

# 各種硬化促進材料を用いたコンクリートの強度発現性と発熱特性

## Strength and Heating Characteristics of Concrete Using Various Curing Promoting Material

恩田 陽介 YOSUKE ONDA  
 石澤 正大 MASAHIRO KOKUZAWA  
 佐々木 亘 WATARU SASAKI  
 谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI

本研究では、主として PC 上部工に用いるコンクリートを対象とし、各硬化促進材料の適用性の基礎的検討として、初期材齢における強度発現性ならびに発熱特性について検討を行った。その結果、早強剤ならびに各種混和材には凝結促進硬化が確認され、凝結速度が早まり、材齢初期における強度が高まったが、材齢長期における強度は変化が見られなかった。簡易断熱温度上昇試験における断熱温度上昇量の推定値は添加しない材料に比べて、若干の増加傾向が見られた。

キーワード：圧縮強度，初期強度，強度発現，凝結，簡易断熱，早強剤，促進，

In this study, mainly as a basic study of the applicability of various curing promoting material to the concrete for PC superstructures was examined about strength development, as well as heat generation characteristics in the initial material age. As a result, condensation promoting effect has been observed in the early-strength agents and various admixtures. Condensation rate was quickened and strength in the age of initial has increased. However, strength in the age of long-term showed no effect, it was observed that estimated value of the adiabatic temperature rise in a simple adiabatic temperature rise test increase slightly for the composition without additive.

**Key Words:** compressive strength, initial strength, setting, simple heat insulation, Hardening accelerator, acceleration,

### 1. はじめに

我が国では、東日本大震災以降の震災復興や東京オリンピックに向けた大規模開発が避けられない課題となっており、建設需要は多いにもかかわらず建設業における人手不足は改善を見ないままである。そのため、以前にも増して施工サイクルの効率化が求められている。

コンクリートの施工・製造の現場では、寒冷期の初期凍害を防止する場合やコンクリート二次製品の型枠の回転を早める場合に硬化促進剤や早強剤<sup>1)</sup>が用いられており、関心が高まっている。

PC 橋梁施工の現場では、コンクリート打設後の初期強度は、型枠の脱型時期やプレストレスの導入時期に影響し、強度発現の遅いコンクリートは工期の延長に繋がる。そのため、現場においては早強セメントを結合材として用いる場合が少なくない。しかし、寒冷期においては外気温の影響で強度発現に遅延が生じる。初期凍害を

防止するためにヒーター等でコンクリートの加熱養生を行う必要があるが、現場条件によっては施工が困難となる場合もある。

そこで本研究では、主として PC 上部工に用いるコンクリートを対象とし、早強剤および各種混和材の適用性の基礎的検討として、初期材齢における強度発現性ならびに発熱特性について検討を行った。

### 2. 実験概要

#### (1) 使用材料と配合

今回の実験で用いた材料を表-1、配合を表-2に示す。本実験では、コンクリートの初期強度発現性を高めるため、C-S-H ナノ粒子により水和反応が促進される液体系の化学混和剤としてカルシウムシリケート化合物のナノ粒子を添加する早強剤<sup>1)</sup>(以下、MXS)と、粉体系の、エトリンタイトの生成と水和促進作用により強度発

表-1 使用材料

材料	記号	物性
水	W	水道水
セメント	H	密度3.13g/cm <sup>3</sup>
シリカフェューム	SF	比表面積16.5m <sup>2</sup> /g,密度2.25g/cm <sup>3</sup>
	FCN	膨張性早期脱型混和材,密度2.90g/cm <sup>3</sup>
混和材	SN	高強度コンクリート用混和材,密度2.55g/cm <sup>3</sup>
	S1	千葉県富津市産山砂, 密度2.63g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S2	茨城県桜川市産砕砂, 密度2.63g/cm <sup>3</sup>
	G	砕石2005,茨城県桜川市産,密度2.66g/cm <sup>3</sup>
混和剤	SP1	高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物)
	SP2	高性能減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物)
	AE1	AE剤 (変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤)
	AE2	空気量調整剤 (ポリアルキレングリコール誘導体)
	MXS	早強剤 (カルシウムシリケート化合物)

