

## 混和材利用早強コンクリートの断熱温度上昇特性について

プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 ○長谷川 剛  
 プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 北野 勇一  
 土木研究所 正会員 石井 豪  
 土木研究所 正会員 中村 英佑

### 1. はじめに

近年、PC構造物の建設材料としてフライアッシュや高炉スラグ微粉末などの混和材を利用するケースが増えつつある。この際、プレストレス導入時の強度を確保するため、早強ポルトランドセメントと混和材を組み合わせたコンクリート（以下、混和材利用早強コンクリートという）が多く利用されている。この混和材利用早強コンクリートは早強コンクリートに比べ単位結合材量が増加する傾向にあり、混和材の利用方法によっては水和熱が増大し、これに起因する初期ひび割れの発生が懸念される。また、既往の技術指針<sup>1),2)</sup>には、初期ひび割れ抵抗性を照査するための混和材利用早強コンクリートに関する設計値が示されていない。そこで、混和材利用早強コンクリートの種類が断熱温度上昇特性に与える影響を把握するため、PC用コンクリートを対象として断熱温度上昇試験を行った。

### 2. 実験方法

コンクリートの配合を表-1に示す。早強コンクリートであるH40は、ポストテンション方式PC橋への適用を念頭に、設計基準強度 $40\text{N/mm}^2$ と材齢3日のプレストレス導入時強度 $30\text{N/mm}^2$ が得られるように水セメント比を40%とした。混和材利用早強コンクリートについては、これまでの採用実績を考慮し、早強ポルトランドセメントをベースとして混和材利用率をフライアッシュII種で20%としたH35F20、高炉スラグ微粉末4000で30%としたH35B430、高炉スラグ微粉末6000で50%としたH35B650の配合を選定した。混和材利用率とは式(1)による。

$$UR = \text{SCM} / (\text{SCM} + \text{C}) \times 100 \quad (1)$$

ここで、UR：混和材利用率(%), SCM：単位混和材量( $\text{kg/m}^3$ ), C：単位セメント量( $\text{kg/m}^3$ )

混和材利用早強コンクリートの水結合材比は、いずれも $W/B=35\%$ とし、断熱温度上昇特性に与える影響を極力避けるため、単位水量と単位粗骨材量をH40と同一にした。また、スランプ $12 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ が得られるように化学混和剤の使用量を調整した。

表-1 コンクリート配合

コンクリートの種類	配合名	セメント種類 (C)	水結合材比 W/B(%)	(水セメント比) W/C(%)	混和材種類 (SCM)	混和材利用率 UR(%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )				
							W	B		S	G
								SCM	C		
早強コンクリート	H40	H	40	(40.0)	—	0	165	0	413	758	968
混和材利用早強コンクリート	H35F20		(43.8)	F	20	94		377	682		
	H35B430		(50.0)	B4	30	141		330	700		
	H35B650		(69.9)	B6	50	236		236	695		

H：早強ポルトランドセメント（密度  $3.14\text{gcm}^3$ ），F：フライアッシュII種（密度  $2.08\text{gcm}^3$ ），B4：高炉スラグ微粉末4000（密度  $2.89\text{gcm}^3$ ），B6：高炉スラグ微粉末6000（密度  $2.91\text{gcm}^3$ ），S：砂（表乾密度  $2.56\text{gcm}^3$ ），G：砕石5号（表乾密度  $2.67\text{gcm}^3$ ）と砕石6号（表乾密度  $2.67\text{gcm}^3$ ）を質量比で1：1の混合使用。

実験水準を表-2に示す。断熱温度上昇試験は断熱法<sup>3)</sup>とマスブロック法<sup>4)</sup>の2方法を用いた。断熱法は断熱温度上昇試験装置(オイル循環式)を用い、断熱温度上昇量を測定した。マスブロック法は、図-1に示すように一辺400mmのマスブロック供試体を作製し、外周6面を発泡スチロールで覆い簡易な断熱を行い、供試体中心温度と外気温を測定した。

