

報告 フライアッシュおよびフライアッシュコンクリートの品質変動に関する検討

船本 憲治*1・笹原 厚*2

要旨：実構造物（コンクリート打設量 18,000m³）での施工を通して，石炭火力発電所から生産されるフライアッシュ細粉およびそれを使用したレディーミクストコンクリートの品質変動に関して，定量的な評価を行った。その結果，発電所構内において高性能分級機で分級されたフライアッシュ細粉は，JIS A 6201 の 種規格を十分満足でき，品質も安定していることが確認できた。また，フライアッシュを使用したコンクリートは，フライアッシュを使用しない場合と比較してほぼ同等の品質変動となり，安定したコンクリートの製造が可能なことが確認できた。

キーワード：フライアッシュ，スランプ，空気量，圧縮強度，品質変動

1. はじめに

現在，我が国において排出される石炭灰の量は約 600 万 t/年と多量であり，さらに，今後，石炭火力発電所の新・増設により，2010 年までにその排出量は 1000 万 t/年にまでに増加すると予想されており¹⁾，石炭灰の更なる有効利用が急務となっている。

そのような状況の中，筆者は，マスコンクリート等，初期に高温履歴を受ける環境下のコンクリートに関する研究を実施し，そこで得られた知見を報告してきた^{2),3)}。しかし，特定した石炭火力発電所から生産されるフライアッシュ

の品質変動に関する報告は文献⁴⁾以外には無く，また，フライアッシュを使用した実構造物コンクリートの品質変動に関する報告例も少ない。

そこで，本論文では，石炭火力発電所から生産されるフライアッシュ細粉の品質変動およびそのフライアッシュを使用したコンクリートの実施工における品質変動について報告を行うものである。

2. フライアッシュの供給

今回，実施工に用いたフライアッシュは，R 石炭火力発電所の電気集塵器で採取され，一度

表 - 1 フライアッシュの品質変動

項目	JIS II 種規格	R細粉(159サンプル(1999.8~2002.8))				R細粉(152サンプル(1996.3~2001.12))				H細粉(50サンプル) ⁴⁾			
		ジェットパック車出荷				船積出荷				-			
		平均	最大	最小	標準偏差	平均	最大	最小	標準偏差	平均	最大	最小	標準偏差
SiO ₂ (%)	45以上	59.6	69.5	50.6	4.5	60.5	72.5	50.3	4.8	57.6	69.9	49.0	4.9
密度(g/cm ³)	1.95以上	-	-	-	-	2.30	2.43	2.19	0.05	2.28	2.39	2.17	0.05
強熱減量(%)	5以下	1.90	3.20	1.00	0.50	1.40	3.10	0.70	0.50	1.77	3.40	0.80	0.62
ブレン値(cm ² /g)	2,500以上	3,831	4,320	3,620	120	3,830	4,280	3,450	175	3,530	3,770	3,300	114
45 μm 残分(%)	40以下	-	-	-	-	5	16	1	3	16	20	12	2
フロー値比(%)	95以上	105	111	99	2	106	115	100	3	108	112	101	3
活性度指数28日(%)	80以上	82	88	80	2	84	95	80	3	89	99	80	4
活性度指数91日(%)	90以上	97	110	92	4	99	110	90	4	105	117	91	5
MB吸着量(mg/g)	-	-	-	-	-	0.28	0.59	0.15	0.09	0.32	0.52	0.20	0.07

*1 九州電力(株) 苓北発電所建設所土木建築課長 博士(工学) (正会員)

*2 (株)間組 建築事業総本部生産技術部課長 (正会員)

サイロに貯灰後、高性能分級機で細粉と粗粉に分級された後の分級細粉である。

また、フライアッシュの出荷は、発電所構内から直接ジェットパック車により行い、そのままレディーミクストコンクリート工場のフライアッシュサイロに供給した。

3. フライアッシュの品質

3.1 試験結果

今回ジェットパック車によりR発電所より出荷されたフライアッシュ細粉および現在までにR発電所より主に建材ボード材料として船積出荷(1000t/船)されたフライアッシュ細粉並びに文献4)のH発電所産のフライアッシュ細粉の品質およびその均一性を表1に示す。