表-2 配合

配合名	W/B	s/a	単位量 kg/m <sup>3</sup>								混和剤 (B×wt%)								
			W	B				S		G	SP1	SP2	MXS	AE1	AE2				
				H	SF	FCN	SN	S1	S2										
H40	40.0	43.0	160	400	0	0	0	302	453	1011	0.7	0	0.0	0.02	0				
H40MXS	40.0	43.0	160	400	0	0	0	302	453	1011						0	2.0	0	0
H40FCN	40.0	43.0	160	380	0	20	0	302	453	1011						0	0.0	0	0
H40SN	40.0	42.7	160	340	0	0	60	298	447	1011						0	0.0	0	0
HSF22	22.0	-	185	757	84	0	0	0	778	0	0	0.0	0	0	0				
HSF22MXS	22.0	-	185	757	84	0	0	0	778	0	0	1.1	2.0	0	0.14				
HSF22FCN	22.0	-	185	727	84	30	0	0	776	0	0	0.0	0	0	0				

表-3 硬化促進材料

記号	性状	概要
MXS	液体	カルシウムシリケート化合物のナノ粒子が種結晶として作用し硬化を促進する
FCN	粉体	CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SO <sub>3</sub> が主成分であり、エトリンガイト生成により硬化を促進する
SN	粉体	石膏とシリカフェュームが主成分であり、蒸気養生にて強度が発現する

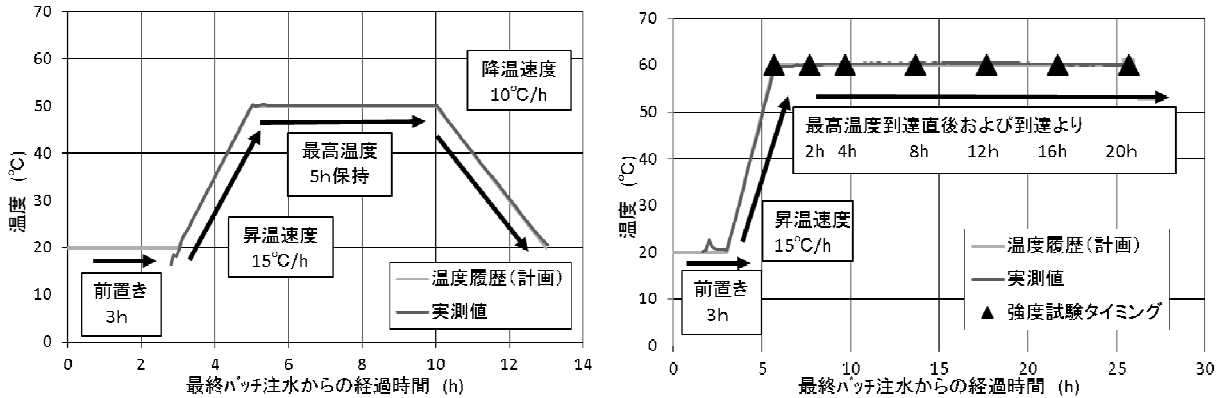


図-1 蒸気養生の温度履歴 (左: H40シリーズ 右: HSFシリーズ)

表-4 養生条件

配合	養生方法	
	封緘	蒸気
H40	12h, 18h, 24h, 1d, 3d, 7d, 28d	終了直後, 3d, 7d, 14d
HSF	12h, 18h, 24h, 1d, 3d, 7d, 28d	図-1参照

現をする膨張性早期脱型混和材<sup>2)</sup>(以下, FCN), 主にコンクリートパイル等に使用され, オートクレーブ養生の省略が可能とされている, 石膏とシリカフェュームを主成分とする高強度コンクリート用混和材<sup>3)</sup>(以下, SN)を用いた。硬化促進材料について表-3にまとめて記す。

評価の対象は, PC 部材に用いる設計基準強度が40~

50N/mm<sup>2</sup>程度のコンクリート (H40シリーズ: H40, H40MXS, H40FCN, H40SN) と, 厚さが薄いプレキャスト PC 部材を想定した設計基準強度80~100N/mm<sup>2</sup>程度の高強度繊維補強コンクリート<sup>4)</sup>から粗骨材と繊維を除いた高強度モルタル (HSFシリーズ: HSF22, HSF22MXS, HSF22FCN) 2種類とした。使用量はすべて標準使用量とし, MXS はベースとなるH40とHSF22の粉体比2%を単位水量の一部とした。混和材はいずれも結合材とみなし, FCNはH40で20kg/m<sup>3</sup>, HSF22で30kg/m<sup>3</sup>を, SNはH40で結合材中の15%をセメントに置換して用いた。

