

論文 インテリジェント材料によるセメントの水和熱制御に関する 実験的研究

西山直洋^{*1}・三橋博三^{*2}・小林利充^{*3}・花田 南^{*4}

要旨: 一般に、マスコンクリートと言われるマッシブな構造物のコンクリートを打設する場合、セメントの水和反応によって、コンクリート内部は断熱養生となり、内外温度差による温度応力が生じ、コンクリート中にひび割れを誘発させる。本研究では、コンクリートの水和熱がある一定のレベルに達したとき、遅延剤を内蔵したカプセルがその温度に反応し、セメントの水和反応を遅延させ、水和熱の発生を制御するインテリジェント材料の効果について検討している。その結果、簡易モデルによる基礎実験及び実大モデルによる検証実験によって、セメント水和熱の温度上昇勾配及び最高温度を制御できることが明らかとなった。

キーワード: インテリジェント材料, マスコンクリート, 水和熱制御, カプセル

1. はじめに

近年、地球規模での人口増加、大都市への人口の集中など、現在の住環境を考えると、空間の有効利用への要求は高まり、建築構造物においても、その高層化、大空間化などがなされている。このようなニーズに対応するため、材料分野においても、部材や基礎部分にマスコンクリートと分類されるコンクリートの使用が増加している。従来、マスコンクリートは、その形状から水和熱による内部拘束応力や外部拘束応力によるひび割れが指摘されてきたが、建築構造物は、ダムなどに使用されるコンクリートと比較して、高スランプ、且つ、低水セメント比の高強度コンクリートを使用する 경우가多く、ひび割れ問題はさらに深刻化しつつある。従って、従来からダムなどに対して用いてきた、低スランプコンクリートの使用、パイプクーリング、散水養生などの対応では適応できない場合が多く、新規な水和熱制御方法の開発が望まれている。

本研究では、インテリジェント材料の概念を適用したセメントの水和熱制御を目的とし、簡

易モデルによる基礎実験を行い、セメント水和熱制御用カプセルの適用性について検討を行っている。更に、簡易モデル実験で得られた結果をもとに、実大モデルによる検証実験を行い、実構造物の適用に対する検討を試みている。

2. インテリジェント材料の概念とその手法

インテリジェント材料に関する研究開発は、10年程前から本格的に行われており [1-3]、比較的新しい研究分野であるため、その基本的な定義についても研究者によって異なっているのが現状である。ここで、インテリジェント材料に関する一般的な概念を述べると、インテリジェント材料とは、材料自身が情報概念を取入れ、複数の機能を組織的に連携させ、より高次の機能を能動的に行うものである [4, 5]。つまり、材料自身がある情報を検知 (sensor 機能) し、そこで得られた情報をもとに判断 (processor 機能) がなされ、行動する (actuator 機能) という機能を併せ持つ材料である。本研究では、セメントの水和熱制御を試みるためにインテリジェント材料

*1 西松建設株式会社技術研究所技術部建築技術課 (正会員)

*2 東北大学大学院工学研究科教授 工博 (正会員)

*3 西松建設株式会社技術研究所技術部建築技術課 博士 (工学) (正会員)

*4 株式会社スリーボンド研究部研究二課

の概念を取入れて検討を行っている。具体的には、遅延剤をパラフィンでカプセル化したものがインテリジェント材料であり、このカプセルをコンクリート中に混入し、コンクリートの水和熱がカプセルの反応温度に達したとき、カプセルが熔融し、封入した遅延剤が流出され、セメントの水和反応を遅延させ、セメントの水和熱を抑制させる方法を提案する。

3. 実験概要

3.1 簡易モデルによる実験概要

3.1.1 使用材料

(1) セメント及び骨材

セメントとしては、JIS R 5210 (ポルトランドセメント) に規定する普通ポルトランドセメントを使用した。又、細骨材としては、阿武隈川産川砂 ($\rho = 2.54$) を、粗骨材としては、阿武隈川産碎石 ($\rho = 2.91$) を使用した。

(2) 混和剤

混和剤としては、ナフタリンスルホン酸塩系高性能減水剤を使用した。

(3) 遅延剤封入カプセル

遅延剤封入カプセルについては、オキシカルボン酸塩系遅延剤をカプセル (成分：パラフィン、平均粒径：150 μm 、反応温度：48 $^{\circ}\text{C}$) に封入したものを実験に供した。

