

水和熱抑制剤を添加したコンクリートの温度ひび割れ抑制効果

The Effect of Controlling Thermal Crack by Concrete Added Hydration Heat Controlling Agent

川里麻莉子^{※1} 寺澤正人^{※1} 槇島修^{※1}
Mariko Kawasato Masato Terazawa Osamu Makishima
佐藤友厚^{※2} 田畑美紀^{※1} 北倫彦^{※2}
Tomohiro Satoh Miki Tabata Tomohiko Kita

【要旨】

マスコンクリート部材においては、水和熱に起因する温度ひび割れの発生が懸念されるため、適切なひび割れ対策が不可欠である。温度ひび割れ対策には、コンクリートの温度上昇を抑制する方法が有効であり、近年では、水和熱を抑制する混和剤として水和熱抑制剤が開発されている。水和熱抑制剤は、セメントの水和反応を適度に遅延させることで、コンクリートの温度上昇速度を緩やかにするものである。この作用により、部材内部の温度を大幅に低減することが可能となるため、低発熱型セメントを使用できない場合などにおいて、効果的な温度ひび割れ対策として期待されている。本稿では、高炉セメント B 種を使用したコンクリートを対象に、水和熱抑制剤を添加した場合の断熱温度上昇特性、強度特性および変形特性についての試験結果と、その特性の解析への反映方法およびモデル部材を対象に実施した温度応力解析結果について報告する。

【キーワード】 水和熱抑制剤 温度ひび割れ 温度応力解析 断熱温度上昇特性 強度特性

1. はじめに

マスコンクリート部材においては、水和熱に起因する温度ひび割れの発生が懸念されるため、適切な温度ひび割れ対策が不可欠である。有効な温度ひび割れ対策のひとつとして、コンクリートの温度上昇を抑制する低発熱型セメントの使用が挙げられる。しかし、セメントの供給体制やコンクリートプラントの設備事情等により、低発熱型セメントの適用が困難な場合がある。これに対して、近年では、セメントの種類を変えることなく、コンクリートの温度上昇を抑制する方法として、水和熱抑制剤¹⁾が開発されている。

水和熱抑制剤は、セメントの水和反応を適度に遅延させることで、コンクリートの温度上昇速度を緩やかにするものである。この作用により、部材内部の温度を大幅に低減することが可能となるため、効果的な温度ひび割れ対策として期待されている。

水和熱抑制剤の主な特徴として、

- ① 添加量の増加に伴い、温度上昇速度が低下する。
- ② コンクリート温度が高いほど温度上昇抑制効果が大きい。
- ③ 添加量の増加に伴い、初期材齢における強度発現が遅延する。

等が確認されている^{1)~5)}。

このように、水和熱抑制剤を添加したコンクリートの水和発熱や強度発現の挙動は、「コンクリート温度」と「添加量」によって大きく異なるため、水和熱抑制剤を効果的に適用するためには、発熱特性や強度特性等への影響を事前に把握しておく必要がある。さらに、ひび割れ抑制効果を解析的に評価するためには、これらの影響を考慮した予測手法を確立する必要がある。

これまで、水和熱抑制剤を用いたコンクリートの発熱特性の評価は行われているものの、そのほとんどが普通ポルトランドセメントを対象にしたものであり、かつ、「コンクリート温度」や「添加量」の影響を定量的に評価した事例はほとんどない。

そこで、本研究では、高炉セメント B 種を使用したコンクリートを対象に、水和熱抑制剤を添加した場合の断熱温度上昇特性、強度特性および変形特性について実験的に確認を行った。また、水和熱抑制剤を添加したコンクリートの発熱特性の解析への反映方法について検討した。

本稿では、実験的に確認された諸特性と、解析への反映方法およびモデル部材を対象に実施した温度応力解析結果について報告する。

2. 各種特性の把握試験

任意の練上り温度、添加量および単位セメント量に対応した断熱温度上昇曲線の予測方法、圧縮強度と静弾性係数の解析への反映方法を検討・確立することを目的として、練上り温度および添加量が水和熱抑制剤を添加したコンクリートの断熱温度上昇特性、強度特性および変形特性に与える影響を実験的に把握した。

