論文 高強度コンクリートの水和発熱と自己収縮の初期特性に及ぼす 試験体寸法および遅延剤の影響

李義培*1·金圭庸*2·南正樹*1·嚴泰善*3

要旨:試験体寸法が大きいほど最大水和温度上昇量,水和発熱上昇区間の水和温度上昇量,材齢91日における自己収縮および自己収縮増加区間の自己収縮量は増加し,遅延剤を混入した場合にはその値は減少する傾向が見られた。また,水和発熱上昇速度と材齢91日における自己収縮の比例関係から,自己収縮は初期材齢の水和発熱上昇速度によって影響を受けると推察された。一方,凝結時間と屈曲点および水和温度上昇時点はセメントの水和反応において密接な関係があることを確認した。

キーワード:試験体寸法,遅延剤,高強度コンクリート,水和熱,自己収縮,初期特性

1. はじめに

水和熱および自己収縮は高強度コンクリートの基本 的な初期材齢特性として密接な関係があり,初期材齢に おいて水和発熱特性は自己収縮に影響を及ぼす。

既往の研究では、セメントペースト、モルタルおよび コンクリートで発生する自己収縮の大きさおよび発現 率は初期材齢の内部温度の履歴と大きさによって影響 を受けると報告されている^{1),2),3),4),5)}。一方、W/C が低い 高強度コンクリートの場合、打ち込み後数日以内に自己 収縮の大部分が発現するため⁶⁾、初期材齢の水和熱およ び自己収縮の特性と関係は高強度コンクリートの自己 収縮において非常に重要だと考えられる。

従って、本研究では試験体寸法および遅延剤の影響に よる高強度コンクリートの水和発熱および自己収縮の 挙動特性を分析し、初期材齢の水和熱および自己収縮の 特性と関係を定量的に検討した。また、凝結の始発およ び終結の水和物成分分析を行い、自己収縮評価の基準で ある凝結時間と水和温度および自己収縮の履歴特性と の関係を検討した。

2. 実験計画および方法

2.1 実験計画

表-1 は本研究の試験体の条件を示したものである。 高強度コンクリートの水和発熱と自己収縮の関係を評 価するため,試験体の寸法は 100×100×400mm 試験体 を基準にして,試験体の厚さと長さを 1.5 倍大きくした 150×150×600mm 試験体を作製した。また,実部材の 寸法を考慮して 300×300×300mm の簡易断熱試験体を 作製し,加えて遅延剤による初期材齢の水和熱および自 己収縮の特性を検討するため遅延剤 0.3%を混入した 300×300×300mm 試験体も作製した。

表-1 試験体の条件

区分		条 件		
寸法 ¹⁾	$100^{2} \times 400$	$150^2 \times 600$	300 ² >	×300
養生	気中	簡易断熱		
遅延剤混入	無	無し	有り	
凝結試験体	-	モルタル	-	

1) 寸法:(試験体の断面長さ)²×(試験体の長さ)(mm)

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† 密度: 3.15g/cm ³ , 料	セメント 分末度: 3,770cm ² /g
細骨材	海砂, 窖 F.M.: 3.05, 吸	昏度:2.54g/cm ³ 数水率: 1.01%
粗骨材	砕石, 密 F.M.: 6.02, 吸	5度:2.65g/cm ³ 数水率: 1.39%
遅延剤	糖類系	
高性能減水剤	ポリカルボン酸系	

一方,水和温度および自己収縮の履歴と凝結時間との 関係を検討するため,水和温度,自己収縮および凝結時 間を寸法 150×150×600mm モルタル試験体により測定 した。水和物の成分分析を行うため同一条件のセメント ペースト試験体も作製し,練混ぜ前のセメント粉末,始 発時,終結時および一日後の硬化した試料を採取して XRD 分析を行った。

2.2 使用材料および調合

表-2 はコンクリート使用材料の種類および特性を示 したものである。 **表-3** はコンクリートの調合を示した もので, W/C 20%と単位セメント量 800kg/m³に設定した。 2.3 試験体の作製および試験方法

*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 助教授 工博 (正会員) *3 雙龍洋灰工業(株) 技術研究所 コンクリート研究室 室長 工博 (正会員)

