

# 論文 高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす水和発熱上昇速度の影響

具岡諱\*1・金圭庸\*2・吉培秀\*3・金武漢\*2

**要旨：** 本研究では初期材齢において高強度コンクリートの水和発熱上昇速度を調節するため、試験体寸法を変化させた場合とセメントの水和熱及び水和反応を考慮した相転移物質及びマイクロカプセル遅延剤を用いた場合に対する水和熱と自己収縮との相関関係を明らかにした。その結果、試験体寸法が大きいほど最大水和温度、水和発熱上昇速度及び自己収縮特性に影響があり、相転移物質及びマイクロカプセル遅延剤による水和発熱上昇速度が低減し自己収縮が減少する傾向を示した。

**キーワード：** 試験体寸法, 相転移物質, マイクロカプセル遅延剤, 高強度コンクリート, 水和熱, 自己収縮

## 1. はじめに

水和熱は水和反応促進に影響を及ぼし、また初期材齢において自己収縮に影響を及ぼす要因としても作用する<sup>1), 2)</sup>。既往の研究<sup>3)</sup>では水和熱と自己収縮の関係を定量的に分析するため、初期材齢において水和温度と自己収縮を考慮した分析方法を提示した。その結果、水和発熱上昇区間での温度履歴特性が自己収縮と密接な関係があることが分かった。

本研究の目的は、初期材齢において高強度コンクリートの水和発熱上昇速度と自己収縮との相関関係を明らかにすることである。水和発熱上昇速度に影響を及ぼす材料的要因として、図-1に示すように①部材寸法による水和発熱量の影響、②セメント水和発熱量の調節、③セメント水和反応を徐々に遅延する方法などがあり、個々について検討する必要がある。

このため普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに対し、試験体の寸法条件と水和発熱上昇速度調節剤としての相転移物質(PM)及びマイクロカプセル遅延剤(MR)による水和熱と自己収縮の相関関係を評価した。

## 2. 実験計画および方法

### 2.1 実験計画

表-1に本研究の実験計画を示す。水和発熱上昇速度と自己収縮に対する試験体の寸法効果の影響を検討するために100×100×400mm及び150×150×600mmの標準養生試験体と、実部材を考慮して300×300×300mm簡易断熱試験体をそれぞれ作製した。

また、水和発熱上昇速度を低減させるため、相転移物質及びマイクロカプセル遅延剤を、セメントの水和作用を考慮して、セメント重量に対し3%及び0.4%にした。水和温度及び自己収縮測定のための試験体寸法は300×

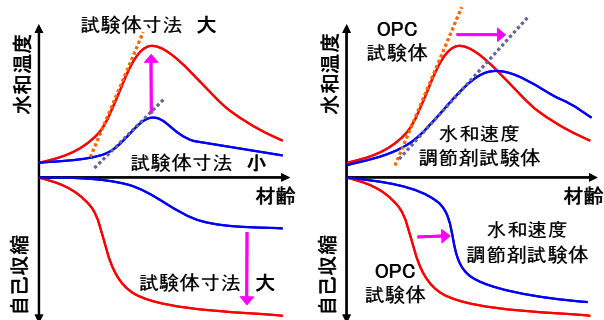


図-1 水和熱と自己収縮の特性概要

表-1 実験計画

区分	W/C	試験体寸法 (mm)	水和速度調節剤 混入率 (%)	
			PM <sup>1)</sup>	MR <sup>2)</sup>
OPC	0.20	100×100×400	—	—
		150×150×600	—	—
		300×300×300 (簡易断熱養生)	—	—
OPC + 調節剤	0.20	300×300 - PM3.0	3.0	—
		300×300 - MR0.4	—	0.4

1) PM: 相転移物質  
2) MR: マイクロカプセル遅延剤

300×300mmの簡易断熱試験体とした。

### 2.2 使用材料および調合

表-2にコンクリートに使用した材料の種類及び特性を示す。表-3はコンクリートの調合を示したもので、W/Cは20%、単位セメント量は800kg/m<sup>3</sup>に設定した。