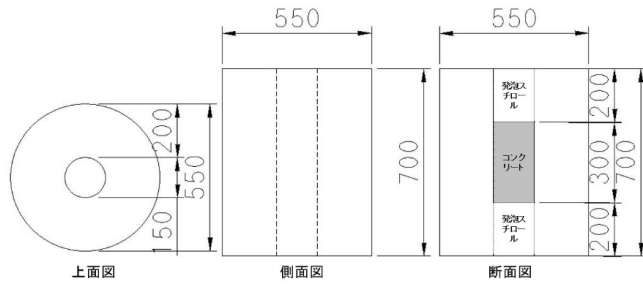


図-2 簡易断熱型枠 (単位:mm)

## (2) 試験内容

本研究では、コンクリートおよびモルタルの品質に関する試験として、凝結試験、圧縮強度試験、簡易断熱温度上昇試験を実施した。

凝結試験では、JIS A 1147 に準拠し、20℃の恒温室内で試験を行った。H40 シリーズではウェットスクリーニングによりモルタル試料を採取した。HSFシリーズではウェットスクリーニングを行わず高強度モルタルをそのまま試料とした。

圧縮強度試験では、JIS A 1132 に準拠して、供試体を作製し、JIS A 1108 に準拠して試験を行った。供試体は、H40 シリーズにφ 100 × 200mm、HSFシリーズにφ 50 × 100mmの円柱供試体を使用した。養生方法は恒温室内(温度20 ± 2℃)での封緘養生、および蒸気養生とした。養生の方法と試験材齢を表-4に示す。蒸気養生により与えた温度履歴および試験のタイミングを図-1に示す。蒸気養生の前置き時間は最終バッチより3時間とした。蒸気養生後の供試体は封緘養生と同様に保管した。

簡易断熱温度上昇試験では、H40 シリーズについて発熱性状の確認として、発泡スチロール製の簡易断熱型枠(以下、簡易断熱型枠)を用いて、内部にコンクリートを打ち込み、コンクリート内部の中心と側面の温度測定を行った。簡易断熱型枠の寸法を図-2に示す。また、既往の研究<sup>5)</sup>を参考に、この簡易断熱型枠の熱損失について求めた。φ 150 × 300mmの円柱供試体を、60℃にて存置し、内部温度が均一になるように十分加熱した後、簡易断熱型枠に挿入し、20℃60%の恒温室内での経時変化を測定したものから放熱量を求めた。ここで、簡易断熱試験の気温との温度差に応じた温度降下勾配データから、断熱温度上昇を推定した。

## 3. 実験結果と考察

### (1) 凝結試験

H40 シリーズと HSF シリーズの凝結試験結果を図-3に

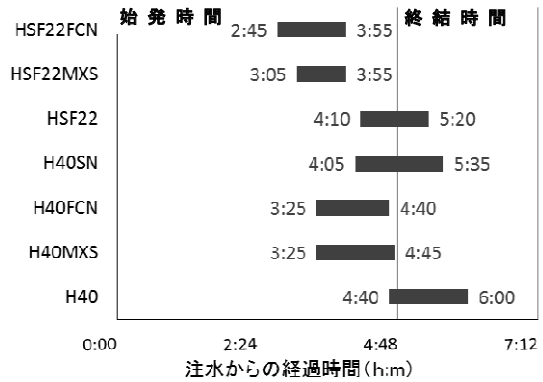


図-3 凝結試験結果

示す。図-3の横軸には注水からの経過時間、縦軸には配合を示している。

H40 シリーズでは、H40MXSとH40SNにおいて凝結時間が早くなっており、両者の比較においてはほぼ同様な凝結促進効果が見られた。HSFシリーズにおいても同様に凝結促進効果が見られるが、HSF22FCNの凝結始発がHSF22MXSよりも早かった。

各混和材材料においては、MXSを用いた配合の始発時間は、どのシリーズも添加しない配合と比べて早く始発を迎え、H40MXSで75分、HSF22MXSで65分の始発時間の短縮となった。また、始発から終結に至るまでの時間は、H40MXSには影響は見られなかったが、HSF22MXSで50分と、HSF22に対して15分短くなった。既往の文献<sup>1)</sup>によると、C-S-H系早強剤ではW/C40%の配合で添加量2%とした場合、始発時間が約1時間の短縮、始発から終結に至るまでの時間も短くなる傾向があったとされており、本実験においても同等の効果があった。

