

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

宇都宮大学工学部 学生会員 ○小山田邦弘
 宇都宮大学工学部 正会員 藤原浩巳
 宇都宮大学工学部 正会員 丸岡正知

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おり石油代替エネルギーとして原子力に次ぐものとされ、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フライアッシュの有効活用が望まれている。

一方、コンクリート用骨材を取り巻く情勢は資源の枯渇、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。そこで、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¹⁾。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はなく、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及び耐久性に関して検討したものである。

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に示す。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)
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
	S2	川砂	2.60
	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
粗骨材	G	砕石	2.65
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)	比表面積 (cm ² /g)	45 μm 残分 (%)	MB吸着量 (mg/g)
0.1	1.07	2.10	3060	35.6	0.46

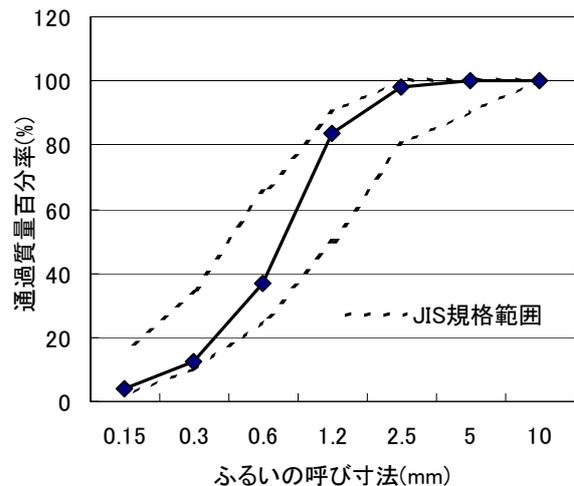


図-1 高炉スラブ粒度分布

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・高炉水砕スラグの有無を意味している。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FA粗粉以外の全量を置換した。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

キーワード：低品位フライアッシュ 高炉スラグ細骨材 代替細骨材

連絡先：〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2 宇都宮大学工学部建設学科材料研究室

TEL 028-689-6211

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 程度のコンクリートとした。

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 試験項目及び方法

A. 圧縮強度試験

圧縮強度は、φ10×20cm 円柱供試体を用いて 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。

B. 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粗粉以外全量パイセックスガラスを使用した。

C. 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. 試験結果及び考察

3.1 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を図-2 に示す。この結果より、標準養生において、FA 粗粉をコンクリート用細骨材として使用したコンクリートの強度発現性は、初期強度が FA 粗粉を使用していない通常のコンクリートよりも多少大きくなるが、ほぼ同程度ということがわかった。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ゾ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、通常は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量は一定である。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 粗粉と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コンクリートの強度発

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 G				
					W	C	BS	S1	S2	FA	BS-S					
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				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	45				12±2.5cm	165	257	110	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	165	257	110	514	518	0	0	800				
13	45-B30F							463	466	84	0					
14	45-B30FB							0	0	84	968					

