

# 論文 分級フライアッシュを使用した高強度コンクリートの発熱特性及び力学特性

手島 則夫\*1・中村 成春\*2・梶田 佳寛\*3

要旨：本研究は、分級フライアッシュを使用した高強度マスコンクリートの発熱特性及び部材コンクリートの強度発現について実験的に検討し、その発熱特性を解析したものである。分級フライアッシュの混入は、水和熱を抑制する効果があり、無混入の場合に比べて部材コンクリートの強度発現上有利となる。また発熱特性の解析では、部材試験体を有限長さの一次元部材とした熱拡散方程式を利用した。熱拡散方程式の厳密解を求め、逆解析を行って実験結果に適合するような発熱定数を算定し、分級フライアッシュの混入が発熱特性に及ぼす影響を明らかにした。

キーワード：分級フライアッシュ、高強度コンクリート、水和熱、熱拡散方程式

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の多様化に伴い、コンクリートの高性能化、高機能化が要求されている。マスコンクリートに高強度コンクリートを適用する場合、セメントの水和熱でコンクリートの内部温度が高温となり、温度ひび割れの発生や構造体の長期強度の停滞が懸念されている [1]。そこで、フライアッシュをセメントの一部に置換して使用すると、初期材齢でコンクリートの発熱を抑制し、構造体の強度発現性状が改善できる [2]。しかし、フライアッシュ混入に伴う性能改善効果の定量化については十分検討されていない。特に今後、粒度分別された分級フライアッシュ（以下、CFA）の製品化や多量利用に対して、フライアッシュの水和熱抑制効果等を定量的に明らかにすることは重要である。本研究は、CFAを使用した高強度コンクリートにおいて、CFA混入量が及ぼす水和熱特性ならびに初期高温履歴を受けた時の強度特性を実験検討し、CFAが及ぼす性能改善効果を考察することを目的とする。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験の要因と水準

表-1に実験の要因と水準を示す。水結合材比W/Bを4段階に設定し、高粉末度及び中粉末度の二種類のCFAをセメントと置換し混入した。CFA混入量の水準は、低W/B条件ほど多段的になるように設定し、CFA無混入コンクリート（Pと表記）と比較した。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
W/B (%)	26、31、38、49
CFA種類	高粉末度；B種、 中粉末度；D種 (CFA無混入条件をPと表記)
CFA混入量 (kg/m <sup>3</sup> )	W/B=26%条件；0、200、300 W/B=31%条件；0、200 W/B=38%条件；0 W/B=49%条件；0

- \*1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻、 (正会員)
- \*2 宇都宮大学助手 工学部建設学科建築学コース、工博 (正会員)
- \*3 宇都宮大学教授 工学部建設学科建築学コース、工博 (正会員)

## 2.2 使用材料

表-2 に使用したCFAの品質を示す。骨材は、鬼怒川産川砂（表乾比重2.60、吸水率2.02%、粗粒率2.61）と岩瀬産硬質砂岩碎石（表乾比重2.66、吸水率0.65%、実積率60.2%）を使用し、セメントは3社等量混合した普通ポルトランドセメントを使用した。混和剤は、高性能AE減水剤を使用した。

## 2.3 コンクリートの調合と性質

表-3 にコンクリートの調合、フレッシュコンクリート及び強度性状を示す。全調合において単位水量を170kg/m<sup>3</sup>とし、W/B条件毎に粗骨材かさ容積を一定とした。W/B=26、31%の条件では、スランプが23±2cm及び空気量が3.0±1.5%に、W/B=38、49%の条件では、スランプが21±2cm及び空気量が4.5±1.5%になるよう、混和剤の添加により調整した。以後、各調合の呼び名は、本表中の記号に従うものとする。

## 2.4 実験方法

図-1 に部材試験体の概要を示す。メタルフォーム内の300×300×900mmのコンクリート試験体の上下面及び側面を150mm厚の発泡スチロールで覆って断熱状態とし、両端面からのみ放熱するよう

表-2 CFAの品質

種類	比重	粉末度 cm <sup>2</sup> /g	50%平均 粒径 μm	強熱減量 %	フロー 値比 %	活性度 指数 28日
B種	2.42	6610	4.2	3.16	106	99
D種	2.29	4030	10.2	2.26	102	91

