

## 論文 コンクリートの緻密度の性能評価手法に関する基礎研究

三浦 律彦<sup>\*1</sup>・十河 茂幸<sup>\*2</sup>

要旨：コンクリートの硬化物性はセメント硬化体の緻密度と関係が深い。コンクリートの緻密度は一般に水やガスの透過速度（透水・透気試験）で評価されるが、超低水セメント比の高耐久コンクリートでは透過速度が著しく小さく、通常の方法では定量評価が難しい。そこで、水セメント比が15～25%の超緻密コンクリートを対象に、緻密化の配合手法と定量評価手法に関する検討を行った。検討要因はセメント種類、フライアッシュ(JIS 種品)や膨張材の混入量であり、評価手法として細孔分布計測と透気・透水試験等を行った。その結果、微細なフライアッシュ置換による緻密化向上と、膨張材併用の影響が定量評価できた。

キーワード：緻密度，性能評価，細孔分布，フライアッシュ，膨張材，透気試験，透水試験

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の性能規定化の世界的な流れの中で、構造物の長寿命化（高耐久化）に対する関心が高まっている。特に、欧州規格に準じて行われる海外工事などでは、既に、コンクリートの品質を代表する要求性能の1つとして水密性（緻密度）や低吸水性が求められるようになってきた。

一方、近年我が国では、大都市部の40m以上の大深度地下を有効利用するための法整備が進められており、大深度地下構造物の検討も始まっている。この場合、これまでになく高い水圧が作用する環境下に構築されるため、コンクリート構造物にも高い水密性が要求されることになる。また、国内の核廃棄物処分場等の建設計画においては、500年以上の長年月にわたる汚染物質の漏洩防止技術が求められており、一案として長期間腐食劣化のない超緻密な無筋コンクリート構造も検討され始めている。

これらのことから、各々のコンクリート構造物の要求性能レベルに合った不透水性（緻密度）を有するコンクリートの設計技術が求められるようになると思われる。不透水性の超緻密コンクリートは厳しい浸食環境下での耐久性に優れ、大規模補修が難しい大深度地下コンクリート構

造物の長寿命化に有力な技術となり、さらにはLCCの観点から構造物の維持管理費の大幅なコストダウンも可能となると思われる。

そこで、本研究では圧縮強度や弾性係数、それに耐久性といったコンクリート一般の硬化物性と関連の深い、セメント硬化体の緻密度をとりあげ、その向上技術と定量評価を行うための手法についての実験検討を行った。

## 2. 実験概要

## 2.1 検討配合と使用材料

## (1) 検討要因

実験の対象としたコンクリートは水セメント比25%以下の超高強度（超緻密）配合とした。近年の高性能AE減水剤の技術革新により、水セメント比15%でも現場打ちできるコンクリートが製造できるようになっている。

コンクリートの不透水性（緻密度）改善技術としては、シリカフュームやフライアッシュ等のポゾラン物質の併用が一般に知られているが、今回はシリカフュームセメント（低熱ポルトランドセメントへのプレミックス品）を使用し、フライアッシュや膨張材の混入量も検討した。

## (2) 使用材料

実験に使用した材料を表-1に示す。シリカ

\*1 (株)大林組 技術研究所 土木材料研究室 主任研究員 工修 (正会員)

\*2 (株)大林組 技術研究所 土木材料研究室 室長 工博 (正会員)

フュームセメント(SFC)の他に普通ポルトランドセメント(OPC)を基本材料として使用し、一部で早強ポルトランドセメント(HPC)も使用した。フライアッシュ(FA)は粉末度の高い JIS 種品を、また膨張材は CSA 系で標準使用量が従来品の 2/3(20kg/m<sup>3</sup>)に低減された改良品(標準形:EX, 水和熱抑制形:EXR)を使用した。

