

論文 フライアッシュを用いたマスコンクリートの諸性状に関する検討

牧野 真之¹ 江口 清² 飛坂 基夫³ 柳 啓⁴

要旨：フライアッシュを用いたコンクリートについて、マスコンクリートを対象に、温度特性、強度特性、耐久性状に関する確認・検討を行った。その結果、フライアッシュがコンクリートの圧縮強度に寄与する傾向、中性化の進行に対する抵抗性と圧縮強度の関係、およびコンクリートの内部温度が圧縮強度に及ぼす影響、等について明確になった。また、コンクリートの断熱温度特性については、結合材の水和熱をパラメータとして定式化を試みた。

キーワード：フライアッシュ、マスコンクリート、断熱温度特性、セメント有効係数

1. はじめに

近年わが国において、石炭灰の発生量は年々増大し2000年には1000万トに達するとも予測されており¹⁾、地球規模の環境といった観点からもこれに対する技術対策が急務であるといえる。

一般に、良質なフライアッシュを混和材としてコンクリートに混入すると、ワーカビリティの改善、ならびに水と熱の低減等に有効であるといわれている反面、フライアッシュの品質によっては、コンクリートの品質管理が困難であったり、中性化等の耐久性が劣る可能性がある²⁾ことも知られている。

本論は上記を踏まえ、フライアッシュの大量利用が見込まれるマスコンクリートに着目し、フライアッシュを混和材として用いたコンクリートの諸特性を把握し、その適用性について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 要因と水準

表-1に実験の要因と水準を示す。フライアッシュの混和量がコンクリートの性状に及ぼす効果・影響を把握するため、置換率をセメントの内割りで0~45%の範囲で4水準設定した。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
フライアッシュの種類	2試料 (A, B)
フライアッシュ置換率	0%, 15%, 30%, 45%
水結合材比	35%, 45%, 55%

表-2 使用材料一覧

材料名	W/B=35, 55%の調合	W/B=45%の調合
セメント	普通ポルトランドセメント 3社混合 (比重: 3.15)	普通ポルトランドセメント A社製 (比重: 3.16)
細骨材	大井川産川砂 (比重: 2.63, 吸水率: 1.67%)	
粗骨材	青梅産碎石 (比重: 2.66, 硬質砂岩)	両神産碎石 (比重: 2.71, 硬質砂岩)
フライアッシュ	2種類 (A, B) (詳細は表-3)	
水	水道水	
混和剤	高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系) 空気量調整剤 (アミン系・ナトリウム系の混合)	

2.2 使用材料および調合

使用材料を表-2に示す。JISの品質規定値を満足しないフライアッシュのコンクリート用混和材としての有効性を把握するために、特に強熱減量に着目し、JISを満足するもの1試料の他に、これを満足しないものを1試料選定した。これらに関する概要を表-3に示す。

調合を表-4に示す。所定のスランプ、空気量を

*1 前田建設工業(株)技術研究所 (正会員)

*2 前田建設工業(株)技術研究所副部長 (正会員)

*3 (財)建材試験センター中央研究所上級専門職 工博 (正会員)

*4 (財)建材試験センター中央研究所無機材料試験課上級専門職 (正会員)

表-3 フライアッシュの品質および概要 *1

項目	フライアッシュの種類			
	A	B		
二酸化けい素	%	63.1	49.1	
湿分	%	0	0.1	
強熱減量	%	1.6	10.6	
比重		2.24	2.06	
粉末度	45μmふるい残分	%	4.9	53.9
	比表面積	cm ² /g	4,070	4,470
フロー値比	%	103	96	
活性度指数	%	材齢28日	90	88
		材齢91日	99	97
平均粒径 *2	μm	12.25	12.78	
炭種		海外	国内	
※1の負荷(MW):採取時/定格		700/700	210/210	

*1 太字は実験により測定した値を示し、その他は成績証明書より転載した。

*2 レーザー回折式粒度分布測定試験機を用い、試料を3分間攪拌した後平均粒径を測定した。

表-4 調査表 *1

W/B ₂ (%)	FA/B ₃ (%)	使用 FA	S/a (%)	単位 水量 (kg/m ³)	高性能 AE減水剤 (B×%)	空気量 調整剤 (B×%)
35	0	-	41.8	170	0.68	0.015
	15	A	40.9		0.58	0.045
	30		40.1		0.48	0.075
	45	39.2	0.38		0.085	
45	0	-	44.8	170	0.60	0.035
	15	B	44.0		0.65	0.250
	30	A	43.6		0.30	0.085
			43.1		0.70	0.500
	45	B	42.3		0.65	1.100
55	0	-	46.5	170	0.55	0.008
	15	A	46.1		0.40	0.050
		B	45.9		0.55	0.150

