Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, 1998

論文　シリカフュームを使用した100N/mm²級高強度コンクリートの発熱・強度特性

河野政典*1・桝田佳寛*2・上西　隆*1・起橋孝徳*1

要旨：本研究は，シリカフュームを使用した100N/mm²級高強度コンクリートの水和発熱特性および高温履歴を受けた場合の強度発現性について実験的，解析的に検討を行ったものである。水和発熱特性を定量的に評価するため断熱温度上昇の推定式を提案し，逆解析手法により算出した断熱温度上昇量から推定式の係数である発熱特性値を定めた。この発熱特性値をもとに結合材の混入量が及ぼす水和発熱特性および強度発現性への影響を明らかにした。

キーワード：シリカフューム，高強度コンクリート，断熱温度上昇，構造体強度

1. はじめに

100N/mm²級高強度コンクリートには，発熱を抑制するため低熱ポルトランドセメントの使用が，粘性を低減して施工性を改善するためシリカフュームの使用が有効である。低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートは，普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べて，部材内部の温度上昇が低くなり，高温履歴を受けた場合でも良好な強度発現性状を示すことが報告されている[1)]。また，低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇式は，ごく初期材齢の水和反応を考慮した式が提案されている[2)]。しかし，100N/mm²級コンクリートのように結合材量が非常に多くなる場合には，温度上昇を予測するための発熱特性や，結合材量と温度上昇量の関係，温度上昇量と強度発現性の関係などについて不明な点が多い。

本研究では，100N/mm²級高強度コンクリートの発熱特性や高温履歴を受けた場合の強度発現性状を把握することを目的として，低水結合材比のコンクリートを用いて部材試験体を製作し，その温度履歴からの断熱温度上昇曲線の推定，および結合材量と発熱特性や強度発現性状の関係について考察した。

2. 実験概要

2.1 実験計画

試験および計測項目を**表－1**に，実験の要因と水準を**表－2**に示す。水結合材比(以下W/Bと略す)は3水準，打設時期は3水準とした。単位水量は，全てのW/Bと打設時期の組み合わせについて160kg/m³で行うほか，W/B=22%の標準期については180kg/m³でも行った。実験は合計10ケース実施し，W/B=22%の冬期については断熱温度上昇試験を行った。

表－1　試験および計測項目

	試験・計測項目
発熱特性	部材試験体の温度履歴の計測 断熱温度上昇試験
強度発現	圧縮強度 ・標準水中養生供試体(材齢 7, 28 日) ・温度追随養生供試体(材齢 7, 28 日) ・コア供試体　(材齢 28 日)

表－2　要因と水準

要　因	水　準
水結合材比(%)	19，22，25
打設時期	夏　期(H9年 7月) 標準期(H9年 10月) 冬　期(H9年 12月)
単位水量(kg/m³)	160，180

*1 (株) 奥村組　技術研究所　建築研究室 (正会員)
*2 宇都宮大学教授　工学部建設学科　工博 (正会員)

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

2.2 使用材料

使用材料とその品質を**表－3**に示す。結合材として，セメントには高ビーライト系の低熱ポルトランドセメントを，シリカフュームには濃度50%のスラリー形態のものを使用した。

2.3 コンクリートの調合

コンクリートの調合を**表－4**に示す。調合は単位粗骨材かさ容積を0.57m³/m³と一定にした。シリカフュームはセメント質量に対し内割りで10%置換した。練上がりの目標値は，スランプフローを 60±10cm，空気量を1%程度とし，高性能AE減水剤の添加量を各調合毎に調整した。

混練には容量 0.05m³ の水平2軸強制練りミキサを使用した。ミキサへは，粗骨材，細骨材，セメントの順に投入し，1分間の空練りを行い，その後シリカフュームスラリーと高性能AE減水剤を添加した水を加え混練した。加水後の混練状況を目視により管理し，練上がりが確認できるまで混練を行った。

2.4 実験方法

硬化過程における構造体コンクリートの温度履歴および高温履歴を受けたコンクリート強度のデータを得るため，部材試験体を製作した。

部材試験体の概要を**図－1**に示す。300×300×900mm のコンクリート試験体の上下面および側面を300mm厚の発泡スチロールで覆い断熱状態とし，両端面からのみ放熱させた。

コンクリート温度測定位置を**図－2**に示す。コンクリート温度の他に環境温度も同時に測定した。各打設時期における平均環境温度は，夏期で27.5℃，標準期で17.3℃，冬期で10.2℃であった。