FCNを用いた配合では、どちらのシリーズにおいても早く始発を迎え、始発時間はH40FCNで75分、HSF22FCNで85分の短縮となった。既往の文献<sup>2)</sup>においては、本研究とは雰囲気温度が異なり5℃の低温環境での結果が示されているが、その結果は20kg/m<sup>3</sup>の添加で始発時間に90分の短縮があったとされている。今回の実験では20℃環境において実施したが、凝結時間は既往の文献<sup>2)</sup>に対して、添加量が同量のH40シリーズでは短縮効果は小さく現れた。一般に、コンクリートの凝結時間は環境温度の影響を受け、環境温度が低い場合にはコンクリートの凝結時間は遅延する。今回の実験と既報を比較して、凝結時間については環境温度やW/Cの相違から環境温度による影響を評価することはできないが、凝結時間の短縮効果は環境温度による影響を受けないものと推察される。

H40SNでは、H40に対して、始発は35分早まったが、始発から終結に至るまでの時間は10分長くなった。始発

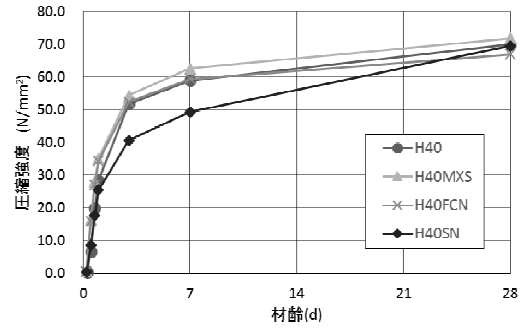
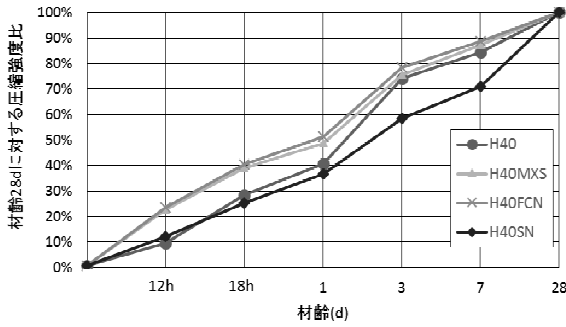


図-4 圧縮試験結果 (H40 シリーズ 左図: 材齢 - 材齢 28d に対する強度比, 右図: 材齢 - 強度)

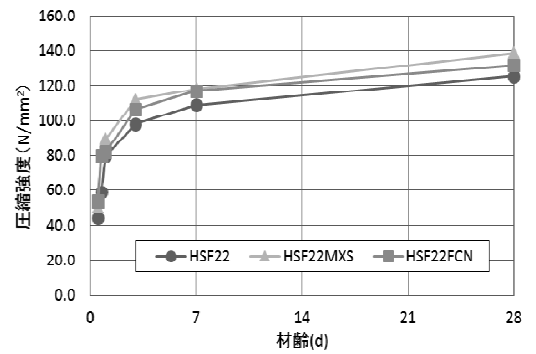
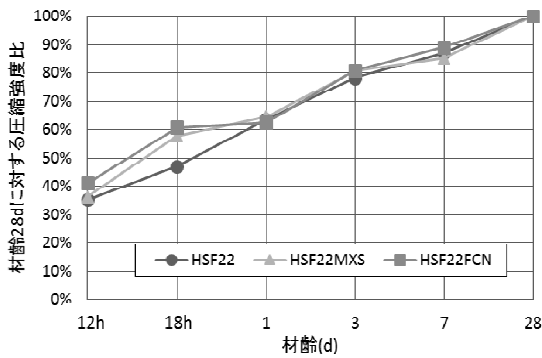


図-5 圧縮試験結果 (HSF シリーズ 左図: 材齢 - 材齢 28d に対する強度比, 右図: 材齢 - 強度)