### (3) 検討配合

FA や EX 等の混和材を混入する前のベースとなる配合を表 - 2 に示す。目標スランプフローは 600 ± 100mm, 目標空気量は 2.0 ± 1.0% とした。FA や EX はセメントの一部置換(内割, s/a 一定条件)で混入した。FA 混入率は SFC (W/C=18%)で 7.5%, 12.5%, 17.5%とし、OPC では 20%と一定にした。EX 混入量は 7.5, 12.5, 17.5, 22.5kg/m<sup>3</sup>とした。

## 2.2 試験項目

### (1) 強度, 弾性, 密度の試験

100 × h200mm 供試体による密度の計測と圧縮強度試験を、封緘材齢 1 日(脱型時, SFC のみ), 及びその後標準養生材齢 7 日, 28 日, 91 日で実施した。また材齢 91 日と一部の材齢では静弾性係数の計測も併せて実施した。

### (2) 細孔分布の計測

細孔分布の計測は水銀圧入式のポロシメータを用いて行った。試料は標準養生の材齢 91 日におけるコンクリート強度試験後に供試体から採取し、粗骨材を除去した 5~2.5mm サイズのモルタル小片で行った。測定は各配合とも 2 回ずつ行い、各細孔半径における細孔容積の分布を平均値で求めた。

### (3) 透気試験, 透水試験

コンクリートの緻密度を評価する手法として一般に用いられている透気試験<sup>1)</sup>, 透水試験を実施した。供試体は材齢 91 日まで標準養生し、各々カッティング・整形後約 1 ヶ月以上気中で乾燥してから試験を実施した。

このうち、透気試験は 150 × h150mm の供試体から薄く切り出して端面を整形した円盤状の試験体を用いて行った。最初は、通常配合と同

表 - 1 コンクリートの使用材料

分類	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	種類及び物性他
セメント	SFC	3.08	シリカフュームセメント (プレミックス品)
	OPC	3.16	普通ポルトランド, 比表面積: 3280 cm <sup>2</sup> /g
	HPC	3.14	早強ポルトランド, 比表面積: 4470 cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ	FA	2.35	JIS A 6201 I 種品, 比表面積: 5400cm <sup>2</sup> /g
膨張材	EX	3.00	CSA系新型膨張材(水和熱抑制型: EXR)
細骨材	S	2.60	木更津産陸砂 吸水率: 2.07%, 粗粒率: 2.79
粗骨材	G	2.66	青梅産碎石(2005) 吸水率: 0.74%, 粗粒率: 6.74
混和剤	SPA	—	高性能AE減水剤: ポリカルボン酸系

表 - 2 コンクリートのベース配合

No	セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	SPA
1	SFC	25.0	45.0	160	640	716	896	6.400
2		20.0	43.0	160	800	626	849	9.600
3		18.0	43.0	144	800	644	874	14.400
4		16.0	43.0	128	800	662	898	17.600
5		15.0	43.0	120	800	671	910	21.600
6	OPC	20.0	48.0	150	750	742	820	15.000

様に厚さ 50mm で透気試験を行ったが、圧力を上げ(0.1 ~ 0.3N/mm<sup>2</sup>), 長時間経っても全く透気量が確認できなかったため、厚さを 10mm 程度まで薄く加工し直して再度試験を実施した。

透水試験は 150 × h150mm の供試体の側面をゴムシールし、打設面から水压(5 N/mm<sup>2</sup>)加えて 1~5 週間継続させ、その後割裂して浸透深さの計測を行った。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 材齢に伴う強度性状の変化

#### (1) 圧縮強度

圧縮強度の発現性状を図 - 1 ~ 図 - 4 に示す。SFC の場合では、材齢 28 日までは W/C が低いほど、また FA 混入率が低いほど高い強度が得られたが、91 日ではその関係が若干くずれ、FA 混入率が 7.5~12.5% で最大の圧縮強度を示した。OPC の場合では、FA 混入量や EX 混入量の影響は無視できるほど小さかった。

