

論文 各種リサイクル材料のコンクリートへの有効活用に関する研究

小山田 邦弘^{*1}・藤原 浩巳^{*2}・丸岡 正知^{*3}・川島 顕^{*1}

要旨: 資源の枯渇, 天然骨材の採取禁止などにより代替骨材資源の確保が重要な課題となっている。本研究では, 低品位フライアッシュ, 高炉スラグ細骨材をコンクリート細骨材の一部として置換した時の, 基本的性状, 耐久性について各種試験を行い, 低品位フライアッシュ及び高炉スラグ細骨材をコンクリート細骨材として使用したコンクリートの諸特性を明らかにした。その結果, 低品位フライアッシュ, 高炉スラグ細骨材を用いたとしても通常のコンクリートと同等以上の強度発現性, 耐久性を有することがわかった。

キーワード: 低品位フライアッシュ, 高炉スラグ細骨材, 細骨材代替

1. はじめに

石炭は他の化石燃料に比べ, 供給の安定性や経済性に優れているため, 石油代替エネルギーとして原子力に次ぐものとされており, 近年, 石炭火力発電設備が増加している。これに伴い, フライアッシュの増加が予想され, 環境に配慮した資源再利用の循環型社会形成のためには, より一層のフライアッシュの有効活用が望まれる。その一方, 従来よりフライアッシュはセメントの原料などに有効活用されているが, 近年のセメント需要の減少に伴い今後更なる大量使用は期待できない。またフライアッシュは, コンクリート用混和材として使用することで, 長期強度, 耐久性の増大が得られるとされているが, その品質の変動, 未燃焼カーボンによる AE 剤の吸着など実用性, 汎用性に問題がある。

一方, コンクリート用細骨材は自然環境への配慮から天然骨材の採取は制限され, また, 安山岩, 流紋岩系の骨材及び河川砂利・山砂はアルカリ骨材反応性に問題がある場合が多い。このような状況下, 代替骨材資源の確保が重要な課題となっている。そこで, 板井ら¹⁾によりフライアッシュを細骨材として使用する研究が行われている。この研究により, フライアッシュの大量使用, 細骨材代替とフライアッシュの新たな有効活用が示された。しかし, フライアッシュをコンクリート用細骨材として混入したコンクリートの研究は比較的少ない。また, フライアッシュだけでなく他のリサイクル材料をコンクリート用細骨材として併用した研究も少なく, 更なる資源の有効活用のためにこのような研究は重要であると考えられる。

そこで, 本研究では低品位フライアッシュ及び高炉スラグ細骨材を細骨材として使用したコンクリートの硬化性状, 耐久性に関して検討したものであり, これらの諸特性を明らかにしたものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で用いる使用材料を表-1に示す。また, 本研究で用いるフライアッシュの品質を表-2, 高炉スラグ細骨材の粒度分布を図-1にそれぞれ示す。一般的にコンクリート用混和材として使用されているフライアッシュは「JIS A 6201 コンクリート用フライアッシュ」に定められているⅡ種が多く用いられているが, フライアッシュ原粉を何度も分級処理を施すために多量のエネルギーを消費する。よって本研究では環境負荷低減を目指し, フライアッシュ原粉を一度だけ分級し, 粒度の粗い方のフライアッシュであるフライアッシュ粗粉(以下FA粗粉)を用いた。また, 耐久性向上のために高炉スラグ微粉末(ブレン値 4000cm²/g)を結合材として使用した。本研究は PC 製品への適用も視野にいれているためセメントには早強ポルトランドセメントを用いた。

表-1 使用材料

種別	記号	名称	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	F.M.	最大寸法 (mm)
結合材	C	早強ポルトランドセメント	3.14	—	—	—
	BS	高炉スラグ微粉末	2.90	—	—	—
細骨材	S1	砕砂	2.58	1.49	2.49	—
	S2	川砂	2.60	3.42	3.01	—
	FA	フライアッシュ粗粉	2.10	—	—	—
	BS-S	高炉水砕スラグ細骨材	2.70	0.68	2.70	—
粗骨材	G	砕石	2.65	1.49	6.71	20
混和剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤	1.05	—	—	—
	DF	ポリアルキレン誘導体	1.00	—	—	—

