

産地の異なるフライアッシュを用いた コンクリートの性質について

廣 川 一 巳*・前 川 静 男**
高 橋 昌 之***・斉 藤 敏 樹***

On Property of Concrete with Fly ash made by different coal

Kazumi HIROKAWA・Shizuo MAEKAWA
Masayuki TAKAHASHI・Toshiki SAITOH

要 旨

火力発電所のボイラー燃焼温度の規制, 石炭の質の変化によりフライアッシュの強熱減量が増加気味である。本研究はこの強熱減量の変化がコンクリートの性状にどのように影響するかを, 練り上り性状, 凍結融解試験, 乾燥収縮試験などの点で考察したものである。

1. ま え が き

近年, エネルギー問題がとりざたされている中, 石炭による火力発電が見直されてきた。この石炭火力発電の副産物であるフライアッシュの生産量も石炭火力発電の増加とともに増えている。

このフライアッシュは微粉炭燃焼ボイラーから出る微粉末の灰でありコンクリート混和材として利用すると, フライアッシュがボールベアリング的作用をして流動性が増し, コンクリートの単位水量を減少することが出来たり, 乾燥収縮を小さくしたり, ポゾラン反応による長期強度の増大, 水和熱の減少, 海水などに対する化学抵抗性の増大などのメリットがある。また経済的な面でもフライアッシュは安価であるため, セメントに混和することにより, セメントのコストを低下することが出来る。

しかし, 国内における石炭事情もあり海外炭に依存する度合いが強く, 石炭の質に変化が出ている。また, 火力発電所の微粉炭専焼ボイラーの低 NO_x 化のため, ボイラーの燃焼温度の規制がある。こ

のような状況のなかでフライアッシュの強熱減量が増加の傾向にあり, フライアッシュをコンクリートに利用する上でいろいろ考慮すべき点も出てきている。^{1),2),3),4)} 本研究ではフライアッシュを入れない普通ポルトランドセメントと, その普通ポルトランドセメントに9種のフライアッシュを置換率20%で混ぜたときのコンクリートの練り上り性状, 凍結融解試験, 乾燥収縮試験を通し, 強熱減量の影響を調べたものである。

2. 実 験 概 要

2. 1 実験材料及び配合

使用セメントは普通ポルトランドセメントで各フライアッシュは置換率20%で使用した。また, 各フライアッシュはあらかじめ普通ポルトランドセメントに混ぜて使用した。セメントとフライアッシュの物理的性質と化学成分を表-1と表-2に示す。

骨材は静内川産の細骨材(比重2.71, 吸水率1.44, F.M.2.62)と同じ静内川産の粗骨材(比重2.77, 吸水率2.71)を使用した。混和剤としては減水剤(セメント量の0.25%)とAE助剤(目標の空気量となるよう試験で決めた。使用量は表-3, 表-4に示す)を加えた。

* 助 手 土木工学科

** 教 授 土木工学科

*** 北電興業㈱

表-1 フライアッシュとポルトランドセメントの物理的性質

	moisture content (%)	ignition loss (%)	adsorption capacity for MB (mg/g)	setting		residual fineness		specific gravity	specific surface area (cm2/g)	water content (%)	compressive strength ratio (%)	flexural strength ratio (%)		
				initial (h-m)	final (h-m)	44 μ (%)	88 μ (%)							
None		0.29		2-48	3-48	5.30	0.60	3.17	3,130		7	222	7	48.1
											28	359	28	66.8
											91	431	91	78.3
Flyash A	0.13	1.42	0.36	3-54	4-50	12.60	2.40	2.10	3,320	98.0	7	66.0	7	80.0
											28	73.8	28	93.3
											91	104.0	91	111.0
Flyash B	0.32	3.58	1.50	3-49	4-29	9.20	1.60	2.18	4,465	98.7	7	58.3	7	78.0
											28	70.9	28	89.7
											91	103.0	91	111.0
Flyash C	0.13	2.47	0.26	3-18	4-00	15.30	5.10	2.27	4,275	103.3	7	57.3	7	80.0
											28	72.0	28	91.6
											91	83.6	91	95.1
Flyash D	0.22	4.83	0.97	2-48	4-22	1.39	0.16	2.33	5,245	100.1	7	56.8	7	80.7
											28	72.7	28	103.7
											91	95.7	91	96.3
Flyash E	0.14	4.54	0.80	2-28	3-53	15.33	5.13	2.12	3,730	103.1	7	47.3	7	63.4
											28	56.1	28	80.4
											91	77.5	91	81.4
Flyash F	0.18	5.46	0.86	3-35	4-39	2.51	1.18	2.06	3,625	102.8	7	42.6	7	61.6
											28	59.1	28	83.1
											91	79.3	91	92.2
Flyash G	0.07	5.93	0.76	3-10	4-23	11.60	13.30	2.12	3,200	104.0	7	49.4	7	72.6
											28	63.0	28	82.2
											91	77.5	91	97.7
Flyash H	0.15	8.47	0.92	3-31	4-27	23.00	9.50	2.19	4,365	104.5	7	51.4	7	71.7
											28	58.0	28	84.7
											91	78.2	91	94.1
Flyash I	0.16	10.28	0.96	3-34	4-29	23.80	10.50	2.21	4,475	105.0	7	55.2	7	75.1
											28	62.2	28	85.8
											91	80.1	91	92.5

