○				
W/C45-L50E50	-							396	524	840	0.700	10.0A	2579	○	○	○	○			
W/C45-E100	490							-	-	1091	807	0.600	5.0A	2739	○	○	○	○		
W/C45-E100	490							-	-	1091	807	0.600	5.0A	2740	○	○	○	○		
3	W185-W/C55	55	37.0	500	185	163	-	-	-	1045	807	0.375	6.0A	2692	○	○	○	○		
	W185-W/C50	50					370	130	-	-	1045	807	0.375	6.0A	2692	○	○	○	○	
	W185-W/C45	45					412	88	-	-	1063	807	0.400	3.0A	2705	○	○	○	○	
	W175-W/C55	55	35.0		175	181	-	-	-	1038	824	0.450	11.0A	2698	○	○	○	○		
	W175-W/C50	50					350	150	-	-	1074	807	0.500	9.0A	2716	○	○	○	○	
	W175-W/C45	45					389	111	-	-	1091	807	0.600	5.0A	2679	○	○	○	○	
	W165-W/C55	55	33.0		165	170	-	-	-	1067	824	0.525	11.0A	2702	○	○	○	○		
	W165-W/C50	50					330	170	-	-	1102	807	0.550	8.0A	2725	○	○	○	○	
	W165-W/C45	45					367	133	-	-	1116	807	0.600	5.0A	2740	○	○	○	○	

*1 P=C+FA *2 単位粗骨材かさ容積 *3 Pに乘じる *4 AE剤は1A=0.001%で計算し, Cに乘じる

の条件で水セメント比を増減することによるセメントとFAの混合割合の影響について評価することを目的とし、単位粉体量 500kg/m³、単位水量 175kg/m³の一定、水セメント比 55, 50, 45%の3水準、EFSをNS, LSに対しそれぞれ 0, 50, 100%容積置換した。実験シリーズ3では単位水量の影響について評価することを目的とし、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ブフローは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、SP, AE使用量を調整した。なお、本実験で使用したNS, LS, 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材料分離抵抗性や間隙通過性、自己充填性を満足するために、単位粗骨材かさ容積を調整し配合修正を行った。その結果、EFS置換率の増大に伴い単位粗骨材かさ容積は小さくなり、NSを100%置換した配合はEFSを100%置換した配合に比べ50L/m³程度、LSを100%置換した配合はEFSを100%置換した配合に比べ40L/m³程度小さくなった。

2.3 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。

2.4 試験項目および方法

試験項目および方法を表-3に示す。硬化性状として、圧縮強度および静弾性係数、乾燥収縮、凍結融解試験を実施し、それぞれ関連する試験方法に準拠した。なお、圧縮強度試験についてはすべての配合で実施し、静弾性係数、乾燥収縮、凍結融解試験については代表配合で実施した。凍結融解試験では、橋本ら⁵⁾が提案している液体窒素ガスを用いた簡易的凍結融解試験を実施した。この試験方法の10サイクルが、JIS A 1148に規定されてい

る凍結融解試験の300サイクルに相当すると報告しており⁶⁾、表層部の劣化を短いサイクル数で確認できる。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度と静弾性係数

(1) 圧縮強度

図-1(a)~(c)に圧縮強度試験の結果一覧を、図-2(a)~(c)に各細骨材単味における材齢と圧縮強度の関係を実験シリーズ別に示す。既報⁴⁾で示した通り、すべての配合で空気量は目標範囲内に納まっており、空気量の影響はなかったものとする。実験シリーズ1では、図-1(a)より、FA混入量の違いに関わらず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自体が滑らかで球形に近いので、セメントペーストとの付着力低下や骨材とセメントペースト間の遷移帯厚さが増大⁷⁾したことに起因するものと考えられる。図-2(a)より、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、単位水量一定の条件では、FA混入量を増加することによる水粉体比の低下によりコンクリート組織が緻密化し、強度が増加したものと考えられる。

実験シリーズ2では、図-1(b)より、水セメント比の違いに関わらずEFS置換率の増大に伴い圧縮強度は低下した。図-2(b)より、材齢28日までの圧縮強度は水セメント比の低下に伴い増加したが、材齢91日では水セメント比55%で同等か増加している。単位粉体量、単位水量一定の条件では、水セメント比が大きくなると粉体に占めるFAの割合が増加するため、FAのポズラン反応が長期強度の増進に寄与したものと考えられる。

表-3 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	備考
スランブフロー	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 ^{*1}	JIS A 1108	標準水中養生7, 28, 91日
静弾性係数 ^{*2}	JIS A 1149	標準水中養生28, 91日
乾燥収縮 ^{*2}	JIS A 1129-2	材齢182日
凍結融解 ^{*2}	簡易凍結融解試験	10サイクル

