

# 水和熱抑制剤を用いたコンクリートの特性

## 基礎的性状と温度応力解析の一考察

川中 政美\* 高山 亨\* 安部 弘康\*\* 立山 創一\*\* 隅田 孝弘\*\*\* 高田 良章\*\*\*

### Properties of Concrete using a Hydration Heat Controlling Agent

A study on fundamental properties and thermal stress analysis of concrete using a hydration heat controlling agent  
by Masami KAWANAKA, Toru TAKAYAMA, Hiroyasu ABE  
, Sohichi TATEYAMA, Takahiro SUMIDA and Yoshiaki TAKATA

#### Abstract

A hydration heat controlling agent (TS below) was developed to inhibit temperature-cracking of mass concrete. TS is a chemical agent that reduces temperature-cracking by moderating the rate of hydration to reduce the maximum temperature of the members by releasing the heat of hydration. TS is an effective means in areas where low-heat cement materials are unavailable. Civil engineering structures are constructed of relatively massive components that often use B-type blast furnace cement. This report clarifies the features of TS use for B blast furnace cement and examines the conditions for practical thermal stress analysis.

#### 要 旨

マスコンクリートの温度ひび割れの抑制を目的に開発された水和熱抑制剤（以下 TS）は、水和速度を緩やかにして水和熱を放出することにより部材の最高温度を低減し、ひび割れを抑制する化学混和剤である。低熱系セメントを入手できない地域では、この TS は効果的な手段となる。比較的マッシブな部材となる土木構造物は、高炉セメント B 種（以下 BB）を用いる場合が多い。この BB に対する TS の特徴を明らかにするとともに、実用上の解析に用いる条件などについて検討したので報告する。

キーワード：水和熱抑制剤／マスコンクリート／高炉セメント／圧縮強度特性／温度応力解析

#### 1. はじめに

マスコンクリートは外部拘束を受けると温度ひび割れが発生しやすいため、一般にはコンクリートの温度上昇量の少ない低発熱性のセメントを用いて温度ひび割れの発生を抑制する対策が講じられている。しかし、地域によっては低発熱性のセメントの入手が困難な場合もある。水和熱抑制剤（以下、TS）は、セメントの水和反応を抑制し、水和速度を緩やかにすることによって放熱効果を利用し、コンクリートの温度上昇量を低減する混和剤である。本報は、このTSを用いたコンクリートの基礎的性状を確認するとともに、コンクリート模擬部材を作製し、

TSによるコンクリートの温度上昇量の低減効果を実験的に検証した。

#### 2. 実験概要

##### 2.1 水和熱抑制剤の一般的性質

表 1 に TS の一般的性質を示す。TS は水に難溶であり、セメントのアルカリ環境下で長時間にわたって徐々に溶解し、セメント粒子表面や生成する水和物に吸着してセメントの水和反応を抑制する。しかし、セメントの液相中への溶解量が常に少ないため、溶解と吸着作用を繰り返しながら、セメントの水和反応の進行を停止させることなく、

\* 土木本部技術部門

\*\*\* (株)フローリック技術本部

\*\* 技術研究所材料施工研究室

その水和反応速度を適度に低下させることができる混和剤である。

## 2.2 使用材料とコンクリートの配合

表2に使用材料を、表3にコンクリート配合を示す。セメントは土木構造物に多く使用されている高炉セメントB種を用い、セメント量が300kg/m<sup>3</sup>、スランブ8cmのレディーミクストコンクリート(27-8-20BB)を使用した。TSの添加量はセメント質量に対して、無添加の0%、0.55%、0.7%、0.85%および1.0%とした。TSの添加は、TS無添加(27-8-20BB)に、水溶性袋に必要量充填したTSをレディーミクストコンクリート工場のミキサに同時添加した。

## 2.3 模擬部材寸法と打設時期

図1に模擬部材の外観を示す。模擬部材は、マッシュプでありながら放熱をある程度期待できる寸法(1.5mの立方体)の試験体を計5体作製した。打設時期は、2010年9月(標準期)に茨城県つくば市の屋外の実験ヤードで行い、同一日に試験体5体を順次打設した。

## 2.4 コンクリートの温度計測

温度計測は、試験体中心部と外気温を熱電対で計測した。

## 2.5 フレッシュ性状の試験項目

表4に試験項目を示す。コンクリートはつくば市のレディーミクストコンクリート工場から出荷し、出荷時と荷卸時(荷卸まで約30分)にフレッシュコンクリート試験を実施した。