2.1 試験概要

(1) 試験要因と水準

試験は、練上り温度および添加量を試験要因とし、表-1に示す9水準を設定した。ここに示す配合記号は、単位セメント量-添加率-練上り温度を表している。

(2) 試験に供したコンクリート

試験には、高炉セメントB種を用いた単位セメント量 300kg/m^3 、水セメント比55.0%のコンクリートを使用した。試験対象の水和熱抑制剤は、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を主成分とするものである。

(3) 試験項目および試験方法

実施した試験項目および試験方法を以下に示す。

①簡易断熱温度上昇試験

簡易断熱温度上昇試験用の供試体概要を図-1に示す。供試体の寸法は、 $400\times 400\times 400\text{mm}$ とし、外周を100mm厚の発泡スチロールと12mm厚の化粧合板で覆った。供試体の断面中心温度は、発熱ピーク以降の温度低下過程も確認するため、材齢12~28日程度まで計測した。なお、断熱温度上昇曲線を同定するために、計測完了後に3次元FEM非定常熱伝導解析による解析値を温度計測値に一致させるフィッティング解析を実施した。解析に使用したモデルを図-2に示す。

②圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JISA 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠した。養生は、目標練上り温度と同温度環境下での気中養生とした。

③静弾性係数試験

静弾性係数試験は、JISA 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠し、前述の圧縮強度試験用の供試体を用いた。

(4) 水和熱抑制剤の添加・練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜは、セメントおよび骨材のみの空練り1分間、練混ぜ水を加えた本練り1分間の後に、粉末の水和熱抑制剤をミキサー内に投入し、さらに、2分間の練混ぜを行った。

表-1 試験要因と水準

No.	配合記号	単位セメント量 (C)	水和熱抑制剤添加量 (C×添加率)	目標練上り温度
1	300-0.0-15	300kg/m^3	0.0kg/m^3 (C×0.0%)	15°C
2	300-0.8-15		2.4kg/m^3 (C×0.8%)	
3	300-0.0-20	300kg/m^3	0.0kg/m^3 (C×0.0%)	20°C
4	300-0.7-20		2.1kg/m^3 (C×0.7%)	
5	300-0.8-20		2.4kg/m^3 (C×0.8%)	
6	300-0.9-20		2.7kg/m^3 (C×0.9%)	
7	300-1.0-20		3.0kg/m^3 (C×1.0%)	
8	300-0.0-30	300kg/m^3	0.0kg/m^3 (C×0.0%)	30°C
9	300-0.8-30		2.4kg/m^3 (C×0.8%)	