*1 全配合で実施 *2 代表配合で実施(表-2参照)

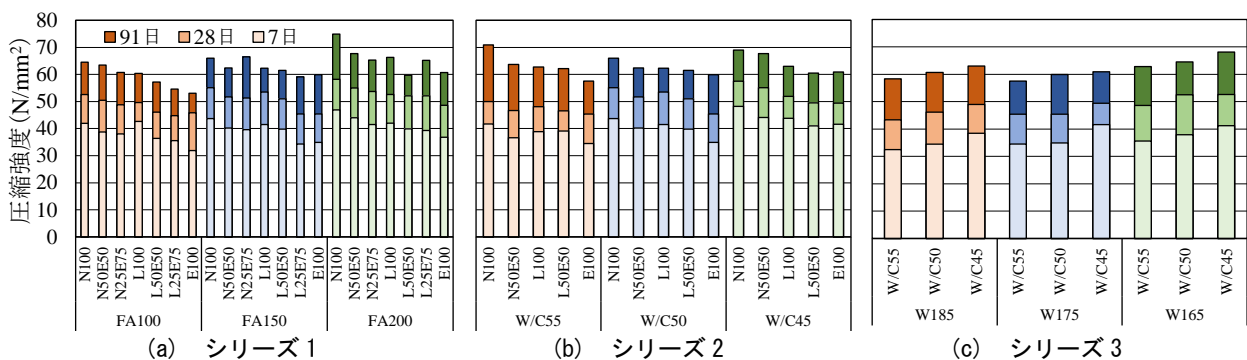


図-1 圧縮強度結果一覧

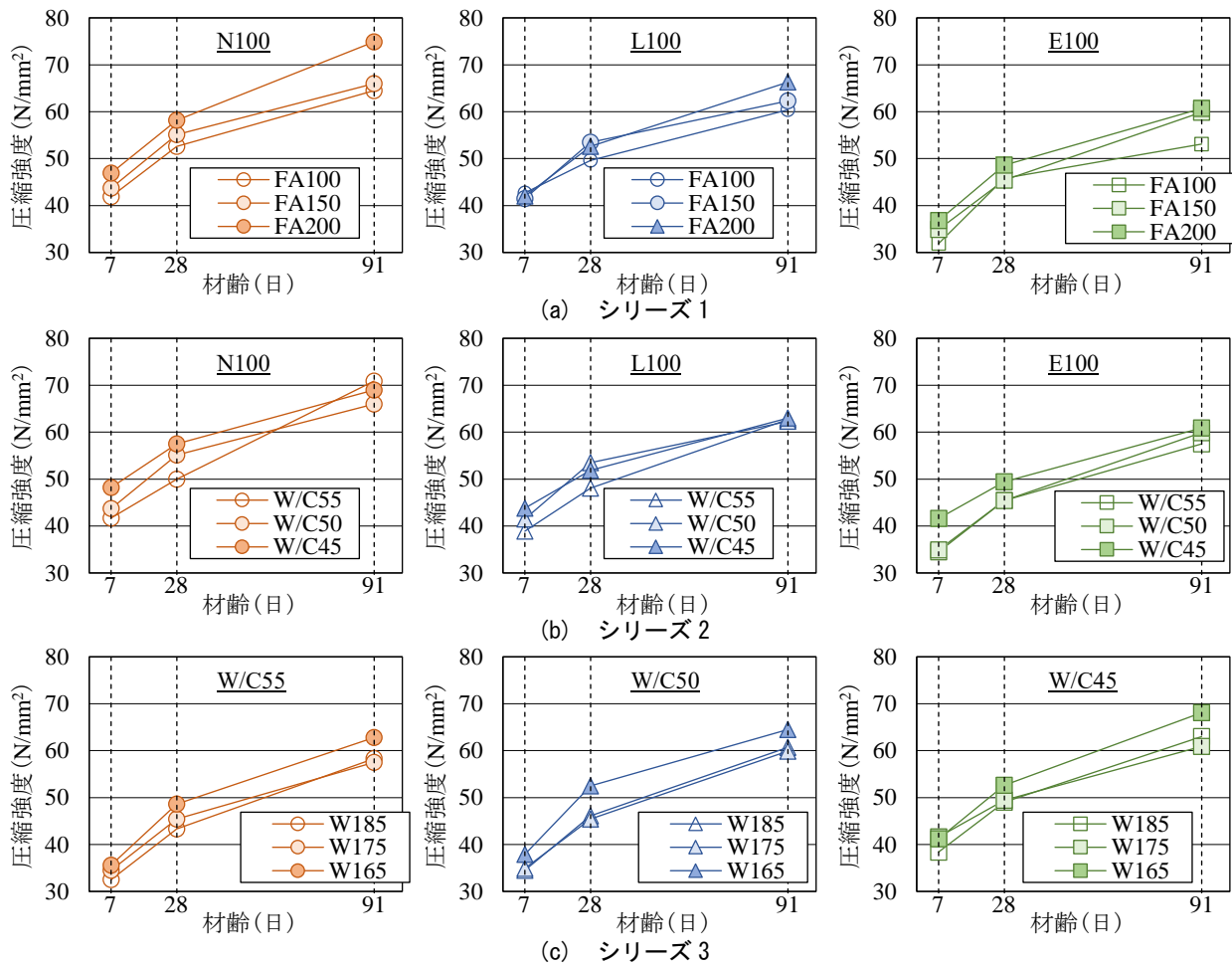


図-2 材齢と圧縮強度の関係

実験シリーズ3では、図-2(c)より、単位水量の低減に伴い各材齢における圧縮強度は増加した。単位粉体量一定の条件下では、単位水量が小さくなると粉体に占めるFAの割合が増加するため、フィラー効果によるコンクリート組織の緻密化とポズラン反応により、材齢初期から長期に至るまで強度発現に効果があったと考えられる。

(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-3に示す。また、土木学会標準示方書の式⁸⁾を実線で、単位容積質量を $2.4t/m^3$ としたNew RC式⁹⁾を破線で示す。EFSを100%置換した場合、圧縮強度は小さくなったが、静弾性係数は他の骨材と比較して最も大きな値を示した。一般に、骨材の弾性係数が大きく、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認められ、EFS自体の特徴が顕著に表れたものと考えられる。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。

3.2 乾燥収縮

図-4(a)~(c)に、乾燥収縮ひずみ、質量減少率と材齢の関係を実験シリーズ別を示す。実験シリーズ1では、細骨材種類に関わらずFA混入量の増加に伴い質量減少

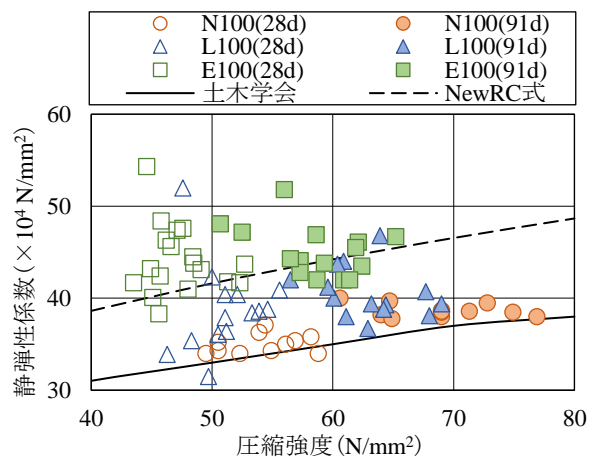