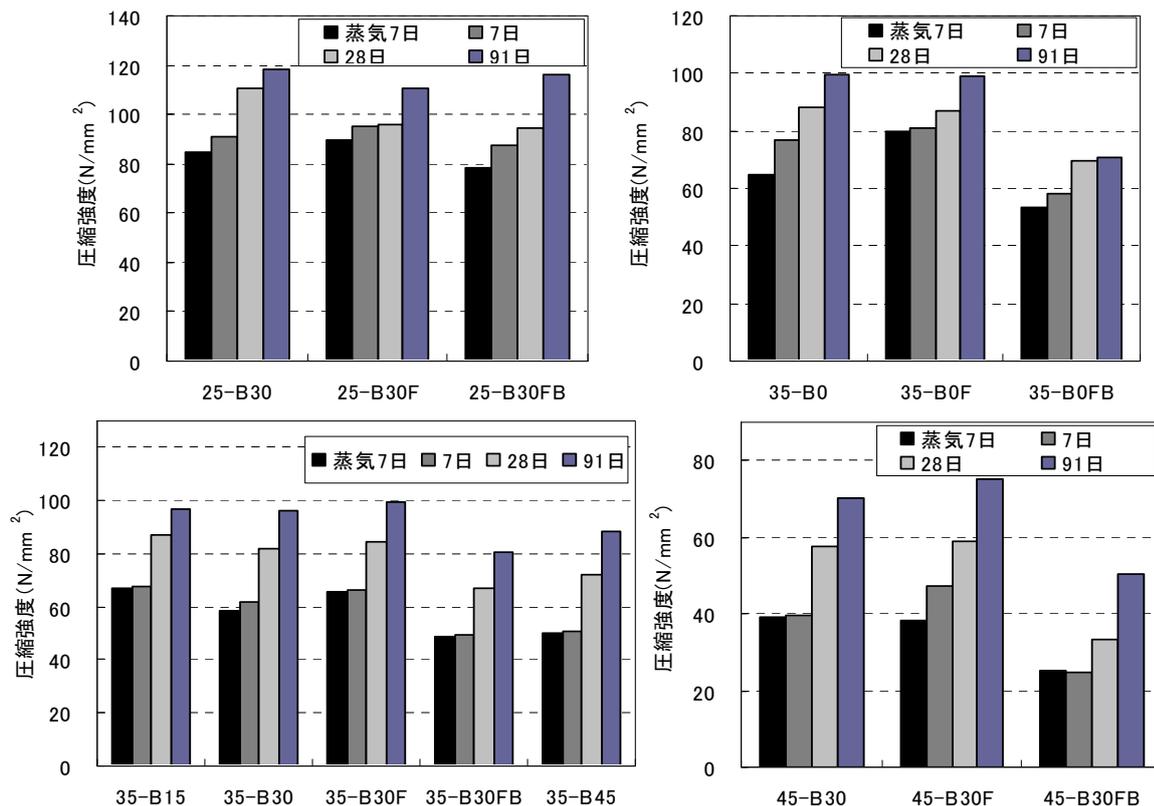


図-2 圧縮強度試験結果

現性は、FA 粗粉と高炉スラグ細骨材を使用していない通常のコンクリートと比較すると、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。

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。

蒸気養生においては、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コンクリートは、FA 粗粉を使用していない通常のコンクリートと比較して圧縮強度が大きいことがわかる。次に、FA 粗粉及び高炉スラグ細骨材をコンクリート細骨材として使用したコンクリートは、FA と高炉スラグ

細骨材を使用していない通常のコンクリート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、標準養生の場合と同様の傾向が認められた。以上の結果より、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場合、コンクリートの強度は低下するものの、養生条件の影響は小さいと考えられる。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、置換率の増大に強度は低下したが、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 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-3 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、単位セメント量が增大しても膨張を示さなかった。このような 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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

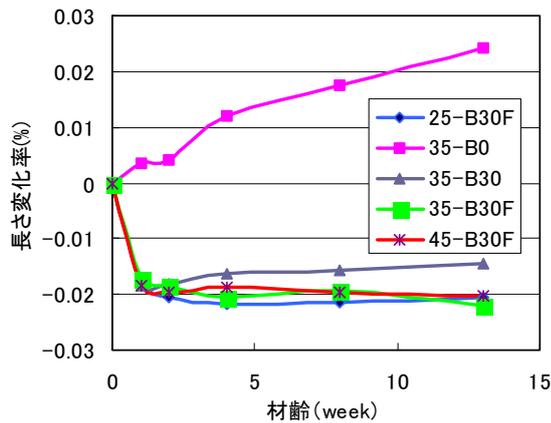


図-3 アルカリ骨材反応試験結果

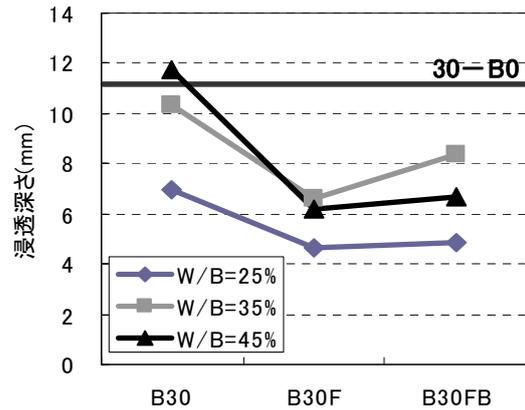


図-4 塩化物イオン浸透試験結果

pH の低下によるものと考えられる。本研究ではアルカリ骨材反応性の高いパ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ため、このようなりサイクル材料を多用したコンクリートにおいては、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と考えられる。

3.5 塩化物イオン浸透試験

塩化物イオン浸透試験結果を図-4に示す。図中の横線は基本配合である35-B30の浸透深さを示している。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ポゾラン反応により、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、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は高い抵抗性を示した。

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2割から3割程度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、養生条件の

影響は小さい。

(2)高炉スラグ微粉末及び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った。

(3)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ある。

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硬化性状、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。本研究の実施で株式会社デイ・シイ、株式会社富士ピー・エス、その他関係各位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，Vol23，No2，pp.109-114