*1:スランブ: 18±1.5cm,空気量: 4.5±1.0%,

*2:水結合材比,*3:フライアッシュ置換率(セメントの内割り)

満足するように、高性能AE減水剤および空気量調整剤を用いて調整を行った。

2.3 試験項目および方法

試験項目および方法を表-5、図-1に示す。

3. 実験結果

3.1 フライアッシュを混和したセメントの水和熱

結合材の熱的性能を把握するために、水和熱を測定した。結果の一覧を表-6に示す。24時間以後の水和熱量は、いずれの調合においてもフラ

表-5 試験項目および方法

試験項目		試験方法・内容
結合材	水和熱量	微小熱量計による
フレッシュコンクリート	スランブ	JIS A 1101による
	空気量	JIS A 1128による
	練り上がり温度	棒状温度計による
コンクリートの温度上昇	簡易断熱温度上昇	簡易断熱温度試験による(図-1参照, 1m×1m程度の断面の柱中央部の温度履歴に相当)
	断熱温度上昇	断熱温度上昇試験装置による(W/B: 35,55%)
硬化コンクリート	圧縮強度 静弾性係数	JIS A 1108, ASTM C-469-65による 養生: 標準養生, 簡易断熱養生
	促進中性化深さ	建築学会(案)による (W/B: 35,55%)

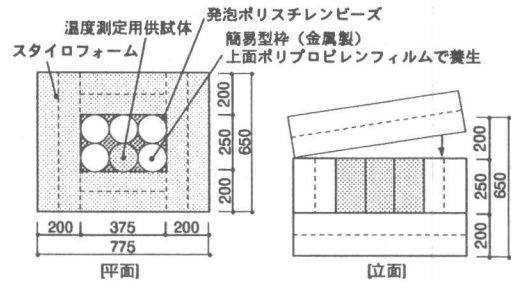


図-1 簡易断熱試験方法

表-6 フライアッシュを混和したセメントの水和発熱量

FA/B (%)	FA 種類	水和発熱量 (J/g)		
		1時間後	24時間後	48時間後
0	-	13.3 (100)	191.2 (100)	257.4 (100)
15	A	11.9 (90)	169.8 (89)	226.9 (88)
	B	12.6 (95)	162.3 (85)	214.5 (83)
30	A	9.9 (74)	142.6 (75)	190.1 (74)
	B	11.9 (89)	138.1 (72)	181.1 (70)
45	A	8.3 (63)	119.6 (63)	165.0 (64)
	B	10.8 (81)	102.4 (54)	139.6 (54)

()内はフライアッシュ無添加に対する百分率

イアッシュAを用いたものの方が大きくなった。

3.2 フレッシュコンクリートの性状

表-7にフレッシュコンクリートの性状を示す。空気量調整剤の添加率は、フライアッシュ置換率の増加に伴い高くなる傾向を示し、特にフライアッシュBについては顕著で、Aの3~6倍程度の量を要した。

3.3 コンクリートの発熱特性

表-7 フレッシュコンクリートの性状

W/B (%)	FA/B (%)	FA 種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
35	0	-	19.0	4.8	23.0
	15	A	19.0	4.4	23.0
	35	A	19.5	4.6	23.0
	45	A	17.5	4.0	23.0
45	0	-	18.0	4.5	22.5
	15	B	19.0	5.4	22.0
	30	A	18.5	5.5	21.5
		B	18.5	4.8	20.5
45	B	17.0	4.0	20.0	
55	0	-	19.0	4.6	22.0
	15	A	19.5	5.5	22.0
		B	17.0	5.2	22.0

表-8 最高温度, 最高温度到達時間

W/B (%)	FA/B (%)	FA種類	最高温度 (°C)	最高温度到達時間 (hr-min)
35	0	-	70.6	22-33
	15	A	66.2	25-16
	30	A	58.4	29-42
	45	A	50.4	31-24
45	0	-	56.9	23-00
	15	B	53.1	30-00
	30	A	46.7	30-00
		B	44.8	34-30
45	B	41.0	41-00	
55	0	-	51.3	28-48
	15	A	47.1	28-36
		B	47.8	28-00