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

率は減少したが、乾燥収縮ひずみに顕著な相違は認められなかった。一方で、EFSを100%使用した配合は、FA混入量の違いに関わらず、乾燥収縮ひずみ、質量減少率ともに他の細骨材と比較して小さくなった。これは、硬質且つ緻密なEFSがセメントペースト部の収縮を拘束する効果と、他の細骨材に比べ吸水率の小さいEFS内部からの自由水の逸散が低減され、より緻密なセメントペーストが形成されたことに起因すると考えられる。

実験シリーズ2では、水セメント比の増大に伴い乾燥

収縮ひずみ、質量減少率ともに大きくなった。一般に、単位水量を一定とした場合、水セメント比の増大に伴って単位セメント量が減少した分だけ骨材量が増加する。骨材の乾燥収縮ひずみは、セメントペーストに比べて小さいため、骨材が相対的にセメントペーストの収縮を拘束する役割を担うことになる。本実験シリーズ2では、単位粉体量および単位水量を一定としたため、水セメント比の増減に関わらず骨材量に大きな差は生じない。つまり、水セメント比の増大に伴う乾燥収縮ひずみ、質量減少率の増大は、水和に寄与しない自由水の増加が影響していると推察される。

実験シリーズ3では、単位水量の低減に伴い乾燥収縮ひずみ、質量減少率ともに減少した。水セメント比が一

定の場合、単位水量を低減するとコンクリート中のセメントペースト量が減少した分だけ骨材量が増加し、それに伴った収縮拘束効果が生じる。本実験シリーズ3では、単位粉体量を一定としたため、単位水量の違いに関わらず骨材量に大きな差は生じていない。つまり、単位水量低減に伴う自由水の低減や、水粉体比が小さくなったことによるコンクリート組織の緻密化により、乾燥収縮ひずみ、質量減少率が減少したものと考えられる。