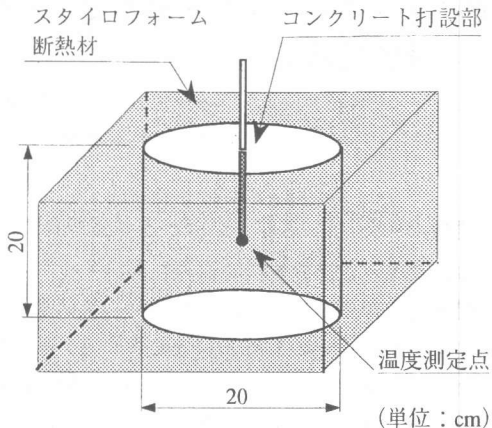
3.1.2 実験方法

(1) 温度測定用供試体容器の作製

供試体容器の形状としては、直径20cm (内寸) 及び高さ20cm (内寸) の円柱とし、その周囲をスタイロフォーム断熱材で覆った。又、内部には、熱電対固定用鉄筋を配置し、コンクリート中央部の温度を測定した。なお、供試体容器の形状を図一1に示す。

(2) 温度測定用供試体の作製

水セメント比 (W/C) = 35.0、45.0 及び 55.0%、 V_p [マトリックス体積 (水+セメント+減水剤)] : V_s (細骨材体積) : V_a (粗骨材体積) = 1 : 1 : 0、1 : 1 : 0.5、1 : 1 : 1 と変化させ、それぞれ混和剤混入率 3.0% (セメント質量に対して)、遅延剤封



図一1 供試体容器の形状 (簡易モデル用)

入カプセル混入率 0.5% (セメント質量に対して) とした調合の供試コンクリートを JIS A 1138 (試験室におけるコンクリートの作り方) に準じて練混ぜた後、前述した供試体容器に供試コンクリートを詰め、簡易モデル用供試体を作製し、恒温恒湿 [20 $^{\circ}\text{C}$ 、50% (RH)] の条件下に静置した。なお、練混ぜ機は、練混ぜ時に受けるカプセルの損傷を最小限に抑えるため、オムニミキサーを使用した。又、本実験のシリーズを表一1に示す。

表一1 実験シリーズ

Vp:Vs:Va	水セメント比 (%)					
	35.0		45.0		55.0	
	P*	C**	P	C	P	C
1:1:0	ma-p	ma-c	mb-p	mb-c	mc-p	mc-c
1:1:0.5	ha-p	ha-c	hb-p	hb-c	hc-p	hc-c
1:1:1	ca-p	ca-c	cb-p	cb-c	cc-p	cc-c

[注] *: プレーンコンクリート

** : カプセル混入コンクリート

(3) 温度の測定

コンクリート内部温度の測定は、図一1に示す●印の位置 (供試体中央部) で行った。又、温度センサーは、C-C 熱電対を用いて、データロガーによって温度測定を行った。なお、測定間隔については、3分間隔とし、168時間 (7日) まで行った。

3.2 実大モデルによる実験概要

3.2.1 使用材料及び調合

(1) レディーミクストコンクリート

実験に使用したレディーミクストコンクリー

トは、JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) に規定する普通コンクリート (呼び強度27, スランプ18cm, 骨材最大寸法2cm, 空気量4.0%, AE減水剤使用の普通ポルトランドセメント) を使用した。なお、レディーミクストコンクリートの標準調合を表一2に示す。

表一2 標準調合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
53.0	49.1	334	177	858	903	1.25

(2) 遅延剤封入カプセル

遅延剤封入カプセルについては、簡易モデル実験で使用したものと同等のものを用いた。なお、遅延剤封入カプセル混入率は、セメント質量に対して、0.5%とした。

3.2.2 実験方法

(1) 温度測定用供試体容器の作製

供試体容器の形状としては、直径100cm (内寸) 及び高さ100cm (内寸) の円柱とし、外周部及び上下部を発泡ポリスチレン断熱材で覆った後、エアークャップ断熱材を3層巻きとした。又、内部には、熱電対固定用セパレーターを配置し、コンクリート内部温度 (9箇所) を測定した。なお、供試体容器の形状を図一2に示す。

(2) 温度測定用供試体の作製

本実験では、カプセル無混入コンクリート (プレーンコンクリート) 及び遅延剤封入カプセル

混入コンクリート (カプセル混入コンクリート) を、前述した供試体容器にそれぞれ打設した。ここで、供試体の作製手順としては、プレーンコンクリート打設後、トラックアジテータ車内に遅延剤封入カプセルを投入し、中速で3分間攪拌を行い、カプセル混入コンクリートを打設した。又、締固めについては、棒状バイブレータを用いて行った。