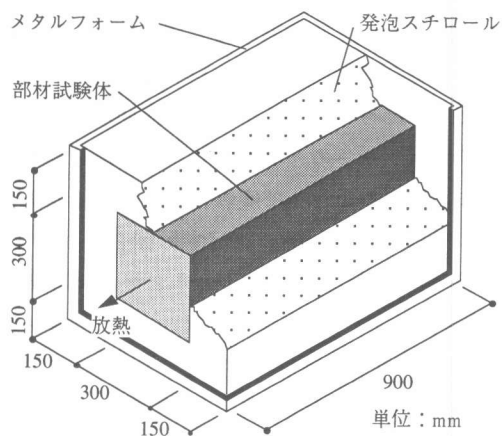


図-1 部材試験体の概要

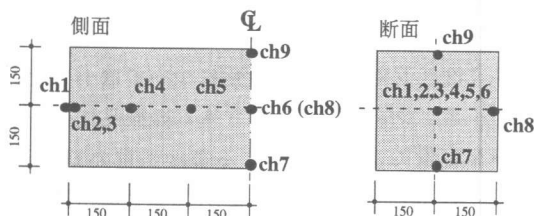


図-2 温度測定位置

表-3 コンクリートの調合、フレッシュコンクリート及び強度性状結果

記号	CFA 銘柄	W/B %	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					高性能AE 減水剤*		スランプ cm	空気量 %	部材試験体 最高温度 (°C)	圧縮強度 (MPa)			
			CFA	W	C	S	G	主剤	助剤				標準養生供試体		コア供試体	
													28日	91日	28日	91日
P260	-	26	0	170	650	637	928	1.5	1.0	22.7	2.4	85.3	96.4	98.0	60.9	81.1
P310	-	31	0	170	550	689	960	1.0	0.0	21.3	2.2	79.5	84.0	89.8	66.6	66.1
P380	-	38	0	170	450	702	992	0.9	3.0	21.2	4.9	69.3	57.5	66.5	50.3	49.1
P490	-	49	0	170	350	783	992	1.2	3.0	21.3	4.1	56.4	44.7	52.2	42.7	44.8
B262	B	26	200	170	450	575	928	1.2	3.5	23.7	2.6	71.2	87.3	99.0	76.0	80.5
B263	B	26	300	170	350	549	928	1.2	4.5	23.2	3.0	57.6	71.8	87.0	68.5	68.5
B312	B	31	200	170	350	624	960	0.9	3.0	22.0	2.1	57.9	65.5	77.4	55.6	57.4
D262	D	26	200	170	450	577	928	1.3	3.0	23.3	3.4	72.1	80.4	97.1	73.7	75.2
D263	D	26	300	170	350	543	928	1.3	4.0	24.7	2.8	62.3	67.7	87.5	67.9	68.6
D312	D	31	200	170	350	627	960	1.0	0.1	22.5	1.9	61.0	64.2	78.1	42.7	66.8

\*主剤；セメント質量に対する%添加率 (C%)、助剤；セメント質量に対する0.001%添加率 (C\*0.001%)

にした。部材試験体は恒温室に設置し、温度はCC熱電対により検出した。測定は9チャンネル（以下ch）についてデータロガーで記録した。図-2に各chにおける温度測定位置を示す。ch1、2は、メタルフォームの外部表面及びコンクリート接触部の温度を計測し、ch3~6は部材試験体の放熱平面上の中央部温度を、ch6~9は部材試験体中央の断熱平面上の温度を測定した。また、材齢28日及び91日において、標準養生供試体と各部材試験体から採取したコア供試体について圧縮強度試験を行った。コアは、打設後3週から4週の間各材齢3本ずつ採取し、20℃・60%RH気中で保管後、圧縮試験前日に24時間吸水させた。

