

報告

[1067] 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

畑元浩樹\*1・平野利光\*2

1. はじめに

近年のエネルギーの多様化から石炭火力発電が見直され、石炭灰の排出量が増大する傾向にあり、石炭の種類もわが国の石炭政策の縮小により国内炭から海外炭へと徐々に移行してきている。

一方、フライアッシュのJIS規格は国内炭を対象に定められており、海外炭の増加や発電燃焼方式の変化に伴う石炭灰粒形の非球形化、未燃カーボン含有量などの低品質な石炭灰の使用ができない状況にある。

本報告は、海外炭から発生する石炭灰の有効利用を目的とし、海外炭専焼の松浦火力発電所（長崎県）より排出される石炭灰を用いて混和材料「フライアッシュ」への利用の適用性を検討したものである。なお、本報告では、「松浦火力発電所から排出される石炭灰」を石炭灰、「JIS A 6201の規格を満足する石炭灰で、市販されているもの」をフライアッシュと呼ぶことにする。

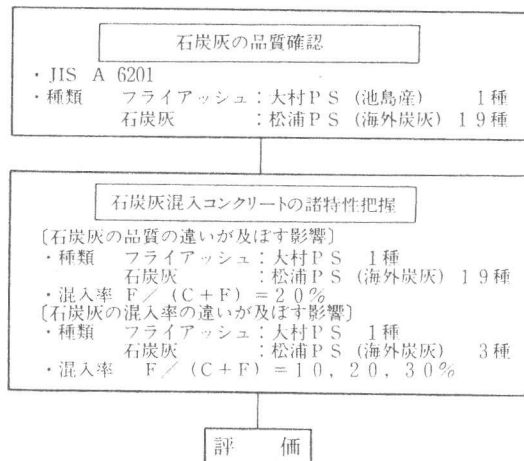


図-1 実施フロー

2. 研究概要

図-1のフローに示すように、①石炭灰の品質を確認するとともに、②石炭灰混入コンクリートの諸特性を把握しフライアッシュを混入したコンクリートとの性状比較を行った。

3. 石炭灰の品質

表-1に石炭灰の炭種およびその化学成分、物理的品質を示す。石炭灰の品質は、同一炭種でも石

表-1 石炭灰の化学成分および物理的品質

炭種記号	石炭の産地	JIS A 6201規格値 採取日	化学成分				物理的品質					JIS A 6201への適合
			酸化 けい素 (%)	水分 (%)	強熱 減量 (%)	メチレン ブルー 吸着量 (mg/g)	比重	粉末度 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	単位 水量比 (%)	圧縮強度比 (%)		
										28H	91H	
フライアッシュ	国内	H1. 1.31	59.4	0.09	1.24	0.27	2.29	4740	95.4	95.1	116.5	○
B	オーストラリア	H1. 7.25	70.2	0.09	2.57	0.48	2.22	4260	101.5	73.4	88.1	○
C-1	オーストラリア	H1. 8. 8	66.4	0.10	2.58	0.48	2.11	3360	100.4	67.3	84.0	○
C-2		H2. 8.10	64.7	0.03	2.03	0.30	2.07	2850	99.8	68.5	86.7	○
D	オーストラリア	H1. 8.18	53.1	0.03	2.90	0.56	2.13	3390	99.8	73.2	84.2	○
E-1	オーストラリア	H1. 8.28	69.0	0.08	4.15	0.56	2.22	4150	101.1	67.8	80.0	○
E-2		H2. 8.17	56.2	0.06	2.45	0.41	2.16	3480	100.4	67.8	82.5	○
E-3		H3.12.24	73.0	0.04	3.74	0.47	2.26	4740	101.6	76.8	94.2	○
F	インドネシア	H1. 9.28	48.5	0.06	[13.93]	0.61	2.17	5630	[106.3]	[57.8]	79.0	×
G	アメリカ	H1.10.11	52.3	0.04	0.86	0.60	2.45	3640	96.8	77.6	94.2	○
H-1	アメリカ	H1.11.24	51.7	0.08	4.71	0.61	2.17	4520	[102.2]	67.3	90.0	×
H-2		H2.11.22	57.3	0.06	1.57	0.25	2.12	3090	99.3	71.7	88.5	○
I	オーストラリア	H2. 4.10	46.1	0.16	2.61	0.49	2.31	3870	100.4	70.0	83.5	○
J	オーストラリア	H2. 8. 2	71.9	0.06	[5.54]	0.55	2.18	3170	[104.6]	60.5	74.0	×
K	オーストラリア	H2. 9.10	66.9	0.06	2.18	0.48	2.21	3490	101.5	71.0	87.9	○
L	中国	H3. 1.10	53.8	0.05	4.77	0.58	2.37	4560	100.9	76.1	92.9	○
M	カナダ	H3. 1.17	62.0	0.08	0.13	0.06	2.17	3400	95.3	77.3	87.7	○
O-1	アメリカ	H3. 2.15	52.9	0.08	1.73	0.59	2.09	3830	100.0	74.4	95.6	○
O-2		H3. 8. 1	49.4	0.06	3.73	0.44	2.19	4020	100.9	69.8	87.7	○
P	カナダアメリカ	H3. 2.28	56.3	0.07	1.50	0.34	2.17	3440	99.1	71.5	95.4	○