## 2.6 圧縮強度試験と養生

圧縮強度の測定は、標準養生と封緘養生は材齢7日、(14日)、28日、56日および91日とした。また、TSの添加量0%、0.7%および0.85%については、初期強度が3N/mm<sup>2</sup>程度になるまでの間、模擬部材の中心部の温度履歴を水槽で追従させて養生する温度履歴追従養生<sup>[1]</sup>(以下、温追養生)も実施した。

## 2.7 断熱温度上昇試験

断熱温度上昇試験の試料は、トラックアジテータ車から採取し、フレッシュ性状を確認後、速やかに試験を開始した。なお、温度応力解析を実施するための断熱温度上昇試験、若材齢圧縮試験(温度追随

表1 水和熱抑制剤の一般的性質

成分	多価アルコールと無機塩を含む 多価アルコール脂肪酸エステル
概観	白色粉末状
かさ密度(g/cm <sup>3</sup> )	0.46~0.56
溶解性	水に難溶

表2 使用材料

材料名	記号	密度(g/cm <sup>3</sup> )	吸水率(%)	実積率(%)
セメント	高炉セメントB種	BB	3.04	—
細骨材	神栖産陸砂	S	2.61	1.54
粗骨材	石岡産碎石	G	2.70	0.52
混和剤	AE減水剤 高機能タイプ(標準形I種)	Ad	1.07	—
	水和熱抑制剤	TS	—	—

表3 コンクリートの配合

No.	配合記号	W/C(%)	S/a(%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				W	BB	S	G	Ad	TS
1	TS:0%	54.0	44.3	162	300	801	1045	3.0	0
2	TS:0.55%	54.0	44.3	162	300	801	1045	3.0	1.65
3	TS:0.70%	54.0	44.3	162	300	801	1045	3.0	2.10
4	TS:0.85%	54.0	44.3	162	300	801	1045	3.0	2.55
5	TS:1.00%	54.0	44.3	162	300	801	1045	3.0	3.00



図1 模擬部材外観

表4 試験項目

項目	試験方法
スランブ試験	JIS A 1101 による
空気量試験	JIS A 1128 による
温度計測	熱電対で計測(試験体中心部, 外気温)
圧縮強度試験	JIS A 1108 による(標準, 封緘, 温度追随)
静弾性係数試験	JIS A 1149 による

養生)の配合は、0%(無添加)、0.7%、0.85%の3種類を用いた。

## 2.8 温度応力解析

表5に解析条件を示す。温度応力解析(以下解析)は、TSによる試験体中心温度およびひび割れ指数の改善効果を把握する目的で実施した。解析は3次元非定常温度応力解析プログラム(K社製)を

使用し、断熱温度上昇特性および圧縮強度特性は実測値を用いた。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 フレッシュコンクリートの性状

表6にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。目標スランプ8cmのTS無添加に対し、TSを添加した出荷時のスランプは、TS自体が減水性を有しているため、見かけのスランプは大きく増大したが、荷卸時のスランプは14～16cmの範囲となった。TS無添加の空気量は、出荷から荷卸で1%程度低下するのに対し、TSを添加した場合は1～1.5%程度空気量が増大する傾向を示した。

#### 3.2 部材中心温度

表7および図2に模擬部材の中心部の温度履歴を示す。TSの添加量が増加するに伴い、温度上昇が開始するまでの時間は長くなるが、温度上昇の傾きは緩やかになる。模擬部材中心の最高温度は、TSの添加量の増加に伴い低くなる。例えば、TS無添加と比較してTS：0.7%で約4℃、TS：0.85%で約10℃低下する結果を示した。

#### 3.3 圧縮強度特性

図3および図4に圧縮強度試験結果を示す。TS：1%を除けば、材齢7日以降は、無添加と比較して同程度以上の強度が得られることが確認された。図5に模擬部材の温度追従養生した初期強度を示す。TSを添加した方が同一温度における初期強度が若干高い傾向を示した。図

表5 解析条件

項目	種類	設定値
熱伝導率	地盤	1.0 (W/m <sup>2</sup> C)
	コンクリート	2.7 (W/m <sup>2</sup> C)
密度	地盤	1600 (kg/m <sup>3</sup> )
	コンクリート	2400 (kg/m <sup>3</sup> )
比熱	地盤	2.6 (kJ/kg <sup>2</sup> C)
	コンクリート	1.2 (kJ/kg <sup>2</sup> C)
初期温度	地盤	16 (°C)
	コンクリート	23.2 (°C)
断熱温度上昇特性	コンクリート	測定値 表入力