### 2.3 試験体の作製および試験方法

高強度コンクリートの内部水和温度及び自己収縮測定のための試験体の作製において、寸法300×300×300mm試験体は厚さ100mmの発泡ポリスチレン断熱材

\*1 大韓民国 忠南大学校 大学院 建築工学科 博士課程 (正会員)  
\*2 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 教授 工博 (正会員)  
\*3 大韓民国 (株)TRIPOD 工博 (正会員)

表-2 使用材料の種類と特性

種類	物理・化学的性質
セメント	普通ポルトランドセメント 密度: 3.15g/cm <sup>3</sup> , 粉末度: 3,770cm <sup>2</sup> /g
細骨材	海砂, 密度: 2.54g/cm <sup>3</sup> F.M.: 3.05, 吸水率: 1.01%
粗骨材	碎石, 密度: 2.65g/cm <sup>3</sup> F.M.: 6.02, 吸水率: 1.39%
相転移物質	構成: Sr(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O, 融点: 88°C 融解熱: 82 cal/g, 比熱: 0.44 cal/g°C
マイクロカプセル遅延剤	コーティング: パラフィン有機物 遅延剤: 粉末型遅延剤
高性能減水剤	ポリカルボン酸系

表-3 コンクリートの調合

W/C (%)	Slump-flow (mm)	S/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	G	S
20	650±50	0.47	160	800	781	664

で簡易断熱し、型枠を脱型せずにコンクリートの温度と自己収縮を測定した。寸法 100×100×400mm と寸法 150×150×600mm 試験体については1日後に型枠を脱型し、PE フィルムとアルミニウム接着テープで密封した。試験体の内部温度と自己収縮は熱伝対と埋込み型ひずみゲージを用いて測定し、測定時間は10分毎に材齢91日までデータロガーで自動記録した。

自己収縮を評価するためには初期水和熱による熱膨張の影響を考慮して補正しなければならない。本研究では熱膨張を除いた自己収縮を式(1)により算出した。<sup>4)</sup>

$$\epsilon_{auto} = \epsilon_{total} - \epsilon_{thermal} \quad (1)$$

ここに、 $\epsilon_{auto}$  : 自己収縮 ( $\times 10^{-6}$ )

$\epsilon_{total}$  : 測定した変形 ( $\times 10^{-6}$ )

$\epsilon_{thermal}$  : 水和熱による熱変形 ( $\times 10^{-6}$ )

また、水和熱による熱変形は式(2)により算出した。

$$\epsilon_{thermal} = \gamma \times \Delta t \quad (2)$$

ここに、 $\gamma$  : コンクリートの熱膨張係数 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )

$\Delta t$  : 温度変化 ( $^{\circ}\text{C}$ )

コンクリートの熱膨張係数( $\gamma$ )は各調合および骨材の特性によって異なり、また初期材齢コンクリートの場合水和反応が進むにつれて熱膨張係数の値が変化するため実測値を用いるべきである。本研究では既往の研究<sup>3)-6)</sup>に基づき、図-2のように熱伝対と埋込み型ゲージを埋め込んだ  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  試験体を作製した後、水槽中の水温を上昇させ、その時の試験体の温度増加量および膨張量を測定して熱膨張係数を算定した。