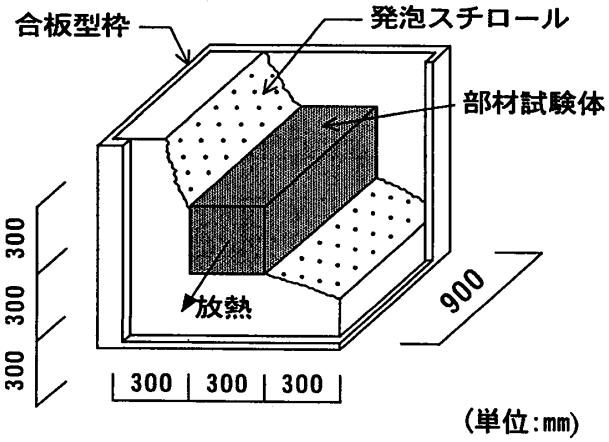
表－3 使用材料

セメント C	低熱ポルトランドセメント(高ビーライト系) 比重:3.20，比表面積:4120 cm²/g 組成化合物 C_3S:35%，C_2S:46%，C_3A:3%
細骨材 S	鬼怒川産川砂 表乾比重:2.58，吸水率:1.94 %
粗骨材 G	岩瀬産硬質砂岩砕石 表乾比重:2.66，吸水率:0.59 % 最大骨材径：20 mm，実積率:59.8 %
シリカフューム SF	形態:スラリー（シリカフューム の濃度：50 %） 比重:1.39 スラリー中のシリカフューム成分 比重:2.20 比表面積:185000 cm²/g SiO_2:93.4 %
混和剤 add	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 比重:1.045

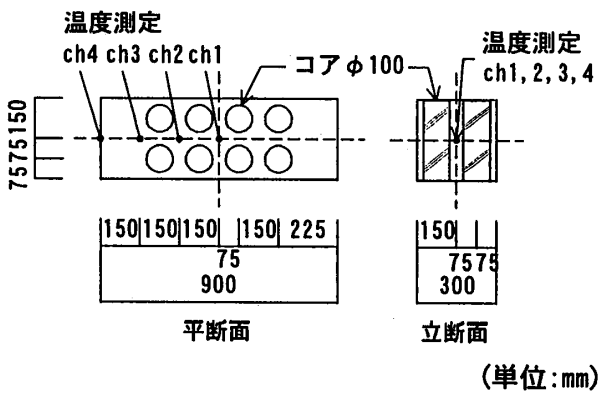
表－4 コンクリートの調合

記号*(標準期の場合)	W/B (%)	S/a (%)	単位量(kg/m³)					add (C×%)
			W	結合材 B		S	G	
				C	SF			
A1916	19	39	160	758	84	561	907	2.5
A2216	22	43	160	655	73	653		2.0
A2218	22	38	180	736	82	529		2.0
A2516	25	45	160	576	64	723		1.5

* 記号：　夏期の場合頭文字は"S"で，冬期の場合は"W"で記す。



図－1 部材試験体の概要図



図－2 コンクリート温度測定位置
コア採取位置

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

コア供試体（φ100mm）は，**図－2**に示す位置から採取し，長さ200mmに整形した。温度追随養生供試体は，φ100×200mmのモールドに採取し，封かん状態で材齢7日まで部材試験体中心部の温度に追随させた水槽で養生した。その後脱型し，試験材齢まで標準水中養生を行った。

2.5 発熱特性の解析方法

(1)熱特性値の同定

コンクリートの発熱特性を定量的に評価するため，逆解析により各種熱特性値を求めた。部材試験体は有限長さの一次元部材と考えられるため，一次元差分法により熱伝導解析を行った。基本式を式(1)に示す。

$$T_{(t+1,\,i)}=T_{(t,\,i)}+h^2\frac{\Delta t}{\Delta x^2}\{T_{(t,\,i+1)}+T_{(t,\,i-1)}-2T_{(t,\,i)}\}+\Delta Q \quad \cdots\cdots \quad (1)$$

$T_{(t,i)}$ ：tステップのi点での温度(℃)

$h^2=\lambda/c\rho$：熱拡散率（m^2/hr）

λ ：熱伝導率（W/m·℃）

ρ ：密度（= 2400 kg/m^3）

c ：比熱（= 0.92 kJ/kg·℃）

Δx ：節点間距離（m）

ΔQ ：Δt時間内の断熱温度上昇量(℃)

