

論文 フライアッシュが高強度コンクリートの流動性および強度発現に及ぼす影響

船本 憲治*¹・村上 英治*²・黒羽 健嗣*³・並木 哲*⁴

要旨: 近年の海外炭専焼大型石炭火力発電所から発生するフライアッシュ（比表面積 4000cm²/g程度）の高強度コンクリート（ $f_c=60\text{N/mm}^2$ クラス）への適用性について検討した。その結果、フライアッシュの有効性である流動性の改善を確認した。また、実際の柱内部と同様の温度履歴を与えた供試体に関する実験を実施し、高強度コンクリートにフライアッシュを混入することにより、水和熱を低減すると共に、長期材齢でも高い強度が得られた。また、断面の大きい部材では、フライアッシュ混入コンクリートに起こる初期の強度発現の遅れも改善できることが確認できた。

キーワード: フライアッシュ, 比表面積, 高強度コンクリート, 流動性, 水和熱, 強度発現

1. はじめに

石炭火力発電は、原子力発電に次ぐベース電源として位置付けられており、今後、環境保全に考慮しつつ積極的な開発が計画されている。それにともなって、石炭灰の発生量は、1991年のアンケート調査結果による 580万トン（電気事業 410万トン・一般産業 170万トン）から、2000年には1000万トン（電気事業 800万トン・一般産業 200万トン）へと増大すると推定されている。しかし、石炭灰の有効利用率は、現在、電気事業関係では約50%、一般産業関係では約74%になっているものの、その有効利用率は頭打ち傾向にあり、今後の石炭灰の発生量の増大を考えると大量利用への新たな技術開発が急務となっている[1]。

石炭灰の有効利用としては、セメント製造用原料（粘土代替）、セメントおよびコンクリート混和材、人工軽量骨材[2] 等があるが、近年、従来は存在しなかった 700~1000MW級海外炭専焼ボイラが稼動をはじめ、フライアッシュの性状も従来から変化しており[3]、混和材として良質のものが発生するにもかかわらず、その製品のバラツキによりセメント製造用原料として用いられるケースが多いのが現状である。そこで、電力業界としては、発電所の燃焼技術の改善、フライアッシュ分級装置の設置、フライアッシュ品質管理システムの構築等に努めている。

一方、近年、コンクリート強度はJ A S S 5の設計基準強度の上限値36N/mm² を超え60N/mm² 程度まで実用化されている。しかし、フライアッシュを混入した高強度コンクリートの研究は比表面積7000cm²/g以上のものが多く[4]、今後の大量利用を考えると海外炭専焼大型石炭火力発電所から発生する比表面積4000cm²/g程度のフライアッシュの研究が求められている。

そこで、本論文では、近年の海外炭専焼大型石炭火力発電所から発生するフライアッシュ（比表面積4000cm²/g程度）の高強度コンクリートへの適用性について検討し、その流動性改善効果、水和熱低減効果および強度発現性状について考察した。

* 1 九州電力(株) 土木部建築課, 工修(正会員)

* 2 九州電力(株) 土木部建築課

* 3 大成建設(株) 技術研究所, 工博(正会員)

* 4 大成建設(株) 技術研究所(正会員)

2. 実験計画

普通ポルトランドセメント（以後NC）の一部にフライアッシュ（以後FA）を置換した場合、その球形な粒子によりコンクリートの流動性改善に効果があることがすでに多くの実験により確認されているが、近年の海外炭専焼大型火力発電所から発生するFAで同様の傾向があるのかはデータが少なく、今回、実験により把握することとした。

一方、高強度コンクリートを断面寸法の大きな柱構造体などに打設した場合には、セメントの水和熱により構造体の内部温度が高温となり、その水和熱により構造体の長期強度が停滞する傾向がある。しかし、セメントの一部をFAに置換すると、水和熱による構造体の温度上昇を低く抑えられ、構造体の強度発現性状の改善が期待できる[5]。そこで、本実験では、柱構造体の内部温度を模擬できる簡易的な試験方法を用い、高強度コンクリートのセメントの一部をFAに置換した柱構造体の強度発現性状を検討した。