3.2 R発電所における品質変動

今回ジェットパック車によりR発電所より出荷されたフライアッシュ細粉は、すべてJIS A 6201(コンクリート用フライアッシュ)規格の種に適合している。なお、密度および45 μ m残分については、すべてJIS種に適合していることは確認したが、統計分析対象としなかったため空欄になっている。

R発電所において、今回ジェットパック車により出荷された細粉と現在までに船積出荷された細粉を比較すると、今回の方がブレン値の均一性がやや良くなっている他は同等の品質のフライアッシュになっている。なお、ジェットパック車および船積により出荷された細粉は品質が安定しており、JIS規格の品質の均一性として要求されているブレン値 $\pm 450 \text{ cm}^2/\text{g}$ に対しても十分対応できる分級設備を有している

と言える。

3.3 他発電所との比較

今回のR発電所と文献4)のH発電所のフライアッシュ細粉を比較すると、今回の方が多少ブレン値が大きいものの、逆に、フロー値および活性度指数は小さい傾向にある。しかし、両者はほぼ同等の品質になっている。

4. コンクリートの材料

骨材は、芦北産砕石(表乾密度 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ ・吸水率 0.47%)および崎戸産海砂(表乾密度 $2.58\text{g}/\text{cm}^3$ ・吸水率 2.13%)・八代産海砂(表乾密度 $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ ・吸水率 2.45%)を使用した。また、セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、混和剤はリグニンスルホン酸系AE減水剤およびアニオン系空気量調整剤を使用した。

5. コンクリートの調査

表-2にコンクリートの調査を示す。構造物は、計画供用期間45年に基づく耐久設計基準強度(F_d)を $21\text{N}/\text{mm}^2$ 、構造安全性に基づく設計基準強度(F_c)を $21\text{N}/\text{mm}^2$ とした。なお、フライアッシュを使用したコンクリートの耐久設計基準強度の割増は、かぶり厚さを 10mm 増してその低減を図り $F_d=21\text{N}/\text{mm}^2$ のままとした。

フライアッシュ置換率($F/(C+F)$)は 20% とし、地中構造物で中性化の考慮の必要がない部材は $F/(C+F)=30$ 、 45% とした。なお、マスコンクリート以外は $F/(C+F)=0\%$ とした。

また、 $F/(C+F)=0$ 、 20 、 30% の場合は、建築学会標準仕様書(JASS5)および文献2),3)により構造体と供試体の強度差(F)を $3\text{N}/\text{mm}^2$ とし、

表-2 コンクリートの調査および打設実績

No	品質 基準強度 (N/mm^2)	管理 材齢 (日)	スラ ン プ (cm)	空気 量 (%)	W/ (C+F) (%)	F/ (C+F) (%)	単位量(kg/m^3)					AE 減水剤 ($(C+F) \times \%$)	空気量 調整剤 ($(C+F) \times \%$)	打設 部位	打設 時期	打設 量 (m^3)
							W	C	F	S	G					
1	24	28	15	4.5	54.2	0	182	336	0	748	999	0.25	0.005	上部スラブ他	1999.10~2002.4	1,333
2	24	91	15	4.5	56.3	20	176	250	63	768	996	0.25	0.008	機械基礎他	1999.11~2002.8	7,100
3	24	91	15	4.5	55.0	30	172	219	94	770	996	0.25	0.011	機械基礎他	2000.1~2000.7	1,278
4	21	91	15	4.0	55.0	45	175	175	143	780	973	0.25	0.014	ホイラーマット	1999.8~1999.12	8,351