[ ]で囲んだ数値はJIS A 6201に適合しない

\*1 九州電力(株)総合研究所土木研究室 (正会員)

\*2 九州電力(株)総合研究所土木研究室 副主査(正会員)

炭の採取時期あるいは発電燃焼程度の違いによってばらつくことが予想されるが、石炭採取時期の違いによるばらつきを全ての炭種で確認することは困難である。このため、ここでは試料の採取時期の違いによるばらつきをC, E, H, O炭灰の4種類で確認した。表-1の各データの中から強熱減量とメチレンブルー吸着量の関係を図-2に示す。石炭灰の品質について要約すると次のとおりである。

- ① JIS A 6201「フライアッシュ」の規格には大半のものが適合した。
- ② フライアッシュAが良質であるのに対して石炭灰は全般的に品質が低レベルで、その程度は炭種の違い、あるいは同一炭種でも試料の採取時期の違いにより異なっている。
- ③ メチレンブルー吸着量はフライアッシュAに比べて2倍程度高い。
- ④ 単位水量比は大半が100%以上となり、減水効果は期待できない。この最大要因は、写真-1～写真-2（電子顕微鏡写真、倍率450）を比較して判るように、石炭灰は不整形粒子を多く含んでいることにあると考えられる。

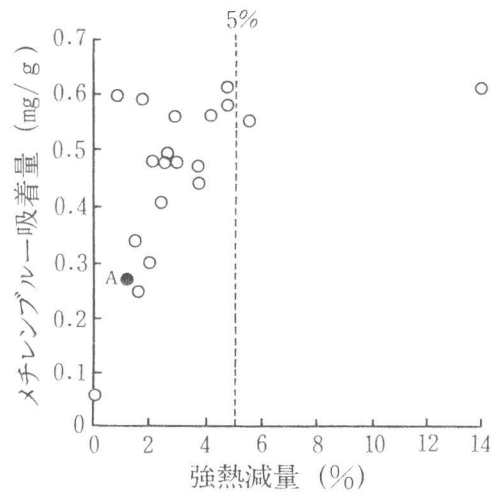


図-2 強熱減量とメチレンブルー吸着量の関係

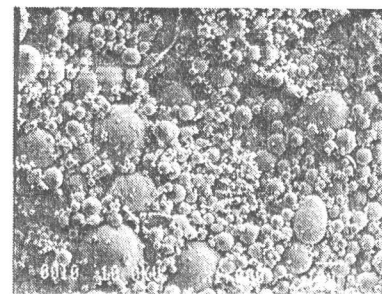


写真-1 フライアッシュA

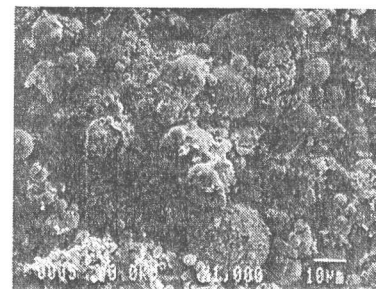


写真-2 石炭灰H-1

#### 4. 石炭灰混入コンクリートの諸特性

4.1 石炭灰の品質の違いによるコンクリートの諸特性  
プレーンコンクリート（1種）、フライアッシュ混入コンクリート（1種）、石炭灰混入コンクリート（19種）について石炭灰の品質の違いがフレッシュ性状に及ぼす影響を把握した。実施内容を表-2に示す。プレーンコンクリート（PC配合）で得られた細骨材率（44%）を一定とし、フライアッ