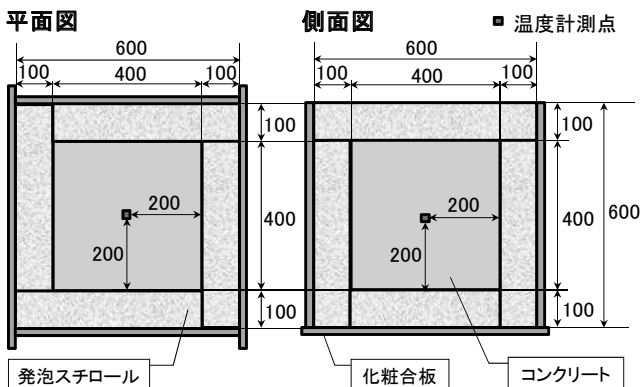


図-1 簡易断熱温度上昇試験の供試体概要

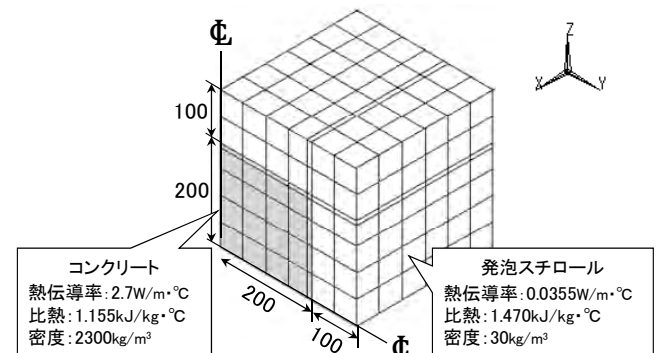
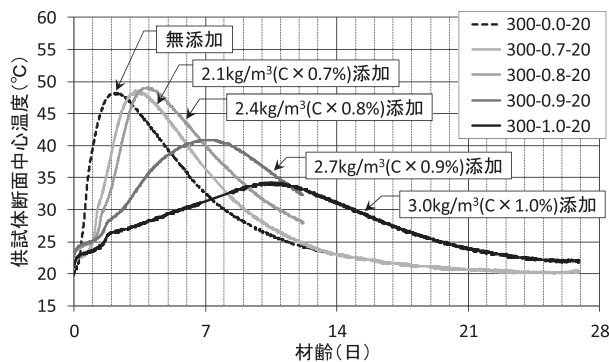


図-2 解析モデル (1/8 モデル)

2.2 試験結果

(1) 簡易断熱温度上昇試験

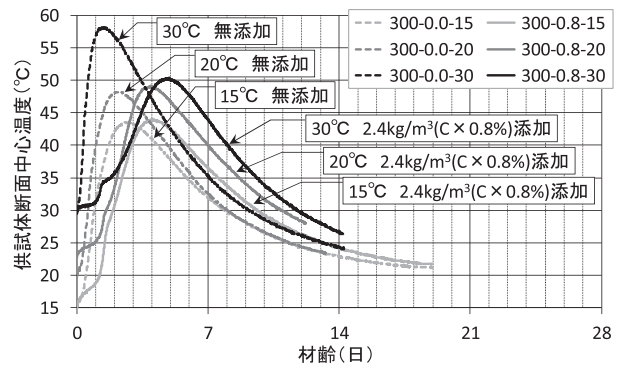
供試体の断面中心温度の計測結果を図-3に、同定した断熱温度上昇曲線（以後、同定曲線と呼ぶ）を図-4に示す。図-3より、水和熱抑制剤の添加量が多いほど、最高温度が低減し、最高温度発生時期が遅延する水和熱抑制効果が確認された。添加量が多いほど、また、練上り温度が高いほど、その効果が顕著に現れることが確認された。この傾向は、同定曲線の断熱温度上昇速度により表現されるが、同一の単位セメント量、練上り温度であれば、添加量に関係なく、終局断熱温度上昇量は無添加コンクリートとほぼ同等であった。



【添加率(量)の違いによる比較】

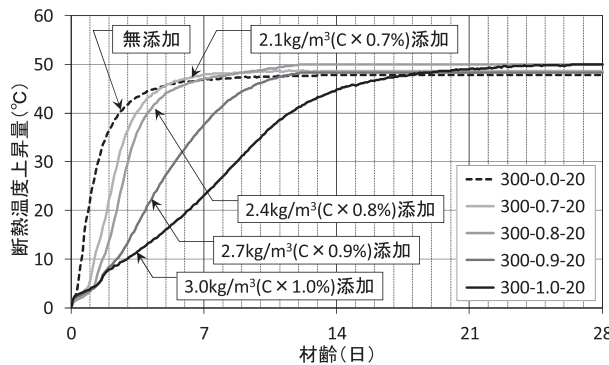
(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験結果を図-5に示す。水和熱抑制剤を添加した場合、無添加と比較して材齢4日程度までの初期材齢において、強度発現が遅延する傾向が見られた。また、材齢7日では無添加と同等の圧縮強度が得られ、材齢28日では無添加に対して10%程度の強度増進する傾向となった。ただし、練上り温度が30°Cの場合、材齢28日時点の圧縮強度は無添加の80%程度に留まり、15°Cや20°Cよりも強度発現が遅延する結果となった。これは、水和熱抑制剤の強度発現遅延作用によるものであり、さらなる長期材齢においては、無添加と同等の圧縮強度が得られるものと考えられる。

