

# 論文 超速硬セメントを利用したコンクリートの物性に関する研究

鄭然植<sup>\*1</sup>・姜錫和<sup>\*2</sup>・李先祐<sup>\*3</sup>・卞相秀<sup>\*4</sup>

**要旨** : 道路、橋梁、鐵道、滑走路、港灣等の緊急および補修工事、寒中コンクリート等には超速硬セメントが多く使用されており、このような超速硬セメントには非晶質C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>系、Hauyne系、CA系等3種類の形態がある。

本研究は非晶質C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>系、Hauyne系、CA系などの3種類のセメントを利用したコンクリートの物性や耐久性を通じて各セメントの特徴を調査、検討した。

**キーワード** : 超速硬セメント、非晶質C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>系、Hauyne系、CA系、補修工事

## 1. はじめ

道路、橋梁、鐵道、滑走路、港灣等の緊急および補修工事、寒中コンクリート等には超速硬セメントが多く使用されている。特に道路や橋梁等の補修、補強工事は長期間の交通規制なく早期に強度が得られなければならない。超速硬セメントは3時間だけで壓縮強度が200kg/cm<sup>2</sup>以上發現するように設計されている特徴をもっている反面、短時間内で水和するので、作業性(可使用時間の確保等に難しい点がある。

現在、韓國では非晶質C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>系、Hauyne系、CA系等3種類の超速硬セメントが實用化されている。このような超速硬セメントを利用したコンクリートは施工時の作業時間の管理、養生の管理に注意しなければならない。もし、不適切な養生をすることはけいひび割れが発生する等の結果を招來する。また、一定期間が経つと再補修をする等の耐久性に問題點があると指摘されているが、これに対する研究報告はほとんどないのが實情である。特に韓國でのコンクリート舗装の場合、補修時點に到ってその需要はどんどん伸びることが展望され、これに對して綿

密な研究の必要性が感じられる。

本研究は非晶質C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>系、Hauyne系、CA系の3種類セメントを利用したコンクリートの物性や耐久性を通して各セメントの特徴を調査、検討した。

## 2. 實驗概要

### 2.1 使用材料

本實驗に利用した3種類のセメントとは非晶質C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>系セメント(以下、RCAと略)、Hauyne系セメント(以下、RCBと略)、CA系セメント(以下、RCCと略)を用いた。

その化學成分と物理的特性を表-1に示す。細骨材は比重が2.60、粗粒率2.75の河川砂を、粗骨材は比重が2.62、粗粒率2.75の碎石をそれぞれ使用した。高性能減水劑はK社製品(韓國)のナフタレンスルホン酸鹽系を用いた。

コンクリートの配合を表-2に示した。RCBやRCCの場合、遅延劑はグルコン酸ナトリウムを用い、高性能減水劑(粉末)がすでに混合されている状態のセメントで配合した。または目標スランプは8cmとして水セメント比で調整した。

\*1 東洋中央研究所 建設材料研究室責任研究員 工博(正會員)

\*2 東洋中央研究所 建設材料研究室室長 工博(正會員)

\*3 東洋中央研究所 建設材料研究室主任研究員

\*4 東洋中央研究所 建設材料研究室研究員

**Table 1 Physical and chemical properties of rapid hardening cement**

	Chemical composition(%)								Physical properties	
	lg. loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Blain(cm <sup>3</sup> /g)	Specific gravity
RCA	2.2	15.5	9.4	2.1	58.0	0.6	10.0	0.5	4710	3.04
RCB	4.27	10.6	14.4	2.0	50.9	1.7	15.2	0.2	4550	2.91
RCC	3.4	9.9	18.6	1.8	49.9	1.5	11.9	1.1	4140	2.90

**Table 2 Concrete mix proportion**

	Gmax (mm)	Slump (cm)	Air content	W/C (%)	S/A (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )						
						W	C	S	G	SP	retarder	AE
RCA	25	8	4~6	35.5	36	400	142	644	1150		-	
RCB				42.5		400	170	637	1140	-		
RCC				42.5		400	170	637	1140	-		

