

ASR 抑制を目的としてフライアッシュ原粉を用いたコンクリートの物性

破壊診断工学研究室 恩田 尚明

1. はじめに

近年、アルカリシリカ反応（以下 ASR と表記）によるコンクリート構造物の劣化が問題となる一方で、火力発電の需要が高まり産業副産物である多くの石炭灰が排出されている。

ASR による劣化は、石炭灰の一種であるフライアッシュ（以下 FA と表記）をセメントに置換して使用することで抑制されることが知られている。しかし石炭灰の中で JIS に適合し利用されているのは 1 割程度であり、その他の原粉はセメント原料として使用されているが、新設構造物の減少などにより将来的には有効に活用することが困難になると予想される。

本研究では、ASR をフライアッシュにより抑制することを目的とするが、JIS に適合するものだけでなく、フライアッシュ原粉による抑制効果を明らかにすることを旨とする。そのため反応性骨材を用いて供試体を高温多湿環境下で促進養生することで意図的に ASR を発生させ、その上でフライアッシュのうち主に流通している JIS II 種 FA に加え、FA 原粉も使用し、4 項目について長期的な実験を行うことで比較・検討し、FA 原粉利用の有効性について考察することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、モルタルバー法により「無害でない」と判定された細骨材および粗骨材の両方に反応性骨材を用い

表-1 フライアッシュ品質

項目	単位	規定値	JIS II 種 FA	FA 原粉		
JIS 項目	SiO ₂ 含有量	%	45.0以上	61.6	61.6	
	湿分	%	1.0以下	0.1	0.1	
	強熱減量	%	5.0以下	2.5	2.4	
	密度	g/cm ³	1.95以上	2.24	2.22	
	粉末度	網ふるい方法	%	40以下	11	29
		プレーン方法	cm ² /g	2500以上	3610	3100
	フロー値比	%	95以上	105	104	
	活性度	材齢28日	%	80以上	84	82
		材齢91日	%	90以上	102	97
	参考値	Al ₂ O ₃ 含有量	%		25.31	22.96

た供試体を作製した。反応性骨材は北海道産・雲仙産の安山岩砕石および砕砂であり、石炭灰は碧南火力発電所で採取された FA 原粉と JIS II 種 FA を使用した。両者の品質を表-1 に示す。

2.2 供試体概要および配合

供試体として 100×100×400mm の角柱供試体と φ100×200mm の円柱供試体を作製した。概要を表-2 に示す。また、ASR を生じさせるために等価アルカリ量が 12kg/m³ の NaNO₂ を使用した。

表-2 供試体概要

供試体名	反応性骨材	FA置換率 (%)	FA品質	置換方法	W/C (%)	
H-FA0	北海道産	0	-	内割	57	
H-FA20		20	原粉			
H-FA20S			JIS II 種			
H-FA40		40	原粉			
H-FA40S			JIS II 種	外割		
H-FA20+		20	原粉			
H-FA20S+			JIS II 種			
H-FA0-W			0	原粉	内割	50
H-FA20-W			20			
H-FA40-W			40			
U-FA0	雲仙産	0	-	内割	57	
U-FA20		20	原粉			
U-FA20S			JIS II 種			
U-FA40		40	原粉			
U-FA40S			JIS II 種			

2.3 実験方法

2.3.1 ASR 抑制

FA 混和による ASR 抑制効果が得られるか供試体にプラグを埋め込み、温度 35~45°C・湿度 100% で ASR 促進を行い、膨張量の計測を行った。供試体のプラグ位置を図-1 に示す。

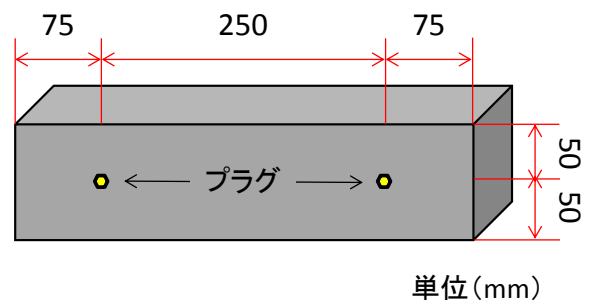


図-1 供試体プラグ位置

2.3.2 圧縮強度とヤング係数

FAを混和した場合、長期強度が増進することが予想されるため、円柱供試体を各配合につき9本ずつ作製した。供試体は作製後20℃の恒温槽で湿布養生した後、材齢1ヶ月、3ヶ月および12ヶ月時点での圧縮強度とひずみを計測し、ヤング係数を求めた。