表-2 フライアッシュと普通ポルトランドセメントの化学成分 (%)

	moisture content	lg.loss	Insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
none		0.29	0.74	22.21	6.33	2.05	63.87	1.80	0.14	0.19	1.77
A	0.13	1.42		62.17	23.24	5.10	2.69	1.85	0.66	1.08	0.29
B	0.32	3.58		54.95	25.09	4.76	6.12	2.53	0.84	0.61	0.23
C	0.13	2.47		51.71	27.56	5.47	8.58	1.79	0.12	0.26	0.45
D	0.22	4.83		59.22	27.52	3.91	1.83	0.46	0.16	0.34	0.20
E	0.14	4.54		72.66	15.65	3.62	0.47	0.73	0.20	0.39	0.13
F	0.18	5.46		56.01	25.98	5.24	2.68	2.24	0.11	0.95	0.08
G	0.07	5.93		52.75	26.38	5.66	4.66	2.08	0.49	0.53	0.20
H	0.15	8.47		49.93	26.19	4.56	6.48	1.86	0.21	0.64	0.23
I	0.16	10.28		44.44	27.68	5.36	8.33	1.64	0.13	0.39	0.57

表-3 乾燥収縮試験の配合と練り上り性状

	Maximum Size (mm)	W/(C+F) (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/cm³)						Slump (cm)	Air content (%)	Temperature (°C)	
				C+F	F	W	S	G	Admixture Cx% No.5L No.202A				
None	25	48.3	40.0	300	0	145.0	775.5	1189.0	0.25	0.0005	8.2	4.6	20.9
A	25	47.3	40.0	300	60	142.0	767.0	1177.0	0.25	0.0025	8.8	4.6	21.6
B	25	47.4	40.0	300	60	142.1	769.5	1179.8	0.25	0.018	8.2	4.8	20.4
C	25	49.4	40.0	300	60	148.2	764.0	1171.0	0.25	0.003	7.3	4.5	20.2
D	25	48.3	40.0	300	60	145.0	770.0	1177.0	0.25	0.018	8.3	4.9	20.4
E	25	49.3	40.0	300	60	148.0	762.0	1169.0	0.25	0.011	6.1	4.2	19.7
F	25	49.3	40.0	300	60	148.0	762.0	1169.0	0.25	0.010	6.8	4.7	20.6
G	25	48.8	40.0	300	60	146.4	760.5	1166.1	0.25	0.012	7.8	4.7	20.6
H	25	49.3	40.0	300	60	147.9	764.0	1169.0	0.25	0.020	8.0	4.6	20.6
I	25	51.3	40.0	300	60	153.9	757.0	1160.7	0.25	0.022	8.8	4.6	20.3

