

1. 序論

コンクリートにおける細孔組織は強度や耐久性を支配する重要な要因であり、その組織の解明とそれがもたらす現象の把握は重大な意義を有する。特に、近年重要な研究課題として注目されている若材齢における高強度コンクリートの自己乾燥や自己収縮挙動およびひびわれ発生などの現象も、若材齢における活発なセメントの水和反応過程における細孔構造の特徴が強く反映された現象であると考えられる。これまで、硬化コンクリートの細孔構造の特徴に関しては、水銀圧入法を用いて数多くの有用な知見が得られてきたが、凝結直後からのごく若材齢のコンクリートの細孔構造を明らかにした例はないようである。

本研究は、モルタルやコンクリートの研磨面の反射電子像に対して画像解析手法を適用し、若材齢、特に打設後 24 時間以内における高強度コンクリートの細孔構造を明らかにすることを目的としている。さらに、得られた細孔径分布と初期のセメントの水和反応過程における特徴を合わせて考察することにより、シリカフュームが自己収縮に及ぼす影響をセメントペーストの微視的構造との関連から検討する。

2. 実験概要

表-1 高強度コンクリートの配合(kg/m³)

(1)使用材料およびコンクリートの配合

記号	W/B	水	セメント	シリカフューム	細骨材	粗骨材	減水剤(%wt.B)	自己収縮ひずみ
PC	0.25	145	581	0	559	1086	1.7	200×10^{-6}
SF	0.25	142	510	57	559	1086	2.6	290×10^{-6}

セメントは普通

ポルトランドセメントを使用した。粗骨材および細骨材はいずれも石川県手取川産の川砂利および川砂であり、粗骨材の最大寸法は 10mm である。使用したシリカフュームは市販の粉体品(比表面積=20.0 m²/g, SiO₂ 含有量=90.8%)であり、シリカフュームの置換率は 10%である。高強度コンクリートの水セメント比は 0.25 であり、供試体は打設後直ちに密封し、材齢 7 日まで密封養生を継続した。以上の高強度コンクリートの配合を、別途求めた密封養生 7 日における自己収縮ひずみ¹⁾と合わせて表-1 に示す。

(2)反射電子像観察

コンクリート供試体から材齢 12 時間および 24 時間にて厚さ約 10mm の板片を切り出した。板状試料をエタノールに 24 時間以上浸漬して水分の置換を行った後、エポキシ樹脂を含浸させた。樹脂の硬化後、表面を耐水研磨紙を用いて研磨し、表面に金-パラジウム蒸着を行って反射電子像観察試料とした。

観察倍率 500 倍にてモルタル部分の反射電子像を任意の個所で最低 5 画面取り込んだ。1 画像は 1148×1000 画素からなり、1 画素は倍率 500 倍では約 0.22 μm に相当する。取り込んだ画像に対して骨材等の粒子

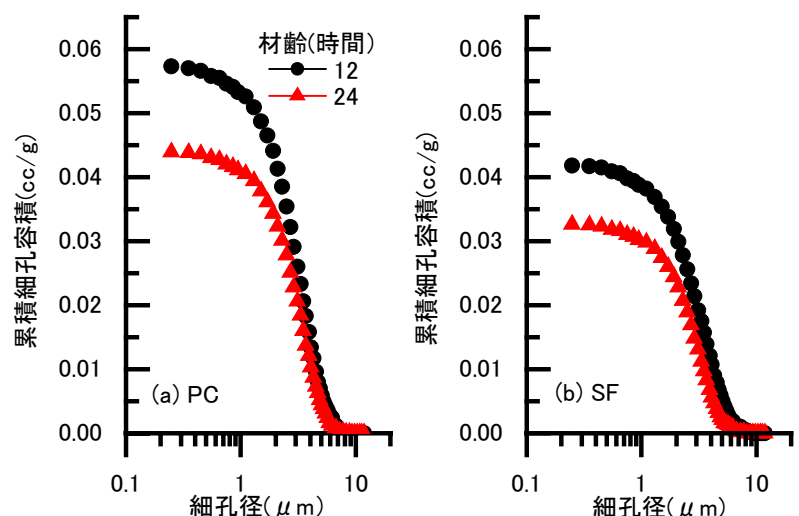


図-1 若材齢における高強度コンクリートの細孔径分布

キーワード：画像解析，細孔径分布，毛細管空隙，若材齢，収縮

連絡先:工学部土木建設工学科 〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20

076-234-4621 Fax 076-234-4632

除去やフィルター処理等の1次処理を行った後、細孔に相当する黒色の画素および未水和セメントに相当する白色の画素数をカウントしてそれぞれの面積を求めた。また、細孔体積をペーストの密度で除して、単位質量当たりの細孔体積として累積細孔径分布曲線を求めた²⁾。