表-2 フライアッシュの品質

	湿分 (%)	強熱減量 (%)	密度 (g/cm ³)	粉末度		メチレンブルー吸着量 (mg/g)
				45 μmふるい残分 (%)	比表面積 (cm ² /g)	
JISⅡ種	0.13	1.8	2.37	2	4550	0.27
FA粗粉	0.10	1.1	2.07	36	3060	0.46

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科地球環境デザイン学専攻 (正会員)

*2 宇都宮大学大学院 工学研究科教授 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学大学院 工学研究科助教 工博 (正会員)

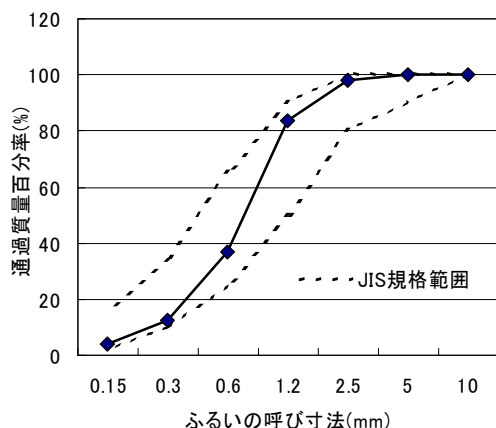


図-1 高炉スラグ細骨材の粒度分布

2.2 配合条件

配合条件を表-3 に示す。記号は水結合材比・高炉スラグ微粉末のセメント置換率・FA粗粉の有無・高炉水砕スラグ細骨材の有無を意味している。例えば、配合番号 No3(25-B30FB)は水結合材比 25%で、セメントの 30%を高炉スラグ微粉末で置換し、細骨材に FA粗粉と高炉スラグ細骨材を使用した配合を示している。FA粗粉を混和する配合では、全細骨材体積の 10%を内割り置換し、高炉スラグ細骨材を用いる配合では、細骨材の全量を置換した。また、川砂と砕砂は体積比で 1:1 とした。配合 1 から 3 は水結合材比が 25%であり、配合 4 から 11 は水結合材比が 35%であるスランブフロー600mm 程度の高流動コンクリートとした。なお、配合 4 から 6 は高炉スラグ微粉末を混和しない配合であり、配合 4 を基本配合とした。配合 7 から 11 は高炉スラグ微粉末の置換率を 15%、30%、45%と変化させた組合せとした。配合 12 から 14 は水結合材比 45%でありスランブ 12cm 程度とした。

高性能減水剤及び消泡剤の添加率は、高流動コンクリ

ート配合となる配合 1 から 11 はスランブフロー 600±50mm、配合 12 から 14 はスランブ 12±2.5cm、また目標空気量は全配合 1.5±1.0%となるように適宜調整した。

供試体の養生は、標準養生(20℃、水中)及び蒸気養生とした。蒸気養生のパターンは前置き 2 時間(20℃、RH60%)、温度上昇速度を 20℃/時間、最高温度は 60℃とし、最高温度保持時間 4 時間とした。最高温度保持時間終了後、20℃まで自然降温とした。また、蒸気養生後は 20℃、RH60%で気中養生とした。

2.3 実験項目及び方法

(1) スランブ、スランブフロー試験

スランブ、スランブフロー試験は JIS A 1101, JIS A 1150 に準拠して試験を行った。

(2) 空気量試験

空気量試験は JIS A 1128 に準拠して試験を行った。

(3) 圧縮強度試験

圧縮強度は、φ10×20cm 円柱供試体を用い、JIS A 1108 に準拠して測定した。試験条件は、標準養生供試体で材齢 7, 28, 91 日、蒸気養生供試体は材齢 7 日とした。