パラメータの同定手法には，直交方向探索法の一つである座標回転法[3]を適用した。この方法では，互いに直交する方向ベクトルに沿って探索を行うが，探索効率を良くするため，移動の際には探索の幅だけでなく，方向ベクトルの組も回転させて適切な探索方向を決定する。未知パラメータは，コンクリートの断熱温度上昇量，熱伝導率および表面の熱伝達係数とし，式(2)を用いて各時間ステップ毎に，計測温度と解析温度の残差平方和Jが最小となるように繰り返し計算を行い，パラメータを同定した。

$$J=\sum_{i=1}^{n}\{T_{m(t,\,i)}-T_{a(t,\,i)}\}^2\leqq\varepsilon \quad \cdots \quad (2)$$

$T_{m(t,i)}$ ：tステップのi点での計測温度(℃)

$T_{a(t,i)}$ ：tステップのi点での解析温度(℃)

n ：計測点数（= 4）

ε ：収束判定値（= 0.1）

(2)断熱温度上昇曲線の推定

逆解析により求めた断熱温度上昇量から，断熱温度上昇曲線を推定した。既往のS字型断熱温度上昇曲線式[4]では適合性が良くないため，ここではごく初期材齢から終局に至るまでの断熱温度上昇傾向をより良く表現できる式として式(3)を提案し用いた。

$$Q_{(t)}=\frac{1}{1+a\cdot e^{bt}}\cdot Q_\infty(1-e^{-\gamma t}) \quad \cdots \quad (3)$$

$Q_{(t)}$：時間 t(day)の断熱温度上昇量(℃)

Q_∞ ：終局断熱温度上昇量(℃)

γ ：発熱開始から発熱終結期に至るまでの温度上昇速度に関する係数(1/day，発熱終結期に至るまでの時間が短いほどγは大きい)

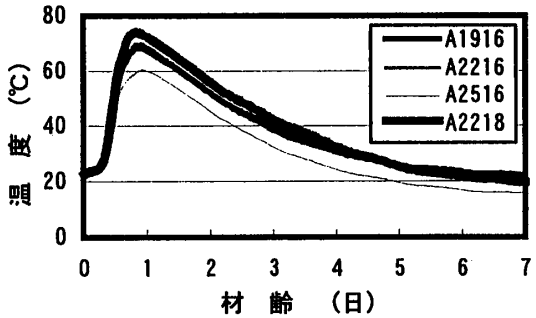
a ：発熱加速期の温度上昇速度に関する係数（上昇速度が大きいほどaは大きい）

b ：発熱開始から発熱加速期に至るまでの時間に関する係数(1/day，発熱加速期に至るまでの時間が短いほどbは大きい)

3. 実験結果

3.1 温度履歴

標準期に打設した部材試験体の中心部温度履歴を**図－3**に，全ての部材試験体における中心部の最高温度を**表－5**に示す。同一単位水量の場合は，W/Bが小さいほど部材試験体の中心部の最高温度は高くなる傾向にある。最高温度の到達時間には，W/Bによる違いは見られなかった。A2218の最高温度は73.9℃で，同じW/BのA2216よりも6℃高く，かつ，単位結合材量の



図－3 試験体中心部温度履歴（標準期）

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

大きいA1916よりも4.5℃高い。

夏期および冬期においてもW/Bが小さいほど，部材試験体の中心部の温度上昇量は大きくなる傾向にあった。

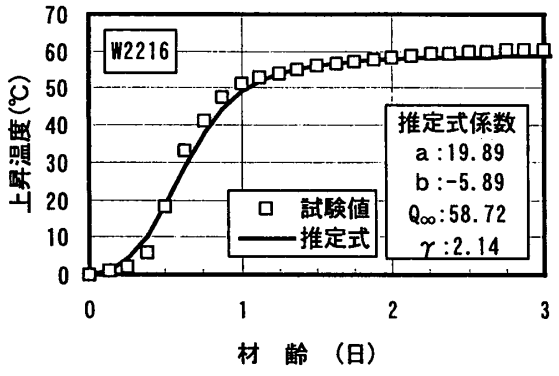
3.2 強度発現

圧縮強度の試験結果を**表－5**に示す。温度追随養生供試体の材齢7日強度は標準水中養生供試体に比べ大きいが，材齢7日から28日の強度増進は小さい。コア供試体強度は，温度追随養生供試体と同様の強度発現性状を示していた。