#### (2) 密度

材齢に伴う密度の変化性状を図 - 5 ~ 図 - 8 に示す。W/C が低いほど、FA 混入率が低いほど密度は大きくなり、材齢 28 日程度までは増加の傾向を示した。また SFC では W/C=15, 16% の配合で、また OPC では FA 無混入で EX

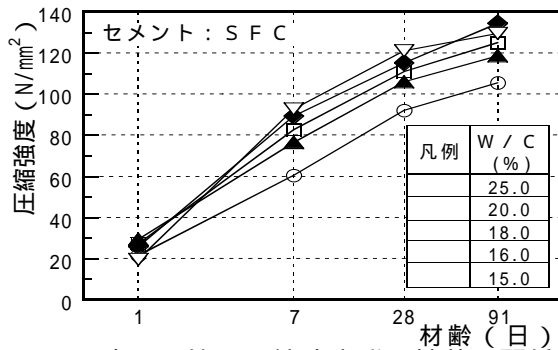


図 - 1 水セメント比と圧縮強度発現性状の関係

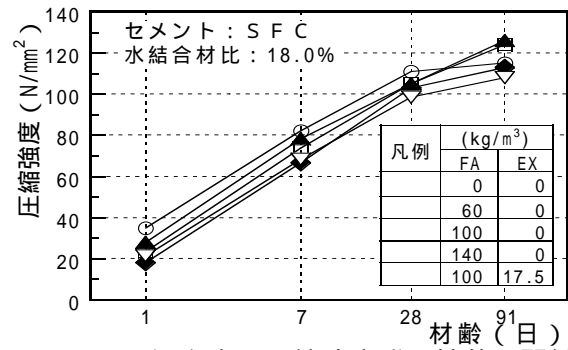


図 - 2 FA 混入率と圧縮強度発現性状の関係

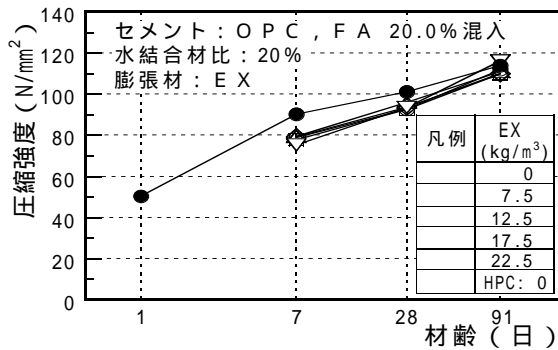


図 - 3 EX 混入率と圧縮強度発現性状の関係

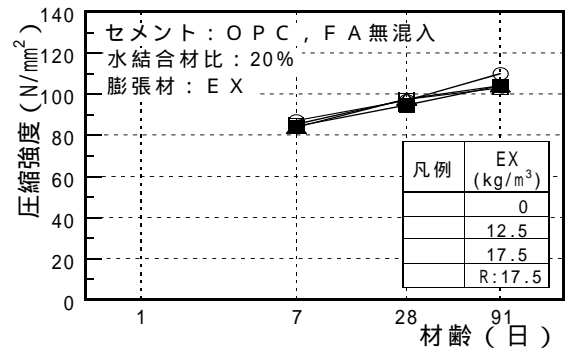


図 - 4 EX 混入率と圧縮強度発現性状の関係

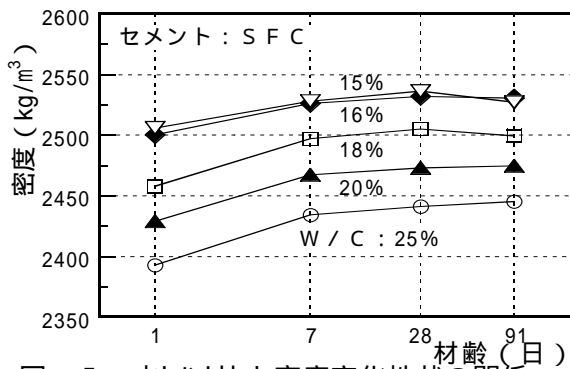


図 - 5 水セメント比と密度変化性状の関係

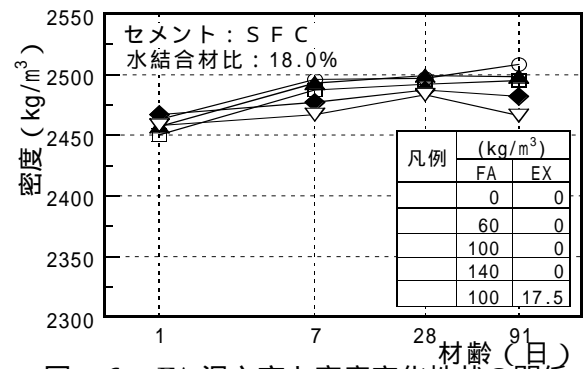