2.1 材料

(1) 骨材

骨材は、九州北部地域で一般的に用いられている骨材の中から文献[6]により高強度に適したものを選定しており、その試験結果を表-1に示す。JASS5「高強度コンクリート」、JISA5005「コンクリート用砕石及び砕砂」の基準と比較すると、C砕砂の粒形判定実積率がやや下回っている。

骨材組合せは表-2に示す通りとし、混合した細骨材は粗粒率2.71、塩分0.007%である。

(2) フライアッシュ

FAは、D社M発電所から採取した海外炭分級FAであり、その試験結果を表-3に示す。試験結果は、すべてJISA6201の基準を満足している。また、海外炭FAは国内炭FAに比べて一般に球状でない粒子の混入が多いが、本試料は分級FAであり、単位水量比の試験結果によると粒形のよいFAと推察される。

2.2 調合

検討要因と水準を表-4に示す。水結合材比（以後W/B）の設定は、設計基準強度60N/mm²クラスを想定し25.0、28.6%とし、目標スランプは現実の施工実績に合わせてそれぞれ23cmとした。なお、高性能AE減水剤はナフタレン系、補助AE剤はアニオン系を使用した。

FAの置換率は20%を基本とし、比較として30%のものも実施した。

表-1 骨材試験結果

種類	産地	表乾比重	吸水率 (%)	粒形判定実積率 (%)	粘土塊量 (%)	洗い損失量 (%)	塩分 (NaCl) (%)	単位容積質量 (kg/L)	粗粒率
細骨材	A海砂	2.59	0.74	—	0.04	1.0	0.005	1.57	1.67
	B海砂	2.56	1.59	—	0.03	1.4	0.012	1.64	2.65
	C砕砂	2.67	1.97	52.3	0.22	4.2	0.000	1.64	3.68
粗骨材	D砕石	2.70	0.35	61.0	0.06	0.1	—	1.73	6.49

表-2 骨材組合せ

細骨材（絶乾重量比）	粗骨材
A海砂：B海砂：C砕砂 =1:2:1（粗粒率=2.71）	D砕石

表-3 フライアッシュ試験結果

	比重	比表面積 (cm ² /g)	圧縮強度比 28日 (%)	SiO ₂ (%)	湿分 (%)	強熱減量 (%)	MB吸着量 (mg/g)	単位水量比 (%)
JISA 6201	1.95以上	2,400以上	60以上	45以上	1以下	5以下	—	102以下
FA	2.22	3,980	77.8	71.1	0.04	1.0	0.35	97

表-4 検討要因と水準

調合	B/W	W/B (%)	FA置換率 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位粗骨材 (m ³ /m ³)
NO.1	4.0	25.0	0	23	3	160	0.57
NO.2	3.5	28.6	0	23	3	165	0.58
NO.3	4.0	25.0	20	23	3	160	0.57
NO.4	3.5	28.6	20	23	3	165	0.58
NO.5	3.5	28.6	30	23	3	165	0.58

粗骨材はかさ容積

2. 3 練混ぜ

練混ぜには容量 0.1m³のパン型強制練りミキサーを使用し、1バッチの練混ぜ量は55ℓとした。また、練混ぜ順序は、先にモルタルを練混ぜた後、粗骨材を投入する方法とした。

2. 4 養生条件

練混ぜは、温度20℃湿度80%の恒温恒湿室で行い、練り上がったコンクリートのスランプ、スランプフロー、空気量を測定し、その後φ10×20cmのモールドに打込んだ。養生条件は、標準養生、現場封かん養生および初期断熱封かん養生とした。初期断熱封かん養生とは、コンクリートを打込んだモールドを図-1に示す発泡スチロール製簡易断熱装置中に5日間入れ、その後恒温恒湿室内で封かん養生を行うものである。温湿度条件は、夏期を想定して30℃、80%とした。