一方、図-3に熱膨張係数に対する補正の模式図を示す。熱膨張係数は図-3(a)に示すように測定した熱膨張

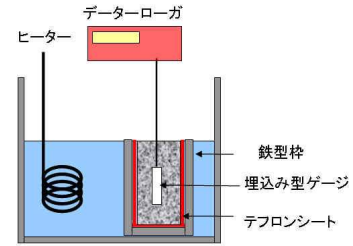


図-2 熱膨張係数の測定試験模式図

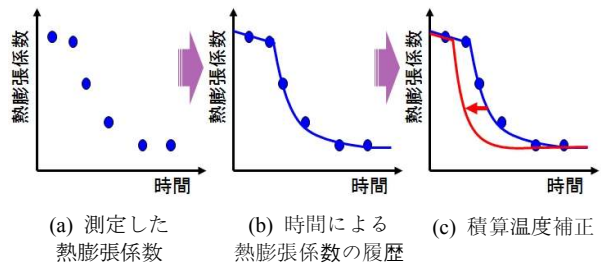


図-3 測定した熱膨張係数に対する補正の模式図

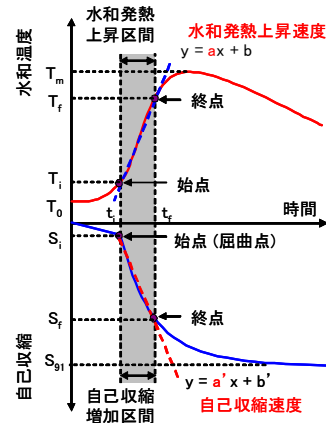


図-4 水和発熱および自己収縮の挙動特性の分析概要

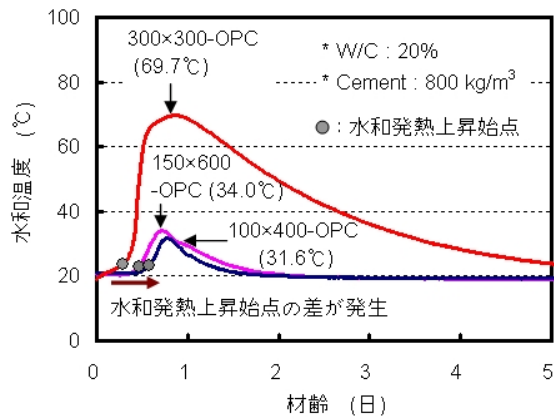
係数は回帰分析により図-3(b)のように熱膨張係数の履歴曲線を類推することができる。

しかし、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$  試験体の熱膨張係数は水和熱による熱膨張変形の影響を受けにくい、 $300 \times 300 \times 300\text{mm}$  簡易断熱試験体の場合、初期に発生する高い水和熱による熱膨張変形の影響を考慮しなければならない。

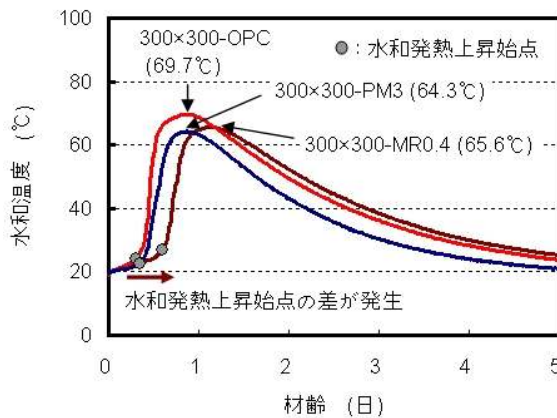
そこで、熱膨張係数を測定した  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  試験体と各々の試験体の積算温度(Maturity)を算定した後、材齢換算係数を求めて図-3(c)のように熱膨張係数の補正を行った。なお、積算温度を算定するための基準温度は $-10^{\circ}\text{C}$ とした。

## 2.4 水和発熱と自己収縮との相関関係の分析方法

初期材齢において水和熱と自己収縮の特性を定量的に分析するため、既往の研究<sup>3)</sup>では図-4のように水和温度と自己収縮が急激に上昇する区間、すなわち水和発熱上昇区間及び自己収縮上昇区間が設定されている。この区間の勾配である水和発熱上昇速度と自己収縮速度



(a) 試験体寸法による水和温度



(b) 水和熱調節による水和温度

図-5 試験体の寸法と水和熱調節による水和温度

表-4 水和発熱上昇区間の設定

区分	始点		終点		回帰式
	時間 (hr.)	温度 (°C)	時間 (hr.)	温度 (°C)	
100×400 - OPC	11.5	21.3	16.7	29.7	$Y = 1.91 + 1.59X$
150×600 - OPC	13.0	20.7	19.5	31.1	$Y = -2.07 + 1.63X$
300×300 - OPC	5.5	25.8	9.7	62.5	$Y = -34.7 + 9.90X$
300×300 - PM3.0	7.2	21.8	14.8	55.5	$Y = -18.8 + 3.82X$
300×300 - MR0.4	13.0	25.1	19.3	56.6	$Y = -50.4 + 5.40X$