図 - 6 FA 混入率と密度変化性状の関係

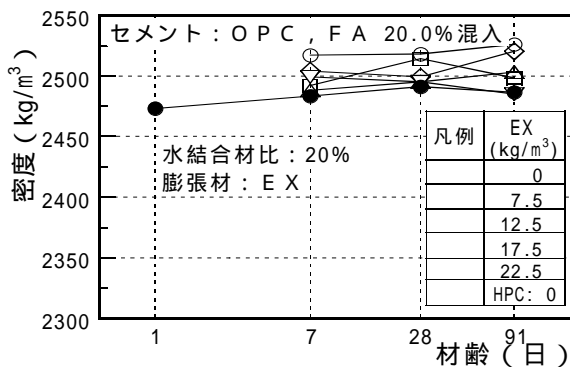


図 - 7 EX 混入率と密度変化性状の関係

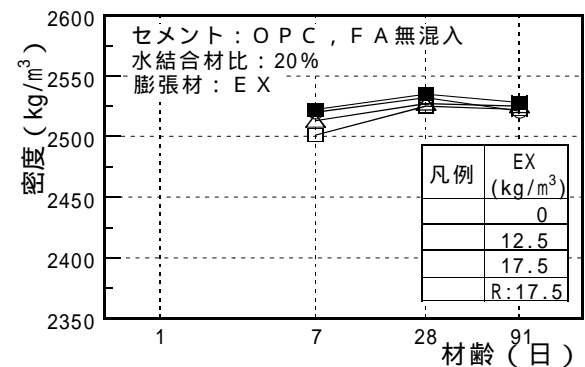


図 - 8 EX 混入率と密度変化性状の関係

使用の配合で  $2,500 \text{ kg/m}^3$  以上の高密度が得られた。このことから、緻密度が相対的に高い高強度配合では膨張材による水和組織弛緩の悪影響が生じにくくなる可能性があると思われる。

### (3) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を図 - 9, 10 に示す。SFC の場合 (図 - 9) の静弾性係数は、FA 混入量が最も多い配合 ( ) や FA と EX を併用した配合 ( ) で少し高め値となった。OPC の場合 (図 - 10) の静弾性係数は、標準

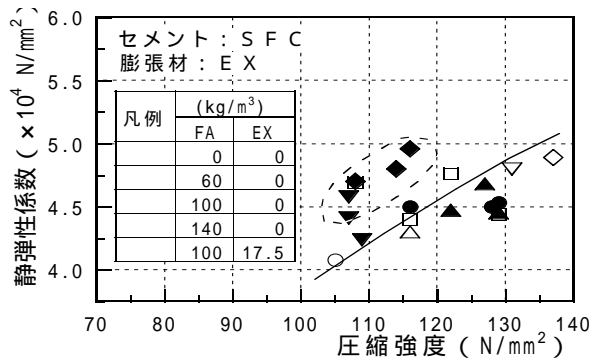


図 - 9 圧縮強度と静弾性係数の関係 (SFC)