(3)DSC 分析

水和反応過程における $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量を定量的に評価することを目的として、DSC 分析を行った。(1)のコンクリート供試体から骨材を除いたセメントペースト供試体を作製し、同様に密封養生を行った。材齢 12 時間および 24 時間にて試料を

取り出し、直ちに真空乾燥を行い DSC 分析試料とした。

3. 結果および考察

図-1 に材齢 12 時間および 24 時間における細孔径分布を示す。材齢 12 時間にて既にシリカフューム混入の方が小さな全細孔量を示し、同じ水セメント比であれば、シリカフュームの有無による全細孔量の差は小さいという水銀圧入法による一般的な結果とは明らかに異なる。このことは、画像解析対象外の範囲の細孔(直径約 $0.2\mu\text{m}$ 以下)がシリカフューム混入系では多いことを示し、シリカフューム混入コンクリートではごく若材齢にて既に細孔組織は微細化しており、材齢の進行にともないさらに細孔の微細化が進行することを示す。

図-2 はセメントペースト相の未水和セメント、毛細管空隙および水和反応生成物(CSH および $\text{Ca}(\text{OH})_2$)の体積率を示したものである。時間の進行にともない毛細管空隙の体積率は明らかにシリカフューム混入の方が小さくなっているが、未水和セメントの減少割合はシリカフューム無混入と差はないようであり、シリカフュームの混入によるセメントの水和反応の促進効果は現れてはいない。しかし、セメントの絶対量がシリカフューム系では少ないにもかかわらず、反応生成物量はほぼ同量であり、シリカフュームを不活性フィラーと仮定した場合の推定量を上回る反応生成物量を示している。このことより、材齢 24 時間というごく若材齢においてもシリカフュームのポゾラン反応が CSH ゲルの生成に寄与していることが示唆される。実際、図-3 の DSC 曲線に示すように、材齢 12 時間では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の吸熱ピークに大きな差は認められないのに対して、24 時間ではシリカフューム混入の方がかなり小さな吸熱ピークを示し、ポゾラン反応によって $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が消費されたことを示している。

以上のような細孔構造およびセメントペースト相の構成割合の特徴は、一般に観察される自己収縮挙動とも対応するようである。すなわち、シリカフューム混入による自己収縮の増大は、ごく若材齢にて微細な径の細孔を多量に含むこと、および収縮変形を妨げる $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 結晶粒子の消費が非常に早い段階にて開始する³⁾ ことによるものと考えられる。

4. 結論

反射電子像の画像解析手法を適用して、材齢 24 時間以内のごく若材齢の高強度コンクリートの細孔構造およびセメントペースト相の構成割合を明らかにした。シリカフュームは材齢 24 時間以内で、すでにポゾラン反応を開始し、これが若材齢における収縮挙動に関与することが示唆された。

参考文献 1)久保,五十嵐,川村,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.22,2000(投稿中).2)五十嵐,川村,渡辺,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.22,2000(投稿中).3)Jensen, O.M. and Hansen, P.F., ACI Mat. J., Vol.93, No.6, pp.539-543, 1996.

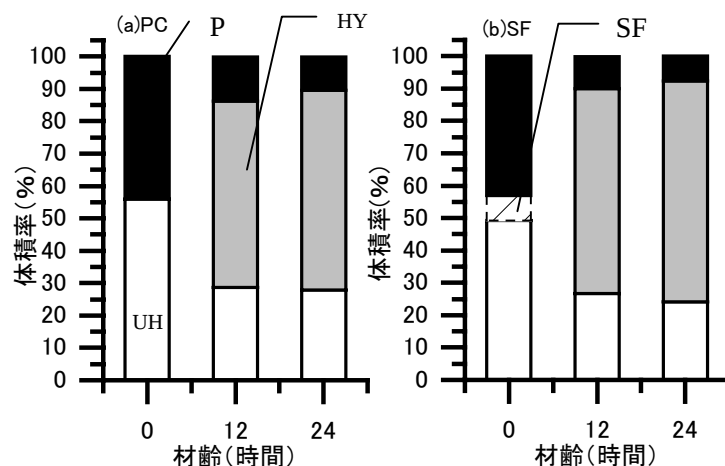


図-2 セメントマトリックスの構成割合(UH:未水和セメント P:毛管空隙 HY:反応生成物(CSH&CH) SF:シリカフューム)

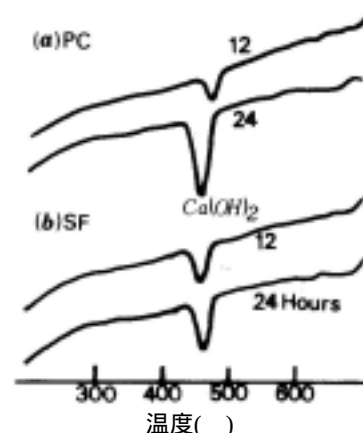


図-3 DSC 曲線