の関係を明らかにするため、試験体の寸法と、相転移物質及びマイクロカプセル遅延剤を用いて水和発熱上昇速度を変化させ、水和熱と自己収縮との関係を統計的に求めた。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 水和発熱の性状

図-5 に試験体の大きさ及び水和熱調節による水和温度を示す。100×400 - OPC 及び 150×600 - OPC 試験体の場合、最高温度は 31.6°C 及び 34.0°C であり、300×300 - OPC 試験体の最高温度 69.7°C に比べて 55% 及び 51% 低

かった。

水和熱調節において、300×300 - PM3.0 及び 300×300 - MR0.4 試験体の最高温度は、相転移物質及びマイクロカプセル遅延剤の熱吸収性及び水和遅延性能によりそれぞれ 64.3°C 及び 65.6°C となり、300×300 - OPC 試験体に比べ水和最高温度が約 8% 及び 6% 程度低かった。

また、300×300 - OPC 試験体の最高温度までの到達時間は、試験体の作製後 21 時間であった。300×300 - PM3.0 試験体の場合 OPC と同じく、21 時間後に最高温度に到達したが、300×300 - MR0.4 試験体の最高温度は約 5.3 時間遅延した。これは混入した各物質の特性によるもので、相転移物質は発生された熱のみを吸収するが、マイクロカプセル遅延剤の場合、水和反応を遅延させたことによる影響であると思われる。

表-4 は水和発熱上昇区間の特性を示したものである。100×400 - OPC 及び 150×600 - OPC 試験体の水和発熱上昇速度は 1.59°C/hr 及び 1.63°C/hr となったが、300×300 - OPC 試験体は小型試験体に比べて約 6 倍である 9.90°C/hr の上昇速度であった。

一方、300×300 - PM3.0 及び 300×300 - MR0.4 試験体の水和発熱上昇速度はそれぞれ 3.82°C/hr 及び 5.40°C/h となり、300×300 - OPC 試験体に比べて緩やかである。

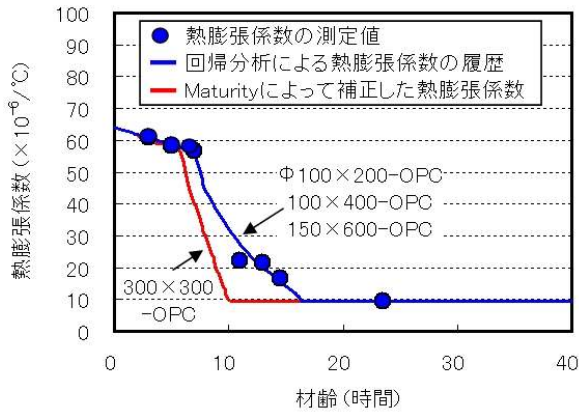
このように試験体の寸法と相転移物質及びマイクロカプセル遅延剤によって高強度コンクリートの最大水和温度と水和発熱上昇速度に影響を及ぼすことを確認することができた。

#### 3.2 水和熱を考慮した熱膨張係数の補正

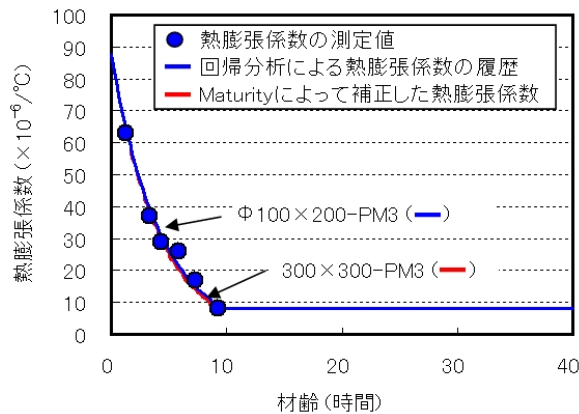
図-6 に熱膨張係数の測定と水和熱を考慮した補正を示す。初期状態でのコンクリートは液状であり熱膨張係数が大きいですが、時間が経過することによって徐々に減少する傾向を示した。