W/C	Slump -flow (mm)	S/a	鼡	赴 (kg/n	(kg/m^3)		
(%)		5/a	W	С	G	S	
20	650±50	0.47	160	800	781	664	

表-3 コンクリートの調合



図-1 水和温度および自己収縮の測定試験模式図



図-2 熱膨張係数の測定試験模式図

水和温度および自己収縮の測定のための試験体の作 製および試験模式図を図-1 に示す。寸法 300×300× 300mm 試験体は厚さ100mmの発泡ポリスチレン断熱材 で簡易断熱処理し,型枠を脱型せずにコンクリートの温 度と自己収縮を継続的に測定した。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使用して測定し,測定時間は10 分間隔で91日までデーターローガ(Data-logger)で記録し た。

一方,自己収縮を評価するためには初期水和熱による 熱膨張の影響を取り除くために補正しなければならな い。これより本研究では熱膨張を取り除いた自己収縮を 式(1)により計算した。

$$\mathcal{E}_{f} = \mathcal{E}_{i} \times C_{\varepsilon} + (C_{\beta} - \gamma) \times \Delta_{t} \tag{1}$$

ここに、 ϵ_f : 熱膨張を取り除いた自己収縮 (×10⁻⁶)

ε_i: 測定した収縮 (×10⁻⁶)

C₈: ゲージの校正係数 (×10⁻⁶/1×10⁻⁶)



図-3 水和発熱および自己収縮の挙動特性の分析概要

特性係数		定義および算定方法
	始点	- 終点を基準して回帰分析し, 決定係数が 0.95 以上になる時点
水和	終点	- 最大温度上昇量の 80% ¹⁾ にな 時点
熱	温度上昇量	- 区間の温度上昇量 - 上昇量 = T _f -T _i
上 昇 区 間	温度上昇率	- 最大温度上昇量に対する区間の 温度上昇率 - 上昇率=(T _f - T _i)/(T _m -T ₀)×100
⊨J _	水和発熱 上昇速度	- 区間の勾配 - 回帰式の回帰係数 (a)
	始点	- 屈曲点
自己	終点	- 屈曲点を基準に回帰分析して 決定係数が0.95 以上になる時点
収縮	縮増量	- 区間の縮増量 - 縮増量 = S _f - S _i
増 加 区	縮増率	- 材齢 91 日における自己収縮に 対する区間の縮増率 - 縮増率 = (S _f - S _i)/S ₉₁ ×100
	自己収縮速度	- 区間の勾配 - 回帰式の回帰係数 (a´)

 断熱温度上昇式による断熱温度上昇曲線を分析した 既往の研究^つの結果である。

C_β: ゲージの温度補正係数 (×10⁻⁶/℃)

γ:試験体の熱膨張係数 (×10⁻⁶/℃)

Δt: 温度変化(℃)

コンクリートの熱膨張係数(γ)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 め実測値を使用しなければならない。本研究ではコンク リートの温度を一時的に急上昇させて膨張量を計測し た既往の研究⁴⁾を基に,図-2 に示すように熱伝対と埋 込み型ゲージを埋め込んだ*Φ*100×200mm 試験体を作製



図-4 熱膨張係数の測定結果

表一5 熱膨張係数	の算定結果
-----------	-------

調合	時間毎に適用し	時間毎に適用した熱膨張係数1)						
1077-20	7時間以前	y = -1.06x + 64.1						
進延剤 無混入	7 時間 ~ 24 時間	$y = 83.23e^{-0.099x}$						
	兵混入 7 時間 ~ 24 時間以後 24 時間以後	9.5						
	8時間以前	y = -1.03x + 66.4						
遅 並 剤 混 入	8 時間 ~ 30 時間	$y = 93.55e^{-0.0768x}$						
	30 時間以後	10.2						

1) y: 熱膨張係数 (×10⁻⁶/°C), x: 時間 (hr.)