(1) 簡易断熱温度上昇試験

表-8に各調合の簡易断熱試験によるコンクリート内部の最高温度ならびに到達時間を示し、図-2に内部温度履歴を示す。フライアッシュの置換率が高くなるとともにコンクリート内部温度の最高温度は低くなり、またその到達時間は長くなる傾向が認められた。

(2) 断熱温度上昇試験

各調合の断熱温度上昇曲線を図-3に示し、それぞれの回帰式を表-9に示す。

3.4 硬化コンクリート

(1) 圧縮強度・静弾性係数

図-4に各調合の材齢と圧縮強度の関係を示し、図-5に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。フライアッシュを用いたコンクリートの静弾性係数

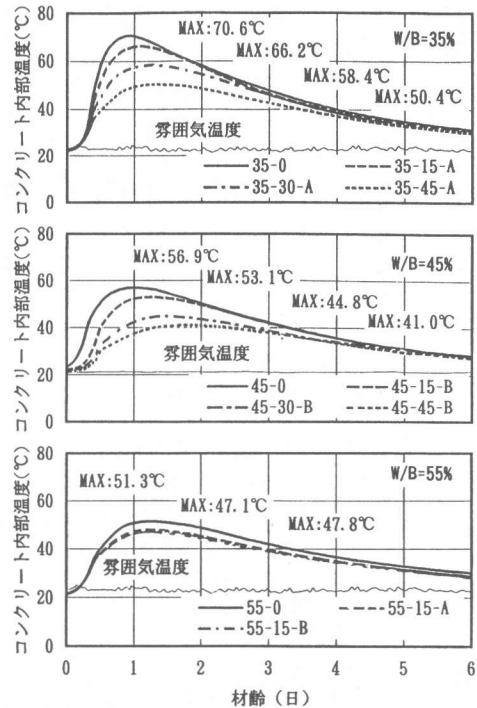


図-2 簡易断熱によるコンクリート内部温度履歴

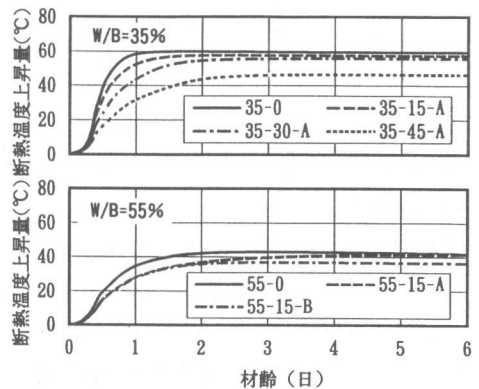


図-3 断熱温度上昇試験結果

表-9 各調合における断熱温度上昇式

W/B (%)	FA/B (%)	FA種類	断熱温度上昇式
35	0	-	$Q(t)=59.93\{1-\exp(-2.047t)\}$
	15	A	$Q(t)=57.63\{1-\exp(-1.777t)\}$
	30		$Q(t)=55.80\{1-\exp(-1.378t)\}$
	45		$Q(t)=46.34\{1-\exp(-1.120t)\}$
55	0	-	$Q(t)=42.93\{1-\exp(-1.413t)\}$
	15	A	$Q(t)=41.41\{1-\exp(-1.021t)\}$
		B	$Q(t)=36.82\{1-\exp(-1.285t)\}$

但し、 $Q(t)$: 材齢t日における断熱温度上昇(°C)

