

混和材利用早強コンクリートの断熱温度上昇量の予測

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
 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
 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と熱が増大し、これに起因する初期ひび割れの発生が懸念される。しかし、既往の技術指針^{1)・2)}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、PC用コンクリートを対象とした断熱温度上昇試験を実施し、混和材利用早強コンクリートの断熱温度上昇特性を予測することを試みた。

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40N/mm²と材齢3日のプレストレス導入時強度30N/mm²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H40F20とH35F20、高炉スラグ微粉末4000で30%としたH40B430とH35B430、高炉スラグ微粉末6000で50%としたH40B650とH35B650の配合を選定した。混和材利用率とは式(1)による。

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

ここで、UR：混和材利用率(%), SCM：単位混和材量(kg/m³), C：単位セメント量(kg/m³)。

混和材利用早強コンクリートの水結合材比(W/B)は、早強コンクリートと同じW/B=40%と、プレスト

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 (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	H40F20			(50.0)	F	20		83	330	734	
	H40B430			(57.1)	B4	30		124	289	749	
	H40B650		(80.0)	B6	50	206		206	745		
	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 (3.14)，F：フライアッシュII種 (H40F20：2.30, H35F20：2.08)，B4：高炉スラグ微粉末 4000 (2.89)，B6：高炉スラグ微粉末 6000 (2.91)，S：砂 (2.56)，G：砕石 5号 (2.67) と砕石 6号 (2.67) を質量比で1：1の混合使用。各材料の括弧内は、密度 (g/cm³) を示す。

レス導入時強度を確保可能な W/B=35%とした。また、スランプ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%が得られるように化学混和剤の使用量を調整した。

実験水準を表-2に示す。断熱温度上昇試験は断熱法³⁾とマスブロック法⁴⁾の2方法を用い、打込み温度は前者で約 20℃, 後者で約 20℃～35℃まで3段階に変化させた。断熱法はオイル循環式の断熱温度上昇試験装置を用い、各コンクリート試料の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的な断熱を行い、供試体中心温度と外気温を取得し、逆解析することで断熱温度上昇量を求めた⁴⁾。

3. 断熱温度上昇試験の結果

打込み温度20℃に着目し、シリーズIとシリーズIIの断熱温度上昇試験の結果を図-2に示す。シリーズIIのH35F20に着目すると、断熱法とマスブロック法の断熱温度上昇量はほぼ一致することが確認された。また、両シリーズとも混和材利用による発熱の遅延はあまり認められず、早強コンクリートH40と混和材利用早強コンクリートの温度履歴は概ね相似形となっていることがわかる。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、早強コンクリートの断熱温度上昇特性式を利用できる可能性があるといえる。

上述の通り、今回、水和遅延効果があまり認められない混和材を利用することから、断熱温度上昇特性は、文献1)に示される式(2)により評価できると考えられる。

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-rt}) \quad (2)$$

ここで、 Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量, r : 温度上昇速度定数。

この式(2)によって図-2の測定結果を回帰分析し、断熱温度上昇特性値を求めた結果を表-3に示す。終局断熱温度上昇量 Q_{∞} に着目すると、シリーズIで早強コンクリートH40と混和材利用早強コンクリートH40F20, H40B430, H40B650とは概ね同程度の値 (-1.3～+1.3℃) であるのに対し、シリーズIIでは早強コンクリートH40に比べ、混和材利用早強コンクリートH35F20, H35B430,

表-2 実験水準

シリーズ	配合	実験法/打込み温度			
		断熱法		マスブロック法	
		20℃	20℃	25℃	35℃
I	H40	○			
	H40F20	○			
	H40B430	○			
	H40B650	○			
II	H40		○	○	○
	H35F20	○	○	○	○
	H35B430		○	○	○
	H35B650		○	○	○