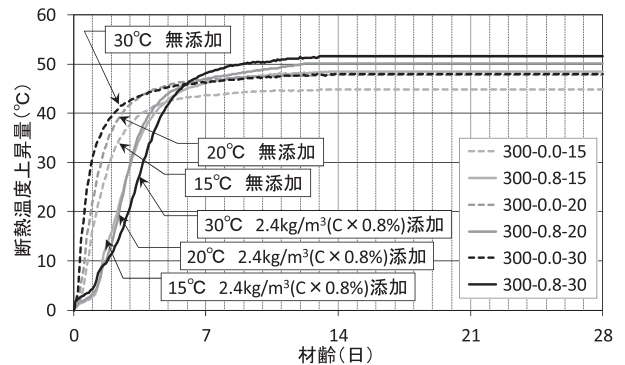


【練上り温度の違いによる比較】

図-3 供試体断面中心温度の計測結果

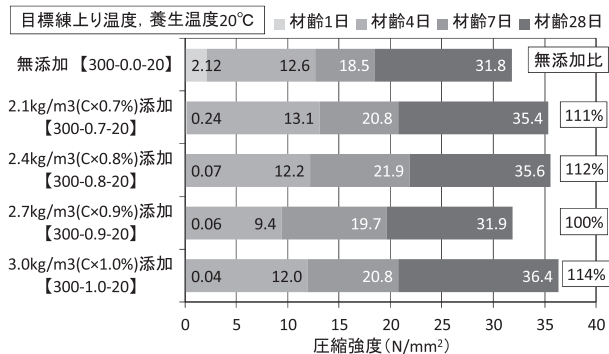


【添加率(量)の違いによる比較】

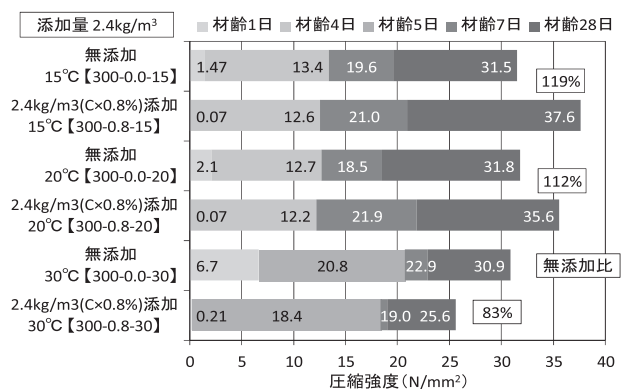


【練上り温度の違いによる比較】

図-4 フィッティング解析により同定した断熱温度上昇曲線



【添加率(量)の違いによる比較】



【練上り温度の違いによる比較】

図-5 圧縮強度試験結果

(3) 静弾性強度試験

静弾性強度試験結果の一例を図-6に示す。また、図中の四角内に、同一材齢における無添加に対する比率を示す。水和熱抑制剤を添加した場合、材齢2日までの初期材齢において、無添加に比べて著しく低い値を示し、材齢7日で無添加と同等となった。

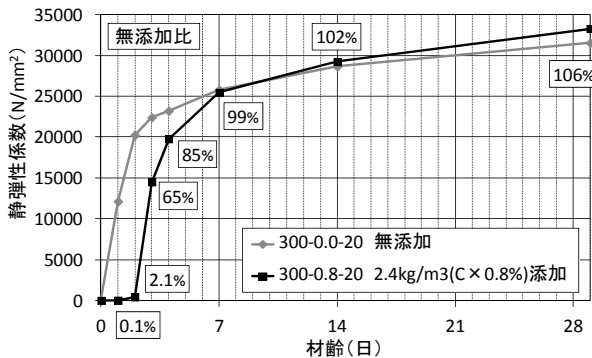


図-6 静弾性係数試験結果

3. 断熱温度上昇特性の予測手法の検討

3.1 断熱温度上昇曲線のモデル化

「マスコンクリートのひび割れ制御指針2008（日本コンクリート工学協会）」⁶⁾（以後、JCI指針と呼ぶ）では、コンクリートの断熱温度上昇曲線を以下の式で表している。

$$Q(t) = Q_{\infty} \cdot (1 - e^{-\gamma \cdot (t-t_0)^s}) \quad (1)$$

ここに、 t : 材齢 (日)

$Q(t)$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量 (°C)

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 (°C)

