

# 論文 外国炭石炭灰を用いた高流動コンクリートの流動特性

山崎竹博<sup>1</sup>・渡辺 明<sup>2</sup>・出光 隆<sup>3</sup>・平山浩司<sup>4</sup>

**要旨：**石炭はエネルギー対策の一環として電力エネルギーの安定供給に欠かせないが、年間405万トンの灰を生じ、今後さらに増える傾向にある。筆者らは、フライアッシュ原粉をコンクリート用混和材として活用することを検討した。わが国は石炭灰の多くを海外に依存しているため、産地によって灰の性質にもばらつきが見られる。本研究では、性質の異なる4炭種の灰を選び、性質のばらつきが高流動コンクリートの流動性、施工性、強度に及ぼす影響について検討した。その結果、表-1に示す項目についてフライアッシュのJIS規格を満たす灰で置換すれば、W/P=30%でも自己充填性が高く、その置換率によって高強度から150kg/cm<sup>2</sup>の低強度まで強度設計が可能なが判った。

**キーワード：**高流動コンクリート、石炭灰、強度設計、強度特性

## 1.まえがき

日本のエネルギー消費量はアメリカに次ぎ、1992年度では石油換算で4億4千万トンにも達している。その供給構成は、石油57%、石炭16%、原子力11%、水力4%となっている。その中で費量の38%を占める電力は、石炭からの供給率が8%と低く、1994年の総エネルギー調査会の期需給見直しでも石炭供給率15%への増加を見込んでいる。現在、価格はカロリー当たり円の2分の1の安さであり、石炭火力発電は今後定着するものと考えられる。石炭火力発電では環境汚染防止や自動燃焼技術は確立されているが、大量に発生する石炭灰の処理を必要とする環境保護の観点から、造成地や埋立地などの投棄用地が不足し、今後、石炭灰の処理が困難になる傾向にある。このような、石炭灰の処理方法の一つとして、筆者らは電気集塵機で回収された原粉灰をそのままコンクリート用混和材へ利用することでの問題点について実験的検討を行った。わが国では、石炭鉱業審議会答申に基づき国内炭採掘を1000万トン以下とし、ほとんどが国産で補っている。外国炭の性質は輸入される国や炭鉱によって異なり、排出される灰の品質も表-1に示すように、炭種の違いによるばらつきが見られる[1]。本研究では、外国炭石炭高流動コンクリートに用いた場合、その品質のばらつきが及ぼす、流動性、施工性、強度特性の影響について比較検討を行った。

表-1 石炭灰分析結果

炭種	湿分	強熱減量(%)	比重	比表面積(cm <sup>2</sup> /g)	品質
JIS A 6201規格	1.00以下	5.00以下	1.95以上	2,400以上	
ハンタバレー	0.07	5.75	2.18	3,900	低
エンシャム	0.22	3.16	2.31	3,250	中
ユーラン	0.14	1.57	2.23	3,640	良
ブレアソール	0.10	2.73	2.20	3,520	良

- \*1 九州工業大学助教授 工学部設計生産工学科 工博(正会員)
- \*2 九州共立大教授 工学部土木工学科 工博(正会員)
- \*3 九州工業大学教授 工学部設計生産工学科 工博(正会員)
- \*4 九州工業大学大学院 工学部設計生産工学科 工学研究科

## 2. 実験概要

### 2. 1 使用材料

石炭灰の品質は燃焼時の温度や時間などに影響され、低温や短時間での燃焼では未燃カーボンが増え、強熱減量が増加する。このため、本論文では、石炭灰の一般的性質を強熱減量でクラス分けし、3.00%以下を良, 3.00~5.00%を中, 5.00%以上のものを低品質とした。実験には、表-1に示す良品で比表面積の違うユーラン炭, プレアソール炭, 中品質のエンシャム炭, 低品質のハンターバレー炭の4炭種の石炭灰を選んだ。炭種の名称は、オーストラリアの産炭地の地名である。表-1に併記のJIS A 6201 (フライアッシュ)の規格に外れるものはハンターバレー炭の強熱減量だけであった。コンクリートに使用した各材料および混和剤を表-2に示す。石炭灰を用いたコンクリートの流動性は使用する混和剤の種類によって影響を受けるので、予備実験から最も優れたスランプ保持性や分散性等の得られたポリカルボエーテル系高性能AE減水剤を使用した。