なお、本断熱装置では、コンクリートの水和発熱によりコンクリート温度が上昇し、断面が80cm×80cm程度の柱の平均的な温度履歴と同程度となること文献[7]ですでに確認されている。

3. フレッシュコンクリートの性能

フレッシュコンクリートの性能試験結果を表-5に示す。スランプは22~24cm、空気量は2~4%の範囲に入り、目標を満足した。なお、FAを混入したコンクリートに所定の空気量を確保するためには補助AE剤が必要であった。

目視による練り上り状況の観察結果では、調合No.1のみやや粘性が高かったが、同条件でFAを混入したNo.3は粘性が小さくなり良好な練り上り状況となり、この傾向は文献[4]とも一致した。

4. 流動性改善効果

FA置換率と高性能AE減水剤の使用量の関係を図-2に示す。FA置換率が大きくなるにつれ、高性能AE減水剤の使用量が減少しており、FAの使用がコンクリートの流動性の改善

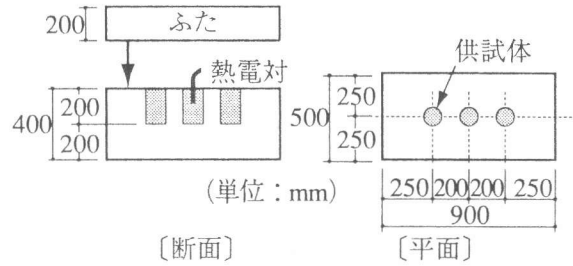


図-1 初期断熱封かん養生装置

表-5 フレッシュコンクリートの性能

記号	W/B (%)	FA置換率 (%)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	高性能AE減水剤 (B×%)	補助AE剤 (B×%)
NO.1	25.4	0	22.6	38.8	3.3	2.99	0
NO.2	28.6	0	23.0	42.8	2.7	1.40	0
NO.3	25.0	20	23.6	40.8	2.2	2.10	0.10
NO.4	28.7	20	23.0	39.8	2.5	1.30	0.07
NO.5	28.8	30	23.0	42.5	2.3	1.20	0.10