γ : 断熱温度上昇速度に関する係数

t_0 : 発熱開始材齢 (日)

s : 断熱温度上昇速度に関する係数

これに対し、同定曲線は、断熱温度上昇速度が初期材齢の途中で変化する傾向があり、上述の一般的な断熱温度上昇曲線では表現できない。そこで、図-7に示すように、温度上昇速度の変化点である材齢1.0日を境に、材齢1.0日以前を「第1領域」、材齢1.0日以降を「第2領域」と分割することで、水和熱抑制剤を添加したコンクリートの断熱温度上昇曲線のモデル化が可能であると考えた。

- ・ 第1領域 (材齢1.0日以前)

$$Q(t) = Q_0 / 1.0 \times t \quad (2)$$

- ・ 第2領域 (材齢 1.0 日以降)

$$\begin{cases} Q(t) = Q_0 + Q_m \cdot (1 - e^{-\gamma \cdot (t-1.0)^s}) \end{cases} \quad (3)$$

$$Q_{\infty} = Q_0 + Q_m \quad (4)$$

ここに、 t : 材齢 (日)

$Q(t)$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量 (°C)

Q_0 : 第1領域における断熱温度上昇量 (°C)

Q_m : 第2領域における断熱温度上昇量 (°C)

γ : 断熱温度上昇速度に関する係数

s : 断熱温度上昇速度に関する係数

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 (°C)

また、 Q_0 、 Q_m 、 γ 、 s は、以下の予測関数で算定できるものとして、各係数を回帰分析等により求めた。

$$Q_0 = F(\text{add}, T) \quad (5) \quad Q_m = F(Q_{\infty \text{ non}}, Q_0) \quad (6)$$

$$\gamma = F(\gamma_{\text{non}}, \text{add}, T) \quad (7) \quad s = F(\text{add}, T) \quad (8)$$

ここに、 add : 水和熱抑制剤 添加量 (kg/m³)

T : 練上り温度 (°C)

$Q_{\infty \text{ non}}$: 水和熱抑制剤を添加しないコンクリートの終局断熱温度上昇量 (°C)

γ_{non} : 水和熱抑制剤を添加しないコンクリートの断熱温度上昇速度に関する係数

上記の各予測関数で求めた Q_0 、 Q_m 、 γ 、 s による断熱温度上昇曲線（以後、モデル化曲線と呼ぶ）と同定曲線の比較を図-8に示す。両者は良好な一致を示しており、検討したモデル化曲線およびモデル化曲線を規定する各係数の予測関数は概ね妥当なものと判断される。

