

論文 セメント粉末度の変化がコンクリートの工学的特性に及ぼす影響

韓 千求*1・韓 敏喆*2・金 貞辰*3

要旨：本研究ではセメントの粉砕工程で粒度分級によって採取した微粒子セメント(以下, F), 粗粒子セメント(以下, C)及び OPC を単独で使用する事とか OPC とともに使用する方法(OF, OC, FC)に対して粉末度変化によるコンクリートの諸工学的特性に関して考察を行った。研究結果によると F を用いると流動性及び空気量は低下したが, C の場合は流動性及び空気量が増加する傾向であった。粉末度が最も大きな F は凝結時間が一番早かったが, 粉末度が小さい場合は FC, OF, O, OC, C の順に凝結時間が遅くなった。微細構造分析結果によれば微粒子セメントを用いることによってコンクリートの空隙構造が緻密になることが分かった。
キーワード：粒度分級, 微粒子セメント, 粗粒子セメント, 粉末度, 工学的特性, 空隙構造

1. はじめに

近年, 建設現場では超高層建築物の需要増加による骨造工事の工期短縮の問題とともに基礎, 柱及び梁のような主要構造部材がマスコンクリート化され低熱コンクリートの適用を要するなど多様な現場の需要に応じる特殊セメントの必要性が増大している。

しかしながら, 現在まで多くの建設現場では地理的な条件及び経済性などの問題によって普通ポルトランドセメント(OPC)のみを主に使っている実情なので, この場合は様々な構造物から要求される性能を発揮させることができないだけでなく, ひび割れおよび耐久性低下などの問題点も発生している。

このような問題点を解決するために既存の普通ポルトランドセメント生産設備の粉砕ラインで(図-1 参照)粒度分級装置によって粒子の大きさ別に採集した後, 微粒子と粗粒子を区分して早強型及び低熱型セメントとして活用するための一連の研究を行っている。このような方法で製造されるセメントは既存の早強及び低熱セメントの製造工程で要求される鉱物の成分調整及び焼成温度の調節のような別途工程が必要ないので費用節減効果が大きくなることが期待される。

本研究ではこのような粒度分級技術を用いて製造した早強型及び低熱型セメントを単独に使用するかまたは, OPC と混合して使用することのようにセメントの

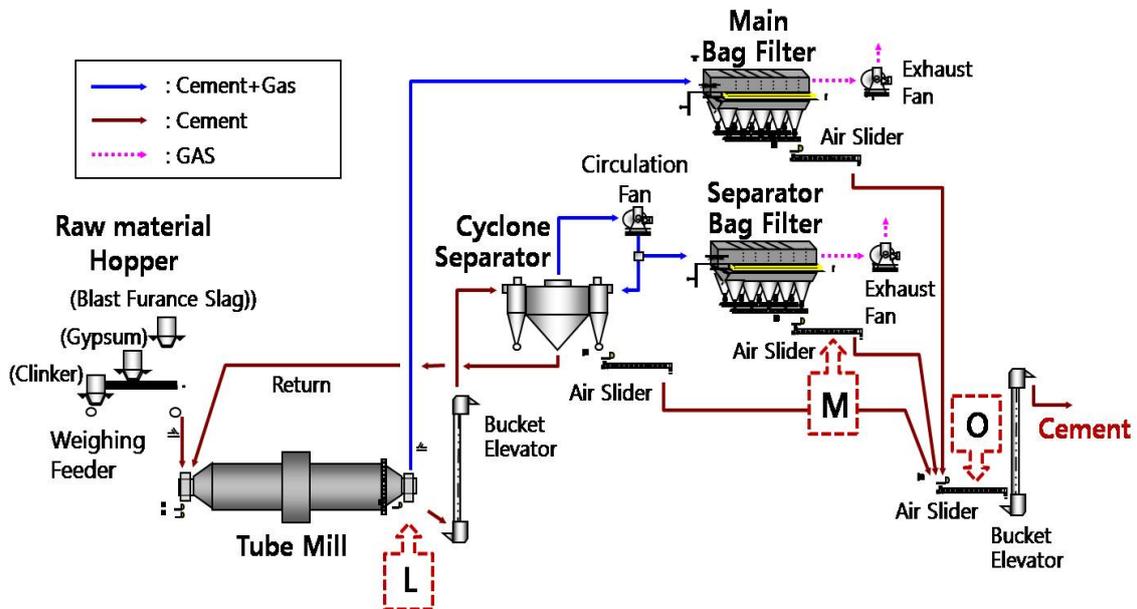


図-1 普通ポルトランドセメントの粉砕工程図

*1 韓国 清州大学校 理工学建築工学部教授 工博 (正会員)
 *2 韓国 清州大学校 理工学建築工学部助教授 工博 (正会員)
 *3 韓国 Lotte 建設(株) 技術研究院 責任研究員 工博 (正会員)