した後,水槽中の水温度を10分間約15℃づつ上昇させ, 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。

2.4 水和発熱および自己収縮の挙動特性の分析方法

初期材齢の水和温度と自己収縮の挙動特性を定量的 に分析するため、本研究では図-3のように水和温度お よび自己収縮が急速に増加する区間である水和発熱上 昇区間および自己収縮増加区間を分析区間と設定した。 区間の設定方法は基準点から回帰分析して決定係数が 0.95以上になる区間までを設定し、水和発熱上昇区間の 基準点は最大温度上昇量の 80%⁷にな時点であり、自己 収縮増加区間の基準点は屈曲点である。また、各々区間 の特性分析と関係検討のために使用した係数の定義お よび算定方法は表-4に示す。



図-5 自己収縮および水和温度の履歴曲線

3. 実験結果および考察

3.1 初期材齢コンクリートの熱膨張係数

初期材齢コンクリートの熱膨張係数の測定結果を示 した図-4 によると遅延剤を混入しなかったコンクリー トの熱膨張係数は試験体の作製後徐々に低下し,約7時 間後からは急速に低下して約24時間以後からは約9.5 ×10⁶/℃で一定値となった。遅延剤を混入したコンクリ ートも同様の傾向を示し,約30時間以後からは約10.2 ×10⁶/℃の値となった。

本研究では実測値を用いて**表-5**に示すように各時間 における熱膨張係数を算出し、これにより自己収縮に対 して熱膨張補正を行った。

3.2 熱膨張補正後の自己収縮と水和温度の履歴特性

図-5 は水和熱による熱膨張を補正した後の自己収縮 と水和温度の履歴を示したものであり、試験体作製直後 から測定した結果である。寸法 $100 \times 100 \times 400$ mm 試験 体の最高水和温度および材齢 91 日における自己収縮は 各々32℃、-308×10⁻⁶で、寸法 $150 \times 150 \times 600$ mm 試験体 の場合は各々34℃、-336×10⁻⁶であった。寸法 300×300 × 300mm 試験体は寸法 $100 \times 100 \times 400$ mm 試験体に比べ て水和温度は約 2.3 倍の 73℃、自己収縮は約 7 倍の

	始	点	終	·点		水和発熱	終点 - 始点	最大温度	区間温度	区間温度
試験体	時間 (hr.)	温度 (℃)	時間 (hr.)	温度 (℃)	回帰式	上昇速度 (℃/hr.)	時間 (hr.)	上昇量 (℃)	上昇量 (℃)	上昇率 (%)
$100^2 \times 400$	11.5	21.3	16.7	29.7	Y = 1.91 + 1.59X	1.59	5.2	10.7	8.4	78.5
$150^2 \times 600$	13.0	20.7	19.5	31.1	Y = -2.07 + 1.63X	1.63	6.5	13.7	10.4	75.9
$300^2 \times 300$	5.5	25.8	9.7	62.5	Y = -34.7+9.90X	9.90	4.17	51.0	36.7	72.0
300 ² ×300(遅延剤)	8.7	25.0	13.3	58.8	Y = -50.2 + 8.01X	8.01	4.67	47.1	33.8	71.8

表-6 水和発熱特性の分析結果

	始	点	彩	冬点		自己収縮	終点 - 始点	91 日	区間	区間
試験体	時間 (hr.)	収縮 (×10 ⁻⁶)	時間 (hr.)	収縮 (×10 ⁻⁶)	回帰式	速度 (×10 ⁻⁶ /hr.)	時間 (hr.)	自己収縮 (×10 ⁻⁶)	収縮量 (×10 ⁻⁶)	収縮率 (%)
$100^{2} \times 400$	16.7	-17	31.8	-166	Y = 117 - 9.40 X	-9.4	15.2	-308	-149	48.2
$150^2 \times 600$	10.5	-25	23.2	-136	Y = 70.3 - 9.54 X	-9.5	12.7	-336	-111	33.0
$300^2 \times 300$	5.3	-343	9.2	-1774	Y = 2024 - 405 X	-405.0	3.8	-2260	-1431	63.8
300 ² ×300(遅延剤)	8.5	-314	13.2	-1523	Y = 2275 - 283 X	-283.0	4.7	-1928	-1209	63.5