(3) 圧縮強度試験用供試体の作製

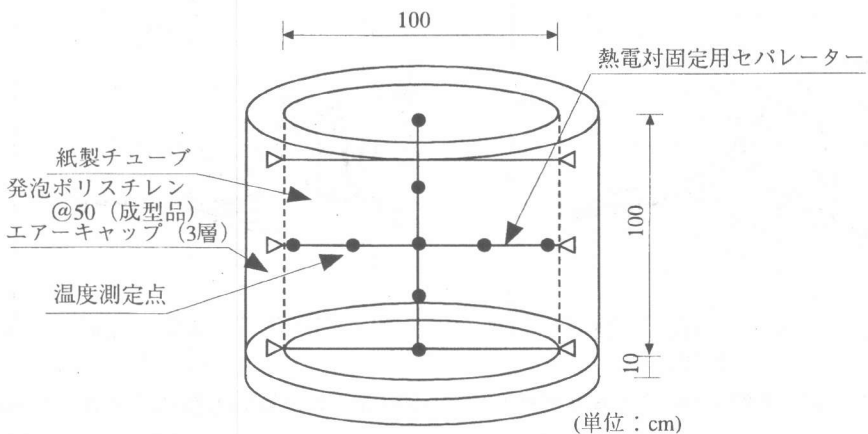
JIS A 1132 (コンクリートの強度試験用供試体の作り方) に準じて、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の圧縮強度試験用供試体を作製した。その後、温度測定用供試体中央部の内部温度に追従させた水槽中に、供試体を入れて養生を行った (履歴養生)。又、併せて標準 (20℃) 養生についても同様に行った。

(4) 温度の測定

コンクリート内部温度の測定は、図一2に示す●印の位置 (9箇所) において行った。又、測定間隔については、発熱温度がピークに達した後、20時間までを5分間隔とし、その後672時間 (28日) までを30分間隔とし、簡易モデル実験と同様に測定を行った。

(5) 圧縮強度試験

JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) に準じて、材齢2, 5, 7, 14, 28及び56日における供試体の圧縮強度試験を行った。



図一2 供試体容器の形状 (実大モデル用)

4. 実験結果及び考察

4.1 簡易モデルによる実験

図-3には、調合条件の違いによる遅延剤封入カプセル混入コンクリートに及ぼす影響

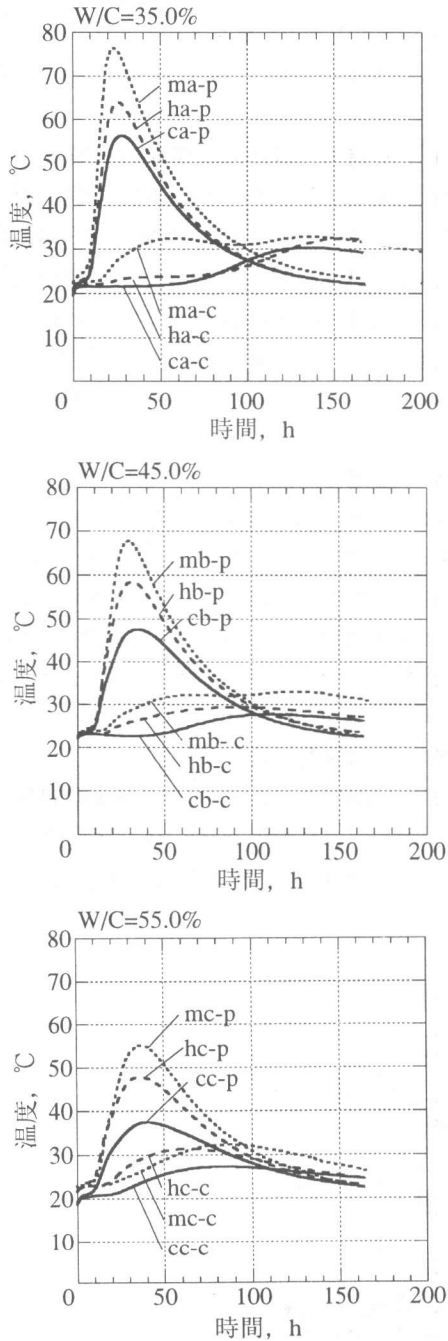


図-3 調合条件の違いによるカプセル混入コンクリートの温度履歴

について、その温度履歴を示す。又、図-4には、得られた温度履歴について、その温度変化の割合を示す。なお、ここに示す温度変化の割合は、測定温度を30分毎にそれぞれ平均温度を求め、それぞれにつ