図-5 に、最終ひずみと質量減少率の関係を示す。質量減少率が小さくなると乾燥収縮ひずみも小さくなる傾向が確認でき、コンクリート中の自由水の逸散と乾燥収縮には相関性があるといえる。また、乾燥収縮ひずみ、質量減少率ともに EFS, LS, NS の順に概ね小さくなっ

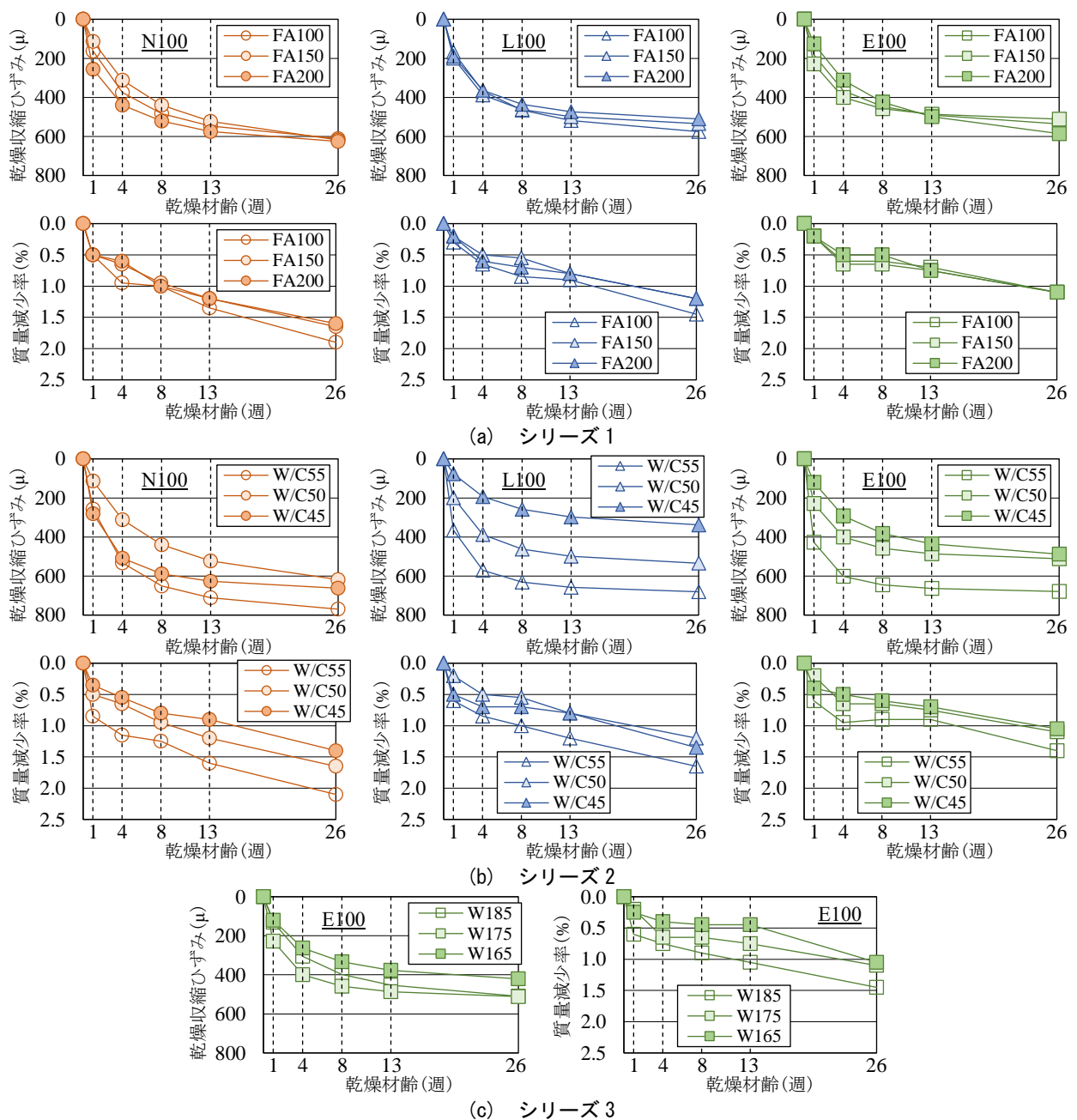


図-4 乾燥収縮ひずみ、質量減少率と材齢の関係

ており、硬質且つ緻密な EFS は乾燥収縮の低減に効果があると考えられる。いずれにしても、EFS を使用した配合は日本建築学会・収縮ひび割れ指針(案)¹⁰⁾に示されたコンクリートに対する設計値 800×10^{-6} 以下を満足した。

