

(125) 早強性高流動コンクリートの発熱特性

(株)富士ビー・エス 左東 有次  
 福岡大学 土木工学科 添田 政司  
 福岡大学 土木工学科 大和 竹史  
 (株)富士ビー・エス 徳光 卓

1. まえがき

施工省力化や効率化のため、プレテンションPC製品の重要性はますます高まりつつある。しかしながら、PC工場製品の製造はまだ人力に頼っているのが現状であり、現場の省力化と同時に工場生産の効率化を進めることが、プレストレストコンクリートの発展に必要と考えられる。

高流動コンクリートはパイブレッタ作業を省略でき、オートメーション施工に適した工法と考えられるが、PC製品においては製造効率を上げるために早強性が求められ、高流動コンクリートは従来の配合に比べて粉体量が増加するため、硬化時の発熱量が大きくなりやすい問題点がある。そこで早強性を有する設計強度=50~80N/mm<sup>2</sup>までの粉体系高流動コンクリートの硬化時の発熱特性を調査し、早強性と高強度を確保しつつ、発熱をコントロールする方法についての実験的研究を行った。

2. 発熱量測定方法

発熱量の測定は図-1に示すような10cm厚の発砲スチロール製断熱容器により簡易に行った。試験に先立ち、下記の要領により放熱試験を行い、温水の冷却特性から装置の熱伝導率を求めた。

- ①容器にビニール袋を入れ、袋に温水(約70℃)約5ℓを流し込む。
- ②温水中に熱電対を挿入し、ビニール袋の空気を追い出しながら蒸気が漏れないよう、口を十分に縛る。そのとき、熱電対は容器と接しないよう、温水の中央に注意深く配置する。
- ③雰囲気温度測定用の熱電対を配置したのち、一定間隔で温度計測を行う。

装置の放熱特性は雰囲気温度だけでなく風や直射日光などの影響も受けるため、実験は締め切った室内

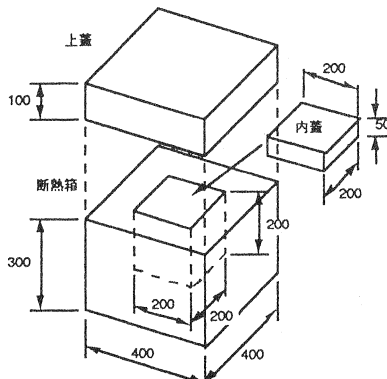


図-1 発熱量測定容器

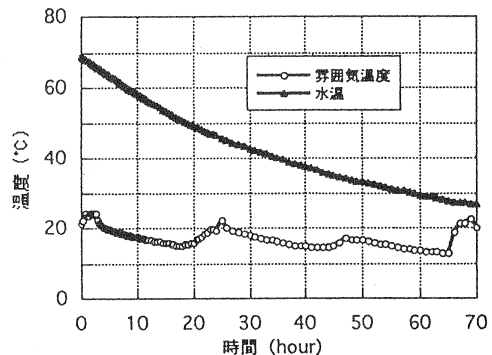


図-2 温水の温度低下と雰囲気温度の関係

で実施した。温水の温度低下と雰囲気温度の関係を図-2に示す。温水の温度低下はなだらかであり、雰囲気温度変化の影響は敏感に表れていないことから、割合によく断熱性が保たれていることがわかる。

この関係から容器の熱伝導率は式(1)のように求められる。

$$\text{熱伝導率 } k = (Q \times t_e) / (A_e \times \overline{T_d}) \quad (\text{kcal/h/m}^2/\text{°C}) \quad \text{-----} \quad (1)$$

ここで  $Q$ :熱損失量(kcal/h)  $Q = W * T_w / t$   
 $T_w$ :水温変化(°C)  
 $t$ :計測時間(h)  
 $t_e$ :容器の厚さ(m)  
 $A_e$ :容器の内面積(m<sup>2</sup>)  
 $\overline{T_d}$ :水温と雰囲気温度の差の加重平均値(°C)

コンクリートの発熱特性は放熱試験で用いた温水に代え、コンクリート約14kgを用いて試験した。測定環境および測定要領は放熱特性調査と同様であり、この結果から上昇温度を式(2)により求めた。

$$\text{上昇温度(°C)} \quad \Sigma T_e = \Sigma (T_{cc} - T_{co}) \quad \text{-----} \quad (2)$$