表－4 凍結融解試験の配合と練り上り性状

	Maximum Size (mm)	W/(C+F) (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/cm³)							Slump (cm)	Air content (%)	Temperature (℃)
				C+F	F	W	S	G	Admixture Cx% No.5L No.202A				
None	25	48.3	40.0	300	0	145.0	775.5	1189.0	0.25	0.0005	7.6	4.6	18.1
A	25	47.3	40.0	300	60	142.0	767.0	1177.0	0.25	0.0025	9.3	4.9	18.2
B	25	47.4	40.0	300	60	142.1	769.5	1179.8	0.25	0.026	7.0	4.0	18.5
C	25	50.6	40.0	300	60	151.8	760.1	1165.3	0.25	0.005	7.8	5.4	18.5
D	25	48.3	40.0	300	60	145.0	770.0	1177.0	0.25	0.024	7.0	4.1	18.3
E	25	49.3	40.0	300	60	148.0	762.0	1169.0	0.25	0.012	7.0	4.8	17.4
F	25	49.3	40.0	300	60	148.0	762.0	1169.0	0.25	0.010	7.2	4.6	17.8
G	25	48.8	40.0	300	60	146.4	760.5	1166.1	0.25	0.012	7.3	4.4	17.8
H	25	49.3	40.0	300	60	147.9	764.0	1169.0	0.25	0.018	6.9	4.3	18.4
I	25	51.3	40.0	300	60	153.9	757.0	1160.7	0.25	0.022	8.8	4.3	18.0

コンクリートの配合は s/a=40%，単位セメント量 300 kg で、目標スランプを 8 ±0.5 cm、目標空気量を 4.5±0.5%とした。

普通ポルトランドセメント及びフライアッシュを使ったコンクリートの配合を表－3、表－4に示す。ただし、表－3は乾燥収縮試験用供試体作成時のもので、表－4は凍結融解試験用供試体作成時のものである。

2. 2 乾燥収縮試験

コンクリートの長さ変化試験のうち、同一供試体でコンタクトゲージ法とダイヤルゲージ法を行なった。供試体の大きさは 10×10×40 cm の大きさのものを各種 3 本 1 組で行なった。ダイヤルゲージ法はコンクリートの両端にボルト（頭部に直径 5 ～ 6 mm、深さ 1 ～ 2 mm のくぼみをもったもの）を供試体作成時に埋込んで行なった。

供試体は脱型後材令 14 日まで水中養生（20 ± 3℃）し、このときを基準とし、基準から 1 週，4 週，8 週，3 ケ月，9 ケ月，12 ケ月まで長さ変化の測定を行なった。また、長さ変化測定時に質量をはかり、質量変化率も測定した。

2. 3 凍結融解試験

供試体は 10×10×40 cm のもの 3 本 1 組として行なった。試験方法は ASTM C－666 A 法に準じて行なった。また供試体は脱型後材令 56 日まで水中養生（20 ± 3℃）し、凍結融解試験を開始した。凍結融解サイクルは 1 日 8 サイクルで 300 サイクルまで行ない、30 サイクルごとに一次たわみ振動数と質量を測定した。

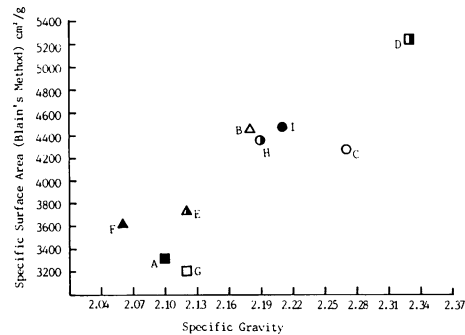
表－5 フライアッシュの JIS 規格

二酸化珪素（％）		4.5 以上
水分（％）		1 以下
強熱減量（％）		5 以下
比重		1.95 以上
粉末度 比表面積（ブレン方法）（ cm^2/g ）		2400 以上
単位水量比（％）		102 以下
圧縮強度比（％）	28 日	60 以上
	91 日	70 以上

3. 結果及び考察

3. 1 フライアッシュの物理的性質

A～Iのフライアッシュで表－5の JIS 規格を満たしているのが A, B, D の 3 つであった。フライアッシュの C は単位水量比，E は単位水量比と圧縮強度比の材齢 28 日，G は強熱減量と単位水量比，F・H は強熱減量と単位水量比と圧縮強度比の材齢 28 日，I は強熱減量と単位水量比と二酸化珪素で規定を満たしていない。