### 3. 断熱温度上昇試験の結果および考察

#### 3.1 マスブロック法による断熱温度上昇の推定

文献4)によれば、コンクリート中の熱伝導速度はマスブロック供試体の表面からの熱の逸散速度に比べて遥かに大きく、供試体内での温度分布は、ほぼ均一となる。このため、マスブロック供試体の熱収支は式(2)で表すことができる。

$$\rho c V \frac{dQ(t)}{dt} - Sh(T_{mass} - T_{out}) = \rho c V \frac{dT_{mass}}{dt} \quad (2)$$

ここで、 $\rho c$ :コンクリート密度(2300kg/m<sup>3</sup>)と比熱(1.05kJ/kg°C)、 $V$ :供試体体積(0.064m<sup>3</sup>)、 $Q(t)$ :断熱温度上昇量(°C)、 $S$ :供試体表面積(0.96m<sup>2</sup>)、 $h$ :熱伝達率(W/m<sup>2</sup>°C)、 $T_{mass}$ :供試体中心温度(°C)、 $T_{out}$ :外気温(°C)

熱伝達率 $h$ は、式(2)において $T_{mass}$ と $T_{out}$ の実測値から得られた $Q(t)$ の計算値と、断熱法で得られた断熱温度上昇量の差が最小となるように最小二乗法により求めた。

断熱法およびマスブロック法の温度測定結果の一例(H35F20)を図-2に示す。図にはマスブロック法の温度測定値を基に式(2)より断熱温度上昇量を逆算した結果(熱伝達率 $h$ は0.36W/m<sup>2</sup>°C)を併せて示したが、断熱法の測定値とマスブロック法から逆算した値は精度良く一致する結果となった。

#### 3.2 混和材利用早強コンクリートの断熱温度上昇特性について

熱伝達率を $h=0.36W/m^2°C$ とし、式(2)を用いてマスブロック法より断熱温度上昇量を求めた結果を図-3に示す。図には、文献1)に式(3)として示される断熱温度上昇特性に関する予測式(以下、現予測式)を併せて示す。

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-rt}) \quad (3)$$

表-2 実験水準

試験法	打込み温度(°C)	コンクリート配合			
		H40	H35 F20	H35 B430	H35 B650
断熱法	20		○		
マスブロック法	20	○	○	○	○

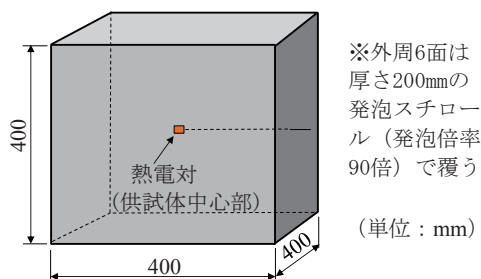


図-1 マスブロック供試体

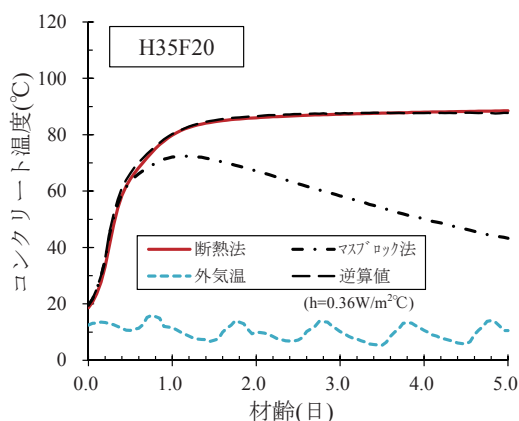


図-2 断熱温度上昇試験の結果

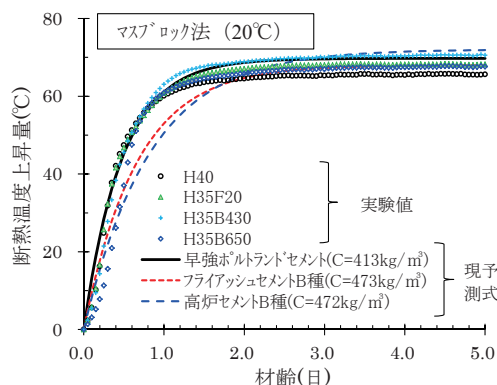


図-3 実験値と現予測式の対比

ここで、 $Q_{\infty}$ ：終局断熱温度上昇量， $r$ ：温度上昇速度定数

図-3中の早強コンクリートH40に着目すると、実験で得られた温度履歴は早強ポルトランドセメントの現予測式に近いことが確認できる。一方、混和材利用早強コンクリートH35F20、H35B430、H35B650の温度履歴はフライアッシュセメントB種および高炉スラグセメントB種の現予測式とは乖離し、早強コンクリートH40と相似形となることがわかる。つまり、混和材利用早強コンクリートの断熱温度上昇特性は、混合セメントの現予測式を適用することができないものの、早強コンクリートの予測式を利用できる可能性があるといえる。