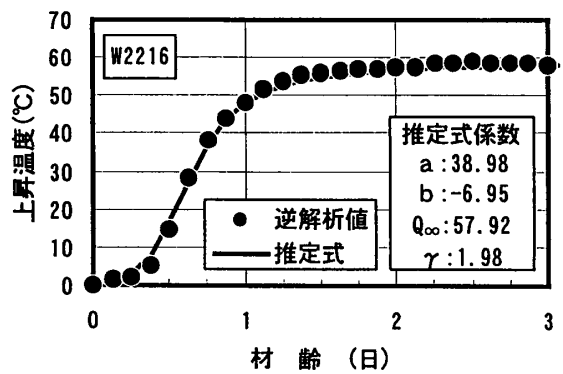
4. 解析結果

W2216の断熱温度上昇試験結果と推定式を**図－4**に示す。推定式による断熱温度上昇曲線は，発熱過程を適切に表現しているといえる。

W2216の部材試験体の計測温度から逆解析により求めた断熱温度上昇量と推定式を**図－5**に示す。**図－5**と**図－4**の推定式はほぼ一致しており，逆解析により求めた断熱温度上昇量により発熱特性値を評価できると考えられる。逆解析の結果から求めた断熱温度上昇式の各係数の値を**表－6**に示す。



図－4 断熱温度上昇試験結果



図－5 断熱温度上昇量（逆解析）

5. 考察

5.1 結合材量と発熱特性

結合材量と断熱温度上昇推定式の各係数との関係を**図－6 (1)～(4)**に示す。結合材量が多くなるに従いaが大きく，bが小さくなる傾向が見られる。これは，結合材量が多いほど高性能AE減水剤の量も多くなるため，初期材齢での水和反応は鈍いが，その後の反応は激しく，かつ，終局発熱量に達するまでの時間も短くなることを示している。この傾向は，同一調合では打設時期の環境温度が高いほど顕著に表れていた。

また，結合材量が多くなるに従いQ_∞も大きくなる傾向が見られるが，その増加割合は，結合材10 kg/m³あたり約0.4℃と小さく，これは既往の文献[2]のほぼ1/2程度であった。γは結

表－5 部材試験体の最高温度と圧縮強度試験結果

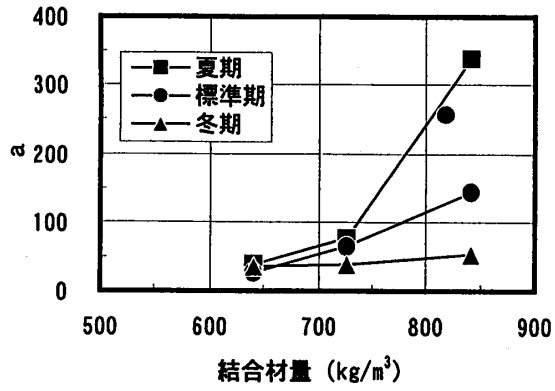
打設時期	養生	19% 最高温度(℃)	19% 材齢 7日	19% 材齢 28日	22% 最高温度(℃)	22% 材齢 7日	22% 材齢 28日	25% 最高温度(℃)	25% 材齢 7日	25% 材齢 28日
夏期	標水		100	138		90	124		77	116
	温追	73.8	141	141	72.4	127	129	69.0	106	111
	コア			144			132			118
標準期 W=160	標水		102	144		91	140		74	116
	温追	69.4	143	148	67.9	130	135	60.4	105	110
	コア			150			133			115
標準期 W=180	標水					98	138			
	温追				73.9	128	131			
	コア						132			
冬期	標水		105	137		89	137		73	114
	温追	54.0	140	144	60.2	125	133	56.0	112	117
	コア			135			129			112

強度単位：N/mm²

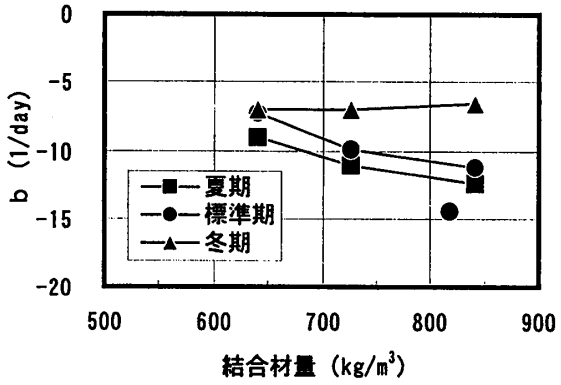
表－6 断熱温度上昇式の各係数値

記号	a	b	Q_∞	γ
S1916	338.86	-12.38	62.55	2.00
A1916	141.97	-11.24	60.43	2.27
W1916	53.80	-6.61	60.00	1.35
S2216	74.57	-11.08	58.01	2.51
A2216	64.54	-9.96	58.44	2.46
W2216	38.98	-6.95	57.92	1.98
A2218	257.40	-14.40	65.30	2.43
S2516	38.17	-9.10	55.96	2.94
A2516	25.88	-7.29	52.88	2.61
W2516	34.82	-7.01	52.79	1.88