### 3. 実験結果

#### 3.1 発熱特性

図-3に各部材試験体における内部温度の経時変化を示す。ch6~9の内部温度は、ほぼ同じ

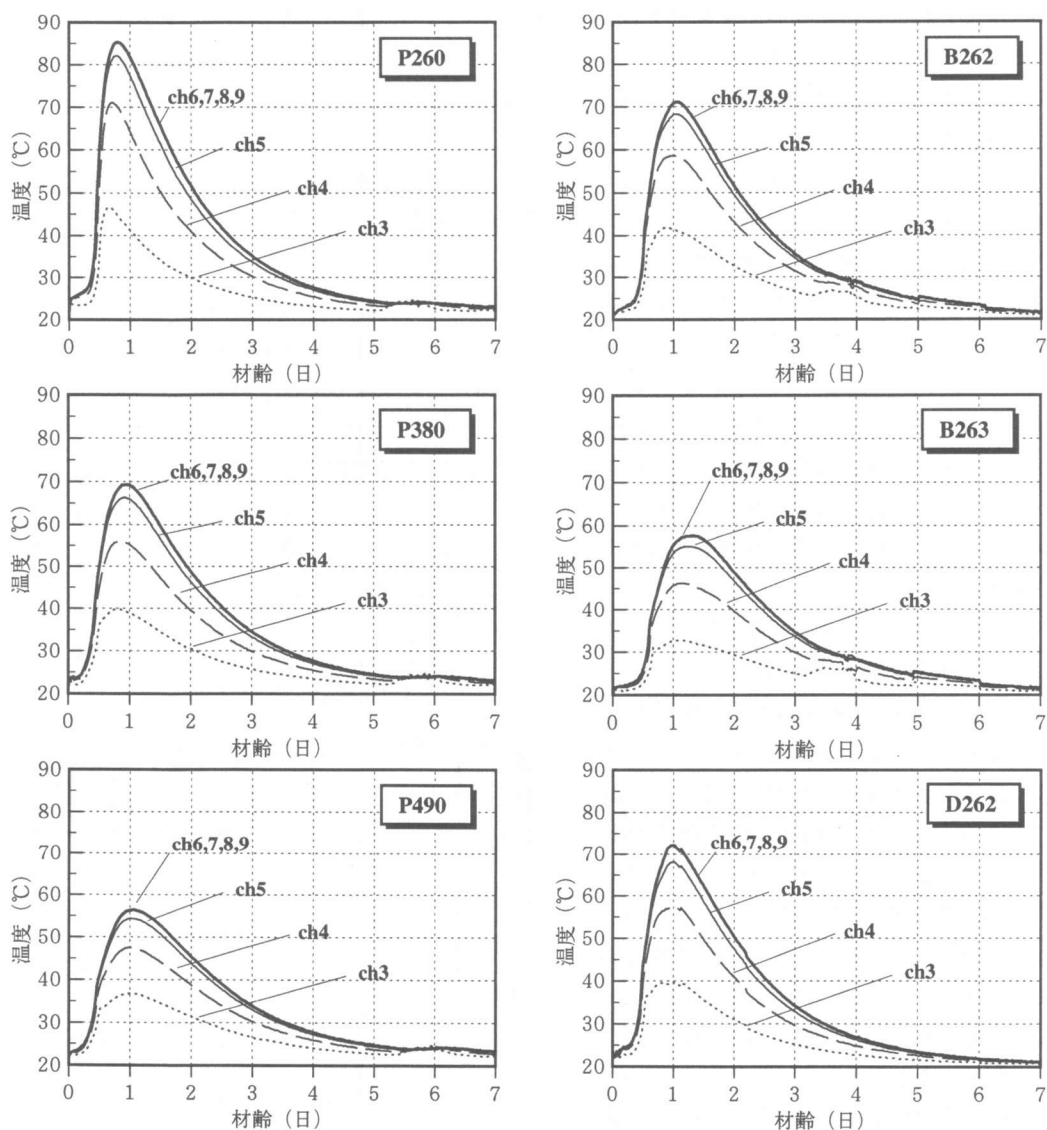


図-3 各部材試験体の温度測定結果

温度変化を示し、断熱平面上におけるコンクリートの温度変化はほぼ一定であった。また、c h 3～6では放熱面から離れるほど温度が上昇しているため、本実験の部材試験体におけるコンクリートの温度変化は、放熱平面上の一次元で温度変化すると考えられる。

B262とD262は、C F Aの粉末度を比較したものであるが、どのc hにおいても非常に近い温度変化を示しており、今回の実験では、C F Aの粉末度は、コンクリートの水和熱による温度上昇にあまり影響しなかったといえる。また、C F A混入コンクリートは、C F A無混入コンクリートに比べて発熱速度が僅かに遅れる傾向にある。