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 比 重 : 3.15
骨材	細骨材 表乾比 重 : 2.56 吸水率 : 3.09 % 実積率 : 65.4 % 粗粒率 : 2.68 %
	粗骨材 表乾比 重 : 2.78 吸水率 : 1.48 % 実積率 : 60.9 % 粗粒率 : 2.78 %
混和剤	高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系複合体) 比 重 : 2.18 AE助剤 (変性アルキルカルボン化合物系) 比 重 : 1.03

### 2. 2 実験配合の選定

高流動性をもち、材料分離の少ないコンクリートを用いて石炭灰の種類の違いによる流動性への影響を調べた。その配合選定の方法として、予備実験として品質の安定した国内炭石炭灰をセメントと同量用い、単位結合材量(以下、Pと記す)を550kg/m<sup>3</sup>、細骨材率s/aを50%の一定値として、単位水量を140~190kg/m<sup>3</sup>、高性能AE減水剤量をP×1.8~2.6%の間で変化させ、コンクリートの流動特性試験を行った。このとき、空気量を4

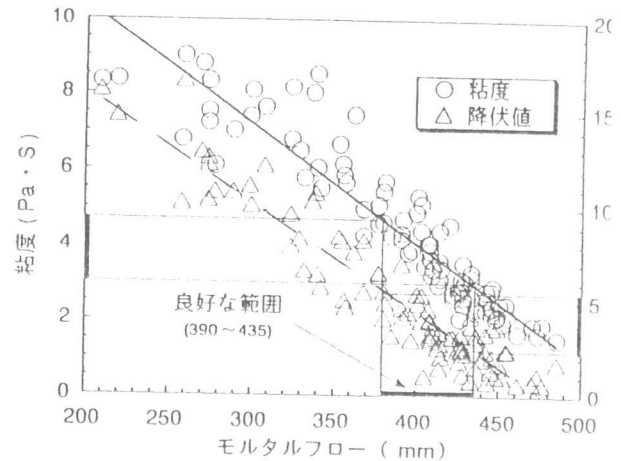


図-1 モルタルのコンシステンシー

%とする為のAE助剤量も求めている。それらの結果から、コーン引き上げから20秒後のスランプフローが65±5cm, U字型充填試験器による充填値が30cm以上で材料分離のないコンクリー

表-3 コンクリート配合

配合 No.	W/P (%)	S/a (%)	空気量 (%)	単位重量(kg/m <sup>3</sup> )					高性能AE減水剤 P×(%)	AE助剤 P×(%)
				W	P		S	G		
					C	F				
HAN-1	32.7	50	4	180	275	275	719	786.3	1.8	0.01
2	29.1			160			744.6	815.4	2.0	0.02
3	29.1			160			744.6	815.4	2.4	0.04
4	27.3			150			757.4	829.3	2.6	0.05
EN-1	30.9	50	4	170	275	275	747.1	811.3	1.8	0.01
2	29.1			160			759.9	825.2	2.0	0.02
3	27.3			150			772.7	839.1	2.0	0.03
4	25.5			140			785.5	853.0	2.4	0.04
YU-1	32.7	50	4	180	275	275	728.8	791.5	1.8	0.01
2	29.1			160			754.4	819.3	2.0	0.02
BU-1	30.9	50	4	170	275	275	739.5	803.0	1.8	0.01
2	30.9			170			739.5	803.0	2.0	0.02
3	29.1			160			752.3	816.9	2.2	0.03
4	27.3			150			765.1	830.8	2.6	0.05