表-1 実験計画

調査事項	実験要因	実験水準	
	W/C	2	30%, 50%
目標流動性	2	180±10 mm, 600±100 mm	
目標空気量	2	3.0±1.0%, 4.5±1.5%	
セメント種類変化	6	O, F, C, OF, OC, FC	
実験事項	フレッシュコンクリート	5	Slump(経時変化 0, 30, 60分) Slump flow(経時変化 0, 30, 60分) 空気量(経時変化 0, 30, 60分) 凝結時間
	硬化コンクリート	3	圧縮強度(養生温度: -5, 20°C) SEM(3日, 7日: O, F) 空隙量(3日, 28日: O, F)

表-2 コンクリート調査

W/C (%)	W (kg/m³)	S/a (%)	AE減水剤& SP/C (%)	C 種類	単位量(kg/m³)				
					C			S	G
					O	F	C		
50	185	44	0.6 (AE減水剤)	O	370	0	0	749	972
				F	0	370	0		
				C	0	0	370		
				OF	185	185	0		
				OC	185	0	185		
				FC	0	185	185		
30	175	46	1.3 (SP)	O	583	0	0	714	854
				F	0	583	0		
				C	0	0	583		
				OF	292	292	0		
				OC	292	0	292		
				FC	0	292	292		

粉末度を変化させて製造したセメントがコンクリートの諸工学的特性に及ぼす影響に関して考察を行う。

2. 実験計画および方法

2.1 実験計画

本研究に用いた実験条件を表-1に記す。まず、実験要因は水セメント比が30%及び50%の2水準でプレーン調合はOPCを単独に使用することにした。

また、図-1のように普通ポルトランドセメント生産設備の各粉砕ラインでOPC、微粒子セメント、粗粒子セメントなど3種類のサンプルを採集して、OPC(以下、O)、微粒子セメント(以下、F)、粗粒子セメント(以下、C)を単独に使用する場合とOPC+微粒子セメント(1:1、以下、OF)、OPC+粗粒子セメント(1:1、以下、OC)、微粒子セメント+粗粒子セメント(1:1、以下、FC)の6水準に変化させて総12水準に対して実験計画をした。

また、目標流動性はOPCを単独使用した場合を基に、

表-3 セメントの化学成分の構成

試料	化学成分 (%)								LSF	SM	IM
	LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O			
O	0.4	21.9	5.0	3.7	64.2	2.0	1.8	0.9	90.4	2.5	1.4
F	0.5	21.2	5.0	3.7	62.9	2.0	3.2	1.3	89.6	2.4	1.4
C	0.2	22.2	5.2	3.8	64.4	2.1	1.1	0.9	90.0	2.5	1.4
OF	0.5	21.6	5.0	3.7	63.6	2.0	2.5	1.1	90.0	2.5	1.4
OC	0.3	22.0	5.1	3.7	64.3	2.0	1.5	0.9	90.2	2.5	1.4
FC	0.4	21.7	5.1	3.8	63.7	2.0	2.2	1.1	89.8	2.5	1.4

LOI: 強熱減量, LSF: 石灰飽和度, SM: 珪酸率, IM: 鉄率

表-4 セメントの鉱物組成

試料	鉱物組成 (%)			
	C3S	C2S	C3A	C4AF
O	50.8	24.5	7.0	11.2
F	46.9	25.5	7.0	11.2
C	49.9	26.1	7.4	11.6
OF	48.7	25.3	7.0	11.2
OC	50.7	24.9	7.3	11.2
FC	48.4	25.8	7.1	11.6

表-5 セメントの物理的性質

セメント組合	密度 (g/cm³)	粉末度 (cm²/g)	凝結時間(分)		圧縮強度(MPa)		
			始発	終結	3日	7日	28日
O	3.15	3,324	228	337	23	30	39
F	3.15	6,479	180	279	36	43	49
C	3.15	1,813	242	393	10	17	26
OF	3.15	5,024	205	290	30	37	44
OC	3.15	2,515	242	370	17	24	33
FC	3.15	3,769	211	336	23	30	38