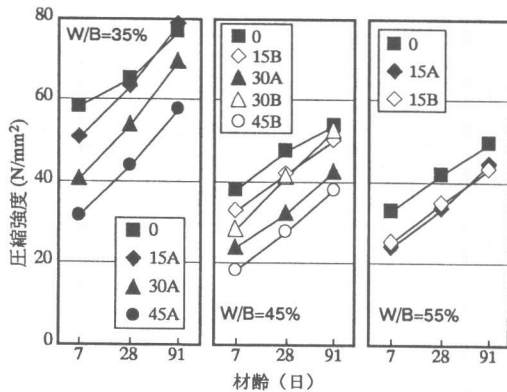


図-4 材齢と強度の関係

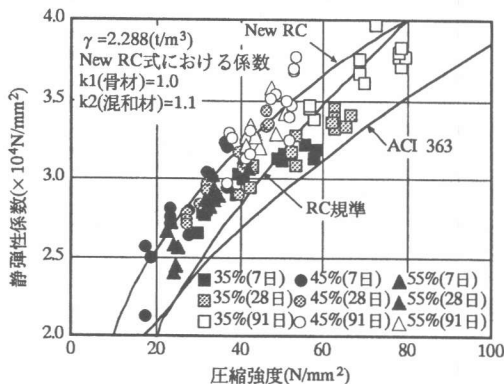


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

は、水結合材比が35%の調査ではNew RC式を若干下回る傾向を示した。

(2) 中性化速さ

図-6に水結合材比35%, 55%の調査のコンクリートの促進中性化深さを示す。フライアッシュの品質による明確な差異は認められず、フライアッシュを15%混和したコンクリートは材齢26週で20mm程度の中性化が認められた。

図-7に材齢91日における圧縮強度の逆数と材齢26週における中性化深さの関係を示し、図-8にフライアッシュ置換率と圧縮強度の関係を示す。JASS 5「高流動コンクリート」中の中性化深さに関する規定値25mmを参考にすると、これを満足するための材齢91日における圧縮強度は、水結合材比35%で51N/mm²程度、水結合材比55%で41N/mm²程度と推定される。さらにこれと図-8よりフライアッシュ置換率の上限は水結合材比35%で50%、水結合材比55%では20%程度となる。

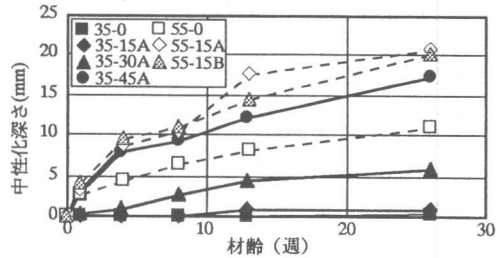


図-6 促進中性化試験結果(W/B=35,55%)

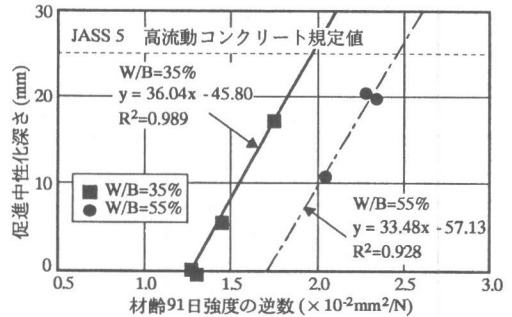


図-7 圧縮強度の逆数と中性化深さの関係

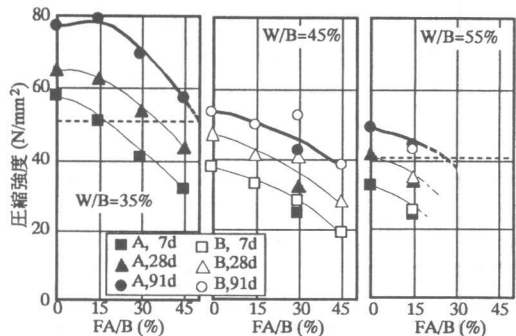


図-8 フライアッシュ置換率と圧縮強度の関係

4. 検討および考察

4.1 フライアッシュが圧縮強度に及ぼす効果

フライアッシュがコンクリートの圧縮強度に及ぼす効果を確認するために、フライアッシュを等価セメント量に換算する方法³⁾を用い検討した。一般に、圧縮強度は結合材水比と直線関係で表せることから、本検討では式(1)を用いた式(2)により、圧縮強度に対するフライアッシュのセメント有効係数(k)を算出した。

$$C^* = C + k \cdot FA \quad (1)$$

$$F = a \cdot (C + k \cdot FA) / W + b \quad (2)$$

ここで、C*: 換算セメント量, C: セメント量

k: フライアッシュのセメント有効係数

表-10 フライアッシュのセメント有効係数

W/B (%)	FA/B (%)	FA種類	セメント有効係数	
			材齢28日	材齢91日
35	15	A	0.88	1.37
	30		0.45	0.73
	45		0.31	0.52
45	15	A, B	0.06	0.33
	30		0.08	0.35
	45		0.08	0.35