**2.2 試験項目と方法**

(1)水和物分析

各超速硬セメントを水セメント比50%で混合した後、各材齢別(30分、3時間、6時間、1日、7日)の試料を採取して水和反応を停止させた後、SEMおよびX-rayを用いて水和物分析を行った。

(2)モルタルの圧縮強度

モルタル(セメント:砂=1:2)は水セメント比を40%で、養生温度を5、20、35℃の15℃間隔とし、材齢別(3時間、6時間、1日、3日、7日、28日)の圧縮強度を測定した(本実験に用いたすべての材料をあらかじめ各温度で一定時間維持させた)。

(3)コンクリートの物性

表一2の配合によって各超速硬コンクリートの圧縮、曲げ強度(15×15×55cm)の供試体を製作して材齢別(3時間、6時間、1日、3日、7日、28日)の圧縮や曲げ強度とBET比表面積分析、SEM撮影を行い、長さ変化率も測定した。

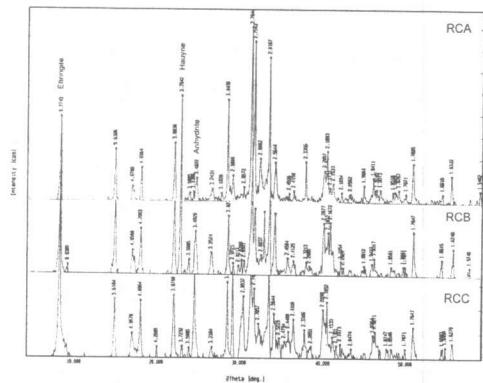
ゲル時間はコンクリートの作業性を調べるためにフレッシュコンクリートを容器に入れてT-Type Thermocoupleを設置して時間の経過による温度上昇を測定した。

凍結融解供試体(10×10×40cm)を製作した後、KS F 2456(韓国産業規格の急速凍結融解に對するコンクリート抵抗試験方法)によって凍結融解実験を行い、各サイクル別でコンクリートの凍結融解供試体の表面観察と撮影を行った。

**3. 実験結果および考察**

**3.1 水和物の分析**

各超速硬セメントを使用したペーストについて材齢別にX線回折分析を行った代表的な結果をFig.1に、走査型電子顕微鏡の写真をFig.2に示した。各超速硬セメント水和物でOPCの主成分であるC<sub>3</sub>S、C<sub>2</sub>Sのクリンカ鉱物の回折ピークが現われたことから、これは各超速硬セメントは速硬成分(非晶質C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>系、CA系、CSA系および無水石膏)とOPCとの混合物であることが分かる。



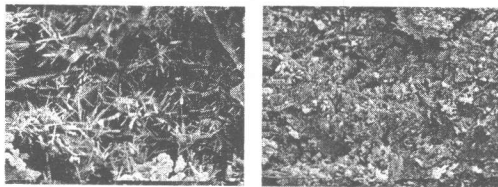
**Fig.1 X-ray diffraction patterns of pastes using rapid hardening cement**

X線回折分析の結果、各超速硬セメントの主な水和物はエトリンガイトと判断され、材齢によるエトリンガイトの回折ピークの強度が増加するので、エトリンガイトの生成量が多くなるのが分かる

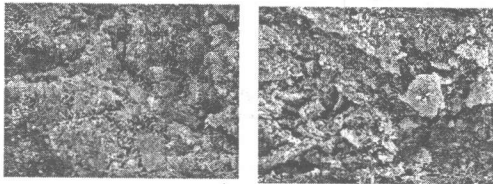
。特異なことはRCAの場合、材齢による無水石膏の回折ピークがかなり減少することに比べてRCBやRCCの場合、多量のエトリンガイトが生成するものの、相当の量の無水石膏が残存している。