(4) 静弾性係数試験

静弾性係数試験は、φ10×20cm 円柱供試体を用いて JIS A 1149 に準拠して測定した。試験条件は、標準養生供試体で材齢 28 日とした。

(5) アルカリ骨材反応試験

アルカリ骨材反応性試験は、実験水準を表-3 の配合番号 2, 4, 8, 9, 13 において、JIS A 1146 に準拠して試験を行った。ただし、アルカリ骨材反応を促進させるために細骨材には FA粗粉以外全量パイレックスガラスを使用した。

(6) 凍結融解試験

凍結融解試験は、試験水準を表-3 の配合番号 4, 8, 9, 10 において、JIS A 1148 に準拠して測定した。

表-3 配合条件

配合番号	記号	水結合材比 (%)	スランブフロー /スランブ	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)												
					水		結合材		細骨材				粗骨材				
					W	C	BS	S1	S2	FA	BS-S	G					
1	25-B30	25	600±50mm	1.5±1.0	165	462	198	390	394	0	0	800					
2	25-B30F							351	354	64	0						
3	25-B30FB							0	0	64	736						
4	35-B0	35				600±50mm	1.5±1.0	165	471	0	475		478	0	0		
5	35-B0F										427		431	77	0		
6	35-B0FB										0		0	77	894		
7	35-B15										401		71	472	476	0	0
8	35-B30										470		474	0	0		
9	35-B30F	330				141	423	426	76	0							
10	35-B30FB						0	0	76	885							
11	35-B45						259	212	467	471	0		0				
12	45-B30	45	12±2.5cm	1.5±1.0	257	110	514	518	0	0							
13	45-B30F						463	466	84	0							
14	45-B30FB						0	0	84	968							

(7) 塩化物イオン浸透試験

塩化物イオン浸透試験は、標準養生材齢 28 日の全配合の供試体を JSCE-G 572 に準拠して濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液中に 6 ヶ月間浸漬した。6 ヶ月浸漬後供試体を割裂し、割裂面に 0.1mol/l 硝酸銀水溶液を噴霧して塩化物イオンの浸漬深さを測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュ性状試験結果

フレッシュ性状試験結果を表-4、所定のスランプを得るのに必要な SP 添加率を図-2 から図-5 にそれぞれ示す。一般的にフライアッシュを結合材としてセメントに内割り置換した場合、フライアッシュは粒形が球体であるためボールベアリング効果によって流動性が向上する。しかし、フライアッシュを細骨材として置換した場合は、単位粉体量の増加により粘性が増加することが知られている。水結合材比が 25%においてはフライアッシュ粗粉を使用することで SP 添加率が増加した。これは既往の研究²⁾より、単位粉体量が 600kg/m³以上になると高性能減水剤の添加量が増加するとされている。本研究において、水結合材比が 25%の配合は、フライアッシュ粗粉も粉体と考え、単位粉体量が 25-B30 では 660 kg/m³、25-B30F では 724 kg/m³であり、これより、低水結合材比においては、フライアッシュ粗粉を細骨材として使用したコンクリートは、フライアッシュ粗粉を使用していないコンクリートと比較して、単位粉体量による影

響が、フライアッシュのボールベアリング効果よりも大きいために、所定のスランプフローを得るのに必要な SP 添加率が大きくなったと考えられる。これに対し、水結合材比が 35%および 45%の配合においては、単位粉体量が 600 kg/m³以下であるため、単位粉体量の影響よりもフライアッシュ粗粉によるボールベアリング効果が大きく、所定のスランプフローを得るのに必要な SP の添加率が減少したと考えられる。

次に、フライアッシュ粗粉と高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは他のコンクリートと比較して SP の添加率が極めて少ない。これは、高炉スラグ細骨材は表面がガラス質で平滑であるため、流動性が向上したと考えられる。