W/C50%の場合は目標スランプ180±10mm, W/C30%の場合は目標スランプフロー600±100mmを満足するように調査設計した後、全ての調査に適用した。目標空気量はW/C30%では3.0±1.0%, W/C50%では4.5±1.5%にした。

実験事項としてはフレッシュコンクリートではスランプ、スランプフロー、空気量の経時変化と凝結時間を測定した。硬化コンクリートでは養生温度-5°C及び20°Cで材齢別に圧縮強度を測定し、微細構造(SEM)はW/C50%を基にOおよびFに対して材齢3, 7日で測定した。また、空隙構造は材齢3日及び28日でポロシメータを用い水銀圧入法によって測定した。本研究に用いたコンクリート調査事項は表-2である。

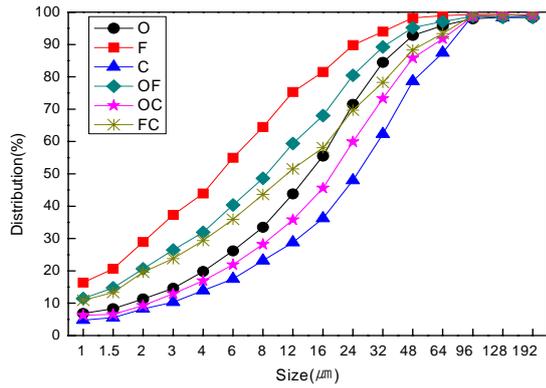


図-2 セメント種類別の粒度分布

表-6 骨材の物理的性質

区分	密度 (g/cm ³)	F.M	吸水率 (%)	0.08 mm網の通過量(%)
細骨材	2.61	2.7	0.7	4.7
粗骨材	2.66	6.56	0.6	3.9

表-7 混和材の物理的性質

区分	主成分	形態	色状	密度(g/cm ³)
AE 減水剤	ポリカルボン酸系	液状	黄色	1.05
高性能減水剤	ポリカルボン酸系	液状	黄色	1.05
AE 剤	陰イオン系	液状	黄色	1.02

2.2 使用材料

本研究の使用材料としてセメントは韓国A社の普通ポルトランドセメントと粒度分級によって製造された微粒子セメントと粗粒子セメントを用いた。それぞれの化学成分、調性鉱物及び物理的性質は表-3、表-4及び表-5であり、各セメントの粒度分布は図-2である。

細骨材は韓国産混合砂を使い、粗骨材は20mmの碎石骨材を用いた。その物理的性質は表-6である。混和剤としてAE減水剤、高性能減水剤とAE剤は韓国産U社の製品を使い、その物理的性質は表-7である。

2.3 実験方法

本研究の実験方法としてコンクリートの混合は強制式ファンタイプのみキサーを使って混合した。フレッシュコンクリートの実験事項としてスランプ、スランプフロー、空気量、凝結時間、圧縮強度はJISと類似な韓国のKSに基づいて測定した。養生温度-5℃の場合初期凍害を防止するために成形後、養生温度20℃で1日封かん養生した後、-5℃が維持される養生室で所定の材齢まで封かん養生を行った。また、微細構造測定のために硬化セメントペーストに対してSEMによる微細構造分析とポロシメータによる水銀圧入法によって空隙量及び細孔分布を測定した。

3. 実験結果および分析

3.1 フレッシュコンクリートの特性

3.1.1 流動性

図-3と4はW/C別セメントの種類変化によるスランプフロー、スランプを示したものである。

まず、OPCを用いたプレーンコンクリートの場合は全てのW/Cで調合設計による目標スランプおよびスランプフローを満足した。

一方、セメントの種類が異なる場合のスランプおよびスランプフロー値は粉末度が小さいCの場合が最も大きく現われたが、これはセメント粒子が大きいほど水と接する比表面積が小さくなることに加えて連続粒子分布によって流動性が増加するため、スランプおよびスランプフローが増加したと思われる。また、Fの場合、大きな粉末度によって水との接触面積が大きくなった結果、流動性が全然発揮されなかったためスランプフローを施すのが不可能になり、スランプフローがスランプコーンの直径とほぼ同じくらいの210mm程度を現われたと思われる。