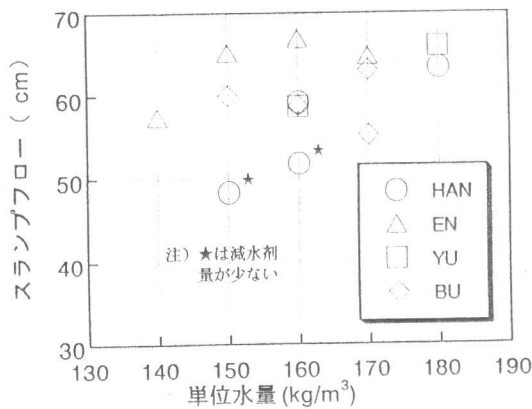


図-2 単位水量とスランプフローの関係

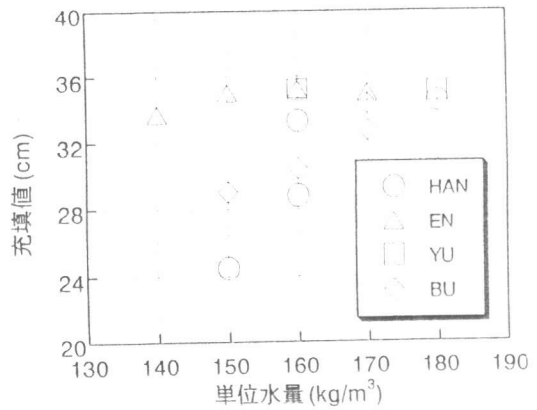


図-3 単位水量と充填値の関係

配合を選定した。その選定配合のウェットスクリーニングモルタルのミニスランプコーン (JIS規格のスランプコーンの1/2サイズ) によるフロー値を求めたところ380~435mmであることが判った。次に、高流動コンクリート用モルタルを特定する目的で4種類の石炭灰を用いたモルタルフロー値と見掛粘度、降伏値をB型粘度計を用いて測定した。その結果を図-1に示す。それはそれぞれほぼ直線とみなすことができる。同図から高流動コンクリート中のモルタルのフロー値の範囲に相当する見掛粘度を求めると3.0~4.7Pa・Sとなり、降伏値は2.5~5.5Paであった。

各石炭灰のモルタルごとにこれらの範囲に入る配合を選び、 $P=550\text{kg/m}^3$ 、 $s/a=50\%$ 一定として計したコンクリートの配合を表-3に示す。図-1のモルタルフローの範囲でも見掛粘度と降伏値に石炭灰の種類によってばらつきが見られる。それらのばらつきがコンクリートの流動性に与える影響を調べる目的で実際にコンクリートによる試験を実施した。図-2、3に単位水量とスランプフロー、充填値との関係を示す。モルタル試験で適当とみなされた配合でコンクリート試験を行ってみると、スランプフローが $65\pm 5\text{cm}$ 、充填値30cm以上を満たしていない場合が認められた。図-2および図-3から、高流動コンクリートの範囲として設定したスランプフロー、充填値が全ての石炭灰について得られる配合として表-4に示す配合を求めた。

表-4 配合表 (単位水量、高性能AE減水剤量一定)

配合No.	W/P (%)	S/a (%)	空気量 (%)	単位重量(kg/m³)				高性能AE減水剤 P× (%)	AE助剤 P× (%)	
				W	P		S			G
					C	F				
HAN	30.9	50	4	170	275	275	738.0	801.5	0.02	
EN							747.1	811.3	0.03	
BU							739.5	803.0	0.04	
YU							741.6	805.4	0.02	

### 3. 実験結果および考察

前述のようにいずれの石炭灰を使用しても高流動コンクリートを得られる。これらの配合においてコンクリートの流動特性、圧縮強度を測定した。以下、それらの性質に与える各種要因について述べる。

#### 3.1 石炭灰の物理的性質がコンクリートの流動特性に及ぼす影響

##### (1) 石炭灰の比表面積の影響

4種類の石炭灰の比表面積は、表-1に示したように3,200~3,900 cm<sup>2</sup>/gとなっている。図-

比表面積とスランプフローおよび充填値との関係を示す。同図からスランプフローは、比表面積と極めて高い相関性を示し、比表面積が大きくなるにつれてスランプフローは小さくなる傾向を示す。また、鉄筋通過性および自己充填性を評価する充填値は比表面積が大きくなれば大きくなる傾向を示す。このことは、石炭灰の比表面積が大きくなれば自己充填性は増加してコンクリートの流動性は低下するが、粗骨材の周囲のペースト膜は厚くなるため降伏強度は低下し、鉄筋通過性および自己充填性は良くなることを意味する。