ただし  $T_{cc}$ :初期温度の影響を含まないコンクリートの上昇温度(°C)  $T_{cc} = T_c + \Sigma T_r$   
 $T_{co}$ :打設直後のコンクリート温度(°C)  
 $T_c$ :コンクリート温度の実測値(°C)  
 $T_r$ :低下温度(°C)  $T_r = Q_c \times t / W / \alpha$   
 $Q_c$ :コンクリートの熱損失量(kcal/h)  $Q_c = k \times A_e / t_e \times (T_c - T_a)$   
 $W$ :試料重量(kg)  
 $\alpha$ :コンクリートの比熱(kcal/kg/°C)  
 $T_a$ :雰囲気温度(°C)

### 3. コンクリートの発熱特性

試験に用いたコンクリートの示方配合および圧縮強度試験結果を表-1に示す。試験用コンクリートとして、従来型のプレテンション用コンクリート(以後、従来PCと略す)、早強セメント・高炉スラグ微粉末併用高流動コンクリート(以後、BS0, BS25, BS50, BS70と略す。数字は高炉スラグ置換率を表す)、高炉スラグ・シリカフェーム併用高流動コンクリート(以後、HPBSSF(p), NPBSSF(p), HPBSSF(l)などと略す。HPは早強セメント・NPは普通セメント使用、括弧内はシリカフェームの形態で、pは粉体、lはスラリーを表す)の3シリーズを使用した。従来PC・BSコンクリートの設計強度は28日強度=50N/mm<sup>2</sup>、1日強度(常圧蒸気養生)=35N/mm<sup>2</sup>であり、従来PCのスランブは12cm±2.5cm、高流動コンクリートのスランブフローは60cm~70cmを目標とした。高炉スラグ70%置換の配合を除いて、いずれも設計値および目標値を満足している。BSSFコンクリートの設計強度は28日強度=80N/mm<sup>2</sup>、1日強度(常圧蒸気養生)=50N/mm<sup>2</sup>であり、スランブフローは65cm~75cmを目標としたが、いずれの配合も設計値および目標値を満足している。

表-1 試験に用いたコンクリートの示方配合と圧縮強度試験結果

	Vw/Vp (%)	S/Slim (%)	G/Glim (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						SP*** (%)	アソア <sup>®</sup> (cm)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
				C	BS	SF	W	S	G			1日	28日
				従来PC	39*	-	-	428	-			-	167
BS0	100	68	53	592	0	-	188	786	840	2.2	60.0	51.6	66.7
BS25	100	68	53	296	273	-	188	786	840	1.6	59.0	39.0	64.0
BS50	100	68	53	415	164	-	188	786	840	2.0	69.5	51.7	66.0
BS70	100	68	53	178	382	-	188	786	840	1.3	52.5	34.4	65.5
HPBS	87	65	50	324	300	0	180	882	771	1.6	74.5	53.4	81.5
HPBSSF(p)	87	65	50	350	240	27	180	882	771	1.6	74.5	57.2	82.2
HPBSSF(l)	87	65	50	350	240	28	180	882	771	2.2	72.5	72.7	101.2
NPBSSF(p)	87	65	50	351	240	27	180	882	771	1.6	71.5	51.2	76.5

\*W/C    \*\*アソア    \*\*\*高性能AE減水剤

### 3. 1 従来PCコンクリートの発熱特性

高流動コンクリートの発熱特性試験に先立ち、従来PC配合コンクリートの発熱特性を調査した。従来PC配合の温度の実測値と上昇温度の計算値を図-3に示す。実測温度を見ると、打設後5時間付近から温度が上昇を始め、18時間~20時間で最高温度約50℃に達したのち雰囲気温度近くまで徐々に温度が低下している。

この発熱特性から計算した上昇温度を見ると、初期は実測値と同様な温度上昇を示したのち、実測温度が最高となった打設後18時間~20時間近傍から温度上昇は頭打ちとなり、計測終了時では約6℃に収束している。式(2)により計算された上昇温度曲線は、断熱温度試験により得られる上昇温度曲線に近似していることから、コンクリートの発熱特性をおおよそ表しているものと判断した。

さて、コンクリートの発熱による問題は、セメント等の反応により生じた熱が構造物の熱損失(放熱)を上回り、さらにその蓄熱量が大きくなった場合に生じると考えられる。上昇温度の計算値の差分値を求めることにより温度上昇勾配が計算できる。構造物に固有の熱損失があると考えた場合、その熱損失量より温度上昇勾配が小さいとき放熱量が発熱量を上回り、逆に大きいときは蓄熱が進むことになる。図-4に従来PCの温度上昇勾配を示す。従来PCコンクリートは工場において発熱に起因する問題を生じていないため、温度上昇勾配が図-4を上回らないことを一つの指標として以後の検討を行った。