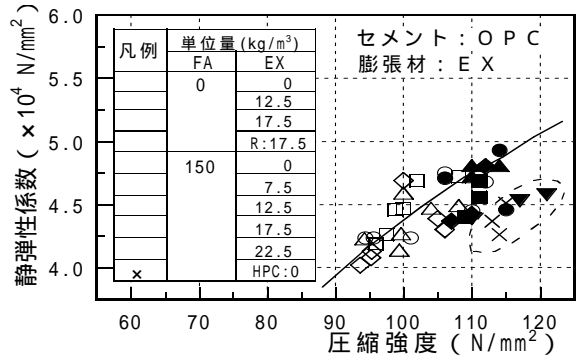


図 - 10 圧縮強度と密度の関係 (OPC の場合)

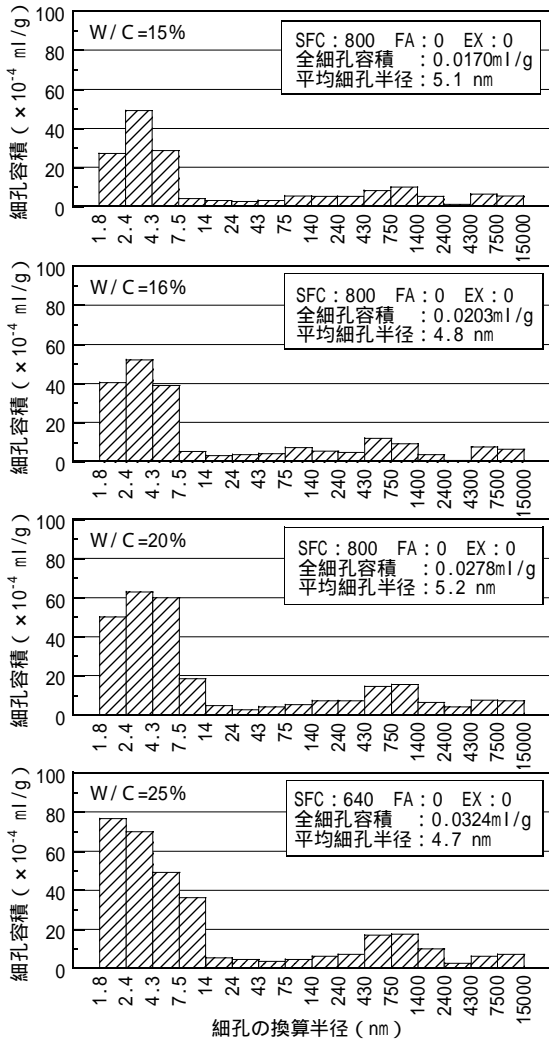


図 - 11 水セメント比と細孔分布の関係 (SFC)