図－1 比表面積と比重の関係

フライアッシュ中の Fe₂O₃ の含有量が多いほど比重が大きくなる¹⁾といわれているが、表－2より逆のフライアッシュが多く、むしろ図－1に

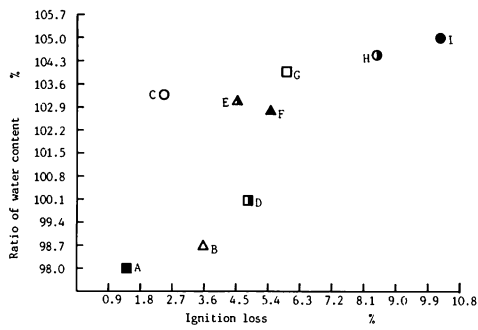


図-2 強熱減量と単位水量比の関係

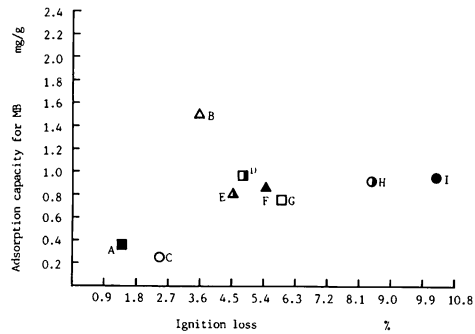


図-3 強熱減量とMB吸着量の関係

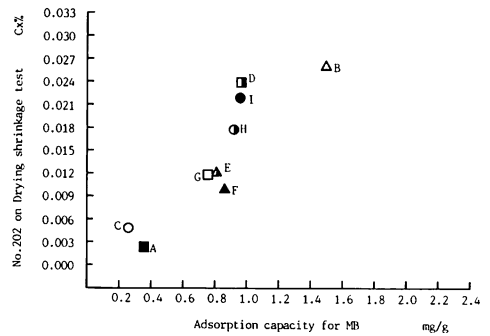


図-4 MB吸着量と乾燥収縮試験時のAE助剤との関係

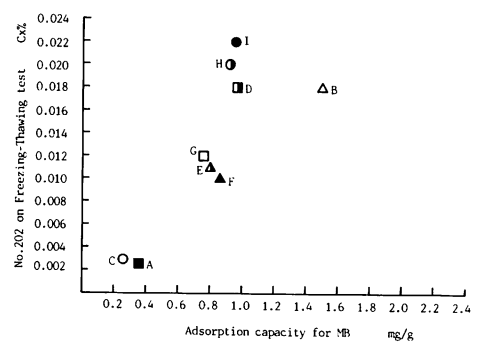


図-5 MB吸着量と凍結融解試験時のAE助剤との関係

示されるように比表面積が大きいほど比重が大となっている。これは粒子の小さいものの比重が大きいことが考えられる。強熱減量との関係でいうと、図-2に示されるように多少はずれたものもあるが強熱減量が多いものは単位水量比も大きい傾向があった。また、図-3に示すように強熱減量の多いものはMB吸着量も多くなる傾向があるが差はあまり大きくない。しかし、フライアッシュBは強熱減量の量に関係なく大きくでている。

単位水量比やMB吸着量以外のものと強熱減量との関係はつかめなかった。

3. 2 練り上り性状

表-3、表-4に乾燥収縮試験と凍結融解試験のときの配合を示してある。ともに目標は同じであるがフライアッシュCにおいては単位水量が変化した。また、減水剤に加えるAE助剤の量もフライアッシュBとDにおいて大きく変動している。これらのフライアッシュは所要の配合にするとき他のフライアッシュ使用のものと比べむずかしかったのと同じしている。

一般的にMB吸着量の多いものはAE剤等の使用量が多いといわれている。図-4、図-5に

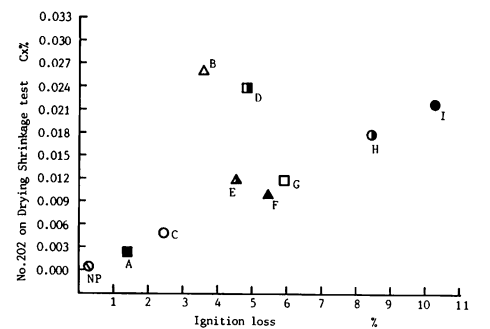


図-6 強熱減量と乾燥収縮試験時のAE助剤量との関係

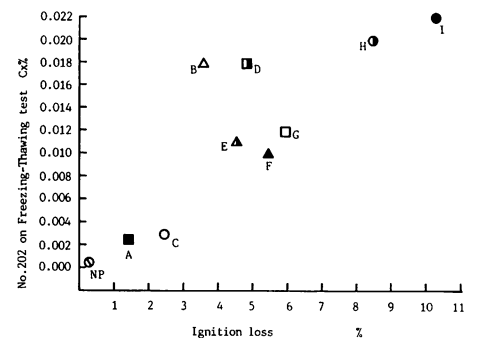


図-7 強熱減量と凍結融解試験時のAE助剤との関係

示すように本実験に使用したフライアッシュのMB吸着量とAE助剤との関係もMB吸着量の多いものほどAE助剤の量も多くなっている。特にフライアッシュBは他とはなれた所にあり、空気量の調整がむずかしかったことと一致している。