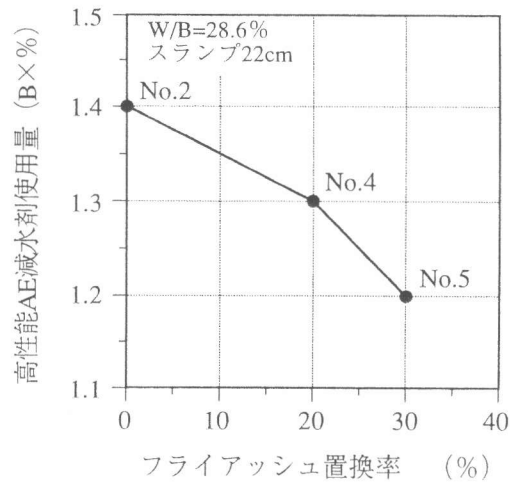


図-2 FA置換率と高性能AE減水剤使用量の関係

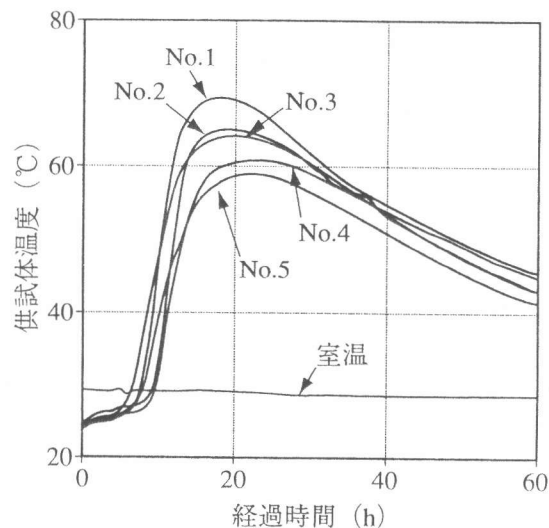


図-3 初期断熱封かん養生供試体温度履歴

に寄与することが確認できた。この傾向は文献[4]とも一致した。

5. 水和熱低減効果

初期断熱封かん養生を実施した供試体の温度データを図-3に示す。これにより、断熱養生供試体の温度は、60~70℃近い高温となっているが、同一水結合材比ならば、FAを20%置換した方が置換率0%の場合より最高温度で4~5℃低くなり、30%置換するとさらに温度上昇が抑制されることがわかる。

FA置換率と単位結合材当たりの温度上昇量を図-4に示す。これにより、構造体の温度は、結合材使用量が多いほど上昇すること、FAの置換率を大きくするほど減少することがわかる。また、結合材当たりの温度上昇量はFAの置換率に依存していることから、本実験程度の低水結合比の範囲であっても、FAの使用が部材温度上昇の抑制に有効な手段であることが推察される。

6. 圧縮強度の発現性状

圧縮強度試験結果を表-6に示す。

標準養生および初期断熱封かん養生供試体の材齢と圧縮強度の関係を図-5および図-6に示す。また、各養生条件でのFA置換率と圧縮強度の関係を、図-7(材齢7日)、図-8(材齢91日)に示す。

この結果、いずれの条件でも柱構造体強度として60N/mm²以上の高強度が得られることが予想できる。

6. 1 養生条件の影響

図-5、図-6に見られるように、材齢7日では、初期断熱封かん養生は標準養生より高い強度となるが、これは高温によりポルトランドセメントの水和が促進されることと、FA中のSiO₂がポゾラン反応により硬化物を生成することの相乗効果と考えられる。しかし、その後の強度の伸びは停滞し、長期材齢では標準養生のコンクリート強度の方が逆に高くなる。この傾向はセメントの一部をFAに置換しても同様である。

6. 2 標準養生におけるFAの影響

図-5、図-6に見られるように、NCのみを使用したものとその一部をFAに置換したコンクリート強度を比較すると、材齢56日まではNCのみの強度が高いが、材齢91日ではFA置換の

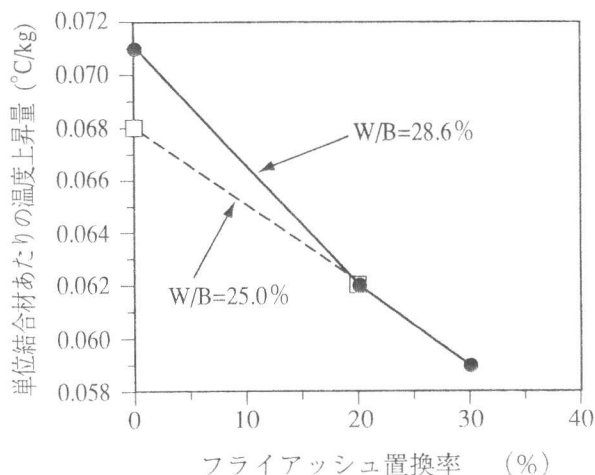


図-4 FA置換率と単位結合材当たりの温度上昇量の関係

表-6 圧縮試験結果

調査	W/B (%)	FA置換率 (%)	養生条件	圧縮強度 (N/mm ²)			
				7日	28日	56日	91日
NO.1	25.4	0	標準	73.1	84.8	90.2	94.4
			現場封かん	70.9	75.1	82.9	88.5
			初期断熱	74.5	78.1	80.7	86.0
NO.2	28.6	0	標準	64.3	76.0	80.2	83.5
			現場封かん	62.1	68.7	72.8	76.0
			初期断熱	62.6	66.2	67.4	71.3
NO.3	25.0	20	標準	66.0	81.6	87.7	97.8
			現場封かん	70.7	83.7	93.1	97.1
			初期断熱	76.3	81.3	85.0	87.3
NO.4	28.7	20	標準	57.3	70.6	78.1	86.2
			現場封かん	59.3	71.1	76.0	80.7
			初期断熱	62.6	68.9	70.1	72.8
NO.5	28.8	30	標準	53.0	68.4	77.6	84.4
			現場封かん	55.0	70.2	78.8	80.8
			初期断熱	60.4	66.3	70.8	71.8