品質基準強度(F_q)を 24N/mm^2 とした。一方, $F/(C+F)=45\%$ の場合は,文献 2),3)により $F=0$ とし, $F_q=21\text{N/mm}^2$ のままとした。

目標空気量は 4.5% とし, GL-4m以深で凍結融解の可能性のないポイラーマットのみ 4.0% とした。なお, AE 減水剤は粉体比で一定とし, 空気量調整剤を目標空気量になるようにフライアッシュ置換率の増加とともに増量させた。

6. コンクリートの打設

現場近傍の同一レディーミクストコンクリート工場における本工事のコンクリート打設部位・打設時期・打設量(気温による温度補正值 $T=T_n=0$ の場合)を表 2 に示すが, 1999年8月~2002年8月で約 $18,000\text{m}^3$ のコンクリート打設を行った。なお, コンクリートの練混ぜは, 傾胴型ミキサ(容量 2.0m^3) 2機を用い, 各ミキサの練混ぜ時間はフライアッシュ置換率 $0\sim 45\%$ ですべて 75 秒間とした。

7. コンクリートの品質管理結果

7.1 フレッシュ性状

コンクリートの圧縮強度試験は, 打込み工区ごと・打込み日ごと, かつ, 打込み量 150m^3 ごとに1回行っており, その時に測定したスラン

表 3 コンクリートのフレッシュ性状

F/(C+F)		0%	20%	30%	45%
目標スランプ(cm)		15	15	15	15
目標空気量(%)		4.5	4.5	4.5	4.0
ス ラ ン プ	個数	32	80	19	60
	平均(cm)	15.6	14.8	15.0	14.4
	標準偏差(cm)	1.1	1.3	1.0	1.2
	変動係数(%)	6.9	8.6	6.7	8.3
	最大値(cm)	17.0	17.5	17.0	16.5
	最小値(cm)	13.0	12.5	13.0	12.5
空 気 量	個数	32	80	19	60
	平均(%)	4.6	4.4	4.3	4.3
	標準偏差(%)	0.7	0.6	0.7	0.4
	変動係数(%)	14.4	13.1	16.1	10.0
	最大値(%)	5.5	5.5	5.7	5.0
	最小値(%)	3.3	3.4	3.2	3.2

表 4 コンクリートの圧縮強度試験結果

F/(C+F)		0%	20%	30%	45%
管理材齢(日)		28	91	91	91
品質基準強度(F_q : N/mm^2)		24	24	24	21
呼び強度(F_n : N/mm^2)		24	24	24	21
28 日 強 度	個数	32	65	15	-
	平均(N/mm^2)	31.5	26.7	24.6	-
	標準偏差(N/mm^2)	2.9	2.3	2.4	-
	変動係数(%)	9.1	8.7	9.5	-
	最大値(N/mm^2)	41.5	33.9	28.6	-
	最小値(N/mm^2)	26.7	21.7	21.1	-
91 日 強 度	個数	-	80	19	60
	平均(N/mm^2)	-	34.2	32.1	27.7
	標準偏差(N/mm^2)	-	3.1	3.2	2.9
	変動係数(%)	-	9.0	9.9	10.5
	最大値(N/mm^2)	-	42.3	36.5	35.8
	最小値(N/mm^2)	-	28.5	27.9	21.5