表-2 コンクリート試験内容

配合条件		試験項目
種類	フライアッシュ1種、石炭灰19種	フレッシュコンクリートの性状： スランプ、空気量、フリージング、 凝結時間、単位容積重量
水結合材比	W / (C + F) = 60%	
スランプ	12 ± 1 cm	
空気量	4.5 ± 0.5%	
混入率	F / (C + F) = 20%…内割り	

ッシュ混入コンクリート（A配合）、石炭灰混入コンクリート（B～P配合）の配合を定めた。これらの配合を表-3に示す。表中の配合番号は表-1の炭種記号と同じである。

##### (1) 単位水量

図-3は各配合の単位水量（比）を示したものである。石炭灰を混入した配合ではフライアッシュA配合ほどの減水効果は認められない。フライアッシュによって単位水量が減少するのは球

形体で表面が滑らかな粒子であることに起因しており、不整形粒子を含む石炭灰を混入したコンクリートでは単位水量が多くなったものと考えられる。コンクリートの単位水量と石炭灰の強熱減量の関係（図-4）をみると、両者には相関が認められるが、それでも若干のばらつきが生じている。このばらつきは、コンクリートを製造する際、事前に試し練り試験を行い単位水量を決定しなければならないことにつながり、コンクリート製造者にとってこの作業工程は大きな問題となるが、コンクリートの単位水量と比較的高い相関があり、簡単な試験で得られるモルタルの単位水量比（図-5）で管理すればさほどの支障はない。

## (2) AE剤使用量

図-6は各配合のAE剤使用量（比）を示したものの

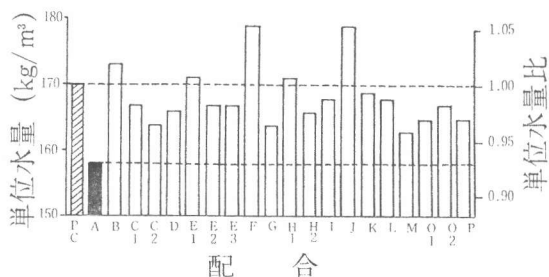


図-3 単位水量（比）

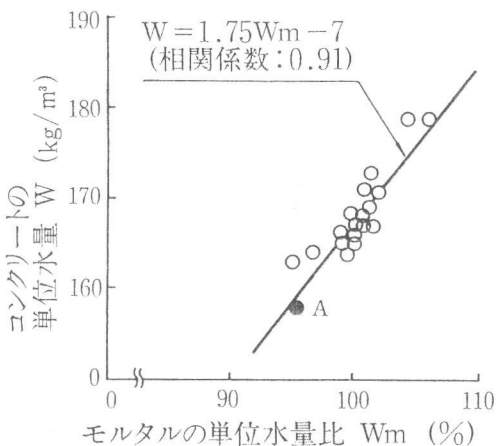


図-5 モルタルの単位水量比とコンクリートの単位水量の関係

表-3 コンクリートの配合

配合番号	採取日	細骨材率 s/a (%)	単位水量 W (kg/m³)	単位量 (kg/m³)				AE減水剤 (cc/m³)	AE剤 (cc/m³)
				セメント C	石炭灰 F	細骨材 S	粗骨材 G		
P C	—	44.0	170	283	—	783	1094	566	57 (0.02%)
A	H1. 1.31	44.0	158	210	53	796	1113	526	145 (0.06%)
B	H1. 7.25	44.0	173	230	58	769	1075	576	245 (0.09%)
C-1	H1. 8. 8	44.0	167	222	56	778	1087	556	209 (0.08%)
C-2	H2. 8.10	44.0	164	218	55	783	1094	546	137 (0.05%)
D	H1. 8.18	44.0	166	222	55	781	1091	554	208 (0.08%)
E-1	H1. 8.28	44.0	171	228	57	773	1079	570	271 (0.10%)
E-2	H2. 8.17	44.0	167	222	56	779	1089	556	125 (0.04%)
E-3	H3.12.24	44.0	167	222	56	781	1091	556	278 (0.10%)
F	H1. 9.28	44.0	179	238	60	757	1057	596	328 (0.11%)
G	H1.10.11	44.0	164	218	55	788	1102	546	314 (0.12%)
H-1	H1.11.24	44.0	171	228	57	773	1079	570	328 (0.12%)
H-2	H2.11.22	44.0	166	222	55	781	1091	554	152 (0.05%)
I	H2. 4.10	44.0	168	224	56	779	1089	560	210 (0.08%)
J	H2. 8. 2	44.0	179	238	60	757	1057	596	283 (0.09%)
K	H2. 9.10	44.0	169	226	56	776	1084	564	169 (0.06%)
L	H3. 1.10	44.0	168	224	56	779	1089	560	266 (0.10%)
M	H3. 1.17	44.0	163	218	54	786	1098	544	54 (0.02%)
O-1	H3. 2.15	44.0	165	220	55	782	1092	550	220 (0.08%)
O-2	H3. 8. 1	44.0	167	222	56	779	1089	556	195 (0.07%)
P	H3. 2.28	44.0	165	220	55	783	1094	550	165 (0.06%)