注射電子顕微鏡で水和物を観察した結果、各超速硬セメントを使用したペーストにはエトリンガイト結晶が見られる。材齢3時間でRCAやRCCの場合、大きく成長したエトリンガイト結晶を観察することができるが、RCBの場合、RCAやRCCに比べて大きさが小さなエトリンガイト結晶が観察され、未反応のクリンカ鉱物も検出された。

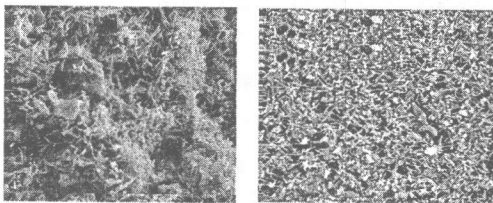
材齢7日には大部分のエトリンガイト結晶が網目状構造を形成して、その他周辺に硅酸カルシウム水和物が分布されて緻密な微細構造を形成している。



(a) RAC (3hr, 7day)



(b) RAB (3hr, 7day)



(c) RAC (3hr, 7day)

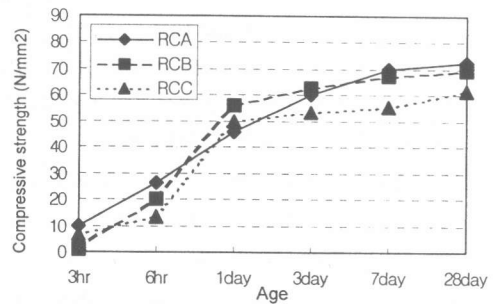
Fig.2 SEM of pastes using rapid hardening cement

### 3.2 モルタル圧縮強度

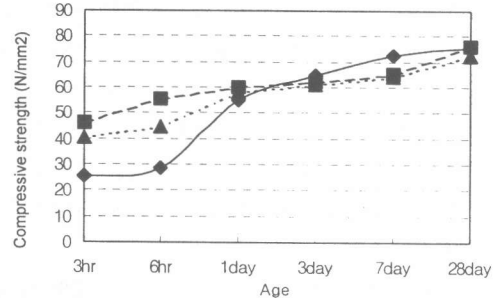
超速硬セメントを利用したモルタルに及ぼす養生温度の影響をFig.3に示した。図中で(a)は養生温度5℃、(b)養生温度20℃、(c)養生温度35℃で行った。養生温度5℃の場合、超速硬セメントの

もっとも大きな特徴である3時間の強度を見るとRCBは強度がまったく発現していない。また、RCAの場合、材齢によって強度が増大する反面、RCBやRCCは6時間から1日にかけて急激な強度の増加があらわれた。

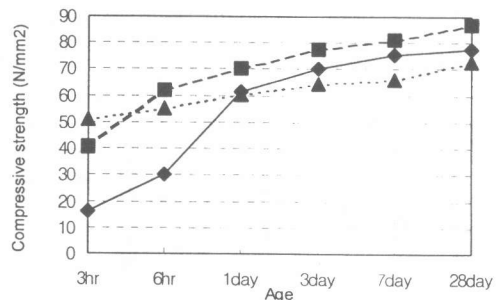
養生温度20℃でRCBやRCCの場合、初期強度がRCAに比べて高く現れたが、材齢による強度の増進は緩やかである。またはRCAは初期の強度が低い、RCBやRCCに比べて強度増進の幅は大きい。



(a) 5°C



(b) 20°C



(c) 35°C

Fig.3 Compressive strength of mortar at each curing temperature

超速硬セメントの特性が現われるエトリンガイト水和物はRCAやRCB, RCCで各各の形態が異なる。すなわち、細長い形態のものが、RCBやRCCの場合、短い形態のものになっている。したがって、RCAの場合、細長い形態のものがお互い組み立て、そのすきまの空隙が大いので、RCBやRCCに比べて初期強度が低く、時間の経過によってその空隙にはかの水和物が形成され強度の増進の幅が大きくなると思われる。