また、OFを使った場合はOの置換による粉末度の減少によってFを使った場合に比べて流動性が比例的に増加する傾向を現した。

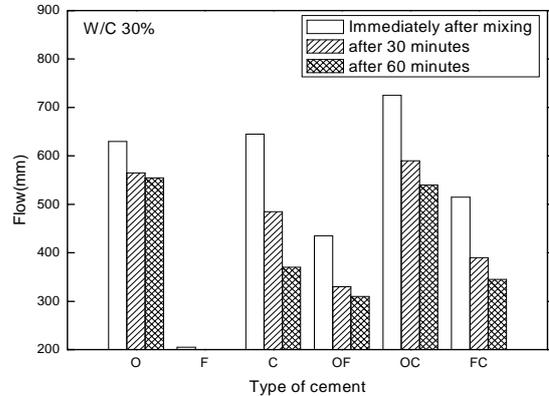


図-3 セメント種類の変化によるスランプフロー

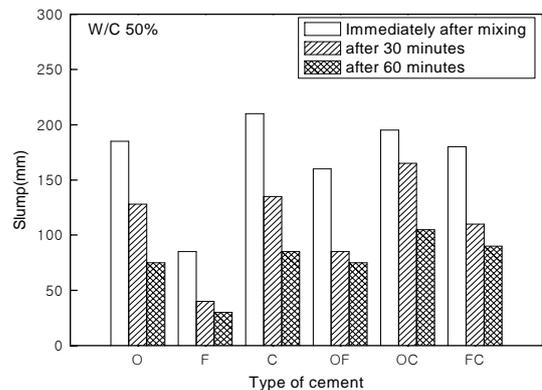


図-4 セメント種類の変化によるスランプ

しかしながら、OCの場合はOの置換によって粉末度の比例的な増加によって流動性が減少する傾向を現した。一方、経時変化によるセメント組合の変化別、流動性は混合直後から30分までは急激な減少を示したが、60分経過時点では緩く減少する結果が現われた。

3.1.2 空気量

図-5と6はW/C別セメントの種類変化による空気量を示したものである。

まず、空気量はプレーン調合の場合W/Cに関わらず全てが目標空気量を満足したが、粉末度が最も大きい微粒子セメントFを使った場合、最も小さい空気量を現した。これは微細なセメント粒子の空隙充填効果によることと考えられる。

W/C 30%では粗粒子セメントであるCの場合、目標空気量より大きい結果を現した。特にOF及びFCを使った場合は空気量が6%以上になることが確認されたが、これはセメントの粉末度が大きいことによる影響と考えられる。

経時変化による空気量はセメント種類別に若干の差はあるが流動性と同じく減少する傾向を現した。

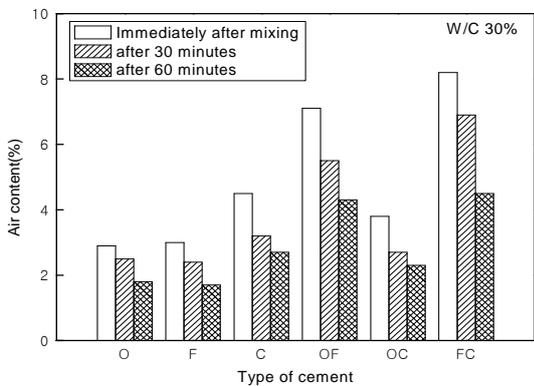


図-5 セメント種類の変化による空気量(W/C 30%)

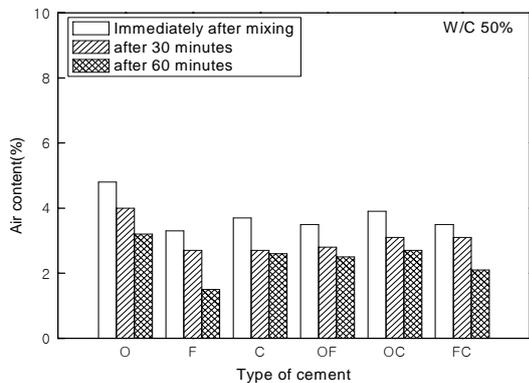


図-6 セメント種類の変化による空気量(W/C 50%)