● AE減水剤の使用量はすべて(C+F)×0.2%である。  
● AE剤の( )内の値は(C+F)に対するAE剤の使用率を示す。

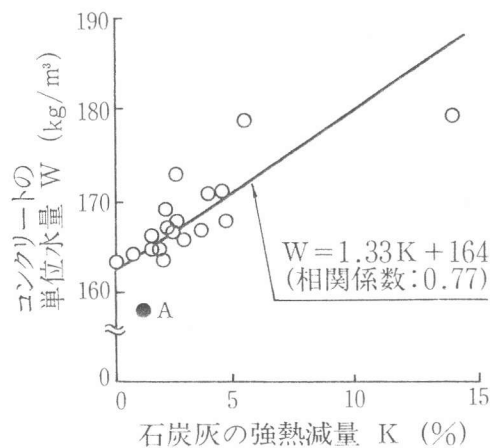


図-4 石炭灰の強熱減量とコンクリートの単位水量の関係

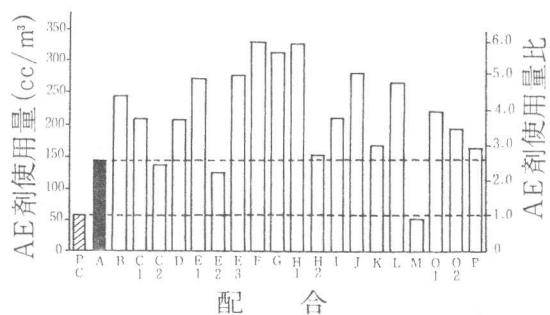


図-6 AE剤使用量（比）

である。フライアッシュを混入したコンクリートはPC配合に比べてAE剤を約 2.5倍多く必要とするが、石炭灰を混入したコンクリートの場合更に多く必要とし、その使用量比は多いもので6倍近い炭種もある。活性炭素含有量の指標となるメチレンブルー吸着量とAE剤使用量の関係(図-7)をみると、両者には密接な関係があり、所要空気量を連行させるために必要なAE剤量は石炭灰のメチレンブルー吸着量を把握することによりある程度予想が可能である。

#### 4. 2 石炭灰の混入率の違いによるコンクリートの諸特性

石炭灰19炭種のうち松浦火力発電所で多く消費され、かつメチレンブルー吸着量が0.4, 0.5, 0.6 mg/g程度のも3炭種(E-2, K, H-1)を選定し石炭灰の混入率を10, 20, 30%と変化させ、混入率の違いがコンクリートに及ぼす影響を把握した。

コンクリート試験に先立ち、これに使用するAE剤の選定試験を行った。実施内容を図-8に示す。

##### (1) AE剤の選定

AE剤の選定試験では、H-1配合(混入率30%)を対象とし、普通コンクリート用AE剤1種(a)とフライアッシュ用特殊AE剤3種(b, c, d)を用いた4種のコンクリート配合試験を行った。使用したAE剤は表-4のとおりである。以下、コンクリート配合名はAE剤の記号で表す。a配合で得られた基本配合によりb, c, d配合でのAE剤量を求めた。この時のスランプおよび空気量の経時変化を図-9に示す。フライアッシュ用特殊AE剤を用いた配合のAE剤量は、c配合が最も少ない。(a;309cc/m<sup>3</sup>, b;1854cc/m<sup>3</sup>, c;464cc/m<sup>3</sup>, d;742cc/m<sup>3</sup>)また、図-9からスランプ、空気量の経過60分における低下量も、c配合が最も小さく性状が安定しており、AE剤cを以降のコンクリート試験に使用した。