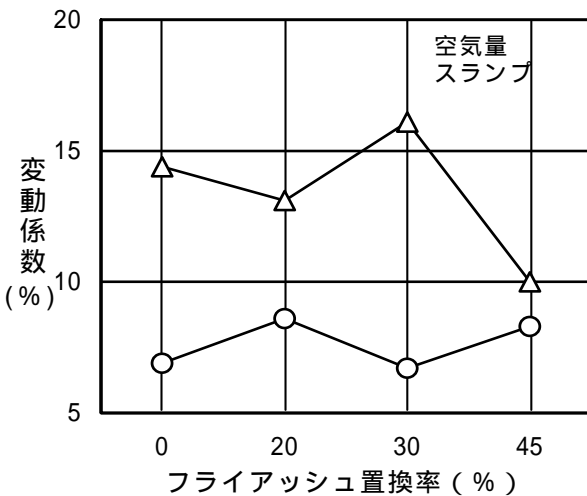


図 1 フライアッシュ置換率と空気量・スランプの変動係数の関係

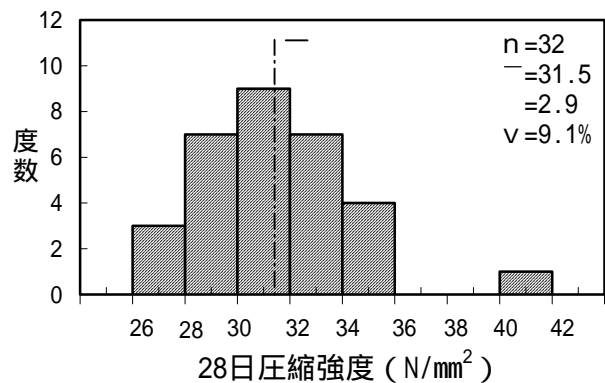


図 2 圧縮強度ヒストグラム($F/(C+F)=0\%$)
[管理材齢 28 日, 呼び強度 24N/mm^2]

プおよび空気量の試験結果を表 3 に示す。

スランプは、JIS A 5308 における許容差 $\pm 2.5\text{cm}$ をすべて満足している。また、フライアッシュ置換率とスランプの変動係数を図 1 に示すが、その変動係数は、フライアッシュの有無により有意な差は見受けられなかった。

空気量は、JIS A 5308 における許容差 $\pm 1.5\%$ をすべて満足している。また、フライアッシュ置換率と空気量の変動係数を図 1 に示すが、その変動係数は、フライアッシュの有無により有意な差は見受けられなかった。

なお、今回、フライアッシュを使用したコンクリートでは、フライアッシュ置換率毎に空気量調整剤を増量させ対応したが、各調合とも原則的に表 2 の基本調合で対応でき、フライアッシュの強熱減量の変動があっても粉体量に対して $\pm 0.003\%$ の範囲の空気量調整剤の変動により、目標空気量が安定的に得られた。これは、今回使用したフライアッシュの強熱減量が、表 1 に示したように平均 1.9%、標準偏差 0.5% と低い値で安定していたためと考えられる。

7.2 標準養生における圧縮強度

(1) 試験概要および結果

レディーミクストコンクリートの受入れ検査として実施した圧縮強度試験（標準養生）は、打込み工区ごと・打込み日ごと、かつ、打込み量 150m^3 ごとに 1 回行っており、その試験結果を表 4 および図 2 ~ 5 に示す。なお、供試体寸法は、表 2 における調合 NO.1 ~ 3 の場合は $10\text{cm} \times \text{H}20\text{cm}$ 、調合 NO.4 の場合は $12.5\text{cm} \times \text{H}25\text{cm}$ である。

a) $F/(C+F)=0\%$ の場合（図 2）

管理材齢となる 28 日圧縮強度は、すべて呼び強度を満足しており、その標準偏差は $2.9\text{N}/\text{mm}^2$ 、変動係数は 9.1% となっている。なお、JASS5 によると「使用するコンクリートの強度の標準偏差は、レディーミクストコンクリート工場に実績がない場合は $2.5\text{N}/\text{mm}^2$ または $0.1F_c$ の大きい方の値」となっており、今回の値はそれより多少大きめの値であった。