### 3. 3 断熱温度上昇特性の回帰結果

断熱温度上昇特性の予測式としては前出の式(3)のほかに、文献2)に示される式(4)がある。

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-r(t-t_0)}) \quad (4)$$

ここで、 $t_0$ ：発熱開始材齢 (日)

この式(4)は発熱開始材齢 $t_0$ を考慮するものであり(以下、 $t_0$ 考慮)、一方、式(3)は発熱開始材齢 $t_0$ を考慮しないものである(以下、 $t_0$ 未考慮)。そこで、今回得られた実験値をもとに、式(3)および式(4)を適用して回帰分析により得られた断熱温度上昇量を図-4に示す。図より、発熱開始材齢 $t_0$ を考慮した方が実験値をより良く評価できることがわかる。また、 $t_0$ 考慮の回帰結果に着目すると、H35F20については発熱開始材齢が早強コンクリートH40と同程度であるのに対し、H35B430とH35B650は早強コンクリートH40より発熱開始材齢が0.03~0.10日遅れる結果となった。なお、 $t_0$ は実験値を回帰して算定し、パラメータとして与えている。

また、上記の回帰結果を発熱開始材齢と断熱温度上昇特性値との関係として整理した結果を図-5に

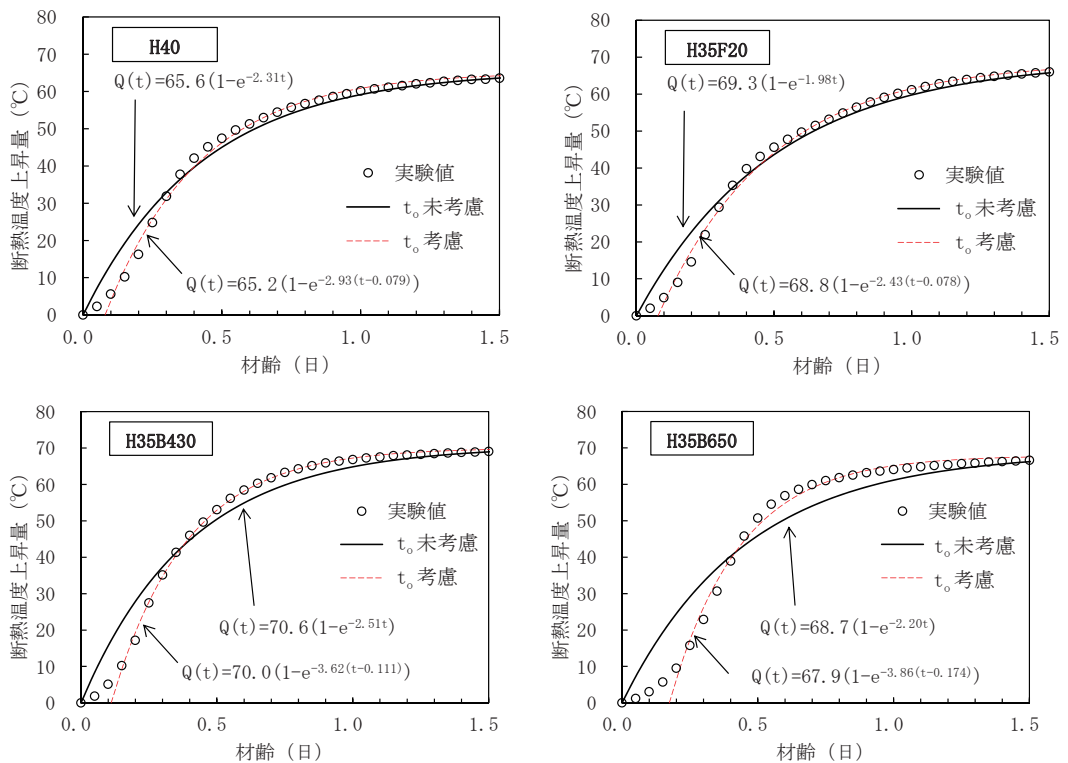


図-4 断熱温度上昇特性の回帰結果

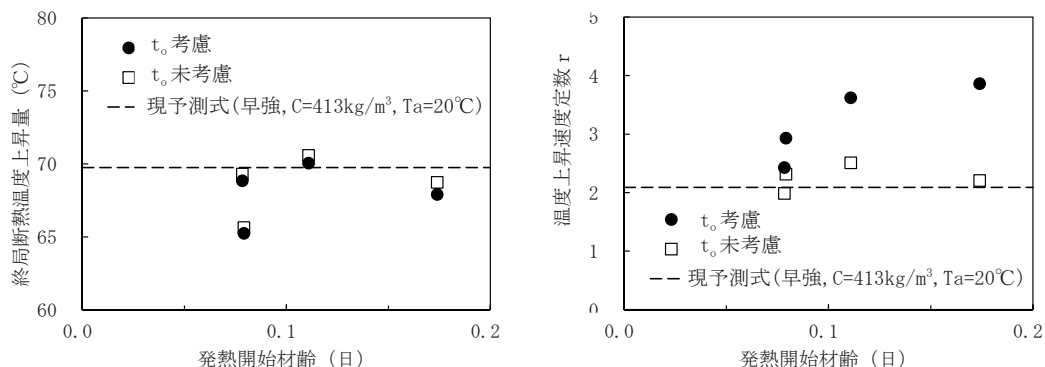


図-5 終局断熱温度上昇 (左) と温度上昇速度定数 (右) の算出結果

示す。図中にはH40の単位セメント量 ( $C=413\text{kg/m}^3$ ) を用い打込み温度 $20^\circ\text{C}$ における早強ポルトランドセメントの現予測値を併せて示した。左図の終局断熱温度上昇量 $Q_\infty$ より、いずれの配合も現予測式に近く、かつ、 $t_0$ 考慮、 $t_0$ 未考慮にかかわらず回帰結果はほぼ同値となることが確認できた。次に右図の温度上昇速度定数  $r$  を見ると、 $t_0$ 未考慮とした場合は現予測式に概ね一致するのに対し、 $t_0$ 考慮の場合には発熱開始材齢が遅れるにつれ、温度上昇速度定数  $r$  は現予測式と乖離した。