表-4 フレッシュ性状試験結果

配合番号	記号	SP(%)	DF(%)	スランプフロー (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
1	25-B30	1.75	0.85	640	-	1.0	10.5
2	25-B30F	1.80	0.88	645	-	1.0	10.5
3	25-B30FB	0.45	0.85	635	-	1.9	10.0
4	35-B0	2.00	0.87	645	-	0.7	10.0
5	35-B0F	1.80	0.87	635	-	0.8	9.0
6	35-B0FB	0.48	0.9	595	-	1.6	10.0
7	35-B15	1.75	0.76	590	-	1.3	10.0
8	35-B30	1.45	0.89	565	-	2.2	10.5
9	35-B30F	1.20	0.92	640	-	2.5	10.0
10	35-B30FB	0.45	0.86	625	-	1.2	10.0
11	35-B45	1.50	0.91	550	-	1.3	12.0
12	45-B30	1.70	0.71	-	14.0	2.1	10.0
13	45-B30F	1.28	0.71	-	14.0	2.1	10.0
14	45-B30FB	0.15	0.91	-	13.0	1.8	10.0

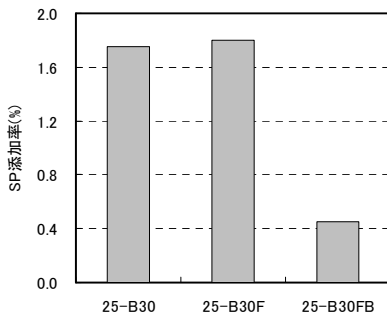


図-2 SP 添加率 (W/B=25%)

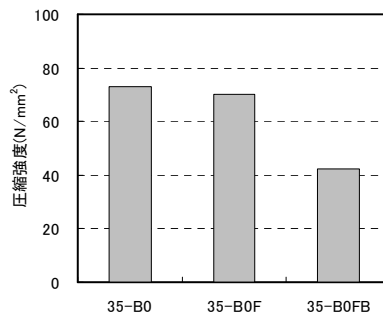


図-3 SP 添加率 (W/B=35%)

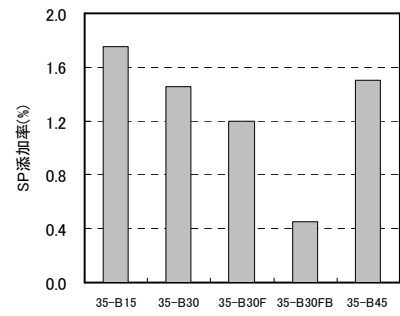


図-4 SP 添加率 (W/B=35%)

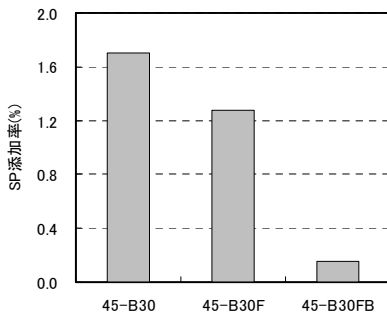


図-5 SP 添加率 (W/B=45%)

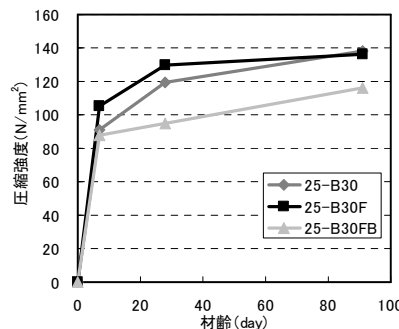


図-6 圧縮強度試験結果 (W/B=25%)

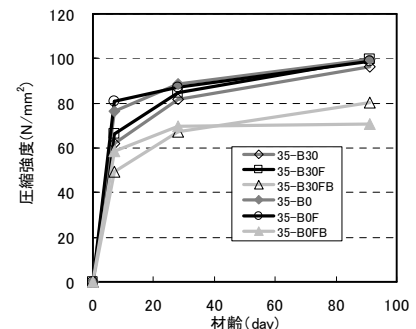


図-7 圧縮強度試験結果 (W/B=35%)

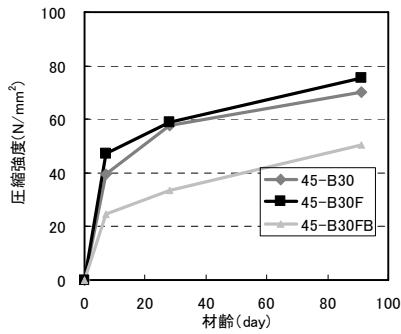


図-8 圧縮強度試験結果 (W/B=45%)