表6 フレッシュコンクリートの試験結果

No.	TS 添加率 (C×%)	出荷時			荷卸時		
		スランプ <sup>7</sup> (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	スランプ <sup>7</sup> (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
1	0	12.0	4.8	22.0	10.5	3.9	22.0
2	0.55	21.0	3.5	22.0	14.0	4.4	22.0
3	0.70	20.5	3.8	22.0	15.0	4.6	22.0
4	0.85	22.0	3.2	21.0	16.0	4.8	22.0
5	1.00	22.5	3.4	21.0	14.5	4.9	21.5

表7 模擬部材の中心温度

No.	TS 添加率 (C×%)	最高温度 到達日数	初期温度 (°C)	最高温度 (°C)	最高温度 上昇量 (°C)	温度低下量 (°C)
1	0	1.53	23.6	55.3	31.7	—
2	0.55	2.23	23.5	54.2	30.8	0.9
3	0.70	3.22	23.3	51.0	27.7	4.0
4	0.85	6.89	23.2	44.8	21.6	10.1
5	1.00	11.08	22.8	43.3	20.5	11.2

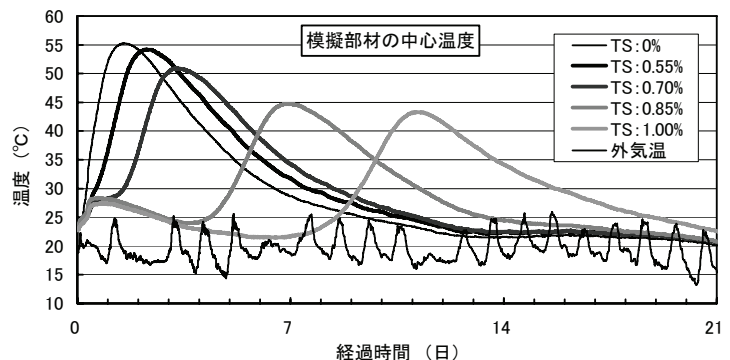


図2 模擬部材中心部の温度履歴

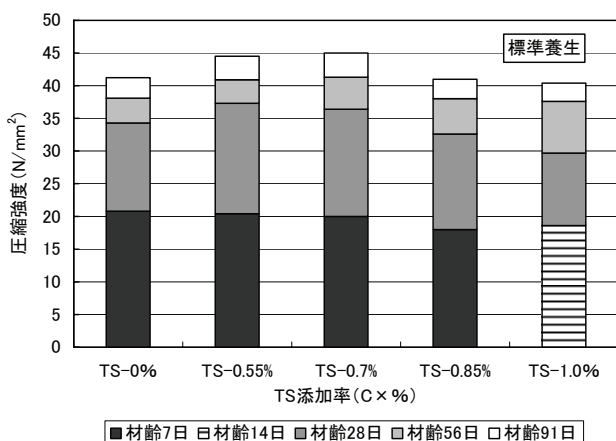


図3 圧縮強度試験結果 (標準養生)

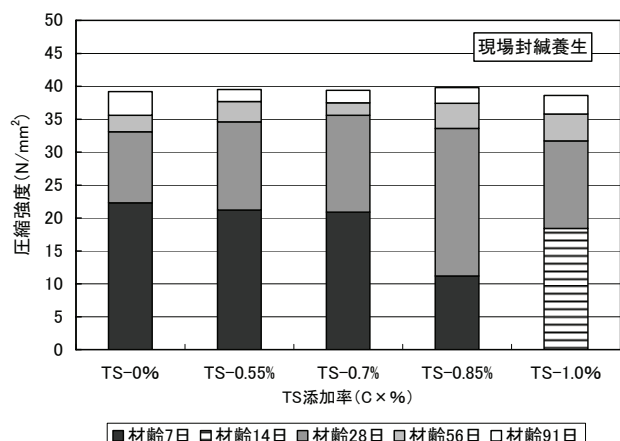


図4 圧縮強度試験結果 (封緘養生)