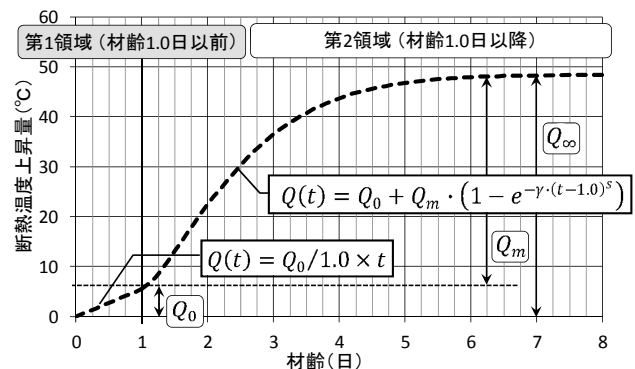


図-7 断熱温度上昇曲線のモデル化

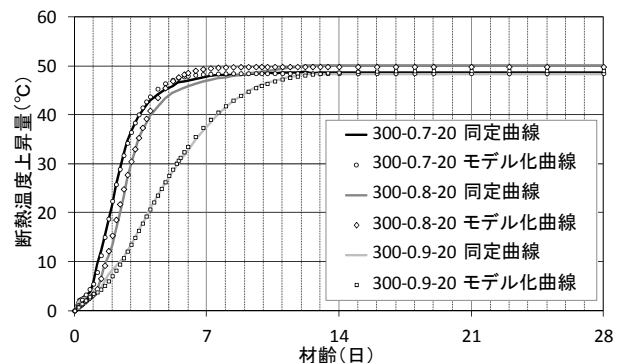


図-8 同定曲線とモデル化曲線の比較

ここで、本検討とは異なるコンクリート材料（セメント製造会社、骨材、混和剤）を用いたコンクリートに対して簡易断熱温度上昇試験を行い、予測式の妥当性を確認した。試験には、高炉セメントB種を用いた単位セメント量 322kg/m^3 、水セメント比54.9%、水和熱抑制剤添加量 2.5kg/m^3 、練上り温度 30°C のコンクリートを使用した。なお、特定のコンクリートに対する断熱温度上昇特性の予測を行う場合、水和熱抑制剤を添加しないコンクリートの終局断熱温度上昇量 $Q_{\infty non}$ および断熱温度上昇速度に関する γ_{non} が不明であることを想定し、「JCI指針」等に示される断熱温度上昇曲線の予測式より求まる Q_{∞} および γ を代用する方法をとった。

図-9には、簡易断熱温度上昇試験により求めた同定曲線と、前述の方法で予測したモデル化曲線の比較を示す。同定曲線とモデル化曲線は、概ね良好な一致を示しており、検討した断熱温度上昇特性の予測手法は、再現

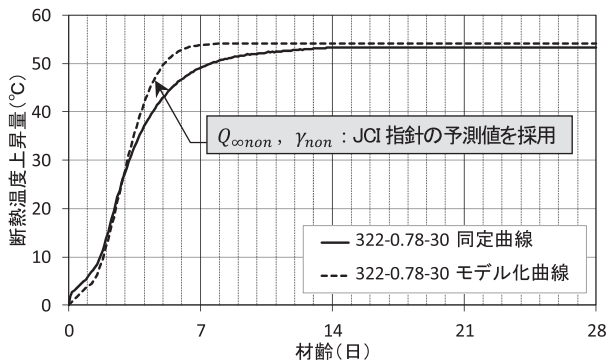


図-9 別途試験での同定曲線とモデル化曲線の比較

性および汎用性が高いものと判断される。

4. 温度応力解析による水和熱抑制効果の確認例

提案した予測手法にて断熱温度上昇特性を求めた後に、底版上に施工される2層打設の壁部材を対象に3次元FEM非定常熱伝導解析を実施し、水和熱抑制剤の温度ひび割れ抑制効果を確認した。

4.1 解析概要

解析対象は、底版上に施工される壁厚1.6m、高さ5.0m、打設長10mの壁部材とした。打設条件は、高さ2.5m×2リフトの2層打設とし、打設間隔を1週間とした。打設温度は 30°C 、水和熱抑制剤の添加量は 2.7kg/m^3 とし、①水和熱抑制剤を適用しない場合（無添加）と、②壁部材の下層リフトのみに水和熱抑制剤を適用した場合（水和熱抑制剤添加）を比較した。断熱温度上昇特性は前述の予測式により設定し、強度特性および変形特性は試験結果をもとに設定した。コンクリートの熱物性値等のその他の解析定数は、「JCI指針」に示される一般値を採用した。

4.2 解析結果

温度応力解析結果を表-2に示す。水和熱抑制剤を適用した下層リフトは、適用しない場合と比較して最高温度は 17.7°C 低下、最小ひび割れ指数は0.78上昇した（表中○印）。また、水和熱抑制剤を適用していない上層リフトのひび割れ指数1.0以下の範囲が減少した。水和熱抑制剤を適用した下層リフトに加え、上層リフトのひび割れ指数が改善した理由としては、下層リフトの最高温度発生時期の大幅な遅延により、上層リフトの温度降下時期と

表-2 温度応力解析結果

	① 無添加	② 水和熱抑制剤添加	
経験最高温度分布	 最高温度：70.9°C (1.9日)	 最高温度：53.2°C (6.5日)	[°C] 85.00 80.00 70.00 60.00 50.00 40.00 30.00
経験最小ひび割れ指数	 最小ひび割れ指数：0.59	 最小ひび割れ指数：1.37	1.00 0.90 0.80 0.70 0.60 0.50