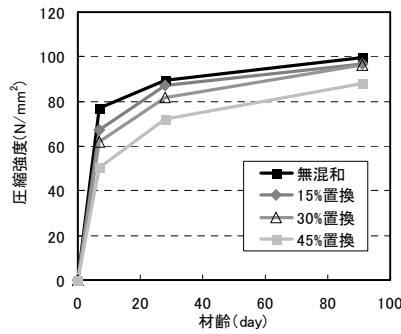


図-9 高炉スラグ置換率と圧縮強度

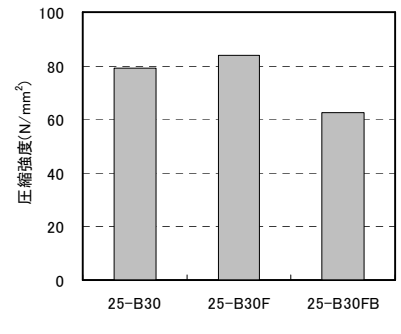


図-10 圧縮強度試験結果 (W/B=25%)

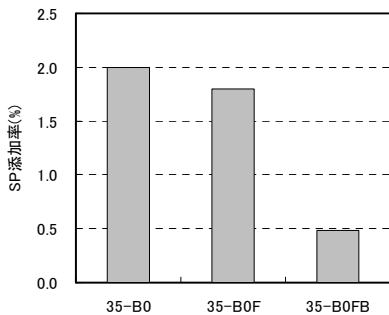


図-11 圧縮強度試験結果 (W/B=35%)

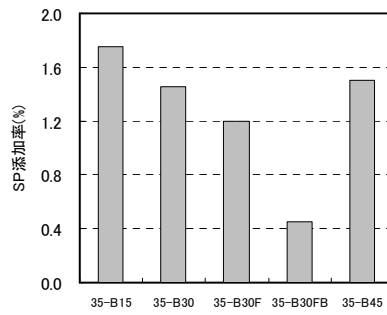


図-12 圧縮強度試験結果 (W/B=35%)

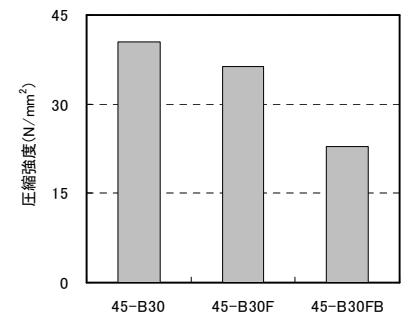


図-13 圧縮強度試験結果 (W/B=45%)

3.2 圧縮強度試験結果

標準養生における圧縮強度試験結果を図-6から図-8に示す。この結果より、FA粗粉を細骨材として使用した25-B30F、35-B0F、35-B30F、45-B30Fの配合の強度発現性は、初期強度がFA粗粉を使用していない25-B30、35-B0、35-B30、45-B30の配合よりも多少大きくなるが、ほぼ同程度ということがわかる。一般的にフライアッシュを混和材として使用することでポズラン反応によって長期材齢において高い強度発現性を得ることができる。しかし、通常セメントに内割り置換しているため初期材齢においては強度が低下してしまうが、本研究ではFA粗粉を細骨材として使用しているため、水結合材比が同じであればFA粗粉の有無にかかわらず結合材料は一定である。また、細骨材に置換していることから微粉末効果も期待できる。よって、初期材齢においても通常のコンクリートと同等の強度発現性を示したものと考えられる。

次に、FA粗粉および高炉スラグ細骨材をコンクリート用細骨材として使用した25-B30FB、35-B0FB、35-B30FB、45-B30FBの配合の強度発現性は、FA粗粉および高炉スラグ細骨材を使用していない25-B30、35-B0、35-B30、45-B30の配合と比較すると、強度比で約20%から30%低下する結果となった。これは、FA粗粉を細骨材として一部使用し、残りの細骨材を高炉スラグ細骨材で全置換したため、細骨材としての強度が通常の細骨材よりも小