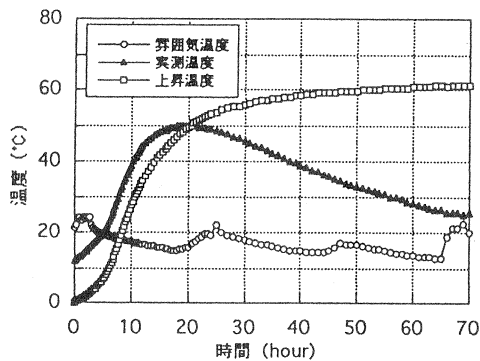


図-3 従来PCコンクリートの発熱特性

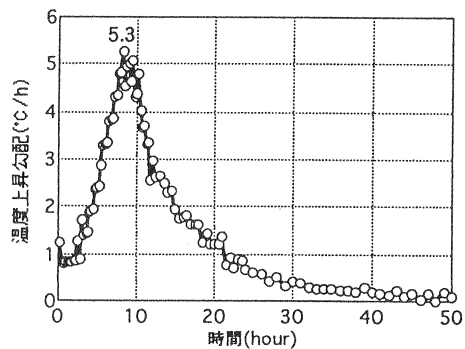


図-4 従来PCコンクリートの温度上昇勾配

### 3. 2 早強セメント・高炉スラグ微粉末併用高流動コンクリートの発熱特性

発熱量を比較するため、骨材量・水量・粉体容積を一定とし、早強セメントと高炉スラグ微粉末は容積比で0%, 25%, 50%, 70%置換した。高炉スラグ微粉末のブレン値は $3,810\text{cm}^2/\text{g}$ である。

図-5にBS0, BS70配合高流動コンクリートの温度変化実測値を示す。BS0の場合、打設後8時間付近から急激に温度上昇し、16時間付近で最高温度 $69^\circ\text{C}$ に達したのち温度が徐々に低下している。一方、BS70の場合、温度上昇開始時間はほぼBS0と等しいがその温度上昇は急激でなく、BS0が最高温度に達した16時間付近から温度上昇が緩やかになり、打設後35時間で最高温度 $53^\circ\text{C}$ に達したのち温度が徐々に低下している。

図-6に高炉スラグ微粉末の置換率を変化させたBS0~BS70配合の式(2)による上昇温度の計算値を示す。高炉スラグ置換率が増加するにしたがって最高温度が低く、また最高温度到達時間が長くなっているものの、各配合の最高温度の差は $1.5^\circ\text{C}$ 程度であり、特に大きな差があるとは言えない。

すなわち、高炉スラグの硬化過程における発熱はセメントに比べて若干少ない程度であり、高炉スラグ置換による発熱温度抑制効果は温度上昇勾配の低下によるものと考えられる。

図-7にBS0, BS70配合高流動コンクリートの温度上昇勾配を示す。BS0配合の最大温度上昇勾配は $36.5^\circ\text{C}/\text{h}$ と従来PC配合コンクリートを大幅に上回り、図-4の従来PC配合コンクリートの最大温度上昇勾配 $5.3^\circ\text{C}/\text{h}$ を上回る時間も約5時間程度となっている。BS70配合では最大温度上昇勾配が従来PCより