##### (2) コンクリートの配合

コンクリートの配合試験では、全ての配合で所要のコンシステンシーおよびワーカビリティを満足するように各単位量を求めた。AE剤cを使用したコンクリート配合試験結果を表-5に示す。なお、フライアッシュA, 石炭灰E-2, K, H-1の配合番号のうち、10, 20, 30は混入率を表す。

PC配合の単位水量172 kg/m<sup>3</sup>に

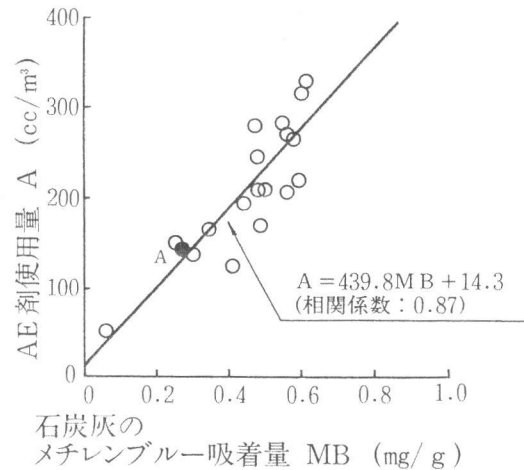


図-7 石炭灰のメチレンブルー吸着量とAE剤使用量の関係

AE剤の選定試験		
(配合条件)	AE剤の種類	普通コンクリート用AE剤 1種 フライアッシュ用特殊AE剤 3種
(コンクリート試験)	石炭灰の種類	H-1
	水結合材比	W/(C+F) = 60%
	混入率	F/(C+F) = 30%...内割り
	スランプ	12±1cm
	空気量	4.5±0.5%
(コンクリート試験) スランプ、空気量の経時変化		
石炭灰の混入率の違いがコンクリートに及ぼす影響把握		
(配合条件)	プレーン	フライアッシュ
(コンクリート試験)	石炭灰の種類	E-2 K H-1
	水結合材比	W/(C+F) = 60%
	混入率	F/(C+F) = 0, 10, 20, 30%...内割り
	スランプ	12±1cm
	空気量	4.5±0.5%
(コンクリート試験) フレッシュコンクリートの性状 プリージング、凝結 硬化コンクリートの性状 圧縮強度 断熱温度上昇 凍結融解 中性化 乾燥収縮		
評価		

図-8 コンクリート試験内容

表-4 AE剤の種類

A	E	剤	内 容
普通コンクリート用	a		P社製 303A (アルキルアルスルホン酸塩系陰イオン表面活性剤)
フライアッシュ用	b		P社製 AE-775 (高アルキルカルボン酸塩系陰イオン界面活性剤)
	c		T社製 FA-10 (高級脂肪酸ポリオキシエチレンアルキルエーテル)
	d		Y社製 Y-FA (アニオン系およびノニオン系特殊界面活性剤)

表-5 コンクリートの配合試験結果

配合番号	メチレンブルー吸着量 (mg/g)	石炭灰の混入率 F/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位水量 W (kg/m³)	単位量 (kg/m³)				A E 減水剤 (cc/m³)	A E 剤 (cc/m³)
					セメント					
					C	F	S	G		
PC	—	—	44.0	172	287	—	778	1090	574	86 (0.03%)
A-10	0.27	10	43.0	162	243	27	776	1127	540	162 (0.06%)
A-20		20	42.0	155	206	52	765	1161	516	181 (0.07%)
A-30		30	41.0	151	176	76	750	1186	504	252 (0.10%)
E-2-10	0.41	10	43.0	168	252	28	763	1113	560	140 (0.05%)
E-2-20		20	42.0	166	222	55	745	1132	554	166 (0.06%)
E-2-30		30	41.0	165	192	83	724	1146	550	220 (0.08%)
K-10	0.48	10	42.0	167	250	28	748	1134	556	222 (0.08%)
K-20		20	41.0	165	220	55	729	1152	550	248 (0.09%)
K-30		30	40.0	165	192	83	708	1165	550	303 (0.11%)
H-1-10	0.61	10	42.0	170	255	28	743	1126	566	283 (0.10%)
H-1-20		20	41.0	168	224	56	724	1144	560	336 (0.12%)
H-1-30		30	40.0	167	195	83	705	1160	556	417 (0.15%)