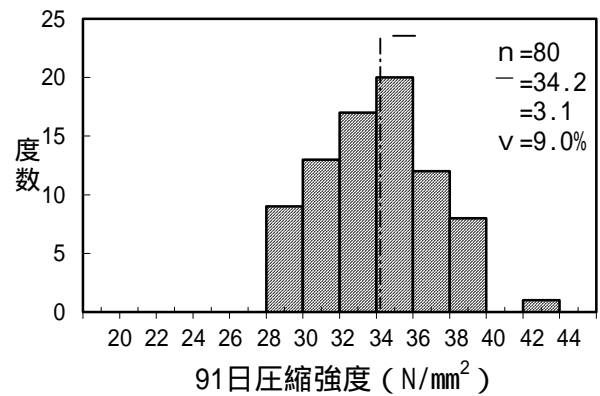
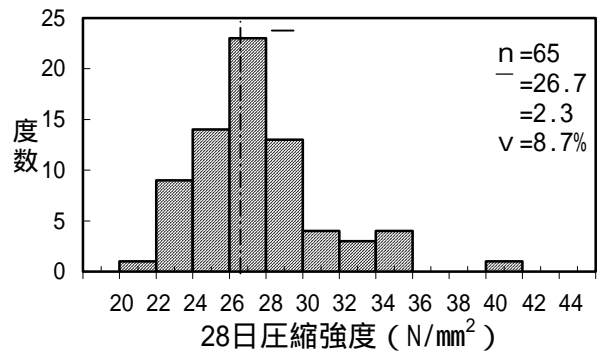


図 3 圧縮強度ヒストグラム ($F/(C+F)=20\%$)
[管理材齢 91 日、呼び強度 $24\text{N}/\text{mm}^2$]

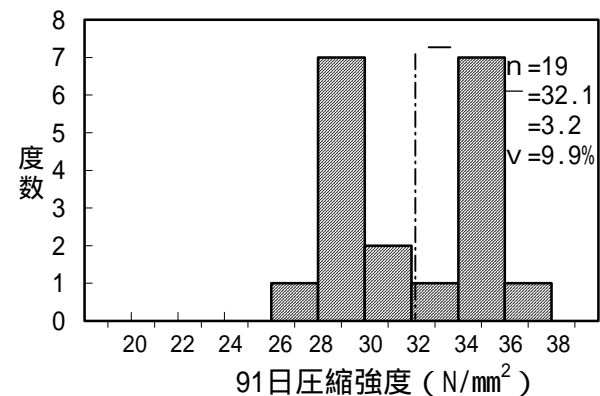
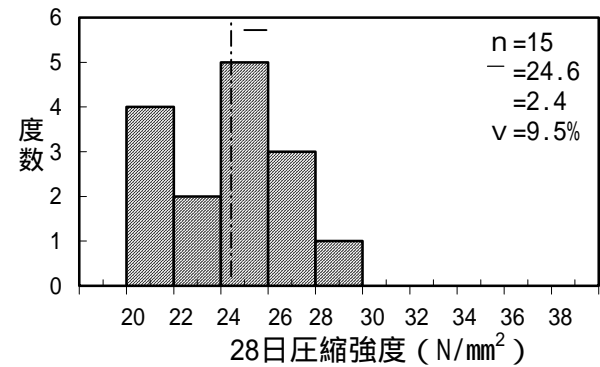


図 4 圧縮強度ヒストグラム ($F/(C+F)=30\%$)
[管理材齢 91 日、呼び強度 $24\text{N}/\text{mm}^2$]

b) $F/(C+F)=20\%$ の場合 (図 3)

管理材齢となる 91 日圧縮強度は、すべて呼び強度を満足しており、その標準偏差は 3.1N/mm^2 、変動係数は 9.0% となっている。

一方、文献 3)では、JASS5 のマスコンクリートで規定している強度管理方法に関する問題点を指摘し、フライアッシュを使用したマスコンクリート構造体の一つの強度管理方法として、「管理材齢を 91 日とし、フライアッシュ置換率 $15\sim 30\%$ のコンクリートの構造体の強度検査を材齢 28 日の標準養生供試体強度で行う」ことが提案されている。そこで、この手法を用いると、今回の 28 日圧縮強度の最小値は 21.7N/mm^2 で、設計基準強度 21N/mm^2 をすべて満足しており、十分な構造体強度が確保されていると言える。

c) $F/(C+F)=30\%$ の場合 (図 4)