さくなり、そのためコンクリートの圧縮強度の低下が生じたと考えられる。また、高炉スラグ細骨材はそれ自体で若干の潜在水硬性を有しているが、細骨材であるため粒度が粗く高炉スラグの界面での反応は起こりにくいと考えられ、潜在水硬性による強度増進は極めて少なく反応速度も極めて緩慢であると考えられる。

図-9に高炉スラグ微粉末の置換率を変化させた配合の圧縮強度試験結果を示す。この結果より、置換率が増えるに伴い、初期強度の低下が確認された。しかし、高炉スラグ微粉末の置換率が大きいほど圧縮強度の伸びが大きく、長期強度は置換率が30%程度であれば無混和のコンクリートと同等であることが確認された。

蒸気養生における圧縮強度試験結果を図-10から図-13に示す。これより、低水結合材比においてはFA粗粉を細骨材として使用した25-B30F、35-B0F、35-B30Fの配合は、FA粗粉を使用していない25-B30、35-B0、35-B30の配合と比較して圧縮強度が同等以上であることがわかる。次に、FA粗粉及び高炉スラグ細骨材をコンクリート用細骨材として使用した25-B30FB、35-B0FB、35-B30FB、45-B30FBの配合コンクリートは、FAと高炉スラグ細骨材を使用していない25-B30、35-B0、35-B30、45-B30の配合と比較して強度が低下している。この強度低下割合は水結合材比が高くなるに従い増大した。以上の結果より、FA粗粉、高炉スラグ細骨材をコンクリート

細骨材として使用したコンクリートの強度発現性は、強度は低下するが、蒸気養生においても標準養生の場合と同様の傾向が認められた。また、高炉スラグ微粉末の置換率を変化させた配合においては、置換率の増大に伴い強度は低下したが、高炉スラグ微粉末を混和することで、標準養生の場合と同等の圧縮強度が得られることが確認された。

3.3 静弾性係数試験

静弾性係数と圧縮強度の関係を図-14に示す。FA粗粉を細骨材として使用したコンクリートは通常のコンクリートと同等の静弾性係数を得ることができた。また、フライアッシュ粗粉及び高炉スラグ細骨材をコンクリート細骨材として使用したコンクリートは、通常のコンクリートと比較して、同一圧縮強度における静弾性係数は大きいことが確認された。

3.4 アルカリ骨材反応試験

アルカリ骨材反応試験結果(13週まで)を図-15に示す。高炉スラグ微粉末及びFA粗粉を使用していない通常のコンクリートでは、アルカリ骨材反応(ASR)による膨張を示している。これに対し、高炉スラグ微粉末及びFA粗粉を細骨材として使用したコンクリートは、単位セメント量が増大しても膨張を示さなかった。ASR抑制効果は、従来の知見通り、高炉スラグ微粉末を用いることで、セメントの水和反応による水酸化カルシウム Ca(OH)_2 の生成量が少なく、生成された水酸化カルシウムは高炉スラグ微粉末と反応するため、硬化体中の水酸化カルシウム量は減少すること、FA粗粉のポズラン反応によりコンクリート細孔溶液のpHの低下によるものと考えられる。ASRの進行には水酸化カルシウム Ca(OH)_2 が関与すると考えられている³⁾。本研究においても、高炉スラグ微粉末、フライアッシュの反応による水酸化カルシウム Ca(OH)_2 の消費はASRの抑制に効果的であることが確認された。また、本研究ではアルカリ骨材反応性の高いバイレックスガラスを粉砕、粒度調整し細骨材として使用している。よって、この試験結果より従来では使用でき