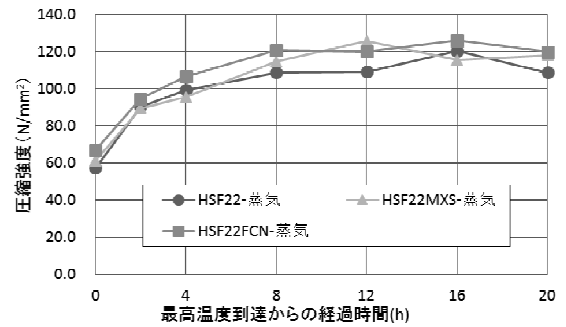
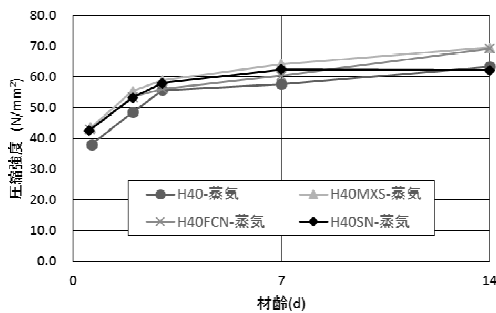


図-6 圧縮試験結果 (蒸気養生 左図:H40シリーズ, 右図:HSFシリーズ)

の早まりについては、これは SN の主成分が石膏であるため、無混和と比較してエトリンガイトを多量に生成したことによる凝結促進と SN に含まれるシリカフェームによる凝結促進効果であると推察する。また、終結に至るまで時間が長くなったのは、主成分である無水石膏による凝結遅延であると推察する。

## (2) 圧縮強度試験

### a) 封緘養生

図-4に H40 シリーズ, 図-5に HSF シリーズの試験結果をそれぞれ示す。図中の左には材齢と材齢 28d との強度比の関係, 図中の右には材齢と強度の関係を示している。

図-4より, H40MXS と H40FCN では材齢 24h までの強度発現が, 他配合に比べ大きく, 材齢 28d の強度比で約

50%の強度発現があることがわかる。これらはどちらの配合も水和促進効果によるものと考えられる。

H40SNでは初期強度は他配合に比べ低かったが, 材齢 7d以降に強度が増進し, 材齢 28d においては他配合と同程度の強度発現があった。SN は主成分が石膏およびシリカフェームであり, そのうちのシリカフェームは, ガラス質シリカを有しており, セメントの水和によって生成される水酸化カルシウムとの間にポズラン反応を示す。材齢7d以降にポズラン反応が進行して強度の増進が見られたものと推察する。

H40では, 材齢1d以降, 材齢3dまでに強度増進が見られ, 材齢3dでH40MXSやH40FCNと同程度の強度比が得られ, それ以降は材齢 28d までの強度比はほぼ同様に推移した。

材齢28日の強度においてはどの配合もほぼ同程度の値

表-5 最大温度と終局断熱温度上昇量

配合		H40	H40MXS	H40FCN	H40SN
実測値	$T_{max}$ (°C)	56.7	60	60.4	54.6
	時間 ( $T_{max}$ )	16:50	14:20	14:00	17:30
JCI式	$Q_{\infty}$ (°C)	68.0	68.0	65.2	59.8
推定値	$Q_{\infty}$ (°C)	65.1	68.4	66.4	64.0
誤差		-4.2%	0.6%	1.8%	6.9%

となっており、長期強度への影響は見られなかった。以上より、H40配合においては、混和材料の種類によって強度の発現タイミングが異なるが、各種硬化促進材料の長期強度への影響は少ないものと考えられる。

図-5(左)より、HSF22MXS および HSF22FCN では、初期材齢から HSF22 より高い強度を発現し、材齢 18h で約60%の強度発現があった。HSF22では材齢1dで強度比が他配合と近い値となり、その後はどの配合も同様な強度発現を示した。

図-5(右)より、圧縮強度は HSF22MS が最も大きく、その後、HSF22FCN、HSF22の順番に大きかった。その差はどの材齢においても、それぞれ 5N/mm<sup>2</sup> 程度であった。これらより、混和材料を添加した配合の圧縮強度は若干ながら大きい傾向を示した。

b) 蒸気養生

図-6の左には H40 シリーズ、右には HSF シリーズの試験結果を示す。

H40 シリーズでは、どの配合も蒸気養生を行うことで 40N/mm<sup>2</sup> 程度の強度発現があった。蒸気養生終了後も強度が増進し、材齢 14d で 60~70N/mm<sup>2</sup> の強度が得られ、