方が逆に上回っている。

6. 3 初期断熱封かん養生におけるFAの影響

図-5, 図-6に見られるように, NCのみを使用したものとセメントの一部をFAに置換したコンクリート強度を比較すると, 材齢7~91日のいずれの材齢においても, FA置換の方がNCのみより強度が高くなっている。

ただし, FAを30%置換した場合の材齢7日強度だけはNCのみより強度が低くなっている。

6. 4 初期材齢における強度発現性状

図-7に示されたW/B=28.6%の材齢7日におけるFA置換率と強度の関係によると, 標準養生と現場封かん養生では, FAを混入すると強度が低下するが, 初期断熱封かん養生ではFAを20%置換しても強度低下は起きない。しかし, FAを30%置換すると強度はやや低下している。

また, 型枠脱型時期の管理において, FAを混入したコンクリートの場合, 現場封かん養生では正確な管理が難しいことがわかる。

6. 5 長期材齢における強度発現性状

図-8に示されたW/B=28.6%の材齢91日におけるFA置換率と強度の関係によると, 全ての養生条件においてNCのみの場合よりFAを置換した方が強度が大きくなることわかる。

強度試験結果から, 現場封かん養生の強度は柱構造体の強度を模擬した初期断熱封かん養生に比べてかなり高くなっており, 柱構造体の管理に使用するのは危険であると考えられる。