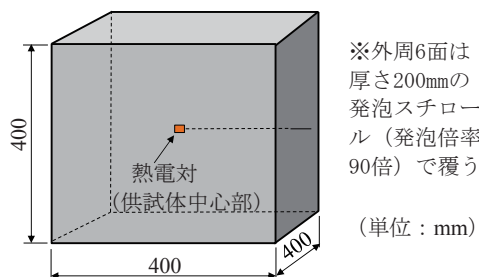


図-1 マスブロック供試体

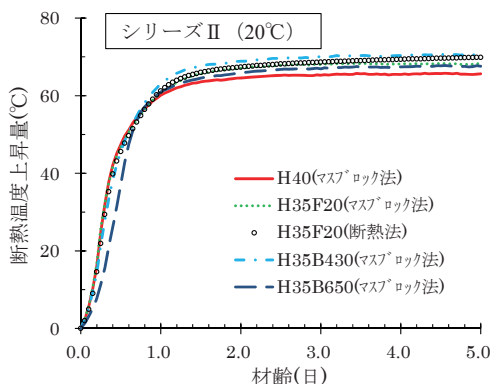
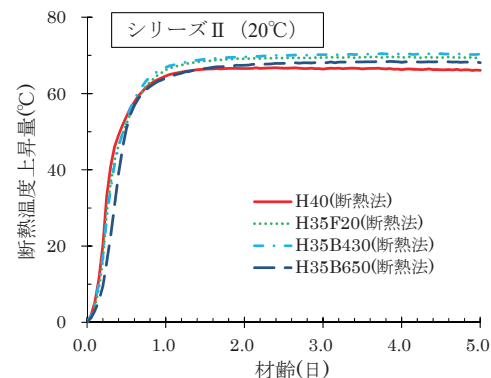


図-2 断熱温度上昇量の測定結果

H35B650は+3.1~+5.0℃といずれも高くなっている。つまり、今回検討した混和材利用早強コンクリートは、同じ結合材量である早強コンクリート並みの水和発熱量を有するといえる。

4. 混和材利用早強コンクリートの断熱温度上昇特性の予測

4. 1 終局断熱温度上昇量 Q_{∞}

3章で述べたように、混和材利用早強コンクリートの断熱温度上昇量は、早強コンクリートの設計値を適用できる可能性がある。文献1)では、式(3)が提示されている(以下、現予測式)。

$$Q_{\infty} = a + bT_a \quad (3)$$

ここで、 $a=15.9+0.135C$ 、 $b=-0.106+0.0000257C$ 、 T_a : 打込み温度(℃)。

しかし、単位セメント量が 400kg/m^3 を超えると、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} は単位セメント量の一次式で予測されるよりも小さくなるとの指摘もある⁴⁾。そこで、文献4)に示される早強コンクリートの終局断熱温度上昇量 Q_{∞} に関するデータをもとに、式(4)に示す通り、単位セメント量の累乗式にて回帰した(以下、改良式)。

$$Q_{\infty} = aC^b \quad (4)$$

ここで、 $a=1.49$ 、 $b=0.63$ 。

図-3は今回の実験値(H40)と現予測式または改良式を対比したものであるが、今回の実験値は改良式にほぼ一致することがわかる。また、混和材利用早強コンクリートは、単位セメント量 C を式(5)に示す換算結合材量 Bc として読み替える。

$$Bc = k_{ATR} SCM + C \quad (5)$$

ここで、 Bc : 換算結合材量、 k_{ATR} : 断熱温度上昇特性に関する混和材寄与率。

表-4は今回の実験値から現予測式あるいは改良式に合致するように k_{ATR} を逆算した結果である。現予測式により算出される k_{ATR} は $0.34\sim 0.95$ となり、シリーズIとシリーズII(水結合材比)や混和材種類の違いが見られるのに対し、改良式により算出される k_{ATR} は $0.79\sim 1.07$ と差異が小さい。

4. 2 温度上昇速度定数 r

表-3中の温度上昇速度定数 r を換算結合材量 Bc との関係として整理した結果を図-4に示す。混和材利用の有無によらずデータのばらつきが見

表-3 断熱温度上昇特性値の回帰結果

シリーズ	配合	T_a (°C)	Q (°C)	r
I 20°C	H40	20.0	66.8	1.50
	H40F20	20.7	65.5	1.32
	H40B430	21.5	66.1	1.35
	H40B650	21.6	68.1	1.30
II 20°C	H40	19.0	65.6	2.31
	H35F20	19.5	69.3	1.98
	H35B430	19.2	70.6	2.51
	H35B650	16.8	68.7	2.20

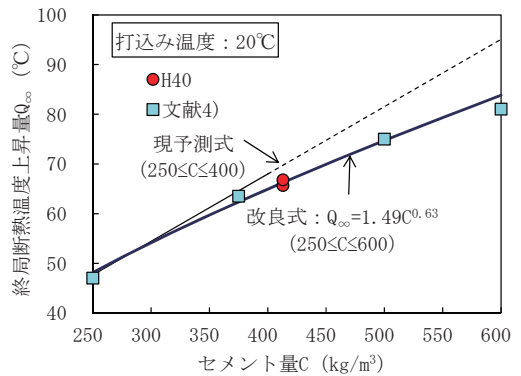


図-3 早強コンクリートの終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の実測値と予測式の対比

表-4 混和材寄与率 k_{ATR} の算定結果

シリーズ	配合	現予測式式(3)	改良式式(4)
I 20°C	H40F20	0.63	0.84
	H40B430	0.79	0.95
	H40B650	0.95	1.07
II 20°C	H35F20	0.34	0.79
	H35B430	0.63	0.96
	H35B650	0.71	0.89