● A E 減水剤の使用量はすべて (C+F) × 0.2% である。  
 ● A E 剤の ( ) 内の値は (C+F) に対する A E 剤の使用率を示す。

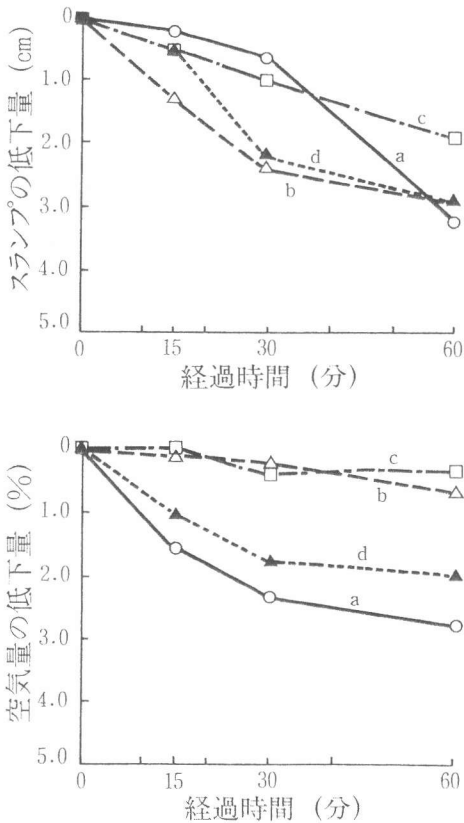


図-9 スランプ、空気量の経時変化

比べて、A 配合での単位水量の低減量は混入率10%; 10kg/m³, 20%;17kg/m³, 30%;21kg/m³ となっている。

これに対して、石炭灰を混入した配合でのその低減量は混入率10%;2~5kg/m³, 20%;4~7kg/m³, 30%;5~7kg/m³程度で混入率増加の効果もそれほど期待できない。石炭灰を混入した配合のAE剤使用量については石炭灰のメチレンブルー吸着量が高いほど多く、またいずれの炭種も混入率を増すほど多く必要とする。メチレンブルー吸着量の最も高いH-1 配合では混入率10%~30%で283~417cc/m³となり、PC配合のメチレンブルー吸着量の3.29~4.85倍であった。

### (3) コンクリートの性状

混入率 20%での圧縮強度を、一例として図-10に示す。石炭灰を混入した配合の材令28日における圧縮強度 (混入率10%;246~247kgf/cm², 20%;213~224kgf/cm², 30%;179~185kgf/cm²) は全般にA 配合 (混入率10%;227kgf/cm², 20%;212kgf/cm², 30%;168kgf/cm²) を上回るが、混入率の増加に伴い低くなっている。

断熱温度上昇量、乾燥収縮ひずみ、中性化促進および凍結融解試験は混入率20%での代表ケースで行った。これらの結果のうち、断熱温度上昇量、乾燥収縮ひずみおよび中性化深さの経時変化を図-11~図-13に示す。石炭灰を混入した配合の断熱温度上昇量の経時変化は、A 配合とほぼ同様な傾向をたどっている。PC 配合と比べると、材令3日ではPC配合の40.9℃に対して32.5~33.5℃ (A 配合;33.6℃) と7~8℃低減しているが、材令が進むにつれ低減度合いは減少し材令14日ではPC配合の42.7℃に対して39.2~40.9℃と 2~4℃程

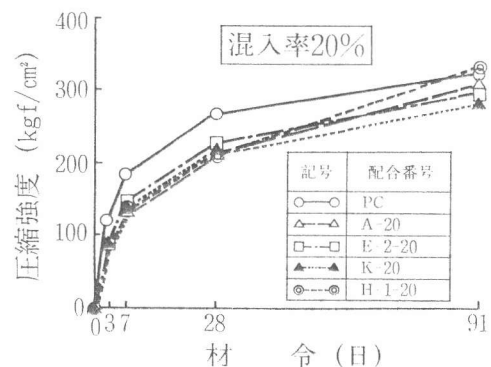


図-10 材令と圧縮強度の関係

度の発熱抑制効果しか認められない。乾燥収縮ひずみの経時変化では、A配合、PC配合および石炭灰を混入した配合とも殆ど同じで、経過日数120日において約  $700 \times 10^{-6}$  となっている。また、中性化試験（温度  $40 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度  $80 \pm 3\%$ 、炭酸ガス濃度  $5 \pm 0.3\%$ ）において、石炭灰を混入した配合の中性化深さを促進材令90日でみると3.78~4.76cmとなっており、A配合（4.16cm）と変わらない。ちなみに、岸谷の中性化速度式[1]から推定すると、100年後の中性化深さは2.7~3.2cmとなっている。なお、凍結融解抵抗性については、A配合と殆ど変わらなかった。