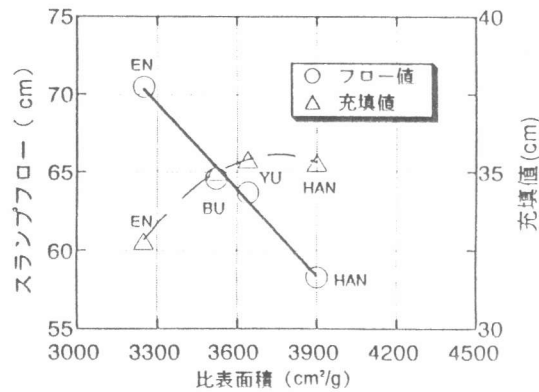


図-4 比表面積と流動特性の関係

(2) 石炭灰の強熱減量と流動特性  
 石炭灰の強熱減量は主として石炭灰中の未燃カーボンによるものと考えられる。その量は発電所燃焼装置や石炭の種類によって異なり、多い場合には高性能AE減水剤を吸着してその分散効果低下させる。本研究では、4種の石炭灰(強熱減量1.00~5.75%)を用いて、練混ぜ5分後と30分に再度練直した後、流動特性試験を行った。その結果を図-5に示す。その結果ポリカルボン酸エステル系の高性能AE減水剤を用いた場合、JISフライアッシュの規格(5.00%以下)を外れるハターバレー炭(5.75%)でも30分後のスランプフローの低下は見られなかった。

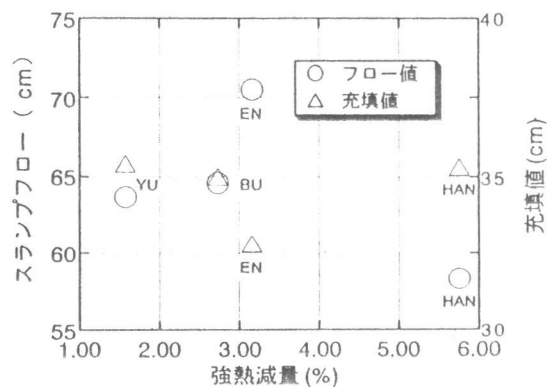


図-5 強熱減量と流動特性の関係

4) 石炭灰の湿分と流動特性  
 石炭灰の粒子は、セメント粒子とほぼ同じサイズの球状シリカ質材料であり、湿分の吸収によってフロック等を生じる。これらのフロックは水と混ぜる際に分散を阻害する要因となるが、図-6に示す実験結果ではむしろ湿分の大きいものはスランプフローが増大する傾向がみられる。このことは今回使用した石炭灰の湿分がすべてフライアッシュのJIS規格(1.00%)よりもかなり良好な状態にあったためと考えられる。換言すればフライアッシュのJIS規格内にある湿分であれば流動性に大きな影響を与えないと考えられる。

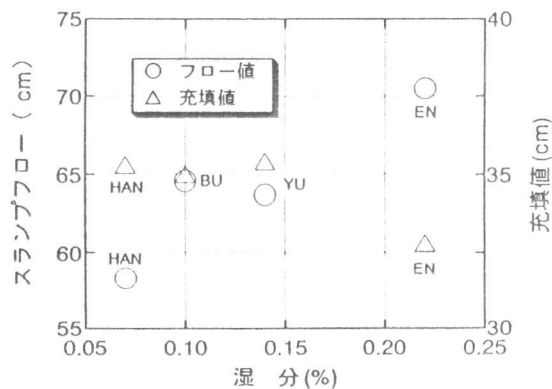


図-6 湿分と流動特性の関係

### 3. 2 コンクリートの圧縮強度

石炭灰の物理的性質の相違がコンクリートの強度に及ぼす影響について考察する。図-7~1に石炭灰の物理的性質と材齢7日および28日の圧縮強度の関係を示した。図-7は比表面積を軸に取ったものであるが、圧縮強度はほぼ一定で変化しないものとみなせる。一方、図-8にす比重の材齢28日強度への影響については比重が2.23, 2.18と低下するにつれて、若干強度が低