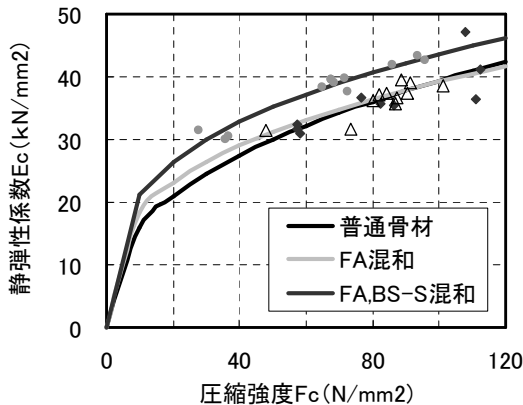


図-14 静弾性係数試験結果と圧縮強度の関係

なかった、アルカリ骨材反応性を有するとされる骨材を用いても膨張を抑制できると推察され、コンクリート用骨材として、使用可能な骨材の範囲が広がる可能性が示された。

3.5 凍結融解試験

凍結融解試験結果を図-16に示す。一般的に、凍結融解抵抗性向上のためには、AE剤あるいはAE減水剤を使用し3~6%程度のエントレインドエアを連行することが有効であるとされている。しかし本研究では、消泡剤を使用し、密実な硬化組織を有するコンクリートとすることで、耐凍性の向上を目指した。FA粗粉を細骨材として使用したコンクリートは、FA粗粉を使用していないコンクリートと比較して相対動弾性係数は低下しており、FA粗粉を細骨材として使用することで、圧縮強度が増大するのに対し、凍結融解抵抗性は低下するという結果になった。この結果については今後、更に検討が必要である。しかし、300サイクル経過後であっても相対動弾性係数は60%を下回ることはなく、今回のFA粗粉を使用したコンクリートは、凍結融解抵抗性を有するコンクリートといえる。また、FA粗粉と高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、210サイクル経過時に相対動弾性係数が60%を下回った。これは、高炉スラグ細骨材の強度が弱いこと、骨材とセメントペーストとの付着が弱い

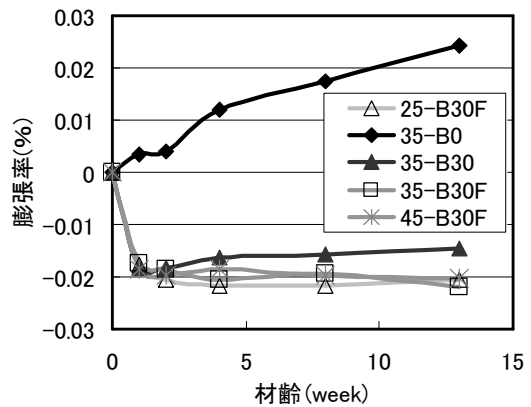


図-15 アルカリ骨材反応試験結果

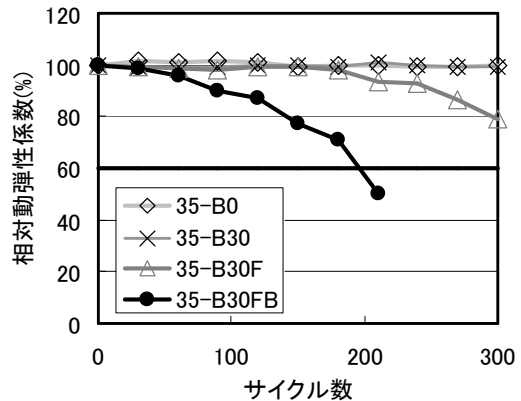


図-16 凍結融解試験結果

ことにより、高炉スラグ細骨材を使用することで圧縮強度が低下すると考えられるが、今後の検討課題としたい。

3.6 塩化物イオン浸透試験

塩化物イオン浸透試験結果を図-17に示す。この結果より、高炉スラグ微粉末及びFA粗粉を細骨材として使用することで塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上した。これはFA粗粉の微粉末効果及びボズラン反応により、より密実になり、細孔がより小さいものになったためと推測される。また、高炉スラグ微粉末によって緻密な硬化体組織が形成され⁴⁾、塩化物イオンの浸透を抑制すると同時に、高炉スラグ微粉末に含まれる酸化アルミニウム(Al_2O_3)成分が作用し、塩化物イオンを固定する生成物を生成しやすくする⁵⁾ことが知られており、本研究でもそのことが確認された。また、高炉スラグ細骨材を使用することで塩化物イオン浸透抵抗性は多少の低下が確認されたが、通常のコンクリートより高い抵抗性を示した。