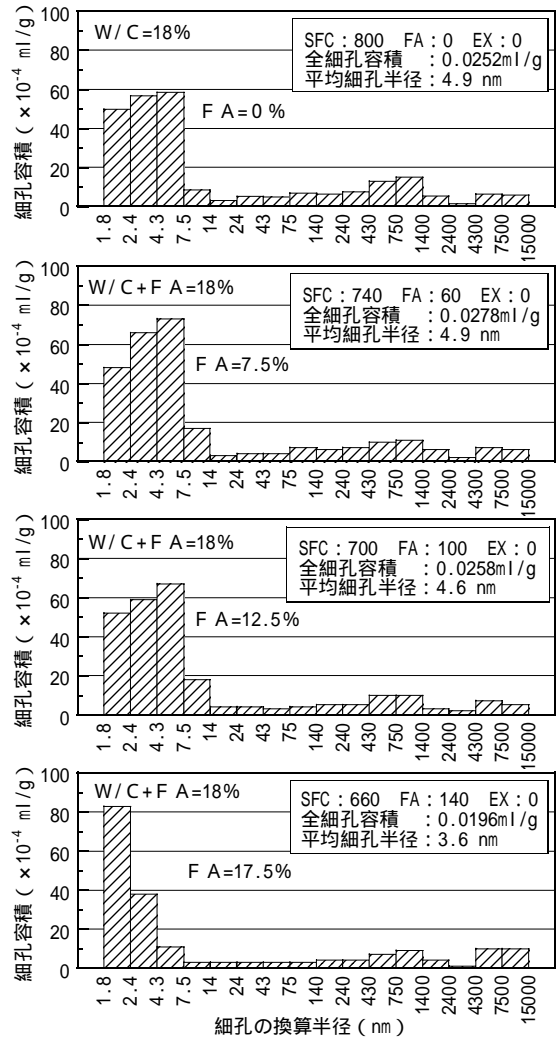


図 - 12 FA 混入率と細孔分布の関係 (SFC)

使用量以上の EX を混入した配合 ( ) で 1 割程度低めの値となったが、それ以外では EX 混入の影響はほとんど認められなかった。

### 3.2 細孔分布の計測結果

#### (1) 水セメント比と細孔分布の関係

SFC の場合の水セメント比と細孔分布の関係の一例を図 - 11, 13 に示す。水セメント比の低減に伴い、粗大な細孔容積や全細孔容積が減

少するとともに、半径 14nm 以下の比較的微細な細孔量 (S 細孔量<sup>2)</sup>) も急激に減少する傾向が認められる。これらの細孔容積の減少が硬化体の緻密化に関係しており、耐久性向上<sup>3)</sup>にも大きな役割を果たしていると考えられる。水セメント比 15, 16% の場合では、水セメント比 25~30%<sup>1)</sup> 程度の超高強度配合よりさらに 1/2 程度の細孔容積まで緻密化が改善されているこ

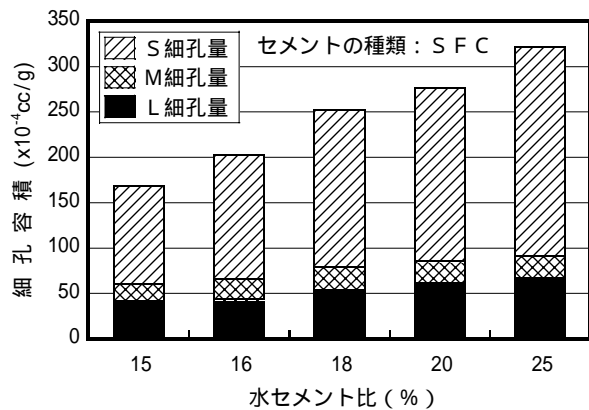


図 - 13 水セメント比と細孔容積の関係 (SFC)

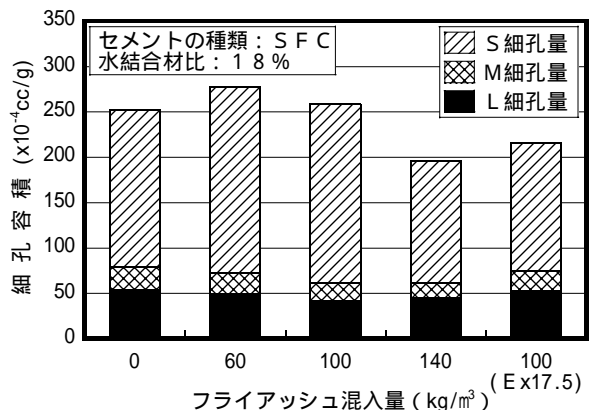


図 - 14 FA 混入率と細孔容積の関係 (SFC)