MXS と FCN を用いた配合では H40 および H40SN より材齢 14d の強度が高くなった。この理由として、前置き時間の影響が考えられる。当日の練混ぜ順序は H40、H40MXS、H40FCN、H40SN の順であり、それぞれ約40分のタイムラグが発生している。そのため、蒸気養生の前置き時間も最大で約2時間の差が生じている。蒸気養生におけるコンクリートの強度発現性は前置き時間に影響を受け、既往の文献<sup>6)</sup>においては前置き時間を5hと長くすることで、強度を高めることができると報告されている。今回の実験では、各配合の前置き時間に最大2時間の差があり、最も前置き時間の短かった H40SN では材齢 14d の強度が低く現れたと考えられる。

また、H40SN では、封緘養生時の強度は他配合と比較して低い値を示したのに対して、蒸気養生時では同程度の値が得られている。これは蒸気養生を行ったことで水和反応が促進し、強度発現したと推察される。

図-6(右)は、蒸気養生の最高温度到達からの時間と圧縮強度の関係を示す。どの供試体も最高温度到達後 8

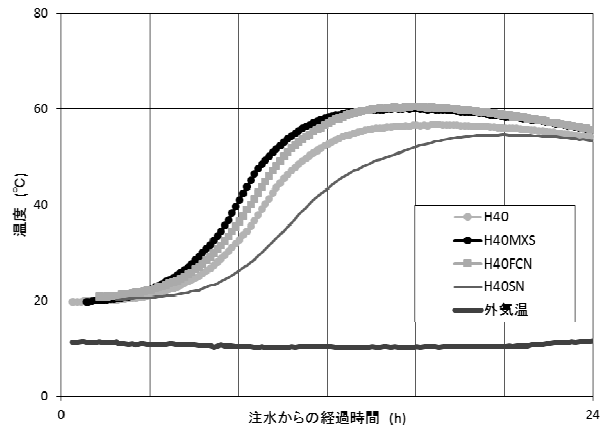


図-7 簡易断熱温度上昇試験結果

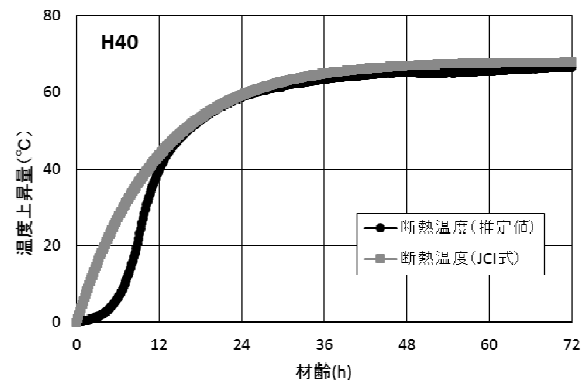


図-8 断熱温度上昇量の推定 (一例)

h までは強度は増進したが、8 h 以降の強度増進は見られず、圧縮強度はほぼ横ばいとなった。

HSF シリーズにおいても、H40 シリーズと同様に前置き時間の影響を受けていると考えられる。HSF シリーズにおける当日の練混ぜ順序は HSF22、HSF22MXS、HSF22FCN の順であり、それぞれ注水時刻に約1時間の差が生じた。そのため、HSF22 と HSF22FCN では前置き時間に2時間の差が生じているが、各配合における強度には差があまり見られていない。これは図-3より HSF22FCN が2時間45分で凝結始発を迎えており、蒸気養生の温度に耐えるに十分な強度発現があったことによるものと推察される。

(3) 簡易断熱温度上昇試験

図-7にコンクリート温度と外気温の実測値を示す。表-5に最大温度とその到達時間、JCI式<sup>7)</sup>による終局断熱温度上昇量  $Q_{\infty}$ 、及び終局断熱温度上昇量  $Q_{\infty}$  の推定値、両者の誤差を示す。

ここで、終局断熱温度上昇量の推定値とは、今回の実験において用いた断熱型枠によるコンクリート温度の実測値から断熱型枠の放熱量による補正を行うことで求めた推定値である。図-8には、一例として、H40における断熱温度上昇量の推定値と JCI 式による値を示す。



今回の断熱型枠による簡易断熱温度上昇量の推定値は、混和材料の添加のないH40の結果で誤差が4.2%であり、温度は約3°C低くなるという結果であった。この推定値を断熱温度上昇試験の結果として取り扱うためには、さらなるデータの蓄積および断熱温度試験との整合性の確認が必要であると考えられる。