### 5. まとめ

本研究の結果を要約すると、以下のとおりである。

- ① 今回使用した石炭灰19炭種の品質は、JIS A 6201「フライアッシュ」の規格には大半の炭種が適合した。しかしながら、フライアッシュAが良質であるのに対して石炭灰は全般的に品質が低レベルで、その程度は炭種の違い、あるいは同一炭種でも試料の採取時期、発電燃焼程度の違いによって異なっている。
- ② 石炭灰はフライアッシュAほどの減水効果は認められない。
- ③ 石炭灰を混入したコンクリートは通常よりAE剤を多く必要とするが、その量は石炭灰のメチレンブルー吸着量を把握することによりある程度予想が可能である。
- ④ 石炭灰を混入したコンクリートの圧縮強度は全般にフライアッシュ混入のコンクリートより上回るが、混入率の増加に伴い低くなっている。
- ⑤ 断熱温度上昇量、乾燥収縮ひずみ、中性化の進行および凍結融解抵抗性は、フライアッシュAとほとんど同じである。

### 6. おわりに

石炭灰には一部フライアッシュ JIS規格外のものがみられたが、混和材料「フライアッシュ」として技術的に適用可能であることが検証された。一方、現行の JIS規格により低品質な石炭灰の使用ができない状況にある。現在、SI単位系への移行も含めた JIS規格改正の動きがみられる。本報告の結果が JIS規格改正に役立ち、規格が緩和されれば、海外炭から発生する石炭灰の活用拡大につながる。

【参考文献】1)喜多ほか：コンクリート構造物の耐久性シリーズ中性化、技報堂出版、pp36, 19

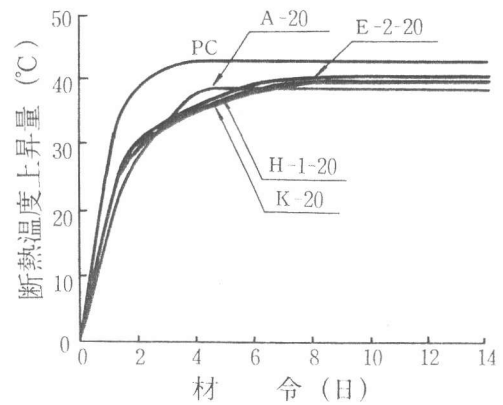


図-11 断熱温度上昇量

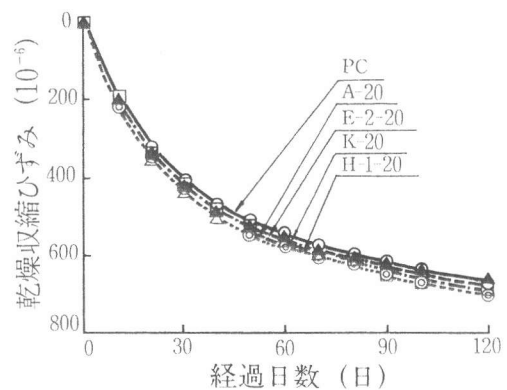


図-12 乾燥収縮ひずみ

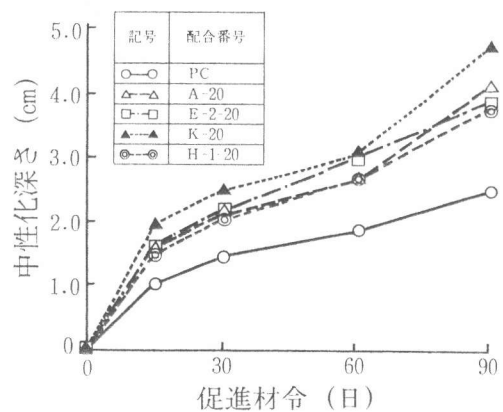


図-13 中性化深さ