同一W/B条件でC F A混入量が異なるP260、B262、B263について着目すると、C F A混入量の増加に伴い単位セメント量が減少する。そのため、C F A混入量が増加するとコンクリートの最高温度は減少している。一方、水セメント比すなわち単位セメント量が等しいP380、B262、D262及びP490、B263は、C F A混入条件で僅かに最高温度が高いものの、C F A無混入条件とそれほど大差ない温度変化を示している。そのため、結合材としてのC F Aは、コンクリートの発熱にあまり寄与していないと考えられる。以上のことから、C F Aをセメントの一部に置換して混入することにより、コンクリートの発熱温度が抑制できることが分かる。

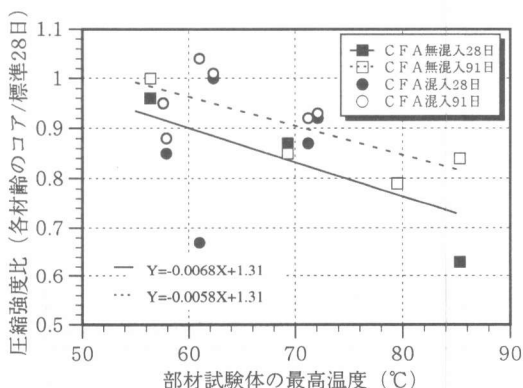
### 3.2 強度特性

表－4に同一水結合材比のC F A無混入コンクリートに対するC F A混入コンクリートの圧縮強度百分率を示す。この表から標準養生の場合は、C F Aを混入すると無混入に対し、材齢28日では平均78.8%であるが、材齢91日では91.9%となり、長期強度の伸びが大きいことが分かる。一方、標準養生供試体と比べて、コア供試体の場合は、材齢28日では平均103%と非常に大きく、材齢91日でも92%で標準養生の場合と同じになる。このことからC F Aの混入は、部材コンクリートの強度発現に対して非常に有効であることが分かる。

図－4に部材試験体の最高温度と標準養生供試体の材齢28日圧縮強度に対するコア供試体の各材齢の圧縮強度比の関係を示す。図中に回帰式を示した。回帰式から部材の最高温度が54℃以上になると、材齢91日のコア強度は、標準養生の材齢28日強度よりも小さくなるといえる。このことは、部材の最高温度が高くなると長期になっても部材コンクリートの強度が調合強度を超えないことを意味している。従って、部材の最高温度を低く抑える必要があり、C F Aを混入するとコンクリートの温度上昇を抑制できるため、強度発現を阻害することが少ないといえる。

表－4 C F A無混入に対するC F A混入の圧縮強度百分率

記号	標準養生供試体		コア供試体	
	28日	91日	28日	91日
B262	90.6%	101.0%	124.8%	99.3%
B263	74.5%	88.8%	112.5%	84.5%
D262	83.4%	99.1%	121.0%	92.7%
D263	70.2%	89.3%	111.5%	84.6%
B312	78.0%	86.2%	83.5%	86.8%
D312	76.4%	87.0%	64.1%	101.0%
平均	78.8%	91.9%	102.9%	91.5%



図－4 最高温度と強度増加比との関係

#### 4. 熱拡散方程式に基づく発熱特性の定量評価

CFA混入量が及ぼすコンクリートの発熱特性を定量評価するため、逆解析を行い、各種発熱定数を求める。

##### 4.1 定式化

実験結果から部材試験体を有限長さの一次元部材として扱えるため、発熱特性の解析には、式(1)の熱拡散方程式を適用した。式(2)と式(3)に境界条件、式(4)に初期条件を示す。境界条件は、ニュートン形冷却条件を用いた(図-5)。

$$[\text{基本式}] \quad \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{Q(t)}{c\rho} \quad (1)$$

$$[\text{境界条件}] \quad x=0 \quad ; \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$x=d \quad ; \quad -\frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T-T_0) \quad (3)$$

$$[\text{初期条件}] \quad t=0 \quad ; \quad T = T_0 \quad (4)$$

ここに、 $T$ ；コンクリート温度、 $t$ ；材齢、 $x$ ；試験体中心からの距離、 $c$ ；比熱(0.22一定)、 $\rho$ ；密度、 $k$ ；熱拡散率( $k=\lambda/c\rho$ )、 $\lambda$ ；熱伝導率、 $\alpha$ ；熱伝達率と熱伝導率との比、 $T_0$ ；基準温度である。