2.3.3 塩化物イオン浸透抵抗性

フライアッシュコンクリートは塩化物イオン浸透抵抗性が高いとされているため、供試体は作製後28日間湿布養生した後、NaCl 10%水溶液に2ヶ月および12ヶ月間浸漬し、コンクリート内部の塩化物イオン量を計測するためドリル削孔で試料を採取した。試料採取位置を図-2（図中黄色部が削孔部分）に示す。2ヶ月浸漬供試体の深さは15mm毎にコンクリート粉を採取し、深さ45mmまで3か所、12ヶ月浸漬供試体はより詳細に塩化物イオンの浸透状況を調査するために、深さ10mm毎にコンクリート粉を採取し、深さ50mmまで5か所で行った。その後、採取したコンクリート粉を蛍光X線分析装置にて、塩化物イオン量を計測した。

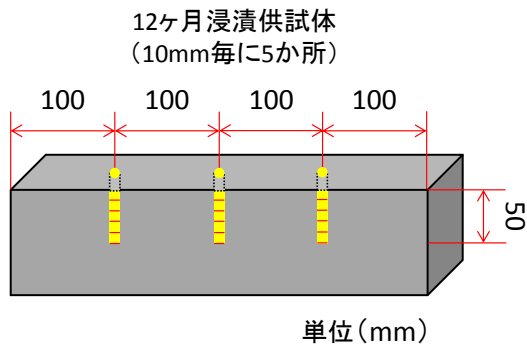


図-2 供試体削孔位置

2.3.4 耐凍害性

フライアッシュコンクリートは空気連行性が低く、凍害の発生が懸念されるため、28日間水中養生した角柱供試体を凍結試験機で-18℃まで冷却した後、5℃まで融解させた。これを1サイクルとして、30サイクル毎に質量と一次たわみ共鳴振動数を計測した。計測した一次たわみ共鳴振動数から、JISA1148「コンクリートの凍結融解試験」に規定される相対動弾性係数を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 ASR抑制

図-3に示すように、北海道産骨材において、FA未混和の配合は膨張量が約8000 μ で収束し、FA20%置換、FA40%置換の配合ではそれぞれ約4000 μ 、約300 μ で収束した。同様に雲仙産骨材においても、FA未混和の配合は膨張量が約5500 μ で収束し、FA20%置換、FA40%置換の配合ではそれぞれ約1000 μ 、約300 μ で収束した。FA混和によるASR膨張の抑制、およびFA20%置換の配合においてはアルカリ量12kg/m³の高アルカリでは膨張の十分な抑制に至らず、FA置換率が多いほどASR抑制効果が大きいたことが確認された。FA原粉とJISⅡ種FAでは、ASR膨張の抑制効果に差は見られなかった。FAのASR抑制において重要な成分であるSiO₂の含有量に差が無かったためと考えられる。

また、図は省略するが内割置換と外割置換では、FAを外割置換した配合の方が早期にASR膨張が発生し、収束時点では内割置換に比べて1000 μ 程度多く膨張が生じた。外割置換の方がセメントの量におけるFAの割合が小さいため、FAの抑制機構から考えても、内割置換より高い膨張量を計測されたと推察される。水セメント比の低い配合の方が早期にASR膨張が発生した。水セメント比の低い配合の方がセメントの割合が大きく、膨張量が大きいと考察される。