OPC 試験体において 100×400 - OPC 及び 150×600 - OPC 試験体の熱膨張係数は、 $\phi 100 \times 200$ mm 試験体によって測定された熱膨張係数履歴と同様の傾向であり、約 7.5 時間以後から値が減少し、約 16.3 時間以降は約  $9.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  で一定値となった。しかし、300×300 - OPC 試験体は高い水和温度による積算温度補正により、約 6 時間後から熱膨張係数は他の試験体よりも急激に減少し、約 10 時間後からは約  $9.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  で一定値となった。

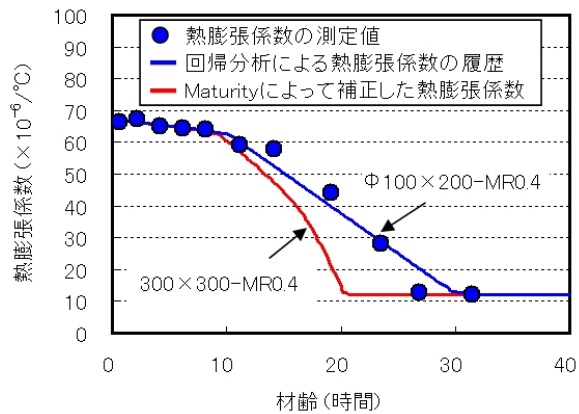
一方、相転移物質 PM を 3.0% を混入した  $\phi 100 \times 200$ mm 試験体は熱膨張係数が打設直後から急激に減少し、約 9.3 時間後から約  $8.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  の値となった。また、300×300 - PM3.0 試験体の熱膨張係数は  $\phi 100 \times 200$ mm 試験体と同じ傾向を示した。これは初期に熱膨張係数が一定の値となり、約 10 時間以後から発生する高い水和熱の影響がほとんど無かったためだと考えられる。