水和熱は、初期の温度勾配を直線近似したため、発熱温度 $Q(t)$ は式(5)で表される。

$$\int_0^t Q(\tau) d\tau = Q_0(1 - e^{-\beta t}) \quad (5)$$

ここに、 $\tau$ ；媒介変数、 $Q_0$ ；終局断熱発熱量、 $\beta$ ；発熱速度定数である。

以上より、式(2)～(5)を式(1)に組み込むと厳密解(6)を得る。

$$T = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Q_0 \cdot \beta}{c\rho} \cdot \frac{1}{k\mu_n^2 - \beta} \cdot \frac{\alpha \sqrt{\alpha^2 + \mu_n^2}}{\mu_n \{\alpha + d(\alpha^2 + \mu_n^2)\}} \cdot (e^{-\beta t} - e^{-k\mu_n^2 t}) \cdot \cos \mu_n x \quad (6)$$

ここに $\mu_n$ は、 $\tan \mu_n d = \alpha / \mu_n$  ( $n=1, 2, \dots$ ) の関係から算定される。

##### 4.2 解析方法

厳密解(6)は、既知量を除くと $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\lambda$ 、 $Q_0$ の4種類の未知量(発熱定数)により制御される。従って、厳密解(6)の数値解を求めることは、実験値と合致する発熱定数の決定に帰着する。図-6に発熱特性の逆解析フローを示す。各種発熱定数を非線形最小二乗法により最適化させ[3]、実験値と適合する解を求めることで発熱特性の定量評価が可能となる。

##### 4.3 解析結果

表-5及び図-7に解析結果を示す。解析温度 $T_{ana.}$ は、概ね実測温度 $T_{exp.}$ と合致しているため、求められた発熱定数は有意である。 $\beta$ はCFA混入量の増加に伴って減少し、CFAを混入すると発熱速度が遅くなる。図-8にセメント量又はCFA量と $Q_0$ との関係を、図-9に材齢91

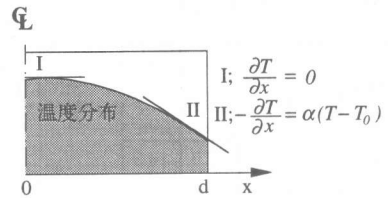


図-5 境界条件

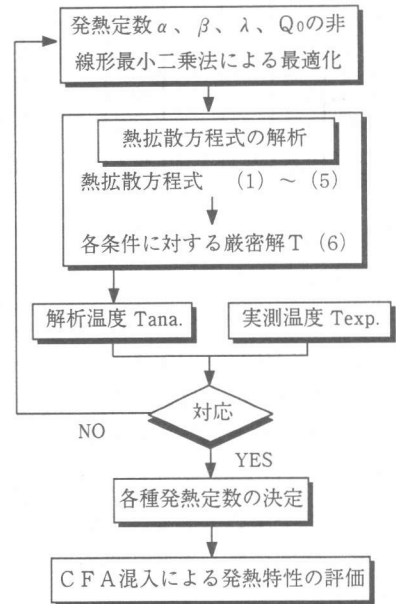


図-6 逆解析フロー

表-5 解析結果

記号	$\alpha$ 1/m	$\beta$ 1/h	$\lambda$ $\times 10^3$ J/mh $^\circ$ C	$Q_0$ $\times 10^7$ J/m $^3$
P260	3.82	0.37	12.9	14.9
P310	4.29	0.25	11.7	14.0
P380	4.45	0.18	11.0	12.1
P490	3.87	0.13	10.7	9.4
B262	3.66	0.17	11.8	12.9
B263	5.18	0.13	9.1	9.8
B312	5.52	0.13	8.0	9.4
D262	4.72	0.16	11.6	13.6
D263	4.90	0.10	11.7	12.5
D312	5.36	0.11	10.7	11.7