6に静弾性係数と圧縮強度の結果を示す。TSを添加した方が若干低い傾向を示した。

### 3.4 断熱温度上昇特性の比較

断熱温度上昇試験結果を図7に示す。同図には、日本コンクリート工学協会（以下jci）のBB（TS：0%）の断熱温度上昇特性式<sup>[2]</sup>（以下温度式）も併記した。TS：0%の終局断熱温度上昇量（以下 $Q_{\infty}$ ）は、試験値とjci温度式で約12℃の差を生じた。原因は特定できないが、練り混ぜから打ち込みまでの時間（約40分）による放熱や試験機の精度などが考えられる。TS：0.7%，0.85%の特性は、温度上昇が2段階あり、添加量が増加するとともに一段階目の平衡状態が長くなる。さらに2段階目の温度上昇速度（ $r$ ：勾配）は若干低下する。 $Q_{\infty}$ は試験値の無添加と同等程度である。TSによるこの特性を表現する近似式を現在検討中である。実務で解析を行う場合の断熱温度特性は打設条件を反映した断熱温度上昇試験を行い、実測値を用いる（表入力形式で補間して計算に利用する）ことが適していると考ええる。

### 3.5 圧縮強度特性

図8に圧縮強度（打ち込み温度23℃，TS：0%，0.7%，0.85%）と有効材齢の関係を示す。無添加のBBの圧縮強度は概ねjciの圧縮強度発現式<sup>[2]</sup>（以下強度式）に近似する。また、TS：0.7%，0.85%の強度はjciの強度式で硬化原点を実測値に合うように設定することにより、概ね表現できる。

### 3.6 実測中心温度と解析値の比較

図9に中心温度の実測値と解析結果の比較を示す。中心温度は実測値と解析値で約4℃の差を生じた。この原因は特定できていないが、解析に用いた断熱

温度上昇特性や解析条件が実際と異なっていることが考えられる。しかし、それぞれの条件下（実測別、解析別）における中心温度差はTS：0%を基準として0.7%で約-4℃，0.85%で約-10℃となり、同様な値を示した。これによりTSの温度低減効果を確認した。