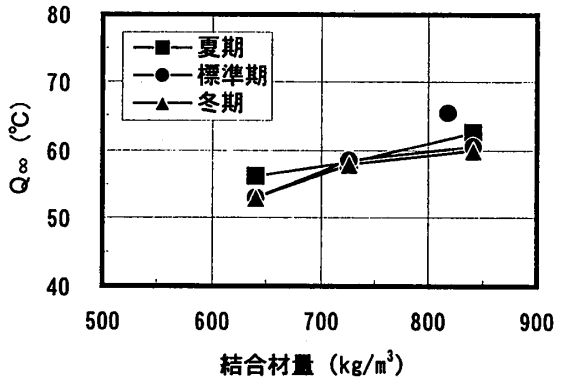
NII-Electronic Library Service



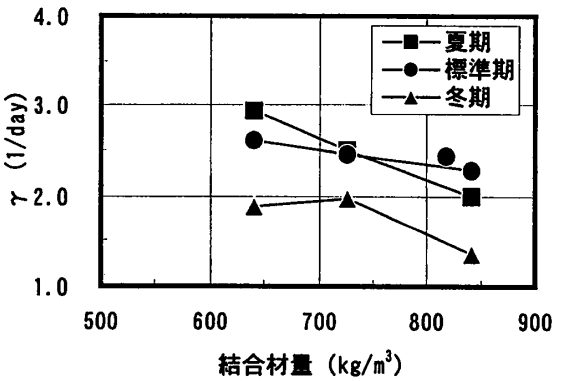
図－6(1)　結合材量とaの関係



図－6(2)　結合材量とbの関係



図－6(3)　結合材量とQ_∞の関係



図－6(4)　結合材量とγの関係

合材量が多くなるに従って小さくなる傾向があった。

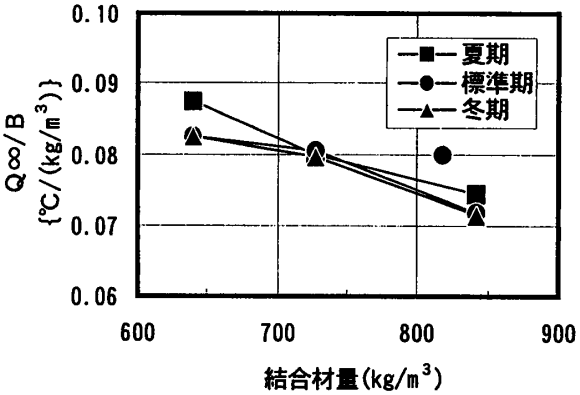
打設時期によるQ_∞の違いは見られないが，γは打設時期の環境温度が低い場合小さくなっている。これは環境温度が低い場合においては，終局発熱量に達するまでには時間を要するが，終局発熱量は環境温度に関わらずほぼ一定であることを示している。

結合材量と単位結合材量あたりの温度上昇量の関係を**図－7**に示す。同じ単位水量の調合においては，結合材量が多いほど単位結合材量あたりの温度上昇量は小さくなる傾向が見られる。これは，結合材量が多くなるほど，水と結合材の接する機会が少なくなり，水和反応の割合も小さくなるためと考えられる。

5.2　結合材量と発現強度

結合材量と温度追随養生供試体およびコア供試体の材齢 28 日圧縮強度との関係を**図－8**に示す。打設時期にかかわらず，圧縮強度は結合材量が多くなるに従い大きくなっているが，結合材 10kg/m³ あたりの強度の上昇割合は，W/B=25～22％では約 2.1 N/mm² であるのに対し，W/B=22～19％では約 1.1 N/mm² と小さくなる。

結合材量と単位結合材量あたりの圧縮強度の関係を**図－9**に示す。単位結合材量あたりの強度発現については，結合材量が 800 kg/m³ 以上では，他のものより若干小さくなる傾向が見られ，単位結合材量あたりの発熱量と関係していると考えられる。