FA：単位フライアッシュ量(kg/m³),

F：圧縮強度(N/mm²), a,b：実験定数

上記によって得られたフライアッシュのセメント有効係数を表-10に示す。

フライアッシュのセメント有効係数は、水結合材比が低いほど、大きくなる傾向が認められた。また、セメント有効係数は、水結合材比が35%の調合ではフライアッシュの置換率が高くなるほど低くなったが、水結合材比45%では、35%の値よりも低く、かつフライアッシュの置換率に係わらずほぼ一定の値となった。

4.2 コンクリートの発熱量に関する検討

フライアッシュを混和したコンクリートの断熱温度上昇量を予測できれば、それをマスコンクリートに使用する際の事前検討に有効であると考えられる。そこで、比較的簡便に測定可能な前記微量熱量計による結合材の水和発熱の結合材の水和熱に関するデータに着目し、フライアッシュAを用いたコンクリートに関して断熱温度上昇量の定式化を試みた。コンクリートの断熱温度上昇式は、一般に下式(3)で表される。

$$Q(t) = K \cdot \{1 - \exp(-\alpha t)\} \quad (3)$$

但し、Q(t)：材齢tにおける断熱温度上昇量(°C)

K：終局断熱温度上昇

α ：温度上昇速度に関する定数

ここでは、以下に示す考え方にに基づき検討を行った。

- ① 発熱がほぼ終了する材齢48時間までの水和熱量(J/g、以下H₄₈と称す)は式(3)中のKと相関があると考える。
- ② 発熱量がピークを越え下降過程となる材齢24時間までの水和熱量(J/g、以下H₂₄と称す)は式(3)中の α と相関があると考える。

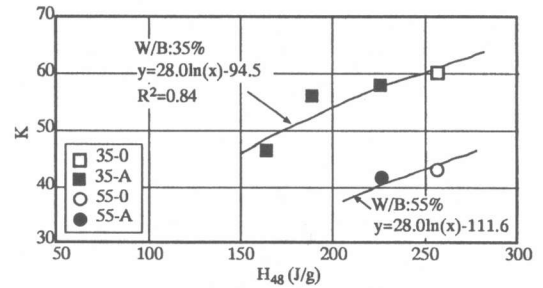


図-9 H₄₈とKの関係

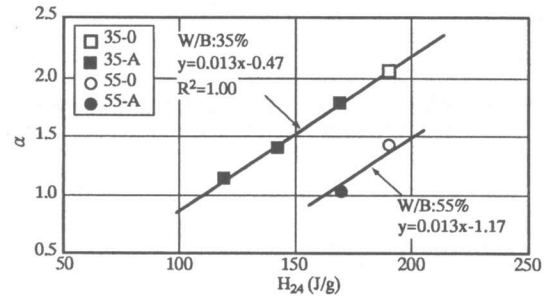


図-10 H₂₄と α の関係

(1) Kに関する検討

Kは上記①の他、コンクリート温度(T)、結合材量(Bw)の関数と考えられ下式(4)で表される。

$$K = f(H_{48}, Bw, T) \quad (4)$$

ここで、今回の検討では練り上がり温度20°Cに限定し、Tの変動は考慮せず式(5)で表現する。

$$K = f(H_{48}) + Bc \quad (5)$$

但し、Bc：結合材量(Bw)により決定する係数

図-9にH₄₈とKの関係を示す。図から、(5)式中のf(H₄₈)は28.0・ln(H₄₈)で表されることがわかる。また、Bcについては、水結合材比35%(Bw：486kg/m³)のときに-94.5、水結合材比55%(Bw：309kg/m³)のときに-111.6となり、これをBwの一次関数と仮定すると、下式(6)で表される。