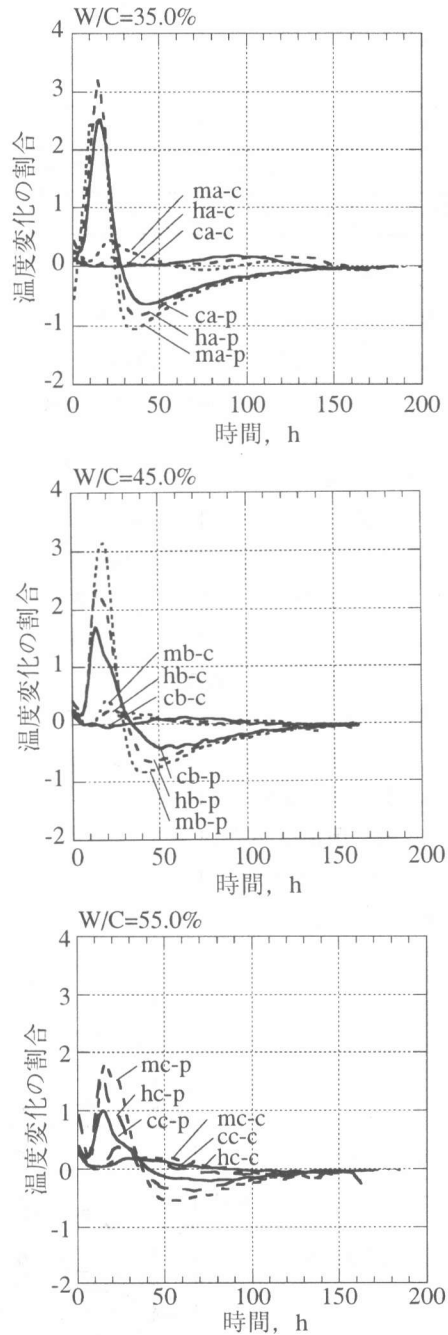


図-4 調合条件の違いによるカプセル混入コンクリートの温度変化の割合

いて、直後の平均温度との差（平均温度の変化量）を時間で除した値である。

図-3から明らかなように、調査条件にかかわらず、カプセル混入コンクリートは、プレーンコンクリートに比べ、コンクリート内部の発生熱が著しく抑制されていることが確認される。又、カプセル混入コンクリートについては、発熱温度ピークが若干移行している傾向が見られるが、この傾向についてもセメント量の差異が影響しているものと考えられる。なお、カプセル混入コンクリートは、初期材齢において、温度の停滞が生じているが、これは、カプセル表面に付着した遅延剤の影響によるものとする。

図-4からもわかるように、カプセル混入コンクリートは、プレーンコンクリートに比べ、X座標軸付近で推移していることから、カプセルを混入することで、コンクリート内部の急激な温度変化を抑制することが可能であると言える。

4.2 実大モデルによる実験

図-5及び図-6には、カプセル混入コンクリート及びプレーンコンクリートの温度履歴及び圧縮強度をそれぞれ示す。なお、図-5には、供試体中央部における温度履歴結果を示す。

カプセル混入コンクリートの温度上昇勾配は、簡易モデルによる実験結果と同様に、プレーンコンクリートに比べ、より緩やかな傾きを示している。又、その温度上昇勾配に伴って、カプセル混入コンクリートの最高上昇温度（最高温度：48℃）も約25℃と、プレーンコンクリートの約65%に抑制されており、カプセルを混入することで、コンクリート内部の急激な温度変化を緩和することができたものと言える。これは、48℃付近で温度曲線の変曲点を得られており、カプセルの反応温度である48℃と同程度であることから、適切な水和熱抑制効果が現れたものとする。又、本論文では、供試体中央部における温度履歴のみを示しているが、他の測定点においても同様の測定値を示したことから、供試体中において、カプセルは均一に分散していたものと推察される。