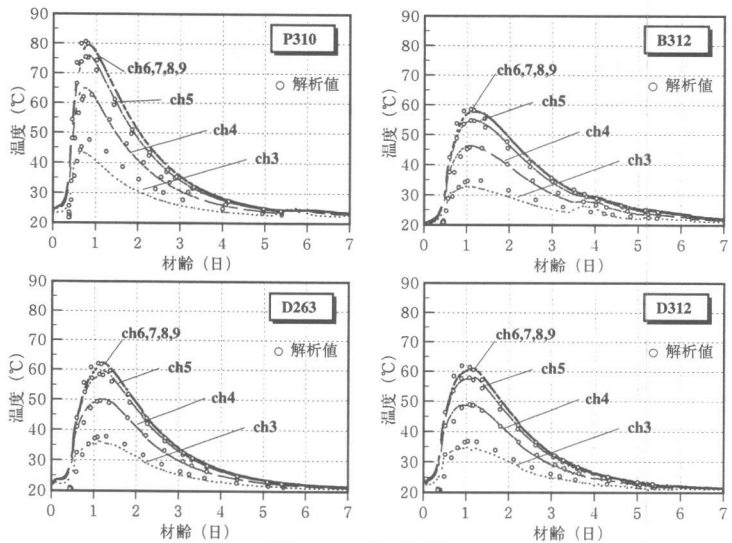


図-7 解析結果

日コア強度と $\lambda$ との関係を示す。 $Q_0$ はセメント量に対し $24.9 \times 10^4$ J/kg、CFA量に対し $5.8 \times 10^4$ J/kgの傾きとなり、CFAの混入は、コンクリートの水和熱抑制に有効である。また、コンクリートの部材強度が増加すると $\lambda$ が増加する傾向にあることが認められる。

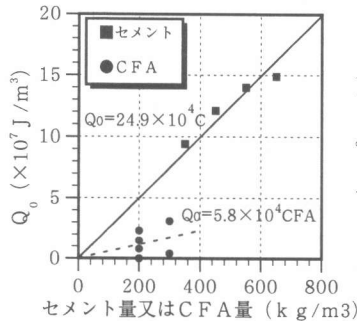


図-8  $Q_0$ と結合材量の関係

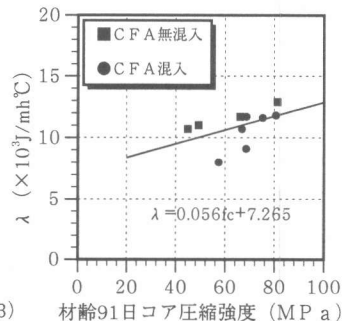


図-9  $\lambda$ とコア強度の関係

## 5. 結論

CFAを使用した高強度コンクリートにおいて、水和熱特性及び初期高温履歴を受けた時の強度特性を検討した結果、本研究の範囲で以下のことが明らかになった。

- 1) CFAをセメントの一部に置換して混入するとコンクリートの発熱が抑制できる。
- 2) CFA混入の高強度マスコンクリートは、部材コンクリートの強度発現が期待できる。
- 3) 熱拡散方程式に基づく逆解析を行い、発熱特性の定量評価を行った。その結果、 $Q_0$ として、セメント量に対し $24.9 \times 10^4$ J/kg、CFA量に対し $5.8 \times 10^4$ J/kgが得られた。

## 謝辞

本研究は、日本フライアッシュ協会の委託により、日本建築学会に設けられたフライアッシュ調査研究小委員会の一環として行ったものである。本研究の実施にあたり、建設省建築研究所第二研究部無機材料研究室室長の阿部道彦氏、主任研究員の鹿毛忠継氏、同部外研究員の大下昭三氏、藤田克己氏、宇都宮大学卒論生の大久保敏彦氏、深川正浩氏、ならびに宇都宮大学建設学科建築材料研究室の皆様が多大な御協力を賜りました。ここに記して厚く謝意を表します。

## 参考文献

- [1] 丸嶋紀夫、戸祭邦之、黒羽健嗣：高強度コンクリートの水和発熱による温度上昇がセメントの水和と強度発現に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.1、pp.457-462、1992.6
- [2] ACI226委員会報告、抄訳 三井健郎：フライアッシュのコンクリートへの利用、コンクリート工学、Vol.26、No.4、pp.67-71、1988.4
- [3] 西田德行、潮田和司、土橋吉輝、松井邦人：現場計測データに基づくコンクリートの熱特性の推定とその考察、土木学会論文集、No.544/5-32、pp.89-100、1996.8