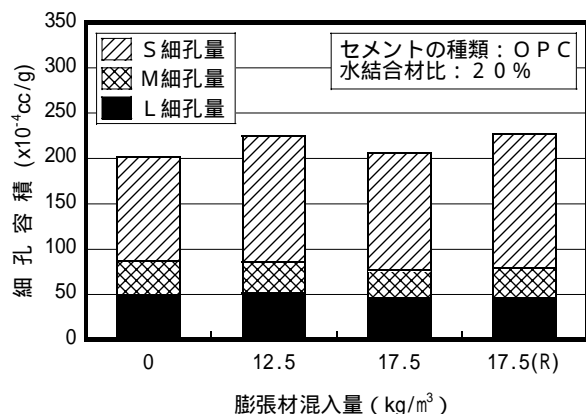


図 - 15 EX 混入量と細孔容積の関係(OPC 単味)

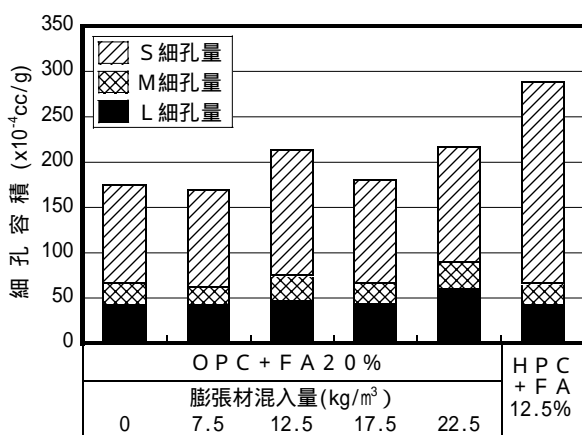


図 - 16 EX 混入量と細孔容積の関係(OPC+FA)

とが明らかになった。この場合，図 - 13 に示したように，半径 240nm 以上の比較的粗大な細孔量 (L 細孔量<sup>2)</sup>) と半径 14nm 以下の S 細孔量の変化が主であり，中間の M 細孔量<sup>2)</sup> は変化が少ないという特徴がある。

### (2) FA 混入率と細孔分布の関係

SFC の場合の FA 混入率と細孔分布の関係を図 - 12, 14 に示す。FA 混入率が増加しても，100kg/m<sup>3</sup> (12.5%) までは，L 細孔量や M 細孔量が減少して S 細孔量が増加するため，全細孔容積はほとんど低減しなかったが，さらに FA 混入率を 140 kg/m<sup>3</sup> (17.5%) まで増加させると S 細孔量も減少して全細孔容積も低減でき，緻密化がより進んでいくことが判明した。このことは，使用しているセメント系粒子の成分 (混合比) や粒度分布によって，緻密化に最適な混入率が存在する可能性を示唆している。

### (3) 膨張材混入量と細孔分布の関係

OPC の場合の EX 混入量と細孔分布の関係を

図 - 15, 16 に示す。このうち，FA を混入していない場合 (図 - 15) では，EX 混入により L 細孔量はほとんど変化せず，M 細孔量が若干減少して，S 細孔量が若干増加するため，全細孔容積に大きな変化は見られなかった。しかし，中性化や塩分浸透などの耐久性に関係が深い M 細孔<sup>3)</sup>以上の細孔量が低減していることから，耐久性の向上が予想される。

一方 FA を併用した場合 (図 - 16) では異なり，EX 混入量が増加すると M 細孔量が若干増加し，特に標準使用量以上の 22.5 kg/m<sup>3</sup> では，M 細孔量，L 細孔量ともに増加して，全細孔容積も増加し，硬化組織の弛緩現象が認められた。