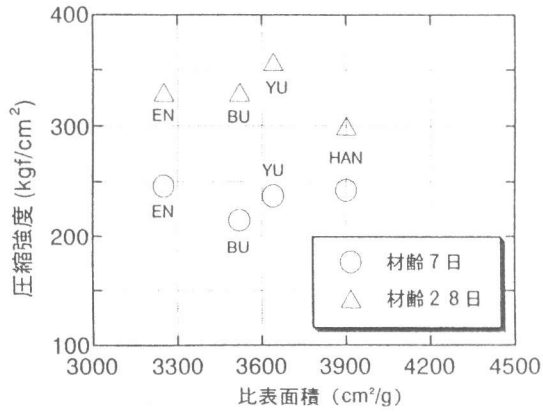


図-7 比表面積と圧縮強度の関係

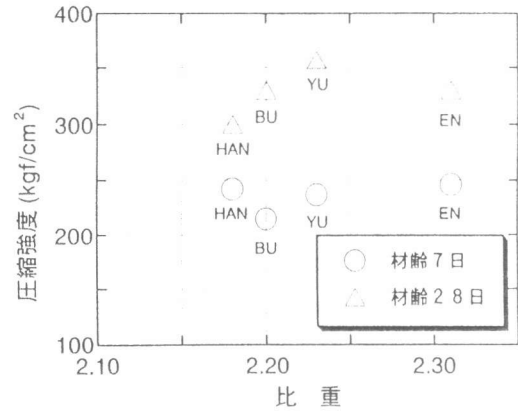


図-8 比重と圧縮強度の関係

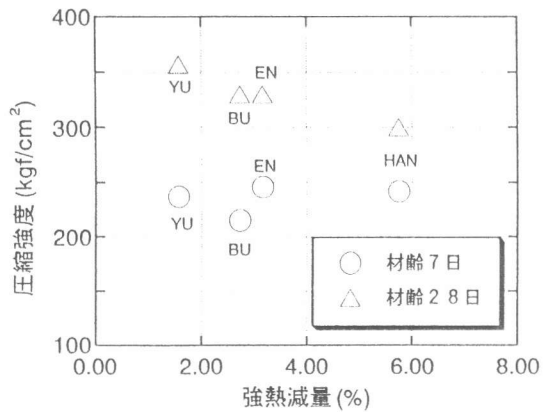


図-9 強熱減量と圧縮強度の関係

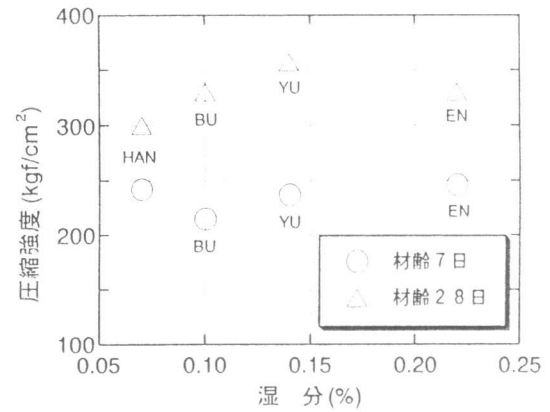


図-10 湿分と圧縮強度の関係

下していくようである。また、強熱減量の強度への影響は、図-9に示すように、材齢7日強度にはほとんど見られないが、材齢28日強度は強熱減量が増大するほど低下する傾向を示した。すなわち、未燃カーボンが多い石炭灰は材齢7日から28日までの強度の伸びが小さいようである。灰の湿分については、図-10に示すように、湿分0.15%で材齢28日圧縮強度のピークが見られ、分0.07%に対して0.15%では17%の強度増加となっている。