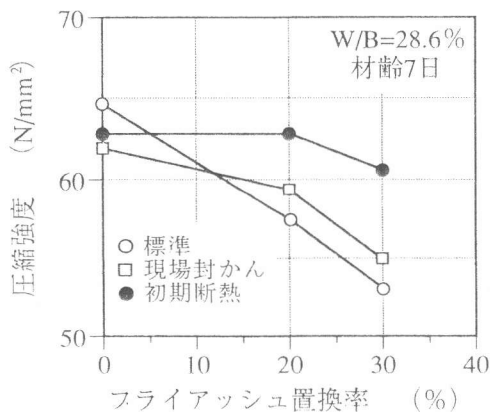


図-7 FA置換率と圧縮強度の関係

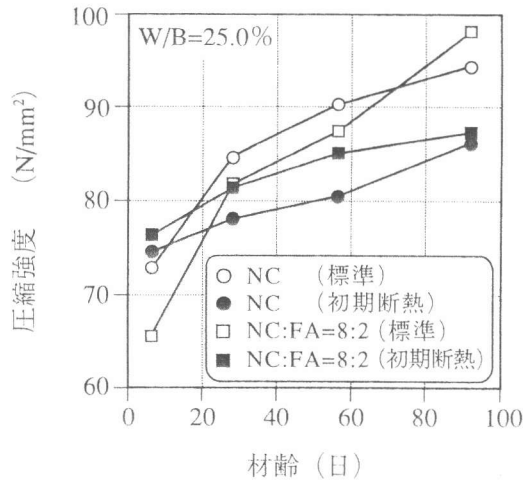


図-5 材齢と圧縮強度の関係

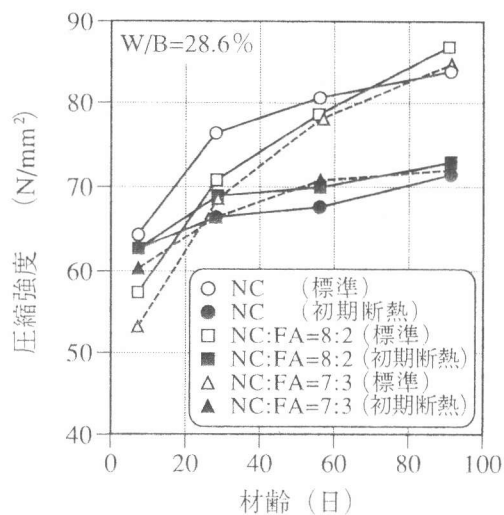


図-6 材齢と圧縮強度の関係

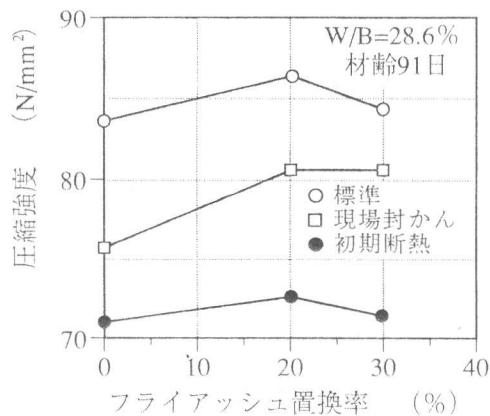


図-8 FA置換率と圧縮強度の関係

7. まとめ

近年の海外炭専焼大型石炭火力発電所から発生するフライアッシュ（比表面積4000cm²/g程度）の高強度コンクリートへの適用性について実験を行い以下の結論を得た。

(1) 流動性改善効果

低水結合比のコンクリートは粘性が高く扱いにくい性状を有しているが、このコンクリートのセメントの一部をフライアッシュと置換すると、粘性が小さく良好な練り上り状況になった。

高強度コンクリートでは、所定のスランプを得るため高性能A E減水剤の使用は不可欠であるが、フライアッシュ置換率が大きくなるにつれ、高性能A E減水剤の使用量が減少しており、フライアッシュの使用がコンクリートの流動性向上に寄与することが確認できた。

(2) 水和熱低減効果

80cm×80cm程度の柱の平均的な温度履歴が今回実施した初期断熱封かん養生の供試体の温度履歴と同程度と考えると、最高温度は60～70℃に近い高温に達することが判明した。また、同一水結合材比ならば、フライアッシュを20%置換することにより最高温度で4～5℃低くなり、30%置換するとさらに温度上昇が抑制されることが確認できた。

(3) 圧縮強度の発現性状

設計基準強度60N/mm²クラスのコンクリートのセメントの一部にフライアッシュを置換すると、今回行った柱内部を模擬した室内実験では、水和熱により初期強度発現の遅れが改善されるとともに長期材齢においても普通ポルトランドセメントと同等以上の強度が得られた。従って、実構造物においても同様の効果が得られる可能性を見出した。しかし、置換率が30%と多くなると初期の強度発現が普通ポルトランドセメントより低くなる傾向が見受けられた。

〔参考文献〕

- [1] 環境技術協会，日本フライアッシュ協会：石炭灰ハンドブック，平成7年10月
- [2] 是石俊文，船本憲治ほか：フライアッシュを使用した人工軽量骨材の開発，セメント・コンクリート，No.478，pp.18-27，1986.12
- [3] 畑元浩樹，平野利光：海外炭専焼発電所から発生する石炭灰を用いたコンクリートの性状について，コンクリート工学，Vol.16，No.1，pp.413-418，1994.5
- [4] 石井光裕，浮田和明ほか：分級フライアッシュを混入した高強度コンクリートの諸特性，コンクリート工学，Vol.13，No.1，pp.263-268，1991.5
- [5] 丸嶋紀夫，戸祭邦之ほか：高強度コンクリートの水和発熱による温度上昇がセメントの水和反応へ与える影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.725-726，1991.9
- [6] 船本憲治，黒羽健嗣ほか：九州産骨材の高強度コンクリートに関する適用性について，日本建築学会九州支部研究報告，pp.101-104，1994.3
- [7] 飯島直人，戸祭邦之ほか：設計基準強度600kgf/cm²を目標とした構造体強度の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.545-546，1989.10