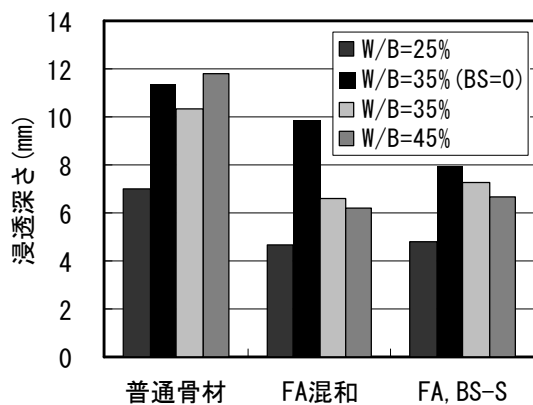


図-17 塩化物イオン浸透試験結果

4. まとめ

FA粗粉及び高炉スラグ細骨材をコンクリート細骨材として使用することで以下の知見が得られた。

(1)FA粗粉で細骨材の一部を置換したコンクリートは単位粉体量が 600kg/m^3 を超えると所定のスランプを得るのに必要なSP添加率が増加する。また、FA粗粉と高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは通常のコンクリートと比較してSP添加率が減少する。

(2)FA粗粉で細骨材の一部を置換することで、通常のコンクリートと同等あるいはそれ以上の圧縮強度を得ることができる。FA粗粉と高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは通常のコンクリートと比較して圧縮強度が低下する。また、蒸気養生の場合は標準養生の場合と比較すると多少の強度低下が認められたが、同様の傾向を示す。

(3)FA粗粉で細骨材の一部を置換することで、アルカリ骨材反応を抑制することが確認された。これによって、使用可能な骨材の範囲が広がる可能性を示した。

(4)FA粗粉を細骨材として使用したコンクリートは通常のコンクリートと比較すると凍結融解抵抗性は低下するが、十分な凍結融解抵抗性を有するコンクリートとすることが可能である。また、FA粗粉と高炉スラグ細骨材を使用すると凍結融解抵抗性が低下した。

(5)FA粗粉、FA粗粉と高炉スラグ細骨材を細骨材として使用したコンクリートは、通常のコンクリートと比較すると塩化物イオンの浸透抑制効果が大きい。

以上より、FA粗粉を細骨材として使用することで通常のコンクリートと同等以上のフレッシュ性状、硬化性状、および耐久性を得ることができ、低品位なフライアッシュであってもコンクリート細骨材として大量使用することができる可能性が見出された。

FA粗粉と高炉スラグ細骨材をコンクリート細骨材として使用したコンクリートは、圧縮強度が低下するが、塩化物イオンの浸透抑制効果が大きいコンクリートを得ることができ、低品位フライアッシュと高炉スラグ細骨材をコンクリート細骨材として併用できる可能性が見出された。

謝辞

本研究は環境負荷軽減コンクリート研究会(EFC研究会)の委託により実施したものである。本研究の実施において、株式会社デイ・セイ、株式会社富士ピー・エス、その他関係の皆様にご多大なご協力を賜りました。ここに記して厚く謝意を表します。

参考文献

- 1)板井知明ほか：フライアッシュを細骨材の一部と置換したコンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.109-114，2001
- 2)松家武樹ほか：細骨材としてフライアッシュIV種を用いたコンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.57-62，2002
- 3)岸谷孝一ほか：アルカリシリカ反応における $Ca(OH)_2$ の影響，セメント技術年報，No.38，pp.102-105，1984
- 4)檀康弘ほか：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの蒸気養生特性，セメント・コンクリート論文集，No.45，pp.222-227，1991
- 5)大即信明ほか：塩分環境下におけるセメント硬化体中の鋼材腐食に及ぼす混和材の影響，セメント・コンクリート論文集 No.45，pp.538-543，1991