管理材齢となる 91 日圧縮強度は、すべて呼び強度を満足しており、その標準偏差は 3.2N/mm^2 、変動係数は 9.9% となっている。しかし、サンプルが少なく、また、後述の季節の影響等により、ピークが 2 つできる現象が生じている。

一方、前述の文献 3)のマスコンクリートにおける一つの強度管理手法を用いると、今回の 28 日圧縮強度の最小値は 21.1N/mm^2 で、設計基準強度 21N/mm^2 をすべて満足しており、十分な構造体強度が確保されていると言える。

d) $F/(C+F)=45\%$ の場合 (図 5)

管理材齢となる 91 日圧縮強度は、すべて呼び強度を満足しており、その標準偏差は 2.9N/mm^2 、変動係数は 10.5% となっている。

一方、文献 3)のマスコンクリートにおける一つの強度管理手法「管理材齢を 91 日とし、フライアッシュ置換率 45% のコンクリートの構造体の強度検査を材齢 91 日の標準養生供試体強度で行う」を用いると、今回の 91 日圧縮強度の最小値は 21.5N/mm^2 で、設計基準強度 21N/mm^2 をすべて満足しており、十分な構造体強度が確保されていると言える。

(2) フライアッシュの影響

フライアッシュ置換率と圧縮強度の変動係数

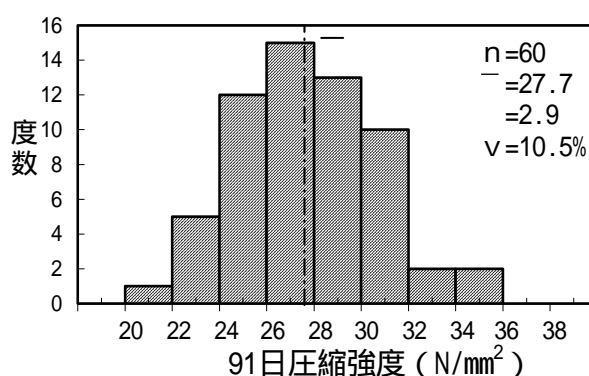


図 5 圧縮強度ヒストグラム ($F/(C+F)=45\%$)
[管理材齢 91 日, 呼び強度 21N/mm^2]

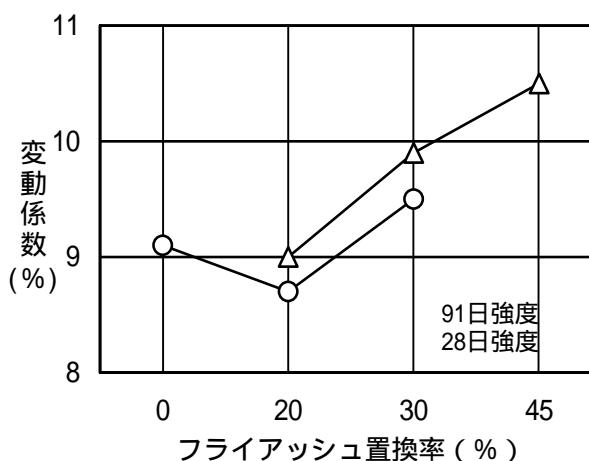


図 6 フライアッシュ置換率と圧縮強度の変動係数の関係

の関係を図 6 に示す。

変動係数は、フライアッシュ置換率が 0% から 20% まではあまり変わらなかったが、置換率が 20% から 45% と大きくなるに伴い大きくなる傾向にあり $8.7\% \sim 10.5\%$ となっている。しかし、その値は最大でも 10.5% であり、実用的には問題のない範囲と考えられる。