表-7 自己収縮特性の分析結果





-2260×10⁻⁶まで増加し、初期水和温度が高いほど自己収 縮も大きくなった。遅延剤を混入した寸法 300×300× 300mm 試験体の水和温度は約 68℃,自己収縮は約 1928×10⁻⁶となり,遅延剤を混入しなかった試験体に比べ て値が小さくなった。一方,すべての自己収縮履歴で打 ち込み後 5~17時間の間に屈曲点が現れ,内部温度が急 速に上昇する時間と類似な傾向で見られた。また,初期 自己収縮と水和温度が急速に増加する履歴の形も非常



図-8 水和発熱上昇区間と自己収縮増加区間の時間

に類似しており³⁾,両者の間には相関性が相当高いと判断された。

3.3 初期材齢の水和発熱および自己収縮の挙動分析

(1) 水和発熱の挙動特性

表-6 は水和発熱上昇区間における挙動特性を分析した結果であり、図-6 は区間の水和温度上昇量および最大温度上昇量に対する区間の上昇率を示したものである。本研究の範囲で水和温度上昇率は全般的に約70~80%であり,最大温度上昇量と水和発熱上昇区間の水和温度上昇量は試験体寸法が大きくなるほど増加する傾向が見られた。

水和発熱上昇速度に関して寸法 100×100×400mm お よび 150×150×600mm 試験体は各々1.59℃/hr.および 1.63℃/hr.となり, 寸法 300×300×300mm 試験体は寸法 100×100×400mm 試験体に比べて約 6 倍の 9.90℃/hr.で 算定され, 試験体寸法が大きくなるほど水和発熱上昇速 度も増加する傾向が見られた。一方, 遅延剤を混入した 試験体の水和発熱上昇速度は減少した。

(2) 自己収縮の挙動特性

表-7 は自己収縮増加区間における挙動特性を分析した結果であり、図-7 は区間の自己収縮量および材齢 91 日における自己収縮に対する区間の収縮率を示したものである。水和発熱特性とは異なり試験体寸法が大きく



図-9 自己収縮速度と材齢 91 日の自己収縮の関係



図-10 水和発熱上昇速度と自己収縮速度の関係

なるほど収縮率も増加し、また材齢 91 日における自己 収縮と自己収縮増加区間の自己収縮量も増加した。

自己収縮速度において, 寸法 100×100×400mm およ び 150×150×600mm 試験体は各々-9.4×10⁻⁶/hr., -9.5×10⁻⁶/hr.となり, 寸法 300×300×300mm 試験体は寸法 100× 100×400mm 試験体に比べて約43倍の-405.0×10⁻⁶/hr.で算 定され, 試験体寸法が大きくなるほど自己収縮速度は増 加する傾向が見られた。 一方, 遅延剤を混入した試験 体の自己収縮速度は減少した。

(3) 水和発熱特性と自己収縮特性の関係

図-8 は水和発熱上昇区間と自己収縮増加区間の時間を比較した図である。寸法 100×100×400mm および 150×150×600mm 試験体の場合水和発熱上昇区間と自 己収縮増加区間の時間差が多少発生した。しかし,寸法 300×300×300mm 試験体は遅延剤の有・無に関係なく水 和発熱上昇区間と自己収縮増加区間の時間は非常に類 似していた。

図-9は自己収縮速度と材齢91日における自己収縮の 関係を示したものであり,自己収縮速度が増加するほど 材齢91日における自己収縮も増加する傾向が見られた。



図-11 150×150×600mm モルタル試験体の水和温度,

自己収縮および凝結時間の測定結果



図-12 練混ぜ前のセメント試料,始発および終結, 1 日後の試料の XRD 分析結果

また,図-10は水和発熱上昇速度と自己収縮速度の関係を示したものであり,水和発熱上昇速度が増加するほど自己収縮速度も増加する傾向が見られた。

図-9と図-10の結果から,水和発熱上昇速度が増加 するほど自己収縮速度と材齢 91 日における自己収縮は 増加する傾向が見られる。すなわち,初期材齢において 水和発熱上昇速度は自己収縮に大きい影響を及ぼすと 考えられる。

3.4 水和発熱および自己収縮の挙動特性と凝結時間の 関係

図-11 は寸法 150×150×600mm モルタル試験体の水 和温度,自己収縮および凝結時間の測定結果で,水和温 度が上昇する時点と自己収縮が急速に増加する屈曲点 が始発時間と終結時間の間に位置づける。