(a) OPC 試験体



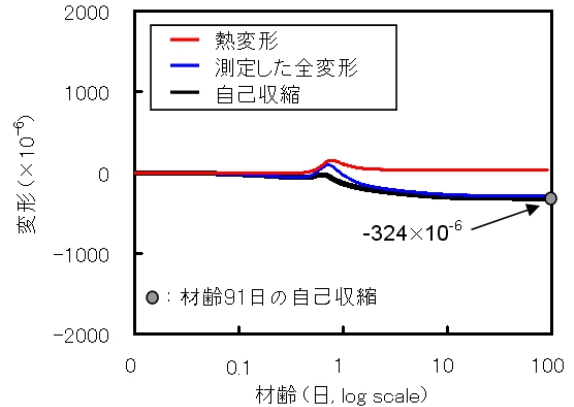
(b) OPC+PM3.0 試験体



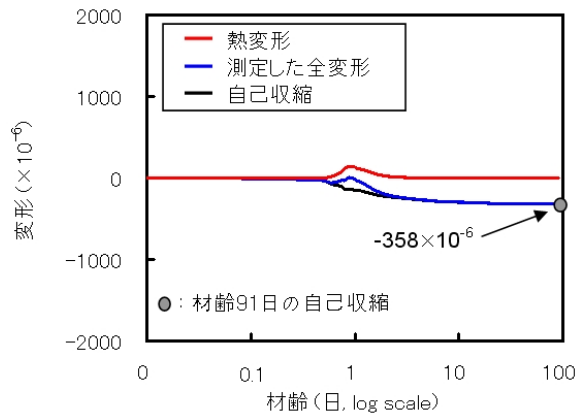
(c) OPC+MR0.4 試験体

図-6 熱膨張係数の測定と水和熱を考慮した補正

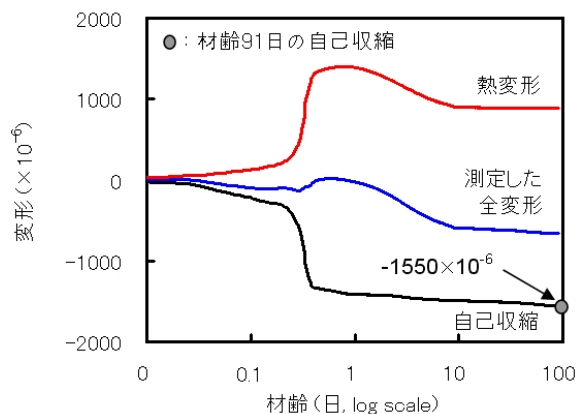
マイクロカプセル遅延剤 MR を 0.4% 混入した  $\Phi 100 \times 200 \text{mm}$  試験体は熱膨張係数が打設直後から 10 時間まで緩やかに減少し、約 30 時間以後は約  $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  で一定値となった。300×300 - MR0.4 試験体を積算温度で補正した結果、約 20 時間後から一定値となった。マイクロカプセル遅延剤によって水和反応が遅延され、コンクリートの液状状態から塑性状態、そして固体状態へ徐々に変化して熱膨張係数が緩慢に小さくなり、その後一定になったと考えられる。



(a) 試験体寸法 100×100×400mm-OPC



(b) 試験体寸法 150×150×600mm-OPC



(c) 試験体寸法 300×300×300mm-OPC

図-7 OPC コンクリートの熱変形及び自己収縮

### 3.3 熱変形を考慮した自己収縮

図-7 に試験体寸法別の OPC コンクリートの熱変形及び自己収縮を示す。100×400 - OPC, 150×600 - OPC 及び 300×300 - OPC 試験体の材齢 91 日の自己収縮はそれぞれ  $324 \times 10^{-6}$ ,  $358 \times 10^{-6}$  及び  $1550 \times 10^{-6}$  であり、試験体寸法が大きくなるほど高い水和熱の影響により自己収縮も大きくなる傾向を示した。

また、図-8 と図-9 に相転移物質とマイクロカプセル遅延剤コンクリートの熱変形及び自己収縮を示す。

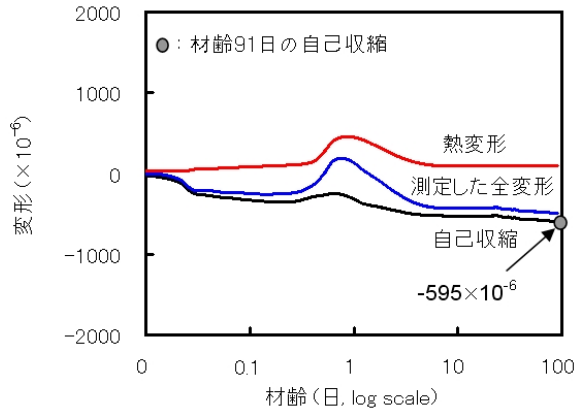


図-8 相転移物質(PM3.0)コンクリートの熱変型及び自己収縮 (300×300×300mm)

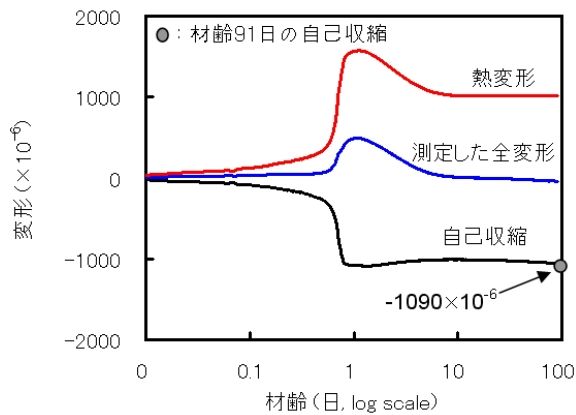


図-9 マイクロカプセル遅延剤(MR0.4)コンクリートの熱変型及び自己収縮 (300×300×300mm)

表-5 自己収縮増加区間の設定

区分	始点		終点		回帰式
	時間 (hr.)	収縮 (×10 <sup>-6</sup> )	時間 (hr.)	収縮 (×10 <sup>-6</sup> )	
100×400 - OPC	16.7	-17	31.8	-166	Y = 117-9.40X
150×600 - OPC	10.5	-25	23.2	-136	Y = 70.3-9.54X
300×300 - OPC	5.2	-332	8.8	-1243	Y = 1169-267X
300×300 - PM3.0	16.5	-250	39.7	-408	Y = -135-7.48X
300×300 - MR0.4	14.0	-335	17.8	-876	Y = 1818-149X