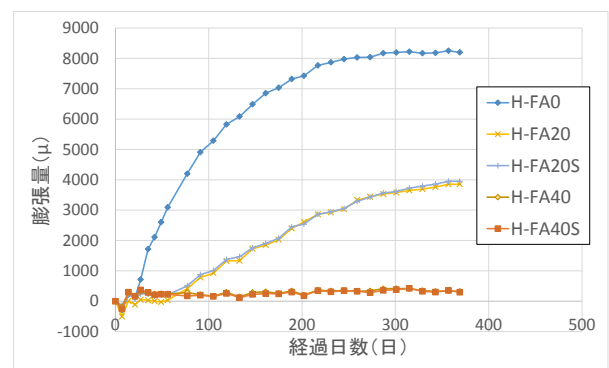


図-3 ASR膨張量（北海道産骨材）

3.2 圧縮強度とヤング係数

表-3に示すように、両骨材において、FA混和の配合では、材齢進行による圧縮強度の増進を確認

表-3 圧縮強度結果

	1ヶ月		3ヶ月		12ヶ月		1ヶ月とのFA0ヤング係数比(%)
	ヤング係数 ($\times 10^3 \text{N/mm}^2$)	FA0ヤング係数比(%)	ヤング係数 ($\times 10^3 \text{N/mm}^2$)	FA0ヤング係数比(%)	ヤング係数 ($\times 10^3 \text{N/mm}^2$)	FA0ヤング係数比(%)	
H-FA0	28.9		33.5		8.4		29
H-FA20	29.1	101	30.4	91	17.9	213	62
H-FA20S	28.4	98	31.3	93	20.9	249	72
H-FA40	24.6	85	30.7	92	31.4	374	109
H-FA40S	26.9	93	29.1	87	30.4	362	105
H-FA20+	29.2	101	32.8	98	16.6	198	58
H-FA20S+	30.1	104	33.0	99	19.7	234	68
H-FA0-W	25.3		26.6				
H-FA20-W	26.6	105	29.2	110			
H-FA40-W	24.8	98	27.2	102			
U-FA0	29.6		31.0		22.5		76
U-FA20	25.2	87	31.2	101	32.8	146	111
U-FA20S	28.4	98	30.9	100	33.1	147	112
U-FA40	25.8	89	31.2	101	33.8	150	114
U-FA40S	29.6	102	31.2	101	32.8	146	111

した。FAの特長であるポズラン反応により強度が増進したと考察される。FA未混和およびFA20%置換における配合の一部では、養生期間中にASRが発生して、圧縮強度およびヤング係数が低下したと考えられる供試体があった。FA40%置換の配合ではそのような現象がなかったため、FA置換率による差を確認した。また、FA原粉よりもJIS II種FAを混和した配合の方が多少高くなる傾向が見られた。しかし、その差は最大でも6N/mm²程度と小さいため、強度のみから判断すると、FA原粉でも十分に利用できるかと考察される。

内割置換と外割置換では、FAを外割置換した配合の方が内割置換の配合より高い圧縮強度を計測した。セメント量を減らしていないため圧縮強度が高いと考えられる。一方、水セメント比が低い配合の方がセメントの割合が大きいため圧縮強度が高くなると予想していたが、ほぼ同等の値を示した。水セメント比が低い配合の方が使用した粗骨材量が減っているためだと考察される。

3.3 塩化物イオン浸透抵抗性

図-4に示すように、北海道産骨材において、FA未混和の配合に比べて、FA混和の配合の浸透抵抗性の向上を確認した。FA置換率についても、FA20%置換の配合よりもFA40%置換の配合において浸透抵抗性の向上を確認した。FAが多く含まれているためポズラン反応が起きやすく供試体内部が緻密化したと考察される。FA原粉とJIS II種FAでは、表面付近では多少のばらつきがあったが、コンクリート内部では塩化物イオン量が少なく、

同程度の浸透抵抗性が見られた。FA原粉がJIS II種FAと同等のSiO₂およびAl₂O₃を含有しており、ポズラン反応を起こしたためだと考えられる。また、雲仙産骨材を用いた配合同士を比較すると、北海道産骨材の配合と比べて配合間の差はほとんど見られなかったが、FA混和による浸透抵抗性の向上を確認した。骨材の種類による影響については、塩化物イオンが浸透しやすい場合もあるがFAを混和することによる浸透抵抗性の向上効果を確認した。

図-5に示すように、FAを外割置換した配合の方が表面付近で高い塩化物イオン量を計測したが、それより内部では同程度の塩化物イオン量を計測した。外割置換の配合の方がセメントの量が多く、水和反応によりコンクリート内部が緻密になっているためだと推察される。

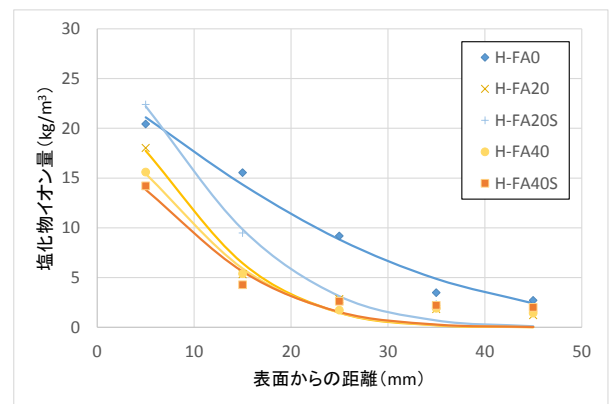


図-4 塩化物イオン浸透量
(北海道産骨材：浸漬12ヶ月)