また、強熱減量との関係では、図-6、図-7に示すように、強熱減量の多いものはAE助剤の量も多くなる傾向がみられる。フライアッシュBとDは変動が大きいので少しはなれている。

3.3 乾燥収縮試験

コンタクトゲージ法とダイヤルゲージ法を行ったわけだが、ダイヤルゲージ法はボルトの埋込みがうまくいかなかったため測定するときミスが多く、結果はコンタクトゲージ法のみとする。

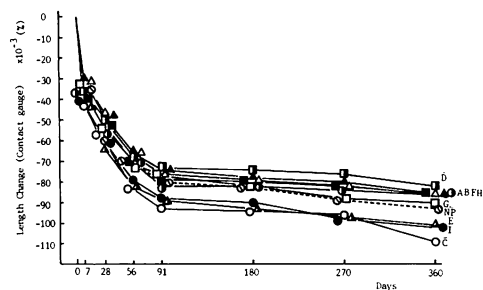


図-8 コンタクトゲージ法による長さ変化率

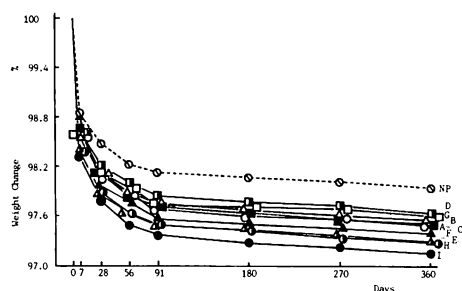


図-9 重量変化率

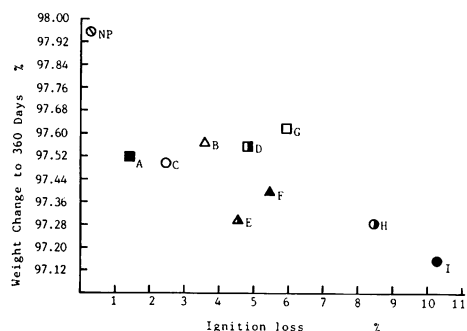


図-10 強熱減量と360日後の重量変化率との関係

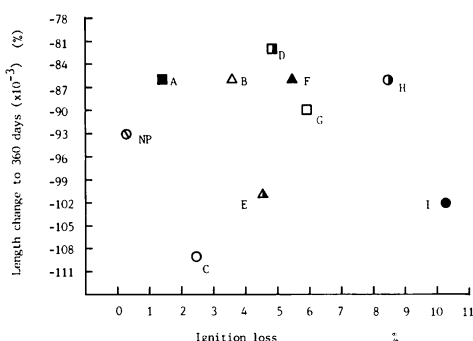


図-11 強熱減量と360日後の長さ変化率との関係

一般にフライアッシュを適量混合すると単位水量の減少とともに乾燥収縮も少なくなることが認められている。表-3の結果より、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比べ単位水量が減少したものがフライアッシュAとBだけであった。しかし、図-8の長さ変化率を見ると普通ポルトランドセメントより収縮が小さいものも多く、フライアッシュAとBの他にD, F, G, Hが小さい結果となった。単位水量は普通ポルトランドセメントのみよりは多いが、乾燥収縮は小さいという結果となった。ただしフライアッシュI, E, Cは他のフライアッシュより単位水量が多いためか、普通ポルトランドセメントのものより、やや乾燥収縮が大きい。

重量変化率については図-9に示すとおり、すべて普通ポルトランドセメントより重量の変化の割合が大きくなった。また、図-10に示すように強熱減量との関係については、図-11の強熱減量と360日後の長さ変化率の関係同様、強熱減量と重量変化率との関係も明確な関係は見いだせなかった。

3.4 凍結融解試験

相対動弾性係数については図-12に示すように、普通ポルトランドセメントに比べほとんど差がなかった。その中でも少し離れているのがフライアッシュF, E, Iで、比較的単位水量が多いものであった。しかしフライアッシュCは単位水量が多い割には普通ポルトランドセメントと変わらない結果となった。図-13に示すように強熱減量と耐久性指数の関係でみると、先ほどのフライアッシュF, Eを用いたものはなれているものの、他は強熱減量の多いものは耐久性指数が小さい傾向がみられる。