養生温度35℃ではRCCの場合、材齢3時間の圧縮強度は養生温度が高くなるほど強度が増加するが、RCAやRCBの場合20℃から35℃で養生温度が高くなると材齢3時間の圧縮強度はむしろ低くなった。しかし、6時間以後の圧縮強度は3種類すべて養生温度が高くなるほど強度は増加する。

6時間以後の圧縮強度は温度あるいはセメントの種類によって大きな変化はなかったが、超速硬セメントのもっとも大きな特徴である3時間の圧縮強度には温度の影響があることが分かる。すなわち、RCAよりRCBやRCCが低い温度で敏感に作用すると考えられる。これは各超速硬セメントで生成されるエトリンガイト水和物の形態が温度によってその生成量および水和物の生成時期が各各異なっているからであると考えられる。これは各超速硬セメントで生成されるエトリンガイト水和物の形態が温度によってその生成量および水和物の生成時期が各各異なっているからであると考えられる。

温度変化によるモルタルのフロー結果をFig.4に示した。RCAがRCBやRCCより全體的にフロー値は高い。すなわち、RCAがRCB、RCCより流動性が良好なことが分かる。特にRCAの場合

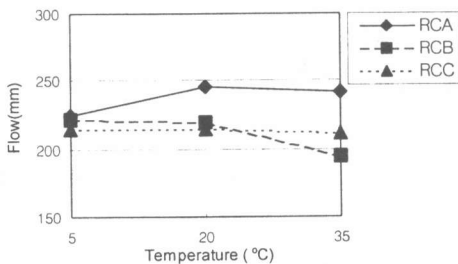


Fig.4 Flow of mortar at different temperature condition.

、温度が高いほど流動性が向上されるが、RCBは温度が高くなると流動性が悪くなる特徴もっている。

### 3.3 ゲル時間の測定

各超速硬セメントのゲル時間の測定結果をFig.5に示した。本実験ではゲル時間は超速硬コンクリートの水和熱による温度上昇が1℃になる時間で、硬化時間は温度上昇が4℃になる時間で規定した。一般的にゲル化時間で始発が現われ、その以前までは作業が可能であり、硬化時間では終結が現われる。

ゲル化時間はRCCがもっとも早く、RCBが遅く出てくる。道路補修の場合、理想的な可使時間を約30分と考えると、RCAが適切な可使時間をもっていることが分かる。またはRCBは初結と終結の間に時間差が大きい特徴がある。

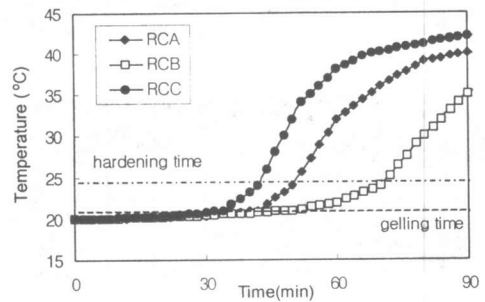


Fig.5 Gel time of rapid hardening cement

### 3.4 コンクリートの圧縮および曲げ強度

コンクリートの圧縮強度と曲げ強度をFig.6とFig.7に示した。本実験の配合条件では3時間強度が200kg/cm<sup>2</sup>以上の強度発現するとともに28日強度が約600kg/cm<sup>2</sup>以上の強度が得られて、3種類ともすべて類似した強度発現を示した。しかし、曲げ強度の結果を見ると圧縮強度とは異なってRCAの場合、初期曲げ強度(3時間)はRCBやRCCよりも高いが、6時間以後の曲げ強度の増進は緩慢に現われることが分かる。またはRCAとRCCの結果を見ると初期曲げ強度(3時間)はやや低いが、6時間以後の曲げ強度の増加の幅はRCAに比べて大きいことが分かる。