3.1.3 凝結時間

図-7と8はW/C別経過時間による貫入抵抗値を示したものである。

セメント組合変化別凝結特性では、粉末度が最も大きいセメントであるFが一番早い凝結時間を示したし、FC、OF、O、OC、Cの順に凝結が遅れることと現れた。これは粉末度が大きいほど水と接する比表面積が増加して水和反応が促進されることから凝結時間が短縮されたと思われる。

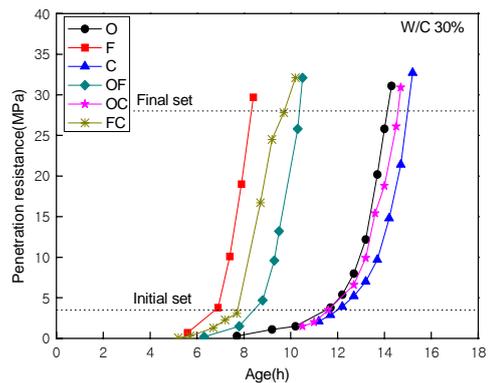


図-7 経過時間による貫入抵抗値(W/C 30%)

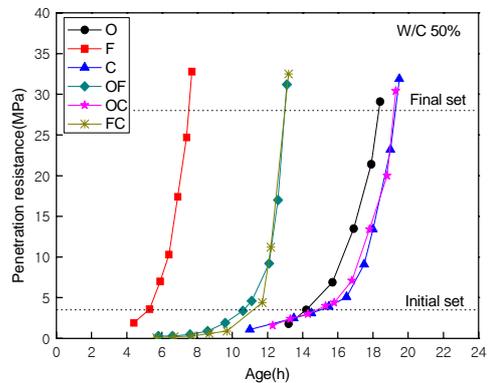


図-8 経過時間による貫入抵抗値(W/C 50%)

3.2 硬化コンクリートの特性

図-9~12は養生温度別材齢経過における圧縮強度の変化を示したものである。

一般的に材齢が経過するほど、粉末度が大きいほど圧縮強度は増加した。また、養生温度に関わらずすべての材齢でFを使った場合が最も大きい圧縮強度を現わした。

まず、W/C50%場合、材齢1日及び3日の圧縮強度はF、OFなど微粒子セメントを使った場合ではOより大きく現われたが、以後は材齢経過によってFを除外するとOと似ているとかまたは、若干低くなることに見られた。

また、W/C30%の場合、OFはOより大きい粉末度の微粒子系列のセメントなのでOより大きい強度が予想され

たが、調合での空気量過多によって材齢3日からOより強度が低下した。しかし、等しい空気量の条件ではOより大きい強度を発揮されると思われる。特に、セメントFを用いる場合1日の圧縮強度はOの3日の圧縮強度と類似する傾向を示してあり早強性が非常に優れていることが認められた。

養生温度別には養生温度-5℃のFの場合、養生温度20℃の圧縮強度と類似した強度発現を現して低温でも高い圧縮強度を確保することができると考えられる。FにOを置き換えたOFを使った場合もOより高い初期強度を示したので寒中施工時OにFを置き換えて使うと初期凍害の防止及び優れた早期強度の発現性能の確保ができると考えられる。一方、粗粒子セメント系列であるC, OCなどは低温領域で材齢に関わらずOに比べて低い強度発現を示してあり低温領域では使用するのに注意が望まれる。

結果的に圧縮強度は粉末度が大きい微粒子セメントFを単独に使ったコンクリートが最も大きく現われ早強型セメントを取り替えて使えると思われるが、実務での経済性及び現場の需要による生産性を考えるとOと微粒子セメントを要求水準に合わせて適切に置き換えて使えば高い初期強度の確保と経済性を求めることができると考えられる。