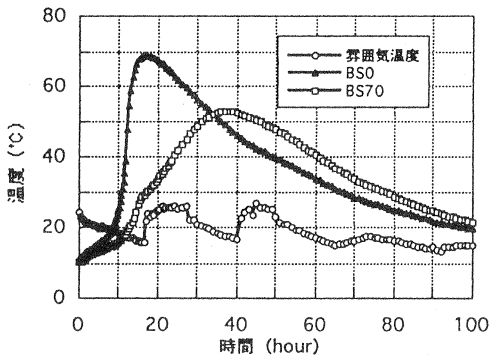


図-5 BS0, BS70配合高流動コンクリートの温度変化実測値

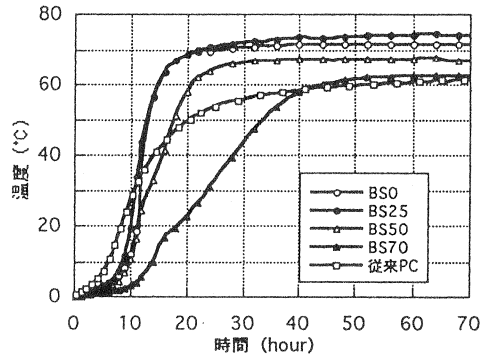


図-6 BS0~BS70配合の上昇温度の計算値

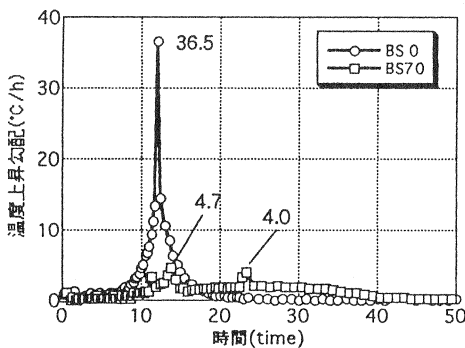


図-7 BS0, BS70配合高流動コンクリートの温度上昇勾配

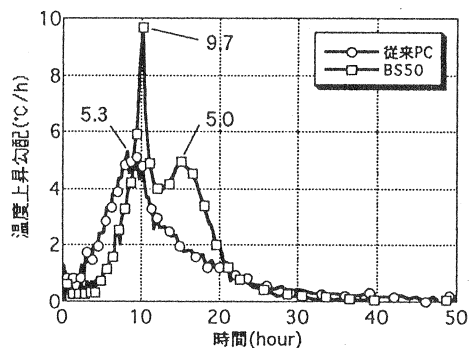


図-8 従来PCコンクリートとBS50配合の温度上昇勾配

も抑制できる反面、温度上昇勾配がほぼゼロになるまでの時間は50時間程度まで長くなっている。

図-8に従来PC配合コンクリートとBS50配合コンクリートの温度上昇勾配を示す。BS50配合の場合、最大温度上昇勾配のピークは10h付近と15h付近の2箇所、各々9.7℃/h、5.0℃/hを示している。しかし、温度上昇勾配が継続して5.0℃/hを超えるのは2時間程度であるから、高炉スラグの置換率を変化させることにより温度上昇勾配および発熱時間がコントロールでき、さらに、蒸気養生の最高温度やその継続時間を調整することによって、発熱制御と早強性・高強度の確保が可能と推定される。

### 3. 3 シリカフューム混和高強度高流動コンクリートの発熱特性

既往の研究[2]によれば、高炉スラグ微粉末置換コンクリートに比べてシリカフューム混和コンクリートの方が最終断熱温度上昇量を低下させることができると言われている。図-9に従来PC、BS50、HPBSSF(p)、NPBSSF(p)配合の式(2)による上昇温度の計算値を示す。上昇温度曲線はシリカフュームを混和した配合においてもBSコンクリートと同様の勾配変化がみられるが、温度上昇が約24時間で収束し、その到達温度も従来PC、BS50配合に比べて各々8℃、15℃程度低くなっている。HPBSSF(p)、NPBSSF(p)配合による上昇温度の差はセメントの種類が異なるにも関わらず顕著でない。

図-10に従来PC、HPBSSF(p)、NPBSSF(p)配合の温度上昇勾配を示す。HPBSSF(p)配合では従来PC配合に比べてまだ全般に勾配が大きめであるものの、BS50配合に比べて、より従来PCの温度上昇勾配変化に近づいている。NPBSSF(p)配合では打設後8時間付近を除いて、従来PC配合の温度上昇速度に比べてやや下回っている。

高炉スラグ微粉末を置換したコンクリートに、さらにシリカフュームを混和することにより、温度上昇勾配を低下させることができ、発熱制御と早強性・高強度の確保がさらに容易になるものと思われる。