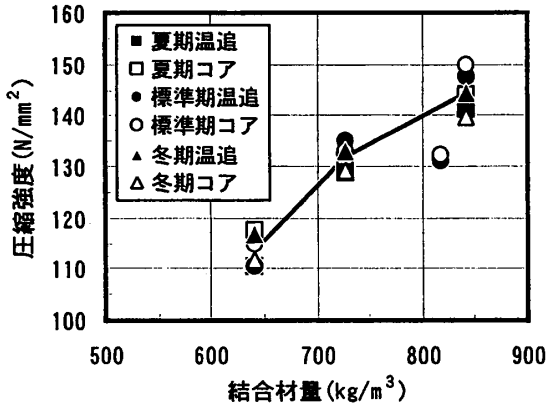
図－7　結合材量と単位結合材量あたりの温度上昇量の関係

NII-Electronic Library Service

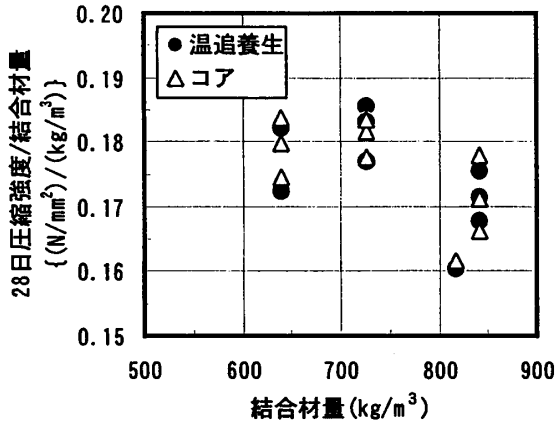
Japan Concrete Institute

5.3 最高温度と発現強度

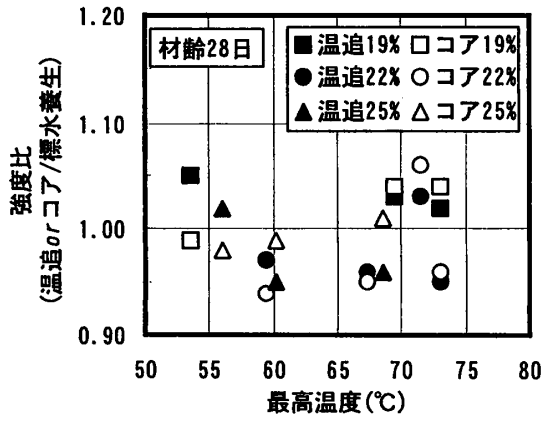
部材試験体中心部の最高温度と，材齢 28 日における温度追随養生とコアの標準水中養生に対する強度比の関係を**図－10** に示す。最高温度に関わらず，温度追随養生およびコアは，標準水中養生の約 95％以上の強度を有していた。



図－8　結合材量と圧縮強度の関係



図－9　結合材量と単位結合材量あたりの圧縮強度の関係



図－10　最高温度と圧縮強度比の関係

6.　まとめ

シリカフュームを使用した 100N/mm² 級高強度コンクリートの発熱特性と強度特性について実験的，解析的に検討した結果を以下にまとめる。

① 今回用いた断熱温度上昇推定式は，ごく初期材齢からの発熱特性を適切に表している。

② 逆解析により断熱温度上昇量を求め，発熱特性の評価を行った。結合材が多いほど，終局断熱温度上昇量は大きくなる傾向にあるが，その増加割合は結合材 10kg/m³ あたり 0.4℃程度であり，また，単位結合材量あたりの発熱量も小さくなる。

③ 単位結合材量あたりの強度発現は，結合材量 800 kg/m³ 以上では若干小さくなり，圧縮強度は必ずしも結合材量に比例して増加しない。

④ 温度追随養生およびコアの材齢 28 日強度は，最高温度に関わらず標準水中養生 28 日強度の 95％以上を有していた。

謝辞

本研究の遂行にあたって，多大なご協力をいただきました宇都宮大学の中村成春助手，萩原伸治氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

1) 佐野寛・桝田佳寛・古川雄二・山本幸雄：高強度コンクリートの実用化に関する研究(その 3)，日本建築学会大会学術講演梗概集，1996.9，pp.207～208

2) 太田達美・名和豊春・山崎庸行・江口仁：高ビーライト系セメントを用いたコンクリートの温度上昇予測に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.645～650，1995

3) 今野浩・山下浩：非線形計画法，日科技連，1978

4) 平賀友晃・倉林清：コンクリートの断熱温度上昇特性に関する既往の研究成果について，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，pp.1～6，1982.8

NII-Electronic Library Service