3.3 凍結融解抵抗性

急速凍結融解試験の結果を図-6 に示す。JASS5 凍結融解作用を受けるコンクリート⁹⁾によれば、JIS A 1148 によるコンクリートの凍結融解試験において、300 サイクルにおける相対動弾性係数 85% 以上を標準的な値としている。一方、同解説によれば相対動弾性係数 60% 以上の場合で十分な耐凍害性を有するとある。試験方法は異なるものの、今回実施した配合はすべて相対動弾性係数 60% 以上を満足した。また、細骨材種類、FA 混入量、単位水量の違いによる相対動弾性係数に特筆すべき有意な差は認められなかった。EFS 置換率の増加に伴うブリーディング量の増大は凍結融解抵抗性の低下を招くことが指摘されているが、本実験における EFS を 100% 置換した条件では空気量 4% 以上を確保できており⁴⁾、凍結融解抵抗性に与える影響は小さかったものと推察される。

4. 結論

本研究で得られた結果は以下の通りである。

- (1) EFS 置換率の増大に伴い圧縮強度は直線的に低下した。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。
- (2) 静弾性係数は、EFS を使用した条件で最も大きくなった。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。
- (3) 硬質且つ緻密な EFS を使用することで、乾燥収縮ひずみ、質量減少率の低減に効果があった。また、乾燥収縮ひずみと質量減少率には相関性があることが確認できた。
- (4) 細骨材種類の違いに関わらず相対動弾性係数は 60% 以上を満足し、EFS を 100% 置換した条件においても凍結融解抵抗性に与える影響は小さかった。

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，

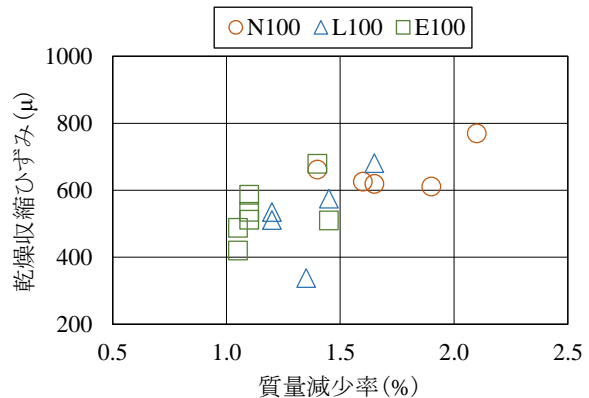


図-5 乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係

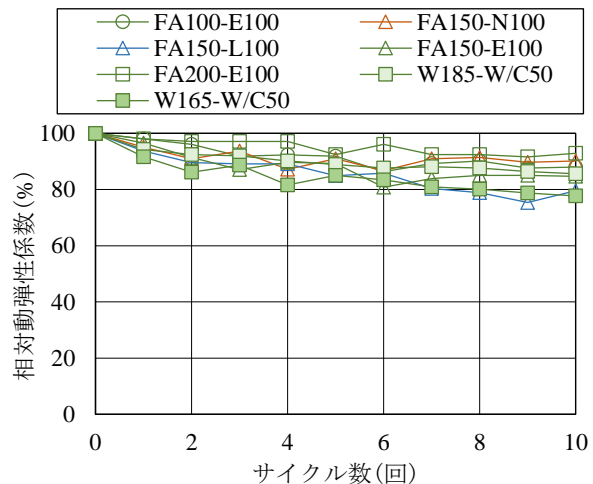


図-6 サイクル数と相対動弾性係数の関係

Vol.20, No.2, pp.97-102, 1998

- 4) 横山卓哉，橋本親典，渡辺健，石丸啓輔：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1157-1162，2019
- 5) 橋本紳一郎，橋本親典，渡辺健，上田隆雄：液体窒素を用いた急速凍結融解試験によるコンクリート表面劣化の定量化，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.887-892，2006
- 6) 弓場上有紗，橋本親典，渡辺健，石丸啓輔：再生骨材コンクリートによる JIS の凍結融解試験方法(A法)と液体窒素を用いた簡易急速凍結融解試験方法の比較，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.941-946，2011
- 7) 内川浩：セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響，コンクリート工学，Vol.33，No.9，pp.5-17，1995.9
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2017.3
- 9) 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
- 10) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造物の収縮ひび割れ制御指針・施工指針(案)・同解説，2006.2