3.3 微細構造の分析

3.3.1 SEMによる微細構造の分析

写真-1は材齢経過による粒度分級セメントの硬化体をSEM装置を用いて測定した微細構造である。

まず、材齢3日経過したOPCの場合は初期水和生成物である水酸化カルシウムとエトリンガイトが多く

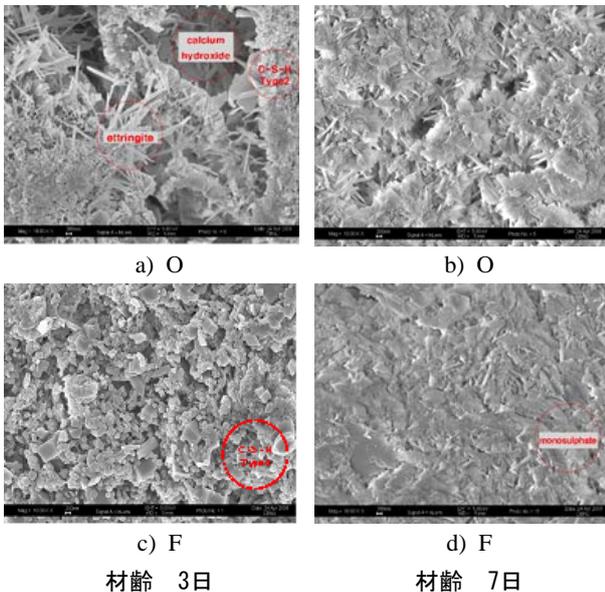


写真-1 FCの置換率及び材齢変化によるSEM観測結果

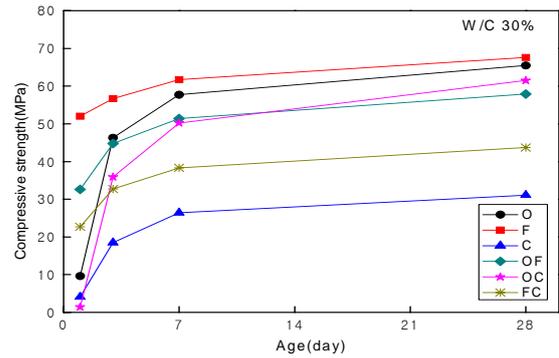


図-9 材齢経過による圧縮強度(養生温度20℃)

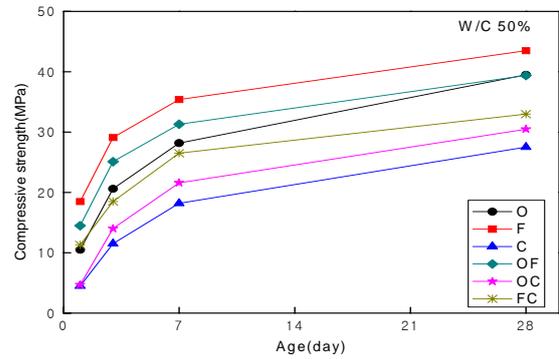


図-10 材齢経過による圧縮強度(養生温度20℃)

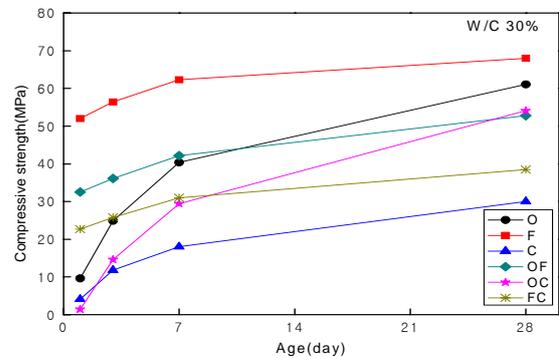


図-11 材齢経過による圧縮強度(養生温度-5℃)

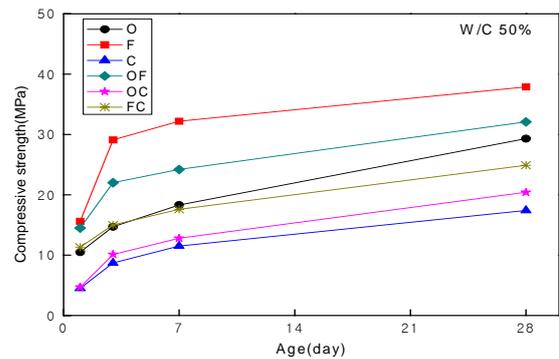


図-12 材齢経過による圧縮強度(養生温度-5℃)

観測されたが、Fの場合は網状型のC-S-Hゲル等が多量観測された。また、材齢28日の場合すべてのセメント条件で累積細孔量の分布が小さな方の細孔で増加することに現われたが、Oに比べてFの場合0.001 μm 以上の累積細孔量は約36%程度減少することと現われた。

3.3.2 細孔分布

図-13は材齢3日と28日のO及びFを使ったセメント硬化体の累積細孔量を示したものである。

全般的に微粒子セメント及び材齢の増加によって累積細孔量は減少する傾向を現した。材齢3日ではFの場合、主に0.01~1 μm 間の累積細孔量分布が大きい差を示しているがOの場合は大体5 μm 以下の幅広い累積細孔量分布を現した。