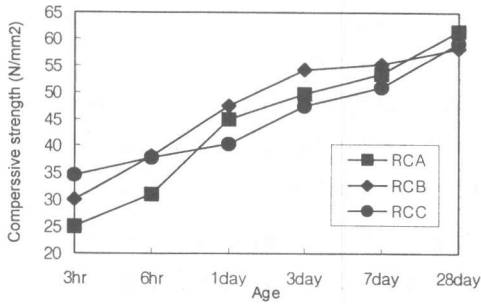


Fig.6 Compressive strength of concrete

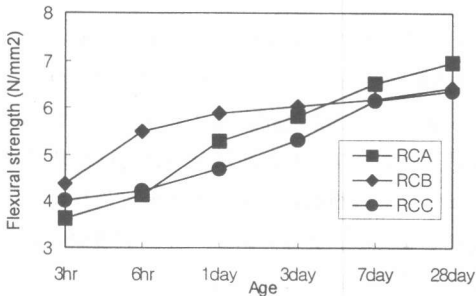


Fig.7 Flexural strength of concrete

### 3.5 コンクリートの長さ変化率

各超速硬コンクリートの材齢による長さ変化を調べるために23℃、相対湿度60%の恒温恒湿器で養生しながら顕微鏡comparator法にしたがって長さ変化を測定した結果をFig.8に示した。

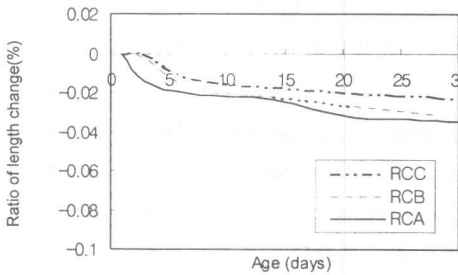


Fig.8 Length change ratio of concrete

3種類の超速硬セメントはすべて材齢28日で0.03%程度の低い収縮率を示すことが分かる。これは超速硬セメントの主な水和生成物であるエトリンガイトが多量の水分を結晶水として固定されているためであると判断される。したがって、これらの超速硬コンクリートは乾燥収縮によるひび割れ発生がかなり抑制されて、収縮に對