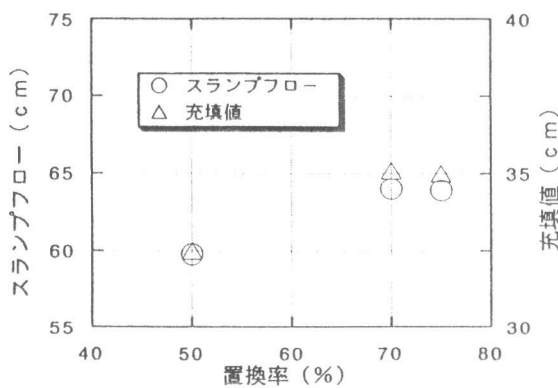


図-11 結合材中の石炭灰置換率と流動特性の関係

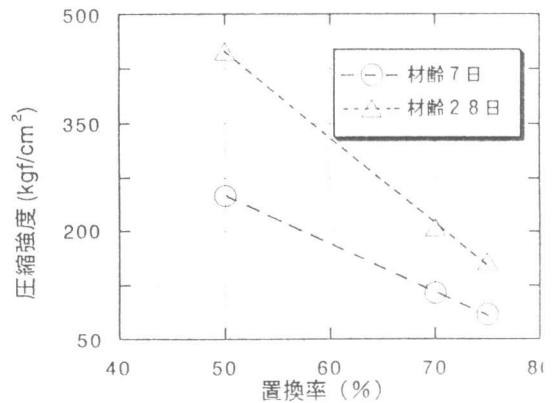


図-12 結合材中の石炭灰置換率と圧縮強度の関係

### 3. 3 石炭灰の置換率とコンクリートの強度

コンクリートの強度は、内部に存在する空隙の増大によって低下する。従来、コンクリートの強度設計はセメント水比(C/W)で行われてきたが、近年の高流動コンクリートなど高性能AE減水剤を使用したコンクリートでは結合材にセメントのみを使用した場合、C/Wによって低強度から高強度まで強度を変化させることは困難であると考えられる。筆者らは、使用する石炭灰量で高流動コンクリートの強度制御を行う方法について検討した。まずはじめに表-4に示す配合でセメントに対する石炭灰の置換率のみを変化させてコンクリートの流動特性試験を行ったところ、図-11に示すように石炭灰置換率75%までスランプフロー、充填値共に伸びる傾向が得られた。この傾向は、セメント粒子に比べて球形に近い石炭灰を使用することによるボールベアリング作用によって降伏値が低下するためと考えられる。これらのコンクリートの圧縮強度を材齢7日および28日で調べたところ、図-12に示すように圧縮強度が410~150kgf/cm<sup>2</sup>の範囲ではほぼ石炭灰置換率で制御できることが明らかとなった。

## 4. 結論

産地の異なる外国炭はその灰の物理的性質も異なる。その違いが高流動コンクリートの流動特性、強度特性に及ぼす影響について、本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる。

①表-1に示す項目について、JIS A 6201(フライアッシュ)の規格を満たす石炭灰を75%程度セメントに置換しても高流動性は損なわれない。

②石炭灰の比表面積が3,200~3,900cm<sup>2</sup>/gの範囲においては、比表面積が大きくなればスランプフローはわずかに低下するが降伏値が低下するため自己充填性は良くなる。

③ポリカルボン酸エーテル系の高性能AE減水剤を用いた場合、強熱減量がJIS規格を外れる石炭灰でも30分後のスランプフローの低下は見られなかった。

④石炭灰の湿分はJIS規格(1.00%以下)であればコンクリートの流動性に悪影響を与えないと考えられる。

⑤石炭灰の比表面積の相違はコンクリートの強度に影響しないようである。

⑥未燃カーボン量が多い石炭灰は、材齢7日強度は通常のコンクリートと変わらないが材齢7日から28日までの強度の伸びが小さい。

⑦低水結合材比で打設する高流動コンクリートの強度は、セメントを石炭灰で置換する率により容易にコントロールできる。本研究では、W/P=30.4%、P=550kg/m<sup>3</sup>、石炭灰置換率75%で材齢28日圧縮強度150kgf/cm<sup>2</sup>の低強度高流動コンクリートが得られた。

## 5. おわりに

石炭灰をセメントの混和材料として使用することにより低水粉体比で自己充填性が高く、コンクリートの強度制御が可能なコンクリート打設が可能であるとの結論を得た。今後さらにコンクリートの緻密化による耐久性向上への改善にも検討を加えたい。最後に、材料のご提供をいただきました九州電力株式会社に謝意を申し上げます。

参考文献 [1]高山俊一, 出光隆, 山崎竹博, 畑元浩樹; フライアッシュの品質の違いが高流動コンクリートの流動性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, 16巻, 1号, pp107~112, 1994.6