300×300 - PM3.0 及び 300×300 - MR0.4 試験体の材齢 91 日の自己収縮はそれぞれ  $595 \times 10^{-6}$  及び  $1090 \times 10^{-6}$  であり, 300×300 - OPC 試験体に比べて 38%及び 70%低い値であった。

一方, 表-5 は各試験体の自己収縮増加区間を設定したものである。OPC では 100×400 - OPC 及び 150×600 - OPC 試験体の自己収縮速度は  $-9.40 \times 10^{-6}/\text{hr}$  及び  $-9.54 \times 10^{-6}/\text{hr}$ , 300×300 - OPC 試験体は小型試験体に比べて約 30 倍である  $-267 \times 10^{-6}/\text{hr}$  であった。

また 300×300 - PM3.0 及び 300×300 - MR0.4 試験体

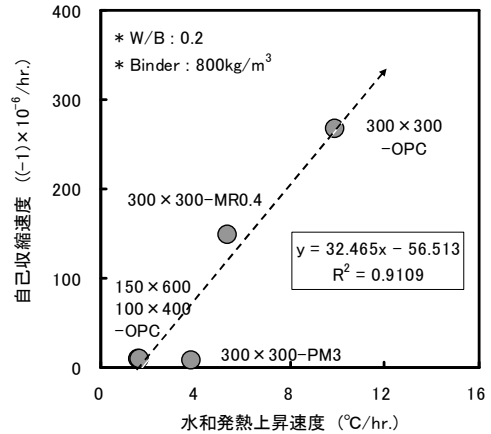


図-10 水和発熱上昇速度と自己収縮速度の関係

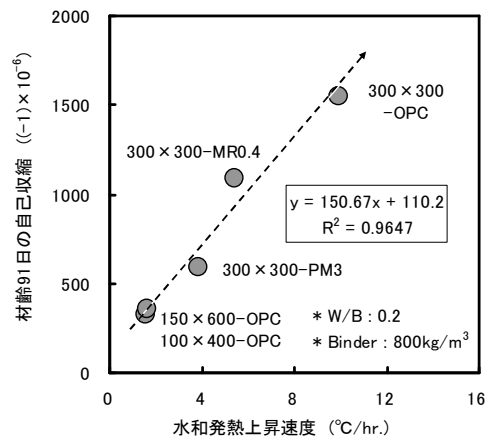


図-11 水和発熱上昇速度と材齢 91 日の自己収縮の関係

の自己収縮速度はそれぞれ  $-7.48 \times 10^{-6}/\text{hr}$  及び  $-149 \times 10^{-6}/\text{hr}$  であり, 300×300 - OPC 試験体に比べそれぞれ 3% 及び 55%低い値を示した。

### 3.4 水和発熱特性と自己収縮特性の関係

図-10 に水和発熱上昇速度と自己収縮速度の関係を示す。水和発熱上昇速度の要因となる試験体の寸法, 相転移物質及びマイクロカプセル遅延剤による水和発熱上昇速度と自己収縮速度は高い相関関係があると考えられる。

図-11 に水和発熱上昇速度と材齢 91 日の自己収縮の関係を示す。本研究の範囲内において, 普通ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートに対し, この関係を数式で表すと式(3)のようになる。

$$AS_{91} = a \cdot HV + b \quad (3)$$

- ここに,  $AS_{91}$  : 材齢 91 日自己収縮 (×10<sup>-6</sup>)
- $HV$  : 水和発熱上昇速度 (°C/hr)
- $a$  : 収縮変換係数 (×10<sup>-6</sup>.hr/°C)
- $b$  : 自己収縮補正定数 (×10<sup>-6</sup>)