H40MXSおよびH40FCNの最大温度の到達時間はH40と比較して150分～170分早くなった。これらは、MXSとFCNが水和促進効果を有しており、MXSにおいてはC-S-Hのナノ粒子が種結晶として作用することによる水和促進<sup>1)</sup>により、また、FCNにおいては水和促進によるエトリンサイトとC-S-Hの多量生成によって、発熱速度が早まったためと考えられる。また、最大温度 $T_{max}$ はH40に対して3.3～3.7°C高くなった。簡易断熱型枠では、断熱材に発泡スチロールを用いており完全な断熱とは言えず外気温の影響を受ける。今回、用いた型枠はどの配合も同一形状、同一場所にて温度測定を行ったことから、ほぼ同様の外気温の影響を受けたと考えられると、H40MXS、H40FCNではコンクリート温度が増加しており、セメントペースト中の水和反応量も増加していると考えられる。

H40SNでは、最高温度はH40と比較して1.9°C低く、最高温度到達時刻は40分遅くなった。H40SNでは無水セッコウを添加したセメントペーストに見られるような<sup>8)</sup>エーライトの誘導期が長くなることによるピーク温度の遅延が見られた。しかし、無水セッコウを添加した場合に反応量が増大し温度が高くなることはなく、他配合に比べてピーク温度は低く現れた。これは、FCNと同様に、元々発熱量の大きい早強セメントに内割で置換しているため、最高温度が低くなったと考えられる。

#### 4. まとめ

早強剤および各種混和材を用いたコンクリートの初期材齢における強度発現と発熱特性を調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 本実験の範囲で用いた各種硬化促進材料では、凝結の始発、終結時間は短くなった。
- ② 各種硬化促進材料を用いた配合では、強度発現のタイミングに影響は見られるが、長期強度においては影響は見られなかった。
- ③ H40シリーズにおいて蒸気養生時の強度発現に前置き時間の影響が見られたが、HSFシリーズにおいては前置き時間の影響は見られなかった。その理由としてHSFシリーズでは凝結始発が早く、十分な強

度が確保できた上で蒸気養生が開始されたことによるものと推察された。

- ④ MXSとFCNでは水和促進により、最大温度到達時刻が早まり、最大温度も増加した。SNでは、石膏により最大温度到達時刻が遅くなり、セメント量の減少によって最大温度の低下が見られた。

以上より、各種硬化促進材料においては、その硬化促進メカニズム・材料特性の違い、使用量より、強度発現や発熱性状に影響があった。材料の選定においてはこれらを加味した上で適切に用いる必要があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 例えば、春日貴行、大野誠彦、井本晴丈、矢口稔:C-S-H系早強剤を使用したコンクリートの基本性能、土木学会第68回年次学術講演会、V-551、101-1102、20013.9
- 2) 樋口隆行、Duc Phuong NGUYEN、庄司慎、富岡茂:低温で打設し蒸気養生を行った早期脱型材配合コンクリートの物性、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.1、pp.1963-1968、2013.7
- 3) 例えば、坂井悦郎、渡辺芳春、清水久行、松永嘉久:無水セッコウ系混和材を用いた早期脱型コンクリートの性質、Vol.15、No.1、pp.297-302、1993
- 4) 佐々木亘、芦塚憲一郎、出口宗浩、谷口秀明:高強度コンクリートの力学特性に与える鋼繊維の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.1、pp.277-283、2013.7
- 5) 吉武勇、中村秀明、谷本俊夫、浜田純夫:現場利用可能なマスコンクリートの簡易断熱温度上昇測定法の提案、土木学会論文集、No.606/V-41、103-110、1998.11
- 6) 丸山晃平、宇治公隆、上野敦、大野健太郎:蒸気養生条件が相違するコンクリート製品の強度特性および細孔構造に関する研究、コンクリート工学会年次論文集、Vol.33、No.2、pp.571-576、2011
- 7) 日本コンクリート工学会:マスコンクリートのひび割れ制御指針2008、4章、P47
- 8) 松永嘉久:無水セッコウ系混和材によるコンクリートの高性能化と環境負荷低減、東京工業大学大学院博士論文、東京工業大学附属図書館学位論文データベース、2章、p13-14、2002.9.30