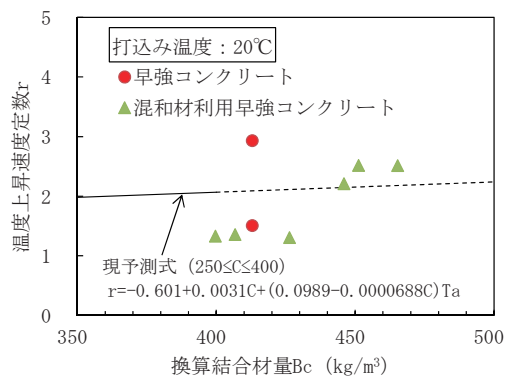


図-4 混和材利用の有無が温度上昇速度定数 r に与える影響

られるものの、現予測値の適用範囲を延長した値に近い結果となることが確認された。

4. 3 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} および温度上昇速度定数 r の温度依存性

コンクリートの打込み温度を変化させた場合の断熱温度上昇特性値を3章に示した方法で求めた結果を図-5に示す。左図の終局断熱温度上昇量 Q_{∞} に着目すると、早強コンクリートH40はセメント量 413kg/m^3 とした場合の改良式と概ね一致し、混和材利用早強コンクリートH35F20, H35B430, H35B650は換算結合材量 472kg/m^3 ($k_{ATR}=1.0$) 程度以下となったが、いずれにしても打込み温度が変化しても Q_{∞} はほとんど変わらない結果となった。また、右図の温度上昇速度定数 r については、打込み温度が高くなるにしたがい r も増大し、概ね現予測式に近い結果が得られた。

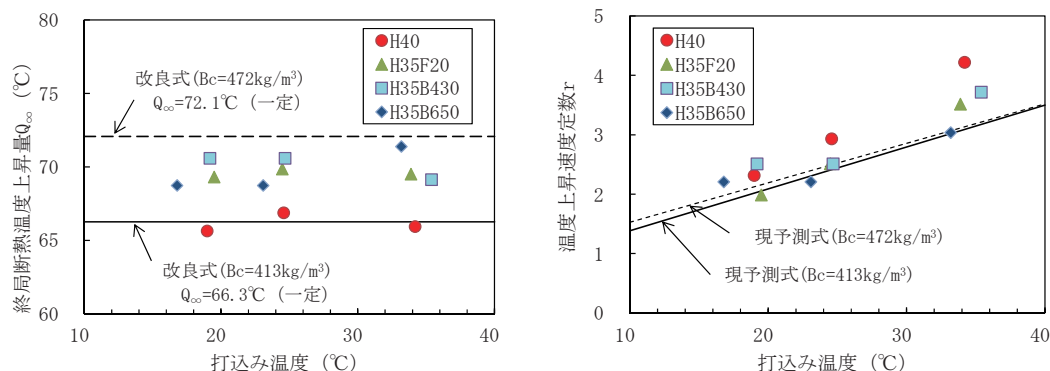


図-5 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} (左) および温度上昇速度定数 r (右) の温度依存性

5. まとめ

本検討を通じ、次のことが確認された。

- 1) 今回対象とした早強コンクリートの終局断熱温度上昇量 Q_{∞} は、単位セメント量 C の一次式として表される現予測式よりも小さく、既往の実験データより単位セメント量 C の累乗式として求めた改良式 (適用範囲: $250 \leq C \leq 600\text{kg/m}^3$) にほぼ一致する。
- 2) 今回対象とした混和材利用早強コンクリートの断熱温度上昇量 Q_{∞} は、早強コンクリートと相似形であり、混和材寄与率 ($k_{ATR}=0.79 \sim 1.07$) を考慮した換算結合材量 B_c に読み替えた改良式により断熱温度上昇量を予測し得る。また、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の温度依存性は早強コンクリートおよび混和材利用早強コンクリートともほとんど認められない。
- 3) 今回対象とした混和材利用早強コンクリートの断熱温度上昇速度 r は、混和材の種類や打込み温度によらず、早強コンクリートの現予測式の適用範囲を延長した値と概ね一致する。

なお本検討は、(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