一方、材齢7日では材齢3日と等しくFの場合後期材齢で観測される様々な水和生成物の形態が現われたし、特に水和後期の生成物として知られている密実なC-S-Hゲルが多く観察された。従って微粒子セメントの使用によるセメントの水和反応量が多かったことよって水和生成物が初期に多く生成されることが確認できた。結局、初期材齢でこのような水和生成物の多量生成が圧縮強度を向上させることが認められる。

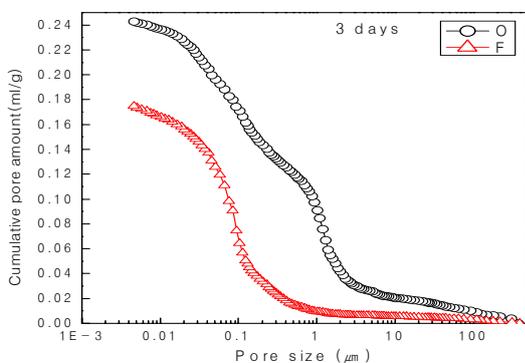


図-13(a) コンクリート内部の空隙量(材齢3日)

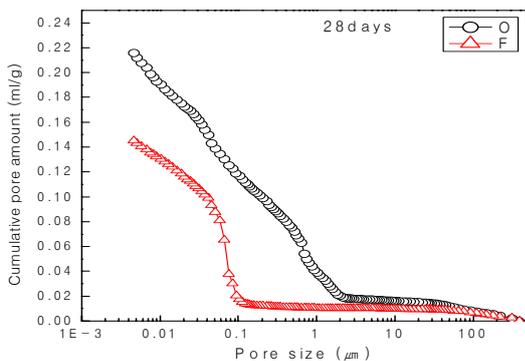


図-13(b) コンクリート内部の空隙量(材齢28日)

4. まとめ

本研究ではセメント粉砕工程で採取した微粒子セメントと粗粒子セメントをOPCと単独、又は組合して使うことによるコンクリートの工学的特性を分析した結果は次の通りである。

1) コンクリートの流動性及び空気量は微粒子セメントを使った場合、低下する傾向を現した。また、経時変化によっても低下する傾向だったが、Oを置換することによって比例的に流動性及び空気量は増加することになった。

2) 凝結特性は粉末度が最も大きいFが一番早い凝結時間を示し、FC、OF、OC、Cの順に凝結時間が増加した。これは粉末度の減少による比表面積の減少に起因して遅くなることと考えられる。

3) 圧縮強度は粉末度が大きい微粒子系列のF及びOFを使ったコンクリートが初期材齢でOに比べて向上した早強性の確保ができると現われた。以後の全材齢にかけてOより大きい圧縮強度を現わしたが、Oの置換によって比例的に圧縮強度はFより低下し、C及びOC系列の粗粒子セメントは初期材齢及び28日でもOより低い強度を現わした。

4) 養生温度別セメント組合による圧縮強度の場合Fセメントは-5 $^{\circ}\text{C}$ の低い養生温度でもOより高い早期強度発現を現しているが、粗粒子セメント系列のC及びOCの場合はOより低い強度発現を現している。

5) SEM及びポロシメータによる微細構造分析結果、Oの場合初期材齢3日及び7日で初期水和生成物である水酸化カルシウムとエトリンガイト及びC-S-HゲルのType 2が多量観測された。しかし、Fはエトリンガイトと少しのモノサルフェート水和物及びC-S-HゲルType 1(繊維状)など、後期材齢の水和物が観測された。

参考文献

- 1) Kim Jong Baik, Cha Wan Ho, Kwon O Bong, Han Min Cheol, Han Cheon Goo, A Fundamental Study on the Properties of Cement depending on Particle Classification, Proc. of Fall Conference. Korean Building Execution Institute, Vol. 6, No. 2, 2006
- 2) Kim Jong Baik, Cha Wan Ho, Kwon O Bong, Han Min Cheol, Han Cheon Goo, A Fundamental Study on the Properties of Cement Mortar depending on Particle Classification, Proc. of AIK, Vol. 6, No. 2, pp.119~122, 2006
- 3) Japan Cement Association, Cement and Concrete Chemistry and Application, 1994
- 4) Korea Concrete Institute, Recent Concrete Engineering, Kimoondang, 2005