(3) 季節の影響

季節別の圧縮強度試験結果を表 5 に示す。なお、 $F/(C+F)=0$ の場合は、マスコンクリート仕様ではなく、冬季のコンクリート強度において温度補正を行う必要があり、同一調合での冬季データは存在していない。

サンプル数が比較的多い $F/(C+F)=20\%$ の場合には、夏季・冬季の差は生じていない。しかし、サンプル数が少ない $F/(C+F)=30\%$ の場合には夏季が高く、逆に、 $F/(C+F)=45\%$ の場合には夏季が低くなる結果となり、今後、多くのデータにより詳細な分析を行っていく必要があると思われる。

5. まとめ

実構造物（コンクリート打設量 $18,000\text{m}^3$ ）での施工を通して、石炭火力発電所から生産されるフライアッシュ細粉およびそれを使用したレディーミクストコンクリート（フライアッシュ置換率 45%以下）の品質変動に関して、以下の結論が得られた。

- (1) 石炭火力発電所構内において高性能分級機で分級されたフライアッシュ細粉は、JIS A 6201（コンクリート用フライアッシュ）の種規格を十分満足できる。また、JIS 規格の品質の均一性として要求されているプレーン値 $\pm 450\text{cm}^2/\text{g}$ に対しても、安定的な生産が可能である。
- (2) コンクリートのスランプおよび空気量の品質変動は、フライアッシュの有無により有意な差は見受けられなかった。また、フライアッシュの強熱減量の変動（平均 1.9%、標準偏差 0.5%）に対しても、空気量調整剤により、目標空気量が安定的に得られた。
- (3) コンクリートの圧縮強度の変動係数は、フライアッシュ置換率が 0% から 20% まではあまり変わらなかったが、フライアッシュ置換率が 20% から 45% と大きくなるに伴い大きくなる傾向にあり 8.7% ~ 10.5% となっている。しかし、その値は最大でも 10.5% であり、実用的には問題のない範囲と考えられる。
- (4) 石炭火力発電所から生産されるフライアッシュ細粉を使用した場合には、フライアッシュの品質変動に左右されず安定した

表 5 季節別のコンクリート
圧縮強度試験結果

F/(C+F)		0%	20%	30%	45%
品質基準強度(F_q : N/mm^2)		24	24	24	21
呼び強度(F_n : N/mm^2)		24	24	24	21
材齢(日)		28	91	91	91
夏季	個数	13	17	2	15
	平均(N/mm^2)	29.5	33.2	33.9	25.2
	標準偏差(N/mm^2)	1.7	2.5	-	2.1
	変動係数(%)	5.7	7.7	-	8.2
	9	最大値(N/mm^2)	31.6	39.8	35.4
7	最小値(N/mm^2)	26.7	28.5	32.4	21.5
冬季	個数	-	17	4	7
	平均(N/mm^2)	-	33.2	29.5	31.7
	標準偏差(N/mm^2)	-	3.2	-	-
	変動係数(%)	-	9.6	-	-
	2	最大値(N/mm^2)	-	38.2	31.7
12	最小値(N/mm^2)	-	28.5	28.2	27.7

コンクリートの製造が可能なが確認できた。

謝辞

本検討に際し、間・鹿島・前田共同企業体および天草地区生コンクリート協同組合の方に御協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 総合資源エネルギー調査会：今後のエネルギー政策について報告書（案），pp.27，2001.6
- 2) 船本憲治，竇口繁紀，笹原厚：フライアッシュを使用したマスコンクリートの発熱及び強度発現特性，日本建築学会構造系論文集，第 540 号，pp.1-6，2001.2
- 3) 船本憲治：フライアッシュを使用したマスコンクリートの強度管理方法に関する一提案，日本建築学会技術報告集，第 14 号，pp.1-4，2001.12
- 4) 江藤弘之，赤塚剛，山本晃：フライアッシュの品質変動がコンクリートに及ぼす影響について，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1, pp.111-116, 2002.7