ここで本研究では水和反応による化学成分の変化を 精密に分析するために練混ぜ前のセメント粉末,始発時, 終結時および一日後の硬化した試料を採取して XRD 分 析を行い,その結果を図-12 に示す。

練混ぜ前のセメント試料では石膏および半水石膏の ピークが現れた。しかし、始発時には石膏のピークが減 少しエトリンガイトの生成が観察され、さらに終結時の 石膏は見れずエトリンガイトのピークが高くなった。す なわち、練混ぜ後石膏と水和物の反応によってエトリン ガイトが生成し膨張する。また終結時間で石膏が全部消 費さればエトリンガイトが形態変化を起こし、水和反応 が活性化して水和温度および自己収縮が急速に増加す る。この結果自己収縮履歴に屈曲点が現れ、初期自己収 縮と水和温度が急速に増加する時点が類似であると判 断される⁸⁾。

一方,日本コンクリート工学協会の自己収縮研究委員 会の報告書では自己収縮の基点を凝結の始発として定 義している^の。これは自己収縮をコンクリートのひび割 れの要因として検討するためには流動を伴うフレッシ ュコンクリートの体積変化を除外する必要があり,その 基準を凝結時間としていた。

上記の分析結果を基に,フレッシュコンクリートの液 性状態から硬化状態に変化する時点,凝結時間,屈曲点 および温度上昇時点はセメントの水和反応過程におい て密接な関係があることを確認できた。

4. まとめ

試験体寸法および遅延剤の影響による高強度コンク リートの水和発熱および自己収縮の挙動に対する初期 特性を分析した結果は次のようである。

- (1) 試験体寸法および遅延剤に関係なく、初期材齢での 水和熱と自己収縮が急速に増加する時点とそれらの 履歴曲線の間には高い相関性があると見られた。
- (2) 試験体寸法が大きくなるほど最大水和温度上昇量, 水和発熱上昇区間の水和温度上昇量,材齢91日にお ける自己収縮および自己収縮増加区間の自己収縮量 は増加し,遅延剤を混入した場合にはその値が減少 する傾向が現れた。
- (3) 水和発熱上昇速度と自己収縮速度の比例関係から、 初期材齢での水和発熱上昇速度の調節によって自己 収縮を低減するものが可能であると考えられる。
- (4) ひび割れ評価において有効自己収縮の基準である 凝結時間と屈曲点および水和温度上昇時点はセメン トの水和反応過程において密接な関係があることを 確認した。

謝辞

本論文は2007年度政府(教育科学技術部)の財源に韓国 科学財団の支援を受けて遂行された研究(R01-2007-000 -11142-0)で,研究者の一部は2段階BK21事業の支援を 受けました。また,雙龍洋灰工業(株)技術研究所の李宗 烈所長からご協力を頂き,ここに感謝の意を表します。

参考文献

- Bjøntegaard, Ø., Sellevold, E.J. and Hammer, T.A.: High Performance Concrete at Early Ages: Selfgenerated 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) Bjøntegaard Ø., Sellevold E.J. and Hammer T.A.,: High Performance Concrete at Early Ages: Selfgenerated Stresses Due to Autogenous Shrinkage and Temperature, Supplementary paper at the Third CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, Auckland, New Zeeland, pp. 25-37, 1997
- Horita, T. and Nawa, T.,: A Study on Autogenous Shrinkage of Cement Mixes, J. Struct. Constr. Eng., AIJ 542, pp. 9-15, 2001
- 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) Shima, T., Matsuda, T., Koide, T., Kawakami, H., Suzuki, Y. and Nishimoto, Y.: Autogenous Shrinkage Characteristic of Ultra High-Strength Concrete Cured under High Temperature (Part1. Experimental Result and Shrinkage Decrease Effect by Expansive Admixture), Proceeding of the architectural research meetings of AIJ, pp. 69-70, 2006

 6) 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

- 7) Euibae Lee, Kyoungmo Koo, Gyuyongkim Kim, Sangsoo Lee and Hayoung Song: A Study on the Relationship between Hydration Heat and Autogenous shrinkage of high Strength Concrete, The 7th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia, pp.846-849, 2008
- 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