重量変化率は図-14に示すように普通ポルト

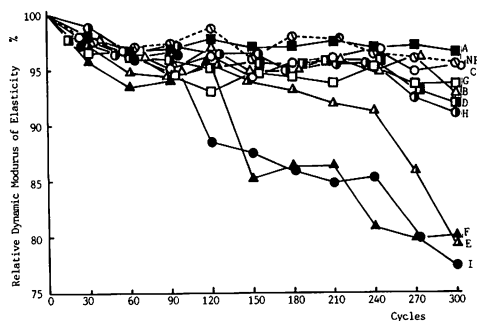


図-12 相対動弾性係数

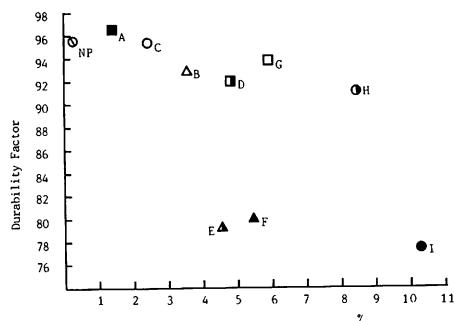


図-13 強熱減量と耐久性指数との関係

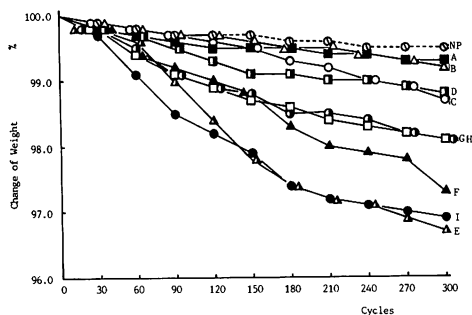


図-14 重量変化率

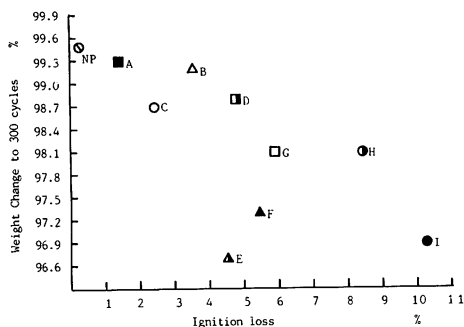


図-15 強熱減量と300サイクル時の重量変化率

イアッシュE, Fが少しはなれているものの強熱減量の多いものは重量の損失も大きい傾向があり, 図-13と同様の結果となった。

4. ま と め

以上のことをまとめると次のことがわかった。

- i) MB吸着量の大きなものはAE助剤の量もふやす必要があり, 練り混ぜに注意を要する。
- ii) フライアッシュの強熱減量の大きなものは, ①単位水量が多くなる, ②AE助剤の量が多くなる, ③耐久性指数が小さくなる, という傾向がみられた。
- iii) JIS規格をはずれたフライアッシュがあったものの, 普通ポルトランドセメントのみと比較しても, 乾燥収縮ではほとんど同等かそれ以上に収縮が小さく, また凍結融解に対する抵抗性も少し結果の悪いのもあったが, ほとんど大差なかった。

最後に実験に協力していただいた, 亀田卓三, 小林義幸, 剣持浩高, 藤川俊也氏, 資料のまとめに協力していただいた田中忍氏に深く感謝する次第である。また本研究の一部は北電興業(株)の受託研究費による。

参 考 文 献

- 1) 国分正胤, フライアッシュおよびフライアッシュセメント, 第5回国際セメント化学シンポジウムにおける主論文, セメント・コンクリート No. 267
- 2) 吉越盛次, 混和材としてのフライアッシュに関する研究, 土木学会論文集第31号
- 3) 大賀・長瀧, 低品質フライアッシュのコンクリートへの有効利用に関する研究, 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集
- 4) 上木・小林・田中, 最近のフライアッシュの品質特性ならびに使用上の問題点について, 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集
- 5) 北海道電力技術研究所の試験結果による

(昭和60年11月30日受理)

ランドセメントより重量の減少が多かった。強熱減量との関係で見ると図-15に示すようにフラ