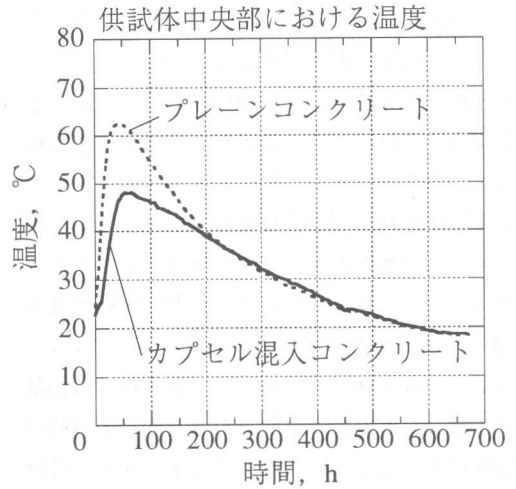


図-5 カプセル混入コンクリート及びプレーンコンクリートの温度履歴

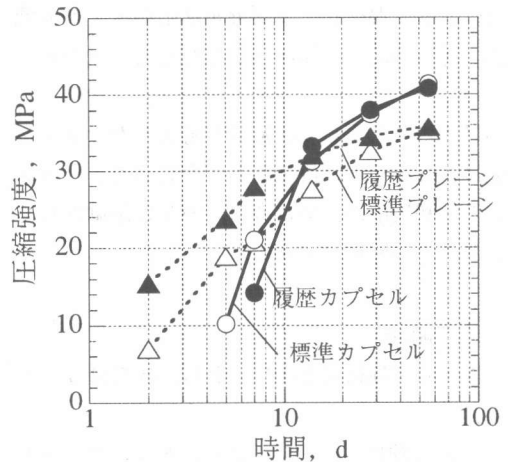


図-6 カプセル混入コンクリート及びプレーンコンクリートの圧縮強度

ここで、実大モデルによる実験は、前述した簡易モデルにおけるcc-p（プレーンコンクリート）及びcc-c（カプセル混入コンクリート）に相当するが、最大温度及び抑制効果について大きな差（絶対値として）が生じている。これについては、供試体寸法、つまり供試体体積の違い（1：125）が起因しているものと推察される。

養生初期において、カプセル混入コンクリートは、シリンダーの付着強度がコンクリートの強度を上回り、脱型強度が得られなかった。これ

は、前述した温度履歴の結果からもわかるように、カプセルを混入することで、セメントの水和反応が阻害され、初期材齢においては、セメントの水和反応が十分に進行しておらず、圧縮強度が得られなかったものとする。しかしながら、材齢14日以降の圧縮強度については、養生条件にかかわらず、プレーンコンクリートに比べ、カプセル混入コンクリートの圧縮強度が10%程度高くなる傾向を示している。これは、プレーンコンクリートに比べ、初期材齢の段階で急激な温度上昇がなかったことが、その後の強度増進に寄与したものとする。なお、標準養生を行ったカプセル混入コンクリートの圧縮強度は、初期材齢の段階において、履歴養生を行ったものよりも若干高くなる傾向にある。これは、養生温度が、カプセル反応温度よりも低く、養生初期に水和反応が進行したことを示している。

以上のことから、遅延剤を封入したカプセルをコンクリートに混入することにより、セメントの水和反応が、当初の狙い通りに制御されていることが明らかである。

5. 結論

以上の実験結果を総括すれば、次の通りである。

- (1) 本実験は、インテリジェントコンクリートの研究開発の一環として行ったセメントの水和熱制御方法の提案であったが、開発したカプセルは、本実験の結果からも明らかのように、十分な効果が得られているものとする。
- (2) 簡易モデルによる実験から、調合条件にかかわらず、カプセルをコンクリートに混入することにより、セメント水和熱が低くなる傾向にある。
- (3) カプセルの分散性については、実大モデルによる実験で得られた温度測定結果より、十分に均一であったものとする。
- (4) 本実験における実大モデルで得られたセメント水和熱の制御効果より、実用に十分に供

せることが明らかとなった。

謝辞

本実験を行うに当たり、東北大学大学院工学研究科 乾弘泰氏、株式会社スリーボンド研究所 石丸泰象氏及び青木一志氏のご協力を頂きました。ここに、心よりお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 三橋博三, 乾 弘泰: インテリジェントコンクリートの開発に関する実験的考察 ; 止水機能の自己回復, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.1181-1182, 1998.9
- [2] 渡邊宗幸, 大濱嘉彦, 出村克宣, 三橋博三: 硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルにおける自己修復機能の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.89-90, 1998.9
- [3] 杉田 稔: インテリジェント・コンクリート, コンクリート工学, Vol.32, No.7, pp.146-149, 1994.7
- [4] 三橋博三ほか: 自己修復機能を有するインテリジェントコンクリートの開発に関する研究, 科研費報告書, 1998.3
- [5] 乾 弘泰: 水和熱による温度ひび割れの自己抑制機能を有するインテリジェントマスコンクリートの開発に関する研究, 平成10年度東北大学大学院修士論文, 1999.3