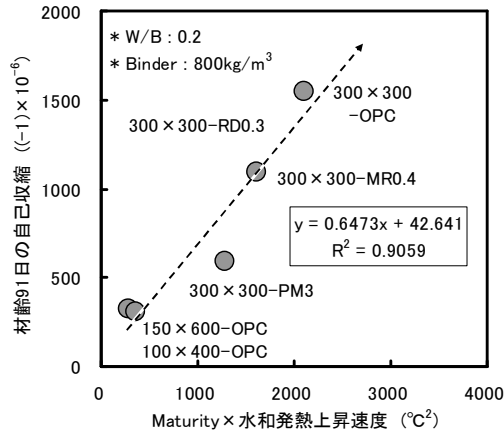


図-12 水和発熱上昇速度及び積算温度の関数と材齢91日の自己収縮の関係

この相関関係から収縮変換係数と自己収縮補正定数を導き数式に表すと式(4)になる。

$$AS_{91} = 105.67 \cdot HV + 110.2 \quad (4)$$

図-12 に水和発熱上昇区間の積算温度を考慮した水和発熱上昇速度と材齢91日の自己収縮の関係を示す。この関係を数式で表すと式(5)のようになる。

$$AS_{91} = c \cdot M_{HS} \cdot HV + d \quad (5)$$

ここに、 $M_{HS}$  : 水和発熱上昇区間の積算温度 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{hr}$ )  
 $c$  : 収縮変換係数 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}^2$ )  
 $d$  : 自己収縮補正定数 ( $\times 10^{-6}$ )

本研究の範囲で得られた結果を数式で表すと式(6)のようになる。

$$AS_{91} = 0.6473 \cdot M_{HS} \cdot HV + 42.641 \quad (6)$$

#### 4. まとめ

初期材齢において高強度コンクリートの水和発熱上昇速度と自己収縮との関係を検討した結果は次の通りである。

- (1) 初期材齢において、高強度コンクリートの試験体寸法と相転移物質及びマイクロカプセル遅延剤の効果により、水和発熱量及び水和発熱上昇速度に影響をおよぼす。
- (2) コンクリート硬化後の熱膨張係数は一定な値となるが、初期コンクリートの液状状態から塑性状態、固体状態への状態変換による熱膨張係数は水和反応が進むにつれて熱膨張係数の値が変化するため実測値を考慮する必要がある。
- (3) 水和発熱量及び水和発熱上昇速度が高いほど自己収縮量は大きくなるが、相転移物質及びマイクロカプセル遅延剤の混入によって自己収縮が低減する効果がある。

- (4) 水和発熱上昇速度と自己収縮特性との相関関係に基づいて、初期材齢での水和発熱上昇速度の調節による自己収縮を低減することが可能であると考えられる。

#### 謝辞

本論文は2009年度韓国政府の財源による韓国研究財団の支援を受けて遂行された研究(R01-2007-000-11142-0)であり、研究者の一部は2段階BK21事業の支援を受けました。

#### 参考文献

- 1) Bjøntegaard, Ø., Sellevold, E.J. and Hammer, T.A. High Performance Concrete at Early Ages: Self-generated Stresses Due to Autogenous Shrinkage and Temperature, In the Int. Semina : Self-desiccation and its Importance in Concrete Technology, Lund, Sweden, pp. 1-7, 1997
- 2) Hydration Heat and Autogenous Shrinkage of High-Strength Mass Concrete, Journal of Asian and Building Engineering, Vol.8, p.509-516, 2009
- 3) Horita, T. and Nawa, T.: A Study on Autogenous Shrinkage of Cement Mixes, J. Struct. Constr. Eng., A IJ 542, pp. 9-15, 2001
- 4) Loukili, A., Chopin, D., Khelidj, A. and Touzo, J. L.: A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history”, Cement and Concrete Research 30, pp. 915-922, 2000
- 5) Turcry, P., Loukili, A., Barcelo, L. and Casabone, J. M. (2002) Can the maturity concept be used to separate the autogenous shrinkage and thermal deformation of a cement paste at early age, Cement and Concrete Research 32, 1443-1450
- 6) Viviani M, Glisic B. and Smith I.F.C., Separation of thermal and autogenous deformation at varying temperatures using optical fiber sensor, Cement and Concrete Composite 29, 2007, pp. 435-447
- 7) 自己収縮研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1996
- 8) T. Takahasi, H. Nakata, K. Yosida and S. Goto: Influence of Hydration on Autogenous Shrinkage of Cement Paste, Concrete Research and Technology 7, pp.137-142, 1996