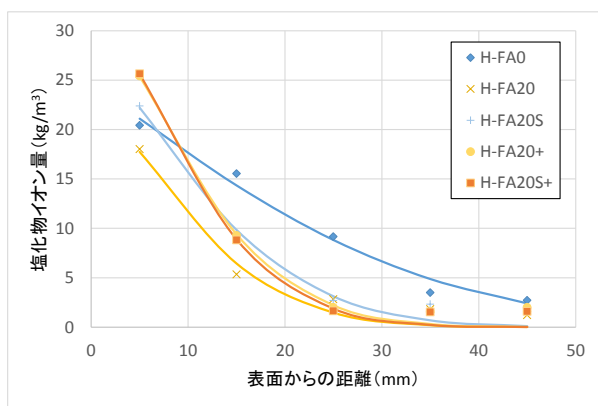


図-5 塩化物イオン浸透量
(内割置換と外割置換：浸漬12ヶ月)

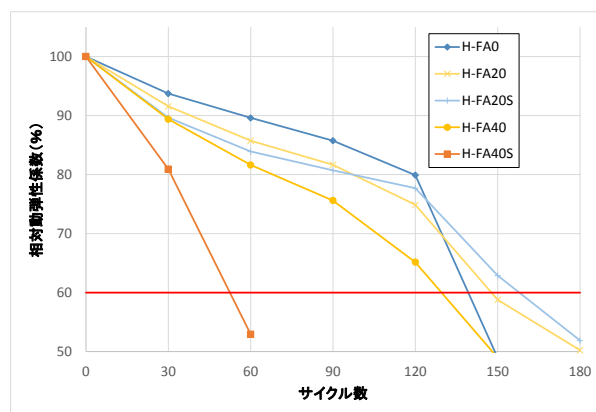


図-6 相対動弾性係数（北海道産骨材）

3.4 耐凍害性

図-6 に示す北海道産だけでなく、雲仙産の骨材においても今回の配合では60～180サイクルで相対動弾性係数が60%を下回り、300サイクルを待たず測定不能となってしまった。写真-1 に特に劣化が激しかったU-FA40Sの供試体を示す。FA未混和の配合はASRゲルの空気泡内への析出などが考えられる。FA混和の配合で耐凍害性が低い理由として、FAを混和したことで良質な空気を連行しづらい、凝結過程における微細な空気が消失した、初期強度が低く、水中養生1ヶ月で凍結融解試験を開始するため劣化進行が速くなった、などが考えられる。FA原粉とJISⅡ種FAでは、両骨材ともに凍害劣化の進行は原粉と比較してJISⅡ種FAの配合で速く、FA40%置換の供試体ではその特徴が顕著であった。この結果については検討が必要であるが、FA原粉でもJISⅡ種FAと同等の耐凍害性を発現できると推察される。

内割置換と外割置換では、FAを外割置換した配合の方が内割置換した配合と同等以上の相対動弾性係数を計測した。外割置換の配合の方がセメントの量が多く、水和反応によりコンクリート内部が緻密になっているためだと推察される。水セメント比の低い配合において相対動弾性係数が低い傾向が見られた。本来であれば水セメント比の低い配合の方がセメントの割合が多くなり、耐凍害性が優れるはずであるが凍結融解試験に必要な微細な空気が連行できなかったのではと推察される。



写真-1 U-FA40S 供試体

4. 結論

今回の研究によって得られた結論は以下の通りである。

- FA置換率が多いほどASR抑制効果が大きく、FA原粉とJISⅡ種FAでは、ASR膨張の抑制効果に差は見られなかった。
- FAのポズラン反応により材齢進行に伴う圧縮強度の増進を確認した。また、FA原粉とJISⅡ種FAを比較してもその差は小さく、強度のみから判断すると、FA原粉でも十分に利用できると考察される。
- FA原粉とJISⅡ種FA混和の配合は、FA未混和の配合よりコンクリート内部で塩化物イオン量が少なく、同程度の浸透抵抗性を確認した。
- 凍害劣化の進行はFA原粉と比較してJISⅡ種FAの配合で速く、FA40%置換の供試体ではその特徴が顕著であった。結果について検討が必要であるが、FA原粉でもJISⅡ種FAと同等の耐凍害性を発現できると推察される。