$$Bc = 0.1 \cdot Bw - 141.5 \quad (6)$$

以上より、式(5)は下式(7)で表される。

$$K = 28.0 \cdot \ln(H_{48}) + 0.1 \cdot Bw - 141.5 \quad (7)$$

(2) α に関する検討

α は上記②の他、Kと同様、コンクリート温度(T)、結合材量(Bw)の関数と考えられ、下式(8)により表される。

$$\alpha = g(H_{24}, Bw, T) \quad (8)$$

ここでTに関しては上記と同様にその変動を考慮しないものとし、式(9)で表現する。

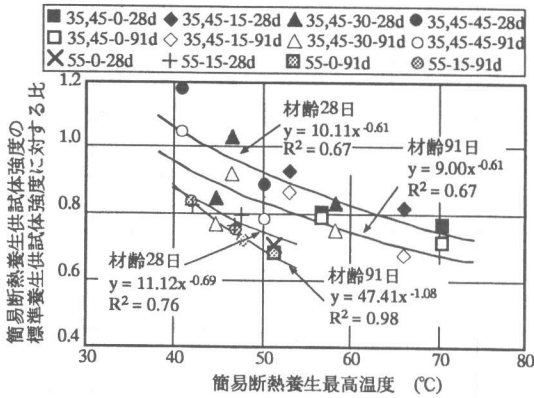


図-12 内部最高温度と簡易断熱養生供試体強度の標準養生供試体強度に対する比の関係

$$\alpha = g(H_{24}) + Bd \quad (9)$$

但し、Bd：結合材量(Bw)により決定する係数

図-10に H_{24} と α の関係を示す。図より、式(9)の $f(H_{24})$ は $0.013 \cdot H_{24}$ となる。また、Bdについては(1)と同様に単位結合材量(Bw)の一次関数と仮定すると、式(9)は式(10)となる。

$$\alpha = 0.013 \cdot H_{24} + 0.004 \cdot Bw - 2.38 \quad (10)$$

4.3 内部温度と圧縮強度の関係

一般に、コンクリートが50°C以上の高温履歴を受けると、構造体強度の増進の割合が低下する⁴⁾。ここでは、コンクリートの温度履歴が圧縮強度に及ぼす影響について検討する。簡易断熱試験によって得られたコンクリート内部温度の最高温度と簡易断熱養生供試体強度の標準養生供試体強度に対する比の関係を図-12に示す。これによると、簡易断熱養生供試体強度の標準養生供試体強度に対する比は最高温度が高くなるに従い小さくなる。また、その傾向は、水結合材比によって傾向が異なり、水結合材比55%のコンクリートでは、35～45%のものに比べて著しく、40°C程度以上の履歴を受けた場合、前者では、41～51°Cの範囲で0.9→0.7となり、後者では、41～71°Cの範囲で1.0→0.7となる。材齢による傾向の差異は、後者に顕著に表れる。フライアッシュを混和しないコンクリートでは、混和したものに比べ、最高温度が高くなるため、簡易断熱養生供試体強度の標準養生供試体強度に対する比が低くなる傾向を示す。

5. まとめ

本実験により得られた知見を以下に記す。

1. 所要の中性化に対する抵抗性を満足するための圧縮強度は、水結合材比に対応した値となる。建築学会(案)による試験方法で中性化深さ25mmを満足するには、水結合材比35%で51N/mm²、水結合材比55%で41N/mm²程度となる。また、これらの強度を満足するためのフライアッシュ置換率は、水結合材比35%で50%、水結合材比55%で20%が上限値となる。
2. 断熱温度上昇曲線のKおよび α は、使用する結合材の微小熱量計による水和熱の測定により、精度よく推測することできる。
3. 簡易断熱養生供試体強度の標準養生供試体強度に対する比は、最高温度が40°Cを越える場合、水結合材比35、45%では1.0以下、水結合材比55%では0.85以下となる。フライアッシュを混和したコンクリートでは、混和しないものに比べ最高温度の低下を見込めるため材齢・水結合材比によらず、その比は高くなる。
4. 今後さらにデータを蓄積し、強度・温度等の推測精度を高め、フライアッシュの的確な混和量を求める必要がある。

謝辞：本研究は、日本建築学会のフライアッシュ調査研究小委員会(主査：川瀬清孝新潟大学教授)の活動の一環としてマスコンクリートWGが行ったものである。本研究の実施にあたりまして(株)NMBならびに山宗化学(株)の関係者の皆様にご協力を賜りました。ここに記して厚く謝意を表します。

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年度版、1995.10
- 2)炭酸化研究委員会報告書、(社)日本コンクリート工学協会、pp.33-37、1993.3
- 3)フライアッシュを用いたコンクリートの技術の現状、フライアッシュコンクリートシンポジウム論文報告集、土木学会、pp.159-205、1997.12
- 4)松木雅之、榎田佳寛他：高強度コンクリートを用いた構造体コンクリートの強度発現性状に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.559-560、1989