する安定性があると思われる。

### 3.6 凍結融解実験および表面観察

各超速硬コンクリートの凍結融解実験結果をFig.9に、各サイクル別コンクリート供試体の表面写真をFig.10に示した。

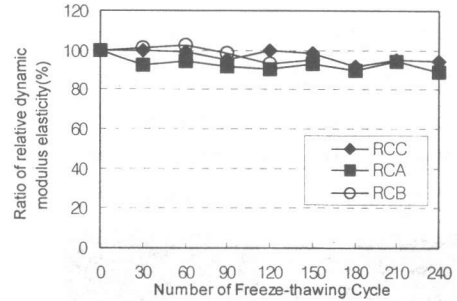


Fig.9 Resistance of freeze-thawing of concrete

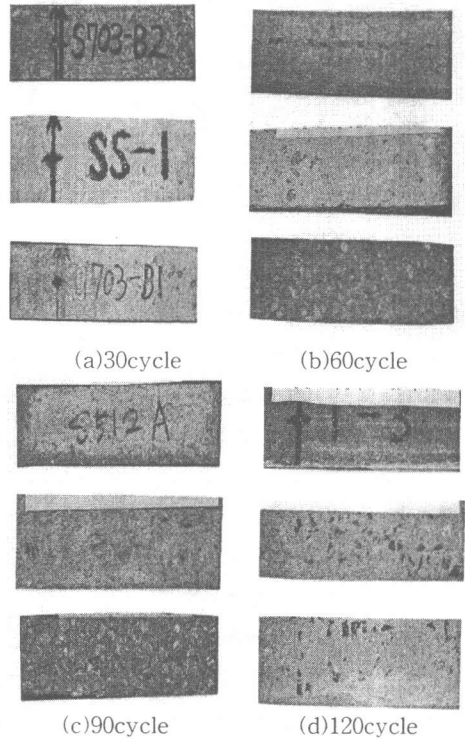


Fig.10 Surface photo of concrete specimen

各超速硬セメントの種類によるコンクリートの凍結融解の抵抗性はセメントの種類に関係なく同等に現われた。しかし、各サイクル別(30、60

、90、120)コンクリートの供試体の表面を見るとスケーリング現象の有無がはっきり現われることが分かる。

表面スケーリング現象の場合、RCBは30サイクルから、RCCは60サイクル以後から現われ始め、RCAは120サイクルまでもほとんど表面に変化がなかった。

また、重量の変化を見ると表面スケーリング現象がほとんどないRCAは約0.5~1.0%範囲で増加してRCBやRCCは1.5%の重量が減少した。

圧縮強度の供試体も凍結融解試験をしてその供試体の表面写真と内部写真をFig.11に示した。

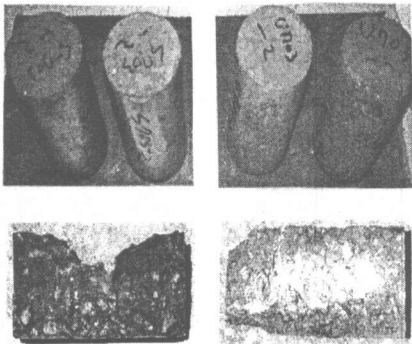


Fig.11 Inner and surface photos of specimen

一般的に凍結融解に悪影響を及ぼす空隙の大きさは100nm~1 $\mu$ mの増加であると報告されている。本論文には記載されていないが、各コンクリートの気孔率を測定した結果、やはりRCBやRCCがRCAに比べて上記空隙のおおきさが多く現われた。または図のようにスケーリング現象が発生したものは表面のみ水分が吸収されており、スケーリング現象が起らないものは全體的に均一に水分が吸収されていることが分かる。

スケーリング現象が発生した供試体は表面の水分が凍結融解作用によって膨脹収縮し表面剝離が発生したためと思われる。

#### 4. 結論

本研究は非晶質C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>系、Hauyne系、CA系等3種類の形態として実用化されている超速硬セ

メントを利用したコンクリートの物性を調査、検討した。検討を通じて得られた結論を整理すると次のとおりである。

- 1)3種類の超速硬セメントはいずれも水和物としてエトリングイトという物質を生成するが、その形態や大きさは異なることが分かった。
- 2)超速硬セメントの種類により、モルタルの圧縮強度の発現性が異なり、特に低温で強度発現が悪ものがある。流動性は逆に高い温度で影響を受けることが分かった。
- 3)コンクリートの圧縮強度と長さ変化はセメントの種類に関係なく大きな変化は見られないが、曲げ強度に差異があることが現われた。
- 4)超速硬コンクリートの凍結融解は用いた超速硬セメントの種類によって相対動弾性係数に差異がないが、表面のスケーリング現象には大きな差異があることが分かった。

#### 参考文献

- 1)縦山好幸・大友弘志・半田 實・五味秀明:床版上面増厚工法に関する超速硬SFコンクリート付着強度発現機構に関する研究.土木學會論文集、No.577, pp877-886, 1996.6
- 2)二階堂泰之・伊藤巧・坂井悦郎・大門正機:超速硬セメントの初期水和におけるエトリングイト生成と微細構造、コンクリート工學年次論文集報告、Vol.17, No.1, pp319-324, 1995
- 3)H. Uchikawa, S. Uchida : The hydration of 11CaO · 7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · CaF<sub>2</sub> at 20°C、Cement & Concrete research, Vol.2, pp681-195, 1972
- 4)内川 浩・宇都輝添:超速硬セメントの舗装コンクリートへの適用、セメント技術年報、31, pp427-430, 1978
- 5)小川 正・松崎安雄・鎌尾 博:ジェットセメントを用いたコンクリートに関する2、3の実験、28, pp368-372, 1975
- 6)Charles H. Fentiman:Hydration of carboaluminous cement at different temperatures, cement & concrete reserarch, Vol.15, pp622-630, 1985