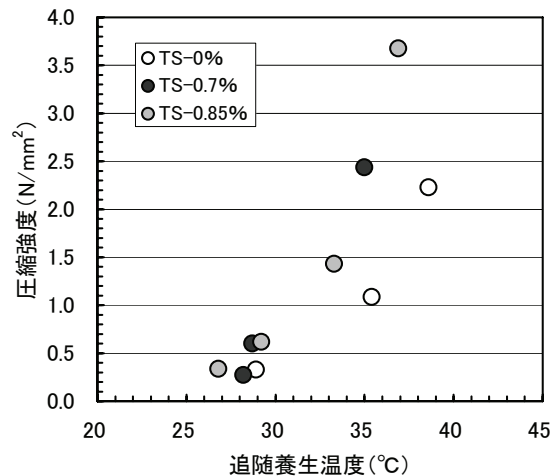


図5 温度追従養生した初期強度

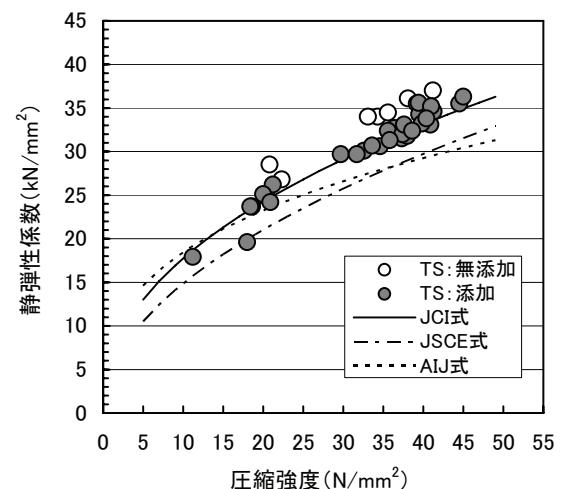


図6 圧縮強度と弾性係数

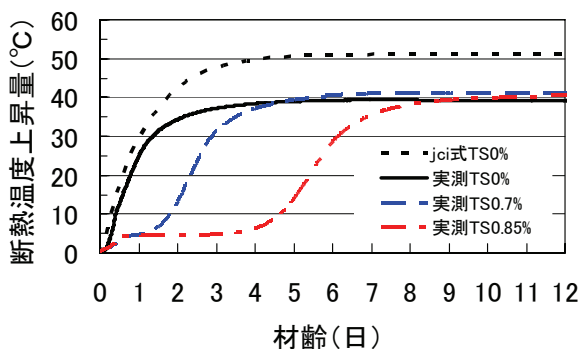


図7 断熱温度上昇特性

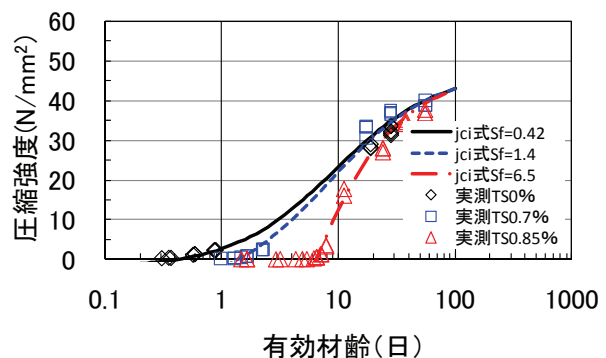


図8 圧縮強度と有効材齢

### 3.7 ひび割れ指数の解析結果

図10に上記の条件を取り入れて試験体中心部のひび割れ指数を解析により求めた結果を示す。各添加量における最小ひび割れ指数は、TS：0%を基準としてTS：0.7%で0.14、TS：0.85%で0.26増加し、解析上で改善効果を確認した。

## 4. 実験のまとめ

高炉セメントB種（BB）に対する水和熱抑制剤（TS）を用いた各種特性について以下にまとめる。

### 4.1 基礎的性状確認実験

以下の特性が確認できた。

- (1) 若材齢時の圧縮強度発現は遅延する。
- (2) 材齢7日以降の圧縮強度は、無添加と同等以上となる。
- (3) 静弾性係数は、TSを添加した方が若干低い傾向を示したが、jci式と良く整合している。
- (4) 模擬部の材中心温度は、TS：0.85%で最大約10℃低減した。

### 4.2 温度応力解析用の各種性状確認実験と解析

以下の特性が確認できた。

- (1) 断熱温度上昇特性は、打設条件を反映した断熱温度上昇試験を行い、解析に用いることが望ましい。
- (2) 標準期における圧縮強度は、硬化原点の値をjciの強度式に取り込むことにより概ね表現できる。
- (3) 中心温度の実測値と解析値の比較は、両者で差を生じたものの温度低減効果を確認した。
- (4) 試験体中心部のひび割れ指数は、解析により改善効果を確認した。

## 参考文献

- [1] 日本建築学会：建築工事仕様書・同解説JASS 5 鉄筋コンクリート工事2009, pp.133
- [2] 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2008, pp.47-56

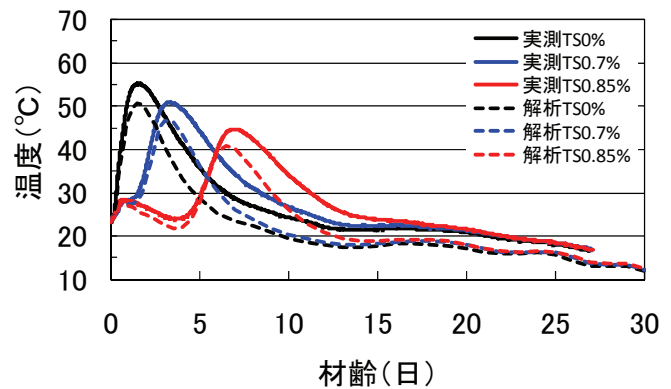


図9 中心温度の解析値と実測値の比較

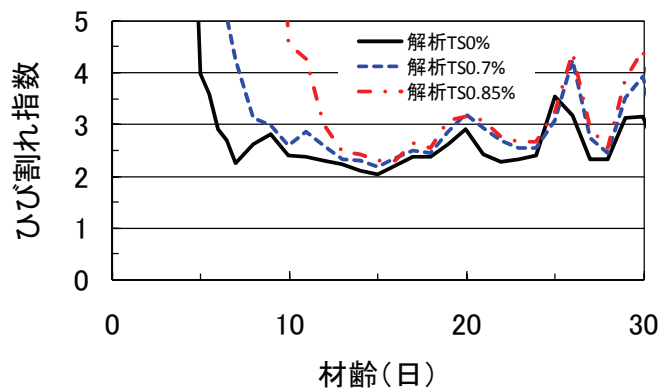


図10 ひび割れ指数の比較（解析値）