※ 白色部は1.0以上

下層リフトの温度降下時期が重なり、下層リフトの温度降下に伴う温度収縮と上層リフトの温度収縮が同調したことに加えて、下層リフトの強度発現の遅延などが考えられる。このように、水和熱抑制剤の部分適用は、適用リフトだけでなく、適用しない上層リフトに対しても温度ひび割れ抑制に有効となる場合があることが確認できた。

5. まとめ

本研究では、高炉セメントB種を使用したコンクリートに対して水和熱抑制剤を添加し、断熱温度上昇特性、強度特性、変形特性に関する試験の実施、断熱温度上昇特性の予測手法の検討および温度応力解析による効果確認を行い、以下の結論を得た。

(1) 水和熱抑制剤の特性

- ① 水和熱抑制剤の添加量が多いほど、水和熱抑制効果が顕著となる。
- ② 練上り温度が高いほど、水和熱抑制効果が顕著となる。
- ③ 水和熱抑制剤の添加により、初期強度発現が遅延する傾向があるが、材齢7日程度で無添加と同等となる。

(2) 断熱温度上昇特性の予測手法

- ① 水和熱抑制剤を添加したコンクリートの断熱温度上昇過程は、2領域に区分される。
- ② 水和熱抑制剤の添加量および練上り温度から、断熱温度上昇曲線を予測する手法を考案し、その再現性および汎用性の高さを確認した。

(3) 温度応力解析による温度ひび割れ抑制効果の確認

- ① 提案した予測手法を用いた温度応力解析により、水和熱抑制剤の温度ひび割れ抑制効果を確認した。

6. おわりに

本研究を通じて、水和熱抑制剤の温度ひび割れ抑制効果を確認した。ただし、水和熱抑制剤の効果は、練上り

温度（養生温度）および添加量に大きく影響を受けるため、練上り温度に応じた適切な添加量を設定する必要がある。また、添加により初期材齢において強度発現の遅延が施工工程に影響することにも留意が必要である。今後は、現場での実構造物への適用を通じて、本剤をより効果的な温度ひび割れ対策の一つとして確立していく予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、高田良章氏をはじめとする株式会社フローリックの皆様には多大なご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 高田良章, 松沢友弘, 隅田孝弘, 田中恭一, 川中政美, 高山 亨, 安部弘康, 立山創一：水和熱抑制剤を用いたコンクリートの基礎的性状, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, V-130, pp.259-260, 2011.
- 2) 土木学会コンクリート技術シリーズNo.8「マスコンクリート技術の現状と動向」, pp.19-20, 1994.
- 3) 東 邦和, 廣中哲也, 梅原秀哲：水和発熱抑制剤を用いたコンクリート壁体の温度応力の低減に関する研究, 土木学会論文集, 土木学会論文集, No.662, V-49, pp.121-134, 2000
- 4) 津崎淳一, 田中 斉, 榎島 修, 加藤淳司：水和熱抑制剤を添加したコンクリートの発熱・初期強度性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）, 1066, pp.131-132, 2001
- 5) 川里麻莉子, 佐藤友厚, 田畑美紀, 北 倫彦：早強ポルトランドセメントに対する水和熱抑制剤の効果検証試験, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, V-348, pp.695-696, 2011
- 6) 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.46-59, 2008.

Summary In mass concrete members, thermal crack due to the heat of hydration is of concern. Thus, appropriate crack control measures are essential. In order to control thermal crack, controlling the rise of concrete temperature is effective. Hydration heat control agents have recently been developed as admixtures for controlling the heat of hydration. Hydration heat control agents slow the rise of concrete temperature by appropriately delaying the hydration of cement. The action is capable of greatly lower the internal temperature of the member. It is hoped that such agents work effectively to control thermal crack in the case where no low-heat cement can be used.

This paper presents the results of testing concerning the characteristics of adiabatic temperature rise, strength and deformation in the case where concrete with blast furnace slag cement type B was applied with hydration heat control agents. Also reported are the methods for reflecting the characteristics in analysis and the results of thermal stress analysis of model members.

Key Words : Hydration heat controlling agent, Thermal crack, Thermal stress analysis, Adiabatic temperature rise characteristic, Strength characteristic