図-11にシリカフュームの形態を粉体、スラリーに変化させた場合の温度上昇勾配を示す。シリカ

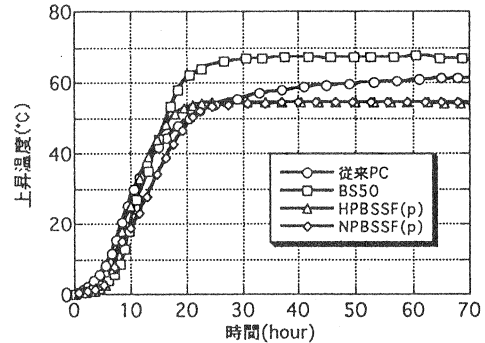


図-9 従来PC、BS50、HPBSSF(p)、NPBSSF(p)配合の上昇温度の計算値

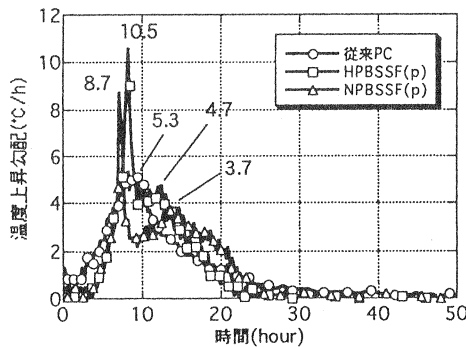


図-10 従来PC、HPBSSF(p)、NPBSSF(p)配合の温度上昇勾配

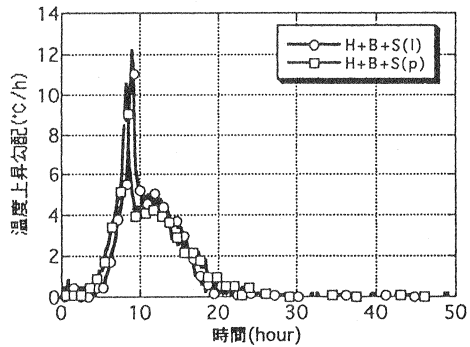


図-11 シリカフュームの違いによる温度上昇勾配の変化

フュームの形態が異なっても温度上昇速度に顕著な差は見られなかった。

### 5. プレテンションホロー桁の発熱特性

BS25, BS50配合高流動コンクリートを用いたプレテンションホロー桁の試作に併せて, 横桁部(充実部)および円柱供試体( $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ )に熱電対を埋め込み, その温度変化を調査した。養生方法は現行のPC橋桁製作と同様の常圧蒸気養生とした。

図-12に養生温度と円柱供試体内部温度の関係を示す。円柱供試体の内部温度は蒸気養生最高温度を上回っているが, ほぼ養生温度と同様な温度変化を示している。

図-13に桁内部温度の変化を示す。BS配合高流動コンクリートでは養生温度に対して桁内部温度は高くなるが, その差はBS25配合で約 $20^{\circ}\text{C}$ , BS50配合で約 $10^{\circ}\text{C}$ であり, 脱枠したPC桁にひびわれ, その他の異常は見られなかった。このことから高炉スラグの置換比率を変化させることにより, 蒸気養生の条件下においても発熱温度の調整が可能であると考えられる。

なお, 図-12に示した円柱供試体と図-13の試験桁から切り取ったコアの圧縮強度はコンクリートの温度変化・最高温度の違いにも関わらず, ほぼ同一強度を示し, いずれも所定の強度を満足した。

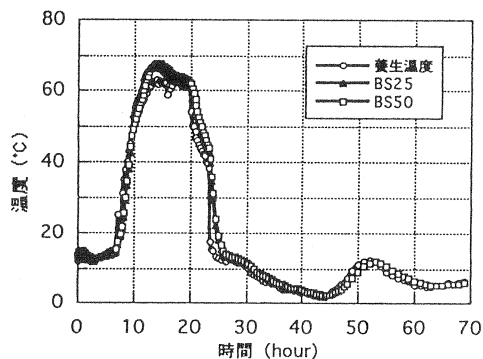


図-12 養生温度と円柱供試体内部温度の変化

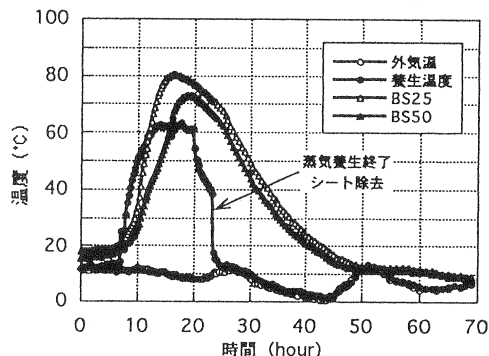


図-13 試験桁内部温度の変化

### 6. まとめ

本研究の結果をまとめると以下のとおりになる。

- ①本試験で用いた簡易な発熱特性測定装置によりコンクリートの発熱特性の目安を得ることができる。
- ②高炉スラグの置換率により温度上昇および発熱時間がコントロールでき, さらに, 蒸気養生の最高温度や時間の調整によって, 発熱制御と早強性・高強度の確保が可能である。
- ③高炉スラグ微粉末を置換したコンクリートに, さらにシリカフュームを混和することにより, 高強度化が図れ, 同時に温度上昇勾配および発熱時間を抑えることができる。

### 参考文献

- 1.左東有次・添田政司・大和竹史・徳光卓: 早強性を有する高流動コンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp219-224, 1994
- 2.谷口裕史・宮野一也・福留和人・喜多達夫: 高強度コンクリートの強度および断熱温度上昇に及ぼす各種材料の影響, コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, pp31-36, 1990