このように膨張材を多量使用する場合には，結合材の組成や配合によっては緻密化に逆行することもあるので注意を要する。

## 3.3 透気試験、透水試験結果

### (1) 透気試験結果

SFC で水セメント比を変化させた場合の透

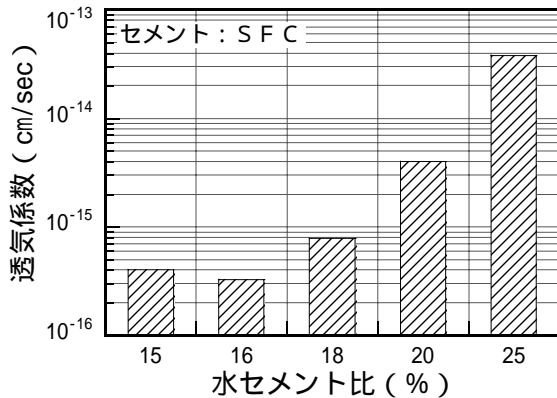


図 - 17 水セメント比と透気係数の関係 (SFC)

気試験結果の一例を図 - 17 に示す。24 時間当たりの透気量 (絶対値) が 1 cc 未満と非常に少なく、結果は試験体ごとにかなりばらついたが、全般に図のような大変小さな値が計測できた。これらの値は既往の結果 (W/C=30 ~ 40%)<sup>1)</sup> に比べると、百分の 1 から 1 万分の 1 というオーダーで、過去に例のないくらい著しく気密性の高いコンクリート (超緻密コンクリート) であることが判明した。この結果は前述の全細孔容積の低減結果とも一致するものであった。

#### (2) 透水試験結果

SFC で水セメント比を変化させた場合の透水試験結果では、高圧 (5N/mm<sup>2</sup>) で長期間 (1 ヶ月以上) 加圧しても、何れの配合も水の浸透深さが全く確認できずゼロという判定となり、透水係数も結果的にゼロと判定された。今回のような超低水セメント比の配合は、水の浸透深さを割裂破断面において目視で判定するような従来法では定量評価が困難なくらい極めて小さな透水係数を有していると思われる。従って、今後は別の評価試験法や判定手法を検討する必要があると思われる。

#### 4. まとめ

本研究で明らかになったことをまとめると以下ようになる。

- (1) SFC を用いた超低水セメント比 (15, 16%) のコンクリートの全細孔容積は水セメント比

25 ~ 30% 程度の超高強度コンクリート配合の約 1/2 程度まで低減し、密度が 2,530kg/m<sup>3</sup> 程度の大変緻密な硬化体が形成されることが確認された。この場合の透気係数は  $1 \times 10^{-16}$  cm/s オーダーであり、既往の高強度コンクリートの百分の 1 から 1 万分の 1 に匹敵する極めて高い気密性を有している。

- (2) SFC の水セメント比 18% の配合では、JIS 種品の高粉末度の FA を 17.5% 内割混入することにより、水セメント比 16% の総細孔容積まで低減でき、結果的に水セメント比を 2% 低減したのに等しい緻密度改善が期待できる。
- (3) 水セメント比 20% の OPC 配合では、EX を 17.5kg/m<sup>3</sup> 程度併用することにより、M 細孔以上の細孔容積が若干低減でき、緻密度や耐久性の改善も期待できる。
- (4) 結合材の種類や配合によっては、EX 多量混入により逆に総細孔容積が増大し、緻密度や耐久性が悪影響を受ける場合もあるので、膨張材量の選定に際しては注意を要する。
- (5) 緻密度の高い超低水セメント比コンクリートの透水係数の定量評価は大変難しく、浸透深さや不透水性を精度良く定量評価できる新手法の検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) 竹田, 迫田, 平田: 粗骨材の吸水率がコンクリートの透気性に及ぼす影響, 土木学会第 53 回年次講演会概要集, 第 5 部, pp.158-159, 1998.10
- 2) 三浦, 芳賀, 中根: 空気量、気泡分布、細孔分布が高強度コンクリートの耐凍結融解性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.679-684, 1990.6
- 3) 三浦, 十河, 芳賀: 超微細な高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの細孔分布と耐久性, 土木学会第 45 回年次講演会概要集第 5 部, pp.182-183, 1990.9