#### 4. まとめ

本検討を通じ、次のことが確認された。

- 1) マスブロック法の温度測定値を基に式(2)より断熱温度上昇量を逆算した結果 (熱伝達率  $h=0.36\text{W/m}^2\text{C}$ )、断熱法の測定値とマスブロック法から逆算した値は精度良く一致する結果となった。
- 2) 混和材利用早強コンクリートの断熱温度上昇量(H35F20, H35B430, H35B650)は、混合セメントの現予測式とは乖離し、強度発現が同程度の早強コンクリートの現予測式と相似形になった。
- 3) 今回実験を行ったコンクリートの断熱温度上昇特性値を回帰分析により求めた結果、発熱開始材齢  $t_0$  を考慮しない場合には温度上昇速度定数  $r$  は現予測式と概ね一致するが、発熱開始材齢  $t_0$  を考慮とした場合は現予測式と乖離する。

本検討は、(独)土木研究所、(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会ほか国内7 機関による共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の一環として実施した。

#### 【参考文献】

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[設計編：標準]，pp.314-318，2013.3
- 2) 日本コンクリート工学会：マスコンのひび割れ制御指針2008，pp.46-56，2008.11
- 3) 日本コンクリート工学会：品質評価試験方法研究委員会報告書，pp.71-72，1998.12
- 4) 国土交通省土木研究所材料施工部コンクリート研究室・(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会共同研究報告書第266号：現場打ち高強度コンクリート部材の設計施工法の開発に関する共同研究報告書—現場打ち高強度コンクリート施工マニュアル (案) 一，pp.119-122，2001.3